

# Wiskundige versus experimentele tradities in de ontwikkeling van de natuurwetenschap

Thomas S. Kuhn

Iedereen die de geschiedenis van de wetenschappelijke ontwikkeling bestudeert, stuit herhaaldelijk op een vraag die als volgt geformuleerd zou kunnen worden: 'Is er sprake van een eenheid van de wetenschappen of niet?' Deze vraag wordt gewoonlijk opgeroepen door concrete problemen rond de opzet van een uiteenzetting en die bijzonder nijpend worden wanneer de wetenschapshistoricus gevraagd wordt een overzicht te geven van zijn onderwerp in lezingen of in een boek met een behoorlijke reikwijdte. Moet hij de wetenschappen één voor één behandelen en beginnen met bij voorbeeld de wiskunde, dan verdergaan met de astronomie en vervolgens met de natuurkunde, de scheikunde, de anatomie, de fysiologie, de plantkunde enzovoort? Of zou hij het idee moeten verwerpen dat zijn object een samengesteld geheel van individuele gebieden is en het in plaats daarvan moeten beschouwen als kennis van de natuur *tout court*? In dat geval is hij, voorzover mogelijk, verplicht alle wetenschappelijke probleemgebieden te zamen te beschouwen, te onderzoeken wat de mensen op elk willekeurig tijdstip over de natuur wisten en na te gaan op welke manier het geheel van wetenschappelijke kennis gezien als een eenheid werd beïnvloed door veranderingen van de methode, van het filosofische klimaat of van de samenleving in het algemeen.

In het geval van een meer genuanceerde beschrijving kunnen beide benaderingen herkend worden als historiografische methoden met een lange traditie die in het algemeen onafhankelijk van elkaar beoefend zijn.<sup>1</sup> De eerste, die de wetenschap ziet als een hoogstens losjes verbonden verzameling van afzonderlijke wetenschappen, wordt ook gekenmerkt door de nadruk die de beoefenaars ervan leggen op de nauwkeurige bestudering van de technische inhoud, zowel experimenteel als theoretisch, van vroegere versies van de specialisatie die men op het oog heeft. Dat is een grote verdienste, want de wetenschappen zijn technisch van aard, en een geschiedschrijving die de inhoud ervan verwaarloost, gaat vaak over iets totaal anders en verzint soms omwille van zich zelf haar onderwerp. Aan de andere kant zijn historici die zich ten doel gesteld hebben de geschiedenis van een technisch specialisme te schrijven, er gewoonlijk van uitgegaan dat de grenzen van hun onderwerp samenvallen met de grenzen die door recente handboeken over het corresponderende gebied voorgeschreven worden. Wanneer bij voorbeeld elektriciteit hun onderwerp is, dan lijkt hun definitie van een elektrisch effect vaak heel erg veel op die van de moderne fysica. Aan de hand daarvan doorzoeken

ze antieke, middeleeuwse en vroeg-moderne bronnen op passende verwijzingen en soms is het resultaat dan een indrukwekkend verslag van geleidelijk accumulerende kennis over de natuur. Zo'n verslag is dan echter samengesteld op basis van toevallig gevonden boeken en manuscripten die gewoonlijk als filosofische, literaire, historische, bijbelse of mythologische werken bekend staan. Het is kenmerkend voor dit soort uiteenzettingen dat zij het feit verduisteren dat de meeste verschijnselen die zij 'elektrisch' noemen — bij voorbeeld bliksem; het barnsteeneffect en de torpedo (sidderaal) — tijdens de perioden waaruit hun beschrijvingen stammen gewoonlijk niet als verwant beschouwd werden. Men zou ze nauwkeurig kunnen lezen zonder te ontdekken dat de verschijnselen die nu 'elektrisch' genoemd worden geen apart onderwerp vormden vóór de zeventiende eeuw en zonder zelfs maar verspreide aanwijzingen te vinden over hoe het gebied toen ontstaan is. Wanneer een historicus zich bezig moet houden met wetenschappelijke vakgebieden die wel bestonden in de periode waar het hem om gaat, dan zijn de traditionele verslagen van de ontwikkeling van de afzonderlijke wetenschappen vaak zeer a-historisch.

Een soortgelijke kritiek is niet van toepassing op de andere belangrijke historiografische traditie, die de wetenschap als één enkele onderneming behandelt. Zelfs wanneer de aandacht wordt beperkt tot één bepaalde eeuw of natie, blijkt de inhoud van die ene vermeende onderneming te omvattend te zijn, te zeer afhankelijk van technische details en alles bij elkaar te diffuus om door een historische analyse verhelderd te kunnen worden. Ondanks ceremoniële kniebuigingen naar klassieken als Newtons *Principia* of Darwins *Origin*, hebben historici die de wetenschap als een eenheid zien daarom weinig aandacht besteed aan de veranderende inhoud ervan en ze hebben zich in plaats daarvan geconcentreerd op het veranderende intellectuele, ideologische en institutionele kader waarbinnen deze zich ontwikkelde. De technische inhoud van moderne handboeken is dus irrelevant voor hun onderwerp en de werken die zij schrijven, zijn in het bijzonder in recente decennia door en door historisch en soms zeer verhelderend geweest. De ontwikkeling van wetenschappelijke instituties, waarden, methoden en wereldbeelden is duidelijk op zichzelf een achtenswaardig onderwerp voor historisch onderzoek. De ervaring suggereert echter dat dit onderwerp in geen enkel opzicht zo direct samenvalt met de studie van de wetenschappelijke ontwikkeling als de beoefenaren gewoonlijk verondersteld hebben. Het is gebleken dat de relatie tussen de meta-wetenschappelijke omgeving enerzijds en de ontwikkeling van speciale wetenschappelijke theorieën en experimenten anderzijds, indirect, duister en controversieel is.

De traditie waarbinnen de wetenschap als een eenheid opgevat wordt, kan in principe niets bijdragen aan een beter begrip van die relatie, want zij ver-

spert door haar vooronderstelling de toegang tot de verschijnselen waarop de ontwikkeling van dit beter begrip gebaseerd moet zijn. Sociale en filosofische vooronderstellingen die de ontwikkeling van een bepaald gebied in een bepaalde periode bevorderden, hebben deze soms op een ander tijdstip belemmerd; wanneer de betreffende periode gespecificeerd is, dan lijken voorwaarden die vooruitgang in één wetenschap bevorderden, vaak schadelijk voor andere geweest te zijn.<sup>2</sup> Onder deze omstandigheden zullen historici die de feitelijke wetenschappelijke ontwikkeling willen belichten, een moeilijke middepositie tussen de twee traditionele alternatieven moeten innemen. Dat wil zeggen, ze mogen niet aannemen dat de wetenschap een eenheid vormt, want dat is duidelijk niet het geval. Maar ze mogen evenmin bij voorbaat de indeling in vakgebieden aannemen zoals die in huidige wetenschappelijke handboeken en in de structuur van de tegenwoordige universitaire faculteiten tot uitdrukking komt.

Handboeken en de institutionele structuur zijn nuttige indicatoren van de natuurlijke indelingen die de historicus moet zoeken, maar het zouden de indelingen moeten zijn van de periode die hij bestudeert. Samen met ander materiaal kunnen ze dan op zijn minst een voorlopige lijst opleveren van de verschillende gebieden van wetenschapsbeoefening op een bepaald moment. Het samenstellen van zo'n lijst is echter nog maar het begin van het werk van de historicus, want hij moet ook iets weten over de relaties tussen de genoemde vakgebieden en bij voorbeeld vragen naar de mate van interactie tussen hen en het gemak waarmee beoefenaren van het ene naar het andere vakgebied konden overstappen. Dergelijke onderzoeken kunnen dan geleidelijk aan een kaart opleveren van de complexe structuur van de wetenschappelijke bedrijvigheid van een bepaalde periode en zo'n soort kaart is noodzakelijk voor onderzoek naar de ingewikkelde gevolgen van intellectuele of sociale meta-wetenschappelijke factoren voor de ontwikkeling van de wetenschappen. Maar een structurele kaart alleen is niet voldoende. Naarmate de te bestuderen gevolgen voor het ene of andere gebied variëren, moet de historicus die ze wil begrijpen, tenminste ook representatieve onderdelen bestuderen van de soms duistere technische activiteiten binnen het gebied, of de gebieden, die hem interesseren. Zowel in de geschiedenis als in de sociologie van de wetenschap is de lijst van onderwerpen die zinvol bestudeerd kan worden zonder aandacht te besteden aan de inhoud van de relevante wetenschappen, uiterst kort.

Historisch onderzoek van het soort waar zojuist voor gepleit werd, is nog maar nauwelijks op gang gekomen. Mijn overtuiging dat dergelijk onderzoek vruchtbaar zal zijn, is niet gebaseerd op recent onderzoek van mijzelf of iemand anders, maar komt voort uit herhaalde pogingen om als docent de schijnbaar onverenigbare producten van de hier beschreven, onafhankelijk

van elkaar beoefende tradities samen te voegen.<sup>3</sup> Alle resultaten van die synthese zijn onvermijdelijk voorlopig en partieel, vaak geforceerd en soms overschrijden ze de grenzen van de bestaande wetenschap. Toch kan een schematische voorstelling van een reeks van zulke resultaten van dienst zijn zowel om te illustreren wat ik bedoelde toen ik sprak over de veranderende natuurlijke indeling van de wetenschappen als om de voordelen aan te geven die behaald zouden kunnen worden wanneer we er meer aandacht aan zouden besteden. Eén van de consequenties van een meer ontwikkelde versie van de hierna te onderzoeken posities zou een fundamenteel nieuwe formulering kunnen zijn van een reeds tijdenlang durend debat over de oorsprong van de moderne wetenschap. Een andere consequentie zou het isoleren van een belangrijke innovatie kunnen zijn die gedurende de negentiende eeuw bijdroeg tot het ontstaan van de moderne fysica.

### *De klassieke natuurwetenschappen*

Mijn hoofdthema kan door een vraag ingeleid worden. Welke van het grote aantal onderwerpen dat tegenwoordig tot de natuurwetenschappen behoort, waren reeds in de oudheid brandpunten voor de voortdurende activiteit van specialisten? De lijst is uiterst kort. De astronomie is het oudste en meest ontwikkelde onderdeel; tijdens de hellenistische periode, toen onderzoek op dat gebied naar een voordien ongeëvenaard niveau opklom, werd de astronomie verbonden met een extra paar, de geometrische optica en statica, inclusief de hydrostatica. Alleen deze drie gebieden van natuurwetenschap — astronomie, statica en dynamica — werden gedurende de oudheid object van onderzoekstradities die gekenmerkt werden door vocabularia en technieken die voor leken ontoegankelijk waren en dus door literatuur die zich uitsluitend tot de beoefenaren richtte. Zelfs nu nog kunnen Archimedes' *Drijvende Lichamen* en Ptolemaeus' *Almagest* alleen gelezen worden door mensen met technische ervaring van een hoog niveau. Andere onderwerpen, zoals warmte en elektriciteit, die later tot de natuurwetenschappen gingen behoren, bleven gedurende de hele oudheid eenvoudig interessante klassen van verschijnselen, onderwerpen voor terloopse vermelding of voor filosofische speculatie en discussie. (Met name elektrische verschijnselen werden aan verschillende van zulke klassen toebedeeld.) De beperking tot ingewijden is natuurlijk geen garantie voor wetenschappelijke vooruitgang, maar in de drie zojuist genoemde gebieden vond inderdaad vooruitgang plaats op een manier die de esoterische kennis en techniek vereiste die hun isolering tot stand bracht. Wanneer verder de accumulatie van concrete en schijnbaar permanente probleemoplossingen een maatstaf voor wetenschappelijke vooruitgang is, dan zijn deze gebieden de enige onderdelen van wat later de natuurwetenschap-

pen zouden worden, waarin tijdens de oudheid ondubbelzinnig vooruitgang plaats vond.

In die tijd werden deze drie echter niet afzonderlijk beoefend; ze waren in plaats daarvan nauw verbonden met twee andere — de wiskunde en de harmonieleer<sup>4</sup> — die gewoonlijk niet langer als natuurwetenschappen beschouwd worden. Van deze twee was de wiskunde zelfs ouder en meer ontwikkeld dan de astronomie. Vanaf de vijfde eeuw voor Chr. gedomineerd door de geometrie werd de wiskunde beschouwd als de wetenschap van reële fysische kwantiteiten, in het bijzonder ruimtelijke, en zij bepaalde in grote mate het karakter van de andere vier die zich rond haar schaarden. De astronomie en de harmonieleer hielden zich respectievelijk met posities en verhoudingen bezig en zij waren dus letterlijk wiskundig. De statica en de geometrische optica ontleenden begrippen, diagrammen en technisch vocabulaire aan de geometrie en net als deze hadden ze een algemeen logisch-deductieve structuur, zowel wat betreft de presentatie als het onderzoek. Het is onder deze omstandigheden niet verrassend dat mensen als Euclides, Archimedes en Ptolemaeus, die ieder aan één van deze onderwerpen bijdroegen, bijna altijd ook aan de andere belangrijke bijdragen leverden. Het was dus niet alleen het ontwikkelingsniveau dat van deze vijf een natuurlijke groep maakte en hen onderscheidde van andere hoog ontwikkelde antieke specialisaties, zoals anatomie en fysiologie. Omdat ze beoefend werden door een aparte groep en deel uitmaakten van een gemeenschappelijke wiskundige traditie, worden astronomie, harmonieleer, wiskunde, optica en statica hier tezamen genomen als de klassieke natuurwetenschappen of, eenvoudiger, als de klassieke wetenschappen.<sup>5</sup> Ja, het is zelfs tot op zekere hoogte anachronistisch om ze als afzonderlijke vakgebieden te vermelden. Verderop zal het bewijs geleverd worden waaruit blijkt dat ze vanuit een aantal significante gezichtspunten beter als één enkel gebied, de wiskunde, beschreven kunnen worden.

Een ander gemeenschappelijk kenmerk was ook een voorwaarde voor de eenheid van de klassieke wetenschappen en dit zal een bijzonder belangrijke rol spelen in de rest van dit opstel. Hoewel alle vijf gebieden, inclusief de antieke wiskunde, eerder empirisch dan *a priori* waren, vereiste hun ontwikkeling die in de oudheid aanzienlijk was, weinig nauwkeurige waarneming en zelfs nog minder experimenteel werk. Voor iemand die geschoold was in het zien van geometrie in de natuur leverde een klein aantal relatief makkelijk toegankelijke en meestal kwalitatieve waarnemingen van schaduwen, spiegels, hefbomen en de bewegingen van sterren en planeten een empirische basis die voldoende was voor het uitwerken van vaak zeer sterke theorieën. Ogenscheinlijke uitzonderingen op deze zeer algemene generalisatie (de systematische astronomische observatie in de oudheid en experimenten en

waarnemingen met betrekking tot lichtbreking en kleuren verkregen door een prisma, toentertijd en in de middeleeuwen) zullen dit centrale punt dat in de volgende paragraaf onderzocht wordt, alleen maar bevestigen. Hoewel de klassieke wetenschappen (inclusief de wiskunde in belangrijke opzichten) empirisch waren, waren de voor hun ontwikkeling vereiste data van dien aard dat ze met behulp van de alledaagse waarneming, soms in bescheiden mate verfijnd en systematisch, verkregen konden worden.<sup>6</sup> Dit is één van de redenen waarom deze groep van vakgebieden zich zo snel kon ontwikkelen onder omstandigheden die de evolutie van een tweede natuurlijke groep niet zo sterk bevorderden. Naar deze tweede groep wordt in de titel van dit artikel eveneens verwezen: deze groep wetenschappen is het produkt van een experimentele traditie.

Laten we eerst, voor we die tweede groep onderzoeken, eens even gaan kijken hoe de eerste groep zich ontwikkelde na haar ontstaan in de oudheid. Alle vijf de klassieke wetenschappen werden vanaf de negende eeuw actief beoefend in de Islam, vaak op een niveau van technische bedrevenheid dat vergelijkbaar is met dat van de oudheid. De optica boekte opmerkelijke voortgang en het zwaartepunt van de wiskunde werd ten aanzien van een aantal aspecten verschoven door het binnendringen van algebraïsche technieken en zaken waaraan binnen de dominante geometrische hellenistische traditie gewoonlijk geen waarde was gehecht. Vanaf de dertiende eeuw werd in het Latijnse westen de verdere technische uitwerking van deze in het algemeen wiskundige gebieden ondergeschikt gemaakt aan een hoofdzakelijk filosofisch-theologische traditie, en belangrijke vernieuwingen bleven voornamelijk tot de optica en de statica beperkt. Belangrijke gedeelten van het geheel van antieke en islamitische wiskunde en astronomie bleven echter bewaard en werden soms om wille van zichzelf bestudeerd tot ze, gedurende de renaissance, weer het object van onafgebroken erudiet Europees onderzoek werden.<sup>7</sup> De groep wiskundige wetenschappen die toen weer gevormd werd, leek erg veel op haar hellenistische voorvader. Terwijl deze wetenschappen gedurende de zestiende eeuw beoefend werden, werd echter met hen in toenemende mate onderzoek naar een zesde thema verbonden. Gedeeltelijk als een gevolg van de veertiende-eeuwse scholastieke analyse werd het probleem van de plaatselijke beweging losgemaakt van het traditionele filosofische probleem van algemene kwalitatieve verandering, en werd het een zelfstandig onderzoeksobject. Het reeds in de antieke en middeleeuwse filosofische traditie grondig bestudeerde probleem van de beweging was afgeleid van de alledaagse waarneming en werd in algemeen wiskundige termen geformuleerd. Het paste daarom vanzelf in de groep wiskundige wetenschappen en met de ontwikkeling daarvan is het sindsdien nauw verbonden.

Aldus uitgebreid bleven de klassieke wetenschappen vanaf de renaissance

een hechte eenheid vormen. Copernicus specificeerde het gehoor dat hij competent achtte om zijn klassieke boek op het gebied van de astronomie te beoordelen met de woorden: 'Wiskunde wordt geschreven voor wiskundigen.' Galileï, Kepler, Descartes en Newton zijn maar een paar van de vele zeventiende-eeuwse geleerden die zich met gemak en vaak met succes bewogen van de wiskunde naar de astronomie, naar de harmonieleer, de statica, de optica en naar het onderzoek van de beweging. Met gedeeltelijke uitzondering van de harmonieleer bleven de nauwe banden tussen deze min of meer wiskundige gebieden daarbij tot in de negentiende eeuw bestaan zonder veel verandering te ondergaan, hoewel de klassieke wetenschappen toen al lang niet meer de enige gebieden van de natuurwetenschap waren die voortdurend aan intensief en nauwkeurig onderzoek onderworpen werden. De onderwerpen van wetenschappelijk onderzoek waaraan een Euler, Laplace of Gauss voornamelijk bijdroegen, zijn bijna identiek aan die welke eerder door Newton en Kepler belicht waren. Bijna precies dezelfde lijst zou ook het werk van Euclides, Archimedes en van Ptolemaeus omvatten. Evenals hun klassieke voorlopers presteerden bovendien de mensen die in de zeventiende en achttiende eeuw deze klassieke wetenschappen beoefenden, afgezien van een paar opmerkelijke uitzonderingen, daarbij op het gebied van experimenten en nauwkeurige waarnemingen weinig van belang, hoewel toch vanaf ongeveer 1650 zulke methoden voor het eerst intensief gebruikt werden om een andere reeks van thema's te bestuderen, die later nauw verbonden raakte met delen van de klassieke groep.

Eén laatste opmerking over de klassieke wetenschappen zal de weg banen naar een beschouwing van de beweging die nieuwe experimentele methoden bevorderde. Afgezien van de harmonieleer<sup>8</sup> werden zij allen gedurende de zestiende en zeventiende eeuw radicaal vernieuwd en nergens anders binnen de natuurwetenschap traden zulke veranderingen op.<sup>9</sup> De wiskunde maakte de overgang van geometrie en 'de kunst der onbekende grootheden' naar algebra, analytische geometrie en differentiaal of integraal rekening; de astronomie werd verrijkt met niet-cirkelvormige banen die gebaseerd waren op de, opnieuw in het centrum geplaatste positie van de zon; de studie van de beweging werd door nieuwe, geheel kwantitatieve wetten veranderd; en de optica verwierf een nieuwe theorie van het licht, de eerste aanvaardbare oplossing voor het klassieke probleem van lichtbreking, en een drastisch veranderde kleurentheorie. De statica, opgevat als de theorie van machines, is een duidelijke uitzondering. Maar als hydrostatica, de theorie van vloeistoffen, werd ze gedurende de zeventiende eeuw uitgebreid tot pneumatica, 'de zee van lucht', en daarom kan ze in de lijst van vernieuwde gebieden opgenomen worden. Middels deze conceptuele transformaties van de klassieke wetenschappen namen de natuurwetenschappen deel aan een meer algemene

revolutie van het westerse denken. Wanneer men de Wetenschappelijke Revolutie dus ziet als een revolutie van *ideeën*, dan moet men vooral de veranderingen in deze traditionele, quasi-wiskundige gebieden trachten te begrijpen. Hoewel er gedurende de zestiende en zeventiende eeuw ook andere zeer belangrijke dingen met de wetenschappen gebeurden (de Wetenschappelijke Revolutie was niet enkel een revolutie in het denken), blijken deze van een ander en tot op zekere hoogte onafhankelijk soort te zijn.

### *De opkomst van de Baconiaanse Wetenschappen*

Nu we ons tot de opkomst van een andere groep onderzoeksgebieden wenden, begin ik opnieuw met een vraag en deze keer met een vraag waarover veel verwarring en onenigheid bestaat in de geschiedkundige standaardliteratuur. Wat was er nu eigenlijk nieuw aan de experimentele beweging van de zeventiende eeuw? Sommige historici hebben beweerd dat juist het idee om de wetenschap te funderen op informatie verkregen via de zintuigen nieuw was. Volgens deze opvatting geloofde Aristoteles dat wetenschappelijke conclusies uit axiomatische eerste principes afgeleid konden worden; pas tegen het einde van de renaissance waren de mensen voldoende aan zijn greep ontsnapt om de natuur in plaats van boeken te bestuderen. Deze overblijfselen van zeventiende eeuwse rethoriek zijn echter absurd. De methodologische geschriften van Aristoteles bevatten vele passages die de noodzaak van nauwkeurige observatie net zo benadrukken als de geschriften van Francis Bacon. Randall en Crombie hebben een belangrijke middeleeuwse methodologische traditie gelokaliseerd en bestudeerd die, vanaf de dertiende tot aan het begin van de zeventiende eeuw, regels uitwerkte voor het trekken van deugdelijke conclusies uit waarneming en experiment.<sup>10</sup> Descartes' *Regulae* en Bacons *New Organon* hebben veel aan die traditie te danken. Een empirische wetenschapsfilosofie was geen nieuw verschijnsel ten tijde van de Wetenschappelijke Revolutie.

Andere historici wijzen er op dat, wat de mensen ook gedacht mogen hebben over de noodzaak van waarnemingen en experimenten, zij daar in de zeventiende eeuw toch veel vaker gebruik van maakten dan ze voorheen hadden gedaan. Deze generalisatie is ongetwijfeld juist, maar ze gaat voorbij aan de essentiële kwalitatieve verschillen tussen de oudere en de nieuwe experimenten. De leden van de nieuwe experimentele beweging, vaak de baconiaanse genoemd naar de voornaamste woordvoerders ervan, beperkten zich niet gewoon tot het uitbreiden en uitwerken van de empirische elementen die in de traditie van de klassieke natuurwetenschap aanwezig waren. Zij schiepen in plaats daarvan een ander soort empirische wetenschap die een tijdlang veeleer naast haar voorganger bleef bestaan dan haar te vervangen. Een be-

knopte karakteristiek van de toevallige rol die experiment en systematische waarneming in de klassieke wetenschappen speelden, kan ons helpen de kwalitatieve verschillen te bepalen die de oudere vorm van de empirische praktijk van haar zeventiende eeuwse rivale onderscheidt.

Binnen de antieke en middeleeuwse traditie blijken vele experimenten bij nader inzien 'gedachtenexperimenten' te zijn geweest, dat wil zeggen constructies in het denken van mogelijke experimentele situaties waarvan de uitkomst veilig voorspeld kon worden op basis van voorafgaande alledaagse ervaring. Andere experimenten werden echt uitgevoerd, met name in de optica, maar het is voor de historicus vaak ontzettend moeilijk om vast te stellen of een bepaald experiment dat in de literatuur ontdekt is, een gedachtenexperiment of een echt experiment was. Soms zijn de resultaten waarvan verslag uitgebracht wordt, niet wat ze nu zouden zijn; in andere gevallen zou de vereiste apparatuur niet met de destijds bestaande materialen en technieken gemaakt kunnen worden. Dit levert serieuze problemen voor het geschiedkundige oordeelsvermogen, en ook Galileï-kenners worden er door achtervolgd. Hij voerde zeker experimenten uit, maar hij is evenzeer bekend als de man die de middeleeuwse traditie van gedachtenexperimenten op haar hoogtepunt bracht. Het is helaas niet altijd duidelijk in welke vermomming hij verschijnt.<sup>11</sup>

Ten slotte lijken de experimenten die duidelijk wel uitgevoerd werden, onveranderlijk één of twee doeleinden gehad te hebben. Sommige waren bedoeld om een gevolgtrekking te demonstreren die reeds tevoren via andere middelen ontdekt was. Roger Bacon schrijft dat, hoewel men in principe het vermogen van vuur om vlees te verbranden kan deduceren, het gezien de neiging van de menselijke geest om zich te vergissen, overtuigender is je hand in het vuur te steken. Andere daadwerkelijke experimenten, waarvan sommige grote gevolgen hadden, waren bedoeld om concrete antwoorden te geven op vragen die een bestaande theorie opwierp. Het experiment van Ptolemaeus met betrekking tot de breking van licht op de grens tussen water en lucht is een belangrijk voorbeeld. Weer andere zijn bij voorbeeld de middeleeuwse optische experimenten die kleuren teweegbrachten door zonlicht door met water gevulde bollen te leiden. Toen Descartes en Newton prismatische kleuren onderzochten, breidden zij deze antieke en, in het bijzonder, middeleeuwse traditie uit. De astronomische waarneming vertoont een nauw verwant kenmerk. Vóór Ticho Brahe zochten astronomen niet systematisch de hemel af en ze volgden evenmin systematisch de planeten in hun bewegingen. In plaats daarvan noteerden ze opkomsten, opposities en andere standaard planeten-configuraties, waarvan men tijden en posities moest weten om astronomische kalenders op te stellen of om parameters te berekenen die men voor de bestaande theorie nodig had.

Vergelijk deze empirische aanpak eens met die waarvan Bacon de meest invloedrijke voorstander werd. Wanneer de beoefenaren ervan, mensen als Gilbert, Boyle en Hooke, experimenten uitvoerden, waren ze er zelden op uit te demonstreren wat ze al wisten of om een detail vast te stellen dat nodig was voor uitbreiding van een bestaande theorie. Zij wilden veeleer zien hoe de natuur zou reageren op voorheen niet waargenomen, vaak voorheen niet eens bestaande omstandigheden. Typisch voor hen waren de omvangrijke natuurlijke of experimentele historiën, waarin de veelsoortige data opeengestapeld lagen die velen van hen onmisbaar achtten voor de constructie van een wetenschappelijke theorie. Wanneer men ze nauwkeurig bestudeert, blijken deze uiteenzettingen vaak minder toevallig wat keuze en ordening van de experimenten betreft dan hun auteurs veronderstellen. Op zijn laatst vanaf 1650 werden de mensen die ze schreven gewoonlijk geleid door een of andere vorm van de atomistische of corpusculaire filosofie. Zij hadden dus een voorkeur voor experimenten die waarschijnlijk de vorm, ordening en beweging van kleine lichaampjes zouden onthullen; de overeenkomsten op basis waarvan men bepaalde onderzoeksverslagen naast elkaar plaatste laten vaak hetzelfde geheel van metafysische vooronderstellingen zien.<sup>12</sup> Maar de kloof tussen metafysische theorie enerzijds en specifieke experimenten anderzijds was aanvankelijk zeer wijd. Het corpuscularisme dat aan veel zeventiende eeuws experimenteel werk ten grondslag ligt, verlangde zelden het uitvoeren van enig specifiek experiment, noch suggereerde het er de gedetailleerde uitkomst van. Het experiment werd onder deze omstandigheden zeer hoog gewaardeerd en de theorie vaak verguisd. Gewoonlijk was men zich echter niet bewust van de wisselwerking die natuurlijk plaatsvond.

Deze houding tegenover de rol en de status van het experiment is slechts de eerste innovatie die de nieuwe experimentele beweging van de oude onderscheidt. Een tweede is de sterke nadruk die gelegd wordt op experimenten die Bacon zelf beschreef als 'het trekken aan de staart van de leeuw'. Deze experimenten bedwongen de natuur en toonden haar onder omstandigheden die zonder het krachtig ingrijpen van de mens nooit verkregen zouden kunnen worden. De mensen die achter elkaar graan, vis, muizen en verschillende chemicaliën in het kunstmatige vacuüm van een barometer of een luchtmeter plaatsten, brengen precies dit aspect van de nieuwe traditie tot uitdrukking.

De verwijzing naar de barometer en de luchtpomp brengt een derde innovatie van de baconiaanse beweging onder de aandacht, en deze is misschien wel de meest opvallende van alle. Voor 1590 bestond de instrumentele uitrusting van de natuurwetenschappen enkel uit apparaten voor astronomische waarneming. De daaropvolgende 100 jaren waren getuige van de snelle introductie en het gebruik van telescopen, microscopen, thermometers, barometers, luchtpompen, detectors voor elektrische lading en talloze andere

nieuwe experimentele toestellen. Deze zelfde periode werd gekenmerkt door de snelle overname door natuuronderzoekers van een arsenaal aan chemische apparatuur dat voordien alleen in de werkplaatsen van handwerkslieden en de wijkplaatsen van alchemistische adepten te vinden was. In minder dan een eeuw werd de natuurwetenschap instrumenteel van aard.

Deze in het oog springende veranderingen werden vergezeld van verscheidene andere, waarvan er één speciale vermelding verdient. De baconiaanse experimentele wetenschapsmensen verachtten gedachtenexperimenten en drongen aan op zowel nauwkeurige als uitvoerige verslaggeving. Deze aansporing leidde soms tot amusante confrontaties met de oudere experimentele traditie. Robert Boyle bij voorbeeld stelde Pascal aan de kaak wegens een boek over hydrostatica waarin de uitvoerige experimentele illustraties duidelijk in gedachten op maat gesneden waren om de theorie te ondersteunen, hoewel de principes onaanvaardbaar bleken te zijn. Monsieur Pascal vertelt ons niet, klaagde Boyle, hoe een man op de bodem kan zitten van een vat van twintig voet gevuld met water met een laatkop aan zijn been. Evenmin vertelt hij waar men de bovenmenselijke vakman kan vinden die de precisie-instrumenten kan maken die nodig zijn voor een aantal van zijn andere experimenten.<sup>13</sup> De historicus die de literatuur leest uit de traditie waarin Boyle staat, heeft geen moeite om te vertellen welke experimenten echt uitgevoerd werden en welke niet. Boyle noemt zelf vaak getuigen, en levert soms zelfs hun adelsbrieven erbij.

Gegeven het kwalitatief nieuwe geluid van de baconiaanse beweging, hoe beïnvloedde haar bestaan de ontwikkeling van de wetenschap? De bijdragen van het baconianisme aan de conceptuele transformatie van de klassieke wetenschappen waren erg klein. Een aantal experimenten speelde inderdaad een rol, maar deze zijn alle diep geworteld in de oudere traditie. Het prisma dat Newton aanschafte om 'de vermaarde kleurenverschijnselen' te onderzoeken, stamt van middeleeuwse experimenten met bollen gevuld met water. Het hellend vlak is ontleend aan de klassieke studie van eenvoudige machines. De slinger, hoewel letterlijk een nieuw verschijnsel, is in de allereerste plaats een nieuwe fysische uitdrukking van een probleem waar de middeleeuwse aanhangers van de impetus-theorie zich mee beziggehouden hadden in samenhang met de oscillerende beweging van een trillende snaar of van een lichaam dat door het centrum van de aarde valt en dan weer terugkeert. De barometer werd eerst gezien en geanalyseerd als een hydrostatisch toestel, een met water gevulde pompschacht zonder lekken, bedoeld om het gedachtenexperiment te realiseren waarmee Galileï de grenzen aan de afkeer van de natuur van een vacuum had 'bewezen'.<sup>14</sup> Pas nadat een vacuüm boven een kwikkolom geproduceerd en de variatie van de kolomhoogte afhankelijk van weersgesteldheid en hoogte gedemonstreerd was, werden de barometer en

haar nakomeling, de luchtpomp, aan het kabinet van baconiaanse instrumenten toegevoegd.

Hoewel de zojuist genoemde experimenten van belang waren, zijn ze toch maar gering in aantal, en alle hebben ze hun bijzondere effectiviteit te danken aan het feit dat ze direct geconfronteerd konden worden met de zich ontwikkelende theorieën van de klassieke wetenschappen die hen hadden gesuggered. De uitkomst van Torricelli's barometerexperiment en Galilei's experiment met het hellend vlak was grotendeels voorzien. Newtons prisma-experiment zou er evenmin als de traditionele voorlopers ervan in geslaagd zijn de kleurentheorie te veranderen wanneer Newton geen toegang had gehad tot de zojuist ontdekte wet van lichtbreking, een wet waarnaar binnen de klassieke traditie van Ptolemaeus tot Kepler gezocht was. Om dezelfde reden verschillen de consequenties van dat experiment zo duidelijk met die van de niet-traditionele experimenten die gedurende de zeventiende eeuw kwalitatief nieuwe optische effecten zoals interferentie, diffractie en polarisatie onthulden. Omdat deze laatsten geen produkten van de klassieke wetenschappen waren en niet in nauwe samenhang met de klassieke theorieën gebracht konden worden, hadden ze tot aan het begin van de negentiende eeuw weinig invloed op de ontwikkeling van de optica. Na alle — in sommige gevallen zeer noodzakelijke — nuanceringen, zal blijken dat Alexandre Koyré en Herbert Butterfield gelijk hadden. Het is accurater de transformatie van de klassieke wetenschappen gedurende de Wetenschappelijke Revolutie toe te schrijven aan nieuwe manieren van kijken naar oude verschijnselen dan aan een reeks niet-geanticiperde experimentele ontdekkingen.<sup>15</sup>

Gezien deze omstandigheden hebben talloze historici, waaronder Koyré, de baconiaanse beweging beschreven als een vorm van bedrog die van geen enkel belang was voor de ontwikkeling van de wetenschap. Deze evaluatie is echter, precies als die welke er soms zo fel door bestreden werd, het produkt van de opvatting die uitgaat van de wetenschappen als een eenheid. Het baconianisme heeft dan misschien weinig bijgedragen aan de ontwikkeling van de klassieke wetenschappen, het gaf echter wel aanleiding tot het ontstaan van een groot aantal nieuwe wetenschappelijke gebieden die vaak in voorafgaande ambachten wortelden. De bestudering van het magnetisme dat haar eerste data verkreeg uit vroegere ervaringen met het zeekompas, is zo'n geval. Elektriciteit als onderzoeksobject kwam voort uit pogingen om de relatie tussen de aantrekkingskracht van een magneet op ijzer en die van gewreven barnsteen op strohaksel te vinden. Deze beide gebieden waren voorts voor hun latere ontwikkeling afhankelijk van de uitwerking van nieuwe, krachtiger en meer verfijnde instrumenten. Het zijn typische nieuwe baconiaanse wetenschappen. Bijna hetzelfde geldt voor het onderzoek naar warmte. Lange tijd een onderwerp voor speculatie binnen de filosofische en

medische tradities, veranderde het, door de uitvinding van de thermometer, in een object voor systematisch onderzoek. De scheikunde vormt een ander en meer ingewikkeld geval. Veel van de belangrijkste instrumenten, reagentia en technieken ervan waren reeds lang voor de Wetenschappelijke Revolutie ontwikkeld. Maar tot aan het einde van de zestiende eeuw waren ze voornamelijk in handen van ambachtslieden, apothekers en alchemisten. Pas na een herwaardering van de ambachten en manipulatieve technieken werden ze regelmatig gebruikt bij het experimentele zoeken naar kennis van de natuur.

Omdat deze en soortgelijke gebieden nieuwe brandpunten vormden van wetenschappelijke activiteit in de zeventiende eeuw, is het niet verrassend dat in het begin de bestudering ervan weinig veranderingen opleverde die opvallender waren dan de herhaalde ontdekking van voorheen onbekende experimentele effecten. Wanneer het bezit van samenhangende consistente theorieën waarmee precieze voorspellingen gedaan kunnen worden een teken van een ontwikkeld wetenschappelijk gebied is, dan bleven de baconiaanse wetenschappen heel de zeventiende en een groot deel van de achttiende eeuw onderontwikkeld. Wat hun onderzoeksliteratuur en hun ontwikkelingsgang betreft leken ze minder op de contemporaine klassieke wetenschappen dan op een aantal sociale wetenschappen van vandaag de dag. Tegen het midden van de achttiende eeuw waren de experimenten in deze gebieden echter systematischer geworden en ze concentreerden zich in toenemende mate op zorgvuldig uitgekozen reeksen van verschijnselen waarvan men dacht dat ze bijzonder onthullend zouden zijn. In de scheikunde behoorde de bestudering van reacties met behulp van de pneumatische trog en van verzaadiging tot de prominente onderwerpen; op het gebied van elektriciteit het onderzoek naar geleiding en de Leidse fles; in de thermometrie en de warmteleer, de bestudering van de temperatuur van mengsels. Tegelijkertijd werden corpusculaire en andere begrippen steeds meer aangepast aan deze speciale experimentele onderzoeksgebieden; de noties van chemische affiniteit van elektrische vloeistoffen en hun atmosferen zijn daar bijzonder bekende voorbeelden van.

De theorieën waarin zulke begrippen functioneerden, bleven geruime tijd voornamelijk kwalitatief en overeenkomstig daarmee vaak vaag, maar toch konden ze worden geconfronteerd met individuele experimenten met een mate van precisie die in het begin van de achttiende eeuw in de baconiaanse wetenschappen nog ondenkbaar was. Daarbij bereikten de baconiaanse wetenschappen al vrij spoedig een stadium dat erg veel leek op dat van de klassieke wetenschappen in de oudheid, omdat het streven naar verfijning dat dergelijke confrontaties mogelijk maakte, tot aan de laatste 3 à 4 decennia van de achttiende eeuw voortduurde en in toenemende mate centraal kwam te staan in de betreffende gebieden. Elektriciteit en magnetisme bereikten de

fase van volwassen wetenschap met het werk van Aepinus, Cavendish en Coulomb; warmte met het werk van Black, Wilcke en Lavoisier; de scheikunde bereikte dit stadium iets geleidelijker en twijfelachtiger, maar niet later dan het tijdstip van Lavoisiers Chemische Revolutie. Aan het begin van de volgende eeuw werden de kwalitatief nieuwe optische ontdekkingen van de zeventiende eeuw voor het eerst opgenomen in de oudere wetenschap van de optica. Met het plaatsvinden van zulke gebeurtenissen was de baconiaanse wetenschap eindelijk volwassen geworden en rechtvaardigde daarmee het geloof, zij het niet altijd de methodologie, van haar zeventiende eeuwse grondleggers.

Hoe was de relatie tussen de groep baconiaanse wetenschappen, gedurende de bijna twee eeuwen van hun volwassenwording, en de groep die hier 'klassiek' genoemd wordt? Deze vraag is veel te weinig bestudeerd, maar ik geloof dat dit het antwoord zal blijken te zijn: er bestond nauwelijks contact en wat er aan contact was, ging dan vaak nog gepaard met grote moeilijkheden, intellectuele, institutionele en soms politieke. Tot in de negentiende eeuw bleven de twee groepen, klassieke en baconiaanse, onafhankelijk van elkaar. Grof gezegd werden de klassieke wetenschappen tezamen onder de noemer 'wiskunde' gegroepeerd; de baconiaanse wetenschappen werden in het algemeen als 'experimentele filosofie' beschouwd of, in Frankrijk, als '*physique expérimentale*'; de scheikunde had stabiele banden met de farmacie, de geneeskunde en de verschillende ambachten en was ten dele een lid van de laatste groep en ten dele een verzameling van meer praktische specialisaties.<sup>16</sup>

De scheiding tussen de klassieke en de baconiaanse wetenschappen is vanaf het ontstaan van de laatste na te gaan. Bacon zelf was niet alleen jegens de wiskunde wantrouwig, maar jegens heel de quasi-deductieve structuur van de klassieke wetenschap. De critici die hem belachelijk maken omdat hij gefaald zou hebben de beste wetenschap van zijn tijd te herkennen, hebben niet begrepen waar het om ging. Hij verwierp het copernicanisme niet, omdat hij de voorkeur gaf aan het ptolemaïsche systeem. Hij verwierp veeleer beide, omdat hij dacht dat geen enkel systeem dat zo ingewikkeld, abstract en wiskundig was, bij kon dragen aan de kennis of de beheersing van de natuur. Hoewel zijn volgelingen in de experimentele traditie de copernicaanse kosmologie aanvaardden, namen zij bijna nooit de moeite zelf ook maar de wiskundige vaardigheid en geraffineerdheid te verwerven die vereist was om de klassieke wetenschappen te begrijpen of te beoefenen. Deze situatie duurde de hele achttiende eeuw voort: Franklin, Black en Nollet vertonen deze afkeer net zo duidelijk als Boyle en Hooke.

De andere kant is veel dubbelzinniger. Wat ook de oorzaken mogen zijn van de baconiaanse beweging, zij raakten ook de eerder ontstane klassieke

wetenschappen. Ook in deze gebieden deden nieuwe instrumenten hun intrede, met name in de astronomie. Ook de maatstaven voor de verslaggeving en evaluatie van data veranderden. Tegen het einde van de zeventiende eeuw waren confrontaties als die tussen Boyle en Pascal niet langer denkbaar. Maar, zoals eerder aangegeven is, het gevolg van deze ontwikkeling was eerder een graduele verfijning dan een substantiële verandering in de aard van de klassieke wetenschappen. Voordien was de astronomie reeds instrumenteel en de optica reeds experimenteel van aard geweest; over de relatieve waarden van kwantitatief telescopische observatie en waarneming met het blote oog bestond gedurende heel de zeventiende eeuw twijfel; afgezien van de slinger waren de instrumenten van de mechanica in plaats van middel voor onderzoek voornamelijk werktuigen voor pedagogische demonstraties. Ofschoon de ideologische kloof tussen de baconiaanse en de klassieke wetenschappen smaller werd, verdween ze onder deze omstandigheden geenszins. Door de achttiende eeuw heen voerden de belangrijkste beoefenaren van de gevestigde wiskundige wetenschappen weinig experimenten uit en leverden ze minder wezenlijke bijdragen aan de ontwikkeling van de nieuwe experimentele gebieden.

Galileï en Newton zijn schijnbare uitzonderingen. Maar alleen de laatste is een echte uitzondering en beiden werpen ze licht op de aard van de breuk tussen de klassieke en de baconiaanse wetenschappen. Galileï, een trots lid van de *Lincei*, ontwikkelde ook de telescoop, het echappement, een vroege vorm van de thermometer, en bovendien nog andere nieuwe instrumenten. Het is duidelijk dat hij zeer belangrijk is geweest voor bepaalde aspecten van de beweging die hier baconiaans genoemd wordt. Maar zoals Leonardo's loopbaan ook aangeeft, bezigheden op het gebied van instrumenten en techniek maken van een mens nog geen experimentele wetenschapper en Galileï's dominante houding tegenover dat aspect van de wetenschap bleef binnen de grenzen van de klassieke benadering. Bij sommige gelegenheden verklaarde hij dat de kracht van zijn geest het voor hem overbodig maakte om de experimenten die hij beschreef ook uit te voeren. Op andere momenten, bij voorbeeld bij de beschouwingen over de beperkingen van waterpompen, nam hij zonder commentaar zijn toevlucht tot apparaten die de mogelijkheden van de bestaande techniek te boven gingen. Boyle's kritiek op Pascal is zonder meer op Galileï van toepassing. Deze kritiek isoleert een figuur die aan de klassieke wetenschappen hoogst belangrijke bijdragen kon leveren en dat ook deed, maar aan de baconiaanse wetenschappen alleen bijdroeg met ontwerpen voor instrumenten.

Newtons leerjaren vielen in de tijd waarin het Britse baconianisme zijn hoogtepunt beleefde en hij nam ondubbelzinnig deel aan beide tradities. Maar, zoals I. B. Cohen twee decennia geleden benadrukte, het resultaat

daarvan was het ontstaan van twee door Newton beïnvloede onderscheiden stromingen, de ene herleidbaar tot Newtons *Principia*, de andere tot zijn *Opticks*.<sup>17</sup> Dit inzicht krijgt bijzondere betekenis wanneer men zich realiseert dat, hoewel de *Principia* duidelijk binnen de traditie van de klassieke wetenschappen valt, de *Opticks* geenszins ondubbelzinnig in de baconiaanse traditie staat. Omdat een voordien hoog ontwikkeld gebied als de optica zijn onderwerp was, kon Newton voortdurend zorgvuldig uitgekozen experimenten met de theorie in samenhang brengen en daaraan dankt hij zijn successen. Boyle, wiens *Experimental History of Colours* verscheidene van de experimenten omvat waarop Newton zijn theorie fundeerde, deed geen pogingen in deze richting en stelde zich tevreden met de opmerking dat zijn resultaten speculaties suggereerden die misschien de moeite waard waren om nader onderzocht te worden.<sup>18</sup> Hooke die 'de ringen van Newton', het eerste thema van de *Opticks*, Boek II, ontdekte, verzamelde zijn gegevens op ongeveer dezelfde manier. Newton selecteerde en gebruikte ze in plaats daarvan om de theorie uit te werken, ongeveer zoals zijn voorgangers in de klassieke traditie de meer toegankelijke informatie gebruikt hadden die de alledaagse ervaring gewoonlijk verschaft. Zelfs toen hij zich tot zulke nieuwe baconiaanse gebieden als scheikunde, elektriciteit en warmte wendde, zoals in de 'Vragen' bij zijn *Opticks*, koos Newton uit de groeiende experimentele literatuur die speciale waarnemingen en experimenten die theoretische problemen zouden kunnen verhelderen. In deze nog in wording zijnde gebieden konden niet zulke diepgaande resultaten behaald worden als in de optica; desondanks bleken begrippen als chemische affiniteit, verspreid over de 'Vragen', een bijna onuitputtelijke bron te zijn voor de meer systematische en selectieve baconiaanse beoefenaren van de achttiende eeuw, en daarom grepen zij er steeds weer op terug. Zij vonden in de *Opticks* en haar 'Vragen' een niet-baconiaanse toepassing van het baconiaanse experiment, een produkt van Newtons scherpzinnigheid en diens tegelijkertijd doorkneet zijn in de klassieke wetenschappelijke traditie.

Newtons geval is echter uniek, met gedeeltelijke uitzondering van zijn continentale tijdgenoten Huyghens en Mariotte. Tijdens de achttiende eeuw, aan het begin waarvan zijn wetenschappelijk werk voltooid was, was er niemand anders die in belangrijke mate aan beide tradities deel had, een situatie die ook weerspiegeld wordt door de ontwikkeling van wetenschappelijke instituties en loopbanen tenminste tot in de negentiende eeuw. Hoewel er op dit gebied nog veel aanvullend onderzoek nodig is, zullen de volgende opmerkingen in grote lijnen het kader aangeven dat door onderzoek waarschijnlijk verrijkt zal worden. Althans op elementair niveau hadden de klassieke wetenschappen zich in het standaard curriculum van de middeleeuwse universiteiten genesteld. Gedurende de zestiende en zeventiende eeuw groeide het

aantal aan hen gewijde leerstoelen. De mensen die ze bezetten, te zamen met degenen die op plaatsen in de pas opgerichte nationale wetenschappelijke academies van Frankrijk, Pruisen en Rusland waren benoemd, leverden de belangrijkste bijdragen aan de zich ontwikkelende klassieke wetenschappen. Geen van hen kan eigenlijk een amateur genoemd worden, hoewel de term vaak zonder onderscheid gebruikt werd voor de beoefenaren van de zeventiende en achttiende eeuwse wetenschap als geheel. De beoefenaren van de baconiaanse wetenschap waren echter gewoonlijk wel amateurs, met uitzondering alleen van de scheikundigen die gedurende de achttiende eeuw in de farmacie, de industrie en een paar medische scholen een loopbaan vonden. Vóór de laatste helft van de negentiende eeuw hadden de universiteiten geen plaats voor andere experimentele wetenschappen. Hoewel een aantal van de beoefenaren daarvan wel plaatsen kregen in de verschillende nationale wetenschappelijke academies, werden ze vaak als tweederangs burgers beschouwd. Alleen in Engeland, waar de klassieke wetenschappen voor de dood van Newton duidelijk in verval raakten, waren ze behoorlijk vertegenwoordigd, een in het oog vallend verschil waar later nader op in gegaan zal worden.

Het voorbeeld van de Franse Academie van Wetenschappen is in dit opzicht leerzaam en het onderzoek ernaar zal ons tegelijkertijd de achtergrond verschaffen voor een punt dat in de volgende paragraaf besproken zal worden. Guillaume Amontons (1663–1705), bekend vanwege zijn bijdragen aan zowel het ontwerp als de theorie van baconiaanse instrumenten als de thermometer en de hygrometer, kwam in de Académie nooit hoger dan de status van *élève*, in welke hoedanigheid hij verbonden was aan de astronoom Jean Le Fèvre. Pierre Polinière (1671–1734), vaak aangehaald als de man die de *physique expérimentale* in Frankrijk introduceerde, was op geen enkele manier ooit formeel verbonden met de Académie. Hoewel de twee belangrijkste Franse geleerden die bijdroegen aan de achttiende eeuwse elektrische wetenschap lid van de Académie waren, werd de eerste, C. F. de C. Dufay (1698–1739) in de sectie voor scheikunde geplaatst, terwijl de tweede, de Abbé Nollet (1700–1770) lid was van de enigszins heterogene sectie die officieel gereserveerd werd voor de beoefenaren van de *arts mécaniques*. Pas na zijn verkiezing in de Royal Society van Londen klom Nollet op in de hiërarchie en volgde onder andere zowel de Comte de Buffon als Ferchauld de Réaumur op. Anderzijds kreeg de beroemde instrumentmaker Abraham Bréguet, een man met het soort talenten waarvoor de sectie voor mechanica bedoeld was, geen plaats in de Academie totdat hij, in 1816 op 69-jarige leeftijd, bij koninklijk besluit werd opgenomen in de rangen.

Deze geïsoleerde gevallen geven aan wat ook uit de formele organisatie van de Académie valt af te lezen. Pas in 1785 werd er een afdeling voor de

*physique expérimentale* opgericht en deze werd toen ondergebracht bij de wiskundige afdeling (samen met de geometrie, de astronomie en de mechanica) in plaats van in een afdeling voor de meer instrumentele *sciences physiques* (anatomie, scheikunde en metallurgie, plantkunde en landbouw, en natuurlijke historie en mineralogie). Na 1815, toen de naam van de nieuwe afdeling veranderd werd in *physique générale*, waren de experimentele wetenschapsmensen onder de leden ervan voor enige tijd zeer gering in aantal. Wanneer we naar de achttiende eeuw in zijn geheel kijken, dan waren de bijdragen van de leden van de academies aan de baconiaanse natuurwetenschappen klein vergeleken met die van artsen, apothekers, industriëlen, instrumentmakers, rondtrekkende docenten en financieel onafhankelijke personen. De enige uitzondering is weer Engeland, waar de Royal Society dicht bevolkt was met zulke amateurs in plaats van met mensen die in de allereerste plaats binnen de wetenschappen carrière maakten.

### *De oorsprong van de moderne wetenschap*

Laten we nu nog even teruggaan van het einde van de achttiende naar het midden van de zeventiende eeuw. De baconiaanse wetenschappen waren toen in wording terwijl de klassieke wetenschappen een radicale verandering ondergingen. Te zamen met tegelijkertijd optredende veranderingen in de levenswetenschappen vormen deze twee reeksen gebeurtenissen wat we nu de Wetenschappelijke Revolutie noemen. Hoewel ik me in dit opstel niet ten doel stel de buitengewoon ingewikkelde oorzaken ervan te verklaren, is het de moeite waard om te zien hoe anders de vraag naar de oorzaken wordt wanneer de te verklaren ontwikkelingen elk voor zich beschouwd worden.

Het is geen verrassing dat alleen de klassieke wetenschappen gedurende de Wetenschappelijke Revolutie veranderden. Andere gebieden van de natuurwetenschap bestonden voor het einde van deze periode nog nauwelijks. Voorzover ze wel bestonden, ontbrak het hen verder aan enig consistent technisch leerstuk dat een zinvol geheel vormde dat gereconstrueerd kon worden. Daarentegen is één reeks van oorzaken van de transformatie van de klassieke wetenschappen terug te voeren op hun eigen vroegere ontwikkelingsgang. Hoewel de historici het helemaal niet eens zijn over het gewicht dat daaraan toegekend moet worden, zijn er nu maar weinigen die betwijfelen of bepaalde middeleeuwse herformuleringen van de oude islamitische of Latijnse doctrines van groot belang waren voor figuren als Copernicus, Galileï en Kepler. Ik zie geen overeenkomstige scholastieke wortels voor de baconiaanse wetenschappen, ondanks de aanspraken die soms gemaakt worden voor de methodologische traditie die van Grosseteste stamt.

Vele andere factoren die tegenwoordig herhaaldelijk aangehaald worden

om de Wetenschappelijke Revolutie te verklaren, droegen zeker bij aan de evolutie van zowel de klassieke als de baconiaanse wetenschappen, maar vaak op verschillende manieren en in verschillende mate. De invloed van nieuwe intellectuele elementen — eerst Hermetische en later corpusculair-mechanische — op de omgeving waarbinnen de vroeg moderne wetenschap beoefend werd, verschaffen ons een eerste voorbeeld van die verschillen. Binnen de klassieke wetenschappen werd de status van de wiskunde soms verhoogd door Hermetische bewegingen; ze moedigten pogingen aan om wiskundige regelmatigheden in de natuur te ontdekken en lieten af en toe de eenvoudige wiskundige vormen die aldus ontdekt waren toe als formele oorzaken, het eindpunt van de wetenschappelijke causale keten.<sup>19</sup> Zowel Galileï als Kepler leveren voorbeelden van deze in toenemende mate ontologische rol van de wiskunde en de laatste vertoont ook een andere, meer occulte Hermetische invloed. Van Kepler en Gilbert tot aan Newton, hoewel tegen die tijd in een zwakkere vorm, hielpen de natuurlijke sympathieën en antipathieën die in het Hermetische denken op de voorgrond traden, de leegte vulen die ontstaan was door de instorting van de aristotelische sferen die voorheen de planeten in hun baan gehouden hadden.

Na het eerste kwart van de zeventiende eeuw, toen de Hermetische mystiek steeds meer werd verworpen, werd haar plaats, nog steeds binnen de klassieke wetenschappen, snel ingenomen door de een of andere vorm van de corpusculaire filosofie die van het klassieke atomisme stamde. Aantrekkings- en afstotingskrachten tussen ofwel grote ofwel microscopisch kleine lichamen waren niet langer in trek, hetgeen een bron van veel tegenstand tegen Newton betekende. Maar binnen het oneindige universum van het corpuscularisme konden er geen bevoorrechte centra of richtingen zijn. Natuurlijke continue beweging kon alleen in rechte lijnen plaatsvinden en kon alleen verstoord worden door botsingen tussen lichamen. Dit nieuwe perspectief leidt direct van Descartes naar Newtons Eerste Bewegingswet en — via de studie van botsingen, een nieuw probleem — ook naar zijn Tweede Wet. Eén van de factoren die een rol speelden bij de transformatie van de klassieke wetenschappen was duidelijk het nieuwe intellectuele klimaat, eerst Hermetisch en later corpusculair, waarbinnen ze na 1500 beoefend werden.

Hetzelfde nieuwe intellectuele milieu beïnvloedde de baconiaanse wetenschappen, maar vaak om andere redenen en op andere manieren. De Hermetische nadruk op occulte sympathieën helpt ongetwijfeld de groeiende belangstelling voor magnetisme en elektriciteit na 1500 verklaren; soortgelijke invloeden verhoogden de status van de scheikunde vanaf de tijd van Paracelsus tot aan die van Van Helmont. Maar recent onderzoek suggereert steeds meer dat de belangrijkste bijdrage van het Hermeticisme aan de baconiaanse wetenschappen en misschien wel aan de hele Wetenschappelijke

Revolutie de Faustiaanse figuur van de magiër was, die de natuur wilde manipuleren en beheersen, vaak met behulp van vernuftige listen, instrumenten en machines. De erkenning van het feit dat Francis Bacon een overgangsfiguur is tussen de magiër Paracelsus en de experimentele filosoof Robert Boyle, heeft meer dan wat ook in recente jaren geleid tot de transformatie van het historisch denken over de manier waarop de nieuwe experimentele wetenschappen geboren werden.<sup>20</sup>

De gevolgen van de overgang naar het corpuscularisme waren voor de baconiaanse wetenschappen, in tegenstelling tot hun klassieke tijdgenoten, dubbelzinnig, en dit is de eerste reden waarom het Hermeticisme zich langer handhaafde in gebieden als scheikunde en magnetisme dan in, zeg, astronomie en mechanica. De bewering dat suiker zoet is omdat de ronde deeltjes ervan de tong strelen, is niet evident een verbetering ten opzichte van het toeschrijven van een zoetings-vermogen aan suiker. De achttiende eeuwse ervaring zou aantonen dat de ontwikkeling van de baconiaanse wetenschappen vaak de hulp nodig had van begrippen als affiniteit en phlogiston, en in dit opzicht is er geen fundamenteel verschil met de sympathieën en antipathieën van de Hermetische beweging. Maar het corpuscularisme maakte de experimentele wetenschappen los van de magie en bevorderde aldus de noodzakelijke onafhankelijkheid. Belangrijker nog, het rechtvaardigde het experiment, en geen enkele vorm van aristotelianisme of platonisme had dat kunnen doen. Gedurende de tijd dat de heersende traditie met betrekking tot wetenschappelijke verklaringen de specificatie van formele oorzaken of essenties verlangde, konden alleen data verkregen uit de natuurlijke loop der gebeurtenissen relevant zijn. Experimenteren of de natuur dwingen betekende haar geweld aandoen, en op die manier zou de rol van de 'naturen' of vormen die de dingen maakten tot wat ze waren, aan het oog onttrokken worden. In tegenstelling daarmee was experimenteren in een corpusculair universum onmiskenbaar relevant voor de wetenschappen. Het kon de mechanische condities en wetten waaruit natuurlijke verschijnselen volgden niet veranderen en zou deze juist bijzonder kunnen belichten. Dit was de les die Bacon herhaaldelijk verbond met de fabel van Cupido in ketenen.

Een nieuw intellectueel milieu was natuurlijk niet de enige oorzaak van de Wetenschappelijke Revolutie, en de andere factoren die het vaakst aangehaald worden ter verklaring ervan, winnen eveneens aan bewijskracht wanneer ze voor klassieke en baconiaanse gebieden elk apart onderzocht worden. Tijdens de renaissance werd het monopolie op geleerdheid van de middeleeuwse universiteiten geleidelijk aan doorbroken. Nieuwe bronnen van rijkdom, nieuwe levenswijzen en nieuwe waarden, te zamen droegen ze bij aan de statusverhoging van een groep die vroeger als handwerkslieden of ambachtslieden geclassificeerd werd. De uitvinding van de boekdrukkunst en de

herontdekking van aanvullende antieke bronnen gaf de leden ervan toegang tot een wetenschappelijke en technische erfenis waarover men daarvoor alleen binnen de omgeving van de clericale universiteiten kon beschikken, als dat tenminste al het geval was. Eén van de resultaten, in kort bestek weerspiegeld in de carrières van Brunelleschi en Leonardo, was het verschijnsel van kunstenaar-technicus die uit de gilden voortkwam, en die onder andere deskundig was op het gebied van de schilderkunst, beeldhouwkunst, architectuur, vestingwerken, watervoorziening en het ontwerpen van oorlogstuig en bouwmachines. Gesteund door een steeds uitgebreider patronagesysteem, waren deze mensen tegelijkertijd werknemers en in toenemende mate ook ornamenten van de renaissance-hoven en later ook van de stadstaten van Noord-Europa. Sommigen van hen waren ook informeel verbonden met humanistische kringen die hen kennis lieten maken met Hermetische en neo-platoonse bronnen. Het waren echter niet deze bronnen die in hoofdzaak hun status als leden van een nieuwe gemeenschap van gecultiveerde geleerden legitimeerden. Deze status dankten zij voornamelijk aan hun vermogen werken aan te halen en trefzeker te becommentariëren als Vitruvius' *De architectura*, Euclides' *Geometrie* en *Optica*, de pseudo-aristotelische *Mechanische Problemen* en, vanaf het midden van de zestiende eeuw, zowel Archimedes' *Drijvende Lichamen* als Hero's *Pneumatica*.<sup>21</sup>

Het belang van deze nieuwe groep voor de Wetenschappelijke Revolutie is onbetwistbaar. Galileï, in veel opzichten, en Simon Stevin, in alle opzichten, zijn het produkt van deze groep. Wat echter nadruk verdient is dat de bronnen die de leden gebruikten en de gebieden waarop zij voornamelijk invloed uitoefenden, tot de groep wetenschappen behoorden die hier de klassieken wordt genoemd. Zij gebruikten hoofdzakelijk werken over wiskunde, statica en optica, hetzij als kunstenaar (perspectief), hetzij als technicus (bouwwerken en watervoorziening). Ook de astronomie kwam af en toe binnen hun gezichtskring, zij het in mindere mate. Eén van de zaken die Vitruvius bezig hield was het ontwerpen van nauwkeurige zonnewijzers geweest; de kunstenaars-technici van de renaissance breidden deze belangstelling soms ook uit tot het ontwerpen van andere astronomische instrumenten.

Hoewel alleen hier en daar veelbelovend, was de belangstelling van de kunstenaars-technici voor deze klassieke gebieden een belangrijke factor voor hun wederopbouw. Deze belangstelling vormt waarschijnlijk de basis van Brahe's nieuwe instrumenten en is zeker de bron van Galileï's onderzoek naar de sterkte van materialen en de beperkte kracht van waterpompen, waarvan de laatste direct naar Torricelli's barometer leidt. Het is aannemelijk, maar controversiëler, dat zuiver technische interesse, in het bijzonder aangemoedigd door de ballistiek, mede verantwoordelijk waren voor het losmaken van het probleem van plaatselijke beweging van het omvattender filosofische

probleem van verandering. Tegelijkertijd werden daardoor getallen in plaats van geometrische verhoudingen belangrijk voor de benadering van dat probleem. Deze en aanverwante gebeurtenissen leidden ertoe dat er in de Franse Académie ook een afdeling voor *arts mécaniques* kwam en waren er de oorzaak van dat deze afdeling bij de afdelingen voor geometrie en astronomie geplaatst werden. Dat de Académie de baconiaanse wetenschappen later geen natuurlijke thuishaven bezorgde, heeft zijn tegenhanger in de interesse van de kunstenaars-technici van de renaissance die niet gericht waren op de niet-mechanische, niet-wiskundige aspecten van zulke ambachten als verven, weven, glasblazen en navigatie. Dit waren echter juist de ambachten die zo'n grote rol speelden in de genese van de nieuwe experimentele wetenschappen. Bacons programmatische uitspraken vroegen om natuurlijke historiën voor al deze ambachten en een paar van die historiën van niet-mechanische ambachten werden ook geschreven.

Omdat het mogelijk nut van zelfs maar een analytische scheiding tussen mechanische en niet-mechanische ambachten nog niet eerder naar voren gebracht is, moet dat wat nu volgt zelfs nog voorlopiger zijn dan het voorafgaande. Het ziet er echter naar uit dat de laatsten pas later voorwerp van theoretische belangstelling werden dan de eersten. In het begin werden ze waarschijnlijk bevorderd door paracelsiaanse opvattingen en hun institutionalisering blijkt uit werken als Biringuccio's *Pyrotechnica*, Agricola's *De re metallica*, Robert Normans *Neue Attractive* en Bernard Pallisy's *Discours*, waarvan de eerste werd gepubliceerd in 1540. De positie die de mechanische ambachten voordien reeds verworven hadden, helpt het verschijnen van boeken als deze verklaren, maar de beweging die hen voortbracht is niettemin een apart verschijnsel. Slechts weinig beoefenaren van de niet-mechanische ambachten werden door patronage ondersteund en evenmin slaagden ze erin voor het einde van de zeventiende eeuw aan de bepalingen van de gilden te ontsnappen. Geen enkele van hen kon zich beroepen op een belangrijke klassieke literaire traditie en dit feit is er waarschijnlijk de oorzaak van dat de pseudo-klassieke Hermetische literatuur en de figuur van de magiër voor hen belangrijker waren dan voor hun tijdgenoten uit de wiskundig-mechanische gebieden.<sup>22</sup> Met uitzondering van de scheikunde, onder apothekers en artsen, werd feitelijke praktijkuitoefening zelden gecombineerd met geleerde gesprekken erover. Een verhoudingsgewijs groot aantal artsen behoorde echter tot degenen die geleerde werken schreven, niet alleen over scheikunde, maar ook over andere niet-mechanische ambachten die data leverden die voor de ontwikkeling van de baconiaanse wetenschappen nodig waren. Agricola en Gilbert zijn daar alleen maar de vroegste voorbeelden van.

Deze verschillen tussen de twee in vroegere ambachten gewortelde tradities kunnen misschien nog een ander verschil helpen verklaren. Ofschoon de

kunstenaars-technici van de renaissance sociaal nuttig waren, en dat ook wisten en er soms hun claims op baseerden, zijn de utilitaristische elementen in hun geschriften veel minder hardnekkig en fel dan die in de geschriften van mensen die uit de niet-mechanische ambachten putten. Bedenk hoe weinig Leonardo erom gaf of de mechanische apparaten die hij uitvond al dan niet daadwerkelijk gebouwd konden worden; of vergelijk de geschriften van Galileï, Pascal, Descartes en Newton eens met die van Bacon, Boyle en Hooke. Hoewel het utilitarisme in beide groepen geschriften aanwezig is, staat het alleen in de tweede groep centraal. Dit feit kan ons misschien de sleutel leveren tot een laatste belangrijk verschil tussen de klassieke en de baconiaanse wetenschappen.

Vanaf tenminste 1700 bloeiden de baconiaanse en klassieke wetenschappen binnen verschillende nationale kaders, uitgezonderd de scheikunde die tegen het einde van de zeventiende eeuw een rijk geschakeerde institutionele basis gekregen had. Beoefenaren van beide soorten wetenschappen zijn in bijna alle Europese landen te vinden, maar het centrum van de baconiaanse wetenschappen was duidelijk Groot-Brittannië, en voor de wiskundige wetenschappen was dat het Continent, met name Frankrijk. Newton is de laatste Britse wiskundige tot aan het midden van de negentiende eeuw die te vergelijken is met continentale figuren als De Bernouillis, Euler, Lagrange, Laplace en Gauss. In de baconiaanse wetenschappen ontstaat de tegenstelling eerder en is minder scherp, maar voor de jaren tachtig van de achttiende eeuw is het moeilijk continentale experimentele wetenschapsmensen te vinden wier reputaties kunnen wedijveren met die van Boyle, Hooke, Hauksbee, Gray, Hales, Black en Priestley. Degenen aan wie men verder het eerst denkt, zijn geconcentreerd in Holland en Zwitserland, vooral in eerstgenoemd land. Boerhaave, Musschenbroek en De Saussure, allen zijn daar voorbeelden van.<sup>23</sup> Dit geografische patroon behoeft meer systematisch onderzoek, maar dat zal waarschijnlijk verrassend blijken te zijn, wanneer rekening wordt gehouden met de relatieve bevolkingsaantallen en, in het bijzonder, met de relatieve produktiviteit in de baconiaanse en de klassieke wetenschap. Dergelijke onderzoekingen kunnen misschien ook laten zien dat de zojuist geschetste verschillen pas na het midden van de zeventiende eeuw ontstonden en langzaam aan meer opvallend werden gedurende de generaties die volgden. Zijn de verschillen tussen de activiteiten van de Franse Académie en de Royal Society in de achttiende eeuw niet groter dan die tussen de activiteiten van de *Accademia del Cimento*, de Montmor Academie en het Britse 'Invisible College'?

Temidden van de talrijke concurrerende verklaringen voor de Wetenschappelijke Revolutie is er maar één die een sleutel verschaft tot dit patroon van nationale divergenties. Het is de zogenaamde Merton-these, een herformu-

lering met betrekking tot de wetenschappen van verklaringen voor de opkomst van het kapitalisme die eerder door Weber, Troeltsch en Tawney geleverd werden.<sup>24</sup> Gesteld wordt dat de gevestigde puriteinse of protestantse gemeenschappen na hun eerste evangelische, bekerende fase een 'ethos' of 'ethiek' voortbrachten die bijzonder gunstig was voor de ontwikkeling van de wetenschappen. Tot de belangrijkste componenten behoren een sterk utilitaristisch karakter, een grote waardering van arbeid, inclusief handarbeid en technische arbeid en een wantrouwen jegens elke vorm van systeem dat ieder mens aanmoedigde zijn eigen interpretator te zijn, eerst van de bijbel en later van de natuur. Ik laat hier de moeilijkheden buiten beschouwing, hetgeen anderen niet hoeven te doen, die opdoemen bij het identificeren van zo'n ethos en bij de beantwoording van de vraag of dit ethos aan alle protestante of alleen aan bepaalde puriteinse secten toegeschreven kan worden; de grootste bezwaren tegen dit gezichtspunt zijn altijd geweest dat het te veel probeert te verklaren. Bacon, Boyle en Hooke lijken de Merton-these te bevestigen, maar Galileï, Descartes en Huyghens niet. Het is in ieder geval verre van duidelijk of er, voordat de Wetenschappelijke Revolutie enige tijd aan de gang was ergens post-evangelische puriteinse of protestante gemeenschappen bestonden. Het is geen verrassing dat de Merton-these controversieel is geweest.

De aantrekkingskracht ervan is echter veel groter wanneer ze niet op de Wetenschappelijke Revolutie als geheel wordt toegepast, maar in plaats daarvan op de beweging die de baconiaanse wetenschappen bevorderde. De oorspronkelijke impuls van die beweging tot macht over de natuur met behulp van manipulaties en instrumentale technieken werd ongetwijfeld gesteund door het Hermeticisme. Maar de corpusculaire filosofieën die vanaf de jaren dertig van de zestiende eeuw in toenemende mate het Hermeticisme binnen de wetenschappen vervingen, brachten niet dit soort waarden met zich mee en het baconianisme bleef desondanks voortbloeien. Dat dit in het bijzonder in niet-katholieke landen het geval was, suggereert dat het toch de moeite waard kan zijn te ontdekken wat, met betrekking tot de wetenschappen, nu eigenlijk een 'puritein' en een 'ethos' zijn. Twee uit hun context gehaalde biografische gegevens mogen dat probleem bijzonder intrigerend maken. Denis Papin, die Boyle's tweede luchtpomp maakte en de hogedrukpan uitvond, was een hugenoot die door de achtervolgingen in het midden van de zeventiende eeuw uit Frankrijk verdreven werd. Abraham Bréguet, de instrumentmaker die in 1816 aan de Franse Académie werd opgedrongen, was een immigrant uit Neuchâtel, waarnaar zijn familie was gevlucht na de herroeping van het Edict van Nantes.

*De genese van de moderne fysica*

Mijn laatste onderwerp moet als een epiloog gepresenteerd worden, een voorlopige schets van een positie die door nader onderzoek ontwikkeld en gewijzigd moet worden. Ik heb de in het algemeen gescheiden verloopende ontwikkeling van de klassieke en de baconiaanse wetenschappen tot diep in de achttiende eeuw nagegaan, maar nu moet ik tenminste de vraag stellen wat er daarna gebeurde. Iedereen die met de huidige stand van zaken in de wetenschappen vertrouwd is, zal inzien dat de natuurwetenschappen niet langer in het bovengeschetste patroon passen, iets wat het opmerken van dit patroon zelf bemoeilijkt heeft. Wanneer en op welke wijze vond de verandering plaats? Wat was de aard ervan?

Het antwoord luidt gedeeltelijk dat de natuurwetenschappen gedurende de negentiende eeuw deelnamen aan de snelle groei en verandering die alle disciplines ondergingen. Oudere gebieden zoals geneeskunde en rechtsgeleerdheid kregen nieuwe institutionele vormen, meer rigide en met exclusievere intellectuele codes dan ze voorheen gekend hadden. In de natuurwetenschappen nam vanaf het einde van de achttiende eeuw het aantal tijdschriften en verenigingen snel toe en vele ervan waren, in tegenstelling tot de traditionele nationale academies en hun publikaties, beperkt tot afzonderlijke wetenschappelijke gebieden. Eeuwenoude disciplines zoals wiskunde en astronomie werden voor het eerst professies met eigen institutionele vormen.<sup>25</sup> Gelijkssoortige verschijnselen deden zich voor in de nieuwere baconiaanse velden van onderzoek, alleen iets langzamer, en één van de gevolgen daarvan was het zwakker worden van de banden die hen tevoren samengebonden hadden. Met name de scheikunde was zeker tegen het midden van de eeuw een zelfstandige intellectuele progesie geworden, en hoewel nog altijd verbonden met de industrie en met andere experimentele gebieden, had ze nu een eigen identiteit los van deze beide anderen. Scheikundige begrippen gingen snel afwijken van de begrippen die elders in de natuurwetenschappen gebruikt werden, gedeeltelijk om redenen van institutionele aard en gedeeltelijk vanwege de gevolgen voor scheikundig onderzoek van, in de eerste plaats, Daltons atoomtheorie en, daarna, van de toegenomen aandacht voor organische verbindingen. Terwijl dit gebeurde, werden onderwerpen als warmte en elektriciteit steeds meer uit de scheikunde verbannen en overgelaten aan de experimentele filosofie of aan een nieuw gebied, de fysica, die meer en meer haar plaats innam.

Een tweede belangrijke bron van verandering gedurende de negentiende eeuw was een graduele verschuiving in de identiteit van de wiskunde. Tot aan misschien het midden van de eeuw stonden onderwerpen als de mechanica van de hemellichamen, de hydrodynamica, elasticiteit en de trillingen

van continue of discontinue media centraal in het professionele wiskundige onderzoek. Vijfenzeventig jaar later waren zij 'toegepaste wiskunde' geworden, een interessesfeer gescheiden van en gewoonlijk van lagere status dan de meer abstracte vragen van de 'zuivere wiskunde' die centraal was komen te staan in het vak. Leden van de faculteiten der wiskunde gaven soms nog wel cursussen over onderwerpen als de mechanica van de hemellichamen of zelfs de theorie van het elektromagnetisme, maar het waren cursussen voor niet-wiskundigen geworden en de thema's ervan stonden niet langer aan het front van het wiskundig denken.<sup>26</sup> De daaruit voortvloeiende scheiding tussen wiskundig onderzoek en natuurwetenschappelijk onderzoek behoeft dringend nadere bestudering, zowel om zichzelf wille als vanwege het effect ervan op de ontwikkeling van het laatste. Dit geldt eens te meer omdat het in de verschillende landen op verschillende manieren en in verschillend tempo plaats vond; deze factor in de ontwikkeling van de bijkomende nationale verschillen zal verderop besproken worden.

Een derde soort verandering die bijzonder relevant is voor de thema's die in dit artikel behandeld worden, was het opmerkelijk snel en volledig dóórdringen van de wiskunde in een aantal baconiaanse gebieden tijdens de eerste vijfentwintig jaren van de negentiende eeuw. Van de onderwerpen die nu het object van de fysica vormen, hadden alleen de mechanica en de hydrodynamica vóór 1800 reeds wiskundige vaardigheden van hoog niveau vereist. Elders waren de elementaire delen van de geometrie, trigonometrie en de algebra ruimschoots voldoende. Twintig jaar later was de hogere wiskunde door het werk van Laplace, Fourier en Sadi Carnot essentieel geworden voor de bestudering van warmte; Poisson en Ampère hadden hetzelfde gedaan voor elektriciteit en magnetisme; en Jean Fresnel, met zijn directe volgelingen, had een zelfde soort effect voor het gebied van de optica. Pas toen hun nieuwe wiskundige theorieën aanvaard waren als modellen, werd een discipline met een identiteit zoals die van de moderne fysica, één van de wetenschappen. De opkomst ervan verlangde dat de conceptuele en institutionele hindernissen die de klassieke en baconiaanse wetenschappen tevoren van elkaar gescheiden hadden gedeeltelijk uit de weg geruimd werden.

Waarom deze hindernissen toen gedeeltelijk uit de weg geruimd werden, wanneer en op welke manier, is een probleem dat veel aanvullend onderzoek vraagt. Maar het antwoord zal ongetwijfeld grotendeels te vinden zijn in de interne ontwikkeling van de relevante gebieden gedurende de achttiende eeuw. De kwalitatieve theorieën waarin na 1800 de wiskunde zo snel door-drong, waren pas ontstaan tijdens en na de jaren tachtig van de achttiende eeuw. Fouriers theorie maakte het begrip specifieke warmte noodzakelijk en eveneens het consequent en systematisch onderscheid tussen de begrippen warmte en temperatuur. De bijdragen van Laplace en Carnot aan de warm-

teleer vereisten bovendien aan het eind van de eeuw de erkenning van adiabatische verhitting. Het pionierswerk dat Poisson verrichtte in het mathematiseren van de statisch elektrische en magnetische theorie was mogelijk gemaakt door het voorafgaande werk van Coulomb, en het meeste daarvan was pas in de jaren negentig van de achttiende eeuw verschenen.<sup>27</sup> Het op wiskundige wijze behandelen van de wisselwerking tussen elektrische stromen door Ampère leverde bijna tegelijkertijd zijn ontdekking op van de effecten waarop zijn theorie betrekking had. Recente ontwikkelingen in de wiskundige techniek speelden ook een rol, met name voor het mathematiseren van de elektrische theorie en de warmteleer. De artikelen die tussen 1800 en 1825 voordien experimentele gebieden volledig wiskundig maakten, hadden twee decennia voordat de uitbarsting van de mathematisering begon, niet geschreven kunnen worden, misschien met uitzondering van de optica.

De interne ontwikkeling, voornamelijk van baconiaanse gebieden, kan echter niet verklaren op welke manier de wiskunde na 1800 geïntroduceerd werd. Zoals de namen van de auteurs van de nieuwe theorieën al aangeven, waren de eerste mensen die andere gebieden wiskundig maakten zonder uitzondering Fransen. Behalve in een paar aanvankelijk weinig bekende artikelen van George Green en Gauss gebeurde er verder nergens iets van dien aard vóór de jaren veertig van de negentiende eeuw, toen de Britten en Duitsers ter elfder ure begonnen het voorbeeld na te volgen dat door de Fransen een generatie eerder was gegeven. Institutionele en individuele factoren zullen waarschijnlijk verantwoordelijk blijken te zijn voor dat vroegtijdige Franse leiderschap. Na een langzaam begin in de jaren zestig van de achttiende eeuw, met de benoeming van Nollet en daarna van Monge om *physique expérimentale* te doceren aan de *Ecole du génie* te Mézières, drongen baconiaanse onderwerpen steeds meer door in het onderwijs van Franse militaire ingenieurs.<sup>28</sup> Deze beweging culmineerde in de oprichting tijdens de laatste tien jaar van de achttiende eeuw van de *Ecole polytechnique*, een nieuw soort onderwijsinstelling waar studenten niet alleen les kregen in de voor de *arts mécaniques* relevante klassieke vakken, maar ook in scheikunde, warmteleer en andere aanverwante vakken. Het kan geen toeval zijn dat al degenen die wiskundige theorieën maakten over voordien experimentele gebieden ofwel docenten ofwel studenten waren aan de *Ecole polytechnique*. Het magistrale leiderschap van Laplace in het uitbreiden van de newtoniaanse mathematische fysica naar niet-wiskundige onderwerpen, was eveneens van groot belang voor de richting die hun werk nam.<sup>29</sup>

Om redenen die tegenwoordig nog duister en controversieel zijn, liep de praktijk van de nieuwe mathematische fysica na ongeveer 1830 in Frankrijk snel terug. Ten dele hing dit samen met een algemene achteruitgang van de vitaliteit van de Franse wetenschap, maar een veel belangrijker rol speelde

waarschijnlijk het feit dat de wiskunde opnieuw, net als vroeger het primaat kreeg toegewezen en zij zich vanaf het midden van de eeuw steeds verder verwijderde van de concrete problemen van de natuurkunde. Toen de fysica na 1850 geheel wiskundig werd en daarbij niettemin aangewezen bleef op nauwkeurige experimenten, daalden de Franse bijdragen een eeuw lang tot een niveau dat niet te vergelijken was met dat van zulke voorheen vergelijkbare gebieden als scheikunde en wiskunde.<sup>30</sup> De fysica had, in tegenstelling tot andere wetenschappen, een stevige brug over de kloof tussen de klassieke en de baconiaanse wetenschappen nodig.

Wat in Frankrijk gedurende de eerste vijftientig jaar van de negentiende eeuw was begonnen, moest daarom later elders opnieuw opgebouwd worden, aanvankelijk in Duitsland en Engeland vanaf het midden van de jaren veertig van de negentiende eeuw. Zoals wel verwacht kon worden, werd de cultivatie van een gebied dat aangewezen was op een soepel verlopende communicatie tussen experimenteel geschoolde beoefenaren enerzijds en wiskundigen anderzijds, in beide landen eerst verhinderd door bestaande institutionele vormen. Een deel van het zeer bijzondere succes van Duitsland — zoals blijkt uit de doorslaggevende rol van Duitsers in de twintigste eeuwse conceptuele transformatie van de fysica — moet te danken zijn geweest aan de snelle groei en de daaruit voortvloeiende kneedbaarheid van de Duitse onderwijsinstellingen tijdens de jaren toen mensen als Neumann, Weber, Helmholtz en Kirchhoff een nieuwe discipline schiepen, waarin zowel experimentele wetenschapsmensen als wiskundige theoretici samen zouden werken als beoefenaren van de fysica.<sup>31</sup>

Tijdens de eerste decennia van deze eeuw verspreidde dit Duitse model zich steeds meer over de rest van de wereld. Terwijl dit gebeurde, werd de langdurige scheiding tussen de wiskunde en de experimentele natuurwetenschappen steeds minder zichtbaar en de indruk kon zelfs gewekt worden dat ze verdwenen was. Maar vanuit een ander gezichtspunt is het misschien nauwkeuriger om te stellen dat ze verplaatst werd — van een positie tussen gescheiden gebieden naar binnen de fysica zelf, waar het een bron van zowel individuele als professionele spanningen blijft. Ik geloof dat, alleen omdat de fysische theorie tegenwoordig geheel wiskundig is, de theoretische en de experimentele fysica zulke verschillende ondernemingen lijken te zijn dat bijna niemand kan hopen in beide gebieden uit te blinken. Een dergelijke dichotomie tussen experiment en theorie is niet kenmerkend voor gebieden als scheikunde of biologie waarin de theorie naar haar aard minder wiskundig is. De kloof tussen de wiskundige en de experimentele wetenschap blijft daarom misschien bestaan, geworteld als ze is in de aard van de menselijke geest.<sup>32</sup>

## Noten

Dit artikel is een herziene en uitgebreide versie van een George Sarton Memorial Lecture, gehouden in Washington, D.C., in 1972 tijdens een gezamenlijke bijeenkomst van de American Association for the Advancement of Science en de History of Science Society. Een eerdere versie is voorgedragen aan de Cornell University gedurende de daaraan voorafgaande maand. In de drie jaren die sindsdien verstreken zijn, heb ik kunnen profiteren van de commentaren van een groot aantal collega's, te veel om allemaal op te noemen. Een aantal van hen waaraan ik speciale dank verschuldigd ben, zullen in de noten die volgen vermeld worden. Hier spreek ik alleen mijn dank uit voor de aanmoedigingen en de verhelderende opmerkingen die gedurende de periode van herziening door twee historici gegeven werden, wier belangstelling de mijne overlapt: Theodore Rabb en Quentin Skinner. De versie die daar het resultaat van was, werd in een Franse vertaling gepubliceerd in *Annales*, XXX (1975), p. 975-998. In de Engelse versie, gepubliceerd in de *Journal of Interdisciplinary History*, VII : I, zomer 1976, p. 1-31, is een aantal, voor het merendeel kleine, additionele veranderingen aangebracht. De Nederlandse vertaling is van de hand van Ilonka de Lange.

- 1 Voor een iets uitgebreider bespreking van deze twee benaderingen, zie Kuhn, 'History of Science' in de *International Encyclopedia of the Social Sciences*, XIV (New York 1968), p. 74-83. Merk op hoe het onderscheid dat tussen deze twee gemaakt wordt ook het tegenwoordig veel bekendere onderscheid tussen internalistische en externalistische benaderingen van de geschiedenis van de wetenschap zowel verdiept als verduistert. Praktisch alle auteurs die nu als internalisten beschouwd worden, richten zich op de evolutie van één enkele wetenschap of van een aantal nauw met elkaar samenhangende wetenschappelijke ideeën; de externalisten behoren bijna allemaal zonder uitzondering tot de groep die de wetenschappen als een eenheid beschouwt. Maar de etiketten 'internalist' en 'externalist' zijn dan niet langer helemaal juist. Degenen die zich voornamelijk op individuele wetenschappen geconcentreerd hebben, bij voorbeeld Alexandre Koyré, aarzelden niet aan buitenwetenschappelijke ideeën een belangrijke rol toe te schrijven in de ontwikkeling van de wetenschap. Zij verzetten zich hoofdzakelijk tegen aandacht voor socio-economische en institutionele factoren op de wijze waarop schrijvers als B. Hessen, G. N. Clark en R. K. Merton dat gedaan hebben. Maar aan deze niet-intellectuele factoren werd door degenen die de wetenschappen als een eenheid beschouwen niet altijd veel waarde gehecht. Het 'internalisten-externalisten debat' gaat dus vaak over andere problemen dan de naam suggereert en de daaruit voortspruitende verwarring is soms schadelijk.
- 2 Ten aanzien van dit punt zie, in aanvulling op het materiaal verderop, Kuhn, 'Scientific Growth: Reflections on Ben-David's "Scientific Role"', *Minerva*, X (1972), p. 166-178.
- 3 Deze problemen rond synthese gaan terug tot het allereerste begin van mijn loopbaan, toen ze in twee gedaanten optraden die aanvankelijk niets met elkaar te maken leken te hebben. Het eerste, geschetst in noot 2, betrof het probleem hoe men socio-economische interesses relevant kan maken voor uiteenzettingen over de ontwikkeling van wetenschappelijke ideeën. Het tweede, actueel geworden door het verschijnen van Herbert Butterfields bewonderenswaardige en invloedrijke *Origins of Modern Science* (Londen 1949), betrof de rol van de expe-

rimentele methode in de Wetenschappelijke Revolutie van de zeventiende eeuw. Butterfields eerste vier hoofdstukken verklaarden op aannemelijke manier de voornaamste conceptuele transformaties van de vroeg moderne wetenschap als 'niet in eerste instantie voortgebracht door nieuwe waarnemingen of extra bewijsmateriaal, maar door een ommekeer die plaats vond in de geest van de wetenschapsmensen zelf . . . doordat ze een ander soort denkraam gebruiken'. De twee volgende hoofdstukken leveren meer traditionele verslagen van 'The Experimental Method in the Seventeenth Century' en van 'Bacon and Descartes'. Ofschoon deze onderwerpen zonder meer relevant leken te zijn voor de wetenschappelijke ontwikkeling, bevatten de hoofdstukken die daar over gingen maar weinig materiaal dat elders in het boek uitgewerkt werd. Later ontdekte ik dat één van de redenen waarom dit niet het geval was te maken had met het feit dat Butterfield de conceptuele transformaties in de achttiende-eeuwse wetenschap volgens hetzelfde model probeerde te verklaren (geen nieuwe waarnemingen, maar een nieuw denkraam) dat voor de zeventiende eeuw zo uitermate geslaagd was. Dit geldt met name voor een hoofdstuk over 'The postponed Scientific Revolution in Chemistry'.

- 4 Henry Guerlac was de eerste die mij de noodzaak deed inzien om de muziektheorie tot de groep van klassieke wetenschappen te rekenen. Het feit dat ik aanvankelijk een gebied dat niet meer als wetenschap beschouwd wordt, weggelaten zou hebben, geeft aan hoe gemakkelijk men de betekenis mist van het methodologische voorschrift dat ik in het begin van dit artikel gegeven heb. De harmonieleer was echter niet precies het gebied dat we nu muziektheorie zouden noemen. Het was in plaats daarvan een mathematische wetenschap die numerieke grootheden toekende aan de talrijke intervallen van verscheidene Griekse toonladders of schalen. Daar er hiervan zeven waren, elk in drie genera en in vijftien *tonoi* of sleutels, was deze discipline nogal ingewikkeld; de specificatie van een aantal intervallen vereiste vier of vijf digitale getallen. Omdat alleen de meest eenvoudige intervallen empirisch toegankelijk waren, zoals de verhoudingen van de lengten van trillende snaren, was de harmonieleer dus een zeer abstract onderwerp. De relatie tot de muzikale praktijk was hoogstens indirect, en blijft duister. Historisch gezien dateert de harmonieleer uit de vijfde eeuw voor Chr. en ze was ten tijde van Plato en Aristoteles hoog ontwikkeld. Euclides is één van de velen die er verhandelingen over schreef en zijn werk werd grotendeels verdrongen door dat van Ptolemaeus, een verschijnsel dat ook op andere gebieden bekend is. Voor deze beschrijvende opmerkingen, evenals voor die in noot 8, ben ik veel dank verschuldigd aan Noel Swerdlov met wie ik verscheidene verhelderende gesprekken gevoerd heb. Daarvóór achtte ik me niet in staat het advies van Guerlac op te volgen.
- 5 De afkorting 'klassieke wetenschappen' is mogelijk een bron van verwarring, want anatomie en fysiologie waren in de klassieke oudheid eveneens hoog ontwikkelde wetenschappen en ze vertonen een aantal, maar geenszins alle ontwikkelingskenmerken die hier aan de klassieke natuurwetenschappen toegeschreven worden. Deze bio-medische wetenschappen maakten echter deel uit van een tweede klassieke groep die door een aparte groep mensen beoefend werd en de meesten van hen waren nauw geassocieerd met de geneeskunde en medische instituties. Vanwege deze en andere verschillen kunnen de twee groepen niet te zamen behandeld worden en ik beperk me hier tot de natuurwetenschappen, gedeeltelijk uit competentie-overwegingen en gedeeltelijk om

- overmatige complexiteit te vermijden. Zie echter verderop noot 6 en 9.
- 6 Uitvoerige of nauwkeurige gegevens worden in het algemeen pas beschikbaar wanneer de verzameling ervan een of andere zichtbare sociale functie vervult. Het feit dat anatomie en fysiologie, die zulke data vereisen, in de oudheid hoog ontwikkeld waren, moet een gevolg zijn van hun evidente relevantie voor de geneeskunde. Dat zelfs die evidentie vaak heftig betwist werd (door de empirici!) helpt ons de relatieve schaarste, uitgezonderd bij Aristoteles en Theophrastus, verklaren van oude gegevens die toepasbaar waren op de meer algemene taxonomische, comparatieve en ontwikkelings-interessen die fundamenteel waren voor de levenswetenschappen vanaf de zestiende eeuw. Van de klassieke wetenschappen waren alleen voor de astronomie data nodig die duidelijk een sociale functie hadden (kalenders en vanaf de tweede eeuw voor Chr. de astrologie). Wanneer de andere wetenschappen afhankelijk geweest waren van nauwkeurige data zouden ze waarschijnlijk niet verder vooruit gekomen zijn dan de studie van onderwerpen als warmte.
- 7 Voor deze paragraaf heb ik zeer veel profijt gehad van discussies met John Murdoch die de historiografische problemen benadrukt die men tegenkomt wanneer men de klassieke wetenschappen beschouwt als onafgebroken voortgaande onderzoekstradities in de Latijnse Middeleeuwen. Zie over dit onderwerp zijn 'Philosophy and the Enterprise of Science in the Later Middle Ages', in Y. Elkana (ed.), *The Interaction between Science and Philosophy* (New York 1974), p. 51-74.
- 8 Hoewel de harmonieleer niet veranderde, daalde de status ervan aanzienlijk in de periode van het einde van de vijftiende tot het begin van de achttiende eeuw. Ze werd meer en meer verbannen naar de eerste hoofdstukken van verhandelingen die hoofdzakelijk op meer praktische onderwerpen gericht waren: compositie, temperatuur en constructie van instrumenten. Toen deze onderwerpen steeds meer centraal kwamen te staan in zelfs vrij theoretische verhandelingen, werd de muziek steeds meer gescheiden van de klassieke wetenschappen. Maar de scheiding kwam laat en was nooit volledig. Kepler, Mersenne en Descartes, allen schreven ze over harmonieleer. Galileï, Huyghens en Newton toonden er belangstelling voor; Eulers *Tentamen novae theoriae musicae* staat in een traditie met een lang leven. Na de publikatie ervan in 1739 speelde de harmonieleer op zich niet langer een rol in het onderzoek van belangrijke wetenschapsmensen en had een aanvankelijk verwant gebied haar plaats al ingenomen: de theoretische en experimentele studie van trillende snaren, oscillerende luchtkolommen en de akoestiek in het algemeen. De carrière van Joseph Sauveur (1653-1716) illustreert duidelijk de overgang van harmonieleer als muziek naar harmonieleer als akoestiek.
- 9 Ze vonden natuurlijk wel plaats in klassieke levenswetenschappen als anatomie en fysiologie. Dit waren ook de enige disciplines van de bio-medische wetenschappen die tijdens de Wetenschappelijke Revolutie getransformeerd werden. Maar de levenswetenschappen hadden altijd al berust op nauwkeurige waarneming en af en toe ook op experimenten; zij hadden hun autoriteit ontleend aan antieke bronnen (bij voorbeeld Galen), die soms verschilden van die welke voor de natuurwetenschappen belangrijk waren; en hun ontwikkeling was nauw verbonden met die van de medische professie en corresponderende instituties. Het gevolg is dat de factoren die besproken worden wanneer men de conceptuele transformatie of de zojuist vergrote reikwijdte wil verklaren van

de levenswetenschappen in de zestiende en zeventiende eeuw, geenszins altijd dezelfde factoren zijn als die welke het meest relevant waren voor de corresponderende veranderingen in de natuurwetenschappen. Desondanks versterken terugkerende gesprekken met mijn collega Gerald Geison mijn reeds lang bestaande vermoeden dat ook zij met succes onderzocht kunnen worden vanuit net zo'n gezichtspunt als hier ontwikkeld wordt. Het onderscheid tussen experimentele en wiskundige tradities zou voor dat doel van weinig nut zijn, maar een indeling naar medische en niet-medische levenswetenschappen zou zeer belangrijk kunnen zijn.

- 10 A. C. Crombie, *Robert Grosseteste and the Origins of Experimental Science, 1100–1700* (Oxford 1953); J. H. Randall Jr., *The School of Padua and the Emergence of Modern Science* (Padova 1961).
- 11 Zie voor een nuttig en makkelijk toegankelijk voorbeeld van middeleeuwse experimenten Lezing II van Dante's *Paradijs*. Passages lokaliseerbaar via de index-ingang 'experiment, role of in Galileo's work' in Ernan McMullin (ed.), *Galileo, Man of Science* (New York 1965), tonen aan hoe ingewikkeld en controversieel Galileï's relatie tot de middeleeuwse traditie blijft.
- 12 Een uitvoerig voorbeeld wordt gegeven door Kuhn, 'Robert Boyle and Structural Chemistry in the Seventeenth Century', *Isis*, XLIII (1952), p. 12–36.
- 13 'Hydrostatical Paradoxes, Made out by New Experiments' in A. Millar (ed.), *The Works of the Honourable Robert Boyle* (Londen 1744), II, p. 414–447, waar de bespreking van Pascals boek op de eerste bladzijde te vinden is.
- 14 Voor het middeleeuwse voorspel tot Galileï's benadering van de slinger, zie Marshall Clagett, *The Science of Mechanics in the Middle Ages* (Madison 1959), p. 537 e.v. Voor de weg naar Torricelli's barometer, zie de te weinig bekende monografie van C. de Waard, *L'expérience barométrique, ses antécédents et ses explications* (Thouars (Deux-Sèvres) 1936).
- 15 Alexandre Koyré, *Etudes Galiléennes* (Parijs 1939); Butterfield, *Origins of Modern Science*.
- 16 Zie voor een vroeg stadium in de ontwikkeling van de scheikunde als een voorwerp van intellectuele belangstelling, Marie Boas, *Robert Boyle and Seventeenth-Century Chemistry* (Cambridge 1958). Zie voor een uiterst belangrijk later stadium Henry Guerlac, 'Some French Antecedents of the Chemical Revolution', *Chymia*, V (1959), p. 73–112.
- 17 I. B. Cohen, *Franklin and Newton* (Philadelphia 1956).
- 18 Boyle, *Works*, II, p. 42–43.
- 19 De grotere waarde die door vele vroeg moderne wetenschapsmensen aan de wiskunde, als werktuig of als ontologie, werd toegeschreven, werd ongeveer een halve eeuw geleden opgemerkt en werd vele jaren lang beschreven als een antwoord op het neo-platonisme van de renaissance. Verandering van het etiket in 'Hermeticisme' brengt de verklaring van dit aspect van het wetenschappelijk denken niet verder (ofschoon dankzij deze verandering ook andere belangrijke innovaties opgemerkt werden) en de verandering toont ons één van de wezenlijke beperkingen van de huidige wetenschap, en ik wist niet hoe ik die hier kon vermijden. Zoals het tegenwoordig gebruikt wordt, verwijst 'Hermeticisme' naar een verscheidenheid van vermoedelijk verwante bewegingen: neo-platonisme, cabalisme, de Rozenkruisers en wat je maar wilt. Het is dringend noodzakelijk deze te onderscheiden: naar de tijd, geografisch, intellectueel en ideologisch.

- 20 Frances A. Yates, 'The Hermetic Tradition in Renaissance Science', in C. S. Singleton (ed.), *Science and History in the Renaissance* (Baltimore 1968), p. 255–274; Paolo Rossi (vertaling Sacha Rabinovitch), *Francis Bacon: from Magic to Science* (Londen 1968).
- 21 P. Rossi (vertaling Salvator Attanasio), *Philosophy, Technology, and the Arts in the Early Modern Era* (New York 1970). Rossi en vroegere geleerden op dit gebied bespreken echter niet het mogelijk belang van een onderscheid tussen ambachten die door de kunstenaars-technici beoefend werden en ambachten die later door figuren als Vanoccio Biringuccio en Agricola aan de geleerde wereld voorgesteld werden. Voor een aantal aspecten van dit onderscheid, dat verderop ingeleid zal worden, ben ik veel dank verschuldigd aan gesprekken met mijn collega Michael S. Mahoney.
- 22 Hoewel geen van beide helemaal precies over dit onderwerp gaan, geven twee recente artikelen aan hoe eerst het Hermetisme en daarna het corpuscularisme konden figureren in de strijd voor intellectueel-sociale status in de zeventiende eeuw: P. M. Rattansi, 'The Helmontian-Galenist Controversy in Restoration England', *Ambix*, XII (1964), p. 1–23; T. M. Brown, 'The College of Physicians and the Acceptance of Iatromechanism in England, 1665–1695', *Bulletin of the History of Medicine*, XLIV (1970), p. 12–30.
- 23 Informatie relevant voor dit punt staat verspreid in Pierre Brunet, *Les physiciens Hollandais et la méthode expérimentale en France au XVIIIe siècle* (Parijs 1926).
- 24 R. K. Merton, *Science, Technology and Society in Seventeenth-Century England* (New York 1970). Deze nieuwe uitgave van een werk dat voor het eerst in 1938 gepubliceerd werd, omvat een 'Selected Bibliography: 1970' die nuttige aanwijzingen geeft over de polemiek die sinds de eerste verschijning is blijven voortbestaan.
- 25 Everett Mendelsohn, 'The Emergence of Science as a Profession in Nineteenth-Century Europe', in Karl Hill (ed.), *The Management of Scientists* (Boston 1964).
- 26 Relevante herinneringen aan de relatie tussen wiskunde en wiskundige fysica in Engeland, Frankrijk en de Verenigde Staten tijdens de jaren twintig van deze eeuw, zijn te vinden in de interviews met Leon Brillouin, E. C. Kemble en N. F. Mott die bewaard worden in de verschillende Archives for History of Quantum Physics. Voor informatie over deze archieven, zie T. S. Kuhn, J. L. Heilbron, P. F. Forman en Lini Allen, *Sources for History of Quantum Physics: an Inventory and Report* (Philadelphia 1967).
- 27 Verschillende aspecten van het probleem van het mathematiseren van de fysica worden beschouwd in Kuhn, 'The Function of Measurement in Modern Physical Science', *Isis*, LII (1961), p. 161–193, waar het onderscheid tussen klasieke en baconiaanse wetenschappen voor het eerst in druk verscheen. Andere aspecten worden besproken in Robert Fox, *The Caloric Theory of Gases from Lavoisier to Regnault* (Oxford 1971).
- 28 Relevante informatie is te vinden in René Taton, 'L'école royale du génie de Mézières' in R. Taton (ed.), *Enseignement et diffusion des sciences en France au XVIIIe siècle* (Parijs 1964), p. 559–615.
- 29 R. Fox, 'The Rise and Fall of Laplacian Physics', *Historical Studies in the Physical Sciences*, IV (1976), p. 89–136; R. H. Silliman, 'Fresnel and the Emergence of Physics as a Discipline', *ibid.*, p. 137–162.

- 30 Relevante informatie en een leidraad voor de nog altijd spaarzame literatuur over dit onderwerp is te vinden in R. Fox, 'Scientific Enterprise and the Patronage of Research in France 1800-70', *Minerva*, XI (1973), p. 442-473; H. W. Paul, 'La science française de la seconde partie du XIXe siècle vue par les auteurs anglais et américains', *Revue d'histoire des sciences*, XXVII (1974), p. 147-163. Beide gaan echter voornamelijk over de beweerde achteruitgang in de Franse wetenschap als geheel, en dit effect is zeker minder geprononceerd en misschien heel anders dan het verval van de Franse fysica. Gesprekken met Fox hebben mij in mijn overtuiging gesterkt en hebben me geholpen om mijn opmerkingen over deze punten te structureren.
- 31 Russel McCormmach, 'Editor's Foreword', *Historical Studies in the Physical Sciences*, III (1971), ix-xxiv.
- 32 Andere herhaaldelijk opgemerkte maar nog altijd weinig onderzochte verschijnselen wijzen ook in de richting van een psychologische basis voor deze kloof. Vele wiskundigen en *theoretische* fysici hebben hartstochtelijke belangstelling voor en zijn betrokken bij de muziek en voor een paar van hen was de keuze tussen een wetenschappelijke of een muzikale loopbaan bijzonder moeilijk. Een net zo vaak voorkomende betrokkenheid is niet te zien in de experimentele wetenschappen, inclusief de experimentele fysica (en ik denk evenmin in andere disciplines die geen duidelijke relatie met muziek hebben). Maar de muziek, of een deel ervan, behoorde eens tot de groep wiskundige wetenschappen, en nooit tot de experimentele wetenschappen. Verder onderzoek naar een subtiel onderscheid dat vaak door fysici opgemerkt wordt: tussen een 'wiskundig' en een 'theoretische' fysicus, zal waarschijnlijk ook onthullend zijn. Beiden maken veel gebruik van wiskunde, vaak bij dezelfde problemen. Maar de eerste neigt ertoe het fysische probleem als conceptueel vaststaand op te vatten en machtige wiskundige technieken te ontwikkelen die er op toegepast kunnen worden; de tweede denkt meer fysisch, en past de conceptie van zijn probleem aan de vaak meer beperkte wiskundige werktuigen aan die hem ter beschikking staan. Lewis Pyenson, aan wie ik veel verschuldigd ben voor zijn nuttige commentaren op mijn eerste versie, is bezig interessante ideeën over de evolutie van het onderscheid te ontwikkelen.