

VU Research Portal

Hoe een handvol wiskundigen de theoretische fysica ingrijpend veranderde
van Lunteren, FH

published in
Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde
2024

[Link to publication in VU Research Portal](#)

citation for published version (APA)
van Lunteren, FH. (2024). Hoe een handvol wiskundigen de theoretische fysica ingrijpend veranderde. *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde*, 90(9), 32 - 35.

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

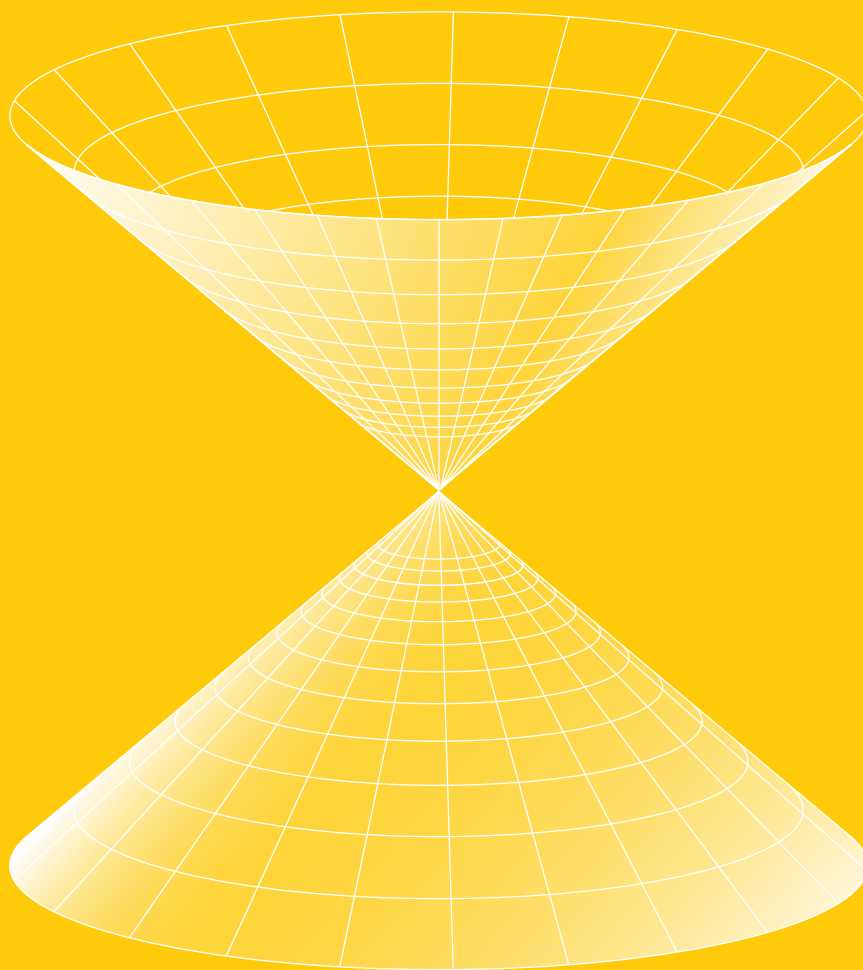
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

E-mail address:
vuresearchportal.ub@vu.nl

Hoe een handvol wiskundigen de theoretische fysica ingrijpend veranderde



Rond de eeuwwisseling van 1900 ontwikkelden enkele vooraanstaande Franse en vooral Duitse wiskundigen een opmerkelijke belangstelling voor de nieuwste ontwikkelingen binnen de prille theoretische fysica. Overtuigd van een diepe harmonie tussen de zuivere wiskunde en de theoretische problemen in de fysica, meenden zij bij te kunnen dragen aan de oplossing van die problemen. Een aantal van hun leerlingen en assistenten maakte de overstap naar de natuurkunde. Daardoor veranderde de theoretische natuurkunde ingrijpend, zowel wat betreft het wiskundig instrumentarium, als het doel van de theorievorming. Die effecten werken door tot op de dag van vandaag.

In 1912 feliciteerde Einstein zijn nieuwe vriend Paul Ehrenfest met diens benoeming in Leiden als opvolger van Lorentz. Die benoeming verheugde hem des te meer daar hij Ehrenfest zag als “één van de weinige theoretici die nog niet door de wiskunde-pest van hun natuurlijke verstand beroofd zijn”. Einstein stond allernuist alleen in zijn klacht over de veranderende rol van de wiskunde in de theoretische fysica. In de daaropvolgende jaren zouden steeds meer gelijksoortige klaagzangen opklinken onder tijdgenoten en collega's van Einstein en Ehrenfest, in het bijzonder bij Ehrenfest zelf. Om te begrijpen wat hier aan de hand was moeten we kijken naar de veranderende relatie tussen de wis- en natuurkunde, de opkomst van de theoretische natuurkunde als nieuwe specialisatie binnen de natuurkunde, en de opbloeiende belangstelling voor de natuurkunde onder vooral wiskundigen in Göttingen.

Natuurkunde en wiskunde vóór 1900

Begrippen als fysica en mathematica gaan terug op de klassieke oudheid, maar bezaten lange tijd een andere betekenis dan vandaag de dag. Wiskunde was de verzamelaar voor alle wetenschappen die zich bezighielden met maat en getal. De voornaamste daarvan waren meetkunde, rekenkunde (inclusief algebra), sterrenkunde, optica en muziekleer. In de zestiende eeuw kwam daar de bewegingsleer bij. Fysica was die tak van de wijsbegeerte die zich voornamelijk richtte op de verklaringen van de natuurverschijnselen, oftewel natuurfilosofie. Die verklaringen bezaten doorgaans een kwalitatieve vorm. Wiskundigen kunnen een zonsverduistering voorspellen, maar niet uitleggen waarom de hemelse sferen bewegen. Wiskunde en natuurfilosofie waren verschillende takken van sport, met elk hun eigen beoefenaren. De wetenschappelijke status van de filosofen overtrof die van de wiskundigen in hoge mate. Meetbare eigenschappen werden veelal gezien als bijkomstig. Ze dragen niet bij aan dieper inzicht in het wezen van de natuur en zijn vooral nuttig voor praktische doeleinden.

Mogelijk was dat mede een reden dat in de zeventiende eeuw steeds meer wiskundigen, zoals Kepler, Galilei, Huygens en Newton, claimden dat de essentie van de natuur juist gelegen was in wiskundige verhoudingen. Zij zagen zichzelf ondanks hun aanstelling als wiskundige als de ware natuurfilosofen. Aldus ontstond er enige overlap tussen beide type wetenschappen, maar volledig was die niet. De zeventiende eeuw gaf ook de aanstoot tot de opmars van het experiment binnen de natuurfilosofie. De resulterende proefondervindelijke wijsbegeerte ging gepaard met een inkrimping van het brede gebied van de natuurfilosofie, dat zich nu vooral richtte op warmte, druk, geluid, elektriciteit en magnetisme en andere verschijnselen die zich goed leenden voor experimenteel onderzoek. Wiskunde speelde daarbij lange tijd nauwelijks enige rol. Dat alles veranderde in het begin van de negentiende eeuw. Onder aanvoering van de Franse wiskundige Laplace, onderwierpen jonge wiskundigen als Fourier,

Poisson en Ampère de experimentele natuurkunde aan een wiskundig regime. In Duitsland deed de wiskundige Gauss iets soortgelijks. De meeste experimentatoren bleven ver uit de buurt van dit wiskundig geweld. Zij voelden een grotere verwantschap met de scheikunde, die zich al evenzeer bezighield met warmte, elektriciteit en licht. Velen van hen – Gay-Lussac, Oersted, Davy, Faraday, Joule, Regnault en Magnus – deelden zelfs een scheikundige achtergrond. Het is veelzeggend dat de op de experimentele natuurkunde georiënteerde *Annalen der Physik* in 1818 werd omgedoopt in *Annalen der Physik und Chemie*.

De grote overlap van de natuurkunde met aangrenzende vakgebieden bleek echter van tijdelijke aard. Halverwege de negentiende eeuw keerde het tij. Scheikundigen stortten zich massaal op het nieuwe terrein van de organische chemie, wiskundigen ontdekten het al even nieuwe gebied van de zuivere, niet aan de werkelijkheid ontleende wiskunde. Die vormde al spoedig de kern van het vakgebied. Waar de natuurkunde vijftig jaar eerder nog vermalen dreigde te worden tussen de wiskunde en de scheikunde (de *Grundwissenschaften der Physik*, volgens een invloedrijk leerboek natuurkunde uit die tijd), kregen de fysici nu steeds meer het rijk alleen. Dit alles speelde juist in een tijd dat de betreffende onderzoeksvelden het karakter van moderne disciplines kregen, met eigen specialisten, leerstoelen, opleidingen, verenigingen, tijdschriften en congressen.

Nu als scheikundigen kregen hoogleraren in de experimentele natuurkunde in de tweede helft van de negentiende eeuw de beschikking over eigen gebouwen, voorzien van practicumzalen en onderzoeksruimtes en een handjevol personeel, waaronder veelal een instrumentmaker, een amanuensis en assistenten. In Duitsland werd het minder lucratieve, want kleinschaligere onderwijs in de theoretische of mathematische fysica veelal overgedragen aan een jonge ‘buitengewoon hoogleraar’ (anders dan nu een soort universitair docent). Die maakten doorgaans dankbaar gebruik van de aanwezige laboratoriumfaciliteiten om zelf zo snel mogelijk een gewoon hoogleraarschap (Ordinariaat) in de experimentele fysica in de wacht te slepen. Slechts een enkeling, zoals Max Planck in Berlijn (en Lorentz in Leiden) bezette een louter aan de theorie gewijde leerstoel.

Maar die situatie veranderde snel in het begin van de twintigste eeuw toen steeds meer universiteiten leerstoelen voor theoretische (of mathematische) fysica in het leven riepen. In sommige gevallen kreeg de betreffende hoogleraar zelfs de beschikking over een eigen instituut, dat geheel los stond van het instituut voor experimentele natuurkunde. De nieuwe ontwikkelingen op het gebied van vooral de quantumfysica verhoogden zowel de vraag naar, als het prestige van de theoretici. Binnen enkele decennia evenaarde het aantal artikelen in de theoretische natuurkunde dat in de experimentele fysica. Theoretische natuurkunde was een zelfstandig specialisme geworden, dat zich niet langer op het grensvlak van de wis- en natuurkunde bevond, maar in het hart van de fysica.

Poincaré en Klein

Inmiddels toonde een groeiend aantal toonaangevende Europese wiskundigen een hernieuwde belangstelling voor de ontwikkelingen binnen de natuurkunde. Een van hen was de Fransman Henri Poincaré. De Parijse wiskundige, ingenieur, astronoom, fysicus en filosoof manifesteerde zich al op jonge leeftijd als een van Europa's grootste wiskundigen. In de jaren 1880 verkreeg hij naast andere aanstellingen de Parijse leerstoel voor mathematische fysica en waarschijnlijkheidstheorie. Poincaré's groeiende belangstelling voor de problematische relatie tussen de mechanica, optica en de elektrodynamica bracht hem in het vaarwater van Lorentz. Fysici kennen Poincaré dan ook vooral vanwege zijn pionierswerk op het gebied van de speciale relativiteitstheorie, maar hij was ook degene die op het eerste Solvay-congres in 1911 de fysische gemeenschap doordrong van de ernst van de quantumproblematiek. Zoals hij daar liet zien was de gesuggereerde sprongwijze verandering van energie in atomaire systemen niet een tijdelijk lapmiddel, maar een wezenlijke en onomkeerbare aantasting van de fundamente van de traditionele fysica. Aan de verdere uitwerking van de nieuwe fysica heeft hij niet kunnen bijdragen, want hij overleed een jaar later.

Veel verder reikte de invloed van een handvol wiskundigen uit Göttingen. Dat begon met de aanstelling van Felix Klein in 1886. Hij had net als Poincaré zijn sporen verdiend op het gebied van de zuivere wiskunde. In Göttingen richtte hij zich steeds meer op het grensvlak van de wis- en natuurkunde. Bovenal zorgde hij voor een bruisend onderzoeksklimaat, mede door de introductie van een wekelijks colloquium, een bibliotheek en een leeskamer. Als redacteur slaagde hij erin de *Mathematische Annalen* een leidende positie te geven binnen de internationale wiskundewereld. In 1895 wist hij bovendien David Hilbert naar Göttingen te halen. Hilbert weerstond een aantal jaar later de lokroep van Berlijn op voorwaarde van een derde wiskundeleerstoel in Göttingen, bestemd voor zijn oude vriend Hermann Minkowski. Daarmee slaagde Kleins opzet om van Göttingen een toonaangevend wiskundecentrum te maken.

Kleins pogingen om bruggen te slaan tussen de hogere wiskunde enerzijds en de natuurkunde en techniek anderzijds resulteerden in een ambitieus project waartoe hij in 1894 het initiatief nam. Het betrof een meerdelig overzichtswerk met bijdragen van wereldwijd leidende specialisten op de genoemde gebieden: zijn *Encyklopädie der mathematischen Wissenschaften*. Onder de Nederlandse natuurkundige bijdragen vinden we een artikel van Hendrik Lorentz over de elektrodynamica en een van Heike Kamerlingh Onnes over de toestandsvergelijking. Sommige bijdragen, zoals die van Paul en Tatiana Ehrenfest over de statistische mechanica en vooral die van Wolfgang Pauli over de speciale en algemene relativiteitstheorie, hebben een canonieke status verworven. De redactie van de natuurkundige delen van de *Encyklopädie* delegeerde Klein aan zijn voormalige medewerker Arnold Sommerfeld.



Links: Felix Klein. Rechts: Henri Poincaré. Foto's: Wikimedia.

De relativiteitstheorieën

Een ander initiatief van Klein betrof de organisatie van een reeks seminars op het gebied van de mathematische fysica, waarbij hij ook zijn collega-wiskundigen betrok. Minkowski deelde Kleins voorliefde voor dit grensgebied en Hilbert raakte er eveneens voor gewonnen. Het seminarium van 1905 betrof de nieuwe elektronentheorie en behandelde vooral de recente bijdragen van Poincaré en Lorentz, culminerend in Lorentz' recente bijdrage voor de *Encyklopädie*. Onder de deelnemers waren briljante jongeren als Max Born, die het jaar daarop bij Hilbert zou promoveren, en Max von Laue. Twee jaar later zouden Born en Minkowski nauw samenwerken op het gebied van de speciale relativiteitstheorie. Het was dat jaar, 1908, kort voor zijn voortijdige dood, dat Minkowski zijn beroemde herformulering van Einsteins speciale relativiteit presenteerde, gebaseerd op een vierdimensionaal ruimtetijdcontinuüm. Volgens Born waren de kiemen van dat werk gelegen in het seminarium van 1905.

Aanvankelijk had Einstein weinig op met Minkowski's ideeën over de betekenis van de niet-euclidische meetkunde voor de natuurkunde. Maar zijn werk aan de algemene relativiteitstheorie dwong hem die mening te herzien. In 1912 riep hij de hulp in van een bevriende wiskundige, Marcel Grossmann. Einsteins pogingen om de zwaartekracht te relateren aan de geometrie van de ruimte wekten de aandacht van Hilbert, die in de zomer van 1915 Einstein uitnodigde voor een reeks lezingen over dit onderwerp. Hilbert zelf werkte op dat moment aan een geünificeerde veldentheorie, gebaseerd op Einsteins ideeën enerzijds en die van Gustav Mie over de elektrodynamica anderzijds. In november van dat jaar vonden zij min of meer gelijktijdig de kort daarop door Einstein gepubliceerde vergelijkingen van de algemene relativiteitstheorie.

Waar Einsteins werk berustte op tal van fysische bewegingen, had Hilberts route naar de vergelijkingen een

meer formeel karakter. Einstein was dan ook niet onder de indruk van Hilberts werk. Het probleem was in zijn ogen niet zozeer het vinden van covariante vergelijkingen, maar veeleer hun presentatie als een eenvoudige en natuurlijke generalisatie van Newtons zwaartekrachttheorie. Meer algemeen vond hij Hilberts unificatiepogingen overambitieuze en naïef. Een soortgelijke mening had hij over de latere pogingen van Hilberts leerling Hermann Weyl om langs geometrische weg de elektrodynamica te incorporeren in zijn algemene relativiteitstheorie. Waar het deze grote wiskundigen volgens hem aan ontbrak was werkelijk fysisch inzicht. Toch zou Weyls hier geopperde idee van een ijktheorie de theoretische natuurkunde later goede diensten bewijzen.

De quantumtheorieën

De eerdergenoemde Sommerfeld was gepromoveerd in Königsberg bij de wiskundige Ferdinand von Lindemann. Daar had hij ook Hilbert leren kennen. Voor zijn *Habilitation*, een soort tweede promotie, ging hij naar Göttingen, waar Klein hem in 1894 aanstelde als zijn assistent. Onder invloed van Klein verplaatste Sommerfeld zijn aandacht naar de toegepaste wiskunde. Zijn *Habilitationschrift* behandelde de wiskundige theorie van buigingsverschijnselen. Samen werkten zij jarenlang aan een meerdelig werk over de tolbeweging. In 1900 werd Sommerfeld met steun van Klein buitengewoon hoogleraar aan de technische hogeschool in Aken, waar hij zich bezighield met wiskundige toepassingen op het gebied van de werktuigbouwkunde en in het bijzonder de hydrodynamica. Na Lorentz' weigering om Leiden te verlaten voor München, wist Sommerfeld in 1906 het directoraat van het nieuwe instituut voor theoretische fysica aldaar in de wacht te slepen. Tien jaar later zou het uitgroeien tot een van de voornaamste centra van de nieuwe quantumtheorie, naast Göttingen en Kopenhagen. Evenals Kleins voormalige assistent Sommerfeld, zou ook Hilberts vroegere assistent Born een krachtig stempel drukken op de ontwikkeling van de quantumfysica, vooral na zijn benoeming in 1921 als hoogleraar theoretische fysica in Göttingen. Een belangrijke rol was daarbij weggelegd voor Sommerfelds leerlingen Wolfgang Pauli en Werner Heisenberg. De eerste promoveerde in 1921 bij Sommerfeld op de quantumtheorie van het geïoniseerde waterstofmolecuul, de tweede voltooide in 1923 een proefschrift op het gebied van Sommerfelds oude liefde, de hydrodynamica. Beiden zouden hun carrière vervolgen bij Born in Göttingen en bij Bohr in Kopenhagen. Het was Born die samen met Pascual Jordan, een assistent van de eveneens in 1921 in Göttingen aangestelde wiskundige Richard Courant, Heisenbergs baanbrekende ideeën omwerkte tot de beroemd geworden matrixmechanica.

Ook Courant, voormalig assistent en promovendus van Hilbert, begaf zich graag op het raakvlak van de wis- en natuurkunde. Tijdens de oorlog had hij samen met fysici als Peter Debye gewerkt aan een vorm van draadloze telegra-

fie. In 1924 publiceerde hij samen met Hilbert het vuistdikke standaardwerk *Methoden der mathematischen Physik*. Van de andere leerlingen van Hilbert die hun sporen zouden nalaten in de theoretische natuurkunde volstaat het de twee bekendste te vermelden: enerzijds Emmy Noether, die in 1918 als onbetaald medewerker in Göttingen haar fameuze Noether-theorema afleidde, anderzijds de Hongaarse duivelskunstenaar John von Neumann, die begin jaren dertig samen met Hilbert de wiskundige grondslagen van quantummechanica uitwerkte.

Slot

Een van de gevolgen van deze wiskundige bemoeienissen met de theoretische natuurkunde was dat dit jonge vakgebied ingrijpend veranderde. Oudere theoretisch fysici als Planck, Lorentz, Einstein, Ehrenfest en Schrödinger zagen zich geconfronteerd met nieuwe, geavanceerde wiskundige methoden en technieken die hen volstrekt vreemd waren. De wiskundige formalismes waarvan zij zich oorspronkelijk bedienden waren tamelijk elementair en wiskunde werd door hen vooral gezien als een middel in hun streven naar fysisch inzicht. Hadden zij al de nodige moeite gehad met nieuwigheden als waarschijnlijkheidsrekening en vectorrekening, nu werd het basisarsenaal van de theoreticus uitgebreid met matrices, tensoren, groepentheorie, spinoren, Hilbertruimtes en operatoren. In hun onderlinge correspondentie vinden we veel geweeklaag over de wiskunde-epidemie waaraan hun vakgebied ten prooi leek te vallen.

Maar erger nog vonden ze de wiskundige virtuositeit, gespeend van enige fysische reflectie, waarmee jonge theoretici natuurkundige problemen te lijf gingen. Zij hadden zich de nieuwe technieken razendsnel eigen gemaakt en deze gepaard aan een pragmatische het-doel-heiligt-de-middelen-mentaliteit, typerend voor onder andere de Sommerfeldschool. Dat doel was niet langer een dieper inzicht in de fysische werkelijkheid, maar een werkzaam formalisme dat correcte voorspellingen ophoestte. Vragen over de fysische betekenis van de verschillende symbolen en hun samenhang waren steeds minder welkom; als de berekende voorspellingen goed spoorden met de meetuitkomsten was de klus geklaard. De geleidelijke verschuiving van het zwaartepunt van de fysica naar de Verenigde Staten versterkte deze pragmatische houding, later kernachtig samengevat in David Mermin's motto: "Shut up, and calculate!" Het tij lijkt heden ten dage langzamerhand weer wat gekeerd, maar generaties studenten moeten gefrustreerd zijn geraakt in hun behoefte aan iets meer betekenisgeving. Er is uiteindelijk meer dan enkel wiskunde.

BRONNEN

- 1 J. Mehra & H. Reichenberg, *The Historical Development of Quantum Theory* vol. 1, 62-313 (1982).
- 2 F. van Lunteren en M. Hollestelle, *Paul Ehrenfest and the dilemmas of modernity*, *Isis* 104(3), 504-36 (2013).
- 3 F. van Lunteren, *Het ontstaan van het systeem van bètadisciplines: de natuurkunde*, *Studium* 6(2), 91-112 (2013).