

Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoekerschool van een fysicus in diaspora

He was [...] the best teacher in our profession

Albert Einstein

Eind augustus 1932 ontving Philip Idenburg, secretaris van het curatorium van de Leidse universiteit, een verontrustende brief. De schrijver van het epistel was Albert Einstein, het onderwerp de geestesgesteldheid van de Leidse hoogleraar Paul Ehrenfest. Einstein sprak openlijk zijn zorg uit over Ehrenfest, die naar zijn zeggen gebukt ging onder zware depressies en zou spelen met de gedachte aan zelfmoord. Einstein drong krachtig aan op snelle maatregelen.

De oorzaak van Ehrenfests gemoedstoestand moest volgens Einstein gezocht worden in de stormachtige ontwikkelingen binnen de theoretische natuurkunde, Ehrenfests vakgebied. De nieuwe opvattingen karakteriseerde Einstein als 'heterogeen, verwarrend en logisch onbevredigend, maar door de feiten afgedwongen.' In deze chaotische situatie was het een theoretisch natuurkundige niet langer mogelijk het vakgebied in zijn geheel te beheersen en aldus als 'leider en wegwijzer' te dienen voor de jonge generatie onderzoekers. Voor een veeleisend en gewetensvol leraar als Ehrenfest was deze toestand eenvoudigweg ondraaglijk. Volgens Einstein bestond er maar één uitweg uit dit dilemma: de eventueel tijdelijke aanstelling van een tweede theoretisch natuurkundige. Wellicht zou na een jaar of tien de situatie in de natuurkunde weer genormaliseerd zijn. Hij wees er daarnaast op dat een verdeling van taken in de *experimentele* natuurkunde reeds gebruikelijk was.

Idenburg reageerde voortvarend. Maar ondanks de steun van het College van Curatoren slaagde hij er niet in het gewenste te bewerkstelligen. Het ministerie weigerde extra geld uit te trekken voor de Leidse natuurkunde. Ruim een jaar later werden Einsteins angstige vermoedens bewaarheid. Ehrenfest beëindigde zijn leven. Daarmee verloor de Leidse universiteit een van haar meest opmerkelijke vertegenwoordigers.¹

Het hier vermelde voorval raakt direct aan een aantal wezenlijke aspecten van Ehrenfests leven. Het confronteert ons bovenal met de tragiek van dit leven, maar ook met Ehrenfests voornaamste rol, namelijk die als leermeester, en tenslotte met het onlosmakelijke verband tussen Ehrenfests levensgeschiedenis en de geschiedenis van de kwantumtheorie. Wie was deze Ehrenfest? En wat was zijn betekenis voor de Leidse universiteit?

¹ P.J. Idenburg, *De Leidse universiteit 1928-1946: Vernieuwing en verzet* (Den Haag, 1978) 354-6.

Beantwoording van deze vragen, zal, zoals het bovenstaande suggereert, ons naar de ontwikkeling van de kwantumtheorie voeren en, bovenal, naar Ehrenfests onderwijs en zijn Leidse leerlingen. Zoals we zullen zien bewerkstelligde Ehrenfest een cultuuromslag in de Leidse fysica, een omslag die zich met name binnen het onderwijs deed gelden. Meer algemeen kan hij worden gezien als de heraut van de moderne natuurkunde in Nederland. Dit is het verhaal van zijn Leidse professoraat.²

Jeugd en opleiding

Paul Ehrenfest werd geboren in Wenen op 18 januari 1880, als jongste van vijf broers. Zijn joodse ouders hadden een goed lopende kruidenierszaak in een van de armere wijken van Wenen. In de jaren negentig bezocht hij het Weense Akademisches Gymnasium. Dit was een moeilijke tijd voor hem, onder andere door het verlies van zijn beide ouders. Zijn moeder overleed in 1890 en zijn vader zes jaar later. Ehrenfest ging lange tijd gebukt onder hevige depressies. Daarbij ontwikkelde hij een groeiende weerzin tegen de school en de daar gehanteerde onderwijsmethoden. Later zou hij erop staan zijn kinderen thuis te onderwijzen.

In 1899 vervolgde Ehrenfest zijn opleiding aan de Weense technische hogeschool. Al spoedig maakte hij tevens gebruik van het onderwijsaanbod van de Weense universiteit. Hoewel hij scheikunde had opgegeven als specialisatie richting raakte hij al spoedig gegrepen door de theoretische fysica. Vermoedelijk gebeurde dit vooral onder invloed van de colleges van Ludwig Boltzmann, Oostenrijks meest prestigieuze fysicus. Studenten in Duitstalige landen bezochten veelal verschillende universiteiten en ook Ehrenfest volgde dit patroon. Zo vertrok hij in november 1901 naar Göttingen waar hij anderhalf jaar zou verblijven.³

Voor Ehrenfest was Göttingen een openbaring. Het rijke onderwijsaanbod, de kameraderie met zijn, veelal buitenlandse, medestudenten en bovenal de verwoede discussies over wis- en natuurkunde op de wekelijkse studentenbijeenkomsten maakten Göttingen voor hem tot een ideaal studieoord. Onder die buitenlandse studenten trof hem vooral een jonge Russische wiskundige, Tatyana Alexeyevna Afanassjewa, afkomstig uit St. Petersburg. Ze was enkele jaren ouder dan Ehrenfest, bezat een sterke en onafhankelijke geest, en, evenals Ehrenfest, een fascinatie voor de grondslagen der exacte wetenschappen. Beide vonden elkaar tevens in een afkeer van genotmiddelen als alcohol en tabak. Binnen een paar maanden na haar komst naar Göttingen besloten de twee tot een huwelijk.

Na een kort bezoek in het voorjaar van 1903 aan Leiden, waar hij de colleges van Lorentz bezocht, keerde Ehrenfest terug naar Wenen om daar bij Boltzmann zijn studie af te ronden. In

² Deze biografische schets leunt – onvermijdelijk – zwaar op M.J. Klein, *Paul Ehrenfest*, Vol. 1: *The making of a theoretical physicist* (Amsterdam, 1970). Voor Ehrenfests publicaties, zie M.J. Klein (red.), *Paul Ehrenfest: Collected Scientific Papers* (Amsterdam, 1959).

³ *Ibid.*, 17-42.

juni 1904 behaalde hij zijn doctoraat en kort daarop huwde hij de daartoe naar Wenen overgekomen Afanassjewa. Daar de Oostenrijks-Hongaarse wetten een huwelijk tussen een jood en een christen verboden verklaarden beiden zich officieel onkerkelijk. In het voorjaar daarop bezochten ze Rusland bij wijze van huwelijksreis en tevens om zich te oriënteren op hun geplande toekomst aldaar. In oktober werd hun eerste dochter geboren.⁴

Na zijn promotie had Ehrenfest zijn studies aan de Weense universiteit voortgezet. Het bescheiden inkomen waarover het echtpaar door erflating beschikte, maakte het vinden van een betaalde positie geen dringende aangelegenheid. Ehrenfest verdiepte zich in de statistische mechanica en de daarmee verband houdende stralingstheorie van Planck. Hierbij fungeerde Afanassjewa als onmisbaar klankbord. Aan het eind van het voorjaar van 1906 verliet het echtpaar Wenen. Na de zomer te hebben doorgebracht in Zwitserland, reisden ze door naar Göttingen. Daar aangekomen werd Ehrenfest getroffen door het bericht van Boltzmanns zelfmoord. Het nieuws zorgde voor een schok in de internationale natuurkundige gemeenschap. Voor zijn leerling Ehrenfest moet de klap in verhevigde mate zijn aangekomen.

Hoewel Ehrenfests hoop op een aanstelling in Göttingen als privatdocent ijdel bleek, werd hij wel door de hoogleraar Felix Klein gevraagd om te participeren in het wiskundig colloquium. Als onderwerp voor zijn voordracht koos hij de discussie over Boltzmanns statistische onderbouwing van de tweede hoofdwet der thermodynamica. Het succes van zijn optreden bleek wel uit het daaropvolgende verzoek van Klein om, eventueel in samenwerking met zijn echtgenote, een bijdrage te leveren over de statistische mechanica voor Kleins *Enzyklopädie der mathematischen Wissenschaften*. Dit project zou uiteindelijk drie jaar in beslag nemen.

In de herfst van 1907 achtten beide echtelieden de tijd rijp om zich in St. Petersburg te vestigen. Niet dat de vooruitzichten op een betrekking daar nu zoveel beter waren; integendeel zelfs, maar gegeven het gebrek aan perspectief elders en Ehrenfests aversie tegen Wenen was Affanasjewa's thuishaven een voor de hand liggende keus. Ehrenfest zocht er direct contact met een groep jonge wis- en natuurkundigen. Met een van hen, de Oekraïense fysicus Abram Federovich Joffe, ontwikkelde hij een hechte en levenslange vriendschap.

Het intellectuele klimaat in de universiteit van St. Petersburg verschilde hemelsbreed van dat in Göttingen. De natuurkunde-examens vergden een excessieve hoeveelheid gedetailleerde kennis. Origineel onderzoek werd eerder ontmoedigd dan gestimuleerd. Door het organiseren van informele tweewekelijkse colloquia, alsmede een wekelijks studentenseminarium probeerde Ehrenfest het enthousiasme onder de jonge fysici levend te houden. Maar toen in 1911 de academische situatie in Rusland onder de nieuwe onderwijsminister nog verder verslechterde, nam Ehrenfest het besluit Rusland te verlaten. De uitzichtloze situatie belemmerde hem steeds meer in zijn werk.⁵

⁴ *Ibid.*, 41-51.

⁵ *Ibid.*, 75-93.

In januari 1912 vertrok Ehrenfest uit St. Petersburg voor een rondreis langs de voornaamste Duitstalige universiteiten. Hij had inmiddels een aantal verdienstelijke publicaties op zijn naam staan. In de kring der theoretische fysici was zijn naam voldoende bekend en werd zijn werk in het algemeen gerespecteerd. Desondanks slaagde hij er niet in een privaattochterschap in de wacht te slepen. In Leipzig, waar Boltzmann enige jaren gedoopt had en nu zijn Weense vriend en studiegenoot Herglotz werkte, eiste men een promotie aan een Duitse universiteit. In München, waar Kleins voormalige assistent Sommerfeld in enkele jaren tijd een grote reputatie had opgebouwd, had hij al evenmin succes. Sommerfeld wilde zijn eigen beloftevolle leerlingen niet passeren.

Beter leken de vooruitzichten in Praag. Hier maakte Ehrenfest kennis met Einstein, een ontmoeting die zou resulteren in een warme en levenslange vriendschap. Zij waren van dezelfde leeftijd, deelden een joodse achtergrond, bezaten dezelfde natuurkundige interesses, en hadden daarenboven een gemeenschappelijke afkeer van formaliteiten.

Einstein stond op het punt naar Zürich te vertrekken en het zag er naar uit dat Ehrenfest hem in Praag zou kunnen opvolgen. Maar Ehrenfests rechtlijnigheid doorkruiste deze optie. Zijn weigering om zijn onkerkelijke staat, al was het maar *pro forma*, te herroepen stond een aanstelling in Praag in de weg. Einstein zelf was verbijsterd over deze, in zijn ogen nodeloos rigide opstelling. Ehrenfests daaropvolgende pogingen om met Einsteins hulp in Zürich een positie te vinden liepen evenzeer spaak.⁶

Terug in St. Petersburg, zonder enig vooruitzicht, ontving hij een brief van Lorentz die zijn carrière een onverwachte wending zouden geven.

Lorentz' opvolging

In het eerste decennium van de vorige eeuw was Leiden uitgegroeid tot een van de belangrijkste natuurkundige centra in Europa. De vloeibaarmaking van helium en de daaropvolgende ontdekking van supergeleiding bezorgden het Leidse laboratorium en zijn directeur Kamerlingh Onnes wereldfaam. Zo mogelijk nog groter was de reputatie van zijn directe collega, de Nobel-laureaat Hendrik Antoon Lorentz. Diens uitzonderlijke kennis en beheersing van het gehele gebied der natuurkunde hadden hem een enorm gezag bezorgd binnen de internationale natuurkundige gemeenschap. In 1906 werd de Leidse fysica versterkt door de komst van een derde hoogleraar: de experimentele fysicus J.P. Kuenen. Zijn benoeming was een direct gevolg van de Leidse wens de door het buitenland begeerde Lorentz voor ons land te behouden.

Ondanks de door Kuenens komst bewerkstelligde taakverlichting verzocht Lorentz het Leidse curatorium in het najaar van 1911 toestemming om zijn leerstoel in te wisselen voor een extraordinariaat. De combinatie van onderwijstaken en toenemende organisatorische

⁶ *Ibid.*, 165-192.

verplichtingen, waaronder de organisatie van de internationale Solvay-congressen, liet hem nauwelijks meer tijd voor onderzoek. Reeds eerder had hij een benoeming aanvaard tot curator van het 'Fysisch Kabinet' van Teylers Stichting te Haarlem, een speciaal voor hem gecreëerde onderzoekspositie. Nu wenste hij zijn werkterrein naar Haarlem te verplaatsen, waar hij de beschikking had over een eigen laboratorium en een assistent.⁷

Na de in februari 1912 verkregen ministeriële toestemming bekommerde Lorentz zich persoonlijk om zijn opvolging. Zijn eerste keus, de rijzende ster Albert Einstein, had reeds een aanbod uit Zürich geaccepteerd. Daarop ging zijn voorkeur uit naar een minder bekende buitenlander, namelijk Paul Ehrenfest. In mei 1912 schreef hij Ehrenfest in hem de gewenste opvolger te zien.

De keuze voor Ehrenfest was bepaald verrassend. Een buitenlander op een Nederlandse fysicaleerstoel was zonder precedent en bovendien weinig voor de hand liggend in een periode dat de Nederlandse natuurkunde bloeide als nooit tevoren. Enkele jaren eerder vertolkte Van der Waals de gevoelens van menig landgenoot toen hij enthousiast terugkeek op het ontstaan van een door een eigen stijl en nauwe samenwerking gekenmerkte 'vaderlandsche natuurkunde'.⁸ Leiden bezat zelf een aantrekkelijke kandidaat voor de vacante positie in Willem Hendrikus Keesom, sinds 1909 conservator van het Leidse natuurkundig laboratorium. Nog eind 1911 had Kamerlingh Onnes zich sterk gemaakt voor een benoeming van Keesom als hoogleraar in de theoretische natuurkunde te Utrecht. Keesom zou uiteindelijk in Leiden als tweede op de voordracht worden geplaatst.⁹

Een andere geëigende kandidaat van eigen bodem was de jonge en briljante Peter Debije. Deze in Aken opgeleide fysicus was in 1911 aangesteld als buitengewoon hoogleraar in de theoretische fysica te Zürich en in januari 1912 bevorderd tot gewoon hoogleraar. Door Lorentz werd hij hoger aangeslagen dan Keesom, vooral vanwege zijn veelzijdigheid. Buitenlanders als Sommerfeld en Einstein zagen hem als de gedoodverfde opvolger van Lorentz. Debije was weliswaar op 3 februari in Utrecht benoemd, op een moment dat Lorentz nog geen volledige duidelijkheid had over Einsteins kandidatuur. Maar tussen het tijdstip van Einsteins afwijzing van het Leidse aanbod en Debije's formele aanvaarding van de Utrechtse leerstoel zat nog een kleine maand. Debije zou, indien voor de keus gesteld, ongetwijfeld de voorkeur hebben

⁷ A.J. Kox, 'Hendrik A. Lorentz (1853-1928): 'grootmeester van den wereld-aether'', in A.J. Kox & M. Chamalaun, *Van Stevin tot Lorentz: Portretten van Nederlandse natuurwetenschappers* (Amsterdam, 1980) 231. UB Leiden, Archief faculteit der wis- en natuurkunde: FA 1, notulen faculteitsvergadering 12-2-1912.

⁸ J.D. v.d. Waals, 'De arbeid van Kamerlingh Onnes voor de Vaderlandsche Natuurkunde', in: *Het Natuurkundig Laboratorium der Rijks-Universiteit te Leiden in de jaren 1882-1904* (Leiden, 1904) 73-75.

⁹ H.A.M. Snelders, 'De bemoeienissen van Lorentz en Einstein met de Utrechtse leerstoel voor theoretische fysica (1911-1914)', *TGGNWT* 10 (1987) 61-3. UB Leiden, Archief faculteit der wis- en natuurkunde: FA 1, notulen faculteitsvergadering 10-6-1912.

gegeven aan Leiden. Maar blijkbaar achtte Lorentz deze optie een gepasseerd station. Zijn naam kwam hoe dan ook niet voor op de voordracht.¹⁰

Daarop verscheen wel die van een voormalige leerling van Lorentz, namelijk Leonard Salomon Ornstein. Deze was sinds 1908 in Groningen aangesteld als lector in de wiskundige fysica. Zijn onderzoeksterrein was tot dan toe beperkt gebleven tot de statistische mechanica. Hij zou enkele jaren later de naar Göttingen vertrekkende Debije opvolgen en uiteindelijk, in Utrecht, de overstap maken naar de experimentele fysica.¹¹

Het passeren van Nederlandse kandidaten ten gunste van een gereputeerde buitenlander als Einstein was, gezien het prestige van de leerstoel, wellicht niet zo opmerkelijk. Bovendien was Einstein ook in Utrecht de eerste keus geweest. Maar Ehrenfest was geen Einstein en bovendien ambteloos. Niet iedereen was evenzeer onder de indruk van zijn werk. Kritiek op zijn werk had overigens veelal een antisemitische bijklank. Zo ontraadde Debije vlak na zijn eigen benoeming in Utrecht zijn voormalige leraar Sommerfeld om Ehrenfest aan te stellen als privaattoeant in München. Daarbij karakteriseerde hij Ehrenfest als 'een jood van het hogepriester-type' die door zijn 'bedwelmende Talmudlogica' frisse en onbevengene ideeën zou verstikken en aldus een 'uiterst schadelijke invloed' zou uitoefenen. De daarop volgende benoeming van Ehrenfest in Leiden schreef hij, overigens ten onrechte, toe aan de inspanningen van de eveneens joodse Einstein.¹²

Lorentz bezat echter grote waardering voor het werk van Ehrenfest. Diens voornaamste publicaties behandelden onderwerpen die Lorentz in het bijzonder interesseerden, zoals Einsteins relativiteitstheorie, de statistische mechanica en de recente kwantumproblematiek. Deze onderwerpen raakten direct aan de fundamentele natuurkunde, fundamentele die de laatste jaren aan het wankelen waren gebracht.

Deze belangstelling was karakteristiek voor Ehrenfest. Zoals later steeds meer zou blijken lag zijn kracht minder in het verkrijgen van nieuwe resultaten, dan in het grondig onderzoeken en verhelderen van hun betekenis. Anders dan voor sommige andere natuurkundigen was de theoretische natuurkunde voor Ehrenfest niet primair een fascinerend spel met symbolen. Het was evenmin een ambacht, waarbij de beoefenaar zijn identiteit ontleende aan de beheersing van een aantal resultaatgerichte wiskundige technieken.

Ehrenfests voornaamste gereedschap was dan ook niet zozeer de wiskunde als wel de logica. Hiermee gewapend exploreerde hij de veelvuldige paradoxen die hij in de fysica signaleerde en die de leidraad vormden bij zijn onderzoek. Voor een creatief en avontuurlijk fysicus als Debije

¹⁰ Snelders, 'De bemoeienissen', 63-4. M.J. Klein et al, eds., *The Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 5, *The Swiss Years: Correspondence, 1902-1914* (Princeton, 1993) 421. Klein, *Paul Ehrenfest*, 185.

¹¹ Voor Ornstein zie H.G. Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie: De experimentele natuurkunde in Utrecht onder W.H. Julius en L.S. Ornstein 1896-1940* (Rotterdam, 1994).

¹² *Collected Papers of Albert Einstein*, 5, 447; C. Jungnickel & R. McCormmach, *Intellectual mastery of nature: Theoretical Physics from Ohm to Einstein*, vol. 2, *The now mighty theoretical physics 1870-1925* (Chicago, 1986) 286-287.

gold het hier wellicht oninteressante haarkloverijen. Maar Lorentz bewonderde de diepgang en helderheid van Ehrenfests werk, eigenschappen die ook zijn eigen werk karakteriseerden.

Zowel Lorentz als Einstein wantrouwden op resultaten gerichte wiskundige virtuositeit die ten koste ging van fysisch inzicht. Zoals Einstein Ehrenfest in deze tijd schreef zag hij in hem 'een van de weinige theoretici, die door de wiskunde-epidemie nog niet van hun natuurlijke verstand beroofd waren'.¹³ Ook Sommerfeld kwam door persoonlijk contact met Ehrenfest tot het inzicht dat het de laatste uiteindelijk ging om de 'fysische feiten', ook al leek hij in zijn artikelen meer een 'logicus en dialecticus'. Bovenal kwalificeerde hij Ehrenfest in zijn correspondentie met Lorentz als een briljante spreker en voortreffelijk docent.¹⁴

Voor Ehrenfest was het onverwachte aanbod een geschenk uit de hemel. Lorentz' wens werd door alle betrokken partijen geëerbiedigd. Op 25 september 1912 werd Ehrenfest bij Koninklijk Besluit benoemd tot Leids hoogleraar in de theoretische natuurkunde. Kort daarop reisde het inmiddels met een tweede dochter uitgebreide gezin naar Leiden.

Leids hoogleraar

Ehrenfests leeropdracht was strikt genomen niet identiek aan die van Lorentz. De aanduiding '*mathematische fysica*' maakte plaats voor '*theoretische natuurkunde*'. Dit impliceerde geen inhoudelijke verandering, maar geheel zonder betekenis was deze wijziging nu ook weer niet. We hebben al gezien hoe een aantal theoretici, onder wie Lorentz, de fysische intuïtie boven de wiskundige abstractie plaatsten. Waar de negentiende-eeuwse '*mathematische fysica*' oorspronkelijk nog een grensgebied van de wis- en natuurkunde representeerde, zag de gerijpte '*theoretische fysica*' haar plaats in het hart van de natuurkunde.

Binnen die natuurkunde had het jonge vakgebied zich enigszins moeizaam een plek verworven als zelfstandig specialisme. Nog aan het eind van de negentiende eeuw werd het in Duitsland gebruikelijke *extraordinariaat* in de theoretische (of mathematische) fysica veelal beschouwd als een opstapje naar het meer prestigieuze *ordinariaat* in de experimentele natuurkunde. Die laatste positie ging in de regel gepaard met het directoraat van het natuurkundig instituut. De taak van de theoreticus was, naast het geven van onderwijs, veelal het theoretisch ondersteunen van het experimentele werk in het laboratorium.

Pas rond de eeuwwisseling ontstonden de eerste Duitse instituten voor theoretische natuurkunde, geleid door een ordinarius.¹⁵ Aldus kreeg de theoretische fysica steeds meer het karakter van een volwaardig carrièredoel. Dit proces werd versterkt door Einsteins opzienbarende relativiteitstheorieën en de daaropvolgende ontwikkelingen binnen de

¹³ *Collected Papers of Albert Einstein*, vol. 5, 484.

¹⁴ Klein, *Paul Ehrenfest*, 185.

¹⁵ Jungnickel & McCormach, *Intellectual mastery of nature* 2, 254, 274, 287.

kwantummechanica. Gezamenlijk hebben deze de theoretische fysica een ongekend prestige bezorgd.

In Nederland lag de situatie van meet af aan anders. Zowel in Leiden als in Utrecht werd de fysica aan het eind van de vorige eeuw vertegenwoordigd door twee, in principe gelijkwaardige hoogleraren: één voor de experimentele en één voor de mathematische fysica.¹⁶ Hoewel de experimentator als directeur van het laboratorium in wezen een belangrijker positie bezat, was de theoreticus volledig onafhankelijk. Lorentz' huizenhoge reputatie gaf de Leidse leerstoel voor theoretische natuurkunde daarbij een extra glans. Lorentz' opvolger was dan ook geen kleinigheid. Zelfs Einstein bekende een lichte huivering te voelen bij de gedachte Lorentz' leerstoel te moeten bekleden.¹⁷

Bij Ehrenfest, toch al geplaagd door twijfels, was de angst om tekort te schieten nog veel sterker. Een bezoek aan de energieke en zelfverzekerde Debye in Utrecht, enkele weken na zijn aankomst in Leiden, was voldoende om hem ervan te overtuigen dat Lorentz de verkeerde keuze had gemaakt. De enige manier waarop hij met deze gedachte kon leven was door haar openlijk uit te spreken, zowel tegenover Debye als tegenover Lorentz. Eind december schreef hij Lorentz de komende twee, drie jaar te beschouwen als een proefperiode, waarna hij zou beslissen over een eventuele continuering van het professoraat. Enkele maanden later verontschuldigde hij zich voor het feit dat hij het laatste half jaar geen enkel nieuw idee had ontwikkeld of uitgewerkt.¹⁸

Wat Ehrenfest bovenal miste in Leiden was een nabije vriend als Joffe in St. Petersburg en Herglotz in Wenen. Ehrenfest hunkerde naar iemand met wie hij zijn angsten en vreugden kon delen en op wie hij zijn natuurkundige invallen kon uitproberen. Aanvankelijk vervulde Afanassjewa die laatste rol zo goed en zo kwaad als dat ging. Maar zij was geen direct betrokkene in de snelle fysische ontwikkelingen die zich in deze tijd voltrokken. Natuurlijk was daar de door Ehrenfest verafgode Lorentz, die iedere maandag Leiden bezocht om zijn college te geven. Maar deze was meer een vaderfiguur voor Ehrenfest dan een vriend in de ware zin des woords. Daarbij was het contrast tussen de rusteloze, spontane en emotionele Ehrenfest en de wat afstandelijke en minzame Lorentz, altijd de rust en kalmte zelf, te groot voor een daadwerkelijke zielsverwantschap.

Überhaupt bleef de relatie met zijn wat vormelijke Leidse ambtgenoten, ondanks het wederzijdse respect, altijd wat gereserveerd. Ehrenfest's temperament maakte het hem onmogelijk om zich aan te passen aan de Leidse mores. Hij verafschuwde formaliteiten, tot beschaafde conversatie was hij niet in staat en een goed glas en een sigaar waren aan hem, de

¹⁶ F. van Lunteren, 'Van meten tot weten'. De opkomst van de experimentele fysica aan de Nederlandse universiteiten in de 19de eeuw', in F. van Lunteren en L. Palm, *De natuurwetenschappen in Nederland in de negentiende eeuw. Studies voor Harry Snelders* (themanummer van *Gewina*, Rotterdam, 1995) 102-138.

¹⁷ *Collected Papers of Albert Einstein*, 5, 411, 509.

¹⁸ Klein, *Paul Ehrenfest*, 14-15, 197.

geheelonthouder, niet besteed. Meer op zijn gemak voelde hij zich bij jonge Leidse natuurwetenschappers als de privaattoecent Volgraff, Lorentz' leerlingen Droste en Fokker en de chemicus Backer. Met hen organiseerde Ehrenfest informele bijeenkomsten waar over natuurwetenschap werd gediscussieerd.¹⁹ De enige Nederlander met wie hij daadwerkelijk bevriend raakte was de Amsterdamse natuurkundige en pedagoog Philip Kohnstamm. Ehrenfest en zijn gezin zouden menig weekeinde doorbrengen in Kohnstamms woning te Ermelo.²⁰

Maar de lang gezochte thuishaven zou ook Leiden niet worden. Ehrenfest vond twee manieren om met dit probleem om te gaan. De eerste was het intensiveren van de contacten met bevriende fysici in het buitenland, hetzij door ze op te zoeken zo vaak hij maar de kans kreeg, hetzij door ze voortdurend te pressen om naar Leiden te komen. Al in december 1912 logeerde Herglotz een tiental dagen in Leiden, het daaropvolgende voorjaar was Joffe te gast bij de Ehrenfests en die zomer een hele stoet kennissen, waaronder Russische vrienden als Epstein en Krutkow. De laatste zou enige tijd in Leiden blijven om met Ehrenfest samen te werken. Zelf bezocht Ehrenfest tijdens de zomers van 1913 en 1914 Einstein in respectievelijk Zürich en Berlijn.²¹

De tweede manier was wellicht nog effectiever. Wat hij niet vond in zijn Leidse collega's, zocht hij in een handvol uitverkoren studenten.

Ehrenfest als docent

Van begin af aan stak Ehrenfest al zijn aandacht en energie in het onderwijs aan zijn Leidse studenten. Dit ging veel verder dan het geven van de voorgeschreven colleges. Overigens bereidde hij deze zo grondig voor dat hij aanvankelijk nauwelijks tijd overhield voor onderzoek. Maar bovenal probeerde hij een inspirerend klimaat te creëren zoals hij dat zelf als student in Göttingen had aangetroffen.

Het grootste probleem in zijn ogen was het minimale contact tussen studenten en wetenschappelijke staf, en tussen studenten onderling. Geografische, professionele, sociale en leeftijdsverschillen stonden dergelijke contacten in de weg. De omgang met hoogleraren beperkte zich, buiten de collegezaal, in de regel tot de incidentele theevisite. Veel bètastudenten reisden wegens geldgebrek dagelijks heen en weer tussen Leiden en hun ouderlijk huis in een der omringende dorpen of steden. Zij namen nauwelijks deel aan het Leidse studentenleven. Dat studentenleven werd bovendien gedomineerd door niet-facultaire

¹⁹ *Ibid.*, 200.

²⁰ Ehrenfest aan Jan Burgers, 23-5-1928, Archief Paul Ehrenfest (hierna APE), Museum Boerhaave Leiden, inv.nr. esc:2, sectie 7; zie ook H.A. Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland: breekijzer voor democratisering in het interbellum* (Utrecht, 1997) 48.

²¹ Dagboek voor 1914, ongedateerd, APE, inv.nr. enb:4.

verenigingen. Naast het elitaire studentencorps waren er nog diverse andere, min of meer verzuilde verenigingen.

Ehrenfests eerste Leidse initiatieven waren dan ook vooral gericht op het bevorderen van onderlinge contacten. Ze behelsden het instellen van het zogenaamde woensdagavondcolloquium, het nieuw leven inblazen van een facultaire studievereniging, en de inrichting van een studentenleeszaal.²²

Het wekelijks colloquium - eerst in Ehrenfests woning, later in het Instituut voor theoretische natuurkunde - werd een begrip in binnen en buitenland. Gevestigde namen werden na of tijdens hun voordracht onderworpen aan een spervuur van vragen en kritische kanttekeningen. Genodigde studenten werden daarbij in staat gesteld en zelfs aangemoedigd op voet van gelijkheid te debatteren met de groten der aarde. Ehrenfests voornaamste oogmerk werd in de studentenalmanak treffend gekarakteriseerd:

Het is hier dat men kennis maakt met de modernste onderzoekingen, met het aarzelend tasten en mistasten, dat men het geheele grensgebied der wetenschap waarneemt, en moge de strijd der meeningen op den jongere al eens wat verwarrend werken, hij leert de natuurkunde beschouwen als een levend organisme en niet als een dood, hoewel stijlvol geheel.²³

Ehrenfest verwachtte van de genodigde studenten dat zij de bijeenkomsten geregeld bezochten. Zelf hield hij nauwgezet presentielijsten bij. Het initiatief vond vrijwel onmiddellijk navolging onder de chemici en de wiskundigen.

Ehrenfest ontdekte daarnaast het bestaan van een in 1895 opgericht en nu in een sluimertoestand verkerend faculteitsdispuut, genaamd *Christiaan Huygens*. Door studenten krachtig aan te sporen om lid te worden, slaagde Ehrenfest er spoedig in de vereniging weer tot leven te wekken. De voornaamste activiteit van dit dispuut werd het organiseren van tweewekelijkse bijeenkomsten van alle geïnteresseerde studenten in de exacte wetenschappen, beginnende zowel als gevorderde. De bijeenkomsten vonden 's avonds plaats in de woning van een der studenten. Het programma bestond doorgaans uit drie door de studenten te houden voordrachten: een grote, een geïmproviseerde en een kleine lezing.

De vaak aanwezige Ehrenfest mengde zich graag in de discussies. Vermoedelijk minder welkom waren zijn aanmaningen tot onthouding van alcohol en tabak. Inzet en betrokkenheid vormden een voorwaarde voor het lidmaatschap. Ehrenfest deed daarbij zijn best om studenten te overreden hun activiteiten zo veel mogelijk te verschuiven van de algemene verenigingen naar *Christiaan Huygens*. Dit gold met name voor de studenten die lid waren van het door hem

²² Klein, *Paul Ehrenfest*, 9-10.

²³ *Almanak van het Leidsch Studentencorps* (1916) 115.

verafschuwde *Leidsch Studentencorps*.²⁴ In de jaren twintig zou hij tevens een vereniging voor natuurkundestudenten in het leven roepen, *De Leidsche Fles* genaamd. Hier zouden gevorderde studenten *seminars* leiden, naar het voorbeeld van zijn eigen colloquia.²⁵

Bovenal probeerde hij forenzende studenten ertoe te bewegen om, eventueel middels een beurs, hun domicilie naar Leiden te verplaatsen. Voor het ontstaan van een levendige en onderzoekgerichte cultuur onder de studenten achtte hij een gemeenschappelijke verblijfplaats noodzakelijk. Soms adviseerde hij een tweetal studenten om gezamenlijk een specialistisch onderwerp te bestuderen. Ook spoorde hij de Leidse studenten aan om contact te leggen met hun vakgenoten in Utrecht en Amsterdam.

Moeilijker te realiseren was de gewenste leeszaal. Dit vergde de nodige financiën en de medewerking van de universiteitsbibliotheek. Zoals meestal in dergelijke gevallen vermeed Ehrenfest de formele procedures en wendde zich direct tot Lorentz. Lorentz, die veel sympathie bezat voor de door Ehrenfest gewenste veranderingen, slaagde erin het gevraagde te bewerkstelligen. In mei 1913 werd de in de collegezaal ondergebrachte 'leeskamer Bosscha' voor studenten geopend. De zaal was vernoemd naar de pas overleden Leidse curator en fysicus, Johannes Bosscha, wiens vermogende zoon de benodigde gelden had gedoneerd.²⁶

Ehrenfests colleges werden al gauw een begrip in Leiden. Doorgaans behandelde hij het ene jaar de elektrodynamische theorie van Maxwell, uitmondend in Lorentz elektronentheorie en Einsteins relativiteitstheorie, en het andere jaar de statistische mechanica, uitmondend in de kwantumtheorie. Zoals gezegd bereidde hij deze colleges zeer consciëntieus voor. Zijn gebruik van het bord was uiterst verzorgd en doordacht. Maar zijn presentatie verschilde hemelsbreed van de gepolijste en systematische uiteenzettingen van Lorentz. Ehrenfest colleges blonken bovenal uit door levendigheid. Deze werd sterk vergroot door zijn gebruik van idiosyncratische uitdrukkingen en metaforen en zijn nimmer volledige beheersing van de Nederlandse taal.

Evenals in zijn onderzoek vermeed hij ingewikkelde wiskundige berekeningen en richtte hij de aandacht op opvallende, soms paradoxale punten in de theorie. Begripsverheldering, waar het hem primair om te doen was, bereikte hij door pakkende beelden en gedachte-experimenten. Waar mogelijk richtte hij de aandacht op recent onderzoek en wees hij op conflicterende gezichtspunten. Hij streefde er daarbij voortdurend naar de studenten zo veel en zo direct mogelijk bij het college te betrekken.²⁷

Formeel had Ehrenfest alleen te maken met die studenten die hun kandidaatsexamen al hadden afgelegd. De colleges theoretische fysica maakten enkel deel uit van het doctoraalprogramma. Maar de lange Leidse studieduur van gemiddeld zeven jaar was hem een

²⁴ Klein, *Paul Ehrenfest*, 8-9.

²⁵ G.E. Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest', *American Journal of Physics* 24 (1956) 433.

²⁶ Klein, *Paul Ehrenfest*, 8-10; Lorentz aan Ehrenfest, 2-7-1913, APE, inv.nr. esc:7, sectie 4.

²⁷ Uhlenbeck, 'Reminiscences', 431-432; H.B.G. Casimir, *Haphazard reality: half a century of science* (New York, 1983) 66-68.

doorn in het oog. Als hij tussen het tiental eerste-jaars-studenten een talent ontwaarde, ontfermde hij zich daar onmiddellijk over. Zo werden Dirk Coster en Jan Burgers al in hun eerste jaar uitgenodigd voor het colloquium en legden zij al na een jaar hun kandidaatsexamen af in plaats van na de gebruikelijke drie tot vier jaar. Bovenal probeerde hij de door hem uitverkoren studenten zo snel mogelijk in aanraking te brengen met de frontgebieden van het onderzoek. Ook kwam het voor dat hij een student vroeg een specifiek onderwerp te behandelen op een van zijn colleges.²⁸

Studenten die zich wilden specialiseren in de theoretische natuurkunde waren volledig afhankelijk van Ehrenfests welwillendheid. In de praktijk was hij tamelijk selectief in het accepteren van studenten. Talent was niet het enige criterium. Voor Ehrenfest was het even belangrijk dat hij met de betrokkene overweg kon. Uitverkiezing kwam in de praktijk neer op intensieve dagelijkse samenwerking. In sommige gevallen werden dergelijke studenten zelfs geweerd van de reguliere colleges. Aan examens werden zij door Ehrenfest al evenmin onderworpen. Daartegenover verwachtte Ehrenfest van hen dezelfde toewijding en volledige overgave als hij zelf betrachtte.

Het intensieve contact tussen leerling en meester had een tweeledige functie. Het voerde de student in in de frontgebieden van het fysisch onderzoek, en het gaf Ehrenfest het door hem benodigde klankbord voor zijn eigen ideeën. Ehrenfest leerde hen om wetenschappelijke artikelen te lezen en daarbij op zoek te gaan naar de kern van een betoog en de daaraan ten grondslag liggende aannames. Deze aanpak dwong de student op zijn tenen te lopen, zeker in de beginfase. Maar na enige tijd zou de leerling-meester-verhouding overgaan in een gelijkwaardige samenwerking.²⁹

In enkele gevallen ontpopte de student zich zelfs als de meerdere van de docent en werden de verhoudingen omgekeerd. Als Ehrenfest meende dat hij een leerling niet veel meer te bieden had, stuurde hij deze naar een passend, veelal buitenlands instituut om daar verder te rijpen. Ook moedigde hij hen aan om posities te accepteren op plaatsen waar de theoretische natuurkunde nog niet tot volle wasdom was gekomen. Ehrenfest wantrouwde prestigieuze en grootschalige onderzoekscentra, die in zijn ogen de ontplooiing van het individu belemmerden.³⁰

Het lag hierbij niet in Ehrenfests vermogen om een grens te trekken tussen de natuurkunde en meer persoonlijke aangelegenheden. Ook hierin toonde Ehrenfest zich de tegenpool van de afstandelijke Lorentz. In huize Ehrenfest vonden zijn studenten altijd een open deur. Soms werd hier gezamenlijk gemusiceerd of onder leiding van de vrouw des huizes in de tuin gewerkt.

²⁸ *Ibid.*, 208.

²⁹ Uhlenbeck, 'Reminiscences', 432-433, Casimir, *Haphazard reality*, 70-71.

³⁰ Zie bijv. Ehrenfest aan Joffe, 13-4-1928, APE, inv.nr. esc:6, sectie 1.

Discretie was zowel hem als zijn echtgenote volledig vreemd. De studenten werd naar Oost-Europees gebruik het hemd van het lijf gevraagd.³¹

De directe, vriendschappelijke relatie tussen Ehrenfest en diens studenten had echter ook haar schaduwzijden. Ehrenfest bemoeide zich ingrijpend met hun leefwijze en, in een enkel geval, zelfs met hun partnerkeuze.³² Een van zijn studenten, Dirk Coster, zou hem ooit een 'vampier' hebben genoemd.³³ Daarnaast overlaadde hij menig student met zijn eigen zieleroerselen, inclusief al zijn existentiële twijfels. Voor een jonge student zonder veel levenservaring kon het een onthutsende ervaring zijn om direct geconfronteerd te worden met de depressies en de radeloosheid van de bewonderde leermeester.³⁴

Een volledige toewijding aan de fysica en een ascetische levenswijze lagen voor Ehrenfest in elkaars verlengde. Een geparfumeerd luchtje ten gevolge van een kappersbezoek of, erger nog, een zweem van alcohol konden uiterst heftige reacties oproepen. Tact verdroeg zich überhaupt niet met zijn gepassioneerde temperament. Hem onwelgevallige studenten of medewerkers moesten soms met een tamelijk bruuske afwijzing rekenen. Maar even plotseling kon hij zich uitputten in verontschuldigheden.³⁵

Voor diegenen die opgewassen waren tegen Ehrenfests eigenaardigheden vormde diens aanpak een ideale leerschool. De onderzoekscultuur die Ehrenfest in Leiden creëerde liet niet na vrucht te dragen. Zoals we zullen zien bracht het overgrote merendeel van zijn promovendi het uiteindelijk tot het hoogleraarschap. In dit opzicht contrasteerden zij met die van Lorentz, die in meerderheid in de anonimiteit verdwenen.

Het voornaamste Leidse werkterrein van Ehrenfest en zijn leerlingen werd gevormd door de nieuwe kwantumtheorieën. Een kort overzicht van de inhoudelijke ontwikkelingen op dit gebied is dan ook onvermijdelijk.

Kwantumverschijnselen en het adiabatisch principe

De periode rond Ehrenfests benoeming in Leiden was er een van hevige beroering in de natuurkunde. Nauwelijks was de natuurkundige gemeenschap doordrongen geraakt van de betekenis van Einsteins relativiteitstheorie, of het Solvay-congres van 1911 bracht het besef van een nieuwe aantasting van de fundamenten der fysica. De wortels daarvan gaan terug tot het jaar 1900. In dat jaar had de Duitse fysicus Max Planck een wet voorgesteld die een bepaald type elektromagnetische straling beschreef, de straling van een 'zwart lichaam'. De door Planck voorgestelde wet kreeg al snel ondersteuning van experimentele zijde.

³¹ A. Romein-Verschoor, *Omzien in verwondering*, deel 1 (Amsterdam, 1970) 129.

³² F. Alkemade, 'Biography', in: F.T.M. Nieuwstadt & J.A. Steketee, *Selected Papers of J.M. Burgers* (Dordrecht, 1995) xiv-xv.

³³ Klein, *Paul Ehrenfest*, 210.

³⁴ J.M. Burgers, *Autobiographical notes* (typescript) 29-30.

³⁵ Casimir, *Haphazard reality*, 78-79.

Maar in de tweede helft van het decennium rees bij een enkeling het besef dat Plancks afleiding van de wet op vreemde aannames stoelde. Steeds sterker drong de conclusie zich op dat de wisselwerking tussen materie en straling in het onderhavige geval afweek van de gangbare *continue* afgifte en opname van energie door de stralingsbron. Het leek wel of de stralingsbron enkel die energiewaarden kon aannemen die een geheel veelvoud waren van een bepaald energiepakketje, oftewel *energiekwantum*, en aldus *sprongsgewijs* van energie veranderde. In 1907 liet Einstein zien dat een soortgelijke aanname, toegepast op de warmtetrillingen van materiedeeltjes in een vaste stof, licht kon werpen op de raadselachtige daling van de soortelijke warmte bij lage temperaturen.³⁶

Ehrenfest behoorde samen met Einstein tot de pioniers in het onderzoek van de kwantumproblematiek. Zijn belangstelling voor de betreffende stralingsverschijnselen was gewekt door de colleges die hij in 1903 bij Lorentz had gevolgd. Deze interesse werd nog versterkt door het feit dat Plancks theoretische aanpak berustte op aan Boltzmann ontleende statistische methoden. In een tweetal artikelen, gepubliceerd in 1905 en 1906 had hij Plancks werk aan een grondige analyse onderworpen. In 1911 publiceerde hij een derde artikel over dit onderwerp, waarin hij de vraag opwierp welke aspecten van de kwantumhypothese een essentiële rol vervulden in de theorie van de warmtestraling.

Wat Ehrenfest in wezen liet zien was dat de genoemde energiekwantisatie een noodzakelijke en tevens voldoende voorwaarde vormde voor de afleiding van de stralingswet. Dit impliceerde dat het hier niet ging om een probleem van voorbijgaande aard. Ehrenfests in oktober verschenen artikel trok echter nauwelijks enige aandacht onder zijn vakgenoten. Diezelfde maand werd in Brussel het eerste Solvay-congres gehouden onder voorzitterschap van Lorentz. Het congres werd grotendeels gewijd aan de nieuwe kwantumtheorieën en het was vooral deze bijeenkomst die de natuurkundige gemeenschap doordrong van de ernst van de situatie.

De vraag die zich nu opdrong was of het mogelijk was de kwantumhypothese te generaliseren voor andere atomaire processen. Van begin af aan was Ehrenfest gefraspeerd door de volgende paradox. Hoewel de kwantumtheorie in het atomaire domein niet te rijmen leek met traditionele theorieën, bleken sommige klassieke resultaten hun geldigheid in de nieuwe situatie te behouden. Ehrenfest hoopte door analyse van deze resultaten meer greep te krijgen in de raadselachtige kwantumvoorschriften.

Zoals gezegd kwam Ehrenfest in Leiden aanvankelijk nauwelijks toe aan onderzoek. In de kerstvakantie van 1912 zette hij echter een eerste stap in de richting van de door hem gezochte grondslag. Hij bewees dat voor een willekeurig systeem, gekarakteriseerd door een periodieke beweging (denk bijvoorbeeld aan een slinger), onder oneindig langzame ('adiabatische') verandering van bepaalde variabelen (bijvoorbeeld de lengte van die slinger) de verhouding van de gemiddelde bewegingsenergie en de frequentie van die beweging onveranderlijk ('invariant')

³⁶ Voor de geschiedenis van de opeenvolgende kwantumtheorieën, zie M. Jammer, *The conceptual development of quantummechanics* (New York, 1989²)

is. Volgens Ehrenfest berustte Plancks stralingswet in wezen op een kwantumvoorschrift voor deze invariant in het specifieke, door Planck beschouwde proces.³⁷

In het voorjaar van 1913 vond er wederom een internationale, aan de kwantumproblematiek gewijde conferentie plaats, ditmaal in Göttingen. Tot zijn grote frustratie moest Ehrenfest ervaren dat hij niet tot de genodigden behoorde, in tegenstelling tot bijvoorbeeld Lorentz en Debije. Debije slaagde erin om een aantal nieuwe resultaten af te leiden door op een handige wijze Einsteins werk aan de soortelijke warmtes van vaste stoffen te generaliseren. Niet lang daarna zou hij Utrecht voor Göttingen verruilen.

Veel radicaler was een enkele maanden later gepubliceerde toepassing van de kwantumhypothese. Het betrof hier een nieuwe theorie over de inwendige structuur van het atoom, gepubliceerd door de jonge Deense fysicus Niels Bohr. Bohrs atoom bestond uit een positief geladen kern en daaromheen cirkelende elektronen. Hij perkte de klassiek toegestane banen van de elektronen in middels een kwantumregel.

Veel problematischer was zijn suggestie dat de frequentie van de door een atoom uitgezonden straling niets te maken had met de frequentie van de baanbeweging van het elektron. Deze aanname streed zowel met de klassieke elektrodynamica, als met alle bestaande ideeën over golven en trillingen. Volgens Bohr was de emissie van straling een gevolg van de sprongsgewijze verandering van energie bij de overgang tussen twee door de kwantumregel toegestane elektronbanen en werd de frequentie van die straling enkel en alleen bepaald door het bijbehorende energieverschil.

Deze ogenschijnlijk absurde aanname stelde Bohr in staat iets te doen wat niemand voor hem gelukt was, namelijk het berekenen van de specifieke frequenties van door waterstofatomen uitgezonden straling. Sommigen, onder wie Einstein en Sommerfeld, waren voldoende onder de indruk van Bohrs resultaten om de theorie serieus te nemen. Anderen zagen in zijn afleiding weinig meer dan betekenisloos gegoochel. Ehrenfest behoorde tot de sceptici. In een brief aan Lorentz bekende hij dat Bohrs werk hem tot wanhoop dreef: 'Als dit de manier is om het doel te bereiken, moet ik de natuurkunde opgeven'.³⁸ Waar Bohrs werk velen attendeerde op het belang van het spectraalonderzoek voor de verdere uitbreiding van de kwantumtheorie, zou Ehrenfest voorlopig zijn eigen weg blijven volgen.

In november verscheen een kort artikel van Ehrenfests hand in de verslagen van de KNAW waarin hij besprak hoe het bestaan van de door hem gevonden adiabatiscie invariant het mogelijk maakte om nieuwe kwantumvoorschriften te vinden. Dit was een eerste voorbeeld van wat Einstein zijn 'adiabatiscie hypothese' zou noemen. In een volgend artikel toonde hij aan dat de statistische gewichten, nodig voor de toepassing van Boltzmanns statistische methoden op atomaire en stralingsverschijnselen, adiabatiscie invarianten moesten zijn.³⁹

³⁷ Klein, *Paul Ehrenfest*, 246-263.

³⁸ *Ibid.* 278-9.

³⁹ *Ibid.*, 270-272, 279-292.

Ehrenfests artikelen werden echter nauwelijks opgemerkt, mede door het ontbreken van een heldere uiteenzetting van de aard en functie van zijn 'adiabatische hypothese'. Einstein was een van de weinigen die waardering toonden voor Ehrenfests werk. Persoonlijke contacten droegen ongetwijfeld bij tot deze houding. In maart 1914 had Einstein voor het eerst enige tijd doorgebracht bij de Ehrenfests, gevolgd door een tegenbezoek in Berlijn in mei van dat jaar. In de daarop volgende zomer betrokken de Ehrenfests hun nieuwe woning in Leiden. Ondanks zijn aanhoudende twijfels over zijn toekomst in Leiden speelde Ehrenfest met de gedachte het Nederlands staatsburgerschap aan te vragen.⁴⁰ Dit voornemen werd nog versterkt door de politieke ontwikkelingen in Europa.

De oorlogsjaren

Die zomer brak de oorlog uit die Europa meer dan vier jaar in zijn greep zou houden. De van enig nationaal gevoel gespeende Ehrenfest toonde zich geschokt over het feit dat vele wetenschappers uit de strijdende landen de oorlogsretoriek van hun politieke leiders klakkeloos overnamen. Een dieptepunt in dit opzicht was een door 93 vooraanstaande Duitse wetenschappers gesigneerd manifest. Hierin werd het optreden van het Duitse leger in België gesteund en het Duitse militarisme gelegitimeerd als een onlosmakelijk onderdeel van de Duitse cultuur. Zelfs door Ehrenfest hooggeschatte lieden als Klein en Planck hadden hun naam aan het document verbonden. Toen Ehrenfest in 1918 een uitnodiging kreeg voor een conferentie in Göttingen, weigerde hij om principiële redenen te komen.

De oorlog bemoeilijkte sowieso het contact met zijn buitenlandse vrienden en collega's. Van zijn Russische kennissen ontving hij lange tijd geen berichten. Einstein bracht gedurende de vier oorlogsjaren slechts eenmaal een bezoek aan Leiden, namelijk in het najaar van 1916. In de voorafgaande jaren had Einstein zijn *algemene* relativiteitstheorie uitgewerkt. Maar ook in de kwantumtheorie stonden de ontwikkelingen niet stil. Veel opzien baarde een reeks artikelen van Sommerfeld, waarin hij Bohrs theorie generaliseerde door de introductie van aanvullende kwantumcondities. Door daarnaast relativistische effecten in de theorie te betrekken, slaagde hij erin rekenschap te geven van de fijnere details in het spectrum van waterstof.

Ondanks zijn antipathie tegen Bohrs theorie zocht Ehrenfest onmiddellijk naar mogelijke raakvlakken van Sommerfelds werk met zijn werk aan adiabatische invarianten. In 1916 publiceerde hij vervolgens de eerste uitgebreide uiteenzetting van zijn principe. Hierin beargumenteerde hij dat aan kwantumregels onderworpen grootheden, zoals die van Debije en, tot op zekere hoogte, die van Sommerfeld, gezien konden worden als specifieke instanties van adiabatische invarianten. De adiabatische hypothese stelde nu dat - ook in het atomaire domein- toegestane bewegingen via een omkeerbare adiabatische verandering overgingen in nieuwe toegestane bewegingen. Kende men de kwantumcondities voor het oude systeem dan

⁴⁰ Lorentz aan Ehrenfest, 4-8-1914, APE, inv.nr. esc: 7, sectie 4.

kon men in principe die voor het nieuwe afleiden. Dit artikel was en bleef zijn voornaamste bijdrage aan de ontwikkeling van de kwantumtheorie. Enkele jaren lang publiceerde Ehrenfest niets meer op dit gebied. Een verdere exploratie van zijn ideeën liet hij over aan zijn wiskundig meer vaardige leerling Jan Burgers.

Ten gevolge van de mobilisatie in de oorlogsjaren liep het aantal studenten in de faculteit sterk terug. Desondanks bloeide het intellectuele leven in de faculteitsvereniging *Christiaan Huygens*. Onder de studenten treffen we hier Dirk Struik, Hendrik Antoon Kramers, Jan Burgers, Dirk Coster, en Marcel Minnaert. De laatste was naar Leiden gekomen om zich verder te scholen in de natuurkunde. De vervlaamsing van de Gentse Universiteit onder de Duitse bezetting bood hem, de Vlaamse activist, de mogelijkheid van een natuurkundig lectoraat. Ook in ander opzicht lieten de internationale ontwikkelingen de studenten niet onberoerd. Zo was de uit de arbeidersklasse afkomstige Dirk Coster mede-oprichter en voorzitter van de 'Studentenvereniging tot studie van het socialisme'. De radicalere Struik werd eveneens lid van dit gezelschap. Ook Minnaert, Burgers en de beide Ehrenfests bezaten uitgesproken socialistische sympathieën. Maar desondanks werd er binnen Christiaan Huygens over politiek geen woord gewisseld. Dit was een oord van volledige en exclusieve toewijding aan de natuurwetenschap.⁴¹ De discussies onder de Leidse theoretici werden tijdens de oorlog minder bepaald door de kwantumproblematiek dan door Einsteins in 1915 voltooide algemene relativiteitstheorie. Debet hieraan waren de bijdragen van de Leidenaren Lorentz, Fokker en De Sitter en de aanwezigheid van de Finse fysicus Nordström, een specialist op het gebied van de gravitatie. Ehrenfest zelf speelde hierbij een ondergeschikte rol. Ook was zijn belangstelling voor de kwantumtheorie na 1916 sterk verminderd. Mogelijkerwijs was hij gedesillusioneerd door de recente ontwikkelingen op dit gebied en de geringe weerklank die zijn eigen werk ten deel viel. Zijn interesse verschoof volledig naar de wiskundige theorievorming op het gebied van de economie. Deze belangstelling werd ingegeven door een door hem vermoede analogie tussen thermodynamische en economische processen.⁴² Zijn studie resulteerde niet in publicaties. Tegen het eind van de oorlog keerde hij uiteindelijk weer terug naar de fysica.

Een stimulans voor de hernieuwde passie ging mogelijk uit van de publieke omarming van zijn adiabatisch principe door niemand minder dan Bohr zelf. Deze benadrukte in 1918 de 'grote vooruitgang' die in zijn ogen te danken was aan Ehrenfests principe en de daardoor bewerkstelligde coherentie in de wirwar van kwantumregels. Het adiabatisch principe en zijn eigen correspondentieprincipe waren in Bohrs visie het kompas voor de verdere ontwikkeling van de kwantumtheorie.⁴³ De eerlijkheid gebiedt te zeggen dat de historische betekenis van de laatste die van de eerste verregaand overtrof.

⁴¹ D.J. Struyk, Autobiografische aantekeningen (typescript), hfdst. 5, 22.

⁴² Klein, *Paul Ehrenfest*, 305-306.

⁴³ A. Pais, *Niels Bohr's times, in physics, philosophy, and polity* (Oxford, 1991) 189-190.

In het voorjaar van 1919 bezocht Bohr Leiden op uitnodiging van Ehrenfest en dit werd het begin van een hechte vriendschap. Ehrenfests houding ten aanzien van Bohrs werk en ideeën veranderde volledig. Het werd hem al gauw duidelijk dat Bohr, anders dan bijvoorbeeld Sommerfeld, zijn innovaties niet als fundamenteel beschouwde, maar enkel als een stap in de richting van een dieper liggende, samenhangende theorie. Bohrs meer intuïtieve dan wiskundige werkwijze moet hem al evenzeer sympathiek zijn geweest. En Bohrs correspondentieprincipe legde, net als zijn adiabatische principe, een verbinding tussen de kwantumprincipes en de klassieke theorieën. Zoals zoveel andere fysici kwam Ehrenfest uiteindelijk volledig in de ban van zowel Bohrs persoonlijkheid als zijn natuurkundige opvattingen. Toen bleek dat Bohr wegens ziekte niet kon verschijnen op het Brusselse Solvay-congres van 1921, gaf Ehrenfest in zijn plaats een uiteenzetting over het correspondentieprincipe.⁴⁴

Na de oorlog zocht Ehrenfest naar wegen om zijn andere idool, Einstein, zo veel mogelijk in zijn nabijheid te hebben. Dit was niet louter een kwestie van eigenbelang. Hij meende dat het noodzakelijk was om hetzij Einstein, hetzij Debije aan Leiden te binden teneinde de reputatie van de Leidse fysica te redden. Kamerlingh Onnes bezat een sterke voorkeur voor Einstein, mede omdat de ambitieuze Debije zich steeds meer op het experimentele vlak begaf en mogelijk te veel interesse zou tonen voor het laboratorium.⁴⁵ In de zomer van 1919 deed Ehrenfest na overleg met de andere leden van de faculteit Einstein het aanbod van een Leids professoraat zonder enige onderwijsverplichting. Einstein sloeg het aanbod af, maar beloofde in de herfst naar Leiden te komen.⁴⁶

Na dit bezoek kwam Ehrenfest met het voorstel van een bijzonder hoogleraarschap. Dit zou enkel een jaarlijks bezoek van drie tot vier weken aan Leiden vereisen. Met geld van het Leids universiteitsfonds werd dit plan uiteindelijk ten uitvoer gebracht. Einsteins oratie in oktober 1920 werd opgeluisterd door de aanwezigheid van vooraanstaande buitenlandse fysici. Einstein zelf was inmiddels een beroemdheid. Zijn nieuwe theorie haalde in september 1919 wereldwijd de voorpagina's na empirische ondersteuning door de Britse astronoom Eddington.

Ondanks zijn aanhoudende twijfels raakte Ehrenfest geleidelijk aan steeds meer geworteld in zijn nieuwe thuisland. Zijn gezin was inmiddels uitgebreid met twee kinderen, beiden geboren tijdens de oorlog. Paul jr. ('Pavlik') was geboren in mei 1915; Vassily ('Vassik') vlak voor het einde van de oorlog, in augustus 1918.⁴⁷ In mei 1919 was Ehrenfest benoemd tot lid van de Koninklijke Academie van Wetenschappen. Het jaar daarop verkreeg hij eindelijk de Nederlandse nationaliteit.

⁴⁴ *Ibid.*, 190, 195.

⁴⁵ Ehrenfest aan Lorentz, 8-9-1919, APE, inv.nr. esc: 7, sectie 7.

⁴⁶ Klein, *Paul Ehrenfest*, 310-312.

⁴⁷ *Ibid.*, 316-317, 308.

Tussen oost en west

Na de oorlog bleven de wetenschappelijke betrekkingen tussen de verschillende staten lange tijd op een laag pitje staan. Britse en vooral Franse fysici meden in Duitsland georganiseerde congressen. Omgekeerd werden Duitse fysici geweerd van de Solvay-congressen van 1921 en 1924. Nederlanders als Lorentz en Ehrenfest vervulden veelal een brugfunctie tussen beide kampen. Maar het meeste zorgen baarde Ehrenfest de naoorlogse situatie in Rusland. Jarenlang had hij niets uit St. Petersburg vernomen. Pas na de oorlog kwam het weer tot een regelmatige correspondentie.

De oorlog had het land volledig uitgeput en de fysici aldaar in een nog groter isolement gebracht. Russische tijdschriften verschenen niet wegens gebrek aan papier, de natuurkundigen ontbeerden instrumenten en waren sinds het begin van de oorlog verstoken van Westerse publicaties. Initiatieven van met name Joffe hadden geresulteerd in de oprichting van een nationale organisatie van natuurkundigen en enkele nieuwe onderzoeksinstituten, waaronder Joffe's Leningrads Fysisch-Technisch Instituut.⁴⁸

Ehrenfest gebruikte zijn contacten om te bewerkstelligen dat zoveel mogelijk West-Europese fysici overdrukken van recente publicaties naar Rusland opstuurden. Ook trachtte hij Russische fysici te helpen bij het verkrijgen van visa, die zij nodig hadden om in het Westen instrumenten, boeken en tijdschriften te kopen. In april 1921 bezocht Ehrenfest Joffe, die aanvankelijk enkel een Duits visum had kunnen krijgen, in Berlijn. Gezamenlijk zochten zij naar wegen de wetenschappelijke contacten tussen Rusland en het Westen te normaliseren. Pas in juli kon Joffe Leiden bezoeken, waar Ehrenfest een ontmoeting met Lorentz en Kamerlingh Onnes regelde.

Ehrenfests inspanningen waren niet louter ingegeven door oude vriendschapsbanden. Tijdens zijn Leidse hoogleraarschap zocht hij onophoudelijk naar wegen om contacten tussen jonge Nederlandse en Russische fysici te bevorderen. En dit gold niet alleen voor theoretici. Veel jonge Russische experimentatoren zouden door Ehrenfests bemiddeling in het Leidse laboratorium werken en omgekeerd Nederlandse fysici in Leningrad.⁴⁹

Daarnaast spoorde hij bevriende fysici aan om deel te nemen aan Russische congressen. Zelf bezocht hij in de zomer van 1924 het vierde nationale congres van de Russische natuurkundigen in Leningrad. Hij hield hier een voordracht over de recente ontwikkelingen binnen de kwantumtheorie en maande jonge fysici aan zich in het Westen bij te scholen. Het jaar daarop overlegde Ehrenfest met A. Trowbridge, directeur van de door de Rockefeller Foundation gestichte International Education Board, over zijn plannen om enkele begaafde jonge Russische fysici voor een jaar naar West-Europa te halen. De eerste die hier profijt van trok was de theoreticus Yakov Frenkel. Op advies van Ehrenfest werkte hij achtereenvolgens bij

⁴⁸ P.R. Josephson, *Physics and Politics in Revolutionary Russia* (Berkeley, 1991) 72-86.

⁴⁹ *Ibid.*, 108-110.

Pauli in Hamburg, Einstein in Berlijn en Born in Göttingen. Hij zou zich na terugkomst ontwikkelen tot de leider van een nieuwe generatie van theoretici in Leningrad. In zijn voetspoor reisden ook andere getalenteerde theoretische natuurkundigen als Fock, Landau en Gamow naar het Westen.⁵⁰

In deze periode richtte Ehrenfest zich tevens sterk op Amerika. Zowel voor als na de oorlog reisde een stoet van Europese geleerden op uitnodiging naar de Nieuwe Wereld om daar een reeks colleges of lezingen te geven. Zo ook Ehrenfest. Op 3 december 1923 vertrok hij uit Rotterdam voor een vijf maanden durend verblijf in de Verenigde Staten. Zijn voornaamste reisdoel was het California Institute of Technology in Pasadena dat hem had uitgenodigd als Research Associate. In de voorafgaande jaren waren Lorentz en Sommerfeld hier eveneens te gast geweest.

Daarnaast bezocht Ehrenfest tal van andere natuurkundige centra en maakte hij kennis met de voornaamste Amerikaanse fysici. Veel jonge Amerikanen, voor wie de nieuwe natuurkunde veelal een gesloten boek was, getuigden later van de grote stimulans die uitging van Ehrenfests bezoek.⁵¹ Zijn verblijf in Pasadena resulteerde in enkele gezamenlijke publicaties met de Amerikanen Tolman en Bateman. Zoals we zullen zien zou hij later Nederlandse leerlingen aansporen om een positie in de VS te accepteren.

Amerika bezat verschillende charmes voor Ehrenfest. Eén daarvan was gelegen in het feit dat tijdens en vooral na de oorlog en de daaropvolgende revoluties veel jonge Russische fysici naar Amerika waren geëmigreerd. Een tweede bestond in het Californische klimaat en landschap en een derde hing samen met de Amerikaanse achterstand op het gebied van de kwantumtheorie. Ehrenfest had hier meer dan in Leiden het gevoel zich nuttig te kunnen maken. Daarbij kwam nog dat Ehrenfest steeds meer waardering kreeg voor de sterke maatschappelijke oriëntatie van de Amerikaanse universiteiten. Bovenal was hij aangenaam getroffen door de directheid en openheid van de Amerikaanse academici, die zo sterk contrasteerde met de vormelijke manieren van zijn Nederlandse ambtgenoten.

In de Leidse fysica hadden inmiddels grote veranderingen plaatsgevonden. Direct na de oorlog was natuurkundig laboratorium ingrijpend verbouwd. Ook het gebouwtje voor de theoretische natuurkunde onderging een aanzienlijke uitbreiding, die eind 1920 voltooid was.⁵² Belangrijker waren de veranderingen in de personele sfeer. In 1922 overleed vrij plotseling de hoogleraar en toenmalige rector Kuenen. Omdat Kamerlingh Onnes binnen korte tijd met emeritaat zou gaan, richtte de opvolgingsprocedure zich op twee hoogleraren experimentele fysica. Om beide een gelijkwaardige positie te garanderen werd het laboratorium opgesplitst in twee afdelingen met ieder een eigen directeur. Keesom kreeg de leiding over het lage-temperaturen-onderzoek; De

⁵⁰ *Ibid.*, 131-132, 113-116.

⁵¹ K.R. Sopka, *Quantum Physics in America: The years through 1935* (AIP, 1988) 89, 321.

⁵² C.A. Crommelin, 'Verbouwing en Uitbreiding', in: *Het natuurkundig laboratorium der Rijksuniversiteit te Leiden in de jaren 1904-1922* (Leiden, 1922) 69-77.

Haas ontfermde zich over het overige onderzoek.⁵³ De conservator van het laboratorium, Claude Crommelin, werd in 1924 tot adjunct-directeur en lector benoemd.

Directer was de betrokkenheid van Ehrenfest bij een andere opvolgingskwestie, en wel die in Utrecht. In 1925 was de Utrechtse fysicus Julius overleden. Aangezien Ornstein geleidelijk aan de leiding over het laboratorium van Julius had overgenomen, werd in de eerste plaats gedacht aan de benoeming van een theoretisch fysicus. Ehrenfest werd voorzitter van de benoemingsadviescommissie. De drie voornaamste kandidaten voor de positie waren Burgers, Kramers en Ehrenfest zelf. Hoewel de Utrechtse faculteit een sterke voorkeur bezat voor Ehrenfest, stelde deze alles in het werk om Kramers benoemd te krijgen. Hij had grote behoefte aan een nabije expert op het gebied der kwantumtheorie. Na Kramers benoeming zou hij hem regelmatig om hulp vragen. Op Ehrenfests initiatief vonden er bovendien tweewekelijkse ontmoetingen plaats tussen zijn eigen leerlingen en die van Kramers.⁵⁴

Eind jaren twintig volgden wederom twee benoemingen in de natuurkunde binnen Leidse faculteit. Na het overlijden van Lorentz in 1928 nam Fokker diens positie in Teyler over, alsmede het bijzonder hoogleraarschap in Leiden. Datzelfde jaar ontplooidde Ehrenfest initiatieven om te komen tot de instelling van een bijzondere leerstoel in Leiden voor Gilles Holst, de directeur van het Philips natuurkundig laboratorium. Hij motiveerde het voorstel met de constatering dat industriële laboratoria een steeds belangrijker arbeidsveld vormden voor natuurkundigen. Ehrenfest zelf onderhield al jaren nauwe banden met de Eindhovense fysici. Het door de drie andere Leidse hoogleraren gesteunde plan werd het jaar daarop gerealiseerd met steun van het Universiteitsfonds.⁵⁵ In de jaren dertig zou Ehrenfest, na een hernieuwd bezoek aan de VS, de Leidse curatoren blijven wijzen op de noodzaak van een sterkere oriëntatie op maatschappelijke en industriële vraagstukken.⁵⁶

De nieuwe kwantummechanica

Gedurende de naoorlogse jaren slaagde Ehrenfest er steeds minder in om zijn stempel te drukken op de inhoudelijke ontwikkelingen binnen de natuurkunde. De meeste van zijn veelal korte bijdragen schreef hij in samenwerking met andere fysici. Wel bleef hij de ontwikkelingen nauwgezet volgen en becommentariëren. Als criticaster speelde hij een vooraanstaande rol op tal van internationale congressen. Daarenboven wist hij Leiden tot een van de knooppunten in het Europese kwantumnetwerk te maken.

⁵³ UB Leiden, Archief faculteit der wis- en natuurkunde: FA 1, notulen faculteitsvergadering 8-12-1922 en 9-7-1924.

⁵⁴ M. Dresden, *H.A. Kramers: Between tradition and revolution* (New York, 1987) 311-313; Heijmans, *Wetenschap tussen universiteit en industrie*, 69-70.

⁵⁵ Ehrenfest aan Fokker, 3-10-1928, APE, inv.nr. esc:4, sectie 4; 'Verklaring der Hoogleraren der Natuurkunde', 12-12-1928, APE, esc:8, sectie 4.

⁵⁶ Zie bijv. Ehrenfest aan Kohnstamm, 28-3-1931, APE, inv.nr. esc:6, sectie 7.

De voornaamste centra van dit naoorlogse netwerk waren Kopenhagen, Göttingen en München. Göttingen was in zekere zin een nieuwkomer in de kwantumindustrie. De leider van het instituut voor theoretische fysica aldaar was de eerder genoemde Max Born, die in 1920 de naar Zürich vertrokken Debije had opgevolgd. Naar Göttingse traditie was hij meer een mathematisch dan een theoretisch fysicus. Zijn kracht lag niet zozeer in de innovatie, maar meer in de wiskundige exploitatie van andermans ideeën.

Een grote stimulans voor het onderzoek in Göttingen aan de kwantumtheorie was een lezingenreeks die Bohr in juni 1922 in Göttingen gaf. Hier ontmoette Bohr Wolfgang Pauli, voormalig student van Sommerfeld en assistent van Born. Pauli was een briljante jonge fysicus, die al op 21-jarige leeftijd furore had gemaakt met zijn gezaghebbende uiteenzetting over Einsteins relativiteitstheorieën voor Kleins *Enzyklopädie*. Op Bohrs uitnodiging kwam hij een jaar naar Kopenhagen. Deze geschiedenis herhaalde zich twee jaar later met Werner Heisenberg, eveneens van München naar Göttingen gekomen. Zowel Pauli als Heisenberg zouden een belangrijke rol spelen in de verdere ontwikkeling van de kwantumtheorie.

Al spoedig bleek dat verdere verfijning van het Bohr-model niet de beoogde resultaten zou brengen. Voor atomen met meer dan één elektron bleek het onmogelijk om nauwkeurig rekenschap te geven van de spectra, en zelfs bij het waterstofatoom traden problemen op. Bovendien was de combinatie van klassieke theorieën met een toenemende wirwar van ad-hoc-regels uiterst onbevredigend. Zowel in Kopenhagen als in Göttingen groeide de overtuiging dat een radicale breuk met aloude fysische opvattingen onvermijdelijk was.

In 1925 verkreeg het Bohratoom een laatste succes door Pauli's invoering van een vierde kwantumgetal en door het klassiek geworden Pauli-verbod: twee elektronen kunnen binnen een atoom nooit in een identieke toestand verkeren. 'Identiek' betekent hier 'gekaracteriseerd door dezelfde vier kwantumgetallen'. Ehrenfest vermoedde onmiddellijk een verband tussen het Pauli-verbod en de ondoordringbaarheid der materie. Zijn gevolgtrekkingen op dit punt bleken echter enigszins overhaast.⁵⁷ Meer succes had men in Leiden met de interpretatie van het raadselachtige vierde kwantumgetal. De eerste drie kwantumgetallen bepaalden de baanbeweging van het elektron rond de kern. Twee leerlingen van Ehrenfest, Goudsmit en Uhlenbeck, suggereerden nu dat het vierde kwantumgetal betrekking had op de draaiing van het elektron om zijn eigen as ('spin'). Deze omstreden suggestie bleek uiteindelijk valide.⁵⁸

Ehrenfests eigen werk rond het midden van de jaren twintig betrof bovenal de statistiek, doorgaans toegepast op kwantumtheoretische problemen. In dit kader bestudeerde hij tevens de nieuwe kwantumstatistische methoden, geïntroduceerd door Bose en Einstein. Een fundamenteel aspect van de nieuwe statistiek was dat deeltjes hun individualiteit verloren, waardoor verwisseling van twee deeltjes niet langer tot een nieuwe fysische toestand leidde.

⁵⁷ W. Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel mit Bohr, Einstein, Heisenberg u.A. Band I: 1919-1929* (1979) 370-371.

⁵⁸ B.L. van der Waerden, 'Exclusion principle and spin', in: M. Fierz & V.F. Weisskopf (red.), *Theoretical Physics in the twentieth century* (New York, 1960) 210-216.

Het was overigens Ehrenfest die, altijd op zoek naar betekenisgeving, deze fysische interpretatie introduceerde. In de zomer van 1925 gaf Ehrenfest voor Born en zijn medewerkers, onder wie Heisenberg en Jordan, in Göttingen een aantal colleges over Bose-Einstein statistiek en de toepassing daarvan op gassen.⁵⁹

Kort daarop kwam Heisenberg op uitnodiging van Ehrenfest naar Leiden. Met Ehrenfest en Goudsmit besprak hij zijn radicaal nieuwe ideeën, die de grondslag zouden vormen voor de zogenaamde matrixmechanica. Ehrenfest was diep onder de indruk van Heisenbergs theoretische innovaties. Gekscherend vergeleek hij Heisenberg met Isaac Newton: beiden hadden niet alleen een nieuwe mechanica, maar tevens de bijbehorende nieuwe wiskunde ontwikkeld. Ehrenfest verdiepte zich al spoedig in matrices en droeg Uhlenbeck op datzelfde te doen. Het bleek echter lastig om uit de theorie concrete resultaten af te leiden en nog veel lastiger om een aanschouwelijk beeld te creëren van de door Heisenbergs theorie beschreven processen.⁶⁰

Het jaar daarop verschenen Diracs al even esoterische kwantumalgebra en, tot opluchting van tal van fysici, Schrödingers toegankelijker golfmechanica. Al spoedig bleken er directe verbanden tussen de ogenschijnlijk zo verschillende formalismes te bestaan. Ehrenfest zag de nieuwe ontwikkelingen met lede ogen aan. In een brief aan Einstein klaagde hij over indigestie ten gevolge van het 'unendlicher Heisenberg-Born-Dirac-Schrödinger Wurstmachinen-Physik-Betrieb'.⁶¹ Einsteins reserves golden vooral de matrixmechanica en de exotische interpretatie die de Kopenhaags-Göttingse alliantie aan de golftheorie van Schrödinger gaf. Einsteins debatten met Bohr over deze laatste kwestie zijn legendarisch geworden. Ehrenfest, die meer naar Bohrs positie neigde, ervoer de onoverbrugbare tegenstelling tussen beiden als uiterst pijnlijk.⁶²

Met name met Pauli ontwikkelde Ehrenfest in deze tijd sterke vriendschapbanden. In oktober van 1926 was Pauli voor het eerst enkele dagen in Leiden. Hij zou er regelmatig terugkomen. De verbale schermutselingen tussen beide, niet van sarcasme gespeende kempfanen zijn legendarisch geworden. Volgens de overlevering zou Ehrenfest Pauli bij een van hun eerste confrontaties op spottende wijze hebben medegedeeld dat diens *Enzyklopädie*-bijdrage hem beter beviel dan de persoon van Pauli zelf. De jonge, maar ietwat arrogante Pauli riposteerde trefzeker als volgt: 'Das ist doch komisch, mir geht es mit Ihnen gerade umgekehrt'.⁶³

Later droeg Pauli het hem door Ehrenfest toegekende epitheton 'Gesell Gods' als een geuzennaam. Waar Heisenberg zich vaak ergerde aan Ehrenfests voortdurende pogingen tot opheldering, had Pauli veel waardering voor Ehrenfests kritische benadering. Ehrenfest had

⁵⁹ M. Born, *The Born-Einstein letters* (London, 1971) 83.

⁶⁰ J. Mehra & H. Rechenberg, *The historical development of quantum theory*, vol. 4 (New York, 1982) 232-233.

⁶¹ *Ibid.*, 278.

⁶² Pais, *Niels Bohr's times*, 409.

⁶³ Pauli, *Wissenschaftlicher Briefwechsel*, 370; Casimir, *Haphazard reality*, 82-87.

omgekeerd een grote bewondering voor Pauli's capaciteiten en voor de 'Klarheit und fleckenlose Ehrlichkeit seines Denkens'.⁶⁴ Meer dan eens stuurde hij leerlingen naar Pauli om zich onder diens leiding verder te ontwikkelen. Het deed hem veel genoegen om Pauli in 1931 de Lorentz-medaille van de Koninklijke Academie uit te kunnen reiken.

Een andere door Ehrenfest bewonderde theoreticus was Paul Dirac. De reputatie van deze enigmatische Brit stelde zelfs die van Heisenberg en Pauli in de schaduw. Vanaf 1926 werd hij in toenemende mate gezien als het nieuwe orakel dat de anderen de weg wees. In dat jaar worstelden Einstein en Ehrenfest gezamenlijk met Diracs eerste grote publicatie op het gebied van de kwantumtheorie. Einstein schreef Ehrenfest later dat jaar: 'Ik heb moeite met Dirac. Dit balanceren op het duizelingwekkende pad tussen genialiteit en gekte is afschuwelijk.'⁶⁵ Nog datzelfde jaar bezocht Dirac Leiden, maar hij gaf niet toe aan de druk van Lorentz en Ehrenfest om daar enige tijd te blijven. Pas in 1928 bracht hij er alsnog een aantal weken door om aan zijn nieuwe boek te werken en zijn ideeën op het Leidse gehoor uit te proberen.⁶⁶

De kwantumtrein denderde intussen voort. In 1928 ontwikkelde Dirac zijn relativistische kwantumtheorie voor het elektron. De theoretische fysici hadden nauwelijks de kans gekregen om te wennen aan tensoren en matrices, of ze werden al weer geconfronteerd met een nieuw wiskundig object: 'spinoren'. De term was overigens afkomstig van de ermee worstelende Ehrenfest.⁶⁷ Diracs in 1927 ontwikkelde kwantumtheorie der elektromagnetische straling werd vervolgens uitgewerkt door Heisenberg en Pauli tot de zogenaamde kwantumelektrodynamica. Intussen onderwierp de Göttingse wiskundige Von Neumann de nieuwe kwantumtheorie aan een strenge wiskundige behandeling. Von Neumanns 'furchtbare mathematische Kanone' en zijn 'unlesbar compliziertes Formelapparat' vervulden Ehrenfest met afschuw en ontzag⁶⁸.

Leidse leerlingen

Aan de vruchten kent men de boom. Een goede inschatting van Ehrenfests betekenis als leraar vereist een nadere beschouwing van zijn leerlingen. In de twintig jaar van zijn hoogleraarschap trad hij tien keer op als promotor. Na vier promoties tussen 1918 en 1922 (Burgers, Kramers, Tresling⁶⁹ en Coster) volgde na een dal van vijf jaar een tweede 'golf' van zes promoties in de periode 1927-1931 (Uhlenbeck, Goudsmit, Tinbergen, Rutgers, Casimir en Krans).

Jan Burgers, in het najaar van 1914 naar Leiden gekomen, ontwikkelde zich tot Ehrenfests naaste medewerker. Ehrenfest onderkende al spoedig zijn grote wiskundige talent. Omgekeerd

⁶⁴ Ehrenfest aan Casimir, 23-3-1930, APE, esc:2, sectie 8.

⁶⁵ A. Pais, *Subtle is the Lord: The life and the science of Albert Einstein* (Oxford, 1982) 441.

⁶⁶ H.S. Kragh, *Dirac: A scientific biography* (Cambridge, 1990) 45-46, 67-68.

⁶⁷ A. Pais, *Inward bound: of matter and forces in the physical world* (Oxford, 1986) 292.

⁶⁸ Ehrenfest aan Kramers, 29-8-1928, APE, inv.nr. esc:6, sectie 9; Ehrenfest aan Klein, 22-10-1929, APE, inv.nr. esc:6, sectie, 7.

⁶⁹ Over Jan Tresling zijn (nog) geen biografische gegevens gevonden.

raakte Burgers volledig in de ban van zijn leermeester. Hoewel hij enige tijd als assistent in het laboratorium van Kamerlingh Onnes werkte, koos hij uiteindelijk toch voor de theorie. In 1917 publiceerde hij een aantal uitwerkingen van Ehrenfests adiabatische principe. Reeds aan het eind van dat jaar deed hij, na iets meer dan drie jaar studie, zijn doctoraalexamen. Vervolgens vertrok hij naar Haarlem om daar te werken als conservator van het natuurkundig laboratorium onder Lorentz. Hier voltooide hij zijn dissertatie, in wezen een verdere uitwerking van zijn eerdere werk. Nog voor zijn promotiedatum, in november 1918, kreeg hij het aanbod van een hoogleraarschap in Delft met als leeropdracht aero- en hydrodynamica.⁷⁰

Minstens zo getalenteerd, maar onafhankelijker was de erudiete Rotterdamse artsenzoon Hendrik Kramers. Hoewel een leeftijdgenoot van Burgers, was hij zijn studie reeds in 1912 begonnen. Ook hij was aanvankelijk diep onder de indruk van Ehrenfests passie voor de natuurkunde en het onderwijs, maar hij schermde zijn privé-leven meer af. Zijn brede interessesfeer stond een exclusieve concentratie op de natuurkunde in de weg. Dit gebrek aan totale toewijding aan de natuurkunde – zijn bezoek aan de colleges en de colloquia was nogal onregelmatig – diskwalificeerde hem in Ehrenfests ogen als natuurkundige. Ehrenfest zou hem zelfs geadviseerd hebben zijn toekomst in het onderwijs te zoeken.⁷¹

Na zijn doctoraalexamen in het voorjaar van 1916 werd Kramers inderdaad leraar op het Arnhems gymnasium. Na een half jaar besloot hij zijn studie in het buitenland voort te zetten. De keus viel op het eveneens neutrale Denemarken, waar Niels Bohr zojuist benoemd was tot hoogleraar in de theoretische fysica. Kramers vertrok op goed geluk naar Kopenhagen, zonder enige aanbeveling op zak. Hij zou er vervolgens bijna tien jaar blijven.

De samenwerking met Bohr was van begin af aan een groot succes. Van een werkelijke breuk met Ehrenfest was overigens geen sprake. Zo kwam Kramers in 1919 terug naar Leiden voor zijn promotie bij Ehrenfest. Zijn proefschrift behandelde de toepassing van de kwantumtheorie op de berekening van de intensiteiten van de spectraallijnen van waterstof. Tot dan toe was men er enkel in geslaagd de frequenties van die lijnen te bepalen.⁷² Kramers wiskundige virtuositeit was ook Ehrenfest niet ontgaan en in het voorjaar van 1919 deed hij vergeefse pogingen om Kramers te overreden als assistent naar Leiden te komen.⁷³

In 1923 publiceerde Kramers een theorie over de dispersie, het verschijnsel dat lichtstralen van verschillende kleuren onder verschillende hoeken gebroken worden. Ook hierbij gaat het in wezen om de wisselwerking tussen straling en materie. Kramers werk zou uiteindelijk een belangrijke rol spelen in het ontstaan van de matrixmechanica van Heisenberg. Zoals we zagen werd hij in 1926 hoogleraar theoretische natuurkunde in Utrecht. Acht jaar later zou hij Ehrenfest in Leiden opvolgen.

⁷⁰ Alkemade, 'Biography', xiii-xviii.

⁷¹ M. Dresden, *H.A. Kramers: Between tradition and revolution* (New York, 1987) 90-94.

⁷² *Ibid.*, 97-110.

⁷³ Lorentz aan Ehrenfest, 12-3-1919, APE, inv.nr. esc: 7, sectie 7.

Vijf jaar ouder dan Kramers en Burgers was de Amsterdammer Dirk Coster. Opgeleid aan de Rijkskweekschool te Haarlem, werkte hij van 1908 tot 1913 op diverse scholen als onderwijzer. Particuliere ondersteuning maakte het hem mogelijk in 1913 in Leiden te gaan studeren. Aangemoedigd door Ehrenfest voltooide hij zijn studie in drie jaar. Vervolgens was hij vier jaar werkzaam als assistent aan de Delftse Hogeschool. Hier bekwaamde hij zich in de experimentele fysica. In 1920 en 1921 verrichte hij in het Zweedse Lund onderzoek aan röntgenlijnspectra van diverse elementen. In juli 1922 promoveerde hij in Leiden op de dissertatie *Röntgenspectra en de atoomtheorie van Bohr*. Daarop werkte hij een jaar bij Bohr en Kramers in Kopenhagen, hetgeen resulteerde in de ontdekking van het element Hafnium, en vervolgens een jaar als conservator van Teyler's natuurkundig laboratorium. In 1924 volgde zijn benoeming tot hoogleraar in de experimentele natuurkunde in Groningen.⁷⁴

Ehrenfests voornaamste Nederlandse leerlingen in het begin van de jaren twintig waren Jan Tinbergen, de eerder genoemde Goudsmit en Uhlenbeck, en de uit Duitsland afkomstige Gerhard Heinrich Dieke. De in Den Haag woonachtige Tinbergen was vlak na zijn in december 1922 afgelegde kandidaatsexamen assistent geworden van Ehrenfest. Hij vervulde deze functie tot zijn doctoraalexamen in juli 1925. Ondanks de grote invloed die hij van Ehrenfest onderging stond zijn maatschappelijke engagement een toekomst als natuurkundige in de weg. Op advies van Ehrenfest verdiepte hij zich vanaf juli 1924 in de wiskundige economie, Ehrenfests oude passie.

Van mei 1926 tot juni 1928 verrichtte hij zijn vervangende dienstplicht als hulpschrijver in de Rotterdamse gevangenis en vervolgens als medewerker aan het Centraal Bureau voor de Statistiek in Den Haag. Zijn in 1929 voltooide dissertatie behandelde een aantal minimumproblemen binnen de fysica en de economie. Het was het startpunt van een glanzende carrière als econoom, die in 1969 bekroond zou worden met de eerste Nobelprijs voor de economie.⁷⁵

Goudsmit was in 1919 in Leiden gaan studeren, krap 17 jaar oud. In 1921 nodigde Ehrenfest hem uit voor het wekelijks colloquium. Goudsmit verdiepte zich in de fijnstructuur van de spectra, een onderwerp waarover hij datzelfde jaar al publiceerde. Op advies van Ehrenfest bracht hij twee maanden door bij Paschen in Tübingen om kennis te maken met de experimentele spectroscopie. Vanaf september 1924 werkte hij enige dagen per week als assistent van Zeeman in het Amsterdamse laboratorium, waar hij zich verder bekwaamde op dit gebied. Na zijn doctoraalexamen in 1925 stuurde Ehrenfest hem enkele weken naar Bohr in Kopenhagen. Na weer enige tijd in Leiden en Amsterdam te hebben gewerkt bezocht hij van oktober 1926 tot juli 1927 achtereenvolgens Tübingen en Kopenhagen.⁷⁶

⁷⁴ *Biografisch Woordenboek van Nederland*, deel 3, 114-116.

⁷⁵ J. Tinbergen, *Minimumproblemen in de natuurkunde en de economie* (Amsterdam, 1929) ix-x.

⁷⁶ S.A. Goudsmit, *Atoommodel en structuur der spectra* (Amsterdam, 1927) ix.

De twee jaar oudere Uhlenbeck was zijn studie in Leiden een half jaar eerder begonnen. Ook hij werd in 1921 tot het colloquium toegelaten. Van september 1922 tot juni 1925 werkte hij in Rome als huisleraar van de zoon van de Nederlandse ambassadeur. In de tussentijd behaalde hij zijn doctoraal. In Rome volgde hij colleges aan de universiteit en raakte bevriend met de een jaar jongere Enrico Fermi. Terug in Nederland kreeg Uhlenbeck het advies van Ehrenfest om zich samen met Goudsmit te verdiepen in spectraallijnen. De samenwerking resulteerde binnen enkele maanden in de eerder genoemde hypothese van de elektronenspin. Dit bleek al spoedig een belangrijke stap in de verdere ontwikkeling van de theorie der atoomspectra.

Na zijn terugkeer uit Rome werkte Uhlenbeck als assistent van Ehrenfest. Gezamenlijk publiceerden zij een viertal artikelen, een getuigenis van de sterke band tussen leerling en leermeester. Op 7 juli 1927 promoveerden Goudsmit en Uhlenbeck, beiden op hun werk aan atoomspectra.⁷⁷ Een maand later reisden zij met hun echtgenotes naar de Verenigde Staten. Op advies van Ehrenfest hadden zij een aanstelling aan de Universiteit van Michigan in Ann Arbor geaccepteerd. De Amerikaanse fysicus Randall, een leerling van Paschen, had hier een centrum voor spectroscopisch onderzoek opgezet. Mede door de aanwezigheid van de Nederlandse spectroscopisten werd de jaarlijkse zomerschool in Ann Arbor een geliefd reisdoel voor Europese fysici. Uhlenbeck zou in 1934 Kramers opvolgen in Utrecht.

Dieke, tenslotte, was de derde spectroscopist. Hij was in 1920 in Leiden gaan studeren en ging Uhlenbeck voor als assistent theoretische fysica. In de herfst van 1924 verbleef ook hij enige tijd bij Bohr in Kopenhagen. Na zijn doctoraal in 1925 vertrok hij naar Berkeley waar de Amerikaanse fysicus Birge een belangrijk centrum voor moleculaire spectroscopie had gevestigd. Zijn natuurkundig laboratorium was vermoedelijk op dat moment het best geoutilleerde in de Verenigde Staten. Birge gold daarnaast als een van de Amerikaanse pioniers van de nieuwe kwantumtheorie. Dieke promoveerde hier in 1926. Na twee jaar in Pasadena en Tokio te hebben gewerkt, kwam hij in 1928 naar Groningen als conservator van het natuurkundig laboratorium. Twee later zou hij zijn carrière voortzetten aan de Johns Hopkins universiteit in Baltimore.⁷⁸

Eind jaren twintig werkte Ehrenfest nauw samen met drie Leidse leerlingen, namelijk Rutgers, Krans en Casimir. Rutgers en Krans waren beide afkomstig van de Universiteit van Amsterdam. Goudsmit had hen geattendeerd op het Leidse colloquium, hetgeen uiteindelijk resulteerde in de overstap naar Leiden. Roelf Krans kwam in 1926 naar Leiden. In 1928 werd hij, naast Rutgers, assistent van Ehrenfest. Hij zou na zijn promotie in 1931 leraar worden in Arnhem. Uiteindelijk keerde hij terug naar de alma mater om didactiek der natuurkunde te doceren aan

⁷⁷ *Ibid.*; G.E. Uhlenbeck, *Over statistische methoden in de theorie der quanta* ('s-Gravenhage, 1927).

⁷⁸ Zie voor Dieke *American Men of Science* (9th edition), vol. I: *The physical sciences*; Sopka, *Quantum Physics in America*, 101, 109, 180.

de universiteiten van Utrecht, Groningen en de Vrije Universiteit. Hij schreef een groot aantal natuurkundeleerboeken voor het middelbaar onderwijs.⁷⁹

Arend Rutgers had scheikunde gestudeerd en was pas na zijn doctoraal in 1927 naar Leiden gekomen om zich daar te bekwamen in de theoretische natuurkunde. Samen met Ehrenfest publiceerde hij een drietal artikelen. In 1930 promoveerde hij in Leiden op een dissertatie over thermo-elektriciteit in kristallen. Zijn belangstelling voor dit onderwerp was gewekt door een voordracht van de Amerikaanse fysicus P.W. Bridgman op het Leidse colloquium. Hij zou vervolgens terugkeren naar Amsterdam en uiteindelijk hoogleraar fysische chemie worden in Gent.⁸⁰

Casimir, evenals Goudsmit en Uhlenbeck woonachtig in Den Haag, begon zijn studie in 1926. Na zijn kandidaats in 1928 kwam hij, na een kortstondig verblijf in Göttingen, onder Ehrenfests hoede. Ehrenfest had een hoge dunk van de jonge Casimir. Hij schatte hem zelfs hoger dan Kramers.⁸¹ Kramers was ongetwijfeld een beter wiskundige, maar Casimir was naar Ehrenfests mening intuïtiever en 'fysischer' en toonde meer toewijding. In het voorjaar van 1929 nam Ehrenfest hem mee naar Bohr voor de eerste van een serie Kopenhaagse conferenties. Op Bohrs uitnodiging verbleef hij het grootste deel van de daaropvolgende twee jaar in Kopenhagen. Vanaf september 1931 werkte hij als assistent van Ehrenfest. Twee maanden later promoveerde hij op een kwantummechanische behandeling van de rotatie van een vast lichaam.

In juni 1932 stuurde Ehrenfest hem voor zes weken naar Lise Meitners Berlijnse instituut, een van de voornaamste centra voor de toen opgang makende kernfysica. In Berlijn ontving hij een uitnodiging van Pauli voor een assistentschap in Zürich, waar hij meer dan een jaar zou doorbrengen. In september keerde hij terug naar Leiden, waar hij bleef tot zijn vertrek naar Philips in de oorlogsjaren.⁸²

Buitenlandse bezoekers

In Leiden was het een komen en gaan van buitenlandse coryfeeën die Ehrenfest kwamen bezoeken of op het colloquium kwamen spreken. Maar zijn reputatie als leraar bracht tevens een groot aantal jonge buitenlanders ertoe enige tijd in Leiden te werken. Onder hen bevonden zich later beroemd geworden fysici als Fermi, Tamm, Oskar Klein, Elzasser en Oppenheimer. Voor Ehrenfest waren deze bezoekers van het grootste belang. Niet alleen omdat hij zelf een voortdurende prikkel nodig had om tot resultaten te komen, maar vooral vanwege de

⁷⁹ Voor Krans zie *Wie is dat?* ('s-Gravenhage, 1956); Casimir, *Haphazard reality*, 79-81.

⁸⁰ A.J. Rutgers, *Bijdrage tot de theorie der thermo-electriciteit in kristallen* (Amsterdam, 1930) vi-vii; Casimir, *Haphazard reality*, 79-81.

⁸¹ Dresden, *H.A.Kramers*, 113.

⁸² Casimir, *Haphazard reality*, 127-149.

stimulerende invloed op zijn Leidse leerlingen. De bezoekers speelden een belangrijke rol in de onderzoekscultuur die Ehrenfest in Leiden wilde bewerkstelligen. Dit laatste klemde des te meer naarmate hij zelf zijn greep op de ontwikkelingen binnen de natuurkunde geleidelijk aan verloor. Zoals we hebben gezien beet de Rus Krutkow in 1913 het spits af. Ook in de periode na de oorlog werkte Ehrenfest samen met jonge fysici van Oost-Europese origine. De naoorlogse situatie voor jonge theoretici was uiterst moeilijk. Banen waren schaars en Ehrenfest gebruikte de Leidse assistentenpositie zoveel mogelijk ter ondersteuning van jeugdig talent. Tussen 1919 en 1921 werkten achtereenvolgens Viktor Trkal, Paul Epstein en Georg Breit als assistent in Leiden. De samenwerking met Ehrenfest resulteerde in elk van deze gevallen in een gezamenlijke publicatie.

Trkal was een kort daarvoor in Praag gepromoveerde Tsjech, die na zijn verblijf in Leiden een carrière zou opbouwen als theoretisch fysicus in Praag. Epstein was een Pool die tijdens zijn studietijd in Rusland met Ehrenfest bevriend was geraakt. Als assistent van Sommerfeld leverde hij tijdens de oorlog belangrijke bijdragen aan de verdere ontwikkeling van het atoommodel van Bohr. Ondanks zijn groeiende reputatie slaagde hij er na de oorlog niet in om een positie in Duitsland in de wacht te slepen. Zijn gecombineerde Poolse én joodse achtergrond speelde hem hierbij parten. In 1920 kwam hij naar Leiden, waar hij enige tijd werkte als assistent en vervanger van Ehrenfest. Mede door bemiddeling van Lorentz kreeg hij vervolgens een aanstelling in Pasadena, waar hij de rest van zijn leven zou blijven. Breit, tenslotte, was tijdens de oorlog uit Rusland naar de VS geëmigreerd. Na zijn studie aan de Johns Hopkins universiteit, kwam hij naar Leiden met een beurs van de National Research Council. In 1921 keerde hij terug om zijn loopbaan als fysicus in de VS voort te zetten.⁸³

Fermi bezocht Leiden in het najaar van 1924 met een beurs van de International Education Board. Ehrenfest was eerder onder de indruk geraakt van een publicatie van Fermi op het gebied der statistische mechanica en had om die redenen Uhlenbeck op Fermi geattendeerd. Voor Fermi was het verblijf in Leiden een inspirerende ervaring. Ehrenfests expliciete waardering voor Fermi's werk bezorgde de jonge en enigszins onzekere Italiaan het door hem benodigde zelfvertrouwen.⁸⁴

Ralph de Laer Kronig, de volgende bezoeker, had Ehrenfest in 1924 tijdens diens rondreis in Amerika ontmoet. Op advies van Ehrenfest reisde hij het jaar daarop naar Europa, met financiële ondersteuning in de vorm van een Behr-Cutting Fellowship. Gedurende zijn rondreis langs enkele belangrijke Europese centra bracht hij tevens enige tijd in Leiden door. Ook hij plukte de vruchten van zijn Leidse verblijf. Samen met Goudsmit publiceerde hij een artikel over

⁸³ Voor Trkal, zie *Poggendorfs biographisch-literarisches Handwörterbuch* 7b, Teil 8; voor Epstein, zie *Dictionary of Scientific Biography* vol. 17; en voor Breit, *American Men of Science* (9th edition), vol. I: *The physical sciences*.

⁸⁴ E. Segrè, *Enrico Fermi: Physicist* (Chicago, 1970) 34, 36.

de intensiteiten van de Zeeman-componenten van de spectraallijnen.⁸⁵ Onafhankelijk van Uhlenbeck en Goudsmit opperde ook hij kort daarop het idee van een roterend elektron. Later zou hij zich, na enkele jaren in Londen, voorgoed in Nederland vestigen. Na een langdurig lectoraat in Groningen werd hij in 1939 benoemd tot hoogleraar in de theoretische natuurkunde in Delft.

In 1926 bezocht de Zweedse fysicus Oskar Klein, een voormalig medewerker van Bohr, Leiden als eerste gast van het Lorentzfonds. Dit fonds, waarvan het curatorium bestond uit Lorentz, Ehrenfest, Zeeman en Fokker, werd deels bestemd voor het intensiveren van internationale contacten. Kleins pionierswerk aan een vijfdimensionale generalisatie van Einsteins algemene relativiteitstheorie zou Ehrenfest en Uhlenbeck inspireren tot eigen onderzoek op dit gebied.⁸⁶

Desastreus verliep het Leidse verblijf van de uit Göttingen afkomstige Walter Elzasser, die in 1927 Uhlenbeck opvolgde als assistent van Ehrenfest. Onverenigbaarheid van karakters resulteerde al spoedig in een uiterst vijandige bejegening door Ehrenfest. Na enkele weken kwam het tot een uitbarsting, gevolgd door het overhaaste vertrek van Elzasser. In zijn latere autobiografie zou Elzasser enkele bittere passages wijden aan zijn ervaringen met Ehrenfest.⁸⁷

In januari 1928 kwam de latere Nobelprijswinnaar Igor Tamm voor enkele maanden naar Leiden, eveneens met financiële ondersteuning van het Lorentz-fonds. De Rus Tamm voerde Ehrenfest en diens leerlingen in in de geheimen van het werk van Dirac en de later in Leiden gearriveerde Dirac zelf in de kunst van het fietsen. Ehrenfest beschouwde Tamm als een van de grootste talenten in de theoretische fysica. Hij schreef Joffe zelfs in Tamm een ideale opvolger te zien.⁸⁸

Met Oppenheimer wist Ehrenfest zich minder goed raad. De jonge Amerikaan bracht het najaar van 1928 op verzoek van Ehrenfest door in Leiden, daartoe in de gelegenheid gesteld door een NRC-fellowship. Daarvoor had hij al twee keer een kort bezoek gebracht aan Ehrenfest, die hij in het voorjaar van 1926 in Cambridge had leren kennen. Inmiddels was de situatie in Leiden echter drastisch veranderd. Goudsmit en Uhlenbeck, met wie Oppenheimer bevriend was geraakt, waren weg en Ehrenfest ging steeds meer gebukt onder depressies. Daarbij kwam dat Oppenheimers formalistische benadering van de kwantumtheorie niet of nauwelijks aansloot bij Ehrenfests meer fundamentele belangstelling. Na enkele maanden besloot Ehrenfest dat hij de intelligente en creatieve, maar in zijn ogen nogal slordige Oppenheimer weinig te bieden had, waarop hij hem doorstuurde naar Pauli in Zürich.⁸⁹

⁸⁵ R. Kronig, 'The turning point', in M. Fierz & V. Weisskopf, *Theoretical physics in the twentieth century: A memorial volume to Wolfgang Pauli* (New York, 1960) 17-18.

⁸⁶ Voor Klein, zie *Dictionary of Scientific Biography*, vol. 17.

⁸⁷ W.M. Elsasser, *Memoirs of a physicist in the atomic age* (New York, 1978) 82-92. Zie ook Casimir, *Haphazard reality*, 78-79.

⁸⁸ Ehrenfest aan Joffe, 13-4-1928, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 1.

⁸⁹ A.K. Smith & C. Weiner, *Robert Oppenheimer: Letters and Recollections* (Cambridge (Mass.), 1980) 96-97, 107, 117, 121-123.

Na Oppenheimer stakte de stroom gastmedewerkers. In 1930 inviteerde Ehrenfest de Russische fysicus Fock, een expert op het gebied van de kwantumveldentheorie, om op kosten van het Lorentzfonds naar Leiden te komen. Maar de tijd verstreek en Fock kwam maar niet. Daarbij liet hij ook nog zo weinig van zich horen, dat Ehrenfest herhaaldelijk in woede uitbarstte over Fock die 'wieder in die bodenlose Schlamperei des nicht-Briefschreibens verfallen ist, die die Zusammenarbeit zwischen holländischen und russischen Physikern so gut wie unmöglich machen droht.' Het is wellicht tekenend voor de teruglopende reputatie van Ehrenfests instituut, dat halverwege de jaren twintig nog bruiste van de activiteit.⁹⁰

Ehrenfests laatste jaren

Werd Ehrenfest zijn leven lang geplaagd door gevoelens van onzekerheid over zijn onderzoeksprestaties, na 1926 golden zijn twijfels tevens zijn betekenis als leraar. Niet alleen voelde hij zich niet langer in staat om nog belangwekkende bijdragen te leveren aan de kwantumtheorie, zelfs het bijhouden van de snelle en chaotische ontwikkelingen lukte hem naar eigen zeggen niet meer. De nieuwe theorieën hadden een veel hoger abstractieniveau dan de oude kwantumtheorie van Bohr. Alle aanschouwelijkheid had plaats gemaakt voor complexe operaties met exotische wiskundige symbolen en objecten.

Waar veel oudere fysici de nieuwe ontwikkelingen zo veel mogelijk negeerden, werd Ehrenfest er bij vlagen door tot wanhoop gebracht. In 1928 bekende hij in een brief aan Kramers het spoor volledig bijster te zijn.⁹¹ Aan Joffe schreef hij zich te voelen als een hond die, inmiddels volledig uitgeput, achter een tram aan holt waarin zich zijn baas bevindt. 'Wie haesslich ist allein schon die mathematische Pest in die die ganze theoretisch-physikalische Litteratur ertrunken ist.'⁹² Voordurend bestookte hij medefysici, met name Kramers en Pauli, met verzoeken om opheldering. In een enkel geval gebeurde dat zelfs publiekelijk, zoals in zijn in het *Zeitschrift für Physik* gepubliceerde 'Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen'. De positieve reacties van Schrödinger en Pauli op dit artikel gaven hem overigens veel bevrediging.⁹³

Veelal benutte Ehrenfest de veelvuldige bezoeken van buitenlandse experts om zowel zichzelf als zijn leerlingen bij te scholen. Tegelijkertijd werden deze bezoeken hem steeds meer tot een plaag. Hij voelde zich vaak gedwongen om gesprekken aan te gaan over zaken die zijn uitgeputte, door depressies geteisterde verstand te boven gingen. Om aan deze bezoekers te

⁹⁰ Ehrenfest aan Joffe, 23-2-1931, APE, inv.nr. esc:6, sectie 2.

⁹¹ Ehrenfest aan Kramers, 28-8-1928, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 9.

⁹² Ehrenfest aan Joffe, 28-4-1928 en 2-6-1928, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 1.

⁹³ Ehrenfest aan Joffe, 3-11-1932, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

ontsnappen nam hij soms zijn toevlucht tot doelloze reizen door Europa, meestal begeleid door een jonge fysicus die bereid was gevonden als reisgezel te dienen.⁹⁴

Ehrenfests problemen werden in deze tijd nog versterkt door het wegvallen van de in 1928 overleden Lorentz en de geleidelijke verwijdering van zijn echtgenote. Deze bevond zich tijdens de laatste jaren van Ehrenfests leven veelvuldig in de Sovjet-Unie. Zij probeerde haar opvattingen over het wiskunde-onderwijs dienstbaar te maken aan de opbouw van de jonge sovjet-republieken. De verwijdering was niet louter geografisch. In 1932 kwamen beide echtelieden overeen hun huwelijk te ontbinden, een voornemen dat echter niet meer is uitgevoerd.⁹⁵

Ehrenfest zelf, geheel levensmoe, hunkerde ernaar zijn Leidse baan op te zeggen, en zelfs zijn 'nutteloze' leven te beëindigen. Wat hem naar eigen zeggen daarvan weerhield was bovenal het feit dat zijn kinderen afhankelijk waren van zijn inkomen. De meeste zorgen baarde hem zijn jongste, mongoloïde zoon Vassik, die in de jaren twintig in een kliniek in Jena was ondergebracht. Ehrenfest wilde voorkomen dat zijn overige drie kinderen belast zouden worden met de zorg voor Vassik.⁹⁶

Geldzorgen vormden daarnaast een voortdurende plaag voor Ehrenfest. Hij zocht steeds naar manieren om zijn hoogleraarsinkomen aan te vullen, zoals het afnemen van door hem verafschuwde examens en het houden van populaire voordrachten. Ehrenfest was een veel gevraagd spreker, mede door zijn geestige en boeiende voordracht. Hij hield tal van lezingen voor genootschappen, waarin hij probeerde zijn gehoor inzicht te verschaffen in de nieuwste ontwikkelingen binnen de fysica. Deze betroffen uiteraard doorgaans de relativiteitstheorie en vooral de kwantumtheorie.

Vijf voordrachten over de kwantumtheorie, gehouden voor de Haagse maatschappij *Diligentia* en bewerkt door Dieke, verschenen in 1924 in druk onder de titel *Theorie der quanta en atoombouw*. Een tweede reeks lezingen voor hetzelfde genootschap kwam in 1932 uit als *Golfmechanika*, dit keer door toedoen van Casimir. Veel genoeg beleefde Ehrenfest overigens niet aan deze optredens. Zo schreef hij Lorentz in 1927 deze populaire voordrachten te haten en ze enkel uit financiële nood te houden. Rechtlĳnig als hij was meende hij hierdoor tevens verplicht te zijn ook voor niet betalende toehoorders te spreken.⁹⁷

Ook tijdens zijn laatste levensjaren bracht Ehrenfest veel tijd door in het buitenland. De winter van 1929-1930 was hij in Rusland en in juni daaropvolgend vertrok hij wederom naar het Amerikaanse continent. Op uitnodiging van zijn voormalige leerlingen nam hij deel aan de zomerschool te Ann Arbor om vervolgens door te reizen naar zijn geliefde Californië, waar hij de winter doorbracht. Hij speelde sterk met de gedachte een positie in Amerika te accepteren en

⁹⁴ Ehrenfest aan Joffe, 5-5-1928 en 2-6-1928, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 1.

⁹⁵ Zie ook Einstein, 'Paul Ehrenfest in memoriam', in: *Out of my later years* (Westport, 1970) 239.

⁹⁶ Ehrenfest aan Joffe, 8-7-1933, 2-6-1928 en 4-3-1930, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

⁹⁷ Ehrenfest aan Lorentz, 25-5-1927, APE, inv.nr. esc: 7, sectie 9.

probeerde aan Kramers de toezegging te ontworstelen hem in dat geval in Leiden op te zullen volgen.⁹⁸

Terug in Nederland richtte hij zich op de mogelijkheden in de Sovjet-Unie, waar diverse onderzoeksinstituten werden opgericht. Ehrenfest hoopte een rol te kunnen spelen in het onderwijs in dergelijke organisaties en in het bevorderen van onderlinge contacten. Zijn voorafgaand bezoek aan Rusland hing deels samen met een uitnodiging van Joffe om advies te geven inzake de organisatie van het Russische onderwijs in de theoretische natuurkunde.⁹⁹

In de zomer van 1931 bezocht hij Joffe in Parijs tijdens een lange rondreis door Europa in gezelschap van Dieke. Hij nam zich kort daarop voor om het volgende jaar naar Rusland te reizen om zich te oriënteren op de mogelijkheden aldaar. Zijn streven was in het najaar van 1933 in Rusland een nieuw bestaan op te bouwen. Joffe, die inmiddels een vooraanstaande positie in de Russische wetenschappelijke wereld bekleedde, had goede hoop om de wens van zijn vriend te kunnen inwilligen.¹⁰⁰

In december 1932 reisde Ehrenfest inderdaad naar Rusland, maar van een Russische aanstelling kwam niets terecht. Joffe probeerde Ehrenfest ertoe te bewegen een positie te accepteren in Leningrad, Moskou, Kiev of Charkow, maar dat aanbod wees Ehrenfest categorisch af. Naar zijn idee bevonden zich daar reeds theoretische fysici met wie hij zich niet kon meten.¹⁰¹ Daarmee leek Ehrenfests lot min of meer beslist. Tijdens de voorafgaande zomer had hij zijn beste vrienden, onder wie Bohr, Einstein, Herglotz, Joffe en Kohnstamm, een (nooit verzonden) afscheidsbrief geschreven waarin hij aangaf in zelfmoord het enige alternatief voor een toekomst in Rusland te zien. Het was in deze tijd dat Einstein contact opnam met Idenburg.¹⁰²

In het daarop volgende voorjaar werd de fysische gemeenschap volledig in beslag genomen door de politieke ontwikkelingen in Duitsland. Het nieuwe Nazi-bewind zuiverde in hoog tempo de Duitse universiteiten van joodse medewerkers. Fysici in West-Europa spanden zich in hun ontslagen collega's elders onder te brengen. Ook Ehrenfest zette zich in voor zijn Duitse vakgenoten. Maar deze nieuwe taak vermocht, naar eigen zeggen, zijn depressies niet te verdrijven.¹⁰³

Toch toonde hij in juli 1933 een kleine opleving. Hij ontwikkelde zelfs plannen om met hulp van Casimir het Leidse onderwijs weer op gang te brengen en zo mogelijk zelfs weer wat onderzoek te doen.¹⁰⁴ In augustus bracht hij enige dagen door op Schiermonnikoog en in september was hij korte tijd in Kopenhagen.

⁹⁸ Kramers aan Ehrenfest, 23-1-1931, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 9.

⁹⁹ Ehrenfest aan Joffe, 12-3-1929, 24-12-1931 en 24-8-1932, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

¹⁰⁰ Joffe aan Ehrenfest, 14-10-1932, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

¹⁰¹ A.F. Joffe, *Begegnungen mit Physikern* (Leipzig, 1967) 47.

¹⁰² Pais, *Niels Bohr's times*, 409-410.

¹⁰³ Ehrenfest aan Joffe, 12-5-1933, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

¹⁰⁴ Ehrenfest aan Joffe, 8-7-1933, APE, inv.nr. esc: 6, sectie 3.

Maar van een werkelijke verbetering was geen sprake. In Kopenhagen maakte hij bij zijn vertrek een uiterst geagiteerde indruk. Dirac herinnerde zich achteraf een directe zinspeling op een spoedig levenseinde. Terug in Nederland begaf hij zich op 25 september naar het Professor Wateringinstituut in Amsterdam waar Vassik sinds een maand behandeld werd. De eindeloos doordachte details van zijn fatale voornemen werden nu vastberaden ten uitvoer gebracht. Na een uur samen te hebben doorgebracht in de wachtkamer van het instituut schoot hij eerst zijn zoon en vervolgens zichzelf door het hoofd.¹⁰⁵ Daarmee kwam een einde aan een lange en slepende lijdensweg.

Besluit

Als fysicus behoorde Ehrenfest niet tot de absolute top, maar lange tijd kon hij zich direct daaronder scharen. Zijn belangrijkste wapenfeiten als onderzoeker waren het samen met zijn vrouw geschreven *Enzyklopädie*-artikel over de statistische mechanica en zijn adiabatisch principe. Daarnaast publiceerde hij een groot aantal verdienstelijke artikelen, al dan niet in samenwerking met anderen. Ook vervulde hij volgens menigeen een belangrijke rol als kritisch commentator. Vlak voor zijn dood benadrukte Dirac hoe waardevol zijn bijdragen aan congressen en symposia gevonden werden. Dit alles was niet voldoende om zijn voortdurende gevoel van ontoereikendheid weg te nemen. Hij kon niet anders dan zich voortdurend meten aan zijn meer succesvolle vakgenoten.

Ongeëvenaard daarentegen was hij als docent. Zijn betekenis als zodanig valt nauwelijks te overschatten. Het was bovenal Ehrenfest die de moderne fysica in Nederland introduceerde, zowel binnen de academische wereld als onder het brede publiek. In Amsterdam, Groningen, Utrecht en Delft werden studenten lange tijd niet of nauwelijks geconfronteerd met de relativiteits- en kwantumtheorieën. Als een moderne Mozes leidde Ehrenfest zijn volgelingen naar het beloofde land der moderne fysica, een gebied dat hij naar eigen gevoelens zelf nooit ten volle zou betreden.

Na Ehrenfests dood werden vier van de nog altijd schaarse natuurkunde-leerstoelen in Nederland bezet door zijn leerlingen: Coster in Groningen, Burgers in Delft, Kramers in Leiden en Uhlenbeck in Utrecht. Evenzeer van zijn betekenis als leraar getuigen de Gentse leerstoel van Rutgers, de Amerikaanse van Dieke en Goudsmit, Tinbergens Rotterdamse leerstoel en Casimirs latere hoogleraarschap in Leiden, gecombineerd met het directoraat over het Philips natuurkundig laboratorium.

Meer nog dan Lorentz zorgde Ehrenfest voor de invlechting van de Leidse natuurkunde in een internationaal netwerk. Daarbij richtte hij zich niet enkel op de voornaamste West- en Midden-Europese centra, maar tevens op Oost-Europa en de Verenigde Staten. Talloze jonge natuurkundigen in binnen- en buitenland hebben kunnen profiteren van Ehrenfests connecties

¹⁰⁵ Pais, *Niels Bohr's times*, 410.

en zijn voortdurende bereidheid jong talent vooruit te helpen. De onophoudelijke stroom van buitenlandse bezoekers aan Ehrenfests instituut heeft geresulteerd in een passend monument. Gastsprekers op het Leidse colloquium werden geacht hun handtekening te plaatsen op een van de muren van de colloquiumzaal. Het betreffende stuk muur is inmiddels al twee keer meeverhuisd met de Leidse theoretici. De traditie wordt tot op de dag van vandaag in ere gehouden. Het is een van de redenen dat gereputeerde wetenschappers graag een uitnodiging aanvaarden om op het Leidse Ehrenfestcolloquium te spreken.