

# Ehrenfest en Einstein

## Menselijke katalysator van het heldere denken

MARIJN J. HOLLESTELLE\*

### ABSTRACT

#### *Ehrenfest and Einstein*

Ehrenfest and Einstein met just before Ehrenfest became professor at Leiden University. They had much in common and became best friends. Ehrenfest shed light on some problematic aspects of Einstein's work and during the years acted as an important sparring partner for Einstein. Ehrenfest also explained difficult aspects of Einstein's work to the physics community. He set others on the track of working on general relativity and made Leiden an international centre for these developments during the years 1912–1920. Ehrenfest made sure Einstein was appointed part-time professor at Leiden, from which Leiden physics profited. He also aided Bohr and Einstein during their notorious debates. Ehrenfest struggled with depression his whole life. The rapid developments and mathematicising of quantum physics, Hitler's appointment as Reichs Chancellor, money and marriage problems worsened his depressions. In 1933 Ehrenfest committed suicide, and Einstein moved to the United States and away from the study on quantum physics.

*Keywords:* Ehrenfest; Einstein; physics

#### *Ehrenfest ontmoet Einstein'*

Op 23 februari 1912 vond een bijzondere ontmoeting plaats op het station van Praag. Paul Ehrenfest, een gerenommeerde maar werkloze Oostenrijkse fysicus, werd door Albert

\* Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO), Cluster Chemische & Exacte Wetenschappen, Den Haag. E-mail: m.hollestelle@nwo.nl. Ik bedank de redactie, Dirk van Delft en een referent voor hun bijstand en hun nuttige commentaar.

1 Dit artikel leunt voor een belangrijk deel op mijn proefschrift: M.J. Hollestelle, *Paul Ehrenfest. Worstelingen met de moderne wetenschap, 1912–1933* (Leiden 2011. Online via <https://openaccess.leidenuniv.nl>). Daarbij heb ik veelvuldig gebruik gemaakt van het Archief Paul Ehrenfest van het Museum Boerhaave (verder aangeduid als APE). Over Einstein en Ehrenfest, of Einstein in Leiden, is onder meer geschreven in: M.J. Klein, 'Paul Ehrenfest, Niels Bohr, and Albert Einstein: Colleagues and Friends', in: *Physics in Perspective* 12 (2010) 307–337; D. van Delft, 'Albert Einstein in Leiden', *Physics Today* 59 (2006) 57–62; S.I. Rispens, *Einstein in Nederland. Een intellectuele biografie* (Amsterdam 2006). Belanghebbende publicaties op het terrein van Einstein zijn onder meer: A. Pais, *Subtle is the Lord. The science and the life of Albert Einstein* (eerste druk 1982; Oxford 2005); W. Isaacson, *Einstein. His life and universe* (New York 2007). In dit artikel wordt verwezen naar *The Collected Papers of Albert Einstein*, hieronder verder aangehaald als CPAE, die sinds 1987 worden uitgebracht bij Princeton University Press. Met

Einstein van de trein gehaald. De twee ontmoetten elkaar die dag voor het eerst. Vrijwel vanaf het eerste moment dat ze met elkaar spraken vormde zich een warme band tussen de twee. Ze vulden de dagen van Ehrenfests bezoek met gezamenlijk musiceren, lange wandelingen en even zo lange gesprekken en geanimeerde discussies over de brandende kwesties in de natuurkunde. Einstein vond in Ehrenfest een waardige sparringpartner voor zijn ideeën. Hij zou over hun ontmoeting schrijven: ‘Nach wenigen Stunden waren wir wirkliche Freunde – Menschen, die durch ihr Streben und Sehnen wie für einander geschaffen waren.’<sup>2</sup> De vriendschap bleef de rest van Ehrenfests leven zeer hecht. Ze hadden dan ook veel met elkaar gemeen: ze waren even oud, beiden Joods, deelden een sterke liefde voor muziek, hadden een kosmopolitische blik op de wereld, een scherp gevoel voor recht en onrecht, en waren beiden bezeten door de theoretische natuurkunde.

Later datzelfde jaar werd Ehrenfest als hoogleraar aangesteld in Leiden (fig. 1). Hiermee werd niet alleen de band tussen Einstein en Ehrenfest sterker, maar ook die tussen Einstein en Nederland. Hendrik Antoon Lorentz had al een groot internationaal netwerk, maar spande zich veel minder in om buitenlanders naar Leiden te halen. Na Ehrenfests komst kwamen buitenlandse fysici zeer regelmatig op bezoek en groeide Leiden uit tot een centrum van de quantumfysica waar de allernieuwste ontwikkelingen in de theoretische fysica werden bediscussieerd, met Ehrenfest als charismatisch middelpunt. Samen met het op het buitenland georiënteerde experimentele laboratorium onder leiding van Heike Kamerlingh Onnes en diens opvolgers Wander Johannes de Haas en Willem Hendrik Keesom, werd Leiden zo een snelkookpan voor de internationale wetenschap.<sup>3</sup> Ehrenfest leidde een aantal zeer verdienstelijke onderzoekers op, die bijna allemaal hoogleraar werden. Hij zorgde anders dan zijn voorganger Lorentz voor de ontwikkeling van een eigen onderzoeksschool. Zijn nauwe band met Einstein was hierbij van groot belang.

### *Paul Ehrenfest: de weg naar Leiden*

Paul Ehrenfest werd op 18 januari 1880 geboren te Wenen – toen nog onderdeel van de Oostenrijks-Hongaarse dubbelmonarchie.<sup>4</sup> Zijn ouders waren seculiere joden die vanuit een kleine joodse gemeenschap in Moravië verhuisd waren naar de arbeidersbuurt *Favoriten* in Wenen.<sup>5</sup> Daar kreeg de gevoelige Paul al snel te maken met het alomtegenwoordige antisemitisme.<sup>6</sup>

Zijn moeder overleed toen hij nog maar tien jaar oud was, zijn vader toen hij zestien jaar oud was. Het lijkt erop dat Ehrenfest al na het overlijden van zijn moeder depressieve

betrekking tot Ehrenfest: M.J. Klein, *Paul Ehrenfest*, vol. 1: *The making of a theoretical physicist* (Amsterdam 1970); M.J. Hollestelle, *Paul Ehrenfest. Worstelingen met de moderne wetenschap, 1912–1933* (Leiden 2011); D. van Delft, ‘Paul Ehrenfest’s final years’, *Physics Today* 67 (2014) 41–47; niet gepubliceerd maar daardoor niet minder belangrijk is het pionierende artikel van F.H. van Lunteren, ‘Paul Ehrenfest: de Leidse onderzoeksschool van een fysicus in diaspora’ (2003); F.H. van Lunteren & M.J. Hollestelle, ‘Paul Ehrenfest and the dilemmas of modernity’, *ISIS* 104 (2013) 504–536.

2 Albert Einstein, ‘Nachruf Paul Ehrenfest’, *Almanak van het Leidsche Studenten-Corps* (Leiden 1934) 94–97.

3 Zie hierover: D. van Delft, *Heike Kamerlingh Onnes. Een biografie* (Amsterdam 2005).

4 De onderstaande beschrijving van de jaren tot 1912 leunt sterk op: Klein, *Ehrenfest* (n. 1) en niet minder op: P. Huijnen, ‘*Die Grenze des Pathologischen*’. *Het leven van fysicus Paul Ehrenfest 1904–1912*, doctoraalscriptie Rijksuniversiteit Groningen (2003); P. Huijnen & A.J. Kox, ‘Paul Ehrenfest’s Rough Road to Leiden: A Physicist’s Search for a Position, 1904–1912’, *Physics in Perspective* 9 (2007) 186–211.

5 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 17–32.

6 *Ibidem* 24–25.



Fig. 1: Paul Ehrenfest in Leiden, staand voor een kathedraal en ontspannend achter de vleugel. Informele schetsen, in 1920 gemaakt door Harm Kamerlingh Onnes, een neef van de fysicus Heike Kamerlingh Onnes. (Museum Boerhaave, Leiden)

trekken begon te vertonen. Ehrenfests biograaf Martin Klein schrijft: ‘He was often miserable, deeply depressed and at odds with himself and the world.’<sup>7</sup> In 1891 werd Paul toegelaten tot het Akademisches Gymnasium. Als gevolg van het verlies van zijn vader zakten zijn eerst zo veelbelovende schoolresultaten in. Op school kon de gevoelige en intelligente Paul op weinig begrip rekenen. Einstein zei later dat Ehrenfest in zijn jeugd had geleden onder ‘geistige Unterdrückung durch verständnislose und egozentrische Lehrer’, iets waar Einstein zelf ook last van had gehad.<sup>8</sup> Zijn broers brachten hem een fascinatie voor wiskunde en natuurkunde bij, wat hem uiteindelijk door een moeilijk schooljaar heen sleepte. Vanaf dat moment was natuurwetenschap voor Ehrenfest zijn baken van troost, zijn religie.

In 1899 begon Ehrenfest zijn studie aan de *Technische Hochschule* en, kort daarop, ook aan de universiteit van Wenen. Onder invloed van de beroemde Ludwig Boltzmann raakte Ehrenfest in de ban van de theoretische fysica. In 1901 vertrok Ehrenfest voor anderhalf jaar naar Göttingen om daar colleges te volgen. Daar kwam hij onder de indruk van de kosmopolitische sfeer die er hing, de losse omgangsvormen met de hoogleraren, en het intellectuele klimaat dat er heerste. Hij leerde hier ook zijn toekomstige vrouw Tatiana Afanassjewa kennen, een Russische wiskundige. Tussendoor bezocht Ehrenfest Leiden en bleef er een maand om de colleges van Hendrik Antoon Lorentz te volgen, op dat moment de meest gerespecteerde natuurkundige ter wereld. In 1904 promoveerde Ehrenfest en kort daarop trouwde hij met Tatiana. Omdat het huwelijk tussen twee verschillende geloven in Wenen niet was toegestaan, verklaarden ze onkerkelijk te zijn. Ehrenfest kon niet direct een plek vinden waar hij een *habilitation* kon schrijven, en toen Tatiana een baan als onderwijzeres kon krijgen in Rusland verhuisde het echtpaar in 1907 naar Sint-Petersburg.

<sup>7</sup> Ibidem 17–32; citaat pagina 34; Huijnen & Kox, ‘Ehrenfest’s Rough Road’ (n. 4) 186–211.

<sup>8</sup> Einstein, ‘Nachruf’ (n. 2) 96.

*Onduidelijkheden rond Einsteins nieuwe theorie*

Inmiddels had Einstein in 1905 een belangrijke ontdekking gedaan, al was dit nog niet tot de doorgedrongen tot de natuurkundige gemeenschap. Einstein had net als Ehrenfest een voorliefde voor de grondslagen van de natuurkunde. Door na te denken over de grondslagen van de bestaande elektromagnetische theorie kon Einstein laten zien dat deze tot een vreemde asymmetrie leidde in de beschrijving van bewegende magneten en geleiders. Volgens de toen geldende theorie geeft een bewegende magneet aanleiding tot een elektrisch veld in de buurt van de magneet. Indien zich in dit elektrische veld een geleider bevindt gaat er in die geleider een stroom lopen. Is de magneet in rust en wordt de geleider door het magneetveld bewogen dan ontstaat er volgens de gangbare theorie geen elektrisch veld maar wel een stroom in de geleider. Dezelfde verschijnselen worden dus anders beschreven. Op basis van deze inzichten publiceerde Einstein in 1905 zijn speciale relativiteitstheorie. Het was niet meteen duidelijk of en in hoeverre deze theorie verschilde van Lorentz' elektronentheorie. Daar kwam bij dat Einstein niet altijd even duidelijk was.<sup>9</sup> Wat in ieder geval in beide theorieën problematisch was, was de gedeelde aanname dat bewegende elektronen konden deformeren. Ehrenfest had Einsteins werk gelezen en schreef in 1907 een tweetal kritische artikelen over de deformatie van elektronen, die een reactie van Einstein uitlokten.<sup>10</sup> In 1909 volgde Ehrenfest met een ander kritisch artikel, waarin hij liet zien dat de theorie van Einstein een opvallende paradox opleverde.<sup>11</sup> Ehrenfest beschouwde een cilinder met een eenparige rotatie om zijn as. Ieder element op de rand van een draaiende cilinder bezit een momentane snelheid loodrecht op de straal van de cilinder en zou dus contraheren in transversale richting. De totale omtrek van de cilinder neemt af. In radiale richting is er geen beweging, en er is dan ook geen Lorentzcontractie van cilinderelementen langs de straal van de cilinder. De straal zal dus niet afnemen. Dat was echter in tegenspraak met de vaste verhouding tussen cirkelomtrek en straal. Deze opmerkelijke paradox werd al snel de 'Ehrenfestparadox' genoemd.<sup>12</sup>

Ehrenfests kraakheldere artikel was maar één pagina lang en bevatte vrijwel geen wetenschap. Hij legde hiermee enkele problemen in de relativiteitstheorie bloot, en lokte diverse reacties uit. Die varieerden van mogelijke oplossingen van de paradox, tot afwijzingen van de gehele relativiteitstheorie.<sup>13</sup> Heersend onbegrip rond Einsteins theorie werd aldus aan

- 9 De volgende paragraaf leunt zwaar op Klein, *Ehrenfest* (n. 1) en op: A.I. Miller, *Albert Einstein's special theory of relativity: Emergence (1905) and early interpretation (1905–1911)* (Reading 1981). Zie voor Ehrenfests rol in het onderzoek naar elektronen, de relativiteitstheorie en relativistische deformatieverschijnselen: R. Staley, *Einstein's generation. The origins of the relativity revolution* (Chicago/London 2008) 260–293.
- 10 M. Abraham, 'Prinzipien der Dynamik des Elektrons', *Annalen der Physik* 10 (1903) 105–179; P. Ehrenfest, 'Zur Stabilitätsfrage bei den Bucherer-Langevin-Elektronen', *Physikalische Zeitschrift* 7 (1906) 302–303; P. Ehrenfest, 'Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz', *Annalen der Physik* 23 (1907) 204–205; A. Einstein, 'Bemerkungen zu der Notiz von Hrn. Paul Ehrenfest: Die Translation deformierbarer Elektronen und der Flächensatz', *Annalen der Physik* 23 (1907) 206–208.
- 11 P. Ehrenfest, 'Gleichförmige Rotation starrer Körper und Relativitätstheorie', *Physikalische Zeitschrift* 10 (1909) 918. Zie hierover tevens: M.J. Hollestelle, 'Honderd jaar Ehrenfestparadox', *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 75 (2009) 316–318.
- 12 Vrijwel tegelijkertijd zagen Born en Einstein in dat een roterend star lichaam voor problemen zorgde: M. Born, 'Über die Definition des starren Körpers in der Kinematik des Relativitätsprinzips', *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 233–234; A. Einstein aan A. Sommerfeld, 29 september 1909; M. Eckert & K. Märker (red.), *Arnold Sommerfeld: Wissenschaftliche Briefwechsel Band 1: 1892–1918* (Berlin 2000) 362–363.
- 13 Born, 'Über die Definition des starren Körpers' (n. 12); M. Planck, 'Gleichförmige Rotation und Lorentz-Kontraktion', *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 294; M. Abraham, 'Die Bewegungsgleichungen eines Massenteilchens in der Relativtheorie', *Physikalische Zeitschrift* 11 (1910) 527–531.

het licht gebracht. Volgens een aantal fysici en wiskundigen zou Ehrenfests paradox slechts onderstrepen dat metingen aan bewegende lichamen in Einsteins theorie slechts 'schijnbare waarden' opleverden, veroorzaakt door de manier van klokkenregulering en lengtemeting in Einsteins theorie.<sup>14</sup> De Lorentzcontractie was volgens hen een subjectief, haast psychologisch fenomeen.

Ehrenfest reageerde met een aantal artikelen op Einsteins critici. Ook Einstein zelf mengde zich in de discussie. Dit luidde het begin in van de acceptatie van de relativiteitstheorie als een wezenlijke innovatie; na de toelichting van Ehrenfest en Einstein werd Einsteins theorie eindelijk gezien als fundamenteel verschillend van die van Lorentz. Dat dit onderscheid werd gemaakt was in grote mate te danken aan Ehrenfests scherpzinnige bijdragen.<sup>15</sup>

Ehrenfest zelf stond in eerste instantie zeer kritisch tegenover Einsteins relativiteitstheorie. Maar, zoals de Duitse fysicus Max Born aan Ehrenfest schreef, Einstein was zelf voor een belangrijk deel mede debet aan het feit dat zijn geniale idee bijna door wiskundige en fysische onduidelijkheden werd verduisterd. Born hoopte ondanks Ehrenfests scepsis tegenover het relativiteitsprincipe dat hij in Ehrenfest 'einen tapferen Bundesgenossen gewonnen zu haben im Kampfe gegen die Verworrenheit der Begriffe und die Unverfrorenheit der Hypothesen, die sich jetzt in der Physik bereit machen'.<sup>16</sup> Zoals hierboven aangetoond lukte dat inmiddels al behoorlijk, en de komende jaren zou Ehrenfests rol als bestrijder van verwarrend en onduidelijkheid nog belangrijker worden.

De Ehrenfestparadox werd overigens door Einstein zelf als hoogst problematisch gezien. De realisatie dat een waarnemer op de schijf de waargenomen effecten kan toeschrijven aan de schijnbare aanwezigheid van een gravitatieveld, zette Einstein op het spoor van de algemene relativiteitstheorie. De Ehrenfestparadox vormde zo een cruciale 'missing link' in Einsteins ontwikkeling van de algemene relativiteitstheorie.<sup>17</sup>

### *Ehrenfest op banenjacht*

Ehrenfests reactie op Einstein maakt meteen duidelijk waar Ehrenfests kracht lag, namelijk in het signaleren van onduidelijkheden in bestaande theorieën. Ondertussen had Ehrenfest zich gericht op het schrijven van een omvangrijk overzichtsartikel, waarmee hij voor eens en voor altijd duidelijkheid zou scheppen in het tot dan toe nogal onoverzichtelijke, maar belangrijke werk van zijn leermeester Boltzmann, die in 1906 zelfmoord had gepleegd. Ondanks zijn scherpzinnige artikelen lukte het Ehrenfest niet om in Sint-Petersburg een positie aan de universiteit te krijgen. In Rusland hadden joden en buitenkerkelijken weinig kans op een vaste positie op een universiteit of hogeschool, en bovendien had Ehrenfest zichzelf onmogelijk gemaakt bij het universiteitsbestuur door kritiek te uiten op de wijze waarop examens werden

14 Zie bijvoorbeeld: G.N. Lewis & R.C. Tolman, 'The principle of relativity, and non-newtonian mechanics', *Philosophical Magazine* 18 (1909) 510–523; W. von Ignatowsky, 'Der starre Körper und das Relativitätsprinzip', *Annalen der Physik* 33 (1910) 607–630; Varičak, 'Zum Ehrenfest'schen Paradoxon', *Physikalische Zeitschrift* 12 (1911) 169–170. Ook fysici als Van der Waals jr waren deze mening toegedaan.

15 Miller, *Einstein's special theory of relativity* (n. 9) 253.

16 Born aan Ehrenfest, 5 juli 1909: APE: Ehrenfest Scientific Correspondence (hierna ESC) 1, sectie 9.

17 J. Stachel, 'The rigidly rotating disk as the "missing link" in the history of general relativity', in: D. Howard & J. Stachel (eds.), *Einstein Studies Vol 1: Einstein and the history of general relativity* (Boston, Basel, Berlin 1989) 48–62.

afgenomen. In 1905 was Ehrenfests eerste kind geboren, in juli 1910 volgde een tweede kind, waardoor er meer dan ooit behoefte kwam aan een tweede inkomen.<sup>18</sup>

Ehrenfest ging te rade bij zijn studievriend Hans Hahn, die een professoraat in de wiskunde had gekregen in Czernowitz, in het meest oostelijk gelegen deel van Oostenrijk-Hongarije. Maar deze liet in 1911 weten dat buitenkerkelijken – en joodse afstammelingen – een professoraat wel konden vergeten. Voor een privatdocentschap bij zijn vriend Gustav Herglotz te Leipzig diende hij in het bezit te zijn van een Duits doctoraat. De theoretisch fysicus Arnold Sommerfeld te München wilde liever zijn eigen leerlingen voor laten gaan bij een vacature voor het privatdocentschap.<sup>19</sup>

Op 19 januari 1912 vertrok Ehrenfest voor een reis van vier maanden langs de universiteiten van Duitsland, Oostenrijk-Hongarije en Zwitserland. Na bezoeken aan Berlijn en Leipzig ging hij voor een week naar Sommerfeld in München, waarna hij voor enkele dagen afreisde naar Zürich, om daarna door te reizen naar Wenen.<sup>20</sup> Na een kort bezoek aan Brünn (Brno) vertrok hij naar Einstein in Praag. Einstein, die daarvoor slechts kort contact had gehad met Ehrenfest, nodigde hem onmiddellijk uit om bij hem te logeren. Eenmaal in Praag sloten de twee al snel een hechte vriendschap. Einstein zou aan het eind van dat academisch jaar vertrekken naar Zürich, en hij stelde zelfs voor dat Ehrenfest zijn opvolger in Praag zou worden. De leerstoel werd hem bijna in de schoot geworpen.<sup>21</sup> Praag behoorde ook tot Oostenrijk-Hongarije, waardoor Ehrenfest wel een bepaalde geloofsrichting zou moeten opvoeren. Ondanks Einsteins geruststellingen dat het slechts een formaliteit betrof, weigerde Ehrenfest principieel. Na enkele bezoeken in Polen en Rusland keerde hij terug naar Sint-Petersburg. Daar schreef Einstein hem dat hij er alles aan zou doen om Ehrenfest op diens verzoek eventueel ook naar Zürich te halen als privatdocent. Hij droeg hem met lovende woorden voor als opvolger van Peter Debye.<sup>22</sup> Maar wederom wilde Ehrenfest vasthouden aan zijn buitenkerkelijkheid, waardoor hij de positie misliep. Een geïrriteerde Einstein schreef hem: 'Es wurmt mich geradezu, dass Sie den Spleen der Konfessionslosigkeit haben; lassen Sie ihn ihren Kindern zuliebe fallen.'<sup>23</sup> Ehrenfest besloot toen maar om zonder baan Einstein naar Zürich achterna te reizen.<sup>24</sup> Precies in deze tijd zou Ehrenfests leven radicaal veranderen.

Lorentz vond dat zijn onderwijstaken en organisatorische verplichtingen teveel tijd in beslag namen. Hij verplaatste zijn werkplek naar Haarlem, waar hij al curator van het *Fysisch Kabinet* van de Teylers Stichting was, liet zijn gewoon hoogleraarschap omzetten in een buitengewoon hoogleraarschap, en wilde zich daar weer op het onderzoek storten.<sup>25</sup> Al snel informeerde Lorentz de faculteit dat hij een vervanger voor zijn nu vacante leerstoel in Leiden op het oog had, namelijk de rijzende ster Einstein. Daar deze al in onderhandeling was met Zürich, was het volgens Lorentz zaak direct actie te ondernemen.<sup>26</sup> Einstein had echter toen al het aanbod uit Zürich geaccepteerd. Lorentz ging dus op zoek naar een andere kandidaat. Juist in deze tijd had

18 Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (n. 4) 58.

19 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 167; Debye aan Ehrenfest, 30 mei 1911: APE ESC 3, sectie 3.

20 Ibidem 171–174.

21 Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (n. 4) 81–82.

22 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 180.

23 Einstein aan Ehrenfest, 25 april 1912: CPAE 5, doc. nr. 384.

24 Huijnen, *Die Grenze des Pathologischen* (n. 4) 83.

25 Notulen Faculteitsvergadering 21 november 1911, UB Leiden, AFA FA, inv. nr. 12. Zie ook het artikel van Frits Berends in dit nummer van *Studium*.

26 Notulen Faculteitsvergadering 12 februari 1912, UB Leiden, AFA FA, inv. nr. 12.

Ehrenfest aan Lorentz een overdruk gestuurd van zijn in 1911 gereedgekomen en alom geprezen overzichtsartikel over het werk van Boltzmann. Ook Lorentz was er van onder de indruk; in april 1912 sprak hij zijn waardering uit voor het mooie werk van Ehrenfest.<sup>27</sup> Ehrenfest had zich beziggehouden met de statistische mechanica, relativiteitstheorie, thermodynamica en elektronentheorie. Ehrenfest was bovendien een van de weinige fysici die aan de nieuwe quantumtheorie werkte, naast enkelingen als Albert Einstein, Max Planck, James Jeans, Joseph Larmor, Henry Poincaré en Lorentz zelf.<sup>28</sup> Hij had dus niet alleen diepgang, maar was ook nog eens een breed ontwikkeld fysicus, en ook dat werd door Lorentz gewaardeerd. Lorentz deelde Ehrenfests oog voor de subtiliteiten en de grondslagen van de theoretische fysica.

Desgevraagd liet Sommerfeld aan Lorentz weten wat hij van Ehrenfest als docent vond: ‘Er trägt meisterhaft vor’. Ehrenfest was gevat, en maakte de wiskunde aanschouwelijk in pakkende beelden. En Einstein, zo had Sommerfeld gehoord, wil hem in Praag als zijn opvolger.<sup>29</sup> Lorentz wist genoeg, maar de bureaucratie werkte traag; pas op 29 september hoorde Ehrenfest dat hij zou worden aangesteld als opvolger van Lorentz.<sup>30</sup>

### *Vliegende start te Leiden*

In zijn oratie aan de Leidse universiteit sprak Ehrenfest niet over de opkomende quantumtheorie, maar over de theorieën van Lorentz en Einstein. De verschillen tussen de theorieën van Einstein en Lorentz werden nog maar net erkend, en Einstein was inmiddels hard bezig om de theorie uit te breiden van inertiaalstelsels naar stelsels met versnelde bewegingen. Ehrenfest had het relativiteitsprincipe inmiddels omarmd.

Het pleit was echter nog niet helemaal beslecht. Planck, Lorentz en Poincaré bleven kritisch ten opzichte van de speciale relativiteitstheorie. Ehrenfests vriend Walter Ritz had in de jaren 1908–1909 als alternatief voor de relativiteitstheorie een emissietheorie van het licht ontwikkeld. Hij verving daartoe de ether en Maxwells elektromagnetische velden door fictieve deeltjes die met de lichtsnelheid werden uitgezonden door elektrische ladingdragers. Ritz stierf echter in 1909. Ehrenfest schreef in 1912 een samenvattend artikel over de moeilijkheden die volgens Ritz optraden in de relativiteitstheorie.<sup>31</sup>

In dat jaar werden emissietheorieën als die van Ritz gezien als serieus alternatief voor Einsteins theorie. De enige manier om het pleit te beslechten was een experimentele toetsing, maar niemand wist hoe dat zou kunnen. Einstein maakte zich behoorlijk druk over de rivaliserende emissietheorie, zoals kan worden opgemaakt uit verscheidene brieven die tussen Ehrenfest en Einstein over en weer gingen. Onderwerp was het vinden van een methode om voor eens en voor altijd duidelijk te kunnen laten zien welke theorie de juiste was.<sup>32</sup>

In zijn oratie stelde Ehrenfest dat, wanneer een waarnemer de snelheid van licht afkomstig van een ten opzichte van de waarnemer rustende lichtbron A en een bewegende lichtbron B vergeleek, de theorie van Einstein en Lorentz voorspelde dat in beide situaties de gemeten lichtsnelheid gelijk was. Ritz’ theorie echter voorspelde een verschil in snelheid overeenkomend met het snelheidsverschil tussen A en B. Deze beslissende meting was echter nog nooit uitgevoerd, zo zei Ehrenfest, ‘weil es eine Messgenauigkeit erfordert, die wir

27 Lorentz aan Ehrenfest, 20 april 1912 : APE ESC 7, sectie 4. Zie ook Berends (n. 25).

28 H. Kragh, *Quantum generations. A history of physics in the twentieth century* (Princeton 1999) 65.

29 Sommerfeld aan Lorentz, 24 april 1912: Eckert & Märker, *Sommerfeld* (n. 12) 417–418.

30 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 191. (Telegram, Lorentz aan Ehrenfest, 29 september 1912.)

31 P. Ehrenfest, ‘Zur Frage nach der Entbehrllichkeit des Lichtäthers’, *Physikalische Zeitschrift* 13 (1912) 317–319.

32 A. Einstein aan P. Ehrenfest, 25 april 1912; 2 mei 1912; ca. 16 mei 1912: *CPAE* 5, doc. nrs. 384, 390, 394.

mit unseren gegenwärtigen Hilfsmitteln weitaus noch nicht erreichen können<sup>33</sup>

Het is mogelijk dat Ehrenfest hierover nog met de Leidse hoogleraar sterrenkunde Willem de Sitter heeft gesproken; in ieder geval kwam De Sitter door Ehrenfests oratie op het idee om een beslissend experiment uit te voeren.<sup>34</sup> Hij mat de snelheid van het licht afkomstig van een ster die om een andere ster heen draaide en daarbij het ene moment van de aarde af en het andere moment er naartoe bewoog. De gemeten lichtsnelheid bleek in beide gevallen identiek. Ritz' theorie was daarmee weerlegd. Einstein kon opgelucht ademhalen.<sup>35</sup> Het resultaat van De Sitter wordt sindsdien als een belangrijk bewijs tegen emissietheorieën aangehaald.<sup>36</sup>

### *Ehrenfest als inspirerend docent*

De oratie van Ehrenfest zette meteen de toon en de komende jaren zou Leiden uitgroeien tot een belangrijk knooppunt voor de theoretische natuurkunde. Ehrenfest spande zich in om de allernieuwste ontwikkelingen naar Leiden te brengen. Daarnaast hervormde hij het onderwijs grondig. Hij stichtte de 'Leeszaal Bosscha' die al snel uitgroeide tot een werk- en ontmoetingsplaats voor alle fysici. Ehrenfest kwam vaak op de leeszaal langs, en studenten met vragen en problemen vonden vrijwel altijd een luisterend oor bij hem. Wanneer zijn fiets tegen de gevel van het lab was geparkeerd wisten de studenten dat ze de hoogleraar in het gebouw konden treffen voor een onderonsje.<sup>37</sup> Ehrenfest was benaderbaar en notoïr informeel. Tot die tijd was het natuurkundeonderwijs in Leiden tamelijk traditioneel, en liet volgens ingewijden te wensen over. De student Dirk Struik zag Kamerlingh Onnes met zichtbare tegenzin zijn laboratorium uitkomen om zijn collegedictaat 'zo saai mogelijk' op te lezen om direct daarna weer te vertrekken. Volgens Claude August Crommelin – vanaf 1924 onderdirecteur van het laboratorium – waren de colleges van zijn leermeester Kamerlingh Onnes moeilijk te volgen en ook onder vier ogen werd men niet wijzer. De colleges van Onnes' opvolgers Wander de Haas en Willem Keesom moeten ook niet bepaald aantrekkelijk zijn geweest. Ook zij staken al hun energie in onderzoek, en draaiden ongeïnspireerd en routinematig hun colleges af.<sup>38</sup>

Bij Ehrenfest stonden colleges nooit op de tweede plaats; voor hem waren ze onlosmakelijk verbonden met het wetenschappelijke bedrijf. In Ehrenfests colleges passeerden de allernieuwste ontwikkelingen de revue (fig. 2).<sup>39</sup> Berekeningen ging hij uit de weg en numerieke constanten werden door hem gezien als volkomen irrelevant voor de kern van het betoog. Hij stimuleerde het stellen van vragen, en gaf zelf het goede voorbeeld door als toehoorder tijdens colloquia studenten of buitenlandse collega's te bestoken met

33 P. Ehrenfest, *Zur Krise der Lichtaether-Hypothese* [Oratie] (Leiden 1912) 18.

34 W. de Sitter, 'A proof of the constancy of the velocity of light', *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen: Proceedings of the section of sciences* (Hierna *KNAW Proceedings*) 15 (1913) 1297–1298; W. de Sitter, 'On the constancy of the velocity of light', *KNAW Proceedings* 16 (1913) 395–396; W. de Sitter, 'Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit', *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) 429; W. de Sitter, 'Über die Genauigkeit, innerhalb welcher die Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle behauptet werden kann', *Physikalische Zeitschrift* 14 (1913) 1267.

35 Einstein aan Ehrenfest, 28 mei 1913: *CPAE* 5, doc. nr. 441.

36 Zie bijvoorbeeld: J.G. Fox, 'Evidence against emission theories', *American Journal of Physics* 33 (1965) 1–17; W.K.H. Panofsky & M. Phillips, *Classical Electricity and Magnetism* (Reading 1962) 272–285.

37 R.L. Krans aan Ehrenfest, 25 juli 1930: *APE ESC* 6, sectie 9.

38 D.J. Struik, *Autobiographical Notes*, typescript (1973), chapters 5, 12. Niels Bohr Library, call number: MB 508; Van Delft, *Kamerlingh Onnes* (n. 3) 196–199.

39 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 287.



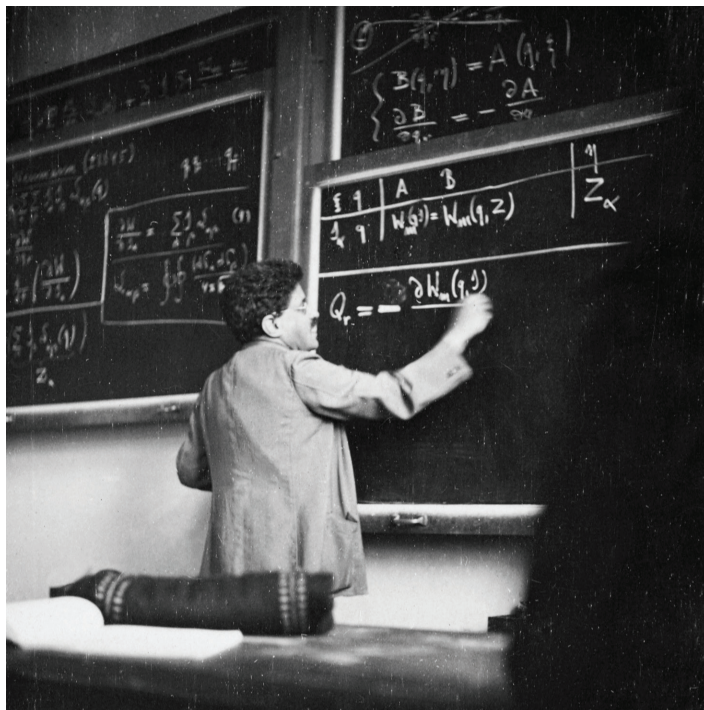


Fig. 2: Paul Ehrenfest geeft college, circa 1925. (Archief T.P. van Aardenne, Noord-Hollands Archief, Haarlem)

ogenschijnlijk domme vragen.<sup>40</sup> Ook pauzeerde hij vaak even om bij een belangrijk resultaat naar zijn toehoorders op te merken: ‘Das ist der springende Punkt’,<sup>41</sup> ‘Und hier, meine Damen und Herren, ist der Moment, wo der Frosch ins Wasser springt’, of: ‘Meine Damen und Herren, dies IST schön.’<sup>42</sup> Op kenmerkende wijze vatte hij eens de hele elektrodynamica samen in twee differentiaalvergelijkingen, en staande voor twee grote volgeschreven borden verklaarde hij: ‘Je zou toch kunnen vragen wat zou er nou gebeurd zijn als dat minnetje een plusje was; dan zou de snelheid van het licht imaginair zijn. Dan heb je toch de indruk dat je een *skroeffje* te pakken hebt waarmee God de wereld gemaakt heeft’.<sup>43</sup>

#### *Ehrenfest als menselijke katalysator*

Het colloquium was een andere door Ehrenfest ingestelde noviteit. Ehrenfest begon binnen enkele weken na zijn aankomst in Leiden al met het organiseren van het colloquium. Het vond aanvankelijk plaats bij hem thuis, maar werd later vanwege groeiende studentenaantallen verplaatst naar het natuurkundig laboratorium. Iedere woensdagavond, van half acht tot ongeveer tien uur, gaven studenten voordrachten over recent verschenen publicaties of eigen werk waar men mee bezig was. Daarna werd de discussie geopend. Ook de jongere

40 H.B.G. Casimir, ‘Introduction’, in: M.J. Klein, *P. Ehrenfest. Collected scientific papers* (Amsterdam 1959) xi-xii.

41 H.B.G. Casimir, *Haphazard reality. Half a century of science* (New York 1983) 68.

42 Struik, *Autobiographical Notes* (n. 38) chapters 5, 10.

43 Historisch Documentatiecentrum voor het Nederlands Protestantisme, Archief Geschiedenis van de Natuurkunde en Sterrenkunde aan de VU, collectienummer 532, doos 5, inv. nr. 28: werkstuk over en interview met G.J. Sizoo 1987. Met dank aan Ab Flipse voor de informatie en de verwijzing.



Fig. 3: Paul Ehrenfest te midden van zijn studenten, circa 1925. (Archief T.P. van Aardenne, Noord-Hollands Archief, Haarlem)

studenten werden aangemoedigd om vragen te stellen en deel te nemen aan de discussies, iets dat buiten Ehrenfests colloquium niet overal gebruikelijk was (fig. 3).

Ehrenfest hechtte aan informaliteit, want dat stimuleerde de productiviteit van de discussie: ‘Die fysikalischen Pickniks sind viel fruchtbarer als die physikalischen Predigten!’<sup>44</sup> Op internationale congressen en tijdens bezoeken aan buitenlandse collega’s schuwde Ehrenfest het debat evenmin. Hij bombardeerde collega’s met scherpe en ogenschijnlijk simpele vragen. Keer op keer kon Ehrenfest zo tot de kern van een ingewikkeld betoog komen, en problemen of paradoxen signaleren. Al snel werd Ehrenfest in Europa en Amerika gekenschetst als de ‘menselijke katalysator’, omdat hij helder denken stimuleerde bij iedereen met wie hij in contact kwam.<sup>45</sup>

De internationale top van de fysica en ook vele jonge, aanstormende talenten bezochten Ehrenfest en zijn colloquium om hun ideeën uit te proberen en aan te scherpen. Leiden werd zo een snelkookpan voor de nieuwste inzichten, waar Ehrenfest en zijn studenten fungeerden als lakmoesproef voor nieuw ontwikkelde inzichten. Ehrenfest maakte school en zijn vele getalenteerde leerlingen hadden bloeiende wetenschappelijke carrières in binnen- en buitenland.

44 Ehrenfest aan F.W.G. Swann, 20 april 1929: APE ESC 9, sectie 7.

45 I. Langmuir aan G.N. Lewis, 2 juli 1930. Citaat in: N. Reingold & I.H. Reingold, *Science in America. A documentary history 1900–1939* (Chicago 1981) 399.

*Ehrenfest als Einsteins sparringpartner*

In de jaren die volgden vormde Ehrenfest samen met Lorentz een welkom klankbord voor Einsteins ideeën over de in ontwikkeling zijnde algemene relativiteitstheorie. Vanaf 1912 correspondeerde Ehrenfest veelvuldig met Einstein over diens werk. Ehrenfest fungeerde daarbij als sparringpartner en als contactpersoon. Einstein stuurde Ehrenfest steeds de drukproeven van zijn artikelen. Ook vroeg hij of Ehrenfest deze kon doorsturen naar Max Abraham, een andere expert in de relativiteitstheorie, en verzocht hij ze tevens te laten zien aan Lorentz, De Sitter en de Finse fysicus Gunnar Nordström.<sup>46</sup> Ehrenfest leverde kritiek, stelde vragen en drong erop aan dat Einstein zijn argumenten helderder formuleerde. Einstein deed zijn best om Ehrenfests vragen te beantwoorden. Daarbij kwam hij veelal tot een aanscherping en verbetering van zijn theorie.<sup>47</sup>

Einstein publiceerde in 1913 een eerste versie van zijn gegeneraliseerde theorie.<sup>48</sup> Mede dankzij de vragen en opmerkingen van Lorentz en Ehrenfest kwam Einstein in 1915 tot de formulering van zijn uiteindelijke theorie.<sup>49</sup> Gedurende de periode 1915–1920 was Leiden een centrum voor onderzoek naar algemene relativiteit. Johannes Droste werkte gedeeltelijk samen met zijn leermeester Lorentz. Adriaan Fokker droeg bij aan zowel de speciale als de algemene relativiteitstheorie. In Zürich werkte hij in 1913 als assistent samen met Einstein en gezamenlijk publiceerden ze in 1914 een artikel over de algemene relativiteit. Ook Ehrenfests studenten Hendrik Kramers, Jan Tresling en Dirk Struik (tevens een student van Jan A. Schouten, een Leidse mathematicus die ook baanbrekend werk aan de algemene theorie verrichtte) schreven enkele artikelen.

In 1916 kwam Nordström naar Leiden, en bleef daar tot hij in 1918 tot hoogleraar te Helsinki werd benoemd.<sup>50</sup> Tijdens de jaren dat hij in Leiden verbleef, woonde hij eerst bij Ehrenfest in huis, om later in een huis aan de overkant van de straat te gaan wonen. Nordström leverde in zijn Leidse jaren belangrijke bijdragen aan de verdere uitwerking van de algemene relativiteitstheorie, waarbij hij profiteerde van Ehrenfests kritiek en diens goede contacten met Einstein. Nordström had in 1914 als eerste voorgesteld een vijfdimensionale ruimte te gebruiken voor de unificatie van elektromagnetisme met een scalair zwaartekrachtsveld. Einstein zag het werk van Nordström als een serieus alternatief voor zijn eigen pogingen een zwaartekrachtstheorie te formuleren. Even later liet Einstein samen met Fokker zien dat Nordströms scalaire gravitatie-theorie beter begrepen kon worden binnen de context van een gekromde ruimtetijd.<sup>51</sup> De vooruitgang die hiermee werd geboekt deed Einstein het pad inslaan dat uiteindelijk leidde tot zijn algemene relativiteitstheorie.

De eerste jaren in Leiden ontwikkelde Ehrenfest zijn ‘adiabatische hypothese’, een formeel principe dat een mogelijke ingang leek tot een dieper inzicht in het hoe en waarom van de

46 *CPAE* 5, doc. nr. 384, 387; *CPAE* 8A, doc. nr. 112, 218, 269, 298.

47 Einstein aan Ehrenfest, 25 april 1912: *CPAE* 5, 384; Einstein aan Ehrenfest, 26 april 1912: *CPAE* 5, 387; Ehrenfest aan Einstein, 14 mei 1912: *CPAE* 5, 393; Ehrenfest aan Einstein, ~16 mei 1912: *CPAE* 5, 394; Ehrenfest aan Einstein, 29 juni 1912: *CPAE* 5, 411; Einstein aan Ehrenfest, ca. 7 november 1913: *CPAE* 5, 481.

48 A. Einstein & M. Grossman, ‘Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation’, *Zeitschrift für Mathematik und Physik* 62 (1913) 225–259; *CPAE* 4, 303–339.

49 A.J. Kox, ‘Hendrik Antoon Lorentz, the Ether, and the General Theory of Relativity’, *Archive for History of Exact Sciences* 38 (1988) 67–78; J. Illy, ‘Einstein teaches Lorentz, Lorentz teaches Einstein: Their collaboration in General Relativity, 1913–1920’, *Archive for History of Exact Sciences* 39 (1989) 247–289.

50 Zie o.a. hierover: P. Halpern, ‘Nordström, Ehrenfest, and the role of dimensionality in physics’, *Physics in Perspective* 6 (2004) 390–400.

51 A. Einstein & A.D. Fokker, ‘Die Nordströmsche Gravitationstheorie vom Standpunkt des absoluten Differentialkalküls’, *Annalen der Physik* 44 (1914) 321–328; *CPAE* 4, 589–596.

## Ehrenfest en Einstein

raadselachtige quantumcondities. Ehrenfests adiabatiese hypothese werd in eerste instantie lauw onthaald. Positieve reacties kreeg Ehrenfest wel van Einstein, die in 1914 als eerste na Ehrenfest zijn adiabatiese principe gebruikte.<sup>52</sup> Einstein was goed op de hoogte van de door Ehrenfest ontwikkelde hypothese.<sup>53</sup> Hij had Ehrenfest zelfs gewezen op een problematische eigenschap van de adiabatiese transformatie. Geleidelijk aan slaagde Ehrenfest er echter in zijn voornaamste twijfels weg te nemen en groeide Einsteins enthousiasme voor Ehrenfests werk.<sup>54</sup> 'Ihre Idee der adiabatischen Umformungen lässt mich nicht los. Vielleicht ist dies noch das wertvollste Hilfsmittel in der allgemeinen Hoffnungslosigkeit'.<sup>55</sup> Einstein zag het adiabatiese principe als een belangrijke stap voorwaarts in de quantumtheorie.<sup>56</sup> Het merendeel van hun contact verliep per brief, maar ook bezochten Ehrenfest en Einstein elkaar om over Einsteins onderzoek te discussiëren, zoals in de zomer van 1913, toen Ehrenfest en Nordström naar Zürich togen.<sup>57</sup>

### *De Eerste Wereldoorlog en haar nasleep*

Einstein broedde sindsdien op een tegenbezoek: 'Ich habe immer Lust, einmal bei Euch aufzutauchen'.<sup>58</sup> Vanwege de inmiddels uitgebroken Eerste Wereldoorlog was het lastig voor Einstein om naar Leiden te komen. In de tussentijd bleven de brieven over en weer gaan:

Ich sende Dir auch eine unkorrigierte Korrektur meiner zusammenfassenden arbeit über die Gravitation; schreib mir gelegentlich eine offene Kritik über diese Darstellung des gegenstandes! Ich wollte eine verständliche Einführung schreiben, weiss aber nicht, ob dies gelungen ist.<sup>59</sup>

Na het verwerken van één van Ehrenfests vele kritieken antwoordde Einstein:

Lieber Ehrenfest! Heute endlich sollst Du mit mir zufrieden sein. Ich freue mich sehr über das grosse Interesse, das Du der Sache widmest. ... Du wirst nun wohl keine Schwierigkeit mehr finden.<sup>60</sup>

In de herfst van 1916 kwam Einstein daadwerkelijk naar Leiden.<sup>61</sup> Daar wisselde hij van gedachten over zijn werk met Ehrenfest. Einstein sprak ook met de Leidse hoogleraar astronomie Willem de Sitter. Deze had de speciale relativiteitstheorie van Lorentz geleerd. Hij keek met veel belangstelling naar de algemene relativiteitstheorie, vanwege De Sitters interesse in de consequenties van deze theorie voor de astronomie. Datzelfde jaar publiceerde De Sitter twee artikelen over de theorie in de *Monthly Notices of the Royal Astronomical*

52 A. Einstein, 'Beiträge zur Quantentheorie', *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 16 (1914) 820–828; J. Mehra & H. Rechenberg, *The Historical development of Quantum Theory*, 6 vols. (New York, Heidelberg, Berlin 1982–2000), vol. 6:1, 439–440.

53 Zie: Einstein aan Ehrenfest, ca. 7 november 1913; ca. 10 april 1914; 25 mei 1914; 8 juli 1914 en Ehrenfest aan Einstein, 21 mei 1914. Zie respectievelijk: *CPAE* 5, 481; *CPAE* 8A, 2, 11, 19, 10.

54 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 272.

55 Einstein aan Ehrenfest, 7 november 1913: *CPAE* 5, 481.

56 Einstein aan Ehrenfest, 4 februari 1917: *CPAE* 8A, 294; Einstein aan Ehrenfest, 6 december 1918: *CPAE* 8B, doc. nr. 664.

57 Einstein aan Ehrenfest, tweede helft van november 1913: *CPAE* 5, 484.

58 Einstein aan Ehrenfest, 25 augustus 1916: *CPAE* 8A, 253.

59 Einstein aan Ehrenfest, 29 april 1916: *CPAE* 8A, 218; Einstein aan Ehrenfest, 17 januari 1916: *CPAE* 8A, 182.

60 Einstein aan Ehrenfest, ca. 24 januari 1916: *CPAE* 8A, 185.

61 Einstein aan Ehrenfest, 24 oktober 1916: *CPAE* 8A, 269; Einstein aan Ehrenfest, 7 november 1916: *CPAE* 8A, 275.

*Society*.<sup>62</sup> Zo raakten de Britse fysici en astronomen, die midden in de Eerste Wereldoorlog afgesneden waren van de Duitstalige vakliteratuur en het directe contact met hun Duitse collega's, bekend met de algemene relativiteitstheorie.

Maar ondertussen werkte De Sitter ook aan kritische besprekingen van Einsteins werk.<sup>63</sup> In een artikel postuleerde Einstein een sferische, driedimensionale ruimte met een tijdsafhankelijke kromming. Volgens Einstein kon dit heelal niet bestaan zonder materie.<sup>64</sup> Vervolgens liet De Sitter zien dat er wel degelijk een oplossing bestond voor een heelal dat geen massa bevat – het beroemd geworden *De Sitter Heelal*.<sup>65</sup> In het betreffende artikel, dat in maart 1917 verscheen, maakte De Sitter gebruik van een sferisch vierdimensionaal universum dat een paar maanden eerder tijdens een gesprek was gesuggereerd door Ehrenfest.<sup>66</sup> Ehrenfest had hier in 1912 al aan gewerkt, maar deed dit idee De Sitter graag aan de hand.<sup>67</sup>

De Eerste Wereldoorlog bemoeilijkte ook de verhoudingen tussen landen op wetenschappelijk niveau. Veel Duitse intellectuelen tekende de zogenaamde *Aufruf an die Kulturwelt*, waarin de oorlogshandelingen van Duitsland werden gerechtvaardigd. Een aantal intellectuelen nam later afstand van hun ondertekening. De wiskundige David Hilbert deed dat niet. Toen Hilbert samen met Planck in 1918 Ehrenfest uitgenodigde voor een bijeenkomst van de Wolfskehl-stichting te Göttingen, bedankte Ehrenfest voor de uitnodiging, en liet hij persoonlijk aan Hilbert weten dat hij niet kon komen vanwege zijn afschuw tegen de voortdurende 'verkrachting' van België en zijn sympathie met Russische vrienden en dissidenten in Oostenrijk en Duitsland.<sup>68</sup> Einstein ergerde zich wederom aan de soms wel zeer halsstarrig principiële trekjes van Ehrenfest. Einstein was pacifist – en daarmee zelf ook dissident in Duitsland – en was zeker geen voorstander van de oorlog. Maar in een brief aan Ehrenfest nam Einstein het voor zijn Duitse collega's op en wees hij Ehrenfest vanwege zijn 'kinderlijke houding' terecht. Hilbert was volgens Einstein van een kinderlijke naïviteit wat betreft dit soort politieke aangelegenheden. Bovendien had Ehrenfest in plaats van in Leiden net zo goed in Göttingen kunnen zijn aangesteld, en zou ook hij daarmee verantwoordelijk worden gehouden voor de misstanden in Duitsland, aldus Einstein.<sup>69</sup> Ehrenfest hield ondanks Einsteins kritiek voet bij stuk en weigerde naar Göttingen af te reizen.

Alhoewel Einstein zich in eerste instantie thuis voelde in Berlijn, en hij zijn collega's daar ook in de moeilijke tijden steunde, werd zijn reputatie als dissident alleen maar sterker.

62 W. de Sitter, 'On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. First paper', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 76 (1916) 699–728; W. de Sitter, 'On Einstein's theory of gravitation and its astronomical consequences. Second paper', *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 77 (1916) 155–183.

63 Zoals: W. de Sitter, 'On the relativity of rotation in Einstein's theory', *KNAW Proceedings* 19 (1916) 527–532.

64 Pais, *Subtle is the Lord* (n. 1) 281–288; A. Einstein, 'Kosmologische Betrachtungen zur allgemeinen Relativitätstheorie', *Sitzungsberichte Königlich Preussische Akademie der Wissenschaften Berlin* (1917) 142–152; *CPAE* 6, 541–551.

65 W. de Sitter, 'On the relativity of inertia. Remarks concerning Einstein's latest hypothesis', *KNAW Proceedings* 19 (1917) 1217–1225; W. de Sitter, 'On the curvature of space', *KNAW Proceedings* 20 (1917) 229–242.

66 De Sitter, 'On the relativity of inertia' (n. 65) 1220.

67 P. Ehrenfest aan W. de Sitter, 18 april 1917: Sterrewachtarchief Leiden, archief Willem de Sitter, inv.no. 15. Zie: P. Kerszberg, *The invented universe. The Einstein-De Sitter controversy (1916–1917) and the rise of relativistic cosmology* (Oxford 1989) 142–143.

68 Ehrenfest aan Einstein, 27 maart 1918: *CPAE* 8B, doc. nr. 494. Bijkomende handicap was dat het lokale Oostenrijkse consulaat weigerde Ehrenfest een paspoort te verlenen (noot 4 & 5 bij doc. nr. 494).

69 Einstein aan Ehrenfest, 1 mei 1918: *CPAE* 8B, doc. nr. 528.

Na de oorlog laaiden de anti-Joodse gevoelens in de wankele Weimar-republiek steeds meer op. Zijn relativiteitstheorieën werden door enkele fysici bestempeld als ‘Joods bedrog’, waarbij zijn status als beroemdheid ook nog de nodige afgunst opriep. Daarmee werden de anti-Joodse gevoelens vermengd met gevoelens van weerstand jegens de nieuwe fysica, vooral onder oudere fysici, die Einsteins theorieën zagen als niets anders dan gegoochel met klokken en meetlatten.<sup>70</sup>

Een combinatie van antisemitische en antirelativistische krachten kwam tot ontlasting op een bijeenkomst die Paul Weyland op 24 augustus 1920 had georganiseerd in de zaal van de Berliner Philharmoniker. In aanwezigheid van Einstein haalden Weyland en de fysicus Ernst Gehrcke de relativiteitstheorie door het slijk. Einstein werd beschuldigd van plagiaat, sensatiezucht en wetenschappelijk dadaïsme. In de zaal werden emblemen met hakenkruizen en antisemitische literatuur verkocht. Op 27 augustus reageerde Einstein met een open brief in het *Berliner Tageblatt*, waarin hij Weyland, Gehrcke en Philipp Lenard in felle bewoordingen terechtwees.<sup>71</sup> In een bijeenkomst van de Gesellschaft der deutschen Naturforscher und Ärzte in Bad Nauheim van 19–25 september 1920 namen Einstein en Lenard het tegen elkaar op. Lenard en Stark werden later in het Nazi-tijdperk de voormannen van een ‘Arische fysica’, waaruit ‘Joodse theorieën’ werden geweerd. Ehrenfest liet Einstein weten hoe hij diens bijtende reactie in het *Berliner Tageblatt* vond. Einstein liet zich volgens hem teveel kennen door mee te gaan in de stroom van beschuldigingen. Maar Ehrenfest liet tevens weten dat zijn vriend Einstein in Leiden een voltijdbaan als gewoon hoogleraar zou kunnen krijgen, mocht hij uit Duitsland willen vertrekken.<sup>72</sup>

### *Einstein hoogleraar te Leiden*

Ehrenfest was al in 1919 begonnen met een lobby om Einstein naar Leiden te krijgen. Niet alleen de versterkte samenwerking en het prestige voor Leiden speelden hierbij een rol, maar zeker ook Ehrenfests zelfkritiek en zijn eigen onzekerheid op het gebied van de wetenschap. Voor de toch al onzekere Ehrenfest bleek het opvolgen van de grote Lorentz een onmogelijke opdracht. Zelfs Einstein bekende huiverig te zijn geweest Lorentz op te volgen: ‘Als mich Lorentz damals rief, empfand ich ein unleugbares Gruseln!’<sup>73</sup> Nauwelijks was Ehrenfest als opvolger van de beroemdste natuurkundige van die tijd aangesteld, of hij raakte na een kort bezoek aan de energieke, in het Utrechtse laboratorium werkende Debye alweer volledig in een depressie, geïntimideerd als hij was door Debyes snelle vorderingen. Steeds weer twijfelde Ehrenfest aan zijn eigen wetenschappelijke kwalificaties, en hij had voortdurend het idee voorbij gestreefd te worden door Einstein, Debye, Abram Ioffe, en anderen. Zo meende hij dat, na Einsteins afwijzen van de positie, Lorentz had gekozen voor een tweederangs fysicus. Hij gaf aan Lorentz onverholven blijk van zijn vrees zijn professoraat te

70 In Nederland hadden onder andere J.D. van der Waals jr. en G. Heymans bezwaren tegen de relativiteitstheorie: J.D. van der Waals jr., ‘Over de ruimte’, *Onze Eeuw* 21 (1921) 57–84; Idem, *Over den wereldaether* (Haarlem 1921); Idem, *De relativiteitstheorie* (Haarlem 1923); G. Heymans, ‘Leekenvragen ten opzichte van de relativiteitstheorie’, *De Gids* 85 (1921) 85–108. Zie hiervoor ook: H.A. Klomp, *De relativiteitstheorie in Nederland. Breekijzer voor democratisering in het interbellum* (Utrecht 1997) 43–45; 84–85; K. Hentschel (red.), *Physics and national socialism. An anthology of primary sources* (Basel 1996) 152–157; A. Harrington, *Reenchanted Science: Holism in German Culture from Wilhelm II to Hitler* (Princeton 1996).

71 CPAE 7, doc. 45.

72 CPAE 10, doc. 114 en 127.

73 Einstein aan Ehrenfest, december 1912: CPAE 5, doc. nr. 425.

verkwanselen en vroeg hem de eerste drie jaar als een proeftijd te beschouwen.<sup>74</sup> Dergelijke ontboezemingen zouden in zijn brieven aan Lorentz blijven terugkeren, waarbij Lorentz steeds weer probeerde Ehrenfest gerust te stellen. Ehrenfests zelfkritiek werkte verlamdend. Voortdurend twijfelend aan zijn eigen kunnen tot het bijdragen aan oorspronkelijk en vernieuwend wetenschappelijk werk schreef hij aan Lorentz:

Zoals U weet drijft mij steeds een gedachte: de toekomst van de natuurkunde in Leiden – door mijn wetenschappelijke werk zal ik nooit in staat zijn voldoende te helpen het niveau in staat te houden. Kwam iemand als Debye of natuurlijk – zoo dit mogelijk is – Einstein naar Leiden – ja dan was het mogelijk Leiden voor achteruitgang te bewaren.<sup>75</sup>

Het leek Ehrenfest mogelijk Einstein naar Leiden te krijgen, omdat hij had gehoord dat Einstein in Berlijn onvoldoende inkomsten had om zijn kinderen te kunnen onderhouden. Toen Ehrenfest polste of Einstein hoogleraar te Leiden wilde worden, wees Einstein dit idee van de hand – hij wilde zijn Berlijnse vakgenoten in de nasleep van de oorlog trouw blijven.<sup>76</sup> Toen Einstein een lezing kwam geven, wilde Lorentz hem wel helpen door hem een honorarium van 1.000 gulden toe te stoppen.<sup>77</sup> Ehrenfest vroeg zich af of het niet mogelijk was Einstein een aantal jaren lang steeds gedurende een paar weken per jaar naar Nederland te halen. Naar zijn mening zouden Lorentz, Onnes en Cornelis van Vollenhoven – curator van het Leids Universiteits Fonds – dit met hun contacten wel kunnen bewerkstelligen.<sup>78</sup> Uitgerekend drie dagen na bekendmaking van de bevestiging van Einsteins algemene relativiteitstheorie schreef Kamerlingh Onnes – ervaren in het bespelen van de instanties – op 9 november 1919 het Leids Universiteits Fonds aan. Einstein had bij de constructie van zijn beroemde theorie gebouwd op het werk van Lorentz, aldus Onnes, en het zou een voorrecht zijn hem aan de universiteit te kunnen verbinden.<sup>79</sup> Op 27 oktober 1920 kon Einstein te Leiden zijn oratie houden.<sup>80</sup> Bij zijn volgende bezoek schonk een dankbare Einstein aan zijn vriend Ehrenfest de vulpen die hij jarenlang had gebruikt en waarmee alle berekeningen met betrekking tot de algemene relativiteitstheorie waren opgeschreven.<sup>81</sup>

Leiden profiteerde van de nabijheid van Einstein door diens contacten met Ehrenfest, maar zeker ook door diens fysieke aanwezigheid. Einstein kwam geregeld voor enkele dagen of zelfs weken naar Leiden.<sup>82</sup> Wanneer Einstein in Nederland was, logeerde hij bij Ehrenfest thuis (fig. 4). Hij mocht er bij hoge uitzondering roken, zij het op zijn eigen kamer, waar hij ook zijn handtekening op de muur achterliet, net als vele andere internationale gasten die daar bleven slapen (fig. 5). 's Avonds discussieerden ze over de natuurkunde, of musiceerden samen; Ehrenfest bespeelde de piano, Einstein de viool. Ook gingen ze samen in Haarlem

74 Klein, *Ehrenfest* (n. 1) 14–15, 197.

75 Ehrenfest aan Lorentz, 8 september 1919: APE ESC 7, sectie 7.

76 Lorentz aan Ehrenfest, 22 september 1919: APE ESC 7, sectie 7.

77 Lorentz aan Ehrenfest, 23 september 1919: *Ibidem*.

78 Ehrenfest aan Lorentz, 25 september 1919: Noord-Hollands Archief, archief Lorentz, inv. nr. 20.

79 Van Delft, 'Albert Einstein in Leiden' (n. 1) 60.

80 De procedure en verwickelingen rond Einsteins aanstelling in Leiden zijn uitvoerig onderzocht door Jeroen van Dongen in het kader van zijn werk als associate editor aan de *Einstein Papers*. Zijn onderzoek is opgenomen in: CPAE 10, xliii–xlvi.

81 De vulpen van Einstein wordt nu bewaard in Museum Boerhaave te Leiden.

82 In 1921, 1922, 1923, 1924, 1925 en 1930. Pais, *Subtle is the Lord* (n. 1) 526.

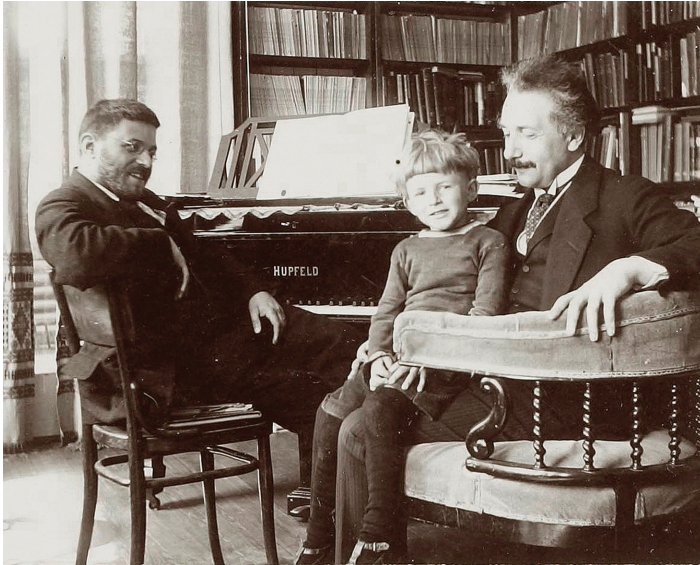


Fig. 4: Albert Einstein bij Paul Ehrenfest thuis met Paul junior op schoot. (Museum Boerhaave, Leiden)

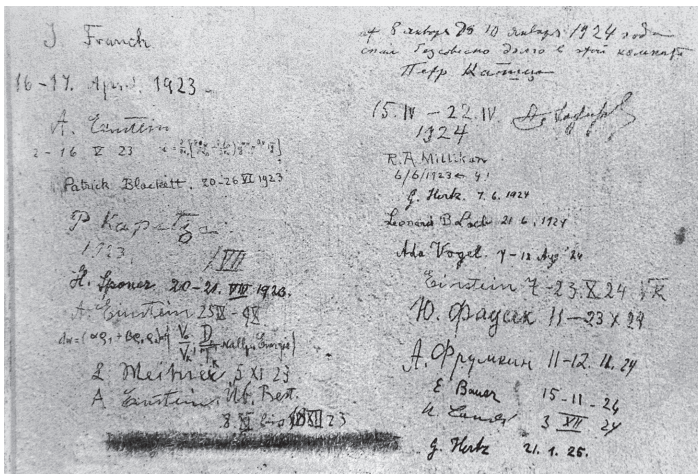


Fig. 5: Fragment van de handtekeningenmuur in het huis van Paul Ehrenfest en zijn vrouw Tatiana Afanassjewa aan de Witte Rozenstraat te Leiden. Onder de namen bevinden zich 15 Nobelprijswinnaars. In dit gedeelte heeft Einstein in de jaren 1923 en 1924 zijn handtekening vier maal geplaatst. (Foto Museum Boerhaave, Leiden)

op bezoek om met Lorentz te spreken. Op het colloquium in Ehrenfests huis was Einstein een graag geziene gast. Daarbij was de aanwezigheid van Ehrenfest van groot belang voor de studenten om Einstein te kunnen begrijpen. Ehrenfest doceerde de natuurwetenschap als een eenheid.<sup>83</sup> Dat was zijn grote kracht; Einstein bijvoorbeeld was nooit een groot docent en kon een lezingenserie nimmer presenteren als een organisch geheel.<sup>84</sup> Ehrenfest legde verbanden tussen gebieden die voor de studenten tot dan toe tamelijk disjunct leken.

<sup>83</sup> Struik, *Autobiographical Notes* (n. 38), chapters 5, 11.

<sup>84</sup> A. Loria, 'Einstein and education', in: A.P. French (red.), *Einstein. A centenary volume* (London 1979) 215–227, m.n. 225.



Ook de studentenalmanak prees dit aspect van zijn onderwijs: men leerde de natuurkunde beschouwen 'als een levend organisme en niet als een dood, hoewel stijlvol geheel'.<sup>85</sup>

Na afloop vatte Ehrenfest de discussie en vaak de hele voordracht samen. Het verhaal gaat dat Einstein een keer op het colloquium een verhandeling hield over de relativiteitstheorie. Het werd Ehrenfest duidelijk dat de toehoorders het niet goed hadden begrepen, en dus vroeg hij of hij het mocht proberen uit te leggen. Einstein had daar niets op tegen en nam plaats tussen de toehoorders. Na afloop van Ehrenfests betoog merkte Einstein op dat hij het nu eindelijk ook zelf had begrepen.<sup>86</sup> Waar of niet, deze anekdote omvat de kern van Ehrenfests wezen. Niet zelden begrepen de toehoorders, inclusief de spreker, pas na een samenvatting van Ehrenfest waar het werkelijk om ging.<sup>87</sup> Om deze reden wisten studenten dat als ze werkelijk wilden weten hoe de relativiteitstheorieën in elkaar zaten, ze niet bij Einstein moesten zijn, maar bij Ehrenfest.<sup>88</sup>

Ook op andere manieren profiteerde de Nederlandse natuurkunde van Ehrenfests contacten met Einstein. De directeur van het Philips NatLab, Gilles Holst, had in 1920 Ehrenfest in de arm genomen om een reeks lezingen over de nieuwste ontwikkelingen in de natuurkunde te houden. Al snel werd ook Einstein gestrikt om een voordracht voor de NatLab-fysici te geven.<sup>89</sup> Daarnaast was Ehrenfest in staat om Nederlandse studenten uit de brand te helpen door gebruik te maken van een fonds dat door Einstein ter beschikking was gesteld voor hulp aan de Leidse theoretische fysica. Dat laatste was voor Ehrenfest een rekbaar begrip. Ehrenfest wendde het geld ook af en toe – zonder medeweten van Einstein – aan voor doeleinden die niet altijd in het verlengde lagen van het oorspronkelijke doel, zoals de verhuizing van de Leidse student Jacob van Zuylen naar zijn betrekking aan de universiteit van Groningen, en het bezoek van Ehrenfests promovendus (en latere Nobelprijswinnaar economie) Jan Tinbergen aan een economisch congres te Lausanne.<sup>90</sup>

### *De spin van het elektron*

Naast hun discussies en werk aan de algemene relativiteitstheorie, hadden Ehrenfest en Einstein een scherp oog voor de stormachtige ontwikkelingen binnen de quantumtheorie. Die theorie was op klassiek natuurkundige leest geschoeid, aangevuld met een opeenstapeling van allerhande *ad hoc* quantumgetallen en daarop toegepaste *ad hoc* selectieregels, wat het geheel maakte tot een vreemd bouwwerk. Daarbij faalde de theorie bij zwaardere elementen dan waterstof. Het werd noodzaak om het verklaringsvermogen van het opgebouwde atoommodel van Niels Bohr en Arnold Sommerfeld nader onder de loep te nemen. Otto Stern en Walther Gerlach voerden te Göttingen een experiment uit.<sup>91</sup> De door een heteroogeen magneetveld geschoten zilveratomen vertoonden de neiging om, of naar boven, of

85 *Almanak van het Leidsch Studentencorps* (Leiden 1916) 115.

86 J.P. Korthals Altes, 'Einstein en Ehrenfest', *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* 71 (2005) 159.

87 G.E. Uhlenbeck, 'Reminiscences of Professor Paul Ehrenfest', *American Journal of Physics* 24 (1956) 431–433, m.n. 432.

88 Persoonlijke mededeling van A. Blaauw, 18 september 2008.

89 K. Boersma, *Inventing structures for industrial research. A history of the Philips NatLab 1914–1946* (Amsterdam 2002) 57, 39; M.J. de Vries & F.K. Boersma, *80 years of research at the Philips Natuurkundig Laboratorium 1914–1994* (Amsterdam 2005) 33–58; Philips Company Archive, NL330 en NL331.

90 Zie: D. Coster aan Ehrenfest, 2 juli 1928; Ehrenfest aan A.D. Fokker, 3 juli 1928; Ehrenfest aan D. Coster, 3 juli 1928, APE ESC 2 sectie 10; Ehrenfest aan D. Coster, 13 juli 1928: APE ESC 3, sectie 1; J. Tinbergen aan Ehrenfest, 25 augustus 1931; Jan Tinbergen aan Ehrenfest, 26 september 1931: APE ESC 10, sectie 1; Ehrenfest aan J. Tinbergen, 27 september 1931: Tinbergenarchieff UB-EUR, Ordner 2 (1931–1934).

91 W. Gerlach & O. Stern, 'Das magnetische Moment des Silberatoms', *Zeitschrift für Physik* 9 (1922) 353–355.

naar beneden af te buigen, en werden niet – zoals klassiek te verwachten viel – in alle richtingen verstrooid. Dit leek volledig consistent met het atoommodel van Sommerfeld-Bohr.

Maar er werd te vroeg gejuicht. In 1922 wezen Einstein en Ehrenfest in een gezamenlijk artikel op een aantal fundamentele moeilijkheden waarmee het Stern-Gerlach-experiment kampte.<sup>92</sup> Zo bleven er voor iedere verklaring die door de quantumtheorie werd gegeven één of meerdere anomalieën bestaan. De roep om een geheel nieuwe theorie werd groter.<sup>93</sup> Een gedeeltelijke oplossing kwam in 1925, toen Ehrenfests studenten Samuel Goudsmit en George Uhlenbeck de elektronspin introduceerden ter onderbouwing van een vierde quantumgetal dat door Wolfgang Pauli was geïntroduceerd. Drie quantumgetallen kwamen overeen met drie vrijheidsgraden; het vierde kon volgens Goudsmit en Uhlenbeck op aanschouwelijke wijze worden voorgesteld als een draaiing. Een tollend elektron bezat een intrinsiek magnetisch moment dat als bijkomstig voordeel de resultaten van het Stern-Gerlach experiment kon verklaren.

Technische problemen die de spin in eerste instantie leek te hebben werden met behulp van onder meer Bohr en Einstein uit de weg geruimd.<sup>94</sup> Zo werd het quantumbouwwerk versterkt doordat eerdere moeilijkheden – zoals met het anormale Zeeman-effect en het Stern-Gerlach-experiment – verdwenen als sneeuw voor de zon.<sup>95</sup> Het succes van de elektronspin leverde het Leidse Instituut voor Theoretische Fysica een enorm prestige op.

### *Quantumstatistiek*

Maar de quantumtheorie kende meer problemen. Onder meer was het onduidelijk hoe de statistische fysica een plaats kon vinden binnen de quantumtheorie. Niet geheel toevallig werd dit onderwerp aangezwengeld door Ehrenfest, die tegenstrijdigheden wist op te sporen die grote consequenties bleken te hebben voor de ontwikkeling van de quantumstatistiek.

In 1914 publiceerde Ehrenfest samen met Kamerlingh Onnes een simpele en inzichtelijke afleiding voor de distributiewet van Planck.<sup>96</sup> In het artikel kwam Ehrenfest tot een aantal interessante constatering. Einstein behandelde in zijn beroemde artikel uit 1905 lichtquanta als deeltjes, die van elkaar onderscheiden konden worden en daarom op de klassieke manier als statistisch onafhankelijk konden worden beschouwd, maar kwam door deze aanpak niet uit op de juiste uitdrukking voor de spectrale verdeling van de straling van een zwart lichaam. Het was onduidelijk hoe de statistische fysica een plaats kon vinden binnen de quantumtheorie.<sup>97</sup>

De zaak raakte in een stroomversnelling toen in 1924 de Indiase fysicus Satyendra Nath Bose een artikel opstuurde naar Einstein. Het was Bose wel gelukt om met behulp van Einsteins lichtquanta de stralingsverdeling van Planck af te leiden. Bose had hierbij gebruik

92 A. Einstein & P. Ehrenfest, 'Quantentheoretische Bemerkungen zum Experiment von Stern und Gerlach', *Zeitschrift für Physik* 11 (1922) 31–34; Mehra & Rechenberg, *Historical development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 1.2, 443–445; M. Jammer, *The conceptual development of quantum mechanics* (New York 1966) 134–135.

93 Kragh, *Quantum generations* (n. 28) 159, 161.

94 A. Pais, *Niels Bohr's Times*, in *Physics, Philosophy and Polity* (Oxford 1991) 243–244; V. Frenkel, 'Physik und Kritik: Paul Ehrenfest', *Informationen aus Wissenschaft und Technik in der Sowjetunion* 9 (1974) 40.

95 Pais, *Bohr's Times* (n. 94) 244.

96 Jammer, *Conceptual development* (n. 92) 51–52.

97 P. Ehrenfest & V. Trkal, 'Deduction of the dissociation equilibrium from the theory of quanta and a calculation of the chemical constant based on this', *Proceedings AA* 23 (1920) 162–183; Mehra & Rechenberg, *Historical development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 4, 59.

gemaakt van een nieuw soort statistische aanpak. De aanpak was zeker elegant – maar al snel kreeg Einstein van Ehrenfest te horen dat de statistiek van Bose-Einstein de fotonen als statistisch afhankelijk beschouwde. Fotonen hadden hiermee net als bij Plancks oorspronkelijke quantumhypothese hun individualiteit verloren – en dat bleef in strijd met de klassieke statistische fysica.<sup>98</sup>

Einstein liet zich niet zo snel uit het veld slaan. Hij zag in de Bose-statistiek een nieuwe steun voor zijn lichtquantum-hypothese. Bovendien generaliseerde hij de Bose-Einstein-statistiek en paste deze toe op een ideaal gas.<sup>99</sup> In een tweede artikel pareerde hij de bezwaren van Ehrenfest. Het verlies van individualiteit van identieke deeltjes was een fundamentele eigenschap en kon worden verklaard wanneer de deeltjes werden beschreven in termen van de materiegolven van Louis de Broglie. De bijzondere eigenschappen van de Bose-Einstein-statistiek werden veroorzaakt door onderlinge interferentie van de materiegolven van de gasdeeltjes.<sup>100</sup> Het oorspronkelijke manuscript van dit artikel heeft Einstein in Leiden laten liggen en is later teruggevonden in de bibliotheek van Ehrenfest.<sup>101</sup>

Tegelijkertijd werd hiermee door Einstein een merkwaardig fenomeen voorspeld. Wanneer een groep deeltjes wordt afgekoeld beneden een (extreem lage) kritische temperatuur zullen ze abrupt in de grondtoestand terechtkomen en zich allemaal als een enkele entiteit gaan gedragen, een verschijnsel dat in latere jaren Bose-Einstein-condensatie zou worden genoemd.

De quantumstatistiek was iets heel anders dan de klassieke statistiek waaraan de natuurkundigen gewend waren. In Göttingen had Born grote moeite om Einsteins radicale werk betreffende het quantumgas te begrijpen. Gelukkig, zo merkte Born op in een brief aan Einstein, kwam Ehrenfest naar Göttingen om de Bose-statistiek uit te leggen.<sup>102</sup> In juni 1925 hielp Ehrenfest Born en consorten de verbinding tussen de materiegolven en de Bose-Einstein-statistiek in Einsteins werk te begrijpen.<sup>103</sup> Zo werd Ehrenfest ook belangrijk in het verspreiden en begrijpen van Einsteins werk op dit terrein.

### *Worstelingen met de quantummechanica*

In 1925 en de jaren daarna volgden de ontwikkelingen in de theoretische fysica zich in hoog tempo op. Werner Heisenberg en Erwin Schrödinger ontwikkelden de matrixmechanica en de golfmechanica, in 1927 publiceerde Heisenberg zijn onzekerheidsrelatie. In die tijd worstelde Ehrenfest, en met hem veel andere oudere fysici, met de voortrazende quantummechanica. Een jongere generatie fysici publiceerde in een buitengewoon hoog tempo nieuwe en wiskundig complexe artikelen. De oudere generatie fysici was deze stijl van natuurkunde bedrijven niet gewend. Ehrenfest, Einstein en anderen

98 Mehra & Rechenberg, *Historical development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 6.1, 19.

99 A. Einstein, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases', *Sitzungsberichte des preußischen Akademie der Wissenschaften* (1924) 261–267.

100 Mehra & Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 1:2, 616–618; A. Einstein, 'Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. 2. Abhandlung', *Sitzungsberichte des preußischen Akademie der Wissenschaften* (1925) 3–14.

101 In 2005 vond Rowdy Boeyink het manuscript in kamer 364 van het Instituut Lorentz in het Huygens laboratorium te Leiden; R. Boeyink, 'In het centrum van het drama'. *Wetenschappelijke worstelingen van Paul Ehrenfest tussen 1916–1925*, doctoraalscriptie Universiteit Utrecht (2005).

102 M. Born aan A. Einstein, 15 juli 1925; M. Born, *The Born-Einstein Letters* (New York 1971; 2005) 81.

103 Mehra & Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 3, 150.

van dezelfde generatie overdachten de materie graag eerst grondig, en gebruikten het liefst zo weinig mogelijk wiskunde. De jongere generatie publiceerde wekelijks nieuwe artikelen, waarbij allerhande problemen ogenblikkelijk werden aangepakt met nieuwe, wiskundig virtuoze technieken. In een brief aan Einstein klaagde Ehrenfest over indigestie ten gevolge van het ‘unendlicher Heisenberg-Born-Dirac-Schrödinger Wurstmaschinen-Physik-Betrieb’.<sup>104</sup> Het industriële productietempo, de hoge mate van specialisatie en de onduidelijke weergave in artikelen waren volgens Ehrenfest ‘das Charakteristikum von Stagnations-Perioden!!!!’.<sup>105</sup> Ehrenfest zei slechts tot rust te kunnen komen bij gelijkgestemden als Bohr en Einstein; natuurkundigen die zich niet bezighielden met het ‘fabriksmessigen “physikmachens”’.<sup>106</sup>

De nieuwe quantummechanica was bovendien zeer abstract en leek geen enkele verbintenis meer te hebben met de klassieke natuurkunde, waarmee het voor fysici als Ehrenfest en Einstein moeilijk werd om de theorie in beelden te vatten. Ehrenfest schreef vertwijfeld zijn vragen over de nieuwe quantummechanica op, in de hoop hier antwoord op te krijgen. Onder andere stelde hij vraagtekens bij de golftheorie van Schrödinger:

Wir sollten uns immer wieder daran erinnern, eine wie *unheimliche Fernwirkungstheorie* also die Schrödingersche Wellentheorie ist, um unser Heimweh nach einer vierdimensionalen *Nahwirkungstheorie* wach zu halten! Gewisse, durch Einstein ersonnene, aber nie im Druck publizierte Gedankenexperimente sind hierfür sehr geeignet.<sup>107</sup>

Einstein was via Ehrenfest in aanraking gekomen met Bohr, en Ehrenfest, Bohr en Einstein waren met elkaar bevriend geraakt. Eind jaren twintig ontspoon zich echter een natuurkundig debat tussen Bohr en Einstein, waarbij Ehrenfest, de centrale figuur in het driemanschap, zich steeds ongemakkelijker voelde.

Op het Solvaycongres van 1927 gingen Einstein en Bohr voor het eerst publiekelijk met elkaar in discussie over de quantumtheorie.<sup>108</sup> Tijdens het diner merkte Einstein op dat een bundel elektronen die door een nauwe spleet valt een diffractiepatroon zal veroorzaken op een scherm. Bekijken we echter een individueel elektron, dan leek er bij de detectie van het elektron op het scherm, waarbij de golffunctie inklapte tot een enkel punt, sprake te zijn van een mysterieuze vorm van non-lokaliteit. Dat zou in tegenspraak zijn met Einsteins relativiteitspostulaat, die instantane werking op afstand verbiedt. Een andere mogelijkheid was dat er wel degelijk een welbepaalde baan aan het elektron kon worden toegeschreven.<sup>109</sup> In dat geval echter faalde de theorie in het beschrijven van die baan. Bohr ging hierna met steun van Ehrenfest – die altijd trachtte Bohrs onbegrijpelijke gedachtegangen helder te krijgen

104 Ibidem, vol. 4, 278.

105 Ehrenfest aan R.E. Peierls, 31 oktober 1932: ESC 8, sectie 7; Zie ook: Ehrenfest aan E. Schrödinger, 28 september 1932: APE ESC 9, sectie 4.

106 Ehrenfest aan Bohr, 25 februari 1931: APE ESC 1, sectie 8.

107 P. Ehrenfest, ‘Einige die Quantenmechanik betreffende Erkundigungsfragen’, *Zeitschrift für Physik* 78 (1932) 555–559, m.n. 557, n.1.

108 Ehrenfest aan Goudsmit, Uhlenbeck en Dieke, 3 november 1927: J. Kalckar, *N. Bohr. Collected Works*, vol. 6 (Amsterdam 1985) 415–418.

109 Mehra & Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 6.2, 715; M. Jammer, ‘The EPR Problem in its Historical Development’, in: P. Lahti en P. Mittelstaedt (red.), *Symposium on the Foundations of Modern Physics. 50 years of the Einstein-Podolsky-Rosen Gedanken experiment* (Singapore 1985) 129–149; Pais, *Bohr’s Times* (n. 94) 318–319; Jammer, *Conceptual development* (n. 92) 360.

– de discussie aan met Einstein. De volgende morgen had Bohr een antwoord gereed, namelijk dat de quantummechanica slechts iets zegt over de waarschijnlijkheid om een deeltje op een bepaalde positie op het scherm aan te treffen, en niets over het causale mechanisme van de diffractie. Zo ging het over en weer; 's avonds discussies tussen Bohr en Einstein, waarbij Ehrenfest, in de woorden van Bohr, 'took part in a most active and helpful way'.<sup>110</sup> Einstein, als een 'duveltje uit een doosje', kwam iedere morgen weer met nieuwe tegenvoorbeelden, die tot Ehrenfests genoegen steeds weer werden weerlegd door Bohr. Ehrenfest was naar eigen zeggen 'zonder reserve pro-Bohr en contra-Einstein'.<sup>111</sup>

Volgens Ehrenfest kwam Einsteins afwijzing van Bohrs denkbeelden overeen met de rigide opstelling van de tegenstanders van de relativiteitstheorie. Maar ook al kon en wilde hij Einstein niet volgen in diens standpunten, de onenigheid tussen Bohr en Einstein bracht hem danig van zijn stuk. Ehrenfest gaf aan niet te kunnen rusten tot zijn twee oude vrienden het met elkaar eens konden worden.<sup>112</sup> Terug in Leiden vertelde een huilende Ehrenfest aan Goudsmit dat hij had moeten kiezen tussen de standpunten van Bohr en Einstein, en dat hem niets anders restte dan zich uit te spreken ten gunste van Bohrs visie.<sup>113</sup>

Op het volgende Solvaycongres in oktober 1930 kwam Einstein met een ander idee. Hij maakte hiervoor gebruik van een 'fotondoos'. Het gedachte-experiment gaat als volgt in zijn werk. Een doos gevuld met straling wordt gewogen. De doos is voorzien van een klein gat, dat door een sluitmechanisme, aangesloten op een klok, kan worden geopend en gesloten. Op een bepaald tijdstip wordt de sluit voor zo'n korte periode geopend, dat slechts één foton kan ontsnappen. De doos wordt wederom gewogen, waardoor zowel het ontsnappingstijdstip als de energie van het foton kunnen worden bepaald. Dat was in tegenspraak met Heisenbergs onzekerheidsrelatie.<sup>114</sup>

De volgende ochtend pareerde Bohr het tegenargument van Einstein, en wel met Einsteins eigen algemene relativiteitstheorie. Door het ontsnappende foton zal de doos op de weegschaal iets omhoog bewegen, waarbij de klok in de doos anders gaat lopen. Volgens het equivalentieprincipe oefent het zwaartekrachtsveld invloed uit op de gang van een klok en dus is kennis van de exacte positie van de klok in het zwaartekrachtsveld nodig voor een exacte tijdsbepaling. Door de onzekerheid in de verplaatsing van de doos treedt een corresponderende onzekerheid in de tijdsmeting op, volledig in overeenstemming met Heisenbergs onzekerheidsrelatie.<sup>115</sup>

Einstein bleef over de fotondoos nadenken en kwam tot de conclusie dat Bohrs argument kon worden vermeden door een systeem te bedenken waarin alleen sprake was van horizontale beweging.<sup>116</sup> In 1931 beschreef Einstein een andere versie van het experiment,

110 N. Bohr, 'Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics', in: Kalckar, *Bohr. Collected Works* (n. 108) 213.

111 Ehrenfest aan Goudsmit, Uhlenbeck en Dieke, 3 november 1927: Kalckar, *Bohr. Collected Works* (n. 108) 415–418.

112 Bohr, 'Discussion' (n. 110) 218.

113 Pais, *Subtle is the Lord* (n. 1) 443.

114 Hoewel het erop leek dat Einstein zijn voorbeeld tegen de onzekerheidsrelatie had uitgedacht, had hij tegen Ehrenfest verteld dat hij allang de onzekerheidsrelatie accepteerde, maar dat hij zijn pijlen richtte op de compleetheit van de quantummechanica. Zie: Ehrenfest aan Bohr, 9 juli 1931: APE ESC 1, sectie 8.

115 Pais, *Bohr's Times* (n. 94) 427.

116 Jammer, 'The EPR Problem' (n. 109) 133.

waarbij twee deeltjes werden uitgezonden door de doos.<sup>117</sup> In een volgende versie werd de fotondoos op wrijvingsloze rails gezet. In de doos bevindt zich een foton van onbekende frequentie. Als de sluiters nu wordt geopend kan een waarnemer op de doos twee opties kiezen: of hij bepaalt de positie van de doos op de rails en voorspelt het tijdstip waarop het foton op een verderop gelegen scherm arriveert, of hij meet de impulsverandering van de doos ten gevolge van de uitzending van het foton en voorspelt met welke energie het foton het scherm zal raken. Het is absurd om de gebeurtenissen op een veraf gelegen scherm te laten afhangen van welke meting er verderop plaatsvindt.

Volgens Einstein was de uitkomst van dit gedachte-experiment dat het foton te allen tijde een welbepaalde positie en energie moest hebben, in tegenstelling tot wat de quantummechanica ons vertelt.<sup>118</sup> Het was Ehrenfest die dit gedachte-experiment onder de aandacht van Bohr bracht. Ehrenfest nodigde Bohr en Einstein voor een paar dagen uit in Leiden om te praten over de fundamentele problemen van de quantummechanica, en lichtte Bohr alvast in over Einsteins nieuwste idee.<sup>119</sup> Ehrenfest hoopte Einstein tijdens de bespreking te kunnen helpen Bohrs ondoorgrondelijke redeneringen beter te kunnen begrijpen. 'Ich werde Euch ganz sicher nicht in Euren Besprechungen stören hoffe aber manchmal Einstein helfen zu können, Deine Andeutungen müheloser zu verstehen'.<sup>120</sup>

Het kwam er echter niet van; Bohr was te druk. Einstein kwam wel naar Leiden, en sprak op het colloquium over een nieuw gedachte-experiment. Ehrenfests kritiek had Einstein doen besluiten af te stappen van zijn fotondoos, en over te gaan op een situatie waarbij twee deeltjes met elkaar een interactie aangingen. Ehrenfest trof Einstein in Rotterdam, waar Einstein per boot aankam na een reis naar de Verenigde Staten. Een dag later schreef Einstein aan Ehrenfest over een nieuwe versie van het experiment: 'Lieber Ehrenfest! Du hast mich gestern drauf gestupft, das 'Kasten-experiment' so abzuändern, dass es dem Wellen-Theoretiker weniger fernliegende Begriffe verwendet'.<sup>121</sup> Het gedachte-experiment ging nu uit van een foton dat op een zwaar deeltje botste, en waarbij de impuls en positie van het deeltje konden worden bepaald door de corresponderende grootheden van het foton te meten.

Einstein kwam zo op een van de uitgangspunten van zijn beroemde paradox, die hij in 1935 samen met Boris Podolski en Nathan Rosen publiceerde: de Einstein-Podolski-Rosen- of EPR-paradox. Volgens de auteurs is de quantummechanica geen complete theorie, en dat probeerden ze te laten zien met behulp van een aangepaste versie van Einsteins eerdere gedachte-experiment.

### *Hitler aan de macht*

Inmiddels bevond niet alleen de theoretische fysica zich in een staat van verwarring. De antirelativistische tegenkrachten die Einstein in 1920 van antisemitische tegenstanders ervoer waren nog maar het begin. In de jaren twintig was de situatie in Duitsland allengs grimmiger geworden. Toen op 24 juni 1922 Walther Rathenau – de Joodse minister van buitenlandse zaken en goede vriend van Einstein – werd vermoord, ontving ook Einstein

117 A. Einstein, R.C. Tolman, B. Podolski, 'Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics', *Physical Review* 37 (1931) 780–781; Mehra & Rechenberg, *Historical Development of Quantum Theory* (n. 52) vol. 6.2, 717–718.

118 Jammer, 'The EPR Problem' (n. 109) 133–134.

119 Ehrenfest aan Bohr, 9 juli 1931: APE ESC 1, sectie 8.

120 Ehrenfest aan Bohr, 15 november 1931: APE ESC 1, sectie 8.

121 Einstein aan Ehrenfest, 5 april 1932. Geciteerd in: Jammer, 'The EPR Problem' (n. 109) 136.

doodsbedreigingen. Hij vertrok voor een reis naar Japan en in november 1923, ten tijde van de mislukte putsch in München door Adolf Hitler en Erich Ludendorff, vluchtte hij naar Leiden.<sup>122</sup>

De echte problemen begonnen toen op 30 januari 1933 Hitler tot kanselier werd benoemd. Na de Rijksdagbrand op 27 februari 1933 werd zonder veel problemen op 23 maart de machtigingswet aangenomen waardoor Hitler de bevoegdheid kreeg om wetten met een enkele handtekening door te voeren. Op 31 maart 1933 werden alle Joodse rechters ontslagen. Op 7 april 1933 werd de *Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums* doorgevoerd. Hierdoor verviel in een klap de onafhankelijkheid van de Duitse staatsuniversiteiten. Aanstellingen en ontslagen werden nu direct geregeld door het Ministerie van Onderwijs. Als gevolg hiervan werd een groot aantal Joodse geleerden ontslagen. In totaal zou de eerste ontslaggolf van 1933/34 het ontslag van 1145 docenten aan het hoger onderwijs ten gevolge hebben.<sup>123</sup> Die werden niet allemaal tegelijk ontslagen, maar in meerdere fasen.<sup>124</sup>

Einstein – op bezoek in Amerika ten tijde van Hitlers machtsovername – besloot niet terug te keren naar Duitsland. Hij keerde wel terug naar Europa. Tijdens de overtocht hoorde hij dat zijn zomerverblijf in Caputh door de Nazi's was geplunderd, onder het voorwendsel dat de communisten het als bergplaats voor wapens gebruikten. Nadat Einstein in België was aangekomen leverde hij bij het Duitse consulaat in Brussel zijn Duitse paspoort in en verklaarde dat hij het Duitse staatsburgerschap opgaf. Hij vestigde zich tijdelijk in België, en beëindigde zijn lidmaatschap van de Preussische Akademie der Wissenschaften.<sup>125</sup> Niet lang daarna verscheen er een veroordeling door de Akademie, waarin het neerleggen van het lidmaatschap van de Akademie werd toegejuicht. Max von Laue protesteerde hiertegen, maar niemand anders dan Von Laue durfde binnen de Akademie openlijk de verklaring aan te vechten.<sup>126</sup> Wel wilde Arnold Berliner, de Joodse hoofdredacteur van *Die Naturwissenschaften*, samen met andere leden van de Akademie heimelijk afstand nemen van deze verklaring en daarop schreef Berliner in april 1933 aan Ehrenfest. Hij deelde Ehrenfest mee dat het ging om een actie van maar enkele leden van de Akademie, en dat de verklaring niet tijdens een officiële zitting van de Akademie was opgesteld of besproken. Hij vroeg Ehrenfest daarom als protest een verklaring te sturen naar de redactie van *Science* en *Nature*. 'Falls Sie dem Plane beistimmen, sollen Sie dieses Notiz an *Nature* und an *Science* schicken – denn wenn ich es tue, riskire ich vielleicht doch Kopf und Kragen. Von Holland aus kann die Notiz sicherlich ohne Risiko von Stapel gelassen werden.'<sup>127</sup> Ehrenfest schreef een stuk dat als onderdeel van een artikel op 2 juni 1933 in *Science* verscheen.<sup>128</sup>

122 J.L. Heilbron, *The dilemmas of an upright man* (Berkeley, California 1986) 114–122; J. van Dongen, 'Reactionaries and Einstein's fame: "German scientists for the preservation of pure science", relativity, and the Bad Nauheim meeting', *Physics in Perspective* 9 (2007) 212–230.

123 K. Hentschel (red.), *Physics and national socialism. An anthology of primary sources* (Basel 1996) lv.

124 S. Gerstengarbe, 'Die erste Entlassungswelle von Hochschullehrern deutscher Hochschulen aufgrund des Gesetzes zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums vom 7.7.1933', *Berichte zur Wissenschaftsgeschichte* 17 (1994) 17–39, m.n. 18.

125 Isaacson, *Einstein. His life and universe* (n. 1) 401–414.

126 Ibidem 405–407.

127 Arnold Berliner aan Ehrenfest, 25 april 1933: APE ESC 1, sectie 3.

128 Anoniem, 'Scientific Events: The Scientific Situation in Germany' (1933) 528–529; 'Verklaring aan *Nature*', APE ESC 1, sectie 3. Ernst Heymann, hoogleraar in de rechten, had de verklaring van de Akademie opgesteld op een zondag, in afwezigheid van Planck en de waarnemend secretaris Heinrich von Ficker. Zie over Einstein,

Nu de weg naar Duitse tijdschriften voor hem was afgesloten, stuurde Einstein voorlopig zijn wetenschappelijke artikelen vanuit België op naar Ehrenfest, ter plaatsing in de *Verslagen* van de Akademie.<sup>129</sup> De naar Engeland uitgeweken Berlijnse hoogleraar geneeskunde Johann Plesch – de arts van Einstein – wilde voor Einstein redden wat er te redden viel. Vooral wilde hij Einsteins stiefdochter Ilse Kayser en haar echtgenoot uit Duitsland halen.<sup>130</sup> Dat was inmiddels al gelukt. Ilse was samen met haar man naar Nederland gevlucht.<sup>131</sup> Het is aannemelijk dat zij hierbij hulp hebben gekregen van Ehrenfest, gezien Ilse's brief vanuit België aan Ehrenfest, waarin ze hem bedankt voor zijn hulp die hij haar in Scheveningen geboden had.<sup>132</sup>

Ehrenfest had het zelf ondertussen moeilijker dan ooit. Zijn moeite de laatste ontwikkelingen te kunnen bijhouden, gecombineerd met de situatie in Duitsland en de vele hulpverzoeken die hij uit Duitsland ontving van ontslagen wetenschappers, gevoegd bij zijn geld- en huwelijksproblemen, maakten zijn periodieke depressies nog heviger en langduriger.

Einstein was volledig op de hoogte van de depressieve periodes van Ehrenfest, maar zag dat het nu wel heel slecht ging met zijn vriend. Al bijna een jaar eerder, in augustus 1932, had Einstein een brandbrief geschreven aan de secretaris van het curatorium van de Leidse universiteit. Hij maakte duidelijk dat Ehrenfest depressief was en zou spelen met de gedachte aan zelfmoord. Einstein pleitte voor de aanstelling van een tweede hoogleraar in de theoretische fysica om Ehrenfest te ontlasten, in ieder geval voor zolang de chaotische ontwikkeling binnen de theoretische fysica voortduurde.<sup>133</sup> Het curatorium kon waarschijnlijk niets doen vanwege de crisis. Net 16 dagen voor Einsteins schrijven had Ehrenfest al zijn afscheidsbrief geschreven en in een gesloten envelop klaargelegd. Nog een jaar lang vocht Ehrenfest tegen zijn depressie voor hij uiteindelijk op 25 september 1933 zelfmoord pleegde.

Na Ehrenfests dood vertrok Einstein in oktober 1933 voorgoed naar Amerika. Daar schreef hij een gevoelig in memoriam voor de *Leidsche Studenten-almanak*. Einstein prees daarin het vermogen van Ehrenfest om het grondidee van een theorie lost te weken van haar mathematische franje en benadrukte de waardering die Ehrenfest oogstte onder vakgenoten vanwege de helderheid die hij bracht bij zijn deelname aan discussies. Einstein noemde de depressies waar Ehrenfest onder gebukt ging, en meende dat deze verergerden door de turbulente ontwikkelingen in de theoretische fysica van de laatste jaren. 'Dazu kommt die erhöhte Schwierigkeit, welche die Anpassung an neue Gedanken dem Fünfzigjährigen stets bietet. Ich weiss nicht, wie viele der Leser dieser Zeilen solche Tragik voll verstehen können.'<sup>134</sup> Einstein, even oud als Ehrenfest, sprak hier ook over zichzelf. Hij was het niet eens met de nieuwe ontwikkelingen. Hij trok zich terug op Princeton, wendde zich af van het onderzoek aan de quantummechanica,<sup>135</sup> en richtte zich op het vinden van een algemenere

de verklaringen van de Akademie en de reactie van (zoals nu blijkt) Berliner en Ehrenfest: Hentschel, (n. 123) 18–21 en 59–61.

129 Ehrenfest aan Einstein, 22 mei 1933: APE ESC 3, sectie 9.

130 J. Plesch aan Ehrenfest, 15 juli 1933: APE ESC 8, sectie 8.

131 Isaacson, *Einstein. His life and universe* (n. 1) 404.

132 I. Kayser aan Ehrenfest, 17 april 1933: APE ESC 3, sectie 9.

133 Van Lunteren, 'Ehrenfest: de Leidse onderzoekschool' (n. 1). Zie voor de inhoud van Einsteins brief: Ph. Idenburg, *De Leidse universiteit 1928–1946: Vernieuwing en verzet* (Den Haag 1978) 354–356.

134 Einstein, 'Nachruf' (n. 2) 96.

135 Pais, *Subtle is the Lord* (n. 1) 428; Einstein staakte zijn constructieve bijdragen aan de quantummechanica in 1925.



theorie waarbij de onbegrijpelijke quantumeigenschappen zouden worden verklaard door voorstelbare, causale processen. En hoewel Einstein er formeel tot in 1953 hoogleraar bleef, kwam hij nooit meer naar Leiden.<sup>136</sup>

### *De erfenis van Einstein en Ehrenfest*

Einstein heeft zijn sporen nagelaten in Leiden; letterlijk door zijn handtekening op de muur van de logeerkamer in Ehrenfests huis, waar hij vele malen te gast was, maar zeker ook door zijn invloed op de ontwikkelingen in de fysica te Leiden. Ehrenfest en Einstein hebben beiden in de fysica hun invloed doen gelden, waarbij de erfenis van Einsteins ideeën natuurlijk het meest zichtbaar is. Maar beiden hebben een belangrijke rol gespeeld in de stormachtige ontwikkelingen die aan de geboorte van de quantummechanica vooraf gingen. Einstein had met zijn relativiteitstheorieën en lichtquantumhypothese bijgedragen aan een revolutie in de natuurkunde. Ehrenfest richtte zich dikwijls op het bekritisieren en verhelderen van het werk van anderen. Dat resulteerde dan wel niet in spectaculaire ontdekkingen, maar Ehrenfests kritische exposés zorgden er wel voor dat keer op keer problematische aspecten van theorieën en ideeën aan het licht kwamen. Ook tijdens de vele discussies die hij met fysici had, speelde Ehrenfest vaak een belangrijke rol in het signaleren van zwakheden, onduidelijkheden en tegenspraken in andermans werk. Hij was een belangrijke sparringpartner voor andere fysici, niet in de laatste plaats voor zijn vriend Einstein, en hij zweeptte anderen op tot grote prestaties. Hij behoorde tot de selecte groep fysici die stevast werd uitgenodigd op de Solvaycongressen, en behoorde dus wel degelijk tot de top van zijn vakgebied. Ehrenfest had gedurende deze periode een niet te onderschatten rol binnen de fysische gemeenschap. Hij werd geprezen voor zijn rol als criticus en katalysator, wist talloze fysici te prikkelen en inspireren, bouwde Leiden uit tot een internationaal toonaangevend centrum, leverde een schaar aan succesvolle leerlingen af en bewees van onschatbare waarde te zijn in de tijd dat de fysica een lastig en verwarrend pad was ingeslagen. Voor Einstein was hij een belangrijke vriend en inspirator die hem het vuur voortdurend na aan de schenen legde. Bovendien speelde Ehrenfests kritische grondhouding een belangrijke rol in het helder krijgen van Einsteins ideeën bij anderen. Zo gezien is Ehrenfests rol in het onderzoek veel groter dan je enkel op grond van alleen zijn publicaties zou verwachten. Het voorbeeld van Ehrenfest illustreert een belangrijk gegeven, namelijk dat veel nieuwe wetenschappelijke resultaten veeleer het gevolg zijn van een collectieve dan een individuele inspanning. De eer gaat echter volledig naar degene die het publiceert.

Ehrenfest zelf schiep veel genoegen in het verder helpen van anderen, maar vond het tegelijkertijd niet te verkroppen dat hij zelf niet in staat was tot veel vernieuwende bijdragen aan de natuurkunde. Einstein was zijn vriend dankbaar voor de belangrijke rol die hij speelde, maar zoals hij treffend beschreef: ‘Litt er doch unablässig darunter dass sein kritisches Denkvermögen seine konstruktive Fähigkeit überragte; der kritische Sinn beraubte ihn sozusagen der Liebe zu den Kindern des eigenen Geistes, bevor sie geboren wurden’.<sup>137</sup>

<sup>136</sup> Ibidem 526.

<sup>137</sup> Einstein, ‘Nachruf’ (n. 2) 95.