

OUDE EN NIEUWE VRAGEN DER NATUURKUNDE

DOOR

G. E. UHLENBECK

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET BUITENGEWOON HOOGLERAAR-
SCHAP IN DE THEORETISCHE NATUUR-
KUNDE, DE LORENTZ-LEERSTOEL, AAN
DE RIJKSUNIVERSITEIT TE LEIDEN OP

1 APRIL 1955

1955
N.V. NOORD-HOLLANDSCHE UITGEVERSM AATSCHAPPIJ
AMSTERDAM

OUDE EN NIEUWE VRAGEN DER NATUURKUNDE

OUDE EN NIEUWE VRAGEN DER NATUURKUNDE

DOOR

G. E. UHLENBECK

REDE

UITGESPROKEN BIJ DE AANVAARDING
VAN HET BUITENGEWOON HOOGLERAAR-
SCHAP IN DE THEORETISCHE NATUUR-
KUNDE, DE LORENTZ-LEERSTOEL, AAN
DE RIJKSUNIVERSITEIT TE LEIDEN OP

1 APRIL 1955

1955
N.V. NOORD-HOLLANDSCHE UITGEVERSMAATSCHAPPIJ
AMSTERDAM

*Mijne Heren Curatoren, Dames en Heren
docenten en studenten en Gij allen, die deze
plechtigheid met Uw tegenwoordigheid
vereert,*

Zeer geachte toehoorders,

Bij deze inwijding van de nieuwe leerstoel, naar Lorentz genoemd, scheen het mij geoorloofd om de titel van mijn rede ook aan Lorentz te ontleen en te spreken over: „Oude en nieuwe vragen der natuurkunde”. Dit is in alle bescheidenheid bedoeld. Het meesterschap waarmee Lorentz in zijn „Alte und neue Fragen der Physik”, de toen (d.i. 1910) brandende vragen der relativiteits- en quantumtheorie behandelde, zult U niet van mij vergen. Maar ik kan U misschien een indruk geven van enige recente problemen, waarvan ik de ontwikkeling van nabij heb meegemaakt. En tevens hoop ik U iets te doen voelen van wat de Leidse natuurkunde, en speciaal het onvergetelijke drietal: Lorentz, Ehrenfest en Kramers, voor mij persoonlijk betekend heeft.

Laat mij beginnen met te zeggen dat de titel U niet moet suggereren dat de physica uit een aantal los samenhangende problemen bestaat. Het wonder der natuurkunde is de eenheid, het systeem en de grote samenvattende theorieën. In dit systeem zijn er natuurlijk vele lacunes, waaraan men zijn hele leven kan werken, maar er is ook een min of meer duidelijke begrenzing, een „frontier”, en daardoor is er altijd een centraal probleem. In mijn studietijd was dit het probleem van de atoomstructuur en de quantummechanica; tegenwoordig is het zonder twijfel het probleem van de z.g. elementaire deeltjes. Wat is de structuur (als men daarover praten kan) van de laatste bouwstenen der materie: het electron, het

proton en het neutron, en wat is het verband met de vele nieuwe, kort levende deeltjes die in de laatste tiental jaren ontdekt zijn? Ik zal daarom beginnen met enige punten van de ontwikkeling van deze nieuwe vraag der natuurkunde. en ik hoop dat U de persoonlijke wijze waarop ik dit zal doen zult willen verontschuldigen.

In de twintiger jaren waren de enige elementaire deeltjes het electron en het proton. Over hun structuur was veel geschreven, speciaal wat betreft het electron, het Lorentz electron. Was dit een klein bolletje van negatieve electriciteit? Door welke krachten werd het dan bij elkaar gehouden? Was de oorsprong van de massa van electromagnetische aard, veroorzaakt door het meesleuren van het electromagnetische veld dat door de lading was opgewekt, of had het electron ook een „echte” massa? Al deze vragen, hoe belangrijk ook, lagen toch in die tijd aan de grens van de wetenschappelijke aandacht. Het centrale probleem was de structuur van het atoom en hiervoor konden de electronen eenvoudig als geladen massapunten beschouwd worden. Het planetaire model van het atoom door Rutherford en Bohr ontwikkeld, was aan iedere student bekend. We wisten dat de verschillende chemische atomen bestonden uit een zware kern, waaromheen een aantal electronen cirkelden. Over de structuur van de kernen maakte men zich ook geen zorgen; ze moesten op één of andere wijze uit protonen en electronen opgebouwd zijn. De brandende vraag was, wat de wetten waren die de beweging der electronen beheersten. Bohr had ons geleerd dat deze wetten zeer verschillend moesten zijn van de bekende Newtonse mechanica, dat er discrete toestanden waren die uit al de mogelijke mechanische banen geselecteerd moesten worden door de z.g. quantumvoorwaarden, en dat de bewegingen der electronen plotseling konden overgaan van één toestand naar een andere (de z.g. quantsprongen) waarbij dan electromagnetische straling hetzij geabsorbeerd of gemitteerd werd. Op grond hiervan kon men, zij het dan ook meestal slechts kwalitatief, de structuur der atoomspectra, de

chemische eigenschappen, de wetten van de Röntgenstraling enz., begrijpen. Het was duidelijk dat men aan het begin stond van een grote nieuwe synthese. Maar het was erg moeilijk! Quantitatief begreep men eigenlijk alleen het waterstofspectrum. Het leek alsof men doorkneed moest zijn in de theoretische mechanica — de meeste theoretici van mijn generatie hebben dan ook een van de handboeken over de 'Mécanique Céleste' in hun boekenkast staan — en dat men bovendien goed thuis moest zijn in het grote experimentele materiaal dat over de atoomspectra verzameld was. En dit was ook nodig, zij het dan ook dat de uiteindelijke oplossing, de quantummechanica, door dieper te gaan weer eenvoudig bleek te zijn.

Hier in Leiden namen Lorentz en Ehrenfest natuurlijk actief deel in al deze grote ontwikkelingen en als student werd men er direct in ondergedompeld. De hoogtepunten van de week waren het Maandagmorgencollege van Lorentz en het Woensdagavondcolloquium dat Ehrenfest leidde. Daar *moest* men heen, zelfs al begreep men er weinig van, wat vooral bij het colloquium in den beginne meestal het geval was. (Bij het college van Lorentz leek altijd alles volmaakt helder, al kon men er vaak weinig van navertellen!) Maar na een tijd leerde men het „jargon”, en dank zij de wijze waarop Ehrenfest een samenvatting kon geven (waardoor soms zelfs de spreker de zaak pas goed begreep!) kreeg men al gauw een gevoel van vertrouwen. Bij deze gelegenheid mag ik wel met een enkel woord gedenken de m.i. onovertroffen opleiding, die Ehrenfest aan zijn studenten gaf. Hij werkte eigenlijk altijd met één student en wel elke middag. De grootste zonde was om te zeggen dat men iets begreep als dat niet het geval was, en het wonder was dat men na een jaar bijna als gelijken samenwerkte. Ja, je dacht als student soms wel dat je het eigenlijk beter wist! Dan stond men op eigen benen, en had de moed gekregen voor eigen werk. Moed is een van de voornaamste qualiteiten die de wetenschappelijke onderzoeker moet hebben, en de methode van

Ehrenfest is de enige wijze die ik ken om het een jong student bij te brengen. Helaas is er voor nodig niet alleen de grote didactische gaven van een Ehrenfest, maar ook de m.i. ideale verhouding tussen de aantallen professoren en studenten (namelijk één op één), die hoe langer hoe meer tot het verleden schijnt te behoren.

Als er meerdere studenten waren, dan moedigde Ehrenfest sterk aan, dat ze samenwerkten. En zo gebeurde het dat ik in 1925 met Goudsmit in nader contact kwam. Ik was enige jaren in Italië geweest, en hoewel ik het doctoraal examen gedaan had, wist ik eigenlijk niets. Goudsmit had zich vroeg gespecialiseerd, had al reeds verscheidene artikelen gepubliceerd over de atoomspectra, waarvan hij een kenner was, en hij kreeg van Ehrenfest de taak om mij op de hoogte te brengen. Goudsmit deed dat met veel toewijding. Gedurende de hele zomer van 1925, drie middagen in de week, vertelde hij mij alles wat hij wist. Het bleek dat wij elkaar goed aanvulden, en we gingen daarom verder en trachtten de nieuwste artikelen van Bohr, Pauli, Landé en anderen te verwerken. We begrepen er niet veel van en soms leek het ons pure abracadabra, een soort toverspel met de quantumgetallen.

We weten nu dat de duisterheid van de theorie der atoomstructuur in die tijd te wijten was aan twee oorzaken. In de eerste plaats was de ware mechanica, de quantummechanica, niet bekend. Dit vereiste een herziening van de grondslagen van de natuurbeschrijving, even diepgaand als voor de relativiteitstheorie nodig bleek te zijn. Dit gebeurde in de grote „doorbraak” van 1926 door het werk van Heisenberg, Schrödinger en Dirac. De tweede, minder fundamentele oorzaak was de onvolledigheid van het planetaire model van het atoom. Behalve de „jaarlijkse” beweging van de electronen rondom de kern, moet men veronderstellen dat de electronen ook een „dagelijkse” rotatie vertonen. Dit is de hypothese van de spin van het electron.

Goudsmit en ik kwamen op dit idee door de studie van een artikel van Pauli, waarin het beroemde uitsluitingsprincipe

geformuleerd werd, en waarin voor het eerst aan het electron vier quantumgetallen werden toegekend. Dit gebeurde geheel formeel, er werd geen voorstelling aan verbonden. Het was ons een raadsel; we waren zo vertrouwd aan de ene kant met de stelling dat elk quantumgetal aan een vrijheidsgraad beantwoordde, en aan de andere kant met de idee van het puntelectron dat klaarblijkelijk slechts drie vrijheidsgraden had, dat we met het vierde quantumgetal geen weg wisten. Alleen als het electron werkelijk een bolletje was dat nog kon roteren, werd het voor ons begrijpelijk. Het vierde quantumgetal was dan aan deze rotatie verbonden. Wat meer technisch, het was ons duidelijk, dat we moesten aannemen:

1. elk electron roteerde zo dat het een halve quantumeenheid ($\frac{1}{2} \hbar$) impulsmoment bezat, en
2. elk electron had daardoor ook een magnetisch moment, waarvan de verhouding tot het impulsmoment twee keer groter was dan de welbekende $e/2mc$, die voor de omloopsbeweging gold.

De eerste veronderstelling was nodig om te verklaren dat er slechts twee oriëntaties van de rotatie-as t.o.v. het vlak der omloopsbeweging mogelijk zijn. Door het magnetisch moment zouden deze twee oriëntaties ietwat verschillende energie hebben en dit zou dan de oorsprong zijn van de alkali dubletten. We wisten dat de afhankelijkheid van de doublet-splitsing van de kernlading dan goed uitkwam, en we dachten dat de fijnstructuur van het waterstofspectrum ook in harmonie met ons beeld was, hoewel we het niet in detail zagen omdat de berekening ons erg moeilijk leek. De tweede onderstelling (de z.g. gyromagnetische anomalie) was nodig voor de verklaring van het anormale Zeeman effect. We vonden wat later in een oud stuk van Abraham (waar Ehrenfest ons attent op maakte) dat voor een roterend bolletje met oppervlakte lading de factor twee die nodig was, werkelijk klassiek begrepen kon worden. Dat moedigde ons aan, hoewel ons enthousiasme sterk gedempt werd toen het bleek dat voor de

rotatie die nodig was de snelheid aan het oppervlak van het electron vele malen die van het licht moest zijn!

Ik herinner mij dat we het meeste hiervan bedachten op een middag laat in September 1925. We waren wat opgewonden, maar *dachten* er niet aan om iets te publiceren. Het leek zo speculatief en boud, dat er wel iets aan haperen moest, vooral ook omdat Bohr, Heisenberg en Pauli, onze grote autoriteiten, nooit iets dergelijks voorgesteld hadden. Maar we vertelden het natuurlijk aan Ehrenfest. Hij kwam direct onder de indruk, vooral, geloof ik, door het aanschouwelijk karakter van onze veronderstelling, dat zo geheel in zijn lijn lag. Hij maakte ons op allerlei attent (o.a. dat in 1921 A. H. Compton al reeds het idee van een roterend electron geopperd had als een mogelijke verklaring voor de natuurlijke eenheid van het magnetisme) en zei tenslotte dat het óf erg belangrijk, óf onzin was, en dat we maar een korte mededeling voor Natuurwissenschaften moesten schrijven en aan hem geven. Hij besloot met: „und dann werden wir Herr Lorentz fragen”. Dit gebeurde. Lorentz ontving ons met zijn bekende grote vriendelijkheid, en hij was vol belangstelling, hoewel geloof ik ook wat sceptisch. Hij zou er over denken. En werkelijk, al reeds de volgende week gaf hij ons een heel manuscript geschreven in zijn prachtig handschrift met lange berekeningen over de electromagnetische eigenschappen van roterende electronen. Het ging ons wat te hoog, maar het was wel duidelijk, dat als men het beeld van het roterend electron au sérieux nam, van het klassieke standpunt uit gezien er ernstige moeilijkheden waren. Eén ervan (later ook door Fermi opgemerkt) was, dat de magnetische energie zo groot was dat met de bekende afmeting van het electron door de equivalentie van massa en energie het electron grotere massa zou hebben dan het proton, of als men aan de bekende massa vasthield het electron zo groot als het hele atoom gedacht moest worden. Hoe dan ook, het leek onzin! Goudsmit en ik dachten beiden, dat het misschien beter zou zijn als we voorlopig maar niets publiceerden. Maar toen wij dit aan Ehrenfest zeiden, antwoordde hij: „ich

habe ihren Brief schon längst abgesandt; Sie sind beide jung genug um sich eine Dummheit leisten zu können"! Eind October verscheen onze mededeling, en zij trok direct de aandacht. Enige dagen na het verschijnen kregen we reeds een brief van Heisenberg, waarin hij schreef dat met ons model de doubletsplitsing in de alkalispectra er goed uitkwam afgezien van een factor twee en hij vroeg onze opinie over deze moeilijkheid. Wij hadden de formule van Heisenberg zelf nog niet afgeleid, maar toen we wisten dat het kon, lukte het ons na hard werken ook, en we kregen dezelfde verkeerde extra factor twee. Deze moeilijkheid werd enige maanden later opgehelderd door Thomas, en wordt sindsdien de Thomas-factor twee genoemd. Eind November kwam Bohr in Leiden voor de viering van het gouden doctoraat van Lorentz, en wij hebben toen vele uren met hem gepraat. Bohr maakte zich geen zorgen over de moeilijkheden verbonden met de klassieke beschrijving van de spin, en hij was eigenlijk direct overtuigd. Hij spoorde ons aan om vooral de fijnstructuur van het waterstofspectrum precies te discuten, en hij hielp ons met het opstellen van een tweede 'Letter to the Editor' (ditmaal aan Nature), dat daardoor sterk de kenmerken van zijn stijl vertoont. Het verscheen in Januari 1926, en sindsdien werd de idee van de spin algemeen aanvaard. Pauli was een van de laatste die het accepteerde, hoewel het enkel een model was om de vier quantumgetallen die hij gepostuleerd had, aanschouwelijk te maken.

Ik ben zo uitvoerig ingegaan op de ontdekking van de electron spin, gedeeltelijk omdat mijn herinneringen daaraan misschien van enige historische interesse zijn, maar ook omdat het toonde dat het elementaire deeltje (want het bleek spoedig dat ook het proton een spin $\frac{1}{2} \hbar$ had) meer attributen had dan enkel massa en lading. Het is een eerste aanduiding van het probleem van de structuur van het elementaire deeltje, dat zeker niet begrepen kon worden op grond van de klassieke theorie.

De verdere ontwikkeling zal ik slechts zeer in het kort

schetsen. In 1926 kwam de grote synthese van de quantummechanica. Het was zulk een diepe ervaring, dat zij voor mijn generatie de hele wetenschapsopvatting bepaald heeft, en men hoopt steeds op een herhaling van zo'n explosie van het inzicht! De idee van de spin van het electron werd door Pauli in 1927 aangepast aan de quantummechanica en de spin kreeg hierdoor een complementaire interpretatie nl. als de polarisatie van de materiegolven. Dit leidde Dirac in een van de diepzinnigste verhandelingen van deze eeuw tot de zg. relativistische theorie van het electron, waardoor de spin van het electron in zekere zin verklaard werd. Het voerde tot de voorspelling van het positron dat spoedig daarna (in 1932) door Anderson en Blackett ontdekt werd. In hetzelfde jaar werd door Chadwick het neutron gevonden, waarmee dus het aantal elementaire deeltjes al tot vier gestegen was. Hierbij kwam voor de oorlog nog het meson en misschien het neutrino, terwijl na de oorlog het aantal snel steeg en nu al reeds een twintigtal bedraagt. Het zou mij veel te ver voeren als ik U de ontdekkingsgeschiedenis, ja zelfs enkel de eigenschappen van al deze nieuwe deeltjes zou willen vertellen. Laat mij volstaan met te zeggen dat al deze deeltjes een min of meer korte levensduur hebben — de enige stabiele blijven het electron, het proton en misschien het neutrino —, dat er een genetisch verband tussen de deeltjes bestaat die op nieuwe selectieregels wijst, en dat men de indruk krijgt dat men drie families van deeltjes en ook drie soorten van wisselwerking onderscheiden kan. Kortom, het is duidelijk dat men voor een geheel nieuwe wereld staat. Het onderzoek is bijna geheel in handen van de experimentatoren. Ik geloof dat de meeste theoretici het wel eens zijn, dat de tegenwoordige methoden der quantumtheorie hun kracht verloren hebben. Als men de eigenschappen van de elementaire deeltjes kent, kan men hun verder gedrag wel min of meer beschrijven, maar men mist de voorspellende kracht wat betreft deze eigenschappen. Helaas is het experimentele werk zeer kostbaar. Hoewel men veel geleerd heeft en nog veel

leren zal van het onderzoek der cosmische straling, ligt de toekomst toch wel bij de hoge energie machines. En dat is wat men in Amerika million dollar physics noemt. Er is echter geen ontkomen aan, en eenieder die b.v. het cosmotron laboratorium in Brookhaven bezocht heeft, zal ook wel de fascinatie gevoeld hebben, die uitgaat van al die groepjes enthousiaste physici werkend rondom zo'n monster machine aan de grenzen van onze wetenschap.

Op een recente phase van de ontwikkeling der quantum-mechanica wil ik nog nader ingaan, gedeeltelijk omdat het een tijd lang de dageraad van een nieuwe synthese leek te zijn (en misschien is het dat ook wel!), maar ook om de rol die Kramers hierbij gespeeld heeft, en die misschien niet voldoende gewaardeerd is, meer naar voren te brengen. Ik heb hier het oog op het z.g. renormalizatie programma van de veldtheorie. De toepassing van de quantumtheorie op het electromagnetische veld is bijna zo oud als de quantumtheorie zelf. Het was al nodig voor de afleiding van de Planck'se stralingswet. De systematische toepassing geschiedde echter eerst in 1927 in de stralingstheorie van Dirac. Deze quantum-electrodynamica gaf de mathematische beschrijving van het dualisme photon-golf van het electromagnetische veld. Om het dualisme materieel deeltje — de Broglie golf uit te drukken moest men op analoge wijze de golfvergelijkingen van de materie beschouwen als klassieke veld vergelijkingen en hierop de quantumtheorie toepassen. De wisselwerking van electronen met het electromagnetische veld werd in deze beschrijving de interactie van twee gequantizeerde velden. Door het werk van Pauli, Weisskopf, Yukawa e.a. werd deze methode uitgebreid, zodat aan elk elementair deeltje een gequantizeerd veld toegevoegd kon worden dat afhankelijk was van de aard (lading, massa, spin) van het deeltje. Omstreeks 1940 leek dit de uiteindelijke vorm van de quantum-mechanica te zijn.

In deze tijd was Kramers bezig met het tweede deel van zijn groot leerboek over de quantummechanica te schrijven.

en hierin moest hij zich natuurlijk rekenschap geven van de bovengenoemde wending van de theorie speciaal wat betreft de quantumelectrodynamica. Het was een echte worsteling! Ik hoor hem nog verzuchten, dat hij maar niet kòn begrijpen waarom de Dirac'se stralingstheorie zo goed was, hoewel het onvoldoende onderscheid maakte tussen het eigen veld van het electron en het uitwendige veld, hoewel het zich geen rekenschap gaf van de oneindige electromagnetische massa, en hoewel de correspondentie met de klassieke theorie van het electron geheel onduidelijk was. Kramers, met zijn diepe kennis zowel van de klassieke als van de quantumtheorie, vond vooral dit laatste punt hoogst onbevredigend. Hij was ook eerder en meer bewust van de onvolmaaktheden van de theorie dan de meerderheid van zijn tijdgenoten. De quantumelectrodynamica was onvolmaakt; men moest met tact rekenen om zich niet te stoten aan de beruchte divergenties, maar de meeste physici (ik zelf inclus) maakten zich daar weinig zorgen over.

De zaak is helaas te technisch om in details te treden en ik kan U enkel de uiterlijke geschiedenis vertellen. In zijn leerboek, dat in 1938 verscheen, kon Kramers enkel een andere vorm geven aan de quantumtheorie van het stralingsveld, waardoor het tenminste duidelijk werd waarom in vele gevallen de Dirac'se theorie het juiste antwoord gaf. Hij was zich echter bewust dat deze vorm niet equivalent met de Dirac'se theorie was en dat het misschien tot afwijkingen kon leiden, die experimenteel getoetst konden worden. Gedurende de oorlog heeft hij hieraan voortdurend verder gewerkt, en toen dan ook in het voorjaar 1947 in Amerika op Shelter Island de eerste van een reeks conferenties over de veldtheorie plaats vond, kon Kramers zijn ideeën tenminste in de onrelativistische vorm volledig voordragen. Het maakte zeer veel indruk, vooral ook omdat op dezelfde conferentie Lamb over zijn metingen vertelde, waaruit voor het eerst definitief bleek dat er in de fijnstructuur van het waterstofspectrum afwijkingen waren van de bestaande Dirac'se theorie. Men

mocht misschien verwachten dat de verfijning van de theorie zoals deze door Kramers begonnen was, van deze afwijkingen rekenschap zou kunnen geven. Deze verwachting is geheel vervuld. Door Schwinger, Feynman en Dyson werden de ideeën van Kramers met kracht opgevat, en op de volgende conferenties (Pocono 1948, Oldstone 1949) kon de volledige relativistische theorie reeds voorgedragen worden. De z.g. Lamb shift werd geheel verklaard. Het is een van de grote successen van de na-oorlogse natuurkunde, waarbij men niet weet wat men meer bewonderen moet, de geraffineerdheid van het experiment of de kracht van de theorie. Daarbij kwam als tweede groot succes de voorspelling van Schwinger dat de gyromagnetische verhouding van het electron iets afwijken moest van de waarde twee die door Goudsmit en mij gepostuleerd was, een voorspelling die door Kusch en Foley experimenteel bevestigd werd. Kortom, het leek zoals ik zei de dageraad van een nieuwe synthese. Het heeft dan ook net als in 1926 de quantummechanica het deed, een hele generatie van jonge theoretici geïnspireerd. Helaas is men in de grote verwachtingen wat teleurgesteld. Vooral de toepassing op de mesonvelden bleek buitengewoon moeilijk te zijn, en hoewel men nog niet zeker kan zeggen, dat voor het mesonveld de theorie en het experiment in tegenspraak zijn, is toch een tamelijk grote dosis optimisme nodig om het vertrouwen in de theorie te behouden. Bovendien heeft de theorie zoals ik reeds eerder zei, wat betreft de elementaire deeltjes een descriptief karakter, en verliest daardoor veel van haar voorspellende kracht. Het is duidelijk dat men een flinke stap voorwaarts heeft gemaakt, maar het is ook duidelijk dat er nog veel aan de theorie ontbreekt. Door het afsplitsen van de oneindigheden — en dat dit voor het electromagnetische en enige andere velden op een eenduidige wijze kan geschieden, is één van de voornaamste prestaties van de theorie — heeft men al de vragen naar de structuur van de elementaire deeltjes afgesneden. Met dit probleem kan men m.i. slechts verder komen door voorzichtig tastend speculeren aan de hand van

het experiment. Het recente werk van Pais en Gell-Mann geeft hiervan een voorbeeld. Men kan er verschillend over denken — ikzelf heb er veel sympathie voor — maar het is toch wel zeker dat de toekomstige synthese, waar we al zo lang op wachten, niet enkel zal komen door de uitbouw van het wiskundig apparaat van de tegenwoordige veldtheorie, maar dat er nieuwe fysische gedachten nodig zijn. En om die te vinden zal de jonge theoreticus een zekere moed en ook naïviteit niet kunnen missen. Misschien kan hij uit de geschiedenis van de ontdekking van de spin, die ik zoëven schetste, lering trekken.

Tot slot wil ik nog een oude vraag der natuurkunde met U bespreken, waar ik mij de laatste jaren speciaal mee heb bezig gehouden. Het is het z.g. condensatieprobleem. Kan men precies begrijpen waarom een gas beneden een zekere kritische temperatuur door samenpersen altijd tot een vloeistof gecondenseerd kan worden? Het is een vraag uit de statistische physica, d.i. het deel der physica, dat tot taak heeft de verklaring van de macroscopische eigenschappen der materie uit de bekend veronderstelde moleculaire constitutie. Het merendeel van de lacunes in het systeem der natuurkunde wordt gevormd door de onopgeloste problemen der statistische physica. Daartoe behoren de welbekende problemen van de suprageleiding en van de fenomenen in vloeibaar helium, maar daartoe behoren óók de veel minder opvallende vragen naar de verklaring van de z.g. phase overgangen. Waarom smelt een vaste stof bij een scherp bepaalde temperatuur; waarom condenseert een damp bij een scherp bepaalde dichtheid, enz.; men kan het aantal van zulke vragen gemakkelijk vermeerderen, vooral als men ook magnetische en andere soorten overgangen beschouwt. Ik wil hier de nadruk leggen op het feit dat voor bijna geen van deze algemeen bekende fenomenen een rigoreuze verklaring bestaat, hoewel de grondslag waarvan men uit moet gaan reeds meer dan vijftig jaar bekend is. Dit wil natuurlijk niet zeggen dat men geen kwalitatieve verklaringen heeft, die vaak van grote waarde

zijn. In de statistische physica, in tegenstelling met het probleem der elementaire deeltjes, ligt echter m.i. de taak van de theoreticus in de ontwikkeling van exacte methodes, in de uitbouw van het wiskundig apparaat. In elk geval voor mij ligt de grote charme van de statistische physica in de samenhangen met gebieden van de wiskunde, waarmede men anders zelden in aanraking komt.

Maar laat ik terugkomen op het condensatie-probleem. De kwalitatieve oplossing ervan werd reeds in 1873 gegeven in de beroemde dissertatie van Van der Waals als een consequentie van de welbekende toestandsvergelijking. Het heeft lang geduurd voordat men zich aan de greep van deze dissertatie ontworsteld had. De fysische ideeën van Van der Waals waren zo helder, en de overeenstemming met het experiment, hoewel kwantitatief nooit exact, was kwalitatief zo mooi, dat er niet veel te wensen overbleef.

De moderne phase van het probleem begon toen Kamerlingh-Onnes voor de beschrijving van het experimenteel materiaal afzag van de Van der Waals'e toestandsvergelijking en er voor in de plaats de systematische z.g. viriaal ontwikkeling gebruikte. Hij was zich hierbij wel bewust, dat de successieve viriaal coefficienten een maat waren voor de wisselwerking van moleculen in paren, tripels, enz., en dat daardoor de samenhang met de intermoleculaire krachten veel precieser geformuleerd zou kunnen worden. De algemene theorie der viriaal coefficienten werd omstreeks 1930 door Ursell en Mayer ontwikkeld. Toen hierbij het inzicht kwam dat een phase overgang (zoals de condensatie) wiskundig enkel begrepen kon worden als een limiet eigenschap van de toestandsintegraal — een punt dat bij mijn weten het eerst door Kramers op het Van der Waals congres in 1937 is opgemerkt — kon het condensatieprobleem tenminste exact mathematisch geformuleerd worden. Toen ik nog in Utrecht was heb ik dit samen met Kahn gedaan. Het bleek dat condensatie mogelijk was en bij voldoende lage temperatuur ook wel waarschijnlijk, maar de uiteindelijke oplossing leek nog ver in het verschiet.

De stimulatie om weer over het condensatieprobleem na te denken kwam voor mij uit een artikel van Kirkwood. Hierin werd op grond van een approximatieve veronderstelling afgeleid dat er een phaseovergang was, zelfs als er *enkel* afstotende krachten tussen de moleculen zouden bestaan. Fysisch leek dit zeer paradoxaal, en ik kon het maar niet geloven. Het leek mij belangrijk om te zien of men de bewering van Kirkwood streng kon bewijzen of streng kon weerleggen en wel om de volgende reden. Het is bekend dat men helium ver boven het kritisch punt door samenpersen in de vaste toestand kan brengen. Men krijgt zelfs de indruk dat dit bij *elke* temperatuur mogelijk zal zijn als de druk maar voldoende hoog gemaakt wordt. Iets dergelijks is voor waterstof gevonden, zodat het misschien een algemene eigenschap is, geldig voor alle gassen. Als dat zo is, dan moet de verklaring op een algemene eigenschap van de intermoleculaire krachten berusten. De scherpe afstoting, werkzaam op kleine afstanden is zo'n algemene eigenschap, en dus zou de phase overgang van Kirkwood misschien de verklaring kunnen geven van de altijd mogelijke condensatie van de fluïde tot de vaste phase.

De zaak is helaas weer te technisch om U de resultaten van de pogingen, die ik samen met Riddell en Ford in deze richting gedaan heb, nader uit te leggen. Laat ik volstaan met te zeggen dat het ons nog steeds niet gelukt is om het vermoeden van Kirkwood te bewijzen noch om het te weerleggen, maar dat wij wel verder zijn gekomen, zodat ik nogal optimistisch ben dat de kwestie spoedig beslist zal worden. Het is misschien ook interessant om te vermelden dat de wiskundige problemen die te voorschijn komen alle te maken hebben met de theorie van de z.g. linear graphs, een theorie waarmee al reeds Cayley begonnen is. Het is m.i. de mathematische tegenhanger van de fysische theorie der fasenovergangen, en men heeft hier misschien weer een voorbeeld van de harmonie tussen de wiskunde en de natuurkunde die mij zo na aan het hart ligt

In de eerste plaats wil ik mijn eerbiedige dank uitspreken jegens *Hare Majesteit de Koningin* voor mijn benoeming tot buitengewoon hoogleraar aan deze universiteit.

Mijne Heren Curatoren. Ik voel het als een grote eer, dat U mij als de eerste bezetter van de Lorentz-leerstoel heeft willen voordragen. De idee van een wisselend gast-hooglerarschap in de theoretische natuurkunde lijkt mij zeer gelukkig. Vooral in Amerika, maar ook hier, is er zoveel als het ware zwevende informatie, die niet of slecht gepubliceerd is, dat een persoonlijk contact van grote waarde is. Ik zal mijn best doen om deze nieuwe onderneming op de juiste wijze te beginnen.

Ik wil verder mijn dank betuigen aan de beheerders van het Lorentz-fonds, die mede dank zij steun van de industrie deze leerstoel hebben mogelijk gemaakt; aan de Regents of the University of Michigan voor het verlof om deze benoeming te aanvaarden, en aan het Department of State voor de toekenning van een Fulbright travel grant.

Dames en Heren Professoren. Hoewel ik slechts een korte tijd in Uw midden zal zijn, wil ik U toch zeggen hoe zeer het mij verheugt een tijd hier te doceren, en daardoor misschien met enigen van U nader contact te krijgen. De Leidse universiteit is niet alleen mijn alma mater, maar ik ben er als het ware steeds door familiebanden mee verbonden geweest, eerst door mijn oom C. C. Uhlenbeck en nu door mijn broeder E. M. Uhlenbeck. Het enige dat mij weemoedig stemt is de herinnering aan mijn leermeester Ehrenfest en aan mijn vriend Kramers. Hoe hoog ik hun verdiensten schat is, hoop ik, uit mijn rede gebleken. Wat zij menselijk voor mij betekend hebben kan ik moeilijk onder woorden brengen.

Waarde Gorter en waarde De Groot. Ik weet dat door Uw initiatief deze leerstoel ontstaan is. Ik kan alleen maar zeggen: ik hoop, dat Gij en ook Uw medewerkers wat aan mij

zult hebben. Ik zelf zal zeker van het nieuwe Leidse werk en door het contact met de Nederlandse physici van alles opsteken.

Waarde Fokker. Gij zijt zowat de enige van de oude garde van Nederlandse physici, waaraan wij allen zoveel te danken hebben, die nog in functie is. Het is voor mij een groot genoegen dat wij tenminste voor een korte tijd collega's zullen zijn en elkaar geregeld zullen zien.

Waarde Casimir. Wij kennen elkaar sinds Gij als jong student bij Ehrenfest kwam studeren, en wij hebben vaak, zowel hier als in Amerika, gelegenheid gehad onze vriendschap te hernieuwen. Ik hoop dat deze tijd weer zo'n gelegenheid zal opleveren.

Dames en Heren Studenten. Officiëel zult U weinig met mij te maken hebben, en ik wil daarom slechts één raad geven. Een gastprofessor is iemand die de verantwoordelijkheden van zijn ambt in zijn eigen universiteit van zich afgegooid heeft, en die daardoor heel weinig te doen heeft. Maakt U daar gebruik van!

Ik heb gezegd.