

*Citation:*

J. de Boer, Levensbericht G.E. Uhlenbeck, in:  
Jaarboek, 1989, Amsterdam, pp. 184-190



*George Eugène Uhlenbeck*

## George Eugène Uhlenbeck

6 december 1900–31 oktober 1988

George Eugène Uhlenbeck werd op 6 december 1900 te Batavia – het huidige Jakarta – op Java geboren. Zeven jaar later keerde het gezin Uhlenbeck naar Nederland terug en vestigde zich in Den Haag. George deed daar in 1918 eindexamen HBS en ging aanvankelijk in Delft voor scheikundig ingenieur studeren, omdat in die tijd HBS-ers nog niet tot de universitaire studie werden toegelaten. Na de aanvaarding van de 'Wet Limburg' ging hij in 1919 naar Leiden om daar theoretische natuurkunde te gaan studeren. Reeds in 1920 deed hij zijn kandidaatsexamen en begonnen zijn contacten met zijn grote leermeester Ehrenfest. Na een half jaar ging Uhlenbeck echter voor een periode van drie jaar naar Rome als huisleraar voor de zoon van de toenmalige Nederlandse ambassadeur Mr. van Royen. Dit verhinderde hem niet om in die jaren toch zijn doctoraal examen in Leiden af te leggen.

In zijn 'Rome-tijd' werd hij goed bevriend met Enrico Fermi, maar hij werd ook betrokken in de activiteiten van het Nederlands Historisch Instituut in Rome, wat o.a. leidde tot zijn eerste publikatie in 1924 *Over Johannus Heckius*, een biografische schets van een van de stichters van de Academia dei Lincei in Rome. Zijn enthousiasme voor cultuur-geschiedenis, in het bijzonder ook zijn bewondering voor Johan Huizinga was zo groot geworden, dat het Ehrenfest, na zijn terugkeer uit Rome in juni 1925, zelfs enige overredingskracht kostte hem terug te brengen tot de 'echte problemen van de natuurkunde'. Ehrenfest zette hem aan het werk: samen met Sam Goudsmit zou hij zich gaan verdiepen in de theorie van de atoomspectra en daarmee begon de 'remarkable summer' van 1925, die tot de ontdekking van de elektronen spin zou leiden en die Uhlenbeck en Goudsmit meteen aan de grenzen van de toenmalige fysica plaatste, in direct contact met leidende wetenschappers uit die tijd.

Samen met Goudsmit worstelde hij die zomer met Sommerfeld's uitleg van de alkalispetra, waarbij naast het baan-impuls-moment van het valentie elektron ook aan de rest van het atoom, de zogenaamde 'atoomromp', een draai-impuls wordt toegekend, hij leerde dat Landé voor de verklaring van het anomale Zeeman-effect had aangenomen, dat voor de atoomromp de verhouding tussen magnetisch moment en impuls moment - de zogenaamde g-factor twee maal zo groot was als voor de baanbeweging en zij studeerden hard op een in dat zelfde jaar verschenen artikel van Pauli, waarin werd voorgesteld voor de beschrijving van dat zelfde anomale Zeeman-effect aan een elektron naast de bestaande drie quantum getallen nog een vierde halfmatig quantumgetal toe te kennen. Dit bracht Uhlenbeck en Goudsmit op de gedachte, dat waar een puntvormig elektron slechts drie vrijheidsgraden heeft het ruimtelijk elektron een extra vrijheidsgraad bezit: zij kwamen zo tot de gedurfde hypothese dat het elektron roteert om zijn eigen as met een draai-impuls van een halve quantum eenheid en een g-factor die twee maal zo groot is als voor de baanbeweging

geldt. Uit een oude publikatie van Abraham (1903) bleek dat voor een klassieke roterende bolvormige elektrische lading, met de lading aan het oppervlak, de g-factor inderdaad deze waarde heeft. Hun leermeester Ehrenfest achtte ondanks de bezwaren die tegen een dergelijk klassiek model konden worden ingebracht het voldoende verantwoord dit idee van een roterend elektron te publiceren en stuurde een artikel van Uhlenbeck en Goudsmit op 17 oktober 1925 naar *Naturwissenschaften*, waarin het in november verscheen. Een maand later werd een tweede meer volledige publikatie: *Spinning electrons and the structure of atomic spectra* in *Nature* gepubliceerd. Hieraan werd door Bohr, die ondertussen ook de grote betekenis van deze nieuwe hypothese had ingezien, een waarderende appendix toegevoegd.

Pas later is gebleken dat Kronig al eerder op dezelfde gedachte was gekomen maar ontmoedigd was door gesprekken met Heisenberg en Pauli, die overwegende bezwaren hadden tegen het gebruik van klassieke modellen in de zich ontwikkelende nieuwe quantummechanica. Over de preciese geschiedenis van de ontdekking van de elektronenspin, een uitermate belangrijke episode uit de geschiedenis van de quantummechanica waarin Uhlenbeck en Goudsmit zo'n grote rol in speelden, is later nog diepgaand onderzoek verricht, waarop wij hier echter niet kunnen ingaan.

Op 7 juli 1927 promoveerde Uhlenbeck op dezelfde dag als Goudsmit op een proefschrift *Over statistische methoden in de theorie der quanta*, waarmee hij opnieuw geheel in de actualiteit kwam te staan, maar nu van de statistische mechanica. Nog maar kort te voren waren de eerste publikaties verschenen over wijzigingen in de statistische beschouwingen van Boltzmann ten gevolge van de quantummechanica. Bose (1924) ontwikkelde de quantumstatistiek voor de stralingsquanta Einstein (1924, 1925) paste dit toe op een ideaal gas, waarbij bij lage temperaturen een interessant condensatie verschijnsel op bleek te treden. Fermi (1926) paste de statistiek aan aan de eisen van het pas gepubliceerde principe van Pauli en tenslotte had Dirac (1926) laten zien hoe de door Bose en Einstein ingevoerde statistiek en die van Dirac in de quantummechanica konden worden begrepen uit de symmetrie eisen, die aan de veel-deeltjes-golffunctie van het systeem moeten worden gesteld. In zijn proefschrift liet Uhlenbeck zien, dat door laten vallen van de symmetrie-eis de oorspronkelijke Boltzmann-statistiek weer te voorschijn komt. De verschillende statistieken konden daardoor vanuit een gemeenschappelijk gezichtspunt worden behandeld.

Geheel in de traditie van zijn leermeester Ehrenfest, bouwde Uhlenbeck in zijn proefschrift voort op de fundamentele ideeën van Boltzmann, zoals die in het beroemde Encyclopaedie-artikel van P. en T. Ehrenfest (1912) waren geanalyseerd en geformuleerd. De ensemble-methode van Gibbs (1902) werd door Uhlenbeck, evenals de zadelpuntmethode van Darwin en Fowler (1922), opgevat als een wiskundige methode ter behandeling van sommatieproblemen met nevenvoorwaarden. In het geval van de Bose-Einstein statistiek werd Uhlenbeck ook geconfronteerd met het probleem van de zogenaamde Bose-Einstein condensatie, dat hem nog vele jaren daarna zou blijven bezighouden: voor een eindig volume en een eindig aantal deeltjes leek strenge wiskundige behandeling géén voor de condensatie karakteristieke discontinuïteit in de macroscopische variabelen op te leveren. Een tiental jaren later zou op het Van der Waals-congres dit probleem wederom aan de orde komen.

Na zijn promotie ging Uhlenbeck wederom tesamen met Goudsmit naar Ann Arbor in de Verenigde Staten, waar hij een professoraat aanvaarde aan de University

of Michigan. De verdere uitwerking van de vele consequenties van de pas ontwikkelde quantummechanica was overal in volle gang en Uhlenbeck en zijn medewerkers werkten hieraan ten volle mee. Met Young werd de klassieke limiet van de WKB methode verder onderzocht en met Dennison (1932) bestudeerde Uhlenbeck de inversietrilling van het ammoniak molecuul; de juist door Dennyson en Hardy gevonden doublet opsplitsing werd op fraaie wijze verklaard met behulp van de symmetrie eisen, die aan de vibratie golf functie in het twee-minima probleem moeten worden gesteld.

Maar Uhlenbeck bleef in zijn hart toch het meest in de statische problemen geïnteresseerd. Vaak ging hij naar Utrecht terug: Ornstein had daar met zijn proefschrift (1908) bij Lorentz al veel onderzoek gedaan met de statistisch mechanica van Gibbs; samen met Zernike en met Burgers deed Ornstein ook veel onderzoek over fluctuaties en Brownse beweging. Uit de Utrechtse contacten tussen Uhlenbeck en Ornstein is dan ook een bijzonder interessante gezamenlijke publikatie *On the theory of Brownian motion* (1930) ontstaan, waarin een fraaie kritische synthese en uitbreiding van de bestaande theorieën van de Brownse beweging gegeven wordt, die nog altijd tot de 'klassieken' op dit gebied gerekend wordt.

Ondertussen drong de quantummechanica steeds verder in de statistische fysica door: Heitler en London, Slater, Kirkwood en Margenau hadden omstreeks 1930 de quantummechanische theorie van de intermoleculaire krachten gegeven, maar de toepassingen op de statistische mechanica waren nog beperkt gebleven tot de statistiek van het ideale gas, waarover het proefschrift handelde. Met Gropper (1932) werden voor het eerst de schijnbare attractiekrachten, resulterend van het symmetriseringsproces van de golf functie van twee moleculen, bestudeerd. Een baanbrekende nieuwe ontwikkeling was echter het werk van Uhlenbeck en Uehling (1933) over de quantumtheorie van de transportverschijnselen, waarbij een quantumtheoretische generalisatie van de Boltzmannvergelijking en van de Chapman-Enskog theorie van de transportverschijnselen werd afgeleid en in een heel mooie publikatie overzichtelijk en systematisch werd gepresenteerd. Hiermede was de gehele theorie van de transportverschijnselen op quantumtheoretische basis gezet.

Met grote interesse volgde Uhlenbeck in die jaren ook de fundamentele ontdekkingen op het gebied van de kernfysica: de ontdekking van het positron, van het neutron en van het neutrino, wat Fermi - een oude vriend van Uhlenbeck - tot zijn theorie van de beta-radioactiviteit stimuleerde. Uhlenbeck heeft in deze jaren, samen met Konopinski, met Rose en met Knipp ook verscheidene belangrijke bijdragen aan de theorie van de beta-radioactiviteit geleverd.

In 1935 keerde Uhlenbeck als opvolger van Kramers aan de rijksuniversiteit van Utrecht naar Nederland terug. Het zouden vier Utrechtse jaren worden waarin het condensatie-probleem uit de statistische mechanica een centrale plaats in zijn onderzoek ging innemen. De toestandsvergelijking voor gassen bij hogere dichtheden kwam op de voorgrond te staan en omdat het hierbij ging om systemen waar de intermoleculaire wisselwerking een dominante rol speelt, heeft Uhlenbeck hierbij in feite ook de statistische mechanica en de ensemble theorie van Gibbs als uitgangspunt aanvaard. Centraal staat dan de berekening van de partitiefunctie, die direct verbonden is met de thermodynamische vrije energie.

Met Erich Beth (1936) werd, gebruikmakend van de ideeën van Ursell (1927) en

van Slater (1913), de formele uitdrukking voor de tweede viriaalcoëfficiënt uit de reeksontwikkeling van Kamerlingh Onnes voor de toestandsvergelijking afgeleid. Een jaar later kwamen voortbouwend hierop de eerste resultaten van het onderzoek met Boris Kahn (1937). Hierin werd een quantummechanische generalisatie gegeven van de theorie van de verdichte gassen, die in dat zelfde jaar door Mayer (1937) was gepubliceerd. Bovendien was de nieuwe formulering niet meer gebaseerd op de aanname van additiviteit van de intermoleculaire krachten. Voor verwaarloosbare interactie volgde uit deze theorie weer de toestandsvergelijking van het ideale Bose-Einstein gas, die ook in Uhlenbeck's proefschrift voor kwam. Er bleek een wiskundig verband te bestaan tussen de Bose-Einstein condensatie en het gedrag van de toestandsvergelijking bij de gewone condensatie, dat Mayer ook al bestudeerd had.

Het probleem van de gas-vloeistof condensatie kwam ook centraal te staan op het Van der Waalscongres, dat in 1937 in Amsterdam gehouden werd. Hier ontstond een boeiende discussie, waaraan ook Uhlenbeck deelnam, over de vraag hoe uit een berekening van de partitiefunctie van Gibbs ooit een discontinuïteit, zo als bij gas-vloeistof-condensatie optreedt, verklaard zou kunnen worden, een probleem waarmee Uhlenbeck al reeds in zijn proefschrift worstelde. Kramers sprak toen als voorzitter het verlossende woord: niet-analytisch gedrag kan alleen verklaard worden als men overgaat tot de thermodynamische limiet. Voor Uhlenbeck was dit congres een bewijs, dat in de statistische mechanica nog zeer fundamentele problemen om een oplossing vragen.

Na zijn terugkeer naar Ann Arbor in 1939 werkte Uhlenbeck eerst aan statistische problemen van het Furry-model van de kosmische straling met Nordsieck en Lamb (1940) en later met Scott (1942), maar in de oorlog werd hij al spoedig voor een aantal jaren betrokken bij het onderzoek van het Radiation Laboratory van MIT, waar hij zich bezig hield met signaal-ruis problemen. Hier kwam hij in contact met Mark Kac, het begin van een lange en vruchtbare wetenschappelijke samenwerking, en met Norbert Wiener, die hem interesseerde voor de formele wiskundige behandeling van stochastische processen. Een belangrijk resultaat hiervan was de zeer bekende studie: *On the theory of Brownian motion II*, die hij samen schreef met Mingh Chen Wang en die in 1945 gepubliceerd werd. Hierin werd gedemonstreerd hoe met gebruik van de Fokker-Planck methode voor de distributie functie van de stochastische variabele resultaten worden verkregen, die identiek zijn met die welke volgen uit de bewegingsvergelijking van de stochastische variabele zelf.

In de vijftiger jaren raakte Uhlenbeck in samenwerking met Riddel en Ford diep geïnteresseerd in de combinatorische problemen, die voortkwamen uit Mayer's symbolische representatie van reeksontwikkelingen voor de toestands-vergelijking in termen van cluster-diagrammen. Deze problemen werden geplaatst in een veel breder wiskundig kader van de theorie van de 'linear graphs'. Door ordening van de diagrammen met gebruik van bloemrijke benamingen als: gewortelde en vrije Cayley-bomen, cactussen en Husimi-bomen en -sterren en door gebruik van voor de meeste fysici onbekende sommatie theorema's uit de wiskunde, werd deze hele problematiek niet alleen bijzonder fraai vorm gegeven, maar ook op een veel bredere basis gezet.

Ondertussen had Uhlenbeck zich opnieuw geworpen op wat voor hem het belangrijkste probleem van de statistische mechanica was en dat hij vaak 'Het probleem van Boltzmann' noemde, de vraag hoe het irreversibel proces naar het thermodyna-

misch evenwicht kan worden begrepen vanuit de strict reversibele mechanische wetten van de moleculaire dynamica. Al reeds vanaf zijn studie jaren onder Ehrenfest had deze problematiek een centrale plaats in zijn denken ingenomen: het ging hierbij enerzijds om Boltzmann's waarschijnlijkheids-beschouwingen, de Boltzmann vergelijking en het H-theorema, diep geanalyseerd door de Ehrenfest's in het Encyclopaedie-artikel (1910) en anderzijds om Gibbs' beschouwingen en het moeilijke 12de hoofdstuk uit Gibbs' Statistical Mechanics (1902), dat later pas waardering kreeg. Uhlenbeck noemde de stelling, dat een geïsoleerd systeem naar een thermodynamisch evenwicht streeft, dan ook de 'nulte hoofdwet' van de thermodynamica!

Ondanks het onderzoek, dat door vele onderzoekers op dit terrein verricht was, bleef in het bijzonder de afleiding van de Boltzmann-vergelijking, die volgens Boltzmann in de gasfase de instelling van het thermisch evenwicht beschrijft, een groot probleem. Reeds had Kirkwood kort na de oorlog (1946) een eerste poging gedaan door 'coarse graining' in de tijd een betere afleiding van de vergelijking te geven. Het was aan Uhlenbeck te danken dat een zéér belangrijke publikatie van Bogolyubow uit 1946 grotere bekendheid kreeg, doordat deze mathematisch zeer ondoorzichtige publikatie, later samen met Chow, grondig op zijn fysische merites werd geanalyseerd, verder ontwikkeld en nieuw gepresenteerd. Het irreversibel proces naar het evenwicht doorloopt verschillende stadia, met een steeds minder gedetailleerde beschrijvingswijze: er treedt een voortdurende 'contractie' van de beschrijvingswijze op. Zo wordt voor een gas in het 'initiële' stadium de ontwikkeling in feite beheerst door de totale verdelingsfunctie van alle moleculen; in de volgende 'kinetische' fase wordt de ontwikkeling bepaald door de één-deeltjes verdelingsfunctie, waarna in het volgende 'hydrodynamische' stadium het systeem op de basis van macroscopische variabelen: lokale dichtheid, snelheid en temperatuur beschreven wordt. De vergelijking die in de 'kinetische' fase geldt is dan een soort ggeneraliseerde Boltzmann vergelijking, die de aanzet is geweest tot nieuwe ontwikkelingen in de theorie van de transportverschijnselen door Cohen en vele anderen.

In 1961 ging Uhlenbeck van Ann Arbor naar de Rockefeller University, voorheen het Rockefeller Institute for Medical Research, in New York. Was in de voorgaande jaren het 'probleem van Boltzmann': het irreversibel proces naar het thermodynamisch evenwicht, als proces van voortschrijdende contractie van de beschrijvingswijze zeer veel beter begrepen, nu zou opnieuw het probleem van de gas-vloeistof condensatie hem wetenschappelijk in beslag gaan nemen. Ook Mark Kac werd aan de Rockefeller University verbonden, waarmee een periode van zeer vruchtbare wetenschappelijke samenwerking aanbrak. Kac had al in 1958 de partitiefunctie van een één dimensionaal gas van harde stokjes met exponentieel verlopende attractie berekend en aangetoond, dat in dit geval geen gas-vloeistof condensatie optreedt. Samen met Kac en Hemmer ging Uhlenbeck op dit systeem verder door: overgang naar de thermodynamische limiet verandert de situatie niet, maar indien men daarna de range van de potentiaal naar oneindig laat gaan, maar zo dat de integraal over de attractie energie eindig blijft, dan treedt wél gas-vloeistof condensatie op: men krijgt de één-dimensionale wet van Van der Waals met de gas en vloeistoftak verbonden door een horizontaal twee-fase stuk: in dit gebied zijn de distributiefuncties lineaire combinaties van die van de vloeistof- en de gas-fase. Door dit werk kwam bijna honderd jaar na Van der Waals' proefschrift de diepere betekenis van deze wet ineens weer

centraal te staan. De zestiger jaren brachten ook van andere zijden nieuwe bijdragen tot beter begrip van de wet van Van der Waals, wat mede samenhang met de nieuwe inzichten die toen over het singulier gedrag van de verschillende thermodynamische grootheden in de buurt van het kritisch punt verkregen werden.

Ook na zijn emeritaat in 1971 bleef Uhlenbeck actief. In de zeventiger jaren kreeg hij ook grote belangstelling voor de zogenaamde 'macroscopische quantumeffecten', die zich op verschillende plaatsen in de lage temperatuur-fysica voordoen. Naar zijn oordeel blijven deze macroscopische kwantisatie- en interferentie-effecten die optreden in superfluide vloeibaar helium en in supergeleiders, nog steeds vragen om een échte quantum statistische beschrijving en om een analyse van de grondslagen en van de geldigheid van de ergodische theorema's in dit gebied. Zijn belangstelling in deze vragen bleek nog uit een diepgaande studie: *The ideal Bose-Einstein gas revisited* uit 1977 samen met Ziff en Mark Kac, waarin de Bose-Einstein-condensatie mathematisch grondig werd onderzocht in de overtuiging dat uiteindelijk hieruit het wezen van de superfluiditeit beter begrepen kan worden.

Uhlenbeck was een geliefde lecturer en geëerde gast op talloze wetenschappelijke conferenties en zomerscholen; hij was de eerste Lorentz-hoogleraar in Leiden (1954/55) en de eerste Van der Waals-hoogleraar aan de universiteit van Amsterdam (1963/64). In 1959 was hij president van de American Physical Society. Van vele zijden werden hem eerbewijzen toegekend, zoals door de Notre Dame University (1953), het Case Institute (1960), de University of Colorado (1968), de Yeshiva University (1969) en de Rochester University (1976). In 1955 kreeg hij de Oersted-medaille van de American Association of Physics Teachers, in 1953 de Research Corporation Award en in 1964 de Max Planck-medaille van de Deutsche Physikalische Gesellschaft. De Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen verleende hem in 1970 de Lorentz-medaille en in 1977 was hij medeontvanger van de prestigieuze Wolf-prijs, toegekend door de Wolf-Foundation in Israël. In dat zelfde jaar, het jaar van zijn 50-jarig doctoraat, werd hem in de Verenigde Staten de hoogste wetenschappelijke waardering, de National Medal of Sciences, toegekend. In Nederland ontving hij toen een hoge onderscheiding door zijn benoeming tot Commandeur in de Orde van Oranje-Nassau.

De laatste jaren bracht Uhlenbeck te zamen met zijn vrouw Else wat meer teruggetrokken door in Boulder, Colorado. Hij kon terugzien op een leven dat geheel aan de grote en fundamentele vragen van de fysica gewijd geweest was. Hij was daarbij een voortreffelijk docent en een grote stimulans voor de leerlingen, medewerkers en vrienden, die het voorrecht gehad hebben met hem te kunnen praten, denken en werken. Bij ons allen zal hij een dankbare herinnering achterlaten.