

100 jaar elektronenspin



In oktober 1925 stelden twee Leidse promovendi, George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit, dat elektronen draaien. In moderne bewoording: een elektron heeft 'spin'. Hoe deden ze deze ontdekking? En wat betekende die voor de natuurkunde?

Tegenwoordig leert elke natuurkundestudent dat een elektron beschreven wordt met een quantummechanische golffunctie én een tweewaardige spin. Dat laatste verschijnsel werd in oktober 1925 ontdekt door George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit, zelfs nog vóórdat Schrödinger zijn beroemde vergelijking opschreef. Daarmee hebben zij ook bijgedragen aan de ontwikkeling van de quantumtheorie zelf. Maar hoe kwam die ontdekking tot stand?

Spectraalzoölogie

De belangrijkste inspiratiebron voor de ontwikkeling van de quantummechanica was de interactie tussen licht en materie. Denk bijvoorbeeld aan de stralingswet voor een zwart lichaam van Planck, of de theorie van het foto-elektrisch effect van Einstein. Maar de belangrijkste fenomenen zijn zonder twijfel de emissiespectra van atomen. Wanneer een atoom verhit wordt, gaat het spontaan licht uitzenden. Dat gebeurt niet bij alle frequenties: het emissiespectrum bestaat uit een enorme verzameling discrete ‘spectraallijnen’. Een belangrijke taak voor een theoretisch fysicus in de jaren voor 1925 was het vinden van structuren in deze ‘spectraalzoölogie’. En een belangrijke stap in het begrijpen van die spectraallijnen was het atoommodel van Bohr. Daarin bevinden elektronen rond de atoomkern zich alleen in discrete, ‘gequantiseerde’ energieniveaus. Als een elektron van een hoge naar een lage baan springt, wordt een foton uitgezonden met de frequentie gelijk aan het verschil tussen de elektronenergieën. Bohr liet in 1913 zien dat emissiespectra grotendeels begrepen konden worden met zijn formule voor de energieniveaus

$$E_n = -\frac{R_H}{n^2}$$

waar R_H de rydbergconstante voor waterstof is, ruwweg gelijk aan 10^7 m^{-1} , en n het zogeheten hoofdkwantumgetal. Dit quantumgetal is een positief geheel getal.

Meer quantumgetallen

Maar met het atoommodel van Bohr was nog niet alles opgelost. Uit precisie-experimenten, zoals die van Leonard Ornstein in Utrecht en Pieter Zeeman in Amsterdam, bleek dat spectraallijnen vaak gesplitst waren in twee of meerdere lijnen: de fijnstructuur van het spectrum. Het was precies deze fijnstructuur die lange tijd een mysterie bleef. Meer quantumgetallen waren nodig om de fijnstructuur te begrijpen. Om te beginnen was daar het impulsmomentquantumgetal l , een geheel getal tussen 0 en $n-1$, dat het impulsmoment van de elektronenbanen beschreef. En het magnetisch quantumgetal m , een geheel getal tussen $-l$ en l , waarmee spectraallijnen verder konden splitsen onder de invloed van een magnetisch veld: het zeemaneffect. De spectraalzoölogie werd bijna voltooid door Wolfgang Pauli, die in het voorjaar van 1925 het uitsluitingsprincipe introduceerde: geen twee elektronen kunnen dezelfde quantumgetallen hebben. Daarvoor was wel een extra,



George Uhlenbeck (links) en Sam Goudsmit (rechts) in Ann Arbor, Michigan, rond 1928. In het midden Hendrik Kramers (foto: AIP Niels Bohr Library).

vierde quantumgetal voor nodig, die Pauli een “niet klassiek beschrijfbaar tweewaardigheid” noemde. Wat dit vierde quantumgetal voorstelde, wist niemand.

Laatste kans

En hier komen twee jonge Leidse natuurkundigen het toneel op. Samuel Goudsmit was in de zomer van 1925 werkzaam als parttime assistent van Zeeman in Amsterdam en was dus goed bekend met de laatste ideeën over atoomspectra. Hij “dacht als een detective” en kon als geen ander verbanden en structuren vinden in de bergen experimentele data. Goudsmit had zelfs letterlijk een cursus detectivewerk gedaan, en zou later leidinggeven aan de Alsos-missie, die als taak had natuurkundigen op te sporen die aan het atoomprogramma van de nazi’s hadden gewerkt [4, 5]. George Uhlenbeck kwam in 1925 terug uit Rome, waar hij drie jaar lang privéles had gegeven aan de zoon van de Nederlandse ambassadeur. Hoewel hij afgestudeerd natuurkundige was, raakte hij geïnspireerd door de cultuur in Rome en stond hij op het punt over te stappen naar de geschiedwetenschap. De Leidse natuurkunde professor Paul Ehrenfest overtuigde hem echter om de natuurkunde nog één kans te geven [6].

Zodoende kreeg Goudsmit de opdracht om Uhlenbeck de laatste kennis over spectraallijnen bij te brengen. Het eerste wat Goudsmit wist te doen, is orde scheppen in de quantumgetallenwirwar van Pauli [1]. Uhlenbeck, een klassiek geschoold fysicus, benadrukte dat elk quantumgetal overeen zou moeten komen met een daadwerkelijke fysische vrijheidsgraad.

‘Zeer belangrijk of nonsens’

Aangekomen bij het mysterieuze vierde quantumgetal, stelde Uhlenbeck voor dat dit gelijk moest zijn aan de rotatie van het elektron zelf. Aangezien elektronen een elektrische lading hebben, zorgt die rotatie ervoor dat elektronen een magnetisch dipoolmoment hebben. Goudsmit en Uhlenbeck noemden deze elektronrotatie de spin. Het bijzondere aan de elektronspin is dat deze gequantiseerde halfwaarden aanneemt: plus of min $\hbar$ (de gereduceerde

constante van Planck) gedeeld door 2. Een klassiek roterende geladen bal zou een magnetisch dipoolmoment hebben gelijk aan $\mu = \frac{e}{2mc} \mathbf{L}$ waar $\mathbf{L} = \pm \frac{\hbar}{2}$ het impulsmoment is. Goudsmit en Uhlenbeck vertelden hun idee aan Paul Ehrenfest. Zijn reactie was dat hun idee “zeer belangrijk of nonsens” was, maar hoe dan ook gepubliceerd moest worden. Hij stuurde hun manuscript meteen op naar het Duitstalige tijdschrift *Naturwissenschaften*. Bovendien vond Ehrenfest dat de studenten hun idee met “de heer Lorentz” moesten bespreken.

Jong genoeg

Lorentz had direct forse kritiek. Een elektron is een ongelooflijk klein deeltje. Als dat zou roteren met een impulsmoment gelijk aan $\frac{\hbar}{2}$ moest de oppervlaktesnelheid van het elektron meer dan tien keer de lichtsnelheid zijn! Bovendien zou een roterend geladen elektron snel zijn energie – en dus ook zijn impulsmoment – verliezen door het uitzenden van elektromagnetische golven. Lorentz toonde aan dat een elektronrotatie simpelweg onverenigbaar is met de klassieke elektrodynamica.

In paniek vroegen Uhlenbeck en Goudsmit aan Ehrenfest of hij het manuscript kon terugtrekken. Helaas, het was al verzonden, maar Ehrenfest maakte zich geen zorgen: “Jullie zijn beiden jong genoeg om je iets doms te veroorloven.” En zo werd het idee van de elektronspin op 17 oktober 1925 toch gepubliceerd [2].

Ondanks de kritiek van Lorentz gingen Goudsmit en Uhlenbeck verder met het uitwerken van hun model. De nieuwe vraag die hen bezighield, was: is er wisselwerking tussen de elektrische lading van de atoomkern en het magnetisch dipoolmoment van een elektron?

Na discussies met Albert Einstein, die te gast was in Leiden, bleek dat relativiteitstheorie de oplossing bood. Normaal gesproken wordt een magnetisch dipoolmoment alleen

beïnvloed door het magnetisch veld. De atoomkern heeft echter louter een elektrische lading. Wel kan een *bewegende* elektrische lading een magneetveld veroorzaken; denk aan de wet van Ampère. Maar hier komt de relativiteitstheorie te hulp: doordat de elektronen rond de atoomkern bewegen, is het vanuit het perspectief van zo'n elektron alsof de atoomkern beweegt. Het dipoolmoment van het elektron kan daardoor wel degelijk wisselwerken met de lading van de atoomkern. De wisselwerking tussen de atoomkern en de elektronspin is wel afhankelijk van *hoe* een elektron rond de kern vliegt. De energie van een elektronbaan wordt daarom niet bepaald door het impulsmomentquantumgetal l , maar door de som $j = l + s$ van het impulsmomentquantumgetal l en de elektronspin s . Dit effect wordt spin-baan-koppeling genoemd (zie de afbeelding op pagina 31).

Bohr als profeet

Om de fijnstructuur goed te kunnen verklaren, moest de koppeling tussen atoomkern en dipoolmoment echter *tweemaal* zo groot zijn als verwacht op basis van klassieke elektrodynamica. Door simpelweg aan te nemen dat de koppeling tweemaal sterker is, kon de volledige fijnstructuur van de atomenspectra begrepen worden. Goudsmit en Uhlenbeck beschreven de spin-baan-koppeling in een publicatie in het Engelstalige *Nature*, verzonden in december 1925 [3].

De beruchte ‘factor twee’, ook wel de Landé g-factor genoemd, werd uiteindelijk begin 1926 verklaard door Llewellyn Thomas met een gedetailleerde relativistische berekening. De kern van die berekening zit al in het werk van Uhlenbeck en Goudsmit: dankzij de spin-baan-koppeling is het echte quantumgetal het totale impulsmoment j . Daardoor kan de koppeling tussen een magneetveld en de elektronspin s anders uitvallen dan in de klassieke elektrodynamica.

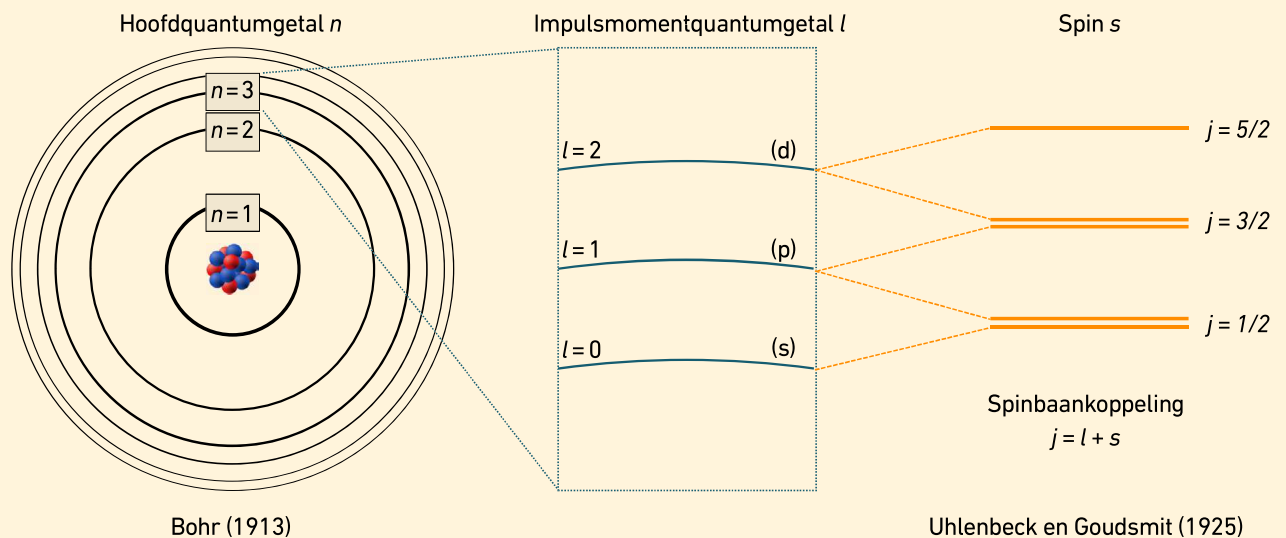
Tegen die tijd raakten de grote namen ook enthousiast over de roterende elektronen. Na een bezoek aan Leiden was zelfs de onbetwiste leider van de quantumrevolutie, Niels Bohr, overtuigd. Hij noemde zich “de profeet van het elektron-magneetgospel” en wist ook Werner Heisenberg en Wolfgang Pauli te overtuigen.

Spintronica

Inmiddels is de elektronspin niet meer weg te denken uit de natuurkundewereld. Spin was de eerste echt volledige quantumeigenschap van materie. Het was werkelijk, zoals Pauli noemde, een “niet klassiek beschrijfbaar” eigenschap. Inmiddels weten we dat alle elementaire deeltjes spin hebben. Bovendien is de rol van spin niet beperkt tot de deeltjesfysica. De tweewaardigheid van spin is de basis van experimenten die quantumverstrengeling kunnen aantonen. Spin kan gebruikt worden in ‘spintronische’ technologie. En ook sommige soorten quantumcomputers hebben als basis de spin – in de vorm van de tweewaardige ‘qubit’. Zelfs als quantumcomputers niet expliciet elektronspin gebruiken, is de beschrijving van een qubit altijd in de taal van de elektronspin.



De onderzoeksgroep van Paul Ehrenfest (helemaal rechts) in Leiden, waarschijnlijk in 1926 of 1927, met George Uhlenbeck (vijfde van links) en Sam Goudsmit (zesde van links). Op de muur achter hen ideeën over de spectrale fijnstructuur, die voor Uhlenbeck en Goudsmit de bron vormden voor hun ontdekking van de elektronspin (foto: Kramers familiearchief, onderhouden door kleinzoon Koos Kuiper).



In 1913 ontdekte Niels Bohr met zijn atoommodel het hoofdquantumgetal n . Om de fijnstructuur in spectraallijnen te begrijpen werden daarna andere quantumgetallen geïntroduceerd, zoals het impulsmomentquantumgetal l . In 1925 ontdekten George Uhlenbeck en Sam Goudsmit dat de fijnstructuur begrepen kon worden door elektronen een tweewaardige spin toe te kennen. Dankzij de spinbaankoppeling zijn de energieniveaus van elektronen in een atoom gegeven door het totale impulsmoment j , dat de som is van het baanimpulsmoment l en de elektronspin s .

Daaruit blijkt dat, boven op de vele technologische toepassingen, spin de kern blijft van quantummechanisch denken. Zoals David Griffiths het in zijn standaardboek over quantummechanica verwoordt: “Spin is de eenvoudigste en schoonste context om over de conceptuele paradoxen van de quantummechanica na te denken.” [7] Een invloed die de jonge Uhlenbeck en Goudsmit in het najaar van 1925 niet hadden kunnen vermoeden.

Louk Rademaker is *assistant professor* theoretische quantummateriefysica aan de Universiteit van Genève en *visiting fellow* aan de Universiteit Leiden.

REFERENTIES

1. Goudsmit, S., Uhlenbeck, G., *Opmerking over de spectra van waterstof en helium*, *Physica* **5**, 266 (1925).
2. Goudsmit, S., Uhlenbeck, G., *Ersetzung der Hypothese vom unmechanischen Zwang durch eine Forderung bezüglich des inneren Verhaltens jedes einzelnen Elektrons*, *Naturwissenschaften* **47**, 953 (1925).
3. Goudsmit, S., Uhlenbeck, G., *Spinning Electrons and the Structure of Spectra*, *Nature* **117**, 264 (1926).
4. Goudsmit, S., *De ontdekking van de elektronenrotatie*, *Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde* **37**, 386 (1971).
5. Calmthout, M. van, *Sam Goudsmit, zijn jacht op de atoombom van Hitler*, Meulenhoff (2016).
6. Calmthout M. van, *De quantumvriend, George Eugène Uhlenbeck (1900-1988)*, Uitgeverij Lias (2025).
7. Griffiths, D.J., *Introduction to Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (1995).

Viering honderd jaar spin: 10 en 11 december 2025 in Leiden

Honderd jaar spin wordt in Leiden uitbundig gevierd op 10 en 11 december 2025.

- Op woensdagavond 10 december is er een speciaal concert in de Leidse Stadsgehoorzaal van de Kazachse componist en concertpianist (de ‘Mozart van Kazachstan’) Rakhat-Bi Abdyssagin, wiens muziek is geïnspireerd door de quantummechanica.
- Op donderdag 11 december vindt een symposium plaats over honderd jaar spin met lezingen van Rakhat-Bi Abdyssagin, Martijn van Calmthout (biograaf van Sam Goudsmit en George Uhlenbeck), Bart van Wees (expert in spintronica) en Anne-Marie Zwerver (expert in quantumcomputers). Het symposium wordt gecombineerd met de uitreiking van de Lorentzmedaille aan Charles Kane. Juryvoorzitter Robbert Dijkgraaf (KNAW) zal de ceremonie inleiden.

Voor meer informatie ga naar bit.ly/48icwVt of scan de QR-code.

