

Het Stern-Gerlach-experiment

Het is 2025! Ter ere van het nieuwe jaar wordt dit eerste artikel van 2025 een terugblik: waar stond de natuurkunde zo'n 100 jaar geleden? De twintiger jaren van de twintigste eeuw stonden in de natuurkunde volop in het teken van de ontwikkeling van de quantummechanica. Hoewel achteraf dat onderzoek vaak vrij lineair wordt beschreven, werden er ook continu foute conclusies getrokken. In 1922 vond het Stern-Gerlach-experiment plaats, wat later ook wel wordt aangewezen als de ontdekking van het verschijnsel quantumspin. Op het moment zelf dachten Stern en Gerlach echter dat ze iets heel anders hadden gemeten...



Afbeelding 1. De Solvayconferentie van 1927. Foto van de beroemde Solvayconferentie van 1927, waarin de quantummechanica werd besproken. Deze foto (later ingekleurd) bevat 17 Nobelprijswinnaars, zoals Einstein, Curie en Bohr. Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

Jubileumjaar Quantummechanica

In de literatuur gaan meerdere data rond die het begin van de theorie van de quantummechanica markeren. Vaak genoemd wordt de ontdekking van Max Planck in 1900. Zijn doel was om het kleurenspectrum van [zwarte stralers](#) als functie van de temperatuur te

beschrijven. Hij ontdekte een formule die de experimenten goed beschreef, en die, nog zonder gedetailleerde verklaring, suggereerde dat energie van licht alleen in quanta – kleine pakketjes – kan voorkomen. Een ander jaartal dat vaak wordt aangehaald bij de geschiedenis van de quantummechanica is 1925: in dit jaar kwam Erwin Schrödinger tot zijn beroemde [Schrödingervergelijking](#). (De vergelijking werd overigens pas in december 1926 gepubliceerd.) Max Born had in 1924 al gepostuleerd dat licht en elektronen zich als golf én deeltje tegelijk gedragen. De Schrödingervergelijking beschrijft de tijdsevolutie van deze zogenoemde [golffuncties](#). In datzelfde jaar werd ook de naam quantummechanica voor het eerst gebruikt, in het artikel '[Zur Quantenmechanik](#)' van Born en Pascual Jordan. Hoe je het ook bekijkt, 2025 is een bijzonder jubileumjaar voor de quantummechanica. Afhankelijk van welk evenement je beschouwt als de start van dit onderzoeksveld, bestaat de quantummechanica dit jaar 125 óf 100 jaar. Daarom beginnen we het jaar met een artikel in het teken van een van de experimenten die cruciaal was in de ontwikkeling in de theorie van de quantumwereld: het Stern-Gerlach-experiment.

Het atoommodel van Niels Bohr

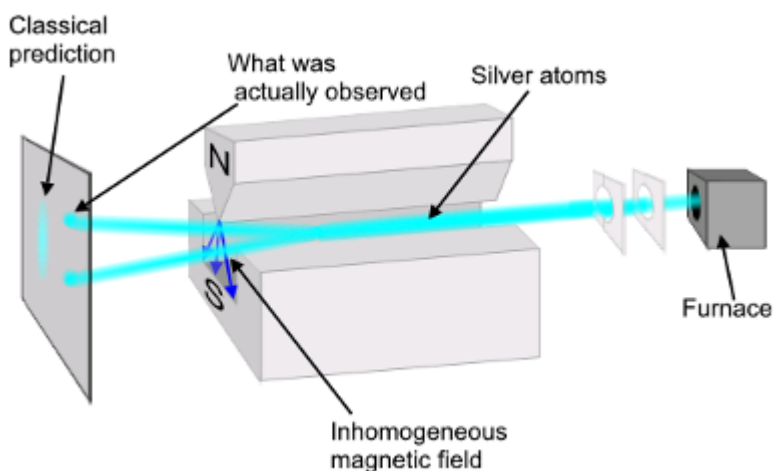
Tussen 1911 en 1918 ontwikkelde de Deense natuurkundige Niels Bohr zijn atoommodel. Ernest Rutherford had in 1909 al ontdekt dat atomen een kleine positief geladen kern hadden, waar negatief geladen elektronen omheen zaten. Het model van Niels Bohr beschreef de banen van die elektronen in meer detail. Zoals uitgelegd in [dit artikel](#), leidde Bohr uit het golfgedrag van elektronen af dat deze alleen in specifieke banen konden voorkomen. Zijn model kon de experimenteel verkregen Rydberg-formule voor de spectraallijnen van het waterstofatoom verklaren.

Het model werd later aangevuld door Arnold Sommerfeld, tot een model waarin ook ellipsvormige banen werden toegestaan. In dit Bohr-Sommerfeldmodel hebben de elektronen drie *quantumgetallen*. Dit betekent dat niet alleen de energie, maar ook het orbitale impulsmoment – grofweg: de 'hoeveelheid draaiing rond de kern' – en de oriëntatie van de baan van het elektron slechts discrete waardes kan aannemen. Dit laatste kun je je voorstellen als een tol die alleen een paar specifieke hoeken met de grond kan maken, niet de hoeken daartussenin. Het bijbehorende quantumgetal – de projectie van het impulsmoment op de as waaromheen de draaiing wordt gemeten – wordt het magnetisch quantumgetal genoemd. Het uitgebreidere model van Bohr en Sommerfeld kon goed de

fijnstructuur van het waterstofatoom beschrijven. De quantisatie van dit magnetisch quantumgetal was, net als alle andere quantisaties, een aanname die de experimentele resultaten beschreef en niet een consequentie van diepere principes.

Het Stern-Gerlach-experiment

Otto Stern vond vooral de quantisatie van het magnetische quantumgetal maar niets en bedacht in 1922, samen met Walther Gerlach, een experiment om deze aanname te ontkrachten. Het experiment bestond uit drie delen: een oven, twee magneten en een scherm.



Afbeelding 2. Het Stern-Gerlach-experiment.

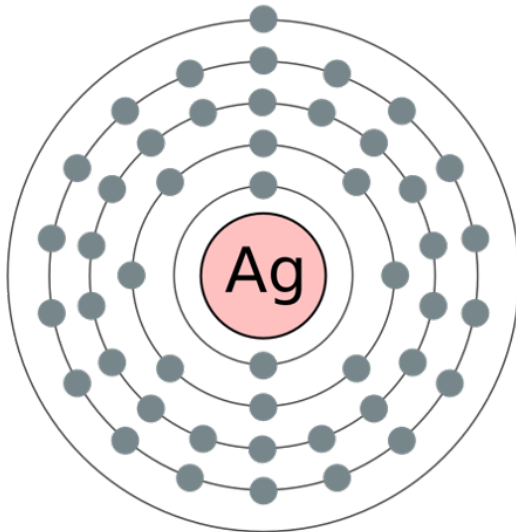
Schematisch overzicht van het Stern-Gerlach-experiment, waarbij zilveratomen worden verhit, door een inhomogeen magnetisch veld worden geschoten en daarna worden geobserveerd. Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

In de oven verhitten Stern en Gerlach een zilverplaatje, zodat de zilveratomen verdampten. De belangrijkste reden voor het kiezen van zilver was de specifieke atoomstructuur ervan. In het Bohr-Sommerfeldmodel worden de banen van Bohr 'schillen' van atomen: in elke baan kunnen nog meerdere elektronen voorkomen met verschillende waarden van de andere twee quantumgetallen. Volgens het Bohr-Sommerfeldmodel zijn bij zilver vier elektronschillen helemaal gevuld. Hierdoor zijn alle quantumgetallen in die schillen 'bezet' en hebben al deze elektronen samen netto geen impulsmoment. De vijfde schil van het zilveratoom bevat exact één elektron. Door zilveratomen te gebruiken, wordt effectief alleen het impulsmoment van

dat laatste elektron gemeten. Omdat elektronen elektrisch geladen zijn, staat het meten van het impulsmoment in direct verband met het meten van het magneteveld - vandaar de naam magnetisch quantumgetal.

47: Silver

2,8,18,
18,1



Afbeelding 3. Structuur van het zilveratoom.

Volgens het atoommodel van Bohr zijn de binnenste vier elektronenschillen bij het zilvermodel gevuld met respectievelijk 2, 8, 18 en 18 elektronen, en bevat de vijfde schil een enkel elektron. Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

Om het magnetisch quantumgetal van de elektronen te meten, werden de atomen in een straal door de magneten heen gestuurd. Door de vorm van de magneten - de ene maakt een punt en de ander vormt een gootje - ontstaat een *inhomogeen* magneteveld. Als de magneten gewoon plat waren geweest, dan was het magneteveld overal in de magneet even sterk en dus *homogeen*. Door deze vorm is het magneteveld sterker aan de kant van de puntvormige magneet dan aan de kant van de goot.



Afbeelding 4. De magneten die gebruikt zijn in het originele Stern-Gerlach-experiment. De magneten bevinden zich in de Carnegie-Mellon universiteit. Foto gemaakt door prof. [Tim St. Pierre](#).

Afhankelijk van het magnetisch quantumgetal van het buitenste elektron - en daarmee het magnetisch quantumgetal van het hele zilveratoom - wordt het atoom in meer of mindere mate afgebogen door het externe magneetveld. Op het scherm achter de magneten wordt dan gemeten in hoeverre de atomen uiteindelijk zijn afgebogen. Volgens de hypothese van Stern en Gerlach dat het magnetisch quantumgetal continue waardes kan aannemen en dus juist níét gequantiseerd was, zouden de atomen normaal verdeeld afgebogen moeten worden. Gemiddeld worden de atomen niet afgebogen, sommigen buigen sterk naar de noordpool van het magneetveld, sommigen sterk naar de zuidpool, en alles ertussenin komt ook voor.

Wat Stern en Gerlach echter zagen, was dat de elektronen zich in twee groepen verdeelden:

de helft werd naar de noordpool afgebogen en de helft naar de zuidpool: niets ertussenin. Ook werden alle elektronen evenveel afgebogen. Hun conclusie: Bohr en Sommerfeld hadden gelijk, en het magnetisch quantumgetal is toch gequantiseerd!

De Schrodingervergelijking en problemen met het Stern-Gerlach-experiment

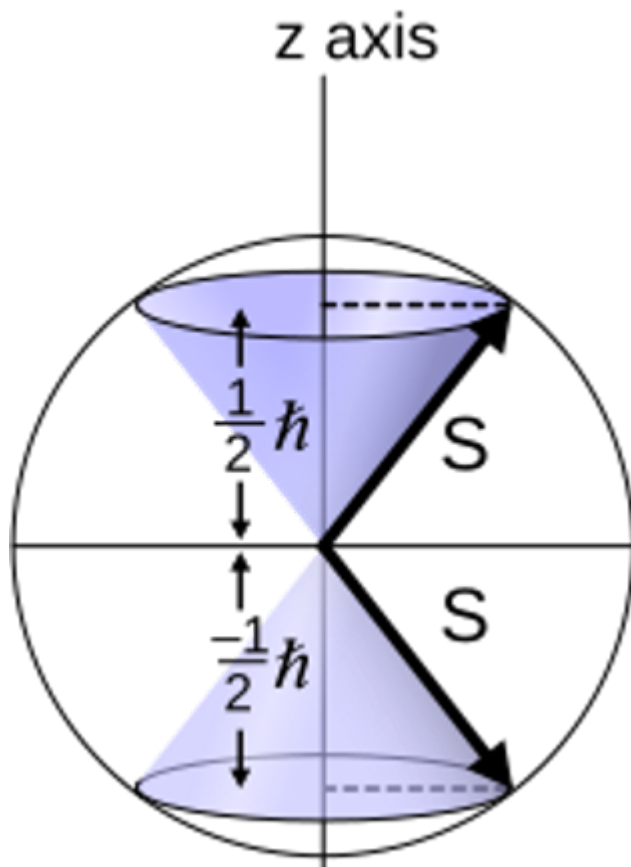
Zoals eerder genoemd, kwam Erwin Schrödinger in 1925 met zijn beroemde Schrödingervergelijking. Als gevolg hiervan konden de exacte eigenschappen van de elektronen in het Bohrmodel worden berekend. Wat bleek: het impulsmomentquantumgetal van het laatste elektron in het zilveratoom is nul! Het magnetisch quantumgetal van het zilveratoom moet dus ook precies nul zijn. Dit stond in schril contrast tot het experimentele resultaat van het Stern-Gerlach-experiment. Er was nog een probleem met de uitslag van dit experiment. Stern en Gerlach waren ervan uitgegaan dat het impulsmomentquantumgetal van het laatste elektron gelijk was aan 1. Volgens het Bohr-Sommerfeldmodel zou de atomenstraal dan inderdaad in tweeën splitsen, maar volgens het nieuwe Schrödingermodel juist in drieën! De observatie van twee groepen atomen paste nu bij geen van beide aannames voor het impulsmomentquantumgetal.

Wat hadden Stern en Gerlach dan gemeten? Dit moest wel een ander soort magneetveld zijn, niet gegenereerd door het impulsmomentquantumgetal, maar door een ander fenomeen waarvan het quantumgetal exact twee waardes zou kunnen aannemen.

Quantumspin

In 1925 werd nog een ander quantumgetal ontdekt: quantumspin. Wolfgang Pauli postuleerde zijn [uitsluitingsprincipe](#) en het feit dat elektronen een 'intern' quantumgetal hebben dat de waardes $+1/2$ of $-1/2$ kon aannemen. In hetzelfde jaar kwamen George Uhlenbeck en Samuel Goudsmit (beiden Nederlands-Amerikaanse natuurkundigen) met het idee dat elektronen als het ware om hun eigen as zouden draaien: ze noemden dit elektronspin. Vergelijk het met de aarde: die draait rondjes om de zon (eens per jaar, vergelijkbaar met het impulsmomentquantumgetal van het elektron in een atoom) maar draait ook om zijn eigen as (eens per dag, vergelijkbaar met de elektronspin). Het idee van Uhlenbeck en Goudsmit gaf een naam en een voorstelling bij het door Pauli gepostuleerde quantumgetal. De spin van een deeltje heeft trouwens niet echt iets te maken met de

draaiing om een as. Het is een quantummechanische eigenschap die niet op klassieke wijze voor te stellen is. Vaak wordt het draaien om eigen as toch gebruikt om quantumspin te beschrijven, omdat quantumspin aan dezelfde natuurwetten voldoet als gequantiseerd impulsmoment. Dat het niet exact hetzelfde is, wordt al duidelijk als je bestudeert hoe hard die elektronen dan zouden moeten draaien. Als je aanneemt dat het elektron daadwerkelijk als een bal is met een straal, dan zou het oppervlak van die bal harder moeten draaien dan de snelheid van het licht. Als je het elektron zelfs als een puntvormig deeltje beschouwt, is het al helemaal niet duidelijk hoe dat draaien er dan uit zou moeten zien. Daarom zeggen we vaak dat de quantumspin een 'intrinsiek impulsmoment' is, in plaats van een 'echte' draaiing.



Afbeelding 5. Quantumspin. Weergave van quantumspin. De projectie van de spin van een elektron op de z-as kan twee waarden aannemen: $+1/2$ en $-1/2$. (Gemeten in eenheden van de gereduceerde constante van Planck, hier aangegeven met een h met een streepje.)

Afbeelding via [Wikimedia Commons](#).

Hoewel niet direct gemotiveerd door de problemen in het Stern-Gerlach-experiment, verklaarden de ideeën van Pauli, Uhlenbeck en Goudsmit wel de resultaten ervan. Stern en Gerlach hadden niet het magnetisch quantumgetal gemeten, maar het magnetisch veld veroorzaakt door de quantumspin!

Zo illustreert het Stern-Gerlach-experiment hoe het vaker gaat in de wetenschap: onderzoek is verre van lineair, en vaak worden verkeerde conclusies getrokken. Dit betekent echter niet dat deze onderzoeken niet bijdragen aan de vooruitgang van de kennis van de wereld! Stern wilde Bohrs ongelijk bewijzen, en laten zien dat het magnetisch quantumgetal niet gequantiseerd was. Direct na het onderzoek dacht hij het tegenovergestelde te bewijzen, en dus Bohr gelijk te geven. Maar hoewel Bohrs principe wel juist was – het magnetisch quantumgetal komt wel degelijk in discrete waardes voor – had dit experiment daar niets mee te maken.

100 jaar later kunnen we terugkijken op deze roerige tijd in de natuurkunde en makkelijk aanwijzen wie gelijk had en wie niet, maar vast staat dat vele mensen en vele onderzoeken hebben gebouwd aan de theorie van de quantummechanica. Waar we de volgende 100 jaar allemaal achter gaan komen in de natuurkunde, en op welke manier, kan alleen de tijd ons leren.