

Atomen en elektronen

Een atoom is de kleinste nog als zodanig herkenbare bouwsteen van de materie. Vrijwel alle scheikundige en natuurkundige eigenschappen van de materie zijn gekoppeld aan de eigenschappen van atomen. Ook elektronische verschijnselen zijn alleen te verklaren door kennis over het atoom te verwerven. Elektronen zijn volgens de klassieke fysica zeer kleine keiharde bolletjes die in cirkel- en ellipsvormige banen rond de kern van een atoom draaien. Zij zijn de absolute basis van de elektronica. Elektrische stroom is immers, alweer volgens de klassieke fysica, niets anders dan een zeer grote hoeveelheid van deze elektronen die zich in één richting door een geleider beweegt.

<p>Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland Email: josverstraten@live.nl Publicatiedatum: 23-04-2017</p>

De wijsheid van de oude filosofen

De oudheid

De prehistorische mens zag een groot rotsblok van een berg vallen en daardoor versplinteren in duizenden kleine brokstukken. Het ligt voor de hand dat deze prehistorische mens zich de vraag stelde of die kleine brokstukken op hun beurt weer te versplinteren waren en of het minuscuul kleine zandkorreltje van het strand ooit deel had uitgemaakt van zo'n groot indrukwekkend rotsblok. Of die prehistorische mens nog verder doordacht en zich de vraag stelde of dat zandkorreltje ook weer te versplinteren was in duizenden onzichtbaar kleine brokstukjes is uiteraard niet bekend.

Indiase en Griekse filosofen

Die vraag werd echter wél reeds gesteld door Indiase filosofen die zo'n 1.200 jaar voor onze jaartelling leefden en door Griekse filosofen als Democritus in de vijfde eeuw voor Christus. Deze denkers vonden het idee dat materie tot in het oneindige deelbaar was niet aantrekkelijk. Dat is ook logisch, want als men over dit probleem doordenkt is de logische consequentie van oneindig deelbare materie dat er in feite helemaal geen materie kan bestaan! De basis van alles zou dan immers een oneindig klein iets zijn en het is moeilijk in te zien hoe uit dit oneindig klein iets, iets kan ontstaan dat niet oneindig klein is.

Atomos

Ergens moet dus een allerkleinste brokje materie zijn, dat door de Grieken 'atomos' werd genoemd, letterlijk vertaald 'het ondeelbare'. Democritus veronderstelde dat deze atomen eeuwig bestonden, ondoordringbaar en hard waren en in de lege ruimte bewogen. De aard van deze beweging bepaalde de eigenschappen van de materie. Op deze manier werd verklaard hoe uit een beperk aantal verschillende atomen (water, aarde, lucht en vuur) alle stoffen konden ontstaan die in de natuur aanwezig waren. Ook de bekende Griekse filosoof Aristoteles nam de theorie van het atomos over, zij het dat hij deze kleinste ondeelbare materie 'minima naturalis' ofwel het 'natuurlijke minimum' noemde.

De atoomtheorie van Dalton

De negentiende eeuw

Het duurde tot het begin van de negentiende eeuw alvorens de wazige filosofische begrippen van de oude Grieken in een min of meer wetenschappelijke vorm werden geformuleerd. Die eer komt toe aan de Engelse chemicus John Dalton, die tussen 1803 en 1810 het boek 'A new system of chemical philosophy' publiceerde. In dit boek beschreef Dalton een beeld van de materie dat was gebaseerd op eenvoudige chemische proeven die veel eerder waren uitgevoerd door bijvoorbeeld de Fransman Lavoisier.

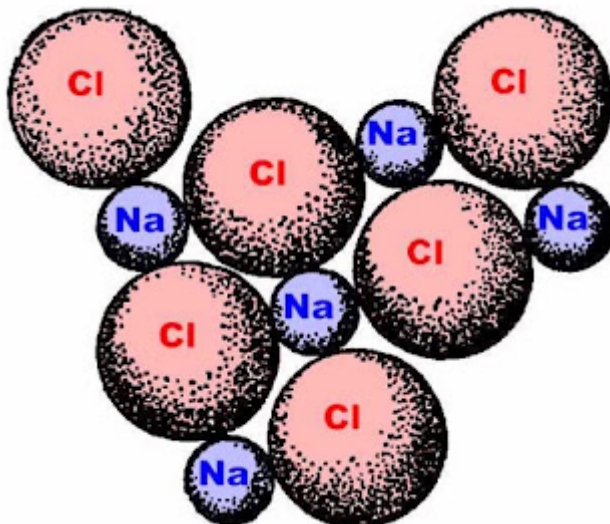
Lavoisier ontdekte dat bij chemische reacties tussen stoffen er steeds sprake is van gewichtsverhoudingen die met elkaar reageren. Zo reageert bijvoorbeeld 16 gram zuurstof (O) met 14 gram stikstof (N) en het resultaat is 30 gram stikstofmonoxide (NO). Is er teveel zuurstof of stikstof aanwezig, dan zal dat na de reactie onaangetaast worden terug gevonden.

Dalton's veronderstellingen

Dalton formuleerde uit dergelijke experimenten de volgende veronderstellingen:

- Alle stoffen bestaan uit atomen.
- Er bestaat een beperkt aantal onderling verschillende atomen.
- Deze atomen zijn de kleinste materiedeeltjes.
- Deze atomen zijn ondeelbaar.
- De atomen hebben onderling bepaalde gewichtsverhoudingen.
- De eigenschappen van de stoffen worden bepaald door het soort atomen waaruit zij bestaan.
- Er bestaan bepaalde stoffen die uit slechts één soort atomen bestaan, deze stoffen werden 'elementen' genoemd.
- Chemische reacties ontstaan doordat de atomen van stoffen op de een of andere manier een verbinding met elkaar aangaan waardoor een nieuwe stof ontstaat met eigenschappen die niet te vergelijken zijn met de eigenschappen van de reagerende stoffen.

Als voorbeeld van deze laatste stelling is hieronder getekend hoe Dalton zich voorstelde dat atomen natrium (Na) zich verbinden met atomen chloor (Cl), waardoor NaCl (keukenzout) ontstaat.



*Verbinding van atomen chloor en natrium tot keukenzout volgens de theorie van Dalton.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Atoomgewicht

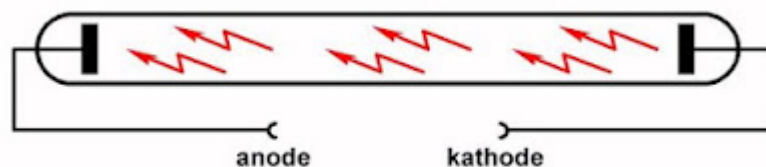
Aan de hand van deze stellingen was Dalton in staat het begrip 'atoomgewicht' in te voeren. Het gewicht van atomen werd uitgedrukt door het te vergelijken met het gewicht van een standaard atoom. Als standaard gebruikte Dalton het gewicht van het waterstof atoom. Op deze manier kon hij een schaal met relatieve atoomgewichten opstellen en kreeg bijvoorbeeld het zuurstofatoom het atoomgewicht 16. Hoe nu een atoom er uitzag, daarover had Dalton

geen enkel idee. In die tijd was dat ook niet noodzakelijk, want de eenvoudige theorie van Dalton met zijn atoomgewichten voldeed uitstekend voor het verklaren van chemische reacties.

De geheimzinnige kathodestralen

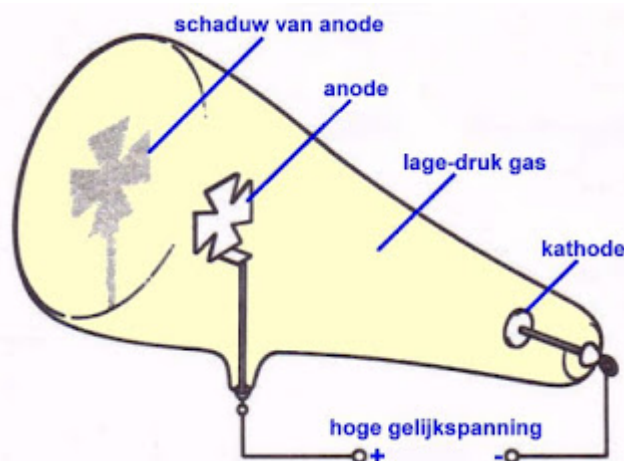
Elektrische geleiding van gassen

Dat er met de atomen van Dalton meer aan de hand was bleek toen de eerste experimenten met elektrische geleiding van gassen werden uitgevoerd. Zo bleek bijvoorbeeld dat een gas, in het algemeen een zeer slechte geleider van de elektrische stroom, onder bepaalde omstandigheden toch geleidend kan worden. Hoewel een groot aantal experimentatoren hebben bijgedragen aan het onderzoek van dit verschijnsel, wordt de eer van het ontdekken van de gasontlading toegekend aan Faraday. In de opstelling van Faraday worden twee elektroden ingesmolten in een glazen buisje. Tussen de elektroden wordt een grote gelijkspanning gezet. Als men nu de lucht uit de buis begint te pompen zal men op een bepaald moment vaststellen dat er in de buis een vreemd violet gekleurd licht ontstaat en dat er een elektrische stroom door de buis vloeit. Het lichteffect werd toegeschreven aan straling die afkomstig was uit de kathode en zich door het gas voortplantte. Deze straling werd vandaar 'kathodestraling' genoemd.



De proef van Faraday waarmee werd vastgesteld dat gassen onder bepaalde omstandigheden elektrische stroom geleiden. (© 2017 Jos Verstraten)

In een ander experiment plaatste men een speciaal gevormde anode in het midden van een glazen kolf en bedekte men de vrije wand van de kolf met een fluorescerende laag. Men stelde vast dat de geheimzinnige straling de fluorescerende laag deed oplichten en dat een schaduw van de anode op de wand werd geprojecteerd.



Uit dit experiment blijkt dat de kathodestralen zich rechtlijnig voortplanten. (Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)

Eigenschappen van kathodestralen

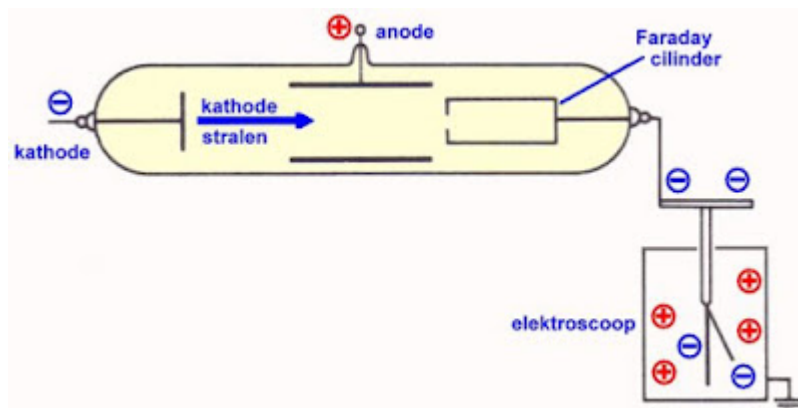
Uit deze en andere experimenten leidde men een aantal eigenschappen van de kathodestralen af:

- De stralen planten zich rechtlijnig voort, want anders zou het schaduwbeeld van de anode op het scherm niet scherp zijn.

- De straling wordt afgebogen door een elektrostatisch veld.
- De straling wordt afgebogen door een magnetisch veld.
- De straling kan energie overbrengen, want als men een klein metalen plaatje in de baan van de straal zet wordt dit warm.

Jean Perrin

Een Franse professor aan de universiteit van Parijs, Jean Perrin, maakte de onderstaande proefopstelling. Hiermee werd een andere zeer belangrijke eigenschap van de kathodestrallen aangetoond. De anode werd nu cilindervormig in het midden van de buis aangebracht en aan het vrije uiteinde werd een extra cilindervormige elektrode ingesmolten. Deze werd verbonden met de knop van een elektroscop. Men stelde vast dat de kathodestrallen die op de elektrode invielen de elektroscop oplaadden. Door proeven kon men vaststellen dat de elektroscop negatief werd opgeladen. De kathodestrallen zijn dus dragers van negatieve elektrische lading.



De proef van Perrin, waaruit blijkt dat kathodestrallen dragers zijn van negatieve elektrische lading. (Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)

De kathodestraling bestaat uit deeltjes

Men begon toen te vermoeden dat de kathodestraling geen echte straling was, maar een stroom of bundel van negatief geladen deeltjes. Dat werd experimenteel bevestigd door de Engelse wetenschapper J. J. Thomson, die tussen 1894 en 1900 een reeks interessante proeven uitvoerde. In een gasontladingsbuis bracht Thomson twee evenwijdige elektroden aan, waartussen een spanning werd gelegd. Door het elektrostatisch veld dat tussen deze twee elektroden wordt opgebouwd zal de bundel geladen deeltjes worden afgebogen. In de buis werd bovendien een magnetisch veld aangebracht. Het magnetisch veld zorgt voor een tweede afbuiging van de deeltjesbundel. Door nu beide velden zo af te regelen dat hun afbuigende werkingen elkaar opheffen en wat gerekend met de reeds toen bekende formules van de magnetische en elektrostatische krachten kon Thomson vrij nauwkeurig de verhouding tussen de lading en de massa van de deeltjes bepalen. Het bleek dat deze verhouding volledig onafhankelijk was van het soort gas in de buis en dat ook de samenstelling van het kathodemateriaal er niets toe deed. Blijkbaar waren deze geheimzinnige, negatief geladen deeltjes een fundamenteel onderdeel van alle materie.

Het experiment van Millikan

De wetenschapper Millikan slaagde er tussen de jaren 1909 en 1917 in de elektrische lading van deze nieuwe deeltjes zeer nauwkeurig te meten. Daarvoor werd een zeer ingenieuze en ingewikkelde opstelling ontwikkeld, die klassiek is geworden in de wetenschapshistorie. Aan de hand van de gevonden waarde van de lading en de resultaten van de proeven van Thomson kon men natuurlijk ook de massa vaststellen. De lading van het deeltje was $1,60218 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, de massa werd vastgesteld op het onvoorstelbare $9,10939 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$! Het nieuw ontdekte deeltje, dat **elektron** werd genoemd, moest dus wel onvoorstelbaar klein zijn!



*De originele opstelling van Millikan, waarmee de lading van het elektron werd gemeten.
(Wikimedia Commons)*

Het atoommodel van Thomson

Thomson stelt een nieuw atoommodel op

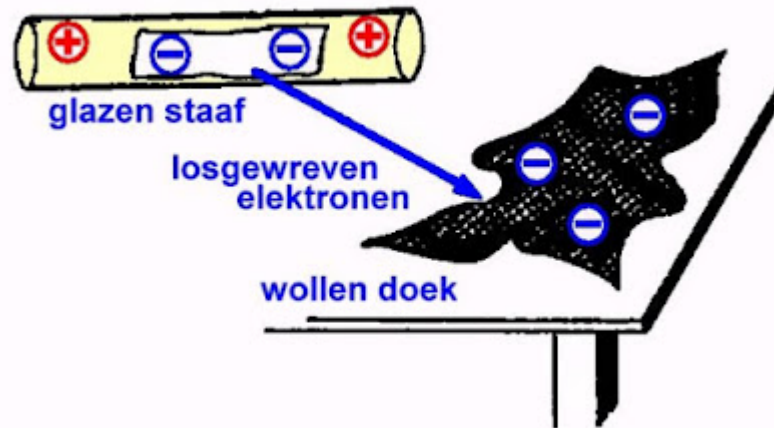
Aan de hand van al deze experimenteel verzamelde gegevens stelde Thomson een nieuw atoommodel op. Het atoom van Thomson bestond uit een homogeen bolletje met een positieve lading, waarin de negatief geladen elektronen waren 'ingebed'. De positieve pit had net zoveel lading als de elektronen, zodat het atoom op zich elektrisch neutraal was. De pitten zaten onderling in een hecht verband en de samenstelling van dit verband bepaalde de eigenschappen van de stof. Volgens Thomson was de stof dus zeer massief, want tussen de atomen was weinig vrije ruimte. Hoewel de positieve pit en de elektronen sterk aan elkaar gebonden waren, kon het toch door uitwendige invloeden gebeuren dat een of meerdere elektronen van de pit werden losgescheurd. Er bleef dan een atoompit over met een positieve lading, die 'ion' werd genoemd.

Een van die uitwendige invloeden was bijvoorbeeld het sterke elektrisch veld in de gasontladingsbuizen. Dit veld rukte de elektronen los van de pit, het gevolg was dat de kleine negatief geladen elektronen door de positieve anode werden aangetrokken. De veel zwaardere positieve ionen werden door de negatieve kathode aangetrokken. Vanwege het grote massaverschil tussen de zware ionen en de zeer lichte elektronen was de snelheid van de elektronen echter veel en veel groter dan deze van de ionen. De zeer snelle elektronenstroom veroorzaakte de kathodestraling en het oplichten van de fluorescerende schermen.

Het was natuurlijk nu ook duidelijk waarom de elektronenstraal werd afgebogen door een magnetisch of elektrisch veld. Geladen deeltjes ondergaan immers een kracht als zij zich door een elektrisch of magnetisch veld verplaatsen!

Wrijvingsverschijnselen verklaard

Het atoommodel van Thomson kon ook de reeds lang bekende verschijnselen van elektrische oplading door wrijving verklaren. Als men een glazen staaf krachtig wrijft met een wollen doek, dan zullen hierdoor elektronen uit de glasatomen worden losgerukt. Deze komen dan in de wollen doek terecht, waardoor hierin een teveel aan negatieve lading ontstaat. De glazen staaf is nu echter elektronen kwijt en wordt dus positief geladen.

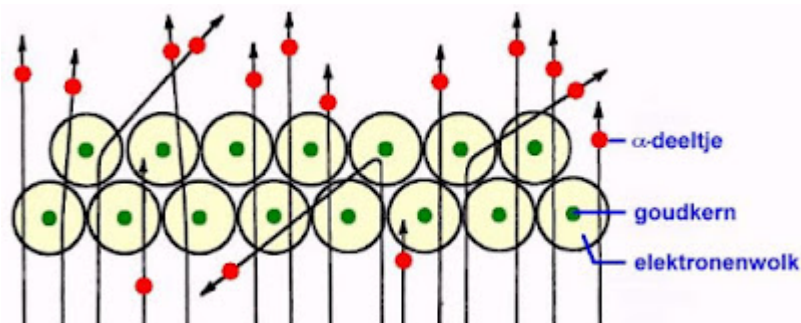


*De Thomson-verklaring van het verschijnsel van de wrijvingsoplading.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Het atoommodel van Rutherford

Rutherford strooit roet in het eten

Het mooie compacte atoommodel van Thomson bleek echter niet bestand tegen proeven die de Engelsman Rutherford rond 1906 uitvoerde. In 1896 werd door Becquerel het verschijnsel van de radioactiviteit ontdekt. Sommige atomen zenden straling uit, die in staat is zorgvuldig tegen licht afgeschermd fotografische platen toch te belichten. Deze geheimzinnige straling dringt dus blijkbaar zonder enig probleem door een papieren afscherming heen! Eén soort straling, die men α -straling (alpha) noemde, kon gemakkelijk worden gedetecteerd. Men vermoedde dat deze straling uit zware deeltjes bestaat die een positieve lading hebben. Nu weet men dat die α -straling niets anders is dan een stroom kernen van heliumatomen, die door sommige radioactieve stoffen wordt uitgezonden. Om de eigenschappen van deze nieuwe straling te onderzoeken schoot Rutherford een bundel van deze α -deeltjes af op een dunne gouden folie.



De strooiingsproeven van Rutherford betekenden het einde van het atoommodel van Thomson. (Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)

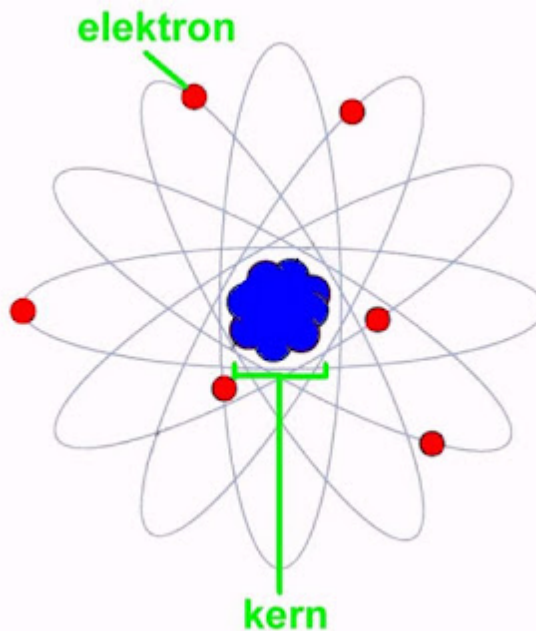
Deze folie bestond uiteraard uit goudatomen, die men samengesteld dacht volgens het model van Thomson. Tot grote verbazing van Rutherford bleek dat de meeste α -deeltjes zonder enige problemen door de goudfolie heen vlogen! Sommige werden weliswaar afgebogen, waarbij bovendien bleek dat de afbuigingshoeken tamelijk klein waren. Sommige α -deeltjes werden echter volledig teruggekaatst. Volgens het atoommodel van Thomson zouden de meeste α -deeltjes teruggekaatst moeten worden. De deeltjes botsen immers tegen de dicht op elkaar liggende atoompitten en volgens de wetten van de mechanica ontstaat er bij die botsing een impulsoverdracht tussen deeltje en atoom, waardoor de deeltjes terug kaatsen. Uit de experimenten moest echter geconcludeerd worden dat er tussen de atomen vrij veel lege ruimte was, waardoor de meeste α -deeltjes ongehinderd door de folie konden vliegen.

Het atoommodel van Rutherford uit 1911

Uit deze en andere experimenten ontwierp Rutherford in 1911 een nieuw atoommodel, dat het 'planeet-model' werd genoemd. Een atoom bestaat volgens dit model uit een kleine harde kern met een positieve lading. Deze lading is gelijk aan of een geheel deel van het atoomgewicht van het atoom. Een waterstofkern (H) heeft dus een lading van +1, een zuurstofkern (O) van +8. Rond deze kern bewegen zich de negatief geladen elektronen in cirkelvormige banen. Alle elektronen hebben een lading van -1. Om het atoom elektrisch neutraal te houden cirkelen er even veel elektronen rond de kern als er positieve eenheidsladingen in de kern aanwezig zijn. Een waterstofatoom moet het dus stellen met slechts één elektron, een zuurstofatoom beschikt over acht elektronen.

Het grootste gedeelte van een atoom bevat dus niets anders dan lege ruimte, hetgeen verklaart waarom radioactieve α -straling zonder merkbare verzwakking door een dunne goudfolie kan dringen. De massa van het atoom zit voor het grootste deel geconcentreerd in de kern, de lichte elektronen dragen nauwelijks bij aan de massa.

Dit planeetmodel kon weer een heleboel fysische verschijnselen verklaren en had natuurlijk erg veel gelijkenis met de samenstelling van een zonnestelsel. Zoiets spreekt natuurkundigen, die immers uit filosofische overwegingen overtuigd zijn dat de natuur zichzelf in allerhande structuren steeds herhaalt, erg aan! Het atoommodel van Rutherford leek dan ook de definitieve verklaring van de bouw van de materie te zijn.



*Het atoommodel van Rutherford, opgesteld in 1911.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Afmetingen van een atoom

Door statistische metingen uit te voeren en te tellen hoeveel α -deeltjes er door een folie vliegen en hoeveel er worden teruggedraaid kon Rutherford vrij nauwkeurig de straal van een atoom en de straal van de kern berekenen. De straal van het atoom bleek ongeveer 10^{-8} cm te zijn, de straal van de kern slechts 10^{-12} cm! De kern is dus 10.000 keer kleiner dan de diameter van het atoom, waaruit duidelijk blijkt dat materie heel ijl is en het heelal, de planeet aarde en ook wijzelf hoofdzakelijk uit niets bestaan. Dat, ondanks deze ijlheid, materie toch ongelooflijk stevig en hard kan zijn, heeft te maken met de grote krachten die in het atoom en tussen de atomen werkzaam zijn en de deeltjes stevig op hun plaats houden.

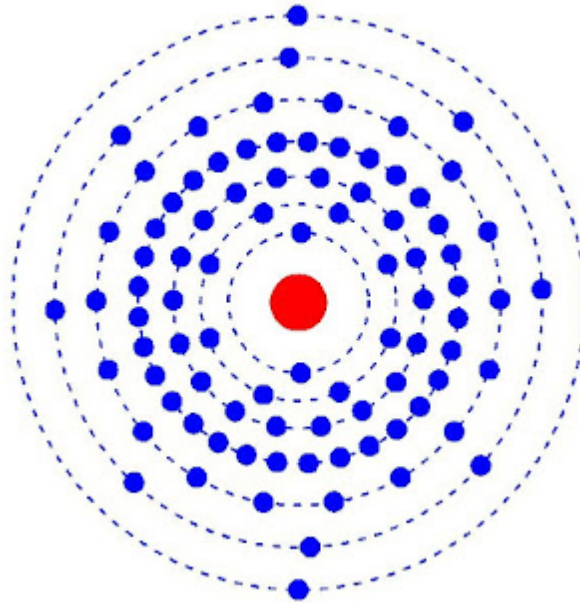
Verfijningen op het atoommodel van Rutherford

De banen van de elektronen

Ontelbare wetenschappers hebben jaren van hun leven besteed aan het aanbrengen van verfijningen in het atoommodel van Rutherford. Zo kon men experimenteel aantonen dat de

elektronen niet zo maar rond de kern draaien, maar in welbepaalde cirkelvormige banen. Die banen noemt men de 'schillen' van het atoom en het blijkt dat iedere schil maar een beperkt aantal elektronen kan bevatten.

Er bestaan zeven schillen die worden aangeduid met de letters K, L, M, N, O, P en Q.



De zeven schillen van een atoom, waarop de elektronen volgens het model van Rutherford hun rondjes draaien. (© 2017 Jos Verstraten)

Het maximaal aantal elektronen

Het maximaal aantal elektronen op iedere schil wordt gegeven door de eenvoudige wiskundige uitdrukking:

$$n = 2 \cdot Z^2$$

waarin Z het volgnummer van de schil voorstelt, gerekend van binnen naar buiten.

Schil K heeft dus $Z = 1$, schil N heeft $Z = 4$. Overigens geldt deze formule maar voor de schillen K, L, M en N. Nadien neemt het aantal elektronen weer af, maar wel volgens dezelfde reeks.

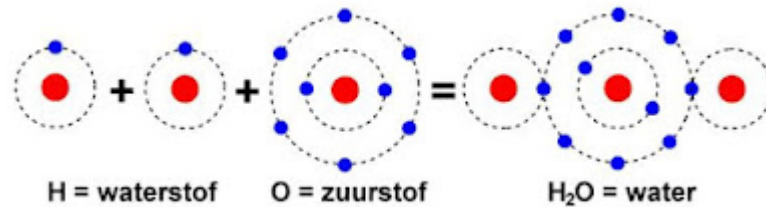
Een en ander betekent dus:

- Schil K bevat maximaal 2 elektronen.
- Schil L bevat maximaal 8 elektronen.
- Schil M bevat maximaal 18 elektronen.
- Schil N bevat maximaal 32 elektronen.
- Schil O bevat maximaal 18 elektronen.
- Schil P bevat maximaal 8 elektronen.
- Schil Q bevat maximaal 2 elektronen.

In totaal kan een atoom 88 elektronen bevatten, althans volgens dit model.

Atoombindingen

Dank zij het atoommodel van Rutherford kan men ook heel eenvoudig verklaren hoe atomen onderlinge bindingen aangaan en nieuwe stoffen vormen. In onderstaande figuur is bijvoorbeeld getekend hoe twee atomen waterstof (H) een verbinding aangaan met één atoom zuurstof (O) om één molecuul water (H_2O) te vormen.



*De verklaring van atoombindingen volgens het model van Rutherford
(© 2017 Jos Verstraten)*

Waterstof heeft slechts één elektron in de K-schil. Op die schil kunnen er echter twee ronddraaien. Zuurstof heeft zes elektronen in de L-schil, maar deze schil kan acht elektronen bevatten. Als nu twee H-atomen botsen met één O-atoom, grijpen de buitenste banen van de elektronen in elkaar, waardoor een soort van gecombineerde baan ontstaat. De elektronen van de twee H-atomen gaan beurtelings om hun eigen kern draaien en om de zuurstofkern, zodat de L-schil van het O-atoom nu schijnbaar acht elektronen bevat. Atomen lijken er dus naar te streven hun schillen met het maximaal aantal elektronen te vullen.

Te mooi om waar te zijn!

De natuur zorgt weer voor problemen

Ondanks het feit dat het atoommodel van Rutherford een heleboel fysische verschijnselen uitstekend kon verklaren, waren er toch een paar problemen.

- Het eerste probleem was dat volgens de elektromagnetische theorie die door Maxwell aan het eind van de negentiende eeuw werd opgesteld een elektrische lading in beweging per definitie elektromagnetische energie uitstraalt. Maar als die elektronen op hun banen dat zouden doen, dan zouden zij continu energie verliezen en daardoor binnen de kortste keren neerstorten op de kern van het atoom. Rutherford kon absoluut niet verklaren hoe de elektronen op hun constante banen bleven bewegen.
- Het tweede probleem was dat het model niet kon bewijzen waarom elektronen maar op bepaalde schillen rond de kern van het atoom kunnen cirkelen. In principe belet niets een elektron om een willekeurige baan op te zoeken. Toch was de aanwezigheid van de schillen ondubbelzinnig experimenteel aangetoond.
- Een derde probleem, hiermee samenhangend, was dat men kon aantonen dat atomen, onder bepaalde omstandigheden, elektromagnetische straling met zeer specifieke golflengtes uitzenden. Die specifieke golflengtes kunnen niet verklaard worden door het model van Rutherford.

Goed genoeg voor het verklaren van een heleboel verschijnselen

Ondanks deze problemen is het atoommodel van Rutherford uitstekend in staat een heleboel natuurkundige verschijnselen te verklaren. Een groot deel van de chemische verbindingen tussen atomen kan bijvoorbeeld met Rutherford worden verklaard. Ook de belangrijkste verschijnselen uit de elektrotechniek en de elektronica, zoals het ontstaan van elektrische stroom en het ontstaan van vrije elektronen, kunnen met het zeer eenvoudige atoommodel van Rutherford worden verklaard.

Via golven naar vrije elektronen

Elektromagnetische golven

Het verhaal over de eigenschappen van elektronen begint met wat een zijsprong lijkt te zijn: elektromagnetische golven. De bespreking van dit verschijnsel is echter absoluut noodzakelijk om een bijzondere eigenschap van elektronen te kunnen begrijpen.

Stralende elektronen

Het blijkt namelijk dat elektronen onder bepaalde omstandigheden licht kunnen uitstralen. Een eigenschap die zeer belangrijk is in de elektronica, want zonder deze eigenschap zouden er bijvoorbeeld geen LED's bestaan.

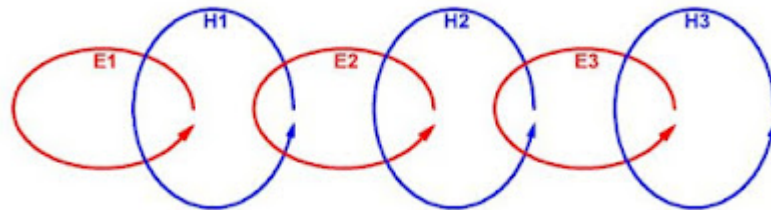
Vrije elektronen

Nadien worden de elektronen losgekoppeld van hun atomen, want dat is absolute noodzaak voor het vloeien van elektrische stroom. Dergelijke elektronen noemt men vrije elektronen en hoe de fysische processen werken die elektronen kunnen bevrijden uit hun atoom vormt het laatste onderwerp van dit artikel.

Elektromagnetische golven

Elektrische en magnetische velden

In de loop van de negentiende eeuw had men een goed inzicht gekregen in de structuur van licht. Licht, zo wist men, was een onderdeel van het elektromagnetisch stralingsspectrum. Straling die ontstaat doordat magnetische en elektrische velden een wisselwerking met elkaar aangaan. Een variërend elektrisch veld veroorzaakt een variërend magnetisch veld. Dit veld veroorzaakt dan weer een variërend elektrisch veld, etc. Die gecombineerde velden veroorzaken een golfverschijnsel in de ruimte, een elektromagnetische golf. Die golf wordt gekenmerkt door een golflengte λ (lambda), die wordt uitgedrukt in meter.



Een elektromagnetisch golfverschijnsel in de ruimte. (© 2017 Jos Verstraten)

De elektrische (E) en magnetische (H) golftrillingen veroorzaken veldlijnen in de ruimte. Deze kunnen cirkelvormig worden voorgesteld. De elektrische ruimtelijke veldlijnen E1 veroorzaken een magnetische inductie, die zich uit onder de vorm van magnetische ruimtelijke veldlijnen H1. Deze staan loodrecht op de elektrische veldlijnen. De magnetische veldlijnen H1 veroorzaken weer elektrische inductie, die zich uit onder de vorm van de elektrische veldlijnen E2. Deze veroorzaken weer magnetische inductie, met als gevolg ruimtelijke magnetische veldlijnen H2. De twee verschijnselen planten zich loodrecht ten opzichte van elkaar door de ruimte voort.

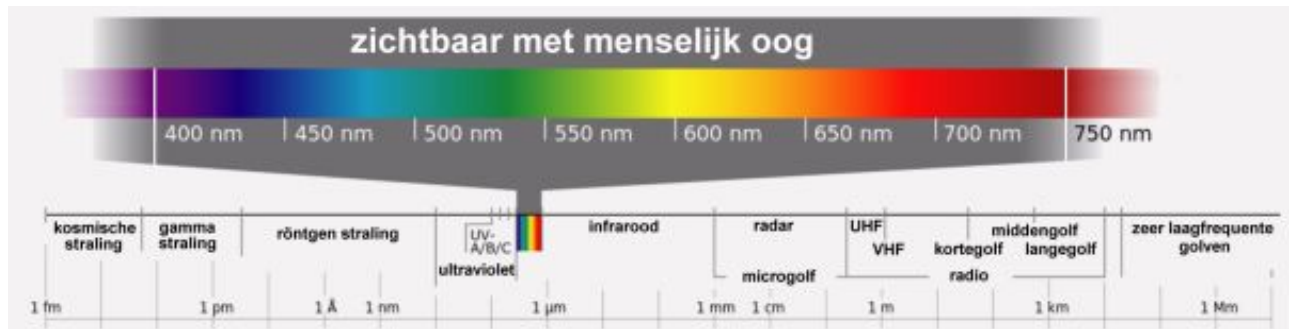
De snelheid van elektromagnetische golven

De snelheid waarmee dit verschijnsel zich voortplant door de ruimte is gelijk aan 299.792,5 km/s! Dat betekent dat een elektromagnetische golf in één seconde ongeveer 7,5 keer rond de aarde kan reizen!

Het elektromagnetisch spectrum

Het zichtbare licht vormt maar een heel klein gedeelte van het elektromagnetisch spectrum. Radio-, TV- en radargolven vormen het gebied met de lange golflengten, van ongeveer 1.000 m tot ongeveer 1 mm. Nadien volgt het infrarode gebied, elektromagnetische warmtestraling die iedereen kent van de zon, de hoogtezon en elektrische radiatoren. Nadien komt het uiterst smalle gebiedje van het zichtbare licht. Het rode licht heeft de langste golflengte, het violette licht de kortste. Vervolgens komt het gebied van de ultraviolette straling, gevaarlijk voor de menselijke huid. Bij nog kortere golflengtes (dan moet men denken aan 10^{-8} m) spreekt men van röntgenstraling, bekend van het ziekenhuis en gammastraling, die erg

gevaarlijk is voor de gezondheid. Hoewel al deze soorten straling nogal verschillend lijken, is de basis steeds hetzelfde: een zich in de ruimte met constante snelheid voortplantende interactie van elektrische en magnetische veldlijnen.



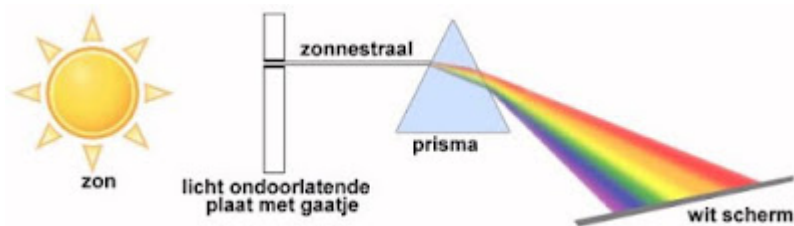
*Het elektromagnetisch spectrum.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Samengestelde straling

Sommige bronnen van elektromagnetische straling zenden slechts één welbepaalde golflengte uit, bijvoorbeeld een ongemoduleerde radiozender of een laser. De meeste elektromagnetische bronnen zenden echter een samengesteld signaal uit, waarin verschillende golflengten aanwezig zijn. Een typisch voorbeeld is de zon, die elektromagnetische straling uitzendt van ver in het infrarode tot ver in het ultraviolette gebied. Men heeft apparaten ontwikkeld waarmee men de golflengtesamenstelling van dergelijke straling kan onderzoeken. Deze apparaten noemt men 'spectroscopen'.

Het glazen prisma

De eenvoudigste spectroscop is een glazen prisma, waarmee men het zonlicht kan ontleden. De opstelling bestaat uit een licht ondoorlatende plaat, waarin een klein gaatje is aangebracht. Via dit gaatje valt het zonlicht op het glazen prisma. De elektromagnetische straling van de zon wordt door dit prisma gebroken. Iedere golflengte heeft echter een andere brekingshoek. Het gevolg is dat de smalle invallende witte zonnestraal wordt omgezet in een brede bundel, waarin men alle kleuren van de regenboog herkent. Als men deze bundel op een wit scherm projecteert ziet men de prachtige kleuren van de individuele golflengtes van het zonlicht, van diep rood tot violet. Via ingewikkelder apparatuur is het ook mogelijk de voor de mens niet zichtbare elektromagnetische straling te ontleden in de samenstellende golflengten.



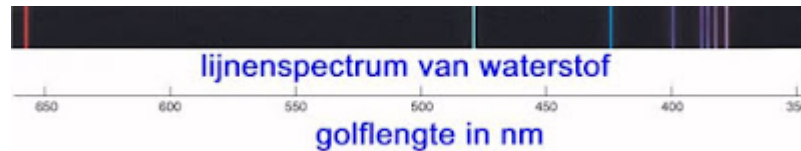
*De eenvoudigste spectroscop is een glazen prisma.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Atomen en straling

Gasontladingsbuis

Als men waterstofgas opsluit in een glazen buis en over de buis een grote gelijkspanning aanlegt zal het waterstofgas licht uitstralen. Als men dit elektromagnetisch verschijnsel door middel van een spectroscop gaat ontleden stelt men iets merkwaardig vast. Het elektromagnetisch spectrum dat door waterstof wordt uitgestraald bestaat niet uit een continu spectrum, zoals bij het zonlicht, maar uit welbepaalde golflengtes. Ieder lijntje in de tekening stelt een welbepaalde golflengte voor uit het opgevangen en geanalyseerd waterstoflicht.

Het blijkt dat alle stoffen een dergelijk lijnenspectrum bezitten. De verdeling van de lijnen is zelfs zo specifiek voor een stof dat men deze als een soort vingerafdruk van de stof kan beschouwen.



*Het elektromagnetisch spectrum van waterstof.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

De oorsprong van de lijnen

De vraag die natuurkundigen moesten beantwoorden was waar deze typische lijnen vandaan kwamen. Nu was reeds bekend dat voor het uitzenden van elektromagnetische straling energie nodig is. De enige voorwerpen in een atoom die dergelijke energie bezitten zijn de elektronen, die immers met grote snelheid (en dus energie) rond de kern draaien. Zouden de elektronen echter de elektromagnetische straling uitzenden, dan zouden zij energie (en dus snelheid) verliezen. Het gevolg zou zijn dat de elektronen dichterbij de kern gingen draaien en tot slot zelfs op de kern zouden neerstorten. Dat is duidelijk in strijd met de waarnemingen!

Een nieuw atoommodel van Bohr

De Deense natuurkundige Niels Bohr ontwikkelde rond 1914 een theorie die deze vreemdsoortige lijnenspectra kon verklaren. Bohr had in zijn studietijd samengewerkt met Thomson en met Rutherford en kende de bestaande atoommodellen als de inhoud van zijn broekzak. Maar hij was dus ook goed op de hoogte van de problemen rond deze modellen. Bohr stelde nu een nieuw atoommodel samen, die in feite mooi aansloot op het planetair model van Rutherford, maar een verklaring gaf voor de stationaire banen van de elektronen en voor het uitzenden van de lijnenspectra.

De stellingen van Bohr

Bohr stelde:

- Elektronen kunnen alleen op welbepaalde banen (schillen) rond de kern draaien (niets nieuws!). Door gebruik te maken van bepaalde stellingen van de quantummechanica van Max Planck kon Bohr echter de stralen van deze banen berekenen. En dat was wél nieuw, want daarmee was de vraag naar het waarom van de waargenomen schillen opgelost.
- In strijd met alles wat de elektromagnetische theorie van Maxwell beweert zenden de elektronen op deze banen géén energie uit. Bohr loste deze tegenstelling op door te beweren dat de traditionele elektromagnetische theorie niet van toepassing is in de kleine-schaal structuur van een atoom. De elektronen kunnen dus tot in de eeuwigheid rustig doorgaan met op deze banen te draaien, omdat dit stationaire toestanden voor het atoom zijn. Deze stationaire schillen noemt men de 'Bohr-banen' van de elektronen. Elektronen zullen dus bij voorkeur een plekje op een van de Bohr-banen opzoeken, omdat dit de meest stabiele toestand van het atoom is.
- Iedere baan of schil komt overeen met een welbepaalde rustenergie van de elektronen. Deze energie hangt af van de afstand tussen de kern en de schil. Als er extra energie aan het atoom wordt toegevoegd, bijvoorbeeld door het op te warmen of aan een sterk elektrisch veld bloot te stellen, kunnen elektronen deze energie absorberen. Zij zijn dan in staat naar een baan of schil te springen die een hogere rustenergie heeft. Voorwaarde is dan wel dat er voldoende energie aan het atoom is aangeboden om het verschil in rustenergie tussen beide schillen te overwinnen. Een elektron dat door toevoeging van extra energie zijn stationaire Bohr-baan verlaten heeft noemt men een 'aangeslagen' elektron.
- Op dat moment is het atoom in een instabiele toestand. Het aangeslagen elektron zal zo snel mogelijk terug vallen naar zijn stationaire Bohr-baan. Hierbij zendt het elektron echter weer een hoeveelheid energie uit onder de vorm van elektromagnetische

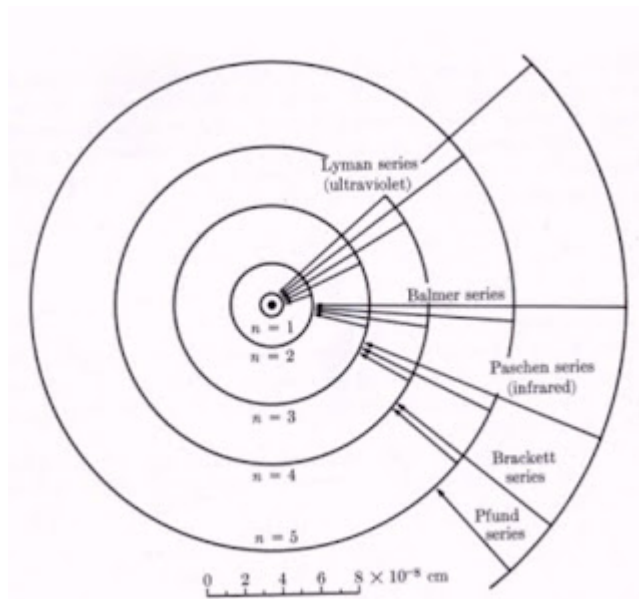
straling. De uitgezonden hoeveelheid energie is gelijk aan het verschil in rustenergie tussen beide schillen. De overgang van een elektron van een aangeslagen toestand naar stationaire Bohr-toestand noemt men een 'quantsprong'.

Verklaring van de lijnenspectra

Met deze stellingen kon Bohr het uitzenden van lijnenspectra verklaren. Iedere golflengte in het spectrum komt immers overeen met de sprong van een aangeslagen elektron van een buitenste schil naar een binnenste schil. Omdat er heel wat sprongen tussen de zeven schillen mogelijk zijn, kan men dus ook heel wat golflengtelijnen in een spectrum verwachten.

De theorie klopt!

Het was mogelijk de energieën te berekenen die overeen komen met alle mogelijke quantsprongen van een aangeslagen elektron. Als men de energie weet die bij zo'n sprong vrijkomt, dan kan men ook de daarmee overeen komende golflengte van de elektromagnetische straling berekenen. Hoe hoger de energie die vrijkomt, hoe kleiner de golflengte van de opgewekte straling. Iedere quantsprong genereert dus één golflengtelijn in het lijnenspectrum van het atoom dat men onderzoekt. Nadien hebben talloze experimentele natuurkundigen geprobeerd alle lijnen terug te vinden die volgens de theorie van Bohr met alle mogelijke quantsprongen overeen komen. In onderstaande figuur zijn de namen vermeld van de wetenschappers die de lijnstructuur van waterstof volledig ontrafeld hebben. Bovendien is aangegeven welke golflengtes van welke quantsprongen zij waargenomen hebben.



Overzicht van de quantsprongen van een elektron in een waterstofatoom.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)

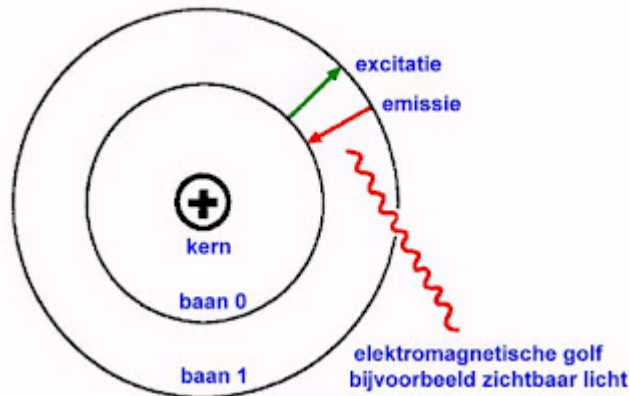
Het belang voor de elektronica

Het zal duidelijk zijn dat de beschreven natuurkundige eigenschappen van het elektron van zeer groot belang zijn voor de elektronica. Van het feit dat elektronen elektromagnetische straling produceren als zij van een aangeslagen in een stationaire toestand terug vallen wordt in tal van elektronische onderdelen gebruik gemaakt. Te denken valt aan:

- Beeldbuizen.
- LED's.
- Luminiserende panelen.
- TL-buizen.
- Indicatorbuizen.

De basis van de optische elektronica

Bij deze onderdelen worden eerst door het toevoegen van externe energie de atomen in aangeslagen toestand gebracht. Een elektron wordt eerst 'geëxiteerd' van baan 0 naar baan 1 en zal nadien terug vallen naar zijn stationaire baan. Op dat moment wordt elektromagnetische straling met een welbepaalde golflengte uitgestraald. Tegenwoordig heeft men een zo goed inzicht in deze fysische processen, dat men zuiver theoretisch kan berekenen aan welke eigenschappen de stoffen moeten voldoen om een bepaalde kleur van het licht te verkrijgen. Het komt er nadien alleen op aan de noodzakelijke grondstoffen op een reproduceerbare en goedkope manier op industriële schaal te maken.



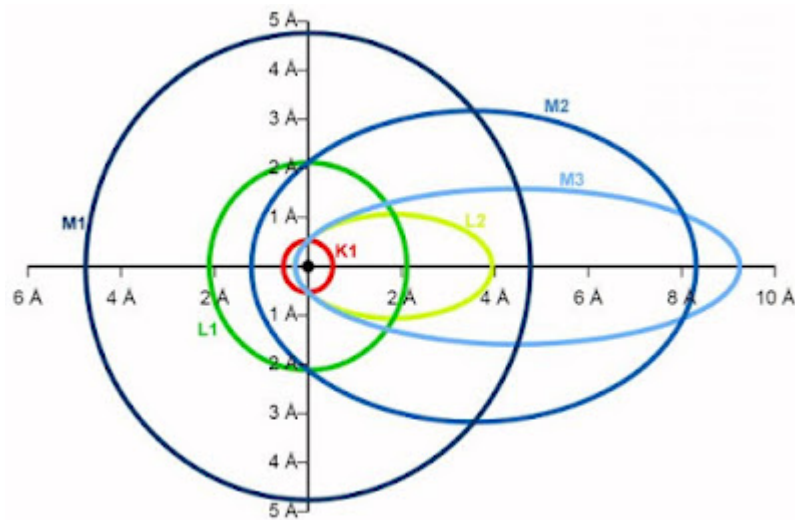
*Verklaring van het uitzenden van elektromagnetische straling door een elektron.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Het atoommodel van Sommerfeld

Toen de wetenschap de beschikking kreeg over zeer nauwkeurige spectroscopen en men hiermee de spectrale lijnen van waterstof grondig ging onderzoeken, bleek dat de enkelvoudige lijnen in feite waren samengesteld uit verschillende lijnen, die heel dicht bij elkaar lagen. Dit noemde men de 'fijnstructuur' van het spectrum. De theorie van Bohr had hiervoor geen verklaring. Die verklaring werd door Sommerfeld geleverd. Deze veronderstelde dat elektronen niet alleen in cirkelvormige banen rond de kern kunnen draaien, maar ook in elliptische. Er zijn dan, per schil, veel meer rustenergieën mogelijk, met als gevolg ook veel meer overgangen van schil naar schil. De rustenergieën in een ellipsvormige baan liggen echter zeer dicht bij elkaar en dus ook de golflengtes van de uitgezonden elektromagnetische straling. Door zeer nauwkeurig onderzoek van de fijnstructuur stelde Sommerfeld het model op dat is toegelicht in onderstaande figuur:

- De K-schil heeft één cirkelvormig baan.
- De L-schil heeft één cirkelvormige en één ellipsvormige baan.
- De M-schil heeft één cirkelvormige en twee ellipsvormige banen.
- Etc.

In iedere baan kunnen natuurlijk weer slechts een bepaald aantal elektronen voorkomen. Het totaal per schil blijft echter gelijk aan dat wat Rutherford reeds stelde. Deze verfijning van het model van Bohr biedt ook een eenvoudige verklaring voor de elektrische geleidbaarheid van sommige stoffen.



*Ellipsvormige banen lossen het probleem van de fijnstructuur van het spectrum op.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)*

Epiloog

Het atoommodel van Sommerfeld is de meest verfijnde benadering van de natuurkundige realiteit van het atoom waar de klassieke mechanica toe in staat is. Toch laat ook dit model vele vragen open. Een groot deel van deze vragen kan beantwoord worden als men het atoom niet langer beschouwt als een soort miniatuur zonnestelsel met harde materieballetjes, maar als een samenhang van materievelden. De quantummechanica biedt hiertoe de theoretische, volledig wiskundig beschreven basis. Maar deze ingewikkelde theorie valt volledig buiten het bestek van deze dit artikel! Voor het begrijpen van de natuurkundige basis van de elektronica kan men volledig terug vallen op het atoommodel van Sommerfeld.

De samenstelling van de atoomkern

Niet behandeld is bovendien de samenstelling van de atoomkern, omdat dit voor de elektronica niet belangrijk is. Voor de volledigheid wordt alleen even vermeld dat de kern bestaat uit protonen en neutronen. De protonen zijn de dragers van de positieve elektrische lading en ieder atoom bevat even veel protonen als elektronen. De neutronen zijn niet geladen, maar hebben wel een aanzienlijke massa. Vanwege hun elektrische neutraliteit vervullen neutronen geen enkele rol in elektrische en elektronische verschijnselen.

Vrije elektronen in geleiders

Emissie van elektronen

Elektronen zijn de basis van de elektrische stroom. Elektrische stroom bestaat immers uit een verplaatsing van een grote hoeveelheid elektronen in een welbepaalde richting in een welbepaalde tijd. Maar zolang elektronen gebonden zijn aan een atoomkern kan er van het vloeien van elektrische stroom geen sprake zijn. De volgende vraag die dus beantwoord moet worden is hoe elektronen aan hun atoomgevangenis kunnen ontsnappen. Ook dat heeft meestal te maken met het toevoeren van voldoende energie aan een atoom. Net zoals een elektron van zijn Bohrse baan naar een verder gelegen baan kan worden verplaatst, kan dat elektron ook zodanig versneld worden, dat het uit het atoomverband ontsnapt. De hoeveelheid energie die hiervoor nodig is noemt men de 'uittreedenergie', voorgesteld door het symbool ϕ (phi). Het verschijnsel van het uittreden van elektronen noemt men 'emissie'.

De uittreedenergie

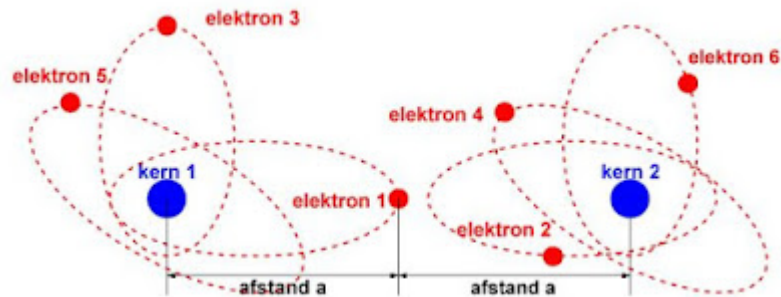
De uittreedenergie is van een groot aantal omstandigheden afhankelijk. In het algemeen geldt dat atomen die een volledig gevulde hoogste schil hebben, aanzienlijk meer energie moeten absorberen om een elektron te laten ontsnappen dan atomen waarbij de laatste schil zo goed als leeg is.

Extern elektrisch veld

Een tweede voorwaarde voor het vloeien van elektrische stroom is dat er een elektrisch veld aanwezig is over de geleider. In sommige stoffen, zoals metalen, zijn de buitenste elektronen zo zwak aan hun atoom gebonden dat zij van atoom naar atoom kunnen zwerven. Toch veroorzaken deze reeds vrije elektronen geen elektrische stroom! Het is immers niet voldoende de elektronen te bevrijden uit hun atomen. Zonder extern elektrisch veld zouden deze elektronen als een soort wolk willekeurige bewegingen uitvoeren van atoom tot atoom. Maar door het aanleggen van een extern elektrisch veld zullen de vrije elektronen aangetrokken worden door de positieve lading van het veld, waardoor de elektronenstroom op gang komt.

Vrije elektronen in geleiders

In onderstaande figuur is getekend hoe men zich het ontstaan van vrije elektronen in een goede geleider volgens het atoommodel van Sommerfeld kan voorstellen. In metalen liggen de atomen dicht op elkaar. Een van de elektronen van het linker atoom zit in een elliptische baan. Op bepaalde momenten bevindt dit elektron zich dus op een afstand a van de eigen kern. Door de dichtheid van de atomen bevindt dit elektron zich op dat moment echter op een identieke afstand a van een naburig atoom (het rechtse). Op dat moment kan het elektron zonder veel moeite overspringen van het ene naar het andere atoom. Dat verschijnsel gebeurt natuurlijk niet eenmalig, maar miljarden keer per seconde.



Het ontstaan van vrije elektronen in geleiders. (© 2017 Jos Verstraten)

Stroom ontstaat door het aanleggen van een veld

Miljarden elektronen bewegen zich dus van atoom naar atoom door de stof. Zonder externe invloeden is deze beweging chaotisch en gemiddeld bekeken verandert er niets. Legt men nu echter een kleine elektrische spanning aan over het metaal, dan ontstaat over de geleider een elektrisch veld. Dit veld oefent een kracht uit op de vrije elektronen, waardoor deze in een door de richting van het veld bepaalde richting gaan bewegen. De chaotische beweging wordt gestructureerd. Dit verschijnsel plant zich razendsnel door het metaal voort, met als gevolg dat er een stroom van elektronen van de negatieve naar de positieve pool op gang komt. De zware kernen zitten vast in de kristalstructuur van het metaal en kunnen zich niet verplaatsen. In een geleider zijn het dus alleen de zeer lichte vrije elektronen die de elektrische stroom veroorzaken.

Thermische emissie

De meest voorkomende manier om elektronen uit hun atoomstructuur te bevrijden is thermische emissie. Warmte uit zich op microscopische schaal doordat de bouwstenen van de stof gaan trillen. Deze bewegingen gaan natuurlijk gepaard met toename van de energie. Als dus atomen, die een zeer lage uittreedenergie hebben, warm worden dan zal de opwarming al voldoende extra energie aan de elektronen geven om deze uit hun atoomverband te bevrijden. Het volstaat dan een uitwendig elektrisch veld aan te leggen om de elektronenstroom te laten vloeien. Nu moet men bij het begrip opwarming niet denken aan het heet stoken van een stof. In de natuurkunde verstaat men onder opwarmen het verhogen van de temperatuur van een stof boven het absolute nulpunt van $-273,16\text{ °C}$. Een stof die op een temperatuur staat van -200 °C is, natuurkundig bekeken, dus al flink opgewarmd!

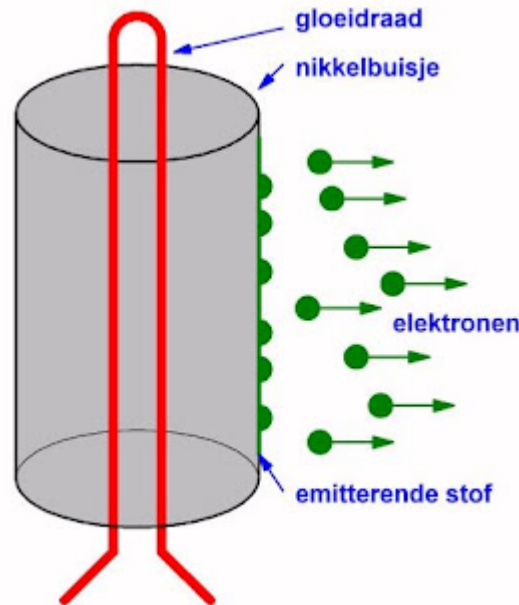
Lekstromen afhankelijk van temperatuur

De thermische emissie is de oorzaak van het verschijnsel dat de lekstroom van halfgeleiders

toeneemt naarmate het kristal warmer wordt.

Beeldbuizen werken dank zij thermische emissie

Thermische emissie werd bijvoorbeeld in de ouderwetse beeldbuizen gebruikt om de elektronen te genereren, waaruit de elektronenstraal wordt opgebouwd. Door middel van een gloeidraad of filament wordt de kathode heet (deze keer letterlijk op te vatten!) gestookt. De wolk vrije elektronen die door de kathode wordt uitgezonden wordt door middel van ingewikkelde elektrostatische en magnetische lenzen en versnellers omgezet in een zeer dunne elektronenstraal, die door de luchtledige glazen beeldbuis op het scherm wordt gericht.



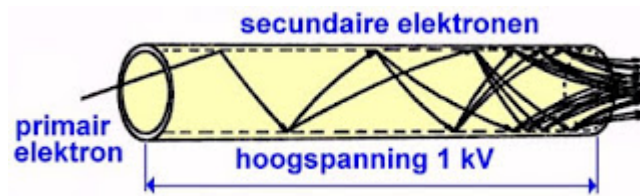
*Thermische emissie in de kathode van een beeldbuis wekt een wolk vrije elektronen op.
(© 2017 Jos Verstraten)*

Foto-emissie

De noodzakelijke uittreedenergie kan ook worden aangeboden onder de vorm van elektromagnetische straling. Uit de algemene wetten van het elektromagnetisme is bekend dat de energie van de straling omgekeerd evenredig is met de golflengte. Bestraalt men dus een stof met elektromagnetische straling dan zal er een moment optreden waarbij de straling zoveel energie in de atomen van de bestraalde stof pompt, dat elektronen uit hun atoomverband kunnen ontsnappen. Het aanleggen van een extern elektrisch veld volstaat dan weer om de bevrijde elektronen in één richting door de stof te laten vloeien. Foto-emissie is de natuurkundige basis van een aantal elektronische onderdelen, zoals fotodioden, fototransistoren en cadmiumsulfide cellen (LDR's).

Secundaire emissie

Elektronen kunnen ook uit hun atomen bevrijd worden door de stof te bombarderen met zeer energierijke elektronen. Deze elektronen botsen tegen de aan atomen gebonden elektronen. Bij een botsing vindt er steeds energie-overdracht plaats. Sommige gebonden elektronen worden hierdoor zo energierijk dat zij uit het atoomverband kunnen ontsnappen. Als de energie van de invallende elektronen zo groot is dat zij in staat zijn meerdere elektronen uit hun atomen te bevrijden, spreekt men van 'secundaire multiplicatie'. Dit effect treedt bijvoorbeeld op in fotovermenigvuldigers, waar men eerst via foto-emissie enkele elektronen bevrijd uit een plaat. Nadien worden deze elektronen versneld door een elektrisch veld. De versnelde elektronen laat men dan tegen een tweede plaat botsen. De primaire elektronen zijn ondertussen zo energierijk door de versnelling geworden, dat zij in staat zijn met verschillende gebonden elektronen te botsen en deze uit hun atomen te bevrijden. Door het beschreven proces herhaalde malen te herhalen kan men een secundaire multiplicatie met een factor van 100 tot 10.000 verkrijgen.



Secundaire emissie van elektronen, toegepast in een elektronische beeldversterker.
(Wikimedia Commons, bewerkt door Jos Verstraten)