

DE AARD VAN LICHT EN MATERIE

Docenten:

O. Slooten

W. van Wetter

Onderzoekers:

Amos Luka Bastian

Alexander Joaquin Mondriaan van der Meer

Inhoudsopgave

Inleiding.....	4
Deelvraag 1: Bestaat materie uit deeltjes?	5
H1.1 Atomen	5
Niet geheel correct.....	6
H1.2 De Brownse beweging	7
Random walk.....	8
De kinetische gastheorie	8
Einstein zijn theorie over de Brownse beweging	9
Het eerste deel van Einstein zijn theorie	9
Het tweede deel van Einstein zijn theorie	10
H1.3 Het Elektron.....	11
De ontdekking	11
De lading massa verhouding	13
Het oliedruppel experiment van Millikan	16
H1.4 Het Atoommodel	18
Goud opent zicht naar het zonnestelsel	18
Lijnenspectra	20
Bohr zijn benadering	21
Deelvraag 2: Bestaat licht uit golven?	4
H2.1 Licht discussie in de Oudheid.....	22
H2.2 De opvattingen in de 17e eeuw.....	23
H2.3 Thomas Young's experiment	25
H2.4 Maxwell	27
De ether	28
Het experiment van Michelson	28
Ether vervolg.....	31
Deelvraag 3: Bestaat licht uit deeltjes?	4
Een ontoereikend begrip.....	32
H3.1 Zwarte stralers	32
Kirchhoff en zijn zwarte lichamen	33
Een zwarte straler in de praktijk	33
De zoektocht naar de juiste formule.....	34
Planck zijn ongemakkelijke aanname.....	36
H3.2 De formule van Planck:	37
H3.3 Het foto-elektrisch effect.....	39

De ontdekking door Hertz	39
Einstein en zijn formule.....	40
Weinig gehoor.....	41
Millikan en het foto-elektrisch effect.....	41
H3.5 Het Compton effect	44
Een botsing.....	44
Impuls.....	45
De formule	45
Compton zijn experiment.....	46
H3.6 Het uitgevoerde Compton experiment.....	48
De opstelling	48
De NaI(ti) scintillatie detector	49
De empirische conclusie.....	52
Bohr wil het niet geloven	52
H3.7 Nu is alles makkelijker	53
Deelvraag 4: Bestaat materie uit golven?	4
H4.1 De gebroeders de Broglie	57
H4.2 De contributie van de Broglie	57
H4.3 Elektronen diffractie	58
Het experiment van Davisson en Germer	58
Bragg reflectie.....	59
H4.4 Het uitgevoerde elektronen diffractie experiment	61
Kristallen en cirkels	65
Het meten	65
De empirische conclusie.....	65
H4.5 Kwantummechanica	65
Het complementariteitsbeginsel.....	66
H4.5 Alle materie.....	67
Conclusie	69
Nawoord	70
Bronvermelding	70
Bijlagen, inclusief het logboek.....	74

Inleiding

Drie eeuwen geleden stelde Isaac Newton dat licht zich hetzelfde gedraagt als een stroom van minuscule deeltjes die in een rechte lijn reizen, en dat het op dezelfde manier wordt gereflecteerd van spiegels als een bal die op een oppervlak stuitert. Maar zijn Nederlandse tijdgenoot, Huygens hadden een alternatieve theorie, namelijk dat licht een golf is: het kan om scherpe randen buigen en verspreiden, ook kan het door twee spleten een interferentie patroon creëren op dezelfde manier als rimpelingen op een vijver met elkaar interfereren. De golftheorie van licht werd de 'klassieke' beschrijving die werd gebruikt in optica. Later, in het eerste kwartaal van de 20e eeuw, onthulden experimenten dat licht, of elektromagnetische straling, eigenschappen van golven en eigenschappen van deeltjes leek te hebben. Hetzelfde gold voor deeltjes zoals elektronen, die zich ook gedragen als golven.

Deze dualiteit is een van de belangrijkste puzzels van de kwantummechanica, de meest succesvolle theorie die we hebben van de manier waarop materie en straling zich gedragen op het atomaire en subatomaire niveau. Hoe kan iets tegelijkertijd zowel een golf als een deeltje zijn? Gezond verstand, op basis van onze ervaringen in de macro wereld, zegt dat dit onmogelijk is. Maar de kwantummechanica vereist dat in de micro-wereld, licht, elektronen en andere entiteiten zich kunnen gedragen als een golf of deeltjes, afhankelijk van de experimentele regeling.

Het of-of denken is de ontsnappingsclausule geweest waardoor fysici hun geestelijke gezondheid konden behouden. In elk experiment vertelt de standaardinterpretatie van de kwantummechanica ons dat licht of een elektron zich zou moeten gedragen als een deeltje of als een golf.ⁱ

Door de eeuwen heen zijn er vele theorieën ontwikkeld en is er veel onduidelijkheid geweest over dit onderwerp. Wat is nou eigenlijk de aard van licht? En hoe gedraagt materie zich? De onderzoeksvraag bij dit onderzoek luidt dan ook: Wat is de aard van licht en materie? Bij dit onderwerp zijn de volgende deelvragen opgesteld:

1. Bestaat materie uit deeltjes?
 2. Bestaat licht uit golven?
 3. Bestaat licht uit deeltjes?
 4. Bestaat materie uit golven?
-

1. Bestaat materie uit deeltjes?

H1.1 Atomen



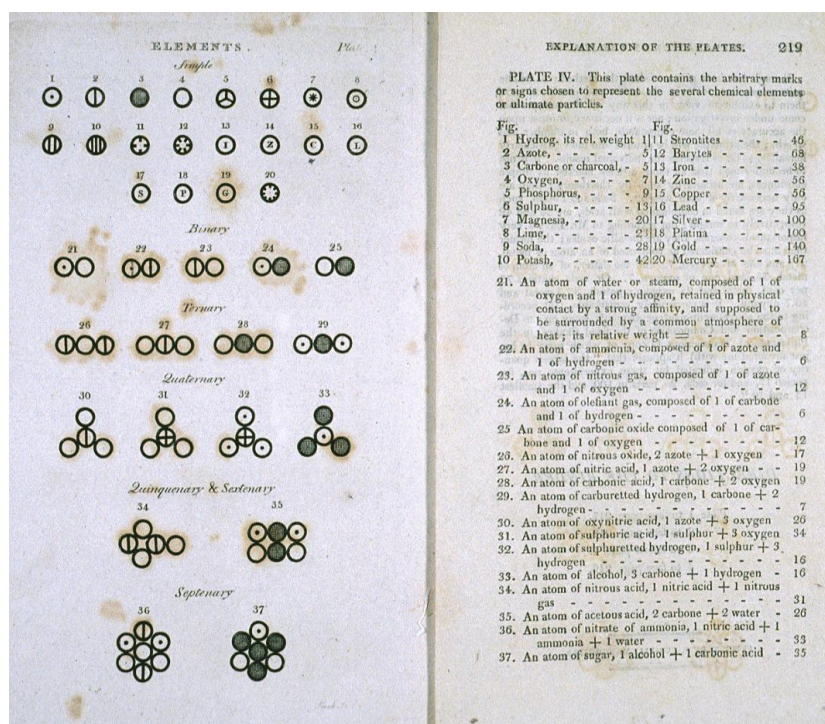
Afbeelding 1 – John Dalton

De atoomtheorie is een theorie over de aard van materie, die stelt dat materie is samengesteld uit afzonderlijke eenheden genaamd atomen. Dit is in tegenstelling met het oude idee dat materie oneindig zou kunnen worden opgedeeld.

De atoomtheorie begon allemaal als een filosofisch concept in het oude Griekenland (door Democritus) en India. Maar toen kwam John Dalton, hij nam het begrip atoom en zette het van een filosofisch concept uit het oude Griekenland om tot een concrete realiteit. John Dalton bestudeerde, en breidde uit op eerdere theorieën van Antoine Lavoisier en Joseph Louis Proust, waarbij hij de nieuwe wet, de wet van multipele proporties ontwikkelde: reagentia moeten steeds in dezelfde verhouding worden gemengd om hetzelfde product op te leveren. Proust had bijvoorbeeld tin oxide bestudeerd, waarbij hij vond dat de massa of 88.1% tin en 11.9% zuurstof was, of 78.7% tin en 21.3% zuurstof

(respectievelijk tin(II)oxide en tin dioxide). Dalton merkte uit deze percentages op dat 100g tin combineerde met 13.5g zuurstof, of met 27g zuurstof; 13,5 en 27 vormen een verhouding van 1:2. Dalton vond dat een atoomtheorie van de materie dit vaak voorkomend patroon kon verklaren – bijvoorbeeld in het geval van Proust zijn tin oxides combineerde 1 tin atoom met of 1 zuurstofatoom of 2 zuurstofatomen.ⁱⁱ

Dalton geloofde ook dat de atoomtheorie kon verklaren waarom water verschillende gassen in verschillende verhoudingen opneemt: hij vond bijvoorbeeld dat water veel beter koolstofdioxide absorbeerde dan



Afbeelding 2 – Verschillende atomen en moleculen zoals afgebeeld in John Dalton's 'A New System of Chemical Philosophy' (1808)

stikstof.ⁱⁱⁱ Dalton zijn hypothese was dan ook dat dit kwam door het verschil in massa en complexiteit van de gassen zijn respectievelijke deeltjes. En dit klopte inderdaad: moleculen van koolstofdioxide zijn veel zwaarder en groter dan moleculen van stikstof.

Dalton stelde ook voor dat elk chemisch element is samengesteld uit atomen van een enkel, uniek type, en hoewel ze niet kunnen worden gewijzigd of vernietigd door chemische reacties, kunnen ze wel worden gecombineerd om complexere structuren te vormen (chemische verbindingen). Dit was de eerste echte wetenschappelijke theorie van het atoom, want hierbij kwam Dalton tot zijn conclusies door het onderzoeken van de resultaten in een empirische wijze.

Niet geheel correct

Dalton schatte de atoomgewichten volgens de verhoudingen waarin ze werden gecombineerd, met een waterstofatoom als eenheid genomen. Dalton stelde zich echter niet voor dat sommige elementen van atomen in moleculen bestaan: bijvoorbeeld zuiver zuurstof, dat bestaat als O_2 . Ook nam hij onterecht aan dat de meest eenvoudige samenstelling tussen twee elementen altijd bestaat uit 1 atoom van ieder element (hij dacht bijvoorbeeld dat water HO was en niet H_2O).^{iv} Dit, in combinatie met het materiaal dat hij tot zijn beschikking had, resulteerde in onjuiste resultaten. In 1803 dacht hij bijvoorbeeld dat zuurstofatomen 5,5 keer zwaarder waren dan waterstofatomen, dit kwam omdat hij in water 5,5 gram water mat voor 1 gram waterstof en dat hij daarom geloofde dat de formule van water HO was. Maar met het behulp van betere gegevens concludeerde hij in 1806 dat het atoomgewicht van zuurstof in feite 7 gram moest zijn in plaats van 5,5, en dit dacht hij voor de rest van zijn leven. Anderen waren echter op dit moment al tot de conclusie gekomen dat een zuurstofatoom 8 keer zo zwaar is als een waterstofatoom (zij gingen ook nog steeds van Dalton's formule voor waterstof uit).^v

Het gebrek van Dalton zijn theorie is in principe gecorrigeerd in 1811 door Amedeo Avogadro. Avogadro stelde voor dat gelijke volumes van twee gassen, bij een gelijke temperatuur en druk, een gelijk aantal moleculen hebben (met andere woorden: de massa van een deeltje in een gas heeft geen invloed op het volume).^{vi} De wet van Avogadro stelde hem in staat om de atomaire aard van diverse gassen af te leiden door het bestuderen van de volumes waarin zij reageerden. Bijvoorbeeld: twee liter waterstof reageert met één liter zuurstof tot twee liter waterdamp (bij een constante druk en temperatuur), wat dus betekent dat één zuurstofatoom in tweeën splitst om twee deeltjes water te vormen. Dus zo was Avogadro in staat om een meer accurate schatting te doen van de atomaire massa van zuurstof en andere elementen, en een duidelijk onderscheid te maken tussen atomen en moleculen. Zijn ideeën werden echter



Afbeelding 3 – Amedeo Avogadro

pas in het algemeen aanvaard rond 1860.

Natuurkundigen twijfelden sinds de atoomtheorie van Dalton aan het bestaan van atomen, en stelden zich de vraag, heeft de natuurkunde deze dingen nodig? Oftewel, zijn er verschijnselen die beter verklaard kunnen worden met de aanname van het bestaan van deze deeltjes?

H1.2 De Brownse beweging

Eerst worden een aantal begrippen uitgelegd, waarna er over Einstein zijn theorie over de



Afbeelding 4 – Antoni van Leeuwenhoek

Brownse beweging wordt vertelt. De Brownse beweging is het vermoedelijk willekeurig bewegen van zwevende deeltjes in een vloeistof of gas. Deze deeltjes vertonen een toevallig aandoend patroon en kunnen dus in alle richtingen wegschieten. Deze beweging wordt ook wel een dronkemanswandeling/toevalsbeweging (Engels: random walk) genoemd. Vanaf nu wordt hier naar verwezen met het Engelse woord: random walk.

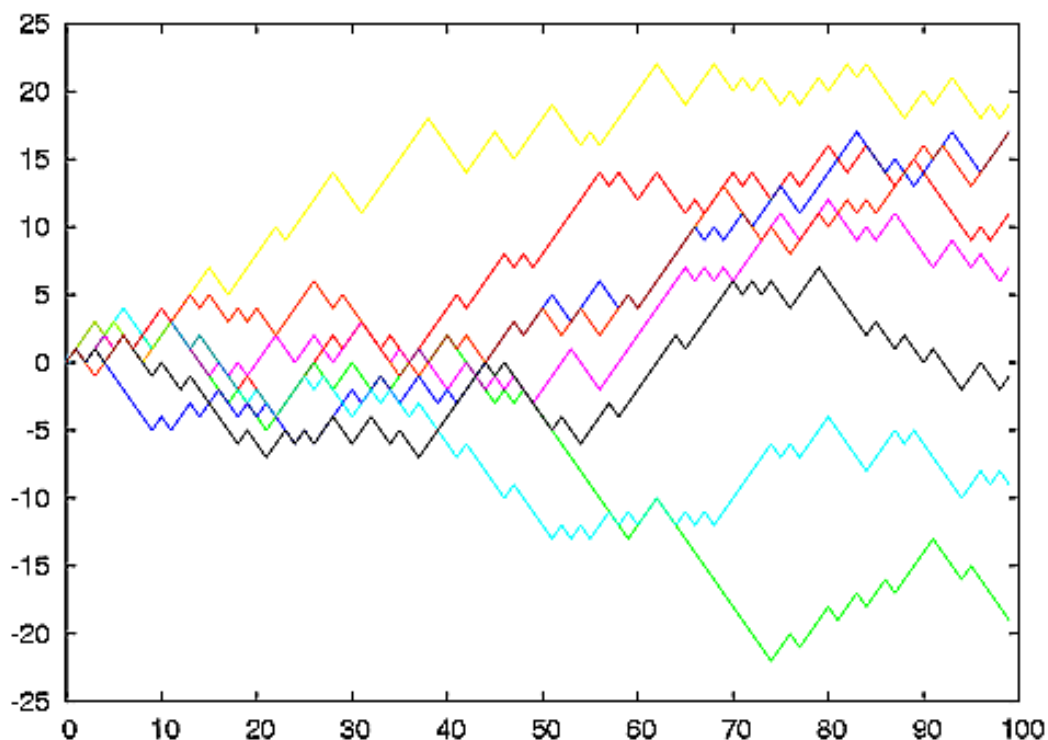
Dit werd voor het eerst geobserveerd door de beroemde Nederlandse microscopist Antoni van Leeuwenhoek rond 1700. Maar Leeuwenhoek had hier geen theorie over en zijn waarneming raakte in de vergetelheid.^{vii}

Robert Brown strooide in 1827 pollen, stuifmeel van bloemen, in water. Toen hij hier met een microscoop naar keek, zag hij de pollen wilde, ononderbroken en onregelmatige kriskrasbewegingen uitvoeren. Een eendimensionale weergave van acht random walks is te zien in grafiek 1. Hier is de verticale beweging, oftewel op en neer, afgezet tegen de tijd. Brown zijn eigen conclusie, was dat alle materie opgebouwd is uit 'primitieve moleculen'.

De verklaring voor de Brownse beweging is dat deze kleine deeltjes aan het botsen zijn met de moleculen van het vloeistof of gas waarin zij zweven. De hevigste botsingen brengen voldoende energie over op het deeltje om microscopische bewegingen te veroorzaken. De Brownse beweging is dus een indirect bewijs voor het bestaan van moleculen en de beweging daarvan. Ook is het een argument voor de kinetische theorie voor de warmte. Deze theorie zegt dat als de temperatuur toeneemt, moleculen harder gaan bewegen en trillen, en dus een hogere kinetische energie krijgen. Het is een argument omdat het Brownse deeltje grotere bewegingen gaat maken, bij een hogere temperatuur.

Random walk

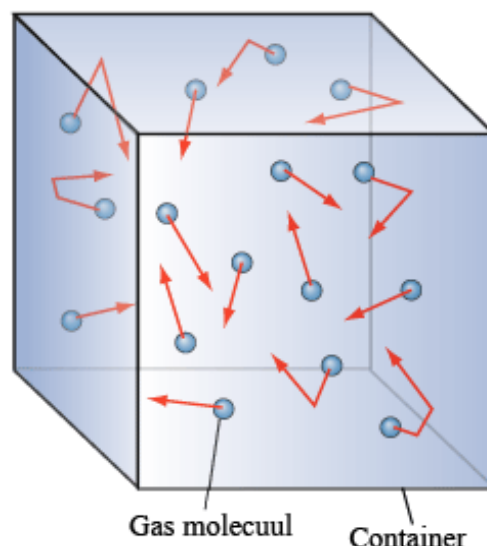
Een random walk is een wiskundige formalisering van een traject dat bestaat uit opeenvolgende willekeurige stappen. Bijvoorbeeld, zoals eerder vertelt, het pad dat een deeltje aflegt in een vloeistof of gas of de financiële status van een gokker. De term random walk werd voor het eerst geïntroduceerd door Karl Pearson in 1905.^{viii} Random walks zijn gebruikt in vele verschillende gebieden, namelijk: ecologie, economie, psychologie, informatica, natuurkunde, scheikunde en biologie. Random walks kunnen het waargenomen gedrag van de processen in deze gebieden uitleggen, en dus dient een random walk als een fundamenteel model voor de stochastisch, dit wil zeggen, aan het toeval onderworpen, opgenomen activiteit.



Grafiek 1 – Voorbeeld van acht random walks in één dimensie te beginnen bij 0. De plot geeft de huidige positie op de lijn (verticale as) tegenover de tijdstappen (horizontale as)

De kinetische gastheorie

De kinetische gastheorie beschrijft een gas als een groot aantal kleine deeltjes (atomen of moleculen), die zich voortdurend willekeurig bewegen. Deze snel bewegende deeltjes botsen voortdurend met elkaar en met de wanden van de container waarin zij zich bevinden (zie afbeelding 5). De kinetische gastheorie verklaart macroscopische eigenschappen van gassen, zoals druk, temperatuur en volume.



Afbeelding 5 – Gasmoleculen die van elkaar en de container afstoten

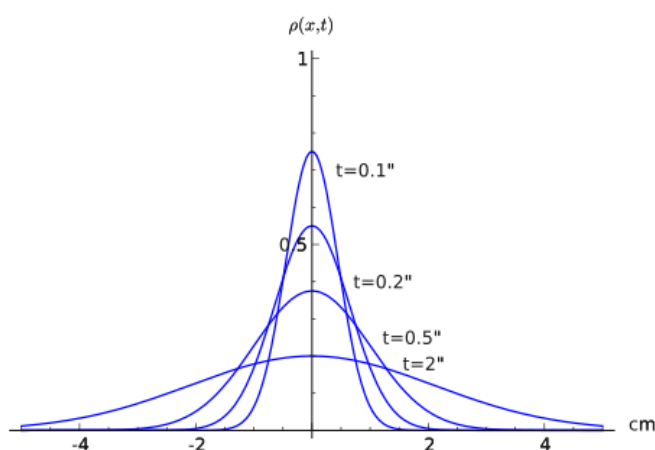
Einstein zijn theorie over de Brownse beweging

Einstein's theorie kun je opdelen in twee delen. Het eerste deel bestaat uit het formuleren van een diffusievergelijking voor Brownse deeltjes, waarbij de diffusie coëfficiënt gerelateerd is aan de kwadratische verplaatsing van een Brownse deeltje. Het tweede deel van Einstein's theorie bestaat uit het in verband brengen van de diffusie coëfficiënt met meetbare fysische grootheden. Hiermee kon Einstein de grootte van een atoom, het aantal atomen per mol en het molecuulgewicht in gram van een gas bepalen. Dit volume, wat $22,414 \text{ dm}^3/\text{mol}$ is, was in overeenstemming met de wet van Avogadro voor alle ideale gassen, bij een standaard temperatuur en druk. Het aantal moleculen, en dus atomen dat zich in dit volume bevindt staat bekend als het getal van Avogadro, en dus is het bepalen van dit getal gelijkwaardig aan de kennis van de massa van een atoom, aangezien deze wordt bepaald door de massa van een mol van een gas te delen door het getal van Avogadro.

Het eerste deel van Einstein zijn theorie

Het eerste deel van Einstein's argument was het bepalen van de afstand dat een Brownse deeltje aflegt in een bepaald tijdsinterval. De klassieke mechanica was niet in staat om deze afstand te bepalen, vanwege het enorme aantal bombardementen dat een Brownse deeltje gedurende het afleggen van deze afstand zal ondergaan, wat ongeveer 10^{21} botsingen per seconde is.^{ix} En zo moest Einstein de collectieve beweging van de Brownse deeltjes overwegen. Einstein heeft een formule opgesteld voor de diffusie, D . En voor de dichtheid van Brownse deeltjes op een bepaalde plaats en tijd, hieruit blijkt dat hoe groter de afstand is tussen het beginpunt van de geplote grafiek hoe lager de dichtheid van de Brownse deeltjes. Dit verband is zichtbaar gemaakt in grafiek 2. Maar belangrijker nog is de formule voor de gemiddelde kwadratische verplaatsing van de deeltjes, deze is uitgedrukt in de verstreken tijd, t en de diffusie, D .

$$x^2 = 2Dt \quad (1)$$



Grafiek 2 – De dichtheid van de Brownse deeltjes, afgezet tegen de plaats, x voor verschillende tijden, t .

Vanuit deze uitdrukking stelde Einstein dat de verplaatsing van een Brownse deeltje niet evenredig is met de verstreken tijd, maar eerder met zijn wortel.^x

Het tweede deel van Einstein zijn theorie

Het tweede deel van Einstein zijn theorie brengt de diffusieconstante in verband met fysiek meetbare hoeveelheden, zoals de kwadratische verplaatsing van een deeltje in een bepaald tijdsinterval. Dit resultaat maakt de experimentele bepaling van het getal van Avogadro mogelijk, en daarom dus het bepalen van de grootte van moleculen. Einstein analyseerde een dynamisch evenwicht dat tot stand werd gebracht tussen tegengestelde krachten. Het mooie aan Einstein zijn argument is dat het eindresultaat niet afhangt van welke krachten betrokken zijn bij het opstellen van het dynamisch evenwicht.

Denk bijvoorbeeld aan zwevende deeltjes in een viskeuze vloeistof. De zwaartekracht laat de deeltjes zich vestigen, terwijl diffusie de deeltjes ordent. De mobiliteit van het deeltje, μ wordt weergegeven met behulp van de wet van Stokes. George Stokes had laten zien dat de mobiliteit van een bolvormig deeltje met straal r gelijk is aan, $\mu = \frac{1}{(6\pi\eta r)}$, waarbij η de viscositeitsconstante is van de vloeistof. De gedetailleerde afleiding van de uiteindelijke formule voor de diffusie zal niet besproken worden. Maar de formule voor de diffusie, D is weergegeven in (2). Alle variabelen zijn in deze formule op te meten tijdens experimenten, en de constanten zijn bekend. Behalve het getal van Avogadro, dit was zo te berekenen.

$$\frac{x^2}{2t} = D = \frac{RT}{6\pi\eta r N} \quad (2)$$

Hier komt de eerste gelijkheid voort uit het eerste deel van Einstein's theorie. Hierin is x^2 de verplaatsing van het bestudeerde deeltje in het kwadraat, t is de tijd dat deze verplaatsing duurt. R is de universele gasconstante. T , is de temperatuur in Kelvin, η is de viscositeitsconstante uit de wet van Stokes. r , is de straal van het Brownse deeltje, en N het gewilde getal van Avogadro. R en N , komen uit de definitie voor de Boltzmanconstante:

$$k_B = \frac{R}{N}.$$

Het type dynamisch evenwicht dat voorgesteld werd door Einstein was niet nieuw. Er was al eerder op gewezen, door J. J. Thomson^{xi} in zijn reeks lezingen aan Yale University, in mei 1903, dat het dynamisch evenwicht tussen de snelheid, dat gegenereerd wordt door een concentratiegradiënt, dat als gevolg van de variatie van de partiële druk, (dit is het aandeel dat de aanwezigheid van een bepaalde stof heeft op de absolute druk) door het bewegen van ionen ontstaat, "ons een methode geeft om het getal van Avogadro te bepalen, die onafhankelijk is van elke hypothese van de vorm of grootte van moleculen, of de wijze waarop zij invloed op elkaar hebben."^{xii}

Een identieke expressie van de formule van Einstein voor de diffusie coëfficiënt werd gevonden door Walther Nernst in 1888^{xiii}, waarin hij de diffusie coëfficiënt uitdrukte als de verhouding van de osmotische druk (dit is het een drukverschil, veroorzaakt door een verschil in opgeloste stoffen) tot de verhouding van de wrijvingskracht en de snelheid waarmee de diffusie plaatsvindt. Met de introductie van de gaswet per eenheid volume voor de osmotische druk wordt de formule identiek aan die van Einstein.^{xiv}

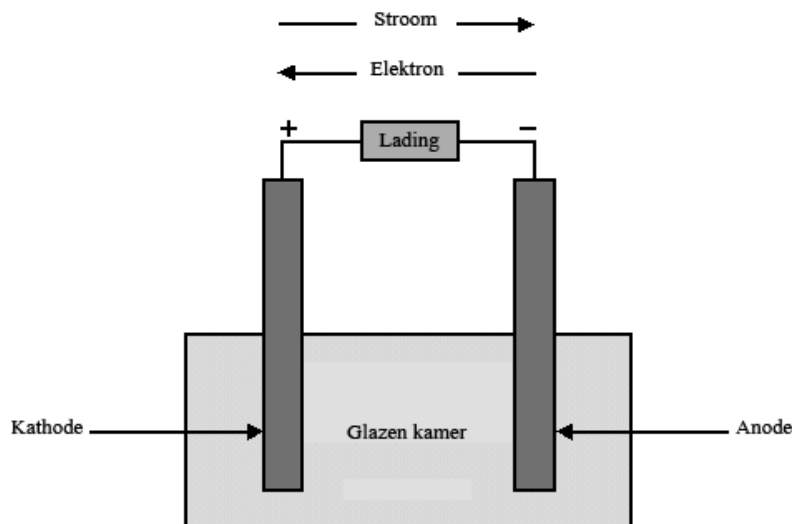
In het begin werden de voorspellingen van Einstein zijn formule schijnbaar verworpen door een reeds van proeven door Svedberg in 1906 en 1907, waarbij de verplaatsing van de deeltjes van vier tot zes keer hoger uitkwamen dan de voorspelde waarde. Ook Henri vond in 1908 verschillende waardes die drie keer hoger waren dan Einstein zijn formule voorspelde.^{xv} Maar toch werden Einstein zijn voorspellingen uiteindelijk bevestigd in een reeks van experimenten die werden uitgevoerd door Chaeudesaignes in 1908 en door Perrin in 1909. De bevestiging van de theorie van Einstein voerde een empirische voortuitgang voor de kinetische theorie van de warmte. In wezen toonde Einstein dat de beweging direct kan worden afgeleid vanuit het kinetische model van thermisch evenwicht. En dus dat dit model klopt met de werkelijkheid, of in ieder geval gedeeltelijk. Veel natuurkundigen waren na deze theorie en de uitslag van het experiment van Perrin overtuigd van het bestaan van moleculen, en dus automatisch van het feit dat materie uit deeltjes bestaat.

H1.3 Het elektron

Het elektron heeft de eer om het eerste subatomaire deeltje te zijn dat ooit ontdekt is. Het is voor het eerst ontdekt door J. J. Thomson in 1897. De ontdekker van het elektron heeft de verhouding van de massa en de lading van een elektron berekend. Robert Millikan heeft vervolgens de lading uitgerekend en daarmee meteen de massa van het elektron.

De ontdekking

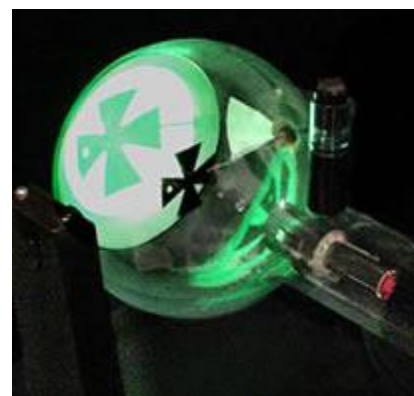
In 1879 wilde J. J. Thomson, een hoogleraar natuurkunde aan de Universiteit van Cambridge in Engeland, meer leren over kathodestralen. Toentertijd wisten hij en andere onderzoekers dat als je een glazen ruimte hebt, dat bijna *vacuüm* is, waarin zich twee elektrisch geladen elektroden bevinden, een negatief en een positief, met een hoge spanning tussen deze elektroden in, er een soort van stralen van de negatieve naar de positieve elektrode stromen (zie afbeelding 6). Aangezien de negatieve plaat bekend stond als een kathode (de positieve plaat is een anode) werden deze mysterieuze stralen zogenaamde “kathodestralen” genoemd.^{xvi}



Afbeelding 6 - Een versimpelde weergave van de productie van kathodestralen. Een Glazen kamer met twee elektrisch geladen platen, waarbij elektronen stromen van de negatief geladen plaat (kathode) naar de positief geladen plaat (anode).

Thomson en zijn tijdgenoten wisten dat kathodestralen een groen gloeiend licht veroorzaakten in de wanden van de gebruikte glazen buis. William Crookes heeft een experiment uitgevoerd waarbij er een gat in de plus elektrode zit, waardoor de stralen gingen. Hij had in het pad van deze stralen een metalen kruis geplaatst. De kathode straling veroorzaakten een scherpe schaduw in het groene licht aan de andere kant van de buis. Dit is te zien in afbeelding 7. De straling beweegt dus zeer rechtlijnig. ^{xvii}

Perrin heeft in 1895 bewezen dat de straling negatief geladen is. Hij liet de straling ook door een gat in de anode, en vervolgens ving hij deze lading op met een ladingverzamelaar. Deze bleek negatief geladen te worden. ^{xviii}



Afbeelding 7 – Crookes zijn experiment

Als de straling inderdaad negatief geladen is, dan zou deze afgebogen moeten kunnen worden met behulp van een elektrisch veld, net als elektrisch geladen deeltjes. Hertz voerde een experiment uit waarbij er twee platen werden geïnstalleerd, waar de kathodestralen tussendoor gingen. Wanneer er een elektrisch veld werd opgewekt met deze platen werden de kathodestralen niet tot weinig afgebogen. Dit verbaasde Thomson. Maar hij kwam tot een verklaring, Hertz had de buis niet voldoende leeggepompt, er was dus nog teveel gas aanwezig. Het gas wordt namelijk een geleider onder invloed van de kathodestralen, dit komt door de vorming van ionen, geladen moleculen. En een elektrisch veld heeft geen invloed op een ruimte omgeven door een geleider in dat veld. ^{xix} Dit is het principe van de kooi van Faraday. ^{xx} Een oplossing hiervoor is om de buis beter leeg te pompen. Dit is dan ook precies wat Thomson heeft gedaan. Hij voerde op deze manier hetzelfde experiment uit als Hertz, en vond dat de straling afgebogen werd naar de positieve plaat. Hieruit

concludeerde Thomson dat de straling negatief geladen was.

Ook werd de straling duidelijk met magnetische velden afgebogen. Vele Duitse natuurkundigen dachten dat het om een vorm van elektromagnetische straling ging, (zie voor de uitleg hiervan Hoofdstuk 2.4) maar elektromagnetische straling kan niet worden afgebogen door magnetische velden, nog door elektrische velden, en verder reist deze straling met de snelheid van het licht.

Thomson heeft onderzocht wat de snelheid van de kathode straling is. Hierbij heeft hij een elektrisch veld, een kracht omhoog op de straling laten werken, en een magnetisch veld een kracht omlaag. Door de velden zo in te stellen dat de baan van de straling rechtdoor bleef gaan, kon hier een vergelijking uit worden gehaald voor de snelheid van de straling. Dit is duidelijk uitgelegd in het volgende hoofdstuk. De snelheden verschilden, maar werden niet hoger dan één derde van de snelheid van het licht.

Elektromagnetische straling gaat altijd met de snelheid van het licht dus ging het niet om elektromagnetische straling. Thomson kwam tot de overtuiging dat het om deeltjes materie ging die negatief geladen zijn.^{xxi}



Afbeelding 8 - J. J. Thomson

Hertz kwam met een volgend probleem. De straling kan door dunne lagen metaal, zoals goud. Het idee van deeltjes zo groot als de moleculen van een gas, die door een vaste stof gaan, verbaasde Thomson. Dit leidde hem tot het idee, dat de geladen deeltjes zeer klein zijn, en dat zou verklaren waarom de deeltjes door een vaste stof kunnen. Ze gaan simpelweg door de tussenruimtes tussen de moleculen door.

Gebaseerd op het vermogen van deeltjes van kathodestralen om gemakkelijk door verdund gas te passeren, kwam hij, terecht, tot de conclusie dat deze deeltjes geen grote elektrische lading hebben en dat hun massa erg klein is ten opzichte van een atoom. Hij deed dit experiment met verschillende materialen voor de elektroden, en verschillende gassen, en hetzelfde resultaat volgde elke keer. Hieruit bedacht hij dat de deeltjes aanwezig zijn in alle stoffen. Zijn metingen en conclusies vormen wat wij de ontdekking van het elektron noemen. De naam elektron is niet bedacht door Thomson zelf. Hij had de naam corpuscles verzonnen, maar aangezien dit gewoon lichamen betekent is het niet erg creatief. De Ier Johnstone Stoney had er plezier in om nieuwe namen te bedenken. Het elektron is zijn enige overlevende verzinsel.^{xxii}

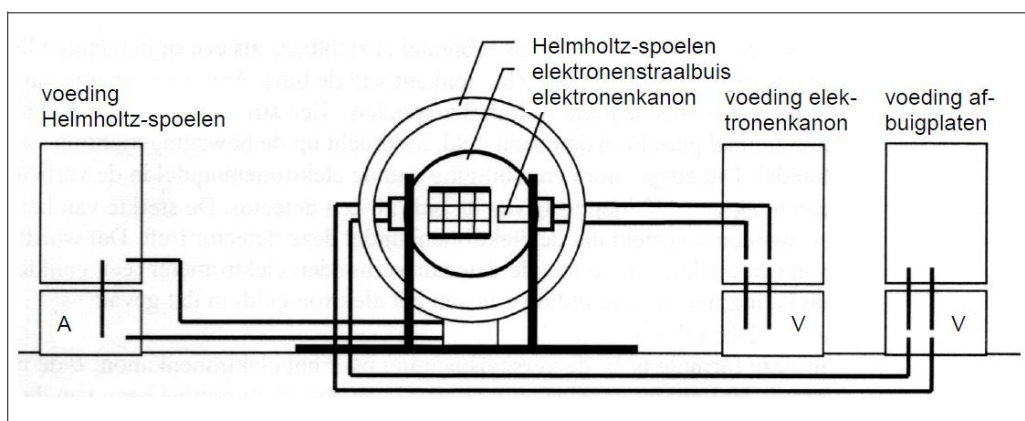
De lading massa verhouding

In het volgende experiment bepaalde Thomson de lading, massa verhouding van het elektron, e/m . J. J. Thomson maakte gebruik van een buis die later de Thomson-buis is genoemd. Het is een bolvormige vacuümbuis met een elektronenkanon, twee horizontale afbuigplaten en daartussen een verticaal fluorescerend scherm.

De gebruikte meetopstelling is weergegeven in afbeelding 9. In een elektronenkanon in de

buis worden elektronen versneld met een versnelspanning U_v over een positieve en een negatieve elektrode binnen het kanon. De elektronen zijn geladen en een spanning is de energie per lading, of beter gezegd de arbeid per lading, hierdoor worden de elektronen versneld, dit kan oplopen tot hoge snelheden. De elektronenbundel loopt daarna tussen twee evenwijdige horizontale platen. Tussen die platen zit een verticaal fluorescerend scherm. Dit scherm is van materiaal gemaakt, dat oplicht wanneer er snelle elektronen tegen aan botsen, hierdoor wordt de elektronenbundel zichtbaar. Door een spanning U_p over de platen ontstaat daartussen een verticaal gericht elektrisch veld. Dat zorgt voor een afbuiging van de elektronenbundel in de verticale richting.

Aan weerskanten van de buis staan twee spoelen (de zogenaamde Helmholtz-spoelen). Een stroom door deze spoelen zorgt voor een homogeen, horizontaal gericht magnetisch veld loodrecht op de bewegingsrichting van de elektronen in de bundel. Dit zorgt voor een Lorentzkracht die de bundel ook in de verticale richting afbuigt, maar de andere kant op ten opzichte van de afbuiging door de elektrische kracht. De sterkte en de richting van het elektrisch en het magnetisch veld kunnen zo worden ingesteld dat de elektronenbundel langs een rechte lijn beweegt. In dat geval compenseren de elektrische kracht en de Lorentzkracht op de elektronen elkaar.



Afbeelding 9 – Meetopstelling voor bepaling van de lading/massa/verhouding van het elektron met de Thomson-buis

De elektrische veldsterkte wordt gegeven door de formule $E_e = \frac{U_p \cdot k}{d}$, de correctiefactor k in de formule geeft aan dat de horizontale platen in de praktijk geen perfecte condensator vormen. E_e staat voor de elektrische veldsterkte. U_p is de spanning, en d de afstand tussen de twee platen. ^{xxiii} Er geldt: $F_e = F_L$, uitgeschreven levert dit (1).

$$eE_e = Bev, \quad v = \frac{E_e}{B}, \quad v = \frac{U_p \cdot k}{B \cdot d} \quad (1)$$

De kinetische energie van het elektron is veroorzaakt door het elektronenkanon en dus gelijk aan de arbeid door de spanning over het kanon. De vergelijking ombouwen levert de verhouding $\frac{e}{m}$ zie (2).

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU_k > \frac{e}{v} = \frac{v^2}{2 \cdot U_k} \quad (2)$$

Invullen van (1) in (2) geeft de bruikbare formule voor de verhouding $\frac{e}{m}$ (3).

$$\frac{e}{m} = \frac{U_p \cdot k^2}{B^2 \cdot d^2 \cdot U_v} \quad (3)$$

In deze formule is U_p de spanning over de horizontale platen, U_v de versnelspanning over het elektronenkanon, B de magnetische inductie van de Helmholtz-spoelen en d de afstand tussen de horizontale platen.

De daadwerkelijke resultaten van Thomson waren niet bepaald eenduidig. Zijn apparatuur was niet erg precies. Hij kwam uit op een waarde voor $\frac{e}{m}$ tussen 1.0 en $1.4 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.^{xxiv}

De huidige waarde is $1,76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$.^{xxv} In latere jaren kwam men met een $\frac{e}{m}$ verhouding die veel preciezer was. Dit gebeurde met een vergelijkbare opstelling. In deze opstelling werd de elektronenbundel met een magnetisch veld zodanig afgebogen dat deze in een cirkelbaan kwam. Hierbij levert de Lorentzkracht de centripetalekracht. Door de Lorentzkracht aan de centripetale kracht gelijk te stellen volgt een formule waar ook de verhouding $\frac{e}{m}$ uit komt. De benodigde variabelen in deze formule waren experimenteel makkelijker nauwkeurig te bepalen.

Deze $\frac{e}{m}$ verhouding is minstens duizend keer kleiner was dan verhouding van een waterstofion (wat nu bekend staat als een proton) .

Thomson schreef: "De geringheid van $\frac{e}{m}$ kan het gevolg zijn van de geringheid van m of de grootte van e , of een combinatie van deze twee."

Thomson lanceerde eigenlijk de deeltjesfysica, of subatomaire fysica, toen hij schreef: "We hebben in kathodestralen een geval van materie in een nieuwe staat, een staat waarin de onderverdeling van de materie veel verder gaat dan in de normale gasvormige toestand." Wetenschappers beseften direct dat dit lichte, negatief geladen deeltje een bestanddeel van atomen moest zijn. Zij wisten al dat atomen in nature elektrisch moesten zijn, want atomen konden makkelijk geïoniseerd worden, dat wil zeggen; geladen.

Het oliedruppel experiment van Millikan

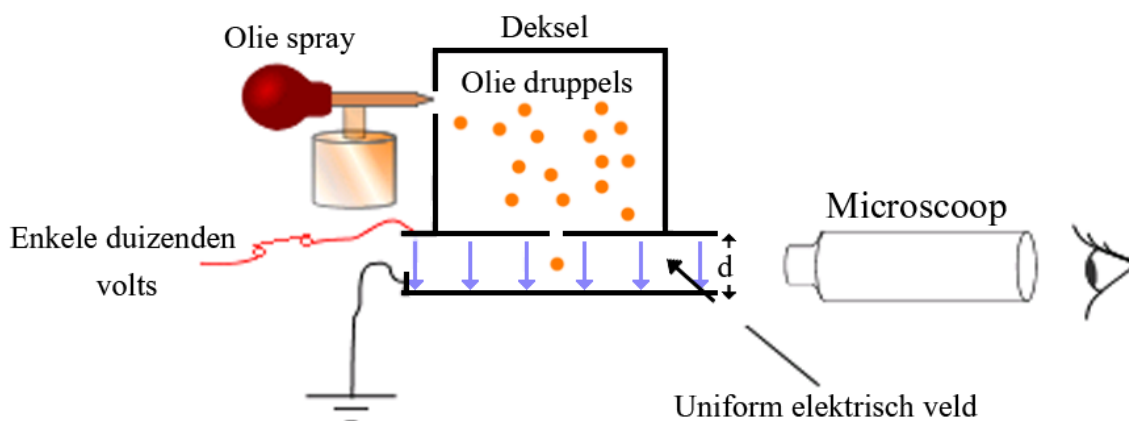


Afbeelding 10 – Robert Millikan

Rond 1910 slaagde Millikan erin de lading van het pas ontdekte elektron te bepalen. Met een verstuiver sproeide hij oliedruppeltjes tussen de platen van een condensator. Door ze te bestralen met ultraviolet licht, werden de druppels negatief geladen.^{xxvi} Een reden voor waarom de druppels hierdoor negatief geladen werden is niet door ons gevonden. De opstelling is weergegeven in afbeelding 11, maar hier is de bestraling door Uv-licht niet weergegeven, maar dit is wel degelijk aanwezig. Maar de ladingen werden niet gelijk verdeeld, er was verschil tussen de ladingen van de druppeltjes. Door de spanning tussen de platen aan te passen, zorgde hij ervoor dat telkens één druppel bleef zweven. Voor zo'n zwevend druppeltje geldt dat de elektrische kracht plus de opwaartse kracht van de lucht gelijk is aan de zwaartekracht, dus

$$F_z = F_e + F_{opw}.$$

Hieruit is een formule te halen voor de lading q per druppel. Maar dan moet wel de massa van de druppel bekend zijn.



Afbeelding 11 – Simpele weergave van de opstelling van de proef van Millikan

De opwaartse kracht F_{opw} zou je de draagkracht van de lucht kunnen noemen. Op de plaats van het druppeltje bevond zich eerst lucht, deze lucht moet vervolgens opzij gaan om het druppeltje er door te laten gaan. De massa van deze verplaatste lucht vermenigvuldigd met de gravitatie versnelling, g , geeft de opwaartse kracht. Dit heet de wet van Archimedes en geldt hetzelfde voor vloeistoffen.^{xxvii} Dus de formule voor de opwaartse kracht is net als de zwaartekracht van de vorm: $F = mg$. Het volume van de verplaatste lucht is even groot als

het volume van het druppeltje. Een druppel is bolvormig dus is het volume: $\frac{4}{3}\pi r^3$.

Dit volume vermenigvuldigd met de dichtheid, ρ_{lucht} , van de lucht, geeft de massa van de lucht. Het volume van de druppel maal de dichtheid van olie, ρ_{olie} , geeft de massa van de druppel. De vergelijking $F_z = F_e + F_{opw}$ wordt hierdoor vergelijking (4).

$$\left(\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_{olie} \cdot g\right) = \left(\frac{qU}{d}\right) + \left(\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot \rho_{lucht} \cdot g\right) \quad (4)$$

Hierbij is r de straal van de druppel, q de elektrische lading per druppel, U de spanning tussen de platen, en d de afstand tussen de platen.

Als men deze krachten vergelijking uitschrijft en de lading per druppel, q , vrijmaakt krijg je (5).

$$q = \frac{\frac{4}{3}\pi r^3 \cdot g \cdot (\rho_{olie} - \rho_{lucht}) \cdot d}{U} \quad (5)$$

Nu moet je nog r berekenen voor in formule (5).

De straal van de druppel is te bepalen door de stroom uit te schakelen, waardoor de druppel begint te vallen, en dan de tijd meten waarin hij valt. De druppel komt al zeer snel op zijn constante eindsnelheid. Bij deze constante eindsnelheid geldt: $F_z = F_w + F_{opw}$.

De wrijvingskracht wordt berekend met behulp van de wet van Stokes, deze wet is weergegeven in (6).

$$F_w = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \quad (6)$$

Deze wet beschrijft de wrijvingskracht van lucht op een voorwerp met een bepaalde straal, r en snelheid, v . Hierbij is η de viscositeitsconstante van de lucht. Hierin komt de snelheid van de druppel voor.^{xxviii} v is constant, dus is deze te bepalen met $v = \frac{x}{t}$. Waarbij x en v gemeten worden. Door $F_z = F_w + F_{opw}$ uit te werken en de straal vrij te maken komt men op (5).

$$r = \sqrt{\frac{6 \cdot \eta \cdot v}{\frac{4}{3}g \cdot (\rho_{olie} - \rho_{lucht})}} \quad (7)$$

Hierin is η de viscositeit van de lucht en g de gravitatieversnelling. Dus met de combinatie van de vergelijkingen (5) en (7) kon Millikan de lading, q , berekenen van zeer veel druppeltjes en kreeg zo een lijst waarden die veelvouden van de elektron lading e zijn. Hij zocht de grootste gemene deler en vond: $1.592 \cdot 10^{-19}$. Dit is erg dichtbij de moderne waarde

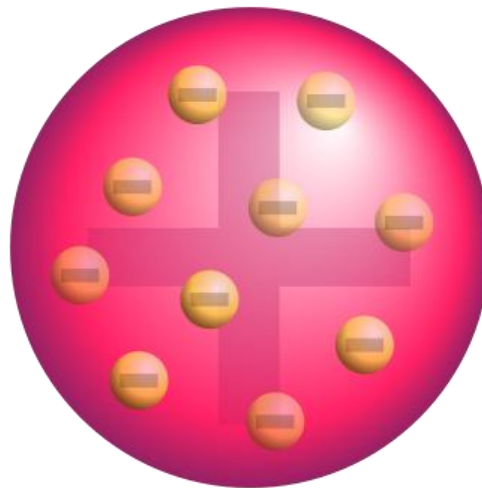
van: $1,602 \cdot 10^{-19}$ xxix

H1.4 Het Atoommodel

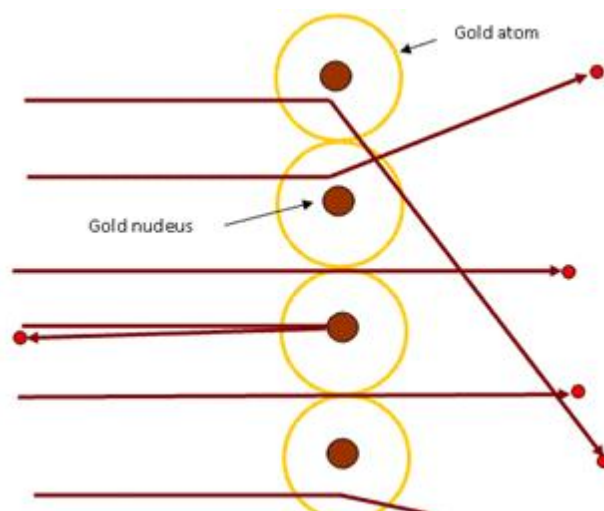
Tot eind 19e eeuw werden atomen beschouwd als min of meer harde bollen. Maar het begon erop te lijken dat atomen toch zelf weer uit verschillende ingrediënten waren samengesteld. Atoom betekent dan ook ondeelbaar in het Grieks.^{xxx} Welke rol elektronen precies speelden in atomen was nog onduidelijk. Toen Thomson het elektron had ontdekt, en had aangetoond dat elektronen in veel verschillende materialen aanwezig zijn, werd de vraag gesteld waar in het atoom die elektronen zich bevinden. Welke rol elektronen precies speelden in atomen was nog onduidelijk. Atomen zijn neutraal, maar de gevonden elektronen zijn negatief geladen, dus moet er positieve lading in een atoom aanwezig zijn om hiervoor te compenseren. Omdat de elektronen zo licht zijn, moet de massa van het atoom voornamelijk door een of meer andere onderdelen worden opgebracht. Thomson zelf had een idee over de ruimtelijke vorm van een atoom, en stelde dit in 1904 voor aan de wetenschappelijke gemeenschap. Het zogenaamde: "Plum Pudding Model" (zie afbeelding 12). Hij zag het atoom als een bolletje waarin de massa homogeen is verdeeld, zoals in een knikker. De elektronen zouden zich dan in de knikker moeten bevinden en de compenserende positieve lading zou ook homogeen verdeeld zijn.

Goud opent zicht naar het zonnestelsel

Maar in 1911 toonde Rutherford, de vroegere assistent van Thomson aan dat dit knikkermodel in strijd is met de uitkomsten van verstrooiingsexperimenten die kort daarvoor door P. H. Geiger en E. Marsden waren uitgevoerd. Zij beschoten een folie van goud met een bundel α -deeltjes, die worden uitgezonden bij radioactief verval van een alfastraler. Dit zijn Heliumatomen met een lading van $2+$, zij hebben een massa dat viermaal groter is dan die van een waterstofatoom. Tot hun verbazing ontdekten de onderzoekers dat een klein deel van de α -deeltjes door het goudfolie werd teruggekaatst, in plaats van er doorheen te vliegen, dit is schematisch weergegeven in afbeelding 13. Voor Rutherford was dit resultaat zeer



Afbeelding 12 - Schematische weergave van J. J. Thomson zijn "Plum Pudding Model" van het atoom



Afbeelding 13 – Een schematische weergave van het Geiger-Marsden experiment

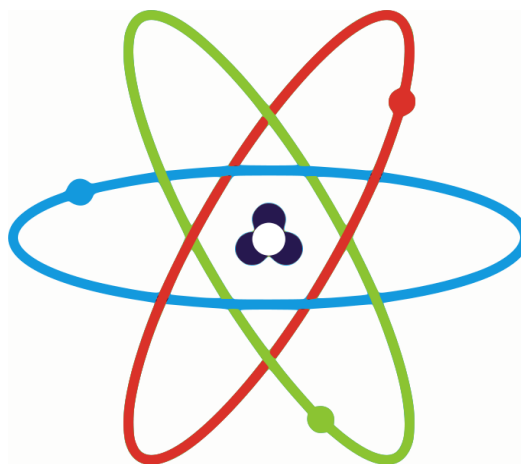
verrassend. Hij noemde het even ongelooflijk als een kogel die door een blad papier wordt geschoten, zou terugkaatsen naar de schutter. Met het knikkermodel kan dat niet worden verklaard. Als de atomen bollen met positieve lading zouden zijn, met negatieve elektronen daarin, dan zouden de krachten op een geladen deeltje elkaar steeds grotendeels compenseren, en zouden alleen kleine afbuigingen mogelijk zijn.

Uit de experimenten leidde Rutherford af dat de positieve ladingdragers in het atoom geconcentreerd moeten zijn in een volume dat veel kleiner is dan de afmetingen van het atoom, dit aangezien er maar een zeer klein deel van de straling weerkaatst werd. Dit kleine deel van het atoom moet dus ook het overgrote deel van de massa bevatten. En hier draaien dan de relatief lichte elektronen omheen. Zo ontstond dus het beeld van het atoom als een klein zonnestelsel, zie afbeelding 14. De elektronen worden in hun banen gehouden door de aantrekkende kracht van de kernlading, zoals de aantrekkende zwaartekracht van de zon dat doet met de planeten. Net zoals het zonnestelsel, bestaat het atoom voornamelijk uit lege ruimte.^{xxxi}

Het was zonneklaar dat de bouw van atomen een belangrijk nieuw onderzoeksgebied zou gaan vormen.

Bohr en anderen toonden aan dat dit model zeer onvolledig was, aangezien een zodanig gevormd atoom volgens de klassieke theorie maar heel kort kan bestaan. Dit werkt als volgt. Er wordt hier als voorbeeld naar een

waterstofatoom gekeken, dit bestaat uit een elektron en een kern. Het rondlopende elektron zal, omdat het geladen is, fungeren als een zendertje dat elektromagnetische straling uitzendt met een frequentie die juist gelijk is aan zijn omlooppfrequentie. De energie van deze uitgezonden straling moet het elektron 'betalen' door zelf energie te verliezen. Het systeem kan dus niet stabiel zijn. Volgens de Maxwell-theorie van het elektromagnetisme zal het elektron banen gaan beschrijven die steeds dichterbij de kern komen te liggen, waarbij de omlooppfrequentie toeneemt. Ook de frequentie van de uitgezonden straling zal dus toenemen. In werkelijkheid gebeurt dit niet, en atomen zijn in het algemeen wel stabiel. Als dat niet zo was, zag het er slecht uit voor de materie, en dus ook voor ons.

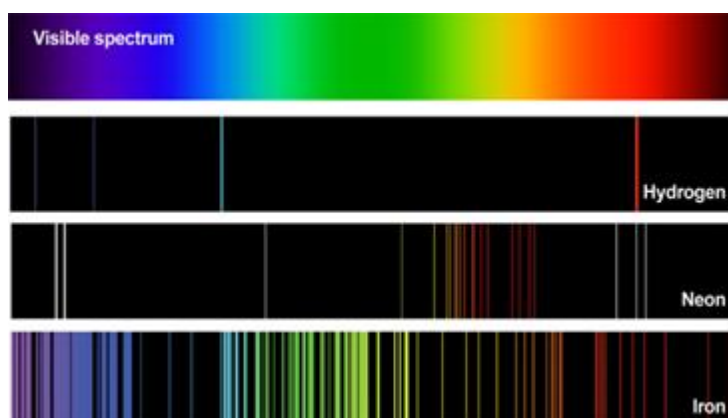


Afbeelding 14 – Het zonnestel atoommodel van Rutherford

Lijnenspectra

Atomen blijken stabiel te zijn. De elektronen storten niet neer op de kern en verliezen niet voortdurend energie door straling uit te zenden. Maar atomen kunnen wel degelijk straling uitzenden of absorberen. Licht dat door een gas valt, zal bij het doorlopen van het gas worden verzwakt, doordat de atomen in het gas stralingsenergie opnemen. En omgekeerd, als een gas wordt verhit, zal het licht gaan uitzenden. Dat is te zien bij een gasvlam, of bij de zon.

Het licht, en de rest van de elektromagnetische straling dat de atomen uitzenden heeft een bijzondere eigenschap. Het is verdeeld over een paar precieze frequenties, met in de tussenliggende frequenties een intensiteit van 0. Deze energieverdeling, of spectrum



Afbeelding 15 – Lijnenspectrum van waterstof, neon en ijzer

vertoont scherpe pieken bij een serie speciale frequenties. Dit noemt men een lijnenspectrum. Atomen kunnen blijkbaar alleen maar straling uitzenden van bepaalde frequenties, maar niet de frequenties tussen deze waarden in. In afbeelding 15 is een weergave van het lijnenspectrum van waterstof te zien. Ook zijn neon en ijzer weergegeven. Het is te zien dat bij een groter atoom met meer elektronen en veel meer lijnen te zien zijn, veruit het simpelste atoom om te beschouwen is daarom waterstof. Lijnen spectra zijn per atoomsoort verschillend. Daarom geeft analyse van deze spectra informatie over naar welke stof er gekeken wordt. Ook de samenstelling van een atmosfeer van een planeet of ster kan zo worden onderzocht.

Dit spectrum is hetzelfde voor het uitstralen en absorberen van straling. Het alleen mogelijk zijn van bepaalde frequenties is in tegenspraak met de klassieke theorie. Volgens deze theorie is er een continue verdeling van mogelijke omloopbanen, en dus ook van frequenties die het rondlopend elektron zou kunnen uitzenden.^{xxxii}

In 1885 heeft de Zwitser Balmer al een formule opgesteld voor de frequenties, f , van de lijnen in het spectrum van waterstof, zoals te zien in afbeelding 15. Dit is formule (1).

$$f = Rc\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{n^2}\right) \quad (1)$$

Hierin staat R voor de Rydberg constante, deze en de rest van de formule zijn empirisch

bepaald door Balmer. c is de snelheid van het licht en n is een geheel getal vanaf 3. Deze formule beschrijft alleen de spectraallijnen in het zichtbare deel. Deze formule heeft jarenlang geen enkele theoretische onderbouwing gehad.^{xxxiii}

Bohr zijn benadering

Het was de opwindende speurtocht naar het inwendige van de atomen waaraan Bohr zijn steentje wilde bijdragen. Bohr reisde naar Cambridge in Engeland, waar hij hoopte te werken met J. J. Thomson, maar deze bleek echter te weinig tijd voor hem te hebben. Bohr ontmoette echter gelukkigerwijs Rutherford, die Bohr zijn enthousiasme en scherpte wist te waarderen en hem uitnodigde naar Manchester te komen. Hij schreef hier een uitgebreid stuk over zijn bezwaren tegen het model van Rutherford, die hierboven behandeld is.

Bohr nam aan dat de Planck-Einstein formule voor de energie van elektromagnetische straling klopt. De energie van uitgestraalde en ingevangen straling wordt gegeven door $E = hf$. Waarin h een constante is en f de frequentie. Waar deze formule vandaan komt wordt besproken in deelvraag 3. Bohr bedacht dat wanneer een atoom straling uitzendt met frequentie f , dat dan de Energie: hf , onttrokken wordt aan het atoom. Deze stelde zich een atoom voor dat van een stationaire toestand van energie, E_2 , naar een lagere toestand van energie, E_1 , sprong, waarbij de energieverandering van $E_2 - E_1$ optreedt. Hierbij wordt straling uitgezonden waarbij de frequentie f weergegeven wordt door (2).

$$E_2 - E_1 = hf \text{ en dus, } f = \frac{E_2 - E_1}{h} \quad (2)$$

De overgangen tussen deze energieniveaus worden ook wel kwantumsprongen genoemd. Door vergelijking (2) te gebruiken en de klassieke formulering van de kinetische energie: $\frac{1}{2}mv^2$ en de formules voor de middelpuntzoekende kracht en de elektrische kracht aan elkaar gelijk te stellen kwam hij op formules voor de energieniveaus van de elektronen. De constante van Rydberg kon hij afleiden door gebruik te maken van de simpele formule van de rondlooppfrequentie en uit te gaan van hoge energieniveaus, waarbij n een groot getal is, op die manier werd de vergelijking waar hij mee bezig was versimpeld, en kon hij de constante van Rydberg opschrijven in al bekende natuurconstanten. Zo kwam hij op de volgende formule:

$$f = Rc \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (3)$$

Deze formule beschrijft de frequentie van de uitgezonden straling bij de overgang van energieniveau n naar m . In het zichtbare deel van het spectrum is de eerste lijn die men kan zien, veroorzaakt door terugval van niveau 3 naar 2. Dus m is 2 en n is 3. Dit verklaart waarom er $\frac{1}{4}$ staat in de formule van Balmer, want 2^2 is namelijk 4. Toen in Bohr zijn formule $m = 1$ werd ingevuld werd een lijn buiten het zichtbare spectrum voorspeld, en dit werd experimenteel bevestigd.^{xxxiv}

2. Bestaat licht uit golven?

H2.1 Licht discussie in de Oudheid



Afbeelding 16 - Claudius Ptolemaeus

Door de eeuwen is ons beeld van wat licht nou precies is drastisch veranderd. De studie van het licht viel al in de oudheid in twee delen uiteen, namelijk: allereerst was er de kwalitatieve natuurfilosofische vraag 'wat is licht?' Is licht een corpusculaire (i.e. deeltjesachtige) *substantie* die zich met zeer grote of zelfs oneindige snelheid voortplant, of juist een *accidens*, een wijziging in de toestand van een of ander mysterieus medium (provisorisch genaamd de *ether*)?^{xxxv} De eerste echte theorieën over licht kwamen van de oude Grieken. Veel van deze theorieën beschreven het licht als een straal - een rechte lijn van punt A naar punt B. Pythagoras, het meest bekend voor zijn stelling van Pythagoras, stelde dat objecten deeltjes naar de ogen afschoten waardoor wij deze objecten konden zien. Plato dacht echter het omgekeerde: dat het oog stralen afvuurde en wanneer deze stralen op een object vielen, wij deze dan konden zien. Andere Griekse filosofen - in het bijzonder Euclides en Ptolemaeus - waren ook erg belangrijk. Met name Ptolemaeus' *Optica*, waarin Ptolemaeus Euclides zijn wiskundige behandeling van de visie en zijn eigen idee van een visuele conus in combinatie met natuurkundige theorieën gebruikte, was erg belangrijk. Het wordt zelfs "een van de belangrijkste werken geschreven over *Optica* vóór Newton" genoemd.



Afbeelding 17 - Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham

Arabische geleerden namen deze ideeën over en scherpten deze nog verder aan, hierbij ontwikkelden zij datgene wat nu bekend staat als geometrische optica. De meest bekende beoefenaar van geometrische optica was Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham, een Perzisch astronoom en wiskundige. Hij identificeerde de optische onderdelen van het menselijk oog en beschreef een proces waarbij lichtstralen kaatsten van objecten naar de ogen van een persoon. Abu Ali al-Hasan Ibn al-Haytham was ook de uitvinder van de 'pinhole camera', ontdekte de wetten van straalbreking en bestudeerde een aantal op licht gebaseerde verschijnselen zoals regenbogen en verduisteringen.^{xxxvi}

H2.2 De opvattingen in de 17e eeuw

In 1676 bewees de Deense astronoom Ole Romer de eindigheid van de lichtsnelheid. Dit lag aan de basis van de lichttheorie die Huygens in zijn *Traité de la lumière* voorstelt, waarin uitsluitend meetkundige configuraties in ruimte en tijd een rol spelen. Volgens Huygens stoten de deeltjes aan het oppervlak van een lichtgevend voorwerp de “ethermaterie” aan, waarbij ieder hierdoor geraakt etherdeeltje de stoot op zijn beurt in alle richtingen doorgeeft.

Ook kwam Huygens tot de inzicht dat als licht tijd nodig heeft om zich voort te bewegen, dat die beweging van het licht hetzelfde zal zijn als die van het geluid: het zal zich dus voortplanten in bolvormige oppervlakken en golven. Vanuit deze visie komt wat nu bekend staat als het Beginsel van Huygens voort: ieder punt waar zich in de ether licht bevindt, wordt zelf het centrum van een golf van weer nieuwe stoten.

Toch zat Huygens met een probleem: de vreemde breking in IJslands kristal (CaCO_3). Zoals veel andere kristallen vertoonde dit exotische materiaal een dubbele breking: een enkele invallende lichtstraal wordt opgesplitst in twee uittredende lichtstralen. Maar bij IJslands kristal verlieten stralen die het kristal loodrecht invielen, het kristal onder een hoek, terwijl bij bepaalde schuine invalshoeken de straal wel gewoon onderbroken doorging. Dit weersprak alle bekende wetmatigheden aangaande de lichtbreking en Huygens kon dit dus niet verklaren in termen van golven van licht. Echter, ergens in de zomer van 1677 werkte Huygens aan een technisch vraagstuk over de lichtfiguren die een transparant voorwerp produceert, zoals de lichtende lus achter een glas water in de zon. Ook dit kon Huygens niet verklaren in termen van golven van licht, maar hij bedacht dat ieder punt van een golf een oorsprong van nieuwe golfjes is en dat je moet kijken naar de samenkomst van al die golfjes. Met deze ingeving lukte het Huygens wel om brandlijnen te construeren met golven, maar belangrijker: de vreemde breking in IJslands kristal kon hij nu ook verklaren.

Met het beginsel van golfvoortplanting bracht Huygens voor het eerst in de geschiedenis natuurfilosofie en wiskunde van licht samen. Hij gaf een wiskundige vorm aan de aard van het licht en wist daar de wetten van de optica uit af te leiden. Maar Newton, een groot bewonderaar van Huygens, nam deze kennisopvatting niet van hem over: Newton hield zich strikt vast aan het ideaal van zekerheid. Hij kon daarom zijn ideeën over de aard van het licht mind goed uiten dan Huygens, want Newton hield zulke speculaties liever gescheiden van de theorieën die hij wel experimenteel kon onderbouwen.

Newton was niet zoals Huygens een aanhanger van de accidenstheorie, maar een aanhanger van de corpusculaire theorie van licht, waarin zowel de rechte lijnige voortplanting als de mogelijke afwijkingen daarvan eenvoudig te verklaren waren uit Newton zijn eigen bewegingswetten in *Principa*. Licht zou, volgens Newton, in afwezigheid van krachten volgens de traagheidswet een eenparig rechte lijnige beweging moeten volgen, terwijl breking, spiegeling en buiging in principe konden worden beschreven door de juist krachten

tussen de obstakels en de lichtdeeltjes te veronderstellen. Huygens geloofde natuurlijk in de ether, maar Newton geloofde daar al heel lang niet meer in, omdat deze in strijd was met zijn eigen beschrijving van het zonnestelsel in *Principia*, het zou namelijk volgens Newton de planeten moeten afremmen als het bestond.

Newton ging diep in over een aantal vragen over de aard van licht. Hij legde uit dat de rechtlijnige voortplanting van licht nooit door de golftheorie van Huygens kon worden verklaard, omdat golven altijd doordringen in de schaduw van voorwerpen. Ook gaf Newton zijn mening over het Ijslands kristal. Voor de dubbele breking van het Ijslands kristal gaf hij een kwalitatief argument, dat ook nog eens het volgende experiment van Huygens verklaarde: de doorgelaten loodrechte straal wordt door een volgend exemplaar van het kristal wederom loodrecht doorgelaten, zonder dubbele breking, terwijl de andere straal opnieuw wordt afgebogen, eveneens zonder dubbele breking. Ook dacht Newton dat lichtdeeltjes behalve een kleur ook nog twee “deugden” zouden moeten hebben. Deze “deugden” zouden kunnen wisselwerken met twee overeenkomstige deugden van de atomen in het kristal, dat de ene uitgaande straal uit lichtdeeltjes met nog slechts de ene deugd, en de andere straal uit deeltjes met de andere deugd bestaat.

In de 19^e eeuw werd de golftheorie nieuw leven ingeblazen als gevolg van het werk van Thomas Young en Augustin-Jean Fresnel, die centrale begrippen uit de fysica van golven als golflengte, frequentie, en interferentie aan de theorie van Huygens toevoegden. Hierdoor viel alles op zijn plaats. Kleur correspondeert met golflengte of frequentie, de rechtlijnige voortplanting van lichtstralen is het gevolg van de constructieve interferentie van golven in de voortplantingsrichting en de vreemde breking door het Ijslands kristal bleek eenvoudigweg een gevolg van polarisatie. Binnen het kader van de klassieke natuurkunde stond de golftheorie dus voor lange tijd als een huis. De mysterieuze ether die Huygens zich voorstelde was echter wel uit de natuurkunde verdwenen. Dit was een gevolg van het beroemde Michelson-Morley experiment in 1887 en de Speciale Relativiteitstheorie van Albert Einstein uit 1905.

Het jaar 1905 bracht echter nog iets met zich mee wat een fundamentele aanslag was op de golftheorie. Einstein bracht namelijk in datzelfde jaar nog een artikel uit, waarin hij suggereerde dat licht dus geen golf is maar een deeltje, een foton genaamd. Dit deeltje voldeed echter niet zoals de golftheorie aan de klassieke mechanica, maar aan die van de zogenaamde kwantummechanica.

Maar zoals we in het heden weten, hebben alle vormen van licht en materie zowel een golf- als deeltjeskarakter. Dit laat dus zien wat voor grootheden Newton en Huygens waren, allebei in hun eigen recht.^{xxxvii}

H2.3 Thomas Young's experiment



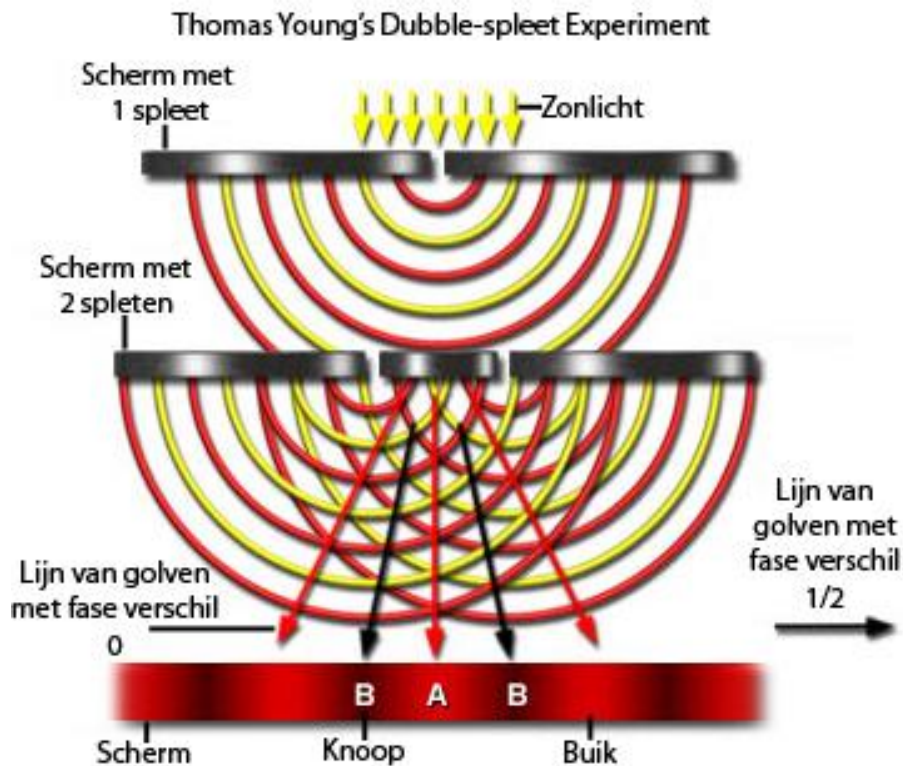
Afbeelding 18 – Thomas Young

In 1801 voerde een Engelse natuurkundige genaamd Thomas Young een experiment uit waaruit het golfachtige karakter van licht kon worden afgeleid. Omdat hij geloofde dat licht was samengesteld uit golven, redeneerde hij dat er een soort van interactie zou ontstaan wanneer twee lichtgolven elkaar ontmoeten.

Young zijn experiment was gebaseerd op de hypothese dat als licht een golfachtig karakter heeft, dat het zich dan zou moeten gedragen op een manier die vergelijkbaar is met rimpelingen en golven op een vijver van water. Twee golven zouden, waar ze elkaar ontmoeten, op een bepaalde manier moeten reageren: namelijk het versterken of vernietigen van elkaar. Wanneer het fase verschil tussen twee golven 0 is, oftewel als de ene golf aan zijn periode begint, dan begint de golf ernaast ook aan zijn periode, dan zouden ze elkaar

moeten versterken, en een grotere golf vormen. In tegenstelling hiermee zouden twee golven met een fase verschil van een half (dit betekent dus dat als de ene golf een buik heeft dan heeft de golf ernaast een dal) die elkaar ontmoeten, elkaar moeten opheffen, ze doven elkaar dus uit.

Om zijn hypothese te testen bedacht Young een ingenieus experiment. Hij gebruikte zonlicht, dat door een kleine spleet ging, waardoor het een nieuwe golf bron werd en licht in alle kanten ging uitzenden. Dit is een coherente lichtbron. Het licht uit de eerste spleet scheen vervolgens op een ander scherm met twee evenwijdige spleten. Licht dat deze twee spleten passeerde mocht toen op een scherm vallen. Young observeerde dat wanneer de twee evenwijdige spleten groot waren, ver uit elkaar stonden en dichtbij het scherm, dat er dan twee overlappende lichtvlekken op het scherm vormden. Echter, als hij de grootte van de spleten reduceerde en ze dicht bij elkaar bracht ontstonden er duidelijke banden van licht gescheiden door donkere banden in een opeenvolgende volgorde. Young gebruikte de term 'interferentiefrajes' om de banden te beschrijven en realiseerde dat dit bandenpatroon alleen kon ontstaan als licht zich als een golf gedroeg.



Afbeelding 19 – De schematische weergave van het dubbele spleet experiment van Thomas Young

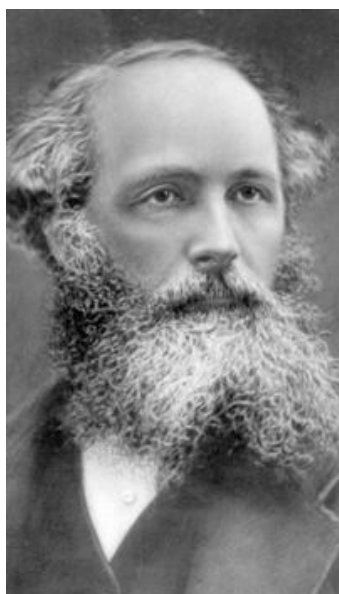
De opstelling van het experiment van Thomas Young, oftewel de dubbel-spleet experiment, is in afbeelding 19 weergegeven. Rood gefilterd licht, verkregen van het zonlicht, gaat eerst door een spleet om een coherente toestand te bereiken. Lichtgolven die de eerste spleet verlaten gaan dan door de twee spleten in de tweede barrière. Een scherm wordt achter de tweede barrière geplaatst om de overlappende lichtstralen die zijn doorgegeven via de twee spleten vast te leggen en het interferentiepatroon zichtbaar te maken. De sleutel tot dit type experiment is de onderlinge samenhang tussen de lichtgolven die worden afgebogen (gediffracteerd) bij de twee spleten in de tweede barrière. Young bereikte bij zijn experiment deze samenhang door middel van de diffractie van zonlicht uit de eerste spleet, maar hiervoor kan elke bron van coherent licht worden gebruikt.

Het coherente golffront van licht dat door de twee spleten gaat wordt verdeeld in twee nieuwe golffronten met dezelfde fase. Lichtgolven van beide spleten moeten een gelijke afstand afleggen om bij punt A te komen op het scherm (zie afbeelding 19). Omdat de twee golven beschikken over de noodzakelijke vereisten voor constructieve interferentie, oftewel versterkende interferentie, zouden ze samen moeten voegen en een heldere rode interferentierand op het scherm moeten produceren.

In tegenstelling hiermee staan geen van de punten B op het scherm op gelijke afstand van de twee spleten, dus het licht van de ene spleet moet een grotere afstand naar een bepaalde punt B afleggen dan het licht door de andere spleet naar hetzelfde punt B. De golf die voortvloeit uit de spleet die het meest dichtbij is bij punt B (bijvoorbeeld de spleet en het punt B aan de linkerkant van afbeelding 19) hoeft minder ver te reizen om zijn bestemming

te bereiken als een golf afkomstig van de andere spleet. Als gevolg hiervan zou de golf van de dichtstbijzijnde spleet iets eerder moeten aankomen bij punt B dan de golf van de andere spleet. Omdat de golven niet in fase aankomen ondergaan ze destructieve interferentie en produceren zij een donkere band (zie afbeelding 19). Maar naast B volgt weer een lichte band. Dit is omdat een golf een periodiek verschijnsel is dat zich constant herhaalt. Het weglengte verschil tot de twee spleten is nu een golflengte, oftewel een periode. Dus is het weer zo dat de wanneer de ene golf met zijn periode begint de golf ernaast ook met zijn periode begint, waaruit constructieve interferentie volgt.

Het succes van het experiment van Young was het onomstotelijke bewijs voor de golftheorie van licht, maar het werd niet meteen geaccepteerd door zijn collega's. De gebeurtenissen die plaatsvinden bij fenomenen zoals de regenboog aan kleuren in zeepbellen waren niet meteen duidelijk voor de wetenschappers die geloofden dat licht gepropageerd werd als een stroom van deeltjes, ondanks dat het werk van Young dit verklaarde. Andere soorten experimenten werden later bedacht en uitgevoerd om de golf-eigenschappen van het licht en de interferentie effecten aan te tonen.^{xxxviii}

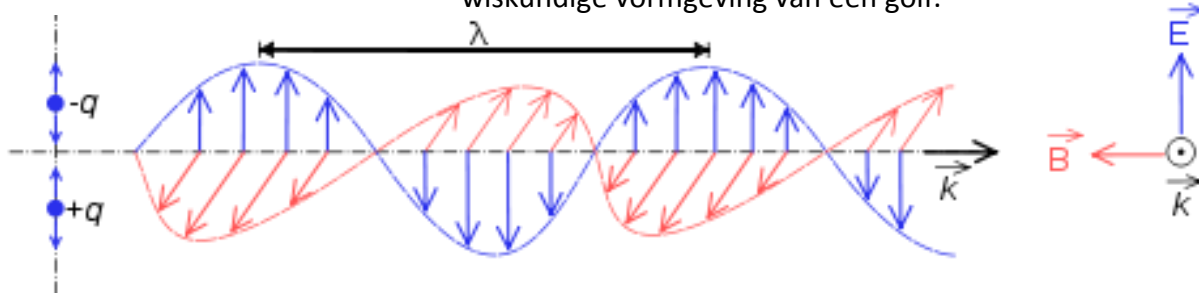


H2.4 Maxwell

Maxwell heeft de beroemde Maxwell-vergelijkingen opgesteld voor het elektromagnetisme. Maxwell dacht dat gamma en röntgenstraling, radiogolven en licht en dergelijken, allemaal in principe hetzelfde fenomeen zijn, die zich allemaal met de lichtsnelheid voortplanten. Hij dacht dat de golven zich op een elektromagnetische manier voortplanten door de ruimte. Dit houdt in dat Maxwell dacht dat de straling zich voortplant door een golvend elektrisch veld loodrecht op een golvend magnetisch veld (zie afbeelding 21). Maxwell was namelijk met zijn beroemde vergelijkingen aan het rekenen en wanneer hij zijn vergelijkingen voor magnetische en elektrische velden met

Afbeelding 20 – James Maxwell

elkaar combineerde, volgde hieruit een vergelijking met de wiskundige vormgeving van een golf.^{xxxix}



Afbeelding 21 - Een visualisatie van een elektromagnetische golf

Hertz heeft voor het eerst het bestaan van deze elektromagnetische golven experimenteel aangetoond. Maxwell was er sterk van overtuigd dat elektromagnetische straling, en dus ook

licht, zich door een mysterieus medium voortplant; de ether.

De ether



Afbeelding 22 – Albert Michelson

De theorie van Maxwell over elektromagnetische golven houdt in dat hun verbreiding berustte op de voortplanting van spanningen in een medium dat de gehele ruimte en daardoor ook de gebieden tussen de materie doordringt. Dit medium werd aangeduid met ether. Het denkbeeld van een ether stemde overeen met de veronderstelling dat ook elektromagnetische verschijnselen in laatste instantie mechanisch verklaarbaar waren. De voortplanting van deze golven in ether stelde men zich daarbij voor als die van golven in water of van geluidsgolven in lucht. De geluidssnelheid hangt in grootte en richting af van de snelheid van de wind, dus van de beweging van het medium ten opzichte van de waarnemer. Een geluidsgolf gaat langzamer met tegenwind, en sneller met meewind. Hetzelfde geldt voor een golf door vloeistof.

Toentertijd was het in de wetenschap een zekerheid dat de

aarde in een baan rond de zon draait, ook was bekend dat dit met ongeveer 30 km/s gebeurde. Het draaien van de aarde om zijn as heeft een veel lagere snelheid, op de evenaar waar de snelheid maximaal is, is dit bijna een halve km/s. Dus als er overal ether is, dan zou de aarde een gedeelte van de ether moeten meeslepen, en zou de ether langs de aarde moeten bewegen in meer of mindere mate. Dan zou er een zekere 'etherwind' langs de aarde moeten waaien. Aangezien de snelheid van het licht, net als die van het geluid, afhankelijk van de beweging van het medium zou zijn, zou iedere bepaling van de snelheid van het licht op aarde daardoor worden beïnvloed. Maxwell kon in 1878 aantonen dat de voorspelde effecten evenredig met $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ moesten zijn. Waarbij v de snelheid van de etherwind ten opzichte van de aarde is en c de snelheid van het licht is. Op grond van aannemelijke veronderstellingen werd dit effect op 10^{-8} geschat. Zulke kleine effecten vielen buiten het meetbereik van fysici van toen.^{xI}

Het experiment van Michelson

Drie jaar later, in 1881 vond Michelson een manier om de minuscule effecten van een eventuele etherwind toch te meten. Zijn idee was om de waarden van c met behulp van een interferentiepatroon, in twee haaks op elkaar staande richtingen met elkaar te vergelijken. Het experiment is schematisch weergegeven in afbeelding 24. Een lichtstraal werd door middel van een halfdoorlatende spiegel gesplitst, waarna de deelstralen loodrecht op elkaar staande banen doorlopen, door spiegels weerkaatst worden en weer verenigd worden op de

glazen plaat. Uit de daarbij ontstane interferentiebanden, die men met een kijker waarnam, was vervolgens het verschil in looptijd en dus de lichtsnelheid in de verschillende richtingen te bepalen.



Afbeelding 23 – Edward Morley

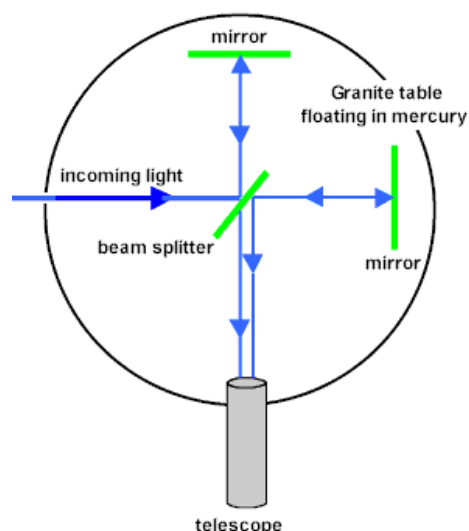
Door de snelheid van de aarde in zijn baan, zou de arm van het experiment die parallel loopt aan de baan van de aarde, eerst vertraagd en daarna versneld moeten worden, de snelheid van het licht langs de arm, dwars op de bewegingsrichting van de aarde zou onaangetast moeten blijven. Door dit verschil in omlooptijd zou er een faseverschil moeten zijn tussen de lichtgolven die langs de twee richtingen zijn gelopen. Aangezien de lichtgolven afkomstig uit beide richtingen uitkwamen in een microscoop, zou hierin een interferentiepatroon zichtbaar moeten zijn.

Het voorspelde effect werd niet waargenomen in de proef. Er werd een zeer geringe verschuiving van het interferentiepatroon verwacht, van ongeveer 0,04 keer de breedte van een bandje. Michelson stelde echter een tienmaal geringer effect vast, dit geringere effect viel binnen de onnauwkeurigheidsmarges van het experiment, dus volgt hieruit dat de lichtsnelheid niet is veranderd door

de 'ether wind', en constant is gebleven.

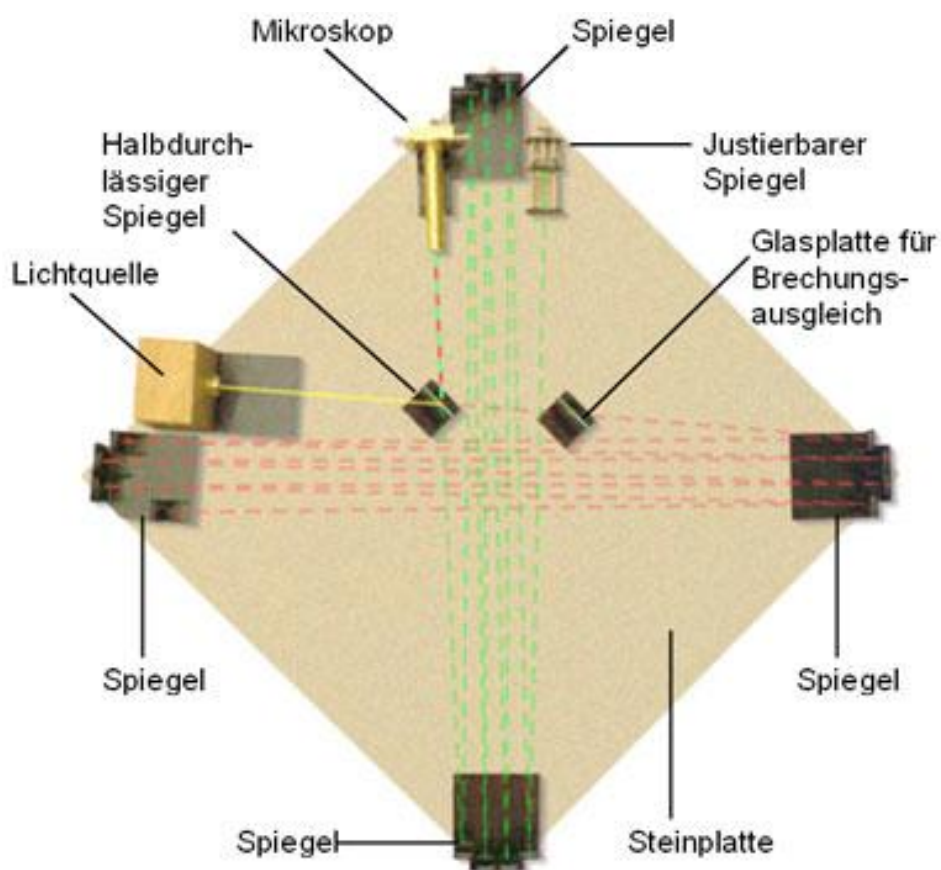
De Nederlandse natuurkundige Lorentz uitte het vermoeden dat de etherwind ook de haaks op de etherwind staande arm van het experiment had beïnvloed. Daardoor zouden de meetbare effecten van de etherwind kleiner zijn dan Michelson had verwacht. Om alle twijfel weg te werken herhaalde Michelson in 1887 het experiment met Edward Morley. Dit tweede experiment was veel nauwkeuriger en geraffineerder dan het eerste. In dit experiment zijn er veel meer spiegels gebruikt, zodat de afstand die het licht moet afleggen aanzienlijk vergroot, en er is gebruik gemaakt van een fijn afstelbare spiegel, verder is het principe hetzelfde als het eerste experiment. Het is weergegeven in afbeelding 25.

Beide onderzoekers maten steeds om 12 uur en om 18 uur 's middags. In deze zes uur werd het laboratorium 90 graden gedraaid, door de rotatie van de aarde om zijn as. Zo is er dus een meting



Afbeelding 24 - Interferometer. Het licht wordt in een halfdoorlatende spiegel gesplitst en via twee spiegels weer samengevoegd. Een snelheidsverschil zou moeten leiden tot een interferentiepatroon in de detector

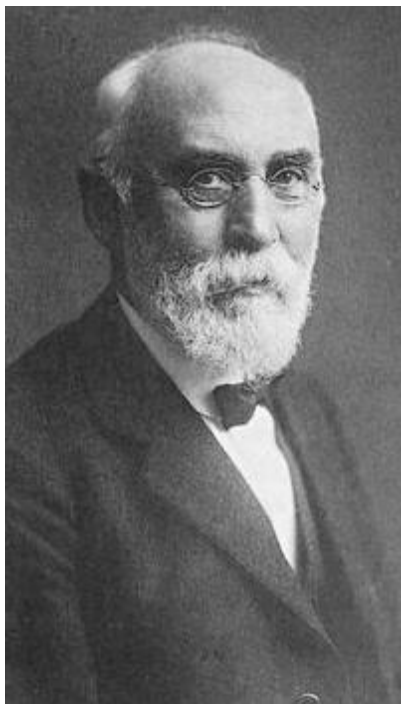
waarbij het experiment uitgevoerd wordt op een punt op de aarde aan de voorkant van de aarde ten opzichte van de zon, en aan de zijkant van de aarde ten opzichte van de zon. Hierdoor zou men een maximale verschuiving van de interferentiebanden kunnen verwachten. De apparatuur was op een blok zandsteen gemonteerd, dat op een laag kwikzilver dreef, waardoor zich bij het draaien geen storende trillingen konden voordoen. Er konden op zestien verschillende posities in een cirkel gemeten worden, om enige wervelingen van de 'ether wind' te kunnen detecteren. Maar ook hier werd geen effect van de etherwind vastgesteld.



Das Michelson-Morley Experiment

Afbeelding 25 - Het geraffineerde Michelson en Morley experiment

Ether vervolg



Afbeelding 26 – Hendrik Lorentz

De resultaten van Michelson en Morley geven een duidelijke conclusie. Er bestaat geen etherwind in de buurt van het aardoppervlak. Klaarblijkelijk bestaat er geen ether of werden aangrenzende etherlagen door de aarde meegesleept. Lorentz zei dat dit een aantal theoretische problemen geeft. Fitzgerald en Lorentz kwamen in 1892 met een slimme veronderstelling. Zij namen aan dat voorwerpen die zich door de ether bewegen een samentrekking ondergaan in de richting van de beweging.

Met de factor: $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$.

Hierdoor worden de doorlooptijden in beide armen van de interferometer gelijk. Deze hypothese lijkt een beetje kunstmatig en maakt de indruk van een ad hoc-idee. Het zou komen doordat de elektrische krachten tussen

materiedeeltjes groter worden als iets snel door de ether beweegt, waardoor het voorwerp inkrimpt. Dit idee werd snel aanvaard door de meerderheid van de natuurkundigen. De conclusie van Einstein was, dat er in zijn geheel geen ether bestaat.

3. Bestaat licht uit deeltjes?

Een ontoereikend begrip

Voor een lange tijd probeerden fysici de problemen met de golftheorie van licht uit te leggen met het feit dat zij een ontoereikend begrip van atomen hadden en de interactie van licht met individuele atomen en moleculen, zoals het uitzenden van thermische straling door materie. Het was pas in 1905 dat Albert Einstein stelde dat de problemen niets te maken hadden met de interactie van licht met atomen en alles te maken had met de fundamentele aard van het licht zelf.

H3.1 Zwarte stralers

Alle materie zendt elektromagnetische straling uit boven het absolute nulpunt. De straling is een omzetting van thermische energie in elektromagnetische energie, en daarom heet het thermische straling. De uitgestraalde intensiteit van de straling is hoger naar mate de temperatuur in het systeem toeneemt, en dus naar mate de energie in het systeem toeneemt. De frequentie waarvan de hoogste intensiteit wordt uitgezonden wordt ook steeds hoger naarmate de temperatuur toeneemt.

In de natuurkunde was het volgende een veel bestudeerd vraagstuk. Waarom heeft een lamp veel "moeite" met het uitzenden van licht met hoge frequenties, en zend hij hier meestal weinig van uit? Er moet veel stroom en dus energie worden toegevoegd voor deze frequenties gehaald worden. Hierbij ging het vooral om blauw licht aangezien dit duidelijk waar te nemen was.

Hieruit volgt dat de frequentie van licht in relatie staat tot de toegevoegde energie. Als de energie van de elektromagnetische straling zelf af zou hangen van zijn frequentie, dan zou dat verklaren waarom een lamp meer 'moeite' heeft met hoge frequenties.

Een goede manier om te onderzoeken hoe de energie van elektromagnetische straling afhangt van zijn frequentie is door te kijken naar zwarte stralers.^{xli}

Kirchhoff en zijn zwarte lichamen



Afbeelding 27 – Gustav Kirchhoff

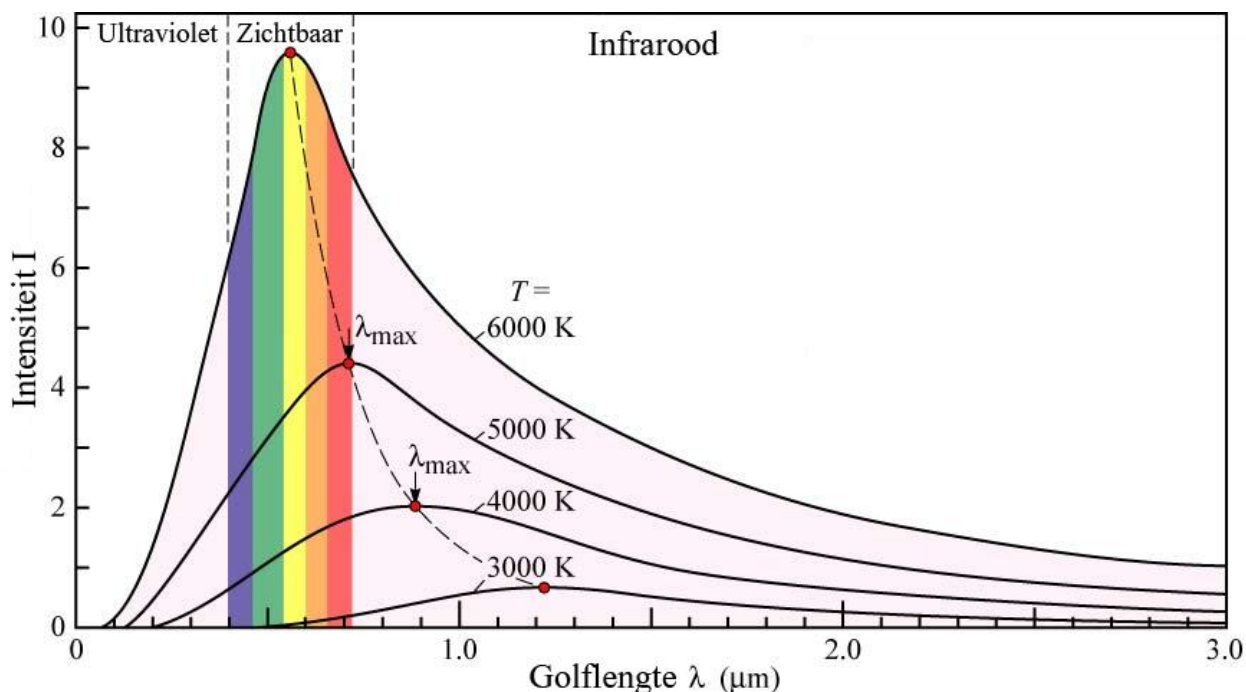
Bij een normaal voorwerp (geen zwart lichaam) toonde Kirchhoff aan dat de stralingsenergie bij een bepaalde frequentie, afhangt van die frequentie en van de chemische samenstelling en de temperatuur van het stralende voorwerp.

Kirchhoff kon echter in 1859 aantonen dat de uitkomst de breuk van de uitgestraalde energie gedeeld door de absorptiecoëfficiënt (dit geeft de mate van absorptie van het gebruikte materiaal weer), altijd alleen van de frequentie en van de temperatuur afhangt. Een jaar later introduceerde hij het begrip 'zwart lichaam'. Dit is een theoretisch lichaam dat alle invallende straling absorbeert. In dit geval is de absorptiecoëfficiënt gelijk aan 1. Dus bij een zwart lichaam komt er onderaan de breuk 1 te staan. Dus is de emissie alleen afhankelijk van de frequentie en de temperatuur, zonder invloed van de materiaal

eigenschappen. Met behulp van zwarte lichamen probeerde men eind negentiende eeuw inzicht te krijgen in de temperatuurafhankelijkheid van de straling en de verdeling over de verschillende frequenties of golflengten, oftewel inzicht in het verkregen spectrum.^{xlii}

Een zwarte straler in de praktijk

Een ideale zwarte straler bestaat niet in de natuur. Maar je kan een zeer goede benadering maken door een doos aan de binnenkant in te smeren met lamp zwart of een ander materiaal dat ongeveer 95% van de ontvangen straling absorbeert, en dan een klein gaatje te maken in de doos. Op deze manier moet het licht dat binnen komt eerst nog meerdere malen gereflecteerd worden op de wanden voordat het weer uit de opening kan, maar bij elke keer wordt er meer opgenomen. Hierdoor word de absorptiecoëfficiënt weergegeven door $1 - (1 - 0,95)^n$, hierin is n het aantal keer dat het licht op één van de wanden wordt weerkaatst. Voor $n = 4$ geeft dit 0,999994. Dit is dus een zeer goede benadering van een zwart lichaam. Door uitvoerige metingen van het spectrum van zwarte stralers bij bepaalde temperaturen, zijn grafieken zoals grafiek 3. te tekenen.



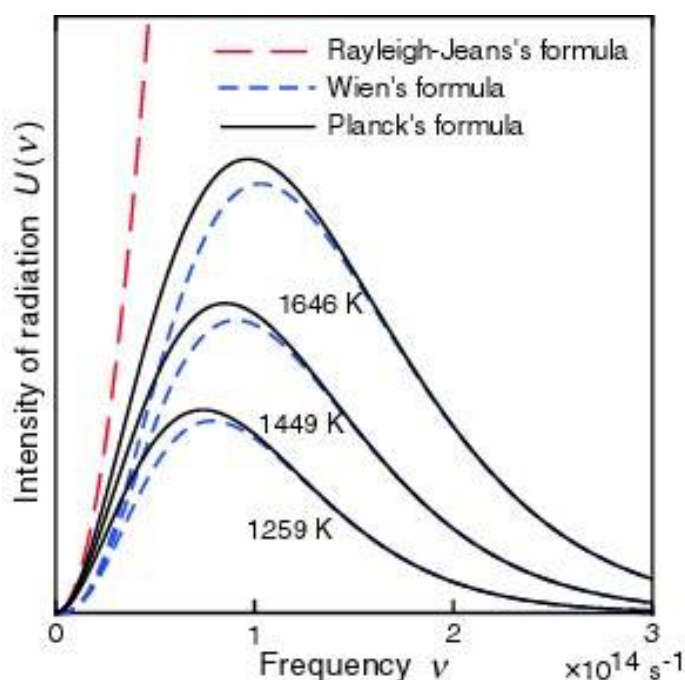
Grafiek 3 - Spectrale intensiteitsverdeling van een zwarte straler als functie van de golflengte bij verschillende temperaturen. Het maximum van de intensiteit verschuift naar een kortere golflengte als de temperatuur van de zwarte straler stijgt.

De zoektocht naar de juiste formule

Er waren meerdere natuurkundigen bezig de wetten achter de experimentele data van zwarte stralers te ontcijferen.

Joseph Stefan had het verband tussen de uitgestraalde energie en de temperatuur bestudeerd. Hij had door middel van onderzoek vastgesteld dat de uitgestraalde energie evenredig is met de 4^e macht van de temperatuur. In 1884 vond Ludwig Boltzmann de theoretische afleiding voor de formule. Dit heet de Stefan-Boltzmann wet.

Rayleigh was er ook mee bezig, hij had een ogenschijnlijk goede wet gevonden. Maar hij had een fout gemaakt bij de afleiding. Jeans



Grafiek 4 – De intensiteit van de elektromagnetische straling die een zwarte straler uitzend afgezet tegen de frequentie van die straling. De voorspellingen van de formules van Planck, Wien en Rayleigh en Jeans zijn weergegeven voor drie temperaturen, T .

corrigeerde deze afwijking en toen was de Rayleigh-Jeans wet geformuleerd. Maar jammer genoeg gold die alleen voor de lage frequenties (zie grafiek 4).

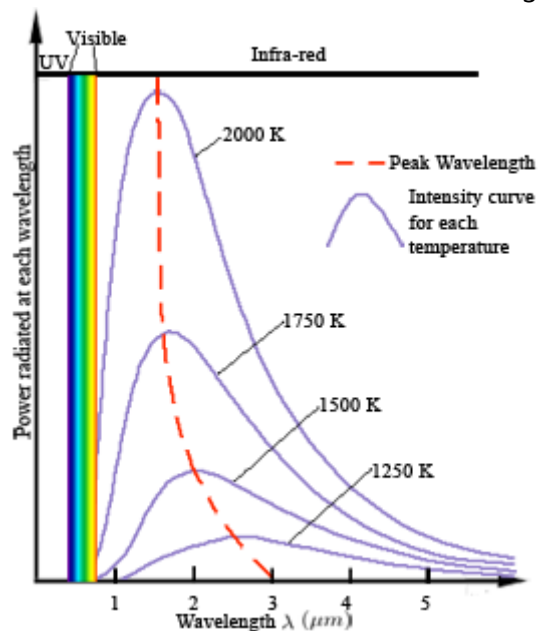
Wilhelm Wien stelde de verschuivingswet op. Deze wet stelde de onderzoeker in staat om uit een gegeven spectrale verdeling bij een bepaalde temperatuur, die bij andere temperaturen direct af te leiden. Een spectrale verdeling laat de golflengtes of de frequenties van straling zien, afgezet tegen de intensiteit (zoals in grafiek 3.). De wet is vernoemd naar de verschuiving van de top van de grafiek naar kleinere golflengten bij grotere temperaturen. Wien had opgemerkt uit de experimenten dat er een duidelijk verband was tussen de golflengte, waarbij de uitgezonden energie maximaal is, en de temperatuur. Het maximum van de grafiek ‘verschuift’ bij hoge temperaturen naar korte golflengten. Als λ_A en λ_B de maxima aanduiden bij curven behorende bij de temperaturen T_A en T_B dan vond hij steeds dat $\lambda_A T_A = \lambda_B T_B$ waaruit hij concludeerde dat het product $\lambda_{max} T$ constant is. In 1893 stelde hij de verschuivingswet van Wien op: vergelijking (1). De verschuivingswet van Wien is geplott in grafiek 5, waar de rode lijn de desbetreffende formule weergeeft.

$$\lambda_{max} T = constant, \quad \lambda_{max} = \frac{b}{T} \quad (1)$$

b is de constante van Wien en werd experimenteel bepaald op $2,897_{exp}^{-3}$. Deze formule heeft nog steeds toepassingen. Hiermee zijn bijvoorbeeld de temperaturen van sterren te benaderen.

Wien probeerde de komende jaren een formule te vinden die paste bij het hele spectrum. Dit wordt dan ook de empirische stralingswet van Wien genoemd. Hij heeft uit experimentele gegevens dan ook een nieuwe constante, C , ingevoerd. In 1896 kwam hij met de stralingswet van Wien. De formule leek te kloppen maar toen kwam men erachter dat hij zeer begon af te wijken bij de lage frequenties. Deze afwijking is weergegeven in grafiek 4. Het gaat dan om de afwijking ten opzichte van de Planck-kromme aangezien deze bijna perfect aansluit op de meetgegevens, maar hier zo dadelijk meer over. De stralingswet van Wien luidt:

$$u_\lambda = \frac{C}{\lambda^5} \cdot e^{-\frac{C}{\lambda T}} \quad (2)$$



Grafiek 5 – De verschuivingswet van Wien, en de spectrale verdelingen van zwarte stralers bij 4 verschillende temperaturen. De uitgestraalde intensiteit is afgezet tegen de golflengte.

Hierin is u_λ de intensiteit per volume eenheid. C is een constante, speciaal voor deze formule, en c is de snelheid van het licht. λ staat voor de golflengte in meter en e is het grondtal van een natuurlijk logaritme. T staat voor de temperatuur in Kelvin.

Planck zijn ongemakkelijke aanname

Uiteindelijk bracht Max Planck de oplossing. Hij was een huisvriend van Wien, en was ook met dit vraagstuk bezig.

De stralingsformule die hij op 14 december 1900 voorstelde bleek niet alleen de oplossing van een oud vraagstuk maar impliceerde ook de geboorte van de kwantumfysica.

Planck heeft bij het opstellen een cruciale aanname gedaan. Planck heeft ingezien dat er geen kloppende formule kon worden opgesteld die het hele spectrum verklaard als men in



Afbeelding 28 – Max Planck

de formule de uitgezonden energie als een continue verschijnsel ziet, een continue stroom energie. In de formules van Wien en Rayleigh-jeans is dit wel het geval. Dus heeft hij een truc toegepast. Hij deed de volgende aanname:

Er zijn harmonische oscillatoren en ze absorberen en stralen alleen energie uit in discrete pakketjes, kwanta. De energie van één kwantum schreef hij op als $h\nu$, waarin ν de frequentie is en h een nieuwe natuur constante. (A)

De vooronderstelling (A) die Planck bij haar afleiding moest maken, omschreef hij zelf als een 'wanhoopsdaad'. Planck verzette zich hevig tegen een dergelijke gekwantificeerde voorstelling van emissie en absorptieprocessen. Hij dacht al helemaal niet dat elektromagnetische straling zelf een kwantum oftewel deeltjeskarakter zou kunnen bezitten. Planck was helemaal niet tevreden met zijn kunstgreep en

hij hoopte dan ook dat die bij verder zoeken weer overbodig

zou worden. Niets was minder waar. Bij alle experimenten uit de 20e eeuw bleek dat straling inderdaad in ondeelbare pakketjes wordt uitgezonden. Deze kwanta werden later door Gilbert N. Lewis in 1926 fotonen genoemd.^{xliii}

De constante h kende hij nog niet, maar door zijn formule toe te passen op experimentele waarden rekende hij h uit. En toen hij deze h gebruikte op experimentele data te voorspellen bleek het te kloppen voor het hele spectrum.

H3.2 De formule van Planck:

$$p(\nu, T) = \frac{8 \cdot \pi \cdot h \cdot \nu^3}{c^3 \cdot (e^{\left(\frac{h\nu}{k_b T}\right)} - 1)} \quad (1)$$

Hierin is $p(\nu, T)d\nu$ de energie per volume eenheid in het frequentie gebied $\nu + d\nu$, k_b is de Boltzmann constante, c is de snelheid van het licht en h is de Planck constante. T is de temperatuur in Kelvin en ν is de frequentie in Hz en e is het grondtal van het natuurlijke logaritme. De vorm van de grafiek van $p(\nu, T)$ als functie van ν is te zien in grafiek 4. Je kan in deze formule $\nu = \frac{c}{\lambda}$ substitueren en dan krijg je de energiedichtheid als functie van de golflengte, dit doen wij hier niet. De theoretische grafieken die bij deze formule ontstaan passen heel nauwkeurig bij de experimentele data die opgedaan is in die tijd voor de spectrums van zwarte stralers.

De afleiding gebeurt in vele stappen maar er zijn twee hoofdstappen. De hoeveelheid straling per volume eenheid in een zwarte lichaam wordt beschreven door de klassieke natuurkunde. In de holte van het zwarte lichaam komen uitsluitend staande golven voor. De golven kunnen alleen van wand tot wand en een geheel aantal golflengtes lang zijn, dit is zo aangezien er anders een fase verschil ontstaat, waardoor de golven elkaar uitdoven. De golflengtes en dus de frequenties zijn begrensd tot een serie discrete waarden die toegestaan zijn voor staande golven. De elektromagnetische theorie geeft het aantal staande golven per volume eenheid in het frequentie interval van ν tot $\nu + d\nu$ als:

$$N(\nu)d\nu = 2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot \nu^2}{c^3} d\nu \quad (2)$$

Het gaat hier om de hoeveelheid staande golven in een bepaalde vorm, dus is ook de polarisatie van belang. Met de polarisatie wordt de wijze waarop de elektrische veldvector trilt bedoeld. Zonlicht wordt ongepolariseerd genoemd, bij zonlicht trillen de elektrische velden in elke richting. Aangezien een staande golf op twee manieren gepolariseerd kan zijn, verticaal of horizontaal, staat er een factor 2 vooraan de formule. (De formule geeft het aantal cavity modes weer. Een cavity mode is een staande golf met een bepaalde frequentie en polarisatie.)

De formule voor $p(\nu, T)d\nu$, de energie per volume eenheid, bestaat uit het voorgaande, $N(\nu)d\nu$, het aantal staande golven per volume eenheid, maal de gemiddelde energie, $\{E\}$ per staande golf/ cavity mode.

De volgende stap is om de gemiddelde energie, $\{E\}$, van iedere cavity mode bij de temperatuur T te vinden. Het was deze stap die Planck heeft aangepast. Straling in een holte komt in thermisch evenwicht door energie met de harmonische oscillatoren, dit zijn harmonisch trillende deeltjes, in de wanden van het materiaal uit te wisselen. Het snel wisselende elektrische veld van de straling in de holte laat oscillatoren in de wanden resoneren. Zij zullen volgens de klassieke elektromagnetische theorie straling uit gaan zenden met de frequentie waarin ze trillen. Dit mechanisme zorgt ervoor dat de straling energie kan uitwisselen met het materiaal (bij constante T) en dat er een thermisch

evenwicht bereikt kan worden. Planck liet zien dat in evenwicht, de gemiddelde energie van een cavity mode met frequentie ν gelijk is aan de gemiddelde energie van thermische trillingen bij die zelfde frequentie ν in het materiaal. Dus de gemiddelde energie van een cavity mode kan gevonden worden door de gemiddelde energie van een harmonische oscillator met een frequentie, gelijk aan de frequentie van de cavity mode, te berekenen.

Volgens de klassieke statistische mechanica, dit is de studie naar de waarschijnlijkheid van de verdeling van deeltjes, zou de gemiddelde energie van een deeltje in een drie dimensionale thermische trilling $k_B T$ moeten zijn, onafhankelijk van de frequentie. In 1900, net voordat Planck met zijn formule op de proppen kwam, gebruikten Rayleigh en Jeans deze laatste klassieke formule voor de gemiddelde energie van een cavity mode. Om de energie per volume eenheid te berekenen deden ze (2) maal $k_B T$, hieruit volgt de volgende formule:

$$p(\nu, T) = 2 \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot \nu^2 \cdot k_B \cdot T}{c^3} \quad (3)$$

Uit (3) volgt dat de energiedichtheid evenredig is aan ν^2 . Dit betekent dat voor elke temperatuur geldt dat de uitgezonden energie steeds maar hoger wordt bij hogere frequenties, dus dit betekent dat de totale uitgezonden energie oneindig groot is! Dit is later in 1911 de ultraviolet-catastrofe genoemd, vanwege de ongelofelijke afwijking aan de ultraviolet kant van het spectrum, en dus de hogere frequenties. Dit is duidelijk te zien in grafiek 4. Planck gebruikte voor de gemiddelde energie per cavity mode, $\{E\}$ de volgende formule.

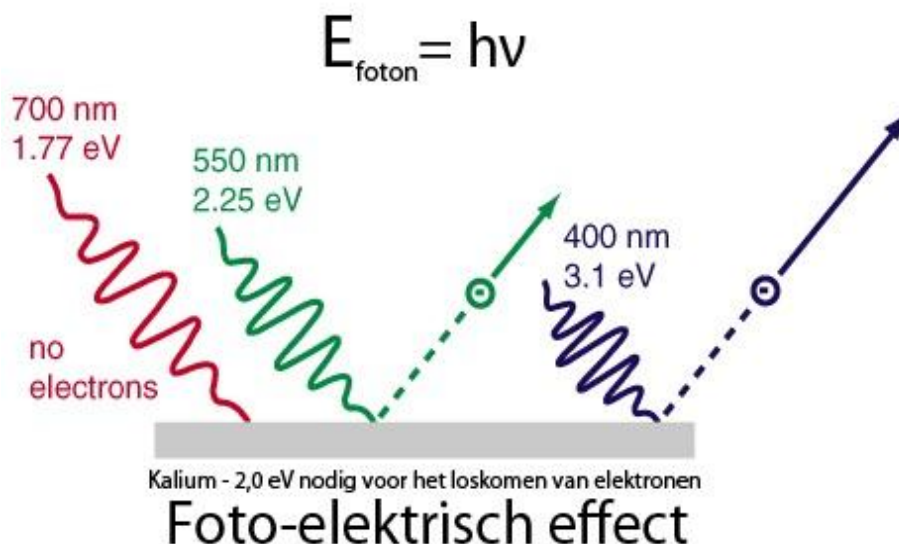
$$\{E\} = \frac{h\nu}{\left(e^{\left(\frac{h\nu}{k_B T}\right)} - 1\right)} \quad (4)$$

De formule (4) is door Planck overgenomen uit de Einstein-Bose statistiek, maar dan zodanig aangepast door Planck om te passen bij zwarte stralers. Deze statistiek beschrijft de kans dat een deeltje een bepaalde energie heeft.^{xiv}

Als je in (4) een erg lage frequentie neemt zodat $h\nu \ll k_B T$ dan is $\{E\}$ bijna gelijk aan $k_B T$, dus geven de twee wetten dezelfde voorspellingen voor lage frequenties.^{xv}

H3.3 Het foto-elektrisch effect

Het foto-elektrisch effect is het verschijnsel dat elektronen loskomen van materie (solide metalen- en niet-metalen, vloeistoffen en gassen) als een gevolg van het energie dat zij opnemen uit elektromagnetische straling met een korte golflengte, zoals ultraviolet-licht. Elektronen die op deze manier loskomen worden ook wel foto-elektronen genoemd.



Afbeelding 29 – Weergave van elektromagnetische straling die elektronen losmaakt uit een plaat Kalium.

De ontdekking door Hertz



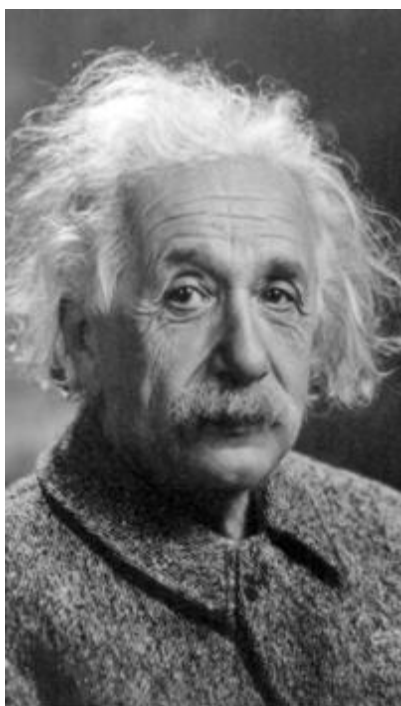
Afbeelding 30 – Heinrich Hertz

Heinrich Hertz heeft het foto-elektrisch effect al in 1887 aangetoond. Verschillende onderzoekers gingen dit verschijnsel experimenteel onderzoeken. Daarbij bleek het onmiskenbaar te zijn dat het hier ging om de uitstoot van negatief geladen deeltjes uit metalen die aan elektromagnetische straling van voldoende hoge frequenties waren blootgesteld. Na de ontdekking van het elektron in 1897 door Thomson was het duidelijk dat deze uitgestoten deeltjes elektronen waren. Lenard stelde in 1902 vast dat de energie van de uitgestoten elektronen onafhankelijk is van de intensiteit van de inkomende straling en dat er onder een bepaalde frequentie in het geheel geen uitstoot van elektronen optrad (zie afbeelding 29). Een bundel UV van lage intensiteit maakt elektronen uit zink los, een bundel zichtbaar licht met een hoge intensiteit ,maakt geen elektronen los. Al wordt er een bundel rood licht gebruikt met een oneindig hoge

intensiteit zullen er geen elektronen worden los gemaakt. Bij ieder metaal bleek een drempelfrequentie te horen waarbij er nog wél elektronen werden vrij gemaakt. Hieruit volgt dat het vrij maken van elektronen alleen afhankelijk van de frequentie is. Dat was in tegenspraak met het beeld van het golfkarakter van het licht.

De relatie tussen de frequentie van het licht en het aantal elektronen dat loskwam klopte niet met de termen van de klassieke golftheorie van het licht: een lichtgolf bestaat uit elektrische en magnetische velden. Hoe sterker de velden (hiermee wordt de amplitude van de golf bedoelt) des te groter zouden de krachten die werden uitgeoefend op de elektronen moeten zijn. De amplitude zou relevant moeten zijn en niet de frequentie van het licht. De afhankelijkheid van de frequentie liet niet alleen zien dat de golftheorie van het licht erg gewijzigd moest worden, maar, met een goede interpretatie, liet het je ook bepalen hoeveel energie nou precies één foton is. Ook leidde het tot een verbinding tussen de golf- en deeltje theorieën die nodig zijn om dit verschijnsel te verklaren.^{xlvi}

Einstein en zijn formule



Einstein stelde daarom het volgende eenvoudige mechanisme voor: een lichtkwantum geeft, wanneer het in metaal doordringt, zijn energie $h\nu$ geheel of gedeeltelijk af aan een elektron. Dit elektron krijgt een maximale kinetische energie wanneer het lichtkwantum zijn totale energie afgeeft. De kinetische energie van de uitgestoten 'foto-elektronen' is dan $h\nu$, waarvan de arbeid W_u , nodig voor het losmaken van het elektron uit het metaal, moet worden afgetrokken. De wet van Einstein voor het foto-elektrische effect is dan ook: $E_{max} = h\nu - W_u$. De uittreed-energie, W_u is gelijk aan de energie van het lichtkwantum waarbij het elektron nog net loskomt, dus bij de drempelfrequentie, ν_0 .

Er geldt:

Afbeelding 31 – Albert Einstein
$$E_{max} = h\nu - h\nu_0 \quad (1)$$

E_{max} neemt lineair toe met de frequentie, compleet onafhankelijk van het gebruikte materiaal en diens eigenschappen. De fotonen waarvan hun energie, E_f , gelijk is aan de uittreed energie, W_u , hebben de drempelfrequentie (ν_0) en dus ook de uittreed energie, weergegeven door: $h\nu_0$. Als een metaal bestraald wordt met fotonen met $E_f > W_u$ wordt het overschot als kinetische energie meegegeven aan het losgemaakte elektron, waarbij $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. Hierin is m de massa van het elektron en v staat voor zijn snelheid. Als met bestraald met een frequentie groter dan ν_0 en de intensiteit verhoogt, zullen er meer elektronen worden los gemaakt, maar de kinetische energie, nog de snelheid per elektron

zal veranderen.

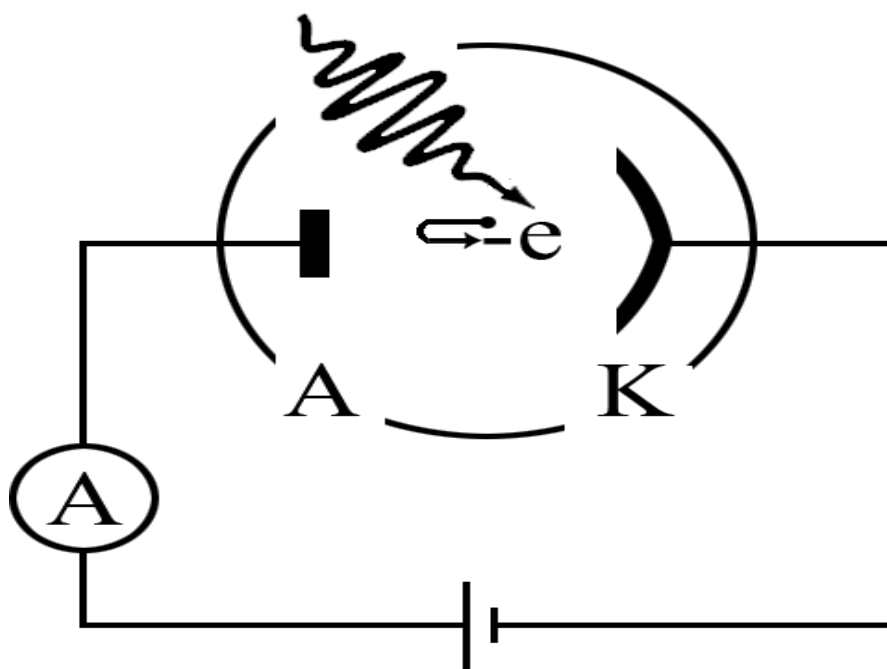
Het vrijmaken van elektronen kost energie, de benodigde energie stop je erin door het te bestralen. Volgens de klassieke golftheorie hangt de energie van de straling af van de amplitude (dit is de maximale uitwijking uit de evenwichtsstand) van de golf, en wordt de amplitude groter naarmate de intensiteit stijgt. De energie van de elektronen zou dus af moeten hangen van de intensiteit van de straling. Maar de energie wordt niet behaald door de intensiteit, dus is hieruit af te leiden dat de energie niet als continu-stroom wordt aangeleverd. Maar als de energie in vaste pakketjes aankomt, zoals in de kwantumtheorie en in de aanname van Planck, dan zou dat verklaren waarom alleen de frequentie van belang is, aangezien alleen de frequentie invloed heeft op de energie per kwantum. En de energie per kwantum is groter bij hoge frequenties. Dat verklaart waarom alleen onder de drempelfrequentie de straling elektronen vrij maakt.

Weinig gehoor

Einstein zijn theorie vond weinig gehoor. Zijn theorie stelt dat straling ook na het uitzenden nog steeds bestaat uit deeltjes terwijl veel anderen dachten dat het zich alleen zo gedroeg bij het opnemen en het uitstalen. De fotonen leken te veel op de 'licht kogeltjes' van Newton. In de natuurkunde was na de proef van Young eindelijk de deeltjestheorie van de hand gedaan. Zelfs Planck vond het onzin, want die hoopte nog dat zijn truc met de kwanta op den duur overbodig zou zijn. Hij gebruikte deze truc alleen maar om de straling van een bron tijdens de uitzending te berekenen en hij stelde zich voor dat zo'n kwantum daarna in golfvorm verder ging. Planck vond het niet prettig dat zijn truc door Einstein zoveel aandacht kreeg doordat hij stelde dat elektromagnetische straling zich ook na uitzending in kwanta vorm blijft. ^{xlvii}

Millikan en het foto-elektrisch effect

In afbeelding 32 is de schematische opstelling weergegeven. Er is een stroomkring maar er is ruimte tussen de kathode en de anode, de negatieve en de positieve elektroden. Er wordt elektromagnetische straling van een reeks frequenties op de kathode gestraald. De vrijgekomen elektronen worden uit de kathode weggeschoten waarvan er velen op de anode terecht komen. De ampèremeter meet de stroom in de kring.



Afbeelding 32 - Eenvoudige schematische weergave de opstelling van Millikan

De elektronen bezitten een lading, q , deze lading is hetzelfde voor alle elektronen, deze lading wordt de elementaire lading genoemd en is gelijk aan de lading van één proton. Deze lading wordt geschreven als $q = e$.

De spanningsbron verricht elektrische arbeid op die lading in de vorm $W_e = eU_{AK}$. Dus het spanningsverschil tussen de kathode en de anode, $U_{AK} = \frac{W_e}{e}$.

Door de spanning te variëren kan men de elektronen versnellen of afremmen. De spanning, U_{stop} , waardoor de elektronen net te overkant niet meer halen is experimenteel te bepalen. Dan loopt er dus net aan geen stroom meer in de kring.

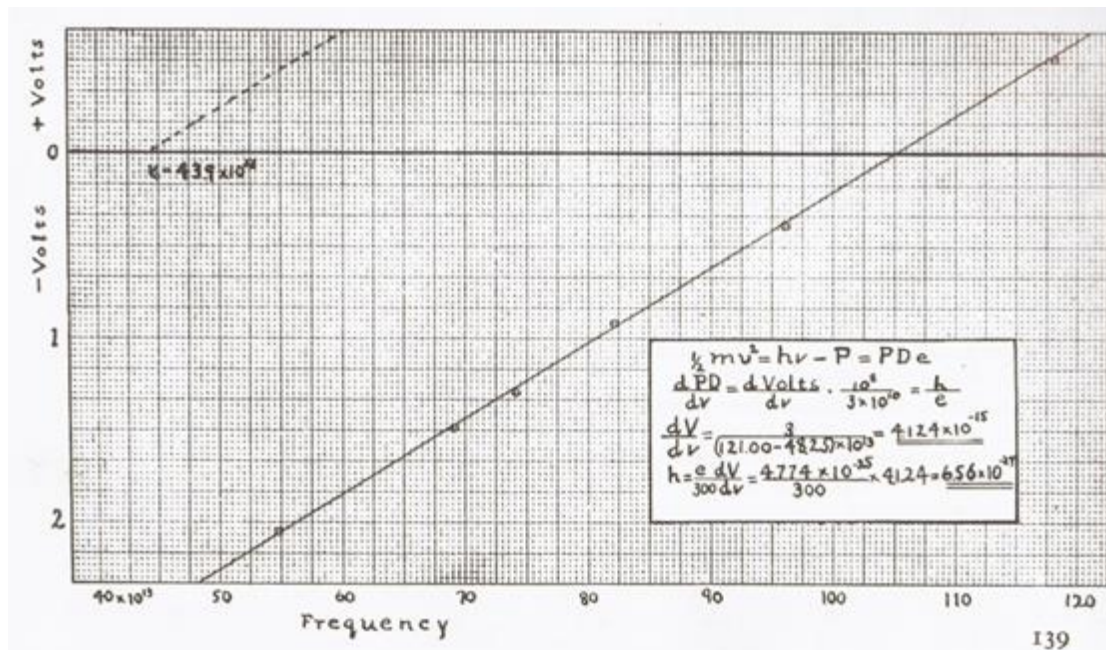
Bij U_{stop} is de elektrische kracht maal de afstand tussen de elektrodes, W_e , gelijk aan de maximale kinetische energie, E_{kmax} van de elektronen. De vergelijking voor W_e ingevuld in (1) levert:

$$eU_{stop} = h\nu - h\nu_0 \quad (2)$$

Alle variabelen en constanten in (2) zijn bekend. h is bekend door de proeven met zwarte stralers (H3.2) ν_0 is de grensfrequentie van de stof. En de elementaire lading is bepaald in het olie druppel experiment van Millikan van een paar jaar eerder. (H1.3)

Uit de formule volgt dat U_{stop} evenredig met ν moet toenemen. Uit de lange reeks experimenten van Millikan kwam dan ook elke keer een netjes lineair verband. In grafiek 6 is een grafiek te zien, gemaakt door Millikan zelf, in de aantekeningen rechtsonder is te zien

dat hij in plaats van W_u , P gebruikt, en de waarde van e die hier wordt gebruikt is in andere



Grafiek 6 – Een grafiek getekent door Millikan zelf. De spanning, U_{stop} afgezet tegen de frequentie

eenheden. Hij gaf zijn resultaten weer in een $U(v)$ diagram. De formule voor U_{stop} wordt gevonden door (2) om te bouwen.

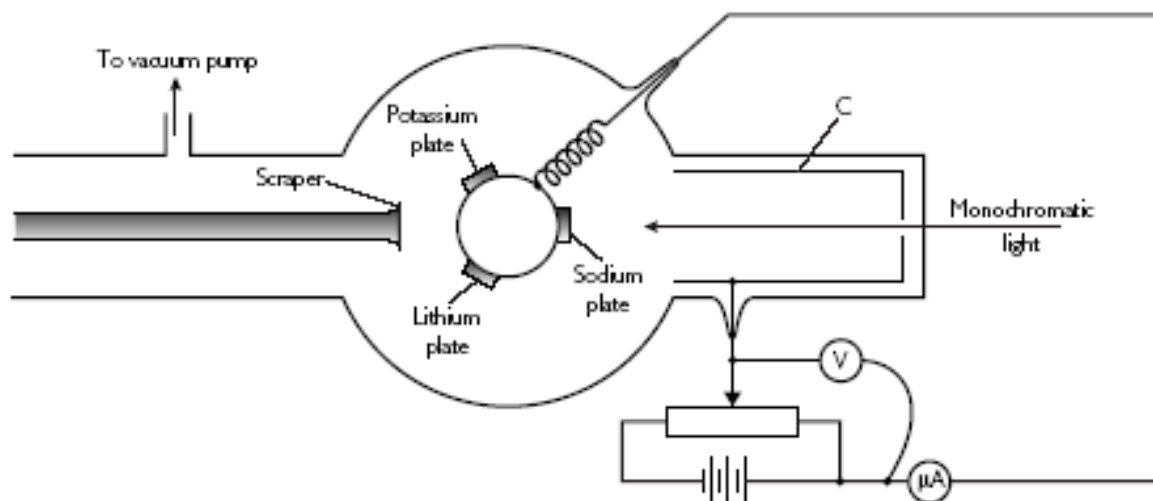
$$U_{stop} = \frac{h}{e} \cdot (v - v_0) \quad (3)$$

De grafiek heeft dus een translatie naar rechts van v_0 . De richtingscoëfficiënt is dus $\frac{h}{e}$.

De resultaten waren voor Millikan zeer teleurstellend, elke keer weer, wat voor metaal hij ook gebruikte voor de kathode. De experimentele gegevens bleven de formule van Einstein en daarmee zijn lichtkwantum aanname bevestigen.

Millikan hoopte dat de resultaten veroorzaakt werden door meetfouten dus ontwierp hij een nauwkeurigere opstelling (afbeelding 33). Hierin worden de metalen oppervlakken bij elke

meting automatisch schoon geschraapt.



Afbeelding 33 - Schematische tekening van de latere practicum opstelling.

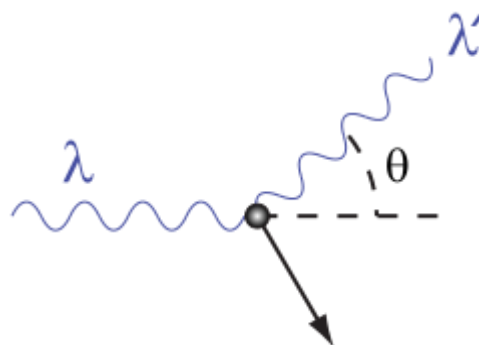
Maar nog steeds bleven de resultaten de theorie van Einstein compleet bevestigen. Hierna heeft Millikan zich "overgegeven" en aanvaard dat energie gekwantiseerd kan zijn.^{xlviii}

H3.5 Het Compton effect

In 1923 toonden de experimenten van A.H. Compton het deeltjeskarakter van straling aan. Dit werd het Compton effect genoemd. Dit werkt als volgt. Wanneer elektromagnetische straling met golflengte λ elektrisch geladen deeltjes met de massa m (bijvoorbeeld elektronen) treft, dan wordt de straling en het deeltje onder een hoek verstrooid. De verstrooide straling heeft een golflengte, λ' die van die hoek afhankelijk is. Dit is alleen goed meetbaar bij hoog energetische straling, zoals gamma en Röntgenstraling. Bij het oorspronkelijke experiment van Compton gebruikte hij Röntgenstraling.

Een botsing

Dit resultaat kan alleen worden begrepen wanneer men de verstrooiing opvat als een botsing tussen een bewegend stralingsdeeltje met een energie, en een rustend deeltje met de massa m . Bij een niet centrale botsing tussen deeltjes, denk bijvoorbeeld aan biljartballen, ketst het oorspronkelijk inkomende deeltje weg onder een bepaalde hoek. Het voorheen rustende deeltje wordt ook onder een bepaalde hoek afgeketst. Het oorspronkelijk inkomende deeltje verliest energie bij de botsing, en hoe groter de afketsingshoek hoe meer energie deze doorgeeft aan het voorheen rustende deeltje.



Afbeelding 34 - De botsing van een foton op een elektron

In afbeelding 34 is een schematische tekening te zien van de botsing.

Een röntgenfoton botst op een elektron waarbij het een deel van zijn energie doorgeeft, het röntgenfoton wordt afgeketst met de hoek θ . De energie van het invallende foton vermindert hierdoor, en volgens de formule van Planck: $E = h\nu$ wordt dan de frequentie lager, en dus de golflengte langer.

Impuls

Bij een botsing tussen twee deeltjes gelden de wetten van behoud van impuls en Energie. Impuls is de hoeveelheid beweging. Een typische deeltjeseigenschap. De formule voor de impuls is de massa maal de snelheid $p = mv$. Er komt massa in voor, maar elektromagnetische straling heeft geen massa. Aangezien Einstein door het foto-elektrisch effect en door de formule van Planck, is gaan geloven dat elektromagnetische straling uit deeltjes bestaat, denkt hij dat deze impuls bezitten. Hier leidde hij de volgende formule voor af: $p = \frac{hf}{c}$. We gebruiken hier f voor de frequentie in plaats van ν om deze niet te verwarren met de snelheid. h staat hier voor de constante van Planck, en c is zoals gewoonlijk de lichtsnelheid. Dit deed hij met behulp van zijn beroemde formule uit de speciale relativiteitstheorie: $E = mc^2$ die hij in 1905 publiceerde^{xlix}, en de formule van plank voor de energie van een foton: $E = hf$, ook hier is de f voor frequentie gekozen om verwarring te voorkomen.

$E = mc^2$, dus $m = \frac{E}{c^2}$, $E = hf$, dus $m = \frac{hf}{c^2}$, $p = mc$, aangezien elektromagnetische straling met de snelheid van het licht voortplant. Dus $p = \frac{hf}{c}$

De formule

Door de wet van behoud van energie en impuls op dit fenomeen toe te passen is er een formule af te leiden die de golflente verandering voorspelt. Wel wordt er bij deze formule aangenomen dat de speciale relativiteitstheorie klopt, dit was moeilijk te accepteren voor veel natuurkundigen. Dit is (1)

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad (1)$$

hierin is λ de golflengte voor de botsing, en λ' de golflengte na de botsing.

De afleiding gaat als volgt. Eerst wordt de wet van behoud van energie toegepast. De energie van het elektron na de botsing, E_e is de bijgevoegde kinetische energie plus de rust energie volgens de relativiteitstheorie, mc^2 . De bijgevoegde energie is het verschil tussen de energie van het foton voor en na de botsing. Dit geeft (2).

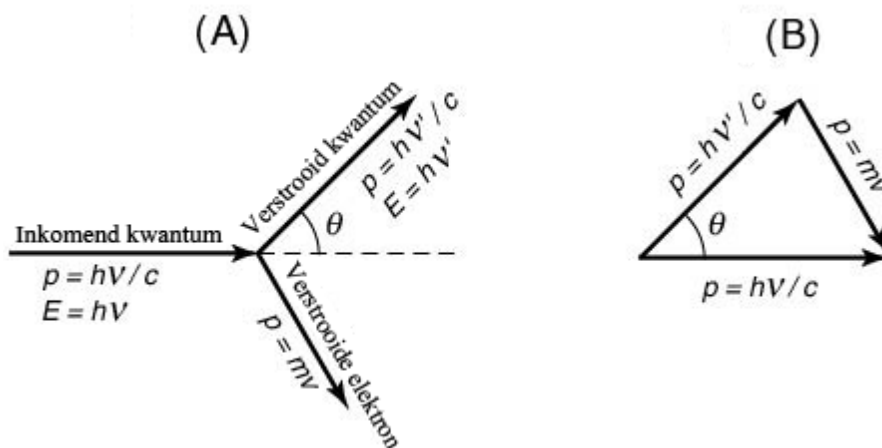
$$E_e = \Delta E_k + E_{rust}, \quad E_e = hf - hf' + mc^2 \quad (2)$$

De bijgevoegde kinetische energie is ook te schrijven als de impuls van het elektron maal de

lichtsnelheid: $\Delta E_k = p_e c$ Dit ingevuld in (2) en gekwadrateerd, levert (3).

$$E_e = p_e c + mc^2, E_e^2 = p_e^2 c^2 + m^2 c^4 \quad (3)$$

Dan nu de wet van behoud van impuls. Hierbij wordt gebruik gemaakt van rekenen met vectoren. In afbeelding 35 is een vector diagram van de situatie weergegeven. Door de cosinus regel toe te passen op de rechter driehoek, bij (B), komt men op de formule (4) voor de nieuwe impuls van het elektron, p_e .



Afbeelding 35 – Een vector diagram van de botsing van een foton op een elektron in rust.

$$p_e^2 = \left(\frac{hf}{c}\right)^2 + \left(\frac{hf'}{c}\right)^2 - 2\cos\theta \cdot \left(\frac{hf}{c}\right) \cdot \left(\frac{hf'}{c}\right) \quad (4)$$

Als (2) en (4) worden ingevuld in de gekwadrateerde vorm van (3) ontstaat (5).

$$(hf - hf')^2 + m^2 c^4 = \left(\left(\frac{hf}{c}\right)^2 + \left(\frac{hf'}{c}\right)^2 - 2\cos\theta \cdot \left(\frac{hf}{c}\right) \cdot \left(\frac{hf'}{c}\right)\right)c^2 + m^2 c^4 \quad (5)$$

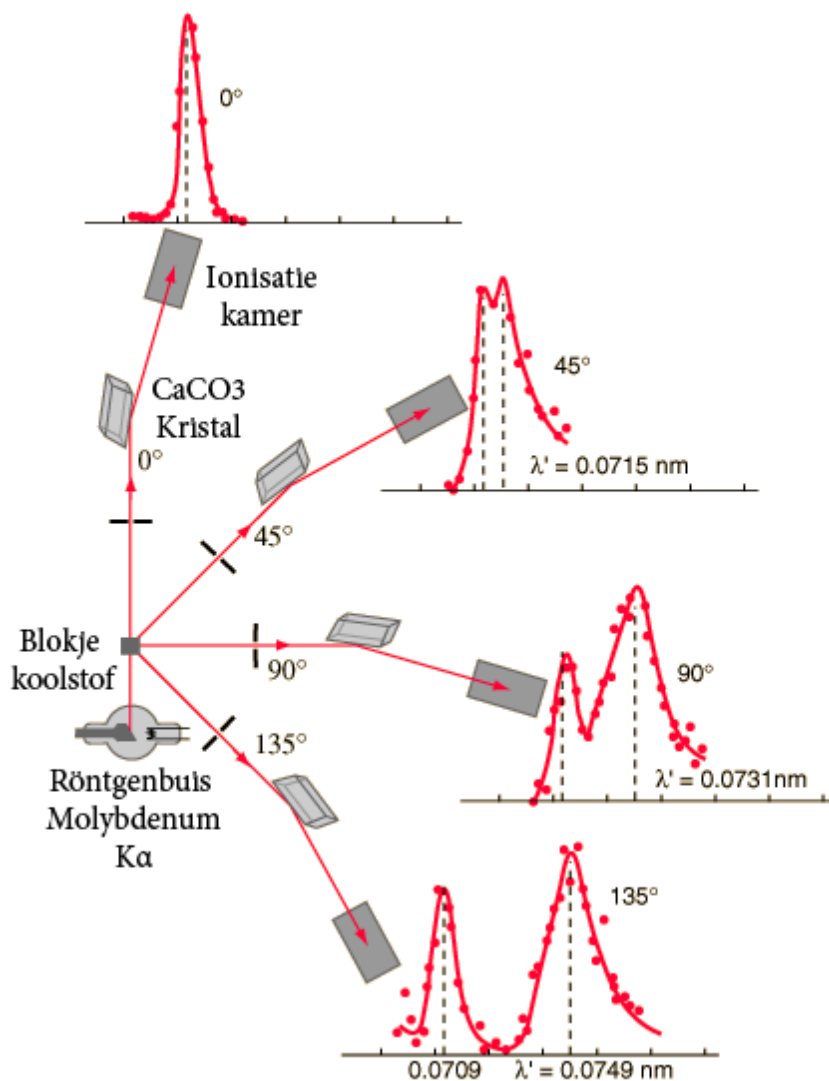
Als alle haakjes worden weggewerkt en als dit wordt versimpeld, volgt uit (5) de vergelijking voor de frequentie verschuiving. Als dan $f = \frac{c}{\lambda}$ daarin wordt ingevuld volgt de formule voor de golflente verschuiving, zoals te zien in (1). Maar je kan uit (5) ook de formule voor de nieuwe energie van het verstrooide foton afleiden. Dit komt later aan bod.

Compton zijn experiment

Compton gebruikte in zijn oorspronkelijke experiment molybdenum K-alpha röntgenstraling. Deze werden afgevuurd op een blokje koolstof. In dit blokje zijn de elektronen aanwezig waaraan de straling verstrooid wordt. Hij had een detector die de golflengte van de straling meet, die verdraaibaar is. Hij varieerde de hoek van de detector ten opzichte van de oorspronkelijke straling, en noteerde de gevonden golflengtes. Zie voor de opstelling en de resultaten afbeelding 36.

De detector was een Bragg-spectrometer. Hierin valt de inkomende straling op een

calciumcarbonaat kristal, vervolgens ontstaat er een interferentiepatroon in de detector, hoe dit werkt wordt in de volgende deelvraag besproken. Dan is de golflengte te berekenen aan de hand van de hoek die het interferentiepatroon maakt ten opzichte van het kristal. De detector geeft waarden zoals weergegeven in de grafieken in afbeelding 25.



Afbeelding 36 – Een schematische weergave van de resultaten en de opstelling van Compton

De linker piek geeft een golflengte die vrijwel gelijk is aan de golflengte van de straling voordat deze verstrooid is. Dit komt omdat deze piek veroorzaakt wordt door verstrooiing aan elektronen dicht bij de kern die niet veel bewegingsvrijheid hebben, dit betekent dat als zij geraakt worden dat dan het hele atoom gerekend moet worden als massa van de verstrooier. In (1) is te zien dat bij een relatief zeer grote massa, de golflengteverschuiving zeer gering is, ongeveer 20000 maal kleiner, ongeacht de hoek θ .

Alle constanten en variabelen in de formule zijn in het experiment te bepalen. De formule (6) bleek keer op keer te voldoen in de experimenten. Hiermee is aangetoond dat elektromagnetische straling en dus ook licht, kleine pakketjes bevatten met een eigen

impuls. Een typische deeltjeseigenschap. En dat voor deze 'deeltjes' ook de wetten van behoud van energie en impuls gelden. Je zou kunnen zeggen dat dit het bewijs is voor het deeltjes karakter van licht.¹

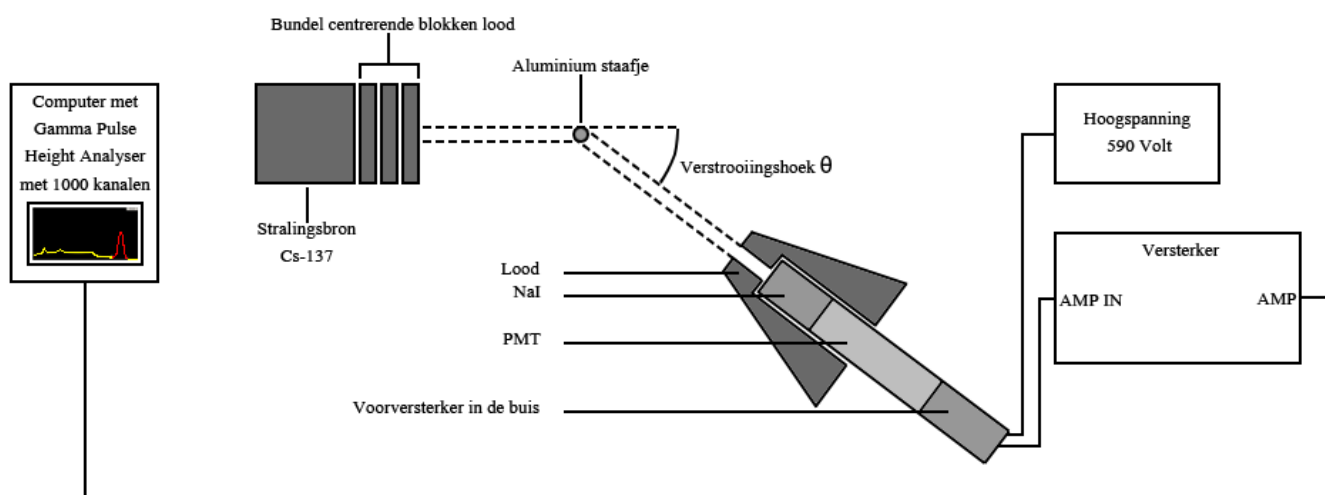
H3.6 Het uitgevoerde Compton experiment

Compton heeft gebruik gemaakt van het meten van de golflengte van de verstrooide straling, maar hier is de energie gebruikt. De formule voor de energie van de verstrooide straling is af te leiden uit de ombouwing en versimplificatie van (5). Dit is (6)

$$hf' = \frac{hf}{1 + \frac{hf(1-\cos\theta)}{mc^2}}, \quad E' = \frac{E}{1 + \frac{E(1-\cos\theta)}{mc^2}} \quad (6)$$

Hierin zijn hf' en E' de energie van de verstrooide straling. E en hf zijn de energie van de straling voor de botsing.

De opstelling

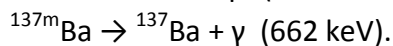
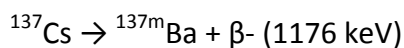


Afbeelding 37 - Schematische weergave van de practicum opstelling

De opstelling lijkt veel op de oorspronkelijke opstelling van Compton, maar er zijn duidelijke verschillen. De bron van de inkomende elektromagnetische straling is geen röntgenbuis, maar een Cesiumpreparaat. Deze straalt gammastraling uit. De detector is hier een NaI(tl) scintillatie detector, en het signaal van de detector wordt verwerkt in een computer met bijbehorend programma. Verder is het materiaal waarin de elektronen waaraan verstrooid wordt zich bevinden hier geen blokje koolstof, maar een cilindervormig blok aluminium. Zie voor de opstelling afbeelding 37.

De cesiumbron zit in een loden omhulsel die veel van de straling blokkeert. Deze staat op een rail. Het omhulsel heeft een klep die open gezet kan worden. De klep staat open in de richting van het blokje aluminium. Dan volgen er nog drie loden platen met een gat in het midden, deze dienen om een straal over te houden met een eenduidige richting.

Het cesium vervalt met bètaverval tot Barium, dit betekent dat er een neutron omgezet wordt in een elektron en een proton. Het elektron schiet weg en het nieuwe atoom heeft een extra proton, hierdoor wordt het atoomnummer met één verhoogd, waardoor barium ontstaat. Het nieuw gevormde barium heeft veel energie en relatief zeer snel wordt de overtollige energie uitgezonden door een gammafoton uit te zenden met een energie van 662 keV. Het betreffende cesium heeft een halfwaardetijd van 30 jaar, en dat van deze vorm barium is 2,6 minuten, dus vandaar dat het relatief snel is. Dit zijn de verval reacties:

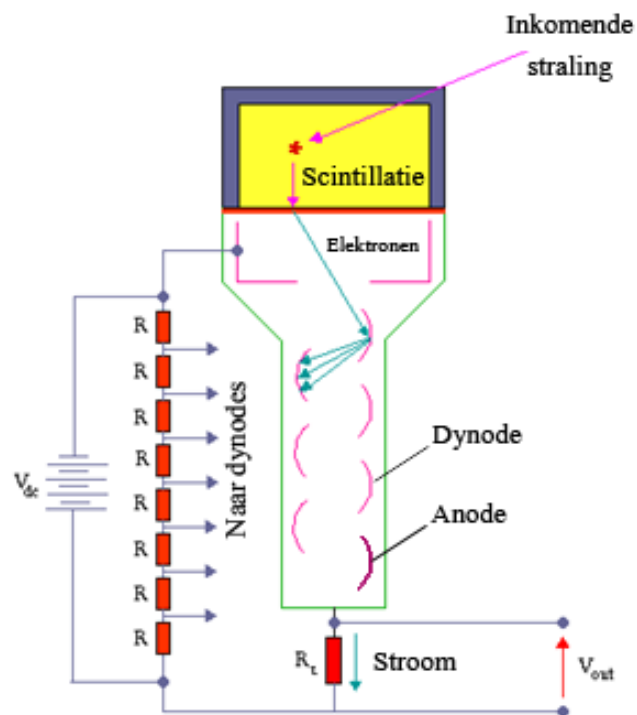


Aangezien deze reacties zo snel op elkaar volgen wordt er meestal gesproken van een cesium bron die gamma uitstraalt met 662 keV.^{li}

De NaI(tl) scintillatie detector

De detector bestaat uit een NaI(tl) scintillatie kristal aan een PMT, een photo multiplier tube. NaI(tl) is een natriumjodide kristal dat werkzaam wordt in combinatie met thallium, het is een fluorescerend materiaal, dat betekent dat er scintillaties plaats kunnen vinden. Scintillaties zijn licht flitsjes die geproduceerd worden door bepaalde materialen bij het absorberen van bepaalde elektromagnetische straling. Deze materialen heten fluorescerende materialen, scintillators of fosfors. In de buurt van hoog energetische straling, meestal gamma of röntgenstraling, gaan zij elektromagnetische straling uitzenden met een zichtbare golflengte, deze golflengte en dus de kleur hangt af van het materiaal.

In afbeelding 37 is een schematische weergave van de detector te zien. De PMT is een vacuüm gezogen buis, met als functie om de inkomende straling om te zetten in een meetbaar stroom-signaal. De lichtflitsen van het kristal worden omgezet in elektronen door een photocathode.

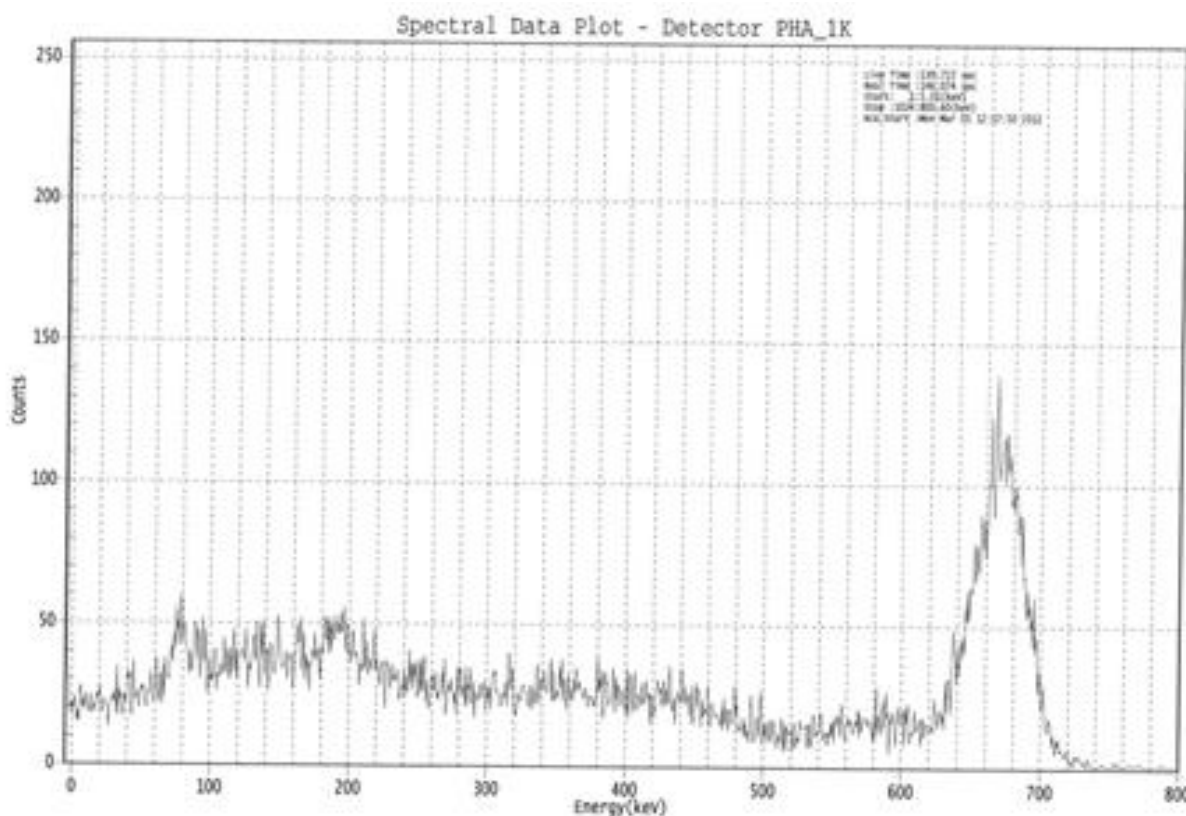


Afbeelding 38 – Een schematische weergave van de NaI(Tl) scintillatie detector

De elektronen die ontstaan zijn niet groot in aantallen en daarom moeilijk meetbaar, hiervoor zijn de dynodes. De dynodes staan onder een spanning van ongeveer 590V. Zij zijn gemaakt van een materiaal dat er voor zorgt dat als er een elektron opvalt, er ongeveer 4 a 5 elektronen worden uitgezonden. De dynodes zijn zo geplaatst dat de uitgezonden elektronen van de voorgaande dynode op de volgende valt, en hierdoor wordt het signaal aanzienlijk versterkt. Als laatste vallen de elektronen op een anode die de elektronen afvoert als een stroompje en uit de detector. ⁱⁱⁱ

Vervolgens gaat dit signaal in een versterker, en daarna de computer in.

Het signaal werd op de computer verwerkt door het programma: Gamma PHA 1k. Dit staat



Grafiek 7 - Het aantal tellingen van een kanaal tegen de energie van gammakwanta bij een hoek van 0 graden, per kanaal.

voor een gamma pulse height analyser met 1000 kanalen. Het programma geeft een grafiek met op de y-as het aantal keren dat een signaal uit een bepaald kanaal is gemeten. Op de x-as staan de kanalen 1 tot 1000. Deze staan voor de voltage van het ingekomen signaal, elk kanaal staat voor een bepaald voltage interval. De spanning van het signaal dat gegenereerd wordt door de inval van een gammafoton blijkt evenredig te zijn aan de energie van dat foton. Dus kan er een ijkings plaatsvinden. Wij hebben de detector zonder de aluminium verstrooier opgesteld in een hoek θ van 0 graden. Dit leverde grafiek 1 op met aan de rechterkant een foto piek, bij het kanaalnummer van de foto piek is in het programma 662 keV ingevuld, de energie bekend uit de theorie. Hiermee is het programma geijkt.

De piek aan de rechterkant heet een foto piek. Deze naam is gekozen omdat deze piek

veroorzaakt wordt door foto-elektrische absorptie van de invallende straling in het kristal. Zoals genoemd in H3.3 wordt hierbij alle energie van het invallende foton geabsorbeerd door een elektron, en houdt het kwantum op met bestaan. De linkerkant van de piek, de lagere energieën, wordt veroorzaakt doordat de hoek net niet goed was, de rechterkant van de piek is ingewikkelder. Een signaal geproduceerd door de detector heeft een bepaalde duur, als tijdens die duur meerdere signalen worden geproduceerd gaan deze bij elkaar optellen, dit verklaart waardoor de energieën aan de rechterkant van de piek hoger zijn dan wat de bron kan uitzenden. In grafiek 7 is bijvoorbeeld te zien dat 800 keV ook een paar keer is gemeten, dit is het resultaat van dat optellen van impulsen, maar de kans erop is zeer klein en daarom is deze energie ook maar een paar keer geteld. Aangezien bij de foto piek alle energie wordt overgedragen is dit de piek die bestudeerd moet worden om erachter te komen wat de energie van de invallende straling was.

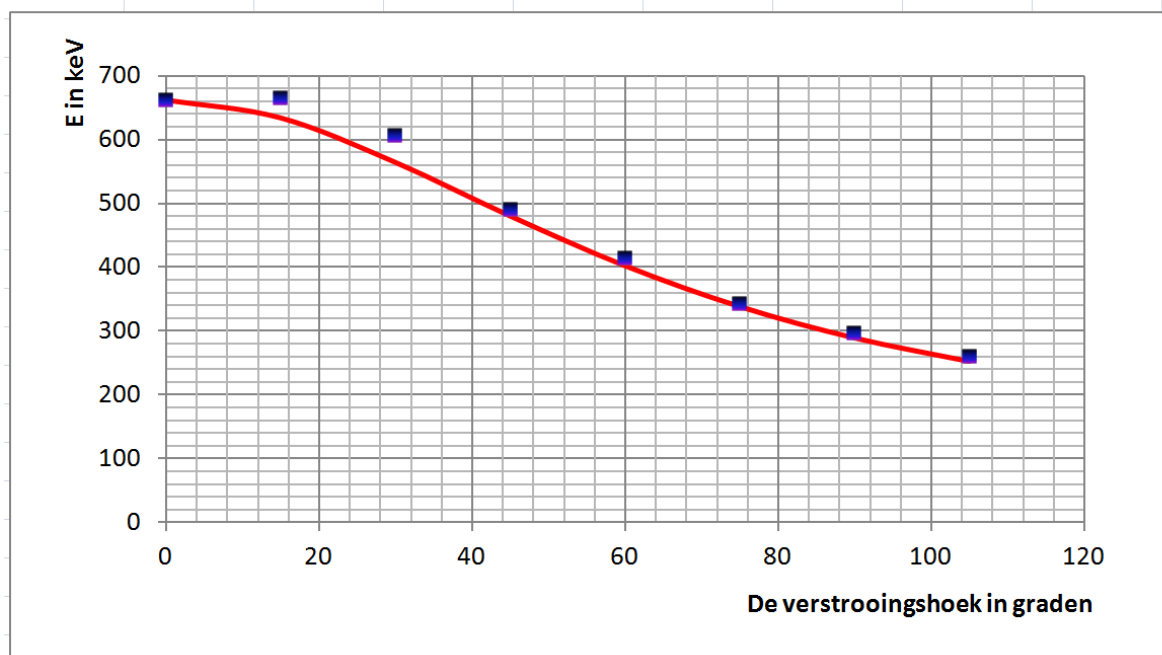
De rest van de grafiek, links van de foto piek, heet de Compton-rug. Dit is het resultaat van Compton absorptie in het kristal, dus de Compton-rug wordt veroorzaakt door kwanta die een gedeelte van hun energie overdragen aan de elektronen in het kristal. De hoek waarbij de botsing plaats vindt is willekeurig vandaar de verspreiding aan de linkerkant van de grafiek.^{liii}

Er is gemeten bij een hoek θ met intervallen van 15 graden, gedurende 1000s tot een maximum van 120 graden. Het programma rekende de top van de piek uit, dit was niet persé de energie met de meeste tellingen, maar de energie die het meeste in het midden van de piek zat. In grafiek 2 zijn de meetwaarden weergegeven met de blauwe lijn. De rode lijn is de voorspelde waarde door de formule.

De precieze meetwaarden zijn te zien in te tabel in bijlage 1. De meetwaarden zijn overzichtelijk gemaakt in grafiek 8. Het valt hier op dat de gemeten waarden rond de 15 en de 30 graden een grotere afwijking van de voorspelde waarden hebben dan bij de grotere hoeken het geval is. Dit is om twee redenen.

Zoals eerder genoemd kunnen de signalen op elkaar stapelen waardoor de piek kan verschuiven. De kans hierop is hoger bij een hogere intensiteit straling. Bij een hoek van 15 graden was de straling van relatief hoge intensiteit, sommige energieën zijn hier meer dan 4000 maal geteld. Terwijl bij een hoek van 45 graden bijvoorbeeld het record rond de 200 ligt. Het programma is geijkt bij een lage intensiteit omdat de intensiteit bij de grotere verstrooiingshoeken ook laag is. Dit is ook nadelig voor de nauwkeurigheid bij 15 graden. Ten tweede was het in het begin niet bekend dat er ook nog een aanzienlijke hoeveelheid straling uit alle kanten van de bron komt, door het lood heen. Wanneer de detector gedraaid wordt over een redelijke hoek, bijvoorbeeld 30 graden, bereikt de straling de detector van uit de zijkant van het omhulsel van de bron. Maar bij 45 graden en verder is dit opgelost door een zeer dikke plaat lood van 5 cm aan de zijkant van de bron neer te zetten. Hierna werden

de metingen nauwkeuriger. De hoek was helaas in slechts twee significante cijfers te meten.



Grafiek 8 – De energie van de invallende lichtkwanta in keV tegen de verstrooiingshoek in graden.

De empirische conclusie

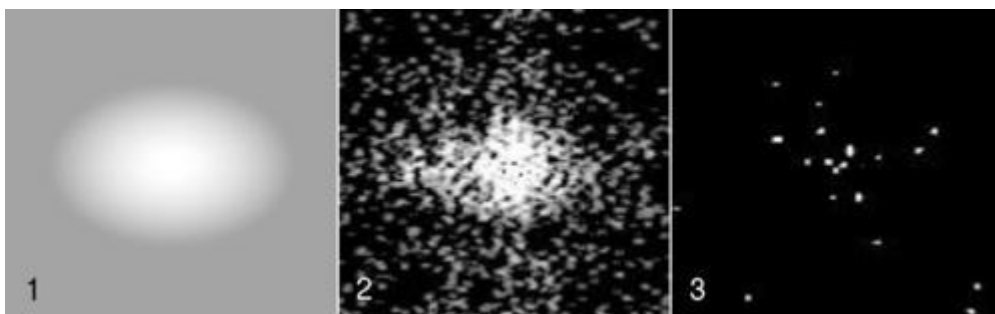
Wanneer men naar grafiek 8 kijkt, is te zien dat de experimentele waarden goed overeen komen met de door de formule (3.12) voorspelde waarden. Het gemiddelde afwijkingpercentage bedraagt 3,8% afwijking omhoog. De empirische conclusie luidt dan ook dat de resultaten sterk doen vermoeden dat de opgestelde formule klopt. Dus in zo verre is de conclusie hetzelfde als die van Compton. Elektromagnetische straling bestaat zeer waarschijnlijk uit deeltjes met een eigen impuls en energie.

Bohr wil het niet geloven

Na dit experiment was Bohr nog niet overtuigd. De verandering van de golflengte kwam goed overeen met Compton's interpretatie, maar de impuls van het elektron na de verstrooiing was nog niet rechtstreeks gemeten. Men kon dus nog zeggen dat bij de wisselwerking tussen straling en geladen elementaire deeltjes de impuls niet behouden blijft. Enkele experimenteel natuurkundigen, waaronder Bothe en Geiger deden een experiment om de impuls van de verstrooide elektronen te meten. De experimenten gaven een rechtstreeks bewijs van de Compton-verstrooiing op het niveau van individuele deeltjes. Daarmee bewezen ze voor het eerst onomstotelijk dat ook bij elementaire deeltjes de wet van behoud van energie geldig is, en ze ondersteunden daarmee de corpusculaire interpretatie van het Compton effect, oftewel het botsingsmodel^{liv}

H3.7 Nu is alles makkelijker

Toentertijd waren de gegevens onvolledig, de ideeën vaag en de experimenten moeilijk te interpreteren. Bovendien moest alles uit het hoofd worden uitgerekend. Tegenwoordig kunnen we eenvoudig tot de kern van de zaak komen met eenvoudige consumenten elektronica zoals een digitale camera. In plaats van een filmpje heeft een digitale camera een computer chip met een oppervlak die is opgedeeld in een raster van lichtgevoelige vierhoeken genaamd pixels. Door het gebruik van een digitale camera om kleinere en kleinere hoeveelheden van licht te detecteren kunnen we iets nieuws leren over licht, zoals te zien is in afbeelding 39.



Afbeelding 39 – Afbeeldingen gemaakt met een digitale camera: in elke opeenvolgende afbeelding is de lichtvlek dimmer gemaakt

Gaande van 1 naar 2 naar 3 wordt er steeds meer licht weggegooid of weg gefilterd. Dit gebeurt door zekere absorbers in het apparaat, dit proces is schematisch weergegeven in afbeelding 40, maar hier gaan we verder niet op in. Dus bij het eerste plaatje is de intensiteit van het invallende licht zeer hoog ten opzichte van het laatste plaatje. Zoals op het tweede en derde plaatje te zien is, geven sommige pixels nog steeds een maximaal signaal en vangen dus gewoon een ongeveer even grote hoeveelheid licht energie op als de pixels in het eerste plaatje.

In plaats van wat je zou verwachten van een golf lijkt het echter op iets vergelijkbaar met een strooipatroon van een geweer. Blijkbaar draagt elke 'kogel' van licht slechts een vaste hoeveelheid energie, wat de reden is dat je een gevoelige digitale camera nodig hebt. De resultaten verschillen dramatisch van wat werd verwacht met de golftheorie van licht. Als het licht een golf was en niets anders dan een golf, dan zou de gehele chip van de digitale camera gelijkmatig worden verlicht. Het verzwakken van de golf door middel van de absorbers zou dan alleen maar betekenen dat elke pixel een lange tijd in beslag neemt om een signaal te registreren.

Dit geeft duidelijk weer dat licht in afzonderlijke pakketjes energie aankomt, oftewel fotonen.

Hoewel Einstein verschillende waarnemingen interpreteerde is dit de conclusie die hij bereikte in 1905: dat de zuivere golftheorie van het licht een oversimplificatie is en dat de energie van een lichtstraal in



Afbeelding 40 – Een stroom deeltjes wordt gedeeltelijk opgenomen

brokken komt in plaats van verspreid te zijn over een bepaalde regio.

We zien deze 'brokken' nu als deeltjes van licht genaamd fotonen, hoewel Einstein het woord 'deeltje' vermeedt en dat het woord 'foton' pas later werd bedacht. Het probleem was dat golven en deeltjes leken op inconsistente categorieën. De reacties op het werk van Einstein hierover kunnen worden beschreven als erg sceptisch. Zelfs twintig jaar later schreef Einstein zelf: "Er zijn dus nu twee theorieën van licht, beiden onmisbaar, en - als iedereen tegenwoordig moet toegeven, ondanks twintig jaar enorme inspanning van de kant van theoretische natuurkundigen - zonder enig logisch verband." ^{lv}

4. Bestaat materie uit golven?



Afbeelding 41 – Louis Victor de Broglie

H4.1 De Gebroeders de Broglie

De eerste onder de theoretici die Einstein's voorbeeld volgden in het confronteren van de uitdaging van het golf-deeltje enigma was een Franse edelman, Louis-Victor de Broglie. Als een jongere zoon geboren in een illustere, rijke, aristocratische familie, had Louis de Broglie recht op prinselijke status. Er werd niet van hem verwacht dat hij een carrière zo intellectueel als wetenschapper zou nastreven. Volgens de oude hertog de Broglie, de grootvader van Louis was wetenschap 'een oude dame content met de attracties van oude mannen'. Maar de oudere broer van Louis, Maurice, was het gelukt om een uitstekende reputatie in de experimentele natuurkunde te verkrijgen, terwijl hij tegelijkertijd een meer traditionele carrière nastreefde. Beïnvloed door zijn broer, en ongetwijfeld beschermd door hem tegen de afkeuring van hun familie, werd Louis een theoretisch natuurkundige na het halen van een niet-wetenschappelijke graad in de Oudheid en Paleografie.



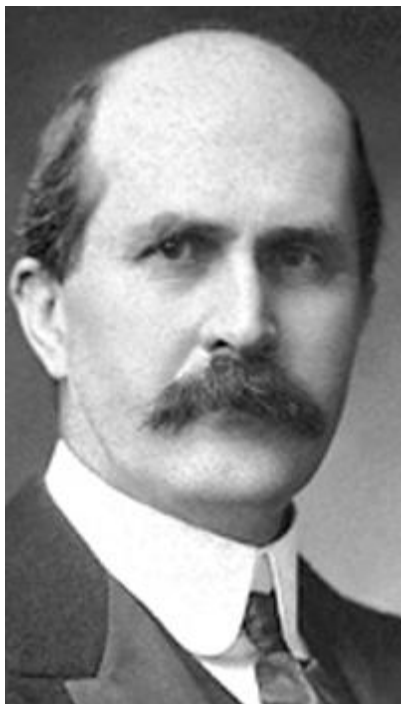
Afbeelding 42 – William Bragg

In het begin van 1913 had Maurice de Broglie al experimenteel werk verricht op röntgenstraling, waarin, in ieder geval voor de proefnemer, de golf-deeltje vraag moeilijk was om te vermijden. Uit zijn eerste experimenten met röntgenstraling volgde de ontdekking dat deze röntgenstralen met elkaar interfereren om kenmerkende heldere en donkere patronen te creëren. Dergelijke 'diffractie' effecten waren al bijna een eeuw geleden voor het eerst geobserveerd in experimenten met gewoon licht, en werden uitgelegd met behulp van een golftheorie. Een van de ontdekkers van de diffractie van röntgenstraling, met de implicatie dat röntgenstraling kon worden gezien als de processie van golven, was William Bragg, een Britse experimentator, die net overtuigend bewijs had gevonden dat röntgenstraling eigenschappen van deeltjes heeft. William Bragg begon voor het eerst röntgenstraling van de andere kant te

bekijken, namelijk als golven, door de ogen van zijn zoon, Lawrence Bragg, die, samen met zijn vader William Henry Bragg, de Nobelprijs voor de Natuurkunde, voor het werk dat zij samen deden in de Röntgendiffractie aan kristallen, ontving. Doordat zij al concrete ervaring hadden gehad met röntgenstraling als zowel deeltje en golf - en, als experimentatoren die zich niet bedreigt voelden door de angsten van theoretici - behoorden zij tot twee van de

eerste mensen die inzagen dat de golftheorie van röntgenstraling, noch de deeltjestheorie van röntgenstraling, niet op zichzelf voldoende was. In 1912 schreef de oudste Bragg: 'Het probleem is niet het beslissen tussen de theorieën van röntgenstraling, maar een theorie te vinden die de capaciteiten van beide bezit.'

Aan het begin van de jaren twintig had Maurice de Broglie al genoeg gezien van het gedrag van röntgenstraling om dezelfde mening te delen als die van William en Lawrence Bragg en om dit standpunt door te geven aan zijn broer Louis de Broglie, die inmiddels zijn talent als theoreticus begon te realiseren. Louis de Broglie schreef: 'Mijn broer beschouwt röntgenstraling als een combinatie van golf en deeltje, maar omdat hij geen theoreticus was, had hij geen bijzonder duidelijke ideeën over het onderwerp.' Voor een tijd werkten de twee broers samen aan experimenten die te maken hadden met elektronen, die worden geproduceerd door Compton verstrooiing van röntgenstraling aan vaste materialen. Door dit experimentele werk en 'lange discussies met mijn broer over de interpretatie van zijn mooie experimenten,' werd Louis de Broglie 'geleid tot diepgaande meditatie over de noodzaak van het altijd associëren van de aspecten



Afbeelding 43 – Henry Bragg

van golven met die van deeltjes.' Hij begon de golf-deeltje dualiteit als een natuurlijke symmetrie te zien, die niet alleen van toepassing was op vormen van straling zoals licht en röntgenstraling, maar ook op de elementaire bouwstenen van de materie, met name elektronen. Sinds het werk van J. J. Thomson in de late jaren tachtig van de 19e eeuw werden elektronen gezien als kleine deeltjes die een bepaalde lading en massa hadden. Op het moment dat de Broglie zijn theorie formuleerde was er geen enkel bewijs dat elektronen zich konden laten zien als iets anders als deeltjes. Toch, op basis van zijn overtuiging van de golf-deeltje symmetrie en argumenten die voortkwamen uit Einstein's relativiteitstheorie, voorspelde de Broglie dat elektronen en andere bestanddelen van deeltjes eigenschappen van een golf zouden moeten vertonen.

In 1923 wees Louis de Broglie erop dat ook elektronen en andere subatomaire deeltjes zo'n dualisme moeten vertonen. Terwijl Einstein was uitgegaan van een golfmodel van licht en daarna een uitbreiding ter verklaring van de deeltjeseigenschappen had voorgesteld, ging de Broglie uit van het klaarblijkelijke deeltjeskarakter van de elektronen om dit vervolgens uit te breiden tot golfeigenschappen. Voor deze theorie was experimentele toetsing nodig. In hetzelfde jaar voerden Davidson, Germer en G.P. Thomson experimenten uit die ondersteuning boden voor het golfkarakter van de materie.^{lvi}

H4.2 De contributie van de Broglie

In het begin van de jaren twintig van de vorige eeuw was de ontwikkeling van de atoomtheorie min of meer op een dood spoor gekomen. In de formules van Bohr en Balmer voor de energieniveaus van atomen worden gehele getallen gebruikt, dus: 1,2,3,4,5,84, en dergelijken. Waar komen deze gehele getallen dan toch vandaan?

De Broglie kwam toen met een nieuw idee. Hele getallen kom je in de natuur alleen maar tegen bij staande golven. Dit is omdat een staande golf, tussen twee punten, in de ruimte is gepositioneerd, en alleen als de golf een geheel aantal golflengten lang is zal deze niet met zichzelf gaan interfereren waardoor er uitdoving plaatsvindt. Bovendien, als je lichtgolven kunt opvatten als deeltjes, dan kun je misschien bewegende elektronen en andere deeltjes ook opvatten als golven. In 1924 schreef hij hier een uitgebreid proefschrift over. Hij gebruikte de formule van Einstein voor de impuls van fotonen, zoals besproken in Hoofdstuk 3.5:

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

En de formule voor impuls bij materie: $p = mv$ Dit combineerde hij tot (2), dit is de de Broglie golflengte. Deze formule geeft de golflengte voor de golfbeweging van materie met massa m en snelheid v .

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad (2)$$

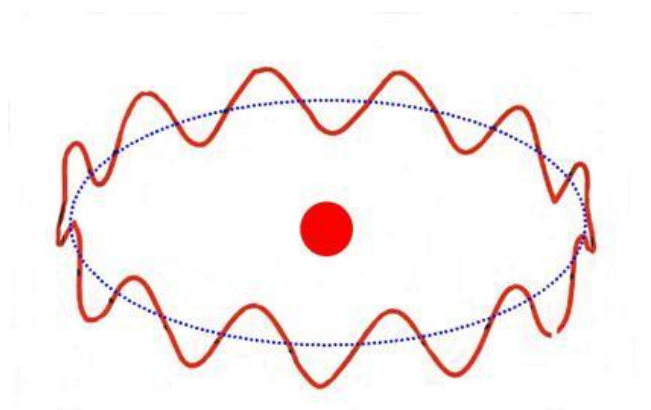
Met een complexe afgeleide -maar die ook begon met $mc^2 = hv$ - bewees de Broglie vergelijking (2) voor alle soorten deeltjes van materie. Dit was de Broglie zijn meest belangrijke bijdrage. Het suggereerde dat elektronen, en alle andere deeltjes van materie, niet alleen attributen hadden van impuls en energie, zoals J. J. Thomson een aantal decennia eerder had vastgesteld, maar ook een mysterieuze golflengte.

Dus de Broglie's impuls-golflengte vergelijking (2) was, net als de Planck-Einstein energie-frequentie connectie, $E = hv$, nog een dualiteits-vergelijking met aan de ene kant een golfgrootte (golflengte, λ), en met aan de andere kant een deeltjes grootte, massa en de altijd aanwezige constante van Planck ertussen.^{lvii}

Een staande elektronengolf zoals weergegeven in afbeelding 44, past alleen maar op de omtrek van zijn baan als hij in fase is met zichzelf.

Anders dooft hij zichzelf uit of gedeeltelijk uit.

Dus de omtrek moet deelbaar zijn door een geheel aantal keer de golflengte. $2\pi r_n = n \lambda_b$. Dit verklaart het gehele getallen probleem.



Afbeelding 44 – Een schematische weergave van een staande elektronengolf rond een atoomkern

H4.3 Elektronen diffractie

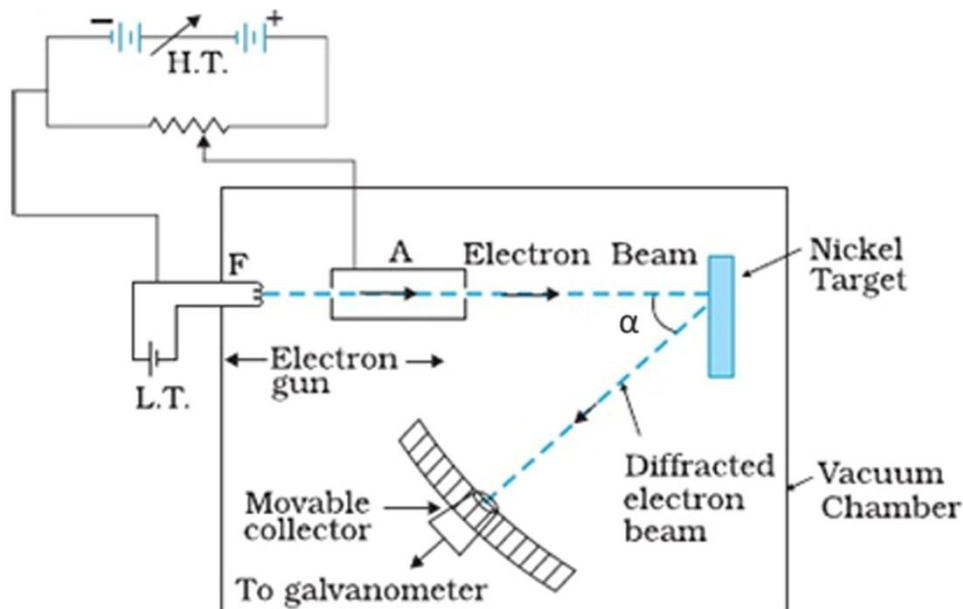


Afbeelding 45 – Clinton Davisson en Lester Germer

De Broglie voorspelde dat elektronen interferentiepatronen zouden opleveren bij het passeren van een nauwe opening. Hij kon niemand overtuigen de proef te doen. Einstein vroeg aan een experimenteel-fysicus Frank of hij een proef kon verzinnen om de ideeën te toetsen. Toen bleek dat de proef al was uitgevoerd door Davisson en Germer. Door met een elektronenbundel op een metaalkristal te schieten vonden zij een interferentie patroon. Maar zij dachten dat er iets mis was gegaan omdat zij niet dachten dat elektronen een interferentiepatroon konden vormen.

Het experiment van Davisson en Germer

Het golf karakter van elektronen is voor het eerst vastgesteld door C.J. Davisson en L.H. Germer in 1927. Er werd net als in H1.2 gebruik gemaakt van een elektronenkanon in een vacuüm gezogen buis. Met een lage spanning werd de elektrode van het kanon aan de linkerkant van afbeelding 46 tot gloeien gebracht, waarbij elektronen vrijkomen. Deze elektronen worden door de elektrische kracht in het kanon voortgestuwd onder invloed van hoogspanning. De elektronen raken vervolgens met hoge snelheid een nikkel kristal, waarna ze worden verstrooid in alle richtingen. Een detector die gevoelig is voor inkomende elektronen kan over een cirkelbaan glijden. De hoek α , die te zien is in afbeelding 46, wordt gevarieerd tijdens de proef. Het bleek zo te zijn dat de detector op het ene punt wel elektronen waarnam, maar bij een iets andere hoek niet, en vervolgens weer wel, kortom: er werd een interferentiepatroon waargenomen.^{viii}



Afbeelding 46 - Een schematische weergave van de opstelling van het Davisson en Germer experiment.

Bragg reflectie

In dit experiment werd ook de de Broglie golflengte getest (vergelijking (2) uit het vorige hoofdstuk). Hierbij wordt de wet van Bragg gebruikt, zie vergelijking (1). Deze formule geldt voor interferentie aan kristallen. Kristallen hebben een bepaalde configuratie, een bepaalde rangschikking van de atomen. Deze rangschikking is meestal verdeeld in vlakken met een bepaalde afstand tot elkaar, d , die overal in het kristal even groot is. Deze configuratie is in het gehele kristal hetzelfde. Bragg heeft bedacht dat de golven op de atomen in het kristal reflecteren.

Wanneer golven met elkaar in de pas lopen vindt er constructieve interferentie plaats, de golven versterken elkaar. Twee naast elkaar lopende golven lopen met elkaar in de pas wanneer het weglengte verschil een geheel aantal keer de golflengte is. Dit is omdat golven een periodiek verschijnsel zijn, en dus een periode hebben waarna alles zich herhaalt. Bragg heeft een formule opgesteld voor het weglengte verschil van twee golven in een kristal.

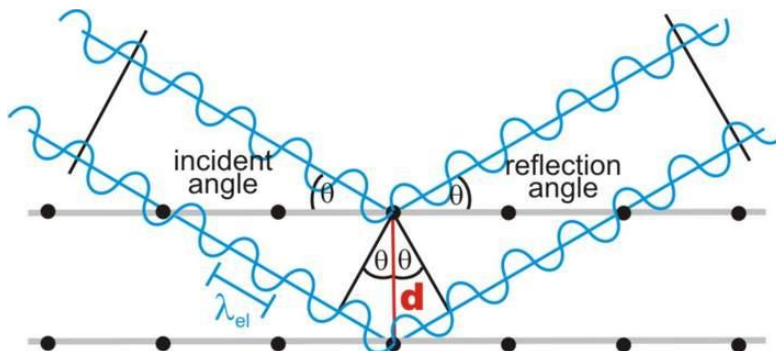
$$n\lambda = 2d\sin\theta, \text{ in dit experiment: } n\lambda = 2d\sin(\frac{1}{2}\alpha) \quad (1)$$

hierin staat n voor de orde van de interferentie band of fringe en is een geheel getal. (Voor meer informatie over interferentie patronen zie H2.3). λ staat zoals gewoonlijk voor de golflengte, d staat voor de constante afstand tussen de atoom patroon lagen in het kristal, θ is de hoek tussen de inkomende golf, en het vlak met atomen waarop hij weerkaatst, dit is te zien in afbeelding 47.

Het hoekverschil tussen de inkomende golf en de gereflecteerde golf heet α , zoals te zien in de opstelling van Davisson en Germer. α is twee maal θ aangezien er sprake is van reflectie, dus: $\theta = \frac{1}{2}\alpha$, dit is ingevuld in (1). Het weglengte verschil is twee maal de overstaande zijde ten opzichte van de hoek θ , in het kleine getekende driehoekje in afbeelding 47. Uit

standaard goniometrie overwegingen volgt dat de overstaande zijde in de kleine driehoek gelijk is aan $d\sin\theta$, en zo is de formule verklaard.^{lix}

Bij dit experiment was de waarde voor d van het nikkel kristal bekend. Door de hoek α te meten, en deze in te vullen in vergelijking (1) volgde de experimentele waarde voor de golflengte van de elektronen. Er werd bij de gebruikte versnelling een golflengte van 0,165 nm gevonden.



Afbeelding 47 – Een schematische weergave van de weeraansluiting van elektronengolven op atomen

De formule van de Broglie moet de waarde voorspellen. Maar hierin komt de snelheid van de elektronen voor. Hier kan een formule voor worden opgesteld door de kinetische energie die de elektronen krijgen van het elektronen kanon gelijk te stellen aan de klassieke formule voor de kinetische energie, en dit is dus gedaan in (2). De formule voor de energie toegevoegd door het elektronen kanon is gelijk aan de elementaire lading maal de versnelling, zoals uitgelegd in H1.2 . De snelheid die de elektronen al hebben door de gloeispanning wordt in dit proces verwaarloosd.^{lx}

$$eU_v = \frac{1}{2}mv^2, \quad v = \sqrt{\frac{2eU_v}{m}} \quad (2)$$

vergelijking (2) invullen in de formule van de Broglie geeft (3)

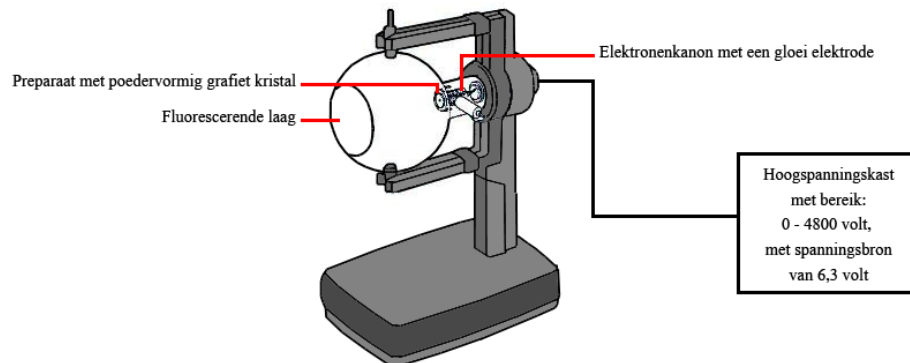
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meU_v}} \quad (3)$$

Hier is h de constante van Planck, m is de massa van een elektron, en e is zijn lading. U_v is de versnelling.

Door de gebruikte versnelling in te vullen in (3) komt men op de voorspelde golflengte tijdens het experiment: 0,167nm. Aangezien de gemeten waarde 0,165nm was, is dit een behoorlijke gelijkheid met de formule. Uit het experiment volgt duidelijk dat materie kan golven in zekere gevallen, aangezien de elektronen een interferentiepatroon veroorzaken, maar voor een definitieve bevestiging van de formule van de Broglie is verder experimenteel onderzoek nodig.

H4.4 Het uitgevoerde elektronen diffractie experiment

In dit experiment zal gekeken worden of de formule van de Broglie, (2), klopt voor elektronen. Ook wordt er getest of elektronen überhaupt een golfbeweging vertonen.



Afbeelding 48 – Schematische weergave van de opstelling van het uitgevoerde elektronen diffractie experiment

De opstelling zoals te zien in afbeelding 48 is als volgt. Er wordt gebruik gemaakt van een bolvormige vacuüm gezogen buis die aan de achterkant over loopt in een cilindervorm. In de cilindervorm bevindt zich een elektronenkanon met een gloei-elektrode en een preparaat met poedervormig grafiet kristal. Aan de overkant van de bolvorm, ten opzichte van het grafiet, bevindt zich een fluorescerende laag op de bolvorm, en deze licht groen op wanneer er elektronen op vallen.

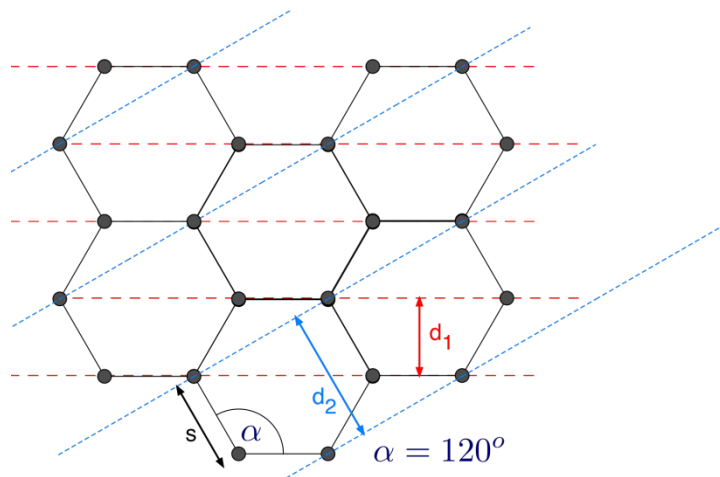
Er is een hoogspanningskastje aangesloten op het elektronenkanon, met een bereik tot 4800 volt. Deze levert de versnelspanning U_v , maar er is ook een spanningsbron van 6,3 volt in het kastje verwerkt, en deze wordt aangesloten op de gloei-elektrode.

Kristallen en cirkels

Wanneer het kastje aangezet wordt, worden de elektronen tot hoge snelheden versneld, en worden op het grafietkristal geschoten. De elektronen worden dan volgens Bragg reflectie verstrooid aan de kristallen. Het waargenomen interferentiepatroon op het fluorescerende scherm bestaat uit twee cirkels met een stip in het midden. De stip wordt veroorzaakt door de elektronen die door het kristal gaan zonder iets te raken.

Het kristal is in poedervorm, dus er zijn zeer veel stukjes kristal aanwezig die in alle richtingen zijn gedraaid ten opzichte van elkaar. Deze verdraaiing ten opzichte van elkaar zorgt ervoor dat er cirkels waar te nemen zijn, in plaats van een stip op een bepaalde afstand van het midden.

Grafiet heeft een dubbele kristalstructuur, en dit betekent dat er sprake is van twee waarden van d (zie afbeelding 49). De afstand tussen de rode stippellijnen is de kleine d , en is 0,123 nm, en de afstand tussen de blauwe stippellijnen is de grote d , en is 0,213nm.^{lxi}



Afbeelding 49 - De twee kristal structuren, en hun onderlinge afstanden, d .

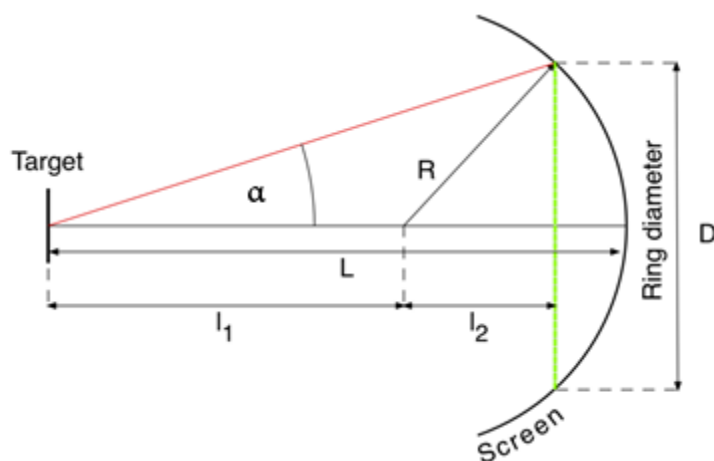
Het gedeelte van de buis dat bedekt is met de fluorescerende laag is relatief gezien niet erg groot, het kan maximaal een hoek α weergeven van ongeveer 15 graden. Vandaar dat dan ook alleen de eerste orde constructieve interferentie te zien is op het fluorescerende scherm. Maar toch zijn er twee cirkels te zien, dit is omdat er bij de grote cirkel Bragg reflectie optreedt op de structuur met de kleine d , en bij de kleine cirkel de structuur met de grote d van toepassing is. Dit wordt duidelijk wanneer men d vrijmaakt in formule (1):

$d = \frac{n\lambda}{2\sin(\frac{1}{2}\alpha)}$. Hierin is duidelijk te zien dat bij een grotere α , de afstand, d , kleiner wordt.

Het meten

De versnelling werd gevarieerd tussen 2000 en 4500 volt, met intervallen van 500 volt. Bij elke spanning, en dus snelheid van de elektronen, werd de diameter van de binnenste en de buitenste cirkel opgemeten met een schuifmaat. Bij elke versnelling is de door formule (3) voorspelde waarde uitgerekend, de precieze waarden zijn terug te vinden in een tabel in bijlage 2, maar deze waarden zijn ook uitgezet in grafiek 9.

Om nu de experimentele golflengte te berekenen wordt de formule (1) voor de Bragg reflectie gebruikt, om de hoek α te berekenen komt er eerst wat wiskunde bij kijken.



Afbeelding 50 - Een doorsnede van de versimpelde situatie in de vacuüm buis.

De hoek α , zoals te zien in afbeelding 50, is te berekenen door middel van (4). Maar de in dit experiment bruikbare formule voor α , (7), krijgt men door (5) en (6) in (4) in te vullen. De diameter, D , verschilt bij elke meting, en daarom verschilt de afstand $l_1 + l_2$ ook bij elke

meting. L is de afstand van het kristal poederpreparaat tot het punt op de bolvorm daar recht tegenover, de gemeten waarde is 0,129 meter. De diameter, D , van de bol is gemeten als 121,5 mm. R is de straal van de bol, dit is 0,06075 meter. Deze waarden zijn ingevuld aan de rechterkant van (7). Vergelijking (6) volgt uit de stelling van Pythagoras.

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{D}{2(l_1+l_2)}\right) \quad (4)$$

$$l_1 = L - R \quad (5)$$

$$l_2 = \sqrt{R^2 - \frac{1}{4}D^2} \quad (6)$$

$$\alpha = \tan^{-1}\left(\frac{D}{2(L-R+\sqrt{R^2-\frac{1}{4}D^2})}\right), \quad \alpha = \tan^{-1}\left(\frac{D}{2(0,06825+\sqrt{0,6075^2-\frac{1}{4}D^2})}\right) \quad (7)$$

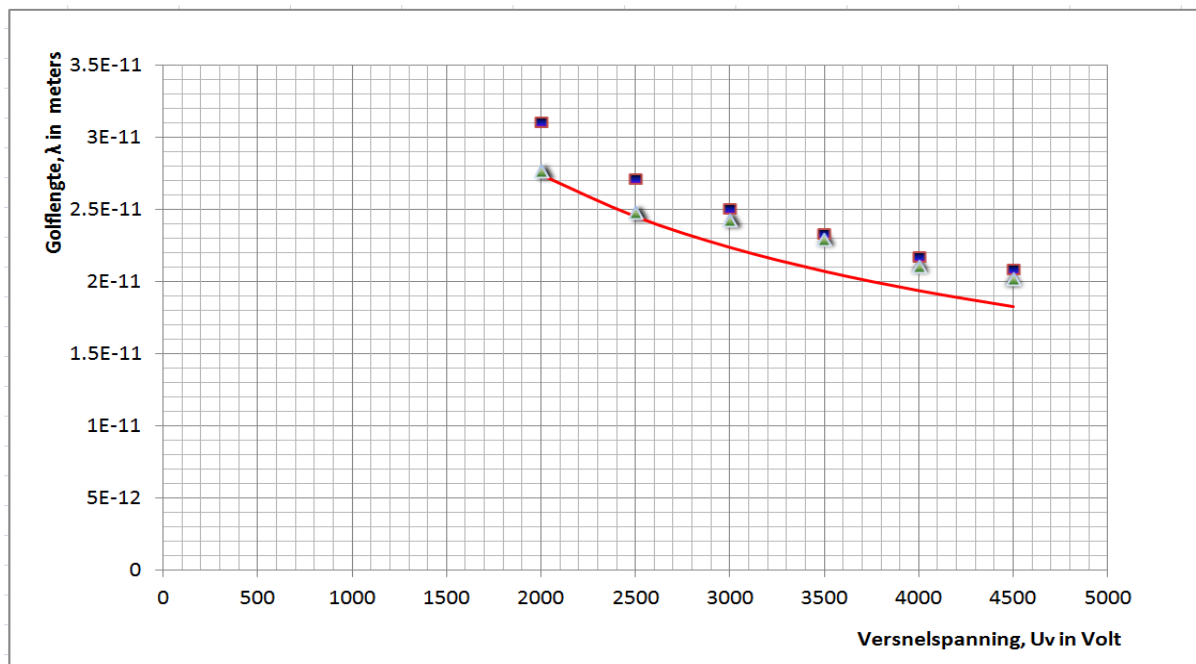
Door vergelijking (7) in te vullen in vergelijking (1) komt men op de formule (8) voor de experimentele waarden van de golflengte van de elektronen. Aangezien er in dit experiment alleen sprake is van een eerste orde patroon, is voor n in de tweede vergelijking van (8) 1 ingevuld, waardoor deze wegvalt.

$$n\lambda = 2d\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{D}{2(L-R+\sqrt{R^2-\frac{1}{4}D^2})}\right)\right) \quad (8)$$

$$\lambda = 2d\sin\left(\frac{1}{2}\tan^{-1}\left(\frac{D}{2(0,06825+\sqrt{0,6075^2-\frac{1}{4}D^2})}\right)\right) \quad (8)$$

Bij elke meting is de golflengte uitgerekend met behulp van de gemeten diameter van de kleine interferentie cirkel en de grote D , en met behulp van de grote cirkel en de kleine d . De precieze waarden zijn terug te lezen in bijlage 2.

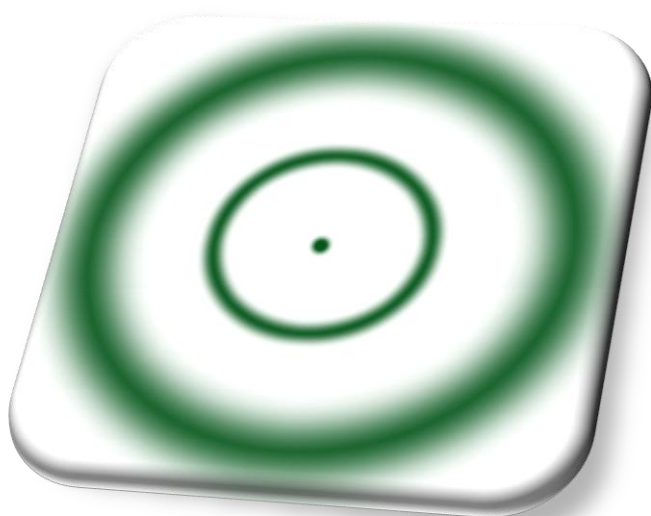
De resultaten voor beide cirkels en de voorspelde waarden zijn ook uitgezet in grafiek 9. Hierin is de golflengte in meters uitgezet tegen de versnelspanning in volt. De rode lijn geeft de voorspelde waarden weer. De groene lijn staat voor de uitgerekende waarden voor de buitenste cirkel, en de blauwe lijn staat voor de uitgerekende waarden voor de binnenste cirkel.



Grafiek 9 – De gemeten en voorspelde golflengte in meters uitgezet tegen de versnelspanning in volt

De beginsnelheid van de elektronen door invloed van de gloeispanning, van 6,3 volt, is verwaarloosd dit zorgt voor een kleine afwijking. Het verloop van de blauwe punten is ongeveer evenwijdig aan de voorspelde waarden maar elk punt heeft een te grote golflengte, de gemiddelde afwijking omhoog is 12% ten opzichte van de voorspelde waarden. Dit lijkt op een systematische fout.

De randen van de interferentiecirkels waren geen perfecte lijnen, maar relatief brede banden. Zoals te zien in afbeelding 51. Bij het meten van de diameter, D , is er vanuit gegaan dat de afstand tussen ongeveer het midden van beide banden genomen moet worden. Maar



Afbeelding 51 - Het gevonden interferentie patroon van de elektronen tijdens het uitgevoerde experiment.

misschien is de afstand van binnenrand tot binnen rand van de cirkel wel doorslaggevend. Tevens gebeurde het in schatten van het midden met het timmermansoog. De afwijking van de metingen aan de buitenste cirkel, de groene lijn, is zoals in de grafiek te zien minder, de gemiddelde afwijking is hier 6,6%, het "midden van de band probleem" zorgt voor een kleinere afwijking aangezien de diameter groter is. Verder valt op dat de groene lijn bij de eerste twee spanningen zeer goed overeenkomt met de voorspelde rode lijn. Dit is wellicht omdat hier niet het midden van de rand van de cirkel maar de juiste plaats van meten is gebruikt, het geheugen heeft zijn gebreken.

De empirische conclusie

Wanneer men naar grafiek 9 kijkt, is te zien dat de experimentele waarden redelijk overeen komen met de door de formule voorspelde waarden. Het gemiddelde afwijkingpercentage bedraagt 9,3% afwijking omhoog. Maar met in achtneming van de bovengenoemde onnauwkeurigheden luidt de empirische conclusie dat de resultaten sterk doen vermoeden dat de formule van de Broglie klopt.

Het is in ieder geval zonder twijfel bewezen dat elektronen, wat materie deeltjes zijn, zich kunnen gedragen als golven, dit is omdat er interferentie heeft plaatsgevonden.

H4.4 Kwantummechanica



Afbeelding 52 – Erwin Schrödinger

De ideeën van De Broglie werden uitgewerkt door Schrödinger in de golfmechanica. Hij bouwde voort op het werk van Hamilton. Hij had de mechanica van Newton zodanig herschreven dat er bepaalde overeenkomsten bleken te bestaan tussen golven en deeltjes. Schrödinger kwam op een vergelijking waarmee je elektronen kan beschrijven als een materiegolf. Het is uiteindelijk niet gelukt om aan Schrödingers materiegolven een concrete fysische betekenis te geven. De enige interpretatie die overbleef was dat je er de kans mee uit kunt rekenen, waarbij je een deeltje ergens zult aantreffen. De Schrödinger golf wordt daarom ook wel een waarschijnlijkheidsgolf genoemd. Een 'baan' van Bohr moeten we daarom vervangen door een waarschijnlijkheidswolk.

Heisenberg pakte het beschrijven van wat er in een atoom gebeurt heel anders aan. Hij zei dat het enige wat je waarneemt spectraallijnen met bepaalde intensiteiten zijn.

Die lijnen hangen samen met veranderingen in de energietoestand binnen een atoom. Voor sommige veranderingen is de kans groot, voor anderen klein. Heisenberg heeft al deze waarnemingen omgezet in wiskundige vorm. Dit geheel wordt de matrixmechanica genoemd.

Golfmechanica en matrixmechanica gaven beide een beschrijving van de processen in een atoom. De golfmechanica is wat beter voor te stellen. Na enige tijd heeft Schrödinger aangetoond dat de beide mechanica's wiskundig gelijk zijn. Sindsdien spreekt men van de kwantummechanica.

Het complementariteitsbeginsel



Afbeelding 53 – Werner Heisenberg

Heisenberg, Bohr en later anderen hebben de onzekerheidsrelatie en verklaringen uitgewerkt in de Kopenhaagse interpretatie van de kwantummechanica. Hierin speelt de waarnemer een belangrijke rol. Hierin gaan het golfmodel en het deeltjes model hand in hand. Oftewel het golf en het deeltjes model zijn complementair. Hierin wordt gezegd dat het niet mogelijk is om de het golf karakter en het deeltjes karakter van elektromagnetische straling tegelijk in één experiment waar te nemen. Zij achtten het niet zeker dat een elektron bestaat tussen twee metingen. Einstein vatte het zo samen: het is net alsof de maan er niet is als je niet kijkt.

Tegen deze opvattingen hebben Planck, Einstein, Schrödinger en de Broglie zich dan ook altijd verzet. Volgens hen moesten elektronen en andere deeltjes toch op een manier reëel zijn. Bohr en Heisenberg wezen er daarentegen met nadruk op dat de problemen voortkomen uit de taal die wij gebruiken. Omdat we woorden uit het dagelijks leven gebruiken om kwantummechanische processen te

omschrijven, zoals plaats en impuls. Zij zeggen dat er voor kwantumverschijnselen geen analogieën zijn in de ons bekende wereld. In 1935 lanceerde Einstein met Rosen en Podolsky zijn laatste aanval op de Kopenhaagse interpretatie. Zij verzonnen een gedachtenexperiment, het EPR experiment om de onzekerheidsrelatie te slim af te zijn. Ze wilden aantonen dat deeltjes hun eigenschappen, zoals plaats en impuls, al hebben en dat ze die niet pas tijdens het meten krijgen. Wat het experiment inhoud zal niet besproken worden, maar het experiment werd in 1972 uitgevoerd. Daarbij bleek dat Einstein ongelijk had.^{lxii} In afbeelding 53 is een Einstein te zien in zijn latere jaren, hier is hij van actieve deelnemer in de race der natuurkunde, veranderd in een kritische waarnemer langs de kantlijn. Volgens een experiment uit 1998 staan deeltjes in een soort telepathisch contact met elkaar, waardoor ze sneller dan het licht informatie uitwisselen.^{lxiii}



Afbeelding 53 - Einstein in zijn latere jaren

H4.5 Alle materie

Het golfkarakter van elektronen is nu duidelijk bewezen, hier wordt veel onderzoek naar gedaan. Maar elektronen zijn natuurlijk niet alle materie, er is meer aanwezig in een atoom. Veruit het grootste deel van de massa van alle materie staat op de naam van protonen en neutronen. Maar gedragen deze zich ook als golven? De formule van de Broglie om de golflengte van een materie golf te voorspellen bevat de term massa, m . Er staat niet bijgeschreven dat deze massa van een elektron zou moeten zijn, ook staat er niets in over een lading, dus zou een neutraal deeltje ook moeten kunnen golven. Dus deze formule impliceert dat alle materie golft.

Voorheen gezien als een onmogelijk idee, maar na het bewijs dat deze formule klopt voor elektronen is er geen reden om aan te nemen dat deze niet geldt voor andere deeltjes. Er is echter een groot obstakel, de massa van protonen en neutronen is ongeveer 1836 keer zo groot als dat van elektronen. Aangezien de formule van de Broglie stelt dat de grootte van de golflengte omgekeerd evenredig is met de massa, is de golflengte van protonen en neutronen zo klein, dat deze bijna onmogelijk te meten is.

De Schrödinger vergelijking beschrijft materiegolven, deze wordt zeer vaak gebruikt voor elektronen. Met behulp van de oplossingen van deze vergelijking voor elektronen, zijn er vele experimenteel waarneembare verschijnselen verklaard en voorspeld. De processen rond de bindingen in moleculen, en hoe zij tot stand komen tijdens

chemische reacties.^{lxiv}

De vergelijking gaat in principe over een elektron dat om een proton draait, zoals de aarde om de zon draait. Maar men kan het ook andersom zien en opschrijven, een proton dat om een elektron draait. Alleen het gezichtspunt hoeft hiervoor om te draaien naar het elektron, dus wordt ervan af het elektron gekeken. Dit is minder vreemd dan het klinkt, het is net als dat er vanaf de aarde naar de zon wordt gekeken, dan lijkt het net of de zon om ons draait, dit is dan ook eeuwenlang geloofd door de mensheid. Wanneer de vergelijking wordt herschreven voor een proton is de vorm van de vergelijking wiskundig gezien identiek, mede doordat de lading van het elektron en het proton beide één elementaire lading is, alleen de massa van het golvende deeltje is 1836 maal groter. Ook in de Schrödingervergelijking is de mate van verspreiding, of de ruimtelijke bezetting van de golf omgekeerd evenredig met de massa waardoor het golfkarakter van een proton zeer slecht is waar te nemen.

Conclusie

Na veel onderzoek gedaan te hebben, is het duidelijk geworden dat het antwoord op elke deelvraag, voor zover het menselijk voorstellingsvermogen gaat, ja is.

Uit de experimenten en veronderstellingen van Dalton, Thomson, Rutherford en anderen is duidelijk geworden dat de materie om ons heen opgebouwd is uit kleine fragmenten, met een meetbare massa. We kunnen met zekerheid zeggen dat materie inderdaad bestaat uit deeltjes.

Na veel onenigheid tussen natuurkundigen door de eeuwen heen, heeft het twee spleten experiment van Young duidelijk bewezen dat licht uit golven bestaat.

Maar na de overwinning, en het simpele karakter van de golftheorie, werd de aard van licht toch weer ingewikkelder gevonden dan gedacht. De ontdekkingen van Planck hebben gedeeltelijk tegen zijn wil, de fotonen visie van Einstein in het leven geroepen. De fotonen theorie heeft zeer succesvol het foto-elektrisch effect verklaard. Maar het Compton effect heeft het echte bewijs geleverd voor het deeltjes karakter van licht. De resultaten van dit experiment zijn aan den lijve ervaren. Hierdoor is het nu bekend dat licht uit deeltjes bestaat met een eigen impuls en energie.

Ook voor de materie is gebleken dat alleen één karakter van beschrijven niet voldoende is. De formule die de Broglie heeft opgesteld voor de golflengte van deeltjes, suggereert dat alle materie zich ook als een golf gedraagt. Hoe kleiner de massa van het bekeken stuk materie, hoe groter de golflengte, en dus hoe groter de eenvoudigheid van het verifiëren van het golfkarakter. Elektronen zijn zeer lichte deeltjes, dat elektronen zich inderdaad als golf kunnen gedragen is door middel van een interferentie patroon empirisch aangetoond in dit onderzoek. Verder is het door middel van eigen onderzoek aannemelijk gemaakt dat de formule van de Broglie klopt en is dit in de literatuur bevestigd. Aangezien elektronen voorkomen in alle niet geïoniseerde atomen, is het in ieder geval aangetoond dat alle materie zich gedeeltelijk als een golf kan gedragen. Het golfkarakter van protonen en neutronen is niet aangetoond, maar abstract naar de betreffende formules kijkende, is er geen reden waarom zij niet zouden kunnen golven, maar wel in veel mindere mate.

Wat is nou precies de aard van licht? Uit dit onderzoek blijkt duidelijk dat licht zowel een golfkarakter als een deeltjes karakter heeft. Hoe dat tegelijkertijd voor te stellen is zeer compliceert, in de kwantum wereld verliest zo ongeveer alles zijn vanzelfsprekenlijkheid. Het is niet volkomen duidelijk of licht tegelijk voorkomt als een deeltje en een golf, daar zijn fysici het niet over eens.

Wat is de aard van materie? Materie heeft net als licht zowel een deeltjes karakter als een (gedeeltelijk) golf karakter. Het deeltjes karakter komt duidelijk wat meer naar voren. Hoe men zich deze materie golven moet voorstellen is ook niet geheel en al eenduidig. Veelal

worden ze gezien als waarschijnlijkheidsgolven.

Nawoord

Wij willen graag de tijd nemen een paar mensen te bedanken. Wij willen allereerst de heer Paul Vlaanderen bedanken, de beheerder van de practicum zalen op de UvA. Hij heeft zich voor ons ter beschikking gesteld om de apparatuur bij de experimenten uit te leggen. Maar ook voor zijn hulp bij het verklaren van de resultaten. Ook willen wij mevrouw Tiffany van der Meer bedanken, zij heeft ons vertrouwd met haar UvA studenten pas, waardoor wij de mogelijkheid hadden, boeken te kunnen lenen die diep op de onderwerpen ingaan. Ook wordt de hulp van de heer Mark Molenaar op prijs gesteld, ondanks dat hij niet de profielwerkstuk coordinator is, heeft hij vele male ons zijn tijd gegund. De antwoorden op bepaalde vragen van de heer Slooten, de co-ordinator zijn zeer op prijs gesteld. Ook willen wij de naam van Thomas Bais noemen, hij heeft ons op weg geholpen om uiteindelijk bij de definitieve onderwerpskeuze te komen.

Bronvermelding

De gebruikte afbeeldingen en hun herkomst:

Afbeelding 1: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/John_Dalton_by_Charles_Turner.jpg

Afbeelding 2: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/Daltons_symbols.gif

Afbeelding 3: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3c/Amedeo_Avogadro2.jpg

Afbeelding 4: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Jan_Verkolje_-_Antonie_van_Leeuwenhoek.jpg

Afbeelding 5: http://www.daviddarling.info/images/gas_molecules.gif

Afbeelding 6: Photoshop door Amos Bastian

Afbeelding 7: http://www.daviddarling.info/images/cathode_ray_tube.jpg

Afbeelding 8: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/c/c1/J.J_Thomson.jpg/200px-J.J_Thomson.jpg

Afbeelding 9: http://www.fisme.science.uu.nl/bbp/bestanden/bbp_2L_13-3%20info%20em%20elektron.pdf

Afbeelding 10: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/2f/Millikan.jpg>

Afbeelding 11:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/11/Simplified_scheme_of_Millikan%E2%80%99s_oil-drop_experiment.png

Afbeelding 12:

http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/ff/Plum_pudding_atom.svg/220px-Plum_pudding_atom.svg.png

Afbeelding 13:

http://www.google.nl/imgres?start=71&um=1&hl=nl&safe=off&biw=1745&bih=860&tbn=isch&tbnid=1Q7MuY25GL_NsM:&imgrefurl=http://dictatorsink.com/rutherford-scattering%26page%3D4&docid=xNeroj5HPWBtUM&imgurl=http://www.jirvine.co.uk/Physics_GCSE/Physics_AQA/Physics_2B/rutherford_Scattering.GIF&w=490&h=505&ei=0b5IT-nFlojv8AOv1uGWAQ&zoom=1&iact=hc&vpx=313&vpy=12&dur=615&hovh=180&hovw=175&tx=115&ty=83&sig=110173818912611989030&page=3&tbnh=148&tbnw=144&ndsp=42&ved=1t:429,r:1,s:71

Afbeelding 14: <http://www.kennislink.nl/system/files/000/093/271/small/Atoom.png?1300615444>

Afbeelding 15: <http://www2.ifa.hawaii.edu/newsletters/images/37spectra.jpg>

Afbeelding 16: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/02/Claudius_Ptolemaeus.jpg

Afbeelding 17: http://www.nidokidos.org/userpix/38570_title_pic_1.jpg

Afbeelding 18: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/61/Young_Thomas_Lawrence.jpg

Afbeelding 19: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/interference/doubleslit/doubleslitjavafigure1.jpg>
 Afbeelding 20: http://static.wix.com/media/571a4f54069f63ea5480916a7476d3c5.wix_mp
 Afbeelding 21:
<http://www.google.nl/imgres?um=1&hl=nl&safe=off&sa=N&biw=1745&bih=813&tbn=isch&tbnid=zQgRTKUvDAZ0bM:&imgrefurl=http://members.upc.nl/r.brinksma2/Natuurkundige%2520verdieping.htm&docid=bm2jDpCaJ4h7cM&imgurl=http://members.upc.nl/r.brinksma2/wave.jpg&w=237&h=182&ei=IY9mT436Baqu0QWRp7S2DQ&zoom=1&iact=rc&dur=325&sig=110173818912611989030&page=1&tbnh=144&tbnw=188&start=0&ndsp=28&ved=1t:429,r:7,s:0&tx=112&ty=86>
 Afbeelding 22: <http://www.news.uchicago.edu/releases/07/images/070924.michelson.jpg>
 Afbeelding 23: http://www.sciencephoto.com/image/147139/large/C0084217-Edward_Morley,_US_physicist_and_chemist-SPL.jpg
 Afbeelding 24: <http://www.spaceandmotion.com/Physics-Michelson-Morley.htm>
 Afbeelding 25: <http://www.einstein-relativity.de/01abb5966a07adf06/index.html#01abb5966a07c1c0a>
 Afbeelding 26: http://www.scientiadigital.net/imagestore/HendrikLorentz1_s.jpg
 Afbeelding 27:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/Gustav_Robert_Kirchhoff.jpg/424px-Gustav_Robert_Kirchhoff.jpg
 Afbeelding 28: <http://www.astroblogs.nl/wp-content/uploads/2008/04/planck.jpg>
 Afbeelding 29: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/imgmod2/pelec.gif>
 Afbeelding 30:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/50/Heinrich_Rudolf_Hertz.jpg/518px-Heinrich_Rudolf_Hertz.jpg
 Afbeelding 31: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/Albert_Einstein_Head.jpg
 Afbeelding 32: Gemaakt door Amos Bastian
 Afbeelding 33:
http://www.google.nl/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0CC0QFjAB&url=http%3A%2F%2Ffranelaghalevelphysics.wikispaces.com%2Ffile%2Fview%2FAS_Unit1_Quantum_02_IOP_photoelectric_effect_questions.doc&ei=-Y9mT-qhLuGg0QW6_qyWCA&usq=AFQjCNFyTVxg7JH_Zg6fkxBVB9jZo654eg
 Afbeelding 34: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/Compton-scattering.svg/259px-Compton-scattering.svg.png>
 Afbeelding 35: <http://www.odcc.ca/projects/2007/pete7o2/Background.html>
 Afbeelding 36: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/imgqua/compdat.gif>
 Afbeelding 37: http://sietze.home.fmf.nl/Study/Verslag_Compton.pdf
 Afbeelding 38: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Scintillation_Detector.gif
 Afbeelding 39: http://www.lightandmatter.com/html_books/lm/ch34/figs/ccd-spot.jpg
 Afbeelding 40: http://www.lightandmatter.com/html_books/lm/ch34/figs/attenuation-bullets.png
 Afbeelding 41: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1929/broglie.jpg
 Afbeelding 42: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1d/Wl-bragg.jpg>
 Afbeelding 43: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/83/William_Henry_Bragg_2.jpg
 Afbeelding 44: <http://www.analyticalspectroscopy.net/ap1-4.htm>
 Afbeelding 45:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/9/99/Davisson_and_Germer.jpg/300px-Davisson_and_Germer.jpg
 Afbeelding 46: <http://www.scribd.com/doc/52744948/22/DAVISSON-AND-GERMER-EXPERIMENT>
 Afbeelding 47: <http://www.microscopy.ethz.ch/bragg.htm>
 Afbeelding 48: Gemaakt in Photoshop door Amos
 Afbeelding 49: <http://chem-guide.blogspot.com/2010/04/covalent-solid.html>
 Afbeelding 50: http://dornsife.usc.edu/labs/physicsdemolab/modern_physics/electron_diffraction.cfm
 Afbeelding 51: <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/1f/Schrodinger.jpg/264px-Schrodinger.jpg>
 Afbeelding 52: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/f8/Bundesarchiv_Bild183-R57262,_Werner_Heisenberg.jpg/264px-Bundesarchiv_Bild183-R57262,_Werner_Heisenberg.jpg
 Afbeelding 53: <http://i.imgur.com/kZslr.png>

De gebruikte bronnen voor het samenstellen van de tekst, en het beantwoorden van de deelvragen:

ⁱ <http://www.dipankarhome.com/What%20is%20light.pdf>

ⁱⁱ Andrew G. van Melsen (1952). "From Atomos to Atom." Mineola, N.Y.: Dover Publications. ISBN 0486495841

ⁱⁱⁱ Dalton, John. "On the Absorption of Gases by Water and Other Liquids", in *Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester*. 1803. Retrieved on August 29, 2007.

- iv Johnson, Chris. "Avogadro - his contribution to chemistry". Retrieved 2009-08-01.
- v Alan J. Rocke (1984). *Chemical Atomism in the Nineteenth Century*. Columbus: Ohio State University Press.
- vi Avogadro, Amedeo (1811). "Essay on a Manner of Determining the Relative Masses of the Elementary Molecules of Bodies, and the Proportions in Which They Enter into These Compounds". *Journal de Physique* 73: 58-76.
- vii <http://historiek.kvcv.be/Artikelen/ECHO/Echo09art01.pdf>
- viii Pearson, K. (1905). *The problem of the Random Walk*. Nature, 72, 294.
- ix S. Chandrasekhar, "Stochastic problems in physics and astronomy," *Reviews of Modern Physics* vol. 15, pp. 1-89 (1943).
- x A. Einstein, *Investigations of the Theory of Brownian Movement*(Dover, 1956).
- xi "Electricity and Matter" (Yale University Press, New Haven, 1904), pp 80-83
- xii "Electricity and Matter" (Yale University Press, New Haven, 1904), pp 80-83
- xiii Zeit. Phys. Chem. 9 (1888) 613.
- xiv J. Leveugle, *La Relativite', Poincaré' et Einstein*, Planck, Hilbert (L'Harmattan, Paris, 2004) p. 181
- xv P. Clark 1976, p. 97
- xvi <http://web.lemoyne.edu/~giunta/ea/THOMSONann.HTML#foot10>
- xvii http://www-outreach.phy.cam.ac.uk/camphy/electron/electron1_1.htm
- xviii Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 29, 30
- xix <http://web.lemoyne.edu/~giunta/ea/THOMSONann.HTML#foot10>
- xx http://www.wereldgeheimen.nl/kooi_van_faraday.htm
- xxi <http://web.lemoyne.edu/~giunta/ea/THOMSONann.HTML#foot10>
- xxii Voor het geheel van H1.3: Kenneth W. Ford, "The Quantum World - Quantum Physics for Everyone" (Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2004), pp 30-31
- xxiii <http://www.drake.edu/artsci/physics/eovermexperiment.pdf>
- xxiv Van quantum tot quark, inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes; Prof. Dr H.B.G. Casimir, en anderen; 1989; 2^e druk; Stichting Teleac, Utrecht; ISBN: 90-6533-184-0; blz. 40
- xxv Quantum mechanics; McMurry, Sara M; 1993; 2^e druk; Addison-Wesley Publishers Company Inc. Wokingham, England; ISBN 0-20154439-3; Blz: 11
- xxvi Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 56
- xxvii <http://www.thuisexperimenteren.nl/science/archimedes/archimedes.htm>
- xxviii <http://www.havovwo.nl/vwo/vna/bestanden/vnawipws2.pdf>
- xxix http://books.google.nl/books?id=Nv5GAyAdiJoC&pg=PA721&lpg=PA721&dq=1.592%E2%88%9910+-19+millikan+oil+drop&source=bl&ots=212v0Rrgqx&sig=90ZoZSR31tSU_qwHh-0p4TxVliM&hl=nl&sa=X&ei=6nVmT8WAGKe80QW7p-GvCA&sqi=2&ved=0CCEQ6AEwAA#v=onepage&q=1.592%E2%88%9910%20-19%20millikan%20oil%20drop&f=false, Blz. 721
- xxx Van quantum tot quark, inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes; Prof. Dr H.B.G. Casimir, en anderen; 1989; 2^e druk; Stichting Teleac, Utrecht; ISBN: 90-6533-184-0; blz. 76
- xxxi Van quantum tot quark, inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes; Prof. Dr H.B.G. Casimir, en anderen; 1989; 2^e druk; Stichting Teleac, Utrecht; ISBN: 90-6533-184-0; blz. 76
- xxxii Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 61
- xxxiii Quantum mechanics; McMurry, Sara M; 1993; 2^e druk; Addison-Wesley Publishers Company Inc. Wokingham, England; ISBN 0-20154439-3; Blz: 33
- xxxiv Van quantum tot quark, inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes; Prof. Dr H.B.G. Casimir, en anderen; 1989; 2^e druk; Stichting Teleac, Utrecht; ISBN: 90-6533-184-0; blz. 78,79,80
- xxxv <http://www.math.ru.nl/~landsman/Huygens2.pdf>
- xxxvi <http://www.howstuffworks.com/light1.htm>
- xxxvii Voor het geheel van 2.2: <http://www.math.ru.nl/~landsman/Huygens2.pdf>
- xxxviii Voor het geheel van 2.3: <http://micro.magnet.fsu.edu/primer/java/interference/doubleslit/>
- xxxix Van quantum tot quark, inleiding tot de quantummechanica: golven en deeltjes; Prof. Dr H.B.G. Casimir, en anderen; 1989; 2^e druk; Stichting Teleac, Utrecht; ISBN: 90-6533-184-0; blz. 45, 49
- xl Voor het geheel van "De ether" en "Het experiment van Michelson": Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 14,15
- xli <http://www.thermovista.nl/natuurkunde>
- xlii Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 18,19
- xliii <http://www.nobeliefs.com/photon.htm>
- xliiv <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/disbe.html>

-
- ^{xliv} Voor geheel van "de formule van Planck" en "De zoektocht naar de juiste formule": Quantum mechanics; McMurry, Sara M; 1993; 2^e druk; Addison-Wesley Publishers Company Inc. Wokingham, England; ISBN 0-20154439-3; Blz: 26,27,28,29
- ^{xlvi} Voor het geheel van 3.3 "Het foto-elektrisch effect" en "De ontdekking door Hertz":
http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html
- ^{xlvii} Voor het geheel van "Einstein en zijn formule": Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 55, 56
- ^{xlviiii} Quantum mechanics; McMurry, Sara M; 1993; 2^e druk; Addison-Wesley Publishers Company Inc. Wokingham, England; ISBN 0-20154439-3; Blz: 35,36
- ^{xlivx} Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 43
- ^l Voor het geheel van "H3.5 Het Compton effect" met uitzondering van het "uitgevoerde experiment"
http://www.kutl.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld1_E/Part3_E/P37_E/Compton_effect_E.htm en
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/quantum/compeq.html#c1>
- ^{li} http://www.stanford.edu/dept/EHS/prod/researchlab/radlaser/manual/rad_safety_manual.pdf
- ^{lii} http://en.wikibooks.org/wiki/Basic_Physics_of_Nuclear_Medicine/Scintillation_Detectors
- ^{liiii} http://stuff.mit.edu/afs/athena/course/22/22.09/lab_writeups/Compton.pdf
- ^{liv} Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 24
- ^{lv} Voor het geheel van "Nu is alles makkelijker": http://www.lightandmatter.com/html_books/lm/ch34/ch34.html
- ^{lvi} Voor het geheel van "De gebroeders de Broglie": William H. Cropper, "Great Physicists – The life and times of leading physicists from Galileo to Hawking", pp 276-277
- ^{lvii} Voor het geheel van "De contributie van de Broglie": William H. Cropper, "Great Physicists – The life and times of leading physicists from Galileo to Hawking", pp 276-277
- ^{lviii} <http://www.scribd.com/doc/52744948/22/DAVISSON-AND-GERMER-EXPERIMENT>
- ^{lix} <http://www.eserc.stonybrook.edu/projectjava/bragg/>
- ^{lx} <http://www.scribd.com/doc/52744948/22/DAVISSON-AND-GERMER-EXPERIMENT>
- ^{lxi} <http://www.a3bs.com/product-manual/U18571.pdf>
- ^{lxii} Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 105
- ^{lxiii} Voor het geheel van "H4.4 Kwantummechanica": Einstein, kwanten en relativiteit: revolutie in de natuurkunde; Oorspronkelijk door Bergia, Silvo geschreven in het ilatliaans, vertaald naar het nederlands door: Van der Veen, Robert; 2002; 1^e druk; Natuur & Techniek, Amsterdam; ISBN: 90 76988 03 X; blz: 101 tot 104
- ^{lxiv} Quantum mechanics; McMurry, Sara M; 1993; 2^e druk; Addison-Wesley Publishers Company Inc. Wokingham, England; ISBN 0-20154439-3; Blz: 120,121
-

Bijlagen

Bijlage 1.

De Tabel met daarin de meetgegevens van het uitgevoerde experiment, het Compton effect.

De verstrooiingshoek in graden	De voorspelde energie in keV	De gemeten energie in keV	De afwijking in %
0	662.0	662.0	0,00
15	634.0	665.2	4.92
30	564.1	605.3	7.30
45	479.9	489.5	2.00
60	401.8	413.2	2.84
75	337.7	342.7	1.48
90	288.4	295.2	2.36
105	251.6	259.8	3.26
120	224.9	233.5	3.82

Tabel 1 - De verstrooiingshoek in graden in relatie tot de energie van inkomende fotonen, voorspeld door de formule van Compton, en de gemeten waarden. Ook is de afwijking van de gemeten waarde ten opzichte van de voorspelde waarde weergegeven.

Bijlage 2.

De versnelspanning in Volt	λ voorspeld, in meters	λ m.b.v. cirkel 1	Afwijking in % omhoog voor cirkel 1	λ m.b.v. cirkel 2	Afwijking in % omhoog voor cirkel 2
2000	2.742E-11	3.103E-11	13.16	2.765E-11	0.839
2500	2.453E-11	2.713E-11	10.59	2.476E-11	0.938
3000	2.239E-11	2.503E-11	11.79	2.424E-11	8.262
3500	2.073E-11	2.33E-11	12.39	2.295E-11	10.70
4000	1.939E-11	2.171E-11	11.96	2.107E-11	8.664
4500	1.828E-11	2.086E-11	14.11	2.016E-11	10.28

Tabel 2. De versnelspanning U_v in relatie tot de voorspelde golflengte en de golflengtes berekend uit de meetwaarden.

De gemiddelde afwijking van de golflengte die voorspeld is door de formule van de Broglie was bij de metingen aan cirkel 1: 12,3%. Bij de metingen aan cirkel 2 was dit: 6,62%

Bijlage 3. Het logboek

Wie?	Tijdsduur (uur)	Datum	Waar?	Activiteit
Amos/Alex	2	01/12/11	Huis Amos	Plan van aanpak gemaakt
Amos	1	05/12/11	Huis Amos	Extra bronnen gezocht voor deelvraag 1 op het internet
Amos	1,5	06/12/11	Huis Amos	Deelvraag 1 ingedeeld in bepaalde onderwerpen, informatie en bronnen gezocht over gekozen onderwerpen
Alex	3	08/12/11	Huis Alex	Stukken 'Atomen', 'Het Elektron' en 'Thomson en het elektron' gemaakt
Alex	4	09/12/11	Huis Alex	Stuk 'Het olie druppel experiment van Millikan' gemaakt
Amos	0,75	11/12/11	Huis Amos	Stuk 'Atoommodel' gemaakt
Amos/Alex	2,5	12/12/11	Huis Amos	Deelvraag 2 ingedeeld in onderwerpen en extra bronnen gezocht over deelvraag 2
Amos	4	14/12/11	Huis Amos	Stukken 'Lichtdiscussie in de Oudheid', en 'Thomas Young's experiment' gemaakt
Alex	2	15/12/11	Huis Alex	Stukken 'Maxwell', en 'De ether' gemaakt
Amos	4	17/12/11	Huis Amos	Stuk 'Het experiment van Michelson' gemaakt
Alex	0,75	17/12/11	Huis Alex	Stuk 'Ether vervolg' gemaakt
Amos/Alex	9	19/12/11	Amsterdam	Naar Openbare Bibliotheek Amsterdam en Bibliotheek UvA, Science Park, om boeken te halen
Amos/Alex	3	20/12/11	Huis Amos	Bruikbare delen van boeken uit OBA en Science Park opgezocht en genoteerd
Amos/Alex	2,5	21/12/11	Huis Amos	Deelvraag 3 ingedeeld in onderwerpen en extra bronnen gezocht over deelvraag 3
Alex	2	21/12/11	Huis Alex	Stukken 'Een ontoereikend begrip', 'Zwarte stralers', en 'Kirchhoff en zijn zwarte lichamen' gemaakt
Alex	10	22,23,24/12/11	Huis Alex	Boeken geanalyseerd en informatie in word ingetypt.
Amos	2	21/12/11	Huis Amos	Stukken 'Het foto-elektrisch effect' en 'De ontdekking door Hertz' gemaakt
Alex	5	22/12/11	Huis Alex	Stukken 'Een zwart lichaam in de praktijk', 'De zoektocht naar de juiste formule' en 'Planck zijn ongemakkelijke aanname' gemaakt
Amos/Alex	4	23/12/11	Huis Amos	Stuk 'De formule van Planck' gemaakt
Alex	2	26/12/11	Huis Alex	Stukken 'De achtergrond straling' en 'Einstein en zijn formule' gemaakt
Alex	0,75	27/12/11	Huis Alex	Stuk 'Weinig gehoor' gemaakt
Amos	3	27/12/11	Huis Amos	Stukken 'Bohr en de energie niveau's van atomen' en 'Bohr wil het niet geloven' gemaakt
Alex	5	28/12/11	Huis Alex	Stukken 'De proef van Millikan' en 'Het Compton effect' gemaakt
Amos	2	28/12/11	Huis Amos	Stuk 'Nu is alles makkelijker' gemaakt
Amos/Alex	2	03/01/12	Huis Amos	Deelvraag 4 ingedeeld in onderwerpen en extra bronnen gezocht over deelvraag 4
Amos	6	03/01/12	Huis Amos	Stukken 'De Gebroeders de Broglie' en 'De contributie van de Broglie' gemaakt
Alex	3	03/01/12	Huis Alex	Stukken 'Interferentie met elektronen' en 'Kwantummechanica' gemaakt
Alex	1,5	04/01/12	Huis Alex	Stuk 'Het complementariteits beginsel' gemaakt
Amos/Alex	4	06/01/12	Huis Amos	Alle stukken bij elkaar gebracht en er een geheel van gemaakt, plaatjes toegevoegd, inhoudsopgave gemaakt etc.
Amos	2,5	11/02/12	Huis Amos	Stuk 'Opvattingen in de 17 ^e eeuw' gemaakt
Alex	8	14,15,16/02/12	Huis Alex	Veel van de aanmerkingen op de nulversie verwerkt.
Alex	8	18/02/12	Huis Alex	Zeer veel veranderen en nieuwe informatie zoeken.
Amos	3	22/02/12	Huis Amos	Stuk 'Het Elektron' gemaakt

Amos	3	27/02/12	Huis Amos	Stuk 'Atoommodel' gemaakt
Amos/Alex	2	2/03/12	Huis Amos	Theorie bij het Compton effect en Elektronen diffractie zoeken.
Alex	8	04/03/12	Huis Alex	De praktische theorie bij de experimenten opzoeken en begrijpen. En stukjes uitgebreid en gewijzigd.
Amos	4	04/03/12	Huis Amos	Praktische theorie bij de experimenten bestudeerd. En stukjes gewijzigd.
Amos/Alex	10	05/03/12	Amsterdam, UvA	Uitvoeren 'Elektronen diffractie experiment' en 'Compton experiment'
Alex	5	6/03/12	Huis Alex	Beschrijven van het experiment door Compton zelf en de omliggende theorie.
Alex	3	7/03/12	Huis Alex	De omliggende theorie van het Compton effect intypen.
Alex	4	8/03/12	Huis Alex	De resultaten van het Compton effect in Excel verwerken, afwijking percentages uitrekenen.
Alex	2	9/03/12	Huis Alex	De stukken rond het Compton effect afronden.
Amos	5	09/03/12	Huis Amos	Stukken 'Brownse beweging', 'Random walk', en 'Kinetische gastheorie' gemaakt
Amos	5	11/03/12	Huis Amos	Stukken 'Het eerste deel van Einstein zijn theorie' en 'Het tweede deel van Einstein zijn theorie' gemaakt
Alex	8	11/03/12	Huis Alex	Elektronen diffractie, experimentele gegevens verwerkt, en ingevoerd in Excel, stukjes geschreven rond de elektronen diffractie.
Amos	4	12/03/12	Huis Amos	Stuk 'Atomen' verbeterd en geheel veranderd en stuk 'Niet geheel correct' gemaakt
Amos	3	13/03/12	Huis Amos	Stuk 'Bohr zijn benadering' gemaakt
Amos	4	14/03/12	Huis Amos	Gezocht naar bewijs dat neutronen en protonen ook golven, bepaalde stukken veranderd en verbeterd
Alex	2	14/03/12	Huis Alex	Half uur gezocht naar protonen en neutronen, grafieken aangepast en vervangen, wijzigingen aangebracht.
Alex	6	15/03/12	Huis Alex	De ontdekking van het elektron beschreven en onderzocht. Afbeeldingen gezocht.
Amos	4	16/03/12	Huis Amos	Stuk 'Bohr zijn benadering' veranderd, delen van de stukken 'Het eerste deel van Einstein zijn theorie' en 'Het tweede deel van Einstein zijn theorie' die wij niet begrepen weggehaald
Amos	2,5	17/03/12	Huis Amos	Extra afbeeldingen toegevoegd om bepaalde stukken duidelijker te maken, kleine dingen veranderd aan het stuk 'Atoommodel'
Amos	4	Doorlopend	Huis Amos	Photoshopen bepaalde afbeeldingen
Amos/Alex	9	18/03/12	Huis Amos	Alles verbeterd, afbeeldingen genummerd, bronnenlijst gemaakt, en ingevuld in het bestand, spellingsfouten gecorrigeerd, voorblad gemaakt etc.
Alex	14	18/03/12	Huis Alex	Conclusie geschreven, Bohr atoom model aangepast, extra informatie gezocht, het stukje 'alle materie' geschreven. Extra afbeeldingen gezocht, plaatjes voorblad, Rutherford atoommodel beschreven, wijzigingen aangebracht in alle hoofdstukken. Bronnen ingevoegd en genummerd.

Bijlage 4.

Hier volgen de grafieken die door het computer programma gemaakt zijn, bij het meten aan het Compton effect.