

Quantumfysica (1): Het foto-elektrisch effect

Dit is het eerste artikel uit het dossier Quantumfysica. Een korte beschrijving van de inhoud van dit dossier vind je in het [overzichtsartikel](#).

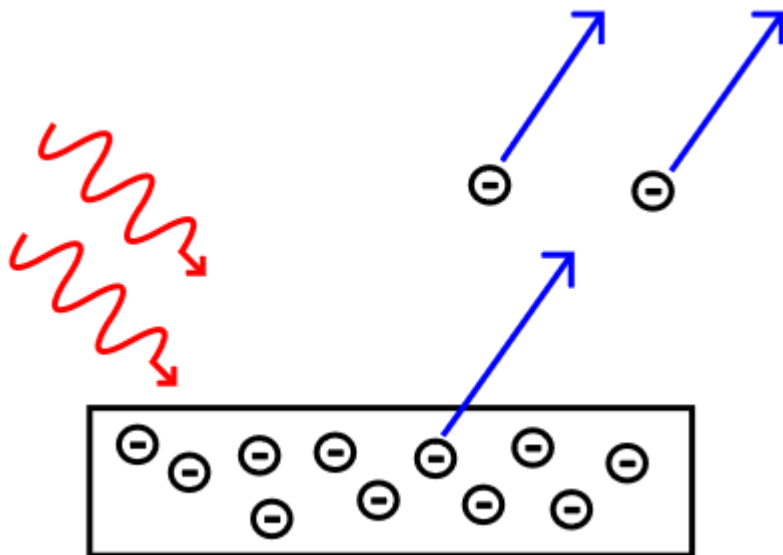
Natuurkundige theorieën zijn altijd gebaseerd op experimenten. Dat geldt ook voor de quantumtheorie. Aan het eind van de 19e en het begin van de 20e eeuw namen natuurkundigen in hun experimenten allerlei verschijnselen waar die niet goed met de klassieke theorieën te beschrijven waren. Uit hun pogingen om die theorieën aan te passen, ontstond uiteindelijk de quantummechanica.

We zullen in dit dossier geen volledige historische beschrijving geven van het ontstaan van de quantummechanica, maar we beginnen onze reis naar het allerkleinste wel met het bespreken van twee experimentele resultaten die een doorslaggevende rol hebben gespeeld in die geschiedenis. In het artikel dat volgende week verschijnt, zullen we het hebben over de straling van zwarte stralers. In dit artikel bespreken we het zogeheten foto-elektrisch effect.



Afbeelding 1. Heinrich Hertz. Foto: Robert Krewaldt.

Al in 1887 ontdekte Heinrich Hertz - de Duitse natuurkundige naar wie ook de eenheid van frequentie is genoemd - dat licht kan helpen bij het losmaken van elektronen uit een metaal. Hij was aan het experimenteren met elektroden waartussen vonken overspringen. Om die vonken beter te kunnen zien, plaatste hij de opstelling in een donkere doos. Het viel hem op dat de opstelling in de doos *kleinere* vonken produceerde dan buiten de doos. Wat verder experimenteren met het tegenhouden van verschillende soorten licht, leerde hem dat het vooral het ultraviolette licht was dat het vormen van vonken (en dus: het losmaken van elektronen uit de elektroden) vergemakkelijkte. Het door Hertz ontdekte effect werd het foto-elektrisch effect genoemd.

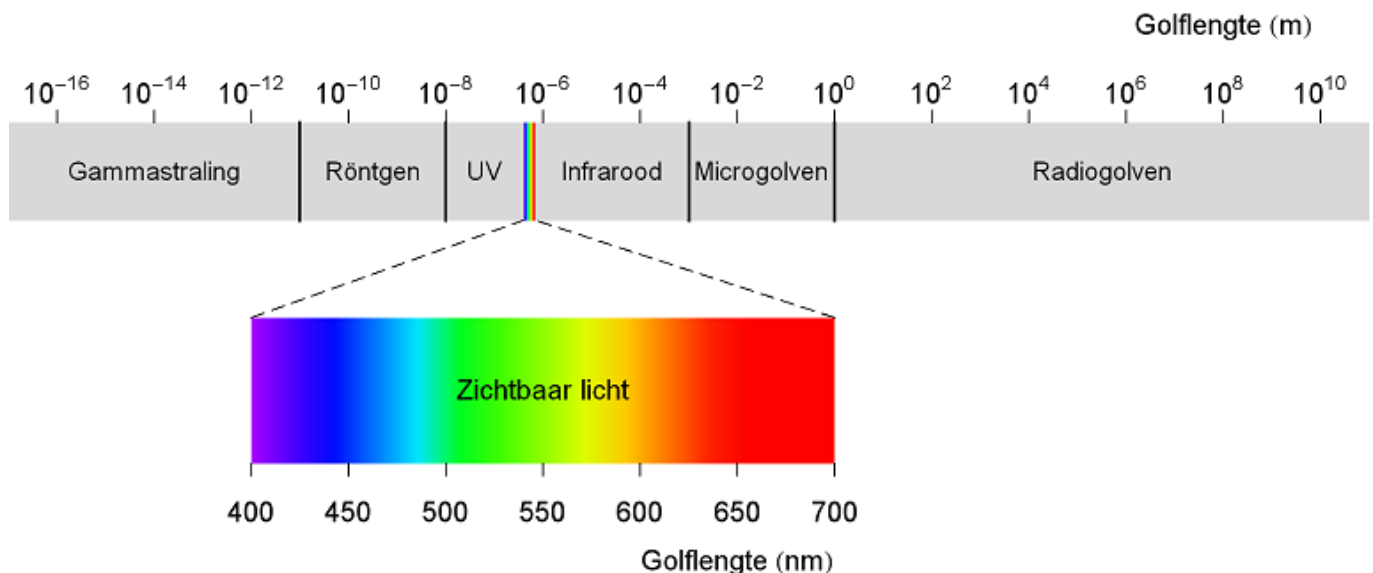


Afbeelding 2. Het foto-elektrisch effect. Licht valt op een metalen voorwerp, en draagt energie over aan de elektronen in het metaal. De elektronen kunnen daardoor uit het metaal ontsnappen. Afbeelding: Wikipedia-gebruiker Wolfmankurd.

Hertz zag zijn ontdekking vooral als een bevestiging van de theorie van het elektromagnetisme die eerder door James Clerk Maxwell was opgesteld. Maxwell had voorspeld dat elektrische en magnetische krachten worden overgebracht door een elektromagnetisch veld, en dat licht niets anders is dan een golf in dit elektromagnetische veld. Uit de experimenten van Hertz bleek nu dat het licht inderdaad in staat is om energie over te dragen aan elektrisch geladen deeltjes - elektronen. Het leek er dus op dat de onzichtbare elektromagnetische golven van Maxwell inderdaad bestaan.

Bij het verder experimenteren met het foto-elektrisch effect viel echter iets vreemds op. Het zou voor de hand liggen dat de grootte van het foto-elektrisch effect met name afhangt van de hoeveelheid energie die de elektromagnetische golf met zich meedraagt. Hoe meer energie, hoe makkelijker de elektronen uit het metaal losgemaakt worden. Met andere woorden: het zou te verwachten zijn dat de grootte van het foto-elektrisch effect vooral afhangt van de *intensiteit* van het licht. Dat bleek tot op zekere hoogte ook het geval, maar vreemd genoeg bleek bij bepaalde kleuren licht het foto-elektrisch effect *helemaal niet* op te treden – zelfs niet als licht van die kleur met een enorme intensiteit op de elektroden werd geschonden. Hertz' oorspronkelijke experiment was daar al een voorbeeld van: het was in zijn opstelling met name het ultraviolette licht dat het foto-elektrisch effect veroorzaakte. Hoe was het mogelijk dat bepaalde kleuren licht wél elektronen uit een metaal konden losmaken, en andere kleuren niet?

De kleur van licht is een maat voor de golflengte: lichtgolven die wij als rood zien, hebben een langere golflengte dan lichtgolven die wij als blauw zien. Iets preciezer: rood licht heeft een golflengte van ongeveer 700 nanometer (een nanometer is een miljoenste millimeter) en blauw licht van iets minder dan 500 nanometer. De andere kleuren van de regenboog hebben een golflengte die daar tussenin zit, en er zijn ook allerlei soorten licht met kortere (“ultraviolet”) en langere (“infrarood”) golflengtes die wij met onze ogen niet kunnen zien.



Afbeelding 3. De golflengtes van het licht. Licht komt voor in allerlei verschillende golflengtes. Zichtbaar licht

heeft golflengtes van grofweg 400 tot 700 nanometer.

De golflengte van het licht is echter niet de enige eigenschap die verandert als de kleur verandert. Lichtgolven bewegen namelijk altijd met een vaste snelheid van zo'n 300.000 kilometer per seconde – zie het [dossier over relativiteitstheorie](#) voor veel meer informatie over de fascinerende lichtsnelheid. Terwijl het licht op-en-neergolft beweegt het dus ook met een enorme snelheid vooruit. Om kortere golflengte te hebben zal het licht daarom veel sneller moeten trillen – het moet immers op-en-neergegaan zijn voordat de golf een bepaalde korte afstand heeft afgelegd. Kortom: licht met kortere golflengte heeft een hogere *frequentie* dan licht met een lange golflengte. Rood licht trilt ongeveer 4×10^{14} maal per seconde, en blauw licht ongeveer 6×10^{14} maal – anderhalf keer zo vaak. (Zie het artikel over [machten en logaritmes](#) voor een uitleg van de notatie.) In de eenheid die naar Hertz vernoemd is: rood licht heeft een frequentie van ongeveer 4×10^{14} Hz, en blauw licht van ongeveer 6×10^{14} Hz.



Afbeelding 4. Golflengte en frequentie. Om met dezelfde snelheid te kunnen bewegen moet licht met een kortere golflengte sneller trillen. De blauwe golf heeft een golflengte die drie keer zo kort is als die van de

rode golf, en een frequentie die drie keer zo hoog is.

Het leek er dus op dat het foto-elektrisch effect alleen plaatsvindt als het licht een golflengte heeft die kort genoeg is, of anders gezegd: als het een frequentie heeft die hoog genoeg is. Hoe kon dat verklaard worden? Het was uiteindelijk de beroemde Albert Einstein die in 1905 een verklaring voorstelde. Einstein nam aan dat het licht zich *niet* voortplantte in continue golven, zoals golven dat op het water doen, maar dat de energie van het licht verdeeld was in kleine pakketjes. Die pakketjes – of: *quanta* – zouden elk een klein beetje energie met zich meedragen, en de hoeveelheid energie die in een pakketje past zou recht evenredig zijn met de frequentie.

Einstein was daarmee overigens niet de eerste die energie opdeelde in quanta. We zullen in het volgende artikel zien dat ook de Duitse fysicus Max Planck dat een aantal jaar eerder al gedaan had, toen hij de straling van zwarte stralers beschreef. Einstein was echter wel de eerste die de pakketjes ook letterlijk interpreteerde als “lichtdeeltjes”, en dus aannam dat licht zich niet als golf voortplantte, maar als een stroom van deeltjes. Dat beeld maakte het voor hem mogelijk om het foto-elektrisch effect te begrijpen. Als licht voorkomt in deeltjes kunnen we de aankomst van één enkel deeltje bij een elektron immers zien als een klein “tikje” tegen het elektron. Zo’n tikje moet hard genoeg zijn om het elektron uit het metaal los te maken – is het dat niet, dan blijft het elektron gewoon in het metaal zitten. Ook een volgende poging om het elektron met een even groot “tikje” los te maken, zal dan niets helpen. Met andere woorden: als de *frequentie* van het licht te laag is om met één enkel lichtquantum een elektron los te maken, kunnen we de *intensiteit* zo hoog maken als we willen, maar zal er toch niets gebeuren.

Het idee van Einstein werkte prachtig – niet alleen op het beschrijvende niveau dat we hierboven hebben gebruikt, maar ook als het gebruikt werd om daadwerkelijk aan experimenten te rekenen en voorspellingen te doen. Het was dan ook uiteindelijk dit idee – en niet dat van de relativiteitstheorie! – waarvoor Einstein in 1921 de Nobelprijs kreeg.

Het idee dat licht in quanta voorkomt, roept natuurlijk direct allerlei vragen op. Had Maxwell het dan fout gehad, en is licht dan geen golf? Maar als dat het geval is, hoe kunnen we dan überhaupt van golflengte en trillingsfrequentie spreken? Is het niet zo dat licht óók allerlei golfverschijnselen vertoont? Het zou nog zo’n 20 jaar duren voordat deze vragen enigszins

bevredigend beantwoord konden worden. Voordat we daarop ingaan, gaan we in het volgende artikel echter eerst nog een stapje terug in de tijd, en bespreken we de straling van zwarte stralers. Aan de hand van die straling, en de ideeën die Max Planck daarover had, kunnen we de mysterieuze lichtquanta nog iets beter begrijpen.

Dit is het eerste artikel uit het dossier Quantumfysica. In het [tweede artikel](#) hebben we het over de straling van zwarte stralers.