

# De geschiedenis van het foto-elektrisch effect

## Een kans voor het onderwijs

In 1905 verklaarde Einstein het foto-elektrisch effect, maar het duurde nog twintig jaar voordat de grote fysici quantisatie van EM-straling accepteerden. Zelfs Bohr publiceerde in 1924 nog een alternatief tegen quantisatie van straling en ook Einsteins Nobelprijs in 1922 was voor de ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect en **niet** voor het idee van lichtquanta. Het foto-elektrisch effect biedt dus een prachtige gelegenheid voor geschiedenis van ideeën, een kans die volgens een onderzoek aan 100 internationale natuurkundeboeken niet wordt gebruikt.

De golf-versus-deeltje-vraag met betrekking tot licht was al opgekomen in de 17<sup>de</sup> eeuw. Huygens legde breking uit met een golfmodel en Newton met een deeltjesmodel. Rond 1800 introduceerde Young het dubbelspleetexperiment dat sterk bewijsmateriaal leverde voor het golfmodel. Fresnel volgde met diverse interferentie-experimenten. De lichtdeeltjesvolgers van Newton waren nog niet overtuigd, maar latere experimenten met polarisatie en het meten van de lichtsnelheid in water door

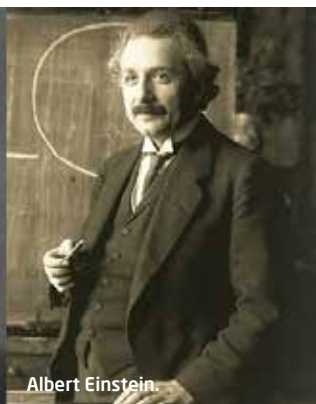
Fizeau en Foucault rond 1850 leverden nog meer bewijsmateriaal voor de golftheorie van licht (Holton & Brush, 2001, p. 347-350). Uiteindelijk legde Maxwell rond 1860 met zijn wetten een solide basis voor een theorie van elektromagnetische golven, inclusief zichtbaar licht. Bij golven is energie gespreid over de ruimte, bij conventionele deeltjes is energie scherp gelokaliseerd in die deeltjes. In 1887 bestudeerde Hertz EM-golven (Pais, 1982, p. 379). Een bijverschijnsel in experimenten leidde tot een serie proeven waaruit

hij concludeerde dat uv-licht een ontlading beïnvloedde. Hallwachs toonde aan dat een neutraal metaaloppervlak door uv-licht positief geladen raakte. Volgens Thomson (1899) kon dat komen door ontsnapping van elektronen. In 1902 kon Lenard de lichtintensiteit variëren met een factor 1000 en vond dat de energie van de uitgezonden elektronen helemaal niets met die lichtintensiteit te maken had. Zijn uitleg was dat de EM-straling alleen als trigger/schakelaar functioneert en dat elektronen al een eigen energie/snelheid hebben voordat de schakelaar ze uit het atoom dirigeert (Niaz et al, 2010). Lenard zag ook dat de vrijgekomen elektronen bij een hogere stralingsfrequentie meer kinetische energie hadden, maar kon dit niet verder specificeren. Met die informatie moest Einstein het doen. Bedenk hierbij dat de Rutherford- en Bohratoommodellen pas tien jaar later kwamen.

In 1905 publiceerde Einstein zijn wet van het foto-elektrisch effect (de formule  $E_{kin, elektron} = hf - E_{uitree}$ ) en zijn uitleg met quantisatie van EM-straling als uitvloeisel van een artikel over thermodynamica en stra-



Niels Bohr.



Albert Einstein.



Robert Millikan.

ling. Eerder had Planck al energiepakketjes gebruikt in een uitleg van zwarte straling. Bij Planck waren de quanta nog een wiskundig trucje, bij Einstein kregen de quanta realiteitswaarde, maar dat was zeer controversieel in die tijd. Einstein zelf formuleerde dit heel voorzichtig, hij voegde een deeltjesmodel toe en verwierp het golfmodel niet, blijkt uit Einstein's formulering uit 1905 (geciteerd in *Subtle is the Lord* door Abraham Pais p. 377): *Light quantum hypothesis: Monochromatic radiation of low density (i.e. within the domain of validity of the Wien radiation formula) behaves in thermodynamic respect as if it consists of mutually independent energy quanta of magnitude*

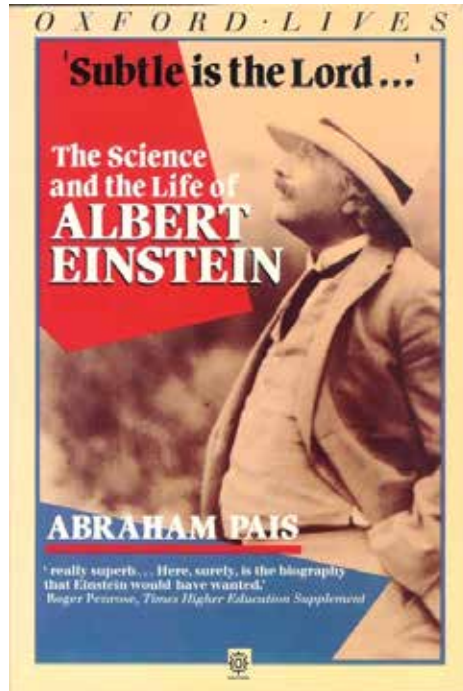
$$R\beta v/N \quad (\beta = h/k, R/N = k, R\beta v/N = h\nu)$$

Na 1905 voerde Einstein meer bewijsmateriaal aan voor zijn lichtquantahypothese, zoals dat bij fotoluminescentie de uitgezonden frequentie niet groter kan zijn dan de geabsorbeerde frequentie en dat in foto-ionisatie de energie van het vrijgekomen elektron niet groter kan zijn dan  $E_{\text{kin, elektron}} = hf - E_{\text{uittree}}$ . Hij voorspelde ook de maximum frequentie van remstraling.

Millikan publiceerde in 1916 het resultaat van tien jaar onderzoek. Hij verifieerde Einstein's formule zeer zorgvuldig en concludeerde (Pais, 1992, p230):

*Einstein's photoelectric equation... appears in every case to predict exactly the observed results... Yet the semi-corpusecular theory by which Einstein arrived at his equation seems at present wholly untenable.*

In 1922 kreeg Einstein de Nobelprijs voor de ontdekking van de wet van het foto-elektrisch effect, NIET voor het veel fundamentele idee van kwantisering en deeltjeseigenschappen van EM-straling. En dan Bohr dus, die publiceerde in 1924, negentien jaar na Einstein's artikel, over het foto-elektrisch effect een *paper* dat suggereert dat energiebehoud *gemiddeld* geldt voor veel deeltjes (hier elektronen) en niet voor reacties van individuele deeltjes. Uitgangspunt was dat Maxwell eens en voor altijd het golfkarakter van straling beschreven had. Op die manier kon hij het foto-elektrisch effect uitleggen zonder energiequanta. Nog in hetzelfde jaar lieten nevelkamer- en coincidentie-experimenten zien dat bij Comptonverstrooiing van



Pais' biografie van Einstein.

Röntgenstraling aan elektronen energie- en impulsbehoud geldt voor individuele deeltjesreacties van Röntgenfotonen en elektronen en dus niet 'gemiddeld'. Dit historisch uiterst interessante verhaal is te vinden in Pais' biografie van Einstein (Pais, 1982) met een update in Pais' biografie van Bohr (1993, p. 233-239) en in Niaz et al (2010). Nadat Compton in 1923 zijn fotonverstrooiingsexperimenten had gepubliceerd, schreef Einstein in het Berliner Tagblad (Pais, p. 41. 4): *There are therefore now two theories of light, both indispensable, and - as one must admit today despite twenty years of tremendous effort on the part of theoretical physicists - without any logical connections.* Kort gezegd, Einstein verwierp het golfmodel niet, maar voegde het deeltjesmodel toe. De naam *foton* werd pas in 1926 voor het eerst gebruikt door Gilbert Lewis en komt dus niet van Einstein.

## Leerboeken

Niaz et al (2010) onderzochten 103 natuurkunde leerboeken gepubliceerd tussen 1950 en 2010 voor gebruik in basisnatuurkunde voor ingenieurs en andere studies. In 84 boe-

ken wordt de historische controversie over Einsteins quantumhypothese niet genoemd. Er was zelfs een boek dat suggereerde dat na Millikan's experimenten Einsteins theorie van het foto-elektrisch effect bevestigd was, nogal in tegenspraak met wat Millikan daar zelf over had geschreven. Van de 103 leerboeken waren er 32 die Millikan's experimenten noemden, maar meestal als experimenten om Einsteins *theorie* te bewijzen in plaats van als toets van zijn *formule* terwijl Millikan de theorie juist afwees. Van de Nederlandse leerboeken vermelden er twee dat lichtquanta pas na 1923 werden geaccepteerd.

Desondanks waren lichtquanta nog best problematisch voor Einstein zelf:

*All these fifty years of conscious brooding have brought me no nearer to the answer to the question, "What are light quanta?" Nowadays every Tom, Dick and Harry thinks he knows it, but he is mistaken.*

(Einstein 1951 in een brief aan Besso, geciteerd in Niaz). En wat een foton nu echt is, daar zijn fysici nog steeds niet uit (Klassen, 2011).

## Conclusies

De geschiedenis van kwantisatie is een fascinerend voorbeeld van begripsontwikkeling in de fysica en dat succesvolle verificatie experimenten niet zo maar leiden tot acceptatie van een theorie. Een prachtig voorbeeld voor het natuurkunde onderwijs dat in Nederlandse quantumhoofdstukken onvoldoende gebruikt wordt. ●

## BRONNEN

- Niaz, M., Klassen, S., McMillan, B., Metz, D. (2010). Reconstruction of the History of the Photoelectric Effect and Its Implications for General Physics Textbooks. *Science Education*, 94(5), 903-931.
- Holton, G., Brush, S.G. (2001). *Physics the Human Adventure: from Copernicus to Einstein and Beyond*. New Brunswick: Rutgers University Press.
- Klassen, S. (2011). The Photoelectric Effect: Reconstructing the Story for the Physics Classroom. *Science & Education*, 20 (7-8), 719-731.
- Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord. The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Oxford University Press.
- Pais, A. (1993). *Niels Bohr's times. In Physics, Philosophy, and Polity*. Oxford: Oxford University Press.