

In het laatste hoofdstuk van het script staat Wassenberg voor een groot dilemma.
Het dilemma betreft de verklaring van twee vergelijkbare experimenten:
De proef van Young: een tralie met 2 spleten; zie Tranche 6, pdf. pag. 196
de proef van Fresnel: een fresnelprisma; zie Tranche 6, pdf. pag. 190.

De proef van Young en de proef van Fresnel zijn twee interferentieproeven. De proeven zijn verschillend ingericht, maar bij de juiste maatvoering zijn de interferentiebeelden identiek.

Beide experimenten kunnen goed beschreven worden met elektromagnetische golven.
Een elektromagnetische golf bestaat echter, ook met de toenmalige kennis, uit fotonen.

Dilemma: hoe is het mogelijk een experiment te verklaren met elektromagnetische golven en met fotonen?

Of, zoals op pag. 216 van H.G.Wassenberg_6 onderaan staat:

”De vraag is nu: Is er in het elektromagnetisch spectrum een grens aan te wijzen zo, dat men aan de ene kant van deze grens te doen heeft met fotonen en aan de andere kant met echte golven, of zijn er fotonen waarvan de golflengte der waarschijnlijkheidsgolf gelijk is aan de golflengte van een echte elektromagnetische golf ?

De natuurkunde geeft op deze vraag een onzeker antwoord!”

Volgens mij hield toen/houdt nu zich niemand met deze vraag bezig.

Essentieel in zijn verhaal is het ontbreken van kennis over de massa van het foton.

Aan het einde van deze bijdrage staat de stand van de literatuur over de fotonmassa voorzover ik die begin jaren 60 kende (zonder de Feynman Lectures on Physics uit 1963).

De auteurs zijn het over één ding eens: snelheid van het foton = lichtsnelheid.

Over de massa (= 0 of $\neq 0$) van het foton zijn de meningen verdeeld. Dat bemoeilijkt het Young-experiment met fotonen te verklaren.

Waar zat het massa-probleem?

De auteurs gebruiken niet de relativistische energie-impuls-relatie voor een vrij deeltje met rustmassa m ($m > 0$).

Om dit toe te lichten gebruik ik de conventie zoals die nu gebruikelijk is.

De genoemde energie-impuls-relatie is: $\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 = m^2 c^2$ voor $m > 0$

In deze formule is $\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$ een lorentzvector en de rechterzijde een lorentzinvariante scalar.

Dat betekent dat de rechterzijde, d.w.z. de massa en de lichtsnelheid, in ieder inertiaalsysteem dezelfde waarde hebben.

De rechterzijde bevat de massa (= rustmassa als $m > 0$) van het deeltje .

Er was bekend (ook in onze natuurkundeles) dat voor een foton in het laboratoriumsysteem geldt:

$E = h f$ (Planck) en $|\vec{p}| = \frac{h}{\lambda} = \frac{h f}{c}$ (Proef van Compton, Tranche 6, pdf. pag. 208).

Als je aanneemt dat voor een foton het viertal $\left(\frac{E}{c}, \vec{p}\right)$ ook een lorentzvector is,

dan geldt ook voor een foton de energie-impuls-relatie $\left(\frac{E}{c}\right)^2 - \vec{p}^2 = \text{constant}$

(Als je niet beschikt over meer theoretische achtergrond/informatie van deze formule, dan is dit de enig redelijke aanname om verder te komen)

Als je de energie E en de impuls \vec{p} van een foton in het laboratoriumsysteem substitueert in deze energie-impuls-relatie, dan vind je: $0 = \text{constant}$.

Dat betekent $m_{\text{foton}} = 0$. Een deeltje met massa 0 is wel heel bijzonder.

In Kronig, pag 347 e.v., staat dat men aan elektromagnetische energie, dus fotonen, een impuls massa kan toekennen. Maar dit wordt niet verder uitgewerkt.

Wassenberg doet dit wel en kent, zoals zovele anderen, aan een foton een massa toe.

Volgens de speciale relativiteitstheorie heeft een rustend deeltje met rustmassa m (> 0) een energie $E = m c^2$.

Een foton heeft een energie $E = h f$ (Let wel: een foton is niet in rust !).

De "massa" van een foton is dan $m = \frac{h f}{c^2}$.

Experimenteel (? , zie opmerking hieronder) heeft men vastgesteld dat als een Cs-133 atoom, in de grondtoestand, een foton met frequentie $f = 9,192631770 \times 10^9 \text{ Hz}$ absorbeert, dan de massa van het Cs-atoom met $6,777 \times 10^{-41} \text{ kg}$ zou toenemen.

(Ik heb deze meting gevonden in het boek T.P. Pearsall: Quantum Photonics (second edition) Pearsall verwijst hiervoor naar een experiment gepubliceerd februari 2013. Pearsall verwijst ook direct naar een conferentie in juli 2013 in Vietnam waar "The arguments are incorrect" vastgesteld wordt).

Dit suggereert, zoals ook in Kronig gebeurt, dat er een wet van behoud van massa is.

Want je kunt schrijven: $m(\text{Cs-133 na}) = m(\text{Cs-133 voor}) + m(\text{foton})$.

Maar dit is bedrog. Je gebruikt eigenlijk de wet van behoud van energie:

$$E(\text{Cs-133 na}) = E(\text{Cs-133 voor}) + h f$$

en deelt nu door c^2

De pagina's 457, 458 en 459 hebben hem wanhopig gemaakt.

Tegenwoordig zou je die pagina's gewoon overslaan. Ze zouden zelfs niet meer in het boek opgenomen zijn.

Een theoretische quantumverklaring van de proef van Young wordt geleverd in de quantumoptica.

Zie R. Loudon, The Quantum Theory of Light, second edition 1992, ISBN 0-19-851155-8

Het experimentele bewijs wordt door A. Aspect et al (1986 en 2005) geleverd.

In 2008 is dit experiment door David Dykstra en collega's in Leiden herhaald.
Een prachtige video van dit experiment kun je bekijken op
<https://www.youtube.com/watch?v=MbLzh1Y9POQ>

Op basis van experiment en theorie kan men dus stellen:

De som van de interferentiebeelden van N statistisch onafhankelijke experimenten
(Young/Fresnel) met één foton per experiment

is gelijk aan

het interferentiebeeld van één experiment (Young/Fresnel) met een zwerm bestaande uit N fotonen.

Interessant om te vermelden is, dat in 2019 door de CIPM in Parijs het kilogram werd afgeschaft. Wat bleef er over?

1. de seconde
2. de lichtsnelheid (Einstein)
3. constante van Planck: daaruit volgt de basiseenheid kilogram , gedefinieerd met fotonen!
4. elektrische lading van het electron
5. constante van Boltzmann: basiseenheid absolute temperatuur
6. constante van Avogadro

Literatuur, rond 1960:

S & vV = J. Schweers en P.van Vianen : Natuurkunde op corpusculaire grondslag

R. Kronig : Leerboek der Natuurkunde, 1958

G. Joos : Lehrbuch der theoretischen Physik, 1959

E.U. Condon en H. Odishaw: Handbook of Physics, 1958

Bij S & vV staat:

Fotonen hebben de rustmassa 0, maar een foton in rust bestaat niet.

De massa van een foton wordt gedefinieerd als de impuls massa (relativistische massa, trage massa)

Dat betekent: $m := \frac{E(\text{foton})}{c^2}$

Bij Kronig staat: Bij een foton kan van rustmassa geen sprake zijn (p. 348).

Op p.348 staat dat men aan elektromagnetische energie, dus fotonen, een impuls massa kan toekennen. Maar dit wordt niet verder uitgewerkt.

Bij Joos staat: Het foton heeft trage massa. Formule zoals bij S & vV.

In Condon en Odishaw staat op pag.6-153 een aanwijzing dat het foton de massa nul heeft.

Interessante aanvulling:

T. Fließbach: Die relativistische Masse, Springer, ISBN 978-3-662-58083-7

