

Het experiment van Michelson en Morley en de reactie van Lorentz

Jos Engelen

12 september 2018

1 Inleiding

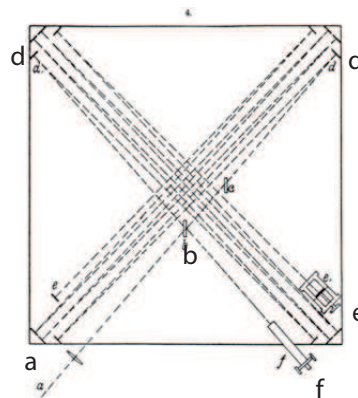
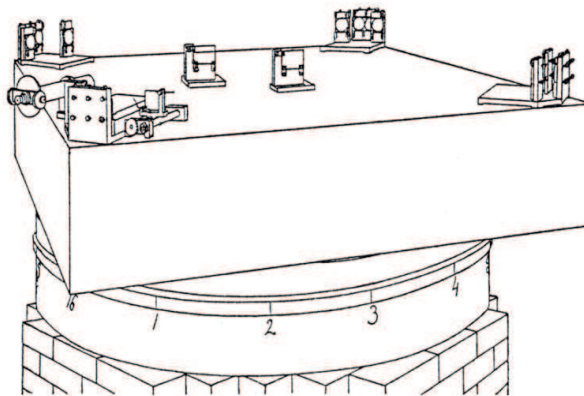
Het experiment van Michelson (1881, [1]) en de verbeterde versie daarvan (Michelson en Morley, 1887, [2]) had als doel de beweging van de aarde, het 'laboratoriumsysteem', door de ether vast te stellen. Aan het bestaan van een dergelijk medium waar licht zich door zou voortplanten en dat daardoor in trilling zou worden gebracht, werd niet getwijfeld, sinds de ontdekking van interferentie en daarmee van het golfkarakter van licht. De ether was rotsvast verankerd in het denken van Maxwell, Lorentz, hun voorgangers en hun tijdgenoten.

Lorentz hechtte groot belang aan de uitkomst van de experimenten van Michelson en Michelson en Morley. Uit het 'nulresultaat' ervan concludeerde hij niet dat er geen ether was. In tegendeel, hij ontwikkelde een theorie, die het nulresultaat verklaarde door Lorentzcontractie: het krimpen van objecten langs hun bewegingsrichting door de ether. Al in 1892 [3] opperde Lorentz deze hypothese, in 1904 culmineerde dit oorspronkelijke idee in een volledige theorie [4], die 'bijna' samenvalt met de speciale relativiteitstheorie, die Einstein in 1905 publiceerde [5]. Een heel opmerkelijk en alom bekend feit is dat de grote doorbraak van Einstein juist te danken was aan het loslaten van de etherhypothese!

2 Het experiment

Het experiment maakte gebruik van twee loodrecht op elkaar staande armen waarin coherent licht van één gemeenschappelijke bron heen en weer kaatste. De twee lichtstralen werden na hun verschillende paden te hebben doorlopen met elkaar in interferentie gebracht. Het was een ingenieuze opstelling.¹ Door reflecterende spiegels waren de lichtpaden 'opgevouwen' en de armen effectief 11 m lang. In Fig. 1 reproduceren we een tekening van de opstelling uit het oorspronkelijke artikel [2]. In de onderste helft van de figuur worden de lichtpaden in beide armen in bovenaanzicht schematisch weergegeven. Linksonder in deze figuur bevindt zich de lichtbron (a), rechtsonder het kijktje (f) waarmee het interferentiepatroon werd waargenomen. Rechtsonder bevindt zich ook een

¹Michelson en Morley hadden nog geen lasers tot hun beschikking! De Michelson interferometer kent veel toepassingen in de natuurkunde, o.a. in detectoren voor zwaartekrachtsgolven.



Figuur 1: De opstelling van het Michelson-Morley experiment; de onderste tekening schetst de lichtpaden in bovenaanzicht

verstelbare spiegel (e) om de lengte van de arm in te regelen zodat het interferentiepatroon zichtbaar wordt. (b) is een halfdoorlatende spiegel. (d) geeft de spiegels aan waar de 'laatste' reflectie plaatsvindt voordat het licht weer samen wordt gebracht.

De coherentielengte van de gebruikte lichtbronnen was klein, minder of veel minder dan 1 mm. Om een interferentiepatroon zichtbaar te maken werd geel licht van een natriumlamp gebruikt, dat een grotere coherentielengte heeft dan breedbandig wit licht. Als het interferentiepatroon zichtbaar was, en dus de beide armen nagenoeg even lang waren, werd het natriumlicht vervangen door wit licht en werd de apparatuur gereed gemaakt om de waarnemingen te doen. In de woorden van [2]: '...then white light was restored, the screw altering the length of path was very slowly moved (one turn of a screw of one hundred threads to the inch altering the path nearly 1000 wave-lengths) till the colored interference fringes reappeared in white light. These were now given a convenient width and position, and the apparatus was ready for observation.'

Als één van de armen gericht is langs de bewegingsrichting van de aarde en de andere daar loodrecht op, zou de tijd die het licht nodig heeft om heen en weer te reizen moeten

verschillen voor beide armen. Immers: de parallelle arm beweegt met het licht in die arm mee door de ether en er tegenin na reflectie; de orthogonale arm beweegt loodrecht daarop door de ether en in die arm ondervindt de voortplanting van het licht een andere invloed van de beweging. Anders gezegd: de weglengte die het licht doorlopen heeft als het weer bij elkaar wordt gebracht is niet gelijk voor beide armen. De weglengte van beide lichtpaden zullen we hieronder in detail bespreken. De weglengte van het orthogonale pad verdient bijzondere aandacht. In het eerste artikel [1] maakte Michelson hieromtrent een vergissing, in het tweede artikel [2] werd deze vergissing rechtgezet, maar op niet geheel juiste wijze. Lorentz had tussen deze twee publicaties in wel het juiste resultaat gepubliceerd [6].

Bij rotatie van de opstelling (die dreef in een grote bak kwik) zou het interferentiepatroon moeten verschuiven. Als het weglengteverschil (door de ether) van het licht in de twee armen gelijk is aan $\Delta D = D_{\text{arm1}} - D_{\text{arm2}}$ dan geldt na rotatie over 90° dat het weglengteverschil van teken omkeert, en dat de bijbehorende verschuiving van het interferentiepatroon een fractie $2\Delta D/\lambda$ van de afstand tussen twee opeenvolgende maxima (of minima) bedraagt, waar λ de golflengte van het gebruikte licht is. De verwachte waarde van ΔD , die we hieronder zullen uitrekenen, bedroeg van de orde van $2Lv^2/c^2$, waar L de lengte van een arm is. Met een armlengte van 11 m, een snelheid $v=30$ km/s (de snelheid van de aarde in haar baan om de zon) en met de lichtsnelheid $c=300\,000$ km/s vinden we voor een golflengte van 590 nm een verschuiving van het interferentiepatroon over een afstand die ongeveer 40% bedraagt van de afstand tussen de interferentiemaxima. Gemakkelijk meetbaar gezien de meetnauwkeurigheid van ongeveer 2% van diezelfde afstand.

Bij rotatie verschoof het interferentiepatroon echter niet. In plaats van te concluderen dat er geen ether is, suggereerde Lorentz al in 1892 [3] een verklaring van het ‘nulresultaat’ door een beroep te doen op contractie van de opstelling in de bewegingsrichting ².

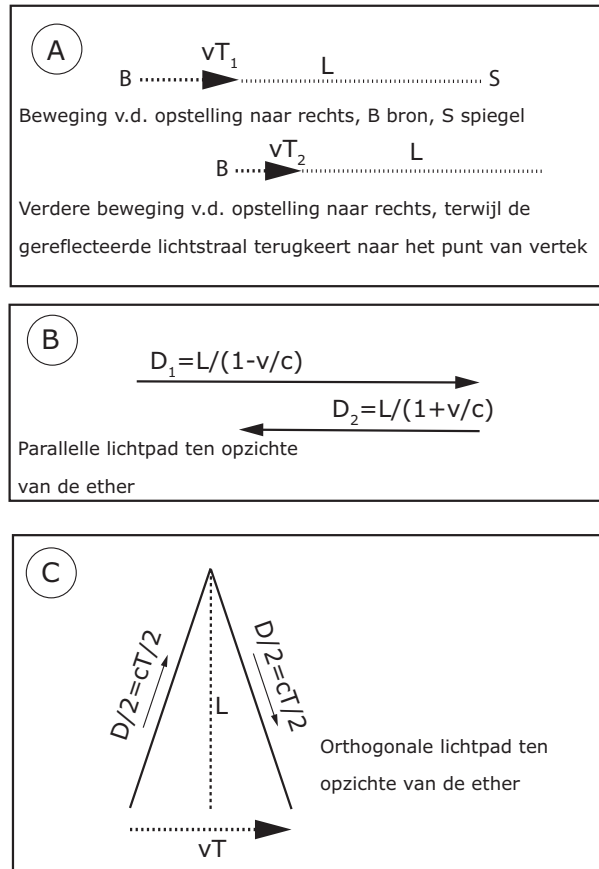
3 De lichtpaden

Laten we de lichtpaden in beide armen analyseren onder de aanname dat één arm gericht is langs de bewegingsrichting van de aarde (de ‘parallelle’ arm), en de andere daar loodrecht op staat (de ‘orthogonale’ arm). In Fig. 2 laten we in A en B het parallelle pad en in C het orthogonale pad zien.

3.1 Het parallelle lichtpad

Voor het parallelle pad geldt dat het licht een weg D_1 aflegt in een tijd T_1 tot het gereflecteerd wordt en na reflectie een weg D_2 in tijd T_2 tot het gedetecteerd wordt (op de plek waar het interfereert met het licht dat het orthogonale pad gevolgd heeft). Het is belangrijk er attent op te zijn dat Fig. 2 betrekking heeft op het ‘etherstelsel’, op het hypothetische stelsel dus, waarin de ether in absolute rust is en het enige stelsel waarin het licht zich voorbeweegt met snelheid c . (Als de etherhypothese correct is, natuurlijk).

²Fitzgerald liet Lorentz weten dezelfde suggestie te hebben gedaan tijdens zijn colleges in Dublin.



Figuur 2: Het parallelle en het orthogonale lichtpad in het Michelson-Morley experiment.

Dan volgt:

$$D_1 = vT_1 + L \quad (1)$$

$$D_2 = L - vT_2 \quad (2)$$

L is de lengte van de arm. Met $T_1 = D_1/c$ en $T_2 = D_2/c$ volgt dan:

$$D_{\parallel} \equiv D_1 + D_2 = \frac{2L}{1 - v^2/c^2} \quad (3)$$

voor de totale weglengte die het licht, t.o.v. de ether, heeft doorlopen 'heen en terug' in de horizontale richting (arm in de bewegingsrichting van het laboratorium, d.w.z. de aarde). Voor de tijd die dit gekost heeft vinden we:

$$T_{\parallel} \equiv T_1 + T_2 = \frac{2L/c}{1 - v^2/c^2} \quad (4)$$

Dit resultaat kan worden teruggevonden in de publicaties van Michelson en van Michelson en Morley en werd ook gevonden door Lorentz in [6]. En het is precies dit resultaat

waarin Lorentz later voorstelde L te vervangen door $L\sqrt{1 - v^2/c^2}$ om de uitkomst van het experiment van Michelson en Morley te verklaren, zie de bespreking van het orthogonale lichtpad, hieronder. Overigens: na deze substitutie zou (3) overgaan in precies de formule die we zouden vinden 'met de kennis van nu' door de Lorentztransformaties op het parallelle lichtpad toe te passen.

3.2 Het orthogonale lichtpad

Voor het lichtpad in de arm loodrecht op de bewegingsrichting van de aarde (zie Fig. 2, plaatje C) vinden we:

$$D = 2\sqrt{L^2 + v^2 T^2/4} \quad (5)$$

D is hier de totale weg die het licht heeft afgelegd, som van heenweg (tot reflectie) en van terugweg (tot detectie). Lengte van heen- en terugweg zijn in dit geval gelijk. Nu geldt: $T = D/c$ en dus:

$$D_{\perp} \equiv D = \frac{2L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6)$$

$$T_{\perp} \equiv T = \frac{2L/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (7)$$

In zijn eerste artikel [1] had Michelson een vergissing gemaakt. Voor de weglengte van het orthogonale pad had hij eenvoudigweg de lengte $D=2L$ genomen, daarmee geen rekening houdend met de veronderstelling dat de opstelling bewoog door de ether en het licht dus in feite de zijden van een gelijkbenige driehoek doorliep (gezien vanuit de ether, het ruststelsel), zie paneel C in Fig. 2.

Lorentz ontwikkelt in zijn artikel [6] een 'optica' voor de voortplanting van het licht indien lichtbron en ether in (relatieve) beweging zijn. In deze zorgvuldige en uitgebreide verhandeling liet Lorentz zien dat de vergissing van Michelson leidde tot een overschatting van het weglengteverschil tussen het parallelle en orthogonale pad met een factor 2. In eerste instantie redde Lorentz daarmee de etherhypothese, want de gevoeligheid van het eerste experiment van Michelson was maar net voldoende om het gezochte effect te detecteren. Nu het voorspelde effect een factor twee kleiner werd was het experiment inconclusief.

In het tweede artikel [2] citeren Michelson en Morley de analyse van Lorentz [6]³.

Het orthogonale lichtpad heeft lengte $2\sqrt{L^2 + v^2 T^2/4}$ (Fig. 2). Voor $T/2$ vullen Michelson en Morley ook nu L/c in. Ze vinden daarom:

$$D = 2L\sqrt{1 + v^2/c^2} \quad (\text{Let op, zie tekst})$$

Dit is echter incorrect. (Het zou betekenen dat het front van de lichtstraal, Fig. 2, zich door de ether verplaatst met snelheid $\sqrt{v^2 + c^2}$.) Lorentz toont in zijn artikel aan dat de

³Citaat: The discussion of this oversight and of the entire experiment forms the subject of a very searching analysis by H. A. Lorentz, who finds that this effect can by no means be disregarded.

weg D doorlopen wordt met de lichtsnelheid c en dat dus geldt $T=D/c$ (en niet $T=2L/c$). Daarmee zou het correcte resultaat (6) gevonden worden.

Binnen het bestek van dit artikel ontbreekt de ruimte om uitgebreid in te gaan op Lorentz' theorie van de voortplanting van het licht, uitgezonden door een bron onder een hoek met de bewegingsrichting door de ether. Deze theorie is niet triviaal en toont aan dat licht zich ook in dit geval rechtlijnig voortplant en wel met snelheid c . Echter, zoals Lorentz ook aangeeft, dit resultaat is niet exact. Voor de analyse van het orthogonale pad in het experiment van Michelson en Morley volstaat Lorentz met termen tot op orde v^2/c^2 .

Wellicht omdat hij tevreden is met een resultaat dat correct is tot op orde v^2/c^2 vult Lorentz in zijn artikel voor T ook $2L/c$ en niet D/c in (terwijl D/c volgt uit zijn theorie). Dit blijft een beetje raadselachtig, en is wellicht elders uitgebreider beschreven, maar het resultaat dat de 'schuine' weg D doorlopen wordt met de lichtsnelheid en niet de 'rechte' weg L, is cruciaal. Had hij het traject dat hij in de voetnoot⁴ beschrijft, zie onze Fig. 2, paneel C, letterlijk genomen, dan had hij het exacte en ook in het licht van onze huidige kennis correcte resultaat gevonden. Een resultaat dat voldoet aan de twee principes van Einstein: constantheid van de lichtsnelheid en het relativiteitsprincipe!

Fig. 3 geeft de twee 'visies' op het orthogonale lichtpad. (Alleen de 'heenweg' is weergegeven, tot het moment van reflectie.) Tot op orde v^2/c^2 zijn beide resultaten dus gelijk, praktische consequenties heeft de 'tweede vergissing' van Michelson en Morley daarom niet.

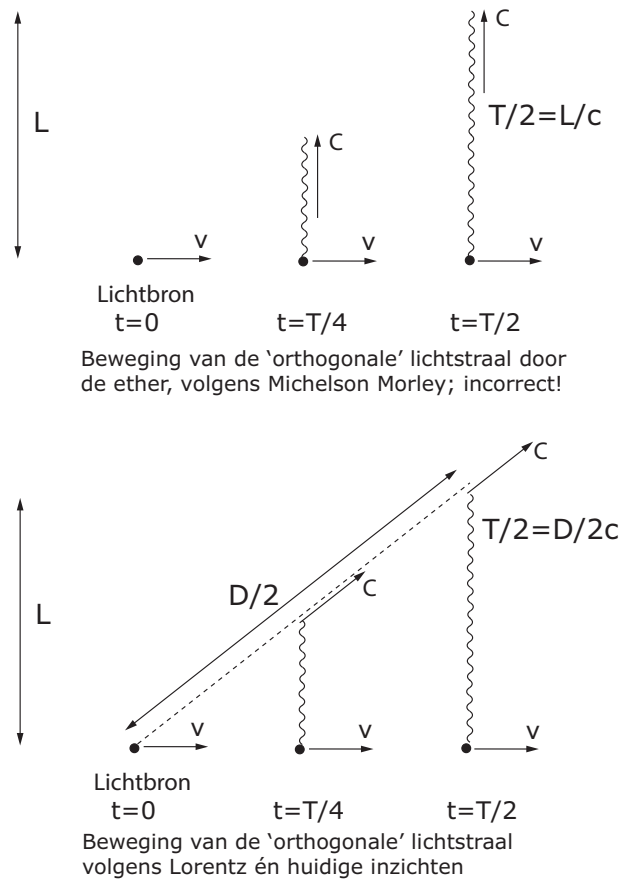
4 Lorentzcontractie

Door (3) te vergelijken met (6) springt meteen in het oog dat de substitutie: $L \rightarrow L\sqrt{1 - v^2/c^2}$ in (3), $D_{\parallel}$ identiek maakt aan $D_{\perp}$: door Lorentzcontractie van de arm parallel aan de bewegingsrichting wordt het weglengteverschil tussen het parallelle en het orthogonale pad nul, en daarmee wordt de ether ondetecteerbaar! Dit betekende voor Lorentz geenszins dat de ether niet bestond: in zijn beroemde artikel [4], dat de theoretische basis legt voor Lorentzcontractie, transformeert hij juist alle fysische systemen naar een systeem in absolute rust: de ether.

We zien ook dat na deze substitutie de tijden $T_{\parallel}$ (4) en $T_{\perp}$ (7) aan elkaar gelijk worden en dat deze een factor $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ groter zijn dan de tijd $2L/c$, die geldt voor $v=0$, dus voor een systeem in rust ten opzichte van de ether. Hiermee is ook de basis

⁴Hier is het relevante citaat uit Lorentz' artikel: 'Si t et t' indiquent les instants où une vibration subit les réflexions en b et en d, et si t'' se rapporte au moment où elle atteint de nouveau la glace b, on doit, dans une figure qui reste immobile dans l'espace, distinguer les lieux b, b' et b'' du point b aux instants t, t' et t'', et le lieu d' de d au moment t'. Les points b, d' et b'' sont alors les sommets d'un triangle isocèle dont les deux côtés égaux sont parcourus avec la vitesse A. La hauteur du triangle étant D, on trouve pour la somme des côtés égaux $2\sqrt{D^2 + bb'^2}$ ou, approximativement, $2D + bb'^2/D$.

En négligeant des quantités d'ordre supérieur, on peut dire que bb' est le chemin parcouru par la glace b pendant que la lumière se propage par la distance D. On a donc $bb' = gD/A$; la somme des côtés égaux du triangle devient $2D + Dg^2/A^2$. Einde citaat. 'La glace b' is de halfdoorlatende spiegel, zie Fig. 2, waarin ook spiegel d aangegeven is. Verder is g de snelheid van de aarde (bij ons v); A de snelheid van het licht (bij ons c). D is bij ons L. Vette letters zijn door ons aangebracht. De gelijkbenige driehoek die beschreven wordt is dezelfde als in onze Fig. 2.



Figuur 3: Het orthogonale lichtpad in het Michelson-Morley experiment in de visie van Michelson-Morley resp. Lorentz

gelegd voor tijddilatatie! Een correcte interpretatie van dit verschijnsel moest wachten op het artikel van Einstein uit 1905 [5], hoewel Lorentz in 1904 [4] al de volledige ruimte-tijdtransformaties had gevonden (mits correct geïnterpreteerd).

5 Conclusie

Het experiment van Michelson en Morley was een heel belangrijke mijlpaal in de ontwikkeling van de moderne natuurkunde. De Michelson interferometer⁵ kende en kent veel toepassingen, meest recentelijk voor de detectie van zwaartekrachtsgolven. De 'nul-resultaten' van het experiment waren voor Lorentz een belangrijke uitdaging. De on-

⁵Michelson won de Nobelprijs in 1907 'for his optical precision instruments and the spectroscopic and metrological investigations carried out with their aid.' Voor de volledigheid vermelden we hier dat ook de andere hoofdrolspelers in dit artikel Nobelprijzen wonnen. Lorentz in 1902 (samen met Zeeman): 'in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena' en Einstein in 1921: 'for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect.'

grijpbaarheid van de ether was voor Lorentz geen reden om deze als fysisch medium te laten varen. In tegendeel: hij formuleerde een theorie, gebaseerd op het bestaan van een stelsel in absolute rust waarnaar alle natuurwetten herleid konden worden. Een theorie die Lorentzcontractie bevatte en die slechts één stap verwijderd was van de speciale relativiteitstheorie van Einstein, die een jaar later zou verschijnen.

Referenties

- [1] Albert A. Michelson, American Journ. of Science, 3d Ser., Vol. 22, April 1881, p. 120.
- [2] Albert A. Michelson and Edward W. Morley, *On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*, Am. Jour. Sci.-Third series, Vol. XXXIV, No. 203, Nov. 1887, p. 334.
- [3] Lorentz, Zittingsverslagen der Akad. v. Wet. te Amsterdam, 1892-1893, p. 74.
- [4] H. A. Lorentz, *Electromagnetic Phenomena in a System Moving with any Velocity less than that of Light*, Proc. KNAW, Amsterdam, 6, 1904.
- [5] A. Einstein, *Zur Elektrodynamik bewegter Körper*, Annalen der Physik, 17, 1905.
- [6] H.A. Lorentz, *De l'influence du mouvement de la terre sur les phénomènes lumineux*, Archives Néerlandaises 21: 103-176 (1887)