

De ontdekking van de snelheid van het licht

Werkgroep 41

R. Genseberger & L. Fucili

OSB Amsterdam / Freudenthal Instituut, Universiteit Utrecht
Scuola Media "G.G.Belli" – Rome / SSIS Universitaire Lerarenopleiding Rome

De eerste bepaling van de snelheid van licht door Römer (1676) is een beroemd hoofdstuk uit de geschiedenis van de natuurwetenschappen. Ze is vooral interessant tegen de historische en astronomische achtergrond. Zelfgemaakte modellen, berekeningen en discussies simuleren de originele methode van Römer en kunnen zorgen voor afwisselende werkwijzen. De historische lijn geeft exemplarisch inzicht in de ontwikkeling van de natuurwetenschappen.

1 Historische achtergrond.

1.1 De snelheid van licht: eindig of oneindig?

De vraag of licht een snelheid had of dat het onmiddellijk op iedere plaats aanwezig is, heeft men zich al lang geleden gesteld. Heron van Alexandrië, uit het oude Griekenland, redeneerde als volgt: wend je 's nachts met gesloten ogen naar de sterrenhemel, open ze plotseling en je ziet onmiddellijk de sterren. Er verstrijkt niet merkbaar tijd tussen het openen van de ogen en het zien van de sterren, dus moet het licht reizen zonder dat daar tijd voor nodig is.

Alhazen (Ibn al-Hasan) (965-1040) de beroemde islamitische natuurwetenschapper, was van mening dat we licht kunnen waarnemen doordat de lichtbron een soort deeltjes uitzendt. Hij concludeerde dat de snelheid van licht daarom eindig moest zijn.

Francis Bacon (1561-1626) begreep intuïtief dat de snelheid van het licht eindig kon zijn. Hij schreef: *Het is niet vreemd dat we niet kunnen zien dat licht voortbeweegt, want er zijn nu eenmaal dingen die vanwege de snelheid van hun beweging niet waargenomen kunnen worden, denk maar aan een kogel die uit een musket geschoten wordt... Dit feit heeft me op een vreemd idee gebracht, namelijk of wanneer we naar een heldere sterrenhemel kijken, we werkelijk zien wat op dat moment bestaat of dat het iets later is; en of, wat betreft onze waarneming van hemellichamen, er sprake is van een werkelijke en een schijnbare tijd (...), en of de beelden of stralen van de hemellichamen een waarneembare tijd nodig hebben om ons te bereiken.*

Kepler (1571-1630) daarentegen was ervan overtuigd dat licht zonder enige vertraging onmiddellijk de hele ruimte vult. Licht is immaterieel en biedt dus geen weerstand aan een bewegende kracht. Volgens de mechanica van Aristoteles zou dit aan licht een oneindige snelheid geven.

Galilei (1561-1642) stelt een experiment voor om te beslissen of licht al dan niet een eindige snelheid heeft. In zijn “Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica”, zegt Salvatio in de dialoog op de eerste dag:

Laten twee personen ieder een licht in een lantaarn nemen, op een zodanige manier dat men, door tussenkomst van de hand, het licht kan tegenhouden of het zichtbaar kan laten worden voor de ander. Laat hen vervolgens tegenover elkaar gaan staan op een paar pas afstand en oefenen tot zij zo vaardig zijn geworden in het laten zien en bedekken van hun licht dat op het hetzelfde moment dat men het licht ziet van zijn metgezel, men zijn eigen licht niet meer bedekt.

Als ze vaardig genoeg zijn, doen de twee experimentatoren hetzelfde op grotere afstand, zó nodig enkele mijlen ver (met gebruikmaking van telescopen).

Als het laten zien en weer bedekken gebeurt op dezelfde manier als op korte afstand, kunnen we veilig aannemen dat de voortplanting onmiddellijk is, maar als er tijd nodig is op een afstand van drie mijl, wat, gezien het gaan van het ene licht en het komen van het andere licht, in werkelijkheid neerkomt op zes mijl, dan zou de tijdsvertraging goed zichtbaar moeten zijn.

De Florentijnse Academie heeft dit experiment uitgevoerd. In het verslag lezen we:
Galileo suggereert in zijn eerste Dialoog van de Verhandeling over Twee Nieuwe Wetenschappen, een eenvoudige manier om te ontdekken of Licht tijd nodig heeft om zich te verplaatsen of dat het een oneindige snelheid heeft (...)
We probeerden het op een afstand van een mijl, wat vanwege het heen en weer terug gaan van het licht op twee mijlen neerkomt, en constateerden geen verschil. We hebben niet de gelegenheid gehad om te onderzoeken of op grotere afstand er wel een verschil te merken zou zijn geweest.

Descartes (1598-1650) ondersteunde het idee dat licht geen tijd nodig had om te reizen. Zijn gezag is een belangrijk obstakel geweest bij de acceptatie van het werk van Römer. Descartes beschouwt een maansverduistering, veroorzaakt door het op één lijn staan van de maan, de aarde en de zon.

Stel nu dat het licht een uur nodig heeft om van de aarde naar de maan te gaan. Dan zal de maan niet donker worden tot één uur nadat de drie hemellichamen precies op één lijn zijn gekomen. Om dezelfde reden zullen wij hier op aarde het donker worden van de maan niet zien voordat er nogmaals een uur is verstreken, oftewel twee uur na het moment waarop de drie hemellichamen op één lijn kwamen. Maar in dit tijdsinterval zal de maan verder zijn gegaan in zijn baan en de drie hemellichamen staan niet dan niet langer op één lijn. Maar dit is duidelijk tegengesteld aan de waarneming, want men ziet altijd de verduisterde maan op de ecliptica precies tegenover de zon (zodat men bijvoorbeeld nooit de zon en de verduisterde maan tegelijkertijd kan zien). Dus heeft het licht geen tijd nodig om te reizen, maar komt overal op hetzelfde moment.

Zowel Galileo als Descartes gaven goede ideeën voor experimenten, beiden kwamen tot een negatief resultaat omdat ze de lichtsnelheid veel te laag inschatten. Het antwoord op de vraag of licht al dan niet een eindige snelheid had zou uit een heel andere hoek komen, als gevolg van het zoeken van een oplossing voor een heel ander probleem.

1.2 De geografische lengte en een hemelse klok

Eén van de grote wetenschappelijke projecten in de zeventiende eeuw was het maken van steeds nauwkeuriger kaarten, nodig vanwege de uitbreiding van de handel en de verovering van de wereld door de Europeanen. Het belangrijkste onopgeloste probleem was de bepaling

van de geografische lengte. Daarvoor had men twee nauwkeurig bepaalde lokale tijden nodig, één op de plaats waarvan men de lengte wilde bepalen, de ander op een plaats van bekende lengte, de referentieplaats. De lokale tijd was geen probleem, maar geen enkele klok bleef nauwkeurig genoeg lopen wanneer ze getransporteerd werd. Daardoor wist men elders nooit de juiste tijd op de referentieplaats. Het probleem zou opgelost zijn als men een astronomisch verschijnsel, dat overal op aarde tegelijkertijd zichtbaar is, kon gebruiken als klok.

Om werkelijk praktisch bruikbaar te zijn, moest het fenomeen redelijk vaak waargenomen kunnen worden. Een verschijnsel dat aan deze voorwaarden voldeed, was de verduistering van de manen van Jupiter, ontdekt door Galileo in januari 1610. Hij realiseerde zich dat dit in principe het lengtegraadprobleem kon oplossen. Er waren alleen tabellen nodig van de tijdstippen waarop de manen verduisterden of weer zichtbaar werden. Gedurende één jaar volgde Galilei geduldig de manen van Jupiter. Hij ontdekte dat de maansverduisteringen bij Jupiter honderden keren per jaar voorkwamen, ze waren zo voorspelbaar dat men een klok erop gelijk kon zetten. Galilei maakte tabellen van het verwachte tijdstip van verdwijnen en weer verschijnen van ieder van de manen en hoopte dat eens hele vloten zouden varen met behulp van zijn tabellen van bewegingen aan de hemel. Hij slaagde er echter niet in één van de prijzen in de wacht te slepen die uitgelooft waren voor de oplossing van het lengtegraadprobleem: zijn methode was niet nauwkeurig genoeg op een schip en niet bruikbaar als Jupiter onzichtbaar was. Toch gaven de Nederlanders hem een gouden keten voor zijn pogingen het lengtegraadprobleem op te lossen. Na Galileo's dood in 1642, werd zijn methode om de lengtegraad te bepalen de basis voor nieuwe, nauwkeuriger kaarten. Ze gaf een beter inzicht in grote afstanden, zoals tussen de continenten.

2 De snelheid van licht gemeten

2.1 Nauwkeurige klokken

Nadat in 1657 Huygens de nauwkeurige slingerklok had uitgevonden, waren ook nauwkeurigere tabellen nodig van de verduistering van de manen van Jupiter om bij het maken van kaarten hier profijt van te kunnen trekken. In 1668 publiceerde Cassini, een hoogleraar sterrenkunde aan de universiteit van Bologna, nieuwe zeer nauwkeurige tabellen. Er bleken nu enige onregelmatigheden in de tabellen te zitten. Om toch verduisteringen nauwkeurig te kunnen voorspellen, was het noodzakelijk te ontdekken of er een regel aan de onregelmatigheden ten grondslag lag.

Römer ging hiermee aan de slag en in september 1676 voorspelde hij dat de verduistering van Io op 9 november van dat jaar 10 minuten later zou plaatsvinden dan op grond van vorige verduisteringen was berekend. Ze vond inderdaad plaats exact op het tijdstip dat Römer had voorspeld.

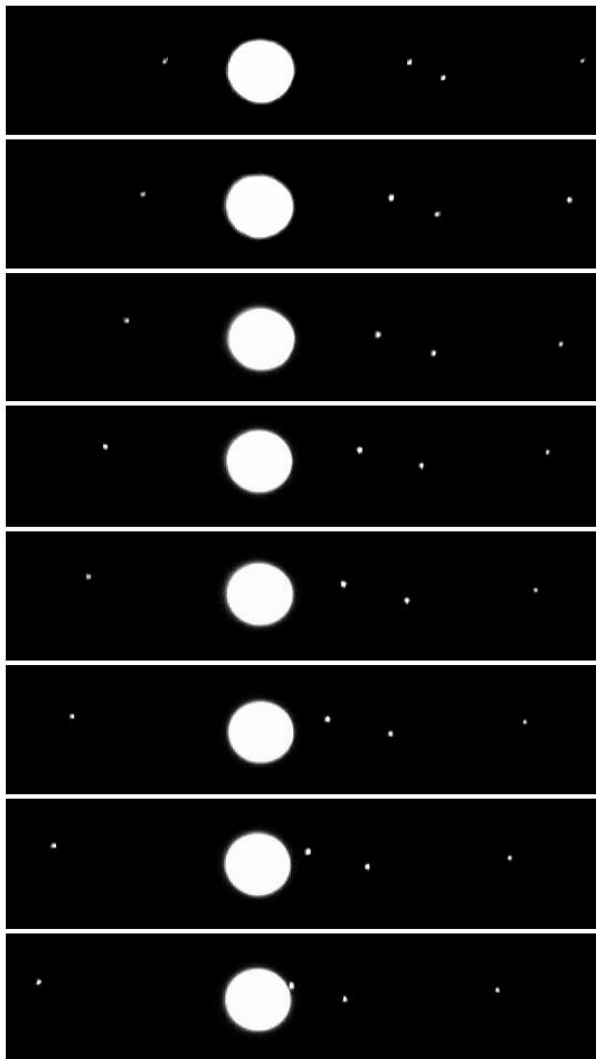
Op 21 november van dat jaar hield Römer een voordracht voor de leden van de *'Académie Royal de Sciences'*, waarin hij beargumenteerde dat het latere tijdstip van verduistering de noodzaak aantoonde van een nieuwe vergelijking, 'de vergelijking van licht'. De reden was dat licht tijd nodig heeft om zich te verplaatsen: 22 minuten om de diameter van de baan van de aarde om de zon te doorkruisen. Bij zijn voordracht was Cassini één van zijn krachtigste opponenten!

We weten nu dat de benodigde tijd 16 minuten is, Römer gaf dus een goede benadering. Het belangrijkste is echter dat er voor het eerst op basis van waarnemingen beargumenteerd kon worden dat licht een eindige snelheid heeft. Hierna zullen we de argumentatie en berekeningen van Römer nauwkeurig volgen.

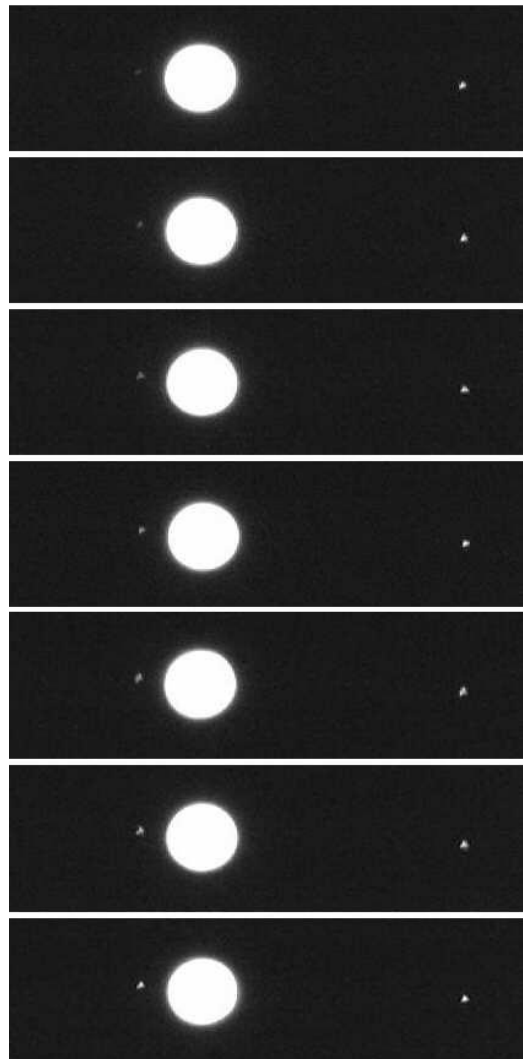
Jupiter en zijn manen

Tabel 1. Gegevens van de Aarde, de Zon en Jupiter (afgeronde getallen)

	<i>Afstand tot de zon</i>	<i>Periode omwenteling</i>
Aarde	$150 \cdot 10^6$ km	365 d
Jupiter	$780 \cdot 10^6$ km	4332 d
	<i>Afstand tot Jupiter</i>	
Io	$0,422 \cdot 10^6$ km	1 d, 18 h, 28 m
Europa	$0,671 \cdot 10^6$ km	3 d, 13 h, 14 m
Ganymedes	$1,071 \cdot 10^6$ km	7 d, 3 h, 43 m
Kallisto	$1,884 \cdot 10^6$ km	16 d, 16 h, 32 m



Figuur 1. Jupiter met zijn manen Europa, Ganymedes, Io en Kallisto (van links naar rechts). Tijdsduur tussen twee opnames is 60 minuten. Alle manen bewegen naar links (oosten).



Figuur 2. Jupiter met Io en Europa. Tijdsduur tussen twee opnames is 20 seconden. Links komt Io te voorschijn uit de schaduw van Jupiter aan het einde van een verduistering.

2.2 Verduistering of bedekking?

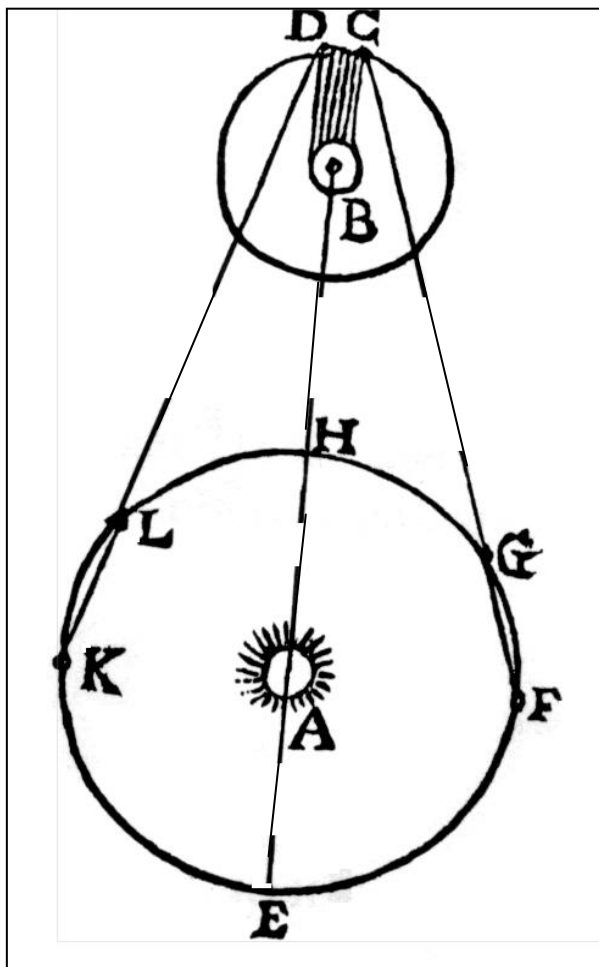
De figuren 1 en 2 geven een goede indruk van wat met een eenvoudige telescoop te zien is van Jupiter en zijn manen. In figuur 2 komt Io niet achter Jupiter zelf te voorschijn, maar op enige afstand daarvan. Een 'verdwijnen' (of 'verschijnen') van een maan van Jupiter kan twee oorzaken hebben:

- De maan verdwijnt vanaf de aarde gezien achter de rand van Jupiter zelf (*bedekking*).
- De maan komt in de schaduw van Jupiter terecht (*verduistering*).

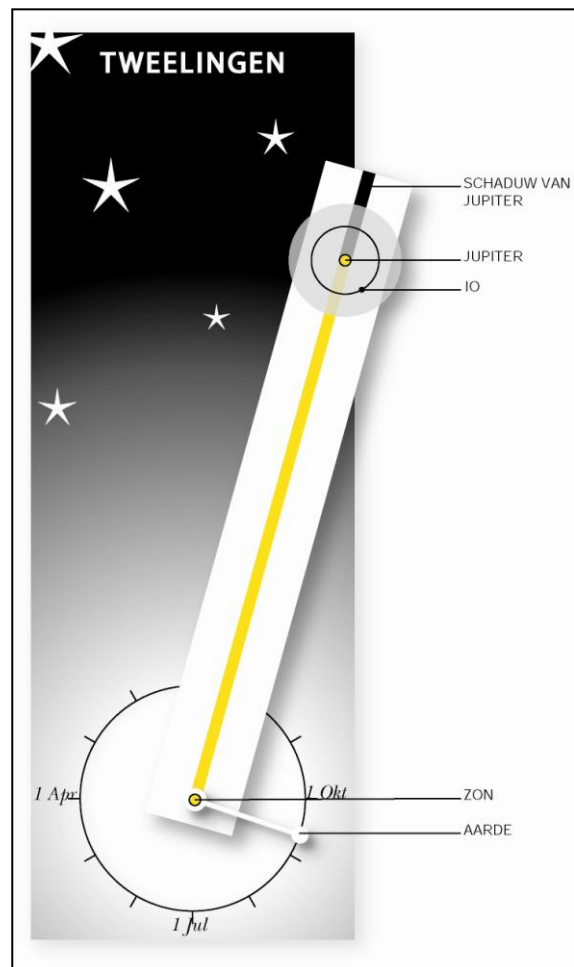
Hetzelfde geldt uiteraard voor het weer verschijnen van de maan.

Figuur 3 is de tekening waarmee Römer dit in 1676 duidelijk maakte in de *Journal des Savants*. Een aardse waarnemer in de posities F en G van Römer's tekening, ziet Io verdwijnen in de schaduw en weer tevoorschijn komen achter de rand van de planeet. In de posities K en L is het omgekeerd: Io verdwijnt achter de rand en komt tevoorschijn vanuit de schaduw.

Welke van de verdwijningen en verschijningen moeten we nu gebruiken als klok? Alleen wanneer we in- of uittreden van de maan in de schaduw bekijken weten we zeker dat de maan intussen een aantal hele omwentelingen om Jupiter heeft gemaakt. Immers, ook de aarde verplaatst zich, waardoor de kijklijn steeds verandert.



Figuur 3. Tekening van Römer. A: zon, B: Jupiter, C en D: twee posities van Io in baan rond Jupiter. E, F, G, H, K en L: posities van de aarde in zijn jaarlijkse baan rond de zon.



Figuur 4. Dynamisch model van Zon, Aarde, Jupiter en Io.

2.3 Een dynamisch model van Zon, Aarde, Jupiter en Io

Om de situatie beter te begrijpen, hebben we het dynamisch model van figuur 4 ontwikkeld. Op een stuk karton is de baan van de aarde rondom de zon getekend. De zon zelf wordt voorgesteld door een splitpen waaromheen de aarde (bolletje klei op plastic roerstaafje) en Jupiter met zijn schaduw draaien. Io is een stip op een stukje transparante folie dat om Jupiter (andere splitpen) heen kan draaien.

Om alles op schaal en op standaardpapier uit te kunnen voeren nemen we als afstand aarde-zon in het model 5 cm. De afstand Jupiter-zon wordt dan 25 cm.

Om de baan van Io rondom Jupiter goed te zien, nemen we daarvoor een andere schaal, met als uitgangspunt de diameter van de splitpen. De straal van de baan van Io rondom Jupiter wordt dan 1,5 cm.

Met deze maten zijn alle effecten goed te simuleren.

Wanneer we bedenken dat de bewegingen van de Aarde, Jupiter en Io allemaal tegen de klokrichting ingaan, helpt dit model om een goed inzicht te krijgen in de methode van Römer.

We zien:

- Dat Io kan verdwijnen achter Jupiter (*bedekking*) of in zijn schaduw (*verduistering*).
- Dat in periodes van 6 maanden alleen het begin van een verduistering of het einde van een verduistering zichtbaar is.
- Waar de Aarde ongeveer was toen de foto's van figuur 2 gemaakt werden.

2.4 Bepaling van de lichtsnelheid met de data van Römer.

Uit de tabellen van Cassini had Römer als gemiddelde periode van Io berekend: 1 dag, 18 uur, 28 minuten en 30 seconden.

Op 24 oktober 1671 begon hij aan een nieuwe serie waarnemingen van het begin van de verduistering van Io, hij ging hiermee door tot 12 januari 1672.

Omdat het begin van de verduistering zichtbaar was, moet de Aarde zich in het model aan de rechterkant van de zon hebben bevonden. De intrede in de verduistering was zichtbaar van oktober tot en met januari, dus Jupiter moet zich ongeveer in de richting bevonden hebben die in het model aangeduid wordt met februari-maart.

Het tijdsinterval bedroeg 80 dagen, met 45 volledige omwentelingen van Io. De eerste verduistering nam Römer waar op 24 oktober, om 17 h, 59 m, 15 s. Uitgaande van de eerder bepaalde gemiddelde periode van Io, berekende Römer dat hij het begin van de 45^{ste} verduistering op 12 januari om 9 h, 21 m, 45 s kon verwachten. Ze begon echter om 9 h, 8 m, 45 s, dus 13 minuten vroeger dan hij verwachtte.

Römer verklaarde het verschil met de eindige snelheid van licht: op 12 januari was de aarde dichter bij Jupiter dan op 24 oktober, voor dat verschil in afstand had het licht 13 minuten nodig. Hij berekende dat het licht dan 22 minuten nodig had om een afstand af te leggen die overeenkomt met de diameter van de baan van de aarde om de zon.

Met behulp van het model is dit eenvoudig na te gaan. Op schaal is de afstand tussen de twee posities van de aarde op 24 oktober en 12 januari ongeveer 6 cm. De diameter van de aardbaan is op dezelfde schaal 10 cm. Met eenvoudige verhoudingen vinden we dan ongeveer de 22 minuten van Römer.

2.5 De lichtsnelheid bepalen met moderne waarnemingen aan Io

Ook met moderne data zoals die in de sterrengidsen staan, zou men de lichtsnelheid moeten kunnen berekenen. We hebben enkele data genomen uit de Sterrengids 2003, pagina 112-113. Jupiter was op 2 februari 2003 in oppositie met de zon: op deze dag stonden de Zon, de Aarde en Jupiter in deze volgorde op één rechte lijn. Met behulp van het model kunnen we zien dat we het eerste halfjaar na die datum alleen het einde van de verduisteringen van Io kunnen waarnemen. In tabel 2 staan enkele van die tijdstippen.

Tabel 2

Datum	UT
03 februari 2003	20 h, 21 m
09 februari 2003	03 h, 47 m
10 februari 2003	22 h, 16 m
18 februari 2003	00 h, 11 m
13 mei 2003	23 h, 11 m

Er zijn slechts een paar data in februari gegeven, omdat we de verduistering niet kunnen zien

als Jupiter onder de horizon staat of wanneer de zon boven de horizon staat.

Uit de data van februari is de periode van Io nauwkeurig te berekenen: de afstand van de aarde tot Jupiter verandert dan bijna niet, zoals blijkt uit het model. Hiermee kunnen we voorspellen om hoe laat we de verduistering verwachten op 13 mei.

Wanneer we vergelijken met de tijd in de tabel, zien we iets verrassends: de tijden zijn exact gelijk! Dat betekent dus dat de tijden in de sterrengids *berekende tijden* zijn, niet de tijden waarop we de verduistering werkelijk kunnen zien! Om de lichtsnelheid met data uit de sterrengids te bepalen, moet men dus zelf op een geschikt moment de tijd bepalen waarop Io verdwijnt in of tevoorschijn komt uit een verduistering.

Literatuur

Cohen, B. (1940). Römer and the First Determination of the Velocity of Light (1676). *Isis*, 31(2), 327-379.

Galileo Galilei (2012). *Dialogo over de twee voornaamste wereldsystemen*. Amsterdam: Athenaeum – Polak & Van Gennep.

Helden, A. van (1983). Römer's Speed of Light. *Journal for the History of Astronomy*, XIV, 137-141.

Genseberger, R.J. & L. Fucili (2003). Discovering the speed of light. *Proceedings of the 7th Summerschool of EAAE, Hall in Tirol*. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Genseberger, R.J. & L.Fucili (2004). De ontdekking van de snelheid van het licht. *NVOX*, 30 (2), 74-77.

Huhn, B. (2002). <http://home.t-online.de/home/huhn.abfl/roemer.htm>

Meeus (2002). *Sterrengids 2003*. Utrecht: Stichting de Koepel.

Pecker, J.C. (2001). *Understanding the Heavens*. Berlin, New York: Springer.

Sobel, D. (1995). *Longitude*. London: Penguin Books.

Email: r.j.genseberger@uu.nl