

M. FRANCESIO - A. LAI - G. ZANINI

Liceo Scientifico «Belfiore» - Mantova

STORIA DELLA SCIENZA

De mora luminis, sive diffusione luminis successiva

Ricerca sulle prime misure della velocità della luce (*)

Introduzione

La semplicità di realizzazione dell'esperienza con la quale per la prima volta si è giunti a stabilire che la luce si propaga con velocità finita, esperienza che è stata portata a termine dal matematico-astronomo danese Olaf Roemer (1) nel 1676, ci ha indotti a sperare che detta esperienza potesse essere ripetibile anche a livello didattico e per questo ci siamo proposti di tentarla.

Com'è noto, attorno a Giove ruotano 14 satelliti naturali e i quattro maggiori, Io, Europa, Ganimede e Callisto chiamati anche « Medicei », erano conosciuti fin dagli inizi del 1600 (furono scoperti da Galileo nel 1610) insieme ai loro periodi medi di rivoluzione. L'astronomo Roemer rilevò delle irregolarità nelle misure dei periodi di rivoluzione del satellite Io: essi divenivano più lunghi quando la Terra, nel suo moto di rivoluzione attorno al Sole, si allontanava da Giove, e più brevi quando la Terra si avvicinava a quel pianeta; Roemer pensò che le irregolarità fossero da attribuire al fatto che la luce si propaga con una velocità finita e che fosse finalmente risolto un

(*) Comunicazione tenuta al Congresso di Rimini il 5 Ottobre 1978.

(1) Olaf (o anche Ole, o Olaus) Roemer nacque ad Arhus, in Danimarca, il 25 Settembre 1644. Nel 1662 si recò a Copenaghen per studiare matematica e astronomia con Erasmo Bartolino. Nel 1671 ebbe occasione di collaborare con l'astronomo francese J. Picard, che si era recato in Danimarca per determinare la posizione dell'osservatorio di Ticho Brahe a Uraniburg, e l'anno successivo seguì Picard a Parigi dove divenne assistente presso l'osservatorio della città. Durante il soggiorno in Francia ebbe modo di farsi apprezzare per le sue doti non comuni di osservatore e di studioso e per la sua notevole abilità tecnica e venne presto eletto membro dell'Accademia delle Scienze. Ritornato a Copenaghen nel 1681, ricoperse diversi incarichi fra cui quello di Professore di Matematica e Astronomia presso l'università e quello di sindaco della città. Morì a Copenaghen il 19 Settembre 1710.

Oltre alla scoperta della propagazione non istantanea della luce, si devono a Roemer la scoperta dell'epicloide e della sua importanza nella progettazione delle ruote dentate e la costruzione di numerosi strumenti di precisione per la determinazione delle coordinate stellari.

problema molto dibattuto a quel tempo: quello della istantaneità o meno della propagazione della luce.

Si supponga infatti che Io ruoti con regolarità attorno al suo pianeta e si consideri la luce diffusa dal satellite verso la Terra un attimo prima di eclissarsi dietro al disco di Giove, ad una data rivoluzione ed a quella successiva. E' chiaro che, se la Terra si è avvicinata a Giove nel periodo intercorso durante la rivoluzione di Io, al momento della seconda eclissi la luce dovrà percorrere, per giungere sulla Terra, un tratto più breve di quello percorso alla eclissi precedente ed il periodo di rivoluzione misurato in questo modo risulterà minore di quello medio effettivo. La loro differenza è uguale al tempo impiegato dalla luce per attraversare lo spazio percorso dalla Terra verso Giove durante la rivoluzione di Io.

Poiché tale rivoluzione ha una durata di poco più di un giorno e mezzo, si può trascurare il moto di Giove e, considerando la notevole distanza del pianeta, definire lo spostamento della Terra come

$$\Delta x = -|\Delta l| \cos \alpha,$$

dove, come indica anche la figura 1, Δl rappresenta lo spostamento della Terra sulla sua orbita ed α l'angolo tra la direzione del moto della Terra e la linea visuale a Giove.

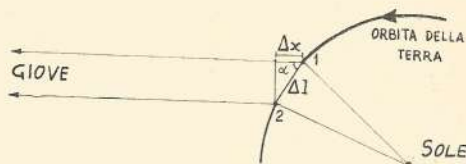


Fig. 1

Indicando con:

T_m = periodo medio di rivoluzione di Io

T = periodo misurato di rivoluzione di Io

c = velocità della luce

si ha dunque che:

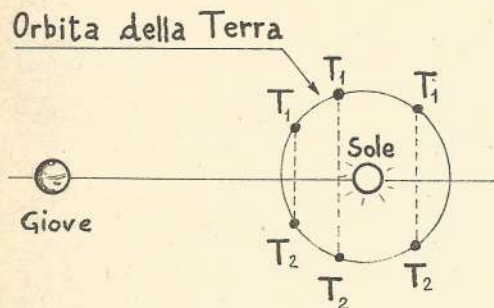
$$c(T - T_m) = \Delta x. \quad (1)$$

Se Δx è negativo e la Terra e Giove si sono avvicinati, allora $T < T_m$; se Δx è positivo e la Terra e Giove si sono allontanati, allora $T > T_m$.

Ovviamente il fenomeno è ancora più accentuato se, anziché considerare una sola rivoluzione, se ne prende un numero n . In tal caso la (1) diventa:

$$c \sum_1^n (T_1 - T_m) = \sum_1^n \Delta x_i. \quad (1')$$

E' interessante osservare che questa relazione vale sempre, qualsiasi sia il segno di ciascuno dei Δx_i che compaiono nella sommatoria. Se ne deduce che, se come momento iniziale e finale si scelgono due istanti T_1 e T_2 tali che la distanza della Terra da Giove non risulti variata, è impossibile misurare c . Questo avviene se si scelgono punti simmetrici rispetto alla congiungente Sole - Giove (Fig. 2).



(Il disegno non è in scala)

Fig. 2

In tutte le considerazioni fatte finora si è sempre trascurato il moto di Giove, considerando che il suo periodo di rivoluzione attorno al Sole è di quasi 12 anni; tuttavia, poiché il suo spostamento angolare è di circa 5° ogni due mesi, esso non può più essere trascurato quando si fa uso della (1') su periodi dell'ordine di qualche mese.

Per ripetere l'esperimento di Roemer, con il preciso intento di determinare l'ordine di grandezza della velocità della luce, pensavamo fosse sufficiente stabilire, per un paio di volte, l'istante in cui Io si eclissava dietro al disco del pianeta. Non appena con i nostri strumenti (telescopi rifrattori con obiettivo di diametro 60 mm e focale 700 mm) ci siamo apprestati a fare osservazioni, si sono presentate delle difficoltà. Innanzitutto, e questo è stato l'inconveniente più grande, le condizioni metereologiche ci hanno spesso impedito di effettuarle. Dall'inizio di Novembre 1977 alla fine di Marzo 1978 vi sono stati solo quattro o cinque giorni, a Mantova, in cui sarebbe stato possibile fare delle osservazioni utili:

negli altri o il tempo era inclemente (e basta che sulla città si stenda un velo di sottile foschia per rendere difficoltosissima e pressoché impossibile l'osservazione dei satelliti soprattutto quando questi si trovano vicini a Giove e sono come assorbiti dalla luce di quello) oppure il satellite Io non si occultava di notte e quindi nonostante la trasparenza dell'aria e del cielo l'osservazione era impossibile.

Se si ha la fortuna di poter assistere ad un occultamento (come ci è capitato nel marzo dello scorso anno quando facevamo i primi tentativi per « prendere dimestichezza » con Giove) si nota che è estremamente difficile poter registrare con una certa accuratezza il momento in cui Io scompare completamente dietro il pianeta, sia perché il fenomeno dura circa tre minuti (il tempo impiegato da Io a percorrere una distanza pari al suo diametro), sia perché quando i due corpi celesti appaiono vicini si verificano fenomeni strani: sembra quasi che Io, che passa dietro al pianeta, intacchi la superficie di Giove come è rappresentato nella Fig. 3 (l'effetto ottico osservato è probabilmente dovuto alla diffrazione della luce [1]). Inoltre, l'immagine barbuglia e perde in nitidezza. Per limitare questo inconveniente il Prof. Fabri, dell'Università di Pisa, ci ha consigliato di lavorare in un periodo in cui Io non si immerge dietro al bordo del pianeta, ma scompare perché entra nel cono d'ombra di Giove (Fig. 4), e ci ha fornito delle tabelle relative ai moti dei satelliti di Giove dove sono riportati, con una precisio-

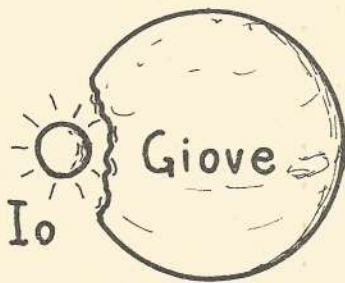


Fig. 3

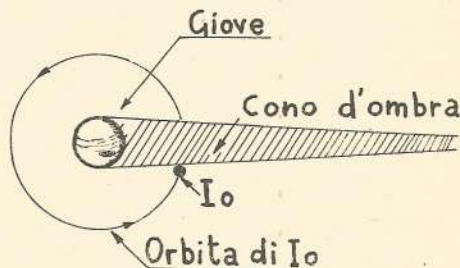


Fig. 4

ne di ± 1 minuto, i giorni e le ore in cui avvengono le eclissi.

Con il metodo indicato, uno di noi è riuscito a fare due osservazioni, rispettivamente il 19 Novembre ed il 14 Dicembre 1977. La prima volta registrò, pur con qualche difficoltà, che Io si occultò nell'ombra di Giove alle ore 22, 36 minuti e 20 secondi (Tempo Universale di Greenwich), nel momento cioè in cui vide cessare i barbugliamenti e tutti quei fenomeni strani che, sia pur in forma meno evidente, erano tuttavia osservabili. La misura si può considerare affetta da un errore pari a ± 10 secondi (2), dovuto essenzialmente a difficoltà di osservazione dato che l'orologio con cui si sono misurati i tempi era regolato quotidianamente sul segnale orario della RAI. Dopo 25 giorni, corrispondenti a 14 rivoluzioni del satellite di Giove, registrò un altro occultamento alle ore 17, 16 minuti e 30 secondi (Tempo Universale di Greenwich). L'intervallo tra le due occultazioni risulta:

24 giorni 18 ore 40 minuti 10 secondi
con un'incertezza sulla misura di 20 secondi.

Nella figura 5 sono rappresentate le posizioni della Terra e di Giove in questo periodo; il disegno è in scala.

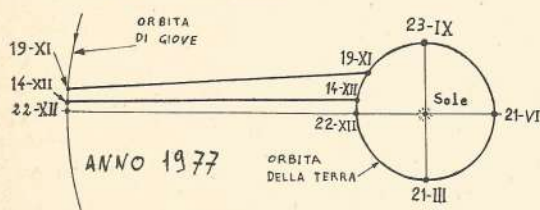


Fig. 5

Se si prova a calcolare l'intervallo tra le due occultazioni sulla base del periodo siderale di Io, che è pari a 1,769138 giorni, tenendo presente che nel frattempo Giove si è spostato sulla sua orbita e quindi il satellite ha dovuto percorrere un po' di più di 14 giri esatti prima di potersi immergere nell'ombra del pianeta, si trova:

24 giorni 18 ore 40 minuti 26 secondi.

La differenza tra il valore misurato e quello calcolato, che rappresenterebbe l'anticipo

$\sum_{i=1}^{14} (T_i - T_m)$, risulta di soli 16 secondi, troppo

piccola e praticamente uguale all'errore di misura: non è quindi stato possibile utilizzarla per calcolare l'ordine di grandezza della velocità della luce che era l'obiettivo che ci eravamo prefissi.

(2) Tale stima dell'incertezza è in accordo con le misure fatte nello stesso periodo da altri astronomi dilettanti, pubblicate su « Sky and Telescope » [2].

D'altra parte, lo spostamento complessivo della Terra nello stesso periodo, dato da

$\sum_{i=1}^{14} \Delta x_i$, risulta di circa 2×10^7 km e poiché

la luce impiega più di un minuto per percorrere tale distanza è evidente che qualcosa non va nella determinazione dell'intervallo

$\sum_{i=1}^{14} (T_i - T_m)$.

Non essendo stato possibile effettuare altre osservazioni per le difficoltà cui si è accennato prima, abbiamo provato a utilizzare dati osservativi forniti da altri astronomi dilettanti [2] e dall'esame di diversi casi è emerso che:

— le osservazioni fatte nello stesso periodo in cui sono state fatte le nostre portano a risultati analoghi a quelli ottenuti da noi. Siamo portati a pensare che forse non siano tanto le misurazioni quanto le approssimazioni introdotte per semplificare il calcolo di c ad essere inadeguate, ma non siamo comunque riusciti a spiegare la cosa;

— le osservazioni fatte in altri periodi dell'anno, soprattutto quando la Terra si allontana da Giove con la massima velocità relativa, il che accade in prossimità della quadratura (3), consentono di ottenere valori accettabili di c come $2,5 \times 10^5$ km/s, $3,4 \times 10^5$ km/s.

Nonostante il nostro insuccesso, l'esperienza acquisita nel tentare l'esperimento ci ha persuasi della sua validità didattica, per lo meno per giovani appassionati di astronomia e che possano disporre di piccoli strumenti come i nostri, perché esso comporta una serie di operazioni teoriche e pratiche, quali la consultazione di un Almanacco astronomico, l'uso di effemeridi, l'individuazione delle posizioni relative della Terra e di Giove in diversi giorni dell'anno ed il calcolo della loro distanza, l'osservazione sistematica di corpi celesti con il telescopio, le misurazioni accurate e le analisi attente dei dati osservativi; operazioni che insegnano a ragionare, a riflettere criticamente sui problemi, a lavorare con pazienza in una ricerca che non si svolge in un paio d'ore di laboratorio in forma controllata, bensì nell'arco di alcuni mesi ed esposta ad ogni genere di imprevisti.

Riteniamo tuttavia che, per assicurare un esito migliore nei risultati e riuscire ad ottenere almeno l'ordine di grandezza della velocità della luce, sia opportuno:

a) operare in condizioni più favorevoli delle nostre, lavorando in luoghi meteorologica-

(3) Posizione di un pianeta per la quale l'angolo pianeta - Terra - Sole è retto.

mente più adatti, dove siano poco frequenti nebbie o foschie;

b) raccogliere un maggior numero di dati osservativi e su un intervallo di tempo dell'ordine di alcuni mesi;

c) fare le osservazioni nei periodi dell'anno in cui la Terra è vicina alle quadrature con Giove e la loro velocità relativa è massima.

Curiosi di vedere quali fossero i dati trovati da Roemer, consultammo testi scolastici, testi universitari, enciclopedie, e, con grande sorpresa, non troviamo alcun accordo tra le varie citazioni: chi dava un valore, chi un altro, chi diceva che Roemer non aveva nemmeno ricavato la velocità della luce dalle sue osservazioni. Abbiamo trovato anche alcuni testi scolastici che non facevano nessun cenno al lavoro dell'astronomo danese e alla determinazione della velocità della luce con mezzi astronomici.

Nella tabella abbiamo riportato in forma

schematica le notizie date dai testi per scuola secondaria superiore (per lo più di Liceo Scientifico) che abbiamo esaminato. Nella prima colonna sono indicati luogo e anno di pubblicazione mentre nelle altre si è cercato di evidenziare in che cosa sia consistito, per gli autori del testo, il contributo di Roemer a questo problema: precisamente,

- se Roemer si sia preoccupato di dimostrare che la velocità della luce è finita e non infinita (seconda colonna);
- quanto tempo avrebbe impiegato la luce secondo Roemer a percorrere il diametro dell'orbita terrestre (terza colonna);
- se Roemer abbia effettivamente determinato la velocità della luce e, in tal caso, quale valore abbia trovato (quarta colonna).

Quando la notizia è incerta o non si capisce bene se il dato sia da attribuire a Roemer o ad altri, abbiamo posto a fianco un punto interrogativo.

Anno e luogo di pubblicazione	Roemer ha dimostrato che la luce si propaga con velocità finita	Tempo impiegato dalla luce per attraversare la orbita terrestre secondo Roemer	Roemer ha calcolato la velocità della luce trovando il valore a fianco indicato (in km s ⁻¹)
1947 Roma	—	—	SI 304.000
1954 Milano	—	996 secondi	SI 300.100 (?)
1960 Firenze	—	—	SI —
1960 Firenze	—	986 secondi	SI 299.000
1962 Torino	—	—	SI 300.000
1962 Milano	SI	1000 secondi	SI 300.000
1963 Torino	SI (?)	15 minuti (?)	SI (?) 300.000 (?)
1963 Milano	SI	—	SI 301.500
1964 Torino	—	—	SI 314.000
1964 Bergamo	SI	22 minuti	SI (?) 210.000 (?)
1968 Treviso	—	—	SI 304.000
1968 Milano	—	—	SI 305.000
1969 Roma	—	—	SI 300.000
1969 Milano	SI	22 minuti	SI (?) 200.000 (?)
1970 Bergamo	SI	—	SI 300.000
1970 Messina	SI	1000 secondi	SI 300.000
1971 Bergamo	—	—	SI 210.000
1971 Varese	—	—	SI 214.300
1971 Torino	—	22 minuti	SI 200.000
1972 Torino	SI	22 minuti	SI 212.000
1972 Bologna	SI	—	SI 200.000
1973 Bologna	SI	—	NO —
1974 Torino	SI (?)	—	SI 210.000
1975 Firenze	SI	22 minuti	SI 210.000
1975 Torino	SI	22 minuti	SI 220.000
1975 Bologna	SI (?)	—	SI 214.300
1977 Bari	—	—	SI 304.000
1977 Bologna	SI	22 minuti	— —
1978 Bergamo	SI	22 minuti	SI 210.000
1979 Firenze	SI	—	SI 225.000

Dalla tabella emergono in modo assai netto le discordanze tra i vari autori. Se si considera inoltre, e lo vedremo meglio più avanti, che:

a) il tempo impiegato dalla luce per percorrere il diametro dell'orbita terrestre, determinato da Roemer in base alle sue osservazioni, è risultato di 22 minuti;

b) non sono rimasti documenti attestanti la effettiva determinazione della velocità della luce da parte di Roemer;

c) i calcoli basati sui dati raccolti da Roemer nelle sue osservazioni sarebbero stati fatti per la prima volta da C. Huygens (4);

si nota chiaramente che solo pochissimi autori hanno saputo riferire i fatti come sono realmente avvenuti. E solo a partire dal 1971 i dati riportati (sia pure attribuiti tutti all'astronomo danese) corrispondono abbastanza da vicino a quelli ottenuti da Roemer e da Huygens.

Nelle altre opere, anche di livello superiore, che abbiamo potuto esaminare le cose vanno un po' meglio di quanto visto per i testi della scuola secondaria superiore. Tuttavia le discordanze sui valori della velocità della luce ottenuti con i dati di Roemer sono ancora abbastanza frequenti e anche in opere di scienziati famosi può capitare di leggere che il valore trovato dall'astronomo danese fu di $313.000 \text{ km s}^{-1}$.

E' stato proprio a causa delle troppe e vistose discordanze tra i vari autori nei fatti riferiti e nei dati riportati che è sorta in noi la necessità di effettuare una ricerca a carattere storico per stabilire come si fossero svolte effettivamente le cose in quel lontano 1676.

(4) Christian Huygens (anche Huyghens o Hugenius), fisico-matematico e astronomo olandese, nacque a L'Aia il 14 aprile 1629. Nel 1654 elaborò la teoria delle evolute ed evolventi delle curve e determinò per primo che Saturno è circondato da un anello e ne scoprì un satellite, Titano. Inoltre dimostrò che la Luna non ha atmosfera e che i suoi mari sono privi di acque. Si accorse anche, nelle sue osservazioni astronomiche, che Marte possiede calotte polari di ghiaccio. Nel 1657 realizzò l'orologio a pendolo e lo descrisse in un opuscolo a cui ne fecero seguito altri sull'orologeria. Dopo i suoi viaggi in Francia e in Inghilterra studiò l'urto dei corpi elastici e si occupò di altri problemi di meccanica. Colbert lo volle alla corte di Luigi XIV e nel 1666 lo nominò all'Accademia delle Scienze.

Nel 1690 pubblicò il celebre « *Traité de la Lumière* », in cui, contrapponendosi alla teoria corpuscolare newtoniana, proponeva e illustrava quella ondulatoria, che solo al principio del XIX secolo poteva incontrare l'assenso generale. Scrisse anche la « *Diottrica* », trattato in cui vengono enunciati i principi della propagazione, della riflessione e della rifrazione della luce.

Morì a L'Aia l'8 giugno 1695.

La ricerca storica

1. Le ricerche che abbiamo condotto per rintracciare i lavori di Roemer e conoscere la vera storia delle prime misure della velocità della luce ci hanno impegnato per parecchio tempo. Non è qui il caso di raccontare le molte visite a diverse biblioteche pubbliche e private fatte da noi o fatte fare da amici e colleghi a Mantova e altrove. Basterà dire che:

a) dall'Accademia delle Scienze di Parigi ci siamo fatti mandare copia della memoria originale relativa alla dimostrazione di Roemer, apparsa su le « *Memoires de l'Académie Royale des Sciences*, Tomo X, Parigi 1730;

b) alla Biblioteca Comunale di Mantova abbiamo trovato l'intera raccolta delle *Memoires* sopra indicate (compresa quella di Roemer che ci eravamo fatti inviare da Parigi!) e nei volumi di questa pubblicazione periodica abbiamo trovato molte notizie riguardo alla nostra storia;

c) alla Accademia delle Scienze di Torino abbiamo potuto consultare diverse opere che si occupano dell'argomento: in modo particolare l'« *Operum Mathematico - Physicorum* » di P. Horrebow, allievo e successore di Roemer all'osservatorio di Parigi, che nel terzo volume dedica alcuni capitoli all'opera del suo maestro. In un capitolo sono riportate, tra l'altro, due lettere che nel 1677 si sono scambiate Huygens e Roemer, le quali ci sono parse forse ancor più interessanti della stessa memoria.

Va detto infine che tutto il materiale procurato ha dovuto essere tradotto, o dal francese o dal latino, e per questo ci è stata assai preziosa la collaborazione di altri amici e altri colleghi.

2. I satelliti di Giove avevano destato, sin dai primi tempi di osservazioni astronomiche, un notevole interesse « a causa delle loro Eclissi, che di solito sono più di 1.300 ogni anno » [3].

Galileo e G. Domenico Cassini, che possono essere considerati i primi ad averli studiati, si proponevano di utilizzarli per la determinazione della longitudine. Infatti, poiché le « rivoluzioni del primo satellite erano state calcolate con grande esattezza, grazie ad un numero molto elevato di misurazioni » [4], Io avrebbe potuto funzionare da "orologio astronomico" e, grazie ad esso, un osservatore sulla terra avrebbe potuto determinare la propria posizione. Fu proprio mentre stava cercando di perfezionare queste tecniche che Cassini si accorse delle irregolarità delle rivoluzioni di Io attorno a Giove e, « in una memoria letta nel mese di agosto 1675 all'Academia » [5].

démie des Sciences di Parigi, come attesta J. B. Du Hamel nella *Regiae scientiarum academiae historia* (Lipsia, 1700)...» disse «...che il fenomeno era originato dal fatto che la "luce non ci perviene dai satelliti se non dopo qualche intervallo di tempo, così che impiega dieci o undici minuti per percorrere uno spazio uguale al semidiametro dell'orbita terrestre" » [5].

In seguito però Cassini cambiò opinione, sia perché le irregolarità del moto di Io non erano rilevabili nei moti degli altri satelliti, sia per non contrastare l'autorità di Cartesio che aveva sostenuto l'istantaneità dello spostamento della luce, provandola con la famosa esperienza delle osservazioni delle eclissi di Luna.

Cartesio sosteneva che se la luce impiegasse un'ora per percorrere la distanza Terra-Luna, durante l'eclissi la Terra, il Sole e la Luna non dovrebbero apparire allineati, contrariamente a quanto accade in realtà. « Ma — come fa rilevare Huygens — bisogna notare che la velocità della luce in questo ragionamento è stata posta in modo che occorre un'ora di tempo per fare il percorso da qui alla Luna. Se si suppone che non occorra per ciò che un minuto di tempo... allora non è facile accorgersene nelle osservazioni d'eclisse, né per conseguenza è permesso di concluderne nulla per il movimento istantaneo della luce » [6].

Roemer deve avere ragionato allo stesso modo perché continuò sulla strada inizialmente battuta da Cassini fino a quando, e lo ricorda una lapide commemorativa apposta nell'osservatorio astronomico di Parigi, « scrisse la prima nota su la velocità della luce » [7]. In seguito, « all'inizio di Settembre egli annunciò che se la sua supposizione fosse stata vera, una Emersione del primo satellite, che sarebbe dovuta avvenire il 16 Novembre successivo, si sarebbe verificata 10 minuti più tardi di quella prevedibile con il calcolo consueto. L'avvenimento rispose alla predizione di Roemer. Malgrado questo successo, essendo il concetto molto nuovo, non ci si arrese ancora: si restò in guardia contro il fascino della novità » [8].

La dimostrazione della propagazione finita della luce, letta all'Accademia delle Scienze di Parigi, fu divulgata dal « Journal des Sçavans » del 7 dicembre 1676 [9]. Essa è riportata nelle Memorie dell'Accademia [10] ed è proprio la memoria di tale dimostrazione che noi riproponiamo in originale e con la relativa traduzione.

DIMOSTRAZIONE RELATIVA AL MOVIMENTO DELLA LUCE TROVATO DAL SIGNOR ROEMER (traduzione)

Da molto tempo i filosofi si danno da fare per decidere con qualche esperienza se l'azione della luce si porta in un attimo a qualunque distanza o se richiede del tempo. Il Signor Roemer dell'Accademia Reale delle Scienze si è valso di un mezzo tratto dalle osservazioni del primo Satellite di Giove, tramite il quale egli dimostra che la luce ha bisogno di meno di un secondo di tempo per attraversare una distanza di circa 3000 leghe, quale è pressappoco la grandezza del diametro della Terra.

Sia A il Sole, B Giove, C il primo Satellite che entra nell'ombra di Giove, per uscirne in D, e sia EFGHKL la Terra posta a diverse distanze da Giove.

Ora supposto che trovandosi la Terra in L verso la seconda quadratura di Giove, un osservatore posto su di essa abbia visto il primo Satellite al momento della sua emersione o uscita dall'ombra in D; e che poi circa 42 ore e mezza dopo, cioè dopo una rivoluzione di questo Satellite, trovandosi la Terra in K, lo veda di ritorno in D, è chiaro che se la luce richiede del tempo per attraversare l'intervallo LK, il Satellite sarà visto più tardi di ritorno in D, di quanto non sarebbe stato se la Terra fosse rimasta in K; per cui il periodo di rivoluzione di questo Satellite, così osservato con le emersioni, sarà ritardato di tanto tempo quanto la luce ne avrà impiegato a passare da L in K, e al contrario nell'altra quadratura FG, dove la Terra avvicinandosi precede la luce, i periodi di rivoluzione misurati con le immersioni sembreranno tanto accorciati quanto quelli misurati con le emersioni erano sembrati allungati; e poiché nelle 42 ore e mezza che il Satellite impiega pressappoco a fare ogni rivoluzione, la distanza fra la Terra e Giove nell'una e l'altra quadratura varia di 210 diametri della Terra, ne deriva che se per percorrere un diametro della Terra occorresse alla luce un secondo di tempo, essa impiegherebbe 3,5 minuti per ciascuno degli intervalli FG, KL, il che causerebbe una differenza di circa mezzo quarto d'ora tra due rivoluzioni del primo Satellite, di cui una sarebbe stata osservata in FG, e l'altra in KL, mentre non vi si nota nessuna differenza sensibile.

Non ne deriva tuttavia che la luce non richieda tempo per attraversare il diametro dell'orbita terrestre; infatti dopo aver esaminato la cosa da più vicino, il Signor Roemer ha trovato che ciò che non era avvertibile in due rivoluzioni, diventava molto notevole rispetto a parecchie prese insieme, e che per

esempio, 40 rivoluzioni osservate dal lato F, erano sensibilmente più corte che 40 altre osservate dall'altro lato in qualunque posto Giove si fosse incontrato, e ciò a ragione di

Memoria originale di O. Roemer, riprodotta da le «Memoires de l'Académie Royale des Sciences», Parigi 1730, Tomo X, pag. 575 e segg. La mancanza della lettera F nella figura è dovuta a un errore di stampa nel disegno originale.

DEMONSTRATION

*Touchant le mouvement de La Lumiere trouvé
Par M. ROEMER.*

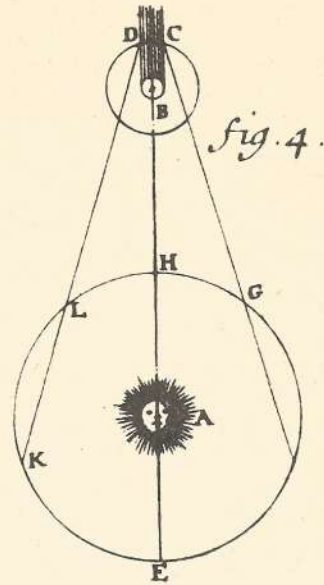
Il y a longtems que les Philosophes font en peine de décider par quelque Expérience, si l'action de la Lumiere se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. M. Roemer de l'Académie Royale des Sciences, s'est avisé d'un moyen tiré des Observations du premier Satellite de Jupiter, par lequel il démontre que pour une distance d'environ 3000 lieues, telle qu'est à peu près la grandeur du diamètre de la Terre, la lumiere n'a pas besoin d'une seconde de temps.

576 MEMOIRES DE MATHEMATIQUE

Pl. 4. Fig. 4. Soit A le Soleil, B Jupiter, C le premier Satellite qui entre dans l'ombre de Jupiter, pour en sortir en D, & soit EFGHKL la Terre placée à diverses distances de Jupiter.

Or supposé que la Terre étant en L, vers la seconde Quadrature de Jupiter ait vu le premier Satellite, lors de son émerison ou sortie de l'ombre en D; & qu'ensuite environ 42 heures & demie après, sçavoir après une révolution de ce Satellite, la Terre se trouvant en K, le voye de retour en D, il est manifeste que si la lumiere demande du temps pour traverser l'intervalle L K, le Satellite sera vu plus tard en D, qu'il n'auroit été si la Terre étoit demeurée en K, de sorte que la révolution de ce Satellite, ainsi observée par les émersions, sera retardée d'autant de temps que la lumiere en aura employé à passer de L en K, & qu'au contraire dans l'autre Quadrature FG, ou la Terre en s'approchant va au devant de la lumiere, les révolutions des immerisions paroîtront autant accourcies que celles des émersions avoient paru allongées; & parce qu'en 42 heures & demie que le Satellite employe à peu-près à faire chaque révolution, la distance entre la Terre & Jupiter dans l'une & l'autre Quadrature, varie tout au moins de 210 diamètres de la Terre, il s'ensuit que si pour la valeur de chaque diamètre de la Terre il falloit une seconde de temps, la lumiere employeroit 3 $\frac{1}{2}$ minutes pour chacun des intervalles FG, KL, ce qui causeroit une difference de près d'un demi quart d'heure entre deux révolutions du premier Satellite, dont l'une auroit été observée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune difference sensible.

Il ne s'ensuit pas pourtant que la lumiere ne demande aucun temps; car après avoir examiné la chose de plus près, il a trouvé que ce qui n'étoit pas sensible en deux révolutions, devenoit très-considerable, à l'égard de plusieurs



ET DE PHYSIQUE. 577

plusieurs prises ensemble, & que par exemple, 40 révolutions observées du côté F, étoient sensiblement plus courtes que 40 autres observées de l'autre côté en quelque endroit que Jupiter se soit rencontré, & ce à raison de 22 pour tout l'intervalle HE, qui est le double de celui qu'il y a d'ici au Soleil.

La nécessité de cette nouvelle équation du retardement de la lumiere, est établie par toutes les Observations, qui ont été faites à l'Académie Royale, & à l'Observatoire depuis 8 ans, & nouvellement elle a été confirmée par l'émerison du premier Satellite observée à Paris le 9 Novembre dernier à 5 heures 35 minutes 45 secondes du soir, 10 minutes plus tard qu'on ne l'eut dû attendre, en la déduisant de celles qui avoient été observées au mois d'Aoust, lorsque la Terre étoit beaucoup plus proche de Jupiter, ce que M. Romer avoit prédit à l'Académie dès le commencement de Septembre; mais pour ôter tout lieu de douter que cette inégalité soit causée par le retardement de la lumiere, il démontre qu'elle ne peut venir d'aucune excentricité, ou autre cause de celles qu'on apporte ordinairement pour expliquer les irrégularitez de la Lune & des autres Planetes. Bien que néanmoins il se soit apperçu que le premier Satellite de Jupiter étoit excentrique, & que d'ailleurs ses révolutions étoient avancées ou retardées à mesure que Jupiter s'approchoit ou s'éloignoit du Soleil, & même que les révolutions du premier mobile étoient inégales, sans toutesfois que ces trois dernieres causes d'inégalité empêchent que la premiere ne soit manifeste.



22 (minuti) per tutto l'intervallo HE, che è il doppio di quello che c'è da qui al Sole.

La veridicità di questa nuova equazione del ritardo della luce, è stabilita da tutte le osservazioni che sono state fatte all'Accademia Reale, e all'Osservatorio da 8 anni, e nuovamente essa è stata confermata dall'emersione del primo Satellite osservata a Parigi il 9 Novembre (5) scorso alle ore 5, 35 minuti, 45 secondi della sera, 10 minuti più tardi di quanto si fosse dovuto attendere, deducendola da quelle che erano state osservate nel mese di Agosto, quando la Terra era molto più vicina a Giove, cosa che il Signor Roemer aveva predetto all'Accademia fin dall'inizio di Settembre; ma per togliere ogni dubbio riguardo al fatto che questa ineguaglianza sia causata dal ritardo della luce, egli dimostra che non può venire da nessuna eccentricità o altra causa di quelle che si danno di solito per spiegare le irregolarità della Luna e degli altri Pianeti. Egli si era accorto sì che il primo Satellite di Giove era eccentrico, e che d'altronde le rivoluzioni erano in anticipo o in ritardo man mano che Giove si avvicinava o si allontanava dal Sole, e persino che le rivoluzioni del primo mobile erano ineguali, ma queste tre ultime cause di ineguaglianza non impedivano che la prima si fosse manifestata.

3. La portata della scoperta ebbe carattere internazionale: le « *Philosophical Transactions* » di Londra del 25 giugno 1677 pubblicarono l'articolo apparso sul « *Journal des Sçavans* » del 7 dicembre 1676 e fu proprio grazie a questa pubblicazione che Huygens venne a conoscenza della rivoluzionaria scoperta.

Per avere informazioni più precise egli scrisse a Roemer: la lettera datata 15 settembre 1677, in latino, è riportata qui unitamente alla traduzione.

Nella lettera Huygens richiama anche il ragionamento di Cartesio, per spiegare come mai da esso non si potesse dedurre la finitezza della velocità della luce se il suo valore è così grande come la teoria di Roemer sembra indicare.

(5) Nella « *Histoire de l'Académie...* » citata al numero [8] si parla, invece, del 16 Novembre e non ci è stato possibile accertare quale delle due date sia quella sicura. Tuttavia, in un elenco di dati osservativi riportati da P. Horrebow [13] e attribuiti a Roemer, a proposito del primo satellite di Giove alla pagina 132 si legge: *1676. Novembris - 9. Hor. 5. 45. 35. Emersio.* e si tratta dell'unica osservazione effettuata nel Novembre di quell'anno che risulti nell'elenco. Si noti l'inversione dei numeri di minuti e di secondi rispetto al dato riportato nella memoria.

LETTERA DI C. HUYGENS A ROEMER (traduzione)

Sul ritardo, ovvero sulla propagazione non istantanea della luce.

Ho appreso da poco dal diario Filosofico Londinese della straordinaria scoperta con cui hai cercato di richiamare l'attenzione di molti sulla immensa velocità della luce.

Poiché è evidente l'importanza di questo argomento, non posso non congratularmi con te a questo proposito ed esortarti affinché, per confermare un così grande risultato, tu, non appena possibile, pubblici tutte le osservazioni raccolte in tanti anni e ogni altra notizia sull'argomento.

In questi giorni, riconsiderando con maggiore attenzione l'argomento con cui Cartesio tentò di dimostrare in base alle eclissi lunari che la luce si propaga istantaneamente, ho dedotto che la velocità della luce sarebbe incredibile, poiché essa coprirebbe in dieci secondi una distanza di almeno 30 diametri terrestri, tanti quanti ci separano dalla Luna: invece, secondo le tue osservazioni, se sono vere come mi auguro, sarebbero necessari appena tre secondi, e forse nemmeno due se si stimasse la distanza Terra-Sole pari a 12.000 diametri terrestri: appunto per questo non vi era nulla da sperare dalle eclissi di Luna per misurare una velocità così straordinaria.

Certamente si deve tenere in maggior conto la tua dimostrazione, poiché, oltre a quella da te indicata, non sembra esistere alcun'altra strada per conoscere questo fatto, degno di essere accolto in ogni filosofia. Tuttavia, desidero sapere se gli illustri Cassini e Picard sono completamente d'accordo con te e in che modo Cassini concilia la sua teoria sui satelliti di Giove con questa nuova scoperta.

Comunque, poiché sembra che nel diario Londinese il traduttore si sia allontanato in qualche particolare dal tuo pensiero, vorrei che tu mi inviassi le pagine del vostro Diario Francese che contengono le tue considerazioni.

Per quanto ho potuto capire dalla versione inglese, tu hai calcolato in 22 minuti il tempo impiegato dalla luce per percorrere il diametro dell'orbita terrestre; e così, se ho calcolato bene, la luce in un secondo percorrerà circa dieci diametri terrestri, e ciò, qualora venga confermato da prove sicure, quanto più appare incredibile, tanto più si deve ritenere bello e divino.

Ti saluto, Dottissimo Roemer. Spedita da L'Aia il 15 settembre 1677.

EPISTOLA CHRISTIANI HUGENII
ad ROEMERUM,

De mora luminis, sive diffusione luminis successiva.

Non nisi nuper admodum e diario Philosophico Londinensi egregium illud inventum tuum didici, quo lucis celeritatem immensam ad numeros revocare aggressus es. Quod cum mihi quantivis pretii esse videatur, non potui, quin hisce literis tibi eo nomine gratularer, hortarerque una, ut tantæ rei confirmandæ gratiâ, cum primum commodum erit, observationes omnes à tot jam annis collectas, quæque alia ad negotium hoc spectant, in lucem emittas. Ego cum hisce diebus Cartesii argumentum illud diligentius expendere, quo lucem momento temporis indivisibili ferri ex Lunæ eclipsibus probare conatus est, incredibilem quidem celeritatem agnovi, quæque ad minimum 30 terræ diametros, quibus à nobis Luna abest, decem scrupulis secundis conficeret: tunc autem observationes si, quod auguror, veræ sunt, vix jam tribus scrupulis secundis opus erit, ac ne quidem duobus, si mecum 12000 diametris terræ & Solis distantiam æstimes: adeoque ex Lunæ eclipsibus nihil sane sperandum erat, quo celeritatis ineffabilis mensura cognosceretur. Quo pluris profecto faciendum epichierema tuum, quod præter id nulla via superesse videatur explorandæ rei in omni Philosophia scitu dignissima. Cupio vero intelligere, an prorsus tecum sentiant viri Clarissimi Cassinus & Picardus, & quomodo ille theoriam suam comitum Jovialium novo huic invento accommodet. Caterum quia in diario Londinensi nonnihil a mente tua aberrasse videtur Interpres, vellem ut pagellam e Diario Vestro Gallico ad me mittas, quæ tua verba continet; non enim adhuc vidi. Quantum autem ex Anglica versione intelligere potui, 22 scrupulis primis horariis transitum lucis per diametrum orbis annui taxasti; atque ita, si bene calculum posui, uno scrupulo secundo circiter 10 diametros terræ pervolabit, quod quanto videtur incredibile, tanto pulchrius diviniusque censeretur, si indubitatæ rationibus comprobetur. Vale, Doctissime Remere. Datum Hage Comitum d. 15 Sept. Ann. 1677.

4. La risposta di Roemer ad Huygens, che reca la data del 30 settembre 1677, merita una attenta lettura per la ricchezza di informazioni e di particolari. Scritta anch'essa in latino, viene riportata qui di seguito insieme alla traduzione in lingua italiana.

LETTERA DI ROEMER AD HUYGENS
(traduzione)

Risponde Roemer sul moto della luce.

Tre giorni fa mi è stata consegnata la tua graditissima lettera dalla quale appare quanto valore tu attribuisca ai miei tentativi nella ricerca sulla luce in base alle osservazioni dei satelliti di Giove, e con quanta benevolenza, come è tua abitudine, valuti i miei lavori. Non posso nasconderti che ho provato un immenso piacere e ho baciato la tua lettera, che ritengo il riconoscimento più grande e più ambito che mai potessi ricevere o sperare per quella mia scoperta.

Ti prego di assumere la difesa di quel mio lavoro; se ti sembra degno di te, con molto piacere te lo offro e te lo dedico.

Sarà mia preoccupazione ordinare e preparare al più presto per la pubblicazione le osservazioni fatte e ogni altra cosa utile ad una trattazione più completa dell'argomento, come se dovessi sottoporla esclusivamente al tuo giudizio; e se avrò la tua approvazione, potrò vantarmi di avere ottenuto la stima di tutti coloro che non sono ben disposti perché prevenuti, o non sono in grado di comprendere i calcoli astronomici perché poco esperti.

Frattanto ti mando le pagine del Diario Francese che mi chiedi. Quanto è in esse contenuto è stato letto all'Accademia, e per sua autorevole sollecitazione consegnato all'Estensore del Diario; tuttavia eventuali errori di calcolo sono imputabili solo a me.

Quanto ai Signori Picard e Cassini di cui vuoi conoscere il parere sull'argomento, il primo è completamente d'accordo con me, il secondo invece dubita che si debba attribuire alla luce la causa delle irregolarità, poiché ciò non troverebbe corrispondenza nel comportamento degli altri satelliti più esterni; sebbene io creda di avere risposto a tempo e luogo a quella obiezione, tuttavia, poiché sembra che egli continui ad essere dello stesso parere, sottopongo al tuo giudizio la mia risposta.

Le ragioni per cui i tre satelliti esterni non possono servire alla ricerca sul moto della luce, si possono riassumere in quattro punti:

I. Le loro immersioni ed emersioni sono più rare.

II. Il momento in cui si accostano all'ombra è meno preciso, sia per il loro movimen-

to più lento, sia perché entrano nel cerchio d'ombra con una grandissima inclinazione.

III. La loro inclinazione e i loro moti non sono noti al punto da non dar luogo a discrepanze di parecchi minuti nelle incidenze oblique.

IV. E' noto che i satelliti presentano delle irregolarità non ancora esattamente determinate, dovute alla loro eccentricità o a qualunque altra causa, che rendono le osservazioni discordanti, rispetto alla teoria di Cassini, di un intervallo di tempo più grande del doppio o del triplo di quello in discussione e che si determina in base al primo satellite.

Questi fenomeni sono più che evidenti nel terzo e nel quarto satellite; ma quanto al secondo, che maggiormente dovrebbe avvicinarsi alla regolarità del primo, si deve aggiungere che si sposta enormemente in longitudine, senza dubbio per la maggior eccentricità (ricordo che esso ha mancato le previsioni dei calcoli perfino di quasi tre quarti d'ora), e in latitudine: il Signor Cassini ed io abbiamo osservato contemporaneamente, tre o quattro giorni fa, che il secondo satellite nell'ultima congiunzione si era trovato al di sotto del primo dopo l'emersione di entrambi dall'ombra, mentre avrebbe dovuto, in base alla teoria della latitudine, trovarsi al di sopra: questo fatto riuscì abbastanza nuovo al Signor Cassini che fino a quel momento aveva creduto che le orbite di tutti i satelliti fossero sullo stesso piano. Ma anche se le cose non sono proprio così, per il secondo satellite tutto è almeno doppiamente più difficile da determinare che non per il primo.

Se le cose stanno come ho detto, è evidente che le irregolarità dei tre satelliti più esterni, di cui non si conosce la causa, non infirmano per nulla i calcoli che si possono dedurre dai fenomeni del primo. Le sue frequentissime rivoluzioni infatti, più facilmente si possono ricondurre a regole, soprattutto perché il disco di Giove ne occupa una parte sensibile dell'orbita e quindi le diverse latitudini non impediscono che il satellite passi per la parte mediana dell'ombra di Giove. Questa è la ragione per cui, lasciati da parte il secondo, il terzo e il quarto satellite, non potevo sperare in alcun aiuto per la mia ricerca se non ed esclusivamente dal primo, alla cui osservazione unicamente mi sono dedicato.

Di questo lavoro ti manderei volentieri qualche parte a titolo esemplificativo; ma fino a questo momento non ho avuto la possibilità di trarre qualche cosa di ordinato da quella enorme quantità di schede e di calcoli. Preparerò tuttavia un breve elenco dei miei tentativi, dai quali, quando avrai tempo, potrai

EPISTOLA ROEMERI ad HUGENIUM.

Respondet Roemerus de motu luminis.

Nudius tertius tradebantur mihi gratissime tue literæ, quibus indicavisti, quantum pretium status conatibus meis circa inquisitionem luminis ex observationibus satellitum Jovis, quamque benigne de meis rebus pro more tuo iudices. Non possum dissimulare, quod profusissimam inde sentiam voluptatem, tuamque illam epistolam exosculer tanquam maximum & sufficientissimum ejus inventi fructum, qui unquam mihi poterit vel contingere, vel sperari. Suscipe, queso, ejus negotii patrocinium; si te dignum videatur, libentissimo animo tibi sit datum dicatumque. ¹ Meum erit, quam primam fieri potest, & observationes ipsas & reliqua, quæ ad eam materiam perscrutandam spectant, ita digerere & ad publicum preparare, ac si tuo unius iudicio esset satisfaciendum; cui quidem si me probavero, omnium recte sententiarum calculos me obtulisse gloriabor. Magnam quoque mihi erit laboris compendium superficere infinitis, quæ afferri necesse esset in eorum gratiam, qui vel preoccupati voluit, vel inexercitati nequeant Astro-nomicorum ratiociniorum momenta discernere. Interea istud Diviti Gallici Julianæ, quod petis, transmittito. Quæsitum ibi continetur, in Academia est recitatum, ejusque sub auspicio Antonii Dierii traditum; errores nihilominus calculi, si qui sunt, mihi soli sunt imputandi. Dommus Picardum & Cassinum, quod antinet, quorum iudicium de illa re cognoscere desideras, ille quidem plane mecum sentit; ille vero dubitabit reponere causam istius irregularitatis in lumine, propterea quod non satisfaciat phenomenon reliquorum satellitum exteriorum; cui dubio quantumvis tunc temporis debite me respondisse credam, nihilominus, quod adhuc illud foreere videatur, meum responsum hic tibi examinandum commendo. Obsacula, quæ impediunt, quo minus tres exteriores satellites inquisitionis motus luminis infervere possint, ad quatuor capita referendam:

I. Immerstones & emersiones eorum sint variores.

II. Momenta appulsuum ad umbram minus sunt precisa & ob motum

eorum lentorem, & quod usplurimum oblique incidant in peripheriam umbræ.

III. Inclinationes & nodi eorum non tam sunt cogniti, quin in obliquis incidentiis plurimorum minorum introcat discrepantia.

IV. In confesso est, ipsos habere irregularitates nondum determinatas, sive illud eccentricitas sit, sive quæcumque alia causa, quæ observationes facit aberrare a theoris Dn. Cassini duplo vel triplo majori temporis spatio; quam est illud, quod hic inquirimus, & ex primo satellite determinamus.

Hæc quidem plus quam satis manifesta sunt in tertio & quarto satellite; sed de secundo, qui propius accedere deberet ad regularitatem primi, insuper notandum, eum enormiter aberrare & in longitudine, sine dubio ob majusculam eccentricitatem, meningue illum vel ad tres boreæ quadrantes calculum elassisse, & in latitudine: observavimus eum simul ante tres vel quatuor dies Dn. Cassinus & ego dictum secundum satellitem in conjunctione ulteriori fuisse infra primum post emersionem auribusque ex umbra, cum tamen debuisset ex theoria latitudinis esse supra: quod satis novum accidit Dn. Cassino, qui hac usque credidit, omnium satellitum orbitas esse in eodem plano. Et si vel maxime hoc non esset, omnia tamen ad minimum duplo sunt assiduciora determinatu in secundo, quam in primo. Quæ si ita se habent, clarissimum est, incogitatas irregularitates trium exteriorum, cuius frequentissime revolutiones ex primi phenomenon deducuntur, cuius frequentissime revolutiones facilius ad regulas revocantur ob hoc imprimis, quod discus Jovis sensibilem orbem ipsius primi satellitis partem occupat, unde latitudines non impediunt, quo minus ipse planeta transeat per medium umbræ Jovis; & hæc in causa sunt, quamobrem, relictis secundo, tertio & quarto, ad meum negotium nihil subsidii sperarem nisi a solo primo, cui examinando me unice addixi. Cuius quidem laboris aliquam partem ceu specimen libenter transmittorem; sed jam mihi non integrum fuit, aliquid ordinati ex ea turba schedarum & calculorum excerpere. Concinnabo nihilominus brevem conatum meorum synopsis, unde, quando tibi otium erit, non difficulter dignosces, a qua parte fundamta

menta ratiociniorum meorum apparerent firma, & a qua parte vacillarent. Contuli & examinavi omnes observationes eclipsium primi satellitis, quas Dn. Picardus solus vel mecum fecit, inde ab anno 1668; sunt vero pluraquam 70. Ex illis vero excerpse & comparavi intervalla sequentia:

Terrâ a Jove recedente Mart. 1671.	Maj. 1671.
accedente Octobr. 1671.	Febr. 1672.
recedente Mart. 1672.	Jun. 1672.
accedente Nov. 1672.	Mart. 1673.
recedente Apr. 1673.	Aug. 1673.
recedente Jul. 1675.	Octobr. 1675.
accedente Maj. 1676.	Nov. 1676.
recedente Jun. 1677.	Jul. 1677.

Recedente jam Tellure a Jove, observatur tardatio accessuum, quamvis ultra quadraturam futura sit sensibiltor. Nec acquievi nisi observationum pari, sed ut plurimum ex tribus vel quatuor hinc conclusionem meam formavi. Inventaque sunt per totum illud sexennium temporaria emersionum intervalla, terrâ a Jove recedente, productiora intervallis mediis; immerisionum vero, terrâ accedente, contractiora. Etque hoc verissimum non tantum de plurimis, sed de omnibus, modo intervalla sumantur longiora: Nam in brevioribus hallucinatio observationum & inconstantia æris parvam differenciam reddunt insensibilem. Ita se habent observata & observatorum universales consideratio. Pro determinatione vero illorum 22 minorum elegi imprimis observationes annorum 1671. 72. 73. tum quod eo tempore habuerimus frequentiores, tum propterea quod Jupiter anno 1672 existeret in suo aphelio sibi similis & in motu, & in intervallis a Sole. Sed cum non tam mihi cordi esset, hypothesi Astronomicam invenire, quam cognoscere naturam motus luminis certitudinè aliqua Physica, inquirendam mihi erat, num illa irregularitas aliunde posset provenire, in quem faciem ex ipsi observationum circumstantiis sequentia demonstravi. Scilicet irregularitatem illam

I. Non provenire ex anomalia Jovis.

II. Non ex anomalia Terræ, seu æquatione temporis.

III. Nec ex configuratione reliquorum satellitum cum hoc ipso primo.

R

IV. Nec

IV. Nec ex configuratione Solis, ut in Luna.

V. Nec ex atmosphaera Jovis. Quæ omnia satis patent ex eo, quod nihil horum commensurable sit cum restitutione Telluris ad Jovem.

VI. Nec etiam, quod palmarium est, ex motu alicujus eccentricitatis orbite ipsius satellitis. Nam eadem acceleratio & tardatio, quæ existit in appulsibus ad umbram in conjunctione ulteriori, etiam ad unguem observatur in conjunctione citiori, tam in appulsibus ad limbum Jovis, quam in transitibus umbræ per discum.

Hæc quidem quo neque valent in adstruenda nova luminis ipse videris. Mihi certe apparet ejusmodi hypotheseos veritatem non alia via posse impugnari, quam si excogitetur aliquis alius irregularitatis fons: æque ad minimum verisimilit, cuius periculus æqualis sit ipsi restitutioni terræ ad Jovem, quique aliquid habeat analogum in reliquo mundi systemate; veluti motus luminis analogus censeri potest motui soni.

Optandam quidem esset, haberi aliquam immediatam & positivam confirmationem hujus rei; sed, ut recte monuisti in literis tuis, nulla alia supersse via videtur, nisi forte revolutio Jovis circa axem suam aliquam spacem præbeat, si modo macula ista Cassiniana in eodem Jovis loco fixa remaneat, de quo tamen dubitare licebit, cum identidem evanescat & restituitur: Jam enim redivit est a mense Julio, postquam per tres annos delinuerit. Apparet vero in eodem circiter situ respectu satellitarum; & locus ejus non male in longitudinale respiciet calculo Dn. Cassini. Habeo vero hoc mense Septembri observationes accuratissimas conferendas cum illis, quas venabor in Decembri, Jove quadraturam prætergresso. Que spes si non fallat, credo negotium confectum, nec ullum relictum locum dubitandi de nova luminis. Dn. Cassinus ante aliqnod tempus observavit ingredinem in satellite tertio transiente per discum Jovis; & ego uni cum ipso, eodem modo transiente quarto per discum, vidimus nigrorem multo sativorem, quam est ipsarum umbrarum, quod indicio est; illos planetas maximum sui partem esse obscuros. De quarto testari possum, partem ejus obscuram multo majorem esse, quam claram, multoque nigriorem, quam est illa macula rei Jovis, vel Lunæ plenæ. Duo menses sunt, ex quo Dn. vicardus & ego maximam temporis partem sumus Versaliti occupati libellatoribus: Ollidum est, quod ipse solus tibi egit, iniquiore valetudine me hic deridente. Sed exposui summam rei, de qua præcipue agitur; obtestor vero, ut duobus verbis, quid sentias, communicare digneris: ego quidem proxima occasione juxta dulum eorum, quæ admoneris, reliqua particularius perscrivarè; dudum enim limitæ epistole sum transgressus. Prosperorem tibi appetor valentiam, tuoque favori me imponi commendo. Parisiæ ex Observatorio d. 30 Sept. 1677.

facilmente capire dove i fondamenti della mia teoria appaiono sicuri e dove appaiono vacillanti.

Ho raccolto ed esaminato tutte le osservazioni delle eclissi del primo satellite che il Signor Picard fece da solo o con me dal 1668 ad oggi; sono più di settanta. Fra di esse ho scelto e confrontato gli intervalli seguenti:

Terra rispetto a Giove in fase di

allontanamento	Marzo	1671 - Maggio	1671
avvicinamento	Ottobre	1671 - Febbraio	1672
allontanamento	Marzo	1672 - Giugno	1672
avvicinamento	Nov.	1672 - Marzo	1673
allontanamento	Aprile	1673 - Agosto	1673
allontanamento	Luglio	1675 - Ottobre	1675
avvicinamento	Maggio	1676 - Nov.	1676
allontanamento	Giugno	1677 - Luglio	1677

Quando la Terra si allontana da Giove, nelle riapparizioni del satellite si osserva un ritardo destinato a diventare più sensibile oltre la quadratura. Non mi sono però accontentato di una sola coppia di osservazioni, ma per abbondare ho tratto le mie conclusioni da tre o quattro coppie. Ed ho scoperto che in quei sei anni, quando la Terra si allontana da Giove, gli intervalli temporali delle emersioni sono più lunghi degli intervalli medi; quando invece la Terra si avvicina a Giove, gli intervalli delle immersioni sono più brevi. E questo è verissimo non solo per la maggior parte dei casi, ma sempre, purché si prendano in esame intervalli alquanto lunghi: infatti in quelli più brevi gli errori di osservazione e le condizioni atmosferiche incostanti rendono insensibile la piccola differenza. Le osservazioni e l'insieme delle considerazioni fatte su di esse sono a questo punto.

Quanto alla determinazione di quei 22 minuti, ho scelto anzitutto le osservazioni degli anni 1671, 72, 73, sia perché in quel tempo ne abbiamo fatte più frequentemente, sia perché nel 1672 le condizioni di Giove, che si trovava all'afelio, erano pressoché costanti per velocità e per distanza dal Sole. Ma, poiché non mi stava a cuore trovare una ipotesi astronomica, quanto piuttosto conoscere la natura del movimento della luce partendo da qualche dato fisico certo, io dovevo cercare se quella irregolarità potesse avere qualche altra origine. A questo fine dimostrai quanto segue, partendo dagli stessi dati delle osservazioni.

Scopersi che quella irregolarità:

I. non deriva da una anomalia di Giove;

II. né da un'anomalia della Terra, o dall'equazione del tempo;

III. né dalla posizione degli altri satelliti rispetto al primo;

IV. né dalla posizione del Sole, come avviene per la Luna;

V. né dall'atmosfera di Giove. Queste affermazioni sono smentite per il fatto che nulla in esse è commensurabile con il ritorno della Terra nella stessa posizione rispetto a Giove.

VI. Essa non dipende nemmeno, cosa evidentissima, da qualche variazione di eccentricità dell'orbita del satellite. Infatti l'anticipo e il ritardo che si verificano in prossimità dell'ombra nella congiunzione superiore, si osservano con assoluta esattezza anche nella congiunzione inferiore, sia negli accostamenti al bordo di Giove, sia nei passaggi dell'ombra (del satellite) attraverso il disco.

Valuterai tu stesso quale peso abbiano queste considerazioni nel provare il ritardo della luce. Sono persuaso che la verità di una tale ipotesi non si possa attaccare altrimenti se non trovando qualche altra causa delle irregolarità (osservate) altrettanto verosimile, con una periodicità corrispondente al ritorno della Terra nella stessa posizione rispetto a Giove, e che abbia qualche analogia nel resto dell'universo; allo stesso modo che il moto della luce si può ritenere analogo a quello del suono.

Sarebbe stato invero desiderabile avere qualche immediata e positiva conferma di questo fenomeno, ma, come giustamente mi hai fatto presente nella tua lettera, sembra che non rimanga altra via: a meno che dia qualche speranza, eventualmente, la rotazione di Giove attorno al suo asse, a patto che la ben nota macchia di Cassini mantenga una posizione invariata sulla superficie di Giove, cosa della quale è lecito dubitare, dal momento che essa ripetutamente svanisce e riappare: infatti è riapparsa dal mese di Luglio dopo che per tre anni non si era più vista. Essa appare pressappoco nello stesso luogo rispetto alle fasce; e la sua posizione in longitudine non risponde male al calcolo del Signor Cassini. Questo Settembre ho fatto osservazioni accuratissime da confrontare con quelle che cercherò di fare in Dicembre quando Giove avrà superato la quadratura. Se questa speranza non andrà delusa, secondo me ogni difficoltà sarà superata e non rimarrà alcuna possibilità di mettere in dubbio il ritardo della luce (6).

(6) Sembra di capire che Roemer stava cercando di misurare gli anticipi e i ritardi non più basandosi sulle rivoluzioni di Io attorno a Giove, ma sulle rotazioni dello stesso pianeta attorno al suo asse, rilevabili attraverso gli spostamenti della Grande Macchia Rossa.

Il Signor Cassini, qualche tempo fa, osservò una macchia scura mentre il terzo satellite pasava attraverso il disco di Giove ed io, insieme a lui, quando allo stesso modo il quarto satellite attraversava il disco di Giove, ho visto una macchia molto più scura di quanto non sia di solito per le ombre e ciò indica che quei pianeti sono per la maggior parte opachi. Per quanto riguarda il quarto, posso affermare che la sua parte oscura è molto maggiore di quella chiara e molto più nera di quanto non siano le macchie di Giove o della Luna.

Da due mesi il Signor Picard ed io siamo occupati per la maggior parte del tempo a Versailles per le livellazioni: sono otto giorni che egli lavora là da solo, perché la mia salute più ragionevole mi trattiene qui.

Ho esposto in sintesi la questione; ti prego di volermi comunicare in breve quello che pensi (al riguardo): quanto a me, alla prima occasione perfezionerò i particolari secondo le indicazioni che mi darai; infatti ormai ho superato i limiti di una lettera. Ti auguro di star bene e mi raccomando caldamente alla tua benevolenza. Dall'Osservatorio di Parigi, addì 30 Settembre 1677.

* * *

La lettera contiene particolari tecnici utilissimi per capire come Roemer sia giunto alla conclusione che la velocità della luce ha un valore finito. Vi si ritrovano anche motivi che richiamano da vicino una impostazione scientifica moderna:

- l'analisi dei dati osservativi, fatta soltanto su quelli ottenuti nelle condizioni migliori, molto accurata per evidenziare un effetto assai piccolo al limite degli errori di misura;
- l'elaborazione di teorie atte a spiegare i fenomeni osservati, e il controllo sperimentale delle loro previsioni;
- la critica attenta di ipotesi e dati, nell'intento di trovare motivazioni valide per dimostrare un fatto intuito del quale lo scienziato è profondamente convinto;
- l'esigenza di porre al vaglio di nuove prove la propria scoperta, al fine di renderla certa e sicura, e la conseguente ricerca di una nuova dimostrazione basata su «osservazioni accuratissime».

Roemer si mostra anche disposto ad accettare critiche, mai disprezzandole o sottovalutandole, ma rispondendo ad esse con motivazioni ponderate: egli non tenta di difendere solo il proprio pensiero, ma ricerca la validità di una teoria avanzando con cautela nelle proprie affermazioni.

E' opportuno mettere in rilievo l'accuratezza dei particolari osservativi di cui si fa menzione nell'ultima parte della lettera: la Grande Macchia Rossa (scoperta da Cassini nel 1665), l'atmosfera di Giove, le fasce, il moto e l'ombra dei satelliti del pianeta. Tutto questo nemmeno settanta anni dopo che Galileo aveva puntato il primo telescopio verso il cielo.

Non mancano nella lettera gli aspetti umani della vicenda. Roemer mostra una profonda commozione e gratitudine nell'apprendere che Huygens, autorevole scienziato, rivela benevolenza e interesse per il suo lavoro. Questo fatto ci può far capire quanto fossero grandi per Roemer le difficoltà di far accettare un fatto nuovo, quale la scoperta della velocità finita della luce, a degli scienziati convinti del contrario e forse prevenuti contro un'idea così rivoluzionaria, al punto che «come accade oggi, « si immaginarono altre ipotesi astronomiche che avrebbero risolto il problema, ma queste erano troppo diverse da tutto ciò che si conosceva nel cielo. Queste avrebbero potuto rendere ragione col calcolo di tutte le osservazioni, ma non avevano verosimiglianza sufficiente da renderle accette allo spirito » [8].

5. In nessun punto della documentazione da noi presentata, si possono trovare calcoli che portino alla determinazione del valore della velocità della luce. Questo fatto, che può sorprendere chi legge, è facilmente giustificabile se si pensa che la preoccupazione prima di Roemer era solo quella di dimostrare che la luce non si propaga istantaneamente, ma che viaggia anche essa ad una velocità, molto elevata se vogliamo, ma pur sempre finita: in questo senso la scoperta di Roemer diede un duro colpo al sistema filosofico cartesiano.

E' lecito però domandarsi se Roemer abbia calcolato la velocità della luce con i dati da lui ricavati. Noi pensiamo di sì: probabilmente questi calcoli sono andati perduti insieme a quasi tutti i manoscritti dell'astronomo nel grande incendio che il 21 Ottobre 1728 distrusse la torre dell'osservatorio di Parigi.

Ci sono giunti invece i calcoli fatti da altri con i dati di Roemer. L'estensore della Storia dell'Accademia dice per esempio: « Dalle osservazioni di Roemer si ricava che la luce in un secondo fa 48.203 leghe comuni di Francia e 337 / 1141 parti di una di quelle, frazione che deve essere trascurata » [11]. Poiché la lega comune corrisponde a 4,445 km, ne segue che la velocità della luce sarebbe pari a circa 214.000 km s⁻¹.

C. Huygens, sfruttando i 22 minuti di ritardo trovati da Roemer, e cioè il tempo impie-

gato dalla luce per percorrere una distanza pari al diametro dell'orbita terrestre, dopo avere valutato il diametro di detta orbita intorno a 24.000 diametri terrestri e questi ultimi di 2.865 leghe ciascuno, «... ogni lega è di 2,282 tese, secondo la misura esatta che il Signor Picard ha preso per ordine del Re nel 1669...» [6], conclude che in un secondo o battito d'arteria la luce fa «... più di 1.100 volte 100.000 tese...» [6]. Poiché sappiamo che una tesa corrisponde a 1,949 m, allora il valore trovato da Huygens per la velocità della luce corrisponde a circa $214.000 \text{ km s}^{-1}$.

L'esperienza di Roemer fu ripetuta da altri astronomi [12]: Horrebow e Du Hamel trovarono, come tempo impiegato dalla luce per percorrere la distanza Terra-Sole, 14 minuti e 7 secondi; la velocità della luce risulterebbe allora pari a $177.000 \text{ km s}^{-1}$.

Cassini, che per vari motivi, come abbiamo già esposto, aveva sostenuto che il ritardo delle emersioni non era legato alla luce, ma ad altri motivi di carattere astronomico e per questo aveva elaborato una teoria (7) che rendesse ragione di questo fatto (della quale si trova un accenno nella lettera di Roemer a Huygens), aveva comunque trovato un ritardo nelle emersioni, pari a 7 minuti e 5 secondi per il primo satellite e 14 minuti e 12 secondi per il secondo.

Newton trovò 7 minuti e 30 secondi, valore già molto vicino alla realtà e la velocità della luce sarebbe pari a $3,3 \times 10^5 \text{ km s}^{-1}$.

Delambre, impiegando nei suoi calcoli solo le osservazioni del primo satellite trovò 8 mi-

(7) Cassini, pur riconoscendo che la teoria di Roemer forniva una spiegazione delle irregolarità del movimento del primo satellite di Giove, non la considerò provata e preferì correggere le effemeridi del satellite con una equazione empirica. Le effemeridi uscirono, in forma riveduta e corretta, nel 1691 e resero possibile l'uso dei satelliti di Giove per la determinazione della longitudine («Scienziati e Tecnologi...», pag. 278).

nuti e 13,2 secondi e la velocità della luce risulterebbe di $304.000 \text{ km s}^{-1}$.

Infine sappiamo da P. Horrebow [12], [13] che Roemer avrebbe voluto pubblicare nel 1704, sei anni prima della morte, un'opera sulla velocità della luce nella quale egli avrebbe ribadito la validità sperimentale del dato trovato da lui nel 1676, cioè 11 minuti.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro non sarebbe stato possibile senza la preziosa collaborazione di numerose persone. Desideriamo ringraziare i professori C. Castagnoli, R. Chittolina, E. Fabri, E. Faccioli, E. Francesio Cornelio, D. Franchini, M. Saccani, L. Stefanini, V. Zanetti e in modo particolare, per le traduzioni dalla lingua francese e dalla lingua latina, F. Bovi Lai e V. Caprioli.

BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Toraldo di Francia, «La diffrazione della luce», Torino 1958, pag. 262.
- [2] «Sky and Telescope», 53/3 Marzo 1977, 54/2 Agosto 1977, 55/3 Marzo 1978, 56/2 Agosto 1978.
- [3] «Histoire de l'Académie Royale des Sciences», Parigi 1733, Tomo I, pag. 212.
- [4] Op. cit. pag. 213.
- [5] «Scienziati e Tecnologi dalle Origini fino al 1900», Milano 1975, Vol. 3, pag. 50.
- [6] C. Huygens, «Traité de la Lumière», ristampa, Parigi 1920, pag. 5 e segg.
- [7] «Scienziati e Tecnologi...» cit.
- [8] «Histoire de l'Académie...» cit., pag. 214.
- [9] «Scienziati e Tecnologi...» cit.
- [10] «Memoires de l'Académie Royale des Sciences», Parigi 1730, Tomo X, pag. 575.
- [11] «Histoire de l'Académie...» cit., pag. 215.
- [12] De Humboldt, «Cosmos», Milano 1851, pag. 64 e pagg. 232, 233.
- [13] P. Horrebow, «Operum Mathematico-Physicorum», Copenhagen 1741, Tomo III.
- [14] Montucla, «Histoire des Mathematiques», Parigi 1799, Tomo II.
- [15] W. Doberck, «Nature», XVII 105, Dicembre 1877.