

***La misura della velocità della luce,
a partire dai tentativi di Galilei
sino all'effetto Doppler***

Massimo Capaccioli

INAF - Istituto Nazionale di Astrofisica

Università di Napoli Federico II

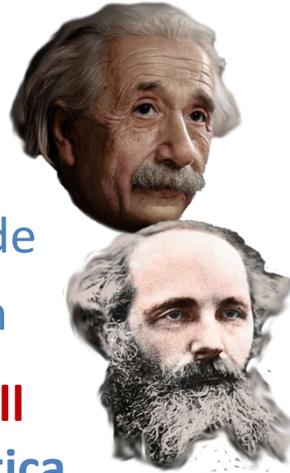
massimo.capaccioli@inaf.it

Misure storiche di c

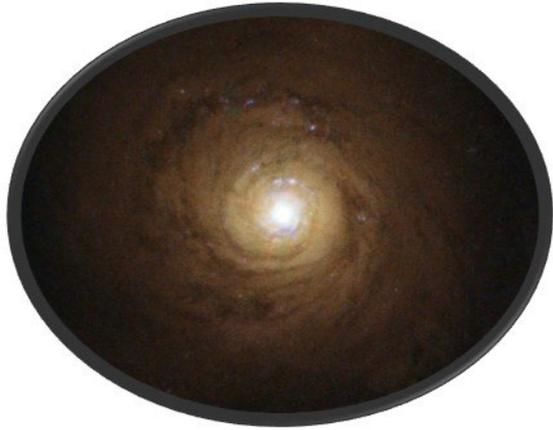
Data	Autore	Paese	Metodo	Velocità [10^8 m/s]	Errore
Antichi	Aristotele - Keplero	Europa	Analogie e fenomeni	infinita	---
1638/1665	Galilei/Cimento	Italia	Lanterne	veloce?	----
1676	Rømer	Francia	Lune di Giove	2.14	28%
1729	Bradley	Inghilterra	Aberrazione	3.08	2.7%
1849	Fizeau	Francia	Ruota dentata	3.14	4.70%
1879	Michelson	USA	Specchio rotante	2.99798	18×10^{-6}
1950	Essen	Inghilterra	Cavità microonde	2997925	0.1×10^{-6}
1958	Froome	Inghilterra	Interferometro	2.997925	0.1×10^{-6}
1972	Evenson et al.	USA	Laser	2.9979457	2×10^{-9}
1974	Blaney et al.	Inghilterra	Laser	2.9979459	2×10^{-9}
1976	Woods et al.	Inghilterra	Laser	2.9979459	2×10^{-9}
1983	XVII Conferenza generale di pesi e misure			2.9979458	

Perché la misura di c è così importante?

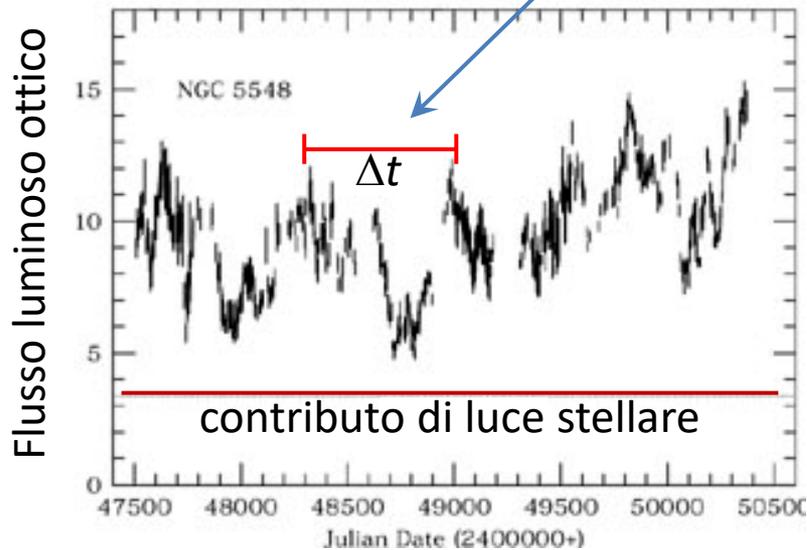
- Serve a escludere l'esistenza di un infinito (sempre difficile da intendere); la **Relatività Generale** farà lo stesso con la **velocità dell'interazione gravitazionale**, ritenuta infinita da **Isaac Newton** (ma «*Hypotheses non fingo*»).
- La constatazione che il valore della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche fornita dalla sua teoria ($c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$) coincideva con la misura della luce indusse nel **1873** lo scozzese **James Clerk Maxwell** a **postulare** che la luce visibile sia essa stessa un'onda elettromagnetica (*A Treatise on Electricity and Magnetism*).
- Insieme all'**età finita** del cosmo e al **ritmo di espansione**, serve a definire le **dimensioni dell'orizzonte cosmologico**.
- Nella **Relatività ristretta** il modulo di c è **invariante** ai moti di sorgente e/o dell'osservatore → **limite** per l'applicazione del **principio di causa ed effetto** (e.g. scoperta dei **buchi neri supermassicci** negli **AGN**, **inflazione cosmica**, ...).



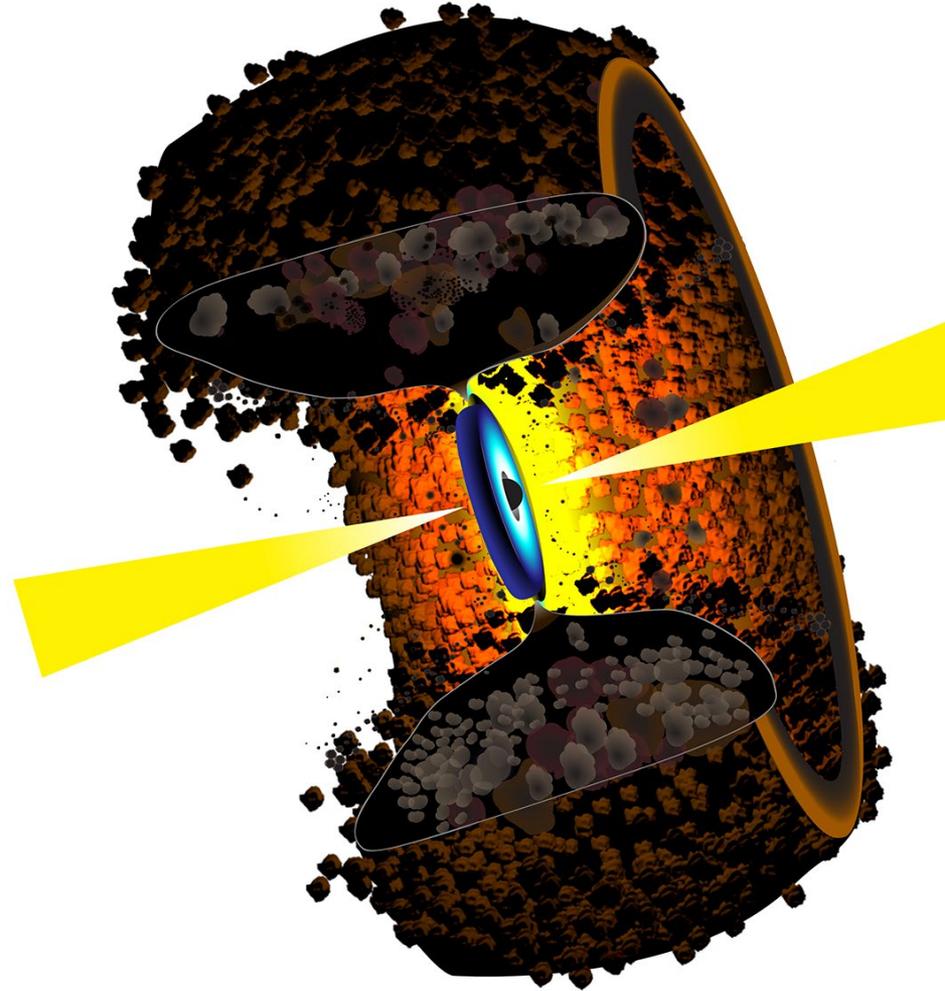
Black hole supermassicci negli AGN



Lunghezza di coerenza $\Delta r = c \Delta t$

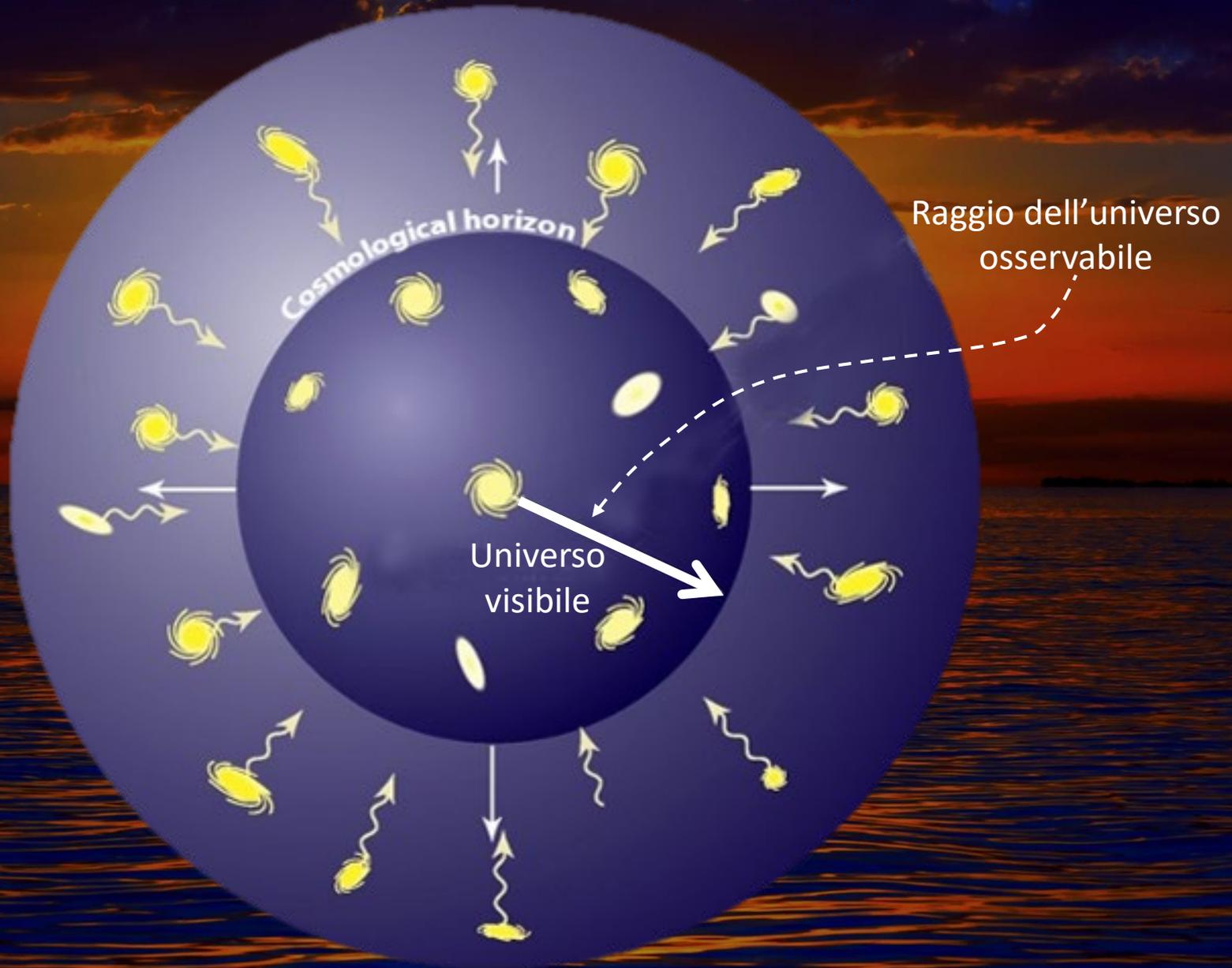


Curva di luce ottica (5100 \AA) di NGC 5548
dal tardo 1988 al tardo 1996.
(Peterson et al., 1999)

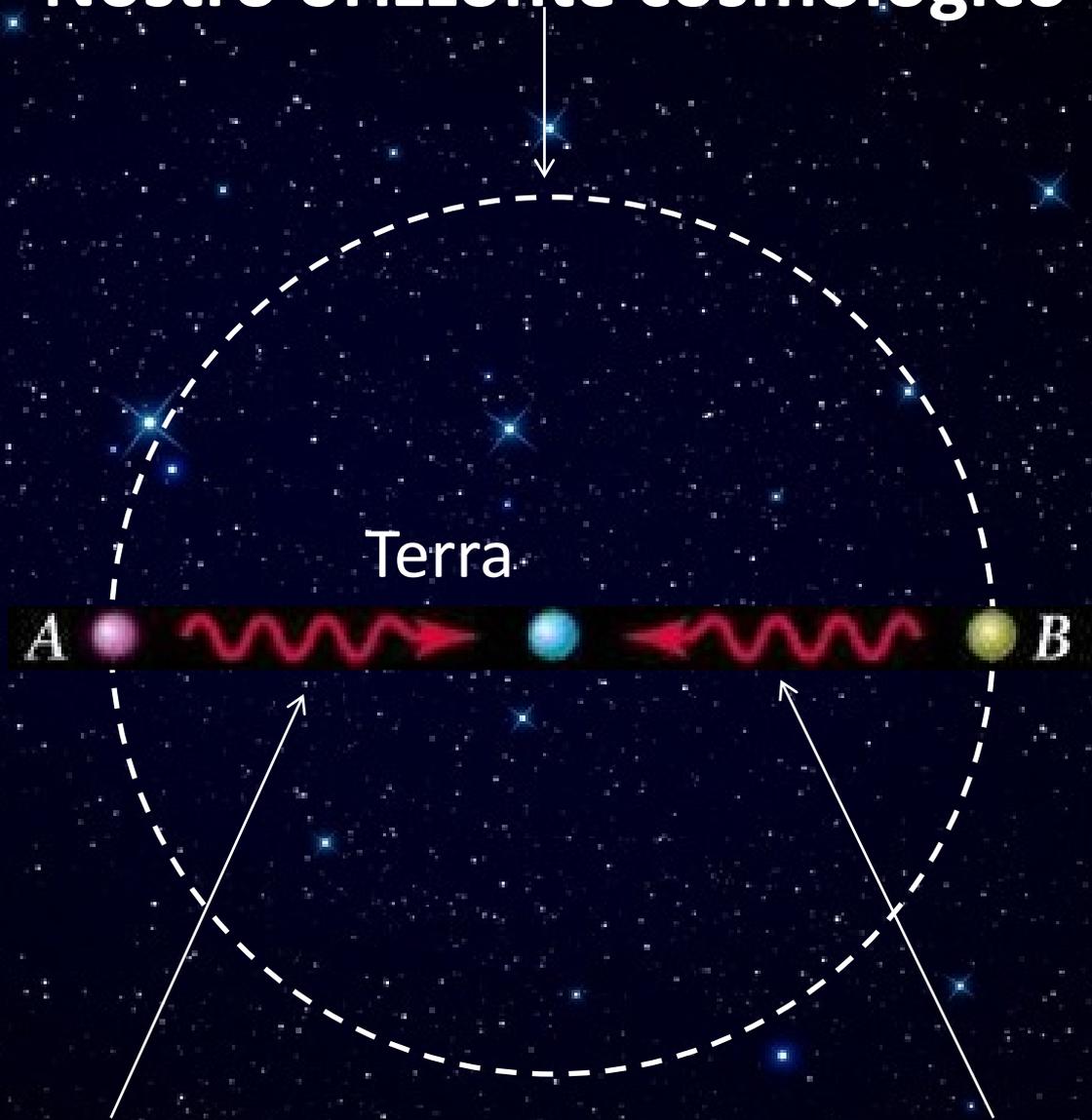


Modello di AGN

L'orizzonte cosmologico (età del cosmo e c finiti)



Nostro orizzonte cosmologico

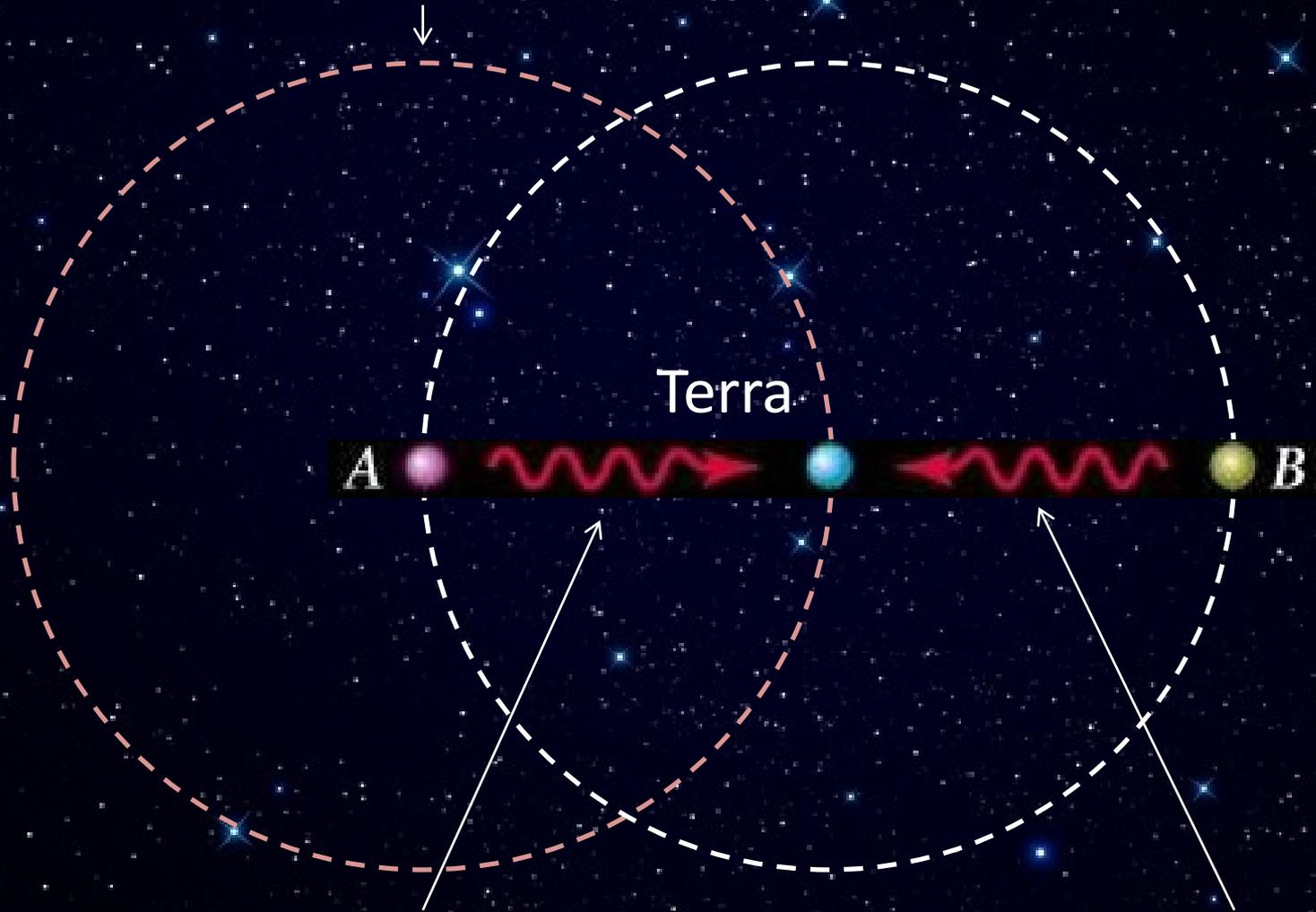


La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **A**

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da **B**

Nostro orizzonte cosmologico

Orizzonte cosmologico di *A*



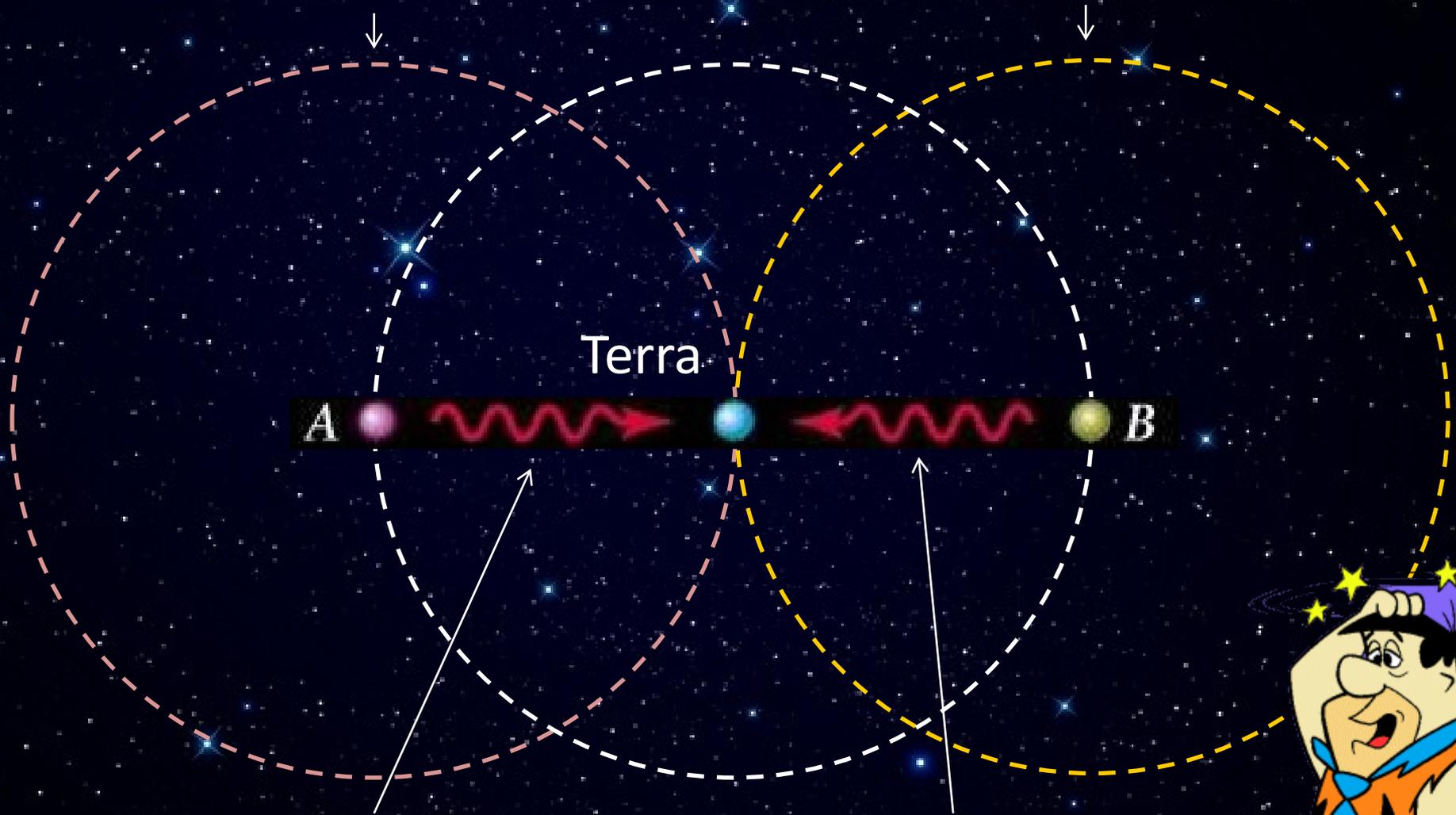
La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da *A*

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da *B*

Nostro orizzonte cosmologico

Orizzonte cosmologico di *A*

Orizzonte cosmologico di *B*



Terra

A

B

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da *A*

La radiazione impiega 14 miliardi d'anni per venire a noi da *B*



Gli orchestrali devono vedere tutti lo stesso direttore

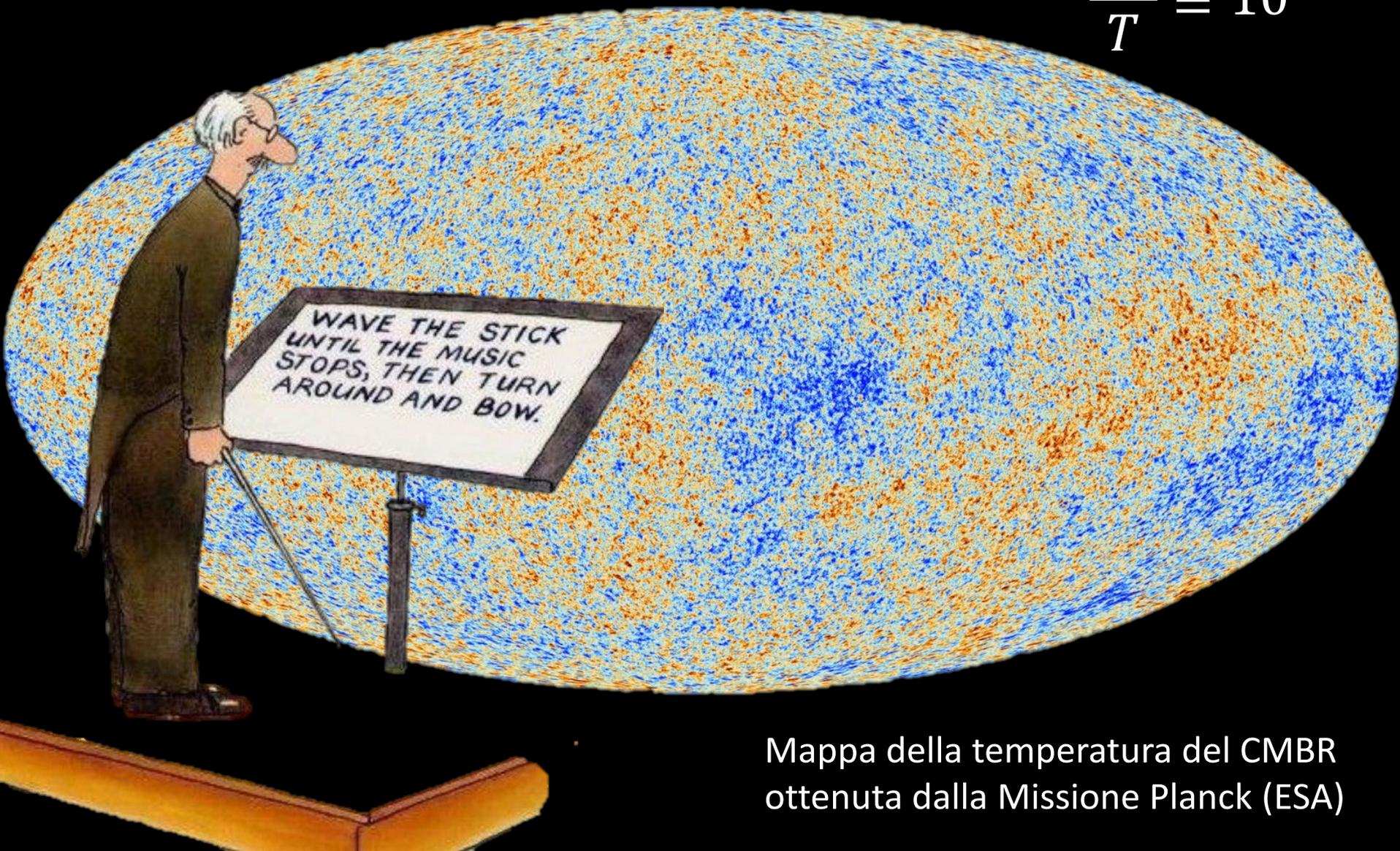


Gerrit van Honthorst: "Concerto"
1623, National Gallery, Washington D.C.

Eppure il direttore d'orchestra c'è stato.

Ma quale?

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$$



Mappa della temperatura del CMBR
ottenuta dalla Missione Planck (ESA)

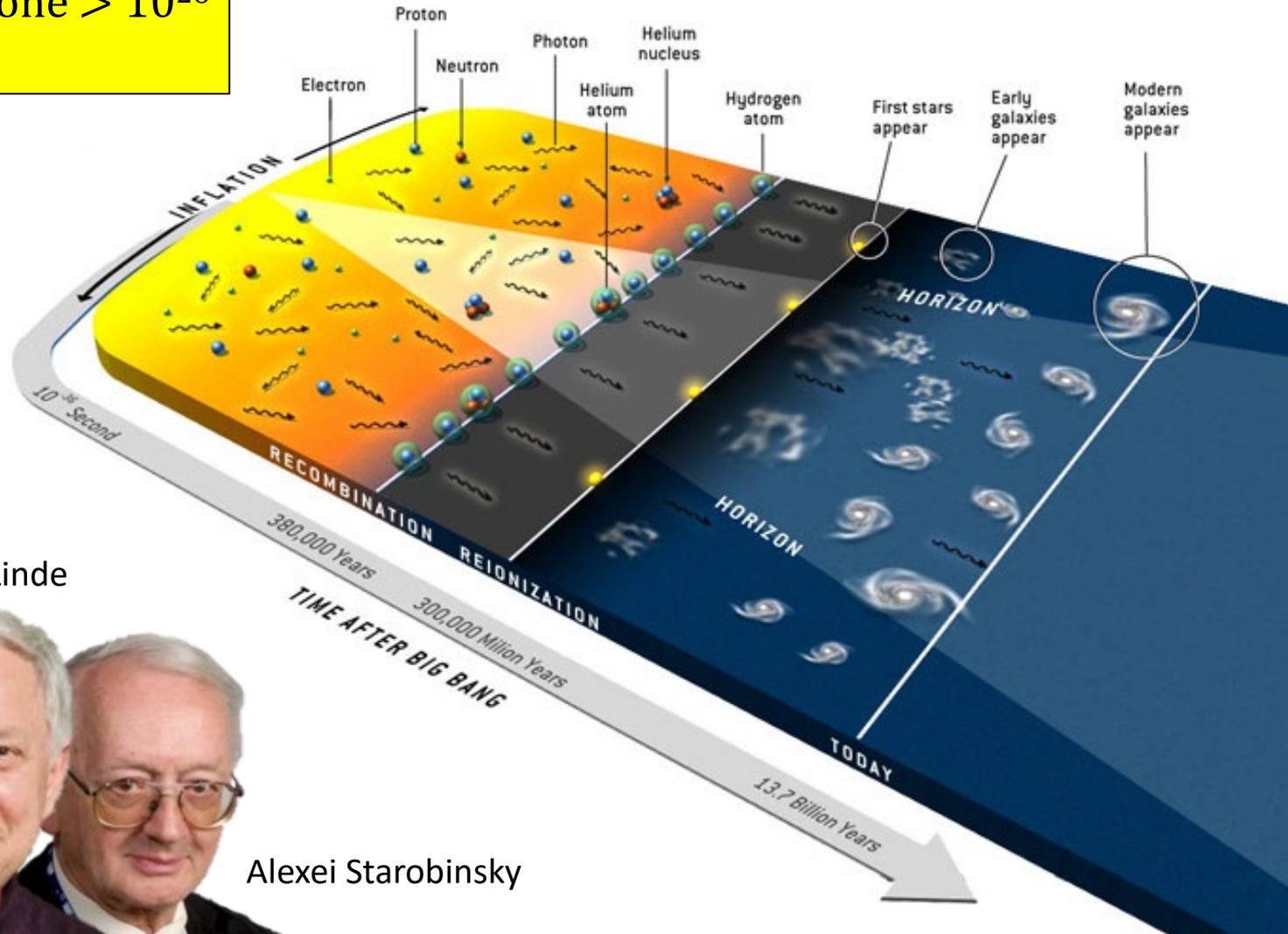
Inflazione cosmica

$t_0 = 10^{-32}$ s dalla singolarità

$\Delta t = 10^{-36}$ s

fattore di espansione $> 10^{26}$

$T_0/T_1 = 100,000$



Alan Guth

Andrei Linde

Alexei Starobinsky

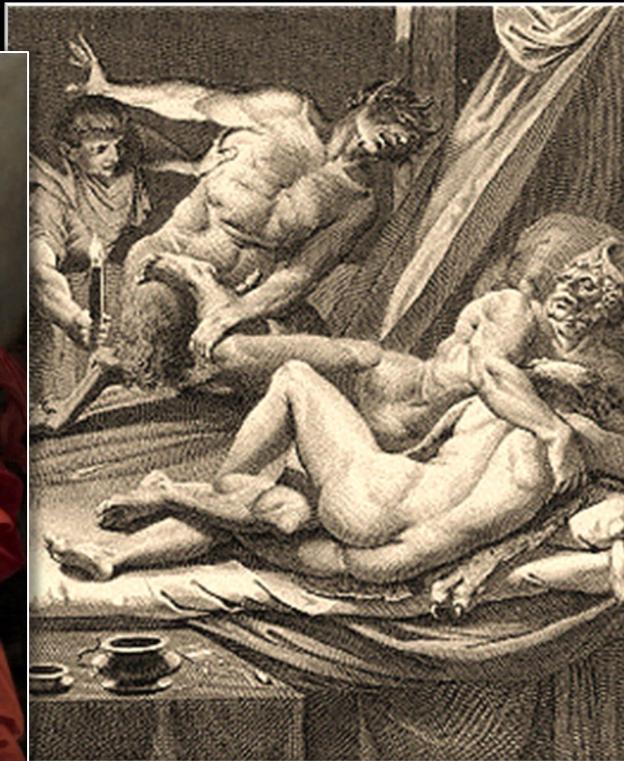
Il controllo della luce: il fuoco



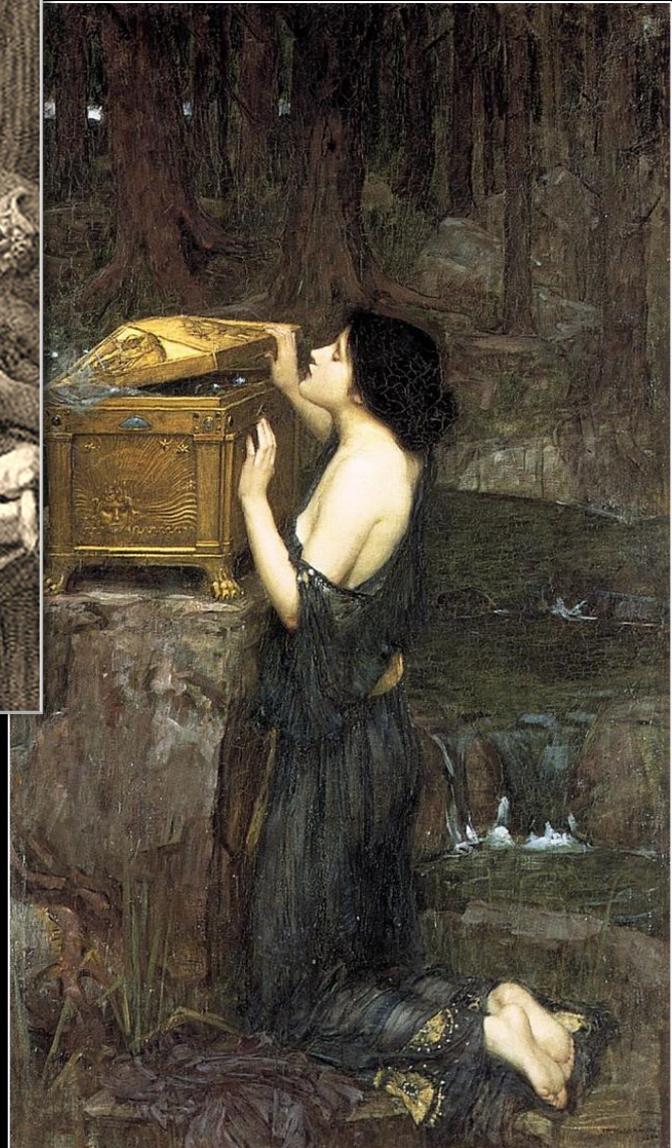
Il mito di Prometeo, Epimeteo e Pandora



Heinrich Friedrich Füger,
Prometeo ruba il fuoco (1817)



Agostino Carracci
Epimeteo e Pandora
(1590 c.)



John William Waterhouse
Pandora (1896)

La luce e la Bibbia

Nella **Bibbia** ci sono più di **200** i riferimenti alla parola 'luce':

- **oltre 25** nel **libro di Giobbe** e **25** nel **libro dei Salmi**;
- **c. 75** nel **Nuovo Testamento**, di cui il maggior numero (**c. 16**) nel **Vangelo di Giovanni**.



Luce e tenebra: due distinti enti biblici

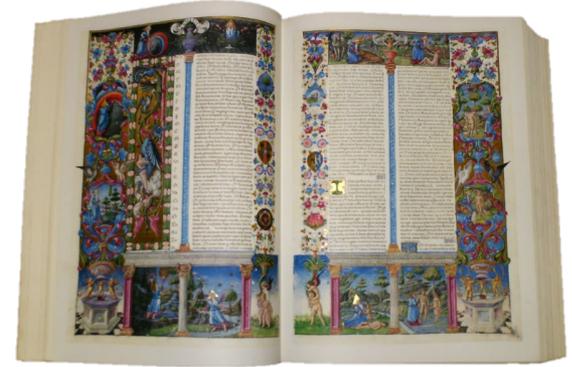
La luce è stata la prima delle creazioni di Dio, secondo il **libro della Genesi**.

«In principio Dio creò il cielo e la terra. Ora la terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque. Dio disse: "Sia la luce!". E la luce fu. Dio vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre e chiamò la luce giorno e le tenebre notte. E fu sera e fu mattina: primo giorno».

«Per la terra di profonda notte, di profonda ombra e disordine, dove anche la luce è come le tenebre». (Job 10.22).

«Qual è il modo per la dimora di luce? E dove l'oscurità risiede?». (Job 38.19).

Luce è stata identificata in tutto il **Nuovo Testamento** con la natura di Dio, se stesso. «La parola è luce che le tenebre non può estinguere, e questa luce illumina ogni uomo ... Noi siamo i figli della luce, che hanno messo da parte il mondo delle tenebre».



Dark Matter

Per lo più gli antichi ritenevano $c = \infty$

Nel *De sensu et sensibilibus* (che è parte dei *Parva Naturalia*) **Aristotele di Stagira** (384-322 a.C.) sosteneva che:

«la luce è dovuta alla presenza di qualcosa, ma non è un movimento».

IPSE DIXIT → la luce ha velocità infinita



Con Aristotele, la **maggioranza degli antichi** finì per ritenere che la luce si propaghi **istantaneamente**.

Erone di Alessandria (10-70 d.C.), per esempio, sottolineava che, **all'apertura improvvisa degli occhi, si vedono simultaneamente le cose vicine e quelle molto lontane**. Un test sostenuto dall'idea preconcepita che la vista sia dovuta a raggi emessi dall'occhio (**estromissione**).

Eccezione: Empedocle di Acragas (490-430 a.C.) riteneva la luce si propaghi con **velocità finita**. Di lui dice Aristotele: «egli sbaglia nel parlare di luce come 'in viaggio' o come essere a un dato momento tra la Terra e il suo intorno, il suo movimento rimanendo impercettibile per noi».

Teoria della visione: estromissione

Platone (428 – 328 a.C.) pensava che la visione fosse causata da **raggi emessi dagli occhi**.

Il colpo dei raggi sull'oggetto consente allo spettatore di percepire cose come il colore, la forma e le dimensioni dell'oggetto.

La nostra visione viene avviata dai nostri occhi che **si protendono per "toccare" o sentire qualcosa a distanza**.

Questa teoria rimase influente per **quasi 1000 anni**, fino a quando l'iracheno **Alhazen** non dimostrò definitivamente che era **sbagliata**.



Teoria dell'estromissione e l'ottica geometrica

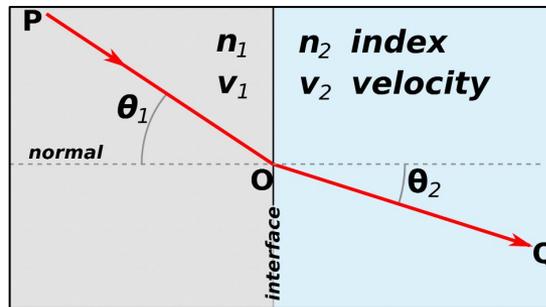
Euclide (300 a.C.) credeva nell'estromissione e la sua teoria della visione diretta, esposta nell'**Ottica** e basata sull'elaborazione di un **sistema ipotetico deduttivo**, sul **metodo dimostrativo** e su **conoscenze di oftalmologia**, si fondava sui seguenti **postulati**:

1. I **raggi rettilinei che provengono dall'occhio**, di **natura indefinita** e con una **direzione di propagazione anch'essa indefinita**, **divergono indefinitamente**;
2. La figura contenuta dall'insieme dei raggi visivi è un cono il cui vertice è all'occhio e la base alla superficie dell'oggetto visto;
3. Si vedono quelle cose sulle quali cadono i raggi visivi e non si vedono quelle cose sulle quali i raggi visivi non cadono;
4. Le cose viste sotto un angolo maggiore appaiono più grandi, quelle sotto un angolo minore appaiono più piccole e quelle sotto gli angoli uguali appaiono uguali;
5. Le cose viste dai raggi visivi più alti appaiono più alte e le cose viste dai raggi visivi inferiori appaiono più basse;
6. Allo stesso modo, le cose viste dai raggi più a destra appaiono più a destra, e le cose viste dai raggi più a sinistra appaiono più a sinistra;
7. Le cose viste da più angolazioni sono viste più chiaramente.

Ottica geometrica e fisica

Erone di Alessandria (10-70 d.C.) estese i **principi dell'ottica geometrica** alla **catottrica**, in particolare la riflessione da superfici lisce.

Invocò il **principio di minima distanza** per spiegare la riflessione, poi sostituito dal **principio di Pierre de Fermat** [*di tutti i possibili cammini che un raggio di luce può percorrere per andare da un punto a un altro, esso segue il cammino che richiede il tempo più breve*] che interpreta anche la **rifrazione**.



Claudio Tolomeo (90-168 d.C.) scrisse anch'egli un'**Ottica** dove discusse la visione, la **riflessione**, la **rifrazione** e le **illusioni ottiche**.

Sostituì i **raggi discreti** di **Euclide** con **coni continui**.

Conducesse accurati esperimenti sulla **rifrazione** e concluse che, per la propagazione della luce da un mezzo all'altro, **il rapporto tra angolo di incidenza e di rifrazione è costante e dipende dalle proprietà dei due mezzi**. Derivò così l'approssimazione per piccoli angoli della legge di rifrazione.

Il contributo della cultura musulmana

Intorno al 1000 d.C., gli scienziati musulmani **Avicenna** e **Alhazen** credevano entrambi che la luce fosse fatta di **particelle** e avesse **velocità finita**.

(G. Sarton, *Introduction to the History of Science* Vol. I; Baltimora, 1927).



Abu Ali al-Hasan ibn al-Hasan ibn al-Haytham (Alhazen)

L'iracheno **Alhazen** (965-1040) è una figura centrale nella scienza (il più grande fisico tra Archimede e Newton).

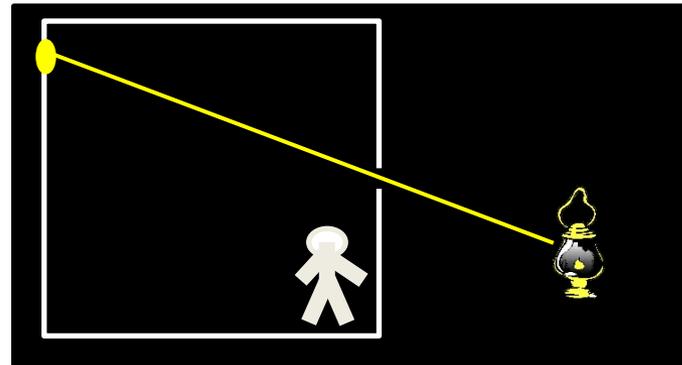
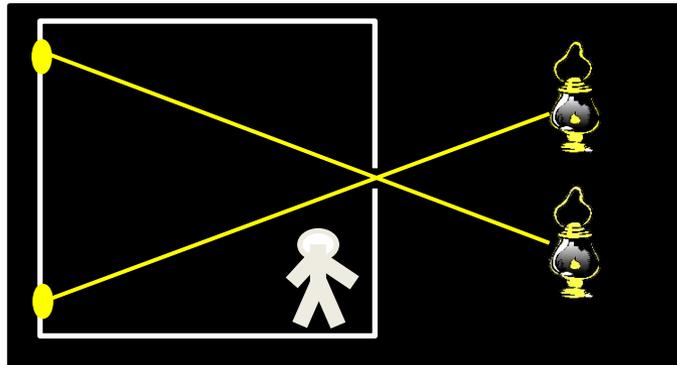
Fu il primo a seguire il **metodo scientifico**, l'osservazione sistematica dei fenomeni fisici e il loro rapporto con la teoria.

Dimostrò con un semplice esperimento che la **teoria dell'estromissione era sbagliata** e che la luce proveniva dalle sorgenti luminose.

Concluse quindi che la luce viene **emessa da oggetti come le lanterne** e viaggia da questi oggetti in **linea retta**.

Sulla base di questi esperimenti, inventò la prima **fotocamera stenopeica** (che **Keplero** avrebbe usato e chiamata camera oscura nel XVII secolo), spiegando anche perché l'immagine risulta **capovolta**.

Spiegò **perché le lenti ingrandiscono**, utilizzando il concetto di curvatura, da cui dedusse che l'ingrandimento ha luogo sulla superficie e non dentro la lente.



Abū al-Rayḥān Muḥammad ibn Aḥmad al-Bīrūnī

L'iraniano **Al-Biruni** (973-1048), scienziato e intellettuale a tutto tondo, fu critico verso la **centralità della Terra**: “*La rotazione della Terra non pregiudica in alcun modo il valore dell'astronomia, poiché tutte le apparenze di carattere astronomico possono essere spiegate abbastanza bene secondo questa teoria come per l'altra...*”.

Riguardo la **luce**, egli sosteneva che **non può essere simultaneamente in due luoghi diversi** come succederebbe se la sua velocità fosse infinita: «*Lux et color in sese, percetitur in tempore*» (*Isis*, Vol. 31, No. 2 (Apr., 1940), pp. 327-379).

«*C'è una divergenza di opinioni riguardo ai movimenti dei raggi. Alcuni [ma non ci racconta chi sono] dicono che questo movimento è senza tempo, poiché i raggi non sono corpi. Altri dicono che questo movimento procede in brevissimo tempo: che, tuttavia, non esiste nulla di più rapido, con il quale potresti misurare il grado della sua rapidità, ad esempio, il movimento del suono nell'aria non è così veloce come il movimento dei raggi; perciò il primo è stato confrontato con il secondo e quindi è stato determinato il suo tempo (cioè il grado della sua rapidità)*».

Si domandava anche **come fare a misurare la velocità della luce** (che ipotizza fatta di **particelle**) ma si arrendeva di fronte alla difficoltà del problema.

Altre ipotesi su una velocità della luce **finita**

Roger Bacon (1250 d.C.) e **Francis Bacon** (1600 d.C.) ammettevano entrambi che la velocità della luce fosse **finita** sebbene **molto rapida**.

F. Bacon scrisse:

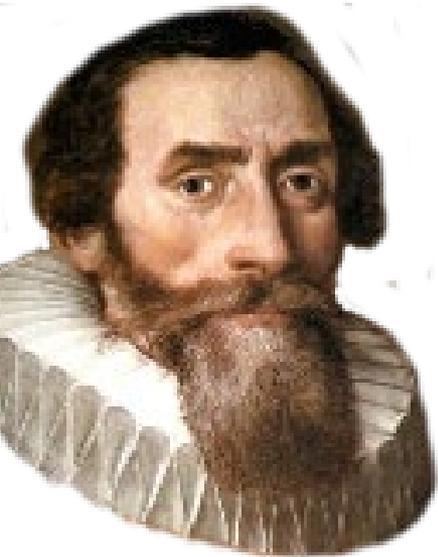
«Anche alla vista, là dove l'azione è più rapida, sembra che siano necessari alcuni momenti di tempo per la sua realizzazione ... cose che per via della velocità del loro movimento non possono essere viste, come quando una palla viene scaricato da un moschetto».

*(Opere filosofiche di Francis Bacon;
J.M. Robertson ed., Londra, 1905).*

Sosteneva che **Alhazen** avesse utilizzato un ragionamento sbagliato per raggiungere una conclusione giusta e proponeva una **dimostrazione metafisica sua propria, salvando Aristotele** (che secondo lui aveva parlato di **cose più o meno veloci, non di infinito**).



Francesco Bacone
(1561-1626)
sostenitore del metodo
induttivo contro quella
cartesiano deduttivo

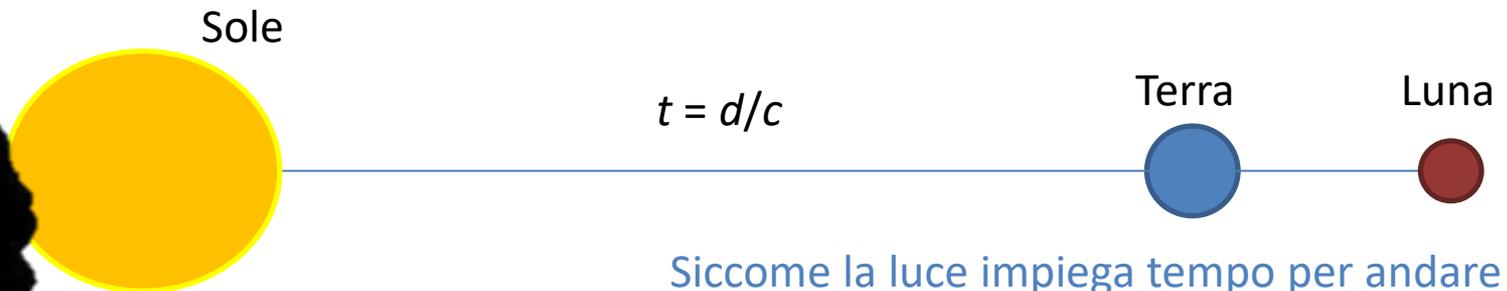


L'opinione di Keplero

Nel 1609, **Johannes Kepler** (1571-1630), sebbene influenzato dal monaco polacco **Erazmus Witelo** («la luce viaggia a velocità infinita nel vuoto ma finita nei mezzi materiali»), mantenne l'opinione della maggioranza che la velocità della luce fosse istantanea, poiché lo spazio non poteva offrire alcuna resistenza al suo movimento, essendo la luce immateriale.

Inoltre, se la velocità della luce fosse finita, argomentò l'astronomo tedesco, durante le eclissi di Luna il Sole e la Luna stessa non sarebbero risultati allineati (argomento usato in seguito anche da **Cartesio**).

(J. Kepler, *Ad Vitellionem paralipomena astronomise pars optica traditur*, Francoforte, 1804).



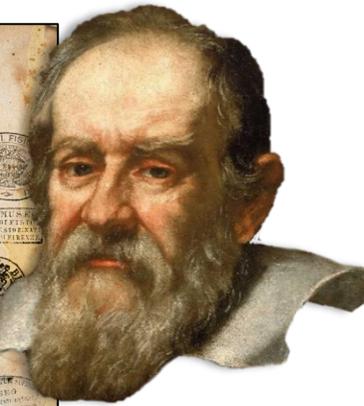
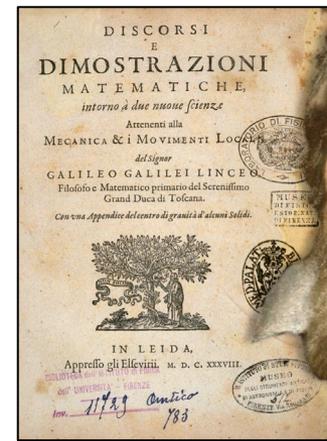
René Descartes
(1596-1650)

Siccome la luce impiega tempo per andare dalla Terra alla Luna, quando noi vediamo l'eclissi in ritardo rispetto all'allineamento.

I dubbi di Galilei

Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze (Leida, 1638)

Scienza nuova prima, intorno alla resistenza de i corpi solidi all'essere spezzati. Giornata prima

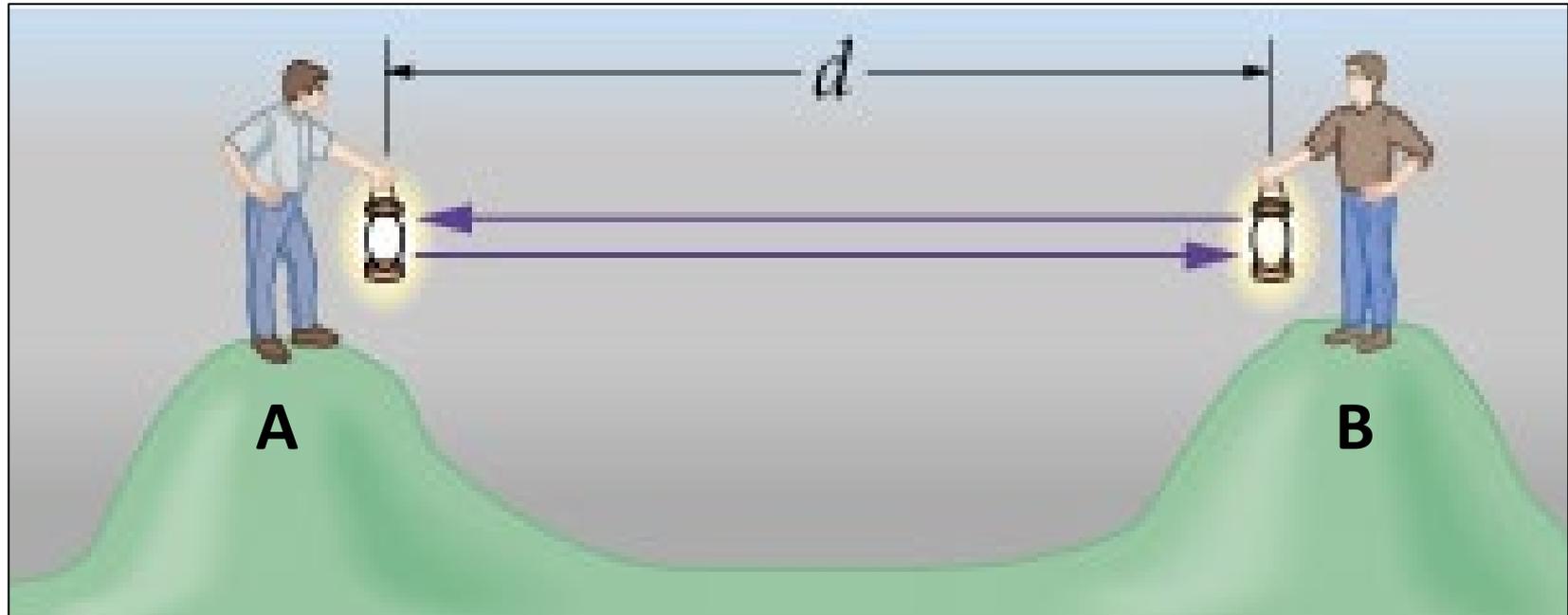


SAGR. Ma quale e quanta doviamo noi stimare che sia questa velocità del lume? forse *instantanea, momentanea*, o pur, come gli altri movimenti, *temporanea*? né potremo con esperienza assicurarci qual ella sia?

SIMP. Mostra l'esperienza quotidiana, l'espansion del lume esser *instantanea*; mentre che vedendo in gran lontananza *sparar un'artiglieria*, lo splendor della fiamma senza interposizion di tempo si conduce a gli occhi nostri, ma non già il suono all'orecchie, se non dopo notabile intervallo di tempo.

SAGR. Eh, Sig. Simplicio, da cotesta notissima esperienza *non si raccoglie altro se non che il suono si conduce al nostro udito in tempo men breve di quello che si conduca il lume*; ma non mi assicura, se la venuta del lume sia per ciò *istantanea, più che temporanea ma velocissima*. Né simile osservazione conclude più che l'altra di chi dice: «*Subito giunto il Sole all'orizzonte, arriva il suo splendore a gli occhi nostri*»; imperò che chi mi assicura che prima non giugnessero i suoi raggi al detto termine, che alla nostra vista?

Il *Gedankenexperiment* di Galilei



$$t_1 = \frac{d}{c} + r \quad t_2 = \frac{d}{c} + r \quad t = t_1 + t_2$$

$$c_m = \frac{2d}{t} = \frac{d}{(d/c)+r} = c \frac{d}{d+rc} \sim c \frac{d/c}{r}$$

Se $d = 3 \text{ km}$ e
 $r = 0,1 \text{ s}$,

$$c_m = 10^{-4} c$$



Ma con quale orologio ?

L'esperimento dell'Accademia del Cimento



Martedì 8 giugno 1660, **Giovanni Alfonso Borelli** (1608-1679) propose un esperimento per determinare la velocità della luce.

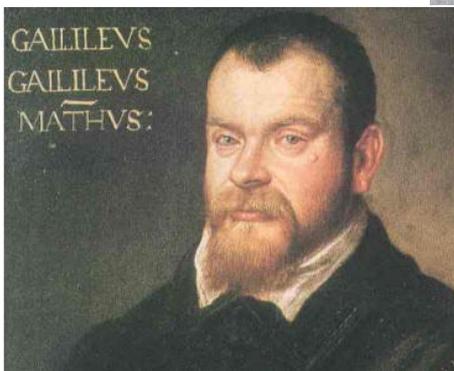
La sera del 24 luglio 1663 venne verificato “se nella distanza di 20 miglia, qual è da Firenze a Pistoia, di notte si scoprisse un fuoco per far l'esperienza del movimento della luce, cioè egli sia stantaneo, oppur si faccia in tempo”.

A Pistoia si trovava **Vincenzio Viviani** (1622-1703), mentre a Firenze, sul Campanile di Giotto, c'era **Lorenzo Magalotti** (1637-1712).

Risultato: «senza alcun ritardo osservabile» (riportato nei *Saggi di naturali esperienze fatte nell'Accademia del Cimento*).

Dopo la notifica degli inconcludenti risultati sperimentali, per analogia con la rapida diffusione di luce da un fulmine **si continuò a pensare che la velocità della luce fosse elevata ma limitata.**

Torniamo indietro all'11 gennaio 1610 quando Galilei scoprì le quattro lune di Giove (medicee)



Sex^{mo} Principe.

*Ilmo Galilij Hamilij^o Senus della Ser.^a V.^a inuigilanti
assiduam et de ogni spirito di botare no solo satisfar
rio che non della lettera di Mad^omatico nelle sue
di Padova,*

*miere d'auere determinato di presentare al Sex^{mo} Principe
(il Ducale et il p^oessore di governamento inestabile di ogni
regio et in terra maritima o terreste sino di tenere quel
sto nuovo artificio nel maggior segreto et solam a disposizione
di V.^a Ser.^a L. V. quale auato dalle piu^e di dite speculationi di
pro, potina in l'uantaggio di scoprire le gr^e et Cole dell' inuis
e due hore et piu^e di tempo prima di esse sanopra noi et distinguend
A numero et la qualita^e de i Vasselli giudiare le sue forze
pallestirsi alla caccia al combattimento o alla fuga, o pure non
nella campagna aperta vedere et particolarmente distinguere ogni suo
moto et propriamente.*

Il 7. di gennaio

Giove si vede usi

Il 8. usi

Il 13. si vedono minime a Giove 4 stelle

Il 14. si vede

*Il 15. la pros^a a 4 ora in mig^a la f^a ora di
stante dalla 3^a a coppia terra*

*Lo spazio delle 3. mediate no con
maggiore del diametro di 7. et e
no in linea retta.*

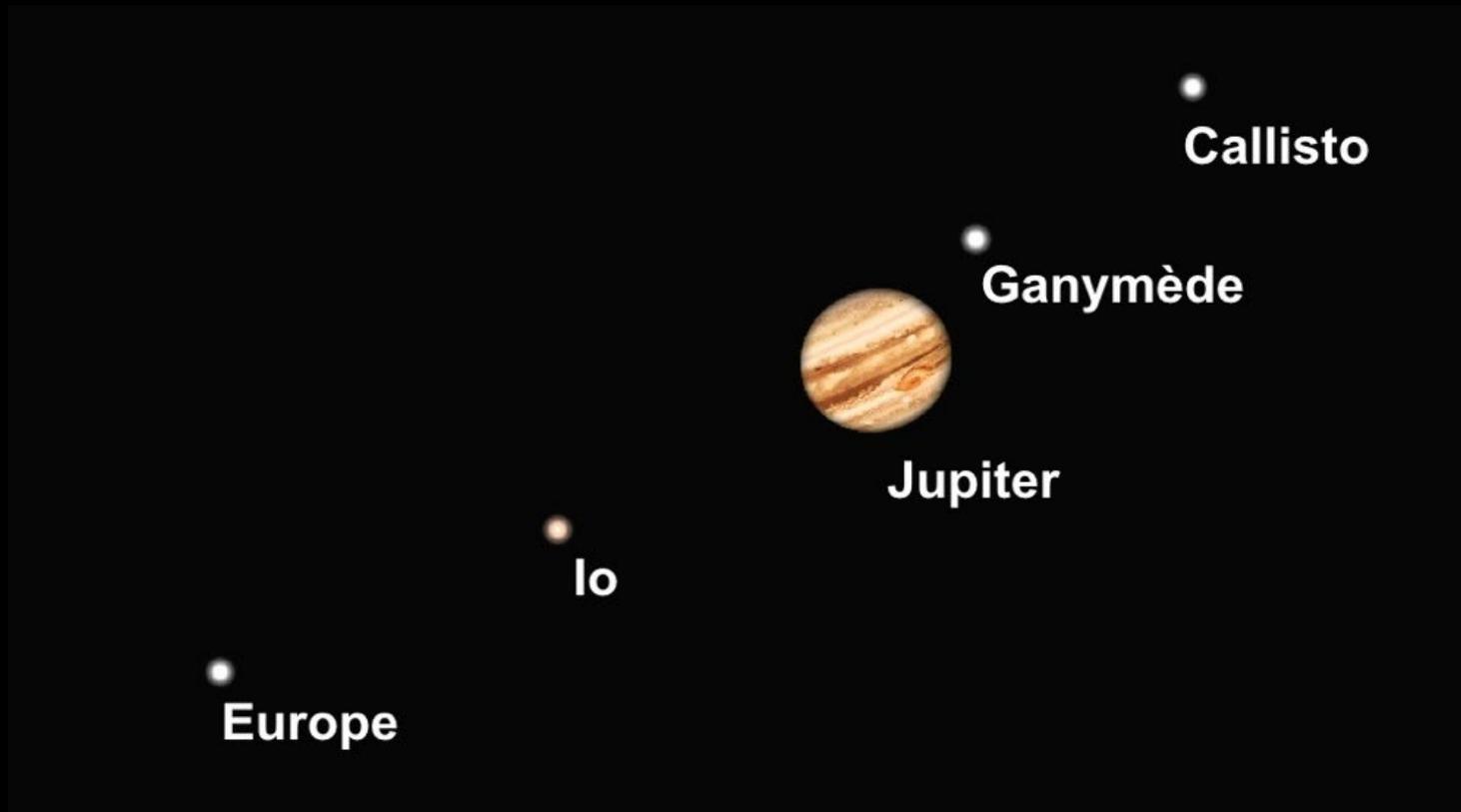
S I D E R E V S
N V N C I V S
MAGNA, LONGEQVE ADMIRABILIA
Spectacula pandens, suspiciendaque proponens
vnicuique, praesertim vero
PHILOSOPHIS, atq; ASTRONOMIS, quae à
G A L I L E O G A L I L E O
PATRITIO FLORENTINO
Patauini Gymnasij Publico Mathematico
P E R S P I C I L L I
Nuper à se reperi beneficio sunt obseruata in LVNÆ FACIE, FIXIS IN-
NUMERIS, LACTEO CIRCVLO, STELLIS NEBVLISIS,
Apprime vero in
Q V A T V O R P L A N E T I S
Circa IOVIS Stellam disparibus interuallis, atque periodis, celeti-
tate mirabili circumuolutis; quos, nemini in hanc vsque
diem cognitos, nouissimè Author depræ-
hendit primus; atque

M E D I C E A S I D E R A
N V N C V P A N D O S D E C R E V I T.

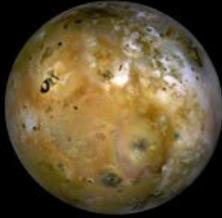
V E N E T I I S, Apud Thomam Baglionum. M D C X.
Superiorum Permissu, & Privilegio.

Le lune gioviane o pianeti medicei

Nome	Diametro	Massa	Distanza da Giove	Periodo orbitale
Io	3 643 km	$8,93 \times 10^{22}$ kg	421 800 km	1,77 d
Europa	3 122 km	$4,8 \times 10^{22}$ kg	671 100 km	3,55 d
Ganimede	5 262 km	$1,48 \times 10^{23}$ kg	1 070 400 km	7,16 d
Callisto	4 821 km	$1,08 \times 10^{23}$ kg	1 882 700 km	16,69 d



Le lune gioviane o pianeti medici densità tra 1.8 e 3.5 g/cm³



Io



Europa



Ganymede



Callisto

$\rho = 5.5$

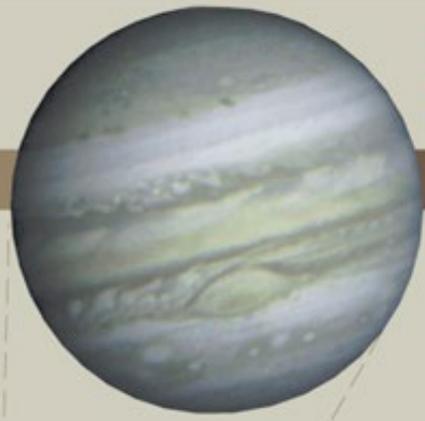


$\rho = 3.4$

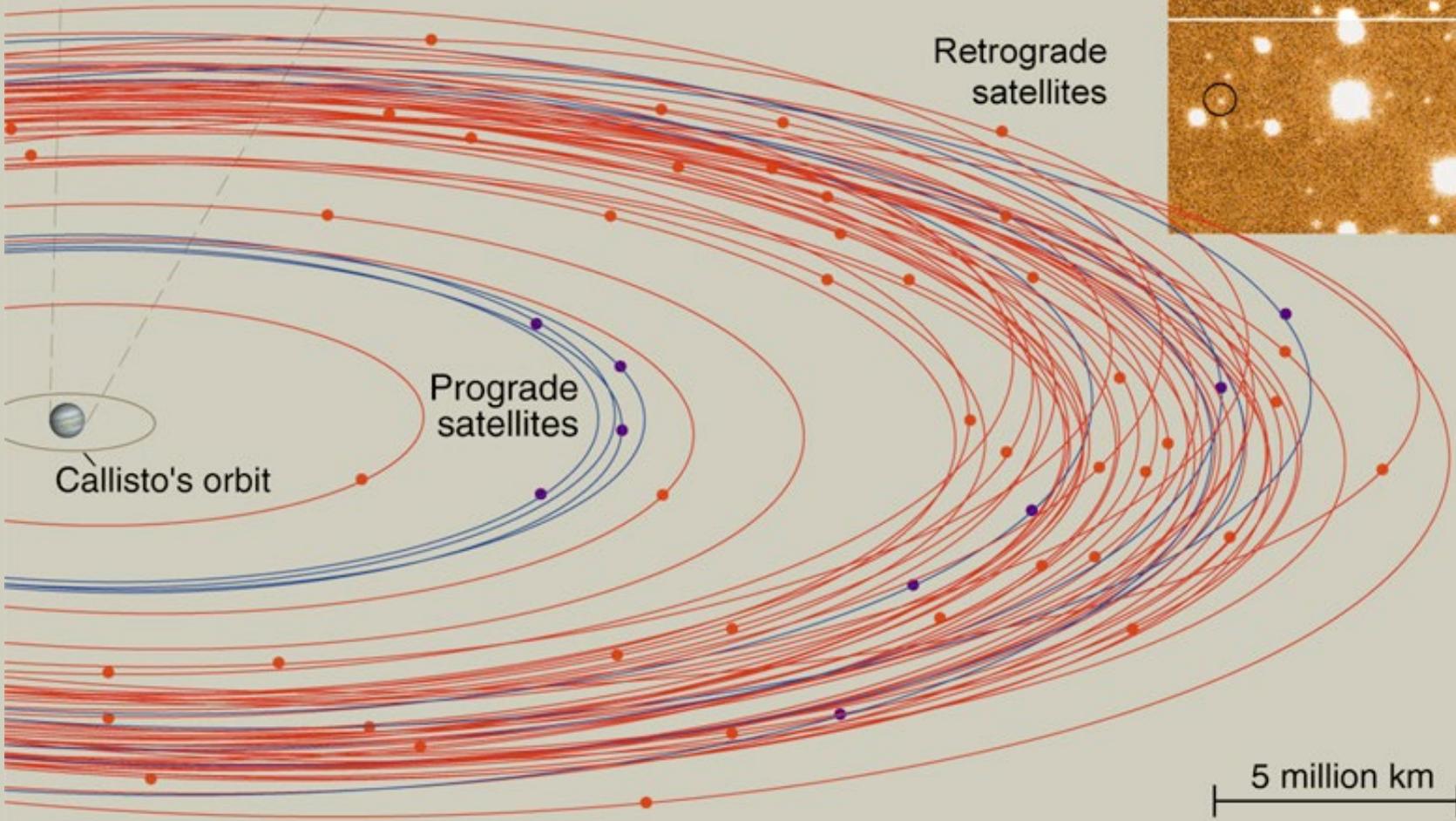


Schematic of Jupiter's Outer Satellites

University of Hawai'i, Institute for Astronomy



44 New satellite orbits are shown in red

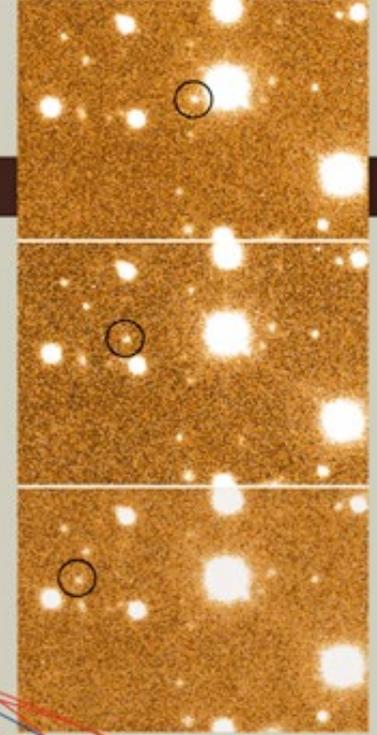


Retrograde satellites

Prograde satellites

Callisto's orbit

5 million km

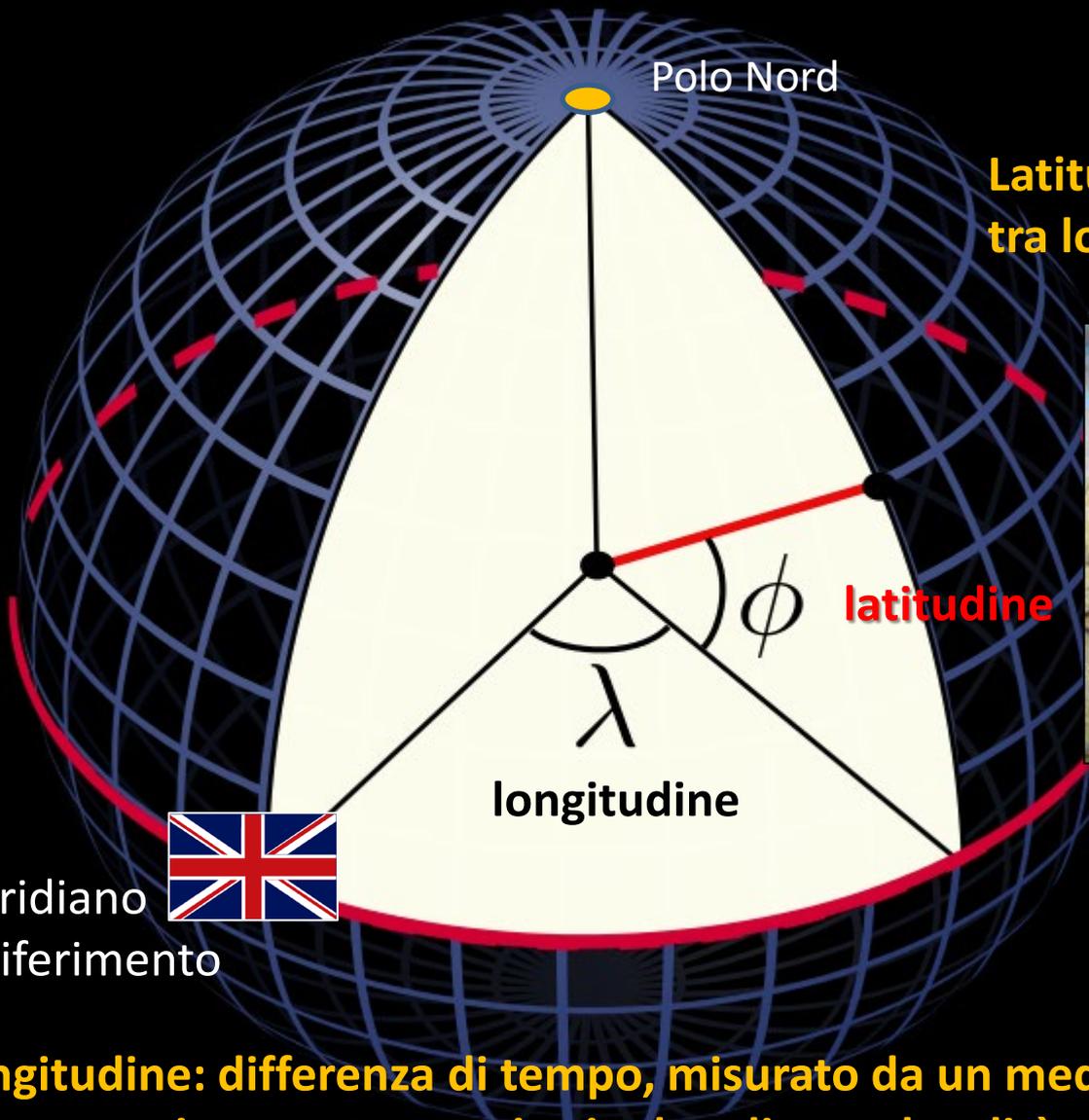


Il problema della misura della longitudine

che interessava la Spagna
cui il papa Alessandro VI aveva assegnato
gran parte del Nuovo Mondo



Le coordinate geografiche



meridiano
di riferimento

Latitudine: basta misurare l'angolo tra lo zenit e il polo (stella polare)



sestante

Longitudine: differenza di tempo, misurato da un medesimo orologio, tra gli istanti del mezzogiorno astronomico in due diverse località, di cui una di riferimento

Bolla *Inter caetera Divinae* di papa **Alessandro VI**

per la ripartizione delle nuove terre tra Spagna e Portogallo
4 maggio 1493 (confermata dal Trattato di Tordesillas, 7 giugno 1493)

La bolla papale risolveva le difficoltà sollevate dalle nuove scoperte geografiche. Segnando una **linea immaginaria** che andava da un polo all'altro **passando a 379 leghe (1770 km) di distanza a Ovest (e a Sud) delle Isole Azzorre e di Capo Verde**, stabiliva **che tutte le terra a occidente di questa linea dovevano appartenere alla Spagna e quelle a oriente al Portogallo**, a meno che non si potesse dimostrare che qualche territorio era stato occupato in precedenza da un'altra potenza cristiana.

«Alessandro vescovo, servo dei servi di Dio, al nostro amatissimo figlio in Cristo Ferdinando ed alla nostra amatissima figlia in Cristo Isabella, illustri re e regina di Castiglia, León, Aragona, Sicilia e Granada, salute e Apostolica benedizione.

Tra le altre opere gradite alla divina Maestà e da noi auspicate, questa certamente occupa il più alto grado possibile, ossia che la Fede cattolica e la religione cristiana siano innalzate, specialmente nei nostri tempi e diffuse e portate ovunque; che si provveda alla salvezza delle anime e che le nazioni barbare siano sopraffatte e portate alla stessa Fede. Quando fummo chiamati, col favore della Divina misericordia, a questo Santo Seggio di Pietro, nonostante i nostri meriti insufficienti, sapevamo che voi, da veri principi e re cattolici, come sappiamo che siete sempre stati, e lo dimostra ...»





Azzorre

SPAGNA → ← PORTOGALLO

1 lega spagnola = 5.57 km

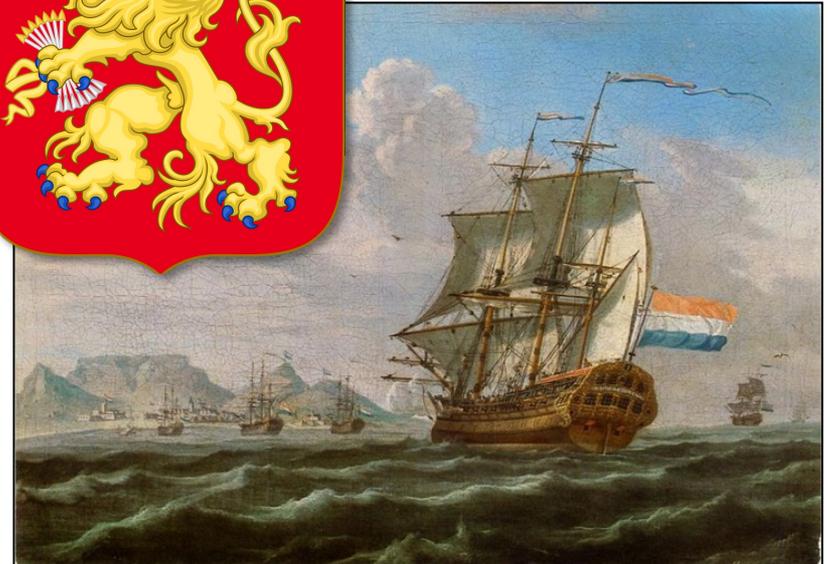
La corsa alla misura della longitudine

1593: premio di Filippo III (1578-1621)

6000 ducati + 2000 ducati l'anno



1600 – 1611: Stati Generali
della Sette Province Unite
5000 fiorini, poi saliti a 15000 fiorini



L'ammiragliato inglese entra nel gioco

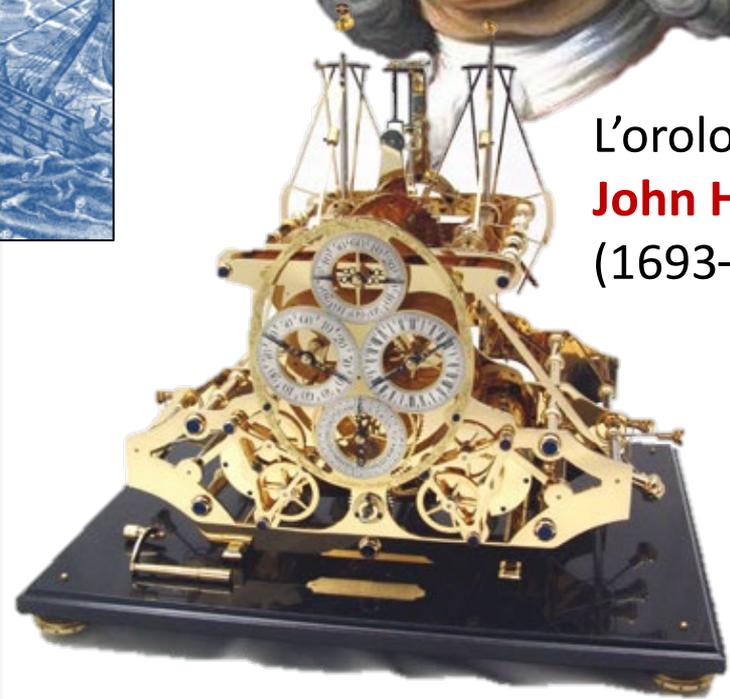
1707: disastro delle isole Schilly



Sir Cloudesley Shovell
(1650-1707)



L'orologio di
John Harrison
(1693–1776)



Le Lune medicee come orologi universali

Callisto

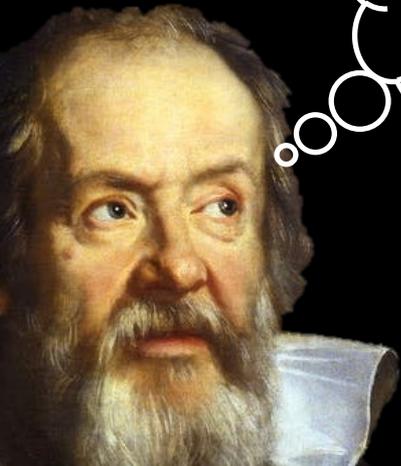


Io Ganimede

Europa

29 luglio 2008, 19.33 UT

I quattro satelliti di Giove scoperti da Galilei nel 1610 possono fungere da lancette di un **orologio celeste** il cui ritmo viene letto con precisione tramite le loro **eclissi**: potenzialmente utili per tarare gli orologi terrestri e determinare la **longitudine**.



La proposta di Galilei in 4 punti

https://www.treccani.it/export/sites/default/Portale/resources/multimedia/Lezioni_fisica/pendolo_Foucault/LEZIONE_PENDOLI_E_ROTAZIONE_TERRESTRE.pdf

Nel **1636 Galilei** scrisse agli **Stati generali olandesi** per proporre il suo metodo per misurare la longitudine:

«Il modo di potere in ogni tempo sapere la Longitudine è stato per molti secoli ricercato [...].

Sino à questa nostra età non è stata conosciuta altra strada, che la antichissima per via de gl' Eclissj Lunarij [...]

Hora sappiano per tanto, come intorno al corpo di Giove, uanno perpetuamente riuolgendosi quattro stelle minorj [...]

Osservando de i sopra nominati accidenti, notando l'hora della sua apparenza; la quale conferita con le osseruazionj medesime fatte e notate con i lor tempi in Amstelodamo ò in altro luogo, darà la differenza de i meridianj. [...]

Ma per l' uso della Navigazione restano 4. particolarità da guadagnarsi.»



La proposta di Galilei in 4 punti

«Prima l' esquisita Teorica de i mouimenti di esse Stelle Medicee [...].

Secondariamente, si ricercano Telescopij di tal perfezzione, che chiaramente rendano uisibilj, et osservabilj esse Stelle.

Terzo, conuien trouar modo di superar la difficultà, che altri può credere che arrechj l' agitazione della Naue nell' uso di esso Telescopio.

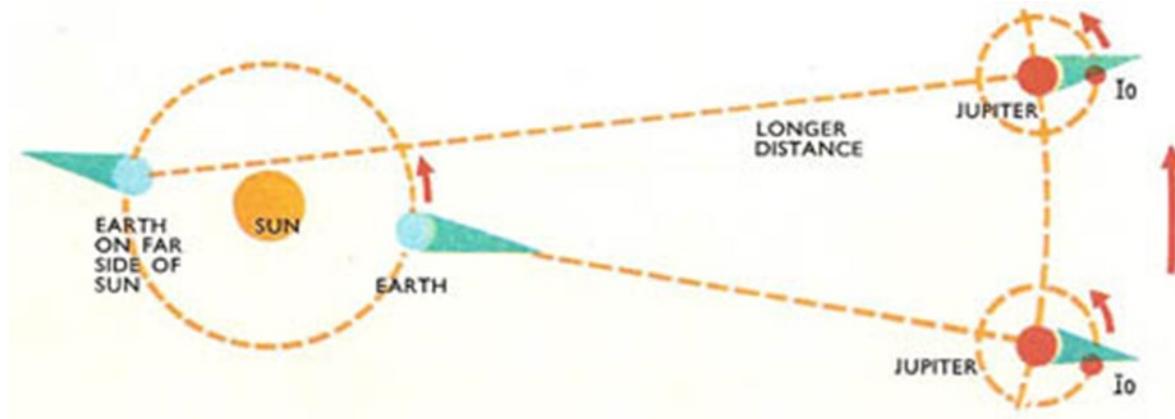
Nel quarto luogo, si ricerca esquisito Orologio per numerar l' hore, e sue minuzie [...]

Finalmente circa il 4 requisito, io hò tal misurator del tempo, che se si fabricassero, 4. ò 6. di tali strumenti, e si lasciassero scorrere, troueremmo (in confermazione della lor giustezza) che i tempi, da quelli misuratj et mostrati, non solamente d' hora, in hora, ma di giorno in giorno, et di mese in mese, non differirebbero tra di loro, nè anco d'un minuto secondo d' hora: tanto uniformamente caminano.

Orologij veramente pur troppo ammirabili per gl' osservatori de i moti, e fenomenj celesti; et è di più la fabrica di tali strumentj schiettissima e semplicissima e assai meno sottoposta all' alterazioni esterne, di qualsiuoglia altro strumento per simile uso ritrouato».

(Christiaan Huygens, *Oeuvres complètes*. Tome III. a cura di D. Bierens de Haan, 2010, pp. 493-497.

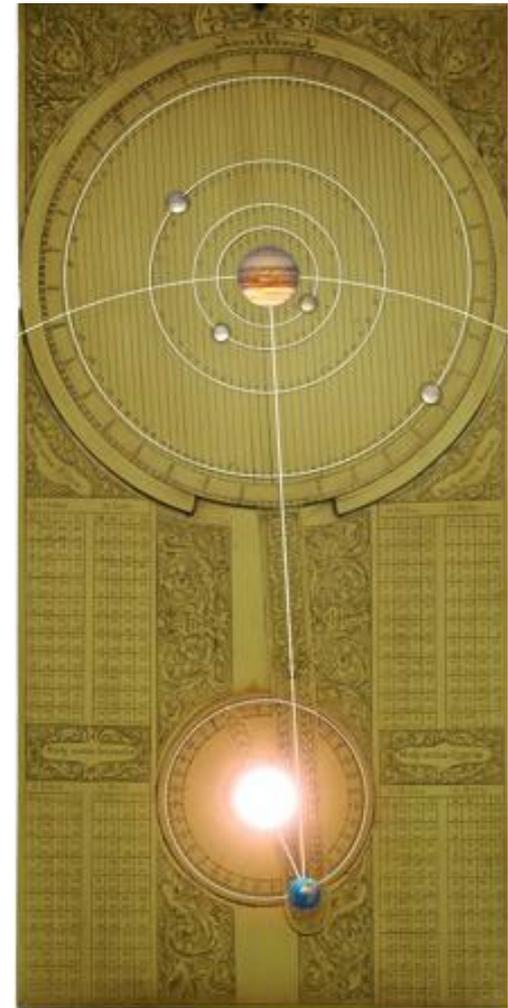
La soluzione proposta da Galilei



L'orologio celeste dato dalle occultazioni delle lune medicee è **potenzialmente accurato** ma di **difficile utilizzo**, soprattutto sul mare.



Giovilabio di Galilei



Galilei non dispone di un buon orologio terrestre ...

Galilei non aveva l'orologio che decantava, ma solo un pendolo e, come ricorda il suo allievo **Vincenzo Viviani** in una *Memoria* del 20 agosto **1659**:

“un pensiero sovvenutogli intorno al togliere il tedio del numerare le vibrazioni del pendolo, adobrandogli brevemente la fabbrica d'un oriuolo o macchinetta la quale mossa nel passaggio del medesimo pendolo (che servir doveva in luogo di quel che vien detto il tempo dell'oriuolo) mostrasse il numero delle vibrazioni”.

Viviani scriveva quando ormai **Christiaan Huygens** aveva già risolto il problema di un *horologium* regolato da un pendolo con oscillazioni isocrone che dava una accuratezza **30 volte migliore dei precedenti orologi meccanici (i migliori pendoli perdevano al più 10 secondi al giorno)**...

MA IL PENDOLO NON REGGEVA IL DONDOLIO DELLE NAVI.

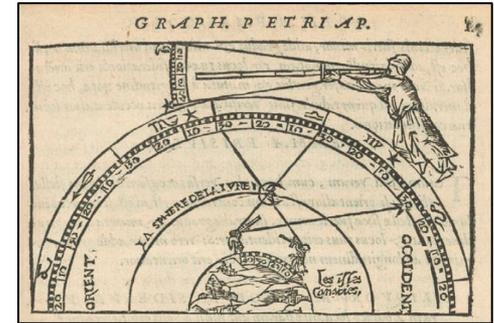
Altri orologi universali: eclissi, distanze e occultazioni lunari

<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2007/2007.14504.pdf#page=4&zoom=280,49,108>

- **Eclissi**: usate da **Ipparco** e da **Colombo** ma rare.

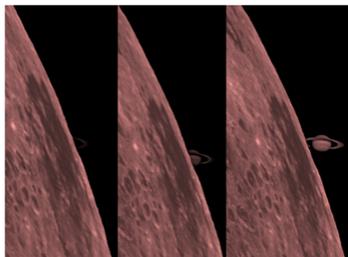
- **Metodo della distanza lunare**:

data una rappresentazione sufficientemente accurata del percorso della Luna in cielo, è possibile **calcolare le distanze lunari per qualsiasi luogo sulla Terra e per tempi specifici**. In qualsiasi altra posizione, si può quindi **determinare l'ora locale in cui si verificano uno o più eventi specifici**.



L'idea delle distanze lunari fu proposta da **Amerigo Vespucci** nel **1499** e discussa da **Pietro Appiano** nel **1524**.

La **Luna** si muove di **0°.5 ogni ora** e ciò richiede misure angolari molto accurate: **2 minuti d'arco (1/30°)** di differenza tra la Luna e la stella di riferimento **corrispondono a 1° di differenza in longitudine**, ossia 60 miglia nautiche all'equatore.



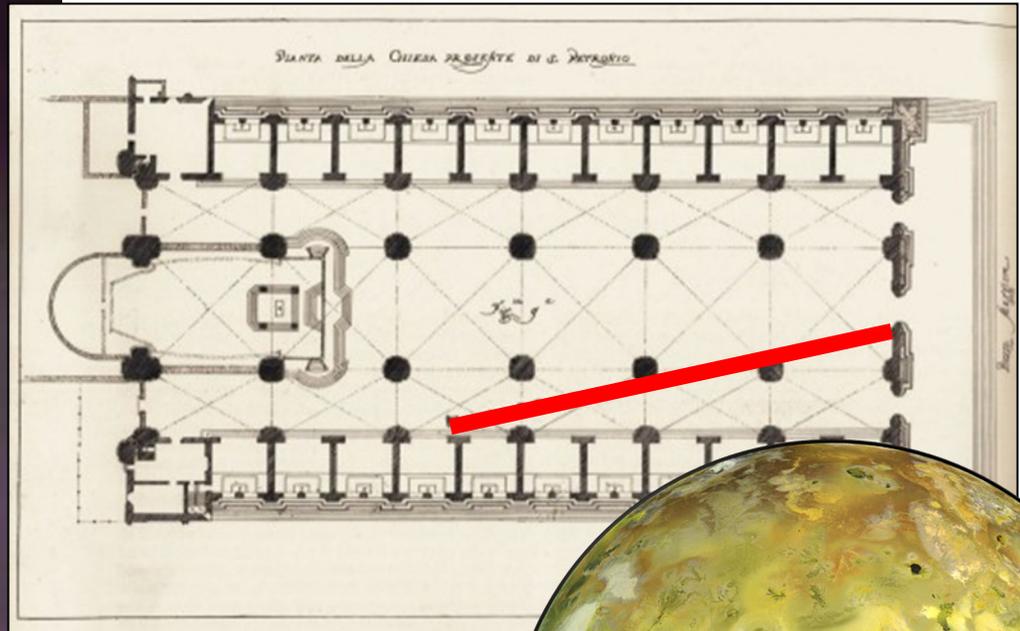
- **Occultazioni (Halley)**:

Nel gioco entra Giovanni Domenico Cassini

(Perinaldo, 1625 – Parigi, 1712)



Orologio solare in San Petronio, Bologna



Satellite Io

L'Osservatorio di Parigi voluto da Colbert;

Cassini vi si trasferì nel 1671



Luigi XIV (1638 –1715)



Jean-Baptiste Colbert (1619 –1683)



Osservatorio di Parigi e telescopio aereo

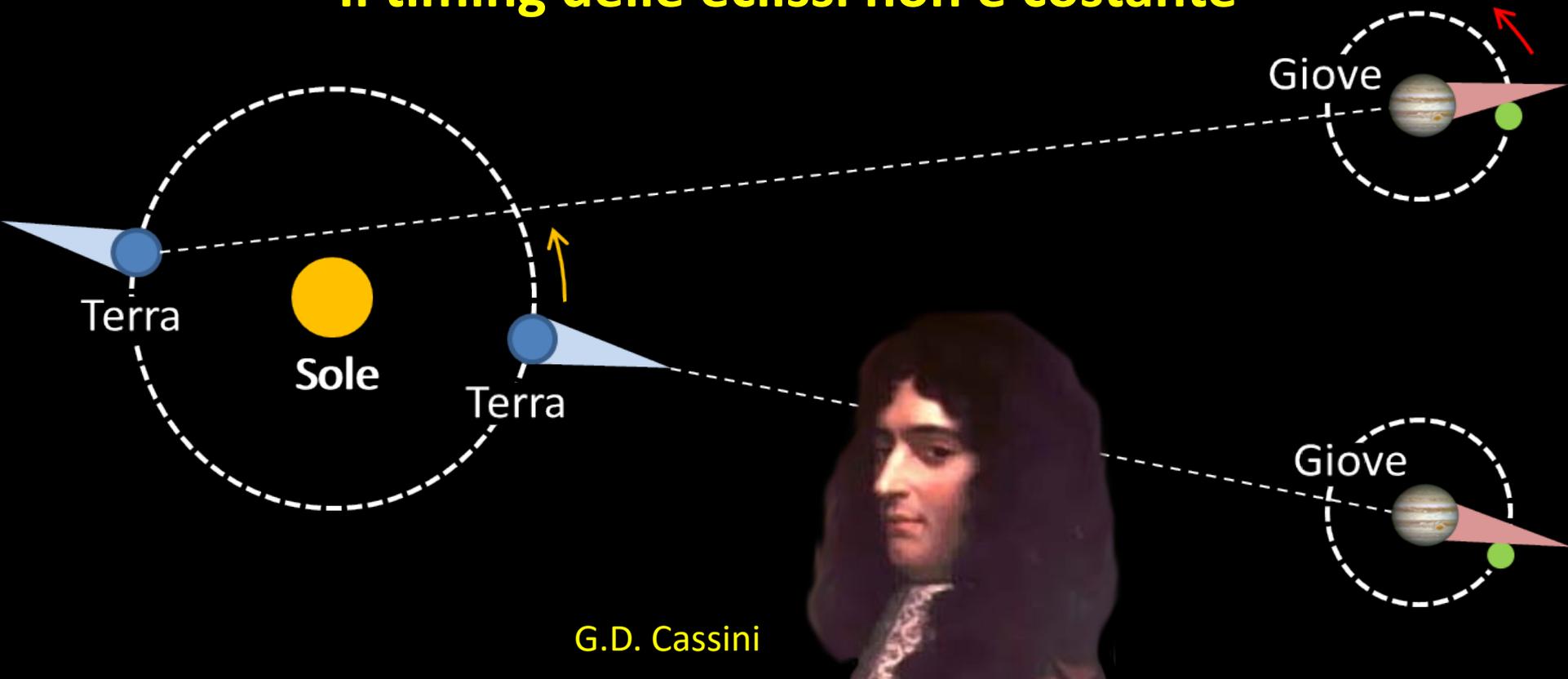
Le disequaglianze dei satelliti di Giove

Jean Philippe Maraldi (1665-1729), nipote di **Cassini**:

- Prima disequaglianza: l'eccentricità delle orbite,
- Seconda disequaglianza: il fatto che l'osservatore si trova sulla Terra e non sul Sole.



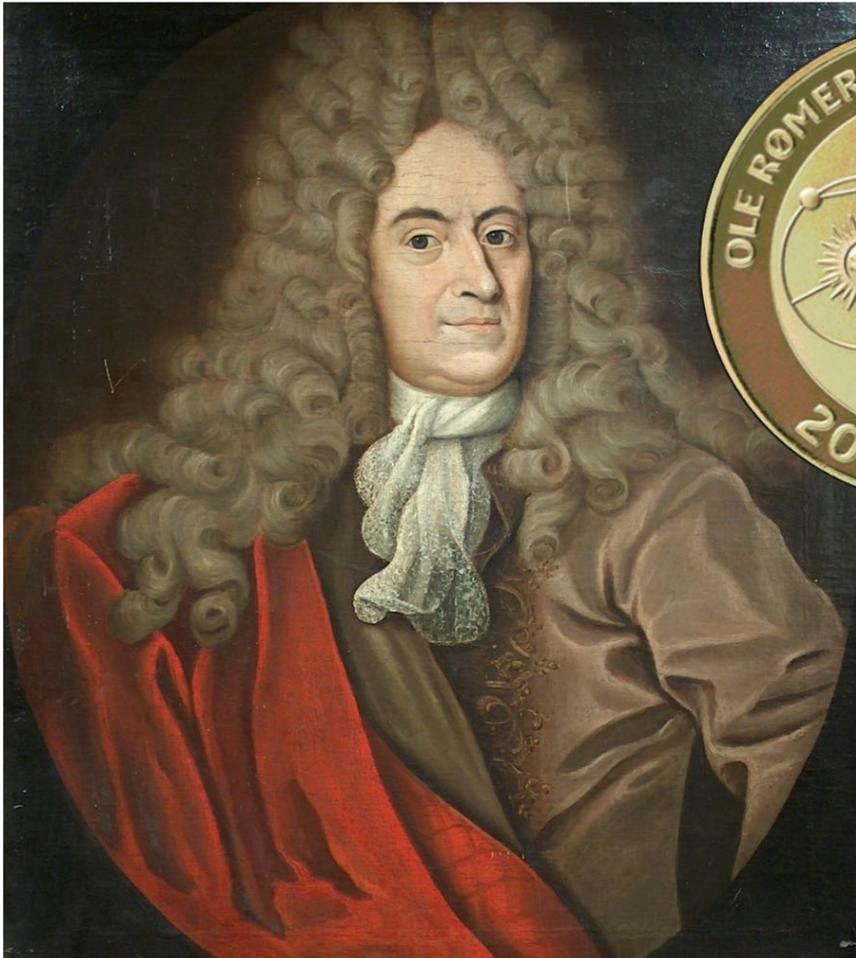
Il timing delle eclissi non è costante



G.D. Cassini

Cassini passò le osservazioni di lo al danese **Ole Rømer** (1644 –1710)

portato a Parigi da **Jean Picard** (1620-1682)
assieme al notebook autografo di Tycho Brahe.

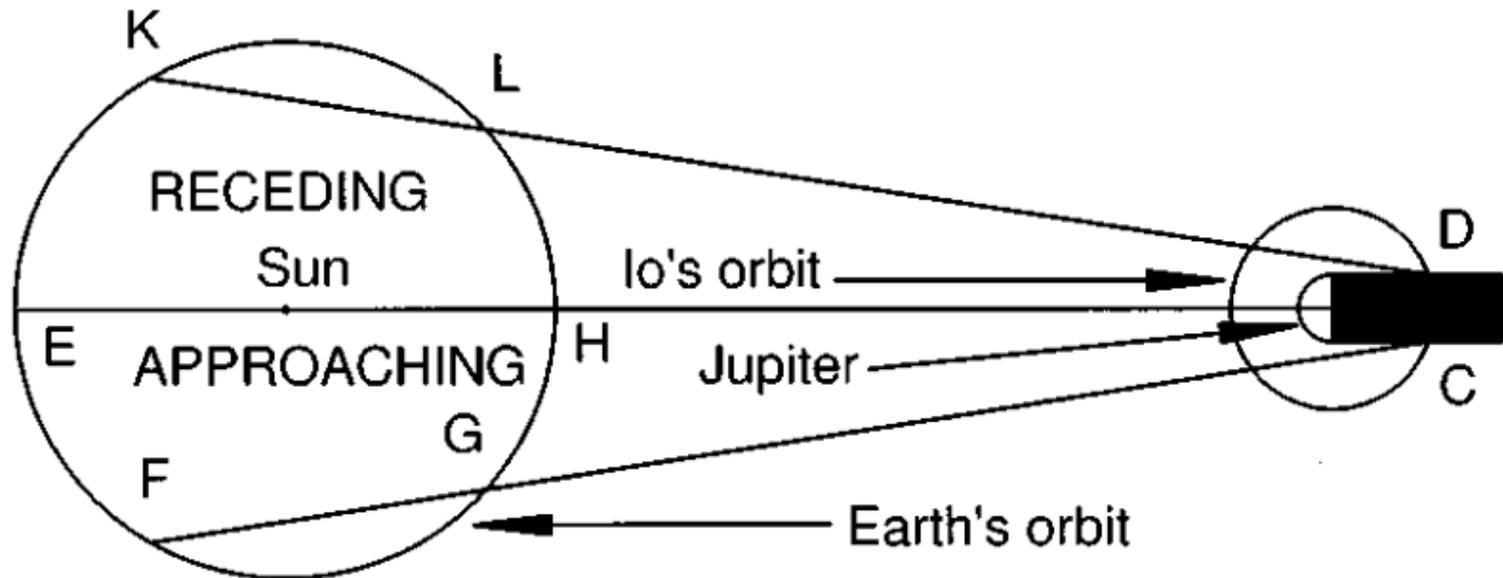


M. Rømer, I. Bernard Cohen,
*Roemer and the First Determination of the
Velocity of Light* (1676),
Isis, Vol. 31, No. 2, 1940, pp. 327-379.

Un bell'articolo sulle 'diseguaglianze' di Io

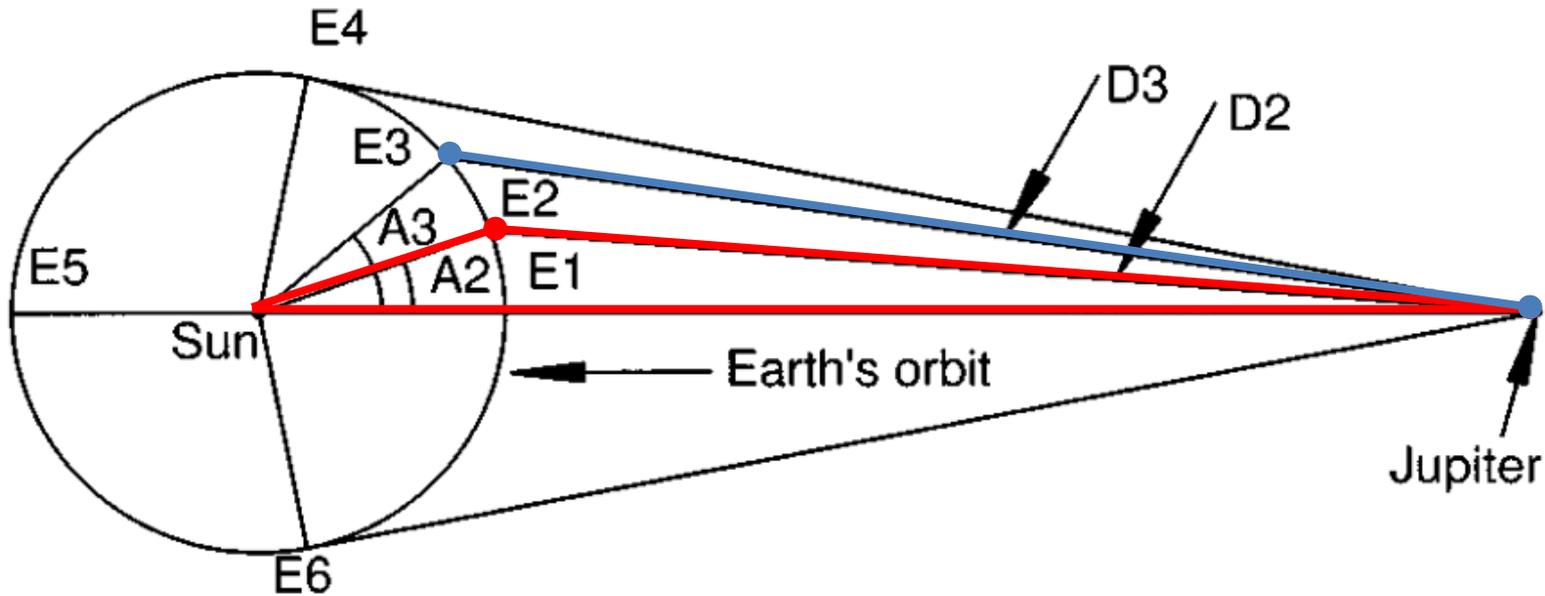
James H. Shea

Ole Rømer, the speed of light, the apparent period of Io, the Doppler effect, and the dynamics of Earth and Jupiter,
Am. J. Phys. 66 (7), 1998



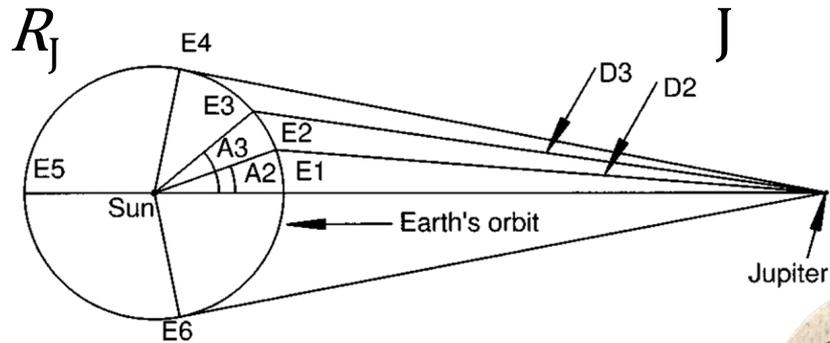
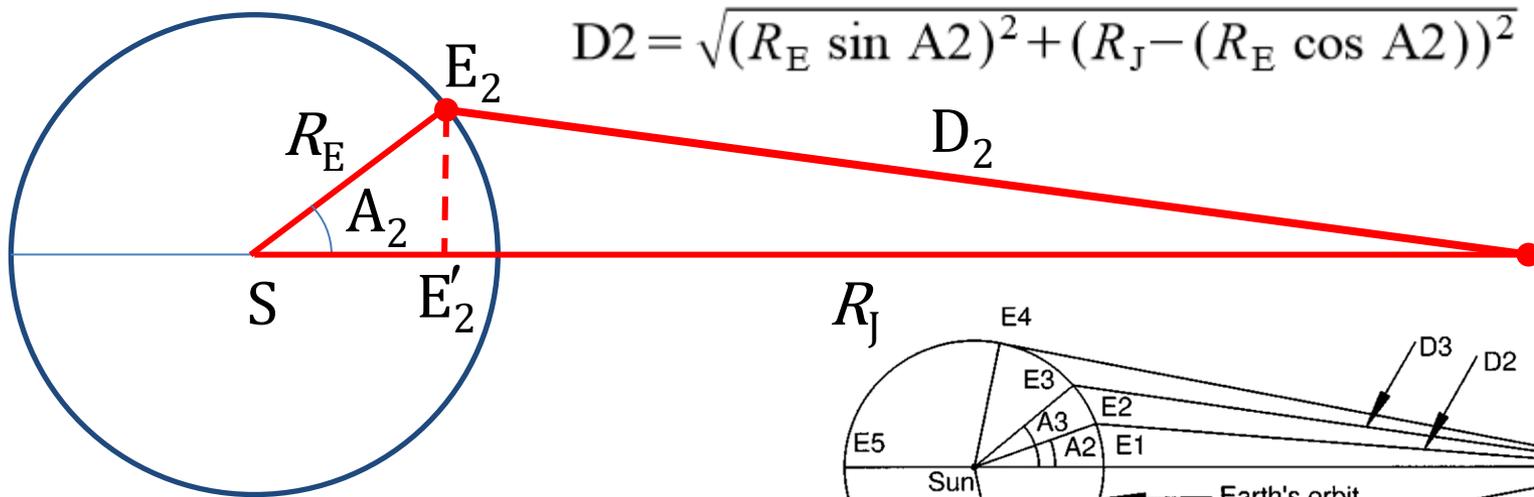
Le distanze Giove-Terra

James H. Shea

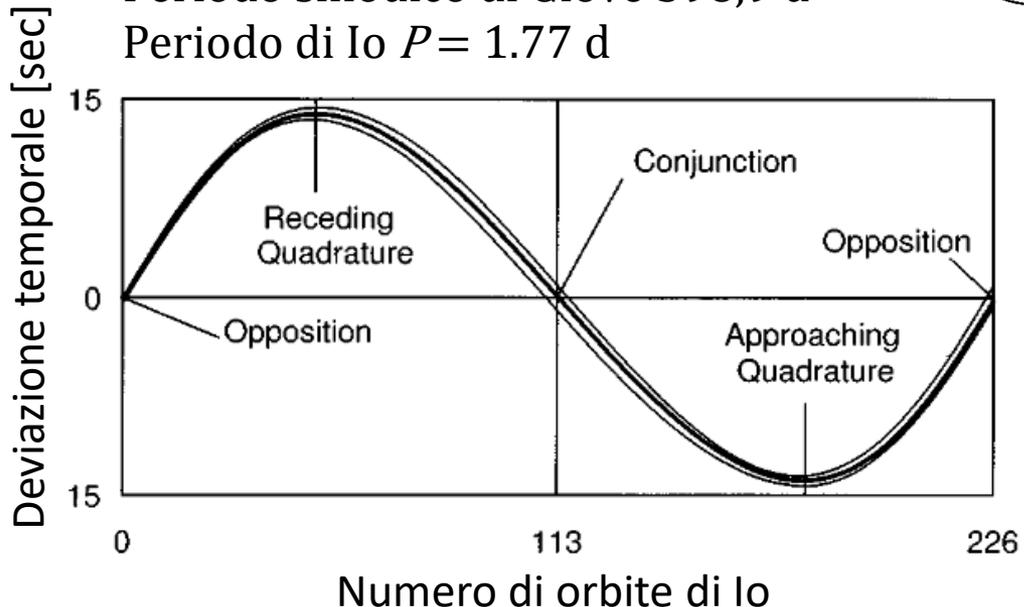


Calcoliamo la differenza di cammino **D3-D2**

La variazione della distanza tra Giove e Terra



Periodo sinodico di Giove 398,9 d
 Periodo di Io $P = 1.77$ d



Variatione apparente del periodo orbitale P di Io

$$\Delta T = \frac{D_3 - D_2}{c}$$

$$\frac{\Delta T}{P} = \frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{\Delta r}{P} \frac{1}{c} = \frac{V}{c}$$

Variatione della distanza tra Terra e Giove in $1P$



C. Doppler



Dimostrazione che riguarda il movimento della luce trovato da **M. Rømer**

della Reale Accademia delle Scienze

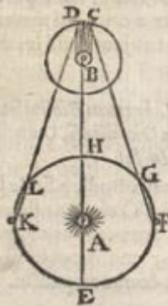
Journal des Sçavans du lundi 7 décembre 1676, pp. 276-279.

276 JOURNAL
Demonstration touchant le mouvement de la lumiere trouvé par M. Rømer de l'Academie Royale des Sciences.

Il y a long-temps que les Philosophes sont en peine de décider par quelque experience, si l'Action de la lumiere se porte dans un instant à quelque distance que ce soit, ou si elle demande du temps. M^r. Rømer de l'Academie 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 lieuës, telle qu'est à peu près la grandeur du diametre de la terre, la lumiere n'a pas besoin d'une seconde de temps.

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 estant en L vers la seconde Quadrature de Jupiter, ait veu le premier Satellite, lors de son émerison ou sortie de l'ombre en D; & qu'en suite environ 42. heures & demie après, sçavoir après une revolution de ce Satellite, la terre se trouvant



DES SÇAVANS. 277
en K, le voye de retour en D: Il est manifeste que si la lumiere demande du temps pour traverser l'intervalle LK, le Satellite sera veu plus tard de retour en D, qu'il n'auroit esté si la terre estoit demeurée en K, de sorte que la revolution de ce Satellite, ainsi observée par les Emersions, 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, où la terre en s'approchant, va au devant de la lumiere, les revolutions des Immersions paroistront autant accourcies, que celles des Emersions avoient paru alongées. Et parce qu'en 42 heures & demy, que le Satellite employe à peu près à faire chaque revolution, la distance entre la Terre & Jupiter dans l'un & l'autre Quadrature varie tout au moins de 210 diametres de la Terre, il s'en suit que si pour la valeur de chaque diametre de la Terre, il faloit une seconde de temps, la lumiere employeroit 3½ min. pour chacun des intervalles GF, KL, ce qui causeroit une difference de près d'un demy quart d'heure entre deux revolutions du premier Satellite, dont l'une auroit esté observée en FG, & l'autre en KL, au lieu qu'on n'y remarque aucune difference sensible.

Il ne s'en suit 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 revolutions, devenoit tres-considerable à l'égard

M m m 7 de

278 JOURNAL
de plusieurs prises ensemble, & que par exemple 40 revolutions observées du costé F, estoient sensiblement plus courtes, que 40 autres observées de l'autre côté en quelque endroit du Zodiaque 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'icy au soleil.

La necessité de cette nouvelle Equation du retardement de la lumiere, est établie par toutes les observations qui ont esté faites à l'Academie Royale, & à l'Observatoire depuis 8 ans, & nouvellement elle a esté confirmée par l'Emersion du premier Satellite observée à Paris le 9 Novembre dernier à 5 h. 35'. 45". du soir, 10 minutes plus tard qu'on ne l'eût deü attendre, en la déduisant de celles qui avoient esté observées au mois d'Aoust, lors que la terre estoit beaucoup plus proche de Jupiter; ce que M^r. Rømer avoit prédit à l'Academie dès le commencement de Septembre.

Mais pour oster tout lieu de douter que cette inégalité soit causée par le retardement de la lumiere, il demontre qu'elle ne peut venir d'aucune excentricité, ou autre cause de celles qu'on apporte ordinairement, pour expliquer les irregularitez de la Lune & des autres Planetes: bien que neanmoins il se soit appercu que le premier Satellite de Jupiter estoit excentrique, & que dailleurs ses revolutions estoient avancées ou retardées à mesure

DES SÇAVANS. 279
sure que Jupiter s'approchoit ou s'éloignoit du soleil, & même que les revolutions du premier Mobile estoient inégales; sans toutesfois que ces trois dernieres causes d'inégalité empêchent que la premiere ne soit manifeste.

Pharmacopée Royale Galenique & Chymique par Moyse Charas Apotecaire Artiste du Roy en son Jardin Royal des Plantes, In 4. A Paris chez l'Auteur, rue des Boucherries, Faux-bourg S. Germain, aux Vipères d'or.

L'Abondance & la bonté des remedes dont cet auteur a rempli son livre peut rendre aux étrangers avec usure ce que nous avons emprunté de leurs ouvrages, n'en ayant point eu jusqu'à present en France sur cette matiere d'une aussi grande étendue que celui-cy. Il comprend l'une & l'autre Pharmacie dont l'union est si nécessaire pour le choix, la preparation, l'usage & la mixtion des medicaments tant suivant le sentiment des anciens, ce que la Pharmacie Galenique enseigne, que suivant ce que les Modernes nous ont appris par leurs nouvelles découvertes dans la Chymie.

Comme l'une & l'autre de ces Pharmacies reconnoit les vegetaux, les animaux, & les mineraux pour la matiere sur laquelle elle doit fonder ses operations, & dont chacune prepare des remedes propres pour le



Dimostrazione che riguarda il movimento della luce trovato da **M. Rømer**

della Reale Accademia delle Scienze

Journal des Sçavans du lundi 7 décembre 1676, pp. 276-279.

Mais pour ôster tout lieu de douter que cette inégalité soit causée par le retardement de la lumière, il demontre qu'elle ne peut venir d'aucune excentricité, ou autre cause de celles qu'on apporte ordinairement, pour expliquer les irregularitez de la Lune & des autres Planetes : bien que néanmoins il se soit aperçu que le premier Satellite de Jupiter estoit excentrique, & que dailleurs ses revolutions estoient avancées ou retardées à mesure que Jupiter s'aprochoit ou s'éloignoit du soleil, & même que les revolutions du premier Mobile estoient inégales; sans toutesfois que ces trois dernières causes d'inégalité empêchent que la première ne soit manifeste.

«Ma per rimuovere qualsiasi motivo per dubitare che questa disuguaglianza sia stata causata dal ritardo della luce, [l'autore] mostra che non può derivare da alcuna eccentricità, o altra causa di quelle che si portano solitamente per spiegare le irregolarità della Luna e di altri pianeti: sebbene tuttavia il primo satellite di Giove fosse considerato eccentrico, e che, inoltre, le rivoluzioni fossero anticipate o ritardate quando Giove si avvicinava o si allontanava dal sole... queste ultime tre cause di disuguaglianza non impediscono alla prima di manifestarsi»

La prima misura della velocità della luce

Ole Rømer pubblicò soltanto la sua stima del tempo impiegato dalla luce a percorrere il diametro dell'orbita terrestre: **22 minuti**.

Fu l'olandese **Christiaan Huygens** (1629-1695) a calcolare la *velocità della luce* nel **1676** (lavoro pubblicato 14 anni dopo):

$$c = 212\,400 \text{ km/s}$$

(senza arrotondamenti avrebbe potuto essere di **232 000 km/s**).



Nel **1694** l'inglese **Edmund Halley** (1656-1742) ridusse i **22 minuti** di Rømer a **17**, con il che:
 $c = 300\,000 \text{ km/s}$.

La reazione di Cassini alle disequaglianze di Io

Nel 1675 **Cassini** affermava alla Reale accademia delle scienze:

«second inégalité paroît venir de ce que la lumière emploie quelque temps à venir du satellite jusqu'à nous, e qu'elle met environ dix à onze minutes à parcourir un espace égal au demi-diamètre de l'orbite terrestre»

(la seconda disuguaglianza sembra derivare dal fatto che la luce impiega un po' di tempo per arrivare dal satellite a noi e che ci vogliono dai dieci agli undici minuti per percorrere uno spazio uguale al mezzo diametro dell'orbita terrestre).



Perché subito dopo **Cassini rinnegò questa straordinaria scoperta?**

Lo spiegò lui stesso:

- 1) le disequaglianze non sono confermate dagli altri satelliti, e**
- 2) potrebbero essere spiegate in altro modo, per esempio con l'eccentricità dell'orbita (!) o ancora tramite un fenomeno sconosciuto.**

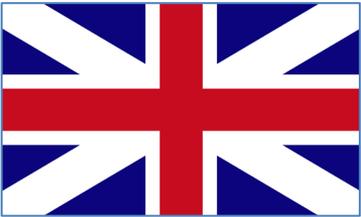
Risultato: **l'Accademia rigettò la spiegazione di **Rømer**.**

Altre reazioni all'ipotesi di Rømer 'mora luminis'



In **Francia** viene rigettata (**peso della famiglia Cassini**) sino alla scoperta dell'aberrazione (1726).

Dopo alcune iniziali critiche, **Christiaan Huygens** (Oss. Di Parigi) la sposò in pieno.



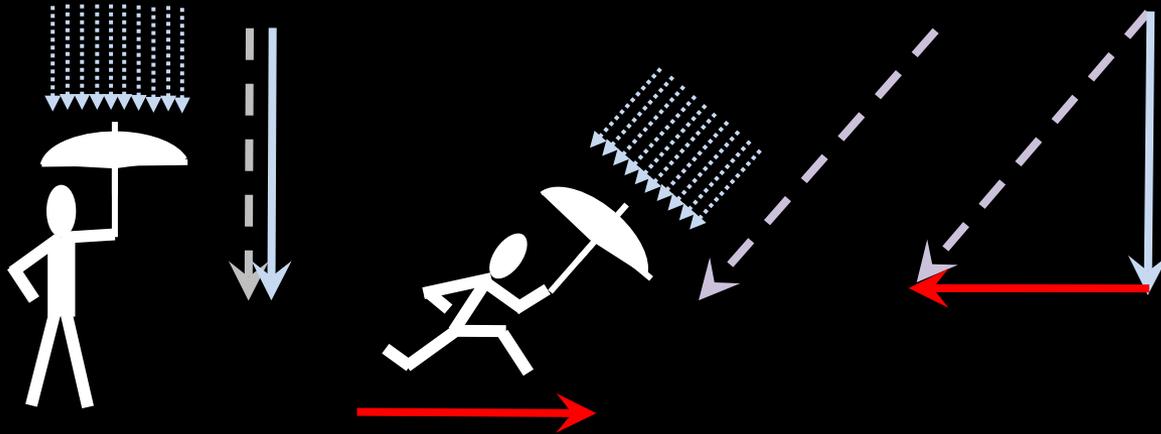
Alcuni **inglesi** la accettano.

Isaac Newton la citò nei *Principia*:

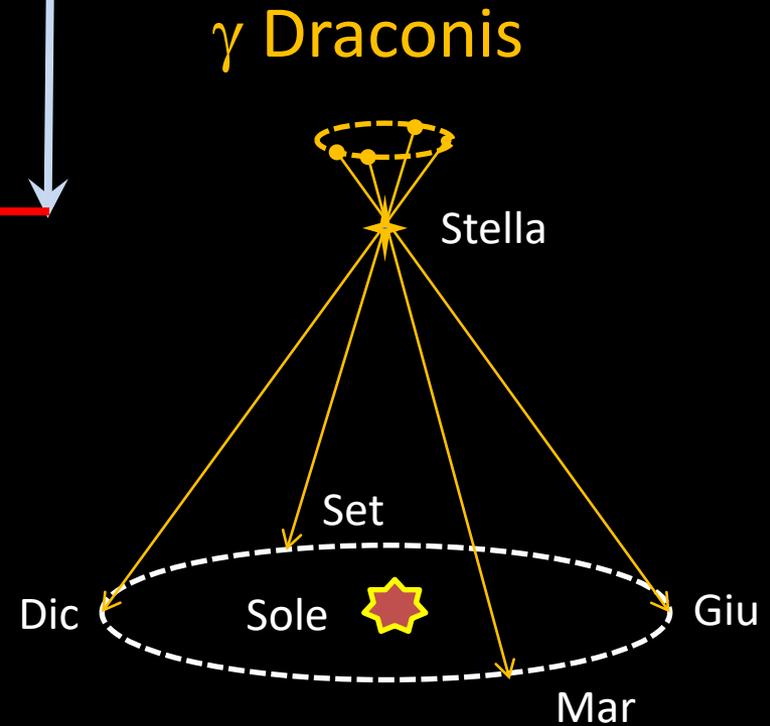
«Namque Lucem successive propagari & spatio quasi decem minutorum primorum a Sole ad Terram venire, jam constat per Phaenomena Satellitorum Jovis Observationibus diversorum Astronomorum confirmata» (Che la luce si propaghi in successione per circa otto minuti dal sole alla terra, è già chiaro dai fenomeni dei satelliti di Giove confermati dalle osservazioni di diversi astronomi), con qualche dubbio residuo.

Robert Hooke (1635-1703), invece, restò del tutto scettico.

1727: velocità della luce e parallasse annua

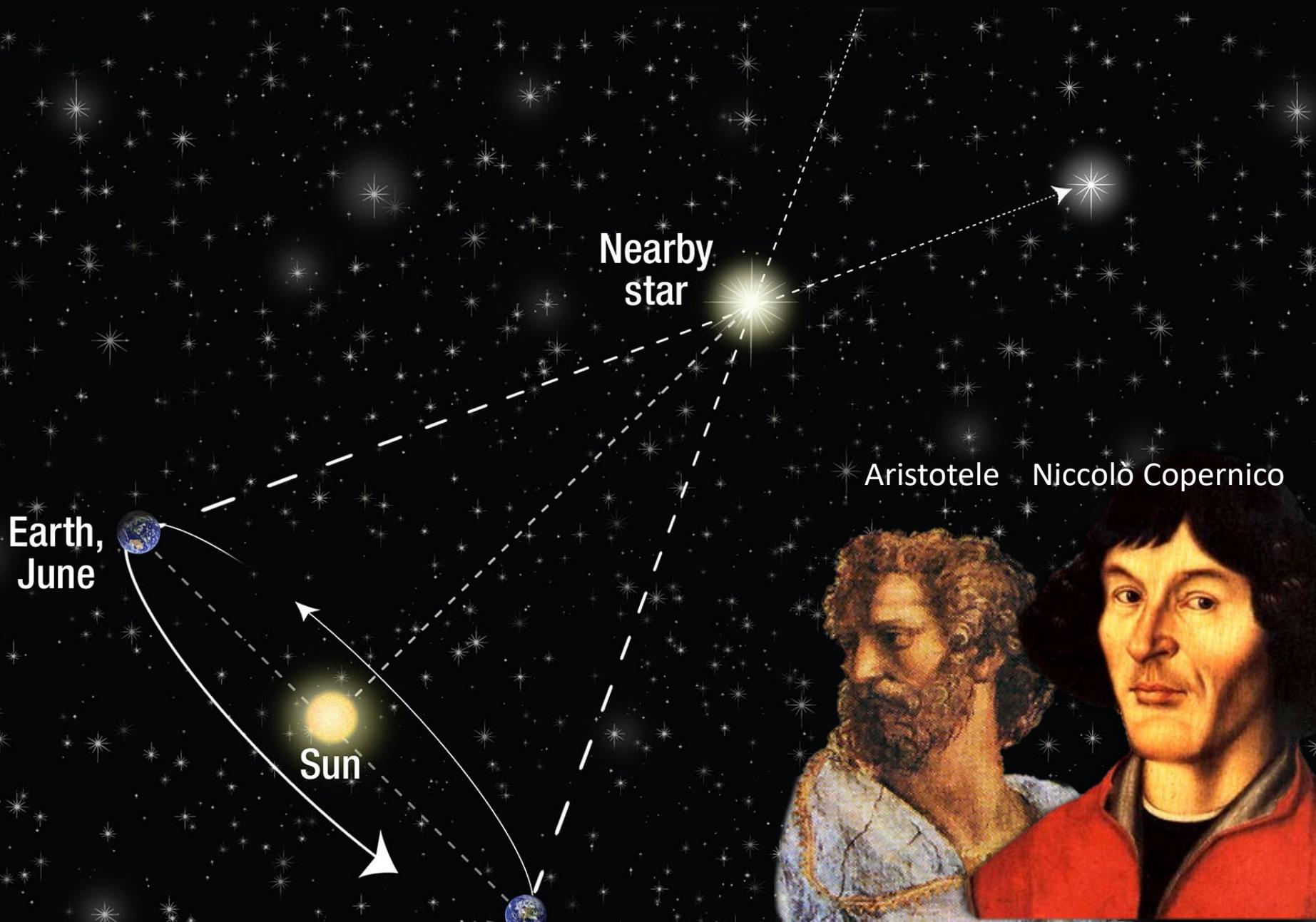


James Bradley
(1692–1762)



La **aberrazione** venne scoperta per serendipity mentre si cercava di misurare la **parallasse annua**.

La *vexata quaestio* della parallasse annua



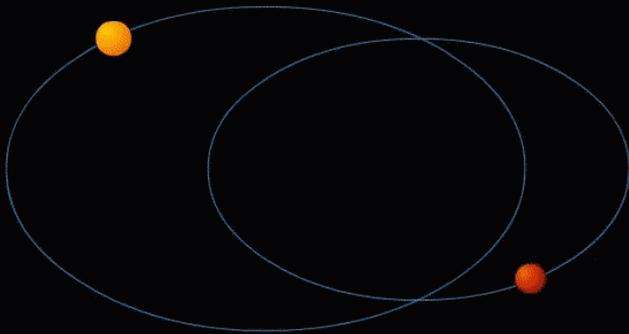


Il suggerimento di **Galilei** di usare le 'stelle vicine'

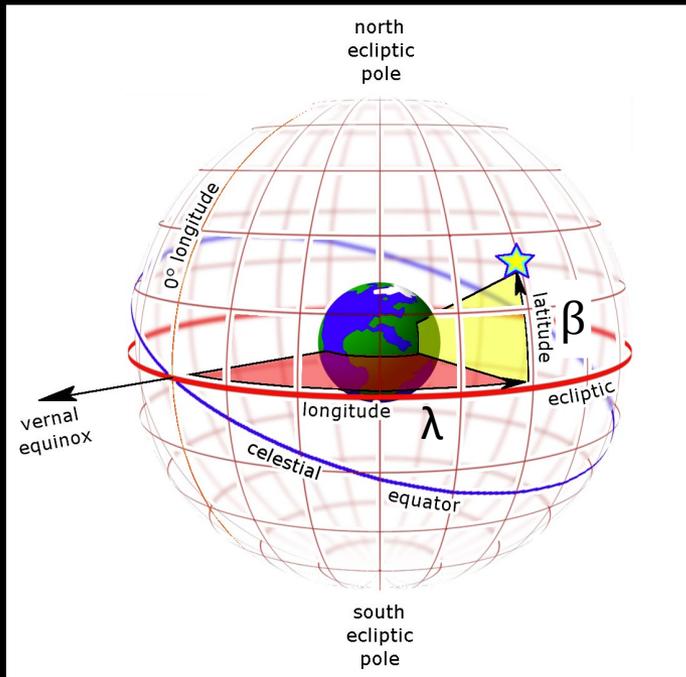
porterà **William Herschel** a scoprire nel **1790** le doppie fisiche
e a verificare l'universalità della legge di gravitazione.



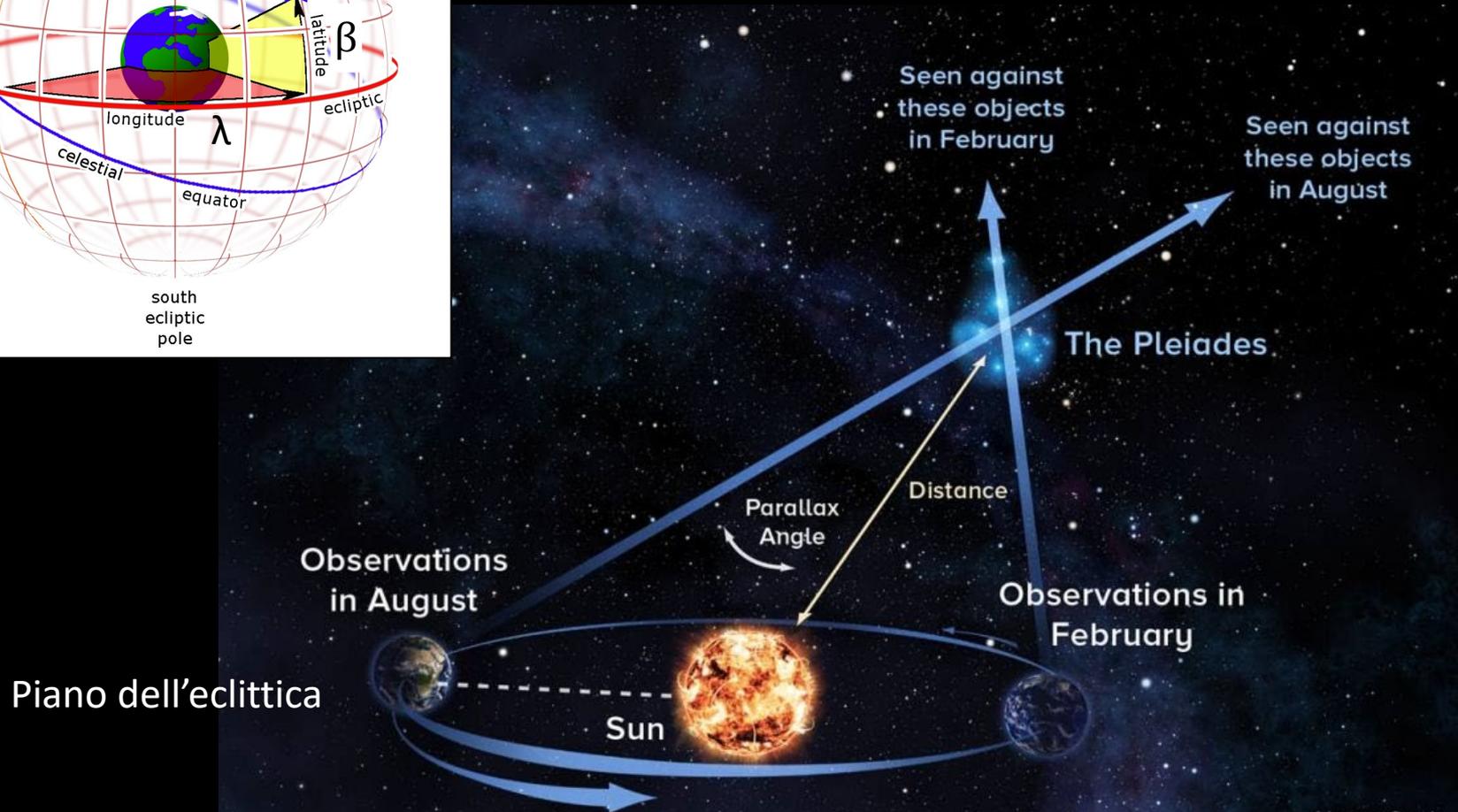
William Herschel
(1738- 1822)



L'ellisse di parallasse annua

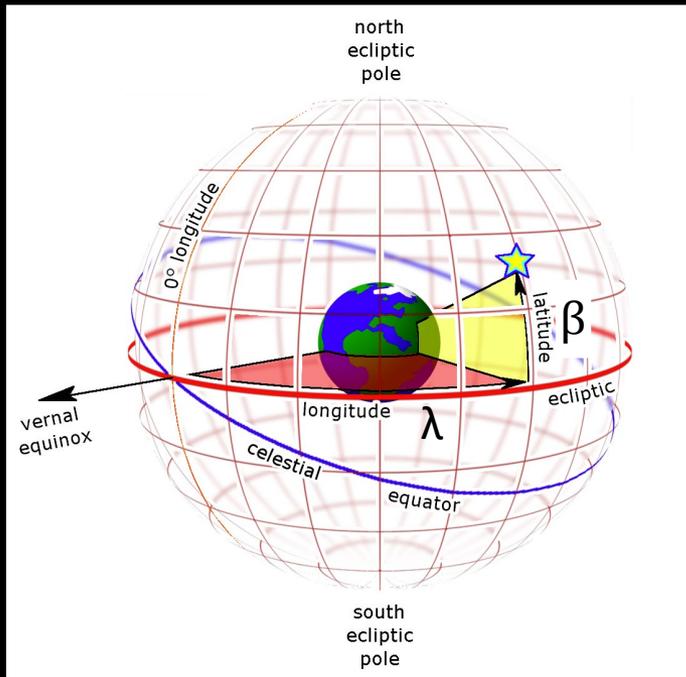


Nell'arco dell'anno la linea di vista dell'osservatore terrestre descrive un **cono**.

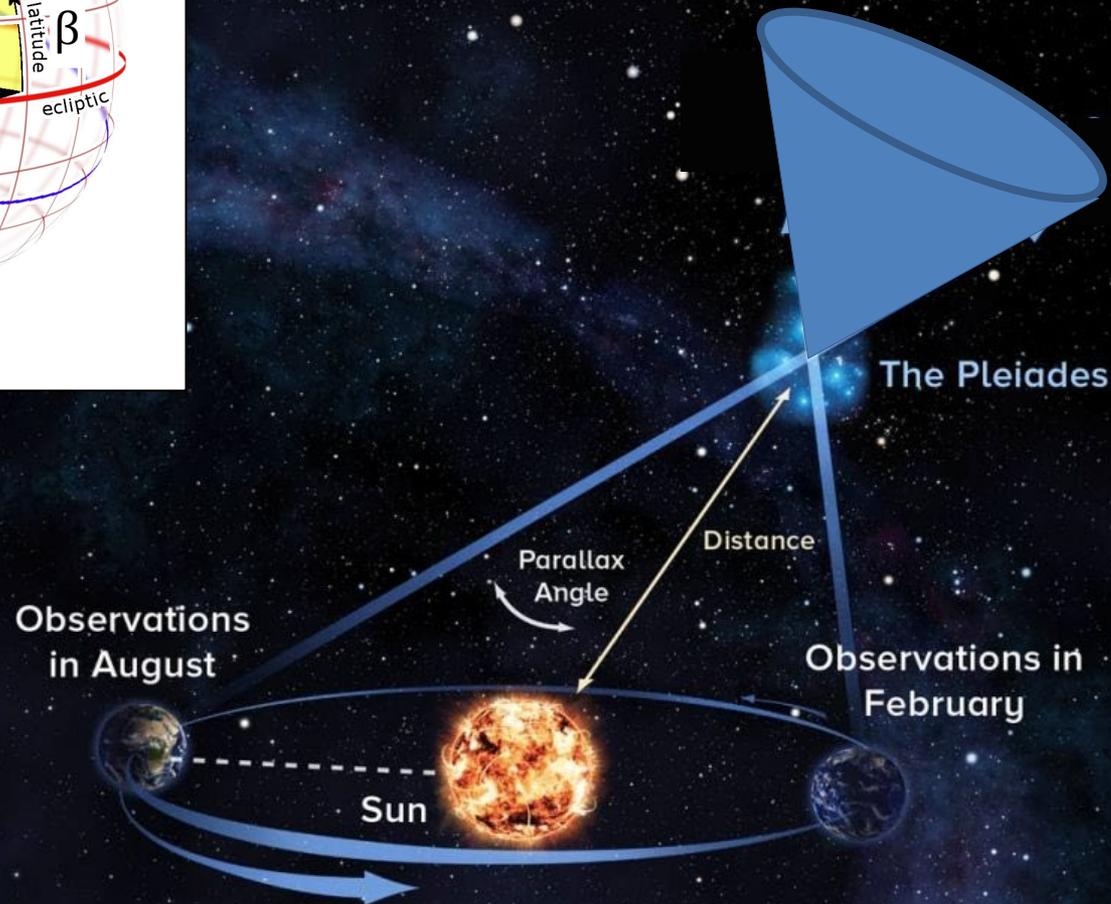


Not to Scale

L'ellisse di parallasse annua

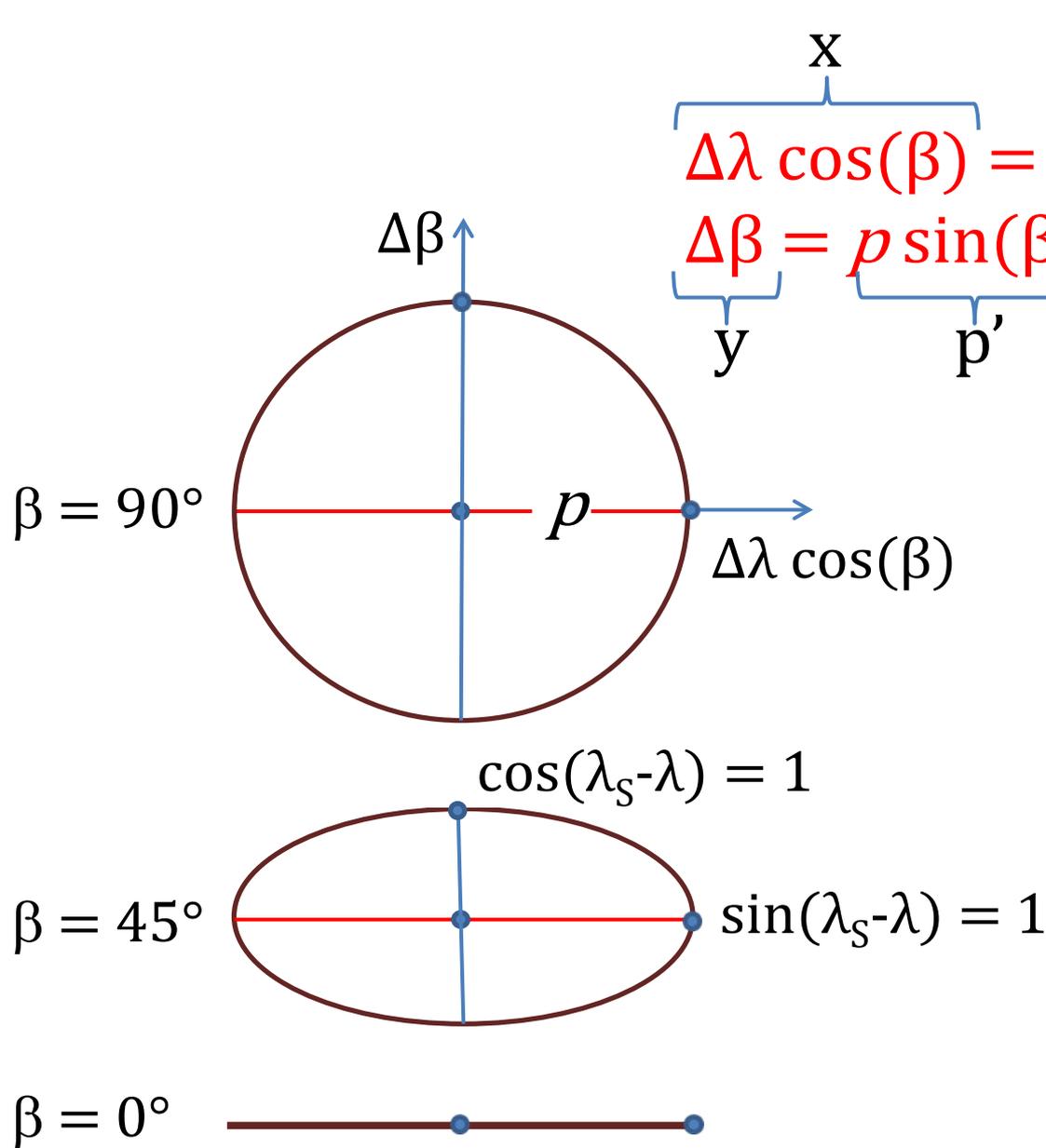


L'intersezione del **cono di parallasse** con il **piano tangente alla sfera celeste**, **perpendicolare alla direzione Sole-stella** (che non è l'asse del cono) è una **ellisse**.



Not to Scale

Dipendenza della parallasse annua da λ_S e β



$$\begin{aligned} \Delta\lambda \cos(\beta) &= p \sin(\lambda_S - \lambda) \\ \Delta\beta &= p \sin(\beta) \cos(\lambda_S - \lambda) \end{aligned}$$

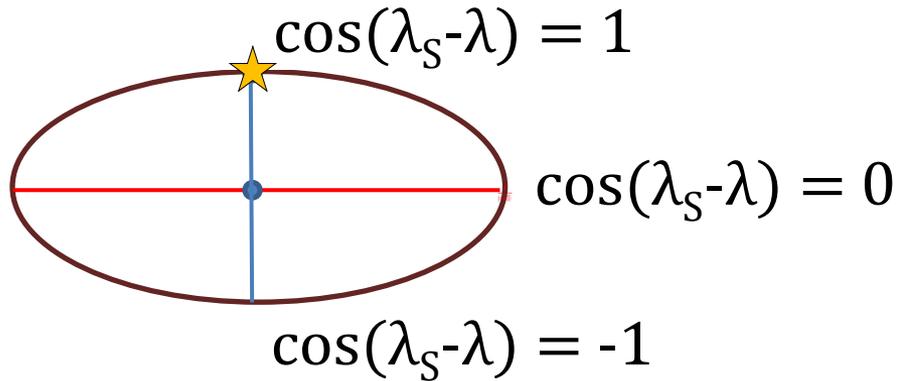
$p = \frac{1}{d} \text{ rad}$

$$\begin{aligned} x &= p \sin(\theta) \\ y &= p' \cos(\theta) \end{aligned}$$

equazioni parametriche di una ellisse

L'asse maggiore (di lunghezza proporzionale all'inverso della distanza) è parallelo al piano dell'eclittica

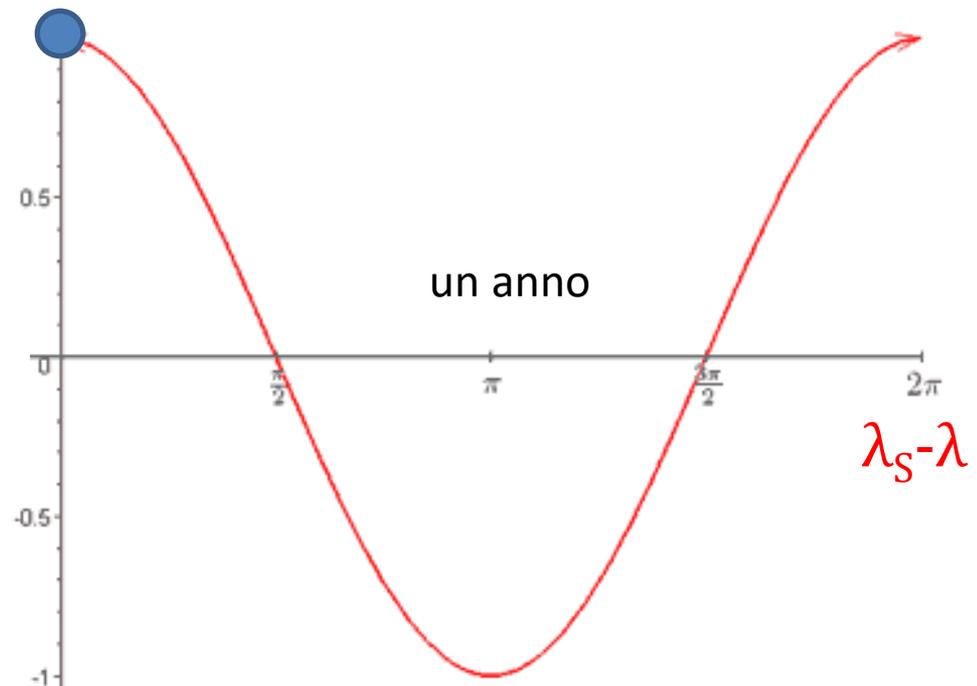
Come si può misurare la parallasse ?



$$\Delta\beta = p \cos(\lambda_S - \lambda) \sin(\beta)$$

$$\frac{\Delta\beta}{p \times \sin(\beta)}$$

Per verificare l'esistenza della parallasse e ricavare p basterà misurare **nel corso dell'anno** la **distanza zenitale di una stella (prossima allo zenit)** al momento del **transito in meridiano**



Tentativi di misurare la parallasse

1669: Robert Hooke provò con γ **Draconis**, passante allo **zenit di Londra** (assenza di rifrazione), progettando e realizzando un **telescopio zenitale** che collocò nel suo appartamento al **Gresham College**.

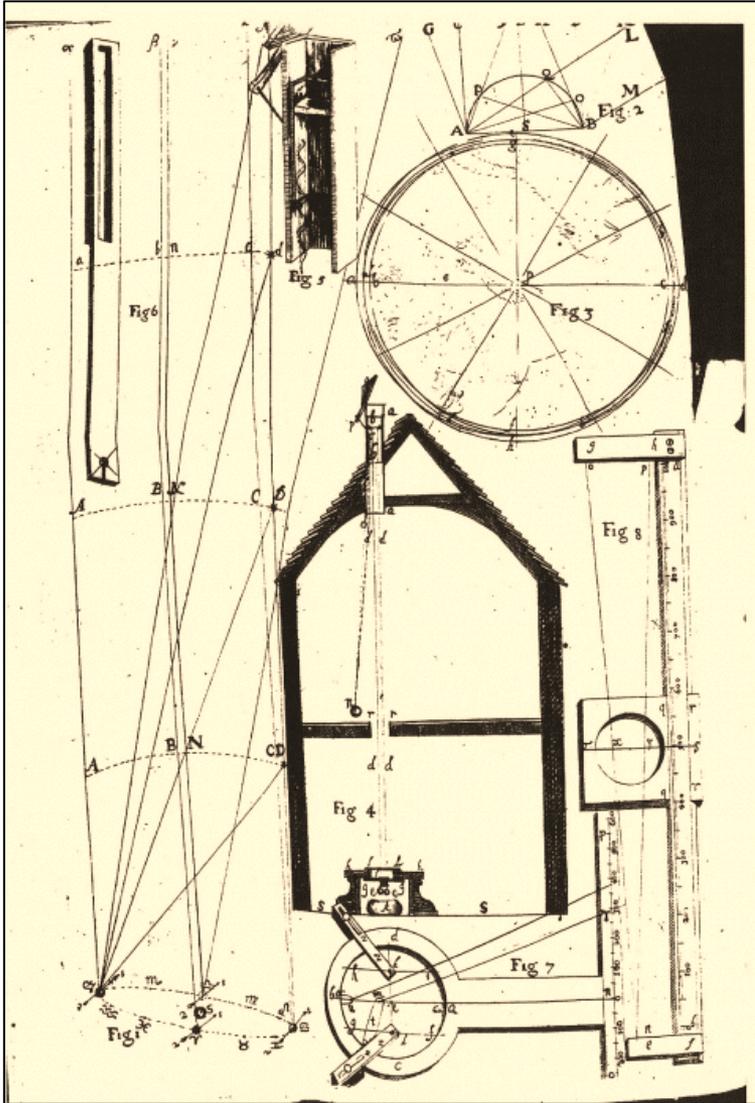
Fece solo 4 osservazioni con dei risultati sorprendenti, poi si ammalò. Aveva una **cattiva fama**, per cui nessuno lo prese sul serio.

1670: Jean Picard e **Cassini** tentarono con la **stella Polare** (osservazioni incomplete e/o inaccurate).

1699: John Flamsteed riprovò con la **Polare**. Trovò che la stella **oscillava annualmente di 40'' in declinazione**, ma Jean Cassini evidenziò che i fenomeni osservati non potevano essere spiegati con la parallasse, per un difetto di fase.

1725: Samuel Malyneux (politico con la passione per l'astronomia) decise di occuparsi del problema riprendendo le osservazioni di γ **Draconis**. Si fece costruire uno strumento da **George Graham** (focale 7.2 metri; apertura di 8.8 cm), che collocò a **Kew**, quartiere sud-ovest di Londra. **E qui comparve il pignolo e sistematico James Bradley.**

Il telescopio zenitale di Robert Hooke



Questa stampa d'epoca combina i diagrammi della parallasse e i disegni degli strumenti ottici e di misura che **Hooke** progettò per le sue osservazioni: vari micrometri e soprattutto un telescopio zenitale.

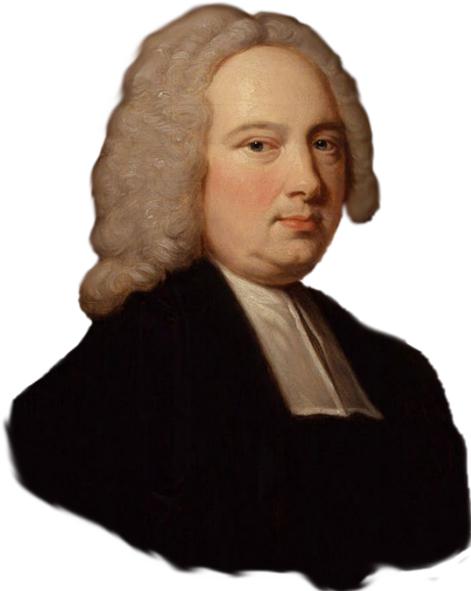
Al centro c'è un telescopio, montato sul tetto della abitazione di **Hooke** al Gresham College e combinato con un tubo e varie lenti aggiuntive. Lo strumento formava una catena complessa, un laboratorio verticale che puntava verso il cielo.

Grazie a questo telescopio, **Hooke** era in grado di seguire con precisione il percorso della stella che si proiettava nello spazio limitato e controllato che egli aveva segnato con le scale graduate.



James Bradley (1693-1762):

uno scienziato classico ben diverso dal romantico Hooke



James Bradley

James Bradley era nipote del Rev. **James Pound**, rettore a Wanstead nell'Essex e grande osservatore, che lo crebbe e lo educò. Fu pupillo di **Edmund Halley**. Ventottenne ottenne la **cattedra Savilian** di astronomia (matematica) a **Oxford**. Fu poi nominato professore di fisica.

Alla **morte di Halley nel 1742**, divenne **astronomo reale** e andò a vivere a **Greenwich**.

Cominciò occupandosi delle osservazioni del sistema gioviano poi passò alla parallasse.

Fu a questo punto che incontrò **Molyneux**, il quale gli chiese di collaborare alla ricerca.

Dopo aver osservato in appena **17 giorni** che γ **Draconis** davvero si muoveva in declinazione rispetto allo zenit, e avendo escluso una **nutazione** (fenomeno che effettivamente scoprirà in seguito), **Bradley** decise di approfondire la questione. Senza disturbare la sua famiglia a **Oxford**, usò l'abitazione dello **zio James Pound** che nel frattempo era morto, mediante uno strumento di minore apertura ma più corto.

Il telescopio zenitale di **Bradley**

Zenith Sector Telescope *in situ*, molto simile a quello usato da **James Bradley**.

Notare la sedia di osservazione reclinata sotto l'oculare e il nonio ad arco accanto all'oculare (*National Maritime Museum, Greenwich*).



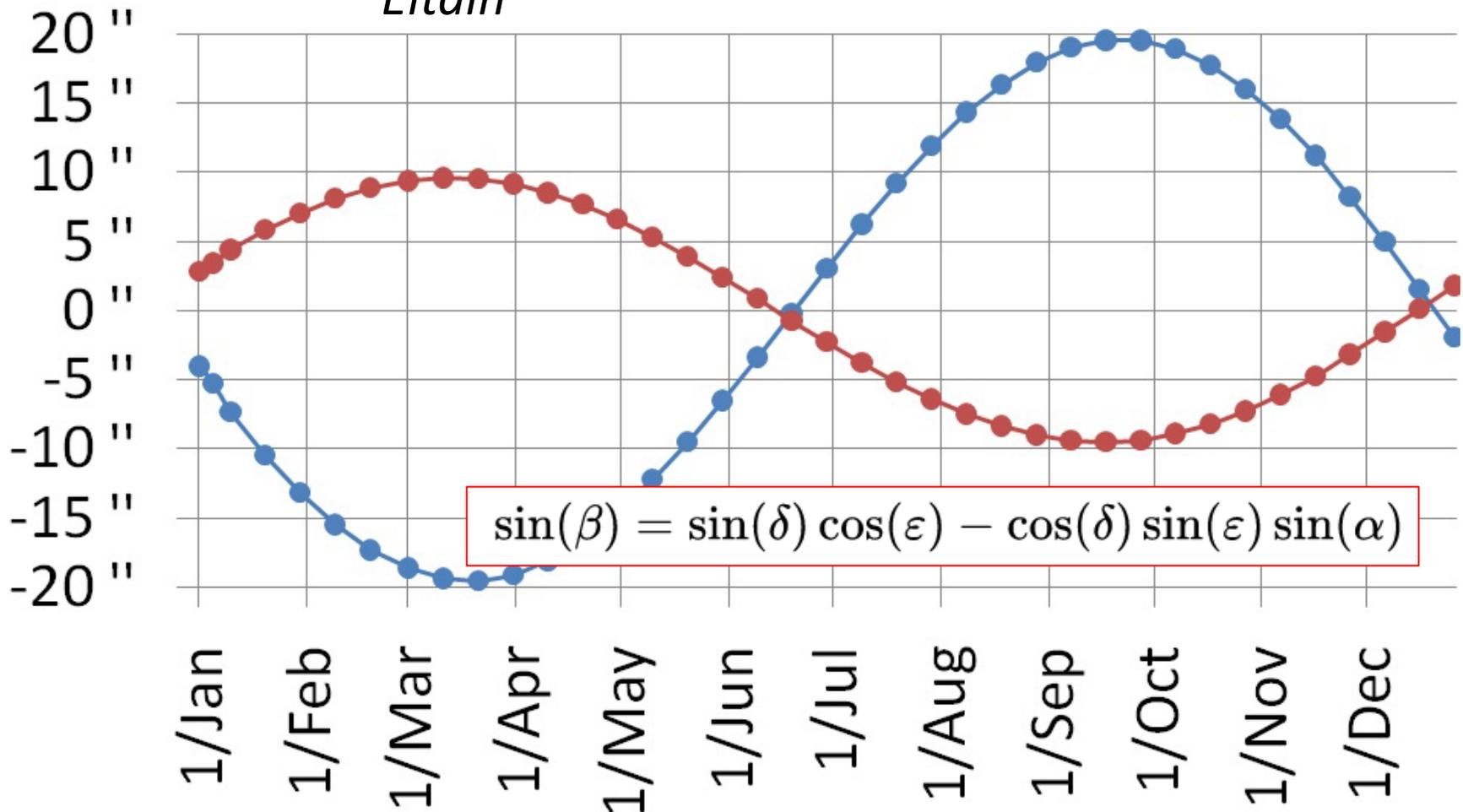
Latitudine
di Londra
51° 30' 30 N

Le osservazioni di **Bradley**

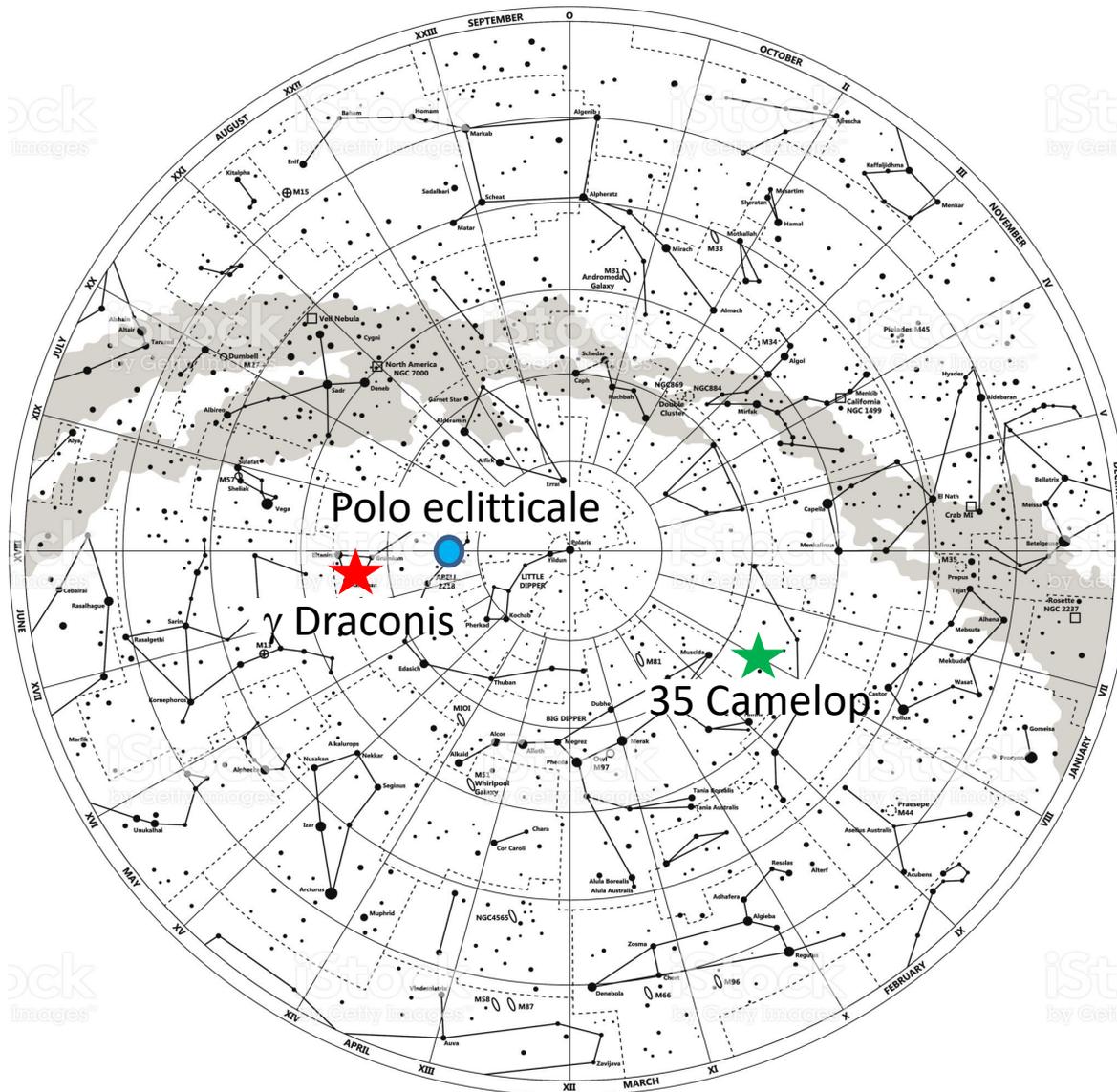
. R.A. 17^h 56^m 36^s
Dec. +51° 29' 20"

R.A. 06^h 04^m 29^s
Dec. +51° 34' 24"

● γ Draconis ● 35 Camelopardalis
Eltain

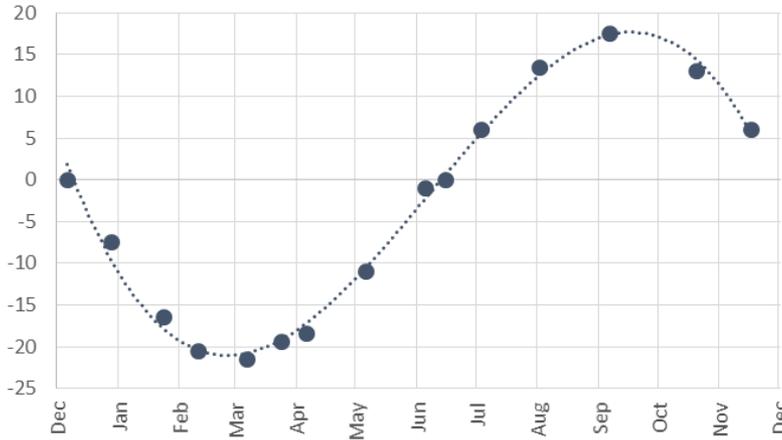


Le posizioni in cielo delle stelle di Bradley

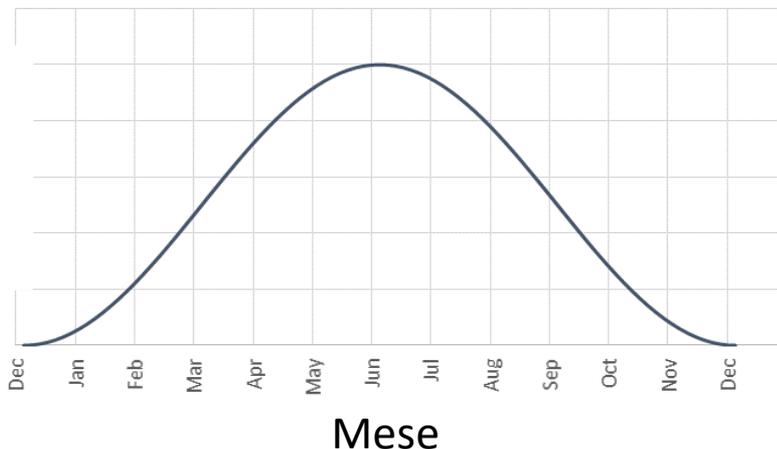


Osservata una dipendenza sinusoidale da λ_s , ma con la fase spostata di 90° rispetto all'attesa

Escursione della latitudine eclitticale di γ Draconis



Variazione attesa a causa della parallasse

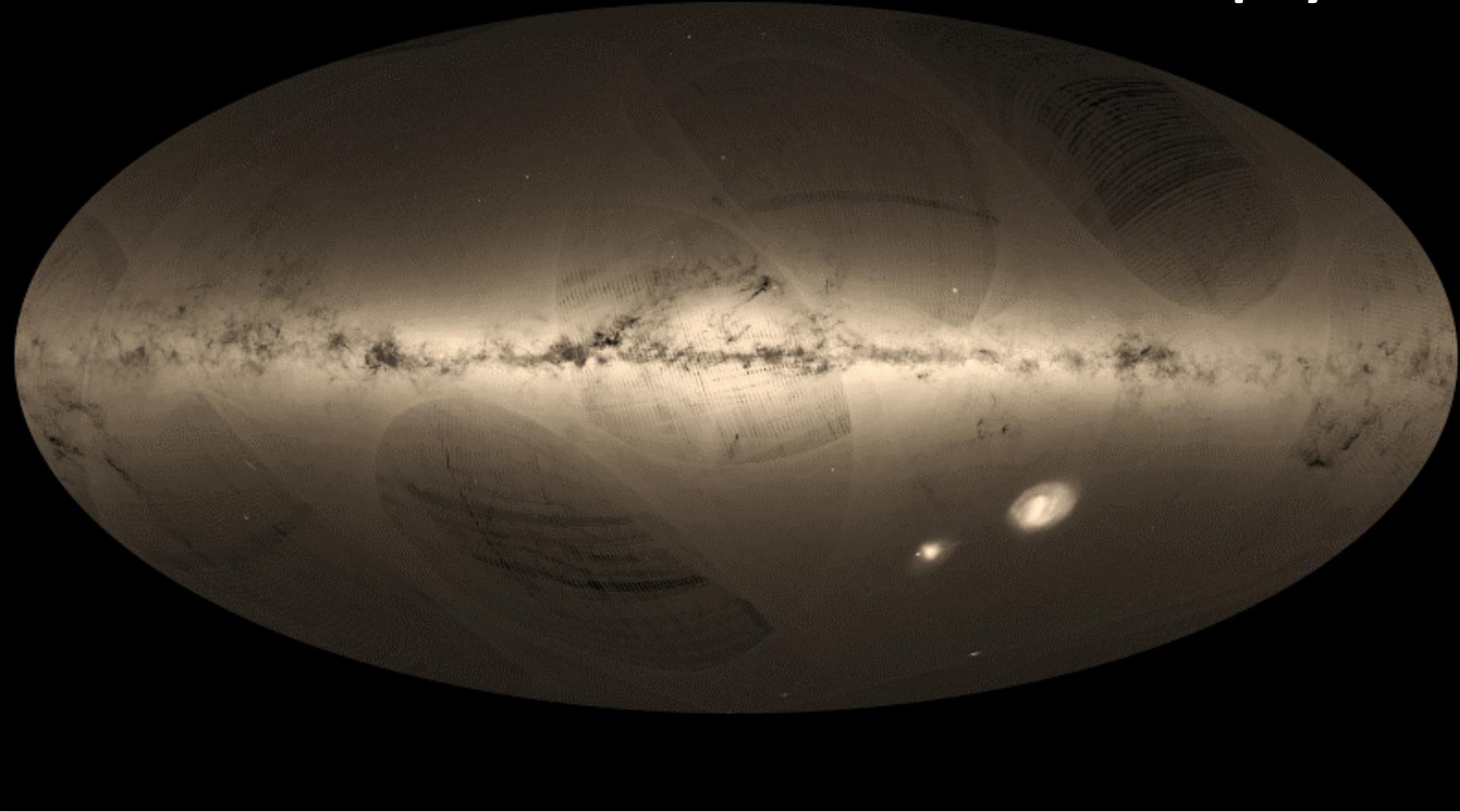


Dunque la curva osservata non poteva essere dovuta alla parallasse.

In effetti:

- γ -Draconis dista **154 anni luce**
 $\rightarrow p = 0.021'' = 6 \times 10^{-5}$ gradi.
È l'angolo sotteso da una persona in piedi a distanza di 20-mila km.
- L'accuratezza delle misure di **Bradley** era **largamente insufficientemente** per rilevare alcuna **parallasse**.
- Le prime misure affidabili di parallasse stellare avrebbero dovuto attendere **Friedrich Bessel** nel **1838 (61 Cygni)**. Oggi i dati di parallasse più affidabili sono quelli satellite **Gaia**.

Global Astrometric Interferometer for Astrophysics



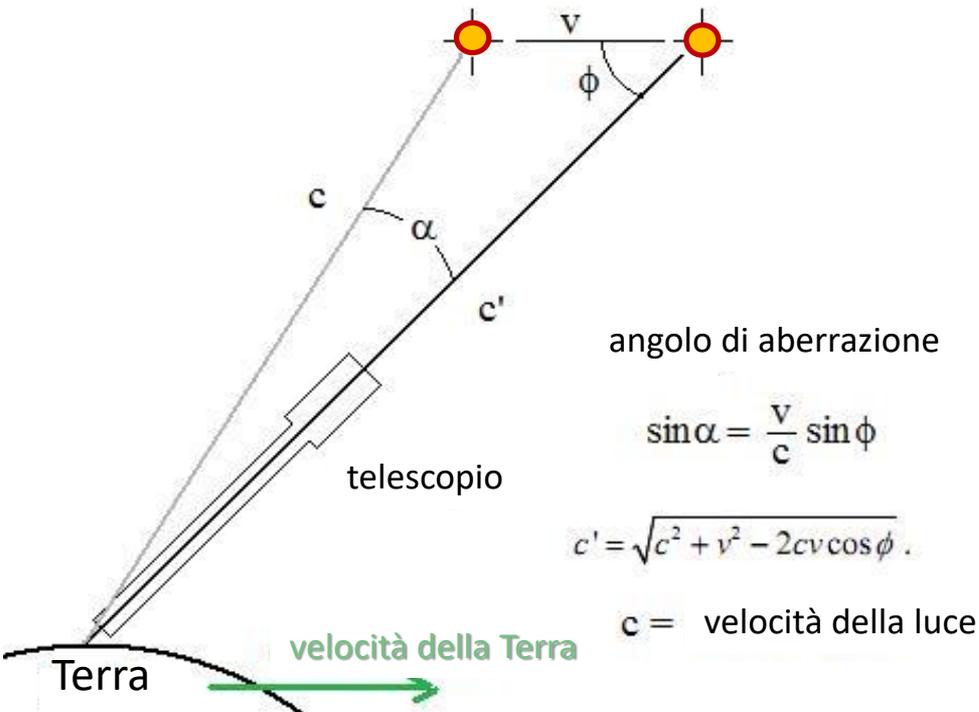
Una vista a tutto cielo delle stelle della Via Lattea (1.4 miliardi) e delle galassie vicine, basata sul primo anno di osservazioni dal satellite Gaia dell'ESA, da luglio 2014 a settembre 2015

Se non può essere parallasse, che cos'è?

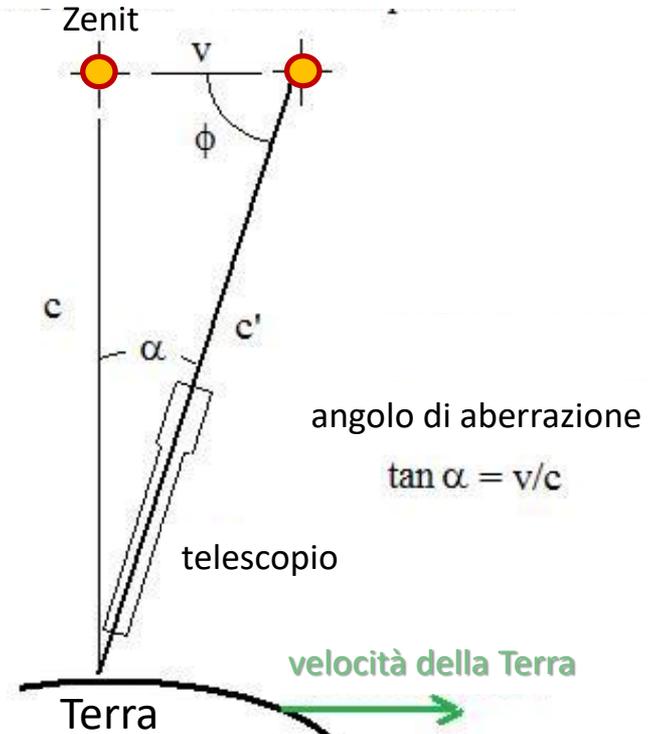


L'aberrazione secondo **Bradley**:
composizione delle velocità della
luce e della Terra nella sua orbita

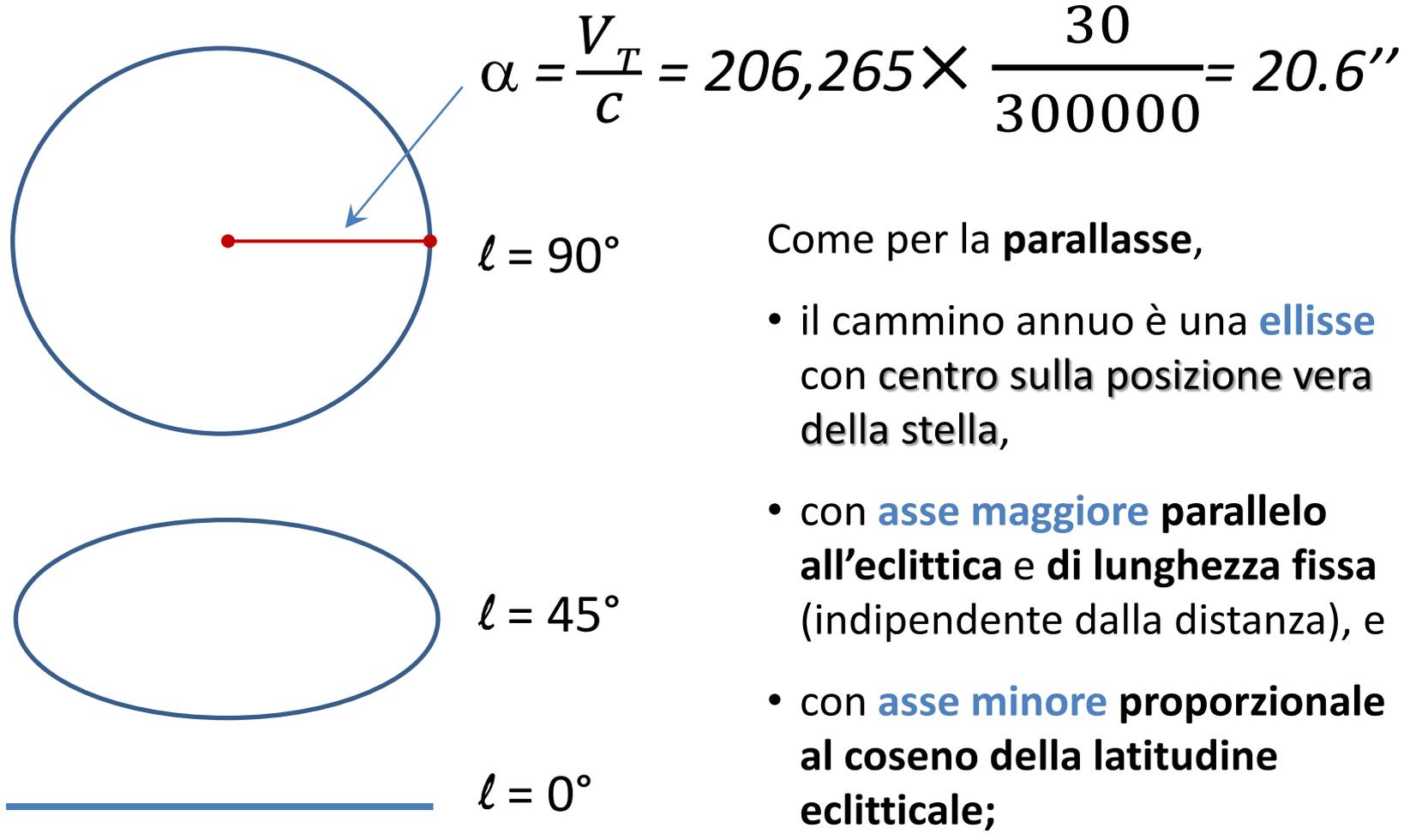
posizione 'vera' posizione osservata



posizione 'vera' posizione osservata



L'ellisse di aberrazione

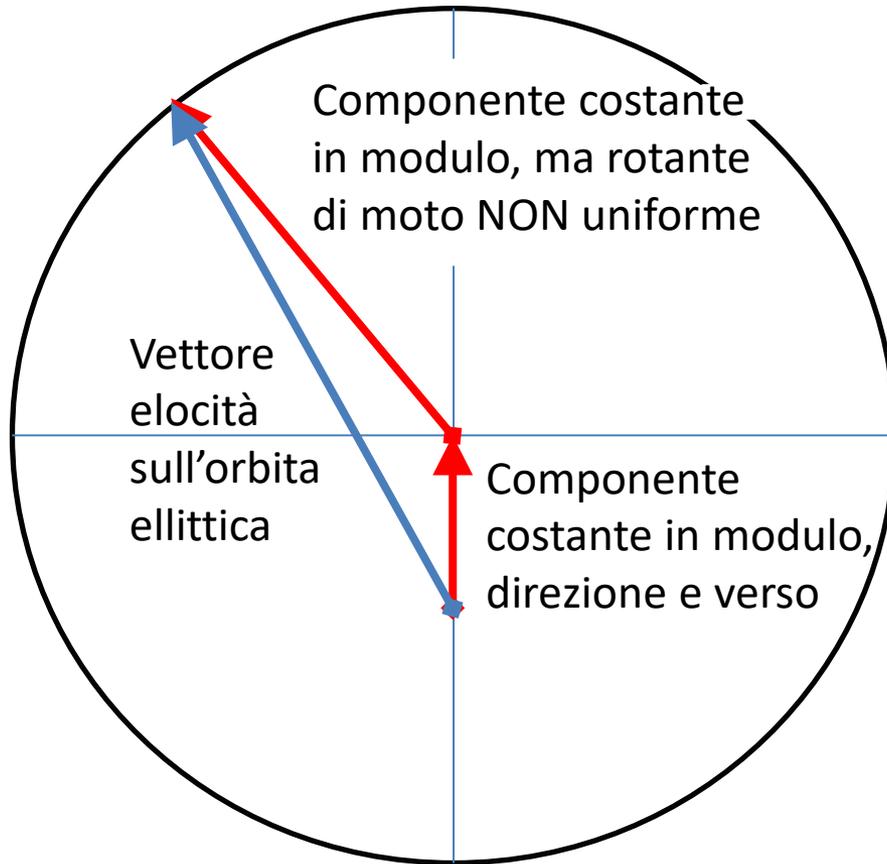


Come per la **parallasse**,

- il cammino annuo è una **ellisse** con centro sulla posizione vera della stella,
- con **asse maggiore** parallelo all'eclittica e di lunghezza fissa (indipendente dalla distanza), e
- con **asse minore** proporzionale al coseno della latitudine eclitticale;
- **ma il semiasse maggiore ha lunghezza fissa**

Per inciso: odografo del moto kepleriano ellittico

Al punto di vista della aberrazione differenziale l'orbita della Terra può essere considerata rigorosamente circolare



L'aberrazione e la **velocità della luce**

La lettera con cui **James Bradley** annunciava a **Halley** la scoperta dell'aberrazione **venne letta davanti alla Royal Society il 9 e il 16 gennaio 1727.**

Osservatore accurato, **Bradley** concluse che la massima aberrazione (2α) era compresa tra **40''** e **41''** (oggi **40''94**), da cui dedusse ($\alpha = \frac{V_T}{c}$ [rad]) il **valore della velocità della luce: 10,210 volte maggiore della velocità orbitale della Terra** (il che equivale a dire che la luce impiega **8m e 13s** per *traversare l'Unità Astronomica*, contro **8m e 19s** del dato moderno).



N.B.: Bradley non usò il termine **aberrazione**; venne impiegato per la prima volta da **Alexis Clairaut** nel **1737**.

Incidente nella brillante carriera di Bradley: collaborò al tentativo di introdurre il calendario papista (Gregoriano) in Inghilterra, come effettivamente avvenne nel 1751. Non gli venne perdonato il grande caos causato dall'operazione (salto da mercoledì 2 a giovedì 14 settembre 1752, inizio d'anno dal 25 marzo all'1 gennaio con problemi di tasse, assicurazioni etc.).

Aberrazione:

prima falsificazione sperimentale dell'ipotesi geocentrica

Isaac Newton

Tycho Brahe

Claudio Tolomeo

Niccolò Copernico

Galileo Galilei



Ma la velocità della luce non si compone con nessun'altra velocità ...

Caso classico

$$u'_x = u_x + v = c \cos(\theta) + v$$

$$u'_y = u_y = c \sin(\theta)$$

L'angolo fatto dalla luce nel sistema solidale alla Terra, ϕ , rispetto a quello nel sistema solidale al Sole, θ è:

$$\tan(\phi) = \frac{u'_y}{u'_x} = \frac{u_y}{u_x + v} = \frac{\sin(\theta)}{v/c + \cos(\theta)} \quad (1)$$

Caso relativistico

Dalle formule di Lorentz:

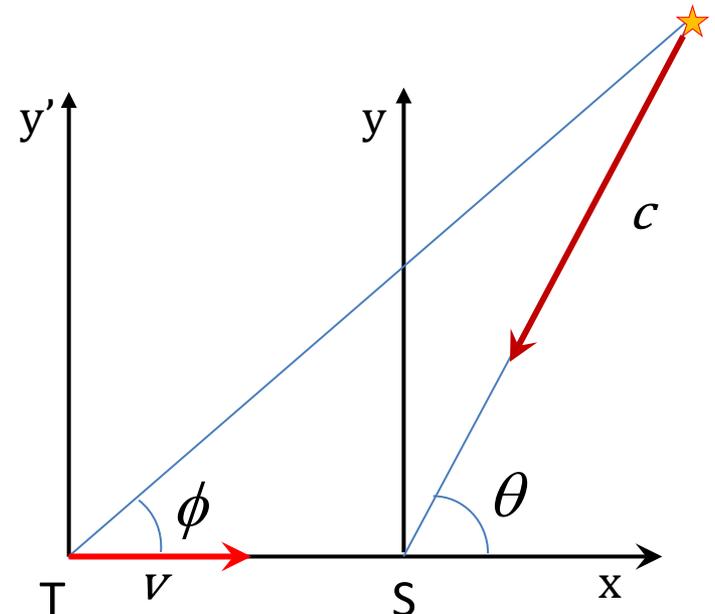
$$u'_x = \frac{u_x + v}{1 + u_x v / c^2}$$

$$u'_y = \frac{u_y}{\gamma(1 + u_x v / c^2)}$$

da cui:

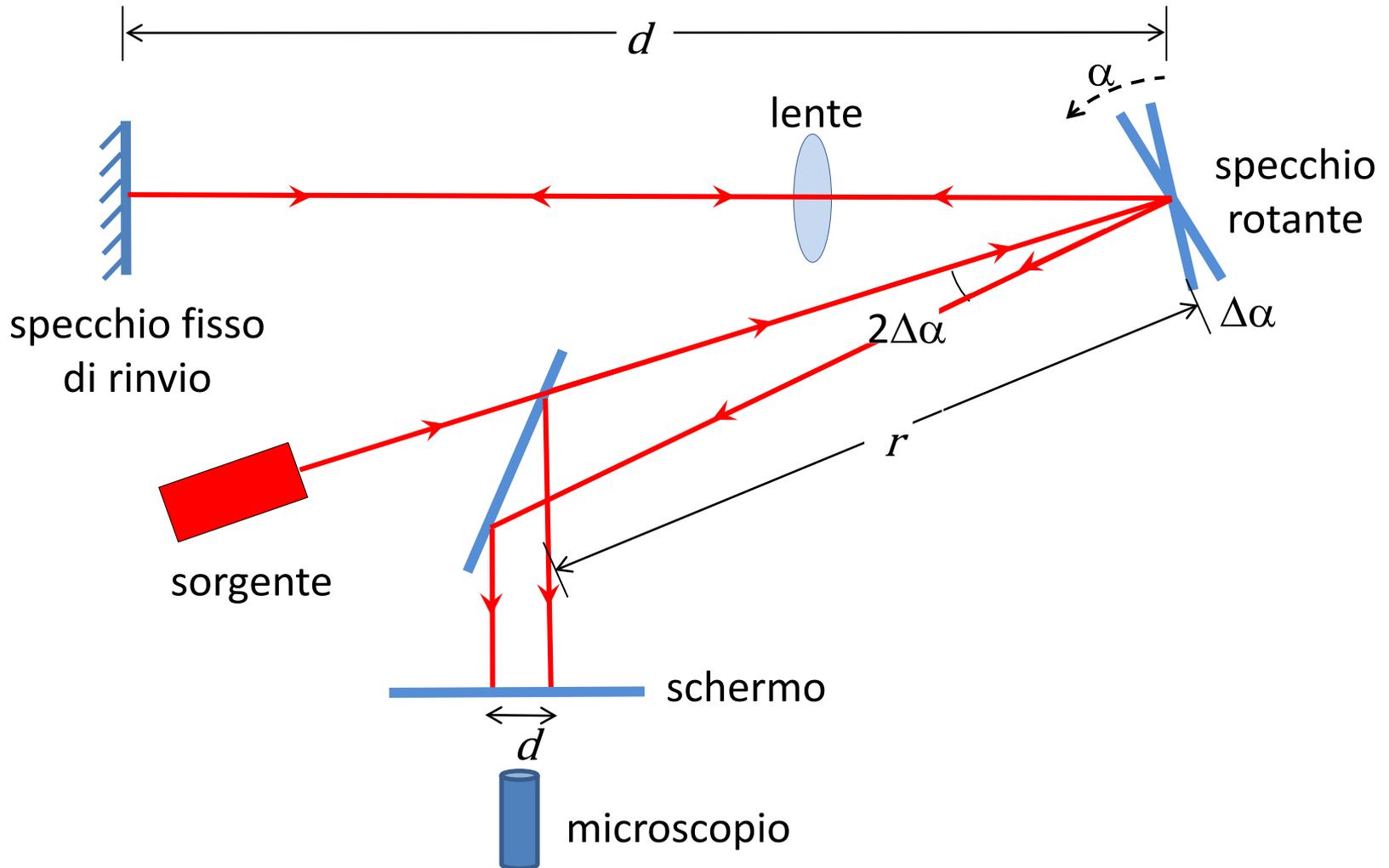
$$\tan(\phi) = \frac{u'_y}{u'_x} = \frac{u_y}{\gamma(v/c + \cos(\theta))} \quad (2)$$

dove: $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$

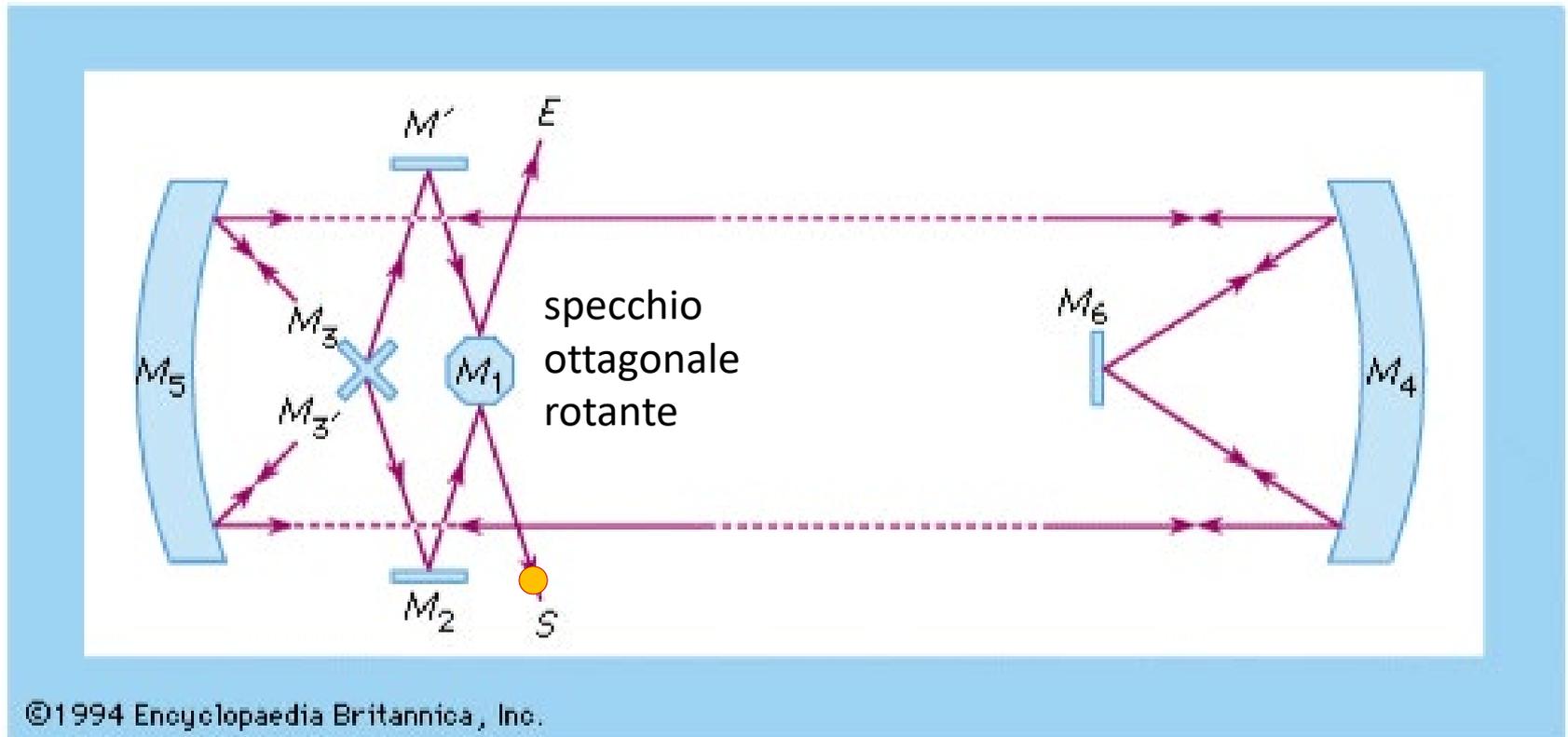


Misure di laboratorio: l'esperimento di **Léon Foucault** (1850)

$$\tan(2\alpha) = d/r; \quad \Delta t = (\alpha/2\pi)/\omega; \quad c = 2d/\Delta t$$



L'esperimento di **Albert Michelson** (1926)



L'effetto Doppler



1842: **Christian Johann Doppler (1803-1853):**

«Lanciando un sasso in uno specchio d'acqua immobile, si produrranno cerchi che sono equidistanti dal centro. Ma se un battello si muove, questi cerchi saranno allungati, ovali, e viaggeranno con il loro centro allontanandosi dal punto dove sono stati creati, seguendo il natante».

Postulato: sia il suono che la luce sono costituiti da onde (**longitudinali!?**). Fenomeno previsto per l'**acustica** e anche per l'**ottica**, sebbene le onde elettromagnetiche siano trasversali.

Spiegazione errata dei colori delle doppie fisiche. **Über das farbige Licht der Doppelsterne und einiger anderer Gestirne des Himmels** (Sui colori della luce delle stelle binarie e alcune altre stelle del cielo).

«È ormai quasi certo che in un futuro non troppo lontano questo effetto offrirà agli astronomi un modo per determinare i moti e le distanze di quelle stelle che, a causa delle loro enormi distanze e la conseguente esiguità degli angoli di parallasse, fino a oggi parevano irraggiungibili».

Verifica dell'effetto Doppler acustico

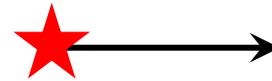
L'impresa di testare l'effetto Doppler acustico riuscì appena tre anni dopo a **Christophorus Buys Ballot**, un professore di chimica e meteorologia all'Università di Utrecht, noto anche per aver scoperto il verso dei vortici depressionari nell'emisfero Nord.



Effetto Doppler: casi classico e relativistico

Caso classico:

Moto della sorgente: $\nu' = \left(1 - \frac{v_s}{c}\right)^{-1} \nu$,
con v_s = velocità radiale della sorgente.



Moto dell'osservatore: $\nu' = \left(1 - \frac{v_o}{c}\right) \nu$,
con v_o = velocità radiale dell'osservatore.



In generale: $\nu' = \nu \left(\frac{c - v_r}{c - v_o}\right)$, ossia:

$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{v}{c}$ con $v = v_s - v_o$, velocità radiale relativa
tra sorgente e osservatore.

Caso relativistico: $\lambda = \gamma \left(1 + \frac{v}{c}\right) \lambda_0$

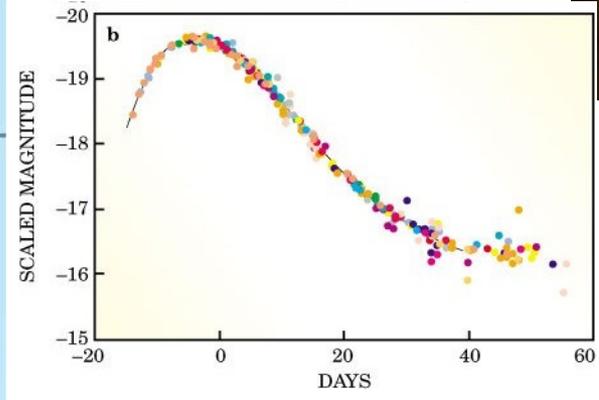
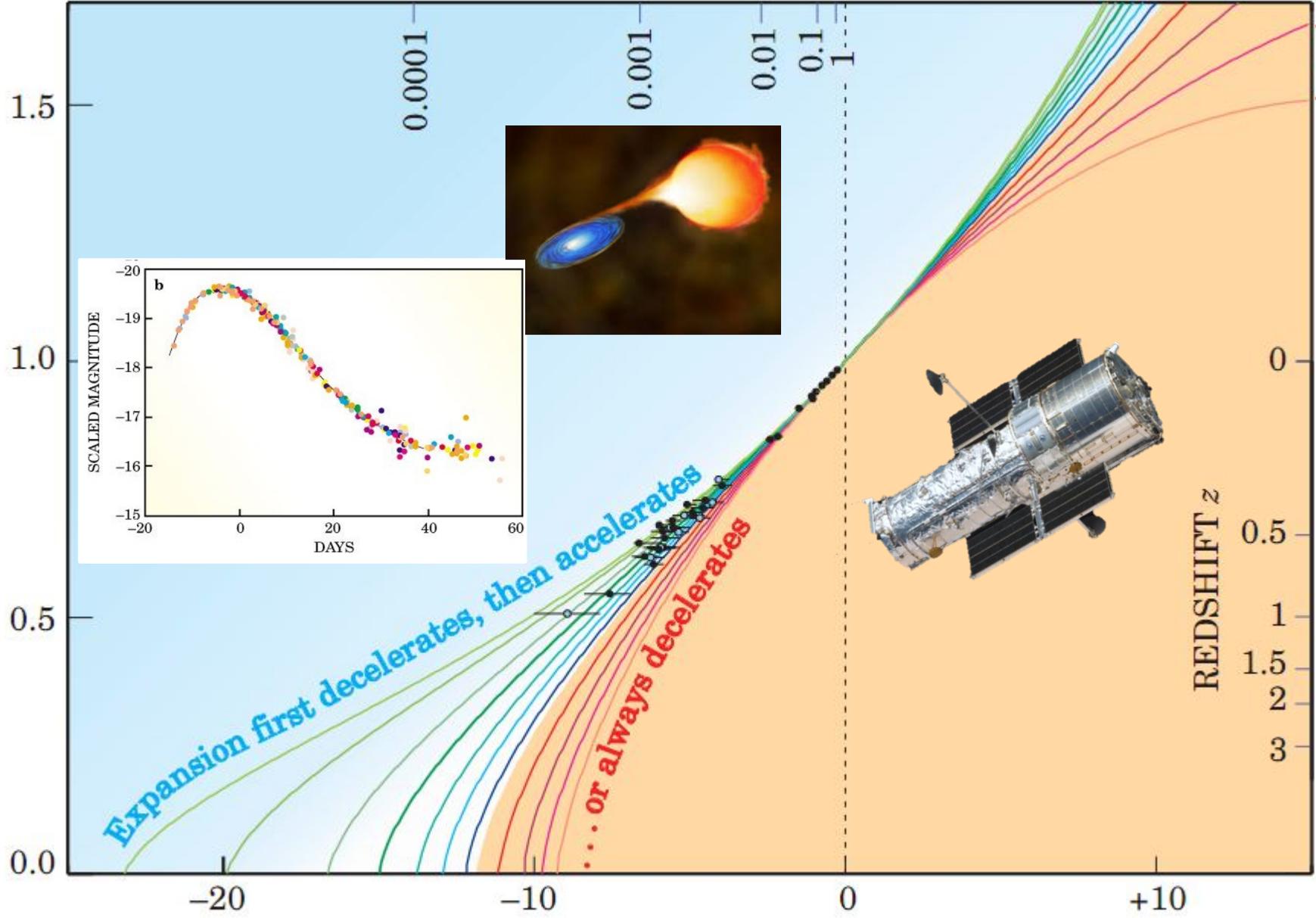
La componente trasversale, che nel caso classico è nulla,
in quello relativistico è sempre positiva.

Infinite applicazioni

LINEAR SCALE OF UNIVERSE RELATIVE TO TODAY

RELATIVE BRIGHTNESS OF SUPERNOVAE

Eternal expansion
Eventual collapse

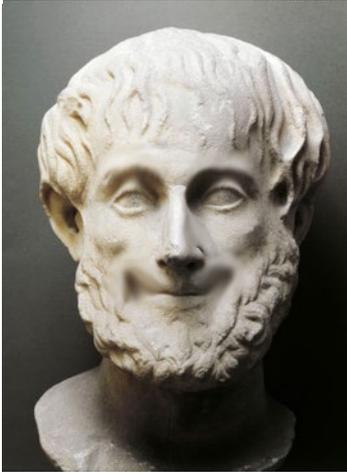


Expansion first decelerates, then accelerates
... or always decelerates

BILLIONS OF YEARS FROM TODAY

REDSHIFT z

L'aberrazione e la natura della luce (etere)



Aristotele,
l'inventore
dell'etere

*"It seems as though we must use sometimes
the one theory and sometimes the other,
while at times we may use either.
We are faced with a new kind of difficulty.
We have two contradictory pictures of reality;
separately neither of them fully explains
the phenomena of light, but together they do."*

Albert Einstein

Democrito (V sec. a.C.) e **filosofi arabi** → **particelle**

Francesco Maria Grimaldi (circa 1650) → **particelle**

René Descartes (1630) → **onde**

Isaac Newton (1670) → **particelle**

Christaan Huygens (1670), **Robert Hooke** → **onde**

Rasmus Bartholin (1669) e **August Fresnel** → **onde trasversali**

Thomas Young (1801) → **onde (interferenza)**

James Clerk Maxwell (1875) → **onde (teoria)**

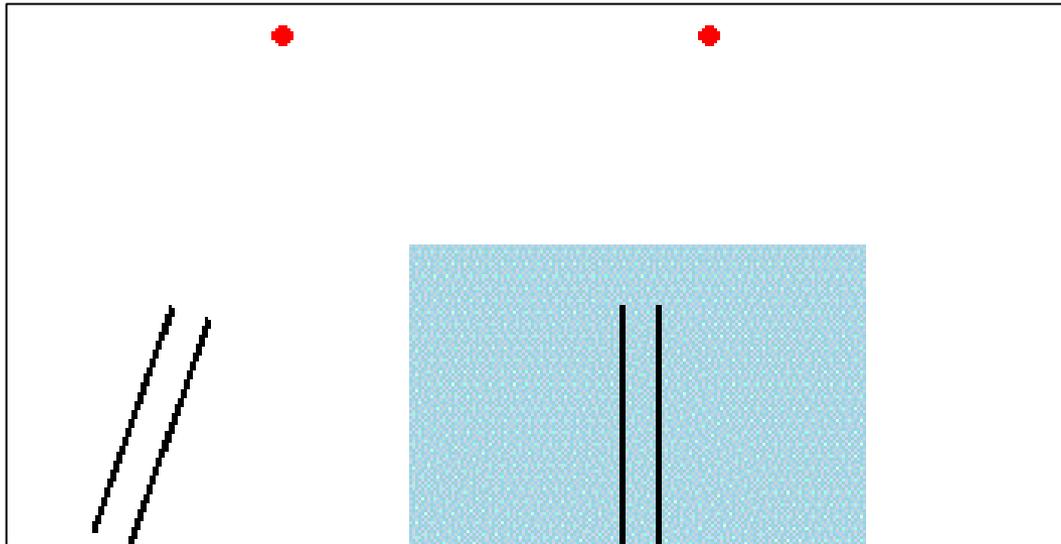
Albert Einstein (1905) → **particelle** (effetto fotoelettrico)

In conseguenza dell'affermarsi della **ipotesi ondulatoria**, nel XIX secolo divennero oggetto di dibattito la **natura** e le **proprietà** del cosiddetto **etere luminifero**, un ipotetico mezzo per la propagazione delle onde luminose.

Un cenno sulla storia dell'etere

James Bradley formulò il suo modello dell'aberrazione nell'ambito dell'**ipotesi corpuscolare**.

1804: **Thomas Young** rielaborò l'aberrazione nel contesto dell'**ipotesi ondulatoria** che richiede la presenza dell'etere, e argomentò che quest'ultimo deve restare immobile nel sistema di riferimento del Sole (altrimenti non si spiegherebbe l'aberrazione).



Un cenno sulla storia dell'etere

Ma poco dopo divenne chiaro che l'argomento di **Young** non reggeva se si consideravano **mezzi con indice di rifrazione diverso dal vuoto**.

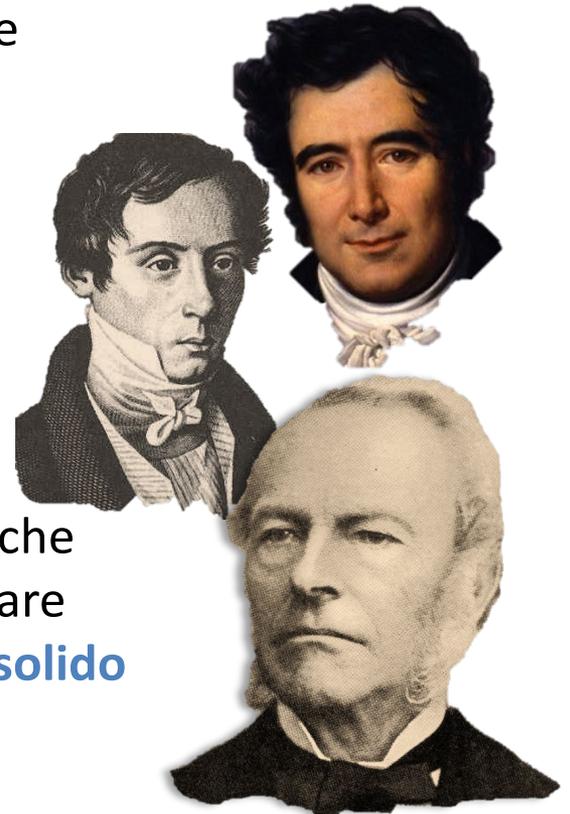
Per esempio, un telescopio **pieno d'acqua** doveva dare un'aberrazione minore, ma nel **1810 François Arago** dimostrò sperimentalmente che **non era vero**.

Nel **1818 Augustine-Jean Fresnel** formulò la teoria secondo cui l'etere restava sì **fermo in generale**, ma veniva **trascinato dai corpi**.

Questa ipotesi poteva spiegare l'obiezione di Arago.

Nel **1845 George Stokes** propose un modello di etere che si comporta come un **liquido a grandi scale** (per spiegare lo scorrimento necessario all'aberrazione) e come un **solido a piccole scale** (per le proprietà elastiche necessarie a supportare la vibrazione).

Fine Ottocento-inizio Novecento: **Albert Michelson, Max Planck, Hendrik Lorentz** e **Albert Einstein** e....



Grazie
dell'attenzione