

La precisione del cielo: uno sguardo dalle origini all'unità astronomica



Urania coeli motus scrutatur, et astra.

Incisione di G.C. Zucchi, 1781

© The Trustees of the British Museum

Oggi vedremo brevemente l'importanza della conoscenza del valore della distanza Terra-Sole (Unità Astronomica) con alta precisione.

A differenza di altre quantità come il raggio terrestre o la distanza Terra-Luna, delle quali già gli Antichi fecero ottime misure ([Eratostene per il raggio terrestre](#) $R_T \sim 6400\text{Km}$ [6371Km], [Tolomeo per la distanza Terra-Luna](#) $\sim 60R_T$ [60.3 R_T]), la misura della distanza Terra-Sole si rivelò particolarmente ostica.

	Anno	D_{TL}	D_{TS}
	Oggi	$60.3R_T$	$389 D_{TL}$
Aristarco	$\sim 250\text{a.C.}$	$19R_T$	$20 D_{TL}$
Ipparco	$\sim 140\text{a.C.}$	$68R_T$	$37 D_{TL}$
Tolomeo	150d.C.	$59R_T$	$21 D_{TL}$

+ Eratostene ($\sim 240\text{a.C.}$) $R_T \sim 6400\text{Km}$

Misurare l'angolo con cui si vedeva sottesa la terra dal Sole (parallasse) e successivamente ricavarne la misura della distanza **TS era al di sotto della risoluzione degli strumenti e la distanza TS restava altamente imprecisa, anche usando metodi alternativi che sfruttavano le eclissi.**

Perché è una misura importante?

Conoscere la distanza TS significava una conoscenza delle dimensioni del Sistema Solare.

Al di fuori SS, fino al 1700, le stelle erano considerate fisse, su una sfera, così come le vedevano proiettate sulla sfera celeste.

A partire dal 1600, con il telescopio, cominciano le prime misure che danno una buona valutazione dell'ordine di grandezza delle **dimensioni** del SS.

Si apriranno i **confini** e si inizierà ad avere una nuova visione del "Mondo".

Nel 900 sarà possibile avere misure anche di stelle e oggetti più lontani con metodi indiretti (stelle pulsanti cefeidi o SNIa) che però continueranno ad usare le misure di parallasse annua per calibrazione.

Oggi sappiamo che il nostro Universo misura 13,7 miliardi di al.

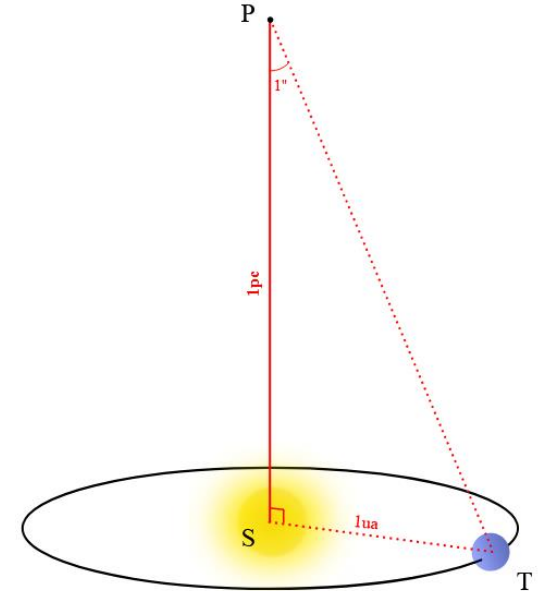


Immagine da Wikipedia

2012 IAU fissa **UA=149 597 870.700 Km**

I personaggi su cui mi soffermerò:



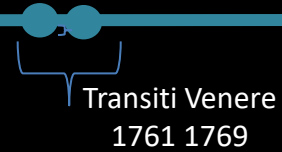
Tycho Brahe (1546-1601) Keplero (1571-1630)



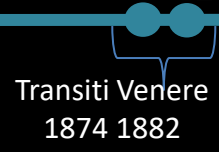
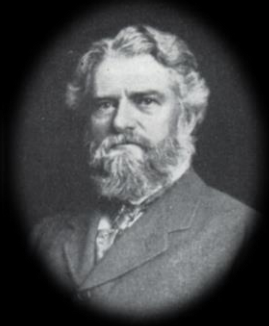
1672
Cassini Richer Picard
Misura parallasse
trigonometrica con
baseline Parigi-Cayenne



1716
Halley
Metodo
Transito di Venere



Transiti Venere
1761 1769



Transiti Venere
1874 1882

1896 congresso
internazionale
Parigi
Newcomb



$\pi_s < 1'$

$\pi_s < 15''$

$\pi_s = 9.5''$

$\pi_s = 8.571''$

$\pi_s = 8.800''$

1672

1835

1896

Il mio racconto comincia da Tycho Brahe

L'uomo dal naso d'oro (1546-1601):

Tycho Brahe nasce a Knutstorp in Danimarca, da nobile famiglia, col nome di Tyge Brahe, (Tykhe).

In giovane età **1562** lascia la Danimarca per recarsi all'Università di Lipsia, per gli studi in legge, ma la sua passione era l'astronomia.

Qui assiste ad una eclissi parziale di sole: era prevista e segnata in alcune tavole compilate dallo stesso Tolomeo.

Quest'ultime nel 1252 erano state revisionate in Spagna da un gruppo di cinquanta astronomi, riuniti da Alfonso X di Castiglia (Tavole Alfonsine)

Il 17 agosto **1563** osserva un secondo evento speciale: una congiunzione di Giove e Saturno(ogni 20 anni). si accorge che le Tavole **Alfonsine** né quelle di Copernico (**Pruteniche**) prevedevano l'evento correttamente, le tolemaiche sbagliavano addirittura di un mese.

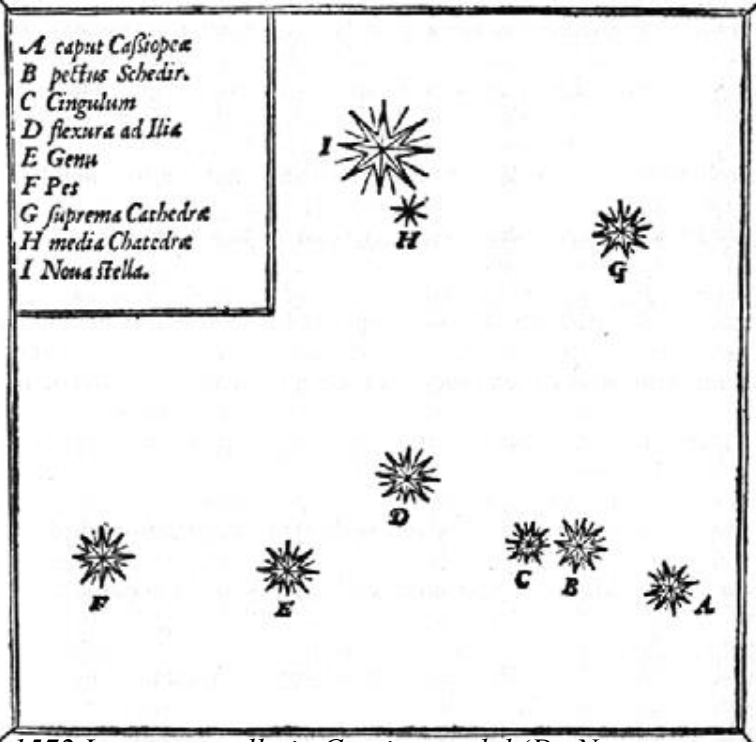
Tabelle molto migliori si sarebbero potute costruire solo osservando più accuratamente le posizioni esatte dei pianeti e per un lungo periodo di tempo.



Tycho Brahe in un'incisione del 1586

(Photo: Gudrun Wolfschmidt)

A caput Cassiopeae
 B pectus Schedar.
 C Cingulum
 D flexura ad Ilia
 E Genu
 F Pes
 G suprema Cathedra
 H media Cathedra
 I Nova Stella.



1572 La nuova stella in Cassiopea, dal 'De Nova Stella' dal libro di Tycho Brahe. 1573

10 anni dopo ai primi di novembre compare in cielo "una nova" evento che lo lasciò sbalordito e quasi incredulo. 1572

Quella sera, l'11 novembre, tornando dal laboratorio di alchimia, notò nel cielo una nuova stella più luminosa di Venere, nella costellazione di Cassiopea. La nuova stella era così luminosa che poteva essere vista alla luce del giorno. Durò diciotto mesi un evento raro, un fenomeno che fece clamore in tutto il mondo.

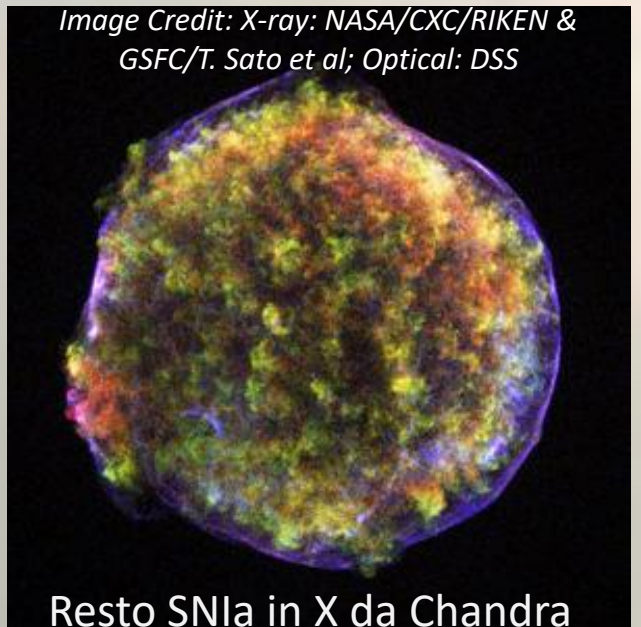


IL FENOMENO METTEVA IN DISCUSSIONE L'IMMUTABILITA' DEL MONDO ARISTOTELICO Cosa significava?

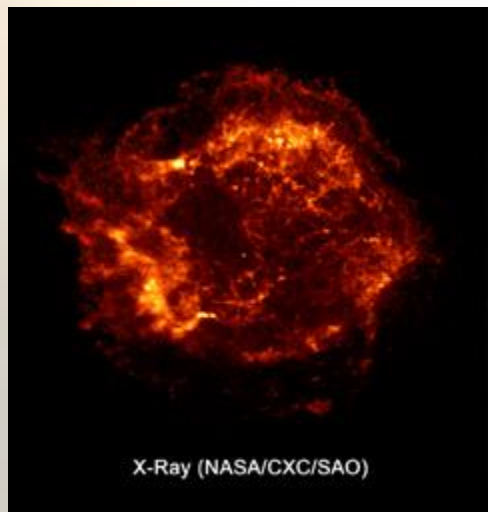
Questa era la domanda che tutti si ponevano. Beza, un amico di Calvino: **la seconda stella di Betlemme, che annunciava la seconda venuta di Cristo sulla Terra.**

Altri discutevano sulle calamità che avrebbe potuto portare con sé.

In seguito nel maggio del 1573 pubblicherà un libro "Nova Stella".



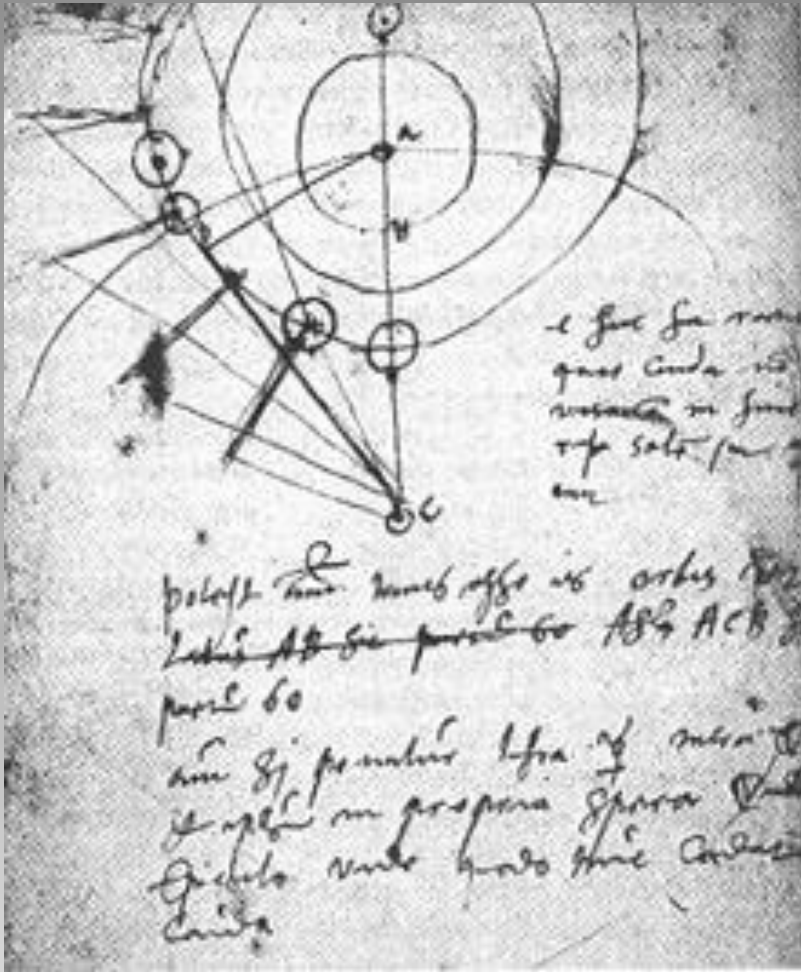
Resto SN Ia in X da Chandra



X-Ray (NASA/CXC/SAO)

(oggi classificata come una SNIa)

Un altro evento fu la cometa del 1577, ben visibile ad occhio nudo.



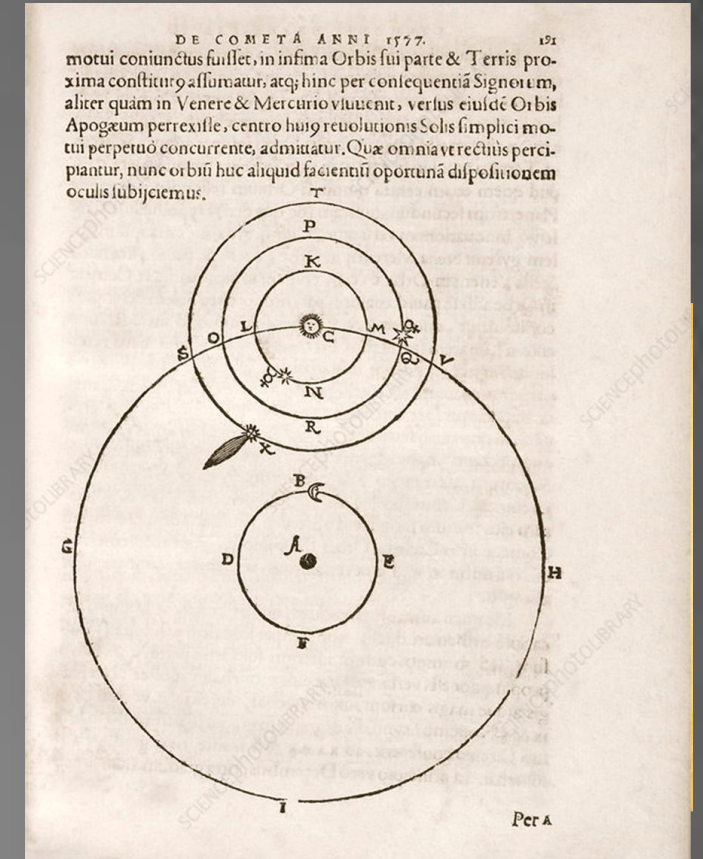
Uno schizzo di Tycho Brahe in uno dei suoi quaderni. Questo disegno mostra la terra al centro con il sole che gira intorno ad essa e gli altri pianeti conosciuti orbitanti, a loro volta, attorno al sole. **La coda di una cometa, è correttamente sempre puntata lontano dal sole.**

La osservazione per oltre due mesi, con un sestante e con il quadrante murale. Misura giorno per giorno la posizione della testa rispetto alle stelle fisse, tracciandone così il percorso in cielo, e annotò le dimensioni e la direzione della coda.

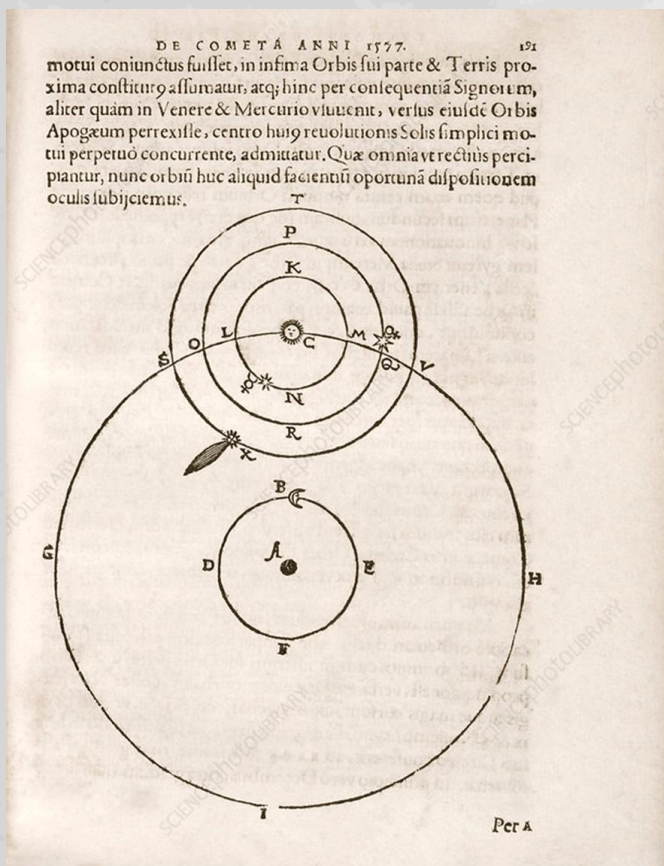
La cometa aveva una parallasse molto piccola, corrispondente a una distanza dalla Terra, sei volte maggiore di quella della Luna.

E perciò non poteva essere "materia spirituale condensata" e la sua luce "concentrazione di vapori" del mondo sublunare.

De cometa 1577: diagramma dell'orbita della cometa con il Sistema Solare, come descritto da Tycho Brahe: il Sole e la Luna orbitano al centro della Terra mentre i pianeti Sun.



Le comete erano corpi celesti e non fenomeni meteorologici!



Studiando con maggiore attenzione l'apparente moto della cometa, con riluttanza arriva alla conclusione che la sua orbita non poteva essere circolare ma doveva essere piuttosto allungata. Questo era un suggerimento audace, perché in quel caso doveva passare attraverso le varie sfere planetarie, e poteva a malapena farlo, **a meno che le sfere planetarie non esistessero!**

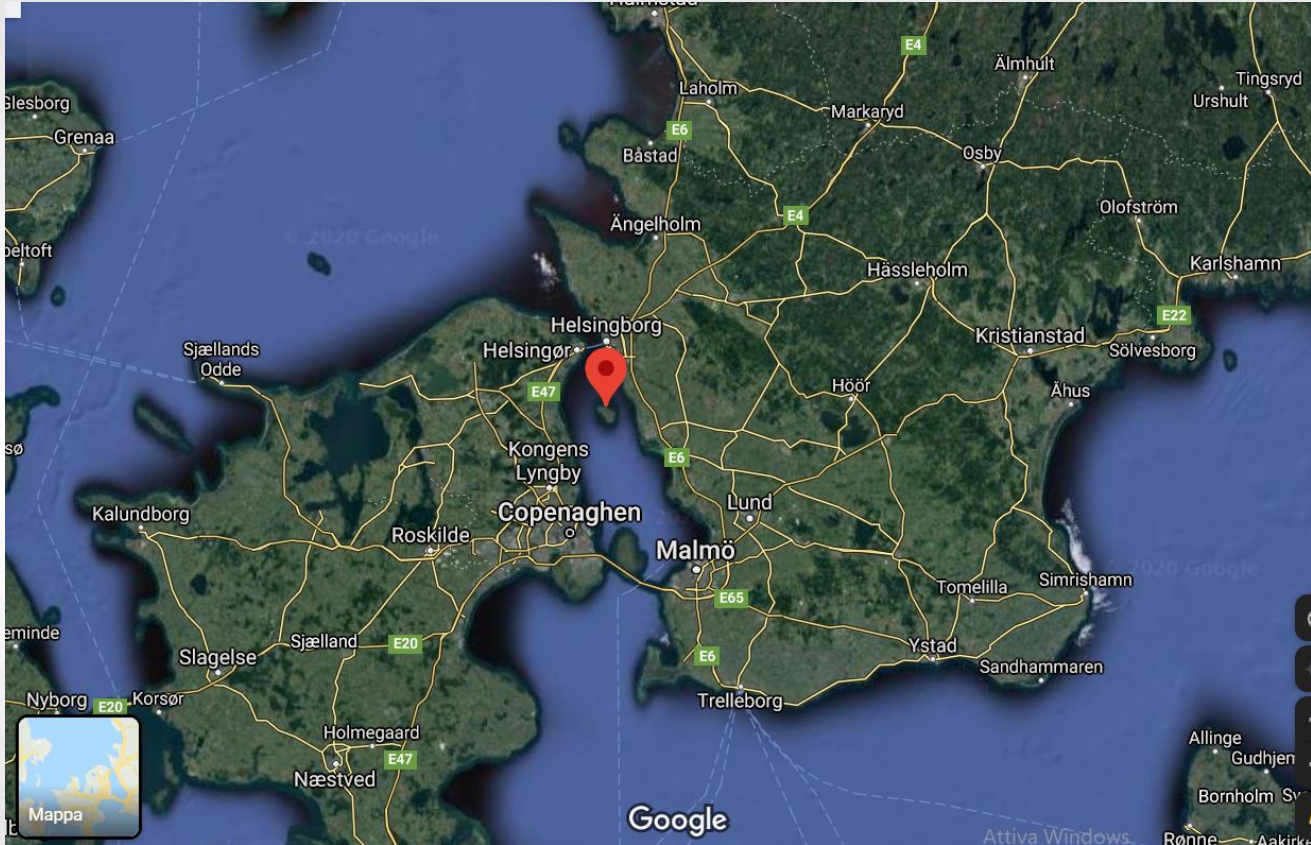
Nel **1588** scriverà un libro "**Fenomeni del mondo etero**"

"mostrerò al fine di quest'opera che la macchina del cielo non è un corpo duro e impenetrabile pieno di sfere, come i più hanno creduto fino ad oggi. Dimostrerò che il cielo si estende in tutte le direzioni e perfettamente fluido e semplicemente senza questo mezzo"

La fama di Tycho divenne così grande che Il re, Federico di Danimarca, che si interessava di scienza e che aveva già donato denaro a Tycho per i suoi studi, gli offrì un feudo, l'isola di Hven, al fine di costruirci un osservatorio.

Si richiedeva a Tycho *" di osservare la legge e i diritti dei contadini, e non far loro ingiustizia contro la legge, né gravarli di nuovi obblighi o altre innovazioni non consuetudinari"*

La piccola isola di Hven



mappa della Danimarca orientale (metà del XVII secolo). Foto: UB-Media, Lund an

QUI Tycho costruirà il più grande centro e osservatorio ... mette in opera strumenti con un livello di precisione estremamente elevata progettati da lui medesimo e costruiti da artigiani espertissimi.

Era dotato di personale(circa 20 astronomi)

Di biblioteca.

Di laboratorio

Di stamperia,

E pure di una bellissima sala per accogliere e discutere con astronomi di altri paesi. E progettava di lavorare lì per 20 anni

l'Osservatorio Danese divenne il primo centro di ricerca a livello europeo da cui poteva nascere

una nuova astronomia, il suo sogno!

++

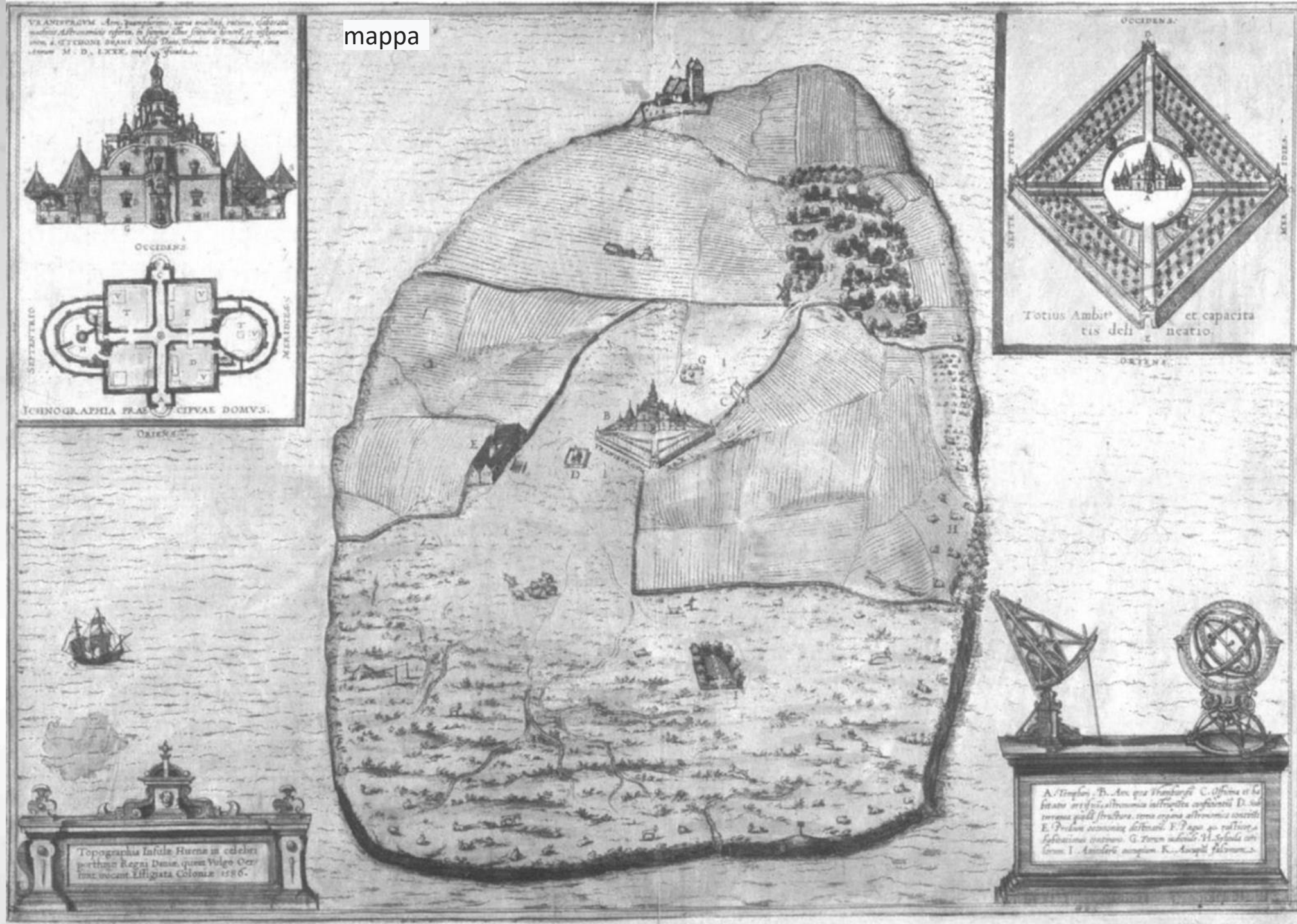


Tycho Brahe. Line engraving by L. Appold after J. de Gheyn, 1586

Tycho de Brahe.

Nasce così Uraniborg

mappa

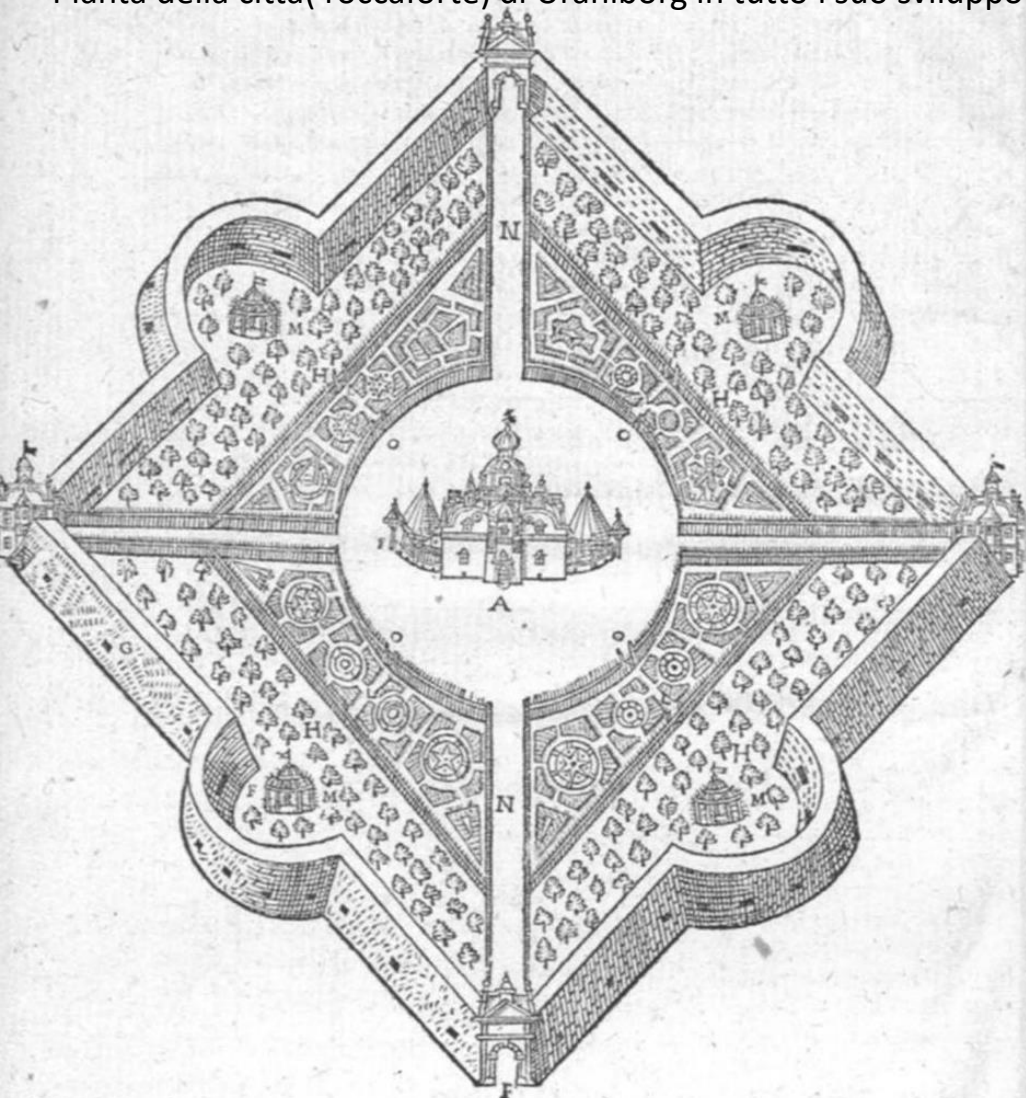


Mappa dell'atlante di Georg vol. II
Civitates orbis terrarum, 6 vols [1572-1617] Cologne: Braunius & Hogenberg, 1586). [1572-1617]

Photo: UB-Media, Lund

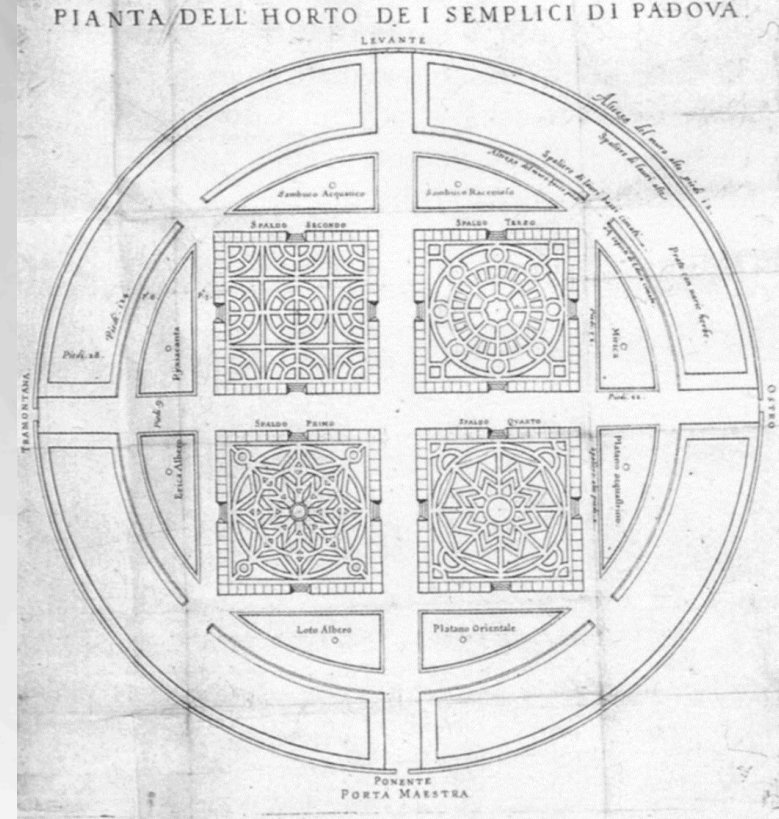
160 TICHONIS BRAHE LIB. I.
 ARCIS VRANIBV RGI QVO AD TOTAM
 CAPACITATEM DESIGNATIO.

Pianta della città (roccaforte) di Uraniborg in tutto il suo sviluppo



Piano di Uraniborg con castello, annessi e giardini:
 xilografia da Tycho Brahe, da Tycho astronomicarum libri
 (Uraniborg, 1596). Foto: UB-Media, Lund

Del.



Giardino botanico di Padova fondato nel 1545, probabilmente l'ispirazione più importante per Tycho nella sua concezione e forma.

(Venezia 1591) da Alessandro Minelli (a cura di), Orto Botanico Di Padova 1545-1995 (Venezia)



Uraniborg a Ven.
 luglio 1996

Parte di giardino ricostruito. Giardino di erbe e fiori nel bastione semicircolare della fortificazione.

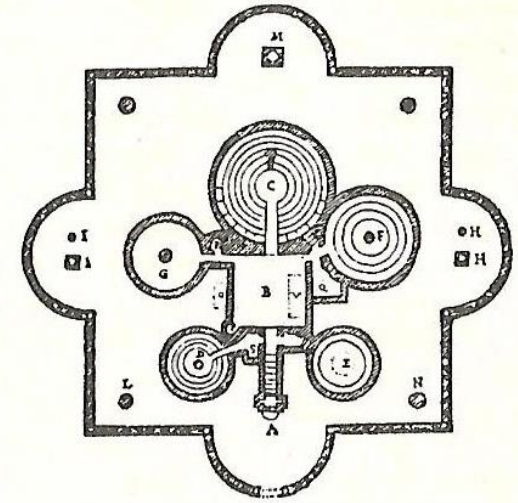
Photo: K. Lundquist

Uraniborg (costruito nel 1576, demolito 1601)

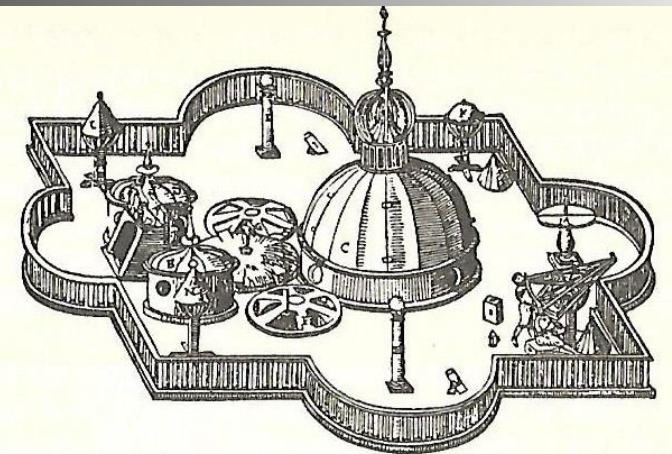
Castello del cielo

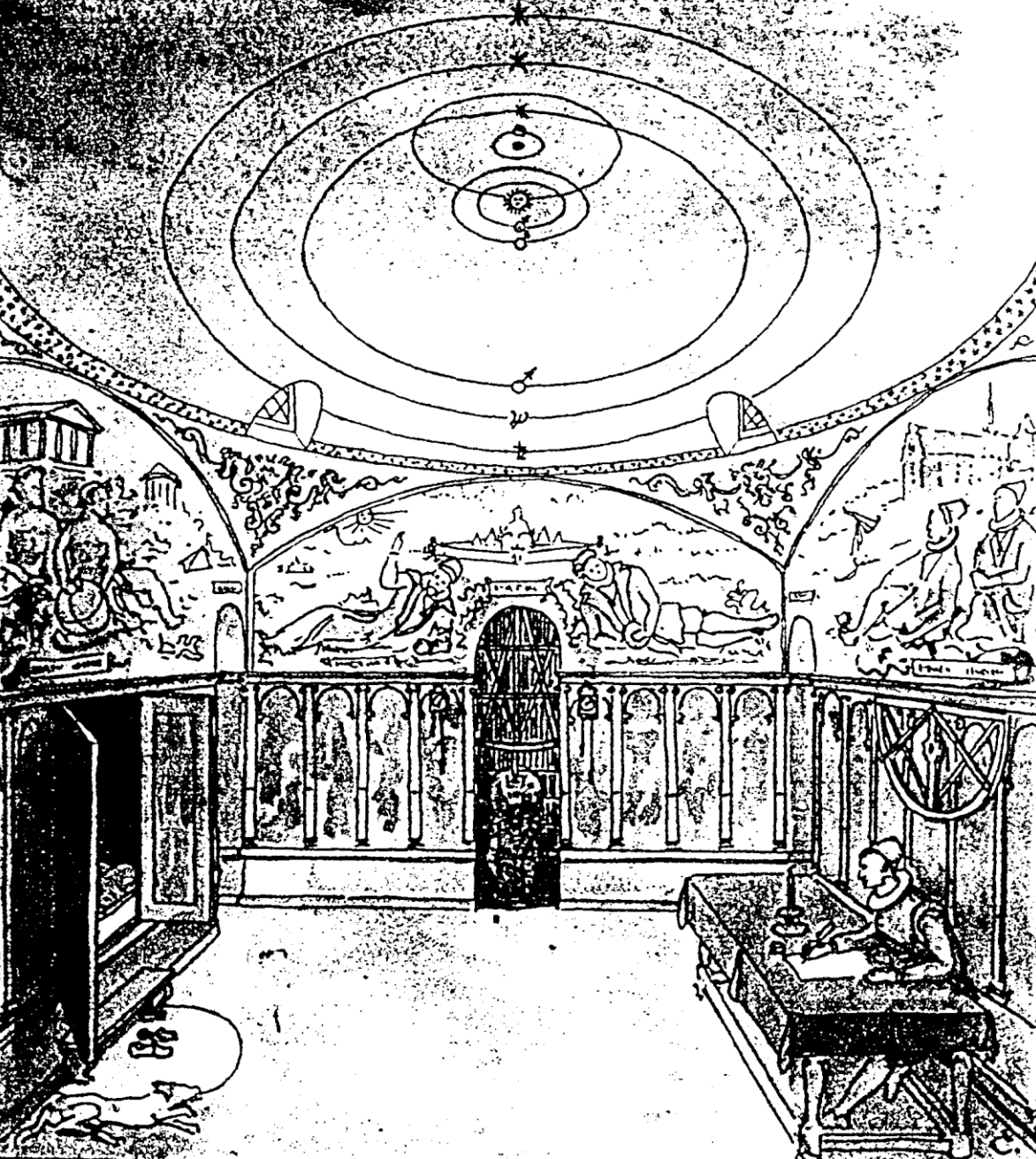


Castello delle stelle



Disegni eseguiti da Tycho di Stjerneborg, l'osservatorio in parte sotterrato da lui costruito fuori il muro perimetrale di Uraniborg, da "*Astronomiae instauratae mechanica*"





"De mundi aetherei recentioribus phaenomenis", pubblicato nel 1588

illustrazione del sistema ticonico, disegnato su un soffitto a Uraniborg

Sistema Tyconico



I pianeti girano attorno al Sole e il Sole con tutto il corteo dei pianeti gira attorno alla Terra

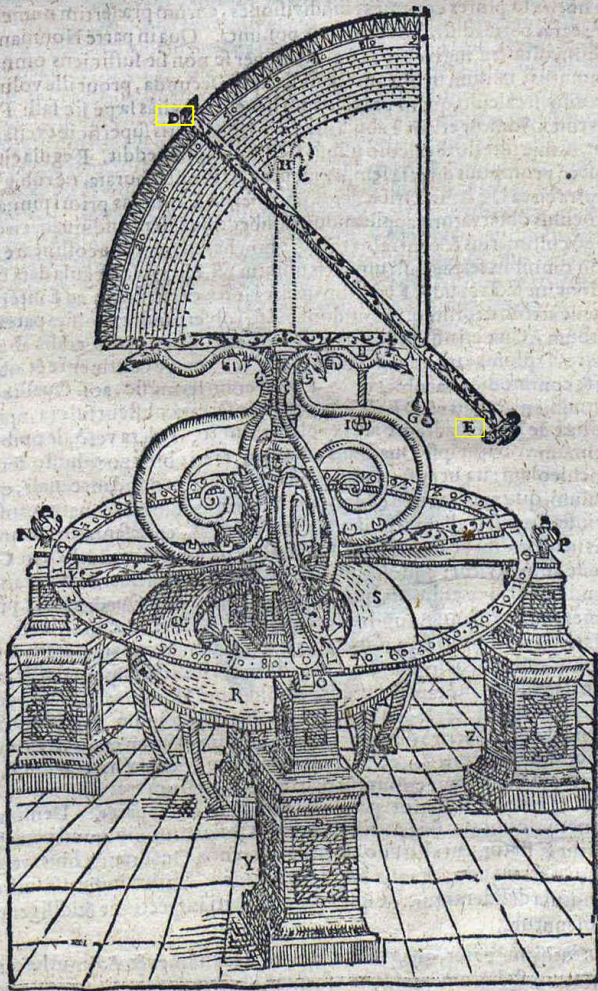
Mostra al Museo tecnico nazionale di Praga, 1994



Acquaforte di Uraniborg: agli angoli sono i castelli a Wandesbeck, castello di Benatki, il Belvedere e la casa di Praga dove è morto; Da "Historia caelestis" T. Brahe 1672

(courtesy National Technical Museum, Prague)

QVADRANS MEDIOCSIS
ORICHALCICUS AZIMUTHALIS.



EXPLI-

1578 nel suo libro "Astronomiae instauratae Mechanica" descrive dettagliatamente tutti suoi strumenti.

Nuovi metodi di puntamento e come trattare la misura degli errori ottenuti, puntando ad una precisione di

1 minuto di arco! 60 parte del grado

"quadrans mediocris"

"Quadrans mediocris orichalcicus azimuthalis"

strumento di ottone esteso su di un quarto di cerchio azimutale (cioè per misurare anche l'azimut),.

Il puntamento in azimut si ottiene ruotando il quadrante attorno a un asse verticale.

Lo strumento di puntamento è la sbarra **DE** chiamata **alidada**: la stella deve essere vista attraverso due traguardi posti alle sue estremità, detti *pinnule*, per mantenere il puntamento. La sbarra può ruotare

TYCHONIS BRAHE
ASTRONOMIÆ
INSTAURATÆ
MECHANICA.



NORIBERGÆ, apud LEVINVM HOLSIVM.

ANNO

M. DCII.

Cum Cæsaris & Regum quorundam Privilegiis.

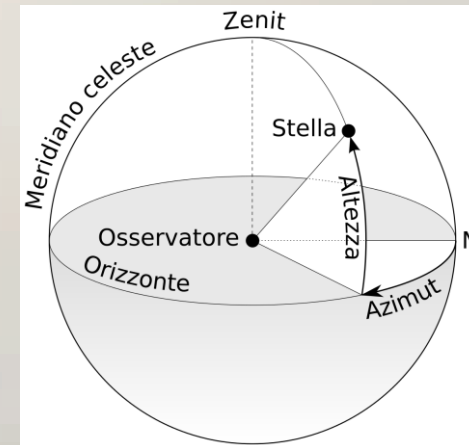
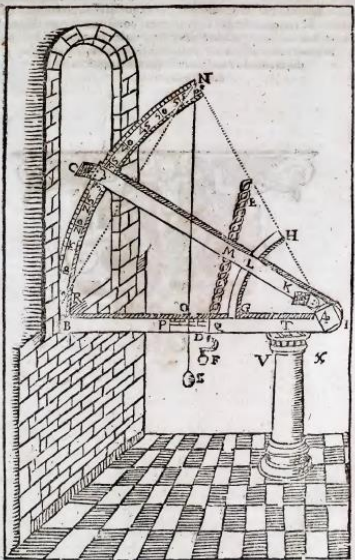


Immagine da Wikipedia

"sestante" Anche per le posizioni di pianeti

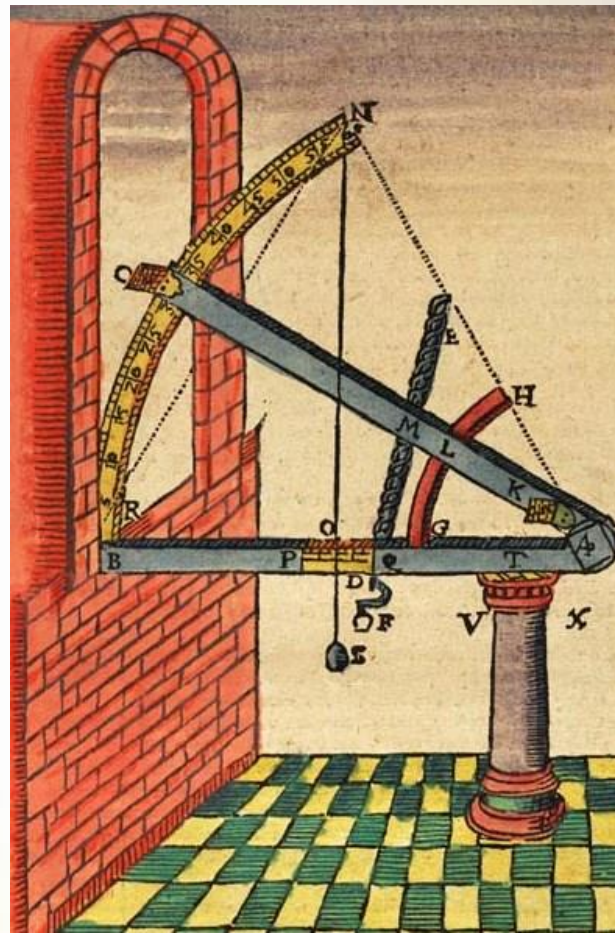
Era un settore di 60°: formati da 2 bracci (di circa 2 metri di lunghezza) uno fisso e l'altro mobile, incernierati, che si aprivano come un compasso su una scala graduata. Fornito di mire che servivano a puntare con precisione e misurare l'elevazione o la distanza fra due stelle. Erano fissi, o potevano essere orientati secondo qualunque piano celeste.

INSTRUMENTVM EIVSDEM VT
ALTITUDIBUS CAPIENDIS IN-
serviat dispositio.

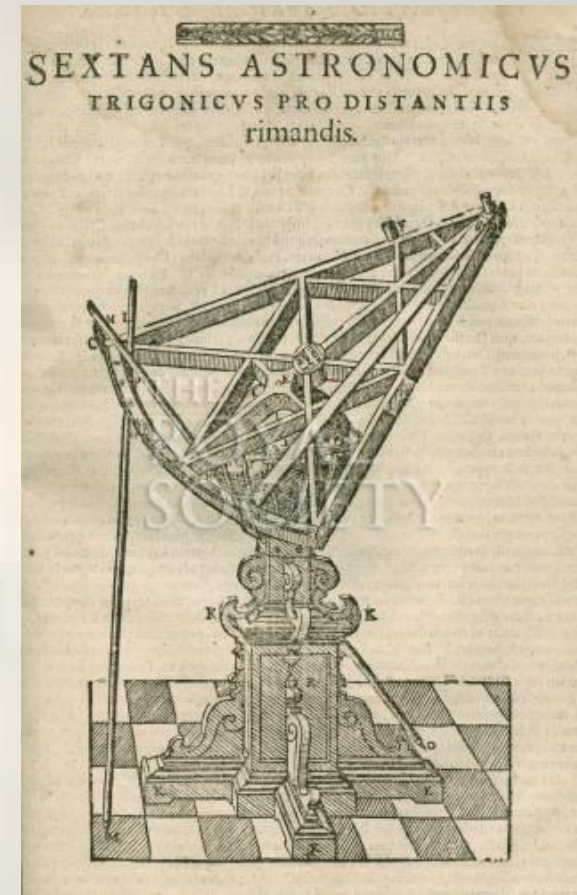


EXPLICATIO FABRICAE ET VSVS.

INSTRUMENTUM hoc ipsius si praeter sextantem circuli capiat, ejus cir-
cumferentia, Alitudinibus quoque Siderum rimandis non est inconvenientis
in modo dispositum, prout haec apposta figuratio ostendit: quae etiam ratione
ego tunc temporis, cum nova stella anno 1622. & sequenti conspiceretur,
ejus Alitudinem minimam, cum in Meridiano infra Polum esset, scrutatus
sum: Maximam enim quando vertici appropinquabat, demerit eodem non
licuit, siquidem in nostro Horizonte admiranda ea stella, cum supra Polum in Meridiano
esset, non longe Zenith distaret: ideoque intra sextantem Circuli partem ejus Alitudo compre-
hendenda requiritur: quemadmodum supra dicto libro & eodem indicato capite haec & similia
videre liceo. Ratio autem, qua observationem instituebam, ibidem quoque perfecta
ejusdem moderata: Sextans hic, quoad Regulam A B inferiorem in alia quadam fenestra dis-
poni ebat supra murum R, ita ut praecise Meridiano Coelesti corresponderet, qui observa-
tioni adhaerere. Erantq; fulcrum quoddam literis V X indicatum hinc suppositum: id est
a parte posteriori versus Centrum juxta T, ejus subtilitatis ut ipsa Regula A B exacte cum
Horizontis aequilibrio conveniret: Idq; hoc modo explorabam: Arcum Instrumenti K N
cum sitis regulis ad meridiani planum dirigebam, & in fine ubi eo Gradus desinunt, juxta
N appendebam perpendicularum per N S signatum, ac regulam fundamentalem A B per cu-
m neos quosdam intra T & V X, positos, prout opus erat, attollebam vel seprimebam: unquam
sic univarium Instrumentum, donec fluit Orisculum N O S cui plumbum iuxta S an-
nectitur, praecise punctum medium inter Sextantis Centrum ad A, & peripheriam dire-
ctam ad O contingeret. Liqet enim inde, quod Organi regula sive basis A B exacte Hor-
izonti aequilibrare: Cum ex Elementis Geometriae sextans Circuli Centro constituit Trian-
gulum isosceles (prout in libro quarto Euclidis Propositione 15 demonstratum est) per
quodationem R N A, & lineam regulae R A. Cumq; recta descendens ab N, qua Zenith
respicit, R A basi, bisariam faceret, necessarii ad angulos rectos fieri, consequitur, utiq;
apparet ex Propositione 12 libri 1. atque proxime antecedentibus. Quo circa perpendicu-
lum N S versus Zenith semper directum fuisse: N O univarium, omnino eidem perpendicu-
lo Regula R A Orthogonalis sit oportet: ideoq; in Horizontis aequilibrio, a quo vertex un-
diq; Circuli quadrante distat, qui rectum angulum efficit. Omnibus itaq; sic quantis fieri
potuit accurate et laborate ordinatis, donec nova stella Meridianum in suo declivioris
fuit motu universi, coningeret, attendi, concipere per aliquid pinnaculum collimari prout
juxta C R regulae analogum, non longe a Centro prope R appositum, quod se hinc necessitate
postularet, removeri poterat. In priori enim parte ejus, simula quaedam confusa erat, una
cum prioris pinnaculi lateris etiam superiore, respectu inferioris & Centri Parallela, per
quam inter observandum motu longi cochleae O E, angulus Instrumenti variabatur donec
novam stellam in superiore limbo pinnaculi ad C praecise collimarem, dimidia eius parte
vel, aliter lateris, quantum ullo acumine discernere licuit. Rimulus enim prioris pinnaci-
ulo utriq; parallelas tunc temporis nondum advennerat, quarum beneficio centrum stel-
lae exactissime notatur. In hunc itaq; modum per Arcum utriq; pinnaculo B C intercepti
minimam stellae Alitudinem supra Horizontem deprehendi, cuiusdem in antecedenti libro lo-
co citato referavi. Cum vero facili Regula B A adeoq; totus sextans ad Horizontem aequi-
librio inter observandum dimoveri posset, si fulcrum a quo innititur Instrumentum me-
nihil in hanc vel illam partem per subtilos cuneos cederent: ideo juxta lineam ad O in
inferioris Regulae medietate sitam quam Instrumenti perpendicularum recte se habens suo
contactu pulsare debuit, utriq; divisiones quaedam erant deperatae: in parvo quodam arcu
P Q circa centrum N descripto, sic ut pro quantitate Gradus unius in tali circuli dimetro
minuta ab utroq; parte distribuerentur, in anteriori O F subarbitraria: in inferiori vero O
Q addenda, prout perpendicularum hinc vel inde aliquam aequilibrio inclinacionem mon-
strabat: Eoq; pacto Alitudinem per Arcum B C inventam observatione per Qa & perpen-
diculo iterum inspecto probavi, ac sicubi id necessum videbatur accuratius limitavi. Li-
cet vero exquisitius resingeretur, si per binas rimulas parallelas oculo ad motas juxta anterioris
pinnaculum fieri collimatio: tamen & sic praecise, uti nunc dixi, ut quod quarebatur,
ita praecise proveniret praeteritum, ubi se prius in eadem stella posse fieri esse per motum
quemadmodum in nova illa, qua perpetuo, quoad duravit eandem retineat in Meridiano
alitudinem intensibiliter mutata. Ea vero qua de hac exempli loco, hic dicta sunt, pari-
ter de aliorum siderum alitudinibus dimetiendis, ac sextantem Circuli partem non exceder-



sestante per misurare l'elevazione di
oggetti celesti



Incisione del sestante astronomico
triangolare per la determinazione delle
distanze Illustrazione tratta da
"Astronomia instauratae mechanica",
by Tycho Brahe (2° ed., Nuremberg,
1602)

"quadrans maximus"

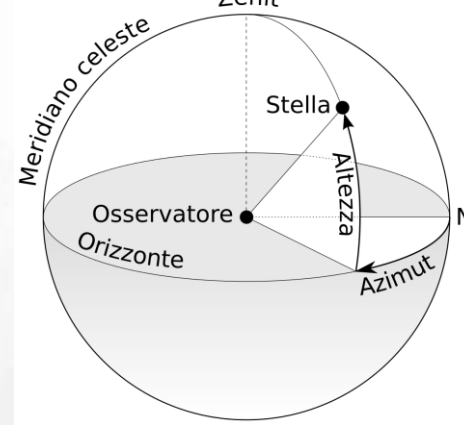
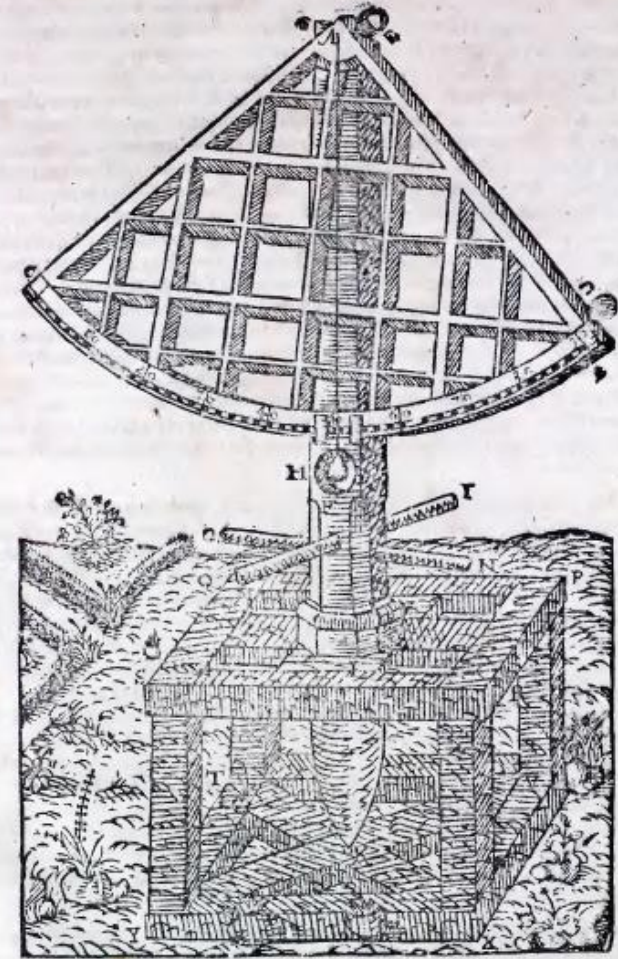


Immagine da Wikipedia

Concepito, **per l'altezza** delle misure più lontane. e fu il quadrante più grande mai progettato da Ticho:

Un quadrante verticale di legno alto 6 metri che richiese 40 uomini per montarlo e molti assistenti durante le osservazioni; con un raggio di 4,5 metri e tenuto sospeso al centro. Le misure si potevano eseguire grazie a un filo a piombo.

QVADRANS MAXIMVS QVA-
LLEM OLIM PROPE AVGVSTAM VINDE-
licorum exstruximus.



"Astronomia instauratae mechanica"

EXPLI

Grande quadrante murale

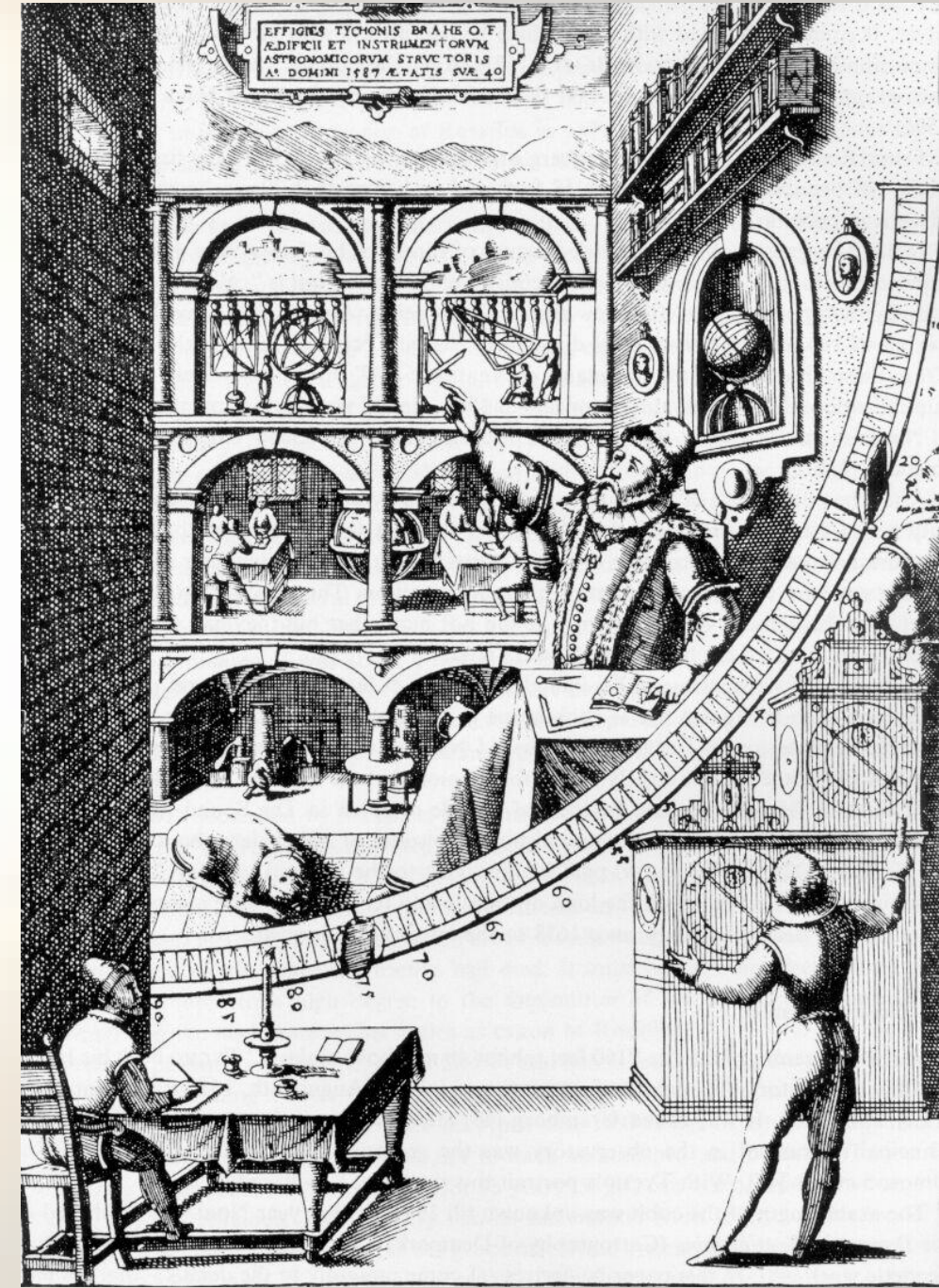
lo strumento più preciso a disposizione di Tycho a Uraniborg.

Costruito su un muro lungo il meridiano di Ven (linea N-S) e con un quadrante in ottone solido di raggio di circa 194 cm. L'uso del grande quadrante determina **l'elevazione delle stelle**. Si legge l'altezza sul bordo esterno del quadrante in corrispondenza della posizione della pinnula.

Si può anche trovare **l'istante di transito** sul meridiano usando gli orologi.

"Ho avuto molta fiducia in questo quadrante , ma nonostante ciò ho anche confrontato con altri grandi quadranti, in maniera da evitare il minimo sospetto di errore in queste sottili misure"

l'osservatore, fa l'osservazione attraverso le fenditure e quindi detta l'altezza misurata a un secondo collaboratore, che siede al tavolo con una luce, un terzo collaborator, guarda gli orologi quando dà un segnale, e il tempo è anch'esso registrato



"armillae equatorialiae maximae"

La GRANDE ARMILLA EQUATORIALE completata nel 1585

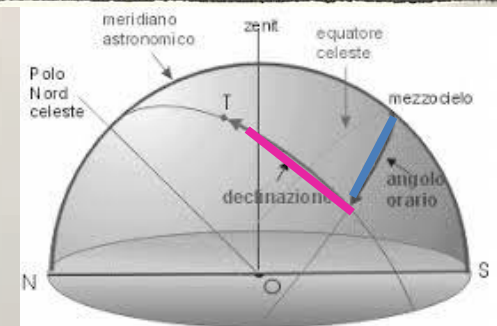
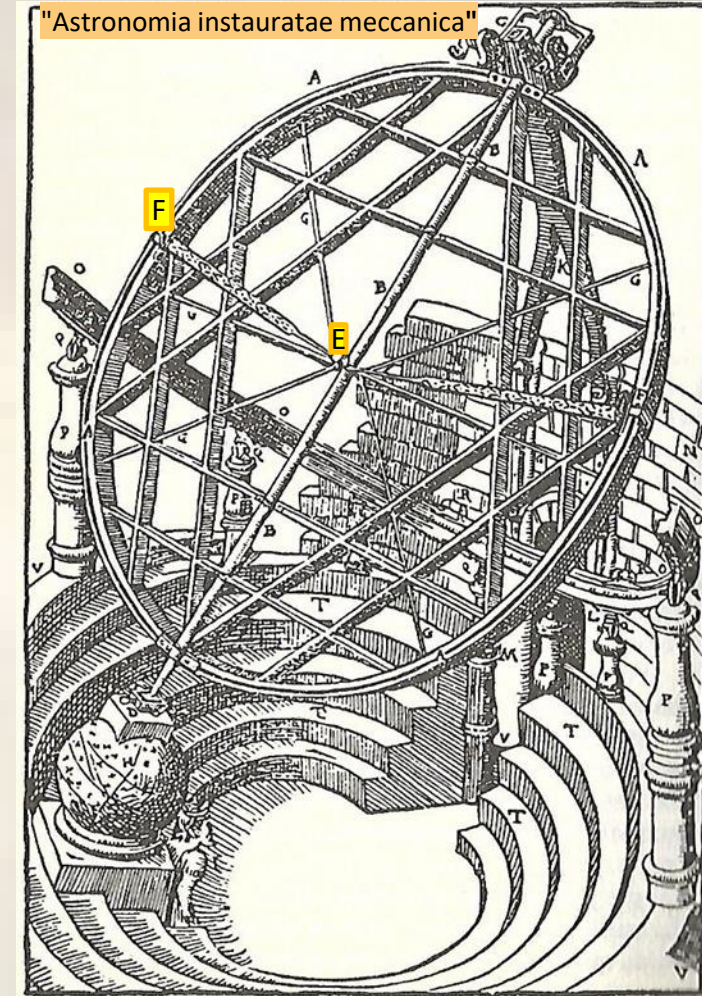
Sarebbe diventata il più importante dei suoi strumenti di **Stjernborg**, usata per misurare ascensione retta e declinazione degli oggetti celesti. Era fatta di legno. Essa ruotava su un asse di acciaio cavo inclinata con asse parallelo all'asse della terra rispetto alla verticale. La circonferenza aveva diametro 2.7m

Sul portale, un'iscrizione in lettere dorate cantava le lodi di Tycho e dei suoi strumenti.

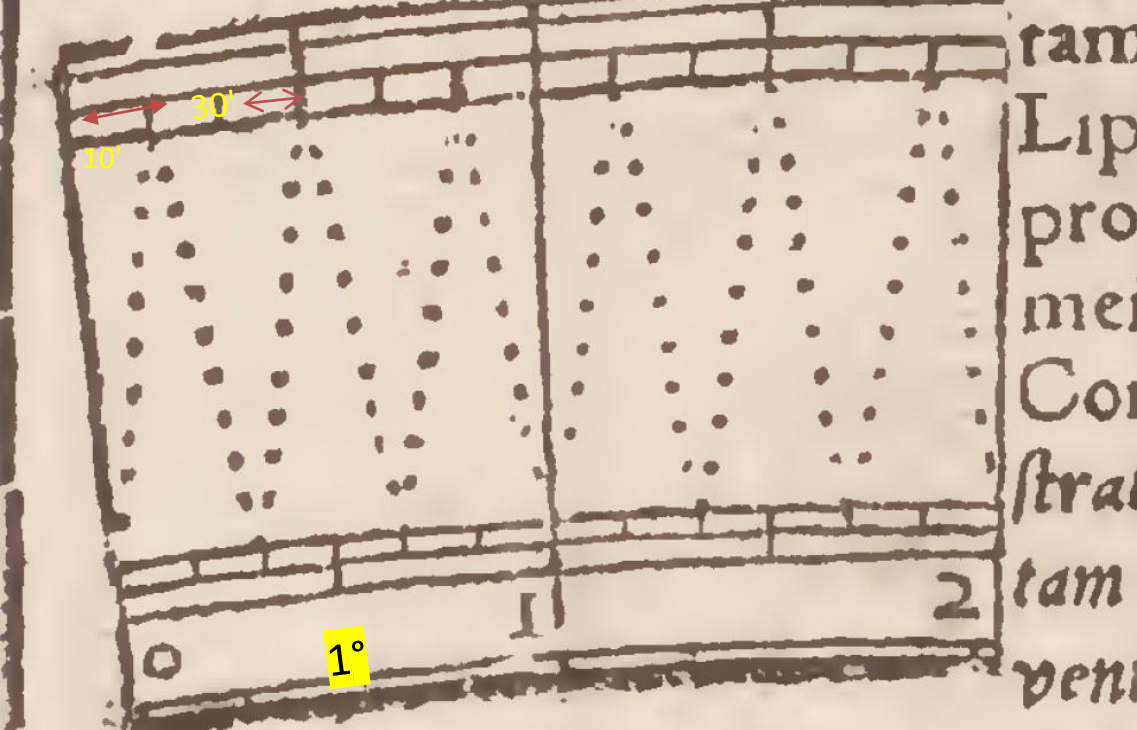
Oltre l'ingresso, ci si trovava nel locale di riscaldamento (salsa control), che dava accesso a 5 anfiteatri circolari, e questi e altri locali sotterranei erano decorati con poesie scritte in lettere dorate. Le pareti del locale riscaldato erano ornate con sette ritratti di astronomi dall'antichità più un ottavo ritratto, di un futuro astronomo chiamato "Tychonides"

bracci EF per la visuale stabiliscono la DECLINAZIONE ossia la distanza angolare(N-S) di una stella dall'equatore. L'ascensione retta veniva letta nell'altro semicerchio.

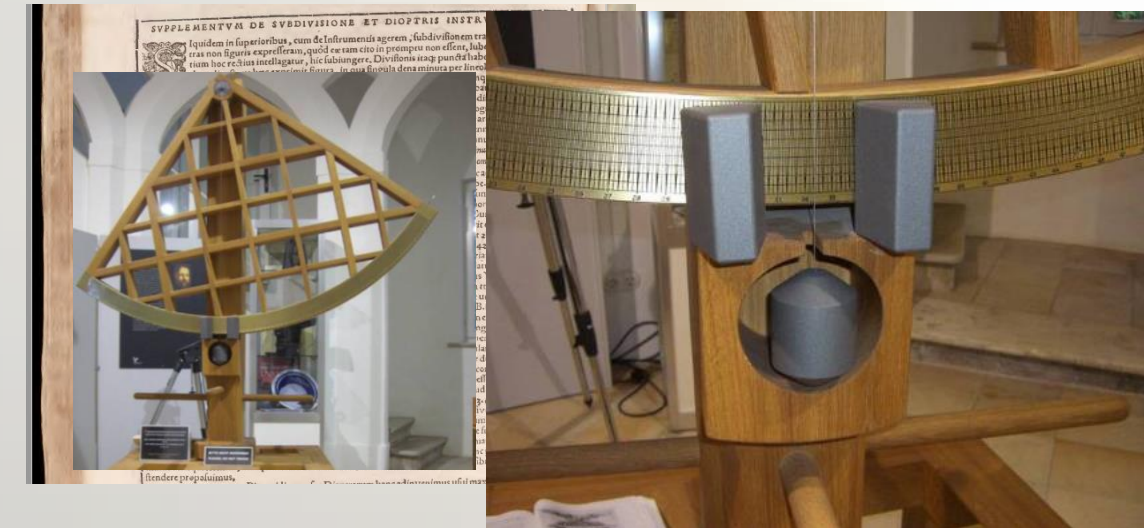
Disegno di Tycho Brae Armillae equatorialiae maximae usato per misurare le ascensioni rette e le declinazioni



Precisione degli strumenti



Per leggere **le parti di un grado** concepì una scala che utilizzava linee (trasversali) di file di dieci punti crescenti e decrescenti a distanze costanti, che erano poste tra un cerchio interno e uno esterno del bordo dello strumento. Questo metodo di divisione fu applicato in tutti i suoi strumenti.



Tycho raffinò notevolmente le sue misurazioni **ripetendo** le stesse osservazioni nei mesi e negli anni e gli studiosi hanno concluso che le posizioni delle stelle date da Tycho erano corrette entro poche decine di secondi.

Riproduzione di un quadrante di Tycho al museo di Augsburg in Germania (dove ha vissuto per pochi anni prima di andare a Ven)

In ogni modo nessuno aveva mai osservato in modo più preciso senza un telescopio.

La precisione della misurazione astronomica, che era di dieci minuti di arco ai tempi di Ipparco e Tolomeo, fu ridotta a Uraniborg a un minuto di arco.

alcuni risultati fra i più rilevanti:

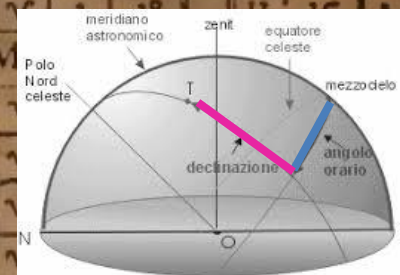
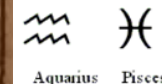
Stilò un catalogo di 1004 stelle

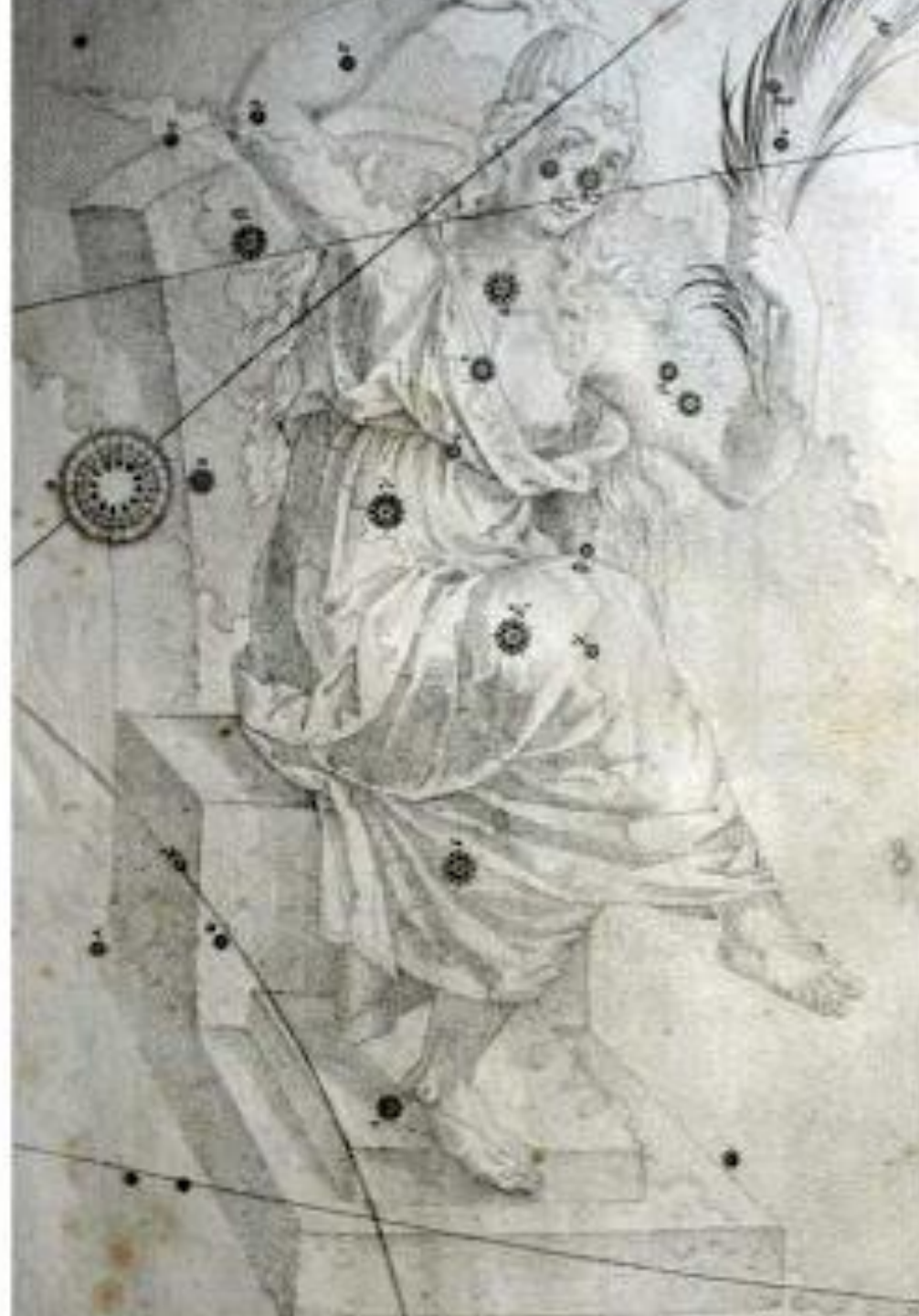
Quello di Tycho **fu il primo catalogo moderno completo**, E segnò l'inizio di una nuova era dell'astronomia osservativa, rimanendo per più di un secolo la più importante fonte di consultazione per le posizioni stellari.

La longitudine alfa ha un settore per il segno zodiacale, gradi e minuti (tra 0 e 30 gradi) e la latitudine delta, ha solo i gradi e minuti rispetto all'equatore celeste.

T. Brahe,
Astronomia Instauratae Progymnasmata
catalogo ridotto di 777 stelle (su 1007)

DENOMINATIO STELLARVM.	LONGITUDO		LATITUDO		INDV.
	G.	M.	G.	M.	
Præcedens oris	17	45	25	16	4
Sequens oris	18	54½	24	52	4
PEGASVS.					
Os Pegasi	26	22	22	7½	3
Caput	1	15½	16	25	4
Quæ ad austrum in capite	20	45½	15	43	5
Inferior & sequens in iuba	13	0	14	30½	6
Superior & præcedens in iuba	12	44	15	43½	6
Lucida colli	10	39½	17	41	2
Sequens in collo	12	25	18	29	1
Sinistrum crus	3	23	36	42½	4
Sinistrum genu	8	50	34	19	4
Dextrum crus	14	3	41	0½	4
Præcedens duarum in pectore	17	29½	28	49	4
Sequens	18	53½	29	24½	4
Dextrum genu	20	10½	35	7½	3
In eodem genu ad austrum	19	25	34	24½	5
Præcedens duarum in ala	25	33	25	35	6
Sequens in ala. & australior	27	6	24	50½	6
Prima alæ, Marchab	17	56½	19	26	2
Eductio cruris, Scheat	23	49½	31	7½	2
Extrema alæ	18	10	18	10	2
ANDROM					
Caput					
Infima in scapula dextra					
Inferior in sinistro humero					
In dextro brachio trium australior					

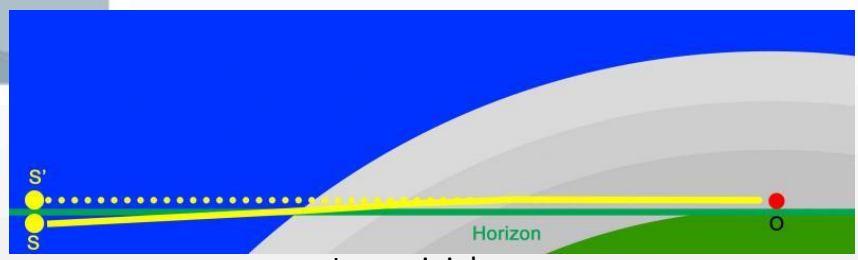
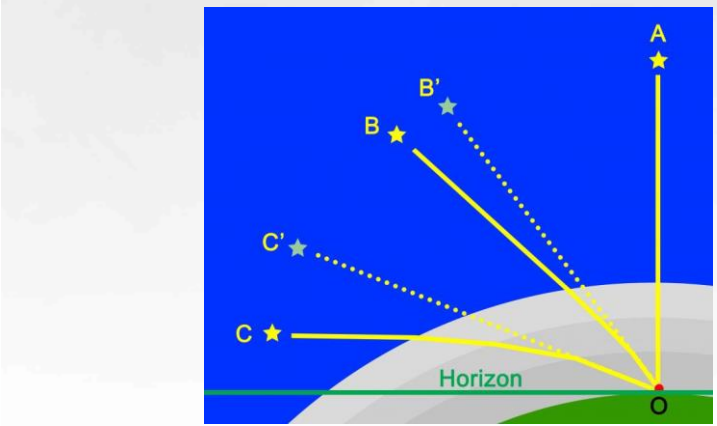
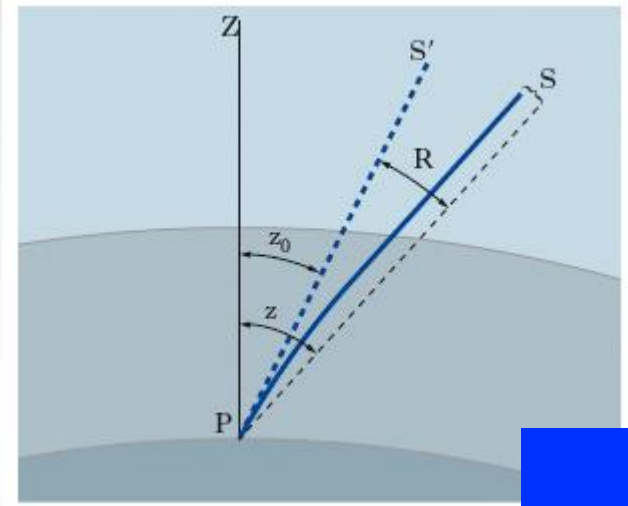




Nel 1603, **Bayer**, pubblica sotto il nome di "**Uranometria**", un **atlante celeste** con tutte le stelle fisse di Tycho (1004), **aggiungendo le lettere greche alle stelle più importanti**, la costellazione di **Cassiopea** e la **Nova del 1572**, nota anche come **Nova di Tycho**

Calcolo della rifrazione atmosferica $r = 30'$

I raggi luminosi che riceviamo a terra cambiano direzione quando attraversano l'atmosfera terrestre. Lo spostamento è massimo sull'orizzonte e diminuisce via via che ci si alza da esso. Dunque la rifrazione incide sulla precisione delle osservazioni e **piuttosto pesantemente se l'oggetto da misurare si trova vicino l'orizzonte.** Tycho dopo un gran numero di misure prese per diverse altitudini e in diverse stagioni, le riporta in una tabella.



OGGI: una persona guarda verso l'orizzonte (alt 0) vede anche oggetti che stanno di sotto fino a $-30'$ perché la rifrazione ne alza l'immagine sopra l'orizzonte di **[33' 41"]**

Immagini da <https://britastro.org/node/17066>

FABVLA Refractionum Fixarum Stellarum.

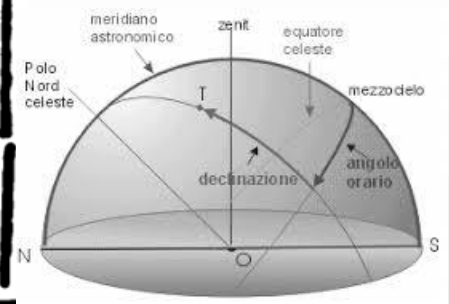
Alt.	Retra.	
G.	M.	S.
0	30	0
1	21	30
2	15	30
3	12	30
4	11	0
5	10	0
6	9	0
7	8	15
8	6	45
9	6	0
10	5	30
11	5	0
12	4	30
13	4	0
14	3	30
15	3	0
16	2	30
17	2	0
18	1	15
19	1	30
20	0	0

DE Refractio Stellarum à Tycho-ne observata.

Alt.	Refract.
0	/. //
0	30. 0
1	21. 30
2	15. 30
3	12. 30
4	11. 0
5	10. 0
6	9. 0
7	8. 15
8	6. 45
9	6. 0
10	5. 30
11	5. 0
12	4. 30
13	4. 0
14	3. 30
15	3. 0
16	2. 30
17	2. 0
18	1. 15
19	1. 30
20	0. 0

Tabella riportata nell'Astronomia Carolina (Carlo II Stuart) del 1661 (testo molto usato e famoso per la sua precisione e accuratezza Usato da Newton Flamsteed Halley...)

T. Brahe, Astronomia Instauratae Progymnasmata T. Street, 1661, Astronomia Carolina



Refractio- num Fixa- rum Stel- larum.			TABVLA REFRACTI- ONVM SOLARIVM.				
Alc. Retra.			Alt.	Refrac- tio.	Alt.	Refrac- tio.	
G.	M.	S.	⊙	/.	⊙	/.	
0	30	0	0	34	0	23	3
1	21	30	1	26	0	24	2
2	15	30	2	20	0	25	2
3	12	30	3	17	0	26	2
4	11	0	4	15	30	27	2
5	10	0	5	14	30	28	1
6	9	0	6	13	30	29	1
7	8	15	7	12	45	30	1
8	6	45	8	11	15	31	1
9	6	0	9	10	30	32	1
10	5	30	10	10	0	33	0
11	5	0	11	9	30	34	0
12	4	30	12	9	0	35	0
13	4	0	13	8	30	36	0
14	3	30	14	8	0	37	0
15	3	0	15	7	30	38	0
16	2	30	16	7	0	39	0
17	2	0	17	6	30	40	0
18	1	15	18	5	45	41	0
19	1	0	19	5	0	42	0
20	0	0	20	4	30	43	0

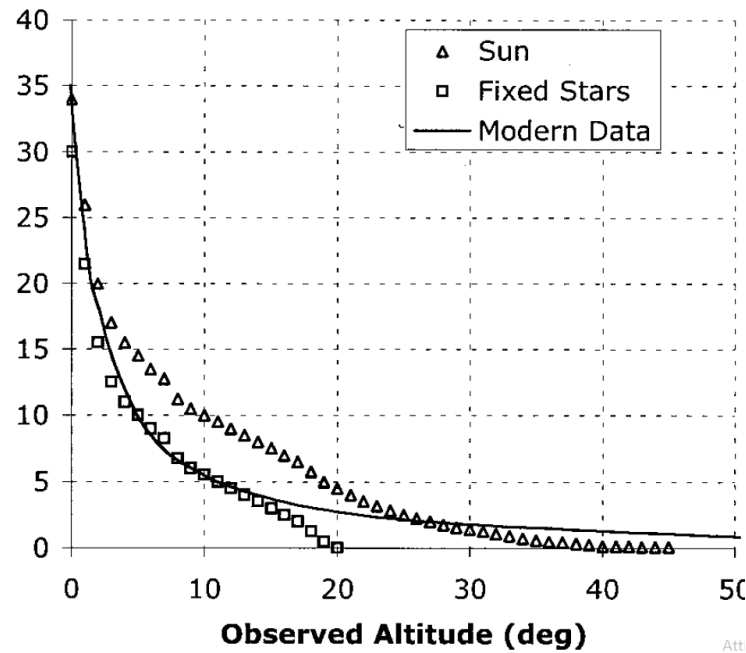
-3'

Tycho fu il primo a misurare la rifrazione atmosferica in modo appropriato. Pubblicò per la prima volta questi dati nel 1596 *nell'Epistolae Astronomicae*.

Nelle tabelle sono riportati gli angoli di rifrazione al variare dell'altezza sull'orizzonte;

La tabella con i dati del sole è affetta da un errore sistematico di circa 3'; questo perché Tycho nei conti usa il valore sovrastimato di 20 volte di Tolomeo (3') per la parallasse del Sole **[valore corretto: ~8.8"]**

Nel grafico la linea continua mostra i valori moderni dell'angolo di rifrazione e quanto le misure di Tycho fossero eccellenti!



W.H.Lehn. S. van Werf, 2005 [16]

DUNQUE un errore sulla misura della distanza Terra-Sole si va a riflettere indirettamente anche in misure di altre quantità fisiche.

obliquità dell'eclittica: Per trovare l'inclinazione dell'orbita solare sfruttò gli equinozi e misurando l'altezza del Sole ai 2 solstizi, d'estate e d'inverno, e ne deduce l'inclinazione

$$i = 23^\circ 31'.5 \quad [\text{Eratostene } 23^\circ 51']$$

[23°26' oggi]

Nel 1597 Brahe lasciò la grande struttura che aveva creato sull'isola di HvVen, a seguito della mancanza di supporto, e di una vera e propria ostilità, da parte del nuovo re, Cristiano IV di Danimarca.

E **nel 1598** **Rodolfo II d'Asburgo**, offre a Brahe l'incarico di "matematico imperiale di corte".

Così Tycho si sposta a Praga e l'anno dopo egli accetta l'offerta dell'Imperatore di costruire un nuovo osservatorio nel castello di Benátky, a 50 km da Praga, dove Brahe lavorò fino alla morte.

Il grande astronomo si spense nell'ottobre **1601** all'età di soli 54 anni, dopo 11 giorni di malattia, lasciando tutte le sue osservazioni nelle mani **di Keplero**.

Si dice che abbia mormorato poco prima di spirare, rivolto a Keplero: "ne frustra vixisse videar",
«*che non sembri che io abbia vissuto invano*».

La sua gloriosa attrezzatura non fu mai più utilizzata.

Raccolse polvere si disperse e fu infine bruciata durante i primi anni della Guerra dei Trent'anni.

Entro un decennio dalla sua morte, il telescopio di Galileo renderà obsoleti tutti gli strumenti di Tycho.

**Ma erano state poste nuove fondamenta
dell'astronomia osservativa con un'accuratezza fino allora sconosciuta.**

Con tutta questa PRECISIONE RAGGIUNGIBILE SENZA TELESCOPIO, TYCHO COMUNQUE non riuscì mai a fare delle misure precise delle **distanze**, nonostante avesse provato con grande assiduità a misurare la parallasse diurna di Marte in opposizione (per ottenere da questa la distanza Terra-Marte)

Nel 1610 Galileo punta per la prima volta al cielo il telescopio. Basterà l'introduzione del telescopio per avere una misura della distanza Terra-Sole?

NON TANTO!!

Nemmeno coi telescopi del '600 '700 si sono ottenute delle misure angolari molto accurate; tanto piccole sono le parallassi dei pianeti e del sole.

Così, a partire dalla fine del '600, ci si ingegnò trovare metodi indiretti, e avrà particolare importanza il metodo del transito di Venere, che faceva uso di orologi invece che di telescopi; oppure misure che sfruttavano una buona conoscenza della velocità della luce, ma si dovrà attendere l'800.



La Parallasse

La parallasse ci può dare una misura della distanza di un oggetto

La parallasse

E' angolo di un oggetto come visto da **due differenti punti** sulla Terra. Maggiore è la distanza del corpo più piccola sarà la parallasse. (La distanza tra i 2 osservatori si chiama baseline).

Lo sfondo di riferimento sono le stelle fisse.

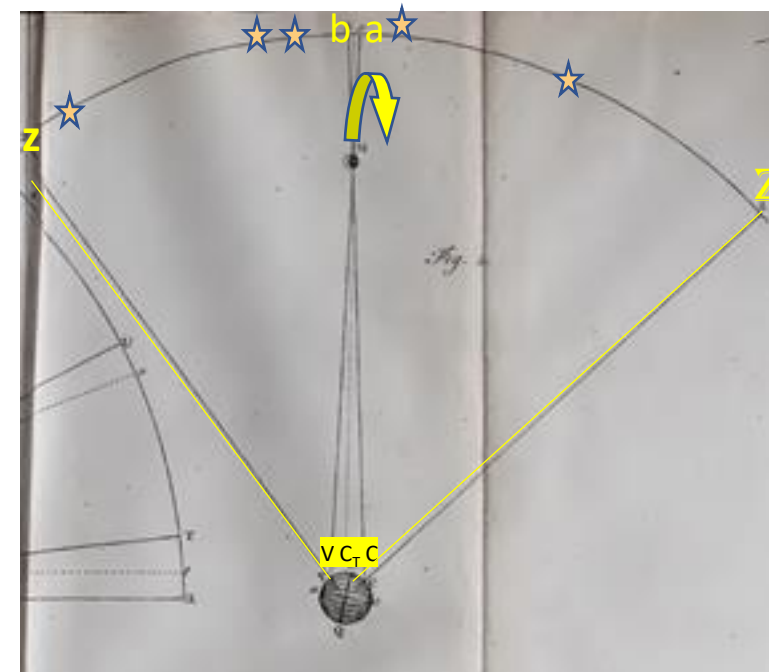
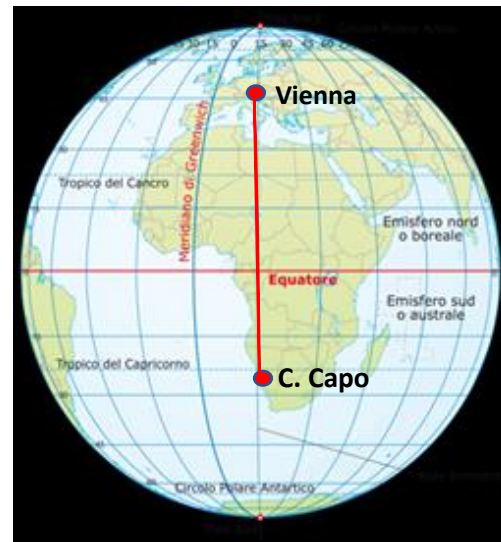
Esempio didattico, di Ferguson **1757**: caso di 2 ossevatori lungo lo stesso meridiano (**Vienna-Città del Capo**)

Quando il corpo celeste passa per il meridiano in cui si trovano i due osservatori, si misurano gli angoli con lo zenit: \widehat{za} da Vienna; \widehat{Zb} da Capo B.Speranza

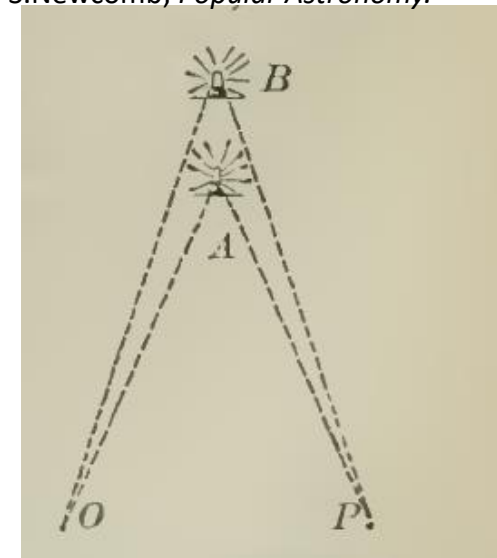
$$\widehat{ba} = \widehat{za} - \widehat{Zb}, .$$

naturalmente noto l'angolo $\widehat{VC_C}$ per calcolare la linea di base dalle latitudini dei due posti

\widehat{zV} = zenit Vienna \widehat{ZC} = zenit Capo Buona Speranza



S.Newcomb, *Popular Astronomy*.

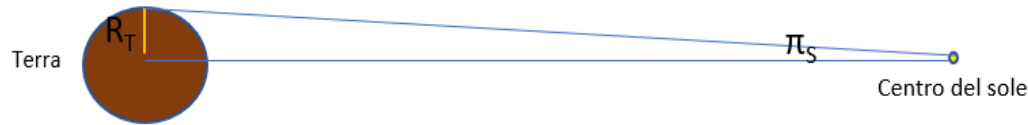


Misura diretta di parallasse, da 2 posti diversi ("trigonometrica", secondo la nomenclatura di Harkness)

Parallasse diurna

Sfrutta la rotazione della Terra: un osservatore, restando fermo dov'è, prende la misura di posizione dell'oggetto rispetto alle stelle fisse 2 volte, separate da un intervallo temporale il più lungo possibile, cui corrisponde una baseline più lunga possibile.

PARALLASSE ORIZZONTALE o TOTALE: Angolo che ha vertice nel centro dell'oggetto osservato ed è sotteso dal raggio della Terra, E' una quantità comoda cui fare riferimento nei calcoli, per ricavare la distanza dell'oggetto al centro della Terra

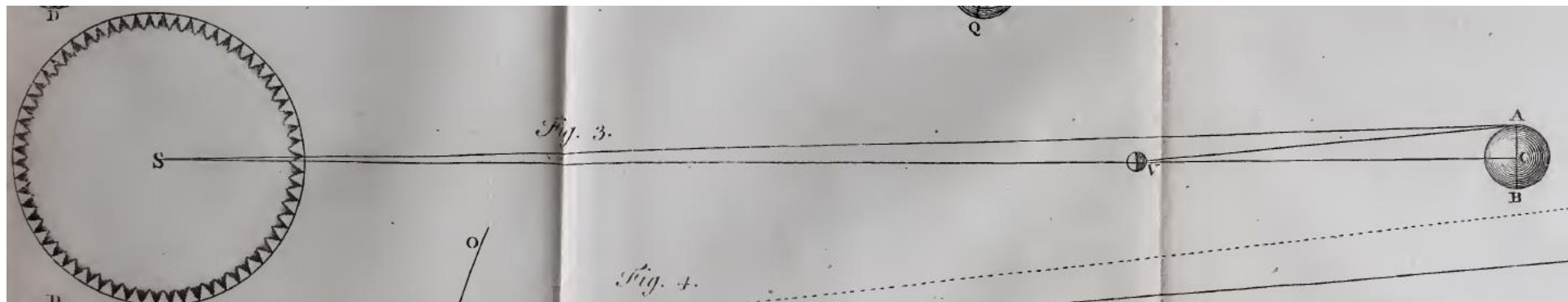


De Parallaxi Solis.
Parallaxis Solis est angulus in illius centro à Terræ semidiametro subtensus, s. est differentia inter ipsius locum verum respectu centri Terræ, & ipsius locum visum ab aliquo puncto superficiei Terræ.

T. Street Astronomia Carolina 1661

NB: molto spesso nel 6-800, gli astronomi usano solo la parola parallasse, sottintendendo che era la parallasse orizzontale.

$$D_{TS} = \frac{R_T}{\tan(\pi_S)} \sim \frac{R_T}{\pi_S}$$



Ferguson Parallasse orizzontale di Luna e Sole

PARALASSE ANNUA: ha per base-line la distanza Terra-Sole.

Sfrutta la rivoluzione della Terra attorno al Sole e serve per parallassi delle stelle più vicine a noi:

$$D = \frac{D_{TS}}{\tan(\pi)} \sim \frac{D_{TS}}{\pi}$$

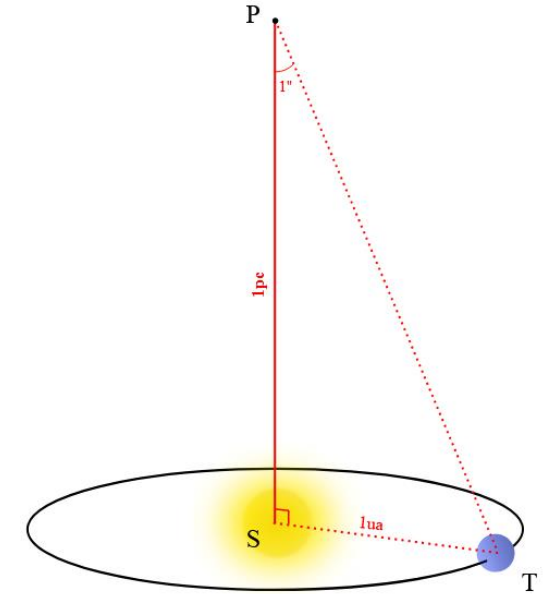
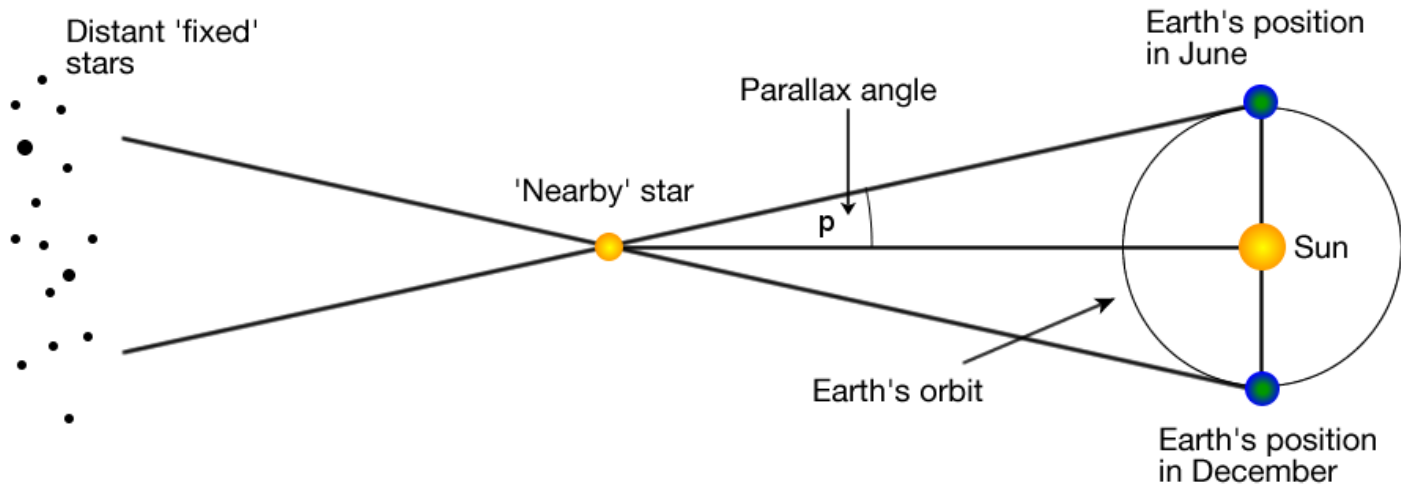


Immagine da Wikipedia

8".794 143

KEPLERO

KEPLERO (1571-1630)

Lo scopritore delle orbite ellittiche

Keplero, sulle spalle di giganti, troverà la soluzione alla cosmologia eliocentrica con l'uso di orbite ellittiche. Il moto non poteva essere uniforme!

In possesso di una quantità formidabile di dati, egli intuì che il moto di Marte non poteva comunque essere spiegato nel sistema copernicano se non si fossero prese in considerazione orbite ellittiche, e usò il database di Brahe per formulare le Leggi del moto planetario che correggevano i problemi degli epicicli nella teoria eliocentrica di Copernico ed erano molto più semplici.

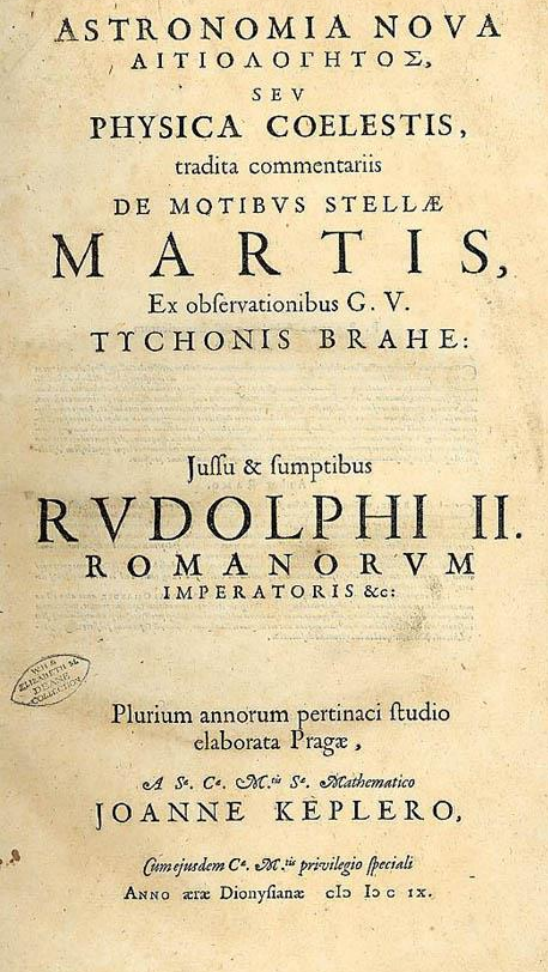
Dunque le leggi le conosciamo tutti, le prime 2 le ha scritte nell' "Astronomia Nova" la terza nella "Harmonices Mundi".

Come Keplero ha messo insieme e "scoperto" la III legge? Basandosi sui rapporti armonici (simili alle leggi che reggono le armonie musicali: di terza, di quinta...). Esamina i rapporti tra le velocità minime (afelio) e massime (perielio), distanze ed eccentricità dei diversi pianeti e trova un ordinamento che era...fedele ai principi dell'armonia musicale.

Rimase folgorato...per diversi giorni...

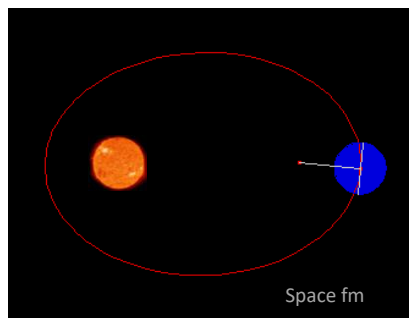


Stampa di J. Keplero, di C. Barth, XIX secolo

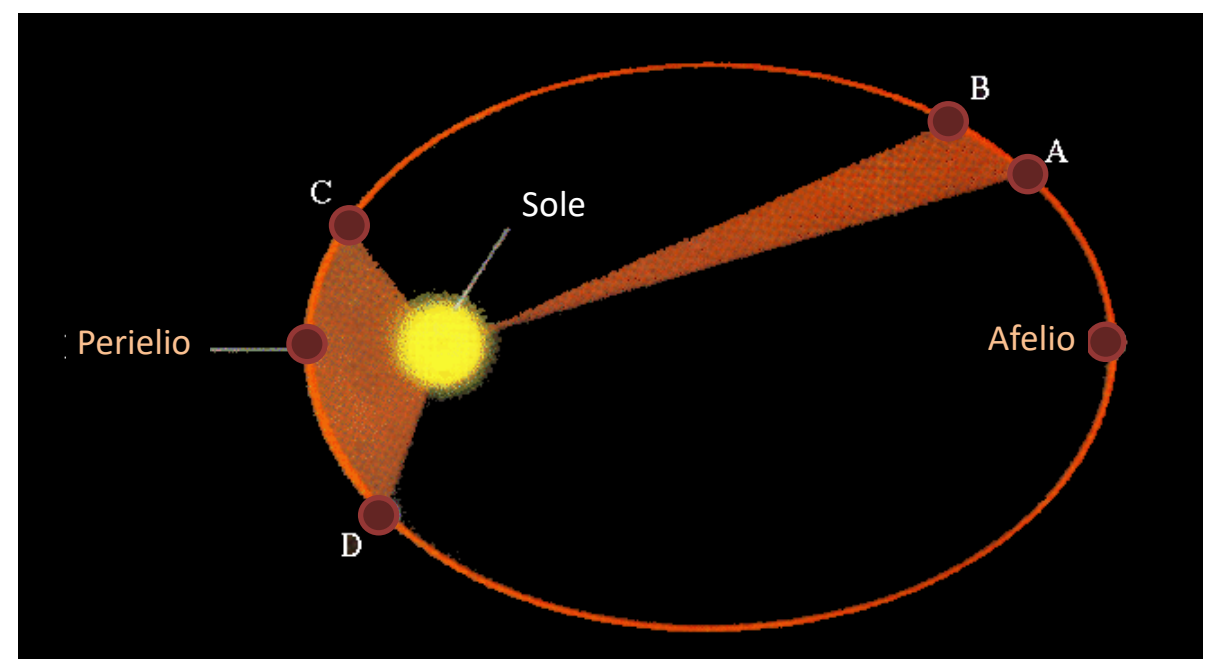


Nel 1609 venne pubblicato "*Astronomia Nova*", dove [Keplero](#) esprime le prime due leggi. nel 1618 pubblica "*Epitome Astronomiae Copernicanae*" in cui presenta il Sistema Solare essenzialmente nella sua forma moderna,

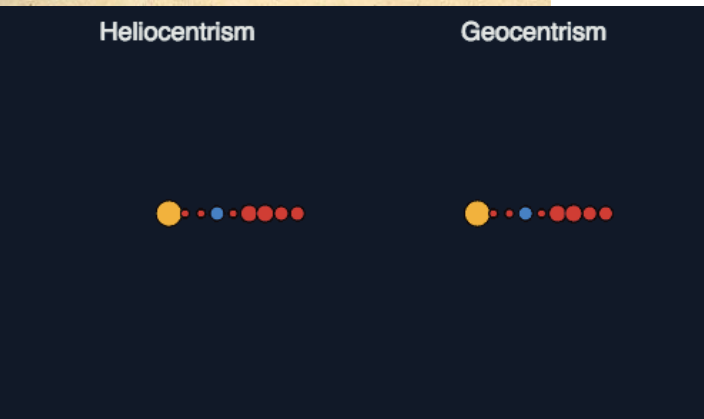
tuttavia la scala assoluta non era ancora nota!



Con l'uso di ellissi, il modello eliocentrico elimina la necessità di epicicli e deferenti.



"Non condannatemi completamente al lavoro meccanico dei calcoli matematici: lasciatemi il tempo di dedicarmi a speculazioni filosofiche mio unico piacere."



Ioannis Kepleri
HARMONICES
MUNDI
 LIBRI V. QVORVM

Primus GEOMETRICVS, De Figurarum Regularium, quae Proportiones Harmonicas constituunt, ortu & demonstrationibus.
 Secundus ARCHITECTORICVS, seu ex GEOMETRIA FIGVRATA, De Figurarum Regularium Congruentia in plano vel folido:
 Tertius PROPRIE HARMONICVS, De Proportionum Harmonicarum ortu ex Figuris; deque Naturâ & Differentiis rerum ad cantum pertinentium, contra Veteres:
 Quartus METAPHYSICVS, PSYCHOLOGICVS & ASTROLOGICVS, De Harmoniarum mentali Essentiâ earumque generibus in Mundo; praefertim de Harmonia radiorum, ex corporibus caelestibus in Terram descendentibus, eiusque effectû in Natura seu Anima sublunari & Humana:
 Quintus ASTRONOMICVS & METAPHYSICVS, De Harmoniis absolutissimis motuum caelestium, ortuque Eccentricitatum ex proportionibus Harmonicis.
 Appendix habet comparationem huius Operis cum Harmonices Cl. Ptolemaei libro II Icumque Roberti de Fluctibus, dicti Flud. Medici Oxoniensis speculationibus Harmonicis, operi de Macrocosmo & Microcosmo insertis.



Cum S. C. M. Privilegio ad annos XV.
 Lincii Austriae,
 Sumptibus GODOFREDI TAMPACHII Bibl. Francof.
 Excudebat IOANNES PLANCVS.
 ANNO M. DC. XIX.

III Legge: o legge armonica

Nel suo libro "Harmonices Mundi" (1619) tenta di connettere il suo lavoro astronomico con altri campi come la geometria, la numerologia e la musica.



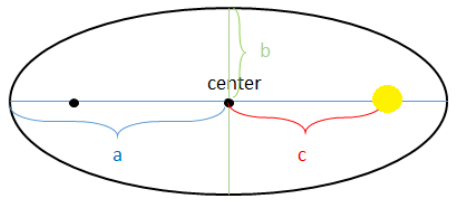
Ricava la terza legge più da considerazioni metafisiche Kepler Harmonices Mundi pag 189

inter principia, primò crederem. Sed res est certissima exactissimaque, quòd proportio quae est inter binorum quorumcunque Planetarum tempora periodica, sit praecise sesquialtera a proportionis mediarum distantiarum, id est Orbium ipsorum; attento tamen hoc, quòd medium arithmeticum in-

... "Sed res est certissima exactissimaque, quod proportio quae est inter binorum quorumcunque Planetarum tempora periodica, sit praecise **sesquialtera** proportionis mediarum distantiarum, id est Orbium ipsorum"...

"Ma è assolutamente certo ed esatto che la proporzione tra i periodi di due qualsiasi pianeti è precisamente la proporzione sesquialtera delle loro distanze medie cioè delle loro orbite..."

Nella tabella si deve leggere



Distanze medie: questa d. media coincide con il **semiasse a**
 Sesquialtera: rapporto di potenza di 2 a 3

Numeri ex motibus medijs in dimensione	Numeri proportionis orbium inter quadratos inventi.	Semidi- ametri ut supra.	Eccentricitas In dimensione Propriâ Comuni ut supra.	Intervalla extrema emergentia.	
				Aphe- lia.	Perihe- lia.
h. 156917. 29539960.	9556.	85.	5. 562	10118.	8994.
2. 390263. 11877400.	5206.	35222.	4222. 258	5464.	4948.
T. 2467584. 1878483.	1523.	55.	5. 138	1661.	1384.
♃. 4635322. 1000000.	1000.	55178.	1647. 17	1017.	983.
♄. 7571328. 612220.	721.	99295.	705. 5	726.	716.
♅. 18864680. 245714.	392.	30625.	17375. 85	476.	308.

Con questa legge ritroviamo i valori in 3ª colonna **misurati i periodi** si ricavano i rapporti tra le distanze medie (semiasse maggiori).

$$T^2/a^3 = \text{cost}$$

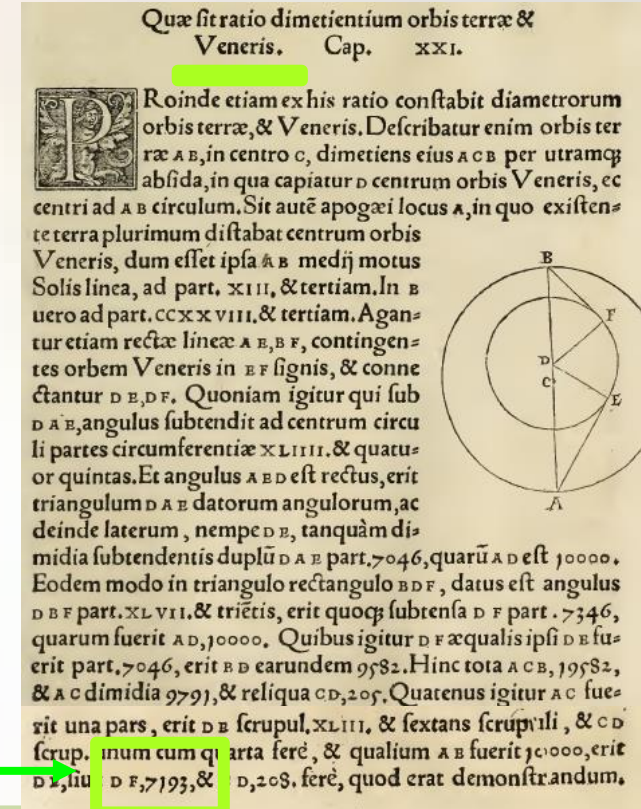
Quindi = posto TS=1, MS=1.523 TS, VS=0.721 TS

DISTANZE RELATIVE

Per esempio **Copernico** (con 1 modello a centri non concentrici) più di 70 anni prima nel "De revolutionibus" dà già tutti i rapporti tra le distanze con una buona precisione:

Distanze relative in unità distanza T-S tratte dal de Revolutionibus di Copernico			
Pianeta	Minima	Media	Massima
Mercurio	0.2627	0.3763	0.4519
Venere	0.7018	0.7193	0.7368
Terra	0.9678	1.0000	1.0322
Marte	1.3739	1.5198	1.6657
Giove	4.9802	5.2192	5.4582
Saturno	8.6522	9.1743	9.6963

Copernico



Copernico, 1543, de Revolutionibus orbium coelestium; Es del calcolo della distanza relativa media di Venere

Keplero

	Numeri ex motibus medijs in dimensione		Numeri proportionis orbium inter quadratos inventi.	Semidiametri ut supra.	Eccentricitas in dimensione		Intervalla extrema emergentia.	
	Pristinâ,	Novâ eversâ inter cubos quærendâ.			Propriâ	Comuni	Aphelia.	Perihelia.
h.	156917.	29539960.	9556.	85.	5.562	10118.	8994.	
24.	390263.	11877400.	5206.	85222.	4222.258	5464.	4948.	
T.	2467584.	1878483.	1523.	35.	5.138	1661.	1384.	
♃.	4635322.	10000000.	1000.	95178.	1647.17	1017.	983.	
♃.	7571328.	612220.	721.	99295.	705.5	726.	716.	
♃.	18864680.	245714.	392.	80625.	17375.85	476.	308.	

Kepler Harmonices Mundi

Come si vede, i dati delle 2 tabelle sono leggermente differenti: questo non è dovuto semplicemente ad una maggior precisione dell'uno rispetto all'altro, ma proprio alla correttezza o incorrettezza del modello da cui i dati sono ricavati. Il pianeta chiave era stato Marte, per il quale Tycho aveva preso misure precise di posizione (non distanza) per più di 15 anni; l'analisi di queste misure mostrava che queste differivano leggermente dalle previsioni che faceva il modello di Copernico. Fu proprio qui che il genio di Keplero si manifestò: conoscendo il periodo di rivoluzione di Marte (687 giorni), analizzò le misure di Tycho prese ogni 687 giorni, e con metodi di triangolazione*, trovò che il giusto modello era ad ELLISSI. [25]

DUNQUE il problema era misurarne una e da lì si sarebbero conosciute tutte.

Come fare?

Per arrivare alla distanza TS vedremo 2 tappe principali:

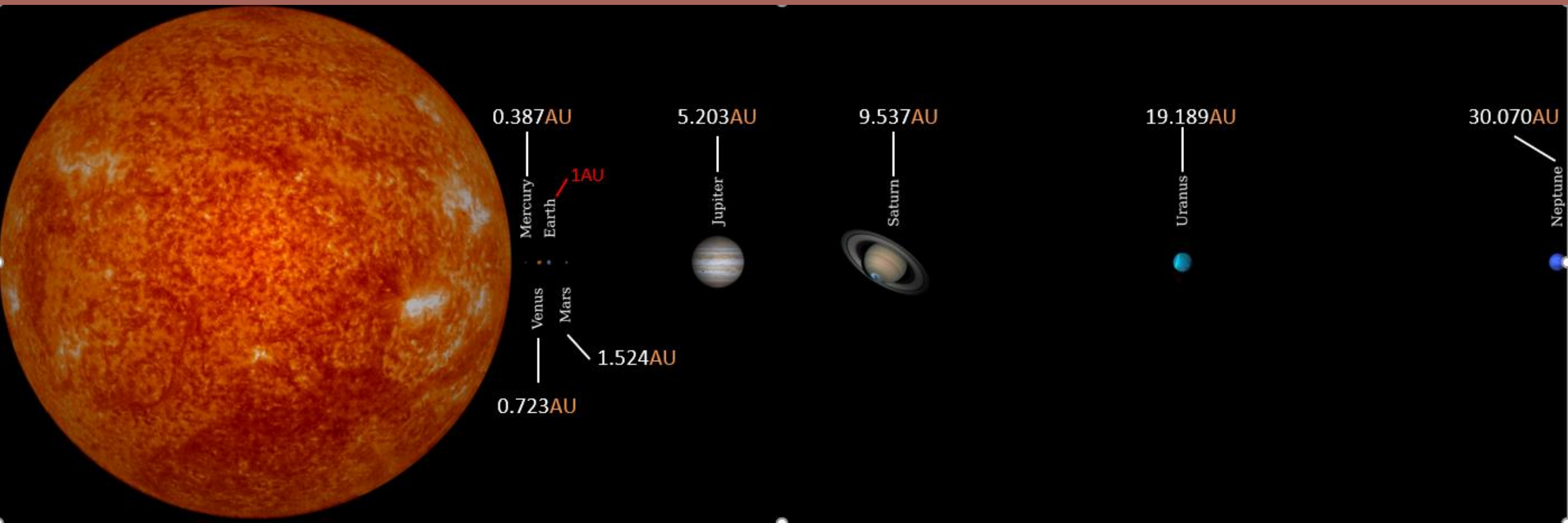
La misura di Cassini che **userà Marte in opposizione**, con il metodo di parallasse con Baseline Cayenna-Parigi

La misure che suggerì Halley che **sfruttano i transiti di Venere** (con misura di tempo, e coi rapporti di keplero hai gli altri)

E' proprio KEPLERO che con la sua "**Admonitio**" da il via alle danze!

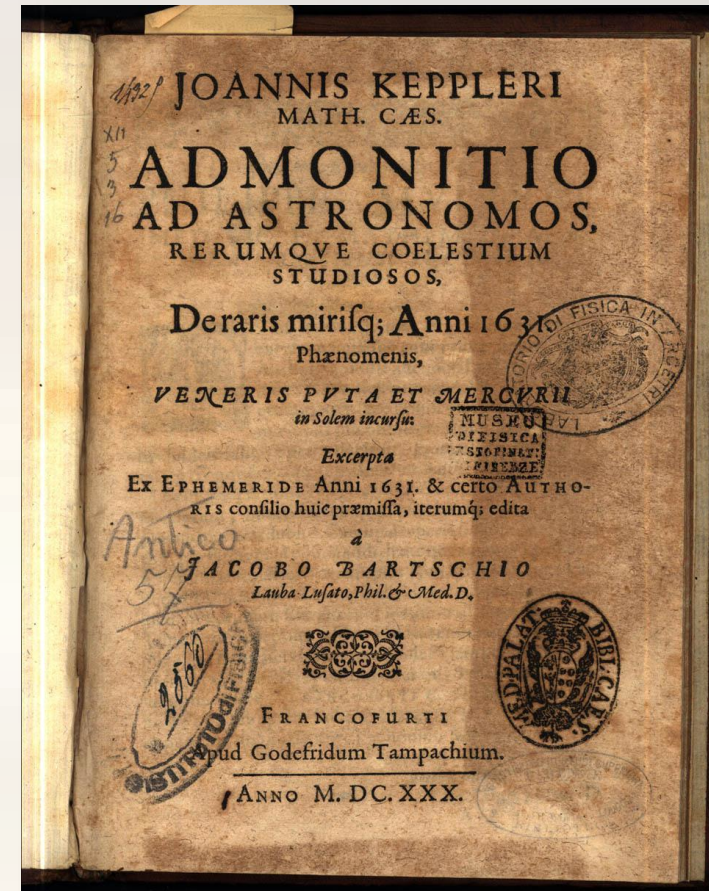
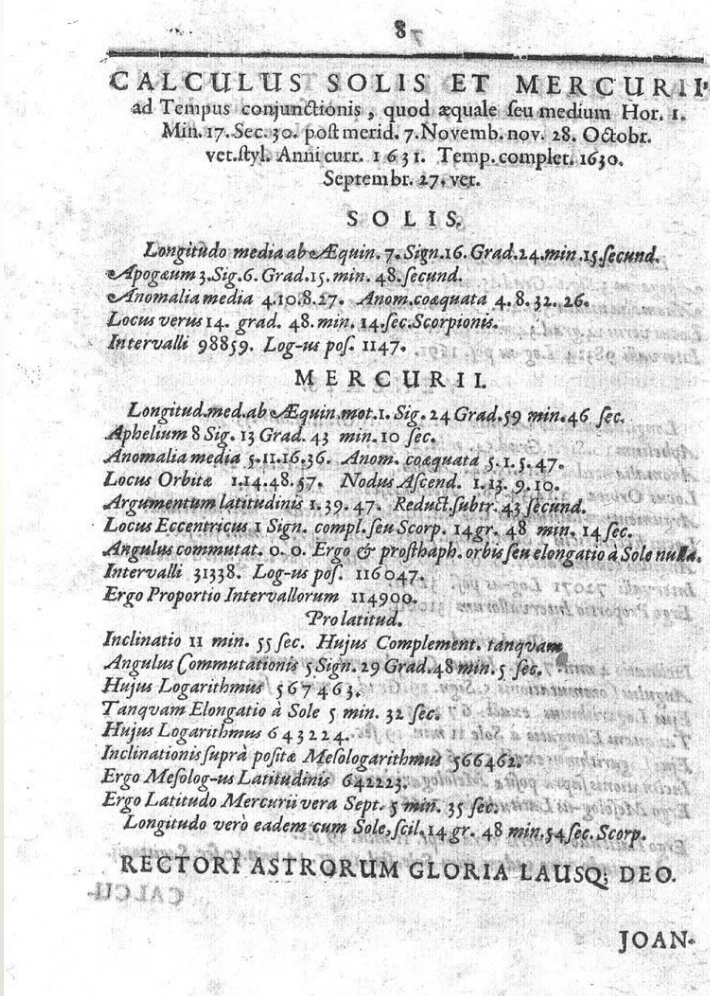
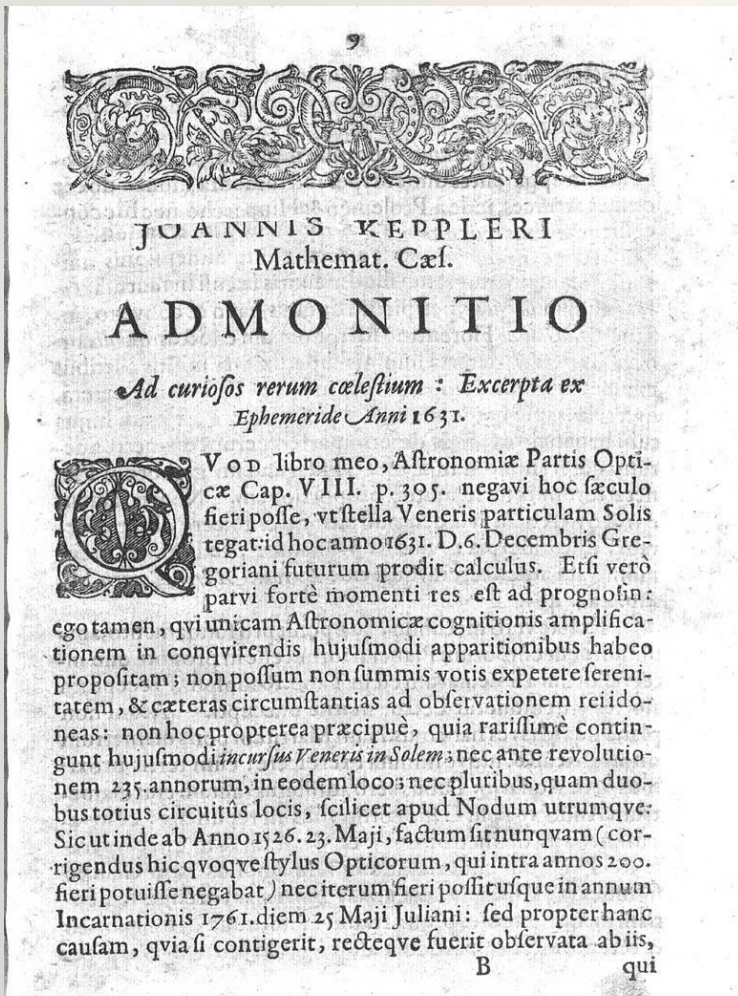
Tappe storiche per la misura della distanza

Terra-Sole nell'età moderna



Kepler che con la predizione dei transiti di Mercurio e Venere

Nel 1630 pubblica una "**Admonitio ad astronomos**"* (Avviso per gli astronomi), nella quale, in poche ma importanti pagine, annunciava due "transiti" sul Sole, il primo di Mercurio e l'altro di Venere, rispettivamente il 7 novembre ed il 6 dicembre 1631, ed esortava gli astronomi all'osservazione di questi importanti fenomeni.

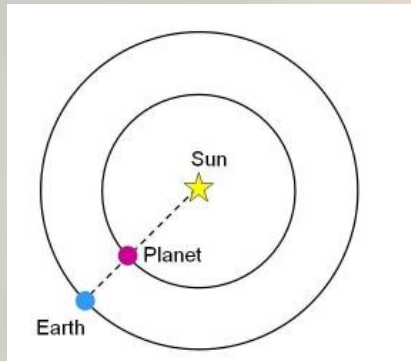


Kepler e la predizione dei transiti di Mercurio e Venere

Transito: si ha quando Terra pianeta e Sole vicini secondo la linea di vista (sono in congiunzione) e si trovano sulla linea dei nodi (lungo l'intersezione dell'eclittica con il piano orbitale del Pianeta).

Si osserva così l'ombra del pianeta attraversare il disco solare.

Gli unici pianeti che possono avere un transito sono quelli interni: **Mercurio e Venere**.



© Immagine Swinburne University of Technology

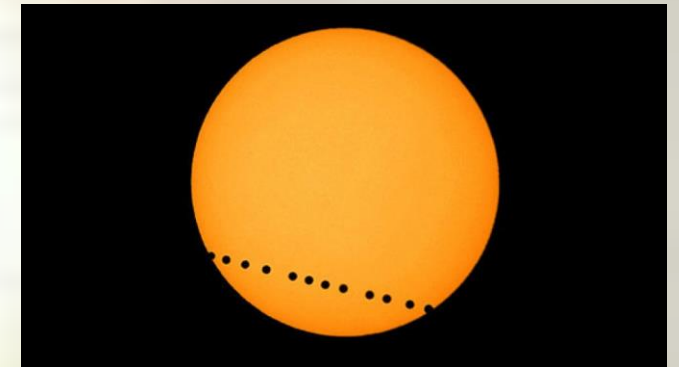
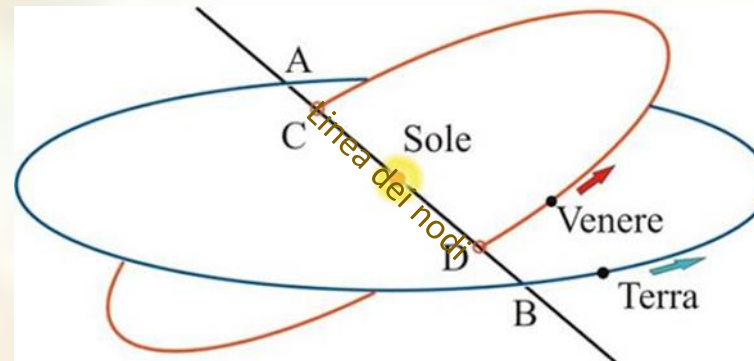


Image courtesy of Antonio Cerezo, Pablo Alexandre, Jesus Merchan and David Marsan

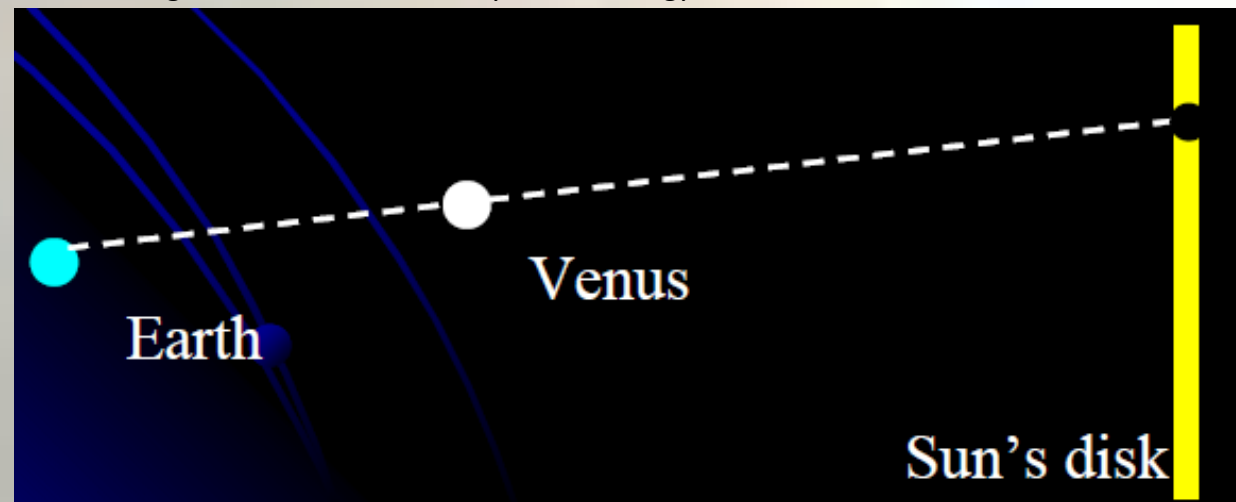
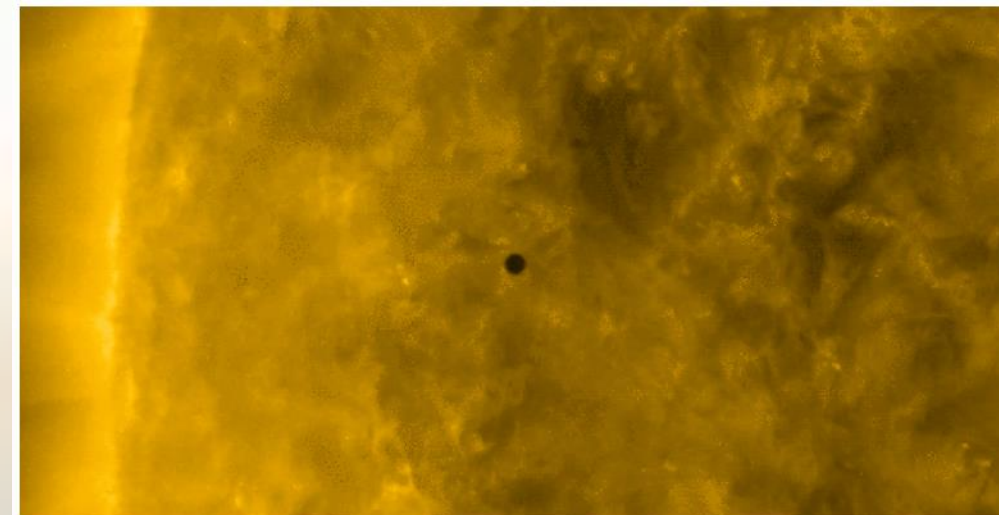


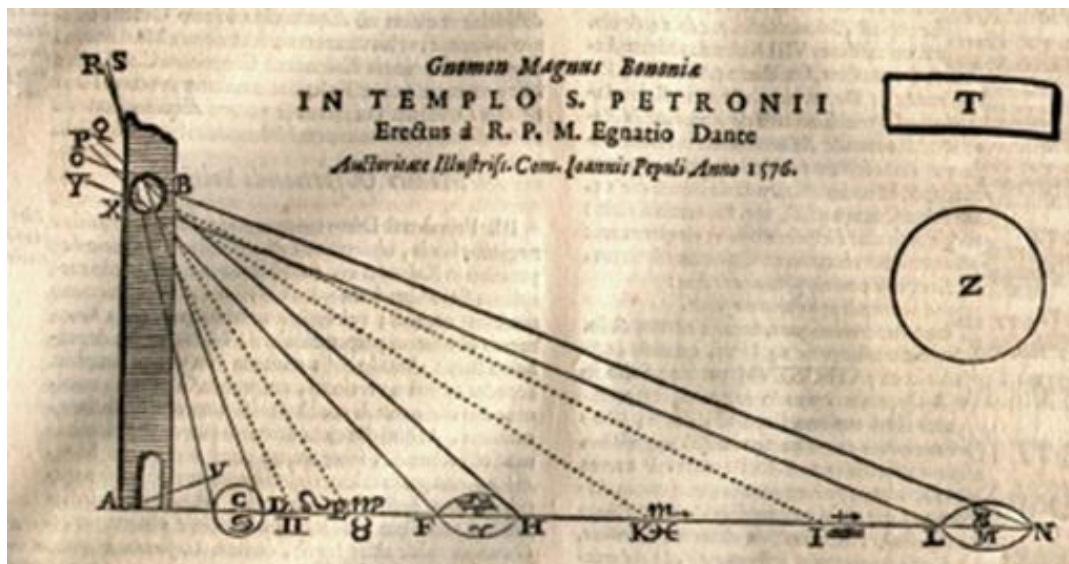
Immagine tratta da J.S.Reid, The Transit of Venus
<https://homepages.abdn.ac.uk/nph120/astro/vt.pdf>



NASA's Solar Dynamics Observatory, or SDO, captured this view of Mercury transiting the Sun on Nov. 11, 2019. Credit: NASA | [Expand image](#) | [More transit images](#)

Giovanni Domenico Cassini (1625-1712)

Cassini nato in provincia di Imperia, **venne chiamato dall'Univ. Bologna** per l'insegnamento di Matematica e Astronomia dal domenicano Egnazio Danti, matematico, astronomo, cosmografo del Gran duca di toscana Cosimo I dei Medici.



Da Almagestum Novum, 1651, del Riccioli, Parte I, p. 132.

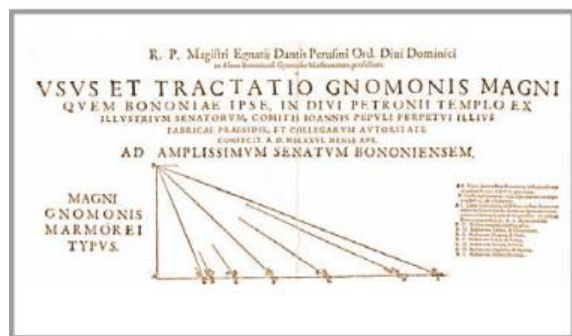
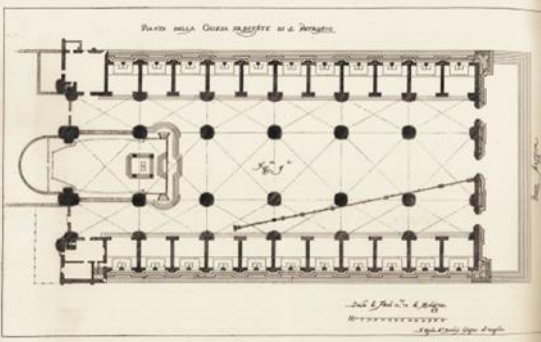


fig. 12 L'intestazione del trattato del Danti sull'uso della Meridiana



Particolare dalla galleria delle carte geografiche di Egnazio Danti al Vaticano



Meridiana di Cassini nella Basilica di S. Petronio, tratto da La meridiana del tempio di S. Petronio di Cassini (1695)

La Fabbriceria di S. Petronio chiese a Cassini di costruire una **nuova meridiana**, che sostituisse quella precedente di Danti (che doveva essere abbattuta per allargamenti della chiesa). Cassini ne suggerì la costruzione, all'interno della basilica di S. Petronio. E nel 1655 la fabbriceria gli affidò il progetto.

Perché ci interessa nella nostra storia?

Perché Cassini riesce a mettere in pratica un'idea che già aveva avuto Keplero per confermare il modello eliocentrico ad ellissi, ma non era riuscito a realizzare: mostrare che il diametro apparente del Sole visto dalla Terra è più grande o più piccolo a seconda del giorno dell'anno, cioè a seconda che ci troviamo più o meno vicino al Sole.

Come ci riuscì? Con una meridiana gigante!



Presenta un progetto unico:

La linea meridiana misura **67,84 m** e l'altezza del foro stenopeico è di **27,10 m**: la più grande al mondo. Cassini riporta questi risultati in "Specimen observationum Bononiensum", del 1656, dedicato alla regina Cristina di Svezia.

Durante un anno tropico il diametro solare apparente passa da un minimo di 1888" ad un massimo di 1952", comportando un valor medio di 1923".

* nel 1664 a Roma, Cassini ricomincia le osservazioni di Giove. LO SEGUE per ventinove rotazioni. E registra varie macchie stabili sul pianeta, tra le quali anche la “macchia rossa”.

Realizza anche tavole più precise sui satelliti di Giove che, in particolare, saranno usate nel 1675 da Olaf Römer nella determinazione della velocità della luce.

Studia Saturno e a lui si deve la scoperta dei suoi quattro satelliti : Giapeto nel 1671, Rea nel 1672, Dione e Teti nel 1684. Inoltre negli anelli di Saturno, Scopre la Divisione di Cassini a lui intitolata.

La fama da lui acquistata di grande astronomo e manager di grandi progetti scientifici, attira l'attenzione di **Colbert che, invita Cassini per realizzare il nuovo osservatorio a Parigi**, la cui costruzione era appena iniziata.

In Francia Luigi XIV crea nel 1666 L'Academie Royale des Sciences e il seguente anno, 1667, l'Observatoire Royal a sud di Parigi di cui Cassini diviene direttore .



Cassini-Huygens

mission to Saturn



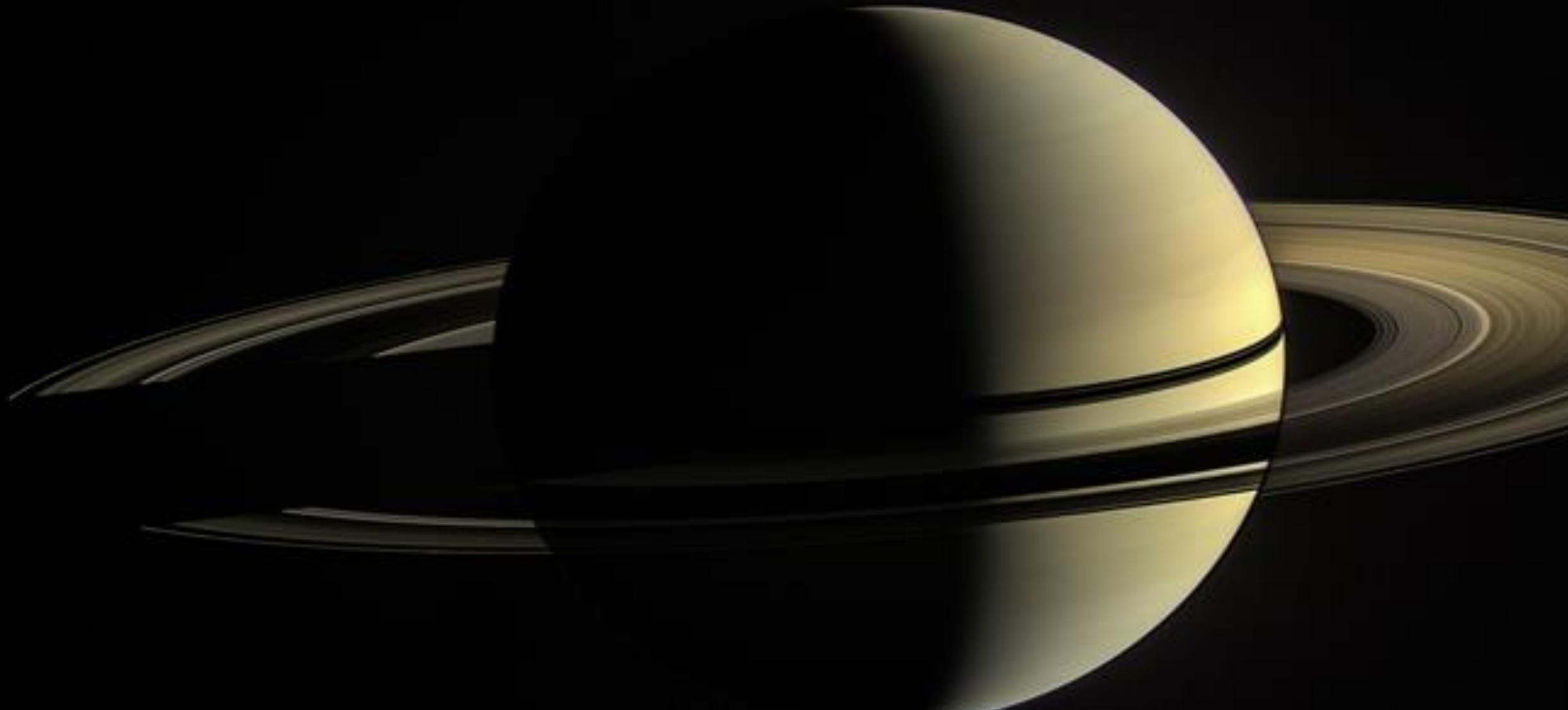
Cassini lanciata il 15 ottobre 1997. NASA, ESA (l'Agenzia spaziale europea) e l'Agenzia spaziale italiana (ASI)

Cassini era **veicolo spaziale** robotico inviato per **studiare Saturno** e il suo complesso sistema di anelli e lune

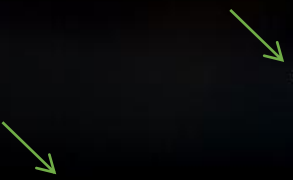
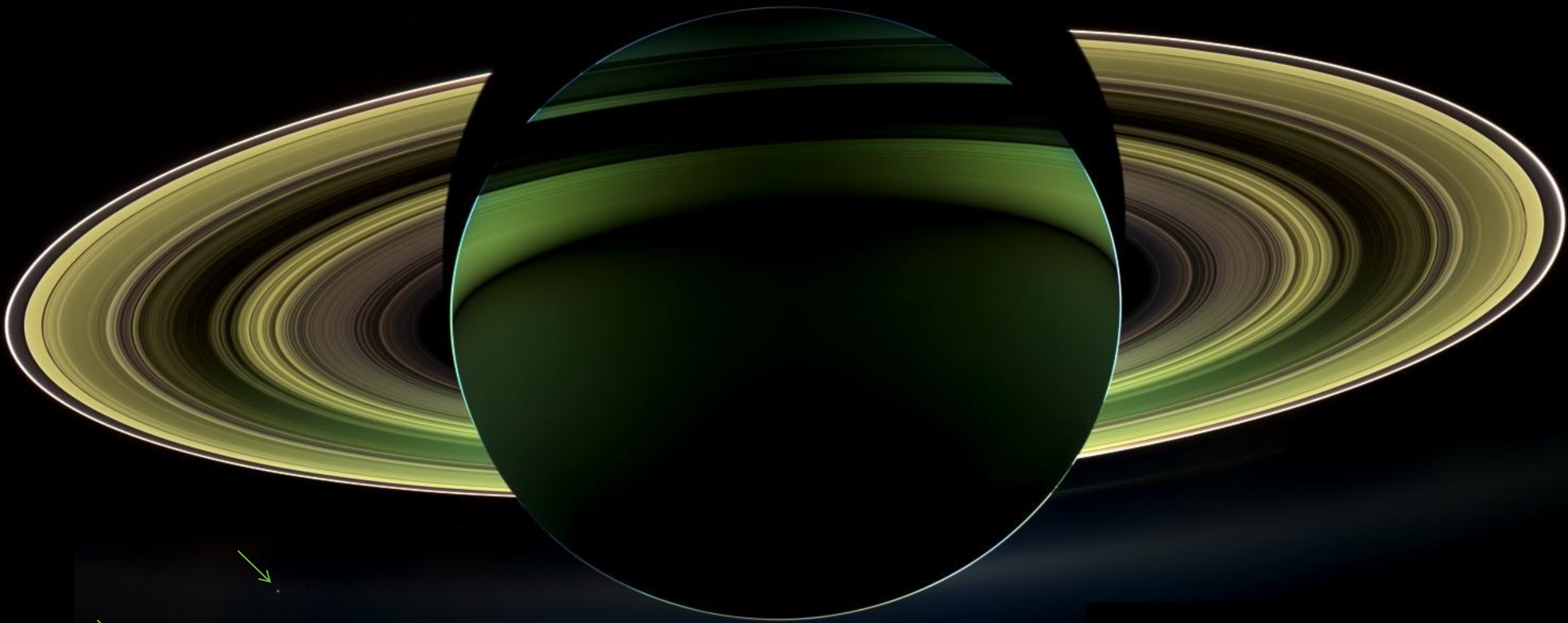
Portava con se una **sonda** chiamata **Huygens**. La sonda, si è paracadutata sulla superficie della più grande luna di Saturno, Titano, nel gennaio 2005.

Huygens ha restituito immagini spettacolari.. **La missione si è conclusa il 15 settembre 2017.**

Immagine di Cassini dall'orbita attorno a Saturno il 2 gennaio 2010.
Questa vista dai colori naturali è un composto di immagini scattate in luce visibile con la fotocamera ad angolo stretto della sonda Cassini a una distanza di circa 1,4 milioni di miglia (2,3 milioni di chilometri) da Saturno.

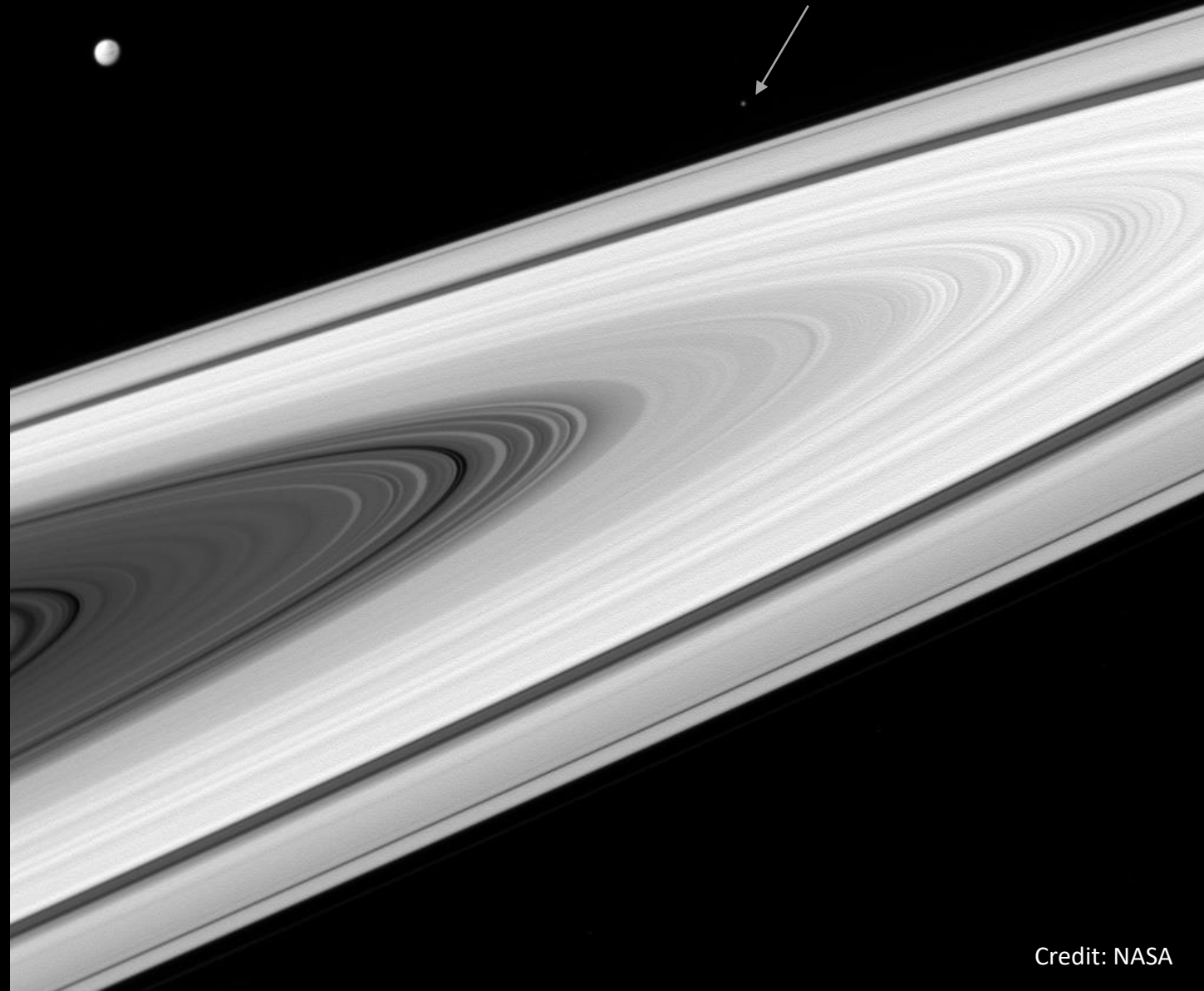


Cassini il 17 ottobre 2012 a una distanza di 800.000 chilometri da Saturno. **Il sole è dietro il pianeta**, che sta schermando le telecamere dalla luce solare diretta. **Encelado e Teti**.



Le immagini scattate utilizzando filtri spettrali a infrarossi, rossi e viola sono state combinate per creare questa visualizzazione dai colori avanzati. Le immagini sono state ottenute con la telecamera grandangolare della sonda

Principale divisione tra gli anelli di Saturno
nominata la “**divisione di Cassini**”.
solco profondo che divide in 2 l'anello



I magnifici anelli di Saturno, **Dione** (1123 chilometri di diametro) ed **Epimeteo** (113 chilometri di diametro). Questa immagine guarda verso il lato degli anelli illuminato dal sole . La vista è stata ottenuta a una distanza di circa 413.000 chilometri



19 luglio 2013. La freccia, che punta a un pallino blu indica la Terra. Siamo noi, visti da una distanza di 1,44 miliardi di chilometri.

• Image credit: NASA/JPL-Caltech



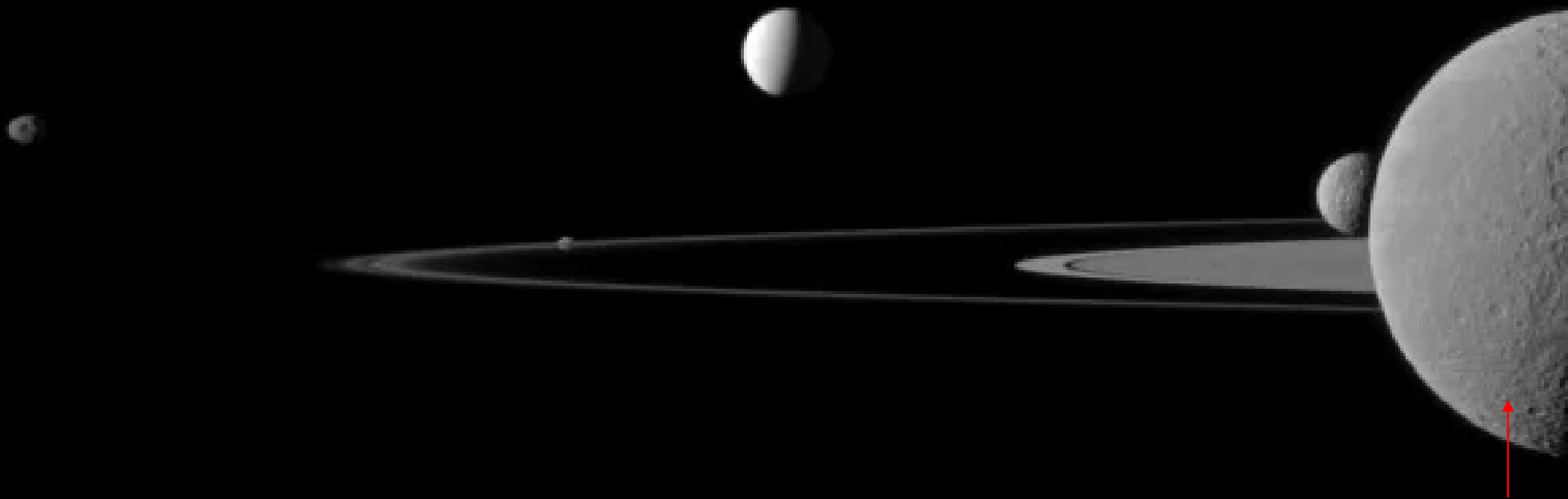
Credit: NASA

Questa immagine sembra uscita dalla fantascienza: tre delle lune di Saturno in mezzaluna. Titano, **Rhea**, e anche il minuscolo Mimas.



Giapeto, satellite di Saturno con la **caratteristica dicotomia** cromatica; come già aveva osservato GD Cassini, Giapeto è visibile solo sul lato ovest di Saturno e mai su quello est; da ciò, già Cassini aveva dedotto che Giapeto ha rotazione sincrona con Saturno e che un lato di è più scuro dell'altro.





Questa meravigliosa immagine mostra cinque delle 53 lune confermate di Saturno.

Da sinistra: Janus; la piccola Pandora, brillante luna di ghiaccio Encelado; Mimas, parzialmente oscurato; e in primo piano, la seconda luna più grande di Saturno, tagliata dal bordo della foto, **Rhea**.



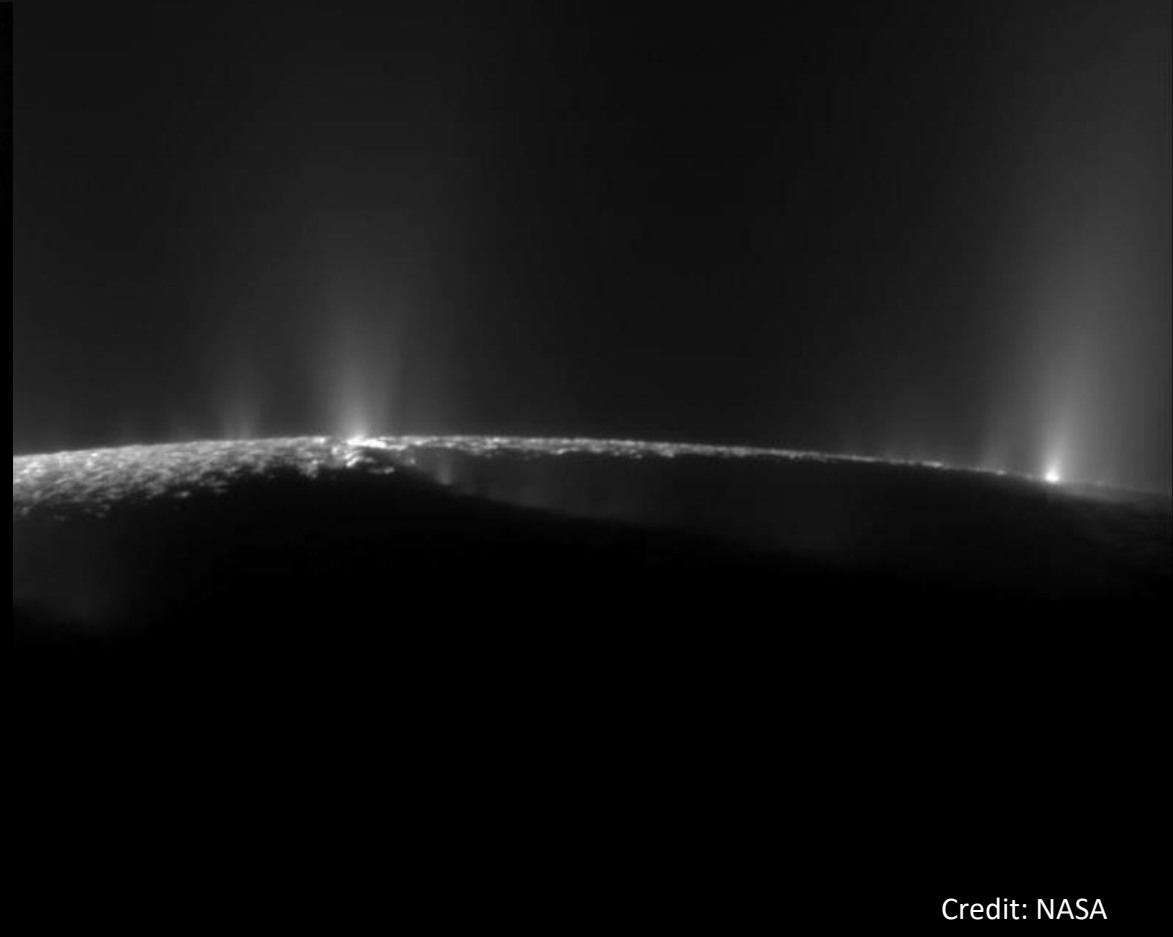
Credit: NASA

Titano con la luna Teti che scompare dietro osservato da Cassini il 26 Nov. 2009. Titano è più grande del pianeta Mercurio. Cassini ha catturato quest'immagine a colori naturali a una distanza di circa 1 milione di Km. da Titano

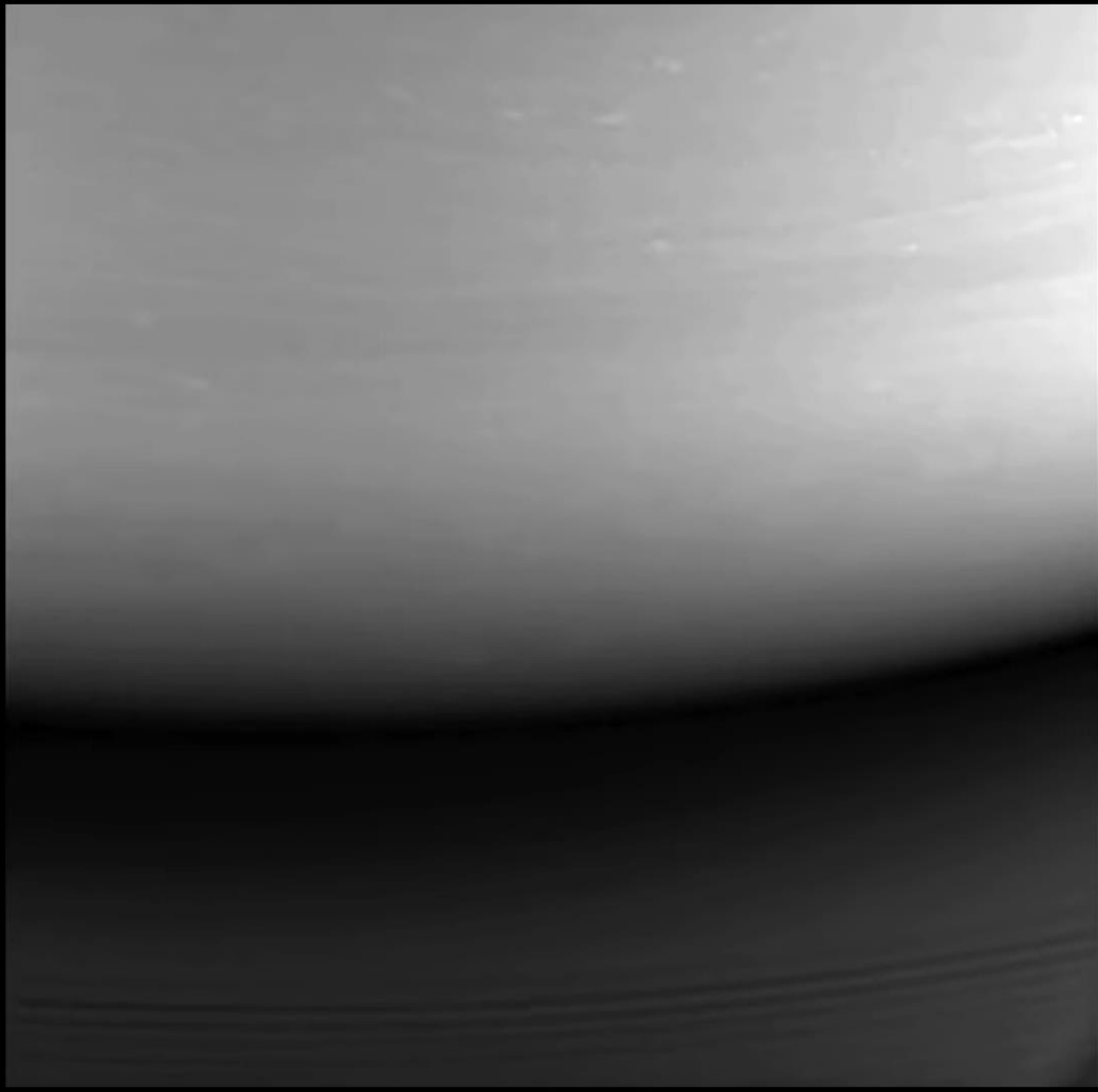
L'enorme luna Titano è vista qui mentre orbita attorno a Saturno. Sotto Titano ci sono le ombre proiettate dagli anelli di Saturno. Questa visualizzazione dai colori naturali è stata creata combinando sei immagini catturate dalla sonda Cassini della NASA il 6 maggio 2012.



Questo mosaico di 2 immagini è una delle visioni a risoluzione più alta acquisite da Cassini durante il suo survey del bacino di geyser che si trova nell'emisfero sud della luna di Saturno, Enceladus.



Una delle
ultimissime immagini
di Saturno, prese da
Cassini, nel posto in
cui entrerà in
atmosfera e si
disintegrerà



Jacques CACQUELART
menuisier de cette église
mort en 1687
Jean Dominique CASSINI
astronome
mort le 14 septembre 1712
Charles de SEVIGNE
marquillier et pénitent
mort le 26 mars 1713
Philippe de la HIRE
mathématicien
mort le 21 août 1718
ICI
témoins du peuple de Dieu



1672

Cassini, con Richer e Picard, compiono una prima misura di parallasse solare diretta.

ottiene un valore di $\pi_s = 9.5''$

$D_{TS} \sim 140\,000\,000\text{ Km}$

Acquaforte di S. Le Clerc 1671, Luigi XIV visita l'Accademia Reale delle Scienze
Metropolitan Museum of Arts, The Elisha Whittelsey Collection



Picard



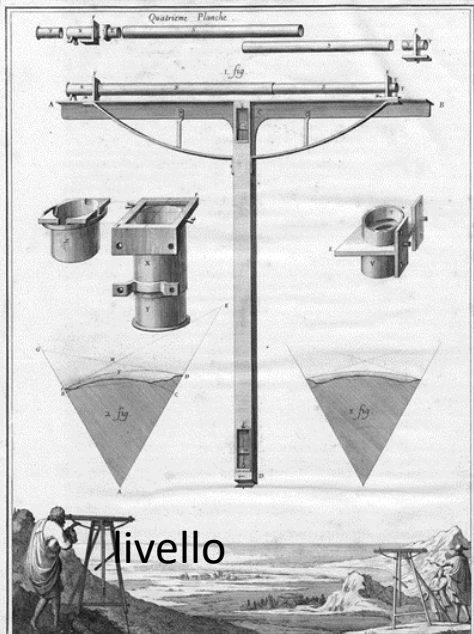
L'utilizzazione di un quadrante in orizzontale, dettaglio da La Mesure de la Terre.

Picard **geografo cartografo** e quando Luigi XIV richiese ai suoi accademici una carta del regno di Francia, presentò progetti e ideò strumenti per ottenere i dati necessari: incorporò il telescopio a strumenti per survey

La campagna avvenne tra il 1669 e il 1670. I risultati della campagna di Picard lo portarono a pubblicare nel 1671 il suo **Mesure de la Terre,**

Per il Raggio della Terra 6375 Km!!
Valore adottato dalla IAU nel 2009 per il raggio equatoriale della terra è **6378,xxKm**

"Con questo strumento si potrebbe determinare il livello in un sol colpo, a delle distanze molto grandi, molto oltre quelle segnate sulle tavola sopra"



Livello



Quadrante con telescopio

La nuova mappa toglieva un intero grado di longitudine di terreni sulla costa ovest. E si dice che per questo Luigi XIV abbia detto: Ho perso più territorio per colpa di questi astronomi che per colpa dei miei nemici!



Ho perso più terre per colpa di questi astronomi che per colpa dei miei nemici.
Quando gli hanno fatto la carta di Francia e gli hanno cassato un grado di terre in longitudine

CASSINI-RICHER-PICARD

Come misurare la parallasse del sole?

a) Una prima possibilità è quella di misurare parallassi più grandi di quella del Sole, e ricavare da queste, con la "terza legge Keplero", la **distanza Terra-Sole**.

Si cercherà allora di usare il pianeta che passa più vicino alla Terra. Qual è?

Dai noti rapporti tra le distanze, sappiamo che Venere è quello che ci passa più vicino ($d_{VT}/d_{TS} \sim 0.3$), seguita da Marte con $d_{MT}/d_{TS} \sim 0.5$.

Converrebbe quindi usare Venere, ma è sempre bassa sull'orizzonte,

quindi si usa Marte!

E nel 1672 Marte si trovava in opposizione!





Jean Picard (1620-1682)



G. Domenico Cassini, (1625 - 1712)

Cassini e Picard presero misure della posizione apparente di **Marte** da Parigi



Jean Richer (1630-1696)

Richer all'isola di Cayenne, nella colonia della Guyana francese (che si trova sulla costa, subito nord del Brasile).

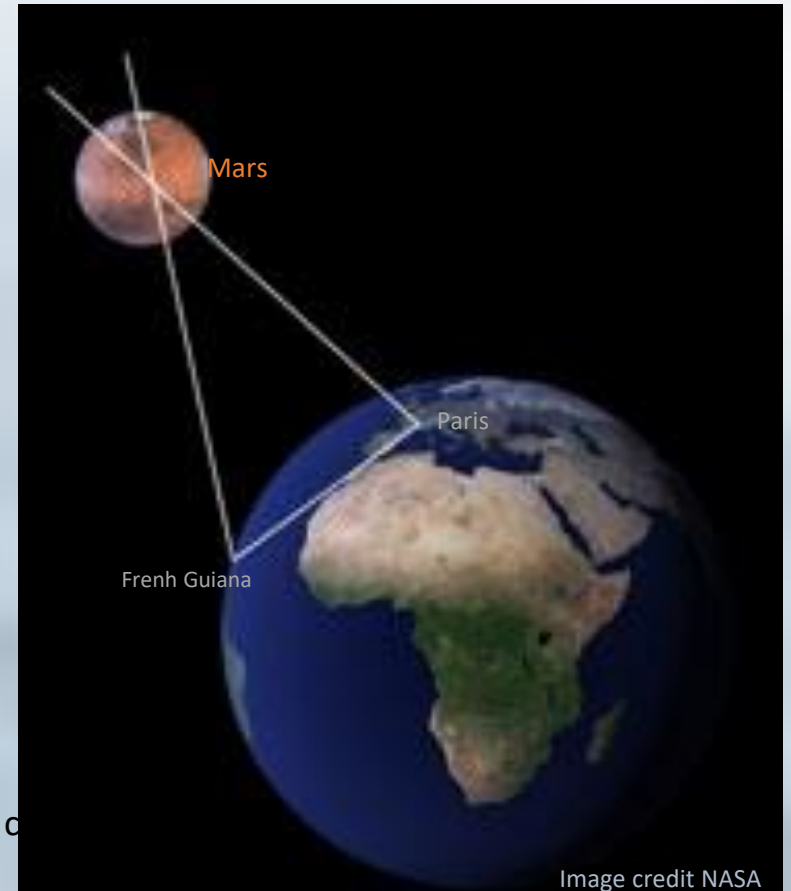
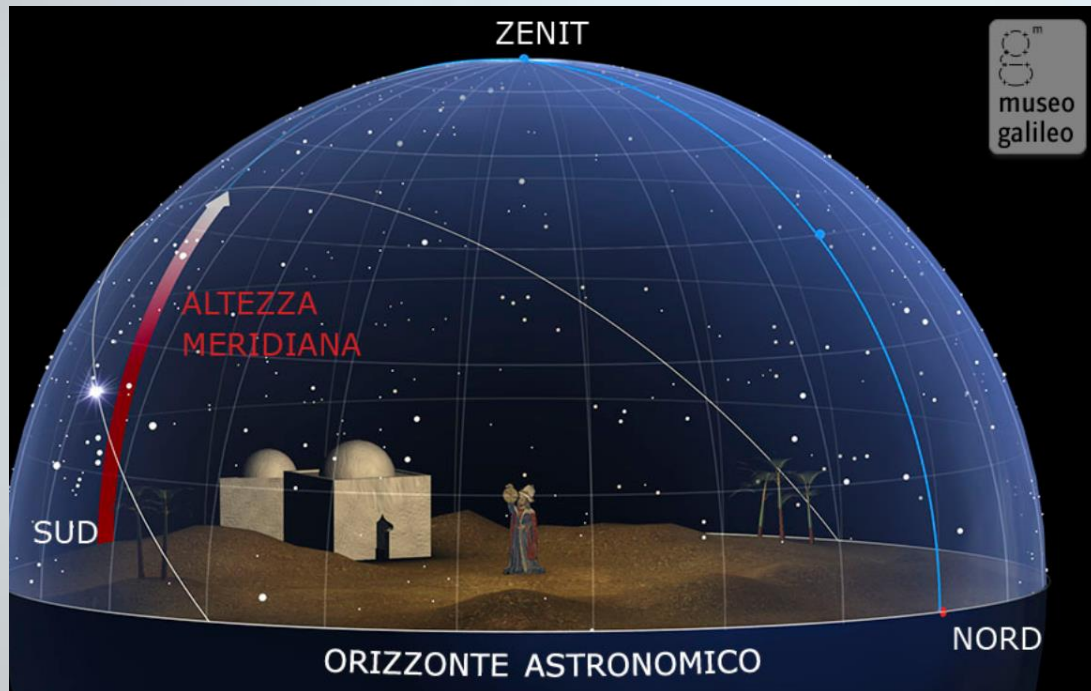


Image credit NASA

Come viene allora presa la misura della parallasse ?
Si prende la misura dell'ALTEZZA MERIDIANA di Marte **NON contemporaneamente**, ma a Parigi, quando Marte passa per il Meridiano di Parigi, e all'isola di Cayenne, quando Marte passa per il meridiano di Cayenne, . Questa differenza di tempo è pari alla differenza di longitudine tra i 2 posti.

Resoconto 1673

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,
Tome 1, 1673 (Résultats de Richer à Cayenne. Cassini)



<https://catalogo.museogalileo.it/galleria/AltezzaMeridiana.html>

1673. 170 HISTOIRE DE L'ACADEMIE ROYALE
une méthode assez sûre, & à laquelle on se peut fier.
M. Richer en Amérique comparoit la hauteur Meridienne de Mars à l'Etoile fixe la plus proche de cette Planette. M. Cassini le même jour comparoit à Paris cette même hauteur Meridienne à la même fixe. Si Paris & Caienne aussi différens en latitude qu'ils le sont, eussent été sous le même Meridien, & que Mars vût dans le même moment de l'un & de l'autre lieu, n'eût pas paru à la même distance de la fixe, il est certain qu'il faisoit parallaxe. Mais Paris & Caienne ne sont pas sous le même

"Richer in America ha confrontato l'altezza meridiana di Marte con la stella fissa più vicina a questo pianeta. Cassini lo stesso giorno ha confrontato a Parigi questa stessa altezza meridiana rispetto alla stessa stella fissa"

*ALTEZZA MERIDIANA=Ogni astro, a causa della rotazione terrestre, sorge e si alza sopra l'orizzonte fino a attraversare il meridiano locale dell'osservatore. Si chiama *altezza meridiana* l'angolo corrispondente all'arco del meridiano locale delimitato dal punto di transito della stella (culminazione) e dall'orizzonte astronomico.

Come avevano misurato la differenza di longitudine?

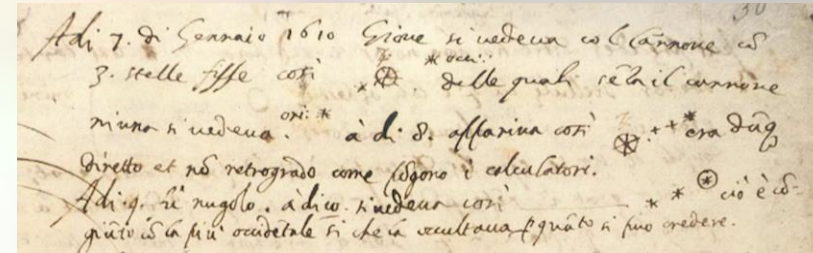
Avevano sfruttato il metodo proposto da Galileo per determinare la differenza di longitudine tra i 2 posti: si usavano le eclissi dei satelliti di Giove come **evento visto in contemporanea** da 2 osservatori a 2 longitudini diverse. Questo permetteva di sincronizzare gli orologi. Inoltre il **22 agosto 1672** (un paio di mesi prima dell'opposizione Marte) ci fu pure un'eclissi totale di Sole visibile sia da Parigi che dalla Cayenne che fu usata come ulteriore misura.

3h e 39min

Se guardiamo coordinate oggi:

Parigi	lat 48°51'60"N long 2°20'55"E	Quindi la differenza di longitudine è: $54^{\circ}40'55'' = 54.6819^{\circ} = 3.6454h =$ 3h e 38min e 44s In ottimo accordo con la misura di allora
Cayenne	lat 4°55'60"N long 52°19'60"W	

Gli orologi che avevano a disposizione erano orologi a pendolo. Un grande miglioramento nella precisione delle misure di longitudine per la navigazione si avrà dopo la metà del settecento con l'invenzione (**1735**) del CRONOMETRO (Harrison)

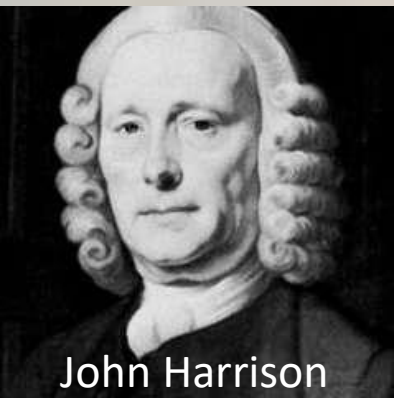


Brogliaccio di Galileo conservato presso la Biblioteca Nazionale di Firenze. Nelle prime righe Galileo riporta le posizioni dei satelliti di Giove osservate il giorno 7 ed 8 Gennaio 1610.

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,
Tome 1, 1673 (Résultats de Richer à Cayenne. Cassini)

Il est facile de juger que l'on ne manqua pas à prendre par diverses méthodes la différence de longitude entre Paris & Caienne, que l'on fixa à 3. heures 39', toutes compensations faites des variations qui se trouvoient dans les observations, & dans les pratiques qu'on avoit employées. La hauteur véritable du Pole à Caienne tirée des hauteurs solsticiales véritables, est de 4° 56' 17" $\frac{1}{2}$.

*"È facile indovinare che abbiamo preso la differenza di longitudine tra Parigi e Cayenne con diversi metodi, che abbiamo fissato a **3 ore e 39 minuti**, una volta fatte tutte le compensazioni dovute alla variabilità che si trova nelle osservazioni e ai diversi metodi che abbiamo usato."*



John Harrison

PROBLEMA: si deve tenere presente che, nell'arco di queste **3 ore e 39 minuti**, Marte si è spostato di moto proprio. Per ovviare a questo, precedentemente avevano preso una lunga serie di misure per definire con accuratezza questo moto proprio. Ma **6 ottobre 1672** Marte si trovava proprio al punto di svolta retrogrado, così che il suo moto, in ascensione retta, era praticamente nullo e la correzione da apportare minima.

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,
Tome 1, 1673 (Résultats de Richer à Cayenne. Cassini)

170 HISTOIRE DE L'ACADEMIE ROYALE
une méthode assés sûre, & à laquelle on se peut fier
M. Richer en Amérique comparoit la hauteur Meridienne de Mars à l'Etoile fixe la plus proche de cette Planete. M. Cassini le même jour comparoit à Paris cette même hauteur Meridienne à la même fixe. Si Paris & Cayenne aussi différens en latitude qu'ils le sont, eussent été sous le même Meridien, & que Mars vû dans le même moment de l'un & de l'autre lieu, n'eût pas paru à la même distance de la fixe, il est certain qu'il faisoit parallaxe. Mais Paris & Cayenne ne sont pas sous le même Meridien; & Mars dans le tems qu'il mettoit à passer du Meridien de Paris à celui de Cayenne, devoit par son mouvement particulier changer de distance à l'égard de cette Etoile fixe. Pour remédier à cet inconvenient, on avoit découvert par une longue suite d'Observations quel étoit le mouvement particulier de Mars, & combien il s'approchoit ou s'éloignoit de la fixe en 24 heures, & par conséquent dans les 3. heures 39' qui sont entre Paris & Cayenne. On avoit égard à ce changement de distance produit par ce mouvement particulier, & le surplus dont Mars paroïssoit plus ou moins éloigné de la fixe, étoit certainement la parallaxe qu'il faisoit d'un de ces lieux à l'autre. Comme la parallaxe

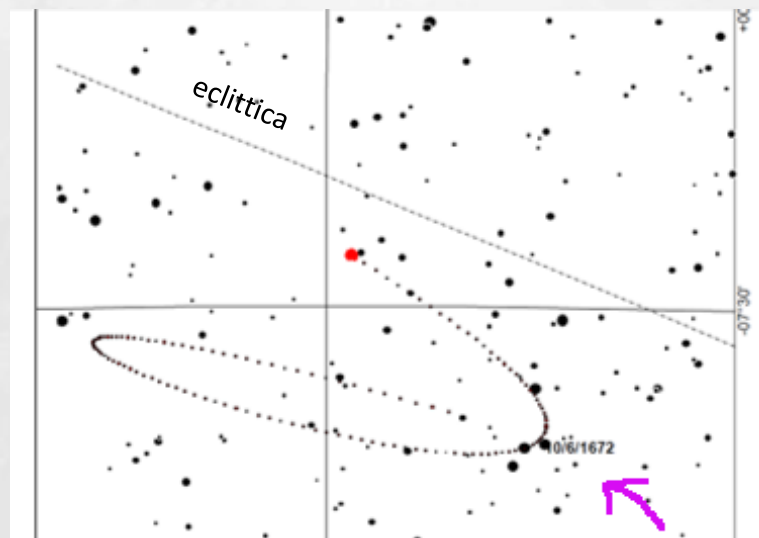
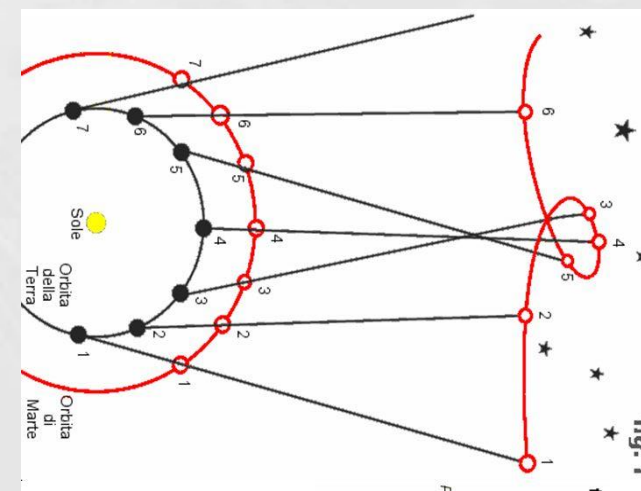


Immagine da <http://www.mccarthyobservatory.org/pdfs/pm020102.pdf>



Moto apparente di Marte, come visto da un osservatore geocentrico, cioè che ha moto di rivoluzione intorno al Sole ma non ha moto di rotazione attorno all'asse terrestre

*"Ma Parigi e Cayenne non si trovano sullo stesso meridiano; e Marte, nel tempo che ha impiegato a passare dal meridiano di Parigi a quello di Cayenne, ha dovuto, a causa del suo **moto proprio**, cambiare la distanza rispetto alla stella fissa di riferimento. Per rimediare a questo inconveniente, si è trovato, con una lunga presa di osservazioni, quale fosse il moto proprio di Marte, e di quanto si avvicini o allontani dalla stella fissa in 24 ore, e di conseguenza nelle 3 ore e 39 primi che ci sono tra Parigi e Cayenne."*

LA MISURA

Si misura la **parallasse di Marte** con baseline Parigi-Cayenne: **15"**;
da questa si ricava la parallasse orizzontale di Marte: **25" 1/3**
col raggio terra)

"Scegliendo le Osservazioni più esatte e le più compatibili tra loro, si è fissato a **15"** la parallasse di Marte con baseline Parigi-Cayenna, e di conseguenza la parallasse orizzontale a **25" 1/3 "**

Dalla **parallasse orizzontale di Marte** si ricava la parallasse orizzontale del **Sole**, usando i noti rapporti tra le distanze (in questo caso noti dalla teoria degli ovali di Cassini). **9,5"**

"... si trova che la distanza di Marte dalla Terra, quando gli è più vicino, come lo è stata durante le osservazioni fatte, sta alla distanza media Sole-Terra come 1 a 2/3. Essendo la parallasse orizzontale di Marte 25" 1/3, quella **del Sole** sarà dunque di **9" 1/2."**

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,
Tome 1, 1673 (Résultats de Richer à Cayenne. Cassini)

Par le choix des Observations les plus exactes & les plus conformes entre-elles, on fixe à **15"** la parallaxe que fait Mars de Paris à Cayenne, & par conséquent la totale à **25" 1/3**.

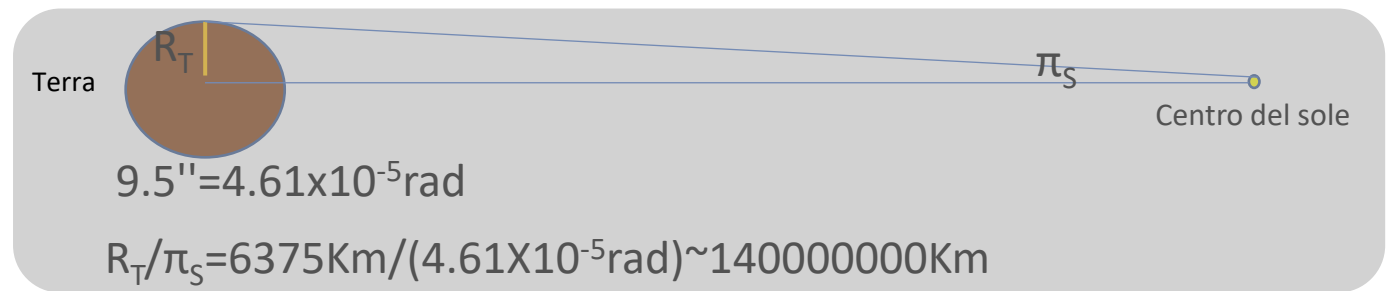
Rien n'est plus agréable ni plus merveilleux dans les vérités **Mathématiques**, que leur extrême fécondité.

Terre, lorsqu'il en est le plus proche, comme il étoit au tems des Observations précédentes, est à la distance moyenne du Soleil à la terre, comme 1 à 2 2/3. La Parallaxe totale de Mars étant de 25" 1/3, celle du Soleil fera donc de **9" 1/2**.

RISULTATO: La distanza terra sole è quindi in media **33 milioni di leghe** cioè **circa 140 000 000km**

[UA=149 597 870.700 Km]

$\frac{R_T}{d_{MT}} = \tan(\pi_M)$ $\frac{R_T}{d_{TS}} = \tan(\pi_S)$ Definizione parallasse orizzontale
 Prendo il rapporto
 $\frac{d_{TS}}{d_{MT}} = \frac{\tan(\pi_M)}{\tan(\pi_S)}$
 Sostituisco il rapporto tra le distanze scelto da Cassini $d_{TS} = 2,2/3 d_{MT} = 2,6 \overline{d_{MT}}$
 e il valore misurato della parallasse di Marte: $\pi_M = 25'' 1/3 = 25,3''$
 $\pi_S = \frac{25,3''}{2,6} = 9,5''$



ERRORE sulla misura :

"A partire da ciò, la distanza di Marte dalla Terra, quando le è più vicino, è di 11 o 12 milioni di leghe, e la distanza media **Terra Sole è 33 milioni di leghe**. Non dobbiamo meravigliarci se parliamo indifferentemente di qualche milione di leghe in più o meno. Un errore di **3 secondi d'arco** nella parallasse di Marte, cioè un errore che non è più grande dello spessore di un capello, corrisponde a 1 milione e 400 mila leghe"

Halley dirà

Per lui il metodo della parallasse diretta non può andar bene, data la non accuratezza degli strumenti angolari:

"quale osservatore, o quale strumento può determinare gli angoli celesti senza avere un **errore di almeno 5" d'arco**? Certamente colui che afferma tali cose, si dirà in seguito che è totalmente privo di conoscenza in materia."

E poi nel 1716 rincarerà la dose nella dissertazione:

"Ed è scarsamente possibile per alcuno determinare con certezza, per mezzo di strumenti, per quanto buoni, i singoli secondi, **o nemmeno 10 secondi**"

Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences,
Tome 1, 1673 (Résultats de Richer à Cayenne. Cassini)

d'ailleurs la grandeur du demi-diamètre de la terre. Par là, l'on fait que la distance de Mars à la terre, lorsqu'il en est le plus proche, est de 11. ou 12. millions de lieuës, & la moyenne distance du Soleil environ de 33. millions. Il ne faut point s'étonner que dans cette matiere, l'on parle si indifféremment de quelques millions de lieuës de plus ou de moins. Une erreur de 3. secondes dans la Parallaxe de Mars, c'est-à-dire une erreur qui n'est guere plus grande que de l'épaisseur d'un cheveu, répond à 14. cens milles lieuës. Tant ces espaces sont prodigieux!

1679 Catalogus Stellarum Australium, pag 45

jusmodi limitantur : Quis enim Observator vel quod Instrumentum sine quinque secundorum errore constanter Angulos coelestes metiri possit? Sane qui talia de seipso affirmat harum rerum prorsus imperitum ausim asserere. In hac methodo afflu-

A New Method of Determining the Parallax of the Sun, or His Distance from the Earth, 1716

"And it is scarcely possible for any one certainly to determine, by means of instruments, however nice, single seconds, or even 10 seconds"

b) Flamsteed (e Cassini da Parigi) Parallasse diurna:

Stesso posto ma si sfrutta la rotazione terrestre

La parallasse diurna (che sfrutta la rotazione della terra) è svantaggiata rispetto a quella trigonometrica, perché le misure sono prese verso l'orizzonte e non nel punto di massima culminazione, rendendo così massimi gli errori dovuti alla rifrazione atmosferica.

Prese misure della posizione di Marte durante la stessa opposizione del 6 ottobre 1672 a Derby da casa sua (ancora Greenwich non era stato costruito.) Anche in questo caso si doveva fare la correzione per il moto proprio, in quanto le 2 osservazioni erano separate da circa 6 ore (6 ore e 10 minuti).

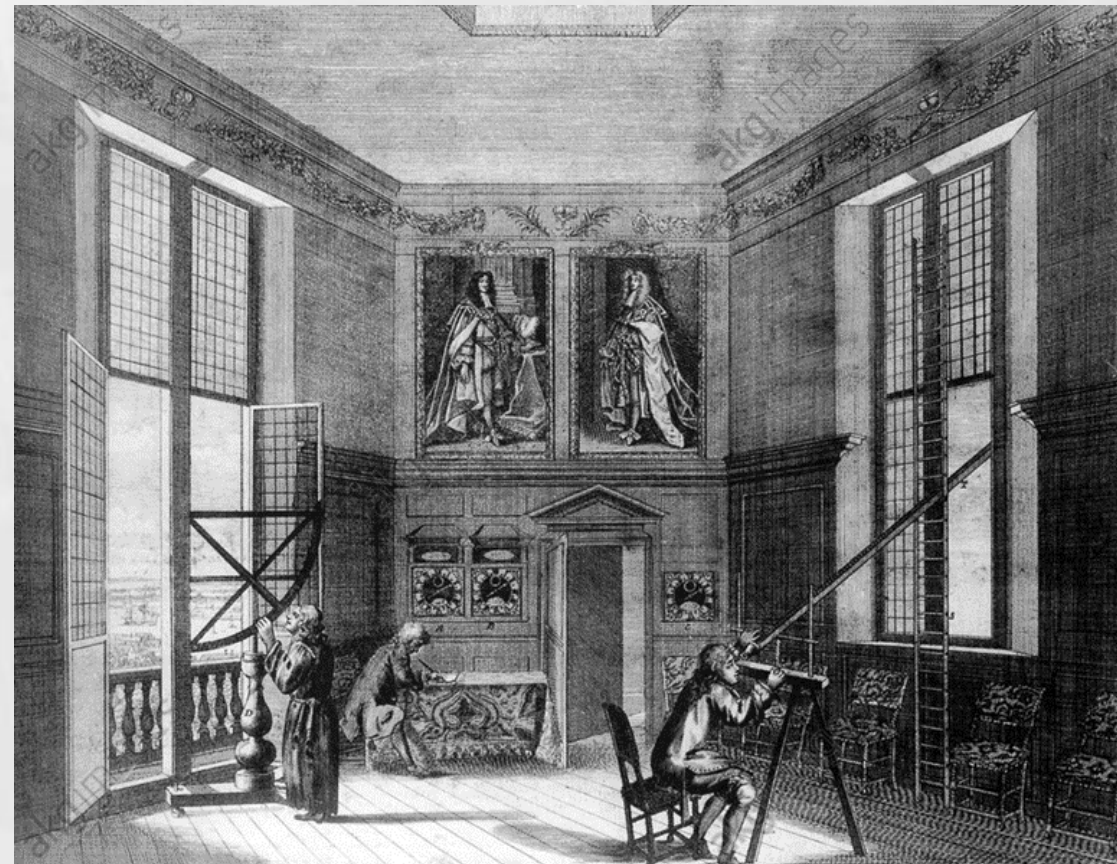
RISULTATO: Dopo aver elaborato i conti trovò come risultato **una parallasse del Sole di "quasi 10"**, che corrisponde a circa **130 000 000 Km.** [UA=149 597 870.700 Km]

ERRORE sulla misura

In seguito, trasferitosi a Greenwich, osserva 3 successive opposizioni di Marte, 1676, 1679, 1681, in particolare, quella del 31 gennaio 1679 **assieme ad Halley**. Qui ha strumenti più precisi (sestante da 6 piedi e 9 pollici, con viste telescopiche) e cerca anche di ovviare al problema della rifrazione; tuttavia ottiene nuovamente circa **10"** come a Derby. E in una misura successiva **12"**. Per cui con cautela alla fine dichiara che la parallasse orizzontale solare doveva essere **MINORE di 15"**.

Per Halley allora, alla diffidenza verso le misure di parallasse diretta acquisita a Sant'Elena, si aggiunge anche quest'altra esperienza di misura di parallasse diurna, che lo porterà a proporre un metodo completamente diverso

il transito di Venere!



Flamsteed col suo quadrante di legno da 3 piedi a Greenwich nella sala ottagonale (da acquaforte del 1676 Francis Place)

HALLEY



HALLEY (1656-1742)

Nasce a Londra 1656, giovane dimostrò grandi qualità e interessi scientifici, quando, già a 15 anni, costruì meridiane, studiò la bussola e i cieli ed entrò al collegio reale di Oxford.

Collaborò con Flamsteed, l'astronomo reale, che lo descrisse in una comunicazione alla Royal Society come un giovane talento che era stato presente alle osservazioni di Marte e lo aveva assistito in maniera scrupolosa.

Episodi scientifici principali di Halley cui dedicherò particolare attenzione

sono:

*1677 si reca all'isola di sant'Elena con lo scopo principale di fare un catalogo delle stelle dell'emisfero sud che pubblica al suo ritorno

"*Catalogus stellarum Australium*". Da qui osserverà anche un transito di Mercurio.

*1716 dissertazione alla Royal Society per proporre il transito di Venere come metodo per ottenere la distanza Terra-Sole con grande accuratezza.

*1718 dal confronto tra le misurazioni astrometriche degli astronomi.

"contemporanei" (Tycho) con quelle degli antichi (Tolomeo, Ipparco e altri) verifica che le stelle "fisse" hanno moto proprio.

*1720 succede a Flamsteed nella carica di primo astronomo reale.

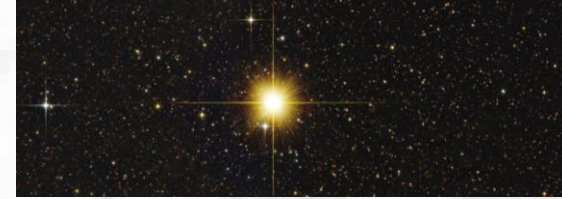


HALLEY (1656-1742)

A vast field of stars, including several prominent blue stars, set against a dark cosmic background. The text is centered and rendered in a white, sans-serif font with a subtle drop shadow.

Le stelle fisse
non sono fisse

(1718) LE STELLE FISSE NON SONO FISSE

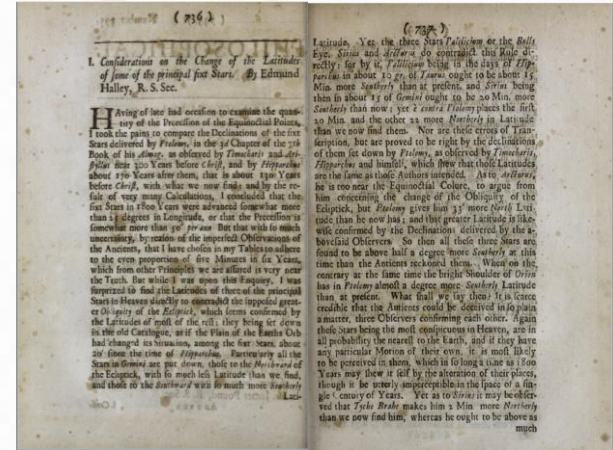


Arcturus
8 Dicembre 2017
Fotografo: G.Parker

Pubblica queste sua scoperta nel 1718

"Considerations on the change of the latitudes of some of the principal fixt stars"

E.Halley: Phil. Trans. Roy. Soc. London 30, 737



Halley stava studiando la precessione degli equinozi, confrontando i dati del suo tempo (di Tycho Brahe) con quelli catalogati da Tolomeo, che erano stati presi da Timocharis e Aristyllus nel 300 a.C., Hipparchus nel 130 a.C.

Confronta le declinazioni di 3 stelle fisse, **Sirius, Arcturus e Aldebaran** (Palilicium o Occhio di Toro), e trova che, oltre al previsto spostamento apparente dovuto alla precessione, c'era anche un ulteriore spostamento di posizione verso sud **di più di 30'**, che lui per primo attribuisce a un MOTO PROPRIO:
LE STELLE FISSE NON ERANO FISSE!

leggiamone i punti chiave

*"Avendo di recente avuto occasione di esaminare di quanto precedono i punti degli equinozi, mi sono preso la pena di **confrontare** le declinazioni delle Stelle fisse fornite da Tolomeo, nel terzo capitolo del settimo libro dell'Almagesto, come osservate da Timocharis e Aristyllus circa nel 300 a.C., e da Hipparchus circa nel 130 a.C., con ciò che abbiamo misurato adesso [...]"*

*...che tutte e 3 queste stelle sono trovate più di **mezzo grado** più a Sud al giorno d'oggi di come le avessero registrate gli Antichi. Che dobbiamo dire allora? [...] Queste 3 Stelle, se hanno un qualsiasi particolare MOTO PROPRIO, è molto probabile percepirlo in esse, che in 1800 anni possono mostrarlo con il cambiamento delle loro posizioni, sebbene sia altamente impercettibile in 100 anni.[...]"*

Le misure moderne dei moti propri sono consistenti con le conclusioni di Halley per Arturo e Sirio, ma evidenziano come per Aldebaran si tratti di un errore di calcolo o misurazione

Soltanto nel 120 anni dopo verranno fatte le prime misure che dimostreranno il moto proprio delle stelle.

HALLEY e il TRANSITO DI VENERE

il 28 ottobre 1677 a Sant'Elena Halley registra sia l'ingresso che l'uscita di Mercurio dal disco solare. Anche Jean **Charles Gallet** osserva l'ingresso, da Avignone in Francia, mentre per tutti gli osservatori in Inghilterra il cielo era coperto dalle nuvole. **Fu qui che per la 1 volta realizzò l'idea che un'accurata misura del transito di Venere**, fatta da 2 osservatori molto distanti tra loro, sulla terra, avrebbe

" dato una dimostrazione della parallasse del sole che fino a quel momento non era mai stata provata se non da argomenti probabili"

datata 22 Novembre 1677

come scrisse in una Lettera a Sir Moore

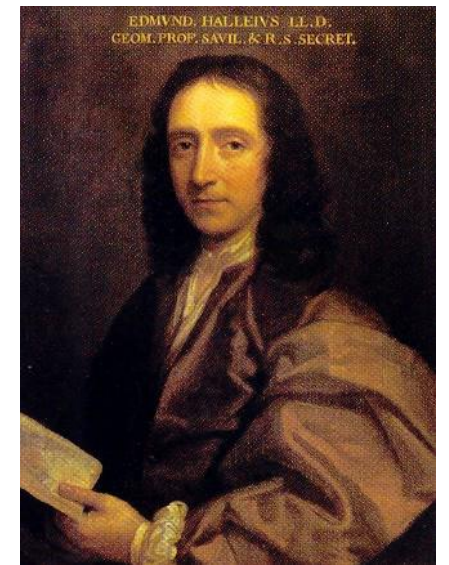
(uno dei suoi 2 patroni e sponsor della missione, e come per altro aveva già suggerito James Gregory nel 1663, nella sua "Optica Promota").

Al suo ritorno in Inghilterra Halley, supportato anche da Robert Hooke, provò a fare dei conti mettendo insieme le sue misure (prese a S.Elena) e quelle di Gallet (Avignone), ma ne ricavò una misura completamente sballata: **45"** d'arco (come parallasse Sole)



"but such hath been my ill fortune, that the Horizon of this Island is almost always covered with a Cloud, which sometimes for some weeks together hath hid the Stars from us, and when it is clear, is of so small continuance, that we cannot take any number of Observations at once"

Lettera Halley a Sir Moore, 1677



In ogni caso aveva posto i semi per una più grande impresa: nel catalogo propone per la **prima volta** come un transito di Venere, con una maggiore parallasse rispetto a Mercurio, avrebbe permesso una misura molto più accurata della P solare.

Il successivo transito di V sarebbe avvenuto il 6 giugno 1761 †

Halley e IL TRANSITO DI VENERE

Nel 1716 (50 anni dopo) Halley che aveva già acquisito una grande autorità ed influenza, fa una **dissertazione alla Royal Society**, in cui esorta astronomi e non (e i governi che dovevano finanziare) ad andare, nei successivi transiti di **Venere (1761 e 1769)**, in svariate località nel Mondo, e raccogliere le misure come da lui indicato e suggerisce poi un metodo per elaborare i dati presi e ricavare la parallasse del **Sole**. Lui non sarebbe più stato in vita!

***Il metodo si basa su una misura diretta di TEMPO (l'intervallo temporale di transito di Venere sul disco solare) per ottenere la parallasse del Sole: gli orologi erano più accurati delle misure angolari prese col telescopio!**

(A Sant'Elena, aveva constatato di persona che le misure, prese anche solo con un orologio a pendolo, potevano raggiungere la precisione di 1 secondo sulle misure temporali:

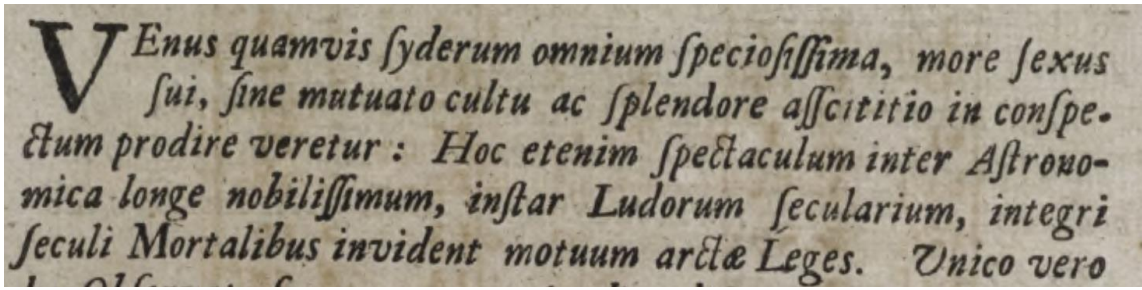
"questi tempi, come ho trovato con l'esperienza, possono essere osservati anche fino ad un singolo secondo di tempo"

***"Non è necessario essere scrupolosi nel trovare la latitudine del luogo o nel determinare accuratamente la longitudine".**

In Francia Joseph-Nicholas Delisle (1688 – 1768), Professore di Astronomia al Collegio di Francia di Parigi, propose un approccio un po' diverso che necessitava soltanto di **una misura temporale** (o ingresso o uscita del pianeta).

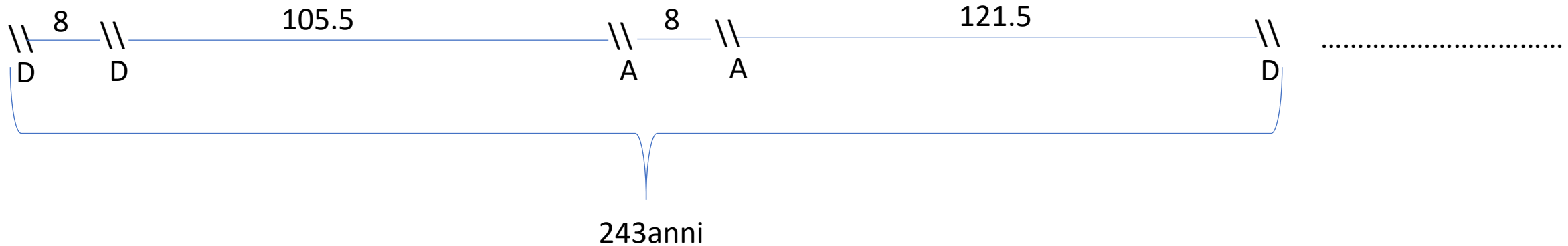
Ma era necessario conoscere con precisione lat. e long. del posto. Il vantaggio era contro le nuvole

* Periodicità dell'evento:



"Venere, infinitamente bellissima tra tutte le stelle, com'è proprio della sua natura femminile, con eleganza propria e splendore riflesso, esita a mostrarsi davanti: questo spettacolo, di gran lunga nobilissimo tra gli eventi astronomici, come i giochi secolari, è negato ai mortali per un intero secolo dalle strette leggi del moto."

I transiti di Venere, a differenza di quelli di Mercurio (che avvengono ogni 13-14 anni), sono un fenomeno **molto raro**. Halley prova a calcolare quando saranno i successivi transiti di Mercurio e Venere, ma poiché fino ad allora "dalla creazione" soltanto un transito era stato osservato (da Horrocks nel 1639), e aveva fornito qualche dato su cui basare i calcoli, le previsioni, come lui stesso ammette, non avrebbero potuto essere perfette; riesce comunque a prevedere con esattezza le date dei successivi transiti: 6 giugno 1761, 4 giugno 1769). Oggi sappiamo che, Per un buon arco temporale (~2000anni) la periodicità è **243=8+105.5+8+121.5anni** (2 al nodo ascendente e 2 al nodo discendente).



Chiamiamo congiunzione inferiore=TVS in quest'ordine (con stessa ascensione retta indipendentemente dalla declinazione).

Le congiunzioni inferiori sono frequenti, circa ogni 1,5 anni, ma, a causa dell'inclinazione del piano orbitale di Venere (3.4°), avere una congiunzione non è sufficiente per avere un allineamento e quindi un transito: affinché la linea di vista Terra-Venere cada sul disco solare, Terra e Venere dovranno trovarsi in prossimità della linea dei nodi (=intersezione eclittica con piano orbita Venere)

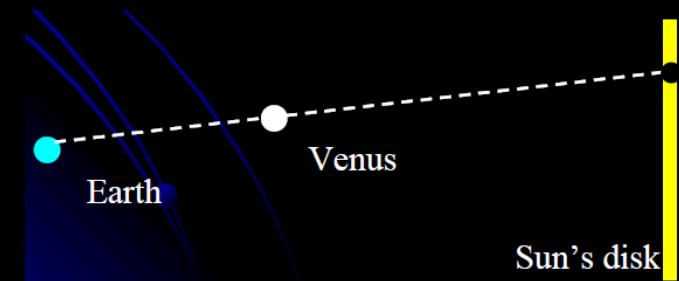
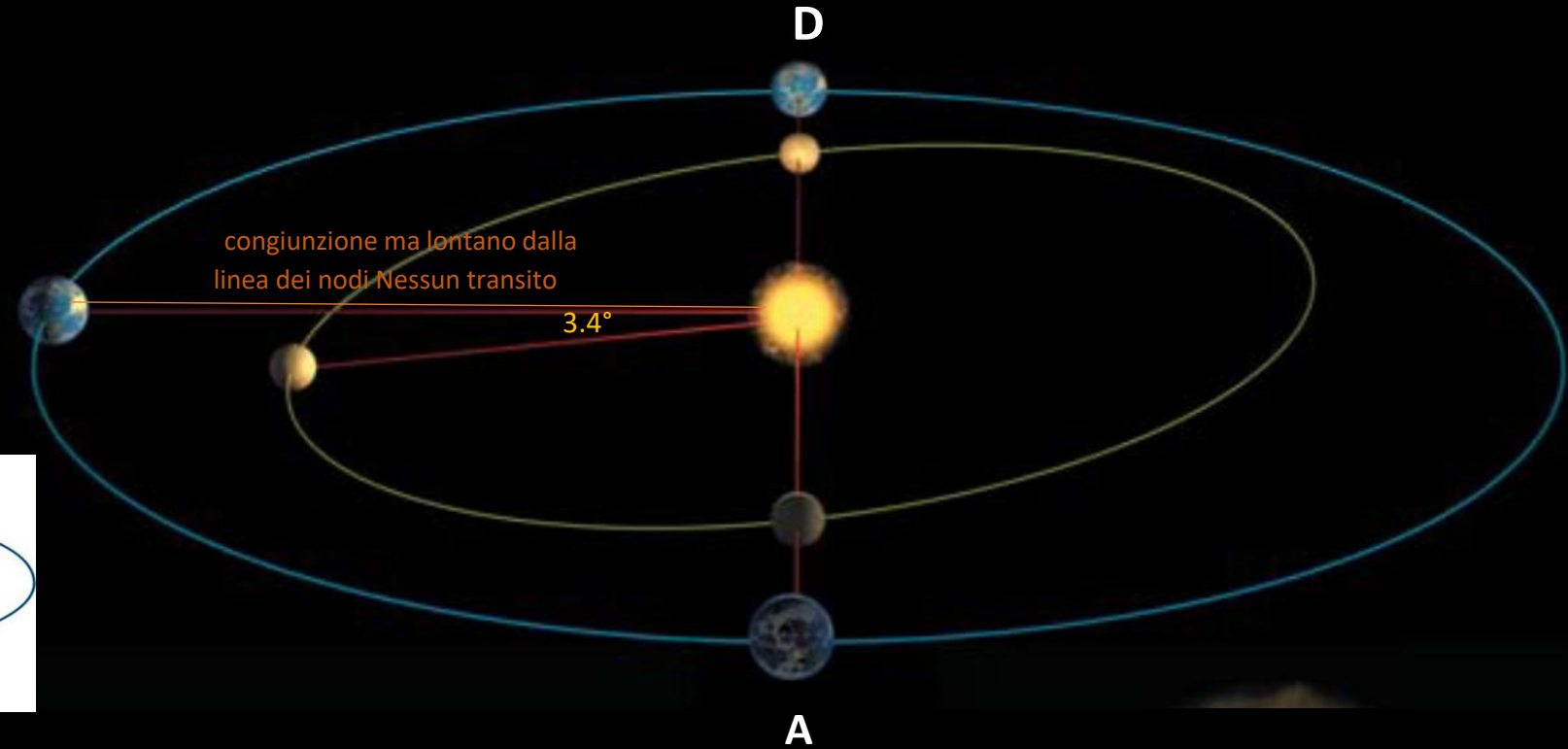


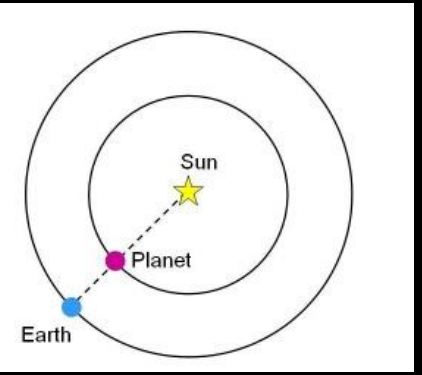
Immagine tratta da J.S.Reid, The Transit of Venus <https://homepages.abdn.ac.uk/nph120/astro/vt.pdf>

Nodo discendente dove Venere,, è vista dalla Terra discendere lungo la sua orbita
Nodo ascendente dove Venere, è vista dalla Terra, salire lungo la sua orbita

Transito solo se c'è un allineamento: la congiunzione avviene sulla linea dei **nodi**

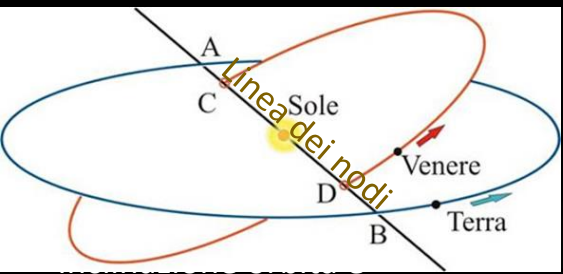


Allineamento coplanare



Congiunzione inferiore

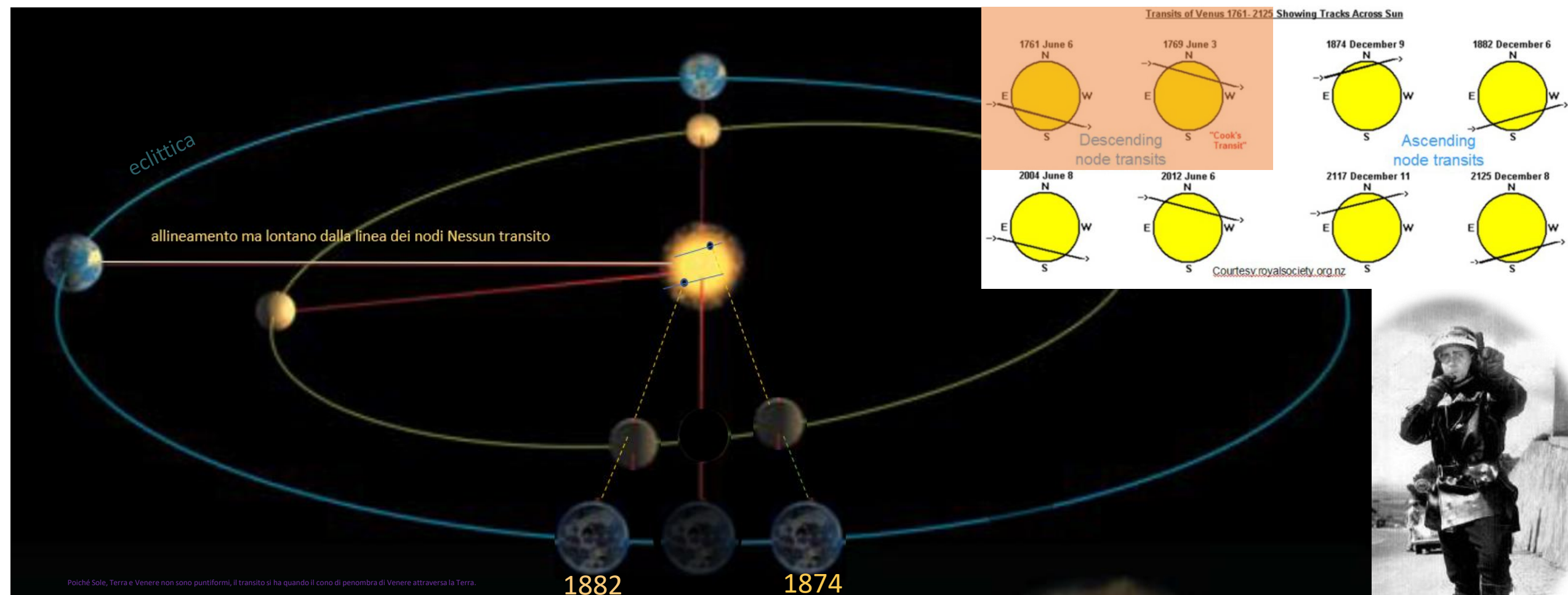
E riferendoci a venere



linea dei nodi 3,4°

Posizione e inclinazione del tragitto di Venere proiettato sul disco solare.

- *Il transito dura alcune ore, durante le quali il pallino entra, transita ed esce dal disco solare, e ne registriamo il percorso.
- *Il percorso è inclinato rispetto all'eclittica, verso l'alto ↗ o il basso ↘ a seconda che ci si trovi al nodo ascendente o discendente
- *c'è un angolo di libertà di circa 3.5°, perché si veda la proiezione di Venere sul Sole. In figura, se l'allineamento cade a sinistra della linea dei nodi, la Terra si trova sopra Venere e proietterà un percorso nella metà inferiore del disco solare (come nel 1882); mentre se l'allineamento cade a destra della linea dei nodi, la Terra si trova sotto Venere e proietterà un percorso nella metà superiore del disco solare (come nel 1874).

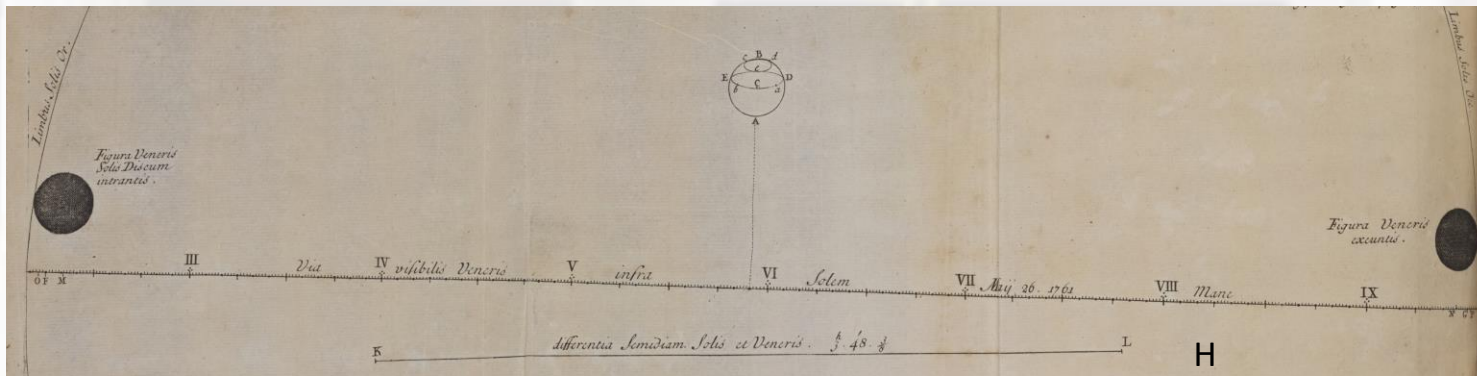
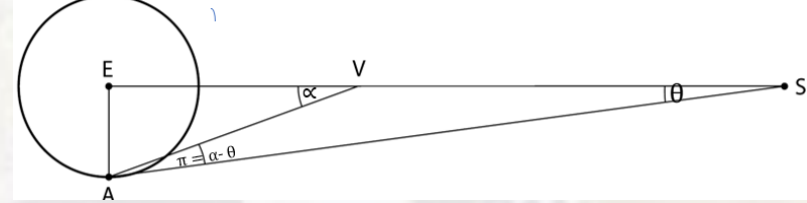


Poiché Sole, Terra e Venere non sono puntiformi, il transito si ha quando il cono di penombra di Venere attraversa la Terra.

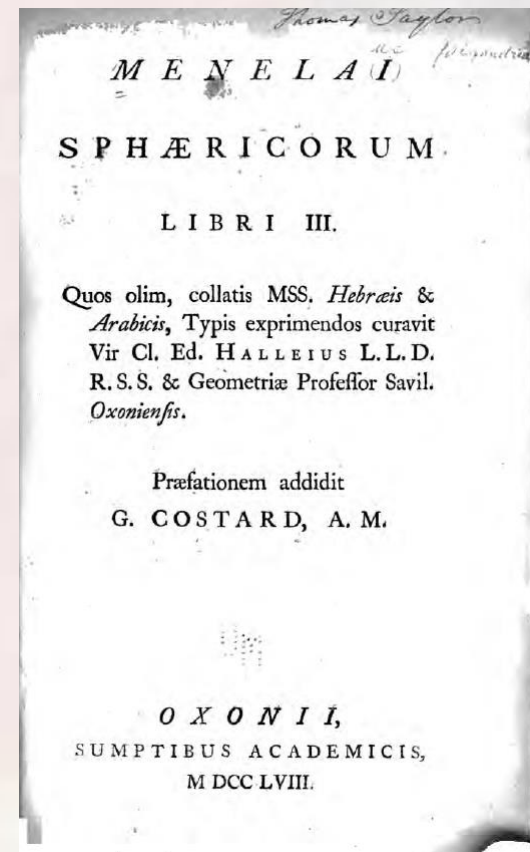
Il metodo di Halley.

Sebbene nella dissertazione Halley non entri nei dettagli, il principio essenziale del suo metodo è il seguente:

a partire dalla differenza tra 2 tempi di transito come visti da 2 osservatori separati da una differenza di latitudine la più grande possibile, si ricava la parallasse relativa ($\pi_V - \pi_S$) (differenza tra la parallasse (orizzontale) di Venere e quella del Sole ($\rightarrow \pi_V$); e da quest'ultima si ricava, dai noti rapporti tra le distanze (terza Keplero), la distanza Terra Sole.



Halley 1716 Methodus Singularis qua solis parallaxis sive distantia a terra ope veneris intra solem conspiciende tuto determinari poterit



L'importanza della dissertazione di Halley, sta nella grande accoglienza e influenza che ebbe, grazie alla sua autorità e prestigio: centinaia di astronomi e non si mobilitarono, sovvenzionati dai governi o privatamente, per andare ad osservare i transiti di Venere del 1761 e 1769 nelle più remote parti del Mondo (dalla Siberia all'Indonesia):

"[...]la parallasse del Sole può essere determinata [...]senza altre qualificazioni nell'osservatore se non la fedeltà e la diligenza, pur con poche capacità in astronomia!"



Ricostruzione degli strumenti usati da Cook nel 1769



Immagini tratte da A.Murray, D.Howse, Lieutenant Cook and the transit of Venus, 1769
Astronomy & Geophysics, Volume 38, Issue 4, August-September 1997, Pages 27–30
<https://academic.oup.com/astrogeo/article/38/4/27/224198> [18]



Replica dell'Endeavour, barca usata da Cook nel 1769

METODO DI CALCOLO

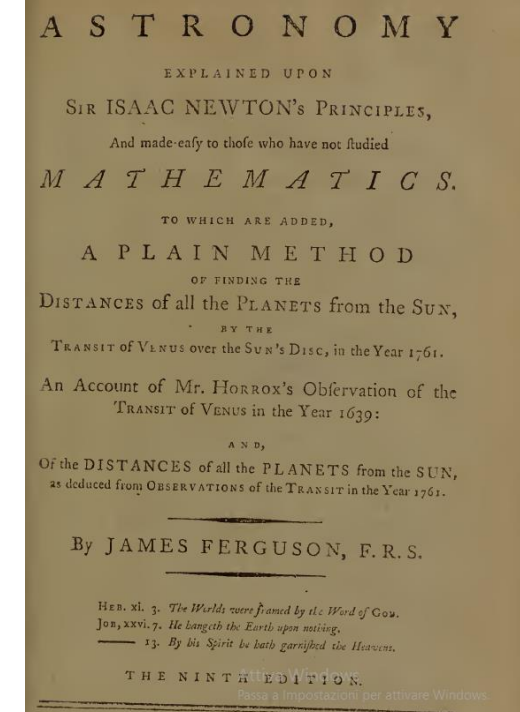
Per quanto riguarda metodo di calcolo, **non esiste evidenza che il suo metodo fu usato da alcuno degli astronomi che fecero i calcoli; ma vennero preferiti in generale metodi grafici.**

Come mai? Prima di tutto Halley nella dissertazione dà solo una traccia del suo metodo di calcolo, senza entrare nei dettagli, riproponendosi, come dice a fine dissertazione,

"di spiegarli in un'altra occasione",

ma purtroppo non lo fece mai. Inoltre, la dissertazione fu pubblicata in latino e chi la tradusse in inglese e la inserì nel suo **Trattato di Astronomia** (1761-64) fu **Ferguson**, che però, disse esplicitamente che il suo metodo non poteva essere usato (*"mostriamo che l'intero metodo proposto dal Dottore non può essere messo in pratica e perché"*) e ne propone una versione grafica (*"io seguirò un altro metodo"*), che fu, di fatto seguita da molti.

Va segnalato tuttavia uno studioso contemporaneo (L.W.B.Browne) [3] che ha provato a fare la ricostruzione più plausibile del metodo di Halley e la ha applicata alle misure prese da Cook a Tahiti nel 1769, trovando un valore di $\pi_s = 8.61''$ al tempo del transito, e concludendo che l'approccio di calcolo di Halley, come da lui plausibilmente ricostruito, dà risultati eccellenti per la determinazione della distanza Terra-Sole.



RISULTATI E ERRORE

L'errore previsto sulla parallasse del Sole

L'errore previsto da Halley, **di un secondo di tempo**, corrisponde nella misura della distanza Terra-Sole a un errore relativo di 1 parte in 500.

E invece...

Le misure prese nel 1761, non diedero i risultati sperati:

1761: nuvole, guerre (guerra dei 7 anni tra (principalmente) Francia e Inghilterra), pirati e goccia nera.

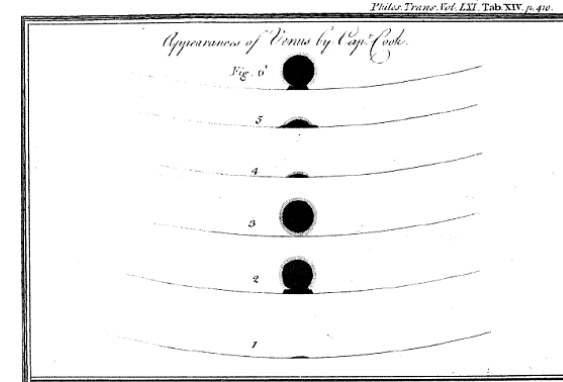
Oltre all'impossibilità per molti di vedere il transito causa nuvole, era anche in corso la guerra dei 7 anni tra (principalmente) Francia e Inghilterra, che fu combattuta anche nei territori coloniali, e inoltre, per qualche sfortunato, anche i pirati ci misero del loro. Ma l'imprevisto fisico più importante fu la cosiddetta "**goccia nera**": al momento di entrare o uscire dal bordo del disco Solare, l'ombra di Venere non si staccava nettamente, ma restava connessa al bordo, dando all'ombra una forma appunto di goccia. Questo fenomeno fece aumentare di molto l'errore previsto di 1 secondo di tempo, nei casi peggiori fino anche ad 1 minuto.

Così, una volta rientrati in patria, i calcoli che gli astronomi fecero, diedero dei risultati per la parallasse solare che variavano tra gli 8.5" di Short (inglese) ai 10.5" di Pingrè (francese), per cui non ci fu praticamente nessun miglioramento rispetto a ciò che già si sapeva. (Cassini 9.5")

1769: un po' meglio, ma sempre goccia nera.

Tuttavia nessuno si perse d'animo, e per il transito del 1769 ci furono preparazioni anche maggiori; anzi ci fu pure chi rimase in sito per tutti gli 8 anni fino al 1769 (G. Le Gentil), sperando che le misure prese per la prima volta gli avessero insegnato qualcosa e che ora, più preparato, avrebbe ottenuto risultati migliori. (Tuttavia molti degli altri osservatori in realtà andarono impreparati e furono colti di sorpresa dalla goccia nera).

I risultati del **1769** sembravano accordarsi attorno ad un valore di **8.5"**



Sketch di Captain Cook, pubblicato nelle Phil. Trans. Roy. Soc.



Newcomb, Popular Astronomy

Per ottenere un risultato definitivo, che analizza i dati sia del 1761 che del 1769 in modo soddisfacente, si devono attendere più di 50 anni, quando il tedesco **Encke**, nel **1835**, dà come risultato definitivo:

π_s dalle osservazioni del 1761:	8.53"
π_s dalle osservazioni del 1769:	8.59"
π_s più probabile considerando entrambi i transiti:	8.571"

E a cui corrisponde un valore per la distanza Terra-Sole di:

$$d_{TS} = 153\,500\,000 \text{ Km}$$

Dando come errore probabile **0.037"**

*Errore probabile = 0.74 errore medio o standard

Questo risultato fu ritenuto valido per i successivi 30 anni.

Siamo nell'800, ed **altri metodi erano diventati** competitivi con quello del transito di Venere.

In particolare, metodi che sfruttavano la conoscenza della velocità della luce, tra cui il più importante, quello che consisteva di sfruttare l'aberrazione di Bradley.

D'altra parte anche il metodo del transito di Venere aveva più assi nella manica: oltre ad avere telescopi e orologi migliori, ora c'erano a disposizione anche le lastre fotografiche.

Simon Newcomb, americano, prese a cuore questa misura, tanto che fece costruire un enorme ELIOSTATO, su misura per i transiti di Venere dell'800.

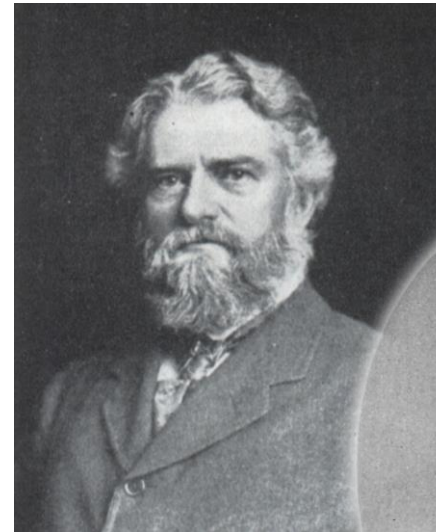
Inoltre egli collaborò con Michealson in più esperimenti che sfruttavano la velocità della luce, in particolare per ricavare la distanza TS.

RISULTATI:

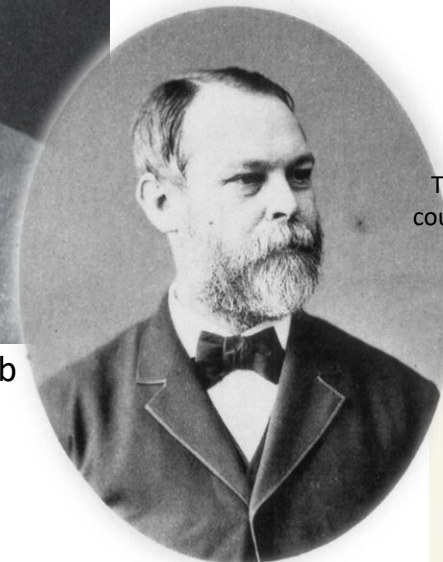
1896: congresso internazionale di Parigi:
vince il sistema di costanti astronomiche di Newcomb:

$$\pi_S = 8.800'' \quad \text{Errore probabile} = 0.038''$$

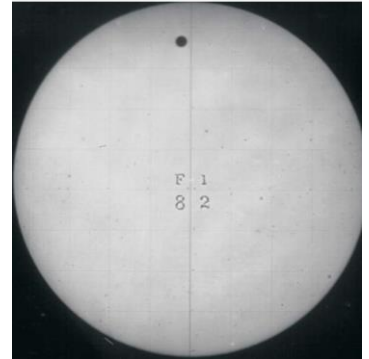
Tale valore è ricavato dando un peso 2 alle misure dei transiti di Venere e peso 40 alle misure che sfruttano la velocità della luce. [7]



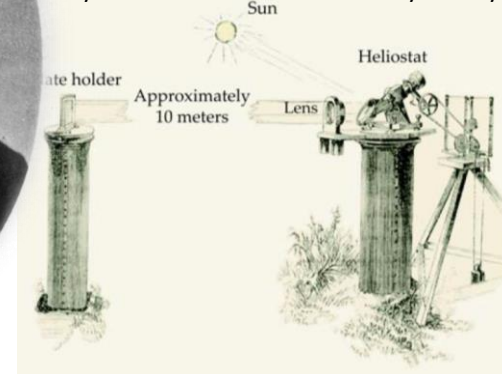
Simon Newcomb



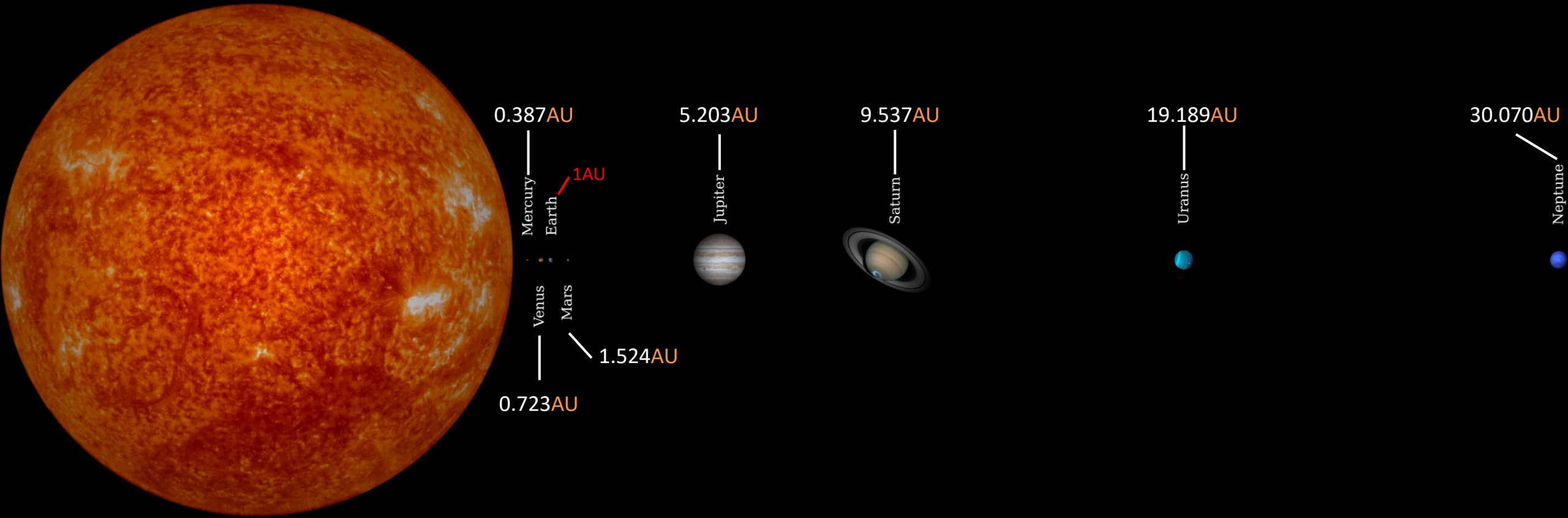
William Harkness



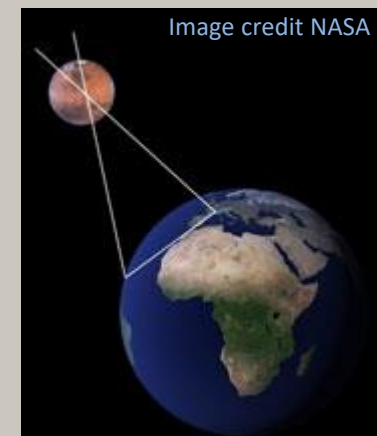
Transit of Venus photographic plate (1882)
courtesy of the U.S. Naval Observatory Library



Newcomb, popular Astronomy (7° ed)



Grazie per
l'attenzione



BIBLIOGRAFIA

- [1] Brahe T. Astronomia Instauratae Mechanica (1598)
- [2] Brahe T. Astronomiae Instauratae Progymnasmata (1602)
- [3] Browne L.W.B. Arch. Hist. Exact Sci. 59 (2005) 251–266
- [4] Capaccioli M. L'incanto di Urania. Venticinque secoli di esplorazione del cielo, Carocci Ed. (2020)
- [5] Copernicus N. De Revolutionibus Orbium Coelestium (1543)
- [6] Dick S. Wayne O. Love T. Journal for the History of Astronomy, xxix (1998), p. 221
- [7] Dick S. Space, Time and Aliens, Collected Works on Cosmos and Culture, Springer (2020)
- [8] Ferguson J. Astronomy Explained Upon Sir Isaac Newton's Principles, and made easy to those who have not studied mathematics. (1°ed 1756, 9°ed 1794)
- [9] Halley E. Catalogus Stellarum Australium (1679)
- [10] Halley E. Phil. Trans. (1683-1775), Vol. 16 (1686 - 1692), 511-522
- [11] Halley E. Phil. Trans. Roy. Soc. London, xxix, (1714–1716), No 348, 454–64. (traduzione in inglese nel libro di Ferguson, o versione leggermente ridotta in <https://eclipse.gsfc.nasa.gov/transit/HalleyParallax.html>)
- [12] Halley E. Phil. Trans. Roy. Soc. London (1718) 30, 737
- [13] Harkness W. The Solar Parallax And Its Related Constants (1891)
- [14] Kepler J. Harmonices Mundi (1619)
- [15] Kepler J. Admonitio ad Astronomos (1630)

- [16] Lehn W.H. e van der Werf S. Appl. Opt. Vol. 44 Issue 27 (2005), 5624-5636
- [17] Lundquist K. Garden History, Vol. 32, No. 2 (Winter, 2004), 152-166
- [18] Murray A. Howse D. Astronomy & Geophysics, Vol 38, Issue 4, Aug-Sept 1997, 27-30
<https://academic.oup.com/astrogeo/article/38/4/27/224198>
- [19] Newcomb S. Popular Astronomy (1878)
- [20] Pannekoek A. A History of Astronomy, Dover Pubns. (new ed. 2003)
- [21] Picard J. Mesure de la Terre (1671)
- [22] Reid J.S. The Transit of Venus <https://homepages.abdn.ac.uk/nph120/astro/vt.pdf>
- [23] Résultats de Richer à Cayenne. Histoire et Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Tome 1, 1673
- [24] Street T. Astronomia Carolina (1661)
- [25] Tao T. The Cosmic Distance Ladder <https://terrytao.files.wordpress.com/2010/10/cosmic-distance-ladder.pdf>
- [26] Van Helden A. Measuring the Universe Cosmic Dimensions From Aristarchus to Halley, Un. Chicago press (1985)
- [27] Van Roode S.M. Halley's method of durations (2005) <http://home.kpn.nl/smvanroode/halleysmethod.pdf>