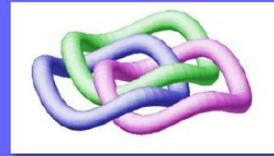




POLITECNICO
MILANO 1863



POLITECNICO



effediesse

La rivoluzione cosmologica
del XVI – XVIII secolo:
tempi e modi della sua affermazione

Marco Beghi

1 febbraio 2023

La rivoluzione cosmologica del XVI – XVIII secolo: tempi e modi della sua affermazione

- **cosa ?** di cosa stiamo parlando ?
cosmologia e astronomia
nel mondo ‘classico’
- **dove ?** in Europa
- **quando ?** XVI – XVIII secolo
- **chi ?** alcuni ‘visionari’
- **come ?** per contributi successivi
- **perché ?** non per motivi empirici



cosa? cosmologia ellenistica e rinascimentale

'*cosmos*': dal V secolo a.C. (Pitagora ?)

in precedenza: enumerazione ('Il cielo e la Terra')

cosmos ↔ *chaos* :

Eraclito: 'l'ordine cosmico eterno, non creato né da uomini né da dei';

Platone (Timeo) la nascita del *cosmos* dal caos primordiale, ad opera di un demiurgo

cosmos ↔ *mundus* :

Plinio il Vecchio: «i Greci hanno dato all'insieme di tutte le cose il nome di *cosmos* [*ornamentum*] e noi lo abbiamo chiamato *mundus* in virtù della sua eleganza perfetta e assoluta»

unus versus → *universo*

Lucrezio: un insieme di particelle che formano un tutto, che ruotano insieme

'*cosmos*' ↔ perfezione estetica (etica): la bellezza intrinseca che viene dall'ordine
la parola già esprime una 'cosmologia'
sfera e circonferenza forme 'perfette'

(il '*cosmeta*', *cosmos* → *cosmesi*, *mundus* → *monile*)



la gerarchia del sapere 'classica'

Filosofia e filosofia naturale [la fisica]:

- l'**essenza** delle cose, degli esseri, la **sostanza** dei cieli e degli astri (la loro natura), le loro **cause ontologiche**
- i caratteri, le proprietà: conseguenze necessarie della loro essenza

Matematica 'salva i fenomeni' :

- aritmetica (algebra)
- geometria
- 'mathematica mixta' (matematica applicata)
 - astronomia (le grandezze, le distanze degli astri, le quantità e le qualità che si manifestano nella loro rotazione)
 - ottica
 - meccanica
 - musica
 - **astrologia ?**



la fisica aristotelica: la Terra

- La natura della materia, e le leggi fisiche, **sulla Terra**, diverse da quelle **nei cieli**;
- Sulla Terra: i 4 elementi terra/acqua/aria/fuoco si recombinao ⇒ ⇒ i corpi **evolvono**, sono **corruttibili**;
- il moto dei corpi sulla Terra: moto ‘naturale’ e moto ‘violento’:
 - ◆ ‘naturale’: i 4 elementi tendono alla loro sede naturale:
 - terra & acqua (‘gravità’, ‘pesantezza’): verso il centro
 - aria & fuoco (‘levità’, ‘leggerezza’): lontano dal centro
 - ⇒ caduta dei gravi
 - ⇒ Terra sferica
 - ◆ ‘violento’ dovuto a una causa, perdura solo se perdura la causa (corpi tendono alla quiete)
[Buridano, prima metà XIV secolo: ‘impetus’]



la fisica aristotelica: i cieli

- natura della materia e leggi fisiche diverse da quelle sulla Terra
- un singolo elemento (quinto elemento, quintessenza, cristallina e trasparente) nessuna possibilità di ricombinazione o evoluzione: **incorruttibili**;
- moto 'naturale', intrinseco: circolare uniforme
- sfera e circonferenza forme 'perfette'
- 'horror vacui': il vuoto è inconcepibile



il sistema eliocentrico: cosmologia



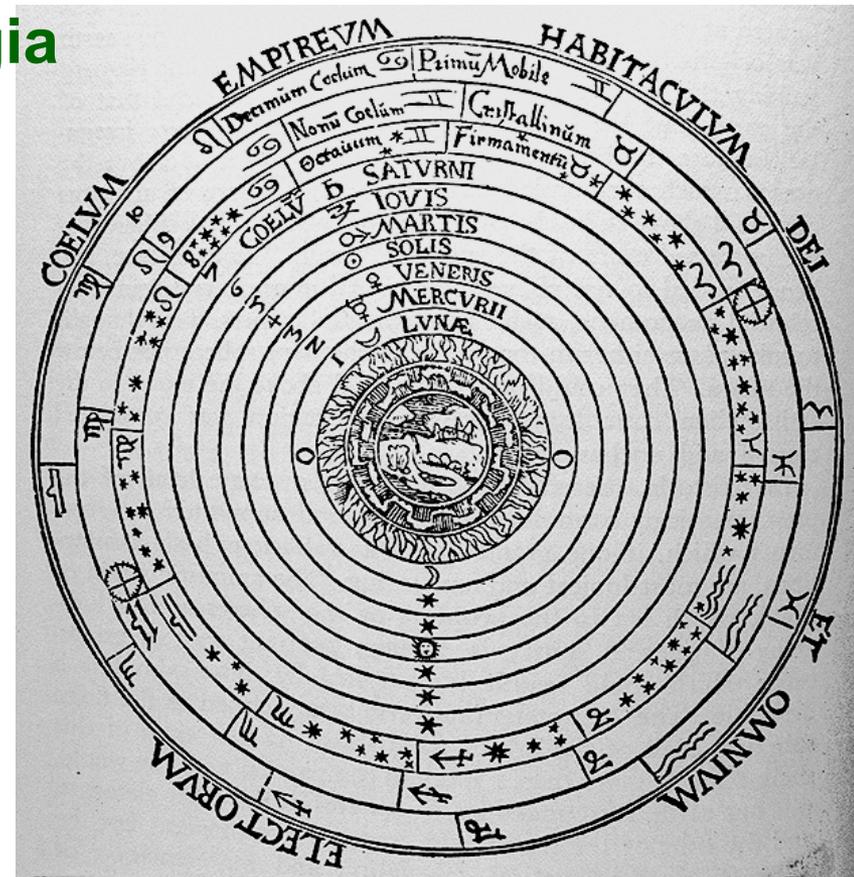
Nel mondo greco diversi modelli cosmologici, anche geocentrici; poi prevale Tolomeo, II secolo d.C.,

Alessandria

Almagestum

[su osservazioni di Ipparco, II secolo a.C.]

- pianeti / stelle fisse
- 'i cieli': pianeti incastonati in sfere cristalline (o fluide ?)
- moto diurno + moto relativo
- dal 'primo cielo' (Luna) in su: natura e leggi dei cieli
- mondo sublunare: natura e leggi della Terra

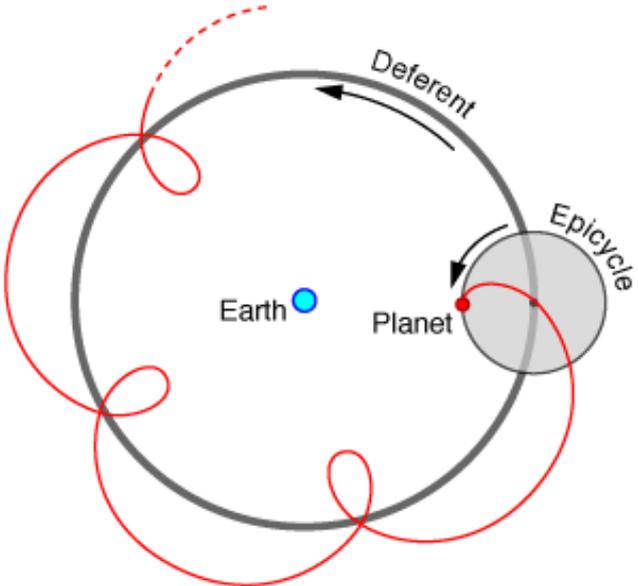
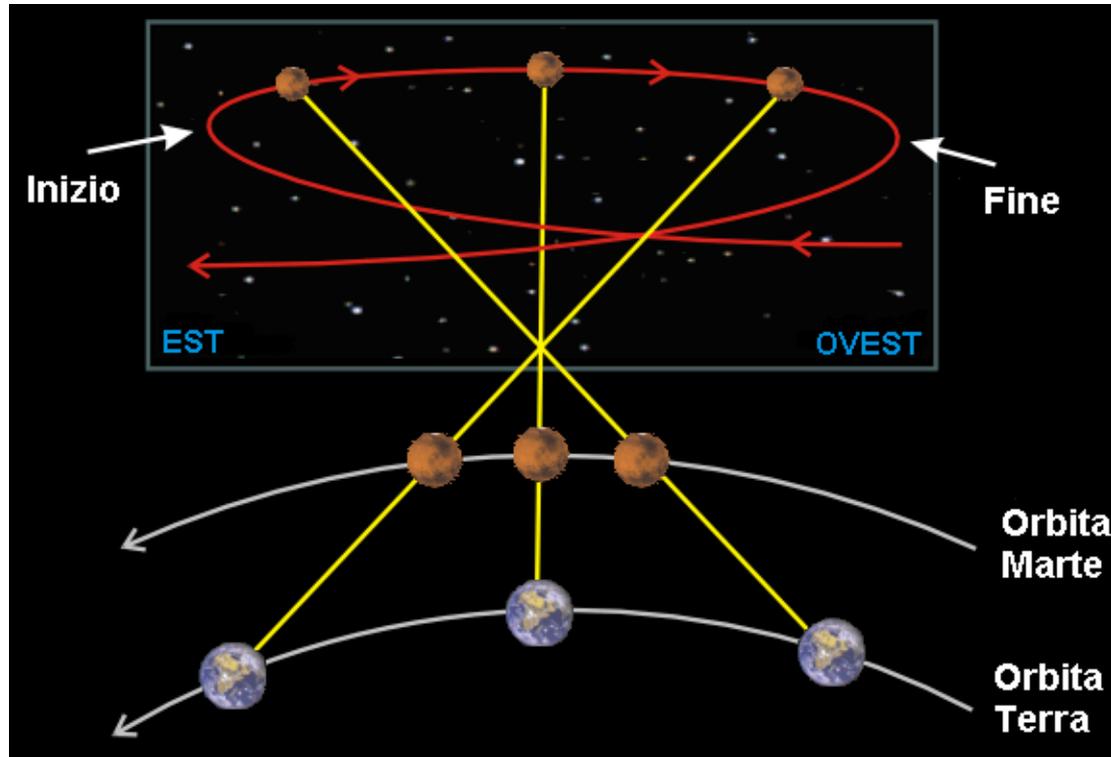
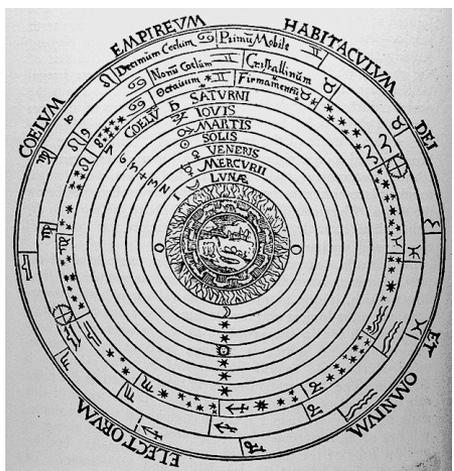


con eliocentrico: 'la Terra, che era orgogliosamente al centro, relegata in periferia'

esattamente l'opposto: il centro raccoglie tutta l'imperfezione, [Dante]
la Terra 'promossa' nei cieli, luogo della perfezione



il sistema eliocentrico: astronomia, le traiettorie dei pianeti



- moto retrogrado dei pianeti descritto mediante deferente / epiciclo (tutti moti circolari uniformi)
- punto equante



dove? in Europa

matematica: arabi [Leonardo Fibonacci]

diverse tecnologie: cinesi

medicina: medicina olistica cinese



quando ? XVI – XVIII secolo

Francesco I : 1494-1547

re di Francia: 1514 - 1547



Carlo V : 1500 – 1558

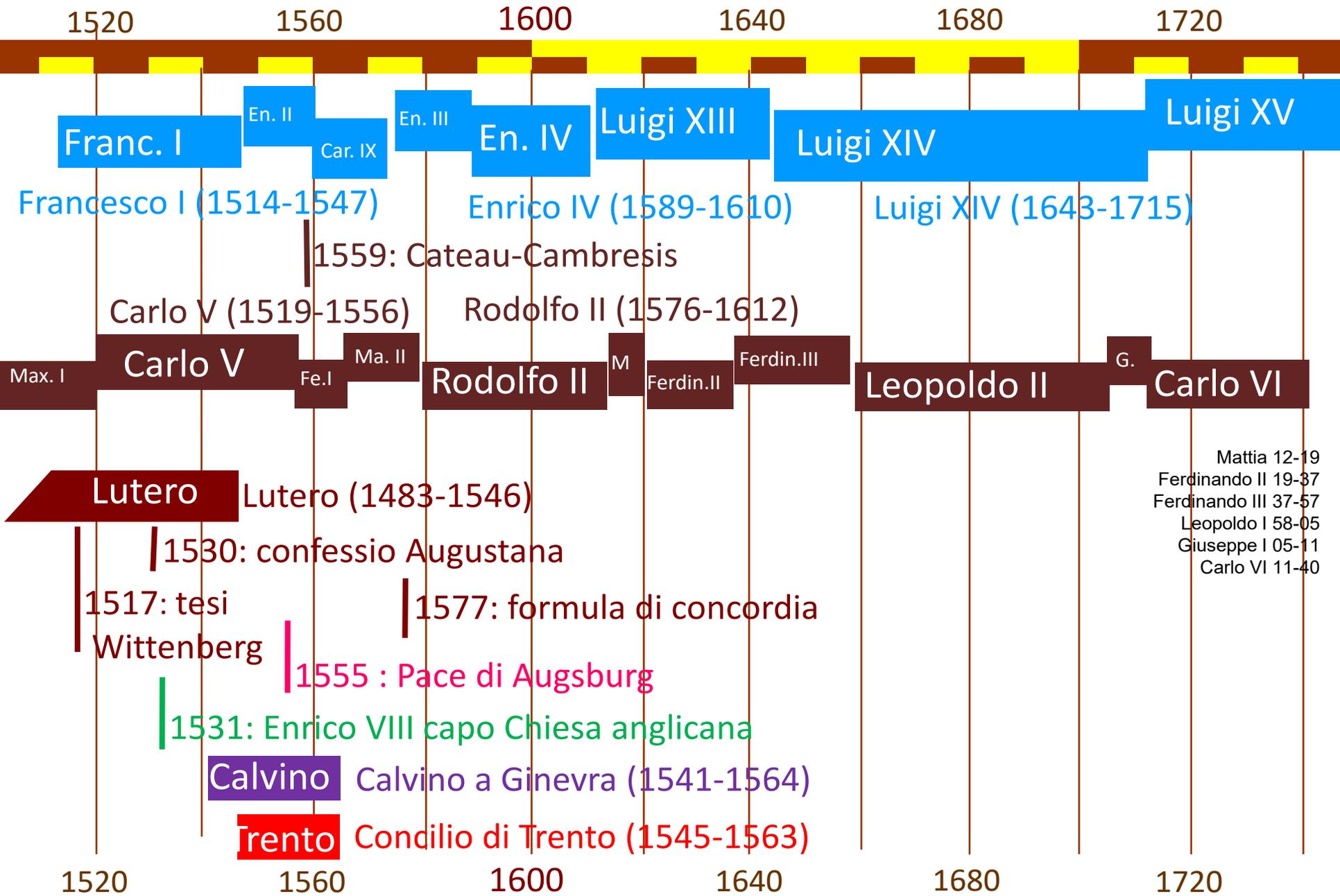
re di Spagna: 1516

imperatore: 1520 -1556



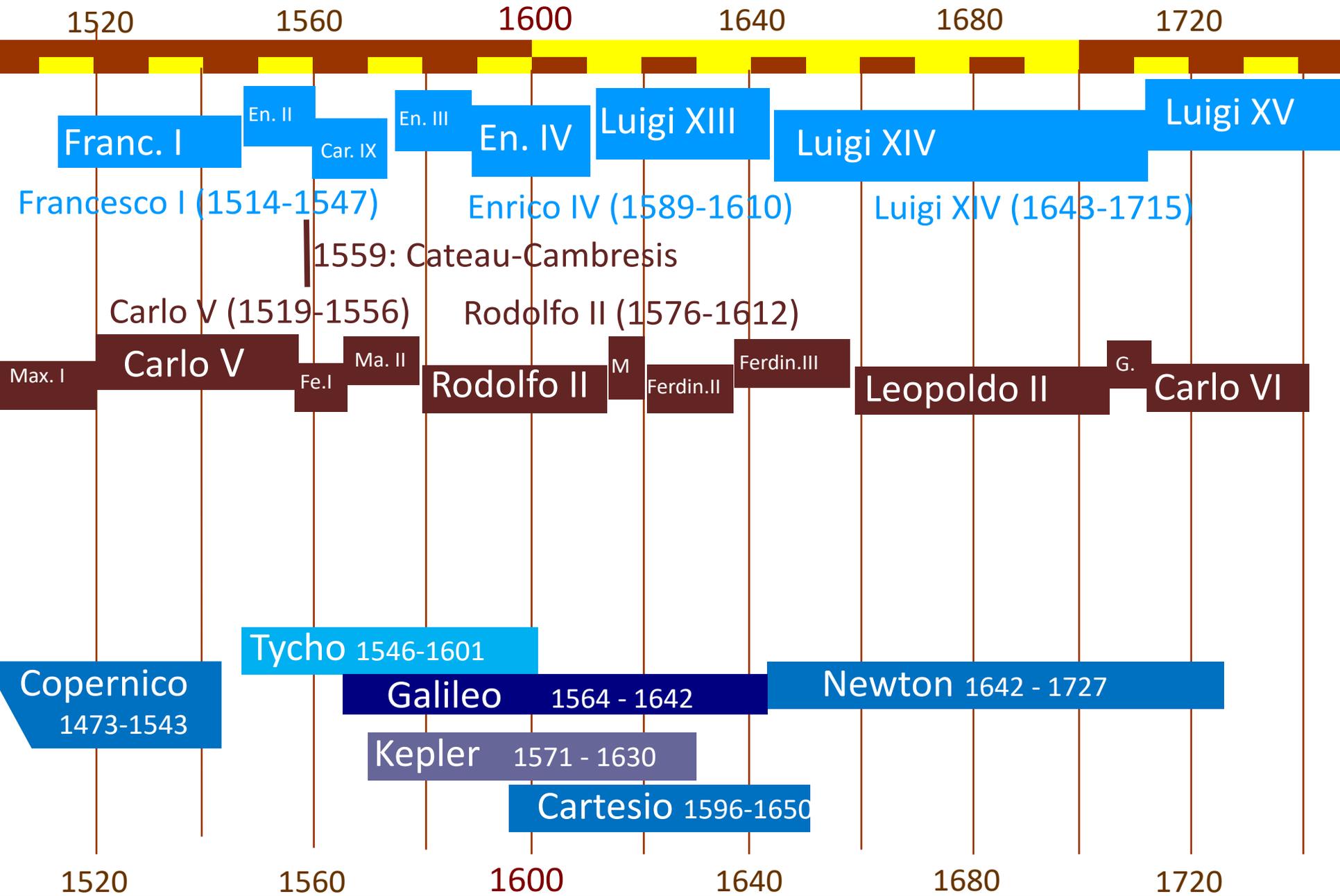
L'impero di Carlo V

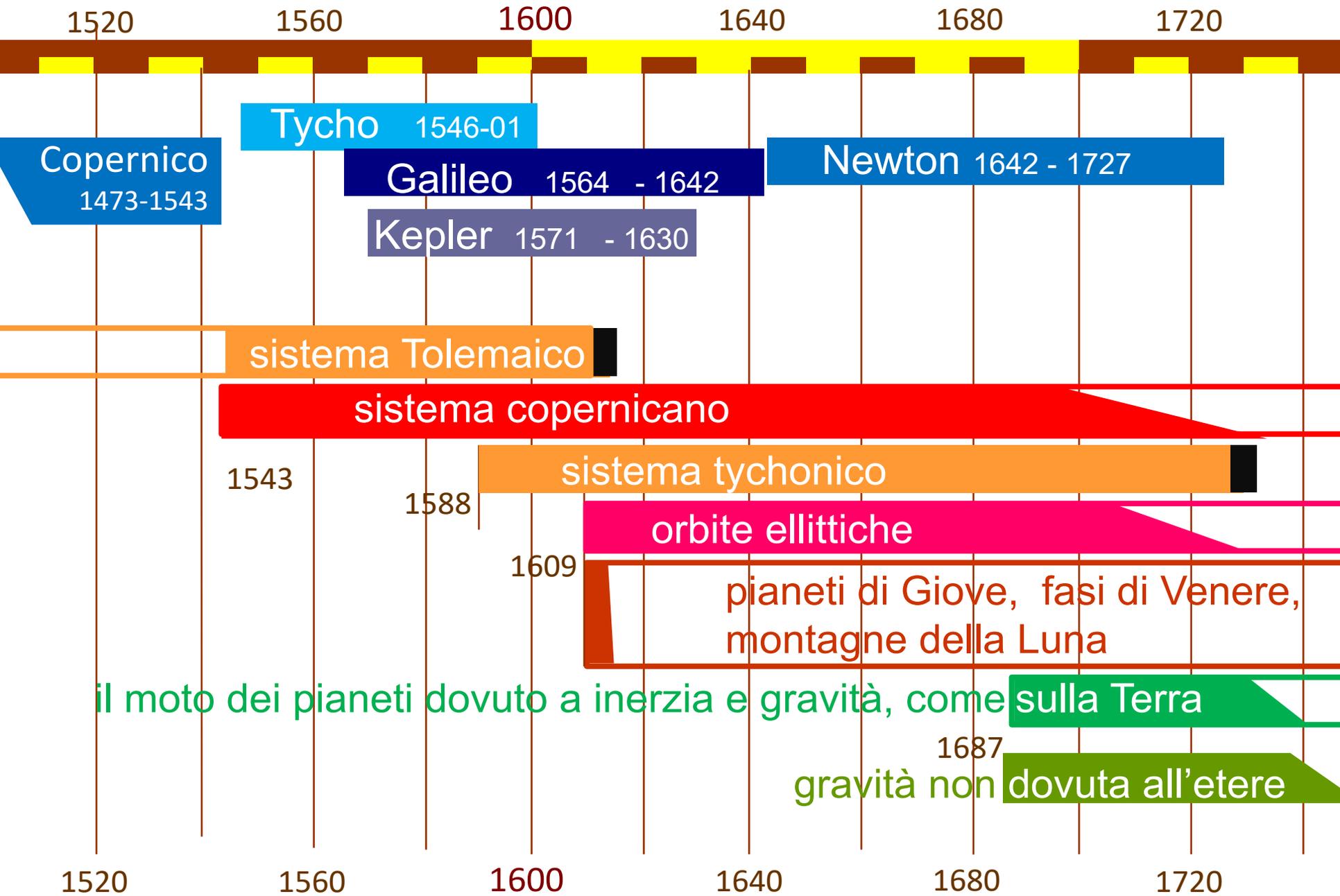




- **cosa ?** di cosa stiamo parlando ?
cosmologia e astronomia
nel mondo 'classico'
- **dove ?** in Europa
- **quando ?** XVI – XVIII secolo
- **chi ?** alcuni 'visionari'
- **come ?** per contributi successivi
- **perché ?** non per motivi empirici







1520

1560

1600

1640

1680

1720

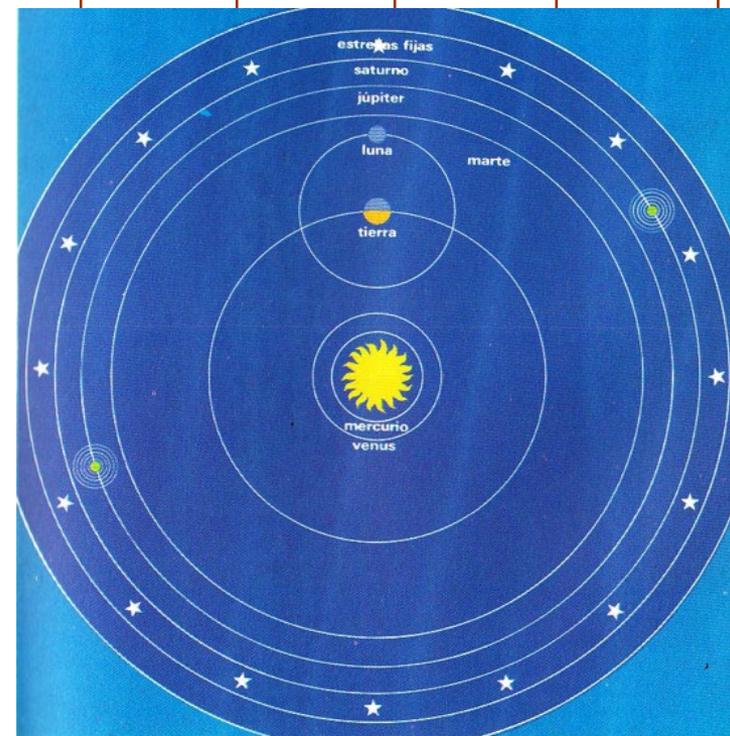
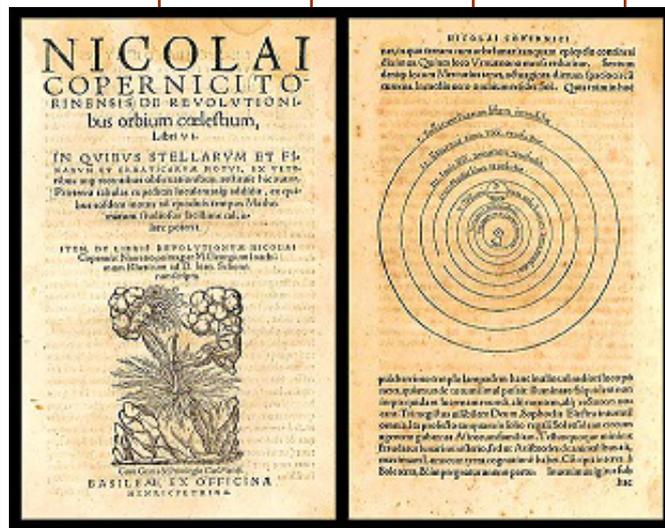
sistema Tolomaico

Copernico
1473-1543

sistema copernicano

1543

De revolutionibus orbium celestium
[poco prima: Rheticus, suo allievo]



Terra ruota su se stessa

Terra ruota intorno al Sole

1520

1560

1600

1640

1680

1720



1520

1560

1600

1640

1680

1720

sistema Tolemaico

Copernico
1473-1543

sistema copernicano

1543

De revolutionibus orbium celestium



punta a una drastica semplificazione dello schema deferenti/epicicli, ma è costretto a usarli [non ha le orbite ellittiche]

prefazione Osiander: matematica per calcolo delle posizioni, non cosmologia

1520

1560

1600

1640

1680

1720



problemi aperti dal sistema copernicano

Nel 'mondo sublunare', e relativi alla rotazione della Terra su se stessa:

- la caduta dei gravi ?
- perché un corpo cade lungo la verticale (perché una freccia non è deviata) ?

Nei 'cieli', e relative alla alla rotazione della Terra attorno al Sole:

- la Terra non è di 'etere', come può rimanere in moto ?
chi la spinge ?
- perché non si misura alcuna parallasse ?

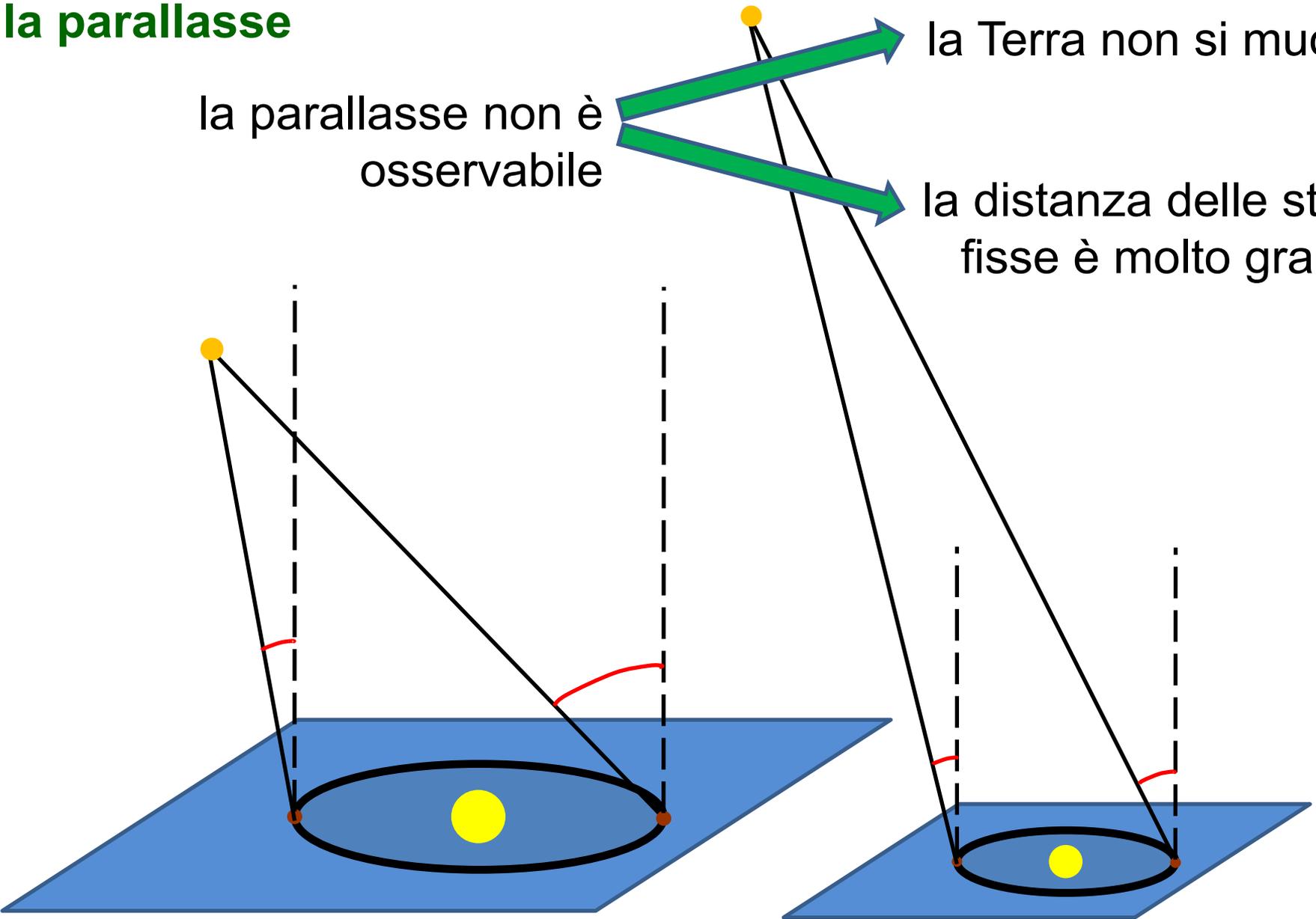


la parallasse

la parallasse non è osservabile

la Terra non si muove

la distanza delle stelle fisse è molto grande



1520

1560

1600

1640

1680

1720

sistema Tolemaico

sistema copernicano

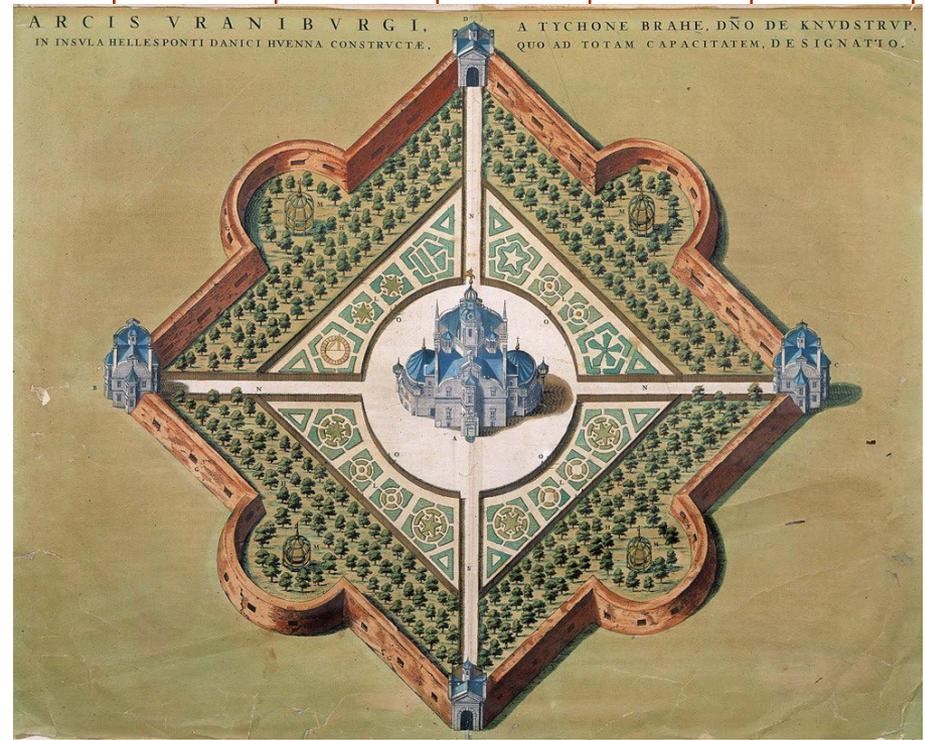
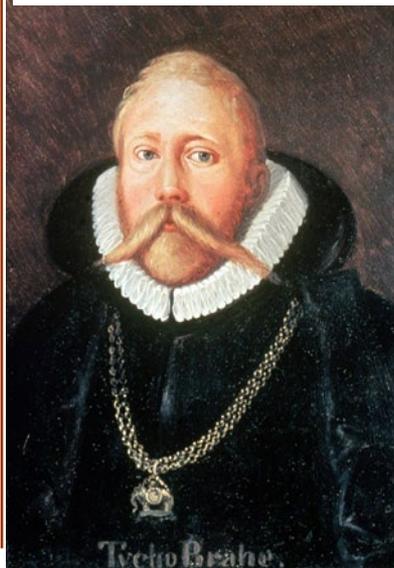
Copernico

1473-1543

Tycho 1546-01



osservatorio di Uraniborg,
isola di Hven,
dono del re di Danimarca



1520

1560

1600

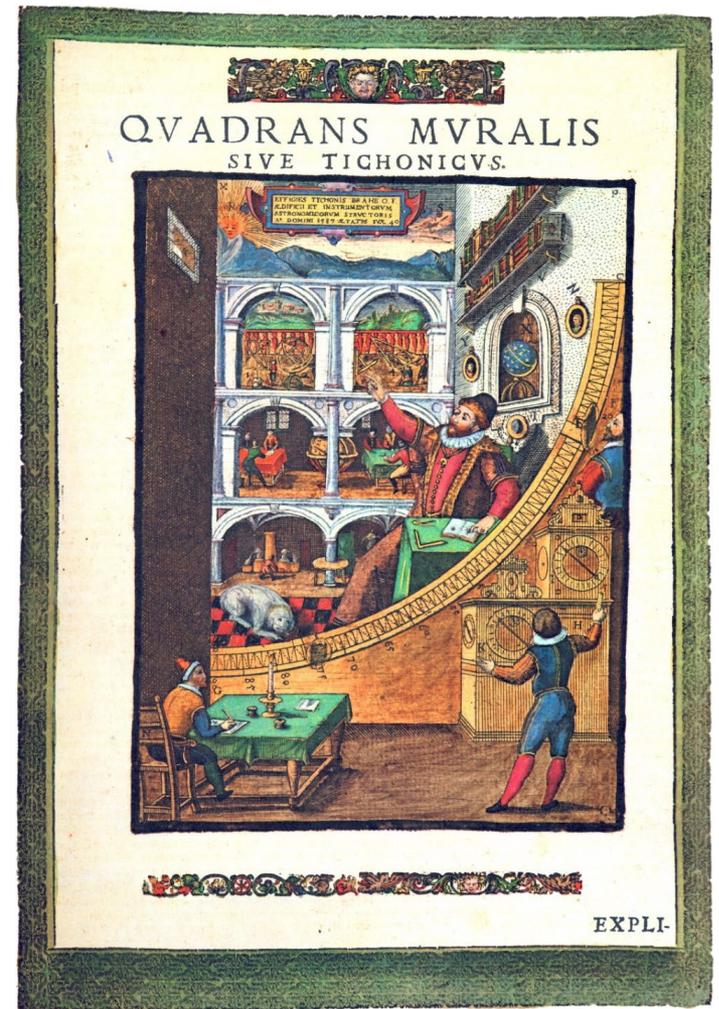
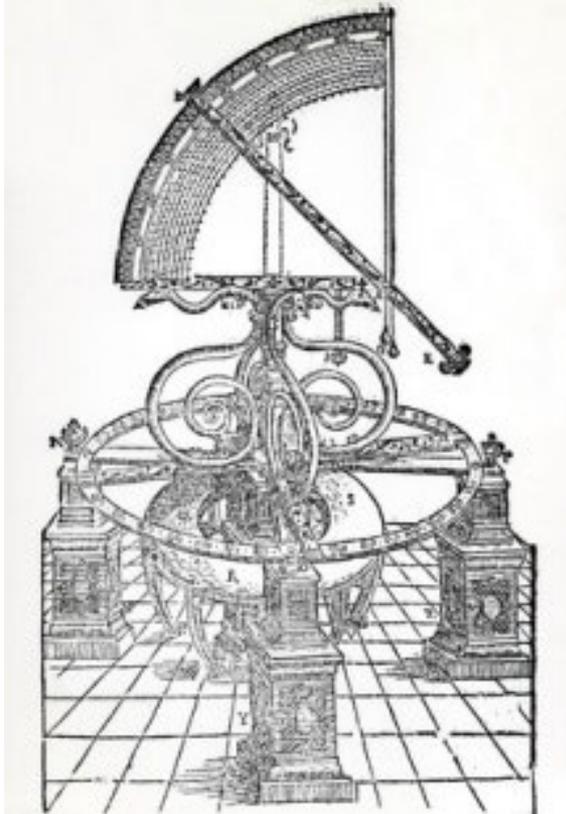
1640

1680

1720



le misure di Tycho Brahe



non ha cannocchiale,
sviluppa strumenti (del tipo della meridiana)
per misurare le posizioni delle stelle (fino a 1')
Tutti gli astronomi successivi lavorano sui suoi dati.



1520

1560

1600

1640

1680

1720

Copernico
1473-1543

Tycho 1546-01

sistema Tolemaico

sistema copernicano

sistema tychonico

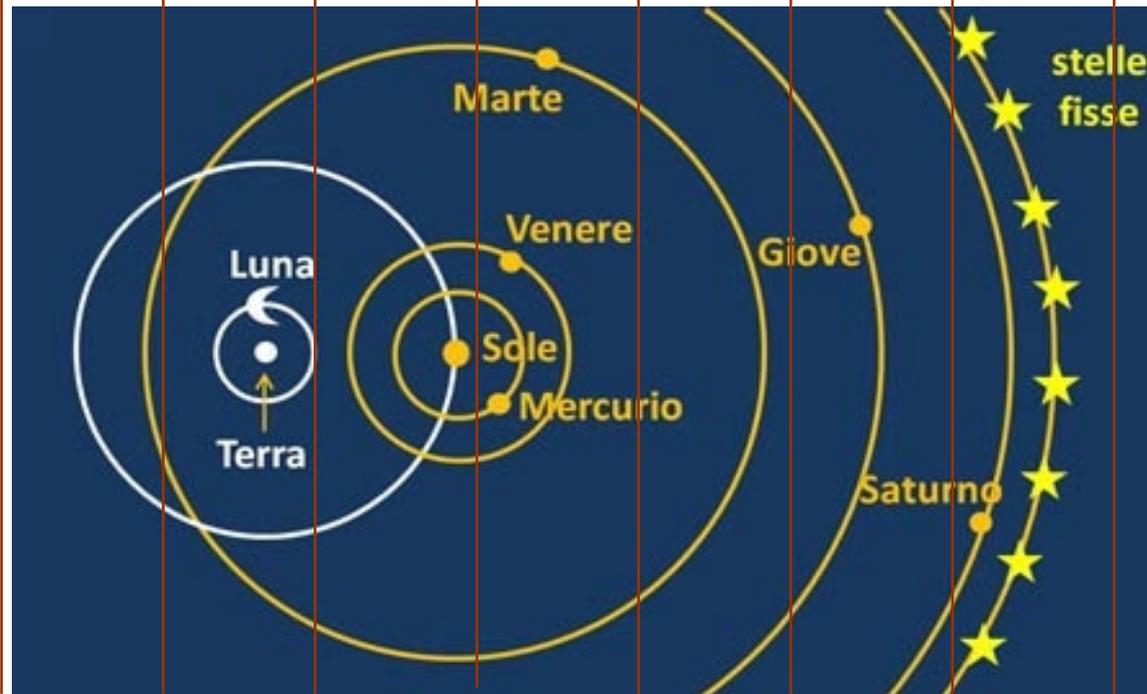
1543

1588

La Terra ferma al centro

Luna e Sole orbitano attorno alla Terra

I pianeti orbitano attorno al Sole



1520

1560

1600

1640

1680

1720



1520

1560

1600

1640

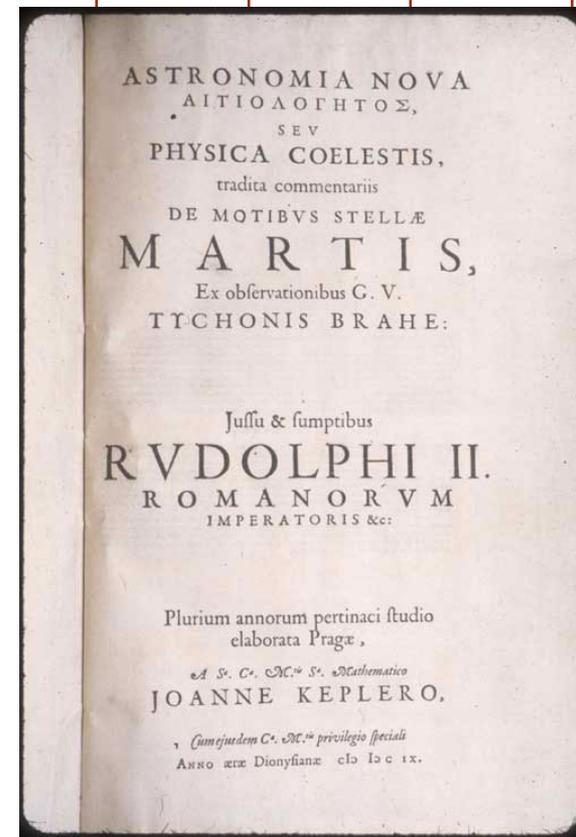
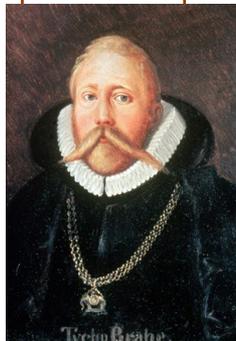
1680

1720

Copernico
1473-1543

Tycho 1546-01

Kepler 1571 - 1630



assistente di Tycho, che diventa
'matematico dell'Imperatore' Rodolfo II
alla morte di Tycho prende il suo posto,
e lavora sui dati di Tycho

1609 *Astronomia Nova*;
1619 *Harmonices mundi*

1520

1560

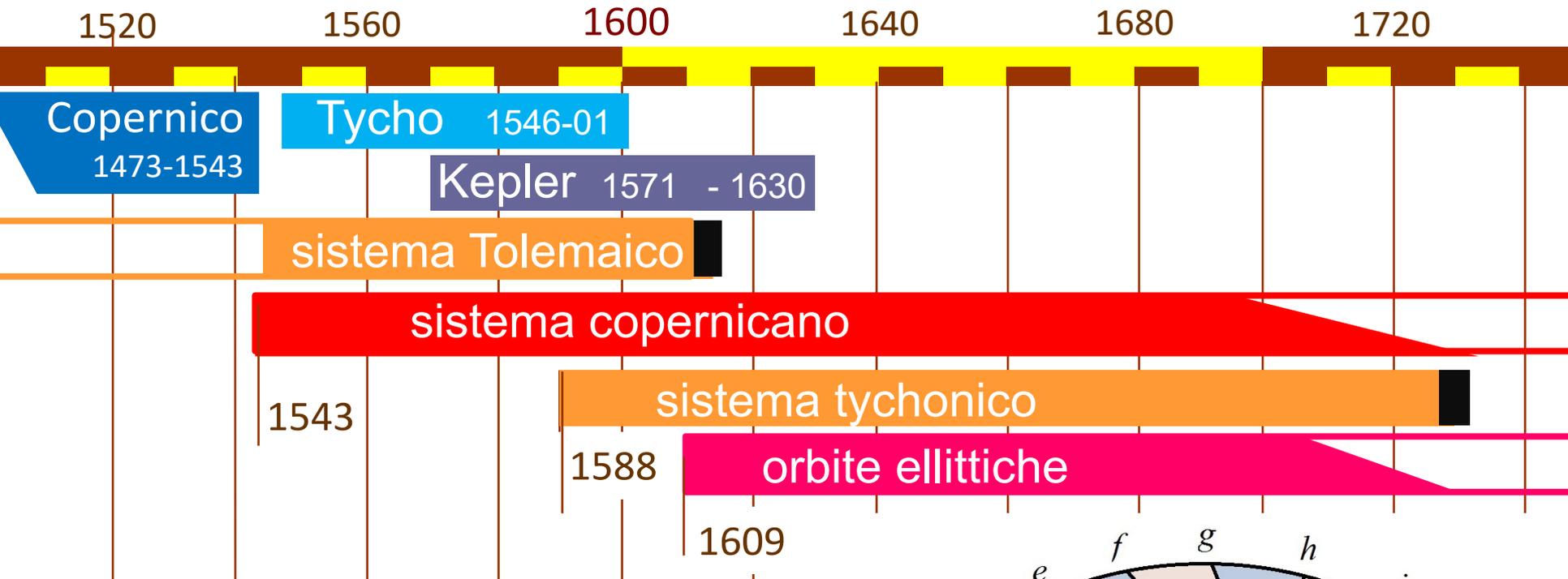
1600

1640

1680

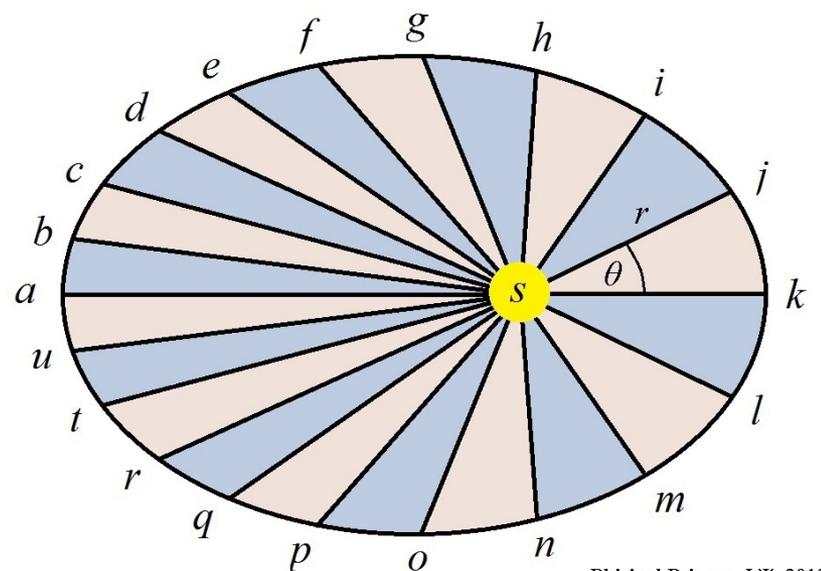
1720





leggi di Keplero:

1. orbite ellittiche
2. velocità areolare costante
3. $T^2 \propto a^3$



Physical Science ΦΨ, 2013

1520 1560 1600 1640 1680 1720



1520

1560

1600

1640

1680

1720

Copernico
1473-1543

Tycho 1546-01

Kepler 1571 - 1630

Galileo 1564 - 1642

FEDERICO CESI (1585-1630)



Principe di Acquasparta (presso Perugia)

- Fondatore, Finanziatore, Presidente della 'Accademia dei Lincei' (1603 - ~1630), prima accademia scientifica al mondo (Royal Society, London: 1660; Académie des Savants, Paris: 1666)
- accademia: militanza culturale [Ciampoli & Cesarini],
- non sopravvive a Cesi, poi fu rifondata
- 'tutore' di Galileo, esponente di spicco della Accademia

1520

1560

1600

1640

1680

1720



FEDERICO CESI a GALILEO, 20 giugno 1612.

... talvolta considerando cose celesti e mondiali, veggio che m'aggraderebbe molto il sistema coperniceo, quando togliesse via affatto gl'eccentrici e l'epicicli . . .

GALILEO a FEDERICO CESI, 30 giugno 1612

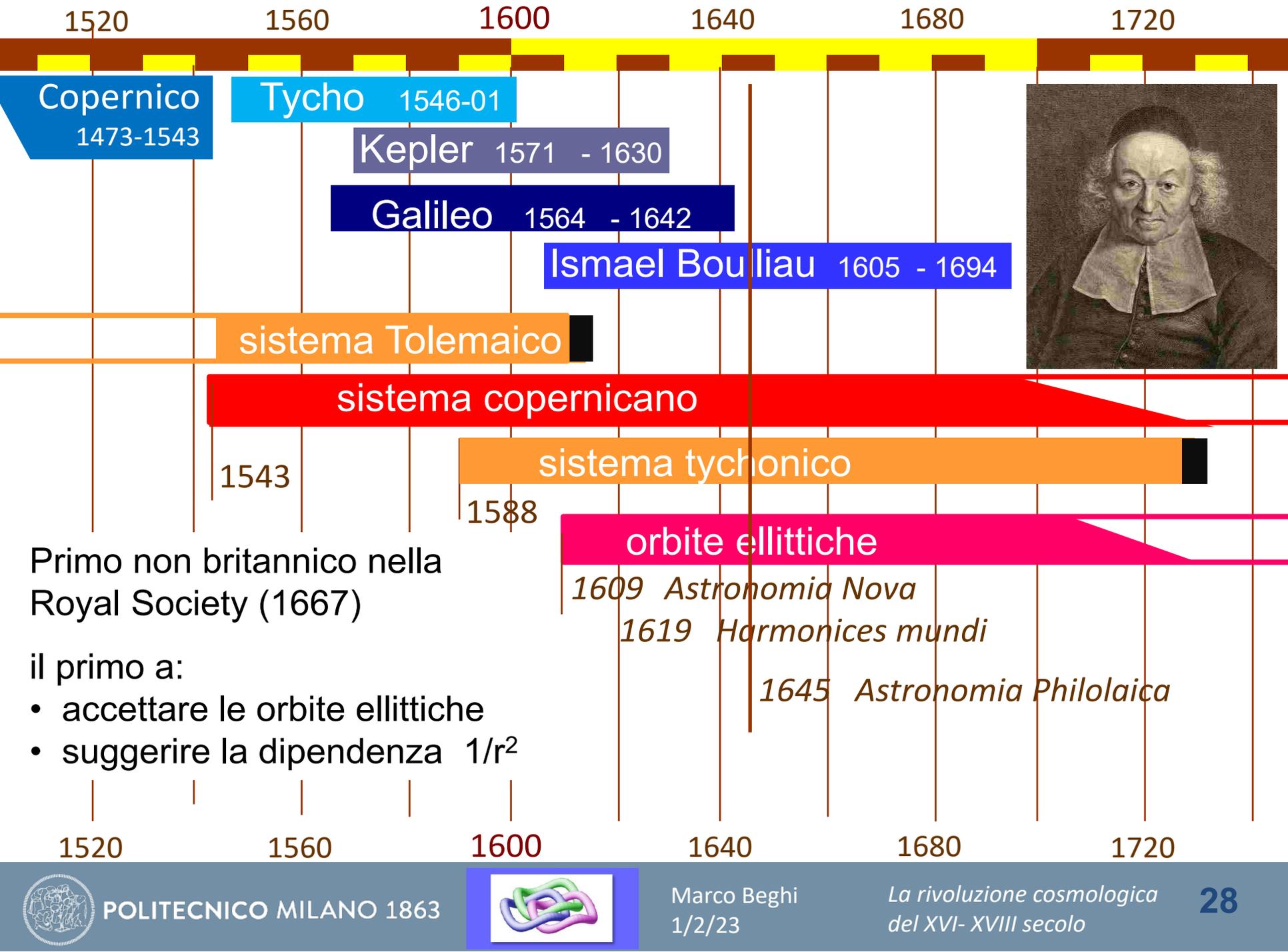
Ho sentito (...) che V.S. illustrissima si occupi (...) nella contemplatione del sistema coperniceo, (...) e massime se con quello si potessero totalmente levare gli eccentrici e gli epicicli. Circa il qual particolare, io voglio solamente rappresentare a V. E. quello che Ella sa molto meglio di me, et è che noi non doviamo desiderare che la Natura si accomodi a quello che parrebbe meglio disposto et ordinato a noi, ma conviene che noi accomodiamo l'intelletto nostro a quello che Ella ha fatto, sicuri tale esser l'ottimo et non altro; ...;



FEDERICO CESI a GALILEO, 21 luglio 1612

Non posso però non lodare (...) l'odio delli eccentrici et epicicli: (...) et io in alcuni miei scartafacci (...) ho in qualche parte considerato, credendo con Keplero che l'obligar l'erranti alla giustezza de' circoli sia un attaccarli contro lor voglia al pistrino et chiuderli onde spesso scappino; et perciò conobbi con V. S. molte motioni non concentriche nè al sole nè alla terra, alcune alla terra, alcune al sole, et forse tutte, se la via de' pianeti è elliptica, come vol Keplero. (...)





Copernico
1473-1543

Tycho 1546-01

Kepler 1571 - 1630

Galileo 1564 - 1642

Ismael Boulliau 1605 - 1694

sistema Tolemaico

sistema copernicano

sistema tychonico

orbite ellittiche

Primo non britannico nella Royal Society (1667)

il primo a:

- accettare le orbite ellittiche
- suggerire la dipendenza $1/r^2$

1609 *Astronomia Nova*

1619 *Harmonices mundi*

1645 *Astronomia Philolaica*

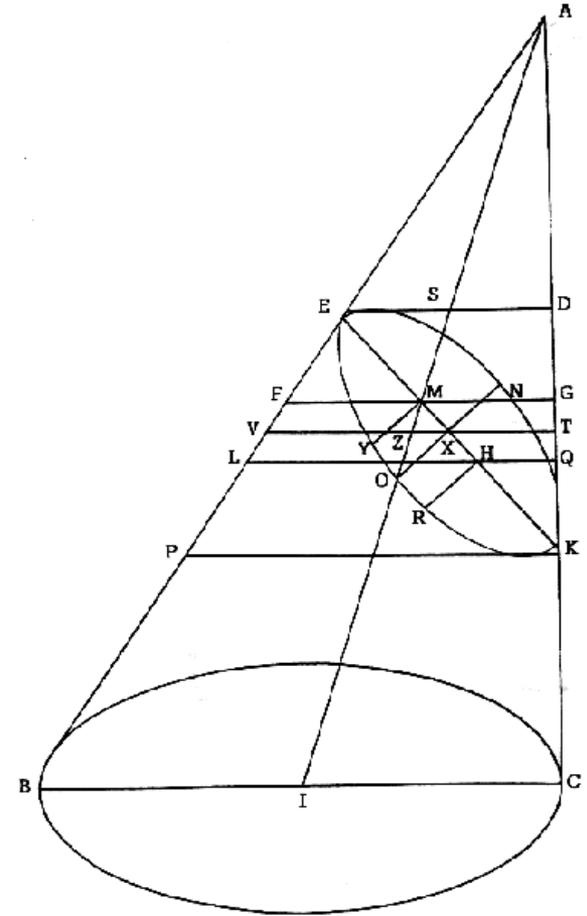


Bouillau: il primo ad accettare le orbite ellittiche

1645 *Astronomia Philolaica*

“I Pianeti sempre ruotano seguendo circonferenze; perché, essendo quella la figura più perfetta, è impossibile che ruotino in modo diverso.

Ogni pianeta, tuttavia, continuamente passa da una circonferenza a un'altra, attraverso un numero infinito di piccoli segmenti di circonferenza, muovendosi in ognuno di essi a velocità angolare uniforme, perché questo è il più perfetto di tutti i moti.”



Più difficile abbandonare I cerchi perfetti che abbandonare la Terra al centro ?



1520

1560

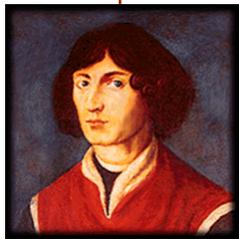
1600

1640

1680

1720

Kopernik
1473-1543



Tycho 1546-01

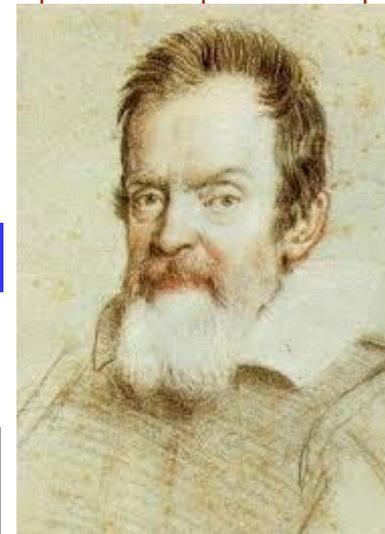


Galileo 1564 - 1642

Kepler 1571 - 1630



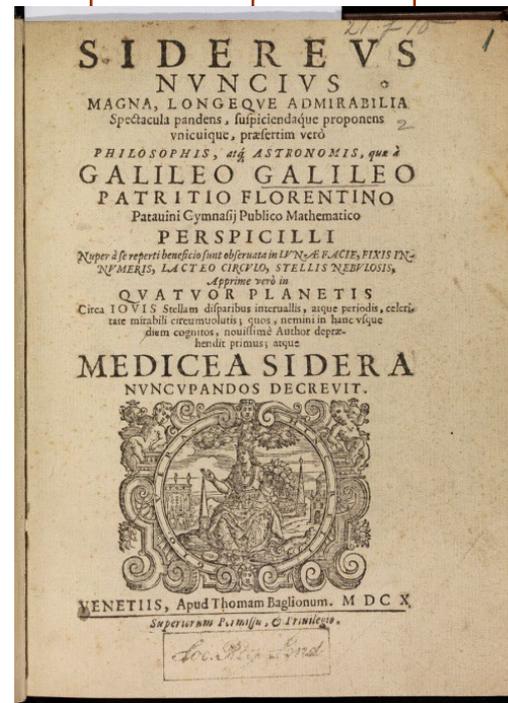
Ismael Boulliau 1605 - 1694



Galileo, 1609

Il primo a guardare il cielo con un telescopio:

- montagne della Luna, Via Lattea
- pianeti di Giove (non solo Luna)
- fasi & magnitudine di Venere:
Tolomeo falsificato



1520

1560

1600



Galileo 1609-12

Galileo 1564 - 1642

1609

1610

1611

1612

cannocchiale migliorato

Satelliti di Giove

Approvazione di Clavius

Roma:
laurea *ad honorem*
dal 'Collegio Romano'
acclamazione dai Lincei

Montagne della Luna
Via Lattea

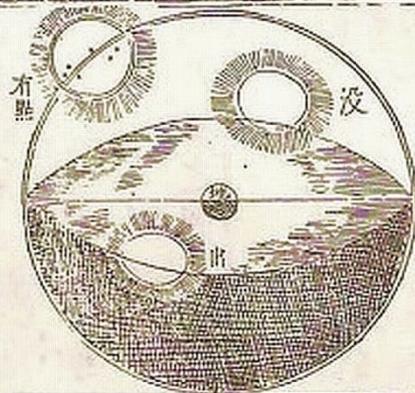
Sidereus Nuncius
approvazione da Kepler
forte dibattito

Fasi di Venere

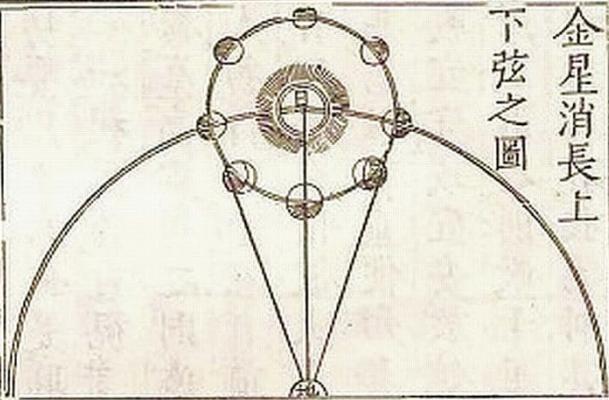


Galileo: Cina 1615

1615: Gesuiti in Cina: *Catechismo Celeste*



太陽之圖



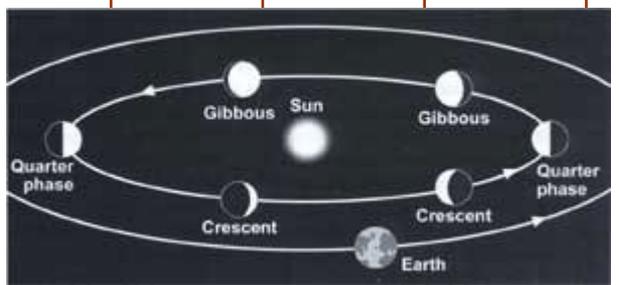
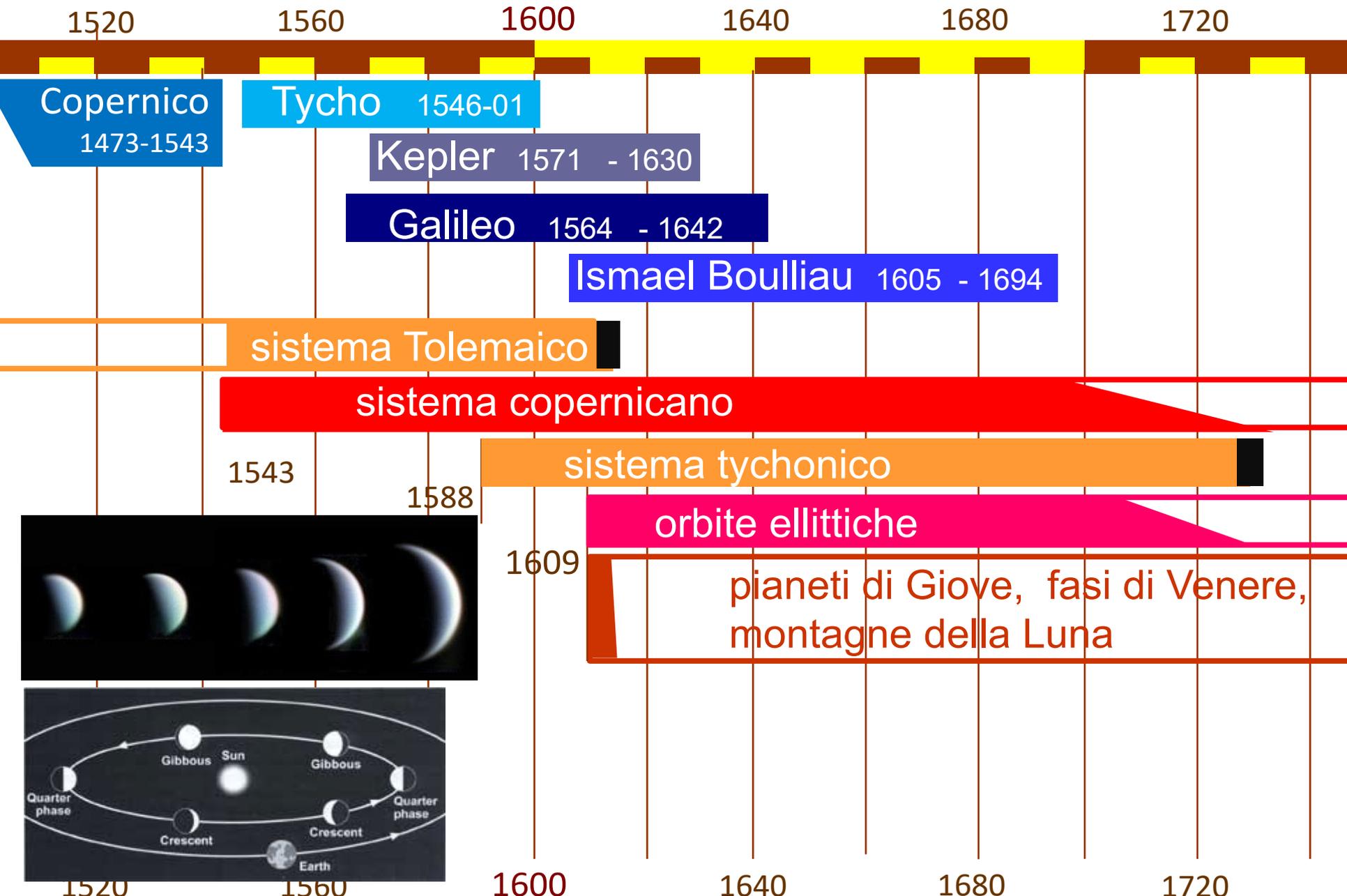
金星消長上
下弦之圖

遠鏡說

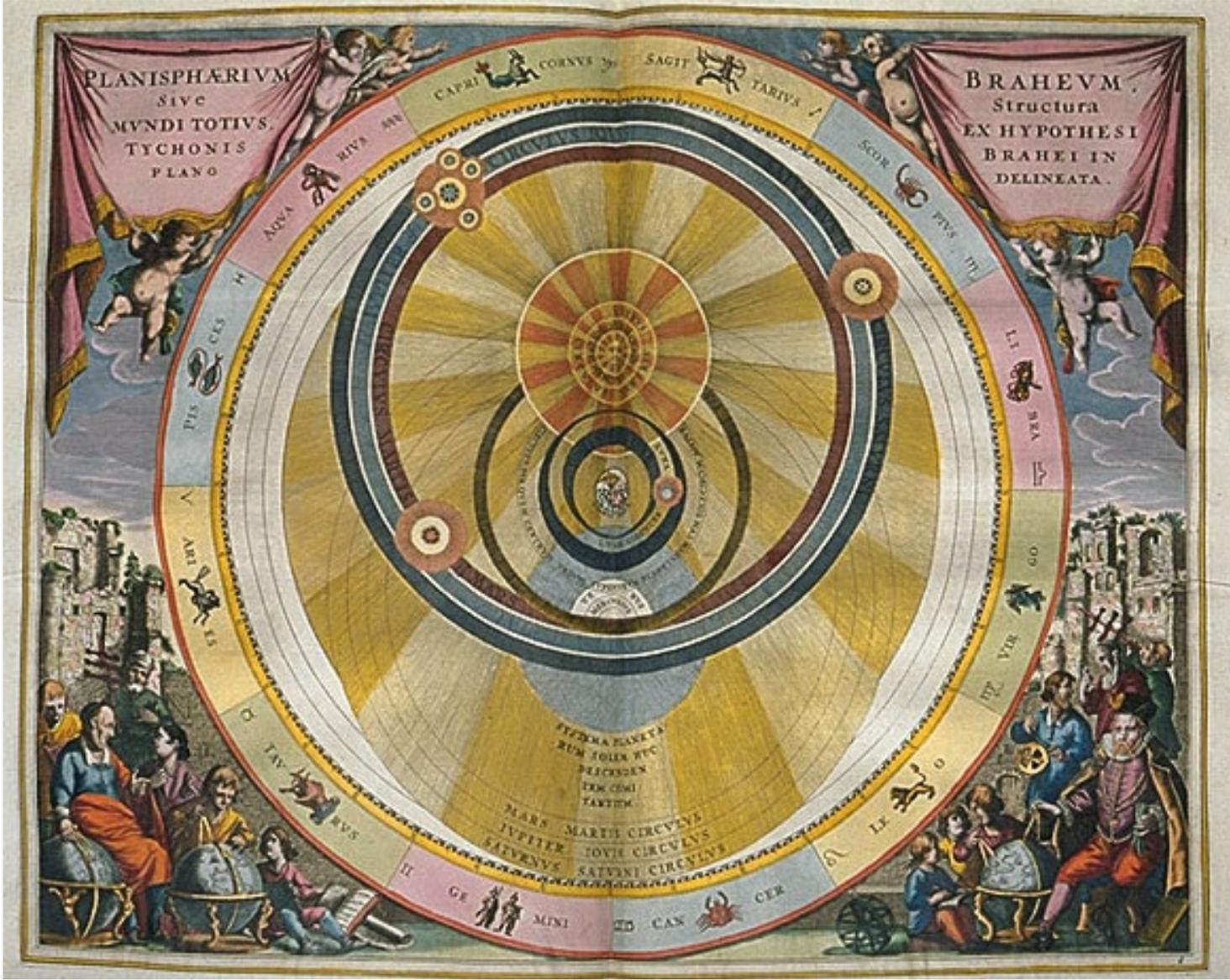
用以觀太陽之出沒。則見本體非至圓。乃似鷄鳥卵。蓋因塵氣騰空。遮蒙恍惚。使之然也。即此可知塵氣騰空。高遠光許。若卯酉二時。併見太陽邊體。齟齬如鋸齒。日面有浮游黑點。點大小多寡不一。相為隱顯。隨從。必十四日方周徑日面而出。前點出

長上下弦。變易於一年之間。亦如月之消長。上下弦。變易於一月之內。又見本體。間或大小不一。則驗其行動。周圍隨太陽者。居太陽之上。其光則滿。居太陽之下。其光則虛。本體之大小。以其居太陽左右之上。下而別焉。





Sistema tychonico



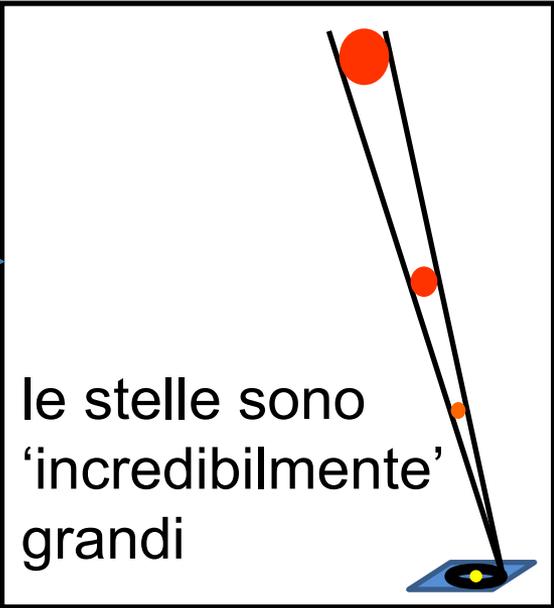
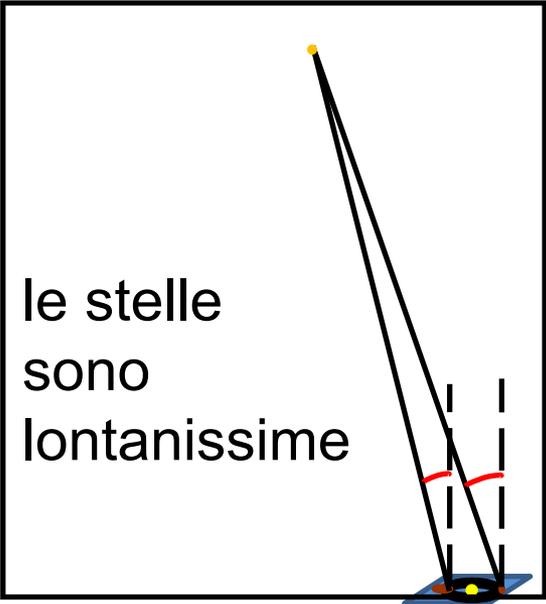
problemi aperti dal sistema copernicano



la Terra ruota attorno al Sole \Rightarrow parallasse

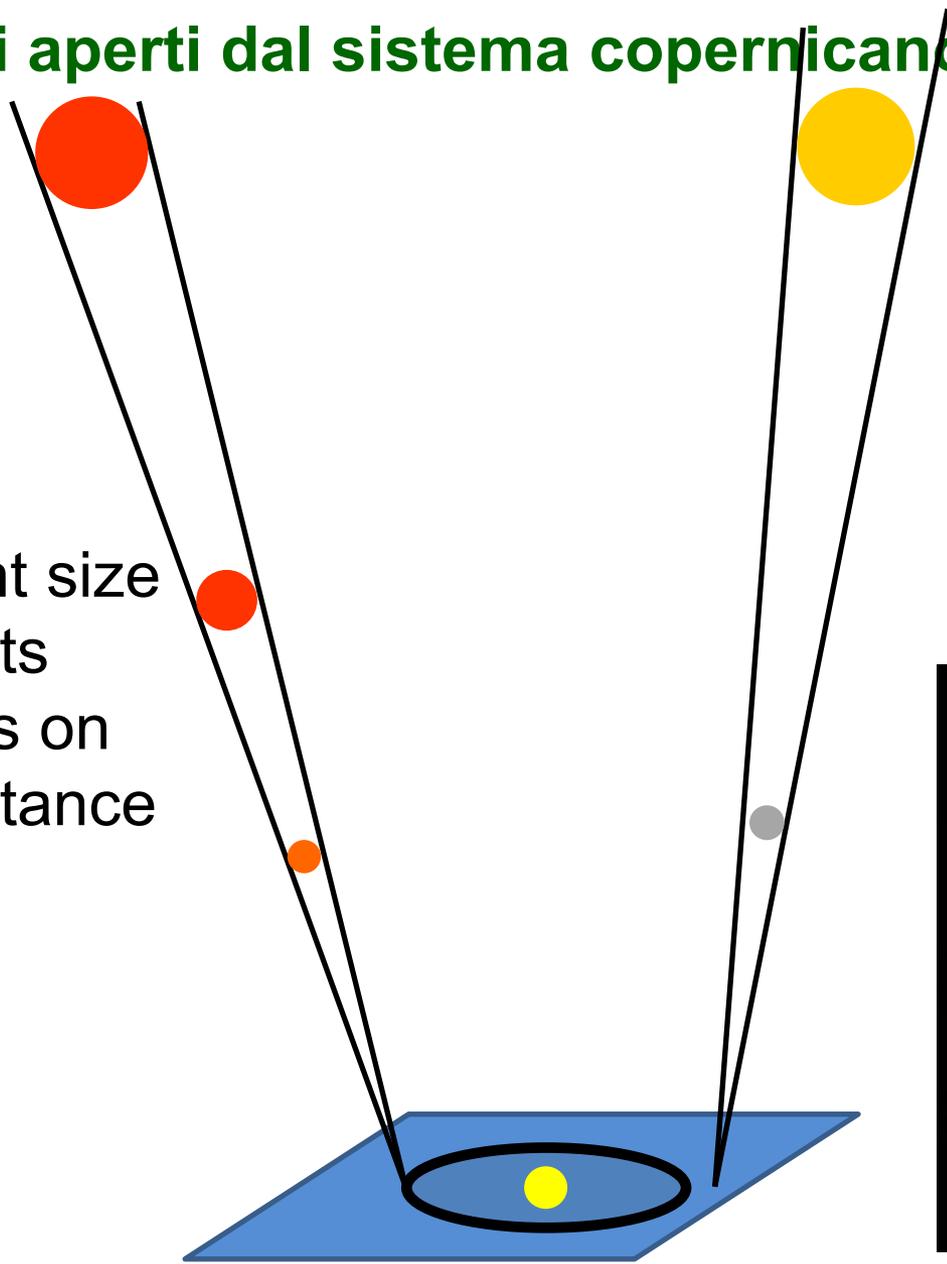
la Terra non si muove

la parallasse
NON è vista
dalle migliori
osservazioni



problemi aperti dal sistema copernicano

apparent size
of objects
depends on
their distance



Sun & Moon
~ same apparent size
~ $\frac{1}{2}^\circ = 30' = 1800''$

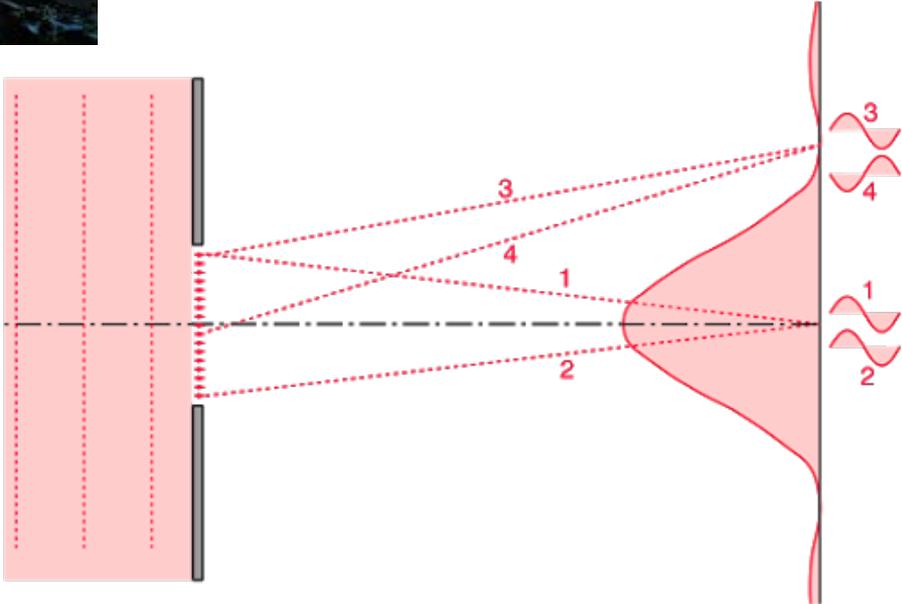
Sun: ~ 400 × size
~ 400 × distance

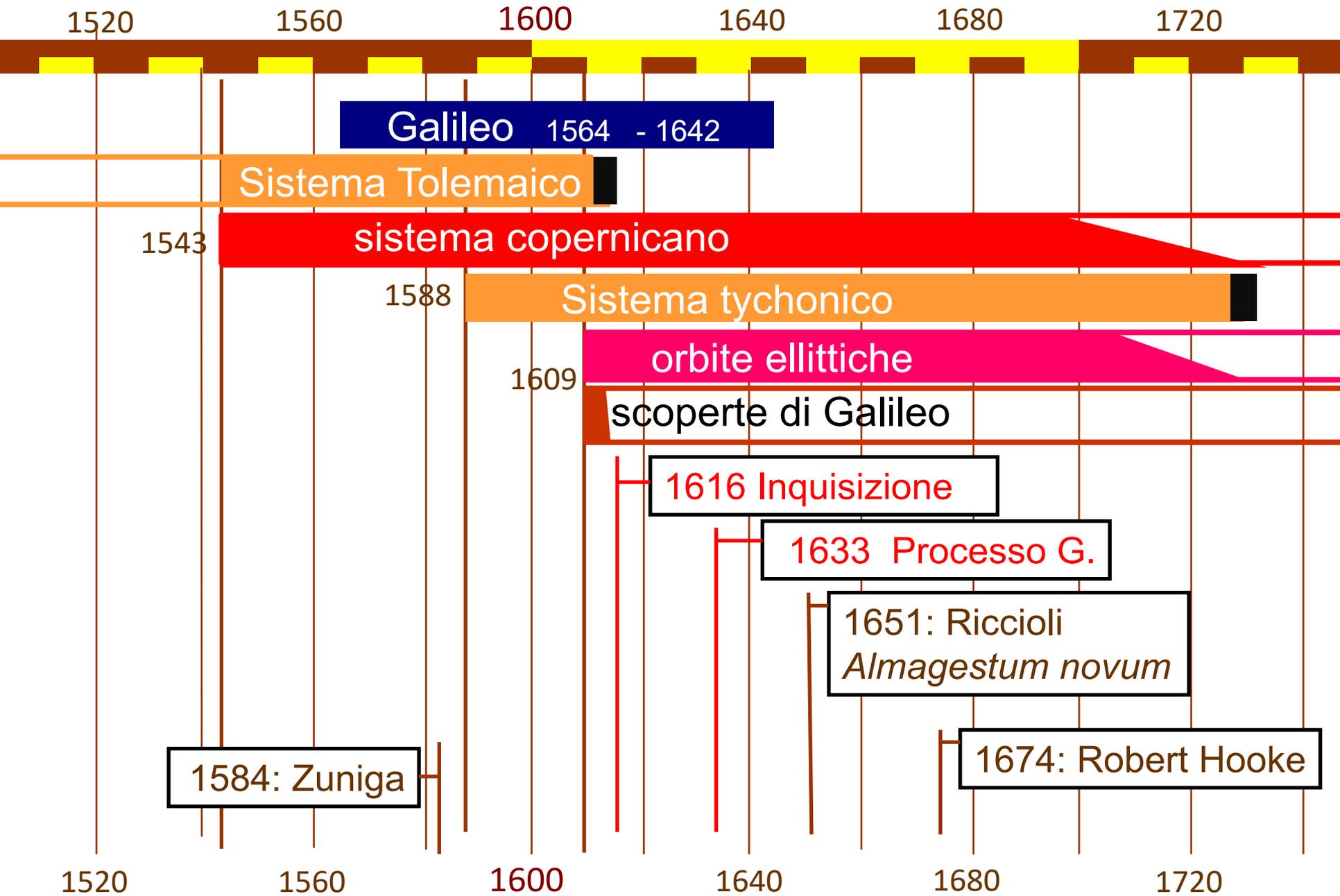


problemi aperti dal sistema copernicano



problemi aperti dal sistema copernicano





1520

1560

1600

1640

1680

1720

Kopernik
1473-1543

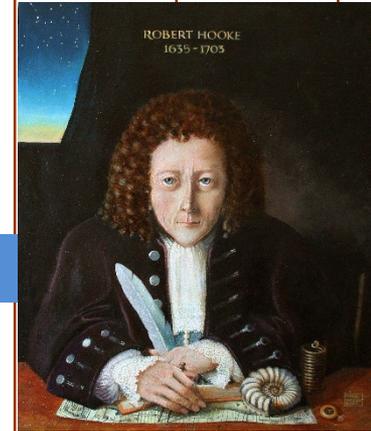
Tycho 1546-01

Galileo 1564 - 1642

Kepler 1571 - 1630

Ismael Boulliau 1605 - 1694

R. Hooke 1635 - 1703



Robert Hooke

- tra i più importanti scienziati del XVII secolo ('il Leonardo inglese')
- 'curator of experiments' della Royal Society: 1662, per oltre 30 anni
- segretario della Royal Society, 1677-1682
- uno dei primi microscopisti (*Micrographia*, 1665; 'la cellula')
- legge di Hooke
- inventore di strumenti astronomici

1520

1560

1600

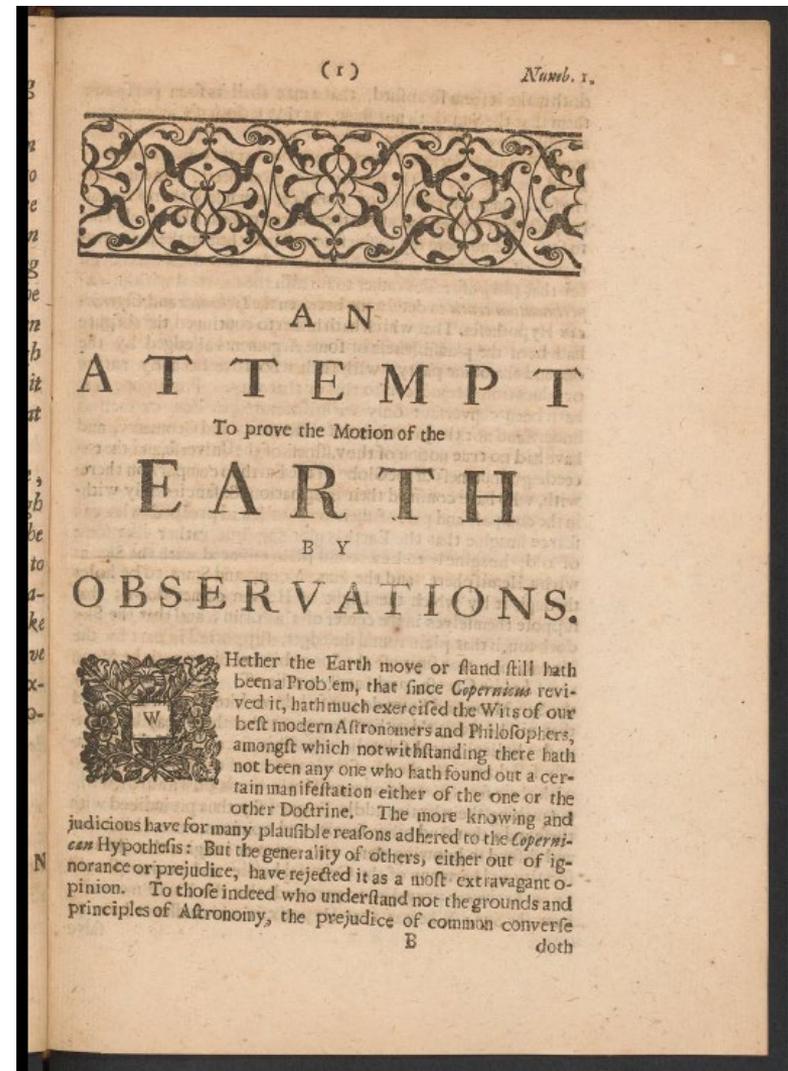
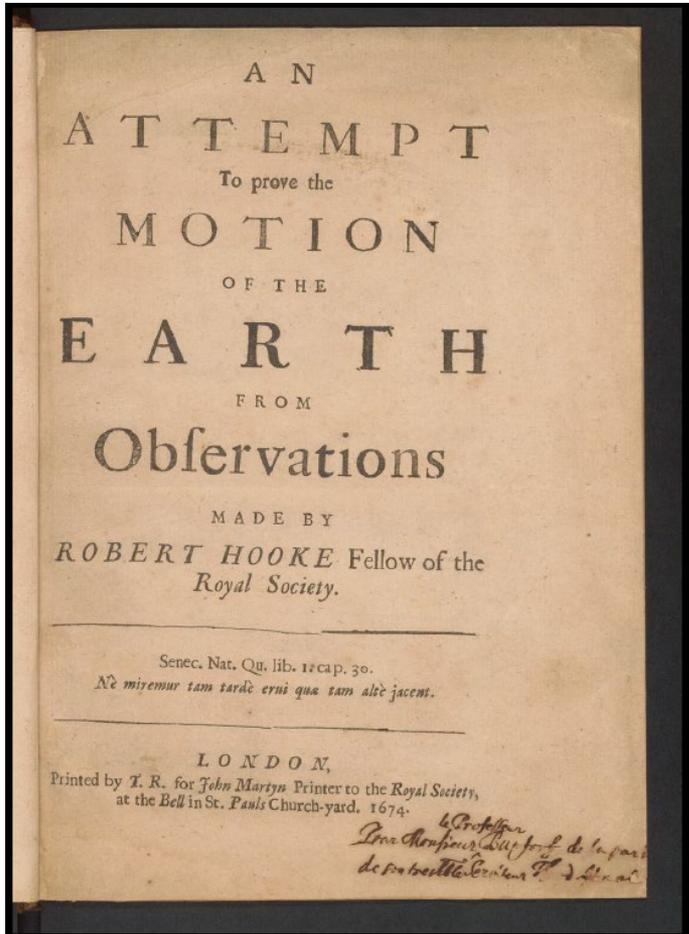
1640

1680

1720



Robert Hooke, 1674



1674 *An Attempt to Prove the Motion of the Earth by Observations*

Un tentativo di dimostrare il moto della Terra mediante le Osservazioni



Robert Hooke, 1674, «An attempt ...»

“Whether the Earth move or stand still hath been a Problem, that since Copernicus revived it, hath much exercised the Wits of our best modern Astronomers and Philosophers, amongst which notwithstanding there hath not been any one who hath found out a certain manifestation either of the one or the other Doctrine (...)”

“Che la Terra si muova o sia ferma è un problema che, da quando è stato posto da Copernico, ha messo alla prova le intelligenze dei nostri migliori Astronomi e Filosofi moderni, tra I quali tuttavia nessuno ha trovato una manifestazione certa dell’una o dell’altra Dottrina (...)”



Robert Hooke, 1674, «An attempt ...»

“Tis not here my business to instruct them in the first principles of Astronomy, (...): But rather to furnish the Learned with an experimentum crucis to determine between the Tychonick and Copernican Hypotheses.(...)”

I confess there is somewhat of reason on both sides, but there is also something of prejudice even on that side that seems the most rational. (...)”

“Non è mio compito qui istruirli sui principi primi dell’Astronomia, (...): Ma piuttosto di fornire all’Istruito un experimentum crucis al fine di determinare tra l’ipotesi Ticonica e quella Copernicana. (...) Confesso che c’è qualcosa di ragionevole da entrambe le parti, ma c’è anche una parte di pregiudizio anche dalla parte che sembra più razionale. (...)”



Robert Hooke, 1674, «An attempt ...»

“Is there not much reason for the Hypothesis of Tycho at least, when he with all the accurateness that he arrived to with his vast Instruments, or Riccioli (...), were not able to find any sensible Parallax of the Earths Orb among the fixt Stars, especially if the observations upon which they ground their assertions, were made to the accurateness of some few Seconds?”

“Non c'è forse molta ragione per l'ipotesi di Tycho, almeno quando egli, con tutta l'accuratezza alla quale è arrivato con I suoi grandi Strumenti, o Riccioli (...), non sono stati in grado di trovare alcuna sensible Parallasse della Terra tra le Stelle fisse, specialmente se le osservazioni sulle quali essi basano le loro asserzioni, sono state fatte con un'accuratezza di pochi secondi d'arco ?”



1520

1560

1600

1640

1680

1720

Kopernik
1473-1543



Tycho 1546-01



Galileo 1564 - 1642

Kepler 1571 - 1630



Ismael Boulliau 1605 - 1694



Newton 1642 - 1727

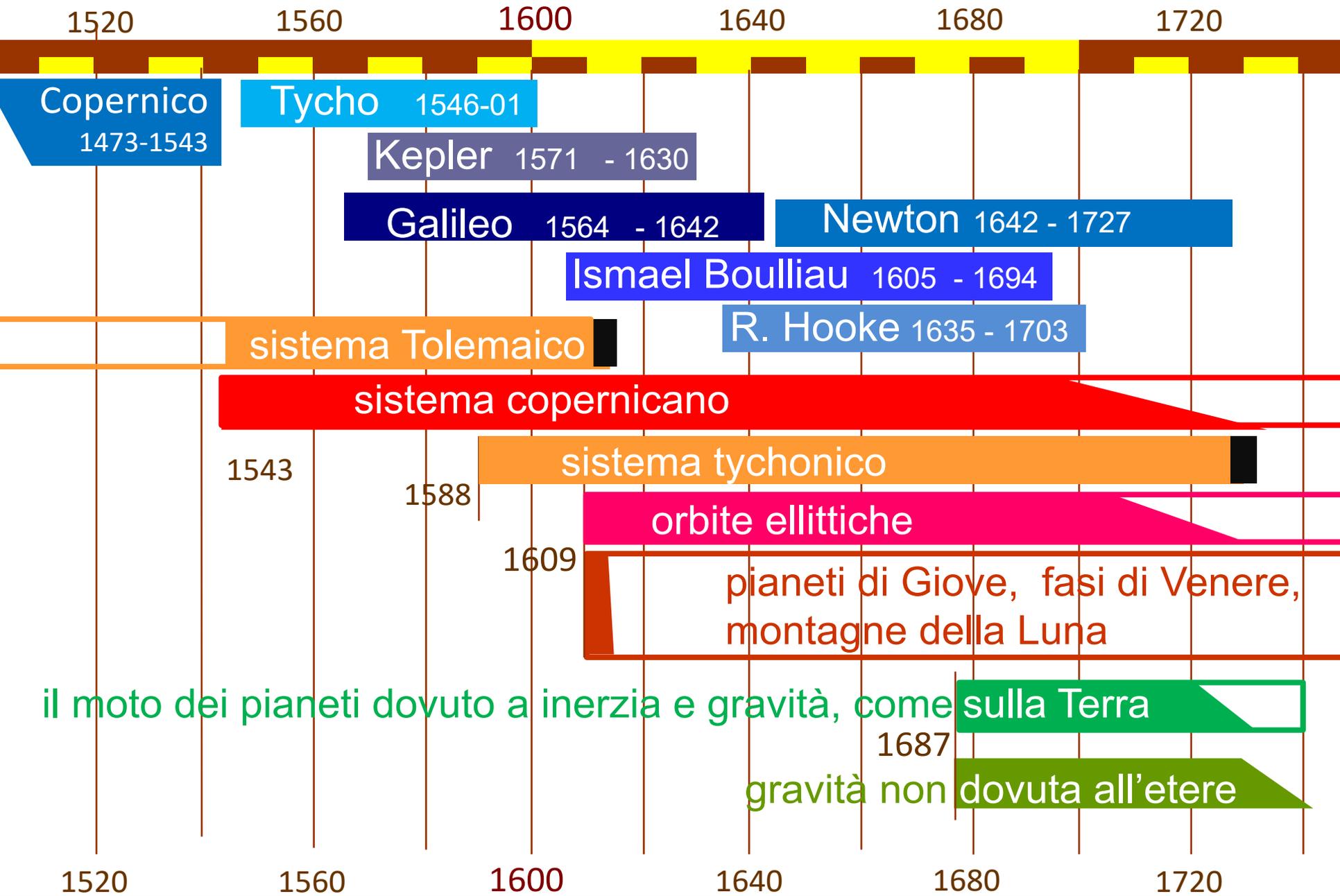
R. Hooke 1635 - 1703



Isaac Newton

- 1684: su sollecitazione di Halley: Forza $\propto 1/r^2 \Rightarrow$ leggi di Keplero
- 1687: *Philosophiae naturalis principia mathematica*:
 - dinamica Newtoniana; leggi di Keplero \Rightarrow Forza $\propto 1/r^2$
 - i pianeti si muovono per effetto della stessa forza gravitazionale che agisce sulla Terra
 - l'attrazione del Sole è molto grande \Rightarrow la massa of Sole è molto grande \Rightarrow \Rightarrow il Sole è al centro





Newton: 'azione a distanza' (senza contatto)

1675: letter to Henry Oldenburg:

[Gravity is the result of] “a condensation causing a flow of ether with a corresponding thinning of the ether density associated with the increased velocity of flow.”

[La gravità è il risultato di] “una condensazione che causa un flusso di etere con una corrispondente diminuzione della densità dell'etere density associata all'accresciuta velocità di flusso.”

1692: letter to Bentley

It is inconceivable that inanimate brute matter should, without the mediation of something else which is not material, operate upon and affect other matter, without mutual contact, as it must do if gravitation in the sense of Epicurus be essential and inherent in it.

E' inconcepibile che materia bruta inanimata possa, senza la mediazione di qualcos'altro che non è materiale, operare su, e avere effetti su altra materia, senza mutuo contatto, come dovrebbe fare se la gravitazione nel senso di Epicuro fosse essenziale e inerente a essa.



Newton: 'azione a distanza' (senza contatto)

1692: letter to Bentley

That gravity should be innate, inherent, and essential to matter, so that one body may act upon another at a distance, through a vacuum, without the mediation of anything else, by and through which their action and force may be conveyed from one to another, is to me so great an absurdity, that I believe no man who has in philosophical matters a competent faculty of thinking can ever fall into it. Gravity must be caused by an agent acting constantly according to certain laws; but whether this agent be material or immaterial, I have left to the consideration of my readers.

Che la gravità debba essere innata, inerente, e essenziale alla materia, così che un corpo possa agire su di un altro a distanza, attraverso il vuoto, senza la mediazione di null'altro, mediante e attraverso il quale la loro azione e forza possa essere portata dall'uno all'altro, è per me un'assurdità così grande, che io credo che nessun uomo che abbia una competente facoltà di pensiero su temi filosofici possa mai cadervi. La gravità deve essere causata da un agente che agisce costantemente secondo certe leggi; ma che questo agent sia materiale o immateriale, l'ho lasciato alla considerazione dei miei lettori.



Newton: sua affermazione ?

***Principia mathematica*, 1687**

Descartes, 1644:

lo spazio è riempito dall'etere,
che forma vortici;

i vortici trascinano i pianeti

Leibniz, 1689, Huygens, 1690

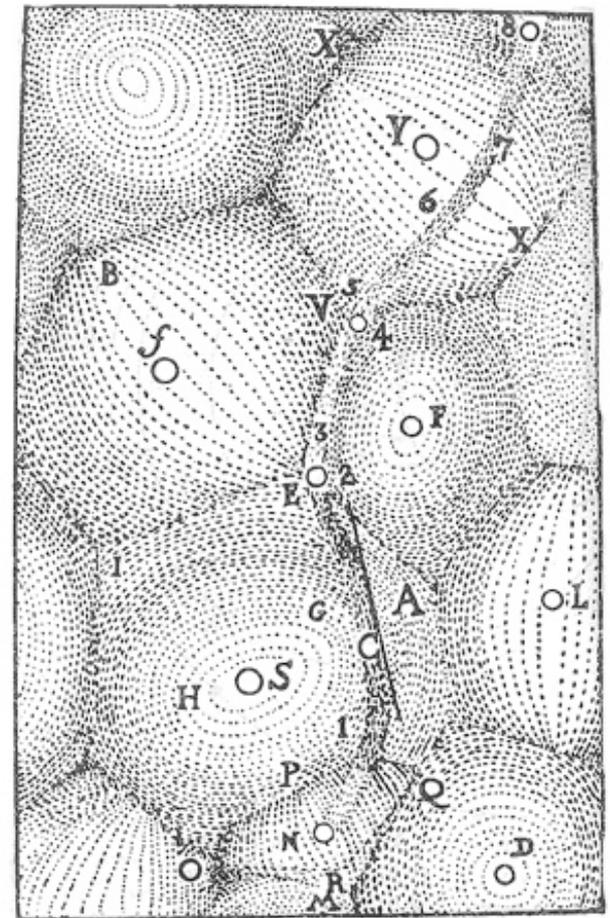
la maggior parte degli scienziati

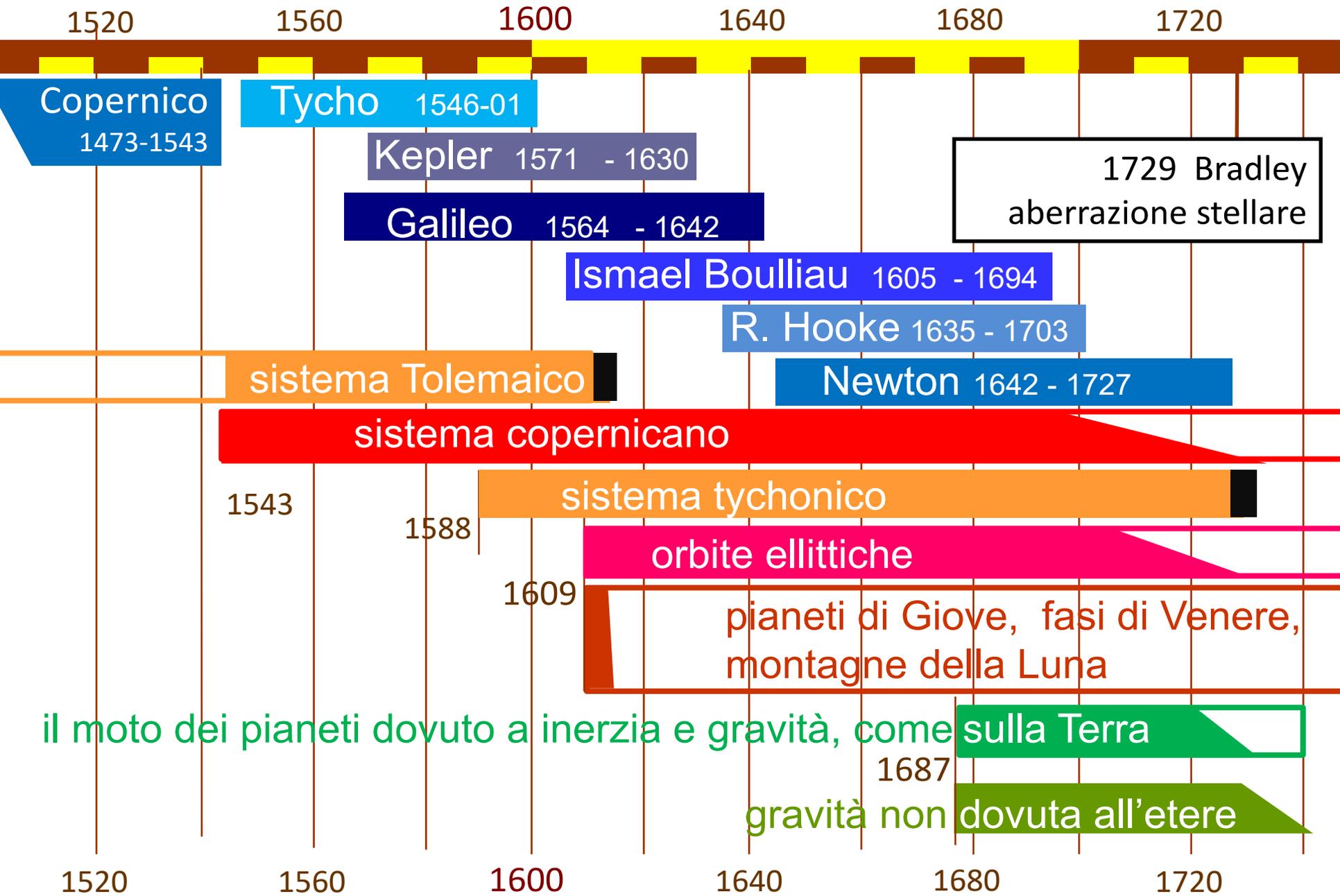
non Britannici, 1687 ~ 1730:

Newton dà descrizione quantitativa,
ma non spiega: la gravità è in qualche modo
dovuta all'etere (sua densità o pressione non uniforme)

Leonhard Euler, 1760:

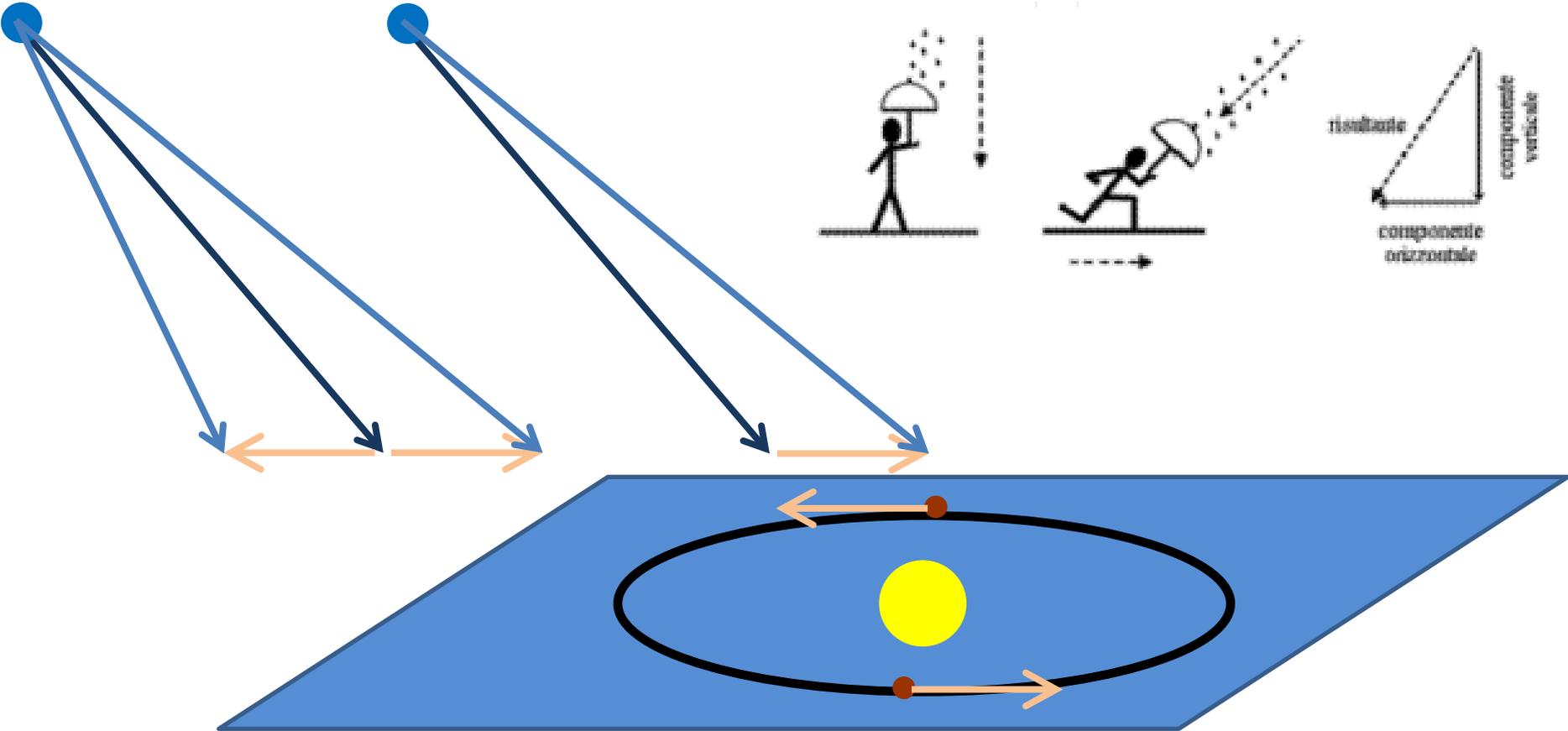
la gravità è dovuta a differenze della pressione dell'etere





Parallasse / aberrazione

1729 James Bradley:
aberrazione stellare annuale:
dipende dalla velocità della Terra



Parallasse / aberrazione

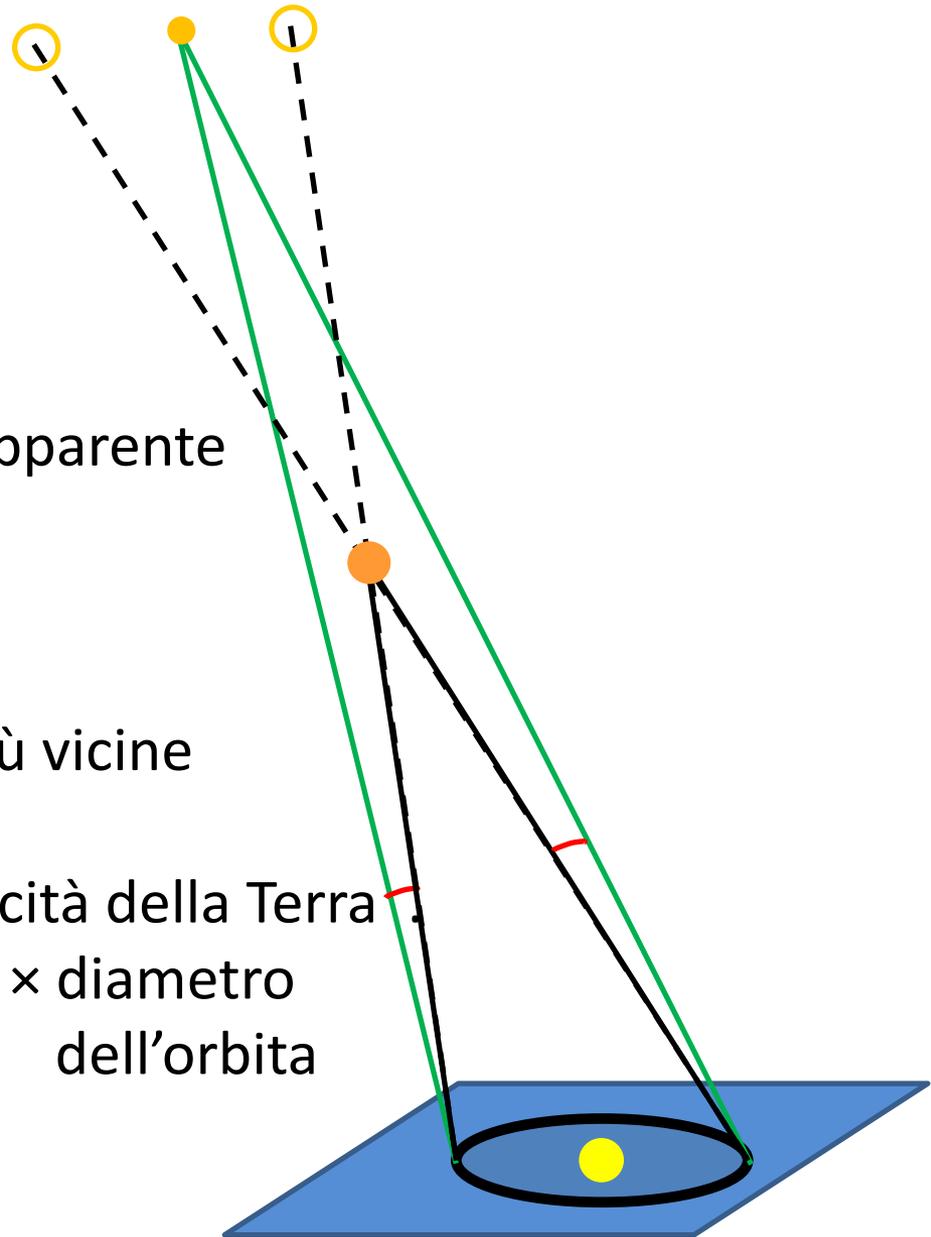
1838 Friedrich Wilhelm Bessel:
parallasse:
dipende dalla posizione della Terra

Sole & Luna: ~ stessa dimensione apparente
 $\sim \frac{1}{2}^\circ = 30' = 1800''$

aberrazione $\sim 20''$

parallasse $\sim 0.3''$ per le stelle più vicine

velocità della luce $\sim 10,000 \times$ velocità della Terra
distanza stelle più vicine $\sim 100,000 \times$ diametro dell'orbita



perché ?

Una rivoluzione:

- sotto due aspetti: astronomico e cosmologico
- che non nasce per problemi empirici [*cfr. quantistica / relatività*]
- che si afferma prima di aver avuto la ‘prova regina’ empirica
- che si sviluppa anche contro evidenze empiriche [*parallasse*],
e in presenza di aspetti che rimangono inspiegati
[moti sulla Terra: Coriolis, Foucault]
[cfr. Planck/Einstein/Bohr]
- che si afferma quando emerge un insieme ragionevolmente completo e coerente



e dopo ?

XVIII & XIX secolo: perfezionamenti

- osservazioni: precisione $1' \rightarrow 10'' \rightarrow 0.5''$
- calcoli: perturbazioni tra i pianeti
- Giove & Saturno: calcolo $\rightarrow 1''$ (Laplace 1786)
- natura sfuggente della gravità dibattuta

XX & XXI secolo: nuove rivoluzioni

- conseguenze della relatività
 - tempo & spazio non separati
 - buchi neri & vari 'strani' fenomeni
- l'Universo si espande ed evolve
- l'Universo non è eterno
- la fonte di energia delle stelle: reazioni nucleari
- nuovi interrogativi: 'materia oscura', 'energia oscura'





Grazie !

