

Società Italiana di Fisica
106° Congresso Nazionale
14-18 Settembre 2020

Tycho Brahe. La precisione

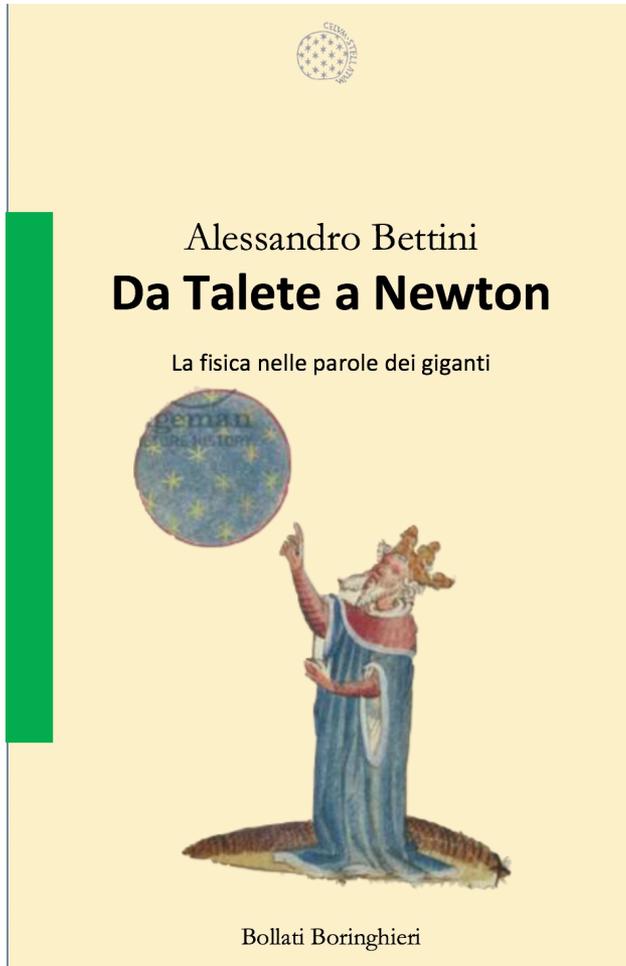
A. Bettini

Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia G. Galilei

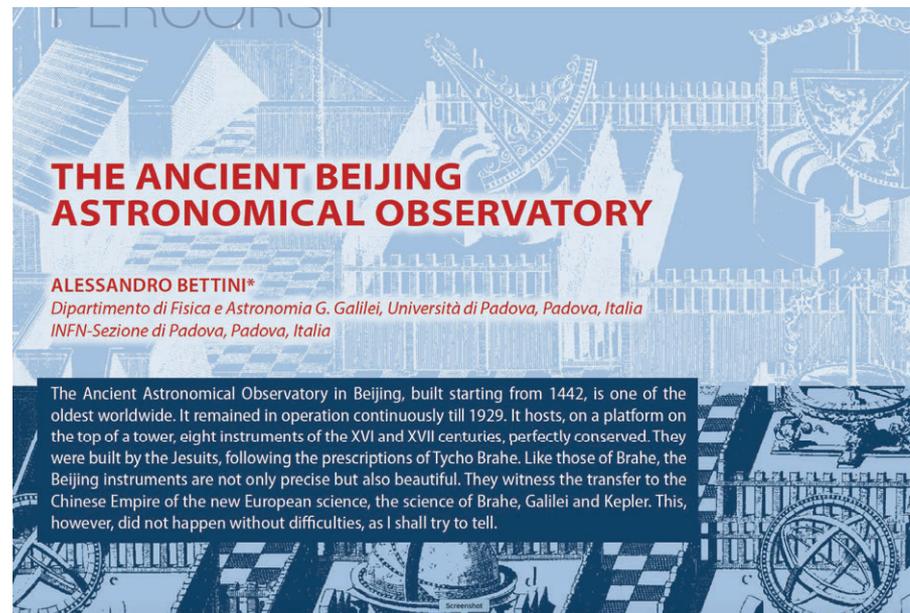
INFN - Sezione di Padova

18 Settembre 2020

Miei precedenti su Brahe



Il Nuovo Saggiatore Vol. 35. n. 1-2 2020



Un'osservazione di Feynman

Tycho Brahe ebbe un'idea differente da tutte quelle degli antichi: pensò che i dibattiti sulla natura dei moti dei pianeti si potessero al meglio risolvere se le loro posizioni nel cielo si fossero misurate con sufficiente precisione. Se le misure avessero mostrato esattamente come i pianeti si muovono, si sarebbe forse potuto stabilire uno o l'altro punto di vista. Fu un'idea formidabile: per scoprire qualcosa, è meglio fare esperimenti accurati che insistere su profondi argomenti filosofici.

Richard Feynman . The Feynman Lectures in Physics Vol I Lect. 7

Tyge (Tycho) Brahe

Skåne 1546 - Praga 1601

14.12.1546. Nasce a Skåne in una nobile famiglia; allevato dallo zio Jørgen

1559. (12 anni) Università di Copenhagen a giurisprudenza, per volere di Jørgen, per diventare uomo di stato

21.8.1560. **Primo evento. Eclisse di sole**, Tycho trova che il modello di Tolomeo la prevede esattamente e vuole studiare astronomia

1562 (15 anni). Lo zio lo trasferisce all'Università di Lipsia e incarica un tutore di controllare che il ragazzo studi legge e non perda tempo con le stelle. Ma Tycho di notte studia e osserva con un compasso e un goniometro

Il giovane Tycho. La congiunzione

1563. *Imparai da solo, senza alcuna guida. Di fatto non ebbi mai il dono di un insegnante di matematica; altrimenti avrei progredito più rapidamente e meglio.*

Calcola che si stava avvicinando una congiunzione di Giove e Saturno

Tavole alfonsine (Sistema tolemaico) prevedono una data

Tavole prussiane (Sistema copernicano), prevedono un altro giorno

24 agosto **Secondo evento Congiunzione**, Entrambe le previsioni sono sbagliate

Benché questo metodo di osservazione non fosse molto accurato, tuttavia mi premisi di progredire al punto al quale divenne manifestissimo che entrambe le tavole (copernicana e tolemaica) soffrivano di errori intollerabili. Ciò apparve evidente alla grande congiunzione di Saturno e Giove del 1563

1564 (18 anni). All'insaputa del pedagogo riesce ad avere qualche lezione di astronomia e a costruirsi strumenti un po' più precisi, e *mi misi ansiosamente ad osservare le stelle ogni volta che potessi beneficiare di cielo sereno, e spesso stavo sveglio tutta la notte, mentre il mio pedagogo dormiva e non si accorgeva di nulla. Osservai le stelle e annotai le osservazioni in un libretto, che ancora conservo.*

Il giovane Tycho. La supernova

11.11.1572. Terzo evento. È sera e Tycho cammina verso casa

Guardando direttamente sopra la mia testa, improvvisamente vidi una strana nuova stella, che mandava la sua luce di bagliore raggiante che colpì i miei occhi. Stupito, attonito e sbalordito, rimasi immobile per diverso tempo con i miei occhi fissi intensamente su di essa e notai che quella stella si trovava vicino alle stelle attribuite nell'antichità a Cassiopea.

Quando finalmente fui convinto che nessuna stella come quella aveva mai brillato prima, fui condotto in tale perplessità dall'incredibilità della cosa da cominciare a dubitare dei miei occhi, e così, rivolto ai servi che mi accompagnavano, domandai loro se essi pure vedessero una stella estremamente luminosa nella posizione che indicai. Immediatamente risposero ad una voce che la vedevano certamente e che era estremamente brillante. Ma, nonostante la loro conferma, rimanendo ancora nel dubbio a causa della novità della cosa, indagai con alcuni contadini, che per caso stavano passando su dei carri, se potessero vedere una certa stella lassù. Ed essi gridarono che vedevano un'enorme stella, che mai avevano vista là in alto

Misura accuratamente per molte notti. *De stella nova.* La nuova stella è molto più lontana dei pianeti, come le altre stelle fisse nonostante le assurdità avanzate *dalla comune mandria di scribacchini.*

Più tardi, a Ven, misurando le orbite di comete distruggerà le sfere rigide di Aristotele e di Copernico

Isola di Ven (Venusia)

1575. Invito del re **Federico II.** Divenire feudatario dell'isola di Ven nell'Øresund e costruirvi un osservatorio astronomico

1576-1581. Costruzione di Uraniburg

1584 Inizio costruzione di Stejerneborg

Grande infrastruttura con finanziamento pluriennale garantito

Programmazione ventennale

Costo totale 1 tonnellata di oro = $7 \cdot 10^9$ €: 1%

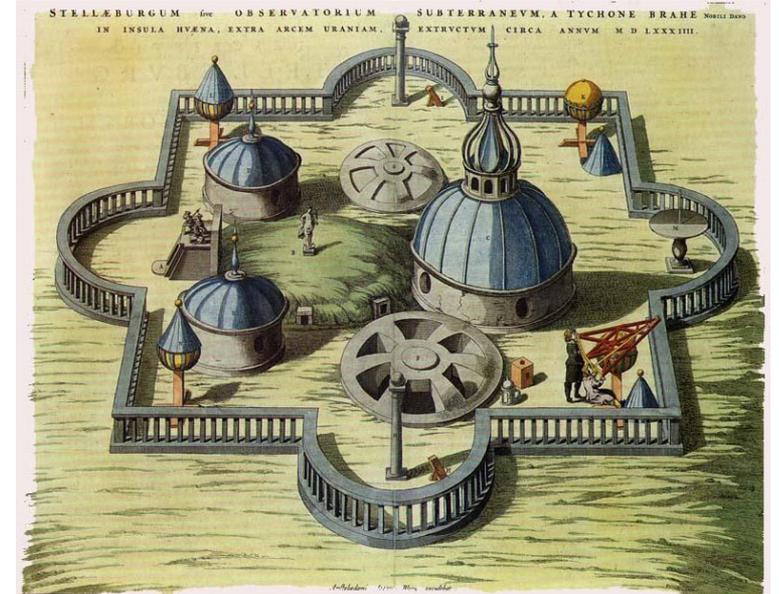
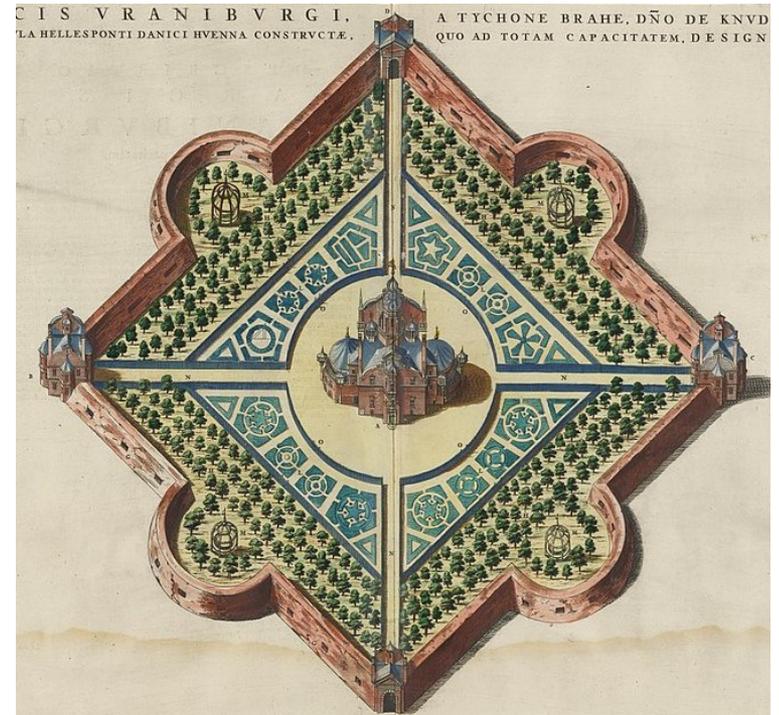
PIL Danimarca

Personale 15-20 per un totale di un centinaio

Grande biblioteca, laboratori, stamperia

1597. Il nuovo re Cristiano IV interrompe il supporto

Brahe si sposta a Praga, come Astronomo Imperiale



Ven oggi

Quanto rimase a Venusia
gradualmente sparì
C'è un museo e ricostruzioni



Astronomiae Instauratione Mechanica

Ma ci ha lasciato le accurate descrizioni biografiche, delle infrastrutture, degli strumenti, delle osservazioni nella *Meccanica per l'Astronomia Riformata* 1598 da cui cito

J.L.E. Dreyer Editore *Tychonis Brahe opera omnia* in 15 volumi Copenaghen 1913 -1929

H Raederm et al. *Tycho Brahe's Description of his Instruments and Scientific Work*, København 1946 (Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab).

http://www5.kb.dk/en/nb/tema/webudstillinger/brahe_mechanica/toc.html

9/25/20

A. Bettini Padova Unive



Riformare l'astronomia per accuratezza sotto il 1'

L'accuratezza era stata dell'ordine dei 10' attraverso i secoli, dagli Ellenisti, ai Musulmani, al XVI secolo. La rivoluzione di Brahe ebbe successo per

- Pianificazione pluriennale
- Progettazione accurata di tutta la strumentazione necessaria
 - Istruzione del personale tecnico
 - Progettare, costruire, misurare, imparare e tornare a capo
 - Costruire strumentazione multipla per controlli incrociati
- Messa a punto di programmi di calcolo e analisi dei dati
- Biblioteca con tutta la letteratura disponibile
- Collaborazioni internazionali ben selezionate
- Stamperia per diffusione risultati
- Ricostruire tutta la base dei dati astronomici con nuovi criteri
 - Determinare l'orbita del Sole con precisione sia nelle coordinate sia nel tempo
 - Costruire una griglia di 9 stelle principali
 - Valutazione delle incertezze statistiche (misure ripetute)
- Valutazione e controllo delle sistematiche
 - Correzione della rifrazione

Costruire strumenti

Voglio affermare qui, sia riguardo questo strumento sia gli altri, che tutto in essi deve essere vicino alla perfezione quanto possibile sotto ogni aspetto e che, di conseguenza, vanno impiegati artigiani esperti, che conoscano come eseguire i lavori a regola d'arte, o, altrimenti, siano in grado di impararlo.

E, anche se forse non possono fare il lavoro alla perfezione la prima volta, il costruttore non se ne deve sentire scoraggiato, ma invece far ripetere il lavoro ed eliminare i difetti in tutti i modi, sino a che non ne rimanga alcuno.

Le osservazioni stesse renderanno tutto ciò sufficientemente chiaro all'esperto, se queste saranno diversificate. Di conseguenza, noi abbiamo realizzato la maggior parte degli strumenti descritti in questo libro più di una volta, non senza grandi spese. Di fatto dovemmo rifare completamente alcuni strumenti.

Astronomiae Insatauratae Mechanica

Meccanica per l'astronomia riformata 1598

Per prima cosa determinammo il corso del Sole tramite accurate osservazioni durate molti anni. Non solo investigammo con gran cura le sue entrate nei punti equinoziali ma anche considerammo le posizioni tra questi punti e i punti dei solstizi, ...In tutti i casi le osservazioni furono fatte e ripetutamente confermate. Successivamente, da queste io calcolai l'apogeo e l'eccentricità corrispondenti ai tempi presenti. Sia riguardo all'apogeo sia all'eccentricità un ovvio errore è presente sia nelle Tavole Alfonsine sia nel lavoro di Copernico; tanto che l'apogeo del Sole è quasi tre gradi avanti rispetto al valore di Copernico

Tenni conto della rifrazione della luce del Sole nelle sue posizioni invernali e introdussi una correzione che essi avevano trascurato.

Inoltre, nei limiti che il tempo e le circostanze ce lo permisero, determinammo accuratamente le posizioni, cioè sia le latitudini sia le longitudini, di tutte le stelle fisse visibili ad occhio nudo, sino a quelle che sono denotate come stelle della sesta grandezza. L'accuratezza era di un minuto d'arco, in qualche caso anche mezzo minuto d'arco. In questo modo determinammo le posizioni di mille stelle.

Controllo della precisione

Controllo moderno. W. Wesley nel 1978 considerò 8 delle 9 stelle base di Brahe Partendo dai dati dello *Smithsonian Astrophysical Observatory star catalog* calcola le elevazioni al passaggio al meridiano di Ven che quelle stelle avevano avuto tra il 1583 e il 1590 nelle notti delle misure di Brahe

Star/Instrument	Mural quadrant	
α Arietis	+115".5 (15".4)	Grande quadrante murale In parentesi gli errori (deviazione standard) sulla declinazione basati sull'altezza al meridiano Sono intorno al quarto di minuto primo
α Tauri	+59".6 (15".1)	
μ Geminorum	+23".5 (17".7)	
β Geminorum	+25".9 (14".9)	
α Leonis	-25".8 (13".4)	
α Virginis	-22".0 (17".7)	
α Aquilae	-97".6 (14".9)	
α Pegasi	+20".1 (11".1)	

TABLE 4. Average error of basic instruments based on eight fundamental stars.

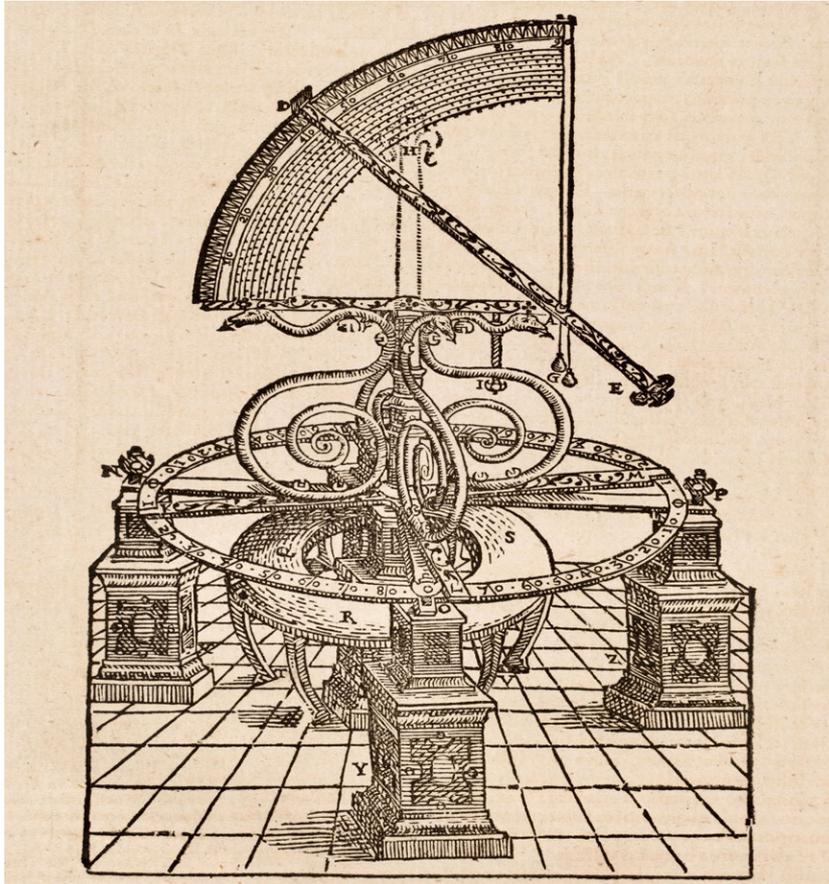
Instrument	Average error	
Mural quadrant	34".6	Media dei valori assoluti degli errori
Revolving wooden azimuthal quadrant	32".3	
Revolving steel quadrant	36".3	
Portable quadrant	40".1	
Small brass quadrant	48".8	
Astronomical sextant	33".2	
Large equatorial armillary	38".6	

Gli errori medi sono sostanzialmente stabili durante gli anni delle osservazioni

W. Wesley. *Journal for the History of Astronomy*, 9 (1978) 42-53.

Quadrante azimuthale medio di ottone

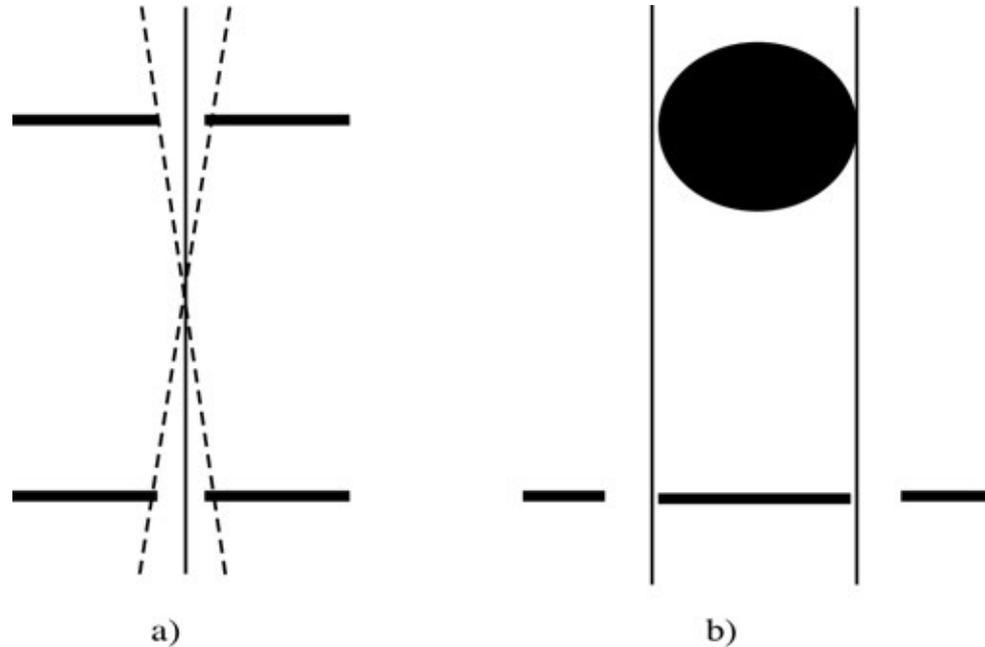
Il quadrante, che è fatto di una robusta piastra di ottone, ha dimensione di un cubito e mezzo dal centro alla circonferenza. Lo spessore è circa mezzo pollice.



In primo luogo il quadrante stesso, che è attaccato ad un robusto cilindro di ferro, può essere fatto girare in un tubo All'esterno, quest'ultimo è sorretto da serpenti sinuosi, che servono al doppio scopo di supporto e decorazione. Sotto il tubo c'è un'altra alidada, che insieme al piano del quadrante si può ruotare sull'orizzonte d'acciaio NOP in ogni direzione. Abbiamo usato questo metodo in quasi tutti i nostri strumenti. Svolgendo queste operazioni, l'alidada col suo indice K mostra l'azimut della stella osservata, assieme alla sua elevazione, con le elevazioni misurate dal quadrante di sopra, e l'azimut tramite il menzionato cerchio azimuthale.

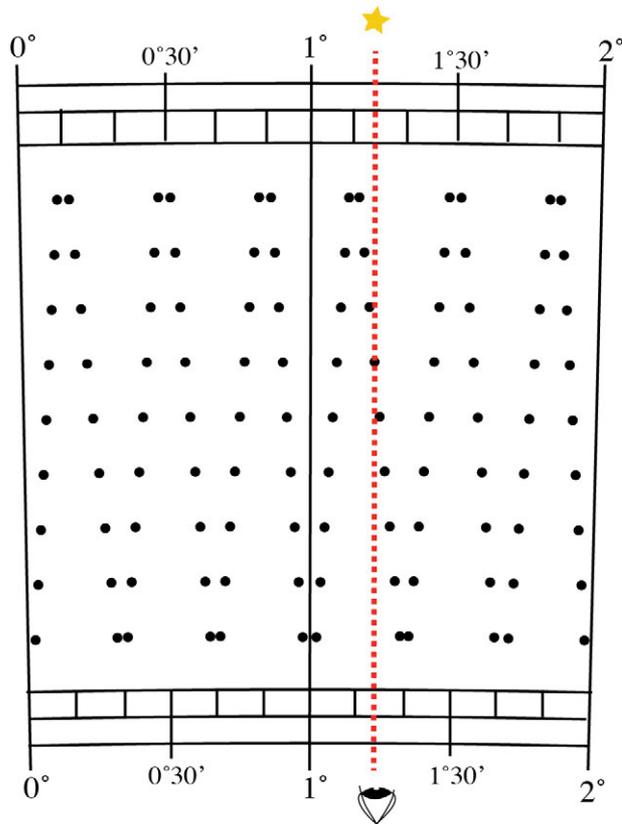
Le illustrazioni della *Mechanica* in B/N a <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b2100066v/f1.item.r=tycho+brahe.langFR>
A colori a <https://wartung.slub-dresden.de/en/>

L'alidada e le sue pinnule



Alidada lunga 1 m con due fenditure di 1 mm di diametro agli estremi
La stella si vede in tutte le direzioni comprese tra le due tratteggiate in figura (non in scala), cioè entro un intervallo angolare di $\pm 1.8'$.
La stella si muove e attraversa l'angolo sotteso dalle fenditure io in circa $14''$.
Trucco doppia fenditura in b)

Il metodi dei punti trasversali



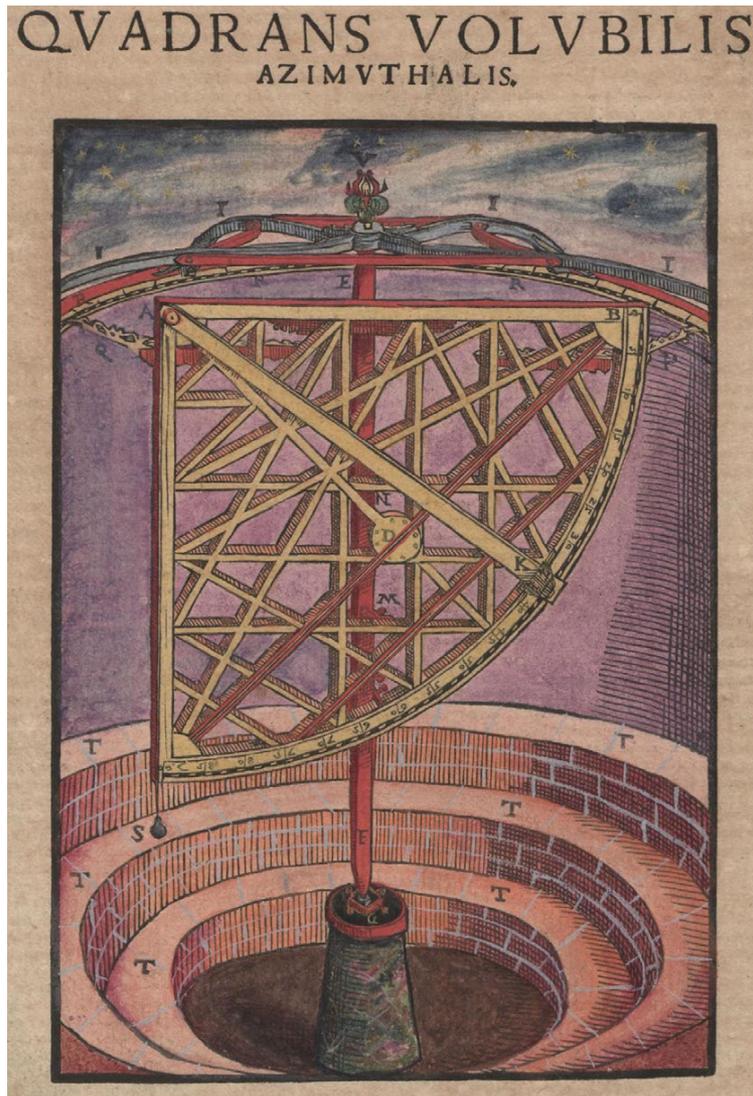
Museo Tycho Brahe. Augsburg. Ricostruzione



In questo modo si ottiene che la linea di vista quando passa attraverso uno di questi punti durante l'osservazione, indica il minuto d'arco, o una sua frazione corrispondente al punto dal quale si scosta.

[https://de.wikipedia.org/wiki/Römerturm_\(Augsburg\)#/media/Datei:Augsburger_Quadrant1.JPG](https://de.wikipedia.org/wiki/Römerturm_(Augsburg)#/media/Datei:Augsburger_Quadrant1.JPG)

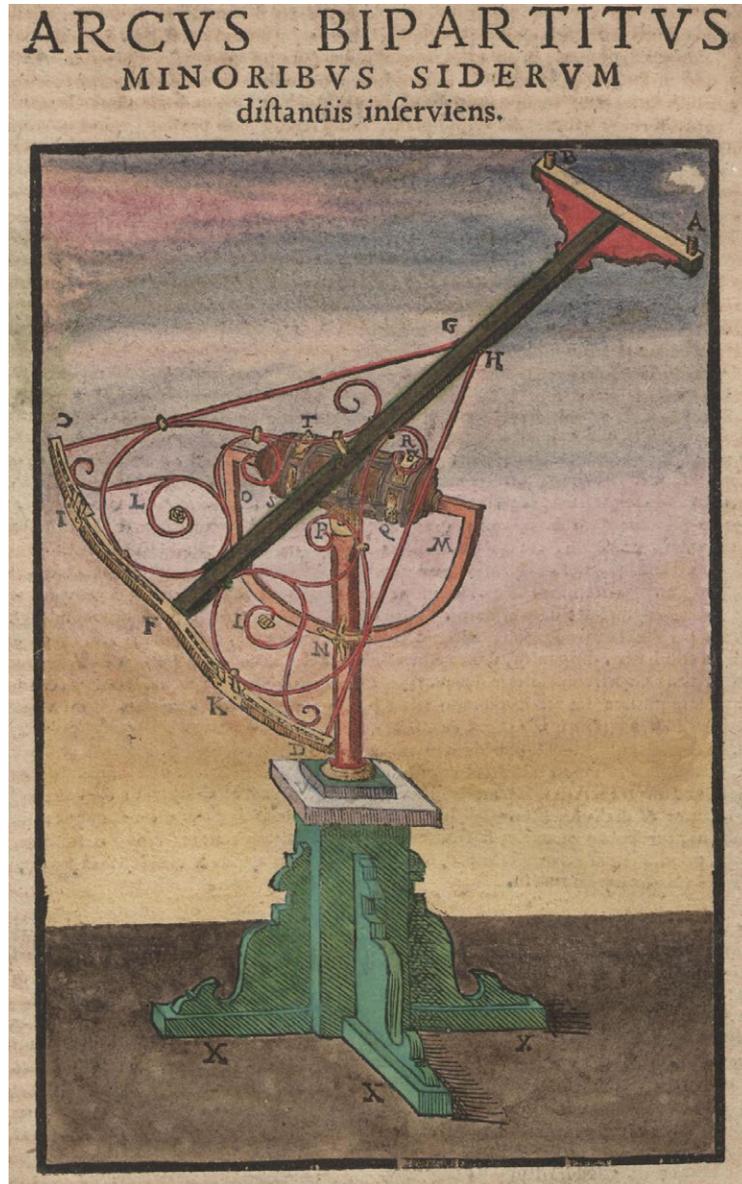
Quadrans volubilis



SLUB Dresden, Digital Collections, S.B.14

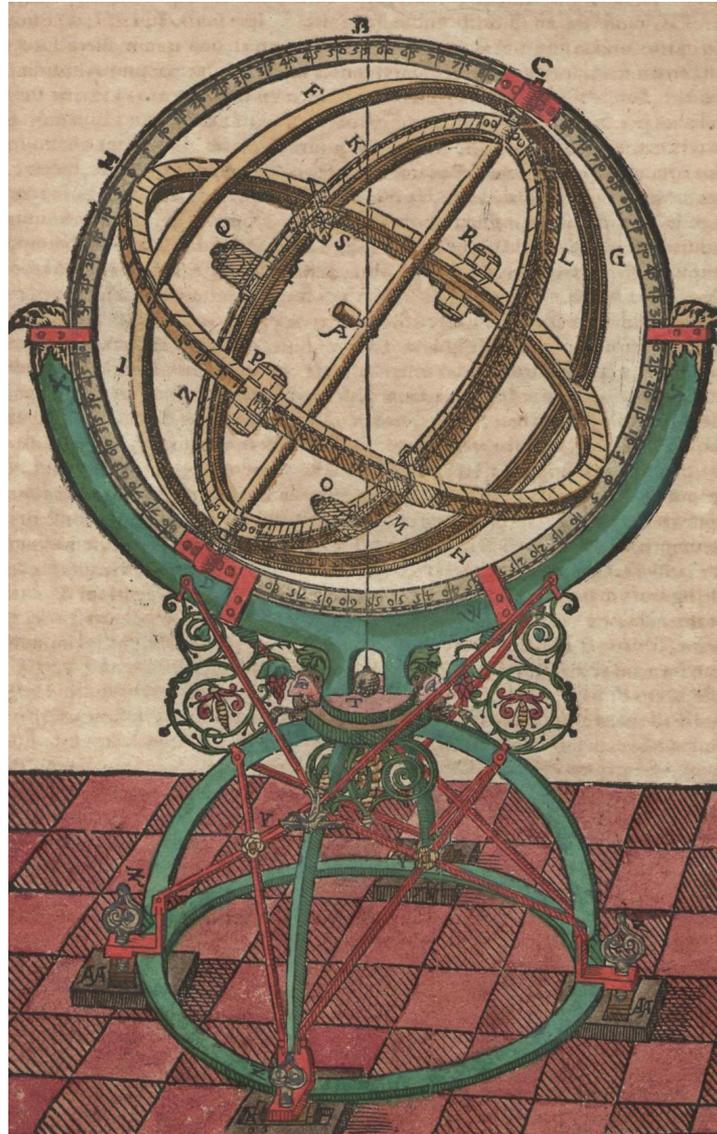
A. Bettini Padova University and INFN

Arcus bipartitus



SLUB Dresden, Digital Collections, S.B.14
A. Bettini Padova University and INFN

Armilla Equatoriale



SLUB Dresden, Digital Collections, S.B.14

A. Bettini Padova University and INFN

Quadrans Muralis vel Tychonicus

dieci secondi sono facilmente distinguibili, ed anche la loro metà, o cinque secondi d'arco, si legge senza difficoltà. Il tutto è fatto per mezzo di punti trasversali secondo il nostro metodo usuale



L'uso del grande quadrante è per determinare l'elevazione delle stelle entro un sesto di minuto primo, mirando attraverso le fenditure superiore ed inferiore di una delle pinnule e lungo i corrispondenti lati del cilindro, e leggendo l'altezza sul bordo esterno del quadrante in corrispondenza della posizione della pinnula. Si può anche trovare l'istante di transito sul meridiano dalla veduta doppia della pinnula e del cilindro, usando gli orologi precisi di cui ho parlato. ...Ho avuto molta fiducia in questo quadrante, ma, ciò non ostante, ho anche confrontato con altri grandi quadranti, in maniera da evitare il minimo sospetto di errore in queste sottili misure

Praga

1597. TB lascia Ven

1598 Astronomo Imperiale del Sacro Romano Imperatore **Rodolfo II** a Praga

1601 Si spegne dopo 11 giorni di malattia.

Si dice che abbia mormorato poco prima di spirare, rivolto a Kepler:

Ne frustra vixesse videar

Non lasciare che io abbia vissuto invano

Statua di Brahe e Kepler a Praga di Josef Vajce

Foto Andrzej O

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Praha_Kepler_Brahe_2.jpg



Johannes Kepler e Marte

1597. Il giovane (26) Kepler aveva mandato a TB il suo *Mysterium Cosmographicum*
Scriverà nella *Astronomia Nova*

in risposta, lui menzionò (tra le altre cose) le sue osservazioni, e accese in me un travolgente desiderio di vederle. Inoltre, Tycho, che fu davvero lui stesso una gran parte del mio destino, non cessò da allora dall'invitarmi ad andare da lui.

Kepler però è titubante di spostarsi sino a Ven, ma quando TB si è stabilito a Praga, nel 1600 Kepler va a trovarlo

a quel tempo, il lavoro che egli aveva in mano, assieme al suo aiuto Christian Severinus (Longomontanus), era la teoria di Marte...Se Christian avesse allora trattato un altro pianeta, pure io sarei entrato a lavorare su questo. Io quindi, una volta di più, penso che sia accaduto per disegno divino che io arrivassi nello stesso tempo nel quale egli era intento su Marte, dai moti del quale solamente, noi saremmo arrivati a conoscere i segreti nascosti dell'astronomia, o saremmo rimasti ignoranti per sempre

Le orbite dei pianeti sono molto simili da cerchi eccentrici. Indistinguibili da ellissi con le precisioni pre Brahe

Con la precisione di TB il solo Marte ha ellitticità abbastanza grande (0.17)

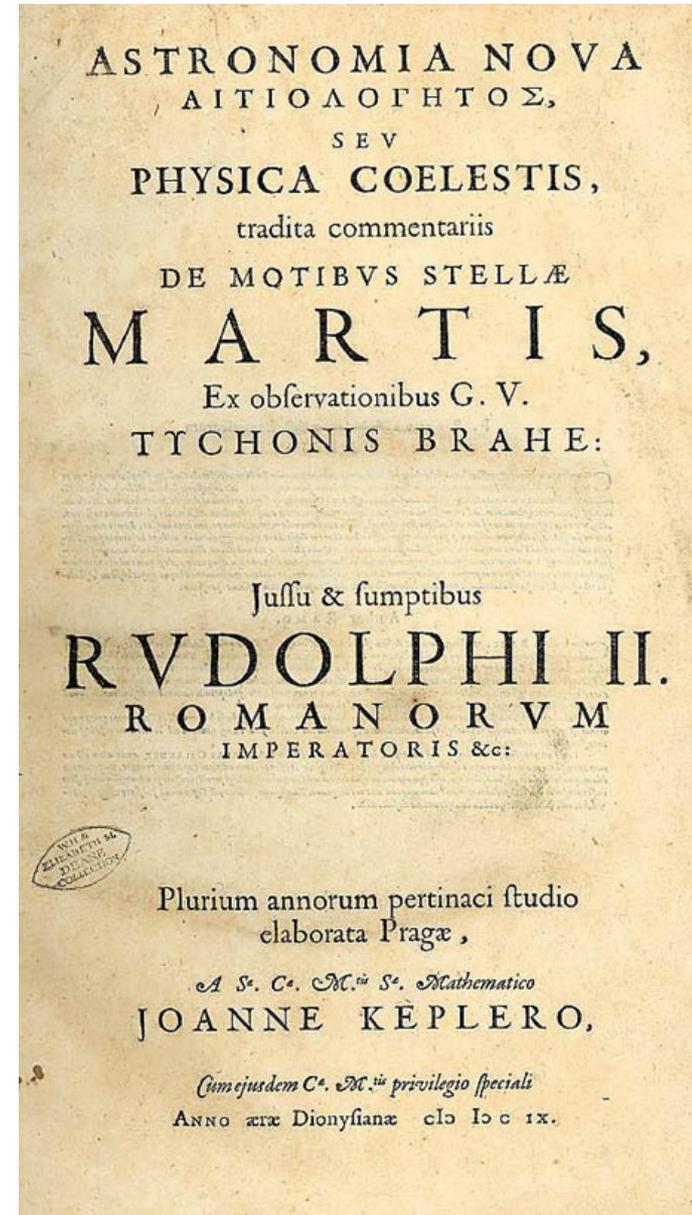
Astronomia Nova

1602 Kepler inizia la sua «lotta contro Marte»

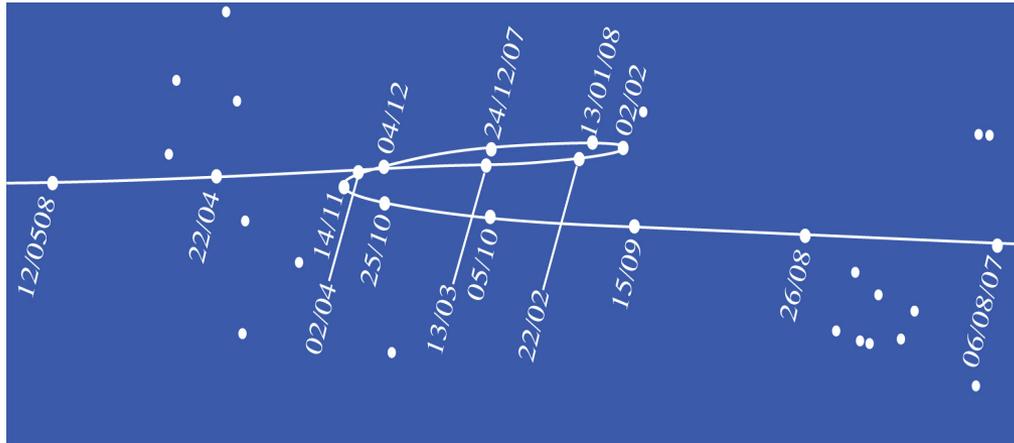
In sette anni di lavoro teorico (non continuamente) riuscirà a vincere il dio della guerra

1609. *Astronomia nova* una delle massime cattedrali della fisica, descrive tutti i tentativi, i loro fallimenti, le correzioni, ancora fallimenti, sino alla scoperta finale della forma vera delle orbite

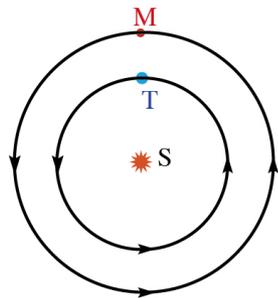
Ottima traduzione in inglese, con commenti di Donahue J. Kepler; *Astronomia nova* Translated by W. H. Donahue. Green Lion Press. Santa Fe, NM, USA 2015.



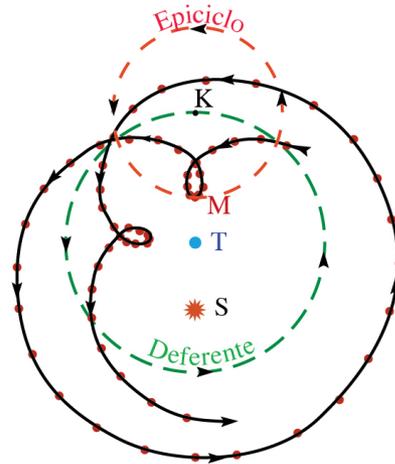
Il problema di Marte



Un problema del moto dei pianeti è il moto retrogrado che accade, per Marte, ogni circa due mesi (riflesso del moto dell Terra attorno al Sole)



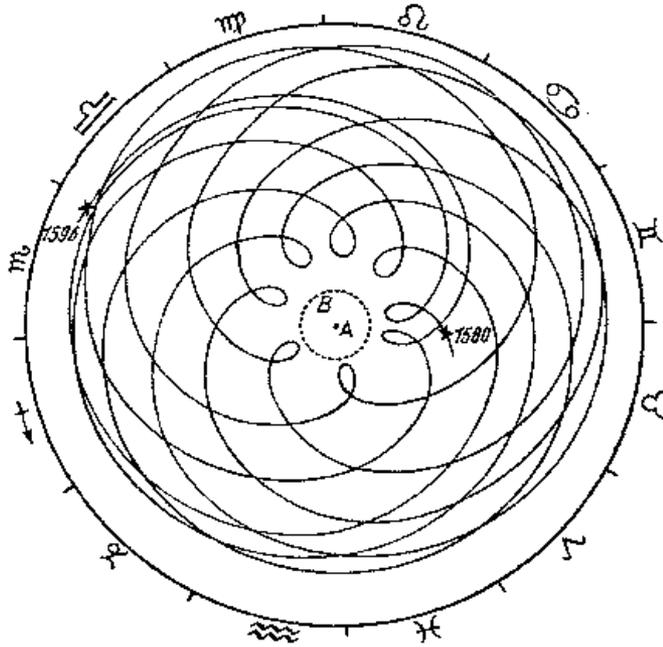
b)



a)

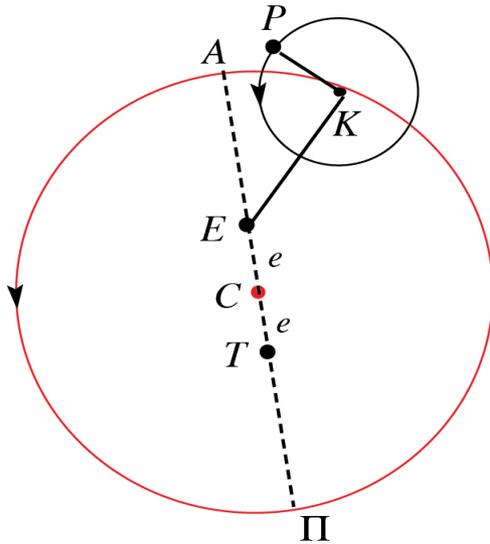
Soluzione approssimata (Ipparco): epiciclo e deferente

Il problema di Marte



Ma i «riccioli» non sono tutti uguali soprattutto per Marte

Perché l'orbita è ellittica e la legge delle aree



Soluzione geniale di Tolomeo: l'equante
Sta dalla parte opposta della Terra sulla linea
delle absidi alla stessa distanza dal centro del
deferente: eccentricità bipartita

La velocità angolare di EK è costante
Legge delle aree senza saperla

Gli attacchi a Marte

1. L'ipotesi vicaria (la chiamerò)

Terra come Tolomeo, Marte simile ma con eccentricità non bipartita esattamente, ma calcolata in base a posizioni acroniche di Marte (sorge al crepuscolo)

Controllo: posizioni previste in longitudine OK ($< 1'$), in latitudine no

2. Bipartizione esatta sia per Terra sia per Marte

Controllo: posizioni previste in latitudine OK; previste in longitudine OK nei quadranti ma non altrove. Negli ottanti differenze di circa $8'$

E da questa così piccola differenza di otto minuti si vede chiara la ragione per la quale Tolomeo, quando usò la bipartizione, fu soddisfatto della posizione così definita per il punto equante... Infatti Tolomeo afferma di non poter andar sotto (la precisione di) $10'$, cioè un sesto di grado, nelle sue osservazioni. L'incertezza o, come dicono, l'intervallo delle osservazioni eccede quindi l'errore nei calcoli di Tolomeo.

Dato che la divina benevolenza ci ha concesso Tycho Brahe, osservatore diligentissimo, dalle osservazioni del quale appare che Marte mostri un errore di $8'$ nel calcolo secondo Tolomeo, è doveroso che noi con mente grata riconosciamo ed onoriamo questo favore di Dio.

Prosegue l'attacco

Ora questi otto minuti da soli, dato che non si possono ignorare, guideranno la via alla riforma di tutta l'astronomia, divenendo materia della gran parte di questo lavoro

Kepler riparte da zero, considera dove può aver sbagliato, ricalcola tutti i parametri, in particolare le eccentricità, trova la legge delle aree e sviluppa un nuovo modello (immaginando un'azione magnetica del Sole), ancora con un cerchio eccentrico, e calcola le longitudini di Marte: OK dappertutto tranne che negli ottanti, ancora fuori di $+8'$ a 45° , $-8'$ a 135°

La legge delle aree gli dice che ha fatto muovere Marte troppo velocemente nelle absidi e troppo lentamente nei quadranti. Bisogna schiacciare l'orbita in mezzo

Se uno preme una salsiccia ben panciuta nel mezzo, egli strizzerebbe e schiaccerebbe la carne macinata, della quale è riempita, dalla "pancia" verso gli estremi, facendola uscire al di sopra e al di sotto della sua mano

Prova un'ellisse, col Sole al centro. In longitudine, ora OK dappertutto tranne che negli ottanti, fuori di $-6'$ a 45° , $+7'$ a 135° . L'opposto di prima, schiacciato troppo!

Il finale

Il cammino è ancora lungo.

Il prossimo tentativo è una curva che chiama, via buccosa, cammino guanciaie (gonfiate col fiato)

E il grade calcolatore sbaglia il calcolo trovando un (inesistente) disaccordo di 5,5'; se non lo sbagliava avrebbe trovato che fittava i dati

Il lampo di genio: un piccolo spostamento dell'ellisse, portando il Sole in un fuoco (capitolo 59). E adesso tutto torna

Nonostante avessi considerato e cercato quasi al punto di impazzire, non ero riuscito a scoprire per quale ragione il pianeta,..., dovesse invece seguire, in accordo perfetto con le distanze osservate, il cammino ellittico, ...Oh me ridicolo! Ad aver pensato che la librazione diametrale non potesse essere la via all'ellisse. ...

Negli ultimi 11 capitoli dimostra che ora tutti i dati sono spiegati entro gli errori

I Gesuiti a Beijing



Matteo Ricci
(Li Mato)
A Pechino 1601-1610

Johan Adam Schall von Bell
(Thang Jo-Wang)
A Pechino 1630-1666

Ferdinand Verbiest
(Nien Nan Huai-Jen)
A Pechino 1660-1688

Immagine da J. B. Du Halde, "Description de la Chine et de Tartarie chinoise" P. G. Lemercier, Paris 1735.

Il giovane Imperatore Kangxi 简体字

Nato nel 1654

Imperatore nel 1661

Periodo di reggenze; gesuiti in carcere

1668 prende il potere

Studia l'astronomia, tradizionale e europea

Riforma del calendario?

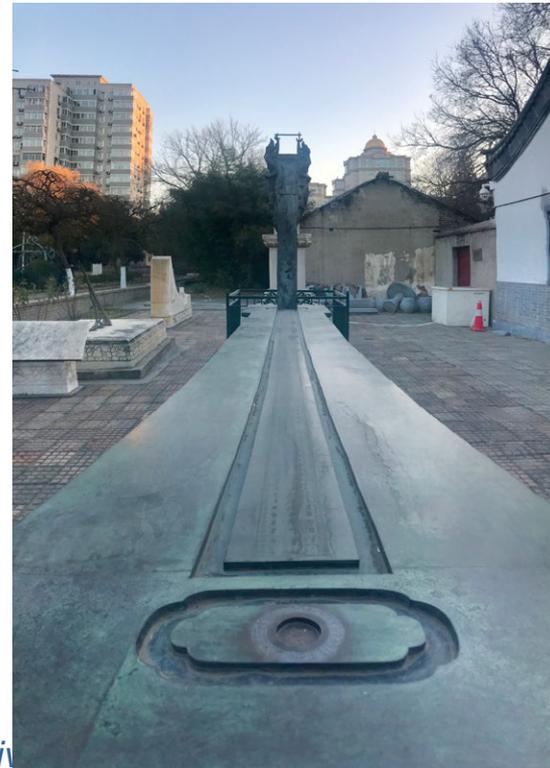
Indice una gara tra astronomi

Predire la lunghezza dell'ombra dello gnomone a mezzogiorno di un giorno a sua scelta

Verbiest predice esattamente, Yang rifiuta

Verbiest Direttore dell'Osservatorio, Yang cacciato

Verbiest costruisce nuovi strumenti sui disegni di Brahe

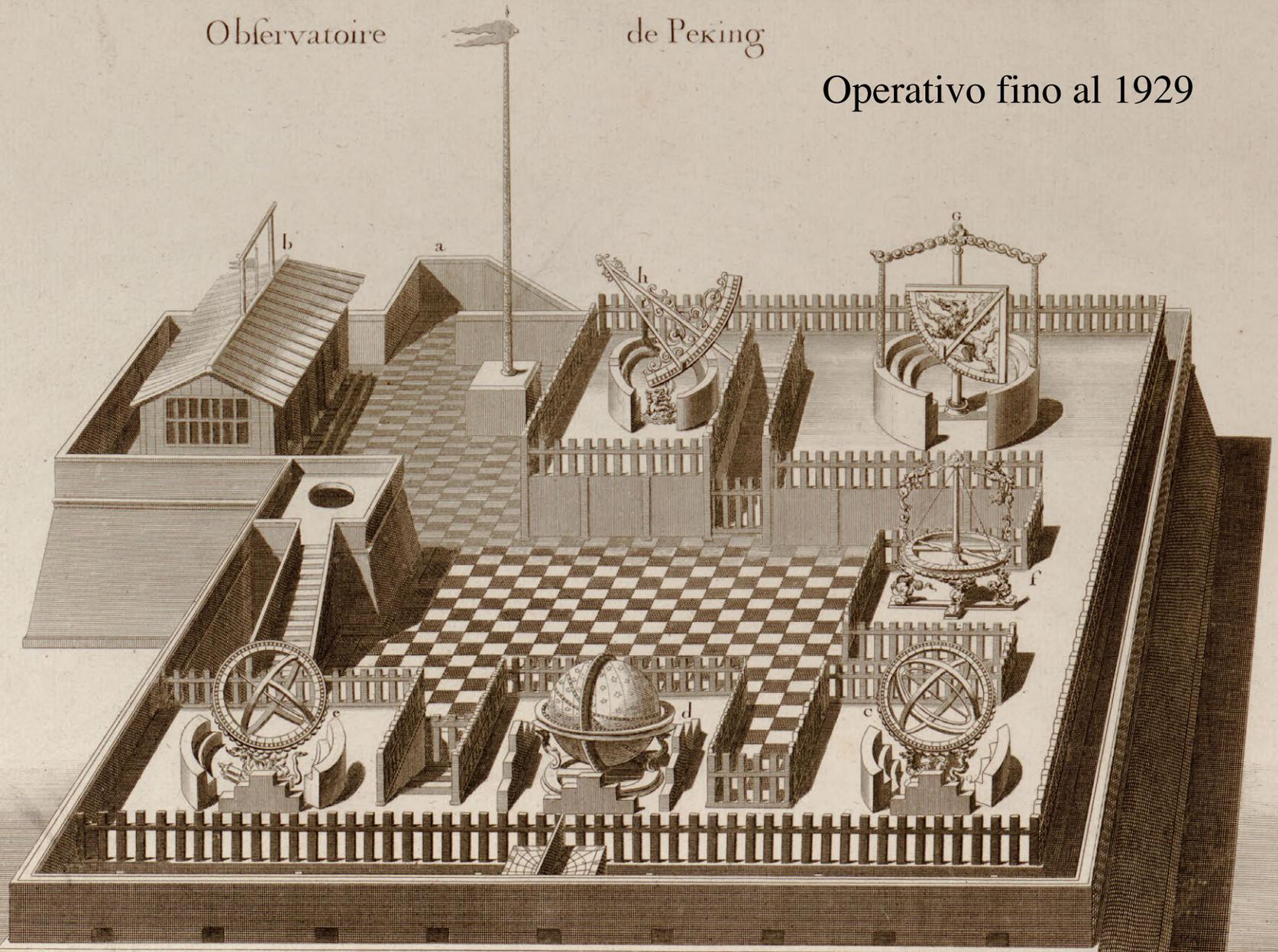


Pechino. Antico Osservatorio

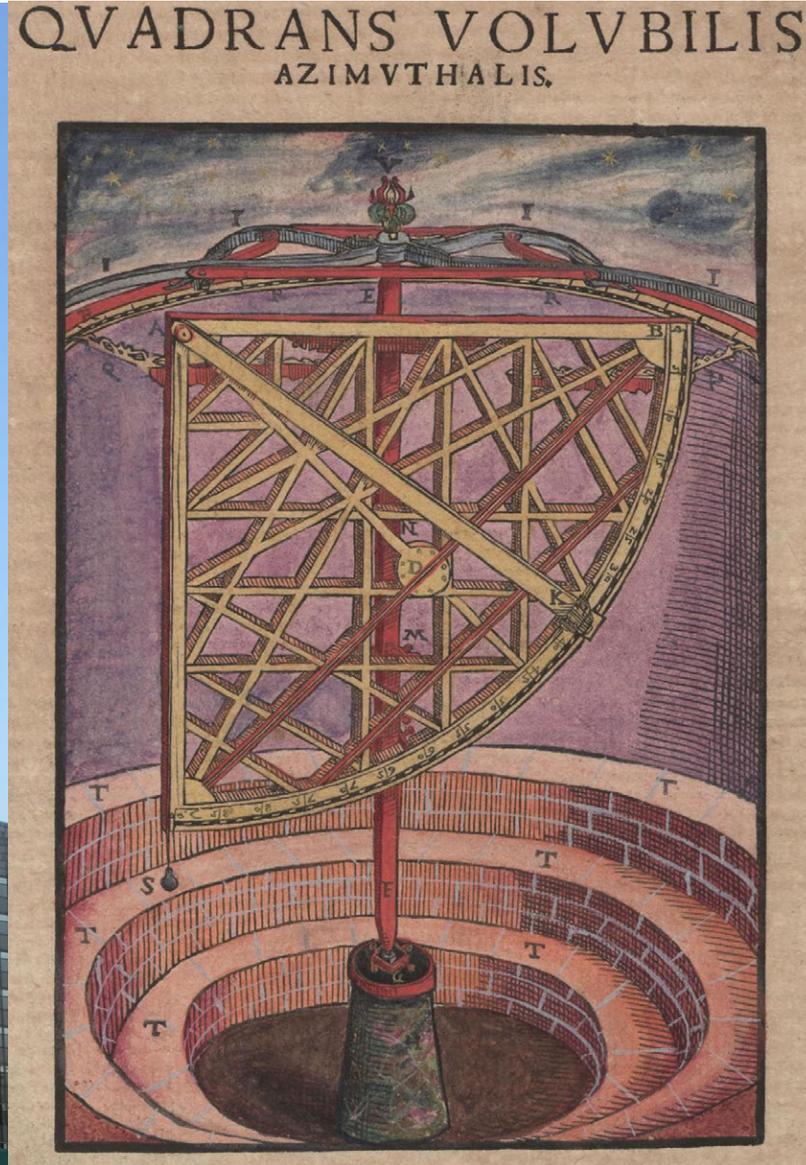
Observatoire

de Peking

Operativo fino al 1929



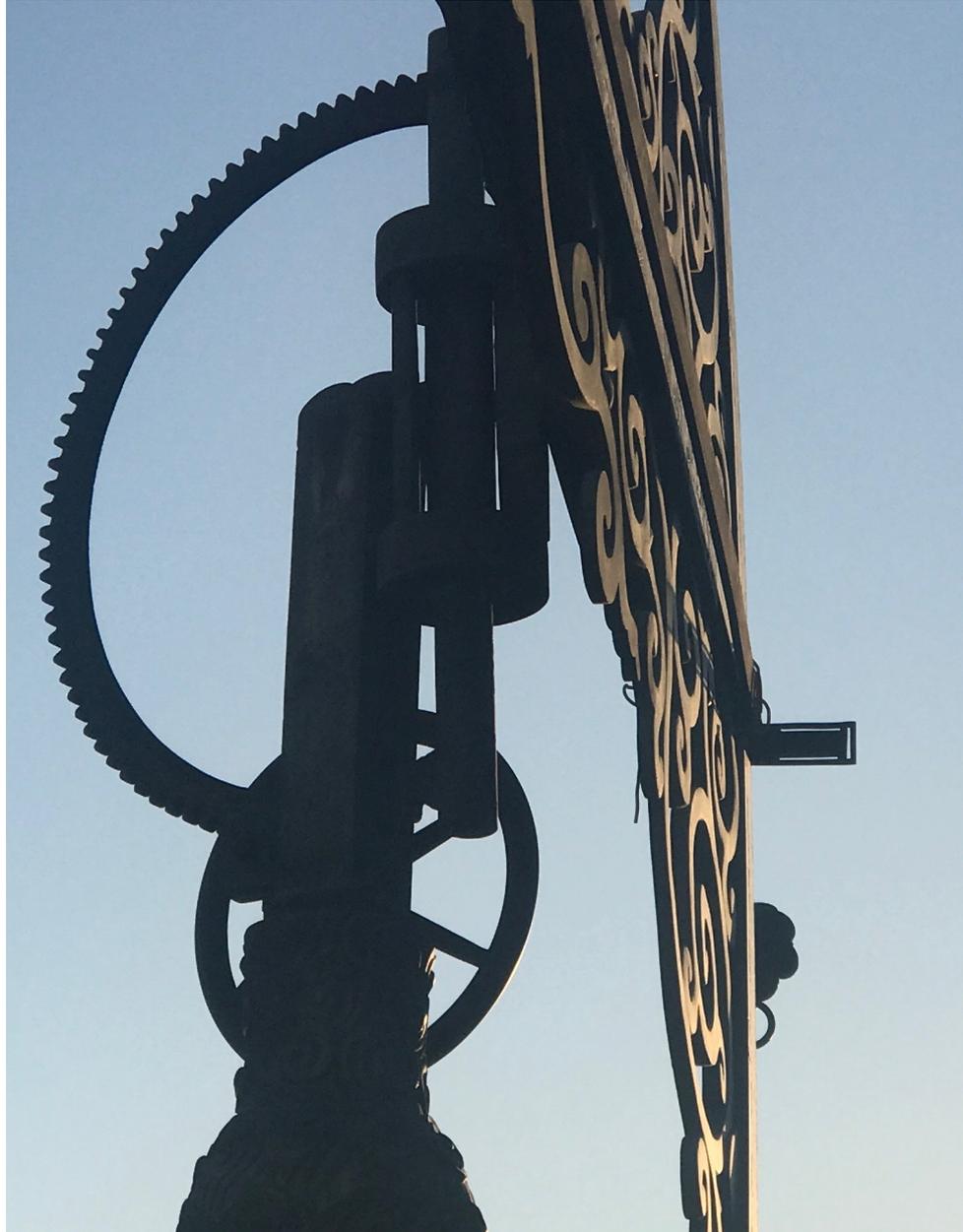
Quadrante volubile



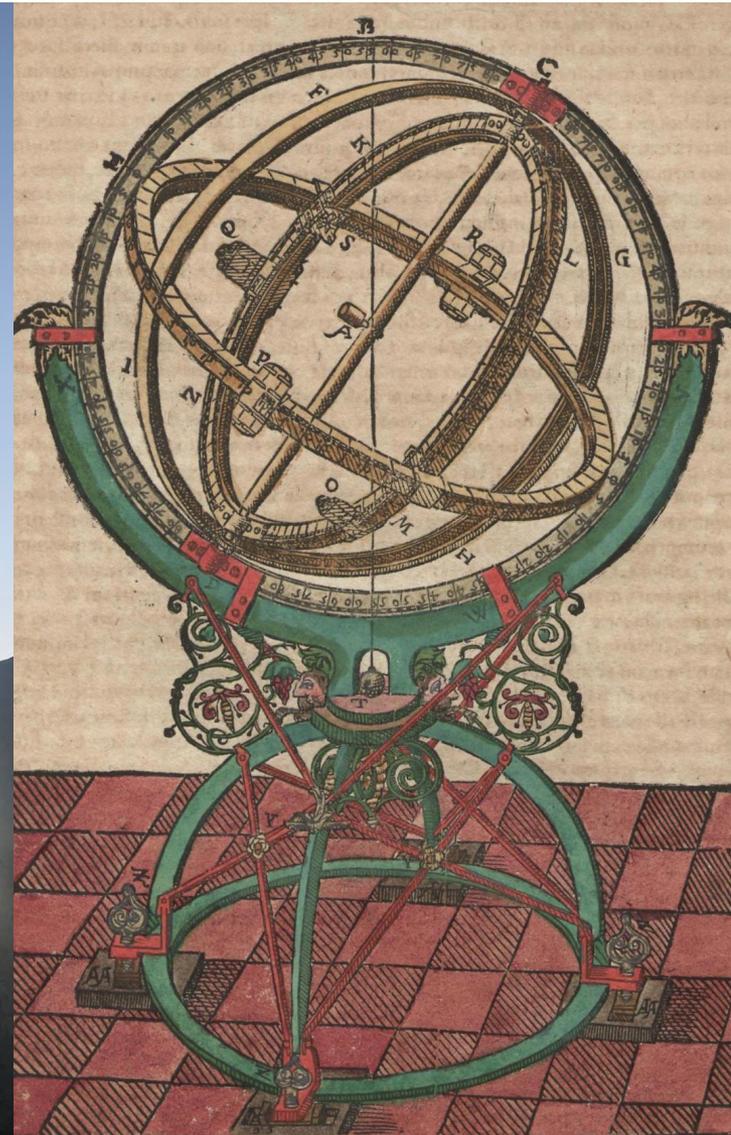
Arco bipartito



Pinnula



Armilla equatoriale



A photograph of a traditional Chinese building's roof, featuring ornate decorations and a blue sky background. The roof is dark, possibly black or dark brown, with intricate carvings and sculptures. The most prominent feature is a large, dark, horned creature, likely a Qilin, perched on the roof. Below it, several smaller, dark, horned creatures are visible. The roof is decorated with a series of golden, square-shaped ornaments, possibly representing the Chinese character '王' (king). The background is a clear, bright blue sky. The overall scene is captured in a low-angle shot, looking up at the roof.

Grazie dell'attenzione