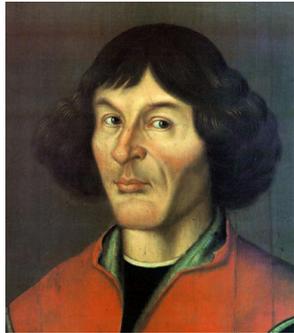


# Gravitazione Newtoniana



Nicolaus Copernicus  
1473 - 1543



Galileo Galilei  
1564 - 1642

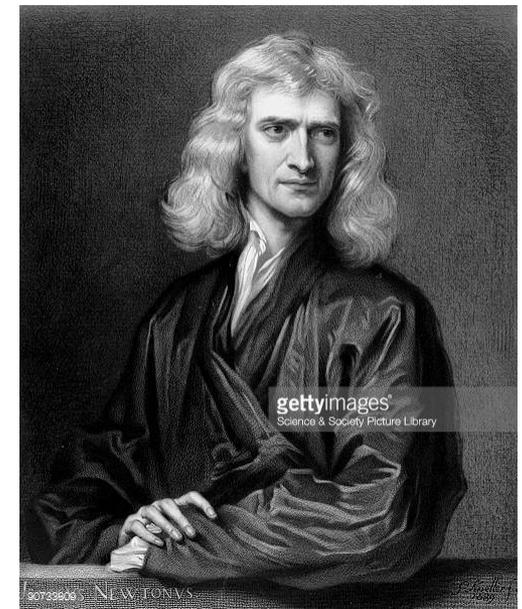


Tycho Brahe  
1546 - 1601



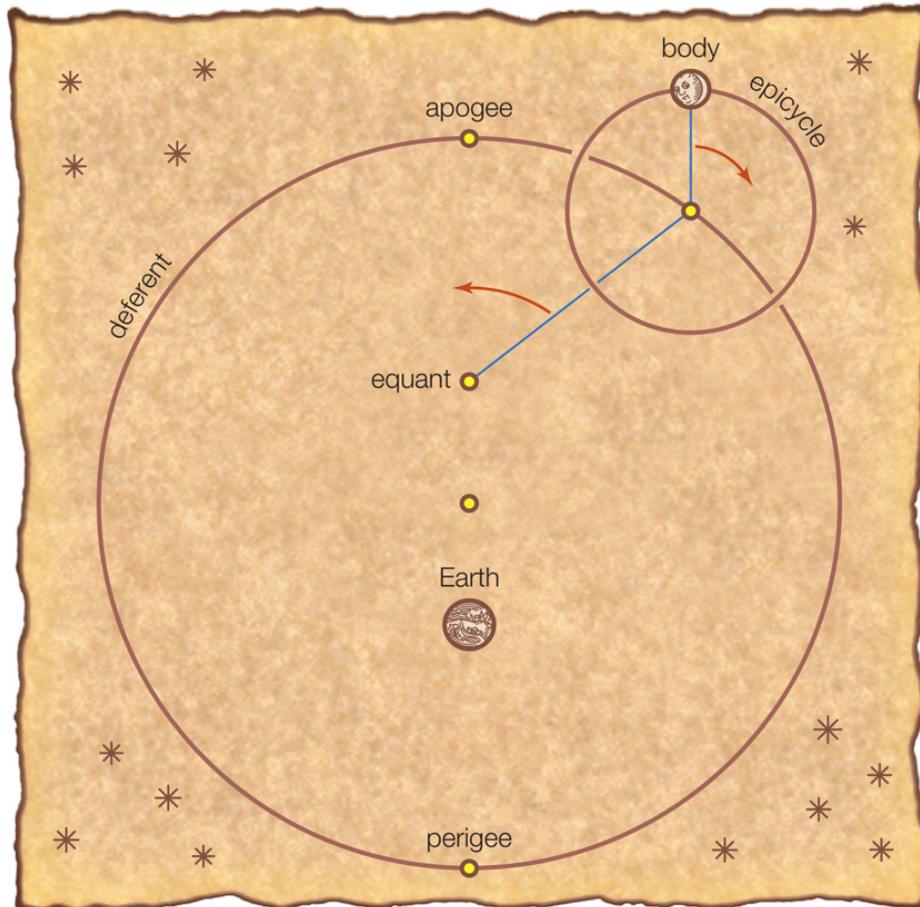
Johannes Kepler  
1571 - 1630

Un'impresa ciclopica



Isaac Newton  
1642 - 1727

# Modello geocentrico Tolémaico



© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

Terra stazionaria  
al centro;  
Sole, Luna, Pianeti:  
orbite circolari,  
ritenute “perfette”

Per descrivere i dati:  
“equante”: orbita spostata  
“epicicli”: moto retrogrado

Riproduce i dati, entro  
le incertezze di misura

# Tavole Alfonsine (1263-1272)

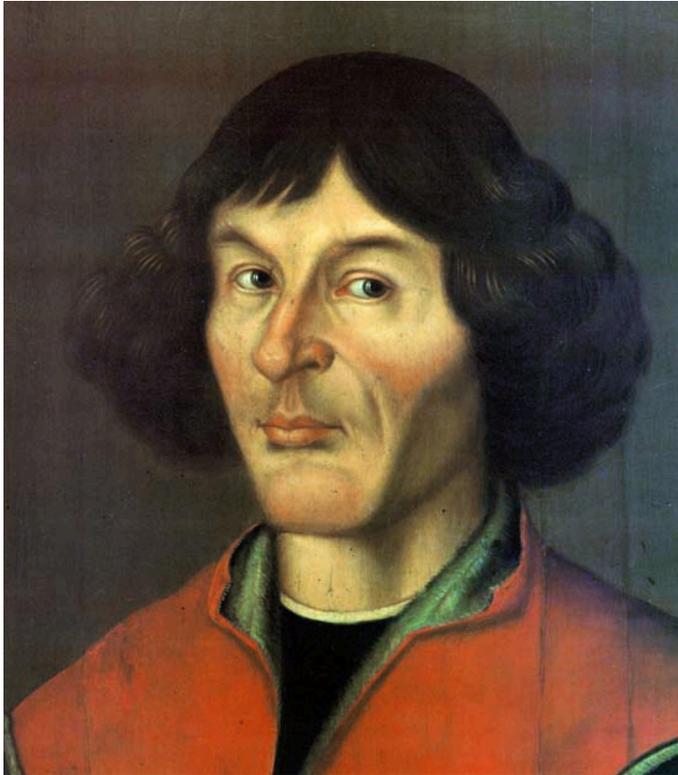
The image shows a page from the Alfonsine Tables, a medieval astronomical work. The page is filled with handwritten text and numbers, organized into columns. The columns are headed in red ink with the following titles: 'Canon ecclesie', 'Canon quartus', and 'Equinoctialis'. The text is in Latin and contains astronomical data, including planetary positions, star positions, and calculations. The numbers are arranged in a grid-like pattern, with some numbers in red ink. The handwriting is in a medieval script, and the page shows signs of age, including some staining and wear.

Tavole delle posizioni dei pianeti rispetto alle stelle fisse, delle eclissi e delle congiunzioni

Compilate sotto la guida di Isaac ben Sid e Judah ben Moses Cohen, basate sui calcoli dell'astronomo arabo Al-Zarqali secondo il modello geocentrico

Spagna: Re Alfonso X di Castiglia (regno: 1252-1284) ricorre a studiosi cristiani, ebrei e musulmani per tradurre testi e utilizzare risultati della scienza araba

# Modello eliocentrico



Nicolaus Copernicus  
(Mikolaj Kopernik)  
1473- 1543

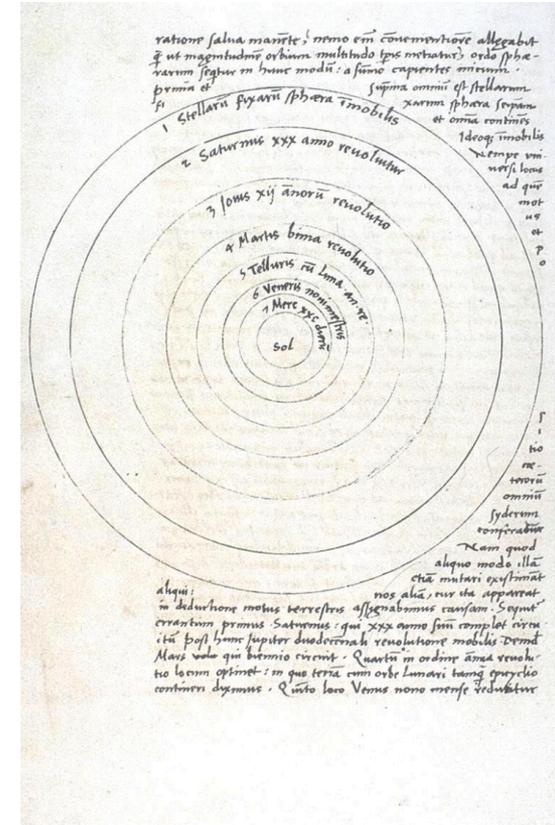
## NICOLAI COPERNICI TORINENSIS DE REVOLUTIONIBVS ORBI- um coelestium, Libri VI.

Habes in hoc opere iam recens nato, & ædito, studiose lector, Motus stellarum, tam fixarum, quàm erraticarum, cum ex ueteribus, tum etiam ex recentibus obseruationibus restitutos; & nouis insuper ac admirabilibus hypothesibus ornatos. Habes etiam Tabulas expeditissimas, ex quibus eisdem ad quoduis tempus quàm facillime calculare poteris. Igitur eme, lege, fructe.

Ἐλαμίσθητος ἕδεις ἐστίνω.

Norimbergæ apud Ioh. Petreium,  
Anno M. D. XLIII.

De revolutionibus  
Orbium Coelestium  
(Nuremberg, 1543)



Sole al centro:  
calcoli più semplici,  
ma accordo coi dati  
come il geocentrico

# Tycho (Tygge) Brahe

Famiglia nobile

Studia arti liberali e diritto

Copenhagen, Lipsia, Wittenberg, Rostock

**Astronomia, inizialmente passione nascosta**

Studio autonomo, misure con strumenti di fortuna, trova inesattezze nelle Tavole Alfonsine e:

1563: Congiunzione Giove-Saturno (un mese!)

1572: osserva una supernova

1576: re Federico II gli offre l'isola di Hven nello stretto Danese, e le risorse per costruirvi un osservatorio (Uraniborg, poi anche Stjerneborg)

1577: osservazione di una grande cometa

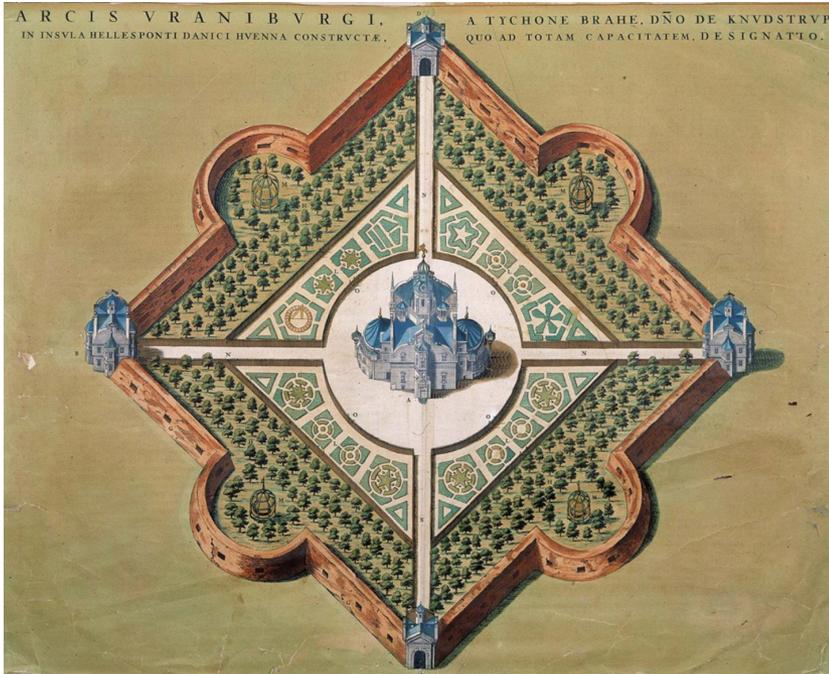


Tycho Brahe  
1546 - 1601

**Studio del moto di Marte**

Come Galileo è convinto che solo i dati possono decidere fra le teorie

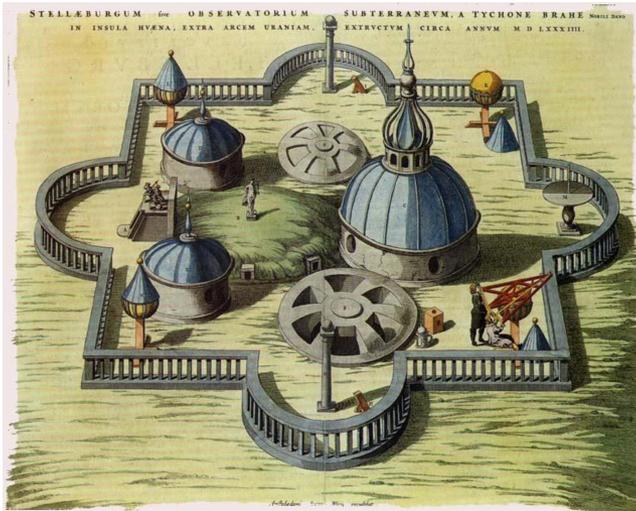
# Uraniborg



Osservazioni a occhio nudo, con strumenti  
che migliorano le misure di un fattore 10

(Nel 1609 Galileo punterà per primo  
un cannocchiale verso il cielo e cambierà  
per sempre la scienza...)

# Stjerneborg



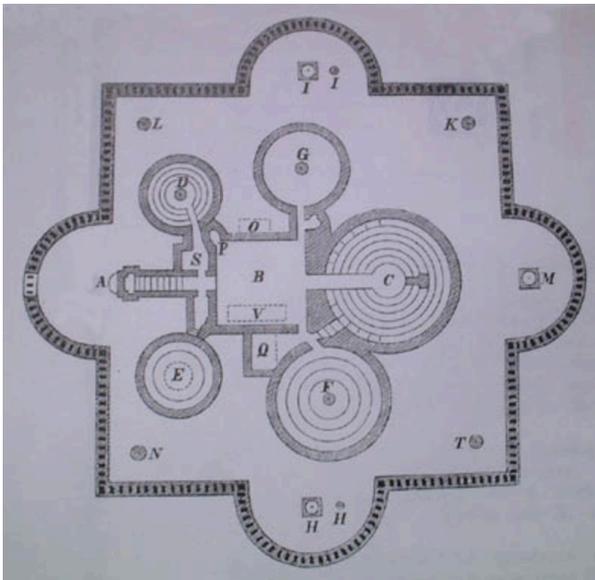
Un secondo osservatorio sull'isola di Hven, parzialmente sotterraneo per ridurre i disturbi alle misure.

Organizzazione “moderna”:  
squadre diverse di operatori per le osservazioni, per i calcoli trigonometrici (a mano, coi logaritmi!), e per la riduzione a tabelle.

Tycho dirige, controlla, confronta i risultati.

In 20 anni di misure sistematiche:  
777 stelle (2/3 di quelle visibili a occhio nudo), posizioni di sole e pianeti rispetto alle stelle fisse.  
Precisione e accuratezza migliorate di un fattore 10

Kepler ha anche un interesse teorico:  
Formula un modello “misto” (in parte copernicano)



# Johannes Kepler

1597: Tycho Brahe lascia Hven per contrasti col successore di Federico II, e si trasferisce a Benatek (Praga)

1600: poco prima della morte (1601) Tycho Brahe prende come assistente Johannes Kepler, uno dei più brillanti giovani matematici europei, per lavorare con lui sulla miniera di dati raccolti

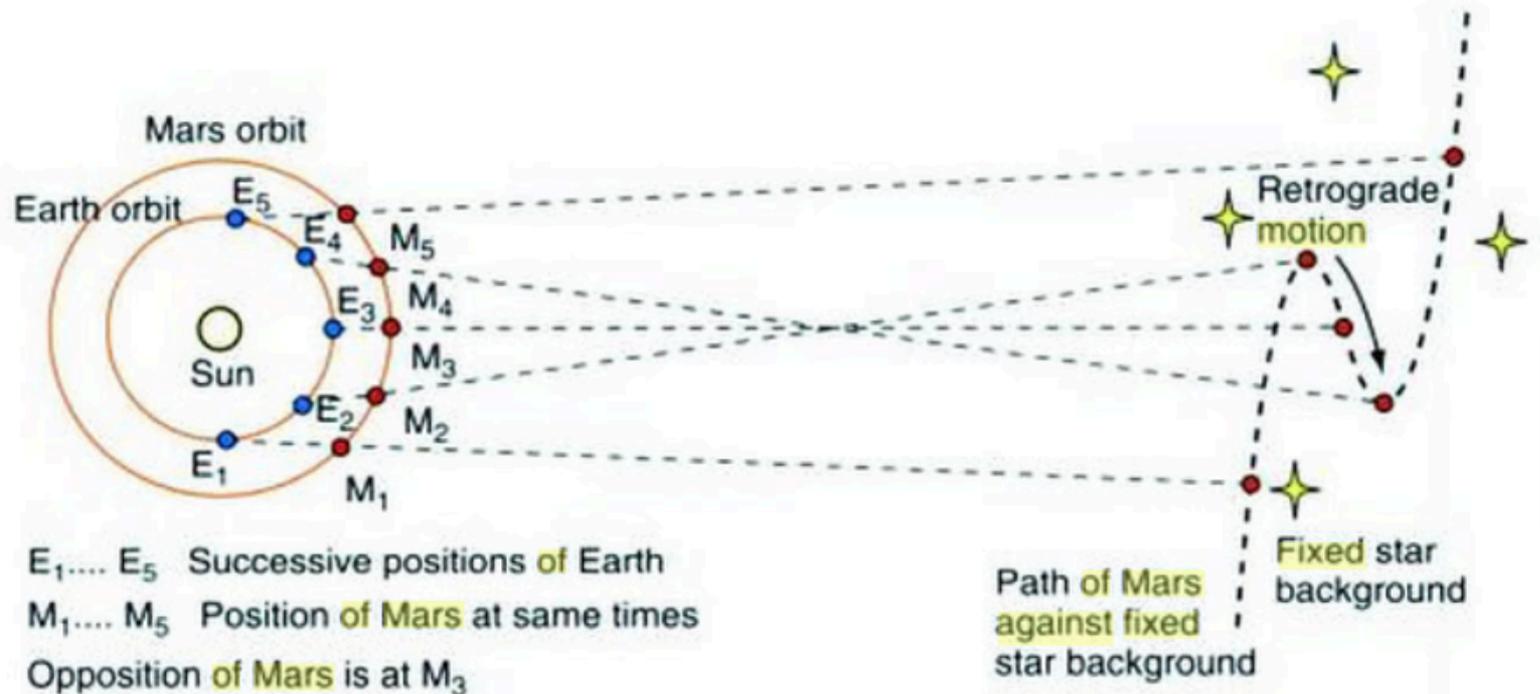


Johannes Kepler  
1571 - 1630

# Kepler: orbita di Marte ??

Entusiasta del modello copernicano, Kepler si concentra su Marte.

Problema complicato! Ricostruire, con calcoli fatti a mano, l'orbita di Marte basandosi solo sulle *direzioni* osservate dalla Terra, rotante attorno al proprio asse e in moto su una traiettoria non nota attorno al Sole

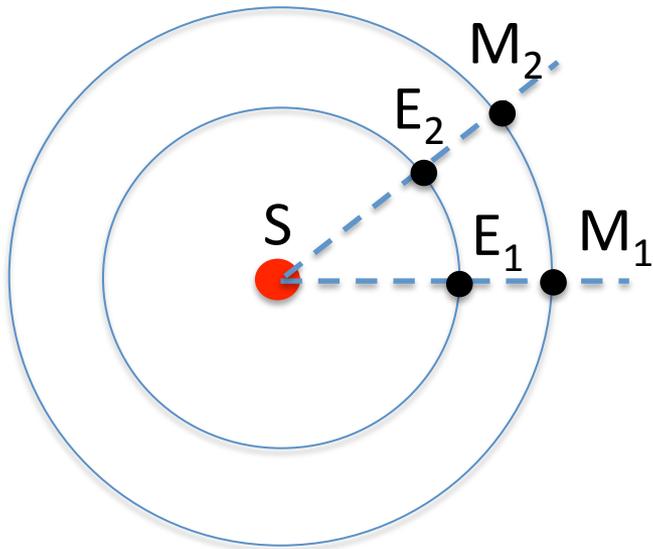


# Orbita di Marte...

Entusiasta del modello copernicano, Kepler si concentra sulla ricostruzione dell'orbita di Marte, e determina:

1. la durata di un "Anno Marziano";
2. l'orbita della Terra attorno al Sole, con la *II Legge* (velocità areolare costante)
3. L'orbita di Marte: *I Legge* (orbite ellittiche) e *III Legge* (periodi)
4. Rimane il problema di determinare accuratamente le distanze nel Sistema Solare...

# L'Anno Marziano o "periodo sidereo"



Periodi misurati in "1 day = 24 hours" (terrestri)  
 "periodo sidereo" = 1 rivoluzione completa  
 "periodo sinodico" = intervallo tra 2 opposizioni

Marte (M): periodo sidereo **T = ???**

Marte (M)-Terra (E): periodo sinodico S = 779.8 d

Terra (E): periodo sidereo A = 365.24 d

Spostamenti angolari, in gradi:

$$1 \text{ S (M, E): } \Delta\theta_M = \Delta\theta_E - 360^\circ$$

$$1 \text{ T (M): } \Delta\theta_M = 360^\circ$$

$$1 \text{ d: } \Delta\theta_M = 360^\circ / T$$

$$1 \text{ S (M, E): } \Delta\theta_M = 360^\circ S / T, \Delta\theta_E = 360^\circ S / A$$

quindi:

$$360^\circ S / T = 360^\circ S / A - 360^\circ$$

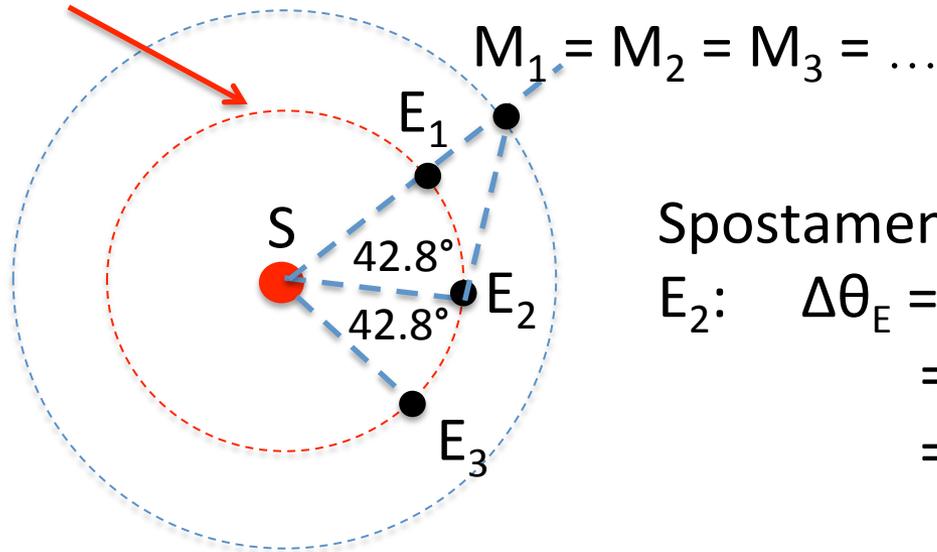
$$1 / T = 1 / A - 1 / S = 0.0014555 \text{ d}^{-1}$$

$$\mathbf{T = 687 \text{ d}}$$

# L'orbita della Terra - 1

Orbita di Marte: incognita, non utilizzata

Orbita della Terra: da determinare



Marte (M): periodo sidereo

$$T = 687 \text{ d} = 1.881 \text{ A}$$

Spostamento angolare della Terra, calcolato:

$$\begin{aligned} E_2: \quad \Delta\theta_E &= 360^\circ T/A = 1.881 \times 360^\circ = \\ &= 677.2^\circ = \\ &= (2 \times 360^\circ) - 42.8^\circ \end{aligned}$$

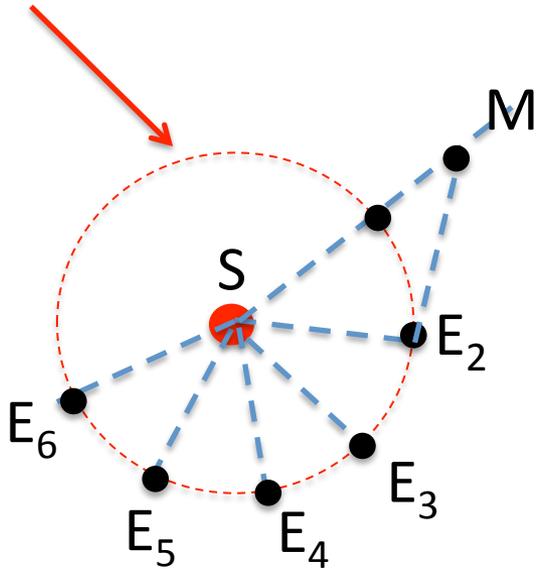
Ad ogni rivoluzione di Marte, la Terra “resta indietro” di  $42.8^\circ$

La posizione della Terra  $E_2$  può essere ottenuta per triangolazione tra la direzione calcolata, rispetto al Sole, e quella ( $E_2$ - $M_2$ ) osservata.

L'orbita terrestre deve passare per i punti ( $E_2, E_3, E_4, \dots$ )

# L'orbita della Terra - 2

Orbita della Terra: da determinare



Tycho Brahe:

osservazioni per più di vent'anni ( $> 20$  A)

10 anni sinodici S (opposizioni S-E-M)

11 anni siderali T di Marte

Kepler:

Ricostruisce 11 posizioni della Terra,

Cerca il best fit di una traiettoria compatibile

**Cerchio?** OK entro le incertezze sperimentali,  
ma **il Sole è spostato dal centro!**

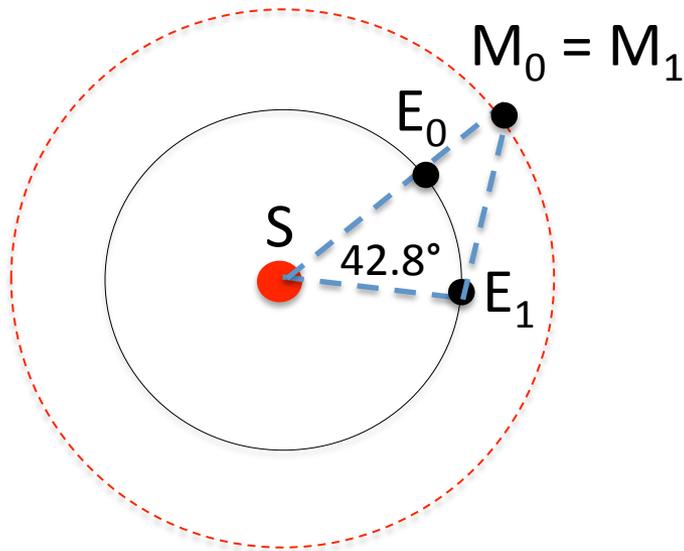
Movimento **più veloce** quando la Terra è **più vicina**

*Legge delle aree (II):*

Il raggio vettore dal Sole al Pianeta spazza aree uguali in tempi uguali

# L'orbita di Marte - 1

## Orbita di Marte: da determinare



Orbita della Terra: nota!

Unità di misura: distanza media S-E = 1 AU

Periodo sidereo (M):  $T = 687$  d

Periodo sinodico (M, E):  $S = 779.8$  d

Ad ogni opposizione S-E-M

Keplero determina la posizione di M  
per triangolazione tra due direzioni  
(S-E<sub>1</sub> calcolata, E<sub>1</sub>-M<sub>1</sub> osservata)

In più di vent'anni di dati: 10 opposizioni S-E-M => 10 punti dell'orbita di Marte  
Alcuni punti si discostano dal cerchio (best fit) per più di 8'

Misure precedenti: incertezza di 10'; Tycho Brahe: meglio di 2'

Keplero considera rigettata dai dati l'ipotesi di orbita circolare;

dopo alcuni tentativi trova che la curva compatibile coi dati è un'ellisse.

# L'orbita di Marte – 2

*I Legge:*

L'orbita di un pianeta relativa al Sole giace in un piano fisso che contiene il Sole; ogni pianeta si muove su un'orbita ellittica Di cui il Sole occupa un fuoco.

Note: Kepler ha avuto un po' di fortuna...

- Eccentricità dell'orbita di Marte:  $e(\text{Marte}) = 0.09$
- Piccola ma 5 volte più grande di  $e(\text{Terra})$  e 12 volte  $e(\text{Venere})$
- Osservazioni più accurate avrebbero evidenziato scostamenti dalle ellissi (perturbazioni da altri pianeti) e complicato l'interpretazione

*III Legge (1619):*

Il quadrato del periodo dell'orbita di un pianeta è proporzionale alla terza potenza del semiasse maggiore dell'orbita ellittica

# Distanze assolute nel Sistema Solare

Misurando le distanze in AU e i tempi in anni terrestri, le dimensioni caratteristiche delle orbite si possono ottenere dalla Terza Legge di Kepler

Per esprimere queste grandezza in unità di misura terrestri (metro, p.es.) bisogna misurare almeno una distanza nota in UA (p.es. Terra-Marte, o Terra-Venere) in metri.

Attualmente “facile” (segnali radar riflessi);  
storicamente: triangolazioni con base più larga possibile sulla Terra (...)

Migliore deteminazione attuale:  $1 \text{ AU} = 149.598 \times 10^6 \text{ km}$