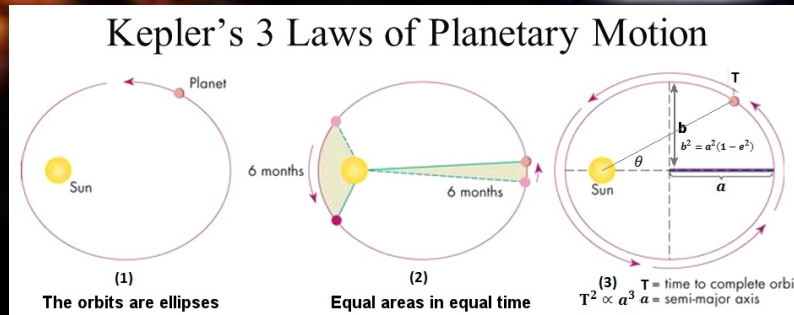


# 08 – Johannes Kepler y Tycho Brahe



# Tycho Brahe

*Tyge Ottesen Brahe*

Knutstorp, Escania,  
14.12.1546 –

Praga, 24.10.1601

astrónomo danés,  
considerado el más  
grande observador del  
cielo en el período  
anterior a la invención  
del telescopio



Se interesó en la astronomía y en la creación de instrumentos de medición más precisos.

Brahe realizó enormes cambios en las técnicas de observación y en los niveles de precisión (del orden de los 4 minutos de arco). Diseñó y construyó un gran número de instrumentos: más grandes, más sólidos y mejor calibrados.

QVADRANS MVRALIS  
SIVE TIGHONICVS.



# Sophia Brahe (1556 – 1643)

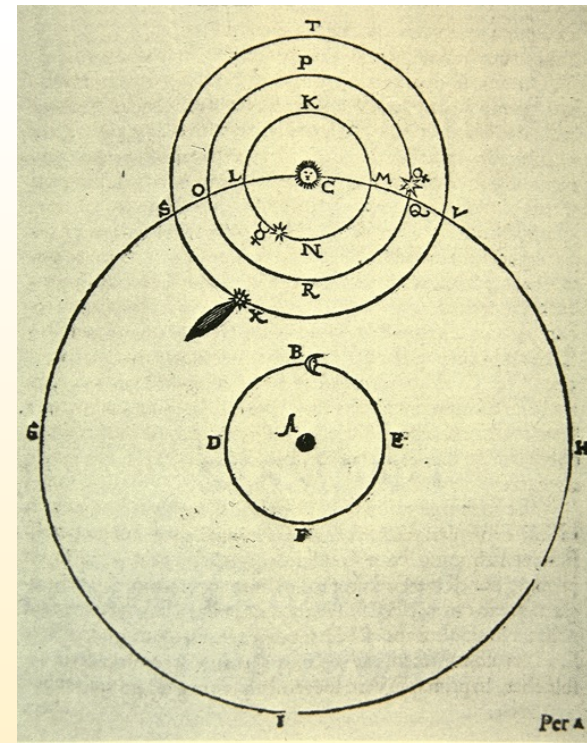
fue una noble danesa.

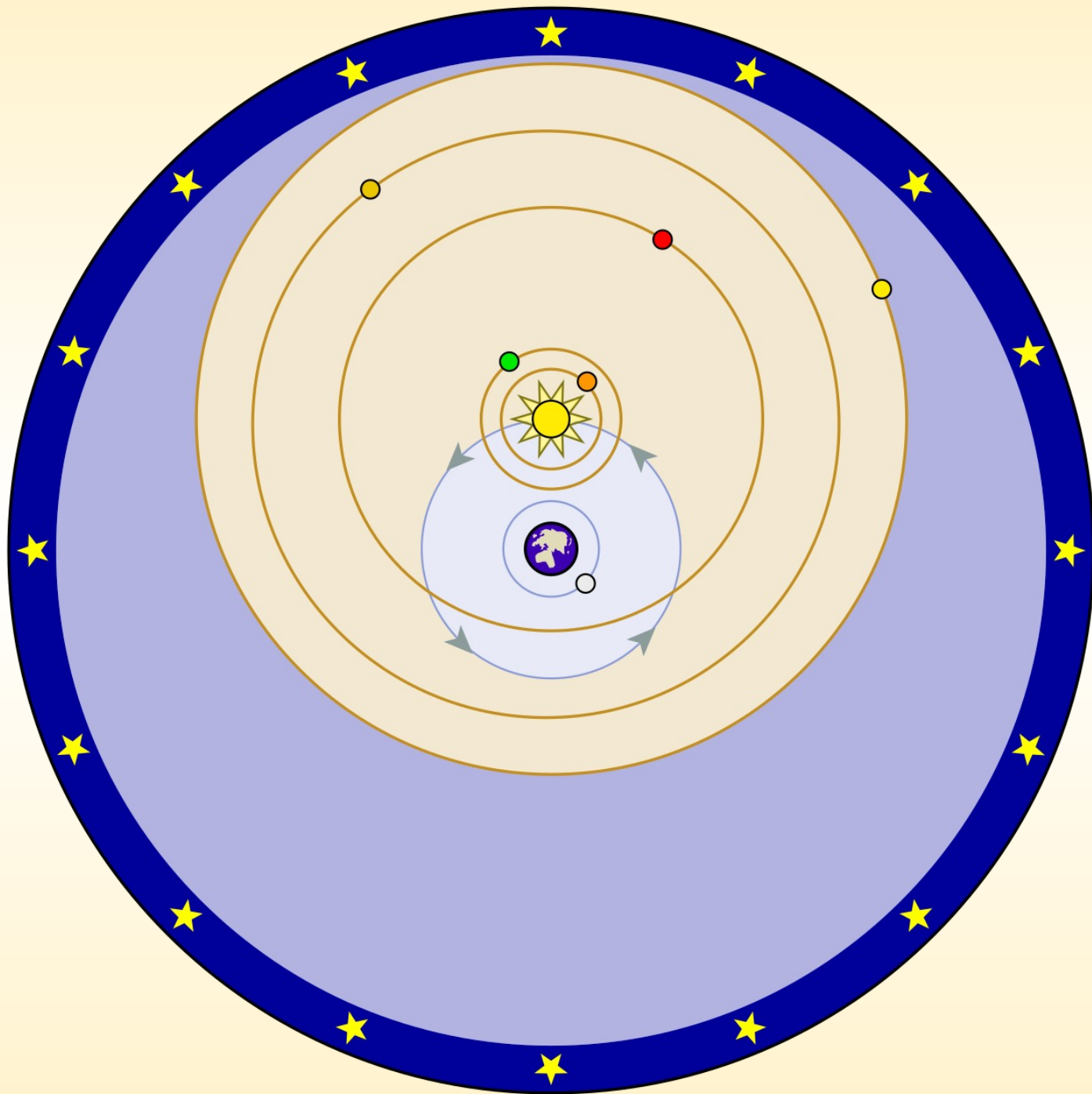
Era horticultor con conocimientos de astronomía, química y medicina.

Trabajó junto a su hermano Tycho Brahe en la realización de observaciones astronómicas.



Como astrónomo, Tycho trabajó para combinar lo que vio como los beneficios geométricos del sistema copernicano con los beneficios filosóficos del sistema Ptolemaico en su propio modelo del universo, el sistema Tychonico. Su sistema vio correctamente la Luna orbitando la Tierra y los planetas orbitando el Sol, pero erróneamente consideró que el Sol orbitaba la Tierra.





# El Sistema Solar de Tycho

La cosmología de Tycho sigue siendo geocéntrica, aunque él fue consciente de las ventajas del sistema copernicano.

Como protestante y conservador, hacer a la Tierra girar alrededor del Sol era demasiado. Además, no era capaz de detectar el paralaje anual de las estrellas. Tycho decidió que la Tierra no se movía.

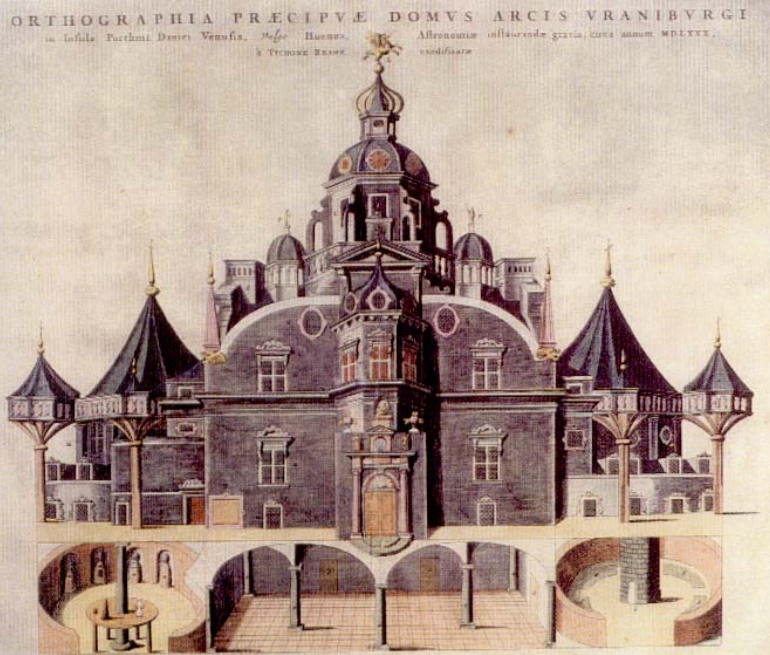
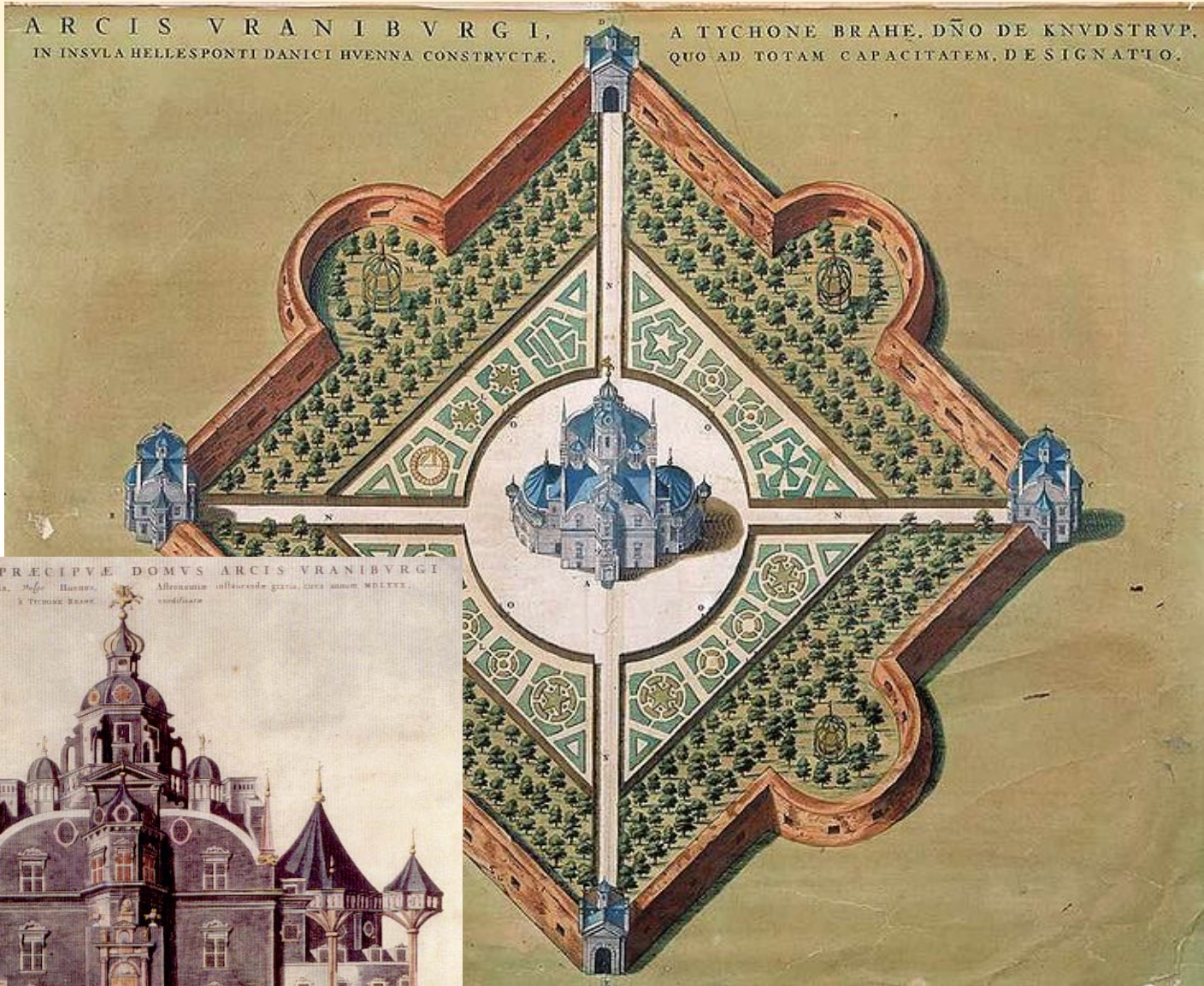
En el sistema de Tycho, la luna y el sol orbitan la tierra, y los demás planetas orbitan el sol. Las estrellas fijas están centradas en la tierra.

Su universo tenía un tamaño de unas 14000 veces el radio terrestre.

# La isla de Hven y el observatorio de Uraniborg (El castillo de los cielos).

En 1575 el rey Federico II de Dinamarca le otorgó a Tycho un castillo en la isla de Hven y la financiación para construir Uraniborg, un antiguo instituto de investigación, donde construyó grandes instrumentos astronómicos y tomó muchas medidas cuidadosas, y luego Stjerneborg, bajo tierra, cuando descubrió que sus instrumentos en Uraniborg no fueron lo suficientemente estables. En la isla (donde se comportó de manera autocrática con los residentes) fundó fábricas, como una fábrica de papel, para proporcionar material para imprimir sus resultados.





Uraniborg

Tycho construyó y mejoró sistemáticamente los instrumentos de medida hasta llegar a una precisión mejor que 1'.



Stjerneborg

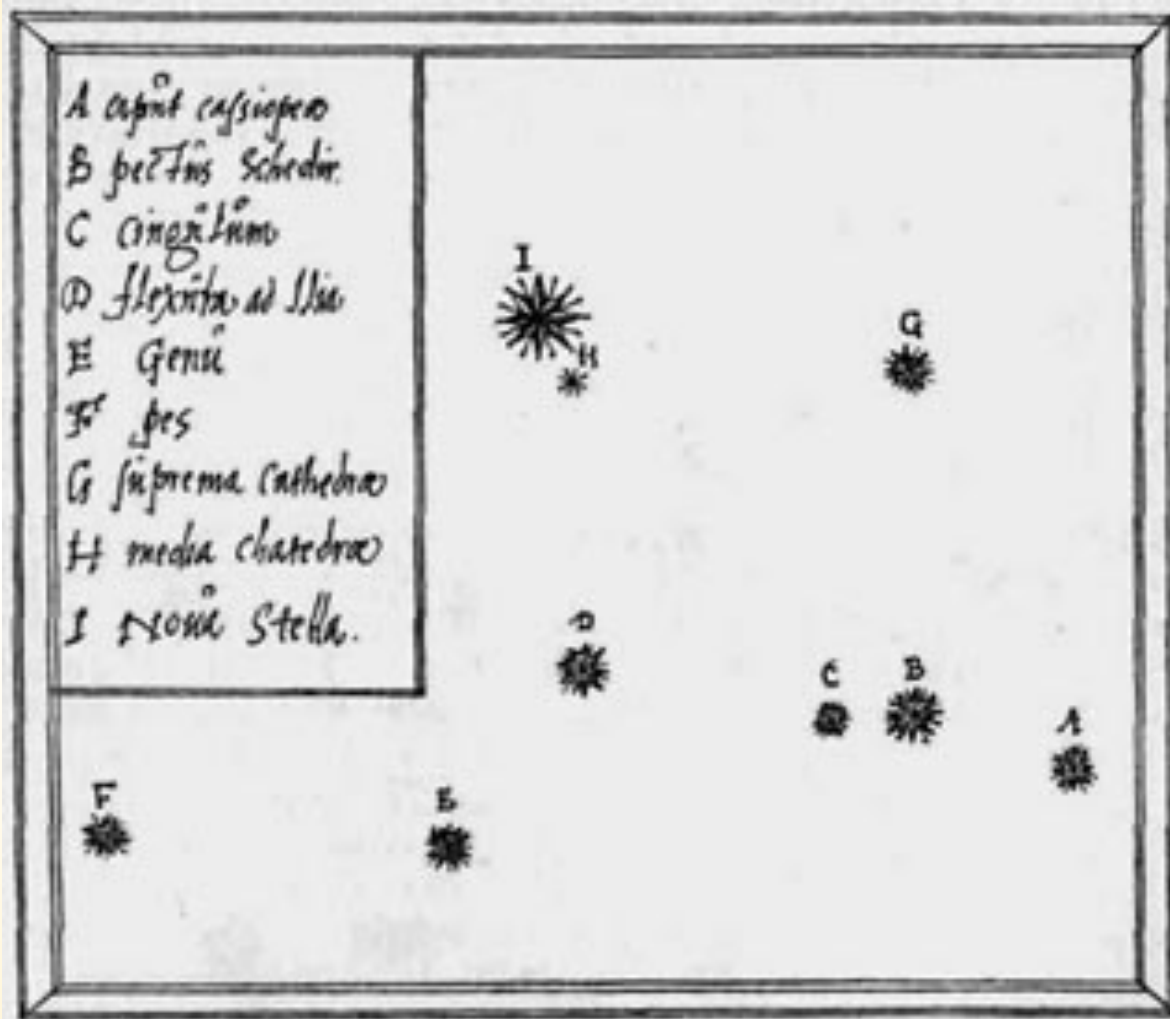
# La nova de 1572 y el cometa de 1577

En Noviembre de 1572 una “nueva estrella” que podía verse incluso durante el día apareció en la constelación de Casiopea. Esto contradecía la teoría aristotélica de inmutabilidad de los cielos.

En 1577 apareció un cometa, y Tycho probó que era “celeste” y que se movía entre los planetas → Las esferas aristotélicas no existen.

Para explicar como se movían los planetas, había que pasar de la geometría a la física.

Tycho publicó sus observaciones de la nova y el cometa dejando claro que eran problemas astronómicos.



# Tycho y las observaciones de Marte

Habiendo medido el paralaje de la nova de 1572 y el cometa de 1577, Tycho intentó medir el paralaje a Marte y determinar así una estimación de la UA.

Su máxima aproximación, según Copérnico sería mucho mayor.

Tras más de 10 años de medidas, no lo consiguió, pero sus medidas serían esenciales para Kepler.

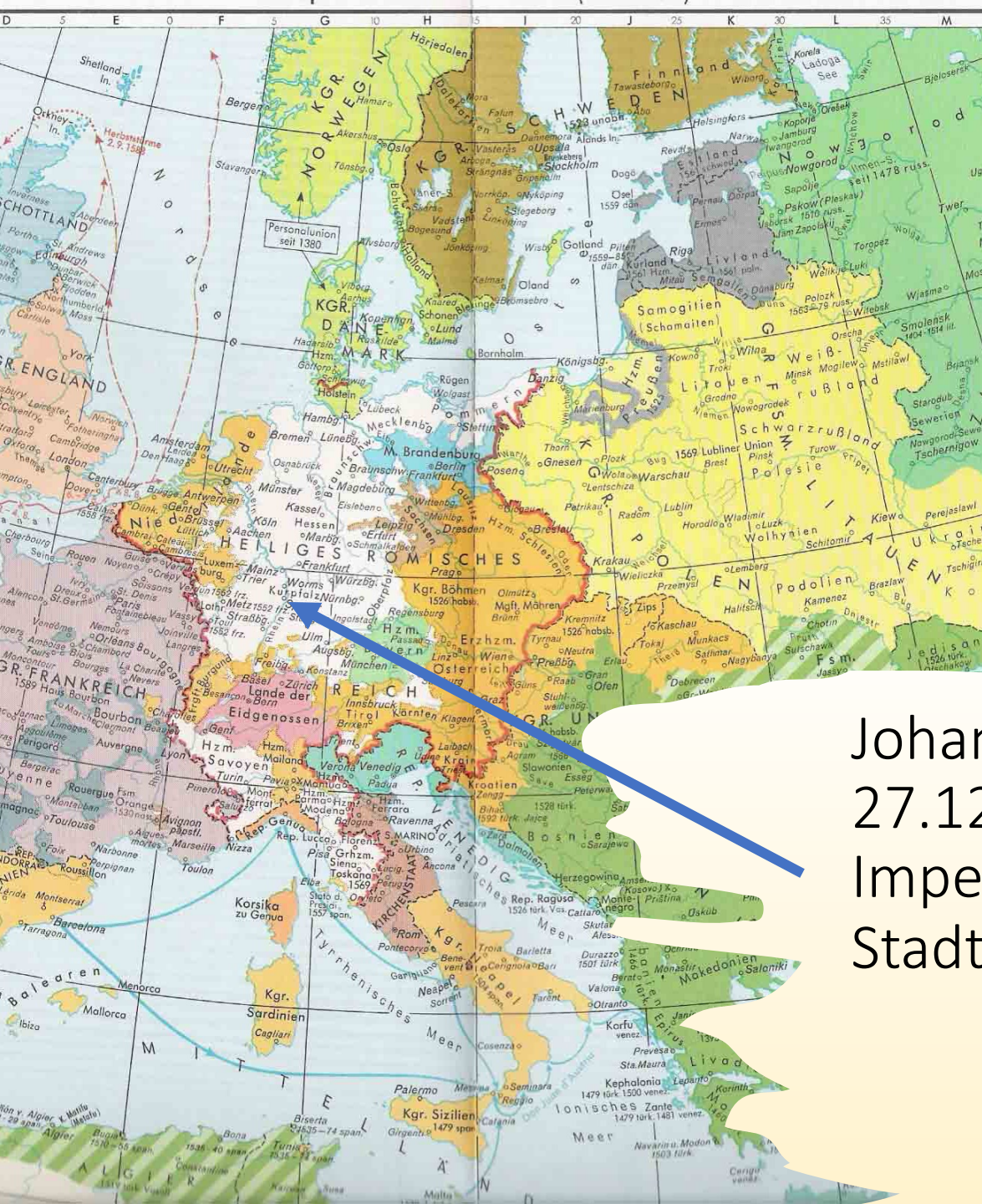
También realizó un catálogo de 777 estrellas de una calidad sin precedentes. Con un “retículo” de estrellas de referencia calculaba la posición de las demás. Perdió interés cuando completó la banda zodiacal.

# El final de un sueño

Después de desacuerdos con el nuevo rey danés, Christian IV, en 1597, Tycho se exilió.

Fue invitado por el rey de Bohemia y el Sacro Emperador Romano Rodolfo II a Praga, donde se convirtió en el astrónomo imperial oficial.

Allí, desde 1600 hasta su muerte en 1601, fue asistido por Johannes Kepler, quien luego utilizó los datos astronómicos de Tycho para desarrollar sus tres leyes de movimiento planetario.



Johannes Kepler nació el 27.12.1571, en la Ciudad Imperial Libre de Weil der Stadt.

Su padre, Heinrich Kepler, se ganaba la vida precariamente como mercenario y abandonó a la familia cuando Johannes tenía cinco años.

Su madre, Katharina Guldenmann, hija de un posadero, era curandera y herbolaria.

Kepler impresionaba a los viajeros en la posada de su abuelo con su fenomenal facultad matemática.





COMETOGRAPHIA  
quædam Lampadis aeris quæ 10.  
die Nouemb. apparuit, Anno a  
*Virgineo partu, 1577.*



*Iris vt est signum, terras perijisse sub vndis:  
Ignibus est ignis cuncta caesura suis.*

*Londini excudebat Robertus Walley.  
Anno Domini, 1578, C*

# Gran cometa de 1577

Conoció la astronomía a una edad temprana y desarrolló una fuerte pasión por ella que abarcaría toda su vida.

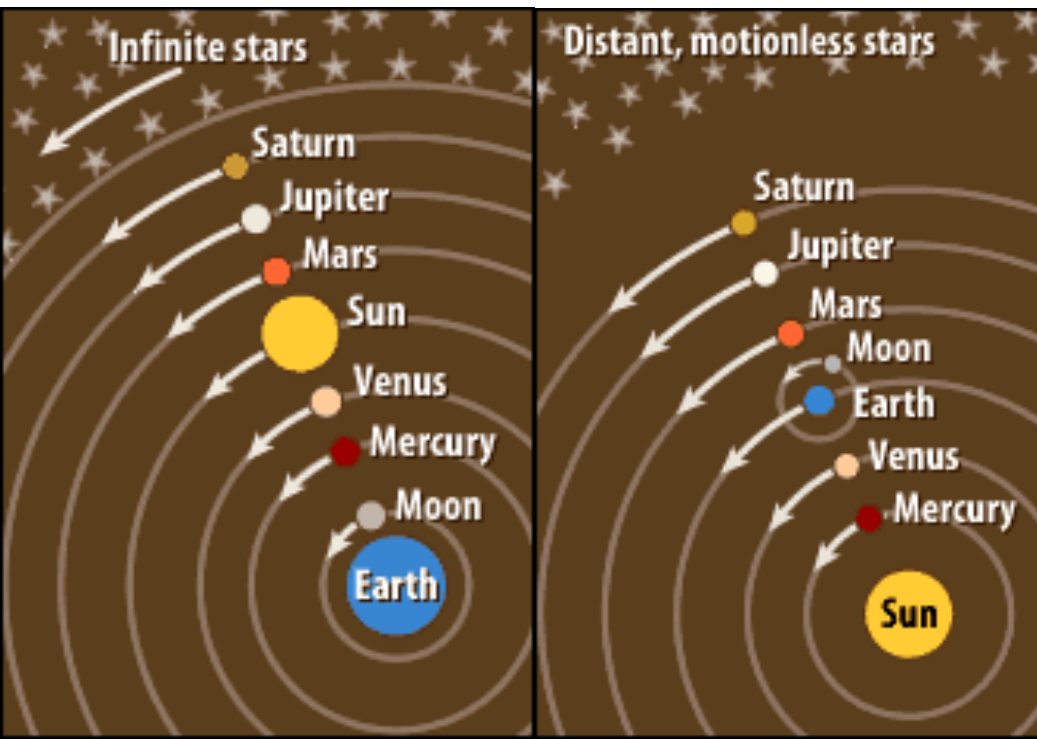
A los seis años, observó el Gran Cometa de 1577 y escribió que "[su] madre lo llevó a un lugar alto para mirarlo".

En 1580, a la edad de nueve años, observó otro evento astronómico, un eclipse lunar. Sin embargo, la viruela infantil lo dejó con visión débil y manos lisiadas.

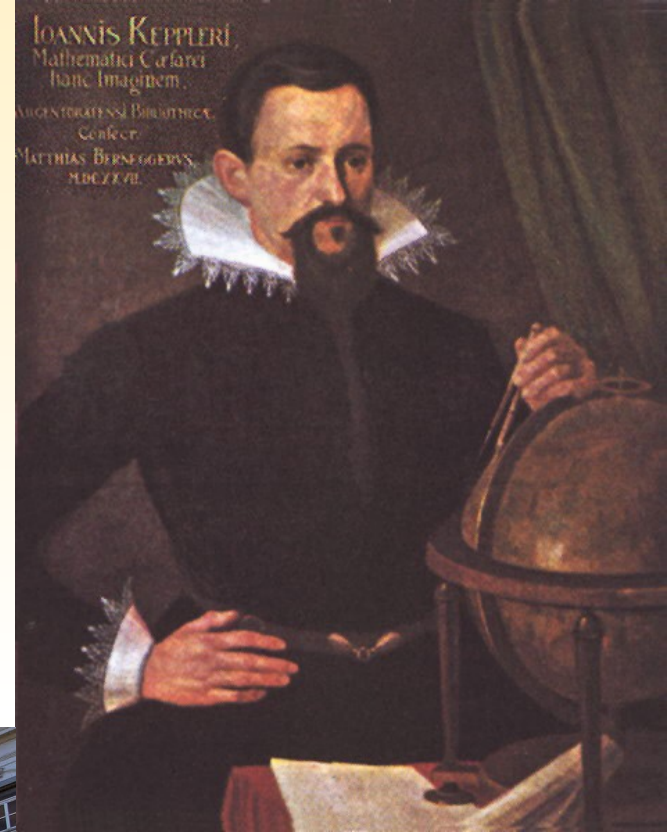
Intentó ser pastor luterano.

A partir de 1589 asistió a la Universidad de Tubinga para estudiar teología.

Con Michael Maestlin (profesor de matemáticas en Tubinga) aprendió tanto el sistema ptolemaico como el sistema copernicano de movimiento planetario. En aquella época se hizo copernicano.

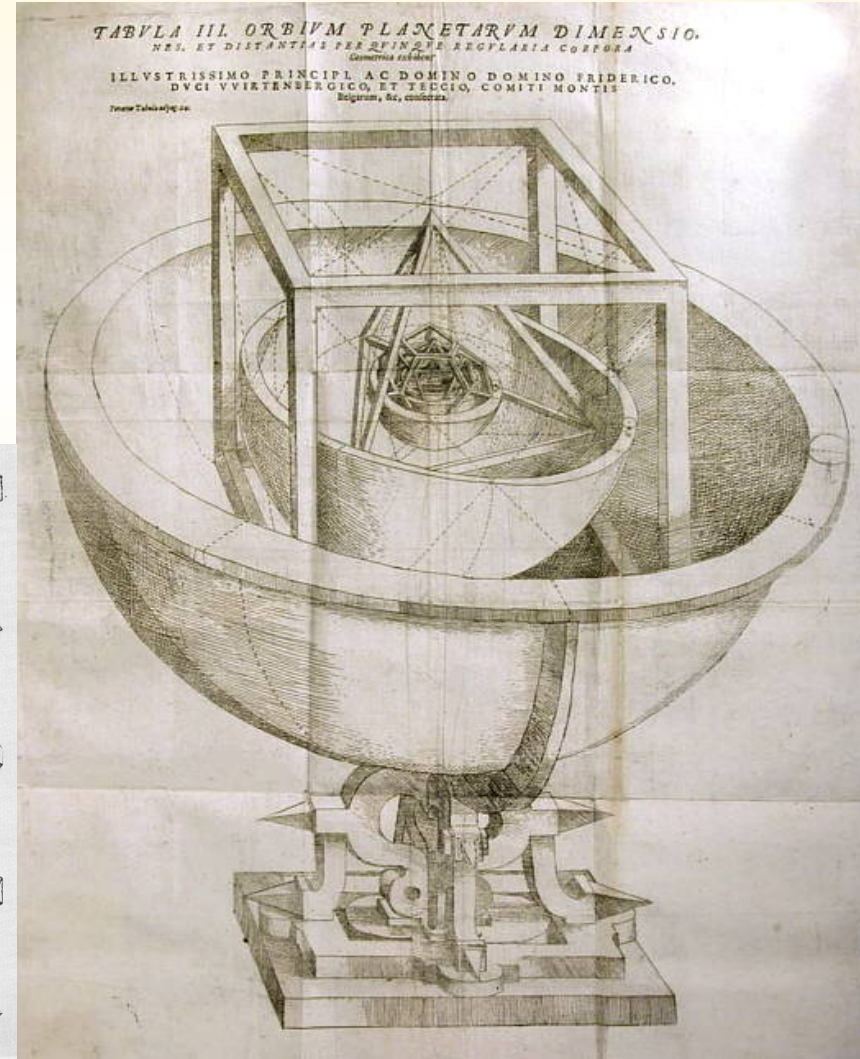
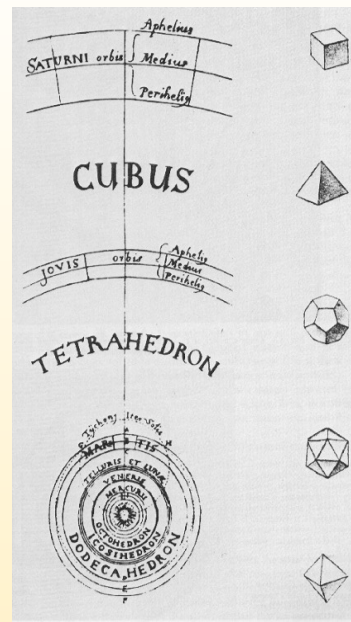


Kepler fue recomendado para un puesto como profesor de matemáticas y astronomía en la escuela protestante de Graz. Aceptó el cargo en abril de 1594, a la edad de 22 años.



# El Misterio Cosmográfico (1596)

El primer gran trabajo astronómico de Kepler, *Mysterium Cosmographicum*, fue la primera defensa publicada del sistema copernicano.



En diciembre de 1595, Kepler conoció a Barbara Müller, una viuda de 23 años (dos veces más) con una hija pequeña, Regina Lorenz.

Müller, heredera de las propiedades de sus difuntos maridos, también era hija del exitoso propietario de un molino. Su padre Jobst inicialmente se opuso al matrimonio porque Kepler era pobre. Barbara y Johannes se casaron el 27 de abril de 1597.

En los primeros años de su matrimonio, los Kepler tuvieron dos hijos (Heinrich y Susanna), quienes murieron en la infancia. En 1602 tuvieron una hija (Susanna); en 1604, un hijo (Friedrich); y en 1607, otro hijo (Ludwig).





En diciembre de ese año, Tycho Brahe invitó a Kepler a visitarlo en Praga; el 1 de enero de 1600 (incluso antes de recibir la invitación), Kepler partió con la esperanza de que el patrocinio de Tycho pudiera resolver sus problemas filosóficos, así como los sociales y financieros.



# Tycho Brahe

*Tyge Ottesen Brahe*

Knutstorp, Escania,  
14.12.1546 –

Praga, 24.10.1601

astrónomo danés,  
considerado el más  
grande observador del  
cielo en el período  
anterior a la invención  
del telescopio





Después de desacuerdos con el nuevo rey danés, Christian IV, en 1597, Tycho se exilió.

Fue invitado por el rey de Bohemia y el Sacro Emperador Romano Rodolfo II a Praga, donde se convirtió en el astrónomo imperial oficial.

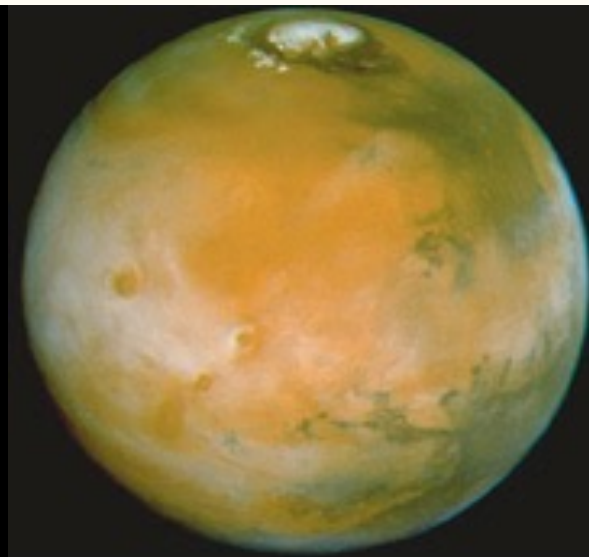
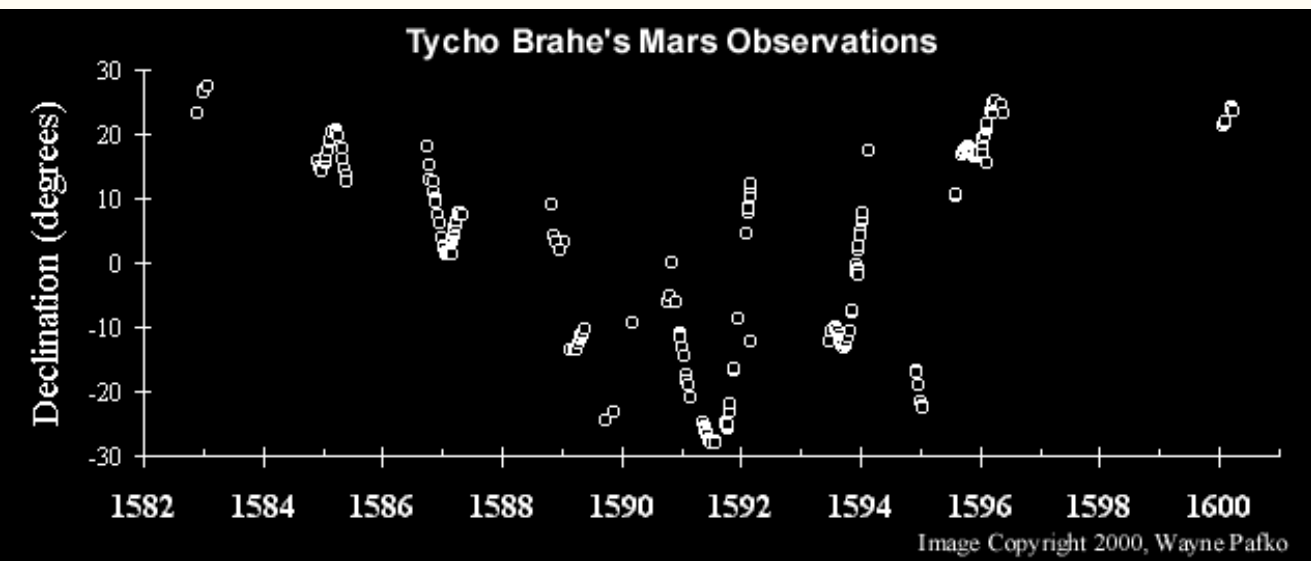
Allí, desde 1600 hasta su muerte en 1601, fue asistido por Johannes Kepler.



Rodolfo II (1552 – 1612) fue Emperador del Sacro Imperio Romano Germánico (1576–1612), Rey de Hungría y Croacia, Rey de Bohemia y Archiduque de Austria. Era miembro de la Casa de Habsburgo.

# Marte y la “Nueva Astronomía” (1609)

En Praga, trabajando con Tycho Brahe y más tarde como su sucesor, a Kepler se le encomendó la tarea de analizar las muy exactas observaciones de Marte realizadas por Tycho durante 20 años y completar las Tablas Rudolfinas, un catálogo de posiciones de estrellas y planetas.



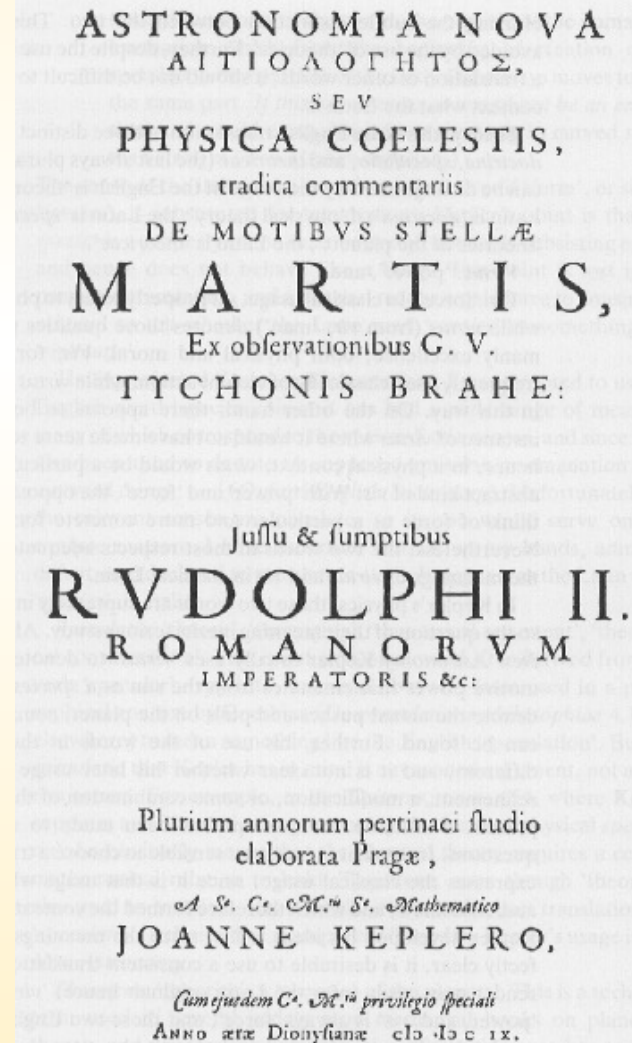
# Kepler y el concepto físico de las órbitas

Esta “intuición” sería decisiva en el futuro desarrollo de la astronomía.

Para Kepler, el Sol era la “causa” del movimiento planetario, y había que referir las órbitas a él.

Kepler pasa de un sistema geométrico a un sistema físico, que dará grandes frutos.

Además, el sistema físico deberá tener validez global (no separadamente entre latitud y longitud como anteriormente).



# Kepler y las órbitas planetarias

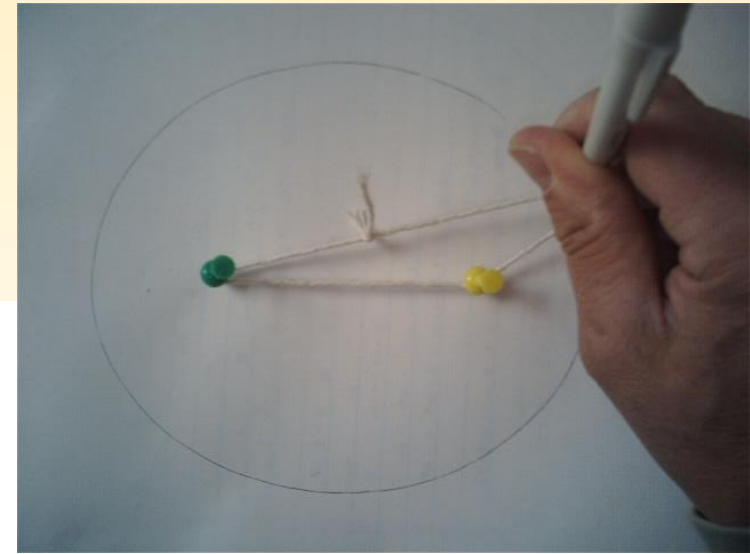
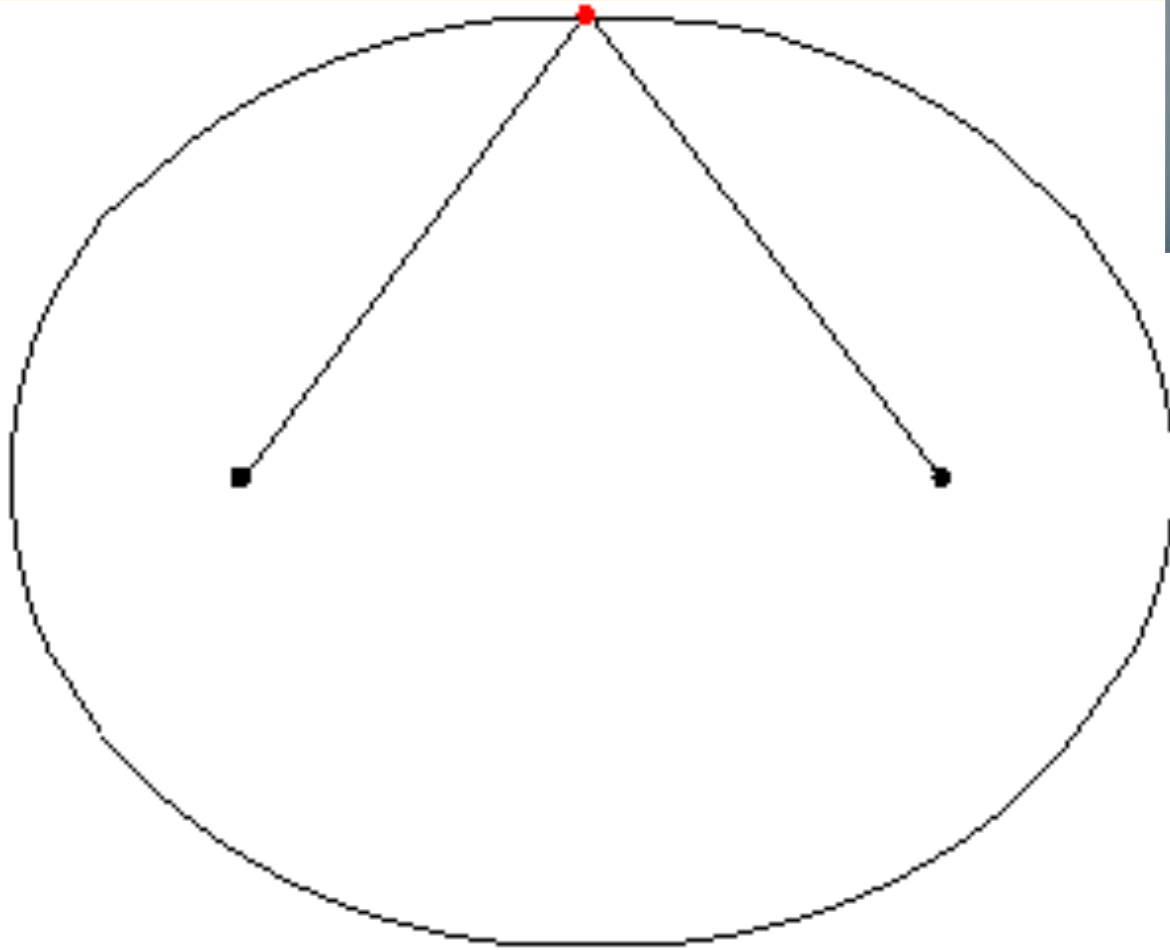
En principio Kepler rechazó las órbitas elípticas por falta de simetría.

Las observaciones de Tycho (y su precisión) fueron providenciales (en particular las 10 observaciones de Marte en oposición con la Tierra).

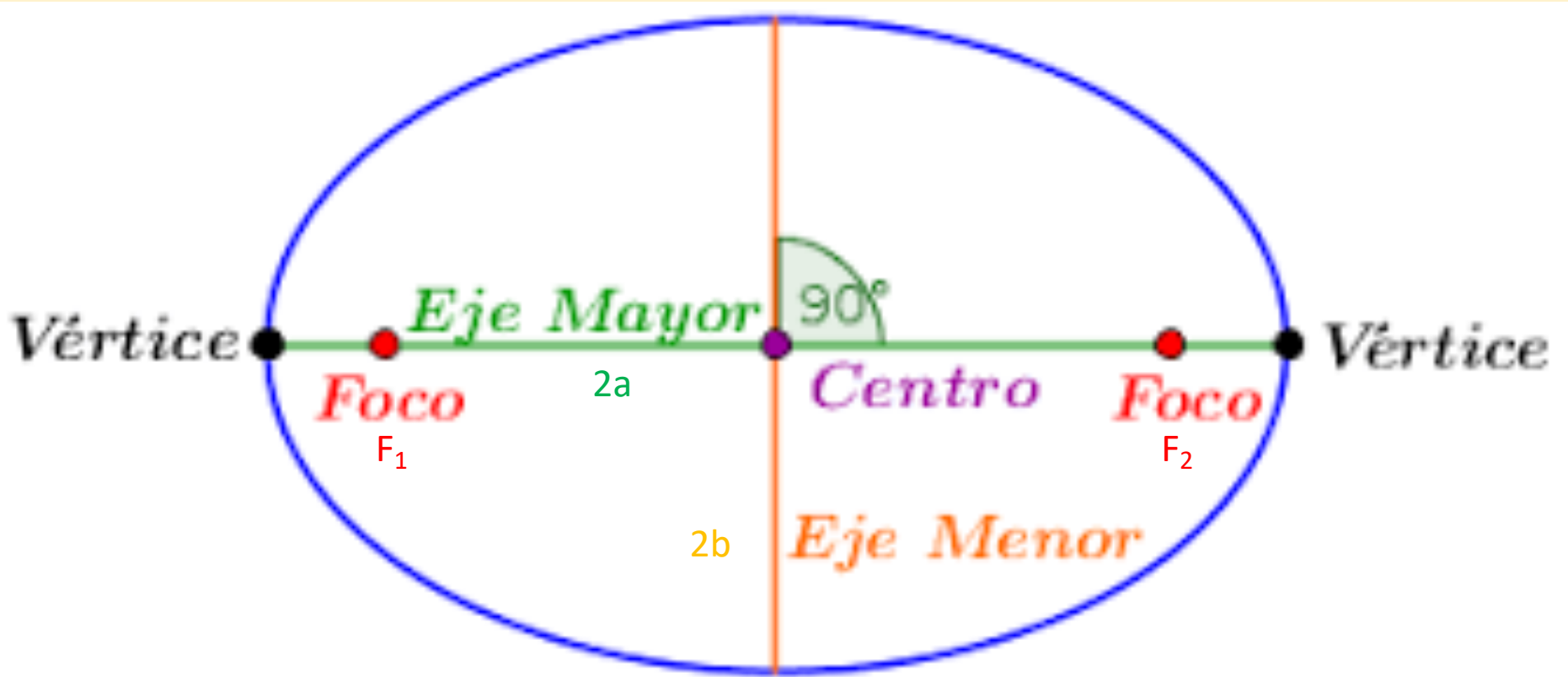
Las órbitas circulares daban un error en latitud de unos  $8'$  (inaceptables para la precisión de las observaciones de Tycho).

Por primera vez en 2000 años se abandonan los movimientos circulares.

# ¿Qué es una elipse?



<https://www.youtube.com/watch?v=FW5zsN-QztY>

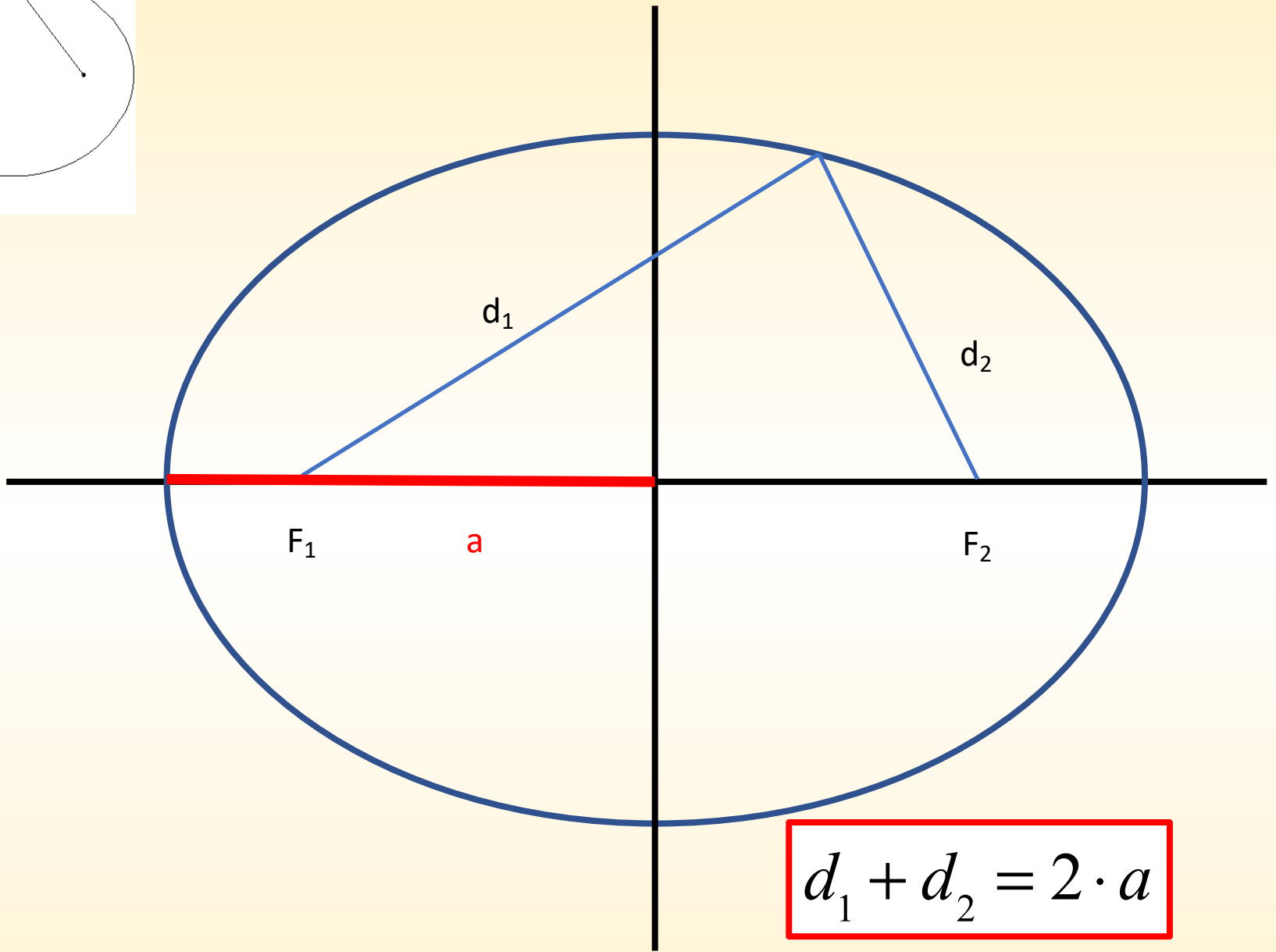
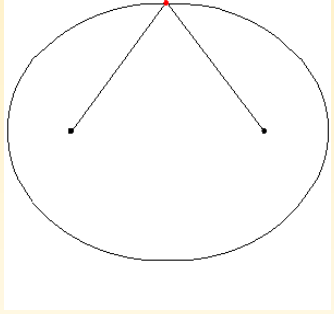


$F_1$  y  $F_2$  son los **focos** de la elipse

Eje mayor:  $2 \cdot a$     eje menor:  $2 \cdot b$

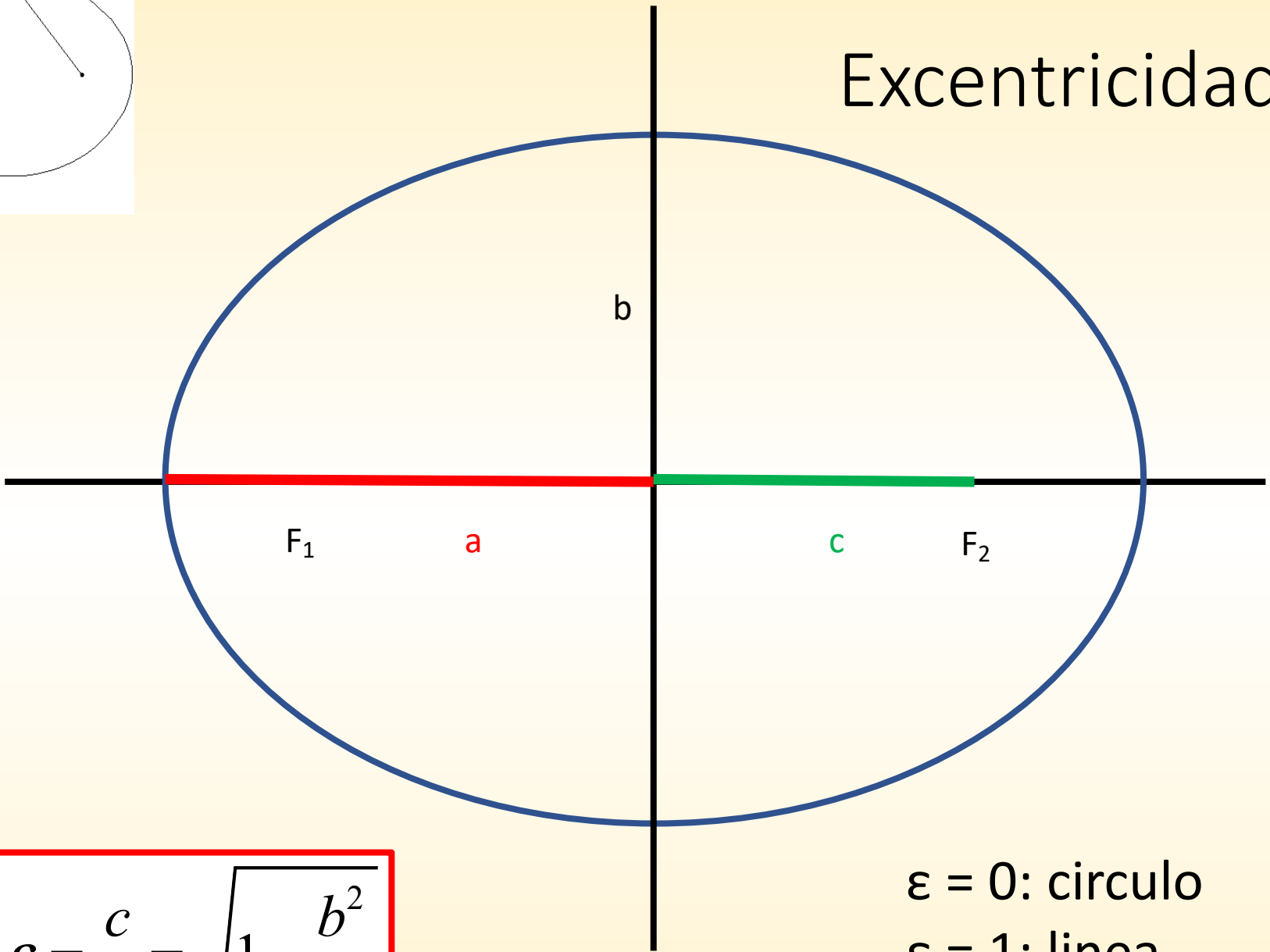
$a$  = **semi-eje mayor**

$b$  = semi-eje menor



$$d_1 + d_2 = 2 \cdot a$$

# Excentricidad



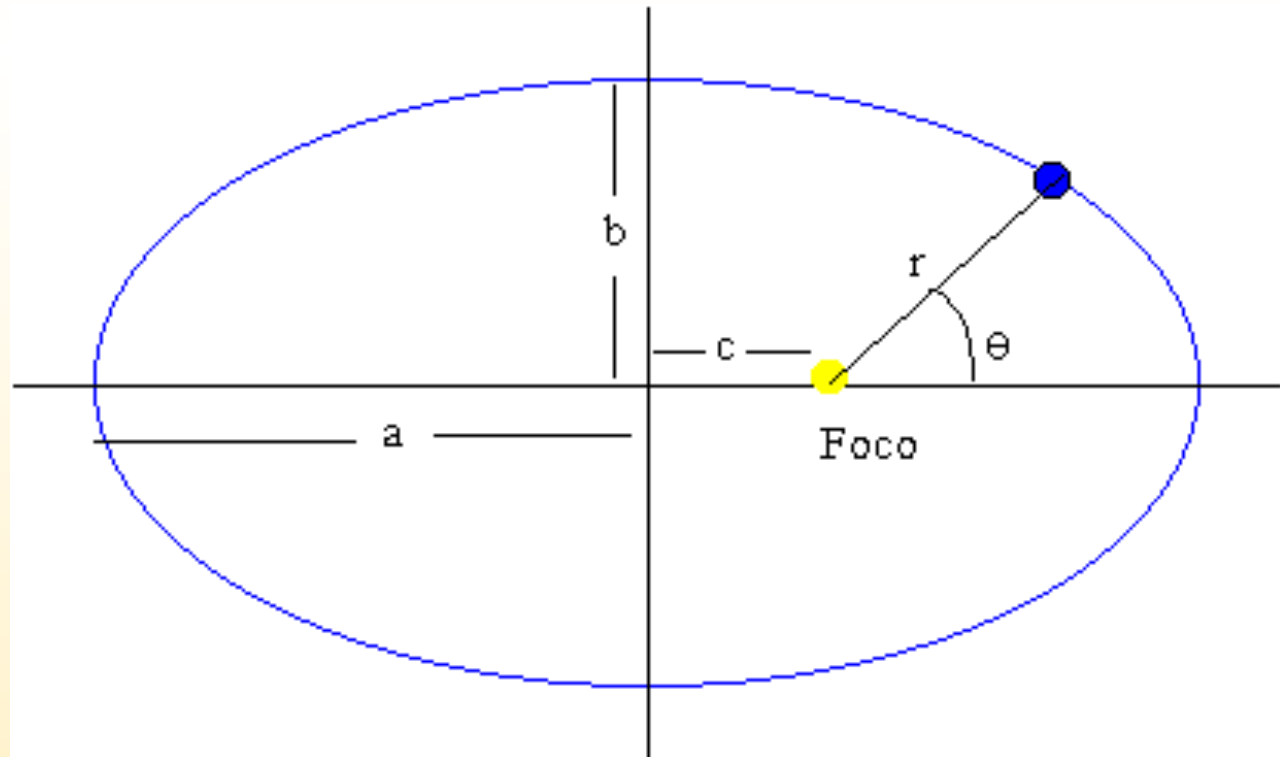
$$\varepsilon = \frac{c}{a} = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}}$$

$\varepsilon = 0$ : círculo  
 $\varepsilon = 1$ : línea



# Primera ley de Kepler

Todos los planetas se desplazan alrededor del Sol describiendo órbitas elípticas, estando el Sol situado en uno de los focos.



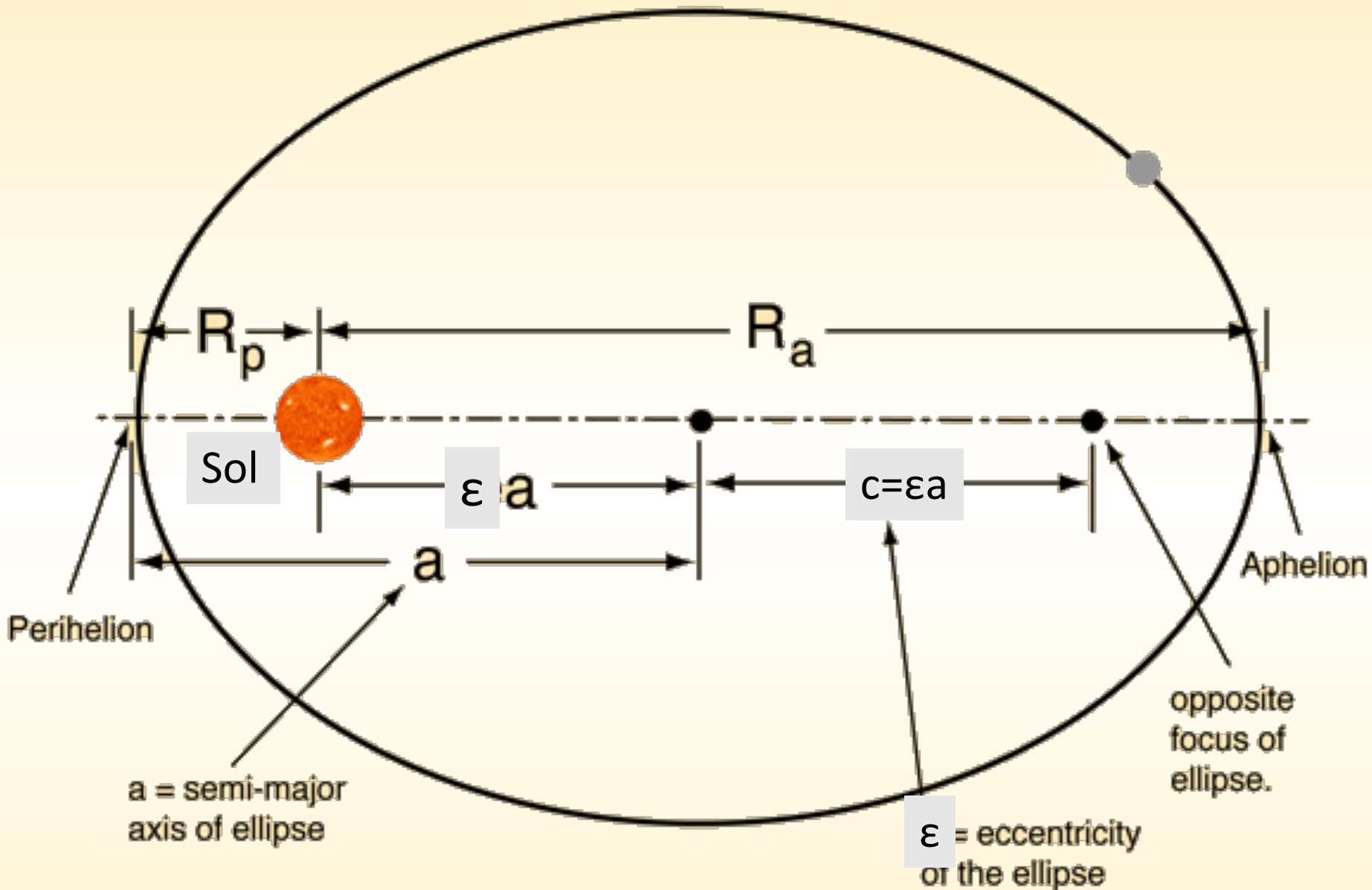
# Ley de las órbitas elípticas (1609)

La primera ley de Kepler, a veces conocida como la ley de las elipses, explica que los planetas están orbitando el Sol en un camino descrito como una **elipse**.

Una elipse es una curva especial en la que la suma de las distancias desde cada punto de la curva a dos puntos especiales es una constante. Los dos puntos especiales se conocen como los **focos** de la elipse.

Cuanto más cerca estén estos puntos, más se parece la elipse a la forma de un círculo. De hecho, un círculo es el caso especial de una elipse en la que los dos focos están en la misma ubicación.

La primera ley de Kepler es bastante simple: todos los planetas orbitan el Sol en un camino que se asemeja a una elipse, con el Sol ubicado en uno de los focos de esa elipse.



$$R_a = a(1 + \epsilon) \quad R_p = a(1 - \epsilon)$$

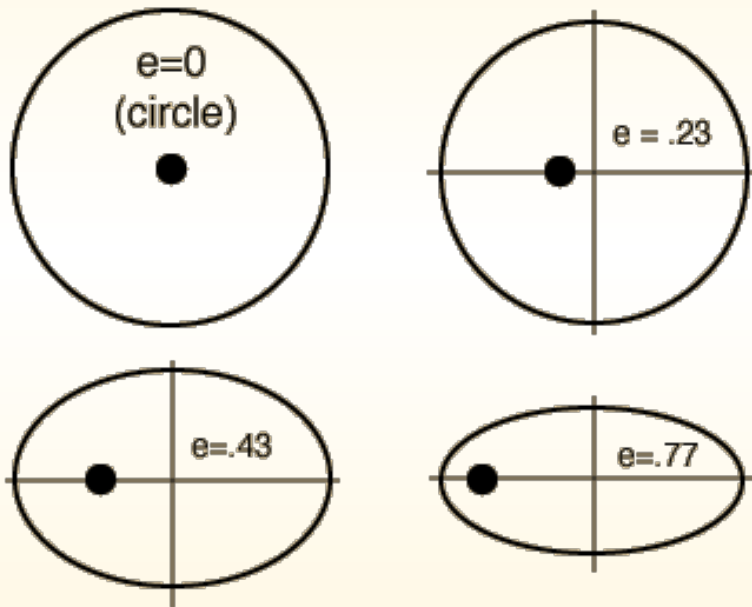
El punto de menor distancia al Sol se llama **perihelio**  $R_p$  y el punto de mayor distancia al Sol se llama **afelio** (de apohelio)  $R_a$ .

helio: del griego antiguo ἥλιος (hélíos, "sol")

peri- : del griego antiguo περί (perí, "aproximadamente, alrededor")

apo-: del prefijo griego antiguo ἀπό- (apó-), de la preposición ἀπό (apó, "de, lejos de")

# Excentricidades de órbitas planetarias

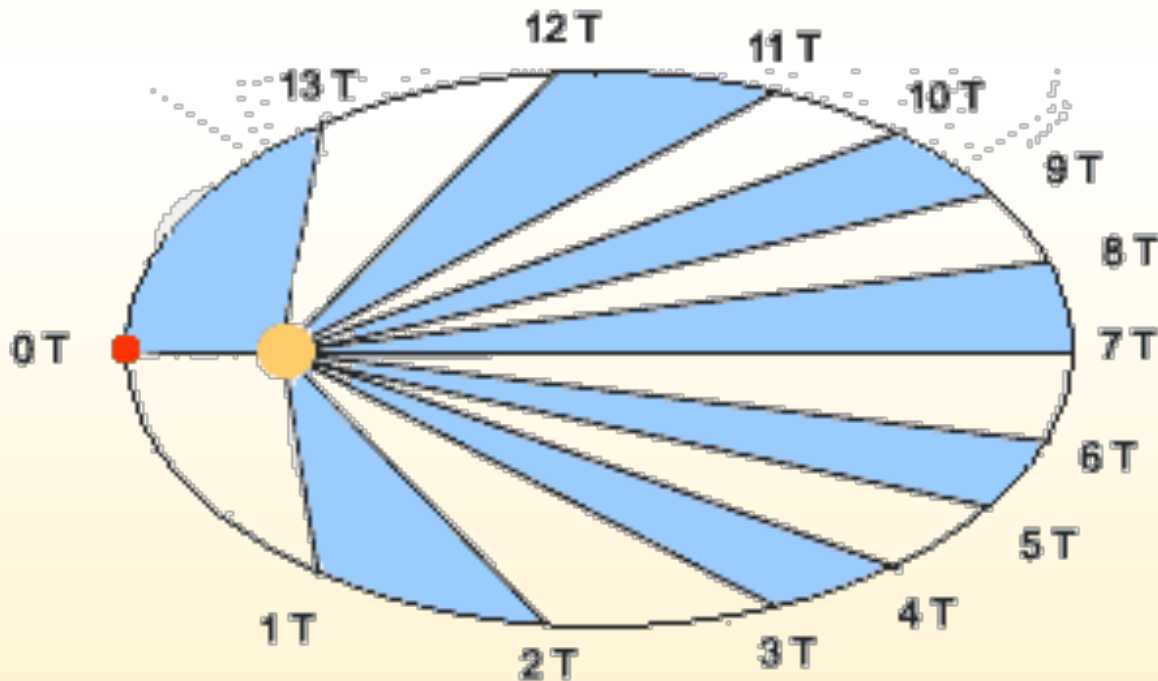


Las excentricidades de los planetas son muy bajas. Esto significa que sus órbitas están muy cerca de círculos.

Mercurio	0.206
Venus	0.0068
Tierra	0.0167
Marte	0.0934
Jupiter	0.0485
Saturno	0.0556
Urano	0.0472
Neptuno	0.0086
Pluton	0.25

# Segunda ley de Kepler

El radio vector que une el planeta y el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales.



T = any unit of time (hour, day, week, etc.)

# Ley de las áreas (1609)

La segunda ley de Kepler, a veces denominada ley de áreas iguales, describe la velocidad a la que se moverá cualquier planeta mientras orbita el Sol.

La velocidad a la que cualquier planeta se mueve a través del espacio está cambiando constantemente.

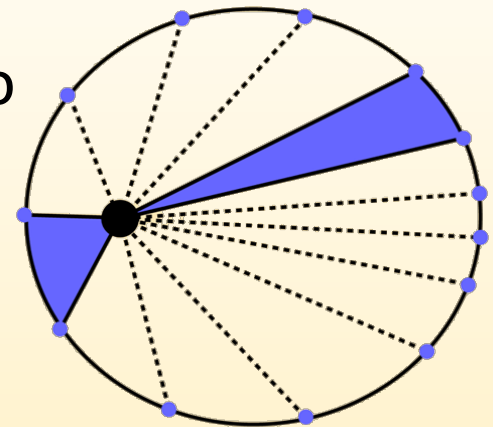
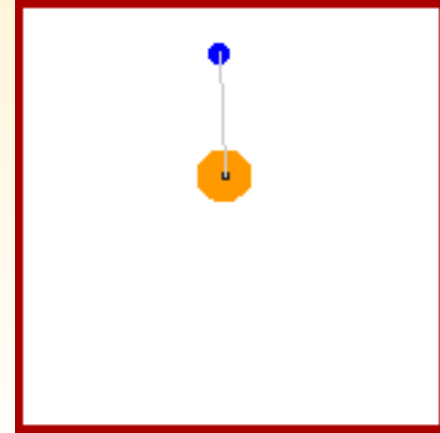
Un planeta se mueve más rápido cuando está más cerca del Sol y más lento cuando está más alejado del Sol.

Sin embargo, si se dibujara una línea imaginaria desde el centro del planeta hasta el centro del Sol, esa línea barrería la misma área en períodos iguales de tiempo.

Esto se representa en los siguientes diagramas:

Como se puede observar en el diagrama, las áreas formadas cuando la Tierra está más cerca del Sol pueden aproximarse como un triángulo ancho pero corto; mientras que las áreas formadas cuando la Tierra está más alejada del Sol pueden aproximarse como un triángulo estrecho pero largo.

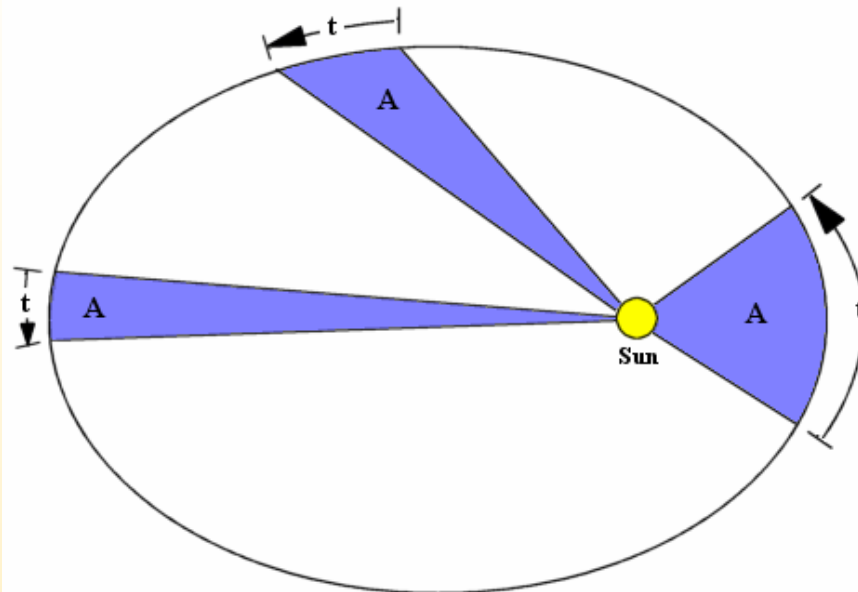
Estas áreas son del mismo tamaño. Dado que la base de estos triángulos es más corta cuando la Tierra está más alejada del Sol, la Tierra tendría que moverse más lentamente para que esta área imaginaria sea del mismo tamaño que cuando la Tierra está más cerca del Sol.

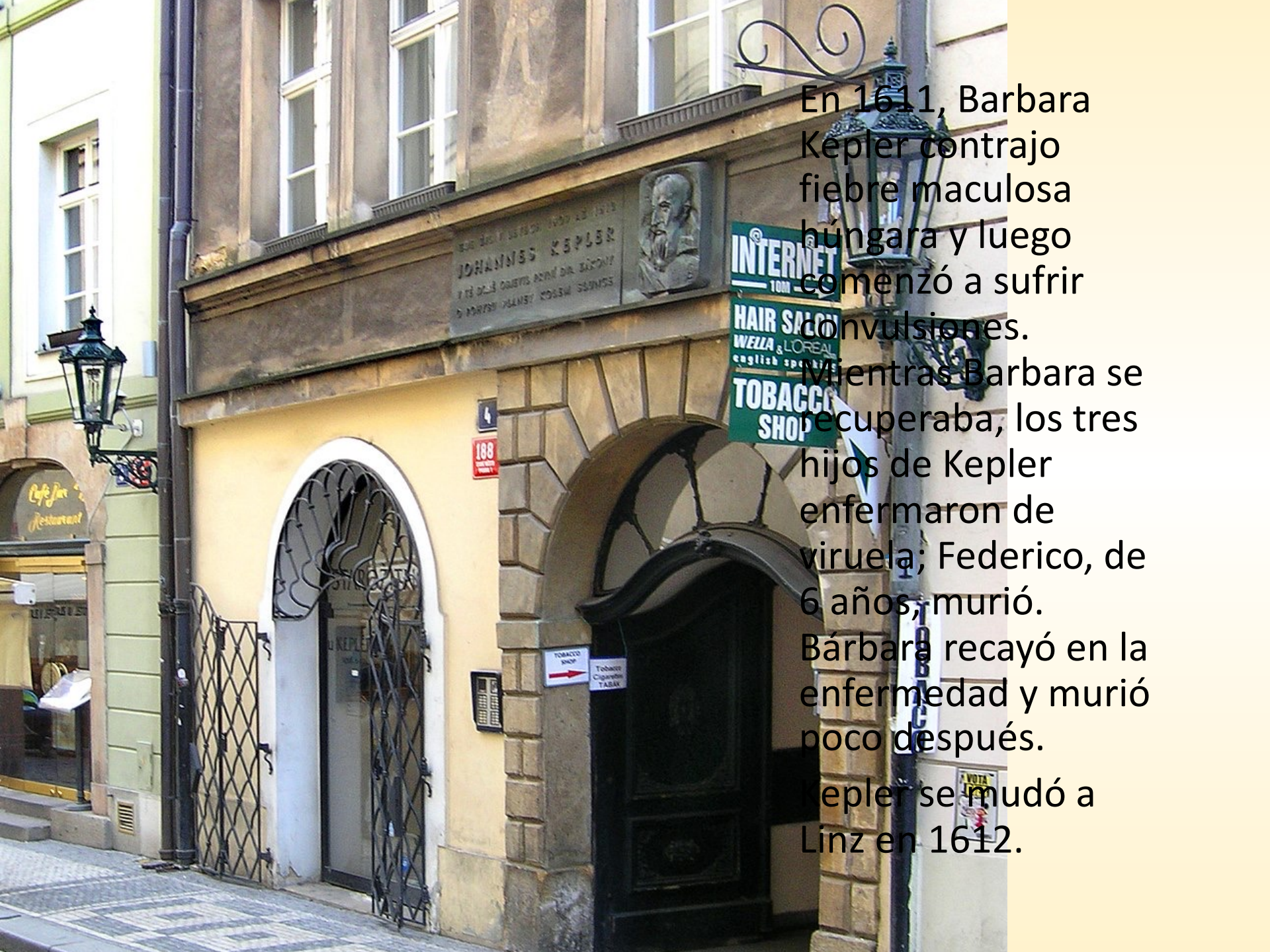




La ley de las áreas es equivalente a la constancia del momento angular, es decir, cuando el planeta está más alejado del Sol (afelio) su velocidad es menor que cuando está más cercano al Sol (perihelio). En el afelio y en el perihelio, el momento angular  $L$  es el producto de la masa del planeta, su velocidad y su distancia al centro del Sol.

$$L = m \cdot r_1 \cdot v_1 = m \cdot r_2 \cdot v_2$$





En 1611, Barbara Kepler contrajo fiebre maculosa húngara y luego comenzó a sufrir convulsiones.

Mientras Barbara se recuperaba, los tres hijos de Kepler enfermaron de viruela; Federico, de 6 años, murió.

Barbara recayó en la enfermedad y murió poco después.

Kepler se mudó a Linz en 1612.

Linz, las principales responsabilidades  
Kepler (más allá de completar las  
las Rudolfinas) eran enseñar en la  
escuela del distrito y brindar servicios  
matemáticos y astronómicos.

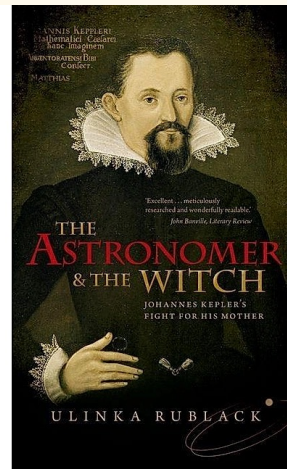
También fue durante su estancia en Linz  
cuando Kepler tuvo que lidiar con la  
acusación y el veredicto final de brujería  
contra su madre Katharina en la ciudad  
protestante de Leonberg.



En 1615, Lutherus Einhorn inició un juicio por brujería, quien durante su reinado como vogt de la ciudad protestante de Leonberg (1613 - 1629) acusó a 15 mujeres de hechicería y ejecutó a 8 de ellas. Actuó de acuerdo con la voluntad del gobierno y del público, que había pedido una investigación sobre brujería, y ordenó el arresto de Katharina Kepler en 1615. Ursula Reinbold había acusado a Katharina Kepler de darle una poción después de una discusión que la había hecho ella enferma. Johannes Kepler defendió él mismo a su madre, con la ayuda de su universidad de Tubinga. Uno de sus amigos estudiantes, Christopher Besoldus, la ayudó jurídicamente.

Su hijo se la llevó a Linz en diciembre de 1616. Cuando regresó a Leonberg en el verano de 1620, fue arrestada y encarcelada durante catorce meses. Le dijeron que la torturarían para asustarla, pero ella se negó a confesar nada.

En octubre de 1621, Kepler pudo lograr su liberación. Katharina Kepler murió al año siguiente.

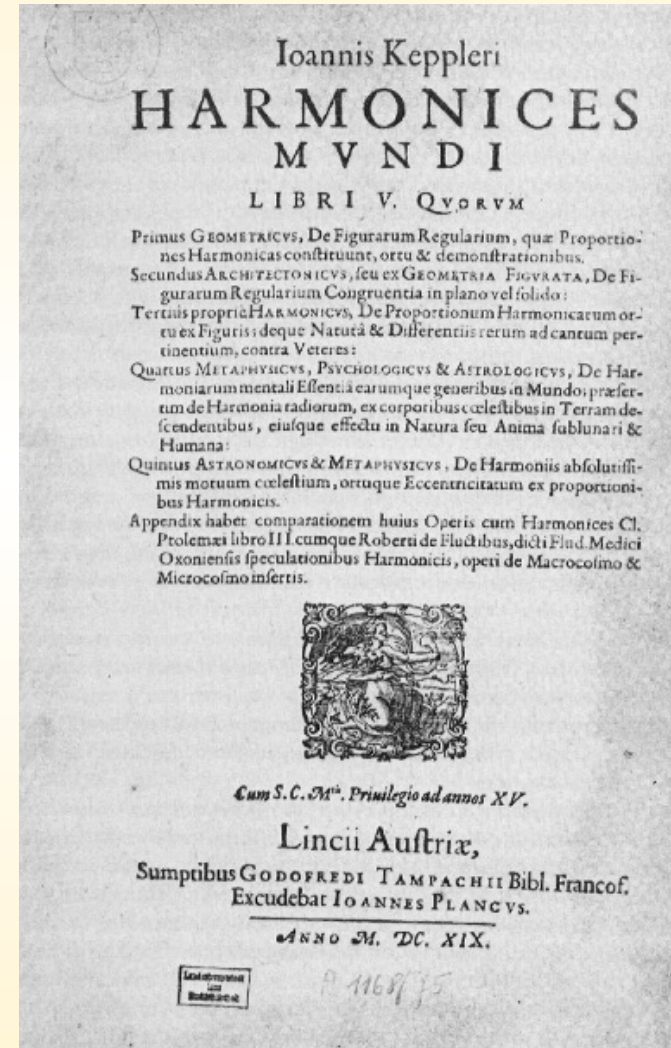


# La Armonía del Mundo

En la “Astronomia Nova” Kepler había estudiado cómo cada planeta orbita el Sol, pero él quería una teoría global de la creación... comprender “La Armonía del Mundo”.

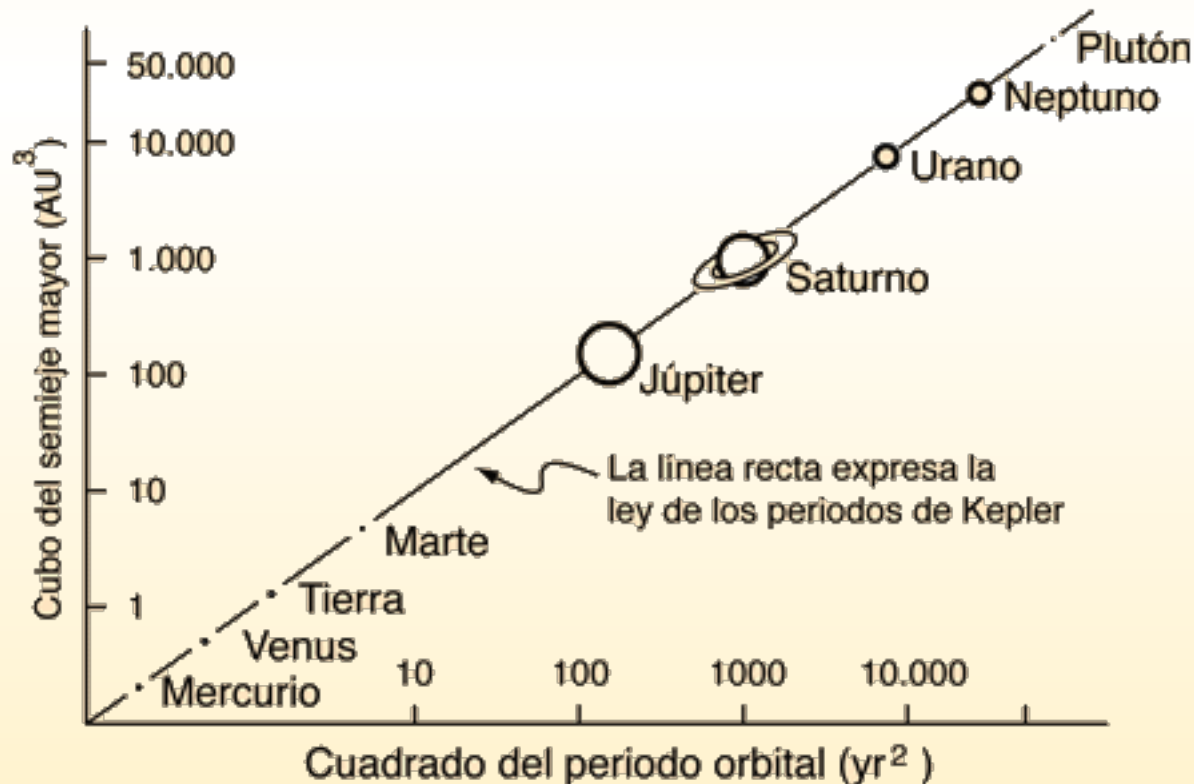
Buscó relaciones entre los parámetros de las órbitas, y encontró su tercera ley del movimiento planetario.

La “Armonía” se publicó en 1619.

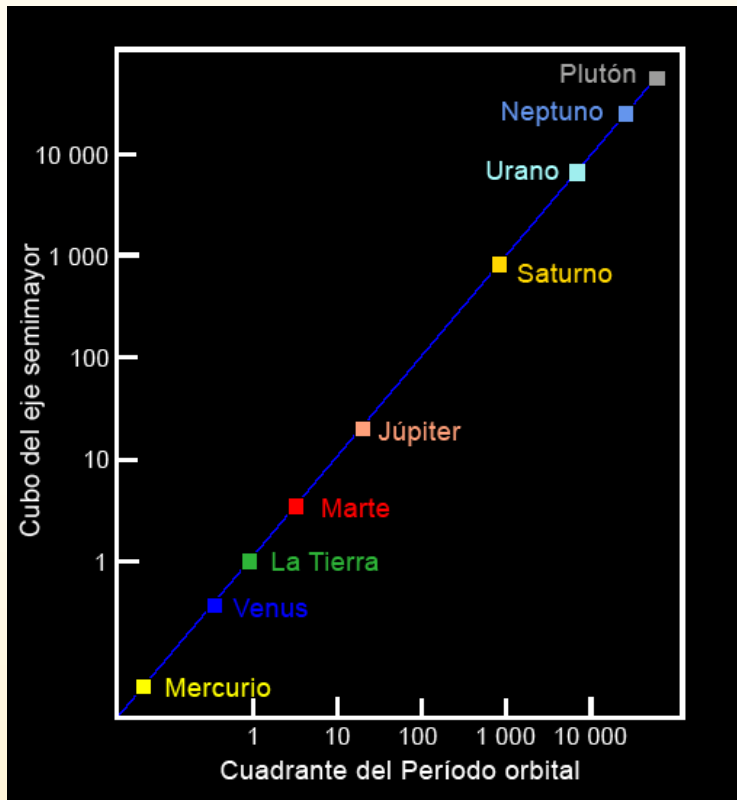


# 3. ley de Kepler: Ley Armónica (1618)

El cuadrado del periodo de las órbitas  $T$  es proporcional al cubo del semieje mayor de la elipse  $a$ .



# Valores para los planetas de nuestro Sistema Solar



Planeta	Periodo (yr)	Distancia (AU)	$T^2/a^3$ (yr <sup>2</sup> /AU <sup>3</sup> )
Mercurio	0.241	0.39	0.98
Venus	0.615	0.72	1.01
Tierra	1.00	1.00	1.00
Marte	1.88	1.52	1.01
Jupiter	11.8	5.20	0.99
Saturno	29.5	9.54	1.00
Urano	84.0	19.18	1.00
Neptuno	165	30.06	1.00
Pluton	248	39.44	1.00

# Determinación de la constante K

Sin la ley de la gravedad, la constante K no puede determinarse.

Necesitamos esperar hasta que Newton formule su ley de la gravedad universal.

Con este conocimiento, finalmente es posible escribir la constante K:

$$K = \frac{4\pi^2}{G(M_1 + M_2)}$$

G: constante de gravitación

$M_1$ : masa del Sol  $M_{\odot}$

$M_2$ : masa del planeta

La masa del planeta es demasiado pequeño en comparación con la masa del Sol y se puede quitar.



La formulación matemática de Newton de la tercera ley de Kepler es:

$$T^2 = \frac{4\pi^2}{GM_{\odot}} a^3$$



El 30 de octubre de 1613, Kepler se casó con Susanna Reuttinger, de 24 años.

Los primeros tres hijos de este matrimonio (Margareta Regina, Katharina y Sebald) murieron en la infancia. Tres más sobrevivieron hasta la edad adulta: Cordula (nacido en 1621); Fridmar (nacido en 1623); y Hildebert (nacido en 1625).

# Las Tablas Rudolfinas

Kepler tenía que “superar” la prueba tradicional de generar tablas con posiciones planetarias (ya que Tycho estaba descontento con la precisión de las tablas pruténicas de Copérnico).

Kepler y Tycho fueron encargados de hacer estas tablas por el emperador Rodolfo II.

Aparecen en 1627 (Tycho y el emperador ya han muerto) y tienen una precisión asombrosa.

El 7 de Nov. de 1631 (ya muerto Kepler), Pierre Gassendi fue el primer observador en ver a Mercurio cruzar por delante del Sol... tal y como predecían las tablas (con un error menor que  $1/3$  del diámetro solar).

TABULÆ *J. Hadley*

# RUDOLPHINÆ.

QUIBUS ASTRONOMICÆ SCIENTIÆ, TEMPO-  
*rum longinquitate collapsa RESTAURATIO continetur;*

A Phœnicæ illo Astronomorum

## TYCHONE

Ex Illustri & Generosa BRAHEORUM in Regno DANIÆ  
familiâ oriundo Equite,

PRIMUM ANIMO CONCEPTA ET DESTINATA ANNO  
CHRISTI MDLXIV: EXINDE OBSERVATIONIBUS SIDERUM ACCURA-  
TISSIMIS, POST ANNUM PRÆCIPUE MDLXXII, QUO SIDUS IN CASSIOPEIÆ  
CONSTELLATIONE NOVUM EFFULSIT, SERIO AFFECTATAI VARIORUM OPERIBUS, CUM ME-  
chanicis, cum litariis, impensis patrimonio amplissimo, accedentibus etiam subsidiis FRIDERICI II. DANIÆ  
REGIS, regali magnificentia dignis, tracta per annos XXV, potissimum in Insula freti SINCERÆ HUG-  
MÆ, & arce URANIBURGO, in hunc usque à fundamentis extractâ:

TANDEM TRADUCTA IN GERMANIAM, IN ÆVE AYLAM ET  
*Nymen RUDOLPHI IMP. anno MD IC.*

TABULAS IPSAS, JAM ET NUNCUPATAS, ET AFFECTAS, SED  
MORTI AUTHORIS SUI ANNO MDCI DESERTAS,

JUSSU ET STIPENDIIS FRETUS TRIUM IMPPPP.  
RUDOLPHI, MATTHIÆ, FERDINANDI,

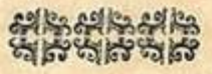
ANNITENTIBUS HÆREDIBUS BRAHEANIS; EX FUNDAMENTIS  
*Observationum reliatarum, ad exemplum serè partium tam exstructarum, continuis multarum annorum  
speculationibus & computationibus, primum PRAGÆ Bohemorum continuatis; deinde LINCII,  
superiori Austriæ Metropoli, subsidijs etiam ill. Provincialium adiutus, perfecit, absolutis,  
adq; causarum & calculi perennis formulam traduxit*

## IOANNES KEPLERUS.

TYCHONI *primus* à RUDOLPHO II. Imp. adjunctus calculi minister; indeq;  
*trium ordine Impppp. Mathematicus:*

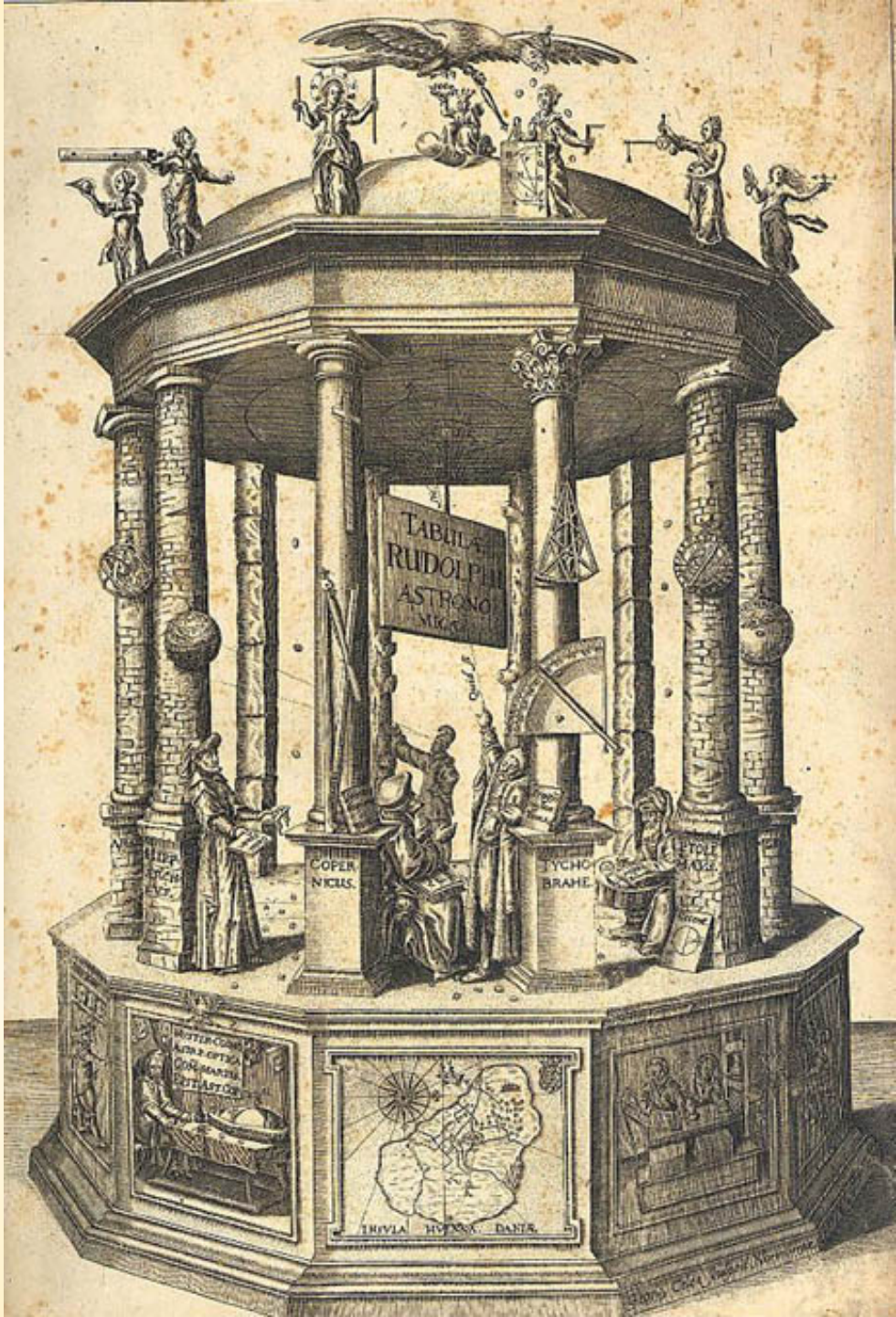
Qui idem de speciali mandato FERDINANDI II. IMP.  
potentibus instantibusq; Hæredibus,

Opus hoc ad usus presentium & posteritatis, typis, numericis proprijs, ceteris  
& prelo JONÆ SAURII, Reip. Ulmanæ Typographi, in publicum  
extulit, & Typographicis operis ULMÆ curator affuit.



Cum Privilegijs IMP. & Regum Rerumq; publ. vivo TYCHONI ejusq; Hæredibus,  
& speciali Imperatorio, ipsi KEPLERO concessis, ad anno XXX.

ANNO M D C XXVII.



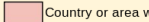
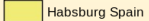
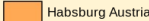
El 8 de octubre de 1630, Kepler partió hacia Ratisbona con la esperanza de cobrar intereses por el trabajo que había realizado anteriormente. Unos días después de llegar a Ratisbona, Kepler enfermó y empeoró progresivamente.

El 15 de noviembre de 1630, poco más de un mes después de su llegada, murió.

Fue enterrado en un cementerio protestante que quedó completamente destruido durante la Guerra de los Treinta Años.



THE THIRTY YEARS' WAR

-  Country or area with a Protestant majority
  -  Habsburg Spain
  -  Habsburg Austria
- ① 1620-1623: Defeat of the Czechs and the Electoral Palatinate
  - ② 1625-1629: Intervention and defeat of Christian IV of Denmark
  - ③ 1630-1632: Intervention of Gustavus Adolphus of Sweden
  - ④ 1635: Intervention of France against Spain and the Emperor  
④ 1642: Occupation of Roussillon  
④ 1643: French victory at the Battle of Rocroi
  - ⑤ 1645-1648: Turenne's and Sweden's campaign in Germany

0 500 km