

TEMA 3b. LA REVOLUCIÓN COPERNICANA (II)



Tema 3b: La revolución copernicana (II)

1. El realismo del modelo copernicano
2. Después de Copérnico
3. Kepler y la puesta al día del modelo heliocéntrico
4. Galileo y la invención del telescopio



1. El realismo del modelo copernicano.

El modelo completo de Copérnico, **De revolutionibus orbium coelestium** se publicó después de su muerte en 1543, pero no era la primera vez que se daba a conocer su modelo.

En 1514 había plasmado las principales ideas en los **Commentariolus**, un bosquejo de unas 40 páginas que circuló entre los astrónomos de la época.

En 1540 un alumno de Copérnico, **Georg Joachim Rheticus** publicó anónimamente la **Narratio Prima**, en la que exponía las ideas heliocéntricas.

1. El realismo del modelo copernicano.

En 1541, **Aquiles Pirmin Gasser** (mentor de Rheticus) reimprimía la obra en Basilea citando al autor y haciendo referencia a Copérnico e incluyendo un prólogo en el que preveía el debate del realismo.

Las dudas (y la presión) de Copérnico por la publicación se resolvieron en una serie de cartas con **Andreas Osiander**, teólogo luterano y colaborador en la imprenta de **Johannes Petreius** en Nuremberg.



1. El realismo del modelo copernicano.

Osiander le dijo⁽¹⁾ que podía suavizar la recepción si decía que los principios de que se sirve la ciencia son:

“hipótesis [...], fundamentos del cálculo, de suerte que, aunque sean falsos, no importa con tal de que salven exactamente los fenómenos de los movimientos [celestes]”

Pero Copérnico no hizo caso y preparó un prefacio en forma de carta al papa **Pablo III** en el que mantenía el realismo de su modelo.

⁽¹⁾ La conversación entre Copérnico y Osiander tuvo lugar entre el otoño de 1540 y la primavera de 1541.

En otoño de ese mismo año, una copia de la obra completa iba camino de la imprenta en manos de Rethicus.

La obra manuscrita de Copérnico pasó por varias manos y actualmente está en el museo de la Universidad Jaguelónica de Cracovia.



1. El realismo del modelo copernicano.

Ante esta acción, Osiander⁽¹⁾ agregó una declaración **anónima** dedicada “al lector” en la que advertía de la naturaleza hipotética de la obra.

La obra se publicaba en 1543 con una doble lectura:

- el realismo del autor
- el instrumentalismo de Osiander

Sin embargo, al no firmar⁽²⁾ Osiander su observación, parecía provenir del propio Copérnico, de forma que quedaba a la interpretación del lector.

⁽¹⁾ El encargado de la publicación fue Rheticus, pero tuvo que marcharse a Leipzig a hacerse cargo de su plaza en la Universidad. El relevo en la edición lo tomó Osiander.

⁽²⁾ Esta maniobra no fue aceptada por Rheticus y Giese (amigo de Copérnico) y protestaron antes las autoridades, sin mucho éxito.

Sin embargo, no hay que pensar en una mala intención de Osiander dada su trayectoria como reformista y anti-papista.



1. El realismo del modelo copernicano.

Hasta 1609 no se aclaró⁽¹⁾ la autoría del prefacio, quedando clara la postura realista de Copérnico.

El jesuita **Roberto Bellarmino** siguió atribuyendo a Copérnico la visión instrumentalista, y en una carta en 1615, dejó clara la herejía de la visión realista.

También afirmó que de hallarse pruebas, habría que reinterpretar las escrituras. Galileo aceptó el reto y acabó condenado.

En 1616 se prohibió formalmente el heliocentrismo por herético.

⁽¹⁾ La llevó a cabo Johannes Kepler en su *Astronomía Nova*.

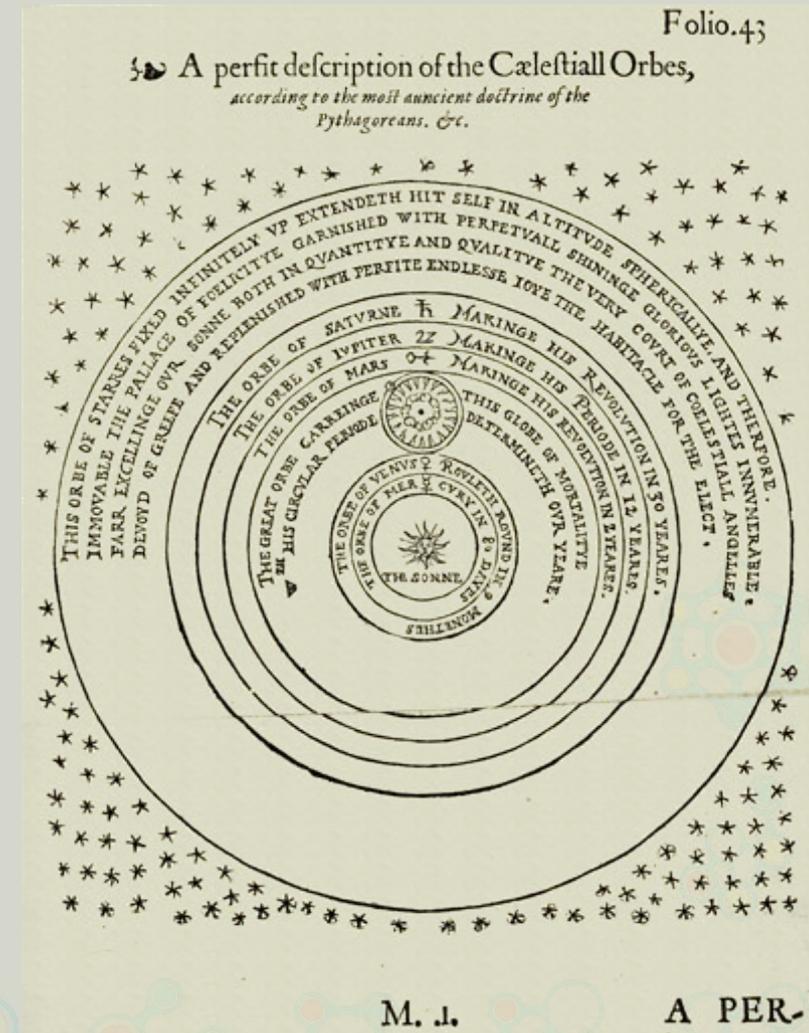


2. Después de Copérnico

Thomas Digges

En 1576 **Thomas Digges** (1546-1595) introduce la idea de espacio infinito interpretando la inmovilidad de las estrellas de Copérnico⁽¹⁾

Digges esparce las estrellas más allá de una última esfera sin que exista ninguna necesidad de que estén más o menos agrupadas



⁽¹⁾ Copérnico necesita estrellas muy lejanas e inmóviles para justificar la ausencia de paralaje desde la Tierra.

Las sitúa sobre una esfera externa, pero ya no tiene una razón motora de ser, al no depender el movimiento de los astros de ella (Kuhn)

2. Después de Copérnico

Giordano Bruno

Esta idea de infinitud incluye un nuevo problema:

¿Cómo va a estar el Sol en el centro de un universo infinito si en el infinito no hay centro?

Giordano Bruno (1548-1600), más cosmólogo que astrónomo, conocedor de la obra de **Nicolás de Cusa**⁽¹⁾ propuso que el Sol era una más de las infinitas estrellas y la Tierra un planeta más como los que orbitaban alrededor de sus soles.

Este panteísmo y otras ideas heréticas⁽¹⁾, le llevaron a la hoguera en 1600.

⁽¹⁾ Nicolás de Cusa (1401-1464) entendía un universo infinito coincidente con Dios infinito.

⁽²⁾ Negaba la transustanciación del alma, la virginidad de María...

El inquisidor que llevó a cabo el juicio fue Roberto Bellarmino, quien luego juzgará a Galileo.

2. Después de Copérnico

Tycho Brahe



Tycho Brahe (1546-1601) detectó errores en las tablas alfonsíes y en las pruténicas, por lo que decidió realizar observaciones precisas.

Construyó un gran observatorio, donde midió el paralaje con una precisión de 10'' de grado.

Descubrió que los **cometas** estaban más allá de la Luna, luego sus trayectorias atravesaban la órbita de varios planetas, lo que eliminaba la idea de esferas sólidas. Es decir, los **planetas flotan** en es espacio, problema no resuelto hasta Newton.

2. Después de Copérnico

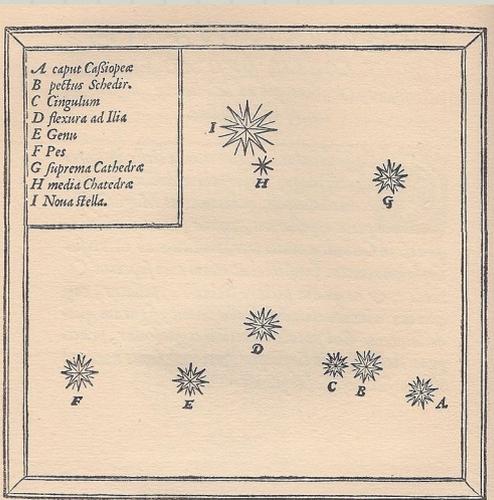
Tycho Brahe

(1) En realidad no vio lo que hoy denominamos nova, sino una explosión estelar similar de tipo supernova

También vio aparecer y desaparecer (meses después) una **estrella nova**⁽¹⁾, antes asociadas a la atmósfera.

Pero al no detectar paralaje, y no moverse como los planetas estaban entre las fijas, existiendo pues corrupción en el “primer motor”.

Pero era profundamente piadoso e interpretó las novas como señales divinas y el movimiento de los planetas en “los cielos líquidos” los fundamentó en la acción divina.



Distantiam vero huius stelle à fixis aliquibus in hac Cassiopeie constellatione, exquisito instrumento, et omnium minorum capaci, aliquoties obseruavi. Inueni autem eam distare ab ea, que est in pectore, Schedir appellata B, 7. partibus et 55. minutis: à superiori

2. Después de Copérnico

Tycho Brahe

En desacuerdo con el movimiento terrestre, propuso un modelo que rebajaba los problemas de Copérnico.

- El Sol gira alrededor de la Tierra inmóvil
- Los planetas giran alrededor del Sol

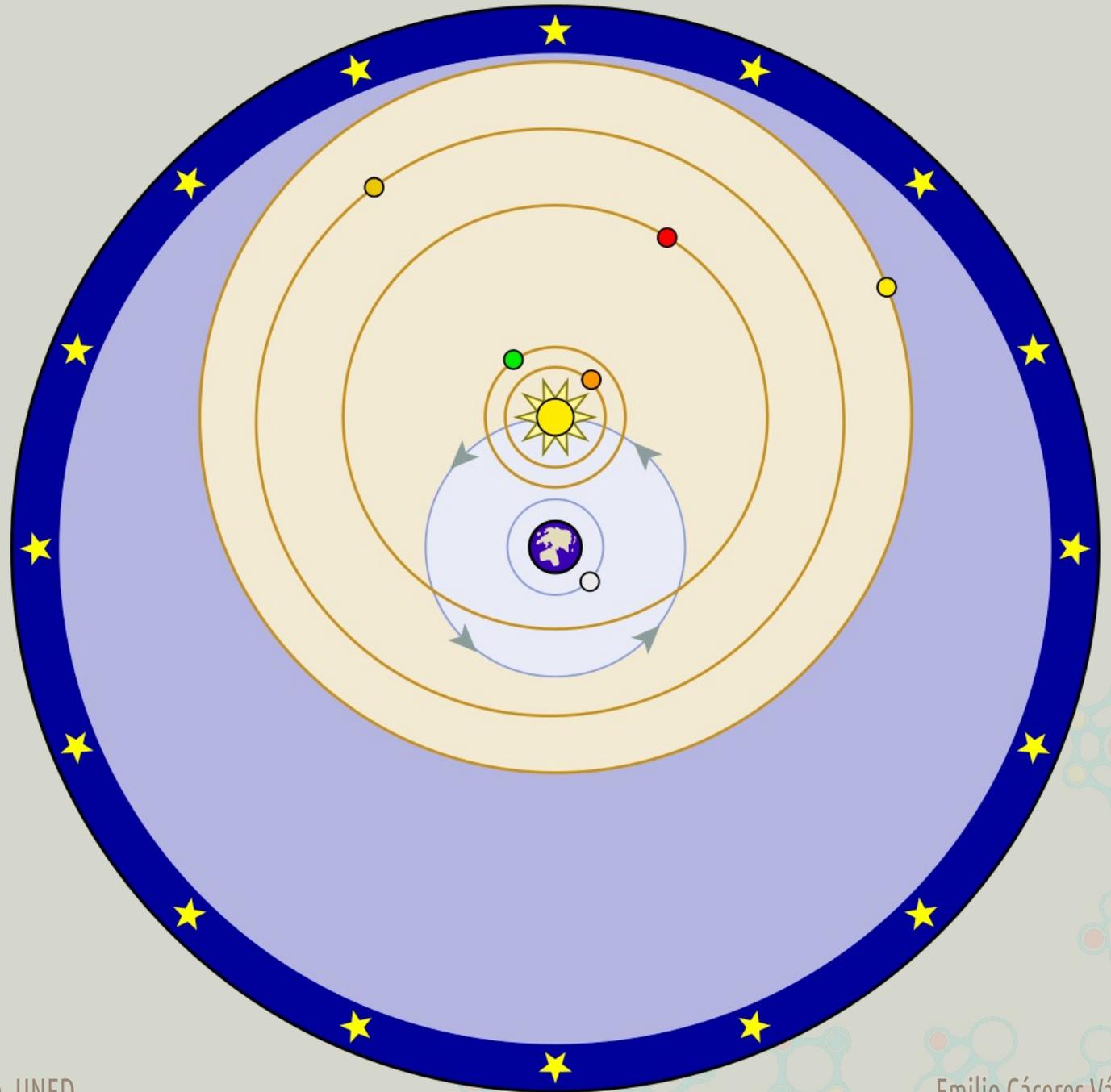
Las observaciones son indistinguibles de las de Copérnico, pero elimina dos problemas:

- El del giro de la Tierra
- El paralaje a las estrellas y el tamaño del universo

2. Después de Copérnico

Tycho Brahe

Es como el modelo copernicano, pero "sujetando" la Tierra en el centro.

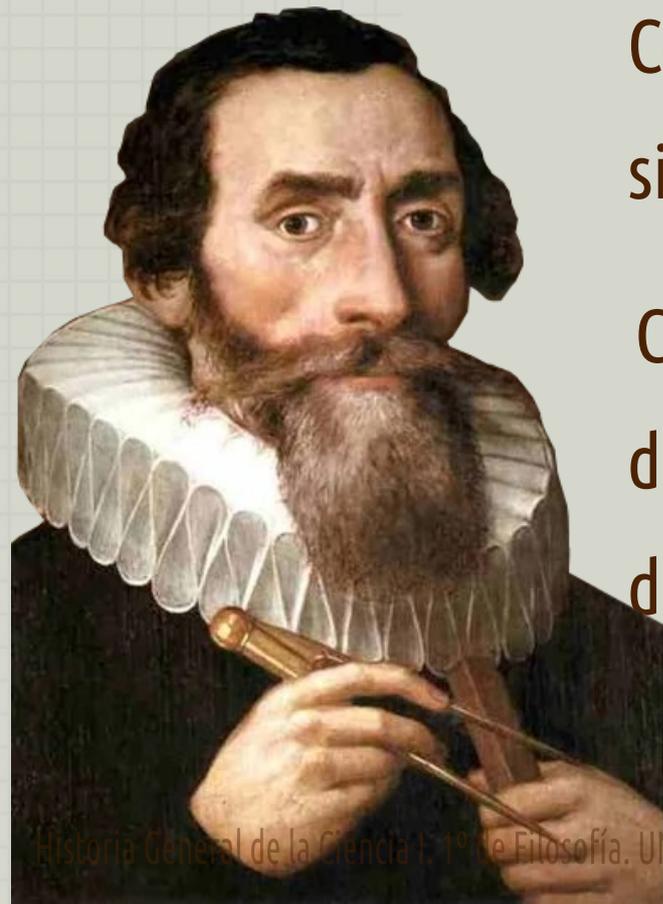


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Digges y Bruno basaron su defensa del realismo del modelo copernicano en especulaciones, pero las razones de **Johannes Kepler** (1571-1630) fueron firmes.

Kepler fue de los primeros astrónomos en estudiar a Copérnico en la universidad y fue quien dio al sistema la forma en la que se popularizó.

Consideraba a Dios como al demiurgo platónico, un dios matemático que diseñó el universo en función de armonías y regularidades geométricas.



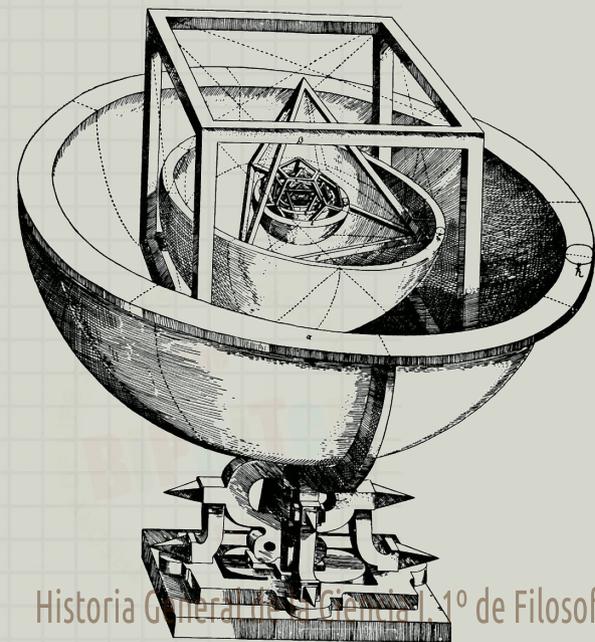
3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Consciente de la equivalencia formal entre los sistemas de Ptolomeo, Copérnico y Brahe, trató de demostrar que el heliocéntrico era el real, lo que dependía del examen de las causas físicas.

Kepler señaló que Copérnico se limitó a hacer una descripción de **cómo es** de hecho el mundo, mientras que él se ocupa de **por qué** es así.

Buscó en el magnetismo⁽¹⁾ una causa del movimiento y en la armonía de las relaciones de los sólidos de Teeteto, las distancias entre los planetas.

⁽¹⁾ W. Gilber publicó *De magnete* en 1600 acerca de los imanes y de la Tierra como un enorme imán.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Trabajando de ayudante de Brahe intentó ajustar las observaciones de éste al modelo de Copérnico.

Primero estudió **la órbita terrestre**, que es el observatorio móvil desde el que se referencian todas las demás observaciones.

Por triangulación, obtuvo las distancias al Sol de la Tierra en distintas posiciones de su órbita.

Los resultados fueron los siguientes...



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

⁽¹⁾ Ver un poco más adelante

El cálculo de la órbita terrestre la realizó partiendo de la posición relativa de Marte y la Tierra cuando **Marte estaba en oposición al Sol.**

Posteriormente, usó las observaciones de Brahe para determinar estas posiciones tras un año marciano.

Como el año marciano dura 687 días⁽¹⁾, es decir, dos años terrestres menos 43 días la posición relativa de la Tierra con marte se retrasaba cada año marciano.

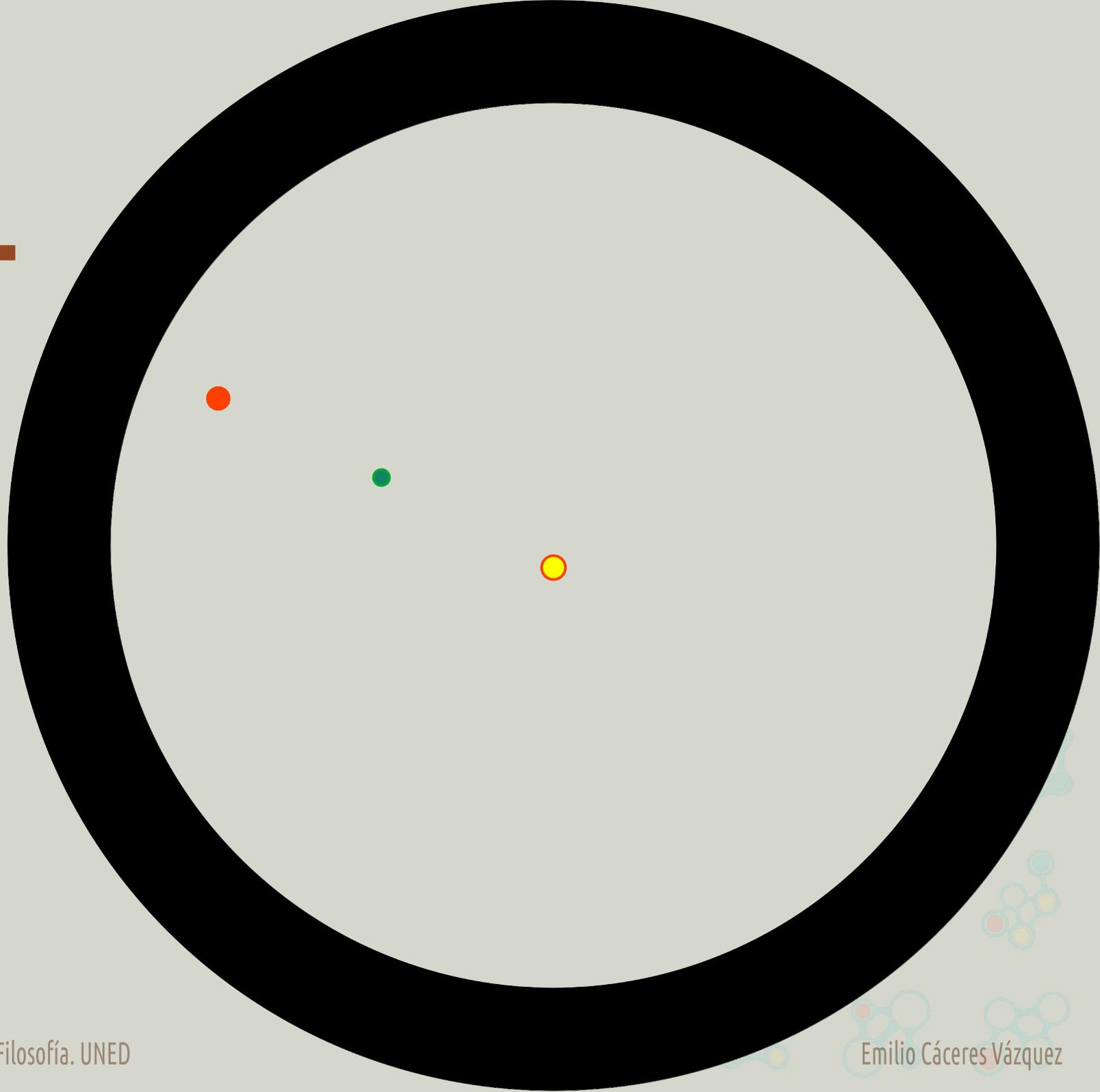
Hizo esto tres veces...



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Punto de partida t_0
Marte en oposición al Sol

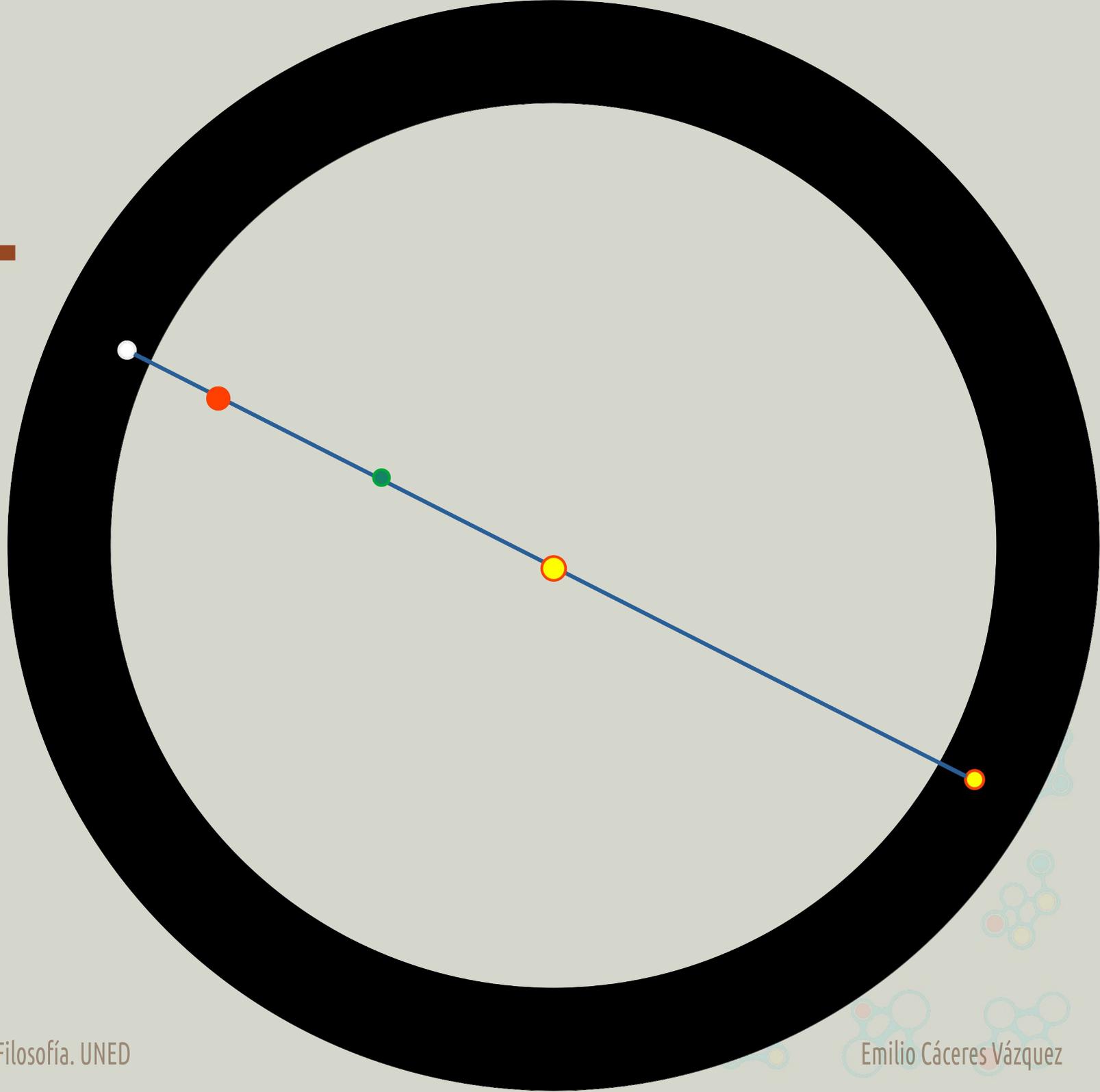


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Punto de partida t_0

Marte en oposición al Sol, en referencia a las estrellas fijas.

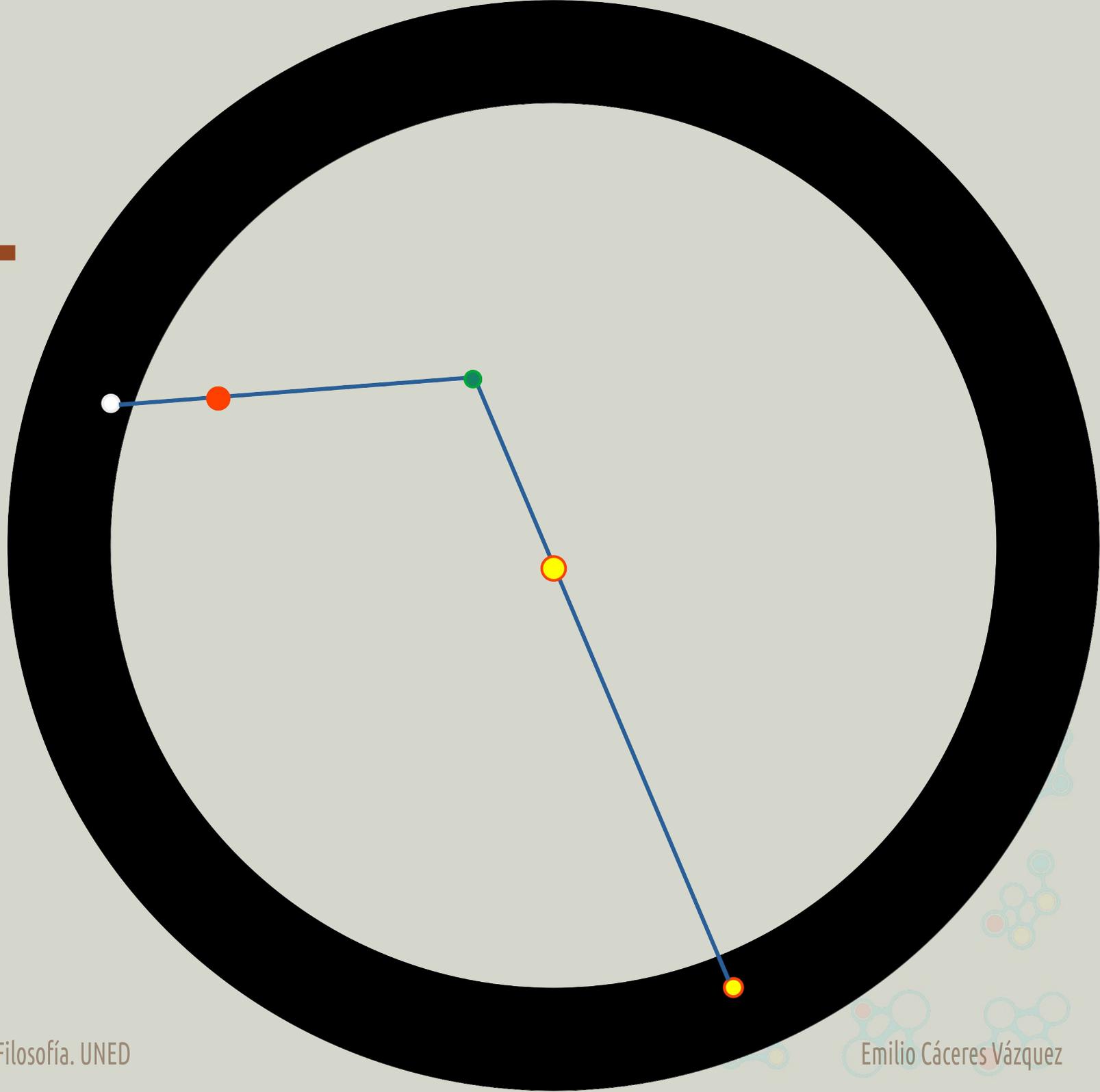


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Punto t_1

Tras 1 año marciano, Marte está en el mismo sitio (por eso es un año marciano) y la Tierra retrasada 43 días.

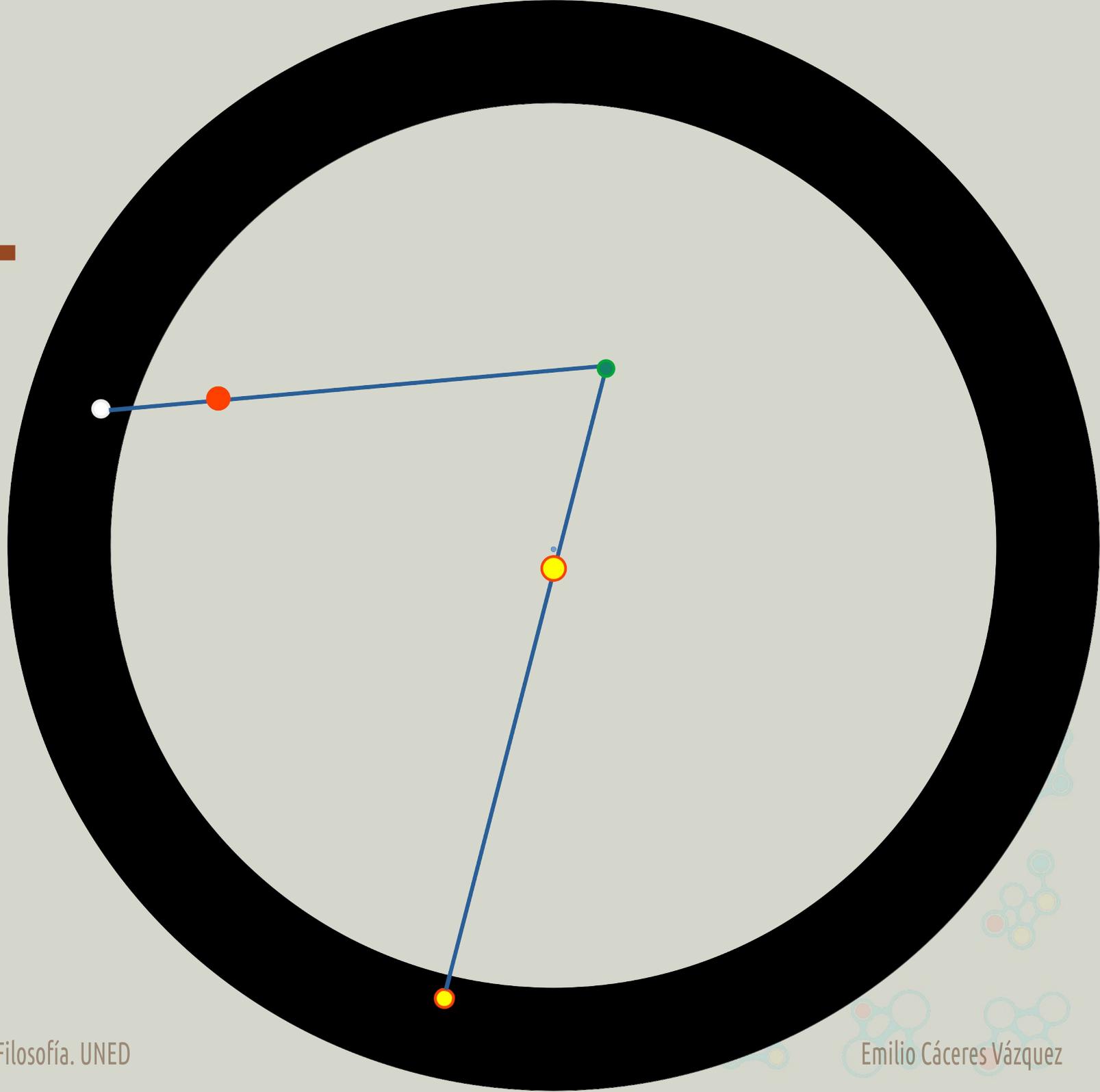


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Punto t_2

Tras dos años marcianos, la Tierra se habrá retrasado más respecto a Marte y su posición relativa será esta

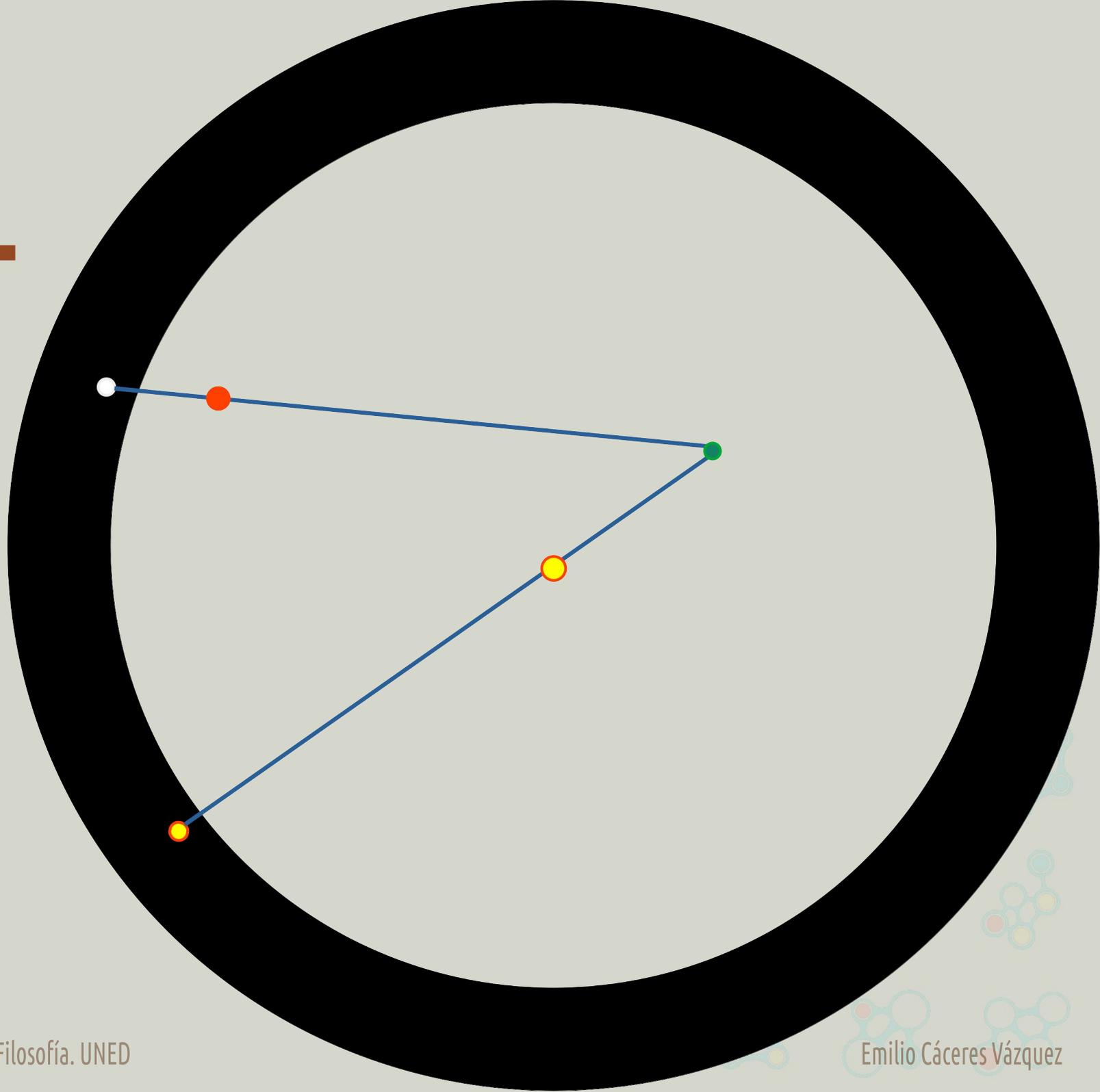


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Punto t_3

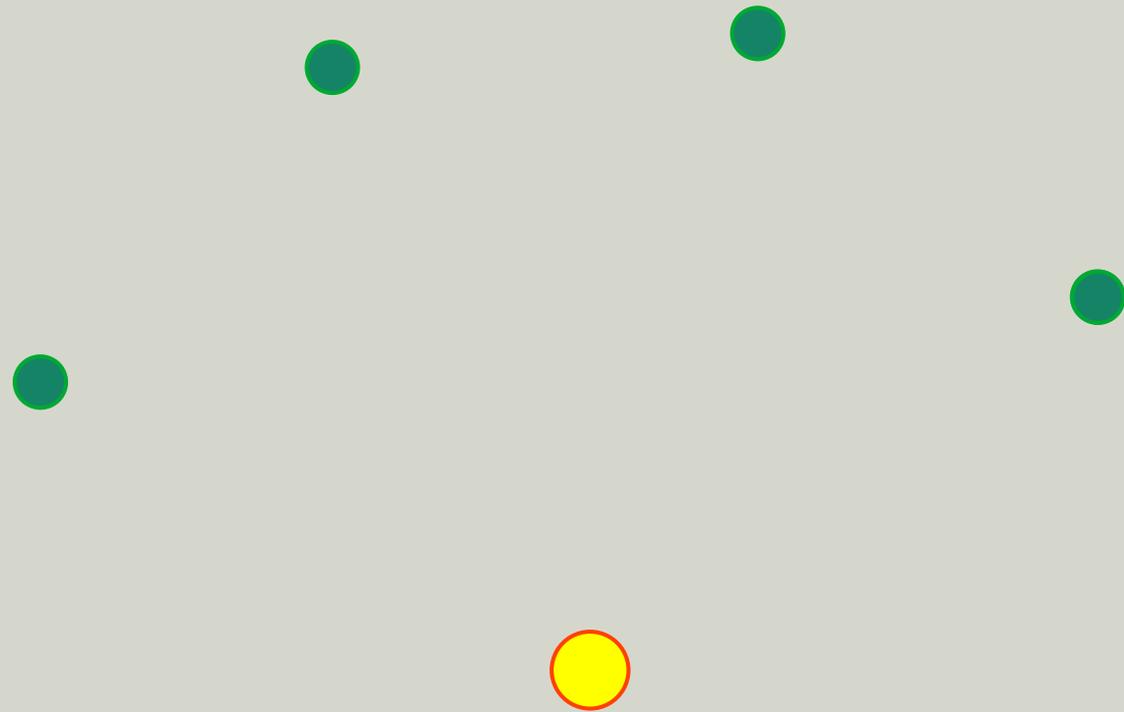
Tras otro año marciano la Tierra se habrá retrasado aún más respecto a Marte



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

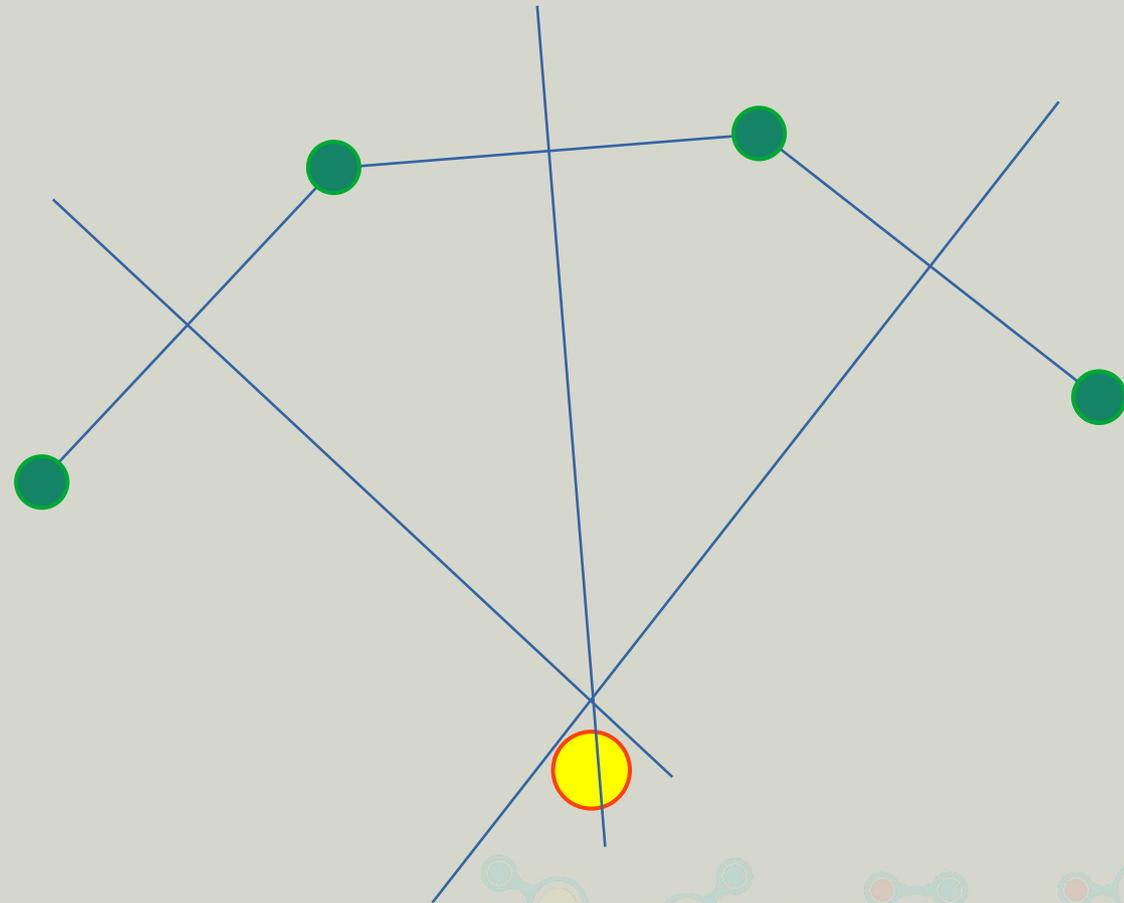
Usando las cuatro posiciones registradas, Kepler las intentó adaptar a una órbita circular...



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

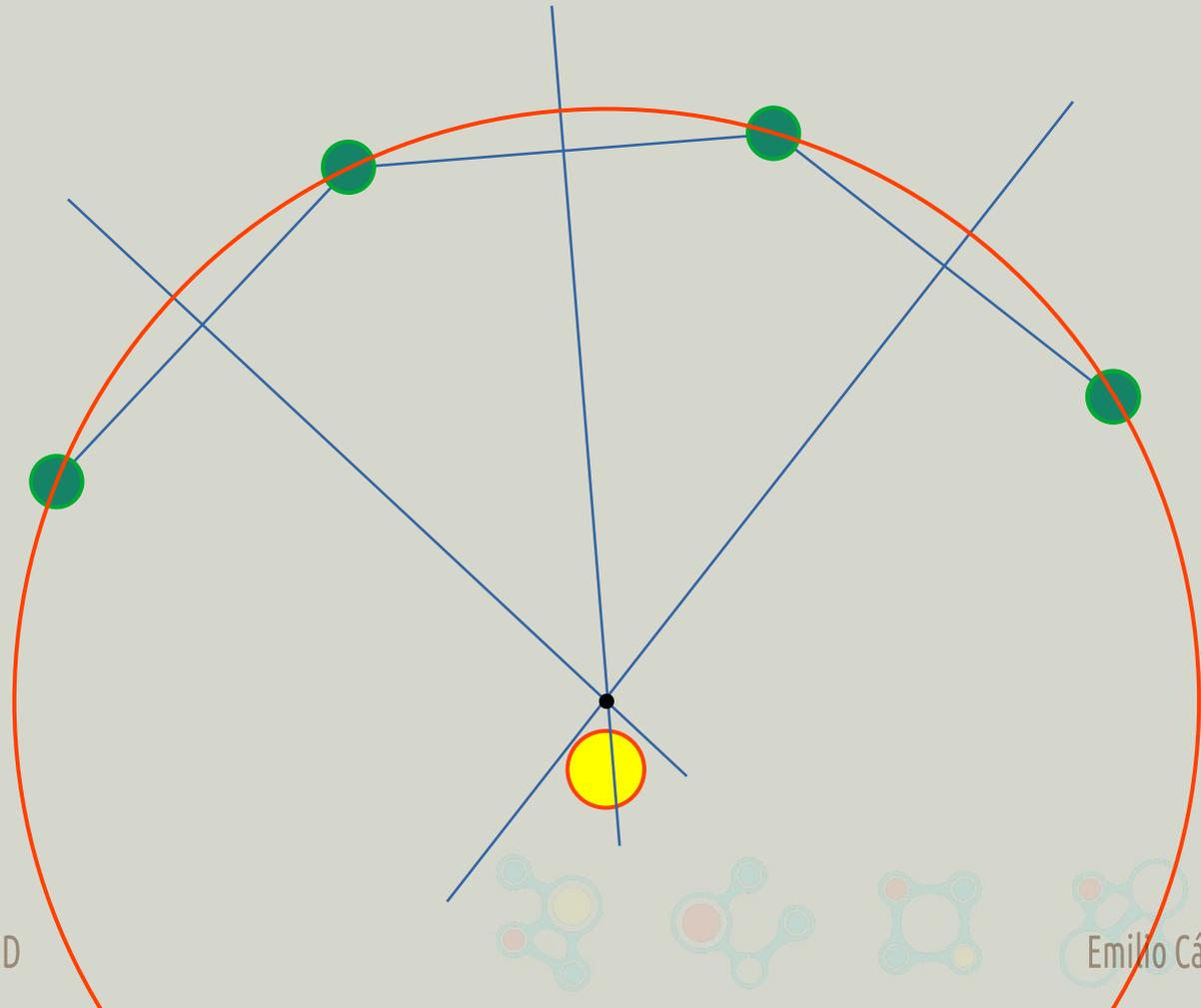
Comprobando que se adaptaban bastante bien a una circunferencia, pero con el Sol desplazado del centro, esto es, precisaba de un **ecuante**.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita terrestre

Copérnico no había asignado ecuante a la Tierra, así Kepler puso a la Tierra en igualdad del resto de planetas, e identificó la excentricidad con el Sol.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Después hizo lo mismo con la órbita de Marte, partiendo de una excentricidad con un ecuante calculado a partir de las observaciones de Brahe.

Aunque este ecuante no se ajustaba completamente o a lo observado, lo mantuvo como hipótesis.

Aún así, había un error intolerable⁽¹⁾ de 8' de grado.

“Dado que no se pueden desdeñar, esos 8' obligan a reformar toda la astronomía” (Kepler, *Astronomía Nova*)

⁽¹⁾ Intolerable para Kepler que usaba las mediciones de Tycho Brahe, aunque para Copérnico entraría dentro de los márgenes de error de sus tablas de datos.

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Para hacer la medición de la órbita de Marte necesitaba anotar varias de sus posiciones a lo largo del tiempo.

Pero al no conocer la distancia a Marte, la única referencia posible es la posición del planeta respecto al fondo de estrellas fijas.

Para ello llevó cabo dos observaciones de cada posición de Marte, separadas un año marciano y por triangulación posicionaba ambos planetas.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

(1)

Para poderlo hacer, necesitaba conocer la duración del **año marciano (M)**, algo que se obtenía a partir del **periodo sinódico (S)**.

Este es el tiempo transcurrido entre la alineación de dos planetas respecto al Sol, es decir, entre dos oposiciones. Se obtiene por simple medición.

En el caso de Marte son 780 días.

En ese tiempo Marte da S/M vueltas mientras que la tierra da S/T vueltas menos una.



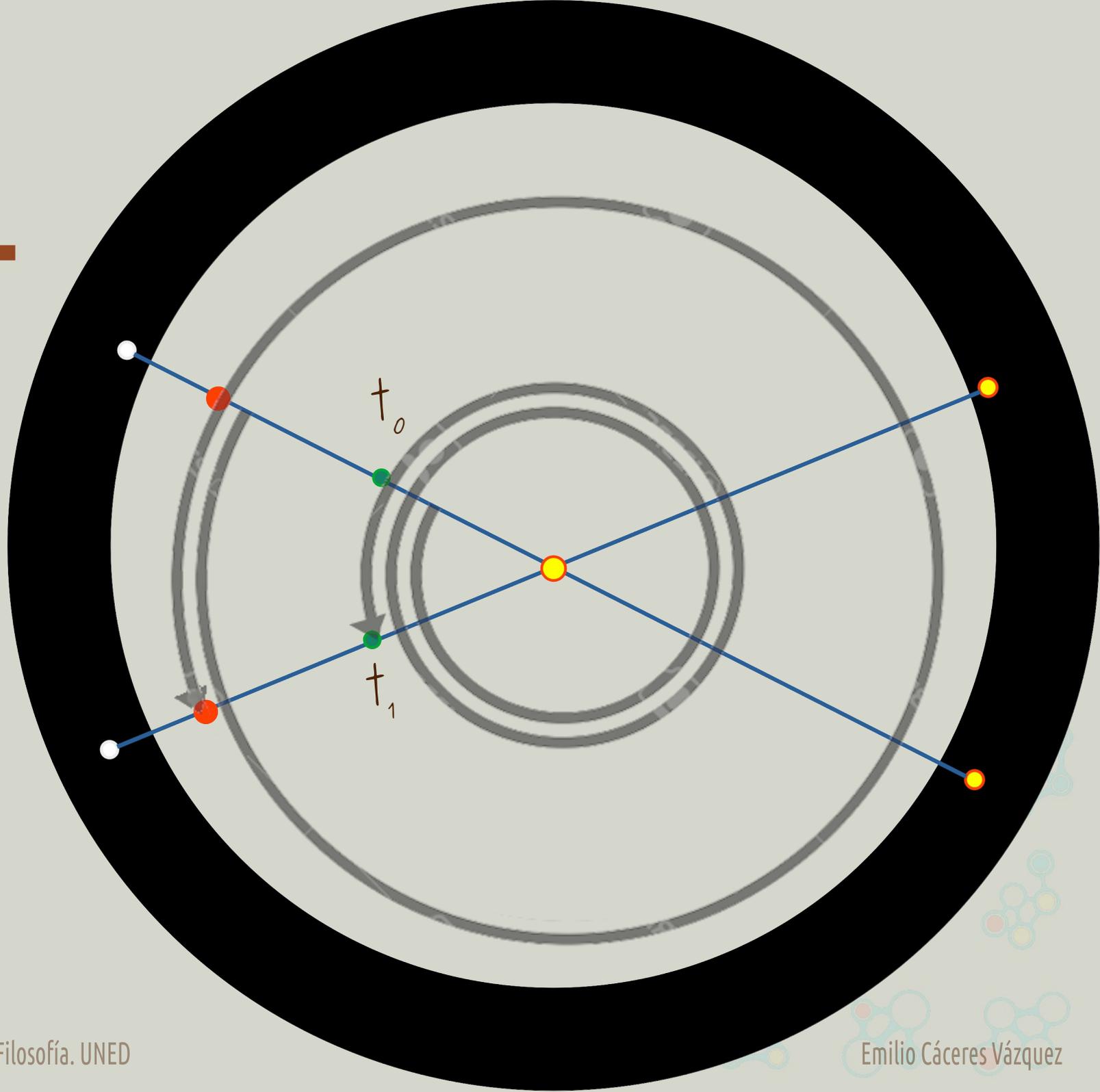
3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

En t_0 la Tierra y Marte están en oposición al Sol

En t_1 , 780 días después (S), la Tierra y Marte están de nuevo en oposición al Sol

Entre t_0 y t_1 la Tierra ha dado dos vueltas y un poco y Marte, una vuelta y un poco.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Teniendo en cuenta lo anterior,

En el tiempo S Marte da S/M vueltas mientras que en el mismo tiempo la tierra da S/T vueltas menos una.

Matemáticamente...

$$\frac{S}{M} = \frac{S}{T} - 1$$

operando...

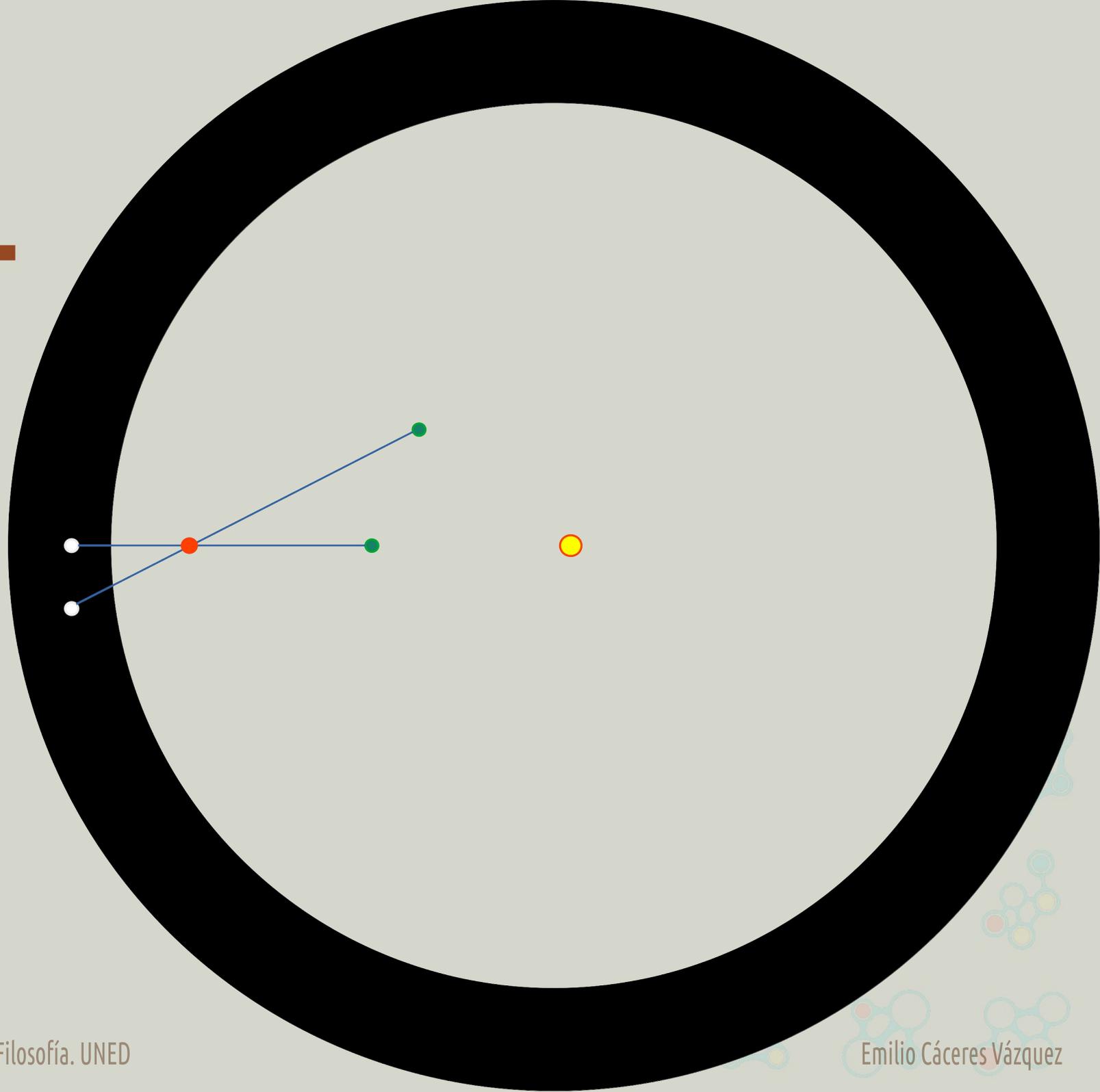
$$M = \frac{T \cdot S}{S - T} = \frac{365 \cdot 780}{780 - 365} = 686 \text{ días}$$

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Punto t_0

Para la posición 1, necesita dos medidas separadas 1 año marciano.

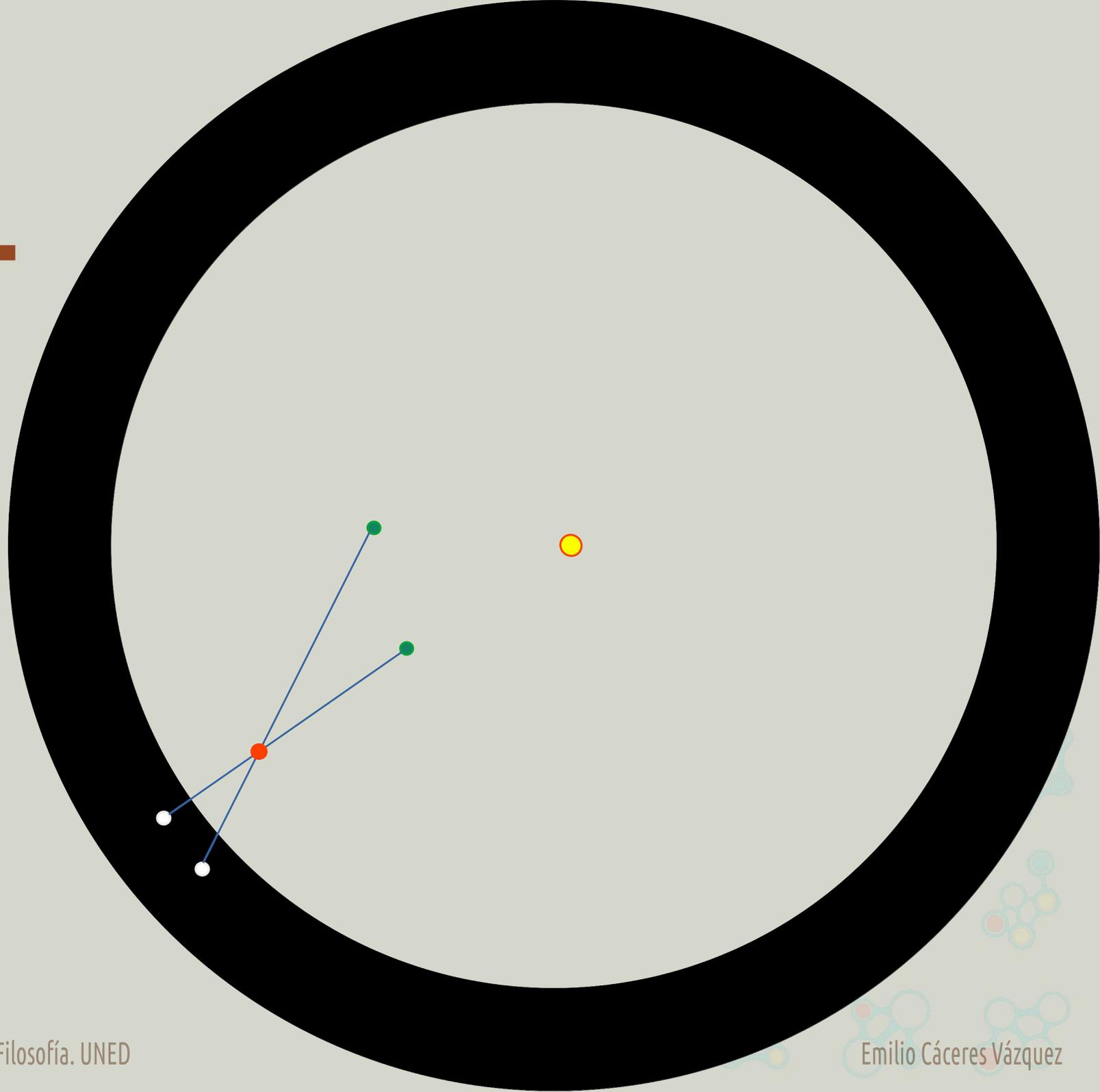


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Punto t_1

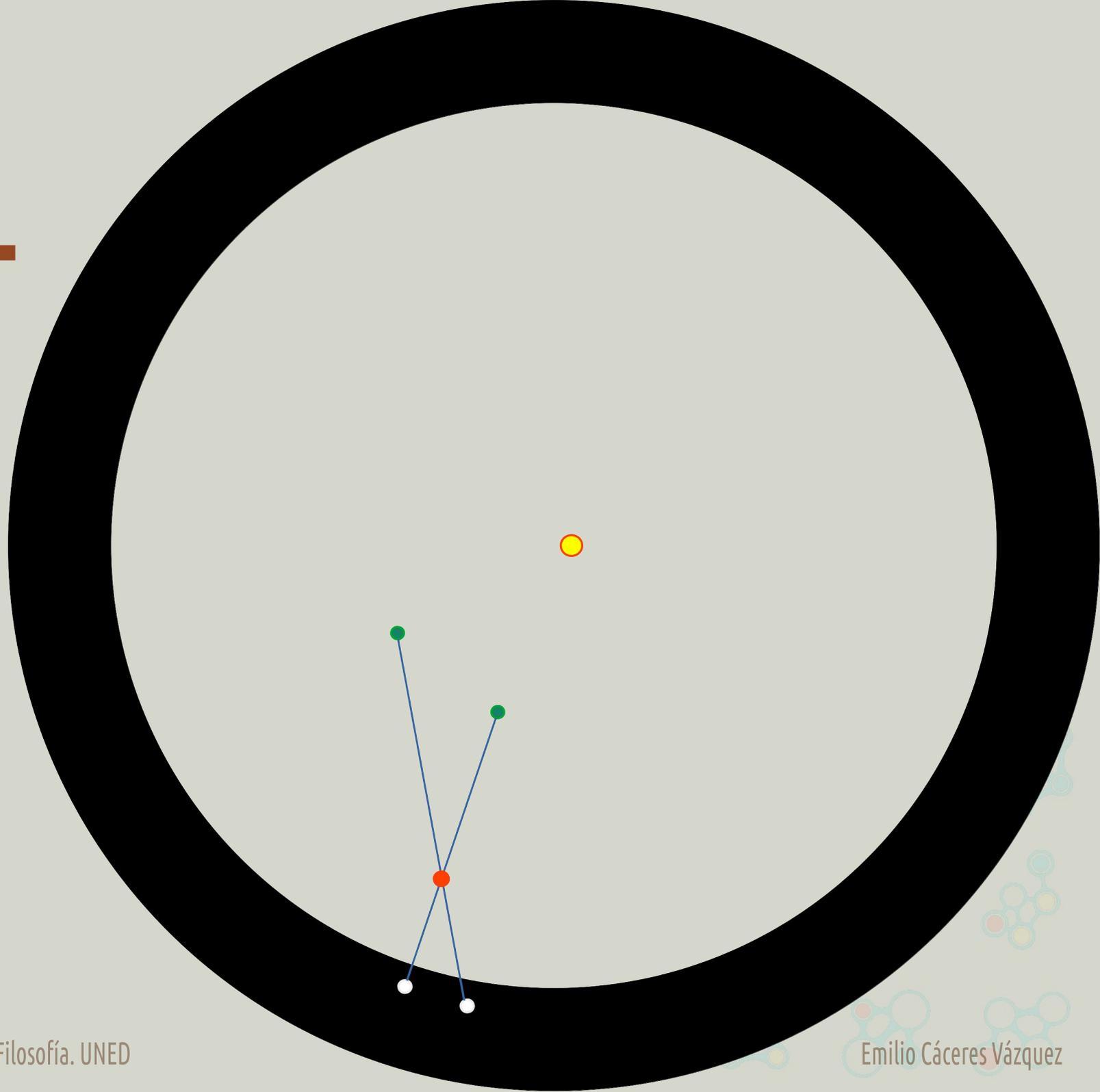
Siguiendo el mismo método, calculó varios puntos de la trayectoria de Marte



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

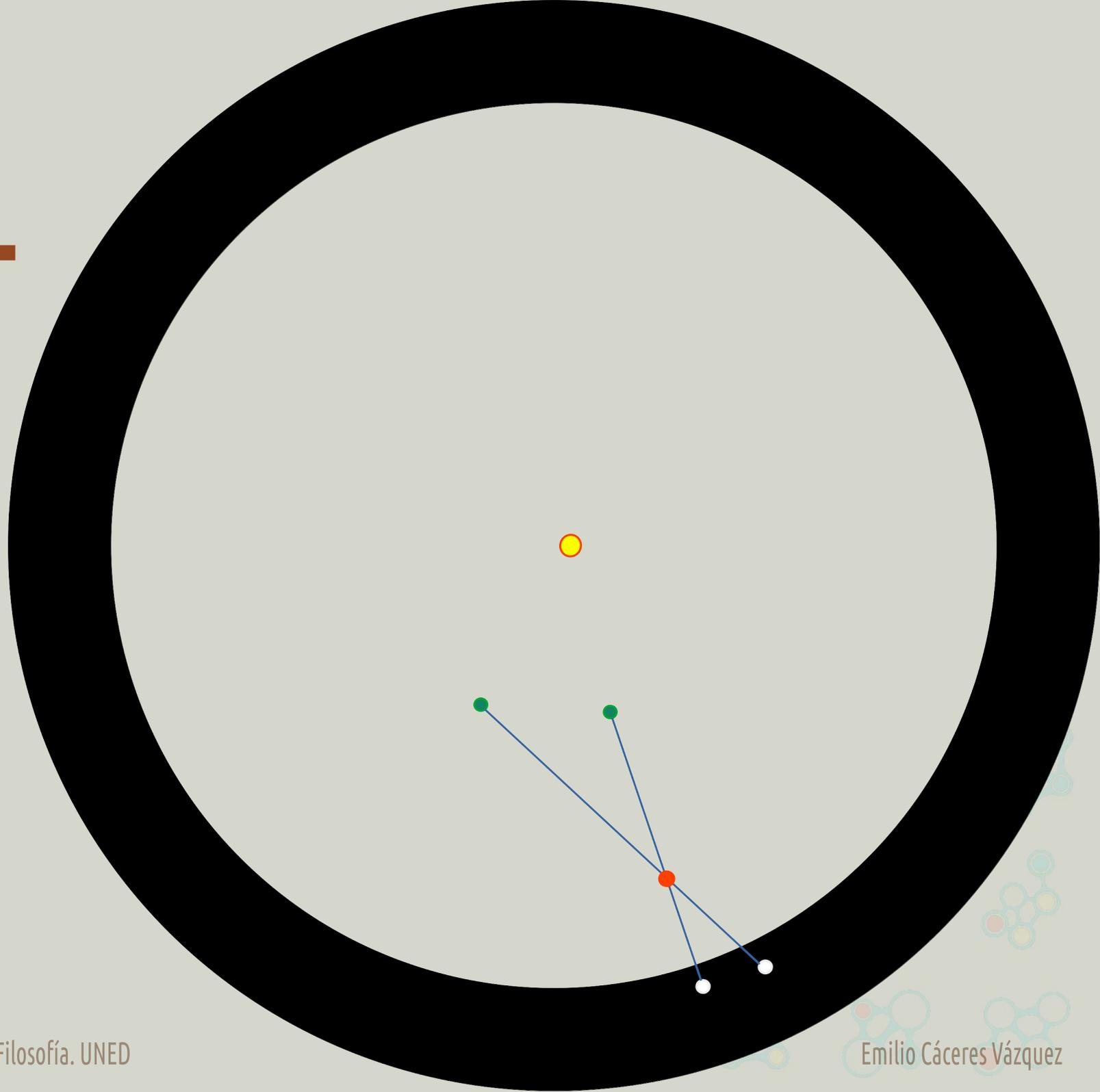
Punto t_2



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

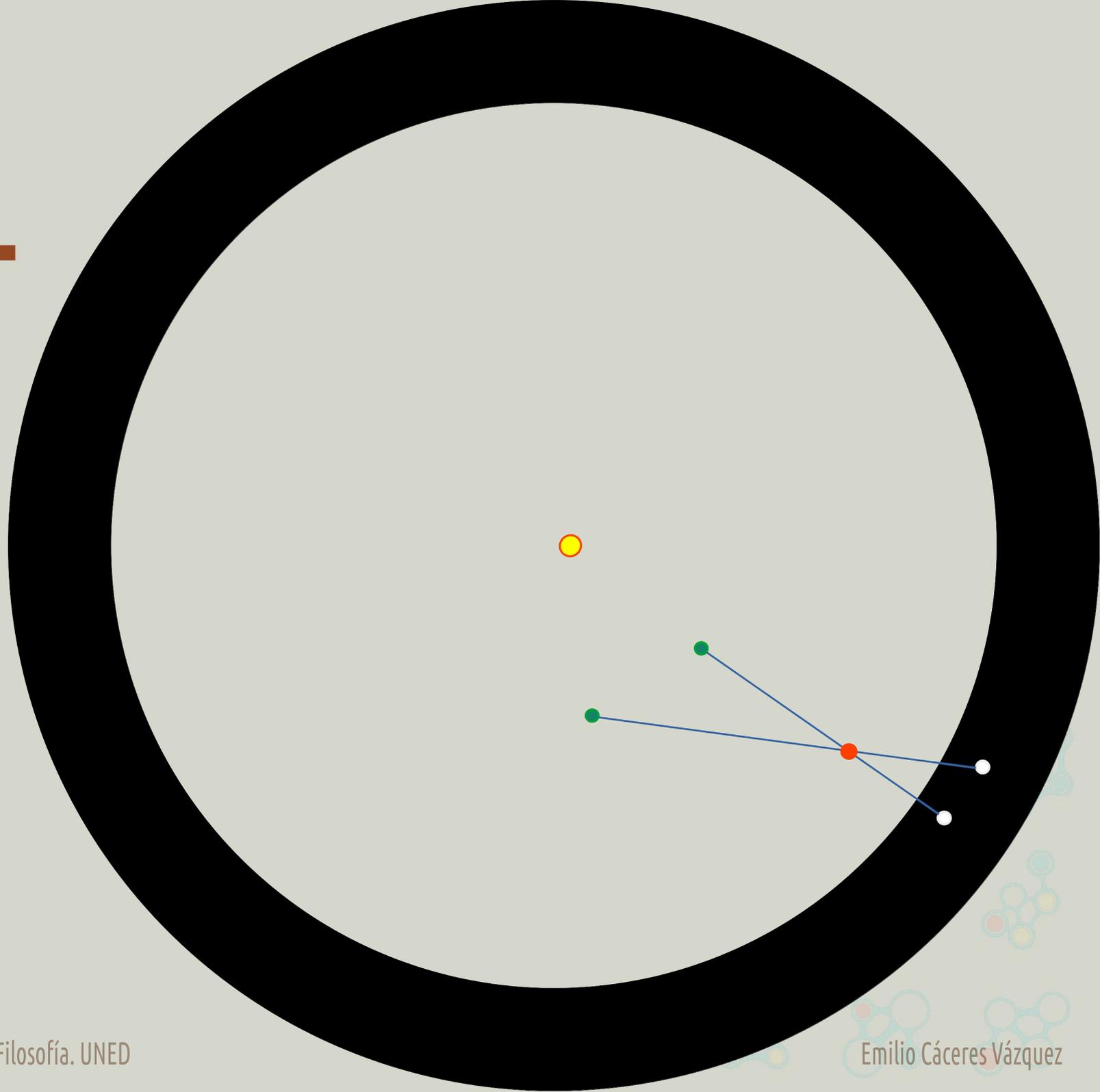
Punto t_3



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

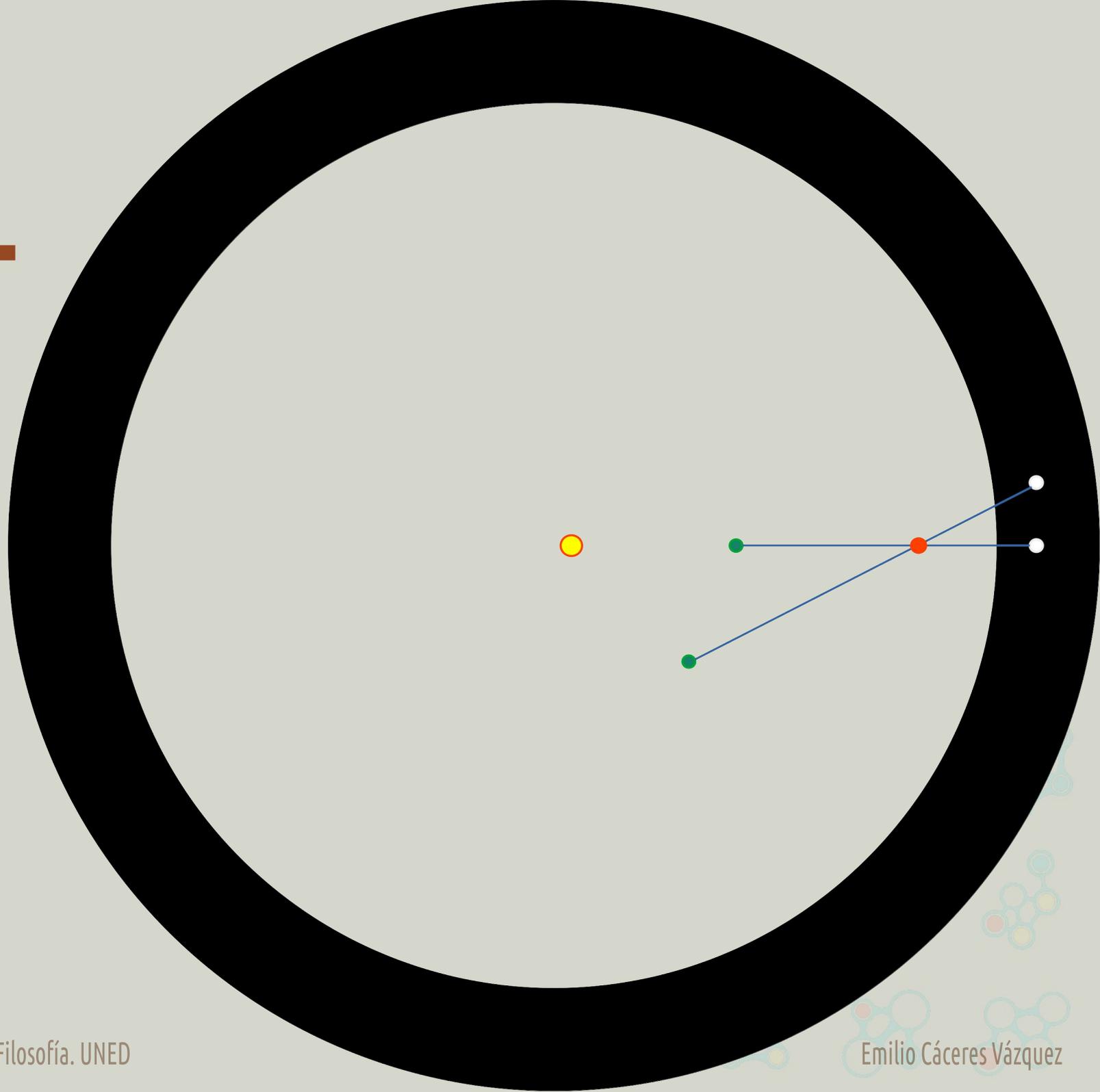
Punto t_4



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

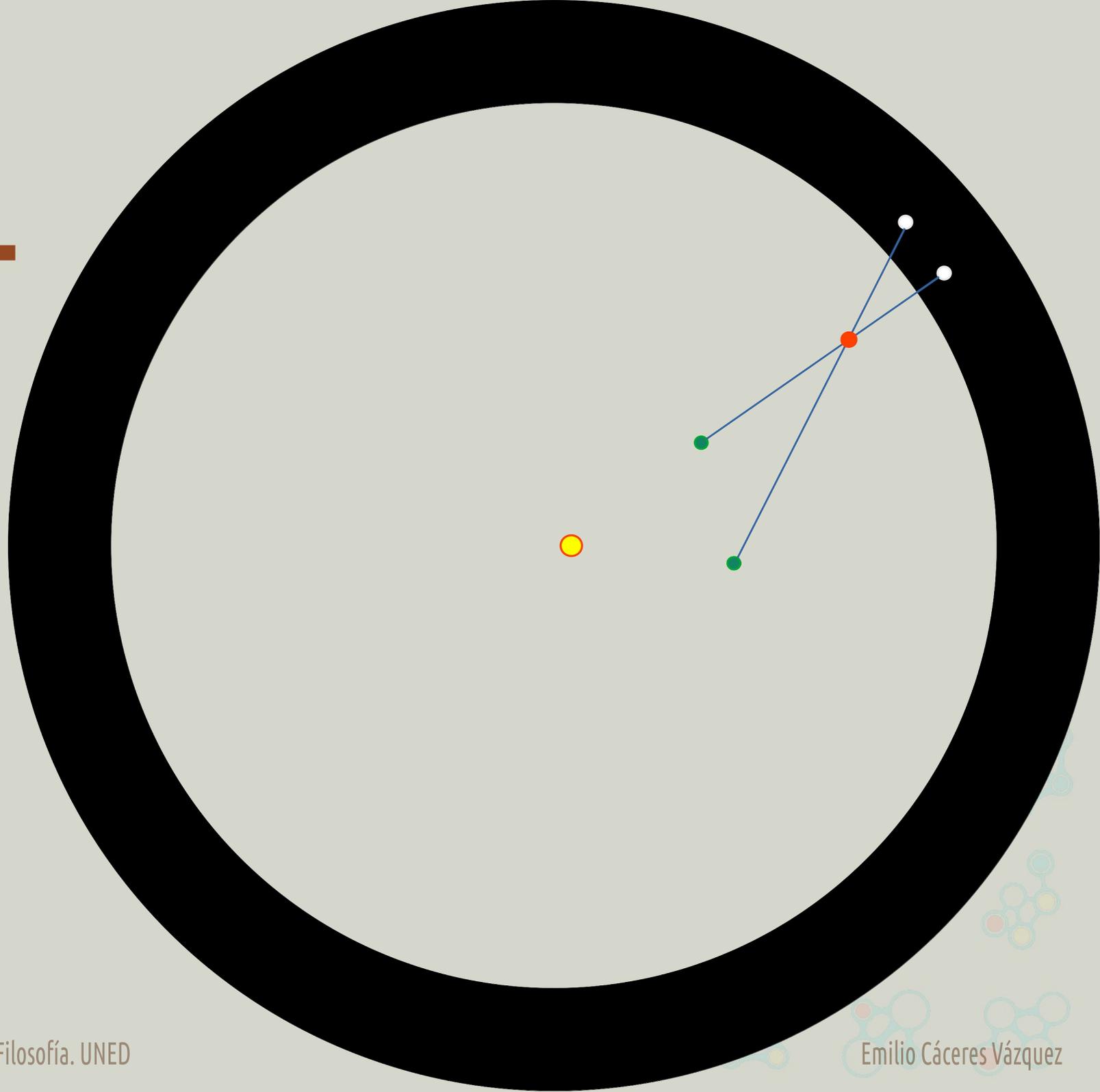
Punto t_5



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

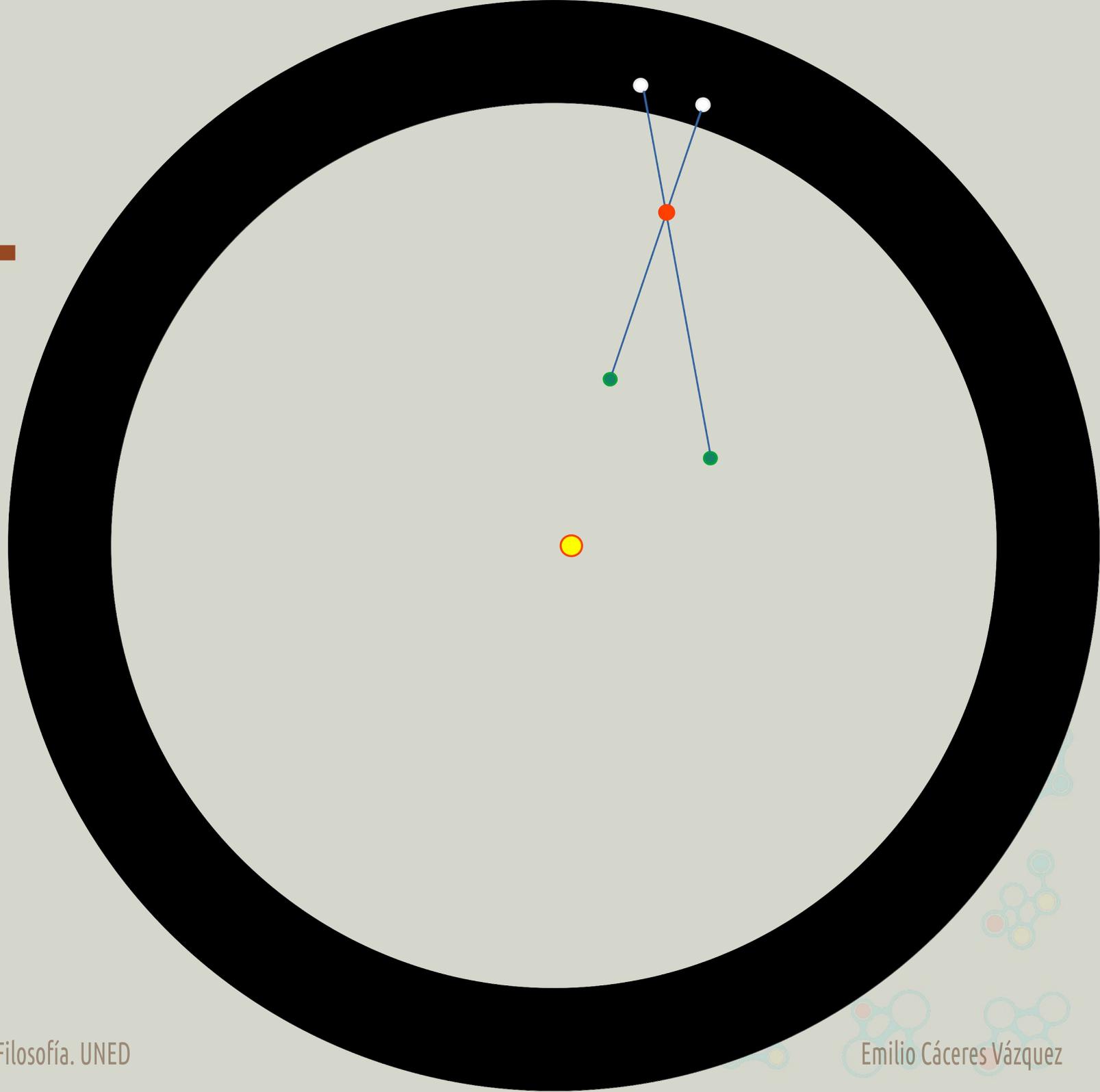
Punto t_6



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

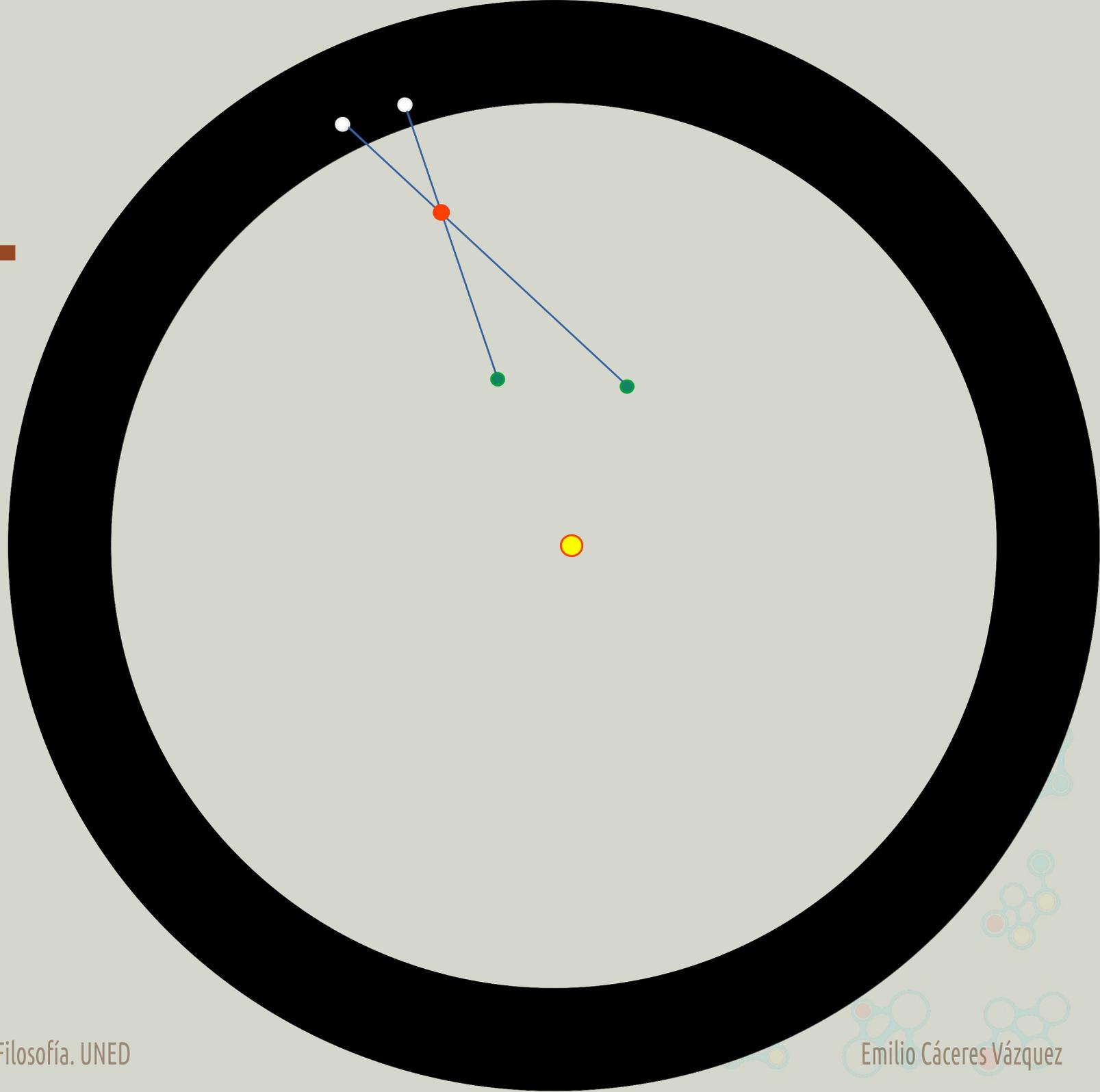
Punto t_7



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

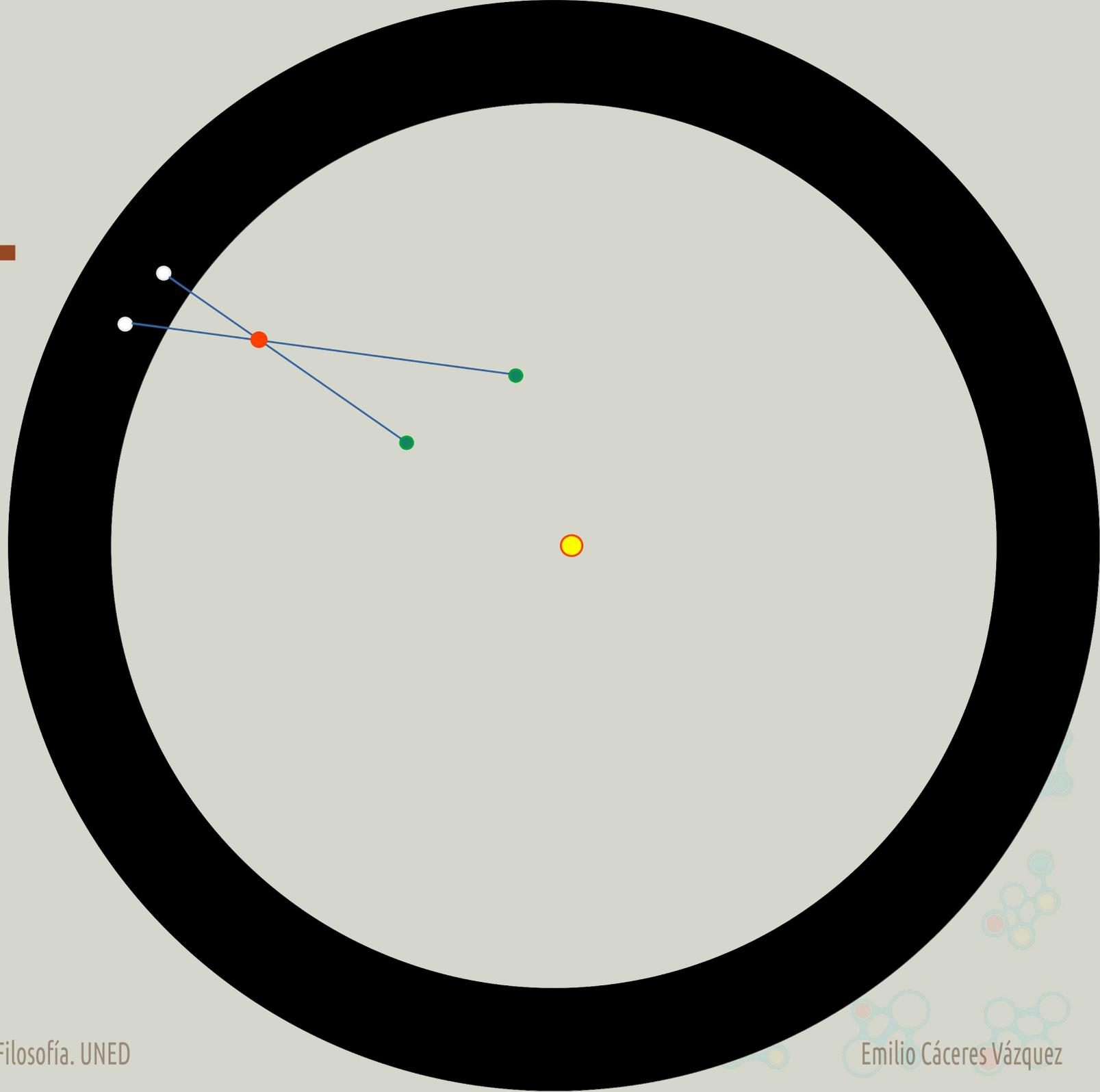
Punto t_8



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

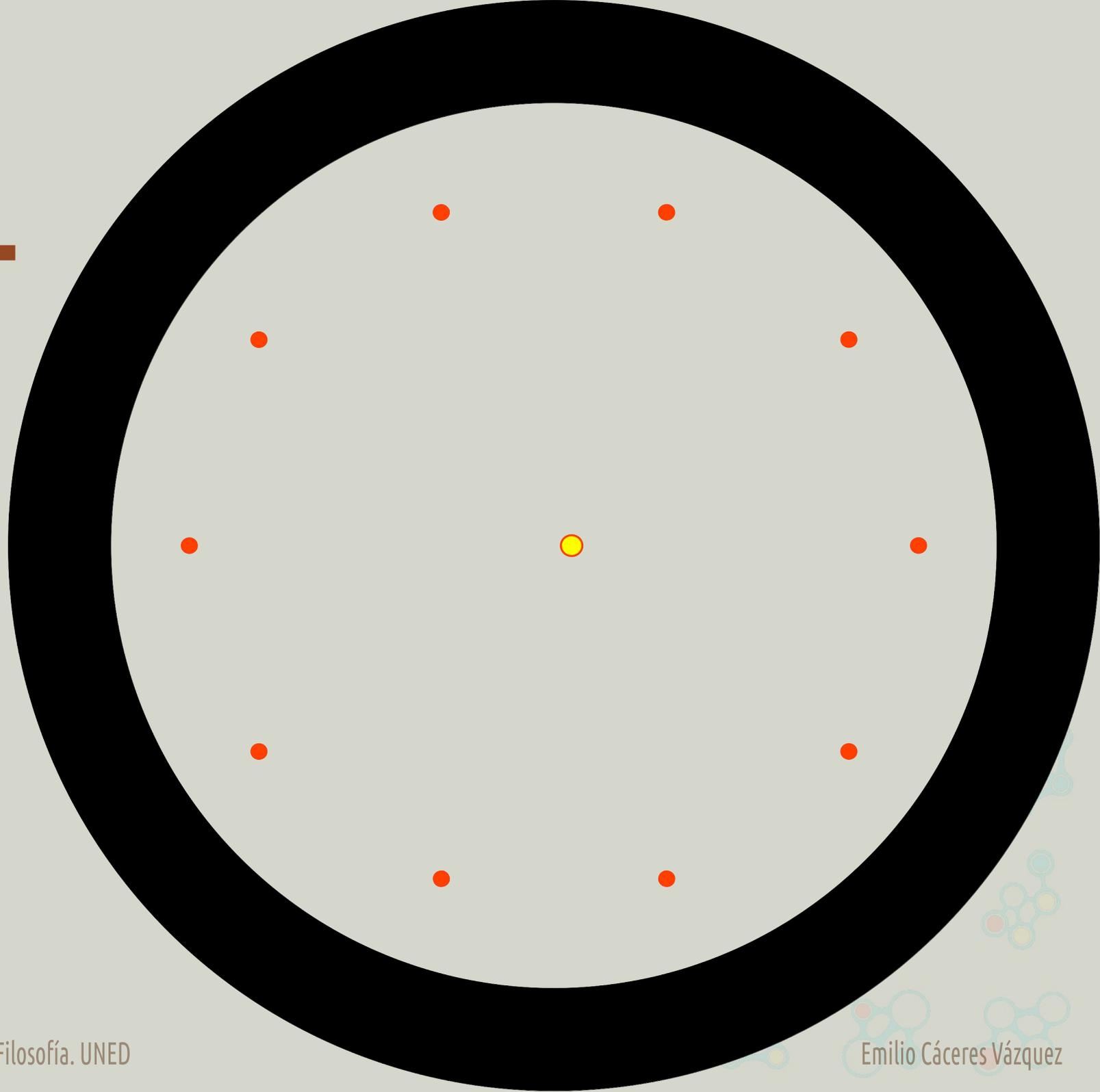
Punto t_0



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

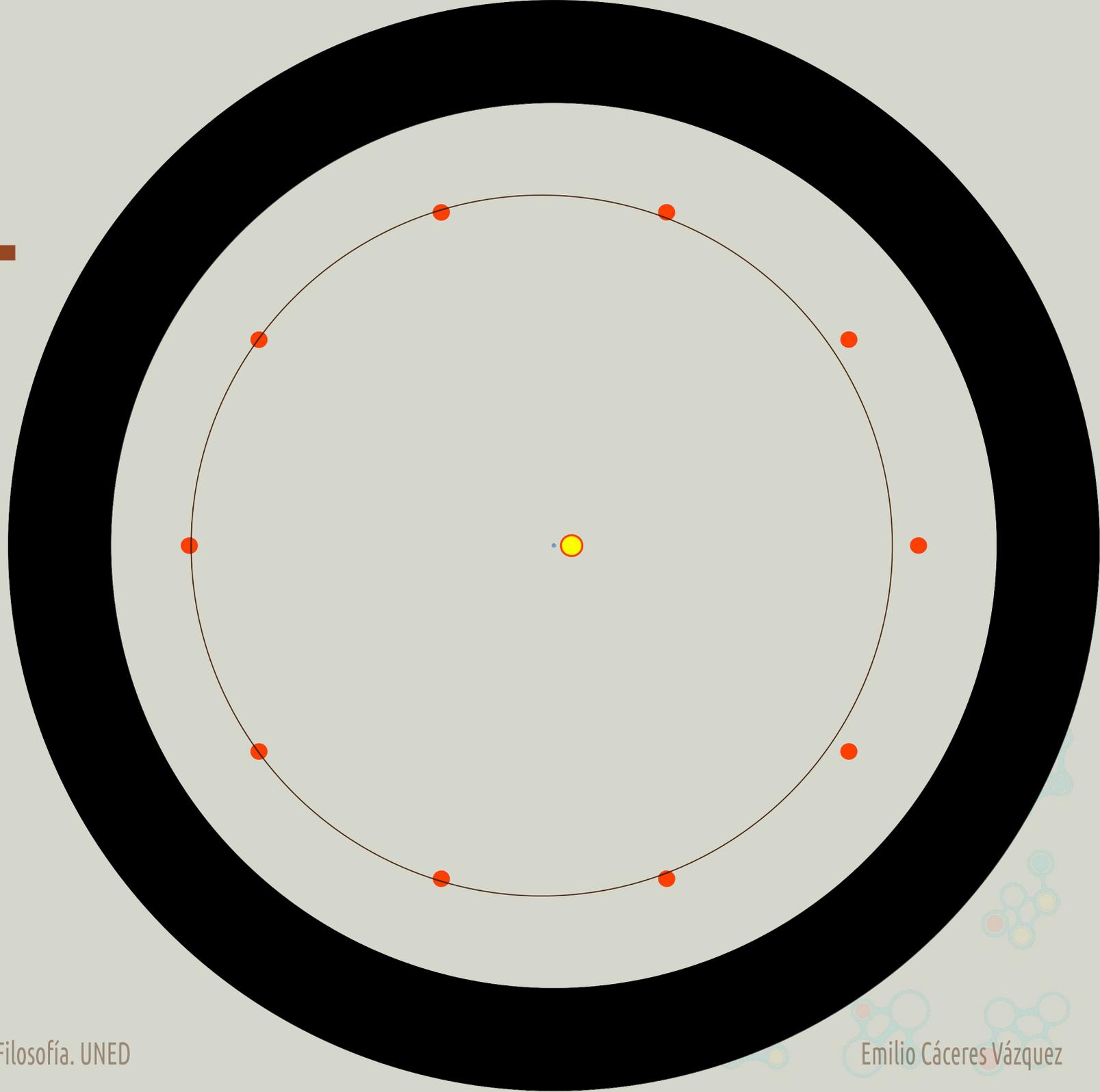
Finalmente, contaba con varias posiciones



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

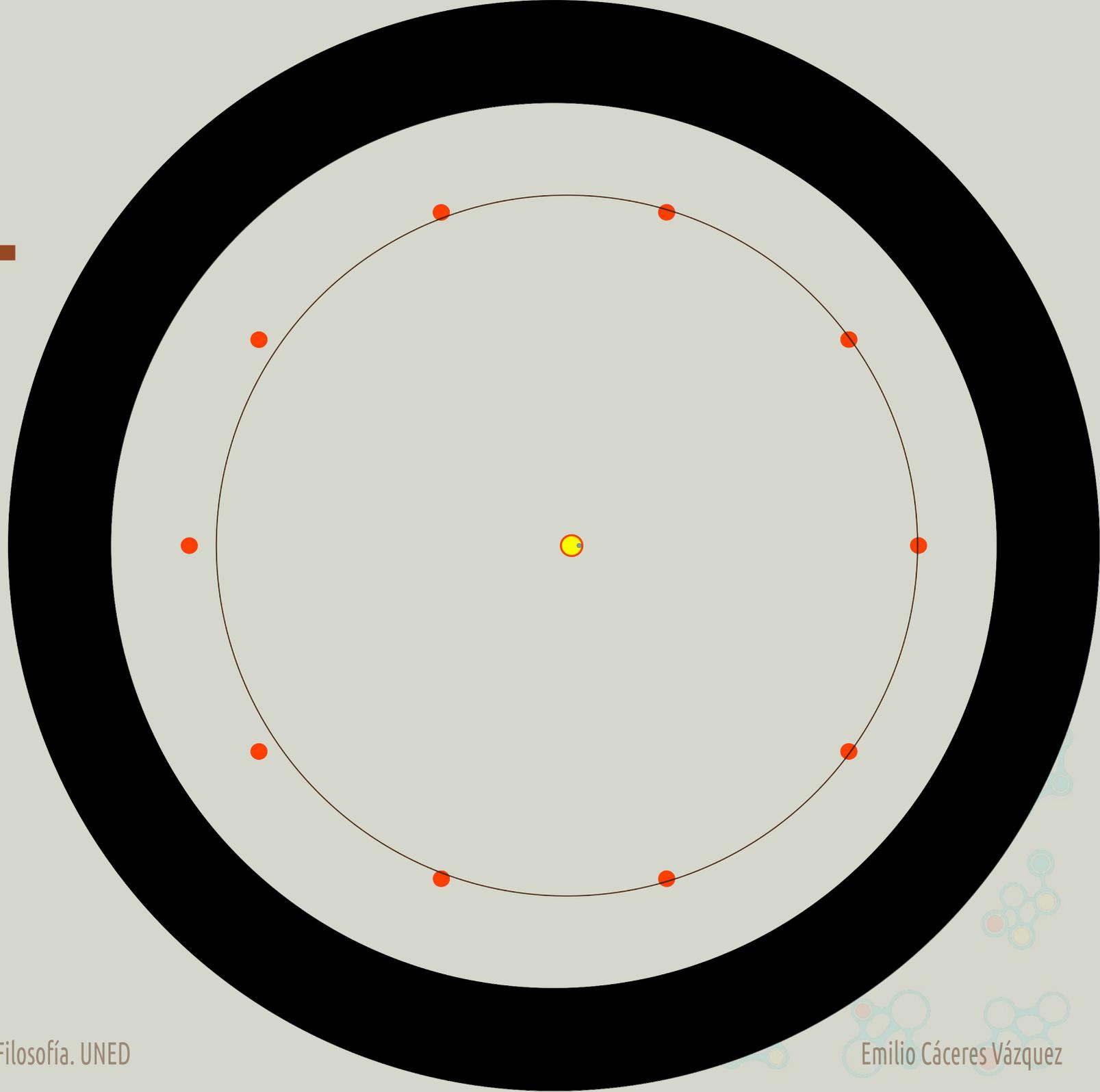
Intentó encajarlas en una órbita circular, con el ecuante hipotético, como había hecho con la Tierra, pero no existía la posibilidad.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Si encajaba unas posiciones, no cuadraban otras.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La primera ley de Kepler

La órbita de Marte no era circular, sino que tenía unos “mofletes”⁽¹⁾ a los lados.

Debido a la necesidad de calcular las áreas barridas por el planeta para su interpretación física, y no sabiendo calcular la de un ovoide, pensó en usar una **elipse**, como aproximación, y usar el método de Apolonio y Arquímedes.

Así, pudo comprobar que la órbita es elíptica con el Sol en uno de sus focos

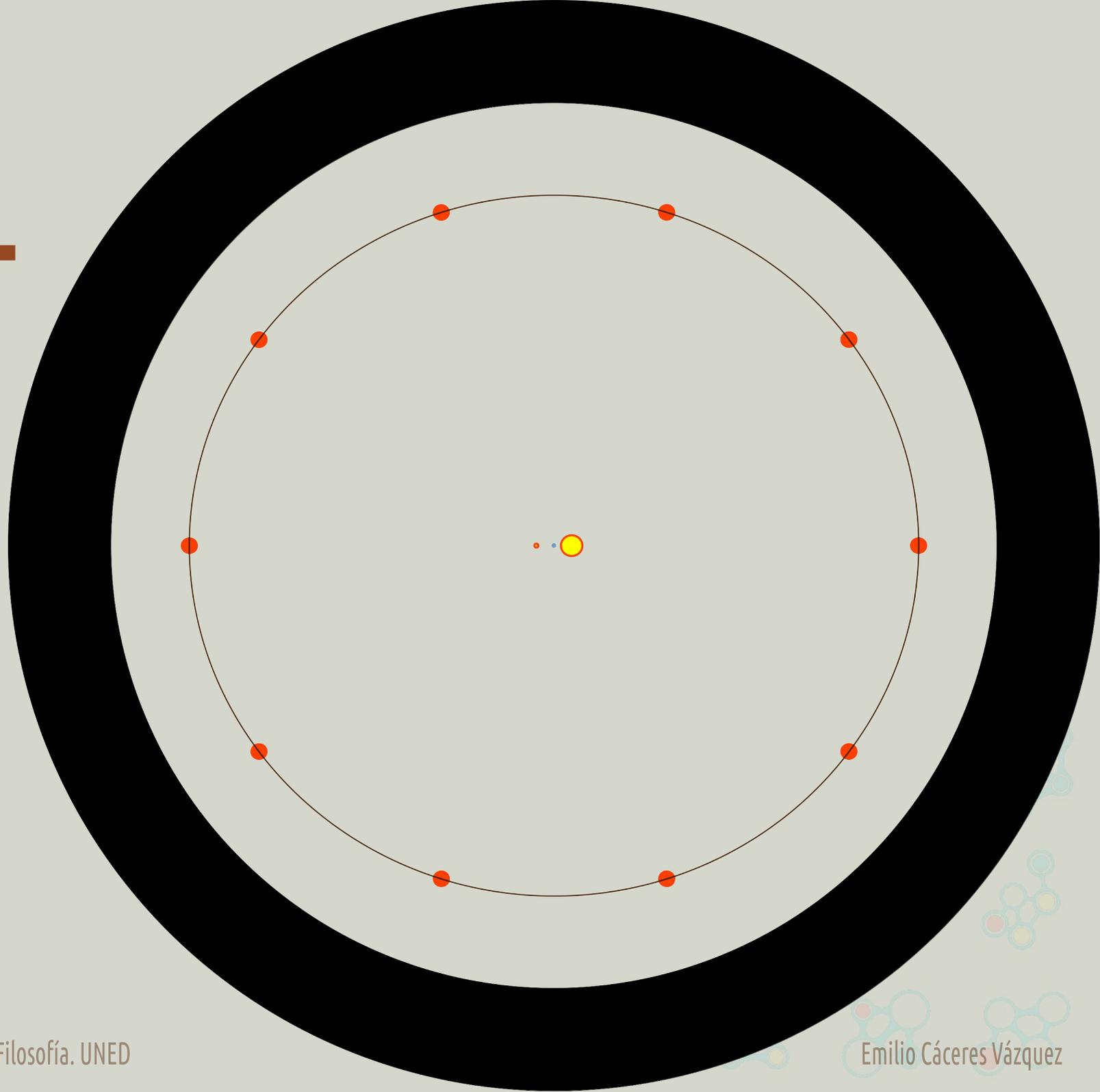
⁽¹⁾ Así lo llaman Solís y Sellés.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

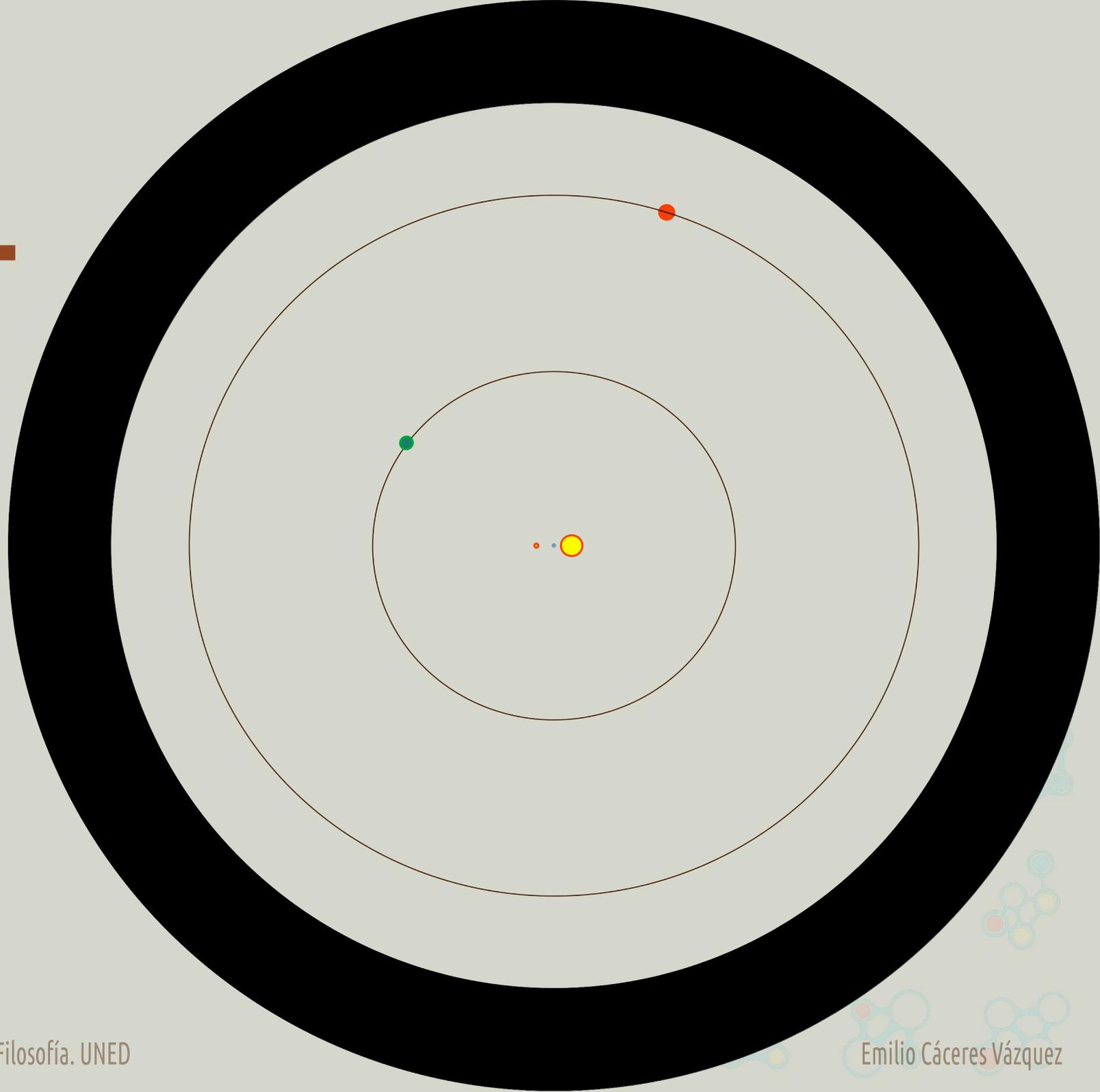
¡Era una elipse!



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

Medición de la órbita marciana

Revisando la órbita terrestre, comprobó que cuadraba mejor con una órbita elíptica que con una circular.

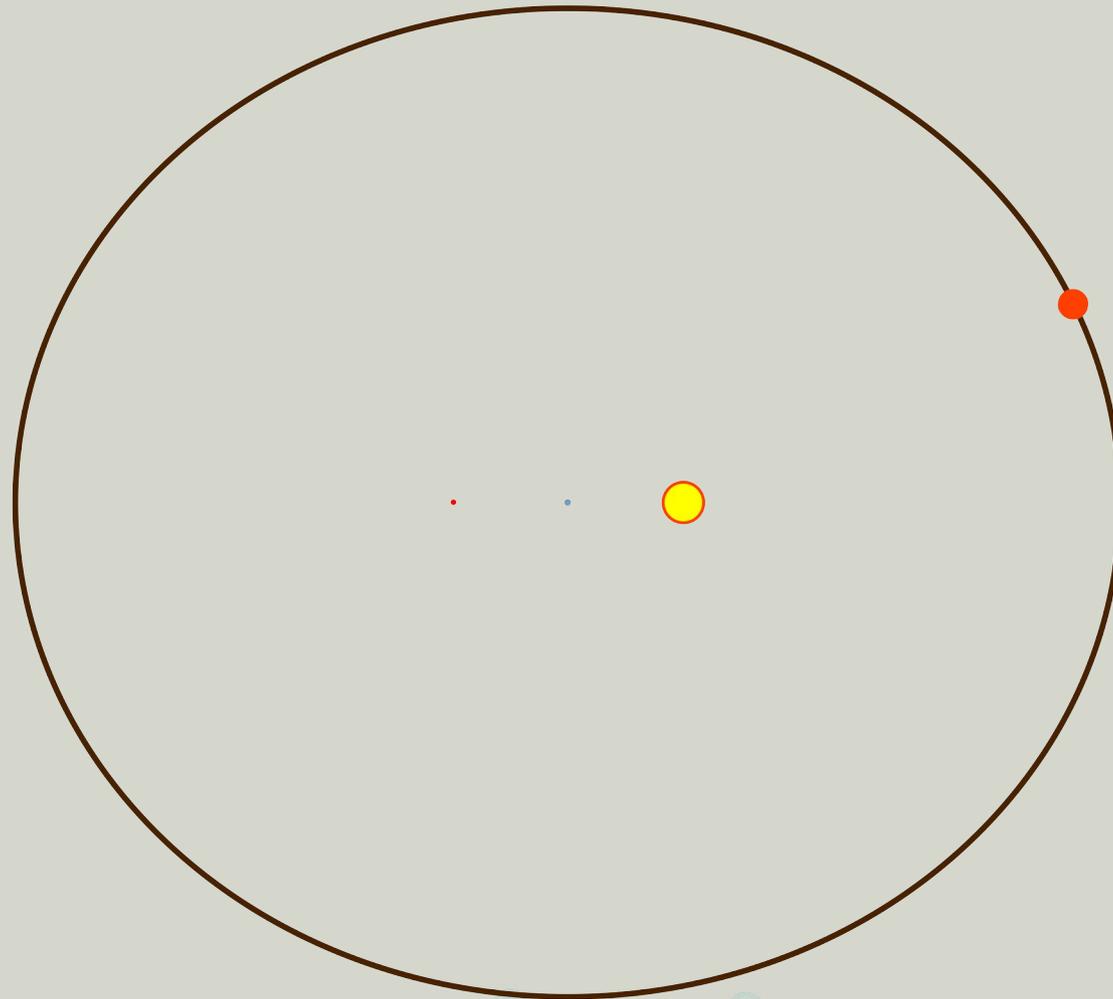


3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La primera ley de Kepler

Primera ley de Kepler: Las órbitas de los planetas son elípticas con el Sol situado en uno de los focos.

He exagerado la excentricidad para que sea visible



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La segunda ley de Kepler

La segunda ley, es en realidad la que asumió en primer lugar y la que se llevó a la formular la primera Buscando la razón física, planteó que el Sol rotaba⁽¹⁾ y que al hacerlo emitía una *species motrix* que arrastraba tangencialmente a los planetas.

Esa fuerza provocaba una velocidad proporcional a la distancia, luego la diferencia de la duración de las estaciones⁽²⁾ no hay que buscarla en la excentricidad, sino en la distancia al Sol, que debe variar.

⁽¹⁾ Lo hizo meses antes de que Galileo lo demostrara con el telescopio y las manchas solares.

⁽²⁾ Recordemos que esta era una de las razones de la introducción del ecuante y de las excentricidad en general.

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La segunda ley de Kepler

Kepler, con los datos de las posiciones de Marte, se puso a calcular sus velocidades en periodos concretos

Para ello necesitaba sumar las distancias en todos los momentos del periodo, un cálculo interminable⁽¹⁾

Decidió esquivar el problema tomando el atajo matemáticamente dudoso⁽²⁾ de sustituir la suma de las distancias, por el área barrida.

Este es el origen de la segunda ley, que si bien lo planteó antes que la primera, y se publicó junto a ella en 1609, no se explicitó hasta 1621⁽³⁾.

⁽¹⁾ Estamos en la época previa al cálculo infinitesimal

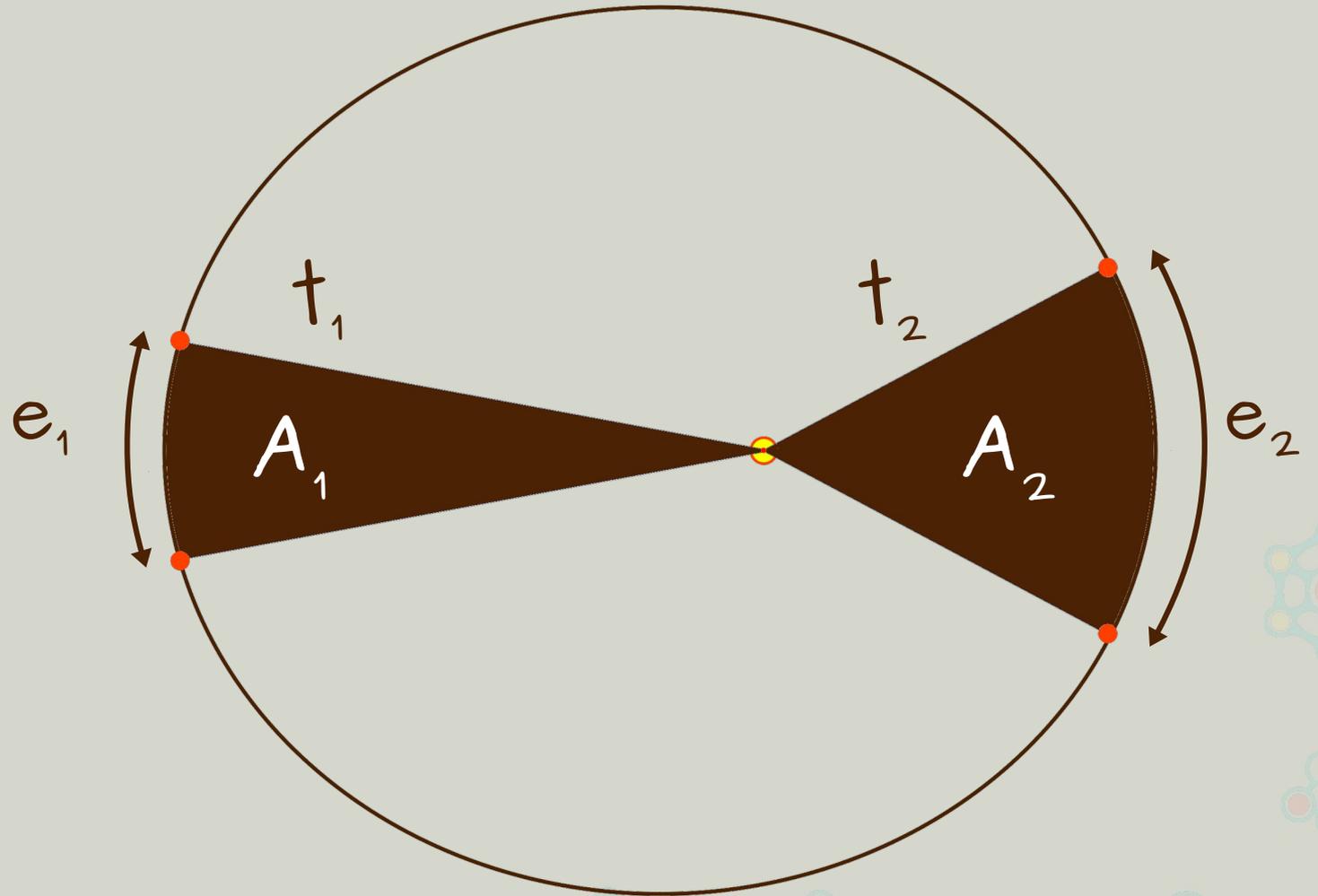
⁽²⁾ Solís y Sellés.

⁽³⁾ Diéguez apunta que se publicaron juntas en *Astronomía Nova* (1609) y Solís y Sellés que no se enunció de forma explícita hasta el *Epitome* (1621)

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La segunda ley de Kepler

La segunda ley dice que la línea que une el Sol y el planeta barre áreas iguales en tiempos iguales.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La segunda ley de Kepler

A la vista de la imagen, resulta obvio que si ambas áreas son iguales y los tiempos también...

$$e_2 > e_1$$

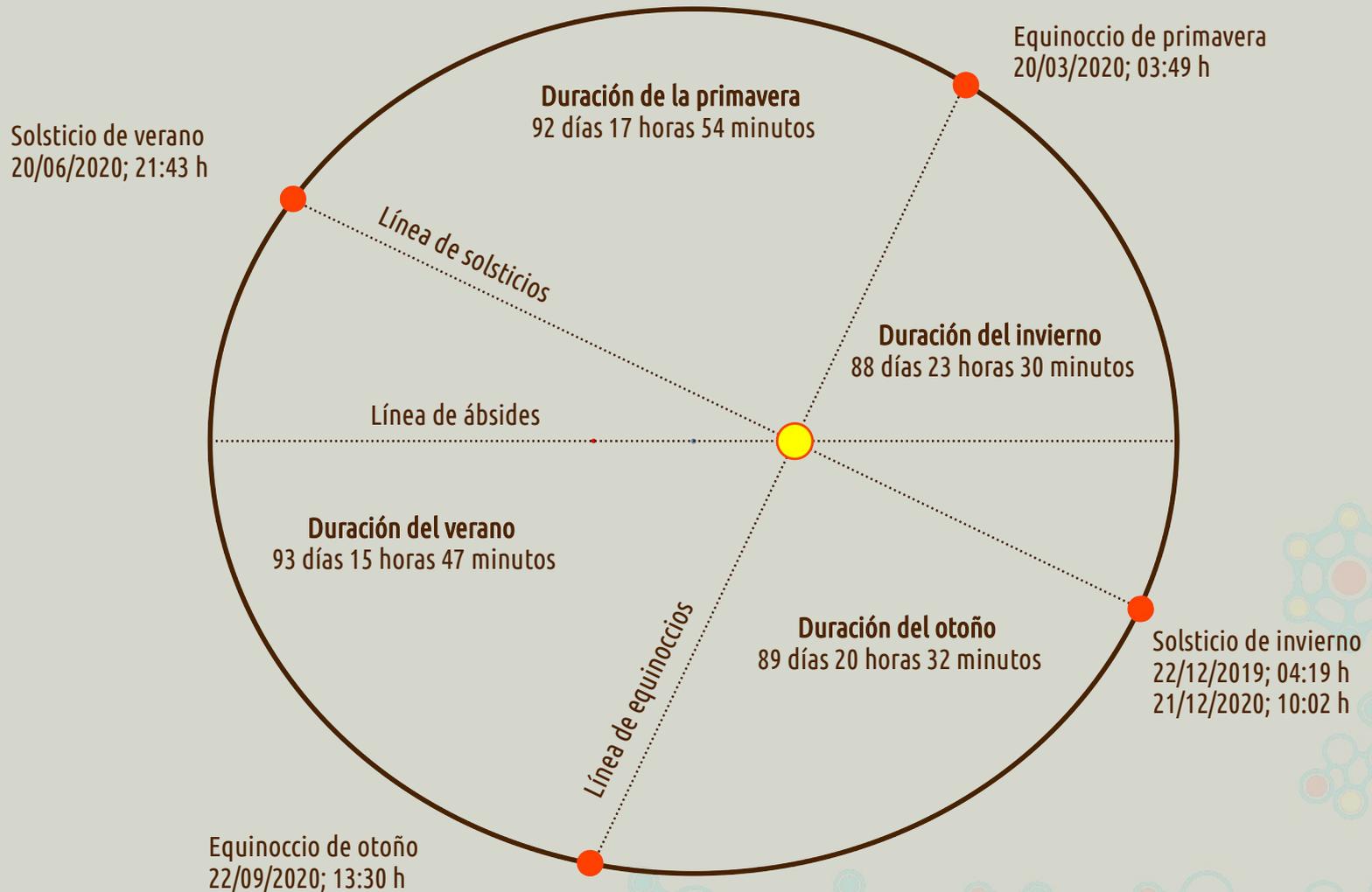
Lo que implica que se recorre más espacio en el mismo tiempo y por lo tanto la velocidad lineal es diferente, mayor en el perihelio (invierno norte).

Si la velocidad en invierno es mayor que en verano, el invierno es más corto.

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La segunda ley de Kepler

Estas son las fechas y duraciones de las estaciones de 2020 en el hemisferio norte



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

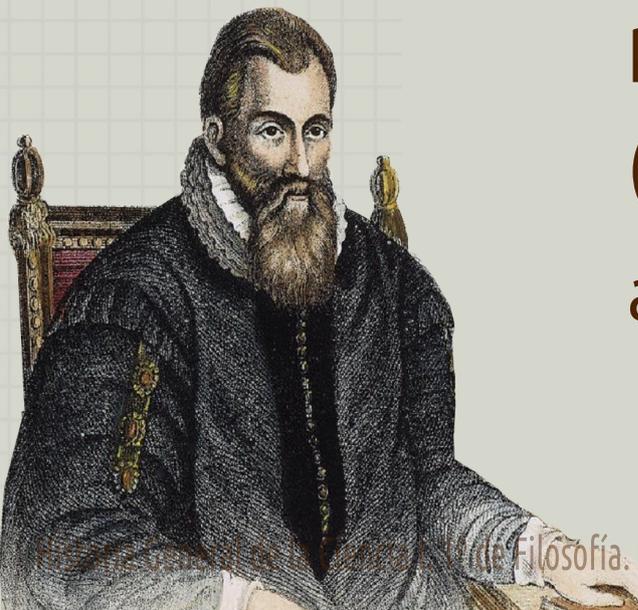
La tercera ley de Kepler

Tras **Astronomía Nova**, Kepler se dedicó a buscar armonías musicales derivadas de asignar tonos a las velocidades de los planetas.

También se interesaba por los descubrimientos de su época, como los **logaritmos** de Napier

John Napier⁽¹⁾ (1550-1617) publicó en 1614 un método para hacer cálculos con una forma de números (arithmos) expresados como proporción (logos), de ahí su nombre.

⁽¹⁾ Su nombre latinizado era Neperus, de ahí el nombre de los logaritmos usados por él **logartimos neperianos**, pues usaba como base $1/e$



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

Los logaritmos son una de las relaciones que existen entre los números que forman un potencia.

Pensemos en la siguiente potencia

$$10^2 = 100$$

Una operación derivada de ella es la raíz cuadrada

$$\sqrt[2]{100} = 10$$

Otra es el logaritmo

$$\log_{10} 100 = 2$$



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

En general, la definición de logaritmo es:

Se dice que x es el logaritmo en base a de un número y cuando la base a elevada a x es el número y

$$\log_a y = x \quad \rightarrow \quad a^x = y$$

Por ejemplo

$$\log_{10} 1000 = 3 \quad \text{porque} \quad 10^3 = 1000$$

$$\log_2 8 = 3 \quad \text{porque} \quad 2^3 = 8$$

$$\log_e 8 = 2,079 \quad \text{porque} \quad e^{2,079} = 8$$

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

Las reglas básicas de los logaritmos:

- $\log (A \cdot B) = \log A + \log B$
- $\log (A/B) = \log A - \log B$
- $\log A^B = B \cdot \log A$

La progresión

- 1, 10, 100, 1000, 10000, 100000...

Se transforma en la sencilla

- 0, 1, 2, 3, 4, 5...

Los logaritmos aplicados a grandes números tienen una gran utilidad al reducirlos y hacerlos manejables

Además facilitan muchas operaciones:

- simplifican la multiplicación a la suma, la división a la resta y la potencia al producto
- Transforman progresiones geométricas, difíciles de representar y visualizar, a aritméticas, mucho más sencillas de manejar.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

Kepler completó las **tablas rudolfinas**⁽¹⁾ en 1627 pero usando los logaritmos de Napier en lugar de las cifras brutas.

Planeta	Periodo (T) (años)	Radio orbital (R) (10 ⁶ km) ⁽³⁾	Radio orbital (R) ⁽⁴⁾	Log ₁₀ T	Log ₁₀ R respecto a ⁽³⁾
Mercurio	0,24	57,91	0,387	-0,618	-0,412
Venus	0,615	108,21	0,723	-0,211	-0,140
Tierra	1,00	149,6	1,00	0,0	0
Marte	1,88	227,94	1,523	0,274	0,182
Júpiter	11,86	778,34	5,203	1,074	0,716
Saturno	29,46	1.426,71	9,547	1,469	0,979
Urano ⁽²⁾	84,01	2.870,39	19,191	1,924	1,283
Neptuno ⁽²⁾	164,79	4.498,39	30,068	2,217	1,478

⁽¹⁾ Las tablas se las encargó el rey Rodolfo II a Brahe y después a Kepler

⁽²⁾ Kepler no conocía Urano y Neptuno, descubiertos en 1781 y en 1846 respectivamente.

⁽³⁾ Tampoco usó los kilómetros porque no se usaron hasta la Revolución Francesa.

⁽⁴⁾ Kepler usó esta forma de medir los radios orbitales, en referencia a la órbita terrestre

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

En busca de proporciones, dividió el radio orbital entre el periodo, en forma logarítmica, obteniendo siempre a misma proporción de $\frac{2}{3}$

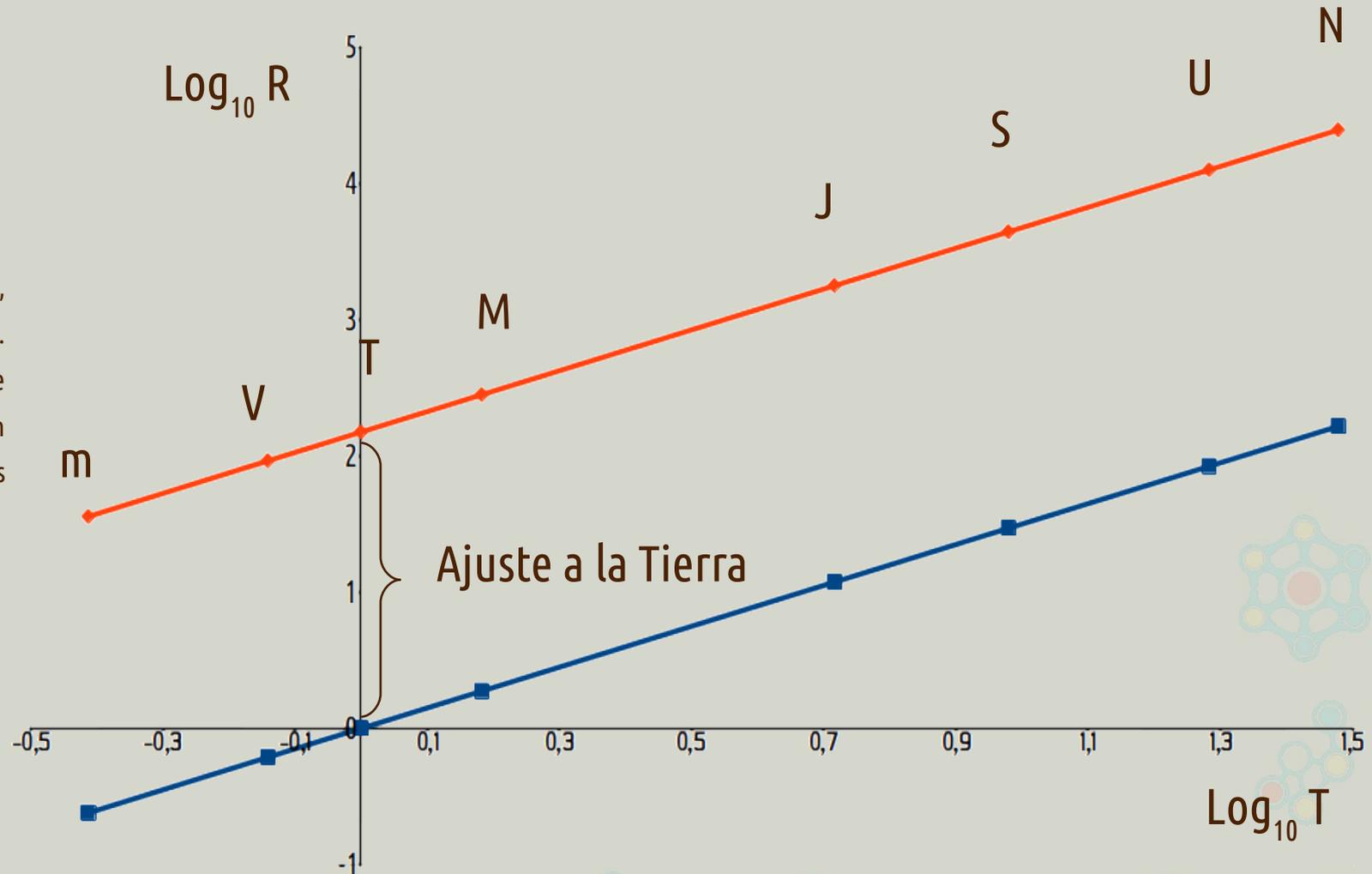
Planeta	$\text{Log}_{10} R$ respecto a ⁽³⁾	$\text{Log}_{10} T$	$\text{Log}_{10} R / \text{Log}_{10} T$
Mercurio	-0,412	-0,618	0,6667
Venus	-0,140	-0,211	0,6667
Tierra	0	0,0	-----
Marte	0,182	0,274	0,6667
Júpiter	0,716	1,074	0,6667
Saturno	0,979	1,469	0,6667
Urano ⁽¹⁾	1,283	1,924	0,6667
Neptuno ⁽¹⁾	1,478	2,217	0,6667

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

⁽¹⁾ Kepler no hizo la representación, sino que observó la relación numérica. Los ejes de coordenadas las introduce en las matemáticas René Descartes en *La Géométrie* de 1637. Kepler no las conoció porque murió en 1630.

Al representar gráficamente⁽¹⁾ las relaciones, se ve que se corresponde con una línea



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

La línea responde a la ecuación de la recta

$$\log_{10} R = \frac{2}{3} \log_{10} T + C$$

La C es la ordenada en el origen, es decir, el punto en el que la recta corta al eje Y.

El valor de C es 2,174, el logaritmo del radio orbital terrestre.

Operando...

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

Operando...

$$\log_{10} R = \frac{2}{3} \log_{10} T + C$$

$$3 \cdot \log_{10} R = 2 \cdot \log_{10} T + 3C$$

$$\log_{10} R^3 = \log_{10} T^2 + 3C$$

$$\log_{10} R^3 = \log_{10} (T^2 \cdot K)$$

De lo que resulta la forma definitiva de la 3ª ley

$$R^3 = T^2 \cdot K \quad \text{ó} \quad K = \frac{R^3}{T^2}$$

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

La tercera ley de Kepler

Con esta ley Kepler iba más allá y encontraba una **relación universal** entre el radio y el periodo.

Esto supone una de las claves de las leyes científicas, el ser aplicadas a todos los elementos de igual tipo.

Más tarde⁽¹⁾ comprobaría que esta relación era también válida para los satélites de Júpiter⁽²⁾ con la diferencia de que la constante K era otra.

La conclusión es que K depende del astro alrededor del cual giran los planetas.

⁽¹⁾ Publicó esta observación en 1621 en el *Epitome Astronomiae Copernicanae* (vol. 3)

⁽²⁾ Galileo descubrió los satélites de Júpiter en 1610

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

El Sistema Solar

Antes de las leyes de Kepler, las posiciones reales de los astros eran desconocidas ya que lo que vemos son sus **posiciones aparentes** sobre el zodiaco.

La teoría heliocéntrica permite⁽¹⁾ a Kepler, permite utilizar estos datos observacionales para inferir a partir de ellos las **posiciones reales** es decir, **teóricas**.

En las tablas rudolfinas define y complementa con nuevos cálculos el sistema solar, por ejemplo, los tránsitos de Mercurio (1631) o de Venus (1639)

⁽¹⁾ Es la existencia de una teoría la que permite determinar las posiciones reales. Por tanto, las posiciones reales son teóricas en el sentido de que no proceden de la observación sino de la existencia de una teoría previa.

3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

El Sistema Solar

Los hallazgos de Kepler apuntaban a que el Sol tenía un papel causal fundamental en los movimientos de los planetas.

- Los planetas giran en una elipse alrededor del Sol
- El Sol está en un foco de esa elipse
- Las velocidades de los planetas dependen de la distancia al Sol

Pero sus intentos de encontrar la razón física mediante el magnetismo no tuvieron éxito.



3. Kepler y la puesta al día del sistema copernicano.

El Sistema Solar



René Descartes (1556-1650) propuso (*Principia Philosophiae*, 1644) un modelo mecanicista, análogo al movimiento de los fluidos

Todos los planetas están inmersos en un material que llenaba el espacio y producía **vórtices** que estos eran los que arrastraban a los planetas y satélites.

Pero todo fueron especulaciones, y no sería hasta Huygens y Newton, unas décadas después, cuando se resolvió el problema causal.



4. Galileo y la invención del telescopio

La corrupción lunar



Galileo Galilei (1564-1642) fue, junto a Kepler, uno de los máximos defensores del modelo heliocéntrico, pero estaba en desacuerdo con las órbitas elípticas.

Su defensa no se basa en las observaciones directas, sino que usa el **telescopio** recién inventado.

En otoño de 1609, tras haber construido y mejorado varios telescopios, empezó a utilizarlo para observar la Luna, cambiando **la idea de perfección** de los objetos celestes.



4. Galileo y la invención del telescopio

La corrupción lunar



4. Galileo y la invención del telescopio

La corrupción lunar

Las observaciones⁽¹⁾ mostraban con claridad que la superficie de la Luna no es lisa, sino que en ella hay montañas y valles

De esta forma refutaba la idea de la perfección de los astros como suponía la cosmología aristotélica

⁽¹⁾ y las ilustraciones, porque resultó importante su formación en pintura y geometría de la perspectiva



4. Galileo y la invención del telescopio

El espacio inmenso

Al observar las estrellas comprobó que hay muchas más estrellas que las visibles a simple vista, lo que plantea dudas...

- ... astronómicas, si se ven solo al aumentarlas, podría ser porque estás más lejos
- ... religiosas, ¿por qué las ha creado Dios si solo son visibles a través del telescopio?

También pudo comprobar que la Vía Láctea no es una nube, sino una acumulación de estrellas.



4. Galileo y la invención del telescopio

El espacio inmenso

El tamaño aparente de las estrellas no cambia al observarlas con el telescopio, algo que si ocurre con los planetas, que se ven más grandes.

Esto podía ser una prueba más del enorme tamaño del universo, pues lo achacó a la distancia: están tan lejos que ni aumentándolas dejan de verse como un punto.



4. Galileo y la invención del telescopio

Los satélites de Júpiter

A principios de 1610, Galileo observando Júpiter observó cuatro cuerpos cercanos a él que se movían a su alrededor, por lo que no podían ser estrellas.

No podían ser estrellas porque estas no se mueven respecto a los planetas (son fijas)

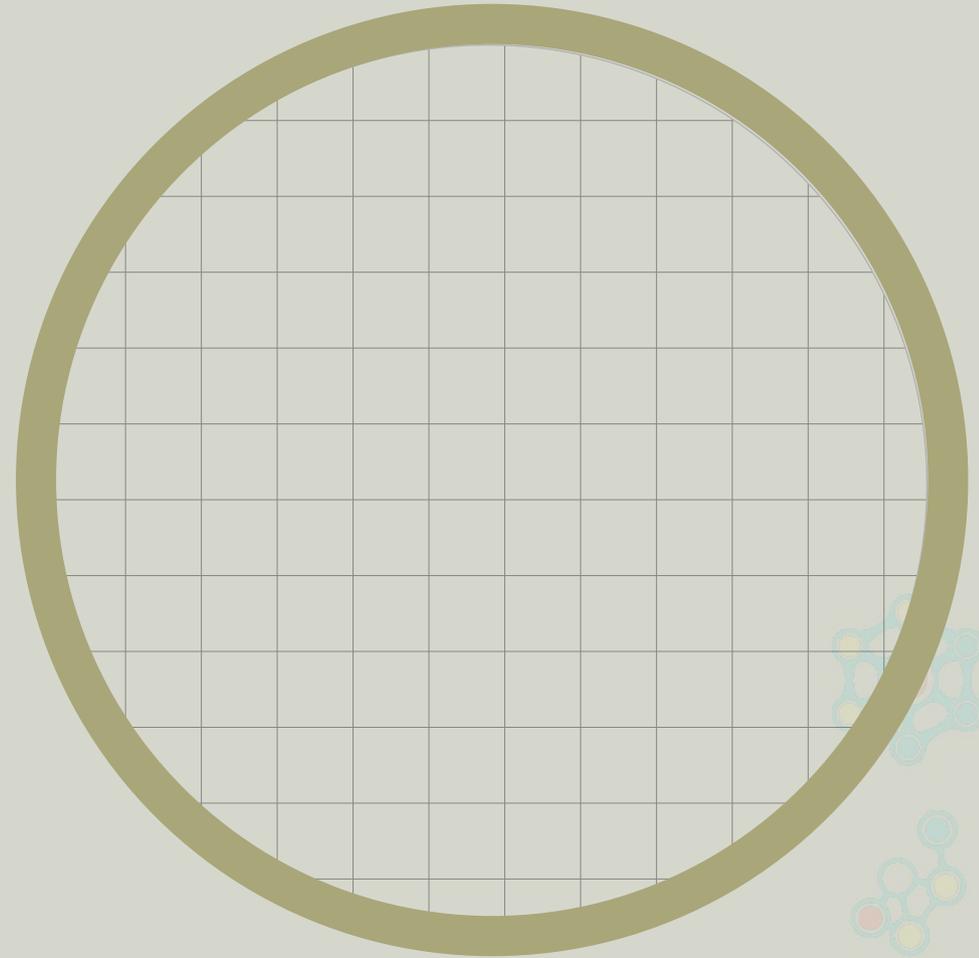
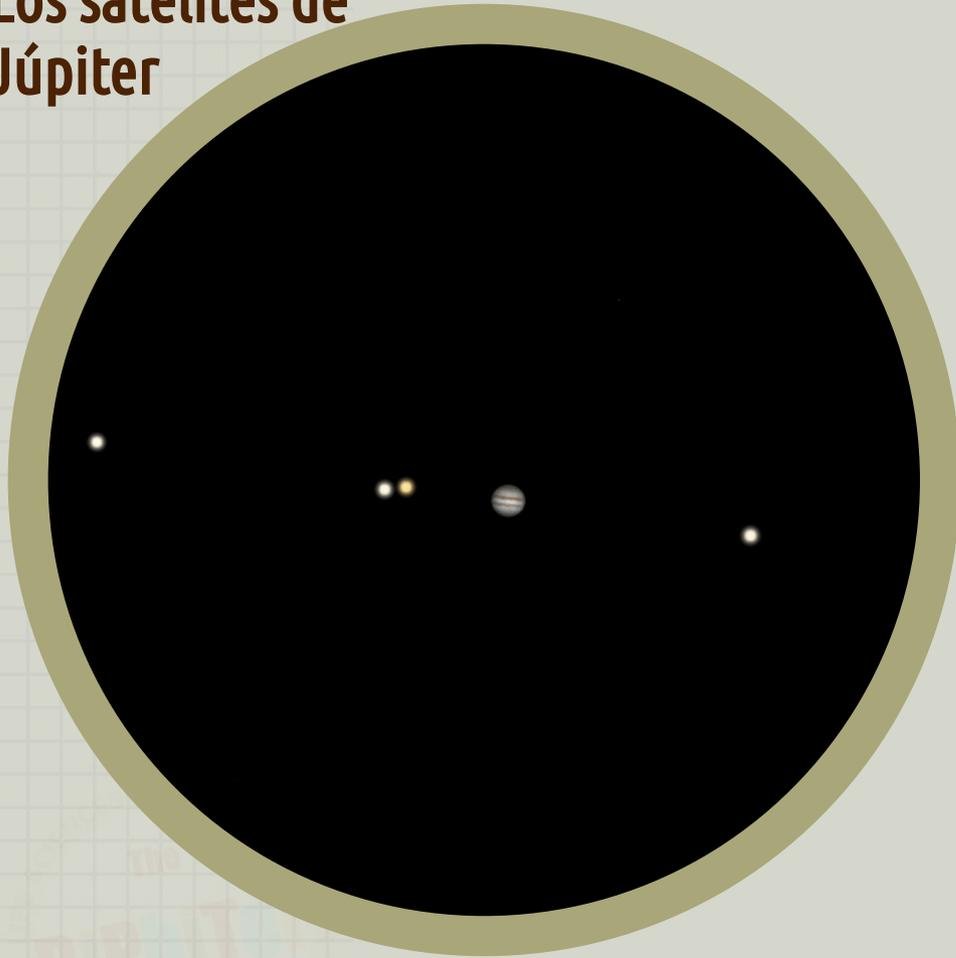
Se trataba de sus cuatro satélites mayores, cuyo desplazamiento midió con ayuda de una rejilla que había adaptado a la mira del telescópico.



4. Galileo y la invención del telescopio

Los satélites de Júpiter

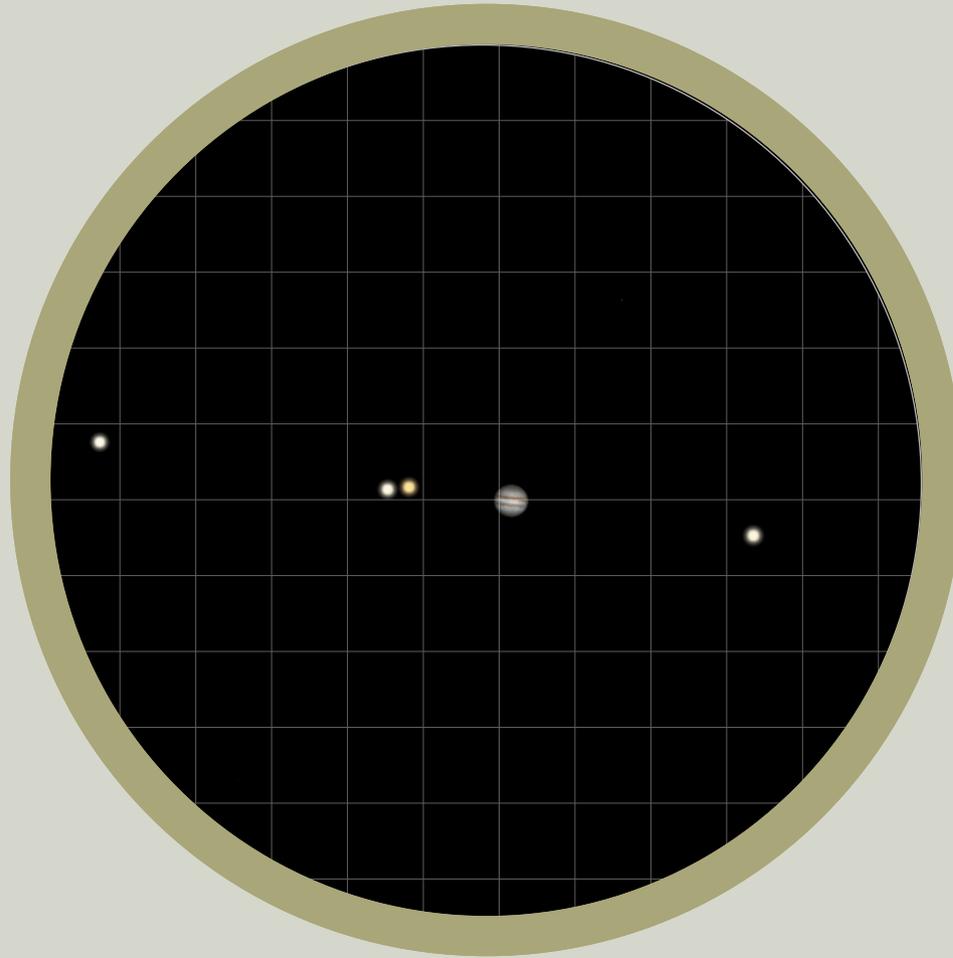
La rejilla la montó al lado del telescopio para mirar con los dos ojos a la vez, las imágenes se superponían



4. Galileo y la invención del telescopio

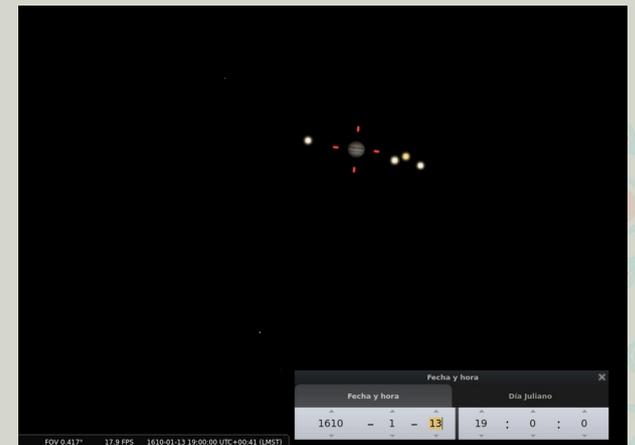
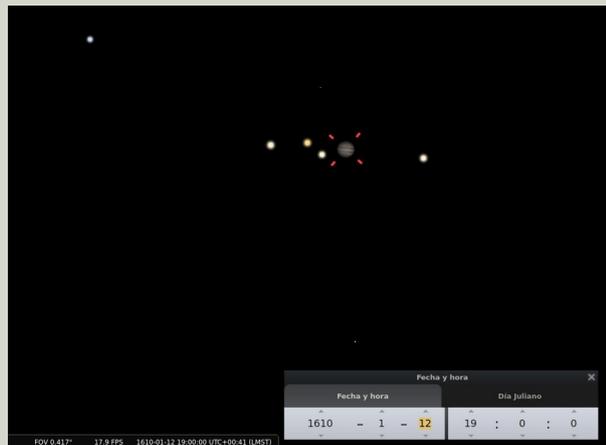
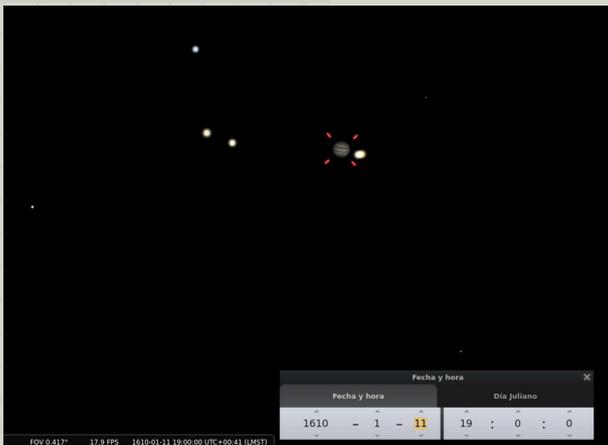
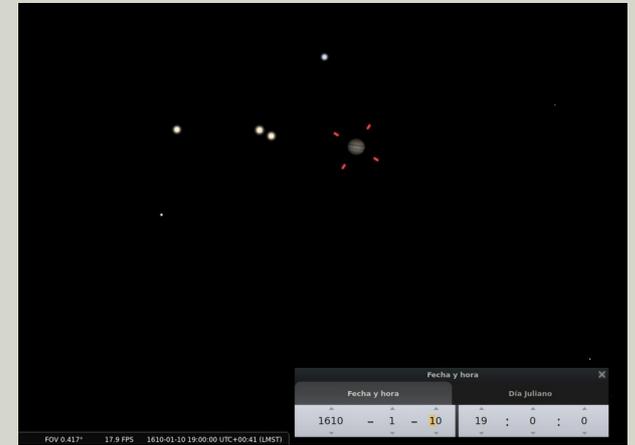
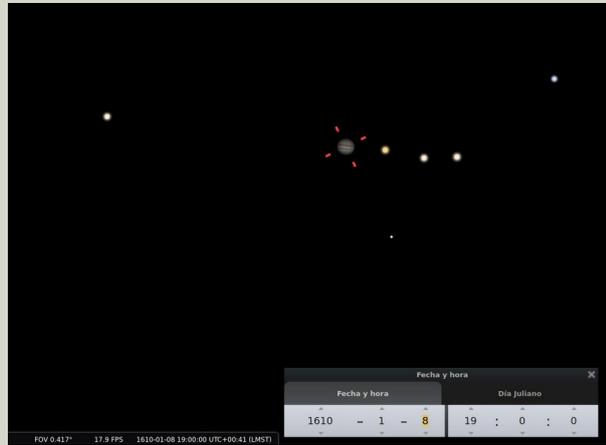
Los satélites de Júpiter

Y así podía anotar con precisión los cambios del día a día y anotarlas en su diario de observación.



4. Galileo y la invención del telescopio

Las observaciones del 7 al 13 de enero de 1610 (el 9 estaba nublado)



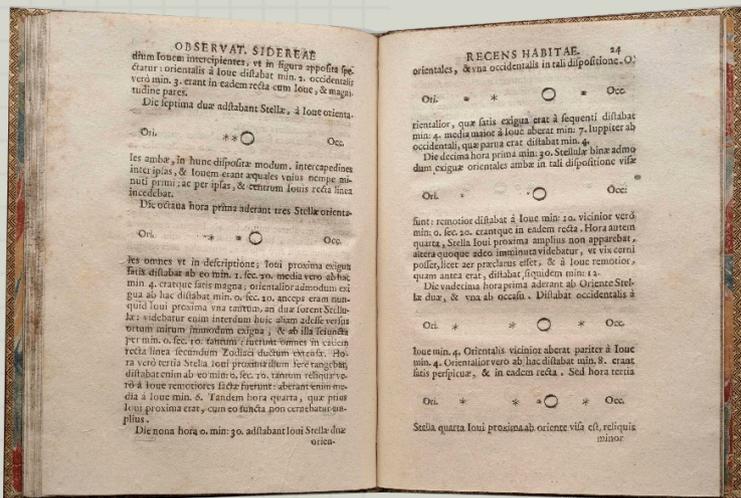
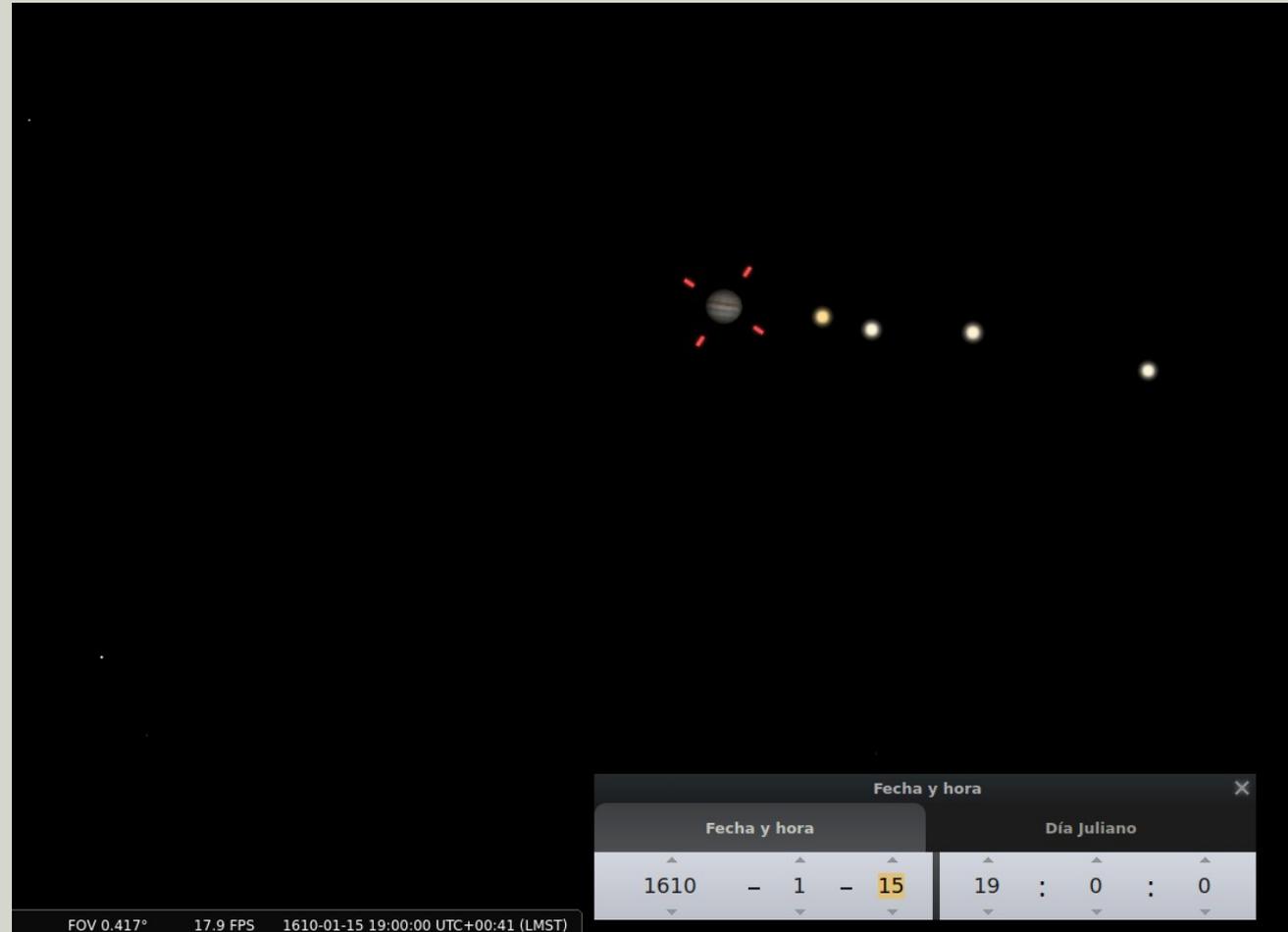
4. Galileo y la invención del telescopio

Y la del día 15 las plasmó en el **Sidereus Nuncius** una breve gaceta astronómica publicada el 13 de marzo de ese mismo año.

Los satélites de Júpiter

Observationes Jovis
1610

2. Jovis	○**
3. Jovis	**○*
4. Jovis	○** *
5. Jovis	○ * *
6. Jovis	* ○ *
7. Jovis	* ○ **
8. Jovis	** ○ *
9. Jovis	* * * ○
10. Jovis	* * * ○ *
11.	* * ○ *
12. H. 4. vesp.	* ○ *
13. Jovis	* * ○ *
14. Jovis	* * * ○ *



4. Galileo y la invención del telescopio

Los satélites de Júpiter

La conclusión a la que llegó es que eran astros que orbitaban alrededor de Júpiter a los que llamó **planetas médicos** en honor a Cosme II de Médicis.

Los denominó Ío, Europa, Calixto y Ganímedes, nombres sugeridos por Kepler⁽¹⁾ cuando se reunieron en la Feria de Ratisbona en octubre de 1613.

Estos satélites eran la prueba de que existen astros que no giran alrededor de la Tierra, lo que corroboraba el sistema heliocéntrico.

⁽¹⁾ "Júpiter es culpado por los poetas debido a sus irregulares amores. Tres doncellas son mencionadas especialmente por haber sido cortejadas clandestinamente por Júpiter con éxito. Ío, hija del río Inachus, Calixto de Lycaon, Europa de Agenor. Luego fue Ganímedes, el hermoso hijo del rey Tros, a quien Júpiter, habiendo tomado la forma de un águila, transportó en su lomo hasta los cielos, tal como los poetas narran de una forma fabulosa"

Mundus Jovialis (Nuremberg, 1614)

4. Galileo y la invención del telescopio

Las fases de Venus

Pero quizá el descubrimiento más fundamental lo llevó a cabo ese mismo año de 1610, aunque a partir de octubre por lo que no se publicó en el Sidereus Nuncius.

Venus era visible a simple vista, pero con el telescopio se apreciaba que tenía fases.

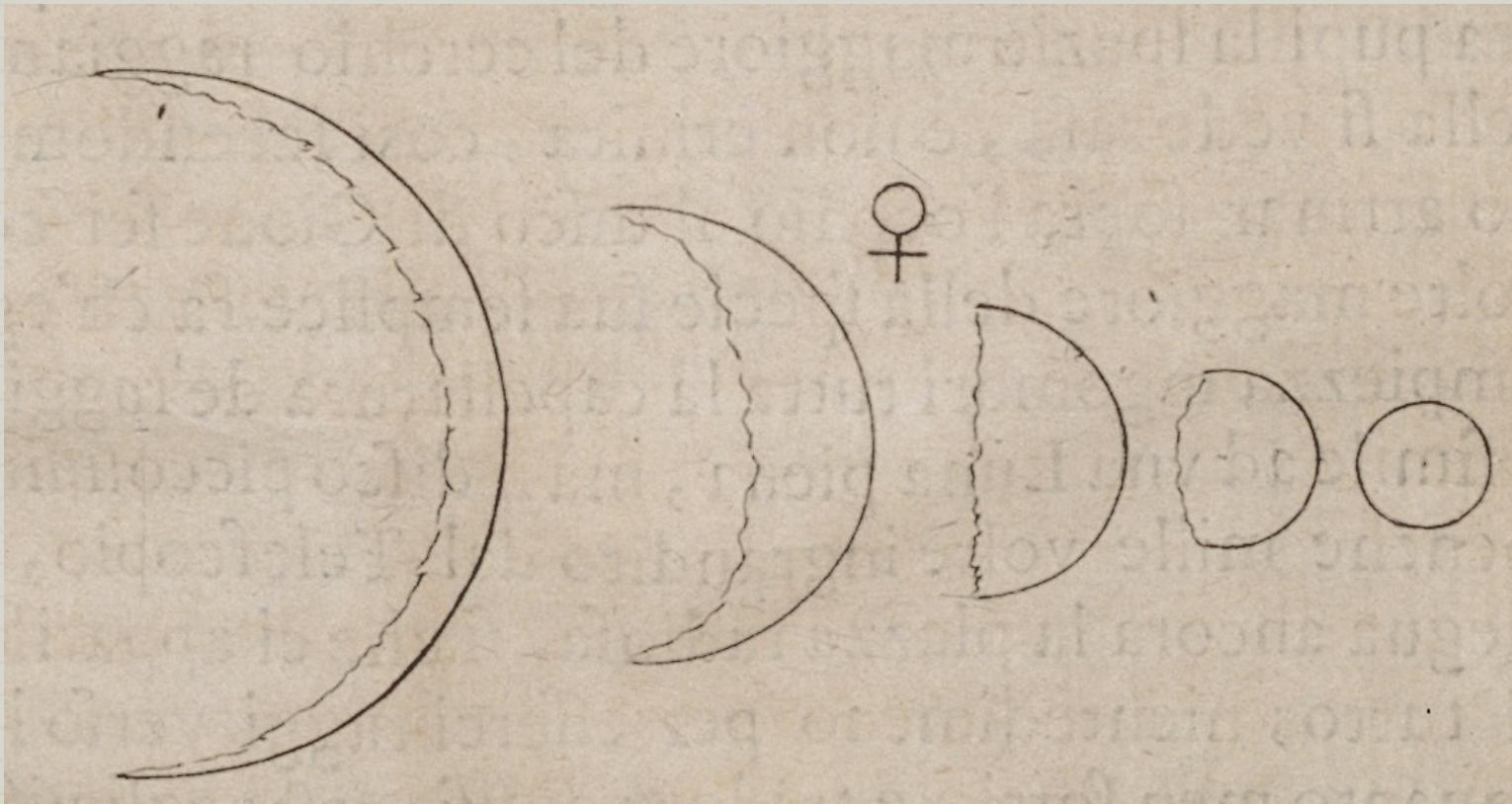
Al estar siempre cerca del Sol, ofrece una cara iluminada visible desde la Tierra en función de las posiciones relativas de los tres astros.



4. Galileo y la invención del telescopio

Las fases de Venus

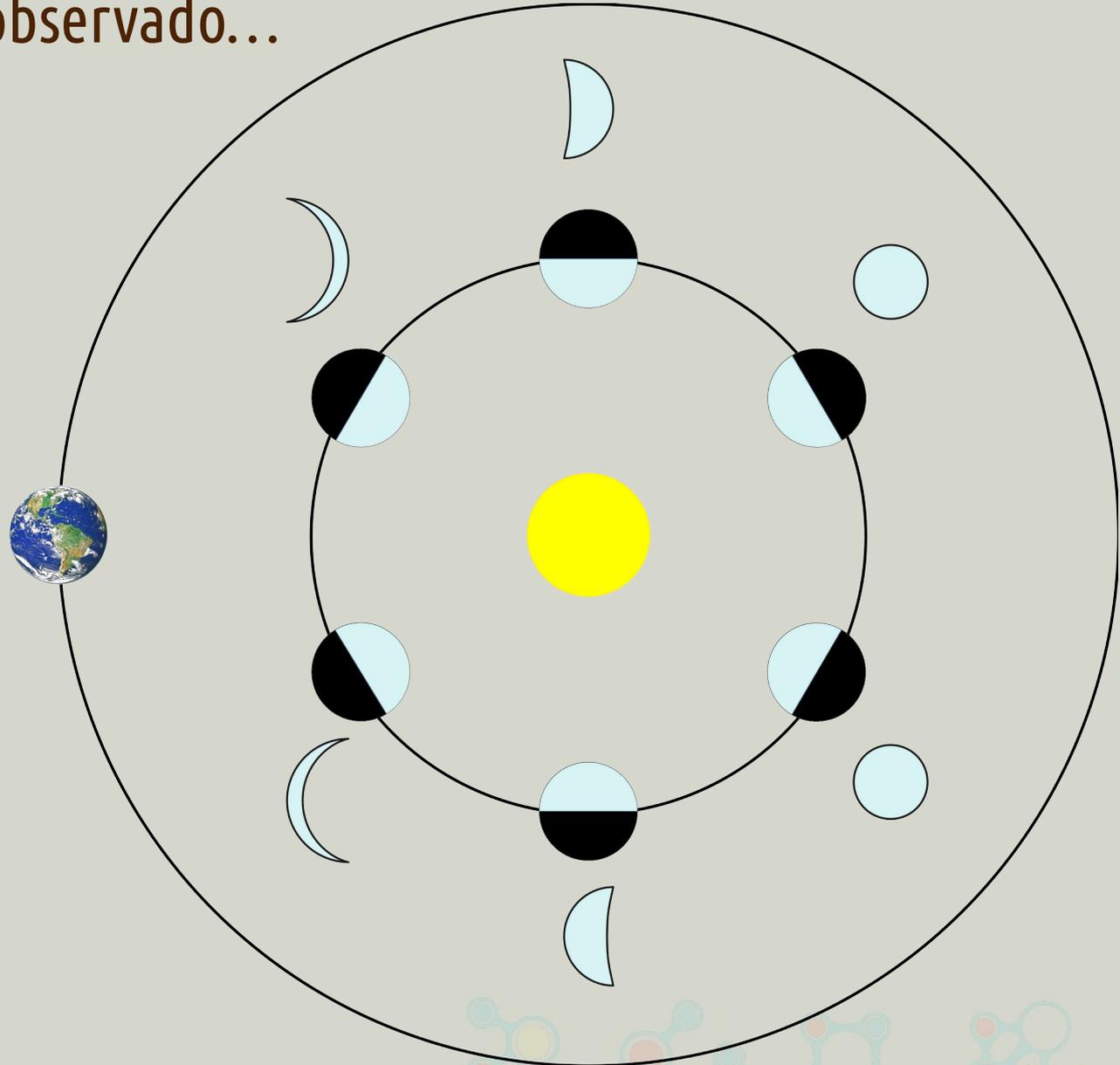
Lo que descubrió fue un patrón de fases incompatible con el modelo ptolemaico, lo que supuso **una prueba que falsaba una teoría.**



4. Galileo y la invención del telescopio

Las fases de Venus

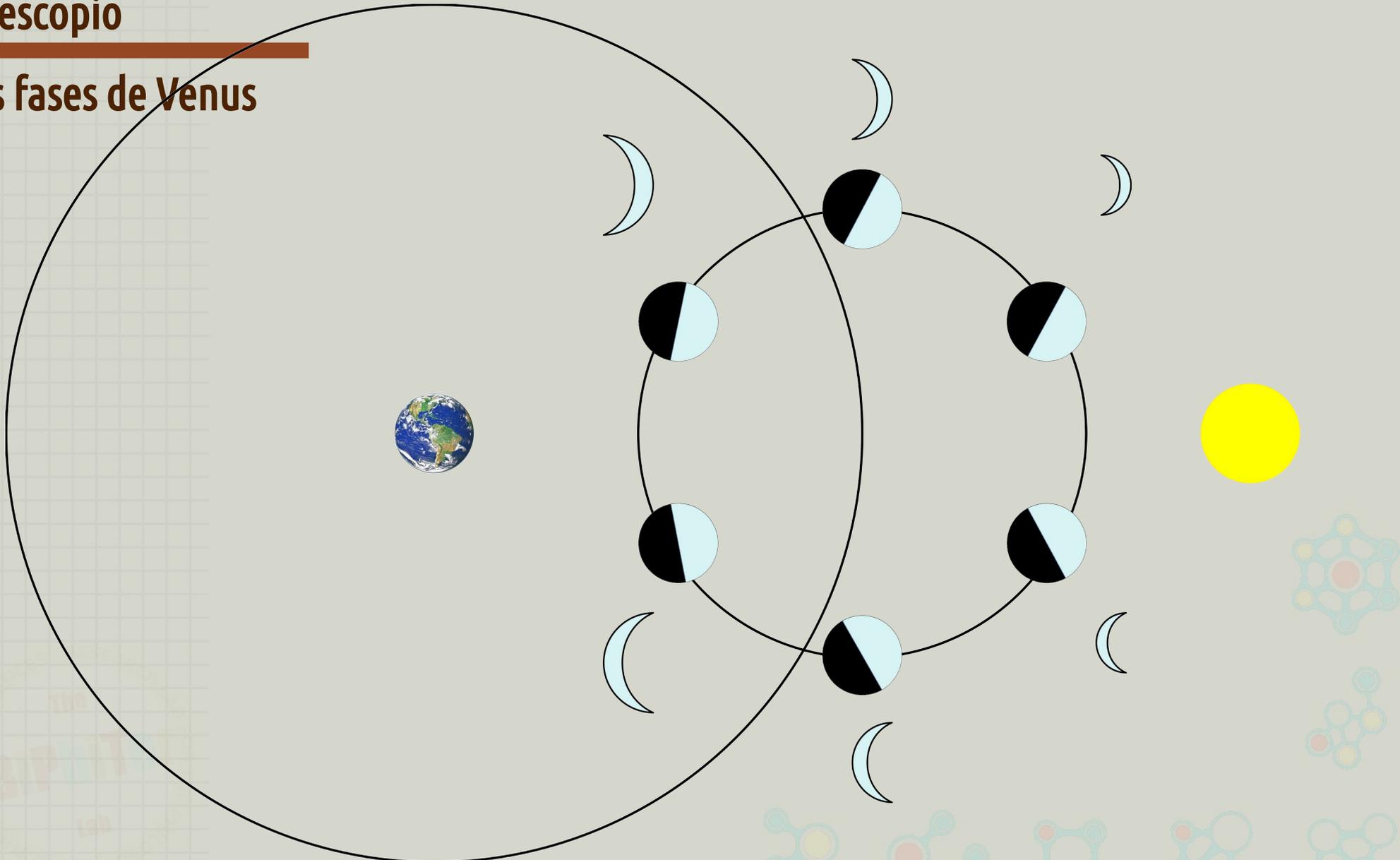
Mientras el modelo copernicano coincide con lo observado...



4. Galileo y la invención del telescopio

Las fases de Venus

En uno ptolemaico nunca habría “venus lleno”



4. Galileo y la invención del telescopio

Las manchas del Sol

Otro descubrimiento significativo de Galileo fue el de las manchas solares.

No fue el primero en observarlas, pero sí en darse cuenta de que no se trata de objetos que pasen por delante, sino que están en su misma superficie, al igual que las irregularidades de la Luna.

Usando el telescopio para proyectar lo observado sobre una superficie, Galileo hizo un seguimiento del Sol durante varios días (julio de 1612)



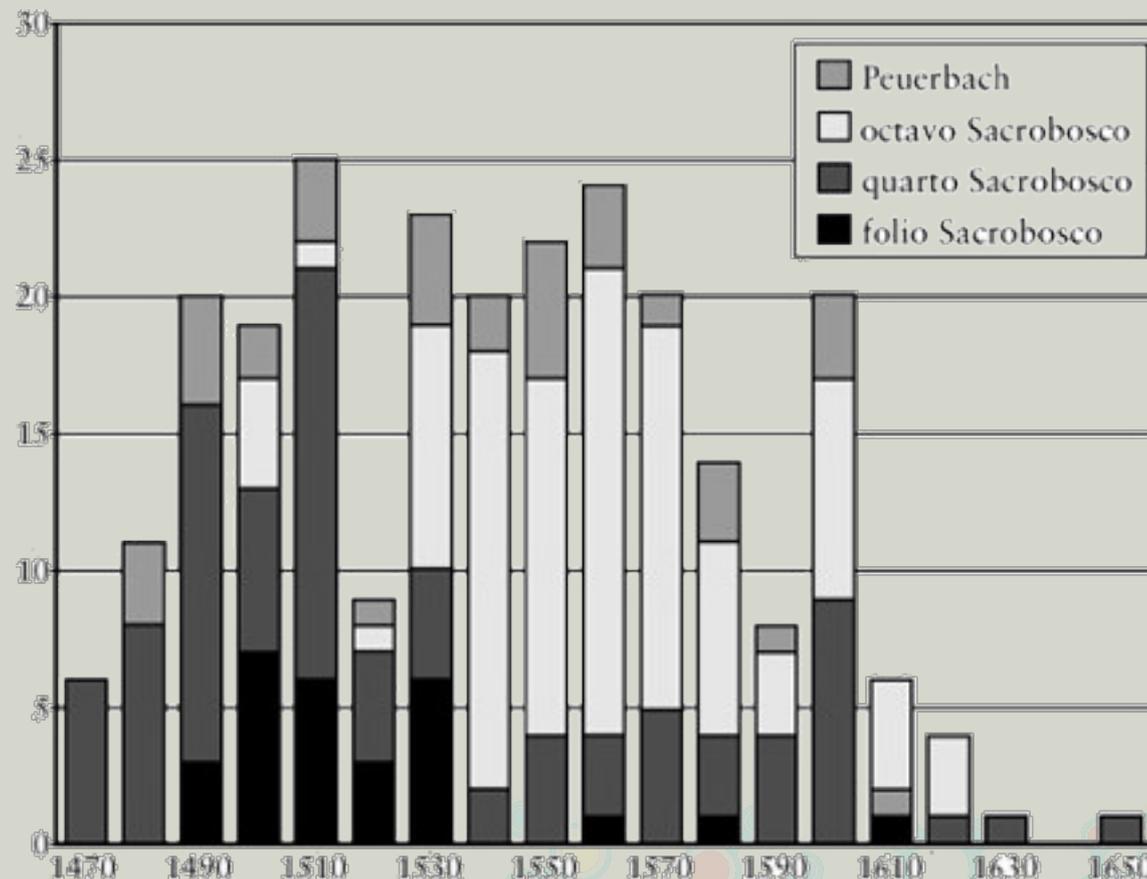
4. Galileo y la invención del telescopio

El fin de los modelos geocéntricos

Tras la publicación del *De Revolutionibus* por parte de Copérnico, el ajuste de Kepler y las pruebas aportadas por Galileo, el modelo Ptolemaico y los demás modelos geocéntricos tocan a su fin.

Datos de ventas de libros de astronomía ptolemaica, editados por Peurbach y Sacrobosco.

Se puede ver como a partir de 1610 no venden nada.



4. Galileo y la invención del telescopio

El fin de los modelos geocéntricos

En este detalle del frontispicio del *Almagestum Novum* (1653) de Giovanni Battista Riccioli, se puede apreciar como la justicia dirime entre los modelos heliocéntrico de Copérnico, a la izquierda (va perdiendo) y el geoheliocéntrico de Tycho Brahe (fue muy popular en su época y en el dibujo lo muestran como ganador) mientras el geocéntrico de Ptolomeo está en el suelo abandonado.

