

Francisco Rodríguez Consuegra

Introducción a la Revolución Científica

Esquemas y textos

Contenido

Bibliografía básica 2

Copérnico (1473-1543)

- esquema 3
- figuras (extraídas de los libros de Kuhn y Hanson) 5
- textos
 - *Commentariolus* 15
 - *De revolutionibus* 17

Galileo (1564-1642)

- esquema 21
- el experimento del plano inclinado 23
- textos
 - *Diálogos sobre los sistemas máximos* 24
 - *Consideraciones ... sobre dos nuevas ciencias* 32

Ofrezco estos materiales de forma totalmente abierta en mi página web, para que se puedan descargar libremente en PDF. Ahora bien, aunque la selección de los textos es mía, todos ellos están extraídos de libros protegidos por un *copyright*; por tanto, debo añadir el ruego, y la *seria advertencia*, de que los contenidos de este trabajo se deben utilizar *exclusivamente* para la docencia o el estudio privados, *sin reproducirse ni publicarse* en ninguna página web, blog, o similar, ni total ni parcialmente, *ni siquiera citando la fuente*. Eso si, siempre se podrá citar el vínculo (“link”) concreto con el que se puede acceder a estos materiales.

Bibliografía básica

- Copérnico, *Commentariolus*. Incluido en la edición de A. Elena.
- Copérnico, *De revolutionibus orbium caelestium*. Traducción castellana, introducción y notas de Carlos Mínguez. Tecnos.
- Crombie, A.C., *Historia de la ciencia de San Agustín a Galileo*. Alianza.
- Drake, S., *Galileo*. Alianza.
- Elena, A., *Nicolás Copérnico, Thomas Digges, Galileo Galilei: Opúsculos sobre el movimiento de la Tierra*. Alianza.
- Galileo, *Diálogos sobre los sistemas máximos*. Traducción castellana, prólogo y notas de J.M. Revuelta. Aguilar.
- Galileo, *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*. Traducción castellana de J. Sádaba. Introducción de Carlos Solís. Editora Nacional.
- Hall, A.R., *La revolución científica, 1500-1750*. Crítica.
- Hanson, N.R., *Constelaciones y conjeturas*. Alianza.
- Kuhn, Th., *La revolución copernicana*. Ariel.
- Wartofsky, M.W., *Introducción a la filosofía de la ciencia* [Véase especialmente el Apéndice A: "Todo cae. El desarrollo del concepto de movimiento desde Aristóteles a Galileo"]. Alianza.

Copérnico

- Introducción
 - importancia del tema
 - ¿una revolución copernicana? El libro de Kuhn

1. Movimientos visibles

- Sol: figura 1(Kuhn)
- Estrellas: 2(Kuhn)
- las dos esferas: figura 4(Hanson)
 - eclíptica y Zodiaco
 - latitud y horizonte
 - sus funciones como esquema conceptual

2. Astronomía antigua

- los planetas en el modelos de las dos esferas
- esferas homocéntricas: figura 6(Hanson)
- epiciclos y deferentes: figura 7(Kuhn)
- Ptolomeo (c. 100-170 d.C.): *Almagesto*
 - epiciclos menores: figura 11(Kuhn)
 - epiciclos combinados: figura 8(Kuhn)
 - excéntricas: figura 9(Kuhn)
 - ecuantas: figura 10(Kuhn)
 - aumento simultáneo de precision y complejidad

3. Cosmología aristotélica y críticas

- figuras 6(Hanson), 5(Hanson) y 12 (Hanson)

4. Copérnico

- Características del *De Revolutionibus*, 1543
- tres movimientos de la Tierra: figuras 13(Kuhn), 14(Kuhn) y 15 (Kuhn)
- mejoras en la explicación de los planetas
 - retrogradación: figura 17(Hanson)
 - desigualdad de las órbitas: figura 18(Kuhn)
 - la Tierra y Marte: figura 16(Kuhn)
- comparación de los dos sistemas: Copérnico todavía usó epiciclos y deferentes
- la armonía

5. Mejoras posteriores

- polémica entre positivismo (salvar los fenómenos) y realismo
- la Iglesia, Giordano Bruno
- Tycho Brahe (1546-1601)
 - observaciones regulares
 - sistema intermedio: figura 19(Kuhn)
 - problemas: cometas y esferas que se cortan
- Kepler (1571-1630)
 - ampliación de Copérnico
 - las tres leyes y sus ventajas
 - las leyes y la observación: armonía y explicación
 - los sólidos regulares
 - escala y órbitas
- Galileo (1564-1642)
 - el telescopio: imperfecciones y grandiosidad
 - “pruebas” definitivas del sistema copernicano
 - las lunas de Jupiter
 - la fases de Venus: figura 20(Kuhn)
- Gilbert (1544-1603) y Kepler: la fuerza de atracción de los imanes
- Descartes (1596-1650): el principio de inercia
- Borelli (1608-1679) y Hooke (1635–1703): inercia y atracción
- Newton (1643-1727): *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*
 - ley de atracción universal: la gravedad
 - cálculos precisos

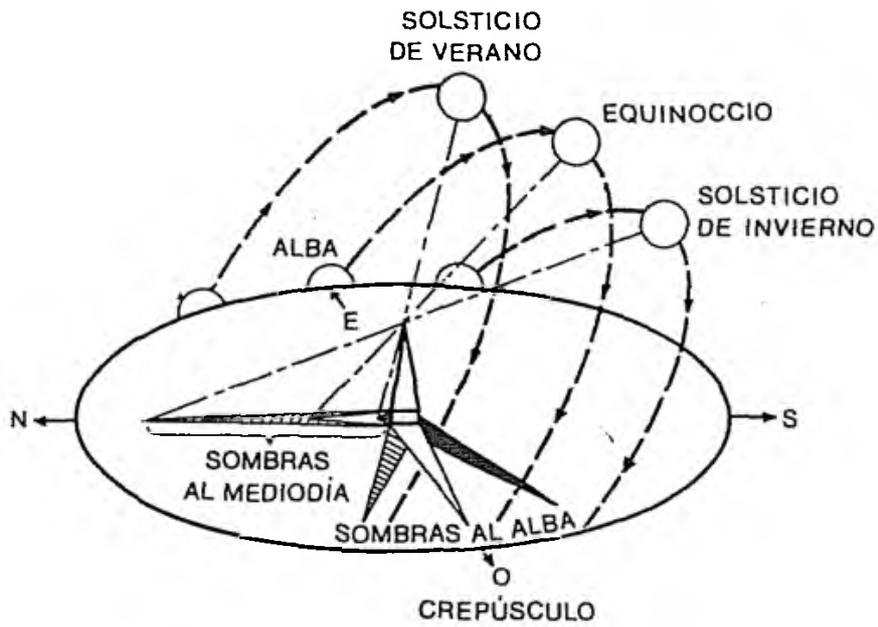


FIGURA 2. — Relación entre la posición del sol en su salida, su elevación a mediodía y la variación estacional de la sombra del gnomon.

1 (Kuhn)

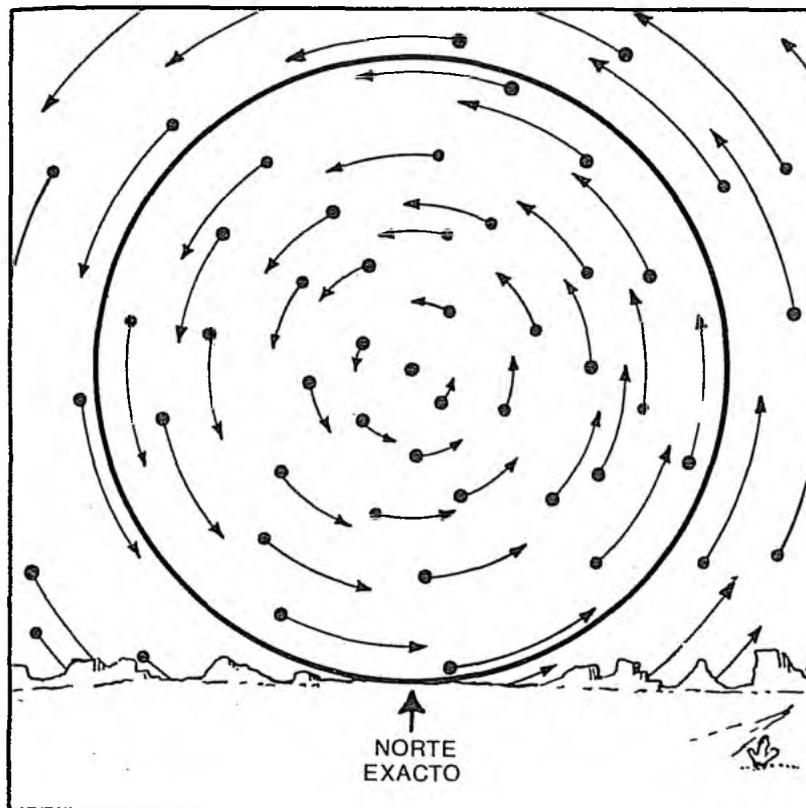


FIGURA 6. — Conjunto de arcos de círculo descritos por algunas estrellas del hemisferio norte durante un período de dos horas. La circunferencia de trazo grueso tangente al horizonte se para las estrellas circumpolares de las que salen y se ponen.

2 (Kuhn)

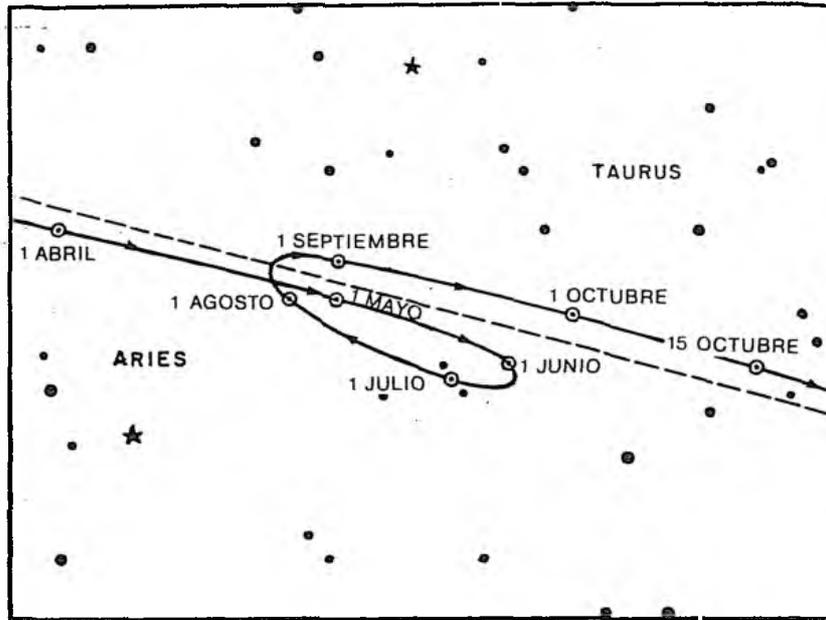
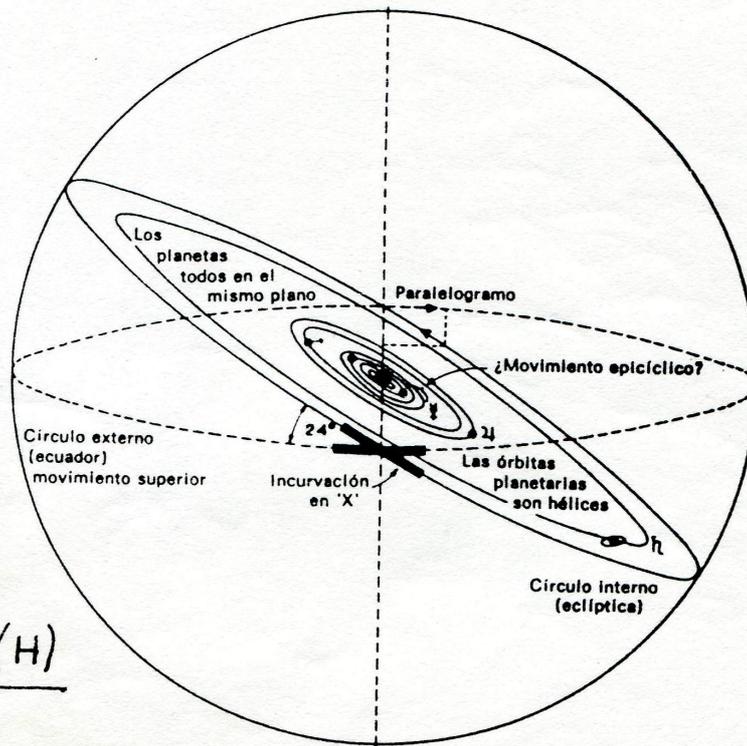


FIGURA 15. — Retrogradación de Marte a través de las constelaciones de Aries y Taurus.

3 (Kuhn)

El Universo según Platón, tal como se expone en el Fedro, el Fedón y el Timeo



4 (H)

FIGURA 12.—Cosmología de Platón.

Pregunta de Platón:

«¿Qué movimientos uniformes y ordenados hemos de suponer para poder dar cuenta de los movimientos aparentes de los planetas?»³⁷. (SOSIGENES)

4 (Hanson)

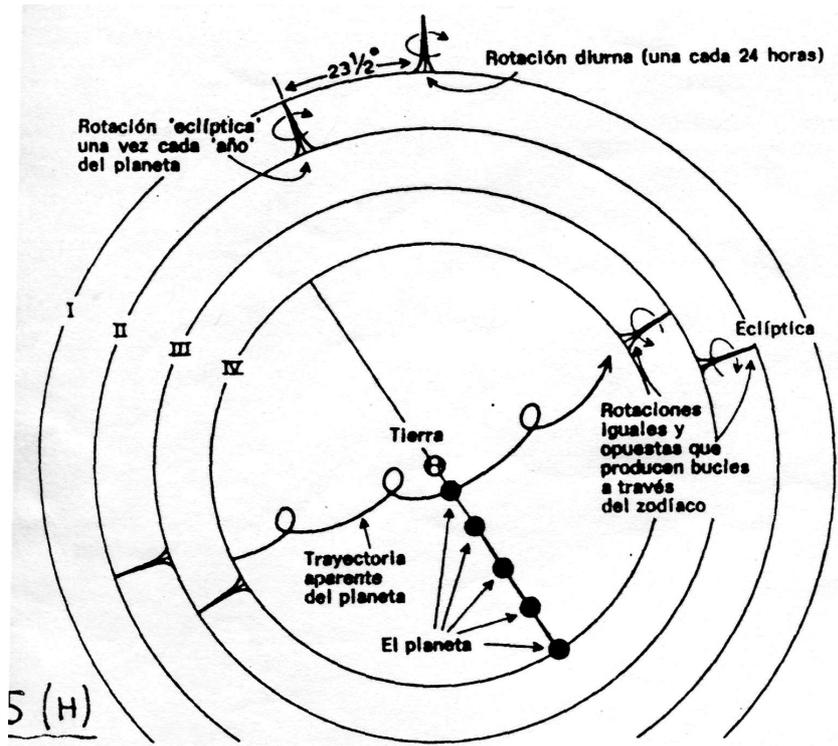


FIGURA 14.—Construcción de esferas encajadas de Eudoxo; intento de simular el movimiento anual de un planeta típico (primera aproximación).

5 (Hanson)

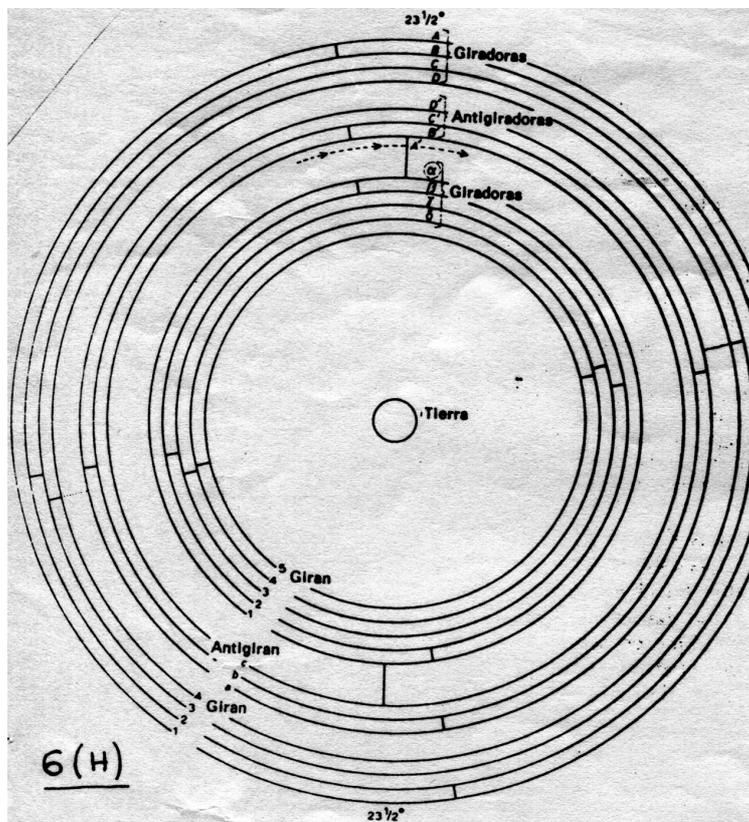


FIGURA 23.—Un grupo de esferas de Eudoxo adaptado por Aristóteles

6 (Hanson)

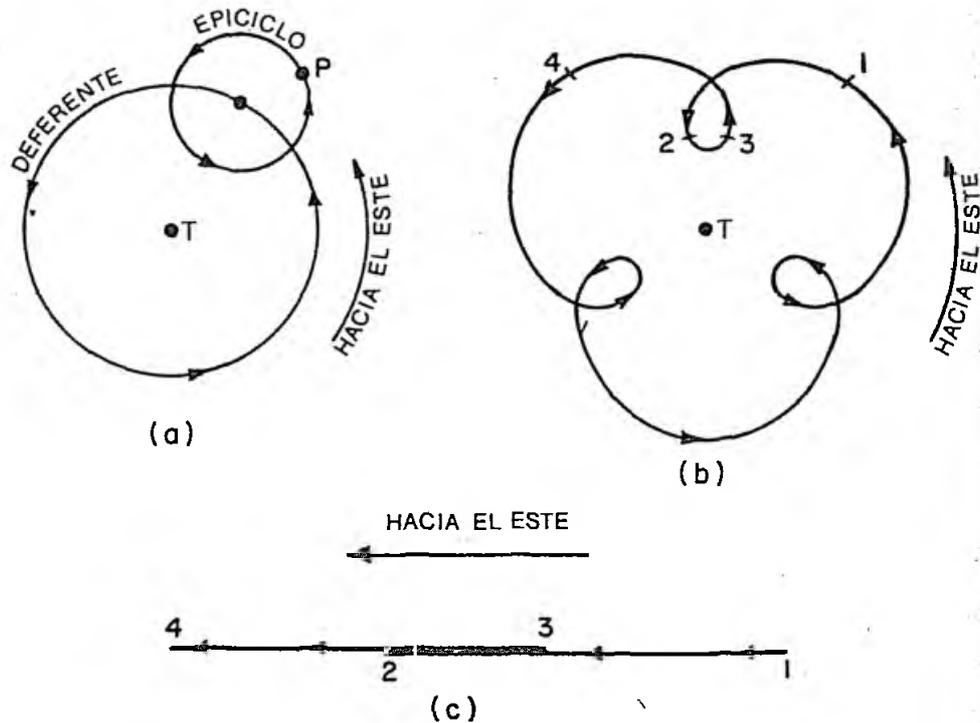


FIGURA 19. — El sistema básico epiciclo-deferente. En (a) se representa un caso típico de epiciclo y deferente; en (b) aparece el movimiento en bucle generado por tal sistema en el plano de la eclíptica; en (c), se ofrece parte del movimiento representado en (b), el trayecto 1-2-3-4 tal como es visto por un observador situado sobre la tierra central *T*.

7 (Kuhn)

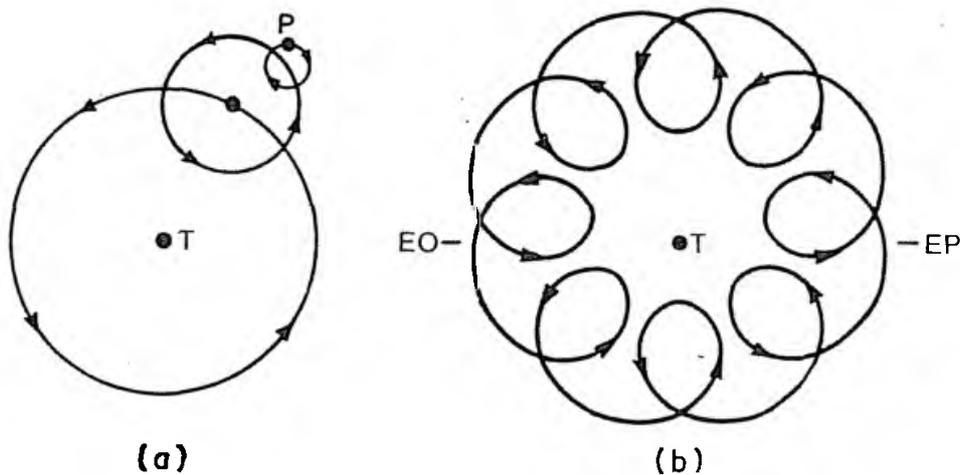


FIGURA 23. — (a) Un epiciclo, sobre un epiciclo, sobre un deferente; (b) camino típico engendrado en el espacio por tal sistema compuesto de círculos. Para simplificar, se ha representado una curva que se cierra sobre sí misma, situación que no se produce en el movimiento real de los planetas.

8 (Kuhn)

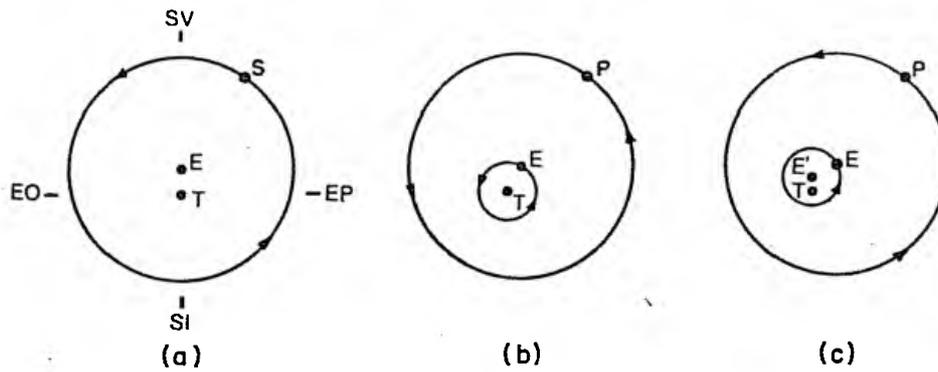


FIGURA 24. — (a) Excéntrica; (b) excéntrica sobre deferente; (c) excéntrica sobre excéntrica.

9 (Kuhn)

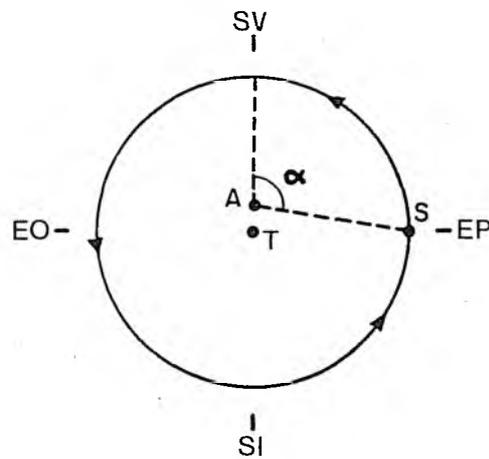


FIGURA 25. — El ecuante. El sol S se desplaza a lo largo de un círculo centrado en la tierra, pero lo hace con velocidad variable determinada por la condición de que el ángulo α gire uniformemente en función del tiempo.

10 (Kuhn)

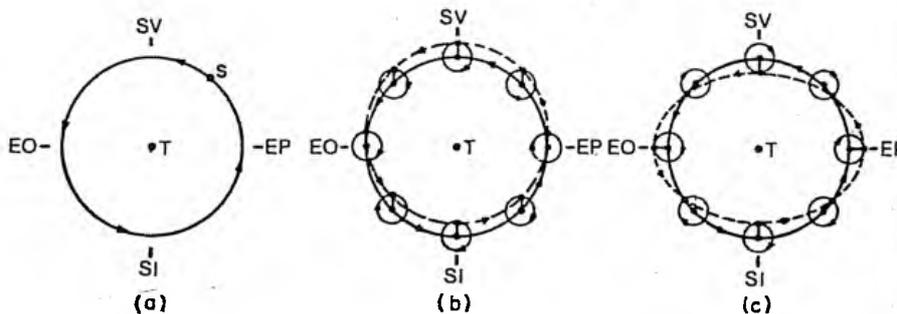
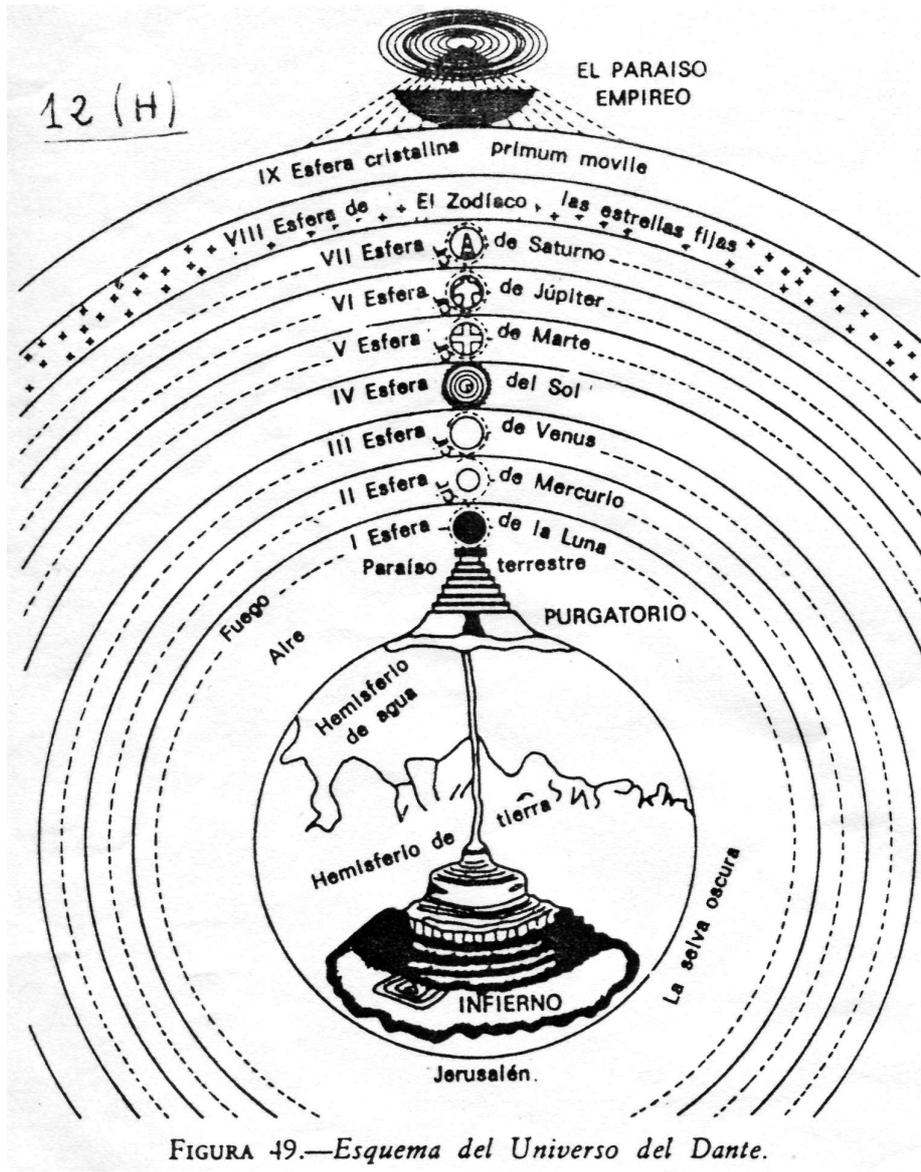
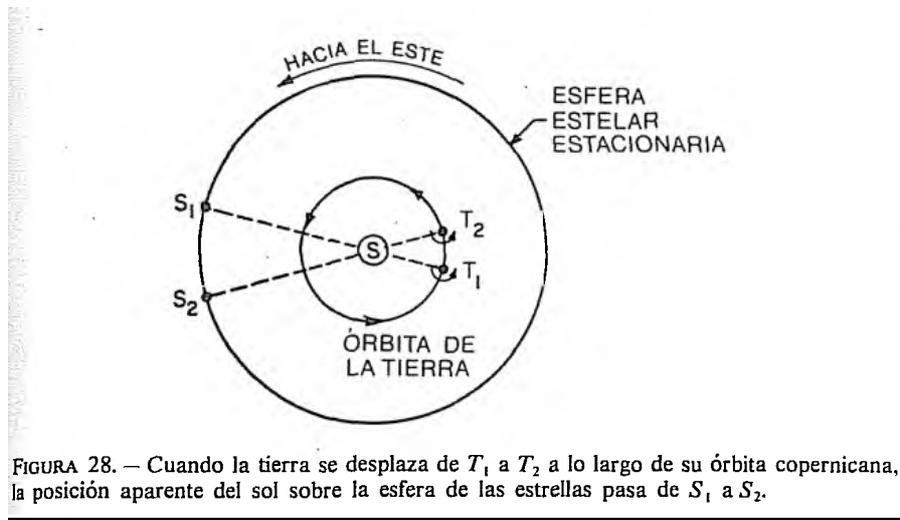


FIGURA 22. — Funciones de un epíciclo menor. En (a) el sol, movido por un solo deferente con centro en la tierra, emplea el mismo tiempo para ir de EO a EP que para retornar de EP a EO . En (b) el movimiento combinado de un deferente y un epíciclo menor arrastra el sol a lo largo de la línea de trazo discontinuo; se necesita, pues, más tiempo para ir de EP a EO que para volver de EO a EP . El diagrama (c) muestra la curva que se genera cuando el epíciclo menor gira con una velocidad doble que la supuesta en la elaboración del esquema (b).

11 (Kuhn)



12 (Hanson)



13 (Kuhn)

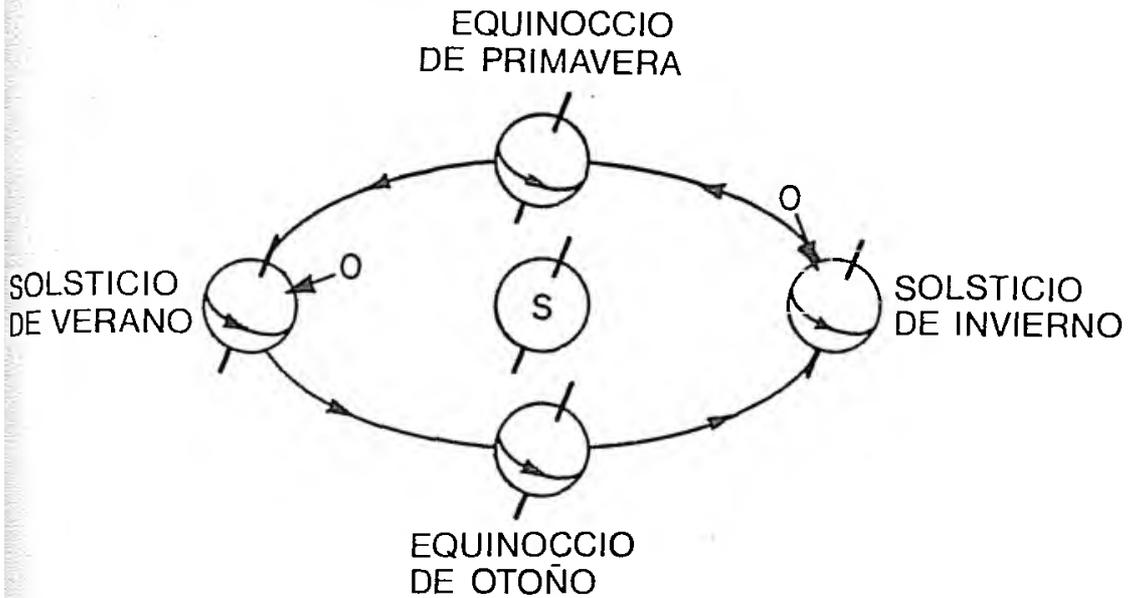


FIGURA 29. – Movimiento anual de la tierra sobre su órbita copernicana. El eje terrestre permanece constantemente paralelo a sí mismo o a la recta fija que atraviesa el sol. En consecuencia, un observador *O* que al mediodía esté situado en latitudes boreales medias ve al sol mucho más alto en el cielo en el solsticio de verano que en el solsticio de invierno.

14 (Kuhn)

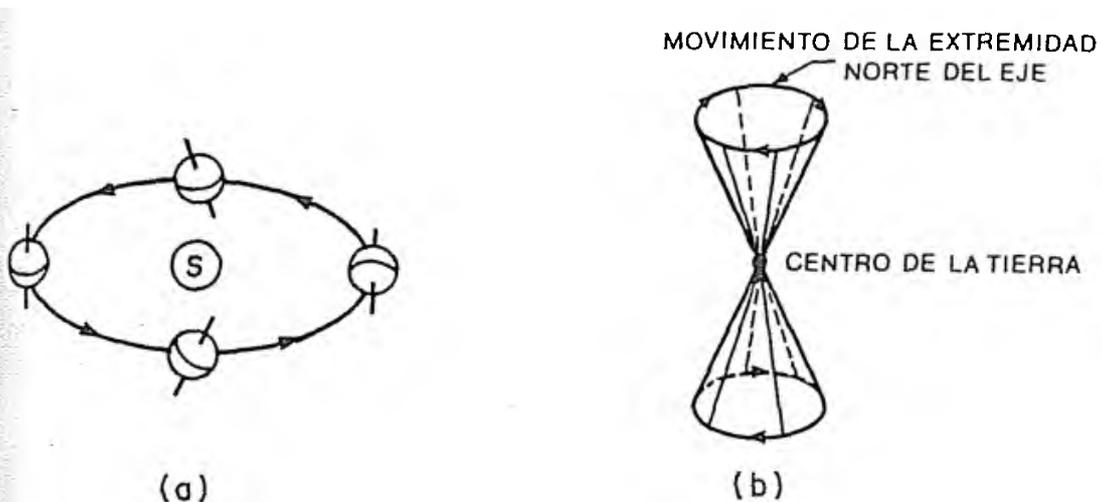


FIGURA 31. – El “segundo” y el “tercer” movimientos de Copérnico. El diagrama (a) nos muestra el segundo movimiento copernicano, el de un planeta fijado a una esfera en rotación con centro en el sol. Este movimiento no mantiene el eje terrestre paralelo a sí mismo, de tal forma que se hace necesario recurrir a un tercer movimiento cónico (b) que obligue al eje a mantenerse en la dirección adecuada.

15 (Kuhn)

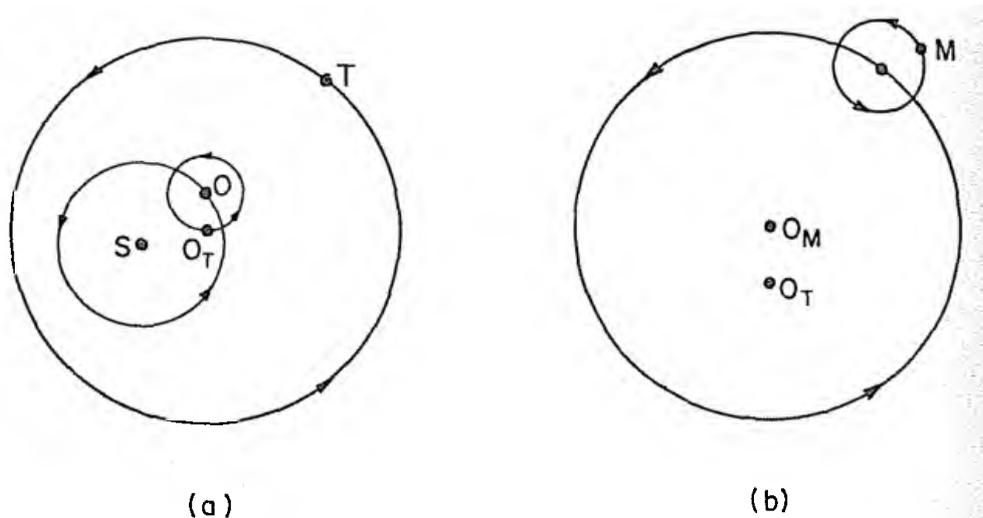


FIGURA 34. — Explicación copernicana de los movimientos de la tierra (a) y Marte (b). En el esquema (a) el sol está situado en S y la tierra, T , se mueve sobre un círculo cuyo centro, O_T , gira lentamente alrededor del punto O , que a su vez se traslada a lo largo de un círculo centrado en el sol. En el esquema (b) Marte está situado sobre un epiciclo que gira sobre un deferente cuyo centro, O_M , mantiene una relación geométrica fija con respecto al centro móvil O_T de la órbita terrestre.

16 (Kuhn)

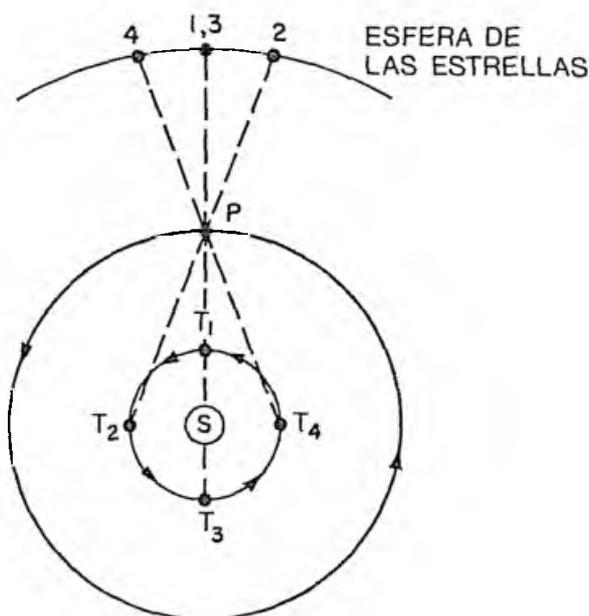
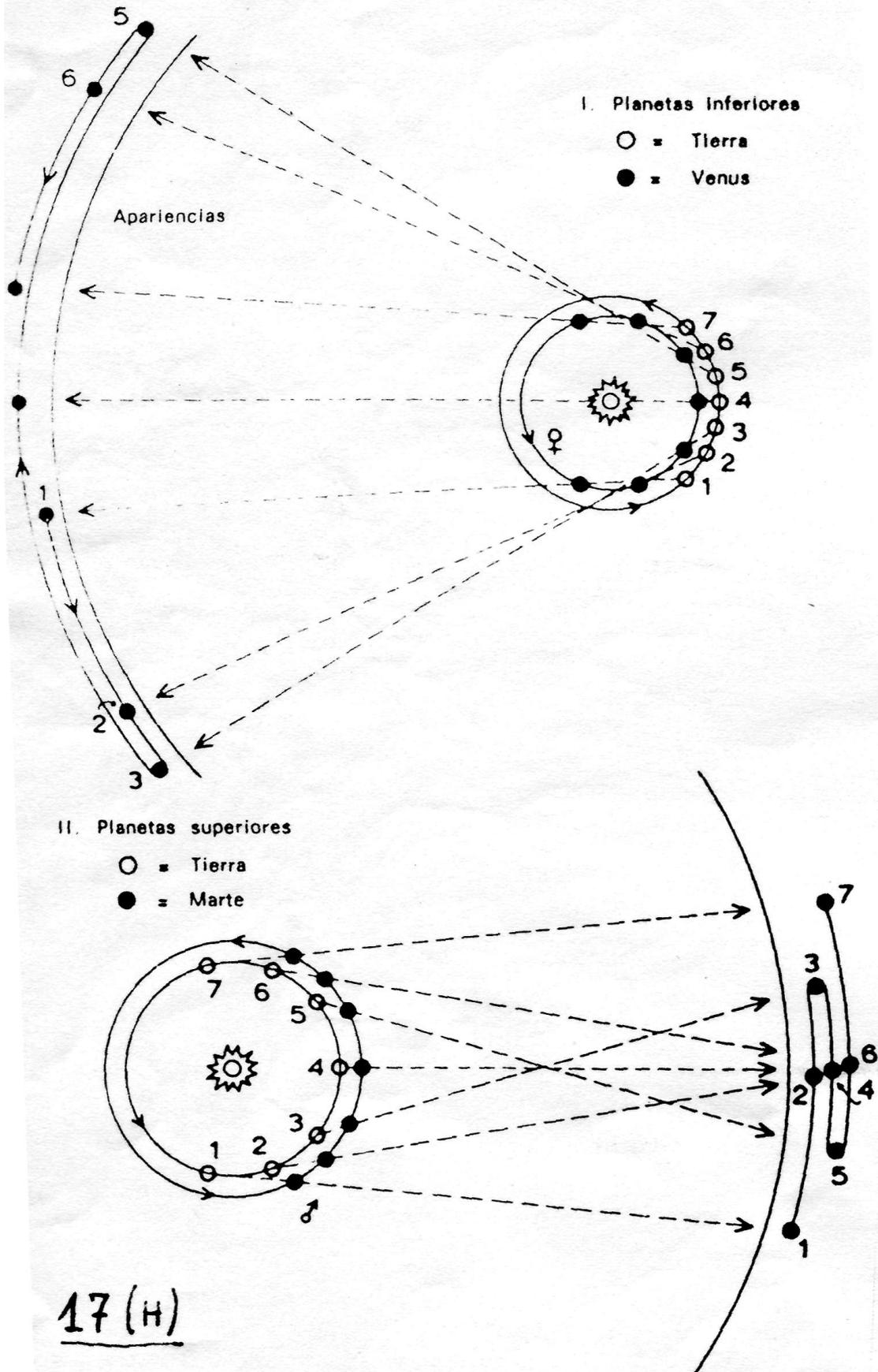


FIGURA 33. — Explicación copernicana de las variaciones del tiempo empleado por un planeta superior para completar sucesivos recorridos de la eclíptica. Mientras el planeta da una revolución completa sobre su órbita, trasladándose de P a P , la tierra da $1\frac{1}{4}$ de revoluciones, de T_1 a T_2 , después de haber pasado nuevamente por T_1 . Durante este intervalo de tiempo la posición aparente del planeta sobre la esfera estelar se desplaza en dirección este de 1 a 2, lo que equivale a algo menos de una vuelta completa. En la siguiente revolución la tierra se desplaza desde T_2 a T_3 , después de haber pasado por T_2 , mientras que la posición aparente del planeta sobre la esfera estelar pasa de 2 a 1, después de haber pasado ya una vez por 1, lo que equivale a algo más de una vuelta completa a lo largo de la eclíptica.

18 (Kuhn)

Concepción copernicana del movimiento retrógrado



17 (Hanson)

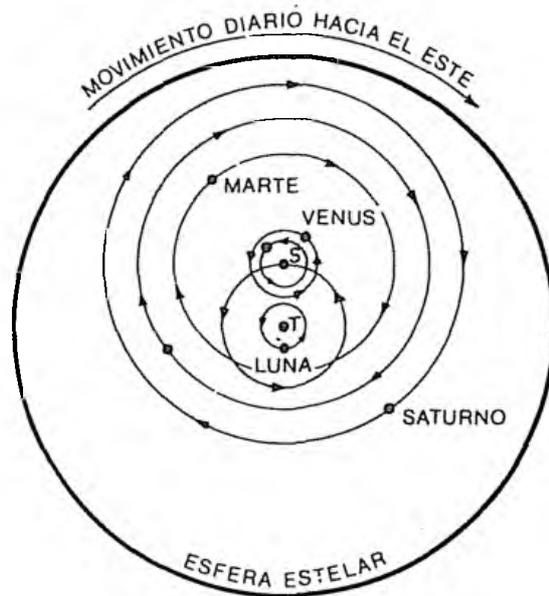


FIGURA 37. — El sistema tiónico. La tierra ocupa una vez más el centro de una esfera estelar en rotación, mientras que la luna y el sol se mueven sobre sus viejas órbitas ptolemaicas. Sin embargo, los otros planetas están situados sobre epiciclos cuyo centro común es el sol.

19 (Kuhn)

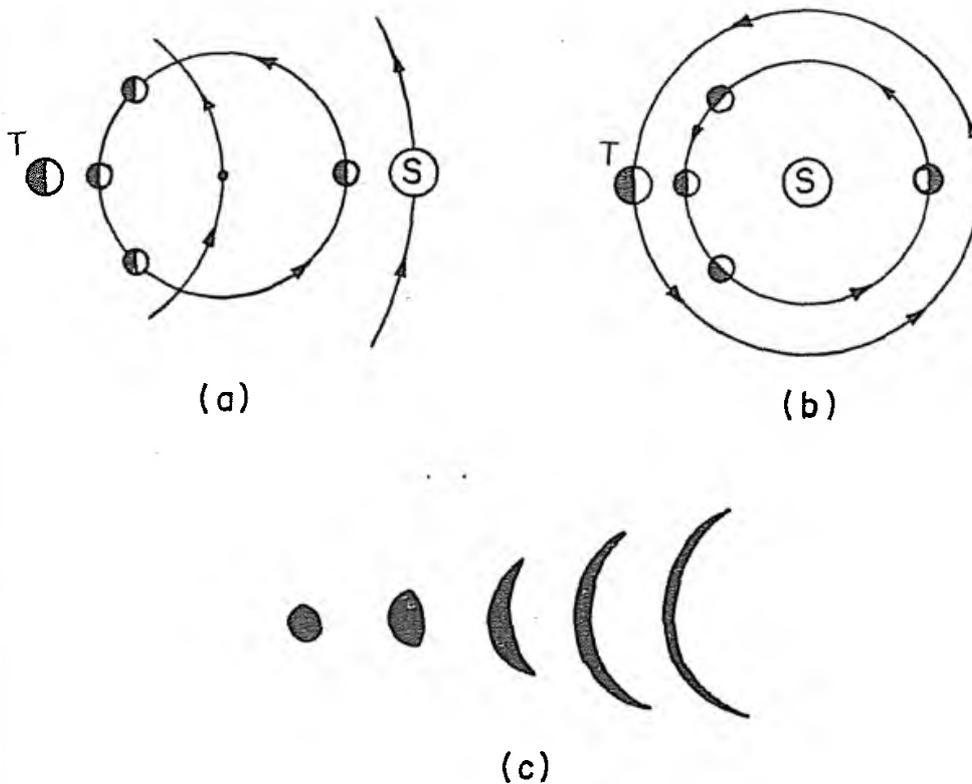


FIGURA 44. — Las fases de Venus en el sistema ptolemaico (a), en el sistema copernicano (b) y tal como son vistas con ayuda de un telescopio de escasa potencia (c). En (a) un observa-

20 (Kuhn)

Textos de Copérnico

Commentariolus

(escrito en 1514, nunca publicado en vida)

Observo que nuestros predecesores recurrieron a un elevado número de esferas celestes a fin, sobre todo, de poder explicar el movimiento aparente de los planetas respetando el principio de uniformidad. En verdad parecía completamente absurdo que un cuerpo celeste no se moviera uniformemente a lo largo de un círculo perfecto. Pero se dieron cuenta de que mediante distintas composiciones y combinaciones de movimientos uniformes podían lograr que un cuerpo pareciera moverse hacia cualquier lugar del espacio.

Calipo y Eudoxo, que trataron de resolver el problema por medio de círculos concéntricos, no fueron sin embargo capaces de dar cuenta por este procedimiento de todos los movimientos planetarios. No sólo tenían que explicar las revoluciones aparentes de los planetas, sino también el hecho de que tales cuerpos tan pronto nos parezcan ascender en los cielos como descender, fenómeno éste incompatible con el sistema de círculos concéntricos. Ese es el motivo de que pareciera mejor emplear excéntricas y epiciclos» preferencia que casi todos los sabios acabaron secundando. Las teorías planetarias propuestas por Ptolomeo y casi todos los demás astrónomos, aunque guardaban un perfecto acuerdo con los datos numéricos, parecían comportar una dificultad no menor. Efectivamente, tales teorías sólo resultaban satisfactorias al precio de tener asimismo que imaginar ciertos ecuantos, en razón de los cuales el planeta parece moverse con una velocidad siempre uniforme, pero no con respecto a su deferente ni tampoco con respecto a su propio centro. Por ese motivo, una teoría de estas características no parecía ni suficientemente elaborada ni tan siquiera suficientemente acorde con la razón.

Habiendo reparado en todos estos defectos, me preguntaba a menudo si sería posible hallar un sistema de círculos más racional, mediante el cual se pudiese dar cuenta de toda irregularidad aparente sin tener para ello que postular movimiento alguno distinto del uniforme alrededor de los centros correspondientes, tal y como el principio del movimiento perfecto exige. Tras abordar este problema tan extraordinariamente difícil y casi insoluble, por fin se me ocurrió cómo se podría resolver por recurso a construcciones mucho más sencillas y adecuadas que las

tradicionalmente utilizadas, a condición únicamente de que se me concedan algunos postulados. Estos postulados, denominados—axiomas, son los siguientes.

1. No existe un centro único de todos los círculos o esferas celestes.
2. El centro de la Tierra no es el centro del mundo; sino tan sólo el centro de gravedad y el centro de la esfera lunar.
3. Todas las esferas giran en torno al Sol, que se encuentra en medio de todas ellas, razón por la cual el centro del mundo está situado en las proximidades del Sol.
4. La razón entre la distancia del Sol a la Tierra y la distancia a la que está situada la esfera de las estrellas fijas es mucho menor que la razón entre el radio de la Tierra y la distancia que separa a nuestro planeta del Sol, hasta el punto de que esta última resulta imperceptible en comparación con la altura del firmamento.
5. Cualquier movimiento que parezca acontecer en la esfera de las estrellas fijas no se debe en realidad a ningún movimiento de ésta, sino más bien al movimiento de la Tierra. Así, pues, la Tierra —junto a los elementos circundantes— lleva a cabo diariamente una revolución completa alrededor de sus polos fijos, mientras que la esfera de las estrellas y último cielo permanece inmóvil.
6. Los movimientos de que aparentemente está dotado el Sol no se deben en realidad a él, sino al movimiento de la Tierra y de nuestra propia esfera, con la cual giramos en torno al Sol exactamente igual que los de más planetas. La Tierra tiene, pues, más de un movimiento.
7. Los movimientos aparentemente retrógrados y directos de los planetas no se deben en realidad a su propio movimiento, sino al de la Tierra. Por consiguiente, éste por sí solo basta para explicar muchas de las aparentes irregularidades que en el cielo se observan.

...

LOS MOVIMIENTOS APARENTES DEL SOL

La Tierra tiene tres movimientos. En primer lugar, gira anualmente sobre un gran círculo alrededor del Sol, siguiendo el orden de los signos y describiendo siempre arcos iguales en tiempos iguales: la distancia que media entre el centro del círculo y el centro del Sol es de una veincicincoava parte del radio de dicho círculo. Así, pues, dado que se supone que la longitud de este radio es inapreciable en comparación con la altura de las estrellas fijas, parecerá que es el Sol el que gira con este movimiento, como si la Tierra permaneciese estacionaria en el centro del mundo.

...

El segundo movimiento de la Tierra, que le es enteramente propio, es la rotación diaria sobre sus polos siguiendo el orden de los signos, es decir, hacia el Este: en virtud de dicho movimiento todo el universo parece girar con una velocidad vertiginosa. La Tierra rota, pues, junto al agua y al aire circundantes.

...

El tercer movimiento es el de declinación. En efecto, el eje de rotación no es paralelo al eje del gran círculo, sino que en nuestros días guarda una inclinación de $23\frac{1}{2}$ con respecto a éste. Por consiguiente, mientras que el centro de la Tierra yace siempre en el plano de la eclíptica (esto es, sobre la circunferencia del gran círculo), sus polos rotan, describiendo pequeños círculos alrededor de centros equidistantes del eje del gran círculo. El período de revolución es de aproximadamente un año, casi igual al del gran círculo.

(Textos extraídos del libro de Alberto Elena citado en la bibliografía)

De revolutionibus orbium coelestium

(publicado en 1543)

AL LECTOR SOBRE LAS HIPOTESIS DE ESTA OBRA

(Prefacio, debido a Osiander)

Divulgada ya la fama acerca de la novedad de las hipótesis de esta obra, que considera que la tierra se mueve y que el Sol está inmóvil en el centro del universo, no me extraña que algunos eruditos se hayan ofendido vehementemente y consideren que no se deben modificar las disciplinas liberales constituidas correctamente ya hace tiempo. Pero si quieren ponderar la cuestión con exactitud, encontrarán que el autor de esta obra no ha cometido nada por lo que merezca ser reprendido. Pues es propio del astrónomo calcular la historia de los movimientos celestes con una labor diligente y diestra. Y además concebir y configurar las causas de estos movimientos, o sus hipótesis, cuando por medio de ningún proceso racional puede averigarse las verdaderas causas de ellos. Y con tales supuestos pueden calcularse correctamente dichos

movimientos a partir de los principios de la geometría, tanto mirando hacia el futuro como hacia el pasado. Ambas cosas ha establecido el autor de modo muy notable. Y no es necesario que estas hipótesis sean verdaderas, ni siquiera que sean verosímiles, sino que basta con que muestren un cálculo coincidente con las observaciones, a no ser que alguien sea tan ignorante de la geometría o de la óptica que tenga por verosímil el epiciclo de Venus, o crea que esa es la causa por la que precede unas veces al Sol y otras le sigue en cuarenta grados o más. ¿Quién no advierte, supuesto esto, que necesariamente se sigue que el diámetro de la estrella en el perigeo es más de cuatro veces mayor, y su cuerpo más de dieciséis veces mayor de lo que aparece en el apogeo, a lo que, sin embargo, se opone la experiencia de cualquier época? También en esta disciplina hay cosas no menos absurdas o que en este momento no es necesario examinar. Está suficientemente claro que este arte no conoce completa y absolutamente las causas de los movimientos aparentes desiguales. Y si al suponer algunas, y ciertamente piensa muchísimas, en modo alguno suponga que puede persuadir a alguien [en que son verdad], sino tan sólo establecer correctamente el cálculo. Pero ofreciéndose varias hipótesis sobre uno sólo y el mismo movimiento (como la excentricidad y el epiciclo en el caso del movimiento del Sol) el astrónomo tomará aquélla mucho más fácil de comprender. Quizás el filósofo busque más la verosimilitud: pero ninguno de los dos comprenderá o transmitirá nada cierto, a no ser que le haya sido revelado por la divinidad. Por lo tanto, permitamos que también estas nuevas hipótesis se den a conocer entre las antiguas, no como más verosímiles, sino porque son al mismo tiempo admirables y fáciles y porque aportan un gran tesoro de sapientísimas observaciones. Y no espere nadie, en lo que respecta a las hipótesis, algo cierto de la astronomía, pues no puede proporcionararlo; para que no salga de esta disciplina más estúpido de lo que entró, si toma como verdad lo imaginado para otro uso. Adiós.

Prefacio de Copérnico (dedicando la obra al Papa Pablo III)

...

Y quizá, tu Santidad no admirará tanto el que me haya atrevido a sacar a la luz. estas lucubraciones, después de tomarme tanto trabajo en elaborarlas, como el que no haya dudado en poner por escrito mis pensamientos sobre el movimiento de la tierra. Pero lo que más esperará oír de mí es, qué me pudo haber venido a la mente para que, contra la opinión recibida de los matemáticos e incluso contra el sentido común, me haya atrevido a imaginar algún movimiento de la tierra. Y así, no quiero ocultar a tu Santidad; que ninguna otra cosa me ha movido a meditar sobre el establecimiento de otra relación [estructura] para deducir los movimientos de las esferas del mundo, sino el hecho de comprender que los matemáticos no están de acuerdo con las

investigaciones. Primero, porque estaban tan inseguros sobre el movimiento del Sol y de la Luna, que no podían demostrar ni observar la magnitud constante de la revolución anual. Después, por que al establecer los movimientos, no sólo de aquéllos, sino también de las otras cinco estrellas errantes, no utilizan los mismos principios y su puestos, ni las mismas demostraciones en las revoluciones y movimientos aparentes. Pues unos utilizan sólo círculos homocéntricos, otros, excéntricos y epiciclos, con los que no consiguen plenamente lo buscado. Pues los que confían en los homocéntricos, aunque hayan demostrado algunos pocos movimientos de los que pueden componerse, no pudieron deducir de ello nada tan seguro que respondiera, sin duda, á los fenómenos. Mas los que pensaron en los excéntricos, aunque en gran parte parecían haber resuelto los movimientos aparentes por medio de cálculos congruentes con ellos, sin embargo admitieron entre tanto muchas cosas que parecen contravenir los primeros principios acerca de la regularidad del movimiento. Tampoco pudieron hallar o calcular partiendo de ellos lo más importante, esto es, la forma del mundo y la simetría exacta de sus partes, sino que les sucedió como si alguien tomase de diversos lugares manos, pies, cabeza y otros miembros auténticamente óptimos, pero no representativos en relación a un solo cuerpo, no correspondiéndose entre sí, de modo que con ellos se compondría más un monstruo que un hombre. Y así, en el proceso de demostración que llaman [método] olvidaron algo de lo necesario, o admitieron algo ajeno, o que no pertenece en modo alguno al tema. Y esto no les hubiese sucedido en modo alguno, si hubieran seguido principios seguros. Pues si las hipótesis supuestas por ellos no fueron falsas, todo lo que de ellas se deduciese podría verificarse sin lugar a dudas. Y aunque lo que ahora digo es oscuro, en su lugar se hará claro.

En consecuencia, reflexionando largo tiempo conmigo mismo sobre esta incertidumbre de las matemáticas transmitidas para calcular los movimientos de las esferas del mundo, comencé a enojarme que a los filósofos, que en otras cuestiones han estudiado tan cuidadosamente las cosas más minuciosas de ese orbe, no les constara ningún cálculo seguro sobre los movimientos de la máquina del mundo, construida para nosotros por el mejor y más regular artífice de todos. Por lo cual, me esforcé en releer los libros de todos los filósofos que pudiera tener, para indagar si alguno había opinado que los movimientos de las esferas eran distintos á los que suponen quienes enseñan matemáticas en las escuelas. Y encontré en Cicerón que Niceto fue el primero en opinar que la tierra se movía. Después, también en Plutarco encontré que había algunos otros de esa opinión, cuyas palabras, para que todos las tengan claras, me pareció bien transcribir:

[Algunos piensan que la tierra permanece quieta, en cambio Filolao el Pitagórico dice que se mueve en un círculo oblicuo alrededor del fuego, de la misma manera que el Sol y la Luna. Heráclides el del Ponto y Ecfanto el Pitagórico piensan que la tierra se mueve pero no con traslación, sino como una rueda, alrededor de su propio centro, desde el ocaso al orto].

Y yo, supuestos así los movimientos que más abajo en la obra atribuyo a la tierra, encontré con una larga y abundante observación que, si se relacionan los movimientos de los demás astros errantes con el movimiento circular de la tierra, y si los movimientos se calculan con respecto a la revolución de cada astro, no sólo de ahí se siguen los movimientos aparentes de aquéllos, sino que también se conectan el orden y magnitud de los astros y de todas las órbitas, e incluso el cielo mismo; de tal modo que en ninguna parte puede cambiarse nada, sin la perturbación de las otras partes y de todo el universo. De ahí también, que haya seguido en el transcurso de la obra este orden: en el primer libro describiré todas las posiciones de las órbitas con los movimientos que le atribuyo a la tierra, de modo que ese libro contenga la constitución general del universo. Después, en los restantes libros, relaciono los movimientos de los demás astros y de todas las órbitas con la movilidad de la tierra, para que de ahí pueda deducirse en qué medida los movimientos y apariencias de los demás astros y órbitas pueden salvarse, si se relacionan con el movimiento de la tierra.

...

Si por casualidad hay [charlatanes] que, aun siendo ignorantes de todas las matemáticas, presumiendo de un juicio sobre ellas por algún pasaje de las Escrituras, malignamente distorsionado de su sentido, se atrevieran a rechazar y atacar esta estructuración mía, no hago en absoluto caso de ellos, hasta el punto de que condenaré su juicio como temerario. Pues no es desconocido que Lacrando, por otra parte célebre escritor, aun que matemático mediocre, habló puerilmente de la forma de la tierra, al reírse de los que transmitieron que la tierra tiene forma de globo. Y así, no debe parecernos sorprendente á los estudiosos, si ahora otros de esa clase se ríen de nosotros. Las Matemáticas se escriben para los matemáticos, a los que estos trabajos nuestros, si mi opinión no me engaña, les parecerán que aportan algo a la república eclesiástica, cuyo principado tiene ahora tu Santidad.

(Textos extraídos de la traducción castellana del *Revolutionibus*, de Carlos Mínguez, véase la bibliografía.)

Galileo

1. Crítica de Aristóteles

- teoría de los elementos
- lugares naturales
- causalidad final

2. La naturaleza es matemática

- atomismo: cualidades primarias y secundarias
- cualidades primarias y platonismo (diferencias)
- movimiento como “estado” y no como “naturaleza: espacio y tiempo
- objeto de la ciencia: descripción de regularidades
- agnosticismo frente a las fuerzas últimas

3. El movimiento

- primera fase
 - *virtus impressa*
 - velocidad proporcional a la distancia recorrida
- segunda fase
 - diferencia entre dinámica y cinemática (fuerzas y movimientos)
 - el ímpetu (momento) como inercia (medida del movimiento)
 - *movimiento uniforme*: distancias iguales en tiempos iguales
 - *movimiento uniformemente acelerado*
 - partiendo del reposo, iguales incrementos de velocidad en iguales intervalos de tiempo
 - velocidad instantánea: proporcional al tiempo
 - distancia: proporcional al cuadrado del tiempo
 - geometrización: véase figura más abajo
 - teorema básico y experimento: id. id.: $e/e_1 = t^2/t_1^2$

4. Nueva mecánica

- noción de sistema inercial (relatividad mecánica)
- el movimiento inercial se conserva (estado y no proceso-devenir)
- no llega al principio de inercia (si Descartes)
- composición de movimientos rectilíneos y circulares (proyectiles)
- el mundo como mecanismo, pero sin distinguir aun (como luego Newton) entre *peso* (fuerza de la gravedad) y *masa* (resistencia intrínseca al movimiento)

5. Método

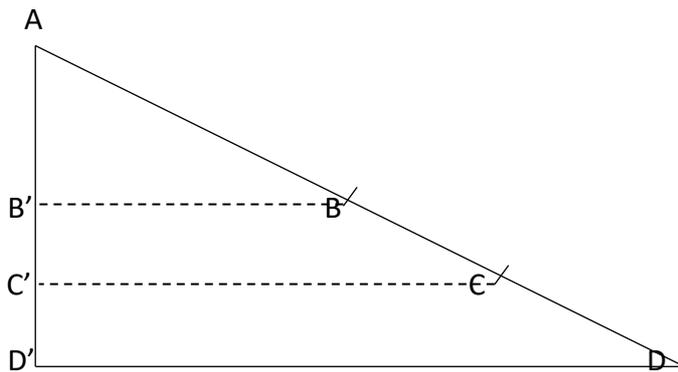
- relaciones entre el par *resolutio-compositio* y el método hipotético-deductivo
 - observación → regularidades -----→ *resolutio*
 - interpretación → hipótesis
 - elección de hipótesis → consecuencias verificables -----→ *compositio*
 - comprobación → observación y medición -----→ *resolutio*
 - obtención de leyes y teorías

6. Razón y sentidos

- remanente platónico
- valor de la experimentación
- ¿hay experimentos cruciales?

Experimento del plano inclinado

Pretende probar que, por un plano inclinado, la razón de los espacios recorridos por un móvil es igual a la razón de los cuadrados de los tiempos transcurridos. Para ello, mide el tiempo que tarda el móvil en recorrer e (AD) y después e_1 (CD), que es la cuarta parte del espacio, el cual resulta ser *la mitad* del tiempo anterior: $t_1 = \frac{1}{2} t$.



$$BC = AB$$

$$CD = \frac{1}{2} AB$$

$$\text{Teorema: } e/e_1 = t^2/t_1^2 ; AD/CD = AD'/C'D'$$

Ejemplo: $e = 8$ m., $t = 3$ s., $t^2 = 9$ s., $e_1 = 2$ m. Entonces, ¿Cuánto mediría t_1 ?

$$8/2 = 9/x^2, \text{ es decir, } t_1^2 = 18/8 = 2'25; \text{ por tanto: } t_1 = \sqrt{2'25} = 1'5, \text{ que es } la \text{ mitad de } t$$

Con este ejemplo solo se ve “lo que tiene a que salir” según la fórmula.

El experimento *lo confirmó*.

Nota: los tiempos se “midieron” a través de una gota de agua, que caía regularmente sobre un recipiente en una balanza, por tanto se hablaba de pesos más que de tiempos, dada la proporcionalidad entre ellos. Véase más abajo la descripción del propio Galileo, en el texto correspondiente.

Textos de Galileo

Dialogos sobre los dos sistemas máximos del mundo (1632)

CRÍTICA DE LOS ARGUMENTOS DE ARISTÓTELES

SALVIATI.- Si bien recuerdo, el primer argumento del Sr. Simplicio, fue éste: la Tierra no se puede mover circularmente, puesto que tal movimiento sería violento, y por tanto, no eterno; de que fuera violento, la razón sería que, si fuese natural, sus partes también se moverían naturalmente en círculo, lo cual es imposible, porque lo natural de las partes es el moverse con movimiento rectilíneo hacia abajo. A lo cual respondo que hubiera preferido que Aristóteles se hubiera explicado mejor, por ejemplo cuando dice: “Las partes también se moverían circularmente”; pues este moverse circularmente se puede entender de dos modos: uno, que toda partícula separada de su todo se mueve circularmente en torno de su propio centro, describiendo sus pequeñas órbitas; otro, que moviéndose todo el globo en torno de su centro en veinticuatro horas, las partes también giran en torno del mismo centro en veinticuatro horas. El primer sentido sería una impertinencia, no menor que quien dijese que en un círculo cada parte ha de ser necesariamente un círculo, o que porque la Tierra es esférica cada parte de la Tierra habría de ser como una bola, porque así lo requiere el axioma “*eadem est ratio totius et partium*” [“Idéntico es el comportamiento del todo y el de las partes”] Pero si él entiende el otro sentido, esto es: que las partes, a imitación del todo, se mueven naturalmente en torno del centro de todo el globo en veinticuatro horas, yo digo que así lo hacen, y a vos, en el lugar de Aristóteles, os tocará probar que no es así.

SIMPLICIO.- Esto lo prueba Aristóteles, en el mismo texto, cuando dice que lo natural de las partes es el movimiento recto hacia el centro del universo, por lo que el circular no le puede convenir naturalmente.

SALVIATI.- Pero ¿no veis vos que en las mismas palabras está implícita, incluso, la refutación de esa respuesta?

SIMPLICIO.- ¿De qué modo y dónde?

SALVIATI.- ¿No dice Aristóteles que el movimiento circular en la Tierra sería violento y por tanto no eterno?; y también, ¿no dice que esto es absurdo, porque el orden del mundo es eterno?

SIMPLICIO.- Así lo dice.

SALVIATI.- Pues si lo que es violento no puede ser eterno, a la inversa, lo que no puede ser eterno no podrá ser natural; pero el movimiento de la Tierra hacia abajo no puede ser eterno; por tanto, menos podrá ser natural, ni le podrá ser natural movimiento alguno que no le sea también eterno. Pero, si hacemos a la Tierra móvil con movimiento circular, éste podrá ser eterno para ella y para las partes y, además, natural.

SIMPLICIO.- El movimiento rectilíneo es el más natural de las partes de la Tierra y es eterno, y nunca sucederá que no se muevan con este movimiento, entendiéndose siempre, claro está, que estas partes no encuentran impedimentos.

SALVIATI.- Os equivocáis, Sr. Simplicio, y quiero liberaros del equívoco. Decidme, ¿creéis vos que una nave, que desde el estrecho de Gibraltar se dirigiese hacia Palestina, podría navegar eternamente hacia aquella playa, moviéndose siempre con igual curso?

SIMPLICIO.- Ciertamente que no.

SALVIATI.- Y ¿por qué?

SIMPLICIO.- Porque esa navegación está limitada por las columnas de Hércules y por el Lido de Palestina, y siendo la distancia limitada, habrá de pasarse en un tiempo finito; a no ser que se diese la vuelta y volviese por el mismo camino en sentido contrario para realizar el mismo viaje, pero éste sería un movimiento interrumpido y no continuado.

SALVIATI.- Muy cierta la respuesta. Y la navegación desde el estrecho de Magallanes por el mar Pacífico, por las Molucas, por el Cabo de Buena Esperanza y desde allí por el mismo estrecho y de nuevo por el mar Pacífico, etc., ¿creéis vos que se podría perpetuar?

SIMPLICIO.- Se podría, porque siendo ésta una circulación que vuelve sobre sí misma, realizándola infinitas veces se podría perpetuar sin ninguna interrupción.

SALVIATI.- Por tanto una nave que realizara este viaje podría continuar viajando eternamente.

SIMPLICIO.- Podría, si la nave fuese incorruptible, pues si se corrompe la nave, se termina por necesidad la navegación.

SALVIATI.- Pero en el Mediterráneo, aunque la nave fuese incorruptible, no podría navegar perpetuamente hacia Palestina, ya que es un viaje finito. Dos cosas, por tanto, se requieren para que un móvil pueda moverse sin interrupción eternamente: la una es que el movimiento pueda ser por su naturaleza interminable e infinito, y la otra, que el móvil sea incorruptible y eterno.

SIMPLICIO.- Todo eso es necesario.

SALVIATI.- Por tanto, vos mismo estáis confesando que es imposible que móvil alguno se mueva eternamente con movimiento recto, dado que este movimiento, bien sea hacia arriba, o hacia abajo, vos mismo lo limitáis con la circunferencia y con el centro; por tanto, aunque el móvil, es decir, la Tierra, sea eterna, sin embargo, al no ser el movimiento recto por su naturaleza eterno, sino muy finito, no puede naturalmente convenir a la Tierra; más bien, como ayer mismo se dijo, Aristóteles se ve obligado a hacer eternamente estable al globo terrestre. Luego cuando vos decís que las partes de la Tierra siempre se moverán hacia abajo, supuesto que no se encuentren impedimentos, os equivocáis grandemente, porque sucede más bien lo contrario, es decir, que es necesario impedirlos, forzarlos y violentarlos, si queréis que se muevan; porque, si ya han caído una vez, necesario será levantarlos de nuevo para que vuelvan a caer una segunda, pues los impedimentos afectan solamente, en cuanto que evitan llegar al centro; pues aunque hubiese, por ejemplo, un pozo que perforase el centro y fuese más allá de él, ni un solo grano de tierra iría a ese más allá, sino en cuanto llevado por el ímpetu, lo traspasase y rebasase para volver luego y finalmente detenerse. En cuanto se refiere, pues, a mantener que el movimiento por la línea recta conviene o puede convenir naturalmente a la Tierra, o a otro móvil, mientras que el universo permanezca en su orden perfecto, olvidadlo del todo, y si no queréis conceder el movimiento circular, esforzaos en mantener su inmovilidad.

SIMPLICIO.- En cuanto a la inmovilidad, los argumentos de Aristóteles y, además, los otros presentados por vos me parece que la concluyen necesariamente hasta ahora, y grandes razones se necesitarán, en mi opinión, para refutarlas.

SALVIATI.- Vayamos, pues, al segundo argumento, que decía que aquellos cuerpos de los que estamos seguros que se mueven circularmente tienen más de un movimiento, exceptuando el primer móvil; así, si la Tierra se moviese circularmente, debería moverse con dos movimientos, de lo cual se seguiría una mutación en las salidas y los ocasos de las estrellas fijas; lo cual no parece que suceda, luego, etc. La respuesta más simple y la más apropiada a esta dificultad estriba en el argumento mismo, y

Aristóteles, por su parte, la expresa con palabras suyas y no puede ser que vos, Sr. Simplicio, no la hayáis visto.

SIMPLICIO.- Ni la he visto, ni tampoco la veo ahora.

SAL VIA TI.- No puede ser porque es demasiado clara.

SIMPLICIO.- Quisiera con vuestro permiso echar una ojeada al texto.

SAGREDO.- Lo haremos traer inmediatamente.

SIMPLICIO.- No es necesario; yo lo llevo siempre en el bolsillo. Hélo aquí y sé precisamente el lugar donde está el texto; en el segundo *Del Cielo*, capítulo 14. Aquí está, texto 97: *“Praeterea omnia quae feruntur latione circulari, subdeficere videntur, ac moveri pluribus una latione, praeter primam sphaeram; quare et Terram necessarium est, sive circa medium sive in medio posita feratur, duabus moveri lationibus: si autem hoc acciderit, necessarium est fieri mutationes ac conversiones fixorum astrorum: hoc autem non videtur fieri; sed semper eadem apud eadem loca ipsius et oriuntur et occidunt”*. Yo no veo aquí ninguna falacia y me parece que el argumento es muy concluyente.

SALVIATI.- Y a mí esta nueva lectura me ha confirmado la falacia del argumento, y además, me ha descubierto otra falsedad. Observad: dos posiciones, o mejor dicho, dos conclusiones, son las que Aristóteles quiere impugnar: la una, contra aquellos que, colocando a la Tierra en el medio, la hacen mover en sí misma sobre su propio centro; la otra, contra aquellos que, colocándola lejos del medio, la hacen mover con movimiento circular en torno de ese medio; y ambas posiciones son atacadas conjuntamente con el mismo argumento. Ahora bien: yo digo que yerra en una y en otra impugnación y que el error contra la primera posición es un equívoco o paralogismo, y contra la segunda, es una consecuencia falsa.

Vayamos a la primera posición, que coloca a la Tierra en el medio y la hace móvil en sí misma sobre su propio centro, y afrontémosla con la objeción de Aristóteles, diciendo: Todos los móviles que se mueven circularmente parece que se retrasan y, por tanto, que se mueven con más de un movimiento, exceptuando la primera esfera, es decir, el primer móvil; por tanto, la Tierra, moviéndose sobre su propio centro y estando colocada en el medio, tendrá que moverse con dos movimientos, y por tanto, retrasarse según lo dicho; pero, si esto fuese así, sería necesario que las salidas y los ocultos de las estrellas fijas se alterasen; lo cual no se ve que suceda, por tanto la Tierra no se mueve, etc. Aquí está el paralogismo: para descubrirlo, razono con Aristóteles del siguiente modo: Tú dices, oh Aristóteles, que la Tierra colocada en el medio no puede moverse sobre sí misma, porque sería necesario atribuirle dos movimientos;

pero, si no fuera necesario atribuirle más que uno solo, tú notendrías como algo imposible que se moviera con ese movimiento único, porque, muy fuera de lugar, te verías obligado a reforzar la imposibilidad en la pluralidad de los movimientos, si no se pudiese mover ni con uno solo. Pero, puesto que de todos los móviles del mundo, tú haces que uno solo se mueva con un solo movimiento y todos los demás con más de uno, y ese único móvil de movimiento único afirmas que es la primera esfera, es decir, aquella por la que todas las estrellas fijas y errantes aparecen moviéndose concordemente de levante a poniente, sin embargo, si la Tierra pudiese ser esa primera esfera, y al moverse con un solo movimiento hiciera aparecer a las estrellas moviéndose de levante a poniente, tú no se lo negarías: mas, quien dice que la Tierra colocada en el medio gira sobre sí misma, no le atribuye otro movimiento que aquel por el cual todas las estrellas aparecen moviéndose de levante a poniente, y así, ésta sería aquella primera esfera que tú mismo concedes que se mueve con un solo movimiento; así, si quieres concluir alguna cosa, oh Aristóteles, habrás de demostrar, que la Tierra colocada en el medio no puede moverse ni siquiera con un solo movimiento, o bien, que ni siquiera la primera esfera puede tener tal movimiento único, pues, de lo contrario, tú en el mismo silogismo cometerías una falacia y la manifestarías negando y al mismo tiempo afirmando la misma cosa.

Voy ahora a la segunda posición, que ataca a los que colocando a la Tierra alejada del medio la hacen móvil en torno de él, esto es, la hacen un planeta y una estrella errante: contra esta posición procede el argumento, y en cuanto a la forma es concluyente, pero peca en cuanto a la materia; pues, concediendo que la Tierra se mueva de esa manera, y que se mueva con dos movimientos, sin embargo, no se sigue de necesidad, que si esto es así, se tengan que dar mutaciones en las salidas y en los ocasos de las estrellas fijas, como en su lugar declararé. Y aquí quiero excusar el error de Aristóteles e incluso quiero alabarlo, por haber proporcionado el más sutil argumento contra la posición de Copérnico; y si la objeción es buena y en apariencia concluyente, veréis que la solución no es menos buena e ingeniosa y que no podía ser hallada por otro ingenio que el de Copérnico; y de la dificultad en entenderla podréis deducir la dificultad tanto mayor de encontrarla. Dejemos por ahora la respuesta pendiente, la cual en su momento entenderéis, cuando se responda a la objeción, que, además, saldrá muy fortificada en su favor.

Ahora pasemos al tercer argumento, también de Aristóteles, y sobre el que no es necesario responder nada, estando ya bastante criticado entre ayer y hoy; él dice que el movimiento de los graves es natural por la línea recta hacia el centro, e indaga después si se trata del centro de la Tierra o más bien del centro del universo, para concluir que natural es el movimiento hacia el centro del universo, y accidental hacia el centro de la Tierra. Así, pues, podemos pasar al cuarto argumento, en el que convendrá que nos detengamos bastante, por estar basado en esa experiencia de la que sacan tanta fuerza la mayor parte de los argumentos que quedan. Dice, pues,

Aristóteles, que es prueba ciertísima de la inmovilidad de la Tierra, el ver cómo los proyectiles lanzados hacia arriba vuelven a caer perpendicularmente por la misma línea e inciden en el mismo lugar desde el que fueron lanzados, aunque el lanzamiento sea cuan alto se quiera; lo cual no podría suceder si la Tierra se moviese, porque durante el tiempo en que el proyectil se mueve hacia arriba y hacia abajo, separado de la Tierra, el lugar donde tuvo principio el movimiento del proyectil se desplazaría, gracias al movimiento de rotación de la Tierra, hacia levante, y por tanto el proyectil habría de incidir en tierra otro tanto espacio alejado del lugar del lanzamiento, cuanto ha sido el desplazamiento de la Tierra; también se acomoda esta prueba al argumento de la bala tirada por la pieza de artillería, que siempre caerá por la misma línea recta por la que subió perpendicular a la superficie de la Tierra. Ahora para comenzar a deshacer este nudo, pregunto al Sr. Simplicio que si alguien quisiese negar a Ptolomeo y a Aristóteles que los graves caen por la línea recta tal como ellos dicen, con qué medio lo haría.

SIMPLICIO.- Por medio de los sentidos, los cuales nos aseguran que esa torre está derecha y perpendicular y nos muestran cómo esa piedra cae rozando las paredes, sin apartarse ni un cabello, y cómo cae al pie justo del lugar desde el que se dejó caer.

SALVIATI.- Pero si por fortuna el globo terrestre girase y, en consecuencia, transportase consigo a la torre y, a pesar de ello, se viese a la piedra caer rozando las paredes de la torre ¿cuál sería su movimiento?

SIMPLICIO.- En este caso, habría que decir “sus movimientos”, puesto que uno sería el que la hace caer desde lo alto hasta el pie y otro sería aquel con que siguiese el movimiento de la torre.

SALVIATI.- Sería, pues, su movimiento un compuesto de dos, esto es, aquel con que mide la torre y aquel con que la sigue; de ese compuesto resultaría que la piedra describiría no una línea simple recta y perpendicular, sino una transversal y tal vez no recta.

SIMPLICIO.- Sobre la no recta, no sé; pero entiendo bien que habría de ser transversal y diferente de la otra perpendicular y recta que describiría estando la Tierra en reposo.

SALVIATI.- Por tanto, de la simple visión de una piedra que cae y roza a la torre, vos no podéis afirmar que ésta describe una línea recta y perpendicular, si no se supone previamente que la Tierra es inmóvil.

SIMPLICIO.- Así es; pues, si la Tierra se moviese, el movimiento de la piedra sería transversal y no perpendicular.

SALVIATI.- Pues ése es el paralogismo de Aristóteles y de Ptolomeo, evidente y claro y descubierto por vos mismo, donde se da como conocido aquello que se pretende conocer.

SIMPLICIO.- ¿De qué modo? A mí me parece un silogismo de buena forma y no una petición de principio.

SALVIATI.- He aquí de qué modo. Decidme, ¿en la demostración, no se incluye la conclusión desconocida?

SIMPLICIO.- Desconocida, porque de lo contrario sería superfluo el demostrarla.

SAL VIA TI.- ¿Pero el término medio no conviene que sea claro?

SIMPLICIO.- Es necesario, porque de lo contrario sería querer probar *ignotum per aequae ignotum*.

SAL VIA TI.- La conclusión nuestra que ha de probarse y que es desconocida ¿no es la estabilidad de la Tierra?

SIMPLICIO.- Esa es precisamente.

SALVIATI.- El término medio que debe ser claro ¿no es la caída de la piedra por la línea recta y perpendicular?

SIMPLICIO.- Ese es el término medio.

SALVIATI.- Y, ¿no se ha concluido hace poco, que nosotros no podemos tener noticia de que tal caída sea recta y perpendicular, si primeramente no se pone en claro que la Tierra está firme?; por tanto, en vuestro silogismo, la certeza del término medio se obtiene de la incertidumbre de la conclusión. Ved, pues, si no se trata de un claro paralogismo.

SAGREDO.- Yo quisiera, con permiso del Sr. Simplicio, defender, si fuera posible, a Aristóteles, o al menos convencerme más de la fuerza de vuestra ilación. Vos decís: El ver que la piedra roza al caer las paredes de la torre no es suficiente para asegurarse de que su movimiento es perpendicular, que es el término medio de nuestro silogismo, si no se supone que la Tierra está inmóvil, que es la conclusión que se ha de probar; porque, si la torre se moviese al mismo tiempo que la Tierra, y la piedra siguiera rozando a la torre al caer, el movimiento de la piedra sería transversal, y no perpendicular. Pero yo respondería que, si la torre se moviese, sería imposible que la piedra cayese rozando las paredes de la torre, pero, puesto que vemos que la roza al caer, se infiere la estabilidad de la Tierra.

SIMPLICIO.- Así es; porque, para que la piedra cayera rozando la torre, aunque ésta fuera transportada por la Tierra, sería necesario que la piedra tuviera dos movimientos naturales, es decir, el recto hacia el centro y el circular en tomo del centro, lo cual es imposible.

SALVIATI.- La defensa que hacéis, pues, de Aristóteles, consiste en decir que es imposible, o que él consideró imposible, que la piedra pudiera moverse con un movimiento mixto del recto y del circular; pues, si él no hubiera considerado imposible que la piedra pudiera moverse hacia el centro y en tomo del centro al mismo tiempo, hubiera comprendido que podía suceder que la piedra cayera rozando a la torre, tanto si ésta se movía como si estaba fija y, en consecuencia, se hubiera acordado de que del simple rozar no se podía inferir nada respecto al movimiento o al reposo de la Tierra. Pero esto no excusa de ningún modo a Aristóteles, no solamente porque debería haberlo dicho, si hubiera tenido este conocimiento, siendo como es un punto tan principal en su argumento, sino porque no se puede decir que tal efecto es imposible, ni que Aristóteles lo considerara imposible. No se puede decir lo primero, porque dentro de poco mostrare que es no sólo posible, sino necesario; y tampoco se puede decir lo segundo, porque Aristóteles mismo concede al fuego el movimiento natural por la línea recta y al mismo tiempo el circular que le viene comunicado por el cielo en el movimiento diurno, tanto a él como al elemento aire; por tanto, si él no considera imposible mezclar el movimiento recto hacia arriba y el circular comunicado al fuego y al aire por el concavo lunar, bastante menos deberá considerar imposible el movimiento recto hacia abajo de la piedra y el circular, si éste fuese el natural del globo terrestre, del que la piedra es parte.

(Textos extraídos de la traducción castellana de José Manuel Revuelta de la Jornada Segunda del *Diálogo sobre los sistemas máximos*, pp. 68-80, ver bibliografía)

Consideraciones y demostraciones matemáticas

sobre dos nuevas ciencias (1638)

SOBRE EL MOVIMIENTO NATURALMENTE ACELERADO

SALVIATI: Hemos tratado en el apartado precedente de las propiedades del movimiento uniforme. Debemos, ahora, tratar del movimiento acelerado.

Ante todo, es necesario investigar y explicar la definición que corresponde con exactitud al movimiento acelerado que nos brinda la naturaleza. En efecto, aunque sea lícito imaginar arbitrariamente ciertas formas de movimiento e investigar las propiedades que de ellas se derivan (así, aquellos que se imaginaron líneas espirales o cóncavas originadas por determinados movimientos, han conseguido demostrar, de hecho, cosa que es digna de admirarse, sus propiedades, argumentando *ex suppositione*, a pesar de que la naturaleza no haga uso de tales movimientos), no obstante, y desde el momento que la naturaleza se sirve de una determinada forma de aceleración, en los cuerpos pesados en caída libre, hemos decidido estudiar sus propiedades, haciendo que la definición que hemos de dar acerca del movimiento acelerado en cuestión corresponda a la esencia del movimiento naturalmente acelerado. Esta correspondencia creemos haberla logrado al fin, después de largas reflexiones, especialmente si tenemos en cuenta que las propiedades que hemos ido demostrando sucesivamente [a partir de nuestra definición] parece que corresponden y coinciden exactamente con lo que los experimentos naturales nos ponen delante de nuestros sentidos. En suma, al estudio del movimiento naturalmente acelerado nos ha llevado, como agarrados de la mano, la observación de las costumbres y reglas que sigue la misma naturaleza en todas sus obras restantes, para cuya ejecución suele hacer uso de los medios más inmediatos, más simples y fáciles. No puedo por menos de estar seguro de que no hay nadie que crea que se pueda nadar o volar de una manera más simple y más fácil que la que usan, por instinto natural los peces y los pájaros.

Cuando observo, por tanto, una piedra que cae desde cierta altura, partiendo de una situación de reposo, que va adquiriendo poco a poco, cada vez más velocidad, ¿por qué no he de creer que tales aumentos de velocidad no tengan lugar según la más simple y evidente proporción? Ahora bien, si observamos con cierta atención el problema, no encontraremos ningún aumento o adición más simple que aquel que va aumentando siempre de la misma manera. Esto lo entenderemos fácilmente si

consideramos la relación tan estrecha (que se da entre tiempo y movimiento: del mismo modo que la igualdad y uniformidad del movimiento se define y se concibe sobre la base de la igualdad de los tiempos y de los espacios (en efecto, llamamos movimiento uniforme al movimiento que en tiempos iguales recorre espacios iguales), así también, mediante una subdivisión uniforme del tiempo podemos imaginarnos que los aumentos de velocidad tengan lugar con [la misma] simplicidad. [Podremos hacer esto] en cuanto determinemos teóricamente que un movimiento es uniformemente y, del mismo modo, continuamente acelerado, cuando, en tiempos iguales, se los tome de la forma que quiera, adquiera incrementos iguales de velocidad. De este modo, si consideramos un número cualquiera de fracciones de tiempo iguales, a partir del primer instante en el que el cuerpo en movimiento abandona la situación de reposo y comienza a descender, el grado de velocidad adquirido en la primera y segunda fracción de tiempo tomadas conjuntamente, es doble del grado de velocidad adquirido por el móvil en la primera fracción; mientras que el grado que se obtiene en tres fracciones de tiempo es el triple y el adquirido en cuatro, cuádruple del grado alcanzado en el primer tiempo, de modo que (para que quede más claro) si el móvil continuara su movimiento según el grado de intensidad [*momento*] de velocidad adquirido en la primera fracción de tiempo y prosiguiera uniformemente con tal grado, este movimiento sería dos veces más lento que el que obtendría [el móvil] con el grado de velocidad adquirido en dos fracciones de tiempo. Por eso, creo que no nos apartamos en absoluto de la recta razón si admitimos que la intensidad de la velocidad crece según el incremento del tiempo [la velocidad es proporcional al tiempo]. Podemos, en consecuencia, admitir la siguiente definición del movimiento del cual hemos de tratar: llamo movimiento igualmente, o lo que es lo mismo, uniformemente acelerado a aquel que, partiendo del reposo, adquiere en tiempos iguales iguales incrementos de velocidad.

...

TEOREMA I, PROPOSICIÓN I

El tiempo en el cual un espacio dado es recorrido por un móvil que parte del reposo con movimiento uniformemente acelerado, es igual al tiempo en el que aquel mismo espacio habría sido recorrido por el mismo móvil con un movimiento uniforme cuyo grado de velocidad fuese la mitad del grado de velocidad máximo alcanzado al final del movimiento uniformemente acelerado precedente.

...

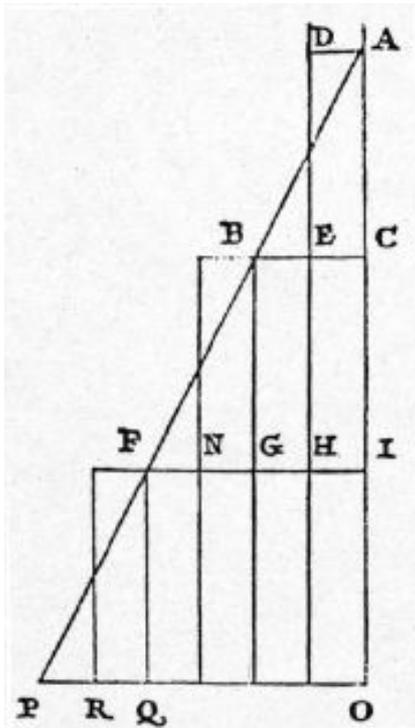
Se pone de manifiesto de todo lo dicho que espacios iguales serán atravesados en tiempos iguales por dos cuerpos, uno de los cuales partiendo del reposo, se mueve con una aceleración uniforme, mientras que la intensidad de velocidad del otro, que se

mueve con velocidad uniforme, es un medio de la intensidad máxima que alcanzaría con movimiento acelerado.

TEOREMA II, Proposición II

Si un móvil cae, partiendo del reposo, con un movimiento uniformemente acelerado, los espacios por él recorridos en cualquier tiempo que sea están entre sí como el cuadrado de la proporción entre los tiempos, o lo que es lo mismo, como los cuadrados de los tiempos.

...



SAGR.: Suspended, por favor, la lectura un momento, pues le estoy dando vueltas a una idea que se me acaba de ocurrir. Para explicarla, y en bien de la claridad mía y vuestra, la ilustraré con un dibujo. Por medio de la línea AI quiero representar el transcurso del tiempo, partiendo del primer instante en A. Aplicando después en A, según un ángulo cualquiera, la recta AF y uniendo los puntos terminales I y F, mientras que se divide el tiempo AI en su mitad, C, trazo la paralela a IF, CB. Si consideramos, después, la línea CB como el grado máximo de la velocidad que, a partir del reposo en el primer instante de tiempo A, fue en aumento según el incremento que se manifiesta en las paralelas a BC, trazadas en el triángulo ABC (que es lo mismo que decir que la velocidad aumenta en proporción al tiempo), entonces admito sin ninguna dificultad, en vista de los argumentos dados hasta el momento, que el espacio recorrido por el

móvil que cae con el incremento de velocidad descrito será igual al espacio que recorrería el mismo móvil durante el mismo intervalo de tiempo AC con movimiento uniforme, cuyo grado de velocidad fuese igual a EC, que es la mitad de BC.

Imaginemos ahora que el móvil que cae con movimiento acelerado y que se encuentra en el instante C tiene el grado de velocidad BC. Es evidente que si tal móvil continuase moviéndose con el mismo grado de velocidad BC, sin más aceleración, atravesaría, en el tiempo siguiente CI, un espacio que es el doble del que pasó en el mismo tiempo AC con el grado de velocidad uniforme EC, que es, a su vez, la mitad del grado BC. Pero, puesto que el móvil desciende con una velocidad que va aumentando uniformemente siempre en todos los tiempos iguales, en el tiempo subsiguiente añadirá al grado de velocidad CB las correspondientes intensidades [*momenti*] de velocidad creciente según las paralelas del triángulo BFG, que es igual al triángulo ABC; de modo que, añadiendo al grado de velocidad GI la mitad del grado FG, el mayor de los adquiridos en el movimiento acelerado y de los determinados por las paralelas del triángulo BFG, obtendremos el grado de velocidad IN, con el que se habría desplazado en el tiempo CI si el móvil hubiera hecho el recorrido con movimiento uniforme. Este grado IN, al ser el triple del EC, nos hace pensar que el espacio recorrido en el segundo tiempo CI debe ser triple del recorrido en el primer tiempo CA. Y si nos imaginamos que a AI se le suma otra parte semejante de tiempo IO, de forma que el triángulo aumente hasta APO, es evidente que si el movimiento continuara durante el intervalo de tiempo IO con el grado de velocidad IF que ha sido obtenido durante el tiempo AI con un movimiento acelerado, al ser tal grado IF el cuádruple de EC, el espacio recorrido en el tiempo IO sería el cuádruple del recorrido durante el primer intervalo de tiempo AC. Pero, si continuamos aumentando la aceleración uniforme en el triángulo FPQ, que es semejante a ABC, el cual, tomado como movimiento uniforme, añadiría un grado de velocidad igual a EC, una vez añadido el grado QR, que es igual a EC obtendremos toda la velocidad uniforme que ha tenido lugar en el tiempo IO y que es el quíntuplo de la velocidad uniforme desarrollada durante el primer intervalo de tiempo AC. En consecuencia, con este sencillo cálculo se ve también que los espacios recorridos en tiempos iguales por un móvil (que, partiendo del reposo, va adquiriendo velocidad en proporción al aumento del tiempo, están entre sí como los números impares *ab unitate* 1, 3, 5; y si tomamos en total los espacios atravesados, el recorrido en el doble de tiempo es el cuádruple del recorrido en la mitad; el recorrido en el tiempo triple es nueve veces y, en suma, los espacios atravesados están en una proporción que es la segunda potencia de los tiempos, es decir, están en la proporción de los cuadrados de los tiempos.

SIMP.: A mí, ciertamente, me ha complacido más esta argumentación simple y clara del señor Sagredo que la para mí oscura demostración del autor, de modo que estoy plenamente convencido de que la cosa es tal y como se la ha expuesto, una vez que se ha aceptado la definición de movimiento uniformemente acelerado. Pero que sea tal la

aceleración de la que se sirve la naturaleza en lo que atañe al movimiento de la caída de los graves, es algo, en mi opinión, un tanto dudoso por el momento. Pienso que tanto por lo que a mi respecta como por aquellos que piensan como yo, es éste el momento oportuno de presentar algunos de esos experimentos de los que se dice que abundan y que en muchos casos concuerdan con las conclusiones que se han demostrado.

SALV.: Vos, como un verdadero hombre de ciencia, exigís algo muy razonable. Es este el modo de actuar de aquellas ciencias que aplican las demostraciones matemáticas a los fenómenos [*conclusioni*] naturales, como es el caso de la perspectiva, de la astronomía, de la mecánica, la música y otras muchas, las cuales confirman sus principios que son los fundamentos de toda la estructura subsiguiente, con experimentos bien establecidos. Espero, de cualquier forma, que no os parezca una pérdida de tiempo el haber discutido con cierto detenimiento acerca de este primer y fundamental principio sobre el cual se apoya la inmensa máquina de infinitas conclusiones, sacadas por el autor, de las que sólo una pequeña parte aparecen en este libro. Bastante habrá hecho aquél con abrirnos de par en par la puerta hasta ahora cerrada a mentes bien capaces. Por lo que se refiere a los experimentos, no han sido pasados tampoco por alto por parte del autor; con el fin de dejar bien probado que la aceleración de los graves que caen de modo natural se da en la proporción antes desarrollada, me he visto muchas veces en su compañía, a fin de probarlo de la siguiente manera.

En un listón o, lo que es lo mismo, en un tablón de una longitud aproximada de doce codos, de medio codo de anchura, más o menos y un espesor de tres dedos, hicimos una cavidad o pequeño canal a lo largo de la cara menor, de una anchura de poco más de un dedo. Este canal, tallado lo más recto posible, se había hecho enormemente suave y liso colocando dentro un papel de pergamino lustrado al máximo. Después, hacíamos descender por él una bola de bronce, dura, bien redonda y pulida.

Habiendo colocado dicho listón de forma inclinada, se elevaba sobre la horizontal una de sus extremidades, hasta la altura de uno o dos codos, según pareciera, y se dejaba caer (como he dicho), la bola por dicho canal, tomando nota como en seguida he de decir del tiempo que tardaba en recorrerlo todo. Repetimos el mismo experimento muchas veces para asegurarnos bien de la cantidad de tiempo y pudimos constatar que no se hallaba nunca una diferencia ni siquiera de la décima parte de una pulsación. Establecida exactamente esta operación, hicimos que esa misma bola descendiese solamente por una cuarta parte de la longitud del canal en cuestión. Medido el tiempo de la caída, resulta ser siempre, del modo más exacto, precisamente la mitad del otro. Haciendo después el experimento con otras partes, bien el tiempo de la longitud completa con el tiempo de la mitad, con el de dos tercios, con el de 3/4 o con cualquier otra fracción, llegábamos a la conclusión, después de repetir tales pruebas

una y mil veces, que los espacios recorridos estaban entre sí como los cuadrados de sus tiempos. Esto se podía aplicar a todas las inclinaciones del plano, es decir, del canal a través del cual se hacía descender la bola. Observamos también que los tiempos de las caídas por diversas inclinaciones del plano guardan entre sí de modo riguroso una proporción que es, como veremos después la que les asignó y demostró el autor.

En lo que a la medida del tiempo se refiere, empleamos una vasija grande llena de agua, sostenida a una buena altura, que, a través de un pequeño canal muy fino, iba vertiendo un hilillo de agua, siendo recogido en un vaso pequeño durante todo el tiempo en que la bola descendía, bien por todo el canal o sólo por alguna de sus partes. Se iban pesando después en una balanza muy precisa aquellas partículas de agua recogidas del modo descrito, con lo que las diferencias y proporciones de los pesos nos iban dando las diferencias de los tiempos. Ocurría esto con tal exactitud que, como he indicado, tales operaciones, repetidas muchísimas veces, jamás diferían de una manera sensible.

(Textos extraídos de la edición de Carlos Solís y Javier Sádaba mencionada en la bibliografía)