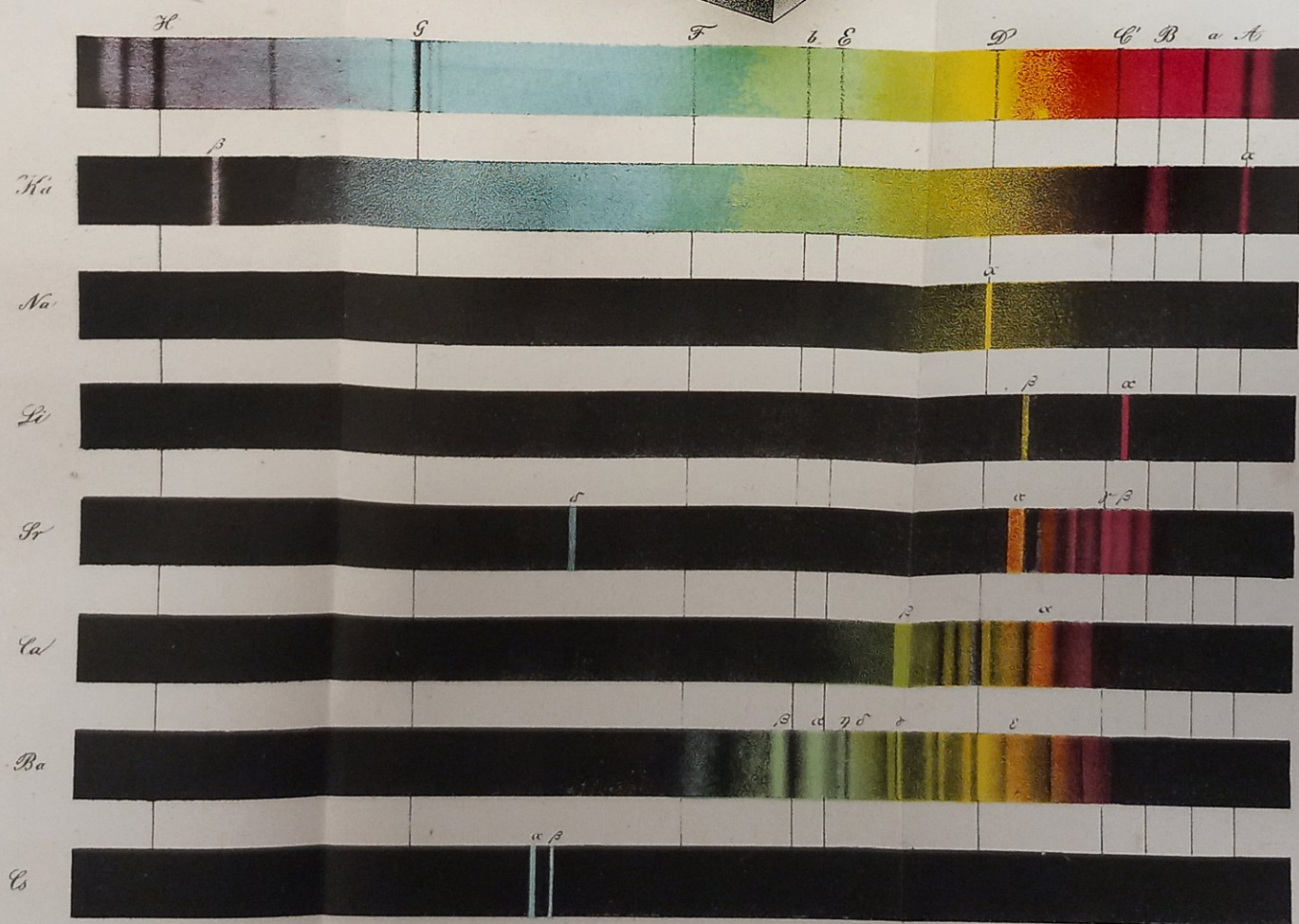
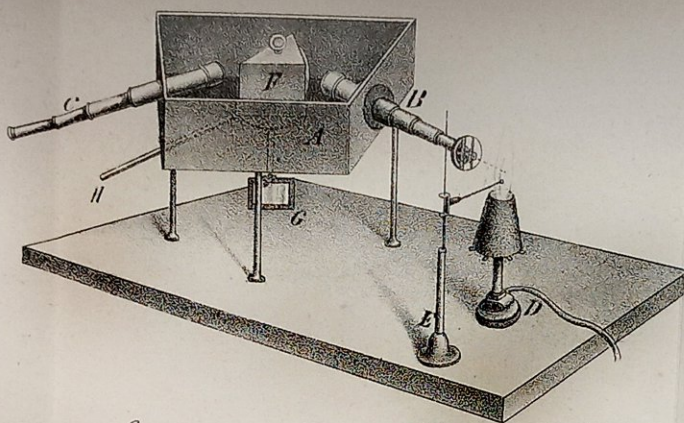




ApEA

NaDiR es una revista de la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía (ApEA) www.apea.es

Presidente:

Carolina Clavijo Aumont

Vicepresidente:

Sebastián Cardenete García

Secretario:

Fernando Sánchez Gil

Tesorero:

Xavier Benlliure i Perales

Vocal de Publicaciones:

Ricardo Moreno Luquero

Vocal página web:

Eva Dominique Ibarra

Vocal FAAE:

Ángel Gómez Roldán

Vocales de Encuentros:

Antonio González Hernández

Fernando Ordóñez Monteagudo

Vocales:

Sensi Pastor Rodríguez

Joaquín Álvaro Contreras

Edición de la revista Nadir: Ricardo Moreno Luquero, rmluquero@gmail.com

Comité de Redacción: Joaquín Álvaro Contreras, Sebastián Cardenete García, Eduardo Zabala

Depósito Legal: Z-2513-98

ISSN: 1575-7528

Junio 2024

Foto de portada: "Análisis químico fundadas en las observaciones del espectro", de Kirchhoff y Bunsen.
©Ricardo Moreno.

SUMARIO

HISTORIA

ASTRONOMÍA EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

ETSICCP

3

MODELOS

MODELO DE LOS MARES Y DE LOS CRÁTERES EN LA LUNA

Ricardo Moreno Luquero

17

HISTORIA

TEORÍA SOLAR DE HIPARCO

Antonio Arribas de Costa

21

PLANETAS

MERCURIO, EL EXTRAÑO PLANETA

Esteban Esteban Peñalba

28

XV ENCUENTROS ApEA

LA PALMA, 30.VI - 4-VII

37

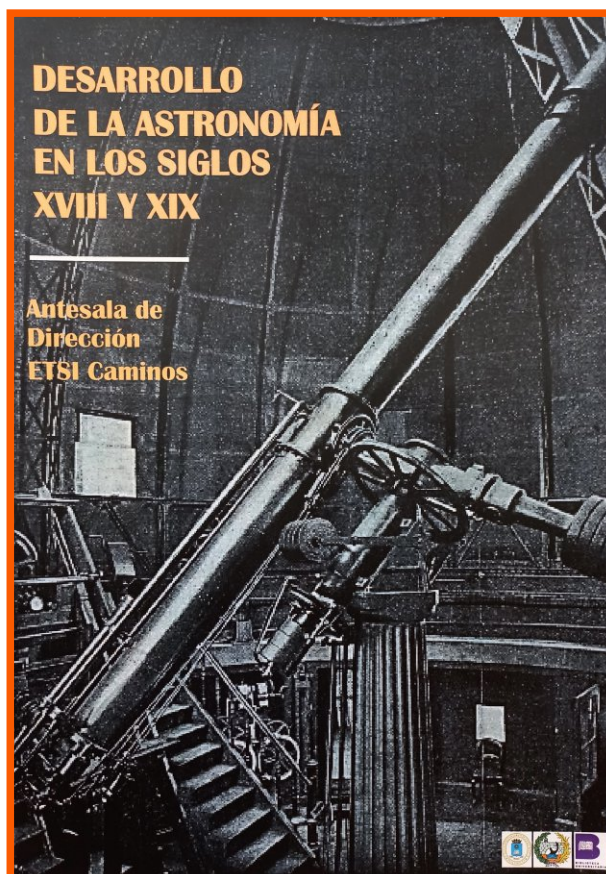
NaDiR no se hace responsable de las opiniones expresadas en los artículos. Si no se indica otra cosa, las imágenes son propiedad de los autores de los artículos.

La distribución de **NaDiR** es gratuita entre los socios de **ApEA**, y se puede descargar de su web.

Se autoriza la difusión del contenido de la revista, citando la fuente.

ASTRONOMÍA EN LOS SIGLOS XVIII Y XIX

ETSICCP



Durante el mes de marzo de 2024, la Escuela de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid organizó una exposición con una selección de obras de destacados científicos que se conservan en su valioso fondo antiguo, con las que hacía un recorrido del desarrollo de la Astronomía en los siglos XVIII y XIX. Por su interés didáctico, traemos a esta páginas el contenido de la exposición, con fotografías de los libros que se citan.

Los siglos XVIII y XIX marcaron un período de avance significativo en el campo de la astronomía, proporcionando respuestas a interrogantes planteados durante milenios. En el siglo XVIII, surgieron disciplinas como la Mecánica Celeste, la Geodesia y la Astrometría, que permitieron describir geométricamente la Tierra, los planetas y los cometas, incluso determinar su ubicación y masa.

Justo cuando parecía que el sistema solar había revelado todos sus secretos, el siglo XIX trajo consigo avances en la tecnología de instrumentación, lo que llevó al descubrimiento de nuevos cuerpos celestes en el sistema solar, como Urano, Neptuno y el cinturón de asteroides. Además,

estos avances permitieron expandir la investigación hacia un nuevo dominio: el estudio de las estrellas. Un paso crucial en este proceso fue el progreso en la física instrumental, que proporcionó información de un tipo totalmente nuevo, dando origen así a la Astrofísica.

MECÁNICA CELESTE

La magnífica síntesis de la casi totalidad de los conocimientos astronómicos de la época realizada por **Newton** a fines del siglo XVII, gobierna y dirige desde entonces la investigación astronómica. Los problemas que desde este momento se van a plantear y su tratamiento matemático llevarán, a lo largo de los dos siglos siguientes, a la edificación de la mecánica celeste clásica.

En *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) (Fig. 1), Newton estableció las tres leyes que rigen el movimiento de los cuerpos y la Ley de la Gravitación Universal que, sin embargo, no fue plenamente aceptada en un principio pues, para los científicos cartesianos, la hipótesis de una acción a distancia que proponía la Ley, era rechazada por su carácter irracional y casi mágico.

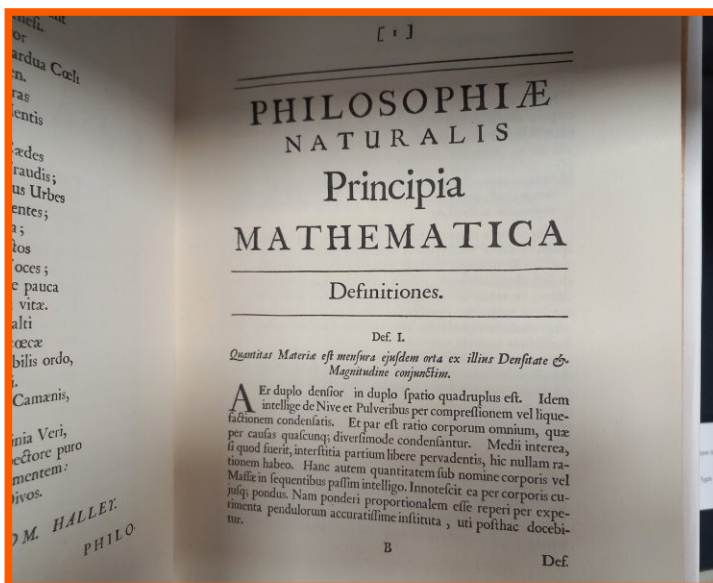


Fig. 1

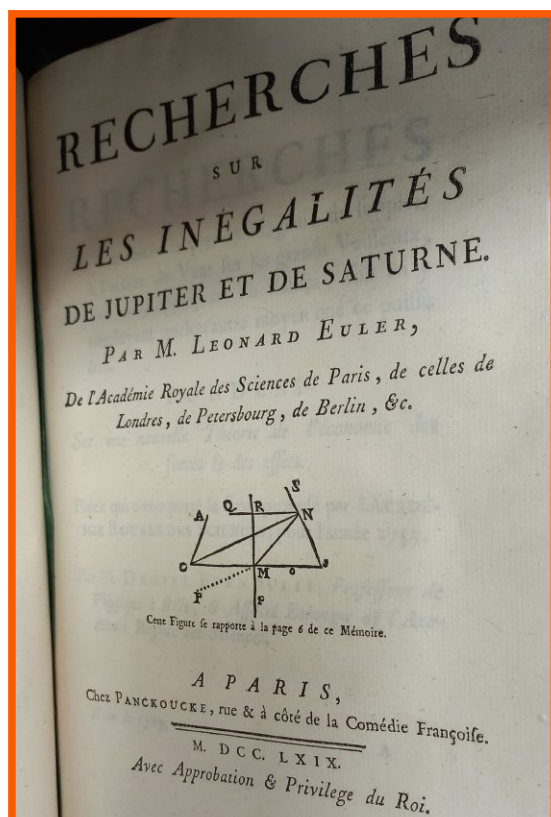


Fig. 2

La confirmación de las teorías de Newton no se producirá hasta años después de la aparición de los *Principia*, cuando se demuestren tres hechos fundamentales basados en los cálculos de Newton: la predicción de la reaparición del cometa Halley, el problema de los n cuerpos y el achatamiento de la Tierra por los polos.

El problema de los n cuerpos

Newton había descrito en sus *Principia* la atracción entre dos cuerpos debida a la acción de la gravedad. Sin embargo, la interacción entre planetas y cometas complicaba el modelo, al pasar de un problema de dos cuerpos a un problema de n cuerpos, lo que causaría perturbaciones que podrían acumularse y poner en peligro la estabilidad del sistema solar.

Una de las manifestaciones de este problema era la irregularidad del comportamiento de las órbitas de Júpiter y Saturno. Ya en 1675 se evidenció la discrepancia entre las predicciones basadas en las leyes de Kepler y las observaciones reales de las posiciones

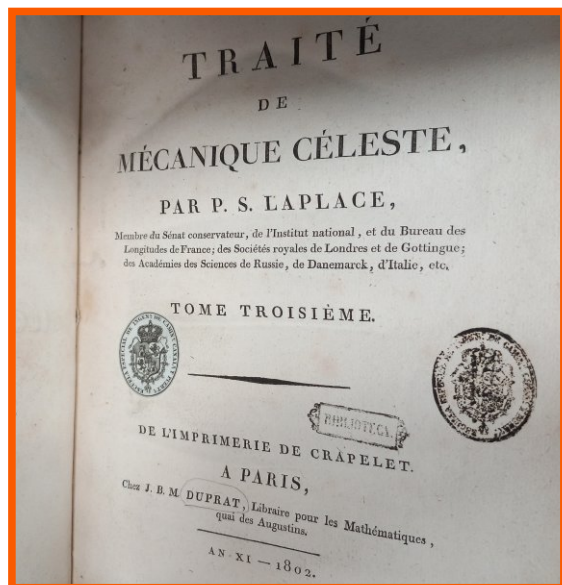


Fig. 3

de Júpiter y Saturno en el cielo. Para abordar este problema la *Académie Royale des Sciences* de París convocó un concurso en 1692 para hallar una solución matemática que pudiera explicar y predecir las irregularidades en las órbitas de ambos planetas. La convocatoria atrajo a algunos de los mejores matemáticos y astrónomos de la época, pero durante décadas, nadie proporcionó una solución satisfactoria, hasta los trabajos de los matemáticos **Euler**, **Laplace** y **Lagrange**.

Leonhard Euler (1707-1783) desarrolló la teoría de perturbaciones, que permitió explicar y predecir las perturbaciones gravitacionales mutuas entre ambos planetas. Euler fue galardonado por ello en 1748, y en 1752, por el trabajo *Recherches sur les irrégularités du mouvement de Júpiter et de Saturne* (1752) (Fig. 2).

Pierre-Simon Laplace (1749-1827) demostró que las perturbaciones de las órbitas de Júpiter y Saturno tienen una periodicidad de 929 años y, por tanto, no se acumulan indefinidamente. Para ello necesitó de una cantidad enorme de cálculos muy detallados que quedaron reflejados en su monumental obra *Traité de mécanique céleste* (Fig. 3).

Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) redujo el problema de los tres cuerpos a la solución del sistema de doce ecuaciones diferenciales, las clásicas ecuaciones de Lagrange de la Mecánica celeste. Ese sistema será la base de todos los estudios posteriores y se encuentra elaborado en su *Mécanique analytique* (1788) (Fig. 4).

Después de estos trabajos, la estabilidad del sistema solar parecía quedar probada, si bien en 1809, **Siméon Denis Poisson** (1781-1840) afinó ese resultado matemáticamente en su trabajo *Sur les inégalités séculaires des moyens mouvements des Planètes* (Fig. 5).

Irregularidad del movimiento lunar

Una de las cuestiones más complejas de la mecánica celeste relacionada con el problema de los n cuerpos y conocida desde tiempos de Ptolomeo, era la irregularidad del movimiento lunar a causa de la atracción que sobre ella ejerce la Tierra y el Sol (y, en mucho menor grado, los demás planetas). Incluso contando con la poderosa herramienta de su nueva teoría, Newton no pudo predecir la posición de la Luna en el cielo con un error menor a varios minutos de arco. Ochenta años después de la publicación de los *Principia*, el problema aún seguía sin resolver, por lo que la *Académie Royale des Sciences* ofreció un premio a quien hallara la solución. Éste fue otorgado a **Joseph-Louis Lagrange** por su trabajo *Recherches sur la libration de la Lune* (1777) (Fig. 6), donde, si bien no proporcionó un resultado concluyente, demostró que esta perturbación no podía deberse solamente a la acción

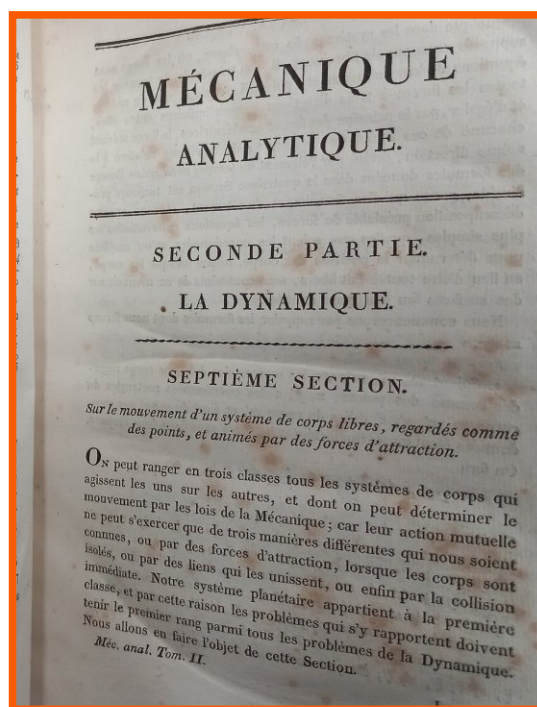


Fig. 4

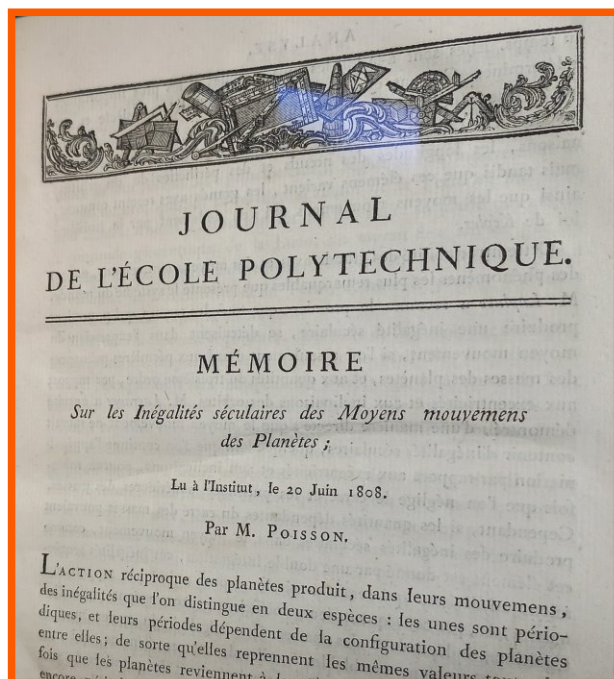


Fig. 5

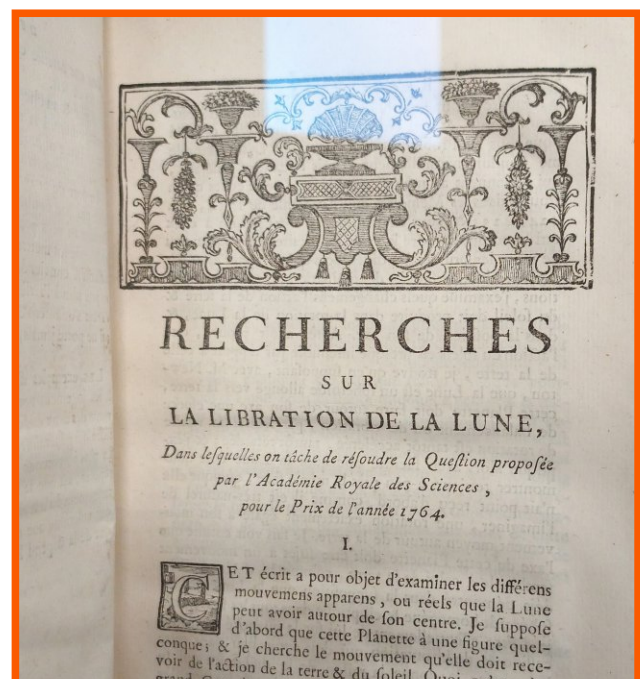


Fig. 6

del Sol o los planetas. Sería **Laplace** en su *Traité de mécanique céleste* (Fig. 3) quien en 1787 demostrara que el movimiento anómalo de la Luna era también efecto de la forma de la Tierra, al tomar en cuenta el efecto de las fuerzas de marea que deforman ligeramente tanto a la Luna como a la Tierra.

LA FORMA DE LA TIERRA

Un razonamiento teórico llevó a Newton a suponer que la Tierra no era esférica, ya que ésta no es, en efecto, una solución para el problema del equilibrio relativo de una masa homogénea en rotación uniforme. Newton postuló que la Tierra tiene la forma de un elipsoide de revolución.

La existencia del abultamiento ecuatorial era para Newton una certeza, y además era necesaria para explicar el fenómeno de precesión, pero los adversarios de las teorías newtonianas no aceptaban el fenómeno. La decisión quedaba, por consiguiente, confiada a las mediciones geodésicas.

Si la hipótesis era cierta, la longitud de un grado de meridiano sería tanto mayor en los polos cuanto más achatada fuera la zona considerada. La *Académie des Sciences* de Paris nombró en 1735 una comisión encargada de medir un arco de meridiano en el ecuador mismo, al sur de Quito. En 1736 otra expedición partiría hacia el círculo polar, en la región de Laponia.

La expedición de Laponia fue dirigida por **Pierre Louis Maupertois** (1698-1759) con ayuda del científico **Alexis Claude Clairaut** (1713-1765). Realizó la medición de un arco de un grado en menos de un año, y en 1737 el achatamiento hacia los polos estaba definitivamente probado por comparación con la longitud del grado de Paris, antes de que terminaran las operaciones en el Ecuador. Los resultados de su estudio fueron publicados en *La figure de la terre* (1738) (Fig. 7).

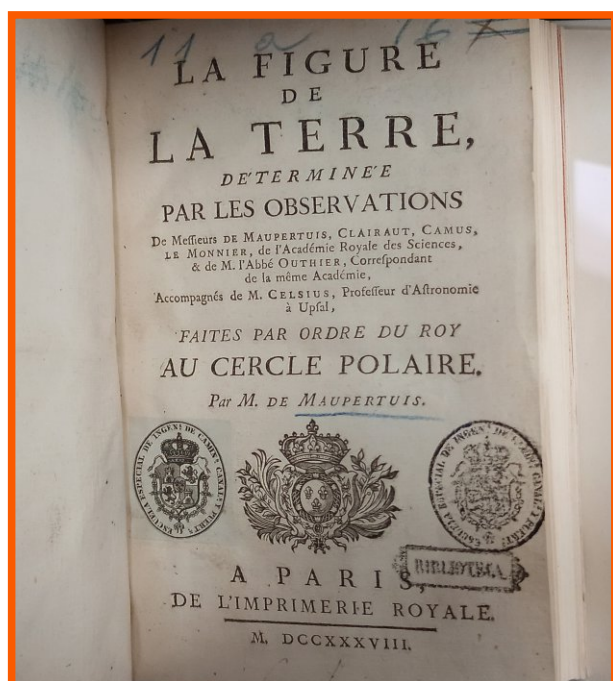


Fig. 7

La expedición del Perú trabajó durante 8 años en condiciones penosas a causa del terreno montañoso, poco propicio para la triangulación, y del clima desfavorable para la observación astronómica. Fue dirigida por **Pierre Bouguer** (1698-1758) y **Charles Marie de La Condamine** (1701-1774), que publicó sus resultados en *Journal du voyage fait par ordre du Roi, a L'Equateur...* (1751) (Fig. 8).

En esta expedición tuvieron una destacada participación dos oficiales españoles: **Jorge Juan** (1713-1773) y **Antonio de Ulloa** (1716-1795), que dejaron constancia de su trabajo en *Relación histórica del viaje a la América Meridional...* (1748) (Fig. 9).

Fig. 8

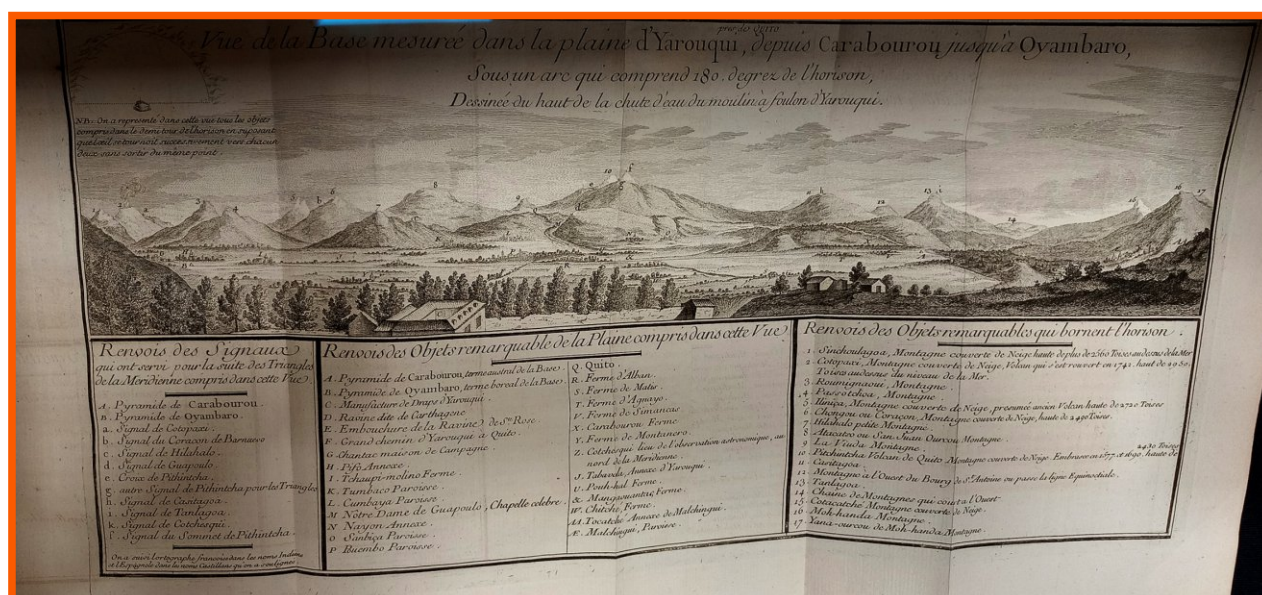


Fig. 9

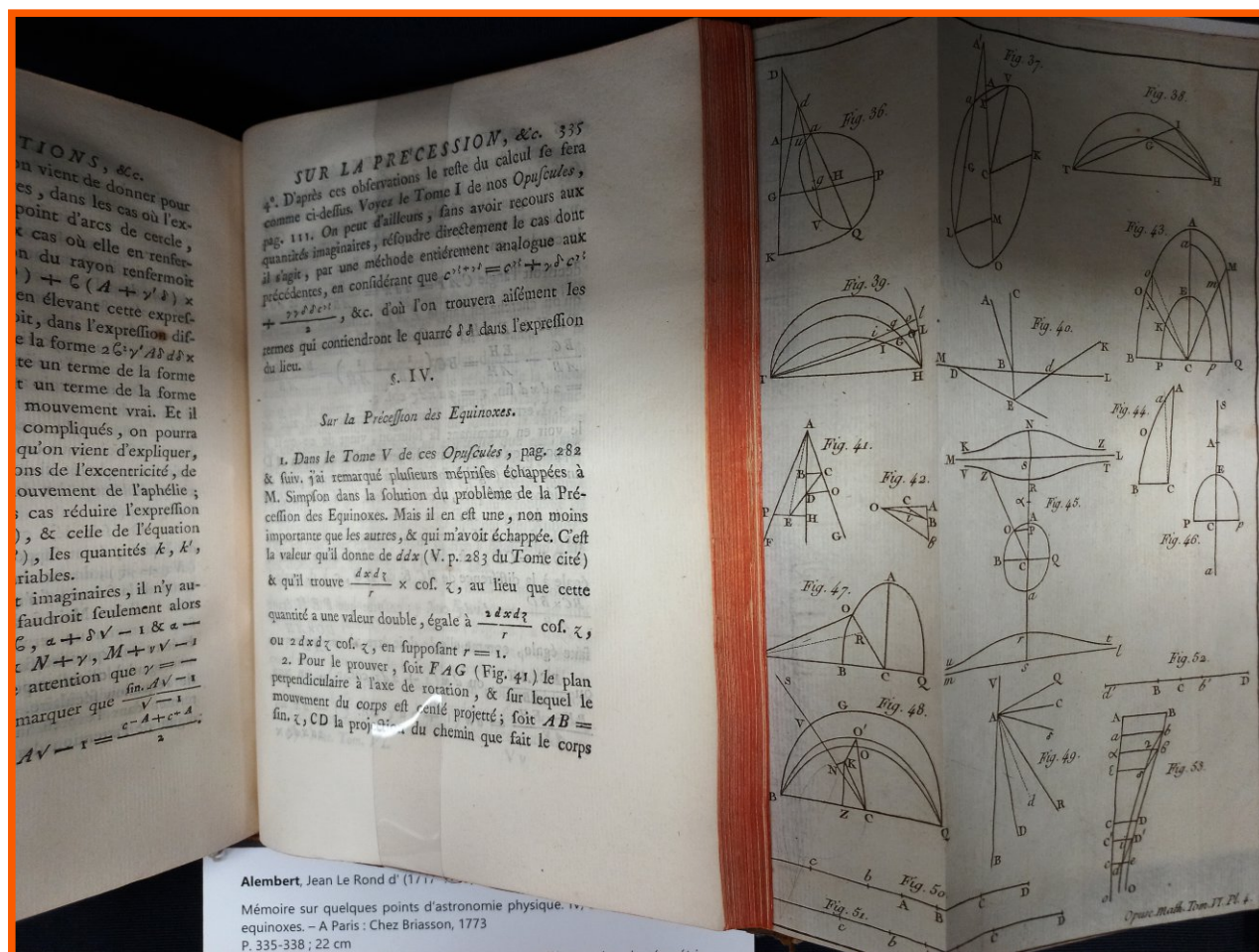


Fig. 10

LOS MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

Newton demostró que la forma achatada de la Tierra en sus polos y la atracción gravitatoria del Sol y de la Luna provocan un lentísimo balanceo en nuestro planeta durante su movimiento de traslación, que se conoce con el nombre de precesión. La atracción de la Luna sobre el abultamiento ecuatorial de la Tierra provoca, además, el fenómeno de nutación. El famoso enciclopedista **Jean le Rond d'Alembert** (1717-1783) dio en sus *Opuscles mathématiques* (1761- 1780) (Fig. 10) una explicación de la precesión más rigurosa que la de Newton y una interpretación matemática de la nutación, descubierta 20 años antes por **James Bradley**, y perfeccionada 100 años después por **Louis Poinso** (1777-1859) en *Précession des équinoxes* (1857) (Fig. 11).

El estudio teórico de la rotación de los cuerpos, conquista del siglo XVIII a través de los trabajos de **Euler**, **d'Alembert** y **Lagrange**, había puesto de manifiesto la existencia de ejes privilegiados, llamados de

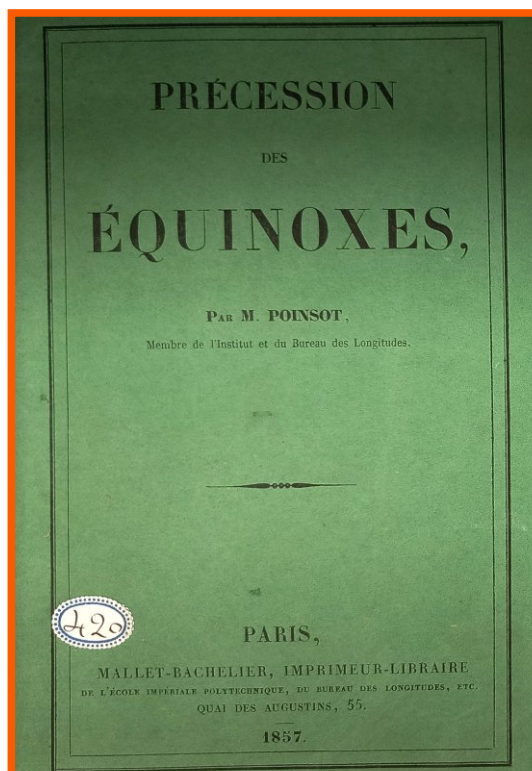


Fig. 11

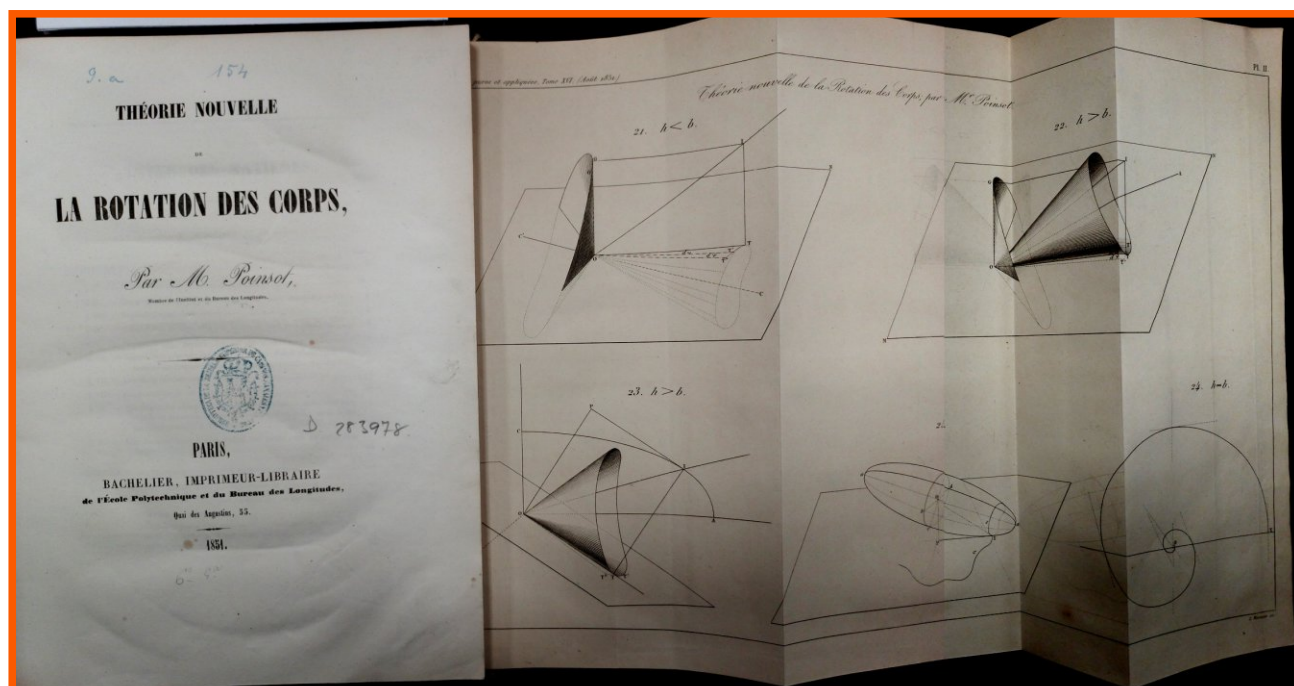


Fig. 12

rotación permanente. En 1834 **Louis Poinso**, en su obra *Théorie nouvelle de la rotation des corps* (Fig. 12) elabora una representación geométrica por medio del movimiento del elipsoide de inercia del cuerpo sobre un plano fijo. Esta solución, que ha conservado el nombre de movimiento de Poinso, muestra que todo sólido suspendido por su centro de gravedad debe conservar la rotación que se le da, si esa rotación se produce en torno a uno de los ejes privilegiados.

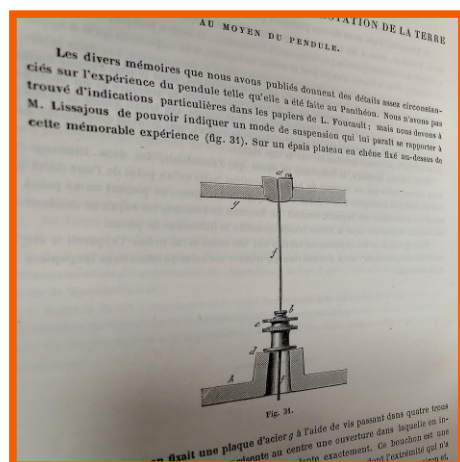


Fig. 13

(1819-1868) presenta en 1851 el fruto de unas célebres experiencias en una memoria titulada *Démonstration physique du mouvement de rotation de la Terre au moyen du pendule* (Fig. 13 y 14). La intuición de este notable experimentador consiste en que si el plano de oscilación de un péndulo es fijo respecto del espacio en el que está sumergida la Tierra —el cual es entonces un sistema de referencia privilegiado—, la rotación de la Tierra sobre sí misma tiene que hacerse perceptible mediante una rotación del mismo plano de oscilación respecto de la Tierra. El experimento se desarrolló en el Panteón de Paris a principios de 1851.

La relatividad del movimiento, es decir, el hecho de que no puede tener una definición precisa sino respecto de un sistema de referencia bien determinado, era una noción ya familiar a los científicos del siglo XVII. Pero los promotores de la Mecánica clásica y analítica del siglo XVIII y principios del XIX se preocuparon más del desarrollo matemático del análisis dinámico del movimiento que del sistema de referencia con respecto al cual se producía ese movimiento.

El físico **León Foucault**

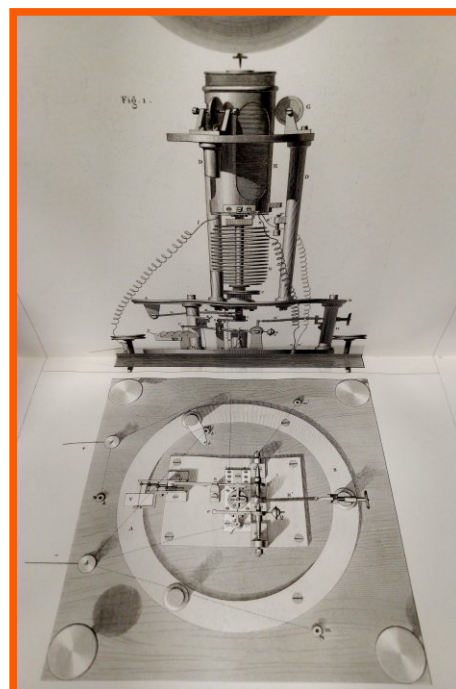


Fig. 14

DIMENSIONES DEL SISTEMA SOLAR

Kepler había descubierto que la distancia media entre cualquier planeta y el Sol guardaba una relación directa con el tiempo que dicho planeta invertía en dar una vuelta completa en torno a él. Comparando entre sí los periodos de traslación de los planetas, resultaba fácil calcular la distancia relativa entre ellos. Sin embargo, era imposible especificar exactamente la distancia; existía el modelo, pero no se tenía la escala. Era necesario conocer al menos una distancia interplanetaria para, a partir de ella, tener una noción más exacta del tamaño del sistema solar.

Para calcular la distancia de un cuerpo planetario se utiliza el método conocido como paralaje, que consiste en la medición de la distancia angular de un cuerpo astronómico con relación a una estrella concreta realizada de forma simultánea en dos observatorios distantes. En 1671, **Jean Richer** (1630-1696), desde Cayenne en la Guyana francesa, y los astrónomos **Jean Picard** y **Giovanni Domenico Cassini** (1625-1712) desde París, observaron de forma simultánea el planeta Marte y anotaron su posición con respecto a otras estrellas. Conociendo la distancia Cayenne-París y la diferencia angular en las observaciones, Cassini estimó la distancia Tierra-Sol en 140.000.000 kilómetros (con apenas un 6 % de error). Tal

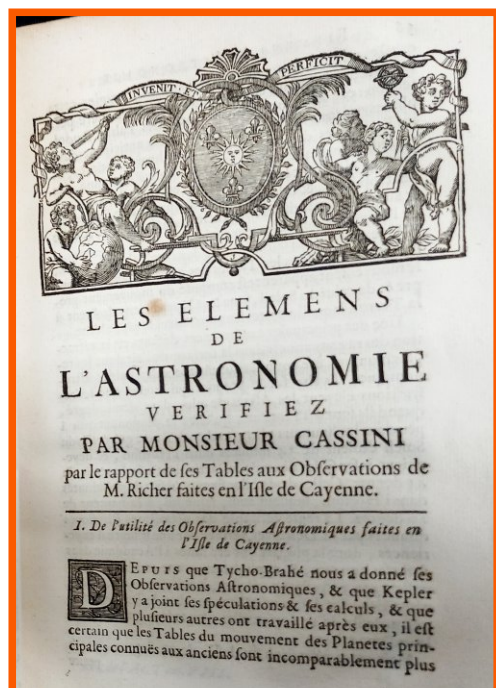


Fig. 16

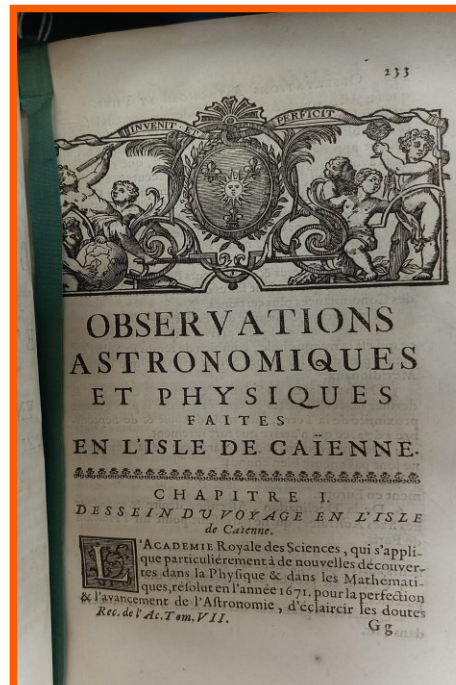


Fig. 15

cifra puede considerarse la primera determinación útil de las dimensiones del sistema solar. Hasta entonces, todas las hipótesis sobre las dimensiones en el sistema solar eran pura fantasía. Estos estudios quedaron recogidos en las obras *Observations astronomiques et physiques faites en l'Isle de Cayenne* (Fig. 15) y *Les éléments d'Astronomie vérifiées par...* (Fig. 16), de **Richer** y **Cassini** respectivamente.

Cassini también verificó las órbitas elípticas de los planetas al comprobar, con el reloj solar de la Basílica de San Petronio en Bolonia, que la variación de la distancia entre el Sol y la Tierra se ajustaba mejor a una órbita ovalada que a una circular con el objeto central situado a una cierta distancia de su centro. **Cassini** utilizó también el reloj solar de San Petronio para medir con precisión inigualada hasta entonces la longitud del año y la inclinación de la eclíptica, gracias a la precisa corrección que aplicó para la refracción atmosférica. Todo ello quedó reflejado en su obra *La meridiana del templo di San Petronio* (Fig. 17).

ORIGEN DEL SISTEMA SOLAR

Junto a su monumental obra *Mécanique céleste* (Fig. 3), Laplace publicó también un modesto ensayo de síntesis, *Exposition du système du monde* (Fig. 18), obra editada en 1796 y reelaborada luego varias veces. Introduce por primera vez la hipótesis de la formación del sistema solar a partir de una nebulosa primitiva que se enfría paulatinamente.

El hecho de que todos los cuerpos del sistema solar estén animados por un mismo movimiento, llevó a Laplace a reflexionar que esa regularidad en los cielos debía tener un origen común y barajó la hipótesis de que el sistema solar podía haberse formado a partir del movimiento rotatorio de una atmósfera alrededor de una estrella central, cuyos planetas y lunas se habrían formado como bolas de gas que se enfriaron y condensaron paulatinamente, y cuyo movimiento giratorio tenía que estar definido en el mismo sentido y casi en el mismo plano que el de la estrella central, el Sol. Aunque el texto no tuviera ningún cálculo justificativo, el mundo culto al que se dirigía la obra tuvo plena consciencia de que allí estaba la primera representación cosmogónica de naturaleza propiamente científica. Con mucho mayor detalle, esta hipótesis nebular sigue siendo el fundamento de las teorías contemporáneas sobre formación estelar.

CATÁLOGOS DE ESTRELLAS

De todos los trabajos astronómicos, la constitución de catálogos de estrellas fue el más ingrato y uno de los más necesarios. Las estrellas llamadas "fijas" eran las referencias naturales que permitían el estudio de la rotación de la Tierra y de su movimiento alrededor del Sol, así como el del movimiento del propio Sol en el espacio.

Esta documentación indispensable se constituyó principalmente desde el siglo XVIII y fue, al principio, obra de los astrónomos británicos.

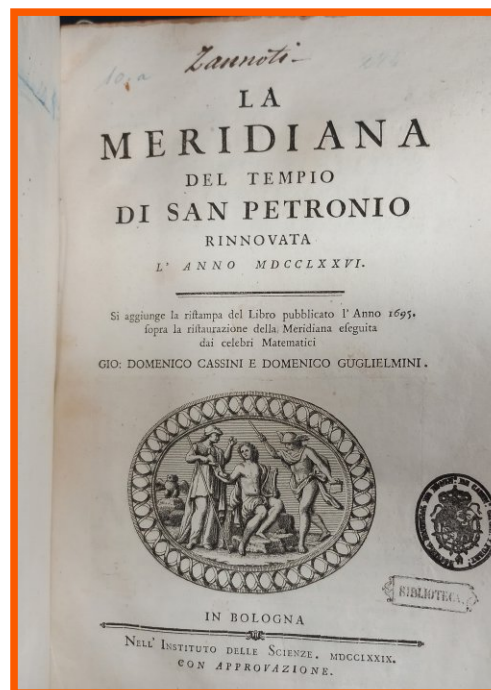


Fig. 17

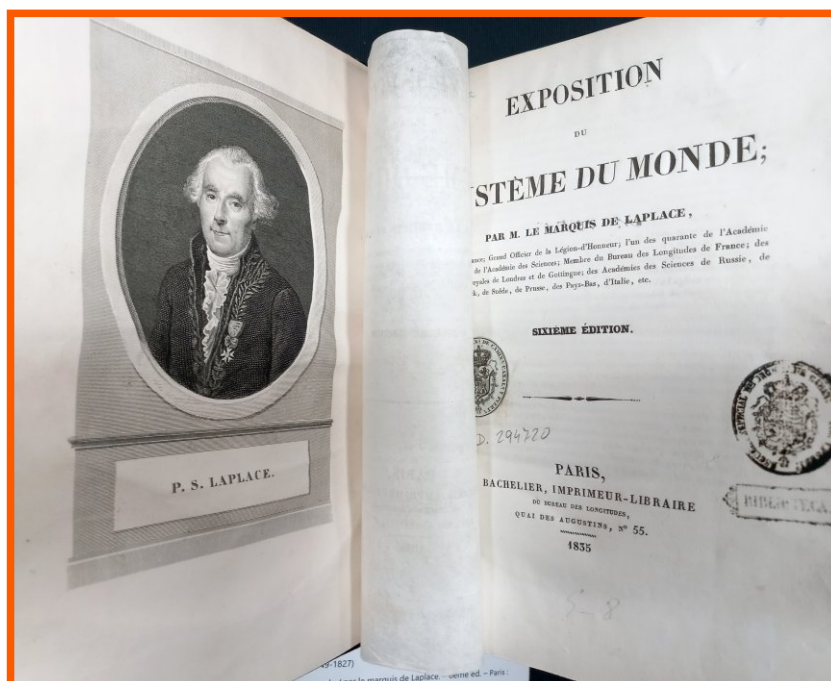


Fig. 18

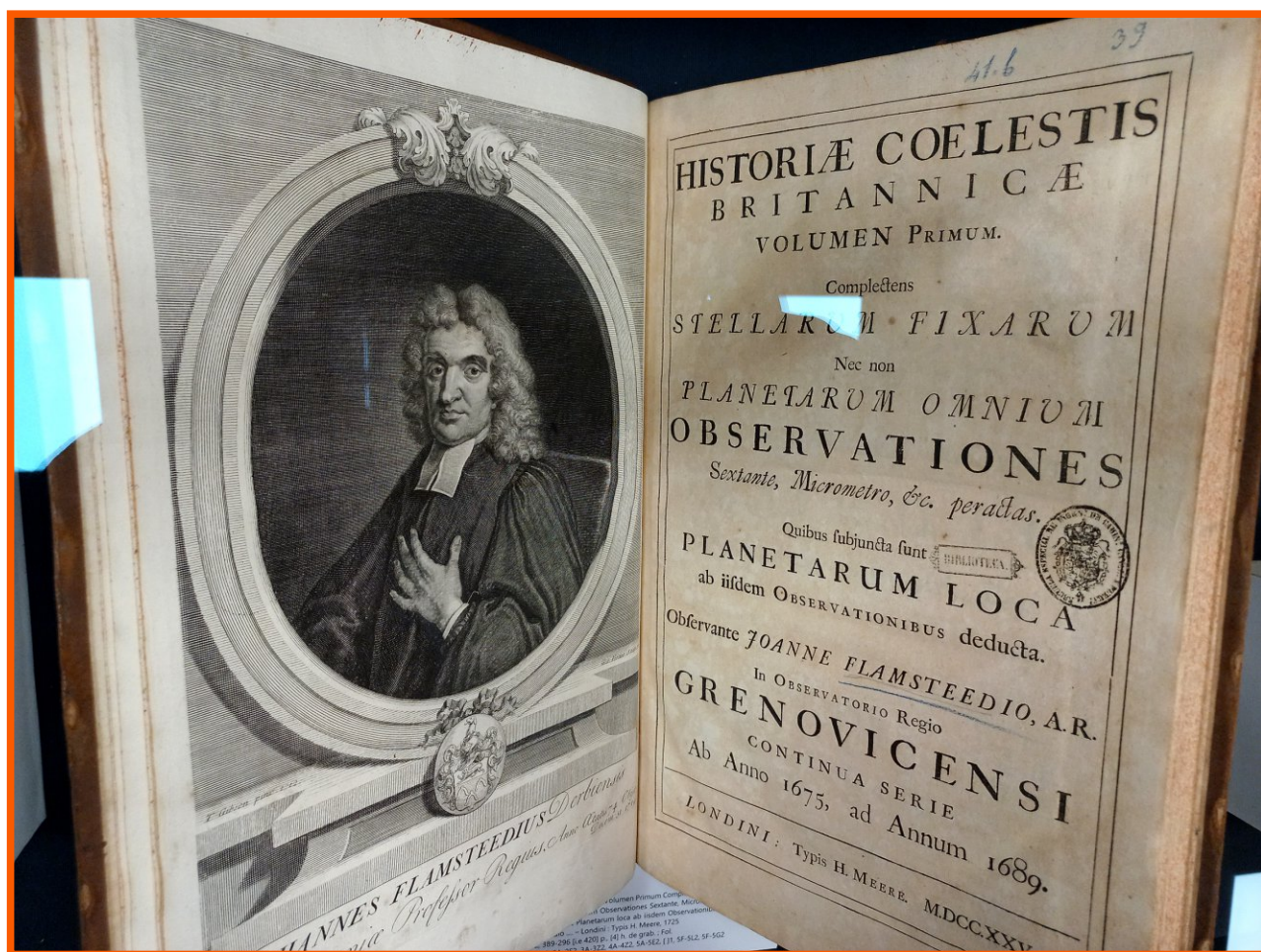


Fig. 19

John Flamsteed (1646-1719) fue el primer Astrónomo Real encargado del observatorio de Greenwich. Las observaciones acumuladas por él durante casi medio siglo acabarían publicándose póstumamente en la *Historia coelestis Britannicae* (Fig. 19) en 1725. Es el primer gran catálogo moderno, que da la posición de unas 3.000 estrellas. También la forma es nueva, ya que se indican las coordenadas ecuatoriales de las estrellas, así como los términos de la precesión anual. Además, la observación regular del Sol pone en relación directa esas determinaciones con los planos fundamentales, y les da un carácter absoluto.

Las posiciones dadas por los astrónomos del observatorio de Greenwich serán las únicas que podrán ser utilizadas más tarde, pues eran de una clara superioridad.

LOS GRANDES INSTRUMENTOS Y EL DESCUBRIMIENTO DE URANO Y NEPTUNO

Los telescopios refractores, como los utilizados por **Galileo** y **Huygens** en los siglos XVI y XVII, adolecían de un severo problema técnico: la aberración cromática. En 1672 Newton presentó ante la *Royal Society* de Londres un telescopio reflector que, al no contener lentes, no sufría de aberración cromática y podía ser tan potente como un refractor 10 veces más largo.

Siguiendo el modelo newtoniano, en 1778 el astrónomo **William Herschel** (1738-1822), del que mostramos aquí su obra *Nouveau Manuel complet d'astronomie* (Fig. 20), construye el famoso telescopio denominado 7 pies (2 m.), cuya imagen se puede observar en *Handbuch der*

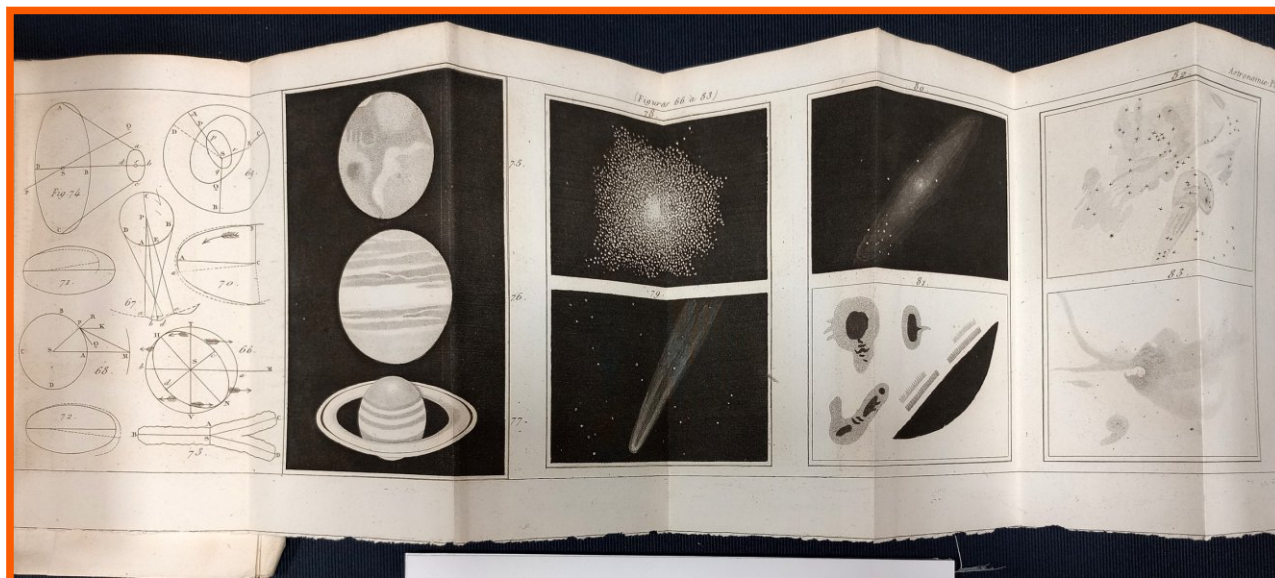


Fig. 20

Astronomischen Instrumentenkunden (Fig. 21). Este aparato superaba no sólo a los reflectores existentes, sino también, y esto ocurría por primera vez, a los refractores. **Herschel** comenzó entonces el examen sistemático del cielo, y emprendió la construcción de instrumentos cada vez más potentes. Realizó estudios sobre la altura de las montañas de la Luna, sobre las manchas solares, sobre la inclinación del eje de Marte y en 1781 llegó a descubrir el planeta Urano. Antes de Herschel, al menos una veintena de astrónomos profesionales habían observado Urano, pero debido a su poco brillo y a su lento movimiento, todos habían pensado que se trataba de una estrella. Por ejemplo, John Flamsteed (1646-1719), lo catalogó como la estrella denominada 34 *Tauri*.

Tras la aparición de los primeros objetivos acromáticos se había detenido el progreso de los refractores, hasta que **Joseph von Fraunhofer** (1787-1826) inventó la montura ecuatorial, cuya imagen se muestra en el libro de **Jean Baptiste Biot** (1774-1862) *Traité*

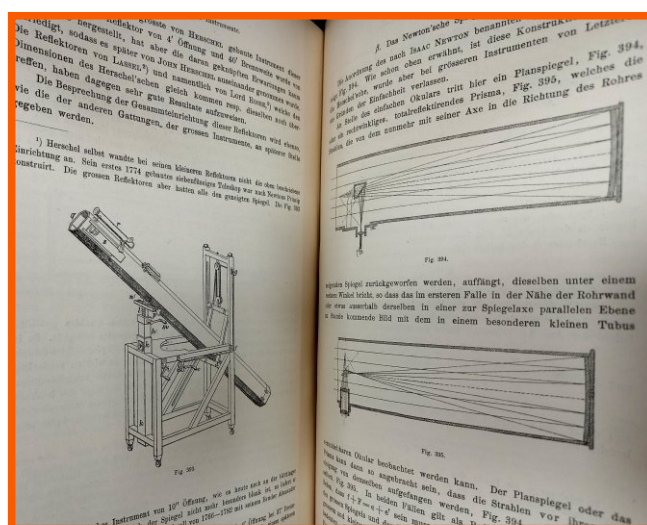


Fig. 21

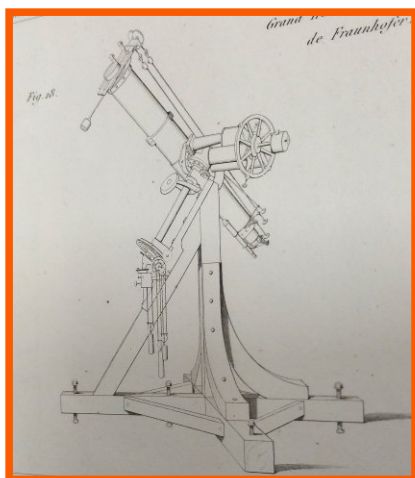


Fig. 22

d'Astronomie Physique (Fig. 22). En 1824 Fraunhofer construyó un refractor de excepcional calidad que fue instalado en el observatorio de Dorpat (hoy Tartu, Estonia), con el que el astrónomo **Friedrich Georg Wilhelm von Struve**, midió la paralaje de Vega, la cuarta estrella más brillante del cielo, y publicó *Description de l'observatoire astronomique central de Poulkova* (Fig. 23). Con una copia idéntica de este instrumento, instalada en el observatorio de Berlín en 1829, **Johan Gottfried Galle** descubrió Neptuno en 1846.

EL ANÁLISIS ESPECTRAL Y EL NACIMIENTO DE LA ASTROFÍSICA

Ya en el siglo XVII, Newton había demostrado, al hacer pasar la luz solar a través de un prisma, que la luz blanca estaba compuesta de los colores del arco iris. En 1814 **Fraunhofer**, al analizar el espectro de la luz solar, observó una serie de líneas oscuras cuyas posiciones aparecían en frecuencias muy definidas, lo que permitió trazar el primer mapa del espectro solar. Medio siglo después, en 1859, **Bunsen y Kirchhoff**, en *Analyse chimique fondée sur les observations du spectre* (Fig. 24), descubrieron el origen de las líneas espectrales del Sol: las capas superiores de la atmósfera solar, menos caliente que la superficie de emisión, absorben las radiaciones características de los elementos que la componen, dejando su huella en el espectro en forma de líneas oscuras. Así pues, cada una de estas líneas estaba asociada con un elemento químico, lo que podía servir para determinar la composición química no sólo del Sol sino también de otros astros.

El análisis espectral hacía posible uno de los sueños de los astrónomos: poder conocer de qué estaban hechos los astros. Había nacido la Astrofísica, si bien el acontecimiento rebasaba ampliamente el dominio de la Astronomía, inaugurando la era de la Física Teórica.

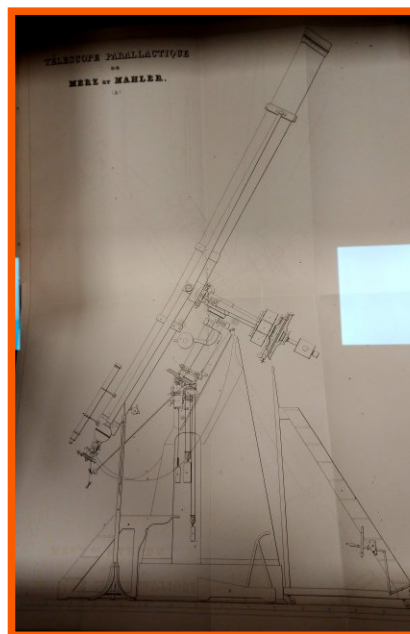


Fig. 23

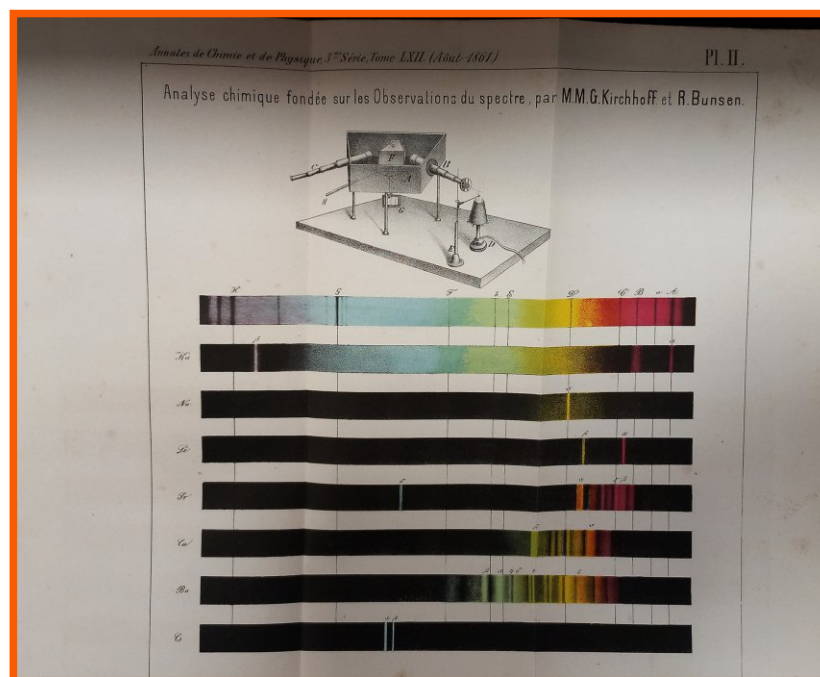


Fig. 24

El interés concedido desde entonces al análisis espectral trae consigo el rápido desarrollo de la espectrometría. Pero el establecimiento detallado de un espectro estelar podía exigir cientos de horas de observación. El registro fotográfico de los espectros, o espectrografía, reduciría muy pronto el tiempo de observación astronómica a la duración de una exposición fotográfica, y además daría a conocer el espectro del ultravioleta.

El método de la espectroscopia no sólo permitiría determinar la composición química de nebulosas y estrellas, sino que

sería la herramienta necesaria para obtener sus parámetros físicos, como la temperatura y la densidad. Por fin se podía estudiar la naturaleza de los astros.

Las primeras observaciones mediante espectroscopio fueron las realizadas por el astrónomo **William Huggins** (1824-1910) en *Analyse spectrale des corps célestes* (Fig. 25), y demostraron que las estrellas estaban hechas de los mismos elementos que existían en la Tierra y en el Sol.

Pero en 1864 **Huggins** analizó la luz procedente de la nebulosa planetaria 'ojo de gato' en la constelación del Dragón, y comprobó que la luz revelaba una única línea de emisión, lo que implicaba que esta nebulosa estaba hecha de un gas fluorescente. Estos datos le permitieron clasificar las nebulosas en dos tipos principales: unas (como el 'Ojo de gato' en Dragón y el 'Anillo' en Lira) estaban hechas de gas, mientras que otras (como la de Andrómeda) estaban constituidas por enormes agregados de estrellas. Se distinguió así, por vez primera, entre las nebulosas gaseosas y las galaxias.

El astrónomo **Pietro Angelo Secchi** (1818-1878) fue otro de los pioneros en la espectrometría estelar. En *Les étoiles: essai d'astronomie sidérale* (Fig.26) estableció la base de las distintas clasificaciones estelares que se realizaron posteriormente.

Fotometría o Astronomía fotográfica

Los principios de la definición y el estudio del brillo de una fuente luminosa fueron ideas de **Pierre Bouguer** (1698-1758). Su trabajo *Essai d'optique sur la gradation de la lumière* (Fig.27) hace de él el padre de la fotometría. La fotografía presentaba grandes ventajas respecto de la observación ocular tradicional. La retina del ojo 'refresca' continuamente su impresión para obtener una nueva imagen, mientras que la fotografía funciona acumulativamente, lo que permite, mediante largas exposiciones, obtener imágenes de objetos muy débiles. Acoplada a un buen telescopio, una placa fotográfica expuesta durante largo tiempo (varias horas o incluso una noche entera) puede revelar estrellas tan tenues que nunca podrían ser vistas de forma directa ni

por los ojos más agudos. Además, la placa fotográfica constituye un registro permanente de la observación, un registro que puede ser posteriormente comparado con nuevas fotos de la misma región del cielo, para buscar cambios; por ejemplo, para medir los movimientos propios de los astros o la aparición de fenómenos transitorios: supernovas, paso de asteroides o cometas.

El primer gran descubrimiento realizado gracias a la fotometría fue las prominencias solares. El astrónomo italiano **Pietro Angelo Secchi** se trasladó a Rivabellosa (Burgos) para observar el eclipse solar que tuvo lugar el 18 de julio. Ya se sabía que durante los eclipses solares aparecían unas nebulosidades en torno al disco, pero se desconocía si se generaban en el Sol o en la Luna. **Secchi** demostró que tales nebulosidades tenían su origen en la superficie solar. De ello dejó testimonio en su obra *Le Soleil* (Fig. 28).

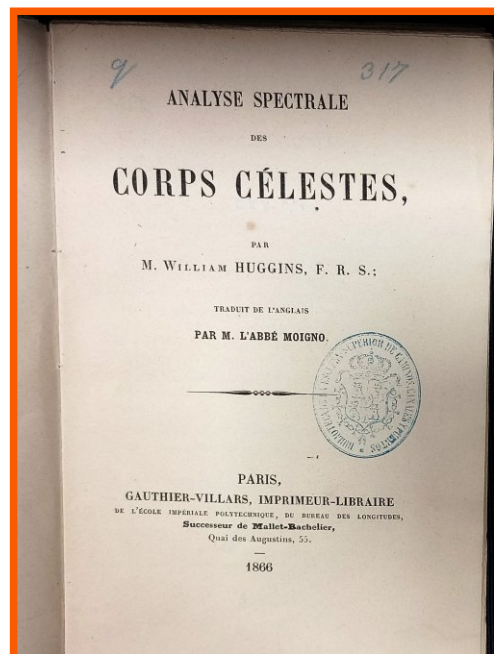


Fig. 25

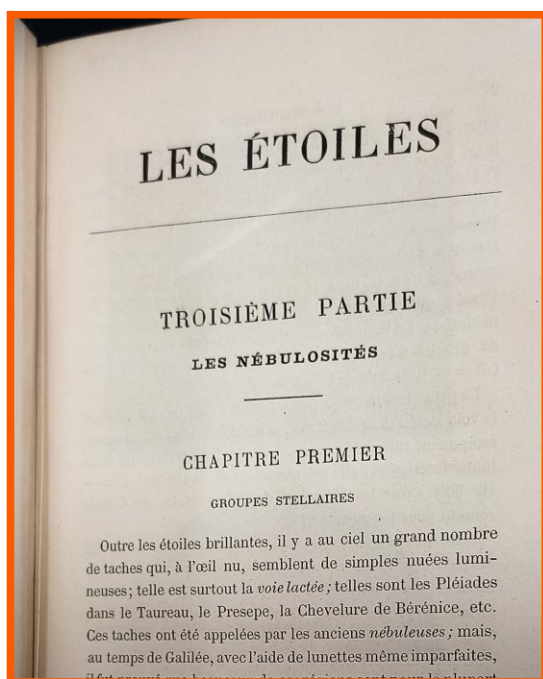


Fig. 26

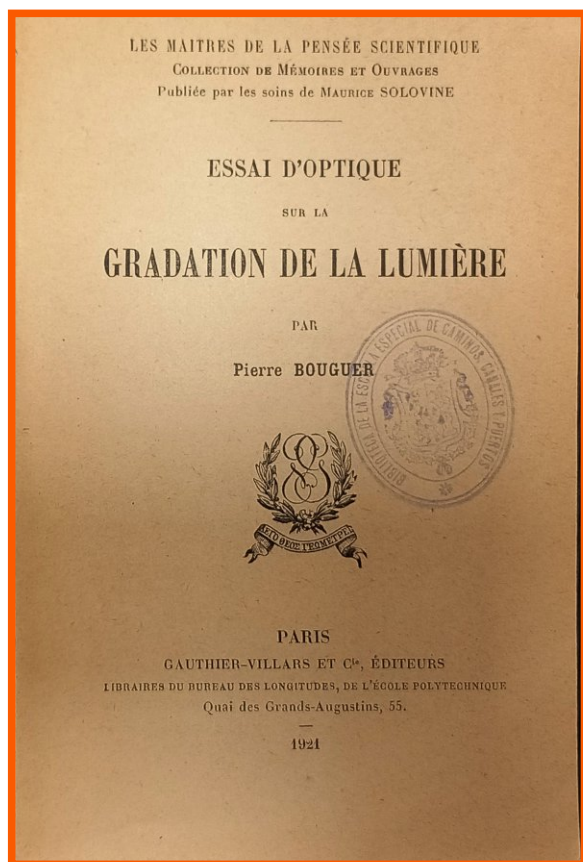


Fig. 27



Fig. 28

BIBLIOGRAFÍA

- Abeles, F. [et al.] (1988) La ciencia contemporánea. El siglo XIX. Primera parte: Las matemáticas. Segunda parte: Mecánica y astronomía. (Historia general de las ciencias / Rene Taton (dir.), v.8). Barcelona: Orbis.
- Bachiller, R. (2009). 1781. Wilharñ Herschel descubre Urano. En Astronomía 1609-2009. <https://www.elmundo.es/elmundo/2009/04/27/ciencia/1240844580> [Fecha de consulta: 09/01/24]
- Bachiller, R. (2009). 1814. Fraunhofer y las líneas oscuras del Sol. En: Astronomía 1609-2009.. <https://www.elmundo.es/elmundo/2009/06/01/ciencia/1243875330.html> (Fecha de consulta: 09/01/24)
- Bauer, E...[et al.] (1988). La ciencia moderna: de 1450 a 1800. Tercera parte: El siglo XVIII. (Historia general de las ciencias / René Taton (dir.), V.6). Barcelona: Orbis.
- González, F.J. (1997). El descimiento del universo en los siglos XVIII y XIX: doscientos años de avances en las observaciones astronómicas. En: Cuadernos de Ilustración y Romanticismo, n.4-5. pp.99-122

MODELO DE LOS MARES Y CRÁTERES DE LA LUNA



Ricardo Moreno Luquero

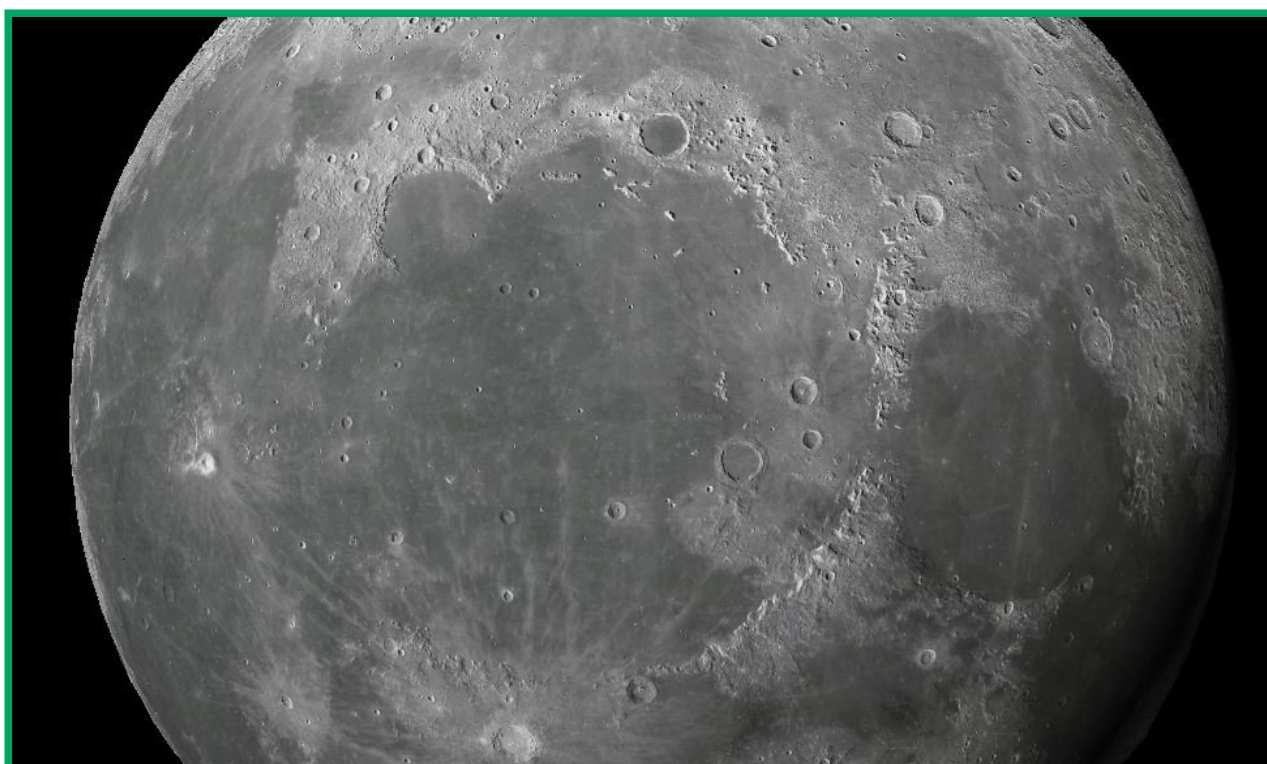


Fig. 1. *Mare Imbrium* en el centro, con el *Sinus Iridum* (bahía del arco iris) y el cráter *Plato* en la parte superior. El *Mare Serenitatis* es el que está a la derecha. En el borde inferior de la foto, el cráter Copérnico.

Los llamados mares y océanos de la Luna son grandes zonas redondeadas que se rellenaron hace relativamente poco con roca basáltica que salió del interior de la Luna, y que les da un aspecto de superficie lisa. Esa roca fundida debió salir por grietas u orificios, no por volcanes, como ocurre en la Tierra. En este artículo se muestra un sencillo modelo de cómo pudo ser. Para completar el tema, también se ofrece un modelo de los cráteres, con harina y cacao.

MARES EN LA LUNA

En la Luna no hay volcanes activos, todos los cráteres que se ven son de impacto. Algunos muy grandes, de cientos de kilómetros de diámetro, se rellenaron con roca basáltica que salió del interior, y forman

unas superficies lisas, de contorno más o menos redondeado, como se ve en la Fig. 1. En esa foto se distingue el *Mare Imbrium* en el centro, de unos 800 km de diámetro, y el *Mare Serenitatis*, a la derecha, de unos 500 km. Encima del primero se distingue a la

izquierda una "C" que es el *Sinus Iridum* (bahía del arco iris), de unos 200 km de diámetro, y el cráter *Plato*, una circunferencia casi perfecta de 80 km de diámetro. Todos están rellenos de la roca basáltica lisa y gris que debió salir del interior de la superficie por grietas u orificios, ya que no hay volcanes. Como en esas superficies hay pocos cráteres de impacto, ese relleno debió ocurrir hace relativamente poco.

Se puede hacer un modelo sencillo del fluir de la roca, con un cartón, una foto grande de la superficie de la Luna (o poco de pasta de modelar), una botella de cola o de otra bebida carbónica, recién abierta, y azúcar (Fig. 2 a 8).

En el centro del cartón recortamos un orificio por donde pueda entrar ajustado la

boca de la botella. Pegamos una fotocopia grande de la superficie de la Luna (Fig. 3 y 4), o también podemos hacer el borde de un cráter, como el cráter Plato, con pasta de modelar, alrededor del orificio (Fig. 1). Ponemos el cartón sobre la botella (Fig. 5) y echamos una cucharada de azúcar en el interior de la botella (Fig. 6). Se produce un gran vertido de espuma, que se extiende por la superficie (Fig. 7) y, en su caso, acaba rellenando el cráter, de forma análoga a como ocurrió en los mares en la Luna.

Para ajustarse a la realidad lunar, la boca de la botella no debe sobresalir apenas del cartón, para que no parezca un volcán activo como los terrestres. Otra cosa es que quieras



Fig. 2. En una hoja de cartón con un orificio del tamaño de la boca de la botella de cola, hacemos el borde del cráter.



Fig. 3. En lugar del cráter, podemos imprimir una foto grande de la superficie de la Luna.

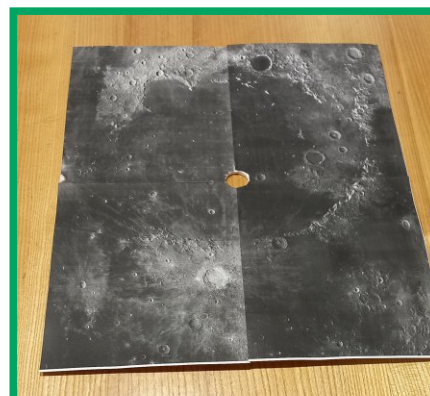


Fig. 4. Y pegarla en el cartón dque tiene el orificio.

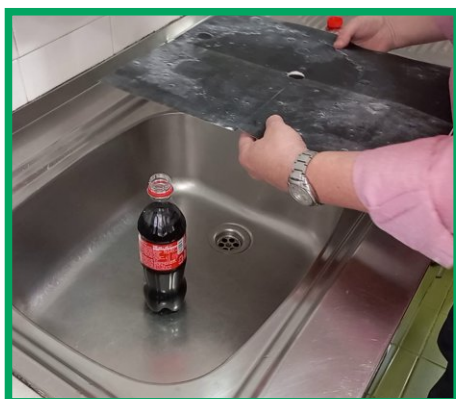


Fig. 5. Ajustamos el orificio del cartón a la boca de la botella



Fig. 6. Echamos una cucharada de azúcar



Fig. 7. Y se produce un vertido, similar al que se produjo en los mares.

hacer un modelo de cráter terrestre, en el que sí puedes encerrar la botella en una montaña hecha con tela por ejemplo.

CRÁTERES DE IMPACTO

Otro accidente geográfico muy característico de la Luna (y de Mercurio y otros cuerpos del sistema solar) son los cráteres producidos por el impacto de meteoritos. Dependiendo de la masa del meteorito y de su velocidad, los cráteres son más o menos grandes. Podemos clasificarlos en tres formas, de más pequeños a más grandes:

- Pequeños, tipo bol de desayuno (Fig. 8).
- Con un pico central, que a veces es una cadena de montañas (Fig. 9).
- Multianillo, con varios anillos concéntricos (Fig. 10).

El meteorito suele arrancar material del interior del terreno, que sale proyectado a gran distancia dejando dibujados sobre el terreno una especie de rayos. Ese material se llama eyecta (Fig. 11 y 12).



Fig. 8. Cráter tipo bol.

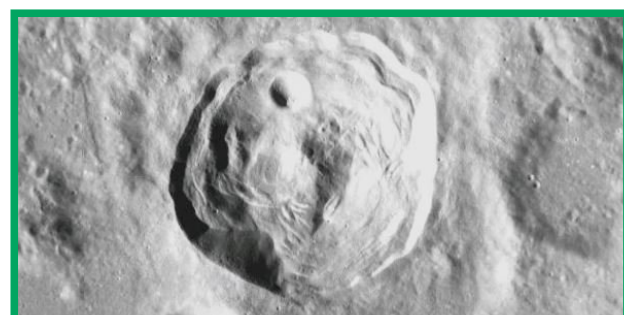


Fig. 9. Cráter con pico central.

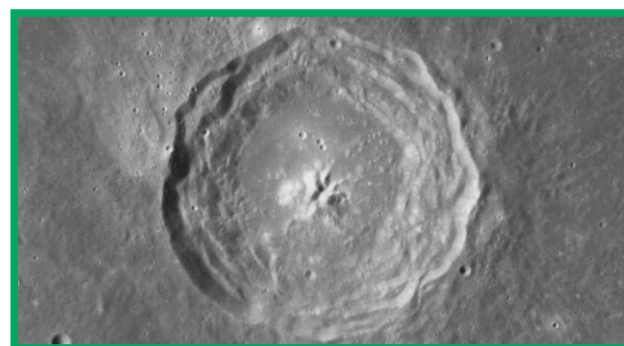


Fig. 10. Cráter multianillo.

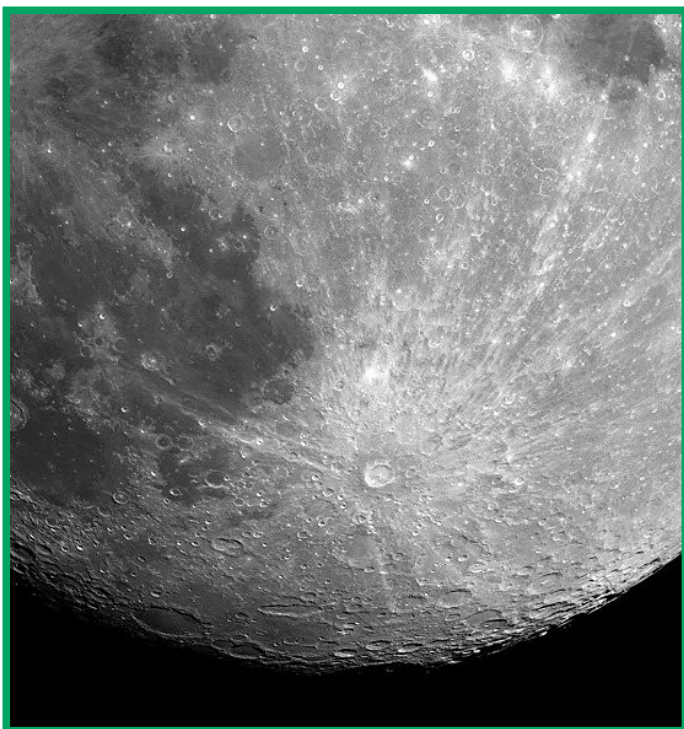


Fig. 11. Cráter Tycho, en la Luna. Se distingue bien la eyecta.

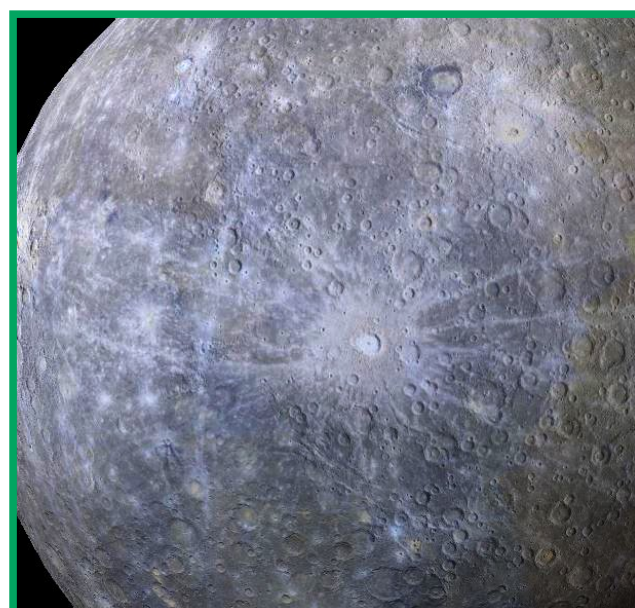


Fig. 12. Cráter Debussy, en Mercurio, también con gran eyecta.

MODELO DE CRÁTERES

Podemos reproducir los cráteres de impacto con un modelo de harina y cacao (Fig. 13).

Conviene recubrir el suelo con periódicos viejos o plástico de pintor, para no ensuciarlo.

Se toma un recipiente ancho y de poca profundidad, por ejemplo una bandeja de comedor, una tapa de caja de cartón de folios, o incluso el propio suelo (será más complicado recogerlo). Se pone dentro de la bandeja una capa de alrededor de 1 cm de harina de espesor, distribuyéndola uniformemente. Se alisa la superficie con una regla.

Sobre la harina, se pone una fina capa de unos pocos milímetros de cacao, suficiente para que cubra la superficie blanca de la harina. Ayuda mucho hacerlo con un colador, para que quede uniforme.

El meteorito lo hacemos no con canicas u objetos extraños, sino con una cucharada llena de cacao en polvo. Desde una altura de unos 2 metros se voltea y se deja caer el material. El cacao de nuestro meteorito es oscuro, y sin embargo arranca una eyecta blanca del interior, que dejará marcas similares a los cráteres de impacto reales.

Se puede experimentar variando la altura desde la que se tira, o la masa de los proyectiles. Si la capa de harina no es gruesa, se puede producir en el centro un pico central. Lo que no hemos conseguido reproducir son los multianillos, que se forman cuando la energía cinética es mucho mayor.

El cacao que usemos debe ser en polvo, lo más fino posible. Mi experiencia, sin ánimo de propaganda, es que el que mejor funciona es el colacao tradicional.



Fig. 13. Secuencia del modelo: bandeja con harina, encima se esparce cacao, se deja caer una cucharada de cacao, se producen cráteres, con eyecta blanco del interior, y algunos con un pico central.

TEORÍA SOLAR DE HIPARCO



Antonio Arribas de Costa



En un artículo para la revista de ApEA ¡del año 2002! hice una breve semblanza del gran astrónomo Hiparco de Nicea. Ahora quisiera contar con algo más de detalle una de sus aportaciones, su Teoría solar que, a mi parecer, señala el despegue de la Astronomía Matemática basada en modelos geométricos cuantificados que permiten hacer predicciones. Nos ha llegado gracias a Ptolomeo que la expone en el libro III del Almagesto, sin añadir nada sustancial de su propia cosecha.

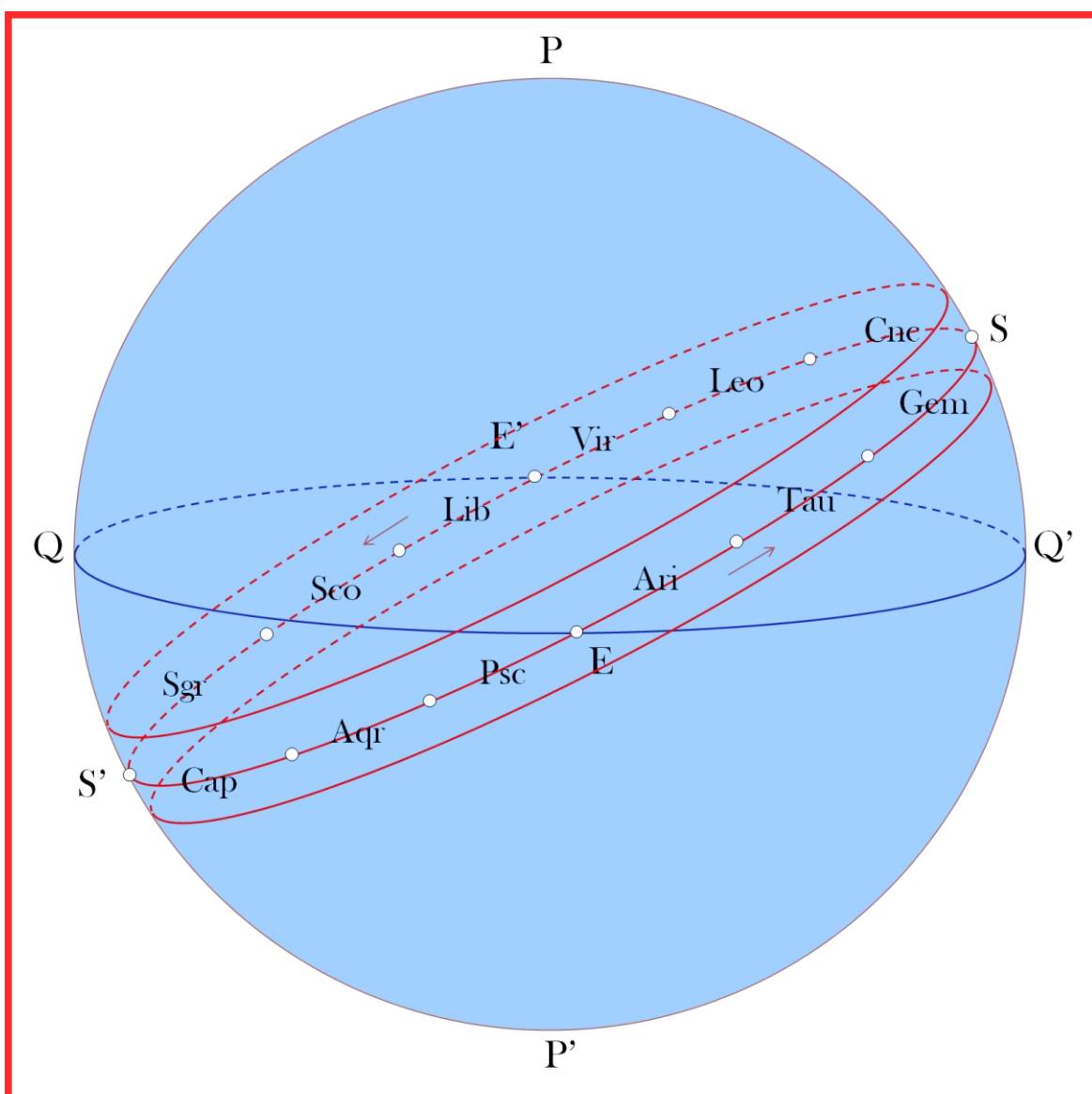
En la época de Hiparco (hacia 170 – 100 aC) estaba completamente asumido el modelo geocéntrico del Universo que consistía esencialmente en dos esferas concéntricas: la terrestre y la celeste. La primera permanecía inmóvil y la segunda, enormemente grande, en la que estaban situadas las estrellas cada una en su posición fija, rotaba diariamente en torno a su eje explicando así satisfactoriamente el movimiento aparente de las constelaciones.

Algunos astros no ocupaban una posición estable entre ellas y por eso eran llamados en conjunto planetas: todos (el Sol, la Luna y los otros cinco planetas visibles a simple vista y conocidos entonces) se movían sin salirse nunca del cinturón zodiacal. Debido a ello esta banda había sido observada con detalle y se utilizaba como referencia para indicar la posición de los astros, dividiéndola en doce partes iguales (de 30° cada una, los signos del Zodiaco) y señalando en qué punto de ese signo estaba el planeta en cuestión; por ejemplo: “la Luna está en Virgo 20° ” o “Marte ocupa Aqr 10° ” o “el Sol se sitúa en Tau 8° ”.

El Sol iba recorriendo, a lo largo del año, la línea central del Zodiaco, la eclíptica (Fig. 1). Su inclinación con respecto al ecuador celeste, hacía destacar de forma natural cuatro puntos en su trayectoria: Aries 0° (Sol en el ecuador, equinoccio de primavera E), Cancer 0° (solsticio de verano S, el Sol en su punto más ‘alto’), Libra 0° (equinoccio de otoño E’) y Capricornio 0° (solsticio de invierno S’). Así quedaba totalmente explicado el ciclo de las estaciones.

¿Totalmente? Al menos de una forma cualitativa todo encajaba bien. Pero en cuanto se hicieron medidas numéricas y se intentó precisar la duración del año y predecir la posición del Sol con anticipación, surgieron algunas dificultades.

Fig. 1



Estamos siempre hablando, naturalmente, del año trópico, el tiempo transcurrido entre dos equinoccios o solsticios del mismo tipo. Para medir su duración necesitamos observaciones de esos días señalados, a ser posible muy alejadas en el tiempo. Hiparco recopila varias determinaciones, por ejemplo un equinoccio de otoño el 27 de septiembre del año -145, al amanecer^[1]. Al parecer se utilizó un anillo ecuatorial, orientado en paralelo al ecuador; cuando la sombra pasaba de un lado al otro del anillo es que el Sol estaba en un equinoccio. Los solsticios, en los que la declinación del Sol varía muy lentamente, son más difíciles de precisar.

Concluye que el año dura un poco menos de $365 \frac{1}{4}$ días. Posteriormente precisó esta cifra: $365 \frac{1}{4} - 1/300$ ^[2]. Pero lo que nos interesa aquí es que ya se sabía que la duración de las cuatro estaciones no era igual. Calipo, en el siglo IV aC, daba estos números:

primavera 94 días, verano 92, otoño 89 e invierno 90

Hiparco corrobora esta anomalía, fijando en $94 \frac{1}{2}$ días para la primavera y $92 \frac{1}{2}$ el verano. Esta desigual duración lleva a pensar que el Sol se mueve con velocidad variable alrededor de la Tierra, pues recorre los 90° de cada estación a ritmos diferentes. Pero esto es impensable, inconcebible, se rompería el dogma básico de la circularidad uniforme para todos los fenómenos celestes.

Para salir del apuro, respetando los fenómenos observados sin incurrir en herejías, lo que Hiparco propone es que la trayectoria del Sol (circular y uniforme por supuesto) sea excéntrica, es decir, el Sol se mueve en el plano de la eclíptica sobre un círculo, cuyo centro C no coincide con el de la Tierra T (Fig. 2). Hiparco se sitúa así dentro de la corriente de los astrónomos que intentan

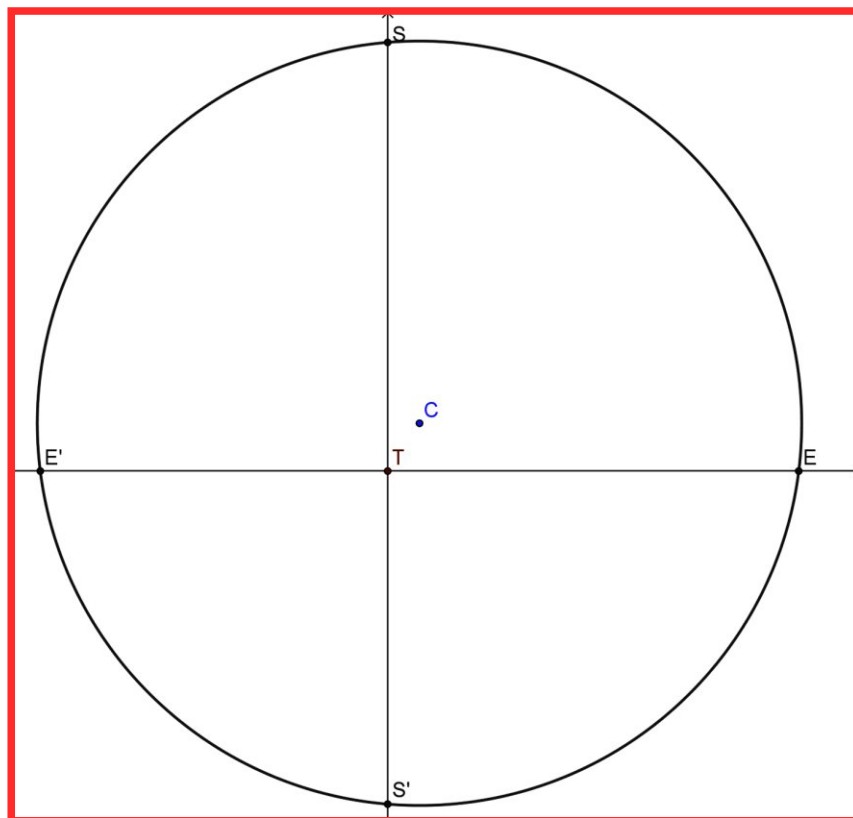


Fig. 2.

[1] En los cálculos se utilizan años con signo (+/-); en el calendario habitual no hay año 0, pero sí en los cálculos; así el año -145 equivale al 146 aC. Hiparco da la fecha según el calendario usado en su momento; lo dice así "en el año 33 del tercer ciclo calípico, en el 4º día epagómeno, al amanecer" tal y como aparece en el Almagesto (p. 133 de la traducción de Toomer). Según el software Stellarium el instante de ese equinoccio fue en realidad el día 26 a las 22h 33m y no el día 27 al amanecer; hay un error de unas 6 o 7 horas.

[2] $365 \frac{1}{4} - 1/300$ días = 365d 5h 55m 12s. La cifra exacta es 365d 5h 48m 45s.

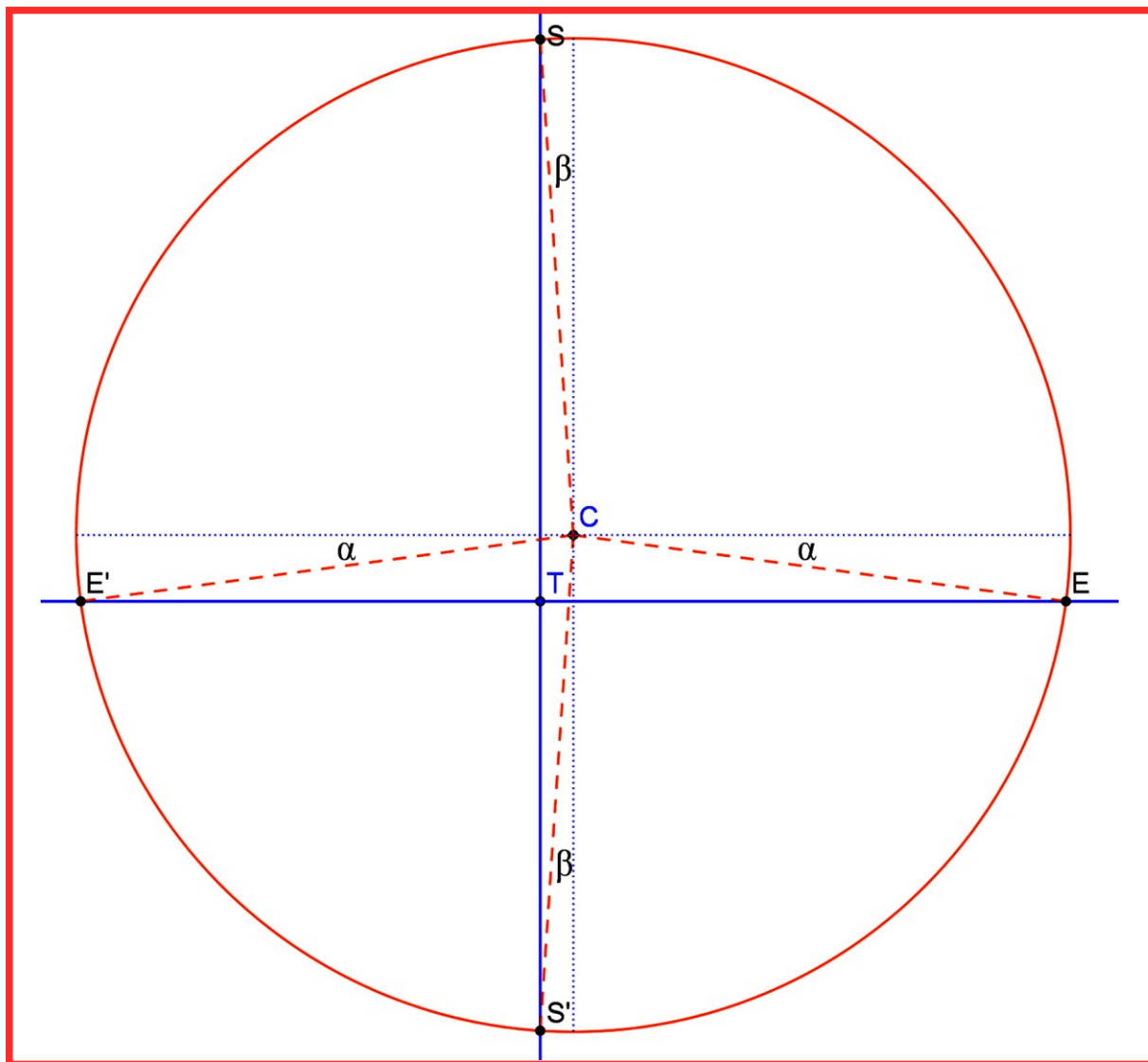
‘salvar’ los fenómenos, ajustarse a lo que se observa, mediante artificios geométricos sin que les importe demasiado la consistencia física del modelo propuesto. Es fácil ver que con la excéntrica se obtiene lo que se desea, al menos cualitativamente.

Pero Hiparco no se contenta con esto sino que se propone encontrar los parámetros numéricos de la excéntrica para que den cuenta con precisión de los datos disponibles. ¿Cuáles son esos parámetros que definen el modelo? Pues la posición del punto C (Fig.3), es decir su distancia a T y la orientación de la línea TC. ¿Y qué datos tenemos? Tan solo la duración de las estaciones. Es todo lo que nos va a hacer falta, más algunas herramientas matemáticas.

Hiparco primero calcula el avance medio del Sol por la excéntrica. Para ello redondea el año a $365 \frac{1}{4}$ días; en ese tiempo ha completado 360° por lo que cada día recorrerá $360^\circ / 365,25 = 0,9856^\circ$ [3].

El segundo paso es hallar el valor de los ángulos α y β . Para ir del equinoccio de primavera (E) al solsticio de verano (S) el Sol ha avanzado, por la excéntrica, un ángulo $\alpha + 90^\circ + \beta$.

Fig. 3



[3] He modernizado todos los cálculos. Ptolomeo utilizó notación sexagesimal y para los asuntos trigonométricos se servía de una única razón: la cuerda de un arco. Lo mismo suponemos que hizo Hiparco.

Los 94 ½ días que dura la primavera equivalen a $94,5 \cdot 0,9856^\circ = 93,1417^\circ$. Así que:

$$\alpha + 90^\circ + \beta = 93,1417^\circ$$

Para el verano, en cambio, tenemos que ha recorrido $90^\circ - \beta + \alpha$ (de S a E') en 92 ½ días equivalentes a 91,17°.

$$90^\circ - \beta + \alpha = 91,17^\circ$$

Sumando, llegamos a que $180^\circ + 2\alpha = 184,312^\circ \rightarrow \alpha = 2,156^\circ$

Y restando, $2 \beta = 1,97^\circ \rightarrow \beta = 0,985^\circ$

Unos pocos razonamientos trigonométricos nos llevan a los parámetros buscados (Fig. 4). Llamaremos R al radio arbitrario de la excéntrica.

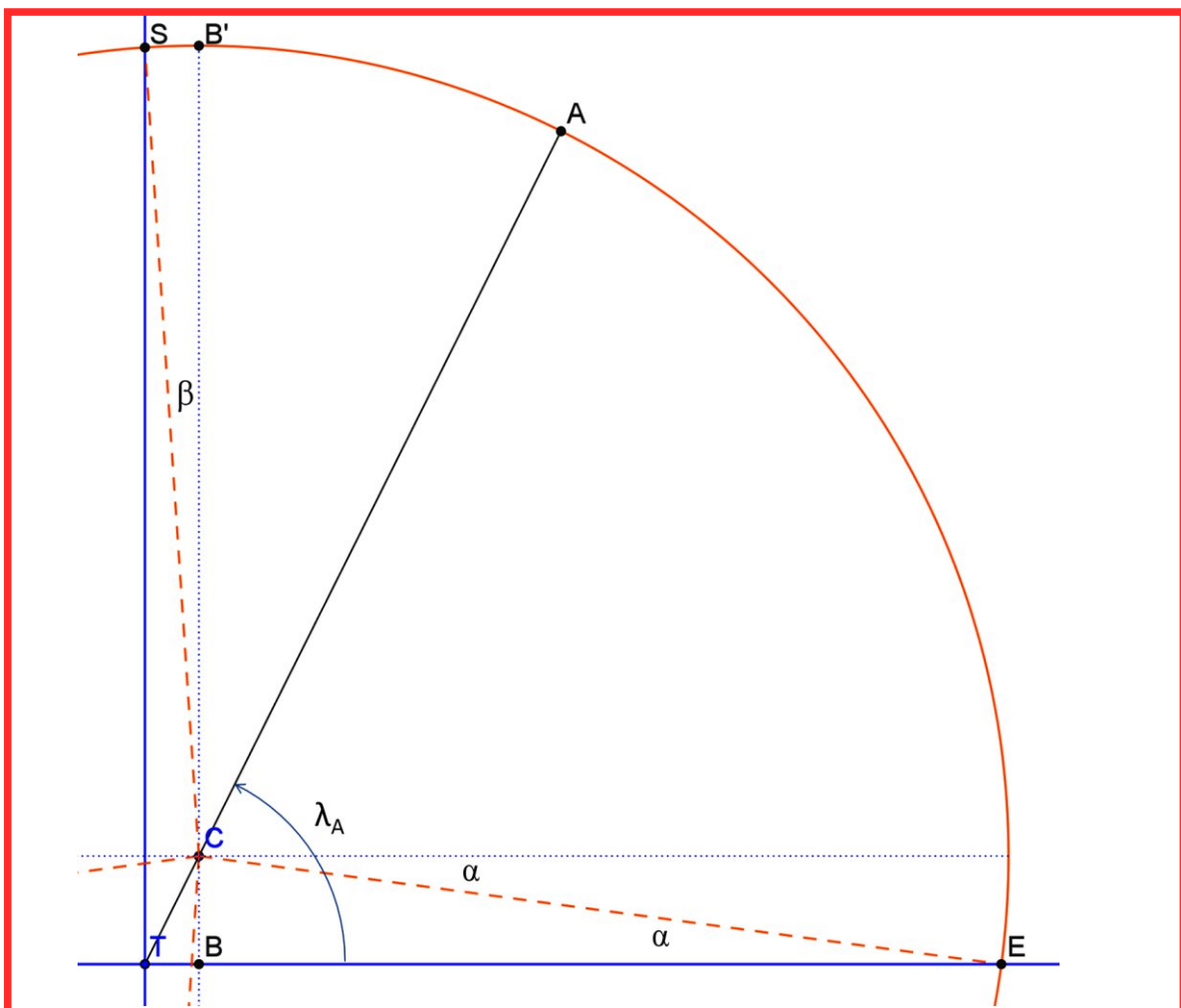
$$BC = R \operatorname{sen} \alpha = R \operatorname{sen} 2,156^\circ = R \cdot 0,0376$$

$$BT = B'S = R \operatorname{sen} \beta = R \operatorname{sen} 0,985^\circ = R \cdot 0,0172$$

$$TC = \sqrt{BC^2 + BT^2} = R \cdot 0,041343$$

Es decir, la razón TC/R, que se llama la excentricidad, tiene que ser 0,041343. Hiparco da el valor $1/24 = 0,41667$. Como en el modelo no hay distancias absolutas podemos hacer $R = 1$; entonces $TC = 1/24$.

Fig. 4



Y la orientación del punto C nos la va a dar el ángulo BTC, llamado longitud del apogeo (λ_A) puesto que es el que forman la línea desde T hasta el equinoccio de primavera E (origen de las longitudes eclípticas) con la prolongación de TC hasta A en la excéntrica. Obviamente A es el punto más alejado posible del Sol, el apogeo.

$$\operatorname{tg} \lambda_A = BC / BT = 2,186 \rightarrow \lambda_A = 65,42^\circ = 65^\circ 26'$$

Hiparco, con sus incipientes herramientas, llega a $\lambda_A = 65^\circ 30'$. La conclusión es que hizo los cálculos francamente bien.

No se detuvo aquí, y esto es lo que resulta destacado: se propuso predecir las longitudes del Sol en cualquier momento. El aparato matemático sigue siendo relativamente fácil. La figura 5 nos da la clave de todo el proceso.

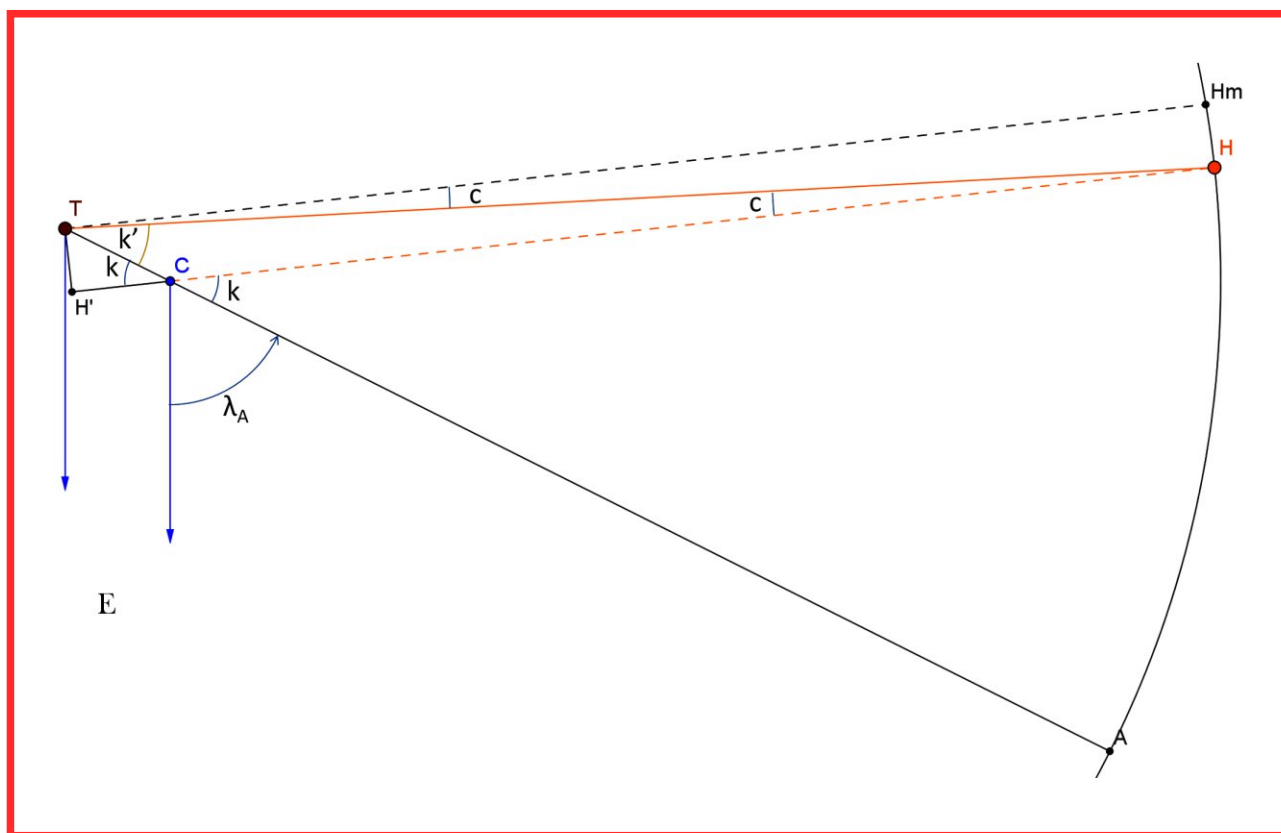


Fig. 5.

T es el centro de la Tierra, C el de la excéntrica, E es el equinoccio de primavera y A el apogeo. H es la posición del Sol, en la excéntrica, un tiempo t después de pasar por el apogeo A, digamos $t = 30$ días, por hacerlo todo sobre un ejemplo. Lo que estamos buscando es la longitud eclíptica de H, es decir el ángulo $\text{ETH} = \lambda$, la posición del Sol visto desde T. Veamos cómo :

El ángulo $\text{ACH} = k$ es lo que ha avanzado el Sol por la excéntrica en esos 30 días. Como sabemos la velocidad angular (constante) de H, pues $k = 30 \cdot 0,9856^\circ/\text{día} = 29,57^\circ$

Trazamos la recta THm, paralela a CH. El ángulo ATHm = ACH = k . Hm es la posición de un Sol medio que circulara uniformemente alrededor de T. La diferencia entre H y Hm es el ángulo c , la corrección que estamos intentando averiguar.

Construimos el triángulo $CH'T$, recto en H' y CH' alineado con CH . El ángulo $TCH' = k$ de nuevo.

$$TH' = TC \sin k = 1/24 \cdot \sin 29,57^\circ = 0,02 \quad (R = 1)$$

$$CH' = TC \cos k = 1/24 \cdot \cos 29,57^\circ = 0,036 \quad (R = 1)$$

$$HH' = CH + CH' = R + CH' = 1 + 0,036 = 1,036$$

Ahora nos fijamos en el triángulo THH'. El ángulo en H es el ángulo c de corrección deseado: $\operatorname{tg} c = TH'/HH' = 0,02 / 1,036 = 0,02 \rightarrow c = \arctg 0,02 = 1,1367^\circ$

Luego el ángulo ATH = k' = ATHm - c = k - c = $29,57^\circ - 1,1367^\circ = 28,432^\circ$

Finalmente, la longitud de H = ETH = ETA + ATH = $\lambda_A + k' = 65,5^\circ + 28,432^\circ = 93,932^\circ = 93^\circ 56'$

Por tanto Hiparco predice que 30 días después de pasar por el apogeo la longitud eclíptica del Sol será $93^\circ 56'$.

Para poder evaluar este modelo tenemos que comparar las posiciones calculadas con las reales del Sol. El año -140 el Sol tenía una longitud de $65^\circ 30'$ (la λ_A asumida por Hiparco) el día 31 de mayo; aceptando ese punto de partida, en este cuadro se recogen las predicciones de Hiparco:

t	fecha	Hiparco	Stellarium	Error
0	31/5/-140	$65^\circ 30'$	$65^\circ 30'$	0°
30	30-jun	$93^\circ 56'$	$94^\circ 6'$	$10'$
60	30-jul	$122^\circ 38'$	$122^\circ 55'$	$17'$
90	29-ago	$151^\circ 49'$	$152^\circ 10'$	$21'$
120	28-sep	$181^\circ 38'$	$181^\circ 56'$	$18'$
150	28-oct	$212^\circ 2'$	$212^\circ 12'$	$10'$
180	27-nov	$242^\circ 48'$	$242^\circ 46'$	$2'$

Las predicciones arrojan un error máximo de unos $20'$. El modelo es simétrico respecto a la línea apogeo-perigeo, por lo que para la segunda mitad del año (desde $t = 182$ hasta $t = 365$) los errores son de la misma amplitud que en la primera mitad. Claro, no conviene juzgarlo con una mirada un tanto despectiva desde lo alto de nuestra atalaya de conocimientos y tecnología actuales, capaces de observar minúsculas fracciones de $1''$ de arco. Fue un primer atisbo, que marcó el camino a seguir. Hasta la revolución físico matemática de finales del XVII todos los esfuerzos predictivos utilizaron modelos geométricos muy similares al que esbozó Hiparco. ¡Casi dos mil años, nada menos!

De todos modos hay algunas valoraciones a precisar.

a) En los parámetros iniciales hay alguna imprecisión. La duración de las estaciones en el año -140 (siempre según Stellarium) fueron: pr = 94 días (y no $94 \frac{1}{2}$) , ve = $92 \frac{1}{3}$ días (y no $92 \frac{1}{2}$). Recalculando con esos valores se obtiene: excentricidad = $0,035 = 1 / 28,6$; $\lambda_A = 65^\circ 48'$

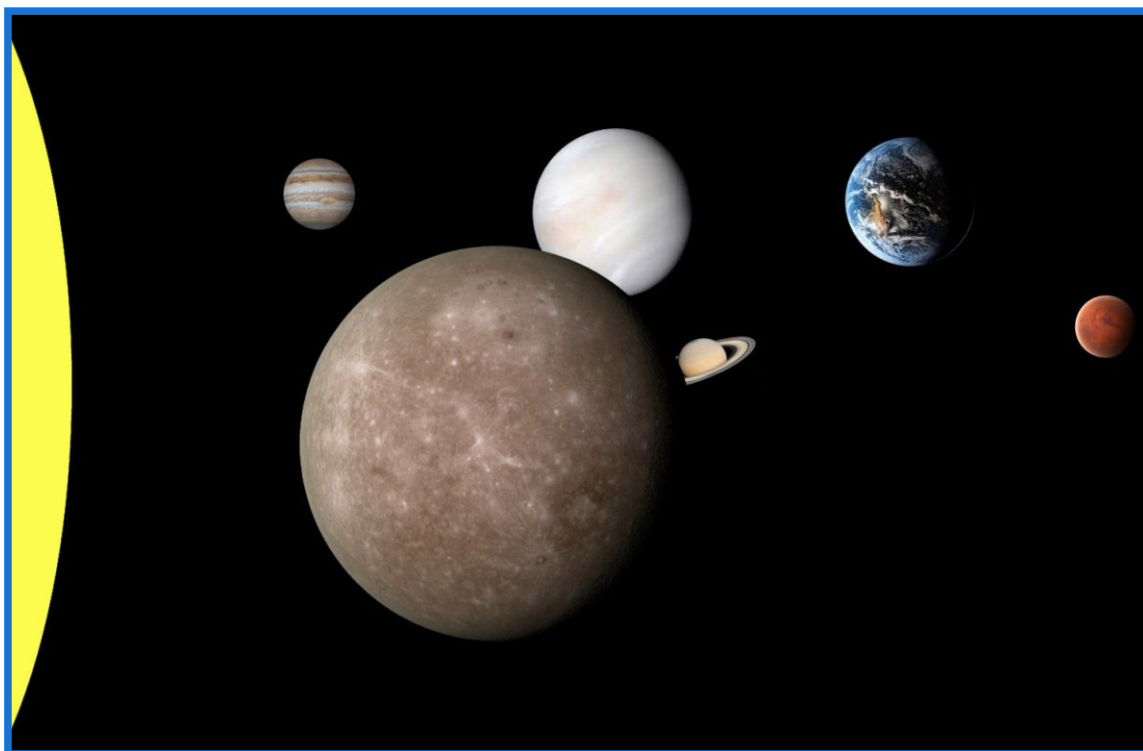
b) el apogeo el año -140, fue en $\lambda_A = 67^\circ 16'$ y un día más tarde, el 1 de junio.

c) El punto de partida inicial es el más favorable posible para el modelo de Hiparco. Estamos aceptando que la determinación del momento en que el Sol tenía una $\lambda = 65^\circ 30'$ fue hecha con toda precisión.

MERCURIO, EL EXTRAÑO PLANETA



Esteban Esteban Peñalba



La mecánica celeste en el primer planeta, condicionada sobre todo por la excentricidad de su órbita y su lenta rotación, da lugar a situaciones muy curiosas, apartadas de lo que para nosotros parece lógico, y que pueden ayudar incluso a nuestro alumnado a aprender, aclarar algunos conceptos y a ser críticos con algunos errores que suelen aparecer en libros, vídeos de divulgación o en artículos de internet.

1- Mercurio es el lugar del Sistema Solar en cuyo cielo el Sol brilla con más fuerza y aparece más grande, pero a pesar de eso pueden verse las estrellas también de día.

El que se vean siempre las estrellas incluso angularmente cerca del Sol en un cielo siempre negro, es debido a que el planeta no tiene prácticamente atmósfera que difunda la luz solar. Lo mismo ocurre

en la Luna, y tanto en eso como en el aspecto de su superficie son astros muy similares.

El tamaño del Sol evidentemente es debido a la cercanía. A causa de la excentricidad de la órbita, varía bastante, entre un diámetro de $1,14^\circ$ cuando Mercurio está en su afelio y desde allí se ve en la constelación de Tauro y $1,73^\circ$ en el perihelio cuando se ve en Escorpio. Desde la Tierra lo vemos de un tamaño de solo $0,5^\circ$ con una variación mínima.

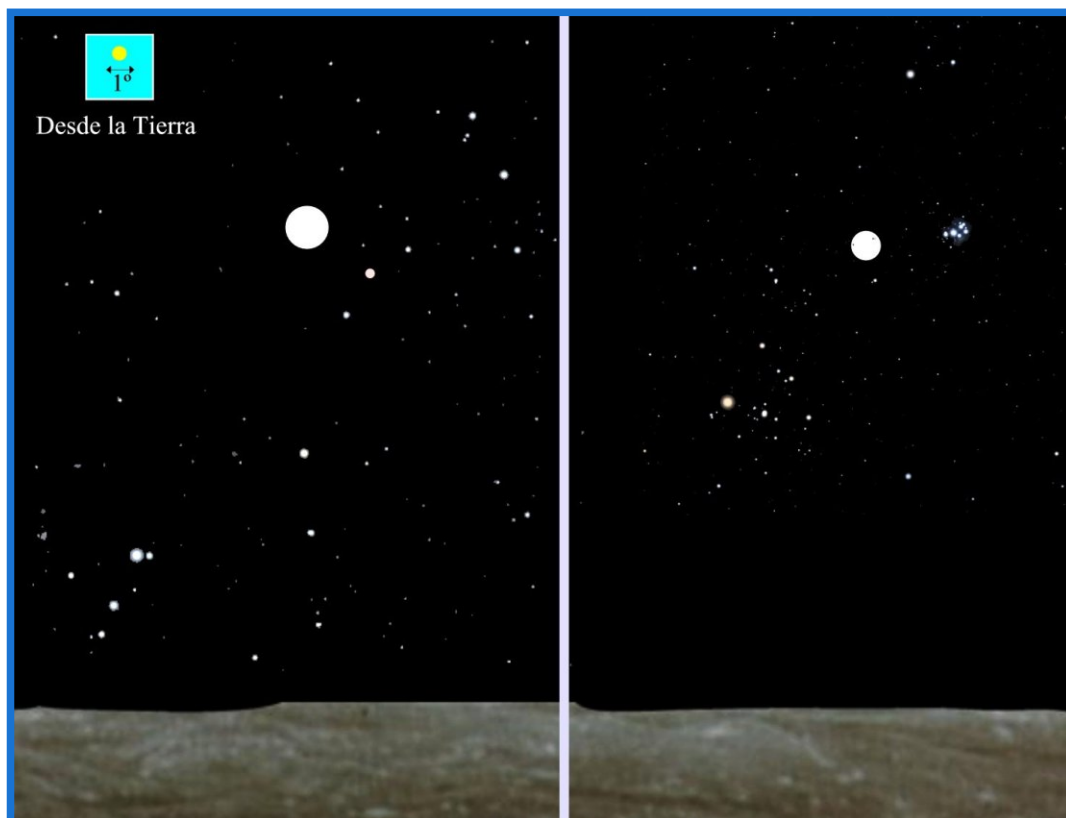


Fig. 1. Imagen supuesta del cielo de Mercurio con el Sol en su máximo y mínimo tamaño aparente y las estrellas sobre un cielo negro. En el recuadro superior izquierdo el tamaño del Sol a la misma escala visto desde la Tierra.

2- En ocasiones el Sol retrocede en el cielo de Mercurio.

El movimiento aparente del Sol en el cielo de cualquier planeta es consecuencia de los

dos movimientos principales de éste. No solo la rotación, sino también la traslación. Mercurio, al igual que la Tierra, rota hacia el este, por lo que aparentemente el Sol se mueve hacia el oeste.

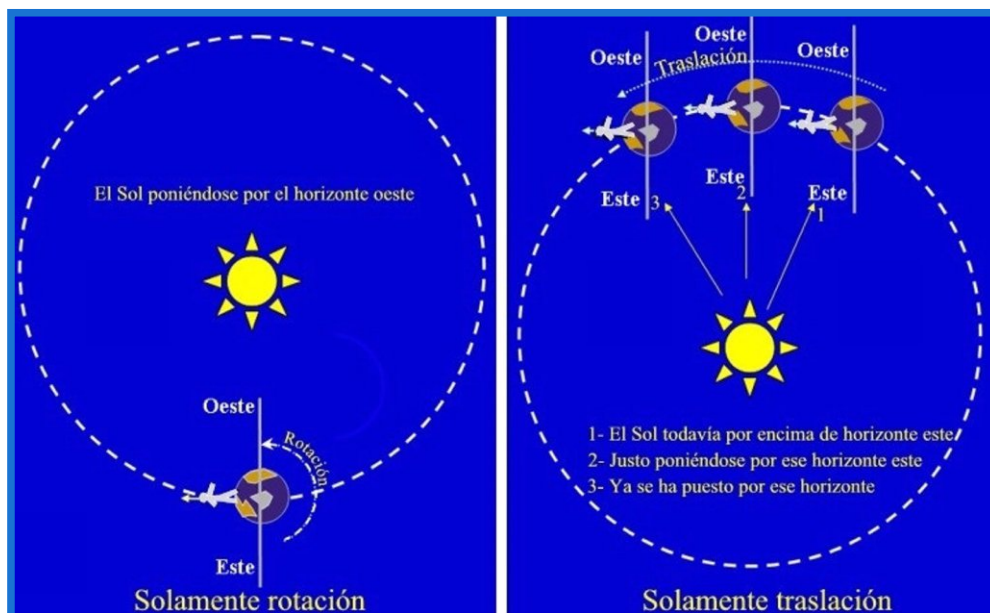


Fig. 2. Situaciones hipotéticas: en la que solo hubiera rotación (izquierda) o solo traslación (derecha). Los puntos cardinales están referidos al observador que en la base de la flecha en la primera vería moverse el Sol hacia el oeste, por donde se ocultaría, mientras en la segunda lo vería irse por el este.

Pero si no hubiera rotación, debido a la traslación veríamos moverse el Sol hacia el este, una vuelta cada año.

Como en la realidad se producen los dos movimientos, siempre prevalece el efecto del más rápido en velocidad angular (en la Tierra la rotación y por eso vemos el Sol moverse hacia el oeste). En Mercurio también es un poco más rápida la rotación y el Sol se vería moverse lentamente hacia el oeste. Pero cuando el planeta está cerca del perihelio la traslación se acelera de acuerdo con la segunda ley de Kepler, y su velocidad angular llega a ser más rápida que la rotación. Entonces el efecto de la traslación prevalece y desde allí el Sol se vería moviéndose en sentido contrario durante un tiempo (unos 9 días terrestres).

3- La duración del día en Mercurio según algunas fuentes es el triple de lo que se dice en otras.



Fig. 3. Ambos datos contradictorios se repiten en otras muchas webs, sobre todo el erróneo.

Paradójicamente, el valor erróneo (58.65 días terrestres) es el que se encuentra más frecuentemente, aunque se podría matizar que ese es el valor del día sidéreo (la duración de una rotación) mientras que 176 es el día solar.

Para diferenciar ambos conceptos hay que aclarar que cuando decimos que en la Tierra el día dura 24 horas, nos referimos al día solar: a lo que vemos que tarda el Sol en pasar

nuevamente por el meridiano y repetir así su posición, mientras que el día sidéreo es la duración de la rotación: 23h 56m.

Está claro que si solo decimos “día” nos estamos refiriendo al “día solar”, que es lo que siempre se entiende por “día”, y quizás el frecuente error con Mercurio venga de que se han tomado los datos de las habituales tablas de rotación de los planetas y, claro, nadie ha estado allí para ver lo que tarda el Sol en salir en dos días consecutivos.

Más adelante se explica con gráficos, esta circunstancia.

4- Los extraños números del planeta Mercurio sobre la duración de su día.

Debido a la situación de Mercurio en el Sistema Solar, próximo a nuestra estrella, sus movimientos de traslación y rotación tienen una duración muy diferente de lo habitual y de ello derivan los curiosos números que se



Fig. 4. Por supuesto, en todos los casos se ha tomado el día solar, y el último recoge la paradoja 3 que se acaba de explicar.

recogen en la figura y las mencionadas paradojas.

Por un lado al ser el planeta más cercano al Sol, es el que se mueve más rápido y tiene el periodo de traslación más corto. Esto debe ser necesariamente así, y su duración está determinada exactamente por la tercera ley de Kepler de acuerdo con su distancia media al Sol. El año de Mercurio (mejor dicho su traslación) dura solo **88** días terrestres.

Por otra parte la rotación es muy lenta: Mercurio necesita nada menos que **58,6** días terrestres en completar un giro sobre su eje, y posiblemente se haya ralentizado debido a las fuerzas de marea siendo el resultado de una resonancia gravitatoria ya que los dos periodos están en una relación exacta 3:2. Cada 3 rotaciones Mercurio da exactamente 2 vueltas alrededor del Sol, completando un periodo de 176 días terrestres en total.

El gráfico de la figura 5 recoge el periodo completo de 176 días terrestres durante los que el primer planeta completa 2 traslaciones (y por tanto 3 rotaciones tal como se ha dicho), ¡pero un solo día!

Aparecen ahí sucesivas posiciones de Mercurio, tanto su situación en la órbita respecto al Sol como la orientación cambiante debido a la rotación, de manera que las flechas que se han dibujado surgen siempre desde el mismo punto de la superficie del planeta y dan idea de dicha rotación.

El intervalo entre las diferentes posiciones es siempre de 4.4 días terrestres, que se ha tomado arbitrariamente para redondear el número de ellas.

Aunque los intervalos de tiempo son iguales, el recorrido no es siempre igual (es claramente mayor cuando está cerca del Sol), como recoge la segunda ley de Kepler.

Las consecuencias de estas situaciones son diversas, pero la más clara es que en este planeta **un día** dura exactamente **dos años** y para ello se tienen que completar **3 rotaciones**.

Efectivamente, en la posición 1 es mediodía en el punto de arranque de la flecha, y no vuelve a serlo hasta la posición 41, que ocurre 176 días terrestres después cuando la flecha vuelve a apunta al Sol.

Analizando paso a paso la situación en ese punto:

En 1 es mediodía, en 11 se pone el Sol y comienza la noche, en 21 es medianoche y se cumple un año, en 31 amanecer, y en 41 vuelve a ser mediodía, dos años después, a la vez que se completa la tercera rotación.

La primera rotación se cumplió entre las posiciones 14 y 15, cuando la flecha vuelve a estar dirigida hacia la izquierda como en el inicio (1) y la segunda poco antes de la 27.

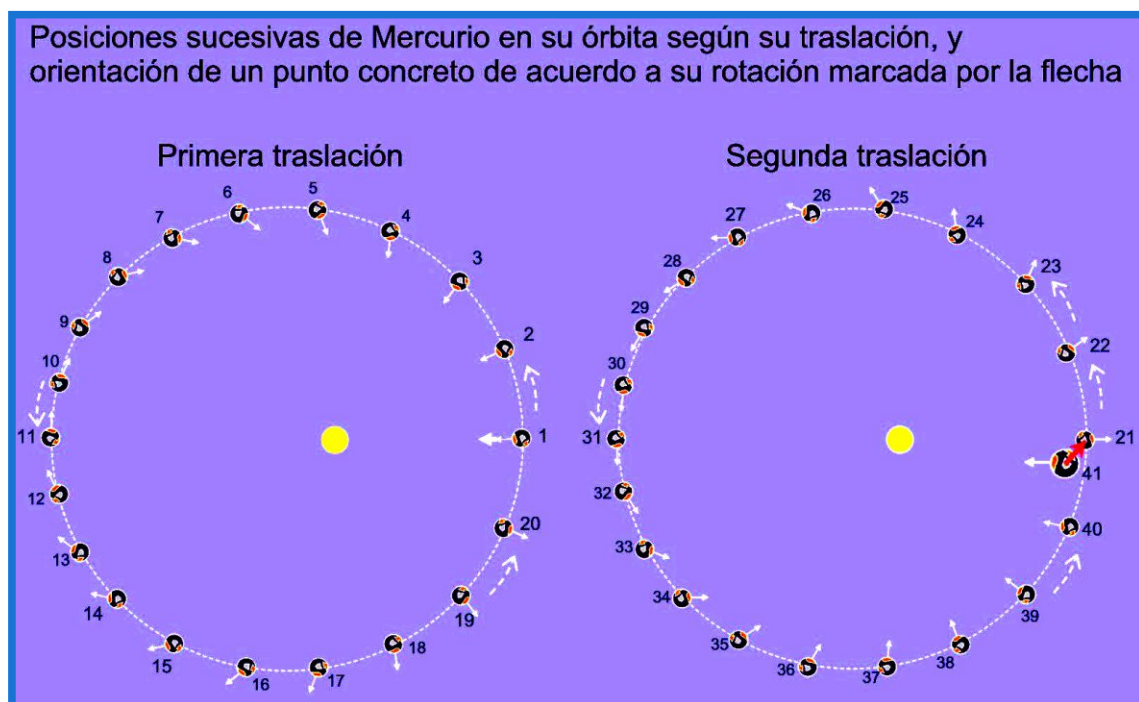


Fig. 5. La última posición (la número 41), debería situarse exactamente en el mismo lugar que la 21, como indica la flecha roja, pero se ha separado para que no la oculte.

5- En la mayoría de los lugares de Mercurio el Sol sale una vez cada dos años pero en algunas zonas sale dos veces cada día.

Tal como se ha dicho en el punto anterior, en Mercurio un día dura 2 años (2 traslaciones) y por ello el Sol saldría cada 2 años.

Sin embargo, por lo dicho en el apartado 2, en ocasiones el Sol retrocede, por lo que si eso ocurre cuando acaba de salir se ocultará nuevamente retrocediendo como si le diera pereza

alumbrar un nuevo día y cuando recupere su dirección normal volverá a salir.

Lo mismo sucede con la puesta de Sol, y estos dobles amaneceres o puestas ocurren solo en las cercanías de los meridianos 90° y 270° haciéndolo todos los días. Se ha cartografiado la superficie de Mercurio tomando la referencia del meridiano 0° aquel en que el Sol retrocede a mediodía.

Una explicación gráfica de las situaciones para que esto ocurra se recoge en el gráfico de la figura 7. En este caso con la doble puesta de Sol.



Fig. 6. Doble amanecer en Mercurio.

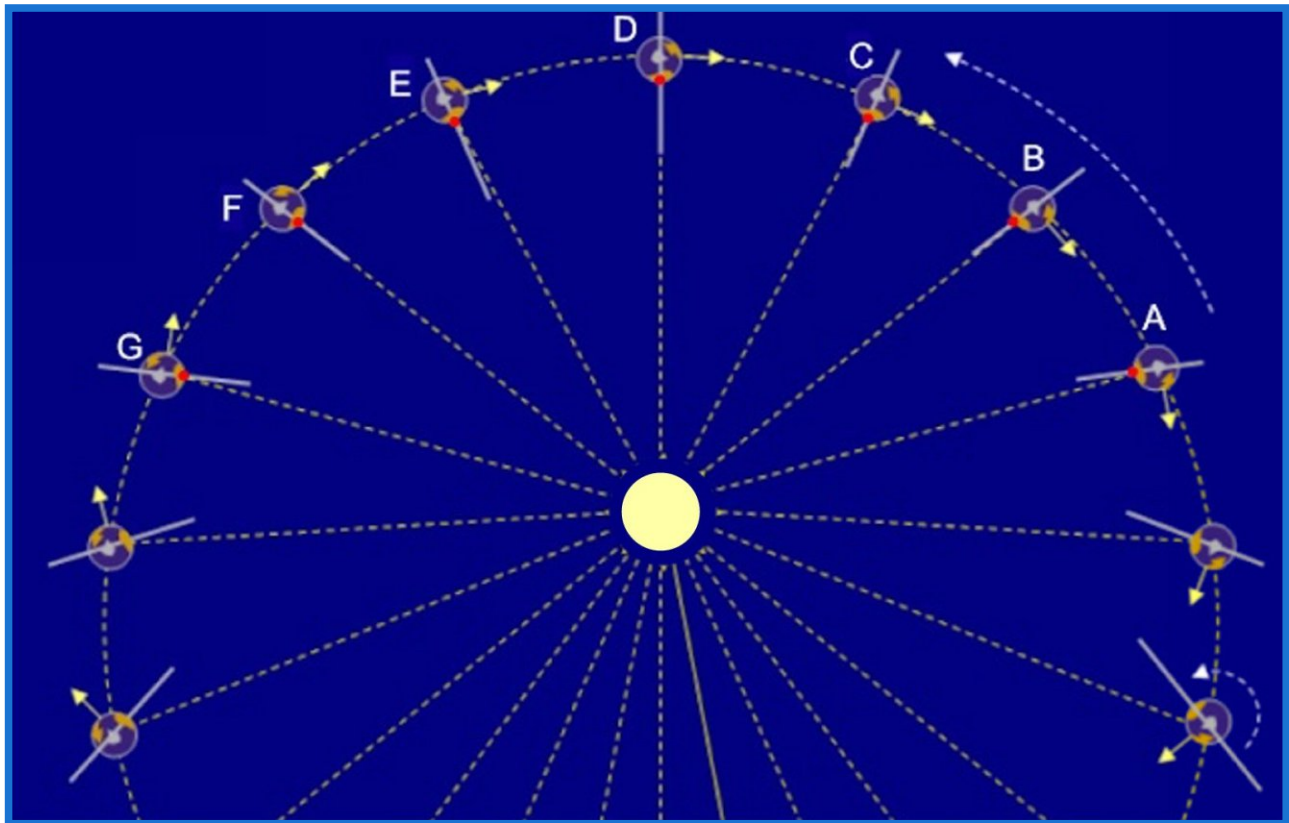


Fig. 7. Como ya se ha dicho, estas extrañas circunstancias de los dobles amaneceres o puestas se deben al paso de Mercurio por su perihelio (punto D) y el consecuente aumento de la velocidad angular: En el gráfico se representan posiciones a igual diferencia de tiempo, pero con recorridos mayores en las cercanías del perihelio

El segmento rectilíneo que atraviesa el planeta representa el horizonte del punto donde arranca la flecha, que determina el punto de observación. Desde ese punto el retroceso ocurre con el Sol en el horizonte y se produce un doble ocaso: En A el Sol está todavía por encima del horizonte, en B se pone, en C está bajo el horizonte, en D vuelve a salir retrocediendo y se mantiene visible en E. En F se pone nuevamente y en G es de noche definitivamente.

- Desde el lugar marcado con un punto rojo se produce el retroceso del Sol en el cielo, en torno al mediodía: En el momento A es por la mañana, el Sol situado al Este del meridiano se va acercando a él, en B culmina en dirección Sur atravesando el meridiano por lo que podría decirse que es mediodía, en C está ya al Oeste del meridiano, en D vuelve a

atravesar el meridiano retrocediendo (segundo mediodía), en E se vuelve a situar al Este del meridiano, en F vuelve a pasar por dicho meridiano y en G se coloca definitivamente al Oeste del mismo.

6- Aunque Venus y Marte se acercan a la Tierra mucho más que Mercurio, si en un viaje imaginario en una fecha elegida al azar tres expediciones llegasen a esos planetas (bien a su superficie o en una órbita baja para evitar las nubes) provistos de telescopios para observar el cielo, lo más probable es que ese día fuera en Mercurio desde donde se viese más grande nuestro planeta azul.

Esta circunstancia es consecuencia de que, aunque parezca sorprendente, en la mayoría de las ocasiones **Mercurio es el planeta más cercano a la Tierra.**

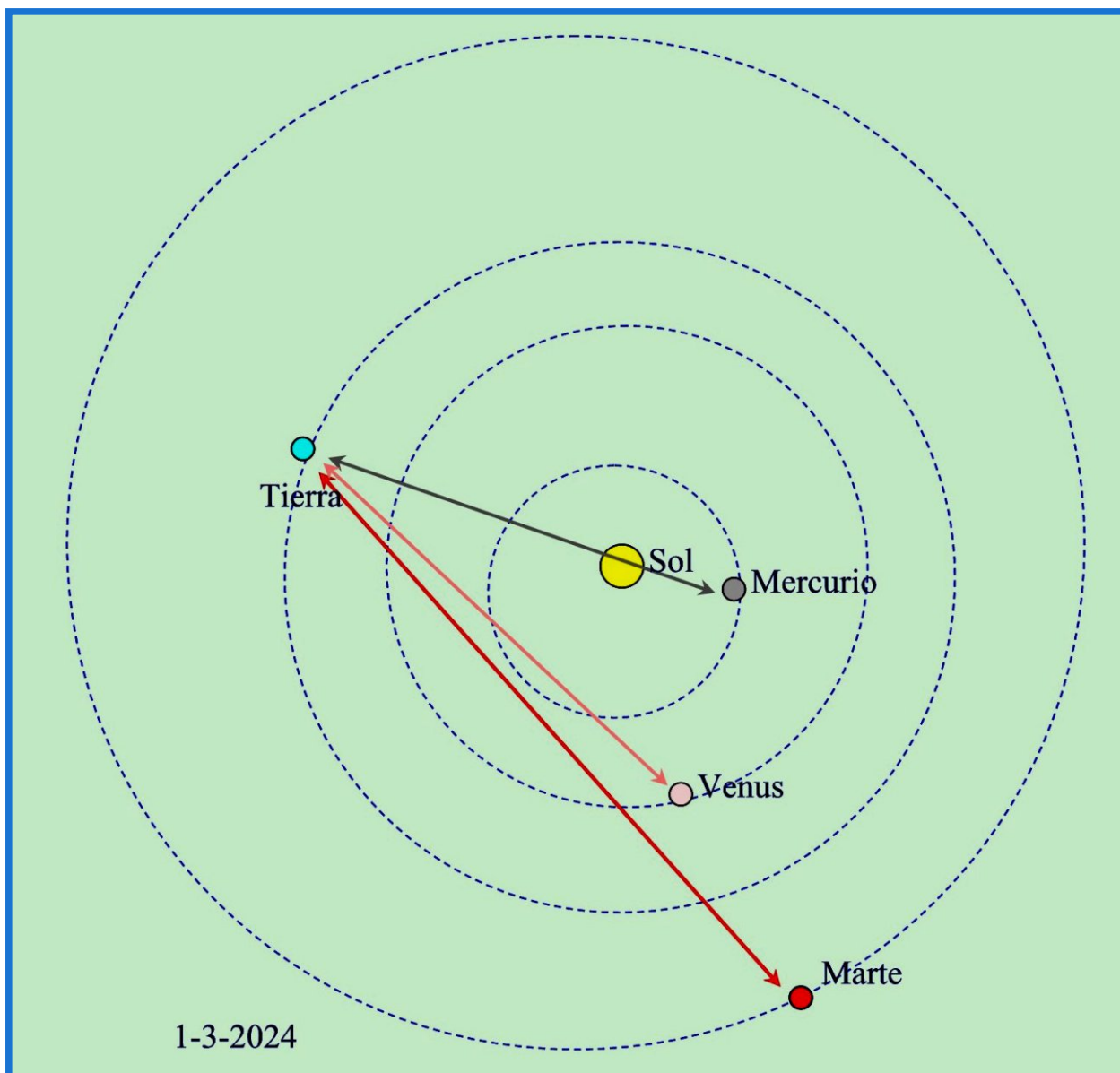


Fig. 8. A modo de ejemplo, la situación a principio de marzo de 2024, la última vez que Mercurio estuvo en el lugar más lejano posible respecto la Tierra, pero a pesar de ello estaba más próximo que Venus y que Marte

En una fecha al azar tanto Venus como Marte o Mercurio podrían ser el planeta más cercano a la Tierra, pero estadísticamente el que más veces lo sería es Mercurio, ya que esto no depende solo de su posición sino también de las posiciones de los otros.

Venus y Marte son los planetas que más se acercan, bastante más que Mercurio, pero éste es el que menos se aleja, (cuando están en la zona opuesta al Sol).

7- Desde la Tierra, Mercurio es el planeta más difícil de observar, pero desde allí nuestro planeta brilla espectacular en su cielo y es visible todas las noches y todos los días.

Mercurio es difícil de observar desde aquí por ser el planeta más interior y su elongación, o separación angular, es pequeña. Pero desde allí la Tierra es planeta exterior y siempre que esté por encima del horizonte se verá en plena noche, magnífico cuando esté en oposición con una elongación próxima a

180° y además, por lo dicho antes, también se verá de día, moviéndose al este o al oeste del Sol.

Por supuesto, no será visible cuando se encuentre exactamente al otro lado del Sol (en conjunción vista desde allí) o muy próximo a esta posición. Pero eso solo ocurre durante una pequeña parte de la noche o del día, cuando desde aquí Mercurio se sitúa en conjunción superior.

8- Aunque es el planeta que se mueve de manera más irregular alrededor del Sol, visto desde cualquier lugar de Mercurio, el astro rey describe todos los días el mismo recorrido respecto al horizonte, sale (y se pone) siempre por el mismo punto y no hay estaciones.

La segunda parte es consecuencia directa de que su eje está situado perpendicular a su plano de traslación, siendo el único caso entre los planetas del Sistema Solar.

Su movimiento irregular en velocidad y en distancia al Sol es consecuencia de la excentricidad de su órbita y no tiene nada que ver con la posición del eje.



Fig. 9. Si desde un lugar de Mercurio viésemos salir el Sol, estaríamos seguros que desde allí todos los días aparecería por el mismo lugar, lo que no ocurre en ningún otro planeta ni satélite del Sistema Solar.

Es cierto que la velocidad del Sol durante el día de Mercurio es variable, pero todos los días es la misma en una determinada zona. Por ejemplo desde un lugar puede ocurrir que el Sol salga rápido por la “mañana” y se frene por la tarde, e incluso, como ya se ha dicho, retroceda un poco. Pero al día siguiente lo mismo: siempre en el mismo momento del día y en el mismo lugar del cielo

9- Hay lugares en Mercurio en los que nunca da el Sol, y otros desde los que siempre es de día.

La rotación de un planeta origina el día y la noche. Pero visto **desde el polo**, el Sol se mueve casi paralelo al horizonte casi a la misma altura (ligeramente más alto o más bajo de un día para otro), y en cualquier planeta excepto el primero, es día perpetuo en primavera y verano y noche perpetua en otoño e invierno.

Pero como se acaba de mencionar, en Mercurio el eje de rotación no está inclinado, no hay estaciones, el recorrido del Sol es igual todos los días y desde el polo el Sol se mueve siempre según una trayectoria a una misma altura, rozando el horizonte.

En el fondo de un cráter situado cerca del polo las paredes del cráter lo ocultarán y nunca llegará la luz solar, mientras que en la cima de un monte de esa zona, de altura mayor que otros cercanos, siempre será de día: Son los llamados picos de luz perpetua, que aunque no se hayan cartografiado es seguro que existen.

Efectivamente, en algunos lugares próximos a cada uno de los dos polos y dependiendo de la orografía, de la altura y situación de los montes o crestas de cráteres de la zona, siempre será de día: Si imaginamos un plano perpendicular al eje de rotación que toque al planeta, como el

que se ha representado de color verde en la imagen de la figura 10, el punto de tangencia recibirá la luz del Sol siempre.

En definitiva, que a quienes les guste tomar el Sol allí podrían hacerlo para toda la

eternidad, mientras que si hay alguien a quien le moleste la luz, en otro lugar cercano podría estar tranquilo.

Una paradoja más del primer planeta de nuestro Sistema Solar

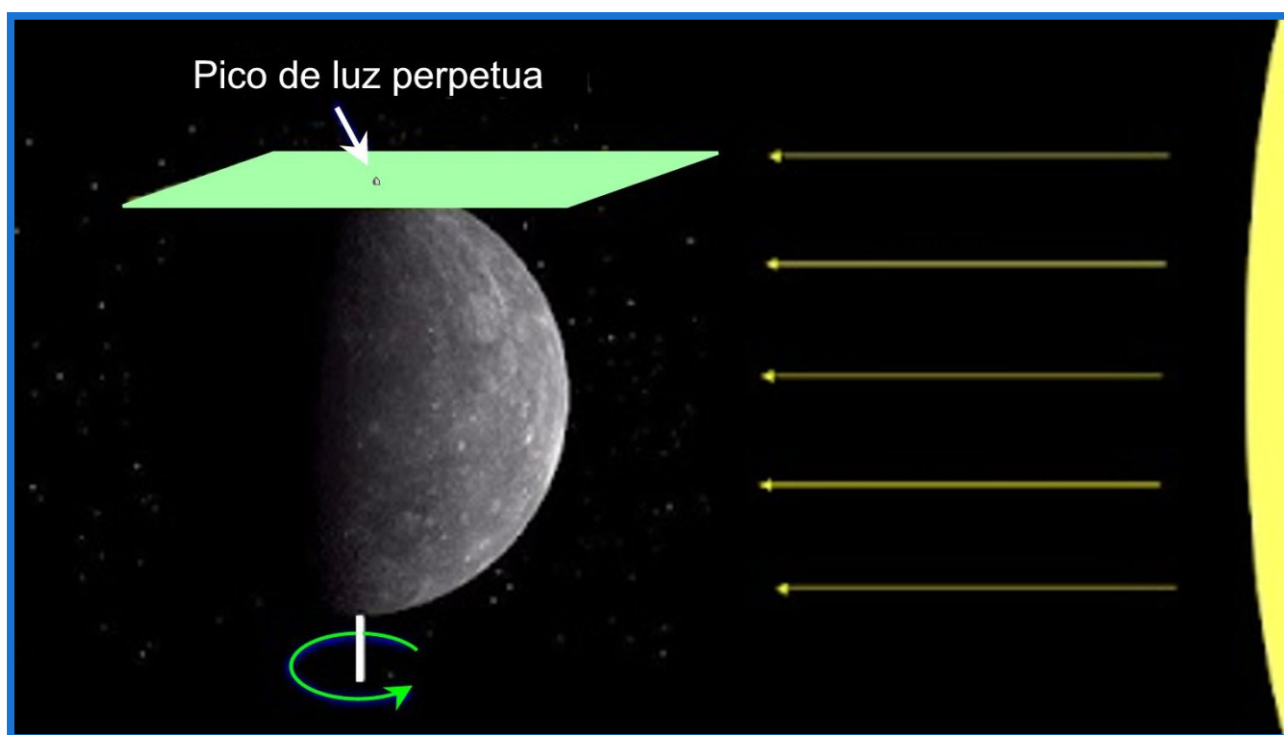


Fig. 10. Situación esquemática de la iluminación que recibe Mercurio del Sol, su eje vertical y la seguridad de la existencia de lugares permanentemente iluminados.



Del 30 de junio al 4 de julio 2024, se celebran los XV Encuentros de ApEA (Asociación para la Enseñanza de la Astronomía). Se celebran en la isla de La Palma, con una temática centrada en las misiones espaciales y el vulcanismo extraterrestre.

Se cumplen 45 años del descubrimiento de una actividad volcánica fuera de la Tierra, en el satélite Ío del planeta Júpiter. En 1979, analizando las imágenes enviadas por la sonda Voyager 1, se realizó este importante descubrimiento que amplió nuestra visión del Sistema Solar. Por otra parte, la isla de La Palma es un ejemplo del vulcanismo terrestre, además de ser uno de los mejores lugares del hemisferio norte para la observación. Este paralelismo será uno de los hilos conductores de los XV Encuentros.

Las dos sondas Voyager se lanzaron en 1977, su misión era explorar Júpiter, Saturno, y la Voyager 2, también Urano y Neptuno. Estas misiones espaciales proporcionaron las primeras imágenes con detalle de Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, y de sus satélites. Las misiones espaciales y los avances que suponen en Astronomía, serán el segundo hilo conductor de estos Encuentros.

Durante los Encuentros habrá ponencias y talleres que tratarán estas y otras temáticas y que, como presidenta, os invito a descubrir del 30 de junio al 4 de julio de 2024, en la hermosa isla de La Palma.

Carolina Clavijo Aumont

Presidenta de ApEA



Clave de colores:

Ponencias (30 min)

Píldoras (10 min)

Talleres (60 min)

PROGRAMA

Domingo
30 jun

16:00 **Excursión al Volcán Tajogaite**
(en erupción durante 85 días en 2021)

Lunes
1 jul

8:30 **Registro y recogida de acreditaciones**
IES Alonso Pérez Díaz (Pl. Santo Domingo, s/n)

9:00 **Acto inaugural**

9:30 **Conferencia inaugural: “Vulcanismo extraterrestre”**
Jesús Martínez Frías, director del Instituto de Geociencias (IGEO, CSIC-UCM).

10:15 **“Vidas semi-paralelas (Volcanes & Estrellas)”**
Enrique Aparicio
“La Palma, la tematización de una isla”
Antonio González
“Premio Fernando Cabrera de Astronomía”
Antonio González

11:15 **Pausa café.** Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.

12:00 **“Cúmulos estelares abiertos”**
Joaquín Álvaro
“El Universo documentado”
Juan Tomé
“Eratóstenes y el radio de la Tierra”
Anicet Cosialls
“El Diagrama de Diapasón de Hubble”
Anicet Cosialls
“La medida del meridiano de París. Geodesia francesa en Levante”
Antonio Arribas y Agustín Laviña

14:00 **Almuerzo.** Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.

16:00 **“Cúmulos estelares abiertos – Parte I”**
“Cúmulos estelares abiertos – Parte II”
Joaquín Álvaro

18:00 **Conferencia abierta al público: “El impacto de la Astronomía en la sociedad”**
Casiana Muñoz Tuñón, subdirectora del Instituto de Astrofísica de Canarias, astrónoma y responsable de la caracterización de los Observatorios

19:30 **Cóctel de bienvenida: restaurante La Chalana, Pza. Santo Domingo.**
(Cena libre)



PROGRAMA

Clave de colores:
Ponencias (30 min)
Píldoras (10 min)
Talleres (60 min)

Martes 2 jul	
9:00	“Cajita para ver las líneas de Fraunhofer del Sol” <i>Ricardo Moreno</i> “Investigación astronómica escolar en el observatorio MPC D23” <i>José Manuel Pérez</i> “Las astrocápsulas como herramientas de divulgación astronómica” <i>Nicolás Cahen</i> “Un radiotelescopio para el Aula de Astronomía de Fuenlabrada” <i>Ángel Pérez</i> “La Odisea de la Voyager” <i>Mª Teresa y Antonio R. Acedo del Olmo</i> “La Esfera Celeste en Geogebra” <i>Mónica López</i>
11:15	Pausa café. Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.
12:00	Subida al Observatorio del Roque de los Muchachos
13:30	Grupo A: Centro de Visitantes Roque de los Muchachos Grupo B: Picnic
14:15	Grupo A: Picnic Grupo B: Centro de Visitantes Roque de los Muchachos
15:30	Visita al Gran Telescopio de Canarias (GTC) y telescopios MAGIC
18:00	Visita al Pico Roque de los Muchachos
19:00	Observación solar desde el Centro de Visitantes, por Raquel Rodríguez y Carmelo González de AsterArk.
19:30	Picnic en el exterior del Centro de Visitantes
20:30	“Arte, historia y astronomía”, por María José Briceño y Juan Nicolás León de StArt La Palma.
20:45	Actividades didácticas al aire libre. Observación de Mercurio a la puesta de sol.
22:30	Observación con telescopios
24:00	Inicio del regreso a Santa Cruz de la Palma



Clave de colores:

Ponencias (30 min)

Píldoras (10 min)

Talleres (60 min)

PROGRAMA

Miércoles

3 jul

10:00 “El papel del concurso Catch a Star en la educación de Astronomía en Europa”

Hristo Stoev

“Cielo y Naturaleza: un nuevo impulso astronómico para Borobia”

Alberto Jiménez y Azahara Rojas

11:15 Pausa café. Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.

12:00 “Un Anillo para gobernarlos a todos”

Arturo Bravo Calderón

“Experiencia sencilla para conocer la calidad del cielo”

Eduardo Zabala

“La European Association for Astronomy Education (EAAE), 30 años educando y divulgando Astronomía”

M^a Teresa y Antonio R. Acedo del Olmo

“Horizontes Astronómicos”

Juan Carlos Rodríguez

“El rover Perseverance en los Bachilleratos de Investigación”

Iñaki Ordóñez

14:00 Almuerzo. Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.

16:00 “La Ciencia de los viajes espaciales”

Anicet Cosialls

“Pa tirar cohetes”

Sebastián Cardenete

18:00 Ruta por Santa Cruz de la Palma

21:00 Cena de clausura: Club Náutico Sta. Cruz de la Palma

Jueves

4 jul

9:00 “escApEate” (Escape Room) – 1ª sesión

Eva Dominique y Azahara López

(Nota: aforo limitado a 15 personas. Se seguirá orden de inscripción)

10:00 Charla abierta al público, “Las misiones Voyager: explorando el Sistema Solar y el currículo educativo”

Antonio Eff-Darwich, doctor en Astrofísica y profesor de Didáctica de las Ciencias Experimentales de la Universidad de La Laguna

11:15 Pausa café. Kiosco Eliseo, Pza. José Mata.

12:00 “escApEate” (Escape Room) – 2ª sesión

Eva Dominique y Azahara López

(Nota: aforo limitado a 15 personas. Se seguirá orden de inscripción)

13:00 ASAMBLEA ApEA



ApEA, la Asociación para la Enseñanza de la Astronomía, nació en 1995 para acoger a todas las personas que se dedican a la enseñanza de la Astronomía en centros educativos, planetarios, museos de la ciencia, agrupaciones de aficionados y clubes de estudiantes.

ApEA engloba a todos los interesados en la enseñanza de todos los niveles educativos reglados -desde la enseñanza primaria hasta la universitaria- así como los no reglados.

También organiza reuniones de formación para sus socios y publica materiales de interés didáctico, como la presente revista.

Más información en www.a pea.es

