

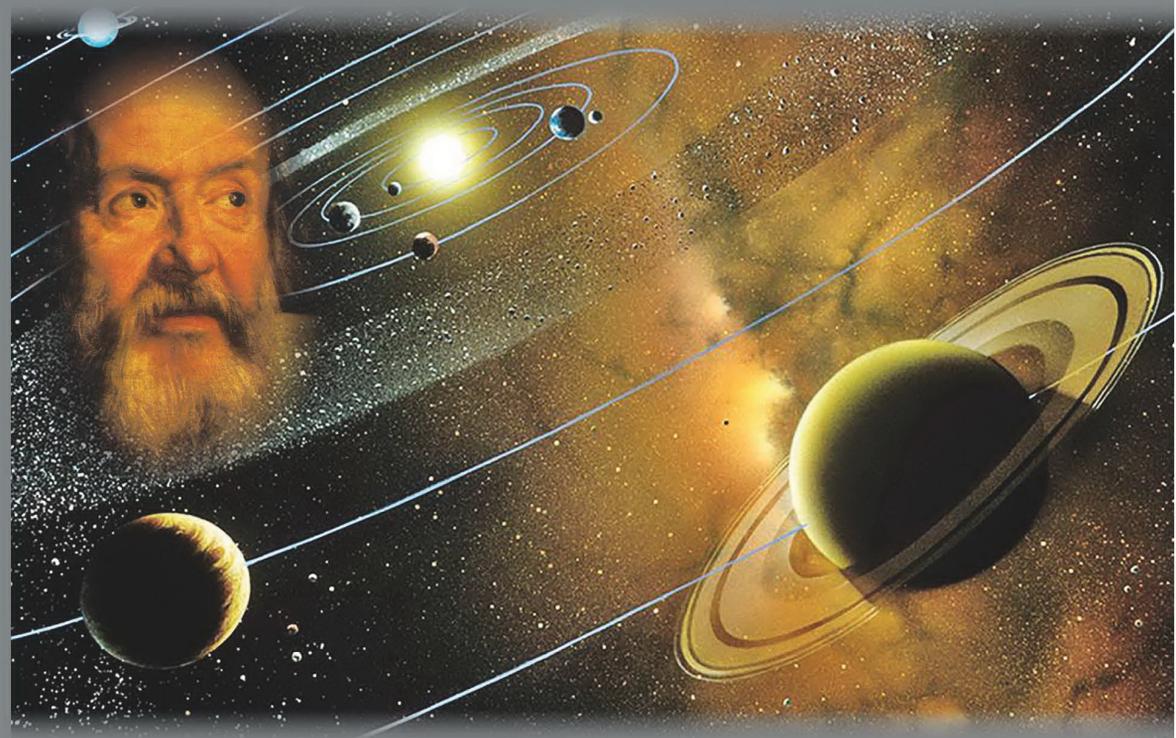
GALILEO GALILEI

y el problema de la longitud

LUIS MEDEROS MARTÍN

ENRIQUE VELASCO CARAVACA

FRANCISCO JOSÉ GONZÁLEZ GONZÁLEZ



FUNDACIÓN
ALVARGONZÁLEZ



ROBINSON
LIBRERÍA NÁUTICA

Galileo Galilei y el problema de la longitud

Esta obra fue galardonada con el
“Accésit”
en la edición de los premios
Librería Náutica Robinson/Fundación Alvargonzález
del año 2021

Luis Mederos Martín
Consejo Superior de Investigaciones Científicas

Enrique Velasco Caravaca
Universidad Autónoma de Madrid
Agrupación Astronómica de Madrid

Francisco José González González
Real Instituto y Observatorio de la Armada



© Robinson Librería Náutica
Santo Tomé, 6 - 28004 Madrid
robinson@nauticarobinson.com

© Luis Mederos Martín
© Enrique Velasco Caravaca
© Francisco José González González

Coordinación editorial:

Alejandro Anca Alamillo

Impresión y encuadernación:

Rivadeneira

Impreso en España - Printed in Spain

Depósito Legal: M-13770-2022

ISBN: 978-84-09-41089-7

Índice

1	La posición geográfica en el mar. Un problema ancestral	13
1.1	La navegación marítima antes del siglo XV	13
1.2	La exploración portuguesa y el cálculo de la latitud	23
1.3	El problema de la longitud: los concursos oficiales	35
2	Galileo y la astronomía. El telescopio	47
2.1	Los orígenes del telescopio	47
2.2	Galileo y sus primeras observaciones	49
2.3	El descubrimiento de los satélites de Júpiter	52
2.4	Los problemas de Galileo con la Iglesia	56
3	La solución de Galileo al problema de la longitud	71
3.1	La observación de los eclipses de los satélites de Júpiter	71
3.2	Propuesta realizada al concurso de la Corona española	82
3.3	La propuesta realizada al concurso de los Países Bajos	87
3.4	El método de Galileo y la cartografía terrestre	89
4	El siglo XVIII: la solución definitiva	99
4.1	El método de las distancias lunares	101
4.2	El método del transporte de la hora	107
4.3	Introducción de los métodos en la España del siglo XVIII	109

5	La observación de los eclipses	123
5.1	Las efemérides modernas de los satélites de Júpiter	123
5.2	Características orbitales de los satélites galileanos	138
5.3	Fenómenos en el sistema de satélites galileanos . . .	140
5.4	Curvas de luz	147
5.5	El estudio científico de los eclipses	148
5.6	Observación visual de un eclipse	151
5.7	Ejemplo de observación	160
6	Telescopios	173
6.1	Partes de un telescopio	175
6.2	Tipos de telescopios	177
6.3	Aberraciones	179
6.4	Características de la imagen	180
6.5	Monturas	181
7	Apéndice. Tabla de eclipses 2022-2024	183
8	Bibliografía	193

El *problema de la longitud*, es decir la determinación de la longitud geográfica en la que se encuentra un barco cuando navega en alta mar, es posiblemente uno de los problemas científico-técnicos que más tiempo llevó a la humanidad resolver, a pesar de que, tras el comienzo de la navegación oceánica a finales del siglo XV, fue muy pronto evidente su importancia y, en consecuencia, se convirtiese en una cuestión de estado para las potencias navales de la época. Esto ocasionó el establecimiento de suculentos premios para quien fuese capaz de resolver el problema. Se ha escrito mucho sobre el premio establecido por el Parlamento inglés en 1714 que ocasionó la contienda entre el relojero John Harrison y la ciencia oficial de la época, representada por Nevil Maskelyne por aquel entonces Astrónomo Real del observatorio de Greenwich. Pero el primer premio había sido convocado siglos antes por Felipe II en 1567, premio que fue incrementado posteriormente por su hijo Felipe III en 1598. A estos concursos, y a los convocados con posterioridad por otras potencias, se presentaron diversas ideas, hasta la solución final al problema que llegó a mediados del siglo XVIII con la invención por Harrison de un cronómetro capaz de transportar a bordo la hora del meridiano de referencia con suficiente precisión.

Algunas de esas ideas fueron muy relevantes, aunque no fuesen finalmente aplicables en la mar. Una de ellas fue la propuesta de Galileo Galilei presentada en 1612 al concurso convocado por Felipe III. La idea de Galileo consistía en utilizar los eclipses de los satélites de Júpiter, que él mismo había descubierto en enero de 1610, como reloj astronómico: el marino llevaría a bordo las predicciones de las horas a las que ocurrirían esos eclipses de manera que al observarlos durante la travesía sabría la hora del meridiano de referencia. Aunque su idea se demostró impracticable en un barco en movimiento, sí fue el método utilizado durante mucho tiempo para determinar la longitud en tierra firme y mejorar así la cartografía. Después de caer en desuso en este ámbito, los eclipses comenzaron a jugar un papel central en el desarrollo de la mecánica celeste del sistema joviano, tan importante para la astronáutica y la astronomía fundamental, y continúan haciéndolo en nuestros días.

Este libro trata la cuestión del problema de la longitud y, en particular, la contribución de Galileo, de una manera novedosa: no se centra en un único punto de vista, histórico o técnico, sino que trata ambos aspectos. Se dirige pues a una audiencia muy amplia, desde los lectores interesados en la historia de la navegación a los aficionados a la astronomía que se planteen el reto de emular hoy día a Galileo determinando la longitud en la que se encuentran, o incluso deseen contribuir a la mejora del cálculo de las efemérides jovianas, observando eclipses de los satélites de Júpiter mediante un simple telescopio de aficionado.

El libro cuenta con diferentes *cuadros técnicos* repartidos a lo largo del texto. Cada cuadro contiene información técnica relevante para lo que se discute en el texto general en la zona del libro en la que se encuentra. Con ello hemos pretendido que cada lector pueda elegir el nivel de profundidad en la materia al que quiere llegar.

L. Mederos, E. Velasco y F. J. González
Enero de 2022.

Para Maicu, Marta y Ana.

Lista de ilustraciones y su procedencia

A continuación se incluye un listado de las ilustraciones de este libro que no son de elaboración propia. Los autores agradecen a las diferentes instituciones el permiso para su utilización.

Capítulo 1

1.1. Rosa de los vientos (grabado incluido en el *Arte pratica de navegar e regimento de pilotos*, 1681). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

1.2. Fragmento del Atlas Catalán de Abraham Cresques (ca. 1375). Bibliothèque Nationale de France (París). Wikipedia - Dominio público.

1.3. Corredera de barquilla. Licencia Creative Commons.

1.4. Carabelas del siglo XVI. Del Álbum d'o seculo (1900). Dominio público.

1.5. Astrolabio astronómico de Ibrahim ibn Sa'id al-Sahli. Museo Arqueológico Nacional (Madrid). Dominio público.

1.6. Réplica de un astrolabio español del siglo XVI. Musée National de la Marine (París). Dominio público.

1.7. Don Enrique el Navegante (1394-1469) (detalle del Retablo de San Vicente, ca. 1470). Museu Nacional de Arte Antiga (Lisboa). Wikipedia - Dominio público.

1.8. Ballestilla. Musée National de la Marine (París). Dominio público.

1.9. Cristóbal Colón (1451-1506) (detalle de la Virgen de los Navegantes, ca. 1531-1537). Real Alcázar de Sevilla. Wikipedia - Dominio público.

1.10. Carta de Juan de la Cosa (1500). Museo Naval (Madrid). Wikimedia Commons, dominio público.

1.11. Fernando de Magallanes (1480-1521). Museo Naval (Madrid). Wikimedia Commons, dominio público.

1.12. Ampolleta (el reloj de arena de los navegantes del siglo XVI). Wikimedia Commons, Licencia de Documentación Libre GNU.

1.13. Vicente Yáñez Pinzón (1462-1514). Museo Naval (Madrid). Wikimedia Commons, dominio público, Licencia, Licencia CC-BY-SA 4.0.

1.14. Gerhard Mercator (1512-1594) (grabado incluido en el *Atlas or a geographicke description of the world*, 1636). Wikipedia - Dominio público.

Capítulo 2

2.1. Hans Lippershey (1570-1619) (grabado incluido en el libro titulado *De vero telescopii inventore*, 1655). Wikipedia - Dominio público.

2.2. Galileo Galilei (1564-1642). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

2.3. Galileo con su telescopio en la Plaza de San Marcos de Venecia. Welcome Library (Londres). Wikimedia Commons.

2.4. *Sidereus nuncius* de Galileo Galilei (Venecia, 1610. Portada del ejemplar conservado en la Houghton Library). Harvard University (Cambridge). Wikipedia - Dominio público.

2.5. Esquema de la primera observación de Júpiter y sus satélites el 7 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*). Wikipedia - Dominio público.

2.6. Esquema de la observación de los satélites de Júpiter realizada la noche del 8 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*). Wikipedia - Dominio público.

2.7. Esquema de la observación de los satélites de Júpiter realizada la noche del 10 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*). Wikipedia - Dominio público.

2.8. Johannes Kepler (1571-1630) (izquierda). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud. Tycho Brahe (1546-1601) (derecha). Skokloster Castle. Wikipedia - Dominio público.

2.9. Nicolás Copérnico (1473-1543). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

2.10. *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico (portada de la primera edición, 1543). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

2.11. *Dialogo* de Galileo Galilei (portada de la edición de 1710). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

2.12. Satélites de Júpiter fotografiados con un telescopio moderno no muy sofisticado. *Jupiter and Moons through a 10" lx200 telescope*, autor Jan Sandberg. Wikipedia . Wikimedia Commons (Licencia: el titular de los derechos de autor de este archivo permite que cualquiera pueda usarlo para cualquier propósito, siempre que el titular de los derechos de autor sea atribuido apropiadamente. La redistribución, obras derivadas, uso comercial, y todo otro uso está permitido).

Cuadro 2.1. El sistema de Ptolomeo (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660). Universiteit Utrecht. Wikipedia - Dominio Público.

Cuadro 2.2. El sistema de Copérnico (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660). Universiteit Utrecht. Wikipedia - Dominio Público.

Cuadro 2.4. El sistema de Tycho Brahe (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660). Universiteit Utrecht. Wikipedia - Dominio Público.

Capítulo 3

3.1. Gemma Frisius (1508-1555). Museum Boijmans Van Beuningen (Rotterdam). Wikipedia - Dominio Público.

3.2. Christiaan Huygens (1629-1695). Kunstmuseum (La Haya). Wikipedia - Dominio Público.

3.3. John Harrison (1693-1776). Wikipedia - Dominio público.

3.4. John Flamsteed (1646-1719). Wikipedia. Este archivo está disponible bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional.

3.5. Edmund Halley (1656-1742) (grabado incluido en sus *Tabulae astronomicae*, 1749). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

3.6. *Philosophical Transactions* (portada del primer número, 1665). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

3.7. James Bradley (1693-1762). National Portrait Gallery (Londres). Wikipedia - Dominio Público.

3.8. Giovanni Battista Odierna (1597-1660). Wikipedia - Dominio Público.

3.9. Giovanni D. Cassini (1625-1712) (pintura mural en Perinaldo, su ciudad natal). Wikipedia - Dominio público.

3.10. Jean Picard (1620-1682). Wikipedia - Dominio público.

3.11. Ole Rømer (1644-1710). Wikipedia - Dominio público.

3.12. *Carte de la France corrigée par Ordre du Roy sur les Observations de Messieurs de l'Académie des Sciences* (1682). Wikipedia - Dominio público.

Capítulo 4

- 4.1. Nevil Maskelyne (1732-1811). Wikipedia - Dominio público.
- 4.2. Octante de Spencer, Browning and Rust (izquierda) y sextante de Stancliffe (derecha) (fines del siglo XVIII). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.4 *Tabulae motuum solis et lunae* de Tobías Mayer (portada de la edición de 1770). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.5 Cronómetros marinos H4 (izquierda) y H5 (derecha) construidos por Harrison. Wikipedia, licencia Creative Commons/Racklever <https://en.wikipedia.org/wiki/User:Racklever>
- 4.6 Jorge Juan (1713-1773) (izquierda) y Antonio de Ulloa (1716-1795) (derecha). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.7 José de Mazarredo (1745-1812). Museo Naval (Madrid).Wikimedia Commons, dominio público.
- 4.8 *Lecciones de navegación* de José de Mazarredo (portada de la edición de 1790). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.9 *Almanaque Náutico para el año bisiesto de 1792* (portada de la primera edición, 1791). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.10 Vicente Tofiño (1732-1795). Museo Naval (Madrid). Wikimedia Commons, dominio público.
- 4.11 *Atlas Marítimo de España* (portada de la primera edición, 1787). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.12 Plano de las rías de Ferrol, Coruña y Betanzos (incluido en el *Atlas Marítimo de España*). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.13 Plano geométrico de la bahía de Algeciras y Gibraltar (incluido en el *Atlas Marítimo de España*). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 4.14 Real Observatorio de la Isla de León a principios del siglo XIX (grabado incluido en el *Nomenclátor de las calles de Cádiz*, 1856). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.

Capítulo 5

- 5.1 Isaac Newton (1643-1727). Real Instituto y Observatorio de la Armada (San Fernando). Autorización mediante formulario de solicitud.
- 5.2 Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1828). Château de Versailles (Francia). Wikipedia - Dominio Público.
- 5.3 Institut de France (Académie des Sciences). Wikipedia. This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license.
- 5.4 Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) (grabado incluido en el *Album du Centenaire (1789-1804)*, 1889). Wikipedia - Dominio Público.
- 5.5 Ralph Allan Sampson (1866-1939) (izquierda) y Willem de Sitter (1872-1934) (derecha). Wikipedia - Dominio Público.
- 5.6 Observatorio de París. Wikipedia, licencia Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0.

Capítulo 1

La posición geográfica en el mar. Un problema ancestral

1.1. La navegación marítima antes del siglo XV

Desde la Antigüedad fueron muchos los intentos realizados por el ser humano para conocer con exactitud su posición sobre la superficie de la Tierra. Los griegos ya aceptaron en el siglo IV a.C. la idea de un planeta redondo. Partiendo de esta premisa impulsaron los primeros intentos de medición de la circunferencia de la Tierra¹ y el desarrollo de avanzados conceptos geográficos, como la esfericidad de nuestro planeta, las coordenadas geográficas y los movimientos de rotación y traslación, que personajes como Copérnico y Galileo tendrían que volver a defender dieciocho siglos después. Claudio Ptolomeo (90-168),

¹Eratóstenes de Cirene (276 a.C.-194 a.C.) midió por primera vez la circunferencia terrestre. Lo hizo determinando el radio del planeta mediante la comparación de la altura máxima alcanzada por el Sol el mismo día en dos lugares diferentes separados por una distancia norte-sur conocida. Para ello comparaba la longitud de las sombras de dos palos verticales iguales colocados en uno y otro lugar. Su resultado fue extraordinariamente preciso si tenemos en cuenta que lo obtuvo hace más de 2200 años.

que preparó en Alejandría una obra geográfica de gran envergadura con vasta información sobre la posición geográfica (latitud y longitud) de numerosos lugares, planteó las primeras instrucciones conocidas para el trazado de los mapas con un método científico, instrucciones que dejaron establecidas las bases de la cartografía de los siguientes siglos.

Algunos hallazgos arqueológicos han permitido constatar que los pueblos costeros del Mediterráneo oriental, del golfo Pérsico y del océano Índico llevaron a cabo viajes marítimos desde la más remota Antigüedad. Las primeras descripciones históricas de estas navegaciones se remontan a los siglos VIII y VII a.C., cuando fenicios y griegos emprendieron numerosos viajes de exploración marítima. En el mar Mediterráneo las condiciones de navegación no suelen ser duras, los vientos dominantes son bastante estables y sus limitadas dimensiones impiden navegar durante muchas jornadas sin avistar tierra. Eso explica la aparición en aquella época de unas herramientas náuticas llamadas *periplos*, unos textos descriptivos que contenían información sobre ciertos itinerarios de navegación, la estimación del tiempo necesario para las travesías y la descripción detallada de sus puertos y fondeaderos.

Más adelante los romanos sustituyeron a fenicios y griegos en el control del Mediterráneo, aunque no realizaron aportaciones de importancia relacionadas con la navegación, posiblemente porque no las necesitaron en las singladuras esencialmente costeras realizadas en un mar que ellos conocieron como Mare Nostrum. Tras la caída de Roma en el año 476, se inició en Europa un largo periodo de escaso interés por la geografía y la exploración marítima. Los musulmanes tomaron entonces el testigo de griegos y fenicios en todo lo relacionado con los viajes marítimos, divulgando entre los navegantes del Mediterráneo importantes mejoras técnicas como la aguja imantada, la cartografía náutica, la vela triangular o el timón de popa. De todas formas, a pesar de la introducción de las citadas mejoras técnicas, durante cientos de años la navegación preferida por los marinos del Mediterráneo, y también por los de la vertiente atlántica, fue la navegación de cabotaje, es decir, la realizada de cabo a cabo

y de puerto a puerto. De hecho, hasta finales del siglo XV toda navegación tenía lugar lo suficientemente cerca de la costa como para que los navegantes pudiesen situarse tomando referencias en tierra prácticamente cada día. Como única excepción a este método podríamos citar las travesías realizadas por los vikingos de los siglos X y XI entre el norte de Europa, Islandia e incluso Groenlandia².

Así pues, habría que esperar hasta finales de la Edad Media para asistir a la generalización de los viajes oceánicos, unos viajes que obligaron a los navegantes europeos a perfeccionar nuevas técnicas e instrumentos que les permitiesen navegar durante largos períodos de tiempo sin tener la costa a la vista. Durante los siglos XII y XIII las técnicas de navegación se habían basado en el uso de la aguja imantada, un sencillo instrumento introducido en el Mediterráneo por

los árabes que permitía conocer donde se hallaba el norte, y poco más. Con el paso del tiempo, ya en el siglo XIV, la aguja imantada se convirtió en aguja náutica al ser adaptada a la navegación colocándola sobre una rosa de los vientos en la que iban marcados, a intervalos equidistantes, treinta y dos vientos que, de esta forma, se transformaban en treinta y dos posibles rumbos para la navegación en línea recta.

Gracias a esta modificación, la aguja permitió calcular la po-

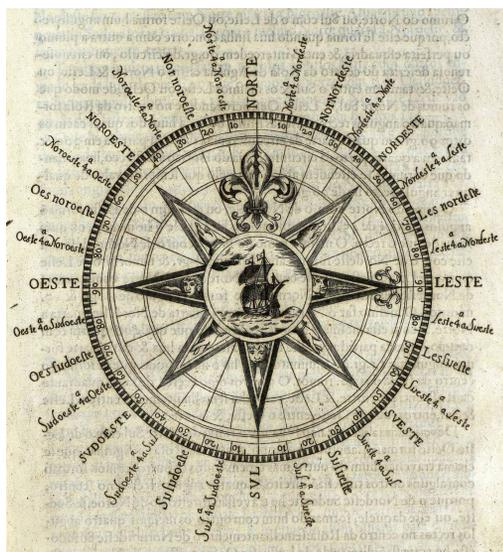


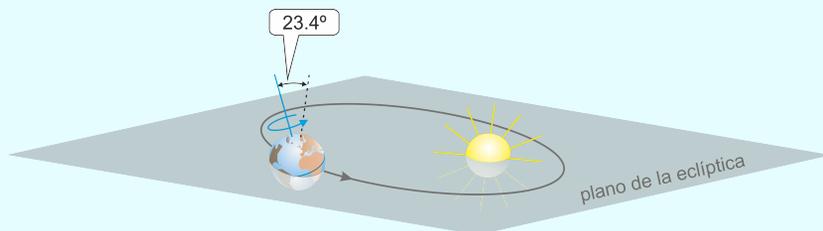
Figura 1.1: Rosa de los vientos (grabado incluido en el *Arte pratica de navegar e regimento de pilotos*, 1681).

²Véase González, F.J., *El océano desconocido: ciencia y fantasía en la antigua cartografía náutica (siglos XIII-XVIII)*. En *Abordajes. Mitos y reflexiones sobre el mar* (Madrid, Instituto Español de Oceanografía, 2014), 45-77.

Cuadro 1.1. Coordenadas celestes de los astros

Si observamos nuestro planeta desde fuera de él, por ejemplo mirándolo desde una nave espacial que sobrevuela el Sistema Solar, veremos a la Tierra rotar, de oeste a este, alrededor de un eje cuyas intersecciones con la superficie definen los polos norte y sur. El tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta sobre sí misma es el intervalo de tiempo que llamamos genéricamente un *día* (volveremos después con más precisión sobre este concepto).

También veremos que, además de rotar sobre sí misma, la Tierra se mueve alrededor del Sol siguiendo una órbita elíptica con el Sol situado en uno de los focos de la elipse. El tiempo que tarda la Tierra en completar una vuelta alrededor del Sol es un *año*. El plano definido por esta elipse, es decir, el plano de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, se llama la *eclíptica*. El eje de rotación de la Tierra está inclinado con respecto a la perpendicular al plano de la eclíptica un ángulo de 23.4° aproximadamente, ángulo que se conoce como *oblicuidad de la eclíptica*. Esta inclinación es la causa de la existencia de las diferentes estaciones en nuestro planeta (figura siguiente).

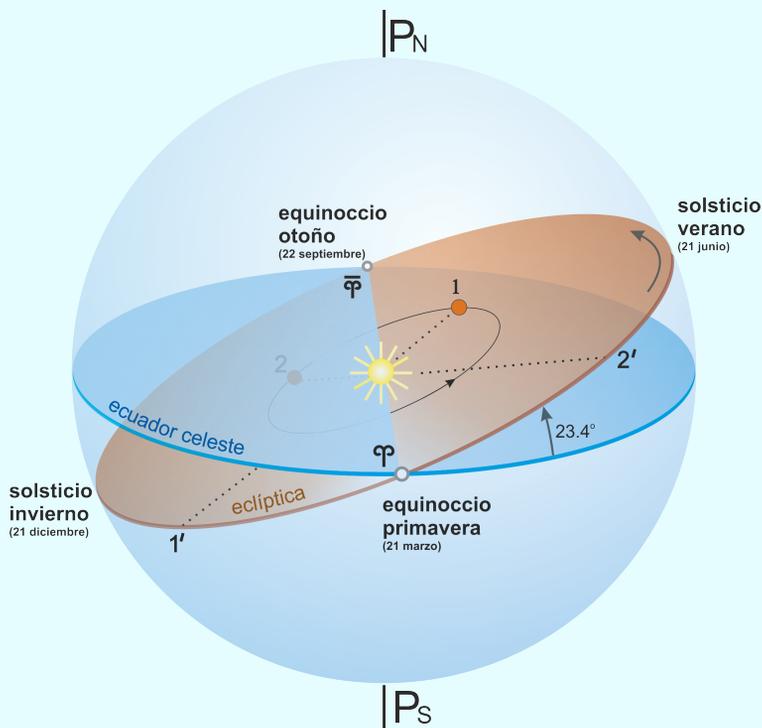


En la figura, por claridad, hemos exagerado la *excentricidad* de la órbita, es decir, el achatamiento de la elipse comparada con un círculo (que es una elipse de excentricidad cero).

Una observadora sobre la superficie terrestre aprecia estos dos movimientos de manera diferente. La rotación de la Tierra se traduce para ella en la rotación del cielo, con todos sus astros, en sentido contrario, de este a oeste. Por ello vemos el orto de los astros por la mitad oriental de nuestro horizonte y el ocaso por su mitad occidental. Una estrella (que podemos considerar fija en la esfera celeste dada la enorme distancia a la que se encuentra de nosotros) que vemos hoy en una posición del cielo la veremos mañana en la misma posición aproximadamente un día después^a.

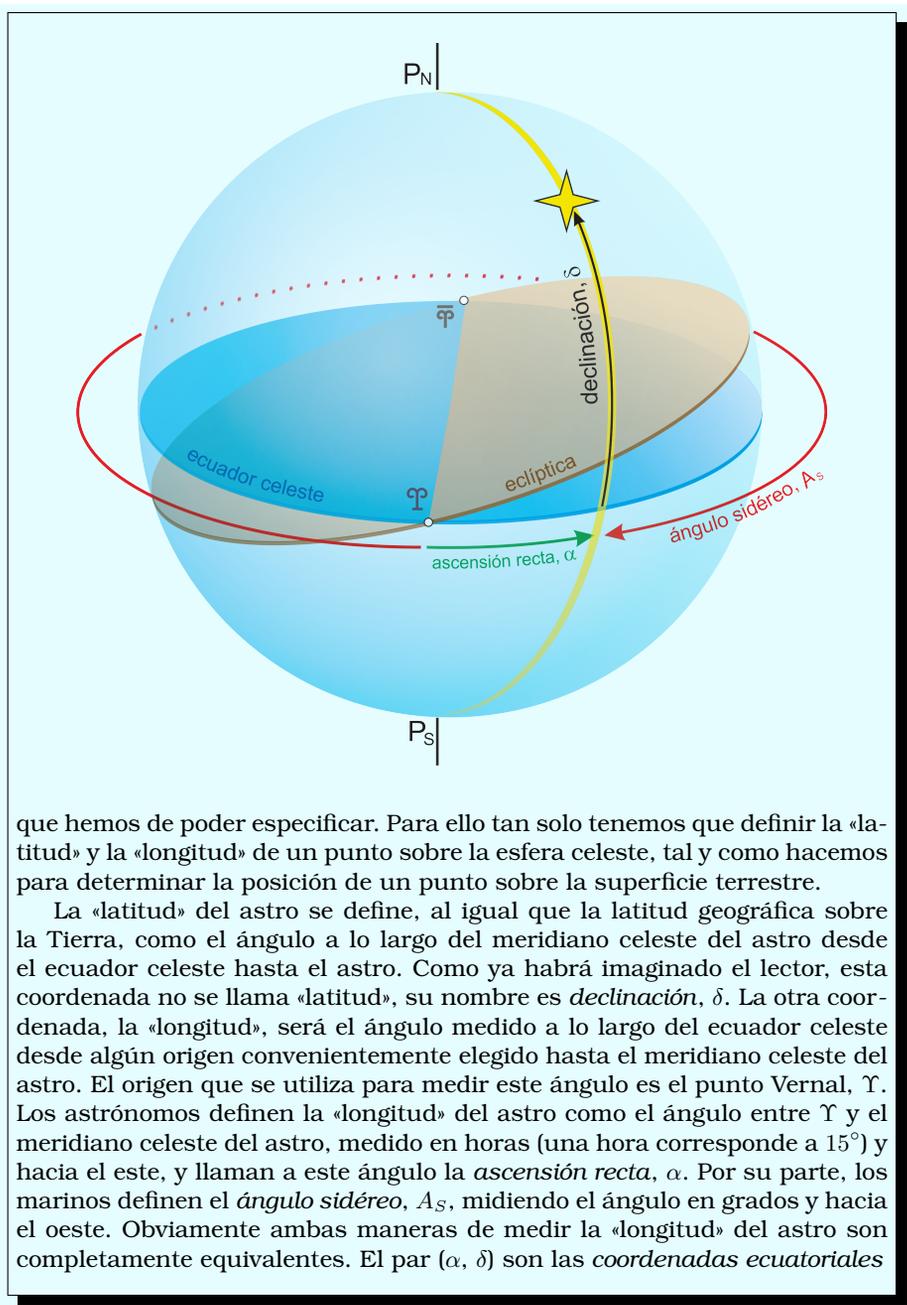
^aAproximadamente porque, como discutiremos en otro cuadro posterior de este libro, el concepto preciso de día es un poco más delicado que la noción intuitiva que estamos utilizando aquí.

¿Y cómo aprecia la traslación de la Tierra alrededor del Sol? Pues este movimiento anual se traduce en un desplazamiento del Sol sobre la esfera siguiendo el círculo resultante de la intersección de la eclíptica con la esfera celeste, círculo que también llamamos eclíptica.



Cuando la Tierra se encuentra en el punto 1 de su órbita (ver figura) un observador terrestre ve al Sol en el punto $1'$ de la esfera celeste. Cuando la Tierra está en 2 el Sol se encuentra en el punto $2'$ con respecto a la Tierra. Así que desde el punto de vista de nuestra observadora terrestre el Sol recorre la eclíptica en dirección oeste-este completando la vuelta en un año. El punto φ de corte entre el ecuador celeste y la eclíptica donde el Sol, en su recorrido, pasa del hemisferio sur al norte, se llama *punto Vernal* o *primer punto Aries*. El instante en que el Sol se encuentra en ese punto marca el comienzo de la primavera en el hemisferio norte (otoño en el hemisferio sur). Cuando el Sol se encuentra en el punto $\overline{\varphi}$ comienza el otoño en el hemisferio norte.

Un astro concreto ocupa, en un determinado instante, un punto del cielo

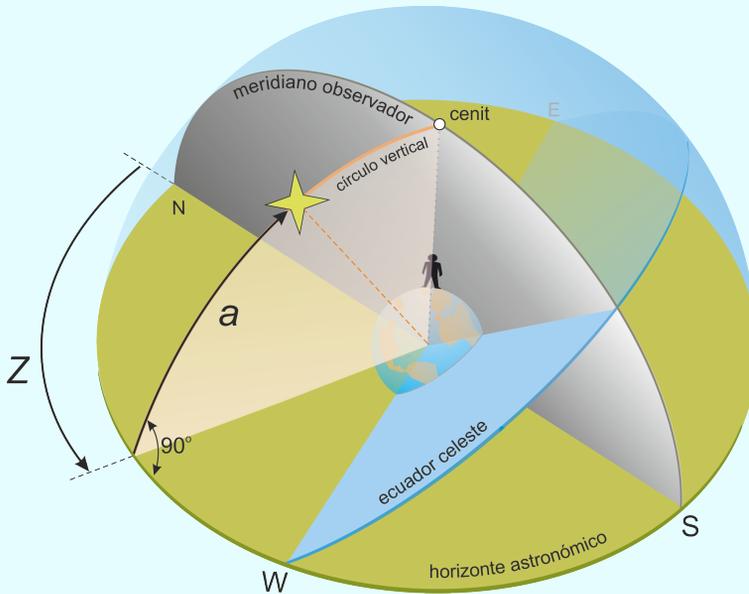


que hemos de poder especificar. Para ello tan solo tenemos que definir la «latitud» y la «longitud» de un punto sobre la esfera celeste, tal y como hacemos para determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre.

La «latitud» del astro se define, al igual que la latitud geográfica sobre la Tierra, como el ángulo a lo largo del meridiano celeste del astro desde el ecuador celeste hasta el astro. Como ya habrá imaginado el lector, esta coordenada no se llama «latitud», su nombre es *declinación*, δ . La otra coordenada, la «longitud», será el ángulo medido a lo largo del ecuador celeste desde algún origen convenientemente elegido hasta el meridiano celeste del astro. El origen que se utiliza para medir este ángulo es el punto Vernal, Υ . Los astrónomos definen la «longitud» del astro como el ángulo entre Υ y el meridiano celeste del astro, medido en horas (una hora corresponde a 15°) y hacia el este, y llaman a este ángulo la *ascensión recta*, α . Por su parte, los marinos definen el *ángulo sidéreo*, A_s , midiendo el ángulo en grados y hacia el oeste. Obviamente ambas maneras de medir la «longitud» del astro son completamente equivalentes. El par (α, δ) son las *coordenadas ecuatoriales*

del astro y son las que utilizan los astrónomos en las publicaciones de efemérides para especificar la posición de los astros en cada instante pues, como es evidente, no dependen de la posición del observador concreto sobre la superficie de la Tierra.

Un astro que se encuentra en un instante dado en el punto (α, δ) del cielo es observado en posiciones diferentes de *su cielo* por observadores situados en lugares distintos en la superficie terrestre. Por ejemplo, si está usted leyendo esto durante el día, el Sol se encontrará en este instante en una posición que está sobre su horizonte (el de usted). Pero en este mismo instante otro observador situado en sus antípodas no puede ver el Sol porque estará bajo el horizonte de este segundo observador. Necesitamos, pues, definir coordenadas de los astros referidas a un observador concreto. Estas son las *coordenadas horizontales*.



Para definir las coordenadas horizontales utilizamos un sistema de referencia asociado al observador concreto situado en latitud φ y longitud λ . El papel jugado por el eje de rotación de la Tierra en la definición de las coordenadas ecuatoriales es jugado ahora por la vertical del observador. El papel del ecuador celeste lo juega ahora el horizonte astronómico. La dirección hacia la que ha de mirar el observador para encontrarse alineado con

el plano vertical del astro se especifica mediante un ángulo, medido a lo largo del horizonte desde un origen determinado, que se llama *azimut*, Z . En la figura anterior hemos elegido el punto cardinal norte como origen del azimut, pero es frecuente en astronomía medir el azimut desde el sur. La otra coordenada horizontal es la *altura*, a , que es el ángulo medido a lo largo del círculo vertical del astro desde el horizonte hasta el astro. Es decir, la altura mide los grados que ha de levantar la cabeza el observador para ver el astro en cuestión.

La relación entre los tres pares de variables (α, δ) , (Z, a) y (φ, λ) es única en cada instante. Es decir, dado un astro que se encuentra en el punto (α, δ) del cielo y un valor concreto del par (Z, a) , solo existe un único punto sobre la superficie terrestre, de coordenadas (φ, λ) , desde el que ese astro se observa en ese instante con esos valores de las coordenadas horizontales. En otras palabras, tal y como ve usted el cielo desde donde se encuentra en este instante solo lo ve usted. La relación matemática entre los tres pares de variables es sencilla, pero eso está más allá de los objetivos de este libro.

sición del buque mediante la estimación de la distancia recorrida a un determinado rumbo, convirtiéndose en una ayuda imprescindible para los navegantes. Además, su utilización impulsó definitivamente la elaboración de unos mapas donde materializar estos cálculos. Nacieron así las primeras cartas náuticas, que recibieron el nombre de *cartas portulanas* o, simplemente, *portulanos*, unas representaciones cartográficas levantadas desde el mar, tomando orientaciones con ayuda de la aguja náutica mientras se navegaba frente a la costa. El resultado así obtenido era un mapa en el que se representaba el litoral de forma bastante precisa, incluyendo las localizaciones de los puertos y las distancias entre ellos, además de numerosos datos procedentes de la información facilitada por la gente del mar y por la tradición oral transmitida a lo largo de muchas generaciones. A pesar de sus limitaciones técnicas, estos primeros trabajos de cartografía náutica se convirtieron en herramientas básicas para la navegación, ya que siempre incluían uno o más puntos desde los que partían líneas rectas espaciadas con el mismo criterio que los treinta y dos vientos marcados en la rosa de los vientos. De esta forma se podían materializar un buen número de



Figura 1.2: Fragmento del *Atlas Catalán* de Abraham Cresques (ca. 1375).

posibles rumbos que, como ya hemos visto, resultaban muy útiles a la hora de determinar la ruta mediante el uso de la aguja náutica y la estimación de la distancia recorrida.

Una vez fijado el rumbo con ayuda de la aguja y de la carta, los pilotos debían calcular la velocidad de la nave para poder estimar la distancia recorrida a lo largo de la línea imaginaria del rumbo marcado. Si los viajes marítimos pudieran ser desarrollados siguiendo un rumbo constante, la actividad del piloto debería limitarse simplemente a mantener el rumbo seleccionado durante toda la singladura comprobando que se seguía la línea recta trazada en la carta para unir los puertos de salida y de destino, para después estimar cada día la distancia recorrida a lo largo de esa línea imaginaria. Pero ya sabemos que un barco de vela no puede seguir normalmente la línea recta del rumbo ideal para llegar a su destino, pues se ve obligado a seguir la ruta más favorable según los vientos y corrientes imperantes en cada momento, cruzando y volviendo a cruzar el rumbo ideal para no desviarse demasiado. Así pues, una vez fijado el rumbo con



Figura 1.3: Corredera de barquilla.

ayuda de la aguja y de la carta, los pilotos intentaban calcular la velocidad de la nave, ya que este era un dato imprescindible para poder estimar con exactitud la distancia recorrida a lo largo del rumbo elegido en cada momento. A principios del siglo XVI ya se usaban aparatos para calcular el desplazamiento de las naves, como la *cadena a popa* utilizada en la expedición de Magallanes. No obstante, este tipo de instrumentos tuvo que luchar inicialmente contra la desconfianza de los marineros, que creían más fiables las estimaciones basadas en su propia experiencia y en el efecto sobre la velocidad del buque de factores como los vientos, las corrientes o la carga transportada. De hecho, hasta 1574 (William Bourne, *A regiment for the sea*) no encontraremos la primera descripción detallada de la corredera de barquilla, un aparato diseñado para calcular la velocidad del buque y facilitar la localización de su posición en una carta náutica³.

³Véase González, F.J., *Del "arte de marear" a la navegación astronómica*. En *Cuadernos de Historia Moderna. Anejo V*. Universidad Complutense (Madrid, 2006), 135-166.

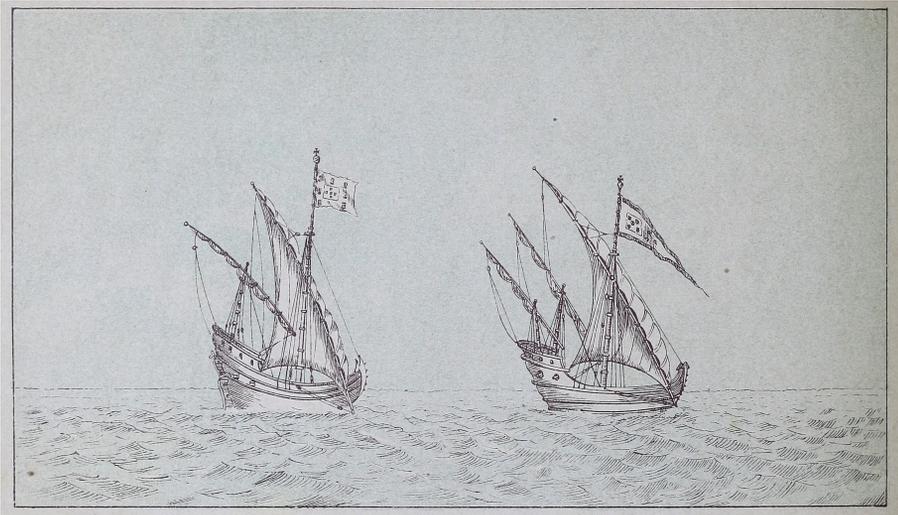


Figura 1.4: Carabelas del siglo XV.

1.2. La exploración portuguesa y el cálculo de la latitud

La exploración marítima del planeta llevada a cabo a lo largo de la Edad Moderna obligó a los navegantes europeos a perfeccionar nuevas técnicas e instrumentos de navegación que resultaban imprescindibles para el desarrollo de sus viajes. No podemos olvidar que, en la mayor parte de los casos, aquellos viajes por mar fueron verdaderos desafíos a la naturaleza. Por lo tanto, era necesario solucionar, desde el primer momento, la principal incógnita a la que un marino se enfrenta en la inmensidad del océano: el conocimiento de la posición geográfica de su nave en cualquier momento de la travesía. Durante la Edad Media, los astrónomos y los geógrafos habían conseguido determinar sin grandes dificultades las coordenadas geográficas en tierra firme. Más adelante, una vez aceptada la esfericidad de la Tierra, el problema de conocer con exactitud la latitud y la longitud en el mar, para poder marcar la posición de los navíos sobre un mapa, se convirtió en un importante motivo de preocupación para aquellas potencias europeas que trasladaban en

barcos gran parte de las riquezas obtenidas en los nuevos territorios ultramarinos.



Figura 1.5: Astrolabio astronómico de Ibrahim ibn Sa'id al-Sahli. Construido en bronce y latón en un taller de Toledo en 1067.

Los viajes de descubrimiento, que obligaban a navegar sin ver la costa durante meses, llevaron a los marinos a utilizar las estrellas como puntos fijos de referencia. De esta forma, y gracias a la práctica de determinadas observaciones astronómicas, el arte de navegar se fue transformando paulatinamente en navegación astronómica, primero con la búsqueda de una solución al problema de la determinación de la latitud, perfeccionada en el siglo XV y, más adelante, con el desarrollo de los métodos para determinar la longitud, que no serían practicables hasta el siglo XVIII.

A partir del siglo XIV se puede constatar en Europa un paulatino aumento del interés por los viajes y la comunicación con otros lugares del planeta, especialmente tras la divulgación de

los viajes de Marco Polo y el cierre de las rutas terrestres hacia Oriente provocado por la expansión de los otomanos, que conquistaron Constantinopla en 1453. Este es el contexto en el que habría que situar la organización de las grandes expediciones navales de exploración oceánica impulsadas por los reinos de Portugal y Castilla, unas expediciones cuyo principal objetivo era establecer un contacto marítimo seguro entre Europa y el Lejano Oriente evitando cruzar el Mediterráneo, que era una ruta controlada por las ciudades italianas y amenazada por los turcos.

El interés marítimo de las monarquías de Europa Occidental pasó entonces del Mediterráneo al Atlántico, de ahí que los cartógrafos de Portugal y Castilla fueran sustituyendo a aquellos de origen veneciano, genovés y mallorquín que habían elaborado las primeras cartas portulanas en los siglos precedentes. Tanto los viajes a la India rodeando África emprendidos por los navegantes portugueses, como las ex-



Figura 1.6: Astrolabio náutico español del siglo XVI (réplica).

pediciones castellanas capitaneadas por Colón y Magallanes, incidieron directamente en un considerable aumento del ámbito geográfico abarcado por los europeos. Y todo ello ocurrió en una época en la que el desarrollo de los viajes oceánicos y el progreso de la cartografía estaban directamente relacionados con las mejoras registradas en las técnicas de navegación. Así pues, podemos afirmar que el cálculo de la latitud en la mar fue resuelto en la Baja Edad Media gracias al desarrollo de la náutica provocado por las necesidades técnicas de los marinos de la Península Ibérica.



Figura 1.7: Don Enrique el Navegante (1394-1460) (detalle del *Retablo de San Vicente*, ca. 1470).

El interés por la exploración de las costas del continente africano, y la búsqueda de las especias por la ruta de la India, hicieron que el reino de Portugal fuese pionero en la organización de las primeras expediciones oceánicas por el Atlántico. En la época del infante Don Enrique (1394-1460), llamado el Navegante, la corte portuguesa apoyó sin reservas la exploración de la costa africana. Estos viajes seguían inicialmente la costa de África hacia el sur. Pero los vientos y las corrientes no son muy propicios para esta

derrota, especialmente en el Atlántico sur donde se encontraban con los vientos alisios soplando del SE y la corriente Benguela en contra. La vuelta hacia Portugal resultaba todavía más problemática, pues una vez al norte del ecuador, y dado que en el hemisferio norte los vientos alisios soplan del NE, había que internarse en el océano hasta encontrar los vientos favorables que llevasen las naves hasta las Azores, para después llegar desde allí por la ruta ya conocida hasta Lisboa.

En sus navegaciones de altura estos marinos pasaban semanas o meses sin ver tierra. ¿Cómo sabían dónde estaban? ¿cómo sabían si su rumbo era el correcto? Al encontrarse en alta mar, lejos de la vista de la costa, el único punto de referencia posible eran los astros. Como ya hemos dicho, los conceptos de latitud y longitud, tal y como los conocemos y utilizamos hoy día para determinar la posición de un punto sobre la Tierra, ya fueron



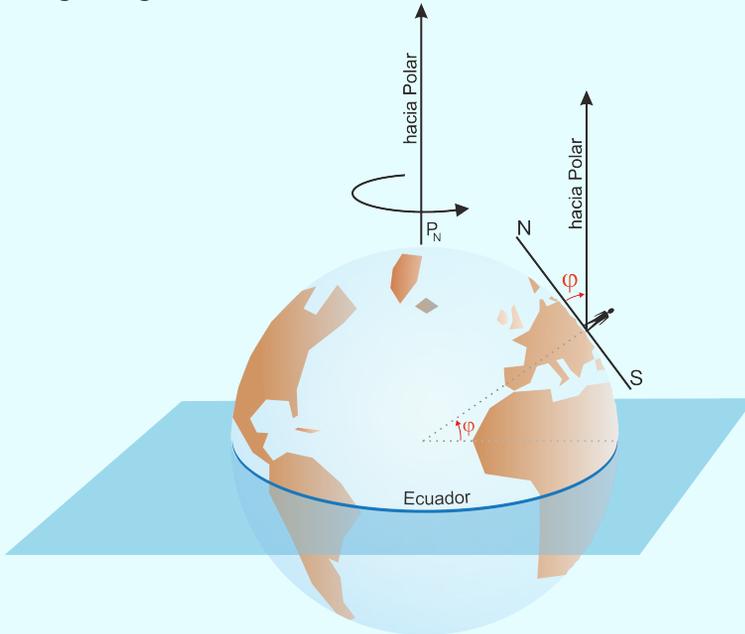
Figura 1.8: Ballestilla.

utilizados por Ptolomeo. En el Portugal del siglo XV se trabajó con ahínco en la mejora de los instrumentos náuticos, se construyeron las primeras naves capaces de soportar navegaciones de larga duración por el océano y se perfeccionó un método de navegación basado esencialmente en el cálculo de la latitud en alta mar⁴. Se trata del método que algunos autores conocen como *método de altura y distancia* cuyas instrucciones prácticas fueron consignadas en los llamados *regimientos*, especialmente en el *Regimiento del Norte*, para la navegación al norte del ecuador, y en el *Regimiento del Crucero del Sur*, para la navegación en el hemisferio austral.

⁴Como puede apreciarse en el cuadro 1.2, el problema de determinar la latitud en alta mar ya estaba resuelto en aquella época.

Cuadro 1.2. La determinación de la latitud y el método de altura y distancia

Desde la Antigüedad se sabía que la altura del polo celeste sobre el horizonte es equivalente en grados a la latitud geográfica del lugar de observación, φ . De ahí que el recurso a la observación astronómica se redujese inicialmente a la determinación de la latitud, definida como la distancia angular entre un punto y el ecuador, medida en grados a lo largo de su meridiano. En el hemisferio norte tenemos la estrella Polar situada muy aproximadamente en el polo celeste, de manera que determinar la latitud era muy sencillo, bastaba medir la altura de la estrella Polar sobre el horizonte (figura siguiente).



También se sabía que la altura máxima, a_m , que alcanza el Sol sobre el horizonte un día dado alrededor del mediodía depende de lo lejos que se encuentre el observador del ecuador, es decir depende de la latitud φ , y de la fecha, pues el Sol varía su declinación δ (su distancia angular al ecuador celeste) a lo largo del año dando lugar a las diferentes estaciones. Esto permitía determinar la latitud en las navegaciones por el hemisferio sur cuando la estrella Polar no es observable (ver figura siguiente).

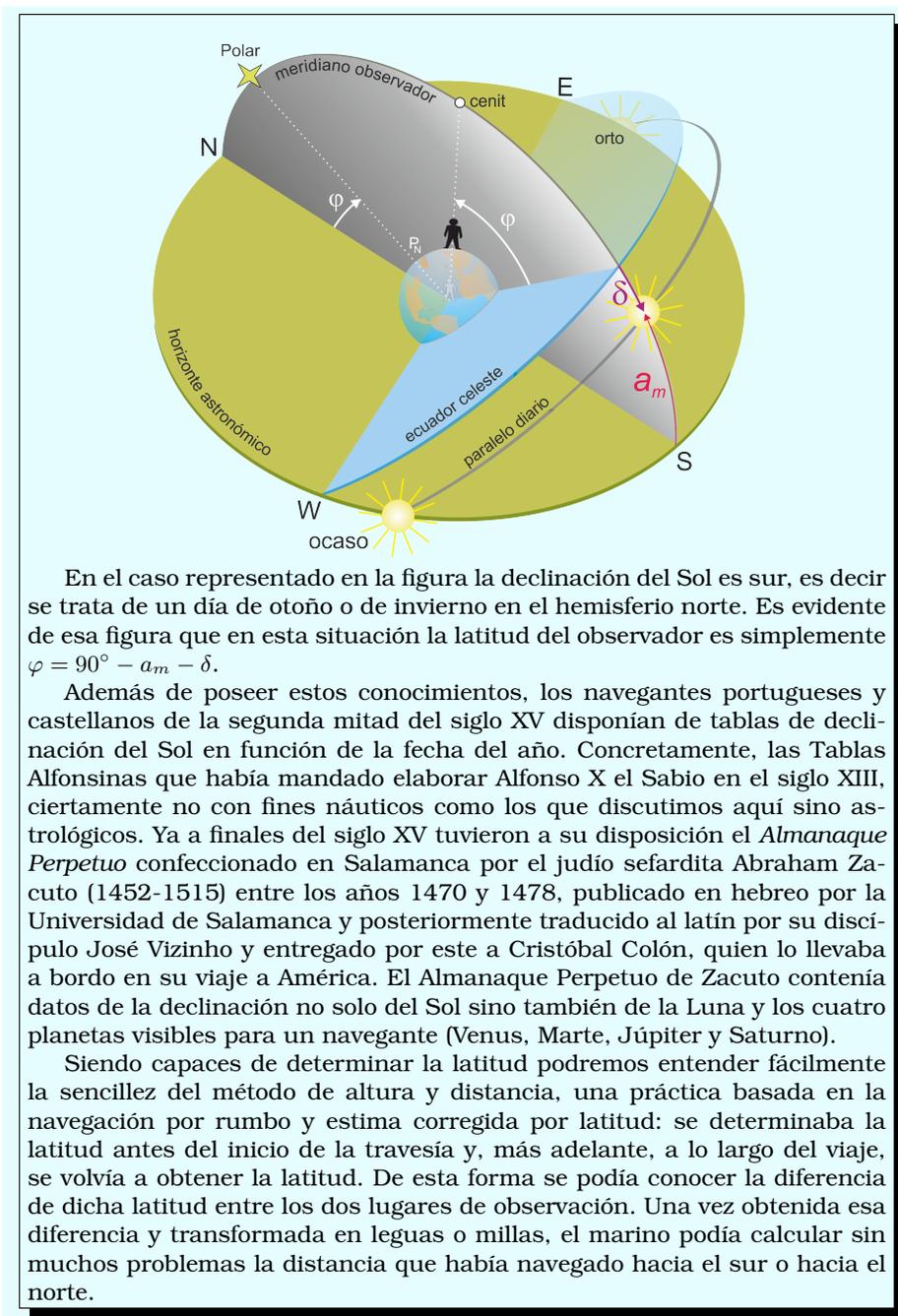




Figura 1.9: Cristóbal Colón (1451-1506) (detalle de *la Virgen de los Navegantes*, ca. 1531-1537).

Los navegantes de la segunda mitad del siglo XV eran capaces de determinar la latitud en la que se encontraban sus naves, utilizando las técnicas que explicamos en el cuadro 1.2, con una precisión aproximada de un grado, error bastante aceptable si tenemos en cuenta las limitaciones derivadas de la precisión de las tablas de declinación de los astros y la que se puede obtener en la medida de la altura de un astro mediante una ballestilla o un astrolabio.

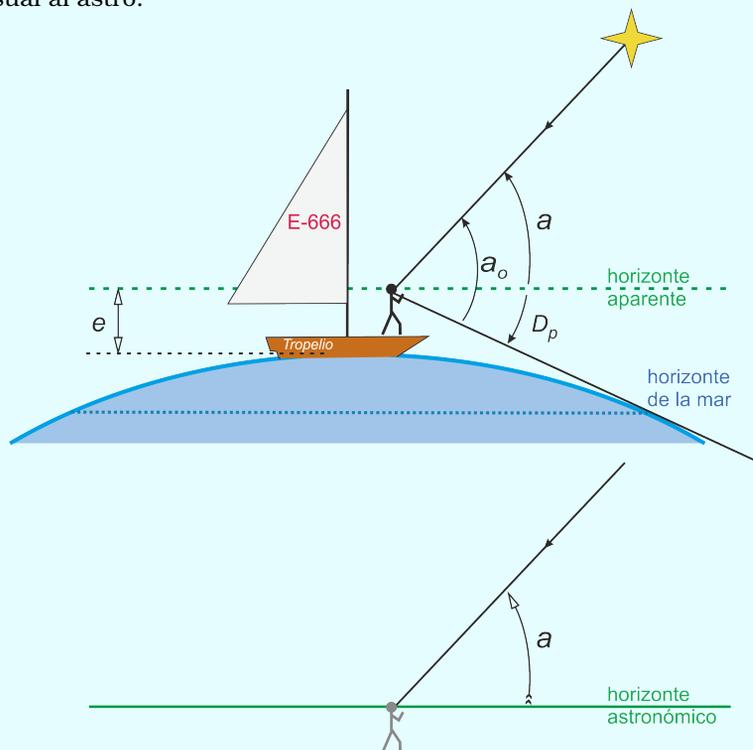
No obstante, y a pesar de las mencionadas limitaciones en precisión, los portugueses exploraron durante el siglo XV toda la costa occidental de África gracias a la puesta en práctica de este método de altura y distancia, haciendo ver al resto de los europeos que el límite del mundo conocido hasta entonces podía ser superado, sobre todo tras la expedición de Bartolomé Díaz (1450-1500), que al doblar el cabo de Buena Esperanza en 1488 demostró que sería posible llegar a Oriente desde Europa por esa ruta, como comprobaría pocos años después Vasco da Gama (ca. 1467-1524), llegando a la India en 1498.

Mientras Portugal volcaba sus esfuerzos en la relativamente segura exploración de la costa africana, el reino de Castilla, también ávido de expansión territorial y comercial, optó por apoyar la arriesgada propuesta de Cristóbal Colón (1451-1506) de viajar hacia el oeste por el Atlántico para llegar a las islas asiáti-

Cuadro 1.3. Corrección de las alturas observadas de los astros

Como hemos explicado en el cuadro 1.2, la altura de la estrella Polar, o la altura de un astro en el momento de su culminación, permite obtener la latitud del observador de una manera muy sencilla. Pero está claro a partir de la figura de la página 29 que esas alturas han de referirse al *horizonte astronómico* del observador (el horizonte de un hipotético observador situado en el centro de la Tierra y orientado según nuestra misma vertical, como se muestra en esa figura), horizonte que, obviamente, no es el que utiliza el navegante para medir la altura del astro mediante una ballestilla (en la época de la que estamos hablando) o con un sextante (hoy día).

El navegante mide el ángulo entre su visual al *horizonte de la mar* y su visual al astro:



La altura observada por el navegante, a_o , ha de ser corregida por *depresión del horizonte*, D_p , corrección que será mayor cuanto mayor sea la

elevación del observador sobre el nivel del mar, *e*. Pero, además, la luz procedente de los astros no viaja en línea recta, como tampoco lo hace la que procede del horizonte de la mar, hasta llegar a nuestro ojo (como se ha representado en la figura anterior): al atravesar las diferentes capas de aire de la atmósfera (que varía de densidad a medida que ascendemos), el rayo luminoso se curva debido a la refracción de la luz al pasar de una capa de aire a otra (el mismo fenómeno que nos hace ver doblado un palo que introducimos parcialmente en una piscina). El resultado es que un astro lo vemos siempre más alto sobre el horizonte de lo que realmente está y, por consiguiente, hemos de aplicar la corrección correspondiente. Estas correcciones, y algunas otras necesarias en ocasiones, como la corrección por paralaje en el caso de la Luna debida a su proximidad a la Tierra^a, permiten obtener la *altura verdadera*, *a*, que mediría el hipotético observador situado en el centro de la Tierra, a partir de la cual el navegante puede determinar su posición.

^aNo vamos a alargarnos aquí en los detalles. Puede consultar el libro *Navegación Astronómica* de L. Mederos, 7^a edición, publicado por la editorial Tutor.

cas productoras de las especias. Como consecuencia directa de esta decisión, España se colocó a la vanguardia del desarrollo de las técnicas de navegación durante la primera mitad del siglo XVI, coincidiendo con la época de los grandes descubrimientos geográficos.

En la búsqueda de las islas de las especias, Colón encontró un nuevo continente que, en un primer momento, supuso para los castellanos un obstáculo que impedía la llegada de sus naves a las Molucas. Y esto es algo que quedó claramente reflejado en la carta de Juan de la Cosa (ca. 1450-1510), confeccionada en 1500, el primer mapamundi que incluye los territorios americanos, que aparecían reflejados en este mapa como una verdadera muralla para la navegación hacia el Occidente. Como todos sabemos, tras la firma del Tratado de Tordesillas entre España y Portugal (1494), que estableció la línea divisoria de sus posesiones ultramarinas en el meridiano situado a 370 leguas⁵ al oeste

⁵La legua era una unidad de longitud relacionada con la distancia que una



Figura 1.10: Carta de Juan de la Cosa (1500).

de las islas de Cabo Verde, se inició un nuevo ciclo de viajes y expediciones cuyos principales hitos, además de los sucesivos viajes colombinos, serían el hallazgo en 1513 del Mar del Sur (el océano Pacífico) por Vasco Núñez de Balboa (ca. 1475-1519) y el viaje de Fernando de Magallanes (1480-1521) que, tras cruzar el estrecho de su nombre en 1520, se encontró con la inmensidad de un océano que él llamó Pacífico y con un nuevo camino hacia el mercado de las especias.

Fue en esa época cuando quedaron perfectamente definidas las cuatro principales determinaciones que eran objeto del arte de navegar: el rumbo, que se determinaba con ayuda de la aguja náutica y se representaba en la carta; la distancia, que se calculaba con ayuda de la experiencia del piloto y con la corredera

persona podía recorrer a pie (o a caballo) en una hora. Era, pues, una unidad imprecisa porque dependía de múltiples factores (el tipo de terreno, el medio que utilizaba para desplazarse, etc). Sin embargo, la legua marina estaba definida con precisión como $1/20$ de grado o, lo que es lo mismo, 3 millas náuticas (la milla náutica se define como $1/60$ de grado, 1852 metros). Sobre las antiguas medidas usadas en la mar puede consultarse el artículo de José Luis Rubio Serrano titulado *Las unidades de medida españolas en los siglos XVI y XVII*, en *Revista de Historia Naval*, 20. (1988), 77-93. Ministerio de Defensa, Madrid.



Figura 1.11: Fernando de Magallanes (1480-1521).

llamado *punto de fantasía*. Si, además del rumbo, el navegante contaba con una buena determinación de la latitud, el punto marcado en la carta recibía el nombre de *punto de escuadría*. Y había otra opción más para situar la nave en la carta, el método de altura y distancia desarrollado por los marinos portugueses, basado en el uso de datos fiables de latitud y distancia navegada, datos que permitían al piloto echar el llamado *punto de fantasía y altura*. Como es fácil de imaginar, la precisión conseguida en todas estas operaciones era bastante escasa, aunque eso no impidió que los marinos peninsulares navegasen por los mares de todo el planeta. En definitiva, un impulso explorador que, mediante las sucesivas expediciones protagonizadas por los marinos de la Península Ibérica, permitió abarcar por primera vez la totalidad del globo terrestre a principios del siglo XVI.

de barquilla; la latitud, que se obtenía mediante observaciones astronómicas; y, por último, la longitud, que se deducía de los datos obtenidos en las anteriores determinaciones. Con esos datos el piloto procedía a efectuar una operación denominada *echar el punto*, consistente en intentar reflejar la situación del buque en la carta náutica. El método más tradicional, que consistía en mantener un rumbo y estimar la distancia navegada, permitía a los pilotos obtener el

1.3. El problema de la longitud: los concursos oficiales

Como se puede deducir fácilmente, las prácticas que hemos descrito anteriormente solo permitían una cierta fiabilidad en las observaciones dirigidas a la determinación de la latitud, por lo que solamente resultaban verdaderamente útiles en las travesías realizadas con dirección norte-sur, especialmente en las navegaciones portuguesas dirigidas a la exploración de las costas de África. La determinación de la otra coordenada geográfica, la longitud, no resultó tan sencilla. Tanto es así, que el problema de su determinación en el mar puede ser considerado como uno de los más importantes problemas tecnológicos de todos los tiempos, no solo por su trascendencia económica, sino también por el largo período que transcurrió hasta que fue solucionado.

El método basado en la determinación de la latitud utilizado por los navegantes lusitanos para rodear África no

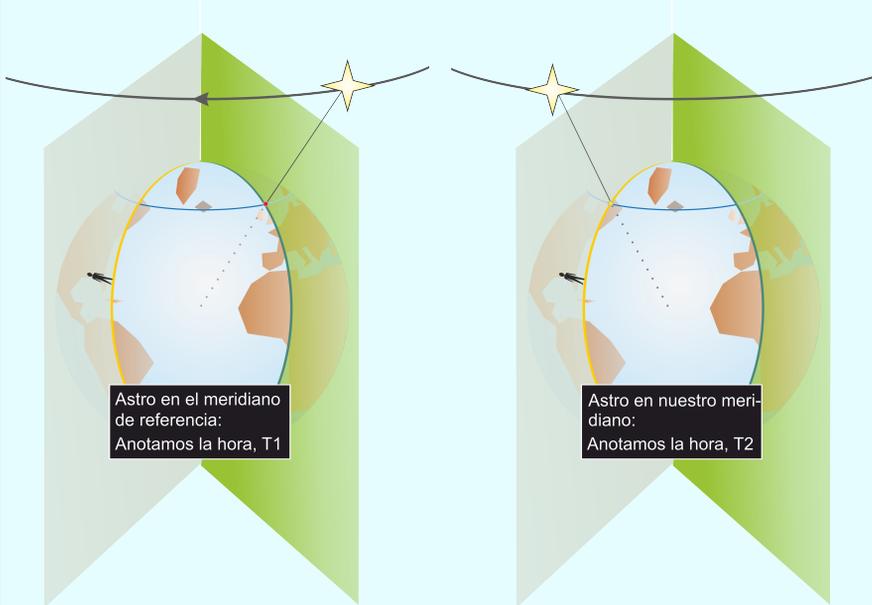


Figura 1.12: Ampolleta (el reloj de arena de los navegantes del siglo XVI).

era válido para atravesar grandes

Cuadro 1.4. La determinación de la longitud

La determinación de la longitud a partir de observaciones astronómicas está ligada inevitablemente a la medida del tiempo. Si, por ejemplo, utilizamos como evento astronómico el paso de los astros por el meridiano del observador, la situación es la esquematizada en esta figura:



La rotación de la Tierra se traduce para un observador sobre su superficie en la rotación diaria del cielo en sentido este-oeste. Si anotamos la hora local del meridiano de referencia, T_1 , a la que una estrella dada pasa por el meridiano de referencia (panel izquierdo de la figura) y, posteriormente, anotamos la hora local del meridiano de referencia, T_2 , a la que la misma estrella pasa por el meridiano del observador, entonces es obvio que la longitud en la que este se encuentra, es decir, el ángulo diedro en grados entre los dos planos representados en la figura, no es más que $L = (T_1 - T_2) \times 15$ puesto que la estrella recorre 15° por hora. Pero esta idea tan simple, conocida sobradamente en los comienzos de la navegación oceánica, presenta dos dificultades prácticas. La primera de ellas es que, como es evidente, el navegante no puede observar el paso de la estrella por el meridiano de referencia cuando se encuentra navegando en alta mar. La segunda dificultad es que ha de saber la hora local del meridiano de referencia en el instante

en que ve a la estrella pasar por su meridiano. La primera de las dificultades tiene una solución sencilla: las horas de paso de las estrellas por el meridiano de referencia pueden determinarse mediante observaciones, de manera que los astrónomos predicen esas horas y las publican por adelantado en un almanaque que el navegante lleva a bordo, al igual que hace con las tablas de declinación de los astros que le permiten determinar su latitud como ya hemos explicado. La segunda dificultad tiene, sin embargo, una solución mucho más compleja: necesitamos saber la hora local del meridiano de referencia cuando no nos encontramos en ese meridiano. Es decir, hemos de *transportar la hora*. Y lo hemos de hacer con la suficiente precisión puesto que el cielo rota con rapidez. Si en una hora rota 15 grados, en un segundo lo hace 0.25 minutos de arco. Es decir, necesitamos saber la hora en el meridiano de referencia con una precisión de un segundo. Esto no era posible cuando se iniciaron las navegaciones oceánicas en la segunda mitad del siglo XV y, de hecho, no fue posible hasta la segunda mitad del siglo XVIII con la invención del cronómetro por John Harrison.

Obsérvese que el método descrito implica el uso de dos eventos astronómicos no simultáneos, el paso de un astro por el meridiano de referencia y el posterior paso del mismo astro por el meridiano del observador. Alternativamente podemos determinar la longitud en la que nos encontramos a partir de la diferencia de horas locales, en el meridiano de referencia y en nuestro meridiano, a la que un único evento es observado *simultáneamente* desde ambos meridianos, por ejemplo un eclipse de Luna o un eclipse de un satélite de Júpiter como proponía Galileo. El navegante llevaría a bordo un almanaque con las predicciones de esas efemérides en función de la hora del meridiano de referencia. Podría entonces determinar la longitud en la que se encuentra a partir de la hora local en su meridiano a la que ha observado el evento en cuestión. El método de los eclipses de Luna era bien conocido a finales del siglo XV, sin embargo en la práctica no era viable por su enorme falta de precisión: los movimientos de la Luna en el cielo no se conocían bien como para que la predicción de las horas de los eclipses fuese suficientemente precisa, la observación del instante inicial del eclipse no es un asunto trivial y, lo que es peor para el navegante, la frecuencia con la que suceden los eclipses de Luna invalidan el método para su uso en la mar.

océanos como el Atlántico o el Pacífico, en los que había que realizar largas singladuras en la dirección este-oeste. Por lo tanto, tras el descubrimiento de América, y del gran espacio oceánico encontrado por Núñez de Balboa, fue cada vez más necesario el hallazgo de un método fiable para determinar la longitud, un

método que permitiese fijar con exactitud la posición de los buques en la inmensidad de los océanos. A partir de entonces, los viajes transatlánticos se multiplicaron a la vez que se organizaba el comercio entre Europa y el Nuevo Mundo.

Sin embargo, durante varios siglos, el comercio ultramarino, y por tanto el crecimiento económico europeo, se vio dificultado por la inexistencia de unos métodos para la determinación precisa de la posición de las naves en el mar. Las travesías se hacían siguiendo un paralelo, es decir, los navíos procuraban buscar la latitud del puerto de destino y seguir la ruta hacia el oeste a latitud constante, verificándola lo más a menudo posible mediante la observación de las alturas del Sol o de las estrellas. Se navegaba conociendo la latitud y manteniendo, en lo posible, rumbos oeste o este hasta encontrar tierra, es decir, siguiendo el principio de *paralelo correr tierra encontrar*. En el viaje de ida los vientos alisios, que impulsaban a los navíos desde Canarias hacia las Antillas, facilitaban la práctica de este método. No ocurría lo mismo a la vuelta, que se hacía más larga y dificultosa, al tener que buscar el impulso de los vientos del oeste por el Atlántico Norte. La longitud era prácticamente desconocida. Tal es así que, por ejemplo, el tamaño en dirección este-oeste del mar Mediterráneo se estimaba en esa época con un error en torno a los 19 grados. Mucho mayores aún eran los errores en las longitudes atribuidas a lugares en las Indias Orientales (China y Japón) de especial interés para el comercio de la época (en torno a los 55 grados).

Este desconocimiento prácticamente total de la longitud en la que se encontraba el navegante y, naturalmente, las longitudes a las que se encontraban los destinos deseados, terminaba en numerosas ocasiones en tragedias con las consiguientes pérdidas humanas y materiales. En otras ocasiones daba lugar a resultados inesperados como, por ejemplo, el descubrimiento de Brasil. La versión oficial es que Brasil fue descubierto por accidente el 22 de abril de 1500 por el navegante portugués Pedro Alvares Cabral que, en su ruta hacia las Indias Orientales doblando el Cabo de Buena Esperanza, se vio obligado a navegar mar adentro en el Atlántico sur al encontrarse vientos en con-

tra. Navegó hacia el oeste sin saber donde se encontraba hasta que en la fecha indicada llegó a la que hoy día es la playa Puerto Seguro, en el actual estado de Bahía. Hay historiadores, sin embargo, que sostienen que 85 días antes de esa fecha, el 26 de enero de 1500, arribó a Punta Gruesa (estado de Pernambuco) el navegante español Yáñez Pinzón que había salido el 19 de noviembre de 1499 de Palos de la Frontera al mando de cuatro carabelas, basándose en los textos escritos por los más famosos cronistas de la época (Bartolomé de las Casas, Pedro Mártir de Algería y Juan de la Cosa).

La longitud, entendida como la distancia angular entre el meridiano de un lugar y un meridiano de origen (meridiano cero), medida a lo largo del ecuador, es fácil de determinar en la mar si se puede calcular con precisión la diferencia horaria entre la posición de un buque y un punto de referencia, por ejemplo el puerto de partida, utilizado en este caso como meridiano cero. Sin embargo, como veremos más adelante, el desarrollo de métodos prácticos para solucionar este sencillo problema teórico tendría que esperar hasta bien entrado el siglo XVIII.



Figura 1.13: Vicente Yáñez Pinzón (1462-1514).

Tal y como hemos explicado más arriba, la latitud del observador, φ , se obtiene de manera muy sencilla a partir de la altura del astro en el momento de su culminación, a_m , y de la declinación del astro en ese momento, δ . Pero determinar la longitud

es un problema diferente, mucho más complejo e inabordable a finales del siglo XV. La razón es simple: la rotación de la Tierra en sentido oeste-este hace que la posición de los astros con respecto a un observador fijo en la superficie de nuestro planeta varíe con el tiempo. La rotación de la Tierra se traduce, para un observador sobre ella, en la rotación diaria del cielo en sentido este-oeste. Así que la determinación de la longitud mediante observaciones del cielo está inevitablemente ligada a una precisa medida del tiempo. Los métodos para determinar la longitud utilizando referencias astronómicas consisten siempre en comparar la hora local del meridiano de referencia a la que ocurre un evento astronómico concreto, por ejemplo el paso de un astro por el meridiano, con la hora local en el meridiano del observador a la que es observado el mismo evento. La diferencia entre ambas horas locales de la misma efemérides nos da directamente la longitud del observador sin más que tener en cuenta que la Tierra rota a razón de 15 grados por hora. Pero conocer a bordo la hora del meridiano de referencia con la suficiente precisión fue un problema que la humanidad tardó casi tres siglos en resolver: la solución no estuvo disponible hasta la segunda mitad del siglo XVIII.

Como se puede imaginar, tanto para Portugal como para España, potencias navales interesadas en el descubrimiento de nuevos territorios y en el comercio con las Indias Orientales y Occidentales, el cálculo de la longitud en el mar era un problema de máximo interés nacional. No es de extrañar, pues, la convocatoria de suculentos premios para quien fuese capaz de resolver el problema de la longitud, presentando un método eficaz para determinar la longitud en la mar con la suficiente precisión como para garantizar la seguridad de la navegación. La Corona española fue pionera en el ofrecimiento de un premio por la resolución del problema de la longitud. Tras una primera iniciativa, realizada en 1567 durante el reinado de Felipe II, sería Felipe III, rey de España, Portugal y las Dos Sicilias (Sicilia y Nápoles) quien ofreciese en 1598 un importante premio de 6.000 ducados, más 2.000 de pensión vitalicia y otros 1.000 de ayuda para gastos, a quien fuese capaz de proporcionar un método

para determinar la longitud en el mar. Se presentaron muchas ideas, la inmensa mayoría completamente descabelladas.

A la propuesta de premio realizada por España siguieron otras iniciativas oficiales planteadas desde Holanda, Francia e Inglaterra. En Holanda la iniciativa fue tomada en 1600 por los Estados Generales (el órgano de gobierno de las entonces llamadas Provincias Unidas de los Países Bajos) con el establecimiento de diversas recompensas, que oscilaron entre una gran suma para el método definitivo y anualidades o sumas más pequeñas para aquellas propuestas prometedoras dignas de estudio por los expertos. De forma similar a lo ocurrido en el concurso español, fueron muchas las soluciones planteadas aunque ninguna de ella fue aceptada como buena por los comités de expertos formados para juzgarlas, a pesar de que fueron cuarenta y seis las propuestas presentadas entre 1600 y 1775.

Francia e Inglaterra llegaron un poco más tarde al fomento de la investigación en el asunto de la longitud. No obstante, su llegada coincidió con un período de significativos avances teóricos y prácticos tanto en astronomía como en instrumentos. El interés de los gobiernos de ambas naciones por encontrar soluciones al problema de la longitud impulsó la participación de instituciones como la Real Sociedad de Londres (1660) y la Academia Real de Ciencias de París (1666), además de la creación de los observatorios de Greenwich (1665) y de París (1667). No hay que olvidar que entre las misiones fundacionales del Real Observatorio de Greenwich estaba encontrar una solución astronómica al problema de la longitud. Decía el rey Carlos II en el acta de constitución del mismo: *En orden a encontrar la longitud de los lugares para perfeccionar la navegación y la astronomía, hemos resuelto construir un pequeño observatorio en nuestro parque de Greenwich* (2 de junio de 1675)⁶.

Unos años más tarde, el Parlamento británico publicó el Decreto de la Longitud (*The Longitude Act*), que en 1714 estableció un premio de 20.000 libras para quien fuese capaz de determinar la longitud con un error máximo de medio grado. Como,

⁶Citado por M.C. Donnelly en *A short history of observatories* (Eugene, University Oregon Press, 1973), p. 20.

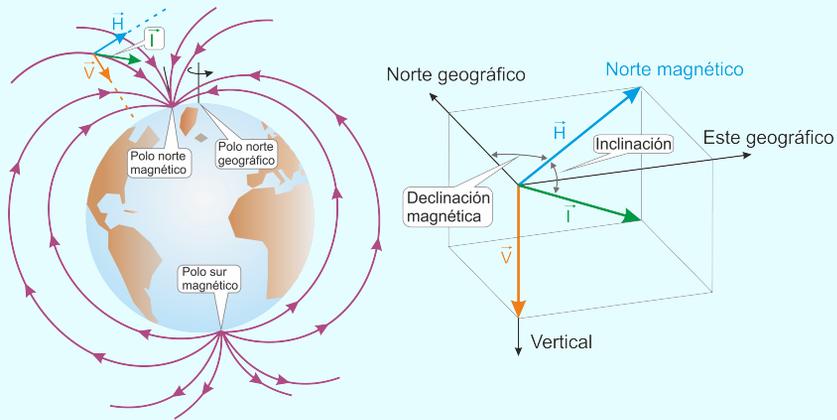
según hemos visto más arriba, un error de 1 segundo en la hora implica un error de 0,25 minutos de arco en la longitud, la condición de un error máximo de medio grado (30 minutos de arco) equivale a un error máximo en la hora de 120 segundos, es decir, 2 minutos. Además, el método propuesto tenía que ser probado en un barco en navegación en condiciones que establecía el Decreto: sobre el océano, desde Gran Bretaña hasta cualquier puerto en las Indias Occidentales señalado por el Comité, sin perder la longitud por encima del límite establecido de medio grado. Se constituyó el Comité de la Longitud (*Board of Longitude*) cuyo cometido era juzgar y, en su caso, adjudicar el Premio de la Longitud. De nuevo, se recibieron propuestas muy diversas, la mayoría descabelladas, como aquella que proponía anclar barcos a lo largo del océano, espaciados a intervalos regulares conocidos, desde los que se dispararían cañonazos a horas fijas determinadas que serían oídos por los navegantes a modo de señales horarias.

Uno de los primeros métodos razonables que optaron al premio fue el relacionado con la variación de la aguja náutica, que ya fue descrita por Cristóbal Colón en el diario de su primer viaje. Al principio, muchos navegantes pensaron que las variaciones de la aguja eran causadas por los defectos de construcción del propio aparato, algo relativamente normal en una época en la que la exactitud de los instrumentos era bastante mejorable. Más adelante, cuando se aceptó la existencia verdadera del fenómeno observado por Colón, se generalizaron los intentos de explicar el problema. Uno de los primeros estudiosos en intentar encontrar una explicación fue Martín Cortés (1510-1582), que en su *Breve compendio de la sphaera* (Sevilla, 1551) aseguró que la "variación de la aguja" era producida por la existencia de un polo magnético distinto al polo geográfico. El debate abierto por Martín Cortés culminó en 1600 con la publicación del tratado titulado *De magnete* por William Gilbert (1544-1603), autor de la teoría de que la Tierra era un gigantesco imán natural con dos polos magnéticos en cuya dirección se orientaban las agujas de marear.

La búsqueda de la longitud por medio de medidas magnéticas

Cuadro 1.5. La declinación magnética

Nuestro planeta es un enorme imán. El campo magnético terrestre nos protege de los nocivos efectos que tendría el viento solar y nos ha proporcionado desde la Antigüedad un modo de orientarnos: la brújula (o compás como es llamada en náutica). Una pequeña aguja imantada que pueda girar libremente, como la de una brújula, se orientará paralelamente a la componente horizontal \vec{H} del campo magnético terrestre \vec{T} que es tangente a las *líneas de fuerza* en cada punto:



En un punto concreto la orientación del vector \vec{T} se especifica mediante unos ejes de coordenadas locales tal como se indica en el panel derecho de la figura. La componente horizontal \vec{H} es la que orienta la aguja de la brújula hacia el norte magnético. Las direcciones hacia el norte magnético y geográfico forman un ángulo entre sí que es la declinación magnética. Necesitamos, por tanto, conocer ese ángulo para corregir el rumbo indicado por el compás antes de trasladarlo a la carta náutica. Cuanto más cerca estemos del polo magnético, mayor es la componente vertical \vec{V} y menor la componente horizontal. En consecuencia, el compás es más impreciso cuanto mayor sea la latitud, dejando de ser un instrumento útil en latitudes polares.

El campo magnético terrestre no es constante en el tiempo. Las líneas de fuerza se deforman y los polos magnéticos se desplazan. De hecho, en las últimas décadas el polo norte magnético ha venido desplazándose desde el norte de Canadá hacia Siberia de manera mucho más rápida de lo que venía siendo habitual según los registros históricos. Las cartas náuticas contienen la información necesaria para determinar la declinación magnética en nuestra posición y en la fecha actual.



Figura 1.14: Gerhard Mercator (1512-1594) (grabado incluido en el *Atlas or a geographicke description of the world*, 1636).

tiene una historia propia e independiente de los otros métodos de determinación de las longitudes. Fue Gerardus Mercator (1512-1594) el primero en tener la idea de determinar la longitud midiendo la declinación magnética, a pesar de que en su época aún no se conocían las leyes del campo magnético terrestre. Durante mucho tiempo, sobre todo en el siglo XVI, la principal solución práctica adoptada por los navegantes, para intentar minimizar en lo posible el error provocado por la variación de las agujas náuticas, consistió en la elaboración y difusión de tablas con las desviaciones de la aguja en los puertos conocidos con los valores de las declinaciones magnéticas⁷. Resultaba evidente, pues, que el estudio del campo magnético terrestre necesitaba datos del conjunto del planeta. Era necesario trabajar a gran escala, de ahí que instituciones como la Real Sociedad de Londres llegaran a organizar la recopilación de las observaciones sobre declinación magnética realizadas por los buques que navegaban por todo el mundo. Gracias a iniciativas como esta Halley pudo publicar en 1702 la primera carta global de declinación magnética, en la que las líneas isógonas o isogónicas unían los puntos con los mismos valores de declinación magnética. La solución propuesta por el científico inglés consistía en cortar la línea isogónica correspon-

⁷Véase García Franco, Salvador: *Historia del arte y ciencia de navegar*, vol. I (Madrid, Instituto Histórico de Marina, 1947), pág. 62.

diente al valor de la declinación magnética determinada a bordo con una latitud observada por la altura de un astro. Lo cierto es que este método nunca fue considerado fiable, aunque no fue desechado totalmente hasta mediados del siglo XVIII⁸.

Desde el punto de vista astronómico, habría que destacar el método que es objeto de este libro, el presentado por Galileo Galilei (1564-1642) tanto en el concurso de España como en el de Holanda. Galileo propuso utilizar los eclipses de los cuatro satélites de Júpiter recién descubiertos por él mismo como un reloj astronómico que debía permitir determinar la longitud. Como veremos más adelante, el método fue rechazado tanto en España como en Holanda tras consultar con diversos expertos. En ambos casos, los expertos consultados coincidieron en señalar la imposibilidad de observar los satélites de Júpiter utilizando un telescopio desde la cubierta de un barco en movimiento.

Finalmente, fueron dos antiguas propuestas las que compitieron durante gran parte del siglo XVIII por llevarse la recompensa. Por un lado, el método de las distancias lunares propuesto por la ciencia oficial del momento, representada por el astrónomo real Nevil Maskelyne, consistente en utilizar el movimiento de la Luna con respecto al fondo de estrellas fijas como reloj astronómico⁹. Por otro lado, el método propuesto por el carpintero, reconvertido en relojero, John Harrison quien, a lo largo del siglo, presentó hasta cinco prototipos de cronómetros hasta demostrar que su reloj era capaz de mantener la precisión requerida por el Decreto de la Longitud y ganar finalmente el premio¹⁰.

⁸En 1698 Halley efectuó una expedición marítima por el Atlántico realizando medidas precisas de la declinación magnética en numerosos lugares. Con estas observaciones logró trazar las primeras cartas magnéticas de la historia, con las que los marinos podrían conocer la declinación magnética en cada punto del Atlántico y corregir su rumbo respecto a lo que marcaba la brújula. Halley, Edmund: *A new and correct chart shewing the variations of the compass in the Western & Southern oceans* (London, 1702).

⁹El método de las distancias lunares se puede estudiar en el libro de L. Mederos titulado *Navegación astronómica* (7ª edición) (Madrid, Tutor, 2020). Su capítulo 13 trata este método en detalle.

¹⁰La historia de la contienda entre ambos métodos puede leerse en el ensayo de Dava Sobel titulado *Longitud* (Barcelona, Anagrama, 2006).

Capítulo 2

Galileo y la astronomía. El telescopio

2.1. Los orígenes del telescopio

Cualquier intento de aproximación a la historia de la invención del telescopio ha de comenzar con el desarrollo de la óptica y el invento de las primeras lentes. Al parecer, la primera lente de la que se tienen noticias fue construida por Aristófanes, en torno al año 424 a.C., utilizando un globo de vidrio lleno de agua con la intención de concentrar la luz solar y no la de aumentar la imagen de los objetos. Después pasaron más de quince siglos sin contribuciones relevantes al desarrollo de la óptica, hasta que hacia el año 1200 de nuestra era el fraile franciscano inglés Roger Bacon talló las primeras lentes con la forma lenticular (es decir, forma de lenteja) que ahora conocemos. En su libro *Opus maius* Bacon explica de forma clara cómo estas lentes pueden aumentar la imagen de los objetos y, en particular, la letra escrita. El siguiente paso fue montar las lentes en un armazón que hiciera posible colocar una lente en cada ojo con el fin de mejorar la vista de las personas con visión defectuosa. Este paso se dio en la Italia de finales del siglo XIII, aunque no se sabe con certeza si la ocurrencia de construir estas primeras gafas fue de Alexandro della Spina, monje dominico de Pisa, o de su amigo Salvino de Armati, de Florencia.



Figura 2.1: Hans Lippershey (1570-1619) (grabado incluido en el libro titulado *De vero telescopii inventore*, 1655).

Zacarias Jansen (ca. 1585-1632), que en algunos escritos afirmaba haber construido un aparato de este tipo en 1590. Pero lo cierto es que no se han encontrado pruebas de ello, por lo que la mayoría de los historiadores creen que sus afirmaciones son falsas.

El consenso actual es que el inventor del telescopio fue el óptico holandés, fabricante de anteojos, Hans Lippershey (1570-1619), del que sabemos que construyó un telescopio en el año 1608. Lippershey no tenía conocimientos teóricos de óptica, de manera que su invento fue el resultado de ensayos mediante los cuales, tras diferentes pruebas y errores pero sin base científica alguna, observó que con dos lentes, una convergente lejos del ojo y una divergente cerca de él, se veían más grandes los objetos lejanos. Lippershey montó las lentes en un tubo y colocándolas a la distancia adecuada construyó el primer telescopio propiamente dicho. Pronto comprendió que este nuevo aparato

En lo que se refiere a la invención del telescopio propiamente dicho, la historia empieza a finales del siglo XVI o principios del XVII. Los historiadores hablan de tres posibles inventores. El primero de ellos es el italiano Giambattista della Porta (1535-1615) que en 1589 incluyó en su libro *De magia naturalis* lo que parece ser una descripción de un telescopio. Sin embargo, la mayoría de historiadores parecen estar de acuerdo en que él no fue el inventor del telescopio. Otro posible autor del invento es el holandés

podría tener una importante aplicación militar, pues permitía observar la proximidad o el movimiento de navíos o de tropas enemigas, de ahí que su primera intención fuese mantener su descubrimiento en secreto y solicitar una patente. No obstante, la construcción del telescopio era muy sencilla y pronto los rumores lo convirtieron en un invento de dominio público, así que la patente le fue denegada. De hecho, después de que el gobierno holandés regalase dos telescopios fabricados por Lippershey al rey de Francia, estos instrumentos se hicieron tan populares que en abril de 1609 ya podían comprarse en las tiendas de los fabricantes de lentes de París.

2.2. Galileo y sus primeras observaciones



Figura 2.2: Galileo Galilei (1564-1642).

Galileo Galilei ha pasado a la historia de la ciencia como autor de numerosas aportaciones y descubrimientos, entre los que destacan la demostración de la veracidad del sistema heliocéntrico propuesto por Nicolás Copérnico (1473-1543) o la defensa de la base matemática de la naturaleza. Sus trabajos experimentales se sitúan en la base de la adopción del método científico y del nacimiento de la ciencia moderna. Además, gracias a sus trabajos sobre el movimiento de los cuerpos está considerado, junto a Johannes Kepler

(1571-1630) y René Descartes (1596-1650), como uno de los precursores más importantes de la mecánica clásica desarrolla-

da años más tarde por Isaac Newton (1643-1727). No obstante, gran parte de su fama le viene por su adaptación del telescopio inventado por Lippershey, convirtiéndolo en el instrumento que revolucionaría la astronomía moderna.



Figura 2.3: Galileo con su telescopio en la Plaza de San Marcos de Venecia.

Galileo había oído hablar del invento de Lippershey en mayo de 1609. Se encontraba de viaje en Venecia cuando tuvo noticias del invento. Por aquel entonces tenía 45 años y era profesor de matemáticas en la ciudad italiana de Padua. A su regreso a Padua puso manos a la obra y construyó su primer telescopio haciendo uso de lentes que encontró disponibles. Este primer telescopio de Galileo consistía en dos lentes simples, una plana convexa y una biconcava, situadas en los extremos de un tubo de plomo. Consiguió así un telescopio de 3 aumentos. Los resultados de sus primeras pruebas fueron tan alentadores para Galileo que inmediatamente se propuso construir otro de 8 aumentos. Así, tan solo tres meses después de haber conocido el invento de Lippershey, en agosto de ese mismo año, Galileo invitó al Senado veneciano a observar el cielo con su telescopio

desde la plaza de San Marcos. La demostración fue impactante pues las autoridades de Venecia se dieron cuenta de que con el telescopio podían ver barcos situados tan lejos que transcurrían dos horas antes de que esas naves pudieran ser vistas a simple vista. Inmediatamente resultó evidente para ellos la utilidad militar de un instrumento que permitía descubrir posibles invasiones por mar con antelación. En agradecimiento el Senado de Venecia duplicó el salario de Galileo que pasó así a cobrar 1.000 escudos al año y, además, lo nombró profesor vitalicio de Padua, ciudad perteneciente a Venecia en aquellos tiempos.

Sus conocimientos de física permitieron a Galileo comprender cómo funcionaba el telescopio y eso le animó a construir uno nuevo de 30 aumentos¹. Con este nuevo instrumento Galileo pudo descubrir los satélites de Júpiter y los cráteres de la Luna. En julio de 1610 observó Saturno, y unos meses después descubrió las manchas solares. Las características físicas de los cuerpos celestes comenzaron a estar entonces al alcance de los ojos de los hombres.

En marzo de 1610 Galileo publicó un libro histórico, cuyo título es *Sidereus nuncius* (el mensajero de las estrellas)². En este libro Galileo describió, utilizando un lenguaje muy claro y directo, alejado del estilo barroco de la época, sus observaciones astronómicas utilizando los telescopios que él mismo había construido. Galileo no fue el primero, ni el único, en dirigir su telescopio hacia el cielo, pero sí fue el primero en publicar sus observaciones. El estilo directo y comprensible utilizado por Galileo hizo que muy pronto el libro tuviese una gran repercusión, alcanzando una popularidad mucho mayor que la de cualquier otro libro científico de la época. El éxito de esta publicación aumentó considerablemente la fama de Galileo, a pesar de que no todos los descubrimientos astronómicos que se anunciaban en

¹Este telescopio se conserva en el Museo Galileo (Istituto e Museo di Storia della Scienza) de Florencia.

²Esta es una obra que todavía hoy está a la venta. La traducción al castellano, titulada *La gaceta sideral*, ha sido publicada por Alianza Editorial en 2007, dentro de la colección Historia de la Ciencia, en un volumen que contiene, además de esta obra de Galileo, el libro de Johannes Kepler titulado *Conversación con el mensajero sideral* (traducido del latín).

ese libro eran originales. De todo ello hablaremos a continuación con mayor detenimiento.

2.3. El descubrimiento de los satélites de Júpiter

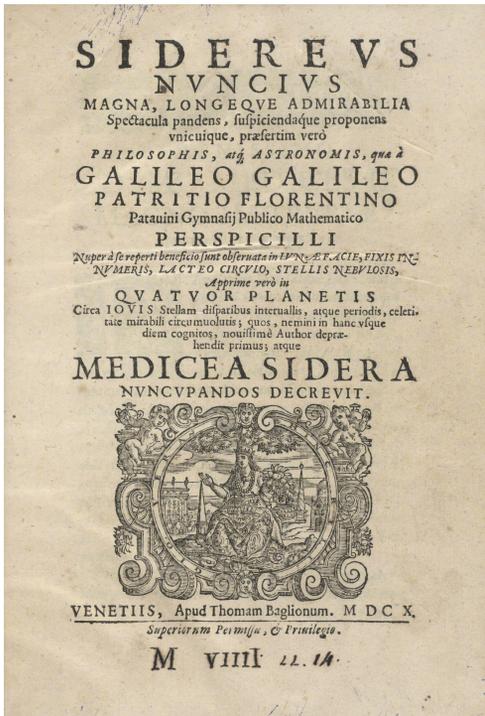


Figura 2.4: *Sidereus nuncius* de Galileo Galilei (Venecia, 1610) (portada del ejemplar conservado en la Houghton Library).

Los primeros satélites de Júpiter fueron descubiertos en 1610, gracias a las observaciones realizadas por Galileo con su telescopio³. El 7 de enero de 1610 Galileo escudriñaba el cielo con su antejo y observó una disposición sorprendente: Júpiter parecía alineado con tres estrellas (una a la derecha y dos a la izquierda). El 8 de enero Júpiter seguía alineado con las tres estrellas, pero en esta ocasión estas estaban colocadas todas a la izquierda. Galileo comenzó entonces una serie sistemática de observaciones durante 54 días que le llevaron a comprobar que esos objetos no eran estrellas del fondo ce-

leste, pues giraban alrededor de Júpiter. Poco después publicó el *Sidereus Nuncius*, comunicando a la comunidad científica su

³En la actualidad se conocen más de sesenta satélites del planeta Júpiter, la mayor parte de ellos descubiertos en los últimos años gracias al uso de potentes telescopios o sondas espaciales. Más información en, por ejemplo, *Conozca cuáles son los principales Satélites de Júpiter y todo sobre ellos*, <https://misistemasolar.com/satelites-de-jupiter/> (octubre 2018).

descubrimiento: algunos astros giraban alrededor de un centro que no era la Tierra. ¿Y si Copérnico tuviera razón?

En el *Sidereus nuncius* Galileo relata cómo tuvo lugar el descubrimiento de los satélites de Júpiter. El 7 de enero de 1610 se encontraba probando el nuevo telescopio de 30 aumentos que acababa de construir. Se dio cuenta entonces de que Júpiter se encontraba sobre el horizonte de modo que decidió apuntar el telescopio hacia él. Esto es lo que escribió en sus páginas sobre el instante de su primera observación de Júpiter y sus satélites el 7 de enero de 1610:

... el séptimo día de este año, 1610, a primera hora de la noche, mientras inspeccionaba las constelaciones celestes con un catalejo, Júpiter hizo su aparición. Y, como me había preparado un instrumento superior, pude ver que había tres estrellas junto a él, pequeñas pero muy brillantes. Aunque creí que pertenecían al grupo de estrellas fijas, no dejaban de intrigarme, porque parecían estar dispuestas exactamente a lo largo de una línea recta y en paralelo a la Eclíptica, y brillaban más que otras estrellas de su tamaño⁴.

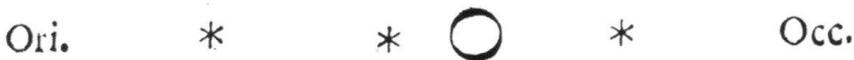


Figura 2.5: Esquema de la primera observación de Júpiter y sus satélites el 7 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*).

⁴Además de esta descripción, incluyó un dibujo (figura 2.5) en el que hacía un esquema gráfico de lo que había observado. Obsérvese que en el gráfico dibujado por Galileo el este se encuentra a la izquierda y el oeste a la derecha, como es habitual en los mapas del cielo. Es así como vemos el cielo cuando miramos hacia el sur. Nótese, sin embargo, que utilizaba un telescopio refractor, con el que se obtiene una imagen invertida. Eso quiere decir que Galileo tuvo en cuenta ese hecho al representar lo que observaríamos a simple vista mirando al cielo (véase el capítulo 6). Esta y las siguientes citas textuales a Galileo son un extracto de su descripción detallada del descubrimiento de los satélites de Júpiter, véase *La gaceta sideral*, Alianza Editorial (2007), pág. 87 y siguientes.

Al día siguiente, 8 de enero, Galileo volvió a apuntar el telescopio hacia Júpiter y lo que vio lo describió así en el *Sidereus nuncius*:

... cuando el 8 de enero volví a observar la misma parte de los cielos, me encontré una situación muy diferente, ya que había tres estrellas pequeñas al oeste de Júpiter, y estaban más cerca entre sí que la noche anterior. [...] Mi confusión se transformó en estupefacción.

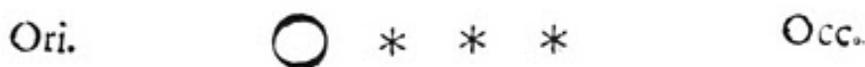


Figura 2.6: Esquema de la observación de los satélites de Júpiter realizada la noche del 8 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*).

El esquema gráfico de esta observación, que incluyó en su libro, es el mostrado en la figura 2.6. Lo que había dejado estupefacto a Galileo es que si las estrellas que había observado próximas a Júpiter eran, como él creía tras la observación de la noche anterior, estrellas *fijas*⁵ como todas las demás que conocía, resultaba entonces que Júpiter se había movido de una noche a la siguiente hacia la parte oriental del cielo. Sin embargo, los astrónomos de la época sabían que Júpiter se encontraba esos días en *movimiento retrógrado*⁶. Galileo esperó ansioso a la noche siguiente con el fin de volver a observar para corroborar esta conclusión, pero el 9 de enero resultó un día nublado que no le permitió hacer observación alguna. Cuando el 10 de enero pudo observar de nuevo a Júpiter se encontró con que solo se veían dos de las tres *estrellas* (figura 2.7).

El 13 de enero Galileo vio aparecer una cuarta *estrella*. Continuó con sus observaciones de Júpiter durante algunas semanas, tras las cuales comprobó que las cuatro *estrellas* se man-

⁵Es decir, las estrellas conocidas desde la Antigüedad, tan lejanas que su movimiento no modifica apreciablemente (con los medios de la época) su posición en el cielo con respecto a nosotros durante siglos.

⁶Es decir, hacia el oeste con respecto al fondo de estrellas fijas.



Figura 2.7: Esquema de la observación de los satélites de Júpiter realizada la noche del 10 de enero de 1610 (publicado por Galileo en su libro *Sidereus nuncius*).

tenían siempre en las proximidades de Júpiter, moviéndose solidariamente con él con respecto al fondo de estrellas fijas, pero cambiando su posición con respecto al planeta y entre sí a medida que se trasladaban junto a Júpiter respecto al fondo de estrellas. Llegó así a la conclusión de que estas cuatro no eran estrellas fijas sino que, por el contrario, eran cuerpos celestes que se movían siguiendo a Júpiter. Lo expresó así en el *Sidereus nuncius*:

... Ahora he llegado a la conclusión de que las tres estrellas se movían sin duda alguna alrededor de Júpiter, al igual que lo hacen Venus y Mercurio alrededor de nuestro Sol.

Así que lo que había observado eran cuatro lunas del planeta Júpiter que daban vueltas a su alrededor en órbitas casi circulares, de manera que desde la Tierra se veía este movimiento circular justamente de perfil. Galileo llamó originalmente a las lunas de Júpiter *Planetas Mediceos* en honor de la familia Medici, bajo cuyo mecenazgo se encontraba. Se refirió a ellos de forma individual mediante los números I, II, III y IV por orden de cercanía al planeta. Los nombres actuales son Io, Europa, Ganimedes y Calisto, asignados años después del descubrimiento de Galileo por el astrónomo Simón Marius (1573-1624) basándose en una sugerencia de Johannes Kepler.

Johannes Kepler, astrónomo, matemático y físico que disfrutaba de una gran reputación en Europa, recibió una copia del *Sidereus nuncius* de manos del embajador toscano en Praga, con una solicitud de Galileo de que le diera su opinión sobre el libro. Kepler no tenía telescopio, de manera que no estaba en condicio-



Figura 2.8: Johannes Kepler (1571-1630) (izquierda) y Tycho Brahe (1546-1601) (derecha).

nes de poder confirmar o desmentir directamente los descubrimientos de Galileo. Sin embargo, teniendo en cuenta la reputación de Galileo, Kepler creyó todo lo que se publicaba en ese libro. Contestó a Galileo mediante una carta muy amable y elogiosa, a la vez que le rogaba que le prestase un telescopio para repetir las observaciones. Galileo no solo no le prestó el telescopio sino que ni siquiera contestó a su carta.

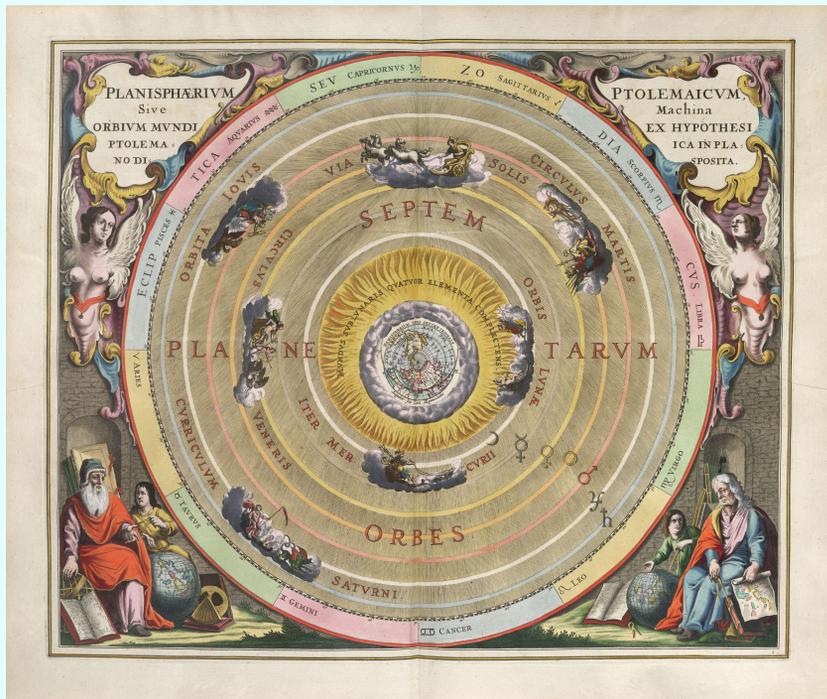
2.4. Los problemas de Galileo con la Iglesia

En marzo de 1611 Galileo fue a Roma con el fin de mostrar su telescopio a las autoridades eclesiásticas. Fue recibido con los máximos honores. Por ejemplo, el Cardenal del Monte escribió en una carta:

Si aún estuviéramos viviendo en la antigua República de Roma, creo realmente que habría una columna en la capital erigida

Cuadro 2.1. El modelo cosmológico de Ptolomeo

El sistema geocéntrico fue desarrollado en la Antigua Grecia y sistematizado por Claudio Ptolomeo (90-168 a.C.) en su gran tratado matemático conocido con el título de *Almagesto*, (traducción del original griego *Hè Megalè Syntaxis*). Ptolomeo aprovechó los trabajos de sus antecesores Eudoxo e Hiparco para construir un sistema del mundo que explicaba los movimientos aparentes del Sol, la Luna y los cinco planetas conocidos en la Antigüedad mediante recursos geométricos y cálculos avanzados. Este modelo cosmológico partía de la premisa de que la Tierra era inmóvil y estaba situada en el centro del Universo. El resto de cuerpos celestes (el Sol, la Luna, los planetas y las estrellas) giraban a su alrededor.



Modelo de Ptolomeo (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660).

En el *Almagesto* Ptolomeo describe el movimiento de los astros alrededor de la Tierra. Para intentar explicar algunos movimientos aparentes que pa-

recían contradictorios a su teoría, especialmente en el caso de los planetas, introdujo unos conceptos geométricos que fueron desarrollados especialmente para explicar los cambios en la dirección o en la velocidad de sus órbitas.

Siguiendo las teorías aristotélicas, el orden del Universo debía estar basado en movimientos circulares perfectos. Eso explica que Ptolomeo estableciese un modelo en el que los planetas se movían alrededor de la Tierra. Cada planeta orbitaba alrededor de un círculo llamado *epiciclo* y este, a su vez, orbitaba alrededor de la Tierra en un círculo aún más grande llamado *deferente*, mientras todo el sistema se movía alrededor de la Tierra. Como consecuencia de ello, cada planeta se acercaba y alejaba de la Tierra en diversos puntos en su órbita, explicando así la disminución aparente de su velocidad, su detención e incluso su movimiento en el sentido contrario (el llamado movimiento retrógrado).

Este complejo artificio de interacción entre diversas órbitas circulares permitió a Ptolomeo mantener a la Tierra en el centro del Universo y describir los movimientos de todos cuerpos celestes, incluidos los planetas, con increíble exactitud. Gracias a ello, el geocentrismo pudo estar vigente más de mil años.

*en honor a Galileo*⁷.

Galileo mantuvo entrevistas con las altas instancias de la iglesia, primero con el cardenal Barberini (que más tarde sería el papa Urbano VIII) y también se entrevistó con Paulo V, que era el papa del momento, con el que mantuvo una audiencia muy amistosa. Fue invitado a ingresar en la selecta Accademia dei Lincei, presidida por el príncipe Federico Cesi, y se ofreció un banquete muy importante en su honor. En este banquete, cuando llegaron los invitados, observaron a través del telescopio lo que había a varios kilómetros de distancia y después de la cena observaron a Júpiter con sus satélites. Posteriormente desmontó el telescopio para que todos pudieran ver que estaba formado simplemente por dos lentes. A este instrumento se le había dado inicialmente el nombre en latín de *perspicillum* o *instrumentum*, pero se cree que fue en ese banquete cuando el príncipe Cesi

⁷Carta de Francesco María del Monte a Cosimo II de Florencia, escrita en Roma el 31 de Mayo de 1611. *Carteggio, a cura di M. Camerota e P. Ruffo, con la collaborazione di M. Bucciantini* (Firenze, Giunti, 2015), pág. 124.

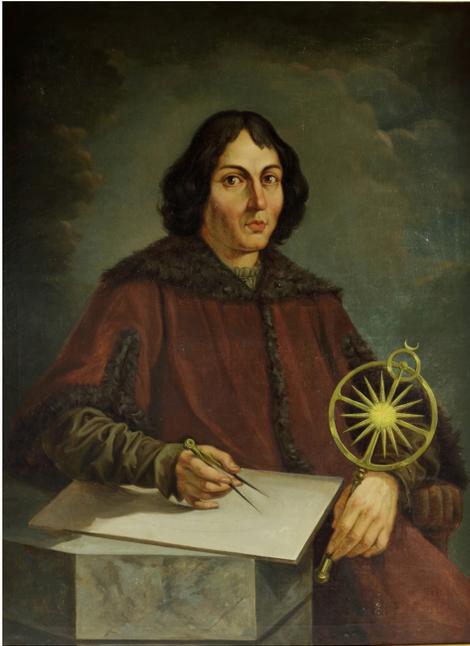


Figura 2.9: Nicolás Copérnico (1473-1543).

introdujo la palabra telescopio.

Hasta este año de 1611 no existió problema alguno entre Galileo y la jerarquía de la Iglesia. Antes al contrario, los astrónomos jesuitas confirmaron con sus observaciones (e incluso mejoraron y ampliaron) sus descubrimientos. Las observaciones de Galileo demostraban que el modelo geocéntrico de Ptolomeo era erróneo, pero no eran suficientes para poder decantarse entre el modelo de Tycho Brahe (1546-1601) o el de Nicolás Copérnico (1473-1543)⁸. El Colegio Romano

⁸El modelo de Ptolomeo suponía que la Tierra es el centro del universo, con el Sol y los planetas girando a su alrededor en órbitas circulares. El Modelo de Tycho Brahe suponía también que la Tierra estaba fija, con el Sol moviéndose alrededor de ella, pero los demás planetas se movían alrededor del Sol. El modelo de Copérnico significó una ruptura fundamental pasando a colocar al Sol en el centro y todos los planetas, incluida la Tierra, orbitando a su alrededor siguiendo órbitas circulares. No podía explicar algunas observaciones como los movimientos retrógrados de los planetas, es decir que veamos a un planeta retroceder con respecto al fondo de estrellas fijas durante un tiempo para volver después al mismo sentido inicial. La explicación de estos movimientos retrógrados requiere la modificación del modelo de Copérnico. Esta modificación fue introducida por Kepler al postular sus famosas tres leyes que describen el movimiento de los planetas alrededor del Sol. Extrañamente, Galileo nunca aceptó el modelo de Kepler, dando como cierto el modelo copernicano sin reserva alguna. Los sistemas astronómicos de Ptolomeo, Brahe, Copérnico y Kepler están explicados con detalle en López Piñero, J.M., Navarro, V. y Portela E., *La Revolución Científica* (Madrid, Historia 16, 1989); Baig, A. y Agustench, M., *La revolución científica de los siglos XVI y XVII* (Madrid, Alhambra, 1987) o García Hourcade, J.L., *La rebelión de los astrónomos. Copérnico y Kepler* (Madrid, Nívola, 2000).

de los jesuitas (la institución científica más prestigiosa de toda Europa en esa época, reconocida por todos los astrónomos y matemáticos incluyendo al propio Galileo) aceptaba el modelo de Tycho Brahe, mientras que los modelos de Copérnico y Kepler eran considerados contrarios a las Sagradas Escrituras. Esto no representaba problema alguno pues, como acabamos de mencionar, las observaciones de Galileo no permitían descartar el modelo de Tycho Brahe.

Los problemas comenzaron cuando un monje llamado Sizi aseguró que la existencia de los satélites de Júpiter era incompatible con las Sagradas Escrituras. Para agravar aún más la situación, en 1612 el astrónomo jesuita Christopher Scheiner (1575-1650) observó las manchas solares (que Galileo había descubierto en junio de 1611). Scheiner no admitía que lo que veía eran manchas en la superficie del Sol (como sostenía Galileo), pues de ser así el Sol no sería perfecto. Para evitar ese problema interpretó las manchas que observaba como planetas que pasaban frente al Sol. Sin embargo, Galileo demostró claramente en diferentes escritos que verdaderamente eran manchas. Peor aún, en esos escritos defendió vehementemente el modelo de Copérnico

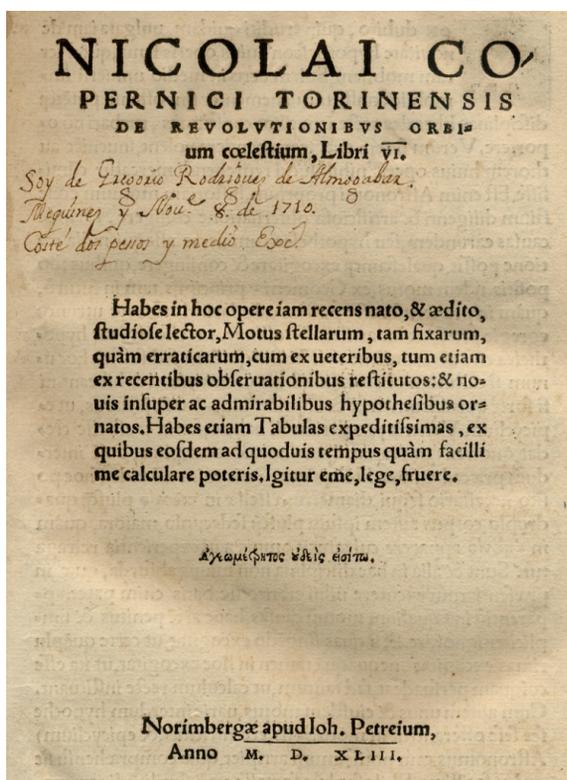
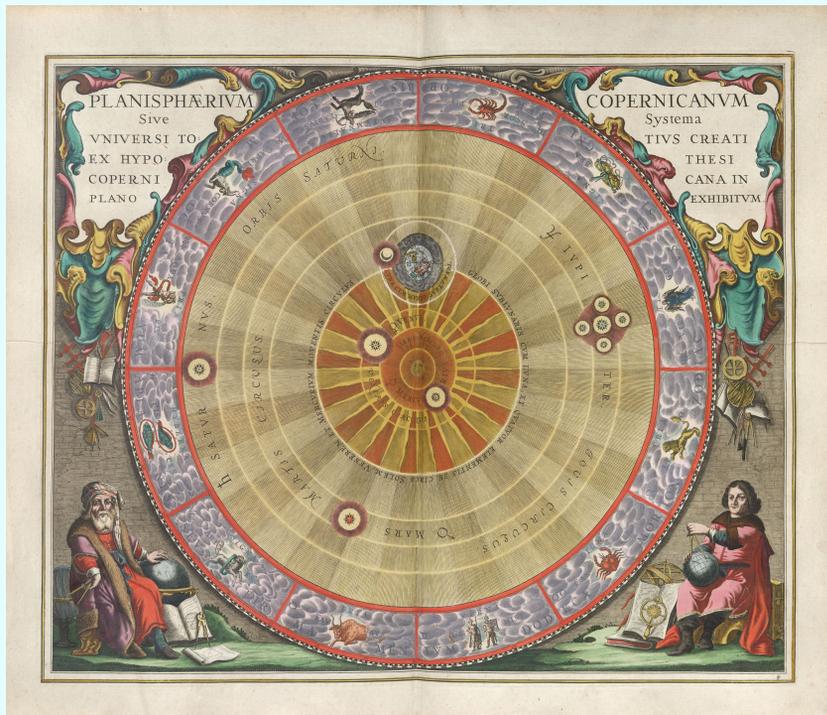


Figura 2.10: *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico (portada de la primera edición, 1543).

Cuadro 2.2. El modelo cosmológico de Copérnico

Aristarco de Samos ya había defendido en la Antigua Grecia la idea de que era la Tierra la que giraba alrededor del Sol, mostrándose partidario de un modelo cosmológico heliocéntrico. Sin embargo, como ya hemos visto, finalmente se impuso la aceptación del modelo geocéntrico desarrollado por Ptolomeo. De hecho, durante toda la Edad Media el sistema geocéntrico fue el único aceptado. Sin embargo, después de catorce siglos de vigencia el modelo se fue haciendo insostenible. Fue entonces cuando Nicolás Copérnico (1473-1543) se atrevió a proponer un sistema astronómico con el Sol situado en el centro, convencido de que el Universo, como obra divina, tenía que estar gobernado por leyes matemáticas simples.



Modelo de Copérnico (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660).

Copérnico intentó mantener en su sistema los principios más caracte-

rísticos de la antigua astronomía: la circularidad de las trayectorias y la uniformidad de los movimientos. La teoría copernicana partía de la premisa de que la Tierra giraba alrededor del Sol acompañada por la Luna, que giraba alrededor de ella. El Sol era el centro del Universo. Gracias a ese cambio, la explicación del movimiento de los planetas no necesitaba las complicadas trayectorias circulares propuestas por Ptolomeo. La verdadera aportación novedosa de Copérnico consistió en calcular matemáticamente las trayectorias de la Tierra y de los planetas alrededor del Sol, de forma que quedara garantizada la solución de los problemas de cálculo y de calendario, cada vez más evidentes con el sistema de Ptolomeo. Posiblemente no sospechó que las innovaciones por él propuestas constituirían la base de la ruptura total con la visión astronómica y cosmológica tradicional que él mismo había tratado de recomponer.

La aportación de Copérnico a la astronomía representó, pues, el primer paso de la revolución científica, un proceso que, a partir de entonces, fue evolucionando a lo largo de más de un siglo y cuyos hitos más importantes fueron marcando el paulatino hundimiento de la antigua ciencia. La Tierra dejó de ser el centro de toda la creación para convertirse en un planeta más que giraba alrededor del Sol, de ahí que desde un primer momento el sistema propuesto por Copérnico fuese cuestionado y combatido por la Iglesia. Eran muchos e importantes los argumentos a favor de la teoría geocéntrica, especialmente la posibilidad de explicar el movimiento de los planetas con la misma corrección que lo hacía el sistema copernicano. Y sobre todo el testimonio de los sentidos, que nos presenta una tierra inmóvil alrededor de la que todo se mueve. Sin embargo, el proceso revolucionario para la ciencia iniciado por Copérnico cambió para siempre los conceptos astronómicos.

(sin duda, influenciado por su descubrimiento de los satélites de Júpiter).

Estos escritos de Galileo suscitaban de inmediato fuertes polémicas, aunque no el rechazo oficial de la Iglesia sino, más bien, al contrario. Tanto es así que los Cardenales Barromeo y Barberini le escribieron cartas muy elogiosas en las que le manifestaban su admiración. Es posible que la polémica hubiera cesado con rapidez si Galileo se hubiese mantenido callado, pero esto era incompatible con su carácter. Sirva como ejemplo de ello la carta que envió en esa época (1615) a la señora Cristina de Lorena, Gran Duquesa toscana, algunos de cuyos párrafos se reproducen en el cuadro 2.3.

Cuadro 2.3. Carta de Galileo a la señora Cristina de Lorena^a

A la Serenísima Señora la Gran Duquesa Madre:

Hace pocos años, como bien sabe vuestra serena alteza, descubrí en los cielos muchas cosas no vistas antes de nuestra edad. La novedad de tales cosas, así como ciertas consecuencias que se seguían de ellas, en contradicción con las nociones físicas comúnmente sostenidas por filósofos académicos, lanzaron contra mí a no pocos profesores, como si yo hubiera puesto estas cosas en el cielo con mis propias manos, para turbar la naturaleza y trastornar las ciencias, olvidando, en cierto modo, que la multiplicación de los descubrimientos concurre al progreso de la investigación, al desarrollo y a la consolidación de las ciencias, y no a su debilitamiento o destrucción. Al mostrar mayor afición por sus propias opiniones que por la verdad, pretendieron negar y desaprobando las nuevas cosas, que si se hubieran dedicado a considerarlas con atención, habrían debido pronunciarse por su existencia. A tal fin lanzaron varios cargos y publicaron algunos escritos llenos de argumentos vanos, y cometieron el grave error de salpicarlos con pasajes tomados de las Sagradas Escrituras, que no habían entendido correctamente y que no corresponden a las cuestiones abordadas...

... Esos adversarios tratan de desprestigiarme por todos los medios posibles. Saben que mis estudios de astronomía y de filosofía me han llevado a afirmar, con relación a la constitución del mundo, que el Sol, sin cambiar de lugar, permanece situado en el centro de la revolución de las órbitas celestes, y que la Tierra gira sobre sí misma y se desliza en torno del Sol. Advierten además que una posición semejante no solo destruye los argumentos de Ptolomeo y de Aristóteles, sino que trae consigo consecuencias que permiten comprender, ya sea numerosos efectos naturales que de otro modo no se sabría cómo explicar, ya ciertos descubrimientos astronómicos recientes, los que contradicen radicalmente el sistema de Ptolomeo y confirman a maravilla el de Copérnico...

... Precisaría que se supiera reconocer que el autor jamás trata en él cuestiones que afecten a la religión o a la fe, y que no presenta argumentos que dependan de la autoridad de la Sagrada Escritura, que eventualmente podría haber interpretado mal, sino que se atiene siempre a conclusiones naturales, que atañen a los movimientos celestes, fundadas sobre demostraciones astronómicas y geométricas y que proceden de experiencias razonables y de minuciosísimas observaciones. Lo cual no significa que Copérnico no haya prestado atención a los pasajes de la Sagrada Escritura, pero una vez así de-

^aLettera a Madama Cristina di Lorena granduchessa di Toscana (escrita en 1615 y publicada por primera vez en 1636)

mostrada su doctrina, estaba por cierto persuadido de que en modo alguno podía hallarse en contradicción con las Escrituras, desde que se las comprendiera correctamente. . .

. . . Yo reverencio a esas autoridades y les tengo sumo respeto; consideraría sumamente temerario contradecirlas; pero, al mismo tiempo, no creo que constituya un error hablar cuando se tienen razones para pensar que algunos, en su propio interés, tratan de utilizarlas en un sentido diferente de aquel en que los interpreta la Santa Iglesia. Por ello, con una afirmación solemne (y pienso que mi sinceridad se manifestará por sí misma), no solo me propongo rechazar los errores en los cuales hubiera podido caer en el terreno de las cuestiones tocantes a la religión, sino que declaro, también, que no quiero entablar discusión alguna en esas materias, ni aun en el caso en que pudieran dar lugar a interpretaciones divergentes; y esto porque, si en esas consideraciones alejadas de mi profesión personal, llegara a presentarse algo susceptible de inducir a otros a que hicieran una advertencia útil para la Santa Iglesia con respecto al carácter incierto del sistema de Copérnico, deseo yo que ese punto sea tenido en cuenta, y que saquéis de él el partido que las autoridades consideren conveniente; de otro modo, sean mis escritos desgarrados o quemados, pues no me propongo con ellos cosechar un fruto que me hiciera traicionar mi fidelidad por la fe católica. Además de eso, aunque con mis propios oídos haya escuchado muchísimas de las cosas que allí afirmo, de buen grado les concedo a quienes las dijeron que quizá no las hayan dicho, si así les place, y confieso haber podido comprenderlas mal; así pues, no se les atribuya lo que yo sostengo, sino a quienes compartieran esa opinión.

El motivo, pues, que ellos aducen para condenar la teoría de la movilidad de la Tierra y la estabilidad del Sol es el siguiente: que leyéndose en muchos párrafos de las Sagradas Escrituras que el Sol se mueve y la Tierra se encuentra inmóvil, y no pudiendo ellas jamás mentir o errar, de ahí se deduce que es errónea y condenable la afirmación de quien pretenda postular que el Sol sea inmóvil y la Tierra se mueva.

Contra dicha opinión quisiera yo objetar que, es y ha sido santísimamente dicho, y establecido con toda prudencia, que en ningún caso las Sagradas Escrituras pueden estar equivocadas, siempre que sean bien interpretadas; no creo que nadie pueda negar que muchas veces el puro significado de las palabras se halla oculto y es muy diferente de su sonido. Por consiguiente, no es de extrañar que alguno al interpretarlas, quedándose dentro de los estrechos límites de la pura interpretación literal, pudiera, equivocándose, hacer aparecer en las Escrituras no solo contradicciones y postulados sin relación alguna con los mencionados, sino también herejías y blasfemias; con lo cual tendríamos que dar a Dios pies, manos y ojos, y, asimismo, los sentimientos corporales y humanos, tales como ira, pena, odio, y aun tal vez el olvido de lo pasado y la ignorancia de lo venidero. Así como las citadas

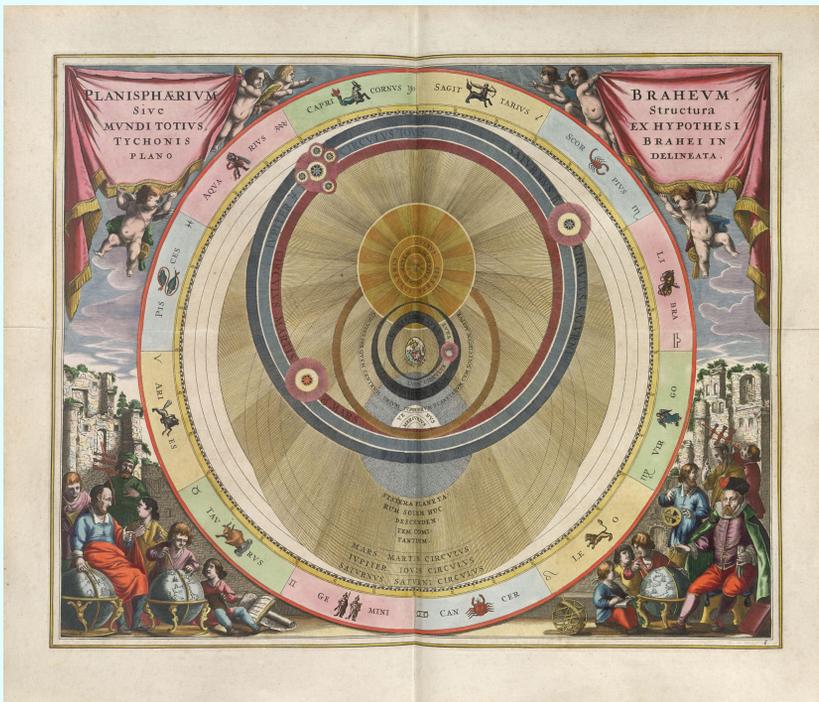
proposiciones, inspiradas por el Espíritu Santo, fueron desarrolladas en dicha forma por los sagrados profetas en aras a adaptarse mejor a la capacidad del vulgo, bastante rudo e indisciplinado, del mismo modo es labor de quienes se hallen fuera de las filas de la plebe, el llegar a profundizar en el verdadero significado y mostrar las razones por las cuales ellas están escritas con tales palabras. Este modo de ver ha sido tan tratado y especificado por todos los teólogos, que resulta superfluo dar razón de él.

El 24 de febrero de 1616 una comisión del Santo Oficio niega la afirmación de que el Sol sea el centro del Universo y esté quieto y que la Tierra no lo sea y se mueva. El 5 de marzo de 1616 la Congregación del Santo Oficio declara la *falsa doctrina pitagórica* (a saber, que la Tierra se mueve y que el Sol está quieto), enseñada por Copérnico, contraria a las Sagradas Escrituras. Dictamina, además, que el libro *De Revolutionibus Orbium Coelestium*, en el que Copérnico había publicado su teoría, ha de considerarse suspendido de publicación e incluido en el *índice de libros prohibidos* mientras no sea corregido. Asimismo, prohíbe, condena y suspende todo libro o doctrina que defienda el modelo copernicano. El Papa ordena al cardenal Bellarmino que advierta a Galileo que abandone sus puntos de vista copernicanos bajo la amenaza de prohibirle volver a enseñar de no acatar la orden, la cual se comunica a Galileo el 26 de febrero de 1616 durante su segundo viaje a Roma, a donde había sido llamado para tal fin.

Galileo se comprometió bajo juramento a guardar silencio, cosa que cumplió durante unos años. Pero en 1624 empezó a escribir un libro, que tituló *Diálogo sobre las mareas*, en el que discutía las ideas de Ptolomeo y Copérnico sobre este fenómeno. En 1630, el libro obtuvo la licencia de los censores de la Iglesia Católica pero le cambiaron el título por *Diálogo sobre los sistemas máximos*, publicándose en Florencia en 1632. En el libro aparecen tres personajes: Simplicio, Salviati y Sagredo. El primero defiende el modelo aristotélico (o sea, el de Ptolomeo) y el segundo defiende el modelo copernicano. Sagredo aparece como

Cuadro 2.4. El modelo cosmológico de Tycho Brahe

Aunque no fue un astrónomo teórico y, por lo tanto, no aportó ninguna nueva ley básica a la nueva ciencia, Tycho Brahe ha pasado a la historia de la astronomía por sus observaciones sistemáticas de los movimientos de los astros. Este astrónomo danés fue un claro integrante de la vanguardia científica de fines del siglo XVI, y hoy es conocido por sus numerosas observaciones astronómicas, llevadas a cabo de forma sistemática y mediante instrumentos contruidos por él mismo. Sus trabajos llegaron a la perfección de lo que era posible hacer sin contar aún con el telescopio. Sus tablas y localizaciones de planetas fueron indispensables para que aquellos que le siguieron pudieran completar sus aportaciones.



Modelo de Tycho Brahe (lámina de la *Harmonia macrocosmica* de Andreas Cellarius, 1660).

Los datos que Tycho Brahe acumuló durante toda su vida desempeñaron un papel fundamental en el desarrollo de la descripción correcta del movi-

miento planetario. Con ellos intentó conciliar a Ptolomeo y a Copérnico, ideando un sistema astronómico en el que la Tierra volvía a su posición central y estática (a su alrededor solo giraba la Luna). Los cinco planetas conocidos giraban alrededor del Sol, mientras éste efectuaba una vuelta alrededor de la Tierra una vez al año. En definitiva, para Tycho Brahe la Tierra volvía a ser el centro del Universo.

A finales del siglo XVI, Brahe se instaló en el castillo de Benatky, próximo a Praga, convirtiéndose en matemático oficial del emperador Rodolfo II. Desde 1600 contó con la ayuda de Johannes Kepler. Esta corta pero fructífera colaboración atravesó por momentos de gran tensión entre dos personajes de fuerte personalidad que se necesitaban mutuamente para sus trabajos. A finales de 1601, tras la muerte de Brahe, todos los resultados de sus observaciones quedaron en poder de Kepler, que los pudo utilizar para la formulación de sus famosas leyes sobre los movimientos planetarios. Unas leyes que, además de descubrir las trayectorias elípticas de las órbitas, sirvieron para confirmar la teoría de Copérnico sobre el Sistema Solar frente a la propuestas de Ptolomeo y Brahe. Años más tarde, estas leyes serían la base para que Newton formulase la Ley de la Gravitación Universal.

una persona moderada y de buen juicio que media entre uno y otro. El libro fue escrito por Galileo en italiano porque se dirige al público en general, tratando de ganar adeptos para el modelo heliocéntrico que es presentado en el libro como más correcto. Simplicio es un personaje tradicional y aristotélico que utiliza argumentos propuestos por filósofos de la época e, incluso, hace uso de un argumento que había utilizado el mismo Papa Urbano VIII.

Tras la publicación del libro, Galileo fue llamado de inmediato a Roma por la Inquisición con el fin de procesarlo bajo la acusación de *sospecha grave de herejía*, basando tal acusación en el hecho de que en 1616 se le había prohibido hablar o escribir sobre el modelo copernicano. Galileo trató de defenderse aduciendo que sus escritos eran tan solo una hipótesis, no una aseveración, sobre los movimientos de los planetas. Pero tal argumento no convenció a las autoridades eclesiásticas y Galileo fue juzgado y condenado. El castigo consistió en la obligación de abjurar de la teoría heliocéntrica, la prohibición del libro *Diálogo sobre los sistemas máximos*, la privación de libertad a juicio

de la Inquisición (que es conmutada por arresto domiciliario) y algunas penitencias de tipo religioso. La leyenda dice que al levantarse, tras permanecer arrodillado durante la abjuración, Galileo golpeó con fuerza el suelo con el pie a la vez que exclamaba *jeppur si muove!* (es decir, *¡sin embargo se mueve!*)⁹.

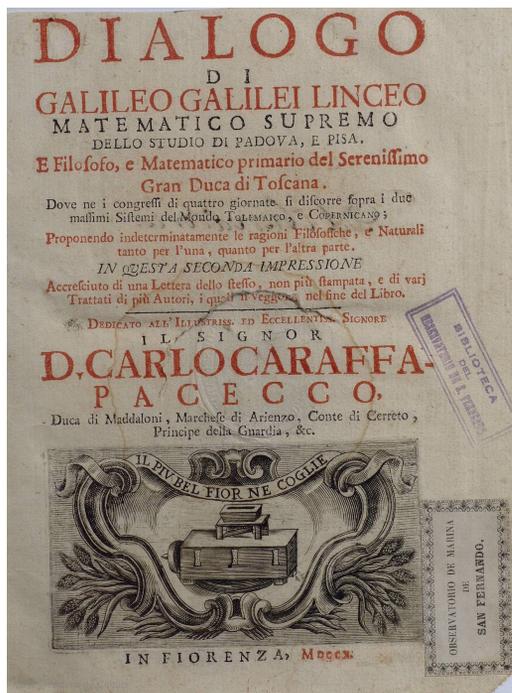


Figura 2.11: *Dialogo* de Galileo Galilei (portada de la edición de 1710).

Durante los años siguientes Galileo, en prisión domiciliaria, reunió todos sus apuntes sobre Mecánica, en los que había trabajado durante más de veinte años. El resultado fue el libro *Consideraciones y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*, que fue publicado clandestinamente en Leyden en el año 1638 por Elzevir¹⁰. Para burlar la vigilancia de la Inquisición, el libro hacía constar al comienzo una nota en la que se decía que la publicación del libro se hacía en contra de la voluntad del autor. En esta obra, posiblemente

⁹En 2018 se descubrió una carta escrita en 1613 por Galileo a un matemático amigo suyo, Benedetto Castelli, en la que critica duramente la doctrina Ptolomeica de la Iglesia sobre el movimiento planetario. Esto demuestra que, a pesar de su carácter, Galileo trató de ser muy cuidadoso en la exposición inicial de sus ideas para evitar el conflicto con la Iglesia, aunque, como vemos, sus intentos no le sirvieran finalmente de nada. Véase Alison Abbott, *Discovery of Galileo's long-lost letter shows he edited his heretical ideas to fool the Inquisition*, Nature vol. 561, pág. 441-442 (2018), <https://www.nature.com/articles/d41586-018-06769-4>.

¹⁰Galileo, *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze* (Leyden, Elzevir, 1638).

la mayor aportación científica de Galileo, el autor explica sus ideas sobre las leyes del movimiento uniforme, del movimiento acelerado y del movimiento de los proyectiles. Hoy en día la transformación entre sistemas de referencia en física clásica no relativista es llamada *transformación de Galileo*. Antes de la publicación de esta obra Galileo se quedó ciego, posiblemente a causa de sus observaciones del Sol con el telescopio que le llevaron, años antes, al descubrimiento de las manchas solares. Murió el 8 de enero de 1642 en Arcetri, cerca de Florencia.



Figura 2.12: Satélites de Júpiter fotografiados con un telescopio moderno no muy sofisticado. *Jupiter and Moons through a 10" LX200 telescope* (Jan Sandberg).

Capítulo 3

La solución de Galileo al problema de la longitud

3.1. La observación de los eclipses de los satélites de Júpiter

El problema de la determinación de la longitud fue planteado en la Antigüedad clásica por Ptolomeo, cuando en su *Geografía* propuso trazar una red de meridianos y paralelos como origen de unas coordenadas geográficas que permitiesen determinar la posición de un lugar concreto. Ptolomeo partía entonces de la siguiente premisa: dos lugares con la misma latitud debían hallarse en el mismo paralelo, mientras que dos lugares con la misma longitud tendrán que estar en el mismo meridiano.

Así pues, el interés inicial por la determinación de coordenadas geográficas estaba motivado por la posibilidad de construir una representación cartográfica de la superficie terrestre que hiciese posible reflejar en la misma la situación de los lugares conocidos, permitiendo al observador o al viajero localizar su posición y, por lo tanto, la distancia recorrida. Cuando a finales de la Edad Media se generalizan los viajes oceánicos surge la necesidad de fijar con precisión la posición de los barcos de los que dependían vidas, mercancías y estrategias políticas. Como ya hemos discutido en el capítulo 1, la determinación de la la-

titud es relativamente sencilla, pues está ligada a la altura del polo celeste sobre el horizonte o a la altura de los astros en el instante de su paso por el meridiano del observador. Sin embargo, la determinación de la longitud es más complicada, pues exige comparar la hora local en la que se observa un mismo fenómeno astronómico en dos lugares diferentes. De ahí la aparición de sucesivos concursos en las principales potencias marítimas destinados a premiar las soluciones prácticas y fiables que permitiesen determinar la longitud en alta mar (España, Holanda, Francia, Inglaterra). A todos ellos se presentaron numerosas propuestas, unas teóricas y puramente astronómicas, y otras más prácticas y tecnológicas basadas en la construcción de nuevos instrumentos.

Si, como ya hemos explicado anteriormente, la forma más directa de determinar la longitud es comparar nuestra hora local con la de un meridiano de referencia, la solución es tan sencilla como construir un reloj isócrono que conserve durante el viaje la hora de dicho meridiano de referencia para poder compararla con la hora local obtenida mediante observación astronómica. Esta propuesta ya fue realizada en 1530 por Gemma Frisius (1508-1555) y su planteamiento sería irrefutable si se pudiese confiar plenamente en la fiabilidad del reloj utilizado¹. Sin



Figura 3.1: Gemma Frisius (1508-1555).

¹Gemma Phrisius, Rainer: *De principis astronomiae et cosmographiae* (Amberes, 1530). No obstante, Hernando Colón ya había propuesto en 1524, durante las reuniones de la Junta de Badajoz, una solución al problema basada

embargo, pasaron más de cien años hasta que Galileo hizo un primer intento de desarrollar un medidor de tiempo preciso, seguido muy poco después por Christian Huygens (1629-1695). Y a pesar de ello, todavía habría que esperar hasta mediados del siglo XVIII para que John Harrison construyese los primeros cronómetros marinos, también conocidos como relojes de longitud.

Otra propuesta de solución a este problema fue la que planteaba recurrir a los movimientos de la Luna respecto a las estrellas como fenómeno astronómico de referencia, para lo que era imprescindible contar con tablas precisas de las posiciones de la Luna. El método fue propuesto por primera vez por Johannes Werner (1468-1522) en 1514 y tuvo diversas variantes a lo largo de los siglos XVI, XVII y XVIII, destacando la propuesta de Kepler y Hevelius, basada en la observación de los eclipses de estrellas por la Luna, y la de



Figura 3.2: Christiaan Huygens (1629-1695).

Maskelyne, que pretendía observar las variaciones de la distancia angular entre la Luna y algunas estrellas de referencia. Este método, que exigía cálculos complejos, instrumentos precisos y tablas precisas de la posición de la Luna, no pudo ser puesto en práctica hasta la segunda parte del siglo XVIII. Fue entonces

en el transporte de la hora en los barcos, al sugerir la construcción de un aparato capaz de conservar a bordo la hora del meridiano de partida para poder compararla en cualquier momento con la hora local determinada en el barco. Véase López Piñero, José María: *El arte de navegar en la España del Renacimiento* (Barcelona, Labor, 1986), pág. 194.

cuando, tras el desarrollo del sextante (1757) y la publicación en 1753 de las tablas de la Luna de Tobías Mayer (1723-1762), Maskelyne impulsó la publicación del primer *The Nautical Almanac* (1766), que incluyó tablas con la distancia angular entre la Luna y nueve estrellas y el Sol cada tres horas para todo el año 1767.

Pero volvamos a la propuesta de Galileo. Una vez descubiertos los satélites de Júpiter tras la puesta de Sol del 7 de enero de 1610 todo sucedió muy deprisa, especialmente teniendo en cuenta la velocidad a la que la información podía diseminarse en aquella época. Tal es así que antes del final de ese mismo año 1610 los satélites de Júpiter ya habían sido observados por Kepler en Praga, por Thomas Harriot (1560-1621) en Syon (cerca de Londres), por Nicolas-Claude Fabri de Peiresc (1580-1637) y Joseph Gaultier de la Valette (1564-1647) en Aix-en-Provence (Francia), por los matemáticos jesuitas en el Colegio Romano en Roma y, se cree, por Simon Marius (1573-1624) en Ansbach, cerca de Núremberg (Alemania).

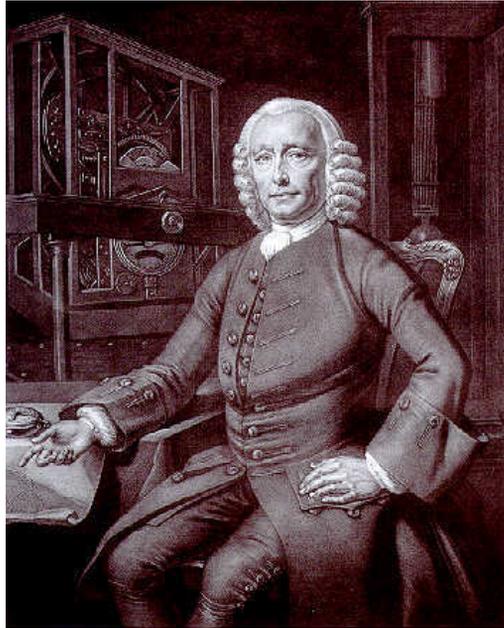


Figura 3.3: John Harrison (1693-1776).

Galileo comprendió pronto que el movimiento de estos nuevos satélites constituía un verdadero reloj celeste, accesible desde cualquier lugar de la Tierra desde donde se pudiese observar Júpiter. Dado que era relativamente sencillo predecir los eclipses de estos satélites por la sombra del planeta, pronto se entendió que estos fenómenos, observados por dos astrónomos ubicados en lugares distintos, permitirían calcular la diferencia de lon-

gitud entre esos lugares comparando las horas locales de sus observaciones. Debía bastar con poseer un telescopio, un reloj bien ajustado y una predicción de los citados eclipses.

El lento ballet de los satélites da lugar a dos tipos de fenómenos: eclipses y ocultaciones, cuando pasan por detrás de Júpiter, y tránsitos y sombras, cuando pasan por delante de Júpiter². La observación de estos fenómenos, y el establecimiento de los instantes de inicio y fin de los mismos, estaba en la base de la utilización del movimiento de los satélites de Júpiter como reloj celeste y de su aplicación a la determinación de la longitud. Debido a la dificultad para observar con exactitud el momento en el que un satélite desaparece por detrás del planeta (*ocultación*), los astrónomos prefirieron desde un primer momento observar las *inmersiones* y las *emersiones* de los satélites (*eclipses*) como fenómenos para realizar sus cálculos³. Los instantes de los fenómenos citados debían estar calculados en función de la hora local de referencia para poder compararla con la hora local del lugar de la observación. Obtenida la diferencia, se podría calcular la diferencia de longitud entre ambos puntos a razón de 4 minutos por grado (60 minutos cada 15 grados), que es la velocidad angular de rotación de la Tierra. Estamos, pues, ante un reloj celeste que podría servir de guardatiempos universal para todos los navegantes que quisieran determinar la longitud en la mar.

Sin embargo, la aplicación del método presentaba grandes dificultades pues había que tener en cuenta la frecuencia de este tipo de fenómenos, la hora en la que se producían (Júpiter debía ser visible) y las condiciones meteorológicas óptimas para la observación. Pero a todo ello habría que añadir una dificultad aún mayor: la falta de precisión en la medida de los instantes, las limitaciones de los anteojos y el movimiento del navío. No

²Los diferentes tipos de fenómenos asociados a los satélites de Júpiter son tratados con más detenimiento en el capítulo 5.

³Se denomina *inmersión* al momento en el que alguno de los satélites entra en el cono de sombra del planeta, momento muy fácil de detectar pues es entonces cuando este desaparece de nuestra vista al dejar de reflejar la luz del Sol. El fenómeno contrario, llamado *emersión*, tiene lugar cuando el satélite se ilumina de nuevo al salir de la sombra y volver a reflejar la luz solar.

obstante, aunque poco práctico en la mar, el método fue muy útil en tierra firme. En cartografía se habían usado desde el siglo XVI los eclipses de Luna, con los que se obtenía un error de ± 100 km. A fines del siglo XVII, los mapas corregidos con el método de los satélites de Júpiter consiguieron una precisión cercana a los ± 10 km. Más adelante, ya en el siglo XVIII, la geodesia por triangulación permitirá llegar a una precisión de ± 1 km.

Los primeros intentos de utilizar los satélites de Júpiter como reloj astronómico para resolver el problema de la longitud fueron inmediatos, comenzando la observación minuciosa de los satélites con el fin de determinar sus órbitas con precisión y poder así preparar tablas con las posiciones de los satélites en función de la hora en el meridiano de referencia. Peiresc observó las lunas de Júpiter desde noviembre de 1610 hasta junio de 1612. Con el resultado de estas observaciones su asociado Gaultier preparó las primeras tablas que describían sus movimientos. Se suponían las órbitas circulares alrededor de Júpiter y todas ellas contenidas en el plano de la eclíptica. Las tablas de Gaultier contenían los elementos orbitales de los satélites basándose en estas suposiciones. El propio Peiresc preparó entonces tablas de efemérides, es decir, un almanaque en el que se proporcionaban las posiciones de los satélites en función del tiempo. En 1612 Jean Lombard hizo un viaje a través del Mediterráneo pasando por Marsella, Malta, Chipre y Trípoli. Durante este viaje observó siempre que pudo la disposición de los satélites de Júpiter con la intención de determinar la longitud por comparación con las efemérides de Peiresc. Pero llegó rápidamente a la conclusión de que las posiciones de los satélites no cambian lo suficientemente rápido como para que la disposición de los satélites alrededor del planeta fuese útil para el fin perseguido de determinar la longitud⁴.

En realidad el primero en publicar tablas con efemérides de

⁴Un reloj con segundero cambia de posición (es decir, de configuración observable de sus agujas) rápidamente, cada segundo, y esa es la precisión con la que es capaz de dar la hora. Un reloj que no tiene segundero cambia de posición solo cada minuto y no es capaz de dar la hora con mayor precisión que el minuto.

los eclipses de los satélites de Júpiter fue Simon Marius, en 1614, aunque sin hacer mención alguna a la posibilidad de utilizar esos datos para determinar la longitud. Las tablas de Odier-na, publicadas en 1656, mejoraron las de Marius, pero su precisión era aun insuficiente para las aplicaciones prácticas.

En Francia el interés en los satélites de Júpiter tuvo una relación directa con la cartografía. Una figura clave en este esfuerzo fue Giovanni Cassini quien, aparte del desarrollo de técnicas observacionales, elaboró sucesivas tablas de efemérides (publicadas en 1668 y 1693), utilizadas durante el siglo XVII. En la sección 3.4 tratamos con más detalles los trabajos de Cassini y su contribución al desarrollo del método basado en los satélites de Júpiter.

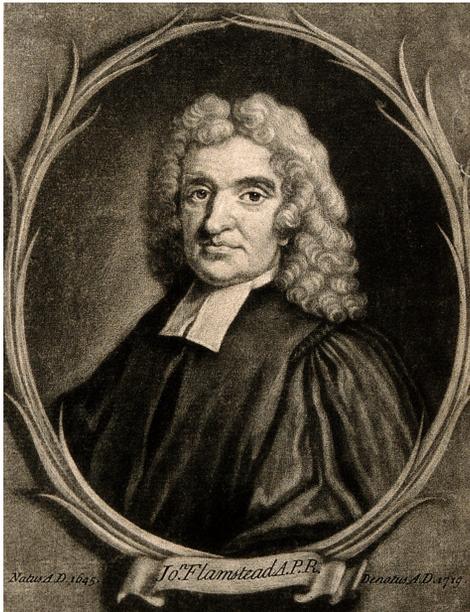


Figura 3.4: John Flamsteed (1646-1719).

Mientras todo esto sucedía en Francia, en Inglaterra también se realizaban esfuerzos encaminados a resolver el problema de la longitud. Los primeros intentos en Inglaterra relacionados con los satélites de Júpiter se debieron a Laurence Rooke (1622-1662), uno de los fundadores de la Royal Society y profesor de astronomía y geometría. Rooke realizó observaciones de los satélites de Júpiter pero murió en 1662 antes de haber conseguido elaborar unas tablas. No obstante, Rooke estaba convencido de que el método no era viable a bordo de un barco porque requería

el uso de telescopios demasiado largos como para poder ser manejados en un barco en movimiento⁵.

⁵Antes de la muerte de Rooke seguían en uso los telescopios refractores

Dos décadas más tarde se inició un periodo muy fructífero con la creación del Real Observatorio de Greenwich en 1675. La fundación del observatorio, por orden del rey Carlos II de Inglaterra, estuvo acompañada además por la creación de la figura del Astrónomo Real. La primera persona en ocupar el puesto fue John Flamsteed (1646-1719), que comenzó a promocionar el método publicando en 1683 nuevas tablas de los movimientos de los satélites de Júpiter y posteriormente, en septiembre de ese mismo año, sus predicciones para los eclipses de los satélites. A finales de 1683, Flamsteed publicó un catálogo de eclipses para el año siguiente en la revista *Philosophical Transactions*⁶. En ese catálogo incluía, además, instrucciones útiles para la observación de los satélites. Según él mismo afirmó, confiaba en que la predicción de los eclipses de Io, el primero de los satélites, podía tener un error de no más de 5 minutos y un poco más las predicciones para los eclipses del tercer satélite. Para las predicciones referidas al segundo y cuarto satélites no se atrevía a prometer nada sobre su precisión ya que había encontrado que, según sus propias palabras, sus movimientos eran más irregulares. En los años siguientes continuó publicando catálogos de eclipses, algunos de ellos en latín para beneficio de los extranjeros. En el



Figura 3.5: Edmund Halley (1656-1742) (grabado incluido en sus *Tabulae astronomicae*, 1749).

que requieren un tubo mucho más largo que un reflector para conseguir los mismos aumentos.

⁶*Philosophical Transactions of the Royal Society (Phil. Trans.)* es una revista científica británica publicada desde 1665, la primera revista del mundo dedicada exclusivamente a la ciencia. Actualmente sigue publicándose separada en diversos volúmenes dedicados a las diferentes Ciencias.

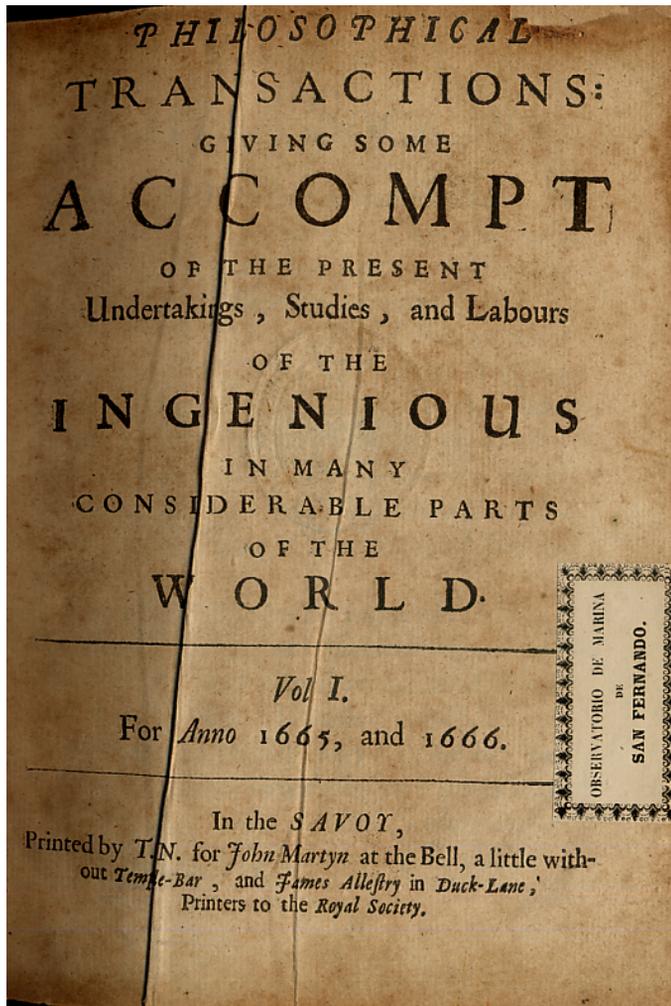


Figura 3.6: *Philosophical Transactions* (portada del primer número, 1665).

catálogo para 1687 comentaba sobre la precisión de las horas previstas advirtiendo que para el segundo y tercer satélites sus observaciones recientes mostraban que era conveniente comenzar las observaciones incluso un cuarto de hora antes de la hora prevista en las tablas con el fin de no perder el evento. Añadía que en uno o dos años más podría, gracias a las observaciones que pretendía realizar, corregir los errores que afectaban a esos

dos satélites de manera que la precisión para sus eventos sería comparable a la que ya tenía para el primer satélite, para el que nunca había observado errores por encima de los 3 minutos con respecto al tiempo previsto en las tablas.

Otro gran impulsor del método en Inglaterra fue Edmund Halley (1656-1742)⁷. Halley fue el sucesor de Flamsteed como Astrónomo Real, puesto al que accedió en 1720 y ocupó hasta su muerte en 1742 a la edad de 85 años. Intentó utilizar el método en 1699 desde las costas de Brasil⁸ durante una expedición por el océano Atlántico efectuada con el fin de hacer un mapa de la declinación magnética⁹. En su primer intento no pudo observar el eclipse porque la gran altura sobre el horizonte que tenía Júpiter observado desde su posición hacía necesaria una montura específica para su largo telescopio, montura de la que no disponía, haciendo impracticable la observación. Un mes más

⁷Tras la publicación de la *teoría de la gravitación* por parte de su amigo Isaac Newton, Halley calculó por primera vez la órbita de un cometa, el que se había avistado en 1682. Su cálculo le llevó a anunciar que ese cometa era el mismo que había sido visto en 1531 y 1607 y a pronosticar que volvería a pasar en 1758. Ese cometa es el que hoy día conocemos como cometa 1P/Halley.

⁸Halley había publicado una copia de las tablas de Cassini a las que había añadido sus propios comentarios (trataremos el trabajo de Cassini más adelante en este mismo capítulo). En particular, criticaba duramente a Cassini por su testarudez al no haber aceptado la teoría de Römer sobre la luz. Eso había ocasionado la existencia de errores importantes en las tablas de efemérides de Cassini para los satélites de Júpiter, excepto para el primero de ellos. Por esa razón Halley solo incluyó las predicciones para las efemérides de Io en la publicación reseñada. Halley, E.: *Monsieur Cassini his new and exact Tables for the eclipses of the first satellite of Jupiter, reduced to the Julian stile, and meridian of London*, *Philosophical Transactions*, 18, no. 214, pp. 237-256, (London, 1694).

⁹Utilizar la declinación magnética del campo magnético terrestre para determinar la longitud en el mar, observando la desviación del compás y comparándola con la declinación indicada por el mapa, fue otro de los métodos que se barajaron para resolver el problema de la longitud, como ya hemos comentado anteriormente. En los últimos años del siglo XVII Halley trazó las primeras cartas magnéticas de la historia, con las que los marinos podían conocer la variación magnética en cada punto del Atlántico y corregir su rumbo respecto a lo que marcaba la brújula. Halley, E.: *A new and correct chart shewing the variations of the compass in the Western & Southern oceans*, (London, 1702).

tarde, en Barbados, se encontraba observando la inmersión de Io cuando el viento comenzó a hacer vibrar su telescopio. Tuvo que cambiar de emplazamiento para proteger el telescopio del viento, pero para cuando consiguió enfocar de nuevo al planeta la inmersión de Io ya había pasado.

Las aportaciones británicas para optimizar el método de los satélites de Júpiter continuaron durante las primeras décadas del siglo XVIII. El mismo Halley publicó tablas para el primer satélite en 1719, todavía basadas en las tablas de Cassini de 1693.



Figura 3.7: James Bradley (1693-1762).

En ese mismo año James Bradley (1693-1762)¹⁰ publicó unas tablas para los cuatro satélites. En 1726 Bradley mencionó, en sus cálculos de las longitudes de Lisboa y Nueva York a partir de observaciones simultáneas del primer satélite, que había errores de hasta 5 minutos y 10 segundos entre el tiempo previsto en las tablas para las inmersiones y emersiones y el realmente observado. Realizó observaciones cuidadosas, utilizando tanto un telescopio refractor de 15 pies como un nuevo reflector de Halley. Encontró que con el reflector era

capaz de observar una emersión unos 15 segundos antes de que la misma emersión fuese visible con el refractor. La conclusión era entonces obvia: si ocurrían errores de ese calibre en observatorios en los que la hora local era conocida con gran precisión, los instrumentos utilizados eran óptimos y los observadores eran expertos, ¿qué no podría entonces esperarse cuando un

¹⁰James Bradley ocupó el puesto de Astrónomo Real en 1742 a la muerte de Halley. Descubrió en 1728 el movimiento de nutación del eje de rotación de la Tierra y, también, el fenómeno de la aberración estelar.

explorador en un lugar remoto del mundo detuviese su expedición para observar los satélites de Júpiter y determinar su longitud comparando la hora local de la observación con la tabulada para el meridiano de referencia? Resultaba evidente, pues, que en 1726 una determinación precisa de la longitud por medio del método de los satélites de Júpiter era posible solo comparando observaciones simultáneas del mismo evento hechas con telescopios similares.

3.2. Propuesta realizada al concurso de la Corona española

Como se deduce de todo lo que se ha dicho anteriormente, el descubrimiento de los satélites de Júpiter supuso una verdadera revolución en el ámbito científico al demostrar de manera indirecta la falsedad de la teoría geocéntrica. A ello se añadiría la posibilidad de aplicación práctica en el cálculo de la longitud, pues una vez conocidas las efemérides de los satélites se podrían utilizar como el reloj astronómico necesario para calcular las diferencias horarias entre dos puntos de la superficie terrestre. Entre las ventajas ofrecidas por estos cuerpos celestes descubiertos por Galileo destacaban especialmente su distancia respecto a la Tierra, que facilitaba su observación simultánea desde cualquier punto del planeta, y su frecuencia, más de mil cada año. En teoría, con las tablas adecuadas, los eclipses debían permitir calcular la situación de un barco en alta mar en cualquier punto de la travesía y en cualquier noche, además de facilitar una gran precisión en los levantamientos cartográficos. No cabe duda de que ambas aplicaciones debían ser de gran interés para una potencia marítima con un gran imperio ultramarino como era España en aquella época.

La propuesta a España fue realizada de forma muy temprana, en 1612, y la negociación con las autoridades encargadas de otorgar el premio, realizadas indirectamente a través de medios diplomáticos, se prolongaron con diversos altibajos hasta 1632. Galileo planteó una propuesta inicial centrada en sus as-

pectos teóricos, en la que criticaba los defectos y limitaciones de los métodos que habían sido propuestos hasta entonces. De los documentos conservados se desprende que la propuesta hecha en nombre de Galileo fue poco concreta y con escasas explicaciones sobre la forma de ponerla en práctica. De hecho, parecía estar más orientada hacia el problema de la representación geográfica y la elaboración de mapas precisos, pues en ningún momento planteaba más problemas técnicos para su aplicación que las dificultades derivadas de la observación de los satélites y la elaboración de unas tablas precisas con sus efemérides. No es descabellado pensar que Galileo creyese que el rey de España estuviera más interesado en cartografiar con precisión los territorios de la Corona que en el problema de la navegación. Quizás por ello minusvaloró la importancia de los problemas derivados del uso de un telescopio en un barco, lo que le obligó a ir completando su propuesta en función de los reproches que se le fueron planteando desde España¹¹.

Las anotaciones que Galileo hacía de todas sus observaciones indican que en septiembre de 1612 ya había establecido los periodos de los satélites de Júpiter y había calculado y confeccionado tablas de sus movimientos. Observó que cuando se produce un eclipse de un satélite de Júpiter, es decir su inmersión en el cono de sombra por detrás del planeta, este tiene lugar de forma bastante rápida¹². Pensó que si un navegante en al-

¹¹Las negociaciones llevadas a cabo durante los reinados de Felipe III y Felipe IV para ceder a España el uso del sistema ideado por Galileo para determinar la longitud en el mar a cambio de la recompensa económica prometida en el concurso convocado en 1598, son conocidas gracias a los documentos incluidos en las obras completas de Galileo y han sido comentadas por diversos autores. Galileo: *Le opere di Galileo Galilei*, 16 v. (Firenze, 1929-1936). En el Archivo General de Simancas, Sección de Estado, Legajo 1688 (AGS E1618SF), se conserva un informe del cartógrafo real Juan Bautista Labaña (1550-1624) sobre el ofrecimiento hecho por Galileo a Felipe III: el método para determinar la longitud y el instrumento para poder practicarlo (*il celatone*). Este informe fue examinado por el Consejo de Estado el 28 de abril de 1618. Véase Floristán Imízcoz, J.M., *Informe de Juan Bautista Labaña, cosmógrafo real, sobre el sistema de cálculo de la longitud de Galileo Galilei*. En *Lógos hellenikós: homenaje al profesor Gaspar Morocho Gayo / coord. por J. María Nieto Ibáñez* Árbol académico, Vol. 2, 2003, págs. 817-836.

¹²En comparación con un eclipse de Luna. Sin embargo, esto no es así en

ta mar pudiese hacer la observación y anotar la hora local del fenómeno para compararla con la hora referida al meridiano de referencia a la que estuviera previsto que ocurriera ese mismo evento, podría determinar fácilmente la diferencia horaria y, por lo tanto, la diferencia de longitud. Hizo entonces su primera propuesta ese mismo año a la Corona española para enseñar a los navegantes cómo observar las lunas de Júpiter y determinar la longitud a partir de esas observaciones. Esta idea de Galileo formaba parte de una propuesta de colaboración más global hecha a la Corona española por Cosimo II de Medici, Gran Duque de la Toscana. Galileo justificó su método como más simple, preciso y manejable que los utilizados en aquel momento (los ya comentados eclipses de Sol o Luna), dado que los eclipses de los satélites de Júpiter son más frecuentes que los de Sol o Luna, se pueden determinar con mayor precisión y sus efemérides son más fáciles de elaborar. La proposición fue, sin embargo, rechazada. A pesar de ello, Galileo no cesó en sus esfuerzos para tratar de convencer de la viabilidad de su idea, esfuerzos que, de hecho, no abandonó durante el resto de su vida.

En 1616, tras la prohibición por parte de la Inquisición de defender o hablar del modelo copernicano, concentró sus esfuerzos en el problema de la determinación de la longitud en el mar. Ese año hizo una segunda propuesta a la Corona española en la que criticaba el método empleado en esos tiempos para situarse en la mar (navegación siguiendo el paralelo y estima de la distancia navegada), así como el uso de los eclipses de Luna para determinar la longitud de diferentes lugares desde los que esos eclipses eran observados¹³. Propuso construir un centenar

realidad, de manera que la determinación del instante del eclipse de un satélite no es un asunto trivial. Volveremos sobre este tema con más detalle en el capítulo 5.

¹³La observación de la hora de comienzo de un eclipse de Luna y su comparación con la hora precalculada a la que ocurriría el fenómeno en el meridiano de referencia era un método utilizado desde hacía bastante tiempo. Es, sin embargo, un método muy poco preciso porque es muy difícil establecer en la práctica, mediante la observación, el momento preciso en que la Luna entra en la sombra de la Tierra. Galileo hablaba de errores frecuentes de más de un cuarto de hora en la determinación del instante de comienzo o finalización del eclipse. Ese error en la hora implica un error en longitud de unos 4°.

de telescopios de 40 o 50 aumentos y llevarlos a España, junto con alguien entrenado en la utilización del método que enseñase a los marinos que lo necesitaran. Galileo se comprometía a preparar personalmente cada año un almanaque con las efemérides de los satélites de Júpiter de manera que los marinos entrenados en el método serían capaces de determinar la longitud en alta mar directamente a partir de las observaciones que harían a bordo. También prometía escribir un informe en el que explicaría detalladamente todo su conocimiento sobre las lunas de Júpiter, de manera que en el futuro los astrónomos pudiesen continuar y mejorar su trabajo y el método de determinación de la longitud pudiese seguir usándose. A pesar de todo este esfuerzo argumental por parte de Galileo la respuesta que obtuvo de la Corona española, por boca del Conde Orso d'Elci, no dejaba lugar a dudas: el método no era práctico para su uso a bordo de un barco en alta mar por la imposibilidad práctica de observar con un telescopio desde la cubierta de un barco en navegación. La respuesta a Galileo de cía textualmente:

... De su escrito entiendo que a partir de la diferencia de tiempo en que se observa el mismo aspecto de esas estrellas alrededor de Júpiter puede saberse rápidamente la diferencia de longitudes verdaderas de esas ciudades o lugares. Pero para ello es antes obligatorio y necesario ver las mencionadas estrellas y sus aspectos. No sé como puede hacerse ésto en el mar, o al menos tan frecuente y rápidamente como es necesario para la persona que

Por el contrario, argumentaba Galileo, el carácter puntual de los satélites de Júpiter, tal y como los vemos a través del telescopio, hace que el instante de sus eclipses pueda observarse con una precisión en torno a 1 minuto lo cual corresponde a un error en longitud de unos 15' solamente. Más aún, Galileo aseguraba que las tablas de los movimientos del Sol y la Luna disponibles en aquellos tiempos eran imperfectas, inexactas, de manera que los eclipses de Luna predichos a partir de ellas podían fácilmente contener un error de un cuarto de hora. Este error, unido al que acabamos de comentar, resultaría en imprecisiones en la longitud en torno a los 8°. Otro problema adicional, mencionado también por Galileo en su crítica a este método incluida en su segunda propuesta a la Corona española, es el hecho de que se den muy pocos eclipses de Luna en comparación con los de los satélites de Júpiter, que tienen lugar mucho más frecuentemente, del orden de mil al año.

navega. Porque, dejando de lado que los telescopios no pueden ser utilizados en los barcos debido a su movimiento, incluso si pudiesen ser usados no servirían durante el día ni durante la noche con tiempo cubierto, porque las estrellas no son visibles, y el navegante necesita saber hora a hora el grado de longitud en el que está...¹⁴

Galileo era consciente de estas y otras dificultades prácticas cuando realizó su segunda propuesta. En primer lugar, en 1616 no existían tablas suficientemente precisas para la predicción de los eclipses de las lunas de Júpiter. Pero Galileo llevaba cinco años observando los satélites de manera sistemática y haciendo modelos de sus órbitas. Estaba seguro de poder predecir los eclipses proporcionando así las efemérides necesarias. En cuanto al problema ocasionado por el balanceo del barco a la hora de observar por el telescopio, Galileo había estado pensando sobre ello tratando de encontrar una solución adecuada. Y para ello inventó un artilugio que llamó *celatone*. Consistía en un casco metálico con un visor en el que se acoplaba un pequeño telescopio. El visor era ajustable de manera que podía alinearse el eje del telescopio con el ojo del usuario. De esta manera el observador podía mantener continuamente al planeta en el campo de visión del telescopio a pesar del balanceo del barco. Construyó un prototipo en el taller del Gran Duque y lo probó personalmente en la cubierta de un buque anclado en la bahía de Livorno. En este prototipo utilizó un telescopio de pocos aumentos, no apropiado para la observación de los satélites de Júpiter, pero sirvió para demostrar que podía utilizarse un telescopio a bordo de un barco. Tanto es así que el comandante militar Giovanni de Medici (que no era precisamente amigo de Galileo) llegó a afirmar que el *celatone* era un invento más importante que el propio telescopio. Más tarde refinó aún más su invento proponiendo la construcción de una *silla flotante* consistente en dos semiesferas concéntricas, la interior de diámetro solo ligeramen-

¹⁴Carta de Orso d'Elci a Curzio Picchena, Madrid, 30-XI-1617, *Le Opere di Galileo Galilei, ristampa della Edizione Nazionale di 1890-1909*, Firenze 1968, vol. XII, n^o 1285.

te inferior al de la exterior. El espacio entre ambas semiesferas se llenaría con aceite. El observador se colocaría entonces dentro de la semiesfera interior quedando de este modo sentado en una suspensión cardan que contrarrestaría de manera eficaz todos los movimientos del barco. Fue así como un método que inicialmente tenía un carácter astronómico, teórico, se fue convirtiendo en una propuesta práctica en la que los instrumentos de nuevo diseño jugarían un papel fundamental.

A estos problemas prácticos se unía otro no menos importante: el telescopio de Galileo no era precisamente el más apropiado para la observación de Júpiter y sus satélites. La razón es que su ocular estaba constituido por una lente cóncava. Esto ocasionaba una apertura de campo extremadamente pequeña, de manera que era difícil localizar el planeta a través del telescopio y, mucho más difícil aún, mantenerlo en el campo de visión el tiempo necesario para poder observar los eclipses de sus satélites. A pesar de todas estas dificultades, Galileo respondió al Conde d'Elci tratando de convencerle de la viabilidad de su propuesta. Pero sus argumentos, muy generales, no convencieron a la Corona española¹⁵. Unos años después, en 1636, inició negociaciones con Holanda.

3.3. La propuesta realizada al concurso de los Países Bajos

A pesar de todos estos intentos por conseguir que su método para determinar la longitud se impusiese en la práctica, es curioso que Galileo nunca llegase a publicar formalmente su propuesta. La primera mención impresa al método apareció en 1639 en las *Tablas Planetarias* publicadas por Vincenzo Ramieri, tres años antes de la muerte de Galileo en 1642. Ramieri era alumno de Galileo y continuó con sus observaciones cuando este se

¹⁵... *Este es todo un arte aún en desarrollo, basado en principios y métodos nuevos, que necesita ser arropado, cultivado y fomentado de manera que con práctica y tiempo se obtendrán los frutos pues ya contiene las semillas y las raíces...*, Galileo a Orso d'Elci, Florencia, 25-XII-1617, *ibid.* n.º 1290.

quedó ciego como consecuencia de sus observaciones del Sol a través del telescopio. En esas tablas Ramieri afirmaba textualmente que pronto publicaría tablas de los movimientos de las lunas de Júpiter que serían útiles para determinar la longitud en el mar. En los años que siguieron diferentes autores hicieron alguna que otra mención al método propuesto por Galileo. Ya hemos comentado el intento más serio de Giovanni Battista Odierna (1597-1660)

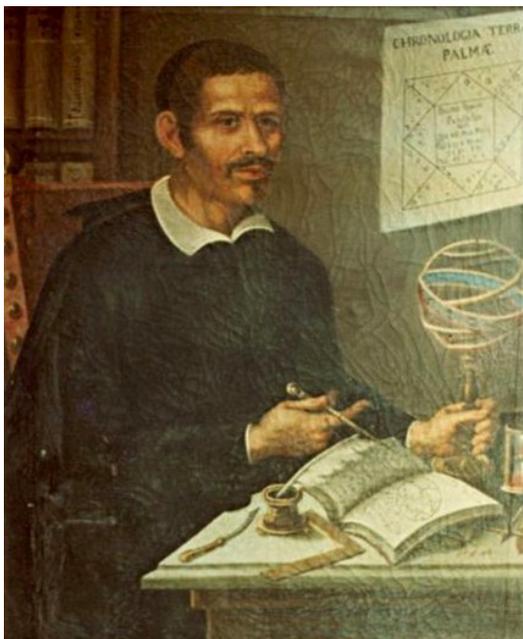


Figura 3.8: Giovanni Battista Odierna (1597-1660).

con la publicación de sus tablas en 1656. Estas tablas supusieron una considerable mejora con respecto a las de Marius de 1614, pero a pesar de ello pronto estuvo claro que no eran aun suficientemente precisas como para que el método de Galileo fuese aplicable en la práctica. Tanto es así que en la década de los sesenta del siglo XVII el método preferido era todavía la observación de los eclipses de Luna y los astrónomos no utilizaban aún los satélites de Júpiter en sus esfuerzos por determinar la diferencia de longitud entre los diferentes observatorios repartidos por Europa.

La propuesta a los Estados Generales de Holanda fue realizada entre 1636 y 1637, con la ayuda de su amigo el abogado y jurista Elia Diodati (1576–1661), que intermedió personalmente ante las autoridades holandesas. Las circunstancias han cambiado respecto a la propuesta realizada a las autoridades españolas en 1612. Galileo tiene ya más de 70 años, goza de un prestigio del que entonces carecía, el telescopio no es ya una

novedad y quienes van a juzgar su propuesta son matemáticos y cartógrafos que admiran sus trabajos científicos. Además, en esta ocasión la propuesta está perfectamente estructurada y en ella se explica la forma de utilizar los satélites de Júpiter, además de distinguir claramente los presupuestos teóricos de los problemas prácticos derivados de su aplicación en la mar. Entre ellos cabría destacar la importancia de calcular de forma precisa las efemérides astronómicas de los satélites de Júpiter, la necesidad de construir un buen número de telescopios precisos, la dificultad de realizar observaciones astronómicas en un barco en movimiento y, por último, la necesidad de contar con un aparato medidor de tiempo que permitiese determinar con exactitud los instantes en los que se producían las inmersiones y las emergencias de los satélites. Aunque Galileo desarrolló importantes trabajos en este último campo, anticipándose unos años a Christian Huygens en la búsqueda del reloj ideal, dedicó sus mayores esfuerzos a solucionar el problema derivado de la influencia del movimiento del barco en la observación astronómica, para lo que ideó, como hemos comentado anteriormente, soluciones tan imaginativas como el celatone y la silla flotante.

3.4. El método de Galileo y la cartografía terrestre

Hasta principios del siglo XVII solo se había obtenido cierta precisión en la determinación de la longitud observando los eclipses de Luna, fenómenos astronómicos que no se ven en todos los lugares de la Tierra y ocurren con muy poca frecuencia. No obstante, con estas observaciones se iniciaron los trabajos dirigidos a la rectificación de la cartografía. A partir de 1666 la Academia de Ciencias de París, con el impulso de Jean-Baptiste Colbert (1619-1683), organizó la triangulación general del territorio de Francia como paso imprescindible para un levantamiento cartográfico preciso. El método de trabajo, puesto a punto por Jean Picard (1620-1682) y Giovanni Cassini (1625-1712), no era otro que el propuesto por Galileo para determinar la longitud de

un barco en la mar. Aunque Galileo había fracasado con sus propuestas debido, esencialmente, a la imposibilidad de hacer una observación astronómica precisa con el telescopio desde la cubierta de un barco en constante movimiento, el método sí resultaba aplicable en tierra.

De esta manera, desde mediados del siglo XVII, y hasta bien entrado el siglo XIX, la observación de las inmersiones y emergencias de los satélites de Júpiter se convirtió en la técnica favorita de geógrafos y astrónomos para el establecimiento de la



Figura 3.9: Giovanni D. Cassini (1625-1712) (pintura mural en Perinaldo, su ciudad natal).

longitud de lugares situados en tierra firme. La puesta en práctica definitiva del método de Galileo se desarrolló gracias a Giovanni Cassini, profesor de astronomía en la Universidad de Bolonia. A mediados de la década de los sesenta del siglo XVII conoció a Giuseppe Campani (1635-1715), fabricante de telescopios afincado en Roma que había logrado por aquel entonces mejoras significativas en la calidad de este instrumento. Al observar los tránsitos de

los satélites de Júpiter sobre el disco del planeta con uno de los telescopios fabricados por Campani, Cassini llevó a cabo una serie de descubrimientos espectaculares. Observó los satélites durante unos años y publicó finalmente sus tablas en 1668. La publicación de estas tablas puede considerarse como el punto de partida de la aplicación práctica del método de Galileo para la determinación de la longitud. Posiblemente ello se debió más a la posición relevante que llegó a alcanzar Cassini que a la calidad de sus tablas que, si bien mejoraban las existentes hasta ese momento, distaban aún de ser perfectas.

El ascenso de Cassini comenzó con su traslado a París en 1669 a donde llevó sus tablas publicadas el año antes. En París



Figura 3.10: Jean Picard (1620-1682).

consiguió muy pronto hacerse cargo de la sección de astronomía de la Real Academia de Ciencias. Sus tablas no eran lo suficientemente precisas como para poder determinar la longitud a partir de ellas, es decir, comparando la hora local a la que se ha observado un eclipse con la hora local del meridiano de referencia predicha en las tablas para ese mismo eclipse. Pero sí lo eran como para permitir a los observadores saber la hora aproximada (con un error pequeño) de los eclipses y planear así su observación. Eso permitía aplicar el

método de otra manera, determinando la diferencia de longitud entre dos lugares a partir de la observación simultánea del mismo eclipse desde los dos meridianos, registrando la hora local en cada uno de ellos a la que el mismo eclipse era observado. La primera oportunidad para poner en práctica el método, aplicado de esta manera, fue la expedición a Dinamarca realizada por Picard, entre los años 1671 y 1672, con el fin de volver a determinar la longitud del observatorio de Tycho Brahe. En su viaje Picard hizo observaciones de eclipses de las lunas de Júpiter (para cuya preparación utilizaba las tablas de Cassini). Cinco de esos eclipses fueron observados simultáneamente desde París por Cassini y sus ayudantes. Como resultado de las observaciones realizadas en ese viaje Picard se convirtió en un firme partidario del método, defendiéndolo de manera vehemente en el informe que presentó al término de la expedición.

El método fue puesto en práctica de nuevo dos años después, durante el viaje de Jean Richer (1630-1696) a Cayenne (en la Guayana Francesa)¹⁶, expedición en la que se determinó la diferencia de longitud entre Cayenne y París mediante la observación simultánea en ambas localidades tanto de un eclipse de Luna como una ocultación de Io por Júpiter. La diferencia de longitud entre Cayenne y París (3 horas y 29 minutos) concordaba muy bien entre los dos métodos.

Los éxitos anteriores no significaron, sin embargo, que se abandonase la observación y el estudio de los satélites de Júpiter. Por el contrario, Cassini y sus colaboradores continuaron con la observación de los satélites y el estudio de sus órbitas desde el observatorio de París. Uno de estos colaboradores, Ole Rømer (1644-1710), de origen danés, encontró en 1674 un error sistemático en las tablas para el primer satélite (Io). Este hallazgo y el estudio de su origen condujeron a Rømer a la conclusión de que la velocidad de la luz es finita y a estimar por primera vez su valor en 1676. Gracias a todos estos esfuerzos el método de los

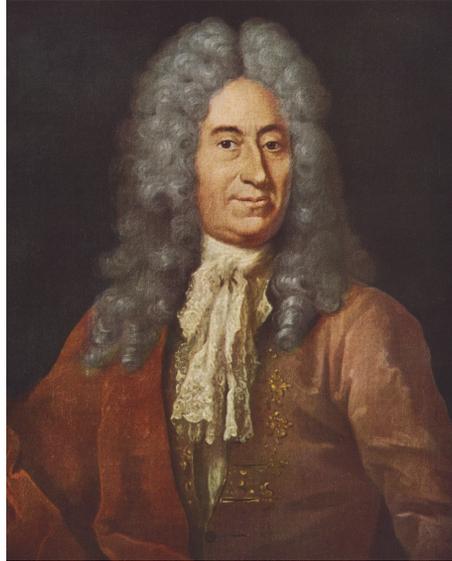


Figura 3.11: Ole Rømer (1644-1710).

¹⁶Richer era un astrónomo ayudante de Cassini en la Academia de Ciencias de París. Fue enviado a la Guayana en 1671 con la misión principal de observar Marte. Durante su estancia en la Guayana, Richer comprobó que péndulos de la misma longitud se balanceaban más lentamente allí que en París. Esta observación fue utilizada por Newton para deducir que la zona cercana al ecuador terrestre estaba más alejada del centro de la Tierra que Europa y por ello, al ser allí menor la fuerza de la gravedad, los péndulos oscilaban más despacio. Gracias a esta observación, Richer se convirtió en el primer científico que constató diferencias en la intensidad del campo gravitatorio terrestre, dando inicio así al estudio de la gravimetría.

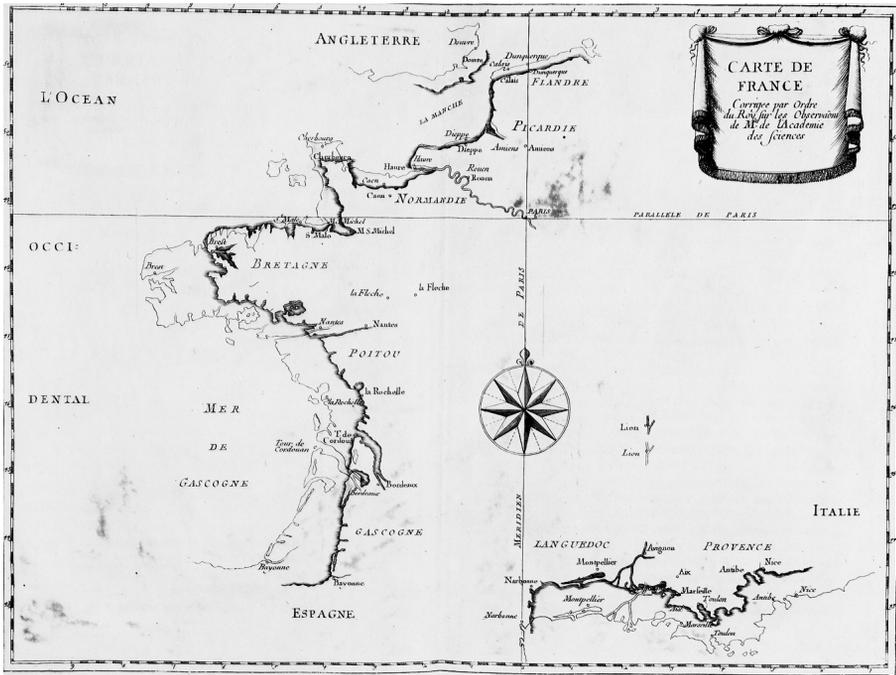


Figura 3.12: *Carte de la France corrigée par Ordre du Coy sur les Observations de Messieurs de l'Académie des sciences* (1682).

satélites de Júpiter continuó perfeccionándose. En 1693 la Academia publicó un mapa de Francia que incorporaba los trabajos de Picard y Philippe de la Hire (1640-1718), que habían determinado las longitudes de las regiones costeras durante los años anteriores utilizando tan solo el método de los satélites de Júpiter. Cuando se compara este mapa con el mejor existente hasta esa fecha, el publicado por Nicolás Sanson (1600-1667) en 1679, se aprecia inmediatamente la enorme mejora conseguida (figura 3.12). Este trabajo significó el espaldarazo definitivo del método de los satélites de Júpiter, que pasó así a ser el método oficial de la Corona francesa a utilizar para determinar las longitudes y reformar toda la cartografía¹⁷.

¹⁷Dice la leyenda que cuando mostraron este mapa al rey Luis XIV su comentario fue algo así como *he perdido más terreno a manos de mis astrónomos*

Fue entonces cuando Cassini publicó un documento titulado *Instrucciones generales para las observaciones geográficas y astronómicas a realizar durante los viajes*¹⁸. La mitad de este documento estaba dedicado a explicar cómo ajustar los relojes de manera que se pudiese medir con precisión la hora local de las inmersiones o las emersiones de los satélites en o desde la sombra de Júpiter. Seguían instrucciones para la medida precisa de la altura meridiana del Sol y las estrellas, necesarias, como ya hemos visto, para determinar la latitud de un lugar. El siguiente párrafo está extraído textualmente de ese documento:

...Las observaciones más apropiadas para determinar la longitud son las inmersiones y emersiones del primer satélite de Júpiter en o desde su sombra. Antes de la inmersión total uno lo ve desvanecerse poco a poco. Si es posible debemos contar los segundos que transcurren desde el instante en que de manera clara vemos que empieza a desvanecerse hasta que desaparece por completo. En el instante en que desaparece debemos empezar a contar de nuevo, y si resulta que después de haber comenzado a contar todavía reaparece, lo cual sucede a veces, debemos recomenzar a contar cuando deje de reaparecer. Cuando estemos seguros de que no reaparece de nuevo seguiremos contando mientras dejamos de observar para mirar el reloj. Entonces restaremos a la hora indicada por el reloj los segundos contados desde la última vez que el satélite desapareció, anotando el resultado. Y si recordamos el intervalo transcurrido entre el desvanecimiento apreciable y la ocultación total debemos anotarlo también, pero si no lo recordamos no debemos preocuparnos puesto que ese intervalo es útil tan solo con el fin de determinar cómo de precisa fue la observación...

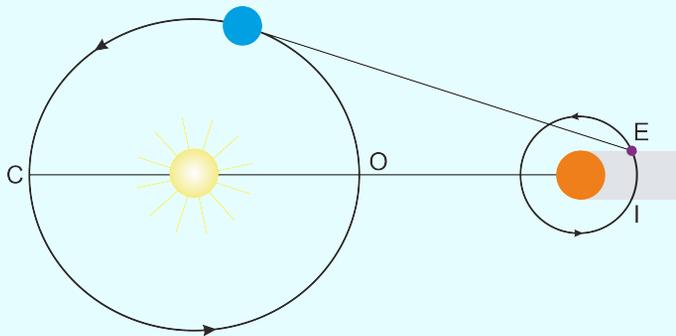
El documento contenía también instrucciones para la observación de las emersiones, cuyo instante era aún mucho más difícil

que de mis enemigos. Véase Albert Van Helden, *Longitude and the Satellites of Jupiter*, pág. 94, en *The Quest for Longitude*, editado por William J. H. Andrewes, Cambridge, Harvard University (1996).

¹⁸Albert Van Helden, *Longitude and the Satellites of Jupiter*, pág. 95, en *The Quest for Longitude*, editado por William J. H. Andrewes, Cambridge, Harvard University (1996).

Cuadro 3.1. Ole Rømer y la velocidad de la luz

Desde la Tierra ocurre una emersión cuando Io se encuentra en la posición E de su órbita y tiene lugar una inmersión en la posición I. Cuando la Tierra está en la posición O de su órbita (Júpiter se halla entonces en *oposición*) los eclipses de Io no son observables pues ocurren detrás de Júpiter. Y tampoco lo son durante los cinco o seis meses del año en los que la Tierra se encuentra alrededor de la posición C de su órbita (Júpiter en *conjunción*) porque entonces Júpiter aparece demasiado cerca del Sol en el cielo. Así que entre O y C solo es posible observar emersiones durante unos cuatro meses mientras que entre C y O se pueden observar inmersiones durante otros cuatro meses aproximadamente:



Las tablas de Cassini, que Rømer estaba comprobando, habían sido calculadas a partir de las posiciones geométricas de los astros en cada instante obtenidas de los modelos de sus órbitas. Si esto es así los eclipses debían observarse, tal como predecían las tablas, de manera regular en el tiempo. Sin embargo, Rømer se dió cuenta de que el tiempo transcurrido entre los eclipses no era constante. Al contrario, variaba ligeramente y lo hacía de manera diferente según la época del año. Concretamente observó que el tiempo transcurrido entre eclipses que tienen lugar en el tramo OC de la órbita terrestre era mayor que el transcurrido entre los que tienen lugar en el tramo CO. Puesto que el periodo de Io en su órbita alrededor de Júpiter es constante (42.5 horas), concluyó que este efecto solo podía deberse a algún problema observacional.

Rømer supuso que si se observa una emersión de Io cuando la Tierra está en la situación esquematizada en la figura, 42.5 horas después, cuando Io ha completado una vuelta a Júpiter, la Tierra se habrá alejado de Júpiter (que supuso inmóvil durante ese intervalo pues su periodo de traslación alrededor del Sol, 11.9 años, es considerablemente mayor que el de la Tierra).

De acuerdo con Rømer la distancia Tierra-Júpiter habría aumentado en unas 210 veces el diámetro de la Tierra. Similarmente, en la otra mitad del año, cuando la Tierra se encuentra entre C y O, la distancia Tierra-Júpiter se habría acortado unos 210 diámetros terrestres durante una revolución de Io en torno a Júpiter. Por tanto, si, en contra de la suposición implícita en las tablas de Cassini, la velocidad de la luz no es infinita, el tiempo transcurrido entre dos emerencias consecutivas debía alargarse mientras que el tiempo entre dos inmersiones acortarse. Rømer supuso una velocidad de la luz de un diámetro terrestre por segundo, de manera que el adelanto o atraso entre inmersiones y emerencias consecutivas, respectivamente, sería entonces de 3.5 minutos. Pero no observó adelanto o retraso alguno, concluyendo entonces que la velocidad de la luz debía ser muchísimo mayor de un diámetro terrestre por segundo.

Pero Rømer se dió cuenta de que el efecto de retardo o adelanto de las emerencias e inmersiones es acumulativo si comparamos las horas de la primera y última de ellas en una serie de eclipses. En la primavera de 1672 observó una serie de emerencias de Io tras la oposición de Júpiter del 2 de marzo. Lo que hizo fue medir el instante (07:58:25) de una emerencia el 7 de marzo y medir el correspondiente a otra emerencia (09:52:30) el 14 de marzo. Entre ambas emerencias habían transcurrido 169 horas, 54 minutos y 5 segundos y en ese tiempo Io había completado cuatro vueltas a Júpiter. Obtuvo así un periodo orbital aparente de Io de 42 horas, 28 minutos y 31.25 segundos. Pero siguió observando la serie de emerencias y el 29 de abril a las 10:30:06 anotó la última de ellas cuando Io había completado 30 vueltas alrededor de Júpiter desde el instante en que observó la primera emerencia el día 7 de marzo. Repitió el cálculo del periodo orbital aparente de Io con el resultado de 42 horas, 29 minutos y 3 segundos. Es decir 31.75 segundos más que en su primera estimación. Aparentemente no demasiado, pero entre la observación del 7 de marzo y esta última Io había dado 30 vueltas, así que el retraso acumulado sería de 952.5 segundos, o sea, algo más de un cuarto de hora. Evidentemente, las tablas de Cassini, que no tenían en cuenta que la velocidad de la luz es finita, eran inservibles para determinar la longitud con precisión.

Rømer expuso su idea sobre el carácter finito de la velocidad de la luz y, por tanto, su nuevo método para el cálculo de los eclipses de los satélites de Júpiter, a la Real Academia de Ciencias de París el 22 de noviembre de 1676. Su revolucionaria idea tuvo una amplia acogida, pero no todos los expertos de la época estuvieron de acuerdo. En particular su jefe en la Academia, Cassini, nunca admitió plenamente la teoría de Rømer, limitándose a tener en cuenta los efectos de la finitud de la velocidad de la luz como una corrección empírica a sus tablas. El espaldarazo definitivo tuvo que esperar aún hasta 1727 cuando Bradley calculó, como parte de sus estudios de la aberración estelar, que la luz tarda 8 minutos y 13 segundos en llegar desde el Sol a la Tierra.

de determinar. Asimismo, Cassini explicaba que, durante los ocho días previos y los ocho posteriores a la oposición de Júpiter, los instantes de las inmersiones y de las emergencias del primer satélite no podían observarse con precisión pues estas ocurrían demasiado próximas al planeta.

Así pues, podemos afirmar que en la década de los años 80 del siglo XVII los satélites de Júpiter se habían convertido en el método oficial en Francia para determinar la longitud. En 1693 Cassini publicó unas nuevas y revisadas tablas, basadas en casi tres décadas de observaciones. La precisión de estas nuevas tablas era suficiente, en lo que al primer satélite se refiere, para determinar la longitud con ellas¹⁹ con un error menor de un grado, siempre que el usuario estuviese lo suficientemente entrenado en la observación. Sin embargo, no ocurría lo mismo con las efemérides de los otros tres satélites para los que las tablas eran mucho menos precisas. En 1690 la Academia inició la publicación de *Connaissance des Temps* (Conocimiento de los Tiempos), una publicación que contenía predicciones anuales de los eclipses de los cuatro satélites de Júpiter, esquemas con sus configuraciones diarias e instrucciones para su observación. Durante los comienzos del siglo XVIII se publicaban instrucciones que daban la impresión de que cualquiera podía aplicar el método haciendo sus propias observaciones. Por ejemplo, se especificaba que:

*...Tan solo es necesario un péndulo, un simple telescopio de 15 a 18 pies y un cuadrante que cualquiera puede fabricar sin dificultad de madera y sin tener habilidades especiales para hacer muy buenas observaciones de los satélites de Júpiter...*²⁰

¹⁹Por comparación directa de la hora local observada con la hora local de París del mismo eclipse contenida en las tablas. Es decir, permitían prescindir de tener que hacer observaciones simultáneas del mismo eclipse desde el lugar de interés y desde París. Cassini, *Les Hypotheses et les Tables des Satellites de Jupiter Reformées sur de Nouvelles Observations*, en *Memories de l'Académie* (1693).

²⁰Aunque se requiere el uso de tres instrumentos de precisión que solo estaban al alcance de los principales astrónomos de la época: el péndulo, el telescopio y el cuarto de círculo. *Connaissance des Temps, Pour l'Année Commune 1773* (Paris 1771), pág 236.

Capítulo 4

El siglo XVIII: la solución definitiva

El método de Galileo basado en los eclipses de los satélites de Júpiter era a comienzos del siglo XVIII uno de los muchos que competían para hacerse con el suculento premio que otorgaba el Decreto de la Longitud, tratando sus partidarios de convencer de su viabilidad al Comité de la Longitud (el *Board of Longitude*) creado por la Corona inglesa mediante el citado Decreto de 1714.

A pesar de ello pronto quedó claro que, si bien el método era viable y suficientemente preciso para establecer la longitud en tierra, sus posibilidades de hacerlo en la mar eran muy pocas, por no decir nulas. Incluso tras la aparición de telescopios reflectores, capaces de conseguir los mismos aumentos que los refractores pero con instrumentos mucho más pequeños, los aumentos requeridos para observar los eclipses de los satélites implicaban el uso de un telescopio demasiado grande y poco manejable en un barco en movimiento. Se llegaron a realizar diferentes intentos para diseñar y construir *sillas marinas* que permitieran contrarrestar el balanceo y cabeceo del barco, al estilo de la ideada por Galileo. Pero las esperanzas depositadas en esa posibilidad se desvanecieron completamente tras las pruebas efectuadas por Nevil Maskelyne¹. Maskelyne trató de observar

¹Nevil Maskelyne fue el quinto Astrónomo Real, puesto que ocupó desde

desde una de estas sillas marinas diseñada por Christopher Irwin durante una expedición a Barbados en 1773 - 1774. Maskelyne escribió sobre esa experiencia que la silla marina del Sr. Irwin se veía demasiado perturbada por el movimiento del barco como para permitir, sentado en ella, el manejo del telescopio para observar los eclipses de los satélites de Júpiter. Esa misma expedición llevaba a bordo uno de los prototipos de cronómetro marino de Harrison.

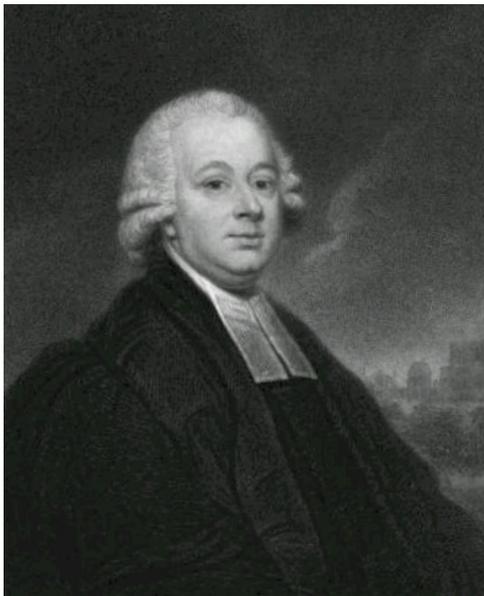


Figura 4.1: Nevil Maskelyne (1732-1811).

Maskelyne concluyó que se encontró que el reloj de Harrison dio la longitud de la isla con gran exactitud. Esto significó el fin de los eclipses de los satélites de Júpiter como método para determinar la longitud en la mar, quedando la contienda reducida a la más conocida pelea entre el método de las distancias lunares (promovido y defendido por el propio Maskelyne) frente al método, finalmente vencedor, del transporte de la hora del meridiano de referencia mediante un artificio mecánico suficientemente preciso: el cronómetro marino².

1765 hasta su muerte en 1811. Fue firme defensor del método de las distancias lunares para obtener la longitud, frente al método que se impuso finalmente: el basado en el transporte de la hora del meridiano de referencia mediante un cronómetro capaz de mantener la hora con precisión suficiente durante toda la travesía.

²La confrontación de los dos métodos, protagonizada por sus mentores Maskelyne y Harrison, respectivamente, tratando de conseguir el suculento premio ofrecido por la Comisión de la Longitud creada por el Parlamento inglés, duró buena parte del siglo XVIII. Pero esa es otra historia que el lector puede seguir con todo detalle en, por ejemplo, el ya citado libro de Dava Sobel. Aquí nos limitaremos a mencionar brevemente ambos métodos para que nues-

No obstante, y a pesar de las ventajas demostradas por el método del traslado de la hora, el método de las distancias lunares siguió practicándose hasta comienzos del siglo XX³. La razón es que un cronómetro marino era un instrumento muy caro y su adquisición resultaba imposible para la mayor parte de los navegantes. Más aun, las señales horarias transmitidas por radio que permiten comprobar la correcta marcha del cronómetro no estuvieron disponibles hasta mucho después, hasta las primeras décadas del siglo XX. Así que para poderse fiar solo del cronómetro era necesario llevar al menos tres de ellos a bordo, algo impensable en esa época excepto, quizás, en buques militares. Si solo tenemos dos cronómetros las cosas marcharán bien mientras ambos coincidan. Pero si dejan de hacerlo, ¿cómo sabemos cuál de los dos indica la hora correcta? Se necesitan al menos tres cronómetros y confiar en que no se estropeen dos de ellos simultáneamente. De ahí que se continuase haciendo uso de las distancias lunares como método para comprobar el correcto funcionamiento del cronómetro del barco y como método alternativo de respeto en caso de fallo de este.

4.1. El método de las distancias lunares

La observación de los satélites de Júpiter desde un navío resultaba muy complicada y poco precisa. Para vencer las limitaciones de los telescopios de la época y la inestabilidad de su punto de observación, los marinos se volvieron hacia la Luna. La imposibilidad de aplicar el método de Galileo en la mar llevó a los astrónomos británicos a impulsar el perfeccionamiento del método de las distancias lunares, de ahí la creación del Observatorio de Greenwich y los trabajos de Flamsteed.

tra revisión del problema de la longitud quede completa. No debemos olvidar, sin embargo, que aunque el método de los eclipses de los satélites de Júpiter no resultase finalmente útil en el mar, este método fue la clave de la revolución que tuvo lugar en la cartografía durante los siglos XVII, XVIII e incluso XIX.

³El Almanaque Náutico español publicó tablas de distancias lunares hasta el año 1906. Véase López Moratalla, T. y Lara Coira, M., *Dos siglos de cálculos del Almanaque Náutico*, en VIII Congreso SEHCYT. Historia de las Ciencias y de las Técnicas, vol. I (Logroño, Universidad de La Rioja, 2004), pp. 419-432.



Figura 4.2: Octante de Spencer, Browning and Rust (izquierda) y sextante de Stancliffe (derecha) (fines del siglo XVIII).

El método de las distancias lunares requiere dos ingredientes fundamentales: una medición precisa de la distancia angular entre la Luna y la estrella de referencia utilizada y, además, unas efemérides precisas de la Luna. Por eso, aunque podemos encontrar la primera descripción del método en los comentarios a la traducción de la *Geografía* de Ptolomeo, realizada en 1514 por Johan Werner, no pudo ser utilizado por los navegantes hasta la segunda mitad del siglo XVIII cuando estos dos ingredientes básicos estuvieron disponibles.

El primer requisito supuso el desarrollo de instrumentos de reflexión, inicialmente el octante patentado en 1734 por John Hadley y, más tarde, el sextante desarrollado por John Campbell (1720-1790) como una modificación del octante. El segundo ingrediente, el problema de las efemérides de la Luna y, por tanto, la capacidad de predecir con la suficiente antelación la distancia angular entre la Luna y las estrellas de referencia, lo resolvió Tobías Mayer, director del Observatorio de Gotinga, gracias a quien se pudo contar a partir de 1753 con unas tablas de

los movimientos de la Luna con una precisión que nunca antes se había conseguido.

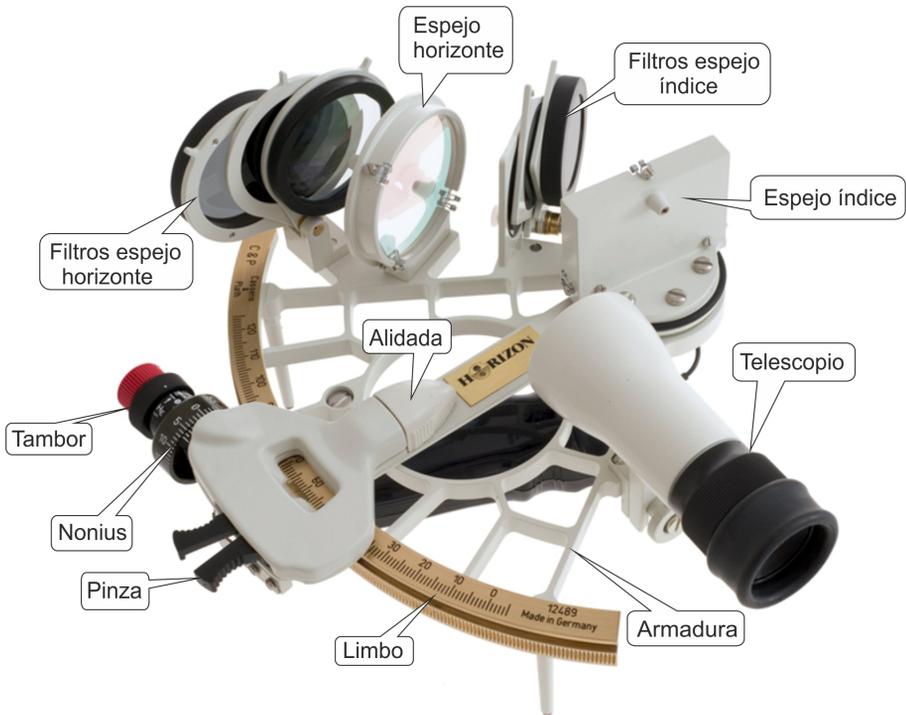


Figura 4.3: Sextante moderno. Partes principales.

La idea en la que está basado el método de las distancias lunares es simple: utilizar el desplazamiento de la Luna respecto a las estrellas como si de un cronómetro universal se tratase. La Luna es el astro que se mueve con mayor velocidad sobre la esfera celeste, comportándose, por tanto, como la manecilla de un reloj que va pasando sobre un fondo de estrellas de referencia.

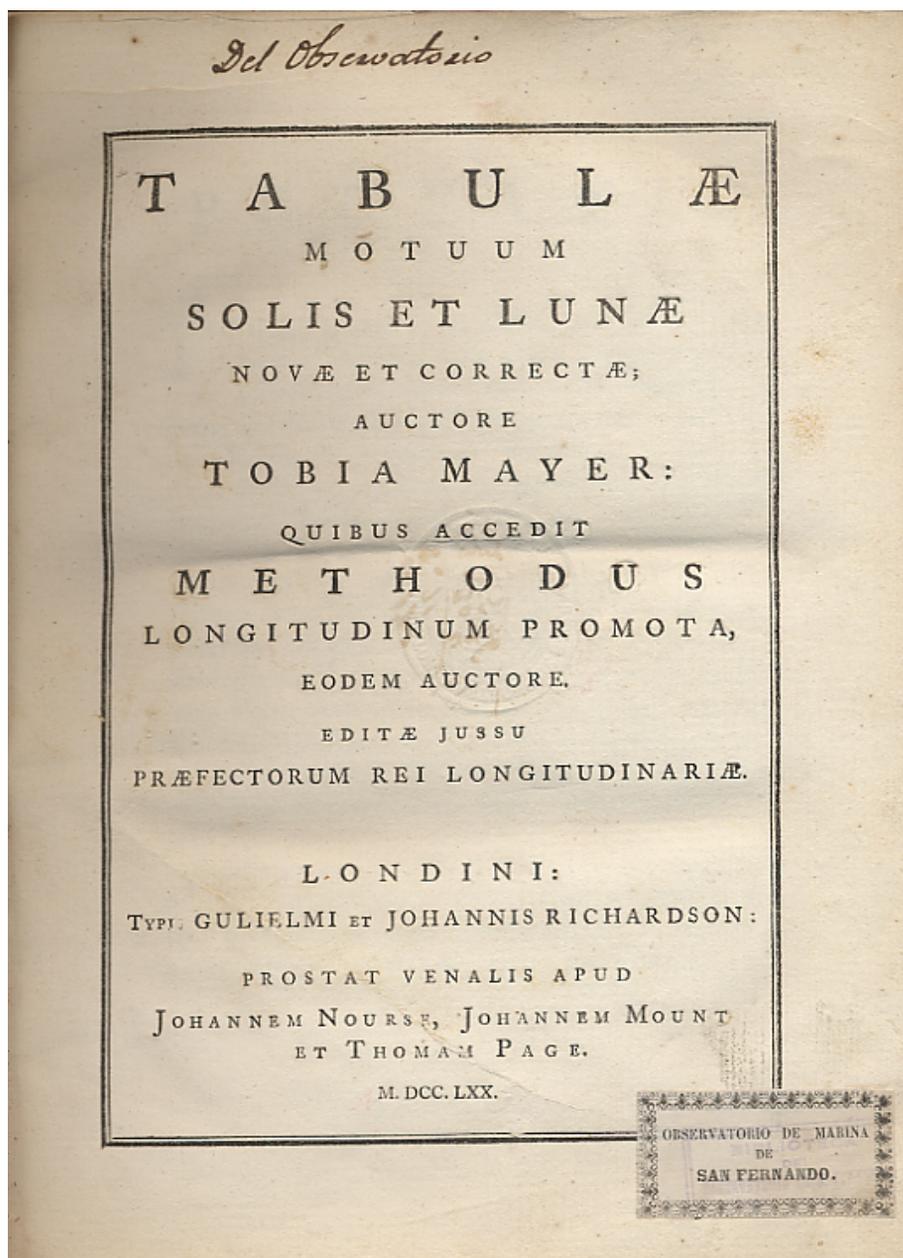
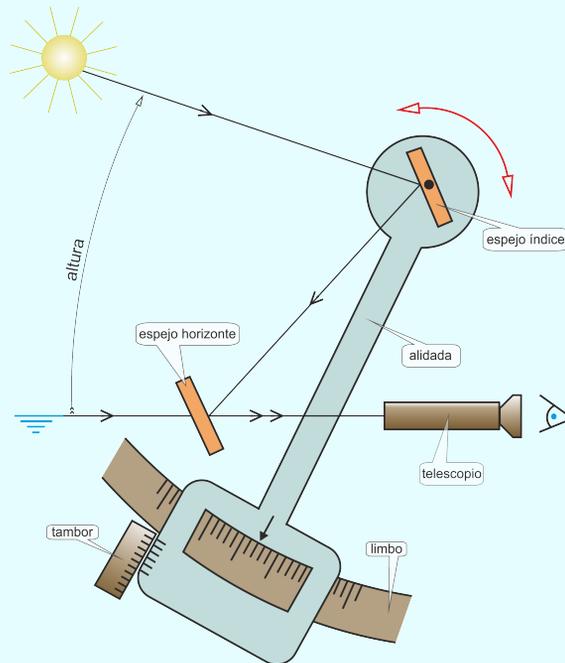


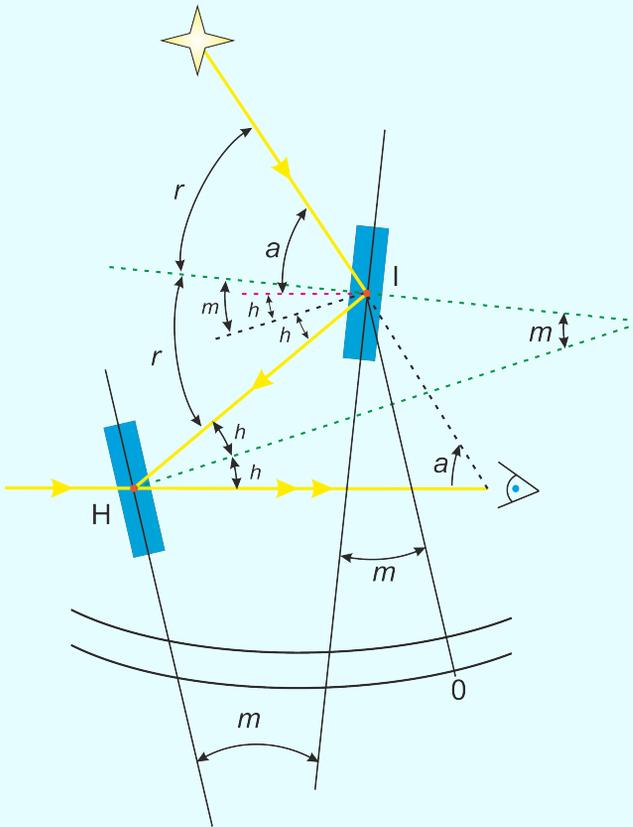
Figura 4.4: *Tabulae motuum solis et lunae* de Tobias Mayer (portada de la edición de 1770).

Cuadro 4.1. Los instrumentos de reflexión

El método de las distancias lunares necesita una medida muy precisa de la distancia angular entre la Luna y el astro de referencia utilizado. De lo contrario la precisión en la hora del meridiano de referencia que se obtiene a partir de la distancia lunar no es suficiente como para que la longitud determinada de esta manera garantice la seguridad en la navegación. Evidentemente, tal precisión en la medida de ángulos no era posible con los instrumentos disponibles a comienzos del XVIII (esencialmente, la ballestilla y el cuadrante de Davis^a). El paso fundamental fue hacer coincidir en la misma imagen los dos objetos cuya distancia angular se desea medir, es decir, el astro y el horizonte cuando medimos la altura de un astro o la Luna y la estrella de referencia cuando medimos una distancia lunar. Esto se consiguió utilizando las propiedades de la reflexión de la luz en un espejo, primero con el desarrollo del octante patentado en 1734 por Hadley y, después, el sextante desarrollado por Campbell como una modificación del octante.



^aUna modificación de la ballestilla para conseguir medir la altura del Sol sin mirarlo directamente, evitando de esta manera las lesiones oculares típicas de los navegantes ocasionadas por el uso de la ballestilla.



La luz procedente del astro se refleja doblemente, primero en el espejo índice I y después en el espejo horizonte H. Por su parte, la luz procedente del horizonte llega directamente al telescopio atravesando la mitad transparente del espejo horizonte. De esta manera el observador ve superpuestas la imagen del astro y del horizonte (o, en general, de los dos objetos que esté observando). En cada una de estas reflexiones los ángulos incidente y reflejado son, de acuerdo con la ley de reflexión, iguales (r en el espejo índice, h es el espejo horizonte). Para orientar adecuadamente el espejo índice con respecto al astro y conseguir la superposición de las imágenes hemos tenido que desplazar la alidada un ángulo m a lo largo del limbo. La ley de la reflexión nos permite entender que el ángulo a que deseamos medir (la altura de la estrella en este esquema) es dos veces m , pues es evidente de la figura que $2r = 2h + a$ y, por tanto, $a = 2(r - h)$. Pero también es evidente que $r = m + h$. En consecuencia, $a = 2m$.

Un octante debe su nombre al hecho de que su limbo es un arco de un octavo de circunferencia, es decir 45° . Por consiguiente, el mayor ángulo que podemos medir con él es 90° , suficiente para medir la altura de un astro sobre el horizonte pero no para medir distancias lunares. Un sextante puede medir ángulos de 120° pues su limbo abarca 60° , un sexto de circunferencia. Este es otro importante logro de los instrumentos de reflexión pues el mecanizado del limbo es uno de los aspectos más delicados en la fabricación de este tipo de instrumentos.

En líneas generales, la práctica del método consistía en medir la distancia angular entre la Luna y una estrella de referencia. En un instante dado esa distancia es la misma independientemente del lugar sobre la superficie de la Tierra desde la que es medida. Esa distancia había sido calculada con antelación por los astrónomos en función de la hora local en el meridiano de referencia y sus valores tabulados. La medida de la distancia lunar permitía entonces saber la hora local del meridiano de referencia y, por tanto, establecer la longitud del navegante por comparación de esa hora con la hora local en su posición en el instante de la medición de la distancia lunar.

4.2. El método del transporte de la hora

El otro método perfeccionado en el siglo XVIII para solucionar el problema de la longitud, el método del traslado de la hora, pretendía solucionar el problema de la forma más sencilla posible: el buque debía zarpar con un reloj que conservase la hora del meridiano del punto de partida y, una vez en alta mar, los navegantes debían deducir mediante observaciones astronómicas la hora local del punto donde se hallaba situado el buque. De esta forma, la diferencia entre la hora local obtenida por observaciones astronómicas y la hora del meridiano de origen guardada en el reloj permitía deducir la diferencia de longitud entre la posición de la nave y el punto de partida (a razón de 15° de longitud por cada hora de diferencia, como ya hemos visto con anteriori-



Figura 4.5: Cronómetros marinos H4 (izquierda) y H5 (derecha) contruidos por Harrison.

dad en este libro).

El método es bien sencillo. De hecho, la más antigua propuesta sobre el uso de relojes en la solución del problema de la longitud ya estaba incluida en una obra de Gemma Frisius publicada en 1530 (*De principiis astronomiae et cosmographiae*). Sin embargo, la construcción de relojes capaces de soportar una navegación oceánica sin pérdida de precisión resultó bastante problemática con los medios técnicos de los siglos XVI y XVII. Tanto es así que, a mediados del siglo XVII, Christian Huygens, conocido por su teoría del péndulo ideal, intentó construir un reloj susceptible de ser usado en alta mar sin pérdida de precisión y no pudo conseguirlo. Habría que esperar todavía unas décadas hasta que el inglés John Harrison diseñase y construyese, a partir de 1735, los primeros cronómetros marinos, unas máquinas de relojería moderna que evitaban el uso del péndulo en su maquinaria.

Al final se impuso el uso del cronómetro, desarrollándose la navegación astronómica basada en la medida de la altura de los astros sobre el horizonte en un instante de tiempo conocido con precisión. Con los datos de esa observación, la situación

estimada en el momento de la observación y la posición del astro en el cielo en ese instante (o sea, las coordenadas celestes del astro proporcionadas por el *Almanaque Náutico*), un navegante suficientemente experimentado puede determinar la posición del barco con un error en torno a una milla náutica⁴.

4.3. Introducción de los métodos en la España del siglo XVIII

¿Y qué ocurría en España mientras todo esto sucedía en Francia e Inglaterra? España y Portugal eran las potencias navales a finales del siglo XV, durante el siglo XVI y principios del siglo XVII. Fueron los países que iniciaron la navegación de altura, con grandes navegaciones oceánicas, y, por tanto, los primeros en plantearse la necesidad de resolver el problema de determinar la longitud en el mar. Fue la Corona española, como hemos comentado más arriba, la primera en establecer un concurso internacional en 1598 bajo el reinado de Felipe III rey de España, Portugal y las Dos Sicilias, con un sustancioso premio a quien propusiese un método práctico para resolver el problema de la longitud. Por esa razón Galileo dirigió su propuesta a la Corona española, por primera vez en 1612 y de nuevo más tarde en 1616, siguiendo con sus intentos de convencer a España de la viabilidad de su propuesta hasta 1630 aproximadamente.

Pero el siglo XVII fue para España un período de profunda crisis económica y social. Las causas fueron diversas y complejas, empezando por problemas demográficos. Se produjo en España una pérdida de población causada principalmente por los efectos de grandes epidemias que, para agravar más las cosas, coincidieron con periodos de hambre y carestía. A ello habría que añadir la pérdida de población causada por la expulsión definitiva de los moriscos (que provocó el hundimiento de la agri-

⁴La navegación astronómica estándar puede estudiarse en el libro *Navegación Astronómica*, de L. Mederos, editorial Tutor (7ª edición). También encontrará en esta referencia la explicación detallada del método de las distancias lunares (capítulo 13).

cultura y la artesanía en Valencia y Aragón) y la participación de los varones en las guerras europeas de la época. A estos problemas demográficos siguieron pronto problemas económicos muy serios provocados por la decadencia de la agricultura, las dificultades para la exportación de la lana castellana o la incapacidad de la escasa industria para competir con las producciones del resto de Europa. Unos problemas que se vieron aumentados por la competencia comercial de los franceses en el Mediterráneo y de ingleses y holandeses en el Atlántico, por el creciente autoabastecimiento de las Indias y por el agotamiento de muchas minas americanas. Las cosas empeoraron aún más por la nefasta política económica (devaluación monetaria, aumento de los impuestos) de los gobiernos de Felipe III, Felipe IV y Carlos II. Como consecuencia de todo ello, la sociedad española del siglo XVII vivió un proceso marcado por el empobrecimiento de ganaderos y agricultores (la mayor parte de la población), la debilidad de la burguesía (que en Europa empezaba a formar unas incipientes clases medias), y el aumento de los grupos sociales improductivos como la nobleza, el clero y los marginados (que terminaron por imponer una mentalidad basada en el desprecio al trabajo). Incluso la débil burguesía española terminó haciendo suyos algunos ideales nobiliarios, haciéndose rentista y abandonando cualquier riesgo empresarial. Como es fácil de entender a la vista de todo esto, el panorama no era en absoluto adecuado para el fomento de las actividades técnicas y científicas. El resultado fue un profundo declive de las aportaciones españolas en el campo de la náutica y otras disciplinas.

Hemos hablado anteriormente de las iniciativas tomadas en Francia e Inglaterra para institucionalizar la astronomía. Mientras tanto, en España, donde el desarrollo institucional no había dado lugar a la creación de observatorios y a la profesionalización de los astrónomos, fue la propia marina de guerra la impulsora del fomento de la astronomía práctica y del desarrollo de la navegación astronómica. Durante el siglo XVIII, la Armada española tuvo que enfrentarse a retos tan importantes como la formación de nuevas generaciones de oficiales con conocimientos matemáticos y astronómicos, el impulso a la divulgación de los

nuevos métodos de navegación y, por último, la organización de numerosas expediciones destinadas a fomentar el conocimiento real y efectivo de los territorios de la Corona.

Una de las primeras medidas tomadas por Felipe V sería el nombramiento de José Patiño (1666-1736) como Intendente General de Marina (1717), cuya principal misión debía ser impulsar la reorganización del poderío naval español, algo que al monarca le parecía indispensable para elevar a España de nuevo a la categoría de potencia de primer orden. El traslado de la Casa de la Contratación desde Sevilla a Cádiz y la entrada en escena de la Academia de Guardias Marinas como nuevo foco de conocimientos náuticos coincidiría, durante la primera parte del siglo XVIII, con el paso del arte de navegar a la ciencia de la navegación. En la Casa de la Contratación estaban vacantes todas las plazas, excepto la de piloto mayor, cuyo ocupante, Francisco Antonio de Orbe (1671-1731), pasaría a dirigir la Academia de Guardias Marinas de Cádiz en 1717.

Muy pocos años después de su creación, la Academia estaría preparada para proporcionar a la Corona un personal especializado capaz de participar en una expedición científica de alto nivel como la organizada por la Academia de Ciencias de París para determinar la verdadera forma de la Tierra. Como ya hemos visto anteriormente, según lo propuesto por Newton la Tierra debía estar, por efecto del movimiento de rotación, achatada por los polos y abultada por el ecuador. Sin embargo, destacados miembros de la citada Academia de Ciencias, siguiendo a Descartes, pensaban que existía un aplanamiento por el ecuador. Como consecuencia de esta polémica, y con la intención de zanjar la disputa, los científicos franceses organizaron dos expediciones dirigidas a la medición de un arco de meridiano.

Ambas expediciones partieron hacia dos lugares bien distantes: Laponia, cerca del polo Norte, y Quito, junto al ecuador. La expedición a Laponia, dirigida por Pierre de Maupertuis (1698-1759), desarrolló sus trabajos entre 1736 y 1737 junto al curso del río Tornea. La expedición destinada a Quito, dirigida por Louis Godin (1704-1760), trabajó entre 1735 y 1744, contando con la participación de dos marinos españoles, Jorge Juan

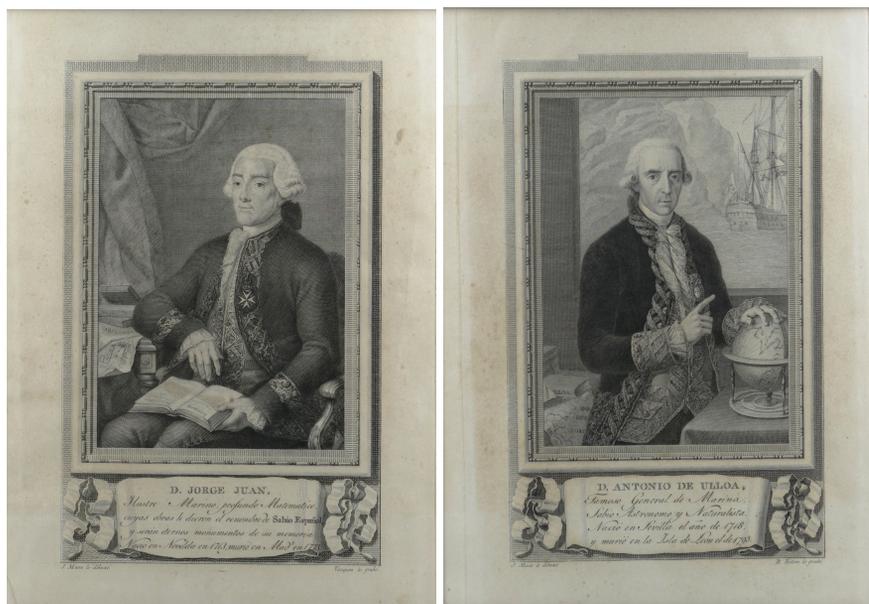


Figura 4.6: Jorge Juan (1713-1773) (izquierda) y Antonio de Ulloa (1716-1795) (derecha).

(1713-1773) y Antonio de Ulloa (1716-1795), formados en la Academia de Guardias Marinas de Cádiz. Finalmente, la comparación de los resultados de ambas expediciones terminaría confirmando la hipótesis de Newton sobre la forma de la Tierra, dando lugar a la primera comprobación experimental de las teorías del científico inglés.

En 1748 fueron aprobadas las Ordenanzas de S.M. para el gobierno militar, político y económico de su Armada Naval (Madrid, 1748), en las que fueron incluidos algunos artículos relativos a la organización de la Academia de Guardias Marinas, que había sido creada por Patiño en 1717. Así pues, coincidiendo con el reinado de Fernando VI, se inició un período de reformas que afectó directamente al funcionamiento de la citada institución docente. Sus enseñanzas volvieron a ser estructuradas, planteando como objetivo básico de la institución la formación de los cadetes en todo lo referente a la navegación, para lo que se insistía en el estudio teórico de todas las ciencias consideradas

necesarias para ello. Además, aquellos alumnos que demostrasen su capacidad en los mencionados cursos, podrían aplicarse, según quedaba expresado en las mismas ordenanzas, al estudio de las ciencias matemáticas más abstractas y difíciles, como el álgebra y la geometría superior.

El personaje encargado de llevar adelante la reestructuración de la institución fue el marino y científico Jorge Juan, cuya participación con Antonio de Ulloa en la expedición franco española para la medida del arco de meridiano y sus posteriores viajes de espionaje industrial a Inglaterra le habían convertido en el hombre idóneo para ese cometido. Jorge Juan se encargó de la contratación del profesorado y del encauzamiento de las propuestas consignadas en las Ordenanzas de 1748. El marino alicantino dirigió sus esfuerzos hacia la estructuración de unas enseñanzas capaces de preparar a los oficiales para dirigir un navío, imponiendo un profundo estudio de las matemáticas, como base para la posterior adquisición de otros conocimientos.

Este será el contexto en el que habremos de enmarcar la organización en Cádiz de un observatorio astronómico de la Marina. El personaje encargado de impulsar esta iniciativa sería el propio Jorge Juan. La propuesta de creación del Observatorio fue realizada por Jorge Juan al marqués de la Ensenada (1702-1781) en noviembre de 1749. El nuevo observatorio fue proyectado como un centro de investigación astronómica estructuralmente unido a la Academia de Guardias Marinas, característica que conservaría hasta su traslado a la Isla de León (hoy San Fernando) en 1798. Las primeras acciones llevadas a cabo, tras el visto bueno del marqués de la Ensenada al proyecto, fueron la preparación del torreón destinado a observatorio, la adquisición de instrumentos astronómicos en Londres y París, llegados a Cádiz en 1753, y el nombramiento del académico francés Louis Godin como director de la citada Academia de Guardias Marinas. Nacía así un nuevo observatorio, el más meridional de su época, que pronto se convertiría en uno de los centros astronómicos mejor dotados de Europa. Durante la segunda mitad del siglo XVIII, coincidiendo con los momentos más álgidos

del reformismo borbónico y del impulso oficial a las actividades científicas, se convirtió, además, en una escuela práctica de astronomía para unos marinos que, gracias a su esmerada preparación científica, podrían participar en las importantes expediciones cartográficas organizadas a finales de siglo.

El otro gran proyecto impulsado por la Armada en relación con la aplicación de la astronomía a los métodos de navegación fue la introducción en España del cálculo de efemérides

astronómicas. Como ya hemos visto, en 1767 fue publicado en Londres el primer número de una publicación anual titulada *The Nautical Almanac*, en la que se incluían las tablas necesarias para la práctica del método de las distancias lunares, uno de los métodos perfeccionados a lo largo del siglo XVIII para la determinación de la longitud en alta mar.

Según todos los indicios, el introductor del método de las distancias lunares en España fue otro de los grandes marinos ilustrados, José de Mazarredo (1745-1812). Después de haber tenido noticias de las tablas confeccionadas en Inglaterra para poder usar el método, y como no le fue posible conseguirlas, aplicó el método mediante cálculos propios en un viaje que realizó embarcado en la fragata *Venus* a Manila en 1772. Poco más tarde, en 1774, practicó de nuevo el método, junto a José Varela, en la determinación de la posición geográfica exacta de la isla de Trinidad del Sur. En sus *Lecciones de navegación* (Isla de León, 1790), José de Mazarredo dedicó una parte importante del texto a la explicación de este método, que fue enseñado por él mismo



Figura 4.7: José de Mazarredo (1745-1812).

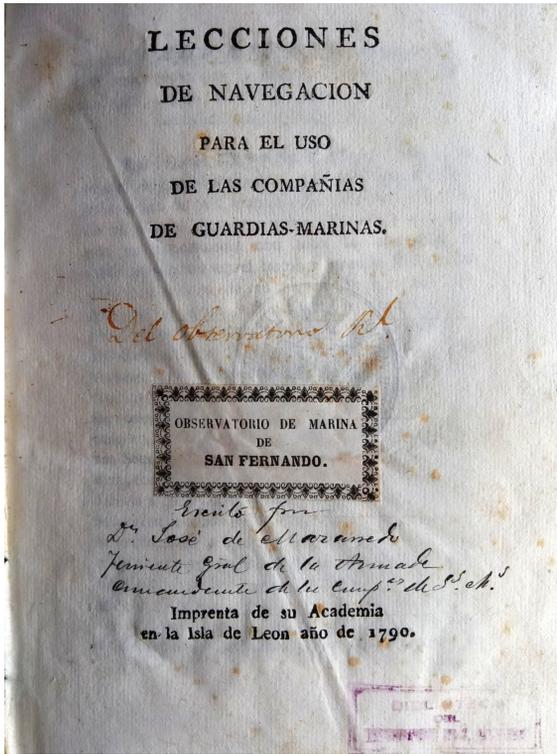


Figura 4.8: *Lecciones de navegación* de José de Mazarredo (portada de la edición de 1790).

en la Academia de Guardias Marinas de Cartagena a partir de 1777.

Desde un primer momento los responsables de la Marina española intentaron favorecer la introducción de estas nuevas técnicas entre los marinos más aventajados. Sin embargo, existían algunas trabas que habría que superar para conseguir una buena introducción y aclimatación de este método, puesto que generalmente el almanaque británico resultaba difícil de encontrar y, además, todas sus

tablas estaban calculadas respecto al meridiano de Greenwich.

Como consecuencia, los oficiales destinados en el Real Observatorio recibieron en 1790 la orden de elaborar unas tablas de efemérides astronómicas para uso de los navegantes. Para desarrollar este trabajo fue creada en el Observatorio una Oficina de Efemérides, dedicada exclusivamente a tareas de cálculo, cuyo primer resultado sería el *Almanaque Náutico para el año bisiesto de 1792*, impreso en Madrid en 1791. A partir de entonces, y a pesar de las tremendas dificultades por las que atravesaría la organización de los cálculos, el Real Observatorio publicaría anualmente, y con la suficiente antelación, las primeras efemérides astronómicas españolas. Desde entonces, y hasta la actualidad, ha sido una de las herramientas de trabajo im-

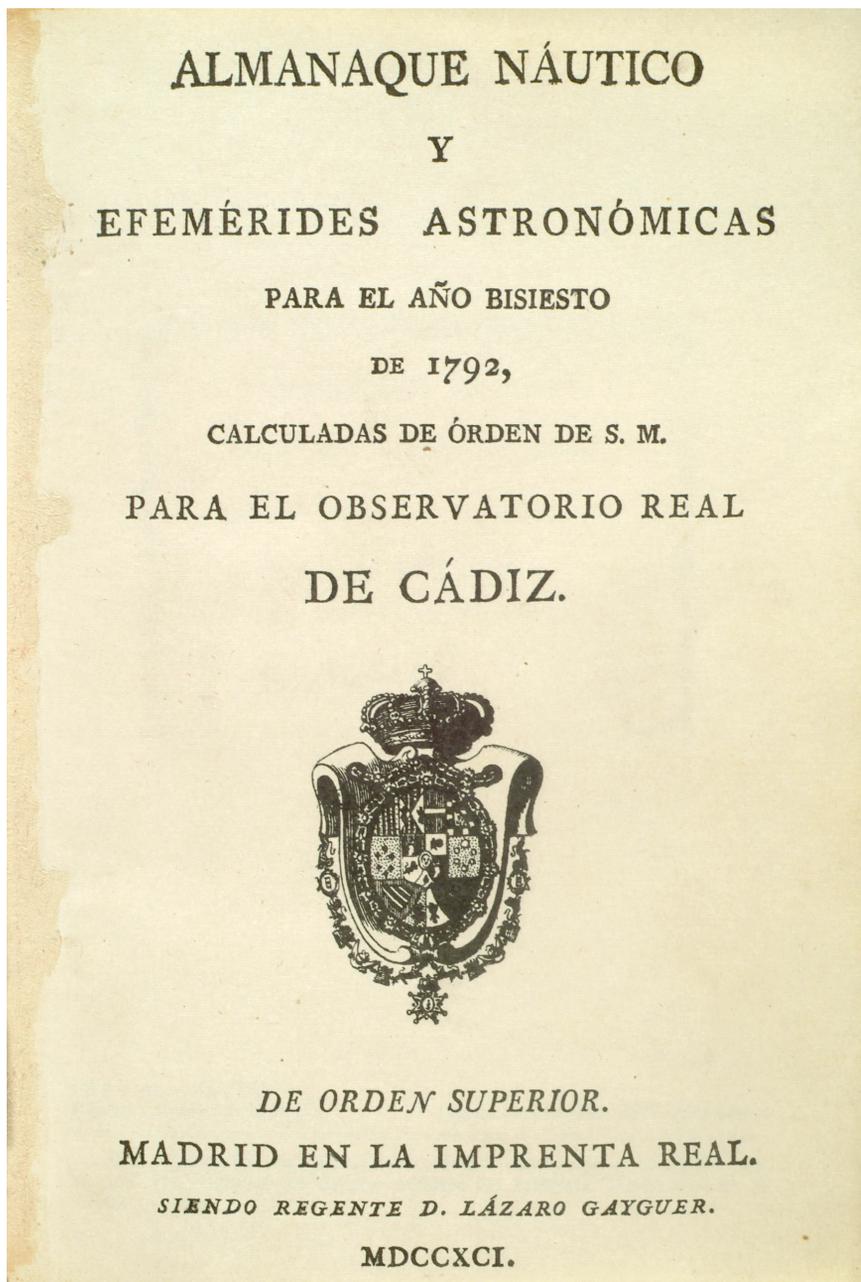


Figura 4.9: *Almanaque Náutico para el año bisiesto de 1792* (portada de la primera edición, 1791).



Figura 4.10: Vicente Tofiño (1732-1795).

prescindibles para los navegantes españoles.

Por otro lado, no debemos olvidar que una de las principales consecuencias de las expediciones organizadas por Francia para medir el grado de meridiano y determinar la verdadera forma de la Tierra fue el considerable aumento del interés de los gobiernos ilustrados por la geodesia y sus aplicaciones prácticas. Jorge Juan, consciente de la necesidad de la realización de un trabajo cartográfico global del territorio español, propuso

al marqués de la Ensenada el primer proyecto de un mapa de España. Sin embargo, la caída en desgracia del citado político provocó el olvido de esta propuesta.

De todas formas, durante la última parte del XVIII ya encontramos en España dos personajes dedicados a trabajos cartográficos de envergadura. El primero de ellos fue Tomás López (1730-1802), que realizó una gran cantidad de mapas de todas las regiones españolas sin moverse de Madrid. Puede decirse que fue un perfecto grabador, pero no un geodesta. El otro gran cartógrafo de la época fue Vicente Tofiño, que en sus trabajos para el levantamiento hidrográfico de las costas españolas introdujo por primera vez en nuestro país el uso de métodos geodésicos y astronómicos en los trabajos cartográficos. Su *Atlas Marítimo de España*, levantado entre 1783 y 1789, se convirtió en el primer trabajo de cartografía científica realizado en España a escala nacional.

Los orígenes de este trabajo están relacionados con la llegada al poder del conde de Floridablanca (1728-1808), y con su pos-

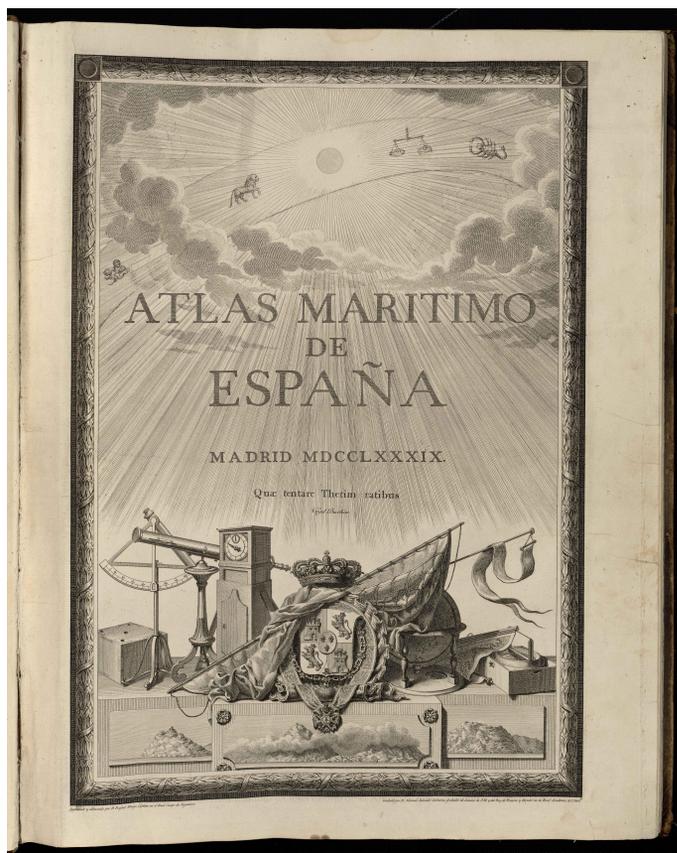


Figura 4.11: *Atlas Marítimo de España* (portada de la primera edición, 1787).

tura favorable al establecimiento de un plan nacional de trabajos hidrográficos. Como consecuencia, justo cuando se acababan de organizar las tareas observacionales del Real Observatorio de Cádiz, el Estado necesitaría contar con el personal que en él se había formado. Vicente Tofiño, responsable del Observatorio, fue encargado entonces de la dirección de una comisión hidrográfica para el levantamiento de las costas de España, formada por un grupo de oficiales de la Armada dispuestos a emprender el mayor trabajo de este tipo realizado en España hasta entonces.

La comisión inició sus trabajos en las costas del Mediterráneo (veranos de 1783, 1784 y 1785), después pasó a las costas

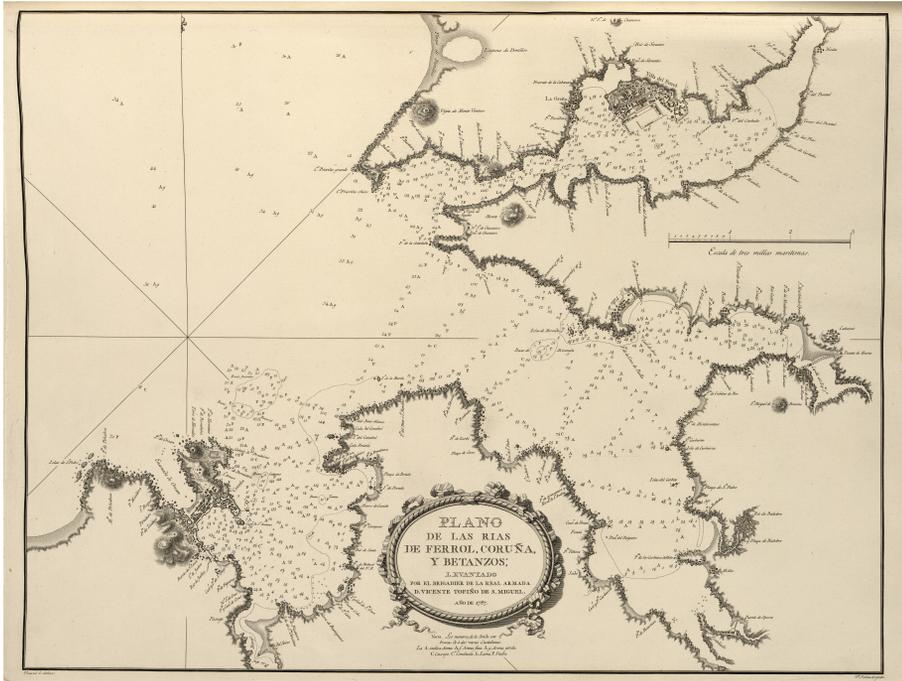


Figura 4.12: Plano de las rías de Ferrol, Coruña y Betanzos (incluido en el *Atlas Marítimo de España*).

de Portugal y Galicia (verano de 1786), a la costa cantábrica (verano de 1787) y, por último, a las islas Azores (verano de 1788). A lo largo de estos años colaboraron en esta gran empresa hidrográfica la mayor parte de los marinos ilustrados que, poco después, protagonizarían las grandes expediciones cartográficas organizadas por España durante la última parte del siglo XVIII y principios del XIX (Dionisio Alcalá-Galiano (1760-1805), José de Espinosa (1763-1815), Julián Ortiz Canelas (1767-1825), Alejandro Malaspina (1754-1809), José de Vargas Ponce (1760-1821), Felipe Bauzá (1764-1834) y muchos otros).

En 1787 fue publicado el *Derrotero de las costas de España en el Mediterráneo y su correspondiente de África* y un primer tomo del *Atlas Marítimo de España*, con 15 cartas de las costas mediterráneas. Unos meses después, durante 1789, salieron de la imprenta el *Derrotero de las costas de España en el océano*

Atlántico y de las Azores o Terceras y el segundo tomo del Atlas, con 30 cartas de las costas atlánticas.

El resultado de la expedición hidrográfica de Vicente Tofiño puede ser considerado fundamental en la historia de la cartografía española. La exactitud conseguida fue tal que algunos de los levantamientos efectuados por la Comisión estuvieron vigentes durante más de cien años. De hecho, algunas de estas cartas no fueron sustituidas en los barcos de la Armada hasta la entrada en servicio de las levantadas, ya en pleno siglo XX, por las comisiones hidrográficas dirigidas por el actual Instituto Hidrográfico de la Marina.

Coincidiendo con el desarrollo de los trabajos hidrográficos que acabamos de describir, las Secretarías de Indias y de Marina no dudaron en impulsar el reconocimiento y estudio de aquellas rutas marítimas consideradas de importancia para la navegación de los buques españoles, especialmente durante el reinado de Carlos III. La preocupación por mejorar las comunicaciones marítimas entre puntos distantes de las posesiones españolas hizo patente la necesidad de completar el conocimiento de su realidad geográfica. Era preciso, pues, corregir la cartografía, establecer con precisión las longitudes y latitudes de los principales puertos y ciudades y mejorar en lo posible la viabilidad de las grandes rutas comerciales.

Por otro lado, la proliferación de viajes de exploración sufragados por otras potencias europeas, especialmente Inglaterra, que pretendían tomar posesión de determinados puntos claves en las rutas marítimas, dio lugar a una reacción de carácter nacionalista y de prestigio, contraria a que los extranjeros se atribuyesen el descubrimiento de tierras que, aunque pertenecían teóricamente a la Corona española, aún no habían sido colonizadas de manera efectiva a mediados del siglo XVIII. Por esta causa, el tradicional carácter secreto y defensivo de los viajes llevados a cabo con anterioridad fue sustituido paulatinamente por una actitud mucho más favorable a la divulgación de los conocimientos adquiridos, de los lugares visitados y de los resultados científicos obtenidos.

Con la ayuda de las nuevas técnicas cartográficas y de nave-

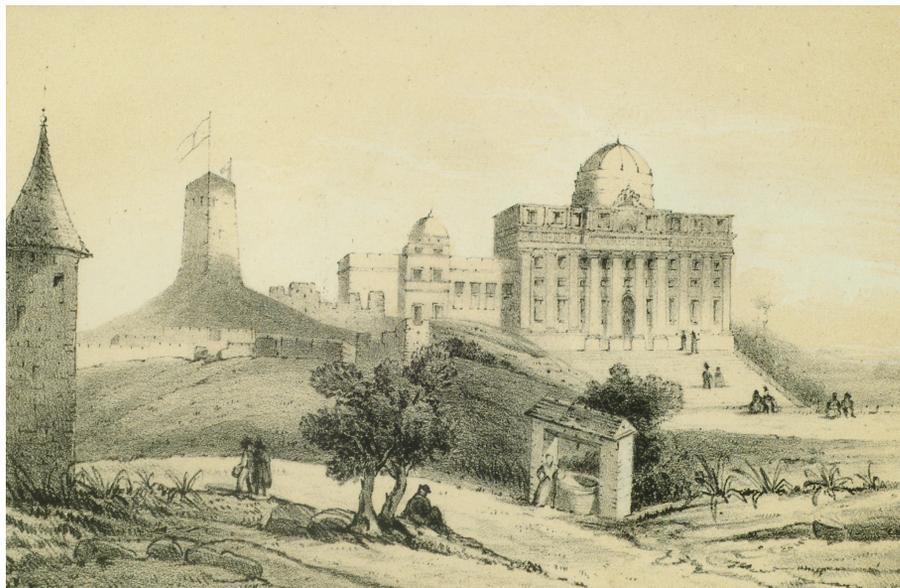


Figura 4.14: Real Observatorio de la Isla de León a principios del siglo XIX (grabado incluido en el *Nomenclátor de las calles de Cádiz*, 1856).

gación, la Marina española impulsó la exploración, e incorporación a la Corona, de territorios antes no controlados plenamente. De ahí que pueda afirmarse que, durante el reinado de Carlos III, el dominio español en América alcanzó su máxima extensión.

Ello explica una constante sucesión de expediciones, en las que los oficiales formados bajo la supervisión de Vicente Tofiño y de otros marinos ilustrados, jugaron un papel protagonista, convirtiéndose en verdaderos exploradores de costas y territorios de los que en Europa se poseían aún escasos conocimientos. Muchas de estas expediciones y campañas hidrográficas contaron para sus trabajos con instrumentos o personal del Real Observatorio de Cádiz.

Capítulo 5

La observación de los eclipses

En este capítulo abordamos las circunstancias, tanto físicas como observacionales, que rodean a los eclipses de los satélites de Júpiter. Las observaciones de estos eventos tienen en la actualidad la máxima vigencia, por cuanto son imprescindibles para mejorar las teorías sobre el movimiento de los satélites. Astrónomos profesionales y aficionados de todo el mundo continúan midiendo los eclipses y enviando la información a organismos dedicados al tratamiento y uso de estos datos. Cualquier aficionado interesado puede, de manera sencilla y asequible, hacer contribuciones al desarrollo de la mecánica celeste de los satélites de Júpiter realizando observaciones de los eclipses, de una manera muy similar a como lo hacía Galileo. En este capítulo discutiremos con detalle la relevancia de las observaciones y comentaremos la técnica necesaria para ello.

5.1. Las efemérides modernas de los satélites de Júpiter

La historia de las teorías sobre el movimiento de los satélites de Júpiter arranca, por supuesto, con Galileo. Pero hoy en día aun se encuentra incompleta y necesitada de mejoras. Es una

historia paralela a la mecánica celeste, que nació para explicar los movimientos planetarios. No en vano el sistema de Júpiter, con sus satélites galileanos, es un pequeño sistema solar en miniatura, inscrito en el verdadero Sistema Solar. Desde el primer momento los satélites galileanos presentaron un desafío matemático al que se dedicaron y continúan dedicándose grandes figuras de las matemáticas, la física y la astronomía, desde el siglo XVII hasta el presente.



Figura 5.1: Isaac Newton (1643-1727).

Las predicciones obtenidas por Galileo para los eclipses de los satélites de Júpiter precedían a la formulación de la teoría de la gravitación universal y de los fundamentos de la mecánica clásica, ambos enunciados por Newton en su obra cumbre, *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (1687). Las predicciones de Galileo y sus contemporáneos se basaban en la suposición, completamente lógica en su tiempo pero no del todo correcta, de que los satélites se movían en órbitas circulares, con velocidades uniformes y periodos bien establecidos. Como ya discutimos en el Capítulo 3, Galileo fue capaz, a partir de meticulosas mediciones, de obtener valores muy cercanos a los conocidos actualmente para los periodos de los cuatro satélites. Las sucesivas mejoras en la exactitud de las predicciones que tuvieron lugar a lo largo del siglo XVII permitieron dar verosimilitud al método de Galileo para la determinación de la longitud.

Tras la construcción de los primeros cronómetros de Harri-

son, la medición de los eclipses de los satélites de Júpiter perdió interés como método para determinar la longitud, pero pasó a cobrar una importancia fundamental en el desarrollo de las teorías físicas para el movimiento de los satélites, algo que Galileo y sus contemporáneos ni siquiera pudieron intuir. Este contexto continúa con total vigencia en la actualidad. Los satélites de Júpiter no sucumbieron al cronómetro; por el contrario, la nueva mecánica de Newton y los posteriores desarrollos teóricos y observacionales catapultaron a los satélites de Júpiter a un lugar prominente y permanente en la historia de la astronomía moderna.

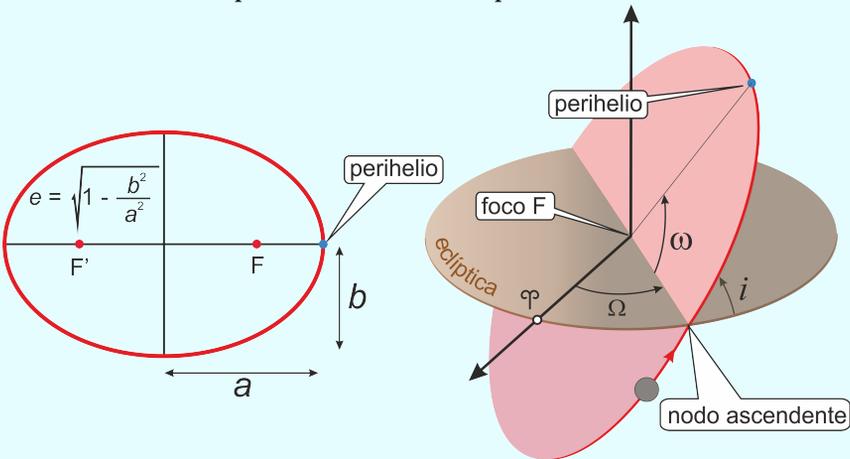
La introducción de la nueva física newtoniana resultó decisiva en el entendimiento de los movimientos orbitales en el Sistema Solar, y de los satélites galileanos en particular. Utilizando sus teorías sobre la dinámica y la fuerza gravitatoria, Newton dedujo desde primeros principios que las órbitas planetarias debían ser elipses (como había intuido Kepler a partir de observaciones), un tipo de curvas cónicas¹, bien conocidas por los griegos, caracterizadas por dos parámetros: el semieje mayor, a , que da cuenta de su tamaño, y la *excentricidad*, e , que mide su grado de achatamiento o deformación con respecto a un círculo perfecto, siendo este simplemente una elipse con excentricidad nula (vea el cuadro 5.1).

Sin embargo, el resultado elíptico descansa sobre la suposición de que cada planeta interacciona únicamente con el Sol, que los cuerpos son masas puntuales, y que los efectos gravitatorios de los otros planetas son despreciables: es el llamado *problema de los dos cuerpos*. Estos últimos efectos son de muy pequeño orden comparados con la atracción solar (en una magnitud proporcional al cociente entre las masas planetarias y la del Sol, que es como mucho de una milésima), de ahí que se denominen *perturbaciones*. La introducción de perturbaciones complicaba en grado sumo los cálculos en mecánica celeste, hasta el punto de hacerlos inviables en tiempos de Newton.

¹Las curvas cónicas son el círculo, la elipse, la parábola y la hipérbola. Su nombre se debe a que son las cuatro curvas posibles que resultan de la intersección de un cono y un plano.

Cuadro 5.1. Elementos orbitales

La posición de un cuerpo celeste se puede determinar conociendo seis parámetros, los llamados *elementos orbitales*, que varían lentamente en el tiempo y se pueden considerar aproximadamente constantes. Gracias a tres de ellos podemos calcular la posición del cuerpo en su órbita. Los otros tres, que son ángulos, nos permiten orientar la órbita con respecto a un sistema de referencia estándar fijo. Según la aplicación, este sistema de referencia puede estar basado en la eclíptica (para el Sistema Solar), en el ecuador celeste (para satélites y cuerpos que orbitan la Tierra), o en cualquier otro plano que interese. Por ejemplo, las órbitas de los satélites de Júpiter se pueden referenciar al plano ecuatorial de Júpiter.



La figura define esquemáticamente los seis elementos orbitales. En el panel izquierdo se presenta una órbita elíptica, caracterizada por su semieje mayor a , y su excentricidad, e . Si además conocemos el instante t_0 de paso por el *perihelio*, o punto más cercano al foco de la elipse, F , donde se sitúa el cuerpo masivo principal (en el caso del Sistema Solar, el Sol), podemos calcular la posición del cuerpo celeste a lo largo de su órbita en cualquier instante de tiempo en el pasado, presente o futuro. En el panel derecho se definen los otros tres elementos orbitales, suponiendo que el sistema de referencia se encuentre basado en la eclíptica. Este sistema sería apropiado para referenciar las órbitas de los planetas, los asteroides y los cometas. Los tres ángulos son la *longitud del nodo ascendente*, Ω , que es el ángulo medido desde el punto Vernal Υ a lo largo de la eclíptica y hasta el nodo ascendente de la órbita (el punto de corte del plano orbital con la eclíptica en el que el cuerpo pasa de estar por debajo de ella a estar por encima); el *argumento de latitud del perihelio*, ω , que es el ángulo medido desde el nodo

ascendente a lo largo de la órbita y hasta el perihelio; y la *inclinación*, i , que es el ángulo que forman la eclíptica y el plano orbital. El conjunto de constantes $(a, e, t_0, \Omega, \omega, i)$ caracteriza completamente la posición de un cuerpo celeste que orbita alrededor de otro.

En realidad, todos los cuerpos se encuentran sometidos a perturbaciones: fuerzas adicionales, debidas a otros cuerpos más lejanos, mucho más débiles que la del cuerpo principal. En el caso de un planeta, la fuerza principal es debida al Sol, y la órbita queda caracterizada mediante seis elementos orbitales constantes. Las perturbaciones debidas a otros planetas hacen que estos elementos dejen de ser constantes. Como su variación en el tiempo es muy lenta, los elementos orbitales constituyen una manera muy conveniente de caracterizar los movimientos orbitales. Incluso para los satélites artificiales, sometidos a perturbaciones adicionales originadas en la forma no esférica de la Tierra, el rozamiento con las capas altas de la atmósfera terrestre, etc., el conjunto de elementos orbitales es también una manera muy eficaz de describir el movimiento orbital.

En el caso de los satélites galileanos su dinámica orbital es a la vez compleja y fascinante. El problema es análogo al del movimiento de los planetas alrededor del Sol, donde los satélites serían los planetas y Júpiter jugaría el papel del Sol. Sin embargo, el movimiento de un satélite no se puede explicar tomando como base el paradigma clásico de un cuerpo central puntual, Júpiter, que lo atrae con una ley proporcional al inverso de la distancia al cuadrado, es decir, el paradigma del problema de los dos cuerpos. Existen muchos otros factores, perturbaciones, que influyen: la forma achatada de Júpiter, que genera un campo de gravedad mucho más complicado; las interacciones entre los satélites y las interacciones con el Sol y otros planetas, que añaden fuerzas adicionales a la fuerza predominante debida a Júpiter. Grandes astrónomos y matemáticos de los siglos XVIII y XIX realizaron contribuciones cruciales para el avance de la mecánica celeste, inicialmente enfocado en el movimiento planetario, en el movimiento lunar y en el problema de la estabilidad del Sistema Solar, diseñando métodos de cálculo factibles para el tratamiento de estos efectos.

La primera teoría posnewtoniana rigurosa (es decir, basada

en conceptos físicos) enfocada en el tratamiento de las perturbaciones sobre los planetas es debida a Pierre-Simon Laplace (1749-1827), quien desarrolló los fundamentos de la mecánica celeste basados precisamente en el concepto de perturbación.



Figura 5.2: Pierre Simon Marquis de Laplace (1749-1828).

Aprovechando su pequeña magnitud, Laplace diseñó un método para incorporar el efecto de las perturbaciones a base de desarrollos en potencias del cociente de masas y en desarrollos trigonométricos para las fuerzas perturbadoras. El método permitía mejoras sistemáticas añadiendo más y más términos en estas series, a costa de complicar los cálculos: en tiempos de Laplace, y realmente hasta la aparición de los ordenadores, las teorías planetarias, aunque formalmente completas, no eran viables computacionalmente más que a los órdenes

más bajos. Otro problema, crucial desde el punto de vista práctico, es que las teorías carecían de poder cuantitativo debido al desconocimiento de los valores numéricos concretos de los parámetros que aparecen, tales como masas, condiciones iniciales de los cuerpos², etc.

Existe una característica singular de la teoría de perturbaciones de Laplace, desarrollada y aplicada posteriormente por otros científicos como Lagrange. Se basa en una idea ingeniosa. Si las perturbaciones no existieran, los planetas seguirían órbitas elípticas. Puesto que las perturbaciones son pequeñas, los cambios orbitales sobre la órbita elíptica van a resultar minúsculos.

²Más adelante explicaremos el significado de las condiciones iniciales.

Por tanto, podemos suponer que la órbita planetaria es en cada momento una elipse, pero una elipse que va cambiando en el tiempo lentamente: es la *órbita osculadora*, la órbita elíptica que seguiría el cuerpo si las perturbaciones cesaran súbitamente.

Aparte de los dos parámetros mencionados, semieje mayor y excentricidad, una órbita elíptica en el espacio se caracteriza por cuatro parámetros más, que miden su orientación y la posición inicial del planeta: en total seis valores, o *elementos orbitales* (cuadro 5.1). En el problema de los dos cuerpos los elementos orbitales son constantes en el tiempo. En presencia de perturbaciones los elementos cambian lentamente, y la teoría de perturbaciones planetarias permite obtener ecuaciones a partir de las cuales se puede predecir el valor de los elementos orbitales en cualquier instante de tiempo. De esta manera, es posible reproducir la posición del planeta en cualquier instante o a intervalos regulares, lo que se denominan *efemérides*.

Utilizando esta teoría, Laplace explicó el comportamiento de los elementos orbitales de los planetas. Pero además, en una aplicación separada, obtuvo una teoría para las perturbaciones de los satélites de Júpiter, aunque nuevamente incompleta en la medida en que los valores de algunos parámetros de la misma no quedaban definidos. Alexis Bouvard (1767-1843), y posteriormente el gran astrónomo Jean-Baptiste Joseph Delambre (1749-1822), determinaron estos valores a partir de observaciones de eclipses. Tras algunas mejoras introducidas por Laplace, Marie-Charles Damoiseau (1768-1846) publicó finalmente unas efemérides en 1836, y a partir de ahí tablas de eclipses, válidas hasta 1880. David Peck Todd (1855-1939) y John Couch Adams (1819-1892) hicieron algunas extensiones, válidas hasta finales de ese siglo, pero en general existía una cierta situación caótica, puesto que los valores de los parámetros utilizados por unos y otros, por ejemplo las masas de los satélites, no eran consistentes y diferían en demasía. Este hecho demuestra de forma palmaria la diferencia entre tener una buena teoría y tener buenos valores numéricos para los parámetros de esa teoría: sin los segundos, la primera no es cuantitativamente útil en la predicción astronómica.



Figura 5.3: Institut de France (Académie des Sciences).

Hay que hacer notar nuevamente las dificultades involucradas en el desarrollo de una teoría de los satélites de Júpiter, derivadas del gran número de perturbaciones importantes que es necesario introducir. Por un lado, tenemos la influencia del Sol, Saturno y otros planetas. Por otro, la forma no esférica de Júpiter y las interacciones mutuas entre los satélites. Pero existe además otro factor importante: los efectos de marea, resultado de la deformación de los cuerpos debida a la interacción gravitatoria, que en el caso de la Tierra y la Luna aparecen de manera más evidente sobre la masa de agua oceánica, dando lugar a las mareas. Incluso hoy en día los efectos de marea sobre los planetas y satélites no se encuentran descritos de una manera completamente satisfactoria, ya que se desconoce en gran medida tanto su estructura interna como la respuesta de estos interiores a las fuerzas inducidas por las de mareas.

Además de Laplace, cabe destacar la contribución de Joseph-Louis Lagrange (1736-1813), matemático italo-francés y figura

clave en el desarrollo de la mecánica celeste, la física y las matemáticas modernas. De entre sus innumerables contribuciones en el campo de la mecánica celeste, dos de ellas destacan debido a sus implicaciones sobre el movimiento de los satélites de Júpiter. Ambas son el resultado de trabajos realizados por Lagrange para optar a sendos premios ofrecidos por la Academia Francesa de las Ciencias, los cuales resultaron ganadores. El primero, de 1764, planteaba la búsqueda de la explicación a un fenómeno bien conocido: la Luna siempre nos presenta la misma cara. En términos de periodos de movimiento, esto implica que el movimiento orbital de la Luna alrededor de la Tierra dura lo mismo que su movimiento rotacional alrededor de su eje. Lagrange no solo explicó el fenómeno, sino que ofreció una teoría completa sobre el fenómeno de la libración, es decir, el movimiento de cabeceo periódico de la Luna alrededor de su movimiento de rotación medio. En lenguaje moderno, Lagrange explicó el fenómeno de la resonancia rotación-traslación, muy habitual en muchos sistemas planeta-satélite del Sistema Solar. En particular, los cuatro satélites galileanos presentan este fenómeno (es decir, siempre presentan la misma cara a Júpiter), cuya explicación debemos indirectamente a Lagrange.

Otra contribución clave de Lagrange, ganadora del premio de la Academia en el año 1766, se relacionaba directamente con los satélites galileanos. Se sabía desde hacía tiempo que el movimiento de los satélites presenta un cierto número de curiosidades. Por ejemplo, la conmensuración entre los periodos de los tres primeros satélites (de la que hablaremos luego), la aparente excentricidad de la órbita de alguno de ellos, etc., *anomalías* que fueron explicadas por Lagrange. Este gran científico ganó o compartió el primer premio de la Academia otras tres veces, hecho que lo encumbró como uno de los personajes más eminentes de la historia de la astronomía y de la ciencia.

La siguiente figura relevante en la historia de las teorías sobre el movimiento de los satélites de Júpiter es el también francés Cyrille Joseph Souillart (1828-1898), quien en 1865 realizó algunas extensiones a la teoría de Laplace, al punto de que la teoría resultante se denomina teoría de Laplace-Souillart. Fue

aplicada asimismo al movimiento de los satélites de Urano, y usada posteriormente en la generación de efemérides y fenómenos de los satélites de Júpiter.

En este punto hay que hacer mención a la importancia de las observaciones. Toda teoría se alimenta de observaciones, necesarias para aproximar lo mejor posible los valores de los parámetros que aparecen en ella. Desde ese punto de vista, el éxito de una teoría sobre el movimiento de los satélites depende del nivel y calidad de las medidas de la posición de estos, de su número y de su extensión en el tiempo: cuanto mejores, mayores en número y más extendidas en el tiempo sean las observaciones, mejor calidad predictiva tendrán las efemérides

generadas con la teoría y, por ende, mejores serán las predicciones de los eclipses. En el siglo XIX se hacían varios tipos de medidas. En primer lugar estaban las medidas astrométricas clásicas: se toman fotografías del cielo en las que aparezcan uno o más satélites y algunas estrellas de fondo con posiciones conocidas. A partir de ahí se infiere la posición de los satélites en el cielo. Varias de estas posiciones permiten reconstruir la posición y movimiento tridimensional. Otros métodos son la medición de la distancia angular relativa entre dos satélites, y la medición de la distancia del satélite al limbo de Júpiter. Finalmente, las



Figura 5.4: Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) (grabado incluido en el *Album du Centenaire* (1789-1804), 1889).

medidas de los tiempos de desaparición y aparición de un satélite que sufre un eclipse proporciona información adicional que permite ajustar valores de los parámetros de la teoría. Los métodos observacionales se fueron sofisticando, y de ello se benefició toda la astronomía, teórica y práctica.

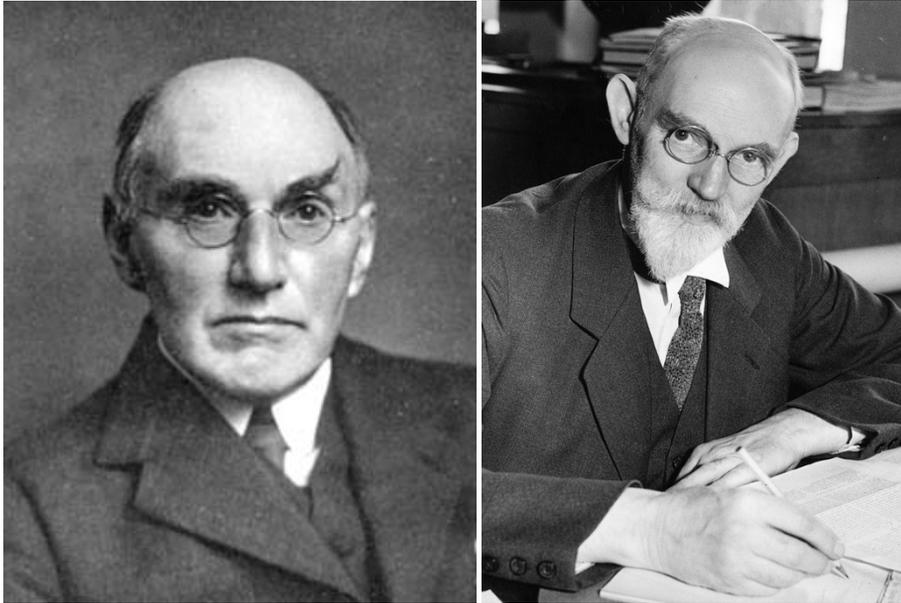


Figura 5.5: Ralph Allan Sampson (1866-1939) (izquierda) y Willem de Sitter (1872-1934) (derecha).

La *edad moderna* en la teoría del movimiento de los satélites galileanos comienza con otra figura relevante, el astrónomo británico Ralph Allen Sampson (1866-1939), quien dedicó gran parte de su vida al desarrollo de una nueva teoría. En 1910 publicó sus *Tables of the Four Great Satellites of Jupiter*, que extendió y mejoró las tablas de Damoiseau y Adams, proporcionando no solo predicciones para los eventos sino también posiciones tabuladas para los satélites. Su trabajo cristalizó en 1921 en una obra titulada *Theory of the Four Great Satellites of Jupiter*, tan avanzada y completa que permaneció vigente hasta los años '70 del siglo pasado. Aún hoy se utiliza la teoría de Sampson, con algunas modificaciones que comentaremos posteriormente.

Los trabajos de Sampson sobre el movimiento de los satélites de Júpiter coincidieron en el tiempo con los de otro de los grandes personajes de la ciencia entre los siglos XIX y XX, periodo en el que la física sufrió una gran revolución debido a la concepción de la teoría de la relatividad y de la física cuántica. Nos referimos al holandés Willem de Sitter (1872-1934). Aunque sus contribuciones a la ciencia suelen asociarse al campo de la gravitación y la cosmología, de Sitter en realidad dedicó más tiempo de su quehacer científico a la teoría del movimiento de los satélites de Júpiter, sobre la cual versó su tesis doctoral, que a la relatividad general. Aunque las teorías de de Sitter y Sampson mostraban ligeras diferencias en sus resultados, sus autores se vieron envueltos en una agria e innecesaria polémica personal en torno a algunos pequeños detalles de la teoría de de Sitter, duramente criticados por Sampson y descortesmente respondidos por el primero, actitudes inusuales en la ciencia de aquella época. Tras largos años de disputa, ambos hombres consiguieron limar asperezas, pero la ciencia perdió la oportunidad de que dos importantes figuras de la astronomía de ese momento colaboraran en un trascendental y difícil objetivo común.

Las misiones de naves espaciales no tripuladas hacia Júpiter y sus satélites, planificadas en la década de 1970 (Pioneer 10 y 11, Voyager 1 y 2), generaron un renovado interés por disponer de efemérides más precisas de los satélites de Júpiter. Hay que tener en cuenta que las trayectorias de las naves espaciales, asistidas por gravedad local, dependen críticamente de su posición relativa con respecto a los planetas y satélites. El éxito o fracaso de una misión, tanto en objetivos científicos como en lo que respecta a la integridad física de la nave, requiere un control muy alto de estas posiciones. Con este objetivo Jay H. Lieske, del *Jet Propulsion Laboratory* californiano, realizó una serie de mejoras de la teoría de Sampson durante esa década, corrigiendo errores, incluyendo nuevos efectos y reescribiendo la teoría con técnicas de cálculo algebraico por ordenador, con objeto de adaptarla a futuras mejoras. La teoría resultó tener una precisión numérica de unos 10 *km* si bien, como en toda teoría dinámica moderna, las incertidumbres en los valores

de los parámetros limitaban su precisión, elevándolas a valores que podían ser mayores en un orden de magnitud (es decir, unos cuantos cientos de kilómetros, aún aceptable para la navegación espacial).

En este punto de la historia estamos ya inmersos en la revolución computacional que significó la aparición del ordenador digital y su fuerte desarrollo, asociado a las mejoras tecnológicas en el campo de los semiconductores. A partir de la segunda mitad del siglo XX el cálculo astronómico y la mecánica celeste dieron un giro hacia un nuevo planteamiento, desarrollado hacia tiempo pero inviable antes de la llegada del ordenador digital. En lugar de basar los cálculos en el ingenioso método de Laplace basado en elementos orbitales, es más fructífero abordar el problema de cara, planteando una solución numérica a las ecuaciones de movimiento en lenguaje vectorial. Esencialmente el problema de la mecánica celeste consiste en lo siguiente: conociendo las posiciones r_0 y velocidades v_0 de los cuerpos involucrados (planetas y satélites) en un cierto instante inicial t_0 , y las fuerzas F sobre esos cuerpos, la mecánica de Newton³ permite conocer las posiciones en un instante posterior $t_0 + t$ (donde t es un pequeño intervalo de tiempo). Este proceso, llamado *integración numérica*, se itera en el tiempo, avanzando cada vez un intervalo temporal t . Al final del proceso se puede reproducir la trayectoria en el tiempo de todos los cuerpos con la precisión que se desee. La única limitación, una vez más, es el grado de conocimiento de los valores numéricos para las constantes y parámetros del problema: masas, posiciones y velocidades iniciales, parámetros rotacionales de los planetas y satélites, etc.

El poder computacional actual es tan grande que las integraciones numéricas, durante periodos extendidos de tiempo, son muy sencillas de realizar. Hasta el punto de que el problema básico se ha convertido en un problema de optimización. Estos

³La segunda ley de Newton establece que el producto de la masa de un cuerpo por la aceleración con la que se mueve es igual a la fuerza que lo hace mover. Si conocemos la masa del cuerpo y la fuerza que actúa sobre él, la segunda ley de Newton se convierte en una ecuación diferencial cuya incógnita es la posición del cuerpo en función del tiempo.

problemas son muy comunes en todas las ramas de la ciencia: disponemos de unos datos experimentales sobre algunas magnitudes y queremos comprobar si se adaptan a una cierta ley matemática. Si es así, se trata de conocer los valores de los parámetros que caracterizan esta ley. Por ejemplo, los núcleos atómicos inestables se desintegran de acuerdo con una ley exponencial, caracterizada por un parámetro llamado vida media. Podemos medir el número de desintegraciones de una cierta población de átomos en función del tiempo y ajustarlo a una ley exponencial. Entonces el famoso *método de mínimos cuadrados*, ideado por el matemático y astrónomo alemán Carl Friedrich Gauss (1777-1855), permite en este caso obtener un valor para la vida media de una especie nuclear a partir de los datos experimentales.

En mecánica celeste la ley matemática es la propia integración numérica, basada en las leyes de la física y la gravitación universal. Y los datos experimentales son las observaciones de la posición de un cuerpo en el cielo, la distancia entre dos cuerpos, el instante en el que ocurre un eclipse, etc. Los valores de los parámetros se obtienen a partir de un ajuste estadístico por mínimos cuadrados. De cuantos más datos observacionales se disponga más fiables serán los valores obtenidos para esos parámetros. La acumulación de observaciones en periodos de tiempo largos es crucial



Figura 5.6: Observatorio de París.

en astronomía. Las medidas de la distancia entre la Tierra y la Luna utilizando un láser (y los retroreflectores dejados en la superficie lunar por diferentes misiones espaciales), o entre la Tie-

rra y algunos planetas mediante radar, o los datos de telemetría enviados por sondas espaciales que visitan planetas y satélites, que dependen del campo gravitatorio que siente la sonda y, por tanto, de la posición de los diferentes cuerpos, han mejorado de manera sustancial la precisión de las teorías modernas, ya que aportan medidas de muy alta calidad. Es el caso de los satélites de Júpiter, visitados en múltiples ocasiones, las últimas por parte de la sonda Galileo y más recientemente por la sonda Juno, cuyos datos serán procesados en los próximos años.

Actualmente la teoría más sofisticada para los satélites galileanos es debida a Lainey *et al.*, del *Institute de Mecanique Celeste et Calcul de Ephemerides* (IMCCE) del Observatorio de París, que data del año 2004⁴. Al igual que el resto de teorías modernas sobre el movimiento de los cuerpos del Sistema Solar, la teoría de Lainey *et al.* se basa en una integración numérica de las ecuaciones dinámicas básicas del sistema galileano. Incluye una enorme cantidad de efectos y perturbaciones, incluyendo sutiles cambios originados en la curvatura del espacio-tiempo, descritos por la teoría de la relatividad general de Einstein y que dan lugar a fuerzas medibles con la tecnología actual. La teoría está ajustada a una enorme cantidad de datos observacionales. Las mejores efemérides disponibles actualmente sobre los eclipses y demás fenómenos de los satélites galileanos se generan con esta teoría que, como siempre, está abierta a mejoras. La observación de los fenómenos de los satélites de Galileo, tales como los eclipses, así como los datos enviados por las sondas espaciales que visitan ese pequeño sistema solar, contribuyen, y seguirán contribuyendo de manera crucial a esta empresa. En particular, las observaciones de astrónomos aficionados dedicados son muy bienvenidas en el IMCCE, uno de los organismos encargados de recogerlas, procesarlas y adaptarlas para su uso en la mejora de los modelos dinámicos sobre los satélites galileanos.

⁴Lainey, Duniez y Vienne, *New accurate ephemerides for the Galilean satellites of Jupiter*, *Astronomy and Astrophysics*, vol. 420 pág. 1171-1183 (Junio 2004).

	$M(\text{kg})$	$R(\text{km})$	$a(\text{km})$	e	$i(^{\circ})$	$T(\text{días})$	T/T_{Io}
Io	$8,931 \times 10^{22}$	1818,1	421700	0,0041	0.050	1.769	1
Europa	$4,800 \times 10^{22}$	1560,8	671034	0,0094	0,471	3.551	2
Ganimeses	$14,819 \times 10^{22}$	2631,2	1070412	0,0011	0,204	7.154	4
Calisto	$10,759 \times 10^{22}$	2410,3	1882709	0,0074	0,205	16.689	9.4

Tabla 5.1: Datos físicos de los satélites galileanos y de sus órbitas en torno a Júpiter. M es la masa del satélite, R su radio, a el semieje mayor de su órbita, e la excentricidad, i la inclinación sobre el ecuador de Júpiter y T el periodo. La última columna es el periodo con respecto al periodo de Io.

5.2. Características orbitales de los satélites galileanos

Las órbitas de los cuatro satélites galileanos son muy aproximadamente circulares. Los datos básicos relativos a las órbitas se encuentran en el tabla 5.1. Como se puede ver las excentricidades son muy pequeñas, menores que 0.01 en todos los casos, lo cual da una medida de su extrema circularidad. Asimismo, las órbitas transcurren en planos muy parecidos, siendo las inclinaciones (ángulo del plano orbital con respecto al ecuador joviano) menores que 0.5° . En la tabla también se proporciona el periodo en días de cada satélite, y el periodo con referencia al de Io. Se puede ver que los periodos de los tres primeros satélites se encuentran en una relación 1 : 2 : 4, es decir, el periodo de Europa es dos veces el de Io, mientras que el de Ganimeses es otras dos veces el de Europa (y por tanto cuatro veces el de Io). Se trata de una *resonancia de Laplace*, llamada así porque fue Laplace el primero en formular el fenómeno. Recientemente se ha descubierto un sistema planetario extrasolar, Gliese 876, en el que existen tres planetas en una resonancia de Laplace.

Existe una consecuencia derivada de la resonancia de Laplace entre Io, Europa y Ganimeses. La resonancia implica que los satélites se sitúan periódicamente en línea con respecto a Júpiter, siendo el intervalo correspondiente igual al periodo mayor, es decir, el de Ganimeses. A partir de este hecho, Laplace dedujo que las longitudes de los satélites (ángulo medido sobre el plano

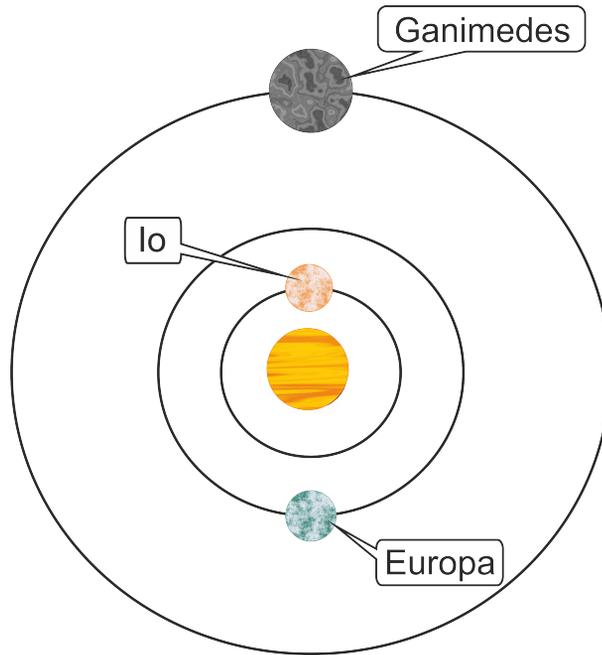


Figura 5.7: Configuración resonante de Io, Europa y Ganimedes en la conjunción (es decir, cuando los tres satélites se encuentran alineados).

ecuatorial de Júpiter desde una dirección fija), λ , satisfacen la relación:

$$\lambda_1 - 3\lambda_2 + 2\lambda_3 - 180^\circ = \theta$$

donde los subíndices 1, 2 y 3 corresponden a Io, Europa y Ganimedes, respectivamente. El ángulo θ , llamado *ángulo de libración*, depende del tiempo de una manera sinusoidal, alrededor del valor 0° y con una cierta amplitud θ_0 , llamada *ángulo de Laplace*. La existencia del término 180° implica que, cuando se encuentran en línea, los satélites 1 y 3 están en el lado opuesto del de 2 con respecto a Júpiter, lo cual amortigua la atracción gravitatoria entre los tres y evita la existencia de una triple conjunción joviana, en la cual los tres satélites se situarían al mismo lado con respecto a Júpiter. La figura 5.7 muestra la configuración periódica resonante de Io, Europa y Ganimedes cuando se encuentran en conjunción, es decir cuando los satélites están

alineados.

La existencia de resonancias en el Sistema Solar es bastante generalizada, pero las resonancias de Laplace, sin embargo, son mucho más raras. En cualquier caso, las resonancias complican sobremanera la evaluación de las series que aparecen en las teorías planetarias, ya que exigen la introducción de numerosos términos para obtener resultados razonables desde el punto de vista numérico. Esto se debe a que la resonancia amplifica el efecto de las perturbaciones, puesto que da lugar a configuraciones particulares que se repiten en el tiempo; fuera de la resonancia las fuerzas perturbadoras, en promedio, tienden a cancelarse.

Uno de los temas candentes más interesantes que se mantuvo a lo largo de los años fue la misma existencia de la libración, es decir, de una amplitud θ_0 no nula. Desde el punto de vista observacional no había evidencias de la libración, por lo que las teorías no la tenían en cuenta, haciendo la suposición de que $\theta_0 = 0^\circ$. En su tesis doctoral, de Sitter calculó las longitudes de los satélites independientemente, y dedujo que θ_0 era pequeño pero no nulo, del orden de 0.05° . Este resultado generó una gran actividad observacional, que permitió matizar el valor del ángulo de Laplace. Su valor aceptado actualmente es de 0.06° , y el periodo asociado al movimiento periódico de libración es de 2080 días.

5.3. Fenómenos en el sistema de satélites galileanos

El sistema de satélites de Júpiter presenta una compleja fenomenología observacional, de la que Galileo y sus coetáneos tan solo conocían una pequeña parte. El fenómeno más evidente es el de los eclipses. Pero existen otros fenómenos cuya observación es más complicada, aunque conviene discutir también.

Antes de ello, expliquemos la razón por la que existen estos fenómenos. Debido a que el plano de la órbita de los satélites en torno a Júpiter casi coincide con el plano orbital de Júpiter

alrededor del Sol, los satélites se sumergen muy a menudo en la sombra proyectada por Júpiter en la dirección contraria al Sol. Estos son los *eclipses* (*Ec*). Pero existe un fenómeno asociado, las llamadas *sombras* (*Sh*): es el fenómeno opuesto al eclipse, en el que un satélite se sitúa entre el Sol y Júpiter y proyecta su sombra sobre el disco de este último. Al ser el diámetro de los satélites tan pequeño comparado con el tamaño de Júpiter, el fenómeno solo puede ser observado con un telescopio suficientemente potente, del que Galileo no disponía. Al igual que los eclipses, las sombras son fenómenos universales, visibles por parte de cualquier observador convenientemente situado. Eclipses y sombras son fenómenos relacionados y suelen aparecer asociados (primero uno, un tiempo después el otro). La figura 5.8 es un esquema en el que se puede apreciar la configuración geométrica del Sol, Júpiter y un satélite en los eclipses y las sombras.

Existen otros dos fenómenos, también asociados entre sí, que son debidos al hecho de que, a su vez, el plano orbital de Júpiter es muy cercano al plano orbital de la Tierra (la eclíptica). Estos fenómenos son las *ocultaciones* (*Oc*) y los *tránsitos* (*Tr*), fenómenos esta vez asociados a la posición de la Tierra. En las ocultaciones, el satélite se oculta por detrás del disco de Júpiter, es decir, la línea que une la Tierra y el satélite es tangente a la superficie de Júpiter. Por otra parte, en lo que discurre como fenómeno asociado, en el tránsito el satélite pasa por delante del disco de Júpiter, haciendo primero contacto, transitando, y finalmente saliendo del disco. Al igual que los eclipses y las sombras, las ocultaciones y los tránsitos se encuentran explicados gráficamente en la figura 5.8.

Hemos dicho que los eclipses y las sombras son fenómenos universales, es decir que cualquier observador *situado convenientemente* puede ser testigo de un eclipse, ya que es un fenómeno asociado a un proceso físico real: en el caso de los eclipses, el oscurecimiento progresivo de un satélite, a medida que se sumerge en la sombra joviana, hasta su desaparición total y posterior reaparición cuando el satélite emerge de la sombra. ¿Qué significa situado convenientemente? En el caso de los eclipses,

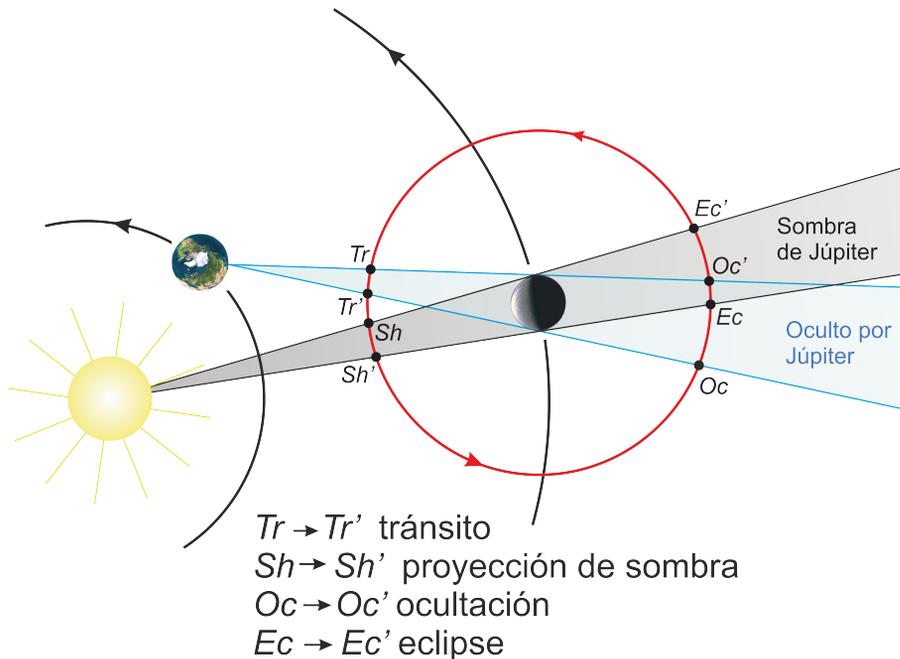


Figura 5.8: Esquema de la configuración geométrica del Sol, Júpiter y un satélite en los diferentes fenómenos. En el gráfico los planos orbitales de la Tierra (la eclíptica), Júpiter y sus satélites se han tomado como el mismo (plano del papel), lo cual es aproximadamente correcto.

un observador situado entre el Sol y Júpiter en la línea que une ambos cuerpos, no tendría visión directa de la sombra de Júpiter puesto que esta se encontraría por detrás del planeta: los eclipses no serían visibles. Para ello, es necesario estar suficientemente apartado de esa línea. De esta manera, la sombra de Júpiter se va a poder observar proyectada en el cielo a una cierta distancia angular de Júpiter, tanto mayor cuanto más apartados nos encontremos de la línea.

En la figura 5.9 podemos ver la situación en el caso de la Tierra. La sombra proyectada por Júpiter es un cono y se materializa desde el punto de vista observacional cuando la trayectoria de un satélite corta al cono. La distancia angular desde Júpiter a la que esto ocurre es distinta para cada satélite. Podemos definir, por tanto, una sombra distinta, que se proyectará aproximada-

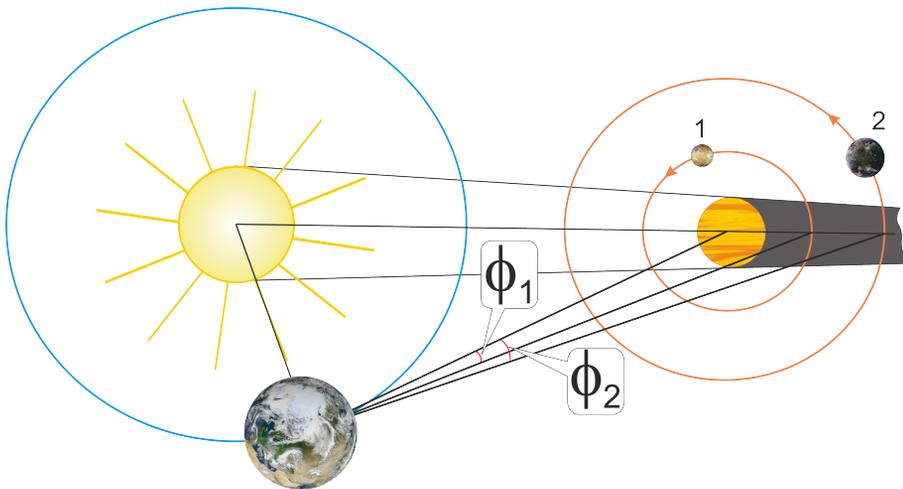


Figura 5.9: Esquema de la situación del cono de sombra proyectado por Júpiter visto desde la Tierra. Se presenta la configuración más ventajosa, en la que la distancia angular entre Júpiter y el eje del cono, a la distancia de cada satélite, es máxima. El ángulo ϕ_i , visto desde la Tierra, entre Júpiter y el eje de la sombra a la distancia del satélite i es mayor cuanto mayor es el radio orbital del satélite.

mente como un círculo, para cada uno de ellos. La distancia angular desde Júpiter a la que podemos observar la sombra, es decir el ángulo ϕ_i que forma Júpiter con su sombra visto desde la Tierra, varía entre $20''$ para Io (el satélite más interno) y $93''$ para Calisto (el satélite más externo). Puesto que el diámetro aparente de Júpiter es de unos $36''$ en esta configuración óptima, la sombra de Júpiter a la distancia a la que se encuentran los satélites del planeta se puede llegar a encontrar apartada del mismo de manera considerable, incluso completamente separada en el caso de los satélites más alejados. La consecuencia es que los eclipses de los satélites pueden llegar a ocurrir a gran distancia angular de Júpiter, llegando a ser fenómenos muy notables y fácilmente observables. Este hecho fue inmediatamente apreciado y observado por Galileo.

Para ilustrar esta cuestión la figura 5.10 representa dos situaciones, con sus puntos de inmersión y emersión asociados. Dependiendo de la situación ambos fenómenos pueden ser observables, o tan solo uno de ellos. Las posiciones asociadas pue-

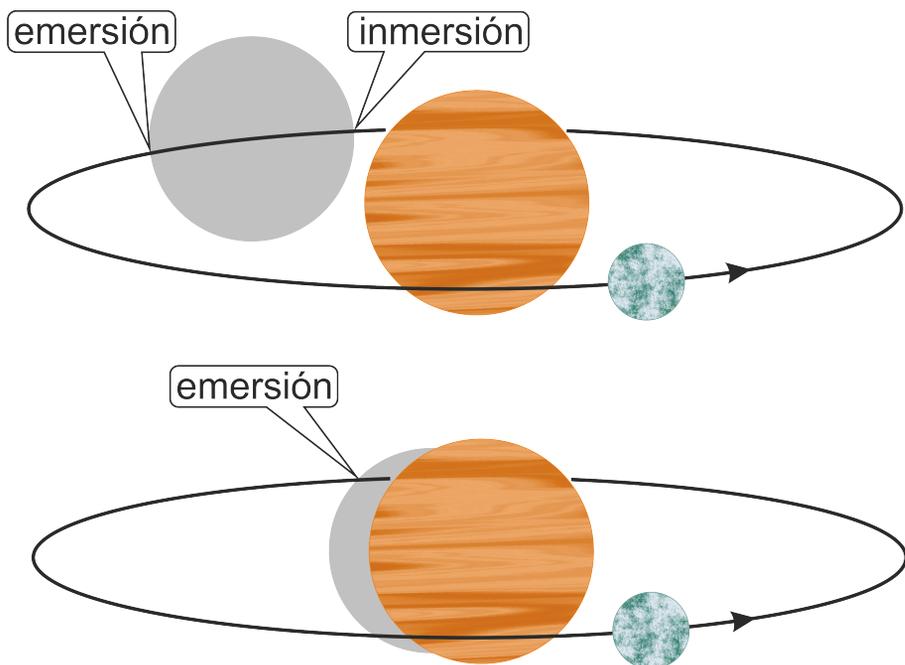


Figura 5.10: Dos situaciones que muestran el disco aparente de Júpiter, un satélite y la sombra proyectada por Júpiter en la dirección contraria al Sol a la distancia a la que se sitúa la órbita del satélite. Dependiendo de la situación de la sombra proyectada con respecto al disco de Júpiter, va a ser posible observar dos fenómenos o solo uno de ellos. En el caso de la inmersión, el satélite se sumerge en la sombra, mientras que en la emersión el satélite sale de la sombra (téngase en cuenta el sentido de movimiento de los satélites, indicado por la flecha).

den ocurrir a distintas distancias del planeta según la localización de la sombra que proyecta Júpiter a la distancia a la que se encuentra el satélite.

Los fenómenos descritos ocurren continuamente en el cielo, más frecuentemente para los satélites más interiores a Júpiter (por moverse más rápidamente). A modo de ejemplo, en el apéndice se pueden encontrar tablas con los eclipses correspondientes a los años 2022-2024, visibles desde Madrid (se han excluido aquellos que no son visibles desde Madrid por no ser suficientemente de noche, no estar Júpiter suficientemente por encima del horizonte, u ocurrir el fenómeno demasiado cerca del borde o limbo de Júpiter). Las tablas también son válidas para otras

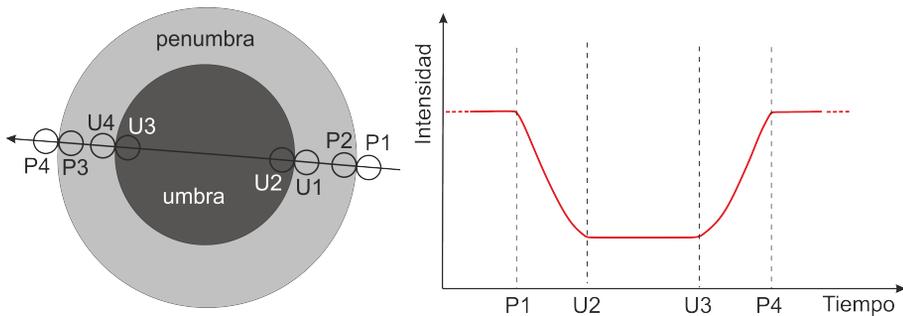


Figura 5.11: Panel izquierdo: progresión de un satélite que sufre un eclipse, con su ingreso en la penumbra y en la umbra, y su posterior salida. Se marcan las configuraciones de los diferentes *contactos*. P se refiere a un contacto exterior o interior con la penumbra, mientras que U hace referencia a la umbra. El eclipse total transcurre entre los instantes asociados a los contactos U2 y U3. La situación mostrada se refiere a un eclipse central: el satélite pasa cerca del eje de la sombra. Existen situaciones en las que el eclipse ocurre muy fuera del eje, de manera que algunos de los contactos no ocurren. Para que exista un eclipse han de ocurrir al menos los contactos P1 y P4. Si los contactos con la umbra no se dan se habla de un eclipse penumbral. Panel derecho: evolución de la curva de luz en un eclipse como el mostrado en el panel izquierdo. Se indican los instantes asociados a los contactos P1 y P4 (comienzo y final del eclipse), y U2 y U3 (comienzo y final del eclipse total). Los instantes observados asociados a la inmersión y emersión ocurrirán en algún momento entre los contactos P1 y U2, y los contactos U3 y P4.

localidades, siempre que Júpiter se encuentre a una altura adecuada sobre el horizonte. Más información en las páginas web de algunas instituciones astronómicas, por ejemplo:

- Institut de Mécanique céleste et de calcul des éphémérides (IMCCE), Observatorio de París, <https://www.imcce.fr>,
- Sky and Telescope (S&T), <https://www.skyandtelescope.com>,
- Agrupación Astronómica de Madrid (AAM), <https://www.aam.org.es>,

donde hay disponible información junto con generadores *online* de efemérides de fenómenos para cualquier localidad, datos sobre las circunstancias de los eclipses, y diversa información útil.

En la figura 5.11, panel izquierdo, se representa esquemáticamente la evolución típica de un satélite a medida que penetra

en la sombra proyectada por Júpiter. Esta situación es ideal, ya que la trayectoria pasa por el centro de la sombra, lo cual corresponde a duración máxima del eclipse. En general, la trayectoria puede transcurrir a cualquier distancia del centro (incluso, para los satélites más externos y dependiendo de las circunstancias orbitales, la trayectoria podría ni siquiera cortar a la sombra).

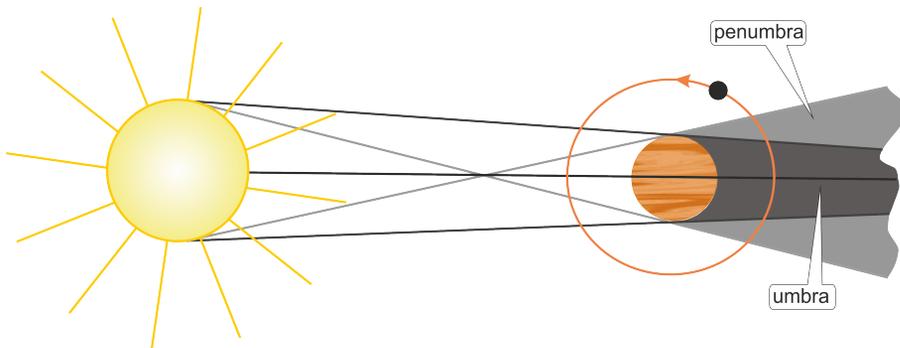


Figura 5.12: Esquema de la situación de la penumbra y umbra, con sus superficies límite, y relación geométrica con el Sol y Júpiter. La órbita de un satélite corta tanto a la umbra como a la penumbra, dando lugar en el cielo a sendos círculos imaginarios concéntricos.

Una característica de la sombra es que, en realidad, presenta dos regiones concéntricas, la *umbra* y la *penumbra*. Esta estructura es general para cualquier cuerpo del Sistema Solar (ya sea la Tierra, la Luna, Júpiter o cualquier otro), o en circunstancias de la vida cotidiana en las que una fuente de luz ilumina un objeto. La umbra es completamente oscura (geoméricamente no debería llegar ningún rayo de luz solar a esta región). La penumbra presenta una iluminación parcial que disminuye desde el borde exterior hasta extinguirse en el borde interior (borde de la umbra). Consideremos un observador hipotético de tamaño despreciable que se sumerge poco a poco en la sombra de Júpiter. Justo antes el observador se encontraría iluminado completamente por el Sol. A medida que se introduce en la región posterior de Júpiter el observador verá como el Sol (que, aunque pequeño, posee un tamaño finito) comienza a ser ocultado por Júpiter. La iluminación solar que recibirá el observador se verá

progresivamente disminuida en una fracción que dependerá de la cantidad de superficie solar visible desde su posición. En la penumbra el disco solar se encuentra parcialmente oculto por Júpiter. La iluminación en la penumbra disminuye progresivamente hasta el punto en el que el disco solar es completamente ocultado por Júpiter: el observador entra en la umbra, en la que permanece hasta que vuelve a salir de la misma, y emerge nuevamente durante un proceso más o menos simétrico. La figura 5.12 describe esquemáticamente la geometría de la penumbra y la umbra, y cómo se definen sus bordes. Téngase en cuenta que esta figura describe la situación en un plano que pasa por el centro del Sol y de Júpiter; en realidad, tanto umbra como penumbra son objetos tridimensionales con forma cónica.

5.4. Curvas de luz

La curva de luz de un satélite durante un eclipse refleja la evolución en el tiempo de la luz solar reflejada por el satélite hacia la Tierra. Un ejemplo de curva de luz se encuentra representado en la figura 5.11, panel derecho, tanto en su etapa de inmersión como de emersión (hay que tener en cuenta que muchas veces no es posible observar los dos fenómenos de un eclipse, sino tan solo uno de ellos). La estructura de una curva de luz no es sencilla en general. Para su interpretación nos valdremos de los llamados *puntos de contacto*. En el panel izquierdo de la misma figura se indica la definición de estos puntos de contacto sobre la sombra proyectada (en el gráfico se representa la sombra aislada. En realidad el disco aparente de Júpiter puede «tapar» la sombra total o parcialmente). U1, U2, U3 y U4 corresponden a puntos de contacto del borde del satélite con la superficie del cono de umbra, mientras que P1, P2, P3 y P4 corresponden a la penumbra. Los números 1-4 indican contactos sucesivos en el tiempo (la trayectoria de un satélite eclipsado transcurre de oeste -derecha- a este -izquierda-). P1 es el primer contacto, con el que se inicia el eclipse, mientras que P4 es el último contacto, con el que finaliza el eclipse. El contacto U2 está asociado a la inmersión completa del satélite en la umbra,

mientras que U3, también medible, corresponde al comienzo de la emersión. Veremos que, idealmente, será necesario determinar visualmente los momentos de los contactos P1, U2, U3 y P4. En el panel derecho de la figura 5.11 se indica la correspondencia entre algunos de los puntos de contacto y la curva de luz.

Las curvas de luz son fundamentales para la mejora de los modelos dinámicos, ya que sirven de conexión entre la realidad observada y el modelo matemático sobre el movimiento. De ahí el interés científico en obtener datos observacionales de las curvas de luz de los eclipses.

5.5. El estudio científico de los eclipses

Las observaciones modernas de los eclipses de los satélites de Júpiter se realizan mediante las llamadas *técnicas fotométricas*. Mediante estas técnicas se recoge en el telescopio la luz que se recibe del satélite ocultado en función del tiempo, durante un cierto intervalo de tiempo que incluye las fases del eclipse (tanto su etapa de inmersión como de emersión, en caso de que ambas sean visibles; en general sólo una de ellas lo será). De esta manera se obtiene la curva de luz como una función $I(t)$, donde I es la intensidad de luz y t el tiempo. La intensidad se mide con respecto a una situación anterior o posterior al eclipse, de manera que $I(t)$ varía entre los valores 0 (satélite completamente sumergido en la sombra de Júpiter) y 1 (satélite completamente iluminado por el Sol). El instrumento que recoge la luz puede ser un fotómetro fotoeléctrico, una cámara reflex o una cámara astronómica. La calibración de la instrumentación de cara a la reducción de los datos recogidos es delicada y requiere experiencia.

Aunque la actividad de la fotometría es estándar en los observatorios astronómicos, los astrónomos aficionados con suficientes conocimientos, instrumental adecuado y perseverancia también realizan estudios fotométricos de estrellas y cuerpos del Sistema Solar. La correcta medición de la curva de luz del eclipse de un satélite galileano constituye una valiosa aportación al

progreso de la astronomía y la mecánica celeste⁵.

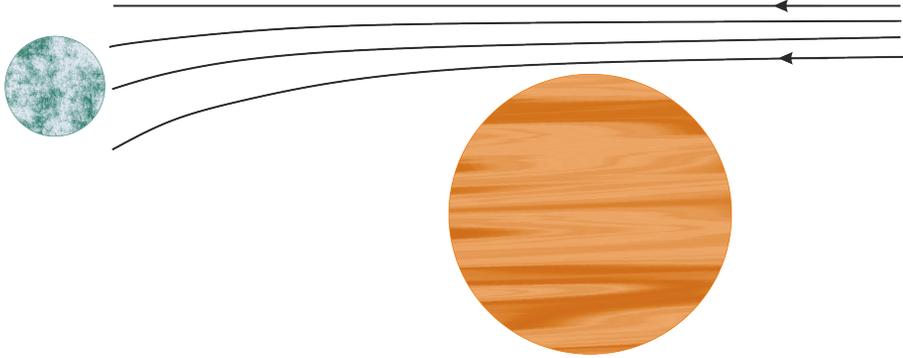


Figura 5.13: Debido a la existencia de una atmósfera inhomogénea en Júpiter, los rayos solares que iluminan un satélite a lo largo de un eclipse se refractan en forma de abanico. En consecuencia, la iluminación del satélite queda disminuida y modificada con respecto a una situación en la que no existiese atmósfera.

Pero el proceso que va desde la curva de luz hasta la posición del satélite en el cielo, que es lo que se pretende obtener, es largo. Es por ello que las medidas de fotometría se centralizan en instituciones astronómicas especializadas. Existen muchas circunstancias que afectan a la curva de luz observada en un eclipse. Por un lado, hay factores geométricos. Ya hemos visto que la estructura de la sombra que proyecta Júpiter posee dos zonas bien diferenciadas. Discutimos antes cómo la iluminación solar sobre un observador hipotético de tamaño despreciable disminuye progresivamente a lo largo de su trayecto por la penumbra. Ahora bien, los satélites de Júpiter no tienen un tamaño despreciable: diferentes puntos de su superficie se sitúan en fases diferentes del eclipse. Al principio del eclipse la parte adelantada del satélite comenzará a sumergirse en la penumbra, mientras que el resto aun permanecerá iluminado. A lo largo del eclipse la iluminación del satélite va a ser muy desigual, hasta que la totalidad del mismo se encuentre ocultada en la umbra. La intensidad de luz solar recibida en la Tierra

⁵Véase, por ejemplo, D. Galadí, *Fundamentos de fotometría astronómica*, Marcombo 2018.

es el resultado de sumar la luz reflejada en las distintas regiones del satélite y que se dirige hacia la Tierra. Además, debido a que, desde el satélite, el Sol y la Tierra no se encuentran en la misma dirección, puede haber una pequeña zona del satélite que, aunque teóricamente visible desde la Tierra, no reciba luz solar, por lo que no contribuirá a la luz total. En cualquier caso, puesto que en la Tierra solo se recibe la luz integrada a toda la superficie del satélite, se necesita un modelo teórico del eclipse para inferir cuál es la posición del centro del satélite a partir de su curva de luz, es decir, para hacer astrometría a partir de la fotometría.

Pero la cuestión es incluso más complicada debido a diferentes factores que exigen formular modelos teóricos para la curva de luz bastantes sofisticados:

- Las propiedades de reflexión o *albedo* de los satélites no son triviales. Las superficies de los satélites y planetas no son espejos: un rayo de luz que incide con un cierto ángulo no sale reflejado como un único rayo en un ángulo simétrico, sino distribuido en un cierto intervalo alrededor de un valor no simétrico con respecto al de incidencia. Las propiedades de reflexión dependen de la composición y topografía, las cuales en general varían de un punto a otro de la superficie (*albedo diferencial*). Un modelo de curva de luz sofisticado requiere un conocimiento de estos aspectos, así como del estado de rotación del satélite, que permitirá saber en todo momento qué cara nos aparece expuesta hacia la Tierra.

- Una fracción importante de los rayos que inciden en el satélite cuando se encuentra en la penumbra, especialmente cerca de la umbra, no vienen directamente de la superficie solar, sino que atraviesan la atmósfera de Júpiter. En este proceso sufren diversos procesos de refracción, dispersión y absorción que modifican la luz solar que llega al satélite (figura 5.13). Lo peor es que, aunque se conoce bastante bien la composición de la atmósfera joviana, hay efectos, como la formación de nubes altas o la existencia de ondas de presión en la atmósfera, que afectan a la luz que la atraviesa de una manera incierta.

5.6. Observación visual de un eclipse

A pesar de todo, existe otro método para medir los eclipses de los satélites de Júpiter: visualmente con nuestros propios ojos; eso sí, utilizando un telescopio, aunque sea modesto. Es decir, *como lo hacían Galileo y sus contemporáneos*. Si bien la observación visual es menos precisa, en un sentido que ahora discutiremos, aun constituye una manera de aportar información valiosa sobre estos fenómenos. Lo bueno de esto es que no es necesario tener un telescopio grande: cualquier telescopio actual, refractor o reflector, por pequeño que sea, es suficiente para realizar observaciones de los satélites galileanos, ya que cualquier telescopio o ayuda óptica moderna siempre va a ser mejor que el precario instrumento utilizado por Galileo en sus estudios. Debido al gran brillo de los satélites un telescopio pequeño puede llegar a resultar incluso más conveniente que uno grande y sofisticado.

Aparte de la ayuda óptica en forma de telescopio, que nos va a permitir enfocar nuestra atención en el satélite eclipsado, existe otro ingrediente muy importante que es necesario resolver: hay que disponer de una escala de tiempos basada en la hora *UTC*. No solo nos interesa discernir el eclipse: *hemos de saber en qué instante preciso de tiempo ocurre para que la observación sea útil*⁶. Para ello, es imprescindible garantizar una precisión de 1 segundo. Posteriormente discutiremos algunas ideas sobre cómo organizar la grabación precisa de la hora *UTC* en nuestra observación.

Existen dos tipos de observaciones visuales de un eclipse:

A. *Detección visual de los instantes de contacto*

1. El satélite ingresa en la penumbra (contacto P1), de manera que su luminosidad comienza a menguar.

⁶Esto es importante tanto si lo que pretendemos es contribuir con nuestra observación a la mejora de las predicciones teóricas, como si simplemente deseamos emular a Galileo determinando la longitud en la que nos encontramos a partir de esa observación.

2. El satélite desaparece completamente de nuestra visión, debido a que ha ingresado por completo en la umbra (contacto U2).

3. El satélite comienza a emerger desde la umbra, es decir, se atisba la primera luz reflejada por el mismo (contacto U3).

4. El satélite alcanza su máximo brillo tras salir de la penumbra (contacto P4).

Generalmente solo será posible observar o bien la inmersión del satélite en la sombra o bien la emersión. La observación de ambos eventos puede ser posible pero no en general. Los instantes P1 y P4 son más difíciles de estimar que los otros dos, debido a que resulta complicado determinar fielmente cuándo el brillo del satélite comienza a disminuir o alcanza su máximo brillo puesto que estos dos eventos son muy progresivos. Otro problema es que, por ejemplo, en una inmersión (los argumentos para una emersión son simétricos), desde que comienza hasta que acaba el eclipse, el brillo del satélite varía desde su valor nominal cuando se encuentra completamente iluminado, hasta un valor imperceptible cuando se encuentra completamente eclipsado. Pero dependiendo del telescopio, especialmente si es pequeño, el límite de brillo que podemos detectar con ese telescopio podría estar situado a un nivel demasiado alto, y es posible que dejemos de percibir luz del satélite cuando en realidad la inmersión no ha terminado en su totalidad. Se requiere pues una corrección al tiempo obtenido, que forma parte del proceso de reducción de datos y depende de nuestro instrumental.

B. *Medida del brillo o magnitud del satélite*

A medida que el satélite se sumerge en la sombra, o emerge de ella, su brillo varía de manera progresiva. En este método, mucho más completo pero también más difícil de poner en práctica, se utiliza un procedimiento basado en otros satélites o en estrellas situadas en el mismo campo visual, y de brillo conoci-

Cuadro 5.2. Magnitud estelar

Para medir el brillo de las estrellas y los cuerpos celestes se utiliza la *magnitud*, m . Se trata de un método basado en una idea del astrónomo griego Hiparco (190-120 a.C.), que clasificó el brillo de las estrellas en una escala de 1 a 6, correspondiendo 1 a las más brillantes y 6 a las más débiles para el ojo humano a simple vista.

La escala de brillos, en términos de energía recibida por segundo, que se aprecia en el cielo es enorme. Sin embargo, nuestros ojos no responden a esta energía de manera lineal. Un cierto incremento de energía (digamos, en número de fotones recibidos en un segundo) no produce la misma respuesta en nuestros ojos (y por tanto la misma percepción de incremento de brillo en nuestro cerebro) si la energía es baja que si la energía es alta. Nuestra respuesta no es lineal, más bien sigue lo que se conoce como *ley potencial*.

Con objeto de acomodar la enorme escala de energías en números sencillos se utiliza la escala logarítmica, que es una aproximación a la ley de potencias y, por tanto, se adapta de alguna manera a la respuesta de nuestros ojos. El logaritmo de un número es una operación que lo modifica y lo reduce a un intervalo mucho más estrecho, tanto si el número es muy pequeño como si es muy grande, resultando un número más manejable. Por ejemplo, el logaritmo en base 10 del número 1678456 es 6.22, mientras que para el número 0.000871 es -3.06. La magnitud m de un objeto que emite una intensidad de luz I (energía por unidad de tiempo, en una longitud de onda determinada o en un rango de longitudes de onda, y a la distancia a la que se encuentra) se define como:

$$m = -2.5 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

donde I_0 es la intensidad de un objeto estándar cuya magnitud se define como cero. Es sencillo ver a partir de esta ecuación que cuanto más brillante es una estrella, menor va a ser su magnitud. Por ejemplo, la magnitud del Sol es de -26.7, la de la Luna Llena de aproximadamente -12.7, la de la estrella Sirio (que es la estrella más brillante del cielo) -1.5, y la de los satélites de Júpiter oscila entre 4.5 y 6.0 cuando este se encuentra en oposición. Además, se puede deducir de esa ecuación que los brillos de dos estrellas o cuerpos con una diferencia de magnitud de 5 unidades se diferencian en un factor 100. Esta condición inspiró de hecho la ecuación anterior.

La magnitud visual máxima alcanzada por el ojo a simple vista es de alrededor de 6, pero esto depende mucho de las condiciones del lugar y la transparencia de su cielo. Por tanto, es teóricamente posible observar a simple vista los satélites de Júpiter más exteriores (Ganimedes y Calisto) cuando se encuentran lo más alejados posible de Júpiter. De hecho, hay

alguna evidencia de observaciones visuales realizadas antes del siglo XVII, e incluso observaciones anteriores a nuestra era, en la civilización china, de estos satélites.

A través de un telescopio, que aumenta considerablemente la capacidad colectora de luz con respecto a la del ojo a simple vista, es posible llegar a magnitudes mucho mayores que 6. Por ejemplo, un telescopio con un objetivo de 10 cm de diámetro, en condiciones normales de visibilidad, puede llegar a la magnitud 12. Las técnicas especiales (óptica adaptativa, periodos de exposición largos) permiten a los telescopios profesionales aumentar la magnitud límite observada. Por ejemplo, un telescopio de 10 m como el Keck, situado en Hawaii, puede llegar a la magnitud 26.

do, para interpolar visualmente y obtener el brillo del satélite a medida que progresa el eclipse.

Para realizar una estimación visual del brillo o *magnitud* (vease el cuadro 5.2) de un satélite se utiliza el llamado *método de Argelander*. En este método, muy utilizado en las estimaciones de brillo de estrellas variables por parte de astrónomos aficionados, comparamos el brillo del satélite con el de dos astros de referencia, que pueden ser otros dos satélites o estrellas de magnitud constante (en el caso de escoger un satélite como astro de comparación hemos de asegurarnos de que no esté él mismo sufriendo un fenómeno tipo eclipse), uno más brillante B y otro más débil D. Los astros de comparación han de estar en el mismo campo visual, y sus identidades han de ser conocidas (con idea de, posteriormente, averiguar sus magnitudes). Idealmente, deberían ser otros satélites o estrellas cercanas de tipo solar (de manera que su distribución de color sea comparable a la de los satélites). Entonces asignamos un grado a la comparación del satélite eclipsado con cada uno de los dos astros de comparación, utilizando unas reglas.

Para el astro de comparación *más brillante* que el satélite, B, asignamos el grado b según las siguientes reglas:

- Si el astro parece igual de brillante que el satélite, entonces $b = 1$.

- Si el astro parece más brillante que el satélite la mayor parte del tiempo que lo estemos observando, pero ocasionalmente parece más débil, entonces $b = 2$.
- Si el astro parece más brillante que el satélite la mayor parte del tiempo que lo estemos observando, pero rara vez parece más débil, entonces $b = 3$.
- Si el astro parece siempre más brillante que el satélite, entonces $b = 4$.
- Si el astro parece bastante más brillante que el satélite, entonces $b = 5$.

Para el astro de comparación *más débil* que el satélite, D, asignamos el grado d según las siguientes reglas:

- Si el astro parece igual de débil que el satélite, entonces $d = 1$.
- Si el astro parece más débil que el satélite la mayor parte del tiempo que lo estemos observando, pero ocasionalmente parece más brillante, entonces $d = 2$.
- Si el astro parece más débil que el satélite la mayor parte del tiempo que lo estemos observando, pero rara vez parece más brillante, entonces $d = 3$.
- Si el astro parece siempre más débil que el satélite, entonces $d = 4$.
- Si el astro parece bastante más débil que el satélite, entonces $d = 5$.

Una comparación del satélite S con los astros de comparación B y D se escribirá entonces de la forma:

$$(B)b(S)d(D)$$

Debemos efectuar estas comparaciones cada cierto intervalo de tiempo, digamos cada fracción de minuto hasta un par de minutos, dependiendo de la duración del eclipse. Junto con cada estimación hemos de anotar el instante *UTC* correspondiente a la mitad del intervalo temporal usado para la estimación (ver



Figura 5.14: Ejemplo de situación relativa de los satélites con respecto a Júpiter y una estrella situada en el mismo campo visual y que puede utilizarse como estrella de comparación (B). En este caso Io sufre un eclipse y los astros de comparación son una estrella y otro satélite (Europa, D).

más adelante). Una práctica habitual para facilitar las comparaciones visuales consiste en desenfocar ligeramente la imagen. Al final de la observación visual del eclipse obtendremos una lista de estimaciones, cada una de las cuales podemos transformar a magnitud visual utilizando la fórmula:

$$m = m_B + b \frac{m_D - m_B}{b + d}$$

donde m_B y m_D son las magnitudes conocidas de los astros de comparación. Estos pueden ser:

- Otro satélite. Hay que tener en cuenta las magnitudes de estos, que varían de manera ligera y lenta en función del tiempo.
- Una estrella del campo visual, suficientemente cercana al satélite eclipsado y no muy cercana a Júpiter (de manera que su luz no entorpezca la estimación), e idealmente de tipo solar. Este caso no es frecuente.

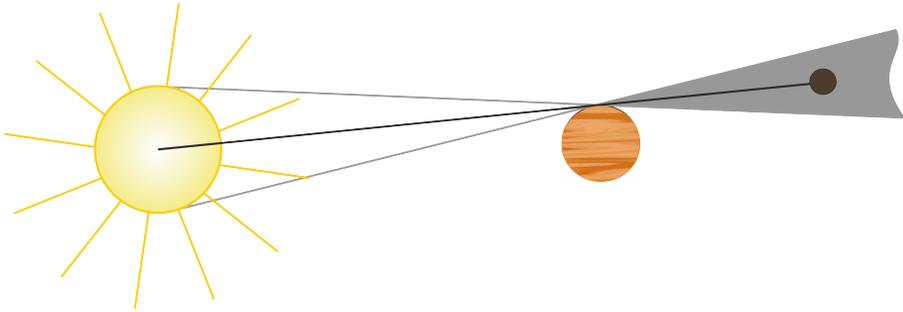


Figura 5.15: Configuración geométrica del Sol, Júpiter y un satélite asociada al llamado *eclipse medio*, EM: la línea que une el centro del Sol con el centro del satélite es tangente a la superficie visible de Júpiter. Aunque Júpiter no tiene superficie sólida, se considera como superficie aquella que define el límite superior de su capa de nubes. En los cálculos es necesario tener en cuenta el achatamiento ecuatorial de Júpiter y la orientación en el espacio de su eje de rotación. La región sombreada es la penumbra (compárese con la figura 5.12).

En muchas ocasiones no dispondremos de un astro de comparación más brillante o más débil. Este puede ser el caso, por ejemplo, al principio o final de una emersión o inmersión, respectivamente, cuando necesitaríamos un astro de comparación muy débil. Lo que haremos es utilizar el único astro disponible, anotando solo el grado b o d de acuerdo con las reglas anteriores según el caso (ya que la interpolación matemática anterior no tiene sentido). La información sobre estrellas de comparación de cada eclipse puede encontrarse, por ejemplo, en la página web de la *American Association of Variable Star Observers* (AAVSO, <https://www.aavso.org>), desde donde podemos descargar cartas estelares con estrellas de comparación. Con respecto a las magnitudes de los satélites de comparación, la aplicación «Multisat» de la web del IMCCE (ver bibliografía) proporciona esta y mucha más información, si bien este dato no lo tiene que aportar el observador sino que forma parte del proceso de análisis posterior.

En la observación visual de un eclipse hemos de tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Hay que elegir la observación de eclipses que ocurran lejos

del disco de Júpiter. Aunque los satélites son brillantes, queremos observar el brillo de satélites que acaban de comenzar a extinguirse, o justo comienzan a poder observarse. El brillo de Júpiter puede impedir completamente la observación. Los eclipses más favorables a este respecto involucran típicamente a los satélites más alejados, Europa, Ganimedes y Calisto, aunque no siempre. Para ello, es necesario elegir, a partir de los datos de una tabla de predicciones, aquellos eclipses que ocurran a distancias mayores que, como mínimo, un radio de Júpiter.

- Las predicciones hacen referencia al llamado instante del *eclipse medio* (ver diagrama en la figura 5.15), EM. Pero la duración del eclipse completo (inmersión o emersión) es larga: hay que comenzar a observar bastantes minutos antes y hasta bastantes minutos después, en una cantidad que depende del satélite: 10-15' para Io y Europa y 20-25' para Ganimedes y Calisto. Además las predicciones, aunque obtenidas con las teorías dinámicas más modernas, pueden ser imprecisas y diferir de la realidad incluso en unos cuantos minutos. Por ello, dan una orientación, pero la ventana de observación ha de ser amplia para evitar perder el fenómeno.

- Es imprescindible hacer una correcta identificación del satélite que va a sufrir el eclipse antes de comenzar a observar. Una mala identificación conducirá a la frustración y al fracaso de la observación. En particular, hay que tener cuidado con los posibles campos invertidos de nuestro telescopio (véase el capítulo 6). La aplicación disponible en la web de Sky&Telescope es una herramienta ideal para este propósito.

- Hay que adoptar una posición cómoda junto al telescopio. Vamos a estar muchos minutos con el ojo concentrado sobre el satélite. En la inmersión la atención ha de agudizarse en cuanto detectemos una disminución de brillo. La emersión es más complicada, ya que hemos de dirigir nuestra atención al punto en el que está previsto que aparezca poco a poco el satélite. Nuevamente es necesario consultar las predicciones para obtener una

idea previa de dónde va a aparecer el satélite.

- Es crítico disponer de una buena base de tiempos (reloj, móvil, GPS) que proporcione la hora *UTC* con precisión de 1 segundo. Esto es más que suficiente ya que, por un lado, la estimación visual de los contactos es relativamente imprecisa y, por otro, la estimación personal de cualquier evento súbito no va a poder ser mucho mejor que 1 segundo. Ahora bien, la hora mostrada en nuestro dispositivo ha de ser correcta al segundo. Una posibilidad es tener una aplicación en el teléfono móvil que muestre la hora obtenida de un estación oficial. Es muy conveniente la asistencia de una segunda persona encargada de la hora, a la que podamos reportar nuestra observación en tiempo real y que pueda anotar la hora asociada al instante estimado y cualesquiera otros comentarios sobre la observación del fenómeno. Otra posibilidad, si no disponemos de asistencia, consiste en grabar toda la observación, incluyendo marcas con la hora *UTC* al comienzo y al final de la grabación y alertas a viva voz de los diferentes fenómenos observados. De esta manera podremos recuperar los eventos y sus horas *UTC* asociadas con posterioridad, a base de analizar la grabación junto con un reloj de cuarzo o la misma aplicación móvil.

Incluso si tan solo deseamos reproducir el método de Galileo (ver la siguiente sección), o simplemente deseamos estimar los instantes de contacto, debemos anotar cuidadosamente los resultados y las circunstancias de la observación, tipo de instrumental utilizado, etc. Si llegamos a hacer estimaciones cuantitativas de los cambios de brillo durante el eclipse, hemos de anotar además los grados asignados en el método de Argelander. Aunque podemos realizar gráficas de la curva de luz con nuestras observaciones, es conveniente enviar las observaciones a las instituciones astronómicas dedicadas a ello y dejar en sus manos la reducción de datos. Un modelo de formulario de observación puede ser este:

Modelo de formulario de observación

NOMBRE DEL OBSERVADOR:

NOMBRE DE LOS ASISTENTES (si los hay):

DIRECCIÓN:

LUGAR DE OBSERVACIÓN:

COORDENADAS GEOGRÁFICAS (GPS): longitud, latitud, altura sobre el nivel del mar.

TELESCOPIO UTILIZADO: Tipo, apertura, distancia focal, aumentos.

ESCALA DE TIEMPOS: tipo de dispositivo y técnica utilizada.

RESULTADOS:

Estimación de instantes de contactos.

Estimación del brillo del satélite eclipsado (incluir todas las estimaciones efectuadas, los astros de comparación utilizados y los instantes de tiempo asociados).

OBSERVACIONES: calidad del cielo, presencia de Luna, crepúsculo, etc.

Los formularios de observación pueden enviarse, por ejemplo, a grupoestudios@aam.org.es.

5.7. Ejemplo de observación

En esta sección detallamos un ejemplo de cómo transcurriría la observación de un eclipse, con su aplicación a la obtención de la longitud geográfica. Hasta ahora hemos discutido con detalle qué son los eclipses, cómo y cuándo ocurren, y cómo se observan con medios técnicos sencillos pero modernos. Asimismo, hemos revisado la historia del fenómeno y su uso como método para estimar la longitud geográfica. Surge la pregunta, ¿es posible hoy en día reproducir las condiciones en las que se usaba en los siglos XVII y XVIII, con objeto de apreciar tanto sus dificultades prácticas como las precisiones alcanzadas?

La respuesta es sí, pero con algunas modificaciones. Imaginemos que estuviésemos en el siglo XVIII, y un grupo de astrónomos europeos realizara una expedición a un lugar cuya longitud, conocida de manera grosera, se deseara determinar con la

mayor precisión posible utilizando el método de Galileo. Los astrónomos (probablemente franceses) llevarían una tabla de predicciones referidas a algún meridiano estándar, con seguridad el meridiano de París, es decir, referidas a la hora solar media local de París. En los tiempos actuales usamos el meridiano de Greenwich y la hora solar media de este meridiano, llamada Tiempo Universal, o la versión moderna, el *UTC*, basado en el tiempo físico atómico pero adaptado al movimiento medio del Sol (véase el cuadro 5.4).

Los astrónomos tendrían primero que calcular la hora solar media del lugar a partir de métodos astronómicos. Esto lo harían utilizando, por ejemplo, medidas del paso del Sol por el meridiano local, que les proporcionaría el instante del mediodía local. Aplicarían luego la ecuación del tiempo, que corregiría el tiempo solar verdadero para dar lugar al tiempo solar medio. Además, mediante un reloj de péndulo o un cronómetro preciso, podrían reproducir este tiempo para su uso posterior. Los astrónomos tendrían una idea aproximada de la longitud del lugar, por lo que podrían estimar aproximadamente a qué hora solar media local podrían observar un eclipse. En nuestro caso podríamos replicar las medidas de culminación del Sol, necesarias para calcular esta hora local, aunque este no es un método muy práctico para nosotros hoy día. Por tanto, obtendríamos la hora media solar local⁷, *LMST*, a partir del *UTC* y del conocimiento de la longitud geográfica exacta de nuestro lugar, λ . El resultado es, evidentemente,

$$LMST = UTC \pm \lambda$$

que se correspondería de manera fiel con el resultado de aplicar los métodos disponibles en aquella época. Los astrónomos eran técnicamente muy hábiles en los métodos observacionales y los relojes de péndulo alcanzaban una precisión relativa de 0.01 % (desviaciones de 1 segundo en 10000) o mejores. Tras la invención del cronómetro, la precisión mejoró en al menos dos órdenes de magnitud. Naturalmente, en la ecuación anterior su-

⁷También conocida como *hora civil del lugar*.

Cuadro 5.3. La adopción del meridiano de Greenwich como referencia

Durante siglos, astrónomos y geógrafos emplearon meridianos origen diferentes según su época o su país. Ptolomeo utilizó un meridiano situado medio grado al oeste de Canarias. Siglos después, los árabes prefirieron hacer pasar su primer meridiano por el Estrecho de Gibraltar. Durante el siglo XIII, época de Alfonso X el Sabio, el meridiano de origen para astrónomos y navegantes fue el de Toledo. Al inicio de la Edad Moderna, los enfrentamientos entre portugueses y españoles por cuestiones territoriales, derivadas de las grandes navegaciones y descubrimientos de la época, llevaron al establecimiento de la llamada *línea de demarcación*, que fue utilizada en la práctica como un verdadero meridiano cero. En el siglo XVI, el célebre geógrafo Mercator introdujo el uso de un nuevo primer meridiano, el de las Azores. Los franceses, un siglo más tarde, comenzaron a elaborar sus cartas náuticas respecto al meridiano que pasa por la parte más occidental de la isla de El Hierro, un meridiano que, con los cálculos de la época, estaba situado exactamente 20 grados al oeste del que pasa por el Observatorio de París. De esta forma, sin ser el Meridiano Cero, París (2º E.) se convertía en el verdadero meridiano de referencia. Mientras tanto, a partir de 1675, los británicos hicieron pasar su primer meridiano por el recién creado Observatorio Real de Greenwich. En la segunda mitad del siglo XVIII, España decidió seguir el ejemplo británico y comenzó a establecer su primer meridiano en Cádiz, donde había sido fundado el Real Observatorio de la Marina en 1753.

El Meridiano de Greenwich fue pronto el más utilizado en las cartas náuticas de todo el mundo, siendo preferido porque a él estaban referidas las efemérides astronómicas publicadas en *The Nautical Almanac*, usadas en sus cálculos por gran parte de los navegantes de todo el mundo. No obstante, otros países con tradición marítima, como España, Portugal o Francia, continuaron utilizando en su cartografía náutica los meridianos de sus observatorios de referencia. En el caso concreto de España, durante todo el siglo XIX los meridianos origen usados por los marinos serían el Meridiano de Cádiz, y más adelante el de San Fernando, es decir, aquel que pasaba por los instrumentos meridianos del Real Observatorio de la Marina. Mientras tanto, durante la segunda mitad del siglo comenzó a ser utilizado el meridiano del Madrid, como referencia de la cartografía terrestre que estaba siendo levantada por el Instituto Geográfico.

En el último tercio del siglo XIX se constata un movimiento científico generalizado favorable a la unificación de signos, lenguajes científicos o medidas (Congresos Meteorológicos y Conferencia Internacional de Pesos y Medidas). Cuando se plantearon las primeras iniciativas para unificar las longitudes terrestres, no existía ninguna razón científica para preferir un meridiano a otro como punto de partida en el cómputo de las longitudes.

No obstante, la decisión sobre este asunto se vio retrasada por factores nacionalistas basados en el presunto prestigio que pudiese reportar a una nación el hecho de que en ella se determinase el Meridiano Cero.

Así estaban las cosas cuando, en octubre de 1883, se celebró la Conferencia Geodésica Internacional de Roma, a la que acudieron, entre otros, los directores de los principales observatorios y los delegados de todos los estados miembros de la *Europäische Gradmessung*, germen de la *International Association of Geodesy* (fundada en 1886). En esta Conferencia se acordó proponer la unificación del cómputo de las longitudes mediante la adopción de un primer meridiano común, que por razones prácticas debía ser el de Greenwich. Con esta propuesta se pretendía, además, animar al Reino Unido a participar en la unificación del sistema de pesos y medidas, introduciendo en su territorio el sistema métrico decimal que había sido adoptado por la mayoría de los países tras la Celebración de la Convención del Metro en París (1875).

Las propuestas acordadas por los participantes en la reunión de Roma encontraron un ambiente favorable en los ámbitos científicos y políticos. Un año después, los científicos discutieron de nuevo sobre este asunto con motivo de la celebración de la Conferencia Internacional de Washington para la adopción de un Primer Meridiano Universal y de una Hora Cosmopolita (1884). La delegación española, partidaria de la candidatura de Greenwich, planteó la conveniencia de que tanto el Reino Unido como los Estados Unidos hiciesen un esfuerzo científico similar aceptando el uso del sistema métrico decimal. En la discusión suscitada entonces, el delegado británico comunicó a sus colegas que en su país se estaban realizando los estudios pertinentes para la adopción definitiva del sistema métrico, hasta tal punto que, tras estudiar las propuestas de la Conferencia de Roma, iba a solicitar su adhesión a la Convención del Metro. Tras reconocer que oficialmente no había un interés especial por adoptar este nuevo sistema de pesas y medidas, aseguró a sus colegas que esto ocurriría tarde o temprano porque los científicos británicos estaban convencidos de las ventajas y de la excelencia del sistema métrico decimal. De esta forma, los representantes del Reino Unido convencieron a los asistentes en la Conferencia de Washington de que la adopción del meridiano de Greenwich como meridiano cero vendría acompañada, con el paso del tiempo, por la participación británica en la unificación de los pesos y medidas mediante la adopción del sistema métrico decimal. Pero lo cierto es que se impuso la conocida diplomacia británica: en la actualidad el resto de los países aún siguen esperando esta decisión.

En Washington se acordó proponer a los gobiernos representados en el Congreso, la adopción del Meridiano de Greenwich como Meridiano Magistral de Longitudes, a partir del cual la longitud se contaría en dos direcciones de 0 a 180 (la longitud este positiva y la oeste negativa). Estas decisiones afectarían directamente al cómputo de la hora, pues también se acordó que

el Día Universal debía empezar para todo el mundo a partir de la media noche media del Primer Meridiano, dividiéndose su duración en 24 horas que darían lugar al sistema de los husos horarios.

Las resoluciones aprobadas en Washington no tuvieron la rápida aplicación que sus partidarios hubieran deseado. Las reticencias de algunos importantes países a aceptar el Meridiano de Greenwich como el primero, especialmente las de Francia, las dificultades técnicas derivadas de la necesaria reforma de las efemérides y la existencia de cartas náuticas y mapas referidos a otros meridianos fueron retrasando año tras año la adopción de un sistema con el que, sin embargo, todos parecían estar de acuerdo.

Diez años más tarde, España, al igual que otros países europeos, aún no se había decidido a llevar a cabo unas reformas cuyos representantes habían aceptado en la Conferencia de Washington. Tampoco se había adoptado en nuestro país el sistema de los husos horarios según el cual España quedaba incluida, para el cómputo de las horas locales, en la llamada Hora del Oeste de Europa (Hora de Greenwich). En los últimos años del siglo XIX todavía era considerada en España la hora oficial como aquella correspondiente al meridiano de cada localidad, es decir, no había una hora oficial común para todo el territorio nacional que pudiese ser utilizada como hora local española. Únicamente los ferrocarriles tenían unificados sus horarios según la hora del Meridiano de Madrid.

Fue en 1901 cuando se decidió definitivamente el establecimiento de la hora oficial española de acuerdo con la del Meridiano de Greenwich. Unos años más tarde, en abril de 1907, se adoptó el Meridiano de Greenwich como primer meridiano para usos navales. Poco después, el Ministro de Marina ordenó a la Dirección de Hidrografía que todas las cartas náuticas grabadas a partir de entonces utilizasen el Meridiano de Greenwich como origen de longitudes. Esta misma disposición oficial ordenó que el Almanaque Náutico para 1910 fuese calculado utilizando Greenwich, y no San Fernando, como meridiano de referencia, y que los cronómetros de la Armada fueran arreglados a la hora del Meridiano de Greenwich.

Véase González, F.J., *La definición del meridiano cero en la cartografía histórica*. En *Revista PH - Instituto Andaluz de Patrimonio Histórico* (Sevilla), 77 Monográfico (febrero 2011), 66-67.

maríamos o restaríamos la longitud según corresponda, es decir según que estuviésemos al este o al oeste del meridiano de Greenwich.

La siguiente diferencia con la que nos encontraríamos es la exactitud de las predicciones. Obviamente las actuales son mucho mejores, lo que nos colocaría con ventaja. Pero probable-

mente, dadas las dificultades de las observaciones y sus consiguientes incertidumbres, este factor no sería excesivamente importante. En cualquier caso, cuando hablamos de predicciones (por ejemplo, las proporcionadas en las tablas del apéndice) nos estamos refiriendo al llamado eclipse medio, EM (véase figura 5.15). Como ya comentamos anteriormente, se trata de un instante asociado a una configuración geométrica particular del Sol, Júpiter y el satélite. Ahora bien, el instante en el que ocurre el EM no se corresponde exactamente con la mitad del eclipse fotométrico, que podemos definir como el instante en que la intensidad luminosa del satélite eclipsado ha disminuido a la mitad. Esto se debe a que el eclipse no es simétrico con respecto al EM, aunque este efecto tiene escaso impacto sobre los resultados obtenidos visualmente.

Vamos a considerar una hipotética observación de un eclipse de Calisto el 5 de septiembre de 2020 en la que se observa una inmersión. En la figura 5.16 se muestran dos configuraciones esquemáticas de este eclipse: arriba, antes de la inmersión y, abajo, justo después. El evento sería cómodo de observar ya que ocurre a una distancia suficientemente alejada del limbo de Júpiter (unos $50''$).

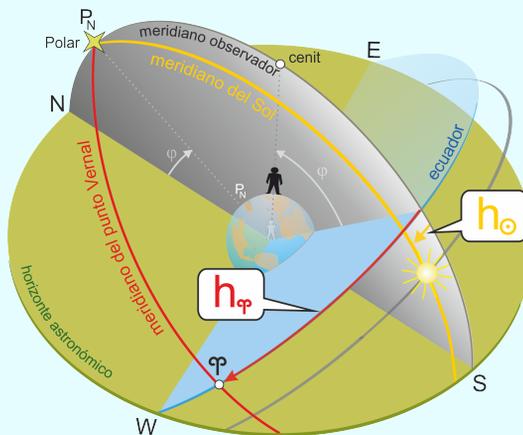
Contaríamos con un reloj con una buena base de tiempo *UTC*, con precisión de 1 s , que nos permitiría replicar las condiciones que podrían tener los astrónomos de finales del siglo XVII o principios del XVIII. Supongamos que la observación se realiza desde un lugar con longitud geográfica $\lambda = 3.7391^\circ W$, latitud geográfica $\varphi = 40.5135^\circ N$ y altura sobre el nivel del mar $H = 702\text{ m}$. La hora solar media local *LMST* la calculamos entonces a partir del *UTC* utilizando la ecuación anterior que, transformada a tiempo, es simplemente:

$$LMST = UTC - 14m\ 57s.$$

Antes de la observación estudiaríamos la configuración del eclipse, identificando el satélite eclipsado con idea de evitar errores en el momento de la observación. Como hemos comentado más arriba, la aplicación disponible en la web de Sky&Telescope puede ser de gran ayuda. Asimismo, en caso de ser posible el

Cuadro 5.4. La medida del tiempo

Hasta hace bien poco la definición del tiempo se encontraba ligada a fenómenos astronómicos. Desde tiempos ancestrales se utilizó la rotación de la Tierra para definir el intervalo de tiempo que llamamos un día. Como discutimos en el cuadro 1.1, la rotación de la Tierra alrededor de su eje es apreciada desde su superficie como una rotación del cielo con todos sus astros. Si utilizamos el Sol como punto de la esfera celeste para determinar cuándo se ha completado una vuelta obtenemos lo que actualmente se llama *Tiempo Solar Verdadero* (TSV): un día solar verdadero es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano del observador. También se puede utilizar un punto del cielo, fijo con respecto a las estrellas, para referenciar la rotación de la Tierra: un *día sidéreo* es el tiempo que transcurre entre dos pasos consecutivos del punto Vernal Υ por el meridiano del observador. Obtenemos así el *Tiempo Sidéreo* (TS). El día solar verdadero y el día sidéreo no coinciden puesto que desde nuestro punto de vista el Sol se mueve hacia el este por el cielo con respecto a las estrellas, que pueden considerarse como fijas al situarse a distancias tan lejanas de nosotros. Así que si hoy el Sol y Υ pasan simultáneamente por nuestro meridiano, mañana el punto Vernal pasará *antes* que el Sol pues este ha *huido* hacia el este mientras el cielo completaba su vuelta. El desfase es de 3m 56s cada día^a.



^aEl Sol da una vuelta completa a la eclíptica en un año. En un día recorre entonces 0.986° , que corresponden a 3m 56s, pues el cielo rota 15° cada hora.

Es claro entonces que el TS y el TSV determinan los ángulos h_{Υ} y h_{\odot} que se conocen como *ángulo horario de Aries* y *ángulo horario del Sol*, respectivamente. El primero de ellos aumenta 15° cada hora sidérea mientras que el segundo aumenta 15° cada hora solar verdadera.

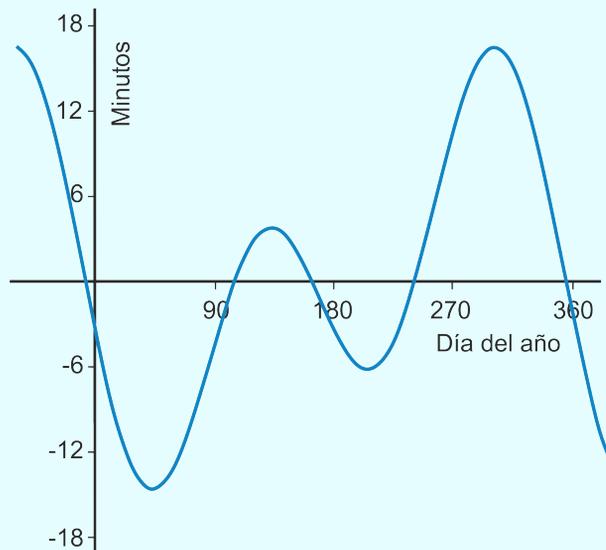
Aunque para los astrónomos el TS es más útil, la vida diaria se rige por una hora basada en el tiempo solar. Usar el TS para ordenar nuestro día supondría que la hora de hacer cualquier actividad rutinaria (entrar a trabajar, por ejemplo) iría variando progresivamente con respecto al Sol debido al desfase de 3m 56s diarios que hemos explicado. Con el paso de los meses acabaríamos entrando a trabajar a media tarde o veríamos salir el Sol a mediodía, etc. Así que no parece conveniente prescindir de la hora solar. Pero hay un problema con el TSV que hemos introducido más arriba: la *huida* del Sol hacia el este a lo largo de la eclíptica no tiene lugar a velocidad constante de 0.986° por día. Debido a que la órbita de la Tierra en torno al Sol es elíptica y no circular, nuestro planeta no se desplaza por ella a velocidad constante. De acuerdo con la segunda ley de Kepler lo hace más deprisa cuando está más cerca del Sol (en el invierno del hemisferio norte) que cuando está más lejos de él (en verano). Y, naturalmente, lo mismo le ocurre al Sol en su vuelta anual a la eclíptica cuando miramos las cosas desde la Tierra. Así que los 0.986° por día es solo un promedio.

A la fuente anterior de no uniformidad del TSV hemos de añadir aun otra más: la hora solar verdadera es el ángulo horario del Sol h_{\odot} que, como muestra la figura, se mide a lo largo del ecuador celeste^a. Pero el Sol recorre la eclíptica (no el ecuador celeste), que está inclinada un ángulo de 23.4° con respecto al ecuador. Así que en realidad hemos de tener en cuenta la proyección del desplazamiento del Sol a lo largo de la eclíptica sobre el ecuador celeste. Y esta proyección tampoco es uniforme. El resultado de estos efectos, ambos debidos a las características de la órbita de la Tierra, es que la escala de TSV no es uniforme. En otras palabras, 1 segundo de TSV (que es, evidentemente, 1 día solar verdadero dividido entre 86400) no dura siempre lo mismo a lo largo de todo el año y esto supone, como es obvio, un gran impedimento.

Para corregir estos problemas se definió un Sol ficticio, el *Sol medio*, que, por definición, se mueve con velocidad constante por el ecuador celeste. Los pasos consecutivos del Sol medio por el meridiano definen el *día solar medio*, y de ahí la hora solar media y el segundo solar medio. A las 12:00 de *Tiempo Solar Medio* (TSM) el Sol medio (no el real) cruza el meridiano local. La relación entre el Sol real y el Sol medio se establece mediante una expresión matemática muy precisa, obtenida aplicando la mecánica celeste,

^aObviamente pasado a horas y sumándole 12 al resultado, de manera que cuando el Sol está en el meridiano del observador son las 12:00 horas solares verdaderas.

llamada *ecuación del tiempo*, $ET = TSV - TSM$:



Esta ecuación nos permite pasar de TSV a TSM y viceversa. Por ejemplo, la figura nos indica que el 1 de enero $ET \sim -3$ minutos. Así que ese día el Sol pasará por nuestro meridiano a las 12:03 de TSM (el que indica nuestro reloj) aproximadamente. Ese día el Sol real va por detrás del Sol medio. Los relojes de Sol se basan en la sombra del Sol verdadero proyectada en una pantalla por el gnomon, a partir de la cual podemos leer el TSV local del lugar donde se sitúa el reloj de Sol. La aplicación de la corrección por la ecuación del tiempo proporciona el TSM local.

El TSM en un lugar situado sobre el meridiano terrestre de Greenwich se denomina *Tiempo Universal*, UT . El TSM de un lugar difiere del UT en una cantidad igual a la longitud geográfica de ese lugar, λ (debidamente expresada en tiempo), de acuerdo con la expresión $TSM = UT \pm \lambda$. Naturalmente, restaremos la longitud si es oeste y la sumaremos si es este (en un instante dado es más temprano cuanto más al oeste estamos pues el cielo rota hacia el oeste con respecto a nosotros). Asimismo, la diferencia de hora de TSM entre dos lugares será igual a la diferencia de longitud $\Delta\lambda$ entre los mismos, siendo más temprano en el lugar situado más al oeste.

El TSM es entonces el más adecuado (comparado con el TS) para regir la vida diaria ya que, en principio, es un tiempo uniforme al haber definido el Sol medio precisamente para eliminar las faltas de uniformidad del Sol real. El precio que hemos tenido que pagar por ello, la ecuación del tiempo, no es algo que nos incomode en la vida diaria: el máximo de ET a lo largo

del año es de unos 15m y no parece que debamos preocuparnos porque el Sol se retrase o adelante esos 15 minutos con respecto a nuestro reloj. Sin embargo, nuestros problemas con la medida del tiempo no han terminado aun. Ambas horas, TS y TSM, se encuentran «atadas» a la rotación de la Tierra y esto supone un problema para las precisiones requeridas hoy en día porque la Tierra no rota con velocidad estrictamente constante. La Tierra rota cada vez más lentamente como consecuencia de las mareas ocasionadas por la Luna (un efecto conocido como *deriva secular*) y, además, superpuestas a la deriva secular la velocidad de rotación sufre fluctuaciones de un día para otro de origen no bien conocido y que llegan a ser de varios milisegundos al día. El resultado es, de nuevo, la falta de uniformidad de las escalas de tiempo, solar o sidéreo, haciéndolas, por tanto, inadecuadas para las aplicaciones científicas actuales.

La solución a este problema llegó al final de la década de los 50 del siglo XX con la invención del reloj atómico. Un reloj atómico utiliza transiciones atómicas entre dos niveles de energía del átomo de cesio como diapason para marcar intervalos de tiempo exactos. Así se ha definido la escala de *Tiempo Atómico Internacional*, TAI, que es uniforme y estable en un grado extraordinariamente elevado. Para que un reloj atómico actual adelante o atrase 1s es necesario esperar millones de años. Esto es lo que ha permitido, por ejemplo, el desarrollo del sistema de posicionamiento por satélite, el hoy omnipresente GPS, que sería completamente inviable utilizando escalas de tiempo ligadas a la rotación de la Tierra.

Aun así, no queremos olvidarnos del Sol porque nuestra vida, nuestra biología, está inevitablemente ligada a él. Además, el cálculo de efemérides astronómicas necesita la escala de tiempos UT pues es la que nos indica cuánto ha rotado la Tierra y, por tanto, cómo está orientada en el espacio con respecto a las estrellas fijas. Con este fin se creó una escala de tiempo atómico, el *Tiempo Universal Coordinado*, UTC, que se mantiene ligada a la escala UT. La rotación de la Tierra se monitoriza continuamente (de ello se encarga el *International Earth Rotation and Reference Systems Service* cuya sede está en París, <http://iers.org>) lo que permite establecer la hora UT con precisión. Por otro lado, la escala UTC se construye promediando el tiempo atómico fabricado con los relojes atómicos de una serie de laboratorios de referencia repartidos por distintos países del mundo (en España el organismo oficial encargado de esta tarea es el Real Instituto y Observatorio de la Armada, ROA, en San Fernando (Cádiz), concretamente su Sección de Hora). Cuando se observa que, debido a las irregularidades de la escala UT introducidas por la «defectuosa» rotación de la Tierra, la diferencia UT-UTC aumenta más de lo deseado modificamos la escala UTC (¡no podemos cambiar UT porque no podemos modificar la rotación de la Tierra!) introduciendo o restando un segundo, según sea necesario, de manera que la diferencia entre ambas escalas sea siempre menor de 0.9s. Este segundo

extra (añadido o restado) se conoce como *segundo intercalar* y cuando se necesita se introduce en el último minuto de junio o de diciembre. Desde la creación de la escala UTC hasta la fecha (enero de 2022) se han introducido 37 segundos intercalares, todos ellos positivos, es decir, añadidos y no restados a la escala UTC, lo que indica que las fluctuaciones actuales en la velocidad de rotación de la Tierra están alargando la duración del segundo solar medio con respecto al que se define para el TAI, que es rigurosamente constante.

En resumen, el tiempo que indica el reloj que lleva usted en su muñeca ahora mismo, y que habrá puesto en hora con las señales horarias emitidas por los medios de comunicación, es el tiempo UTC (naturalmente, modificado en un número entero de horas para tener en cuenta el huso horario en el que se encuentre, el horario de verano, etc.). Para la precisión de 1s necesaria en navegación astronómica, UTC y UT son indistinguibles.

uso de objetos de referencia para aplicar el método de Argelander, es necesario apuntar la situación y naturaleza de estos. En este ejemplo nos limitamos a obtener los tiempos asociados al comienzo y finalización de la inmersión. Durante la observación uno de los observadores se situaría en el telescopio, mientras que el otro se haría cargo de los tiempos. Para mayor seguridad se puede grabar el audio de la observación, con los comentarios tanto del observador como de su ayudante, y con señales temporales que conviene grabar al comienzo, durante y al final del evento, coincidiendo con minutos enteros de hora, con el fin de poder extraer las horas de los eventos al segundo en caso de que haya surgido algún problema. Nos prepararíamos 20 minutos antes de la predicción (esto es suficiente para Calisto), con objeto de poder afrontar imprevistos.

El observador informa al ayudante sobre el instante en el que comienza a percibir un cambio en el brillo del satélite. Debido a la turbulencia atmosférica es común que los objetos brillantes, como son los satélites galileanos, titilen (lo que técnicamente se denomina *centelleo*). A veces este fenómeno puede ser muy acusado. En caso de falsa alarma es necesario comentarlo durante la grabación. Asimismo, pueden existir dudas al final del evento a la hora de precisar el instante exacto en el que el satélite

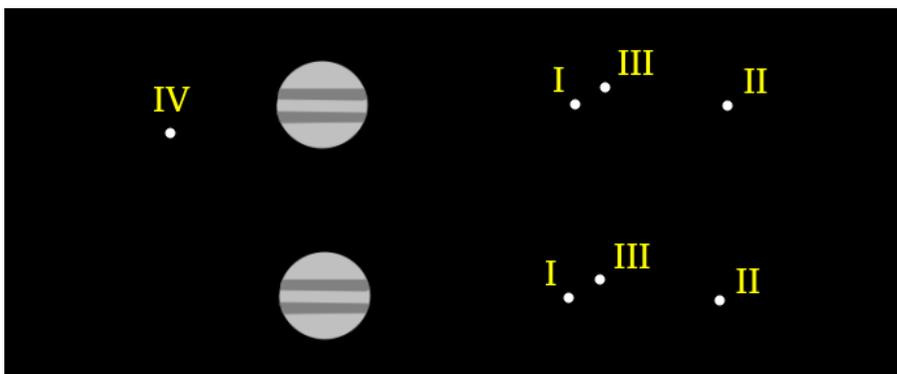


Figura 5.16: Configuraciones esquemáticas del eclipse de Calisto observado por los autores el 5 de septiembre de 2020. Arriba antes de la inmersión y abajo justo después de esta. En el esquema, el N está hacia arriba, y el E hacia la izquierda (visión directa). Se utiliza la notación de Galileo, basada en números romanos, para referirse a los satélites.

desaparece. Todo ha de ser comentado para poder determinar finalmente, y de manera fehaciente, los dos tiempos asociados al comienzo y final del evento. Supongamos que los instantes observados para el comienzo y la finalización de la inmersión fueron:

$$UTC_1 = 23 : 29 : 15, \quad UTC_2 = 23 : 43 : 30$$

Las horas solares medias locales observadas correspondientes serían entonces:

$$LMST_1 = UTC_1 - 14m 57s = 23 : 14 : 18$$

$$LMST_2 = UTC_2 - 14m 57s = 23 : 28 : 33$$

Estos instantes corresponderían a los tiempos que habrían medido los astrónomos del siglo XVIII con su reloj de hora local para el lugar cuya longitud geográfica pretendían determinar.

A continuación identificamos el instante intermedio t con el EM:

$$t = \frac{LMST_1 + LMST_2}{2} = 23 : 21 : 26$$

Comparando con la predicción, $t_{EM} = 23:36:13 \text{ UTC}$, descartando errores atribuibles a la base de tiempos, a condiciones atmosféricas deficientes, o a instrumentación de mala calidad y despreciando las correcciones introducidas por la apertura del telescopio, cualquier diferencia $t - t_{EM}$ se encontraría directamente relacionada con la diferencia de longitudes geográficas entre nuestro lugar de observación y el meridiano al que se refieren las predicciones (en este caso, el meridiano de Greenwich), siempre que demos por buena la predicción del evento. Pasando de tiempo a ángulo (multiplicando por 15), tenemos una estimación de la longitud, λ_{est} :

$$\lambda_{est} = 15 \times (t - t_{EM}) = -3.6958^\circ.$$

Comparando con el valor real, $\lambda = -3.7391^\circ$, obtenemos un error de 0.0433° . ¿A qué distancia Δd equivale este error en longitud, $\Delta\lambda = \lambda_{est} - \lambda$? Obviamente dependerá de la latitud geográfica⁸ φ . Tenemos:

$$\Delta d = R_\oplus \Delta\lambda \cos \varphi = 3.7 \text{ km}$$

donde $R_\oplus = 6378 \text{ km}$ es el radio ecuatorial de la Tierra y $\Delta\lambda$ ha de expresarse en radianes. Dada la imprecisión de la observación visual de eclipses, el error obtenido no estaría nada mal (2 millas náuticas).

⁸Pues los dos meridianos separados por una diferencia de longitud $\Delta\lambda$ se juntan a medida que aumenta la latitud hasta unirse en el polo.

Capítulo 6

Telescopios

Un telescopio es un instrumento óptico que se utiliza para observar objetos muy lejanos, obteniendo un aumento de tamaño aparente suficiente como para discernir sus detalles. Los objetos astronómicos se encuentran tan lejos que la distancia que nos separa de ellos no importa, siendo la angular la única magnitud relevante al observarlos ópticamente: hablamos del tamaño angular de un planeta, la distancia angular entre dos estrellas, etc. (figura 6.1). Los ángulos se miden en grados ($^{\circ}$), minutos de arco ($'$) y segundos de arco ($''$), siendo $1^{\circ} = 60'$, $1' = 60''$. Un arco máximo de cielo que se extienda de horizonte a horizonte cubre 180° . El grosor de un dedo meñique con la mano extendida ocupa aproximadamente 1° . El planeta Júpiter tiene un tamaño máximo de $50''$, mientras que el Sol abarca un tamaño angular de aproximadamente $32' \simeq 0.5^{\circ}$. Pues bien, el telescopio es básicamente un dispositivo que transforma los ángulos que apreciamos en el cielo en distancias reales en un plano focal, formando una imagen en el mismo que se puede observar con una lupa (el ocular).

En este capítulo pretendemos hacer una muy breve introducción al funcionamiento de los telescopios, los diferentes tipos disponibles, etc. El objetivo es facilitar la comprensión de los capítulos anteriores al lector no familiarizado con esta materia. En ningún caso pretendemos incluir aquí un estudio detallado que estaría completamente fuera de los objetivos de este libro.

El lector interesado en este tema puede recurrir a la ingente bibliografía disponible sobre esta materia¹.

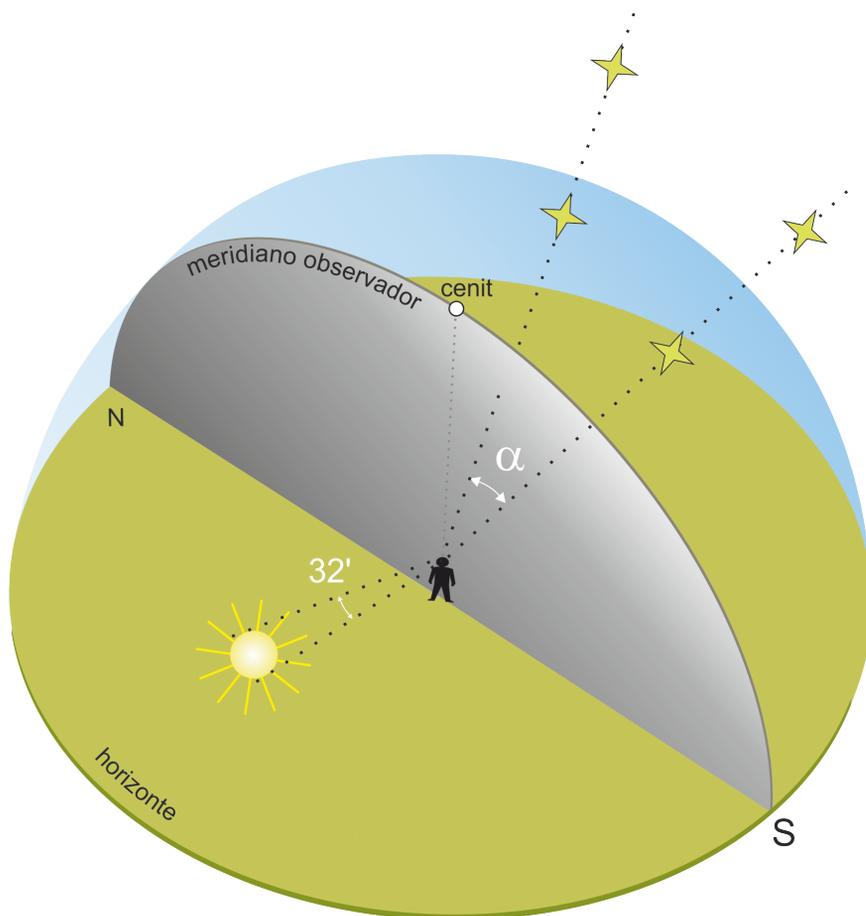


Figura 6.1: La distancia angular α entre las dos estrellas es independiente de la distancia real a la que ambos astros se encuentren de nosotros. El tamaño aparente del Sol es aproximadamente $32'$ (varía entre $31.4'$ y $32.6'$ a lo largo del año debido a la variación de la distancia que nos separa de él como consecuencia de la órbita elíptica que describimos a su alrededor).

¹Por ejemplo, *Fundamentos de los telescopios para aficionados*, de P. Villamiel, (Agrupación Astronómica de Madrid, separata técnica nº 1, 2015).

6.1. Partes de un telescopio

La parte principal de un telescopio es su *sistema óptico*. Consta de un *objetivo*, un *ocular* y un *tubo* que acopla estos elementos alineando en paralelo sus ejes ópticos (figura 6.2). Este sistema óptico ha de ser sostenido mecánicamente por la llamada *montura* (ver más adelante), que permite el movimiento controlado del tubo alrededor de dos ejes perpendiculares independientes facilitando de esta manera la orientación del telescopio hacia el punto del cielo que deseemos observar.

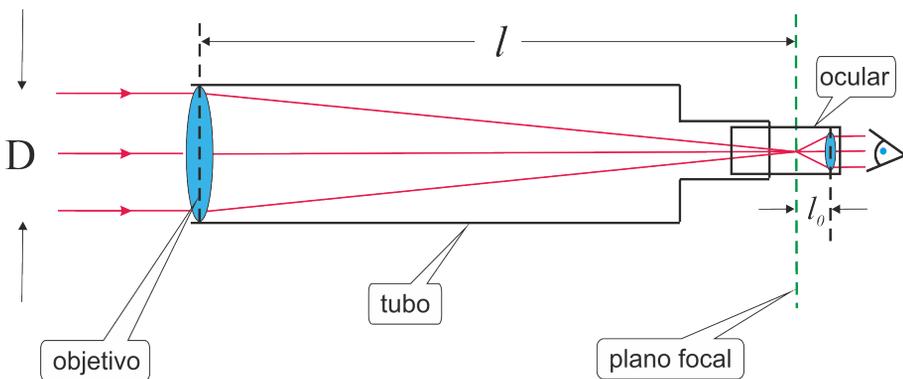


Figura 6.2: Partes principales del sistema óptico de un telescopio. Este esquema corresponde a un telescopio refractor.

El objetivo, que puede ser una lente o un espejo, dependiendo del tipo de telescopio del que se trate, forma imágenes sobre el *plano focal*. En un objetivo perfecto, libre de aberraciones ópticas, rayos de luz paralelos a la entrada del objetivo convergen en el plano focal como un punto. Un conjunto de rayos paralelos pero con distinta inclinación de entrada confluyen en un punto distinto sobre el plano focal. La imagen bidimensional así formada en el plano focal se examina luego con el ocular, que en esencia no es más que una lupa de aumento. Para que la imagen se vea nítida en el ocular, su foco ha de coincidir estrictamente con el plano focal del objetivo.

Las características básicas de un objetivo son: su *diámetro* o

apertura, D , y su *distancia focal*, l , siendo esta última la distancia entre el objetivo y el plano focal. A partir de estos parámetros se define el *número f* o *luminosidad* del objetivo como $f = l/D$. En astronomía de aficionado los diámetros oscilan en general entre los 5 *cm* y los 50 *cm*, mientras que los números f típicamente varían entre 3 y 15. La figura 6.2 muestra gráficamente la definición de D y l .

Se definen los *aumentos* del sistema óptico, x , como el cociente entre la distancia focal del objetivo, l , y la distancia focal del ocular, l_0 , es decir, $x = l/l_0$. El objetivo de un telescopio es naturalmente fijo, pero los oculares son de quita y pon, de manera que, utilizando diferentes oculares de distintas distancias focales, se puede tener acceso a un rango de aumentos. Los telescopios vienen provistos de un juego de oculares, siendo dos o tres el número típico. Las longitudes focales de oculares más usuales en un telescopio de aficionado son de 5 a 40 *mm*. Aumentos corrientes para observar campos estelares, cúmulos, nebulosas y galaxias oscilan entre 30 y 50. La observación de la Luna, el Sol y los planetas puede requerir aumentos mayores.

Otra característica importante de un telescopio, que depende a su vez de factores como los aumentos y el tipo de ocular, es el *campo de visión* del telescopio, que indica el diámetro en grados o minutos de arco de la imagen circular que vemos en el plano focal. Un campo típico para hacer observaciones generales del cielo de manera cómoda es 1° . La observación planetaria o lunar, que requiere mayores aumentos, reduce el campo de visión a fracciones de grado (decenas o incluso unidades de minuto de arco).

El telescopio de Galileo era de tipo refractor (más adelante explicamos los tipos de telescopio). Galileo construyó varios telescopios, con características que variaban de uno a otro. Números típicos eran: una lente objetivo de $D = 2$ *cm*, longitudes focales de $l = 80$ *cm*, luminosidades de $f = 40$, longitudes focales del ocular de 5 *cm*, aumentos de $x = 16$, y campos de visión de unos $15'$. Estos números son muy atípicos hoy en día. En particular, el campo era reducidísimo, lo que planteaba problemas a la hora de localizar y observar cómodamente los objetos celestes.

Los telescopios modernos suelen llevar un pequeño telescopio refractor adosado a su tubo principal, que asiste en la tarea de buscar un objeto en el cielo. En efecto, al ser este telescopio, llamado *buscador*, de una longitud focal mucho más corta, los aumentos que produce son mucho menores y, por tanto, el campo abarcado en el cielo es mucho más grande. Esto facilita la búsqueda de objetos, pues los ejes ópticos de telescopio y buscador son paralelos.

6.2. Tipos de telescopios

Los telescopios cuyo objetivo es una lente (como el esquematizado en la figura 6.2) se llaman *refractores*, mientras que aquellos cuyo objetivo es un espejo con superficie parabólica se llaman *reflectores*. Estos nombres vienen del hecho de que en los espejos la luz se refleja, mientras que en una lente la luz se refracta, atravesando la misma.

En las figuras 6.2 y 6.3 se representan cada uno de estos tipos de telescopios, junto con un esquema de la trayectoria de los rayos luminosos desde que entran en el telescopio hasta que salen por el ocular. Obsérvese que en el diseño de un telescopio reflector como el ilustrado en la figura 6.3, llamado *newtoniano*, la luz incidente sale reflejada del espejo en la dirección de donde vino. Para formar una imagen focal que pueda ser observada es necesario sacar esta luz fuera del eje óptico. Esto se consigue por medio de un espejo plano cuyo eje está inclinado 45° con respecto al eje óptico del espejo parabólico. Este espejo se llama *espejo secundario* (en contraposición a este, el objetivo se llama *espejo primario*).

En otro tipo de diseño de telescopio reflector, el llamado diseño *cassegrain*, el espejo secundario es un espejo cóncavo, con su eje óptico paralelo al del espejo primario. Este espejo secundario concentra los rayos luminosos en un plano focal perpendicular al eje óptico del telescopio y situado detrás del espejo primario. Esto requiere abrir un agujero en este último por donde salen los rayos para formar la imagen.

Existe un tercer tipo de telescopio, el llamado *catadióptrico*,

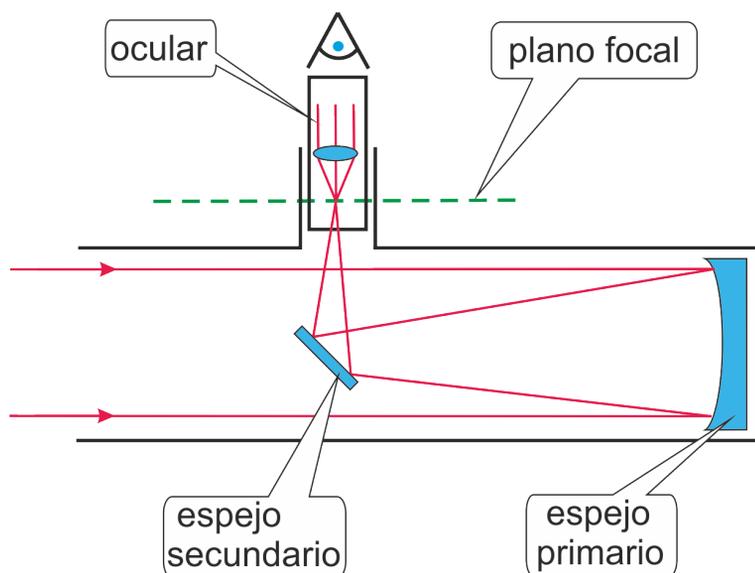


Figura 6.3: Esquema de un telescopio reflector newtoniano.

de tipo cassegrain pero que combina un espejo como objetivo con una lente correctora.

En general los telescopios reflectores son más utilizados hoy en día que los refractores en el campo de la astronomía de ocio, debido a su menor coste en relación a la capacidad colectora de luz, que viene dada por el diámetro del objetivo. Los telescopios profesionales modernos también son reflectores. La construcción de un espejo es menos costosa al tenerse que pulir y tratar un única superficie óptica (en contraste con las numerosas superficies ópticas de una lente objetivo diseñada para eliminar las aberraciones ópticas típicas de los sistemas refractores, como tratamos más adelante).

El primer telescopio reflector se debe a Newton. Disponía de un espejo de $D = 3.4$ cm, con una longitud focal de $l = 16$ cm y un ocular que le proporcionaba $x = 16$ aumentos. Aunque el diseño de Newton tardó en mejorarse, rápidamente comenzaron

a construirse telescopios newtonianos más grandes, debido a los avances en las técnicas de pulido de espejos.

6.3. Aberraciones

Las aberraciones son los defectos de la imagen observada en el telescopio causados por el diseño y características del sistema óptico. La aberración más importante en un telescopio refractor es la *aberración cromática*, debida a que la posición del plano focal (donde convergen los rayos) depende de la longitud de onda o color de la luz². Esto da lugar a imágenes coloreadas, especialmente en sus bordes y contornos.

En un telescopio reflector la aberración más importante es la *aberración esférica*, que tiene lugar cuando la superficie óptica reflectante (el espejo primario) no es exactamente parabólica, diseño más caro y difícil de conseguir que la simple superficie esférica (la cual se toma a veces como aproximación a la parabólica). Asimismo, en los telescopios reflectores el llamado *defecto de coma*, inherente a un espejo parabólico, también es importante, especialmente en telescopios de alta luminosidad. Debido a este defecto las estrellas aparecen como imágenes deformadas en lugar de esféricas (formando pequeñas *comas*).

En los telescopios reflectores antiguos la aberración esférica se evitaba a base de alargar la distancia focal del sistema, ya que entonces el defecto se reduce. La aberración esférica se puede reducir en gran medida en los diseños catadióptricos. Por último, la corrección de la aberración cromática en un telescopio refractor exige la construcción de lentes compuestas, con un elevado número de superficies ópticas internas, y de vidrios especiales que garanticen la focalización en el mismo punto de varios colores; en los sistemas acromáticos se hacen coincidir dos colores, en los apocromáticos tres y, en los llamados superacromáticos, cuatro. Estos últimos eliminan la aberración cromática casi por completo.

²Es decir, cada longitud de onda (cada color) se refracta en la lente de forma ligeramente diferente, de manera que cada color tiene un plano focal diferente.

6.4. Características de la imagen

Una de las propiedades más importantes de la imagen focal a nivel práctico es si resulta modificada o no al atravesar el telescopio. Conocer esto es útil con objeto no solo de orientarnos en el cielo al mirar a través del telescopio, sino al comparar las imágenes con los mapas celestes.

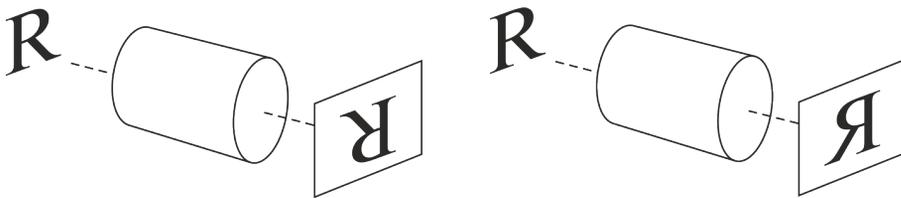


Figura 6.4: Posibles cambios en la imagen formada en el telescopio. A la izquierda inversión (rotación de 180°). A la derecha inversión especular.

Hay dos posibles modificaciones (figura 6.4): inversión (rotación de 180°) e inversión especular. Un objetivo tipo lente rota la imagen en 180° . Esta es la razón por la que en muchos mapas del cielo, de la Luna, de los planetas, y a veces en los diagramas de los satélites de Júpiter, el sur celeste aparezca arriba, el oeste a la izquierda, el norte abajo y el este a la derecha, en lugar de la orientación usual con el norte arriba y el sur abajo.

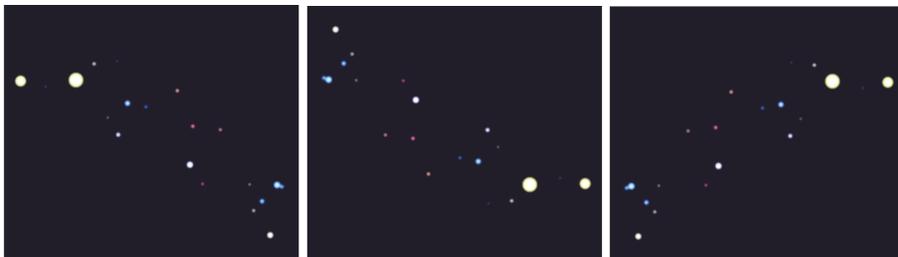


Figura 6.5: A la izquierda la imagen real que verían nuestros ojos. En el centro la imagen a través de un telescopio reflector newtoniano. A la derecha la imagen a través de un refractor dotado de prisma erector o de un telescopio tipo Cassegrain.

Por el contrario, un objetivo tipo espejo produce una imagen especular del objeto observado. Sin embargo, en un diseño newtoniano esta inversión ocurre también en el espejo secundario,

por lo que la imagen final es real y no especular. En cualquier sistema (buscador o telescopio) dotado de prisma erector (que consiste en un espejo que inclina la luz que sale de la lente en 45°), se añade una imagen especular en el plano focal a la imagen que proporciona el objetivo. Hay que tener en cuenta este hecho al comparar los campos estelares observados con los de un mapa estelar. La figura 6.5 resume dos ejemplos de campos estelares vistos a través de un telescopio refractor dotado de prisma erector y un telescopio reflector tipo Newton.

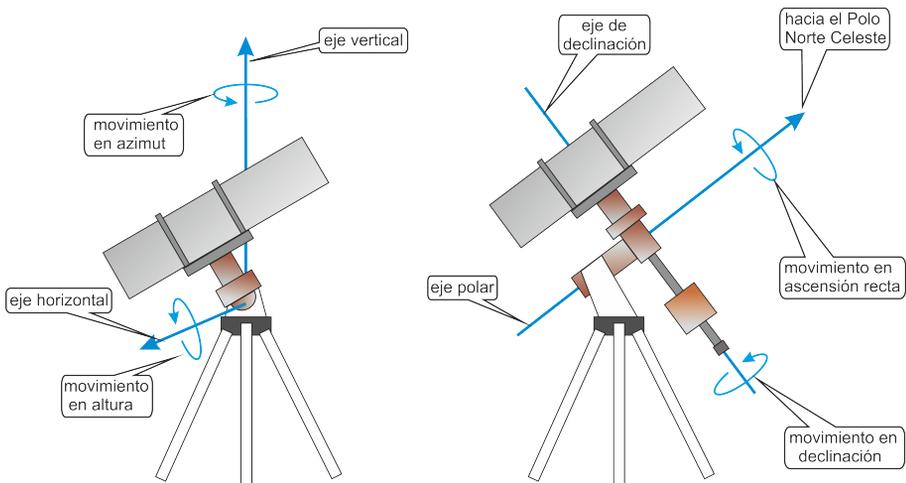


Figura 6.6: Montura altazimutal (izquierda) y montura ecuatorial (derecha).

6.5. Monturas

El tubo óptico de un telescopio viene acoplado a una montura que le permite moverse y apuntar al cielo de manera controlada. En esencia, una montura consta de dos ejes perpendiculares alrededor de los cuales el tubo puede rotar independientemente. La rotación alrededor de cada uno de los dos ejes mide uno de los dos ángulos necesarios para orientar el telescopio hacia un punto concreto del cielo.

Según el tipo de coordenadas que queramos utilizar (véase el cuadro 1.1), la orientación de los ejes de la montura con res-

pecto a la horizontal varía (figura 6.6). Así, si estamos utilizando coordenadas horizontales (azimut *y* altura), uno de los ejes es vertical y el otro horizontal. Las monturas se llaman en este caso *monturas altazimutales*. Por el contrario, si usamos coordenadas ecuatoriales (ascensión recta y declinación), los ejes se orientan uno en dirección al polo celeste (que en el hemisferio norte casi coincide con la estrella Polar, como ya hemos explicado en este libro) y el otro en dirección perpendicular. Estas monturas se denominan *monturas ecuatoriales*.

Capítulo 7

Apéndice. Tabla de eclipses 2022-2024

En este apéndice recogemos información sobre eclipses cuya observación es favorable para los años 2022-2024. Aunque la hora a la que ocurre un eclipse es universal, su visibilidad está condicionada por el hecho de que Júpiter esté por encima del horizonte en una localidad determinada, así como que el Sol se encuentre por debajo del horizonte. La selección de fenómenos se ha realizado para la posición de Madrid, aplicando las siguientes condiciones: altura del Sol sobre el horizonte de Madrid ("h Sol") menor que -10° , altura de Júpiter ("h Jup") mayor que 8° , y distancia del satélite al limbo de Júpiter ("Dist") mayor que 0.1 veces el radio de Júpiter. Para otras ciudades españolas las tablas siguen siendo válidas, pero las alturas del Sol y Júpiter pueden variar hasta unos pocos grados con respecto a las indicadas.

Téngase en cuenta que la noche cerrada tiene lugar en el intervalo situado entre los dos crepúsculos astronómicos (altura del Sol igual a -18°), por lo que eclipses que sucedan con alturas del Sol negativas pero mayores que -18° tendrán lugar durante el crepúsculo (en estas condiciones el cielo se encuentra ligeramente iluminado y la observación no es favorable, pero aun es posible). En la selección de eventos no se ha tenido en cuenta la situación de la Luna (cuya presencia puede llegar a

entorpecer la observación si se sitúa muy cerca de Júpiter). La hora *UTC* mencionada se refiere al *eclipse medio*, EM. Por tanto, la observación hay que comenzarla unos minutos antes de la hora indicada (10-15 minutos en el caso de Io y Europa, y 20-25 minutos para Ganímedes y Calisto), y acabarla unos minutos después. La duración de los fenómenos es variable, desde unos 5 minutos para Io hasta 20 minutos para Calisto.

La distancia "Dist" se expresa en radios aparentes de Júpiter y se considera que, cuanto mayor sea esta, menos molesto va ser el resplandor de Júpiter durante la observación. El parámetro "Elong" es la distancia angular entre el Sol y Júpiter. En "Evento" se codifica cada eclipse de acuerdo con la siguiente notación:

I, II, III, IV: código para cada satélite eclipsado (usando la notación de Galileo, que corresponde a Io, Europa, Ganímedes y Calisto, respectivamente).

Ec: indica que el fenómeno es un eclipse (si bien en las tablas no se menciona ningún otro tipo de fenómeno, como sombras, ocultaciones o tránsitos).

D: desaparición (inmersión) del satélite en la sombra de Júpiter.

R: reaparición (emersión) del satélite de la sombra de Júpiter.

Antes de cada evento es conveniente consultar la aplicación gráfica de la web de la publicación *Sky & Telescope* (<https://www.skyandtelescope.com>), que nos permitirá hacernos una idea de la identidad de cada satélite, localizar la posición del satélite eclipsado y, por tanto, en qué posición aparecerá / desaparecerá con respecto a Júpiter y al resto de satélites.

2022

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
5	19	03:26:36	IV.Ec.R	-14.8	09.5	56.6	2.9
5	31	03:48:49	I.Ec.D	-10.1	21.5	66.1	0.5
6	16	02:05:35	I.Ec.D	-21.4	13.0	79.1	0.6
6	19	02:05:33	II.Ec.D	-21.4	15.0	81.6	1.5
7	9	02:16:12	I.Ec.D	-21.8	30.4	98.8	0.7
7	15	00:55:38	III.Ec.R	-27.7	20.1	104.1	1.0
7	21	01:45:59	II.Ec.D	-26.0	33.2	109.7	1.4
7	22	01:51:26	III.Ec.D	-25.9	34.6	110.6	2.6
7	25	00:32:36	I.Ec.D	-30.0	22.9	113.4	0.6
7	25	02:06:02	IV.Ec.D	-25.3	38.7	113.4	4.3
7	25	03:34:32	IV.Ec.R	-15.1	49.3	113.5	3.7
8	1	02:26:35	I.Ec.D	-24.8	45.2	120.1	0.6
8	8	04:20:34	I.Ec.D	-10.8	50.8	127.1	0.5
8	9	22:49:07	I.Ec.D	-30.2	15.4	128.8	0.5
8	14	22:54:50	II.Ec.D	-32.1	20.2	133.9	1.0
8	17	00:43:10	I.Ec.D	-36.0	39.8	136.0	0.4
8	22	01:31:55	II.Ec.D	-35.2	48.0	141.2	0.9
8	24	02:37:16	I.Ec.D	-29.3	51.3	143.3	0.3
8	25	21:05:47	I.Ec.D	-22.7	08.1	145.2	0.3
8	26	21:56:29	III.Ec.D	-30.0	18.4	146.2	1.4
8	29	04:09:10	II.Ec.D	-16.9	43.2	148.6	0.7
8	31	04:31:25	I.Ec.D	-13.5	38.9	150.8	0.2
9	1	22:59:58	I.Ec.D	-38.7	33.9	152.7	0.1
9	3	01:57:23	III.Ec.D	-36.6	50.9	153.9	1.1
9	10	21:36:23	I.Ec.R	-32.6	26.1	162.3	0.1
9	15	22:43:42	II.Ec.D	-42.7	40.1	167.8	0.1
9	16	05:02:04	I.Ec.R	-11.1	21.7	168.1	0.2
9	17	23:30:39	I.Ec.R	-46.8	46.5	170.1	0.3
9	23	03:56:14	II.Ec.R	-24.5	27.6	175.6	0.2
9	25	01:25:01	I.Ec.R	-46.7	46.9	177.5	0.4
9	26	19:53:37	I.Ec.R	-21.2	19.7	178.4	0.4
10	1	20:56:52	III.Ec.R	-34.0	34.1	174.1	0.5
10	2	03:19:31	I.Ec.R	-32.8	26.7	173.8	0.6
10	3	19:52:39	II.Ec.R	-23.3	24.8	172.0	0.6

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
10	3	21:48:08	I.Ec.R	-42.8	42.3	171.9	0.6
10	9	00:57:17	III.Ec.R	-53.8	42.9	166.3	0.9
10	10	22:30:48	II.Ec.R	-50.9	48.2	164.2	0.8
10	10	23:42:47	I.Ec.R	-56.4	48.1	164.1	0.8
10	18	01:09:03	II.Ec.R	-55.7	35.8	156.3	1.0
10	18	01:37:32	I.Ec.R	-52.5	31.4	156.3	0.9
10	19	20:06:15	I.Ec.R	-30.5	37.6	154.4	0.9
10	26	22:01:10	I.Ec.R	-52.2	48.3	146.6	1.1
11	2	23:56:10	I.Ec.R	-64.7	36.0	139.0	1.2
11	4	18:24:57	I.Ec.R	-14.9	32.3	137.1	1.2
11	4	19:45:38	II.Ec.R	-30.3	43.0	137.0	1.6
11	10	01:51:16	I.Ec.R	-56.4	114	131.5	1.3
11	11	20:20:05	I.Ec.R	-38.0	47.4	129.6	1.3
11	11	22:24:13	II.Ec.R	-59.5	42.8	129.5	1.7
11	13	18:18:08	III.Ec.D	-15.1	36.6	127.6	1.0
11	13	21:02:38	III.Ec.R	-46.2	47.7	127.5	2.5
11	18	22:15:18	I.Ec.R	-59.3	40.5	122.3	1.4
11	18	22:31:30	II.Ec.D	-61.8	38.5	122.3	0.2
11	19	01:02:47	II.Ec.R	-65.2	13.6	122.2	1.9
11	20	22:20:36	III.Ec.D	-60.4	38.9	120.2	1.2
11	21	01:03:47	III.Ec.R	-65.5	11.9	120.1	2.7
11	26	00:10:36	I.Ec.R	-70.5	18.1	115.1	1.5
11	27	18:39:26	I.Ec.R	-20.3	45.2	113.3	1.5
12	4	20:34:48	I.Ec.R	-42.4	44.6	106.3	1.6
12	6	19:38:47	II.Ec.R	-31.7	47.6	104.4	2.1
12	11	22:30:15	I.Ec.R	-63.1	25.2	99.5	1.6
12	13	19:47:27	II.Ec.D	-33.1	45.9	97.7	0.5
12	13	22:17:15	II.Ec.R	-60.9	26.2	97.6	2.2
12	20	18:54:36	I.Ec.R	-22.6	47.8	91.2	1.7
12	20	22:26:15	II.Ec.D	-62.0	20.3	91.0	0.5
12	26	18:34:03	III.Ec.D	-18.2	48.0	85.6	1.6
12	26	21:10:34	III.Ec.R	-47.8	29.9	85.5	3.1
12	27	20:50:08	I.Ec.R	-43.8	32.6	84.6	1.7

2023

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
1	2	22:37:35	III.Ec.D	-62.4	10.1	79.2	1.6
1	7	19:31:17	II.Ec.R	-27.3	39.1	74.9	2.1
1	12	19:10:05	I.Ec.R	-22.4	39.9	70.5	1.6
1	14	19:41:17	II.Ec.D	-28.0	34.5	68.7	0.4
1	14	22:09:08	II.Ec.R	-55.6	08.2	68.7	2.1
1	19	21:05:39	I.Ec.R	-43.1	17.2	64.4	1.6
2	4	19:25:39	I.Ec.R	-21.1	26.6	51.1	1.5
2	7	18:51:04	III.Ec.D	-13.9	31.1	48.7	1.0
2	8	19:20:00	II.Ec.R	-19.2	25.6	47.8	1.8
2	27	19:40:55	I.Ec.R	-19.2	11.6	32.7	1.3
7	1	03:31:32	III.Ec.D	-12.4	24.5	59.8	2.1
7	15	01:55:39	II.Ec.D	-24.3	15.4	70.8	1.3
7	21	02:14:45	I.Ec.D	-23.7	23.1	75.7	0.6
7	28	04:08:57	I.Ec.D	-10.6	48.8	81.6	0.6
8	6	00:31:36	I.Ec.D	-32.9	14.4	89.1	0.7
8	6	01:33:54	III.Ec.R	-30.5	26.2	89.2	1.5
8	13	02:25:43	I.Ec.D	-27.7	40.8	95.4	0.7
8	13	03:38:01	III.Ec.D	-18.3	53.3	95.4	2.5
8	16	01:32:53	II.Ec.D	-33.2	33.1	98.0	1.4
8	20	04:19:49	I.Ec.D	-13.2	62.2	101.7	0.7
8	23	04:08:10	II.Ec.D	-15.7	62.2	104.5	1.4
8	29	00:42:27	I.Ec.D	-39.8	32.8	109.9	0.6
9	5	02:36:33	I.Ec.D	-32.5	57.3	116.7	0.6
9	9	22:37:17	II.Ec.D	-39.6	17.9	121.4	1.2
9	12	04:30:39	I.Ec.D	-16.0	63.0	123.7	0.5
9	13	22:59:09	I.Ec.D	-43.1	25.1	125.4	0.5
9	17	01:13:14	II.Ec.D	-44.9	51.9	128.6	1.1
9	17	23:43:04	III.Ec.D	-47.2	36.6	129.5	1.8
9	18	01:33:39	III.Ec.R	-43.5	55.7	129.6	0.9
9	21	00:53:17	I.Ec.D	-47.6	51.2	132.7	0.4
9	24	03:49:25	II.Ec.D	-25.8	62.1	135.9	0.9
9	25	03:43:33	III.Ec.D	-27.1	62.3	136.9	1.6
9	28	02:47:28	I.Ec.D	-37.0	64.6	140.0	0.3
9	29	21:16:03	I.Ec.D	-36.4	18.0	141.9	0.3

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
10	5	04:41:41	I.Ec.D	-18.5	48.0	147.6	0.2
10	6	23:10:18	I.Ec.D	-53.1	44.9	149.5	0.2
10	11	22:20:42	II.Ec.D	-50.0	39.8	154.9	0.4
10	19	00:57:42	II.Ec.D	-57.0	63.9	162.8	0.2
10	21	05:08:55	I.Ec.R	-16.5	29.9	165.2	0.2
10	22	23:37:30	I.Ec.R	-60.6	59.3	167.2	0.2
10	23	19:48:10	III.Ec.D	-28.1	20.7	168.2	0.3
10	29	19:14:40	II.Ec.R	-23.1	19.2	174.8	0.2
10	30	01:31:58	I.Ec.R	-56.4	59.1	175.1	0.3
10	31	20:00:36	I.Ec.R	-32.3	29.6	177.0	0.4
11	5	21:52:22	II.Ec.R	-53.3	53.1	176.6	0.4
11	6	03:26:31	I.Ec.R	-39.0	35.3	176.4	0.5
11	7	05:36:07	III.Ec.R	-14.6	09.8	175.2	0.3
11	7	21:55:19	I.Ec.R	-54.2	54.8	174.5	0.5
11	13	00:30:19	II.Ec.R	-66.6	58.5	168.8	0.6
11	14	23:50:51	I.Ec.R	-68.0	61.4	166.5	0.7
11	16	18:18:32	I.Ec.R	-15.5	23.4	164.5	0.7
11	20	03:08:30	II.Ec.R	-45.0	26.7	160.7	0.9
11	22	01:44:39	I.Ec.R	-60.0	40.6	158.5	0.9
11	23	20:13:20	I.Ec.R	-37.9	49.6	156.6	0.9
11	29	03:39:32	I.Ec.R	-40.7	13.1	150.6	1.0
11	30	19:05:43	II.Ec.R	-25.4	43.2	148.8	1.2
11	30	22:08:15	I.Ec.R	-59.3	62.3	148.7	1.0
12	5	19:57:06	III.Ec.D	-35.2	54.6	143.2	0.8
12	5	21:40:04	III.Ec.R	-54.5	62.2	143.2	1.7
12	7	21:44:20	II.Ec.R	-55.3	61.9	141.0	1.4
12	8	00:03:16	I.Ec.R	-72.4	45.9	140.9	1.2
12	9	18:32:03	I.Ec.R	-19.1	43.9	138.9	1.2
12	12	23:58:58	III.Ec.D	-72.7	43.0	135.4	1.1
12	13	01:41:30	III.Ec.R	-64.0	24.0	135.4	1.9
12	15	00:23:06	II.Ec.R	-72.7	37.2	133.3	1.6
12	15	01:58:22	I.Ec.R	-61.5	19.2	133.2	1.3
12	16	20:27:10	I.Ec.R	-40.5	61.6	131.3	1.3
12	22	00:40:45	II.Ec.D	-72.2	28.5	125.8	0.2
12	23	22:22:21	I.Ec.R	-61.1	51.4	123.8	1.4
12	31	00:17:36	I.Ec.R	-72.9	26.0	116.5	1.5

2024

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
1	1	18:46:26	I.Ec.R	-19.8	59.1	114.7	1.5
1	1	19:00:55	II.Ec.R	-22.5	60.3	114.7	1.9
1	8	19:18:25	II.Ec.D	-24.7	62.1	107.7	0.5
1	8	20:41:45	I.Ec.R	-40.5	56.6	107.7	1.6
1	8	21:39:57	II.Ec.R	-51.5	48.2	107.6	2.0
1	15	21:57:19	II.Ec.D	-53.4	40.8	100.8	0.5
1	15	22:37:07	I.Ec.R	-60.2	33.5	100.7	1.6
1	16	00:18:57	II.Ec.R	-70.8	14.2	100.7	2.1
1	17	20:07:45	III.EcD	-32.5	56.8	98.9	1.9
1	17	21:48:45	III.Ec.R	-51.5	41.1	98.9	2.8
1	24	19:01:20	I.Ec.R	-18.7	60.9	92.3	1.6
1	25	00:10:26	III.Ec.D	-68.6	9.7	92.1	1.9
1	31	20:56:44	I.Ec.R	-39.2	41.6	85.8	1.6
2	2	18:55:52	II.Ec.R	-15.9	58.8	84.1	2.1
2	7	22:52:09	I.Ec.R	-57.3	15.5	79.4	1.6
2	9	19:12:39	II.Ec.D	-17.6	53.8	77.8	0.6
2	9	21:34:42	II.Ec.R	-44.2	29.0	77.7	2.1
2	16	19:16:25	I.Ec.R	-16.9	49.8	71.6	1.6
2	16	21:51:11	II.Ec.D	-45.5	21.5	71.5	0.5
2	23	21:11:49	I.Ec.R	-37.0	24.7	65.6	1.6
2	29	20:19:12	III.Ec.D	-26.1	31.2	60.6	1.6
2	29	21:59:53	III.Ec.R	-43.6	12.0	60.5	2.5
3	10	19:31:24	I.Ec.R	-15.0	34.5	52.4	1.5
3	12	21:27:46	II.Ec.R	-35.4	11.2	50.7	1.8
3	17	21:26:43	I.Ec.R	-33.9	8.6	46.7	1.4
4	2	19:46:08	I.Ec.R	-12.9	18.8	34.2	1.3
7	16	03:49:08	I.Ec.D	-11.7	19.6	42.7	0.2
8	1	02:06:24	I.Ec.D	-26.9	10.2	54.9	0.4
8	8	04:00:38	I.Ec.D	-14.9	35.9	60.5	0.4
8	9	01:30:53	II.Ec.D	-31.6	8.5	61.2	1.1
8	16	04:04:43	II.Ec.D	-15.0	41.7	66.9	1.2
8	24	02:17:27	I.Ec.D	-31.7	26.3	73.4	0.6
8	27	00:35:33	III.Ec.D	-39.6	9.4	75.8	2.3
8	27	02:31:33	III.Ec.R	-30.9	31.0	75.9	1.3

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
8	31	04:11:33	I.Ec.D	-17.0	52.5	79.3	0.6
9	3	04:34:36	III.Ec.D	-13.6	58.5	81.9	2.4
9	9	00:34:10	I.Ec.D	-44.3	17.4	87.0	0.6
9	10	01:03:14	II.Ec.D	-43.4	23.5	87.9	1.4
9	16	02:28:12	I.Ec.D	-36.8	43.8	93.3	0.6
9	17	03:37:13	II.Ec.D	-26.5	57.2	94.2	1.4
9	23	04:22:12	I.Ec.D	-19.9	67.7	99.7	0.6
9	24	22:50:39	I.Ec.D	-47.0	9.2	101.4	0.6
10	1	22:33:43	III.Ec.R	-48.1	10.9	108.0	1.2
10	2	00:44:39	I.Ec.D	-52.3	35.4	108.1	0.6
10	9	00:31:32	III.Ec.D	-55.5	38.1	114.9	2.2
10	9	02:34:10	III.Ec.R	-42.0	60.6	115.0	1.1
10	9	02:38:39	I.Ec.D	-41.3	61.4	115.0	0.6
10	12	00:37:01	II.Ec.D	-56.3	41.4	115.9	1.2
10	16	04:30:55	III.Ec.D	-22.9	70.7	122.0	2.0
10	16	04:32:41	I.Ec.D	-22.5	70.6	122.0	0.5
10	17	23:01:13	I.EcD	-56.8	27.7	123.8	0.5
10	19	03:11:37	II.Ec.D	-38.1	70.9	125.0	1.1
10	25	00:55:17	I.Ec.D	-59.3	54.7	131.1	0.4
10	26	05:46:23	II.EcD	-10.5	53.5	132.4	1.0
11	1	02:49:23	I.Ec.D	-44.8	72.1	138.7	0.3
11	2	21:17:53	I.Ec.D	-47.0	20.7	140.6	0.3
11	5	21:39:04	II.Ec.D	-51.3	27.1	143.9	0.7
11	8	04:43:33	I.Ec.D	-24.9	54.8	146.4	0.2
11	9	23:12:04	I.Ec.D	-64.8	48.1	148.3	0.2
11	13	00:14:27	II.Ec.D	-67.5	61.6	151.7	0.5
11	13	20:27:30	III.Ec.D	-39.7	20.2	152.6	0.9
11	20	02:50:08	II.Ec.D	-48.5	64.8	159.7	0.3
11	21	00:27:47	III.Ec.D	-68.9	68.5	160.7	0.6
11	24	05:12:27	I.Ec.R	-22.3	36.0	164.3	0.2
11	25	23:41:05	I.Ec.R	-70.2	65.3	166.3	0.2
11	28	04:27:22	III.Ec.D	-31.6	41.2	168.8	0.3
12	3	01:35:32	I.Ec.R	-63.6	67.0	174.4	0.3
12	4	20:04:08	I.Ec.R	-36.5	33.4	176.4	0.4
12	7	23:54:27	II.Ec.R	-72.3	71.6	179.3	0.3
12	10	03:30:05	I.Ec.R	-44.3	41.7	177.3	0.5

Mes	Día	UTC	Evento	h Sol (°)	h Jup (°)	Elon (°)	Dist
12	11	21:58:43	I.Ec.R	-57.7	60.4	175.3	0.5
12	15	02:31:31	II.Ec.R	-55.8	48.5	171.6	0.6
12	17	05:24:44	I.Ec.R	-23.4	14.0	169.2	0.7
12	18	23:53:23	I.Ec.R	-72.7	70.1	167.2	0.7
12	19	18:40:50	III.Ec.R	-20.1	30.3	166.3	0.7
12	20	18:22:04	I.Ec.R	-16.6	27.6	165.2	0.7
12	22	05:08:53	II.Ec.R	-26.9	12.8	163.5	0.8
12	25	18:27:56	II.Ec.R	-17.1	32.9	159.5	0.9
12	26	01:48:09	I.Ec.R	-64.2	47.3	159.1	0.9
12	26	22:42:10	III.Ec.R	-64.0	71.6	158.1	1.1
12	27	20:16:51	I.Ec.R	-37.4	55.1	157.1	0.9

Capítulo 8

Bibliografía

Esta sección no pretende ser, en ningún caso, una recopilación exhaustiva de todo el material que se ha publicado a lo largo de los años sobre la materia tratada en este libro. Se trata únicamente de sugerencias que los autores hacen a aquellos lectores que deseen profundizar en ella.

Bibliografía

AKSNES, Kaare (2010): *Navigation, world mapping and astronomy with Galileo's moons*, en *Proceedings IAU Symposium No. 269* (2010), 42-48.

ALBUQUERQUE, Luis de (1991): *Historia de la navegación portuguesa*, Mapfre, Madrid.

ÁLVAREZ, Rubén, OLIVERO, José María y ALBORNOZ, Enrique (2007): *Cartografía y navegación: del portulano a la carta esférica*, Armada Nacional, Montevideo.

ASIMOV, Isaac (1986): *Historia del telescopio*, Alianza Editorial, Madrid.

ASIMOV, Isaac (2007): *Historia y cronología de la ciencia y los*

descubrimientos, Ariel, Barcelona.

BENNETT, James A. (2001): *The telescope in the seventeenth century*, en HOSKIN, Michael (ed.) (2001): *The Cambridge history of astronomy*, Cambridge University Press, Cambridge, págs. 125-129.

COMELLAS, José Luis (1991): *El cielo de Colón: técnicas navales y astronómicas en el viaje del Descubrimiento*, Tabapress, Madrid.

DAUMAS, Maurice (1972): *Scientific instruments of the 17th & 18th centuries and their makers*, B.T. Batsford, Londres.

DRAKE, Stillman (1980): *Galileo*, Alianza Editorial, Madrid.

DUNN, Richard y HIGGITT, Rebekah (2004): *Ships, clocks, and stars: the quest of longitude*, Harper Collins, New York.

GARCÍA FRANCO, Salvador (1947): *Historia del arte y ciencia de navegar*, vols. I y II, Instituto Histórico de Marina, Madrid.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Francisco José (1992): *Astronomía y navegación en España, Siglos XVI-XVIII*, Mapfre, Madrid.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Francisco José (2006): *Del "arte de marear" a la navegación astronómica: Técnicas e instrumentos de navegación en la España de la Edad Moderna*, en *Cuadernos de Historia Moderna. Anejo V*, Universidad Complutense, Madrid, págs. 135-166.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Francisco José (2014): *El océano desconocido: ciencia y fantasía en la antigua cartografía náutica (siglos XIII-XVI)*, en LOSADA, José Manuel (dir.): *Abordajes. Mitos y reflexiones sobre el mar*, Instituto Español de Oceanografía, Madrid, págs. 45-77.

GONZÁLEZ GONZÁLEZ, Francisco José (2014): *Técnicas e instrumentos de navegación en las expediciones de exploración del Mar del Sur*, en *El Océano Pacífico. Conmemorando 500 años de su descubrimiento*, Fundación Ramón Areces, Madrid, págs. 99-113.

GOULD, Rupert T. (2013): *The marine chronometer: its history and development*, Antique Collectors' Club, Old Martlesham.

HOSKIN, Michael, ed. (2001): *The Cambridge concise history of astronomy*, University Press, Cambridge.

KING, Henry C. (1979): *The history of the telescope*, Dover, New York.

LÓPEZ PIÑERO, José María (1986): *El arte de navegar en la España del Renacimiento*, Labor, Barcelona.

MEDEROS, Luis (2020): *Navegación astronómica* (7ª edición), Tutor, Madrid.

SELLÉS, Manuel (1994): *Instrumentos de navegación: del Mediterráneo al Pacífico*, Lunweg, Barcelona.

SELLÉS, Manuel (2007): *El arte de la navegación en la Península Ibérica*, en *Los orígenes de la ciencia moderna*. Actas del Seminario Fundación Orotava, Año XI-XII, La Orotava, págs. 167-185.

SOBEL, Dava (2006): *Longitud*, Anagrama, Barcelona.

Índice alfabético

A

- Aberración, 179
 - cromática, 179
 - defecto de coma, 179
 - esférica, 179
- Albedo, 150
 - diferencial, 150
- Altura, 20, 182
 - verdadera, 32
- Altura y distancia
 - método de, 27
- Ampolleta, 35
- Ángulo
 - de Laplace, 139
 - de libración, 139
- Ángulo sidéreo, 18
- Argelander
 - método de, 154, 159, 170
- Aries
 - ángulo horario de, 167
 - primer punto, 17
- Ascensión recta, 18, 182
- Azimut, 20, 182

C

- Cabotaje
 - navegación de, 14
- Celatone, 86
- Centelleo, 170

Coordenadas

- celestes, 16
- ecuatoriales, 19
- horizontales, 19
- Corredera, 33
 - de barquilla, 22
- Curva de luz, 147, 150

D

- Declinación, 18, 28, 182
 - magnética, 43, 45
- Decreto de la Longitud, 45
- Deriva secular, 169
- Día
 - sidéreo, 166
 - solar medio, 167
- Distancias lunares, 101, 114

E

- Eclipse, 37, 75, 141
 - de satélites de Júpiter, 71
 - medio, 158, 165
 - observación visual de un, 151
- Eclíptica, 16, 76, 167
 - oblicuidad de la, 16
- Ecuador, 28
 - celeste, 167
- Efemérides, 129
- Elementos orbitales, 129, 135
- Emersión, 75

Esfera celeste, 17
 Estrella Polar, 28, 182
 altura de la, 31
 Excentricidad, 16, 125

G

Greenwich
 meridiano de, 168

H

Hora
 civil del lugar, 161
 transporte de la, 107
 Horizonte
 astronómico, 31
 de la mar, 31
 depresión del, 31

I

Inmersión, 75

K

Kepler
 segunda ley de, 167

L

Latitud
 determinación de la, 28
 Longitud
 Comité de la, 42, 99
 Decreto de la, 41
 determinación de la, 36
 el problema de la, 35

M

Magnitud, 154
 Montura, 181
 altazimutal, 182
 ecuatorial, 182

O

Ocultación, 75, 141

P

Penumbra, 146
 Periplos, 14
 Planeta
 movimiento retrógrado, 54
 Polo
 celeste, 182
 magnético, 42
 Portulano, 20
 Punto
 de contacto, 147
 de escuadría, 34
 de fantasía, 34
 de fantasía y altura, 34
 echar el, 34
 Vernal, 17, 166

R

Regimiento
 del Crucero del Sur, 27
 del Norte, 27
 Resonancia de Laplace, 138

S

Segundo intercalar, 170
 Sextante, 31
 funcionamiento del, 106
 partes del, 103
 Sol
 ángulo horario del, 167
 medio, 167
 Sombra, 75, 141

T

Telescopio, 47, 173

apertura, 176
aumentos, 176
buscador, 177
campo de visión, 176
cassegrain, 177
catadióptrico, 177
de Galileo, 50, 176
distancia focal, 176
luminosidad, 176
montura, 181
objetivo, 175
ocular, 175
orígenes del, 47
partes de un, 175
reflector, 177
refractor, 177

Tiempo

atómico internacional, 169
ecuación del, 168
medida del, 166
sidéreo, 166
solar medio, 167
solar verdadero, 166
universal, 161, 168
universal coordinado, 169

Tránsito, 75, 141

U

Umbra, 146