

EDMOND HALLEY,

GEOFISICO*

Michael E. Evans

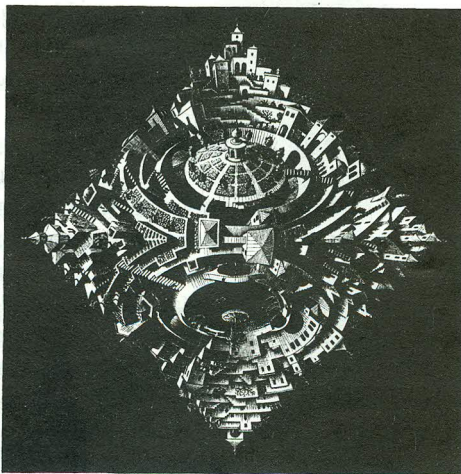
Famoso por el cometa que lleva su nombre y por sus esfuerzos para publicar los *Principia* de Newton, Halley fue uno de los fundadores de la geofísica y tuvo un interés especial en el geomagnetismo.

La reciente aparición del cometa Halley provocó una actividad científica intensa, así como la usual plétora de libros, artículos y demás parafernalia. Entonces, ¿por qué añadir algo más? La excusa que puedo dar es que, aunque Edmond Halley es famoso por su cometa - y es justo que así sea-, sus contribuciones al conocimiento científico fueron mucho más amplias de lo que generalmente se reconoce. En realidad, el estudio de los cometas representa una parte muy pequeña de su obra. Incluso, si no hubiese hecho ninguna de sus aportaciones astronómicas y de otro tipo, Halley nos habría dejado un legado importante como uno de los primeros geofísicos del mundo.

Si bien es cierto que nunca olvidó los problemas celestes y que hizo contribuciones fundamentales y de largo alcance en la astronomía, también tenía algo interesante y original que decir en temas que iban desde las matemáticas en la antigua Grecia hasta el equipo para buceo de profundidad. En 1691, por ejemplo, publicó¹ artículos sobre la distancia entre la Tierra y el Sol, el comportamiento del vapor de agua en la atmósfera, la matemática de las cantidades infinitas, el espesor del chapeado en oro, el desembarco de Julio César en Britania y la *Historia Naturalis* de Plinio. En esa época tenía 35 años, y continuó con ese ritmo de trabajo durante otro medio siglo. No es raro, entonces,

que llegara a ser conocido como "el segundo más ilustre de los filósofos anglosajones"² -siendo, como fue contemporáneo del genial Isaac Newton. (Véase la bibliografía al final de este artículo).

De los numerosos aspectos de las ciencias planetarias que llamaron la atención de Halley, el campo magnético de la Tierra parece haber sido su primer amor. Cuando aún era adolescente, hizo observaciones de la "variación magnética" de la Tierra -la diferencia angular entre el norte geográfico y el geomagnético-, que actualmente se llama declinación. En su último retrato -que se exhibe en la Royal Society de Londres y que fue pintado cuando tenía 80 años- podemos verlo sosteniendo un bosquejo de la Tierra que representa su teoría sobre el origen del campo magnético.



Mapeo del Patrón Magnético de la Tierra.

En su primera publicación formal³ acerca del campo geomagnético, aparecida en 1683, cuando tenía 27 años, Halley reunió 55 determinaciones de la declinación, suficientes para permitirle discernir un patrón magnético global. Desde luego, las propiedades direccionales de la brújula habían sido utilizadas en la navegación durante siglos. De hecho, Halley recopiló gran parte de su información a partir de las bitácoras de los navegantes. Ya a principios del siglo XV se sabía en Europa que las direcciones hacia el norte verdadero no eran paralelas, aunque no se hicieron mediciones exactas hasta que pasaron otros cien años. En China se habían hecho mediciones precisas durante siglos; la primera que se regis-

* Tomado de *Physics Today* febrero de 1988, pp. 41-45. Traducido por Luis Horacio Gutiérrez González, estudiante del Departamento de Física Espacial del Instituto de Geofísica-UNAM.

tra⁴ fue llevada a cabo por el astrónomo I-Hsing alrededor del año 720 d.C.

La primera teoría realmente científica sobre el origen del magnetismo terrestre fue propuesta en el año 1600 d.C. por William Gilbert,⁵ médico de Isabel I de Inglaterra. Pensaba que el planeta estaba permanentemente magnetizado, como un imán, con dos polos diametralmente opuestos situados en los polos geográficos. Mientras los hombres de mente práctica contemplaron un modelo teórico subyacente, esta idea llegó a ser el fundamento de la navegación guiada magnéticamente.

Gilbert suponía que las partes sólidas de la Tierra eran magnéticas y, en consecuencia, creía que en aguas costeras las brújulas se desviarían hacia las masas de tierra adyacentes. Halley señaló que en varios ejemplos de su compilación esto no era cierto, "pero más notablemente cerca de la costa de Brasil", donde la aguja "apunta en la dirección opuesta". Halley también indicó que "poco antes" un cierto Sr. Bond, un viejo maestro de navegación había propuesto una modificación al modelo de Gilbert, que consistía en un dipolo magnético con su eje desviado respecto al eje de rotación de la Tierra. Halley criticó rápidamente esta hipótesis, señalando que los lugares en el mismo meridiano deberían tener declinaciones en el mismo sentido, mientras que algunos datos indicaban lo contrario. El contraejemplo más notorio es la comparación entre las declinaciones en "el estrecho de Hudson y el estuario del Rho de la Plata", los cuales se hallan aproximadamente en el mismo meridiano, pero "en un lugar, la aguja varía 29.5 grados hacia el oeste, y en el otro, 20.5 grados hacia el este".

Halley sugirió que el patrón global de declinación implicaba cuatro polos. La figura 1 muestra un planisferio con sus datos. Las flechas divergentes apuntan alejándose de los polos norte, y las convergentes apuntan hacia los polos sur. A pesar de la escasez de datos -de la cual el mismo Halley estaba completamente consciente- infirió la localización de los cuatro polos que él proponía y los designó como:

*El Polo Norte Europeo, situado "cerca del Meridiano del Fin de las Tierras en Inglaterra y a no más de 7 grados del Polo Artico,"- esto es, alrededor de los 83 N, 6 W.

*El Polo Norte Americano, situado "en un meridiano que pasa cerca del centro de California, y alrededor de 15 grados del Polo Norte del Mundo," 75 N, 119 W.

*El Polo Sur Americano, "alrededor de 16 grados" del "Polo Sur del Mundo" y "unos veinte grados al oeste del Estrecho de Magallanes," 74 S, 90 W.

*El Polo Sur Asiático, "a poco menos de 20 grados" del eje de rotación de la Tierra y "en un meridiano que pasa por Nueva Holanda y la isla de Célebes," 70 S, 120 E

Halley reconocía los papeles complementarios que desempeñan la observación empírica y la teoría fundamental subyacente, de modo que subrayó la necesidad, por una parte, de datos adicionales y, por otra, de una comprensión adecuada del decremento del poder atractivo de un imán con la distancia. Es notable que, después de un esfuerzo de siglos, que culminó con el reciente proyecto de mapeo magnético por medio de satélites llamado MAGSAT, la idea de Halley acerca de cuatro polos aún tenga gran valor.

En un artículo reciente, Jeremy Bloxham y David Gubbins (de la Universidad de Cambridge) reportaron una técnica para extrapolar las observaciones en superficies y por medio de satélites hacia la superficie del núcleo de la Tierra. Encontraron evidencia de lo que denominaron "haces de flujo estático" -regiones permanentes de flujo intenso proveniente del núcleo. No encontraron sólo dos haces de flujo, uno en cada polo, como sería de esperarse para un campo dipolar, sino cuatro. Desde luego que estos haces no están exactamente donde Halley localizó sus cuatro polos, pero si se consideran las limitaciones con que trabajaba, la similitud es sorprendente.

Polos Errantes

Además de la morfología espacial del campo geomagnético, Halley se enfrentó al problema del comportamiento temporal del campo. Unos 50 años antes, un profesor de astronomía de Londres, Henry Gellibrand, había señalado que la declinación varía con el tiempo, pero que los cambios observados eran muy lentos. Halley escribió, en un artículo publicado en 1683, que "se necesitarán algunos cientos de años para establecer una doctrina completa del Sistema Magnético". Sin embargo, en ese artículo plantó la semilla que daría fruto diez años más tarde, cuando discutió nuevamente el tema.

Un siglo antes, en octubre de 1580, William Borough había registrado en Londres una declinación de 11 15' al este del norte, pero en junio de 1622 Edmund Gunter registró una de sólo 6 este. Gunter se percató de la diferencia en los valores, pero lo atribuyó a inexactitudes del reporte anterior. Sin embargo, Gellibrand encontró una década más tarde, que la declinación había seguido disminuyendo, y, para junio de 1624, había llegado a los 4 5' este. Gellibrand, convencido de la realidad de este cambio, anunció el descubrimiento de lo que actualmente se llama "variación secular".

Es un hecho histórico desafortunado que la palabra "variación" fuera utilizada originalmente para designar la declinación, que es una magnitud espacial, mientras que actualmente el término se refiere a los cambios

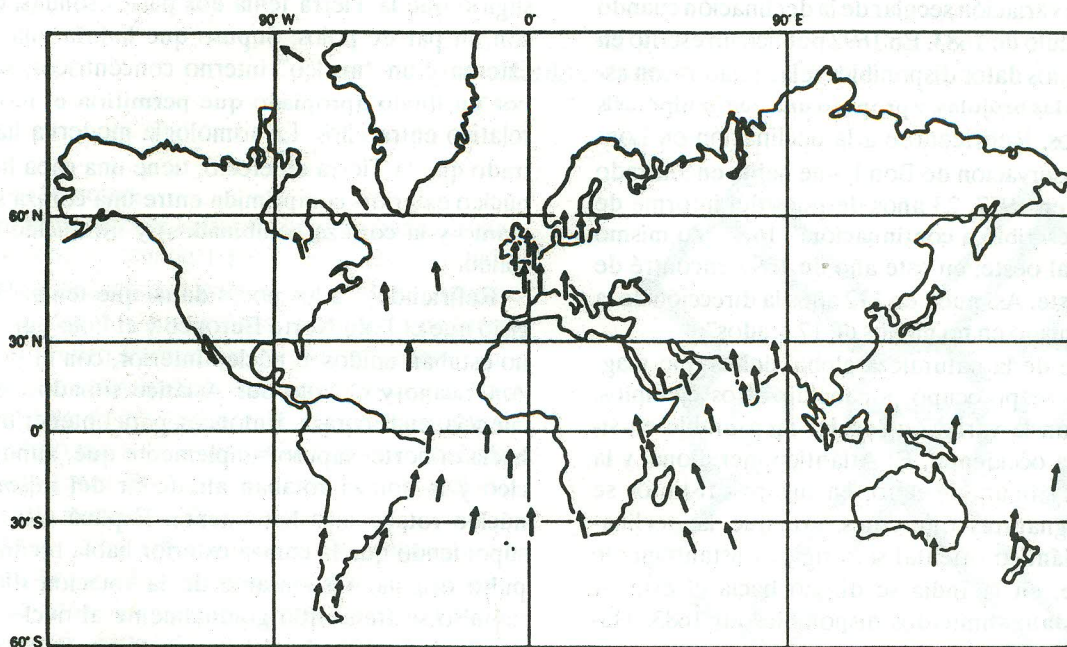
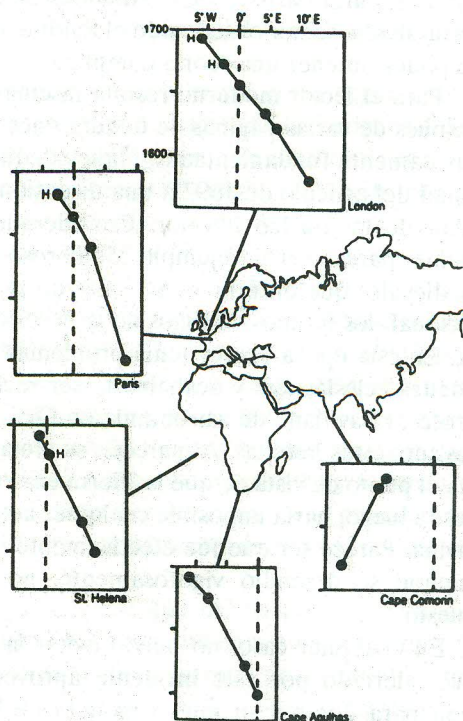


FIGURA 1

DESVIACION DE LA BRUJULA. Las flechas muestran la desviación a partir del norte verdadero en 46 lugares en todo el mundo, con base en los datos de Edmond Halley de 1683. Halley compiló 55 valores angulares (en aquella época llamados "variación" y actualmente "declinación"), pero varios lugares están representados por más de una lectura. Para explicar el patrón observado, sugirió que la Tierra tenía cuatro polos magnéticos localizados aproximadamente a 83° N, 6° W; 75° N, 119° W; 74° S, 90° W; y 70° S, 120° E.

FIGURA 2

CAMBIOS TEMPORALES en la declinación magnética -la diferencia angular entre el norte magnético y el geográfico- como fueron observados en cinco lugares. Los datos fueron tomados del artículo de Halley de 1692. Los propios datos observacionales de Halley están indicados con una "H". El margen superior de cada gráfica representa el año de 1700. Las líneas verticales fragmentadas corresponden a una lectura de la brújula "verdadera" (declinación de 0).



temporales lentos del campo magnético. Debe tenerse esto en mente cuando se lean manuscritos antiguos.

Como hemos visto, Halley ya estaba pensando en el problema de la variación secular de la declinación cuando publicó su artículo de 1683. En 1692 publicó un escrito en el que resumía los datos disponibles relacionados con estos cambios en las brújulas, y propuso una audaz hipótesis para explicarlos. Refiriéndose a la declinación en Londres, citó la observación de Bond, que había encontrado un valor de 0 en 1557, 23 años después del informe de Gellibrand, y escribió a continuación: "1672. Yo mismo observé 2 30' al oeste; en este año de 1697 encontré de nuevo 6 00' oeste. Así pues, en 112 años la dirección de la Aguja ha cambiado en no menos de 17 grados".

Consciente de la naturaleza global del campo magnético, Halley se preocupó por incluir otros ejemplos. Estos ilustraban la variación secular mensurable en sitios de Europa occidental, El Atlántico meridional y la India (véase la figura 2) pero, en lugares distintos se observaron firmas diferentes. Aunque la declinación en el Atlántico oriental se dirigió constantemente hacia el oeste, en la India se dirigió hacia el este. A partir de los datos limitados disponibles en 1683, Halley ya había sugerido -aunque tentativamente- que sus cuatro polos propuestos se estaban moviendo hacia el oeste.

Se puede seguir fácilmente el argumento de Halley si se imagina el efecto en Londres, por ejemplo del Polo Norte Europeo. Para producir la declinación al este observada por Borough en 1580, este polo tendría que haber estado situado muy al oriente de Londres. En 1657 habría estado al norte de Londres, lo que habría provocado una declinación de 0, y en 1692, de los propios resultados de Halley, habría estado al poniente. Un razonamiento similar se aplica en los otros ejemplos, inclusive en los datos de la India. Ahh, entre 1620 y 1688, la declinación cambió 7 hacia el oriente, lo cual concuerda con un movimiento hacia el poniente del llamado Polo Sur Asiático.

Así nació la idea de una deriva hacia el oeste, un concepto fundamental que ha permanecido casi tan arraigado en la mente de los geofísicos como el de las órbitas circulares en la mente de los astrónomos. Pero la geofísica todavía está esperando a su Kepler. En efecto, todavía se comprende poco del campo geomagnético, y la variación secular, en particular, ha resultado ser un problema muy difícil.

El Interior de la Tierra

Halley, sin embargo, pensaba que había resuelto el problema al combinar su antigua idea de los cuatro polos

magnéticos con una nueva propuesta sobre la estructura interna de la Tierra. Señalando que él nunca había visto u oído hablar de un imán que tuviese más de dos polos, sugirió que la Tierra tenía dos partes sólidas, cada una con un par de polos. Supuso que habría una "coraza" externa y un "núcleo" interno concéntricos, separados por un fluido apropiado que permitiría el movimiento relativo entre ellos. La sismología moderna ha demostrado que la Tierra en efecto, tiene una capa líquida -el núcleo exterior- comprimida entre una coraza sólida (el manto y la corteza combinados) y un núcleo interior sólido.

Refiriéndose a los pocos datos que tenía, Halley sugirió que el Polo Norte Europeo y el Polo Sur Americano estaban unidos al núcleo interior, con el Polo Norte Americano y el Polo Sur Asiático situados, en consecuencia, en la coraza. Entonces, para obtener una deriva hacia el norte, supuso simplemente que, aunque el núcleo y la coraza rotaban alrededor del mismo eje, el núcleo rotaba más lentamente. Explicó esta situación suponiendo que la coraza exterior había recibido el impulso original responsable de la rotación diaria; este impulso se transmitió gradualmente al núcleo a través del fluido intermedio -el cuerpo sólido interior simplemente no había tomado suficiente impulso todavía. Este retraso parecía implicar un período de unos 700 años para que el núcleo se retrasase una vuelta completa respecto a la coraza. En vista de una escala de tiempo tan larga, urgió a todos los "Amantes de las Verdades Naturales" a seguir observando el fenómeno, con objeto de poder obtener una teoría completa.

Para el lector moderno resulta fascinante ver cómo después de varias páginas de deducciones científicas rigurosamente fundamentadas, Halley dedica la segunda mitad del artículo de 1692 a una discusión sobre la utilidad de tal núcleo interior. Considerado superficialmente, parece ser un ejemplo asombroso de prejuicios medievales que enturbian las aguas de la investigación racional -los últimos vestigios de la necesidad teleológica. En esta época Halley tenía problemas con las autoridades eclesiásticas y acababa de ser rechazado como Profesor Saviliano de astronomía en Oxford a causa de sus supuestas herejías. Al parecer, se creía que él sostenía el punto de vista de que la Tierra era eterna, lo cual, desde luego, haría imposible cualquier acto de creación divina. Parece ser que fue efectivamente interrogado y, aunque se defendió vigorosamente, no consiguió el puesto.

En cualquier caso, no puedo evitar la sensación de que, alertado por este incidente aprovechara la ocasión para dotar a su nuevo modelo de la Tierra con

propiedades que aumentaban la gloria del Creador. Así, describe cómo este mundo interior pudo haber sido hecho "por la Sabiduría Omnipotente para otorgar una gran superficie para el uso de las Creaturas Vivientes". En efecto, a continuación sugiere que pudiera haber varias capas concéntricas -una especie de edificio de departamentos global. Es difícil decir hasta qué punto creía él mismo en su modelo, pero no cabe duda de que tenía en mente que estas capas adicionales podían resultar muy útiles si datos nuevos hacían necesario un modelo más complejo del campo geomagnético. Con un par de polos en cada capa, su modelo podía ser ajustado indefinidamente -y todo para lo gloria de Dios-.

Esta digresión es puramente especulativa, pero resulta interesante hacer notar que, cuando la Cátedra Saviliana de geometría en Oxford quedó vacante unos 12 años después, Halley consiguió el puesto. Para entonces, tenía 48 años y su reputación se había visto considerablemente reforzada por sus logros en los años intermedios. Sus aportaciones, nuevamente, abarcan una amplia variedad de temas, aun cuando entre ellas destaca el geomagnetismo.

Mapas de Contorno y Auroras.

En 1698, Halley tomó parte en el primer viaje oceánico planeado expresamente para fines científicos; participó no sólo como científico principal a bordo, sino como capitán del buque. Entre el 20 de octubre de 1698 y el 10 de octubre de 1701, el *Paramore* hizo tres viajes bajo su mando, dos en el Atlántico y uno en el canal de la Mancha⁸. Durante los viajes por el Atlántico se le encomendó, entre otras cosas, avanzar hacia el sur tanto como fuese posible con el fin de determinar con más detalle el patrón de declinaciones magnéticas. El resultado fue un enorme avance en términos de la investigación y la comprensión de nuestro ambiente global: armado con 200 nuevas mediciones que abarcaban 100 de latitud y 70 de longitud y tratando de representarlas de una manera fácilmente inteligible, inventó el mapa de contorno.

Esta técnica es tan común actualmente que se toma como un hecho. Pensemos por ejemplo en las isóbaras de los mapas climáticos diarios, sin embargo, como acto creativo, rivaliza en importancia con las líneas de fuerza de Faraday, las cuales probaron ser muy importantes en el desarrollo del electromagnetismo más de un siglo después.

El mapa del Atlántico hecho por Halley muestra esas líneas de declinación igual, que durante muchos años fueron llamadas "Líneas Halleyanas", pero que

ahora son blandamente etiquetadas como "líneas isogónicas". Además de su significado puramente científico, estos mapas fueron de considerable importancia para la navegación, y siguieron siendo solicitados por lo menos durante 50 años después de su primera publicación (probablemente en 1701). En realidad Halley extendió su alcance inmediatamente e incorporó datos del Océano Indico y Extremo Oriente en el llamado Mapa Mundial publicado al rededor de un año después.

En esa época se creía que las líneas isogónicas no sólo permitirían a los navegantes prescindir de la brújula, sino que podrían realmente aportar una solución al viejo problema de la determinación de la longitud del mar. Si algún barco estuviera en una región donde las líneas isogónicas se dirigieran aproximadamente de norte a sur, entonces una determinación de la declinación podría dar una longitud fija. Antes de que John Harrison hubiese construido los primeros cronómetros marinos confiables, la declinación fue de un valor enorme para los buques mercantes y de guerra.

Poco después de haber terminado los estudios del Canal de la Mancha, Halley renunció a la Armada y regresó de un modo muy personal a la corriente científica principal. En lo que se refiere al campo magnético, su interés no decreció. Estuvo desde luego, fuertemente involucrado en la preparación y revisiones subsecuentes de los mapas isogónicos. Con este fin, siguió interesándose en los nuevos datos conforme llegaban a estar disponibles. Publicó su último artículo sobre este tema en 1732, cuando tenía más de 70 años.

Halley todavía hizo una contribución muy original en el campo del geomagnetismo. El 6 de marzo de 1716 ocurrió una aurora boreal sorprendente, claramente visible en el cielo nocturno de Londres. La observó con gran detalle; también reunió y comparó los reportes de otros observadores de todo el país, los cuales publicó en un artículo ese mismo año⁹. Este hecho por sí mismo habría sido un importante avance en un campo envuelto en el misterio y la superstición. No obstante fue mucho más allá y propuso, en realidad, un mecanismo físico subyacente.

La piedra fundamental en la hipótesis de Halley fue la conexión entre la aurora y el campo geomagnético., la cual constituyó un logro notable, no sólo porque eran muy escasos los datos disponibles, sino porque ¡era correcto! Actualmente sabemos que efectivamente existe una conexión íntima entre las trayectorias de las partículas cargadas eléctricamente, causantes de las auroras, y la morfología del campo magnético terrestre. Por supuesto, no acertó en todo; sabemos ahora que estas partículas son inyectadas en el entorno cercano a la

Tierra por el viento solar, mientras que Halley sugirió que se originaban dentro de la Tierra y que fluían hacia el exterior. No es difícil adivinar su origen: ¿cuál otro, sino la capa de fluido entre la coraza exterior y el núcleo interior? Esto podría parecerle cómico a un lector moderno, pero no debemos olvidar que, para las mentes del siglo XVII, era habitual pensar en fluidos pervasivos e imponderables.

Algo más que la cola de un cometa

Mi interés personal, y la necesidad de evitar escribir solamente una larga lista de los logros de Halley, limitaron mi artículo a la discusión de su obra en el campo del geomagnetismo. ¿Cómo podría describir adecuadamente una vida tan larga, productiva, dedicada y penetrante? Ciertamente, es injusto recordarlo solamente por el cometa que lleva su nombre.

Quizás, como Colin Ronan sugiere en su biografía, un título más adecuado para Halley sería el de "padre de la geofísica moderna". Tal vez deberíamos subrayar sus contribuciones como Astrónomo Real por más de 20 años; o quizás deberíamos recordar que, a pesar de haber sido opacado en cierta forma por Newton, no fue uno de sus rivales -de hecho, fue Halley quien impulsó al reticente Newton a escribir los Principia, quien aportó el dinero y quien supervisó personalmente la impresión.

Pero para mí, lo más encantador de Halley no fue la manera en que vivió, sino la manera en que murió.

Aunque se cree que sufrió un ataque menor, su memoria y su juicio, al parecer permanecieron inalterables hasta el final. Pidió un vaso de vino "y habiéndolo bebido, expiró sentado en su silla sin una sola queja". ¡Hombre dichoso!

Referencias

- 1 E.F. MacPike, *Correspondence and Papers of Edmond Halley*, Oxford U. P., Oxford, 1932.
- 2 Anpimo, *Nature* 21, 303, 1880.
- 3 E. Halley, "A Theory of the Variation of the Magnetical Compass", *Philos. Trans. R. Soc. London* 13, 203, 1683.
- 4 J. Needham, *Science and Civilization in China*, Vol. 4: *Physics and Physical Technology*, Part 1, Physics, Cambridge UP., New York, 1962.
- 5 W. Gilbert, *De Magnete* (1600); reimpreso por Dover, New York, 1958.
- 6 J. Bloxham, D. Gubbins, *Nature* 317, 777, 1985.
- 7 E. Halley, "An account of the cause of the change of the variation of the magnetical needle with a hypothesis of the structure of the internal parts of the Earth", *Philos. Trans. R. Soc. London* 17, 563, 1692.
- 8 N.J.W. Thrower, ed., *The Three Voyages of Edmond Halley in the Paramore, 1693-1701*, Hakluyt Society, London, 1981.
- 9 E. Halley, "An account of late surprising appearance of Lights seen in the Air, on the sixth of March last; with an attempt to explain the principal phenomena thereof", *Philos. Trans. R. Soc. London* 21, 406, 1716.
- 10 C.A. Ronnan, *Genius in Eclipse: A Biography of Edmond Halley*, Double day, New York, 1969.
- 11 *Biographia Britannica*: 4, 2516, 1757.

BOSQUEJO BIOGRAFICO DE EDMOND HALLEY.

Edmond Halley nació el 29 de octubre de 1656 en lo que ahora es el norte de Londres. Fue hijo de un rico comerciante, y recibió su primera educación en la famosa escuela de San Pablo. Destacó en todas las ramas del aprendizaje clásico, pero pronto desarrolló un profundo interés por la astronomía y ciencias relacionadas.

Antes de dejar la escuela hizo su propia determinación de la declinación magnética. En 1673 ingresó a la Universidad de Oxford, y pronto hizo importantes contribuciones teóricas y observacionales a la astronomía. A la edad de 18 años entabló una correspondencia significativa con el Astrónomo Real, John Flamsteed, y en 1676 publicó su primer artículo científico en las *Philosophical Transactions of the Royal Society*. Ese mismo año, Halley dejó voluntariamente Oxford antes de gra-

duarse para aprovechar la oportunidad de participar en una expedición a Santa Elena que haría un mapa del firmamento meridional. A su regreso, dos años después, presentó los resultados a la Real sociedad, de la que fue elegido miembro. En 1683 publicó su teoría del campo magnético terrestre, un tema que lo había atraído en su juventud y que siguió atrayéndolo a través de su larga y productiva carrera científica.

Aparte de sus propias investigaciones, desempeñó un papel clave en convencer a Newton de que publicara los Principia, y aportó dinero y asesoría editorial para llevar a cabo la impresión. El segundo artículo de Halley sobre el magnetismo terrestre apareció en 1692, pero siguió estudiando una amplia variedad de tópicos astronómicos y matemáticos. El más memorable de estos estudios

es, por supuesto, su trabajo sobre las órbitas de los cometas, el cual llevó finalmente a su notablemente precisa predicción del retorno del cometa que actualmente lleva a su nombre.

Entre 1699 y 1701 Halley fue la figura central en los primeros viajes oceánicos emprendidos con propósitos puramente científicos. Él fue el capitán del barco y el científico principal a bordo. Poco después de su regreso, publicó un mapa de la variación geográfica de la declinación magnética, que fue una contribución fundamental, no sólo por su contenido geofísico, sino

también por su invención del mapa de contorno de contorno.

En 1704, cuando tenía 48 años, fue nombrado Profesor Saviliano de Geometría en Oxford, y en 1720 sucedió a Flamsteed como Astrónomo Real. A pesar de sus muchos deberes, permaneció activo en la investigación; publicó su último artículo sobre magnetismo en 1732, y su último artículo científico (sobre un eclipse lunar) en 1737, cuando tenía 81 años. Siguió haciendo observaciones en Greenwich hasta los últimos meses de su vida. Murió en enero de 1742.

