

LOS MOVIMIENTOS DE LA TIERRA

Antonio Bernal González

@puntovernal

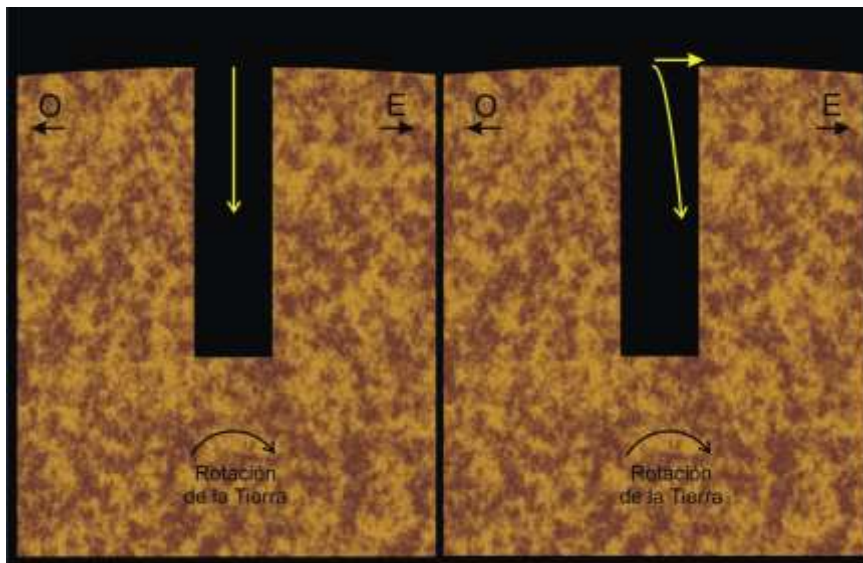
www.puntovernal.webnode.es

Serie de artículos publicados en la revista *Astronomía*, Madrid 2018

1- ROTACIÓN

A mediados del siglo XIX se hizo en Freiberg, Alemania, un experimento tan simple, que nadie pensaría que se trataba de una comprobación científica: se dejó caer un objeto al fondo profundo de una mina vertical. En principio, si el punto de partida es el centro geométrico de la boca del pozo, el proyectil debe tocar el fondo también en el centro, pues la física elemental nos enseña que la caída libre es vertical. Pero en realidad no es así porque la Tierra gira, de manera que el pozo se mueve de oeste a este durante el tiempo de la caída y, por tanto, el objeto se desvía de la línea central. A primera vista se podría pensar que al moverse el pozo hacia el este, el objeto tiende a acercarse a la pared oeste, pero la realidad es que el proyectil también tiene una velocidad horizontal, la inicial debida al movimiento de la Tierra, y el resultado es que su trayectoria es una parábola que lo acerca a la pared del este, como se muestra en la figura 1. A 50 metros de profundidad, cae a 12 milímetros del centro; a 100, la distancia se incrementa a 33 milímetros y a 200 supera los 9 centímetros. Fue el primer experimento que se hizo para comprobar la rotación de la Tierra.

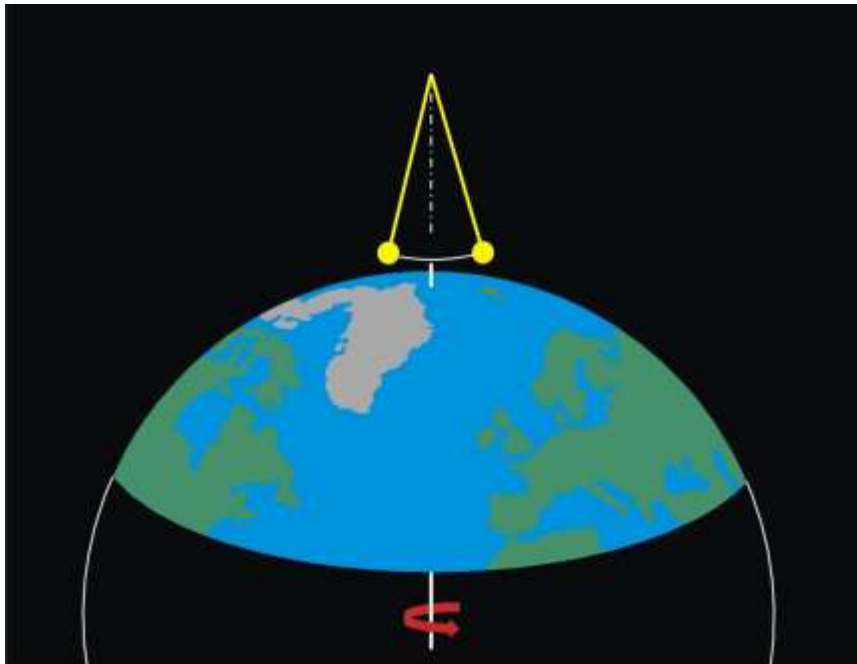
¡Cuánto le costó a la humanidad aceptar ese movimiento! No es tan obvio como nos parece hoy a la luz del siglo XXI, porque no lo percibimos, sino que nos parece que es el cielo estrellado el que gira en torno a la Tierra en el transcurso de un día. De esa percepción nacieron expresiones que todavía utilizamos en el lenguaje corriente, como cuando



Si dejamos caer una piedra en un pozo vertical profundo, a primera vista podríamos pensar que cae en el centro del pozo. Pero la realidad es que el pozo se mueve de oeste a este debido a la rotación de la Tierra y el proyectil también lleva una velocidad inicial horizontal en la misma dirección y por la misma causa. Su trayectoria en el espacio es parabólica.

decimos que el Sol o la Luna "salen" o "se ocultan". Esa apariencia hizo surgir la idea del Universo Geocéntrico del que la Tierra es el centro físico, y de esa concepción nació, por lógica, un sistema filosófico que cree en la Tierra como fin único para el que fue creado todo cuanto existe: si todo gira alrededor de ella, es lógico pensar que es especial entre todos los demás cuerpos del Universo.

Los antiguos filósofos griegos creyeron firmemente en una Tierra estática colocada en el centro del mundo. Para ellos, todos los cuerpos celestes giraban en esferas de diferentes tamaños, en la última de las cuales estaban las estrellas. Esta concepción del Universo fue defendida por Aristóteles, quien la heredó de Platón y éste de Eudoxo y Calipo. Sólo unos pocos se atrevieron a decir que el movimiento de esas esferas no es más que una apariencia debida al giro de la Tierra sobre su eje. El primero en sostener esa idea fue el pitagórico Filolao que vivió en el siglo V a.C. y a él le siguieron otros, como el alumno de Platón, Heráclides de Ponto, contemporáneo de Aristóteles. Pero sus creencias no tuvieron eco en la comunidad de filósofos y astrónomos. En el siglo II d.C. Tolomeo, que fue el astrónomo más influyente de la humanidad, consolidó la idea de una tierra estática y esa creencia perduró hasta el siglo XVI cuando se produjo la revolución científica impulsada por Copérnico. El astrónomo polaco le atribuyó a la Tierra tres movimientos: el de rotación, el de traslación que trataremos en el próximo número de Astronomía, y uno erróneo con el que explicaba lo que hoy llamamos "precesión" que trataremos después de la traslación.



Un péndulo ubicado en el polo y suspendido en el aire, tiende a oscilar en una misma dirección mientras que la Tierra gira debajo de él, por lo que al observador le parece que el plano de oscilación da una vuelta en un día. En latitudes menores el tiempo de giro del plano se alarga en proporción inversa al seno de la latitud.

A la luz de la física moderna la rotación pre copernicana del Universo es imposible porque contradice la limitación de velocidad impuesta por la Teoría de la Relatividad: si los astros giran en torno a la Tierra en el transcurso de un día, todos aquellos que estén de una cierta distancia en adelante –más o menos a la altura de Urano–, viajarían a una velocidad mayor que la de la luz.

En 1851, veinte años después del experimento de Freiberg, el físico francés León Foucault realizó en París la conocida demostración del péndulo que lleva su nombre. De la cúpula del Panteón colgó una bala de cañón por medio de un cable de 67 metros de longitud y la puso a oscilar. El péndulo fue cambiando poco a poco la dirección del plano de balanceo, tardando unas 32 horas en dar un giro completo de 360°, que es lo que la teoría prevé para la latitud geográfica de París, si el cambio se debe a la rotación de la tierra. Para entender el funcionamiento del péndulo de Foucault, basta imaginar que está en el polo norte, como se muestra en la segunda figura, suspendido de un gancho imaginario que no toca la Tierra. Es evidente que el péndulo permanecerá oscilando en el mismo plano, independiente de la rotación de la Tierra. Pero a un observador terrestre le parecerá que cambia poco a poco de dirección.

Al girar, la Tierra da una vuelta sobre sí misma en 23 horas y 53 minutos, no 24 en horas, como podría pensarse. Este último valor es el día solar, el tiempo que tarda un punto de la Tierra en apuntar dos veces consecutivas hacia el Sol. La rotación alrededor de su eje o día sideral, es el tiempo que tarda en apuntar dos veces consecutivas hacia una estrella diferente al Sol. Puesto que la Tierra se mueve alrededor del Sol al tiempo que gira sobre sí misma, es un poco más largo el día solar que el sideral. Una consecuencia física este movimiento terrestre es que el planeta está abultado en el ecuador debido a la fuerza centrífuga generada al girar. Ese abultamiento es casi imperceptible en nuestro planeta, pero no así en otros, como Júpiter y Saturno, en los que la fuerza centrífuga es más de 500 veces mayor que en la Tierra y por tanto son más achatados.

1644 Mersenne dispara balas de cañón hacia arriba. Resultados aleatorios
1770 Strassburg. Experimentos similares
1851 Toulouse. Experimentos similares
1790 Guglielmini (Bologna) Caída libre de balas de cañón desde 30 m. Resultados inciertos.
1802 Benzemberg (Hamburgo). Experimento similar desde una torre de madera de 78 m. Resultados similares
1802 Benzemberg. Experimento similar en una mina de 87 m. Resultados similares
1831 Reich (Freiberg). Experimento en una mina de 159 m. Desviación teórica: 27,5 mm. Resultado: 28,1 mm
1902 Hall (Cambridge, Mass) . Experimentos de laboratorio pesos de 50g a 23 m de altura (948 veces).

Pruebas hechas en diferentes épocas para demostrar la rotación de la Tierra por caída libre

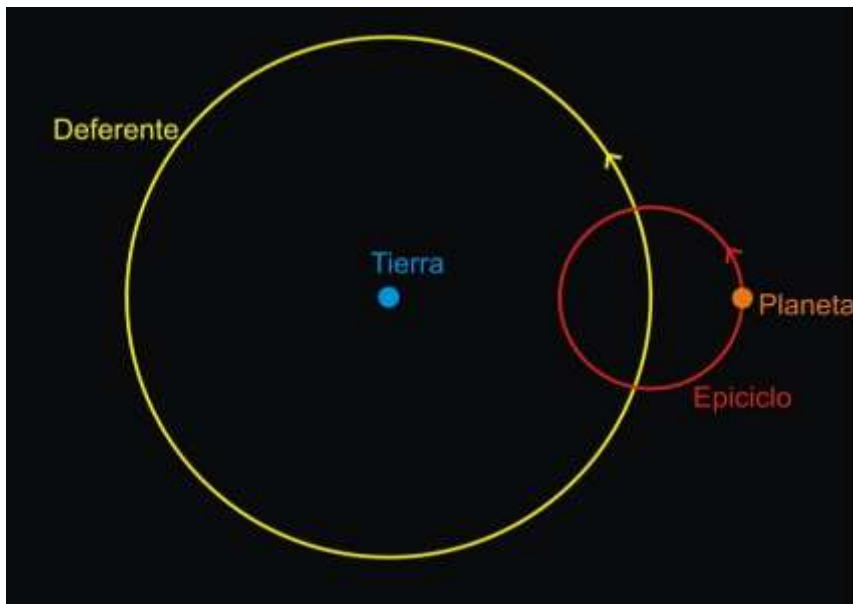
1661 Viviani (Florencia). Hallazgo fortuito de la rotación del péndulo
1851 Foucault Enero. Experimento hecho en una cueva. $L=2$ m peso=5 kg
1851 Foucault Febrero. El mismo experimento en el Observatorio de París. $L=11$ m
1851 Foucault Marzo. El mismo experimento en el Panteón de París. $L=67$ m peso=28 kg

Pruebas de la rotación de la Tierra mediante el péndulo

Como aprendimos en la escuela primaria, el movimiento de rotación de la Tierra no es único. En su obra *Astronomía*, de 1932, José Comas Solá dedica un capítulo entero a analizar los movimientos del planeta y menciona al menos diez. En las siguientes páginas estudiaremos algunos de los más importantes.

2- TRASLACIÓN

Si la rotación de la Tierra fue un movimiento difícil de aceptar por los pensadores antiguos, la traslación alrededor del Sol les pareció aún más absurda porque no hay una evidencia clara de su ocurrencia. En el caso de la rotación, se observa que todos los astros giran alrededor nuestro por lo que podría pensarse que es sólo un movimiento aparente debido a la rotación de la Tierra. En el caso de la traslación, en cambio, ¿qué fenómeno evidente nos haría sospechar de su existencia? Sí, hay algunos como la retrogradación de los planetas, pero son tan sutiles, que pueden ser percibidos sólo por observadores muy agudos y atribuirlos a un movimiento de la propia Tierra habría sido quizás una complicación, en lugar de una simplificación. Por otro lado estaba la autoridad de los grandes pensadores, como Aristóteles, que defendían el concepto de una Tierra quieta en el centro del mundo y posteriormente, la autoridad de las iglesias cristianas que esgrimían argumentos bíblicos para declarar la inmovilidad de la Tierra. "Jehová afirmó el mundo y no se moverá", reza el salmo 93, y el 104 dice: "Pusiste la Tierra sobre sus cimientos y es inamovible por siempre jamás". Claudio Tolomeo, que fue el más influyente de los astrónomos de la antigüedad dice en el *Almagesto*: "Si la Tierra se moviera, todos los animales y todos los cuerpos separados quedarían flotando detrás de ella en el aire".

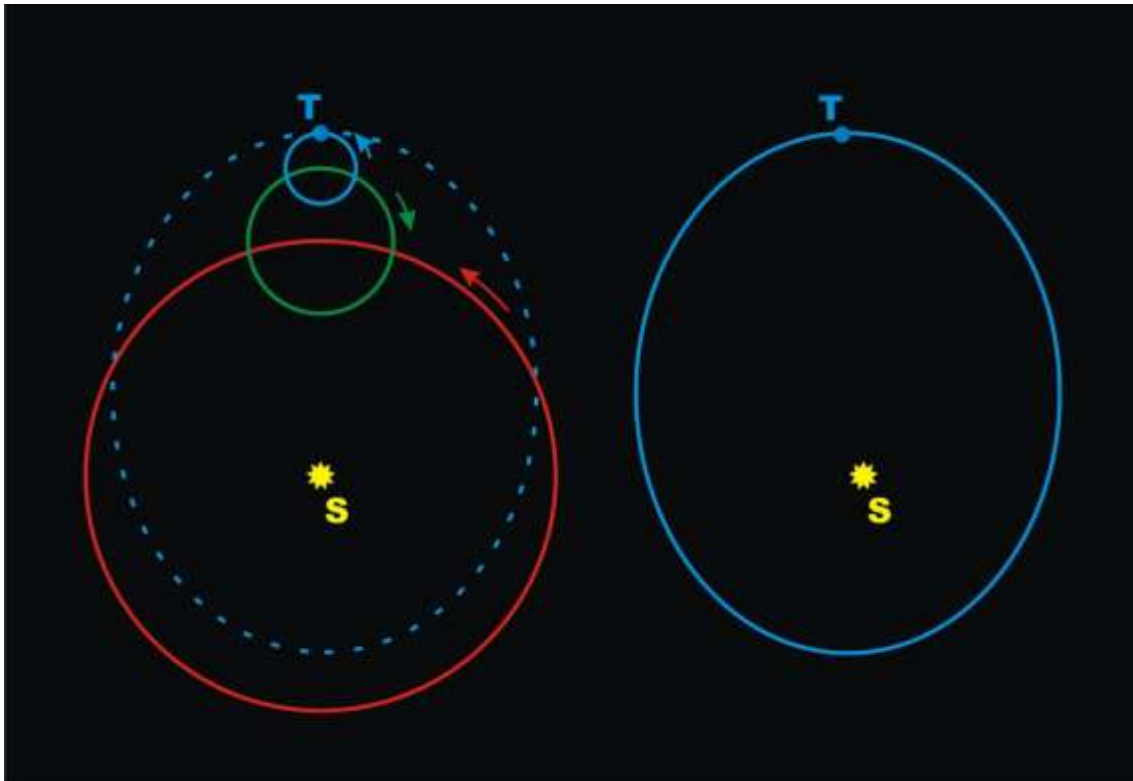


Modelo simplificado del movimiento de un planeta alrededor de la Tierra, según Tolomeo. Explica anomalías tales como los cambios de brillo o las retrogradaciones.

Doscientos cincuenta años antes de Cristo, y a pesar de las evidencias anotadas, el filósofo griego Aristarco de Samos escribió un libro del que tenemos sólo una mención hecha por Arquímedes, en el que proponía que el centro del mundo es el Sol y que la Tierra y los demás planetas giran a su alrededor. Es la visión que tenemos hoy, pero para su tiempo resultaba tan absurda, que el filósofo Cleantes de Aso –de ideas profundamente religiosas– llegó a proponer que a Aristarco se le debía procesar con el cargo de impiedad, por poner en movimiento a la Tierra. Por fortuna para Aristarco, la propuesta no prosperó, pero tampoco lo hizo la suya de la tierra móvil. A la anomalía ya citada de las retrogradaciones se añadían otras alteraciones del cielo, como el cambio de brillo de los planetas que hacía suponer que su distancia a la Tierra era variable, y la diferente duración de las estaciones que permitía concluir que el Sol cambiaba de velocidad en su viaje alrededor de la Tierra.

Un astrónomo y geómetra de la generación que siguió a la de Aristarco, Apolonio de Perge, ideó un sistema para explicar esas anomalías, sin apartarse de la inmovilidad de la Tierra y de los movimientos circulares. El planeta –que

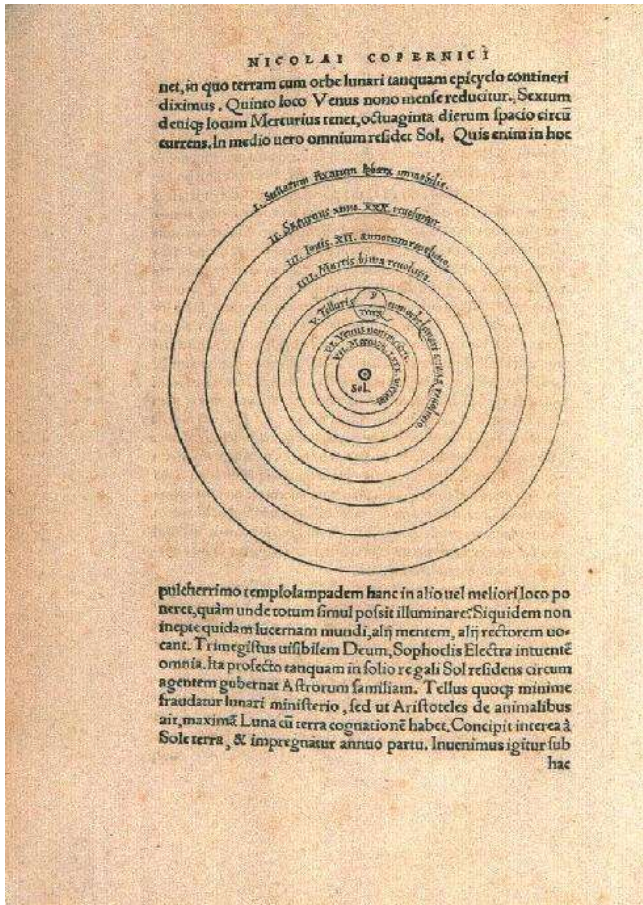
puede ser también el Sol o la Luna— se mueve alrededor de la Tierra en un círculo menor llamado *epiciclo*, cuyo centro da vueltas alrededor de la Tierra siguiendo otro círculo mayor llamado *deferente*. Como se puede ver en la figura, es el deferente el que envuelve a la Tierra y el epiciclo el que da cuenta de los cambios de velocidad o de distancia. Es un artificio muy ingenioso que fue utilizado después de Apolonio por otros astrónomos como Hiparco de Nicea, y perfeccionado en el siglo II de nuestra era por el ya citado Claudio Tolomeo. Los retoques introducidos por este último astrónomo no fueron gratuitos sino que pagaron un precio elevado porque el sistema se convirtió en un complejo rompecabezas ininteligible para la mayor parte de las personas. No se trataba ya de un par de círculos para cada planeta, sino de una cadena de epiciclos sobre los epiciclos, a la que se añadieron otras alteraciones, como el traslado del centro de la Tierra a un lugar excéntrico con respecto a la deferente.



Movimiento de la Tierra alrededor del Sol. Según Copérnico está compuesto por una deferente (en rojo) y dos epiciclos que giran en sentidos contrarios. En línea punteada se ha añadido la trayectoria final de la Tierra. A la derecha, el modelo elíptico de Kepler para explicar el mismo movimiento.

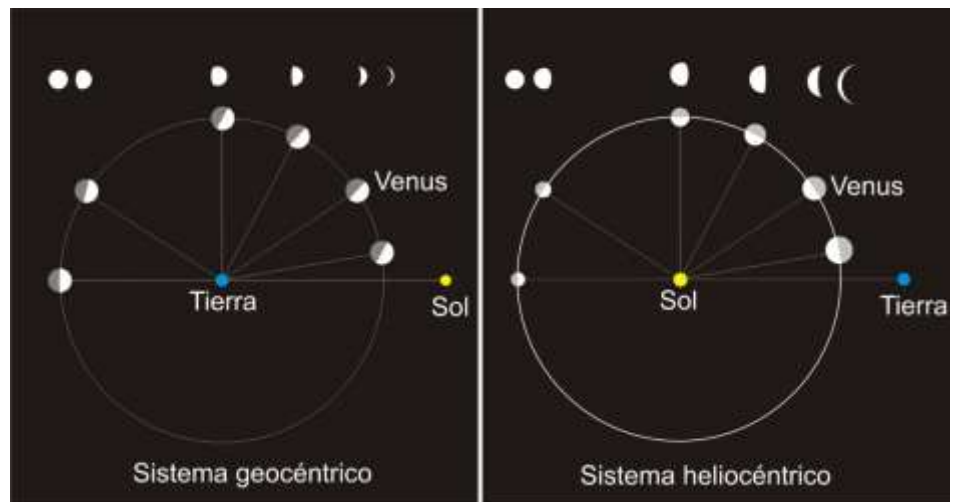
A pesar de su complejidad, ese laberinto de círculos se mantuvo intacto durante toda la Edad Media y llegó como dogma hasta el siglo XVI, para chocar bruscamente con una mente inquieta, típica del Renacimiento. Nicolás Copérnico, canónigo de Torún, en Polonia, tenía interés en muchos campos del saber humano, entre ellos la astronomía. Estudió el sistema de Tolomeo y llegó a compenetrarse tanto con él, que era, según se cree, una de las pocas personas de su época que lo comprendía a cabalidad. Convencido de que el movimiento de los cielos podía representarse de una manera más sencilla, revivió la idea de Aristarco, proponiendo lo que se llamó en adelante el *Sistema Heliocéntrico* en el que los planetas —incluida la Tierra— giran alrededor del Sol. No se puede decir que simplificó el modelo porque fue fiel a las enseñanzas de la Iglesia que defendía las órbitas circulares, así que conservó el sistema de epiciclos y deferentes con la única diferencia de que no era la Tierra la que estaba en el centro, sino el Sol, o ni siquiera éste, sino un sitio cercano él. Para representar su movimiento alrededor del Sol, cada planeta se ubicaba en el último de una cadena de círculos que empezaba con el deferente, de tal manera que la Luna y los siete planetas —incluida la Tierra—, necesitaban un total de más de 30. Como se muestra a la izquierda de la segunda figura, la propia Tierra necesitaba

tres: o bien un deferente y dos epiciclos, o un deferente, un epiciclo y un pequeño círculo que trazaba el deferente alrededor del Sol. Aunque complejo, el sistema tenía la ventaja de que los movimientos retrógrados de los planetas se explicaban como una simple apariencia debida al giro de la Tierra alrededor del Sol y, además, eliminaba un rebuscado artificio llamado *ecuante* inventado por Tolomeo.



Página del libro de Copérnico con su idea simplificada

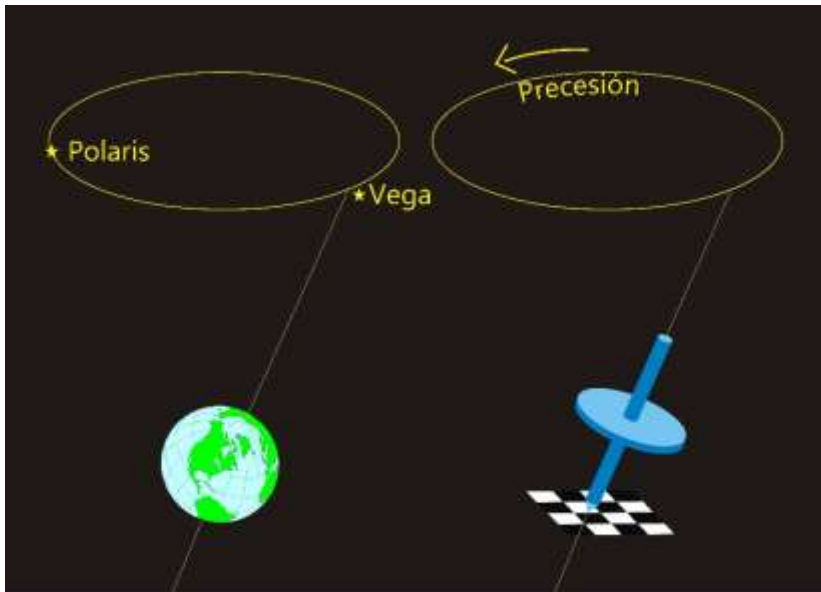
Las fases de Venus en los sistemas geocéntrico y heliocéntrico. El cambio de tamaño según la fase es una demostración de que no gira en torno a la Tierra



Para encontrar un sistema verdaderamente sobrio debió llegar un astrónomo que estuviera libre de las ataduras escolásticas de los círculos. Fue Johannes Kepler, un estudioso luterano de mente libre, heredero de las exactísimas observaciones astronómicas del Danés Tycho Brahe. Estudiando las posiciones del planeta Marte tomadas durante dos décadas por Brahe, llegó a la conclusión de que su movimiento seguía una única curva ovalada alrededor del Sol, en lugar de una serie de círculos entrelazados. Generalizó su hallazgo y lo publicó en 1609 en lo que se llama Primera ley de Kepler: *Los planetas giran alrededor del Sol siguiendo órbitas elípticas*. ¡Qué paradoja! El primer estudio que se conoce sobre la elipse, se debe a Apolonio de Perge, el mismo que inventó el artificio de los epiciclos y los deferentes. Estos desaparecieron como por encanto junto con los ecuantos y excéntricos de Tolomeo, y la treintena de círculos de Copérnico. Las sencillas elipses de Kepler son tan confiables, que más de cuatro siglos después nos han permitido llegar con naves espaciales hasta los confines de los planetas más alejados.

3- PRECESIÓN

Los movimientos de rotación y traslación de la Tierra tardaron en ser aceptados, no porque fueran difíciles de observar, sino debido a los prejuicios sobre el movimiento de la Tierra y a la idea de que los astros sólo se pueden mover en círculos. De no haber tenido estas restricciones mentales, la humanidad se habría ahorrado casi dos mil años en su camino hasta el estado de conocimiento que tenemos hoy. La rotación es evidente con sólo observar el llamado *movimiento diurno*, que de este a oeste hacen todos los astros en el transcurso de un día; la traslación se habría evidenciado por el desplazamiento del Sol sobre el horizonte, al salir o al ocultarse, en el transcurso de 365 días. Un tercer movimiento, el llamado *precesión*, no sólo es difícil de interpretar, sino casi imposible de detectar con los instrumentos de que disponían los antiguos observadores del cielo. Veamos en qué consiste.



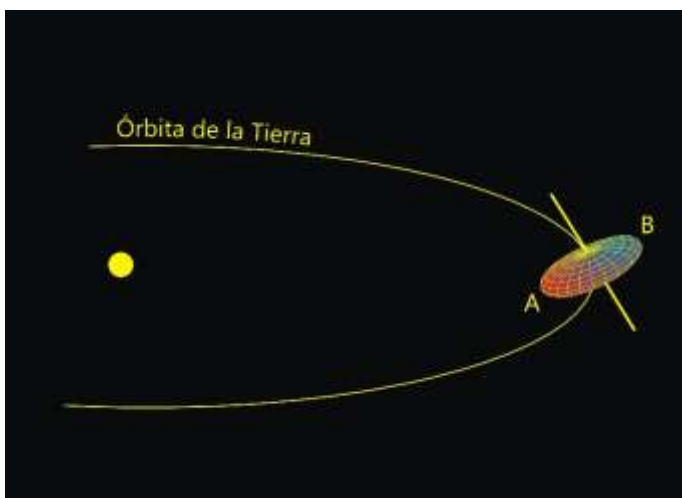
Como en una peonza, el movimiento de precesión de la Tierra hace que su eje cambie de dirección con el tiempo. Actualmente apunta hacia Polaris y dentro de 14000 años lo hará hacia un punto cercano a Vega

Imaginemos la Tierra como si fuera una peonza o un trompo de juguete que baila sobre el embaldosado. Gira sobre su eje, que en la tierra corresponde al movimiento de rotación; se desplaza sobre la baldosa, que en la Tierra equivale a la traslación alrededor del Sol, y, además, su eje tiene un cabeceo que lo hace apuntar a diferentes puntos del espacio como si trazara una curva en el firmamento. Ese es el movimiento de precesión, como se aprecia en la primera figura de este escrito. En el caso de la Tierra, la curva es un círculo muy amplio que se cierra sobre sí mismo después de casi veintiséis mil años, un movimiento tan lento, que en un siglo se mueve apenas el tamaño que abarca el disco de la Luna llena. La consecuencia más evidente de ese balanceo es que el polo celeste, que es el sitio hacia el cual apunta el eje de la Tierra, va cambiando con el tiempo y por tanto la estrella polar no es más que un visitante de paso y después de unos años deja de ser un referente en el cielo. En una entrega anterior de Astronomía explicamos cómo Polaris, la actual estrella polar, se acercó al polo lo bastante como para ser referencia celeste, a finales de la edad media. Quizás no fue casual que por ese tiempo se descubriera el continente americano y se hicieran los primeros viajes de circunvalación alrededor del mundo. En este siglo se encuentra en su punto más cercano al polo, pero dejará de ser la estrella de referencia en menos de un milenio porque se alejará poco a poco del polo a partir del año 2100. En el mapa celeste se muestra la trayectoria del polo celeste durante el período de 26000 años que empezó en el 8000 a.C.



El polo celeste va cambiando de posición, como muestran las cruces azules. Hoy se encuentra cerca de la estrella Polaris, de la Osa Menor

A la par con el movimiento del polo, el plano del ecuador terrestre se balancea en el espacio y por tanto la línea de intersección de ese plano con el de la eclíptica va cambiando su dirección con relación a las estrellas. Puesto que esa línea, llamada *línea de equinoccios*, apunta hacia el origen de las coordenadas celestes de latitud y longitud, quiere decir que las coordenadas van cambiando con el tiempo. Haciendo un paralelo con las coordenadas geográficas, el origen de éstas es el sitio en el que se cruzan el meridiano cero (el de Greenwich) con la línea del ecuador. Ese punto, que queda en el Golfo de Guinea, es fijo en la Tierra. Si fuera móvil, las coordenadas de las ciudades cambiarían con el transcurso de los años, y en cien años Madrid tendría la longitud geográfica que hoy tiene Salamanca. Eso es precisamente lo que ocurre en el cielo: la coordenada de longitud va cambiando a una rata de más de un grado cada siglo debido a la precesión, de manera que después de unos 26000 años vuelve a tener el mismo valor. No es la posición de los astros la que cambia, sino el valor de la coordenada de longitud. En el mapa de las constelaciones del zodiaco se puede ver cómo se mueve el punto cero del sistema de coordenadas, llamado *Primer punto de Aries* o *Punto vernal*. Aunque la palabra "vernal" es antónima de "invernal", ese punto cero no tiene que ver con el verano, sino que es el sitio del cielo por el que pasa el Sol en el equinoccio de primavera.



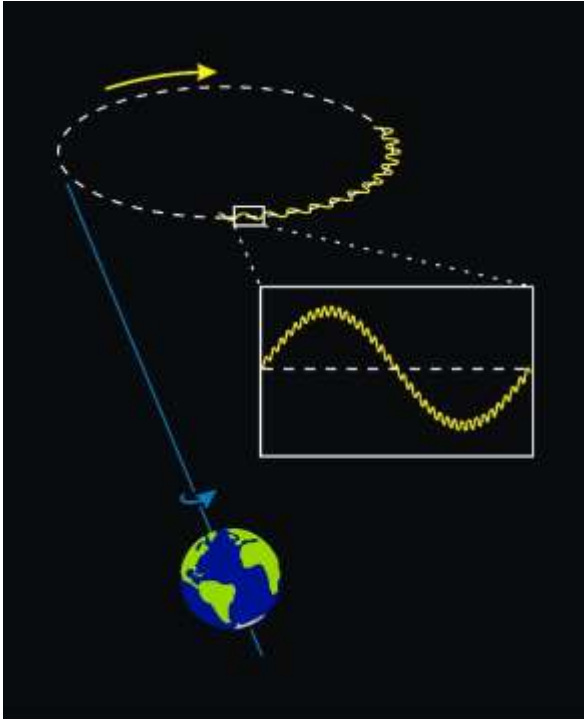
El achatamiento de la Tierra altamente exagerado muestra cómo la gravedad del Sol tira más fuerte del punto A que del B, por estar aquel más cerca, y tiende a enderezar el eje terrestre, causando así la precesión

Aunque parezca extraño, el cambio de posición del eje del planeta se debe a la rotación alrededor de su eje. Al girar, la fuerza centrífuga produce un abultamiento en el ecuador –mal llamado achatamiento polar–, de manera que el planeta no es esférico sino elipsoidal, por lo que hay una concentración de masa a lo largo del ecuador. Al estar inclinado el eje de rotación, la gravedad del Sol atrae con más fuerza al punto más cercano que al más lejano, como si intentara anular esa inclinación. Esta acción continua en el transcurso de millones de años hace que el eje se balancee produciendo la precesión.

Lo más sorprendente del movimiento de precesión es el hecho mismo de haber sido descubierto porque lo fue varios siglos antes de Cristo, cuando no se tenían los instrumentos de precisión con los que hoy podemos detectarlo. Tiene que ver con las dos maneras que tenían los antiguos para saber la duración del año. Una de ellas fue utilizada por los egipcios y consistía en registrar la salida de la estrella Canícula (Sirius) con respecto a la salida del Sol para determinar el día y la hora en la que salían a un tiempo. Haciendo las mediciones durante un largo período, calculaban los días que transcurrían entre dos salidas simultáneas consecutivas de los dos astros, y determinaban el llamado *año sidéreo*. Seguían este método porque la salida helíaca de Sirius coincidía con la crecida del Nilo que era vital para sus actividades agrícolas. El segundo método, usado por los griegos, consistía en medir los días que transcurrían entre dos equinoccios o dos solsticios iguales, por ejemplo entre un equinoccio de primavera y el siguiente. Usando un instrumento llamado *Meridian Armillae* determinaban el momento exacto de ocurrencia de un equinoccio y del siguiente y así sabían la duración del llamado *año trópico*. Entre los años sidéreo y trópico había una pequeña diferencia –el valor actual es de unos 20 minutos– que pasó desapercibida para todos menos para Hiparco de Rodas que hizo sus propias observaciones y las comparó con las de astrónomos anteriores como Metón y Aristarco. Su conclusión, publicada en el libro *Sobre la duración del año*, del que apenas tenemos referencias, fue que el año sidéreo es un poco más largo debido a que el marco de las estrellas fijas va cambiando. Acertó con bastante precisión al calcular la diferencia cuya causa, como sabemos hoy es ese balanceo de la Tierra que llamamos precesión.

4- NUTACIÓN

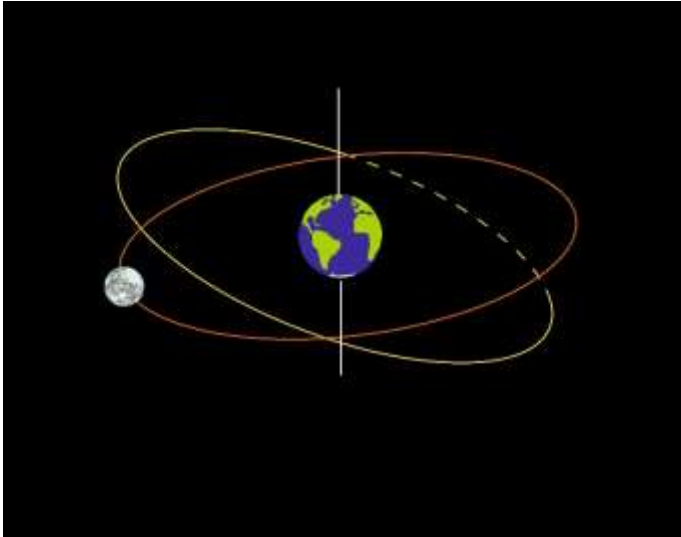
El movimiento de precesión con su período de 26000 años que explicamos antes, no es tan sencillo como parece. Lo veámos como un círculo dibujado en el cielo por el eje polar de la Tierra y así sería si la Tierra fuera una esfera uniforme, sin atmósfera, sin océanos y sin acompañantes cercanos: adiós a la Luna, a los planetas, a los asteroides. Solas la Tierra y el Sol. Pero la realidad es otra. En la Tierra hay corrientes oceánicas y atmosféricas, hay un magma interior que se mueve, y están, además, los cuerpos celestes que atraen en una especie de *tug of war* en todas direcciones. Por esas razones el círculo de precesión no es tan circular y la línea que lo forma no es tan nítida. Si la miramos a gran escala, esa línea tiene en toda su longitud un cabeceo llamado *Nutación*, como si hubiera sido trazada por una mano temblorosa. El nombre es apropiado porque la palabra latina *nutatio* significa oscilación.



La nutación es una oscilación del eje de la Tierra a lado y lado del círculo medio de la precesión. Cada oscilación está compuesta por vibraciones más pequeñas aún, de manera que el eje de la Tierra dibuja en el firmamento una especie de fractal imaginario

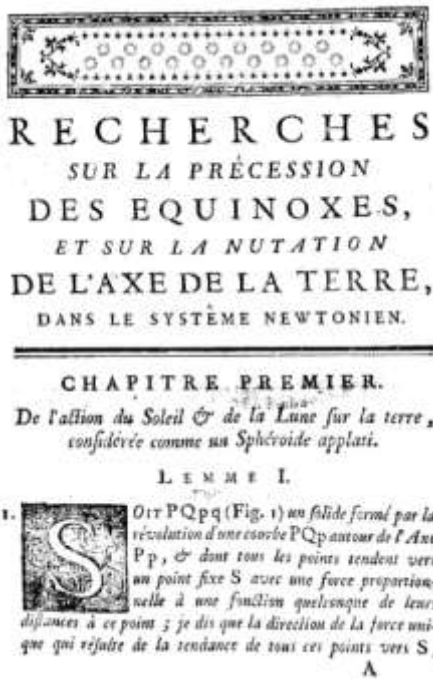
Desde que empieza a trazarse en un momento dado, hasta que se cierra el seudo círculo, se balancea casi 1400 veces, equivalentes a una oscilación de ida y vuelta cada 18,6 años. Viendo este período, un astrónomo listo sospecharía inmediatamente que la Luna tiene algo que ver con él, porque el plano de la órbita de nuestro satélite se balancea en el espacio haciendo un movimiento ondulatorio en ese mismo número de años. Y es verdad: la Luna es la principal causante del movimiento de nutación, al ejercer una fuerza de atracción sobre el abultamiento del ecuador terrestre, de igual manera a como el Sol ejercía su atracción y producía la precesión, según explicamos en la entrega pasada de Astronomía.

Buscando en internet, se encontrarán centenares de gráficos explicativos de la nutación –y de la precesión–, pero muchos de ellos son erróneos, como lo puede comprobar el lector. Basta con mirar el sentido en el que se indica el giro del círculo de precesión, con respecto a la rotación de la Tierra sobre su eje: en la mayoría de ellos aparecen ambos movimientos en el mismo sentido, pero en la realidad van en sentidos contrarios, como se puede ver en la figura que acompaña este escrito. Es posible que la confusión se produzca por el hecho de que en los mapas celestes la precesión se dibuja como un círculo que se desarrolla en el sentido contrario al de las manecillas del reloj. En ese caso lo estamos viendo desde dentro, en cambio en las representaciones como la de este escrito, lo vemos desde fuera, por lo que el sentido de giro es al contrario. En nuestra figura se ha dibujado la nutación como un bamboleo continuo a lado y lado del círculo de precesión, que aparece como una línea blanca punteada. En el recuadro se ve un detalle de esa oscilación y se aprecia que la curva es similar a una sinusoide. Pero no es una línea simple, sino que está compuesta por pequeños movimientos, también de vaivén, de una mayor frecuencia pero de una amplitud bajísima. Las causas principales de estas vibraciones están también en el Sol y la Luna. El tirón gravitatorio del Sol sobre el ecuador terrestre se maximiza cuando uno de los polos apunta hacia él en los solsticios y se minimiza en los equinoccios produciendo, entonces, una pequeña oscilación con un período cercano a los seis meses.



La órbita de la Luna oscila arriba y abajo en un período cercano a los 18 años y es la principal causante de la nutación

Lo mismo hace la Luna una vez cada media revolución alrededor de la tierra, por lo cual, a la anterior se sobrepone otra vibración con período de unos catorce días. Si pudiéramos amplificar aún más el recuadro de la figura para ver uno solo de los pequeños zigzags, notaríamos que tampoco ellos están trazados por una línea limpia sino que hay otras vibraciones aún más pequeñas, de tercer orden, como si se tratara de un fractal. Y es que las causas de estos movimientos no se quedan únicamente en el Sol y en la Luna. También los planetas ejercen su efecto en menor medida y contribuyen así a que la curva de nutación sea tan compleja, que el Earth Orientation Centre, cuya responsabilidad es monitorear los parámetros de orientación del eje de la Tierra, mide esos movimientos en milésimas de segundo de arco. A modo de comparación, un milisegundo de arco es el ángulo bajo el cual se ve una moneda de un euro a una distancia de cinco kilómetros.



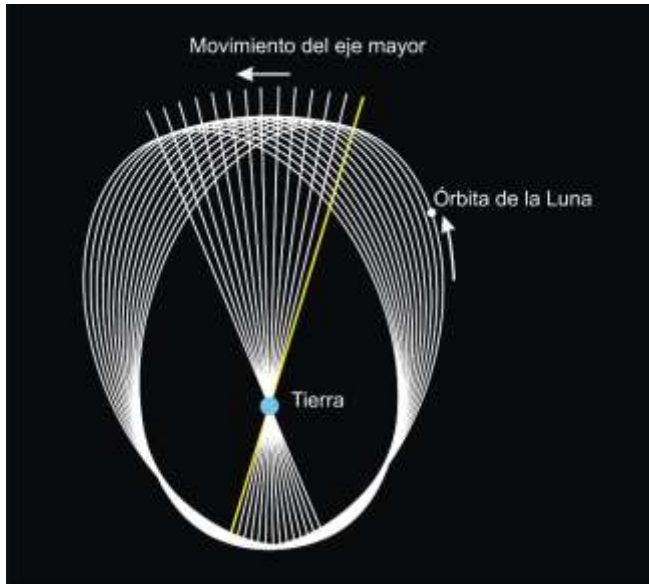
El descubrimiento de la nutación se debe al tercer astrónomo real de Inglaterra, James Bradley. Haciendo observaciones de mucha precisión con el fin de demostrar la existencia de la aberración de la luz, fenómeno que él mismo había descubierto en 1725, encontró que en las posiciones de las estrellas quedaban unos residuos que no se podían explicar por la aberración. Sospechó que existía ese pequeño movimiento causado por la oscilación del plano de revolución de la Luna y, después de 20 años de observaciones dedujo que en efecto, el eje de la Tierra oscila alrededor de una posición media, trazando una pequeña elipse que tiene un eje mayor de unos 18 segundos de arco. Si detuviéramos la precesión y dejáramos sólo la nutación, en el recuadro de la figura se podría ver la forma elíptica de uno solo de los pequeños zigzags.

El problema matemático de la nutación fue resuelto por el matemático suizo Leonard Euler a mediados del siglo XVIII en un documento que presentó ante la Academia de Ciencias de Berlín, tan organizado y bien explicado, que puede seguirse con facilidad sin necesidad de tener conocimientos demasiado especializados en matemáticas. El documento de Euler suscitó una polémica con el matemático francés Jean le Rond D'alambert por la prioridad de la demostración. Es verdad que D'alambert publicó su solución al problema antes que Euler, pero el documento es abstruso y cinco veces más extenso que el de su rival. Por otro lado, hay que reconocer la nobleza de Euler que le dio el crédito al francés al decir que fue su solución la que lo inspiró para estudiar el problema.

Investigación de D'Alembert sobre la precesión y la nutación (1749)

5- BARICIÓN

Además de los cuatro movimientos de la Tierra analizados en las páginas anteriores –rotación, traslación, precesión y nutación–, hay otro, tan abandonado por los matemáticos que calculan órbitas, y tan olvidado por los astrónomos que miran la Tierra como un planeta, que ni siquiera tiene nombre. Para los propósitos de este escrito lo llamaremos *barición* –más adelante explicamos el porqué– y para describirlo empezaremos analizando el movimiento de la Luna alrededor de la Tierra.

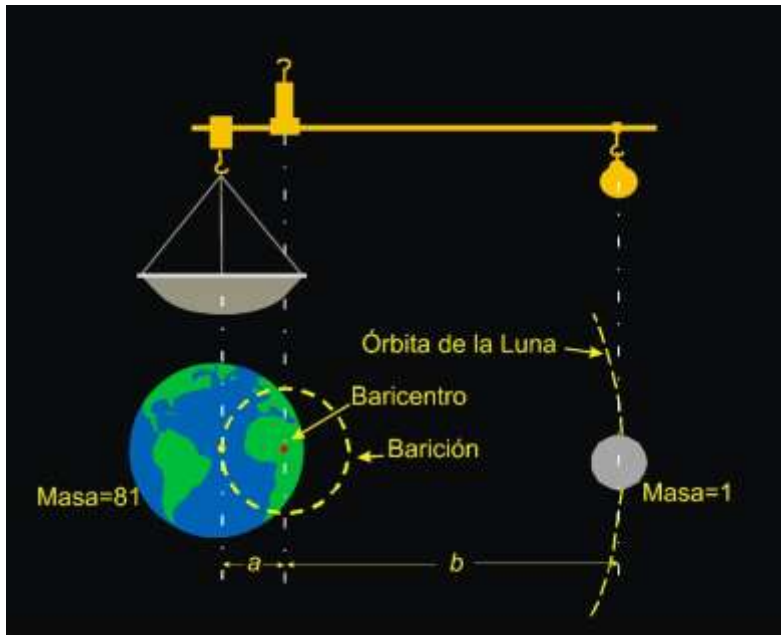


La órbita de la Luna alrededor de la Tierra es una elipse que va girando en el espacio y por tanto no se cierra sobre sí misma, similar a los trazos hechos con un espirógrafo

En un escrito publicado en la revista *Astronomía* en abril de 2017, decíamos que el movimiento real de la Luna es alrededor del Sol, no de la Tierra. En realidad ambas giran alrededor del Sol intercambiando órbitas, pero desde nuestro punto de observación sobre la superficie del planeta es más fácil visualizar a nuestro satélite haciendo una órbita elíptica alrededor del centro de la Tierra. La elipse es una curva alargada que se cierra sobre sí misma y tiene un eje mayor que es, por así decirlo, el diámetro más grande, o la mayor distancia que se puede medir entre dos puntos. Pues bien, la curva que describe la Luna no es en realidad una elipse, porque no se cierra sobre sí misma, pues el eje mayor va rotando en el espacio hasta dar un giro de 360 grados en el transcurso de 8,85 años. El trazo imaginario resultante se parece a los dibujos que se hacían hace años con el juego llamado *Espirógrafo*, que representamos sin escala en la figura 1. En ella tuvimos que exagerar la excentricidad de la elipse pues es tan baja que a la vista es difícil diferenciarla de un círculo. Si tomamos un momento de inicio, por ejemplo, cuando el eje mayor está en la posición mostrada en amarillo, éste se irá moviendo tres grados por cada revolución de la Luna, en el mismo sentido en el que ella se mueve. Hay que añadir que también contribuye a que la curva no se cierre sobre sí misma el hecho de que el eje mayor va cambiando de dimensión de una revolución a otra, aumentando y disminuyendo su longitud, como si la elipse se hiciera unas veces más alargada y otras más redondeada. Éste, sin embargo, es un cambio menor puesto que equivale apenas a un 1,4% de la dimensión original y no se representa en el dibujo.

Ahora bien, ¿qué tiene que ver el movimiento de nuestro satélite con el del planeta que es el que estamos analizando en esta serie de artículos? Mucho porque la Tierra calca con exactitud los movimientos de la Luna, a una escala menor, como si los dos astros fueran la aguja y el lápiz de un pantógrafo. Cuando dos cuerpos están atados por la fuerza de la gravedad, por ejemplo Júpiter y el Sol, o la Tierra y la Luna, el concepto de que uno de ellos gira alrededor del otro es, en cierto sentido, erróneo, porque el centro de giro no es el mayor de los dos, sino un punto intermedio llamado *baricentro*. Es un equilibrio similar al de una balanza romana en la que una gran masa muy cercana al centro de sujeción, es compensada por medio de otra más pequeña, colocada a una mayor distancia (figura 2). Aquí se podría aplicar la ley de las palancas, en la que las distancias respectivas de ambos cuerpos al centro de equilibrio, están en proporción inversa a sus masas:

$$\text{Masa pequeña} \times \text{Distancia grande} = \text{Masa grande} \times \text{Distancia pequeña}$$



El centro de la Tierra da un giro alrededor del baricentro en el mismo tiempo en el que la Luna hace una órbita completa alrededor del mismo

La Luna, que tiene menos masa, hace la fuerza menor, pero su distancia al baricentro es grande. En la tierra, que tiene 81 veces más masa, la distancia al baricentro es 81 veces más pequeña que la que hay desde ese mismo punto hasta el centro de la Luna. Y puesto que la distancia media Tierra Luna es 384400 kilómetros, el centro de la Tierra dista del baricentro 4680 kilómetros. Alrededor de ese punto el centro de la Tierra copia con precisión matemática y a una menor escala esa seudo-elipse o seudo-espiral que hemos descrito como el movimiento orbital de la Luna. Es el quinto movimiento de la Tierra, ejecutado alrededor del baricentro, de donde viene el nombre de *barición* que le hemos dado arriba.

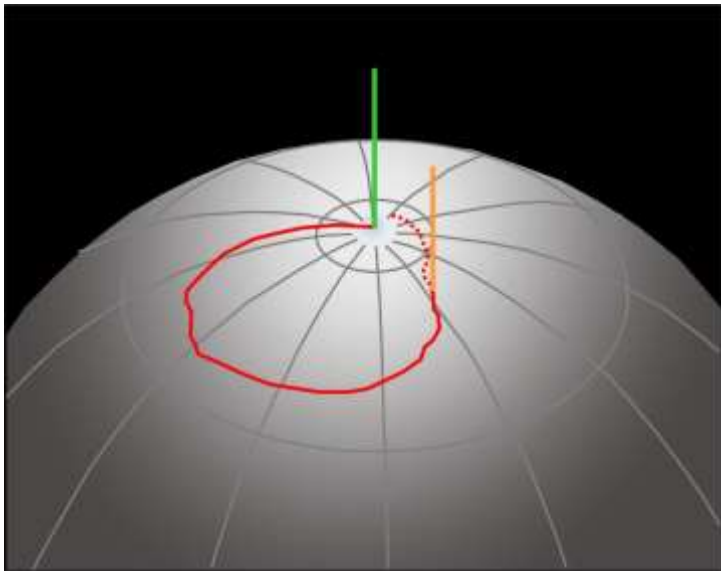
Fecha	Distancia al baricentro (km)		Distancia entre centros (Promedio: 384 400 km)
	Tierra (<i>a</i>)	Luna (<i>b</i>)	
13 jul	4340	352 691	357 031 (perigeo)
27 jul	4933	400 836	405 769 (apogeo)
10 ago	4348	353 320	357 668 (perigeo)
23 ago	4926	400 333	405 259 (apogeo)
8 sep	4388	356 593	360 981 (perigeo)
20 sep	4916	399 515	404 431 (apogeo)
5 oct	4449	361 501	365 950 (perigeo)
17 oct	4908	398 822	403 730 (apogeo)

Puesto que la Tierra tiene un radio de 6370 km, el baricentro queda a unos 1700 kilómetros por debajo de su superficie. Está dentro de la Tierra, pero no en su centro y alrededor de él ejecuta nuestro planeta su danza cuasi elíptica en pequeño, con un eje mayor que también cambia de dirección en el espacio al mismo ritmo que lo hace el de la Luna. En otros sitios del Sistema Solar el baricentro está por fuera del mayor de los dos componentes, no dentro de él como en el par Tierra Luna. Por ejemplo, en el sistema Sol Júpiter, el baricentro se encuentra a una distancia promedio de 742 882 kilómetros del centro del Sol, algo mayor que su radio que es de 695 700 kilómetros.

El valor de 4680 kilómetros dado arriba es un promedio, pero aumenta cuando la Luna está en apogeo –su punto más alejado de la Tierra– y disminuye en perigeo –el punto más cercano–: si la Luna se aparta del baricentro, la Tierra hace lo mismo en dirección opuesta; si el satélite se acerca, el planeta también. En la tabla de la página anterior están las dimensiones de las dos órbitas, la de la Luna y la de la Tierra, para los meses de julio a octubre de 2018. Las dimensiones a y b se refieren a la figura 2. En ella se ve que $a + b = 384\,400$ y que $81 \cdot a = 1 \cdot b$

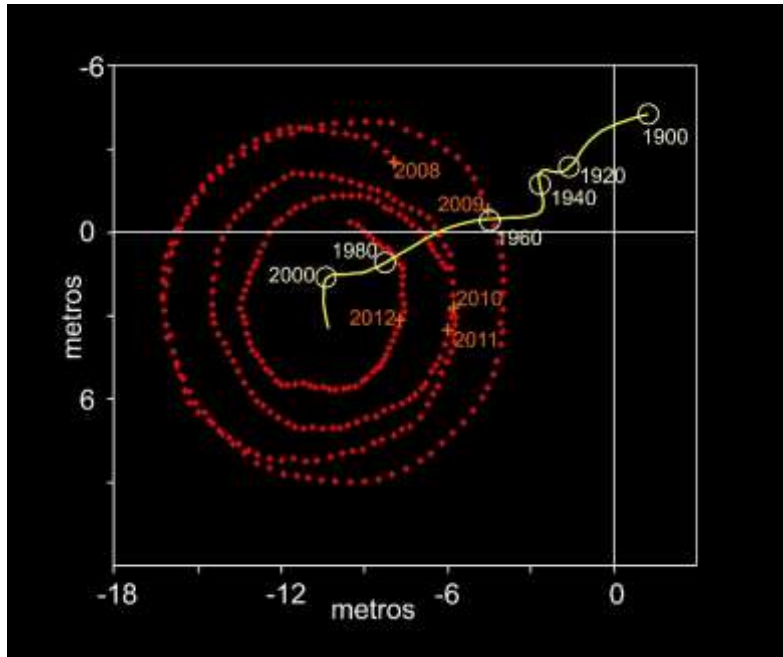
6- MOVIMIENTO DEL POLO

Imaginemos que viajamos al polo —viaje imaginario— y que en el punto exacto en el que el GPS lee los 90 grados de latitud, vemos una varita que emerge de dentro del planeta marcando su eje de rotación, como en los dibujos de los globos terráqueos (línea verde en la figura 1). Si regresamos al mismo sitio después de cierto tiempo, por ejemplo un año, la varita habrá cambiado de sitio (línea naranja). El eje de la Tierra no es constante, sino que se va desplazando sobre la superficie, como lo muestra la línea roja en la misma imagen, dibujando una curva abierta irregular con una lejana aproximación a un círculo. Al moverse el eje, evidentemente cambia la dirección en la que apunta hacia el cielo. Es algo similar al efecto que producía el movimiento de precesión que vimos antes, pero en lugar de ser un fenómeno a largo plazo, la curva se acerca a la posición original en apenas 433 días (fin de la línea punteada roja). En ese tiempo la dirección del eje terrestre cambia una ínfima cantidad que en la superficie de la Tierra equivale a un movimiento de apenas 9 metros. Esta es una de las características sorprendentes de esta oscilación de la Tierra, porque, a pesar de ser tan pequeña, fue descubierta a finales del siglo XIX, cuando no existían satélites artificiales, ni los instrumentos podían alcanzar la precisión de los actuales. El descubrimiento fue hecho por Seth Carlo Chandler, un bostoniano que empezó como calculadora humana en el Observatorio de Harvard cuando aún no había terminado la secundaria y luego fue asistente en el departamento de costas de los Estados Unidos. De allí se retiró y pasó al sector de los seguros de vida, aunque siguió activo como aficionado a la astronomía con tan buen éxito, que un cráter de la Luna fue bautizado con su nombre. El movimiento que describimos también nos lo recuerda: se llama *Bamboleo de Chandler*.



El polo celeste se desplaza unos pocos metros en un año, siguiendo una curva sobre la superficie llamada Polhody, que casi alcanza a cerrarse en un período de 433 días

Más sorprendente aún que su descubrimiento es el hecho de que esta irregularidad en el movimiento terrestre fue predicha doscientos años antes por Isaac Newton en sus *Principia*, de 1667. Un siglo después, en el siglo XVIII, Leonhard Euler calculó su período en 305 días y la diferencia, que pareciera un error de cálculo, fue explicada, ya en el siglo XX, por Simon Newcomb, como debida a la falta de rigidez del planeta. Poco tiempo después del descubrimiento de Chandler la Asociación Geodésica Internacional fundó el Servicio Internacional de Latitud (ILS), con seis observatorios distribuidos en todo el mundo, con el fin de estudiar este exótico movimiento de la Tierra. Con el advenimiento de los ordenadores y los satélites artificiales, los observatorios fueron sustituidos por nuevas tecnologías y en 1987 la Unión Astronómica Internacional creó el Servicio Internacional para la Rotación de la Tierra (IERS) que inició labores el 1 de enero de 1988 en sustitución del ILS.



A largo plazo, el Polhody es una espiral itinerante cuyo centro se mueve sobre la tierra unos 14 metros por siglo

El bamboleo de Chandler no es único, sino que es el componente principal de un movimiento a más largo plazo llamado *Polhody*. Se trata de una deriva paulatina del Bamboleo que es precisamente la que impide que el círculo se cierre sobre sí mismo y hace que se convierta en una especie de espiral itinerante. En la segunda figura se puede ver en rojo el trayecto seguido por el Polhody entre los años 2008 y 2012. Se observa que en un año da un poco menos de una vuelta ya que el período del Bamboleo es 1,19 años (433 días). La línea amarilla es el trayecto medio desde que se fundó el Servicio Internacional de Latitud en 1899, y mide apenas unos 14 metros que, puestos en la superficie de la Tierra, equivalen a que el eje del planeta se ha inclinado en el espacio medio segundo de arco durante esos 112 años.

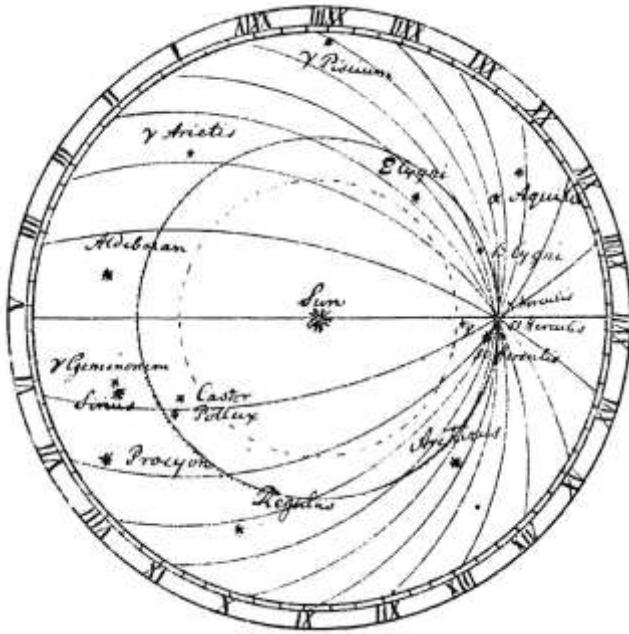
Es evidente que si el eje de la Tierra se mueve, aunque sea una cantidad tan pequeña como la debida al bamboleo de Chandler, alguna influencia debe tener sobre las masas de agua que la cubren. ¡No se puede remover un recipiente con agua sin que en la superficie se noten las consecuencias de ese movimiento! En efecto, el bamboleo produce una pequeña marea que hace subir y bajar la superficie de los océanos unos seis milímetros. No es una cantidad considerable ni afecta de manera alguna a los lugares costaneros, pero tiene la característica de ser la única marea producida por el propio planeta, no por un cuerpo exterior a él.

Ahora bien, ¿a qué se debe esa minúscula vibración periódica del eje terrestre? Durante mucho tiempo se desconocieron sus causas hasta que en 2001 el geofísico Richard Gross logró modelar las variaciones de presión en el fondo del océano, que tiene una cierta flexibilidad. Esos pequeños cambios de presión, que tienen su origen en los vientos y en la fluctuación de la temperatura y la salinidad del océano, mueven el lecho marino deformando así el elipsoide terrestre. En ocasiones ocurren eventos puntuales que producen deformaciones en la corteza terrestre y hacen que el Polhody salga de su regularidad y dé un salto en una dirección imprevista. Tal es el caso de los grandes terremotos, como el de 1960 en Chile o el del año 2004 en Sumatra. En este último, se pudo medir el desplazamiento del polo que fue de diez centímetros en un solo día.

Este que podríamos llamar “micromovimiento” de la Tierra, tiene componentes menores que se pueden medir con los equipos de la actualidad. Eso quiere decir que las líneas rojas de ambas ilustraciones no son tan pulidas como se ven, sino que están trazadas, igual que la nutación, por una mano trémula.

7- MOVIMIENTO HACIA EL ÁPEX

En los numerales anteriores hablamos de otros tantos movimientos de la Tierra –rotación, traslación, precesión, nutación, barición y movimiento del polo–, de los que se podría decir que son propios del planeta porque se deben a sus características físicas o al hecho de tener a la Luna como compañera de viaje alrededor del Sol. Hay otros movimientos que no le son propios a nuestro planeta, pero que participa de ellos por pertenecer a un grupo específico de astros, por ejemplo, al Sistema Solar. Notemos que si la Tierra desapareciera por arte de magia, los seis movimientos descritos se esfumarían con ella; en cambio los que describiremos en esta entrega y en la próxima se producirían igualmente como si nada hubiera pasado. Uno de ellos es el movimiento del Sol y de todo su séquito de planetas.

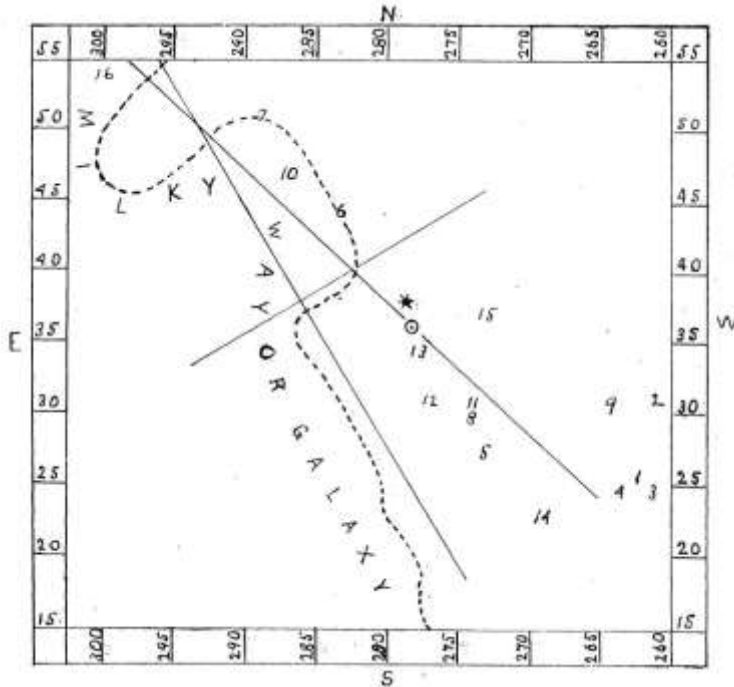


Dibujo original hecho por William Herschel en 1781 en el que fija la dirección del movimiento del Sistema Solar (Ápex) en la constelación de Hércules

El primero en pensar que este movimiento podría existir fue el astrónomo alemán Tobias Mayer cuyo raciocinio elemental del año 1760 fue el siguiente: "...si caminamos por un bosque, los árboles que están al frente parecen separarse unos de otros, mientras que los que están justo en la dirección opuesta parecen juntarse...". Extrapolada al Sistema Solar esa perspectiva, nos dice que si el Sol se moviera entre las estrellas que lo rodean, las que están delante parecerían alejarse unas de otras, mientras que las de atrás parecerían juntarse. La comprobación puede hacerse por medio de los movimientos propios de las estrellas que son tan leves, que eran desconocidos en la antigüedad, pero conocidos en tiempos de Mayer. Desde 1718 Halley había calculado los de Sirius y Arcturus, comparando las posiciones de esas estrellas con las de catálogos tan antiguos como el de Tolomeo. En ese período, cercano a los 1500 años, Sirius se había movido un poco más de un grado y Arcturus más o menos la mitad de esa cantidad. Valores tan pequeños que apenas llegan a un par de segundos en un año, no pueden ser medidos sino comparando las posiciones en períodos de tiempo de muchos años. En la época de Mayer se conocían los de casi un centenar de estrellas, pero sólo unas 15 estaban en posición adecuada para hacer una estimación del movimiento del Sol. Tan escasa cantidad de datos llevó al astrónomo a pensar que su raciocinio era correcto pero que se necesitarían varios siglos para recolectar datos en cantidad suficiente para estimar la dirección del movimiento del Sol.

Esta opinión, respaldada por otros astrónomos de la época, era muy acertada, pero no contaba con la sagacidad de William Herschel que en 1781 era un músico profesional y un aficionado a la astronomía relativamente desconocido. No sería sino hasta el año siguiente cuando se convertiría en el astrónomo más famoso de su época, al descubrir el planeta Urano. Él amplió el razonamiento de Mayer de la siguiente manera: "Si el Sol se mueve hacia un punto –al que

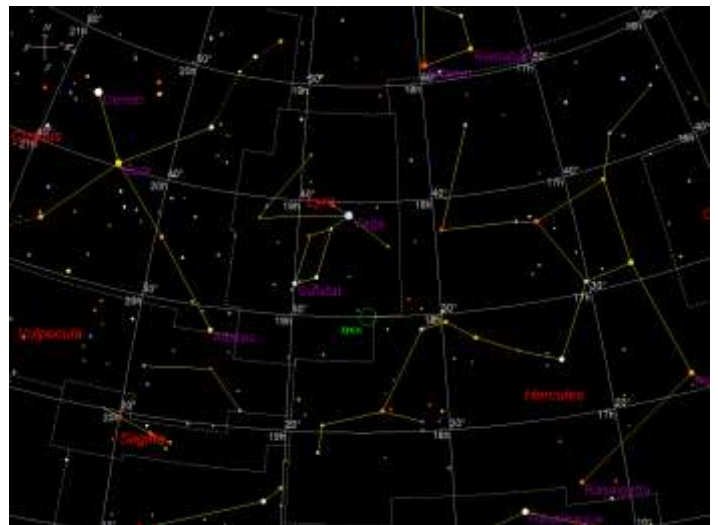
hoy llamamos *Ápex*—y si el punto opuesto del cielo es el *Antiápex*, todas las estrellas parecerían desplazarse siguiendo un círculo que parte del *Ápex*, pasa por la estrella y llega hasta el *Antiápex*. Hizo un dibujo con las estrellas que analizó y con las líneas derivadas según sus movimientos, y encontró que se juntaban en un punto cercano a la constelación de *Hércules*. Fue el primer estimativo de la dirección del movimiento del Sol, del que también participa la Tierra.



1	Herschel	1783
2	Argelander	1837
3	Airy	1859
4	Main	1859
5	Ludwig Struve	1887
6,7	Lewis Boss	1890
8	Kapteyn	1893
9,10	Oscar Stumpe	1896
11,12	Newcomb	1899
13	Newcomb	1903
14,15	Dyson Thackeray	1905
16	Comstock	1906

Varios intentos de encontrar el ápex desde Herschel hasta principios del siglo XX

*El círculo verde muestra la posición del *Ápex* determinada en nuestros días por medio de coordenadas visuales de las estrellas*



Después de Herschel muchos intentaron encontrar el *Ápex* utilizando para ello diferentes catálogos. Hasta los primeros años del siglo XX se habían hecho más de 20 determinaciones, todas con resultados distintos, aunque no muy lejanos del punto señalado por aquel. Aún hoy podemos encontrar varios valores para las coordenadas del *Ápex*, a pesar de

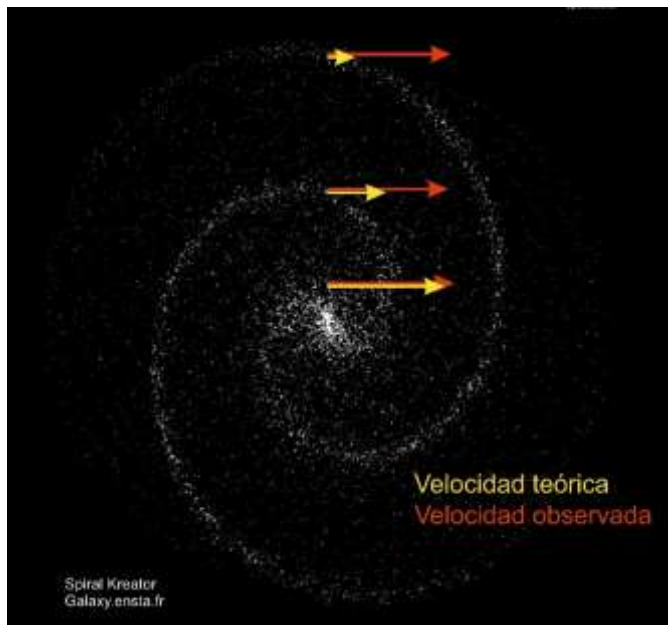
que tenemos catálogos con miles de millones de estrellas y que podemos devorar números en los ordenadores a velocidades enormes. La razón es que no es lo mismo determinarlo con las posiciones visuales de las estrellas que con las tomadas por medio de radio astronomía o de otras técnicas, y que, aunque parezca absurdo, se obtienen resultados diferentes si se calcula con las estrellas de un tipo –por ejemplo, A–, que con las otro, como el F. Pero sabemos que, aunque los puntos difieren, el sentido general, es hacia la frontera entre las constelaciones Hércules y Lyra, a menos de 10 grados de la determinación original de Herschel.

También se ha logrado calcular la velocidad del movimiento que, en el siglo XX se estimó en unos 20 km/s (72 000 km/h), pero que en estudios recientes, usando métodos más refinados, se ha rebajado hasta en un 30%.

En fin, que nosotros los terrícolas viajamos a casi 50 000 kilómetros por hora en una dirección cercana a la de la estrella Vega, y venimos de un punto que se ubica en la pata trasera del Can Mayor, en el hemisferio sur. Al mismo tiempo que hacemos ese recorrido, nos desplazamos girando alrededor del Sol debido a la traslación. Esto arroja una resultante en forma de espiral, de manera que nuestro movimiento es un tirabuzón en medio de las estrellas. Penetramos la galaxia de igual manera que un sacacorchos perfora el tapón de una botella de buen vino.

8- GIRO DE LA GALAXIA

Además de moverse dentro de la Vía Láctea, como lo explicamos antes, nuestro Sistema Solar, y con él la Tierra, participa de los distintos movimientos que tiene la propia Galaxia que, no sólo se desplaza, sino que gira alrededor de su centro como lo hacen los planetas. Examinemos en primer lugar el movimiento de rotación, que se ha medido desde el siglo pasado cada vez con más precisión, por medio del análisis espectral y la determinación muy exacta de la distancia a estrellas y fuentes de radio localizados en lugares muy apartados de la Galaxia. Hoy hay observatorios construidos especialmente para hacer ese tipo de mediciones, como el japonés VERA que está activo desde el año 2003 con cuatro antenas separadas miles de kilómetros, y es capaz de medir ángulos en el cielo con una precisión de millonésimas de grado. Sería equivalente a ver una moneda de un euro colocada en la superficie de la Luna.



La velocidad con la que gira una estrella alrededor del núcleo de una galaxia debería decrecer con la distancia al centro (flechas amarillas), pero la observación muestra que permanecen casi constantes como se representa con las flechas rojas

Como resultado de estas observaciones se deduce la llamada *curva de rotación* que relaciona la velocidad de un cuerpo componente de la Galaxia, por ejemplo, el Sol, con la distancia que lo separa del núcleo galáctico. Es el mismo concepto de la tercera ley de Kepler que conecta distancias con períodos de traslación de los planetas, y las trayectorias son similares a las de estos, que se mueven siguiendo órbitas alrededor del Sol. Ese movimiento alrededor de un centro a nivel planetario, genera una fuerza centrífuga que tiende a lanzar el planeta hacia afuera, pero se compensa con la fuerza de atracción gravitatoria concentrada en el centro del Sol. Los planetas más lejanos son atraídos con menor fuerza—Ley de la Gravitación Universal—por lo que deben viajar más lentamente para generar menos fuerza centrífuga compensatoria. A nivel galáctico también las estrellas más alejadas del núcleo central deberían viajar más lentamente porque la fuerza de atracción hacia el centro es menor por estar más lejos, pero en ellas la teoría parece no cumplirse. Como resultado del estudio de las curvas de rotación de las estrellas se puede calcular la velocidad a la que viajan alrededor del centro galáctico, pero las mediciones no concuerdan con lo que predicen las matemáticas, porque se observa que las más alejadas del núcleo van demasiado rápido en su órbita (figura 1). Según eso la Galaxia debería ser inestable, puesto que las estrellas cercanas a la periferia tendrían que salir disparadas ya que la gravedad no es suficientemente grande para retenerlas. Pero el hecho paradójico, derivado también de las observaciones, es que la Galaxia es estable y que no se dispersará en los próximos miles de millones de años. Hay que anotar que, aunque las distancias y las velocidades son miles de veces más grandes en el caso de la Galaxia que en del Sistema Solar, no lo son tanto como para que se tengan que usar ecuaciones relativistas, sino que se tratan con la física newtoniana que aplicamos a los fenómenos corrientes de la Tierra.



Nuestra Galaxia podría tener un aspecto similar al de la UGC 12158 mostrada en la foto de arriba tomada por el Telescopio Espacial Hubble. De canto, se vería como la galaxia aguja, de la imagen de abajo, un blanco predilecto de los astrofotógrafos aficionados

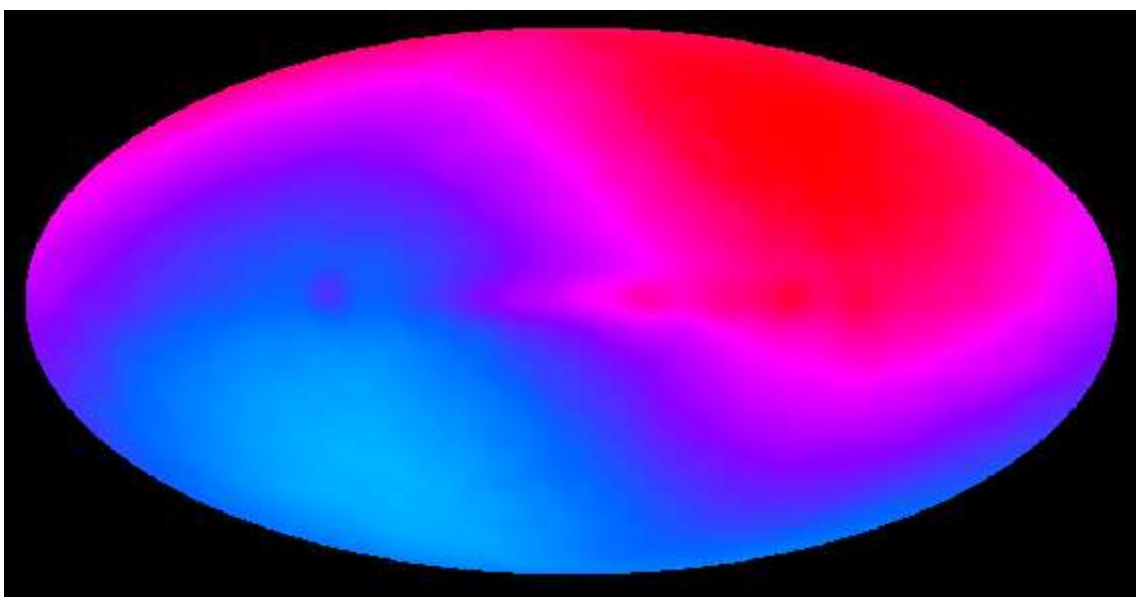
El exceso de velocidad en las estrellas lejanas se ha detectado también muchas galaxias diferentes a la nuestra, a las que se les ha podido calcular la curva de rotación. Parece como si los componentes básicos del Universo, incluida la Vía Láctea, tuvieran mucha más masa que la que muestran según la cantidad de estrellas que vemos en ellas. De ahí surgió, ya en 1933, el concepto de Materia Oscura para compensar la que hace falta en las galaxias. Sería una materia transparente, imposible de ver en ninguna longitud de onda, que parece estar presente en el Universo entero y constituye un porcentaje importante de la masa total. En la Vía Láctea podría haber diez veces más materia oscura que materia ordinaria.

Nuestra Galaxia tiene forma de un disco aplanado formado por brazos espirales que salen de una barra central, todos ellos, tanto los brazos como la barra, compuestos por estrellas en una cantidad estimada que sobrepasa los 150 mil millones. Se cree que su aspecto es similar al de la galaxia UGC 12158 localizada en la constelación de Pegasus, y de perfil podría parecerse a la llamada Galaxia Aguja, de la constelación Coma Berenices (figura 2). El diámetro estimado del disco sobrepasa los cien mil años luz, que en unidades más terrenales sería una cantidad inimaginable: más de un trillón de kilómetros. Se sale totalmente de la escala humana. Si la luz tarda cien mil años en ir de un extremo a otro, imaginemos una de nuestras naves espaciales, como la Nuevos Horizontes, que llegó a Plutón hace unos años: ¡tardaría dos mil millones de años! Nuestro Sol es una de tantas estrellas que la componen, ni de las más grandes ni de las más pequeñas, localizada a unos 26 mil años luz del centro, un poco más de la mitad del camino hasta la periferia, en uno de los brazos espirales, llamado Brazo de Orión.

Pues bien, el Sol con todo su séquito participa del giro de ese carrusel y tarda 250 millones de años en dar una vuelta completa. Un cálculo sencillo nos dice que su velocidad es cercana a los 200 kilómetros por segundo o, en unidades más reconocibles, más de 700 mil kilómetros por hora. Y ahí, a esa velocidad vamos nosotros, habitantes del planeta Tierra. Si comparamos este movimiento de nuestro planeta con los que hemos venido analizando en las últimas entregas de Astronomía, veremos que el giro alrededor de la Galaxia es, con mucho, el más significativo de todos, el que más incógnitas plantea y, por el momento, el más difícil de detectar.

9- EL GRAN ATRACTOR

En las últimas ocho entregas de Astronomía hemos ido analizando otros tantos movimientos de la Tierra, no sólo los propios del planeta, sino los que tiene por pertenecer a grupos: al par Tierra – Luna, al par Tierra – Sol, al Sistema Solar, a la Galaxia. A todos ellos se suma el hecho de que la Vía Láctea gira alrededor del Grupo Local de galaxias, al que pertenece; que este grupo viaja vertiginosamente hacia el Cúmulo de Virgo que parece querer devorarlo y que todos estos mundos caen en vórtice hacia un Gran Atractor Universal. Como en el ajedrez de Borges, este juego también parece infinito, pero hoy terminamos con ese último movimiento, el que parece tener todo lo existente hacia el Gran Atractor. No se trata del movimiento relativo de las galaxias que se separan entre sí debido a la expansión del Universo. Ese movimiento no tiene una dirección determinada, sino que cada galaxia lejana parece alejarse de las otras, mientras que la nuestra la percibimos quieta. Pero si pudiéramos mirarla desde otra cualquiera, veríamos como ella también se aleja. El mejor símil que he visto para visualizar esa expansión es el de un globo al que le han pintado puntos que representan las galaxias; a medida que lo hinchamos, todos los puntos parecen alejarse unos de otros, sin importar cuál de ellos tomemos como referencia.



En esta imagen del satélite COBE se señalan con colores las diferencias de temperatura del Universo. La región más caliente hacia la que nos dirigimos se muestra en rojo y la más fría en azul. Cada una de ellas tiene una diferencia de tres milésimas de grado con la media

El inconveniente para detectar el movimiento hacia el Gran Atractor es que, puesto que se trata de un cúmulo de cúmulos de galaxias, se necesita un marco de referencia en reposo, tan grande, que debería abarcar todo el Universo. Lo interesante es que ese marco existe y se llama el Fondo Cósmico de Microondas. Es un ruido de fondo que había sido predicho desde la década del 40 en el siglo XX, pero no existía un equipo capaz de detectarlo. Era, según la teoría, una especie de eco de los primeros momentos después del Big Bang, cuando el Universo dejó de ser opaco para la luz visible. En 1965 Arno Penzias y Robert Wilson experimentaban con una antena especial, en una investigación que nada tenía que ver con el Universo ni con el Big Bang, sino con la telefonía inalámbrica, y accidentalmente detectaron una radiación que venía de cualquier dirección en la que ellos orientaran la antena. Después de revisar en detalle el montaje de la antena, de considerar la posibilidad de que se tratara de comunicaciones de radio de origen terrestre y de consultar con especialistas en la materia, se llegó a la conclusión de que la radiación provenía del espacio. Lo interesante fue que las características de esas emisiones coincidían bastante bien con lo que se esperaba como eco de los primeros tiempos del Universo. Por ese descubrimiento, Penzias y Wilson recibieron el Premio Nobel de Física en 1978.

Después de la primitiva antena de 1965 se han construido muchas otras, cada vez más complejas y de mayor precisión, hasta llegar en la era espacial, a antenas-satélite que pueden medir pequeñas fluctuaciones del fondo imposibles de imaginar sólo unos años antes. El COBE (Cosmic Background Explorer), por ejemplo, lanzado en 1989, podía medir diferencias en ese fondo de microondas de una parte en cien mil. Pues bien, con toda esa tecnología se ha detectado que, en una cierta dirección, el Fondo de Radiación de Microondas es tres milésimas de grado más caliente que la media, mientras que en la opuesta es más frío en exactamente esa misma cantidad. La interpretación de ese fenómeno es que hay una compresión en un sentido debida al movimiento de las galaxias –incluida la nuestra—hacia el Gran Atractor, y una expansión en el sentido opuesto. Es un fenómeno similar al del efecto Doppler que se estudia en la acústica de un emisor de sonidos en movimiento: las ondas acústicas se comprimen en el sentido de la dirección del movimiento y se expanden en el opuesto. El resultado de los cálculos dice que esas diferencias corresponden a una velocidad de nuestro Grupo Local de galaxias de unos 600 kilómetros por segundo en dirección a la constelación del Centauro. Es una velocidad tan considerable, que equivale a hacer un viaje a la Luna en diez minutos, o, en palabras más técnicas, es el 0,2% de la velocidad de la luz.

De esa carrera vertiginosa participa nuestro planeta y nosotros con él, y ese es, con mucho, el movimiento más veloz de los que hemos analizado en las últimas entregas de Astronomía. En la imagen del COBE se representan con colores las diferencias del fondo de microondas: el rojo es la dirección en la que viajamos, en la que la temperatura es ligeramente más elevada, mientras que la azul es la dirección de la que venimos a la velocidad anotada. ¿A qué se debe ese movimiento? ¿Qué fuerza descomunal impulsa a miles de galaxias a moverse en la misma dirección como bandada de aves migratorias? Hasta el presente nadie lo sabe, pero seguramente no será por mucho tiempo. Cada perfeccionamiento de los equipos para refinar las observaciones trae consigo nuevas incógnitas que, para el hombre, el ser curioso por excelencia, no son más que un reto que no puede resistirse a desvelar. Como en los movimientos de la Tierra, también el juego de los retos es infinito.

10- MOVIMIENTO DEL POLO MAGNÉTICO

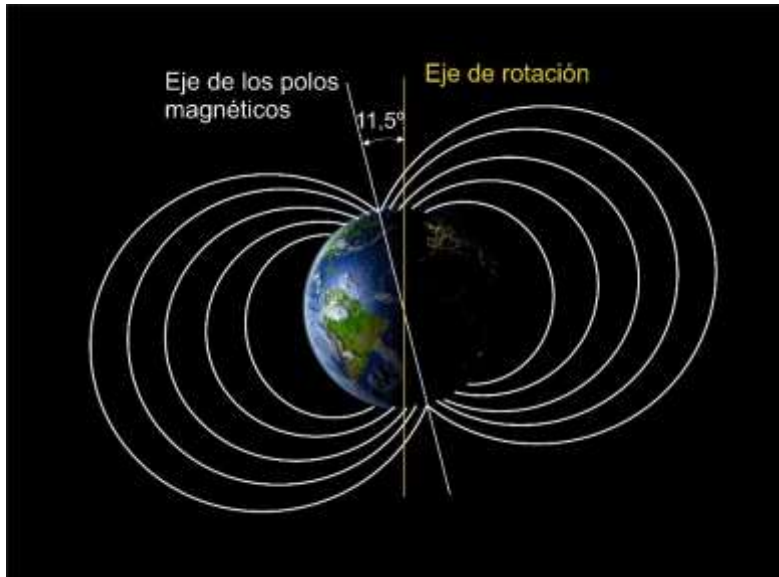
En los nueve numerales anteriores escribimos sobre otros tantos movimientos de la Tierra, desde la rotación y la traslación, que son los más notorios, hasta los que tiene por pertenecer a una galaxia —la Vía Láctea— que vaga por el Universo conocido. Como complemento de esos movimientos, hoy nos referiremos a otro que, aunque no es evidente en el exterior, tiene que ver con algunos que ocurren muy en el interior del planeta. Se trata del movimiento de los polos magnéticos terrestres. Ante todo, digamos que la Tierra es un enorme imán como los de laboratorio o los de nevera y, como ellos, tiene un polo positivo y uno negativo. Esos dos polos están cerca de los geográficos, pero no exactamente en ellos, sino que la línea imaginaria que los conecta está inclinada unos once grados y medio con respecto a la línea que une los polos geográficos. Este imán de tamaño planetario ha tenido su utilidad para la navegación durante más de diez siglos, porque es él el que hace que las brújulas funcionen, aunque con un cierto error llamado “declinación magnética”. Por ejemplo, en Barcelona, una brújula apuntará casi un grado hacia el Este del norte geográfico, mientras que en Madrid lo hará más de medio grado hacia el Oeste. En otras partes del mundo, la desviación es mucho mayor, como es el caso de Río de Janeiro en donde la brújula apunta 23 grados al oeste del norte geográfico. No hay que fiarse, por tanto, de las brújulas, a menos que se sepa cuál es la corrección que hay que aplicar en un lugar para obtener el norte verdadero. Los valores diferentes de la dirección de la brújula obedecen a que la Tierra-imán no es un dipolo perfecto, sino que hay sitios con mayor intensidad magnética que otros, de los cuales, los dos polos son los más fuertes.



En amarillo se puede ver el movimiento del polo magnético cercano al norte geográfico, desde principios del siglo XX

Aparte de estas variaciones en la intensidad y dirección del campo, también hay cambios que ocurren con el paso del tiempo, de tal manera que la desviación magnética de hoy es diferente de la de hace diez años y estará obsoleta en menos de una década. La razón de ese cambio está en que los polos magnéticos no están quietos en dos lugares opuestos de la Tierra, sino que se van desplazando con el transcurso de los años, como se ha podido registrar desde mediados del siglo XIX. Tomemos como ejemplo el movimiento del polo magnético cercano al polo norte geográfico, durante los últimos dos siglos. En 1831 estaba cerca de la actual Taloyoak que es la comunidad más al norte del territorio no insular canadiense; a mediados del siglo XX estaba en el extremo norte de la isla Príncipe de Gales; a principios del XXI pasó cerca de Isachsen y salió del territorio insular para continuar hacia el norte por el Océano Ártico. En el año 2018 cruzó la línea internacional del tiempo y pasó al lado Este de la Tierra, acercándose a unos 1300 kilómetros del polo norte geográfico desde donde se dirige rápidamente hacia Siberia. En todos estos años la velocidad de movimiento ha acelerado desde 4 hasta los 55 kilómetros por año que tiene hoy, pero no ha acelerado a una rata constante. En los últimos 20 años se ha movido tanto como en los primeros 160. Nadie sabe a ciencia cierta a qué se debe la aceleración, pero todo parece indicar que hay dos territorios con campo magnético que se disputan el polo, uno en Canadá y otro en Siberia. Por el momento, el de Siberia parece estar ganando la partida.

Una aceleración tan rápida ha forzado a los científicos que monitorean los polos magnéticos a revisar los modelos que se usan para geolocalización de los barcos, los aviones e incluso los teléfonos móviles, porque el error está llegando a límites inaceptables para una navegación segura. Se pensaba que los modelos serían vigentes al menos hasta el año 2020, pero ahora se considera que es necesario adelantar su actualización.



Las líneas del campo magnético terrestre van de uno a otro polo magnético. Estos están inclinados un ángulo de unos 11,5º con respecto a los polos geográficos

El desplazamiento del polo magnético es diferente a otro fenómeno que se da a intervalos de tiempo de millones de años, que consiste en el intercambio de los polos: cada uno de ellos ocupa el lugar que antes ocupaba el otro. Eso quiere decir que después de que ocurre un fenómeno así, las brújulas quedan apuntando en la dirección contraria durante siglos, hasta que llegue la próxima transformación. No se trata de un evento que ocurra de manera instantánea, sino que tarda varios siglos en efectuarse. La última vez que hubo intercambio de los polos fue hace unos 700 000 años, como puede comprobarse analizando la magnetización de ciertos minerales de esa época lejana. Hoy, algunos medios científicos creen que está próxima a ocurrir de nuevo una reversión de los polos.

La razón para que en la Tierra haya un campo magnético está en su interior. Un núcleo sólido y rotatorio, compuesto por metales, nada en un océano líquido, también de hierro y otros metales conductores de la electricidad. Dentro del líquido se generan movimientos causados por varios factores, en especial por la convección producida por las diferencias de temperatura, y esos movimientos crean corrientes eléctricas que generan un campo magnético. Marte, por ejemplo, no tiene campo magnético global porque su interior se solidificó hace mucho tiempo y, por tanto, no hay corrientes que generen el planeta-magnetismo.

El magnetismo terrestre genera líneas de campo que van de un polo al opuesto, similares a las que se ven cuando se acerca un imán de laboratorio a un puñado de polvo de hierro. Parece como si todas esas líneas salieran de un punto y llegaran hasta otro, formando cascos como los de una naranja y dejando dos agujeros en los sitios de partida y de llegada. El campo magnético hace de escudo protector contra las partículas dañinas provenientes del Sol, que intentan llegar hasta la superficie de la Tierra, pero por los agujeros se alcanzan a colar algunas. Se presenta, entonces, el fenómeno de las auroras polares, un extraordinario espectáculo que nos permite ver desde el exterior los misterios que oculta la tierra en las profundidades metálicas de su centro.