

---

---

# Y sin embargo se mueve...

Ángel Gutiérrez y David Zurdo

---

## UN ASUNTO COMPLICADO

Hay historiadores que mantienen que Galileo jamás dijo “Y sin embargo se mueve”, mientras abandonaba la sala del juicio en el que era acusado por atreverse a afirmar que la Tierra giraba sobre sí misma y alrededor del Sol, refutando la teoría comúnmente admitida de que era éste el que lo hacía alrededor de aquélla.

Quizá, en efecto, nunca dijera estas palabras. Quizá, con el paso del tiempo, ocurrió algo similar a lo que sucedió con el célebre Sherlock Holmes, a quien se le atribuye la también célebre frase “Elemental, querido Watson”, que al parecer no salió de la imaginación del creador del detective, pues jamás le hizo decirlo en ninguno de sus libros.

En cualquier caso, fueran cuales fuesen las verdaderas palabras de Galileo, lo que sí es cierto es que la respuesta a la pregunta de si nuestro planeta es el que gira en torno al Sol, o si es éste el que lo hace alrededor de la Tierra, no es ni mucho menos obvia, ni elemental; ni siquiera lo sería para alguien tan inteligente como Sherlock Holmes.

Cualquier persona que alguna vez haya estudiado Astronomía sabe que, en una asombrosa cantidad de situaciones, es equivalente considerar que la Tierra se



Figura 1. Galileo Galilei

mueve alrededor del Sol (movimiento de *traslación*), o viceversa, es decir, que el Sol lo hace en torno a ella (siguiendo aparentemente una órbita contenida en la llamada *Eclíptica*). Siendo así, no es difícil imaginar lo complicada que resulta esta cuestión desde un punto de vista técnico.



## LOS PELDAÑOS DE LA ESCALERA

Suele admitirse que la Astronomía es la ciencia más antigua que existe. Al pueblo babilónico, que se remonta a una época tan antigua como el siglo XX a.C., se deben las primeras observaciones astronómicas y muchos descubrimientos relacionados con esta ciencia. Los babilonios definieron el *Zodiaco* como una franja dispuesta a ambos lados de la Eclíptica, y dividida en doce partes que contenían doce constelaciones, o agrupaciones de estrellas, a las que dieron nombre y que, en apariencia, el Sol iba atravesando a lo largo de los distintos meses del año. Los astrónomos babilónicos eran capaces de predecir eclipses, determinar las fases de la Luna y también las posiciones de ésta y de los planetas que entonces se conocían: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno (y la Tierra, claro está).

*NOTA: El Zodiaco tiene un ancho de unos nueve grados sexagesimales hacia ambos lados de la Eclíptica. La elección de este valor no fue arbitraria; los babilonios determinaron que dentro de esta franja se movían los planetas conocidos. Esta afirmación también es cierta para todos los demás planetas del Sistema Solar cuya existencia se ignoraba entonces, con la excepción de Plutón, que describe una órbita mucho más inclinada que la de los demás.*

A pesar de estos y otros avances que trajeron consigo las numerosas observaciones de los babilonios, su comprensión real de los fenómenos astronómicos era bastante reducida.

Los sucesores del pueblo babilónico fueron los griegos, que no se limitaron únicamente a estudiar los

movimientos del Sol, la Luna y los planetas, sino que trataron, además, de ir más allá, y comprender la auténtica naturaleza del Universo y de los cuerpos celestes que lo pueblan. El primer gran astrónomo griego fue uno de los *Siete Sabios*, el matemático y filósofo Tales de Mileto, que vivió entre los siglos VII y VI a.C. En lo que se refiere a la Astronomía –pues cultivó también otras ciencias como la Filosofía y la Geometría–, se dedicó al perfeccionamiento de las técnicas matemáticas para determinar eclipses, heredadas de los babilonios, y extendió, entre los navegantes, el método de orientación basado en la inmovilidad de la estrella Polar, la única que, para nosotros, se mantiene aparentemente fija en la esfera celeste.



Figura 3. Pitágoras (fuente: Encarta)

El célebre Pitágoras y sus múltiples discípulos se aventuraron, ya en el siglo VI a.C., a afirmar que la Tierra era esférica. A pesar de la innovación que esto suponía, tal afirmación se basó más en cuestiones metafísicas que en observaciones científicas. Los pitagóricos consideraban que la esfera es la más perfecta de las figuras y que, en consecuencia, nuestro planeta debía necesariamente tener esa forma. El dodecaedro era otra de las figuras que admiraban, así es que no resulta del todo descabellado suponer que podrían haber propuesto una Tierra dodecaédrica. ¿Se la imagina?

De la misma época que Pitágoras fue Heráclito, que, además de afirmar que la Tierra era esférica, sostuvo que los planetas se movían describiendo

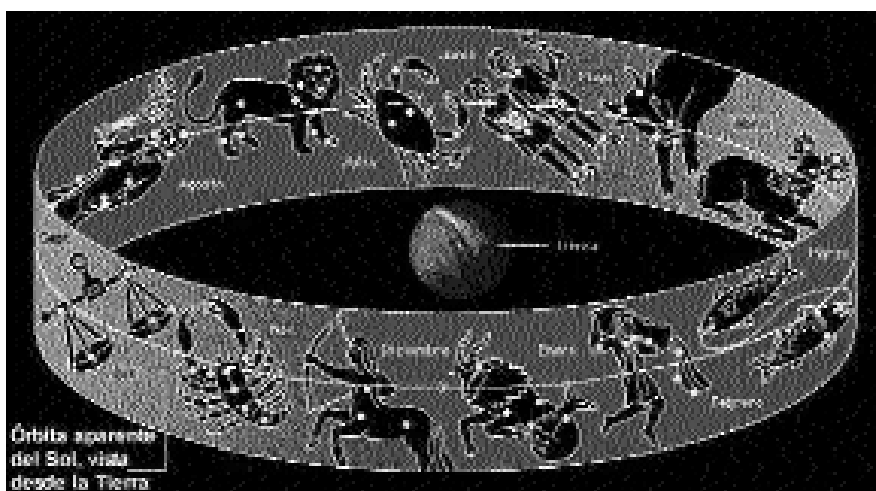


Figura 2. El Zodiaco (fuente: Encarta)



do órbitas circulares. Esta teoría, que se aproxima a la realidad, se debió también, sin embargo, a razones no demasiado científicas.

En la segunda mitad del siglo V a.C., Anaxágoras de Clazomene dio por fin una explicación del porqué de los eclipses, que, como hemos visto, los astrónomos ya eran capaces de predecir desde hacía tiempo. Esta explicación no podía ser más correcta. Según Anaxágoras, los eclipses de Luna se producían porque la Tierra se interponía entre aquella y el Sol, proyectando su sombra en el satélite, y que los eclipses de Sol se debían a que la Luna se interponía entre la Tierra y el Sol, de manera que, en este caso, era nuestro satélite el que proyectaba su sombra sobre la Tierra.

*NOTA: Anaxágoras fue también el primero en afirmar que la materia estaba constituida originariamente por elementos en extremo pequeños e indivisibles, a los que llamó átomos. Esta teoría sería luego desarrollada por otro griego célebre: Demócrito.*

Pericles, que vivió en la misma época que Anaxágoras, fue el primero en sugerir que la Tierra no sólo era esférica, sino que, también, giraba sobre sí misma.

Ya en el siglo III a.C., se encuentra el que quizá sea el más relevante astrónomo de los tiempos antiguos: Aristarco de Samos. La importancia de éste se debe tanto a sus descubrimientos, como sobre todo al hecho de emplear un método científico para llegar a ellos, y no consideraciones más o menos vagas o metafísicas. Sostuvo que la Tierra era esférica y que giraba sobre sí misma, lo que en sí no supuso ninguna novedad. Pero Aristarco añadió una teoría más, que sí lo fue. Según él, la Tierra se movía alrededor del Sol.

La primera medición precisa del radio de la Tierra la llevó a cabo Eratóstenes de Cirene, cuya vida transcurrió entre los siglos III y II a.C. Eratóstenes se dio cuenta de que, a mediodía del *solsticio de verano*, los rayos del Sol incidían verticalmente en un pozo de su ciudad natal, Asuán (el pozo no producía ninguna sombra), mientras que, justo en el mismo momento pero en la ciudad de Alejandría, los rayos solares incidían con un cierto ángulo, como lo demostraba el que los objetos proyectaran una sombra. El sabio midió este ángulo, que estimó en unos  $7^\circ$ , y conociendo la distancia de Alejandría a Siena, calculó el radio de la Tierra, mediante la fórmula que se puede deducir sencillamente de la figura 4:

$$R_{\text{Tierra}} = \frac{360^\circ \cdot D_{\text{Alejandría-Asuán}}}{2 \cdot \pi \cdot \alpha}$$

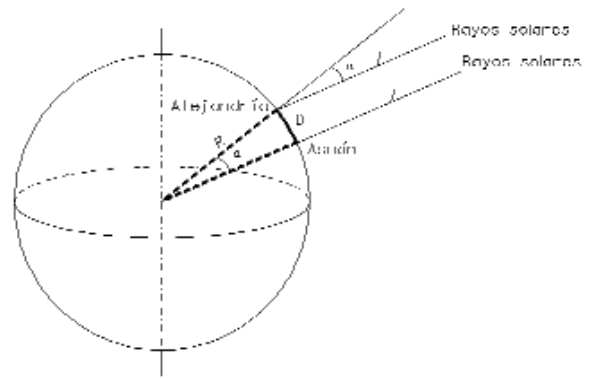


Figura 4. Medición de Eratóstenes

Eratóstenes tuvo suerte en dos aspectos. Primero, en que Alejandría y Asuán están aproximadamente en el mismo meridiano, de modo que la distancia angular (a lo largo de la superficie de la Tierra) entre una y otra ciudad se puede considerar equivalente a la diferencia de latitudes. Y en segundo lugar, en que Asuán está muy cerca del Trópico de Cáncer, por lo que, en efecto, el Sol se encuentra próximo al *cenit* (punto superior de la vertical del lugar) a mediodía del solsticio de verano.

A Eratóstenes se deben también la construcción de la primera esfera armilar y la determinación del ángulo de inclinación u oblicuidad de la Eclíptica (que coincide con la inclinación, respecto a la vertical al plano de la misma, del eje de rotación terrestre).

Otro gran astrónomo de la Antigüedad fue Hiparco de Nicea. Realizó una intensa labor de observación y catalogación de estrellas durante el siglo II a.C., determinó con mayor precisión ciertos parámetros que otros midieron antes que él (oblicuidad de la Eclíptica, la duración de un año, etc.), inventó un instrumento de medición astronómica, el astrolabio, y descubrió fenómenos tan significativos como la *precesión de los equinoccios* (que se debe a la variación del eje de rotación de la Tierra por causas gravitatorias). A Hiparco, se debe también el conocido y habitual método de posicionamiento geográfico basado en la longitud y la latitud.

Ya en la Era Cristiana, surgirá una de las figuras que más profundamente y durante más tiempo marcaron la visión del Hombre con respecto al mundo y al Universo. Claudio Ptolomeo fue un claro precedente de algo que hoy en día es una práctica muy habitual en la política, aunque no sólo en ella: encontrar razones que justifiquen lo que ya se cree de antemano. En el caso de Ptolomeo, esta creencia consistía en que la Tierra era el centro alrededor del que giraba el resto del Universo. Su modelo sostenía que nuestro planeta era



una esfera situada en el mismo centro del Cosmos, y que los demás planetas, además del Sol y de la Luna, describían órbitas circulares en torno a la Tierra, llamadas *deferentes*. Más adelante, para paliar discrepancias entre las observaciones y la teoría, se introdujeron los *epiciclos*, que eran órbitas menores cuyos centros se desplazaban por los deferentes. Y posteriormente, en el caso del Sol y algunos planetas, incluso los *ecuantes*, otros círculos excéntricos compuestos con los deferentes. A medida que la precisión de los instrumentos de medición aumentaba, la correspondencia de la realidad con la teoría disminuía, y ésta última se iba complicando.

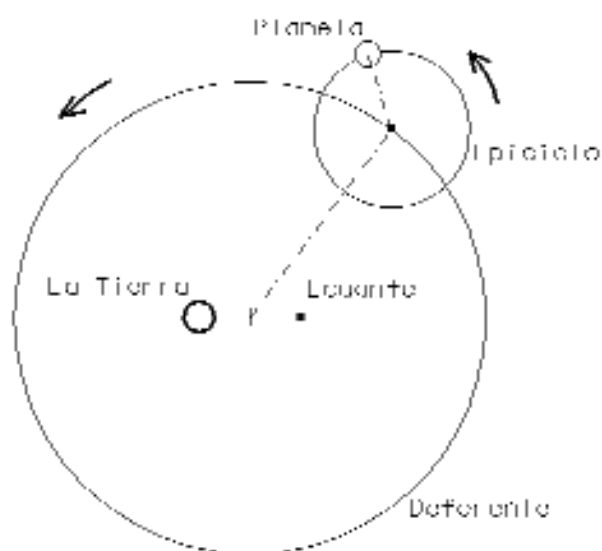


Figura 5. Epiciclo, deferente y ecuante de un planeta en el Sistema de Ptolomeo

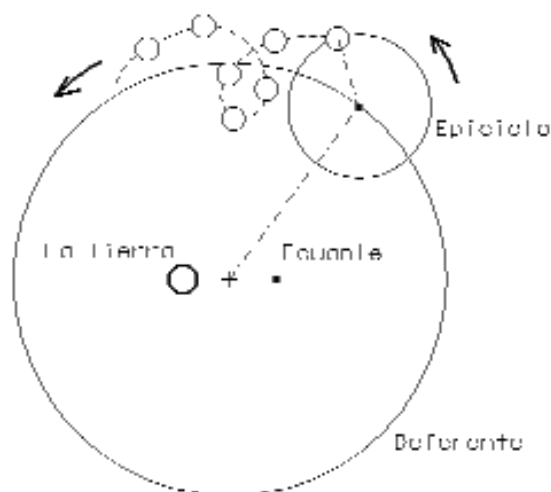


Figura 6. La combinación de las órbitas epiciclo y deferente explica la trayectoria real de los planetas vista desde la Tierra

El sistema geocéntrico de Ptolomeo apenas se cuestionó durante casi mil cuatrocientos años. Además de erróneo, resultaba extremadamente complejo, pues trataba de forzar la visión geocéntrica en la realidad de las observaciones astronómicas. En muchos casos esto era posible, pero hubo algunos fenómenos que continuaron siendo inexplicables con el sistema ptolemaico, a pesar de que se trató de encajarlos añadiendo nuevos deferentes anidados, que no lograron sino complicar todavía más las cosas. Por supuesto, estos fenómenos resultaban inexplicables no por defectos de forma, o por los limitados conocimientos matemáticos de quienes apoyaban el sistema de Ptolomeo, o cualquier otra teoría geocéntrica, sino porque la premisa inicial de todos ellos, la de que la Tierra era el centro alrededor del que giraba todo lo demás, no era correcta. En sus numerosas obras, entre las que destaca *Matematiké Sintaxis* (perdida en su texto original, pero que ha llegado hasta nosotros en su traducción árabe: el *Almagesto*), Ptolomeo hizo importantes contribuciones en varios campos científicos: Trigonometría plana y esférica, Óptica, Geografía, etc. También perfeccionó el astrolabio, inventado por Hiparco, y diseñó relojes de Sol.

La verdadera revolución de la Astronomía y el primer paso hacia las modernas teorías sobre el movimiento de los planetas y las estrellas, se debe al polaco Nicolás Copérnico, que, en el siglo XVI de nuestra Era, propuso un sistema heliocéntrico, según el cual la Tierra giraba sobre sí misma, en torno a un eje inclinado, completando una vuelta aproximadamente cada veinticuatro horas, y que, además, describía una órbita alrededor del Sol, que tardaba un año en recorrer. Uno y otro movimiento se corresponden, respectivamente, con los de rotación y traslación.

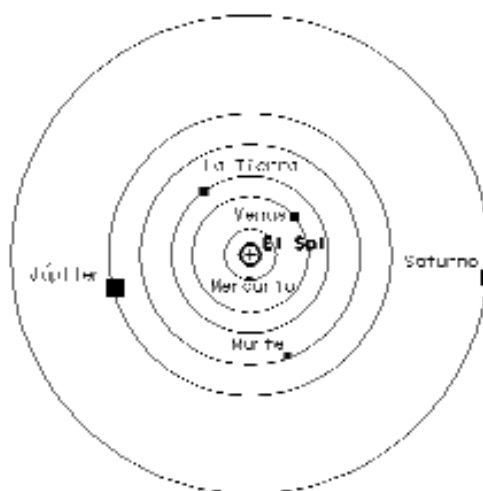


Figura 7. Sistema de Copérnico (sólo aparecen los planetas conocidos en su época)





Las teorías de Copérnico causaron un enorme revuelo en su época, ya que contradecían el sistema de Ptolomeo, considerado poco menos que un dogma de fe entre la mayor parte de los astrónomos, y se enfrentaban directamente con las creencias mantenidas por el poder religioso. Esto llevó a que se rechazara una buena parte del sistema de Copérnico; precisamente aquello que suponía una mayor revolución y que más se correspondía con la realidad. No obstante, a lo largo de la segunda mitad del siglo XVI y la primera del XVII, surgieron varios acérrimos e importantes defensores de la teoría heliocéntrica. El primero de ellos fue el astrónomo y filósofo alemán Johannes Kepler. Su maestro, Tycho-Brahe, adoptó un sistema intermedio entre el de Ptolomeo y el de Copérnico, según el cual los diversos planetas giraban alrededor del Sol, y unos y otro lo hacían, a su vez, en torno a la Tierra. Tal teoría supuso un paso hacia atrás (un peldaño abajo, en nuestra escalera), pero, aún así, Tycho-Brahe aportó una enorme cantidad de observaciones astronómicas de gran precisión, que fueron la base sobre la que Kepler –él sí plenamente convencido por la teoría heliocéntrica–, desarrolló un modelo matemático que explicaba las órbitas de los planetas. Este modelo lo forman las conocidas tres *Leyes de Kepler*, que son las siguientes:

- Los planetas del Sistema Solar, incluida la Tierra, se mueven siguiendo una órbita elíptica alrededor del Sol, que se encuentra en uno de los focos de la elipse.

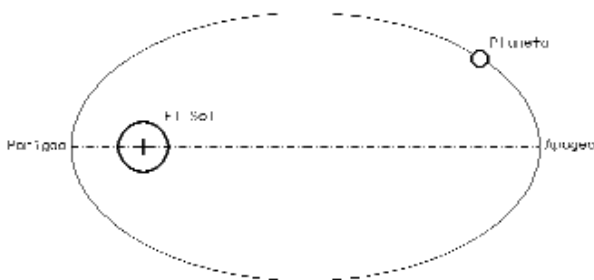


Figura 8. Primera ley de Kepler

- Las áreas barridas por los radios vectores Tierra-Sol en tiempos iguales, son también iguales. Esto implica que cuando la Tierra, u otro planeta, está más alejado del Sol (más cerca del *apogeo*), su velocidad es menor que cuando está más próximo a él (más cerca del *perigeo*). Esta falta de constancia en la velocidad de los planetas ya había sido detectada mucho tiempo antes por varios astrónomos, pero las explicaciones que hasta entonces se habían dado no eran demasia-

do satisfactorias, o llevaban a incoherencias cuando trataban de aplicarse a otros fenómenos astronómicos.

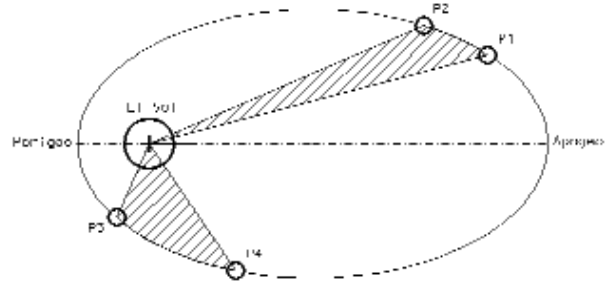


Figura 9. Segunda ley de Kepler

- La relación que existe entre los cubos de los semiejes mayores de las órbitas de los planetas y los cuadrados de sus *periodos* (los tiempos que tardan en recorrer dichas órbitas) es constante. O dicho de otro modo, los cubos de los semiejes mayores de las órbitas de los distintos planetas, son proporcionales a los cuadrados de sus periodos:

$$\frac{a_1^3}{p_1^2} = \frac{a_2^3}{p_2^2} = \frac{a_3^3}{p_3^2} = \dots = \frac{a_i^3}{p_i^2} = \text{Constante}$$

Estas leyes son rigurosamente ciertas si se consideran sólo dos cuerpos (por ejemplo el Sol y Marte); y describen la realidad de un modo aceptable cuando, aun interviniendo más objetos celestes, es posible despreciar su influencia sobre los dos originales. Si no es así, las leyes de Kepler no se ajustan del todo a la realidad. La tarea de definir las órbitas en estos casos se complica entonces enormemente, pues están sujetas una gran cantidad de variables de índole espaciotemporal y gravitatoria.

A pesar de sus limitaciones, los trabajos de Kepler sirvieron de gran ayuda al que quizá sea, junto con Einstein, el mayor y más importante físico de todos los tiempos, Isaac Newton, autor de la trascendente teoría de la Gravitación Universal y las tres leyes fundamentales de la Mecánica.

Al igual que Kepler, Galileo adoptó como base la teoría heliocéntrica de Copérnico. Sus trabajos, tanto en el campo de la Física, como en el de la Astronomía, se enfrentaron con las creencias implantadas en su época, establecidas, sobre todo, por Aristóteles y Ptolomeo. Esto fue la causa de permanentes disputas con otros estudiosos y con la Iglesia Católica, que estaba convencida de que las teorías de Galileo suponían una grave herejía.



Mientras vivió el cardenal Roberto Belarmino, su amigo y defensor, Galileo consiguió proseguir sus investigaciones, cosechando grandes triunfos como el descubrimiento de las manchas solares, de la accidentada topografía de la Luna, o de cuatro de los satélites de Júpiter. Desarrolló también estudios sobre las mareas y las fases de Venus, que explicó mediante la hipótesis heliocéntrica. Sus atrevidas teorías, y en especial el hecho de sostenerlas públicamente, le llevaron a ser juzgado por la Inquisición Papal. Este juicio forzó a Galileo a abjurar de sus ideas cosmológicas y, en él, se le condenó a prisión perpetua, aunque luego se cambió esta dura pena por otra casi simbólica.

A pesar del descalabro que el juicio provocó entre los seguidores de la teoría heliocéntrica, las aportaciones de Galileo a ella y también a la Física (como las relacionadas con la caída de los cuerpos) no se perdieron. Isaac Newton, que casualmente nació el mismo año en que Galileo dejaba este mundo, se sirvió de unas y otras, como lo hizo con los trabajos de Kepler, incorporándolos a sus propios estudios.

---

## LOS ALIADOS

La ciencia astronómica es tan amplia y compleja que requiere, como en el caso de otros campos científicos, la existencia de varias ramas o especialidades, centradas cada una de ellas en una parte concreta.

Quizá la más básica de estas ramas sea la *Astrofísica*, que estudia la estructura y composición física de cuantos objetos pueblan el Universo. La *Astronomía de observación* se encarga de describir, con la mayor precisión posible, el comportamiento de esos objetos. El descubrimiento de las leyes universales que se encuentran en la base de tal comportamiento, es la misión fundamental de la *Astronomía matemática*. Por último, la *Astronomía de posición*, es la parte que estudia los medios y métodos de posicionamiento, indispensables para la elaboración de mapas geográficos y cartográficos.

Estas ramas son las herramientas técnicas de la Astronomía. Su objetivo es describir el qué y el cómo del Universo. Para tratar de responder al porqué, existe la *Cosmología*, que es una mezcla de Física, Astronomía y Filosofía. Las dos primeras disciplinas garantizan su rigor científico, y la otra permite hacer preguntas que no son, ni deben ser, pertinentes en una ciencia exclusivamente empírica.

Otro caso distinto es el de la astrología, que sus defensores tratan de juntar con estas y otras verdaderas ciencias, aunque, en el mejor de los casos, no pasa de un elaborado fraude. Su afirmación básica, la de que las estrellas y planetas tienen influencia sobre los destinos de los seres humanos, resulta tan arbitraria que ni siquiera merece más comentarios. Lo que sí se puede comentar (desenmascarar) es la parte supuestamente científica de la astrología. Ya hablamos del Zodíaco, la franja dividida en doce partes, constelaciones, o signos, que el Sol atraviesa en su aparente camino por la Eclíptica. De este modo, el signo zodiacal de una persona está determinado por la posición del Sol en el Zodíaco cuando dicha persona nació.

El problema es que la posición aparente del Sol en un cierto día es variable con el tiempo y, por tanto, lo es también el signo que corresponde a ese día. Este fenómeno es consecuencia de lo que se denomina *precesión de los equinoccios*, o *retrogradación del punto Aries*. Así, quien nació el tres de octubre de hace algo más de dos mil años, era Libra; si lo hizo el pasado octubre, es Virgo; el que nazca el tres de octubre de dentro de unos dos mil años, será Leo. Cada dos mil ciento cuarenta y tres años, una persona que nazca un cierto día irá teniendo, sucesivamente y “hacia atrás”, todos los signos del Zodíaco. O, dicho de un modo más gracioso: dos personas que nazcan exactamente el mismo día, sólo tendrán el mismo signo si sus nacimientos están separados menos de 2.143 años, o entre 23.571 y 25.714 años.

Por tanto, no es verdad que a un cierto día le corresponda invariablemente un determinado signo, como afirma la astrología. Tenemos ya, entonces, dos arbitrariedades y no sólo una: primero la de que los astros se molestan en actuar sobre nuestras vidas, y después la atribución de un signo zodiacal basándose en una aseveración errónea. Es algo así como decir “Usted es Libra porque a mí me da la gana, y las constelaciones me han revelado que a los Libra hoy les duele la tripa”.

---

## LAS ARMAS DE LA ASTRONOMÍA

Uno de los obstáculos con los que se topó a lo largo de los siglos la Astronomía, fue la inexistencia de medios adecuados para realizar las observaciones que, dada su naturaleza, exigían una gran precisión. Errores que podían considerarse despreciables en medidas



terrestres, por ejemplo, para determinar el área de una parcela, resultaban inadmisibles en Astronomía.

Con el paso de los siglos, se fueron inventando diversos instrumentos y solucionándose los problemas que les restaban precisión. Estos problemas se relacionaban principalmente con los medios ópticos, objetivos y oculares. En un principio, estaban constituidos por lentes, que debían ser pulidas a la perfección y corregidas de aberraciones, tanto cromáticas como de esfericidad. La aberración cromática se produce cuando la luz que procede de un objeto, una estrella por ejemplo, llega al instrumento óptico, que de no estar corregido la descompone en sus diversas longitudes de onda (colores), ofreciendo posiciones y tamaños distintos del objeto.

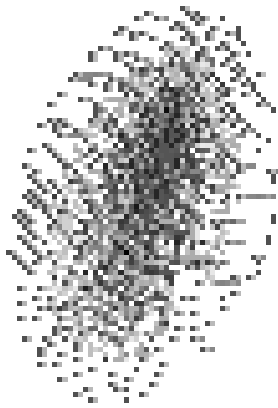
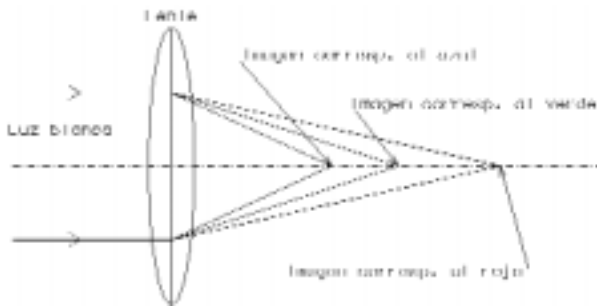


Figura 10. Aberración cromática

La aberración esférica se da cuando, por causa de la lente, los rayos que inciden en ella paralelamente a su eje no convergen en un punto (el foco), como deberían. Esto lleva a que la imagen que se forma no sea nítida. Por ejemplo, un punto no se mostraría como tal, sino como una mancha más o menos grande, dependiendo del nivel de aberración.

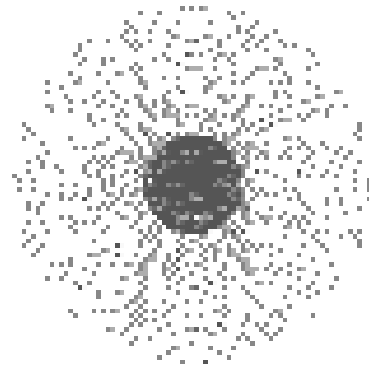
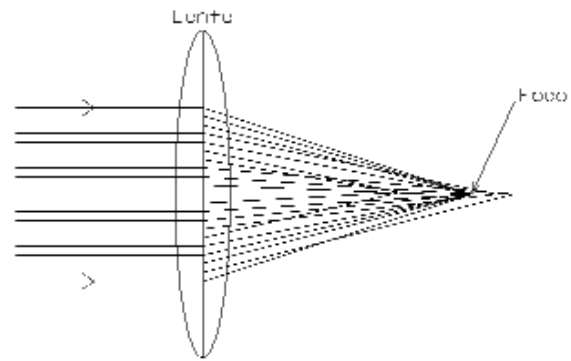


Figura 11. Aberración esférica

## Astrolabio

Como ya vimos, el astrolabio fue inventado por Hiparco de Nicea en el siglo II a.C. Está constituido por un brazo móvil, centrado en un círculo o un arco graduado. Sirve para medir la altura de objetos astronómicos con respecto al horizonte, valor que se emplea en la determinación de la latitud y la longitud de una posición.

Para hallar la altura, debe hacerse coincidir el origen de la graduación del círculo con el plano del horizonte, lo cual se realiza por gravedad, y luego apuntar al objeto mediante el brazo móvil. La intersección entre el brazo y la graduación, proporcionarán el valor de la altura en grados sexagesimales (con la precisión que sea).

El astrolabio era un instrumento muy poco exacto, aunque ciertas mejoras que se fueron introduciendo lo hicieron mejorar en este aspecto. De todos modos, su uso principal era ayudar a los marinos a determinar la latitud de sus barcos, labor para la que su escasa precisión era suficiente.



Figura 12. Astrolabio

## Sextante

Este instrumento sustituyó al anterior, en el siglo XVIII, como herramienta para determinar la altura de objetos astronómicos con respecto al horizonte.

El sextante incluye un arco de círculo graduado L (de  $60^\circ$ ) sobre el que se desplaza un brazo móvil B, en cuyo extremo hay un espejo EM, también móvil y paralelo al brazo. Existe, además, un segundo espejo, EF, mitad transparente y mitad reflectante, fijo y paralelo al brazo cuando éste se encuentra en el origen de la graduación. Frente a este segundo espejo, hay un anteojo fijo A, cuyo eje pasa por el centro del espejo EF.

Para determinar la altura de un objeto sobre el horizonte, debe observarse el mencionado objeto por el anteojo y hacer coincidir la visual con el horizonte. Éste puede verse a través de la parte transparente del espejo EF. Luego debe moverse el brazo, y por tanto el espejo fijado a él, hasta ver por el anteojo la imagen del objeto cuya altura se quiere medir, que llegará al ojo del observador después de reflejarse en el espejo EM y en la parte reflectante del espejo EF. Por último, deberá irse desplazando el brazo hasta hacer coincidir la imagen del objeto con la del horizonte, momento en el que el indicador del brazo marcará sobre la escala graduada el valor de la altura del objeto sobre aquél (la escala del sextante está adaptada al ángulo medido por el brazo, que es la mitad del real).

Aunque tampoco puede decirse que fuera muy preciso, el sextante permitía medidas más fiables que el astrolabio y supuso un gran avance para la navegación.

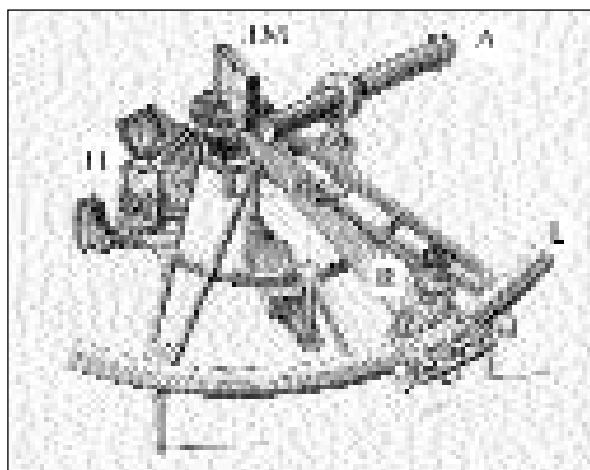


Figura 13. Sextante

## Teodolito

Los teodolitos son instrumentos ópticos que sirven para la determinación precisa de ángulos verticales y horizontales.

Están formados por un anteojo y algún sistema goniométrico (para la medición de ángulos), y pueden ser optomecánicos o, como es más habitual hoy en día, electrónicos. Se usan para mediciones topográficas y cartográficas, además de para observaciones astronómicas.

Los anteojos de los teodolitos son instrumentos fundamentalmente refractores, es decir, en ellos la luz atraviesa un conjunto de lentes hasta llegar al ojo del observador.

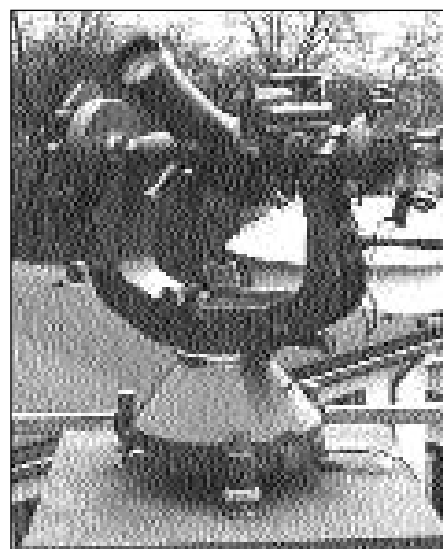


Figura 14. Teodolito T4 usado en Astronomía





## Telescopios

Los telescopios son, sin duda, los instrumentos que más se emplean en observaciones astronómicas de alta precisión, y los que ofrecen mayores posibilidades en todos los sentidos.

Aunque no está del todo claro quién fue su inventor y hubo diversas figuras a lo largo de la Historia que contribuyeron a su desarrollo, se suele aceptar que el primer telescopio se construyó en Holanda. Aún así, probablemente fue Galileo el primero en utilizarlo para realizar observaciones astronómicas.

Los telescopios originales eran refractores, basados en lentes, con lo que estaban sujetos a aberraciones provocadas por ellas, que se hacían más graves cuanto mayor fuera su tamaño. Esto, junto a la influencia del binomio aumento-luminosidad, implicaba que no pudieran alcanzarse grandes diámetros, perjudicando sus capacidad y prestaciones.

La aparición a finales del siglo XVII de los telescopios reflectores dio inicio a una nueva era, ya que solucionó el problema anterior y permitió, además, el análisis espectral de la luz procedente de objetos astronómicos (por ejemplo para determinar su composición), algo que no era posible con los sistemas refractores. Hay dos tipos básicos de telescopios reflectores, en los que se basaron muchos otros modelos que fueron surgiendo hasta nuestros días. Son los siguientes:

- Telescopio de Newton. El objetivo está formado por un espejo paraboloidal (similar al de los faros de un coche), y el ocular se encuentra en un lateral del anteojo. Los rayos de luz que emite el objeto se reflejan en el objetivo, y luego lo hacen en un segundo espejo, situado en el interior del telescopio formando un ángulo de  $45^\circ$  con su eje. Lo que se observa por el ocular es una imagen ampliada de la real.

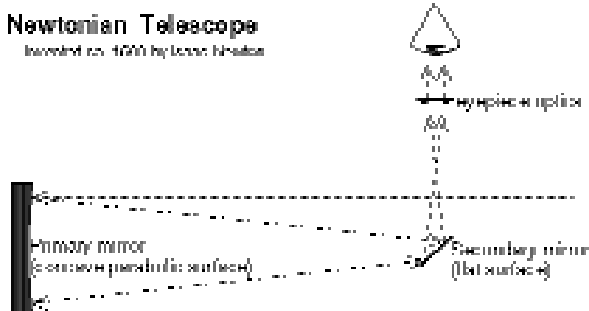


Figura 15. Telescopio de Newton

- Telescopio de Cassegrain. También en este caso, el objetivo está constituido por un espejo paraboloidal. Los rayos procedentes del objeto se reflejan en él, y después vuelven a hacerlo en un espejo convexo secundario, que los hace converger en el centro del ocular, situado en la parte posterior del telescopio.

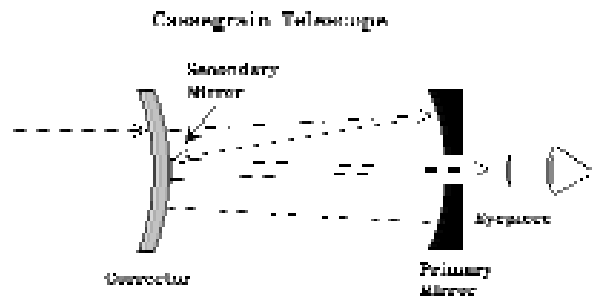


Figura 16. Telescopio de Cassegrain

Tanto en un caso como en otro, es posible sustituir el ocular por un espectroscopio, para poder analizar la luz en vez de observar el objeto del que ella procede.



Figura 17. Telescopio espacial Hubble

## LAS PRUEBAS DEL MOVIMIENTO DE TRASLACIÓN

La afirmación de Copérnico de que la Tierra rotaba sobre sí misma, no fue tomada como una amenaza grave ni por los estudiosos contemporáneos de Copérnico ni tampoco por la Iglesia.

El verdadero problema y lo que llevó a la Inquisición a juzgar a Galileo, fue que éste osó afirmar que la Tierra se movía en torno al Sol. Y hay dos pruebas irrefutables que lo demuestran, aunque probablemente ni aun conociéndolas Galileo se hubiera librado de su condena, porque no era una teoría científica lo que se discutía en aquel juicio, sino algo mucho más impor-



tante: la supremacía del Hombre y del planeta donde él habita con respecto al resto del Universo.

## La paralaje anua

El modelo de Ptolomeo implicaba necesariamente que la posición de las estrellas con respecto a la Tierra era fija. Y, en efecto, esto es así, en apariencia, para la inmensa mayoría de los casos, pero no para todos.

Si se hace una instantánea del cielo en dos momentos diferentes, por ejemplo con seis meses de separación, y luego se superponen las instantáneas, podrá verse, si la precisión del método es suficientemente grande, que casi todas las estrellas están en la misma posición, salvo unas pocas, que se encuentran ligeramente desplazadas. Este desplazamiento es en realidad aparente, pues no se debe al movimiento de la estrella, sino al de la Tierra alrededor del Sol. Así, en el caso más común, desde las sucesivas posiciones de la Tierra a lo largo de su órbita, T1, T2, T3, T4, se irá viendo la estrella E en posiciones distintas (E1, E2, E3, E4), que definen una elipse, llamada *elipse de paralaje*.

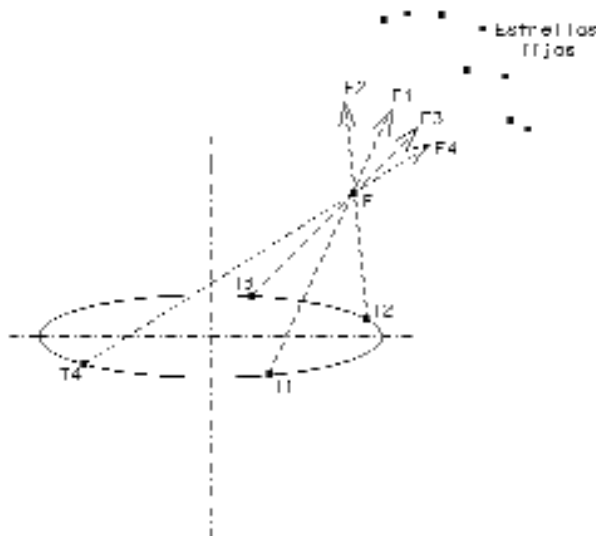


Figura 18. Fenómeno de paralaje

Este movimiento aparente no sería explicable si la Tierra no se moviera por el espacio, porque si estuviera inmóvil las posiciones de las estrellas respecto a ella serían inalterables. Copérnico ya había predicho la existencia de la elipse descrita, pero el efecto de la paralaje es tan tenue y detectable en tan pocos casos, que sólo se consiguió medir en la práctica durante la primera mitad del siglo XIX, por parte del matemático y astrónomo Friedrich W. Bessel.

Se denomina *paralaje* al ángulo bajo el cual se vería desde una estrella el radiovector Tierra-Sol en un cierto momento. Al valor máximo de la paralaje, se le llama *paralaje anua*, que coincide con el semieje mayor de la elipse de paralaje. El fenómeno de paralaje da la impresión de afectar sólo a algunas estrellas, porque para la mayoría de ellas la paralaje anua resulta despreciable, dada la enorme distancia a la que se encuentran con respecto a la Tierra. Esto hace que sus posiciones parezcan fijas cuando en realidad no lo son, pero el desplazamiento aparente resulta tan ínfimo que nuestros instrumentos de medida no tienen precisión suficiente para detectarlo. Sólo en unos pocos casos, en estrellas lo suficientemente próximas –o, para ser más estrictos, no lo suficientemente alejadas–, el efecto paraláctico puede ser detectado.

Incluso para la estrella más próxima, la Alfa de la constelación del Centauro, el ángulo de paralaje máximo es menor de un segundo sexagesimal; 0,758" para ser exactos.

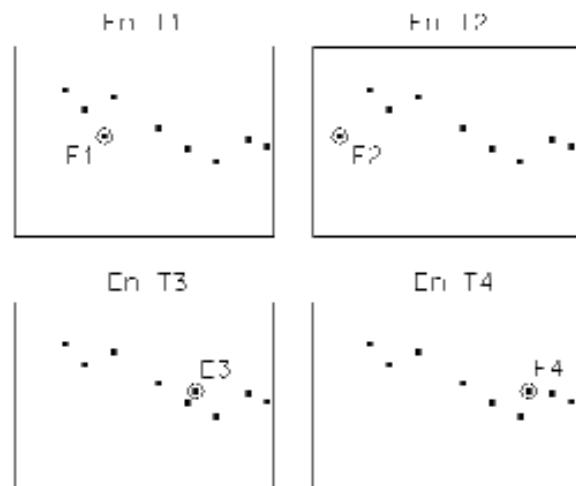


Figura 19. Posición aparente de la estrella de la figura anterior con respecto a las estrellas "fijas"

**NOTA:** El parsec es una medida de distancia muy empleada en Astronomía. Se define como la distancia a la que debe estar una estrella (o cualquier otro cuerpo celeste) respecto de la Tierra, para que su ángulo de paralaje anua tenga el valor de 1". Conociendo la distancia Tierra-Sol media, o Unidad Astronómica (149.675.000 Km), y mediante una sencilla fórmula trigonométrica, se obtiene que un parsec es igual a  $3,084 \times 10^{13}$  Km, o lo que es lo mismo, 3,26 años-luz.

El ángulo de paralaje no suele ser fijo, sino que varía entre un máximo (la paralaje anua) y un mínimo, cuyos valores dependen de la posición relativa entre la



Tierra y la estrella de que se trate. Existen dos modelos posibles: que la estrella esté por encima o por debajo del plano que contiene a la órbita de la Tierra, o que la estrella se encuentre en este mismo plano.

La Figura 20 describe el primer caso, que es, con mucho, el más habitual. En un determinado momento, la Tierra se encontrará en una cierta posición T1, dentro de su órbita alrededor del Sol S. Tomando a éste como origen, la posición de la Tierra estará definida por una longitud LT1 y la de la estrella por otra, LE.

Si la Tierra se desplaza a la posición T2, donde el vector Tierra-Sol es perpendicular al Sol-Estrella ( $LT2 = LE + 90^\circ$ ), entonces la paralaje alcanzará su máximo valor, la paralaje anua PA ( $S\hat{E}T2$ ). El valor de la paralaje se irá reduciendo conforme la Tierra prosigue su órbita, y llegará a un mínimo, PM ( $S\hat{E}T3$ ), cuando alcance la posición T3, en la que la Tierra, el Sol y la estrella están en el mismo plano ( $LE = LT3 - 180^\circ$ ). No es difícil darse cuenta de que la paralaje alcanzará un nuevo máximo en T4, y un mínimo en T5, posiciones en las que se cumple, respectivamente, que  $LT4 = LE + 270^\circ$  y que  $LT5 = LE$ .

En este primer modelo descrito, las posiciones aparentes de la estrella describirán una elipse (E'2, E'3, E'4, E'5), cuyo semieje mayor será la paralaje anua, y que estará más o menos achatada dependiendo de a qué altura se encuentre la estrella con respecto al plano de la órbita terrestre.

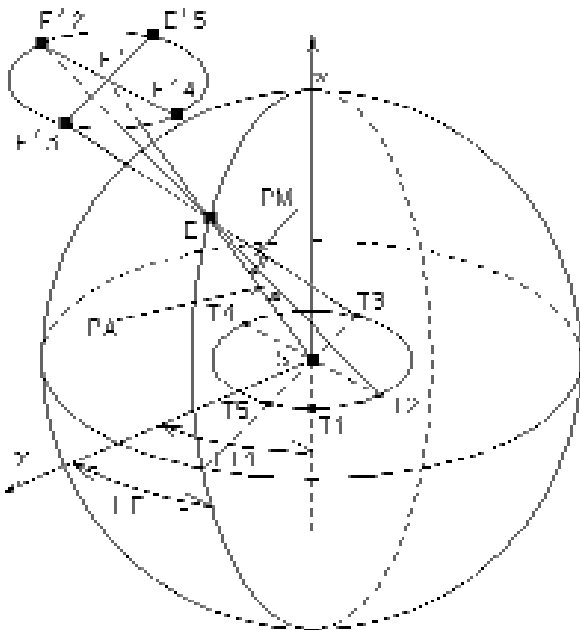


Figura 20. Paralaje en estrellas por encima o por debajo del plano orbital de la Tierra

Si la estrella estuviera en la vertical del centro de la órbita terrestre (hacia arriba o hacia abajo), la elipse de paralaje sería prácticamente un círculo, pues el valor del ángulo de paralaje se mantendría constante.

*NOTA: Para mayor simplicidad, en las figuras 20 y 21 se ha supuesto que el Sol está en el centro de la órbita descrita por la Tierra, y que tal órbita es horizontal. Ambas figuras son meramente ilustrativas y no deben tomarse en un sentido estricto, puesto que, además de ser una simplificación, no se encuentran a escala (lo contrario sería poco útil visualmente, pues recuerde que la distancia Tierra-estrella es, en el mejor de los casos, unas 250.000 veces la distancia Tierra-Sol).*

En el caso de que la estrella estuviera situada en el plano de la Eclíptica (figura 21), la situación sería algo distinta, pues la variación de la paralaje iría desde un máximo, que se alcanzará en las posiciones T2 y T4, hasta el valor cero, que se obtendrá cuando la Tierra esté alineada con el Sol y la estrella en uno u otro extremo de su órbita (T3 y T5).

La elipse de paralaje será, entonces, un simple segmento, entre cuyos extremos se desplazará, en apariencia, la estrella.

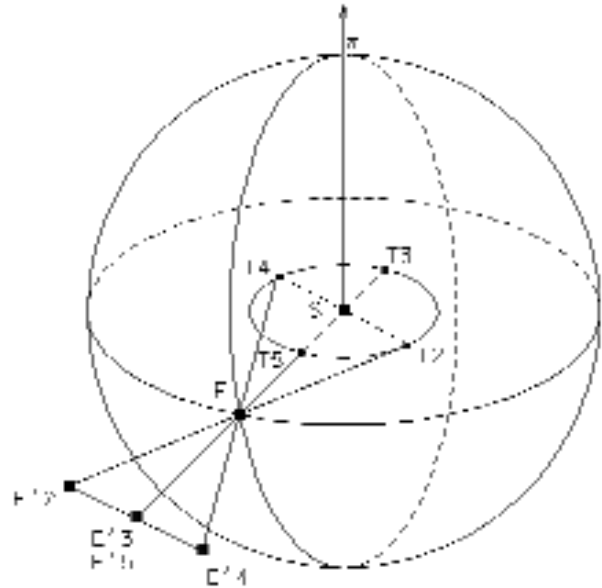


Figura 21. Paralaje en estrellas que estén en el plano orbital de la Tierra

## La aberración anua

Curiosamente, esta segunda prueba irrefutable del movimiento de traslación fue descubierta hacia 1727



por el astrónomo James Bradley, mientras trataba de verificar la existencia de las elipses de paralaje. En éstas, como ya sabemos, el valor de los ejes es variable, pues depende de la distancia a la que se encuentra la estrella y de su posición (altura) en la esfera celeste. Sin embargo, Bradley descubrió que las estrellas describían una elipse cuyo eje mayor era siempre el mismo.

La explicación de este hecho es que las elipses de Bradley, que aparentemente describían las estrellas, no se debían a la paralaje, sino a este otro fenómeno que, como ella, prueba el movimiento de la Tierra alrededor del Sol: la *aberración anua*.

Para explicar la aberración anua pondremos el típico ejemplo del viajero de un tren. Suponga que está en el vagón de un tren que se encuentra parado en la estación, y que en ese momento empieza a llover. Usted verá, en la ventana, que las gotas de agua caen verticalmente. Conforme el tren empieza a desplazarse, a adquirir velocidad, las gotas del cristal van inclinándose con respecto a la vertical, pero al principio lo hacen de un modo imperceptible, pues la velocidad del tren es todavía despreciable con respecto a aquella con la que cae la gota. Sin embargo, llega un momento en el que el tren adquiere suficiente velocidad como para que se note el sesgo de las gotas en el cristal. Por supuesto, cuanto mayor sea la velocidad del tren (suponiendo fija la velocidad con la que cae la gota), mayor será esta inclinación, que es sólo aparente, pues la gota sigue cayendo en vertical.

Ahora imagine que la gota de lluvia es la luz proveniente de una estrella, y que, en vez de ir en un tren, está usted en un planeta que flota en el vacío del Espacio. Si el planeta (la Tierra) está inmóvil y lo está también un observador (usted) que contempla a la estrella, la luz que ésta emite en dos tiempos distintos,  $t_1$  y  $t_2$ , llegará exactamente al mismo punto de la Tierra (al observador). Ahora bien, si la Tierra se mueve con una cierta velocidad, el observador lo hará con ella, de modo que la luz que emita la estrella en un tiempo  $t_1$  le llegará al observador cuando éste se encuentre en una posición  $p_1$ , pero la luz emitida en el tiempo  $t_2$ , sólo llegará al planeta cuando el observador esté en una posición  $p_2$ . Si la velocidad de la Tierra fuera despreciable frente a la de la luz, el desplazamiento  $p_1$ - $p_2$  sería insignificante, pero no lo es, dado que el efecto de la aberración anua puede verificarse en la realidad.

Debido a la aberración anua, las estrellas describen aparentemente una elipse, la *elipse de aberración*, cuyo semieje mayor coincide con el valor de la aberración anua. Este valor es fijo (unos  $20,6''$ ), puesto que es función de la velocidad de la luz y de la velocidad de traslación de la Tierra.

Si, haciendo de abogados del diablo, admitiéramos la hipótesis de que son las estrellas las que se desplazan, y no la Tierra, llegaríamos a la conclusión de que dicha hipótesis no es viable, ya que para que la aberración anua fuera igual, como de hecho es, con independencia de la distancia a la que se encuentre la estrella, las más lejanas deberían moverse a unas velocidades tan increíbles que resultaría físicamente imposible que lo hicieran.

El achatamiento de la elipse de aberración depende, como en la de paralaje, de la situación de la estrella con respecto al plano orbital de la Tierra. No obstante, la posición aparente de la estrella en las elipses de aberración y paralaje no es la misma para posiciones relativas idénticas entre la estrella y la Tierra; algo que Bradley también detectó en sus observaciones. En concreto, cuando las longitudes de la Tierra y la estrella difieren en  $90^\circ$  o  $270^\circ$ , esta última se encuentra aparentemente en uno de los extremos del semieje mayor de la elipse de paralaje y, al mismo tiempo, en uno de los extremos del semieje menor de la de aberración. De modo similar, cuando las longitudes son iguales o difieren en  $180^\circ$ , la estrella se situará en uno de los extremos del semieje menor de la elipse de paralaje, y en uno de los extremos del semieje mayor de la elipse de aberración.

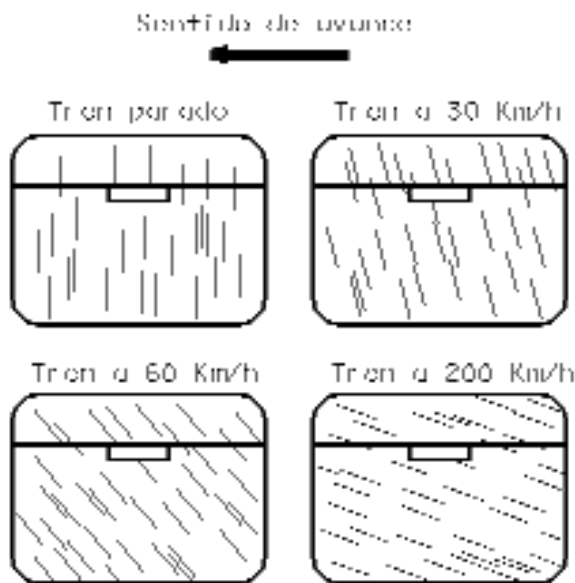


Figura 22. Ejemplo del tren que sirve para explicar el efecto de la aberración anua



## CONCLUSIÓN

En un tiempo como este en el que vivimos, donde la información es tan abundante y, en general, tan fácilmente accesible, resulta sencillo a veces dejarse llevar por la idea de que los que afirmaban que la Tierra era el centro del Universo estaban ciegos. Aparte de las consideraciones religiosas que sin duda influyeron en la época para adoptar esta concepción del mundo, existieron otras verdaderamente científicas que la apoyaron.

El descubrimiento de los fenómenos de aberración y paralaje anuas, que son pruebas fundamentales e irrefutables del movimiento de traslación de la Tierra

en torno al Sol, sólo fue posible después de siglos de invenciones y mejoras, que llevaron al desarrollo de instrumentos lo suficientemente precisos.

Y en otro sentido, menos práctico pero que constituyó un desafío aún mayor, imagine el enorme paso que osaron dar quienes rebatieron las creencias sostenidas durante siglos, durante milenios. Imagine el valor que debieron tener para admitir la pequeñez del ser humano, una mota de polvo en un planeta que gira alrededor de una estrella más entre billones de ellas.

“Agradecemos su ayuda a Don José Luis Valbuena Durán, miembro del Instituto de Astronomía y Geodesia del CSIC, y excelente amigo y compañero”.