

TRÁNSITOS

Pere Planesas

*La medida del sistema solar
y de otros sistemas planetarios*

* Incluye los tránsitos de Mercurio de 2019 y 2032



TRÁNSITOS

Pere Planesas

*La medida del sistema solar
y de otros sistemas planetarios*

* Incluye los tránsitos de Mercurio de 2019 y 2032

Título:

TRÁNSITOS: *La medida del sistema solar y de otros sistemas planetarios.*

Editado en abril de 2019

Catálogo de publicaciones de la Administración General del Estado:

<https://cpage.mpr.gob.es>

En esta publicación se ha utilizado papel de acuerdo con los criterios medioambientales de la contratación pública vigente.

Autor:

© Pere Planesas Bigas, 2019

Edita:

© De la presente edición: Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), 2019. www.cnig.es

Impresión:

Talleres del Instituto Geográfico Nacional (IGN)
www.ign.es

Diseño y maquetación:

Servicio de Edición y Trazado (IGN)
(Subdirección General de Geodesia y Cartografía)

NIPO: 162-19-021-8 (papel)

NIPO: 162-19-023-9 (digital)

ISBN: 978-84-416-4856-2

Depósito Legal: M-13721-2019

DOI: 10.7419/162.06.2019

Los derechos de la edición digital son del editor. La difusión electrónica masiva debe hacerse a través de un enlace al apartado correspondiente de la página web oficial.



CNIG: Calle General Ibañez de Ibero, 3
28003 - Madrid (España)
www.cnig.es
consulta@cnig.es

TRÁNSITOS

Pere Planesas

*La medida del sistema solar
y de otros sistemas planetarios*

INDICE

| | |
|--|----|
| La distancia a la Luna y al Sol | 5 |
| – Los logros de los antiguos griegos | 5 |
| – Primeros avances en la edad moderna | 8 |
| Viajeros empeñados en medir el sistema solar | 11 |
| – El primer tránsito de Venus del siglo XVIII | 12 |
| – El segundo tránsito de Venus del siglo XVIII | 16 |
| – Los dos tránsitos de Venus del siglo XX | 19 |
| La astronomía de los tránsitos de Mercurio y Venus | 22 |
| – Los tránsitos de Mercurio | 23 |
| – Los tránsitos de Venus | 24 |
| Otros tránsitos en el sistema solar | 27 |
| Los exoplanetas | 31 |
| – Tránsitos en otros sistemas planetarios | 31 |
| – Características de los exoplanetas | 33 |
| – Sistemas planetarios | 38 |
| – ¿Qué es un planeta? | 40 |
| Anexo: Los tránsitos de Mercurio de 2019 y 2032 | 43 |
| Bibliografía | 46 |
| Ilustraciones | 46 |

Hace ya más de dos mil años los griegos fueron capaces de desarrollar la primera descripción cuantitativa del Universo. No se limitaron a dar nombres a los astros más destacados y describir sus movimientos, sino que determinaron algunos de sus tamaños y distancias. Lo lograron haciendo uso de la geometría, que desarrollaron y emplearon con maestría, y de una incipiente trigonometría, que inventaron. Pero se encontraron con limitaciones observacionales: sus rudimentarios instrumentos no les permitieron determinar los tamaños y distancias a algunos astros, como es el caso del Sol. Para lograrlo hubo que esperar casi dos mil años e hizo falta la participación entusiasta de decenas de astrónomos de varios países, en lo que constituyó la primera colaboración científica realizada a escala global, que no estuvo exenta de aventuras, peligros y tragedias.

La distancia a la Luna y al Sol

Los logros de los antiguos griegos

El hecho de que la Tierra es esférica fue demostrado de diferentes maneras por varios filósofos griegos, discípulos de Pitágoras y el propio Aristóteles. La primera medida de su tamaño fue realizada por Eratóstenes de Cirene hacia el año 240 a.C. en Alejandría. Conocedor de que en Siena (cerca de la actual Asuán, en el Trópico de Cáncer) a mediodía del solsticio de verano un palo vertical no da sombra, midió el menor ángulo de la sombra de uno en esa fecha en Alejandría, que fue de $1/50$ de círculo. Concluyó que la circunferencia de la Tierra era de 50 veces la distancia entre ambas ciudades, que estimó en 5.000 estadios. Obtuvo un radio terrestre de unos 40.000 estadios. Aunque los valores fueran estimativos y no conozcamos cuál era la longitud de un estadio para Eratóstenes (¿el ático o el egipcio?), sí podemos decir que obtuvo el radio terrestre con una precisión razonable. Cuatro siglos después Posidonio de Apamea realizó otra medida, basada en la diferencia de altura sobre el horizonte de la culminación de la estrella Canopo vista desde la isla de Rodas y desde Alejandría. Obtuvo un resultado menor, pero se equivocó en los cálculos.

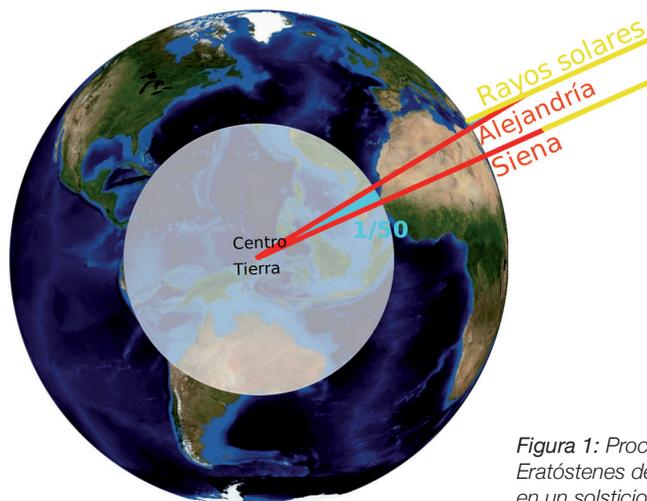


Figura 1: Procedimiento mediante el cual Eratóstenes de Cirene midió el tamaño de la Tierra en un solsticio de verano.

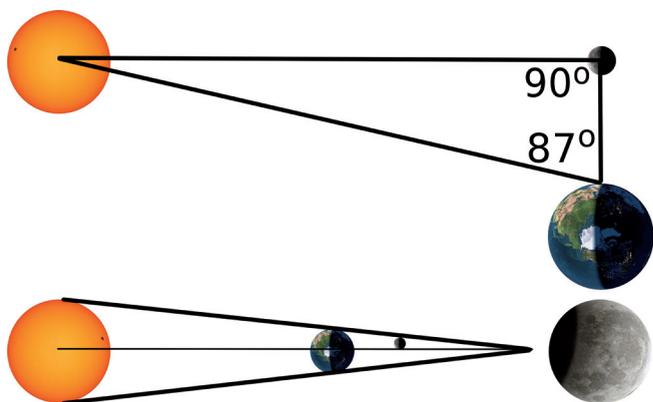


Figura 2: Procedimientos mediante los cuales Aristarco de Samos determinó la distancia al Sol en unidades de distancias lunares (arriba) y, por medio de un eclipse lunar, los tamaños de Sol y Luna en unidades de radios terrestres (abajo).

Aristarco de Samos fue un matemático contemporáneo de Eratóstenes que propuso un modo de comparar las distancias y los tamaños del Sol y la Luna. Argumentó que en el cuarto creciente (o menguante) Tierra, Luna y Sol forman un triángulo rectángulo. Midiendo el ángulo entre Luna y Sol en ese instante, que él estimó erróneamente en 87 grados (valor que quizás se inventó para poder desarrollar su método), calculó que el Sol se hallaba unas 19 veces más lejos que la Luna. Al tener tamaños angulares muy parecidos, como se aprecia en los eclipses totales o anulares de Sol, también se concluía que el Sol era unas 19 veces mayor que la Luna.

Para determinar el valor absoluto de estas medidas Aristarco empleó otro procedimiento, basado en la razón entre el tamaño de la Luna y el de la sombra de la Tierra sobre la Luna medible durante un eclipse lunar. Según él, a la distancia a que se encuentra la Luna, la sombra de la Tierra tiene un tamaño doble que aquella. De ahí dedujo, por procedimientos puramente geométricos, que el tamaño del Sol era casi siete veces mayor

que la Tierra y que esta era casi tres veces mayor que la Luna. Los procedimientos de Aristarco, refinados por los astrónomos Hiparco y Ptolomeo en siglos posteriores, fueron utilizados durante siglos para determinar las distancias en el sistema solar, en función del tamaño de la Tierra.

En definitiva, la medida del tamaño de la Tierra hecha por Eratóstenes, combinada con los resultados de Aristarco, permitió estimar la distancia al Sol. Tanto Ptolomeo (siglo II) como al-Farghani (s. IX), al-Birunni (s. XI), Copérnico y Tycho Brahe (s. XVI) le dieron valores entre 1100 y 1200 radios terrestres, que equivalen a unos 7 millones de km. Todos ellos obtuvieron un valor erróneo, pues consistentemente aceptaron el equívoco resultado de Aristarco de que la distancia al Sol era solo 19 veces mayor que la distancia a la Luna.

En cambio, la distancia a la Luna y su tamaño sí fueron razonablemente bien determinados por los astrónomos griegos. En efecto, otro modo de determinar distancias fue el empleado para medir la distancia a la Luna por Hiparco (c. 190 BC – c. 120 BC), posiblemente el más destacado astrónomo de la antigüedad, además de padre de la trigonometría. Nacido en Nicea, en la costa de la actual Turquía, parece haber pasado la mayor parte de su vida en la isla de Rodas. Hiparco supo que un eclipse solar, que tuvo lugar cerca del año en que nació, fue total cerca de Helesponto mientras que en Alejandría se cubrieron las 4/5 partes del disco solar. Conoció también las alturas sobre el horizonte en que se vio el eclipse en ambos lugares. Partiendo de la hipótesis razonable, por el resultado de Aristarco, de que el Sol está mucho más lejos que la Luna y que, por lo tanto, el desplazamiento de 1/5 del diámetro es debido exclusivamente al cambio de perspectiva en ver la Luna, lo que se conoce como paralaje, calculó que la distancia a la Luna era de unos 77 radios terrestres. Las medidas de paralaje han constituido y constituyen todavía una herramienta esencial para la medida de distancias en astronomía. Utilizando otro procedimiento obtuvo un valor mejor, de 63 radios terrestres, más próximo al real (que es de 60).

Hiparco también se atrevió a especular sobre el tamaño angular de Venus, afirmando que era diez veces menor que el Sol. Ptolomeo añadiría que Mercurio, un planeta menos brillante, era 15 veces menor que el Sol. Ptolomeo también argumentaba que Mercurio y Venus estaban más cerca de la Tierra que el Sol. Frente al hecho de que

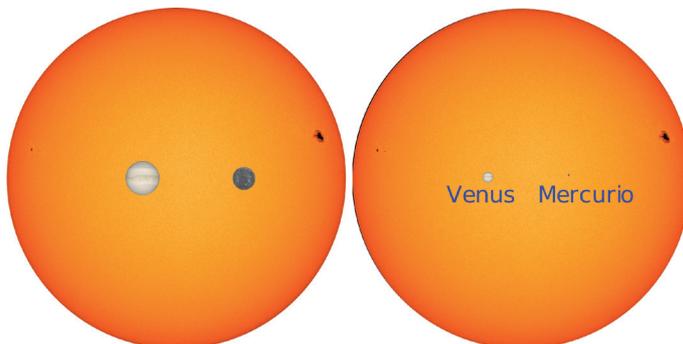


Figura 3: Tamaños de Mercurio y Venus comparados con el Sol, según el alejandrino Ptolomeo (izquierda) y los reales (derecha).

nadie había visto transitar Mercurio o Venus por delante del Sol, argumentó que podía ser debido a su pequeño tamaño (según él, Venus ocupaba el 1% de la superficie solar y Mercurio aún menos) o que podían encontrarse en un plano orbital distinto al Sol, como en el caso de la Luna (que rara vez eclipsa el Sol, cuando debería hacerlo cada mes, en cada luna nueva, en caso de hallarse en un mismo plano).

Primeros avances en la edad moderna

Muchos siglos después, en 1609 Galileo Galilei empezó a utilizar sistemáticamente telescopios para observar los cielos, transformando radicalmente la astronomía. Al año siguiente observó, entre otras muchas cosas, una serie completa de fases de Venus; un Venus lleno solo puede explicarse si gira alrededor del Sol, como afirmaba Copérnico, y no de la Tierra, como se creía antes. Galileo observó que los tamaños angulares de Venus y de Júpiter eran mucho menores de lo supuesto por Hiparco y Ptolomeo. En efecto, cuando Venus se encuentra alineado entre la Tierra y el Sol (conjunción inferior) su tamaño angular es unas 30 veces menor que el del Sol y cuando está alineado al otro lado del Sol (conjunción superior) es unas 200 veces menor.

Coetáneo de Galileo fue Johannes Kepler, conocido por sus famosas tres leyes del movimiento de los planetas, la tercera de las cuales es de capital importancia en el tema que nos ocupa, pues relaciona el periodo de traslación de cada planeta alrededor del Sol con el tamaño de su órbita, según una relación que establece que el cuadrado del periodo es proporcional al cubo del tamaño de la órbita. Los periodos eran bien conocidos, con lo que para conocer con precisión los tamaños de todas las órbitas bastaba con determinar la constante de proporcionalidad o, lo que es lo mismo, el tamaño de una sola de las órbitas planetarias. Por ejemplo, la medida de la distancia de la Tierra al Sol permitiría conocer la distancia de cada uno de los planetas al Sol y, consiguientemente, el tamaño del sistema solar, cuyo límite venía dado entonces por la órbita del planeta más lejano conocido, Saturno. Kepler también llegó a la conclusión, confirmada después por otros, de que los procedimientos de Aristarco para determinar la distancia y el tamaño del Sol no eran suficientemente precisos, ni siquiera usando telescopios, y propuso que debían ser al menos tres veces mayores que lo supuesto hasta entonces. Afortunadamente, de sus propios trabajos saldría un procedimiento que permitiría, en siglos posteriores, medir la distancia al Sol.

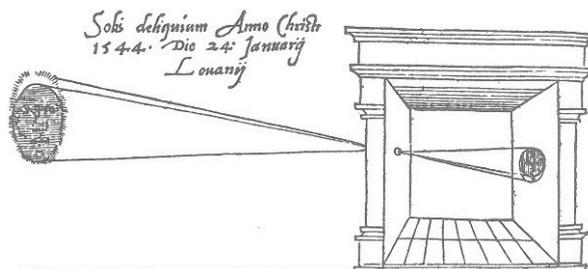


Figura 4: El primer dibujo de una cámara oscura se debe a Gemma Frisius, que la usó para observar el eclipse (híbrido) de sol de enero de 1544. Con este procedimiento de proyección Kepler intentó ver el tránsito de 1607.

Su historia empieza con los tránsitos de Mercurio, el paso de este planeta por delante del Sol. Tras el primer contacto aparente entre los bordes del disco del Sol y del planeta, se ve el disco oscuro del planeta entrar en el disco brillante del Sol hasta quedar totalmente dentro, tras lo cual irá cruzando el disco solar durante varias horas hasta salir por otro punto del borde solar. Kepler calculó que el 29 de mayo de 1607 Mercurio iba a pasar por delante del Sol y debía ser visible como una mancha redonda oscura sobre el fondo del disco solar. Intentó observarlo desde un ático a oscuras, con un agujero en el techo por donde se filtraba un haz de luz del Sol que proyectó sobre una hoja de papel. Es lo que denominamos una “cámara oscura”, expresión que él mismo acuñó. Vio una pequeña mancha que interpretó como Mercurio, aunque se sorprendió por lo pequeña que era, menor de lo esperado. Más se hubiese sorprendido de haber sabido que Mercurio es aún menor que lo que vio y que realmente se trataba de una mancha solar, cuya existencia se desconocía pues no serían descubiertas hasta cuatro años más tarde. De hecho, no hubo tránsito: se había equivocado en los cálculos.

Un par de décadas después, preparando unas tablas de efemérides, Kepler encontró que el 7 de noviembre de 1631 debía darse otro tránsito de Mercurio y un mes después, el 7 de diciembre, uno de Venus, aunque probablemente este no fuera visible desde Europa. Lo anunció a otros astrónomos con cuatro años de antelación y les animó a que los observaran, con el fin de determinar los tamaños aparentes de ambos planetas, pero en una Europa inmersa en la Guerra de los Treinta Años el anuncio no tuvo mucha repercusión. El tránsito de Venus efectivamente no fue visible en Europa y el de Mercurio solo fue visto por tres astrónomos, debido al mal tiempo o al uso de procedimientos inadecuados. El experimentado observador de manchas solares francés Pierre Gassendi lo observó desde París y, como los demás observadores, quedó sorprendido por el pequeño tamaño angular de Mercurio, cien veces menor que el del Sol. No se trataba de una mancha, pues su rápido movimiento, cruzando el disco solar en cuestión de horas y no de un par de semanas, indicaba que se trataba de Mercurio y no de una mancha solar. Compartió su sorpresa con la comunidad científica.

Quedaba por comprobar el tamaño de Venus. Según Kepler su próximo tránsito iba a tener lugar 130 años después, pero no hubo que esperar tanto tiempo. El joven inglés Jeremiah Horrocks, habiendo descubierto fallos en las tablas de efemérides de



Figura 5: Representación artística de la observación de un tránsito por proyección en una pantalla con ayuda de un pequeño telescopio, método usado por Gassendi, Horrocks y Crabtree. (Crabtree era mucho más joven que el personaje del mural.)

Kepler, recalculó las de Venus y descubrió que habría un tránsito el 4 de diciembre de 1639 que Kepler no había predicho. Avisó a su joven amigo William Crabtree y ambos pudieron ver, desde distintos lugares y entre nubes, parte del tránsito poco antes de la puesta de sol. El tamaño angular que determinó era 25 veces menor que el del Sol, valor muy parecido a la estimación directa realizada por Galileo con un telescopio.

En la segunda mitad del s. XVII se progresó en la conversión del telescopio en un instrumento de medida, mejorando su diseño e introduciendo el uso de un micrómetro que permitía medir con cierta precisión ángulos pequeños. La introducción de miras telescópicas en otros instrumentos, como los cuadrantes, permitió a su vez medir ángulos grandes con mayor precisión. Además, los relojes de péndulo inventados por el holandés Christiaan Huygens, inspirado en los trabajos de Galileo, permitían medir los intervalos de tiempo transcurridos entre fenómenos durante las sesiones de observación, mejor que con los relojes de arena.

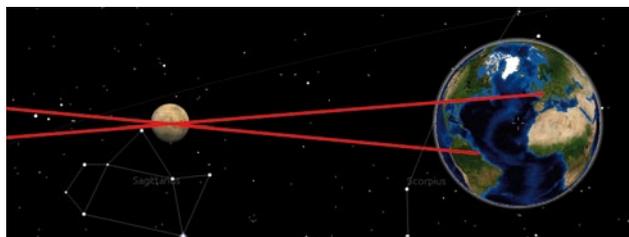


Figura 6: Esquema de la medida de la paralaje de Marte realizada en su oposición de 1673 por Cassini y Picard en París y Richer en Cayena.

Por ello, en el acercamiento de Marte a la Tierra de 1673 el astrónomo italiano Giovanni Domenico Cassini planeó unas observaciones coordinadas que se realizaron en París, por él y Jean Picard, y por el francés Jean Richer en la colonia francesa de Cayena en la Guayana. Se trataba de medir la paralaje de Marte (diferencia entre las posiciones aparentes con respecto del fondo de estrellas según el lugar de observación) y, con ello, su distancia. A partir de ella, aplicando la tercera ley de Kepler, se podría deducir la distancia al Sol. Las observaciones y su análisis no fueron concluyentes, aunque sí sirvieron para descubrir una serie de dificultades en la realización de tales medidas y en su análisis. El joven astrónomo inglés John Flamsteed se ahorró un largo viaje al realizar observaciones de Marte en diversas ocasiones a lo largo de la noche con lo que, gracias al giro de la Tierra, también cambiaba la perspectiva y pudo estimar la paralaje de Marte. Sus resultados fueron un tanto confusos, pero a grandes rasgos parecidos a los de los franceses.

En definitiva, las medidas de la paralaje de Marte confirmaron la sospecha de que las distancias en el sistema solar eran considerablemente mayores de lo aceptado hasta entonces: la distancia al Sol debía ser al menos diez veces mayor que lo supuesto por los antiguos, quizá mayor de cien millones de km. También fue calando la idea de que el Sol era mucho mayor que la Tierra, al menos 70 veces mayor. Este fue el consenso entre los astrónomos a partir de esta época, tanto franceses como británicos, italianos y holandeses, y del propio Isaac Newton. Este valor no podía ser mejorado debido a que la imprecisión en las medidas era muy grande, como consecuencia de

las dificultades que tenían en evaluar los errores sistemáticos de sus instrumentos, los errores en las medidas y la carencia de una teoría de propagación de errores, además de incurrir en errores en sus cálculos. Se necesitaba un método alternativo mejor para obtener un valor más preciso de la distancia de la Tierra al Sol.

Viajeros empeñados en medir el sistema solar

El inglés Edmond Halley tenía solo veinte años cuando, en 1676, embarcó rumbo a la isla de Santa Elena. Situada en el Atlántico sur, le iba a permitir realizar el primer catálogo de estrellas del hemisferio sur. Las observaciones de eclipses le permitieron, además, determinar la longitud geográfica de la isla, pero lo más novedoso e influyente iba a ser su observación del tránsito de Mercurio del 7 de noviembre de 1677.

Quizá conocedor de un comentario del astrónomo escocés James Gregory, acerca de la posibilidad de medir la distancia al Sol mediante la observación de un tránsito, Halley observó el tránsito de Mercurio con sumo cuidado, anotando el tiempo del contacto exterior y, por primera vez, el de contacto interior, tanto en la entrada como en la salida del disco solar, a pesar de las nubes dispersas que amenazaron sus más de cinco horas de observación. Le pareció que era más fácil determinar el instante preciso de los contactos interiores, ese instante en que aparece o desaparece un hilo de luz entre el borde solar y el disco del planeta, por lo que recomendó que se tomaran esos tiempos en tránsitos futuros. En Europa solo hubo una observación parcialmente exitosa, la del francés Jean Charles Gallet que, en Avignon, vio la salida de Mercurio.

Halley intentó determinar la distancia a Mercurio, y consiguientemente deducir la del Sol, combinando sus medidas y la de Gallet, pero sin éxito. Llegó a la conclusión de que era más conveniente realizar tales medidas durante un tránsito de Venus, a pesar de su menor frecuencia, en razón de su mayor cercanía (que se traduce en un mayor ángulo medido) y el mayor tamaño aparente del planeta (que facilita su observación). Durante décadas Halley defendió que la observación de tales tránsitos desde distintos puntos de la superficie terrestre constituía el mejor método para determinar la distancia al Sol.

Su método consistía en medir la duración del tránsito, es decir el tiempo que transcurre entre la inmersión y la emersión, que da la longitud del recorrido del planeta frente el disco solar. Observando el tránsito desde dos lugares de muy distinta latitud se medirían distintos intervalos de tiempo y, por ende, distintas longitudes de recorrido. Las diferencias pueden ser de hasta un cuarto de hora entre posiciones extremas, con lo que bastaba realizar las medidas de tiempo con algunos segundos de precisión. La diferente longitud de los recorridos permitiría, por simple geometría, deducir el ángulo de separación entre ellos, que es también el ángulo bajo el cual vieron el planeta interpuesto un observador con respecto del otro. Conociendo la distancia que los separaba, a partir de sus posiciones geográficas (que debían determinarse con precisión), se calcularía la distancia al planeta. Conocida esta y las distancias relativas de los planetas al Sol (por la tercera ley de Kepler), era posible determinar la distancia absoluta de la Tierra (y de Venus) al Sol.

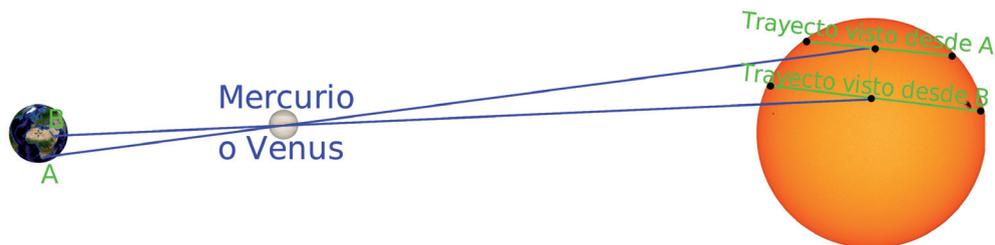


Figura 7: Esquema del procedimiento ideado por Edmond Halley para medir la distancia a Mercurio o Venus aprovechando un tránsito del planeta. (Tamaños y distancias no están a escala.)

Siendo los tránsitos de Mercurio más frecuentes, a razón de 13 por siglo, por su mayor proximidad al Sol, que los de Venus, que se dan a razón de 12 por milenio, en los años siguientes hubo algún intento de medir la distancia al Sol observando los tránsitos de Mercurio, intentos fallidos, lo que confirmó la sugerencia de Halley de que era preferible observar los tránsitos de Venus.

El primer tránsito de Venus del siglo XVIII

El primer tránsito de Venus en que se podía probar este método iba a tener lugar el 6 de junio de 1761, cuando sin duda Halley ya habría muerto, seguido de otro en 1769. Sin embargo, él mismo inició la planificación de la observación sugiriendo lugares en el mundo a donde debían desplazarse los observadores para medir el primero de ellos: a baja latitud en la bahía de Bengala (India), donde el Sol se encontraría cerca del cenit, y a alta latitud en la bahía de Hudson (ahora en Canadá), así como en las islas Madeira y Sumatra, todos ellos colonias británicas. Los holandeses podrían ir a Batavia, la actual Yakarta en la isla de Java, y los franceses podrían ir a Pondichéry, en la costa tamil de la India, sus propias colonias.

En efecto, en Francia también crecía el interés por la observación del tránsito de Venus, especialmente entre los astrónomos más jóvenes, pues los mayores seguían defendiendo el método de las oposiciones de Marte para medir la distancia al Sol. El astrónomo Joseph-Nicolas Delisle lideró este esfuerzo. Empezó demostrando que bastaba con determinar con sumo cuidado el instante de entrada o el de salida de Venus, no necesariamente ambos, siempre y cuando se conocieran con precisión las coordenadas geográficas del lugar, siendo aún difícil en aquella época determinar la longitud geográfica con precisión. Con ello se reducirían los problemas causados por el tiempo atmosférico cambiante durante las horas de observación y se ampliaba la región de la Tierra donde era posible realizar medidas, dado que bastaba con poder hacer una de ellas, no las dos. Se pensaba que la mejora habida en los instrumentos y en las efemérides astronómicas debía permitir determinar las posiciones geográficas con suficiente precisión. Ensayos repetidos de observación de tránsitos de Mercurio permitieron refinar el método de observación, preparar instrucciones y seleccionar los instrumentos necesarios (un telescopio de focal media, un cuadrante y un reloj), siendo

el tránsito de Mercurio de 1753 un ensayo general para muchos futuros observadores del esperado tránsito de Venus que iba a tener lugar ocho años más tarde.

El proyecto de observación a nivel mundial iba tomando ímpetu, muy especialmente en Francia donde, a medida que se acercaba el año, en la prensa aparecían llamadas a enviar expediciones a diversos lugares del mundo. El joven astrónomo Guillaume Joseph Hyacinthe Jean-Baptiste Le Gentil de la Galaisière, después de años dedicado a calcularla, a mediados de 1760 publicó un mapamundi mostrando la región de visibilidad del tránsito, que permitía planear las expediciones a territorios bajo control francés o de países amigos, pues hay que recordar que en Europa se desarrollaba la, posteriormente, denominada Guerra de los Siete Años. Europa envió seis astrónomos en expediciones a lugares lejanos.

Francia envió a Alexandre-Gui Pingré a la isla de Rodrígues en el océano Índico, al abad astrónomo Jean-Baptiste Chappe d'Auteroche a Tobolsk, un lugar de Siberia donde se esperaba que la duración del tránsito fuera mínima, a César-François Cassini de Thury a Viena, mientras Joseph Jérôme Lefrançois de Lalande se quedó cómodamente en París y Le Gentil, tras conseguir sus propios fondos, se dirigió por su cuenta a Pondichéry, en la costa oriental de la India.

Los ingleses no se animaron hasta ver el mapa de Le Gentil en 1760 y no pudieron hacer grandes preparativos, incluso tuvieron dificultades en conseguir el dinero necesario para comprar telescopios. Básicamente enviaron al astrónomo y reverendo Nevil

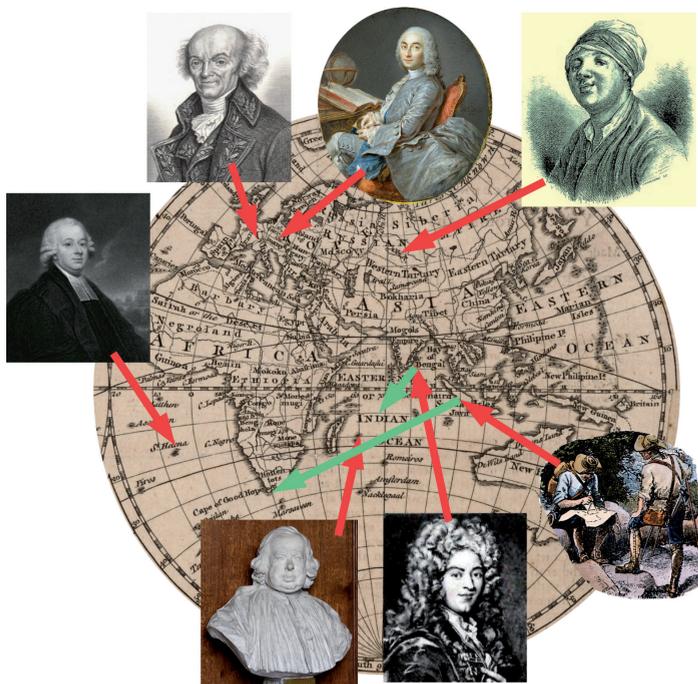


Figura 8: Expediciones francesas e inglesas realizadas para la observación del tránsito de Venus de 1761. (En rojo se indican los destinos previstos y en verde los realmente alcanzados.)

Maskeline a la isla de Santa Elena y al astrónomo Charles Mason y su ayudante Jeremiah Dixon a Bengkulu, en Sumatra, donde se esperaba que la duración del tránsito fuera máxima.

También participaron en la campaña astrónomos suecos, alemanes, italianos, daneses, portugueses, holandeses, rusos y españoles. En total hubo unos 120 observadores repartidos en más de 60 lugares diferentes, muchos de ellos sin abandonar su territorio nacional, como fue el caso de los españoles, que lo observaron desde Madrid y Cádiz, y los suecos, desde Estocolmo y Upsala. En España fue observado por el padre Christian Rieger desde el observatorio del Colegio Imperial de Madrid y por los matemáticos Gerardo Henay y Vicente Tofiño desde el observatorio de Cádiz.

Los países contendientes en la guerra acordaron no interferir en las expediciones lejanas que constituían, incluso en tiempos de guerra, parte del primer proyecto científico mundial de la historia, mundial tanto porque se enviaron expediciones por todo el planeta como por las variadas nacionalidades de los astrónomos participantes. Las intenciones de partida eran buenas pero la realidad fue otra.

Los ingleses Mason y Dixon embarcaron en diciembre de 1760 y, al poco tiempo de salir de puerto, su barco fue atacado por una fragata francesa, regresando con una decena de muertos, varias decenas de heridos e instrumentos dañados. Viendo que no podrían llegar a tiempo a Sumatra, propusieron ir al Mar Negro pero, amenazados de juicio si no cumplían su contrato, en febrero partieron de nuevo hacia Sumatra. En mayo, al llegar a la ciudad del Cabo, fueron informados de que su destino en Sumatra había caído en manos enemigas. Decidieron quedarse allí, realizar observaciones astronómicas para determinar su posición precisa y, en el día señalado, pudieron observar el tránsito. Serían los únicos británicos en medir el tránsito desde el hemisferio sur pues Maskeline tuvo un cielo nublado en la isla de Santa Elena.

En cuanto al francés Pingré, nada más partir hacia el Índico, su barco fue perseguido por la flota inglesa pero pudo escapar. Ya en el Índico, su barco tuvo que escoltar a otro barco francés, seriamente dañado en una escaramuza, hasta la isla de Mauricio. Allí embarcó en otro barco que, a pesar de la mala mar, consiguió llegar a la isla Rodrigues pocos días antes del tránsito, con el tiempo justo para instalar el campamento, engrasar los oxidados telescopios y prepararse para el día del tránsito que, para su desesperación, amaneció lloviendo. Afortunadamente pudo observar y medir la última parte. Permaneció en la isla unos días más a fin de medir con precisión su posición, una pésima idea, pues llegó un barco inglés que capturó el barco francés y asoló la isla. Pingré fue rescatado varios meses después e inició el regreso a Francia, con paradas en la isla de Mauricio y la isla de la Reunión, siendo su barco apresado por los ingleses. Habiendo entablado amistad con el médico de a bordo, le desembarcaron, junto a sus instrumentos, en Lisboa. Por tierra llegó a París unos 500 días después de partir.

El francés Chappe quiso inicialmente trasladar sus instrumentos por mar, pero perdió el barco (que luego embarrancararía en la costa sueca) y, aunque era invierno, optó por dirigirse por tierra hacia Estrasburgo, Viena, Cracovia, usando en ocasiones trineos,

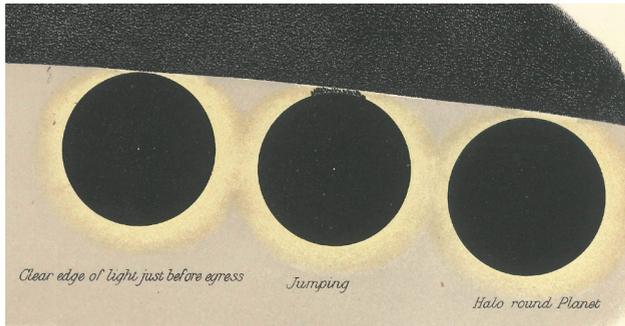


Figura 9: Fenómeno de la gota negra y el anillo luminoso alrededor de Venus, observados por Henri A. Lenehan en el tránsito de 1874.

y finalmente San Petersburgo, donde sus colegas rusos intentaron disuadirle de que continuara el viaje a Siberia. Obstinado en realizar el plan inicial, de nuevo en trineo se dirigió a Moscú, cruzó los Urales y entró en Siberia, llegando con grandes dificultades a Tobolsk en abril, antes del deshielo. Allí montó el observatorio y observó un eclipse de Luna (18 de mayo) y otro de Sol (3 de junio) para determinar la posición del lugar. Más adelante necesitó protección de los cosacos, pues la gente local le culpaba de las grandes inundaciones primaverales de aquel año. Pudo observar el tránsito en un día bien despejado. Permaneció un par de meses más realizando observaciones astronómicas, meteorológicas, geológicas y étnicas y regresó sin mayores problemas.

El francés Le Gentil fue quien tuvo el viaje más complicado. El primero de todos en partir, su barco fue perseguido por los ingleses cerca del cabo de Buena Esperanza y alcanzó la isla Mauricio un año antes del tránsito, donde se enteró que su destino en la India estaba sitiado por los ingleses. En Mauricio se organizó una flota de rescate, que fue dañada por una fuerte tempestad, tras lo cual Le Gentil decidió dirigirse a Batavia pero no pudo partir por padecer disentería. Después pudo embarcar en otro convoy que se dirigía a Pondichéry para ayudar a los sitiados. El monzón los desvió, llegando a la India cuando Pondichery ya había caído en manos enemigas. Camino de regreso a la isla de Mauricio, en un día ideal para la observación, Le Gentil se limitó a ver el tránsito desde el puente del barco, en una posición desconocida en el mar. Pero no se desanimó. Habiendo llegado a Mauricio, decidió no regresar a Francia y esperar el siguiente tránsito, que iba a producirse “solo” ocho años después.

¿Y cuál fue el resultado de todo este esfuerzo? Fue muy pobre, la distancia al Sol fue estimada con una incertidumbre inesperadamente grande, del 12%: un valor entre 124 y 159 millones de km. Las principales causas de ello fueron la dudosa calidad de algunas observaciones, la mala determinación de la longitud geográfica de los lugares de observación y un fenómeno inesperado, el de la “gota negra”, una aparente extensión del disco de Venus hasta el limbo solar que dificultaba la determinación precisa de la hora de los contactos interiores. Puede ser debida a diversas contribuciones: distorsión de la imagen por la atmósfera terrestre, efectos instrumentales, el oscurecimiento del limbo solar, la atmósfera de Venus. Esta campaña de observaciones sirvió para confirmar y mejorar los resultados de las medidas realizadas un siglo antes, las de la oposición de Marte. También sirvió para descubrir que Venus tiene una atmósfera,

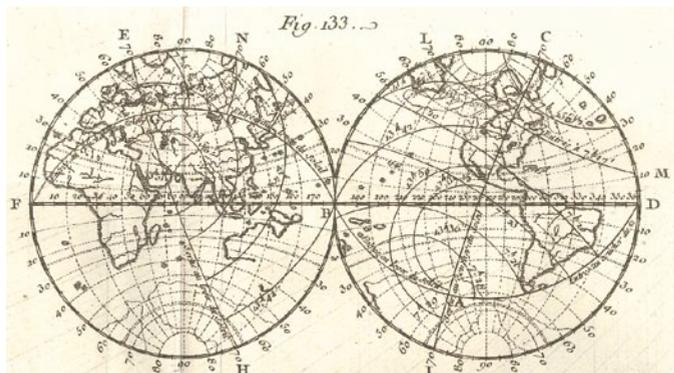


Figura 10: Planisferio mostrando las circunstancias del tránsito de 1769 confeccionado por Lalande (*Traité d'astronomie*, vol. 2).

como la Tierra, como puso de manifiesto el científico ruso Mikhail Vasilyevich Lomonosov, que vio un anillo luminoso rodeando Venus cuando observó el tránsito desde San Petersburgo, lo que sería confirmado por otros, como Chappe, aunque hay quienes cuestionan tal descubrimiento.

El segundo tránsito de Venus del siglo XVIII

El siguiente tránsito, del 3 de junio de 1769, suscitó aún mayor interés y fue observado en mejores condiciones y con mayor experiencia. Francia había perdido la guerra en 1763 y con ello buena parte de sus colonias, pero trataba de mantener un liderazgo científico que los británicos también le querían arrebatarse. A pesar de los escasos resultados de la campaña anterior, hubo aún más observaciones de este tránsito. Hubo más de 150 observadores repartidos por casi 80 lugares distintos aunque, como en la ocasión anterior, solo una parte de ellos tuvo éxito con las observaciones.

En esa ocasión el francés Pingré fue enviado a Haití. El francés Chappe solicitó ayuda a España para dirigirse a los mares del sur (o sea, el Pacífico) pero se le convenció para ir a Baja California, en México, acompañado de dos astrónomos navales españoles, Vicente Doz y Salvador de Medina. Tras un largo viaje de ocho meses llegaron al destino, San José del Cabo, encontrando la región asolada por la epidemia del “vómito negro” (tifus o fiebre amarilla). Con solo dos semanas para preparar el observatorio, el obstinado Chappe desoyó los atinados consejos de partir hacia otro lugar. Observó el tránsito e insistió en permanecer varias semanas más para medir la posición geográfica por medio del eclipse de Luna del 19 de junio. La epidemia acabó con las tres cuartas partes de la población del lugar y con la mayor parte de la expedición científica, incluidos Medina y Chappe. Solo Doz, muy enfermo, pudo regresar a Europa con los datos. Joachin Velásquez, un astrónomo autodidacta nacido en México que colaboró activamente en las observaciones, también sobrevivió. En España el tránsito fue observado por Vicente Tofiño desde el Real Observatorio de Cádiz.

En cuanto a Le Gentil, en 1766 se había dirigido a Manila, en un barco español, para preparar el tránsito que tendría lugar tres años después. Considerado un espía por los

españoles, decidió partir hacia las islas Marianas, aunque afortunadamente perdió el barco, pues naufragaría. Acosado por las autoridades locales, embarcó casi clandestinamente en un barco portugués que se dirigía a Pondichéry, su destino inicial. Allí tuvo más de un año para montar el observatorio, sobre las ruinas del viejo fuerte. Las condiciones atmosféricas fueron excelentes durante las semanas anteriores al tránsito, incluso el día anterior, pero el día del tránsito amaneció nublado, despejando poco después de terminado el fenómeno. Por cierto, en Manila lució un cielo espléndido. Le Gentil cayó en una depresión que le impidió partir hasta el año siguiente. En la isla de Mauricio cayó de nuevo enfermo, permaneciendo otros ocho meses en esta isla. Al poco de partir, una tempestad forzó al barco a dirigirse a la isla de la Reunión. Finalmente, al año siguiente, embarcó en un barco español que le dejó en Cádiz. Por tierra llegó a París, once años y medio después de partir y sin ningún dato que aportar sobre los dos tránsitos. Dado legalmente por muerto, su vivienda y su puesto de trabajo estaban ocupados por otros y sus herederos intentaban repartirse los bienes que el administrador aún no había esquilado, de los que Le Gentil solo pudo recuperar una pequeña parte. Recuperado su trabajo, se casó con una joven y rica heredera y vivió otros 21 años tranquilamente en París, escribiendo artículos y las memorias de sus viajes y criando a su hija Marie Adélaïde.

En esa ocasión fueron los británicos, junto con sus colonos en Norteamérica y otras colonias, quienes dominaron la campaña con casi la mitad de los observadores. Entre los británicos, Mason viajó Irlanda y Dixon a una isla noruega (Hammerfest), dejando que esta vez fueran otros los que emprendieran grandes viajes. Otro astrónomo, William Wales, salió el verano anterior hacia el fuerte Churchill en la bahía de Hudson, ahora en Canadá, un lugar inaccesible durante gran parte del año y hasta donde hubo que acarrear todo el material para la construcción del observatorio. Pasó una invernada entre hielos, con temperaturas por debajo de 40 bajo cero, tras lo cual pudo observar el tránsito sin mayores problemas que los mosquitos y una preocupante discrepancia con su ayudante Joseph Dymond de 11 segundos en la medida del primer contacto.

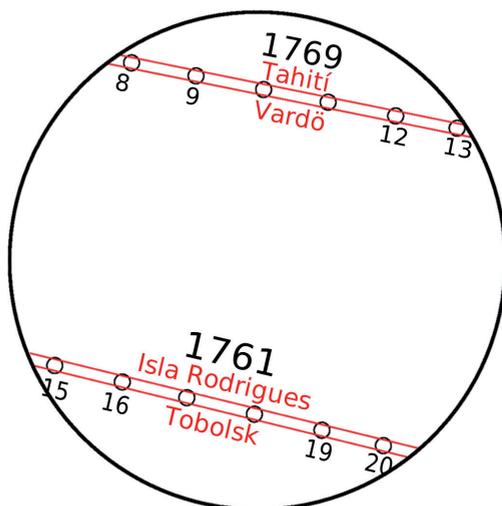


Figura 11: Recorridos extremos de Venus delante del disco solar durante sus tránsitos de 1761 y 1769 observados por Pingré (isla Rodrigues), Chappe (Tobolsk), Cook y Green (Tahiti) y M. Hell (Vardö). Las horas indicadas corresponden al meridiano de París.

Un cuñado de Wales, el astrónomo Charles Green, fue quien participó en la expedición más notoria. Capitaneada por el entonces joven teniente y astrónomo aficionado James Cook, su objetivo confesado era observar el tránsito desde algún lugar en los mares del Sur. Su agenda oculta consistía en explorar nuevas tierras y, en especial, un posible continente austral. Poco antes de salir aún no habían decidido el lugar de observación cuando, tras la llegada de otro barco inglés, su capitán informó de la existencia de una isla, de nombre local Otaheite (ahora Tahití), situada en un lugar óptimo para la observación, alejada de cualquier otro lugar poblado y a medio camino entre Sudamérica y Australia. La expedición británica llegó con seis semanas de adelanto, lo que les permitió montar un campamento, naturalmente llamado Fuerte Venus, y preparar tres emplazamientos, uno de ellos en la isla vecina de Moorea, de los que se ocuparían Green, Cook, el botánico Joseph Banks y otros expedicionarios. Las observaciones tuvieron éxito. Seis semanas después abandonaron Tahití e iniciaron un periplo que se prolongaría dos años más. El astrónomo Green tuvo ocasión de observar desde Nueva Zelanda otro tránsito, el de Mercurio del 9 de noviembre de 1769. Moriría de escorbuto y disentería en el viaje de regreso.

Algunos de los astrónomos cuyos viajes hemos relatado pueden incluirse entre los que podríamos llamar “científicos románticos”, en cuanto a que emprendían, con grandes riesgos, penalidades e incluso la muerte, exploraciones con el fin de alcanzar un nuevo conocimiento o un objetivo de interés para toda la humanidad, independientemente de naciones, religiones e ideologías, y cuyos logros trascendían el ámbito científico o erudito para llegar a un público cada vez mayor por medio de prensa, libros, conferencias, debates e, incluso, la escuela.

En conjunto, los resultados fueron bastante mejores que en la ocasión anterior. De nuevo, el efecto de la gota negra, las incertidumbres en las posiciones geográficas, la diferente habilidad de los observadores y las dificultades en el análisis de los datos, dieron como resultado una variedad de valores de la distancia al Sol, entre 149 y 157 millones de km, una incertidumbre claramente inferior pero aparentemente todavía demasiado grande tras tan importante esfuerzo internacional. Se convino en considerar que la distancia al Sol era la media de estos valores extremos, 153 millones de km, mientras no hubiera una mejor manera de determinarla, pues no habría otra oportunidad de observar un tránsito de Venus hasta un siglo después.

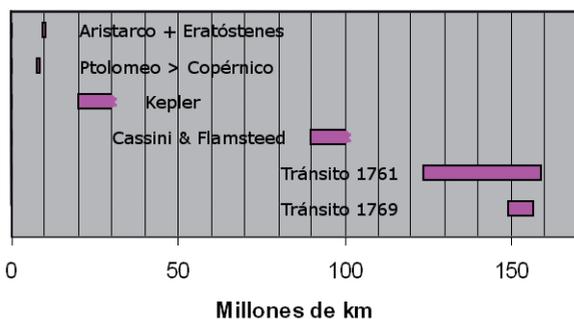


Figura 12: Evolución de los valores de la distancia al Sol considerados desde la antigüedad hasta Copérnico, cotas inferiores dadas en la era moderna por Kepler, Cassini y Flamsteed, y valores e incertidumbre obtenidos tras la observación de cada uno de los tránsitos de Venus del siglo XVIII.



Figura 13: Observatorio de campaña instalado en Eden (Nueva Gales del Sur, Australia), desde donde un grupo del Observatorio de Sidney liderado por William Scott (sentado en el centro), observó el tránsito de 1874. Se aprecia la tensa espera.

El astrónomo alemán Johann Franz Encke, que da nombre al cometa de menor periodo conocido, reanalizó los datos de los dos tránsitos, utilizando mejores valores para la longitud geográfica de algunos lugares de observación y, empleando el método de los mínimos cuadrados inventado por Johann Carl Friedrich Gauss unos años antes, llegó a un valor de la distancia media de la Tierra al Sol de $153,5 \pm 0,7$ millones de km, con una incertidumbre muy baja, lo cual resultaba, por fin, enteramente satisfactorio. En definitiva, los astrónomos viajeros lo habían hecho mejor de lo parecía en un primer momento.

Los dos tránsitos de Venus del siglo XIX

A lo largo del propio siglo XIX, sin embargo, estimaciones del valor de la distancia al Sol obtenidas por otros métodos consistentemente daban una distancia menor, de 147 millones de km. Por ello, hacia final de siglo se emprendieron campañas para observar los dos tránsitos de Venus, del 9 de diciembre de 1874 y del 6 de diciembre de 1882, con el objetivo de aclarar definitivamente este asunto.

Las observaciones del tránsito de 1874 fueron muy distintas de las anteriores. El instrumental científico era mucho mejor, estaba más estandarizado e incluía nuevos instrumentos, como los heliómetros que acompañaron las diez expediciones alemanas o los telescopios equipados con una nueva técnica, la fotografía, que usaron algunos equipos británicos y norteamericanos, para lo que contaron con fotógrafos profesio-

nales. En total, Rusia organizó unos treinta puestos de observación a lo largo de su territorio, desde el Mar Negro hasta el mar del Japón. Los estadounidenses enviaron tres expediciones al hemisferio norte, a Vladivostok, Pekín y Nagasaki, y cinco expediciones al hemisferio sur. Europa envió más de 50 expediciones en total, que cubrieron la amplia región de visibilidad del tránsito en los océanos Pacífico e Índico así como la parte oriental de Asia. Astrónomos profesionales estuvieron a cargo de muchas de las observaciones, a diferencia del siglo anterior en que se encargaron de muchas de ellas aficionados, nobles, relojeros, monjes y aficionados. Los viajes, en tren o en vapor, eran mucho más seguros, se podía usar el recién inaugurado canal de Suez para atajar y no había apenas guerras en Europa.

Después de tanto esfuerzo y dinero invertido, los resultados iniciales fueron decepcionantes: de entrada, los resultados obtenidos a partir de las observaciones individuales realizadas por distintos astrónomos diferían más de lo esperado. Las “ecuaciones personales” evaluadas para corregir cada medida por el tiempo de reacción del observador no mejoraron la calidad de los datos. Además, pocas observaciones fotográficas fueron útiles por la mala calidad de las imágenes, la incertidumbre en la orientación de las placas fotográficas y, en general, la novedad de esta técnica.

Todo ello enfrió los ánimos de los astrónomos, que además estaban perdiendo la fe en este método para determinar la distancia al Sol, por lo que no hubo tantas expediciones para observar el siguiente tránsito, que tuvo lugar ocho años después, en 1882. En

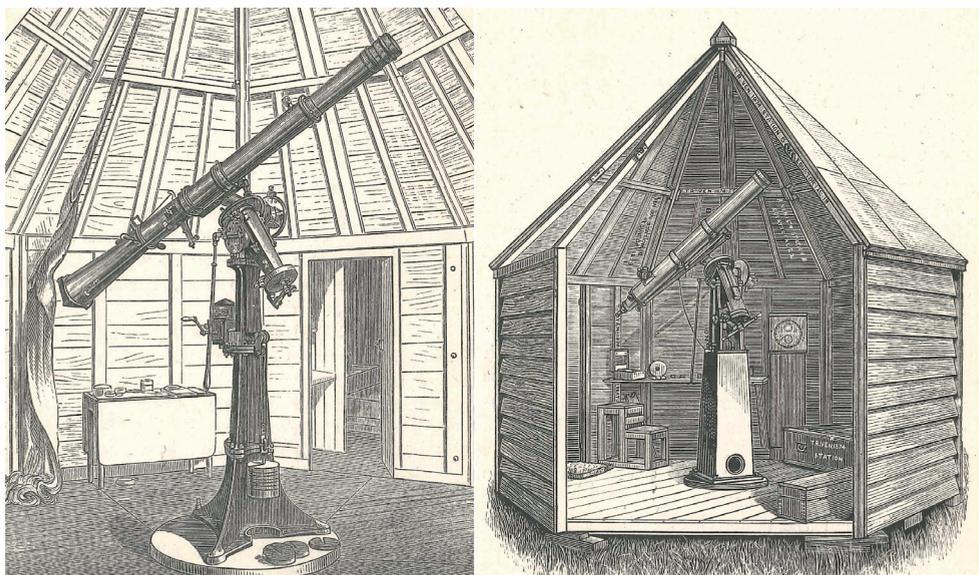


Figura 14: Fotoheliógrafo (izquierda) y telescopio ecuatorial (derecha), usados en las observaciones fotográficas y de contactos, respectivamente, en las cinco estaciones de observación de la expedición británica, instalados en sendas casetas portátiles. En otras expediciones, las casetas se construyeron con las cajas de los embalajes o con tiendas de lona.

cambio, fue mucho más popular, ya que iba a ser visible en toda América y gran parte de Europa. Tuvo especial relieve en los EEUU, al ser visible en todo el país. Para complementar los datos con medidas desde otras latitudes, los estadounidenses enviaron cuatro expediciones a países del hemisferio sur, como Chile y Nueva Zelanda. Entre ellas hubo una a Sudáfrica, liderada por Simon Newcomb, el primer gran astrónomo norteamericano, que se instaló junto a un colegio para señoritas, a quienes entrenó para realizar observaciones. En total se tomaron miles de fotos, pero esta técnica era todavía poco fiable como para dar lugar a un salto cuantitativo en la calidad de los datos.

Fue necesario recopilar todos los datos de los dos tránsitos y analizarlos conjuntamente para reducir la incertidumbre del resultado. Esto lo hizo el americano William Harkness, que obtuvo un resultado de $148,8 \pm 0,2$ millones de km. Considerando los datos de los cuatro tránsitos de Venus observados, es decir, incluyendo también los del s. XVIII, y con valores mejorados de las longitudes geográficas, Newcomb obtuvo una distancia al Sol parecida, de $149,6 \pm 0,4$ millones de km.

Esta alta precisión, que hubiera más que satisfecho a los astrónomos del siglo XVIII, no convencía a los de fines del s. XIX, que trataron de determinar aún mejor la distancia al Sol mediante otros métodos, por ejemplo retomando las oposiciones de Marte, la observación de asteroides que se acercaran a la Tierra aún más que Marte y otras medidas, que llevaron a Newcomb a proponer a finales del s. XIX el valor de $149,5 \pm 0,2$ millones de km, que se adoptó durante muchos años.

En definitiva, en el s. XIX la determinación de la distancia al Sol vino marcada por las mejoras instrumentales, las innovaciones técnicas, como la fotografía y la telegrafía, y una muy desarrollada mecánica celeste. Al terminar el siglo se había determinado la distancia al Sol con una incertidumbre del 1/1000. No creo que haya otro parámetro astronómico cuyo valor haya sido perseguido durante tantos siglos y cuya determinación haya costado tantos esfuerzos, desgracias y muertes. En el siglo XX no hubo tránsitos de Venus, pero hubo otros métodos de determinación de la distancia al Sol que aumentaron la precisión en muchos órdenes de magnitud. Si en tiempos de Newcomb la incertidumbre era de centenares de miles de km, la incertidumbre con que se conoce ahora es de 3 m, una mejora de ocho órdenes de magnitud lograda en solo un siglo.

No hay que menospreciar los resultados de las medidas realizadas por los astrónomos de los siglos XVIII y XIX en las primeras campañas de cooperación científica internacional jamás realizadas. Iniciadas en los tiempos de la Ilustración, permitieron determinar por primera vez el orden de magnitud correcto para la distancia al Sol, de unos 150 millones de km, y el tamaño del sol, 109 veces mayor que la Tierra. Además, dieron a conocer proyectos científicos de gran envergadura a la ciudadanía, muy distintos de los que se hacían en la intimidad de un laboratorio u observatorio. Por primera vez los gobiernos se implicaron, en parte por prestigio, en proyectos internacionales y de gran coste.

En 2012 la Unión Astronómica Internacional adoptó como unidad de longitud para las medidas de distancias en el sistema solar y a otras estrellas la “unidad astronómica” (au) con un valor de exactamente 149.597.870.700 m.

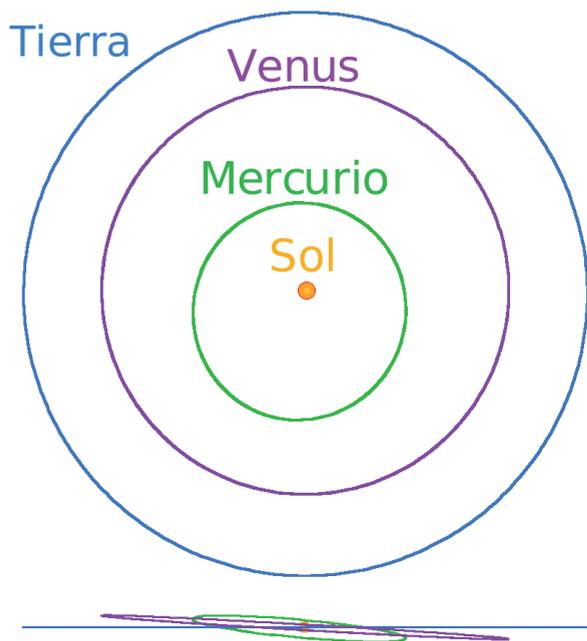


Figura 15: Órbitas de Mercurio, Venus y la Tierra, en que se aprecia la gran excentricidad de la órbita de Mercurio, y, en la vista de perfil, la inclinación de las órbitas de Mercurio y Venus con respecto de la de la Tierra.

La astronomía de los tránsitos de Mercurio y Venus

Los tránsitos son fenómenos mucho menos frecuentes que los eclipses de Sol producidos por la Luna, pues esta está más de cien veces más cerca de la Tierra que Mercurio o Venus, y su período sinódico (tiempo medio entre lunas nuevas, que es de 29,53 días) es mucho menor que el de dichos planetas.

La rareza de los tránsitos en el sistema solar viene dada, además, por la ligera inclinación que tiene la órbita de cada uno de los planetas con respecto de la de los demás, suficiente para que en la mayoría de ocasiones no se vea el planeta interior pasar por delante del disco solar, sino por encima o por debajo de él. En el caso particular de un observador en la Tierra, una dificultad añadida proviene de la gran inclinación de las órbitas de sus planetas interiores, Mercurio y Venus, que son las mayores entre los planetas del sistema solar: la inclinación de la órbita de Mercurio con respecto de la de la Tierra es de $7,0^\circ$, mientras que la de Venus es de $3,4^\circ$. Los tránsitos solo ocurren cuando el planeta más interior se encuentra en su conjunción inferior, es decir, alineado entre el Sol y la Tierra, y además muy cerca de uno de los nodos de su órbita, es decir en los dos puntos en los que su órbita cruza el plano de la de la Tierra, pues solo en este caso se produce el alineamiento casi perfecto de los tres astros.

A pesar de que la inclinación de la órbita de Venus es menor que la de Mercurio, la menor distancia de Venus a la Tierra en sus cruces con el Sol hace que en la actualidad pasa hasta casi 9° por encima o por debajo del disco solar y que en el caso de Mercu-

rio no llega a 5°. Conviene recordar que el Sol tiene solo poco más de medio grado de diámetro angular (32') visto desde la Tierra. El número de conjunciones inferiores por siglo de estos planetas es de 315 en el caso de Mercurio y de 62 o 63 para Venus; la diferencia viene dada por tener Mercurio un menor período sinódico (tiempo entre alineamientos sucesivos con la Tierra) que Venus (116 y 584 días, respectivamente), al encontrarse más cerca del Sol. Con solo considerar estos dos factores, amplitud del movimiento en latitud eclíptica y número de conjunciones inferiores, podemos estimar que la frecuencia de los tránsitos de Mercurio es diez veces mayor que la de los de Venus.

Los tránsitos de Mercurio

En la actualidad los tránsitos de Mercurio tienen lugar en la primera mitad de mayo (unos dos días antes o después de su paso por el nodo descendente, que tiene lugar alrededor del 8 de mayo) o en la primera mitad de noviembre (unos cuatro días antes o después de su paso por el nodo ascendente, que tiene lugar alrededor del 10 de noviembre), dándose estos con el doble de frecuencia. Ello es debido a la gran excentricidad de la órbita de Mercurio (0,206) y a la cercanía del nodo ascendente con el perihelio de Mercurio, de modo que Mercurio está considerablemente más cerca del Sol cuando pasa por el nodo ascendente que cuando pasa por el nodo descendente. En conjunto, se dan 13,3 tránsitos cada siglo, aunque no de forma regular, pues el intervalo entre un tránsito y el siguiente varía entre 3,5 y 13 años, como es el caso de los tránsitos consecutivos de 2016, 2019 y 2032. Además, no se dan tránsitos sucesivos en el nodo descendente (mayo), pero sí en el ascendente (noviembre).

Desde el año 1600 hasta el 2400 se producirán 35 tránsitos de Mercurio, entre los días 2 y 16 de mayo, y 72 entre los días 1 y 20 de noviembre; en promedio se producirá un tránsito cada 24 conjunciones inferiores. La gran dispersión de fechas parece exceder lo antes dicho, pero se explica si se tiene en cuenta que las órbitas de Mercurio y de la Tierra varían a lo largo de los ocho siglos considerados. En particular, el paso por los nodos se retrasa más de un día por siglo.

En el siglo **xxi** habrá un total de 14 tránsitos, cinco en mayo y nueve en noviembre. De ellos, cinco se verán completos desde España, se verá solo una parte del tránsito en otros cinco y cuatro no serán visibles.

Tránsitos de Mercurio en el siglo **xxi**

| Fecha | Visibilidad en España |
|-------------------------|---|
| 7 de mayo de 2003 | Completa desde Baleares y parte de la península |
| 8 de noviembre de 2006 | No visible |
| 9 de mayo de 2016 | Visible todo el tránsito |
| 11 de noviembre de 2019 | Visible el inicio del tránsito |

| | |
|-------------------------|---|
| 13 de noviembre de 2032 | Visible, aunque completo solo en Baleares |
| 7 de noviembre de 2039 | Visible, aunque incompleto en Canarias |
| 7 de mayo de 2049 | Visible todo el tránsito |
| 9 de noviembre de 2052 | No visible |
| 10 de mayo de 2062 | No visible |
| 11 de noviembre de 2065 | No visible |
| 14 de noviembre de 2078 | Visible todo el tránsito |
| 7 de noviembre de 2085 | Visible todo el tránsito |
| 8 de mayo de 2095 | Visible el inicio del tránsito |
| 10 de noviembre de 2098 | Visible el final del tránsito |

Otra característica que diferencia los tránsitos de mayo y noviembre es la duración máxima de un tránsito central, o sea, aquel en que el planeta pasa por el centro del Sol. En mayo pueden llegar a durar casi ocho horas, mientras que en noviembre solo llegan a cinco horas y media, pues en esas fechas el planeta está cerca de su perihelio y por consiguiente está más cerca del Sol y se mueve más rápido (segunda ley de Kepler) que en mayo, cuando está cerca del afelio.

El tamaño angular medio de Mercurio visto desde la Tierra durante el tránsito está entre 10" (noviembre) y 12" (mayo), un ángulo menor que el 1% del tamaño del Sol, lo que explica la dificultad para observarlo con instrumentos rudimentarios como los empleados a principios del siglo xvii.

Las observaciones de los tránsitos de Mercurio realizadas durante el siglo xix revelaron pequeñas discrepancias con las efemérides calculadas, lo que condujo al descubrimiento del anómalo avance del perihelio de Mercurio, que no se pudo explicar enteramente por las perturbaciones gravitatorias causadas por los demás planetas. En noviembre de 1915 el físico Albert Einstein lo justificó, con gran satisfacción suya, constituyendo el primero de los fenómenos que se explicó con la teoría general de la relatividad, que entonces estaba desarrollando.

Los tránsitos de Venus

Los tránsitos de Venus son unas diez veces menos frecuentes debido a su mayor lejanía al Sol y mayor cercanía a la Tierra que en el caso de Mercurio. Son unos fenómenos extraordinariamente inusuales, ya que en promedio hay dos cada algo más de un siglo. Los tránsitos de Venus se pueden dar por pares, dos tránsitos separados ocho años, o ser individuales, lo cual es menos frecuente: se dan unos tres pares por cada dos tránsitos simples, o sea solo uno de cada cuatro tránsitos de Venus es simple. La razón de la alta frecuencia de los pares de tránsitos es que en ocho años (ocho órbitas terrestres) Venus recorre 13 órbitas. Sin embargo, no se produce un tercer tránsito dado que, aunque las trayectorias de los pasos sucesivos son paralelas, están desplazadas

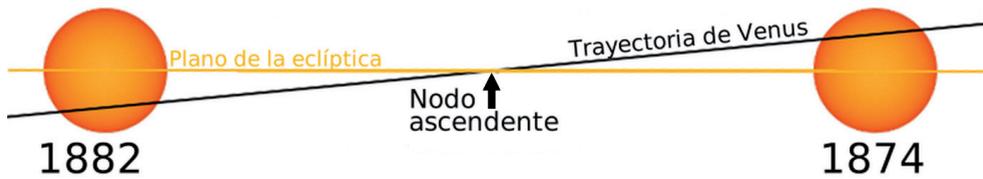


Figura 16: Los pasos consecutivos de Venus por delante del Sol en el siglo XIX.

en más de medio radio solar, por lo que, si dos pasos sucesivos han dado lugar a un tránsito, el tercer paso tiene lugar ya fuera del disco solar.

Los tránsitos individuales, como el de 23 de noviembre (juliano) de 1396, tienen lugar cuando la trayectoria pasa muy cerca del centro del disco solar, con lo que el posible tránsito anterior (26 de noviembre de 1388) o siguiente no llega a producirse. Entre un tránsito (simple o doble) y el siguiente transcurre más de un siglo, actualmente alternándose duraciones de 105,5 y 121,5 años en los intervalos entre pares. El último par de tránsitos de Venus ocurrió el 8 de junio de 2004 y el 5 de junio de 2012. El tránsito de 2012 apenas fue visible desde la península; en cambio el de 2004 fue visible en todas sus fases desde todo el territorio peninsular. El anterior par de tránsitos de Venus se produjo en los años 1874 y 1882. Tan solo el segundo fue parcialmente visible desde España. El próximo par de tránsitos tendrá lugar los días 11 de diciembre de 2117 y 8 de diciembre de 2125.

Tránsitos de Venus históricos y futuros

| Fecha | Visibilidad en España |
|-------------------------|---|
| 7 de diciembre de 1631 | No visible |
| 4 de diciembre de 1639 | Visible su inicio al ocaso |
| 6 de junio de 1761 | Visible su final al amanecer |
| 3 de junio de 1769 | Apenas visible su inicio al ocaso |
| 9 de diciembre de 1874 | No visible |
| 6 de diciembre de 1882 | Visible su inicio al atardecer |
| 8 de junio de 2004 | Completo en península y Baleares; en Canarias, tras amanecer |
| 5 de junio de 2012 | Terminaba al amanecer en el Este peninsular y Baleares; no visible en Canarias |
| 11 de diciembre de 2117 | No visible |
| 8 de diciembre de 2125 | Visible su inicio al atardecer |

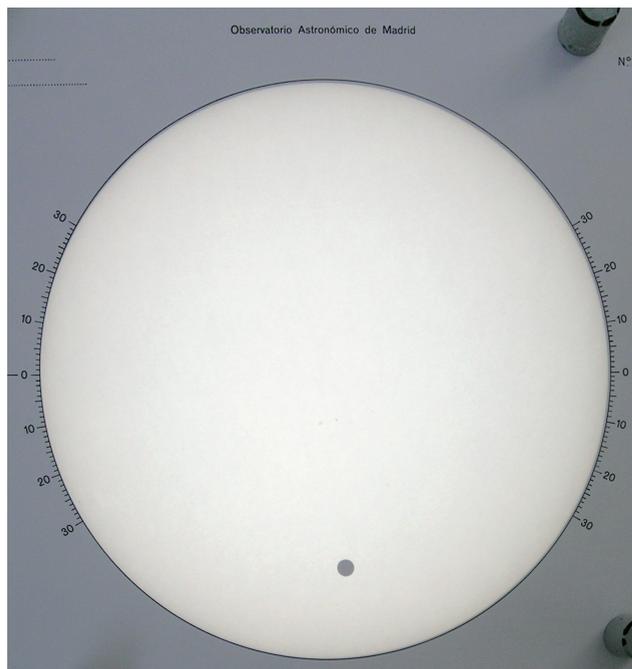


Figura 17: Observación del tránsito de Venus de 2004, por proyección mediante el telescopio solar del Observatorio de Yebes.

Se dan entre 9 y 18 tránsitos de Venus cada milenio, con un promedio de 12,1 cada mil años (en el intervalo de 80 siglos que va del año -2000 al 6000), con escasa diferencia entre la frecuencia de los que se dan en el nodo descendente (actualmente en la primera mitad de junio) y en el ascendente (primera mitad de diciembre). A pesar de la baja excentricidad de la órbita de Venus, los tránsitos de diciembre son ligeramente menos probables debido a su mayor distancia al Sol y menor distancia a la Tierra, lo que se manifiesta en que en ocasiones en diciembre se produce un tránsito aislado, como ocurrió en 1396 y volverá a ocurrir en el 18 de diciembre de 3089. Entre los años -2000 y 6000 se producirán 51 tránsitos en el nodo descendente (mayo/junio) y 46 en el ascendente (noviembre/diciembre), excluyendo los escasos tránsitos rasantes, en que el disco de Venus apenas roza el disco solar, no produciéndose los contactos interiores.

El tamaño medio de Venus visto desde la Tierra durante una conjunción inferior es de $60''$, alrededor del 3% del tamaño angular del Sol. Este tamaño es suficiente como para apreciarlo con gafas protectoras especiales como las usadas en la observación de los eclipses de Sol, como pudimos comprobar en el tránsito de 2004. (Sin embargo, se recomienda fuertemente observar el Sol siempre en proyección sobre una pantalla.) La duración de la entrada o la salida del disco de Venus en el disco solar es de al menos 14 minutos, pudiendo exceder una hora, como fue el de 7 de diciembre de 1631, el tránsito predicho por Kepler que no fue visible desde Europa. La duración máxima de un tránsito central en diciembre es de 8 horas y 10 minutos, lo que limita la zona de la Tierra en que es posible ver todo el fenómeno de principio a fin, debido a que durante este tiempo la Tierra realiza un tercio de su giro diario. La inclinación de la trayectoria de Venus sobre el disco del Sol es de unos 9° .

En la primera sección se ha comentado la coincidencia de un tránsito de Mercurio y uno de Venus en un mismo año, 1631. Se trata de una rara situación, que volvió a darse en 1769 y no volverá a ocurrir hasta finales de 2611. No se pueden dar tránsitos de Mercurio y Venus en un mismo día, dado que la orientación de la línea de los nodos de Mercurio y la de Venus no coincide. Pero dado que la distancia entre ellas se va reduciendo, es posible que dentro de varias decenas de milenios pueda darse esta circunstancia.

Otros tránsitos en el sistema solar

Hasta ahora hemos hablado de los tránsitos por delante del Sol que es posible ver desde la Tierra, que son los de los planetas más cercanos al Sol que ella: Mercurio y Venus. La exploración del sistema solar puede dar lugar a que en el futuro se observen tránsitos desde otros lugares de observación: un astronauta en la superficie de Marte podría ver tránsitos de Mercurio, de Venus y de la Tierra. Y desde una sonda en órbita alrededor de cualquier planeta más exterior que Marte, o de alguno de sus grandes satélites, se podrían ver los tránsitos de los planetas más interiores a él.

Al considerar otros tránsitos conviene tener en cuenta que a medida que nos alejamos del Sol, su tamaño angular y el de los planetas interiores disminuye. En la tabla siguiente se indican los tamaños medios vistos desde cada uno de los planetas durante un tránsito, expresados en segundos de arco ($1'' = 1/3600$ grados). Como puede comprobarse, el tamaño angular del Sol disminuye a medida que nos alejamos de él. Por ejemplo, desde Saturno el Sol se ve unas diez veces más pequeño que desde la Tierra y desde Urano, unas veinte. De los valores de la tabla podemos deducir que uno de los mejores tránsitos que se puede observar en el sistema solar es el de Venus desde la Tierra, pues

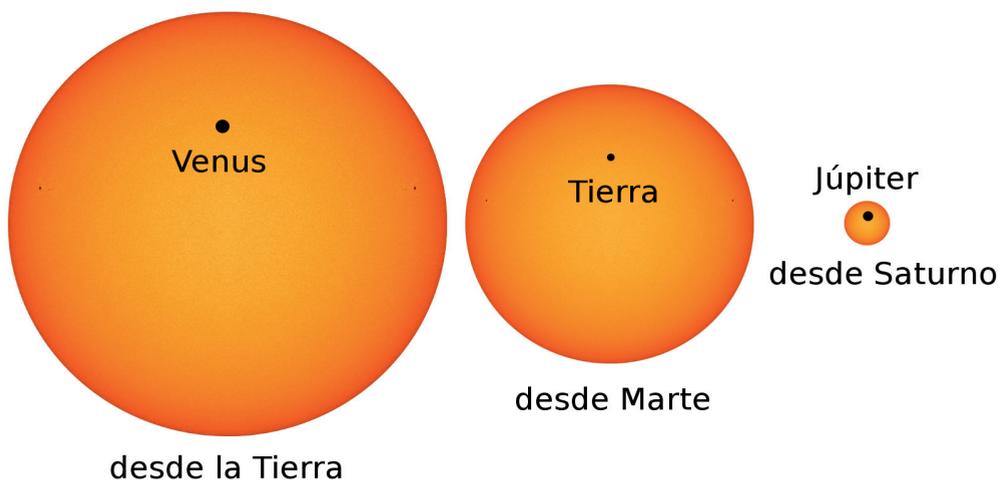


Figura 18: Tránsitos destacados vistos desde varios planetas, a la misma escala angular.

aparece con un tamaño angular de 60", el mayor de todos, y además cruza un disco solar con un tamaño apreciable, de medio grado, unas 30 veces mayor que el de Venus. Por tamaño angular del planeta que transita, en segundo lugar está el tránsito de Júpiter visto desde Saturno y en tercer lugar el tránsito de la Tierra vista desde Marte. En este último caso, la proporción entre los discos del Sol y la Tierra en tránsito es parecida a la del Sol y Venus en tránsito vistos desde la Tierra. Hay proporciones mucho mayores, como son las de los tránsitos de los gigantes planetas gaseosos, en que el diámetro angular del disco del planeta que transita supera el 10% del del Sol, siendo el caso más extremo el ya mencionado del tránsito de Júpiter visto desde Saturno, en que la razón de diámetros es de 22%. Sin embargo se trata de un fenómeno muy poco frecuente, que se dio por última vez hace más de dos mil años y no volverá a darse hasta el año 7541. En definitiva, los tránsitos más atractivos que se pueden ver en el sistema solar son los de Venus vistos desde la Tierra. Los que hemos podido ver el de 2004 hemos sido afortunados.

Tránsitos planetarios en el sistema solar

Tamaños angulares de Sol y planetas vistos desde un planeta más externo

| Visto desde: | Venus | Tierra | Marte | Júpiter | Saturno | Urano | Neptuno |
|--------------|-------|--------|-------|---------|---------|-------|---------|
| Sol | 2653" | 1919" | 1260" | 369" | 201" | 100" | 64" |
| Mercurio | 20,0" | 11,0" | 5,9" | 1,4" | 0,74" | 0,36" | 0,23" |
| Venus | | 60,3" | 20,9" | 3,7" | 1,9" | 0,90" | 0,57" |
| Tierra | | | 33,6" | 4,2" | 2,1" | 0,97" | 0,61" |
| Marte | | | | 2,5" | 1,2" | 0,53" | 0,33" |
| Júpiter | | | | | 45" | 14" | 7,9" |
| Saturno | | | | | | 17" | 8,1" |
| Urano | | | | | | | 6,5" |

Los tránsitos son tanto más frecuentes cuanto más cerca del Sol está el planeta que transita y más lejos está el planeta desde el que se observa. En efecto, cuanto más interior es un planeta menos tarda en dar una vuelta al Sol y, por lo tanto, son más frecuentes las conjunciones con el otro. Y cuanto más lejos del Sol esté el observador, menos influye la inclinación de la órbita del planeta interior en evitar que se dé el tránsito. Por ejemplo, desde Júpiter se ven el doble de tránsitos de Mercurio que desde la Tierra. Por último, cuanto más lejos del Sol estén los dos planetas involucrados en el tránsito, al orbitar más lentamente su ritmo de conjunciones será menor y también lo será la frecuencia de tránsitos. Por ejemplo, en el intervalo medio de tiempo a largo plazo entre dos tránsitos de Júpiter vistos desde Urano, se dan más de 50 tránsitos de Mercurio vistos desde la Tierra.

La duración de un tránsito central es tanto más larga cuanto más alejado del Sol esté el planeta interior, pues cuanto más lejos del Sol están los planetas a menor veloci-

dad se mueven (tercera ley de Kepler), y la menor diferencia entre sus velocidades relativas compensa con creces el menor recorrido del tránsito por ser menor el tamaño angular del Sol a transitar a medida que consideramos pares de planetas más alejados. La duración máxima del tránsito de Mercurio visto desde Venus es de 6,2 horas, la del de Venus visto desde la Tierra es de 7,9 horas, la del de la Tierra visto desde Marte es de 9,5 horas, la del de Júpiter visto desde Saturno es de 22,5 horas y el caso más extremo es la del tránsito de Urano visto desde Neptuno, que dura casi 42 horas.

Aunque no podamos imaginar un observador en la superficie de Venus, pues está rodeado por una atmósfera espesa (92 atmósferas), caliente (460 °C) e inhóspita (vientos, acidez), sí podemos considerar la observación de un tránsito desde una sonda en órbita alrededor de Venus. Los tránsitos de Mercurio vistos desde Venus son tan frecuentes como los vistos desde la Tierra, unos 13,8 por siglo. En el siglo **xxi** se producirán 16; los próximos se darán los días 2 de julio de 2022, 16 de enero de 2028 y uno de corta duración el 1 de agosto de 2033.

Las novelas y películas de ciencia ficción y algunos proyectos reales en fase muy preliminar sí nos permiten imaginar futuros habitantes en Marte. Por el momento las observaciones astronómicas se pueden realizar desde sondas robóticas, como la observación del tránsito de Mercurio de 3 de junio de 2014 realizada desde el vehículo *Curiosity* en la superficie de Marte (y los de sus lunas Fobos y Deimos en marzo de 2019).

Desde el pequeño planeta rojo se pueden ver tránsitos de Mercurio, Venus y la Tierra. En el siglo **xxi** habrá 25 tránsitos de Mercurio, aproximadamente el doble de los visibles desde la Tierra. El próximo se producirá el día 25 de octubre de 2023. Los de Venus también son mucho más frecuentes (siete por siglo) que vistos desde la Tierra. Ello es debido a que la mayor distancia a la que se encuentra Marte reduce el efecto de la inclinación de las órbitas de Mercurio y Venus; además, el periódico sinódico (entre

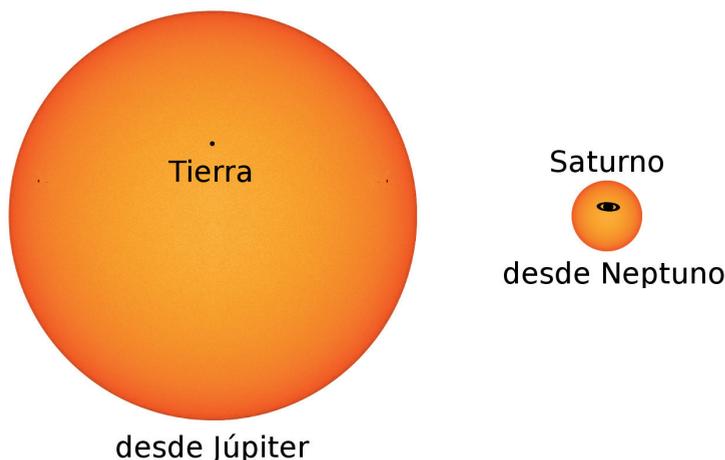


Figura 19: Dos ejemplos de tránsitos observables desde planetas gaseosos en las próximas décadas.

conjunciones inferiores con Marte) es menor. En el siglo xxi desde Marte se podrían ver siete tránsitos de Venus (y ninguno desde la Tierra). En cuanto a los tránsitos de la Tierra, en promedio se producen 3 cada dos siglos. El 11 de mayo de 1984 hubo un tránsito de la Tierra visible desde Marte. El siguiente se producirá en el 10 de noviembre de 2084 (fecha dada según el calendario terrestre actual).

La observación de tránsitos desde los planetas gigantes gaseosos está limitada por varias razones: en primer lugar, no tienen una superficie sólida, por lo que hay que imaginar al hipotético observador en una de sus grandes lunas o en órbita a su alrededor. En segundo lugar, el periodo de rotación de los grandes planetas es muy corto, más corto que la duración de la mayoría de tránsitos, de modo que aunque su superficie fuera sólida, no sería posible ver un tránsito entero desde un único lugar. En efecto, Júpiter da una vuelta en menos de diez horas, Saturno en menos de once horas y Neptuno en unas 16 horas. En cuanto a Urano, la inclinación de su eje es tal (98°) que casi parece rodar sobre su órbita.

Desde Júpiter se pueden ver tránsitos de Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. Un tránsito central de la Tierra visto desde Júpiter tiene una duración media de 11,5 horas. No son tránsitos espectaculares pues, debido a la gran distancia a la que se encuentra Júpiter del Sol y de la Tierra, el tamaño angular de éstos es muy pequeño: $369''$ y $4,2''$, a comparar con los correspondientes a un tránsito de Venus visto desde la Tierra: $1919''$ y $60''$, respectivamente. Se producen unos 9,7 tránsitos de la Tierra cada siglo, aunque esta frecuencia se reduce ligeramente si no se considera toda la superficie de Júpiter como lugar de observación sino que, como se ha comentado antes, el hipotético observador se encuentra en órbita al planeta o a alguna de sus grandes lunas. En el siglo xxi se producirán once tránsitos de la Tierra; los próximos se darán los días 10 de enero de 2026 (que coincidirá con un tránsito del satélite Calisto, visto desde una zona de la superficie de Júpiter) y 24 de junio de 2055.

De entre los muy poco frecuentes tránsitos de un planeta gaseoso visto desde otro, el primero que se producirá será el de Saturno visible desde Neptuno el 29 de mayo de 2061.

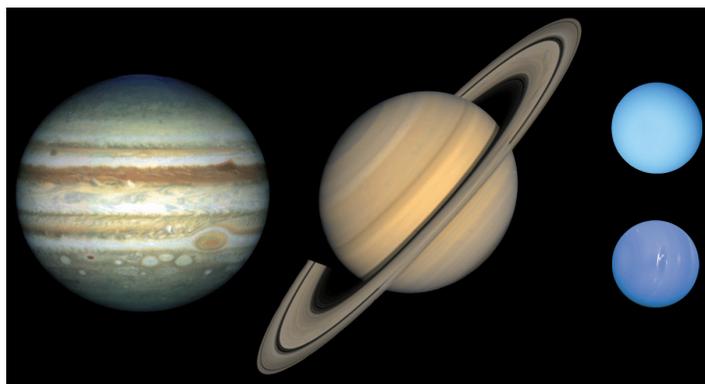


Figura 20: Los cuatro planetas gaseosos gigantes del sistema solar.

Los exoplanetas

Tránsitos en otros sistemas planetarios

Si desde otra estrella se observara el tránsito de Júpiter por delante del Sol, debido a la gran distancia que los separa no se podría ver el paso de Júpiter, pero sí apreciar la disminución del brillo del Sol al ser parcialmente cubierta su superficie por el planeta que transita. Debido a la diferencia de tamaños entre los dos astros (el diámetro del Sol es unas diez veces mayor que el de Júpiter), la disminución del brillo solar sería de casi el 1%, lo que equivale a 0,01 magnitudes. Aun siendo una cantidad pequeña, es medible con los instrumentos actuales, por lo que los “tránsitos fotométricos” son el principal método empleado para descubrir planetas que orbitan alrededor de otras estrellas.

Descubiertos a finales del siglo pasado, en 2019 se ha superado el número de 4000 planetas descubiertos orbitando alrededor de más de 3000 estrellas. Se sabe que una de cada cinco de ellas tiene más de un planeta, constituyendo sistemas planetarios, alguno de ellos con tantos planetas como el sistema solar, como es el caso del de la estrella parecida al Sol Kepler 90. Solo una pequeña parte (1%) de los exoplanetas han podido ser fotografiados directamente, los demás se detectan por métodos indirectos. El método de detección más exitoso es el de los tránsitos, que ha dado lugar a casi el 80% de los descubrimientos. El intervalo de tiempo regular entre disminuciones de brillo de la estrella nos revela no solo la existencia de un exoplaneta que transita frente a la estrella, sino también de su período orbital, o sea la duración del año de ese planeta.

La medida del espectro de la atmósfera de la estrella permite conocer la masa y estimar el tamaño de esta. Conocidos la masa de la estrella y el periodo orbital del planeta, se puede calcular la distancia a la que este orbita. La disminución de brillo debida al tránsito permite calcular el tamaño del planeta, pues cuanto más grande sea más dis-

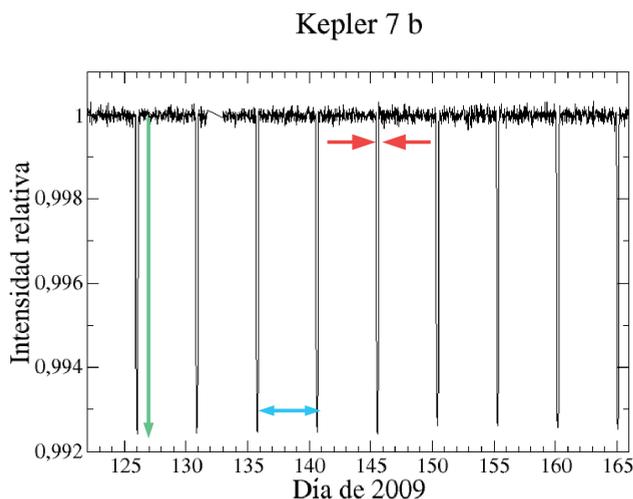


Figura 21: La periodicidad en las disminuciones de brillo de la estrella Kepler 7 indica la presencia de un exoplaneta, que recibe el nombre de Kepler 7 b. Su periodo orbital, de casi 5 días, viene indicado por la flecha azul. El tiempo de tránsito, de unas 5 horas, viene indicado por las flechas rojas. La disminución de brillo, del 0,76%, viene indicada por la flecha verde y nos permite calcular que el planeta es doce veces menor que la estrella, por lo tanto se trata de un planeta gaseoso. La espectroscopía nos dice que la estrella es de tipo G0, casi dos veces mayor que el Sol, lo que nos permite calcular que el radio de la órbita del exoplaneta es de 0,062 unidades astronómicas.

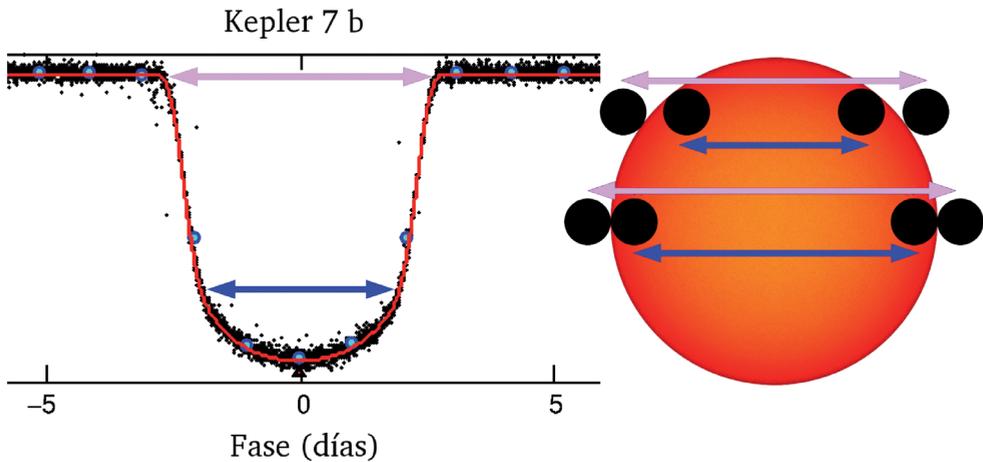


Figura 22: La razón entre el tiempo total del tránsito (indicado por la flecha lila) y el tiempo de inmersión/emersión total (flecha azul) permite conocer cuán central es. La inmersión/emersión es más rápida en los tránsitos centrales que en los cercanos a los polos de la estrella. También puede permitir estimar la inclinación de la órbita: en el caso de Kepler 7 b el ángulo entre el plano de la órbita y la visual es de $3,5^\circ$.

minuirá el brillo. Actualmente es posible medir disminuciones relativas de brillo menores del 0,01%. El tamaño del planeta puede permitir su clasificación en planeta rocoso o gaseoso.

En el caso de un planeta rocoso cabe preguntarse si su distancia a la estrella es tal que podría albergar agua en estado líquido en su superficie, en el supuesto de que se dieran una serie de circunstancias (presencia de agua, existencia de una atmósfera suficientemente densa, una rotación rápida, una excentricidad orbital baja). Conociendo la luminosidad de la estrella (que se deduce de su brillo en magnitudes y su distancia al Sol) y su temperatura superficial (que se deduce de su espectro), se pueden estimar unas distancias mínima y máxima de la que se denomina “zona de habitabilidad” y comprobar si el planeta rocoso descubierto se halla en dicha zona. Ello no significa que sea habitable por seres humanos, sino que tiene potencial para desarrollar ambientes duraderos favorables para la vida. En el caso del sistema solar, se considera que los límites son 0,84 y 1,67 unidades astronómicas, por lo que están dentro de ella la Tierra y Marte.

El tiempo que duran la inmersión y la emersión informan de cuán cerca del centro o de un polo de la estrella está pasando el planeta, pues si pasa cerca del centro dichos tiempos son más cortos que si pasa a elevadas latitudes, lo cual permite deducir la inclinación de la órbita. El tiempo que dura el tránsito, junto con lo anterior, también permite estimar o confirmar el tamaño de la estrella. Variaciones (adelantos o retrasos) en los instantes en que se producen los sucesivos tránsitos de un planeta nos pueden informar de la presencia de otros planetas, que perturban la órbita del que transita.

Se realizan medidas espectroscópicas precisas para confirmar candidatos a exoplaneta. Si muestran los pequeños cambios regulares de velocidad que experimenta la

estrella, alrededor de la cual gira, como consecuencia de la atracción gravitatoria del planeta, se puede determinar la masa de este, pues su efecto será tanto mayor cuanto mayor sea su masa. La medida continuada de la velocidad radial también puede permitir determinar la excentricidad de la órbita, o sea cuánto se desvía de una circunferencia. Además, las líneas espectrales de absorción que se detecten solo durante el tránsito pueden revelar la presencia y composición de la atmósfera del planeta.

Solo un pequeño porcentaje de los planetas que orbitan alrededor de otras estrellas lo hacen en órbitas con una inclinación suficientemente baja con respecto a nuestra visual como para que los tránsitos sean visibles. Además, estos serán tanto más probables cuanto más cercano a la estrella esté el exoplaneta. Por ello, para descubrir sistemas planetarios es necesario observar decenas o centenares de miles de estrellas al mismo tiempo y de manera continuada en una región del cielo, tal como hizo la misión Kepler con la que se han descubierto miles de exoplanetas.

En definitiva, si bien en el pasado los tránsitos de Venus y Mercurio, respectivamente, sirvieron para determinar la distancia al Sol y proporcionar la primera evidencia observacional de la teoría general de la relatividad, en la actualidad los tránsitos de los planetas delante del Sol son poco más que una curiosidad. En cambio, los tránsitos frente a otras estrellas son el método actual más efectivo para descubrir la presencia de exoplanetas orbitando alrededor de ellas y determinar su tamaño y las características de sus órbitas. Los tránsitos tienen presente y futuro.

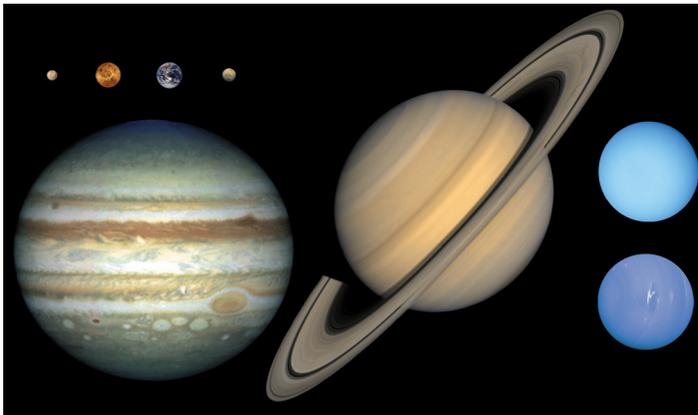


Figura 23: Los ocho planetas del sistema solar representados a escala.

Características de los exoplanetas

Los miles de exoplanetas descubiertos hasta la actualidad permiten conocer la variedad de características de los planetas existentes, así como la diversidad de sistemas planetarios. Hasta hace un par de décadas solo se conocía un sistema planetario, el sistema solar, lo que dificultaba el estudio de su formación y evolución. Por otra parte,

en el estudio de los demás sistemas planetarios usamos como referencia el profundo conocimiento del nuestro, que exploramos desde hace décadas con telescopios y sondas interplanetarias.

Los ocho planetas del sistema solar se suelen clasificar en dos grupos. Los cuatro más cercanos al Sol forman el grupo de los planetas rocosos, telúricos o terrestres. Son relativamente pequeños y poco masivos, siendo la Tierra el mayor (diámetro 12.750 km) y más masivo ($6,0 \cdot 10^{24}$ kg) de ellos. Son densos (unos 5 g/cm^3), están constituidos principalmente de metales (hierro, níquel) y roca (silicatos), tienen una superficie sólida y ninguna o pocas lunas. Los cuatro planetas más alejados del Sol forman el grupo de los llamados planetas jovianos (por Júpiter). Son grandes y su masa es al menos diez veces mayor que la de la Tierra, por lo que se suelen denominar planetas gigantes. Son poco densos (entre $0,7$ y $1,6 \text{ g/cm}^3$) y están constituidos principalmente por hidrógeno molecular y helio, con trazas de metano, amoníaco y agua, y un posible núcleo de composición desconocida, quizá parecida a la de los planetas rocosos. Tienen decenas de lunas. El mayor de ellos es Júpiter, con un diámetro de 143.000 km (unas once veces mayor que la Tierra) y una masa de $1,9 \cdot 10^{27}$ kg, 318 veces mayor que la Tierra. Saturno le sigue en tamaño y masa y es el menos denso de todos. Los dos menores son Urano y Neptuno, el más alejado del Sol; se puede considerar que forman un subgrupo pues tienen una masa parecida (la de Neptuno es de $1,0 \cdot 10^{26}$ kg, 17 veces la de la Tierra) y un tamaño unas cuatro veces mayor que la Tierra (unos 50.000 km de diámetro). En su atmósfera abundan los hielos de agua, metano y amoníaco, por lo que reciben el calificativo de gigantes helados, en contraposición a Júpiter y Saturno, que se califican como gigantes gaseosos.

Entre los exoplanetas existe una mayor variedad de características que entre los planetas del sistema solar pues, además de los rocosos y los gigantes gaseosos y helados, existen los de características intermedias y algunos mucho mayores que Júpiter. De hecho, estos fueron los primeros en ser detectados pues su gran tamaño da lugar a tránsitos fotométricos más notables y su gran masa da lugar a alteraciones periódicas de la velocidad de la estrella más fácilmente detectables, especialmente si se encuentran muy cerca de la estrella pues, con ello, el efecto gravitatorio perturbador es más notorio.

Inicialmente, la distribución de la distancia de los primeros exoplanetas a su estrella correspondiente sorprendió por su gran diferencia con el sistema solar. En este la distancia de los planetas gaseosos al Sol va de 5 a 30 au (unidades astronómicas), mientras que entre los primeros veinte exoplanetas descubiertos más masivos que Júpiter ninguno se encuentra a más de 2,5 au, encontrándose bastantes de ellos más cerca de su estrella que Mercurio del Sol. Posteriormente se han encontrado casos extremos de exoplanetas que orbitan alrededor de su estrella con un periodo orbital (su año) de horas. Tal es el caso de K2-137 b, cuyos tránsitos indican que en poco más de 4 horas da una vuelta completa a una estrella que casi roza: su distancia a la superficie de la estrella es de algo más de medio millón de km, una vez y media la distancia que separa la Tierra de la Luna. Otros planetas gigantes, descubiertos por imagen directa, se encuentran tan lejos de su estrella que tardan miles de años en completar una órbita.

Dada la variedad de masas, tamaños, densidades, estructura y composición, no hay aún una clasificación bien establecida de exoplanetas. Una clasificación basada exclusivamente en su masa y, en menor medida, de la temperatura como la propuesta por la Universidad de Puerto Rico (UPR) en Arecibo, presenta dificultades pues en un mismo rango de masas pueden encontrarse planetas de composición muy distinta. Por su parte David Russell propone considerar la masa y la composición de un modo más detallado que las tres clases antes descritas para el sistema solar. Una clasificación taxonómica más compleja es la propuesta por Eva Plávalová que, además de la masa y la composición (terrestre, gaseoso o helado), incluye una estimación de la temperatura superficial y las características de la órbita (distancia y excentricidad). Otros autores proponen incluir el tamaño del planeta, el tipo y masa de la estrella e incluso su metalicidad, la plausibilidad de vida en el planeta y otras características.

La gran variedad de características físicas ha dado lugar a una diversidad de denominaciones para distintas clases de planetas, lo que añade aún más confusión a cualquier intento de clasificación. A continuación se expone una breve descripción de las características que corresponden a algunos de los nombres más utilizados al referirse a exoplanetas.

Los planetas con una masa inferior a la mitad de la de la Tierra (o con un diámetro menor de 10.000 km) se denominan “subtierras”. Dada su escasa masa, no pueden retener una atmósfera importante salvo que se encuentren lejos de la estrella, posiblemente ya fuera de la zona de habitabilidad. No se sabe cuán abundantes son pues son los más difíciles de detectar debido a su baja masa y pequeño tamaño y, en la actualidad, suponen menos del 1% del censo de los exoplanetas para los cuales ha sido posible determinar la masa (que son aproximadamente la mitad de los descubiertos). Dada su abundancia en el sistema solar (Marte, Mercurio, los planetas enanos y grandes asteroides caen dentro de esta clase), no se descarta que futuros telescopios descubran muchos más. Hay quien propone una clase para los más pequeños de en-

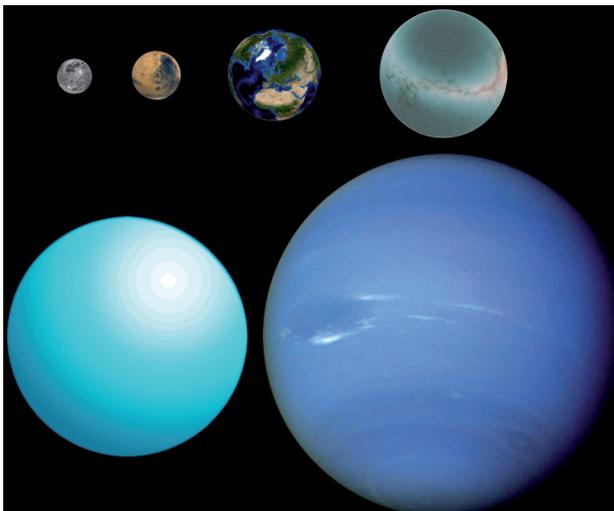


Figura 24: Tamaños relativos orientativos de distintas clases de planetas extrasolares. De menor a mayor representan: un mercurio, una subtierra (como Marte y Trappist 1 d), una tierra (como también es Venus), una supertierra (como Barnard b y Kepler 10 b), un subneptuno (como GJ 1214 b) y un neptuno.

tre ellos, aquellos cuya masa es inferior a un 10% de la terrestre, a los que se les dan nombres como “mercurios” o “ganimedes”, por el mayor satélite natural del sistema solar, que es algo mayor que Mercurio aunque su masa es menor por su gran abundancia de hielos y agua. Los más pequeños posiblemente estén constituidos por una mezcla de hielo y rocas.

Los planetas cuya masa se encuentra entre la mitad y el doble de la de la Tierra se denominan “tierras”. Tal es el caso de la Tierra y Venus, en el sistema solar, y del 2% de los exoplanetas en que se ha medido la masa hasta la fecha. Las observaciones indican que los planetas con una masa inferior a unas 5 masas terrestres son de tipo rocoso, mientras que por encima de este valor aumenta significativamente la contribución a su masa de una envoltura de gases. Por ello, se suelen denominar “supertierras” aquellos cuya masa está entre 2 y 5 veces la de la Tierra y pueden alcanzar un diámetro de unos 20.000 km, constituyendo un 5% del total de exoplanetas. Una de las supertierras más cercanas, situada a solo 6 años luz de distancia, es Barnard b (GJ 699 b). Fue descubierta en 2018 por el español Ignasi Ribas y sus colaboradores. Las supertierras también pueden mantener atmósferas densas y agua líquida dentro de la zona de habitabilidad.

A partir de unas 5 masas terrestres ya no se puede considerar que el planeta es rocoso, pues en general su densidad media es intermedia entre la de un planeta rocoso y uno gaseoso. Se habla de planetas gaseosos enanos y se les da nombres tales como “subneptunos” o “minineptunos”; tienen una espesa atmósfera formada principalmente por hidrógeno y helio, que constituye una parte significativa de su masa total. En este rango de entre 5 y 10 masas terrestres algunos autores incluyen los hipotéticos “planetas océano”, que serían aquellos casos en que la atmósfera es menos espesa y cuya superficie estaría completamente cubierta por una gruesa capa de agua en estado líquido y/o sólido o de otras moléculas abundantes en el espacio, como etano y amoníaco, parcialmente en estado líquido. Su mejor candidato es GJ 1214 b, que orbita (y transita) una estrella situada a 40 años luz. Curiosamente, en el sistema solar no hay supertierras ni subneptunos y lo más parecido a un planeta océano en miniatura son las grandes lunas de Júpiter Ganimedes y Europa.

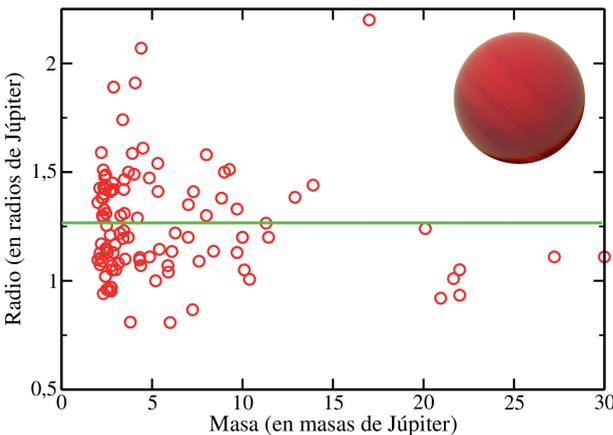


Figura 25: Distribución de superjúpiteres con masa y tamaño conocidos, en que se observa que por mucho que aumente la masa el tamaño se mantiene. El radio medio (línea verde) es un 26% mayor que el de Júpiter.

Los exoplanetas más masivos también se dividen en varias clases. Todos ellos se caracterizan por tener una densidad baja en comparación con los rocosos, aunque se considera la posibilidad de que existan algunos primordialmente sólidos por no haber podido retener una espesa atmósfera por su cercanía a la estrella, a los que se propone llamar “megatierras”, como quizá sea el caso de BD+20594 b. Los “neptunos” son planetas esencialmente gaseosos con una masa mayor de 10 veces la terrestre y un límite superior no bien establecido, con valores típicos entre 30 y 60, aunque siempre inferior a la de Saturno. Se llaman “neptunos fríos” los que se encuentran a una distancia de su estrella superior a la línea de hielo, aquella a partir de la cual agua, amoníaco, metano y otros volátiles han formado granos de hielo. Tal es el caso de Urano y Neptuno en el sistema solar. A los que se encuentran más cerca de su estrella que la Tierra del Sol se les llama “neptunos calientes”. Son muy escasos, siendo *Dulcinea* (μ Arae c) el primero que fue descubierto. Es posible que los neptunos que se han formado o acercado demasiado a su estrella acaben perdiendo su atmósfera, convirtiéndose en un “planeta ctónico”, constituido por el núcleo rocoso o metálico del planeta original. Aún no se ha confirmado ningún candidato. Los neptunos calientes, templados y fríos constituyen alrededor del 12% de los exoplanetas conocidos.

Los planetas gaseosos aún más masivos que los neptunos se denominan “júpiteres” y son planetas en que más de la mitad de su masa está compuesta por hidrógeno y helio. Su rango de masa se extiende hasta el de los objetos subestelares conocidos como enanas marrones y constituyen el 74% de los exoplanetas conocidos. Esta elevada proporción es resultado de un sesgo observacional: es más fácil descubrir un planeta grande y masivo que uno pequeño y ligero. El exoplaneta más masivo cuya masa ha sido relativamente bien determinada es HD 148284 b. Tiene un periodo orbital de 339 días y su masa es de unas 11.000 masas terrestres, que equivalen a 34 veces la masa de Júpiter. A los exoplanetas cuya masa supera, como en este caso, en dos veces a la de Júpiter a menudo se los denomina “superjúpiteres”. Ello no quiere decir que sean necesariamente más grandes que Júpiter: tanto las medidas como los modelos muestran que el mayor campo gravitatorio de los planetas con mayor masa hace que se compriman, que su densidad crezca proporcionalmente a su masa y, como resultado, el volumen de los superjúpiteres sea parecido al de Júpiter. Inicialmente se planteó considerar una masa máxima, de 13 veces la de Júpiter, para excluir objetos con una masa correspondiente a una enana marrón, pero los catálogos actuales los incluyen.

El primer exoplaneta descubierto, en 1995, alrededor de una estrella normal fue Dimidio (51 Pega-si b). Su masa es aproximadamente la mitad que la de Júpiter, pero se diferencia de él en que orbita muy cerca de su estrella, a 0,05 au, en poco más de 4 días. Forma parte, como también Kepler 7 b, de la subclase de los “júpiteres calientes”, los que orbitan tan



Figura 26: Abundancia relativa de los distintos tipos de planetas extrasolares, en base a las masas que han sido medidas hasta marzo de 2019.

cerca de su estrella que tardan menos de diez días en completar una órbita, por lo que se encuentran mucho más cerca de su estrella que Mercurio del Sol. No se comprende cómo pudieron formarse tan cerca de la estrella, por lo que de momento se supone que se formaron lejos de ella y que, por algún mecanismo aún por dilucidar, migraron hacia la estrella, desestabilizando, expulsando o incluso destruyendo los pequeños planetas que se encontraran en su camino. Son los más fáciles de detectar y actualmente los jupíteres y superjupíteres calientes constituyen la cuarta parte del total de los exoplanetas descubiertos.

Sistemas planetarios

A fecha de hoy, se han encontrado planetas alrededor de más de 3000 estrellas. En la mayoría de los casos se trata de un único planeta masivo, pero en un 20% de ellas se ha descubierto más de un planeta. Es de esperar que, con la puesta en marcha de nuevos instrumentos (los telescopios espaciales dedicados TESS, Cheops, Plato y Ariel, además de instrumentos en tierra, como CARMENES y SPECULOOS) se descubrirán más estrellas con varios planetas a su alrededor; es decir, nuevos sistemas planetarios. Tiene especial interés detectar planetas de tipo rocoso, pues deberían ser más abundantes que los gigantes. La detección de una atmósfera en alguno de ellos que, además, se encontrara en la zona de habitabilidad tendría especial interés en los estudios de la aparición de la vida en el universo. Las búsquedas de planetas se han centrado en estrellas similares al Sol, pero se están extendiendo a las más abundantes, pero menos acogedoras, estrellas enanas rojas. Orbitando alrededor de la estrella más cercana al Sol, la enana roja Proxima Centauri, el astrónomo español Guillem Anglada-Escudé encontró en 2016 el exoplaneta más cercano, Proxima b. Con una masa algo mayor que la de la Tierra, su habitabilidad se considera muy incierta pues está sometido a un fuerte viento estelar y a intensas fulguraciones ocasionales.

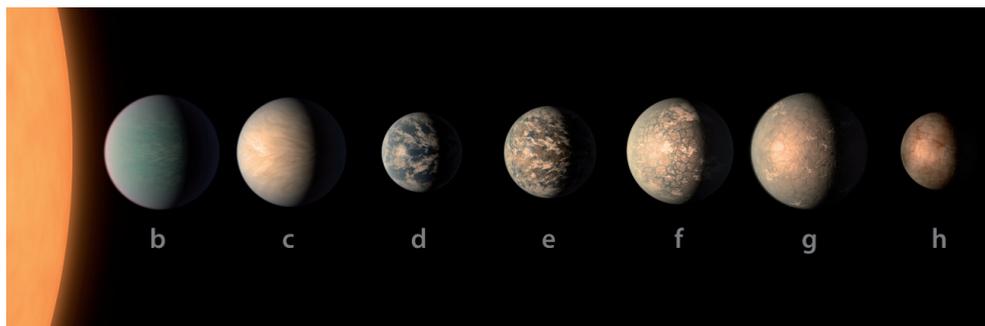


Figura 27: Alrededor de la estrella enana roja ultrafría Trappist 1, cuyo tamaño es apenas mayor que el de Júpiter, se han detectado siete planetas. Los cinco mayores son similares en tamaño a la Tierra y tres de ellos (e, f y g) se encuentran en la zona de habitabilidad estelar, que está muy cerca de la estrella dada su baja luminosidad. Sus períodos orbitales van de 1,5 a 18,8 días. (Las distancias no están a escala).

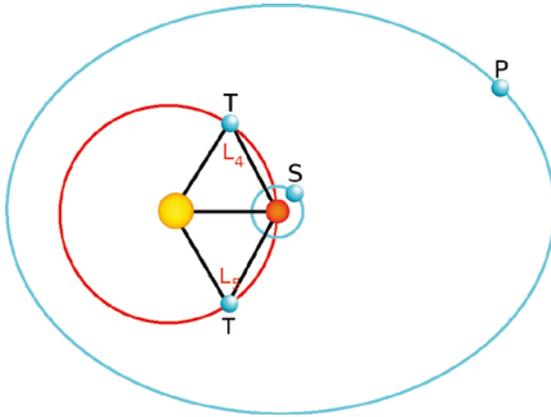


Figura 28: Esquema con los tres tipos de órbita planetaria posibles en un sistema estelar binario (compuesto por una estrella amarilla y una roja): (P) alrededor de ambas estrellas, (S) alrededor de una de ellas y (T) alrededor de la más masiva precediendo o siguiendo a la otra en un punto de equilibrio de Lagrange, L_4 o L_5 .

A fecha de hoy solo se conocen dos sistemas planetarios con ocho planetas, el sistema solar y el de Kepler 90. Se han descubierto siete planetas en el sistema de la estrella enana roja superfría TRAPPIST 1, con la particularidad de que todos son de tipo terrestre y cinco de ellos tienen un tamaño parecido al de la Tierra, tres de los cuales se hallan en la zona de habitabilidad. Sin embargo, la fuerte actividad de la estrella, que presenta intensas fulguraciones, puede impedir el desarrollo de vida en ellos aunque tuvieran agua líquida y atmósfera.

El sistema planetario más cercano al nuestro es el de la enana roja Gliese 876, situado a 15 años luz y con cuatro planetas con características muy variadas: podría tratarse de una supertierra, un neptuno y dos júpiteres. Ambos júpiteres se hallarían en la zona de habitabilidad lo que, al tratarse de planetas gaseosos, no significa que puedan albergar vida; pero sí podrían sustentarla sus satélites si fueran suficientemente grandes y dotados de abundante agua líquida y atmósfera. Una estrella parecida al Sol alrededor de la cual orbitan al menos cuatro planetas se denomina Cervantes (μ Arae). Tres de ellos son júpiteres (Quijote, Sancho y Rocinante) y el menor (Dulcinea) es el primer neptuno caliente descubierto, aunque también se ha argumentado que podría ser una megatierra o un planeta ctónico. Quijote es el único que se encuentra en la zona de habitabilidad de la estrella, pero cabe hacer el mismo comentario que antes.

Uno de los descubrimientos más interesantes e inesperados de los últimos años ha sido el de planetas en estrellas binarias, o sea en sistemas compuestos de dos estrellas que orbitan alrededor de un centro de masas común. Se han encontrado planetas (con órbita de tipo S o circunestelar) que orbitan alrededor de una de las dos estrellas, lo que puede ocurrir si estas están muy alejadas entre sí, y planetas (con órbita de tipo P o circumbinario) en una órbita alejada alrededor de la pareja de estrellas, lo que puede ocurrir si estas están muy juntas. Y también existe la posibilidad de un planeta troyano (con órbita de tipo T), es decir que gire alrededor de una estrella en la misma órbita que se mueve la otra. Del primer tipo, el más numeroso, cabe destacar el sistema de cinco planetas que orbitan alrededor de una de las estrellas del sistema binario 55 Cnc. Del segundo tipo, P, mediante tránsitos se han descubierto dos planetas que orbitan, con períodos de 50 y 303 días, alrededor de la binaria Kepler 47. Y un sistema



Figura 29: Representación artística del atardecer en una supertierra potencialmente habitable que orbita una estrella enana roja que forma parte de un sistema estelar triple (adaptada de: ESO/L. Calçada (CC BY 4.0)).

planetario aún más peculiar es el formado por al menos dos (quizá sean cinco o incluso siete) supertierras que orbitan alrededor de una de las estrellas del sistema estelar triple Gliese 667. Hipotéticos habitantes de una de las supertierras gozarían de tres soles, uno cercano, a 19 millones de km, y dos más alejados, a 230 au.

¿Qué es un planeta?

La antigua definición de planeta como un objeto grande esférico sin luz propia que orbita de manera regular alrededor del Sol ha quedado obsoleta. El descubrimiento de una gran variedad de planetas alrededor de otras estrellas plantea la necesidad de redefinir este concepto, aunque el conocimiento aún escaso de las características de los exoplanetas pueda limitar el alcance de su descripción colectiva.

Esta necesidad surgió incluso antes, con el descubrimiento en 1801 de un objeto de casi 1.000 km de diámetro situado entre las órbitas de Marte y Júpiter, que fue llamado Ceres e inicialmente fue considerado un planeta. El descubrimiento en los años siguientes de varios objetos de similares características (Palas, Juno, Vesta) cambió la situación, pasando todos ellos a denominarse colectivamente asteroides o planetas menores (en la actualidad se conocen más de 800.000 asteroides). El descubrimiento de Plutón en 1930, un objeto situado más allá de Neptuno y calificado inicialmente como planeta, fue generando paulatinamente discusiones al comprobarse que es muy distinto a los ocho planetas conocidos hasta entonces: en su tamaño (no llega a la mitad del de Mercurio), en sus características físicas (está compuesto de rocas y hielos, y recubierto de hielo de nitrógeno), en su órbita (muy inclinada y excéntrica) y por el hecho de estar acompañado de una luna (Caronte, descubierta en 1978) con un tamaño similar (mitad) al propio planeta. Por si fuera poco, a partir de 1992 se empezaron a descubrir otros objetos situados también más lejos que Neptuno, algunos de ellos similares a Plutón en tamaño y composición, como son Haumea, Eris y

Makemake, y muchos más pequeños, como Quaoar y Sedna, y algunos muy lejanos, como 2018 VG18 que orbita el Sol a 125 au, cuatro veces más lejos que Neptuno. Al hacerse insostenible el adjudicar a todos ellos el estatus de planeta, la Unión Astronómica Internacional decidió en 2006 definir un nuevo tipo de objeto, denominado “planeta enano”, que engloba a Ceres, Plutón, Haumea, Eris y Makemake, manteniendo el nombre de asteroides o de objetos transneptunianos, según corresponda, a objetos menores que ellos.

En definitiva, una nueva definición de planeta, indudablemente más compleja, debe considerar aspectos astronómicos, astrofísicos y geofísicos. Una definición tentativa es la siguiente: un planeta es un objeto astronómico que: (1) orbita alrededor de una estrella o de un sistema múltiple de estrellas o del remanente de una estrella; (2) tiene suficiente masa para que, por efecto de su gravedad, adquiera una forma casi esférica en equilibrio hidrostático; (3) ha limpiado los alrededores de su órbita de objetos menores (como planetesimales y asteroides), de manera que domina su órbita; y (4) no es suficientemente masivo como para mantener reacciones nucleares de fusión del hidrógeno y, por lo tanto, no tiene luz propia.

La condición (1) permite incluir los planetas que orbitan alrededor de sistemas estelares binarios y triples, de los que ya se conocen más de un centenar, así como planetas que orbitan alrededor de un púlsar (estrella de neutrones en rápida rotación, resultante del colapso de una estrella supergigante masiva). De hecho, los primeros exoplanetas se descubrieron en 1992 alrededor del púlsar PSR B1257+12.

La condición (2) se traduce en la existencia de una masa mínima para que un objeto pueda ser considerado planeta aunque esta, al igual que el tamaño mínimo, depende de su composición. Para un objeto en que predominan los hielos se traduce en una masa mínima de cerca de una cienmilésima de la de la Tierra y en un diámetro mínimo de unos 400 km, como es el caso de la helada luna Mimas de Saturno, mientras que para un objeto en que predominan las rocas la masa mínima es de unas cinco cienmilésimas de la terrestre y el diámetro mínimo es de unos 600 km, aunque durante años se ha adoptado un límite más conservador de unos 800 km.

Ceres, a pesar de su gran tamaño, no puede ser considerado planeta pues no cumple la condición (3) por encontrarse en el cinturón de asteroides, lo que lo relega a planeta enano. Plutón tampoco la cumple, pues su masa es muy inferior a la del conjunto de objetos que pueblan su entorno orbital. Por supuesto, un planeta puede tener satéli-

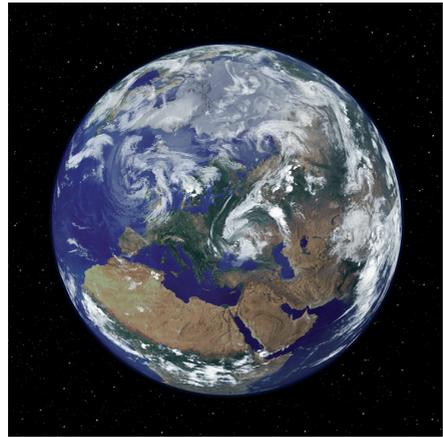


Figura 30: El planeta Tierra es de tipo rocoso y, obviamente, se encuentra en la zona de habitabilidad estelar del Sol, una estrella enana amarilla de tipo G2V que tiene una edad de 4.567 millones de años. En clasificaciones de exoplanetas, Russell clasifica la Tierra como un planeta P4R_{sp}, Plávolová como 1E0W0t y la UPR simplemente como una “tierra cálida”.

tes de gran tamaño que, como en el caso de los satélites galileanos de Júpiter, no se consideran planetas pues no giran primariamente alrededor de la estrella. La condición (3) es débil, pues no se puede verificar en la mayoría de sistemas extrasolares, por lo que no hay más remedio que presuponer que los exoplanetas suficientemente masivos cumplen esta condición. En algún caso quizá se pueda determinar si el planeta tiene masa suficiente para dominar dinámicamente su órbita, lo cual depende del tamaño y excentricidad de esta, de la masa y órbita de los demás planetas del sistema planetario (si los hay) y de la masa de la estrella. Por su parte, la condición (4) no excluye como planetas a objetos subestelares tipo enana marrón en órbita a una estrella, a pesar de que en su interior se puede fusionar el deuterio.

En definitiva, el descubrimiento y caracterización de los planetas extrasolares, posible en gran parte gracias a la observación de sus tránsitos, ha dado lugar a una visión más amplia y, a la vez, más compleja de lo que es un planeta. Las observaciones que se siguen realizando en este campo tan activo de la investigación astronómica enriquecerán aún más nuestro concepto de planeta y presumiblemente nos ayudarán a comprender uno de los grandes enigmas del universo, la aparición de la vida.

Anexo: Los tránsitos de Mercurio de 2019 y 2032

Un tránsito debe observarse tomando las mismas precauciones que cuando se observan manchas solares o las fases parciales de un eclipse de Sol, es decir, observando su imagen proyectada en una pantalla. Dada la pequeñez del disco de Mercurio, a fin de obtener una imagen mayor y más nítida del fenómeno se puede usar un pequeño telescopio o unos prismáticos (que soporten la intensidad de la luz del Sol) para proyectar la imagen en una pantalla blanca. Conviene dejar enfriar el aparato cada pocos minutos de observación, para evitar dañarlo, especialmente su ocular; hay que recordar que un tránsito es un fenómeno que transcurre lentamente a lo largo de varias horas. Los intervalos más interesantes para la observación son los de la entrada del planeta en el disco solar y su salida. Recuerde: ¡asegúrese de que nadie mire directamente por el telescopio o los binoculares cuando estén apuntando directamente al sol!

El tránsito de Mercurio del 11 de noviembre de 2019 es visible en su totalidad en América del sur y central, el este de Norteamérica, el océano Atlántico y el extremo más occidental de África, que es una de las zonas con mejores previsiones de visibilidad del fenómeno, junto con las islas Canarias, el extremo más oriental de Brasil, el Caribe y el desierto de Atacama en Chile. El inicio del tránsito es también visible al atardecer en África, Europa y Asia occidental, y su final lo es en Norteamérica y en el océano Pacífico, hasta Nueva Zelanda. En la península ibérica y las islas Baleares no es visible el fenómeno en su totalidad, pues el sol se pone durante el transcurso del tránsito.

Se trata de un tránsito casi central, es decir se ve pasar Mercurio casi por el centro del disco solar (a $76''$), por lo que es de los de más larga duración que se pueden dar en noviembre: su duración (geocéntrica) es de 5 horas 28 minutos 47 segundos. Unos cinco días más tarde Mercurio se encontrará en el perihelio de su órbita, es decir a su distancia más cercana al Sol, por lo que su tamaño angular visto desde la Tierra será de $9,95''$, casi el menor posible durante un tránsito, y 195 veces menor que el



Figura 31: La proyección de la imagen del Sol con un instrumento adecuado es un procedimiento seguro para la observación de un tránsito, un eclipse solar y las manchas solares.

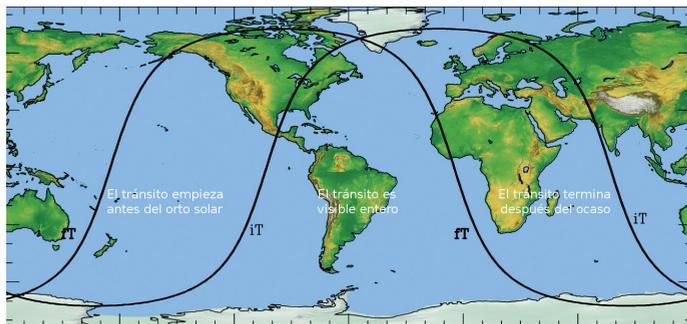


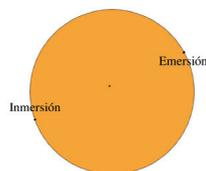
Figura 32: Zonas de visibilidad de todo el tránsito de 2019 (tal es el caso de Sudamérica) o de solo una parte de él (Europa). El inicio del tránsito se ve en la zona bajo la curva iT y su final bajo la curva fT.

diámetro solar. Por ello, su observación solo es posible con un telescopio provisto del correspondiente filtro solar colocado delante del objetivo.

Las efemérides generales de un fenómeno astronómico (eclipse, tránsito, etc.) se suelen dar referidas al centro de la Tierra (geocéntricas) y en la escala de Tiempo Universal (UTC). Las circunstancias locales de cada observador se pueden calcular a partir de ellas, aplicando correcciones por su posición geográfica y por la orientación de la Tierra, y darse en la hora oficial en dicho lugar. En el caso de los tránsitos se dan los instantes de contacto exterior e interior de los discos del Sol y el planeta, tanto en la inmersión como en la emersión, así como el instante central, en que la distancia entre los centros de los dos discos es mínima. Las efemérides locales de los tránsitos difieren poco de las geocéntricas, salvo por la corrección al horario oficial que deba aplicarse para cada país, territorio o región.

Efemérides geocéntricas del tránsito de Mercurio de 2019

| | | |
|-----|-----------------------------------|--------------|
| I | Contacto exterior en la inmersión | 12:35:27 UTC |
| II | Contacto interior en la inmersión | 12:37:08 UTC |
| | Distancia mínima entre centros | 15:19:48 UTC |
| III | Contacto interior en la emersión | 18:02:33 UTC |
| IV | Contacto exterior en la emersión | 18:04:14 UTC |



En las cinco islas Canarias más occidentales el fenómeno es visible en su totalidad, aunque los contactos finales tienen lugar muy cerca del horizonte, lo que puede dificultar su observación. Tomando como coordenadas ilustrativas de dichas islas las del Observatorio de Izaña, el inicio del tránsito tendrá lugar allí a las 12:35:38 con el Sol a unos 44° de altura y el final a las 18:03:40, con el Sol a menos de 2° sobre el horizonte. Tomando las coordenadas del Observatorio de Madrid como indicativas para la península, el inicio del tránsito se producirá a las 13:35:33 de hora oficial y el final después de la puesta del Sol, que tendrá lugar a las 18:01 en Madrid.

El siguiente tránsito de Mercurio no se producirá hasta trece años más tarde, el día 13 de noviembre de 2032. Será visible en su totalidad en la mayor parte de África, la

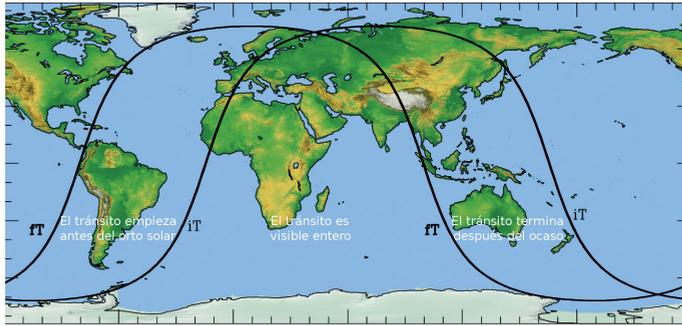


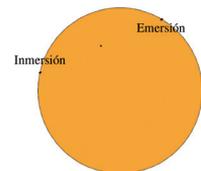
Figura 33: Zonas de visibilidad de todo el tránsito de 2032 (tal es el caso de Turquía) o de solo una parte de él (Australia). El inicio del tránsito se ve en la zona bajo la curva iT y su final bajo la curva fT.

Europa más oriental, hasta Italia y Suiza, la mitad occidental de Asia, desde la India a Oriente Medio, en la Antártida y en el océano Índico. El tránsito ya iniciado se verá al amanecer en Sudamérica, la región más occidental de Europa, incluyendo España, Reino Unido y los países escandinavos, el extremo más occidental de África y el océano Atlántico. No se verá el final del tránsito en la parte más oriental de Asia, Australia, Nueva Zelanda y la parte más occidental del océano Pacífico. Según las estadísticas de cielos despejados, las mejores condiciones de visibilidad se darán en Egipto, el desierto del Sáhara, la península arábiga y el norte de la India. En el caso de España, solo en las islas Baleares más orientales se podrá ver todo el fenómeno, desde poco después de la salida del sol, mientras que en la península y las islas Canarias el sol saldrá con el tránsito ya iniciado.

El tránsito se producirá por la parte alta del disco solar, por lo que su duración será una hora más corta que la del anterior, 4 horas 26 minutos. Al producirse en la misma época del año que el de 2019, los tamaños angulares del Sol y de Mercurio serán parecidos, así como la proporción entre ellos.

Efemérides geocéntricas del tránsito de Mercurio de 2032

| | | |
|-----|-----------------------------------|--------------|
| I | Contacto exterior en la inmersión | 6:40:56 UTC |
| II | Contacto interior en la inmersión | 6:43:00 UTC |
| | Distancia mínima entre centros | 8:54:00 UTC |
| III | Contacto interior en la emersión | 11:05:04 UTC |
| IV | Contacto exterior en la emersión | 11:07:08 UTC |



En Palma de Mallorca el tránsito se iniciará a las 6:41:26 UTC, con el Sol a 1° sobre el horizonte, y finalizará a las 11:07:48 UTC. Obsérvese que, ante el desconocimiento actual de cuál será el horario oficial dentro de tantos años, se ha optado por dar la hora en la escala de Tiempo Universal; habrá que añadirle la corrección pertinente a fin de tener la hora oficial. El tránsito ya se habrá iniciado cuando salga el sol en Madrid y terminará a las 11:07:50 UTC con el Sol a 30° de altura sobre el horizonte. Lo propio ocurrirá en Canarias, donde al final del tránsito el Sol se encontrará a unos 37° de altura.

Bibliografía

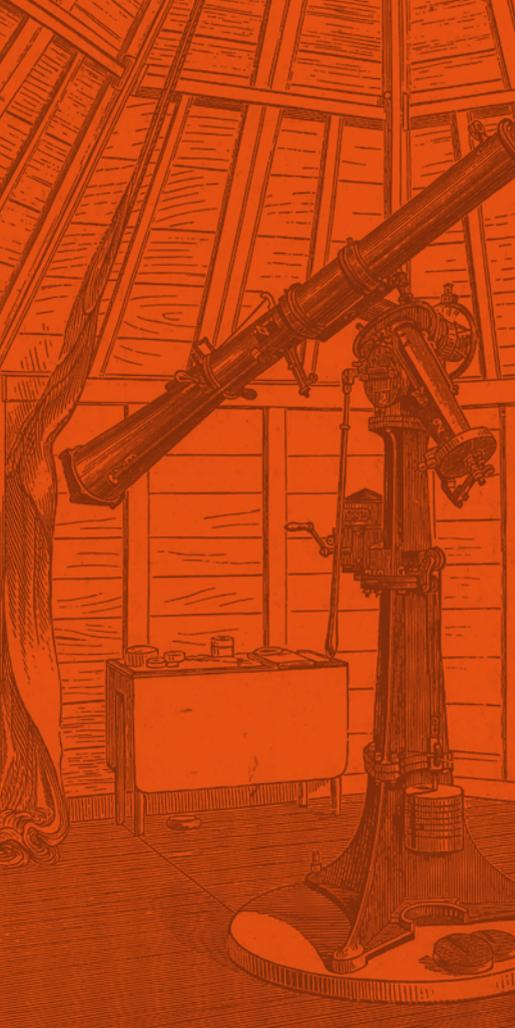
Para conocer más detalles de las observaciones históricas de los tránsitos de Mercurio y, especialmente, los de Venus se pueden consultar los libros *Les passages de Vénus* de Ch. Marlot (en francés), *Chasing Venus* de A. Wulf o *The transits of Venus* de W. Sheehan y J. Westfall (estos y el resto en inglés), o el librito *Venus in transit* de E. Maor. Para ampliar conocimientos sobre los cálculos astronómicos se puede consultar el libro *Transits* de J. Meeus. El (caro) libro *Celestial shadows* de J. Westfall y W. Sheehan recopila el empleo de las observaciones de eclipses, tránsitos y ocultaciones en el estudio de objetos dentro y fuera del sistema solar. El librito *Eclipses de Sol* de P. Planesas, publicado por CNIG/IGN, describe sucintamente los eclipses solares y su observación. En español se pueden consultar los libros breves *Los exoplanetas* de Arturo Quirantes Sierra (2016, RBA) y *Exoplanetas* de Álvaro Giménez Cañete (2012, CSIC-Libros de la Catarata) y el monográfico especial de igual título de la revista *Investigación y Ciencia*.

Ilustraciones

- Fondos de la biblioteca del Real Observatorio Astronómico de Madrid: portada, 9, 10, 13, 14, 34.
- Wikimedia Commons: 4, 5, 29.
- NASA/SDO/STScI/LPI: 20, 23, 27, 30.
- Realizadas por el autor: 1, 2, 3, 6, 7, 8, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 24, 25, 26, 28, 31, 32, 33.



Figura 34: Medalla conmemorativa acuñada por el Instituto de Francia con ocasión del tránsito de 1769. En ella se representa a Venus a punto de pasar por delante del Sol/Apolo bajo la atenta mirada de la Ciencia.



¿Cómo se determinó la distancia al Sol? ¿Cómo se descubrió la anomalía de la órbita de Mercurio, que sería el primer fenómeno explicado mediante la teoría general de la relatividad de Einstein? ¿Cómo se descubren y caracterizan la mayoría de órbitas de los planetas que giran alrededor de otras estrellas? La respuesta a estas tres preguntas es la misma: mediante tránsitos.

La medida de la gran distancia de la Tierra al Sol supuso un reto para los astrónomos de la antigüedad, lográndose en la era moderna mediante una combinación del ingenio de Halley, nuevos instrumentos y la participación entusiasta de centenares de astrónomos profesionales y aficionados en la observación de los tránsitos de Venus, en lo que constituyó la primera colaboración científica realizada a escala mundial, que no estuvo exenta de aventuras y tragedias. Por su parte, la observación de los tránsitos de Mercurio reveló un comportamiento anómalo de su órbita, que sería el primero de los fenómenos explicado con la nueva teoría general de la relatividad. En la actualidad, los tránsitos de planetas frente a las estrellas alrededor de las cuales orbitan constituyen el método más efectivo para descubrirlos y caracterizarlos.