

En Matemáticas

EL TRÁNSITO DE VENUS PARA DETERMINAR LA DISTANCIA TIERRA-SOL¹

Introducción

Este artículo responde a la conferencia dictada el 8 junio del 2004 en el centro asociado de la UNED ubicado en el campus de Las Rozas, en Madrid. Los Tránsitos de Venus tuvieron gran relevancia en el siglo XVIII porque sirvieron a la comunidad internacional para determinar la distancia de la Tierra al Sol. En la actualidad no despiertan tal interés, aunque en esta ocasión se dé la circunstancia de que diversas instituciones internacionales, con fondos de la Unión Europea, promuevan repetir esta medición con la ayuda de estudiantes europeos interesados en el tema. Para dicho menester bastará realizar la observación del tránsito y, tras ello, enviar a la página web del evento los tiempos de entrada y salida de Venus respecto del disco solar.

En esta contribución se ofrecen los conceptos básicos que subyacen en la determinación de la mencionada distancia Tierra-Sol, usando los tiempos de contacto de la imagen de Venus con el borde del disco solar. Se muestra además “por qué” y “cómo” el tránsito de Venus permite determinar dicha distancia.

Se ha intentado, aun a riesgo de perder precisión, simplificar el desarrollo matemático para ofrecer una propuesta fácilmente inteligible en una conferencia. El método se basa en las propuestas de Halley y Delile. Al final del texto se ofrecen diversas direcciones web para aquellos que deseen ver una versión más detallada, aunque también facilitada para no especialistas en mecánica celeste.

Las hipótesis adoptadas han sido sólo dos: suponer que las órbitas de Venus y la Tierra son circunferencias centradas en el Sol y que las posiciones de Venus, el centro del

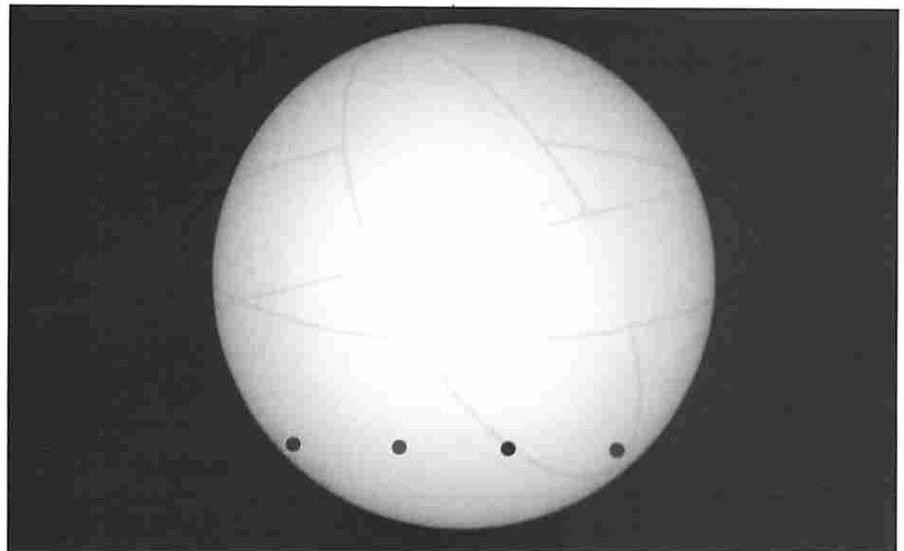


Figura 1. Observaciones del tránsito de Venus del 8 de junio del 2004.

Sol y la de los observadores terrestres son coplanarias. Así pues, partiremos de esas hipótesis y utilizaremos los datos conseguidos en 1769 para observadores muy alejados pero sobre el mismo meridiano.

Con estos puntos de partida el desarrollo matemático es apto incluso para estudiantes de bachillerato; sólo precisa considerar trigonometría elemental, y en el caso de que se quiera conseguir mejores resultados es necesario aplicar también el Teorema de Pitágoras. Si se desea dar un ejemplo de cómo basta conocer los tiempos de los contactos de entrada y salida de Venus para determinar la distancia Tierra-Sol hay que hacer una hipótesis más: suponer que el movimiento de Venus por debajo del disco solar se realiza a velocidad constante.

¿Qué es un tránsito de Venus? y ¿cuándo tiene lugar?

Un tránsito de Venus tiene lugar cuando un observador desde la Tierra ve el paso de Venus siguiendo una línea recta sobre la faz del disco solar. Es algo así como un pequeño eclipse de Sol, pequeño porque el diámetro de Venus aparece como un minúsculo círculo sobre el disco del Sol (figura 1).

Pero cabe preguntarse, ¿cada cuánto ocurre? El período de traslación de Venus es de 224,7 días y el de la Tierra es de 365,25 días. Dividiendo 365,25 por 224,7 el cociente da 1,6255, así pues cuando la Tierra da una vuelta entorno al Sol, Venus da 1,6255 vueltas. Aproximadamente $1,6255 = 13/8$. Podemos pues decir que, si la Tierra da n vueltas en

Tabla 1. Tránsitos de Venus observables desde el siglo XVII.

Tránsitos en junio	Tránsitos en diciembre
	7 diciembre 1631
	4 diciembre 1639
6 junio 1761	
3 junio 1769	
	9 diciembre 1874
	6 diciembre 1882
8 junio 2004	
6 junio 2012	
	11 diciembre 2117
	8 diciembre 2125

¹ Un desarrollo matemático más exhaustivo puede encontrarse en la Gaceta de la RSME, Vol. 7, 1 (2004), de la misma autora.

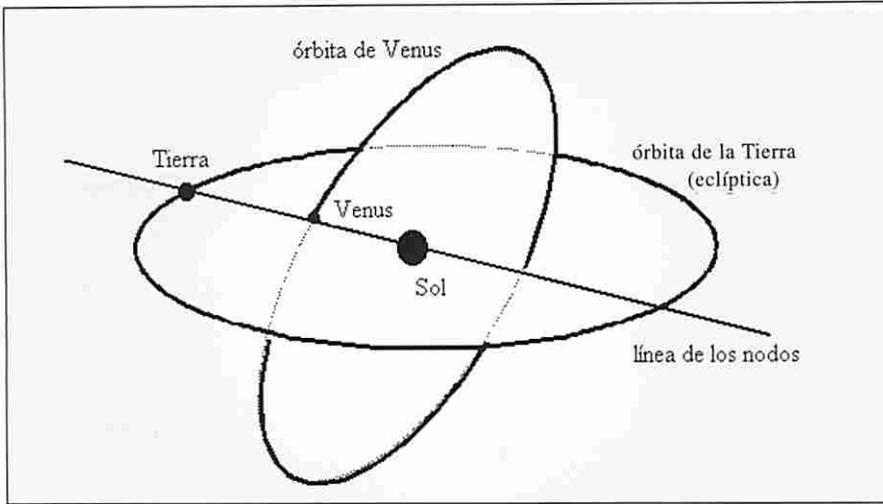


Figura 2.

torno al Sol, Venus da $13n/8$ vueltas. ¿Cuándo coincidirán ambos planetas? Pues, evidentemente, cuando $13n/8$ sea un número natural. Es decir, cuando n sea igual a un múltiplo de 8. Así pues hemos deducido que cada 8 años deben coincidir ambos planetas en línea, y en consecuencia parece deducirse que cada 8 años tendríamos la oportunidad de ver, desde alguna zona del globo, un tránsito de Venus. Pero la realidad (tabla 1) es bien diferente.

Se puede apreciar, que cuando hay

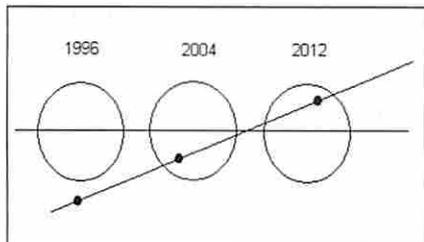


Figura 3.

un tránsito, al cabo de 8 años tiene lugar otro, pero la tabla nos dice que hay que esperar más de 100 años a que se repita una nueva pareja de tránsitos, eso sí, separados por intervalos de 8 años. Cabe pues preguntarse por la causa de esta situación. La respuesta es sencilla. Los primeros cálculos serían ciertos si los planos de las órbitas de Venus y la Tierra (plano de la eclíptica) coincidieran. Pero lo cierto es que el plano de la órbita de Venus está inclinado 3,4 grados respecto al plano de la Tierra. En consecuencia sólo Venus cruzará por delante del Sol cuando ambos planetas estén próximos a la línea de

los nodos, es decir la línea intersección de los dos planos orbitales (figura 2); siempre que la distancia entre ambas órbitas sea inferior al diámetro solar (figura 3). Así, por ejemplo, serán visibles los tránsitos en el 2004 y el 2012, pero en el 1996 no lo fue porque estaba Venus demasiado alejado del plano de la eclíptica. En consecuencia, tendremos tránsitos cuando Venus y la Tierra coin-

cidan en la zona de los nodos, en cada uno de ellos: ascendente y descendente (figura 4). Venus y la Tierra se encuentran un par de veces (separadas por 8 años) en el nodo ascendente en diciembre y después de 121,5 años se encuentran de nuevo un par de veces en el nodo descendente en junio. Después de 105,5 años se reencuentran de nuevo un par de veces en el nodo ascendente, repitiéndose el ciclo indefinidamente (tabla 1, figuras 5 y 6).

En particular hay que mencionar que no siempre serán visibles los tránsitos desde cualquier zona del globo terrestre, porque evidentemente deberán suceder cuando sea de día en el área que se considere, es decir cuando el sol esté por encima del horizonte. Por ejemplo, este tránsito del 2004 ha sido visible en España (figura 7a), pero el próximo que tendrá lugar el 2012 no lo será (figura 8). Así pues hay que aprovechar esta oportunidad, en que además es observable durante todo el lapso de tiempo, entre el primer contacto

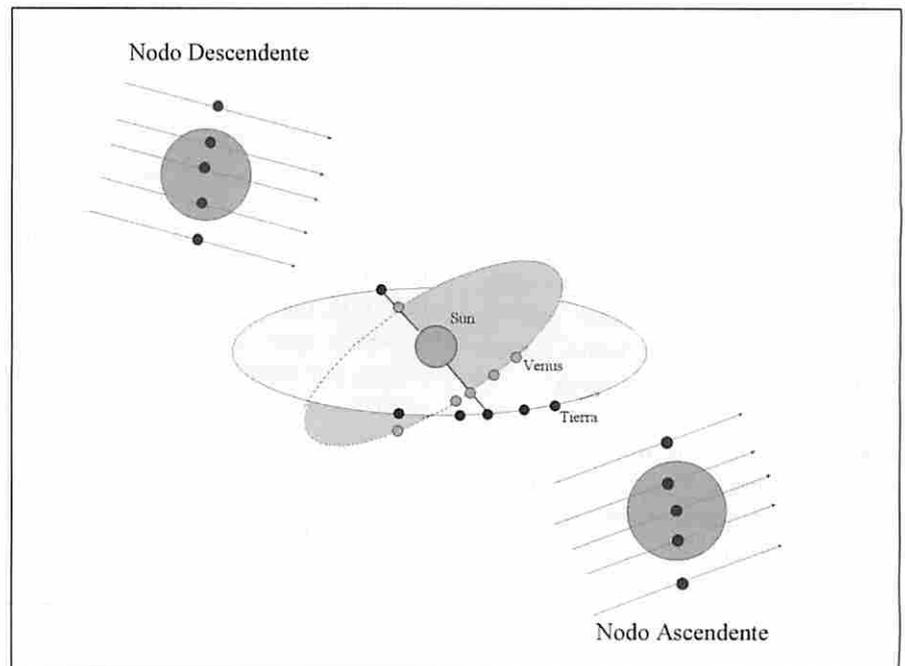


Figura 4.

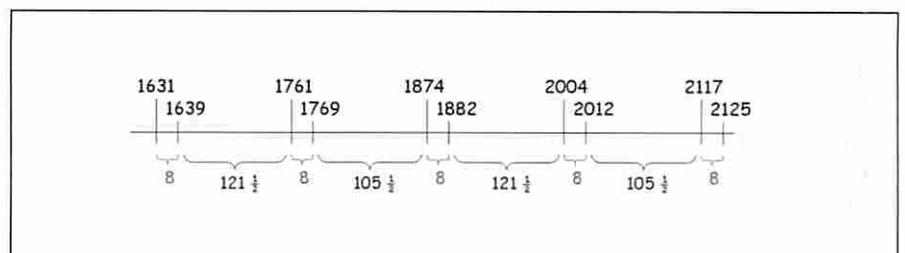


Figura 5.

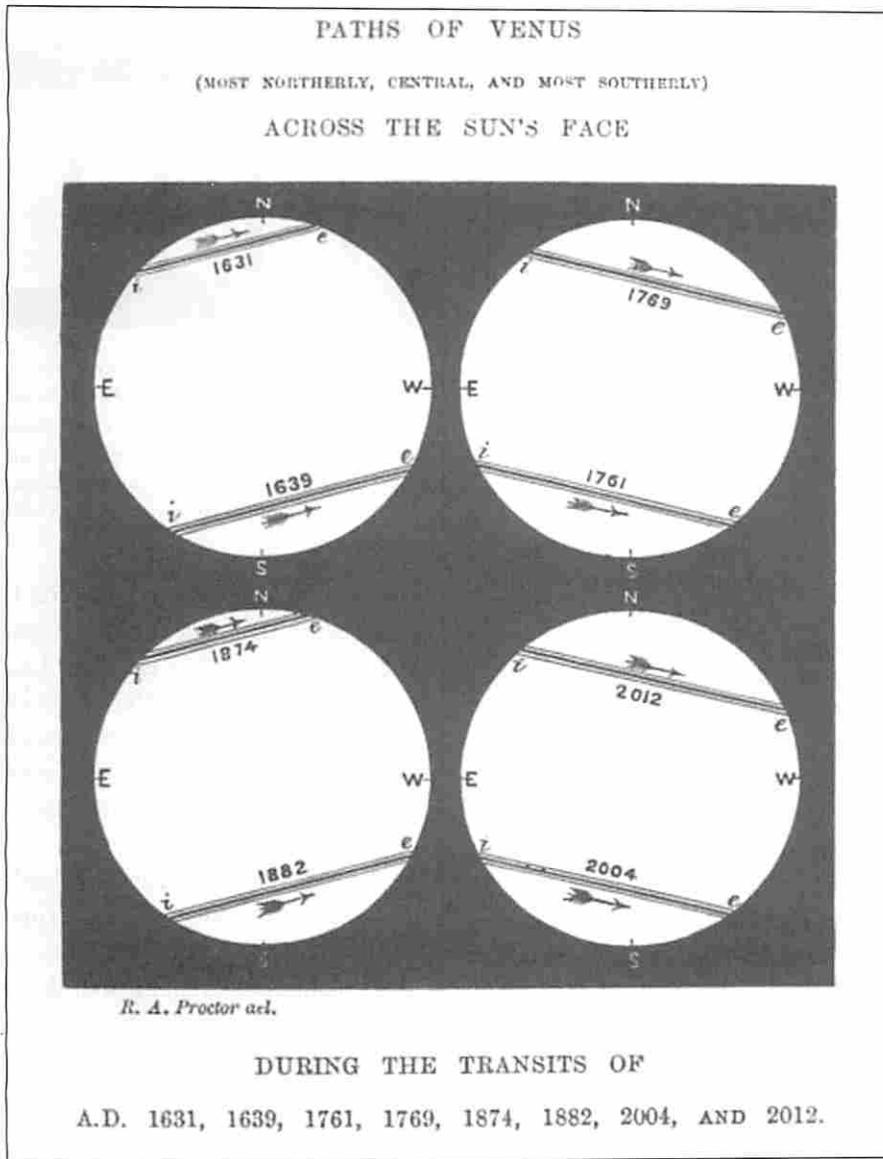


Figura 6

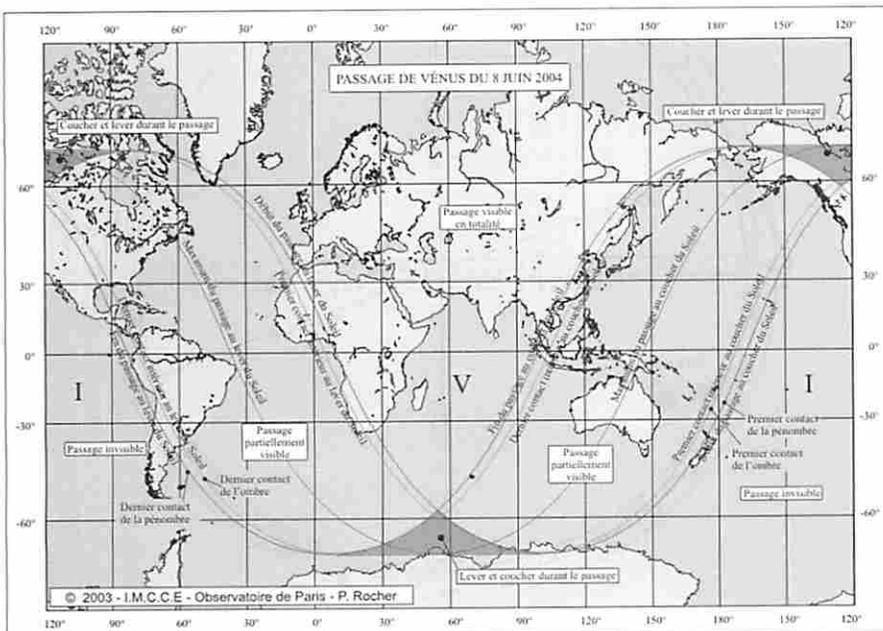


Figura 7a

exterior 7h 20m, primer contacto interior 7h 40m, segundo contacto interior 13h 05 m y segundo contacto exterior 13h 25m (figura 7b)

¿Por qué tenía interés observar los tránsitos?

Jeremiah Harrocks fue la primera persona que vio y tomó datos de observación de un tránsito de Venus el 4 de diciembre de 1639 (figuras 9 y 10). Mikahail Lomonosov el 5 de junio de 1761 descubrió que Venus tenía una atmósfera observable durante los contactos por la difracción de la luz solar: aparecía en forma de un halo alrededor del disco del planeta. Y en el tránsito del 9 de diciembre de 1874 fue cuando se tomaron los primeros daguerrotipos de un tránsito en Saint Paul (figura 11). Aunque la probabilidad de tener buenas condiciones climáticas era tan sólo del 10%, las nubes se abrieron y pudieron realizar unas 500 exposiciones. Todo un éxito.

Aunque Harrocks consideró la posibilidad de usar el tránsito para calcular la distancia de la Tierra al Sol, realmente fue Edmund Halley quien lanzó las campañas de observación de los tránsitos de Venus de los años 1761 y 1769. Fue un buen ejemplo de las primeras campañas de colaboración científica llevadas a cabo por los científicos europeos. Fueron apostados centenares de observadores en diferentes lugares con la intención de asegurarse de que se llegara a buen puerto y que además algunas observaciones se pudieran

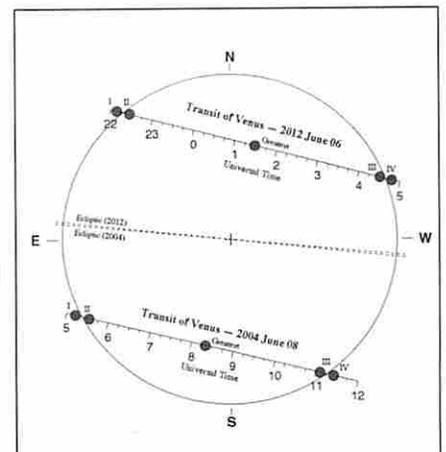


Figura 7b

2012 Transit of Venus

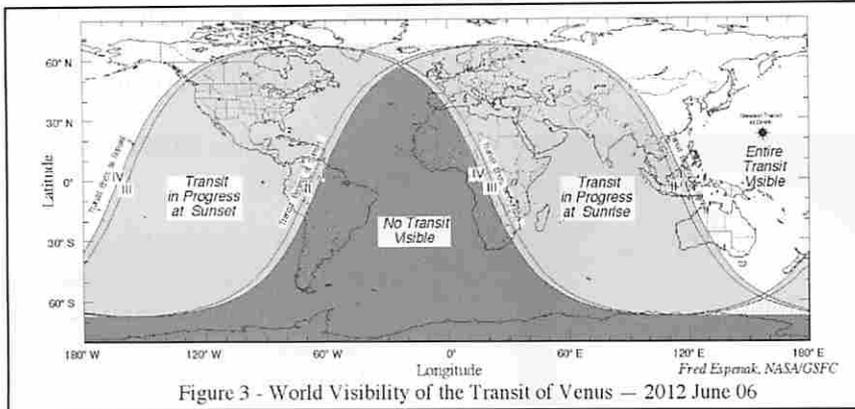


Figura 8.

hacer con buenas condiciones atmosféricas. Para reducir los errores se situaron en lugares cuyas latitudes fueran lo más distantes posible. En el siglo XVIII los viajes a lugares alejados representaban un riesgo cierto, ya que debían enfrentarse a muchos peligros, a los que también se sumó en el caso del Océano Índico la guerra entre franceses e ingleses. Lo cierto es que muchos de los científicos murieron en el empeño o, por diferentes circunstancias, no pudieron obtener las preciadas observaciones.

El gran interés que tenía en este momento histórico la determinación de la distancia Tierra-Sol residía en que gracias a la tercera ley de Kepler se disponía de una relación entre todas las distancias de los planetas del sistema solar. Bastaba desentrañar la distancia de uno de ellos al Sol, para abrir la puerta y poder conocer las dimensiones de nuestro sistema planetario. Aunque Halley murió en 1742 la comunidad científica europea continuó con el proyecto. Así, pues, hay que mencionar que en 1761 se coordinaron más de 120 observadores

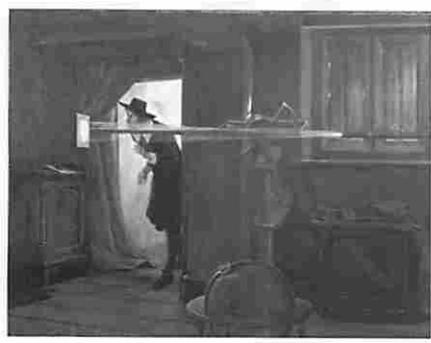


Figura 9. Jeremiah Harrocks usando una habitación oscura con una lente.

res en 62 lugares. En 1769 hubo en total 151 observadores en 77 localizaciones diferentes. Diversos percances dramáticos se sucedieron y los resultados no siempre respondieron a la expectación despertada.

En ambas campañas las dificultades se centraban en los problemas que entrañaba viajar en aquella época, en las posiciones de los observadores —no siempre bien determinadas, especialmente la longitud— y en los relojes poco precisos de que se disponía. Es cierto que la expedición de 1769 pudo contar con la ventaja de que tenían una experiencia previa, lo que permitió mejorar ciertos factores.

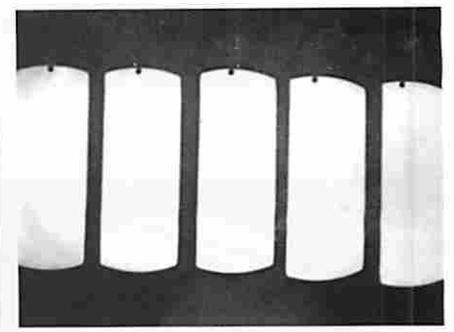


Figura 11. Primeros daguerrotipos realizados el 9 de diciembre de 1874. Las previsiones de tiempo en Saint Paul eran malas (solo tenían el 10% de probabilidad de no estar nublado), pero los resultados fueron excelentes, pudiéndose realizar unas 500 exposiciones.

Uno de ellos fue el fenómeno de la “gota negra” (figuras 12 y 13) observado por primera vez en 1761. Este fenómeno es debido a diferentes causas. Cuanto mejor sea la resolución del instrumento utilizado, en menor grado se presenta este fenómeno, pero se da siempre, en una u otra medida, debido al descenso de brillo de la superficie solar en la proximidad del limbo, lo que hace que el observador cometa un error al determinar el tiempo en que tienen lugar los contactos interiores. La incertidumbre del momento real del contac-

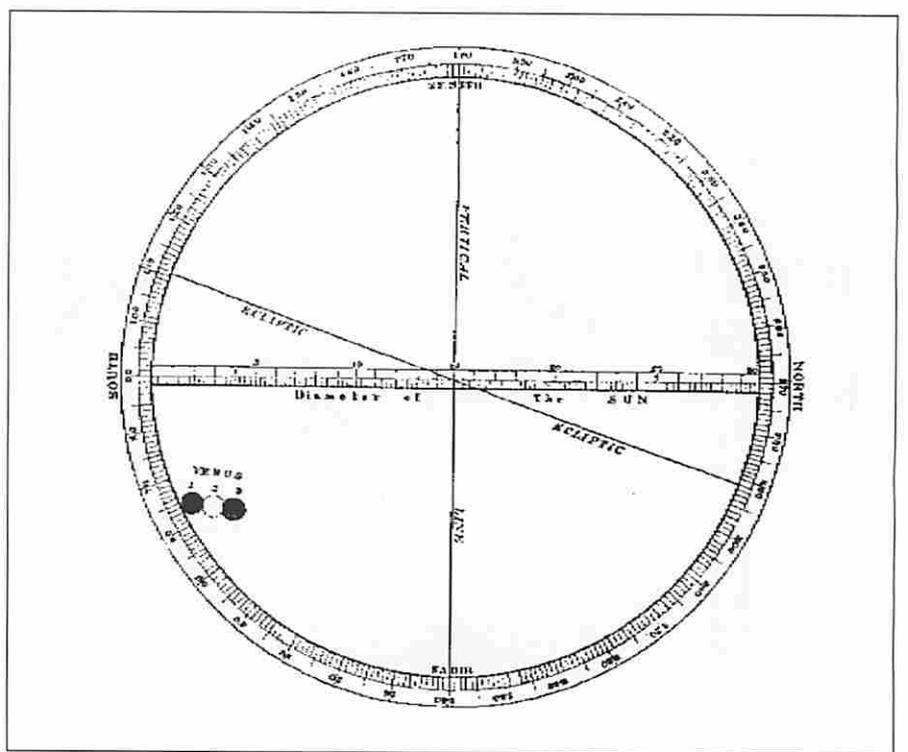


Figura 10. Jeremiah Harrocks estuvo observando a través de las nubes y sólo realizó tres observaciones 3h 15m, 3h 35m y 3h 45m ;después se puso el Sol.

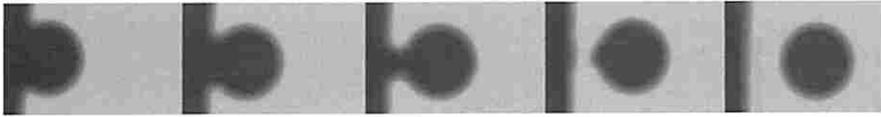


Figura 12. Fenómeno de la "gota negra". El planeta aparece como una gota de líquido "dirigida" hacia el borde del limbo solar.

to puede estar comprendida entre 20 segundos y 1 minuto. En el pasado, algunas expediciones llegaron a construir modelos artificiales para que cada observador llegara a determinar de forma experimental (figura 14) cuál era "su error" debido a éste fenómeno, y así poder dar una mejor lectura del tiempo de contacto.

En la última parte de este trabajo se utilizarán algunos de los valores de observación de los determinados en el tránsito del 3 de junio de 1769

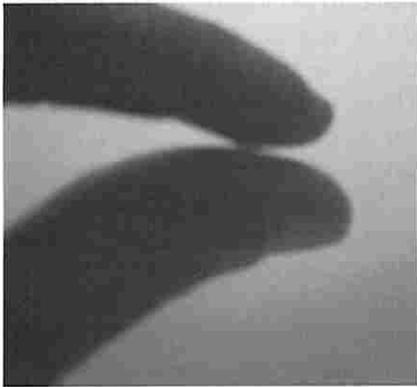


Figura 13. El fenómeno de la gota negra es un efecto óptico: responde a la dificultad del observador para distinguir el punto de tangencia (como acontece cuando unimos dos dedos de la mano).

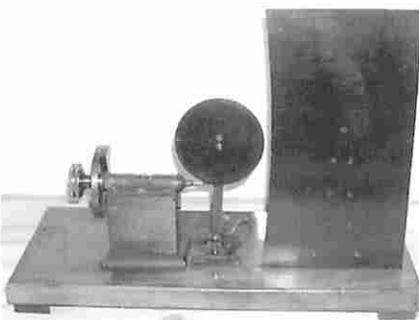


Figura 14. Modelo artificial construido por la expedición holandesa a la Isla de Reunión en el tránsito del 8 de diciembre de 1874 para que cada observador realizara la experiencia de ver la esfera de Venus acercarse al "limbo solar" desde una distancia de 400 pies y así calcular su propio error, de manera que pudiera corregir los datos recogidos, de forma análoga a como los observadores de estrellas variables reconocen las características de su propio ojo.

(figura 15) que aparecen en las figuras 16 y 17. En particular se considerarán las observaciones obtenidas en Vardö (península Escandinava) y Papeete (Tahití), por ser dos de los lugares más alejados de los que se dispone de datos. Ambas expediciones fueron organizadas por científicos ingleses. Una de ellas se dirigió a los Mares de Sur para observar el

tránsito en Tahití; unas islas descubiertas dos años antes. Estas observaciones fueron realizadas por Chales Green y un lugarteniente llamado James Cook, desconocido por aquel entonces, pero que se hizo bien famoso por sus expediciones y aventuras. El otro equipo estaba formado por el director del Observatorio de Viena, Padre Peter Maximizan Hell, junto con el astrónomo danés Horrebow y el joven botánico Borgrewing, que se dirigieron a Vardö donde pudieron observar el tránsito gracias al conocido fenómeno del Sol de medianoche. Esta circunstancia nos permite dispo-

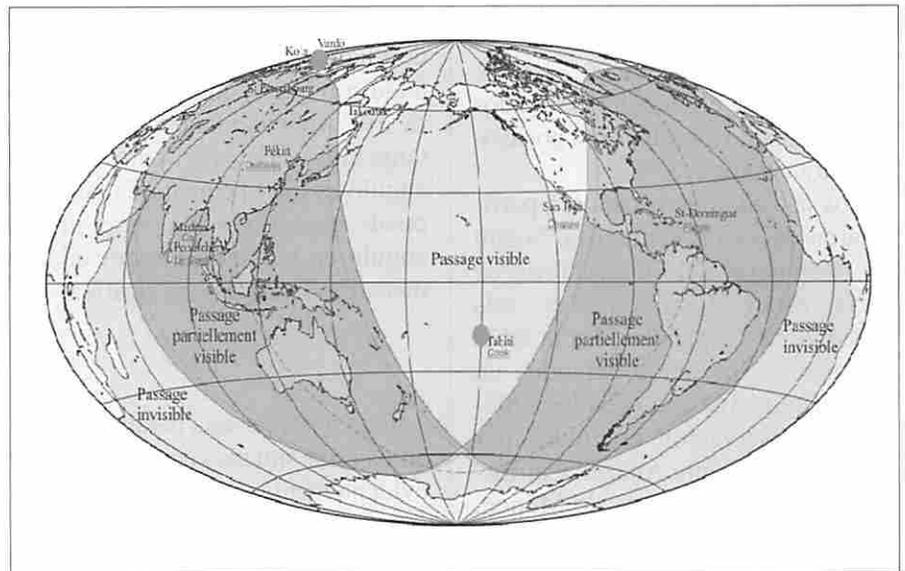


Figura 15. Zona visible del tránsito de 3 de junio de 1769. Se señalan Papeete y Vardö porque son los datos de observación que se consideran en la zona final.

Observations de la durée du passage de Venus en 1769.

Noms des Lieux.	Observateurs.	ENTRÉE DE VENUS.		SORTIE DE VENUS.	
		Premier contact.	Second contact.	Premier contact.	Second contact.
	Messieurs.	H. M. S.	H. M. S.	H. M. S.	H. M. S.
Wardhus, dans la Mer Glaciale.	R. P. Hell.	. . .	9 14 10,6	15 27 55,6	15 45 47,4
	R. P. Sainovitz.	. . .	9 54 7,6	15 27 56,6	15 45 45
	Borgrewing.	9 16 10	9 14 32,6	15 17 28,6	15 45 38,4
Kala.	Rumowitz.	. . .	9 42 2	15 35 22	
Fort du Prince de Galles, dans la baie d'Hudson.	Dymond.	0 57 0,4	1 25 15,1	7 0 42,1	7 19 20,2
		0 57 7,6	1 25 21,9	7 0 43,5	7 19 1,2
Cajanebourg.	Pianman.	. . .	9 20 45 1/2		15 51 27
St. Anne en Californie.	Velsique.	11 55 43	0 14 10	5 51 56	6 11 59
San-Joseph en Californie.	Chappe.	11 49 17	0 17 56,9	5 54 10,5	6 11 19,5
		21 59 24	0 17 31	5 54 47,5	6 12 41
Île du Roi Georges, ou de Tahiti, dans la Mer du Sud.	Médina.	14 59 18	0 17 30	5 54 47,5	6 12 46
		Green.	9 25 40	9 41 55 1/2	15 14 9
	Cook.	9 25 45	9 44 15	15 14 18	15 32 2
	Solander.		9 44 3 1/2		15 32 13

Figura 16. Datos de observación del tránsito de 3 de junio de 1769 publicada en "A Hystory of Astronomy" de A. Pannekoek.

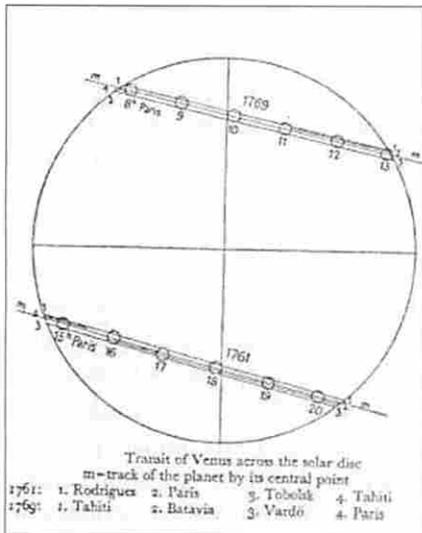


Figura 17. Datos de observación del tránsito de 3 de junio de 1769 publicados en "A History of Astronomy" de A. Pannekoek.

ner de datos de observadores situados sobre el mismo meridiano en posiciones muy alejadas.

Los astrónomos españoles participaron en varias campañas. Según las referencias del Observatorio de París están documentadas seis expediciones españolas. En la tabla que recoge los datos anotados en 1769 (figura 16) aparecen los tiempos de observación obtenidos por Velasques en Santa Ana, en California, al oeste de la costa de Méjico, y los conseguidos, también en California, por Vicente de Doz y Salvador de Medina en la misión española de San José del Cabo, que hoy todavía existe.

¿Qué hay que saber de astronomía? y ¿cómo se puede calcular la distancia Tierra-Sol?

La paralaje es utilizada para medir distancias usando ángulos y una distancia de referencia. Al observar el paso de Venus delante del disco solar se pueden obtener las paralajes de Venus y del Sol y calcular la distancia de la Tierra al Sol. Para ello lo más sencillo es observar el tránsito desde dos lugares de la superficie terrestre suficientemente alejados entre sí. Tomando los tiempos de tránsito de ambos se deducen los mencionados paralajes y, finalmente, la distancia Tierra-Sol.

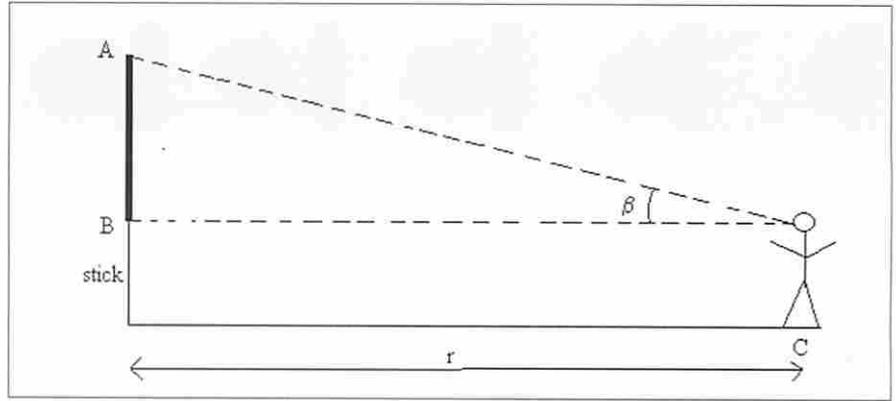


Figura 18. El ángulo β disminuye a medida que r aumenta.

Es importante comprender que el ángulo disminuye al aumentar la distancia (figura 18).

Seguidamente daremos la definición de Paralaje Horizontal. Por definición la paralaje del Sol es el ángulo β que se muestra en la figura 19. Aplicando la definición de tangente, $tg \beta = R/r$, pero como el ángulo es muy pequeño, la tangente puede ser aproximada por el propio ángulo en radianes. Despejando, la distancia Tierra-Sol, r, verifica:

$$r = R/\beta$$

Para observar esta paralaje deberíamos estar situados en el Sol, lo que evidentemente es imposible, y por supuesto en las observaciones que se realizan del tránsito de Venus no se da esta circunstancia. Los observadores estarán situados en diferentes puntos de la superficie terrestre y estarán mirando desde la Tierra el Sol. La situación de cada uno de los observadores será análoga a la de cada uno de nuestros dos "ojos". En la experiencia que se propone a continuación para comprobar que la

paralaje decrece con la distancia consideraremos el fondo de referencia.

Si extendemos un brazo ante nosotros y miramos el dedo índice, cuando los observamos sólo con el ojo izquierdo lo vemos en distinto lugar respecto del fondo distante que cuando lo hacemos sólo con el ojo derecho. Éste fenómeno es la paralaje, es el mismo que crea el relieve en nuestro cerebro cuando usa las diferentes imágenes procedentes de ambos ojos.

Si se acerca el dedo hacia la nariz y miramos hacia un objeto cercano, alternativamente con un ojo o con el otro, se observan las dos posiciones respecto al fondo (figura 20a). Seguidamente, si alejamos el dedo de la nariz, extendiendo el brazo al máximo, y miramos de nuevo, primero con un sólo ojo, y después con el otro (figura 20b), el ángulo de variación de las dos posiciones del dedo es menor. En consecuencia se observa que se verifica que: "al aumentar la distancia a que se encuentra el dedo, el ángulo de paralaje decrece". Siempre se ha tomado como referencia de esta observación los objetos al fondo de la habitación.

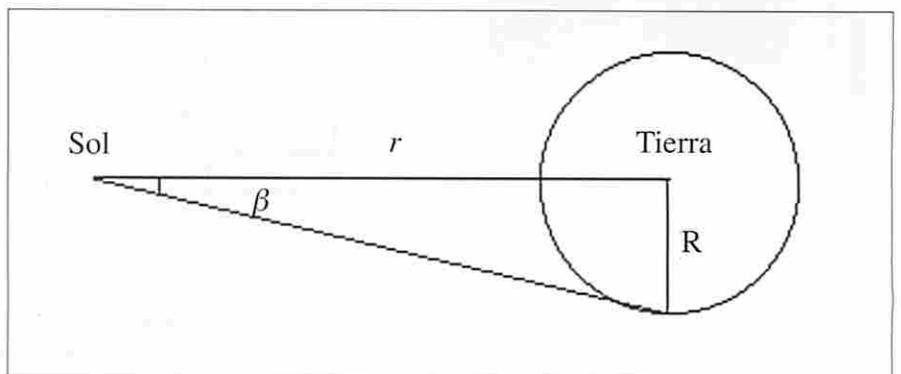


Figura 19.

β es la paralaje solar, el ángulo bajo el cual se ve el radio de la Tierra desde el Sol.



Figuras 20 a y b.

Este fenómeno fue exactamente el percibido por los dos observadores del tránsito de 1769 en Tahití y en Vardö (en la figura 17, la trayectoria 1 corresponde a Tahití y la 3 a Vardö).

Se consideran, pues, dos observadores situados en lugares A y B del mismo meridiano terrestre (para simplificar la geometría del problema), pero con distintas latitudes. Venus se ve como un punto (o pequeño círculo) sobre el disco solar en dos posiciones diferentes A' y B', debido a que las visuales desde A y B hacia Venus no son idénticas (figura 20).

Si comparamos las dos observaciones conjuntamente (figura 21) es posible medir el desplazamiento: la distancia A'B' corresponde a la distancia entre las dos posiciones de Venus observadas simultáneamente desde A y B.

Si se observa el movimiento de Venus durante el tránsito completo,

se puede dibujar la línea de sus posiciones durante todo el tiempo. Si observamos desde los puntos A y B se obtienen dos líneas paralelas (figura 17), una para cada lugar. La distancia entre ambas líneas es el desplazamiento de la paralaje $\Delta\beta$, y que en cada instante corresponde a la distancia A'B'.

Para simplificar el desarrollo matemático consideramos coplanarios los centros de la Tierra O, Venus V y el Sol C, y que tomamos las observaciones desde dos lugares A y B de la superficie terrestre sobre éste mismo plano. Los triángulos APV y BPC tienen iguales los ángulos externos en P; en consecuencia, como la suma de los ángulos de un triángulo debe ser 180°, se cumple:

$$\beta_V + \beta_1 = \beta_S + \beta_2$$

Introduciendo el ángulo $\Delta\beta$ que mide la distancia entre las diferentes posiciones de la trayectoria de Venus sobre el diámetro solar ("en cada instante" equivale a A'B') y reordenando:

$$\Delta\beta = \beta_2 - \beta_1 = \beta_V - \beta_S = \beta_S \left(\frac{\beta_V}{\beta_S} - 1 \right)$$

Por la definición, la paralaje de Venus es $\beta_V = AB/(r_e - r_v)$ y la paralaje solar es $\beta_S = AB/r_e$. Substituidos en la ecuación anterior da lugar a:

$$\Delta\beta = \beta_S \left(\frac{r_v}{r_e - r_v} \right)$$

En particular la paralaje solar β_S queda de la forma:

$$\beta_S = \Delta\beta \left(\frac{r_e}{r_v} - 1 \right)$$

donde $\Delta\beta$ es la distancia angular entre las dos líneas de la trayectoria de Venus vista desde los distintos puntos de observación y el cociente r_e/r_v se puede obtener considerando la tercera ley de Kepler. Así el cubo del mencionado cociente debe ser proporcional al cuadrado del cociente de los periodos de revolución. Como los periodos de revolución de Venus y de la Tierra son conocidos, 224,7 y 365,25 días respectivamente, la paralaje solar β_S verifica,

$$\beta_S = 0,38248 \times \Delta\beta$$

$\Delta\beta$ se consigue a partir de los datos de observación desde sendos lugares A y B del mismo meridiano. En este caso usaremos el dibujo realizado en el siglo XVIII de la trayectoria de Venus desde las diferentes localizaciones, todas sobre el mismo meridiano, cuando la sombra del planeta cruzó el disco solar. $\Delta\beta$ se puede determinar de diferentes formas.

1. Lo más sencillo es por medida directa sobre la figura 17: basta considerar una proporción entre el diámetro D del Sol en la mencionada figura 17 y el diámetro angular del Sol, bien conocido, de 30 minutos de arco expresado en radianes.

$$\Delta\beta = \frac{\pi A'B'}{360 \times D}$$

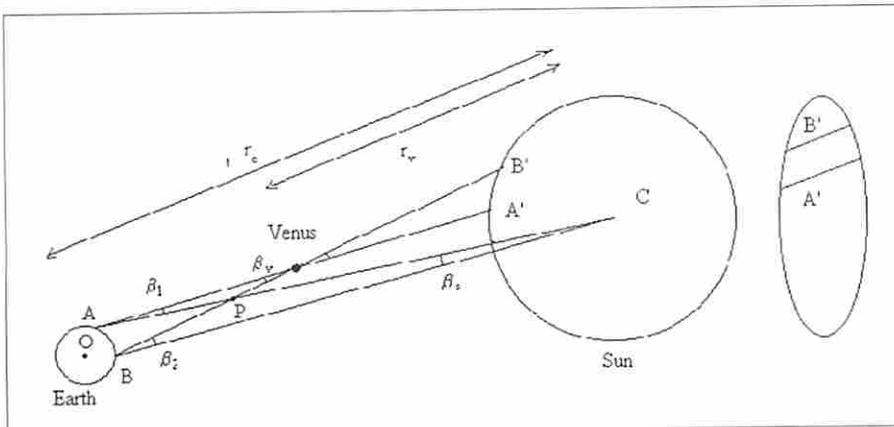


Figura 21. El problema geométrico del tránsito de Venus.

2. También se puede determinar midiendo las cuerdas en la figura 22. De esta forma se gana precisión, porque es siempre más sencillo medir las longitudes de las cuerdas A_1A_2 y B_1B_2 que la distancia entre estas cuerdas $A'B'$.

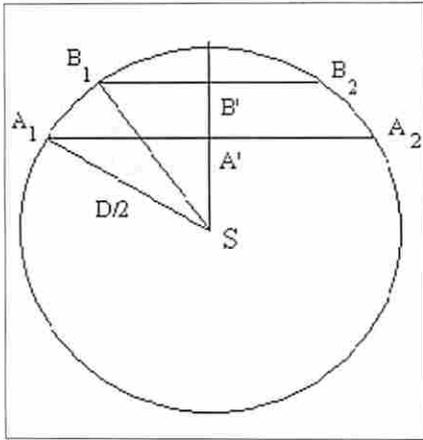


Figura 22. Permite relacionar las longitudes de las cuerdas A_1A_2 y B_1B_2 con la distancia entre ellas $A'B'$.

3. Usando el teorema de Pitágoras en los triángulos $SB'B_1$ y $SA'A_1$ se deduce:

$$\overline{A'B'} = \overline{B'S} = \overline{A'S} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{D^2 - \overline{B_1B_2}^2} - \sqrt{D^2 - \overline{A_1A_2}^2} \right)$$

4. Cabe usar tiempos en lugar de distancias. Basta considerar la proporción entre:

$$\frac{\overline{A_1A_2}}{t_A} = \frac{\overline{B_1B_2}}{t_B} = \frac{D}{t_0}$$

donde t_A y t_B son las duraciones de los tiempos de los tránsitos A_1A_2 y B_1B_2 , e introduciendo t_0 como la hipotética duración del tránsito a lo largo de un diámetro del disco solar. Representando por t' el tiempo correspondiente a $\Delta\beta$, se puede establecer la relación:

$$\frac{t'}{t_0} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 - (t_B/t_0)^2} - \sqrt{1 - (t_A/t_0)^2} \right)$$

Hay que ser cuidadoso al usar los tiempos de observación (figura 23). Cabe destacar que hay tiempos externos (C_1 y C_4) e internos (C_2 y C_3) de observación del contacto de Venus con el borde solar. Los contactos internos están siempre mejor

determinados aunque el efecto de la “gota negra” introduce distorsiones. Por este motivo, a la hora de utilizar los valores numéricos se consideraran sólo estos.

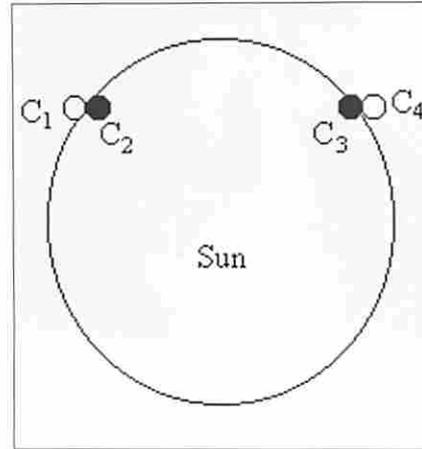


Figura 23. Los tiempos más precisos son los de los contactos interiores C_2 y C_3 . Por ese motivo serán los considerados en los cálculos.

Usando los datos de observación del tránsito de 1769 para Vardö y Papeete (figuras 16 y 17) se deducen los valores indicados en la tabla 2 usando los métodos mencionados y que la distancia AB es de 11425 km en línea recta.

Se puede observar que los resultados conseguidos son razonables si se tienen en cuenta los métodos empleados. La distancia Tierra-Sol se toma actualmente como $149,6 \times 10^6$ km, definición de unidad astronómica de distancia. Hay que mencionar que el segundo resultado obtenido en la tabla 2, usando el método de las cuerdas, introduce menos errores de medición que el método inicial porque se consigue más precisión midiendo las cuerdas, que si se mide $\Delta\beta$ de forma directa. El método final, en que se han considerado los tiempos, tiene interés porque permite establecer una más clara analogía

con los métodos actualmente utilizados de lectura de tiempos, pero introduce más errores al tener que hacer una hipótesis suplementaria el suponer la velocidad del movimiento de Venus constante sobre el disco solar durante todo el tránsito.

El valor de la distancia Tierra-Sol que se determinó en el siglo XVIII estaba comprendido entre 145 y 155 millones de km (según los observadores). Lo cierto es que este resultado se mejoró en los tránsitos del siglo XIX, pero se calculó de forma más exacta usando radar el año 2000. Actualmente se considera que es de $149,597870691 \times 10^6$ km.

Hay que reconocer que en la actualidad el tránsito carece de interés para determinar esta distancia, pero es bueno destacar que sigue considerándose este mismo concepto básico en investigaciones punteras actuales dentro del campo de la astronomía en la detección de planetas extrasolares.

¿Qué interés tienen actualmente los tránsitos de planetas?

En la actualidad la observación de los tránsitos de planetas es uno de los métodos usados para detectar planetas en sistemas estelares distintos del nuestro. El 6 de octubre de 1995, Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra, anunciaron públicamente el descubrimiento del primer exo-planeta (51 Pegasi). En la búsqueda de planetas similares al nuestro, donde pudieran darse unas condiciones análogas, el primer descubrimiento de un exo-planeta no respondió a lo esperado. Su periodo orbital era de 4,2 días y su masa aproximadamente correspondía a 0,5 masas de Júpiter. El nuevo planeta era “un Júpiter

Tabla 2. Resultados obtenidos de la distancia Tierra-Sol, unidad astronómica de distancia, según los tres métodos descritos.

Método usado	$\Delta\beta$	R_e en 10^6 km
Directo	0,00019	157
Cuerdas	0,00020	149
Tiempos	0,00022	136

muy caliente girando en torno a su estrella dentro de la órbita de Mercurio". En consecuencia las temperaturas y el clima debían ser extremos, y si era un planeta gaseoso se le podía pronosticar una corta vida. Desde entonces hasta ahora el camino recorrido ha sido intenso. Se han descubierto 123 exo-planetas en 108 sistemas diferentes, y los hay distribuidos en cualquier parte del universo. La gran mayoría de planetas son bastante masivos, y podría parecer que los sistemas planetarios no se parecen demasiado al nuestro (figura 24), si bien esto puede ser debido a que los métodos utilizados para realizar estos descubrimientos potencian la detección de los planetas más masivos.

Se utilizan cuatro métodos para ello: 1) Imágenes directas del planeta y la estrella, 2) Observación del movimiento propio inducido por el planeta, 3) Variación en la velocidad radial de la estrella debido a la presencia del planeta y 4) Variación del brillo de las estrellas debido al tránsito del planeta delante de ella. Los tres primeros métodos mencionados pueden aplicarse al caso de planetas bastante masivos, como puede ser Júpiter. Pero el último mencionado, el relativo a los tránsitos, puede aplicarse a la detección de planetas de un tamaño similar a la Tierra. Cuando un planeta pasa por delante de la estrella el brillo de ésta disminuye y se percibe claramente este tránsito en la curva de luz de las estrellas (figura 25). Es un método que está al alcance incluso de aficionados (figura 26). El principal problema que tiene este proceso es que sólo es aplicable a aquellos planetas cuyo plano orbital este próximo al plano de traslación de la Tierra, al igual que sucede con el Tránsito de Venus, que sólo es observable cuando Venus y la Tierra esta próximos a la línea de los nodos. El otro problema se debe a que sólo es posible observar esta variación de la curva de luz durante una pequeña parte de su periodo orbital (que puede ser de sólo unas horas). Esto hace que la probabilidad de descubrir un planeta de tipo análogo a la Tierra se reduce drásticamente, pero sin duda

PLANETS AROUND NORMAL STARS

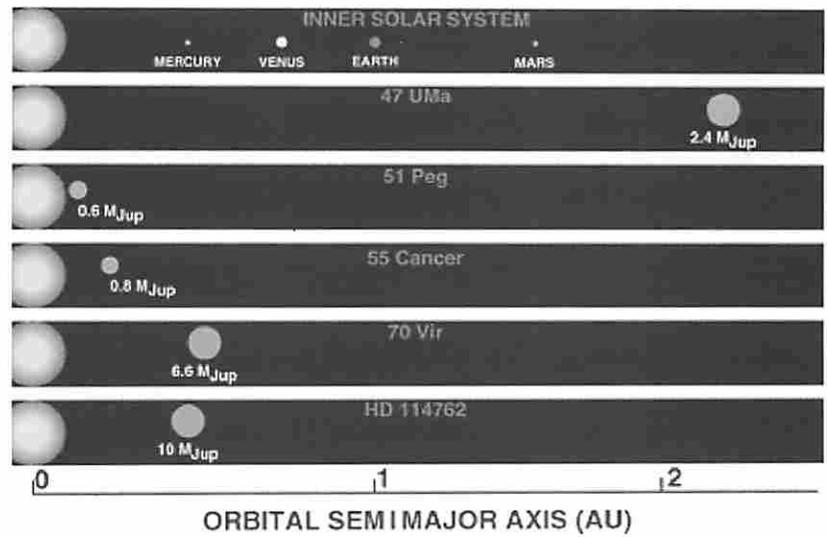


Figura 24. Ejemplos de algunas estrellas con sus planetas.

es un ámbito que se está estudiando por su especial interés. La probabilidad de observar un planeta situado a una unidad astronómica de distancia (1 ua) es del 0,5%. En otras palabras, si todas las estrellas tienen un planeta a 1 ua, es necesario seguir 200 estrellas para ver un tránsito. Si el 10% de las estrellas tiene un planeta a 1 ua, para detectar 5 planetas deberíamos seguir fotométricamente unas 10000 estrellas.

Es bueno destacar que siguiendo los tránsitos de exo-planetas, y gracias a la fotometría, el telescopio Hubble ha descubierto líneas de absorción del sodio en el espectro de

la estrella, lo que ha permitido detectar una atmósfera de Sodio en el planeta considerado. Con estos estímulos se está trabajando en el proyecto COROT (COvection ROTation and planetary Transits) para enviar un satélite destinado a detectar estos tránsitos, que se lanzará el próximo junio del 2006 y que está previsto que en dos años y medio siga 60000 estrellas para analizar sus posibles tránsitos planetarios.

Actualmente se han detectado 4 exo-planetas por este método. Los últimos fueron anunciados el pasado 7 de mayo por ESO (OGLE-TR-113 y OGLE-TR-132).

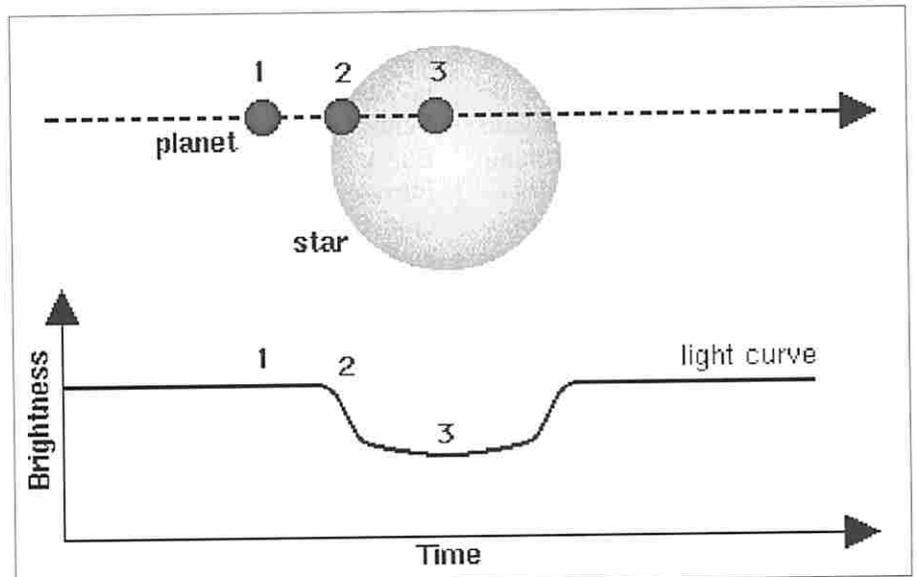


Figura 25. Cambios en la curva de luz de su estrella debido al tránsito del exo-planeta HD 209458.

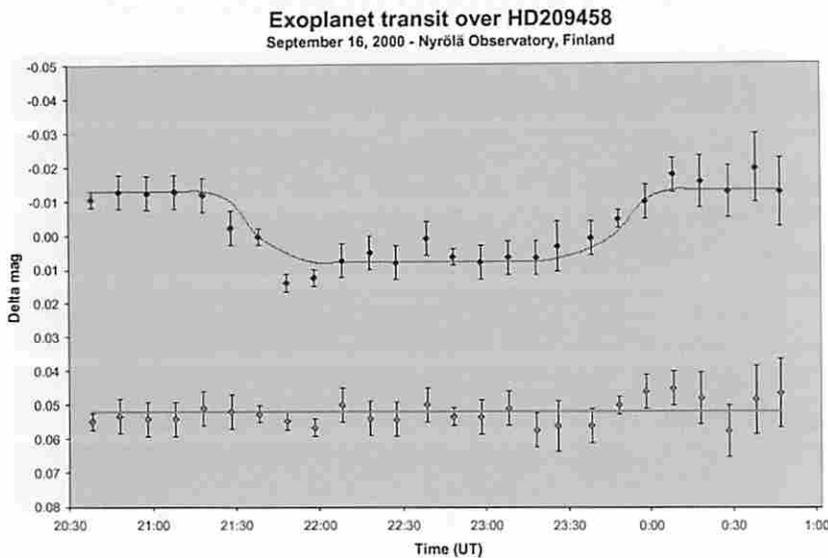


Figura 26. El tránsito de HD 209458 observado por aficionados de Finlandia (Nyrölä Observatory).

Las observaciones del 8 de junio de 2004 y proyectos relacionados

Volviendo a la observación del pasado 8 de junio, está claro que el ejercicio de cálculo propuesto en este artículo se podría repetir de nuevo utilizando los tiempos de observación del tránsito de Venus de este año. Es evidente que hay que contar con la colaboración de un observador situado sobre nuestro mismo meridiano, para que el desarrollo matemático sea más sencillo, y cuya latitud difiera mucho de la nuestra, para reducir al máximo los errores. No es fácil encontrar un observador situado sobre el mismo meridiano y suficientemente alejado para realizar las observaciones. El método de trabajo que aquí se ha desarrollado evidentemente no es el que actualmente es utilizado por los astrónomos profesionales. En éste último los contenidos matemáticos que se utilizan son mucho más complejos y no se consideran las simplificaciones antes efectuadas; de forma que aplicando las técnicas adecuadas se reducen los márgenes de error y se pueden considerar las observaciones realizadas en lugares de diferente latitud y longitud adoptando las necesarias matrices de rotación.

Recurriendo a todas las ventajas que supone seguir los actuales

métodos de cálculo, y usando instrumentos profesionales, no es necesario buscar un colaborador en un lugar muy alejado sobre el mismo meridiano, sino que atendiendo a estas facilidades se pueden conseguir buenos resultados con mucho menos esfuerzo del que realizaron los científicos de siglo XVIII.

La Unión Europea está financiando un proyecto relativo al Tránsito de Venus. Los organizadores: European Southern Observatory (ESO), European Association for Astronomy Education (EAAE), Observatoire de Paris, Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides (IMCCE) y Academy of Science of the Czech Republic proponían realizar la observación del Tránsito de Venus desde cualquier lugar de Europa. Los participantes debían introducir los tiempos de observación C1, C2, C3 y C4 (figura 27) en la página web del proyecto y el Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides realizaba los cálculos para conseguir obtener de nuevo la distancia Tierra-Sol, es decir la unidad astronómica de distancia. De esta forma se quería hacer un homenaje a los pioneros del siglo XVIII e involucrar en un proyecto común a estudiantes y profesores de 27 países europeos. Hay que destacar que sin las observaciones el proyecto no se podía

llevar a cabo; por lo tanto, esto era un acicate para motivar la participación (<http://www.vt-2004.org> y <http://www.venus04.org>, el nodo nacional español). Los interesados enviaban sus tiempos de observación y contribuían a la determinación de la distancia Tierra-Sol, recibiendo un certificado de participación y los resultados por ellos mismos conseguidos (dentro del histograma de los resultados totales obtenidos). En total 2955 observadores enviaron sus tiempos y el valor calculado ha sido de 149581752 km (con un error de 0,011 %). Un éxito y nosotros también colaboramos en él.

El proyecto también propone la participación en un concurso de videos cuya final y entrega de premios tendrá lugar en París los días 5, 6 y 7 de noviembre del 2004.

A nivel nacional se ha organizado también un concurso relativo al tránsito de Venus integrado dentro de "Física + Matemáticas en Acción", proyecto de la Real Sociedad Matemática Española conjuntamente con la Real Sociedad Española de Física. El objetivo de "Pilla el Tránsito de Venus" es proponer la observación de este acontecimiento. Está dirigido a grupos de alumnos de secundaria (ESO o bachillerato) bajo la tutela de un profesor. Para participar había que elaborar un informe explicando cómo se ha preparado, realizado y discutido los resultados de la observación, y remitirlo en html a la <http://ific.uv.es/fisicaenaccion> antes del 31 de julio. Los mejores se colgarán en la web, y el equipo ganador obtendrá cuatro viajes (un profesor y tres alumnos) al Instituto Astrofísico de Canarias para visitar sus instalaciones. También está prevista la edición europea de este concurso integrado dentro de "Catch a Star 3" y el primer premio son 4 viajes a Chile para visitar El Páramo donde ESO tiene instalados el VLT (Very Large Telescope). La convocatoria aparecerá en breve en la página web de ESO y habrá tiempo para presentar los trabajos hasta el mes de octubre.



Figura 27. Tomando el tiempo del tercer contacto (segundo interior) en el Centro Asociado de la UNED de Madrid en Las Rozas.

A modo de conclusión

No puedo terminar este artículo sin añadir algunos comentarios relativos a las observaciones realizadas desde el Centro Asociado de la UNED de Madrid en el campus de Las Rozas.

Desde antes de las siete de la mañana un buen número de personas comenzó a situar los telescopios en la azotea del edificio, contribuyendo todos en la medida de sus posibilidades. Situado el instrumental, y un conjunto de artilugios donde proyectar la imagen del disco solar, protegidos con

sombrillas para que la propia luminosidad del Sol no impidiera poder observar la proyección un tanto tenue a esas horas de la mañana. Cámaras de TV y fotografías sirvieron para tomar el documento gráfico y la buena organización también nos ofreció bizcocho y café. El primer contacto fue prácticamente imposible de observar, pero ya empezamos a tomar los tiempos (cada telescopio el suyo) del segundo contacto (primero interior) en que el fenómeno de la "gota negra" nos hizo a todos discernir "cuándo" veíamos que era realmente tangente al limbo (figura 28). Algo después del segundo contacto, una nube nos impidió ver el tránsito durante un corto lapso de tiempo. Este se aprovechó para desplazar los telescopios al parking del edificio, donde se pudo seguir el tránsito hasta el final. Tres telescopios nos permitieron disfrutar a todos de esta experiencia (figura 29). Creo que la palabra apropiada es "disfrutar" porque en la determinación de los dos últimos contactos el ambiente estaba bien caldeado, por la temperatura del Sol y también por el magnífico ambiente de interés y expectación despertado por



Figura 28: Telescopio en la azotea del Centro Asociado de la UNED de Madrid en Las Rozas. Observando el segundo contacto (primero interior).



Figura 29: Los tres telescopios en el parking del Centro Asociado de la UNED de Madrid en Las Rozas siguiendo el tránsito.



Figura 30. Filmando las imágenes del tránsito en el Centro Asociado de la UNED de Madrid en el campus de Las Rozas.

la experiencia en que nos sentíamos todos protagonistas (figura 30). Los tiempos obtenidos se enviaron a la web del proyecto internacional para contribuir a la determinación de la distancia Tierra-Sol. Quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer la invitación a los organizadores por-

que me permitió participar en este encuentro y felicitarles por el éxito conseguido. Hay que decir finalmente que el día siguiente, 9 de junio, pudimos obtener el fruto de nuestro trabajo. Nuestros tres equipos consiguieron unos resultados excelentes, con un error del orden del 0,2% (tabla 3).

Tabla 3: Resultados conseguidos por los tres telescopios situados en el Centro Asociado de la UNED de Madrid en Las Rozas (Latitud 40.5160888 N y Longitud 3.6797861 W).

Telescopio	Distancia Tierra-Sol
Facultad de Ciencias no.1	150 020 735 km
Facultad de Ciencias no.2	149 940 387 km
Facultad de Ciencias no.3	149 723 313 km

Enhorabuena a todos por un trabajo bien hecho. En el 2012 otro tránsito nos espera.

Bibliografía

- [1] Berthomieu, F., Dahringer, F., Gerbaldi, M., Gaitzch, R., Pickwick, A., Ros, R.M., How to measure the Earth-Sun distance by studying the Transit of Venus, *Proceedings of 7th EAAE International Summer School*, UNIFF, Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona, 2003
- [2] Pannekoek, A., *A History of Astronomy*, Dover Publications Inc, New York.
- [3] Ros, R.M., El tránsito de Venus del 8 de junio de 2004, *La Gaceta de la Real Sociedad Matemática Española*, Vol. 7, 1, Madrid, 2004.
- [4] Ros R.M., El tránsito de Venus para determinar la unidad astronómica de distancia, *Revista Española de Física*, Vol. 18, 2, Madrid, 2004.

<http://ific.uv.es/fisicaenaccion>

<http://www.rsef.org>

<http://www.rsme.es>

<http://www.vt-2004.org>

<http://www.venus04.org>

<http://www.eso.org>

<http://www.eaae-astro.org>

<http://obsprm.fr>

<http://www.imcce.fr>

<http://asu.cas.cz>

Para saber más

<http://www.vt-2004.org/Education/Background/Infoll>

<http://www.vt-2004.org/Education/Edusheet5.html>

Para profesores

<http://www.vt-2004.org/Education/Edusheet1.html>

<http://www.vt-2004.org/Education/Edusheet2.html>

<http://www.vt-2004.org/Education/Edusheet3.html>

<http://www.vt-2004.org/Education/Edusheet4.html>

Rosa M.^a Ros

Universitat Politècnica de Catalunya