

UNIDAD DIDÁCTICA OCULTACIONES



*Cubierta: Ocultación de Saturno por la Luna el 1 de diciembre de 2001.
Imágenes obtenidas a partir de secuencias de videos capturadas con
una webcam acoplada a un pequeño telescopio (créditos J.C. Casado).*

Autores:
Juan Carlos Casado
Miquel Serra-Ricart
Luis Cuesta

Unidad Didáctica
Ocultaciones
2

Diseño original: Gotzon Cañada
Preimpresión e impresión: PRODUCCIONES GRÁFICAS
© Instituto de Astrofísica de Canarias
Edita: Gabinete de Dirección del IAC
Depósito legal: TF/...../2004
ISBN: 84-688-6966-X

INTRODUCCIÓN

Una ocultación es la alineación o interposición de un cuerpo celeste por otro visto desde la Tierra. Dependiendo del tipo de trayectoria o paso entre ambos objetos, estos eventos pueden ser: totales y anulares, si se produce la desaparición o superposición completa; parcial, si únicamente se tapa una parte; o rasante, si el paso se produce tangencialmente (figura 1).

La diferencia entre los tamaños aparentes (o vistos desde la Tierra) del cuerpo ocultante y del ocultado establecen diferentes tipos de fenómenos. Son **eclipses** cuando las dimensiones aparentes de ambos objetos son similares; por ejemplo, el Sol y la Luna, que dan lugar a los eclipses de Sol. (Ver Unidad Didáctica Eclipses).

Los **tránsitos** se producen cuando el cuerpo ocultante es mucho más pequeño que el ocultado. En tal caso no se produce la desaparición del cuerpo más distante, sino un paso o tránsito del primero proyectado sobre la superficie del mayor. Un caso célebre son los tránsitos del planeta Venus delante del Sol (figura 2).

Se llaman **ocultaciones** cuando el cuerpo que causa el fenómeno es mucho mayor aparentemente que el ocultado. Un ejemplo típico son las ocultaciones de



estrellas por la Luna. Aunque, como sabemos, las estrellas son tremendamente más grandes que nuestro satélite, se encuentran tan distantes que se observan como puntos luminosos, por tanto su tamaño aparente es mucho menor que el de la Luna.

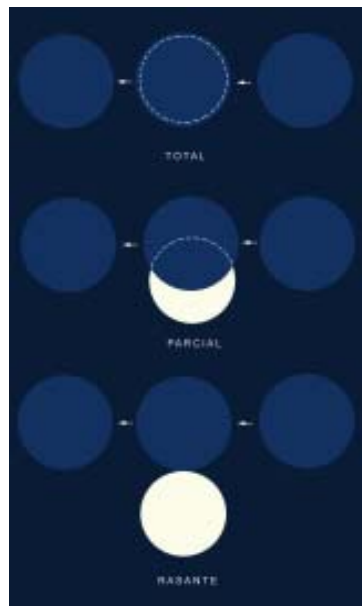
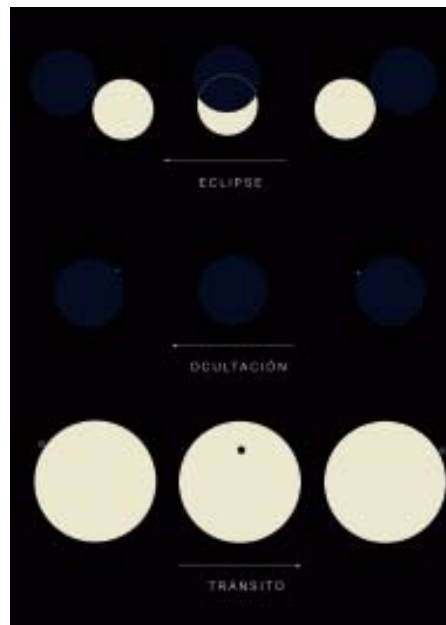


Figura 1. Tipos de ocultaciones según la alineación de los cuerpos entre los que tiene lugar el fenómeno. (créditos J.C. Casado).



Figura 2. Distintos tipos de ocultaciones según el tamaño aparente de los cuerpos implicados en el evento (créditos J.C. Casado).



Las ocultaciones han sido fuentes de importantes descubrimientos en la Astronomía, y en nuestros días siguen proporcionando información de gran interés científico. La determinación de la distancia Tierra-Sol, los tamaños y formas de los diminutos asteroides, la atmósfera de Plutón o la localización precisa de algunas radiofuentes han sido algunos de los logros conseguidos por medio de fenómenos ocultantes.

Actualmente, por ejemplo, se llevan a cabo estudios fotométricos en estrellas para determinar la existencia de exoplanetas mediante ocultaciones. Resulta

emocionante saber que con un equipo de aficionado se está en disposición de realizar uno de tales descubrimientos.

Precisamente en el campo de las ocultaciones, los aficionados pueden prestar un gran servicio colaborando con instituciones científicas y llevar a cabo diversos programas observacionales de interés.

Pero, además, las ocultaciones ofrecen algunos de los fenómenos más llamativos y poco frecuentes de la Astronomía, invitando a realizar observaciones de alto valor pedagógico y documental.

1- OCULTACIONES EN ASTRONOMÍA

1.1 Satélites de Júpiter y Saturno.

El físico y astrónomo italiano Galileo Galilei descubrió en 1610 los cuatro satélites principales de Júpiter con su recién inventado telescopio. Galileo vio que constituían una especie de sistema solar en miniatura con Júpiter como cuerpo central alrededor del cual sus lunas giraban en órbitas perfectamente establecidas.

En honor a su descubridor, estos satélites se denominan galileanos, siendo fácilmente visibles incluso con el telescopio más pequeño. En la tabla siguiente se indican sus nombres y las principales características físicas y orbitales:

Nombre satélite			Radio	Período orbital	Semi-eje mayor		Inclinación orbital	Magnitud visual en oposición
			Km.	Días	M Km.	Aparente	Grados	
Ia	I	Io	1.840	1,76986	0,62159	2° 17"	0,04	-4,8
Europa	II	II	1.552	3,55409	0,67065	3° 40"	0,47	5,2
Ganimedes	III	III	2.650	7,16639	1,06967	5° 48"	0,21	4,5
Calisto	IV	IV	2.420	16,79335	1,88161	10° 13"	0,28	5,5

El semi-eje mayor aparente es el visto desde la Tierra.



Como Júpiter, también Saturno está acompañado de numerosos satélites (hasta ahora se conocen 31). El número de ellos que se puede observar a través de un telescopio de aficionado depende del tamaño del objetivo, de las condiciones atmosféricas -en particular de la luminosidad del cielo y de la transparencia- así como de la experiencia del observador. No obstante, de manera aproximada se pueden establecer las siguientes indicaciones:

- **Titán** es visible con cualquier instrumento, incluso con unos prismáticos potentes.
- **Rea** se puede ver con instrumentos de 8 cm de diámetro.
- **Tetis, Dione y Japeto** necesitan aparatos con un diámetro mínimo de 15 cm.
- Para observar **Encelado** se necesita un telescopio de 30 cm de diámetro, ya que la proximidad a Saturno le deslumbra.

El plano orbital de los satélites galileanos de Júpiter tiene una inclinación muy pequeña ($< 5^\circ$) con respecto a la eclíptica, por lo que en el curso de su movimiento orbital alrededor de Júpiter experimentan diversos fenómenos ocultantes (figura 3). Estos fenómenos se pueden dividir en dos tipos: **fenómenos clásicos** y **fenómenos mutuos**.

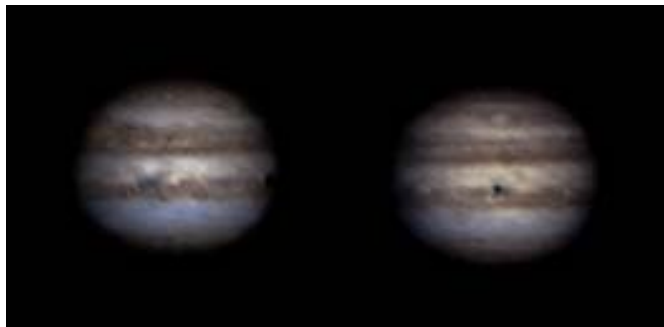


Figura 3. Comienzo del tránsito de la sombra del satélite lo sobre Júpiter (imagen de la izquierda). Se puede ver a la izquierda del disco del planeta la Mancha Roja poniéndose. En la siguiente imagen la sombra de lo ya se encuentra situada sobre el meridiano central del planeta. lo, visible como una pequeña mancha brillante en la banda ecuatorial donde se encuentra su sombra, comienza a entrar por el lado derecho del planeta (créditos J.C. Casado/IAC).



Los fenómenos clásicos son aquellos en los que se ve implicado uno de los cuatro satélites galileanos y Júpiter. Se pueden clasificar en las siguientes categorías (figura 4):

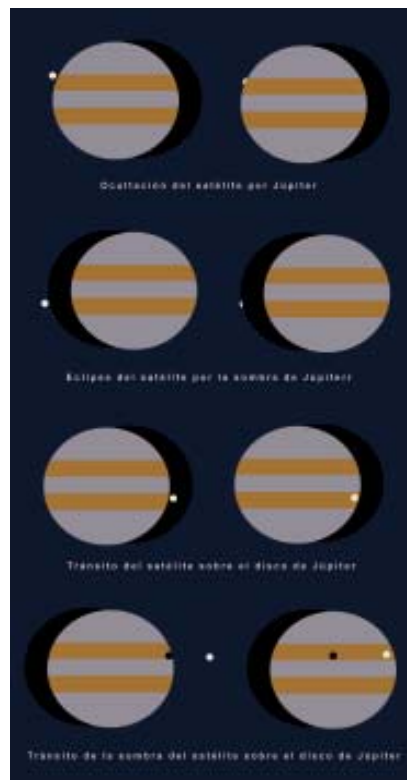


Figura 4. Diferentes tipos de fenómenos clásicos de ocultaciones de los satélites galileanos de Júpiter. En cada fenómeno se muestra el estado inicial (a la izquierda) y el comienzo del mismo (créditos J.C. Casado).

- Ocultación del satélite por Júpiter.
- Eclipse del satélite por la sombra de Júpiter.
- Tránsito del satélite sobre el disco de Júpiter.
- Tránsito de la sombra del satélite sobre el disco de Júpiter.

Los fenómenos mutuos, que veremos con más detalle en el siguiente apartado, tienen lugar entre dos satélites galileanos, de manera que uno eclipsa u oculta al otro.

Los fenómenos clásicos pueden observarse con cualquier telescopio y un reloj o indicador horario que asegure una precisión de 1 segundo. Es necesario disponer de unas buenas efemérides (véase apartado 1.7 «**Recursos en Internet**») para identificar y estar preparados para el evento. Estas observaciones poseen valor científico, ya que se utilizan para mejorar el conocimiento dinámico de los satélites galileanos.

De los cuatro fenómenos clásicos que se han indicado anteriormente, el eclipse por la sombra de Júpiter es el que puede observarse con mayor precisión a la hora de determinar el instante en que se produce. Al ocurrir a una cierta distancia del planeta, su intenso brillo no deslumbra al satélite como ocurre en la ocultación y en el tránsito.



El plano orbital de casi todos los satélites mencionados de Saturno está muy próximo al plano ecuatorial del planeta, excepto el de Japeto que tiene una inclinación de unos 14° . Pero presentan una gran diferencia con respecto a los de Júpiter: dado que el eje polar de Saturno está inclinado con respecto a su órbita, los satélites pueden verse por encima o por debajo del planeta, además de al este o al oeste. Esto hace que sean más difíciles de identificar, ya que es más fácil confundirlos con estrellas.

Cuando el plano del ecuador de Saturno se ve de canto desde la Tierra, cosa que ocurre una vez cada 15 años aproximadamente, no sólo se nota la desaparición de los anillos, sino que algunos satélites dan lugar a los mismos fenómenos señalados para las lunas de Júpiter, es decir: eclipses, tránsitos y ocultaciones tanto de tipo clásico como mutuo.

Fenómenos mutuos

Cada 5,93 años, el plano orbital de los satélites de Júpiter coincide con la línea de visión desde la Tierra. Se producen entonces los llamados «fenómenos mutuos», en que los propios satélites producen ocultaciones y eclipses entre ellos. Durante varios meses se suceden cientos de estos fenómenos.

Aunque Galileo ya había advertido en 1610 un eclipse clásico del satélite Europa, no fue hasta 1693 cuando un granjero llamado Arnoldt observó por primera vez un fenómeno mutuo: la ocultación de Europa por Ganímedes. Sin embargo la primera observación de carácter científico se atribuye al astrónomo catalán Josep Comas Solà, quien en 1891 registró una ocultación parcial entre lo y Europa.

En 1917, el reverendo Espin publica la observación del primer fenómeno de un satélite eclipsado por la sombra de otro. Tres años después se intentaron predecir algunos eclipses, pero apenas se pudieron observar por la imprecisión de las efemérides.



No fue hasta la década de los años 1960, cuando gracias a los avances tecnológicos se hicieron efemérides fiables.

Hay que tener en cuenta que la trayectoria de un satélite galileano está regida por Júpiter y el Sol, pero perturbado en mayor o menor medida por los otros tres satélites y también por Saturno. Esto hace que sus movimientos sean muy complejos, si se quiere alcanzar una buena precisión. En 1977 Lieske publicó su teoría del movimiento de los satélites galileanos basadas en 8.800 observaciones fotográficas y medidas de eclipses. Fueron modificadas por Arlot en 1982 permitiendo la elaboración de tablas muy precisas de los fenómenos mutuos.

Hoy en día se puede determinar la posición de los satélites con una precisión de pocas centésimas de segundo de arco. Ello supone conocer dónde se sitúa el satélite con una incertidumbre de unos cuantos cientos de kilómetros. Gracias a las determinaciones cada vez más precisas de los fenómenos mutuos se van afinando mejor las teorías del movimiento de los satélites galileanos.

Los fenómenos mutuos se pueden clasificar en dos tipos: **ocultaciones** y **eclipses**.

Las ocultaciones suceden cuando se encuentran alineados dos satélites con respecto a la Tierra y pueden ser rasantes, parciales, anulares o totales, según el diámetro aparente de los satélites (figura 5).

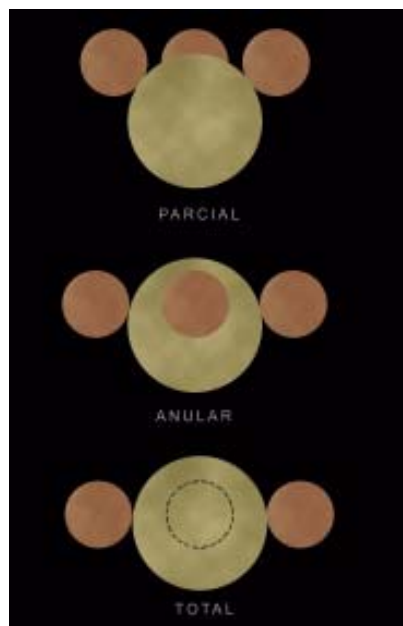


Figura 5.
Ocultaciones y tránsito
de los satélites galileanos
de Júpiter.
(créditos J.C. Casado).

Los eclipses se producen cuando están alineados dos satélites con respecto al Sol (figura 6).

La sombra de uno de ellos se proyecta sobre el otro y lo eclipsa. No necesariamente el satélite más externo



es el que produce la sombra ya que, si están en el lado más lejano de la órbita, será el satélite interno el que eclipsará al más externo. Los eclipses pueden ser totales, parciales, anulares y penumbrales. En ese sentido son semejantes a los eclipses terrestres. Visto desde el Sol, lo que en la Tierra es un eclipse, desde allí sería una ocultación.



Figura 6. Esquema explicativo de los eclipses y las ocultaciones de los satélites galileanos (créditos J.C. Casado).

Además, como los fenómenos mutuos pueden acontecer en cualquier punto de las órbitas, es posible una variedad amplísima de eventos, a cual más sorprendente. Por ejemplo, es posible asistir al eclipse por la sombra de Júpiter de un satélite previamente eclipsado u ocultado por otro, configuraciones que impliquen a más de dos satélites (eclipse u ocultación de un satélite que a su vez está ocultando o eclipsando a un tercero), e incluso una serie de ocultaciones alternativas y eclipses durante varias horas seguidas.

En cuanto a la duración de estos fenómenos, también puede hallarse una gran diversidad que va desde varias horas (hasta 4 y más) a menos de 1 segundo en el caso de las ocultaciones rasantes, siendo un valor bastante frecuente entre los 5 y 10 minutos. Por tanto, suele tratarse de fenómenos de muy rápida evolución, lo cual debe tenerse en cuenta en el momento de observarlos.

Aparte del interés científico, la observación de los fenómenos mutuos de los satélites galileanos es uno de los acontecimientos más bellos que pueda contemplarse en el Sistema Solar. La última vez en que tuvieron lugar estos fenómenos fue en 2003, llevándose a cabo una campaña internacional de observación denominada PHEMU03, en la que participaron activamente los aficionados.

Cada 15 años también pueden contemplarse fenómenos mutuos entre los satélites de Saturno, aunque éstos presentan un brillo superficial unas 100 veces inferior al de los satélites galileanos y su observación se dificulta mucho más. La última configuración favorable fue en 1995, durante la cual se realizaron observaciones por todo el mundo coordinadas por el Bureau des Longitudes (Francia).



Cálculo de la velocidad de la luz con las lunas de Júpiter

La primera tentativa de medir la velocidad de la luz fue realizada por Galileo, utilizando a un ayudante colocado a gran distancia en el campo con una vela y un obturador. Su resultado fue negativo puesto que, como se sabría después, la velocidad es demasiado grande para poder medirse con un método tan tosco.

Durante la década de 1670, el astrónomo danés Ole Roemer estaba haciendo una observación muy cuidadosa de Io, uno de los satélites galileanos de Júpiter. Esta luna completa una órbita cada 1,76 días; este tiempo siempre es igual, así que Roemer esperaba poder predecir su movimiento con gran precisión.

Para su asombro, descubrió que la luna no siempre aparecía donde se suponía que debía estar. En ciertos períodos del año parecía estar atrasada en su horario y en otros se adelantaba. Roemer notó que lo parecía adelantarse en su órbita cuando la tierra estaba más cerca de Júpiter y que parecía atrasarse cuando la Tierra estaba más lejos.

La explicación a estos cambios radica en que cuando Júpiter está más lejos, la luz necesita más tiempo para llegar a la Tierra, de forma que Roemer estaba viendo a lo en una posición más retrasada que usualmente. Y lo opuesto ocurría cuando Júpiter y la Tierra estaban más cerca. Así que lo no estaba cambiando su órbita; simplemente parecía estar en diferentes lugares dependiendo de cuánto tiempo tardara su luz en llegar a la Tierra (figura 7).

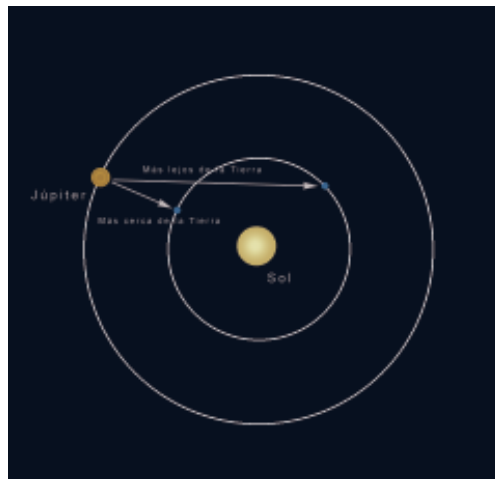


Figura 7. Variación de la distancia Tierra-Júpiter que utilizó Roemer para determinar la velocidad de la luz.

Así, conociendo la aparente variación en el ritmo de la órbita de lo y sabiendo cuánto varía la distancia entre la Tierra y Júpiter, Roemer fue capaz de calcular el valor de la velocidad de la luz, obteniendo un valor de 225.000 km/s. Actualmente, la velocidad de la luz está establecida en 299.792 km/s.



1.2 Ocultaciones de estrellas por la Luna.

En su movimiento por el cielo nuestro satélite natural oculta a estrellas de diverso brillo. Cada mes se producen más de treinta ocultaciones estelares que están al alcance de un pequeño telescopio de aficionado.

Las ocultaciones de estrellas por la Luna se clasifican en ocultaciones **normales** y ocultaciones **rasantes**.

1.2.1 Normales.

Una ocultación normal tiene lugar cuando la estrella es tapada por el disco lunar en zonas no situadas en sus extremos norte o sur. En una ocultación normal solamente se puede ver una **desaparición** o **inmersión** y una **reaparición** o **emersión**. La estrella puede estar oculta más de una hora tras el disco lunar.

Según la fase lunar, las condiciones de observación pueden variar mucho. Si la Luna está en fase creciente, la inmersión se produce por el limbo oscuro y la observación es muy fácil de realizar. La emersión en este caso tendrá lugar por el limbo iluminado y será muy difícil determinarla porque la estrella quedará deslumbrada y además resultará problemático establecer con precisión por dónde aparecerá (figura 8).

Cuando la Luna se encuentre en fase menguante, la observación de la inmersión será complicada pues se producirá por la zona iluminada del disco lunar. También la emersión presentará dificultades, pues aunque se produzca en el limbo oscuro, resultará difícil precisar el punto de reaparición (figura 9).





Figura 8.
Condiciones de observación, según la fase lunar, de una ocultación normal estelar por la Luna (créditos J.C. Casado).

A todo esto hay que añadir la dificultad de que cuanto menor sea el brillo de la estrella más dificultosa resultará la observación (figura 8). Asimismo, la fase de la Luna influirá, perjudicando la observación, a medida que sea más cercana a la Luna Llena.

Figura 9.
Fotografía de la reaparición de la estrella Aldebarán (a la derecha) tras la Luna (créditos J.C. Casado).



En ocasiones, estrellas dobles muy cerradas han sido detectadas en una ocultación al observarse un ligero desvanecimiento de la estrella instantes antes de ser ocultada.

Incluso se ha podido medir el diámetro de estrellas supergigantes por la disminución progresiva de su luz.

El interés científico de estas observaciones reside en que permite determinar con gran precisión la posición de nuestro satélite en su órbita alrededor de la Tierra.



1.2.1.1 Actividad 1: Ocultación estelar normal por la Luna

Se puede registrar una ocultación estelar por la Luna y su posterior reaparición visualmente. Aunque existen medios más precisos como la fotometría fotoeléctrica, estadísticamente se comprueba que el promedio de cuatro observaciones visuales equivalen a una fotométrica.

Debe tenerse en cuenta que las efemérides sólo dan los tiempos previstos para algunas localidades. A no ser que hayan sido calculadas para nuestra posición geográfica, no serán exactas. Por ello, se deberá comenzar a observar unos minutos antes de la hora prevista.

Instrumentación necesaria

Telescopio con abertura mayor de 6 cm.

Cronómetro o reloj con cronógrafo.

Fuente de señales o patrón horario de precisión (valen las señales horarias de RNE).

Metodología

Un elemento imprescindible en las ocultaciones en general es el conocimiento exacto de la hora. Para ello deben sincronizarse los sistemas de registro con la escala TUC (Tiempo Universal Coordinado) o TU. Los laboratorios de hora de cada país difunden señales horarias a través de la radio en distintas frecuencias, algunos de forma continua, que indican el principio de cada hora, minuto y segundo, en la mayoría de los casos en TUC. En España esta función recae en la Sección de Hora del Real Instituto y Observatorio de la Armada en San Fernando (RIOASF), que realiza emisiones en 15.006 y 4.998 kHz entre las 10:00 y 11:00, en la escala TUC. Desde el Observatorio Nacional, en Madrid, se difunden las señales que recibimos a través de RNE cada media hora, en la escala TU. Otras emisoras se relacionan en la figura 10.



EST	LUGAR	F (MHz)	PERIODO	CARACTERÍSTICAS DE LA EMISIÓN
DCF77	Neunglingen Alemania	77.5	Continuo	Año, mes, día de la semana insertado en BCD entre los seg. 21 y 59 En el 0, la duración es de 0.1s y el 1 de 0.2s. No transmite DUT1
EBC	San. Fdo. España	15.006 4.998	10.00-10.25 10.30-10.55	Segundos, mediante pulsos de 0.1s con una frecuencia de 1kHz Minutos, mediante pulsos de 0.5s con una frecuencia de 1.25kHz DUT1 insertado según norma CCIF
MSF	Rugby Gran Bretaña	80	Continuo	Interrupciones de la portadora de 0.1s para los segundos y de 0.5s para los minutos. Código BCD NDT, a 100bits para indicar mes, día, hora y minuto. DUT1 insertado según norma CCIF
WWV	Fret Collins USA	2500 5000 10000 15000 20000	Continuo	Segundos, mediante pulsos de 0.5s con una frecuencia de 1kHz. Se emiten los segundos 29 y 59. Minutos, mediante pulsos de 0.5s con una frecuencia de 1kHz Horas, mediante pulsos de 0.8s con una frecuencia de 1.500kHz
BPM	Puchang China	5000 10000	Continuo	Segundos, mediante pulsos de 0.1s con una frecuencia de 1kHz Minutos, mediante pulsos de 0.3s con una frecuencia de 1kHz Se emite en UTC desde los minutos 0-10,15-

Figura 10. Algunas emisoras de radio en onda corta que emiten patrones horarios.

Igualmente, por Internet se pueden obtener patrones horarios o sincronizar el reloj del ordenador con el de relojes atómicos (véase apartado 1.7 «**Recursos en Internet**»).

Tras ajustar el cronómetro o cronógrafo con las señales horarias, estaremos atentos para detenerlo en el momento de la desaparición o reaparición de la estrella.

El tiempo que se registra no es el de la ocultación en sí misma. Para obtenerlo se debe sustraer la llamada **ecuación personal**, que es el tiempo de reacción o retraso entre el evento real y cuando se detiene el cronómetro (véase apartado 1.7 «**Recursos en Internet**»). Este tiempo es particular de cada persona, acostumbrando a ser de 2 ó 3 décimas de segundo, aunque en las condiciones de observación de una ocultación será mayor.

El tiempo final así obtenido se debe redondear a décimas de segundo. Las observaciones con precisión de segundos no tienen validez científica.

Una vez realizada la observación, se deben consignar los datos en el formato siguiente:

- Nombre del observador.
- Población desde donde se ha observado.



- Coordenadas geográficas con precisión de segundos de arco y altura.
- Telescopio (refractor, reflector, catadióptrico y su tipo: newton, cassegrain, etc..).
- Diámetro y distancia focal (en cm).
- Nombre de la estrella (aparece en las efemérides).
- Fecha de la observación.
- Hora de la ocultación (con precisión de DÉCIMAS DE SEGUNDO).
- Valor de la Ecuación Personal que ha sido sustraída.
- Condiciones ambientales (viento, crepúsculo, luces, etc.).
- Cualquier hecho que se considere destacable (ocultación gradual, limbo oscuro visible, etc.).

Los resultados se enviarán a centros especializados que coordinan este tipo de observaciones, como la IOTA o la European Asteroidal Occultation Network (EAON). En el apartado 1.7 se indican sus direcciones de contacto.



1.2.2 Rasantes.

Una ocultación rasante tiene lugar cuando la estrella es ocultada por el extremo norte o sur de la Luna, pasando tangente al disco. Estas ocultaciones duran tan sólo unos pocos minutos.

En una ocultación rasante se puede ver cómo la estrella se oculta y reaparece varias veces entre las montañas de la Luna, resultando un fenómeno muy espectacular (figura 11).

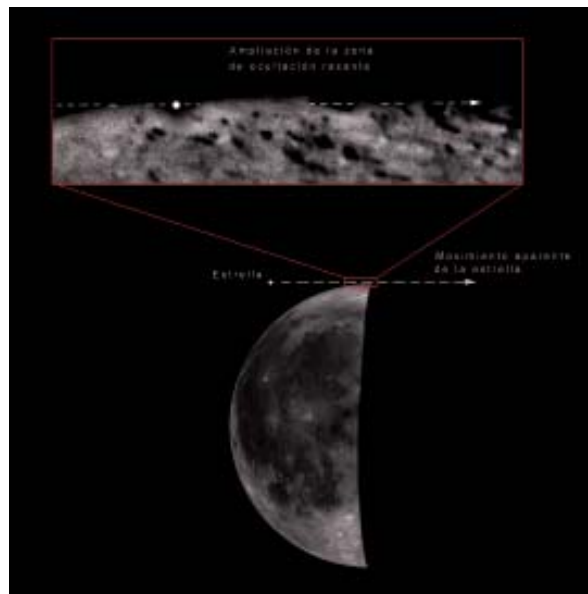


Figura 11. Esquema de una ocultación rasante de estrella por la Luna. En la parte superior se muestra ampliada la zona de ocultación con el accidentado perfil lunar y las sucesivas ocultaciones-reapariciones (créditos J.C. Casado).

Estas ocultaciones son mucho menos frecuentes que las normales y su visibilidad se reduce a una estrecha franja geográfica de típicamente 1 ó 2 km de anchura. Fuera de esta estrecha banda, la estrella quedará oculta por la Luna, dando lugar a una ocultación normal, o no llegará a ocultarse, pasando junto al disco lunar.

Debido a la necesidad de distinguir con detalle el perfil lunar durante la ocultación, es necesario observar con un telescopio de cierta potencia que permita aumentar suficientemente la imagen y esté provisto de seguimiento ecuatorial.

Las efemérides de la ocultación rasante se calculan sobre el perfil teórico lunar y al nivel del mar. Posteriormente, el perfil deberá ser corregido, con lo que se produce un desplazamiento del recorrido de visibilidad que puede alcanzar varios kilómetros.

Las observaciones de ocultaciones rasantes ayudan a mejorar el conocimiento del perfil lunar, lo que es útil para el análisis y las predicciones de eclipses.

1.2.2.1 Actividad 2: Ocultación estelar rasante por la Luna

La observación de una ocultación rasante requiere unas efemérides muy precisas del fenómeno que se pueden obtener en instituciones como la IOTA o el ILOC (International Lunar Occultation Center) (Véase direcciones en «**Recursos en Internet**»). Como esta práctica resulta complicada, se requiere una adecuada preparación y organización.

Es recomendable que antes se haya adquirido algo de experiencia registrando ocultaciones y reapariciones normales de estrellas por la Luna, ya que este tipo de observaciones exigen cierta complejidad instrumental y metodológica.

La determinación del lugar de observación debe ser efectuada cuidadosamente, dentro del error que conllevan las predicciones realizadas, a fin de asegurar la visibilidad del fenómeno.

Por ello es muy conveniente disponer varios equipos de observadores situados en perpendicular a la banda de ocultación, emplazados a unos cientos de metros a uno y otro lado del recorrido de visibilidad previsto (figura 12).



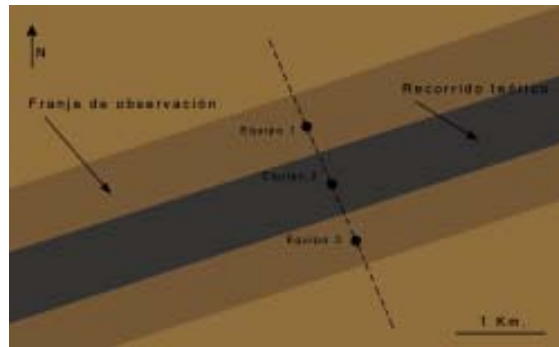


Figura 12. Ejemplo de la zona de visibilidad de una ocultación rasante de estrella por la Luna. Desde la banda del recorrido teórico es posible registrar el fenómeno basándonos en las previsiones calculadas (equipo 2). Sin embargo, es conveniente establecer alrededor de ésta una franja de observación que cubra el área prevista de indeterminación, situando equipos de observación a ambos lados (equipos 1 y 3).

Aunque la observación puede hacerse visualmente, la necesidad impuesta por las, en ocasiones, rápidas apariciones y reapariciones sucesivas y el registro riguroso del tiempo de todo el evento hacen que sistemas electrónicos de registro de imagen como las cámaras de vídeo sean los más adecuados.

Asimismo se debe tener en cuenta que la duración de una ocultación rasante es muy pequeña, por lo que es aconsejable preparar con el mayor cuidado posible todos los elementos necesarios, y proceder a la instalación y comprobación de éstos con la suficiente antelación.



Instrumentación necesaria

Telescopio con abertura mínima de 15 cm.

Cámara de video o de videovigilancia con adaptador al telescopio.

Fuente de señales o patrón horario de precisión (valen las señales horarias de RNE) y preferiblemente emisoras de ondas cortas.

Receptor de onda corta.

Mapa topográfico local y receptor GPS.

Requerimientos

La obtención de datos ha de ser un proceso muy riguroso. Éstos deben remitirse posteriormente a la IOTA (International Occultation Timing Association) que en base a los informes recibidos efectuará su análisis y reducción. Esta precisión es fundamental, a efectos del estudio de los resultados, básicamente en dos aspectos:

1. La localización exacta, con una precisión de 1" en latitud y longitud, del lugar donde se lleva a cabo la observación, así como la altura sobre el nivel del mar. Este último dato, con un error máximo de 30 m.
2. El cronometraje de los tiempos de cada uno de los fenómenos observados. En este aspecto pueden influir la base de tiempos escogida y el sistema utilizado. Por ello se recomienda una emisora de señales horarias en ondas cortas.

Metodología

Una vez determinado el lugar de observación y puesto en estación el telescopio, se centrará la estrella poniendo en marcha la grabación en vídeo de la cámara que se haya acoplado al telescopio con suficiente antelación al inicio previsto del evento. El receptor de onda corta con la emisora previamente seleccionada y comprobada se colocará cerca de la cámara, de manera que ésta vaya grabando los registros sonoros de las señales horarias.

Es muy recomendable disponer de un observador visual con otro telescopio provisto de algún sistema de registro temporal múltiple y bien sincronizado con un patrón horario por si el sistema de vídeo fallara o la recepción de las señales horarias fuera deficiente.

Tanto si se ha producido la ocultación rasante como si el resultado es negativo, los datos o la grabación deben enviarse a centros como la IOTA o el ILOC, junto con todos los datos pertinentes mencionados anteriormente (nombre de la estrella, fecha, telescopio, localización, etc.)

1.3 Ocultaciones de estrellas por asteroides

Los **asteroides** son objetos rocosos y metálicos que orbitan alrededor del Sol, pero demasiado pequeños para ser considerados como planetas. Su aspecto, vistos al telescopio, es puntual, como el de las estrellas. Se les conoce asimismo como **pequeños planetas** o **planetoides**.

El tamaño de los asteroides varía desde el de Ceres, que tiene un diámetro de unos 1.000 km, hasta las dimensiones de un guijarro. 16 asteroides tienen un diámetro igual o superior a 240 km. Se han encontrado desde en el interior de la órbita de la Tierra hasta más allá de la órbita de Saturno. La mayoría, sin embargo, están contenidos dentro del **cinturón principal** o **cinturón de asteroides** (figura 13) que existe entre las órbitas de Marte y Júpiter. Algunos tienen órbitas que atraviesan la trayectoria de la Tierra -los denominados NEAs, de Near Earth Asteroids- e incluso ha habido otros que han chocado con nuestro planeta en tiempos pasados.

Antes de 1991 la única información obtenida sobre los asteroides era a través de las observaciones realizadas desde la superficie terrestre. En 1991 el asteroide Gaspra fue visitado por la sonda espacial Galileo y se convirtió en el primer asteroide del que se obtenían imágenes de alta resolución. Más tarde, en 1993



la Galileo se acercó al asteroide Ida. Se confirmó que esos cuerpos no tienen en general forma esférica sino irregular, y están llenos de impactos de colisiones que tuvieron lugar en la época de formación del sistema solar. Actualmente se estima que existen unos dos millones de asteroides.

Al igual que la Luna, los asteroides en su movimiento aparente por el cielo pasan en ocasiones por delante de alguna estrella produciendo una ocultación. La probabilidad de observar este tipo de eventos con un asteroide concreto es muy baja y la franja de visibilidad reducida, con una forma similar a la del asteroide y un tamaño proporcional al de éste, que va desde decenas hasta centenares de kilómetros.

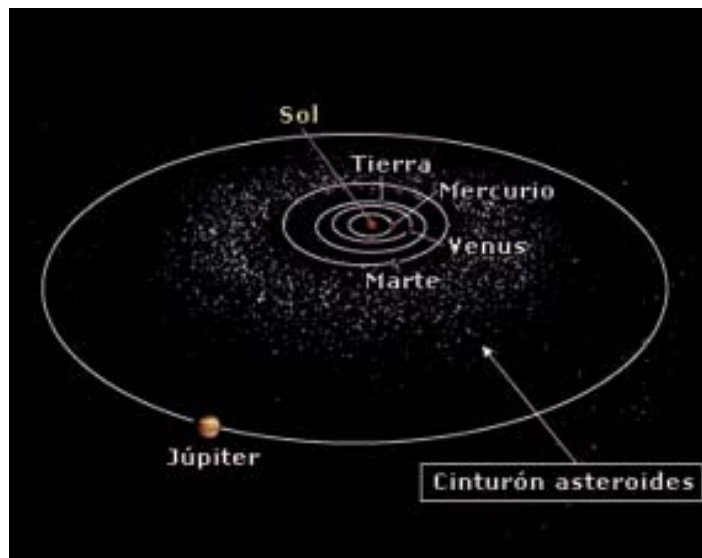


Figura 13.
Situación del cinturón principal de asteroides.

1.3.1 Asteroides simples

Sin embargo, al existir millares de asteroides catalogados, las ocultaciones de estrellas por alguno de estos cuerpos se dan con una frecuencia relativamente elevada, aproximadamente a un promedio de una por semana con posibilidad de ser observada desde una determinada localidad (figura 14).

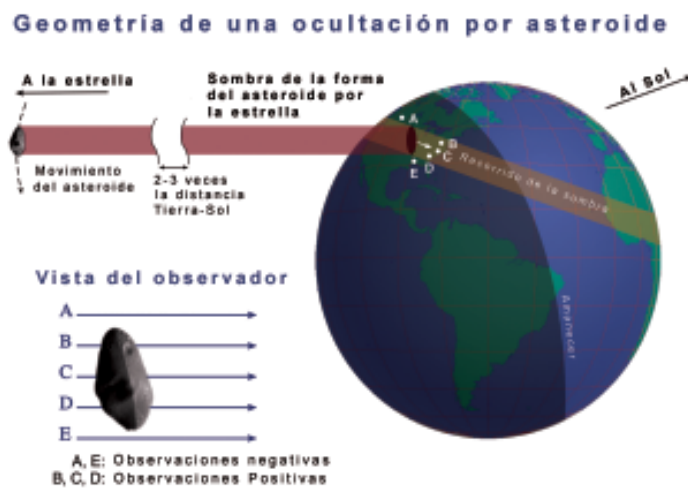


Figura 14. Representación esquemática de una ocultación de estrella por asteroide. El asteroide (situado a una distancia típica de 2 ó 3 veces la de la Tierra al Sol) oculta a la estrella siguiendo una trayectoria que determina el recorrido de su sombra por la superficie de la Tierra. Situando a observadores dispuestos perpendicularmente a este recorrido es posible establecer con precisión su forma y dimensiones (créditos David W. Dunham, IOTA / Johns Hopkins Univ. – Applied Physics Lab.)

Durante la ocultación se aprecia una disminución del brillo de la estrella eclipsada, hasta alcanzar la magnitud del asteroide (esto es porque la estrella ocultada es más brillante que el asteroide) en la mayoría de los casos. Esta caída de magnitud puede ser registrada visualmente o mediante medios electrónicos, como vídeo, fotómetros o CCD. Su duración y amplitud depende del tamaño del asteroide y de su velocidad relativa al observador.

En el caso de que la caída de brillo rebase la magnitud límite del instrumento con el que se observe, se apreciará una desaparición y posterior reaparición de la estrella. Este fenómeno se producirá de forma brusca, del mismo modo que en las ocultaciones por la Luna, al no estar presente una atmósfera a su alrededor.



El interés por este tipo de fenómenos comenzó en 1952, cuando Gordon Taylor propuso el seguimiento de alguno de estos sucesos con el objetivo de intentar averiguar parámetros morfológicos de los asteroides. Sin embargo, no fue hasta el 19 de febrero de 1958 cuando fue observada por primera vez la desaparición de una estrella por el asteroide Juno, uno de los mayores, de 245 km de diámetro. La siguiente ocultación observada, que tuvo lugar el 10 de febrero de 1961, fue la primera registrada fotoeléctricamente. En los años 1970 se mejoró el conocimiento de las órbitas de los asteroides y las técnicas de astrometría. Y a partir de 1997, con los datos astrométricos del catálogo Hipparcos, las predicciones se hicieron considerablemente más precisas.

La dificultad principal de estas observaciones consiste en la estrecha banda de visibilidad de la ocultación y en la imprecisión con que es conocida la trayectoria del asteroide, sometido a perturbaciones gravitatorias que lo apartan de su trayectoria prevista. Esto puede hacer que el recorrido de la banda de visibilidad prevista para la Tierra pueda desviarse en varios cientos de kilómetros.

El cronometraje preciso de ocultaciones de estrellas por asteroides y sus posteriores reapariciones proporciona valiosas informaciones científicas del asteroide como:

- 1) El instante de la ocultación determina su posición con exactitud, lo que permite comprobar sus efemérides, y ayuda a actualizar los elementos perturbadores orbitales.
- 2) La forma y anchura de la banda de visibilidad proporciona su tamaño y forma con precisión. Situando observadores a lo ancho de la franja prevista para la ocultación, será posible reconstruir su perfil con gran fiabilidad.

Los observadores que no observen el evento también aportan datos de gran valor, pues determinan los límites del asteroide o indican perturbaciones en su órbita (figuras 15 y 16)





Figura 15. Forma y dimensiones del asteroide Cleopatra basadas en los resultados obtenidos por diversos observadores en Estados Unidos el 19 de enero de 1991 con motivo de la ocultación de una estrella. El recuadro muestra el recorrido de la zona de ocultación sobre Estados Unidos. Nueve de los observadores registraron la desaparición y posterior reaparición de la estrella, proporcionando la silueta del asteroide. Las líneas discontinuas indican lugares donde no se observaron ocultaciones (créditos IOTA).

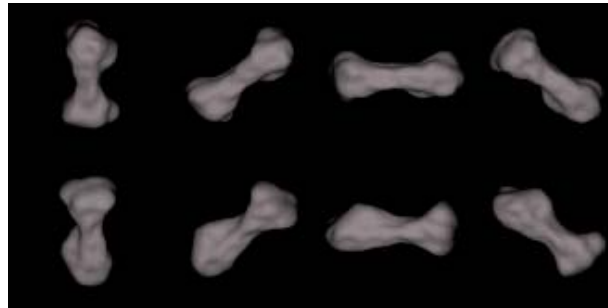


Figura 16. Forma del asteroide Cleopatra según observaciones de radar llevadas a cabo desde el radiotelescopio del Observatorio de Arecibo (Puerto Rico) el año 2000 (créditos Steve Ostro/JPL).

1.3.1.1 Actividad 3: Ocultaciones estelares por asteroides

Ante todo hay que indicar que es necesario ser muy perseverante en este tipo de observaciones ya que, a pesar de producirse con cierta frecuencia, la probabilidad real de registrar la ocultación es reducida, dado el grado de incertidumbre de las trayectorias previstas.



Es conveniente vigilar todos los fenómenos, aunque la banda de ocultación muestre que el evento no será visible desde la localidad del observador, pues como hemos visto anteriormente, la imprecisión puede alcanzar en ocasiones cientos de kilómetros. Esta zona de incertidumbre suele aparecer señalada en los mapas donde se traza la banda de ocultación.

La duración del fenómeno suele ser muy corta, generalmente del orden de unos pocos segundos pero, al no conocerse las efemérides con la debida precisión, es necesario observar durante unos 25 ó 30 minutos, aproximadamente desde unos 15 minutos antes hasta unos 15 minutos después de la hora prevista.

Instrumentación y material

Telescopio con abertura mínima de 10 cm, preferiblemente con montura ecuatorial motorizada.
Camara de vídeo o de videovigilancia con adaptador al telescopio, si se va a realizar la observación por este medio.

Fuente de señales o patrón horario de precisión (valen las señales horarias de RNE) y preferiblemente emisoras de ondas cortas.

Mapa de la trayectoria del eclipse por la Tierra y mapas de detalle locales.

Cartas celestes de localización de la estrella y trayectoria del asteroide en el cielo (en muchas ocasiones éste no resulta visible).

Mapa topográfico local y receptor GPS.

Consideraciones y condiciones de observación

La información presentada en las efemérides sobre ocultación por asteroide se refiere a los datos de éste y la estrella que interviene, trayectoria prevista para la sombra sobre la superficie terrestre y zona de incertidumbre, y una carta para ayudar a la localización de la estrella. Además, se incluyen otras informaciones como la hora prevista de la conjunción geocéntrica (tomando como referencia el centro de la Tierra), el tiempo en el que hay que permanecer atento (unos 30 minutos habitualmente), la distancia angular de la estrella al Sol y a la Luna, así como el tanto por ciento de iluminación de esta última (fase lunar). La zona de incertidumbre se extiende hasta aquella posición que ocuparía la trayectoria de existir un error de 1" en la posición del asteroide (figura 17).



773 Irmintraud – HIP 186

2004 Jul 21 1^h11.4^m U.T.

Planet ()			Star ()		Source ref. HIP
V. Mag. = 13.68	Dist. = 80.1 klt = 806"		$K = 0.707^{th} 94.160^{th}$	$\Delta \alpha = 0^h 15.794.55^s$	
$\mu = 21.800^s$	$\delta = 4.18^s$	Ref. = IOT186A.DOT	V. Mag. = 6.39	Pr. Mag. = 8.87	
$\Delta \alpha = 7.5$	Rel. S.Z. = 11.7s		Sun : 114°	Moon : 152° , 10%	

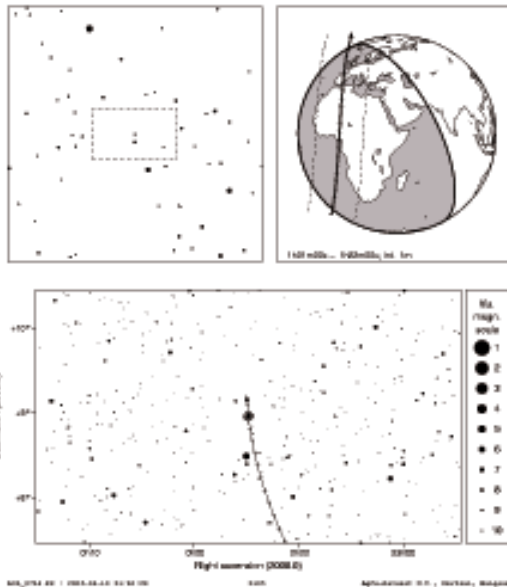


Figura 17. Mapa previsto de información y la ocultación de la estrella HIP 186 (magnitud 6,39) por el asteroide Irmintraud que tendrá lugar el 21 de julio de 2004. Según puede verse en el mapa, la franja prevista de ocultación pasará por la región valenciana, sur de Aragón, La Rioja y País Vasco. La banda paralela trazada con líneas discontinuas representa la zona de indeterminación (créditos IOTA).

En el caso de tener certeza sobre la trayectoria a seguir por la sombra, deberían situarse observadores a intervalos equidistantes y a lo ancho de ésta. Si esto no es posible, cualquiera en la zona de incertidumbre estaría en condiciones de registrar un fenómeno positivo, por lo que su seguimiento es de utilidad. En ambos casos, las posiciones geográficas deben obtenerse de mapas topográficos de escala 1:25.000 ó 1:50.000, o bien mediante el uso de sistemas GPS, expresándose éstas con máximo de 1" de error en longitud y latitud, y de 30 m en altitud.

Actualmente, este tipo de efemérides son calculadas en primera instancia por E.Goffin, y son distribuidas anualmente por la EAON (European Asteroidal Occultation Network) y la IOTA (International Occultation Timing Association). Una copia de las mismas puede ser solicitada directamente al autor o consultadas en Internet (véase apartado 1.7 «**Recursos en Internet**»).

El registro del tiempo se hará de la forma más precisa posible, tal como se ha indicado en las prácticas de ocultaciones de estrellas por la Luna.

El desarrollo de una ocultación estelar por asteroide puede ser de dos formas:



1) Si el asteroide es brillante o si se utiliza un telescopio de suficiente potencia, puede verse cómo se va acercando lentamente a la estrella, hasta que se funden en un solo punto, ya que la separación entre ambos astros llega a ser inferior al poder resolutivo del telescopio. Así transcurre durante algunos minutos hasta que, si tiene lugar la ocultación, bruscamente desciende el brillo de la estrella hasta alcanzar el del asteroide, el único astro visible en ese momento. Normalmente, estas caídas de luz son de varias magnitudes, aunque en ocasiones el asteroide y la estrella pueden tener brillos similares. Lo habitual es que la ocultación sea instantánea pero, si la estrella es de gran diámetro, el descenso de luz puede ser gradual, durando incluso algunos segundos. Tampoco es raro que el descenso de luz sea doble, bajando primero a cierto valor y luego hasta otro inferior, caso de que la estrella sea una doble cercana. Al final del fenómeno, todo se repite simétricamente, viéndose cómo el asteroide se va separando lentamente de la estrella.

2) Normalmente con telescopios pequeños de aficionado, observando desde lugares afectados por contaminación lumínica, el asteroide no llega a verse. El observador debe concentrarse en el seguimiento visual de la estrella, sin perderla de vista en ningún momento mientras dure la vigilancia. Como puede que el período de atención resulte largo y fatigoso, se recomienda que se constituyan equipos o estaciones de observación formados por dos o más personas con sus respectivos telescopios. Esto es muy útil ya que en tal caso pueden confirmarse o descartarse observaciones dudosas, aparte de que se asegura una vigilancia continua.

Hay que tener en cuenta que tan importante es una observación positiva como una negativa. El no registrar una ocultación puede servir para delimitar la línea de visibilidad y también para acotar las dimensiones y el perfil del asteroide. Por tal motivo, cuando el asteroide resulta visible, se pide al observador que señale la trayectoria del planeta con relación a la estrella, indicando si pasó por ejemplo por el Norte o por el Sur, así como la distancia estimada en el momento de su separación mínima y la hora.



Metodología

Existen diversos sistemas de registrar la observación, algunos de gran precisión, pero que exigen un instrumental especializado. Aquí consignamos los dos más sencillos: el visual y el videográfico.

1) Visual. Es un sistema que se encuentra al alcance de cualquiera y el más recomendable para comenzar. El seguimiento de la estrella se realiza visualmente a través del telescopio. La localización de la estrella debe ser lo más segura posible. Lo mejor es situarse con tiempo ante el ocular e inspeccionar el campo con detenimiento. El sistema de registro más utilizado es el de la grabadora de sonidos, aunque la toma de tiempos con un simple cronómetro con memoria será suficiente (éste debería guardar, al menos, dos tiempos). En el caso de optarse por el uso de la grabadora, debe comprobarse su correcto funcionamiento (por ejemplo con pilas frescas), e insertar unas señales horarias a lo largo de la grabación para que sirvan de base de tiempos al reproducirla.

2) Vídeo. Las cámaras de vídeo domésticas se convierten en una herramienta muy útil, al estar al alcance de mucha gente, ser un sistema totalmente objetivo y poder conservar la grabación para estudios futuros. Se trata de insertar unas señales horarias al principio y final de la grabación, o mejor aún durante ésta si se tiene cerca un receptor de onda corta, y acoplar la cámara al telescopio para seguir la estrella. Al no ser común la óptica intercambiable entre las cámaras de aficionados, se hace preciso idear algún sistema para acoplarlas a la óptica del telescopio, en este caso provisto de un ocular de bajo aumento.

Si el registro es positivo, la determinación de los instantes se lleva a cabo visualizando la cinta cuadro a cuadro, con lo que la precisión será el inverso del número de imágenes por segundo, $1/25$ s en el mejor de los casos. Además, es posible digitalizar la parte de la secuencia que interese para reconstruir la curva en el caso de estrellas con diámetros aparentes apreciables. La velocidad de obturación dependerá de la visibilidad de la estrella.



La utilización de intensificadores de luz puede ayudar a disminuir los tiempos o ganar en el seguimiento de estrellas más débiles.

En el caso de que la estrella no sea detectable por el sistema telescopio-videocámara, se puede utilizar ésta como si se tratase de una grabadora de sonidos normal, registrando sólo el audio de la observación. La relación de velocidad de grabación/reproducción de las videocámaras es mejor que la de las grabadoras de sonido, con lo que no habrá errores en los tiempos al ser reproducida la cinta (figura 18).

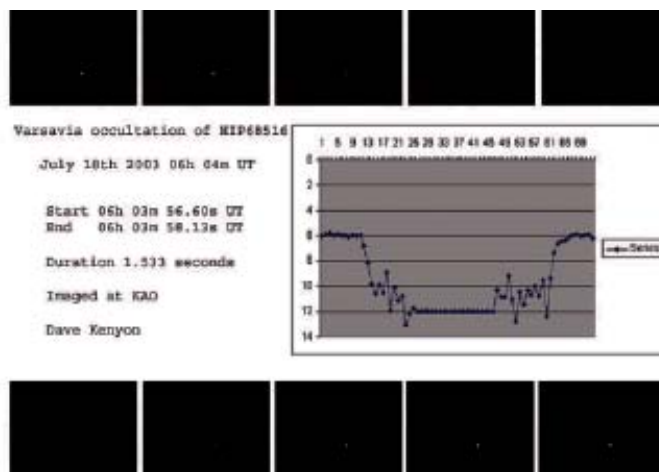


Figura 18. Fotogramas de un vídeo que capta la ocultación de una estrella por el asteroide Varsavia. El recuadro muestra la curva de luz del evento (créditos Dave Kenyon).

1.3.2 Asteroides binarios

Las observaciones de los cráteres pares en la Tierra y en otros cuerpos llevó a los astrónomos a sospechar la existencia de asteroides binarios o dobles. Sin embargo, no fue hasta 1993 cuando, en su viaje a Júpiter, la sonda espacial Galileo captó el primer asteroide binario: Ida. Asteroide de tipo rocoso del cinturón principal, Ida tiene un tamaño de 58x23 km. Su satélite, Dactyl, orbita a 90 km de Ida y es casi esférico, algo sorprendente para un cuerpo que mide 1,5 km de diámetro (figura 19).



Figura 19. Imagen del asteroide Ida con su pequeña luna Dactyl (a la derecha) captada por la sonda Galileo (créditos NASA).



A partir de entonces se han descubierto nuevos asteroides binarios. Estos asteroides dobles son extremadamente desiguales. Pares, como Antiope, son casi gemelos, de unos 80 km de diámetro. Algunos, como 2000 DP107, son también casi del mismo tamaño, pero tienen apenas centenares de metros de diámetro. Otros son notablemente más asimétricos, como en el caso de Sylvia, que con 282 km de diámetro tiene una luna de apenas el 5% de esas dimensiones.

Los asteroides binarios parecen ser más frecuentes de lo que se pensaba. En los NEAs se piensa que el 16% de los asteroides mayores de 200 m son dobles. El estudio de las órbitas de un sistema doble ayuda a determinar sus masas, volumen, estructura interna y composición.

El primer asteroide binario detectado desde la Tierra fue el 2000 DP107, encontrado por radar en septiembre de 2000. Mediante observaciones complementarias realizadas desde el observatorio de Arecibo, se encontró que su satélite, de 300 m, presentaba siempre la misma zona orientada al cuerpo mayor, tal como ocurre con la Luna.

Las colisiones primitivas que tuvieron lugar en los orígenes del Sistema Solar, podrían haber formado muchos de los asteroides binarios, lo que significa que cada luna pequeña es un fragmento de un viejo bloque. Aunque también se cree a partir de modelos teóricos que el paso cercano por planetas como Venus, la Tierra o Marte podría haber arrancado material, colocándolo en una miniórbita.

El radar constituye la mejor vía para identificar estos cuerpos, aunque también se han hecho descubrimientos mediante grandes telescopios provistos de óptica adaptativa. Los astrónomos han registrado cambios en la luz solar reflejada en algunos NEAs, lo que parece indicar que se trata de cuerpos dobles que han producido fenómenos mutuos de eclipses y ocultaciones.

Algunos asteroides binarios han sido descubiertos por ocultaciones. Puede consultarse una lista actualizada de estos cuerpos con sus métodos de detección en: <http://www.imcce.fr/observateur/binast/>



1.4 Ocultaciones de estrellas por planetas

Al igual que la Luna, los planetas se interponen entre la Tierra y las estrellas, produciendo ocultaciones igualmente interesantes. Sin embargo, este tipo de ocultaciones son mucho menos frecuentes que las producidas por la Luna, debido al pequeño tamaño aparente de los planetas y su menor movimiento relativo en el cielo. Muchos de estos sucesos quedan fuera del alcance de los aficionados. El apartado 1.7 «Recursos en Internet» proporciona información sobre las efemérides de estos fenómenos para el siglo XXI así como para periodos más amplios.

Cuando esto sucede, los astrónomos aprovechan la oportunidad para estudiar la atmósfera de la estrella ocultada mediante el análisis de la variación gradual de su luz. Asimismo, estos fenómenos proporcionan información acerca de las dimensiones planetarias, anillos y posibles satélites no descubiertos. De esta manera se consiguieron una serie de descubrimientos:

URANO. El 10 de marzo de 1977, varios grupos de investigadores observaron la ocultación por Urano de la estrella SAO 158687 de magnitud 8,8. En esta ocultación se pretendía obtener información sobre la atmósfera del planeta. Para calibrar los instrumentos se inició la observación mucho antes de la ocultación, registrándose con sorpresa cómo la luz estelar experimentaba súbitas disminuciones a cortos intervalos antes y después de que Urano pasara por delante de la estrella. De esta manera se descubrieron los anillos de Urano, los segundos en ser conocidos tras los de Saturno.

Un año más tarde, el 10 de abril de 1978, Urano ocultaba nuevamente una estrella de magnitud 10, de brillo suficiente para llevar a cabo observaciones de utilidad. Los astrónomos estaban mejor preparados en esta ocasión y detectaron nueve anillos situados a una distancia de hasta un radio del planeta a partir de su atmósfera exterior. Se determinó que los anillos estaban formados por material muy oscuro. Los anillos se disponían perpendicularmente al plano de visión siendo poco densos y estrechos (figura 20).



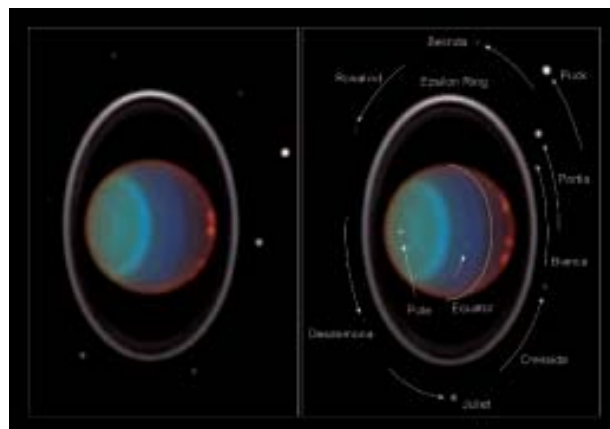


Figura 20. *Urano mostrando su sistema de anillos y varios satélites observados mediante la cámara infrarroja NICMOS del Telescopio Espacial Hubble. Los colores representan diferentes niveles de capas atmosféricas. El color azul indica capas más profundas mientras que el rojo denota nubes altas. Las flechas señalan el movimiento de las lunas en 90 minutos (créditos E. Karkoschka (Univ. of Arizona), NASA).*

Gracias a esta información se modificó la trayectoria de la sonda Voyager 2 para estudiar mejor los anillos.

NEPTUNO. En 1981, ocho años antes de que la Voyager 2 pasara por las cercanías del planeta, éste ocultaba una estrella. La estrella sufrió una brusca y rápida desaparición, atribuyéndose a la ocultación por parte de lo que se creía, una sección de los anillos del planeta. En realidad se había descubierto su pequeño satélite Larisa, de 190 km de diámetro.

Los anillos fueron descubiertos entre 1984 y 1985. El 22 de julio de 1984, dos equipos observaron desde Chile la ocultación de una estrella por Neptuno. Ambos detectaron una rápida disminución en el brillo de la estrella poco antes de ser ocultada por el planeta, pero no fue así después de que ésta emergiera. En agosto de 1985 volvió a realizarse una nueva observación de otra ocultación estelar por ambos equipos de científicos. Un grupo se encontraba en Chile, mientras que el otro estaba en Hawai. Éste último observó la disminución de brillo estelar en un solo lado, mientras que el de Chile no detectó ningún cambio en el brillo de la estrella. Tras un estudio de los datos obtenidos, se llegó a la conclusión de que, los anillos de Neptuno no eran completos, sino solo arcos. En realidad la Voyager 2 descubrió que son anillos completos, si bien existen regiones cuya densidad de partículas es mucho mayor.

PLUTÓN. La atmósfera de Plutón fue detectada y estudiada por primera vez el 9 de junio de 1988, mediante la ocultación de una estrella de magnitud 12.



Se descubrió que posee una tenue atmósfera, con una presión en la superficie de una cienmilésima de la terrestre, a una temperatura de unos 200°C bajo cero. La atmósfera está compuesta de nitrógeno, metano y monóxido de carbono, que se encuentran en los hielos superficiales del planeta.

Se puede realizar la observación de este tipo de fenómenos si se dispone de un telescopio de suficiente apertura para distinguir la estrella que se ocultará. Si es posible, resulta interesante grabar el evento con una cámara de vídeo o mediante una webcam.

1.5 Ocultaciones de planetas por la Luna.

Las ocultaciones de planetas por la Luna son poco comunes. En los planetas más visibles, el fenómeno es distinguible a simple vista, si bien la ayuda óptica de unos prismáticos o un pequeño telescopio permiten ver con detalle el proceso de la ocultación. Especialmente espectaculares resultan las ocultaciones del planeta Saturno, ya que desaparece tras el borde lunar comenzando por los anillos, que es asimismo lo primero en mostrarse en su reaparición.



Si el planeta es brillante, como Venus o Júpiter, el fenómeno puede ser observado incluso con luz diurna, en pleno cielo de día.

La observación de este tipo de ocultaciones fueron utilizadas en el pasado para realizar estimaciones científicas, como una ocultación rasante de Marte observada desde Japón en el siglo VII, que se empleó para determinar la velocidad de rotación de la Tierra. Actualmente estas observaciones, aunque llamativas e interesantes desde el punto de vista pedagógico, no ofrecen informaciones de valor científico (figura 21).



Figura 21. Composición de imágenes que muestran el desarrollo de la ocultación rasante de Marte por la Luna el 17 de julio de 2003 desde Florida (EEUU) (créditos D. Parker/J. Beish).

Se puede captar una ocultación de este tipo con una cámara de vídeo o una webcam acopladas a la óptica de un telescopio, obteniéndose un documento de gran interés pedagógico.

1.6 Ocultaciones de planetas por planetas.

Uno de los fenómenos astronómicos más raros es la ocultación o el tránsito de un planeta por otro. La poca frecuencia de estos eventos se debe al pequeño tamaño aparente de los planetas (del orden de segundos de arco) y a que las órbitas de los planetas no se encuentran todas exactamente en un mismo plano, sino que están inclinadas varios grados unas respecto de otras.

En el periodo comprendido entre los años -3000 y +3000 se producen 190 ocultaciones, según las efemérides DE406 del Jet Propulsion Laboratory de NASA. Ninguno de estos fenómenos ha ocurrido en el curso del siglo XX. La última ocultación de este tipo o mutua entre dos planetas tuvo lugar el 3 de enero de 1818, cuando Venus eclipsó a Júpiter.

De hecho, parece que únicamente ha habido una ocultación de un planeta por otro observada con telescopio en toda la historia de la Astronomía. Fue el 28 de mayo de 1737, cuando el astrónomo John Bevis, desde el observatorio de Greenwich (Inglaterra), vio con su antejo pasar lentamente Venus delante de Mercurio.

La próxima ocultación planetaria mutua tendrá lugar el 22 de noviembre de 2065, con el paso de Venus delante de Júpiter. Pero la ocultación que hará historia será la que acontecerá el 25 de enero de 2518, cuando el globo de Venus pase exactamente sobre el de Saturno. Durante unos minutos, nuestros descendientes asistirán a un espectáculo jamás visto por nadie: el planeta Venus rodeado de anillos (figura 22).

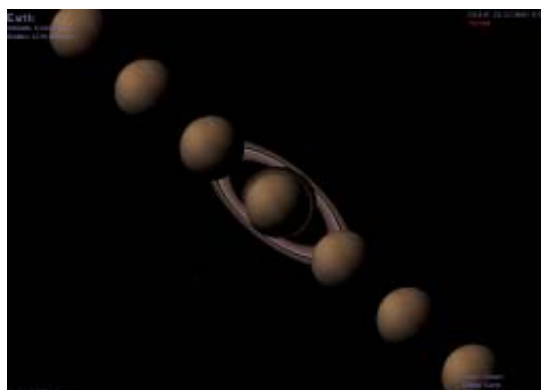


Figura 22. Simulación de la ocultación de Saturno por Venus el 25 de enero de 2518 (a intervalos de 6 minutos) realizado con el programa Celestia.

El sistema Plutón-Caronte

Plutón, el planeta más exterior del Sistema Solar, posee un único satélite conocido que fue descubierto fotográficamente en 1978 examinando imágenes del planeta.



A este satélite se le denominó Caronte, que era el nombre del barquero que ayudaba a cruzar a los muertos al reino de los infiernos en la mitología griega. Durante mucho tiempo, las características básicas de ambos cuerpos fueron un misterio, pero debido a una circunstancia afortunada se han podido obtener datos de bastante precisión.

Caronte se mueve alrededor de Plutón en una órbita muy inclinada. Dos veces en cada año de Plutón - es decir, una vez cada 125 años terrestres- se pueden observar eclipses mutuos producidos entre el planeta y su satélite debido a que el plano de la órbita se encuentra en la dirección de la Tierra. La última temporada de eclipses tuvo lugar desde 1984 hasta 1990 y permitió determinar las principales características de Plutón y Caronte. Así, por ejemplo, se observó que Plutón es menor de lo que se pensaba, con un diámetro ecuatorial de tan sólo 2.320 km y que Caronte es enorme en comparación, pues tiene la mitad de su diámetro, unos 1.300 km. Ambos están separados por sólo unos 19.600 km, lo que produce una órbita sincrónica, de manera que cada uno de ellos muestra un sólo hemisferio al otro, algo único en el Sistema Solar.



El astrónomo R. Marcialis utilizó las ocultaciones de Plutón por Caronte para confeccionar un mapa de baja resolución del planeta en el que se observan zonas oscuras. Estas regiones de grandes variaciones del brillo superficial del planeta han sido confirmadas posteriormente por el Telescopio Espacial Hubble (figura 23).

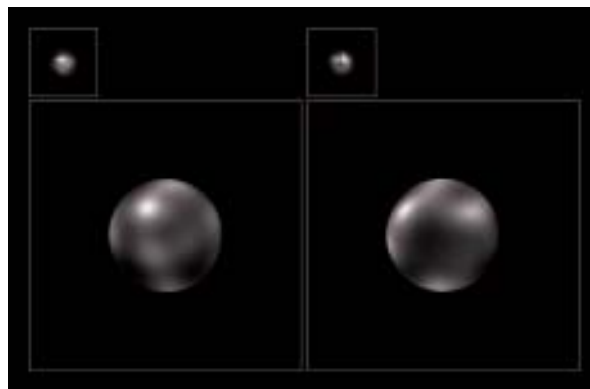


Figura 23. Imágenes de los dos hemisferios de Plutón tomadas con el Telescopio Espacial Hubble, mostrando zonas de fuertes variaciones de brillo. En la parte superior están las imágenes originales, en grande se muestra el resultado después de procesarlas para incrementar la visibilidad de los detalles (créditos NASA).

1.7 Recursos en Internet

Programas

Existen diversos programas para ordenador que pueden conseguirse en las direcciones de Internet indicadas. Son de uso libre (freeware) y algunos de ellos requieren para su instalación un descompresor de formato zip.

- **<http://www.lunar-occultations.com/iota/aops.htm>**

Para Windows (en inglés). **AOPS** es una pequeña aplicación que simula una ocultación y permite conocer nuestra ecuación personal.

- **<http://www.lunar-occultations.com/iota/occult3.htm>**

Para Windows (en inglés). **Occult** es una excelente herramienta para la predicción, análisis y estudio de ocultaciones de estrellas y asteroides por la Luna, así como otros fenómenos ocultantes como eclipses solares, creado por la IOTA (International Occultation Timing Association).

- <http://home.plex.nl/~gottm/doa/>

Para Windows (inglés). **LOW** (Lunar Occultation Workbench) es un programa elaborado por la Asociación Holandesa de Ocultaciones, especializado en la predicción y observación de ocultaciones estelares y de planetas por la Luna (normales y rasantes). Existen dos versiones según el número de estrellas disponibles. Asimismo se pueden descargar catálogos del perfil lunar.

- <http://www.shatters.net/celestia/>

Para Windows, Macintosh y Linux (inglés). **Celestia** es un fantástico simulador tridimensional del Sistema Solar y del espacio en general con superficies texturizadas mediante tecnología Open GL. El programa permite visualizar objetos y fenómenos astronómicos del pasado, presente y futuro, como eclipses y ocultaciones.

Direcciones de interés

- <http://topendsports.com/testing/reactiontest.htm>

Desde esta dirección se nos ofrece un test para medir nuestro tiempo de reacción o ecuación personal.



- <http://www.time.gov/timezone.cgi?UTC/s/0/java>
Patrón horario en Tiempo Universal (UT) con una precisión de 0,5 segundos (indicada).

- <http://www.occultations.org/>
Página principal de la IOTA (International Occultation Timing Association), el organismo mundial más importante en todo tipo de ocultaciones.

- <http://astrosurf.com/eaon/>
Sitio de la European Asteroidal Occultation Network (EAON), una organización de ámbito europeo dedicada a la observación de ocultaciones estelares por asteroides.

- http://www1.kaiho.mlit.go.jp/KOHO/iloc/docs/iloc_e.html
La ILOC (International Lunar Occultation Center) es una entidad internacional con sede en Japón especializada en ocultaciones estelares por la Luna. Recibe al año más de 10.000 observaciones de este tipo provenientes de todo el mundo.



- <http://www.astronomia-e.com/>

Portal web de la revista «Tribuna de Astronomía y Universo», que ofrece efemérides sobre los satélites de Júpiter y Saturno además de información sobre ocultaciones estelares por la Luna y asteroides.

-<http://www.astrogea.org>

Sede del Grup d'Estudis Astronòmics (GEA) con abundante información y enlaces sobre fenómenos ocultantes.

-<http://tdc-www.harvard.edu/occultations/occultations.html>

Efemérides y predicciones de estrellas por objetos del Sistema Solar, la mayoría hasta el año 2050.

-http://personal.telefonica.terra.es/web/artuorm/cielos/index_es.html

Tablas y predicciones de las ocultaciones más importantes del siglo XXI por objetos del Sistema Solar. También se puede encontrar tablas de datos de algunos de estos fenómenos para épocas remotas del pasado y del futuro (desde el año -3000 hasta el +3000).

2. TRÁNSITOS

Se entiende por **tránsito** de un astro el paso de éste por delante del disco de otro de mayor tamaño aparente. Hemos visto en apartados anteriores diferentes tipos de tránsitos como el de los satélites galileanos sobre el disco de Júpiter y los exoplanetas sobre la estrella madre.

Aquí trataremos el paso de los planetas interiores Mercurio y Venus sobre el disco solar.

2.1 Tránsitos de Mercurio

Si Mercurio y la Tierra orbitaran en el mismo plano, veríamos pasar a Mercurio por el disco del Sol en cada conjunción inferior. Esto sucede cada 116 días o periodo sinódico, es decir, el tiempo que tarda en repetirse la misma posición relativa Sol-Mercurio vista desde la Tierra. Al año ocurrirían por término medio tres tránsitos.

Pero Mercurio se mueve en un plano que forma 7° con la eclíptica, de manera que la mayor parte de las veces Mercurio pasa «por encima» o «por debajo» del disco solar, sin que se produzca el tránsito. Para que un tránsito tenga lugar, Mercurio tiene que estar cerca de los nodos de la órbita cuando está en conjunción inferior. La Tierra atraviesa cada año la línea de los nodos de la órbita de Mercurio el 8-9 de mayo y el 10-11 de noviembre; si para esa fecha coincide una conjunción inferior habrá tránsito (figura 24). (En esas condiciones, Mercurio también se encuentra en uno de los nodos).



Figura 24. Dibujo esquemático de las órbitas de la Tierra y Mercurio, mostrando las posiciones donde pueden producirse los tránsitos (créditos ESO, adaptado por J.C. Casado).



Existe una periodicidad en estos fenómenos aunque su explicación detallada obedece a cálculos complejos. Sin embargo, desde un punto de vista aproximado, los tránsitos se producen en múltiplos del periodo sinódico. Mercurio suele transitar en promedio unas 13 veces por siglo en intervalos de 3, 7, 10 y 13 años. El último tránsito de Mercurio aconteció el 7 de mayo de 2003, siendo visible desde España (figura 25), y el próximo tendrá lugar el 8 noviembre de 2006, no observable desde el territorio español. El siguiente visible desde España ocurrirá el 9 de mayo de 2016.



Figura 25. Tránsito de Mercurio poco antes de su finalización, el 7 de mayo de 2003, captado con una webcam y un pequeño telescopio (créditos J.C. Casado).

Durante un tránsito se ve el disco del planeta proyectado contra la superficie brillante del Sol. Mercurio aparece como un minúsculo círculo de color negro que se desplaza lentamente sobre el Sol.

En los casos más favorables, la duración de un tránsito de Mercurio puede llegar a ser de hasta 8 horas. En promedio, los tránsitos de noviembre son más cortos que los de mayo, dado que los primeros se producen cuando Mercurio está cerca del perihelio (distancia mínima al Sol) y se mueve más deprisa que en el afelio.



Dado el pequeño tamaño aparente de Mercurio (unos 12'' en la conjunción inferior), es imposible observarlo durante el tránsito, si no se utiliza algún instrumento óptico. La manera más segura de hacerlo es proyectando la imagen del Sol a través de un telescopio sobre una pantalla blanca (figura 26). Véase «**Seguridad en la observación del sol**», páginas 88-89.



Figura 26. Método de proyección para la observación solar sin riesgo (créditos ESO, adaptado por J.C. Casado).

Justo después del contacto interno entre los discos del Sol y Mercurio, el disco del planeta parece quedarse unido durante algunos segundos al extremo del disco solar, deformándose para adoptar la apariencia de una **gota negra**. Este fenómeno se vuelve a repetir justo antes del último contacto interno (figura 27).



Figura 27.
Efecto de la gota negra durante el contacto interno del tránsito de Venus (créditos J.C. Casado).

El efecto de la gota negra impide cronometrar con precisión los instantes de contacto entre el disco del planeta y el del Sol, y fue la causa principal por la que las observaciones llevadas a cabo para determinar la distancia entre el Sol y la Tierra presentaron una cierta indeterminación. Aunque en un principio el efecto se atribuyó a la turbulencia atmosférica, en realidad se debe a fenómenos de difracción de la luz. El primer tránsito observado de Mercurio fue realizado por el astrónomo francés Pierre Gassendi el 7 de noviembre de 1631, gracias a una predicción calculada por Johannes Kepler, mediante sus Tablas Rudolfinas. El matemático Le Verrier, descubridor del planeta Neptuno, estudiando las observaciones de los pasos de Mercurio desde 1631 hasta mediados del siglo XIX, reveló el avance del perihelio de Mercurio, que tantas implicaciones ha tenido en el desarrollo de la Astronomía.



2.2 Tránsitos de Venus.

La explicación de los tránsitos de Venus es análoga a la que se dio para los de Mercurio. Al igual que en el caso de Mercurio, la órbita de Venus también se encuentra inclinada respecto a la de la Tierra (en este caso, 3,4 grados). Si no fuera así, habría un tránsito de Venus cada 584 días (su periodo sinódico).

La Tierra atraviesa cada año la línea de los nodos de la órbita de Venus en torno al 6-7 de junio y al 9-10 de diciembre. Si para esas fechas coincide con una conjunción inferior, se producirá un tránsito.

En realidad, los tránsitos de Venus son unos fenómenos extraordinariamente inusuales, ya que en promedio hay dos cada poco más de un siglo. Estos dos tránsitos están separados 8 años y el intervalo entre parejas de tránsitos va alternándose entre los 105,5 y los 121,5 años. En algunas ocasiones, como sucedió en 1388, uno de los tránsitos de la pareja puede no producirse, ya que no coincide con el paso por el nodo. Esto es debido a que los tránsitos de diciembre son menos probables que los de junio porque Venus en ese momento está más cerca del perihelio. Así, se producen menos tránsitos en diciembre que en junio.

La última pareja de tránsitos de Venus sucedió el 9 de diciembre de 1874 y el 6 de diciembre de 1882 (figura 28). Únicamente el segundo fue parcialmente visible desde España .

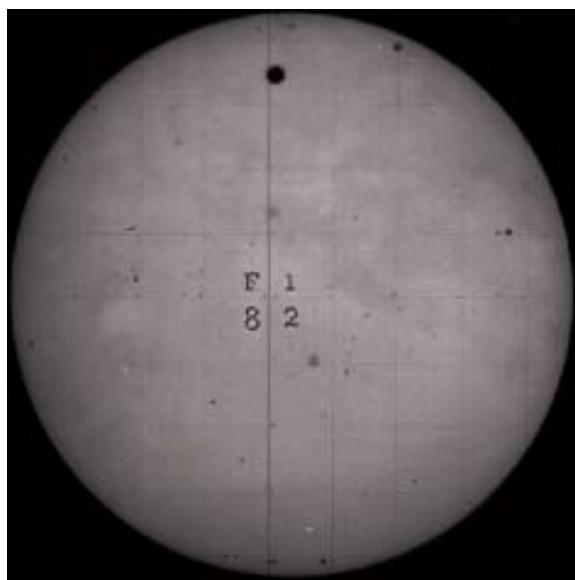


Figura 28. Una fotografía del tránsito de Venus del 6 de diciembre de 1882 (créditos U.S. Naval Observatory).

Desde el punto de vista visual, el fenómeno del tránsito de Venus es similar al de Mercurio: Venus se proyecta como un círculo negro desplazándose lentamente sobre el brillante disco solar. Además, también se produce el efecto de la gota negra cerca de los bordes del disco solar. Los tránsitos de Venus duran como máximo algo más de 8 horas.

Durante el tránsito, Venus presenta un diámetro aparente de 61", por lo que resulta perfectamente visible a simple vista con los medios de protección adecuados para la observación solar (Véase «**Seguridad en la observación del sol**», páginas 88-89).



Durante el tránsito, Venus presenta un diámetro aparente de 61", por lo que resulta perfectamente visible a simple vista con los medios de protección adecuados para la observación solar (Véase «**Seguridad en la observación del sol**», páginas 88-89).

El primer tránsito observado de Venus tuvo lugar el 4 de diciembre de 1639. Horrocks, un clérigo de Liverpool (Inglaterra) que había estudiado Astronomía y Matemáticas, encontró en las tablas planetarias de Kepler que para esta fecha Venus estaría en conjunción inferior con el Sol pasando al sur de éste.

No obstante, usando las tablas de Lansberge obtenía un resultado diferente, por lo que creyó que debía efectuar la observación. Horrocks pudo seguir el tránsito del planeta cuando éste ya había comenzado.

A principios del siglo XVIII, el astrónomo inglés Edmund Halley propuso aprovechar los raros tránsitos de Venus para determinar con gran precisión la **paralaje solar**, lo que permitiría ajustar el tamaño del



Figura 29. Representación esquemática para mostrar la paralaje solar o ángulo P_i . Este ángulo en realidad es muy pequeño, pero a efectos de claridad se ha exagerado su valor (créditos F. Mignard, Obs. de la Côte d'Azur).

sistema solar conocido. La paralaje solar es el ángulo que desde el Sol subtiende el radio ecuatorial de la Tierra (figura 29).

Hasta entonces, el valor de la paralaje había sido medido por Cassini en 1672 mediante triangulación, basándose en observaciones simultáneas de Marte desde París realizadas por él mismo, y por Richer en Cayena. Con ambas medidas, Cassini llegó a una paralaje para Marte de 25", lo que correspondía a unos 9" para el Sol, una determinación extraordinariamente precisa para la época.

Halley planteó medir desde distintos puntos de la Tierra el tiempo que tardaba Venus en cruzar el disco, observando los momentos en que el planeta estaba en contacto con los bordes del Sol, tanto en su ingreso al disco, como en su salida. Por efecto de la perspectiva, dos observadores no ven proyectarse a Venus sobre el mismo punto del Sol, sino que recorre cuerdas paralelas próximas, de diferente longitud. Por tanto, el paso dura un tiempo diferente para los dos observadores. De esa diferencia de tiempo es posible hallar la distancia entre las cuerdas en radios solares y entonces el ángulo con que desde Venus se subtiende a los dos observadores (es el mismo ángulo con que desde Venus se subtiende a las dos cuerdas). A partir de aquí se puede deducir la distancia de Venus a la Tierra y calcular la paralaje (figura 30).



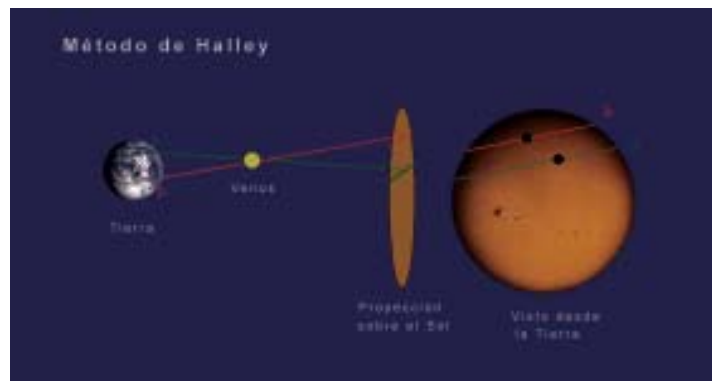


Figura 30. Método propuesto por Halley para calcular la paralaje solar. Dos observadores (a y b) situados en diferentes lugares de la Tierra observan el tránsito bajo ángulos ligeramente distintos, dando lugar a proyecciones o cuerdas desiguales sobre el disco solar (a la derecha). Como no es posible medir con precisión la separación entre estas cuerdas (en el gráfico se ha exagerado), se mide el tiempo de paso del planeta por cada una de ellas, lo que proporciona datos para medir la paralaje de Venus y, por tanto, calcular la paralaje solar (créditos F. Mignard, Obs. de la Côte d'Azur, adaptado por J.C. Casado).

Aprovechando el tránsito de Venus que se iba a producir en 1761, astrónomos de todo el mundo, comisionados por sus gobiernos se prepararon para la observación. Los británicos enviaron una expedición a Santa Helena y otra a Sumatra. Los franceses organizaron cuatro: Siberia, Viena, Isla Rodríguez y Pondicherry en La India. En total, el tránsito fue observado desde unos 70 lugares distribuidos alrededor del globo terrestre, constituyendo la primera gran empresa científica internacional. En este tránsito, el científico ruso M. Lomonosov dedujo correctamente que Venus poseía una atmósfera percibiendo un contorno borroso en el planeta.

Sin embargo, los resultados obtenidos no estuvieron a la altura de las expectativas. El mal tiempo en muchos de los lugares de observación, la dificultad de determinar con precisión la localización geográfica del lugar en que la observación se realizaba y el efecto de la gota negra dificultaron la aplicación del método de Halley.



En la observación del tránsito de 1769 hubo 150 observadores oficiales y otros muchos aficionados. Entre los observadores se encontraba el célebre capitán James Cook, que realizaba el primero de sus viajes. Una de las observaciones con mejores resultados fue la realizada en la península de Baja California por el francés Jean-Baptiste Chappe D'auteroche, al que acompañaban los españoles Vicente de Doz y Salvador Medina y el mexicano Joaquín Velázquez Cárdenas de León.

Los tránsitos de 1874 y 1882 fueron también seguidos por cientos de observadores enviados por las academias científicas de multitud de países. Así, por ejemplo, Francia envió observadores a Nueva Caledonia, Pekín, Japón, Indochina y Nueva Zelanda.

El Boletín de la Sociedad Astronómica de Londres recoge que se obtuvieron 3.440 pruebas fotográficas de los distintos aspectos que ofreció el fenómeno.

En el tránsito de 1882, España participó por primera vez de forma oficial, habilitando el gobierno un presupuesto de 20.000 pesetas para la adquisición de instrumentos y gastos de expedición. Se enviaron dos grupos de observadores, uno a Cuba y otro a Puerto Rico.

En cualquier caso, el fenómeno de la gota negra volvió a perjudicar las observaciones, por lo que la paralaje solar quedaba determinada entre un valor de 8,790" y 8,880", lo que corresponde a unas distancias Sol-Tierra de entre 148,1 y 149,7 millones de km. Actualmente, el método de la paralaje es obsoleto, y las actuales mediciones efectuados con sondas espaciales y técnicas de radar cifran la paralaje en un valor de 8,79415" ó 149,59787 millones de km. Hay que destacar que, a pesar de su mayor frecuencia, los tránsitos de Mercurio no se pueden utilizar para la determinación de la paralaje solar debido a su proximidad al Sol, por lo que las diferencias de cuerdas y de tiempo de paso son demasiado pequeñas.



2.3 El tránsito de Venus del 8 de junio de 2004

Como se ha mencionado anteriormente, éste será el primer tránsito de Venus desde el 6 de diciembre de 1882.

Durante el tránsito se producen cuatro contactos del disco de Venus con el borde del círculo solar: dos contactos a la entrada, exterior e interior, y otros dos a la salida. También tiene lugar el momento del máximo, cuando se alcanza la mínima distancia al centro del disco

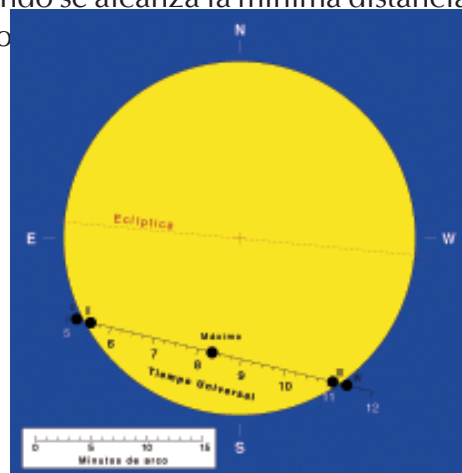


Figura 31. Horarios de los diversos contactos y recorrido de Venus proyectado sobre el disco del Sol para una posición geocéntrica (tomando como referencia el centro de la Tierra) del tránsito del 8 de junio de 2004. Las horas indicadas están en Tiempo Universal. Venus emplea algo más de 6 horas en cruzar el disco solar (créditos F. Espenak, NASA/GSFC, adaptado por J.C. Casado).



El tránsito del 8 de junio de 2004 será el primero del par que formará con el que sucederá el 5 de junio de 2012. Después, habrá que aguardar hasta los años 2117 y 2125 para ver nuevos tránsitos de Venus, esta vez en diciembre.

Este tránsito será visible por completo en Asia, excepto la porción del extremo este; en Europa, excepto el extremo suroeste de la Península Ibérica; en Groenlandia, excepto el extremo sur; en África, excepto la parte oeste; y en la mayor parte del Océano Índico.

Desde España será visible todo el fenómeno excepto en las islas Canarias, donde se observará comenzado, una vez que salga el Sol (figura 32).

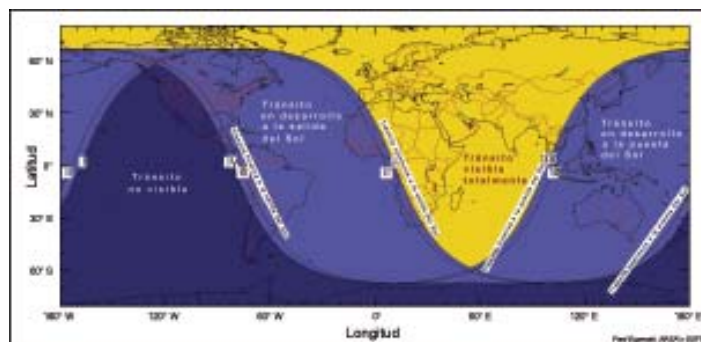


Figura 32. Mapa mundial de visibilidad del tránsito de Venus del año 2004 (créditos F. Espenak, NASA/GSFC, adaptado por J.C. Casado).

La siguiente dirección de Internet proporciona las circunstancias locales del fenómeno para todas las capitales españolas:

http://www.roa.es/Efemerides/transitos/fases_venus.html#espana

El tránsito del 5 de junio de 2012 resultará visible totalmente desde el norte de los países nórdicos, extremo Oriente, Rusia oriental, Mongolia, el este de China, Japón, Filipinas, Papúa Nueva Guinea, centro y este de Australia, Nueva Zelanda, oeste del Océano Pacífico, Alaska, norte de Canadá y casi toda Groenlandia. Desde España únicamente se verá el final del fenómeno a la salida del Sol en la región oriental de la Península Ibérica y Baleares (figura 33).

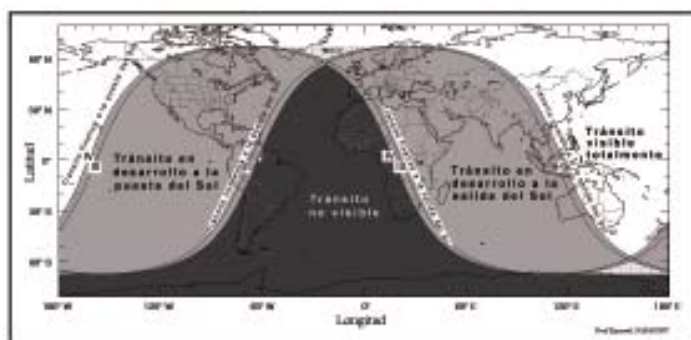


Figura 33. Mapa mundial de visibilidad del tránsito de Venus del año 2012 (créditos F. Espenak, NASA/GSFC, adaptado por J.C. Casado).

Aunque Venus sobre el disco solar resulta visible a simple vista, tal como se ha señalado, la mejor manera de disfrutar del fenómeno consiste en utilizar un telescopio, empleando alguno de los medios descri-

tos en «**Seguridad en la observación del sol**», páginas 88-89.

Para fotografiar el fenómeno se puede emplear una cámara fotográfica o una digital con cualquiera de los métodos de observación segura descritos. La ventaja de la cámara digital reside en que visualizaremos inmediatamente la fotografía y podremos corregir enseguida los posibles defectos.

Puede resultar muy interesante y didáctico captar el evento con una cámara de vídeo o una webcam, acoplándolas a la óptica del telescopio. Como la duración del tránsito se prolonga durante varias horas deben hacerse grabaciones breves a intervalos regulares de tiempo con el fin de obtener una «película» acelerada del fenómeno. En cualquier caso se recomienda haber realizado previamente pruebas para tener todo dispuesto el día del tránsito.

Con motivo del tránsito de Venus en el año 2004, el Observatorio Austral Europeo (ESO), en colaboración con otras instituciones astronómicas y educativas, ha elaborado un completo programa de actividades, entre las que destacan transmisiones en directo del fenómeno por Internet y observaciones para determinar la paralaje solar. Su portal web **<http://www.vt2004.org>** ofrece amplia información del evento y la posibilidad de participar en alguno de los programas establecidos para la observación del tránsito. También el IAC tiene un programa con diversas actividades que incluyen observación en directo del fenómeno y retransmisión a través de internet desde el portal **<http://www.iac.es/tv2004>**





SEGURIDAD EN LA OBSERVACIÓN DEL SOL

La observación del tránsito de Venus requiere las mismas precauciones que una observación normal del Sol. Dependiendo del tipo de observación deberemos atender a las siguientes indicaciones:

Sin instrumentación

Nunca mirar al Sol directamente o incluso con unas gafas de Sol convencionales.

Existen filtros solares homologados dispuestos a modo de gafas con montura de cartulina, que son los únicos que ofrecen una completa garantía de seguridad en la visión del Sol. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la superficie del filtro puede estar dañada por rascaduras o pequeños orificios. Asimismo se deberá comprobar que no haya superado la fecha de caducidad, que se indica normalmente en las gafas. En cualquier caso, estas gafas especiales han de llevar el logotipo de normalización «CE» y deberán seguirse las instrucciones que las acompañan.

También se puede ver el Sol sin peligro proyectando la imagen que proporciona un pequeño agujero practicado con una aguja en una cartulina. La imagen así obtenida, aunque pequeña y poco definida, ofrece un medio para visualizar el fenómeno a un pequeño grupo de personas. (véase el procedimiento en http://www.eclipse.org.uk/pparc_web/pinhole.html). Otra manera segura de realizar la observación consiste en proyectar la imagen del Sol mediante un pequeño espejo plano tal como se indica en la siguiente dirección de Internet: http://www.eclipse.org.uk/pparc_web/mirror.html



Con Instrumental

Existen diversas compañías que fabrican sistemas de proyección para el Sol mediante dispositivos ópticos compactos y mecánicamente sencillos, permitiendo realizar la observación simultánea y segura a un grupo de personas. Entre ellos podemos mencionar el Solarscope (<http://www.solarscope.org/sp/index.sp.html>) y el Sunspotter (<http://www.starlab.com/ltiprod.html>)

Si se utiliza un telescopio puede proyectarse la imagen que proporciona el ocular del telescopio. Bajo ningún concepto se debe mirar directamente por el ocular del telescopio o el buscador (cuya abertura deberá estar tapada), bajo riesgo de graves lesiones en el ojo. Para localizar al Sol se observará la sombra proyectada por el mismo telescopio. Cuando ésta sea mínima, el Sol estará en el campo de visión o muy próximo a él. Es aconsejable disponer de un ocular de bajo aumento y gran campo.

El tamaño del disco proyectado puede variarse acercando y alejando la pantalla de proyección al ocular, intentando asimismo crear el ambiente más oscuro posible alrededor de la pantalla de proyección para aumentar el contraste y la visibilidad de los detalles solares y el paso del planeta. Resulta más aconsejable realizar este método con telescopios refractores, ya que con los reflectores se puede dañar la óptica (figura 26).

Para telescopios reflectores es más adecuado emplear un filtro de plena apertura homologado. Existen tanto en láminas de material flexible como rígidas, algunas de vidrio óptico. En tal caso, la observación se hará mirando por el ocular del telescopio con la certeza de que el filtro se haya fijado firmemente en el tubo del telescopio (véase direcciones de suministradores de filtros solares en http://skyandtelescope.com/observing/objects/sun/article_101_1.asp).



2.4 Recursos en Internet

Programas

Este programa es de uso libre (freeware), necesitando para su instalación un descompresor de formato zip.

-<http://home.plex.nl/~gottm/doa/software/VenusTransit2004.zip>

Para Windows (en inglés). Pequeño programa específico para el tránsito de Venus del 8 de junio de 2004. Una vez introducidas las coordenadas del lugar de observación, calcula los diversos contactos del tránsito y muestra gráficamente la posición del planeta en el disco solar.



Direcciones de interés

- **<http://www.mreclipse.com/Special/filters.html>**

Artículo sobre filtros para observación solar por el especialista B. Ralph Chou.

- **<http://sunearth.gsfc.nasa.gov/eclipse/transit/transit.html>**

Página de referencia sobre los tránsitos de Mercurio y Venus. Ofrece amplia información y vínculos, incluyendo catálogos de tránsitos que cubren miles de años.

- **<http://www.venus04.org/>**

Información, actividades y transmisión en directo en España del tránsito de Venus el 8 de junio de 2004.

- **<http://didaktik.physik.uni-essen.de/~backhaus/VenusProject.htm>**

Actividades educativas con motivo del tránsito de Venus del año 2004.

3-OCULTACIONES FUERA DEL SISTEMA SOLAR

3.1 Sistema dobles

3.1.1 Estrellas binarias eclipsantes

Hoy en día sabemos que la mayor parte de las estrellas no deambulan solas por las galaxias sino que forman sistemas múltiples, normalmente dobles. De las estrellas cercanas al Sol, un 50% son dobles o binarias.

Se denomina **sistema binario estelar** a aquel formado por dos estrellas atrapadas mutuamente por gravedad y que orbitan, siguiendo las leyes de Kepler, alrededor del centro de masas del sistema. Existen tres tipos de sistemas binarios (o estrellas dobles):

- 1) **Binarias visuales**, donde es posible distinguir, a simple vista, las dos estrellas (figura 34).

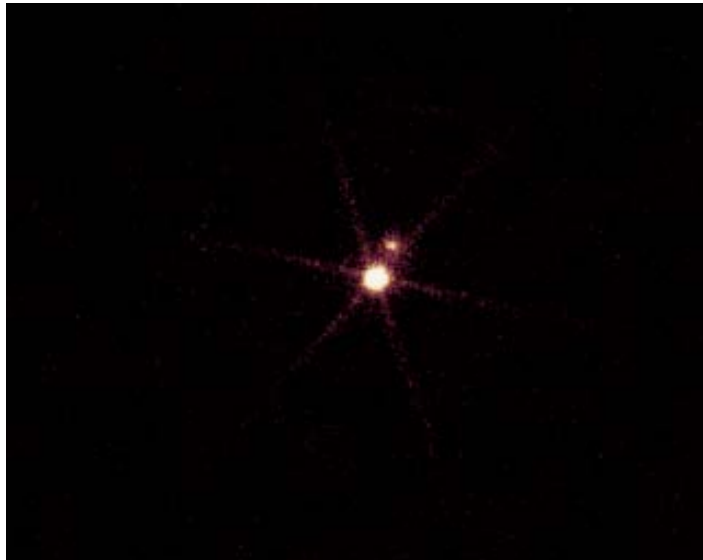


Figura 34. Uno de los sistemas binarios más curiosos de nuestros cielos está situado en Sirius, el sistema estelar Sirius A y B. A simple vista, aparece como la estrella más brillante del firmamento, localizada cerca de la constelación de Orión. Pero, en 1862, Alvan Clark descubrió que el sistema es doble: Sirius A es una estrella similar al Sol (aunque mayor) mientras que Sirius B es una enana blanca, ambas situadas a una distancia aproximada de 8 años-luz. Mientras que en longitudes de onda visibles (telescopios ópticos) el brillo de Sirius A es mayor que B, cuando se observan en rayos X (Observatorio Chandra a bordo de un satélite) resulta que la componente B es más brillante que la A, como puede observarse en la fotografía (créditos NASA/SAO/CXC).



2) Binarias espectroscópicas, en caso de que las estrellas estén tan próximas entre sí (y lejanas de la Tierra), que sea imposible distinguirlos a simple vista o con telescopios. Su naturaleza binaria se infiere a partir del **espectro** del objeto, que nos informa de la dinámica del mismo. Los cambios en la longitud de onda central de determinadas **líneas espectrales** de las estrellas que forman el sistema binario permiten averiguar sus velocidades (consecuencia del **efecto Doppler**). Después de una serie de cálculos se deduce que lo que originariamente era un objeto en realidad son dos estrellas que se acercan y alejan de nosotros de forma periódica, indicando que están orbitando una alrededor de otra.

3) Binarias eclipsantes, cuando la línea de visión del sistema está contenida en el plano de revolución de las estrellas alrededor de su centro de masas. En estas condiciones, las estrellas podrán ocultarse mutuamente produciendo pequeños eclipses que se traducirán en disminuciones periódicas de luminosidad o brillo. Se llamará «eclipse principal» cuando la estrella «pequeña» oculte a la mayor y el fenómeno inverso se llamará «eclipse secundario».

Las binarias eclipsantes también pueden ser visuales y/o espectroscópicas. A partir de cambios periódicos de brillo del objeto que contiene el sistema estelar binario es posible averiguar la geometría del sistema así como la relación de masas y tamaños de las estrellas individuales.

3.1.1.1 Actividad 4: Eclipses en sistemas binarios

Como hemos comentado anteriormente es posible averiguar parámetros físicos del sistema estelar binario eclipsante a partir de la forma de su curva de luz.

En astronomía se denomina **curva de luz** a una representación bidimensional (ejes cartesianos X-Y) de la luminosidad o brillo de un objeto (eje Y) frente a una escala de tiempos (eje X, por ejemplo, horas o días). Para la gran mayoría de los objetos, esta curva es una recta constante, pero existen algunos objetos especiales que tienen variaciones, más o menos periódicas, y que se denominan **objetos variables**.



Las estrellas binarias eclipsantes, debido a sus variaciones de brillo, pertenecen a los objetos de tipo variable en general, y son un tipo de **estrellas variables** en particular.

Para calcular la curva de luz de un objeto es necesario observar, de forma simultánea, nuestro objeto y una estrella de comparación (debemos estar seguros de que nuestra estrella de comparación no es variable).

Para representar la curva de luz debemos calcular las diferencias de magnitudes entre el objeto y la estrella de comparación. Si la observación es visual, deberemos conocer, también, alguna estrella de calibración. Nuestra recomendación, para esta práctica, es realizarla usando algún detector electrónico como, por ejemplo, una cámara CCD unida a un pequeño telescopio. A partir de las imágenes obtenidas con el detector, calcularemos las intensidades o flujos de los objetos y a partir de éstos las magnitudes según la siguiente relación:



$$m_{obj} = A - 2,5 \log(F_{obj}) \quad \text{y} \quad , \quad m_{com} = A - 2,5 \log(F_{com})$$

donde F_{obj} y F_{com} son los flujos del objeto y la estrella de comparación, respectivamente, y m_{obj} y m_{com} sus magnitudes, mientras que A es una constante que depende del sistema (detector+telescopio). Finalmente, si calculamos la diferencia de magnitudes obtendremos:

m_{com}

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{obj} - m_{com} = [A - 2,5 \log(F_{obj})] - [A - 2,5 \log(F_{com})] \\ &= 2,5 \log(F_{com}) - 2,5 \log(F_{obj}) = 2,5 \log\left(\frac{F_{com}}{F_{obj}}\right) \end{aligned}$$

Así, cuando trabajemos con detectores digitales, la diferencia de magnitudes entre nuestro objeto y la estrella de comparación será igual a 2,5 veces el logaritmo del cociente del flujo de la estrella de comparación y el flujo del objeto (número de cuentas si trabajamos con un detector CCD) corregidas de factores instrumentales.



2) Beta Lyrae. En este caso, las estrellas binarias están muy cercanas y existe transferencia de masa produciendo un **disco de acrecimiento** alrededor de la secundaria que la oculta. La curva de luz no es plana en ningún momento y, por tanto, no es posible determinar el momento en que el eclipse comienza o finaliza. Los periodos de variación exceden en general de un día.

3) W Uma. Es una binaria donde las estrellas están muy próximas y, por tanto, llegan incluso a mezclar sus atmósferas. La curva de luz cambia continuamente y los períodos de variabilidad son menores a un día. No es posible determinar el comienzo o finalización de los eclipses.

Para poder realizar la actividad será necesario conocer qué estrellas binarias eclipsantes tendrán eclipses la noche en que queramos observar. También deberemos conocer la situación del objeto así como la localización de posibles estrellas de comparación. Existe un buen programa de cálculo de efemérides en:

<http://www.rollinghillsobs.org:8000/perl/calcEBephem.pl>

Finalmente, si después de obtener una buena curva de luz seguimos animados, podemos intentar deducir los parámetros físicos del sistema binario.

Existen varios programas de simulación de modelos y obtención de curvas de luz sintéticas que podremos comparar con nuestra curva experimental. Un buen programa lo encontraremos en:

<http://www.cosmion.net/software/ebs/>



3.2 Agujeros negros

Los agujeros negros son, sin lugar a dudas, los objetos más atractivos de la Astrofísica moderna. Postulados de forma teórica por Einstein a mediados del siglo pasado, no fue hasta la década de los 90 cuando se confirmó su existencia a partir de datos experimentales fruto de observaciones telescópicas.

Pero los agujeros negros tampoco suelen viajar solos, sino que suelen formar parte de sistemas dobles (formados originalmente o simplemente capturados por gravedad en fases finales). La conclusión es que los agujeros negros suelen tener estrellas compañeras.

Debido al intenso campo gravitatorio del agujero negro, la estrella compañera es deformada y parte de su materia se precipita hacia él.

La materia arrancada y que orbita alrededor del agujero negro se denomina **disco de acrecimiento** donde, debido a violentos choques, se producen intensos fogonazos de luz (principalmente en longitudes de onda muy energéticas como los rayos X) (figura 36).

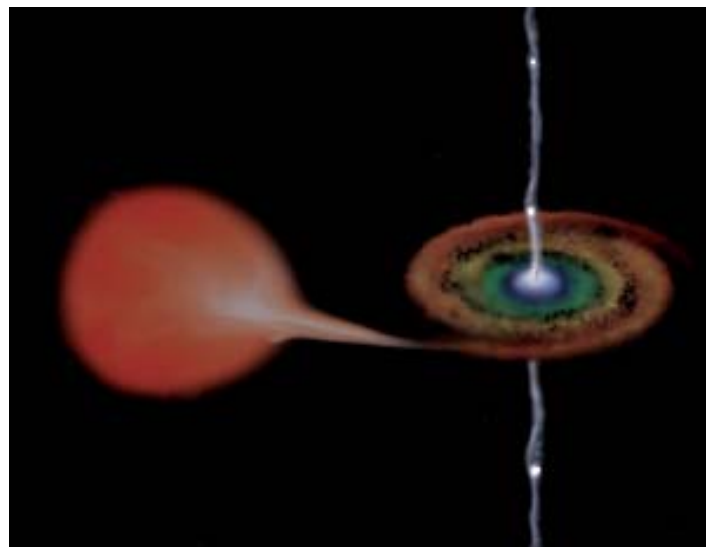


Figura 36. Sistema doble formado por un agujero negro (derecha) y una estrella (izquierda). La fotografía es una simulación de lo que podría ser el sistema XTEJ1118+480, candidato a agujero negro (créditos: NASA/SAO/CXC).

Si el plano de rotación de la estrella compañera y el agujero negro contiene a nuestra línea de visión, la estrella puede eclipsar, de forma periódica, la luz del disco de acrecimiento produciendo ocultaciones. La forma y el periodo de estas ocultaciones pueden ayudarnos a descifrar parámetros morfológicos tanto del agujero negro como del disco de acrecimiento.

3.3 Exoplanetas

La existencia de planetas orbitando estrellas distintas al Sol fue una simple hipótesis hasta que, en el año 1995, los astrónomos europeos Mayor y Queloz consiguieron convertirse en los primeros en detectar, de forma inequívoca, la existencia de un planeta más allá del Sistema Solar, también llamado exoplaneta, en la estrella 51 Pegasi.



Desde entonces, y usando distintas técnicas, ya contamos con 110 exoplanetas (censo de septiembre de 2003) y la lista crece año tras año (figura 37). Puede encontrarse una lista actualizada en:

http://www.princeton.edu/~willman/planetary_systems/



Figura 37. Imagen en infrarrojo, tomada por el Telescopio Espacial Hubble de lo que podría ser un planeta extrasolar. El objeto superior más brillante es un sistema binario estelar en su última etapa de formación mientras que el protoplaneta, expulsado del sistema binario, es el objeto que aparece en la parte inferior izquierda de la imagen (créditos S. Terebey (Extrasolar Research Corp. y NASA).



Hay distintos métodos para detectar exoplanetas. Debido a la diferencia de brillos entre la estrellas madre y sus posibles planetas y a la cercanía de éstos a la estrella es muy difícil conseguir una observación directa del exoplaneta y, por tanto, es necesario utilizar métodos indirectos.

Uno de estos métodos consiste en detectar disminuciones de luz periódicas en la estrella madre debido a ocultaciones, o eclipses, producidas por alguno de sus planetas (figura 38).

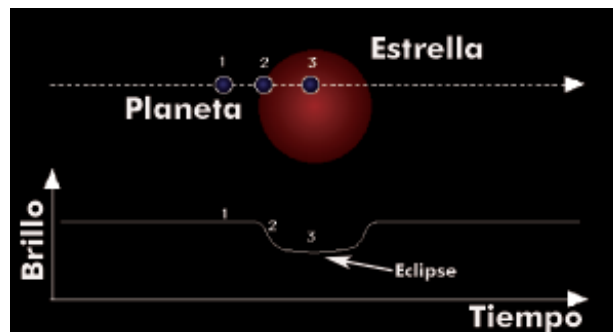


Figura 38. Curva de luz del tránsito o eclipse de un planeta extrasolar por su estrella madre (créditos Hans Deeg).

Para poder usar este método de detección indirecta es condición necesaria que el plano de la órbita del exoplaneta contenga nuestra línea de visión, pudiendo así producirse ocultaciones y tránsitos del exoplaneta con su estrella madre.

El primer exoplaneta descubierto por el método del tránsito fue uno localizado en el sistema de la estrella HD209458. El descubrimiento se dio a conocer durante el año 2000.

3.3.1.1 Actividad 5: Búsqueda de exoplanetas

Para intentar detectar el eclipse o tránsito de un exoplaneta por su estrella madre es necesario disponer de un telescopio con un diámetro mínimo de 20 cm y un detector electrónico como, por ejemplo, una CCD.

Las disminuciones de luz en la estrellas madre son muy pequeñas. Para detectar el eclipse producido por un exoplaneta necesitaremos medidas de brillo o magnitud con errores menores a la centésima de magnitud (0,01 magnitudes). Por ello, esta actividad necesita de gran precisión y un buen equipo.

Para realizar la actividad será necesario calcular la curva de luz de la estrella elegida (ver actividad 4 para definición y cálculos de curvas de luz) y será muy importante elegir unas buenas estrellas de comparación para obtener errores de medida del brillo estelar muy pequeños.

Tenemos dos posibilidades, primero, y para calibrar nuestro sistema, podemos intentar observar y reproducir eclipses de exoplanetas ya conocidos (ver página web con todos los sistemas extrasolares conocidos). Una vez nuestro sistema funcione perfectamente podemos intentar descubrir un exoplaneta mirando a alguna de las cientos de miles de estrellas del firmamento.

3.4 Recursos en Internet

Software

Estos programas para ordenador pueden conseguirse en las direcciones de Internet que se indican y la mayoría son de uso libre (freeware). Algunos de ellos requieren para su instalación un descompresor de formato zip.



- <http://www.atomtime.com/>

Para Windows (en inglés). **AtomTime** es una aplicación que conecta con la hora del servidor del reloj atómico que se encuentra en Boulder (Colorado, EEUU), proporcionando la posibilidad de sincronizar con este patrón de tiempo el reloj de nuestro PC.

- <http://astrosurf.com/ccdbazar/D-Logiciels/Occultime/Occultime.html>

Para Windows (en francés e inglés). **Occultime** es una sencilla utilidad que permite registrar los instantes de las ocultaciones en un archivo haciendo uso del reloj del ordenador.

- <http://astroqc.free.fr/jjlive/index.html>

Para Windows (en francés). **JJLive** es otro pequeño programa que muestra en tiempo real el día juliano y el día en fracción decimal, además de conversiones entre fecha gregoriana y juliana.

- <http://www.physics.sfasu.edu/astro/software/galsat53.zip>

Para MS-DOS (en inglés). **Galilean Satellites** es un programa gráfico que muestra las posiciones relativas de las lunas mayores de Júpiter para una fecha determinada.



- <http://www.astrosurf.com/rondi/jupiter.htm>

Para Windows (en francés). **Jupiter** es un programa gráfico que muestra las posiciones relativas de los satélites galileanos de Júpiter. Se pueden realizar animaciones y muestra mediante informaciones de texto los fenómenos ocultantes que se producen.

- <http://www.physics.sfasu.edu/astro/software/jme3.zip>

Para Windows (en inglés). **Jovian Moon Events High Accuracy** calcula con la precisión de 1 minuto los tiempos de los eclipses, ocultaciones y tránsitos de los satélites galileanos en forma de archivo de texto.

- <http://www.physics.sfasu.edu/astro/software/satsat2.zip>

Para MS-DOS (en inglés). **Satellites of Saturn** muestra gráficamente las posiciones relativas de los satélites de Saturno para una fecha determinada.

Direcciones de interés

- **<http://www.cox-internet.com/ast305/binstar.html>**

Desde esta excelente dirección se nos muestra amplia información sobre estrellas binarias eclipsantes, incluyendo artículos, ejemplos en hojas de cálculos, y diversos programas para ordenador (incluso en JAVA), además de catálogos de este tipo de estrellas e información adicional.

<http://sus.univ.szczecin.pl/~ecliptic/vesta3en.htm>

Tutorial para realizar fotometría de precisión en estrellas variables mediante una webcam.

- **<http://www.nineplanets.org/>**

Amplia información bien organizada y expuesta sobre el Sistema Solar y sus diversos cuerpos.

- **<http://www.imcce.fr/Phemu03/phemu03.html>**

Página de la campaña PHEMU03, con numerosa información y enlaces de interés.

ÍNDICE GENERAL

3.....	INTRODUCCIÓN
7.....	1- OCULTACIONES EN ASTRONOMÍA
7.....	1.1 Satélites de Júpiter y Saturno
20.....	1.2 Ocultaciones de estrellas por la Luna
21.....	1.2.1 Normales
24.....	1.2.1.1 Actividad 1: Ocultación estelar normal por la Luna
29.....	1.2.2 Rasantes
31.....	1.2.2.1 Actividad 2: Ocultación estelar rasante por la Luna
35.....	1.3 Ocultaciones de estrellas por asteroides
38.....	1.3.1 Asteroides simples
43.....	1.3.1.1 Actividad 3: Ocultaciones estelares por asteroides
53.....	1.3.2 Asteroides binarios
56.....	1.4 Ocultaciones de estrellas por planetas
60.....	1.5 Ocultaciones de planetas por la Luna
62.....	1.6 Ocultaciones de planetas por planetas
66.....	1.7 Recursos en Internet
70.....	2 - TRÁNSITOS
70.....	2.1 Tránsitos de Mercurio
76.....	2.2 Tránsitos de Venus
84.....	2.3 El tránsito de Venus del 8 de junio de 2004
90.....	2.4 Recursos en Internet
92.....	3 - OCULTACIONES FUERA DEL SISTEMA SOLAR
92.....	3.1 Sistema dobles
92.....	3.1.1 Estrellas binarias eclipsantes
95.....	3.1.1.1 Actividad 4: Eclipses en sistemas binarios
101.....	3.2 Agujeros negros
103.....	3.3 Exoplanetas
106.....	3.3.1.1 Actividad 5: Búsqueda de exoplanetas
107.....	3.4 Recursos en Internet



