ASTROMETRÍA Y MEDIDA DEL DIÁMETRO ESTELAR EN LA OCULTACIÓN DE HD 61660 POR GANÍMEDES DEL 14 DE OCTUBRE DE 2025

Enrique Velasco

La ocultación de una estrella de magnitud 7,5 por Ganímedes, observada el 14 de octubre, ofrece una oportunidad excepcional para completar todo el proceso de una investigación astronómica: preparar la campaña, realizar las observaciones, reducir los registros fotométricos y, finalmente, interpretar los resultados mediante un modelo físico. Este último paso es especialmente importante. Los astrónomos aficionados no tenemos por qué limitarnos a obtener datos y ceder su análisis a los profesionales; también podemos elaborar modelos, contrastarlos con las medidas y extraer conclusiones científicas.

La campaña, descrita en la presentación anterior, reunió observaciones de varias estaciones. El grupo de mecánica celeste del Observatorio de París promovió su estudio porque las ocultaciones permiten comprobar y perfeccionar las efemérides de los satélites de Júpiter. Existe una teoría dinámica muy elaborada para describir sus movimientos, pero sus predicciones dependen de la calidad de los datos astrométricos con los que se ajusta. La precisión requerida es especialmente exigente ante misiones espaciales como JUICE. La misma ocultación ofrece además una segunda posibilidad: estimar el diámetro angular de la estrella ocultada.

Por qué las ocultaciones permiten una astrometría tan precisa

Una ocultación se produce cuando un cuerpo del Sistema Solar se interpone entre el observador y una estrella, de modo que proyecta sobre la Tierra una región de sombra. En una descripción ideal, bastaría con determinar el instante de desaparición de la estrella y el de su reaparición. En la práctica, las curvas de luz contienen más información, y es preferible analizar su forma completa.

La clave consiste en transformar una medida temporal en una distancia angular. Si conocemos la velocidad angular aparente con la que el borde del objeto ocultante atraviesa la posición de la estrella, un intervalo de tiempo se convierte en un desplazamiento sobre el cielo. En una ocultación lunar, esa velocidad puede ser del orden de 0,4 segundos de arco por segundo; en el caso de cuerpos más lejanos, como asteroides del cinturón principal o satélites galileanos, puede ser mucho menor. Por tanto, una cadencia de registro de milisegundos permite explorar escalas angulares extraordinariamente pequeñas.

Esta técnica no equivale a obtener una imagen directa con semejante resolución. Se trata de una medida indirecta que, gracias a la geometría y al movimiento del cuerpo ocultante, permite acceder a detalles mucho menores que el límite de difracción de un telescopio amateur. La precisión real queda condicionada por la señal disponible, el ruido fotométrico, la sincronización temporal y la calidad del modelo.

Geometría de la ocultación y parámetro de impacto

Para reconstruir la posición de Ganímedes partimos de una referencia estelar cuya posición se supone conocida con gran precisión, gracias a catálogos como Gaia. Las efemérides del satélite presentan incertidumbres de un orden superior: en la conferencia se citó una escala aproximada de 10 milisegundos de arco, equivalente a varias decenas de kilómetros a su distancia. El objetivo es obtener una posición observada de Ganímedes y compararla con la predicha.

Imaginemos el disco de Ganímedes y la trayectoria aparente de la estrella respecto a él. La estrella entra por un borde, permanece oculta y reaparece por el otro. El punto geométrico más útil es el de máximo acercamiento entre el centro del satélite y la posición estelar. La distancia angular mínima recibe el nombre de parámetro de impacto, S, y el instante correspondiente se designa Tm.

Ni S ni Tm pueden medirse directamente, porque durante el acercamiento máximo la estrella está oculta o resulta imposible separarla ópticamente de Ganímedes. Sin embargo, ambos parámetros pueden inferirse a partir de la curva de luz. El instante central de la ocultación determina Tm; la duración del fenómeno, combinada con la velocidad angular relativa, proporciona la longitud de la cuerda atravesada sobre el disco. Si aproximamos Ganímedes por una circunferencia, esa cuerda permite calcular S.

Con el parámetro de impacto y el ángulo de la trayectoria respecto a los ejes ecuatoriales, obtenido de las efemérides, podemos deducir las componentes de la separación en ascensión recta y declinación mediante trigonometría. Así se reconstruye la posición del centro de Ganímedes en el instante Tm. La operación descansa en una idea fundamental de la ciencia: las magnitudes que nos interesan no siempre se observan directamente, sino que se obtienen ajustando a los datos un modelo con significado físico.

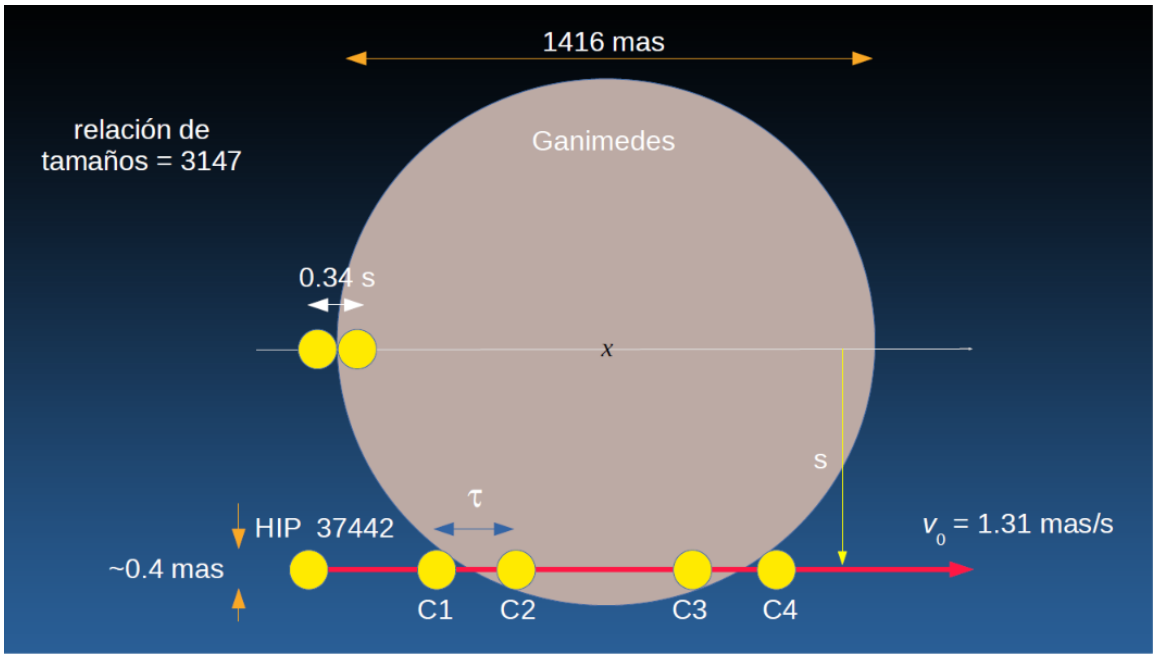

Figura 1. Geometría de la ocultación

La ventaja de observar cerca del límite de la ocultación

La elección de las estaciones de observación no fue casual. Pablo Molina y yo nos situamos muy cerca del límite previsto de visibilidad de la ocultación. Es una estrategia arriesgada, porque un pequeño error en las predicciones puede dejar al observador fuera de la sombra, pero ofrece una ventaja decisiva para medir el tamaño de la estrella.

Si el recorrido de la estrella pasa cerca del centro del disco de Ganímedes, la transición entre estar completamente visible y quedar totalmente oculta es relativamente rápida. En la estimación expuesta, una transición central tendría una duración aproximada de 0,34 segundos. En cambio, una trayectoria casi tangencial al borde del satélite prolonga considerablemente la entrada y la salida de la fotosfera estelar. En una de las estaciones, el intervalo característico se situó alrededor de 2,5 segundos.

Este alargamiento temporal hace más accesible la estructura de la transición a la cadencia de observación disponible. La pendiente de la curva de luz deja de ser la de un escalón ideal y puede revelar que la fuente ocultada tiene un tamaño angular finito. Cuanto mejor se mida esa pendiente, más posibilidades hay de estimar el diámetro de la estrella.

Modelo físico de la curva de luz

El brillo registrado procede de dos fuentes que no se resuelven por separado: Ganímedes y la estrella. El flujo de Ganímedes se considera constante durante el intervalo estudiado, mientras que la contribución estelar disminuye progresivamente a medida que el satélite cubre su disco. Para construir un primer modelo suponemos que ambos cuerpos tienen discos circulares y que el brillo superficial de la estrella es uniforme.

El flujo estelar visible depende entonces de la fracción de su superficie que no está oculta. Antes y después del fenómeno, cuando no hay superposición, recibimos la suma de los flujos de la estrella y de Ganímedes; durante la fase de ocultación total, solo permanece el de Ganímedes. En las fases parciales, la disminución se calcula a partir del área de intersección entre los dos discos. Normalizamos el flujo combinado fuera de la ocultación a la unidad.

El modelo se describe mediante cinco parámetros ajustables: la posición temporal de la curva, su duración, la anchura de las transiciones de entrada y salida, la profundidad de la disminución de flujo y el nivel de referencia. Los tres primeros afectan principalmente al eje temporal y los dos últimos al fotométrico. Esta formulación es deliberadamente sencilla: permite identificar qué información aportan realmente las observaciones sin introducir parámetros que los datos no pueden restringir.

El ajuste se realiza minimizando una función de mérito de tipo mínimos cuadrados. Para cada instante comparamos el flujo calculado con el observado, ponderamos la diferencia por la incertidumbre fotométrica, elevamos al cuadrado y sumamos las contribuciones de todos los puntos. Buscamos el conjunto de parámetros que hace mínima esa discrepancia. La calidad de la observación y la cobertura antes y después del fenómeno son esenciales para que el resultado sea fiable.

Resultados de las cuatro estaciones y medida del diámetro estelar

Se analizaron cuatro curvas de luz independientes. Para valorar si contenían información sobre el tamaño de la estrella se realizaron dos tipos de ajuste: uno suponiendo una fuente puntual, de diámetro nulo, y otro dejando libre el tamaño angular. En tres estaciones, el mínimo de la función de mérito correspondió a una estrella puntual. Esto no demuestra que la estrella carezca de diámetro, sino que la señal de esas observaciones no permite determinarlo con suficiente significación.

La estación 2, correspondiente a Pablo Molina, aportó una curva de luz de mejor calidad, gracias a la combinación de instrumental y condiciones de registro. En este caso, el mejor ajuste se obtuvo con un radio angular de aproximadamente 0,17 milisegundos de arco, equivalente a un diámetro de unos 0,35 milisegundos de arco. Es una medida extraordinariamente pequeña, obtenida sin resolver espacialmente la estrella.

Con la distancia estelar conocida, ese diámetro angular se traduce en un diámetro físico del orden de 13 millones de kilómetros, propio de una estrella notablemente mayor que el Sol. El resultado es compatible, en términos generales, con su clasificación como gigante naranja y con estimaciones fotométricas independientes. Persisten diferencias que podrían estar relacionadas con una simplificación del modelo: hemos supuesto un disco estelar de brillo uniforme, sin incorporar el oscurecimiento hacia el limbo. Introducir ese efecto permitiría refinar la estimación.

Una lección práctica surgió durante la campaña. Algunas estaciones empezamos a registrar demasiado cerca del comienzo previsto de la ocultación, confiando en la exactitud de las efemérides. Pablo Molina inició la grabación con mayor antelación y obtuvo una línea de base más completa. Para ajustar correctamente una curva de luz no basta con registrar la caída: necesitamos datos suficientes antes y después del evento.

estación 1

f_0	f	t_0 (s)	s/R_g	R_s (mas)	$\chi^2_{\min}$
-0.0110	0.07514	111.185	0.99331	0.0301	0.8137407821
-0.0112	0.07514	111.084	0.99362	0.0000	0.8137292178

estación 2

f_0	f	t_0 (s)	s/R_g	R_s (mas)	$\chi^2_{\min}$
+0.0008	0.05521	169.353	0.99333	0.1749	1.0881615683
+0.0008	0.05521	169.322	0.99365	0.0000	1.0883591921

estación 3

f_0	f	t_0 (s)	s/R_g	R_s (mas)	$\chi^2_{\min}$
-0.0052	0.05381	147.580	0.98209	0.0478	0.9928020459
-0.0050	0.05381	147.681	0.98216	0.0000	0.9927702967

estación 4

f_0	f	t_0 (s)	s/R_g	R_s (mas)	$\chi^2_{\min}$
-0.0144	0.06923	229.698	0.93014	0.0052	0.9571599905
-0.0138	0.06977	228.336	0.92936	0.0000	0.9570110732

Figura 2. Resultados de las cuatro estaciones

Una discrepancia astrométrica y una estrella acelerada

La posición deducida para Ganímedes mostró una discrepancia respecto a las efemérides del Observatorio de París. En ascensión recta, el desfase era del orden de 31 milisegundos de arco, cuando inicialmente se esperaba una incertidumbre cercana a 10 milisegundos de arco; en declinación, la concordancia era mejor. Lo notable es que las cuatro estaciones produjeron desviaciones muy semejantes. Esa consistencia apuntaba a una causa sistemática común, más que a errores independientes de las observaciones.

Una hipótesis era que el problema no estuviera en Ganímedes, sino en la posición de la estrella de referencia. En un encuentro de IOTA Europa, investigadores relacionados con el análisis del Observatorio de París comunicaron que también habían detectado esa dificultad. La estrella figura entre las denominadas estrellas aceleradas: su movimiento propio inferido a partir de observaciones de distintas épocas, como Hipparcos y Gaia, no se describe adecuadamente mediante una trayectoria rectilínea uniforme.

Una explicación plausible es la presencia de una compañera estelar no resuelta que produzca un movimiento orbital de la estrella observada. En tal caso, extrapolar su posición usando únicamente un movimiento propio lineal puede introducir errores significativos. Esto limita la exactitud de la astrometría absoluta derivada de la ocultación, aunque no invalida la coherencia de las curvas de luz ni su análisis. La corrección precisa de la posición estelar sigue siendo necesaria para explotar plenamente el resultado.

Conclusiones

Las cuatro observaciones proporcionaron medidas fotométricas coherentes y permitieron reconstruir la geometría de la ocultación. Su comparación reveló una discrepancia astrométrica sistemática que probablemente está relacionada con la referencia estelar y que requiere un tratamiento más elaborado de su movimiento. Por otra parte, la curva de mayor calidad permitió estimar un diámetro angular estelar de aproximadamente 0,35 milisegundos de arco, un resultado compatible con las características físicas de una gigante naranja.

La principal conclusión metodológica es que las ocultaciones estelares permiten obtener información astrométrica y física de enorme precisión con equipos relativamente modestos. También muestran que la astronomía amateur puede participar en toda la cadena de trabajo científico, desde el diseño de una campaña hasta el análisis matemático de los resultados y su interpretación.

Preguntas

¿Hubo observaciones realizadas justo fuera del límite previsto de la ocultación y qué valor tienen?

Se comentó una observación desde la zona de Marsella, inicialmente clasificada como negativa, aunque en la información consultada posteriormente aparecía como positiva. Esa discrepancia de clasificación estaba pendiente de aclaración. En cualquier caso, una

observación negativa próxima al límite de una positiva es muy valiosa porque ayuda a delimitar la sombra del cuerpo ocultante.

¿Qué método se utilizó para minimizar la función de mérito de cinco parámetros? ¿Podía quedar atrapado en un mínimo local?

El problema es relativamente sencillo porque la función depende con mucha intensidad de varios parámetros y de forma más débil del diámetro estelar. Se pueden ajustar primero los parámetros mejor determinados y estudiar después el diámetro. Son adecuados métodos habituales de optimización, como variantes del método de Newton, gradientes conjugados o descenso por gradiente. En este caso no se observó un paisaje complejo de mínimos locales que dificultase identificar el mínimo relevante.

¿Las observaciones negativas pueden ser especialmente importantes cuando el cuerpo ocultante es irregular?

Sí. Si una estación registra la ocultación y otra cercana no la registra, ambas contribuyen a acotar el borde proyectado del objeto. En cuerpos de forma irregular, esta información puede ser decisiva para reconstruir su contorno. En el caso de Ganímedes se empleó una aproximación esférica, pero el principio general sigue siendo válido.