

26a

CONVENCIÓN DE ASTRONOMÍA



SABADELL
14, 15, 16 MARZO
2025

Más allá de la observación, promoviendo la colaboración PRO-AM

Exploración del fascinante TTV, "transit timing variation", en exoplanetas

Florence Libotte



Después de las dos charlas de Mercè y Anastasia, que ya os han hablado de exoplanetas, hoy me he propuesto hablar de un aspecto muy, muy concreto de los exoplanetas que podemos observar con fotometría, que es el Transit Timing Variation. Fascinantes, a mí por lo menos me lo parecen. Intentaré mostraros todo lo que se puede sacar de los Transit Timing Variations.

El fenómeno de Transit Timing Variation, o TTV, como se le conoce en inglés, es un poco la impuntualidad de los exoplanetas cuando esperamos que ocurra un tránsito. Algunos se presentan con retraso, otros con adelanto.

Este fenómeno da información. Como veremos, da información. Os muestro las efemérides de la página web de Exoclock. En el eje vertical lo que tenemos es el Transit Timing Variation, que en realidad es el ΔT de toda la vida, aplicado a exoplanetas, con una especificidad que vamos a ver.

En el caso del WASP-6b, veis que la línea del 0-C minutos está más o menos alineada con todos los puntos. Aquí, en cuanto a Transit Timing Variation, no vemos nada. En los otros tres casos, como en el TOI-216, observamos que de repente la curva sube y baja, es decir, que a veces el tránsito se adelanta y otras se atrasa. Pero hablamos de diferencias significativas. Aquí vemos variaciones de cinco minutos, pero en otros casos ya estamos en los 300 minutos.

Habéis visto antes el COROT-10b, del que habló Mercè, que ya mostraba una variación de hasta cuatro horas. En el caso del WASP-33b, este planeta sigue un patrón en el que se atrasa cada vez más.

Por último, en el WASP-12b, que muchos de vosotros habréis observado, hay muchísimas mediciones. ¿Y qué vemos aquí? A simple vista, podemos intuir una curva suave, incluso sin hacer matemáticas. A lo largo de esta charla veremos cada uno de estos casos y sus explicaciones.

He dividido esta charla en dos grupos. En el primero, hablaré de sistemas multiplanetarios, ya que en estos casos los Transit Timing Variations se explican por la interferencia de otro planeta. En el segundo, hablaré más bien de la formación y evolución de sistemas planetarios, ya que ahí explicaremos los TTV sin necesidad de la presencia de otro planeta.

Soy observadora de exoplanetas. Como ha dicho Mercè, formo parte de este grupo de investigación. Aquí podéis ver todos los telescopios que tenemos la suerte de poder utilizar. Además, tengo el privilegio de pertenecer al equipo de MOSCAT-2, que utiliza el telescopio Carlos Sánchez, de 1,50 metros, dedicado completamente al estudio de exoplanetas y, en particular, a la investigación de los Transit Timing Variations.

Ahora, comencemos con los sistemas multiplanetarios. Solo como recordatorio, existen cinco grandes métodos para detectar exoplanetas. La velocidad radial, que es el método histórico por excelencia. Luego, la fotometría de tránsito, la imagen directa, que ahora es posible gracias a telescopios como el James Webb, el microlensing y la astrometría.

A día 3 de marzo, hay aproximadamente 6.000 exoplanetas confirmados, y el método dominante es la fotometría de tránsito, con más de 4.000 planetas detectados de esta manera. Luego, sigue la velocidad radial, y los demás métodos, aunque útiles, aún cuentan con menos descubrimientos.

Desde 2005 se ha contemplado la posibilidad de usar los Transit Timing Variations para detectar exoplanetas. En 2010, por primera vez, se logró validar un sistema planetario utilizando este método. Fue el caso del sistema Kepler-9b y 9c, dos exoplanetas de tipo Saturno que orbitan alrededor de una estrella similar al Sol.

Este hallazgo fue importante porque mostró que estos dos planetas estaban en resonancia. Es decir, uno tiene un período de 19 días y el otro el doble. Sus TTV están relacionados, pero de manera inversa.

Este estudio permitió confirmar que existía una relación gravitacional entre ambos planetas, que orbitaban la misma estrella y que, además, eran realmente planetas.

La resonancia es un fenómeno bien conocido. Lo interesante aquí es que los TTV pueden usarse para buscar resonancias. Esto es relevante en el caso que explicaré a continuación.

Lo que quiero mostrar aquí es hasta qué punto los TTV de dos planetas relacionados pueden parecerse. A simple vista, parecen un reflejo el uno del otro, pero en realidad corresponden a dos planetas distintos. Son una pareja gravitacionalmente ligada y muestran una resonancia casi perfecta de 2:1. Cuando uno se atrasa, el otro se adelanta, y viceversa.

Este método ha permitido detectar exoplanetas que no transitan. Aunque no los podemos ver directamente con fotometría, sí podemos inferir su existencia gracias a los Transit Timing Variations.

Un caso reciente es el del sistema Kepler-2015b. Aquí, la curva del Transit Timing Variation muestra oscilaciones regulares que encajan perfectamente con el modelo esperado para un sistema de dos planetas, incluso cuando uno de ellos no transita.

Este fenómeno es fundamental, porque nos permite detectar planetas invisibles. Si observamos el TTV de un planeta en resonancia, podemos determinar su período orbital y, a partir de ahí, inferir la existencia del otro planeta.

Ahora, pasemos al segundo grupo de TTV. Se trata de aquellos que no se explican por la presencia de otro planeta, sino por otros mecanismos.

En 1995, cuando se descubrió el primer exoplaneta que llevó al Premio Nobel, se trataba de un gigante gaseoso en una órbita extremadamente cercana a su estrella. Este hallazgo fue revolucionario.

¿Cómo podía existir un planeta así, tan cerca de su estrella? La hipótesis fue que estos planetas se formaban lejos, a varias unidades astronómicas, y con el tiempo migraban hacia el interior del sistema.

Este fenómeno se conoce como decaimiento orbital. A medida que el planeta orbita su estrella, su trayectoria describe una espiral descendente hasta estabilizarse en una órbita donde encuentra equilibrio.

Esta imagen del ALMA muestra un sistema protoplanetario real. Cuando un sistema es joven y aún hay gas en su disco, los planetas pueden verse frenados por el material circundante, lo que provoca que su órbita decaiga.

Un caso llamativo es el de un planeta tan cercano a su estrella que sufre deformaciones gravitacionales hasta adquirir una forma ovalada. Además, pierde materia que es absorbida por su estrella. Su tasa de decaimiento orbital es de unos 30 milisegundos por año. Con este ritmo, en unos 10 millones de años, o bien las fuerzas de marea lo destruirán, o bien será engullido por su estrella.

Este fenómeno se confirmó tras varias discusiones científicas, descartando otros procesos alternativos.

Por último, quiero hablar de un fenómeno aún más extremo: la precesión nodal.

Imaginad que un astrónomo observa un tránsito con su telescopio, pero cuando revisa los datos, no hay ningún tránsito.

Este efecto, llamado precesión nodal, se ha detectado en solo cuatro exoplanetas. Se trata de una oscilación en el plano orbital del planeta, similar a lo que ocurre con la órbita de la Luna, que causa que los eclipses de Sol no ocurran con regularidad.

En el caso del WASP-33b, el período de precesión nodal es de 700 años. Se ha calculado que el tránsito de este planeta fue visible desde 1977 y lo será hasta 2055. Después, desaparecerá de la vista por más de un siglo.

Solo durante el 20% de su período de precesión el tránsito es observable.

En términos del parámetro de impacto, que indica a qué altura cruza el planeta sobre la estrella, si su valor es 0, significa que transita por el ecuador. Si es +1 o -1, el tránsito aún es visible. Sin embargo, más allá de esos valores, el tránsito deja de observarse.

En conclusión, los TTV son fascinantes. Nos permiten determinar períodos orbitales, masas y detectar planetas invisibles. También nos revelan la evolución de los sistemas planetarios y nos sorprenden con efectos como la precesión nodal.