¿Son válidos los modelos de atmósferas estelares?

EL ANÁLISIS DETALLADO DEL EXOPLANETA HD 209458B DESVELA QUE LOS MODELOS DE ATMÓSFERAS ESTELARES EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO DE LOS PLANETAS EXTRASOLARES INTRODUCEN ERRORES SISTEMÁTICOS EN EL CÁLCULO DE SUS TAMAÑOS

Por Antonio Claret (IAA-CSIC)

EL EXOPLANETA HD 209458B ES, DESDE SU DESCUBRIMIENTO EN EL AÑO 2000, UN PLANETA EXTRASOLAR ESPECIAL.

Fue el primero de una serie de exoplanetas descubiertos por la técnica de los tránsitos, basada en la pequeña disminución de luz producida por el planeta al pasar por delante de su estrella. Una curiosidad que puede ser interesante para los aficionados a la Astrofísica es que la estrella madre de HD 209458b puede verse con unos prismáticos en la constelación de Pegaso, ya que se trata de una estrella de magnitud 7 (está a unos 150 años luz de nuestro Sistema Solar).

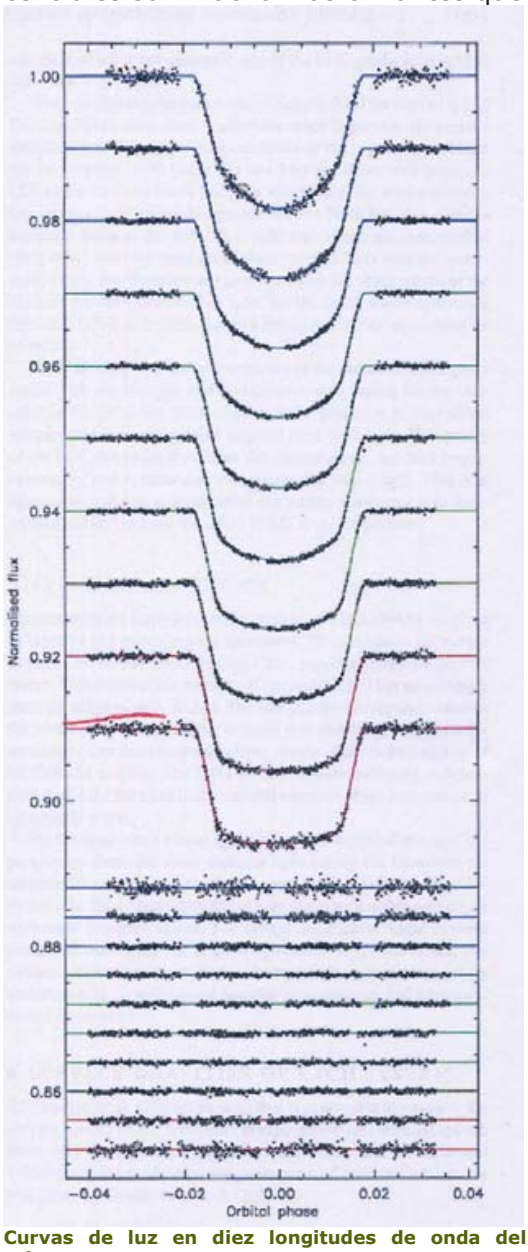
La masa de HD 209458b es 0,7 veces la masa de Júpiter o unas 220 veces la masa de la Tierra y su año, o lo que tarda en completar una órbita alrededor de su estrella, dura aproximadamente 3,5 días. Su radio es 1,3 veces el radio de Júpiter. Debido a su proximidad a la estrella madre, presenta una temperatura alta (más de 800 grados centígrados) y se han detectado, debido al efecto de irradiación de la estrella, signos de evaporación de su atmósfera.

Pero las curiosidades de nuestro exoplaneta no acaban aquí: su atmósfera fue la primera en ser caracterizada y se han encontrado trazas de oxígeno y carbono. Más recientemente, Barman (2007) anunció que había detectado vapor de agua en la atmósfera del exoplaneta. Se trata de una medición muy difícil de realizar y depende, entre otros factores, de los modelos adoptados. Tal resultado debe tomarse con cuidado ya que el estudio del tránsito de HD 209458 nos revela, como veremos más tarde, que algunos modelos usados en su análisis presentan algunos problemas.

El oscurecimiento hacia el borde

La investigación del tránsito de un exoplaneta sigue, *grosso modo*, las mismas técnicas utilizadas en el estudio de las estrellas binarias eclipsantes. En cierto sentido, los tránsitos son más sencillos de analizar porque el planeta posee mucha menos masa, es considerablemente más frío que la estrella y su luz no contribuye a la luminosidad total

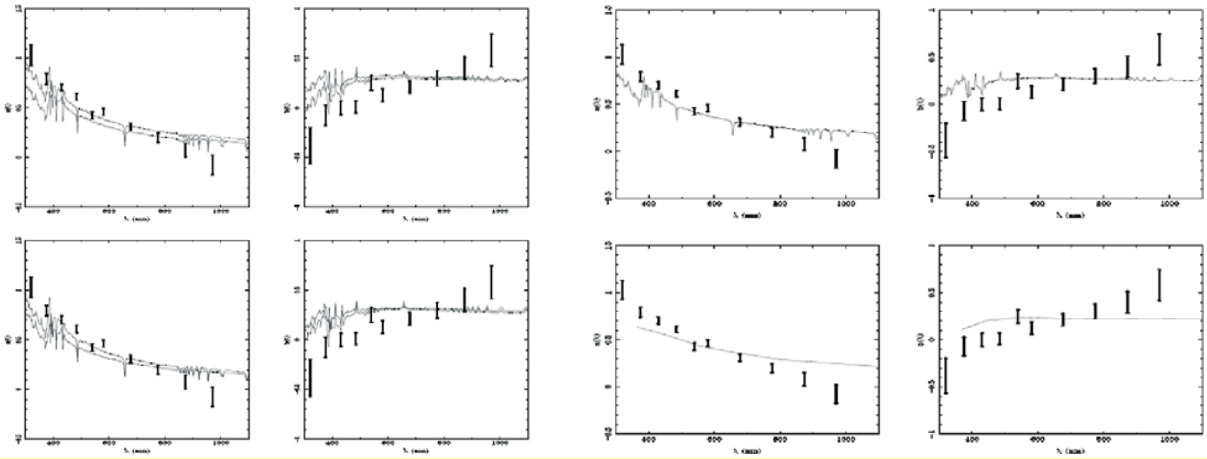
del conjunto. Además, sólo tenemos que estudiar la irradiación de la estrella madre sobre el planeta y no la irradiación mutua, como ocurre en las binarias eclipsantes. La forma del tránsito, o de la curva de luz que obtenemos al observarlo, depende de cómo la luz de estrella está distribuida en su disco. Tal efecto se llama *limb-darkening*, u oscurecimiento hacia el borde y se aprecia muy claramente en el Sol, cuyas regiones centrales son mucho más brillantes que el borde.



Curvas de luz en diez longitudes de onda del tránsito del exoplaneta HD 209458b obtenidas con el telescopio espacial Hubble.

Se trata de un efecto intrínseco de todas las atmósferas estelares y se debe a la semitransparencia de las capas que la forman y al aumento de temperatura de las mismas hacia el interior. Así, si miramos hacia el centro de una estrella vemos capas más profundas (y más calientes), mientras que cuando miramos hacia los bordes vemos capas menos profundas y más frías, por lo tanto más oscuras.

Pues este efecto tiene mucho que decir cuando un exoplaneta transita delante del disco de su estrella madre. No sabemos cómo se distribuye la luz en una estrella, así que tenemos que recurrir a modelos teóricos de atmósferas estelares que sí nos puede dar esta información. Haciendo uso de estos modelos podemos calcular la curva de luz teórica e inferir algunas propiedades de los exoplanetas. Si la curva de luz es de muy buena calidad podemos incluso derivar empíricamente los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde. Hace un año aproximadamente detectamos que estos modelos presentan ciertos problemas cuando comparamos los coeficientes empíricos de algunas binarias eclipsantes con los valores teóricos (Claret 2008). Sin embargo, los datos de estas estrellas eran escasos y dispersos y no permitían emitir una conclusión definitiva sobre la validez de los modelos de atmósferas estelares. Era un indicio, pero sólo eso. Hace unos meses, un colaborador nuestro, J. Southworth (2008), analizó el tránsito de HD 209458b. La curva de luz fue obtenida con el telescopio espacial Hubble y es de las mejores obtenidas hasta ahora para exoplanetas. Tal calidad le permitió inferir los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde de forma empírica. De su análisis se desprende el mismo indicio encontrado por nosotros usando binarias eclipsantes, aunque no era el objetivo principal de su trabajo. Decidimos atacar el problema con herramientas teóricas más sofisticadas, como cálculos monocromáticos (en una sola longitud de onda, en lugar de filtros) y modelos de atmósferas geométrica y físicamente más sofisticados (Claret y Hauschildt 2003).



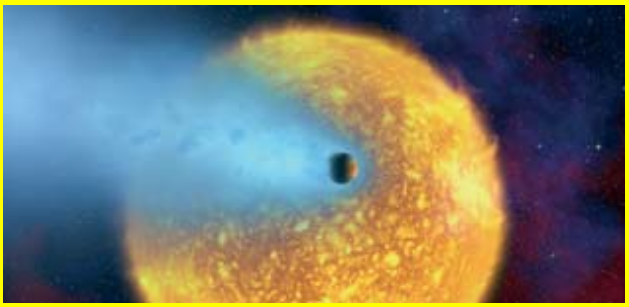
Izda: efectos de las incertezas en la temperatura efectiva y en la metalicidad en los coeficientes de oscurecimiento hacia el borde cuadráticos. Las barras de error representan los valores empíricos para HD 209458a.
Dcha: comparación entre valores teóricos del oscurecimiento hacia el borde usando modelos plano paralelos ATLAS (cuadros superiores) y modelos con simetría esférica PHOENIX (cuadros inferiores). Las observaciones están representadas por las barras de error.

Desacuerdo con los modelos

Ahora teníamos más elementos para analizar la situación real de los modelos de atmósferas estelares: en lugar de las habituales observaciones con cuatro filtros, teníamos diez observaciones abarcando un amplio sector espectral: de 320 hasta los 980 nanómetros.

Hay varias causas posibles para explicar un desacuerdo entre los coeficientes teóricos de oscurecimiento hacia el borde y los empíricos: el tipo de función que se utiliza para representar las intensidades, errores en la observación de la estrella madre o problemas intrínsecos en los modelos de atmósferas. Se utilizan la aproximación lineal y la cuadrática para describir cómo la intensidad se distribuye sobre el disco estelar. La aproximación lineal pude ser descartada cuando tenemos observaciones de muy buena calidad, como es el presente caso. Analizamos también la influencia de los errores en la gravedad y en la temperatura efectiva de la estrella madre y estas barras de error no son lo suficientemente grandes como para explicar el desacuerdo (imagen superior, izda).

Se han detectado, debido al efecto de irradiación de la estrella, signos de evaporación de su atmósfera



La explicación restante se relaciona con la capacidad de los modelos de atmósferas estelares para describir la distribución de las intensidades. Utilizamos modelos más sofisticados con geometría esférica y las discrepancias persistían (imagen superior, dcha). Así que, eliminadas las otras posibles causas, podemos concluir que los modelos actuales de atmósferas estelares no son capaces de predecir con la precisión necesaria cómo se distribuyen las intensidades a lo largo del disco estelar, al menos para el rango de la temperatura efectiva de la estrella madre (Claret 2009).

Tal resultado indica que hay errores sistemáticos en las masas y principalmente en los radios de los exoplanetas estudiados. Por ejemplo, las barras de error en la relación de los radios pueden ser entre tres y cinco veces las publicadas. Los problemas detectados en los modelos de atmósferas pueden tener también consecuencias en otros campos clave de la Astrofísica que dependen de su utilización (que son muchos y variados).
Sería interesante comprobar la validez de los modelos de atmósferas en los varios ámbitos de la Astrofísica y confirmar (o no) las discrepancias descritas aquí.

REFERENCIAS

Barman, T. 2007, Astrophysical Journal, 661, 191
Claret, A. 2009, Astronomy & Astrophysics, in press
Claret, A. 2008, Astronomy & Astrophysics, 482, 259
Claret, A., Hauschildt, P. H. 2003, Astronomy & Astrophysics, 412, 91
Southworth, J. 2008, MNRAS, 386, 1644

Antonio Claret (IAA_CSIC)

Este artículo aparece en el número 29, octubre 2009, de la revista "Información y Actualidad Astronómica", del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA_CSIC)