

PLANETAS Y EXOPLANETAS II

Como ya dijimos en nuestra anterior entrega, se han ido descubriendo nuevos objetos que orbitan alrededor del Sol, pero el Sol no es sino una estrella, por lo que, en principio, podría pensarse que, puesto que hay miles de millones de estrellas, muchas de ellas podrían tener sistemas planetarios. Sin embargo, la búsqueda no iba a ser fácil, puesto que si se habían necesitado siglos y avances tecnológicos en instrumentación para descubrir nuevos objetos transneptunianos debido a lo alejados que se encuentran de la Tierra (y recordemos que están dentro del sistema solar) el descubrirlos en otras estrellas parecía misión imposible. Recordemos que la estrella más cercana, próxima-Centauro, se encuentra a unos 2 años-luz del Sol. Lógicamente, para descubrir estos planetas (si existiesen) habría que emplear técnicas indirectas, y no observación directa.

A lo largo del siglo XX, hubo varios anuncios de descubrimientos de exoplanetas, si bien, el primer caso confirmado fue el de Wolszczan y Fraim en 1992, quienes con el radiotelescopio de Arecibo en Puerto Rico descubrieron planetas alrededor del púlsar PSR 1257+12. Un púlsar es el objeto resultante de la explosión de una supernova. Se trata de un objeto que contiene gran parte de la masa inicial de la estrella, pero es el que la masa está degenerada, pues la explosión se ha producido por el colapso gravitatorio que ha superado a la energía radiada por reacciones nucleares. El remanente de esta supernova se conoce como estrella de neutrones. Una estrella de neutrones tiene una masa entre 1.3 y 21 veces la masa solar, pero tiene un radio de tan solo 12 km.

POR ANTONIO ELIPE

Debido a las leyes de conservación del momento angular, un objeto tan denso tiene que girar muy rápido, varias veces por segundo. Debido a que los polos magnéticos no coinciden con el eje de rotación, la estrella emite pulsos debido a la aceleración de la materia cerca de los polos magnéticos. Cuando se detectan estos pulsos (mediante radioastronomía) la estrella se conoce como púlsar. Pues bien, los planetas descubiertos por Wolszczan se cree que corresponden a restos de la explosión de la supernova que no fueron destruidos y siguen orbitando, caso que se estima muy poco frecuente, aunque posteriormente se han detectado una media docena de planetas alrededor de púlsares. Las pequeñas variaciones detectadas en la frecuencia de los pulsos eran originadas por los exoplanetas.

En 1995, Mayor y Queloz, de la Universidad de Ginebra, anunciaron la primera detección de un exoplaneta alrededor de la estrella 51 Pegasi, una estrella de la secuencia principal, es decir, una estrella normal, lo que abrió una nueva línea de investigación en Astronomía. En efecto, a partir de este descubrimiento, se han mejorado notablemente las técnicas e instrumentos de espectroscopía, lo que ha permitido la detección de un elevado número de sistemas planetarios en otras estrellas.

Dadas las distancias a que se encuentran las estrellas de nosotros, y puesto que los planetas reflejan la luz de su estrella madre, su brillo es generalmente mucho menor, menos de una millonésima que la estrella, por lo que difícilmente puede detectarse directamente. Sin embargo, hay observaciones indirectas que los pueden detectar. Este tipo de observaciones ya había sido empleado en estrellas dobles. Una estrella doble o binaria, en realidad, es un par de estrellas lo suficientemente próximas que se atraen gravitatoriamente entre sí, describiendo órbitas keplerianas alrededor de su mutuo centro de masas. En el caso de binarias, muchas pueden verse separadas por métodos astrométricos,

es decir, mediante un telescopio; son conocidas como binarias visuales. Pero si están muy próximas entre sí, con el telescopio se observan como un solo objeto. Sin embargo, están en movimiento alrededor de su centro de masas, por lo que se detecta una variación en la velocidad radial, que se puede medir en su espectro. En el espectro de una estrella aparecen una serie de líneas de emisión o absorción, que corresponden a los distintos elementos químicos (ionizados o no) de que está constituida la estrella. Los elementos químicos emiten estas líneas en determinadas longitudes de onda, por lo que

En 1995, Mayor y Queloz, de la Universidad de Ginebra, anunciaron la primera detección de un exoplaneta alrededor de la estrella 51 Pegasi.

el espectro es, en cierta medida, una huella dactilar de la estrella. Sin embargo, si la estrella está en movimiento, estas líneas características se desplazan periódicamente hacia mayor longitud de onda (lo que quiere decir por el efecto Doppler que la estrella se aleja, corrimiento hacia el rojo) y hacia menor longitud de onda (hacia el azul, la estrella se acerca). Pues bien,



*Foto por Warner Strauss (www.flickr.com)

con estas medidas se pueden detectar la mayor parte de los elementos orbitales y el par se denomina estrella espectroscópica.

Otra vía de detección de exoplanetas es mediante la fotometría. Si el planeta pasa por delante de la estrella (visto desde la Tierra), se producirá una disminución de la cantidad de luz que nos llega de la estrella. Esta técnica también ha sido empleada con éxito durante muchos años en el cálculo de órbitas de estrellas dobles, las llamadas eclipsantes. La variación periódica de esta oscilación de luz también permite conocer ciertos elementos orbitales, e incluso el tamaño del planeta con relación a su estrella. Esta técnica es la que está utilizando el satélite COROT de la ESA, cuya misión es detectar exoplanetas de tipo rocoso (es decir, similar en composición a la Tierra) mediante fotometría con un pequeño telescopio de solamente 30 cm de diámetro en órbita terrestre.

En algunos casos, también ha podido conocerse la existencia de un exoplaneta de un modo indirecto, calculando la influencia gravitatoria que tenía que ejercer el planeta para poder explicar las variaciones orbitales que sufre la órbita de una estrella doble.

Puesto que los métodos espectroscópicos son los más empleados en el descubrimiento de exoplanetas, veamos bre-

vemente cómo se pueden obtener los elementos orbitales. Los datos de observación corresponden a curvas (en realidad puntos que se ajustan por una curva) de velocidades radiales del centro de masas, es decir, la proyección de la velocidad a lo largo de la visual observador-objeto. Mediante simples operaciones a partir de las leyes de Kepler, se puede probar que esta velocidad radial satisface la ecuación:

$$VR = K [\cos (\omega + f) + e \cos \omega],$$

siendo el factor K :

$$K = \frac{2\pi}{P} \frac{m}{m+M} \frac{a \sin i}{\sqrt{1+e^2}}$$

donde P es el periodo, M la masa de la estrella, m la masa del planeta, a el semieje mayor, e la excentricidad, i la inclinación, ω el ángulo del periastró y el ángulo f es la anomalía verdadera.

P y K pueden determinarse directamente a partir de la gráfica de observaciones; la excentricidad e , el semieje mayor a y el ángulo del periastró ω también se determinan a partir de los datos de observación (tras un proceso no tan directo). La masa M de la estrella puede estimarse por su tipo espectral y, por último, se puede calcular el producto ($m \sin i$), sin que pueda determinarse el valor de la masa del planeta, a no ser que se disponga de observaciones adicionales, como por ejemplo, astrométricas.

Mediante la tercera ley de Kepler, puede verse que la constante observada K es directamente proporcional al producto $m \sin i$, e inversamente

proporcional a la raíz cuadrada de M a, por lo que K es mayor (y por lo tanto más fácil de observar) si la masa m del planeta es elevada y el semieje mayor a es pequeño. Esta es la razón por la que la mayor parte de los exoplanetas detectados tienen una masa muy grande y se encuentran muy próximos a la estrella. Para la mayor parte de los planetas descubiertos, $K > 30$ m/s. Para un planeta con idénticas características que nuestra Tierra (masa y semieje mayor), $K = 10$ cm/s, límite que se encuentra muy por debajo de lo que pueden captar los mejores espectrógrafos y dentro de orden de las variaciones de velocidad radial por turbulencias de la estrella.

Como acabamos de ver, no es casual que la mayor parte de planetas descubiertos sean de gran masa y muy próximos a su estrella, justo al revés de lo que ocurre en nuestro sistema solar, lo que a su vez ha supuesto una revisión de las teorías de formación de sistemas plane-

tarios puesto que, cuando solamente se conocía el sistema solar, la teoría tenía que explicar solamente éste pero, al descubrirse sistemas muy distintos del nuestro, ha habido que explicar la causa de estos sistemas tan diferentes.

En principio, las teorías de formación planetaria dicen que los planetas se forman por acreción de polvo y gas en un disco alrededor de la estrella. Este hecho viene confirmado por observaciones de estrellas jóvenes con discos de polvo y gas, y que se sospecha que poseen grandes planetas. Cuando se forma un planeta, va recogiendo la materia de un anillo circular, abriendo claros en el disco. Se creía hasta 1990 que, cuando el planeta adquiría el tamaño de Júpiter, ese claro ya está vacío y por lo tanto el planeta no crece más. Sin embargo, simulaciones modernas muestran que el planeta va acumulando más materia que le llega a través de una especie de puentes que proceden de la parte externa del anillo y que conectan el planeta con el disco. Esta estruc-

tura viene explicada por la teoría del problema de 3 cuerpos, uno de los temas más estudiados en Mecánica Celeste desde Euler hasta la actualidad; la transferencia de masa tiene lugar, precisamente, por los puntos de Euler de dicho problema. Si la masa del planeta alcanza 80 veces la de Júpiter, se produce la fusión del Hidrógeno, dando lugar a una estrella marrón. Una vez formado el planeta, éste sigue con el disco, pudiendo dar lugar a estructuras de anillos, tal como sucede con los planetas de mayor tamaño de nuestro sistema solar.

Con el descubrimiento de los exoplanetas, se ha abierto un nuevo campo en la Astronomía.

La dinámica anterior puede explicarse modelizando el movimiento de una partícula que inicialmente se encontrase en un movimiento circular próximo al planeta. Esta partícula choca con el resto de partículas transferidas del disco, originando una transferencia de energía que recibe el planeta y que origina que empujen al planeta hacia el interior. Si bien este efecto es muy pequeño debido a la poca masa de la partícula, resulta que son muy numerosas, por lo que en conjunto tienen el efecto de que acercan el planeta hacia la estrella. El estudio cuidadoso de las ecuaciones diferenciales que rigen este movimiento lleva a la conclusión de que la órbita disminuye de tamaño y aumenta la excentricidad. Al desaparecer estas partículas también lo hace su efecto, de modo que sus órbitas se estabilizan.

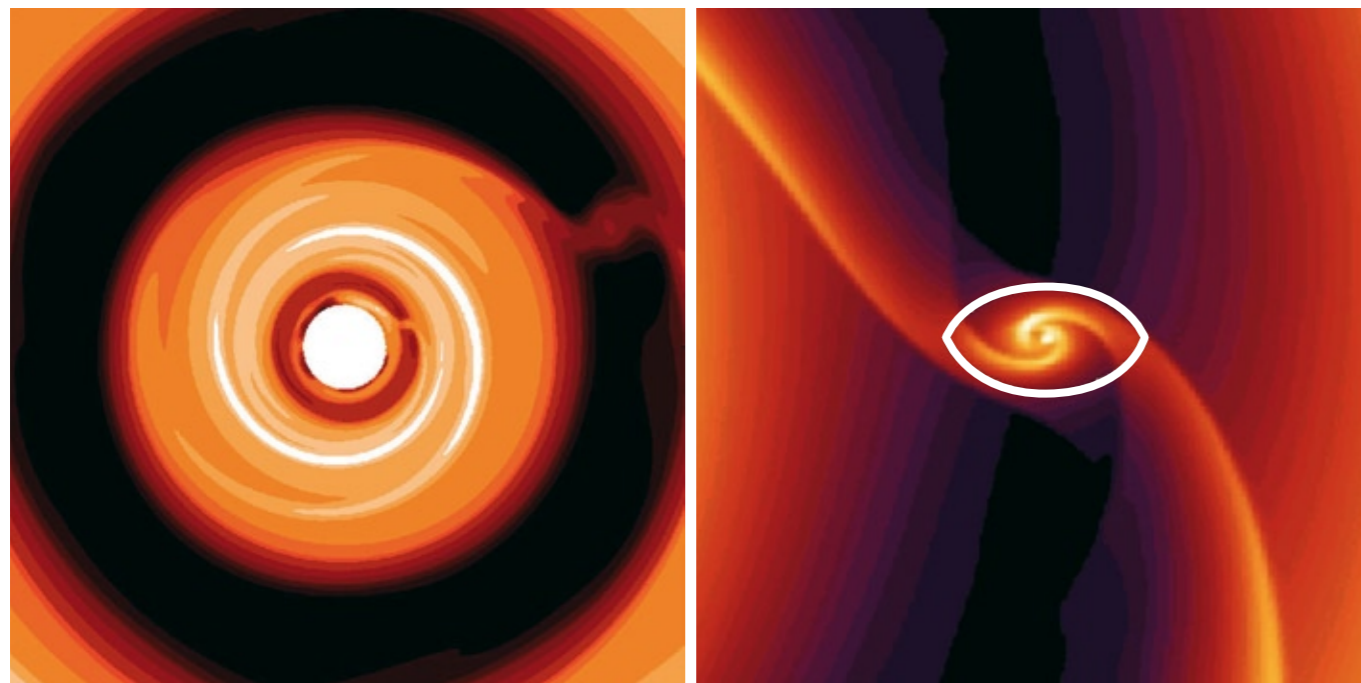
Otra de las características, que presentan muchos de los sistemas extra solares descubiertos, es que poseen varios planetas con conmensurabilidades entre sus periodos. Este fenómeno no sucede entre los planetas del sistema solar, pero sí que es frecuente entre los satélites de los planetas. Las teorías desarrolladas para explicar estas conmensurabilidades o resonancias en los satélites, por ejemplo entre los satélites galileanos de Júpiter, se están empleando para explicar las resonancias entre exoplanetas pero, dado que las masas y periodos son tan distintos a los de los exoplanetas, se ha abierto una línea de investigación en la dinámica orbital para entender este fenómeno y de qué modo la presencia de resonancias va a afectar al movimiento secular de los planetas, es decir, a su movimiento en periodos muy amplios de tiempo.

En resumen, con el descubrimiento de los exoplanetas, se ha abierto un nuevo campo en la Astronomía, tanto desde el punto de vista observacional, donde se emplean técnicas ya utilizadas en estrellas dobles, complementadas con otras nuevas técnicas, incluyendo satélites artificiales, como desde el teórico, explicando el por qué los sistemas descubiertos son tan diferentes de nuestro sistema solar. Además, surgen otras cuestiones en las que se está avanzando, como es el identificar qué exoplanetas pueden ser habitables, o por lo menos pueden albergar vida.

Como vemos, la Astronomía, una ciencia observacional, sigue viva ofreciendo nuevos retos intelectuales al ser humano.

Antonio Elipe

Dpto. de Matemática Aplicada
Director del Centro Universitario de la Defensa
Universidad de Zaragoza



Simulación de la generación de planetas a partir de la nube de polvo que envuelve a una estrella. La acreción de polvo hace que se forme un vacío una vez formado el planeta (izda). Sin embargo, también puede seguir recibiendo masa de la parte externa del disco de polvo mediante mecanismos más complejos.