

ARTÍCULO

## BÚSQUEDA DE EXOPLANETAS

Salvador Curiel y Luis Alberto Curiel Ramírez  
Instituto de Astronomía -UNAM

## Búsqueda de Exoplanetas

### Resumen:

El descubrimiento de los primeros planetas fuera del Sistema Solar marcó una nueva era no sólo para la búsqueda de exoplanetas, sino también para el estudio de la formación de los sistemas planetarios. A la fecha se han encontrado más de 500 exoplanetas, la gran mayoría de ellos son gigantes gaseosos similares a Júpiter. Esto se debe principalmente a que las técnicas que se usan para buscar exoplanetas son excelentes para encontrar planetas gigantes cercanos las estrellas, pero poco sensibles a planetas similares a la Tierra. Sin embargo, en los últimos años se ha logrado encontrar algunos planetas similares a la Tierra, con lo cual abre la posibilidad de estudiar su posible atmósfera y por consiguiente de buscar posibles indicios de vida.

**Palabras clave:** Exoplaneta, Técnicas de observación, Técnicas de ajustes de datos observacionales

### Otros Sistemas planetarios

El descubrimiento de los primeros planetas fuera del Sistema Solar marcó una nueva era no sólo para la búsqueda de exoplanetas, sino también para el estudio de la formación de los sistemas planetarios. Los primeros exoplanetas encontrados tienen características totalmente ajenas a las conocidas en nuestro sistema solar. Son en su gran mayoría planetas gigantes, similares a Júpiter, pero con órbitas mucho más cercanas a sus estrellas que Mercurio al Sol. A esta nueva clase de planetas se le ha denominado Júpiter Caliente. A partir de entonces se han encontrado más de 500 exoplanetas, la gran mayoría de ellos son gigantes gaseosos similares a Júpiter, Saturno, Urano e inclusive Neptuno y a distancias muy variadas de la estrella a la que se encuentran ligados (ver por ejemplo la enciclopedia de exoplanetas [exoplanet.eu/catalog-RV.php](http://exoplanet.eu/catalog-RV.php)). Sin embargo, la mayoría se encuentra a distancias muy cercanas a la estrella, comparadas con la distancia de Júpiter al Sol. Incluso una gran fracción de estos planetas se encuentra dentro del equivalente a la órbita de la tierra en el Sistema Solar. Algunos de estos planetas se encuentran formando sistemas múltiples de 2, 3, o más planetas (actualmente, el record de exoplanetas en un mismo sistema planetario es de 6 planetas), aunque por el momento menos de una decena de los sistemas planetarios conocidos contienen 4 o más planetas. Esto, en parte, es debido a un sesgo observacional. Las técnicas utilizadas para buscar exoplanetas son excelentes para encontrar planetas gigantes cercanos a la estrella, pero poco sensibles a planetas similares a la Tierra. Sin embargo, en los últimos años se han encontrado planetas menos masivos, con masas similares, aunque mayores, a la de la Tierra. El estudio de estrellas pequeñas (unas diez veces

menos masivas que el Sol), llamadas Enanas Cafés, ha permitido encontrar algunos planetas con unas pocas veces la masa de la Tierra. A estos planetas se les ha llamado Super-Tierras. Se espera que el satélite Kepler ([kepler.nasa.gov](http://kepler.nasa.gov)), en funcionamiento desde mediados del 2009, permita encontrar en los próximos años un número grande de planetas similares a la Tierra. Esto abrirá la posibilidad de buscar evidencia de vida en planetas similares al nuestro.

Al comparar los sistemas planetarios conocidos con el Sistema Solar se encuentran resultados muy interesantes. Los exoplanetas se pueden dividir en dos familias: la de Júpiter Calientes, con periodos orbitales de sólo unos pocos días y órbitas circulares, y la de los planetas más alejados de su estrella principal, que en su gran mayoría muestran órbitas marcadamente más excéntricas. A pesar de que la mayoría de los exoplanetas encontrados hasta ahora tienen masas similares a la de Júpiter, sólo unos cuantos comparten otras características con él, tales como su Periodo y el radio de su órbita. Son pocos los sistemas planetarios múltiples en los cuales las órbitas de los planetas son similares a las órbitas de los planetas en el Sistema Solar. Uno de los sistemas planetarios que muestra mayor semejanza al Sistema Solar es el Sistema Upsilon Andrómeda, en el cual recientemente se encontró un cuarto planeta.

## **El Sistema Upsilon Andrómeda**

Un equipo de astrónomos del Instituto de Astronomía de la UNAM, descubrió recientemente un nuevo exoplaneta orbitando la estrella Upsilon Andrómeda (es decir, la estrella Upsilon en la constelación de Andrómeda [1]), la cual tiene características similares al Sol [2]. Siguiendo la nomenclatura adoptada internacionalmente, el nuevo planeta ha sido nombrado Upsilon Andrómeda e (ó ups And-e) [3]. La importancia científica de este descubrimiento es que por un lado con este cuarto planeta, Upsilon Andrómeda se convirtió en el quinto sistema planetario conocido hasta ahora con al menos 4 planetas y por el otro lado, este es el planeta más parecido a nuestro Júpiter que se ha encontrado hasta ahora. Dicho descubrimiento fue publicado en la prestigiosa revista *Astronomy and Astrophysics* (Enero del 2011).

El descubrimiento se llevó a cabo utilizando un nuevo método robusto y novedoso, desarrollado por ellos mismos, que puede ser usado para analizar datos y ajustar modelos teóricos a ellos [4]. Con este método se ajustan las órbitas de los planetas, obteniendo los parámetros que mejor describen cada una de ellas, además de la masa mínima de los planetas [6].

Ya se sabía con anterioridad que la estrella tipo Solar Upsilon Andrómeda, la cual se encuentra ubicada a una distancia de la Tierra de 44 años luz (dentro de lo que se conoce como la vecindad Solar), en la constelación de Andrómeda [1], alberga al menos tres exoplanetas con periodos entre los 4.6 días y los 3.5 años [5]. Sin embargo al combinar mediciones de velocidad radial [6][7] que

son del dominio público y que fueron obtenidas utilizando varios telescopios (en el Observatorio de Lick en Arizona en los Estados Unidos y en el Observatorio de Haute-Provence en Francia) durante los últimos 20 años, dio como resultado el descubrimiento de un nuevo exoplaneta con características notablemente similares a las de Júpiter en nuestro Sistema Solar. Este nuevo planeta tiene una masa de 1.06 veces la masa de Júpiter y un periodo y un semieje mayor de 10.54 años y 5.24 UA [8], respectivamente, muy parecidos al periodo de 11.86 años y semieje mayor de 5.2 UA de Júpiter [9]. Además, este nuevo estudio de los movimientos planetarios en este sistema revela interacciones gravitacional complejas entre los planetas y da indicios de la evolución a largo plazo del sistema.

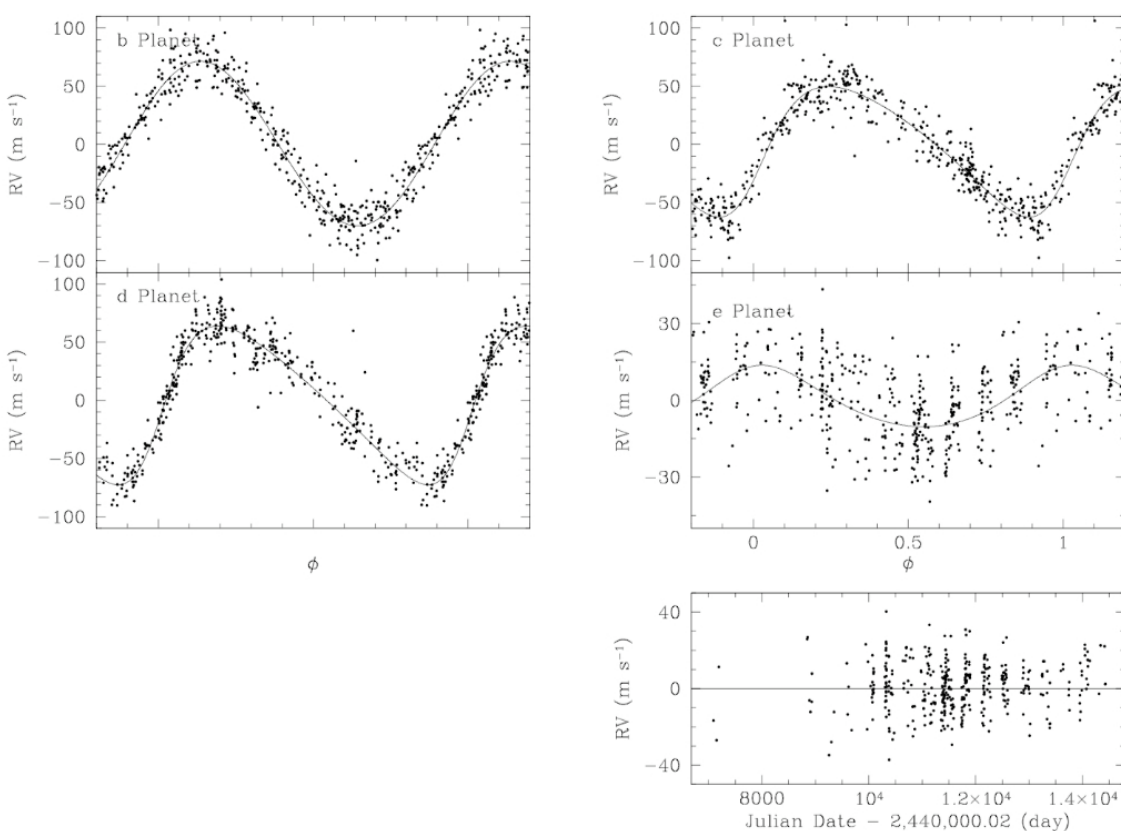


Figura 1: El diagrama muestra los ajustes de las órbitas de los 4 planetas en el sistema planetario Upsilon Andrómeda. El nuevo planeta descubierto es el segundo de arriba hacia abajo del lado derecho. El panel inferior muestra los residuos de las velocidades radiales después de remover los ajustes de las 4 órbitas. Como se puede ver, ya no queda ninguna señal aparente en los residuos.

## ¿Qué tan parecido es el Sistema Upsilon Andrómeda al Sistema Solar?

El sistema planetario Upsilon Andrómeda tiene características muy interesantes. Por un lado, este sistema planetario es muy parecido al Sistema Solar ya que tres de los cuatro planetas

conocidos tienen órbitas muy parecidas a órbitas ocupadas en el Sistema Solar: la órbita de Venus, el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter (donde se encuentra Ceres) y la órbita de Júpiter (ver Figura 2). Por el otro, este es el único sistema planetario conocido donde al menos 4 planetas tienen masas similares a la de Júpiter (entre 0.5 y 4 veces la masa de Júpiter), en comparación, Saturno (el segundo planeta más masivo en el Sistema Solar) tiene una masa menor a una tercera parte de la masa de Júpiter.

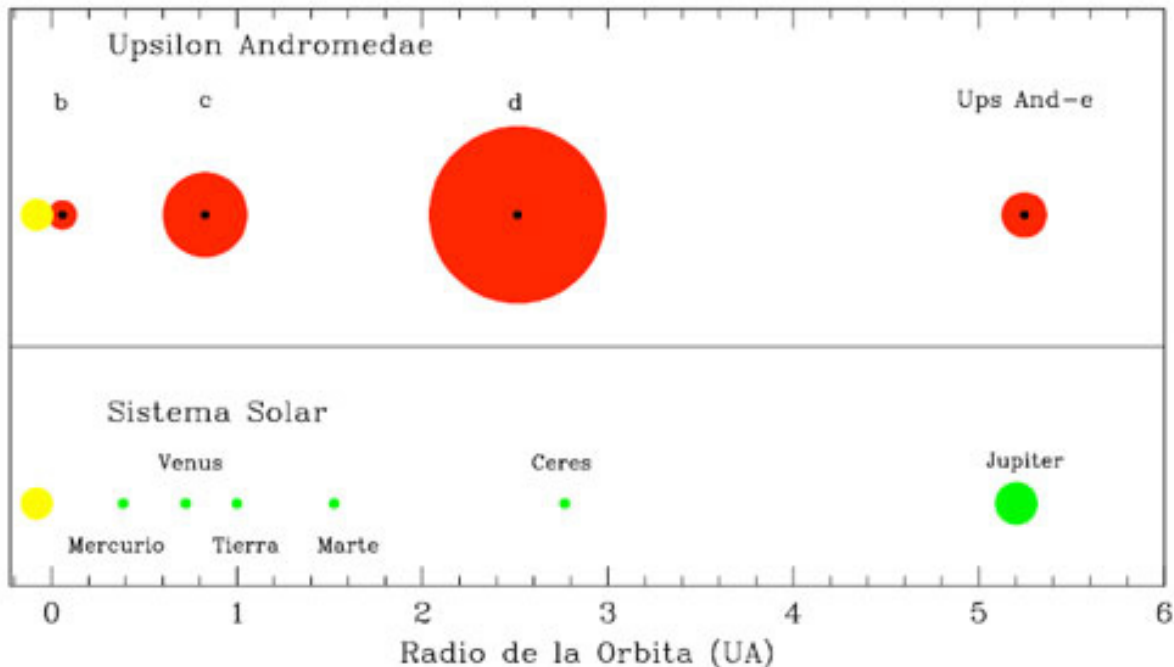


Figura 2: Diagrama que compara la distribución de las órbitas y las masas mínimas de los planetas en Upsilon Andrómada con la distribución de los planetas en el Sistema Solar. El tamaño de los círculos es proporcional a la masa mínima de los planetas. Los círculos amarillos muestran la posición de las dos estrellas (el tamaño no está a escala). Nótese que el planeta b se encuentra mucho más cerca de Upsilon Andrómada que Mercurio del Sol. Este diagrama muestra la gran semejanza entre las órbitas de los planetas en ambas estrellas. Tres de los planetas en Upsilon Andrómada tienen órbitas muy similares a tres de las órbitas pobladas en el Sistema Solar – la órbita del planeta e en Upsilon Andrómada coincide con la órbita de Júpiter, mientras que los planetas c y d tienen órbitas muy similares a las de Venus y Ceres (en el cinturón de asteroides entre Marte y Júpiter), respectivamente.

En la última década y media se han descubierto más de 500 exoplanetas (planetas fuera del Sistema Solar), los cuales están asociados a más de 400 Sistemas Planetarios. A la fecha se

sabe que al menos 50 sistemas planetarios contienen 2 o más planetas, de los cuales únicamente 7 contienen 4 o más planetas. El exoplaneta descubierto por el grupo mexicano forma parte de este reducido grupo de sistemas con mayor número de planetas.

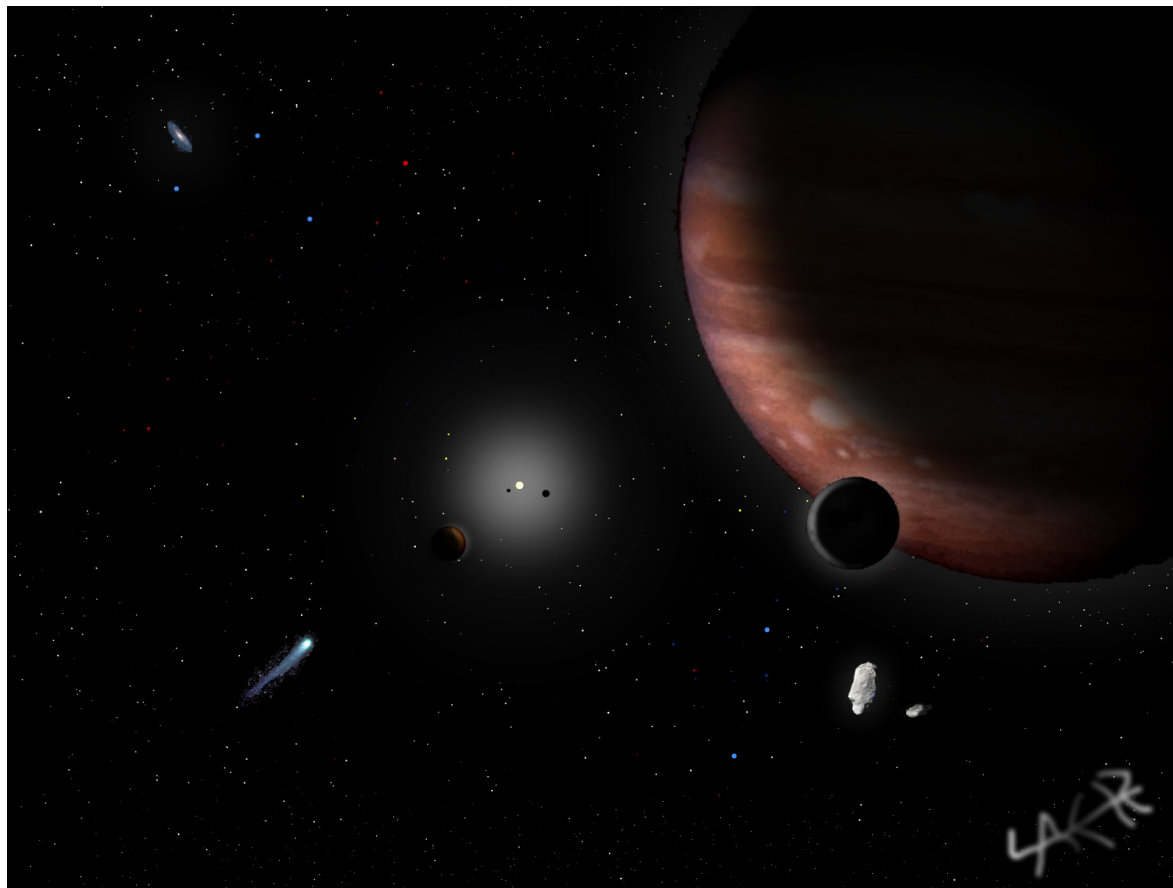


Figura 3a: Representación artística del sistema planetario Upsilon Andrómeda. Créditos: Luís Alberto Curiel Ramírez.

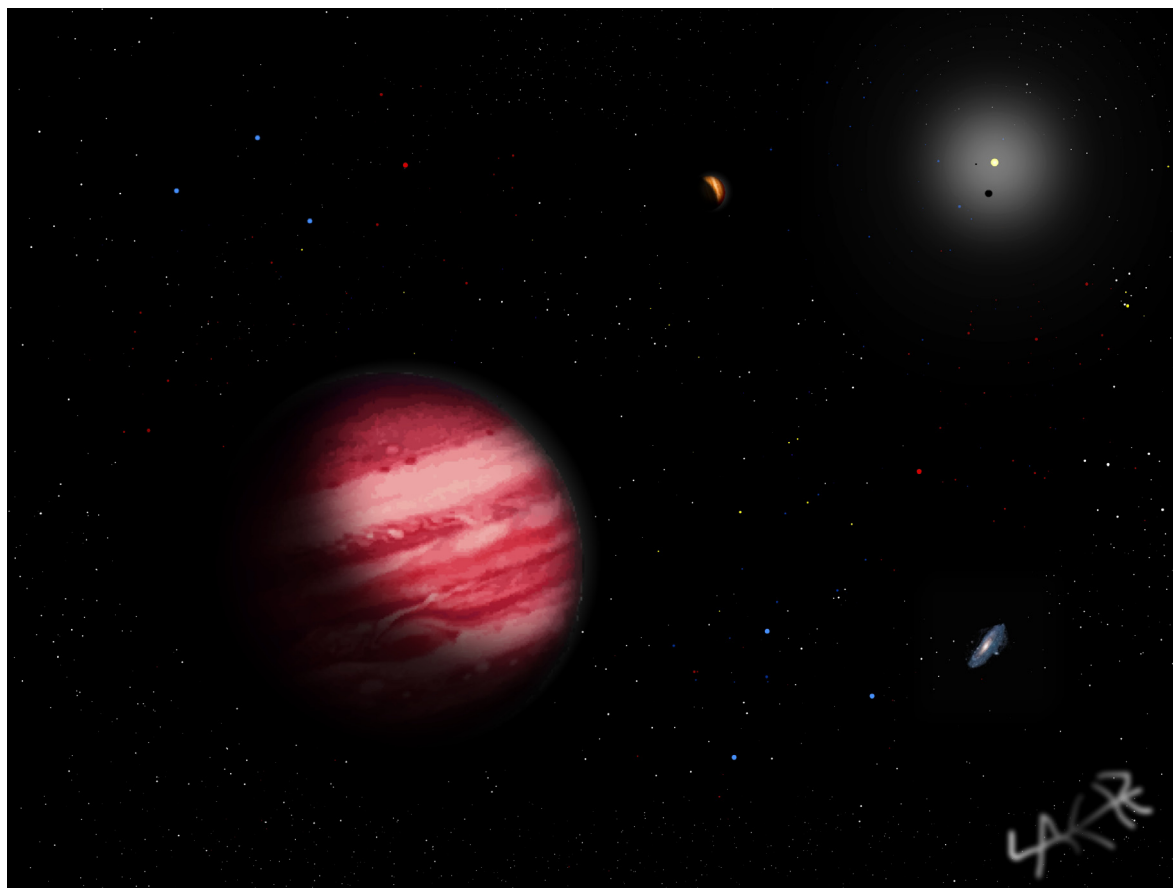


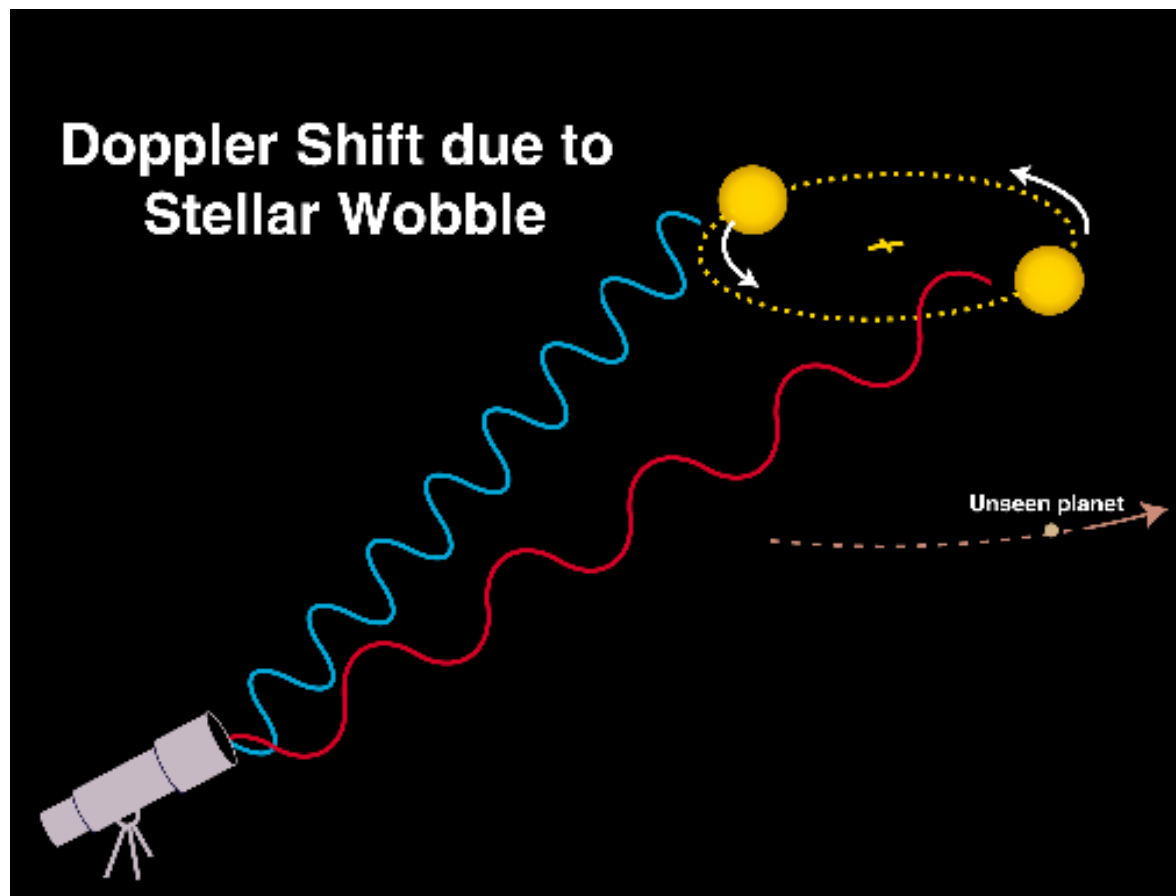
Figura 3b: Otra representación artística del sistema planetario Upsilon Andrómeda. Créditos: Luís Alberto Curiel Ramírez.

### Midiendo el bamboleo de las estrellas

La gran mayoría de los exoplanetas (más de 500) han sido descubiertos utilizando la técnica conocida como Velocidad Radial [6][7], a través de la cual se estudia el movimiento orbital excéntrico de la estrella debido al jalón gravitacional de los planetas que giran alrededor de ella. Al estudiar las variaciones de la velocidad radial (velocidad en la línea de la visual) de la estrella como función del tiempo se puede aislar la señal debida a cada uno de los planetas [6][7]. La detección positiva de un exoplaneta se logra cuando el planeta es suficientemente masivo como para producir movimientos medibles desde la Tierra y al mismo tiempo los datos obtenidos son numerosos y cubren al menos una orbita completa del planeta. El obtener centenares de mediciones individuales de la velocidad radial de la estrella ayuda a encontrar nuevos planetas, así como a mejorar la determinación de sus parámetros orbitales.

Mientras más masivo es el planeta y más cerca de la estrella se encuentra, el pequeño bamboleo (movimiento orbital minúsculo) de la estrella es mayor y por lo tanto es más fácil medirlo con

los instrumentos actuales. Esto explica porque la gran mayoría de los exoplanetas encontrados hasta ahora son Júpiter Calientes, es decir, son planetas con masas similares o mayores a la de Júpiter pero en orbitas muy cercanas a la estrella. Planetas con características similares a nuestro Júpiter en el Sistema Solar son difíciles de encontrar debido a que las mediciones deben cubrir un periodo mayor a los 12 años (para cubrir al menos un periodo de su órbita alrededor de la estrella) y el primer exoplaneta fue descubierto en 1995, hace apenas 15 años.





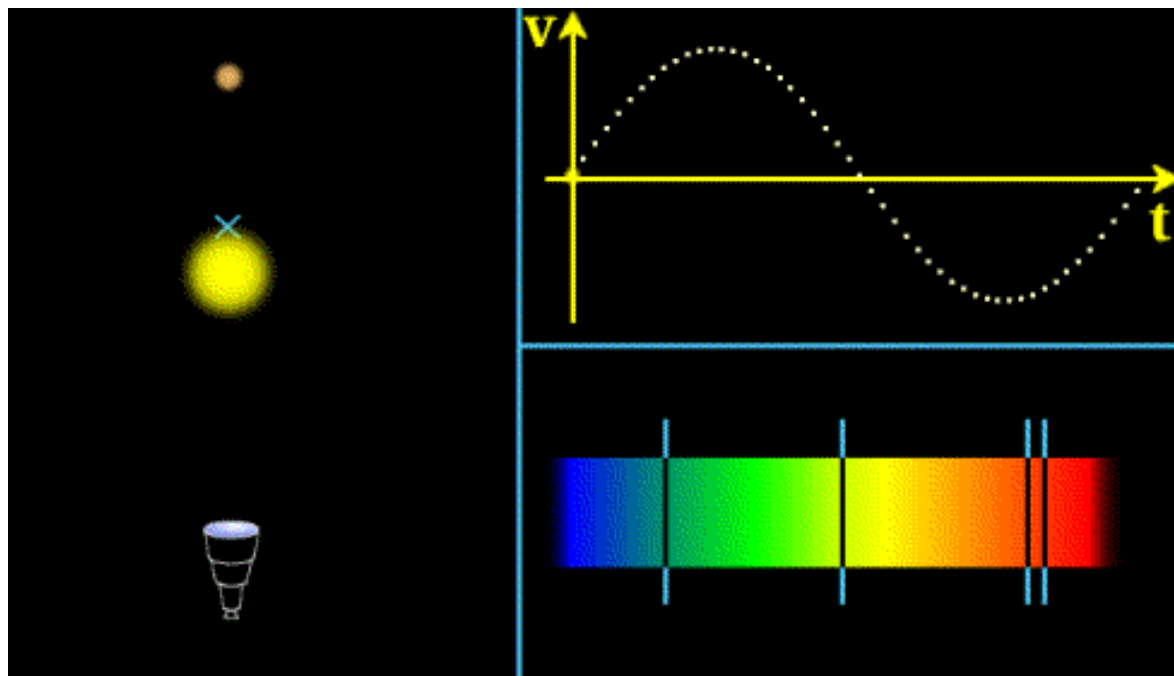


Figura 4: Método de Velocidad radial. Debido al jalón gravitacional de los planetas sobre la estrella y de la estrella sobre los planetas, tanto la estrella como los planetas giran alrededor de su Centro de Masa. Al observar el movimiento de la Estrella, lo que en realidad vemos es el movimiento que producen en la estrella los planetas que giran alrededor de ella. La presencia de un sólo planeta provoca que la estrella gire en una órbita similar a la del planeta. Si observáramos el sistema planetario de canto (es decir, en el plano de la órbita), veríamos que la estrella se acerca y se aleja de nosotros con un periodo igual al periodo de rotación del planeta alrededor de la estrella. Si medimos la velocidad del vaivén encontraríamos que la velocidad cambia en una forma aproximadamente sinusoidal, como se muestra en la figura. La presencia de varios planetas provoca una forma aparentemente caótica, que es la suma de las contribuciones de todos los planetas girando alrededor de la estrella. Los métodos de ajustes, como el usado para descubrir el cuarto planeta en Upsilon And, permiten separar la contribución de los planeta y así obtener los parámetros (por ejemplo, su masa, su periodo y el radio de su órbita) de cada uno de ellos.

## Planetas encontrados en órbitas estables

Un estudio reciente de la estabilidad de las órbitas en el sistema planetario Upsilon Andrómeda mostró que hay pocas orbitas estables donde podría haber planetas todavía sin descubrir alrededor de esta estrella. La orbita del nuevo planeta descubierto cae justo en una de estas orbitas estables predichas. Esto sugiere que la formación planetaria es un mecanismo muy eficiente, capaz de poner planetas en orbitas dinámicamente estables.

## Nuevas perspectivas para el código empleado

El método de ajuste de órbitas está siendo usado para buscar exoplanetas en otros sistemas planetarios. Ya se han encontrado varios candidatos a exoplanetas. Sin embargo, es necesario llevar a cabo estudios detallados de estos candidatos para poder establecer si efectivamente

se trata de exoplanetas, o si las señales encontradas pueden ser explicadas por actividad en la estrella. Por ejemplo, manchas en la superficie de la estrella (análogas a las manchas solares) podrían explicar señales que simulan órbitas con periodos similares al tiempo de rotación de la estrella. Por otro lado, si la estrella tiene ciclos de actividad donde el número y el tamaño de las manchas cambia con el tiempo (por ejemplo, el ciclo de actividad del Sol es de aproximadamente 11 años), esto podría explicar señales con periodos largos (por ejemplo, de varios años).

Finalmente, una nueva versión del código utilizado para encontrar al cuarto planeta en Upsilon Andrómeda, basado en el algoritmo genético AGA [4], está siendo utilizado para estudiar el tránsito de planetas frente a sus estrellas. Este método de tránsito de planetas [10][11] es el segundo método que ha dado mejores resultados hasta ahora, después del método de velocidad radial. En este caso se estudia la curva de luz de la estrella buscando la disminución en el brillo de la estrella que indique la presencia de exoplanetas. Los resultados obtenidos hasta ahora indican que el método de ajuste utilizado es idóneo para buscar exoplanetas por el método de tránsito.

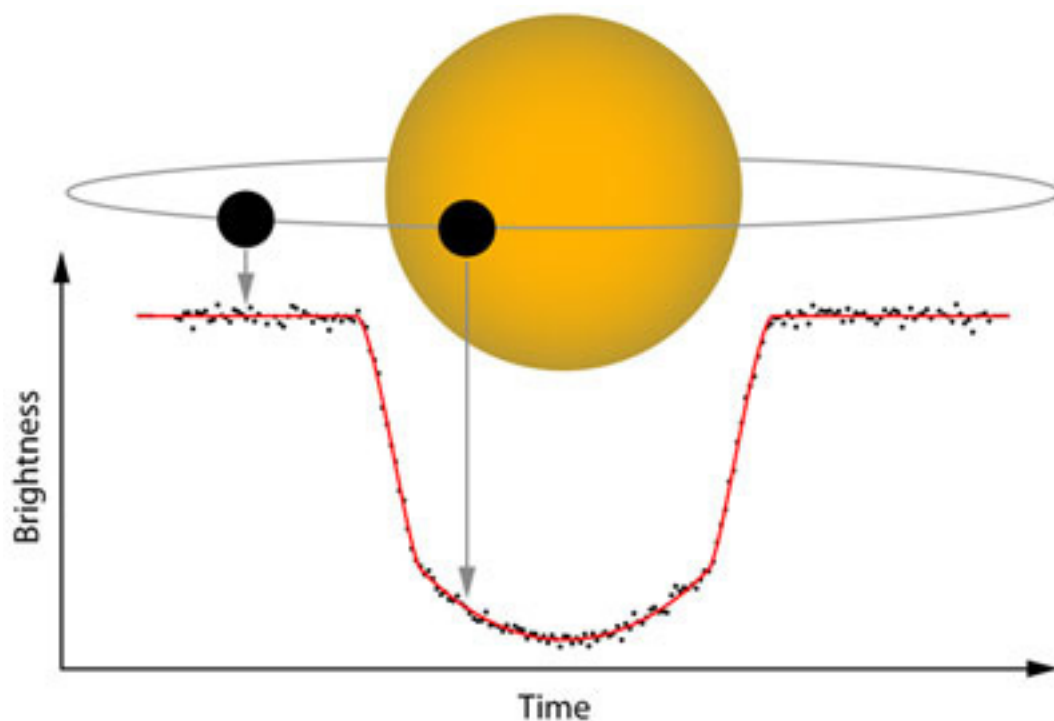


Figura 5: Método de Tránsito. Cuando la órbita del planeta es tal que pasa frente a la cara de la estrella que da hacia nosotros, bloqueando parte del disco de la estrella. Esto hace que durante el tránsito del planeta frente al disco de la estrella disminuya la radiación que llega a nosotros. La forma de la caída, la duración y la profundidad de la disminución de la radiación que nos llega de la estrella dan información sobre el tamaño del planeta y de su órbita. Esta ilustración muestra la variación en la curva de luz de la estrella que ocurre durante el tránsito del planeta. Mientras más grande es el planeta, bloquea más luz proveniente de la estrella.

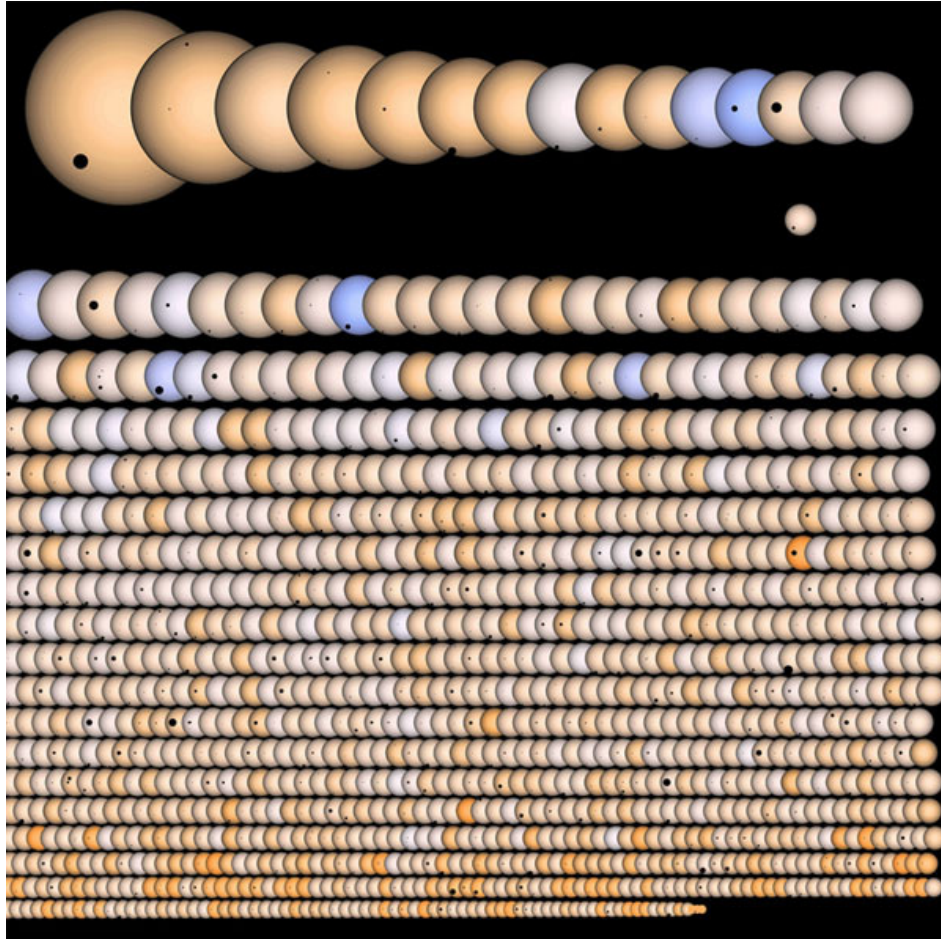


Figura 6: Esta ilustración, creada por Jason Rowe del Equipo científico de la misión Kepler, muestra algunas características de los más de 1000 planetas candidatos encontrados por Kepler. Se muestra los tránsitos de los planetas encontrados con sus estrellas, ordenados de acuerdo al tamaño (la masa) de la estrella. Los discos simulados de las estrellas y de las sombras de los planetas en tránsito se muestran ambos con la misma escala relativa. Algunas estrellas muestran más de un planeta en tránsito. Como punto de referencia, se incluye al Sol a la misma escala y aislado, del lado derecho, debajo de la primer línea de estrellas. Se incluye también la silueta tanto de Júpiter como de la Tierra en tránsito frente al disco solar. Las siluetas de Júpiter y la Tierra, así como la de los demás exoplanetas, se ven mejor si se agranda la imagen. Figura tomada de la página oficial de la misión Kepler (<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/candidates/>).

## Bibliografía

1. Cantó, J., Curiel, S. & Martínez-Gómez, E., 2009, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 501, Issue 3, pp. 1259-1268: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2009A%26A...501.1259C>
2. Curiel, S. Cantó, J., Georgiev, L., Chávez, C. & Poveda, A., 2011, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 525, id.A78: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2011A%26A...525A..78C>
3. The Extrasolar Planets Encyclopedia: <http://exoplanet.eu/>
4. Kepler, A Search for Habitable Planets: <http://kepler.nasa.gov/>
- 5.- Astronomy Picture of the Day: [http://apod.nasa.gov/apod/image/0608/planets\\_iau\\_big.jpg](http://apod.nasa.gov/apod/image/0608/planets_iau_big.jpg)

## Notas al margen

[1] Dada su cercanía (tan sólo unos 40 años Luz de distancia [9]), la estrella Upsilon Andrómeda puede ser observada a simple vista, es decir, sin necesidad de un telescopio o binoculares, en la Constelación de Andrómeda, a tan sólo 10 grados al este de la Galaxia Andrómeda como una estrella de color amarillento.

[2] Upsilon Andromedae es una estrella tipo F8 V y con una edad de unos 3 mil 800 millones de años, es decir, es muy parecida al Sol. Su temperatura es de alrededor de 6,200 grados (el Sol tiene 5,500 grados), su masa es 1.3 veces la del Sol y su tamaño es 1.6 veces más grande que el Sol.

[3] La comunidad Astronómica Internacional ha adoptado un sistema para nombrar a los planetas asociados a otras estrellas, también llamados exoplanetas. De acuerdo a este sistema, a los planetas descubiertos alrededor de una estrella se les designa con una letra del alfabeto siguiendo el nombre de la estrella, de acuerdo al orden de su descubrimiento e iniciando con la letra b; la letra a se reserva para la estrella misma. Por ejemplo, el primer planeta descubierto de la estrella Upsilon Andrómeda lleva como nombre Upsilon Andromedae-b (ó ups And-b), el segundo ups And-c, etc. Siguiendo esta nomenclatura, el nuevo planeta descubierto, al ser el cuarto, ha sido nombrado ups And-e.

[4] El método utilizado, AGA (Algoritmo Genético Asexual), para obtener las órbitas de los 4 planetas, se basa en las estrategias genéticas de los seres vivos para alcanzar el individuo óptimo. En este caso, se busca el modelo que mejor representa un conjunto de datos observacionales. Lo novedoso del método es el uso de una estrategia asexual (como lo hacen las bacterias) y no sexual (como ocurre en la mayoría de los seres vivos, incluyendo el ser humano). Resulta ser un método fácil de implementar y muy robusto. El método AGA fue publicado en el 2009 por J. Cantó, S. Curiel y E. Martínez-Gómez en la revista *Astronomy & Astrophysics*.

[5] Hasta principios del presente año (2010) se habían confirmado tres planetas orbitando la Estrella Upsilon Andrómeda. El más cercano a la estrella fue reportado por el grupo del San Francisco State University (liderado por G. Marcy y R. P. Butler) en 1997. Dos años más tarde, los otros dos planetas fueron dados a conocer en una publicación conjunta por ese mismo grupo y por astrónomos del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. Esto convirtió a Upsilon Andrómeda en el sistema con más planetas, además del Sistema Solar, conocido hasta entonces.

[6] El descubrimiento (o mejor dicho la inferencia) de planetas orbitando una estrella se realiza de una manera por demás ingeniosa. Los planetas no se pueden detectar directamente con los instrumentos actuales; aun con los más sofisticados. Por ello los astrónomos han recurrido a otros procedimientos. El más concurrido y que ha dado los mejores resultados, el Método de Velocidad Radial, radica en detectar el efecto gravitacional del planeta sobre la estrella en torno a la que gira. El efecto es minúsculo, pero detectable hoy en día.

[7] Una estrella sin planetas girando a su alrededor estaría estática, o bien moviéndose en línea recta con velocidad constante. Sin embargo, con planetas orbitándola, su movimiento se ve alterado pues tiene que, a su vez, orbitar en torno al centro de masa del sistema estrella-planetas. El tirón gravitacional de los planetas sobre la estrella se observa desde la Tierra como un cambio en la velocidad radial de la estrella, produciendo un movimiento de vaivén, como si la estrella se acercara y se alejara de nosotros en forma periódica. Este pequeño bamboleo (aparente acercamiento y alejamiento) de la estrella no sólo nos indica la existencia de planetas en su cercanía, sino que nos permite determinar las características de sus órbitas como son su excentricidad (es decir su forma), su distancia a la estrella y sobre todo, nos permite estimar su masa.

[8] Usando el método de Velocidad Radial, los astrónomos sólo pueden estimar una masa mínima para los planetas, debido a que la masa real del planeta también depende de la inclinación de su órbita de acuerdo a la línea de visión, la cual en general es desconocida. Desde un punto de vista estadístico, la masa mínima estimada se encuentra a menudo cercana a la masa real del planeta.

[9] Un año luz es la distancia que recorre la luz en un año a una velocidad de 300,000 kilómetros por segundo. Una Unidad Astronómica (1 UA) es la distancia promedio entre la Tierra y el Sol.

[10] El método de Tránsito se basa en el fenómeno Astronómico que observamos cuando los planetas internos a la órbita de la Tierra (es decir, Mercurio y Venus) cruzan frente al disco solar y bloquean parte de la radiación que produce el Sol. Cuando observamos un tránsito de Mercurio o de Venus lo que vemos es una mancha circular oscura (el planeta) que cruza sobre el disco solar. Si las órbitas de los planetas en el Sistema Solar fueran totalmente coplanares (es decir, en un

mismo plano), veríamos tres tránsitos de Mercurio y uno de Venus cada año. Sin embargo, dado que las orbitas de los planetas no son completamente coplanares, los tránsitos de los planetas internos ocurren cada varios años. En el caso de los exoplanetas, un tránsito ocurre, como en el caso de los planetas internos, cuando el planeta pasa en frente de la estrella y bloquea parte de la radiación que recibimos de la estrella. Para que ocurra el tránsito de un exoplaneta es necesario que su órbita pase entre nosotros y la estrella. Para ver el tránsito de varios planetas en una misma estrella es necesario además que sus órbitas sean coplanares. La probabilidad de que esto ocurra es mayor cuando las orbitas de los planetas son pequeñas, es decir, que todos los planetas observados se encuentren cerca de la estrella. Este método favorece el observar tránsitos de planetas con periodos orbitales pequeños.

[11] Utilizando el satélite Kepler se han descubierto recientemente más de 1000 exoplanetas candidatos (<http://kepler.nasa.gov/Mission/discoveries/candidates/>). La mayoría de ellos son similares a Júpiter, en cuanto a su masa pero no a su órbita. Por otro lado algunos de ellos son tipo Tierra y abren la posibilidad de intentar el estudio de su posible atmósfera y buscar posibles indicios de vida. Sin embargo, todavía falta comprobar que los planetas candidatos descubiertos por Kepler son en realidad exoplanetas y no falsos positivos que aparentan ser exoplanetas, pero no lo son. Es necesario hacer un seguimiento de estos planetas candidatos ya sea desde tierra (usando la técnica de velocidad radial) o desde el espacio (por ejemplo, buscando múltiples tránsitos del mismo planeta candidato, lo cual confirmaría que son exoplanetas) para comprobar si se trata efectivamente de exoplanetas. Se espera que en los próximos años el Satélite Kepler ayude a incrementar substancialmente el número de exoplanetas descubiertos y sobretodo ayude a encontrar muchos exoplanetas tipo Tierra.