

Rodrigo Díaz

Instituto de Astronomía y Física del Espacio,  
UBA-Conicet

# Gliese 411b

## Encuentro cercano con un nuevo exoplaneta

### Introducción

Desde la antigüedad, los planetas despertaron la curiosidad de la humanidad. Esas luces brillantes en el cielo se diferencian de todas las demás por una razón que se intuye profunda y trascendente. Su posición, a lo largo de los meses y los años, cambia con respecto a las llamadas estrellas fijas. De hecho, el término planeta viene del griego Πλανήτης, que significa errante, vagabundo o trotamundos. Explicar esta relativamente sencilla observación fue el objetivo de los primeros modelos de Ptolomeo y de Hipatia de Alejandría. Este problema iluminó el camino hacia la revolución científica, que culminó con la formulación de la ley de gravitación universal por parte de Isaac Newton, y de la que participaron, entre muchos otros, Copérnico, Galileo y Kepler. Todos ellos intentaban explicar precisamente el movimiento de los planetas.

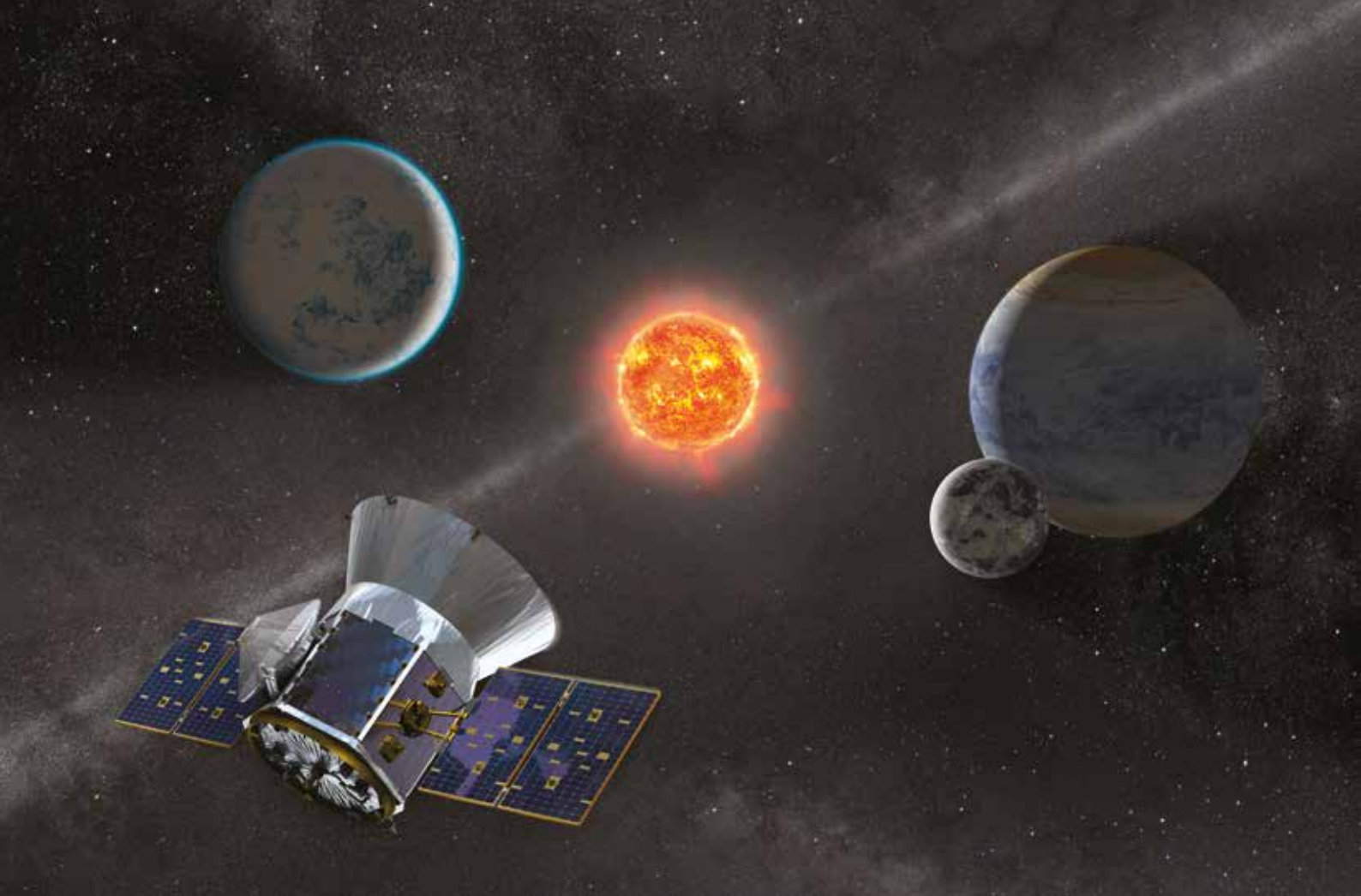
El estudio de los planetas en órbita alrededor de estrellas que no son el Sol (llamados planetas extrasolares o exo-

planetas) guarda similitudes con la historia de la exploración de los planetas del sistema solar. La gran cantidad de cambios y modificaciones en nuestra comprensión acerca de la formación y evolución de los planetas que se produjeron a partir de la detección de los primeros exoplanetas en la década de 1990 constituye una verdadera revolución en la astronomía y la astrofísica. Aún no hemos visto la culminación de esta revolución, y su fin no parece estar cerca. De hecho, el estudio de los planetas extrasolares podría llegar a proveer la primera evidencia de la existencia de vida fuera de la Tierra en las próximas décadas.

No es sorprendente, entonces, que el estudio de los exoplanetas despierte tanto interés y sea en la actualidad uno de los campos más activos de la astrofísica. Una gran cantidad de instrumentos y proyectos están destinados a ellos, y el número de investigadores que se dedican a estos cuerpos aumenta año a año, especialmente entre los jóvenes. Además, los exoplanetas son el objeto de varias

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Los descubrimientos de planetas ajenos al sistema solar, entre ellos el tercero más cercano a nosotros, abre entre otras cosas un camino para estudiar científicamente la posible existencia de vida fuera de la Tierra.



Representación por un dibujante de la misión *TESS*, con los planetas en torno de una estrella de tipo M. Goddard Space Flight Center

misiones espaciales, pasadas, presentes y futuras, tanto de la agencia espacial estadounidense (NASA) como de la agencia espacial europea (ESA).

Los primeros descubrimientos de planetas extrasolares en órbita de estrellas parecidas al Sol son relativamente recientes. Fue en 1995 cuando los astrónomos de la Universidad de Ginebra Michel Mayor y Didier Queloz anunciaron al mundo el descubrimiento de un objeto, con una masa de 0,47 veces la del planeta Júpiter (o 150 veces la masa de la Tierra), en una órbita de poco más de cuatro días de período alrededor de la estrella 51 Pegasi, o sea, en una órbita de alrededor del 13% de la distancia que separa a Mercurio del Sol. Este dato fue una enorme sorpresa y dio origen a un gran desarrollo de modelos de formación y evolución de los sistemas planetarios. Su importancia fue descrita con maestría por Cristian Beaugé y Walkiria Schulz en un artículo publicado en 2009 por *CIENCIA HOY*, citado entre las lecturas sugeridas.

Desde entonces, la acumulación acelerada de detecciones y nuevos sistemas aumentó las sorpresas y los descubrimientos inesperados. Aparecieron planetas de períodos cortos en órbitas excéntricas, o con órbitas inclinadas con respecto al eje de rotación de la estrella, o incluso planetas en órbitas retrógradas (es decir, la estrella rota sobre su eje en un sentido y el planeta orbita

en el sentido opuesto). Se detectaron planetas en torno de estrellas binarias, planetas gigantes inflados que necesitan una fuente de energía todavía no completamente comprendida para explicar su tamaño, planetas con el tamaño de algunas veces el tamaño de la Tierra pero con densidades parecidas a las de Neptuno (casi cuatro veces menor que la de la Tierra), y decenas de otras observaciones que desafían nuestro conocimiento de estos cuerpos y que nos permiten, a la vez, avanzar en su comprensión.

En 2009 la NASA lanzó la misión espacial *Kepler*, que marcó un hito en esta era de descubrimientos. *Kepler* usó la técnica de los tránsitos para detectar planetas de tamaño similar al de la Tierra o incluso menores. Sus mediciones del brillo de más de 150.000 estrellas en las constelaciones de la Lira y el Cisne, durante alrededor de cuatro años, permitieron el descubrimiento de más de dos mil planetas en tránsito, y de otros tantos candidatos que aún aguardan confirmación. Gracias a este extenso catálogo pudo determinarse, con mucha precisión, la cantidad de planetas promedio por estrella. Si bien los relevamientos terrestres de velocidad radial ya habían obtenido mediciones de la cantidad de planetas extrasolares existentes en nuestra galaxia, las observaciones que hizo *Kepler* mejoraron los resultados y permitieron extenderlos a aquellos de pequeño tamaño. Ahora

## ■ MÉTODOS DE DETECCIÓN ■

Las enormes distancias que nos separan de las estrellas, incluso de las más cercanas, junto con el hecho de que estas son decenas o centenas de millones de veces más brillantes que la luz que reflejan sus planetas, hacen que la detección directa de los exoplanetas sea posible solo en sistemas cercanos y jóvenes, que son poco numerosos, pues en estos los planetas emiten mayor radiación. La enorme mayoría de los más de 4000 exoplanetas conocidos fue detectada por métodos indirectos. Las dos técnicas más exitosas hasta la fecha son la detección de tránsitos planetarios y de variaciones en la velocidad radial estelar. Además, estos métodos proveen información sobre importantes parámetros físicos de los planetas.

### Método de los tránsitos

Si la órbita del planeta extrasolar se encuentra alineada con la visual desde la Tierra, desde nuestro punto de vista el planeta pasa periódicamente por delante del disco de su estrella (tránsito). Durante el tránsito, una fracción de la luz de la estrella es bloqueada por el planeta, por lo que una medición precisa del flujo de la estrella (con precisión de algunas partes en diez mil, típicamente) puede revelar la presencia de planetas en tránsito, incluso de tamaños similares a los de la Tierra.

La magnitud de la disminución del flujo de luz de la estrella es proporcional al cuadrado del cociente de los radios del planeta y de la estrella ( $R_p/R_e$ )<sup>2</sup>. De manera que si se conoce por otro método el radio de la estrella, puede deducirse el radio del planeta. Además, la duración del tránsito y la duración del ingreso y el egreso pueden utilizarse para inferir el tamaño de

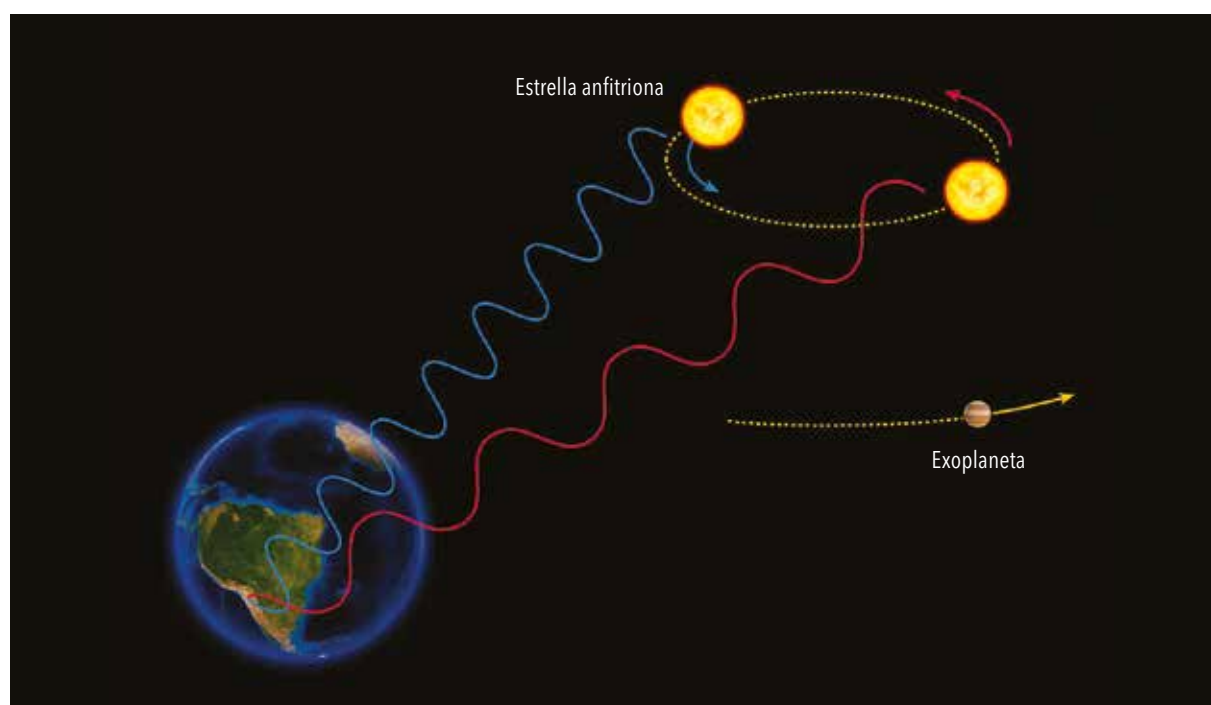
la órbita del planeta y, aunque parezca increíble, la densidad media de la estrella.

### Método de las velocidades radiales

Suele decirse que un planeta está en órbita alrededor de su estrella como si esta estuviese fija con respecto a un observador en la Tierra. En realidad, ambos cuerpos se mueven alrededor de un punto del espacio, que se denomina centro de masa, y que se encuentra en la línea que une sus centros, y tanto más cerca de la estrella cuanto más masa tenga esta que el planeta. Como consecuencia de este movimiento, a lo largo de su órbita la componente de la velocidad de la estrella en la dirección del observador (la Tierra) cambia. Esa velocidad, conocida como velocidad radial, puede medirse mediante el efecto Doppler (el corrimiento hacia longitudes de onda más cortas o más largas) que exhibe la luz de la estrella. La detección de variaciones periódicas permite, entonces, revelar la presencia de un planeta. La amplitud de la variación depende de la masa del planeta, pero hay una degeneración con la inclinación de la órbita, por lo que solo puede conocerse una cota inferior de la masa.

Como es esperable, la amplitud de la señal suele ser muy pequeña (del orden de  $1\text{m/s}$ , o incluso menor), por lo que las mediciones de velocidad radial necesitan instrumentos estables, que operen en condiciones de presión y temperatura controlada.

Además, la técnica de velocidades radiales permite conocer, entre otras cosas, la excentricidad de la órbita (es decir, cuán elíptica es).



Método de las velocidades radiales. <https://www.eso.org/public/images/eso0722e/>



Telescopio de 1,93m del observatorio de la Alta Provenza, donde está instalado el espectrógrafo *SOPHIE*, con el que se detectó el exoplaneta Gliese 411b. CNRS/OHP

sabemos que la mayoría de las estrellas de tipo solar de nuestra galaxia, la Vía Láctea, tiene por lo menos un planeta de masa inferior a la de Neptuno. Sabemos también que los planetas rocosos más pequeños y similares a la Tierra son comunes. Los datos indican que en promedio existen 0,8 planetas por estrella, pero no permiten descartar que nuestra galaxia posea más planetas rocosos que estrellas de tipo solar. Además, sabemos que la órbita de muchos de ellos se encuentra dentro de la zona de habitabilidad, la distancia del planeta a su estrella donde las temperaturas son adecuadas para que, si este tiene un planeta con una atmósfera como la terrestre, pueda albergar agua líquida en su superficie, un elemento clave para pensar en la posibilidad de vida.

El extenso catálogo producido por *Kepler* culmina el trabajo de más de dos décadas iniciado desde la Tierra con relevamientos fotométricos y velocidades radiales, que detectó a los candidatos a planetas gigantes. La precisión de estas mediciones está limitada por las distorsiones atmosféricas y no permite la detección de planetas pequeños. Los candidatos descubiertos por los relevamientos fotométricos requieren mediciones complementarias de velocidad radial, que sirven para confirmar la naturaleza planetaria del objeto y medir su masa. Combinando ambas técnicas, podemos calcular la densidad media, que es el primer paso para estudiar la estructura interna: cómo se distribuye la masa entre el núcleo y el manto, y qué fracción de la masa está constituida por elementos volátiles, que se encuentran posiblemente en la atmósfera. Las estrellas observadas por *Kepler* son, en su mayoría, demasiado débiles para poder ser objeto de mediciones de velocidad radial de alta precisión por lo que, si bien tenemos información sobre su tamaño, ignoramos, o conocemos con muy escasa precisión, sus masas. Como consecuencia, no tenemos información sobre su densidad media, y su estructura interna nos resulta desconocida.

Para subsanar esta falta la NASA lanzó, en abril de 2018, la misión *TESS* (sigla de *Transiting Exoplanet Survey Satellite*) orientada a la detección de tránsitos alrededor de estrellas brillantes. En poco tiempo, *TESS*, permitió detectar una decena de planetas pequeños y medir su masa con buena precisión. *Kepler* se centró en el descubrimiento de nuevos planetas y *TESS*, en su caracterización y el estudio en detalle de sus estructuras internas y sus atmósferas.

Conocer las atmósferas de los exoplanetas no solo permite estudiar su composición y su química sino también su dinámica, por ejemplo, el patrón de vientos. Posibilita, además, caracterizar cómo cambian estos fenómenos con el tiempo. Y, como si esto fuera poco, el estudio de estas atmósferas abre una puerta hacia la exploración de la vida fuera del sistema solar por vía

de la búsqueda de biomarcadores, especies químicas presentes en la atmósfera que solo pueden existir, o mantenerse, por efecto de la vida. Más allá del interés astrofísico, por primera vez en la historia tenemos la posibilidad de encarar de manera científica la pregunta sobre la existencia de vida fuera del sistema solar. Esto es una verdadera revolución.

La señal producida por la atmósfera de exoplanetas rocosos es tan pequeña que las detecciones alrededor de estrellas brillantes y cercanas resultan fundamentales. Solo en ellas pueden realizarse las mediciones necesarias para estudiar las atmósferas en detalle. Se procura, además, que las estrellas sean pequeñas porque la señal es aproximadamente proporcional al cociente de los radios entre el planeta y la estrella, elevado a la cuarta potencia. Un mismo planeta orbitando una estrella de la mitad de tamaño que otra emite una señal dieciséis veces mayor.

Existen dos métodos principales con los que podrán estudiarse las atmósferas exoplanetarias en el futuro cercano: la espectroscopía durante el tránsito y la alta resolución angular combinada con espectroscopía de alta resolución (HRI+HRS, por su sigla en inglés). Para la primera, las detecciones de TESS serán importantísimas con miras al futuro telescopio espacial James Webb (JWST). Este, gracias a su superficie colectora (diámetro del espejo de 6,5m) y al instrumental que llevará, podrá caracterizar las atmósferas de los planetas que transiten alrededor de estrellas brillantes de baja masa y pequeño tamaño. Por otro lado, la técnica HRI+HRS usada en la nueva generación de telescopios terrestres con espejos primarios de entre 30 y 40m permitirá nuevos avances en la medición de atmósferas. Estos telescopios podrán resolver la luz del planeta de la luz de la estrella, o sea, podrán distinguir la luz que nos llega de una fuente y de la otra, tarea no sencilla dado que una de esas luces



Representación por un dibujante de un planeta en órbita de una estrella de tipo M, con características similares al sistema de Gliese 411. ESO/M Kornmesser

puede ser alrededor de diez millones de veces más brillante que la otra.

## Los exoplanetas más cercanos y la detección de Gliese 411b


En este contexto, se están realizando esfuerzos considerables para detectar los planetas más cercanos al sistema solar, apuntando a que se conviertan en objetos para estudiar con la técnica HRI+HRS y la próxima generación de telescopios gigantes. Para lograr esto, la técnica de velocidades radiales es la más adecuada, porque las órbitas de los planetas no necesitan estar alineadas con la línea de la visual. Varios grupos buscan desde hace años planetas orbitando las estrellas más cercanas al Sol. Uno de ellos es el Consorcio SOPHIE, un conjunto de alrededor de treinta investigadores, principalmente de Francia y Suiza, del cual el autor es parte, y cuyo trabajo gira en

torno del espectrógrafo SOPHIE, instalado en el observatorio de Alta Provenza, en el sur de Francia. SOPHIE es uno de los mejores instrumentos del planeta para la realización de mediciones precisas de velocidad radial.

El trabajo de más de diez años de este equipo, sumado a la acumulación de datos por alrededor de siete años, permitió a los investigadores revelar una pequeña variación periódica en la velocidad radial de la estrella cercana Gliese 411. Un análisis minucioso de los datos y de las posibles fuentes de la variación detectada confirmó la existencia de un planeta, con una masa mínima de tres veces la masa de la Tierra, en una órbita de poco menos de trece días de período alrededor de dicha estrella. El anuncio del descubrimiento del planeta, llamado Gliese 411b, se hizo en febrero de 2019 en un artículo de *Astronomy & Astrophysics*, citado en las lecturas sugeridas.

La estrella Gliese 411 se encuentra a solo 8,3 años luz (alrededor de  $10^{14}$ km) del Sol. Es la sexta estrella más cercana después del sistema triple de Alfa Centauri (Próxima Centauri y Alpha Cen A y B), la estrella de Barnard y CN Leonis. Es decir, se trata del cuarto sistema estelar más cercano. Esto hace de Gliese 411b el tercer planeta más cercano al sistema solar conocido hasta ahora (se conoce un planeta alrededor de la estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, y de la estrella de Barnard, anunciado en noviembre de 2018). Sabemos que la masa de Gliese 411b es de alrededor de tres veces la masa de la Tierra, que es típica de los planetas llamados súper-Tierras, y que su distancia orbital es un quinto de la distancia entre el Sol y Mercurio. Pero no sabemos nada sobre su tamaño, ya que no vemos al planeta transitar frente a su estrella. Sin embargo, podemos usar lo que conocemos de otros planetas para estimar el radio de Gliese 411b y calcular cuánta radiación recibe de su estrella, y por lo tanto cuál sería la temperatura del cuerpo. Si toda la radiación absorbida por el planeta fuera reemitida

al espacio, su temperatura sería la temperatura de equilibrio, que está entre  $-18^{\circ}\text{C}$  y  $76^{\circ}\text{C}$ . Sin embargo, si el planeta tuviese una atmósfera, no toda la radiación que absorbe sería reemitida. Por ejemplo, la atmósfera de la Tierra retiene parte de la energía que recibe el planeta, lo que la vuelve hospitalaria para la vida —el conocido efecto invernadero—. Cuando se consideran estos efectos y una atmósfera como la de la Tierra, se encuentra que la temperatura en la superficie de Gliese 411b sería demasiado alta para albergar agua líquida en su superficie. Si alguna vez hubo agua, se debería haber evaporado hace mucho tiempo. El planeta tal vez haya sufrido un efecto invernadero en cadena, como el que se cree que ocurrió en Venus y que da origen a sus elevadísimas temperaturas superficiales.

No se espera que Gliese 411b sea un lugar propicio para la vida. Pero podrá estudiarse su atmósfera y, de esta manera, sus capacidades de albergar vida de manera directa en el futuro cercano. La cercanía de la estrella a la Tierra hace que ella y su planeta abarquen alrededor de 31 milisegundos de arco en el cielo, equivalente al tamaño de una moneda de 2,5cm de diámetro a una distancia de alrededor de 170km. Si bien es chico, resulta suficiente para que los telescopios de nueva generación puedan resolver el sistema y separar la luz de la estrella de la del planeta. Gliese 411b será probablemente uno de los primeros objetos a ser estudiados con la técnica de HRI+HRS. En pocos años vamos a tener información, como mínimo, sobre su composición atmosférica y, tal vez, hasta podamos estudiar la posibilidad, por improbable que parezca, de vida en su superficie. 

Agradezco el oído atento de Dolores Amat, que colaboró para mejorar la claridad del texto y hacerlo más atractivo.

## LECTURAS SUGERIDAS


**BEAUGÉ C y SCHULZ W**, 2009, 'Planetas extrasolares y la búsqueda de otras tierras', *CIENCIA HOY*, 19, 110: 21-28.

**DÍAZ RF et al.**, 2019, 'The SOPHIE search for Northern Extrasolar Planets', *Astronomy & Astrophysics*, A625, A17; accesible en <https://www.aanda.org/articles/aa/abs/2019/05/aa35019-19/aa35019-19.html>.

**SEAGER S** (ed.), 2011, *Exoplanets*, University of Arizona Press, Tucson.



### Rodrigo Fernando Díaz

Doctor en ciencias físicas,  
Universidad de Buenos Aires.  
Investigador adjunto en el IAFE,  
UBA-Conicet.  
[rodrigo@iafe.uba.ar](mailto:rodrigo@iafe.uba.ar)  
 [@exorfd](https://twitter.com/exorfd)