

# EL INSTRUMENTO CARMENES

Durante las últimas tres décadas hemos vivido el crecimiento exponencial de un nuevo campo en la astrofísica, el estudio de los exoplanetas. El pistoletazo de salida lo dio en 1995 el anuncio del descubrimiento de un planeta fuera del sistema solar, el exoplaneta 51 Peg b, por parte de Michel Mayor y Didier Queloz. Este hallazgo les ha valido recibir el Premio Nobel de Física 2019. A pesar de existir otros sugerentes descubrimientos anteriores, como el ahora clasificado como planeta de alta masa  $\gamma$  Cep A b (Campbell, Walker y Yang 1988) y los planetas del púlsar PSR B1257+12 (Wolszczan y Frail 1992), el anuncio de 51 Peg b se considera de forma prácticamente unánime como el detonante de la revolución de los exoplanetas.

El motivo principal es que se trataba de un objeto con una masa mínima lo suficientemente baja para no albergar dudas sobre su naturaleza planetaria (excepto para improbables inclinaciones orbitales extremas) y que además está en órbita alrededor de una estrella de tipo solar, totalmente “normal”.

Durante los primeros años de búsqueda exoplanetaria, el foco de la investigación se centraba en estrellas de tipo solar (GK), cuyas propiedades las hacían más adecuadas para el uso de la técnica espectroscópica Doppler. Para las estrellas G y K que rotan lentamente, que son la mayoría, las líneas espectrales son numerosas, profundas y estrechas, lo que permite determinaciones precisas de velocidad radial, y además los efectos de la actividad magnética no son limitantes al nivel de unos pocos  $m s^{-1}$ . Tras una decena de planetas en estrellas de tipo solar, en 1998 se anunció el primer planeta alrededor de una estrella fría, de tipo espectral M, Gl 876 b (Marcy et al. 1998; Delfosse et al. 1998). Esto significaba la tímida apertura de lo que ahora conocemos como la “oportunidad de las enanas M”. Los motivos por los cuales estas pequeñas estrellas son interesantes residen en el mayor efecto de la señal de un planeta debido a su baja masa y radio, y además en las mejores opciones de detección de planetas en órbitas templadas debido al período orbital relativamente corto. Pero, además, la gran mayoría de las estrellas del entorno solar más inmediato son frías, de tipo espectral M, lo que abriría a la puerta a caracterizar su población planetaria.



**Ignasi Ribas**

Institut de Ciències de l’Espai (ICE, CSIC)  
Institut d’Estudis Espacials  
de Catalunya (IEEC)  
*iribas@ice.cat*

En el marco de los esfuerzos para encontrar exoplanetas cercanos, en 2012 saltó la noticia cuando Dumusque et al. anunciaron el descubrimiento de un planeta con una masa mínima parecida a la Tierra alrededor de  $\alpha$  Cen B, a tan solo 4.3 años luz. El hallazgo resultaba de exprimir hasta el límite los numerosos datos obtenidos con el espectrómetro HARPS, en el observatorio de ESO en La Silla. Desafortunadamente, en 2015 se demostró que la función de ventana del muestreo había conspirado con la variabilidad magnética de la estrella para dar una señal espuria que fue erróneamente interpretada como el planeta. Nuestro vecino se desvanecía. En 2016 la situación cambió de nuevo al anunciarse el descubrimiento de Proxima Centauri b por parte del equipo Red Dots, liderado por Guillem Anglada-Escudé. Se trataba de un exoplaneta con una masa mínima un 30% superior

# Y LOS EXOPLANETAS DEL ENTORNO SOLAR

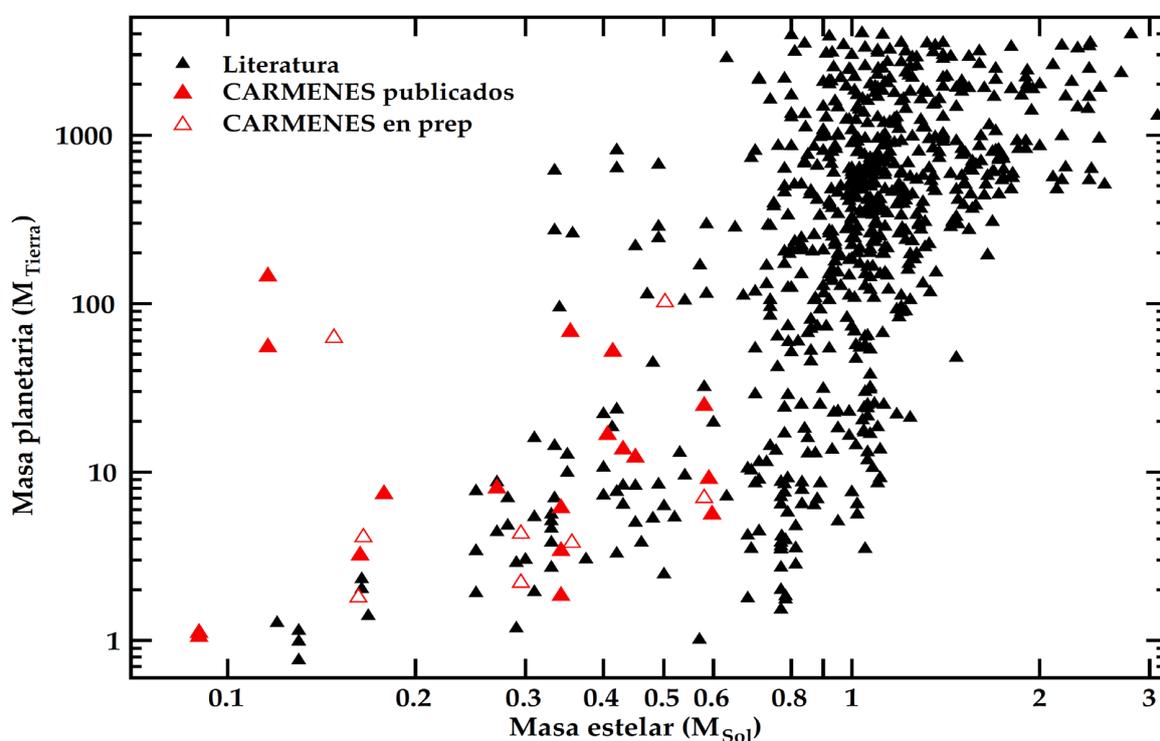


Figura 1: Diagrama de la masa de la estrella frente a la masa del planeta para aquellos descubiertos mediante la técnica de velocidades radiales. Nótese la acumulación en estrellas de tipo solar y planetas gigantes. Los descubrimientos de CARMENES están marcados en rojo y expanden el espacio de parámetros hacia estrellas más frías. En particular, para estrellas con masas inferiores a 0.2 masas solares, CARMENES ha descubierto 9 planetas, comparados con los 7 hallados por otros instrumentos.

a la de la Tierra, a tan solo 4.2 años luz de nosotros. Ahora sí, se nos revelaba el exoplaneta más cercano que, además, se sitúa en una órbita templada alrededor de su estrella. Con este y otros descubrimientos, la mayor parte de ellos realizados con el instrumento HARPS, en la última década hemos visto como se iba poblando de planetas el vecindario galáctico del Sol.

El año 2016 también coincidió con la puesta en funcionamiento del instrumento CARMENES, llamado a hacer una contribución muy relevante a nuestro conocimiento de los exoplanetas alrededor de las estrellas frías y, claro está, necesariamente cercanas. CARMENES se encuentra instalado en el telescopio de 3.5 m en el Observatorio de Calar Alto y fue construido por un consorcio de 11 instituciones españolas y alemanas, con una financiación mayormente aportada por la sociedad Max Planck y por el CSIC. CARMENES se concibió para explotar la oportunidad de las estrellas enanas M mediante la obtención de espectrometría muy precisa en un amplio rango de longitudes de onda y así hallar exoplanetas rocosos en órbitas templadas. El diseño,

usando dos canales independientes, le proporciona una cobertura que abarca desde los 520 nm hasta los 1710 nm, es decir, incluyendo el rojo, el rojo lejano y el infrarrojo cercano, y obtiene datos con una resolución espectral alrededor de 90000. Pero el aspecto más importante es que su control de temperatura y su óptica en vacío le confieren una estabilidad espectacular, de forma que es posible tomar datos de espectrometría Doppler con una precisión del orden de  $1 \text{ m s}^{-1}$  para el canal visible y unos  $3\text{-}5 \text{ m s}^{-1}$  para el canal infrarrojo en series temporales de muy larga duración.

Cuatro años después de su entrada en funcionamiento, y tras más de 15000 medidas tomadas con ambos canales, los descubrimientos que se han sucedido son espectaculares. En cuanto a números, CARMENES es responsable del hallazgo de 18 nuevos planetas publicados y otros 8 cuyas publicaciones están en proceso de preparación. Estos planetas son especialmente valiosos puesto que pueblan una región del espacio de parámetros que hasta ahora no había sido muestreada en detalle, como se ilustra en la Figura 1. Es más, 9 de

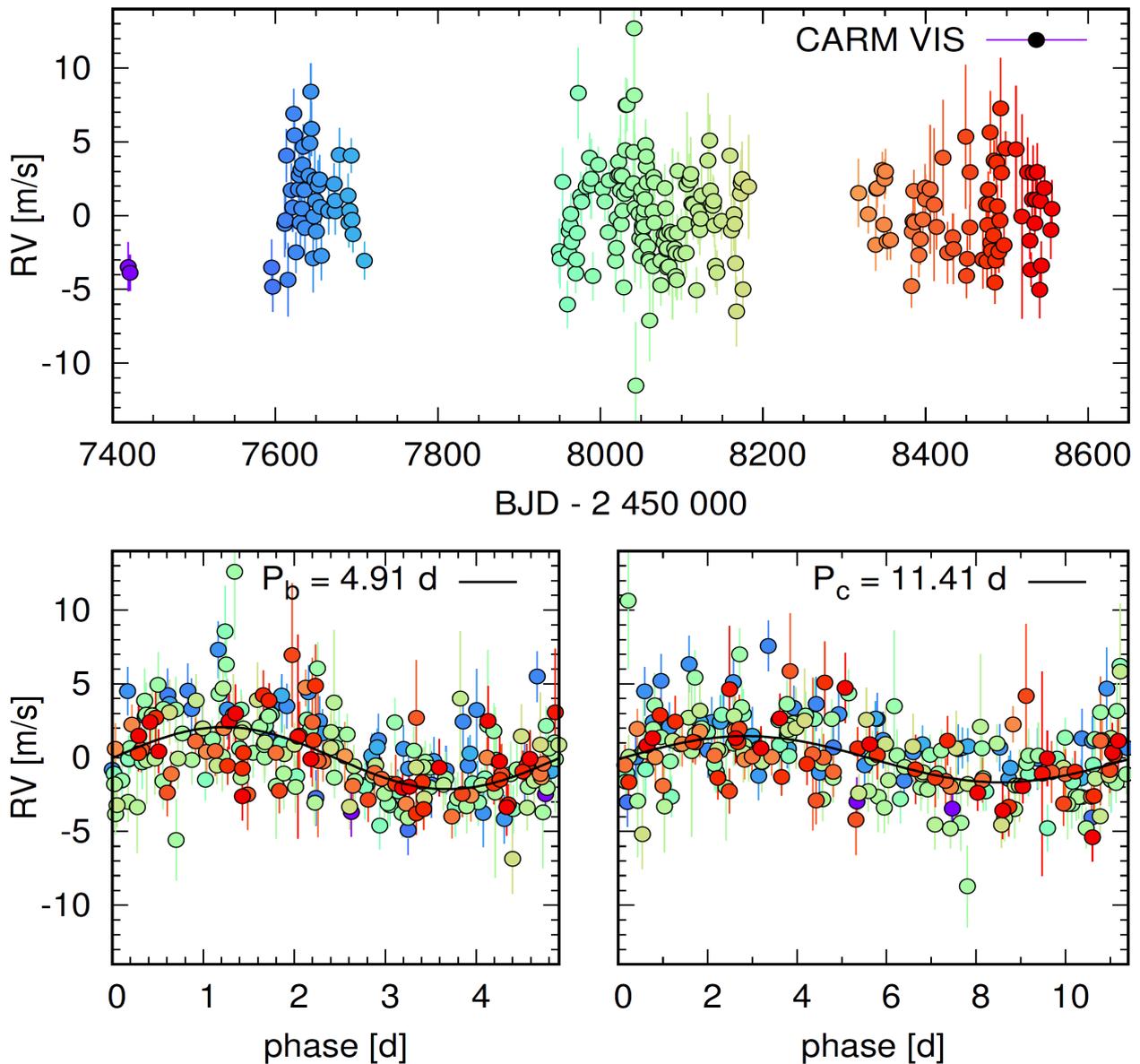


Figura 2: Arriba: Serie temporal de velocidades radiales de la estrella de Teegarden tomada con el canal visible de CARMENES. Abajo: Curva de velocidad radial plegada con el periodo orbital determinado para cada una de las señales planetarias. El ajuste del planeta b, con un periodo de 4.91 días, corresponde a una semi-amplitud de velocidad de  $2.0 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ , lo que indica una masa mínima de  $1.05 \pm 0.13$  masas terrestres. El ajuste del planeta c proporciona una semi-amplitud de velocidad de  $1.6 \pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$  y una masa mínima de  $1.11 \pm 0.16$  masas terrestres. Los planetas tienen una insolación de su estrella que es 1.15 y 0.37 veces, respectivamente, la que recibe la Tierra de nuestro Sol.

los descubrimientos corresponden a planetas alrededor de estrellas con masas inferiores a 0.2 masas solares. Antes se conocían solo 7, con lo que se ha más que doblado el número. Entre la “fauna” de planetas descubiertos por CARMENES encontramos planetas de la masa de Neptuno en órbitas templadas, planetas en sorprendentes órbitas cerradas pero excéntricas,

planetas en sistemas estelares binarios, planetas alrededor de estrellas activas, o el segundo planeta con tránsitos más cercano, por citar unos cuantos.

Pero si hay que destacar algunos, hay tres descubrimientos que merecen mención aparte. El primer gran anuncio fue el hallazgo de una súper-Tierra

fría alrededor de la estrella de Barnard (Ribas et al. 2018), el segundo sistema estelar más cercano a nosotros. Este elusivo planeta fue detectado gracias a la combinación de centenares de medidas de velocidad radial durante más de dos décadas y usando diversos instrumentos, entre los cuales CARMENES jugó un rol esencial. A mediados de 2019 se publicó el descubrimiento de un sistema planetario con al menos dos planetas alrededor de la estrella ultrafría que lleva el nombre de Teegarden (Zechmeister et al. 2019). CARMENES demostraba una capacidad única de tomar espectrometría Doppler precisa para estrellas de tan baja masa. La Figura 2 muestra la serie temporal de velocidades radiales y las curvas de velocidad plegadas en fase. Con amplitudes de velocidad por debajo de  $2 \text{ m s}^{-1}$ , los dos planetas tienen masas mínimas idénticas a la de la Tierra y están situados en la llamada zona de habitabilidad alrededor de su estrella, donde se podrían dar las condiciones adecuadas para la existencia de agua líquida en sus superficies. Los planetas de Teegarden se encuentran a tan solo 12 años luz de nosotros. Y finalmente, en septiembre de 2019 se hizo público el descubrimiento de GJ 3512 b (Morales et al. 2019), un planeta gigante orbitando a una estrella con una masa diez veces inferior al Sol. Explicar su existencia supone un reto imposible para los modelos más recientes de formación planetaria por acreción de núcleo y obliga a recurrir a explicaciones más "exóticas", como es la formación por inestabilidad gravitacional del disco protoplanetario.

Todos estos descubrimientos, al ponerlos en contexto, nos proporcionan información valiosa sobre la arquitectura de los sistemas planetarios, sobre la tasa de ocurrencia de planetas y, por extensión, sobre los mecanismos que llevan a su formación. Pero también nos permiten cartografiar el entorno que nos rodea y poner a nuestro sistema solar, con su Tierra, en contexto. Hoy conocemos 18 planetas en órbita alrededor de las 40 estrellas más cercanas. Casi la mitad de ellos han sido descubiertos por el instrumento CARMENES y la colaboración Red Dots, mayormente empleando el instrumento HARPS. Estas iniciativas están proporcionando un censo preciso de los planetas más cercanos.

Como se ha mencionado anteriormente, estos planetas no solo revisten un interés colectivo, sino que algunos de ellos, como Proxima Cen b, Teegarden

b y c, etc, están en órbitas templadas que permiten clasificarlos como potencialmente habitables. No es difícil soñar con que algún día la tecnología avanzará lo suficiente para poder tomar imágenes directas de estos planetas y estudiar los constituyentes químicos y las propiedades físicas de sus atmósferas. Tal vez alguno de estos ellos pase de ser potencialmente habitable a habitable (con agua líquida en su superficie), e incluso habitado (con una biosfera). Las misiones que nos llevarán a realizar este salto cualitativo se están concibiendo en la actualidad, aunque no se espera que estén en operación hasta la década de los 40. Cuando lo estén, muy probablemente estos planetas cercanos que ahora estamos descubriendo se encontrarán entre sus objetivos predilectos.

## REFERENCIAS

- Anglada-Escudé, G., et al. "A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri", 2016, *Nature*, 536, 437.
- Campbell, B., Walker, G. A. H., Yang, S., "A search for substellar companions to solar-type stars, 1988, *The Astrophysical Journal*, 331, 902.
- Delfosse, X., Forveille, T., Mayor, M., Perrier, C., Naef, D., Queloz, D., "The closest extrasolar planet. A giant planet around the M4 dwarf Gl 876", 1998, *Astronomy & Astrophysics*, 338, L67.
- Dumusque, X., Pepe, F., Lovis, C., Ségransan, D., Sahlmann, J., Benz, W., Bouchy, F., Mayor, M., Queloz, D., Santos, N., Udry, S., "An Earth-mass planet orbiting  $\alpha$  Centauri B", 2012, *Nature*, 491, 207.
- Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S., Fischer, D., Lissauer, J. J., "A Planetary Companion to a Nearby M4 Dwarf, Gliese 876", 1998, *The Astrophysical Journal*, 505, L147.
- Mayor, M., Queloz, D., "A Jupiter-mass companion to a solar-type star", 1995, *Nature*, 378, 355.
- Morales, J. C., et al., "A giant exoplanet orbiting a very-low-mass star challenges planet formation models", 2019, *Science*, 365, 1441.
- Ribas, I., et al., "A candidate super-Earth planet orbiting near the snow line of Barnard's star", 2018, *Nature*, 563, 365.
- Wolszczan, A., Frail, D. A., "A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12", 1992, *Nature*, 355, 145.
- Zechmeister, M., et al., "The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs. Two temperate Earth-mass planet candidates around Teegarden's Star", 2019, *Astronomy & Astrophysics*, 627, A49.