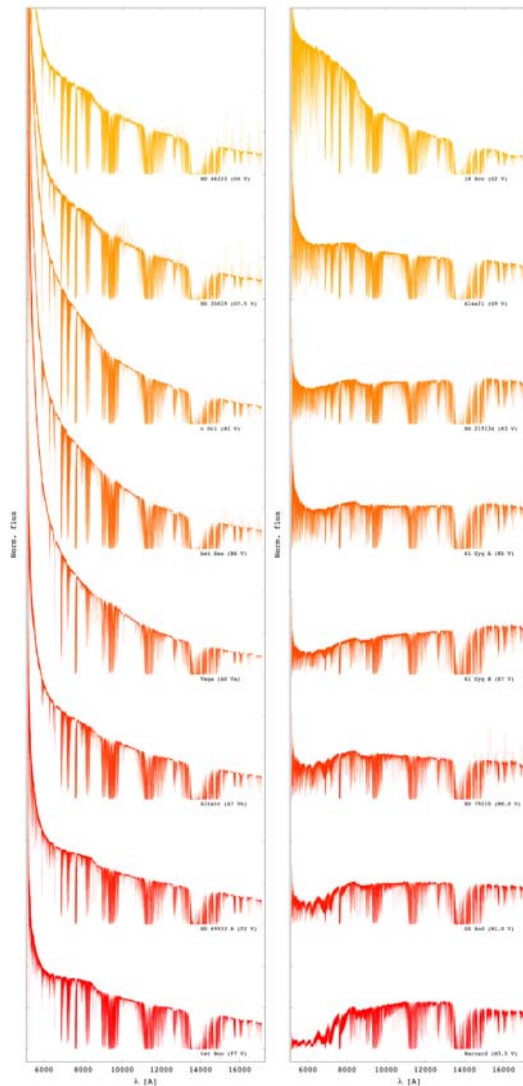


CARMENES 2017: UNA ODISEA PLANETARIA

¿EXISTEN PLANETAS HABITABLES? ¿CUÁNTOS HAY? ¿DÓNDE ESTÁN? CARMENES ES UNO DE LOS POCOS INSTRUMENTOS DEL MUNDO QUE PUEDEN RESPONDER ESTAS PREGUNTAS. Y ESTÁ EN ESPAÑA. EXOTIERRAS Y OLÉ.

JOSÉ A. CABALLERO & CONSORCIO CARMENES



ARRIBA. Espectros CARMENES con recubrimiento completo en longitud de onda para dieciséis estrellas representativas de la secuencia principal desde O4 V hasta F7 V (izq.) y desde G2 V hasta M3.5 V (der.). [Todas las imágenes son cortesía del consorcio CARMENES]

3,5 m. CARMENES está instalado en el telescopio Zeiss 3,5 m de Calar Alto, que aún es el telescopio más grande de Europa Occidental, geográficamente hablando.

300. Durante observaciones de tiempo garantizado, **CARMENES** está monitorizando con una precisión de ~ 1 m/s la **velocidad radial** de algo más de 300 **enanas M** brillantes y cercanas, cuidadosamente seleccionadas, para buscar **exotierras habitables** a su alrededor.

2168 m. Altura del vértice geodésico situado en Calar Alto, el monte más alto de la Sierra de Los Filabres, en la provincia de Almería. Calar Alto alberga el Centro Astronómico Hispano-Alemán, fundado en 1973. Aparte del **3,5 m**, en Calar Alto también hay otros telescopios, todos ellos nombrados con el diámetro de sus espejos primarios: 2,2 m, 1,23 m, 0,8 m Schmidt, 1,5 m OAN...

AIV. Cuando escribí el primer artículo sobre **CARMENES** en *Astronomía*, allá por noviembre de 2014, nuestro proyecto se encontraba en la fase de AIV (*Assembly, Integration and Verification*), lo que significa que estábamos ensamblando, integrando y verificando todos los subsistemas del instrumento en nuestros propios centros. ¡No había ningún subsistema de **CARMENES** en el observatorio de Calar Alto, mientras que se rumoreaba sobre su posible cierre! Como los lectores de *Astronomía* habrán podido seguir durante 2015 y 2016, en la sección *Avances del proyecto CARMENES*, todos los subsistemas llegaron a tiempo al observatorio para que el instrumento completo comenzara a operar casi diariamente desde hace exactamente un año y un mes.

Barycentre. Para alcanzar 1 m/s de precisión en **velocidad radial**, debemos calcular la velocidad radial baricéntrica del observatorio, BERV (*Barycentric Earth Radial Velocity*), y el tiempo baricéntrico de llegada de la luz, BTLA (*Barycentric Time of Light Arrival*), con precisiones de unos pocos cm/s y 1 s, respectivamente. Por ejemplo, para calcular la BERV, debemos tener en cuenta, entre otros parámetros, las posiciones relativas del Sol, todos los planetas y la Luna en cada exposición, la rotación de la Tierra, las coordenadas geográficas del telescopio con precisión de metros y hasta correcciones relativistas.

CARMENES. Es el nombre del espectrógrafo de dos canales instalado en el telescopio de **3,5 m** de Calar Alto (*Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*), del consorcio hispano-alemán que lo construyó y del proyecto científico desarrollado durante las observaciones de tiempo garantizado. **CARMENES** es un retroacrónimo (un acrónimo que encaja con una palabra de uso común) en el que las dos primeras letras provienen de Calar Alto. Cármenes (con tilde en la «a») es el plural de Carmen, un nombre de mujer típico en España que también se usa en Alemania (véase **Karmin**). *Carmen* es también el nombre de una famosa ópera francesa de Georges Bizet basada en una novela de Prosper Mérimée con el mismo título y de un asteroide descubierto desde Heidelberg por Max F. Wolf (558 Carmen, 1905 QB). Un *carmen* es, además, una casa ajardinada con huerto, típica de Granada. Cármenes, en plural, es una pequeña localidad (396 habitantes) al norte de la provincia de León. El Granada Club de Fútbol, militante actual en la Primera División, disputa sus partidos como local en el Nuevo Estadio de Los Cármenes.

Datum. Hasta enero de 2017, el consorcio **CARMENES** ha obtenido casi 3 Tb de datos dentro del proyecto de búsqueda de exoplanetas alrededor de **enanas M**: unos 3500 espectros con los dos canales óptico e **infrarrojo** de las ~ 300 estrellas monitorizadas. Al final de las observaciones de tiempo garantizado esperamos obtener alrededor de 60 medidas de **velocidad radial** para la mayor parte de ellas. A partir de estos datos, estimamos detectar entre 30 y 120 exoplanetas, dependiendo de la actividad intrínseca de las **enanas M**. Alguno de ellos podría ser una **exotierra** transitante a la que poder caracterizar su atmósfera.

Exoearth. La primera «E» de **CARMENES** proviene de *exoearths*, exotierras, y su detección es el objetivo principal de nuestro proyecto. Una exotierra es un exoplaneta de masa terrestre en la zona **habitable** alrededor de una estrella distinta del Sol. El exoplaneta no debe de ser muy grande ($M < 5 M_{\oplus}$), para que no tenga océanos demasiado profundos sin plataforma continental emergida (los planetas más masivos acretan más hielo de agua del disco protoplanetario en el que se formaron), ni muy pequeño ($M > 0,8 M_{\oplus}$), para que tenga tectónica de placas (y se dé el ciclo del carbono).

Fabry-Pérot. Para lograr una calibración ultraprecisa de la longitud de onda de nuestros espectros, utilizamos un par de interferómetros o etalones Fabry-Pérot, que dan un patrón de luz de picos y valles uniformemente distribuidos en frecuencia y de amplitud casi constante. Simultáneamente a la obtención del espectro de la **enana M**, **CARMENES** obtiene también un espectro del etalón correspondiente a su canal. Los espectros de los etalones sirven para hacer la calibración relativa de longitud de onda; diariamente, los etalones se calibran absolutamente con unas lámparas de cátodo hueco (de **uranio**). Luego traducimos el desplazamiento de longitud de onda a variación de velocidad radial con la simple fórmula $v/c = \Delta\lambda/\lambda$.

GJ. El astrónomo alemán Wilhelm Gliese publicó en 1957 su primer catálogo de estrellas a menos de 20 parsec. Este catálogo, que contenía las 915 estrellas más cercanas al Sol conocidas por entonces, fue ampliado varias veces hasta las 3803 estrellas a menos de 25 parsec en 1991. Las últimas ediciones del catálogo fueron en colaboración con Hartmut Jahreiss, lo que explica el acrónimo GJ (Gliese & Jahreiss). Entre dos tercios y tres cuartos de las estrellas GJ son **enanas M**. *Gliese y Jahreiss* son también los nombres de los dos ordenadores del sistema de control del instrumento.

Habitable. La definición básica y clásica de planeta habitable es la de aquél que está a una separación de su estrella tal que el agua en superficie está en estado líquido (entre 0° C y unos 65° C a presión normal, para evitar un efecto invernadero desbordado). Esta definición solo se aplica a planetas telúricos, es decir, rocosos y con una atmósfera poco profunda. Sin embargo, para **exotierras** alrededor de **enanas M** hay que tener en cuenta varios factores más: acoplamiento de marea (por el que solo una cara del planeta está permanentemente iluminada), energía y frecuencia de fulguraciones estelares (muy frecuentes en **enanas M**, y que pueden exterminar cualquier rastro de vida en el planeta), albedo (es menor en el **infrarrojo**, donde las **enanas M** emiten la mayor parte de su flujo, por lo que el planeta refleja menos que si orbitara alrededor de una estrella como el Sol), energía suficiente para realizar la fotosíntesis (las bacterioclorofilas *a* y *b* son los únicos pigmentos fotosintéticos terrestres con máximos de absorción más rojos que 800 nm), etc.

Infrared. La «N» de **CARMENES** proviene de *near infrared and optical*, infrarrojo cercano y óptico. **CARMENES** es un espectrógrafo de dos canales, uno al que llamamos VIS (de *visible*) y que cubre de 520 nm a 960 nm, y otro al que llamamos NIR (de *near infrared*) y que cubre de 960 nm a 1710 nm (el ojo humano es sensible de 380 nm a 780 nm). Los dos canales, encapsulados en tanques de vacío dentro de habitaciones refrigeradas en la sala coudé del telescopio, son prácticamente idénticos excepto por los materiales y recubrimientos de los componentes ópticos (plateado para VIS, dorado para NIR), los detectores (un CCD e2v 4k×4k para VIS, un mosaico de dos CMOS Hawaii-2 2k×2k para NIR), la resolución espectral ($R = 96\,500$ para VIS, $R = 80\,400$ para NIR) y la **temperatura** de trabajo.

J magnitude. Las **300** estrellas seleccionadas para ser monitorizadas con **CARMENES** durante las observaciones de tiempo garantizado son las **enanas M** más brillantes en la banda fotométrica *J* (centrada en 1200 nm) para cada subtipo espectral desde M0.0 V hasta M9.5 V, observables desde **Calar Alto** y que no tengan ningún compañero, óptico o visual, a menos de 5 segundos de arco. Para los tipos espectrales más tardíos imponemos además que no sean más débiles que $J = 11,5$ mag. Muchas de ellas fueron tabuladas por **Gliese & Jahreiss**.

Karmn. Una de las maneras de escribir Carmen en árabe es *Karmn*. Su origen está en el nombre del monte Carmelo (*Karem Ely Har ha'Karmel* en hebreo, *Kurmul* y *Yabal al-Karmil* en árabe), «el viñedo de Dios» de la Biblia. *Karmel* fue latinizado posteriormente por su parecido a *carmen*, *carminis*, poema, canción o rezo en latín, que a su vez proviene de la raíz protoindoeuropea **keh₂n-* (cantar). Carmencita, un diminutivo de Carmen, es también el nombre del catálogo de entrada de **CARMENES**, que tabula más de 2000 **enanas M** con el identificador Karmn Jhhmms±ddm, donde la segunda parte indica las coordenadas ecuatoriales en equinoccio J2000. Las dianas de **CARMENES** son las ~300 mejores **enanas M** seleccionadas de entre las más de 2000 de Carmencita.

Lalande 21185. (M2.5 V, $d = 2,55$ parsec). También llamada HD 95735, BD+36 2147, **GJ 411** o **Karmn J11033+359**, Lalande 21185 es la **enana M** más brillante del hemisferio norte. También es la quinta estre-

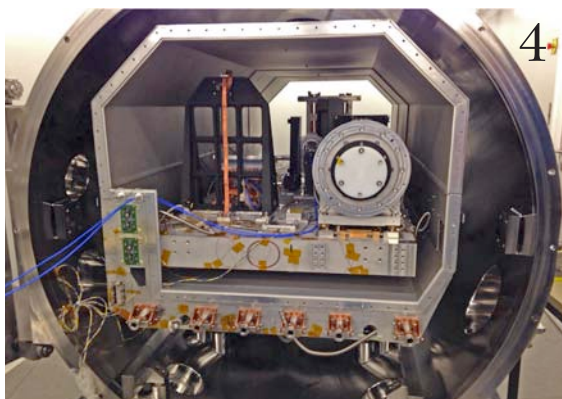


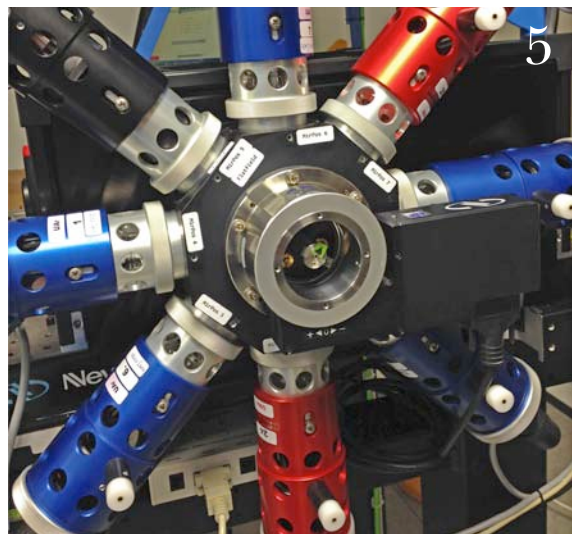
FIGURA 1. Logos usados por CARMENES. Izquierda, grande: soldemirobauhaus; derecha, de arriba a abajo: Consortium, Referees & Reviewers –para las revisiones de diseño– y archivo de datos de tiempo garantizado. Para frikis de *Bola de Dragón*.

FIGURA 2. Edificio del telescopio de 3,5 m con dos coches de comparación.

FIGURA 3. Santos Pedraz atendiendo a los medios en el foco Cassegrain del 3,5 m. Entre el espejo primario y las dos toneladas de PMAS, el pequeño frontal de CARMENES (negro y con pegatinas con el logo).

FIGURA 4. El tanque del canal NIR, por el lado de la red échelle y la cámara, antes de ser cerrado.

FIGURA 5. Octágono distribuidor de las lámparas de la unidad de calibración del canal VIS. Cada color representa un tipo de lámpara (halógena, de cátodo hueco de U-Ne, de Th-Ne...).



lla/sistema estelar más cercana a la Tierra, después del sistema triple α Centauri, la estrella de Barnard, Luhman 16 AB, WISE 0855-0714 y CN Leo. Por supuesto, Barnard (M3.5 V), CN Leo (M6.0 V) y Lalande 21185 son algunas de las ~300 estrellas monitorizadas por CARMENES. Además, *Barnard* y *Lalande* son nuestros ordenadores de reducción de **datos**.

M dwarf. La «M» de CARMENES proviene de *M dwarfs*, enanas M. Son estrellas de la secuencia principal con temperaturas efectivas intermedias entre las de los tipos espectrales K ($T_{\text{eff}} > 3900$ K) y L ($T_{\text{eff}} < 2200$ K). Excepto las enanas M muy jóvenes, tienen masas entre la mitad y un décimo de la del Sol, aproximadamente, lo que facilita proporcionalmente la detección de planetas poco masivos con el método de **velocidad radial**. Varios estudios (con HARPS y *Kepler*, principalmente) apuntan a que casi todas las enanas M tienen un sistema planetario. Como en el catálogo de **Gliese & Jahreiss**, entre dos tercios y tres cuartos de las estrellas de nuestro vecindario solar y, muy posiblemente, de nuestra Vía Láctea son enanas M, lo que hace que quizá haya decenas de millones de **exotierras** solo en nuestra Galaxia.

N₂. Para mantener la **temperatura** del canal **infrarrojo** a 138 K con precisión de unos pocos milikelvin, usamos un innovador sistema de enfriado basado en el flujo continuo de nitrógeno gaseoso por un circuito en contacto térmico con el banco óptico y el escudo de radiación del canal. El sistema, desarrollado en colaboración con el Observatorio Europeo Austral, sirve de prototipo para la instrumentación futura en el Telescopio Europeo Extremadamente Grande de 39 m. Hasta ahora el enfriado de instrumentos se ha realizado con sistemas criogénicos basados en termos rellenos de nitrógeno líquidos (vasos Dewar) que trabajan a temperaturas demasiado bajas, o en intercambiadores de calor basados en pistones (*cryocoolers*) que producen oscilaciones en el sistema.

Order. Las últimas dos letras de CARMENES provienen de *échelle spectrographs*, espectrógrafos échelle. La combinación de una red échelle de difracción por reflexión con una densidad de rayado relativamente baja (como la superficie de un CD) y de un dispersor cruzado (en nuestro caso, un grisma *-grism-*, que es una red de difracción por transmisión *-gra-*

ting- «pegado» a un prisma *-prism-*) separa la luz por longitud de onda en órdenes, que la cámara proyecta en el detector correspondiente. Así, por ejemplo, la línea de H α en 656,28 nm cae en el orden 93 en el canal VIS, que cubre desde 651,75 nm hasta 663,09 nm y se solapa ligeramente en los extremos con los órdenes 92 y 94.

Periodogram. Una vez tenemos series precisas y suficientemente largas de **velocidad radial** para cada una de las ~300 **enanas M**, es el momento de buscar periodos con análisis de Fourier y métodos aún más elaborados. Los picos de nuestros periodogramas más potentes y que tienen una probabilidad de falsa-alarma menores que cierto valor límite pueden corresponderse con actividad asociada a la rotación de la estrella o al periodo de traslación de exoplanetas. Afortunadamente, por su amplia cobertura de longitud de onda y alta resolución, CARMENES es un instrumento único en el mundo para diferenciar entre actividad y planetas.

Quirrenbach, Amado, Ribas, Reiners, Seifert, Caballero. Al igual que nuestro logo, **solmirobauhaus**, CARMENES es 50 % español y 50 % alemán. Ambos países han contribuido a su diseño, construcción y explotación con la misma cantidad de instituciones, financiación y personal científico e ingeniero. Las decisiones más importantes del consorcio las toma un pequeño equipo con el mismo número de miembros españoles y alemanes. Por ejemplo, Andreas (Quirrenbach) y Pedro (Amado) son los investigadores principales, Ignasi (Ribas) y Ansgar (Reiners) son los científicos de proyecto, y Walter (Seifert) y Jose (Caballero) son el ingeniero de sistemas y el astrónomo del instrumento (véase **Zechmeister**).

Results. La «R» de CARMENES proviene de *resolution*, por la alta resolución espectral ($R = \lambda/\Delta\lambda$) de su espectrógrafo échelle doble. Sin embargo, lo que muchos desean y deseamos ver, tras tanto tiempo y dinero invertidos, son los resultados. Desafortunadamente, el acuerdo de confidencialidad que todo miembro del consorcio debe firmar me impide mostrar más de lo que aparece en las figuras hasta que no haya publicaciones arbitradas. Por ahora, baste decir que, bajo el paraguas de CARMENES, se han realizado o están realizando cuatro tesis de grado, quince tesis de máster y trece tesis doctorales en universidades españolas y alemanas.



6



7



8

FIGURA 6. Selfi de la camiseta del autor al lado del criostato del detector del canal VIS.

FIGURA 7. Los ordenadores *Gliese*, *Jahreiss*, *Barnard* y *Lalande* en su armario.

FIGURA 8. Festejando la primera luz de CARMENES el 9 de noviembre de 2015 en la sala de control. De izquierda a derecha: Álvaro, Walter, Jesús, Pedro, Ana Pérez, Gilles, Josep, Ana Guijarro y Andreas. El autor estaba haciendo la foto.

Solmirobauhaus. El logo de **CARMENES** representa la equidad hispano-alemana del consorcio. Si Walter Gropius o Ludwig Mies van der Rohe de la Staatliche Bauhaus, la escuela alemana de artesanía, diseño, arquitectura y arte de entreguerras, y Joan Miró, el famoso pintor, escultor y ceramista surrealista y dadaísta barcelonés, hubieran podido trabajar juntos con nosotros, habrían diseñado un logo como el nuestro, con una **exotierra** en órbita de la una **enana M**.

Temperature. El canal VIS opera a temperatura ambiente, a 12°C (285 K), mientras que el canal NIR lo hace a una temperatura más baja, a -135°C (138 K), para minimizar la radiación **infrarroja** emitida por el mismo instrumento y que llega al detector. El desafío tecnológico no se encuentra en enfriar varias toneladas de material de alta tecnología a esas temperaturas, sino en mantenerlas con variaciones menores de 0,01 K en escala de días. Para ello, minimizamos el contacto térmico (por ejemplo, con un tanque de vacío con solo tres puntos de apoyo internos) y maximizamos la inercia y el aislamiento térmicos en ambos canales, a la vez que mantenemos estable la

temperatura de cada una de sus respectivas habitaciones. En el canal **infrarrojo**, además, usamos N_2 gaseoso para conseguir un enfriado adicional.

Uranium. Para las calibraciones absolutas diarias de longitud de onda utilizamos tres tipos de lámparas de cátodo hueco, de Th-Ne, U-Ne y U-Ar. No estamos interesados en las intensas líneas de emisión del gas amortiguador (neón y argón), sino en los varios miles de finas líneas de emisión del cátodo en sí (torio y, principalmente, uranio), cuya determinación precisa de longitud de onda es suficiente para varias tesis doctorales y de máster.

Velocity. El método que usa **CARMENES** para detectar **exotierras** en órbita de **enanas M** es el de velocidad radial o Doppler, por el que medimos el bamboleo gravitatorio que un compañero planetario produce en su estrella. Por ejemplo, si «los habitantes de α Centauri» tuvieran un espectrógrafo mejor que **CARMENES**, podrían medir una pequeñísima variación de velocidad radial en nuestro Sol de tan solo 0,126 m/s de amplitud y periodo de 11,86 años, producida por Júpiter. Con **CARMENES** llegamos a 1 m/s de precisión en velocidad radial. Además, gracias a la alta resolución

del instrumento, a partir del ensanchamiento de las líneas fotosféricas en los espectros de las estrellas podemos medir su velocidad rotacional, que nos indica la velocidad ecuatorial de la estrella y el ángulo de inclinación entre nuestra visual y el plano en el que la estrella rota. Algunas **enanás M** tienen altas velocidades rotacionales, que se traducen en intensa actividad y, a veces, emisión de **rayos X**.

W [km/s]. Con **CARMENES** se puede hacer mucha más ciencia que buscar exoplanetas: desde determinación de abundancias a clasificación espectral, pasando por cinemática. Por ejemplo, con las coordenadas ecuatoriales, movimientos propios, distancia y **velocidad radial** de una estrella, podemos calcular sus coordenadas y velocidades galactocéntricas *XYZUVW*. Cuando *Gaia* publique la segunda liberación de datos astrométricos, seremos capaces de determinar con precisión exquisita la pertenencia de nuestras **enanás M** a las distintas poblaciones de la Vía Láctea (halo, disco grueso, disco de transición, disco fino, grupos cinemáticos jóvenes...) y, por tanto, estimar su edad.

X-rays. Las **enanás M** son estrellas activas en general, debido a la profundidad de sus capas convectivas y las corrientes magnéticas generadas por el movimiento del plasma en su interior. Esta actividad genera manchas frías (y calientes) en las fotosferas de las **enanás M** que provocan un desplazamiento de las líneas estelares y se pueden confundir con la presencia de exoplanetas. Para cuantificar la actividad estelar, usamos otros parámetros medidos tanto con espectros de **CARMENES**, como la pseudoanchura equivalente de la línea de $H\alpha$ en emisión o la **velocidad rotacional**, o con otros instrumentos y misiones espaciales, como la variabilidad fotométrica o la emisión de rayos X.

Y. En español, la conjunción copulativa se escribe «y» («und» en alemán, «i» en catalán, «and» en inglés...). Aunque solo mi nombre aparece al principio de este artículo, **CARMENES** es una labor de muchos, tanto científicos como ingenieros. Los casi doscientos miembros del consorcio, pasados y presentes, se distribuyen principalmente en centros españoles y alemanes, pero también en otros centros del resto del mundo. En orden alfabético (invertido):

Zechmeister, Zapatero Osorio, Xu, Yan, Winkler, Wiedemann, Wagner, Vilardell, Vidal-Dasilva, Vico Linares, Veredas, Ulbrich, Tulloch, Trifonov, Thiele, Tal-Or, Tala, Tabernero, Suárez, Stürmer, Storz, Stahl, Solano, Shulyak, Seifert, Schweitzer, Schöfer, Schmitt, Schmidt, Schiller, Schäfer, Setiawan, Sarmiento, Sarkis, Sanz-Forcada, Sánchez-López, Sánchez-Carrasco, Sánchez-Blanco, Salz, Sairam, Sadegi, Rosich, Rohloff, Rodríguez-Trinidad, Rodríguez-López, Rodríguez, Rodler, Rix, Ribas, Rhode, Reinhart, Reiners, Reffert, Redondo, Rebolo, Ramos, Ramón, Rabaza, **Quirrenbach**, Quintana, Pluto, Perryman, Perger, Pérez-Medialdea, Pérez-Calpena, Pérez, Pedraz, Pavlov, Passegger, Panduro, Pallé, Oreiro, Ofir, Nowak, Nortmann, Naranjo, Nagel, Mundt, Morales Muñoz, Moya, Morales, Montes, Mirabet, Mathar, Marvin, Martínez-Rodríguez, Martín-Ruiz, Martín, Maroto Fernández, Marín Molina, Marfil, Mandel, Mancini, Mall, Magán Madinabeitia, Luque, López Salas, López-Santiago, López-Puertas, López-Morales, López-Martí, López del Fresno, Llamas, Lizón, Lenzen, Lemke, Launhardt, Laun, Lara, Lamert, Lafarga, Labiche, Kürster, Klutsch, Klüter, Klein, Kim, Kehr, Kaminski, de Juan, Johnson, Joergens, Jeffers, Huke, K. F. Huber, A. Huber, Holgado, Hidalgo, Herrero, Herranz Álvarez, Hernández Hernando, Hernández Castaño, Hernández Arabí, Hermann, Henning, Helmling, Hedrosa, Hauschildt, Hatzes, Hagen, Gutiérrez-Soto, de Guindos, Guijarro, Guenther, Guàrdia, Grohnert, Grözing, González Hernández, González-Peinado, González-Álvarez, Gómez Valera, Gesa, Garrido, García-Vargas, García-Piquer, Gálvez-Ortiz, Gallardo, Galadí, Fuhrmeister, Froehlich, Francisco, Ferrero, Fernández, Feiz, Dreizler, Dorda, Doellinger, Díez-Alonso, Czesla, Costillo, Cortés-Contreras, Colomé, Claret, Cifuentes, Casal, Cárdenas, Cano, Caballero, del Burgo, Brinkmüller, Böhm, Blümcke, Bergond, Berdiñas, Benítez, Béjar, Becerril, Bean, Bauer, Barrado, Azzaro, Arroyo, Anwand-Heerwart, Antona Jiménez, Anglada-Escudé, Ammler-von Eiff, Amado, Alonso-Floriano, Afonso, Aceituno, Abril, Abellán. (A)

José Antonio Caballero es el astrónomo del instrumento en el consorcio **CARMENES**.

