



CARMENES

El cazador de exoplanetas de Calar Alto

CARMENES. ¿Qué?: un nuevo espectrógrafo óptico-infrarrojo. ¿Dónde?: en Calar Alto, Almería. ¿Cuándo?: su primera luz en 2015. ¿Cómo?: con el método de velocidad radial. ¿Para qué?: para descubrir planetas como el nuestro alrededor de las estrellas más cercanas al Sol.

JOSÉ ANTONIO CABALLERO

Nuestro Sistema Solar tiene ocho planetas. Los cuatro interiores son planetas «terrestres» o telúricos: Mercurio (y su superficie idéntica a la de la Luna), Venus (y su tremendo efecto invernadero), la Tierra (y sus seres vivos) y Marte (y sus volcanes y cañones), mientras que los cuatro exteriores, más allá del Cinturón Principal de Asteroides, son planetas «gigantes gaseosos» o jovianos: Júpiter (y su Gran Mancha Roja), Saturno (y sus anillos) y los gemelos helados Urano y Neptuno (y sus aburridas atmósferas).

Otros planetas (o, mejor, exoplanetas) también orbitan otros soles. Desde 1995, el año en que se descubrió el primer exoplaneta alrededor de una estrella como nuestro Sol y las primeras enanas marrones, se han hallado ya más de mil exoplanetas (véase el catálogo más actualizado en la Enciclopedia de los Planetas Extrasolares, *exoplanets.eu*). Sin embargo, la mayoría de ellos son planetas jovianos inhóspitos, tienen temperaturas tan altas como las de las estrellas más frías, u orbitan muy cerca de sus soles (por lo que sus «años» duran solo unos pocos días). Con el desarrollo de nuevas tecnologías para la detección de exoplanetas, especialmente con el uso de espectroscopia ultraestable para medir variaciones de velocidad

radial en estrellas producidas por cuerpos que orbitan alrededor de ellas, la masa mínima de los candidatos a exoplanetas descubiertos recientemente es cada vez más pequeña. Sin embargo, a pesar del esfuerzo de los astrónomos, aún no hemos podido confirmar la detección de la primera exotierra: un exoplaneta con más o menos la misma masa que la Tierra (entre 0,5 y 2 veces la masa terrestre).

Se entiende como planeta habitable aquel que puede albergar agua líquida (y, quizá, vida) en su superficie. Aún tendremos que esperar alrededor de una década para detectar una exotierra en la zona habitable de una estrella de tipo solar, posiblemente con la misión espacial *PLATO* de la Agencia Espacial Europea o con *ESPRESSO*, un futuro instrumento del telescopio VLT. Por el contrario, de acuerdo con la ecuación de equilibrio radiativo (que tiene en cuenta la luminosidad estelar, la separación orbital y el albedo planetario), las exotierras en las zonas habitables de estrellas muy frías y de baja masa deben orbitar mucho más cerca y producir una variación de velocidad radial en su estrella que podría ser medida con la tecnología actual.

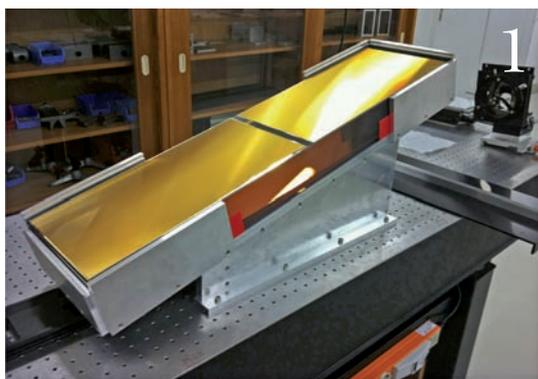
Las estrellas de baja masa son las más abundantes del universo. Son relativamente frías (tienen temperaturas de entre ~4000 y ~2200 K) y débiles en las longitudes de on-

IZQUIERDA

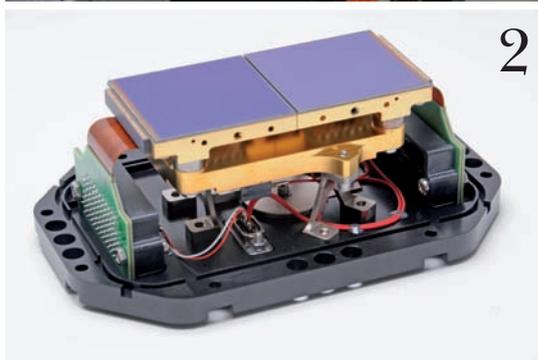
Telescopio Zeiss de 3,5 m de Calar Alto. La flecha amarilla indica la localización exacta de donde irá instalado el frontal de CARMENES. El fardo de fibras ópticas irá fijado a la montura ecuatorial del telescopio hasta la sala coudé en el nivel inferior. [Cortesía Isaac Lozano Rey]

FIGURA 1

Red de dispersión del canal VIS, en el LSW, Heidelberg. Es un mosaico de dos redes échelle (nótese la separación entre los dos) con recubrimiento de oro sobre una base de zerodur. La red de dispersión del canal NIR, en IAA (Granada), es idéntica.

**FIGURA 2**

Mosaico de los dos chips CMOS del detector del canal NIR, con parte de su electrónica. Cabe en la palma de la mano pero necesita un criostato del tamaño de una bombona de butano. Las dos redes de dispersión y este mosaico de chips son los componentes más caros de CARMENES: entre los dos suman casi un tercio del presupuesto global del instrumento.



da visibles, y tienen tipos espectrales M y masas de menos de 0,6 la masa del Sol. Las exotierras habitables en órbita de estrellas enanas M deberían producir una variación de velocidad radial de la misma amplitud que la provocada por «exojúpiteres» alrededor de estrellas más calientes de tipo solar, que son mucho más brillantes en la parte visible del espectro. A pesar de ello, los espectrógrafos ultraestables más exitosos, como HARPS o HIRES, que trabajan en el visible, no están optimizados para observar estrellas de baja masa. Debido a sus bajas temperaturas efectivas, la luminosidad de las enanas M es baja, pero también tienen «colores rojos»: mientras que el Sol emite el máximo de su energía hacia el verde-amarillo, en 550 nm, las enanas M lo hacen en el infrarrojo cercano, a más de 900 nm. Por tanto, un espectrógrafo ultraestable que operara en el infrarrojo cercano sería una de las herramientas más adecuadas, si no la que más, para detectar la primera exotierra habitable. La ExoPlanet Task Force y las redes de planificación europeas ASTRONET y OPTICON recomiendan el desarrollo urgente de espectrógrafos infrarrojos con una precisión de 1 m/s para descubrir e investigar planetas en zonas habitables alrededor de estrellas M tardías, brillantes y cercanas. En palabras de la ExoPlanet Task Force: «Los espectrógrafos infrarrojos son potencialmente la mejor manera de encontrar planetas de masas terrestres en las zonas habitables de estrellas de secuencia principal más tardía que M4V [...]»

El Centro Astronómico Hispano-Alemán de Calar Alto, CAHA, está situado a 2168 m en la Sierra de Los Filabres, al norte de Almería. El centro está operado conjuntamente por el Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA-MPG) de Heidelberg, Alemania, y el Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC) de Granada. A pesar de los recortes, Calar Alto sigue ofreciendo tres telescopios reflectores con aberturas de 1,23 m, 2,2 m y 3,5 m a la comunidad astronómica internacional (*Astronomía* 166, abril 2013).

El telescopio Zeiss de 3,5 m, inaugurado en 1984, es aún el telescopio más grande de Europa Occidental continental. Se pueden usar seis instrumentos diferentes, desde cámaras de gran campo en el visible y en el infrarrojo, a espectrógrafos de resolución intermedia, pasando por una de las mejores unidades de campo integral del mundo, llamada PMAS. La precisa montura ecuatorial del telescopio, en vez de altazimutal, y su cámara de aluminizado, que permite tener su espejo primario siempre en las mejores condiciones, son ejemplos de ingeniería *made in Germany* difíciles de encontrar en otros telescopios.

La predisposición actual de muchos observatorios internacionales, como el Observatorio Europeo Austral en Chile, UKIRT en Hawái o el Isaac Newton Group of Telescopes en La Palma, es la de reducir el número de instrumentos ofrecidos por telescopio y convertir estos en «telescopios dedicados», en los que durante la mayor parte o todo el tiempo opere un único instrumento que proporcione datos de calidad en cantidad. Algunos ejemplos son HARPS en el telescopio 3,6 m de La Silla (primo hermano del 3,5 m de Calar Alto), la cámara de gran campo WFCAM en el UKIRT, o el futuro espectrógrafo multiobjeto WEAVE en el telescopio William Herschel.

En 2008 el Centro Astronómico Hispano-Alemán anunció una competición para construir un instrumento de próxima generación para el telescopio de 3,5 m de Calar Alto. CARMENES, que en aquel momento recibía otra denominación más críptica, fue una de las dos propuestas instrumentales seleccionadas para un estudio de diseño conceptual (Fase A) financiado por la alemana Max-Planck-Gesellschaft, MPG y el español Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC. El otro instrumento era un espectrógrafo de gran «multiplexado» que no siguió desarrollándose.

CARMENES es el acrónimo de *Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs*. A pesar de su aparente complejidad, el nombre posee todos los elementos característicos del instrumento: búsqueda de exotierras, enanas M, Calar Alto, espectrógrafo visible e infrarrojo... La parte del nombre de velocidad radial (Radial-velocity) se transformó en una más general de alta resolución (high-Resolution) ya que con CARMENES se puede hacer mucha más ciencia que buscar «exotierras azules alrededor de estrellas rojas».

El Consorcio CARMENES fue creado oficialmente a principios de 2009 con el objetivo de diseñar, construir, integrar y poner en marcha el instrumento del mismo nombre. El Consorcio está formado en la actualidad por diez centros de investigación y universidades en España y Alemania, en colaboración con el CAHA. Los centros españoles implicados están en Granada, Barcelona, Madrid y Tenerife, además de Calar Alto (véase Tabla 1). A día de hoy, somos más de ciento veinte científicos e ingenieros en el Consorcio, distribuidos más o menos en partes iguales entre España y Alemania. CARMENES es, asimismo, el nombre del proyecto científico que el Consorcio llevará a cabo con el instrumento del mismo nombre durante las observaciones de tiempo garantizado. El tiempo garantizado es la moneda de cambio con la que un observatorio «paga» el instrumento al consorcio que lo ha construido, e igual se aplica en Calar Alto que en los instrumentos del Telescopio Espacial Hubble o el Gran Telescopio CANARIAS. En el caso de CARMENES, el tiem-

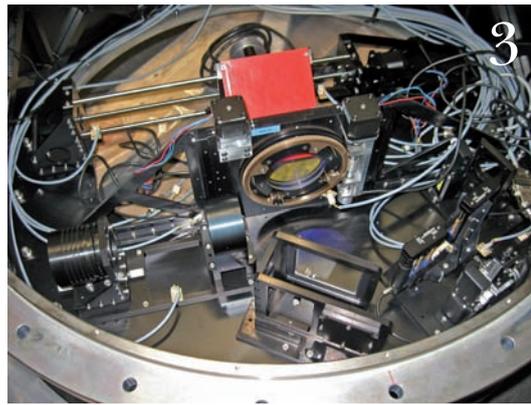


FIGURA 3

Interior del frontal recién ensamblado en el LSW, Heidelberg. La tapa roja cubre el espejo sobre raíles que inyecta la luz en CARMENES. El anillo central cobrizo es el corrector de dispersión atmosférica. La cámara de adquisición y guiado está abajo a la izquierda, el dicroico abajo en el medio y los alimentadores de fibras a la derecha. La disposición de los cables no es la definitiva.

po garantizado se usará para lo que el instrumento ha sido optimizado, que es la búsqueda de velocidad radial de planetas alrededor de estrellas de muy baja masa. Con una estabilidad del orden de 1 m/s en el infrarrojo cercano y monitorización simultánea de indicadores de actividad en el visible, CARMENES podrá detectar exotierras en las zonas habitables de trescientas estrellas M cuidadosamente seleccionadas. Algunas de esas exotierras podrían también mostrar tránsitos por delante de su estrella, lo que permitiría determinar con precisión su masa, radio y densidad, y estimar su composición y estructura interna.

Aunque la mitad de lo que cuesta uno para GTC, o un cuarto de uno para VLT, CARMENES es un instrumento caro y que ha necesitado muchos meses de trabajo de numerosas personas para llegar a buen término. Por ello, tendrá una gran cantidad de tiempo garantizado: al menos seiscientas noches hasta 2018, cuando concluye el actual acuerdo entre la MPG alemana y el CSIC español. La gran cantidad de noches garantizadas revertirá en la calidad e impacto de

TABLA 1. INSTITUCIONES MIEMBROS DEL CONSORCIO CARMENES

Institución	Ciudad
Max-Planck-Institut für Astronomie	Heidelberg
Instituto de Astrofísica de Andalucía	Granada
Landessternwarte Königstuhl	Heidelberg
Institut de Ciències de l'Espai	Barcelona
Institut für Astrophysik Göttingen	Göttingen
Departamento de Astrofísica UCM	Madrid
Thüringer Landessternwarte Tautenburg	Tautenburg
Instituto de Astrofísica de Canarias	Tenerife
Hamburger Sternwarte	Hamburgo
Centro de Astrobiología	Madrid
Centro Astronómico Hispano-Alemán	Calar Alto, Almería



El logo de CARMENES, «solmiro-bauhaus», es una versión minimalista del famoso logo «Turismo español» de Joan Miró con la palabra «carmenes» escrita en fuente Bauhaus (Herbert Bayer 1925). El logo representa el alma del Consorcio, en la que se unen la ingeniería alemana y la pasión española. Con un poco de imaginación, el logo puede representar un pequeño planeta negro alrededor de una estrella roja (Excepto donde se indique, todas las figuras son cortesía del autor y © CARMENES)

los resultados del proyecto CARMENES, que casi con total seguridad multiplicará por un factor cinco o seis el número actual de exoplanetas detectados alrededor de enanas M, ofrecerá la estadística más completa y precisa de las propiedades de los sistemas planetarios alrededor de estrellas de baja masa y llegará a la frontera de las exotierras habitables.

Al menos durante el primer año de operaciones, CARMENES compartirá focos con el resto de instrumentos del 3,5 m. Además, en todo momento, se ofrecerá en observaciones de tiempo abierto a cualquier astrónomo español o alemán para hacer otra ciencia que no sea búsqueda de velocidad

Esperamos que CARMENES y el observatorio de Calar Alto se conviertan en el referente de la búsqueda de exotierras en el hemisferio norte a partir de 2016

radial de planetas de enanas M: desde astrosismología a planetas de estrellas gigantes M o enanas K, pasando por determinación de parámetros astrofísicos y multiplicidad de estrellas de todos los tipos espectrales, abundancias metálicas, cinemática en la Galaxia y un largo etcétera.

Desde principios de 2009, CARMENES ha pasado numerosas revisiones de diseño y exámenes por parte del Observatorio y de las entidades financiadoras, que han sido principalmente MPG, CSIC, la Unión Europea a través de fondos FEDER, el Plan Nacional de Astronomía y Astrofísica y cada una de las instituciones miembros del Consorcio. En la actualidad, se encuentra en la

fase final de ensamblaje, integración y verificación de todos sus componentes, con la primera luz de CARMENES en el telescopio prevista para mediados de 2015, ¡en unos nueve meses!

Como es previsible por la cercanía de la primera luz, CARMENES ya está tomando forma. CARMENES es un espectrógrafo échelle de dos canales alimentado por fibras ópticas que proporcionará una cobertura casi completa en longitud de onda desde 550 hasta 1700 nm. Los componentes optomecánicos de los dos canales, que llamamos NIR (por *near-infrared*) y VIS (por *visible*) están ubicados sobre unos bancos ópticos dentro de tanques de vacío, a su vez dentro

de unas habitaciones climáticas individuales en la sala coudé del telescopio de 3,5 m. La luz de las estrellas llega al espectrógrafo doble desde un «frontal» (*front-end*) colocado en el foco Cassegrain del telescopio a través de unas fibras ópticas de decenas de metros de longitud. El espectró-

grafo también es alimentado a través de fibras por unas unidades de calibración, necesarias para medir con precisión extrema las minúsculas variaciones de longitud de onda y, por tanto, de velocidad radial que los exoplanetas telúricos provocan en sus estrellas. Estas unidades de calibración usan lámparas de torio-neón en el canal VIS y de uranio-neón en el NIR, pero también pueden ser alimentadas por unos etalones Fabry-Pérot de nueva tecnología.

El frontal en el foco Cassegrain, además de tener los inyectores de luz en las fibras ópticas, que ven un área proyectada de 1,5 segundos de arco en el cielo, tiene también un espejo sobre raíles que permite dejar pa-

TABLA 2. PARÁMETROS BÁSICOS DE INGENIERÍA DE CARMENES

	Canal NIR	Canal VIS
$\Delta\lambda$ [μm]	900-1700 nm (29 órdenes)	550-1050 nm (53 órdenes)
Red de difracción	2 x Richardson Gratings R4 (31,6 mm-1)	
Dispensor cruzado	Grisma, infrasil	Grisma, vidrio LF5
Ttrabajo [K]	140,00 \pm 0,05 K	295,00 \pm 0,05 K
Detector(s)	2 x 2k x 2k Hawaii 2-RG (2,5 μm)	1 x 4k x 4k e2v CCD231-84
Calibración λ	Lámparas de U-Ne & etalón Fabry-Pérot infrarrojo	Lámparas de Th-Ne & etalón Fabry-Pérot visible
Parámetros ópticos	R = 82 000 Muestreado promedio: 2,8 píxeles Espaciado entre fibras: 7 píxeles	

sar la luz a voluntad a PMAS, el instrumento colocado justo debajo. Además, el frontal posee un corrector de dispersión atmosférica, una cámara de adquisición y guiado y un dicróico que separa el haz de luz de la estrella en dos haces, uno para cada canal del espectrógrafo. Así, el canal VIS cubre desde 550 hasta 950 nm, y el NIR desde 950 hasta 1700 nm. Aunque la resolución de ambos canales, $\Delta\lambda / \lambda = 82\,000$, es algo inferior a la de HARPS, nuestro «competidor a batir», la cobertura de longitud de onda de CARMENES es muchísimo mayor y cubre las bandas infrarrojas Z, Y, J y H de una sola vez, prácticamente inaccesible para los espectrógrafos de alta resolución actuales.

Los dos canales del espectrógrafo son casi idénticos excepto por dos diferencias fundamentales: la temperatura de operación y el tipo de detector. Mientras que en ambos la temperatura de operación no puede variar más de unas pocas centésimas de grado en escala de días, el canal VIS opera a temperatura ambiente ($T = 295\text{ K}$) y el NIR casi en criogenia ($T = 140\text{ K}$). Eso ha obligado a desarrollar un sistema de enfriado del canal NIR basado en un flujo continuo de nitrógeno gaseoso a baja temperatura. El Observatorio Europeo Austral considera este sistema un prototipo de los criostatos de los detectores de la instrumentación que irá en el Telescopio Europeo Extremadamente Grande (E-ELT).

La otra diferencia radica en el tipo de detector. El canal VIS posee un CCD de alta tecnología con un ruido electrónico bajísimo y optimizado para la parte más roja del espectro. Sin embargo, los CCD son apenas sensibles más allá de 1000 nm, por lo que el canal NIR posee un detector específico del tipo CMOS fabricado en EE. UU. En particular, es un mosaico de dos chips producidos por Teledyne.

El resto de componentes optomecánicos de los dos canales también son muy similares entre sí. Desde que una fibra óptica octogonal entra dentro del tanque de vacío, el haz de luz de cada canal pasa por un adaptador de focal, un rebanador (*licer*) de imagen, un espejo colimador, una red de dispersión, el colimador (segunda vez), un espejo doblador, el colimador (tercera y última vez), un dispersor cruzado, una cámara y, finalmente, el detector dentro de su criostato. Entre el canal VIS y NIR, solo hay unas ligeras diferencias de parámetros, material y recubrimiento de los componentes ópticos y de estructuras facilitadoras de dis-

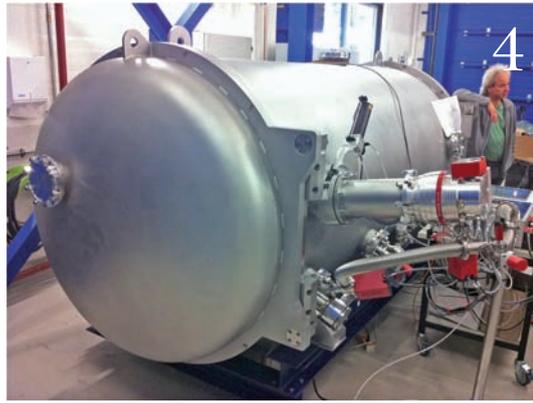


FIGURA 4

Tanque de vacío para el canal VIS en el IAA, Granada. Durante esta fase, los sistemas de válvulas y bombas se controlan desde una pantalla táctil.

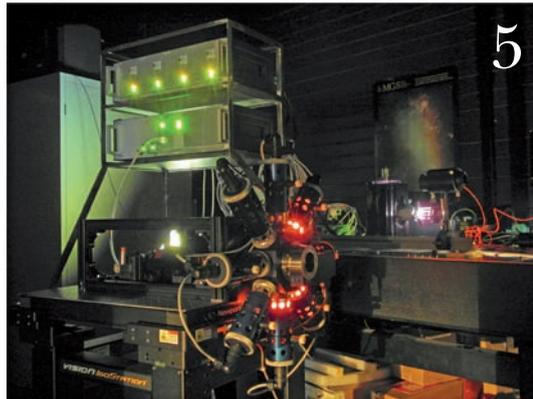


FIGURA 5

Unidad de calibración de longitud de onda del canal VIS durante una fase de pruebas en la sala coudé del telescopio 2,0 m Alfred Jensch del TLS en Tautenburg, cerca de Jena. Las luces rojas provienen de las lámparas de calibración de Th-Ne, las verdes de las de la electrónica de control y la blanquecina, al fondo, del etalón Fabry-Pérot del canal VIS. La unidad, pintada de azul, está ahora en Heidelberg. La otra unidad de calibración, del canal NIR, está en Granada y es idéntica excepto porque utiliza lámparas de U-Ne y está pintada de rojo.

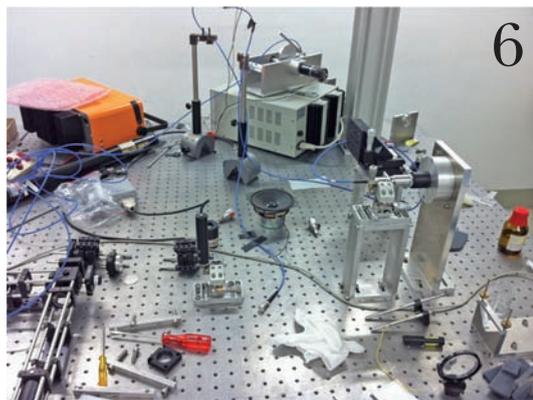


FIGURA 6

Banco óptico para las pruebas de las fibras ópticas en el LSW, Heidelberg. En CARMENES hay fibras de varios tipos: de perfil circular y octogonal, cortas y largas, de núcleos de 100 μm y mayores, con y sin agitadores, con conectores FC, protegidas con un «cable de ducha», etc. Véase uno de los prototipos de agitador de fibras en Musica Universalis, *Astronomía*, noviembre 2013.

persión térmica de los soportes y monturas mecánicas, lo que ha facilitado el diseño del espectrógrafo doble. La Tabla 2 resume los parámetros básicos de ingeniería de los dos canales de CARMENES.

Otros desarrollos tecnológicos avanzados los encontramos en los exposímetros, que determinan automáticamente la duración de una exposición en base a la relación señal-ruido instantánea, el tanque relleno de neón para el almacenamiento y preservación de las lámparas de calibración no usadas, las fibras ópticas de perfil octogonal para el batido (*scrambling*) de la imagen, el avanzado sistema de control computerizado del instrumento, que incluye un programador (*scheduler*) que elige la mejor estrella para observar en un momento dado, el datoducto (*pipeline*) para la reducción y extracción automática de los espectros a los pocos segundos de acabar la exposición, y casi todos los avances tecnológicos que se están

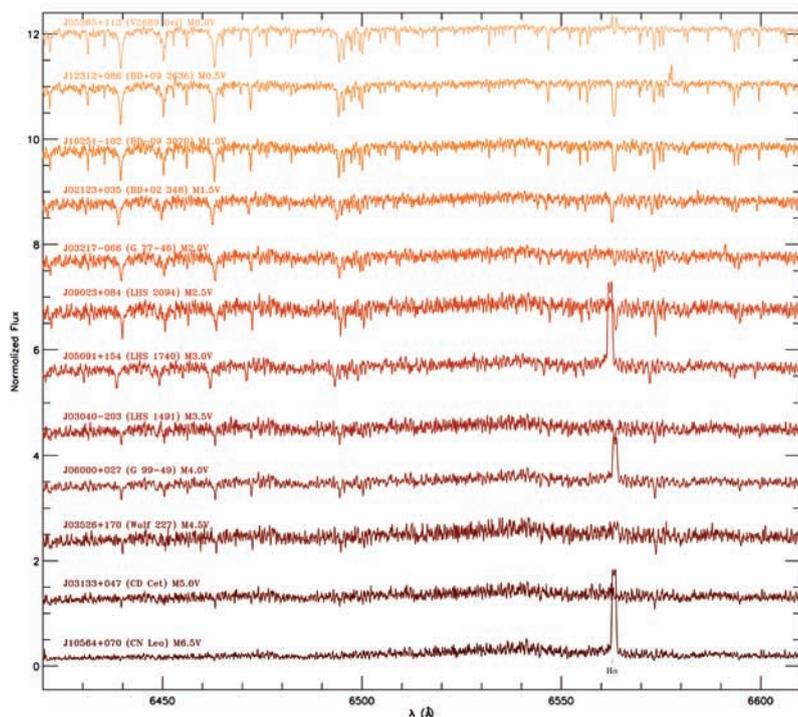


FIGURA 7

Ejemplo de espectros de alta resolución de enanas M obtenidos con FEROS en el telescopio de 2,2 m de La Silla y con CAFÉ en el telescopio de 2,2 m de Calar Alto, como paso previo para seleccionar las trescientas mejores estrellas que CARMENES observará durante el tiempo garantizado.

implementando en instrumentos comparables para la detección de exoplanetas por el método de velocidad radial en el infrarrojo, como SPIRou (franco-canadiense), HPF (estadounidense) o IRD (japonés).

Pero CARMENES es único y tiene tres ventajas fundamentales sobre estos «competidores»:

1 Llegará primero. Esperamos hacer las pruebas del frontal con los sistemas de guiado y control en abril de 2015, la primera luz del canal VIS en agosto y del NIR en septiembre, entre uno y tres años antes que los otros espectrógrafos.

2 Tendrá más noches disponibles de telescopio. El menor tamaño del telescopio de 3,5 m se compensará con una dedicación significativa de su tiempo a CARMENES, tanto garantizado como abierto. Un mayor número de visitas a los sistemas planetarios se traduce en una mejora en la determinación de los parámetros orbitales.

3 Alta resolución y ancha cobertura espectral a la vez. CARMENES es por ahora el único espectrógrafo ultraestable de alta resolución que hará observaciones simultáneas en el infrarrojo cercano y en el visible para discriminar entre exoplanetas y actividad estelar (las estrellas M son activas en general).

Esperamos que CARMENES y Calar Alto se conviertan en el referente de la búsqueda

de exotierras en el hemisferio norte a partir de 2016. Antes, debemos terminar de ensamblar, integrar, verificar y poner en marcha el instrumento, así como de seleccionar las trescientas mejores estrellas que CARMENES observará durante el tiempo garantizado. Para ello, los científicos del consorcio hemos recopilado la base de datos de enanas M más completa y precisa, con casi todo lo que a uno se le puede ocurrir para caracterizar una estrella: nombres, coordenadas, movimientos propios, distancias, velocidades radiales, rotacionales y galactocéntricas, tipos espectrales, temperaturas, gravedades y metalicidades, indicadores de actividad y multiplicidad corta y larga, fotometría desde el ultravioleta hasta el infrarrojo medio... Muchos de estos parámetros vienen de nuestras propias observaciones con multitud de instrumentos en Calar Alto, Roque de los Muchachos, Teide y La Silla, además del Observatorio Virtual. Como el sentido del humor es lo último que perderemos, aunque hayamos tenido que superar multitud de obstáculos (cambios periódicos de dirección del Observatorio, falta de financiación, retención de pagos, reducción de presupuesto y plantilla en Calar Alto e incluso amenaza de cierre del telescopio de 3,5 m), a esta base de datos la llamamos *Carmencita*.

¿Cómo será el futuro de CARMENES y Calar Alto? El acuerdo actual entre la MPG alemana y el CSIC español para las operaciones del observatorio termina en 2018. Lo que ocurra después está sujeto a disquisiciones políticas por un lado y a los resultados inminentes de CARMENES por el otro. Quizá a partir de 2018 solo CARMENES y PMAS se queden en el telescopio de 3,5 m (y PANIC en el 2,2 m), y CARMENES sea el instrumento principal para caracterizar espectroscópicamente los cerca de dos mil sistemas exoplanetarios que *Gaia* descubrirá astrométricamente. A más de diez años vista, CARMENES podría ser el caballo de batalla en el hemisferio norte para la caracterización de las decenas de miles de sistemas en tránsito que *PLATO* descubrirá a partir de 2025. (A)

José Antonio Caballero
es astrofísico en el
Centro de Astrobiología.



Para contactar: c4b4llero@gmail.com.
Web: exoterrae.eu.