

XIII Jornadas de Introducción a la Investigación 2025

DETECCIÓN DE SISTEMAS EXOPLANETARIOS

ALREDEDOR DE ENANAS M: MITIGANDO EL RUIDO ESTELAR

Javier Banegas Paredes

Directores: Dr. David Montes y Dra. Esther González Álvarez

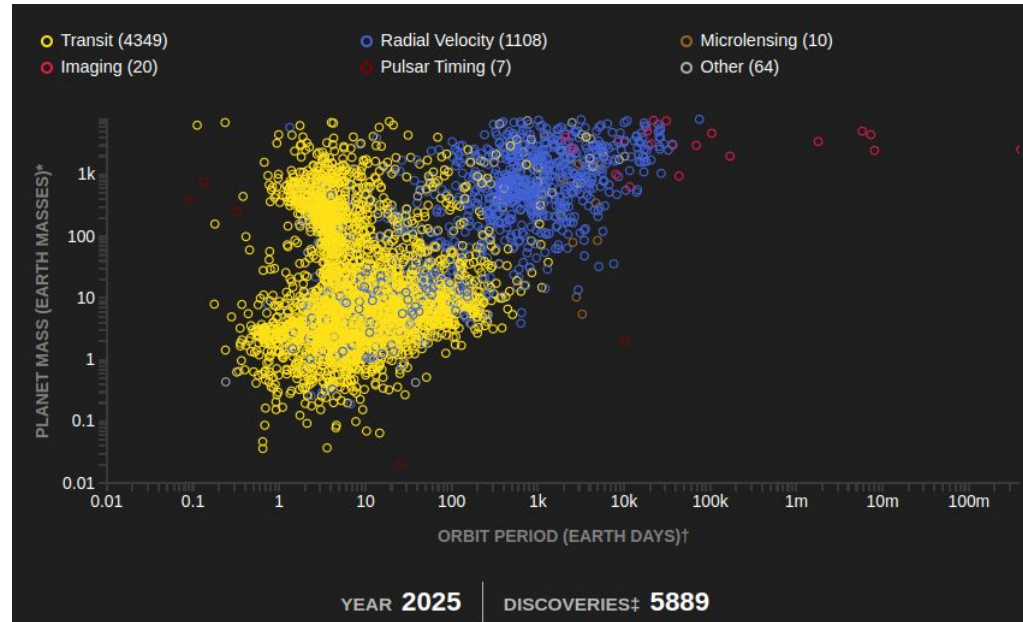
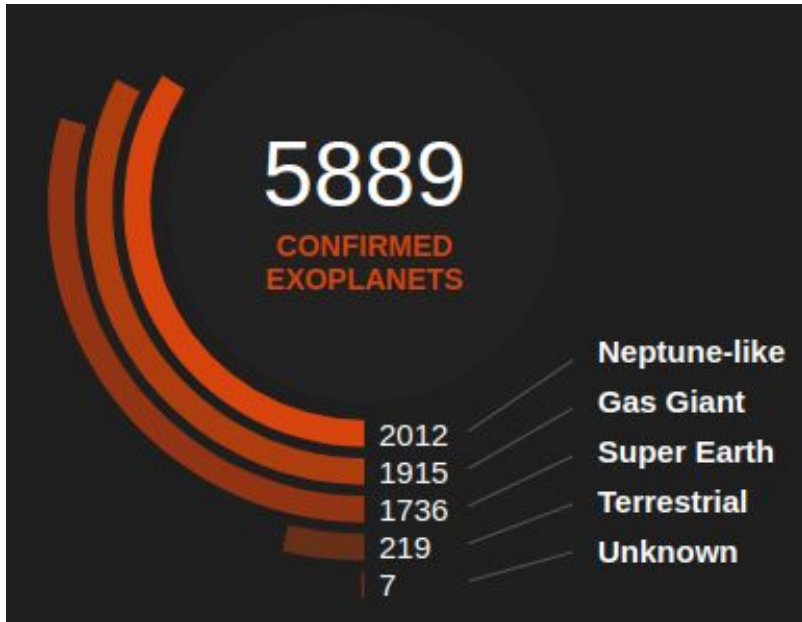
Sistemas estelares, espectroscopía y fotometría
Facultad de CC. Físicas – Universidad Complutense de Madrid



¿Exoplaneta?

Un **exoplaneta** es todo planeta que orbite a otra estrella que no sea el Sol

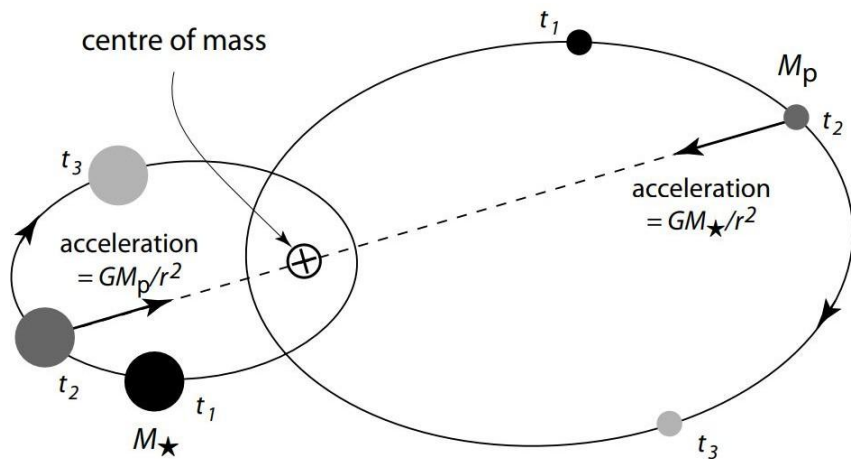
Clasificación de exoplanetas



Métodos de detección de exoplanetas

Velocidad radial

Se basa en el **efecto Doppler** que sufre la luz de la estrella



Parámetros derivados:

- Semiamplitud de velocidad radial $\longrightarrow K$ [m s^{-1}]
- Periodo $\longrightarrow P$ [días]
- Semieje mayor $\longrightarrow a$ [UA]
- Límite inferior a la masa del planeta $\longrightarrow M \sin(i)$ [M_{Jup}]



Métodos de detección de exoplanetas

Se basa en la **disminución de flujo** que se recibe de una estrella cuando su planeta la eclipsa

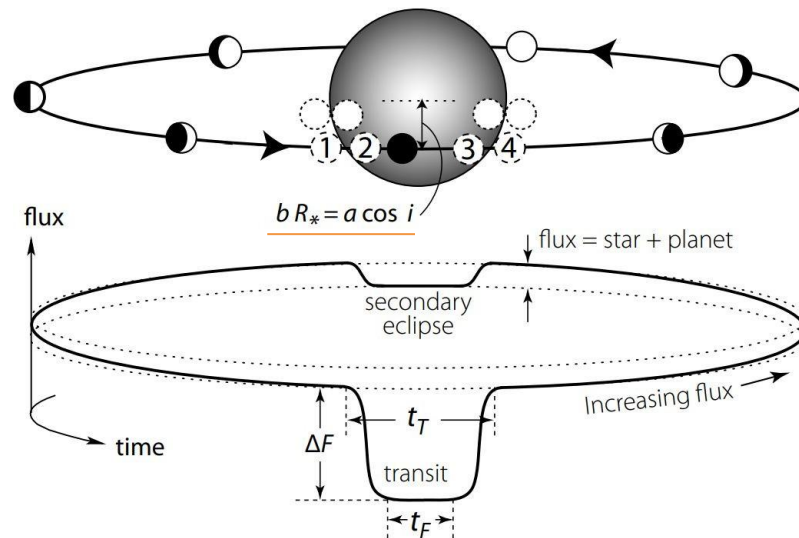
Parámetros derivados:

- Cociente del radio del planeta $\longrightarrow R_P/R_\star$
- Cociente del semieje mayor $\longrightarrow a_P/R_\star$

- Periodo $\longrightarrow P$ [días]
- Parámetro de impacto $\longrightarrow b$
- Inclinación de la órbita $\longrightarrow i$ [deg]

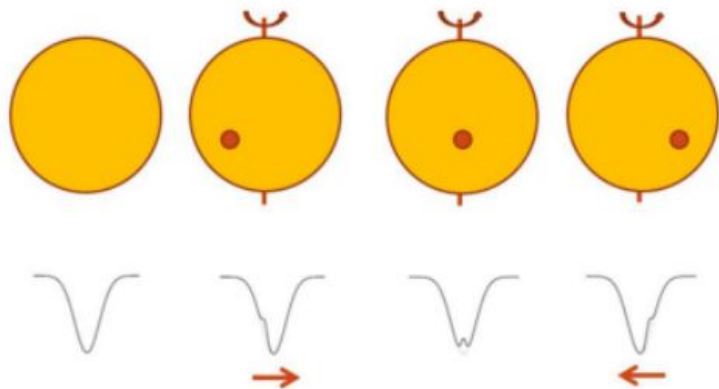


Tránsitos



Actividad estelar en estrellas M

De media las estrellas M son **más activas** que las estrellas tipo solar



Indicador	Descripción	Aplicación
H_{α}	Línea de emisión de hidrógeno (6563 Å)	Sensible a actividad cromosférica
FWHM	Anchura a media altura	Indica dispersión de velocidades
BIS	Diferencia en posiciones del bisector	Sensible a variaciones en forma de la línea
$\log R_{HK}$	Índice de emisión cromosférica	Relacionado con actividad magnética
DLW	Diferencial de anchura de línea	Sensible a variaciones en temperatura y presión

La actividad afecta a la forma de las líneas espectrales, induciendo una distorsión del perfil de línea que influye en los datos de RVs

Los periodos de rotación de las enanas M suelen coincidir con los periodos orbitales de los planetas que se encuentran en la **zona de habitabilidad** de estas estrellas.

Mitigando el ruido estelar

Pyaneti

- Ajuste de datos de RV y tránsitos.
- Procesos Gaussianos (GP) multidimensionales.

Quasic-Periodic Kernel:

$$\gamma_{QP}(t_i, t_j) = A^2 \exp \left\{ -\frac{\sin^2[\pi(t_i - t_j)/P_{GP}]}{2\lambda_p^2} - \frac{(t_i - t_j)^2}{2\lambda_e^2} \right\}$$

[

- P_{GP} (Periodo de rotación de la estrella)
- λ_e (Periodo de vida media de las regiones activas)
- λ_p (Distribución de las regiones activas)

Ajuste simultáneo RV + actividad

$$RV = A_0 G(t) + A_1 \dot{G}(t)$$

$$H_\alpha = A_2 G(t) + A_3 \dot{G}(t)$$

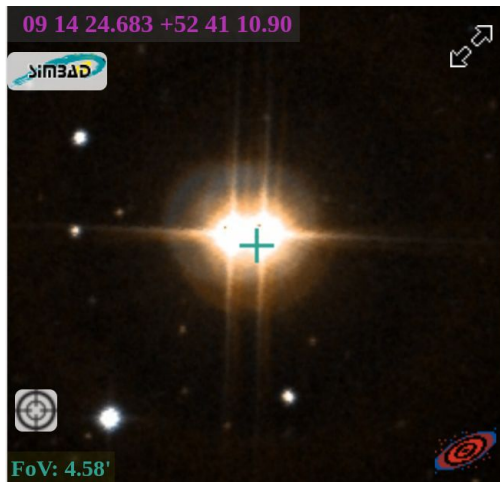
GJ 338 B

Spectral type M0.0 V

Stellar parameters:

- $M_{\star} = 0.64 \pm 0.07 M_{\odot}$
- $R_{\star} = 0.58 \pm 0.03 R_{\odot}$
- $T_{\text{eff}} = 4005 \pm 51 \text{ K}$
- $d = 6.334 \text{ pc}$
- $P_{\text{rot}} = 16.61 \pm 0.04 \text{ d}$

González-Álvarez et al. (2020)



GJ 338 B b

Super-Earth

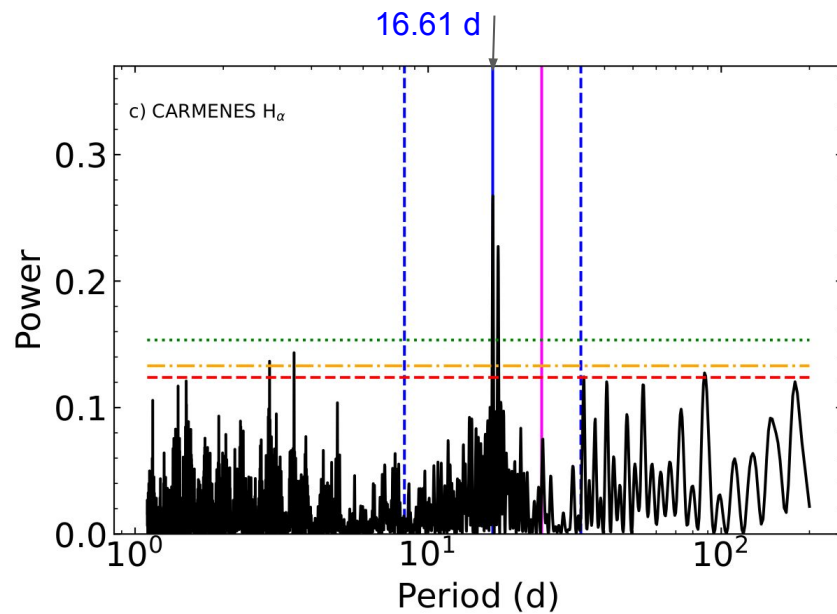
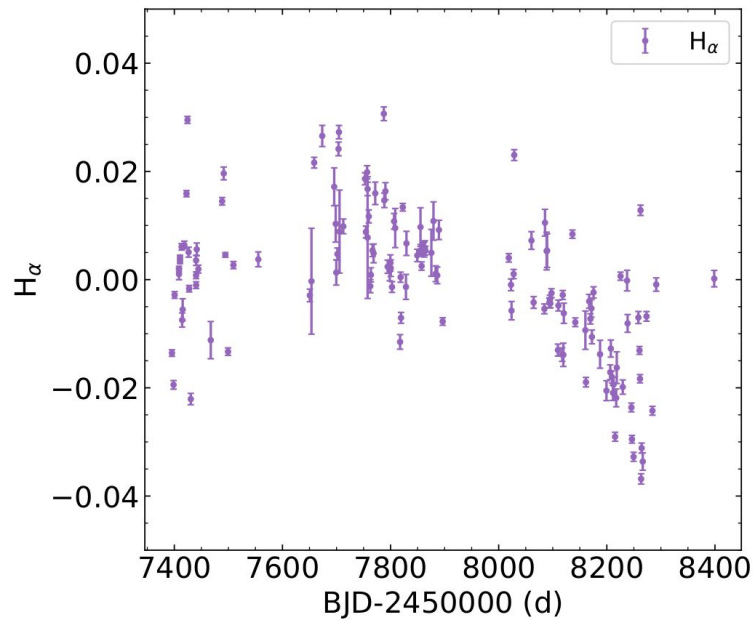
Planetary parameters:

- $M_{\text{p}} = 10.27 \pm 1.4 M_{\oplus}$
- $P_{\text{p}} = 24.45 \pm 0.02 \text{ d}$



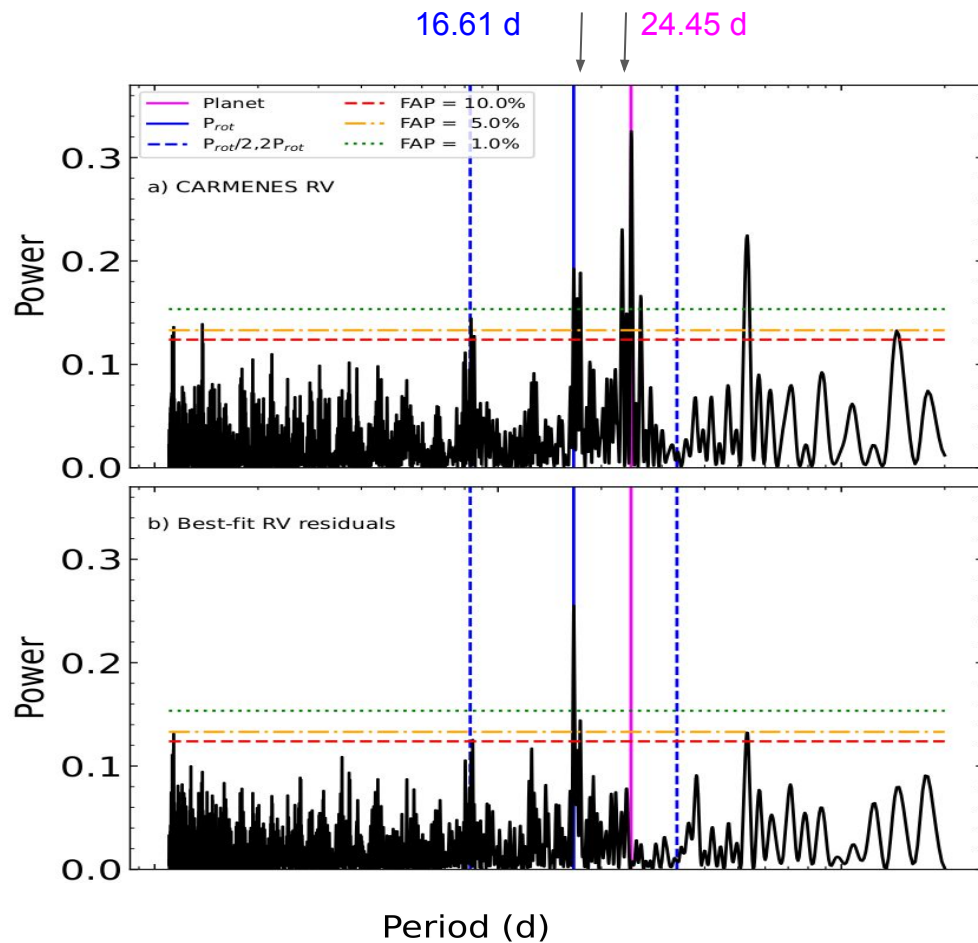
GJ 338 B (GLS $H\alpha$)

CARMENES DATA

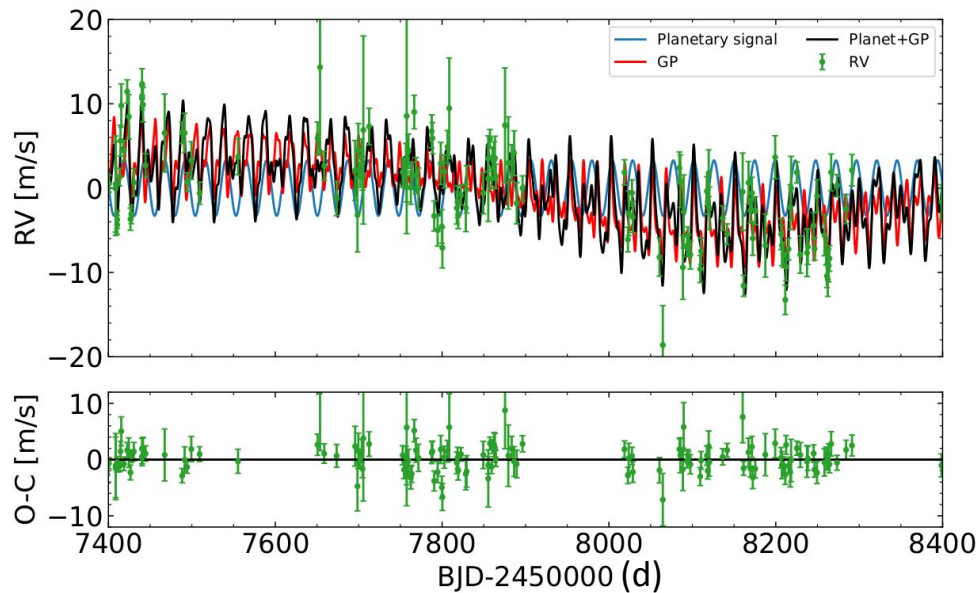


GJ 338 B (GLS RVs)

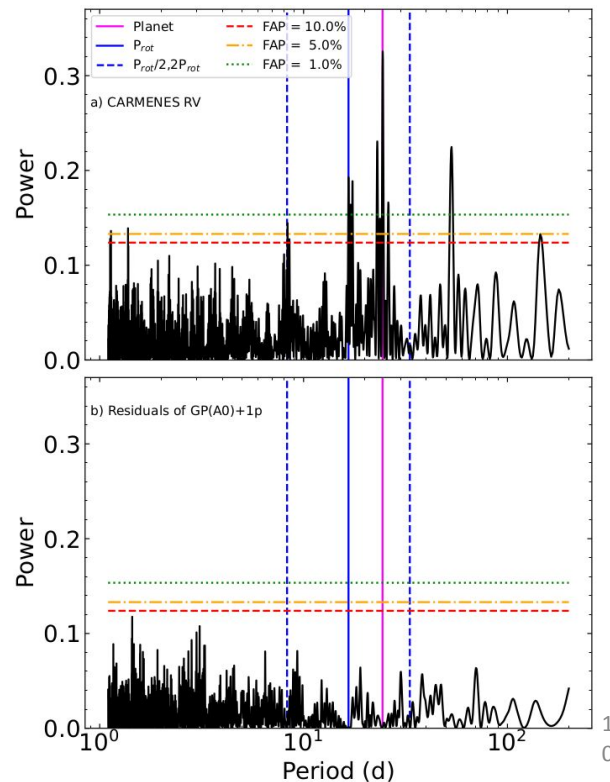
CARMENES DATA



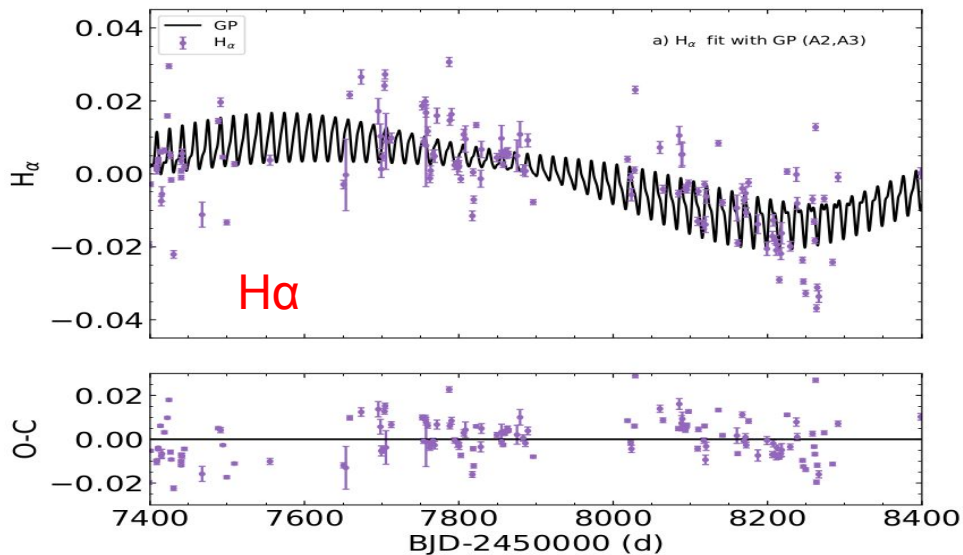
GJ 338 B (GP+RV)



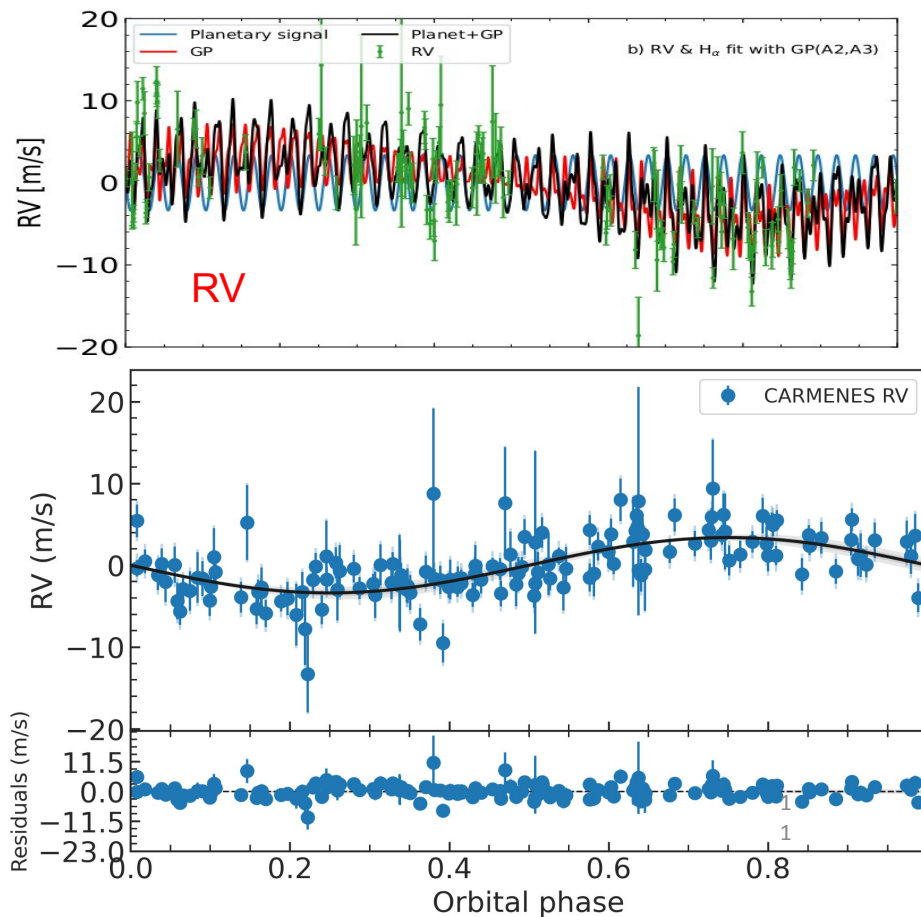
1pl+GP model



GJ 338 B (Multi-GP RV+H α)



Multi-GP+1pl



GJ 338 B b

RV+GP VS RV+Multi-GP

GJ 338B b		
Parameter	RV+GP fit	Multi-GP fit
K [m s ⁻¹]	$3.29^{+0.33}_{-0.32}$	$3.38^{+0.37}_{-0.47}$
P [days]	$24.384^{+0.027}_{-0.024}$	$24.399^{+0.039}_{-0.030}$
$m \sin i$ [M_{\oplus}]	$11.03^{+1.39}_{-1.35}$	$11.31^{+1.56}_{-1.75}$
a [au]	0.1421 ± 0.0052	0.1418 ± 0.0052
S [S_{\oplus}]	3.88 ± 0.53	3.88 ± 0.53
T_{eff} [K]	357 ± 85	357 ± 85
RMS res [m/s]:	2.98	2.8

$$P_{\text{rot (lit)}} = 16.61 \pm 0.04 \text{ d}$$

$$P_{\text{rot}} = 16.564^{+0.177}_{-0.081} \text{ d}$$

Results in González-Álvarez et al. (2020)

$$K \text{ (m/s)} = 3.07 \pm 0.37$$

$$P \text{ (days)} = 24.45 \pm 0.02$$

$$m_P \sin i (M_{\oplus}) = 10.27 \pm 1.4$$

$$3.2$$

GJ 1002

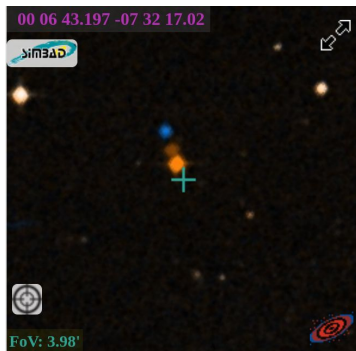
GJ 1002

Spectral type M5.5 V

Stellar parameters:

- $M_{\star} = 0.12 \pm 0.01 M_{\odot}$
- $R_{\star} = 0.137 \pm 0.005 R_{\odot}$
- $T_{\text{eff}} = 3024 \pm 52 \text{ K}$
- $d = 4,84 \text{ pc}$
- $P_{\text{rot}} = 126 \pm 15 \text{ d}$

Suárez-Mascaresño et al. (2023)



GJ 1002 b

Terrestrial

Planetary parameters:

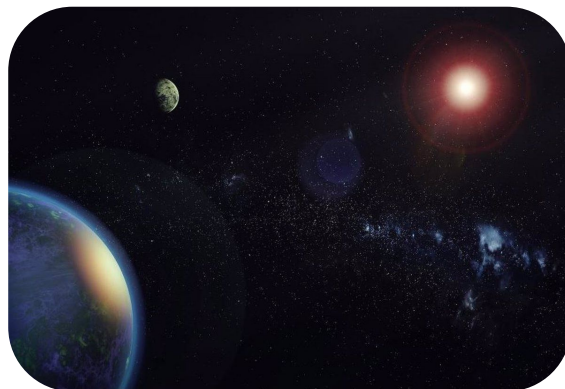
- $M_p = 1.08 \pm 0.13 M_{\oplus}$
- $P_p = 10.34 \pm 0.03 \text{ d}$

GJ 1002 c

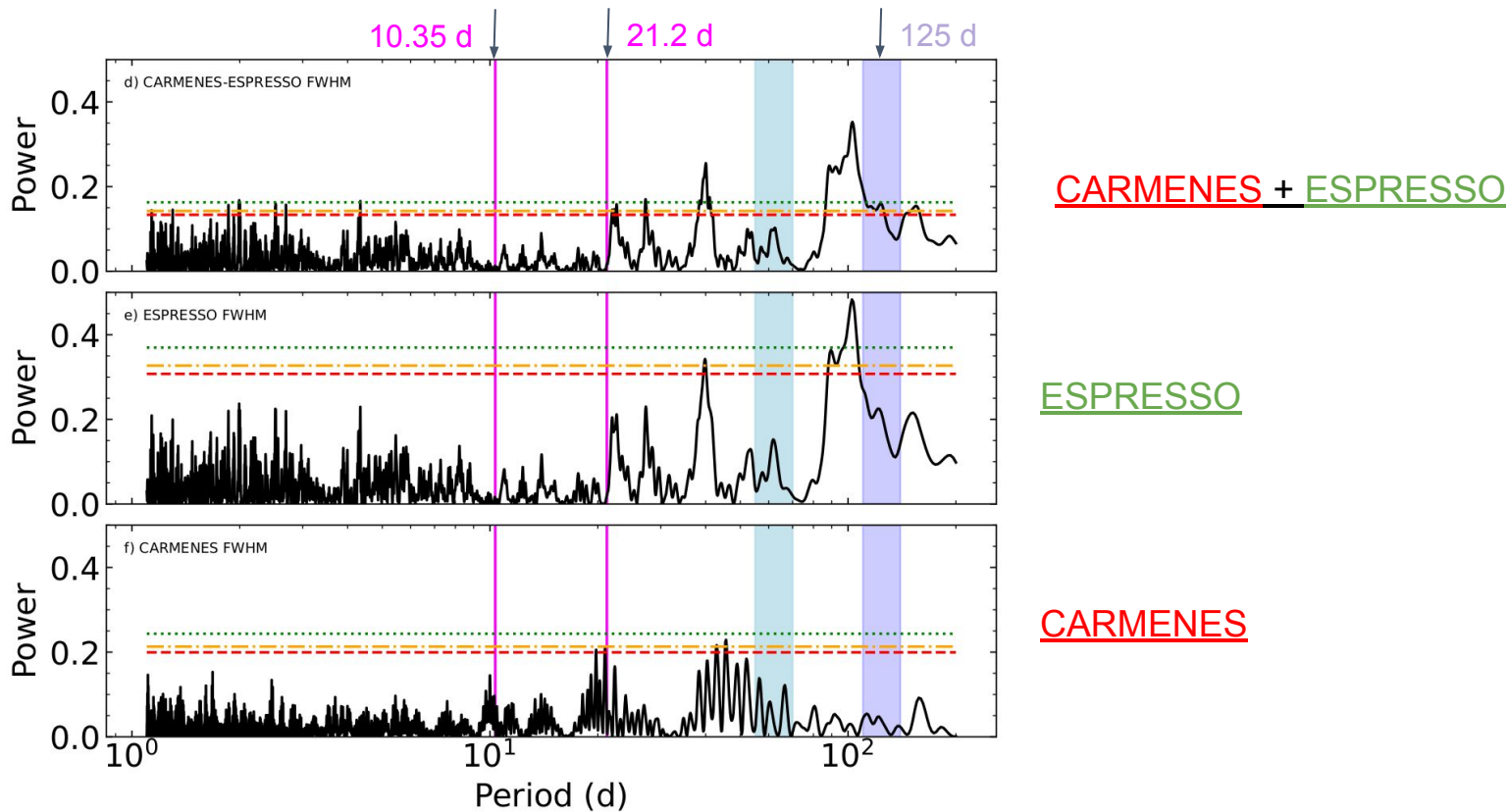
Terrestrial

Planetary parameters:

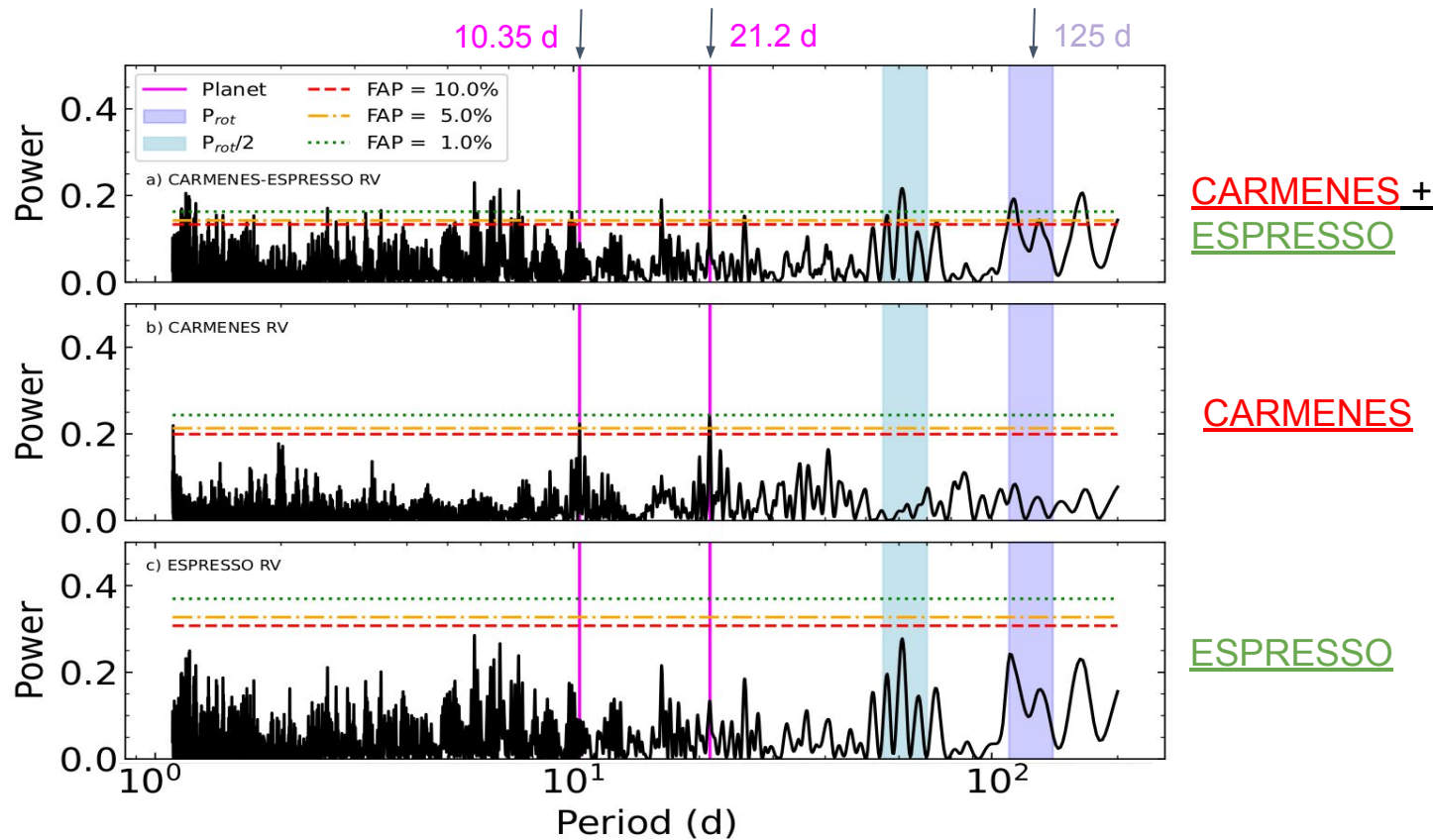
- $M_p = 1.36 \pm 0.17 M_{\oplus}$
- $P_p = 21.20 \pm 0.01 \text{ d}$



GJ 1002 (GLS FWHM)

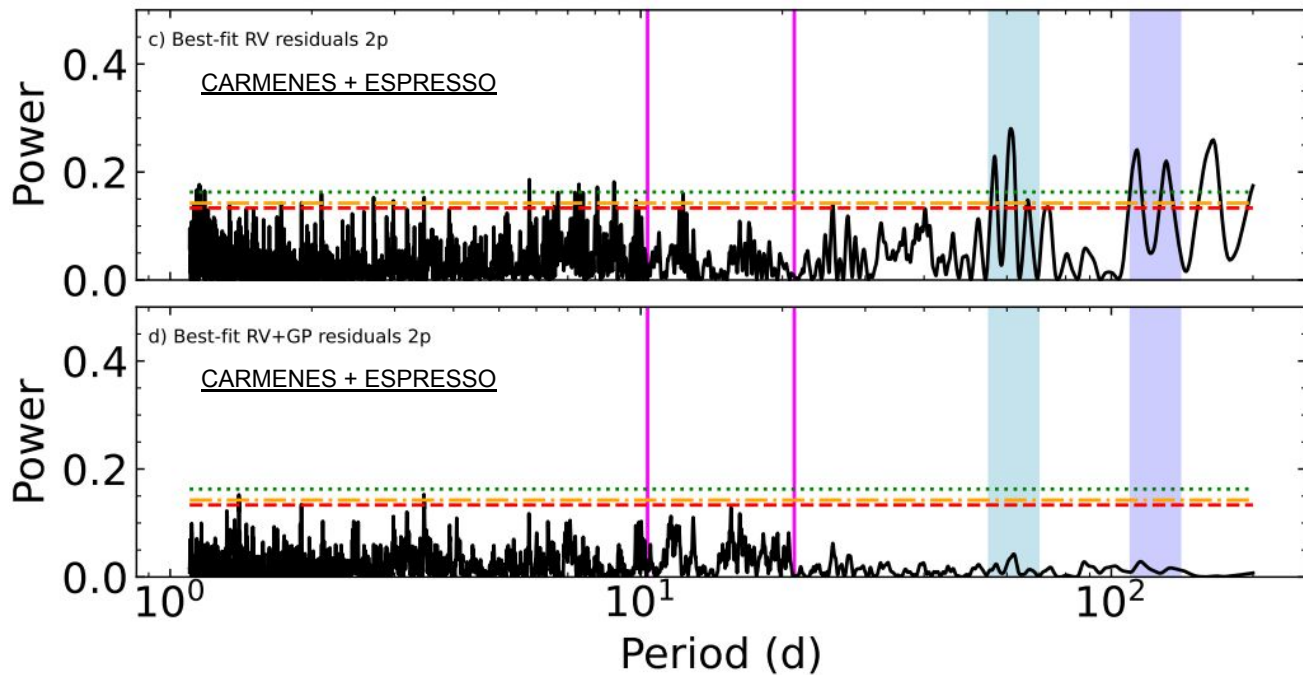


GJ 1002 (GLS RVs)



GJ 1002 (GLS RVs)

GLS RESIDUALS

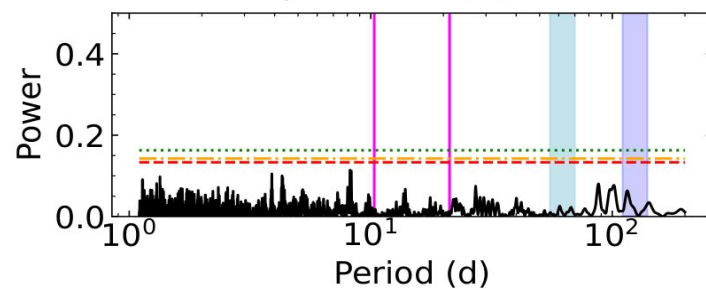
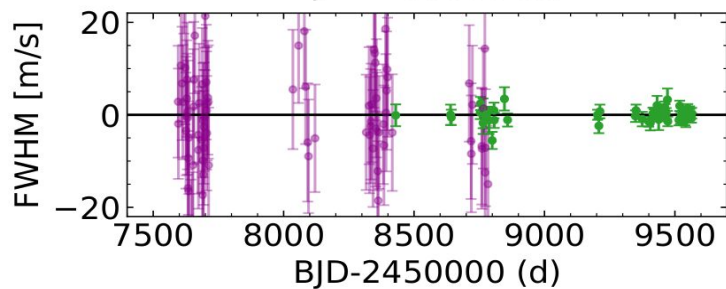
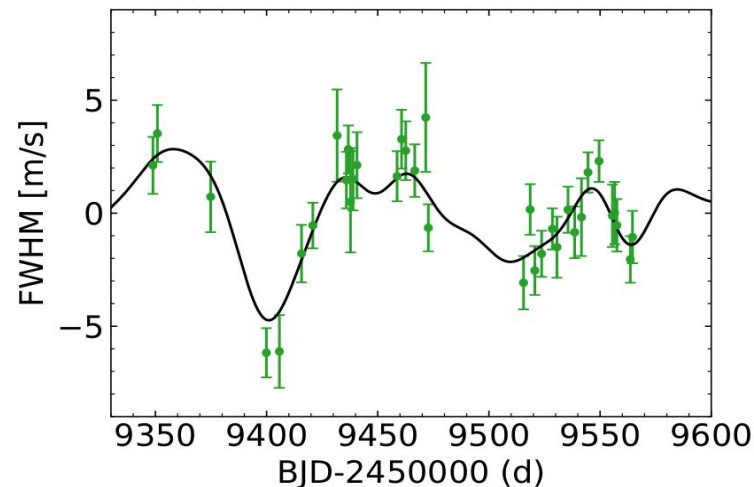
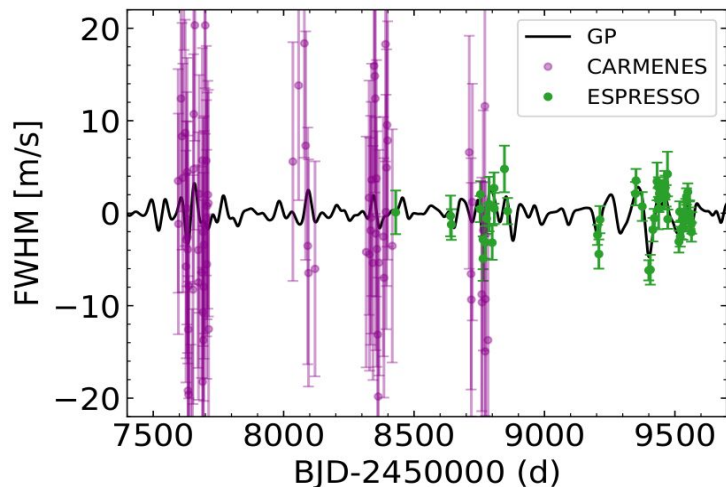


GJ 1002 (Multi-GP RV+FWHM)

FWHM DATA

CARMENES + ESPRESSO

Multi-GP+1pl

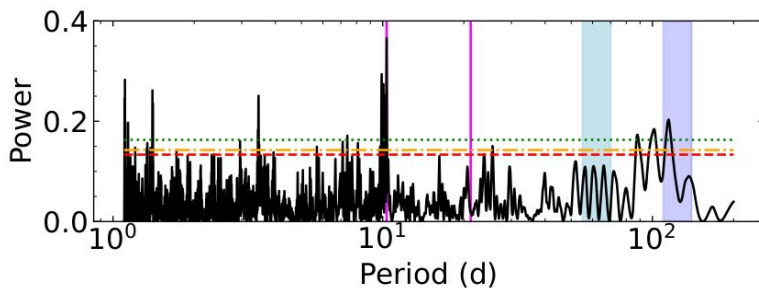
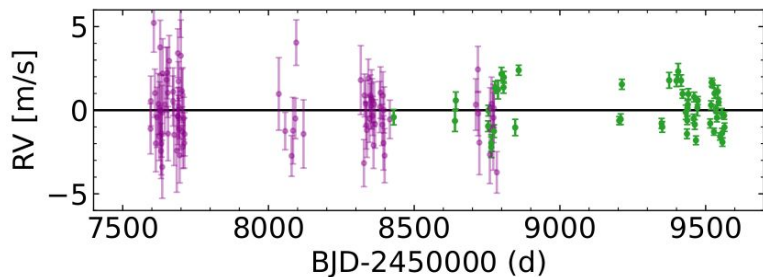
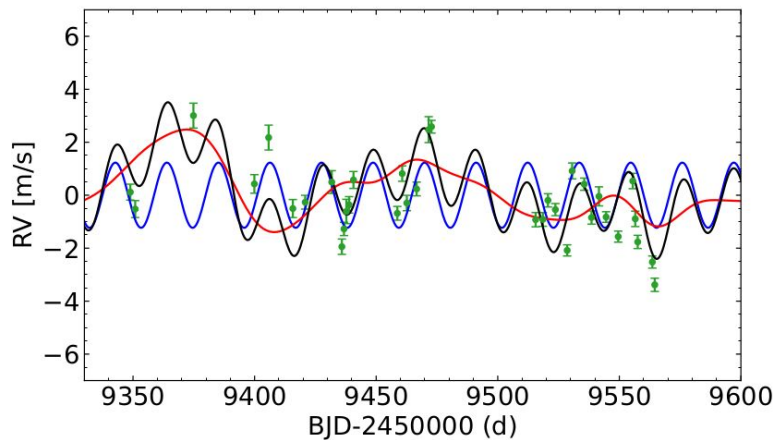
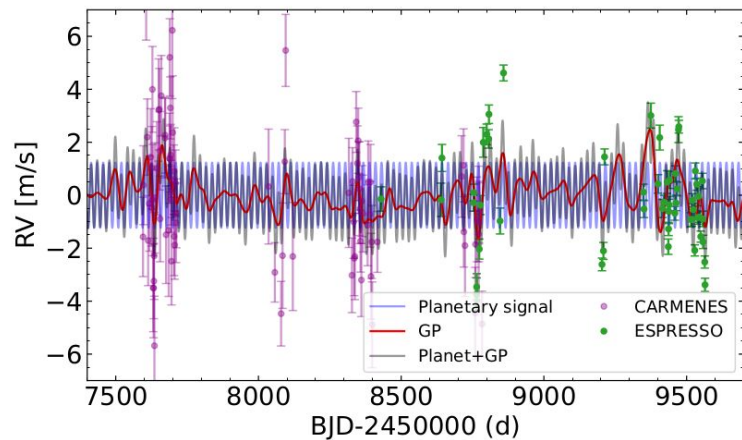


GJ 1002 (Multi-GP RV+FWHM)

RV DATA

CARMENES + ESPRESSO

Multi-GP+1pl

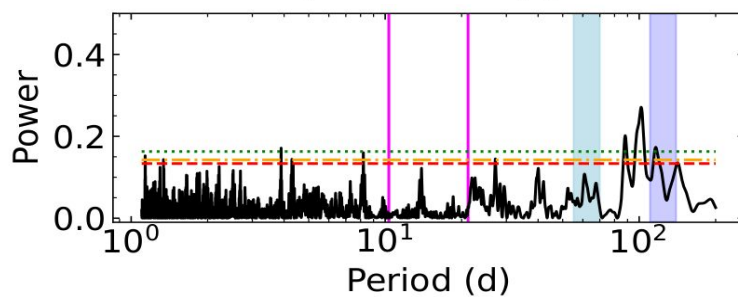
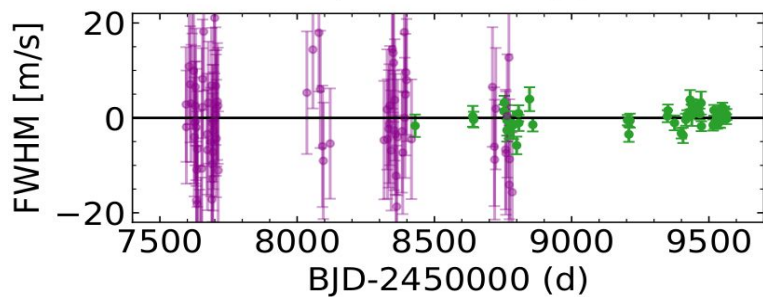
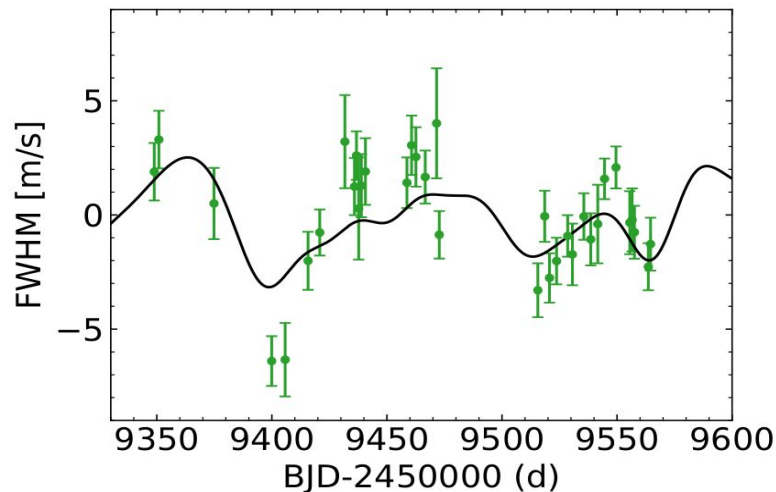
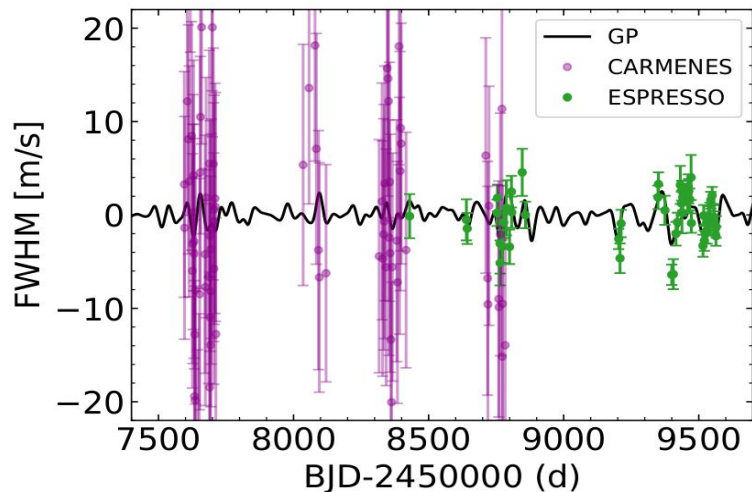


GJ 1002 (Multi-GP RV+FWHM)

FWHM DATA

CARMENES + ESPRESSO

Multi-GP+2pl

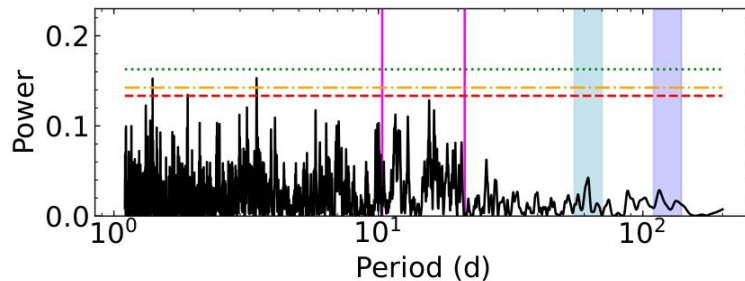
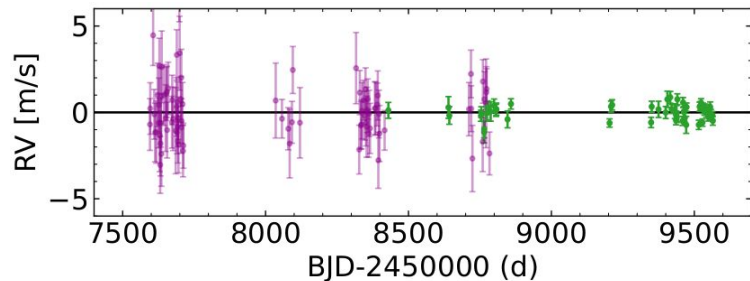
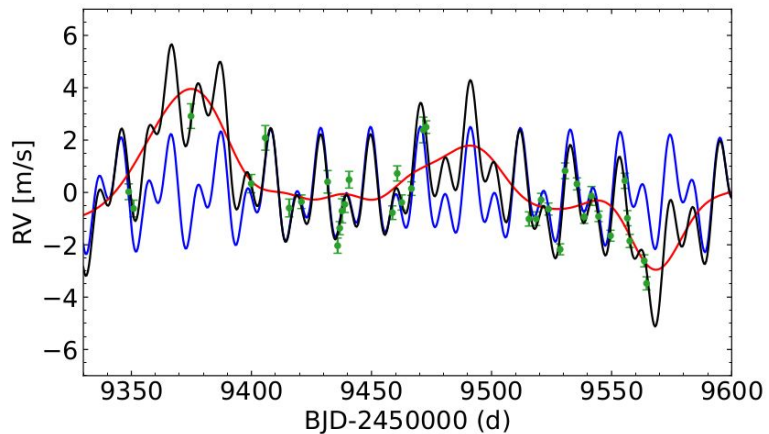
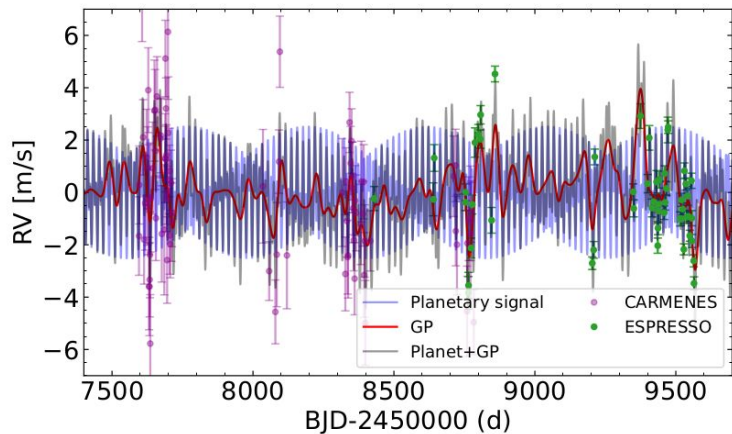


GJ 1002 (Multi-GP RV+FWHM)

RV DATA

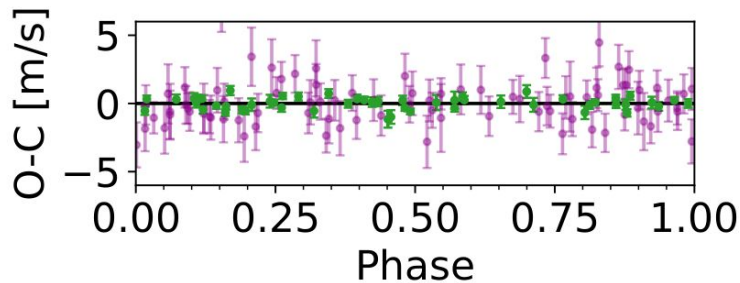
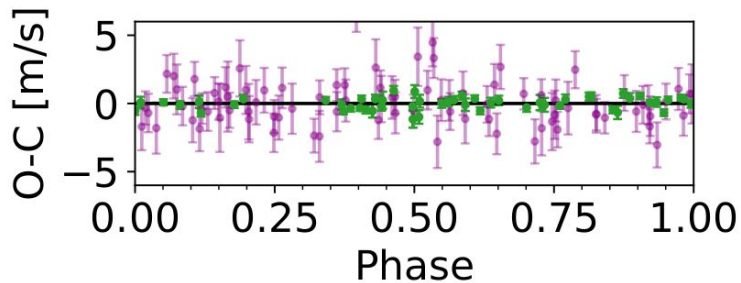
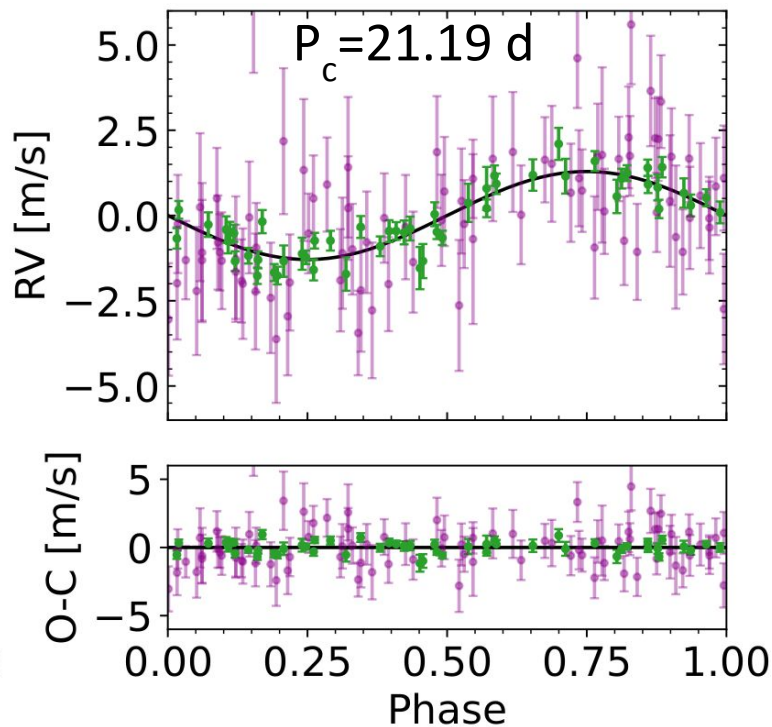
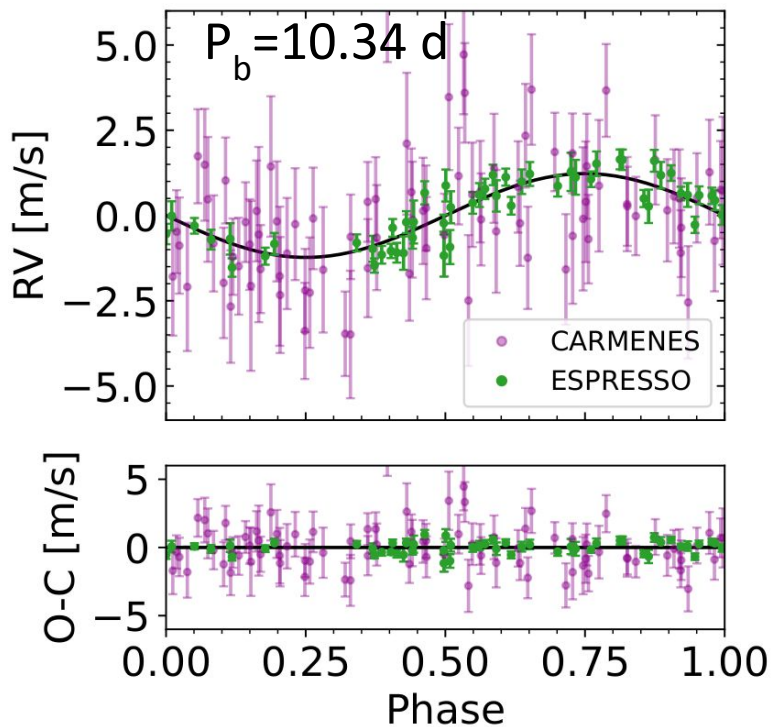
CARMENES + ESPRESSO

Multi-GP+2pl



GJ 1002 b & c

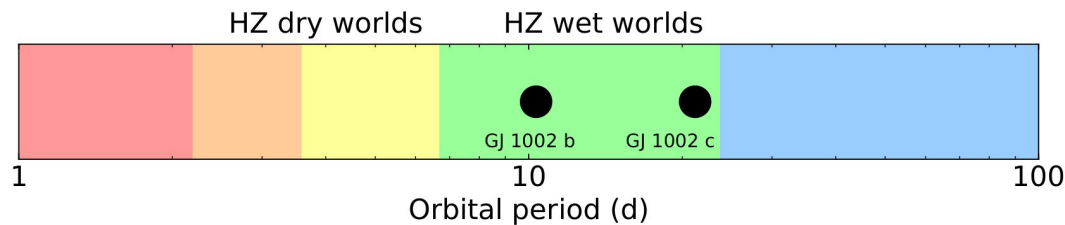
RV PHASE FOLDED



GJ 1002 b & c

GJ 1002 b				GJ 1002 c		
Parameter	Best RV fit	Multi-GP fit	Suárez-Mascareño et al. (2023)	Best RV fit	Multi-GP fit	Suárez-Mascareño et al. (2023)
K [m s^{-1}]	1.23 ± 0.25	$1.28^{+0.16}_{-0.17}$	1.31 ± 0.14	$1.17^{+0.23}_{-0.22}$	$1.26^{+0.17}_{-0.34}$	1.30 ± 0.14
P [days]	$10.34131^{+0.00051}_{-0.16651}$	$10.34173^{+0.01161}_{-0.00022}$	10.346 ± 0.027	$21.1980^{+0.0020}_{-0.0505}$	$21.1989^{+0.0010}_{-0.0015}$	21.202 ± 0.013
$m \sin i$ [M_{\oplus}]	$1.02^{+2.01}_{-0.22}$	$1.06^{+0.21}_{-0.15}$	1.08 ± 0.13	$1.23^{+0.25}_{-0.43}$	$1.33^{+0.19}_{-0.37}$	1.36 ± 0.17
a [au]	$0.0458^{+0.0013}_{-0.0014}$	0.0458 ± 0.0013		0.0739 ± 0.0021	0.0739 ± 0.0021	
S [S_{\oplus}]	$0.674^{+0.065}_{-0.067}$	0.674 ± 0.66		0.259 ± 0.025	0.259 ± 0.025	
T_{eff} [K]	230^{+19}_{-20}	230 ± 18		181 ± 20	182 ± 20	

RMS res [m/s]: 1.91 1.35 1.30 1.91 1.35 1.30

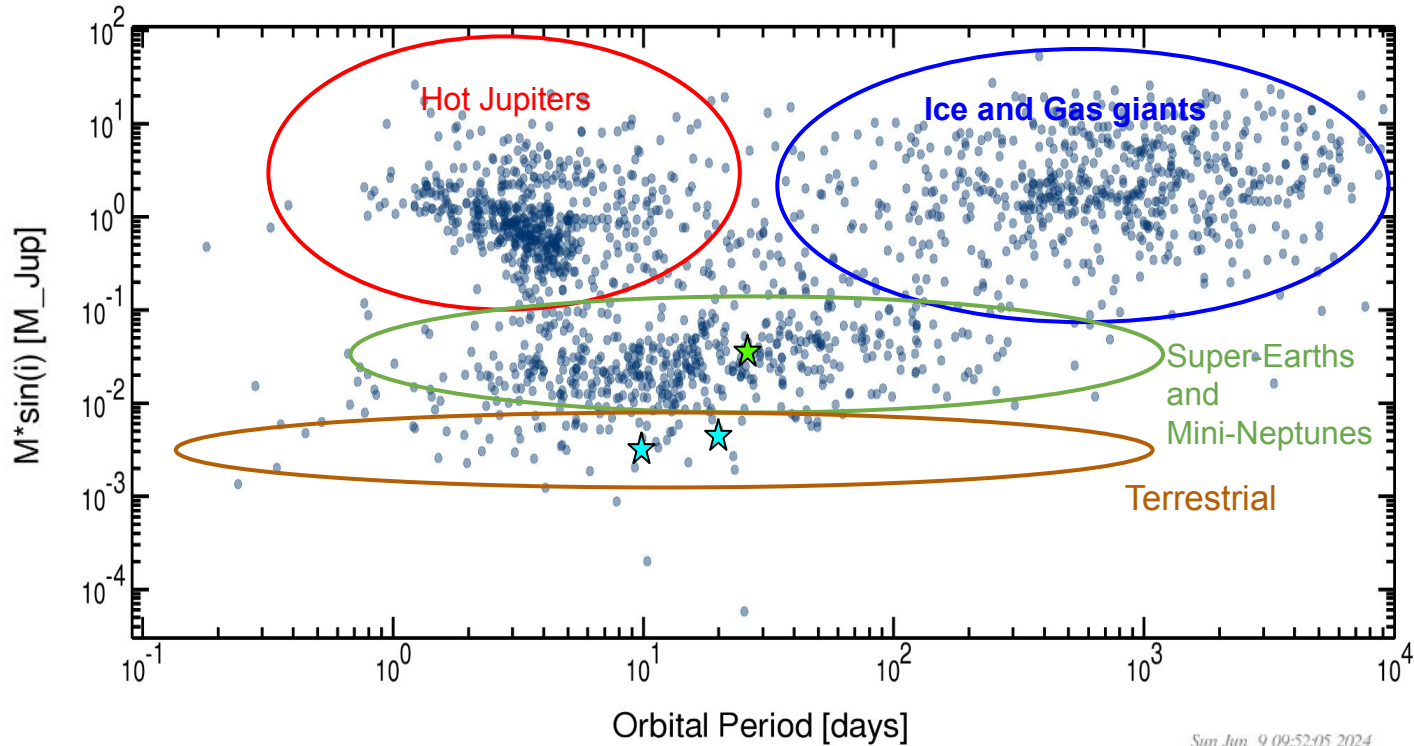


Prot (lit) = 126 ± 15 d

Prot = 127^{+21}_{-17} d

Low activity star → Better modeled with GP

Diagrama masa-periodo



Conclusiones y futuro trabajo

- El uso de Multi-GP en RV+indicadores de actividad es necesario para la detección de planetas como la Tierra en la HZ de GJ 1002.
- Los procesos Gaussianos Multidimensionales (Multi-GP) están emergiendo como una pieza clave a la hora de modelar la actividad estelar en estrellas M.
- Multi-GP ha demostrado mejor eficacia en estrellas más activas, donde la actividad estelar se ve reflejada en FWHM, H α y RV , además de que puede llegar a enmascarar las señales planetarias.
- Un estudio más detallado con la inclusión de nuevos sistemas y el uso de nuevos kernels es necesario para poder llegar a modelar mejor la actividad estelar.

¿Que estoy haciendo?



- Actualmente trabajando en el análisis de dos nuevos candidatos a exoplanetas detectados con CARMENES.
- Ambos muestran señales consistentes con la presencia de planetas en sistemas estelares aún no publicados.