Descifrando los parámetros atmosféricos estelares de estrellas M con CARMENES

Dr. Emilio Gómez Marfil

XI Jornadas de Introducción a la Investigación

13 – 17 marzo 2023

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE UNIVERSIDADES
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU

Presentación

Formación predoctoral (2017 - 2021)

Universidad Complutense de Madrid | Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica
Contrato predoctoral UCM-Santander + Contrato predoctoral FPU
Estancia breve de tres meses en el Observatorio de Hamburgo (Alemania)

Programa de Doctorado en Astrofísica (RD99/2011)

Título de la tesis:
Espectroscopía de estrellas FGKM para la explotación científica de la búsqueda de exoplanetas con CARMENES
Repositorio E-prints Complutense: https://eprints.ucm.es/id/eprint/75814/

Directores: Prof. Dr. David Montes Gutiérrez (UCM), Dr. Hugo M. Tabernero Guzmán (CAB, CSIC-INTA)

Formación postdoctoral (2021 - presente)

Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
Contrato de investigación adscrito al proyecto "María de Maeztu" (ref. MDM-2017-0737)

Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)
Contrato de investigación adscrito al proyecto "Mejorando listas de líneas para estudios de planetas extrasolares y estrellas muy frías" (ref. ProID2021010128)

Observatorio de Hamburgo (Alemania) + Universidad Complutense de Madrid (UCM)
Contrato "Margarita Salas" para la formación de jóvenes doctores (ref. CT18/22)


Hamburger Sternwarte
Universität Hamburg


Centro de Astrobiología (CSIC-INTA)
Campus ESAC


Facultad de Ciencias Físicas
Universidad Complutense de Madrid


Instituto de Astrofísica de Canarias
(IAC)

Introducción

La **caracterización** de las enanas de tipo M es crucial:

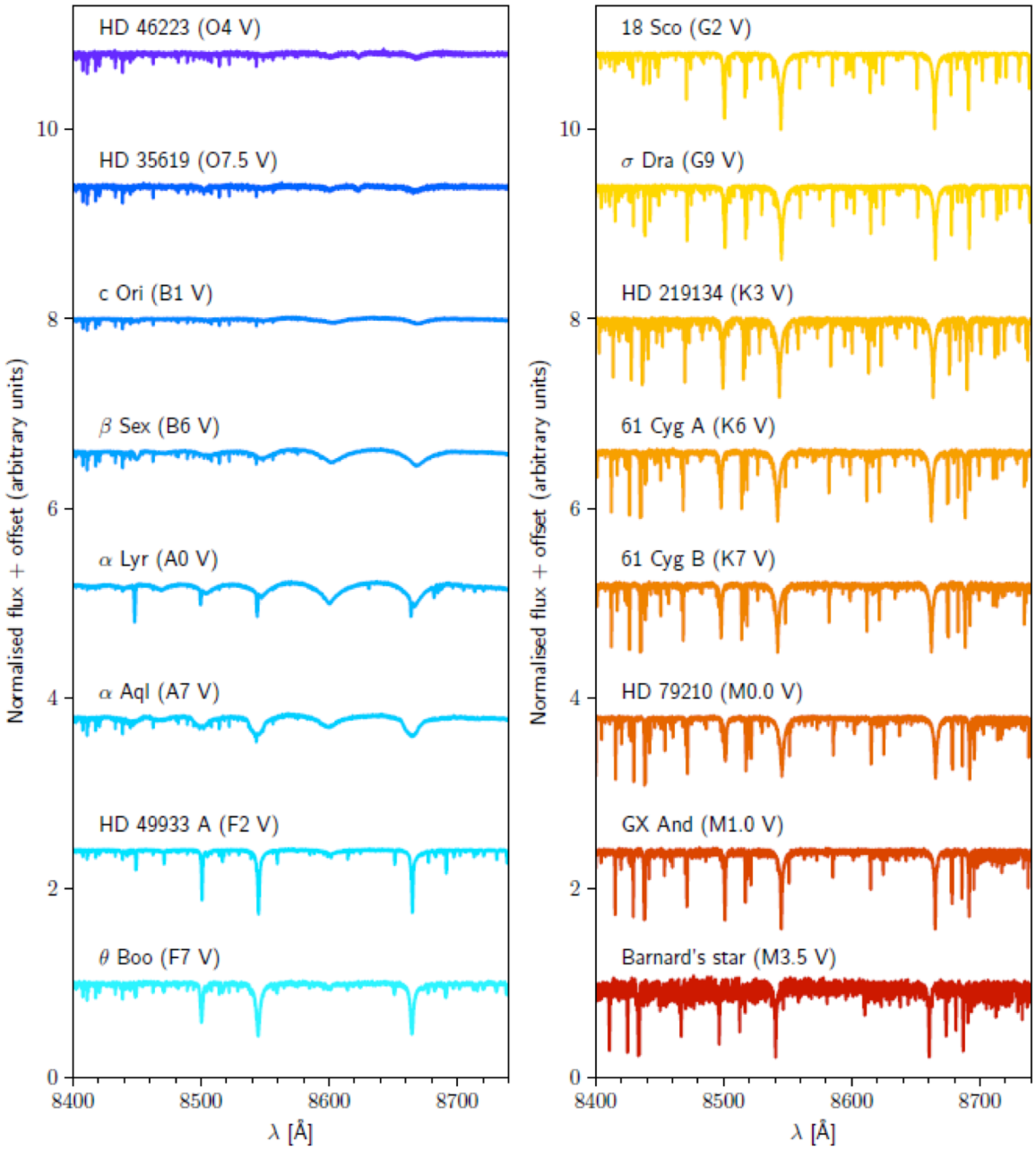
- **Arqueología galáctica** (ubicuidad en el entorno solar, longevidad).
- **Búsqueda de exoplanetas** (formación, evolución y estructura de los sistemas).

El **análisis espectroscópico** de enanas de tipo M es complejo:

- Pico de emisión en el **infrarrojo cercano** (absorción telúrica).
- Intensas **bandas moleculares** (TiO, VO, FeH, OH, CO).
- Presencia de **campos magnéticos** y fenómenos de **actividad estelar** (manchas, playas, fulguraciones).

Tipo espectral	T_{eff} [K]	M [$M_\odot$]	R [$R_\odot$]	L [$L_\odot$]	Frecuencia
O	≥ 30000	≥ 17.4	≥ 7.2	≥ 38000	~ 0.00003%
B	9500 – 30000	2.9 – 17.4	2.7 – 7.2	43 - 38000	~ 0.1%
A	7200 – 9500	1.6 – 2.9	1.2 – 2.7	5.8 - 43	~ 0.6%
F	6000 – 7200	1.05 – 1.6	1.05 – 1.5	1.3 – 5.8	~ 3%
G	5100 – 6000	0.79 – 1.05	0.85 – 1.05	0.4 – 1.3	~ 7.5%
K	3800 – 5100	0.60 – 0.79	0.62 – 0.85	0.05 – 0.4	~ 12%
M	2300 – 3800	0.075 – 0.60	0.08 – 0.62	0.00015 – 0.072	~ 76%

Fuente: Ledrew (2001), Reid & Hawley (2005), Hubeny & Mihalas (2014)


HD 46223 (O4 V)
HD 35619 (O7.5 V)
c Ori (B1 V)
β Sex (B6 V)
α Lyr (A0 V)
α Aql (A7 V)
HD 49933 A (F2 V)
θ Boo (F7 V)
18 Sco (G2 V)
σ Dra (G9 V)
HD 219134 (K3 V)
61 Cyg A (K6 V)
61 Cyg B (K7 V)
HD 79210 (M0.0 V)
GX And (M1.0 V)
Barnard's star (M3.5 V)
Normalised flux + offset (arbitrary units)
λ [Å]
0
2
4
6
8
10
8400
8500
8600
8700

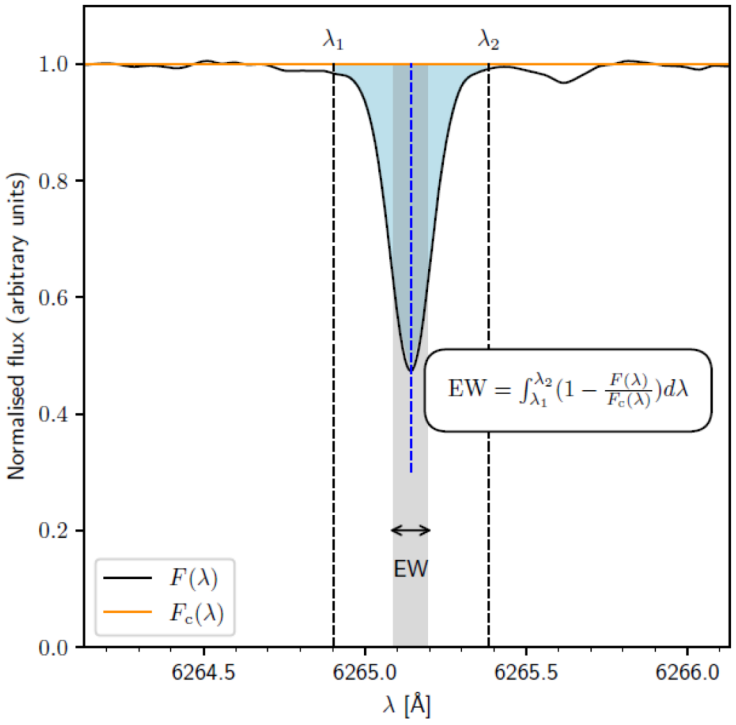
Introducción

Propiedades de interés L, R, M, $T_{\rm eff}$, $\log g$, $v \sin i$, [Fe/H], [X/H] …

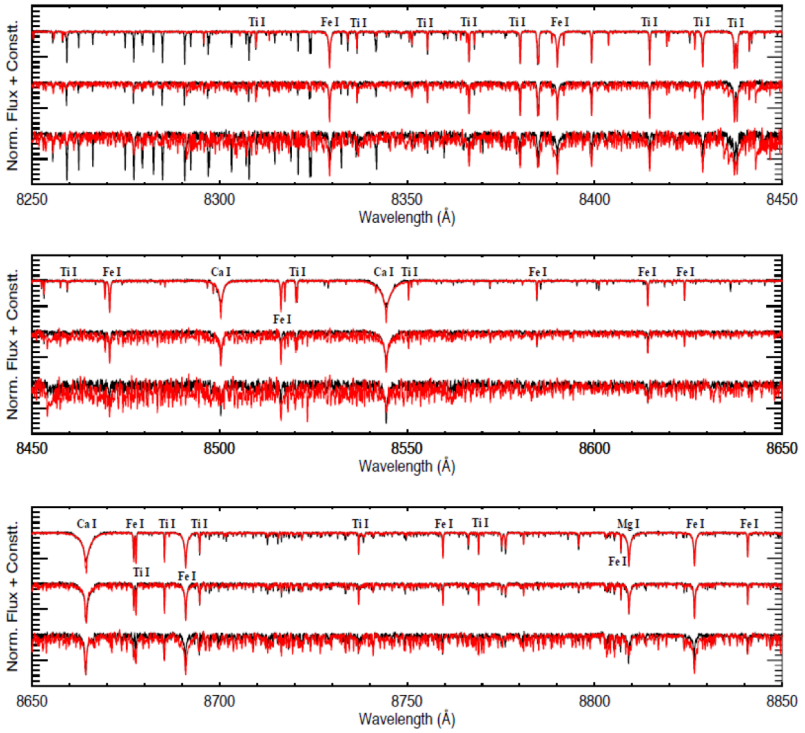
Parámetros atmosféricos estelares $T_{\rm eff}$, $\log g$, [Fe/H]

Métodos espectroscópicos

- Método de anchuras equivalentes – medida de EW de líneas de Fe I y Fe II.
  ¡No válido para caracterizar enanas de tipo M! (pseudocontinuo, apenas Fe II)
- Síntesis espectral – basado en la comparación con espectros sintéticos.



Marfil (2022)



Rajpurohit et al. (2018)

Síntesis espectral

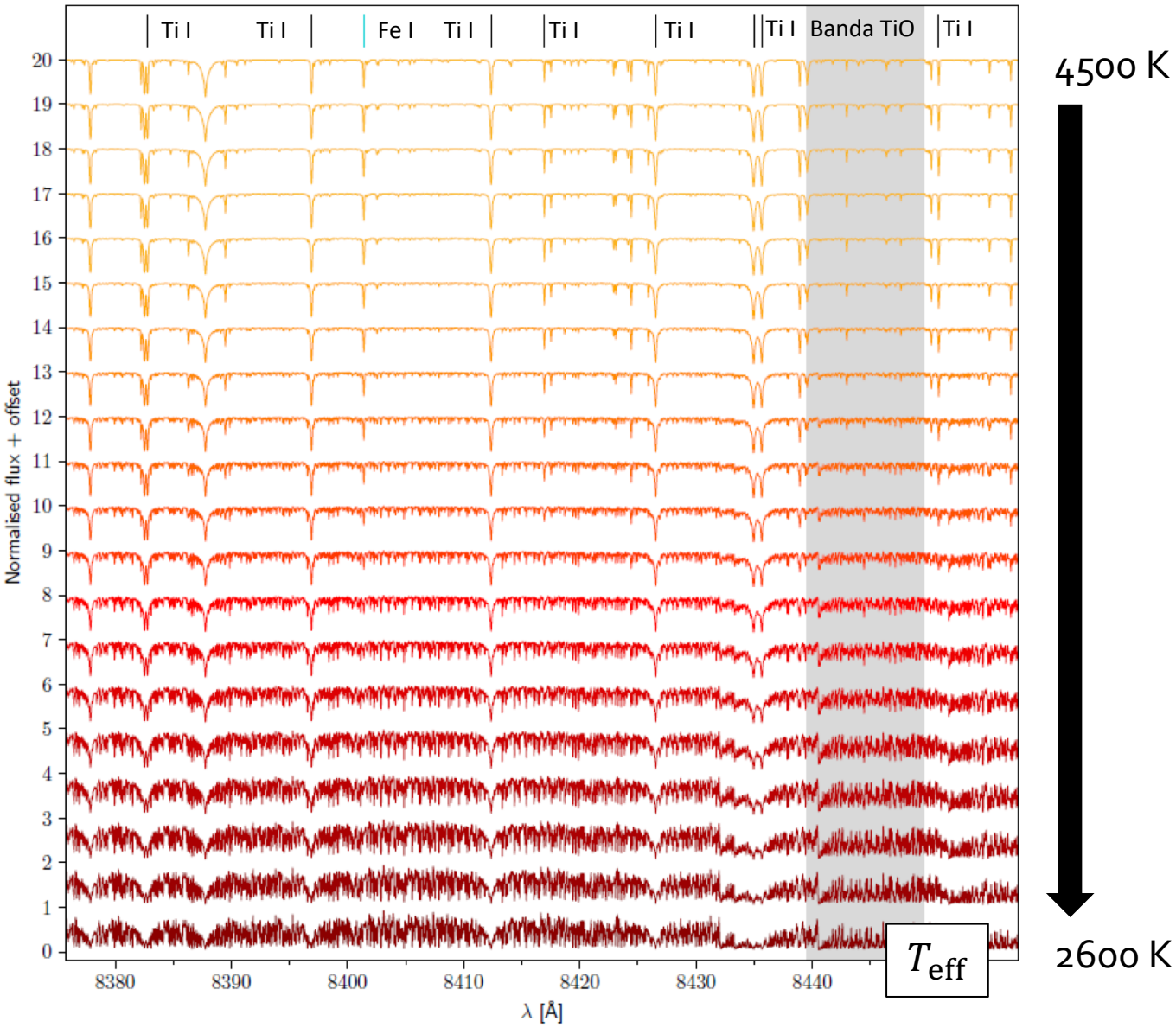
El objetivo es encontrar el espectro sintético que mejor ajusta el espectro observado, mediante un algoritmo de minimización (p. ej. χ^2).

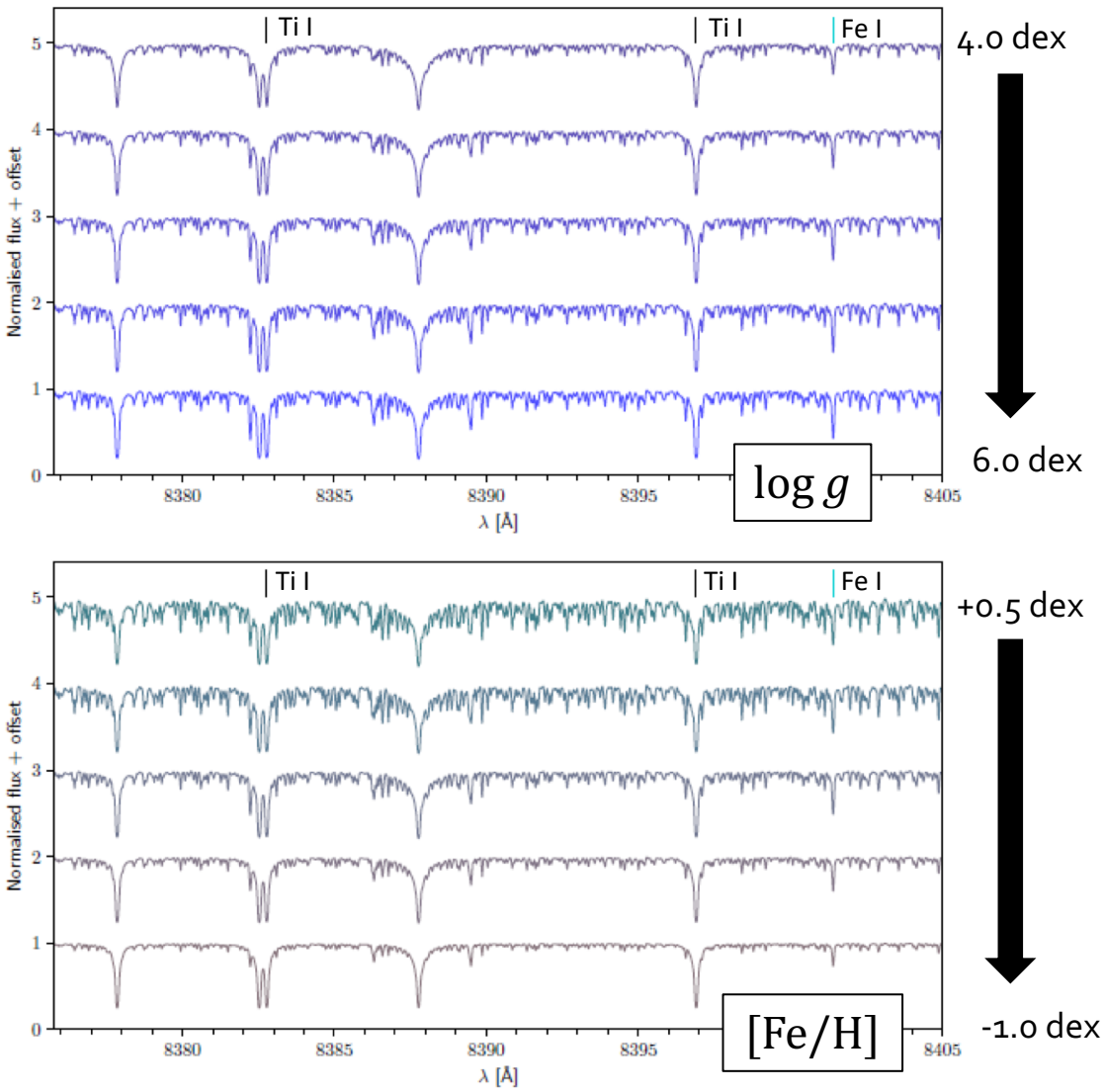
Mallas de espectros sintéticos

- Uso de mallas de la literatura (p. ej. PHOENIX-ACES, Husser et al. 2013).
- Se pueden calcular "desde cero" (modelos de atmósfera + información atómica y molecular + código de transferencia radiativa).

Implementaciones de síntesis espectral

- ASPCAP (García Pérez et al. 2016)
- FERRE (Allende Prieto 2015)
- MINESweeper (Cargile et al. 2020)
- MyGIsFOS (Sbordone et al. 2014)
- The Payne (Ting et al. 2019)
- SME (Piskunov & Valenti 2017)
- iSpec (Blanco-Cuaresma et al. 2014)
- FASMA (Tsantaki et al. 2020)
- BACCHUS (Masseron et al. 2016)
- StePArSyn (Tabernero et al. 2022)


Ti I
Ti I
Fe I
Ti I
Ti I
Ti I
Ti I
Banda TiO
Ti I
Normalised flux + offset
λ [Å]
8380
8390
8400
8410
8420
8430
8440
T_{eff}
4500 K
2600 K


Ti I
Ti I
Fe I
4.0 dex
6.0 dex
log g
Normalised flux + offset
λ [Å]
8380
8385
8390
8395
8405
+0.5 dex
-1.0 dex
[Fe/H]

Espectrógrafo	Resolución	Δλ [Å]
Espectrógrafos comparables en el **óptico** e **infrarrojo cercano**		
GIARPS (Claudi et al. 2018)	115 000, 50 000	3830 – 24500
NIRPS+HARPS (Bouchy et al. 2017)	115 000, 100 000	3780 – 6910, 9500 – 18000
HIRES@E-ELT (Marconi et al. 2020)	100 000	4000 – 18000
Espectrógrafos comparables en el **infrarrojo cercano**		
Veloce (Gilbert et al. 2018)	80 000	5800 – 9300
CRIRES+ (Dorn et al. 2016)	100 000	9500 – 52000
MAROON-X (Seifahrt et al. 2020)	80 000	5000 – 9200
NIRPS (Wildi et al. 2017)	100 000	9500 – 18000
SPIRou (Artigau et al. 2014)	73 500	9800 – 23500
HPF (Mahadevan et al. 2014)	55 000	8100 – 12800
IRD (Kotani et al. 2018)	70 000	9700 – 17500
GIANO-B (Origlia et al. 2014)	50 000	9000 – 24500
iSHELL (Rayner et al. 2016)	75 000	11000 – 53000
Espectrógrafos comparables en el **óptico**		
ESPRESSO (Pepe et al. 2021)	190 000	3800 – 7880
HORuS (Allende Prieto 2021)	25 000	3800 – 6900
HARPS-N (Cosentino et al. 2012)	115 000	3830 – 6930
PFS (Crane et al. 2010)	190 000	3910 – 7340
HARPS (Mayor et al. 2003)	115 000	3780 – 6910
HRS (Tull 1998)	120 000	3900 – 11000
UVES (Dekker et al. 2000)	110 000	3200 – 10500
HIRES@Keck (Vogt et al. 1994)	85 000	3000 – 10000

Observaciones

Enanas de tipo M – cobertura en el infrarrojo cercano

CARMENES (… y muchos más)

A&A 656, A162 (2021)
https://doi.org/10.1051/0004-6361/202141980
© ESO 2021

Astronomy & Astrophysics

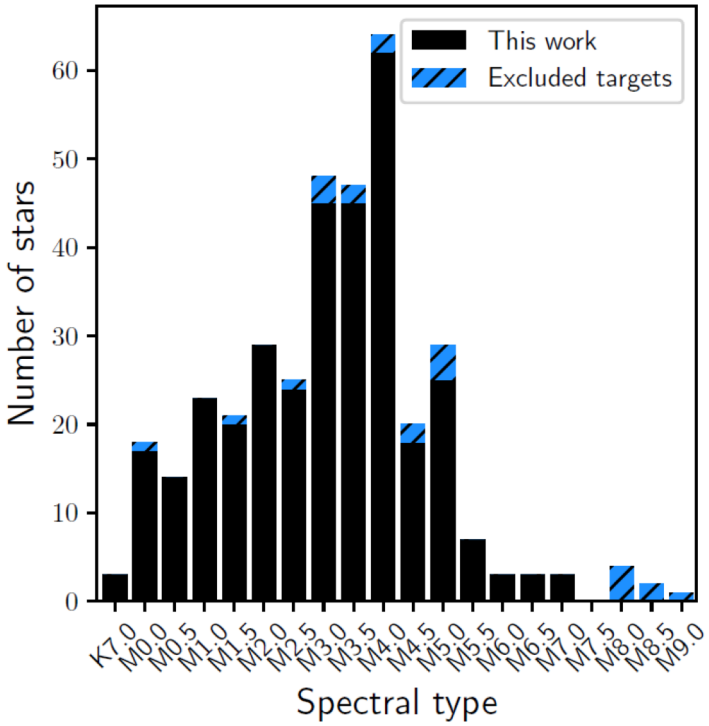
The CARMENES search for exoplanets around M dwarfs

Stellar atmospheric parameters of target stars with STEPARSYN★

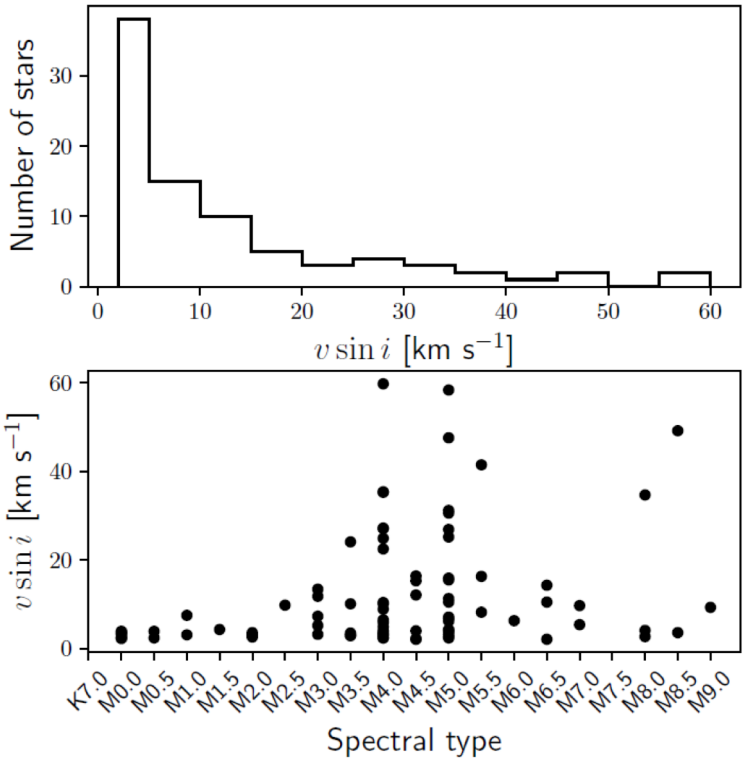
E. Marfil[1,2], H. M. Tabernero[3,4], D. Montes[1], J. A. Caballero[2], F. J. Lázaro[1], J. I. González Hernández[5,6], E. Nagel[7,8], V. M. Passegger[7,9], A. Schweitzer[7], I. Ribas[10,11], A. Reiners[12], A. Quirrenbach[13], P. J. Amado[14], C. Cifuentes[2], M. Cortés-Contreras[2], S. Dreizler[12], C. Duque-Arribas[1], D. Galadí-Enríquez[15], Th. Henning[16], S. V. Jeffers[17,12], A. Kaminski[13], M. Kürster[16], M. Lafarga[10,11,18], Á. López-Gallifa[1], J. C. Morales[10,11], Y. Shan[12], and M. Zechmeister[12]

[1] Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica & IPARCOS-UCM (Instituto de Física de Partículas y del Cosmos de la UCM), Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, 28040 Madrid, Spain
e-mail: emigom01@ucm.es
[2] Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), ESAC, Camino Bajo del Castillo s/n, 28691 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain
[3] Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), Carretera a Ajalvir km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain
[4] Instituto de Astrofísica e Ciências do Espaço, Universidade do Porto, CAUP, Rua das Estrelas, 4150-762 Porto, Portugal
[5] Instituto de Astrofísica de Canarias, c/ Vía Láctea s/n, 38205 La Laguna, Tenerife, Spain
[6] Universidad de La Laguna, Departamento de Astrofísica, 38206 La Laguna, Tenerife, Spain
[7] Hamburger Sternwarte, Gojenbergsweg 112, 21029 Hamburg, Germany
[8] Thüringer Landessternwarte Tautenburg, Sternwarte 5, 07778 Tautenburg, Germany
[9] Homer L. Dodge Department of Physics and Astronomy, University of Oklahoma, 440 West Brooks Street, Norman, OK-73019 Oklahoma, USA
[10] Institut de Ciències de l'Espai (CSIC), Campus UAB, c/ de Can Magrans s/n, 08193 Cerdanyola del Vallès, Spain
[11] Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC), c/ Gran Capità 2-4, 08034 Barcelona, Spain
[12] Institut für Astrophysik, Georg-August-Universität-Göttingen, Friedrich-Hund-Platz 1, 37077 Göttingen, Germany
[13] Landessternwarte, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg, Königstuhl 12, 69117 Heidelberg, Germany
[14] Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), Glorieta de la Astronomía s/n, 18008 Granada, Spain
[15] Observatorio de Calar Alto, Sierra de los Filabres, 04550 Gérgal, Almería, Spain
[16] Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg, Germany
[17] Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Justus-von- Liebig-Weg 3, 37077 Göttingen, Germany
[18] Department of Physics, University of Warwick, Gibbet Hill Road, Coventry CV4 7AL, UK

Received 6 August 2021 / Accepted 7 October 2021



Histograma de la muestra (Marfil et al. 2021)



Velocidades de rotación ($v \sin i > 2$ km s^{-1}) (Marfil et al. 2021)

Muestra

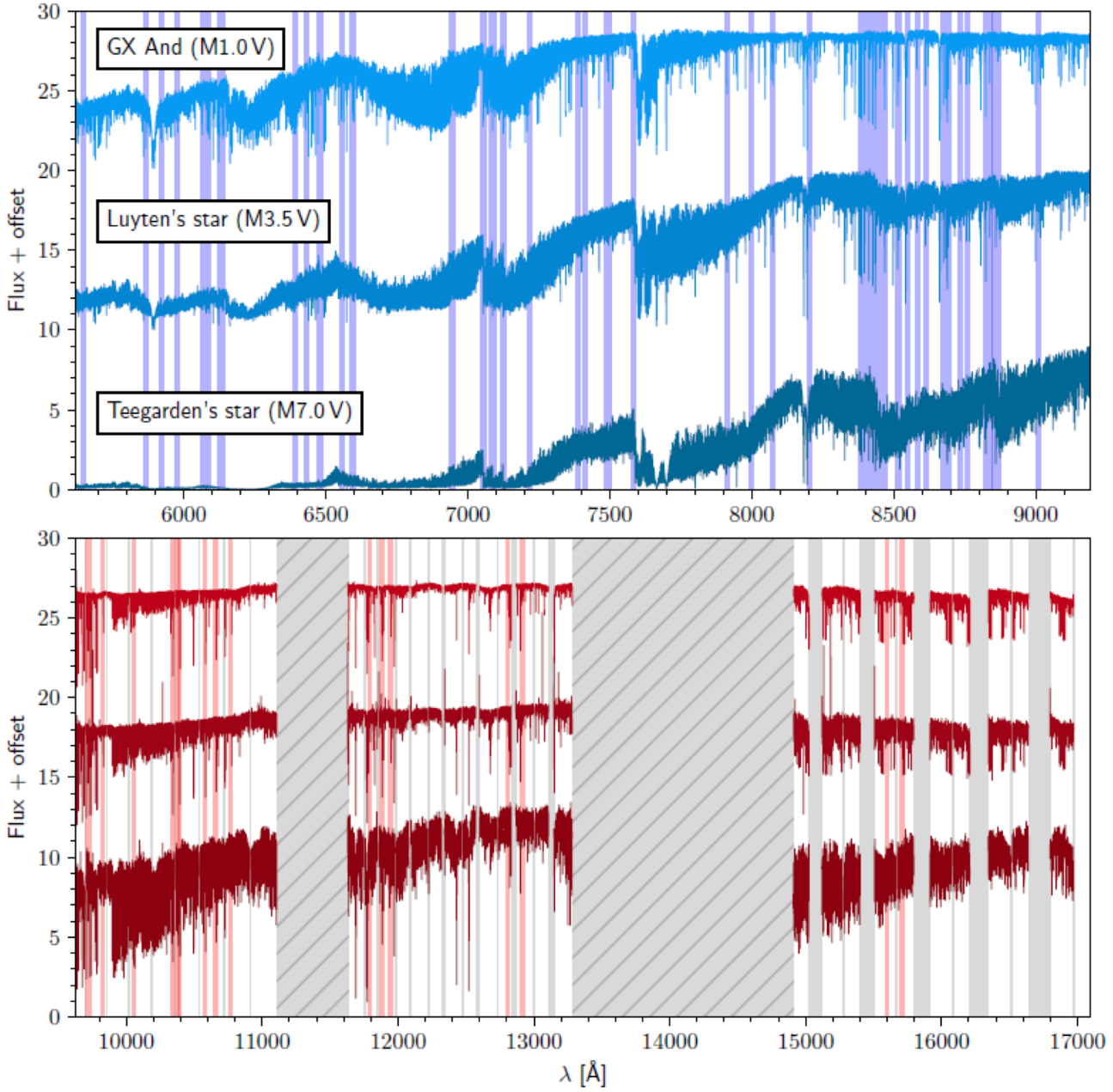
365 estrellas GTO de CARMENES GTO hasta mediados de 2020 (Quirrenbach et al. 2020)

Estrellas excluidas

- Una binaria eclipsante (CM Dra, Morales et al. 2009)
- Diez sistemas SB2 and dos sistemas ST3 (Baroch et al. 2018, 2021)
- Siete enanas de tipo M tardío (limitaciones en la metodología)
- Tres enanas M con espectros "defectuosos"

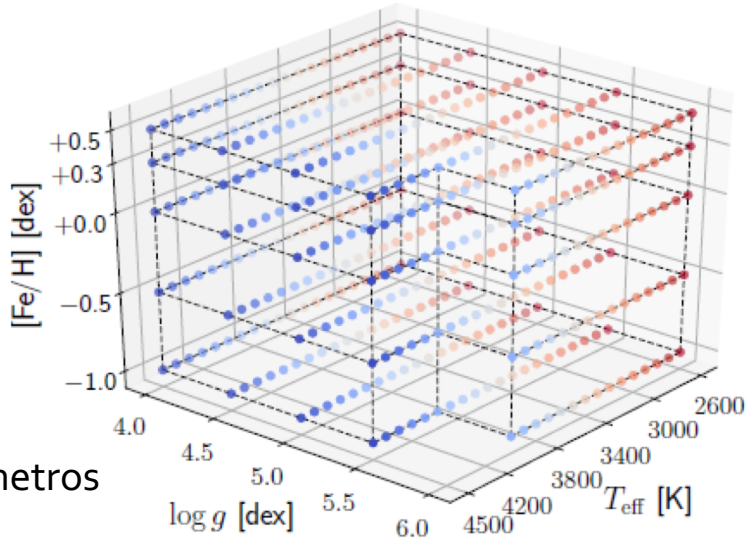
Muestra final

343 estrellas GTO de CARMENES (incluyendo tres estrellas de tipo K7.0 V)


GX And (M1.0 V)
Luyten's star (M3.5 V)
Teegarden's star (M7.0 V)
Flux + offset
λ [Å]

Malla de espectros sintéticos

Modelos de atmósfera (BT-Settl) +
Código de transferencia (Turbospectrum) +
Información atómica y molecular (VALD3 + …)



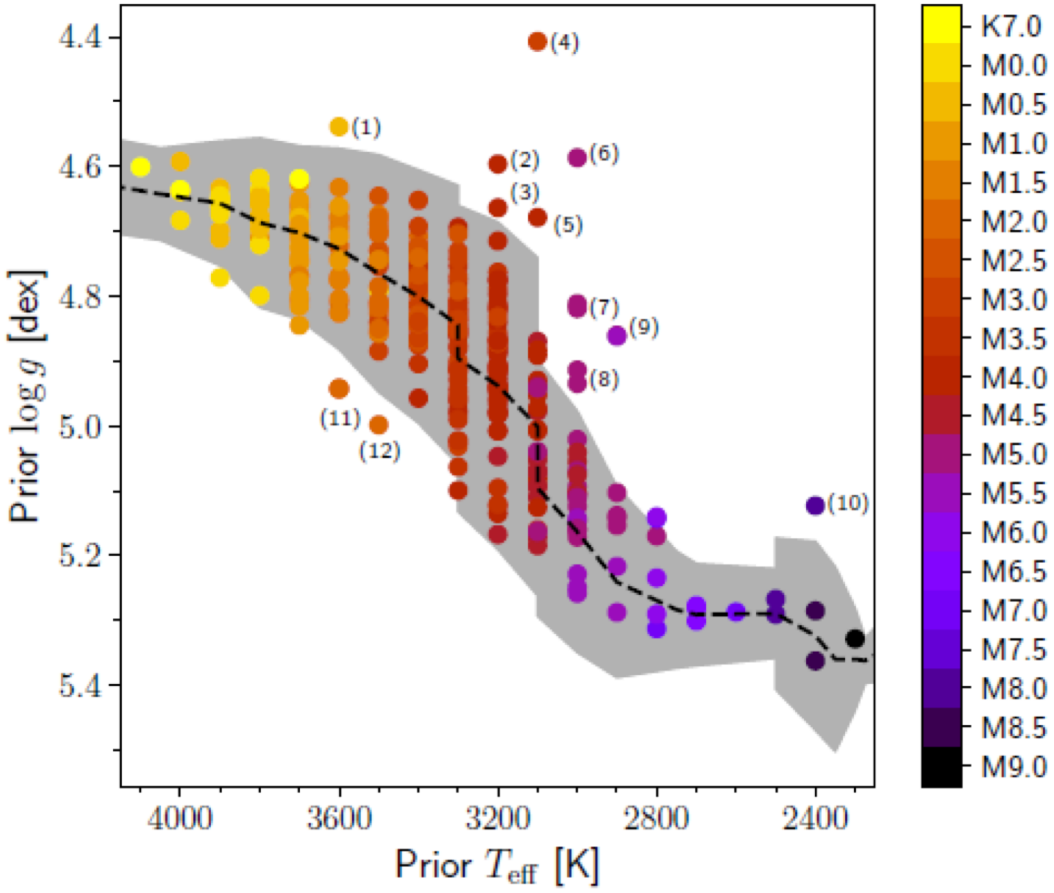
Cobertura de la malla en el espacio de parámetros

Molécula	Fuente	Número de transiciones
H_2O	Barber et al. (2006)	~ 2 900 000
FeH	Dulick et al. (2003)	~ 18 000
MgH	Kurucz (2014)	~ 27 000
CO	Goorvitch (1994)	~ 34 000
SiH	Kurucz (2014)	~ 6 000
OH	Kurucz (2014)	~ 27 000
VO	McKemmish et al. (2016)	~ 3 500 000
CaH	B. Plez priv. comm. (see Heiter et al. 2021)	~ 17 000
ZrO	B. Plez priv. comm. (see Heiter et al. 2021)	~ 12 500 000
TiO	B. Plez priv. comm. (see Heiter et al. 2021)	~ 6 500 000

Información atómica (VALD3) y molecular (otras fuentes)

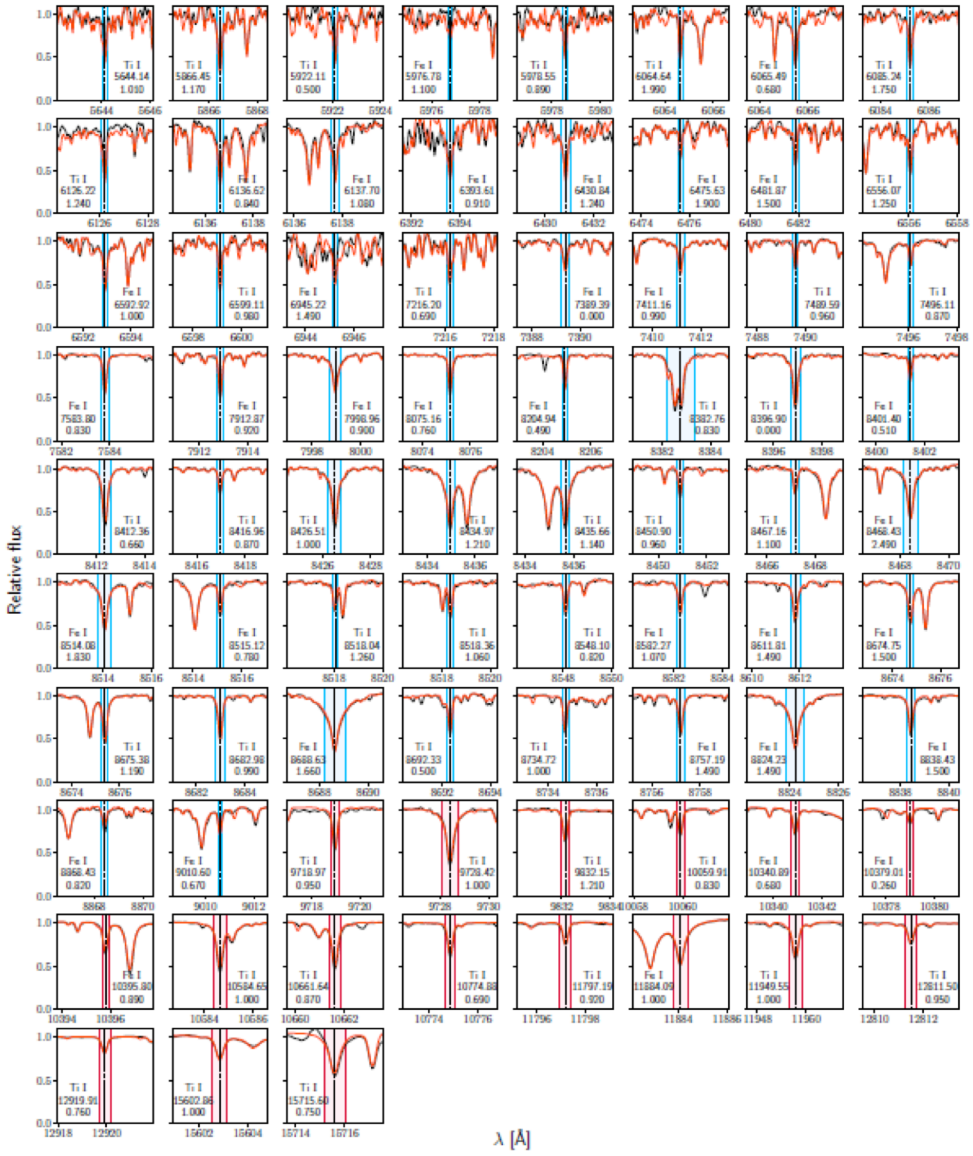
Distribuciones de probabilidad a priori

Basadas en la información fotométrica multibanda disponible para la muestra (Cifuentes et al. 2020)



Resultados del código STEPARSYN (Tabernero et al. 2022) para la estrella M1.0 V HD 233153 (Marfil et al. 2021)

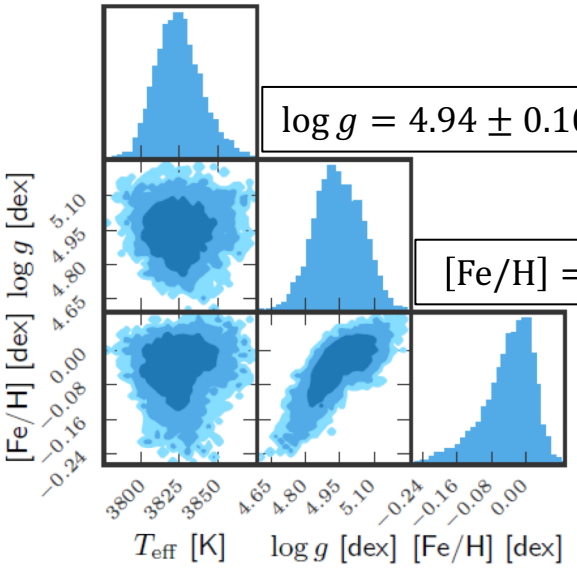
75 líneas Ti I and Fe I
+
5 bandas γ y ϵ de TiO

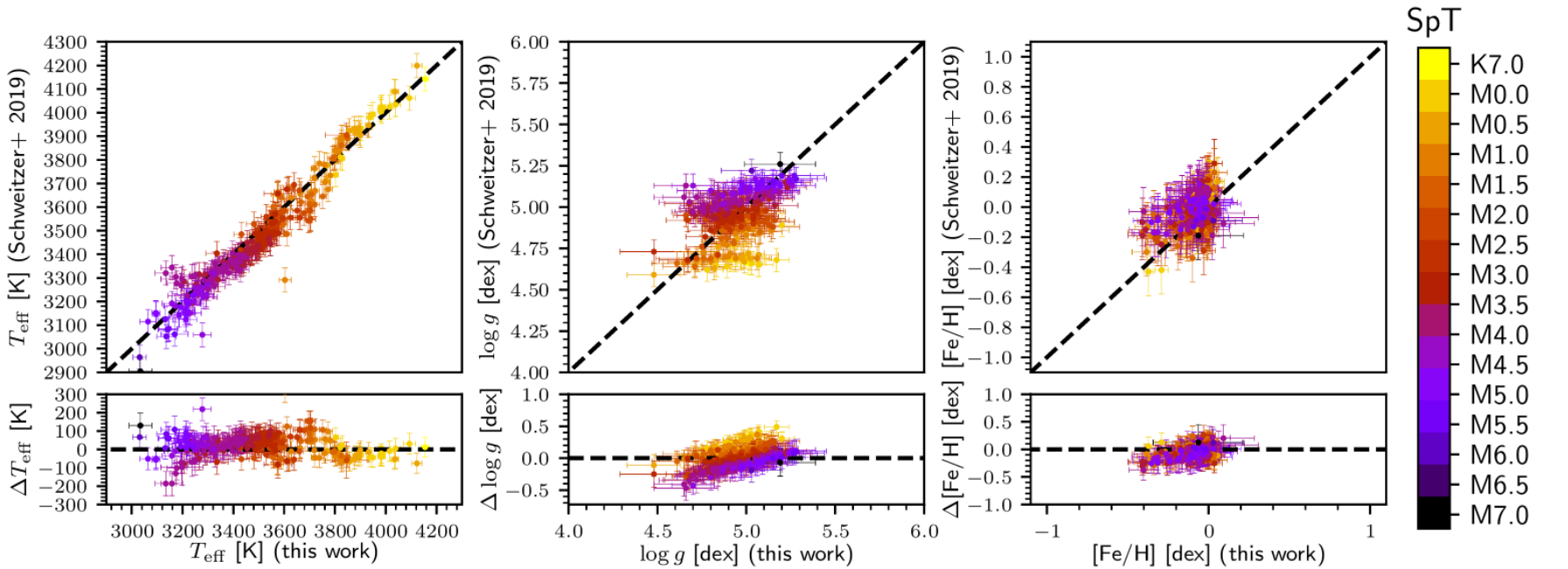


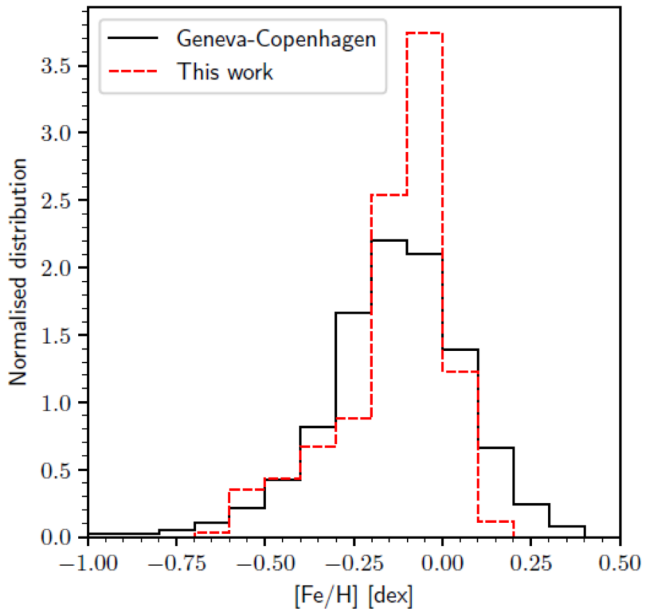
$T_{\rm eff} = 3825 \pm 14$ K

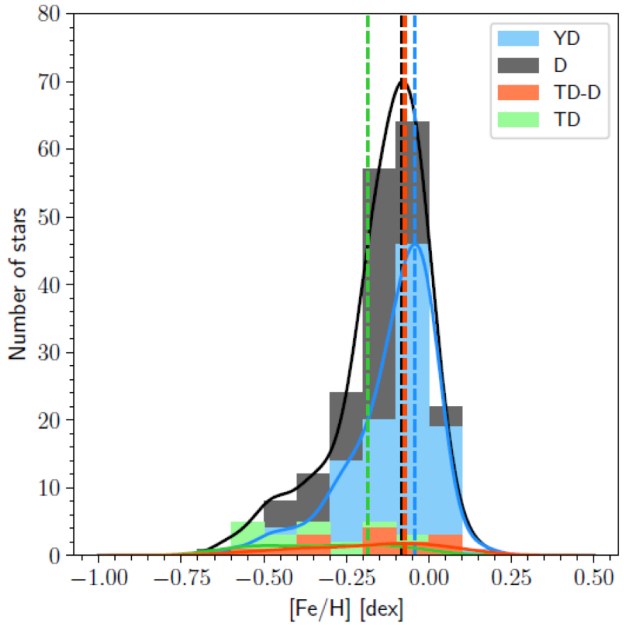
$\log g = 4.94 \pm 0.10$ dex

$[{\rm Fe/H}] = -0.04 \pm 0.06$ dex




SpT
K7.0
M0.0
M0.5
M1.0
M1.5
M2.0
M2.5
M3.0
M3.5
M4.0
M4.5
M5.0
M5.5
M6.0
M6.5
M7.0
$T_{\rm eff}$ [K] (Schweitzer+ 2019)
$\log g$ [dex] (Schweitzer+ 2019)
[Fe/H] [dex] (Schweitzer+ 2019)
$\Delta T_{\rm eff}$ [K]
$\Delta \log g$ [dex]
Δ[Fe/H] [dex]
$T_{\rm eff}$ [K] (this work)
$\log g$ [dex] (this work)
[Fe/H] [dex] (this work)


Geneva-Copenhagen
This work
Normalised distribution
[Fe/H] [dex]

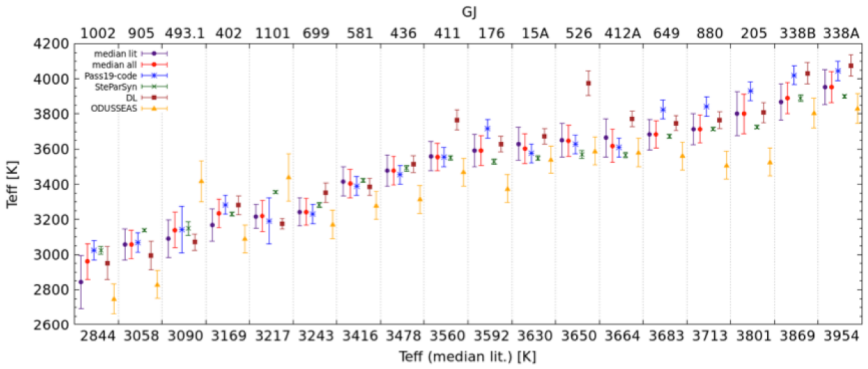

YD
D
TD-D
TD
Number of stars
[Fe/H] [dex]

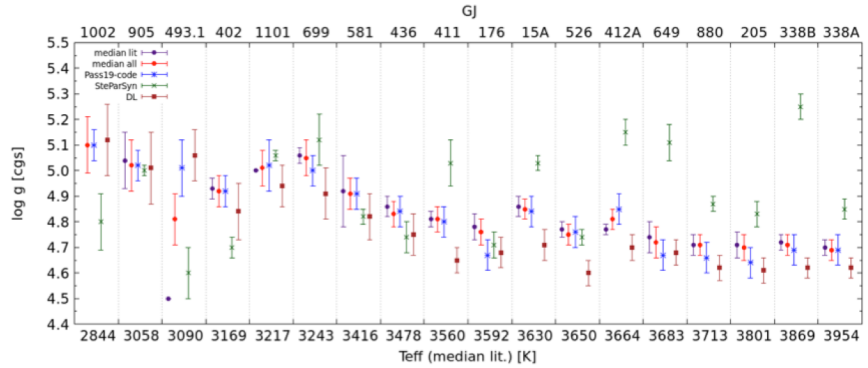
Comparación con otras metodologías

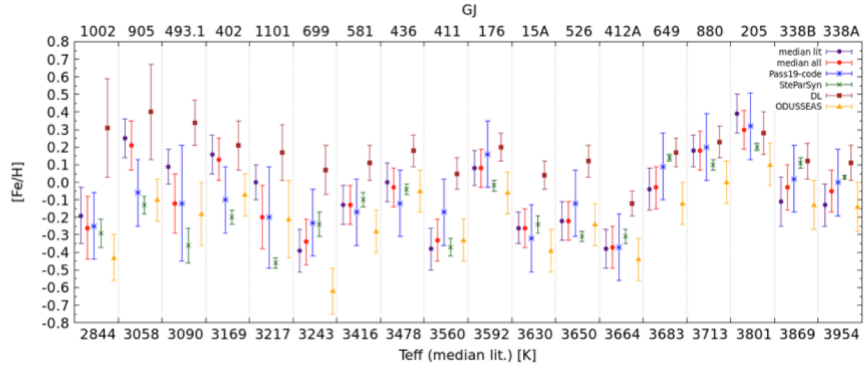
En Passegger et al. (2022)

Diferentes metodologías:
- PHOENIX-ACES + χ^2
- StePArSyn
- Pseudo-EW (ODUSSEAS)
- Aprendizaje profundo (deep learning)

Diferentes aproximaciones:
- Sin restricciones
- Valores medios de la literature
- Normalización de los espectros







Pruebas de referencia

Temperatura efectiva, $T_{\rm eff}$

De la ley de Stefan-Boltzmann: $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\rm eff}^4$

Pero:

$$L = 4\pi d^2 F_{\rm bol}$$

$$R \cong \frac{\theta_{\rm LD}}{2} d$$

$$T_{\rm eff} = \sqrt[4]{\frac{F_{\rm bol}}{\sigma}} \sqrt{\frac{2}{\theta_{\rm LD}}}$$

R: radio de la estrella
σ: constante de Stefan-Boltzmann
d: distancia a la estrella
$F_{\rm bol}$: flujo bolométrico
$\theta_{\rm LD}$: diámetro angular

Gravedad superficial, $\log g$

De la relación fundamental:

$$g = G\frac{M}{R^2}$$

p: paralaje
G: constante de gravitación
M: masa de la estrella

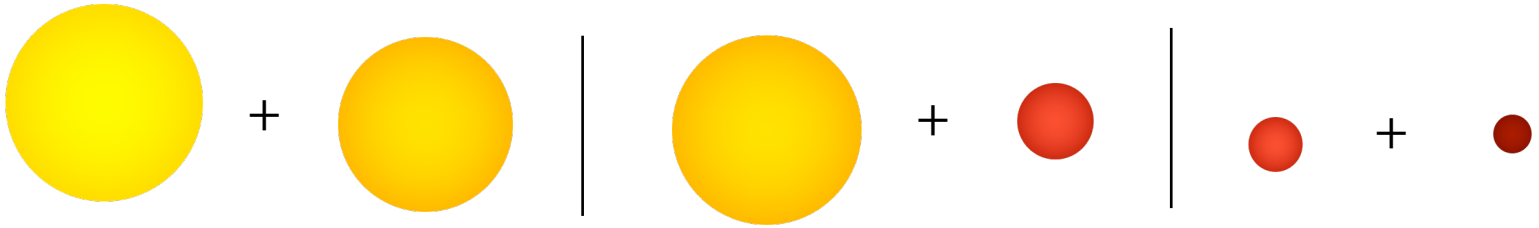
Paralajes (p), de misiones como *Hipparcos, Gaia*.
R, de la distancia y el paralaje: $R = \theta_{\rm LD}/2p$
M, de trazas evolutivas, asterosismología o sistemas binarios.

Importante: $F_{\rm bol}$ y $\theta_{\rm LD}$ solo se pueden medir para unas pocas estrellas cercanas al Sol

Pruebas de referencia

Los sistemas estelares múltiples se forman a partir de la misma nube molecular

Se espera que las componentes presenten composiciones químicas similares
(Montes et al. 2018)



Binarias FGK+FGK
(Desidera et al. 2004, 2006)

Binarias FGK+M
(Ishikawa et al. 2020)

Binarias M+M
(Antoniadis-Karnavas et al. 2020)



Gracias por la atención

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE UNIVERSIDADES
Financiado por la Unión Europea
NextGenerationEU