Jornadas de Doctorandos de Primavera 2022

LA METALICIDAD DE LAS ESTRELLAS DE TIPO M: CALIBRACIONES FOTOMÉTRICAS Y ESPECTROSCÓPICAS

Christian Duque-Arribas
Directores: Prof. Dr. David Montes y Dr. Hugo M. Tabernero

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

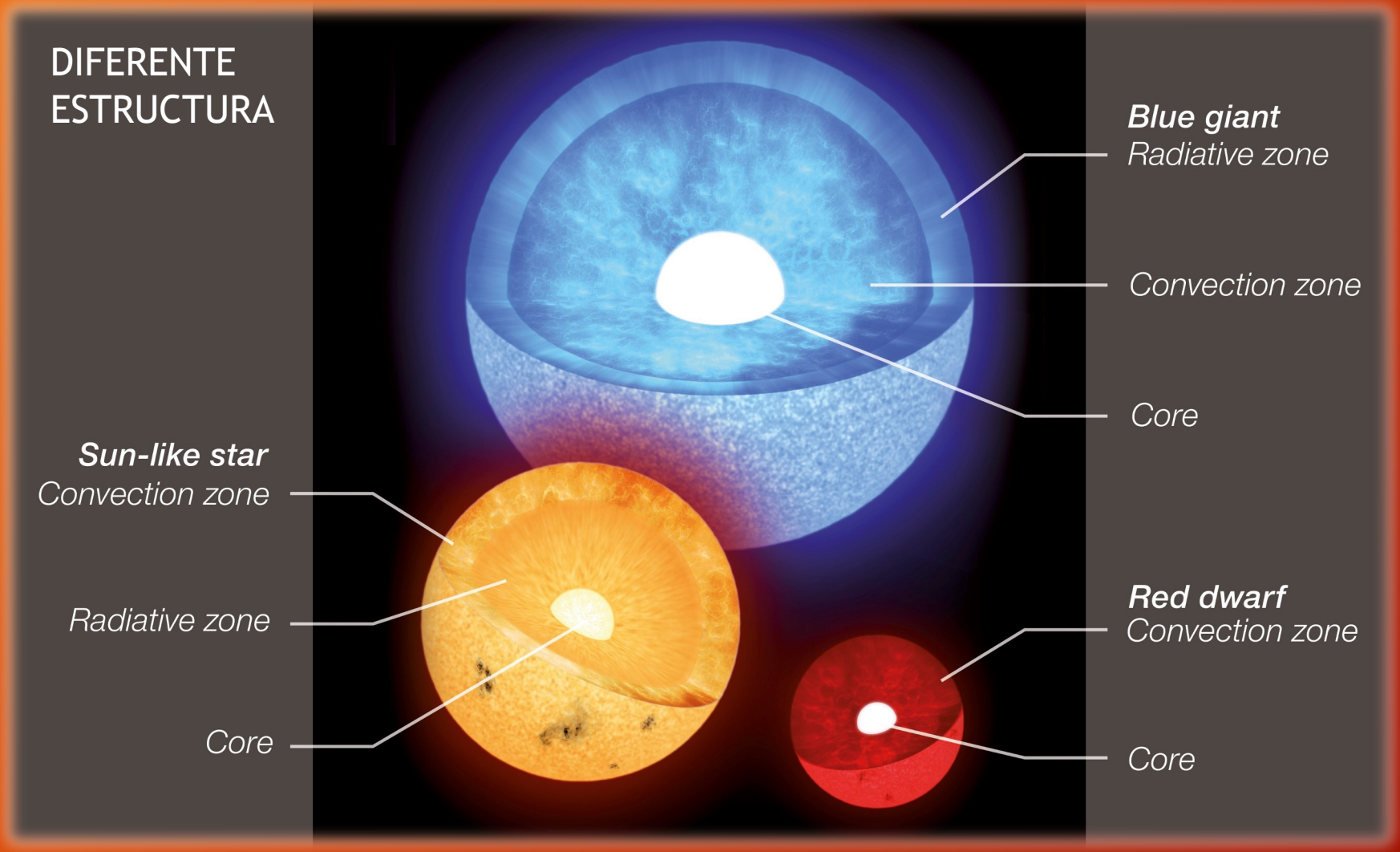
Las estrellas de tipo espectral M…

… son las estrellas (en la secuencia principal) más pequeñas, frías y numerosas de la Galaxia

$0.61\ R_\odot > R > 0.10\ R_\odot$ $\quad$ $0.62\ M_\odot > M > 0.08\ M_\odot$ $\quad$ $3900\ K > T_{eff} > 2300\ K$

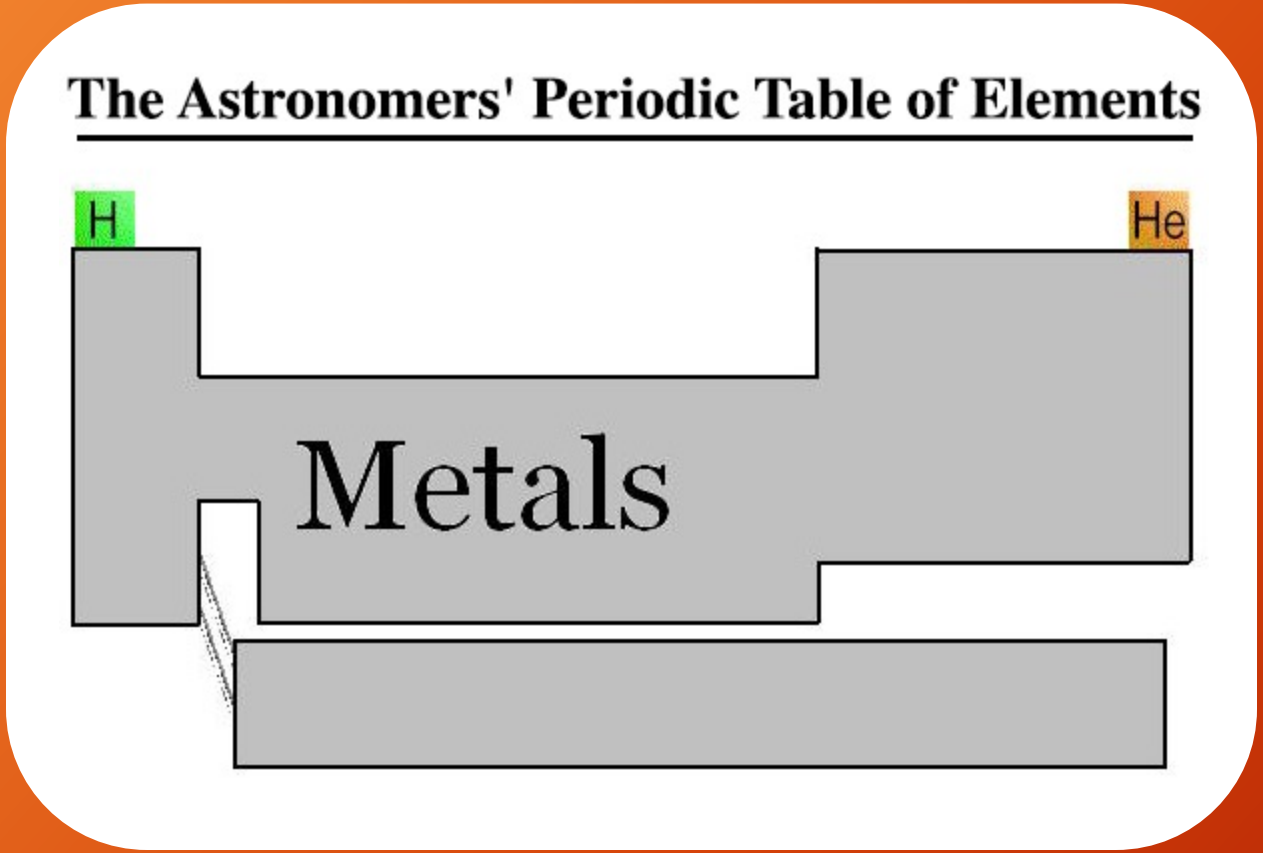
(Delfosse et al. 2000, Cifuentes et al. 2020)

Las estrellas de tipo espectral M



La metalicidad estelar

La abundancia relativa de elementos más pesados que el helio, independientemente de su posición en la tabla periódica.



Para el Sol:

X = 0.71 *Y=0.27* *Z=0.02*

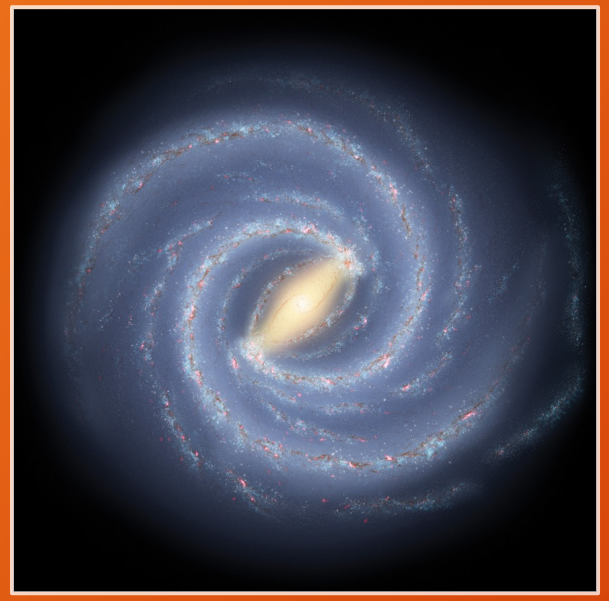
Índice de metalicidad:

Proporción logarítmica entre el número de átomos por unidad de volumen de hierro frente a la de hidrógeno respecto a la abundancia solar

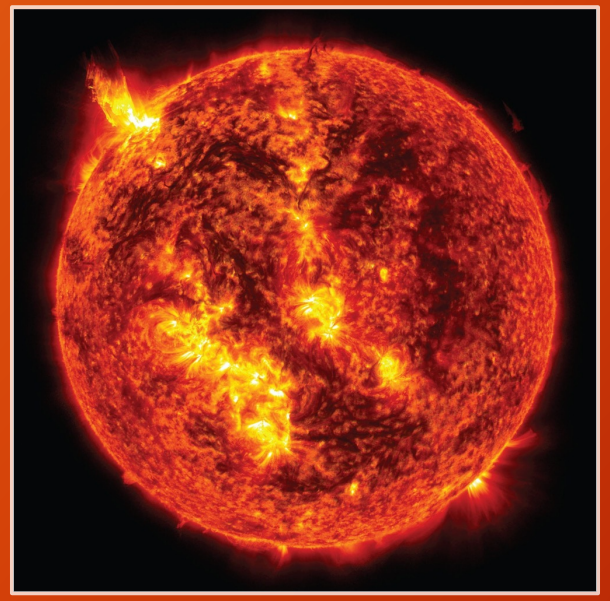
$$[\mathrm{Fe/H}] = \log\left(\frac{A(\mathrm{Fe})}{A(\mathrm{H})}\right) - \log\left(\frac{A(\mathrm{Fe})}{A(\mathrm{H})}\right)_{\odot}$$

La metalicidad estelar

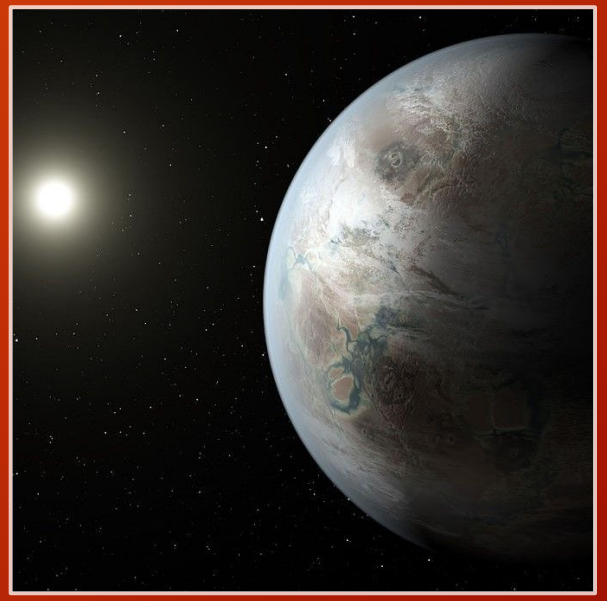
La metalicidad de las estrellas M resulta de gran interés para los astrofísicos en diferentes campos, desde estudios de la Vía Láctea a gran escala hasta la búsqueda de otros mundos más allá de nuestro Sistema Solar.



ASTROFÍSICA GALÁCTICA

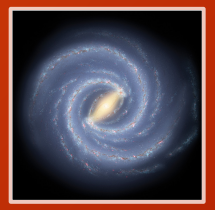


ASTROFÍSICA ESTELAR



ASTROFÍSICA EXOPLANETARIA

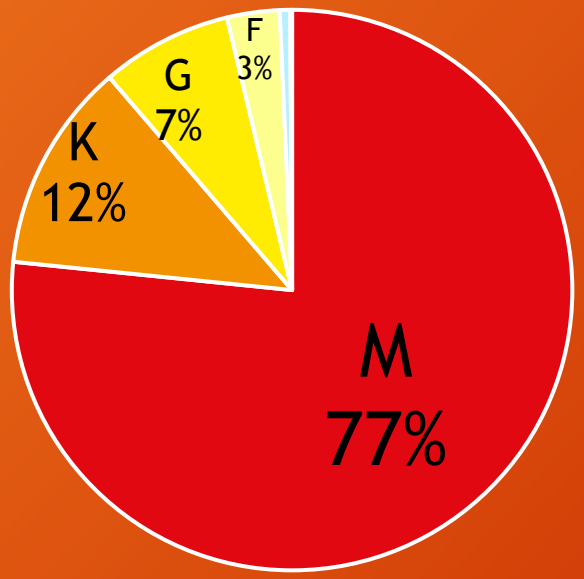
La metalicidad en… astrofísica galáctica



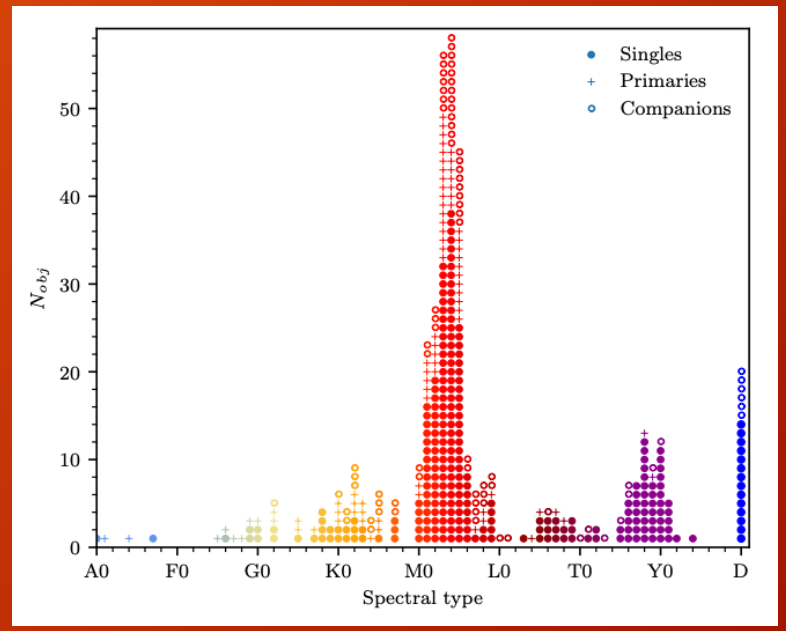
Las estrellas M resultan los objetos idóneos para el estudio tanto de la **evolución química como dinámica de la Vía Láctea:**

- Tiempos de vida que exceden la edad del Universo.
- Muy abundantes, en torno al 70-75% de las estrellas.

REFERENCIAS: Bahcall & Soneira (1980), Reid et al. (1997), Chabrier (2003), Henry et al. (2006), Winters et al. (2015), Ferguson et al. (2017)

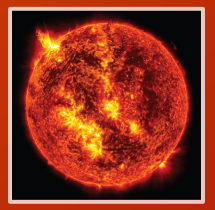


Ledrew et al. (2001)



Reylé et al. (2021)

La metalicidad en… astrofísica estelar



En las últimas décadas se ha experimentado un **increíble avance en el campo de los modelos teóricos estelares**.

Sin embargo, todavía hoy se encuentran **discrepancias** entre las características observacionales y los valores predichos por los modelos actuales, por ejemplo:

- Temperaturas efectivas de los modelos hasta 200-300 K superiores a los valores observados.
- Radios que difieren de las medidas interferométricas hasta un 25%.

Algunos autores apuntan a que estas diferencias pueden deberse a:

- Efectos causados por el **nivel de actividad** (López-Morales & Ribas, 2005)
- Diferencias en el valor de la **metalicidad** (Berger et al. 2006, López-Morales 2007)

→ Son necesarias medidas más precisas que nos permitan desarrollar nuevos y mejores modelos teóricos a fin de comprender en mayor profundidad las estrellas poco masivas.

La metalicidad en… astrofísica exoplanetaria

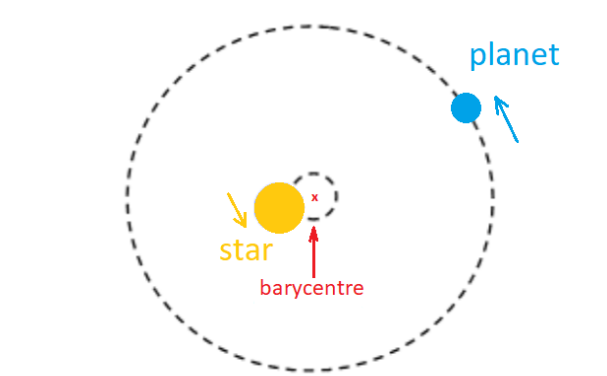
En 1995 fue descubierto 51 Pegasi b (M. Mayor & D. Queloz)

En 1999 se descubrió Gliese 876 b, el primer exoplaneta conocido en orbitar una enana M.

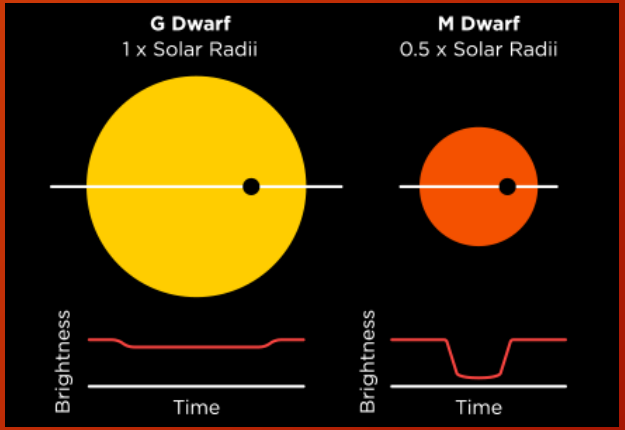
Confirmados: 5005 Candidatos: 8709 Sistemas planetarios: 3759 exoplanets.nasa.gov (23 marzo 2022)

Los dos métodos de detección de exoplanetas más fructíferos se ven favorecidos en el caso de las estrellas M:

- **VELOCIDAD RADIAL**: La baja masa de estas estrellas facilitan el desplazamiento de las mismas al orbitar el centro de masas común del sistema estrella-planeta.
- **TRÁNSITOS**: Al ser estrellas tan frías y pequeñas, la zona de habitabilidad se encuentra mucho más cerca de la estrella, con periodos orbitales mucho menores.



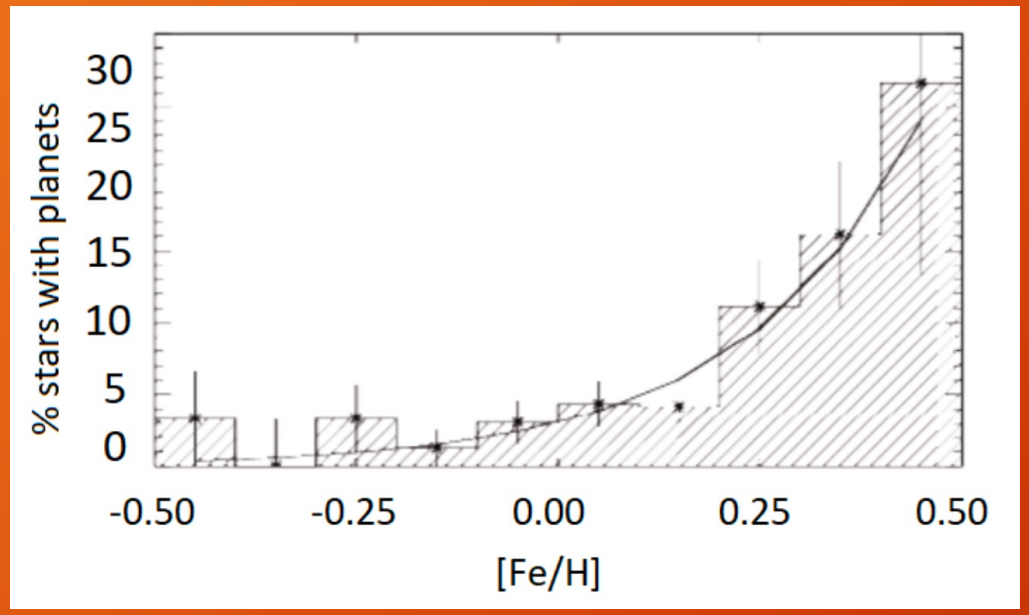
Star orbits around system centre of mass (barycentre)



La metalicidad en… astrofísica exoplanetaria

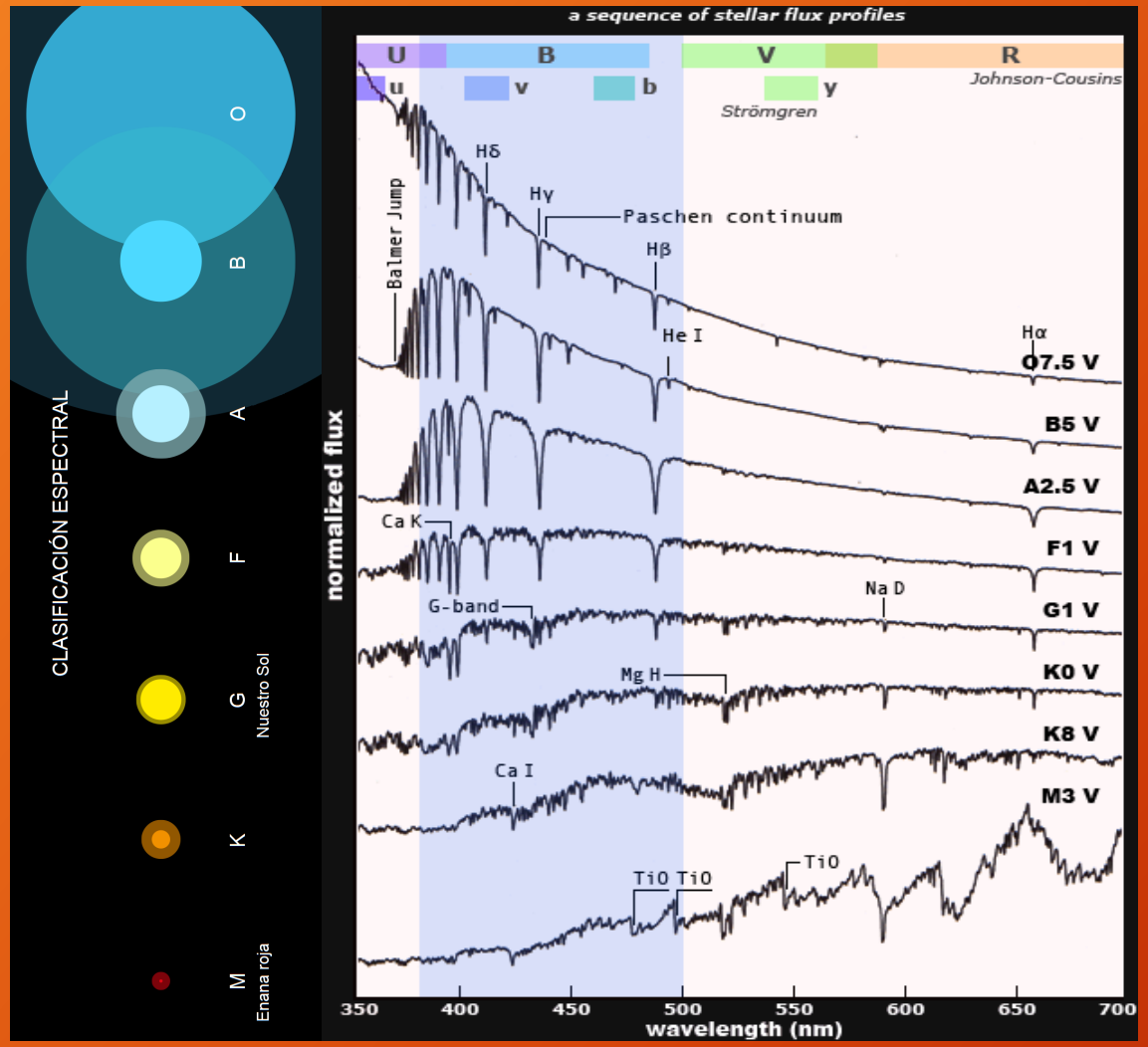
Se ha observado que la frecuencia de planetas gigantes gaseosos aumenta con la metalicidad estelar en el caso de estrellas de tipo solar
→ **correlación planeta-metalicidad** (González 1997, Fischer & Valenti 2005)

Estudios recientes muestran que las estrellas M siguen la misma tendencia
(Johnson & Apps 2009, Rojas-Ayala et al. 2010, Terrien et al. 2012, Hobson et al. 2018)



El estudio de las correlaciones entre los parámetros estelares, como la metalicidad, y la presencia de exoplanetas puede resultar útil en la **selección de objetivos para futuros surveys**.
→ Caracterización de la estrella

Las estrellas de tipo espectral M



Espectros complejos en comparación con los de estrellas más calientes debido a la presencia de **moléculas**.

Para determinar abundancias, el método de la anchura equivalente falla debido a la indeterminación del continuo estelar, por lo que se requiere síntesis espectral

OBJETIVO:
Desarrollar diferentes calibraciones que nos permitan estimar tanto la metalicidad como las abundancias químicas en este tipo de estrellas a partir de fotometría y espectroscopía de baja resolución.

Calibraciones fotométricas

La posición de una estrella en un CCD o CMD viene principalmente dada principalmente por su masa inicial, composición química y edad, pero efectos como la rotación, vientos estelares o actividad magnética también están involucrados.

DIAGRAMA COLOR-COLOR

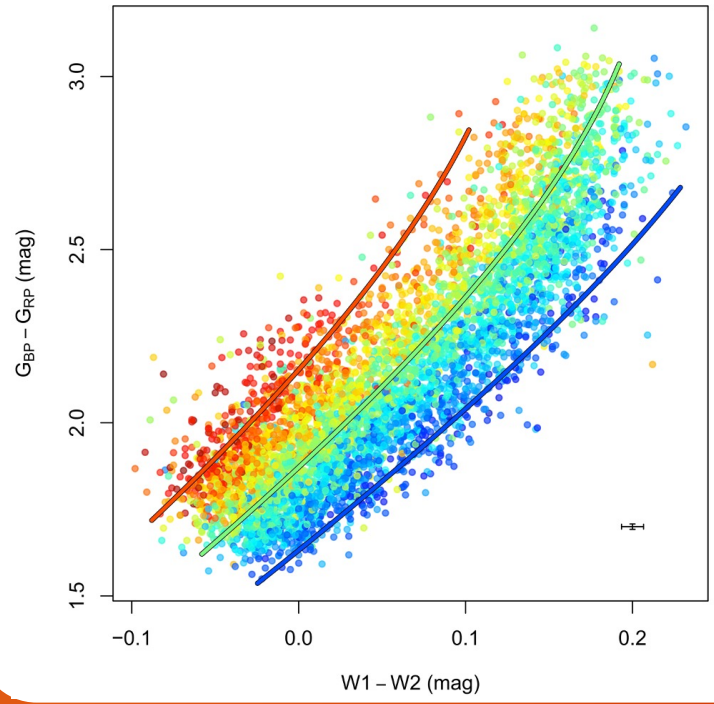
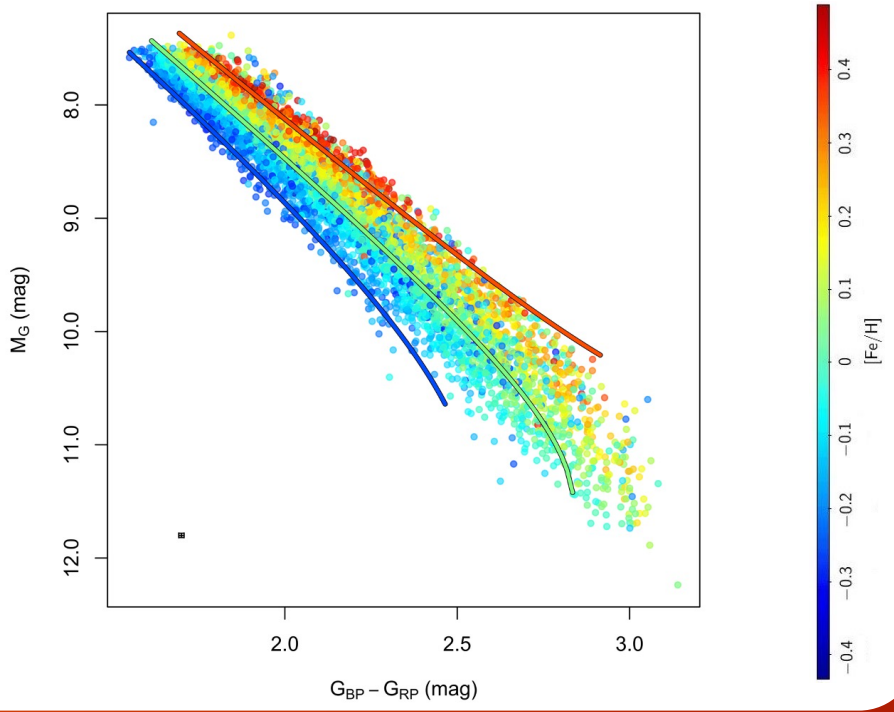


DIAGRAMA COLOR-MAGNITUD



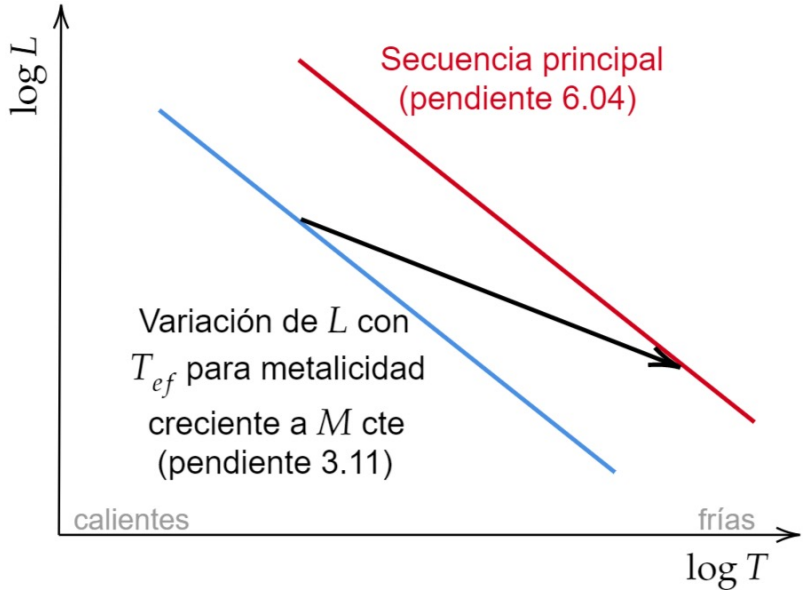
SURVEYS

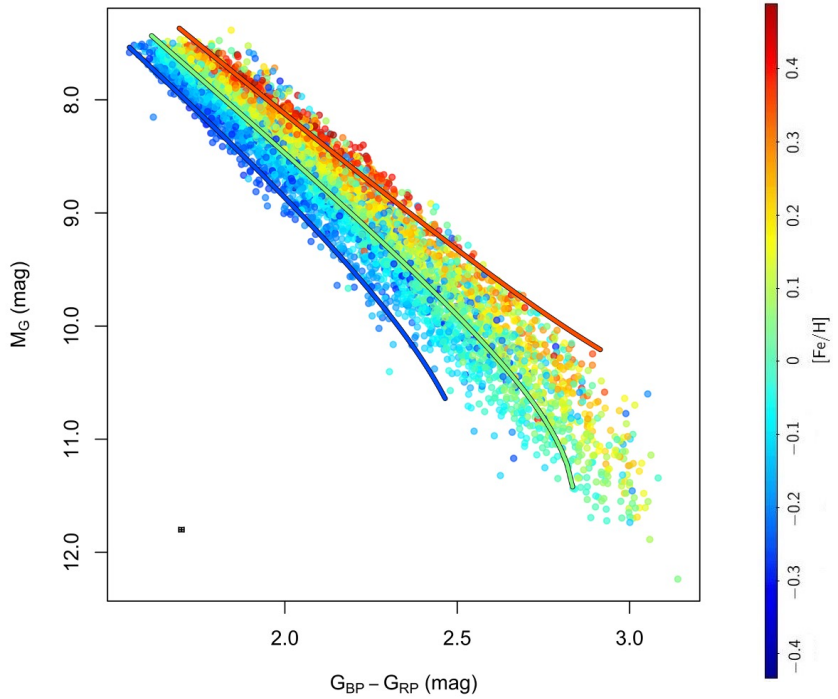
Calibraciones fotométricas

La materia estelar es muy opaca a la radiación, y la opacidad influye en muchas características de la estrella. Un aumento de la metalicidad conlleva un aumento de la opacidad, volviendo a la estrella más fría y menos luminosa.

↑ Metalicidad $\Longrightarrow$ ↑ Opacidad $\Longrightarrow$ ↓ Temperatura & Luminosidad

DIAGRAMA COLOR-MAGNITUD

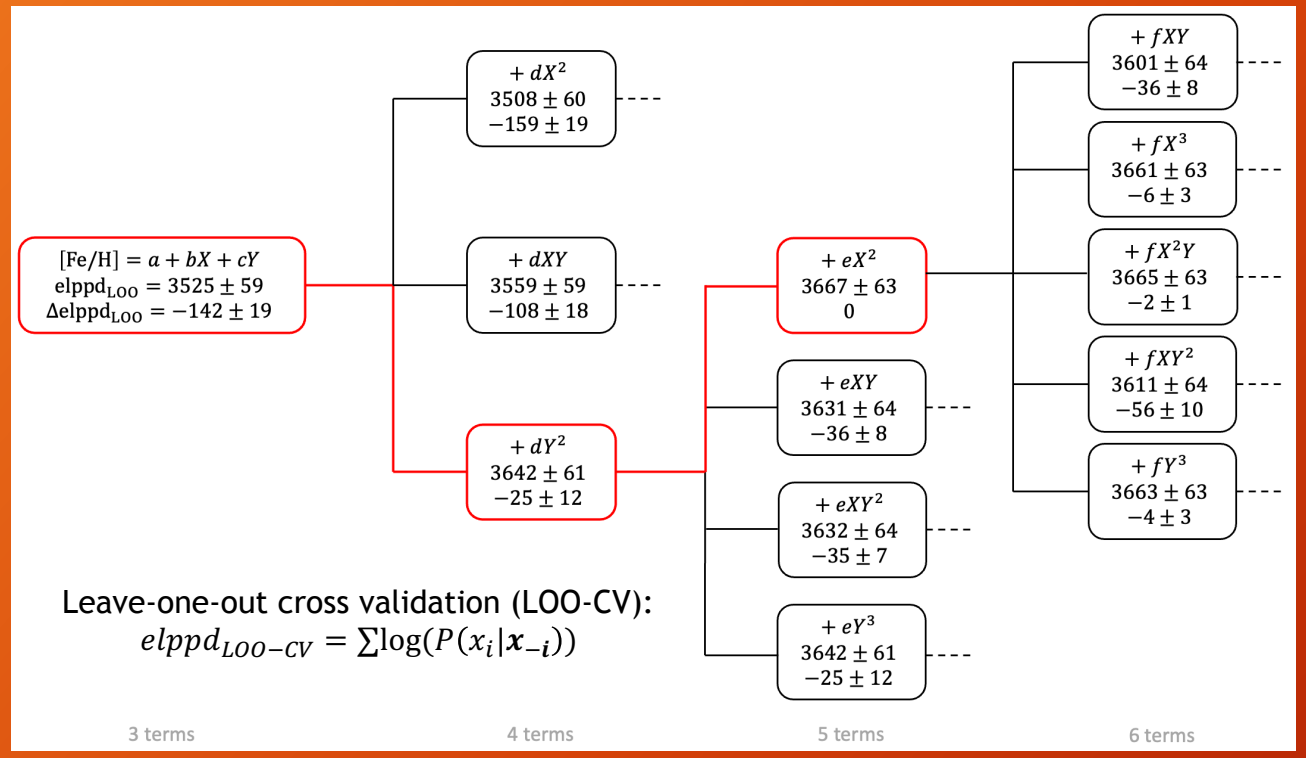




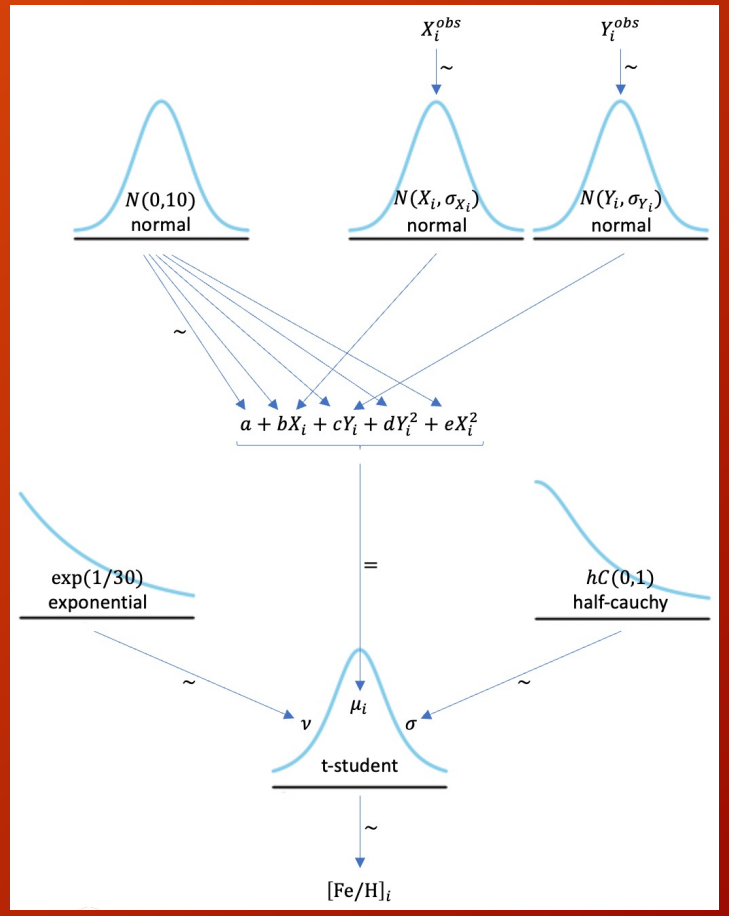
Calibraciones fotométricas

Utilizamos este gradiente de metalicidad para hacer calibraciones empleando estadística Bayesiana y cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC) con Stan.

Regresión paso-a-paso para seleccionar el modelo:



Modelo de regresión robusta y priors:



Calibraciones fotométricas

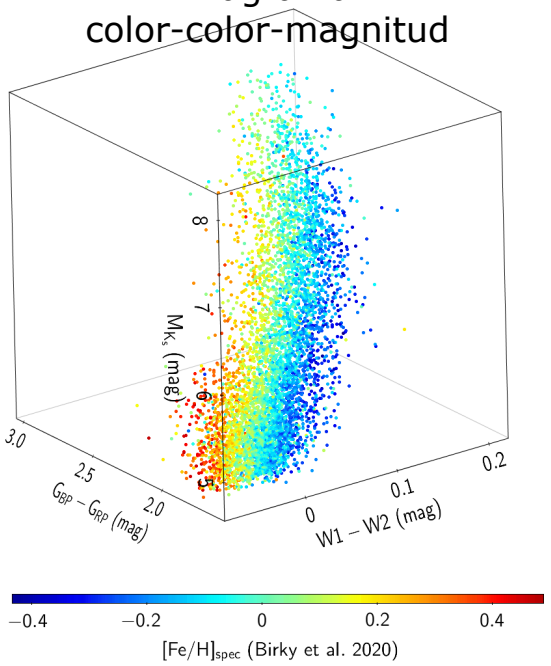
EN REVISIÓN A&A

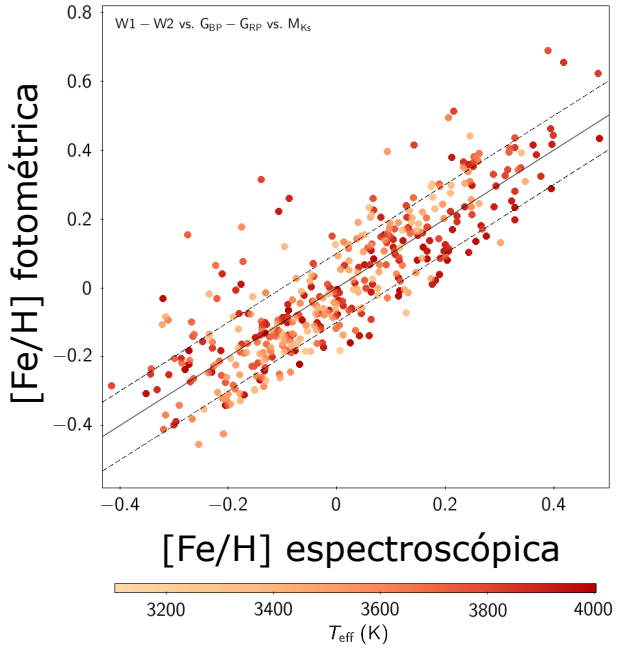
Photometric calibrations of M dwarf metallicity with Markov chain Monte Carlo and Bayesian inference

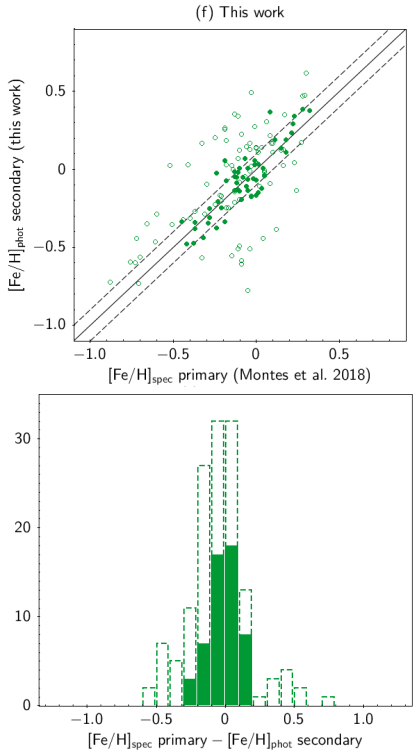
C. Duque-Arribas[1], D. Montes[1], H. M. Tabernero[2], J. A. Caballero[3], J. Gorgas[1] and E. Marfil[1,2]

[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: chrduque@ucm.es
[2] Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), carretera de Ajalvir km 4, 28850 Torrejón de Ardoz, Madrid, Spain
[3] Centro de Astrobiología (CSIC-INTA), ESAC, camino bajo del Castillo s/n, 28691 Villanueva de la Cañada, Madrid, Spain

Diagrama color-color-magnitud







Abundancias químicas en sistemas FGK+M

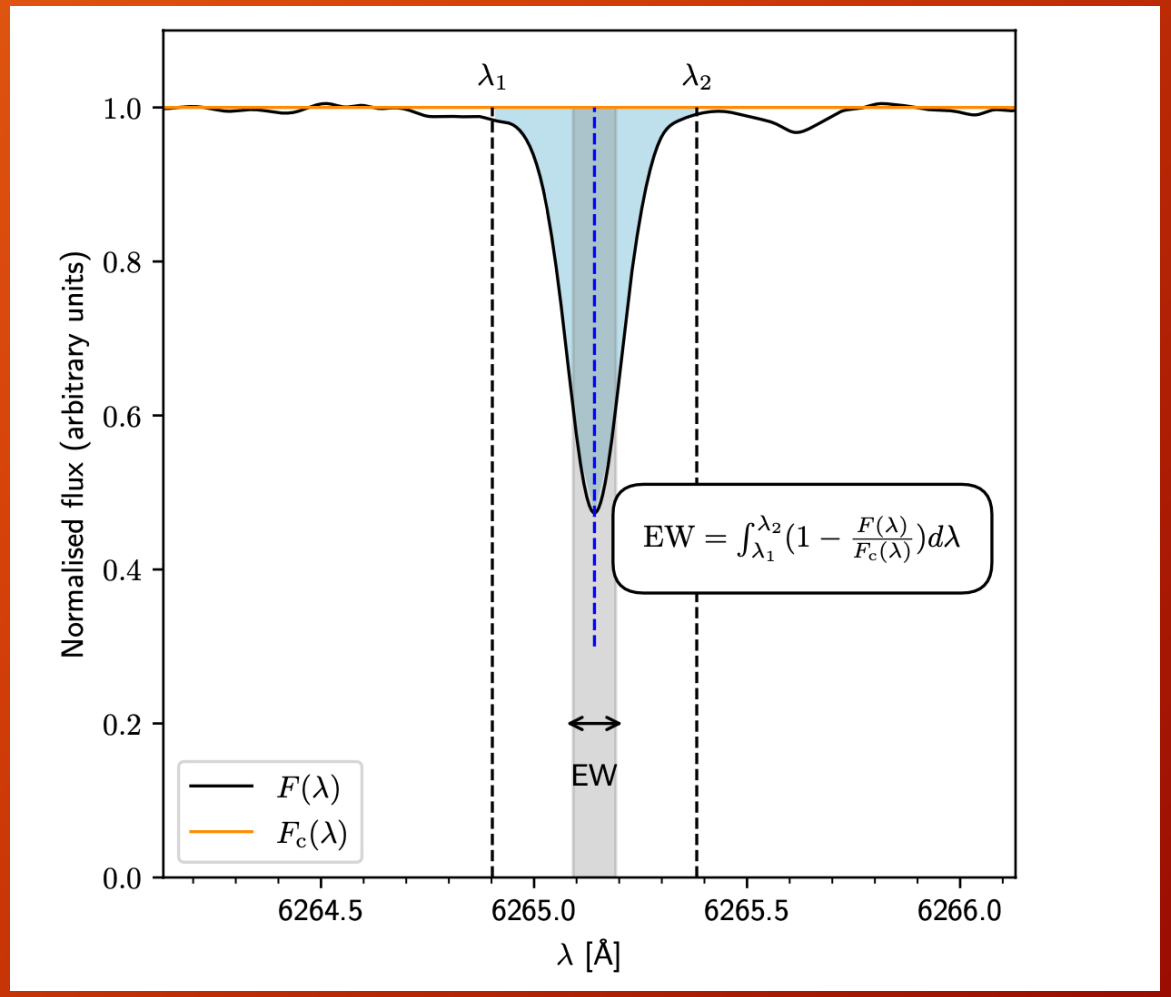
ANCHURA EQUIVALENTE (EW):

Medida del área de una línea respecto al continuo. Rectángulo de anchura/área equivalente al área de la línea.

EQUILIBRIO TERMODINÁMICO LOCAL (ETL):

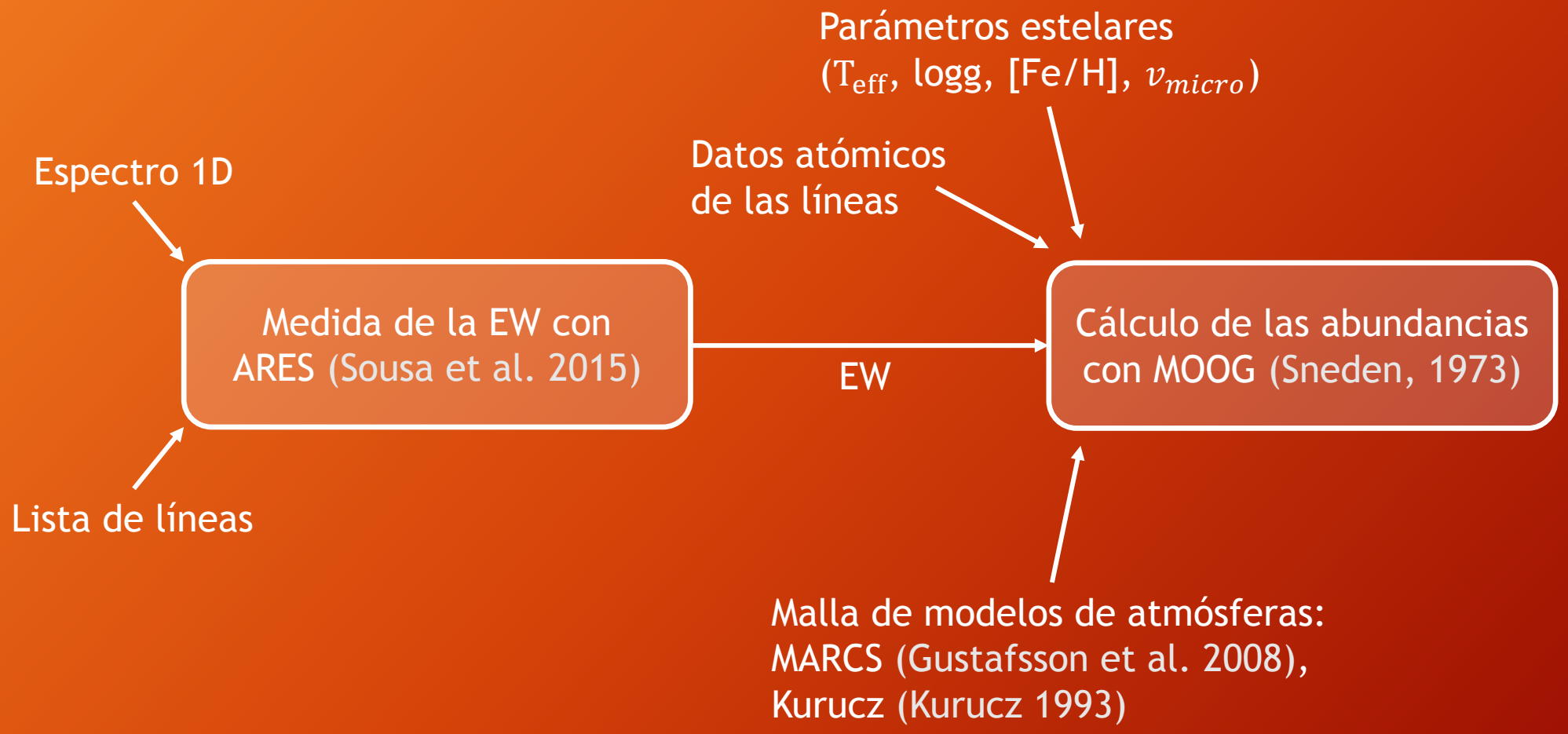
A nivel microscópico el equilibrio termodinámico implica el balance detallado de los procesos de intercambio de energía: cada proceso energético, tanto colisional como radiativo, está equilibrado por su inverso. Para el equilibrio termodinámico local (ETL) se asume además que hay una temperatura única que caracteriza el material en un entorno elemental y que también describe la distribución de energía de las partículas.

- Gradiente de temperaturas muy pequeño.
- Recorrido libre de las partículas/fotones muy pequeño.
- Campo de radiación isótropo.

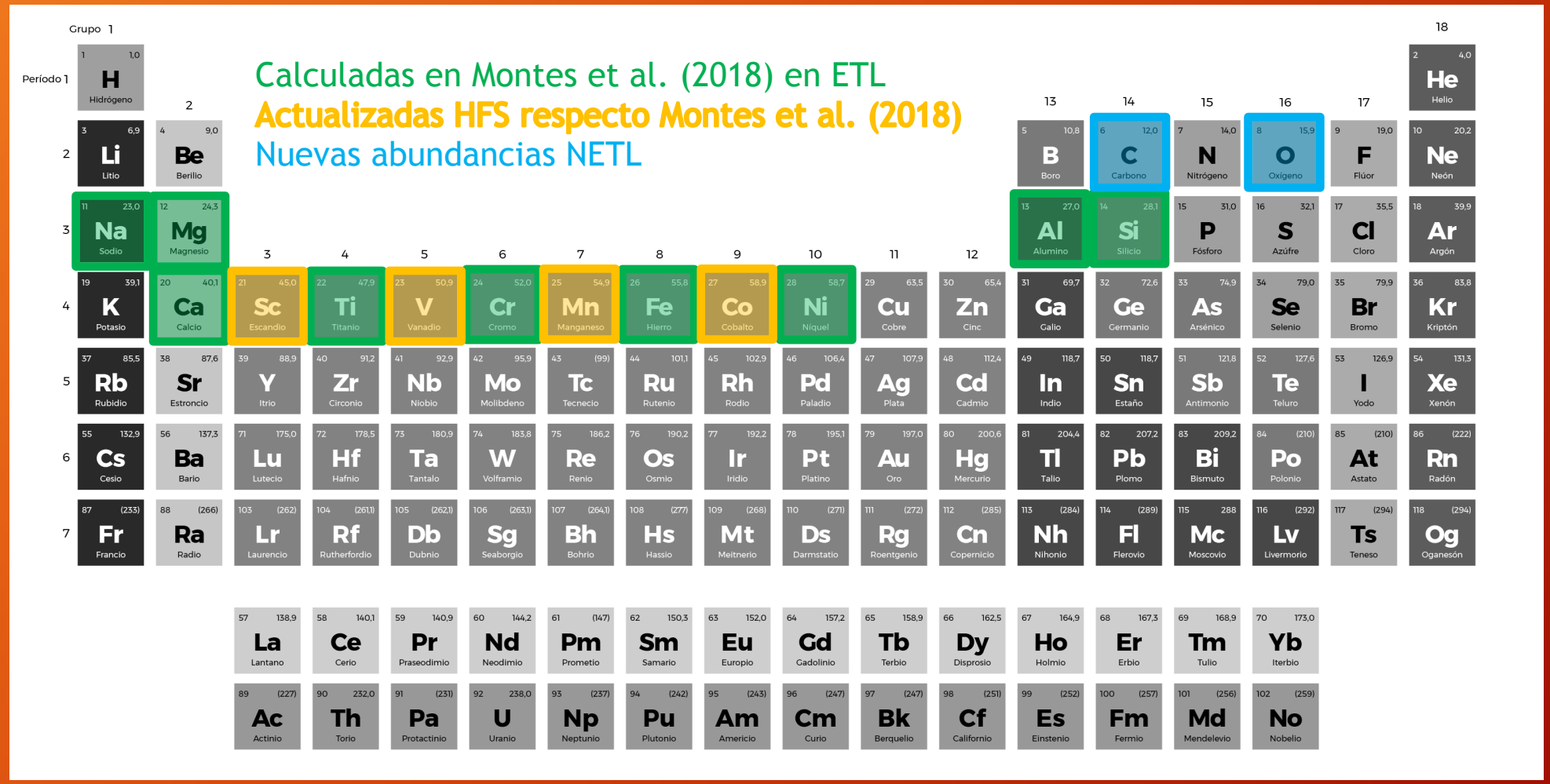


Fe I 6265.13 A from Blanco-Cuaresma et al. (2014)

Abundancias químicas en sistemas FGK+M



Abundancias químicas en sistemas FGK+M



Abundancias químicas en sistemas FGK+M

C	O
carbono	oxígeno

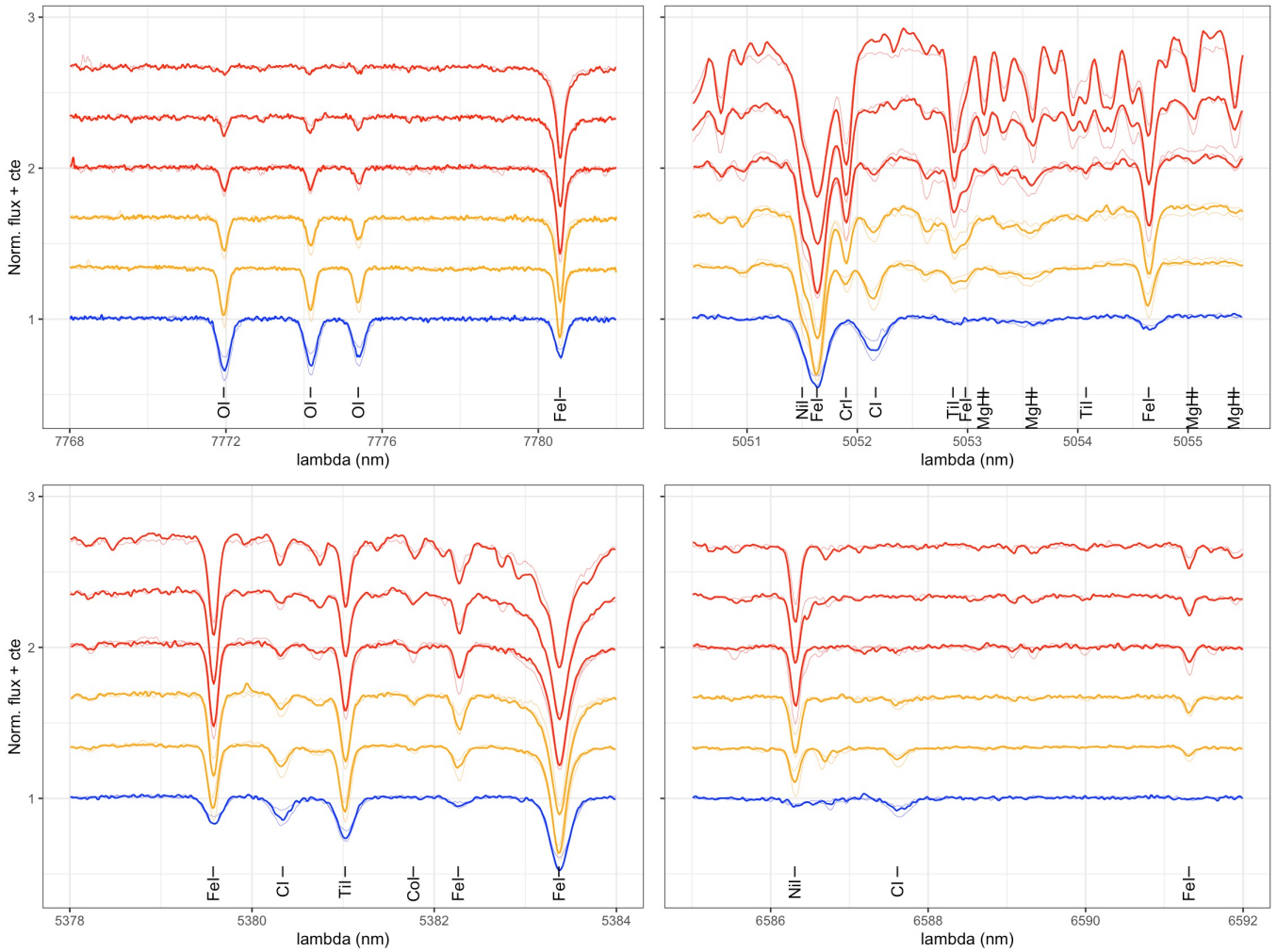
Después del H y He, los elementos más abundantes del Universo.

C: procesos de formación de polvo en el medio interestelar, contribuye a la opacidad estelar y es esencial para la vida

O: trazar el enriquecimiento químico y la historia de formación estelar de poblaciones estelares en la Vía Láctea

C/O (y Mg/Si): estructura y composición de los exoplanetas.

→ NETL : aplicar corrección (Sitnova et al. 2013)

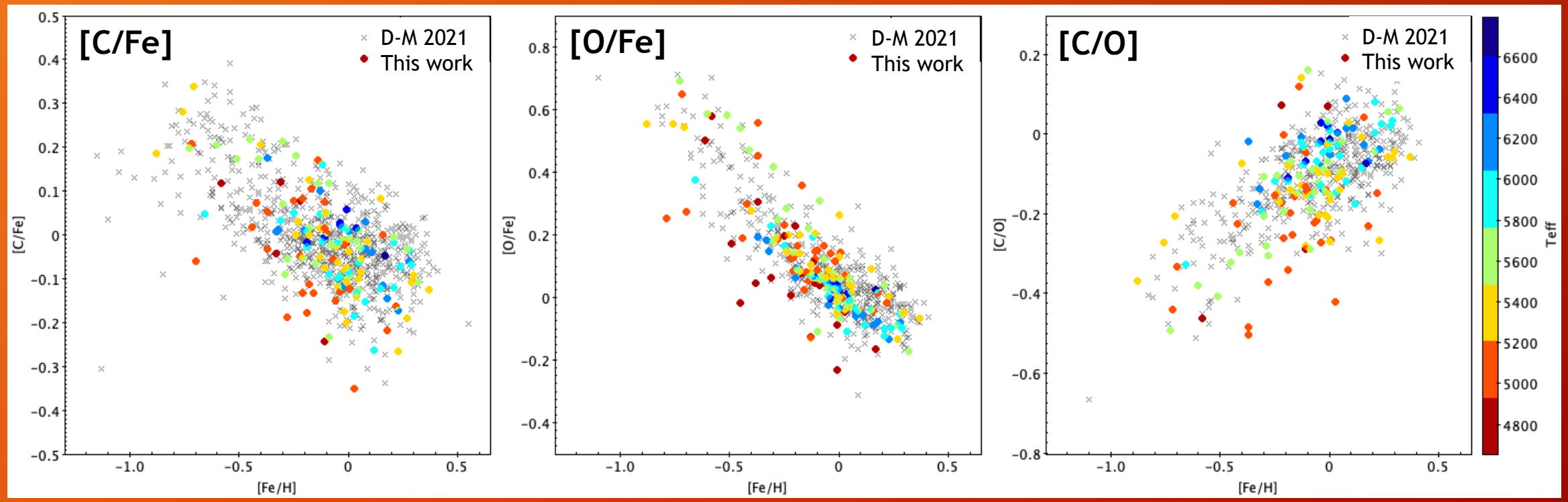


Abundancias químicas en sistemas FGK+M

C
carbono

O
oxígeno

Abundancias de C y O que reproducen las tendencias galácticas observadas en trabajos previos (Delgado-Mena et al. 2021)



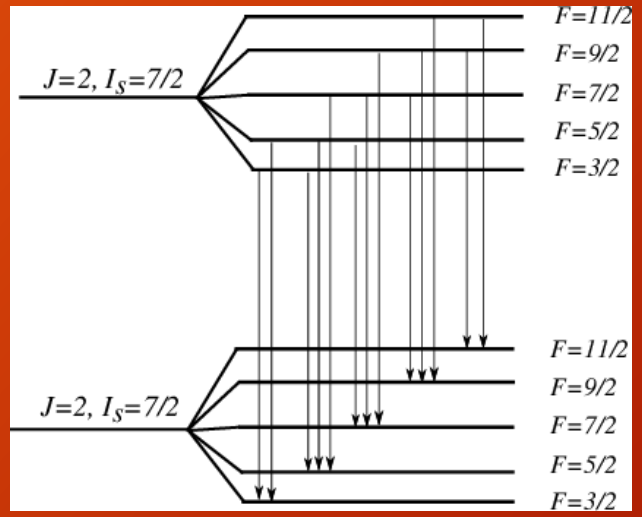
Abundancias químicas en sistemas FGK+M

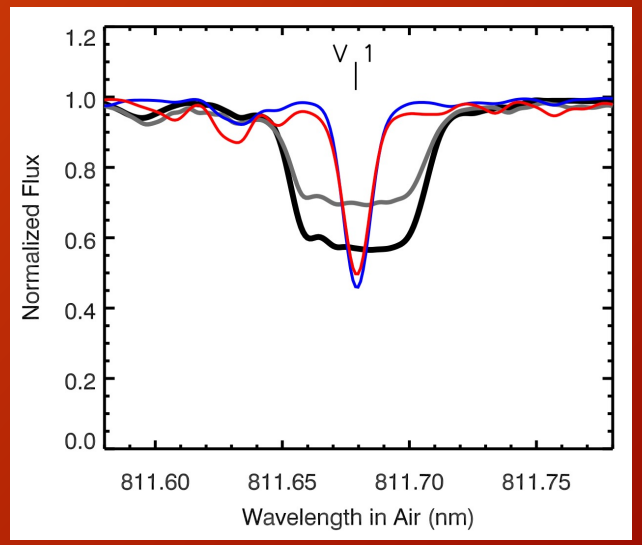
Sc	V	Mn	Co
escandio	vanadio	manganeso	cobalto

Líneas afectadas por estructura hiperfina (HFS):
Interacción entre el momento angular del electrón y el momento magnético nuclear, lo que resulta en el desdoblamiento de los niveles de energía del átomo, provocando un ensanchamiento de las líneas (Condon & Shortley 1963; Sobelman 2006)

Las desviaciones en estrellas de tipo solar se suelen encontrar dentro de las incertidumbres típicas, pero el efecto es mayor en las estrellas de tipo M.

→ Actualizar las abundancias de Montes et al. (2018):
- Medir EW (31 líneas) ✅
- Recopilar datos atómicos ✅
- Calcular abundancias ❌ but ➡ SOON





Shan et al. (2021)

Abundancias químicas en sistemas FGK+M

Index	$\Delta\lambda_{num}$ [Å]	$\Delta\lambda_{den}$ [Å]	Reference
CaOH	6230:6240	6345:6354	Reid et al. (1995)
CaH 1	6380:6390	∑ 6345:6355, 6410:6420	Reid et al. (1995)
I2 (CaH)	6510:6540	6370:6400	Martín & Kun (1996)
I3 (TiO)	6510:6540	6660:6690	Martín & Kun (1996)
Hα	6560:6566	6545:6555	Reid et al. (1995)
TiO 1	6718:6723	6703:6708	Reid et al. (1995)
CaH 2	6814:6846	7042:7046	Reid et al. (1995)
CaH 3	6960:6990	7042:7046	Reid et al. (1995)
TiO-7053	7000:7040	7060:7100	Martín et al. (1999)
Ratio A (CaH)	7020:7050	6960:6990	Kirkpatrick et al. (1991)
TiO-7140	7015:7045	7125:7155	Wilking et al. (2005)
PC1	7030:7050	6525:6550	Martín et al. (1996)
CaH Narr	7044:7049	6972.5:6977.5	Shkolnik et al. (2009)
TiO 2	7058:7061	7043:7046	Reid et al. (1995)
TiO 3	7092:7097	7079:7084	Reid et al. (1995)
TiO 5	7126:7135	7042:7046	Reid et al. (1995)
TiO 4	7130:7135	7115:7120	Reid et al. (1995)
VO-a	∑ 7350:7370, 7550:7570	7430:7470	Kirkpatrick et al. (1999)
VO	∑ α7350:7400, β7510:7560[a]	7420:7470	Kirkpatrick et al. (1995)
Ratio B (Ti I)	7375:7385	7353:7363	Kirkpatrick et al. (1991)
VO-7434	7430:7470	7550:7570	Hawley et al. (2002)
PC2	7540:7580	7030:7050	Martín et al. (1996)
VO 1	7540:7580	7420:7460	Martín et al. (1999)
TiO 6	7550:7570	7745:7765	Lépine et al. (2003)
VO-b	∑ 7860:7880, 8080:8100	7960:8000	Kirkpatrick et al. (1999)
VO 2	7920:7960	8130:8150	Lépine et al. (2003)
VO-7912	7990:8030	7900:7940	Martín et al. (1999)
Ratio C (Na I)	8100:8130	8174:8204	Kirkpatrick et al. (1991)
Color-M	8105:8155	6510:6560	Lépine et al. (2003)
Na-8190	8140:8165	8173:8210	Hawley et al. (2002)
PC3	8235:8265	7540:7580	Martín et al. (1996)

Alonso-Floriano et al. (2015)

ÍNDICES ESPECTRALES

Calcular el ratio de flujo en determinados rangos de longitud de onda con espectros de baja resolución:

$$I = \frac{F_{num}}{F_{den}}$$

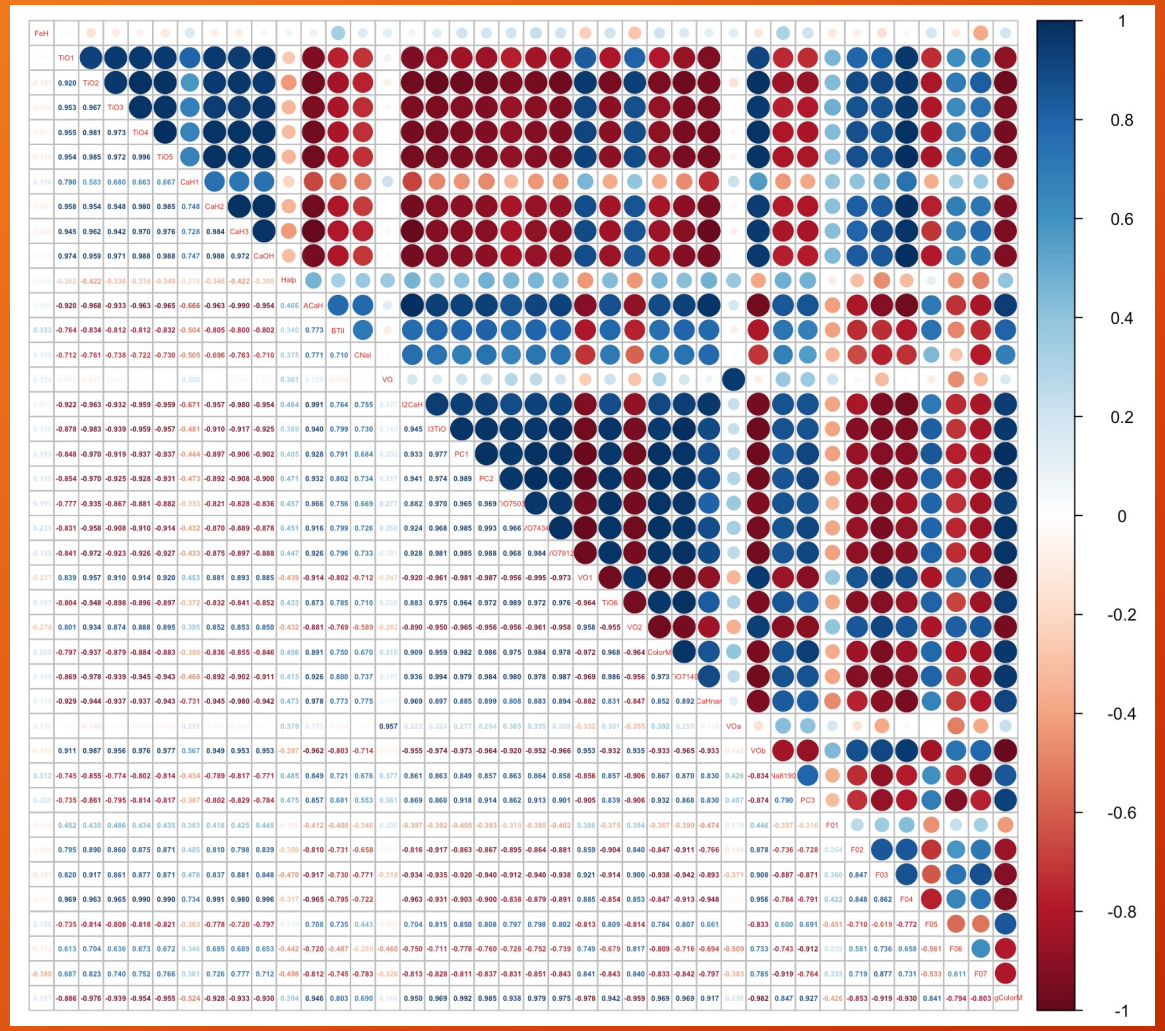
→ Tipo espectral (Alonso-Floriano et al. 2015)

→ Para determinar abundancias:

$$[X/H] = \sum_{i=0}^{n} a_i I_i$$

Abundancias químicas en sistemas FGK+M

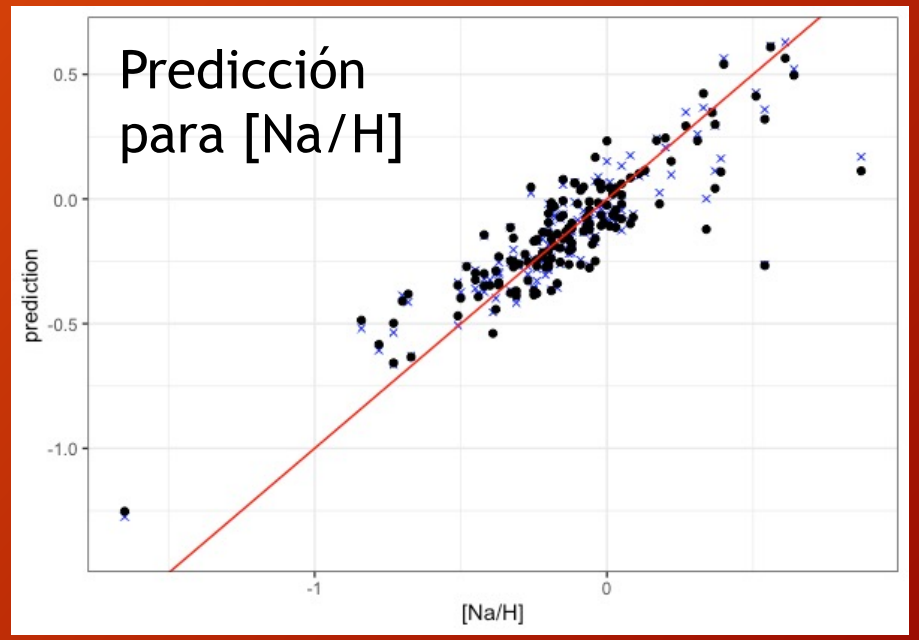
CORRELACIÓN



Projective inference in high-dimensional problems: Prediction and feature selection

Juho Piironen, Markus Paasiniemi and Aki Vehtari

Helsinki Institute for Information Technology (HIIT)
Department of Computer Science, Aalto University
e-mail: juho.t.piironen@gmail.com, markus.paasiniemi@helsinki.fi, aki.vehtari@aalto.fi



CARMENES

Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exoearths with Near-infrared and optical Echelle Spectrographs

carmenes

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]

Metallicities in M dwarfs: Investigating different determination techniques

V. M. Passegger[1,2], A. Bello-García[3], J. Ordieres-Meré[4], A. Antoniadis-Karnavas[5,6], E. Marfil[7,8], C. Duque-Arribas[7], P. J. Amado[9], E. Delgado-Mena[5], D. Montes[7], B. Rojas-Ayala[10], A. Schweitzer[1], H. M. Tabernero[11], V. J. S. Béjar[12,13], J. A. Caballero[8], A. P. Hatzes[14], Th. Henning[15], S. Pedraz[16], A. Quirrenbach[17], A. Reiners[18], and I. Ribas[19,20]

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT
CSIC
ICE
Institut für Astrophysik Göttingen
TLS
Bundesministerium für Bildung und Forschung
KTS
DFG
DLR
Unión Europea
Fondo Europeo de Desarrollo Regional
"Una manera de hacer Europa"
Calar Alto

Las estrellas de tipo espectral M