

# Caracterización espectroscópica de estrellas huéspedes de exoplanetas

PhD. Lauren Flor Torres

Universidad de Guanajuato  
Guanajuato, México

**ACTUALMENTE:**

Profesora cátedra  
Universidad del Valle

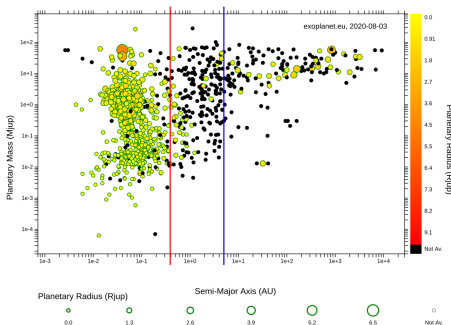
CHIA - CoFundadora  
Colombianas Haciendo Investigación en Astrociencias

GAAM - Líder  
Grupo de Astronomía y Astrofísica Macondo

13 de abril de 2021

# Introducción

- Número de exoplanetas “confirmados” hasta la fecha: 4300 (Schneider et al. 2011, <http://exoplanet.eu/>).
- Dos técnicas de observación: RV, Tr; información sobre  $M_p$ ,  $R_p$ ,  $a_p$ ,  $e_p$ .

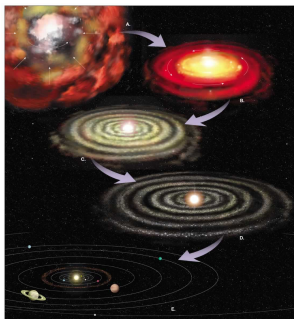


## Clasificación de los exoplanetas

- “Hot-Jupiter” (HJ),  $a_p < 0.4 \text{ AU}$ . (Mayor & Queloz 1995)
- “Super-Earth” (Leconte et al. 2009; Valencia et al. 2006; Martin & Livio 2015; Chabrier et al. 2009).
- “mini-Neptune” (Gandolfi et al. 2017).

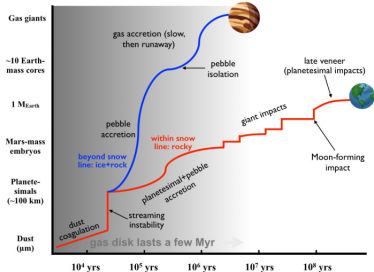
*Hasta la fecha no se tiene ningún sistema planetario similar al Sistema Solar; ¿Bias observacional o procesos de formación diferente?*

**Objetivo:** Desarrollar un método óptimo para el estudio de las características espectroscópicas de una muestra de estrellas huéspedes de exoplanetas (39) observadas con el TIGRE, las cuales nos permitirán estudiar una posible relación entre las formación estelar y planetaria.



## Modelo estándar para estrellas de baja masa ( $0.4M_{\odot} < M < 4M_{\odot}$ ):

- Colapso gravitacional de una nube molecular ( $10^5 - 10^7 M_{\odot}$ , Draine 2011)
- Formación PPD con conservación de momento angular: PPD mínimo,  $0.01$  a  $0.02 M_{\odot}$ , PPD máximo,  $0.5M_{\odot}$  (Armitage 2010).
- Formación diferente para planetas gigante externos y planetas terrestres internos; división línea de hielo (3 AU).
- Formación de planetas gaseosos gigantes rápida ( $10^5 - 10^7$  yr) en la parte fría del disco (Raymond & Morbidelli 2020)



# Migración planetaria

El modelo de la formación planetaria de nuestro sistema solar no explica los Júpiter calientes: los exoplanetas orbitan a distancias muy cercanas de sus estrellas ( $a_p < 0.4\text{AU}$ ).

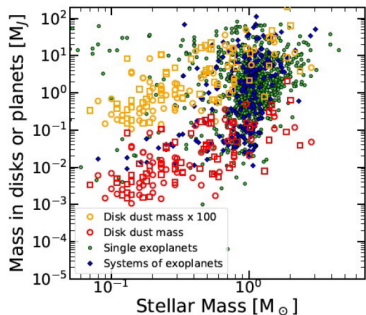
Siguiendo Dawson & Johnson (2018), hay 3 modelos que pueden explicar los HJs:

- 1 *Modelo in situ*, (Boss 1997), donde los exoplanetas se forman cerca de sus estrellas.
- 2 *Modelo de migración en el disco*, donde la formación del planeta incluye una transferencia del momento angular del planeta al disco.
- 3 *Modelo de migración por alta excentricidad* (“*High-eccentricity migration*”) y *efecto de marea* (*circularización*), donde las interacciones entre los planetas excitan la excentricidad moviendolos a distancias muy cercanas de sus estrellas donde se circularizan.

Un manera de unificar el modelo de formación de los planetas sería incluir la migración en el modelo estándar de formación del Sistema Solar (Tsiganis et al. 2005).

Esto implica que la única diferencia entre la formación de los exoplanetas y la formación del Sistema solar, sería la amplitud de la migración; por ejemplo, un PPD más masivo podría producir migración mayor.

# El problema del PPD



- Observación milimétrica: polvo en PPD aumenta con masa de la estrella; para  $1M_{\odot}$  se tiene  $10^{-1}M_J$ ; asumiendo  $M_{gas}/M_{dust} = 100$  da  $10M_J$  apenas similar al PPD mínimo (Raymond & Morbidelli 2020).

*Esto implica que el proceso de formación de los planetas en general debería haber sido casi 100% eficiente.*

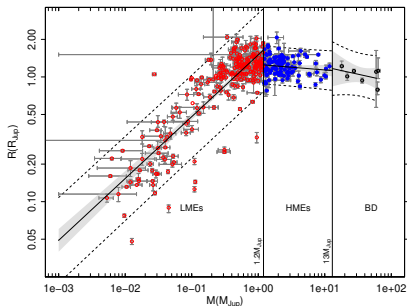
A partir de las observaciones de los PPD no se puede determinar cual fue la masa de los PPD que formó los exoplanetas. Pero asumiendo que el momento angular pasa a los planetas se puede determinar de otra manera cuál era esa masa: esto implica que planetas más masivos se deben formar en PPD más masivos en torno de estrellas más masivas con momento angular que aumenta con la masa.

# El problema del momento angular

El momento angular estelar no es conservado durante su formación.

- Asumiendo velocidad angular de núcleos de formación estelar dentro de nubes moleculares  $= \Omega_{MC} \sim 10^{-14} - 10^{-13} s^{-1}$  y asumiendo un colapso por un  $R_{Jeans}/R_{sol} \sim 5 \times 10^6$  se espera un momento angular específico del orden de  $j_* = \Omega_{MC} \times R_{Jeans}^2 \sim 10^{17} - 10^{18} m^2/s$ .
- $\Omega_{sol} \sim 2.972 \times 10^{-6} s^{-1}$  (<http://ssd.jpl.nasa.gov>),  $j_* = \Omega_{sol} \times R_{sol}^2 \sim 10^{11} m^2/s$  que es  $10^6 - 10^7$  veces menor que asumiendo la conservación del momento angular.
- Ahora, si comparamos la velocidad de quiebre (“break-up velocity”) para el Sol:  $\Omega_b = \sqrt{GM_{\odot}/R_{sol}^3} \sim 6 \times 10^{-4} s^{-1}$ , tendría un momento angular específico de  $j_b \sim 3 \times 10^{14} m^2/s \Rightarrow 10^3 - 10^4$  menor que el esperado para el momento angular del PPD (ley de conservación del momento angular).

## Muestra y observaciones



**Fig. 1:** Relación Masa-Radius para la lista de exoplanetas. “Low-Mass Exoplanets” - LME (triángulos rojos), “High-Mass Exoplanets” - HME (cruz azul) y “Brown-Dwarf” - BDs (círculos negros)

## Puntos para la selección de la muestra observacional

- Estrellas de tipo espectral F,G,K en MS
- Exoplanetas con información disponible de  $M$ ,  $R$ ,  $a_p$  y  $e_p$

## Limitaciones del telescopio

Para la observaciones se hizo uso del telescopio de 1.2m TIGRE.

- Observaciones del primer semestre del 2016 al final del 2019.
- Espectroscopia de alta resolución  $R = 20000$
- Rango de longitudes de onda: azul (350-560nm) y rojo (580 - 880nm)
- $S/N \sim 60$
- $mag_v < 10 - 10.5$

Tabla 1: Muestra homogénea de estrellas huéspedes de exop. observadas con el TIGRE.

Id. #	Star and Planet	Magnitude (V)	Distance (pc)	$M_p$ ( $M_{jup}$ )	$R_p$ ( $R_{jup}$ )	Period (days)	$a_p$ (AU)	$e_p$	Detection Method	Planetary type
1	*KELT-6 c	10.3	242.4	3.71	2.68	1276.0	2.39	0.21	RV	HME
2	*HD 219134 h	5.6	6.5	0.28	0.80	2198.0	3.06	0.37	RV	LME
3	*KEPLER-37 b	9.8	64.0	0.01	0.03	13.37	0.10	0.00	Tr	LME
4	HD 46375 b	7.8	29.6	0.23	1.02	3.02	0.04	0.05	RV	LME
5	HD 75289 b	6.4	29.1	0.47	1.03	3.51	0.05	0.02	RV	LME
6	HD 88133 b	8.0	73.8	0.30	1.00	3.42	0.05	0.08	RV	LME
7	HD 149143 b	7.9	73.4	1.33	1.05	4.07	0.05	0.01	RV	HME
8	HAT-P-30 b	10.4	215.3	0.71	1.34	2.81	0.04	0.04	Tr	LME
9	KELT-3 b	9.8	211.3	1.42	1.33	2.70	0.04	0	Tr	HME
10	KEPLER-21 b	8.3	108.9	0.02	0.15	2.79	0.04	0.02	Tr	LME
11	KELT-2A b	8.7	134.6	1.49	1.31	4.11	0.05	0.19	Tr	HME
12	HD86081 b	8.7	104.2	1.50	1.08	2.00	0.04	0.06	RV	HME
13	WASP-74 b	9.8	149.8	0.97	1.56	2.14	0.04	0.00	Tr	LME
14	HD 149026 b	8.1	76.0	0.36	0.72	2.88	0.04	0.00	Tr	LME
15	HD 209458 b	7.6	48.4	0.69	1.38	3.52	0.05	0.01	Tr	LME
16	BD-10 3166 b	10.0	84.6	0.46	1.03	3.49	0.05	0.01	RV	LME
17	HD 189733 b	7.6	19.8	1.14	1.14	2.22	0.03	0.00	Tr	LME
18	HD 97658 b	7.7	21.6	0.02	0.20	9.49	0.08	0.08	Tr	LME
19	HAT-P-7 b	10.5	344.5	1.74	1.43	2.20	0.04	0	Tr	HME
20	KELT-7 b	8.5	137.2	1.29	1.53	2.73	0.04	0.00	Tr	HME
21	HAT-P-14 b	10.0	224.1	2.20	1.20	4.63	0.06	0.10	Tr	HME
22	WASP-14 b	9.7	162.8	7.34	1.28	2.24	0.04	0.09	Tr	HME
23	HAT-P-2 b	8.7	128.2	8.74	0.95	5.63	0.07	0.52	Tr	HME
24	WASP-38 b	9.4	136.8	2.71	1.08	6.87	0.08	0.03	Tr	HME
25	HD 118203 b	8.1	92.5	2.14	1.05	6.13	0.07	0.29	RV	HME
26	HD 2638 b	9.4	55.0	0.48	1.04	3.44	0.04	0.04	RV	LME
27	WASP-13 b	10.4	229.0	0.49	1.37	4.35	0.05	0.00	Tr	LME
28	WASP-34 b	10.3	132.6	0.59	1.22	4.32	0.05	0.04	Tr	LME
29	WASP-82 b	10.1	277.8	1.24	1.67	2.71	0.04	0	Tr	HME
30	HD 17156 b	8.2	78.3	3.20	1.10	21.22	0.16	0.68	Tr	HME
31	XO-3 b	9.9	214.3	11.79	1.22	3.19	0.05	0.26	Tr	HME
32	HD 33283 b	8.0	90.1	0.33	0.99	18.18	0.17	0.46	RV	LME
33	HD 217014 b	5.5	15.5	0.47	1.90	4.23	0.05	0.01	RV	LME
34	HD 115383 b	5.2	17.5	4.00	0.96	-	43.5	0	Im	HME
35	HAT-P-6 b	10.5	277.5	1.06	1.33	3.85	0.05	0	Tr	LME
36	*HD 75732 d	6.0	12.6	3.86	2.74	4867.0	5.45	0.03	RV	HME
37	HD 120136 b	4.5	15.7	5.84	1.06	3.31	0.05	0.08	RV	HME
38	WASP-76 b	9.5	195.3	0.92	1.83	1.81	0.03	0	Tr	LME
39	Hn-Peg b	6.0	18.1	16.00	1.10	-	795	0	Im	BD

\* identifica sistemas planetarios múltiples.

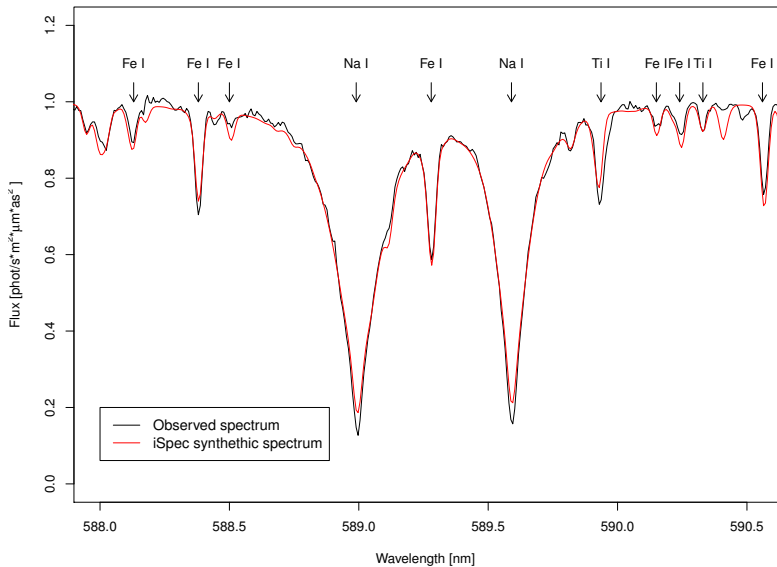


## Análisis del espectro del Sol como calibrador

- **MOLECFIT** (Kausch et al. 2015)
- Mejor S/N - Longitud de onda: 585-875 nm
- **iSpec v2016.11.18** (Blanco-Cuaresma et al. 2014; Blanco-Cuaresma 2019)
- Corrección RV - *Atlas.Arcturus 372-926 nm*
- Normalización del continuo ( $R \sim 20000$ )
- “Synthetic Spectral Fitting” con parámetros del Sol
- **Se buscan las líneas que concuerdan con el espectro del Sol con sus respectivos segmentos (122 líneas).**
- Combinación apropiada: código SPECTRUM, modelo atmosférico ATLAS, abundancias solares de Asplund et al. (2009) y la lista de líneas espectrales “the Vienna Atomic Line Data Base” - VALD.
- Fijar  $v_{mic}$  y  $v_{mac}$ , con las relaciones empíricas (Tsantaki et al. 2013) (ec. 1) y (Doyle et al. 2014) (ec. 2):

$$v_{mic} = 6.932 \times 10^{-4} T_{eff} - 0.348 \log g - 1.437 \quad (1)$$

$$v_{mac} = 3.21 + 2.33 \times 10^{-3} (T_{eff} - 5777) + 2.00 \times 10^{-6} (T_{eff} - 5777)^2 - 2.00(\log g - 4.44) \quad (2)$$



**Fig. 2:** Ejemplo de espectro sintético y observacional.

**Tabla 2:** Parámetros físicos del Sol con el método de este trabajo

Parám.	iSpec	Sol <sup>a</sup>
$T_{eff}$	$5571 \pm 30$ K	5571 K
$\log g$	$4.44 \pm 0.04$ dex	4.44 dex
$[M/H]$	$0.00 \pm 0.03$	0
$[Fe/H]$	$0.00 \pm 0.03$	0
$V \sin i$	$1.60 \pm 1.45$ km/s	1.60 km/s
$v_{mic}$	1.02 km/s	1.07 km/s
$v_{mac}$	3.19 km/s	4.21 km/s
rms of fit	0.0289	

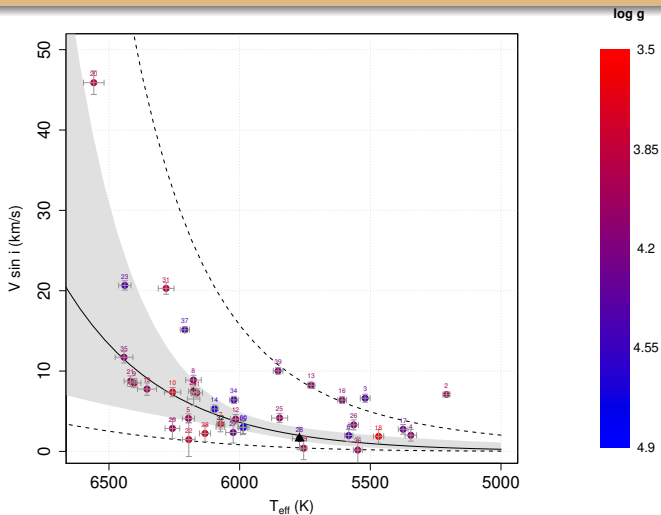
<sup>a</sup>\*Gaia benchmark Stars values  
(Blanco-Cuaresma 2019)

## 122 líneas de Fe, Na, Ca y $H_{\alpha}$

## Método óptimo

- MOLECFIT(Kausch et al. 2015)
- Longitud de onda: 585-875 nm
- Corrección RV - *Atlas.Arcturus 372-926 nm*
- Fijación y normalización del continuo ( $R \sim 20000$ )
- Lista de 122 líneas y segmentos
- Primer iteración fijando  $v_{mic}$  y  $v_{mac}$  del Sol
- Resultados primera iteración  $\rightarrow v_{mic}$  y  $v_{mac}$  y se fijan
- Segunda iteración  $\rightarrow v_{mic}$  y  $v_{mac} \rightarrow$  RESULTADOS FINALES

## Resultados

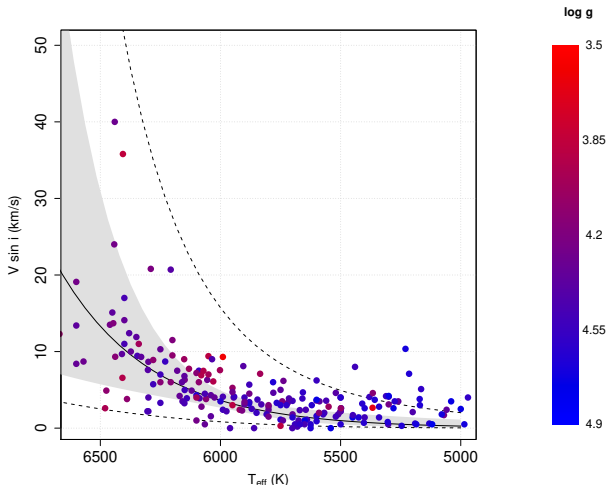


**Fig. 3:** Relación entre la velocidad de rotación y la temperatura efectiva tomando en cuenta la gravedad superficial (“outliers” = No. 2, 3, 13, 16, 17, 26, 33 y 37)

$$\frac{V \sin i}{\text{km/s}} = e^{(2.59 \pm 0.51) \frac{T_{\text{eff}}}{1000\text{K}} + (0.03 \pm 0.54) \log g - (14.37 \pm 4.63)} \quad r^2 = 0.6 \quad (3)$$

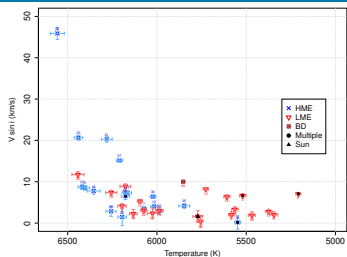
## Muestra de comparación - “Exoplanet orbit Database”<sup>1</sup>

Estrellas de tipo FGK; Tr y RV; sist. simples de LME o HME; información completa de estrella y planeta.

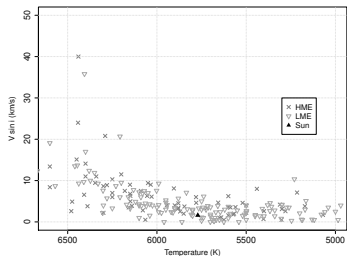


**Fig. 4:** Comparación de la relación obtenida en la Figura 3 con la muestra de la literatura.

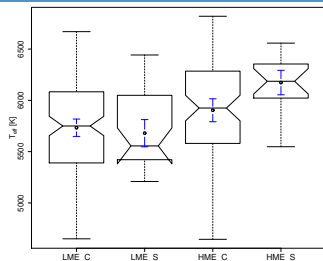
<sup>1</sup>(<http://exoplanets.org/>)



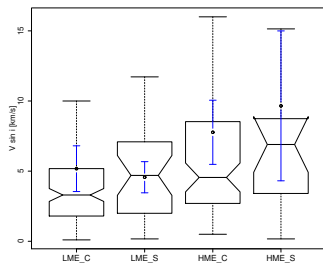
**Fig. 5:** Relación entre la  $T_{\text{eff}}$  y  $V \sin i$  diferenciando por el tipo de planeta que las orbitan.



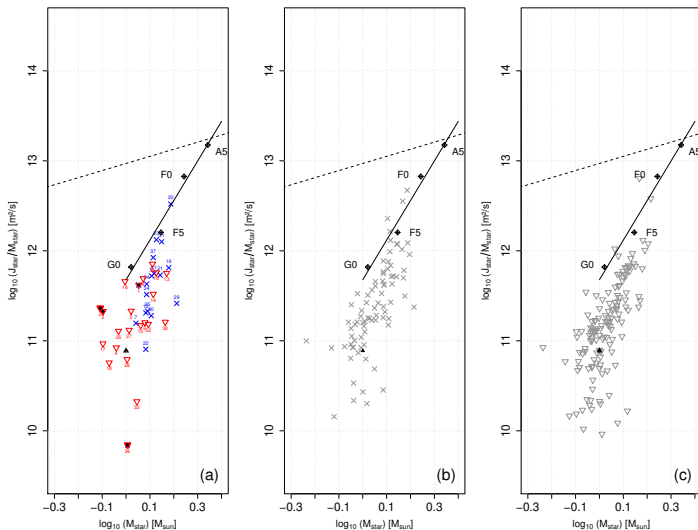
**Fig. 6:** Similar a la Figura 5 pero para la muestra de comparación



**Fig. 7:** Box-plots para la temperatura.



**Fig. 8:** Box-plots para la velocidad de rotación.



**Fig. 9:** Momento angular específico de las estrellas huésped observadas por el TIGRE.

$$j_{\star} = \frac{J_{\star}}{M_{\star}} = \gamma R_{\star} \left( \frac{V \sin i}{\sin i} \right) \quad \gamma = 0.06 \quad (4)$$

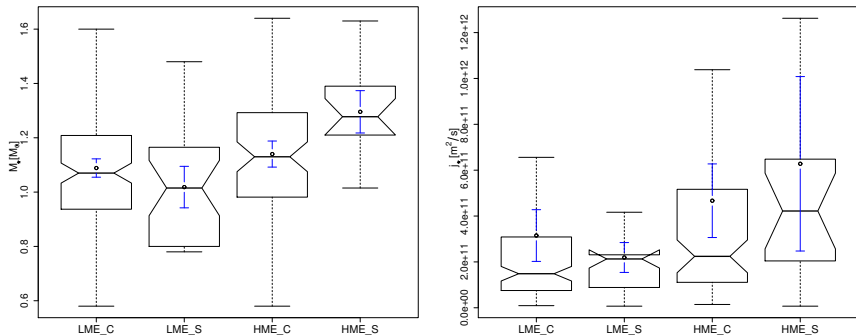


Fig. 10: Box-plots para (Izq.) la masa, y (Der.) momento angular de las estrellas.



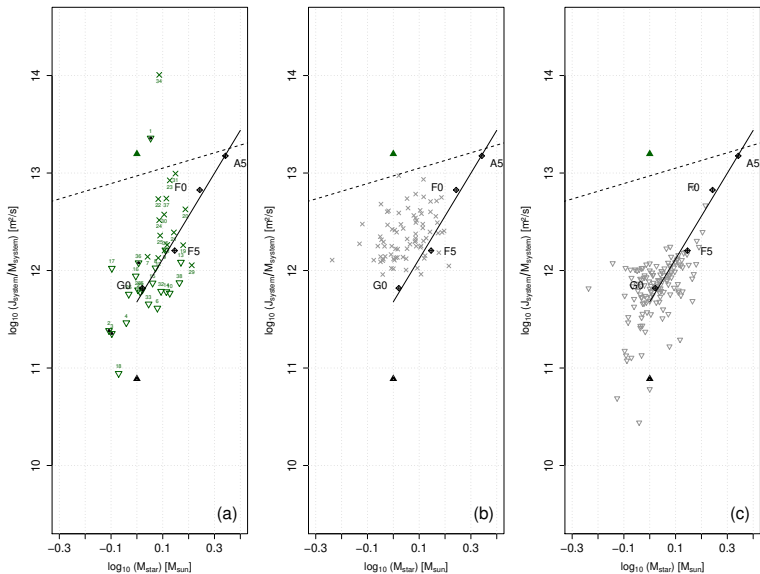
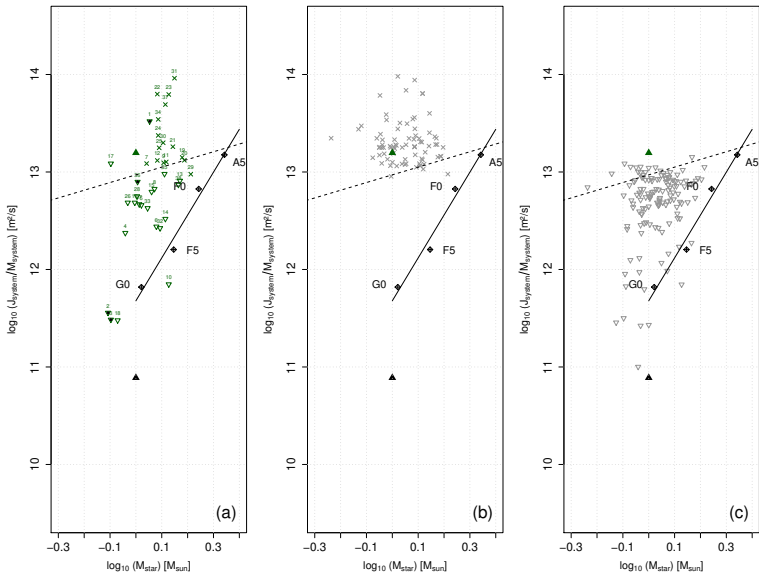
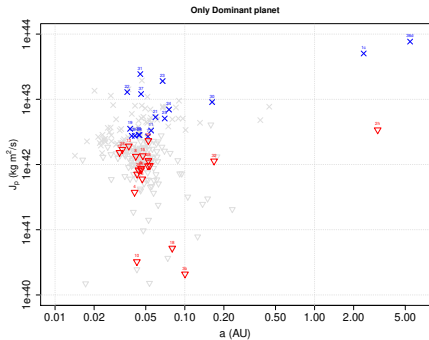


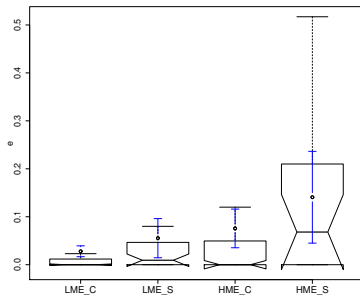
Fig. 11: *Momento angular específico de los sistemas planetarios*



**Fig. 12:** Igual que en la Figura 11 pero teniendo en cuenta la pérdida de momento angular debido a la migración. Para los HME encontramos una razón promedio de 9.43 y para los LME una razón promedio de 7.53



**Fig. 13:** Momento angular de los planetas en diferentes sistemas y diferentes muestras.



**Fig. 14:** Box-plots comparando la excentricidad  $e$  de los exoplanetas de diferentes tipos en las dos muestras

¡Gracias!

# Referencias

- Armitage, P. J. 2010, *Astrophysics of planet formation* (Cambridge University Press), 284
- Asplund, M., Grevesse, N., Sauval, A. J., & Scott, P. 2009, *Astrophysics and Space Science*, 328, 179 [LINK]
- Blanco-Cuaresma, S. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 486, 2075 [LINK]
- Blanco-Cuaresma, S., Soubiran, C., Heiter, U., & Jofré, P. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 569, A111 [LINK]
- Boss, A. P. 1997, *Science*, 276, 1836
- Brosche, P. 1963, 57, 143
- Carrasco, L., Roth, M., & Serrano, A. 1982, *Astronomy and Astrophysics*, 106, 89 [LINK]
- Chabrier, G., Baraffe, I., Leconte, J., Gallardo, J., & Barman, T. 2009, *AIP Conference Proceedings*, 1094, 102
- Dawson, R. I. & Johnson, J. A. 2018 [LINK]
- Doyle, A. P., Davies, G. R., Smalley, B., Chaplin, W. J., & Elsworth, Y. 2014, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 444, 3592
- Draine, B. 2011, *Physics of the interstellar and intergalactic medium*, 540
- Gandolfi, D., Barragán, O., Hatzes, A. P., Fridlund, M., Fossati, L., Donati, P., Johnson, M. C., Nowak, G., Prieto-Arranz, J., Albrecht, S., Dai, F., Deeg, H., Endl, M., Grziwa, S., Hjorth, M., Korth, J., Nespral, D., Saario, J., Smith, A. M. S., Antoniciello, G., Alarcon, J., Bedell, M., Blay, P., Brems, S. S., Cabrera, J., Csizmadia, S., Cusano, F., Cochran, W. D., Eigmüller, P., Erikson, A., González Hernández, J. I., Guenther, E. W., Hirano, T., Suárez Mascareño, A., Narita, N., Palle, E., Parviainen, H., Pätzold, M., Persson, C. M., Rauer, H., Saviane, I., Schmidtobreick, L., Van Eylen, V., Winn, J. N., & Zakhzhay, O. V. 2017, *The Astronomical Journal*, 154, 123 [LINK]
- Kausch, W., Noll, S., Smette, A., Kimeswenger, S., Barden, M., Szyszka, C., Jones, A. M., Sana, H., Horst, H., & Kerber, F. 2015, *Astronomy & Astrophysics*, 576, A78 [LINK]
- Kawaler, S. D. 1987, *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, 1322 [LINK]
- Kraft, R. P. 1970, *Spectroscopic Astrophysics. An Assessment of the Contributions of Otto Struve*, 385 [LINK]
- Leconte, J., Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., & Levrard. 2009, *Astronomy and Astrophysics*, 506, 385 [LINK]
- Martin, R. G. & Livio, M. 2015, *The Astrophysical Journal*, 810, 105 [LINK]
- Mayor, M. & Queloz, D. 1995, *Nature*, 378, 355 [LINK]
- McNally, D. 1965, *The Observatory*, 85, 166 [LINK]
- Raymond, S. N. & Morbidelli, A. 2020, arXiv e-prints, arXiv:2002.05756
- Schneider, J., Dedieu, C., Le Sidaner, P., Savalle, R., & Zolotukhin, I. 2011, *Astronomy & Astrophysics*, 532, A79 [LINK]
- Tsantaki, M., Sousa, S. G., Adibekyan, V. Z., Santos, N. C., Mortier, A., & Israelian, G. 2013, *Astronomy & Astrophysics*, 555, A150 [LINK]
- Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., & Levison, H. F. 2005, 435, 459
- Valencia, D., O'Connell, R. J., & Sasselov, D. 2006, *Icarus*, 181, 545