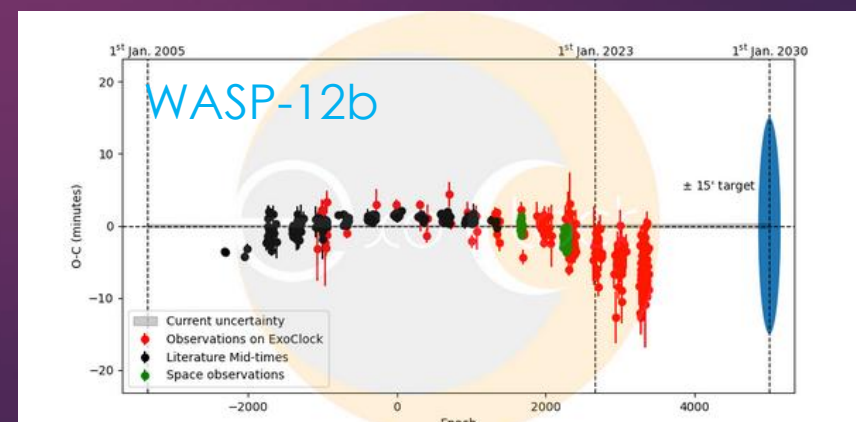
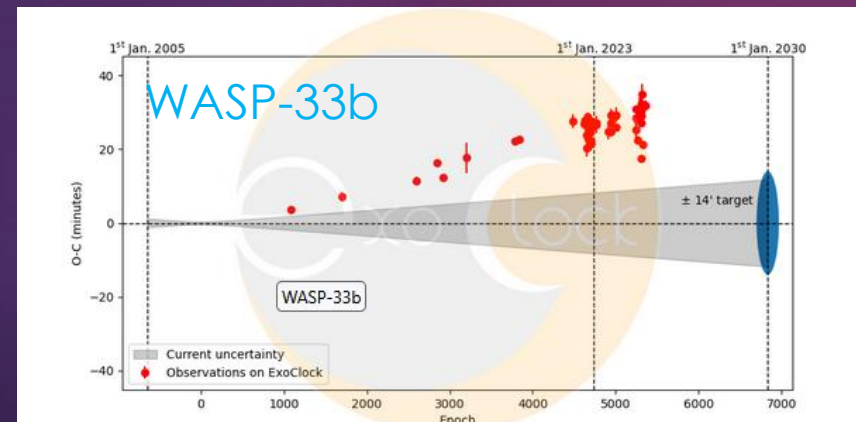
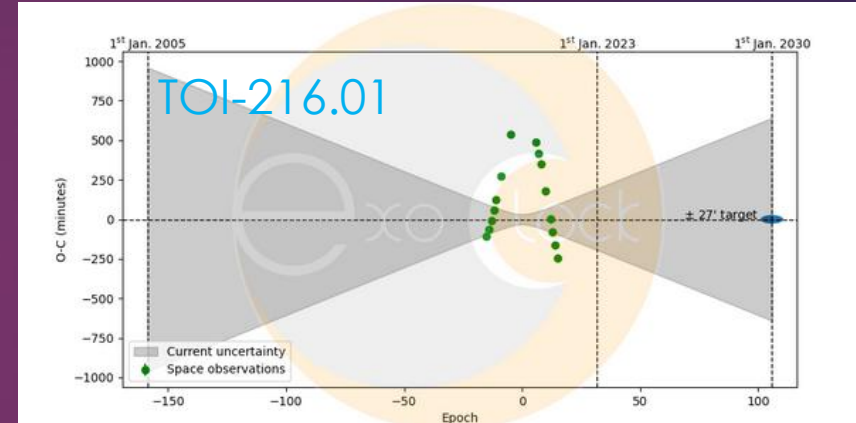
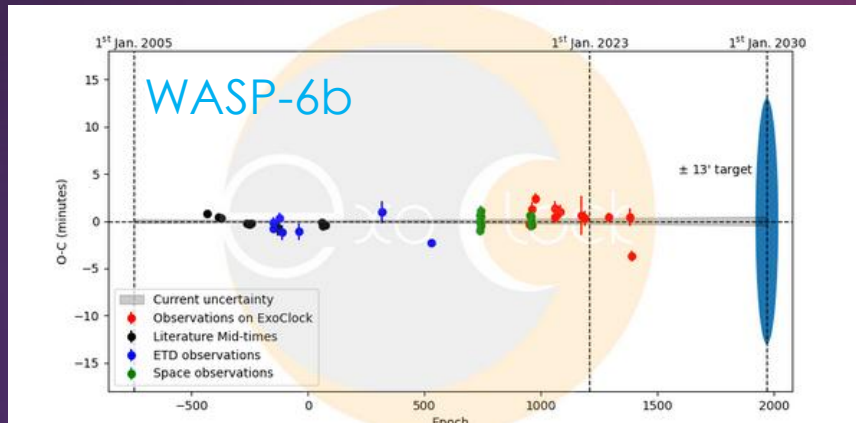


# Exploración del fascinante TTV, "transit timing variation", en exoplanetas

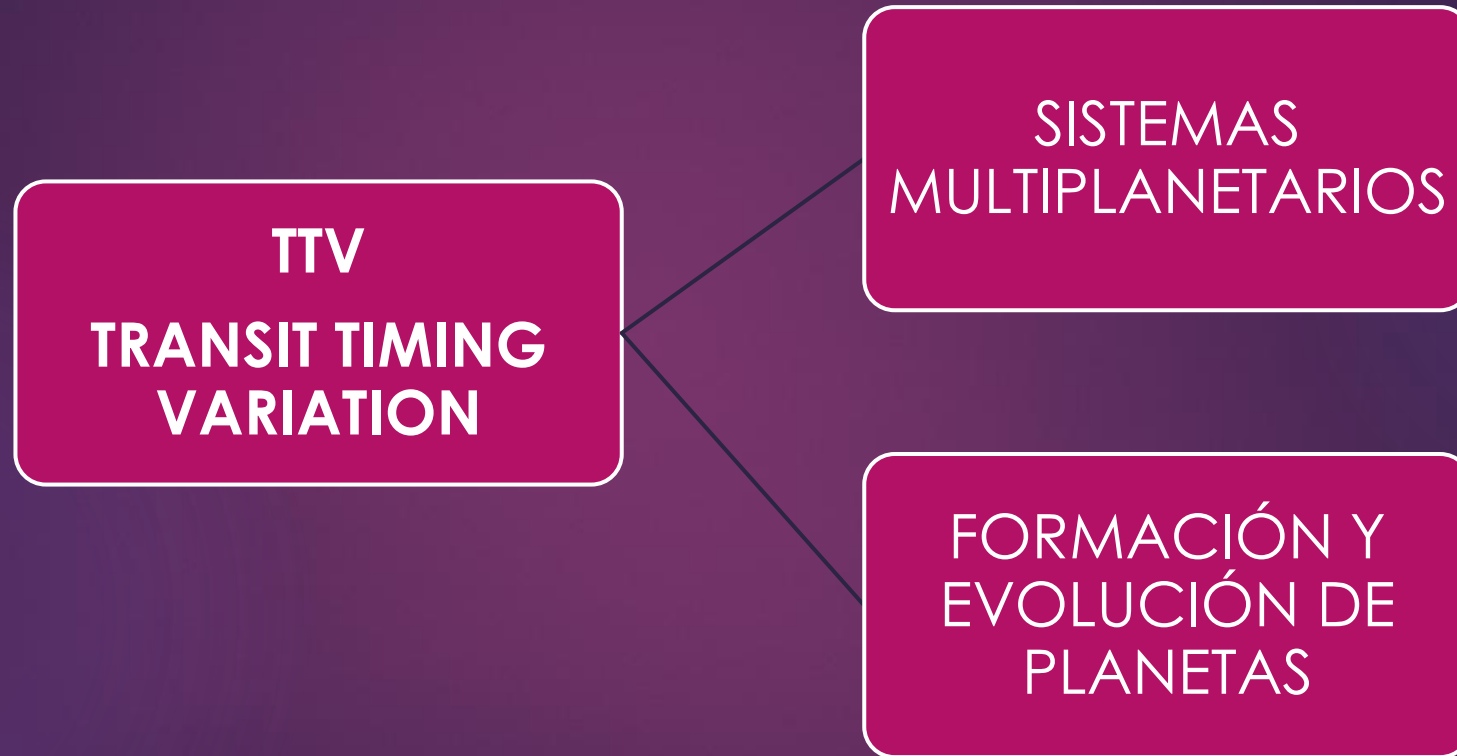
FLORENCE LIBOTTE, MARZO DE 2025, SABADELL, XXVI CONVENCIÓN

# El fenómeno de TTV

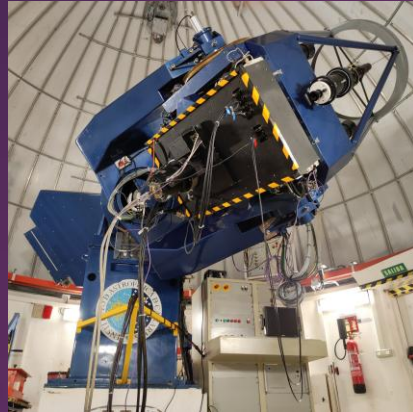
- ▶ TTV = TRANSIT TIMING VARIATION = variación de la medida del momento del tránsito....
- ▶ Las efémerides, lineales, del tránsito no se cumplen... las medidas se salen del cono de error, o siguen una curva, ...



# TTV, una fuente de información valiosa



# ¡Soy observadora del grupo de exoplanetas de Sabadell!



Observatorios de Canarias  
INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS



The TCS: 152 cm telescope  
Equipped with MuSCAT2 camera  
Mainly dedicated to exoplanets observation

Florence Libotte

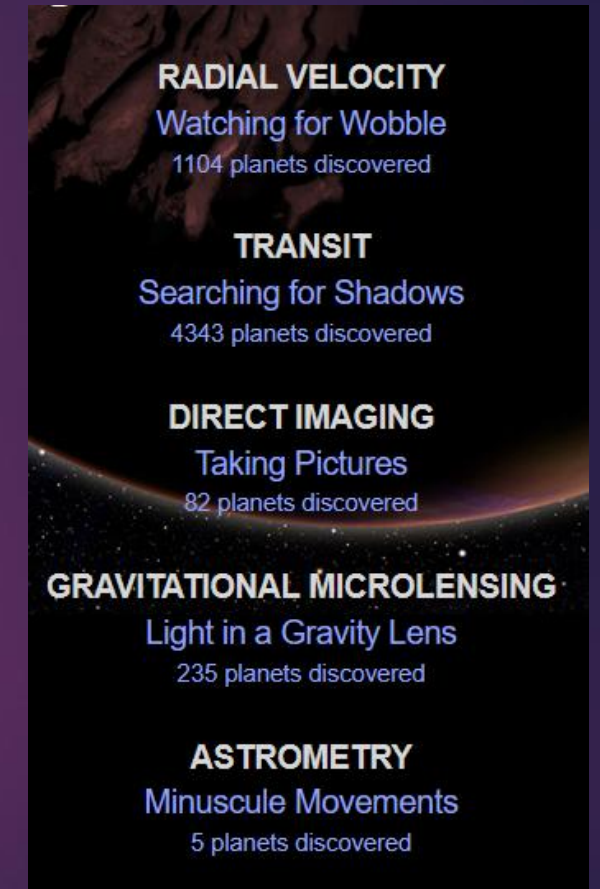


# TTV EN SISTEMAS PLANETARIOS MÚLTIPLES

# Métodos de descubrimiento de exoplaneta

1. Velocidad radial → se descubren planetas más pequeños que Júpiter, se determinan masas
2. Tránsito → radio del planeta , periodo orbital
3. Imagen directa → para planetas gigantes y alejados de su estrella
4. Microlensing
5. Astrometry

Al 3/3/2025 → web  
de la NASA



# TTV y validación de sistemas planetarios

- ▶ En 2005 se contempla el TTV como herramienta para cazar planetas

año 2010 →

## Kepler-9: A System of Multiple Planets Transiting a Sun-Like Star, Confirmed by Timing Variations

MATTHEW J. HOLMAN, DANIEL C. FABRYCKY, DARIN RAGOZZINE, ERIC B. FORD, JASON H. STEFFEN, WILLIAM F. WELSH, JACK J. LISSAUER, DAVID W. LATHAM, GEOFFREY W. MARCY, [...], AND JEROME A. OROSZ [+31 authors](#) [Authors Info & Affiliations](#)

SCIENCE • 26 Aug 2010 • Vol 330, Issue 6000 • pp. 51-54 • DOI: 10.1126/science.1195778

- ▶ Ese sistema está compuesto por dos planetas de tipo Saturno: **Kepler-9 b** y **Kepler 9c**, alrededor de una estrella de tipo solar
- ▶ Periodos: **19.24d** y **38.91d**, **resonancia 2:1**, **presentan TTV**, inversamente relacionados. Es el 1er sistema con TTV confirmado, lo que a su vez certifica la presencia de **relación gravitatoria, que gravitan alrededor de la misma estrella y que son planetas**
- ▶ Rápidamente seguido por más estudios de objetos de la misión Kepler: en 2012, entre más de 1000 planetas, se proponen 39 candidatos probables y otros más de 100 posibles (Eric B. Ford et al.)

# TTV y resonancia ¿dos caras de la misma moneda?

## Resonancia

- Relación entre 2 periodos orbitales de dos planetas alrededor de la misma estrella, matemáticamente proporcional en números enteros pequeños
- En el caso de Kepler 9: 2:1 → la orbita del primero tarda la mitad de tiempo que la del segundo.
- Pero puede ser 3:2 5:3 etc
- Se produce influencia gravitacional periódica y regular entre planetas resonantes

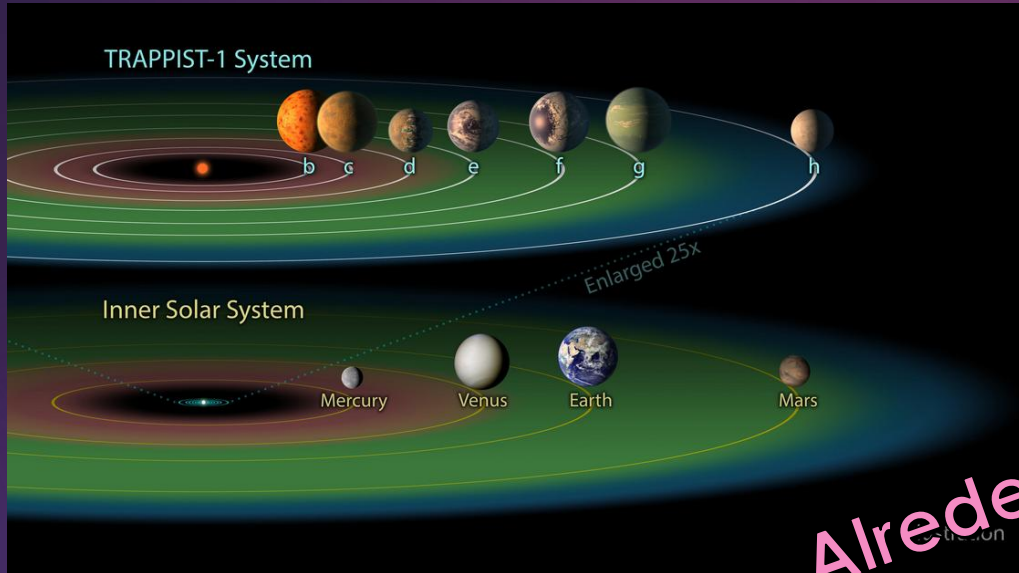
Donde se encuentra resonancia, se buscan TTV y vice-versa

**De qué dependen la amplitud de los TTV:** de la masa del planeta que perturba otro, de la eccentricidad orbital y otros factores → **¡se puede determinar la masa!**

# Una cerveza belga muy conocida: TRAPPIST



Resonancias orbitales:  
8:5, 5:3, 3:2, 3:2, 4:3 and 3:2

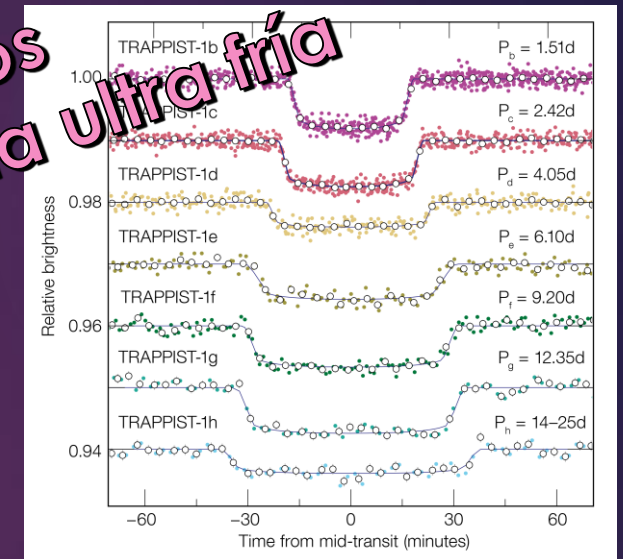


NASA/JPL-Caltech - [Catalog page](#) • Full-res ([JPEG](#) • [TIFF](#))

“For each planet, and especially for f and g, the residuals of the fit **show transit timing variations (TTVs) with amplitudes ranging from a few tens of seconds to more than 30 minutes** that indicate significant mutual interactions between the planets”,

“we used the results obtained above to investigate **the TTV signals themselves**. By performing a series of analytical and numerical N-body integrations (see [Methods](#)), we could **determine initial mass estimates for the six inner planets**, along with their orbital eccentricities” Michaël Gillon et al.

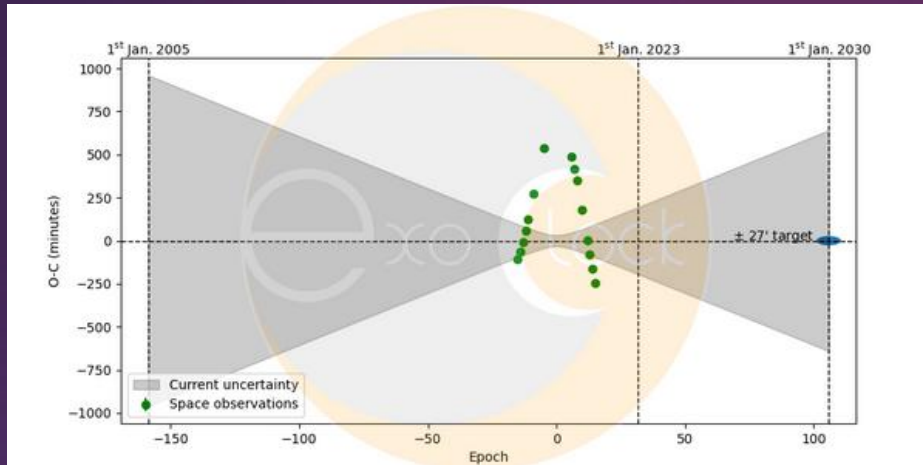
7 mundos rocosos  
Alrededor de una enana ultra fría



By ESO/M. Gillon et al. -  
<http://www.eso.org/public/chile/images/eso1706h/> (TIFF), CC BY 4.0,

## TOI-216, sistema de 2 planetas **cuyas masas se midieron mediante estos TTV**

TOI-216.01



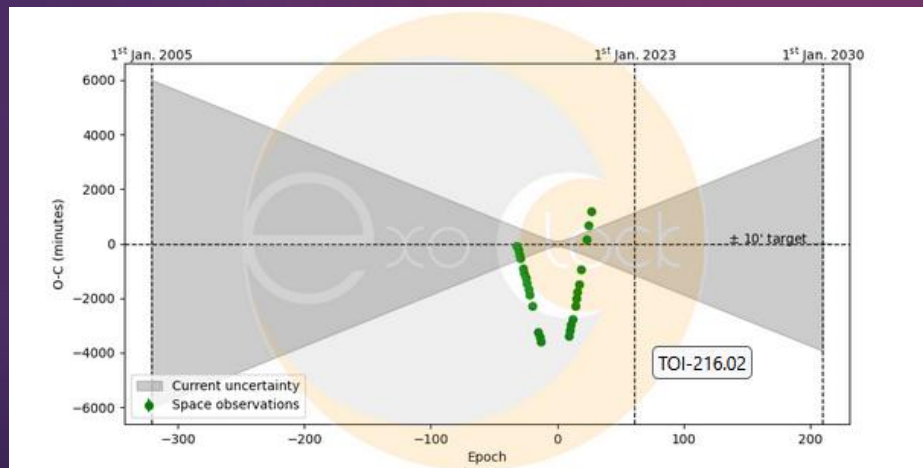
Mag R:  
11.903

Depth 20.94 mmag.  
Last TTV: -245 minutes (2021)  
**Masa: 0.0558** ( $\pm 0.002$ )  $M_J$

**P=34.5073 d**

**Resonancia 2:1**

TOI-216.02



Depth 4.06 mmag.  
Last TTV: +1181.95 minutos.  
**Masa: 0.528** ( $\pm 0.02$ )  $M_J$

**P=17.203 d**

# TTV y descubrimiento de planetas: TOI-2015c

Ref. Khalid Barkaoui, October 19, 2024, TOI-2015b: a mini-Neptune in strong gravitational interaction with an outer non-transiting planet

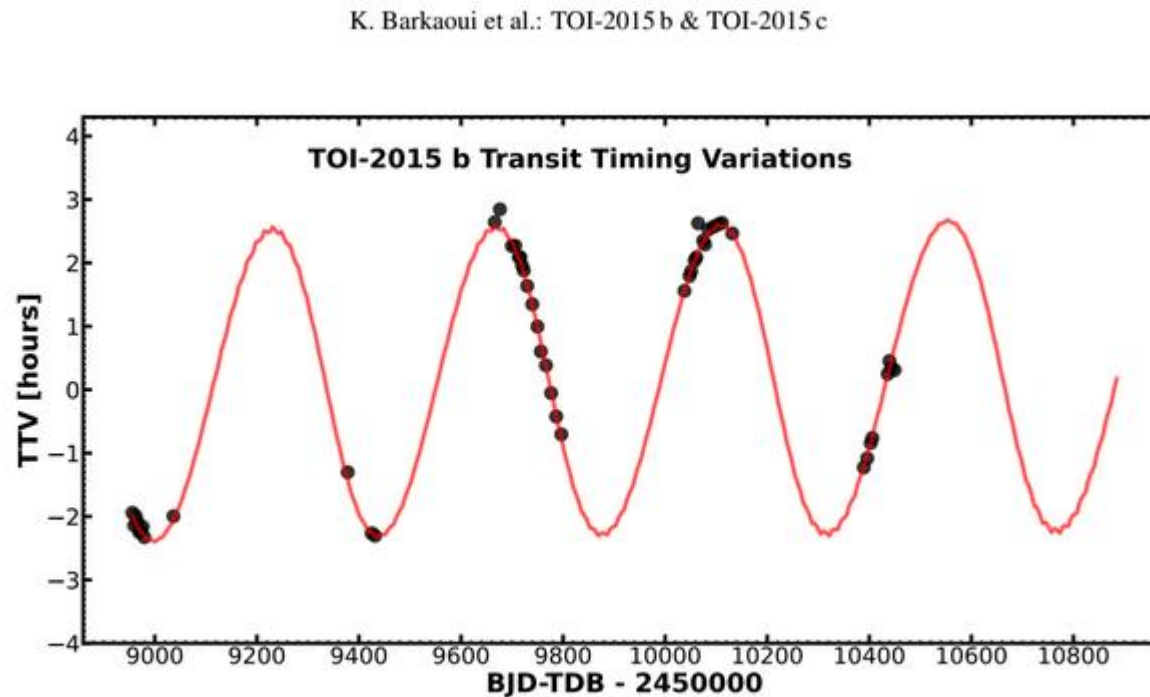


Fig. 11: Transit timing variations (TTVs) measurements for TOI-2015 b from TESS and ground-based facilities. The red line is the best-fit transit-timing model.

# Detección de un planeta invisible

- ▶ 1. determinación de los parámetros estelares: temperatura  $T_{\text{eff}}: 3200^{\circ} \pm 75 \text{ K}$ , Masa: entre 0.28 y 0.33 Masa solar y Radio:  $0.339 R_{\text{sol}}$ , tipo M4, situado a 47 pc, Mag. Ap. en V: 16.11
- ▶ 2. TOI-2015b:, Bajada del tránsito: 8394 ppm, radio inicial:  $3.8 \pm 2.6 R_{\text{Tierra}}$ , Periodo: 3.34916 d
- ▶ 3. **TOI-2015c NO TRANSITA** → se desconoce su periodo → necesidad de analizar los TTV observados en TOI-2015b
  - ▶ **Hipotesis: resonancia de 2:1, 5:3 y 5:2** → aplicando modelos existentes, lo mejor es 5:3 ( con orbitas casi circulares)
- ▶ 4. Descartar otros planetas que transiten → casi descartado, salvo que fueran demasiado pequeños para ser detectados

## Obtención de resultados TOI-2015b

- ▶ mejora de los datos de TOI-2015b, especialmente de su masa:  $3.311 \pm 0.012 R_{\text{tierra}}$  → densidad media:  $1.5 \text{ g/cm}^3$  → Tipo **Neptuno**
- ▶ TOI-2015b compatible con **planeta de agua al 70%**, podría tener atmósfera entre 5-10% de su masa

## Descubrimiento de TOI-2015c

- ▶ Los TTV de TOI-2015b permiten identificar un compañero, TOI-2015c que **no transita**, en una relación de **resonancia cercana a 5:3**, aunque no se descarten otros escenarios
- ▶ **Periodo orbital:  $5.582904 \text{ d} \pm 0.0004 \text{ d}$ , su masa:  $9.52 \pm 0.42$  Masa terrestre; temperatura:  $450^\circ\text{K}$ , no se conoce el radio**

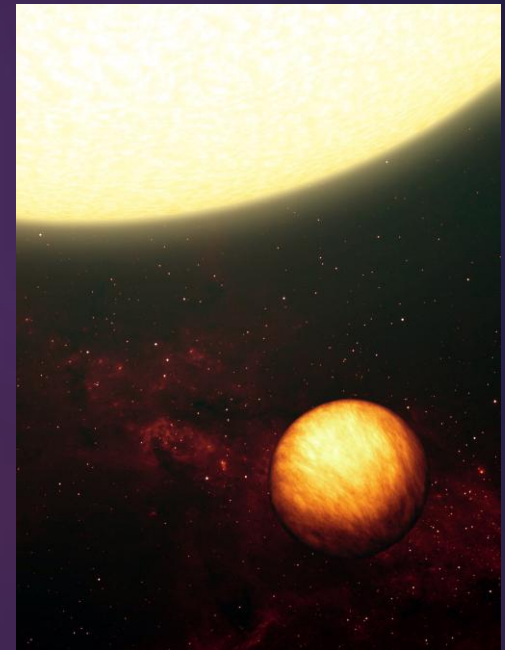
**TTV → Otro método para confirmar y descubrir exoplanetas**

# TTV Y FORMACIÓN Y EVOLUCIÓN DE PLANETAS

# Misterio de los gigantes pegados a su estrella

- ▶ En 1995 Michel Mayor, Didier Queloz anuncian el descubrimiento de **51 Pegasi b**, planeta gigante gaseoso extremadamente cerca de su estrella, a 0.052 UA, con P orbital de 4.23 días,  $R=1.9 R_J$
- ▶ La conmoción es mayúscula ¿Cómo ha podido formarse allí?
- ▶ ¿Cómo puede mantenerse un planeta así tan cerca de su estrella?

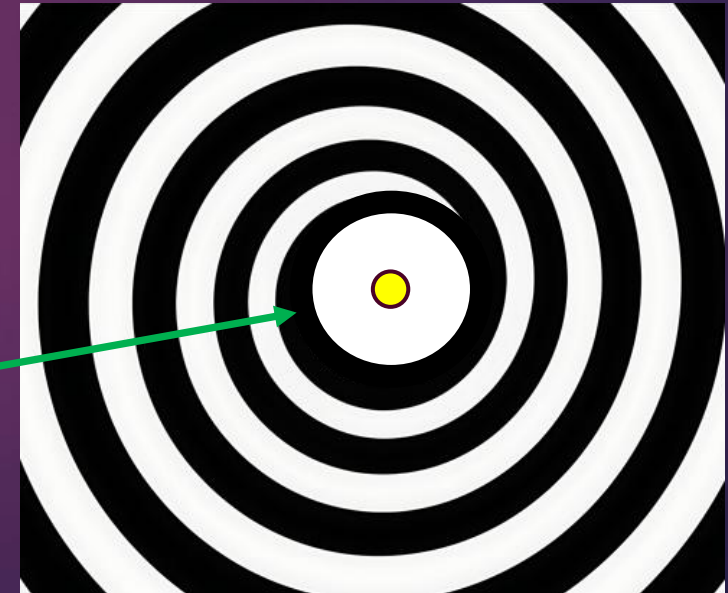
Tres Estadounidenses sugieren una posible **migración planetaria** ( D. Lin, P. Bodenheimer, D. Richardson). Se habría formado a varias UA, y se habría acercado a su estrella siguiendo un camino en espiral, hasta detenerse a corta distancia



De NASA/JPL-Caltech -  
<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA01938>, Dominio público,

# Decaimiento orbital de planetas – “orbital decay”

- ▶ Ocurre en sistemas en formación, con disco protoplanetario
- ▶ la órbita de un objeto celeste se reduce con el tiempo, acercándose progresivamente a su estrella
- ▶ Se producen fricciones, el planeta pierde energía y cae
- ▶ la tasa de cambio se mide en milisegundos por año, con signo negativo
- ▶ Estabilización en órbita baja



# Decaimiento orbital: WASP-12b → WASP-12Ab, único confirmado

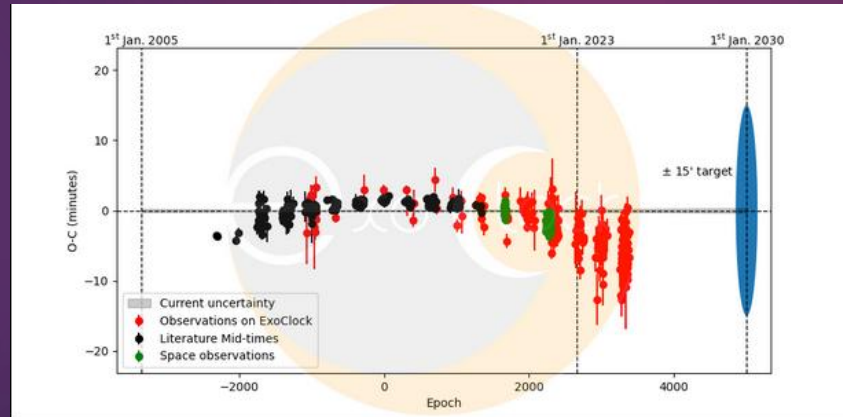
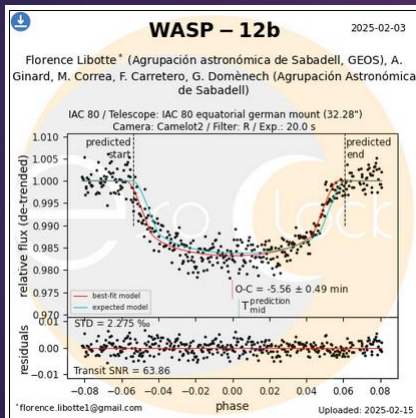
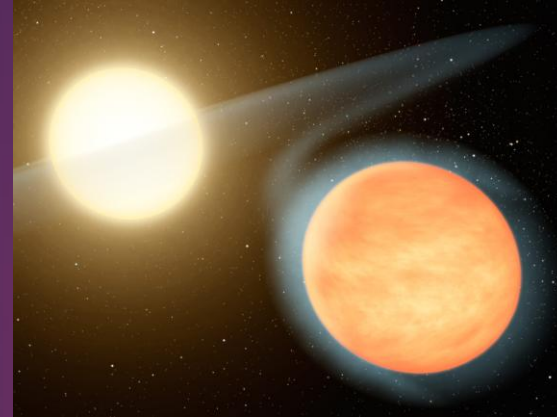
A 1200 AÑOS LUZ DE LA TIERRA

## El planeta con forma de huevo de la Vía Láctea que es dos veces más grande que Júpiter

Se trata de WASP-12b, un gigante planetario gaseoso que podría desaparecer en 10 millones de años. Te contamos todos los detalles.



Planeta WASP-12b | NASA



De NASA/JPL-Caltech -  
[http://www.nasa.gov/mission\\_pages/spitzer/multimedia/pia13691.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/spitzer/multimedia/pia13691.html), Dominio público,

## WASP-12A

temperatura de la estrella: 6300°K +/- 200

Mag R: 11.288; 1.7 R Sol y 1.4 M Sol

Edad: 1.7 +/- 0.8 Gyr

## WASP-12Ab

1.47 MJup – 1.9 Rjup - T°: +/- 2593°K

Periodo: 1.09141937 (± 0.0) day

Semi-Major Axis: 0.02344 (± 0.00056) AU

Eccentricity: 0.0

Duración: 3.0 h

Bajada: 17.81 mmag

Campo magnético

Sufre **fuerzas de marea** descomunales → **¡no es esférico! → forma de huevo!!**

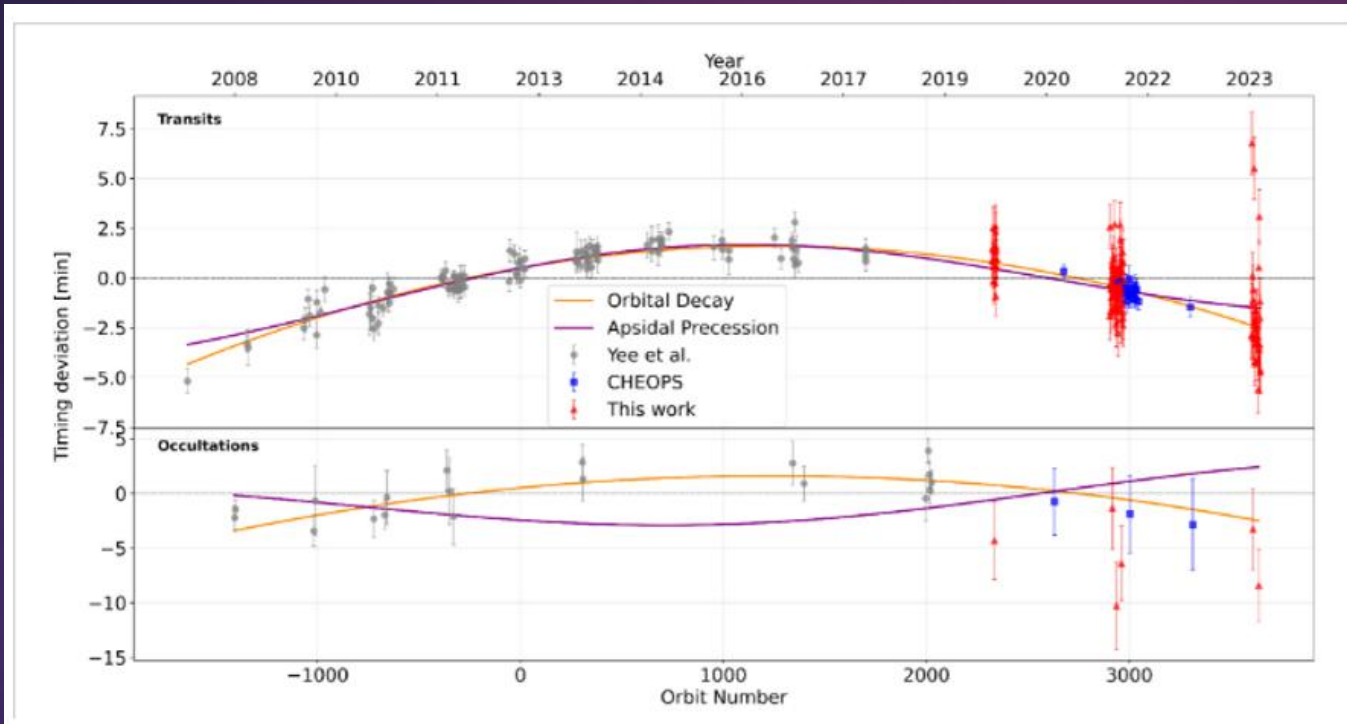
**Pierde masa** que queda absorbida por la estrella

## Datos del decaimiento orbital

Tasa de decaimiento: -30.23±0.82 ms/yr

→ ¡En 10 mio de años se destruirá!

# WASP-12b ¿Decaimiento orbital o precesión apsidal?



- ▶ Shen, Zoutong confirma en 2024 el decaimiento orbital y descarta precesión apsidal
- ▶ Dice: "updating the orbital decay rate to  $-26.310 \pm 0.901 \text{ ms yr}^{-1}$ . My analysis strongly favors the orbital decay model over constant period and apsidal precession models"

**Su conclusión: es decaimiento orbital...**

Zoutong Shen, New Transit Timing Observations of WASP-12b from TESS Sectors 71 and 722024 *Res. Notes AAS* 8 228DOI 10.3847/2515-5172/ad7946

¿Más casos de decaimiento orbital?

**Se buscan activamente...**

WASP-43 b, WASP-103 b, HAT-P-23 b, KELT-16 b, WD 1856+534 b, WTS-2 b, todos Júpiter calientes → no evidence of orbital decay (2024, Searching for tidal orbital decay in hot Jupiters, Efrain Alvarado et al.)

MuSCAT2 , Yugo Kawai, de la Universidad de Tokyo, también busca candidatos!

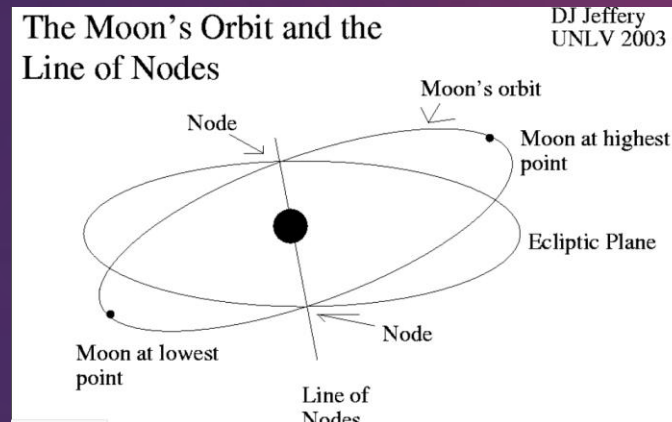
Y otros equipos por el mundo

**INVESTIGACIONES DE MUCHOS AÑOS...**

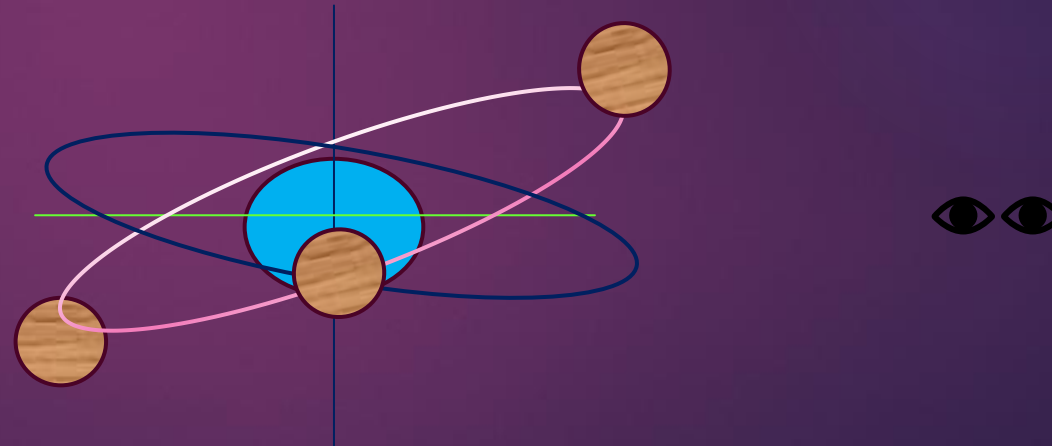
# Precesión nodal

precesión nodal es la precesión del plano orbital de un satélite (o un planeta) alrededor del eje de rotación de un cuerpo astronómico como la Tierra (una estrella). Esta precesión se debe a **la naturaleza no esférica de un cuerpo en rotación, lo que crea un campo gravitacional no uniforme**.

Pongamos que la órbita del planeta es circular



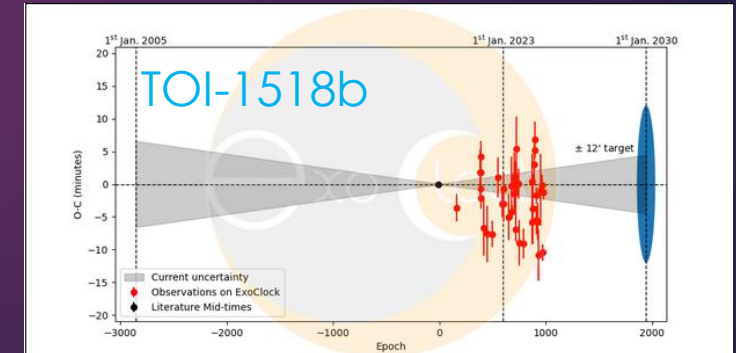
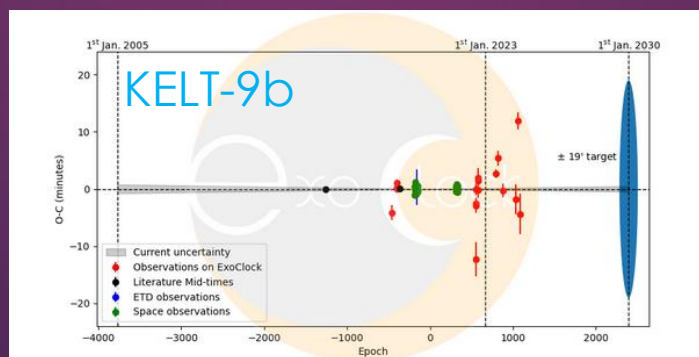
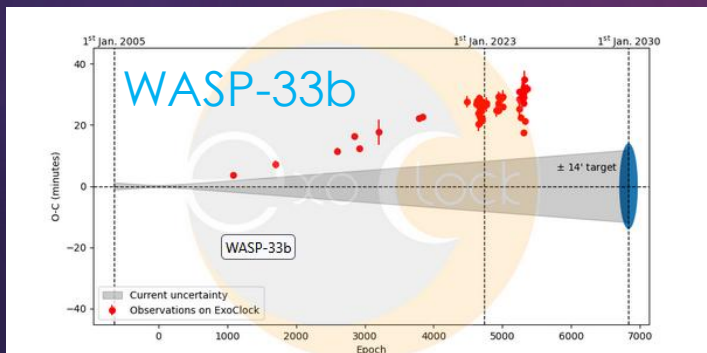
[https://www.physics.unlv.edu/~jeffery/astro/moon/diagram/moon\\_node\\_line.html](https://www.physics.unlv.edu/~jeffery/astro/moon/diagram/moon_node_line.html)



**¡con el tiempo, el planeta deja de transitar!**

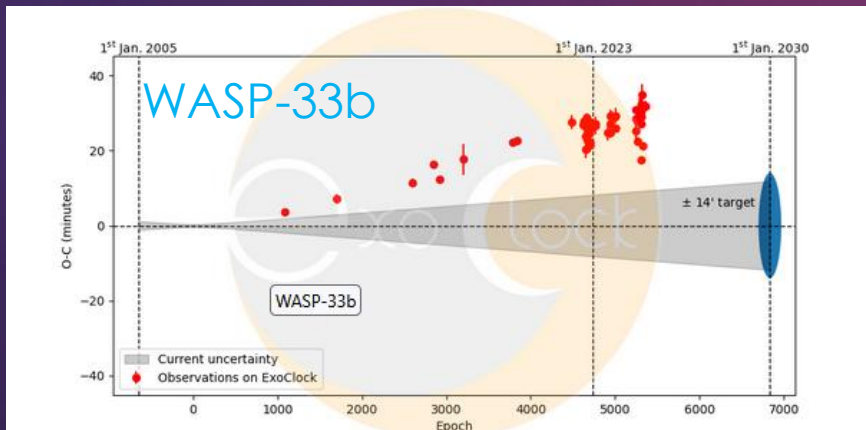
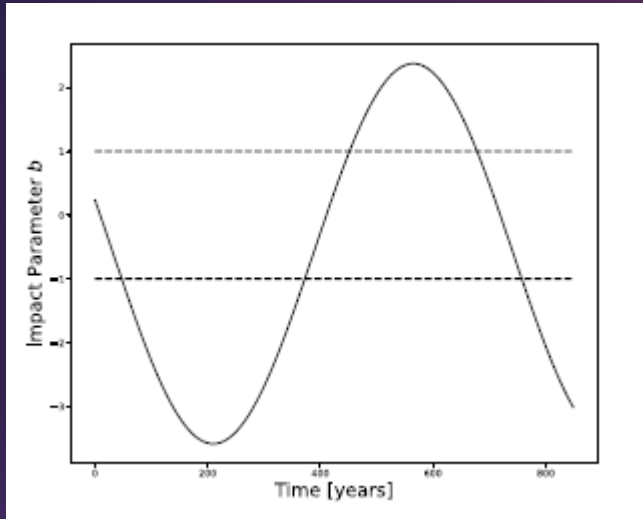
# Precesión nodal: condiciones favorables

- ▶ Estrella de rotación rápida → achatamiento pronunciado (factor J2)
- ▶ Planeta masivo girando muy cerca a su estrella → planetas de tipo Hot Júpiter, con periodos del orden de pocos días
- efectos gravitatorios fuertes
- Periodos de precesión obtenidos: 200 – 1000 años
- ▶ Casos documentados: poquitos... WASP-33b, Kepler-13Ab, KELT-9b, TOI-1518b



# Ejemplo de precesión nodal: WASP-33b

## Parámetro de impacto



### WASP-33 (V807 And) – Delta Scuti

temperatura de la estrella: 7100 - 7430°K +/- 100°

Mag R: 7.94; 1.6 R Sol y 1.6 M Sol

Edad: 0.1 Gyr;

Rotación rápida:  $V \sin i_s = 85.6 \text{ km s}^{-1}$

### WASP-33b

2.8 (2.1) MJup – 1.6 RJup

Periodo:  $1.2198669 \pm 1.2\text{e-}06$  days

Duración: 2.87 h

Bajada: 14.52 mmag

T°: +/- 2800°K

### Datos de la precesión

Velocidad de precesión nodal: **0.507 deg/año**

Periodo: **709 años** (error 34 años)

Visibilidad del tránsito: **aprox 20% del P prec**

**Tránsito visible desde 1977 → 2055** (+/- 2 años)

Paper 2025 (A.M.S. Smith) : TTV  $\leftarrow \rightarrow$  new ephemerid

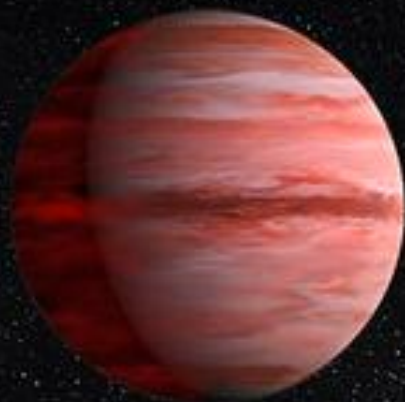
Ref: Nodal precession of WASP-33b for 11 yr by Doppler tomographic and transit photometric observations , Noriharu Watanabe, Norio Narita, Enric Pallé et al, MNRAS 512, 4404–4418 (2022), reconfirmado en 2024

# CONCLUSIÓN

## Fascinantes TTV

1. Resonancias  $\rightarrow$  Masas  $\rightarrow M+R =$  tipo de planetas
2. Descubrimiento de planetas invisibles
3. Decaimiento orbital, sistemas protoplanetarios
4. Datos orbitales, precesión nodal

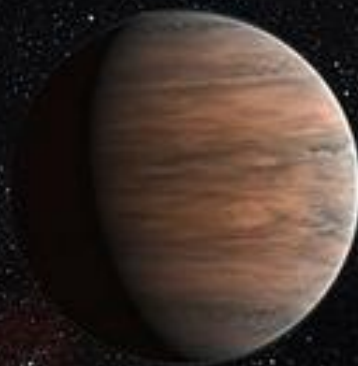
WASP-12b



WASP-6b



WASP-31b



WASP-39b



HD189733b



HAT-P-12b



WASP-17b



WASP-19b



HAT-P-1b



HD209458b



**¡Muchas gracias  
por vuestra atención!**