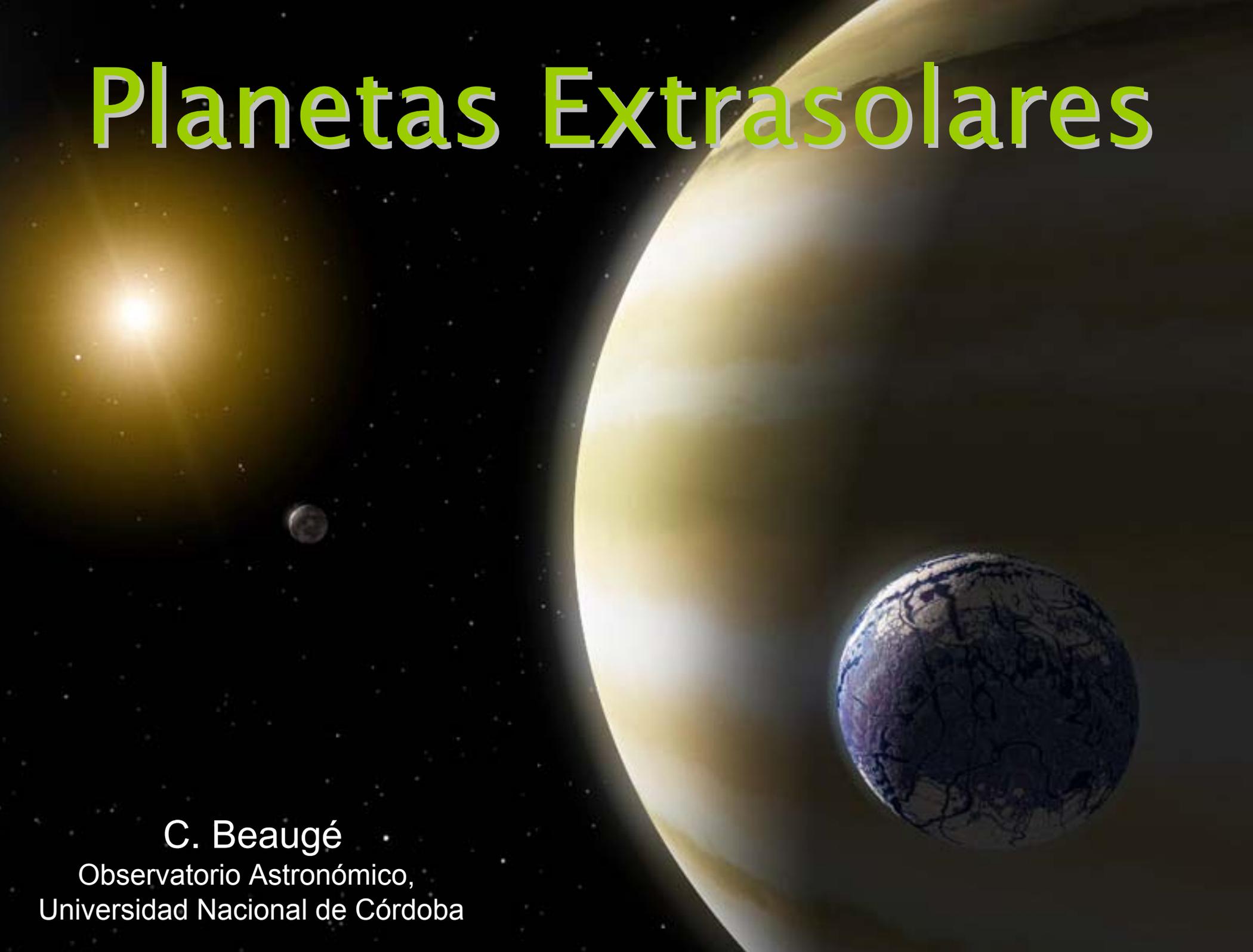


Planetas Extrasolares



C. Beaugé
Observatorio Astronómico,
Universidad Nacional de Córdoba

ASTRONOMÍA: ESTUDIO DEL COSMOS



QUE ESTUDIAMOS?

Origen, Composición & Evolución

- ⇒ • Quienes somos?
- De donde venimos?
- De que estamos hechos?
- Adonde vamos?

La pregunta mas importante: Estamos solos?

LAS PREGUNTAS:

- Existe vida en otros planetas?

No sabemos

Probablemente no en el Sistema Solar

- Existe vida en planetas alrededor de otras estrellas?

⇒ Existen planetas fuera del Sistema Solar?

Si. Actualmente conocemos 245 Exoplanetas.

OBJETIVOS DE LA CHARLA:

- Como son los exoplanetas?

Son parecidos a nuestro Sistema Solar?

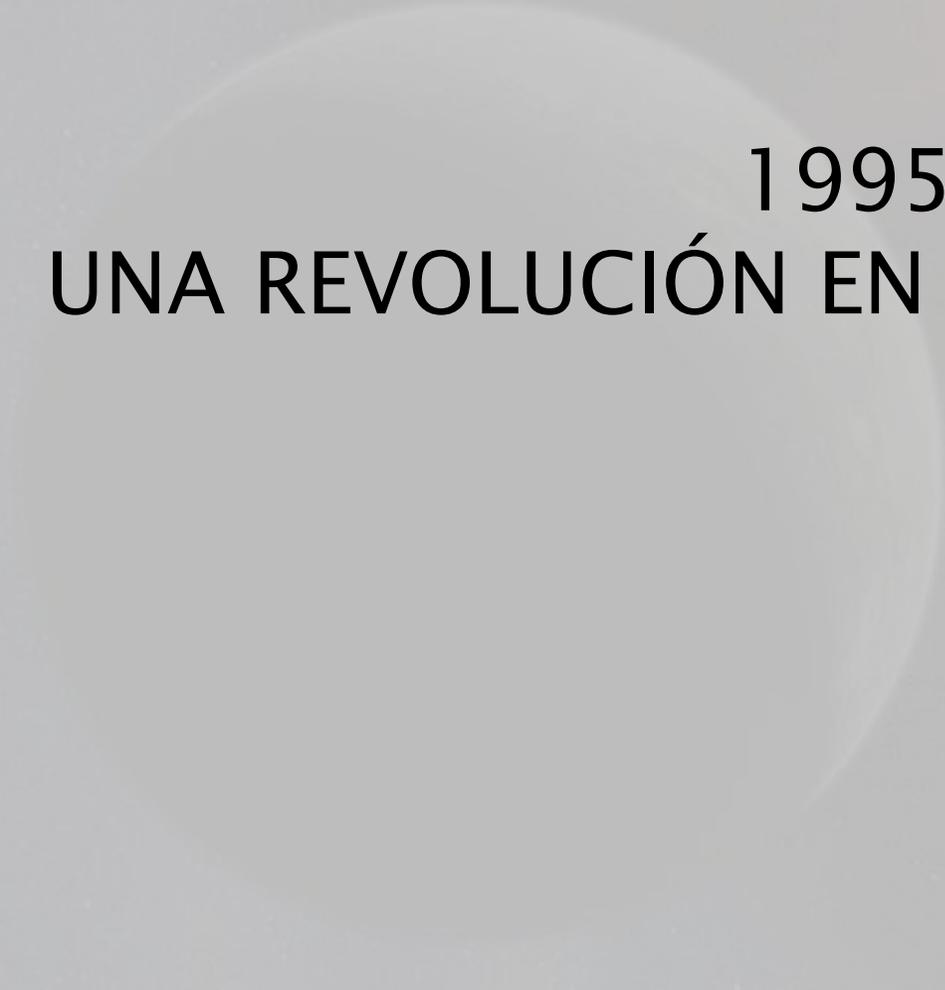
Existen planetas terrestres?

- Como sabemos que están ahí?

- Algún exoplaneta puede ser habitable?

Cuales son las condiciones de habitabilidad?

- Que sabemos, y que no sabemos de exoplanetas?



1995
UNA REVOLUCIÓN EN LA ASTRONOMÍA

1995: UNA REVOLUCIÓN EN LA ASTRONOMIA

Michel Mayor & Didier Queloz descubren el primer exoplaneta alrededor de una estrella de secuencia principal.

La estrella: 51 Pegasi
* G2 , d=14.7 pc

El planeta: $M \sim 0.5 M_{\text{jup}}$

Circular No. 6251

**Central Bureau for Astronomical Telegrams
INTERNATIONAL ASTRONOMICAL UNION**

Postal Address: Central Bureau for Astronomical Telegrams
Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge, MA 02138, U.S.A.
IAUSUBS@CFA.HARVARD.EDU or FAX 617-495-7231 (subscriptions)
BMARSDEN@CFA.HARVARD.EDU or DGREEN@CFA.HARVARD.EDU (science)
Phone 617-495-7244/7440/7444 (for emergency use only)

51 PEGASI

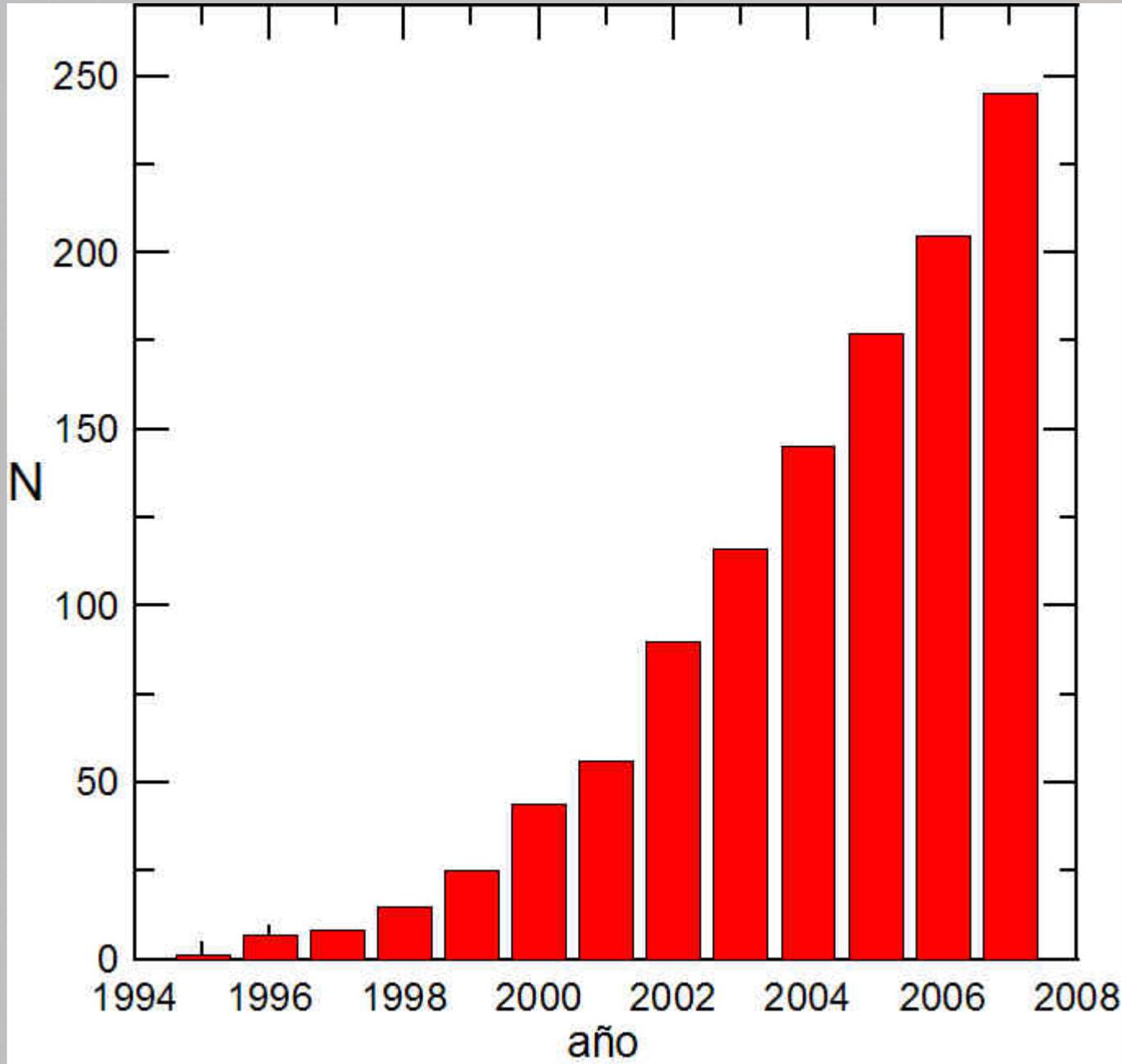
M. Mayor and D. Queloz, Geneva Observatory, have reported the discovery of a Jupiter-mass object in orbit around the solar-type star 51 Peg. The announcement was made in Florence on Oct. 6 at the Ninth "Cambridge" Workshop on "Cool Stars, Stellar Systems, and the Sun". The claim is based on 18 months of precise Doppler measurements made with the ELODIE spectrograph of the Observatoire de Haute-Provence. The parameters of the orbital motion are as follows: $P = 4.2293 \pm 0.0011$ days, $e = 0$ (assumed), $K = 0.059 \pm 0.003$ km/s, $T_0 = 2449797.773 \pm 0.036$. The minimum mass of the companion is 0.47 ± 0.02 Jupiter mass. Alternative explanations for the radial-velocity variation (pulsation or spot rotation) seem to be ruled out by the absence of any significant corresponding photometric variation.

Following the Oct. 6 announcement, confirmation of the 4.2-day radial-velocity variation was obtained in mid-October by G. Marcy and P. Butler (San Francisco State University, University of California at Berkeley) at the Lick Observatory, as well as by a joint team from the Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics (R. Noyes, S. Korzennik, M. Krockenberger and P. Nisenson), the High Altitude Observatory (T. Brown, T. Kennelly and C. Rowland) and Pennsylvania State University (S. Horner).

G. Burki, M. Burnet and M. Kuenzli, Geneva Observatory and Lausanne University, communicate: "Intensive photometric monitoring of 51 Peg has been carried out at the European Southern Observatory. There is no evidence for eclipses in the system. The rms of the V magnitude (on 17 nights) is 0.037, two comparison stars being used. A 4.2-day photometric variability larger than 0.002 mag can be ruled out."

NO FUE UN CASO AISLADO....

Número de Exoplanetas hasta setiembre 2007



CASOS DE ESPECIAL INTERES

Aunque en muchos casos solo conocemos 1 exoplaneta por estrella,

EXISTEN TAMBIÉN INDICIOS DE SISTEMAS PLANETARIOS

24 SISTEMAS PLANETARIOS

- 17 ESTRELLAS CON 2 PLANETAS
- 5 ESTRELLAS CON 3 PLANETAS (Ups And, Gl581, ...)
- 2 ESTRELLAS CON 4 PLANETAS (55 Cnc, HD160691)

Recordemos: nuestro Sistema Solar tiene 8 planetas

COMO SON DETECTADOS LOS EXOPLANETAS?

COMO SON DETECTADOS LOS EXOPLANETAS?

En general, los exoplanetas NO son observados

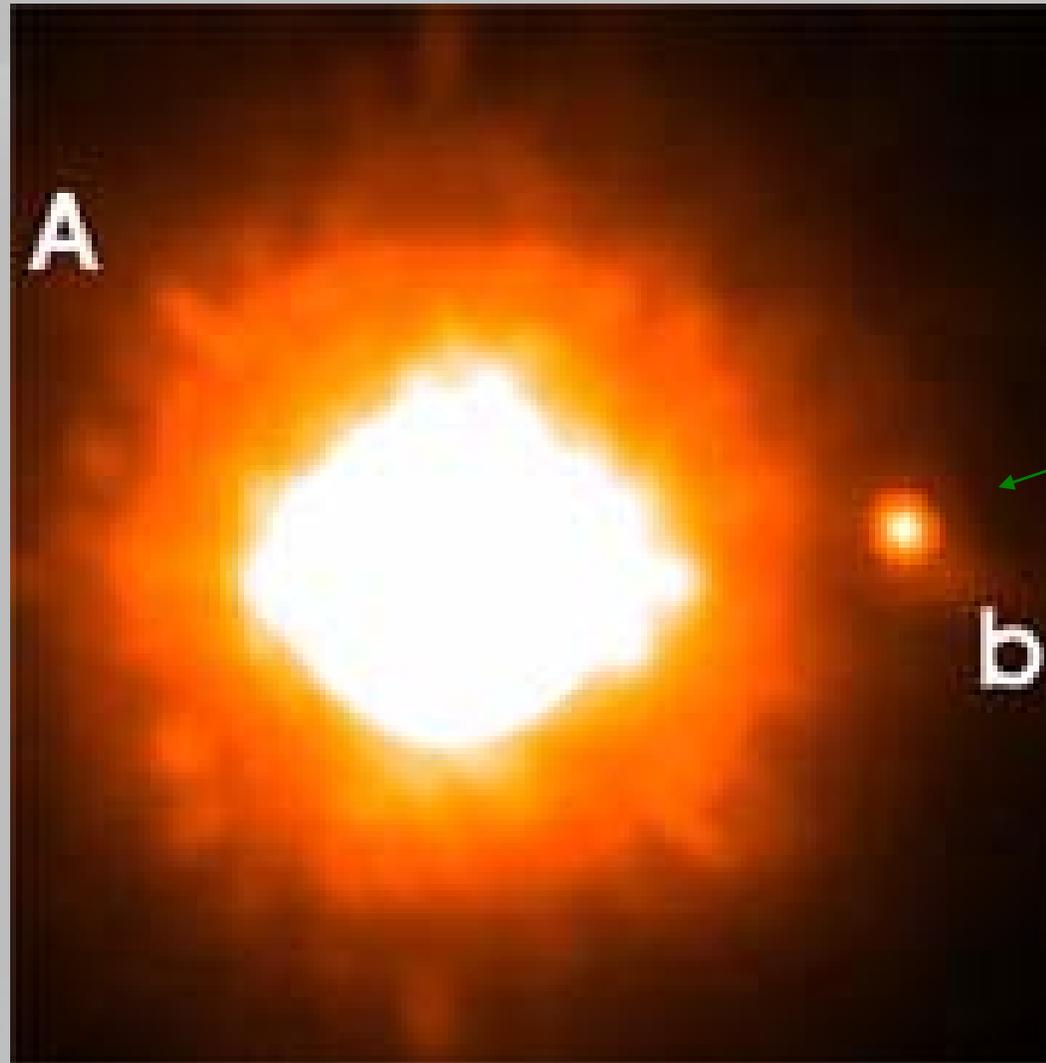
son objetos de muy baja luminosidad ($\sim 10^{-9} L_{\text{sol}}$)

Solo 4 exoplanetas han sido observados.

Ejemplo:

GQ Lupi

(observado con VLT)



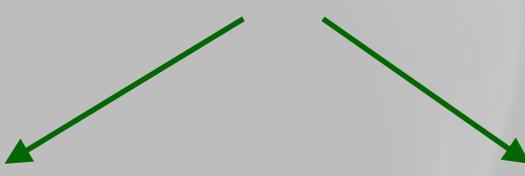
EXOPLANETA!!

COMO SON DETECTADOS LOS EXOPLANETAS?

Si no los vemos, como sabemos que están ahí?

Intentando deducir su existencia a través de efectos sobre la estrella (brillo y posición)

⇒ Metodos Indirectos de detección de Exoplanetas

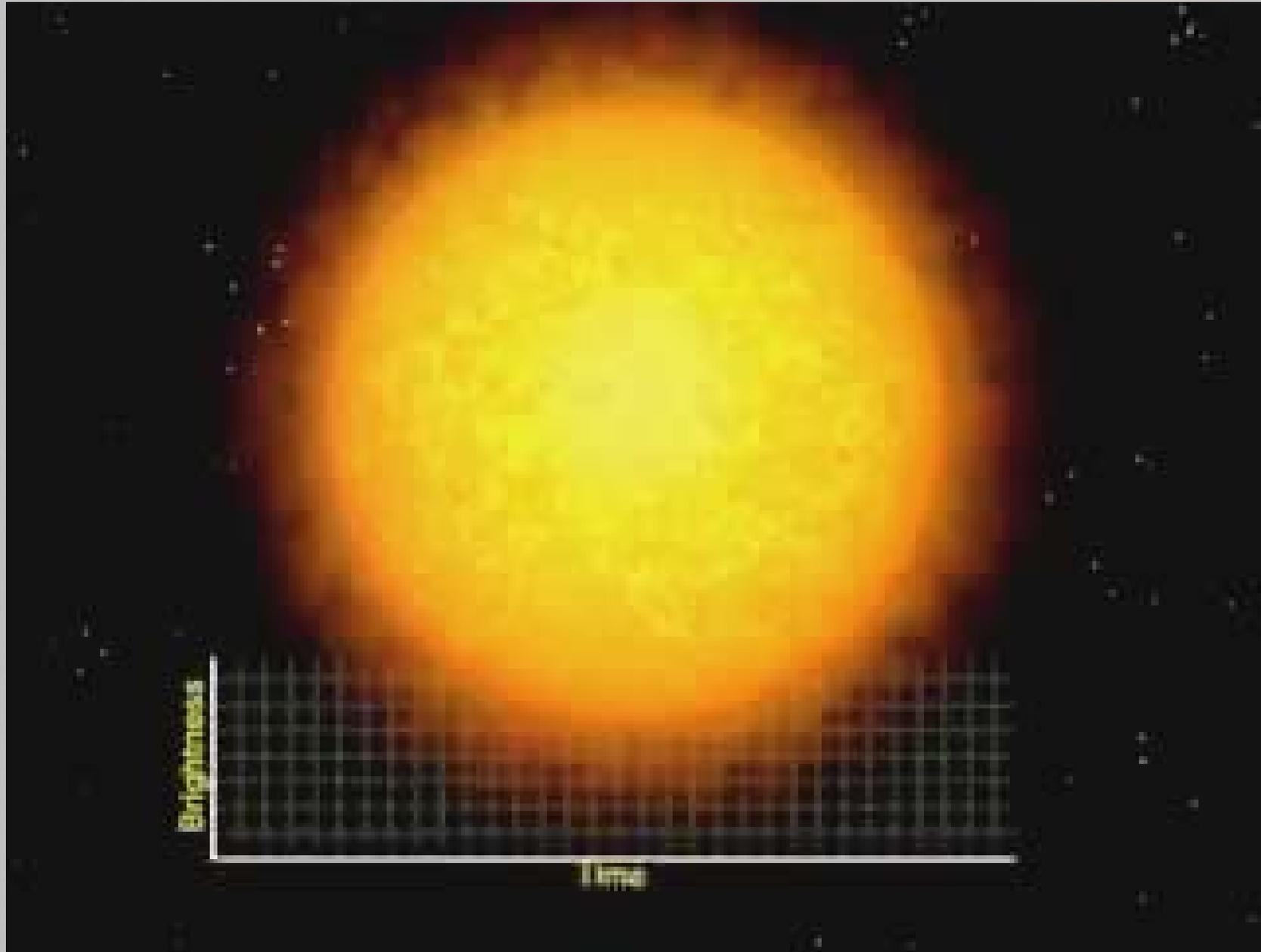


TRANSITO

VELOCIDAD RADIAL

(DOPPLER)

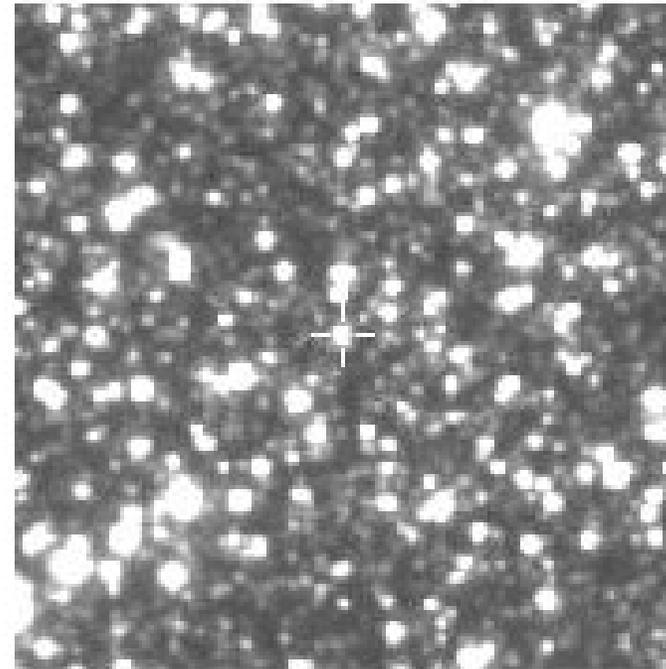
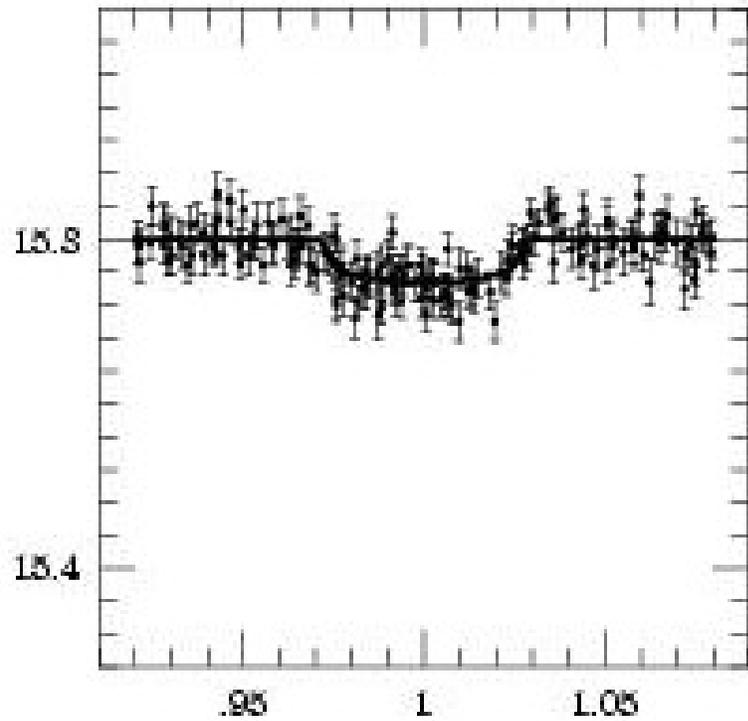
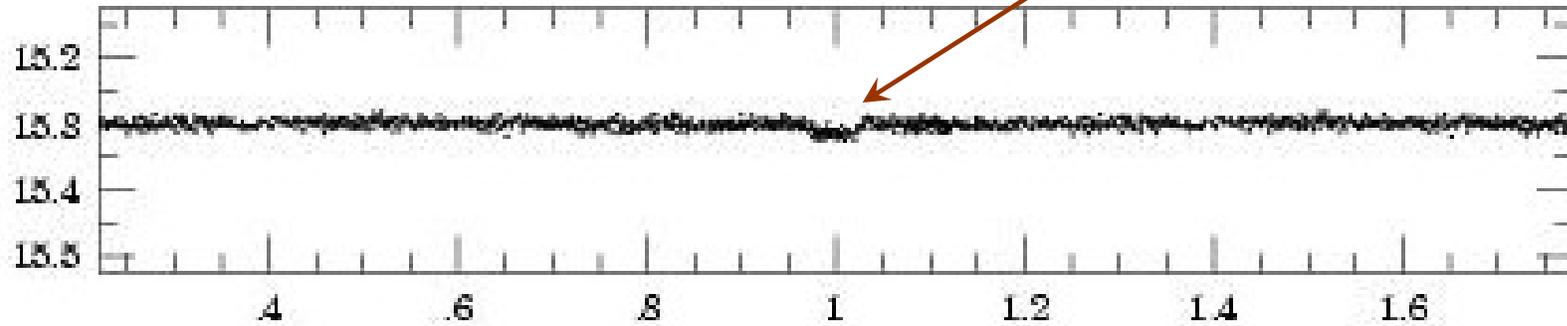
1. TRANSITO (eclipse parcial de la estrella)



1. TRANSITO

planeta!!

OGLE-TR-56



1. TRANSITO

RESULTADO:

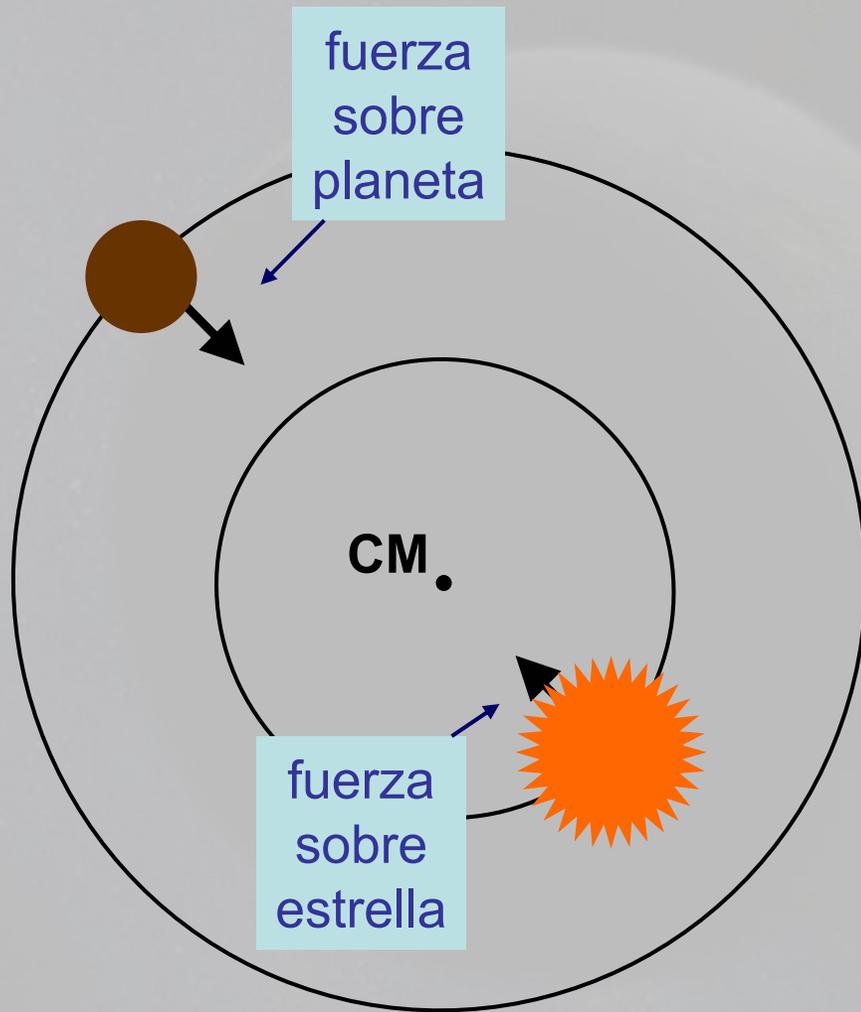
- Periodo \Rightarrow distancia a la estrella
- Tamaño sombra \Rightarrow \sim masa del planeta

LIMITACIONES:

- Solo se pueden observar planetas cuyas órbitas pasen entre la estrella y el observador
- Mas fácil detectar planetas gigantes (mayor sombra)
- Un planeta como la Tierra seria indetectable

2. MÉTODO DOPPLER

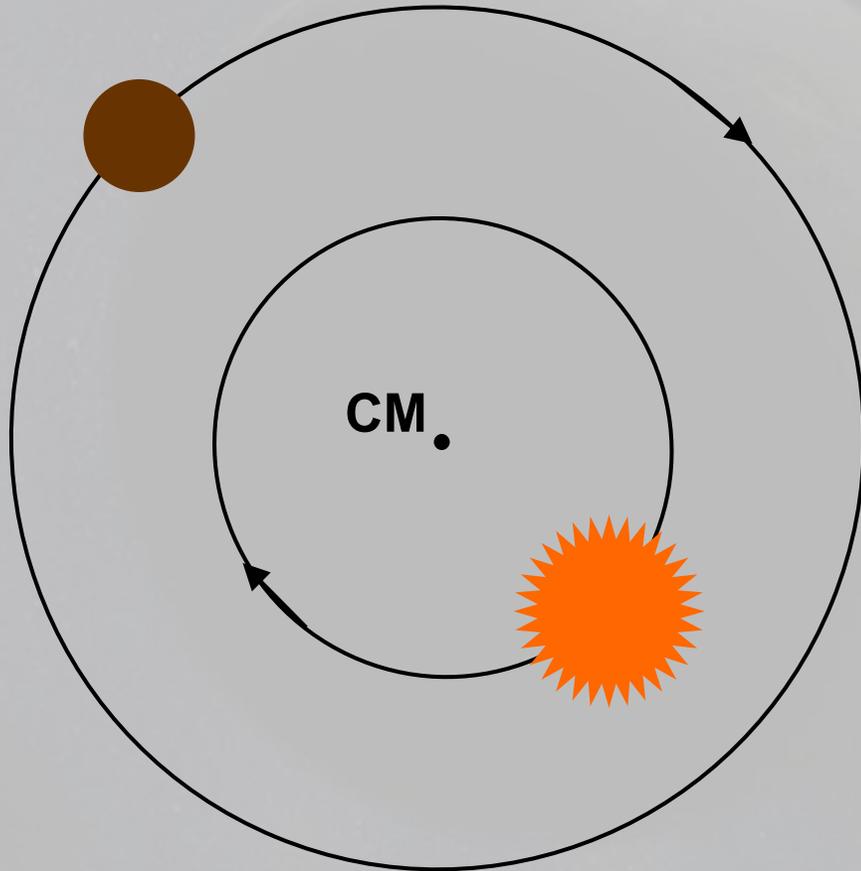
De igual forma que la estrella atrae al planeta, el planeta también atrae a la estrella



Principio de Acción y Reacción
(Isaac Newton)

2. MÉTODO DOPPLER

Ambos cuerpos “orbitan” su Centro de Masa comun



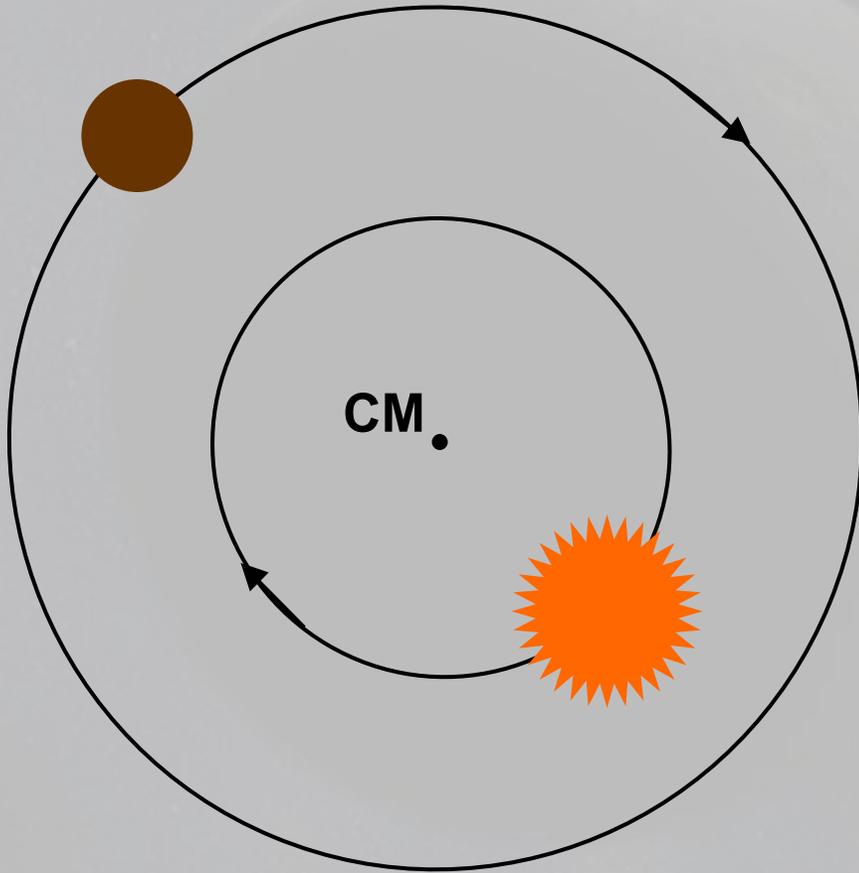
⇒ La presencia de planetas causa:

- a). Oscilaciones en la posición de la estrella en el cielo
- b). Variaciones periódicas en su velocidad

2. MÉTODO DOPPLER

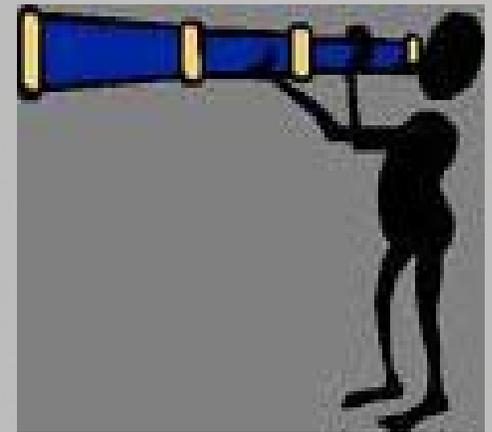
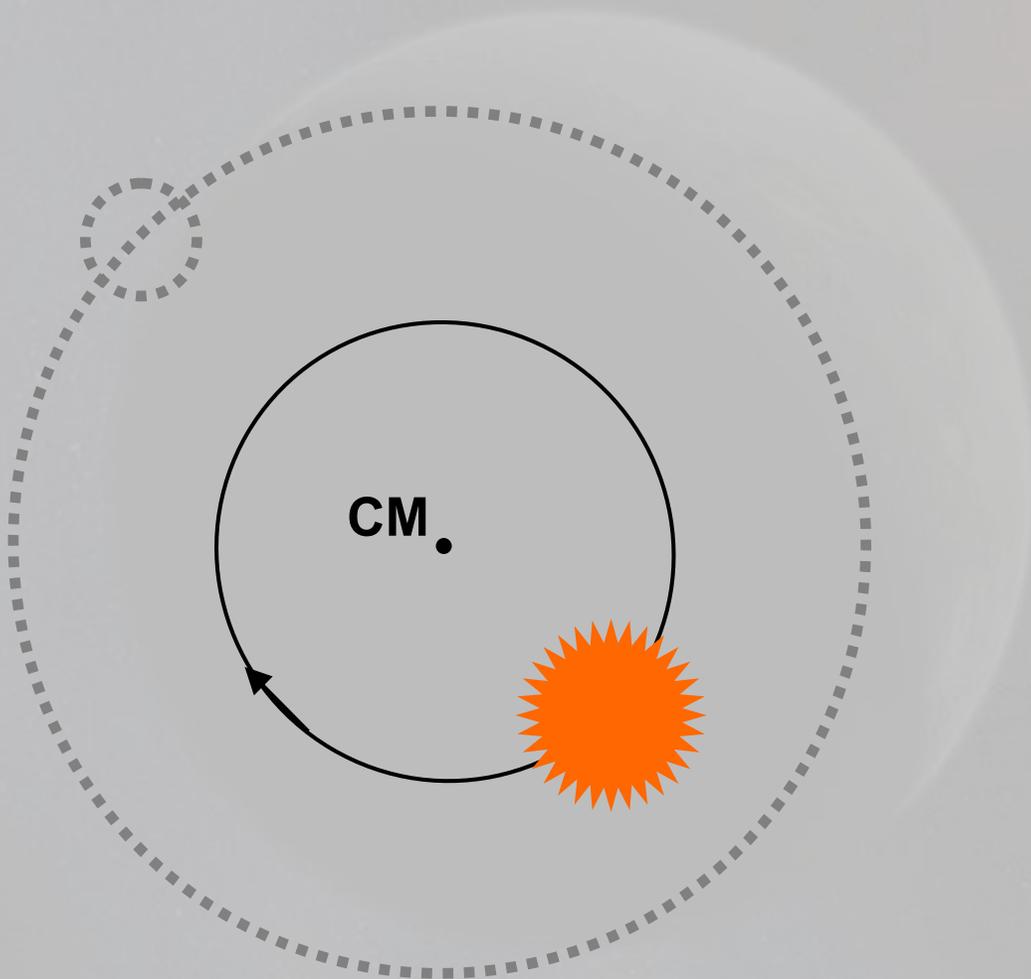
Importante!

Efectos son observables aunque el planeta no sea visible

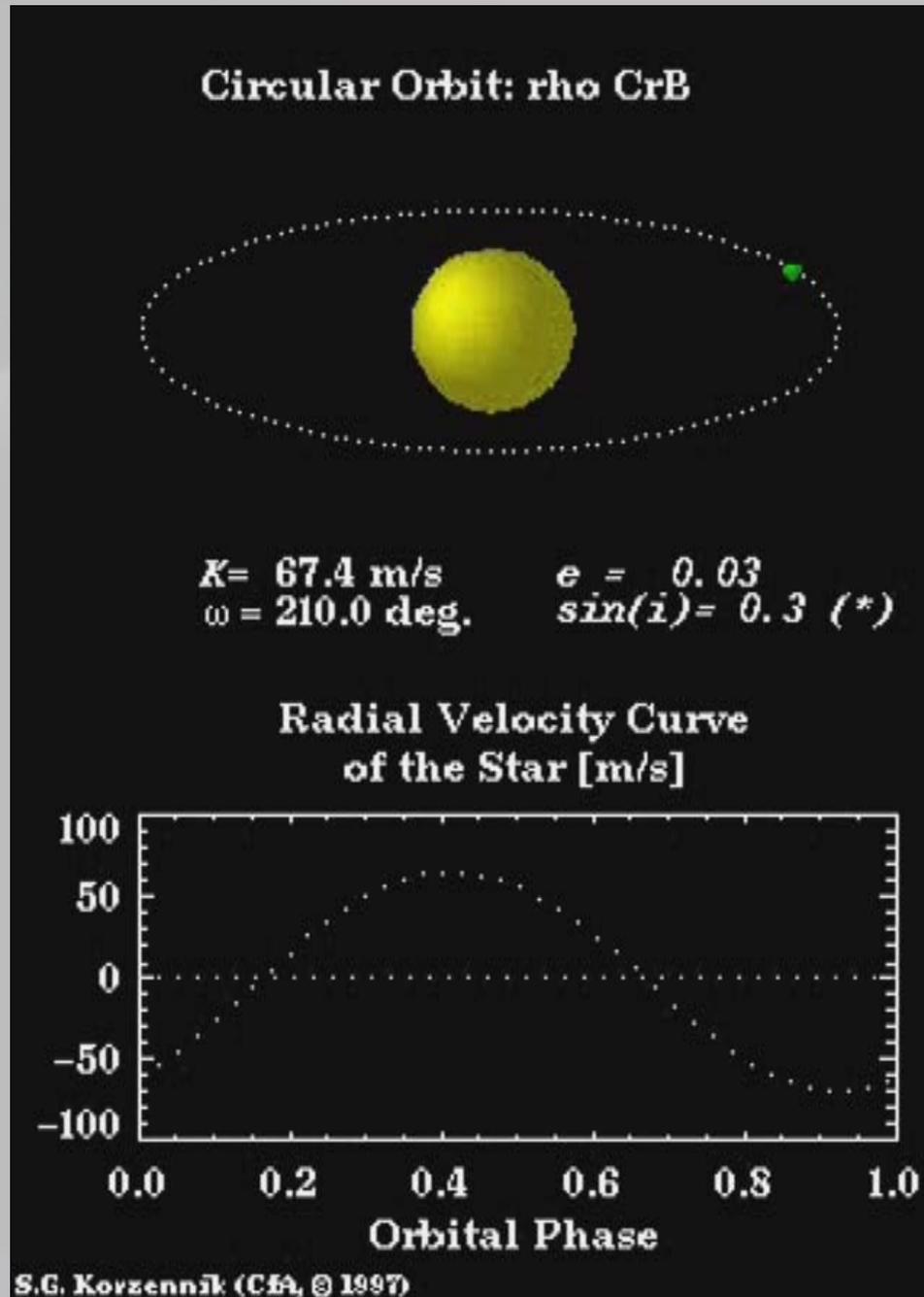


2. MÉTODO DOPPLER

⇒ Podemos deducir la existencia (y características) de exoplanetas observando variaciones en la velocidad de la estrella

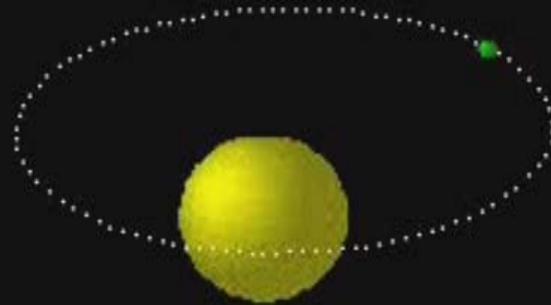


2. MÉTODO DOPPLER



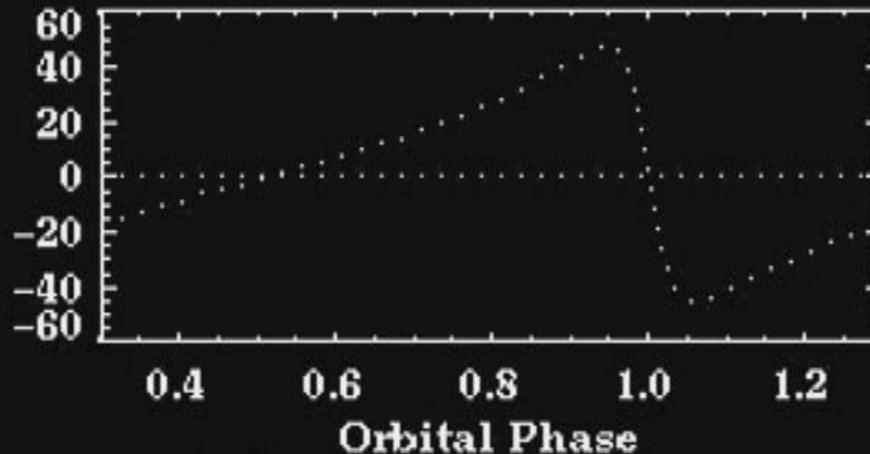
2. MÉTODO DOPPLER

Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



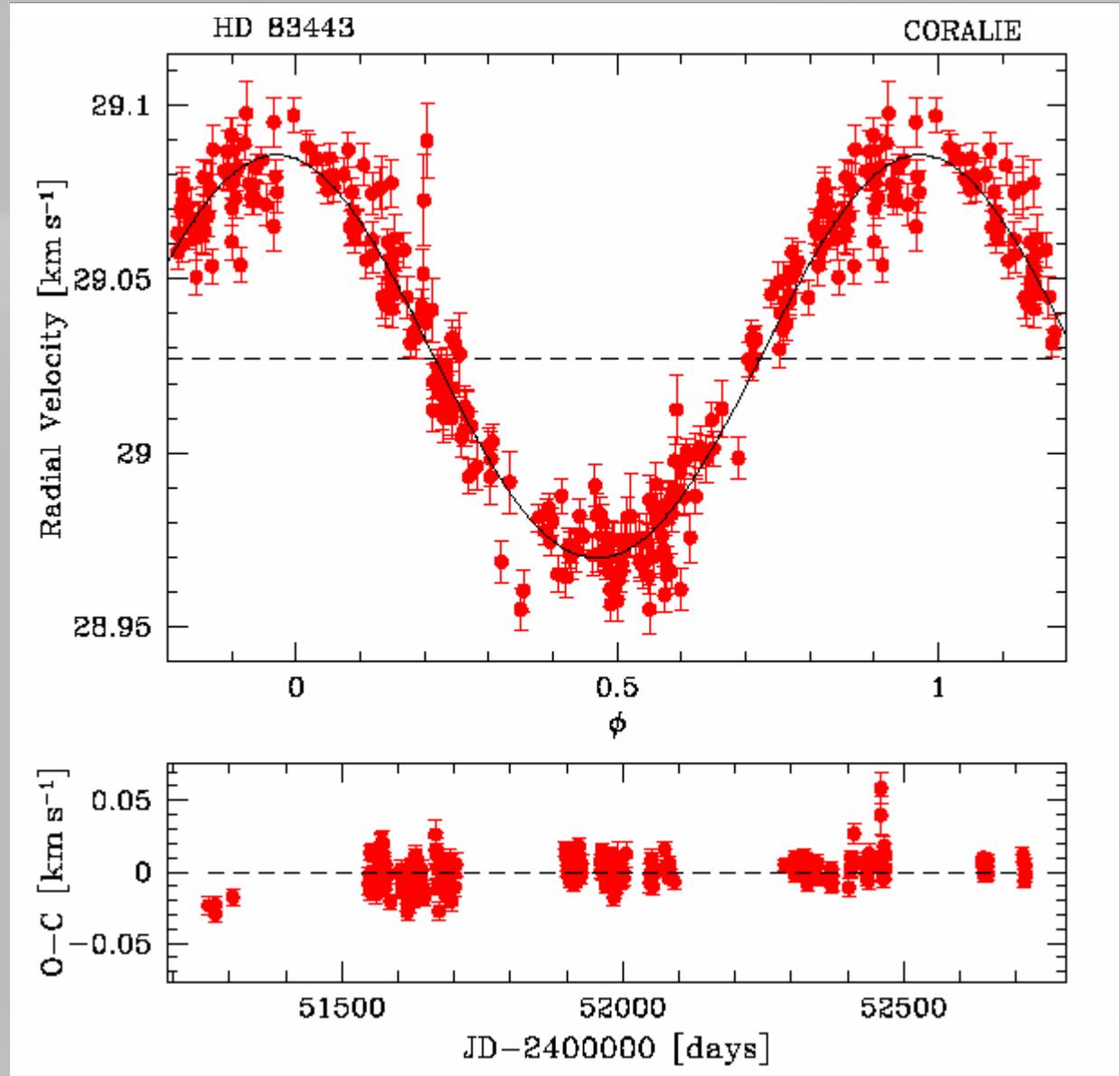
$K = 46.6 \text{ m/s}$ $e = 0.67$
 $\omega = 86.8 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



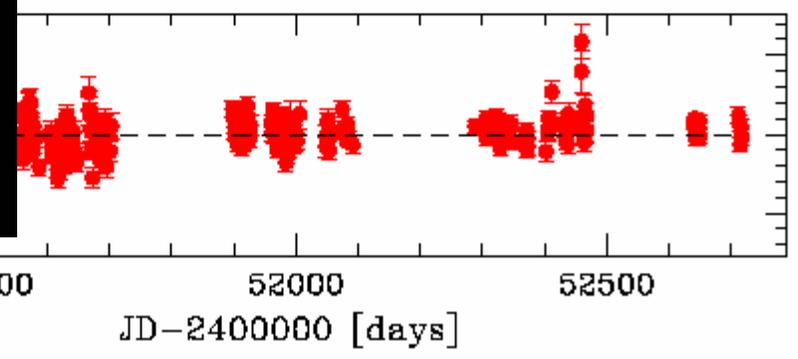
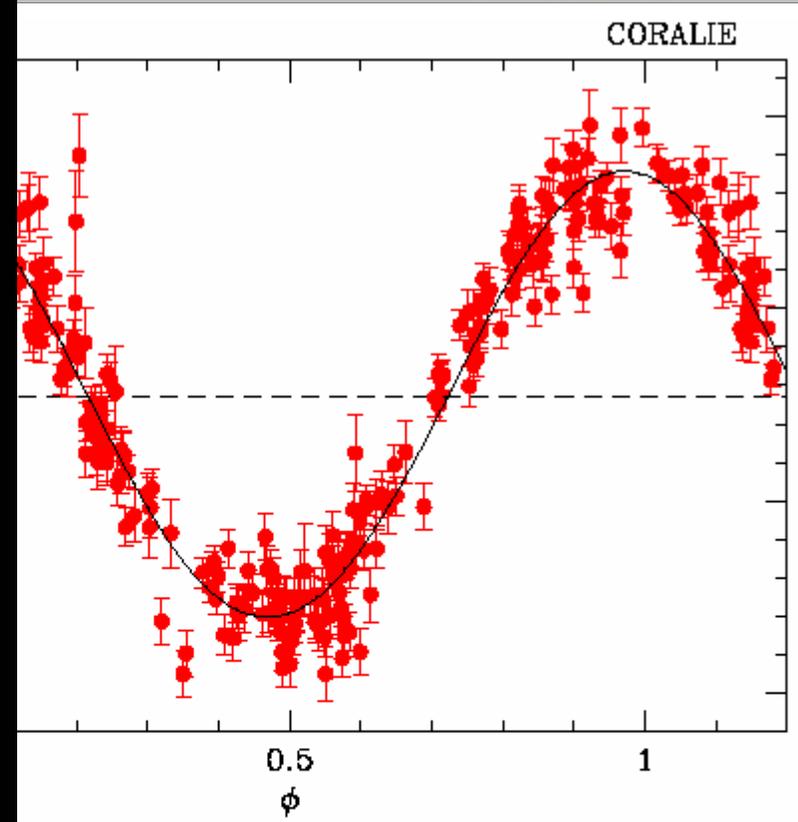
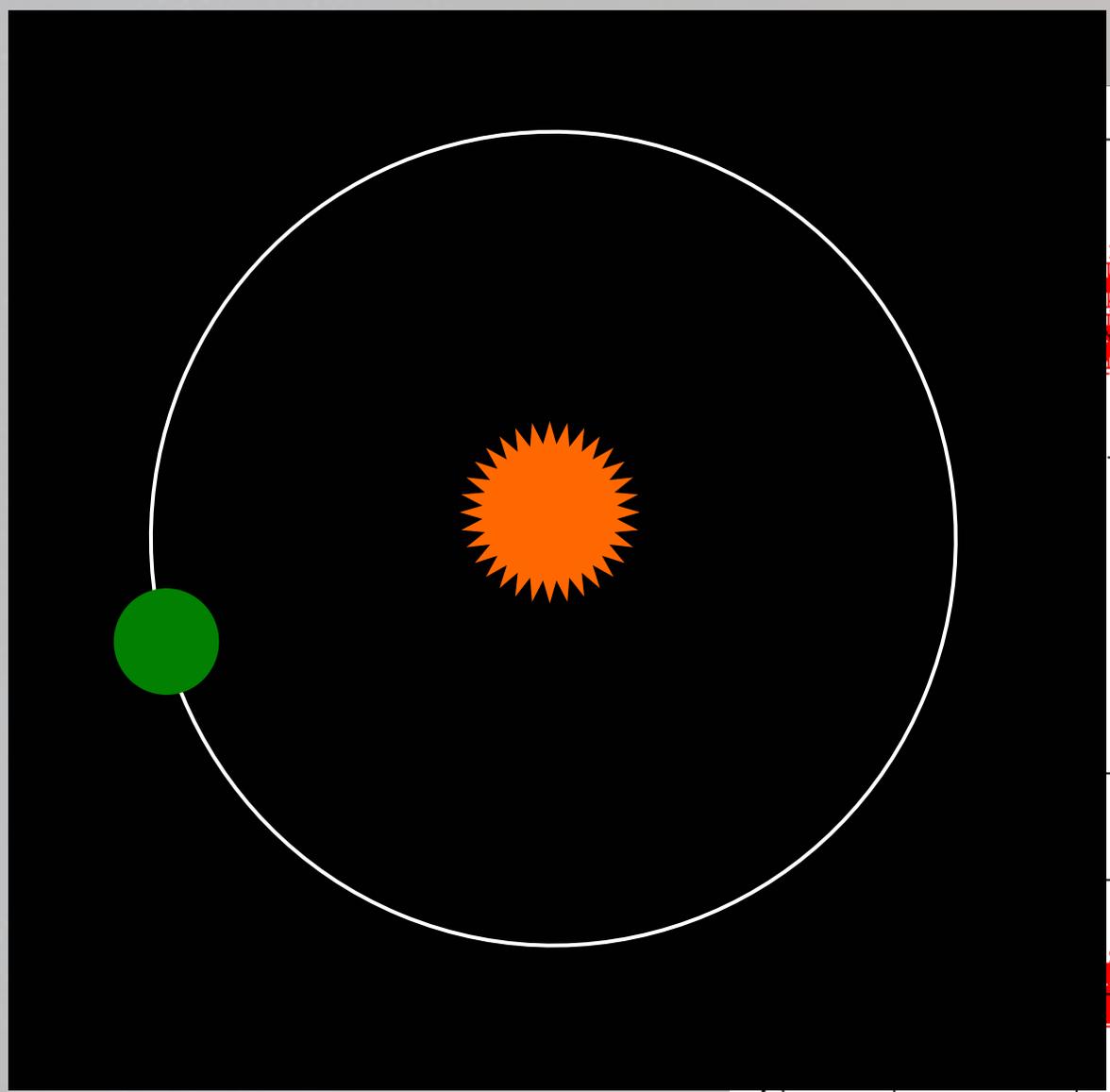
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



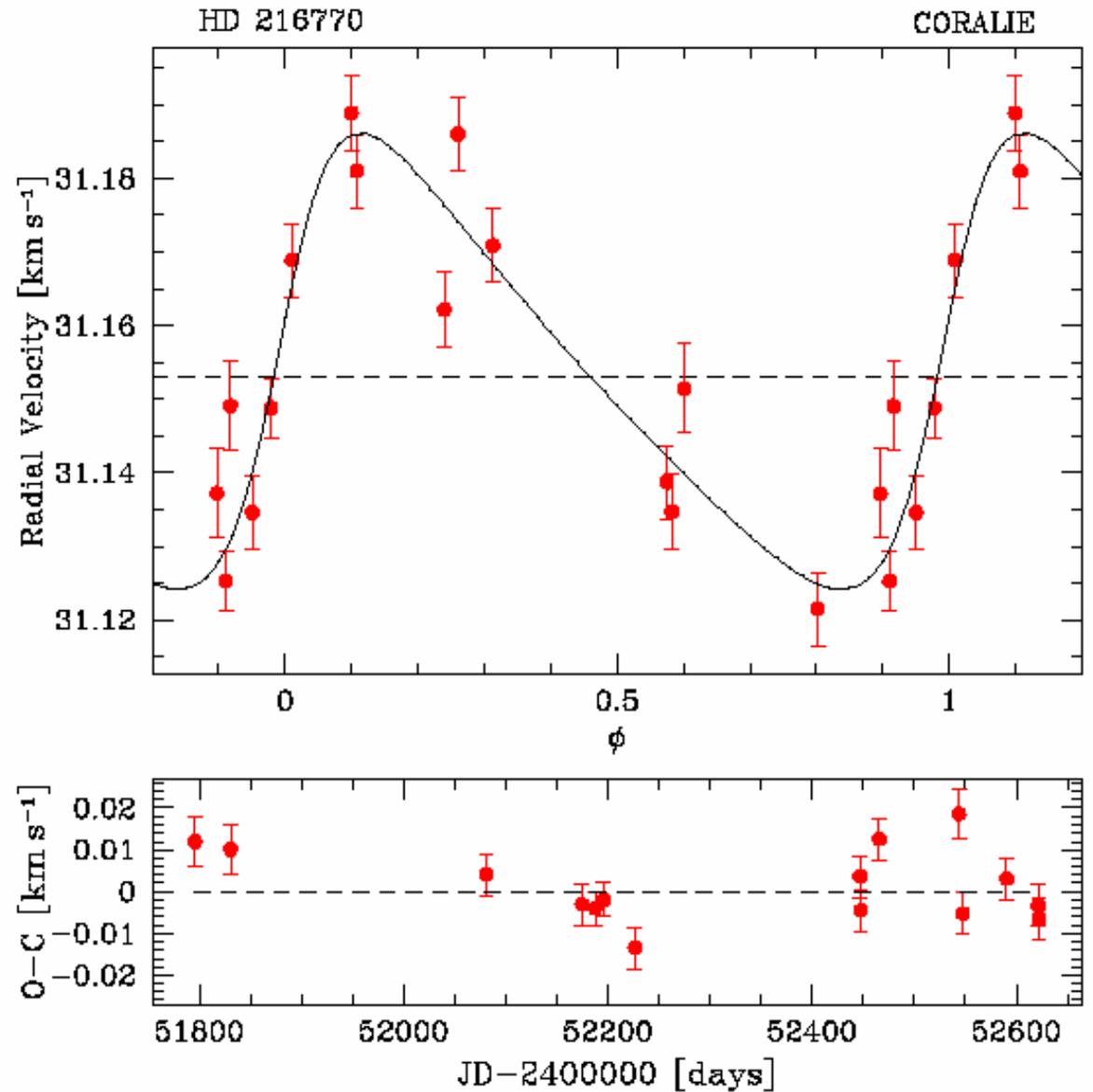
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



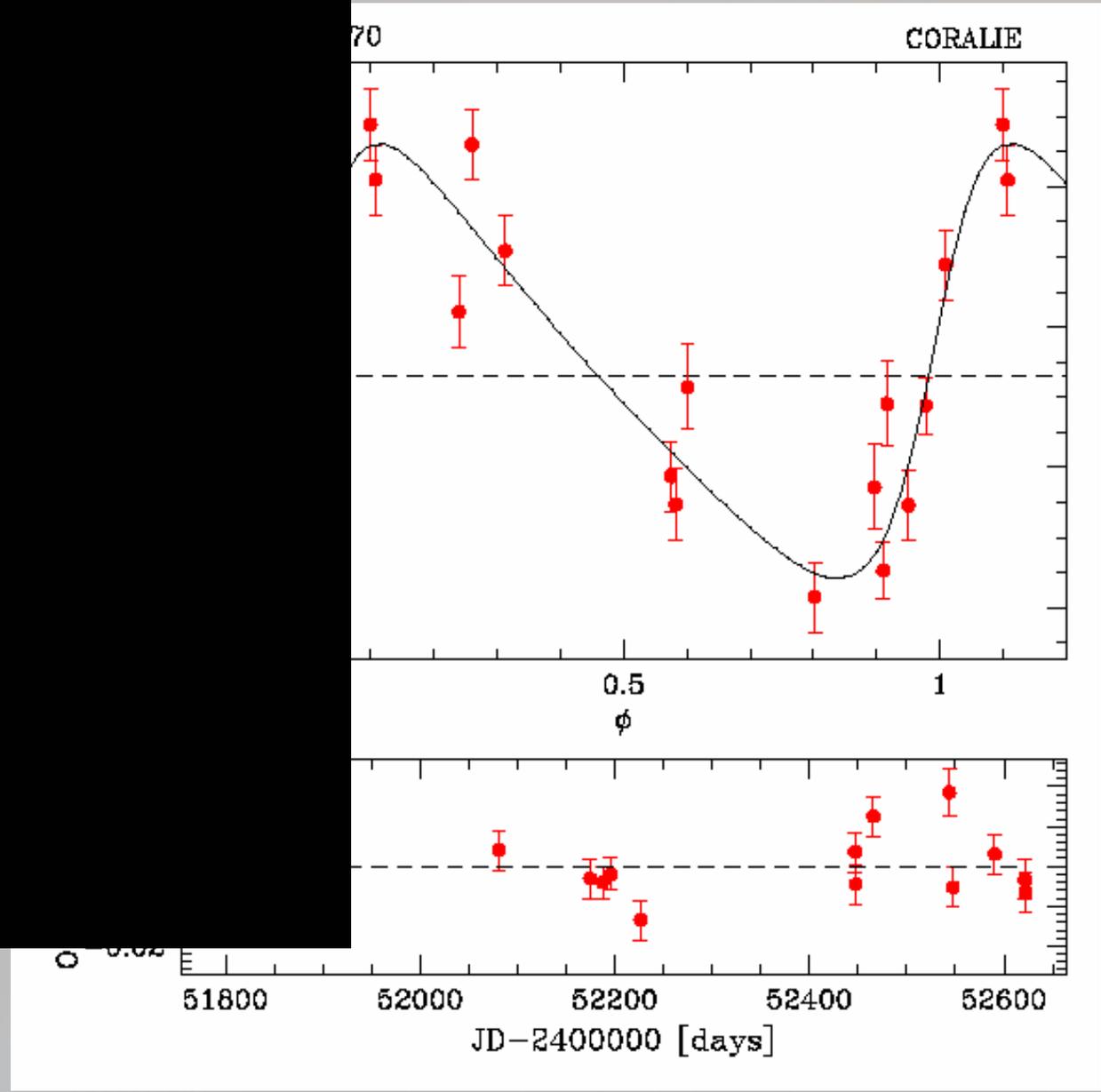
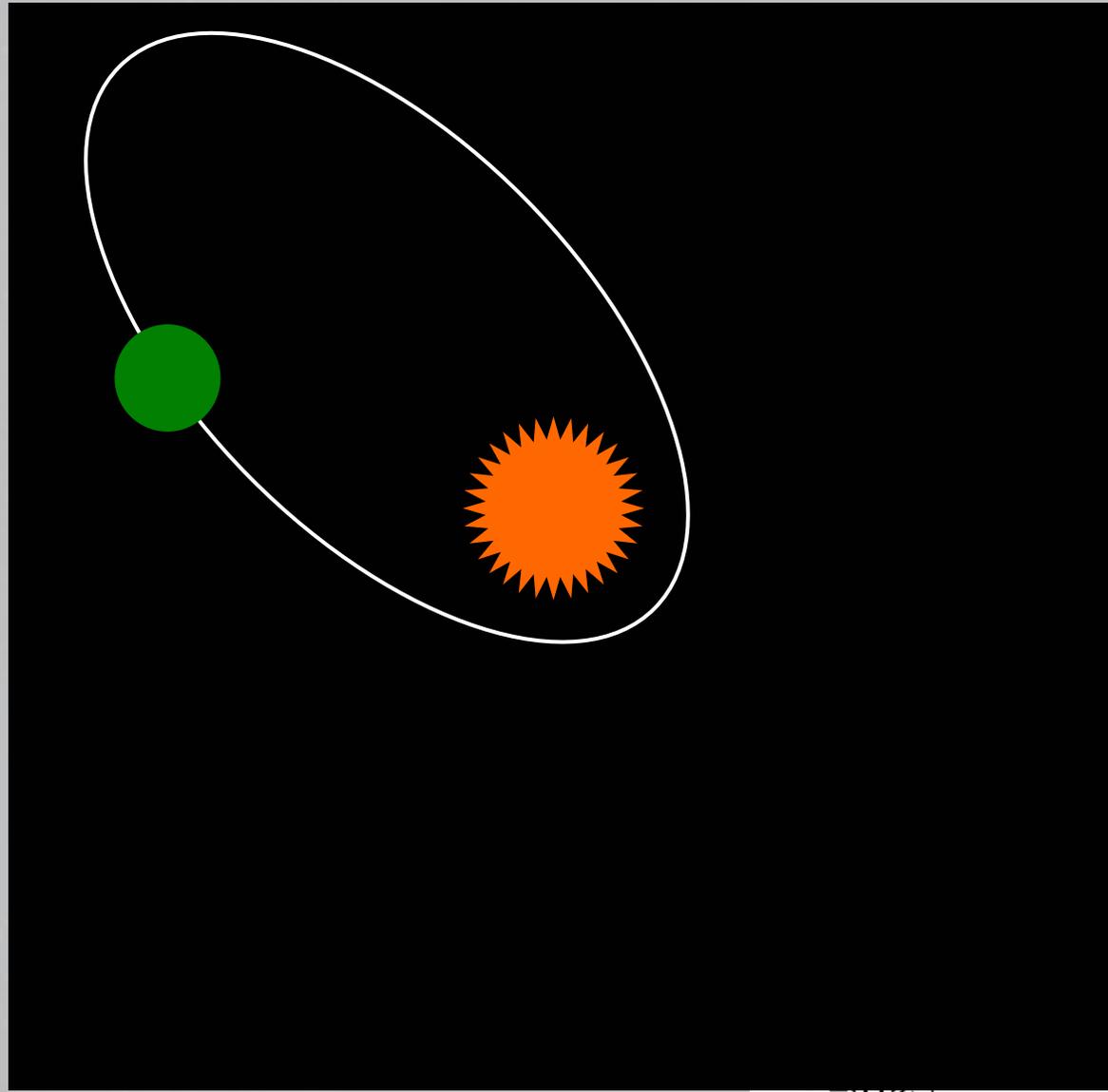
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



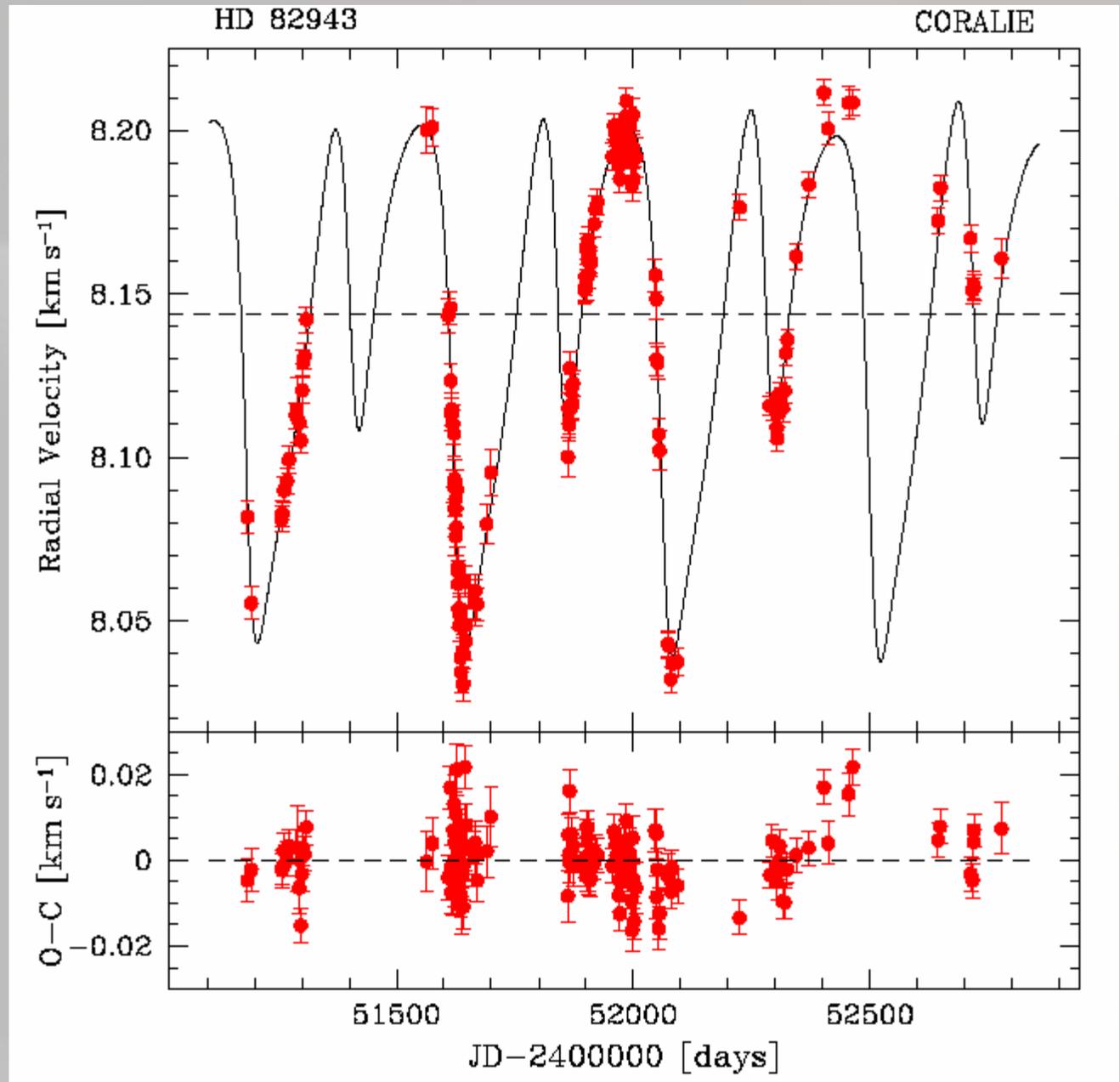
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



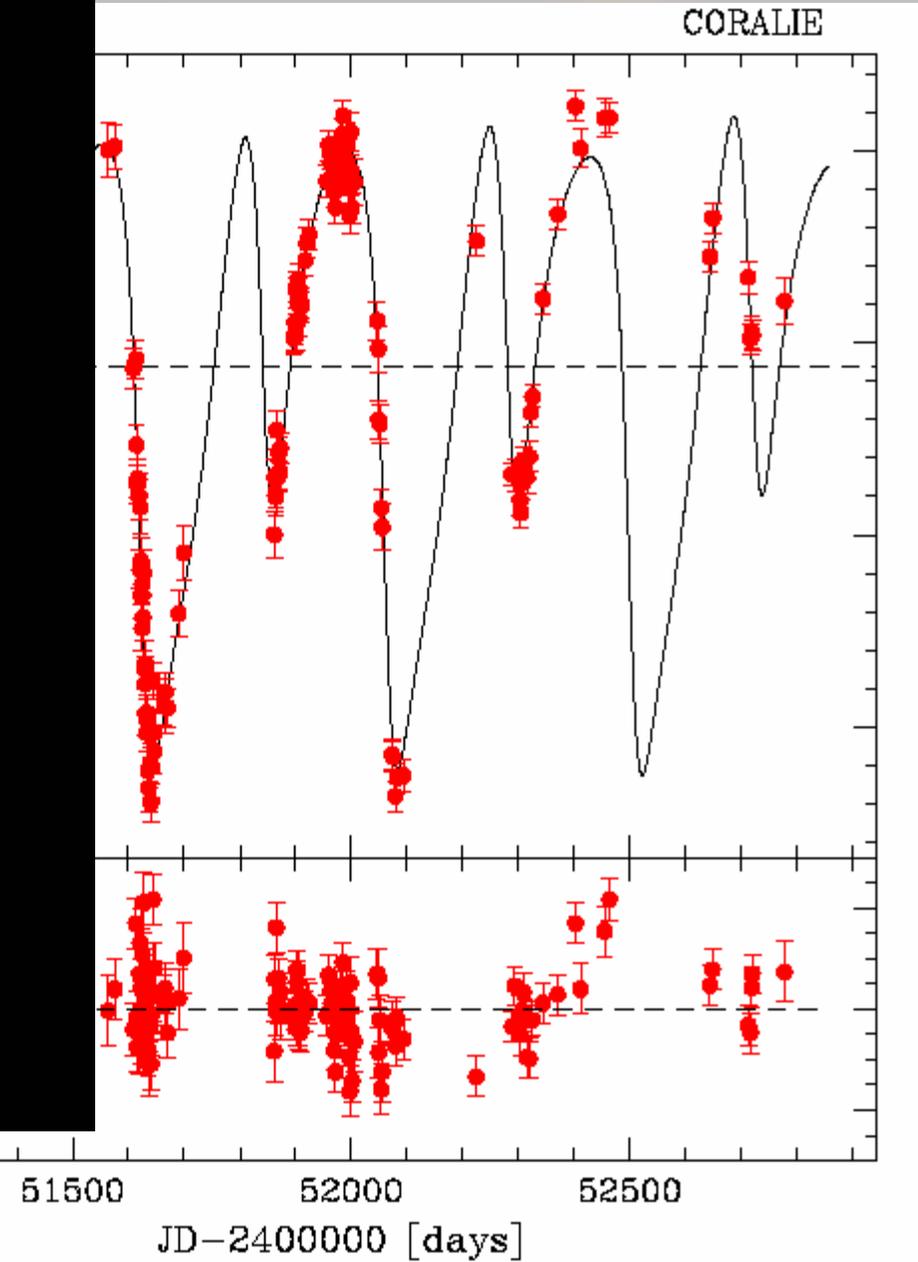
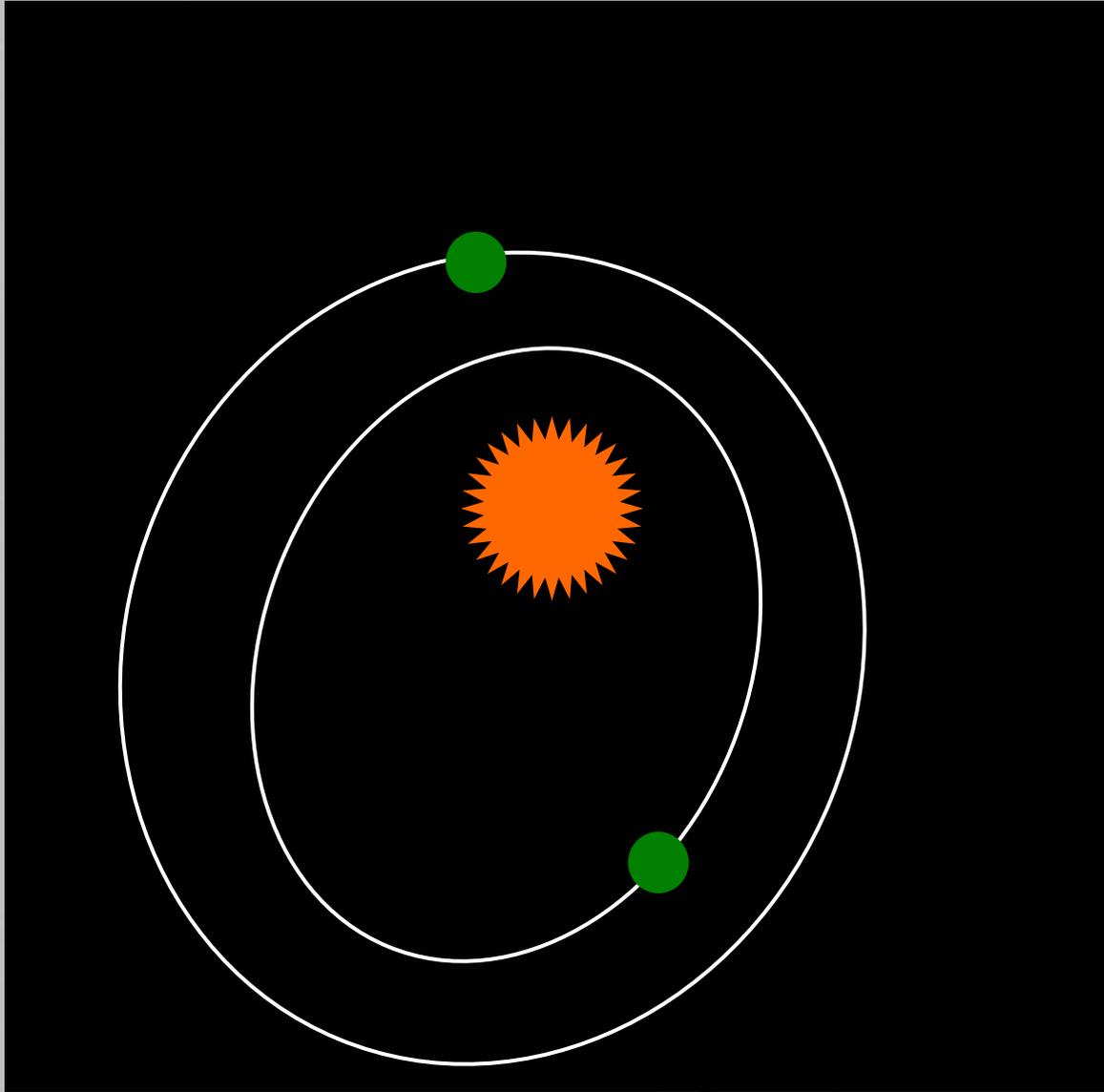
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



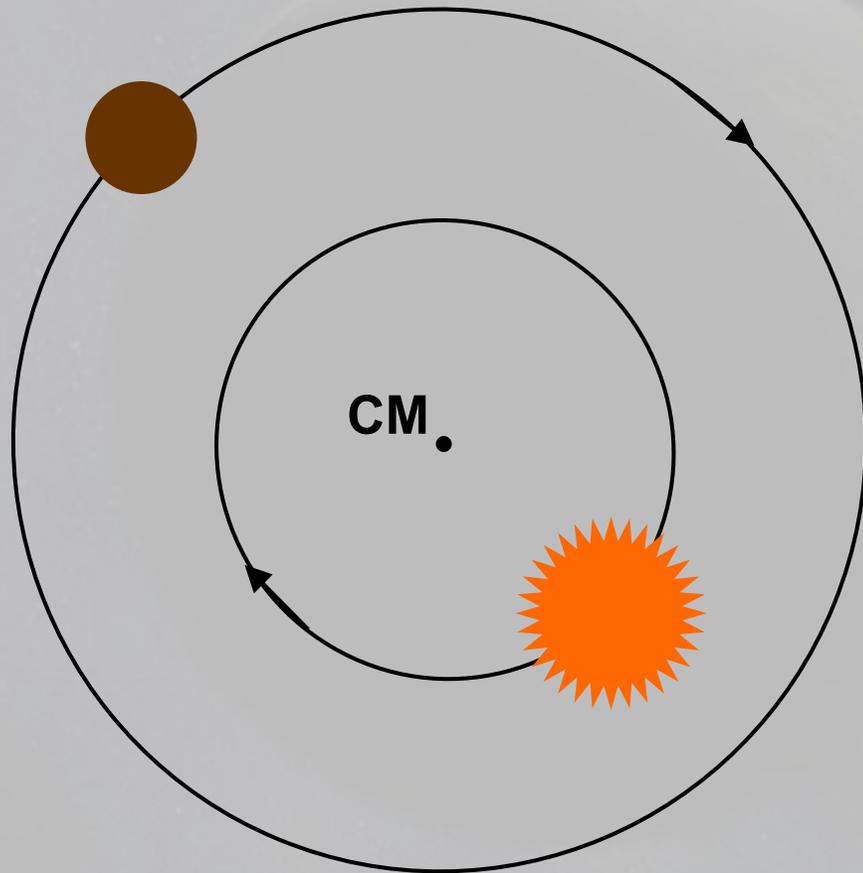
2. MÉTODO DOPPLER

● OBSERVACIONES
— AJUSTE ORBITAL



PLANETAS DETECTABLES

Existe velocidad mínima detectable por los instrumentos

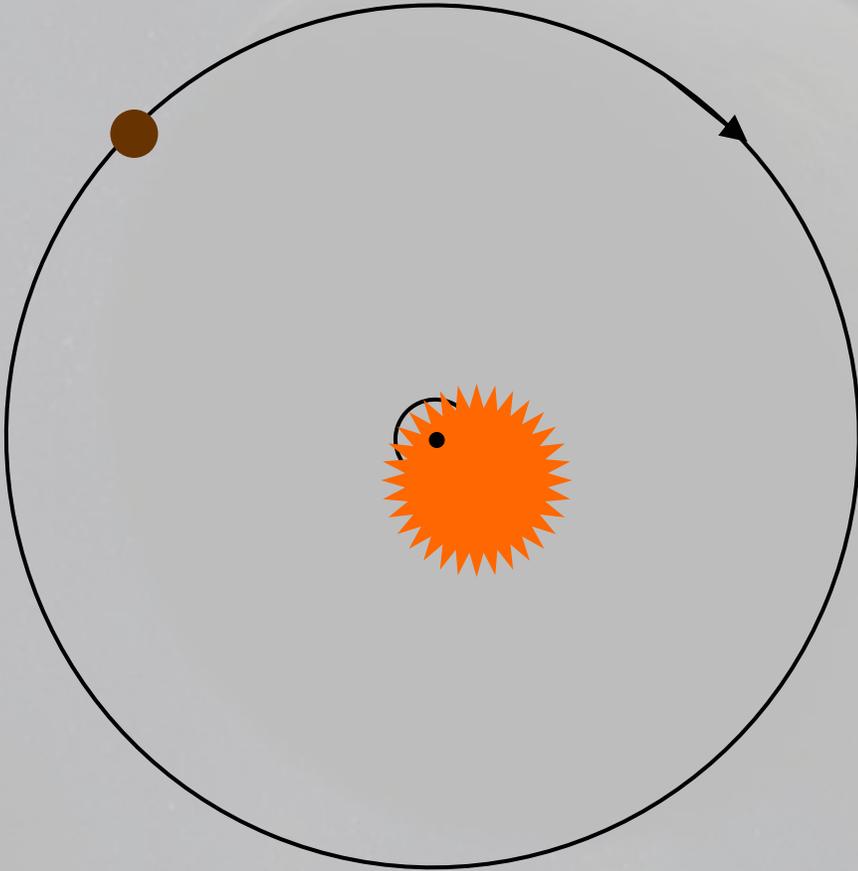


La velocidad de la estrella alrededor del centro de masa depende de:

- a). masa del planeta
- b). distancia del planeta a la estrella

PLANETAS DETECTABLES

Existe velocidad mínima detectable por los instrumentos

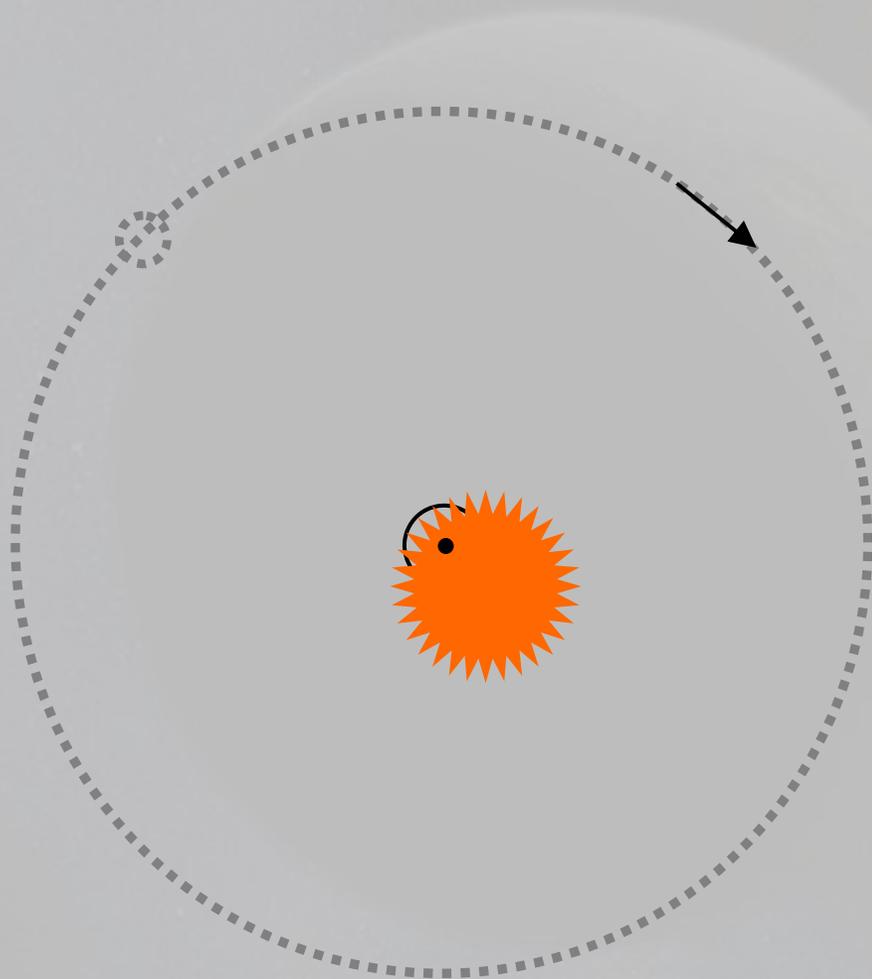


La velocidad de la estrella alrededor del centro de masa depende de:

- a). masa del planeta
- b). distancia del planeta a la estrella

PLANETAS DETECTABLES

Existe velocidad mínima detectable por los instrumentos

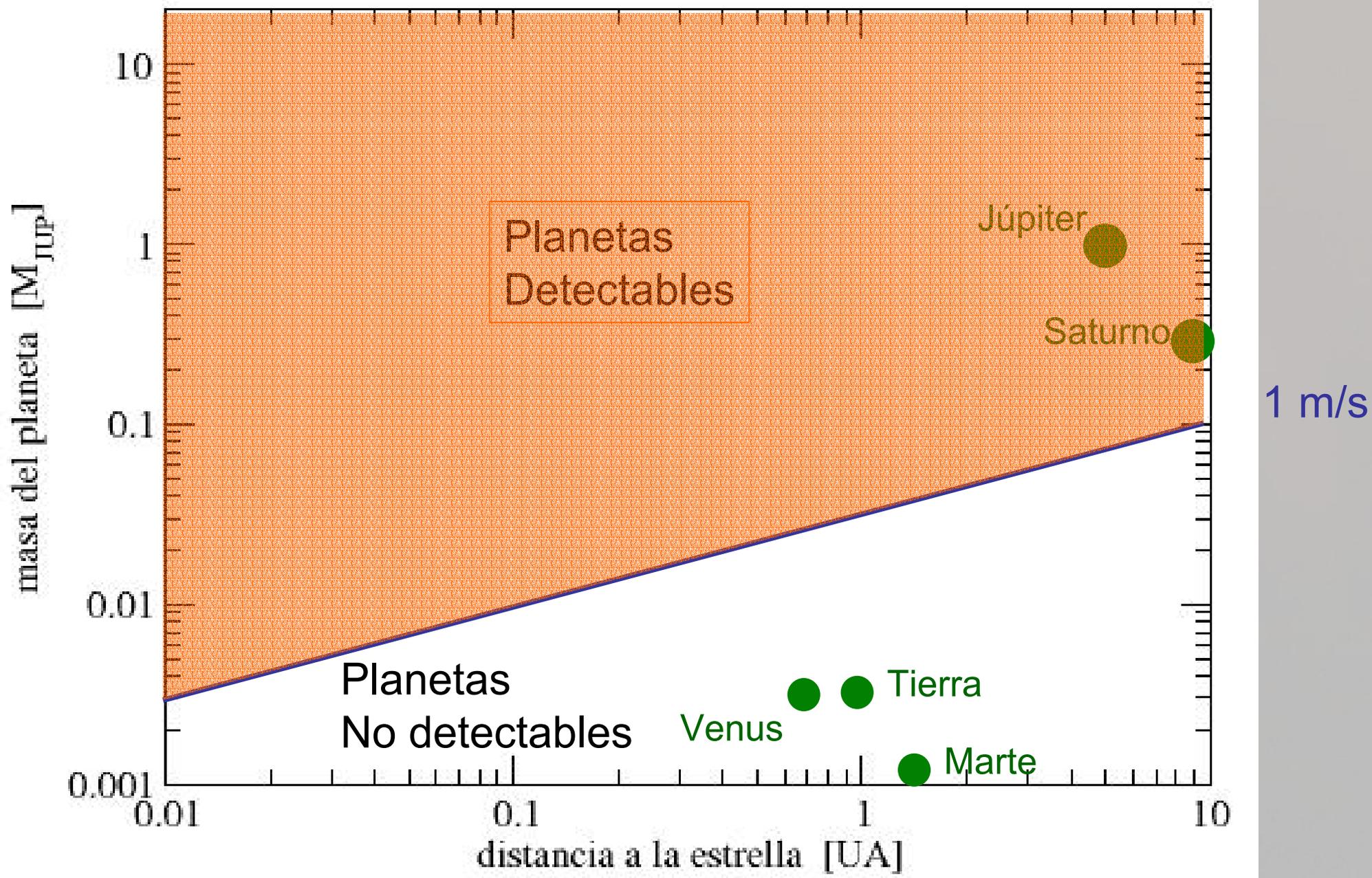


⇒ Planetas chicos o lejos de la estrella NO podrán ser detectados

Existe un efecto de selección.

Favorece el descubrimiento de planetas grandes (gigantes) y próximos a la estrella.

PLANETAS DETECTABLES



QUE TIPO DE EXOPLANETAS
ESPERÁBAMOS ENCONTRAR?

QUÉ TIPO DE EXOPLANETAS ESPERÁBAMOS?

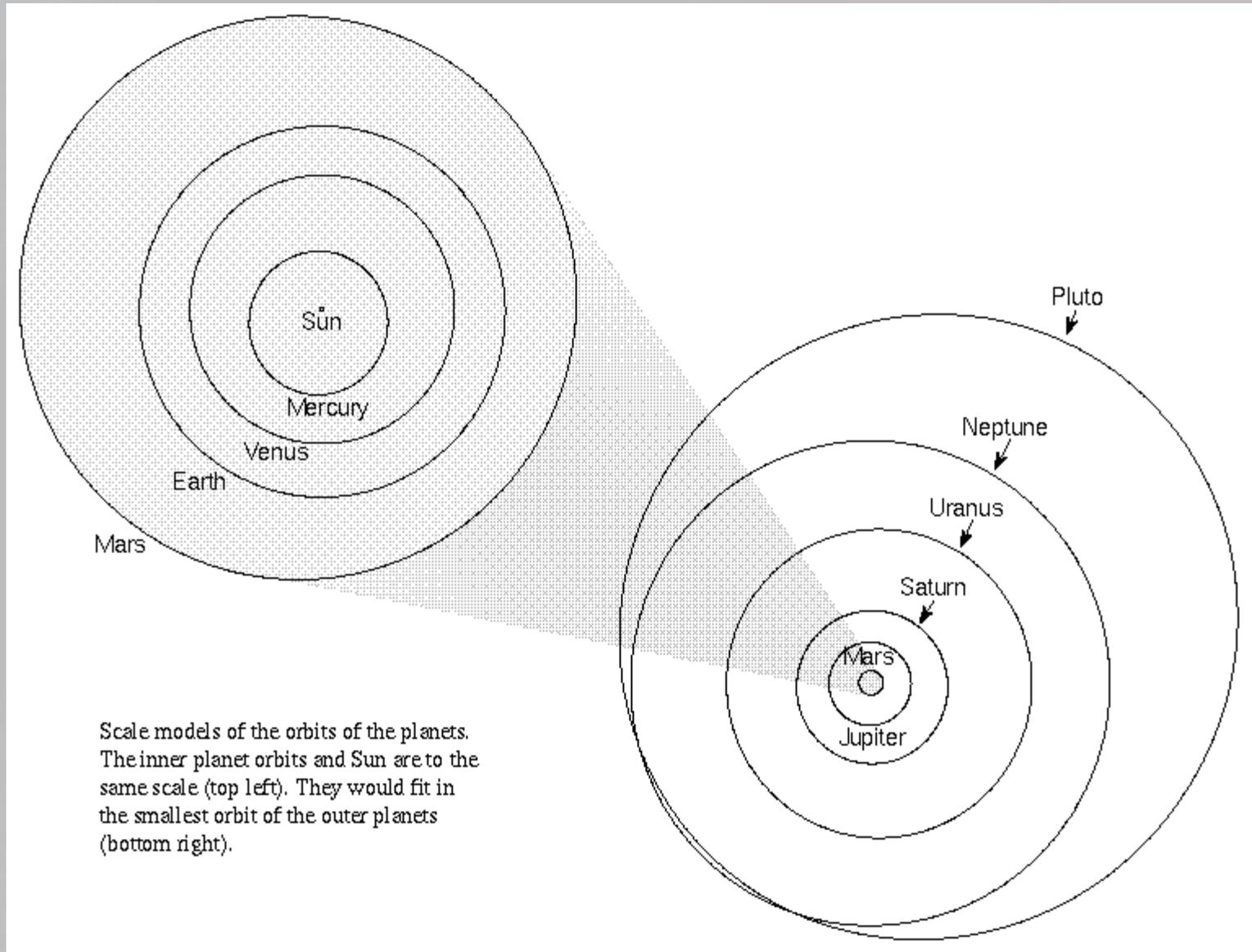
Imaginábamos planetas como nuestro Sistema Solar.

Por qué?

- Suposición natural (siempre esperamos ser parecidos a nuestros vecinos)
- Teorías clásicas de formación planetaria predicen que todos los Sistemas Planetarios deberían ser similares

COMO ES NUESTRO SISTEMA SOLAR?

1. Orbitas casi circulares



COMO ES NUESTRO SISTEMA SOLAR?

2. Dos tipos de planetas (Terrestres & Gigantes)



Terrestres

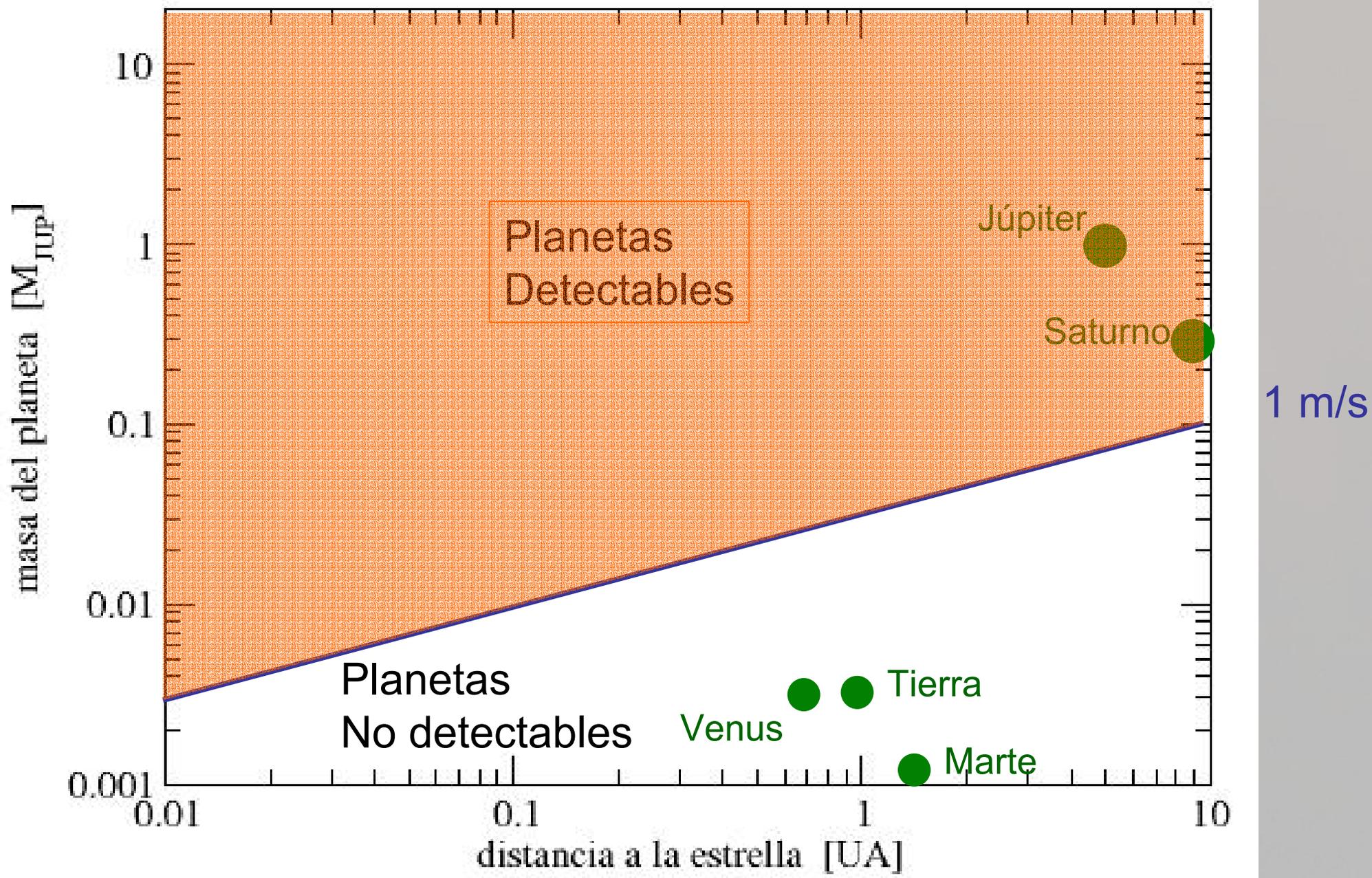
- Pequeños
- Rocosos (sólidos)
- Cerca del Sol



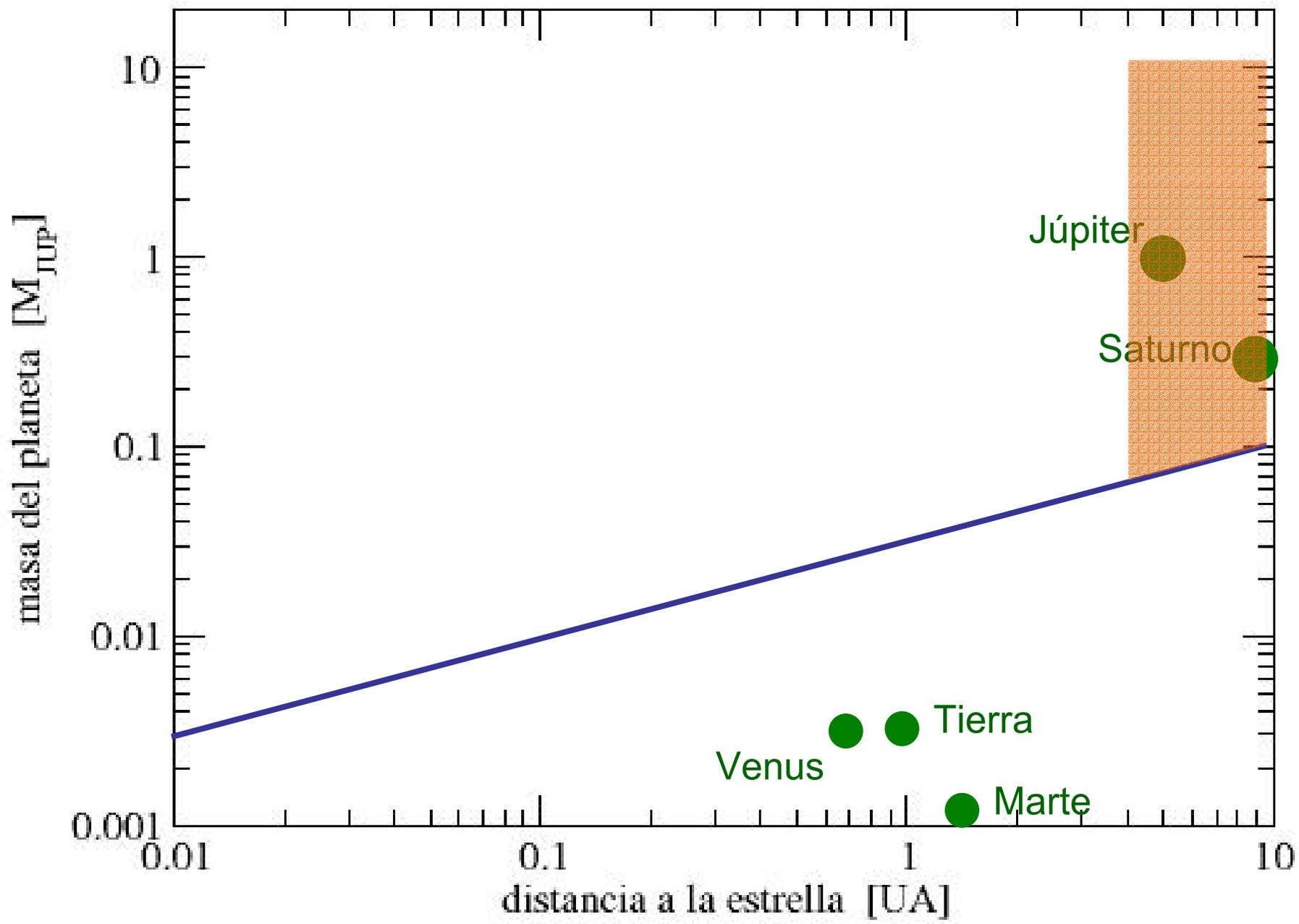
Gigantes

- Muy grandes ($M_{JUP} \sim 300 M_{\oplus}$)
- Gaseosos (no sólidos)
- Lejos del Sol

PLANETAS DETECTABLES

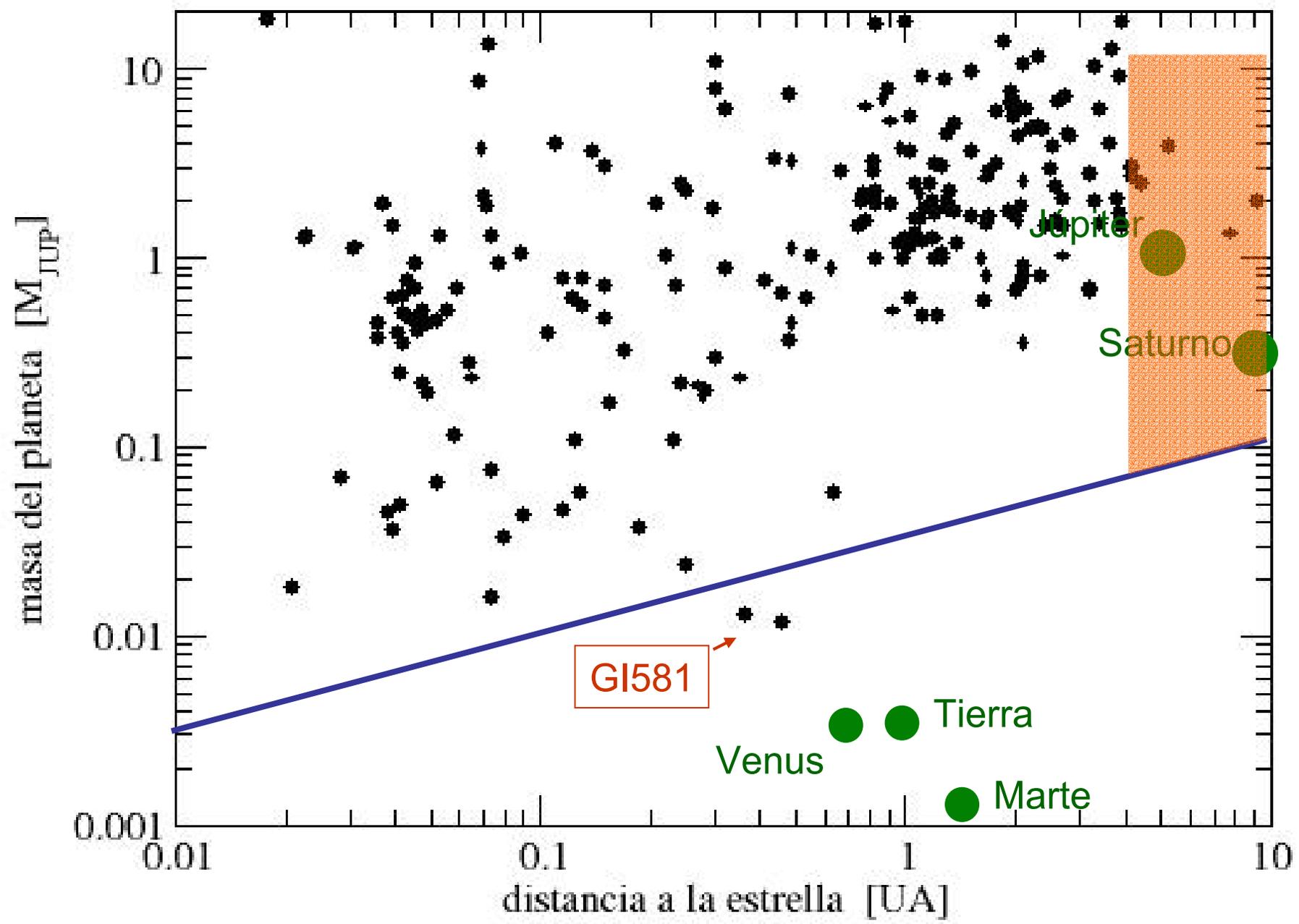


QUE PLANETAS ESPERÁBAMOS DETECTAR?



1 m/s

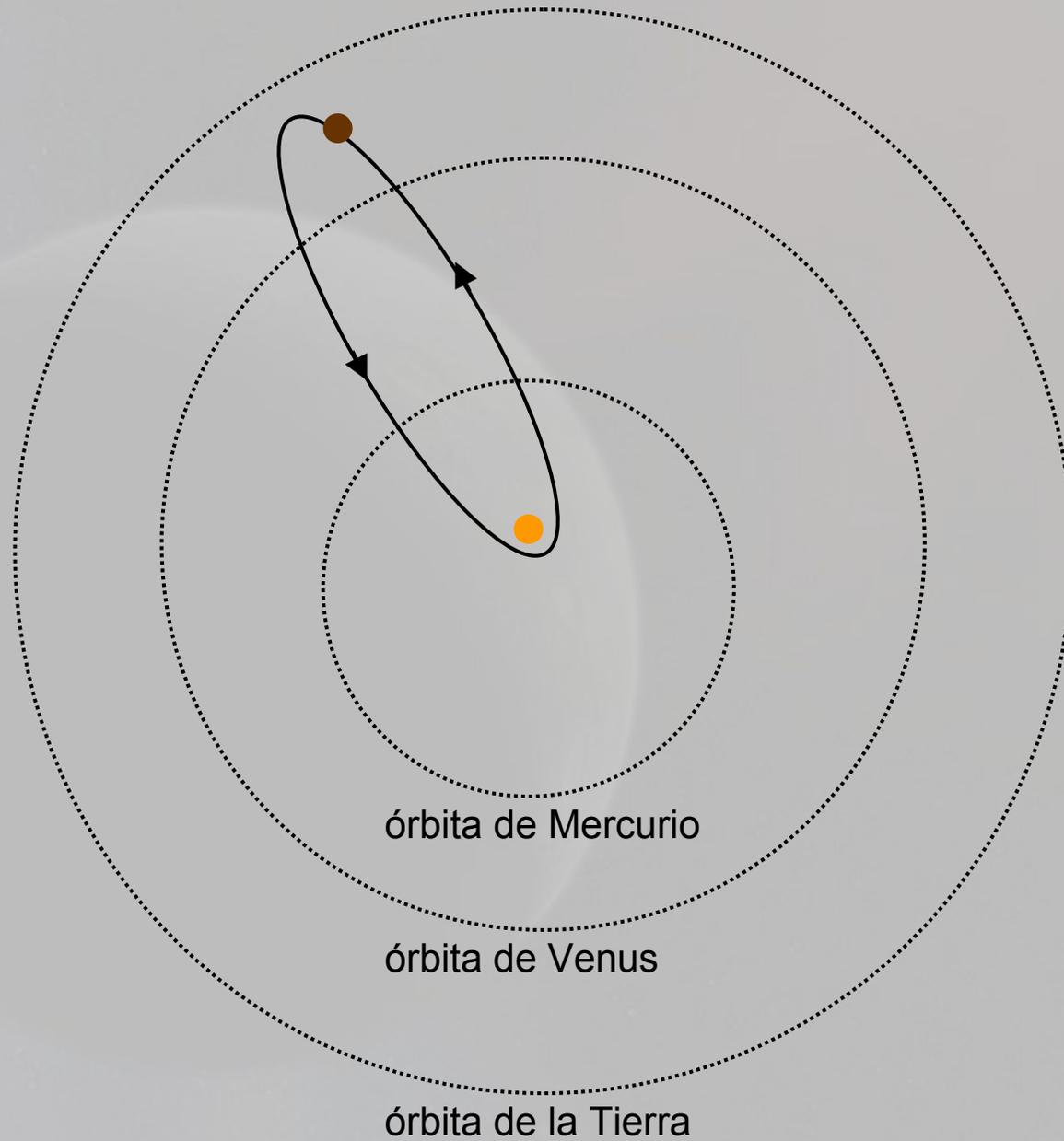
PLANETAS DETECTADOS (!)



1 m/s

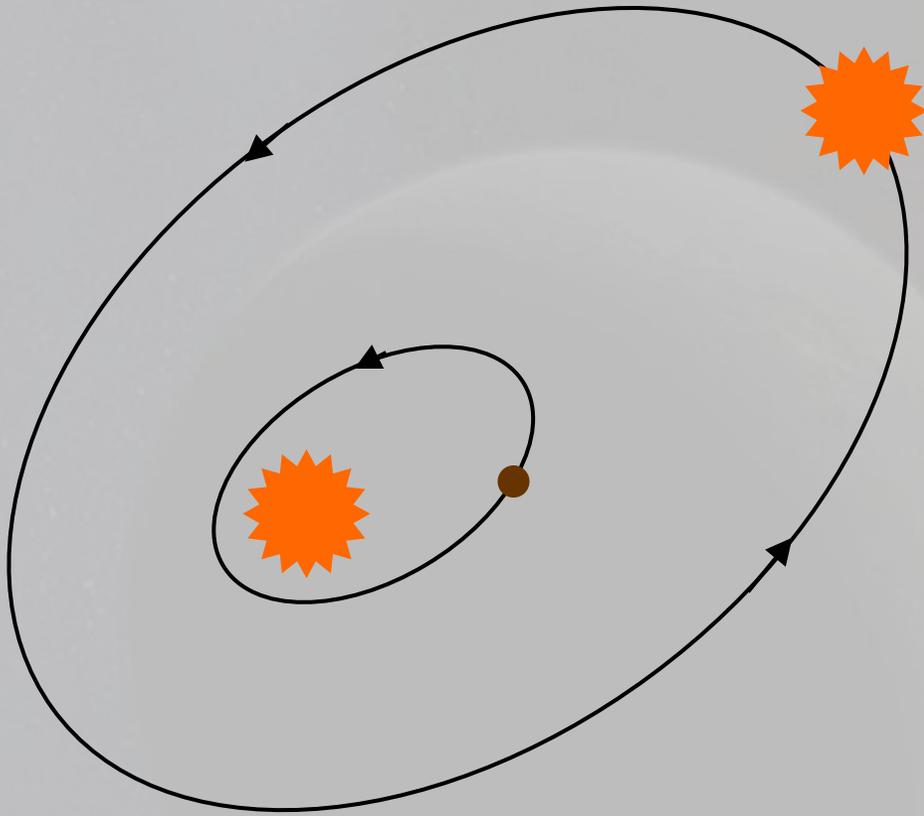
EXOPLANETAS EXTRAÑOS:

HD 80606 ($m = 3M_{\text{JUP}}$)



EXOPLANETAS EXTRAÑOS:

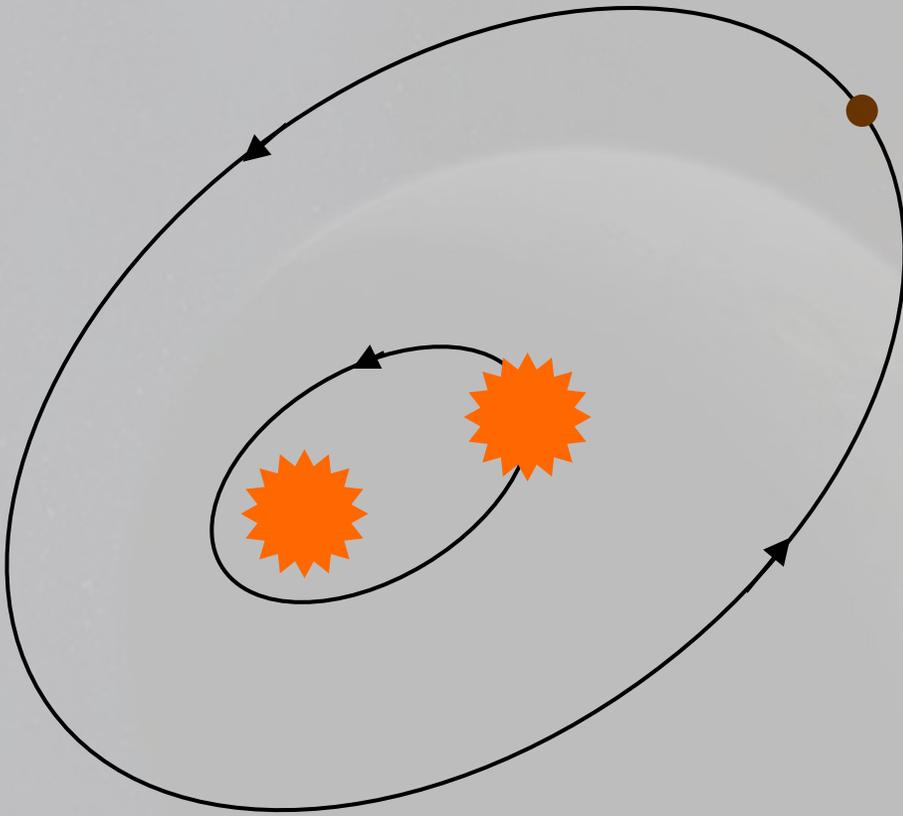
γ Cephei



Planetas en
Sistemas Binarios !

EXOPLANETAS EXTRAÑOS:

HD 202206

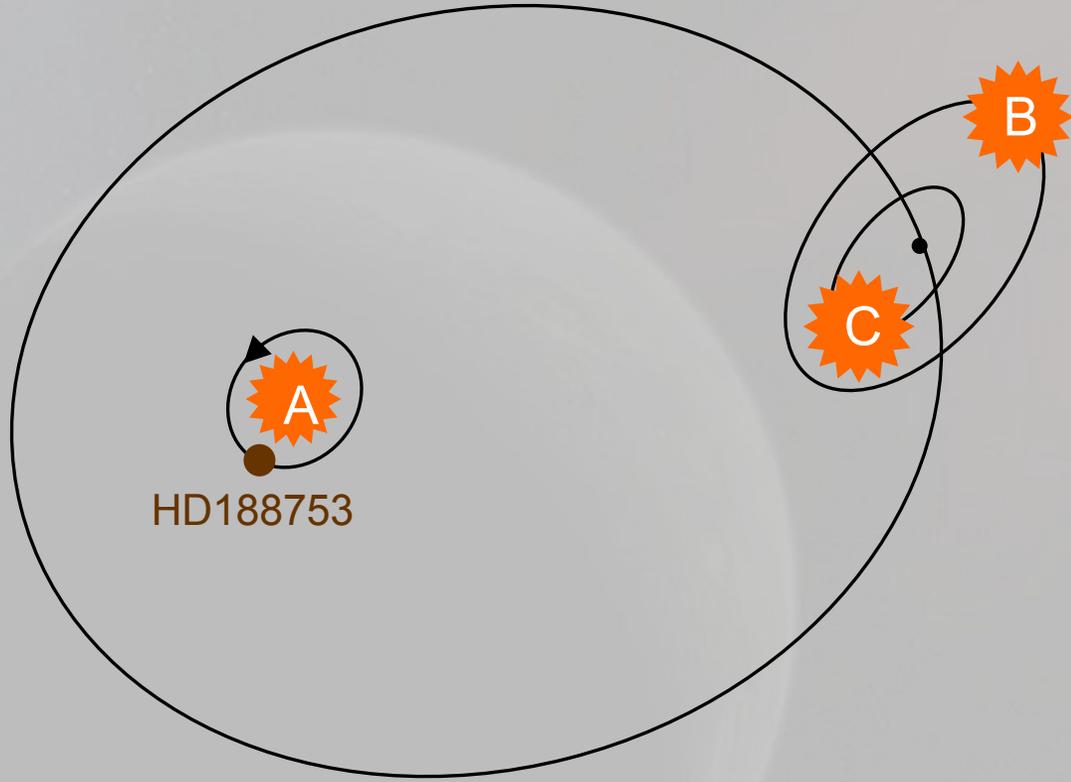


15 años atrás,
se pensaba que
planetas en
Sistemas Binarios
eran imposibles

Hoy conocemos mas de 25

EXOPLANETAS EXTRAÑOS:

HD 188753 (2005)



Distancia B-C: ~ 1 UA
Distancia A-BC: ~ 12 UA

Como se formó?

No se sabe

EXOPLANETAS EXTRAÑOS:

JÚPITER CALIENTES:

- Son planetas gigantes muy cerca de la estrella ($a < 0.1$ UA)
- Están tan próximos que están cayendo a la estrella (“efectos tidales”)
- Solo deberían sobrevivir por ~ 100 millones de años.
- Algunos (e.g. HD 209458 “OSIRIS”) sufren evaporación de su atmósfera debido al sobrecalentamiento estelar.
- Son planetas con sus días contados.

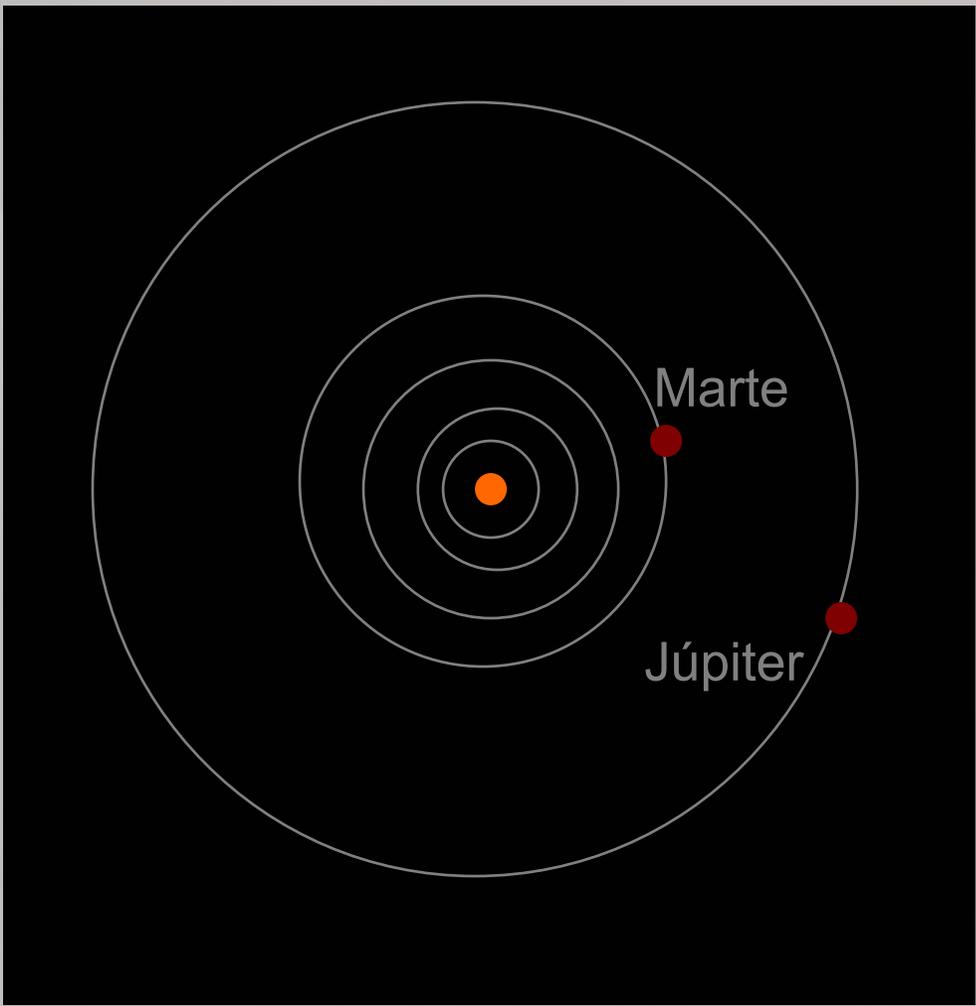
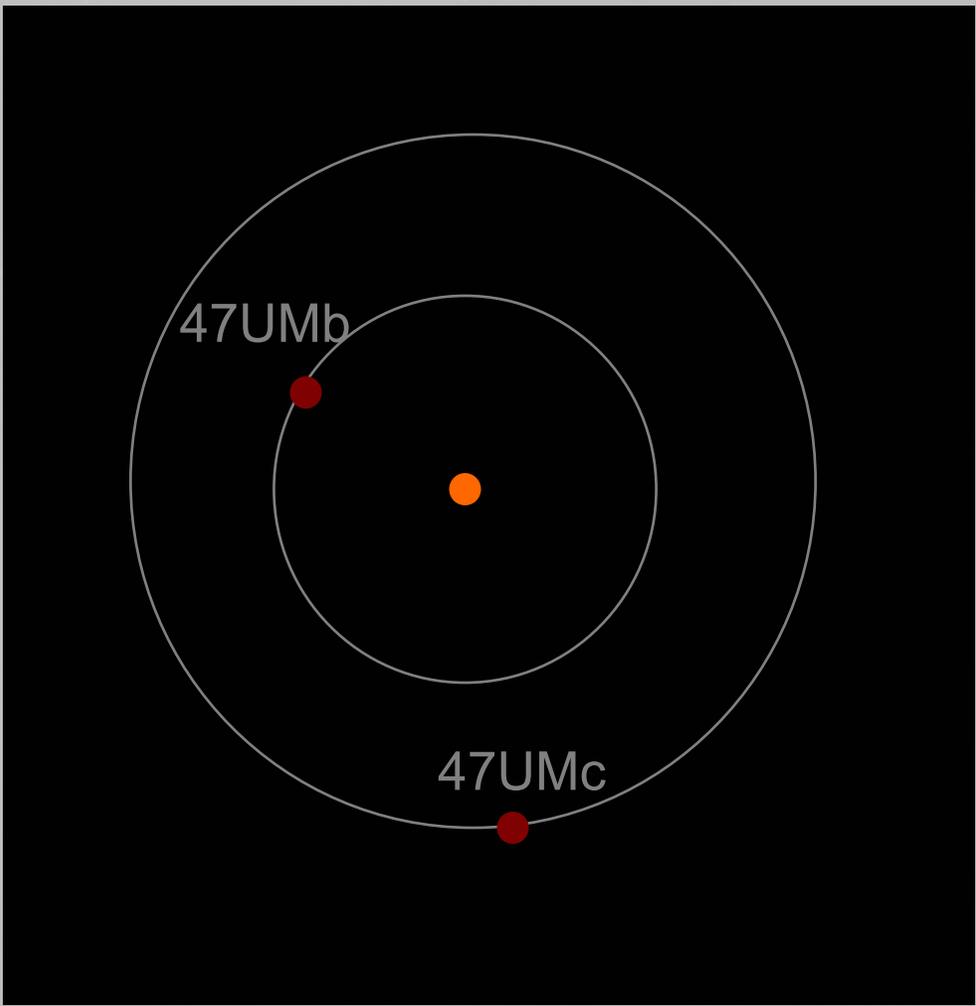
Como se formaron?

No sabemos

EXISTE ALGÚN CASO PARECIDO AL S.SOLAR?

47 Ursa Majoris

(G0V, $d=14.1$ pc , $M_*=1.03 M_{sol}$)



DIVERSIDAD DE SISTEMAS PLANETARIOS

SORPRESAS...

- EXISTE UNA DIVERSIDAD DE PLANETAS NUNCA IMAGINADA
 - Planetas en sistemas estelares múltiples,
 - Planetas consumidos por la radiación estelar
 - Planetas en orbitas cometarias
- SEGÚN LAS TEORÍAS CLÁSICAS DE FORMACIÓN PLANETARIA, LA MAYORÍA DE ESTOS CUERPOS NO DEBERÍA EXISTIR
 - ⇒ Revolución en Astronomía Planetaria

DIVERSIDAD DE SISTEMAS PLANETARIOS

SORPRESAS...

- POR QUÉ CASI NO EXISTEN SISTEMAS PLANETARIOS SIMILARES AL NUESTRO?

Por efectos de selección, será que detectamos principalmente exoplanetas extraños?

....o será que nosotros somos los extraños?

Planetas Habitables



LA BÚSQUEDA DE PLANETAS HABITABLES

ALGÚN EXOPLANETA CONOCIDO POSEE VIDA VIDA?

- NO SABEMOS.

DESCONOCEMOS SI VIDA PUEDE SURGIR EN CONDICIONES MUY DIFERENTES A NUESTRO PLANETA.

- PERO....

PODEMOS BUSCAR SI EXISTEN EXOPLANETAS “HABITABLES” SEGÚN NUESTROS PROPIOS CRITERIOS DE VIDA.

LA BÚSQUEDA DE PLANETAS HABITABLES

CRITERIOS DE HABITABILIDAD

1. PLANETA ROCOSO (NO PUEDEN SER GIGANTES)

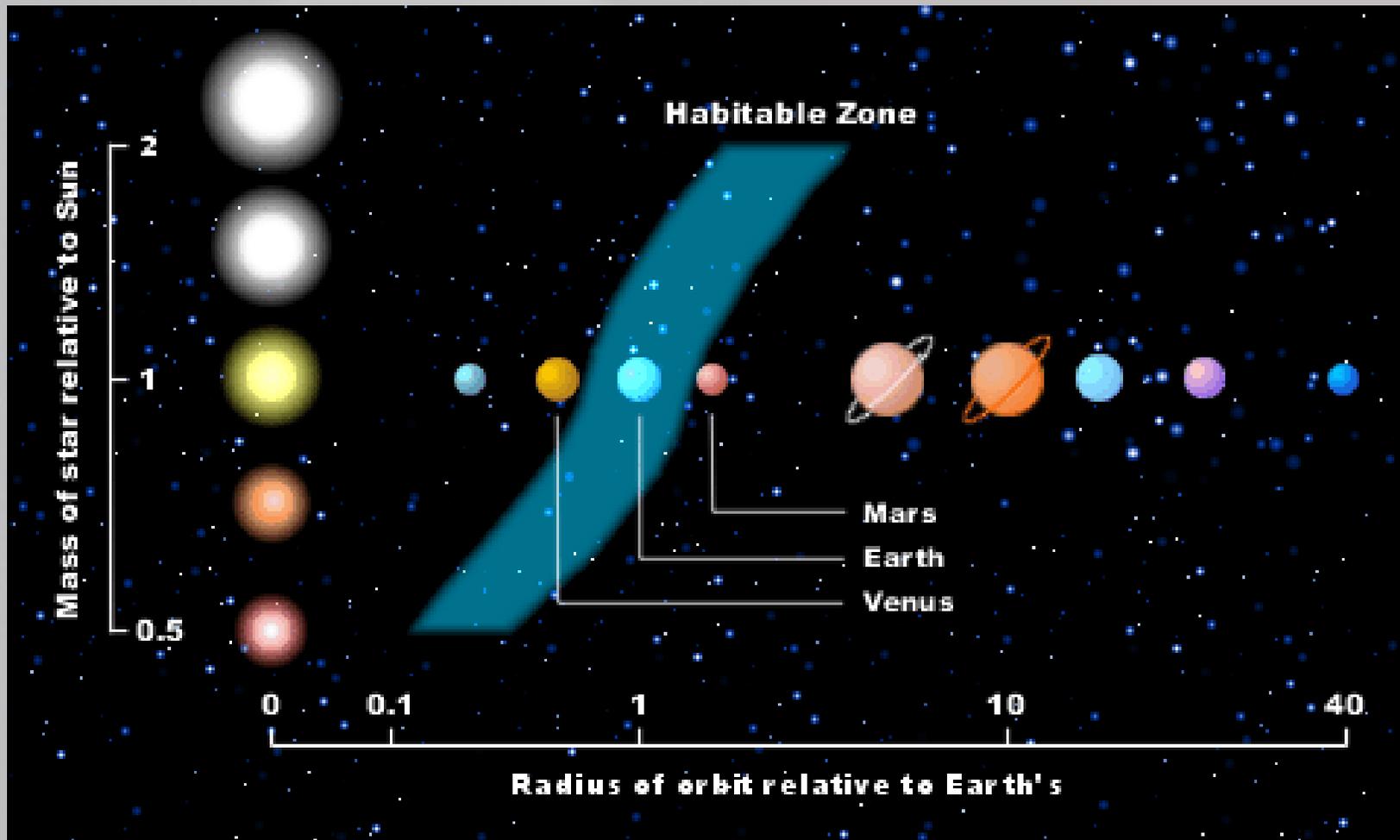
2. ATMÓSFERA (NO PUEDEN SER MUY PEQUEÑOS)

3. AGUA EN FORMA LIQUIDA

LA REGION DE HABITABILIDAD

AGUA LIQUIDA \Rightarrow El planeta no puede estar muy cerca ni muy lejos de la estrella

$$M_* = M_{\text{sol}} \Rightarrow a \sim 0.8 - 1.2 \text{ U.A.}$$



EXISTEN EXOPLANETAS HABITABLES?

Astronomy & Astrophysics manuscript no.
(DOI: will be inserted by hand later)

April 4, 2007

The HARPS search for southern extra-solar planets^{*}

XI. An habitable super-Earth ($5 M_{\oplus}$) in a 3-planet system

S. Udry¹, X. Bonfils², X. Delfosse³, T. Forveille³, M. Mayor¹, C. Perrier³, F. Bouchy⁴, C. Lovis¹, F. Pepe¹,
D. Queloz¹, and J.-L. Bertaux⁵

¹ Observatoire de Genève, Université de Genève, 51 ch. des Maillettes, 1290 Sauverny, Switzerland
e-mail: stephane.udry@obs.unige.ch

² Centro de Astronomia e Astrofísica da Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-018 Lisboa, Portugal

³ Laboratoire d'Astrophysique, Observatoire de Grenoble, BP 53, F-38041 Grenoble, Cedex 9, France

⁴ Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, 98bis Bd Arago, 75014 Paris, France

⁵ Service d'Aéronomie du CNRS, BP 3, 91371 Verrières-le-Buisson, France

Received ; accepted To be inserted later

Abstract. This Letter reports on the detection of two super-Earth planets in the Gl 581 system, already known to harbour a hot Neptune. One of the planets has a mass of $5.1 M_{\oplus}$ and resides in the habitable zone of the star. It is thus the known exoplanet which most resembles our own Earth. The other planet has a $8.2 M_{\oplus}$ mass and orbits at 0.25 AU from the star. These two new light planets around an M3 dwarf further confirm the formerly tentative statistical trend for i) many more very low-mass planets being found around M dwarfs than around solar-type stars and ii) low-mass planets outnumbering Jovian planets around M dwarfs.

Key words. stars: individual: Gl 581, stars: planetary systems – techniques: radial velocities – techniques: spectroscopy

1. Introduction

M dwarfs are of primary interest for planet-search programmes. First of all, they extend the stellar parameters domain probed for planets. For high precision radial-velocity planet searches, M dwarfs are excellent targets as well, because the lower primary mass makes the detection of very light planets easier

in Neptune-mass planet. The minimum mass of the 2nd new planet is 5.1 terrestrial mass (the lowest for any exoplanet to date) and it resides in the habitable zone of Gl 581. The 3rd planet, at 0.25 AU from the star, is also in the super-Earth category ($8.2 M_{\oplus}$). Section 2 briefly recalls some relevant properties of the parent star. Section 3 describes the precise HARPS

EL SISTEMA GI581:

estrella: Tipo M (1/3 masa del Sol)
mas fría que el Sol

La Zona Habitable: 0.06 - 0.09 a_{\oplus}

El planeta:

- GI581c
- $m \sim 5 M_{\oplus}$
- $a \sim 0.07 a_{\oplus}$

⇒ Pese a su masa, 1er candidato serio a planeta habitable

EXISTENCIA DE AGUA EN EXOPLANETAS

- Detectar agua es mucho mas difícil que detectar planetas

Necesitamos poder observar el planeta o detectar un transito con muchísima precisión

Actualmente solo es posible para planetas Gigantes

⇒ Aun no es posible detectar agua en Gl581c

EXISTENCIA DE AGUA EN EXOPLANETAS

Sin embargo....

Existe evidencia de que el agua puede ser común



EXISTENCIA DE AGUA EN HD189733

Letter

Nature **448**, 169–171 (12 July 2007) | doi:10.1038/nature06002; Received 8 April 2007; Accepted 1 June 2007

Water vapour in the atmosphere of a transiting extrasolar planet

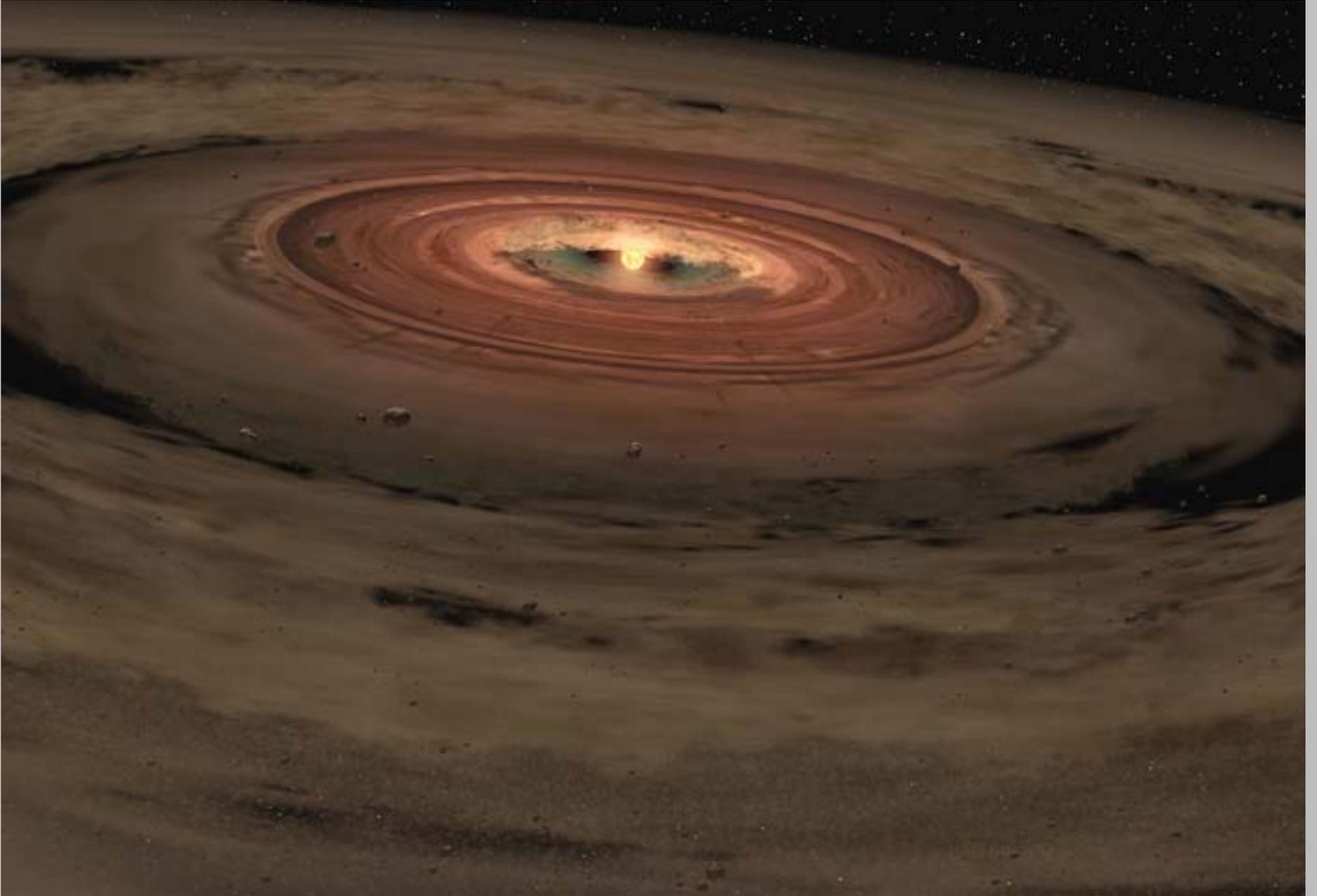
Giovanna Tinetti^{1,2,3}, Alfred Vidal-Madjar³, Mao-Chang Liang⁵, Jean-Philippe Beaulieu³, Yuk Yung⁵, Sean Carey⁶, Robert J. Barber², Jonathan Tennyson², Ignasi Ribas⁷, Nicole Allard³, Gilda E. Ballester⁸, David K. Sing^{3,9} & Franck Selsis¹⁰

1. European Space Agency, Frascati 00044, Italy
2. Department of Physics and Astronomy, University College London, Gower Street, London WC1E 6BT, UK
3. Institut d'Astrophysique de Paris, CNRS, Université Pierre et Marie Curie, 75014 Paris, France
4. Division of Geological and Planetary Sciences,
5. IPAC-Spitzer Science Center, California Institute of Technology, Pasadena, California 91125, USA
6. Institut de Ciències de l'Espai (CSIC-IIEC), Campus UAB, 08193 Bellaterra, Spain
7. Department of Planetary Sciences, Lunar and Planetary Laboratory, University of Arizona, Tucson, 85721-0063, Arizona, USA
8. Centre National d'Etudes Spatiales, Paris 75001, France
9. Ecole Normale Supérieure, CNRS, 69364 Lyon, France

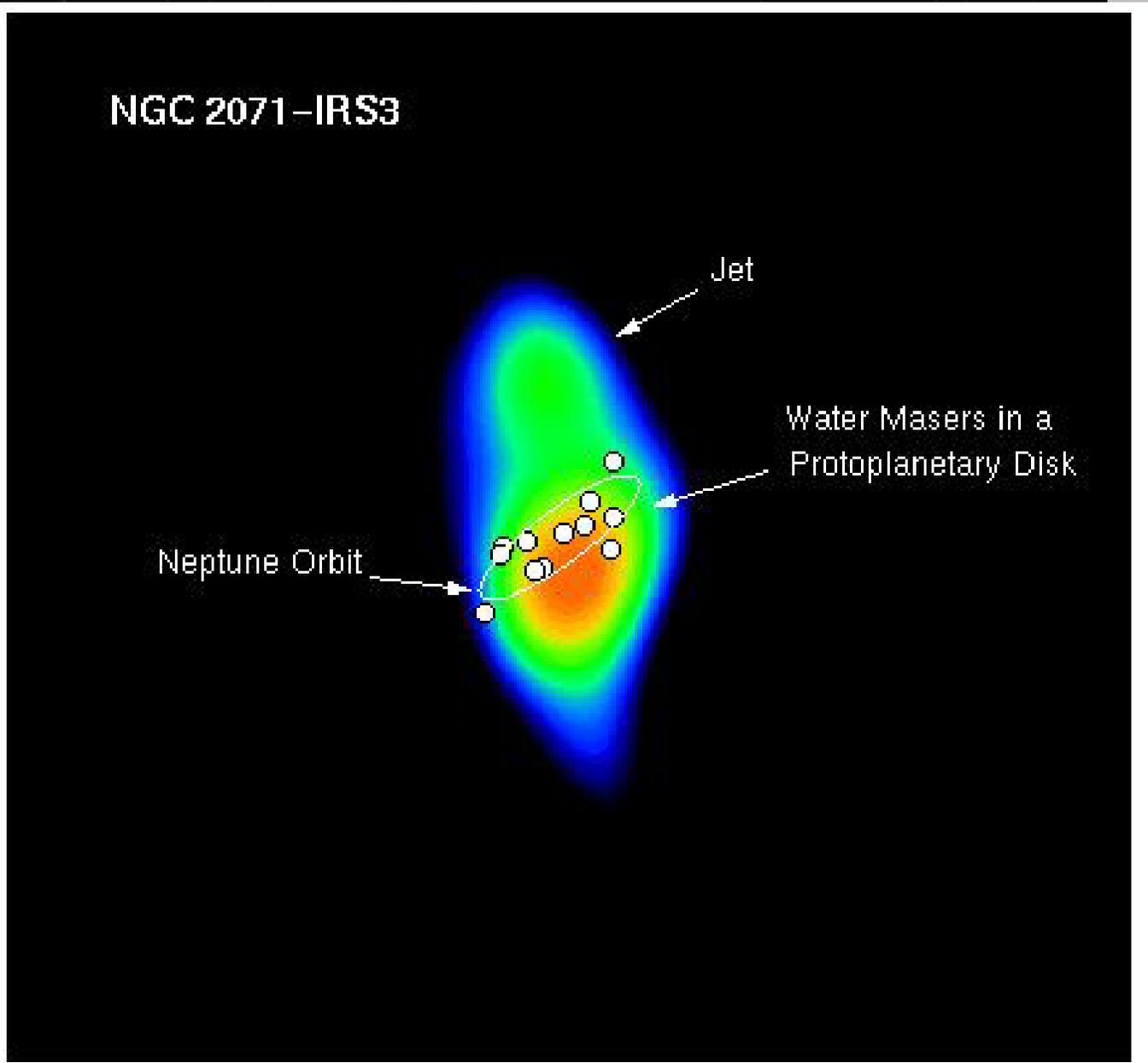
Correspondence to: Giovanna Tinetti^{1,2,3} Correspondence and requests for materials should be addressed to G.T. (Email: gio@qps.caltech.edu).

Water is predicted to be among the most abundant (if not the most abundant) molecular species after hydrogen in the atmospheres of close-in extrasolar giant planets ('hot Jupiters')^{1,2}. Several attempts have been made to detect water on such planets, but have either failed to find compelling evidence for it^{3,4} or led to claims that should be taken with caution⁵. Here we report an analysis of recent observations of the hot Jupiter HD 189733b (ref. 6) taken during the transit, when the planet

AGUA EN DISCOS PROTOPLANETARIOS



AGUA EN DISCOS PROTOPLANETARIOS



EXISTENCIA DE AGUA EN EXOPLANETAS

Aunque aun no hemos encontrado un exoplaneta en la Zona Habitable y que contenga agua....

....estamos descubriendo agua en planetas gigantes y en Sistemas Planetarios en formación.

⇒ Cada día parece mas plausible que existan planetas habitables y, quizás, sean mas comunes de lo que pensábamos.

CONCLUSIONES GENERALES

1. NO ESTAMOS SOLOS (POR LO MENOS COMO SISTEMA SOLAR)

- 245 exoplanetas, incluyendo estrellas con 2, 3 y 4 planetas
- ~11% de las estrellas tipo Solar poseen planetas detectables
- Sin embargo, la mayoría es diferente del nuestro

2. EXISTEN PLANETAS HABITABLES?

- No sabemos
- Sin embargo, cada día parece mas probable que si.
- Gl581c es el primer candidato

CONCLUSIONES GENERALES

3. TODAVIA

- Probablemente
- Existen (y previsiblemente)

Quizás, podemos

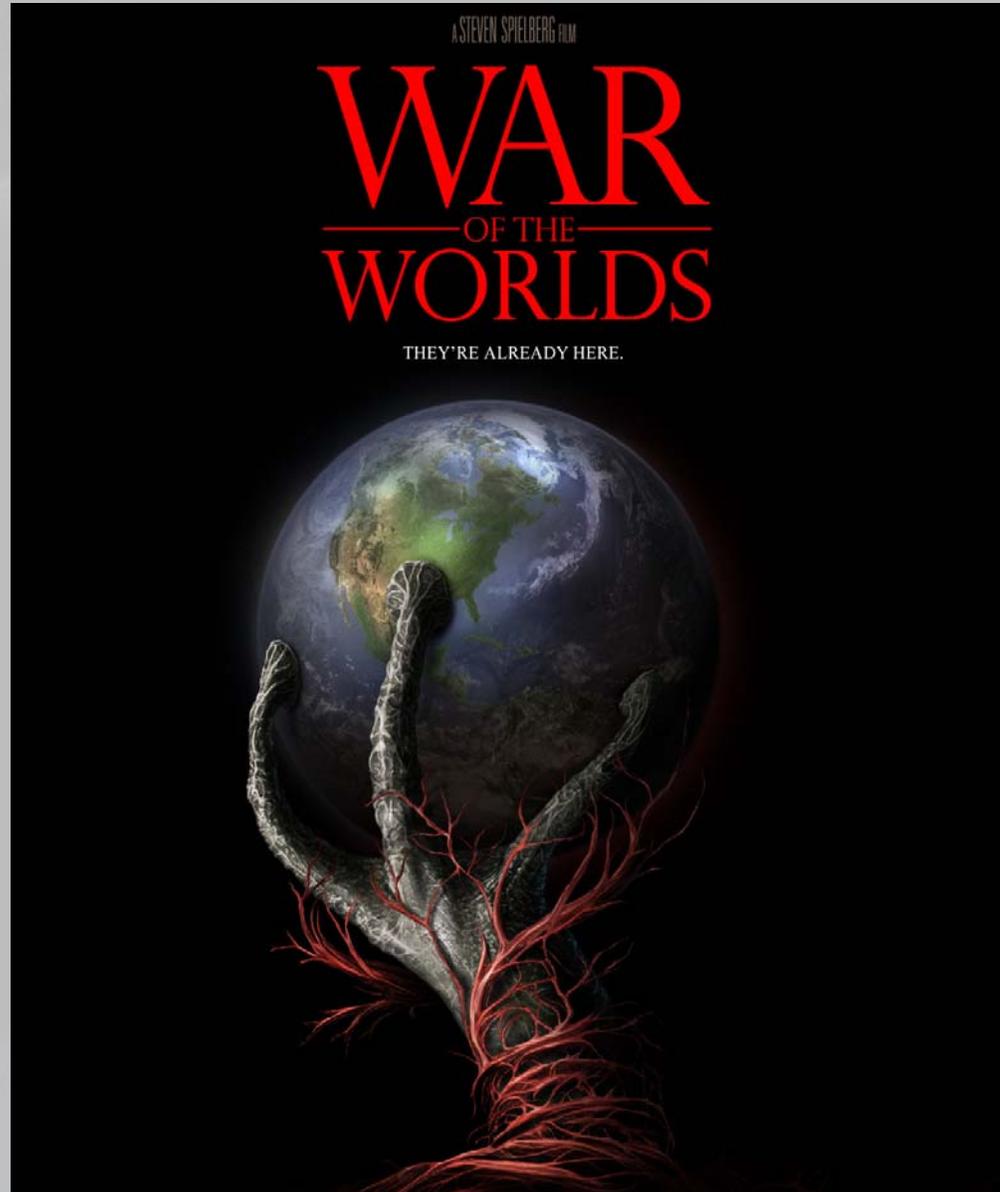


TIERRA

(espaciales)

Siempre hemos imaginado descubrir vida extraterrestre

A veces la hemos imaginado hostil.....



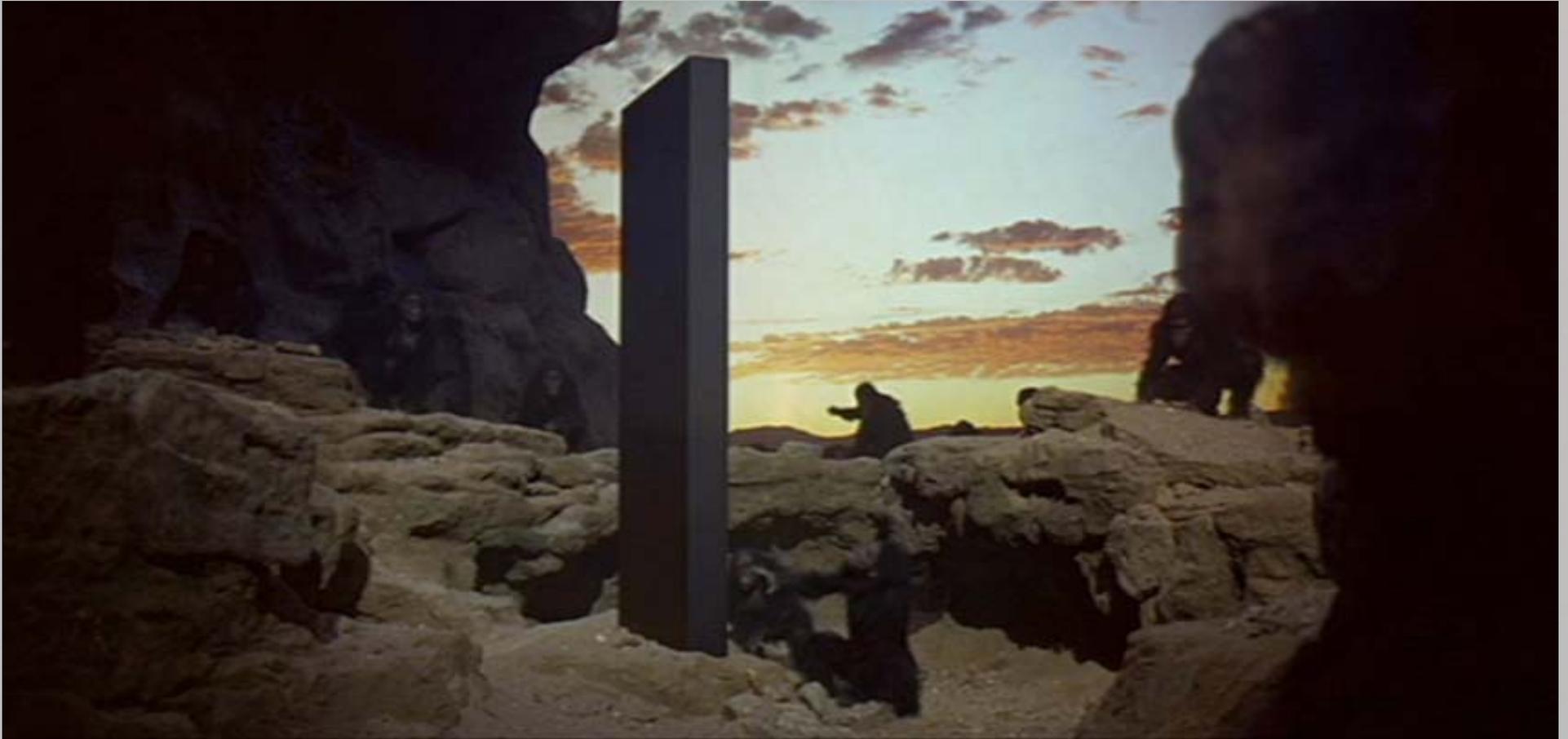
Siempre hemos imaginado descubrir vida extraterrestre

.....otras veces amigable.....



Siempre hemos imaginado descubrir vida extraterrestre

.....y otras casi como dioses



....pero casi siempre nos hemos imaginado como los “explorados”,
y pocas veces como los exploradores.

Lo importante de Planetas Extrasolares

Iniciamos un camino de descubrimiento.

Buscamos nuestro pares, sea como planetas o como vida.

LOS RESULTADOS YA SON INTRIGANTES.

VEREMOS QUE NOS DEPARA EL FUTURO.

FIN