

# Formación de Estrellas y Planetas



**Dra. Mercedes Gómez**

**OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE CORDOBA**

**Diciembre de 2007**

HARDY

# Formación Estelar y Planetaria: ¿Etapas de un mismo proceso?

DIFFUSE CLOUD

DENSE CLOUD

ACCRETION DISK

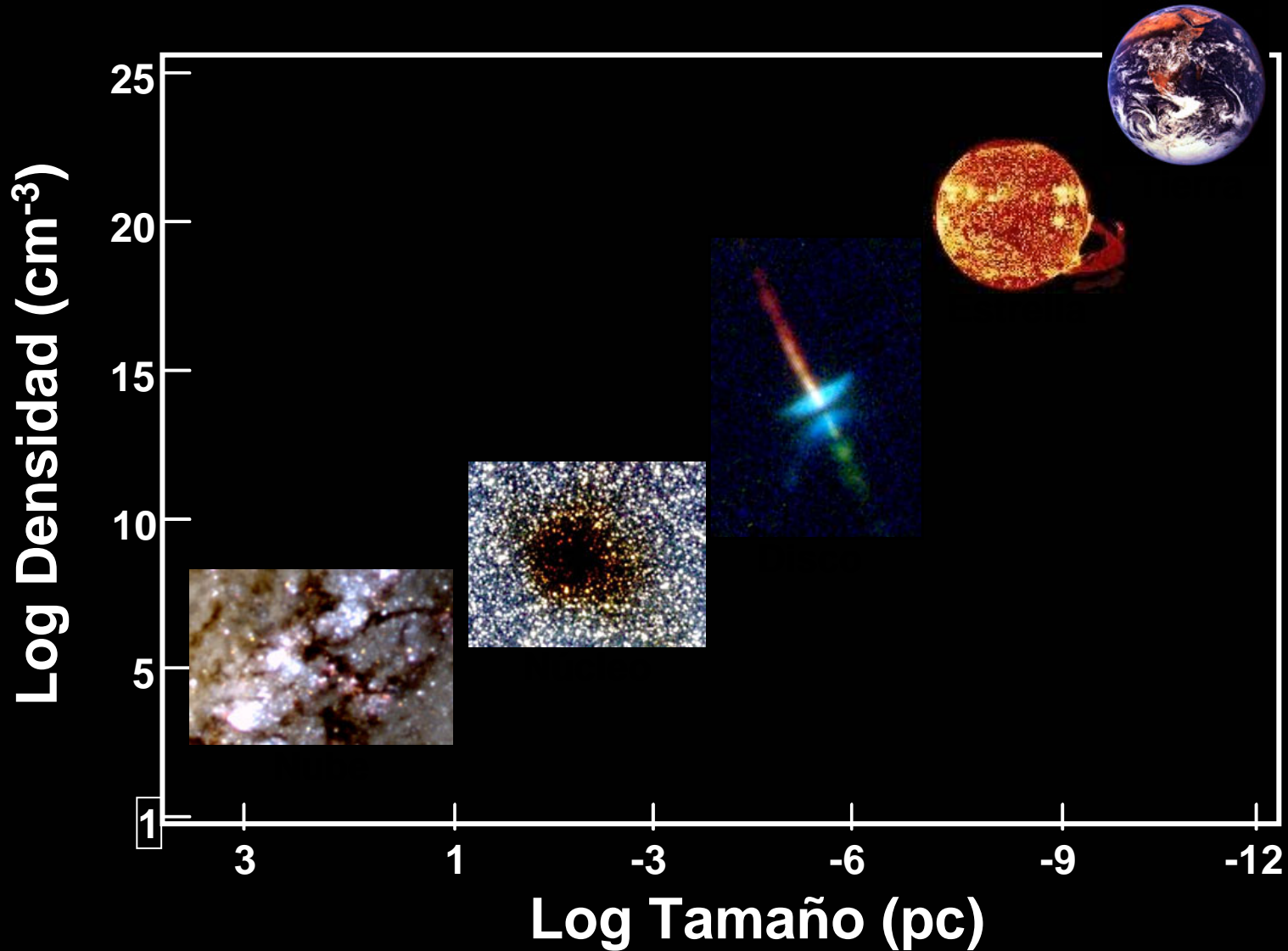
STELLAR SYSTEM

MASS LOSS

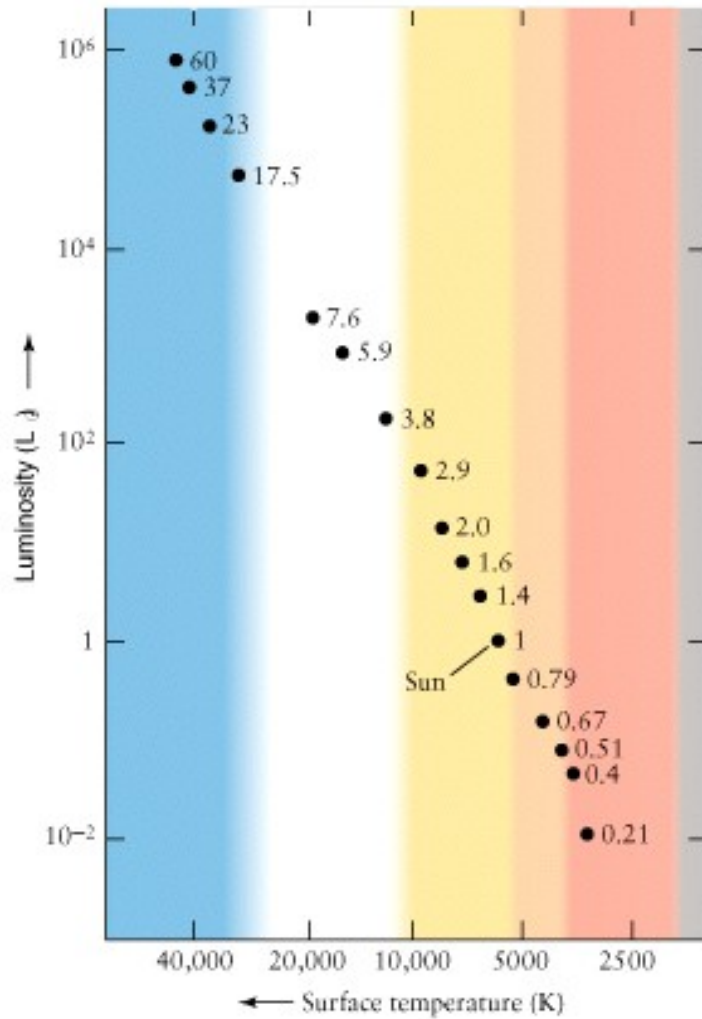
ZOOM TO PLANET



# Desde las Nubes Moleculares hasta los Planetas



# Planetas en Estrellas de Todas las Masas



$$0^{\circ}\text{C} = 273.15^{\circ}\text{K}$$

# Nubes Moleculares

Eagle Nebula  
M16



Hubble  
Heritage

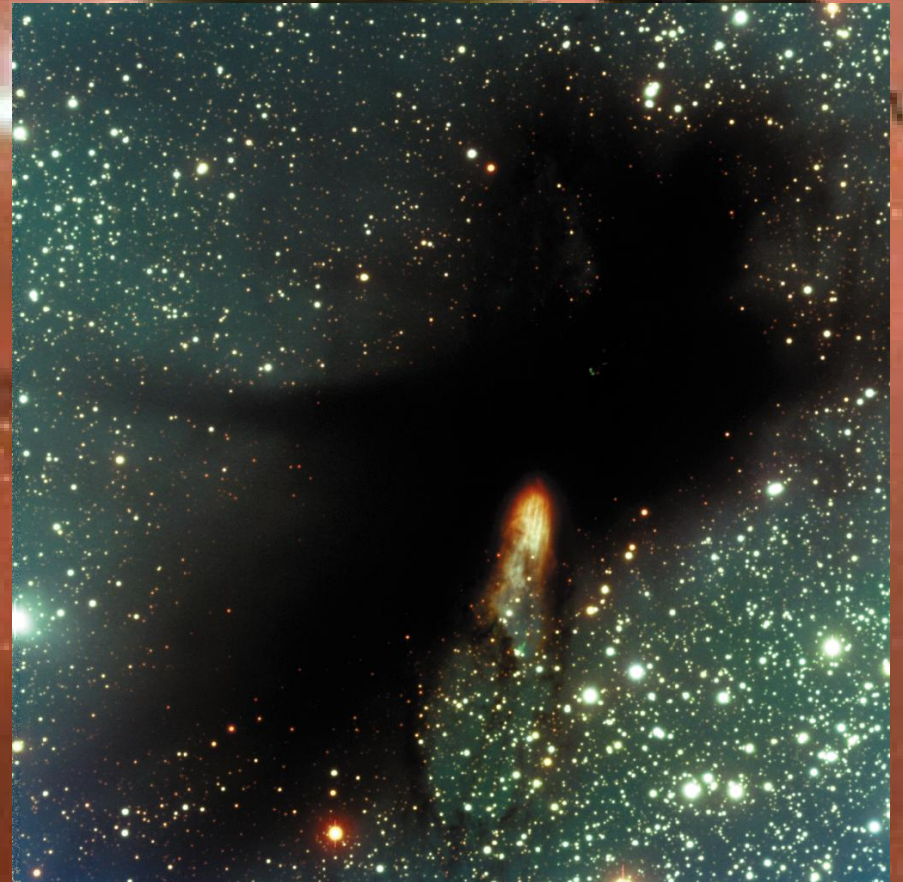
NASA, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope ACS • STScI-PRC05-12b





**Nubes Moleculares.**

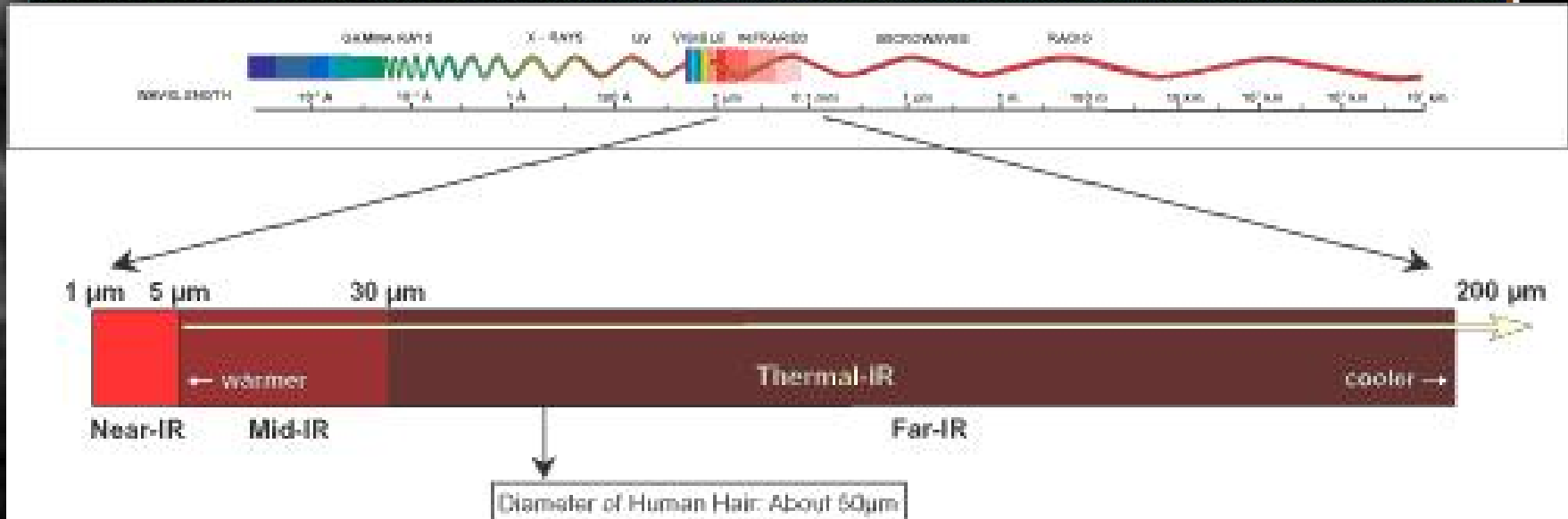
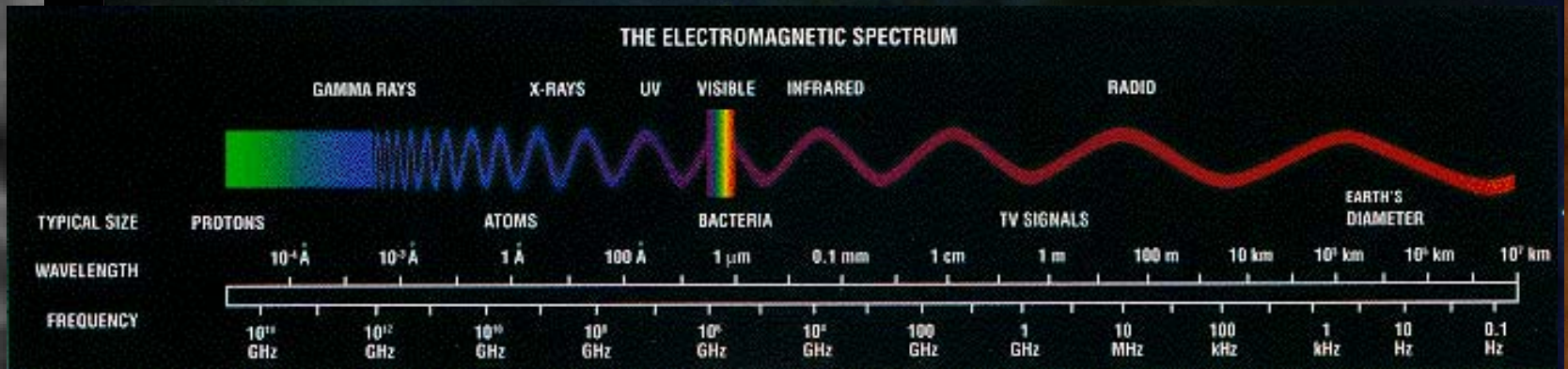
**Oscuras**



# Nubes Moleculares: Orion



# Espectro Electromagnético



**Infrarrojo cercano 1—5 μm**

**Infrarrojo medio 5—30 μm**

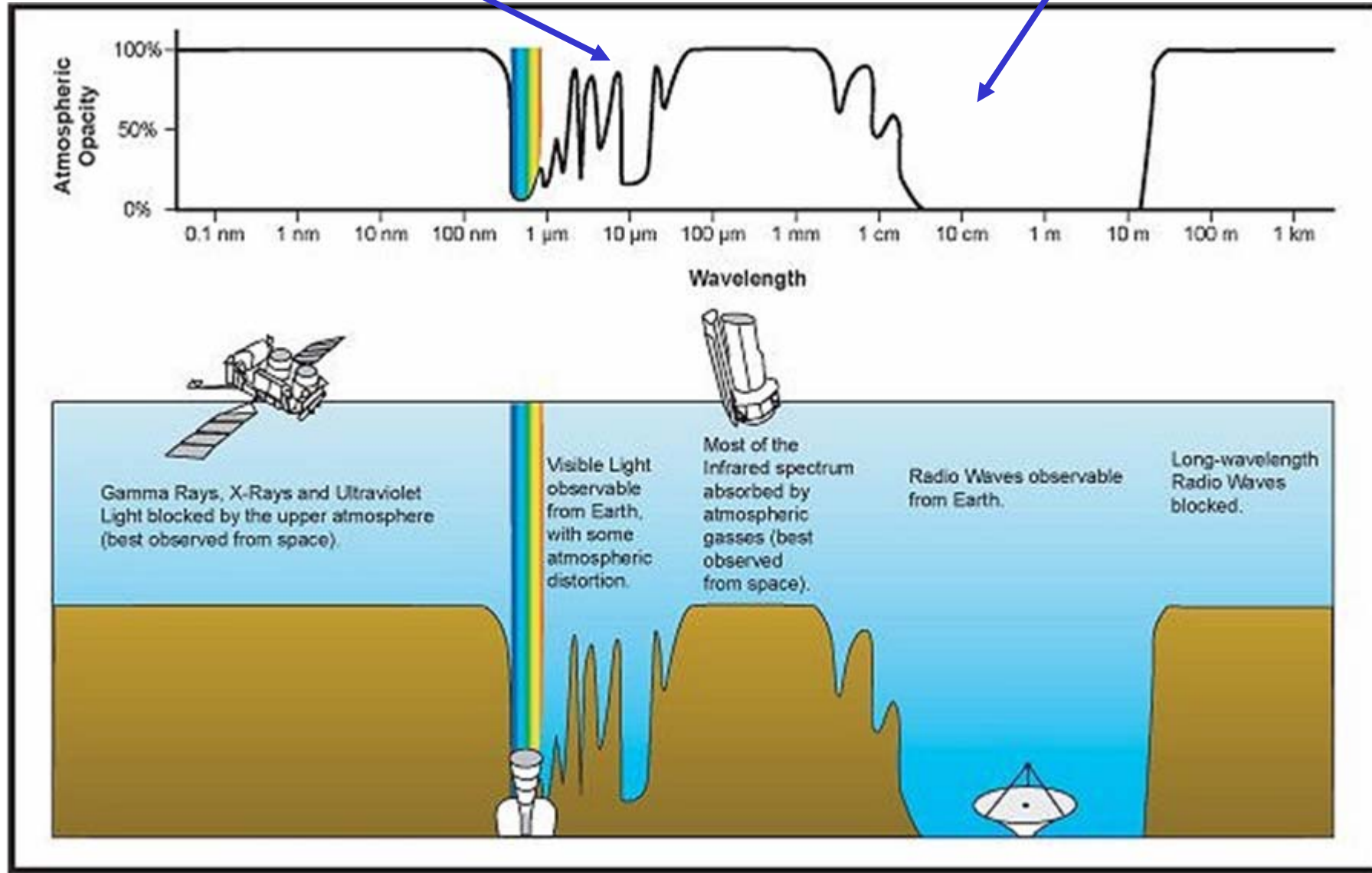
**Infrarrojo lejano 30—200 μm**

$$1 \mu\text{m} = 10000 \text{ \AA}$$

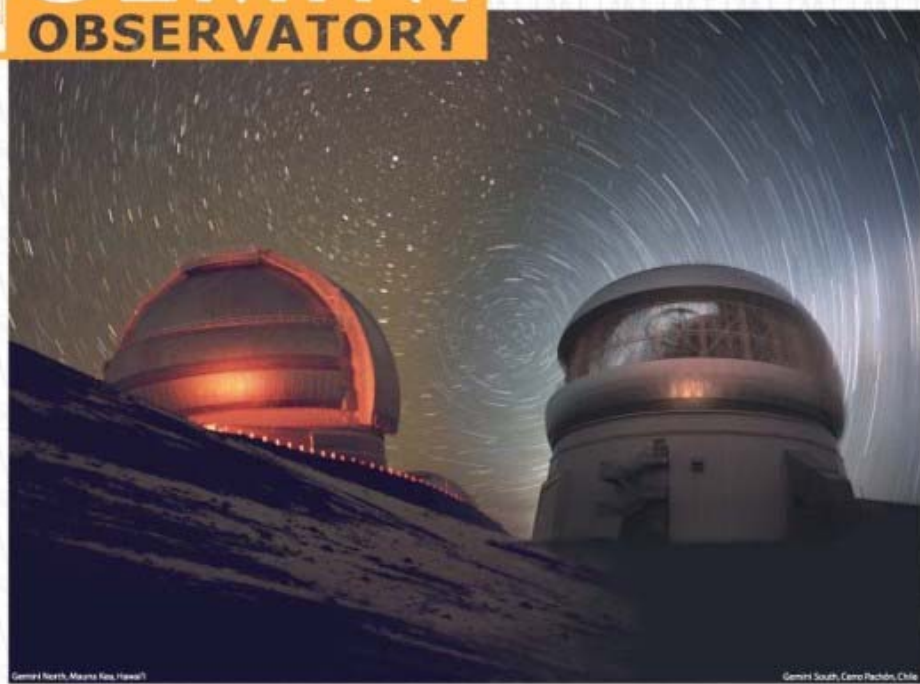
# Opacidad de la Atmósfera Terrestre

Ventana óptica-infrarroja

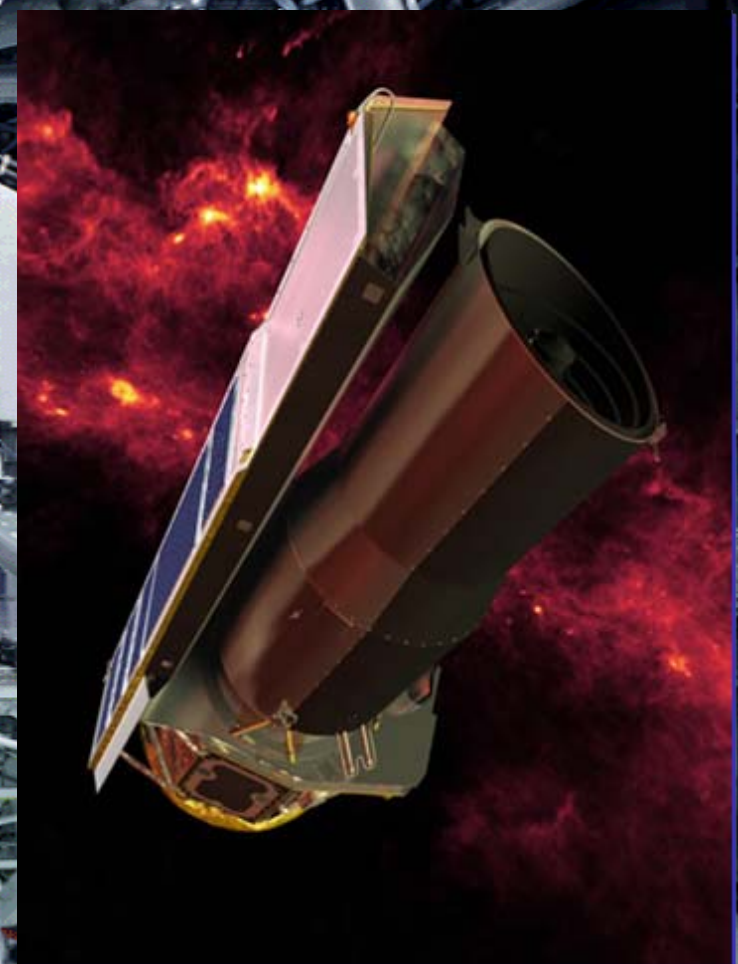
Ventana de radio



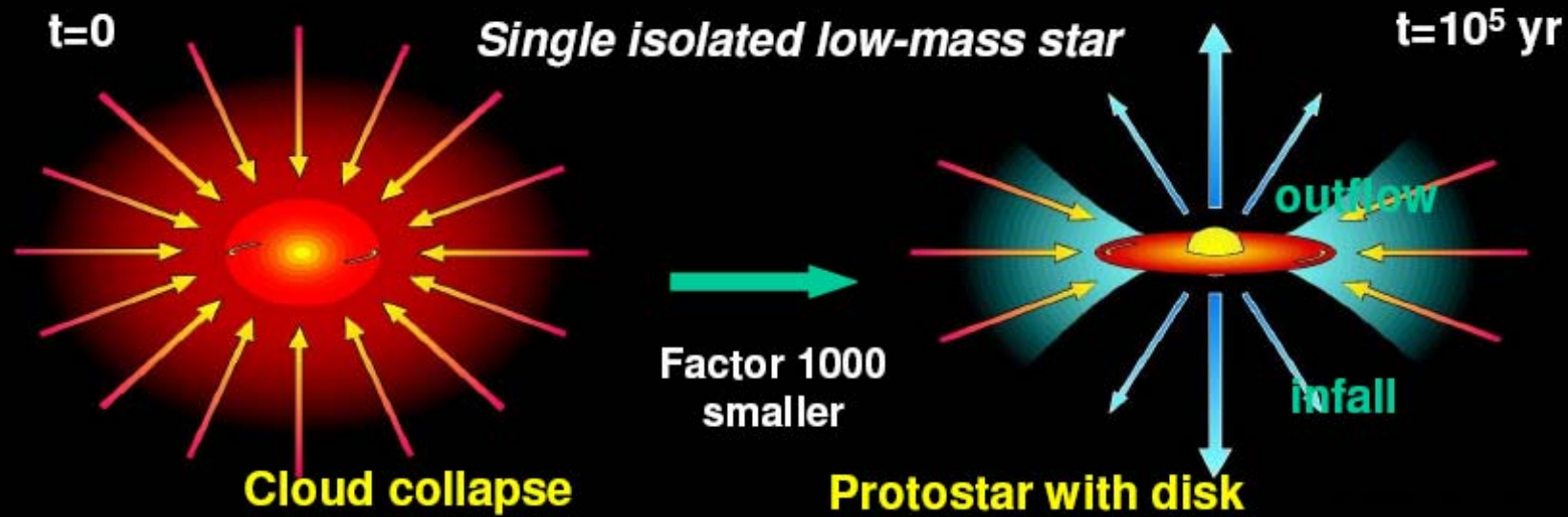
 **GEMINI**  
OBSERVATORY



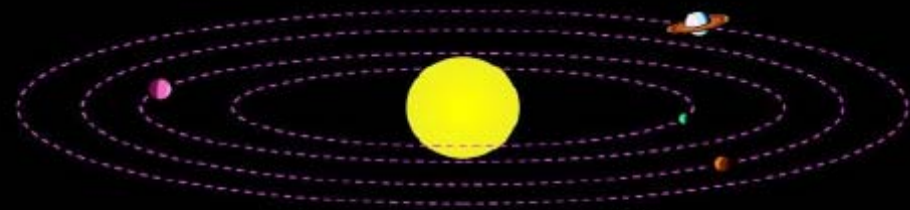
**SPITZER**



# Esquema de Formación Estelar y Planetaria



**Formation of planets**



**Solar system**

**t=10<sup>6</sup>-10<sup>7</sup> yr**

**t > 10<sup>8</sup> yr**

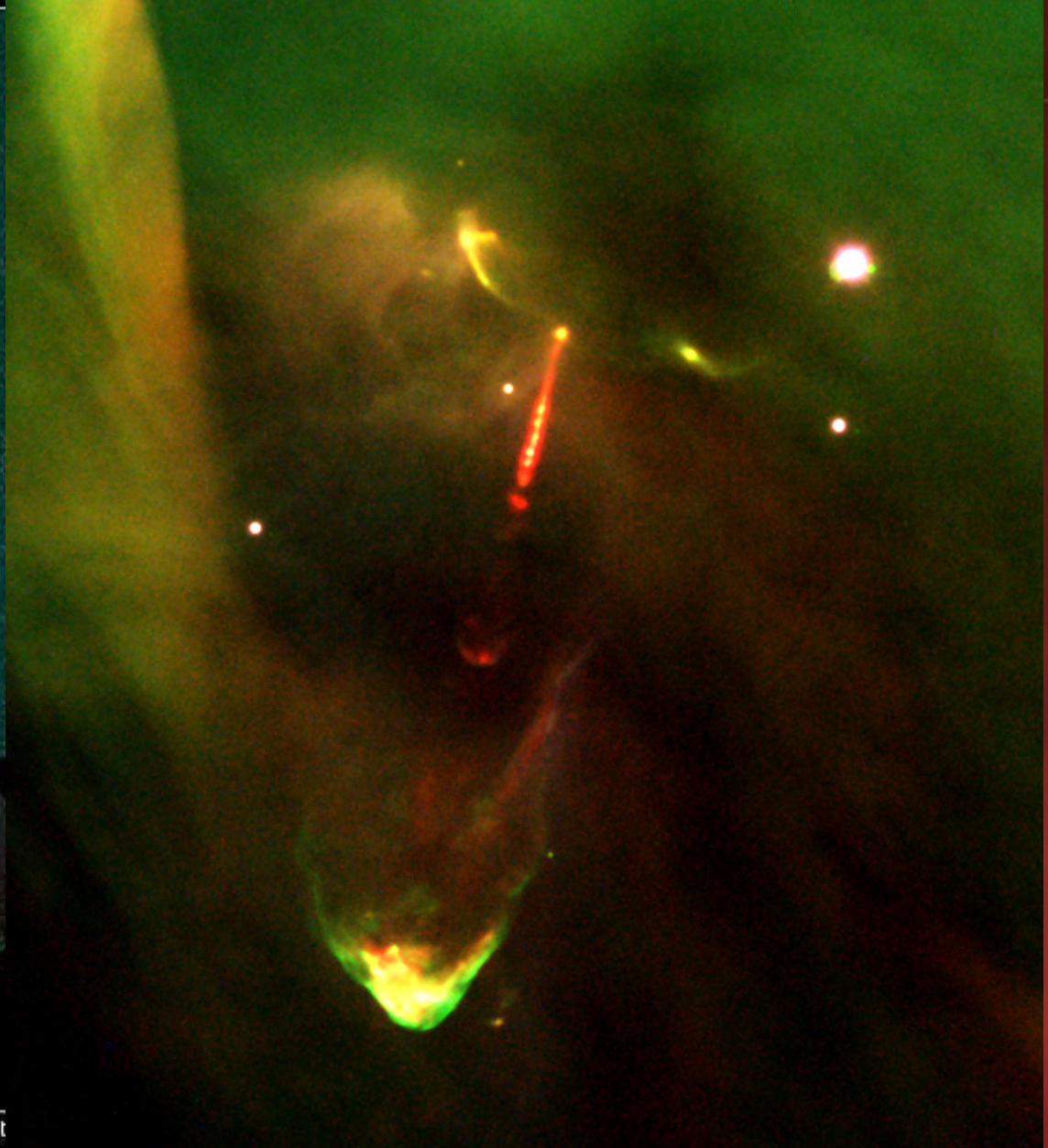
# Formación Estelar

# Formación Planetaria



# Formación Planetaria

# Jets Estelares



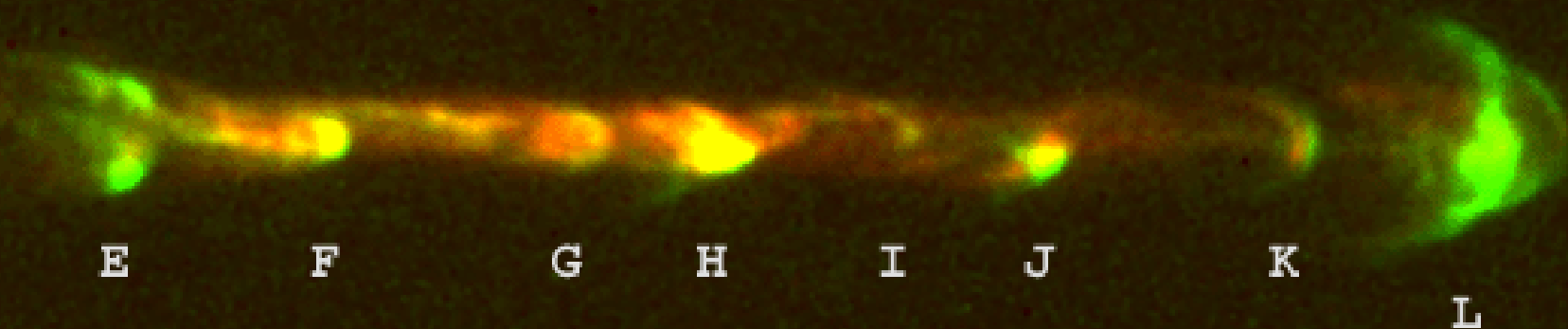
NASA and B. Relpurth (CASA, Universit

HH 111

1994.9 UT

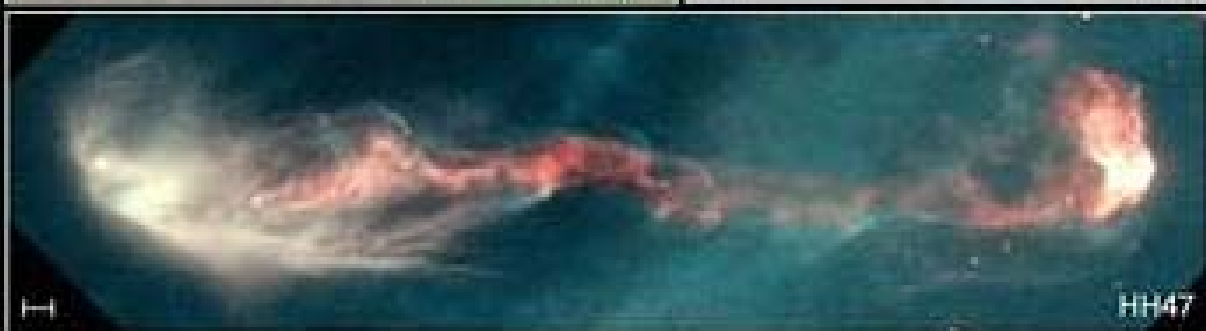
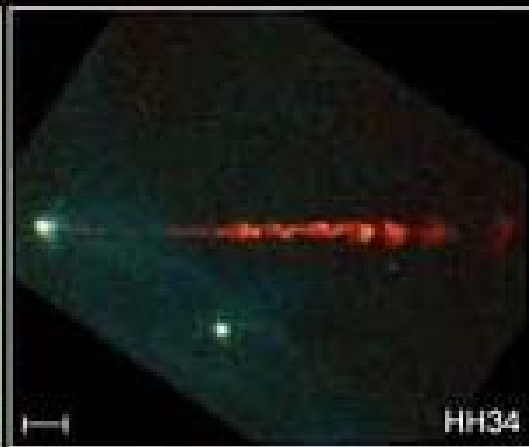
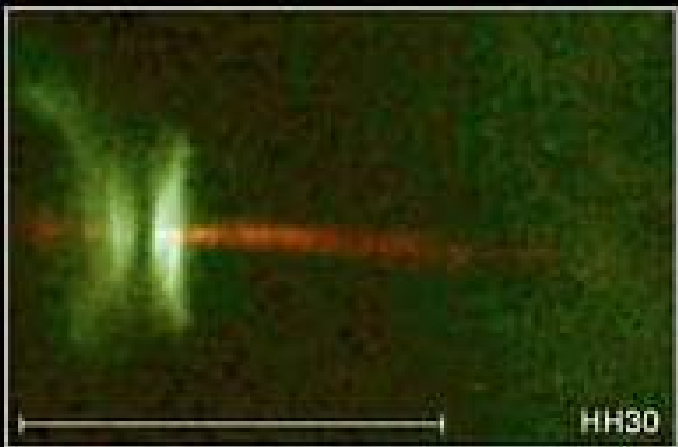
Green: H $\alpha$

Red: [S II]



1000 AU

**Jets Estelares**



**Jets  
Estelares**



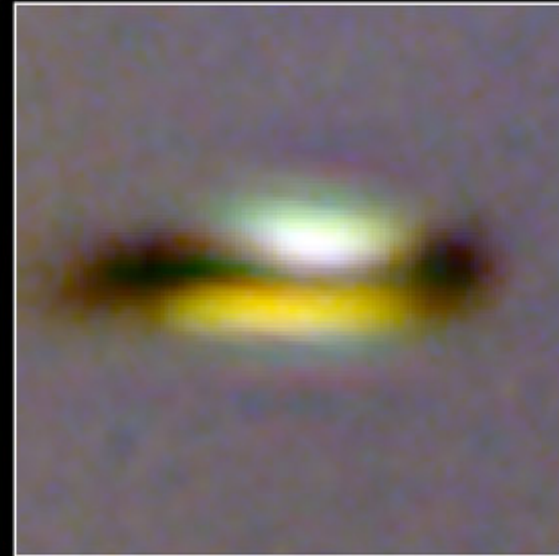
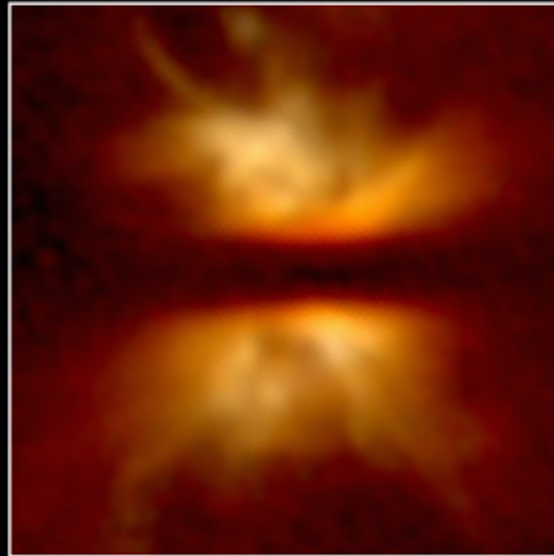
**Jets Estelares**

# Discos Protoplanetarios

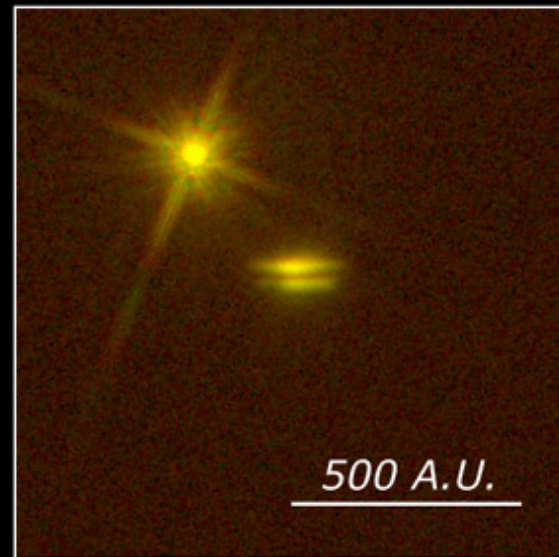
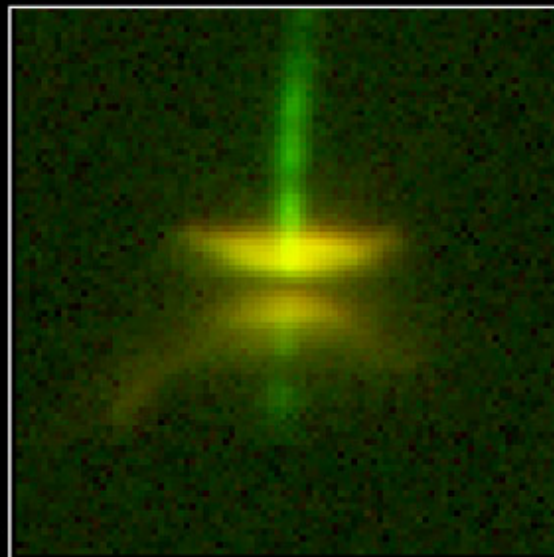
*IRAS 04302+2247*

*Orion 114-426*

**NICMOS**



**WFPC2**



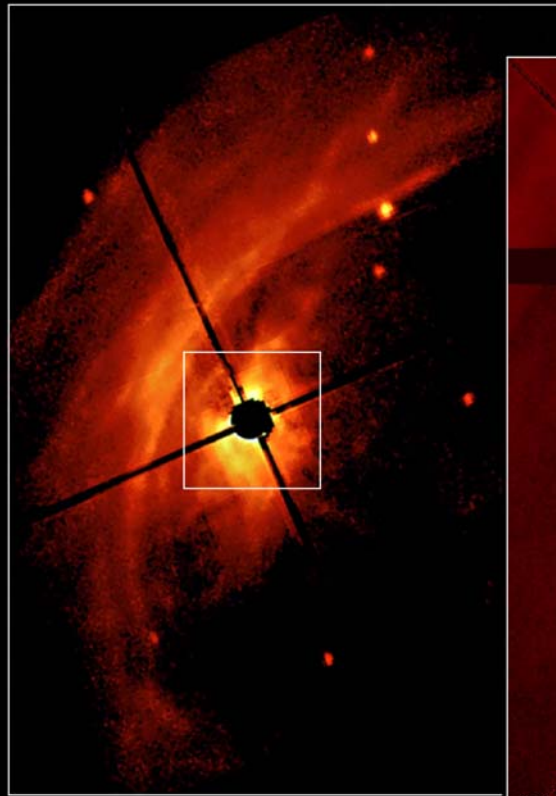
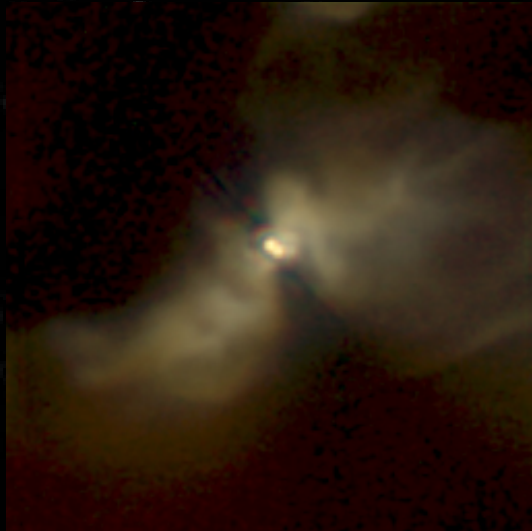
*HH 30*

*HK Tau/c*

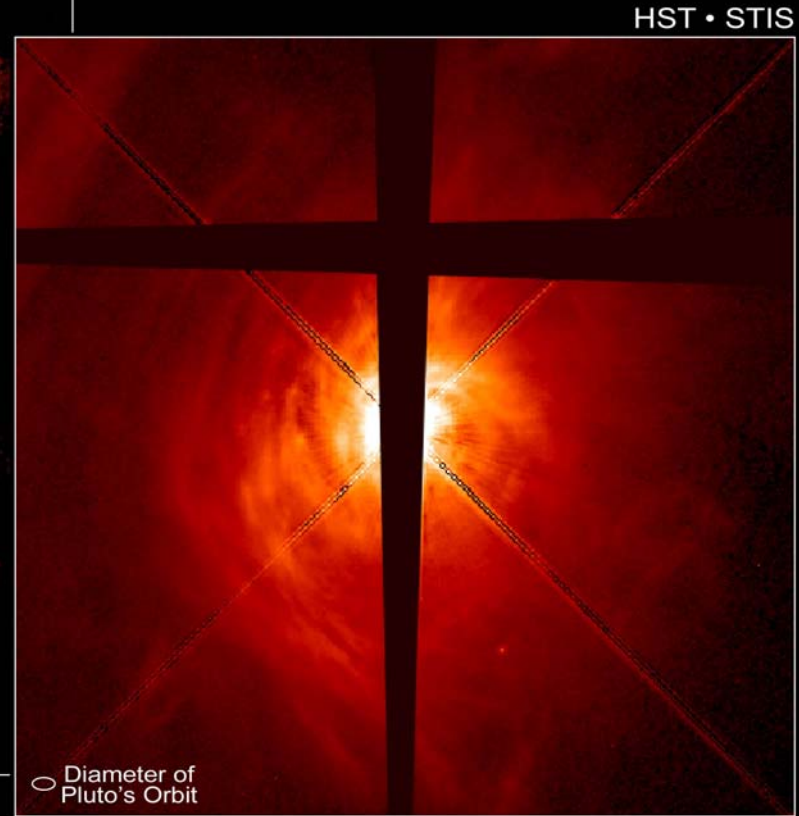
# Discos Protoplanetarios



# Discos Protoplanetarios



University of Hawaii

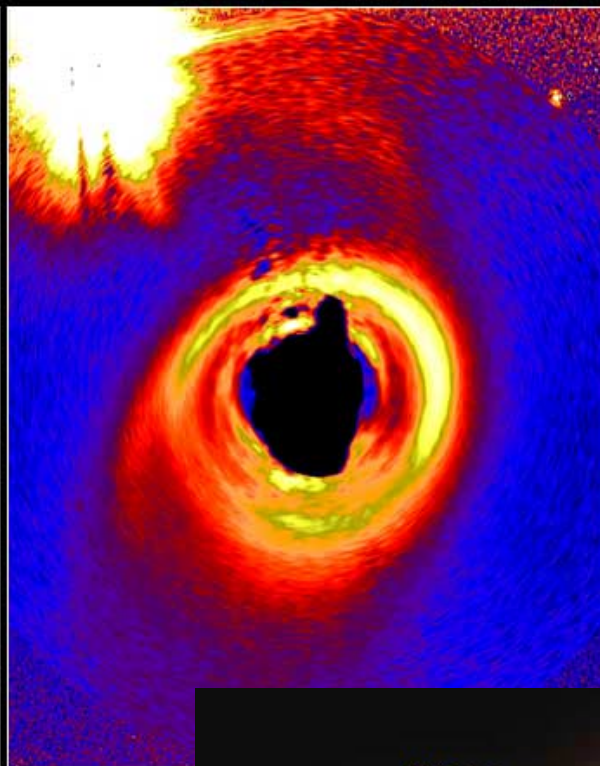
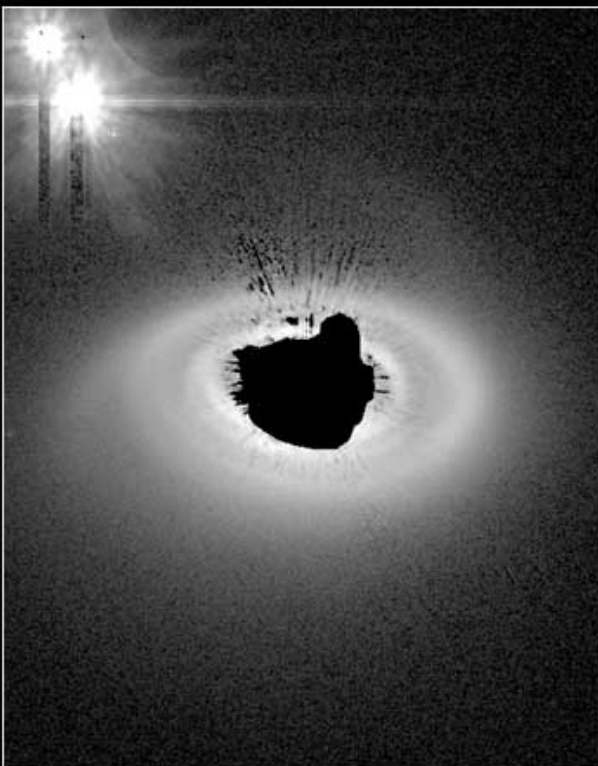


○ Diameter of Pluto's Orbit

**AB Aurigae Disk**  
Hubble Space Telescope • STIS

# Formación Planetaria



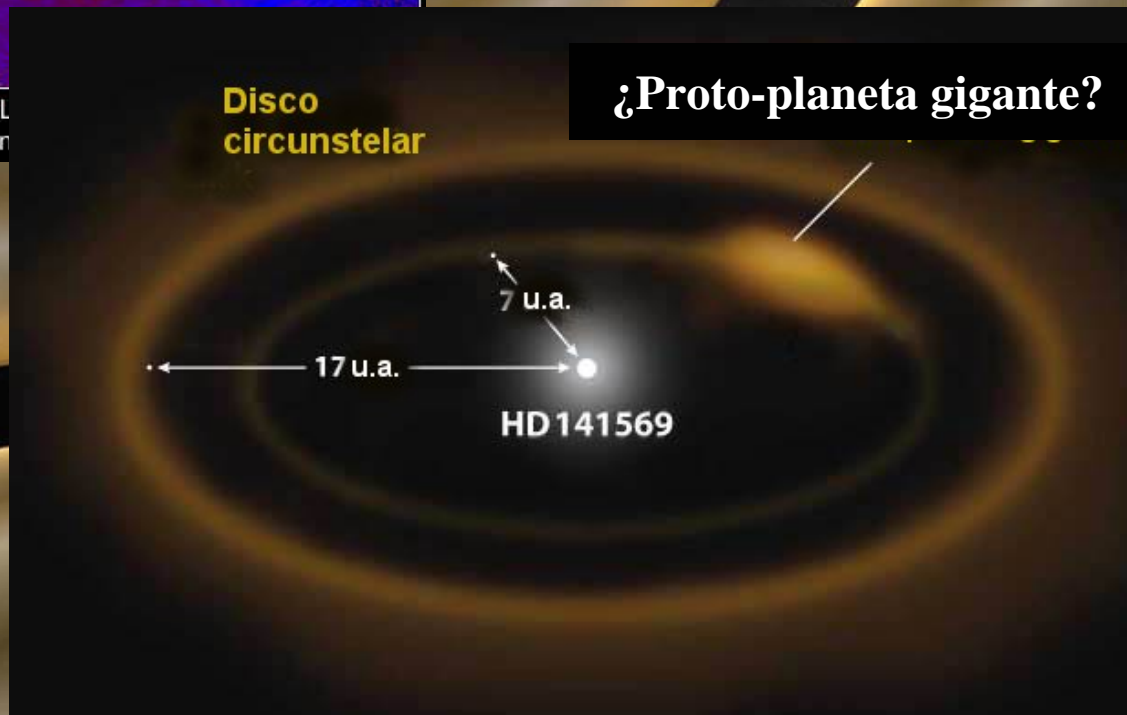


# “Gap” en los Discos Circunestelares

NASA, M. Clampin (STScI), H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCO/L  
D. Ardila (JHU), D. Golimowski (JHU), the ACS Science Team and



Koerner et al. (1998)



# Fomalhaut: Disco Circunestelar



## Estrella

$$T_{\text{ef}} = 8720 \text{ K}$$

$$d = 7.7 \text{ pc}$$

$$V = 1.16$$

## Disco

$$R_{\text{in}} = 133 \text{ UA}$$

$$\text{Ancho} = 25 \text{ UA}$$

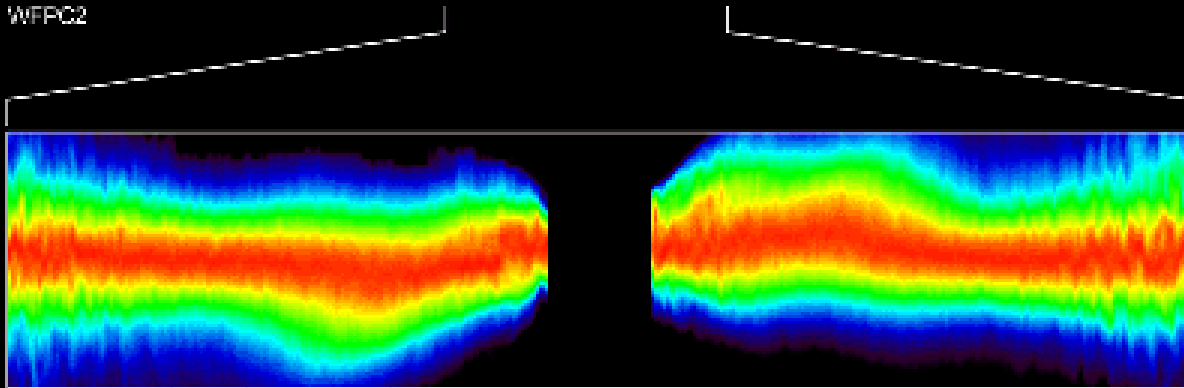
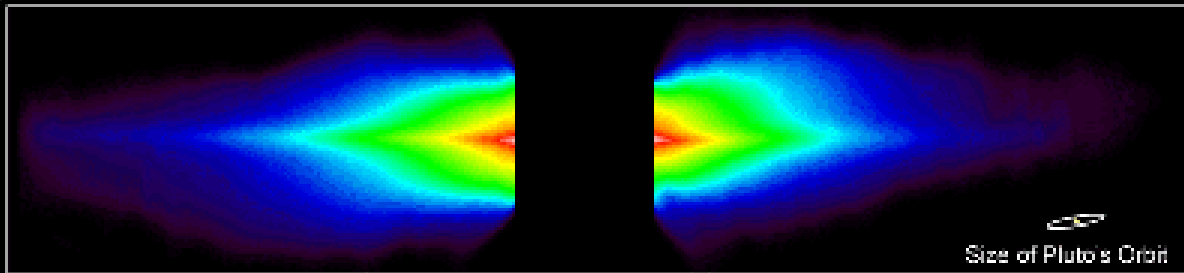
$$E\text{-D} = 15.3 \text{ UA}$$

# $\beta$ Pictoris

$T_{\text{ef}} = 8200 \text{ K}$

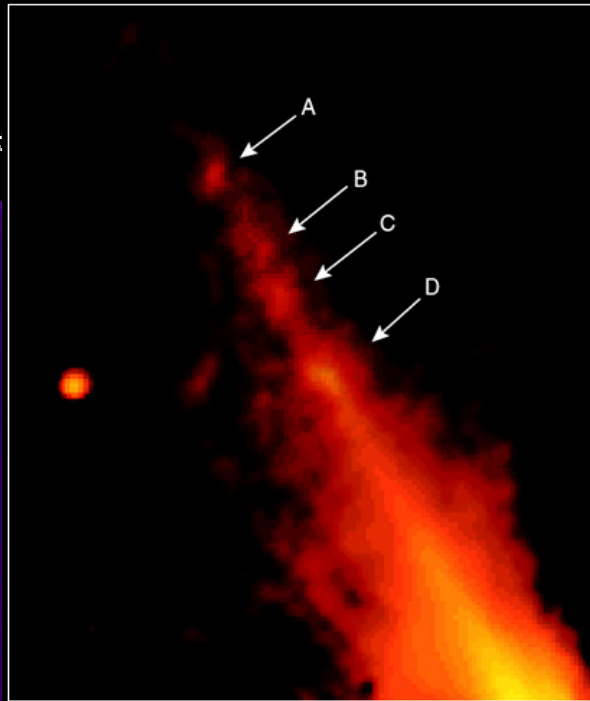
$V = 3.8$

Dist. = 19 pc



## Beta Pictoris

PRC98-03 • January 8, 1998 • ST ScI OPO  
A. Schultz (Computer Sciences Corp.), S. Heap (NASA Goddard Space Flight Center)



## Rings in the Beta Pictoris Disk

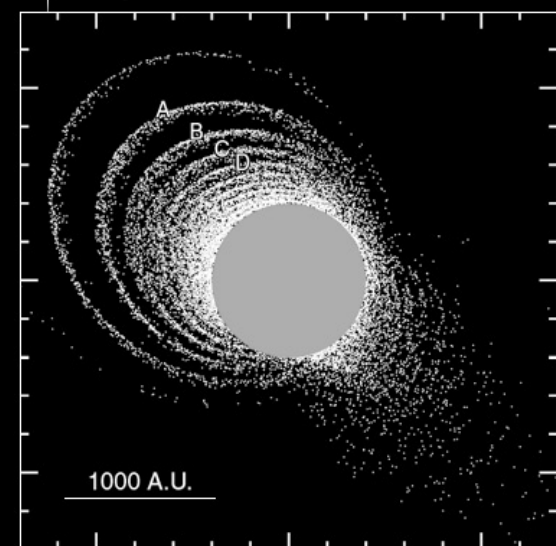


Image • Edge-On  
HST • WFPC2

Model • Face-On

# Epsilon Eridanis

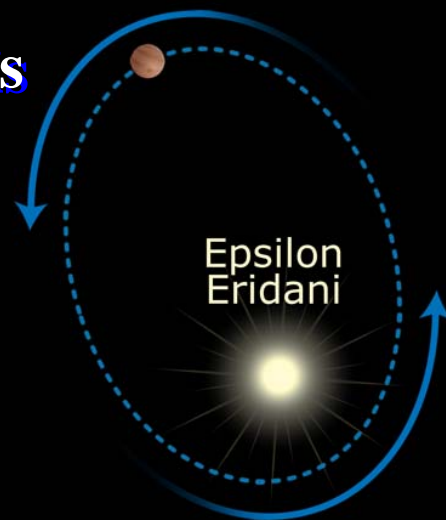
Estrella

$T_{\text{ef}} = 5116 \text{ K}$

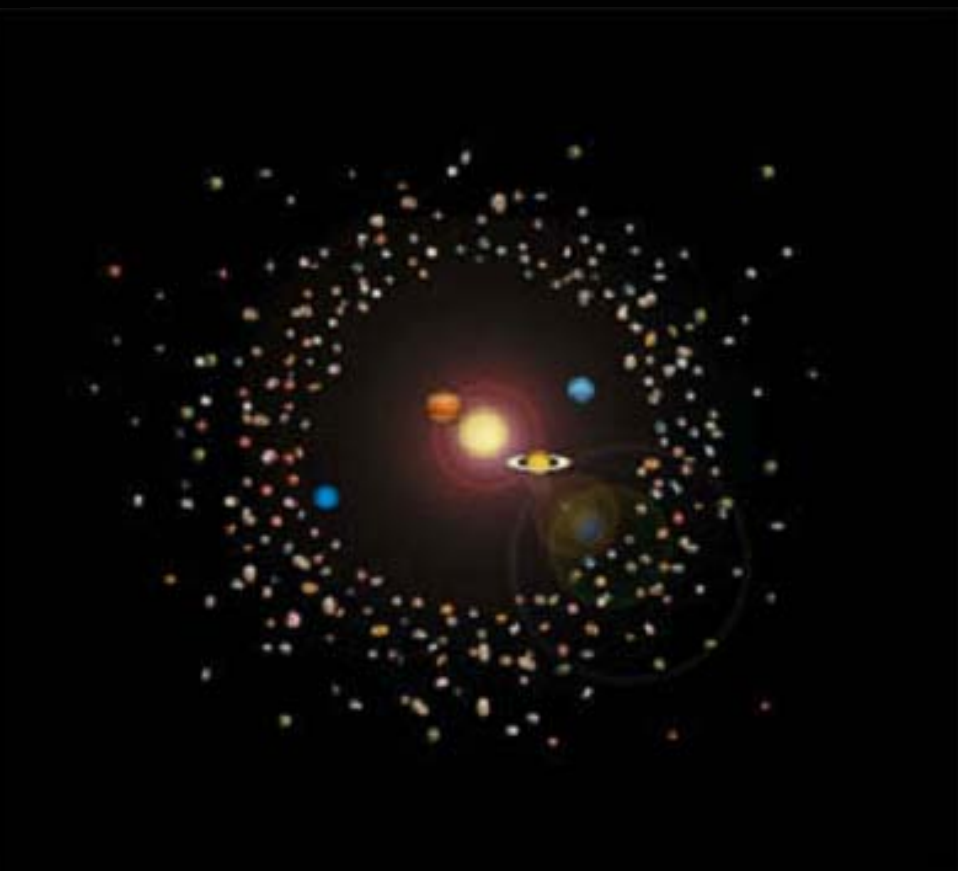
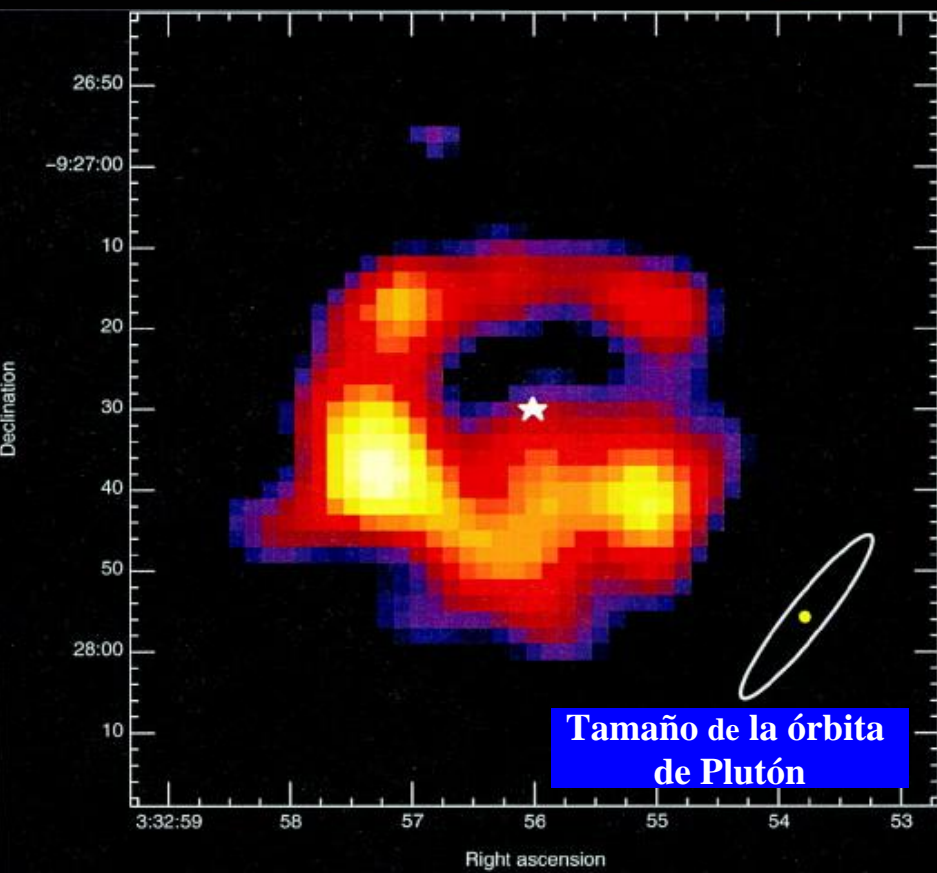
$d = 3.2 \text{ pc}$

$V = 3.73$

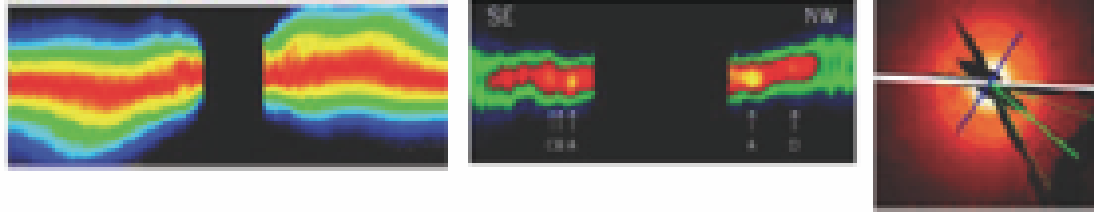
Greaves et al. (2005)



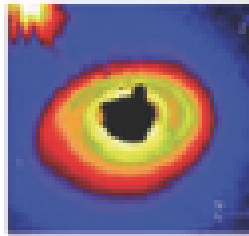
	Planeta interno	Planeta externo
<b>M<sub>seni</sub></b>	<b><math>1.55 \pm 0.24 M_{\text{Jup}}</math></b>	<b><math>0.1 M_{\text{Jup}}</math></b>
<b>a</b>	<b><math>3.39 \pm 0.36 \text{ UA}</math></b>	<b>40 UA</b>
<b>P</b>	<b>6.9 años</b>	<b>280 años</b>
<b>e</b>	<b><math>0.702 \pm 0.039</math></b>	<b>0.3</b>



**Warps**

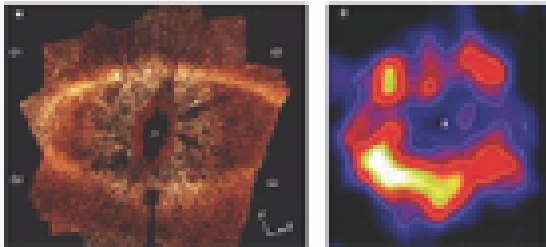


**Spirals**

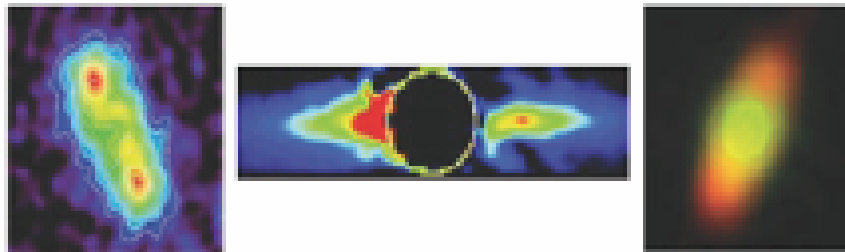


# Morfología de Discos de Circunestelares

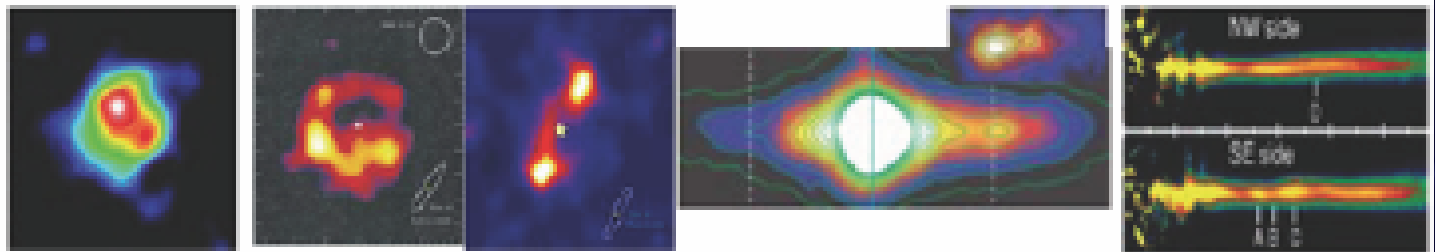
**Offsets**



**Brightness asymmetries**



**Clumpy rings**

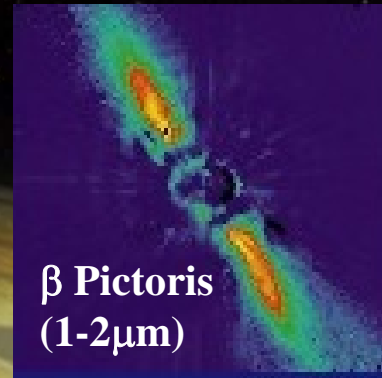


# “Discos de Circunetelares”

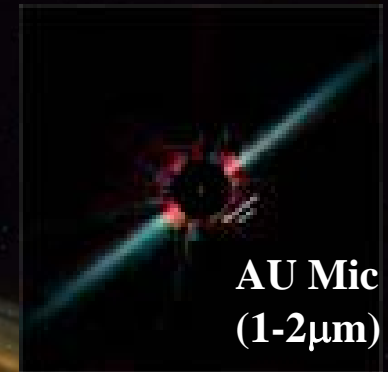
La morfología de algunos de los discos sugiere



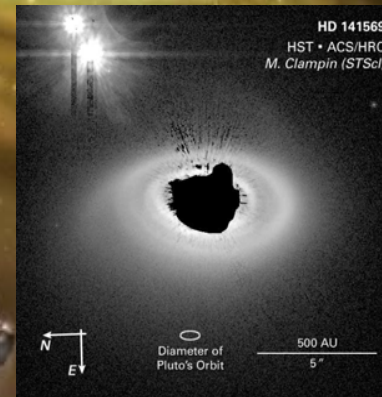
Presencia de planeta/s



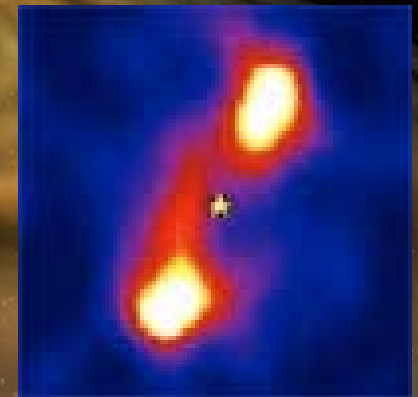
$\beta$  Pictoris  
(1-2 $\mu$ m)



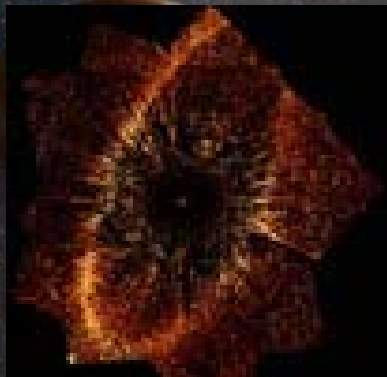
AU Mic  
(1-2 $\mu$ m)



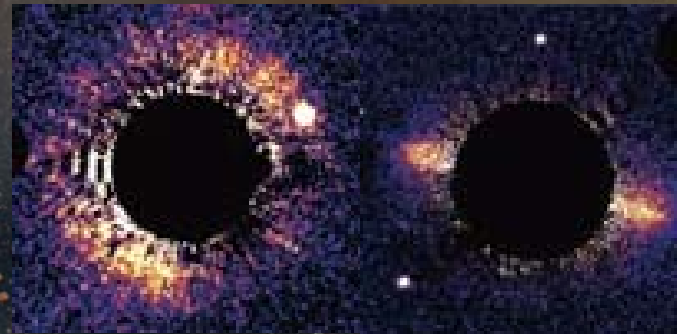
HD 141569 (0.5 $\mu$ m)



$\epsilon$  Eridani (450 y 850 $\mu$ m)



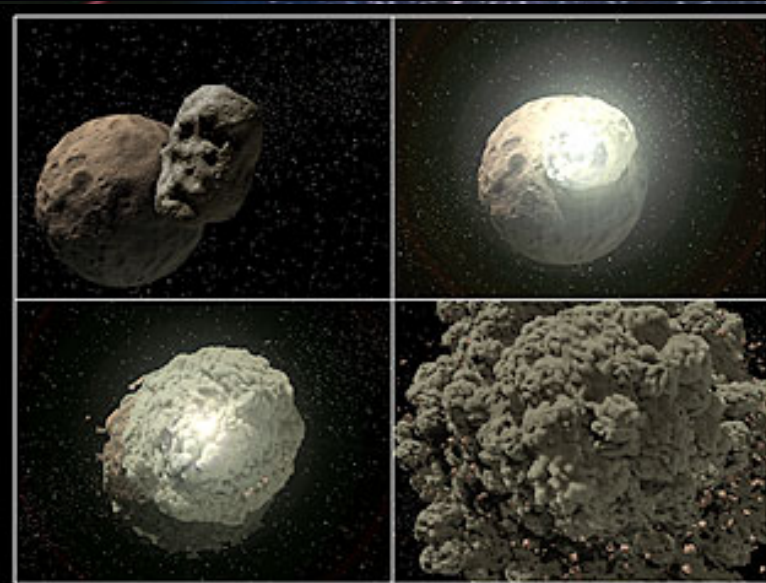
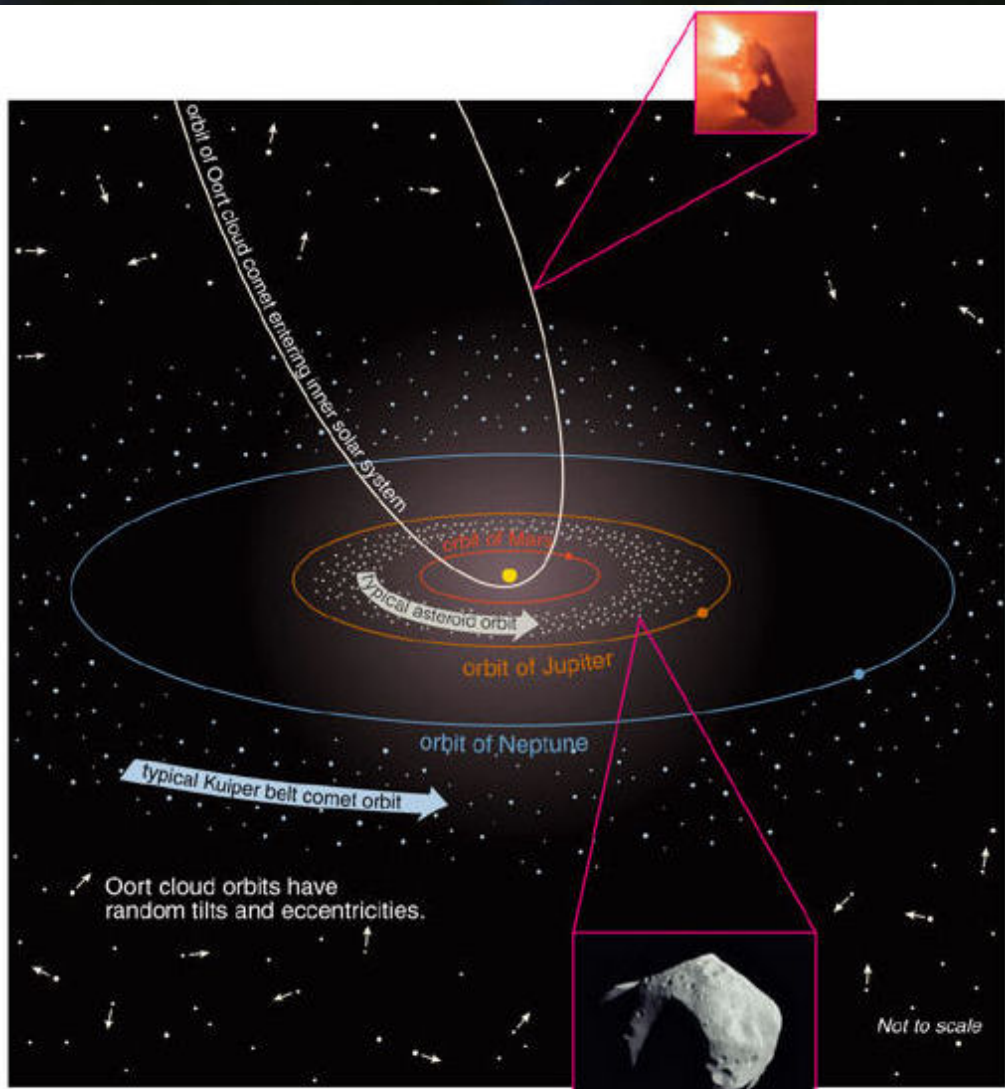
Fomalhaut (0.5 $\mu$ m)



HD 53153

HD 139664 (0.5 $\mu$ m)

# El cinturón de Kuiper del Sistema Solar y la Luz Zodiacal

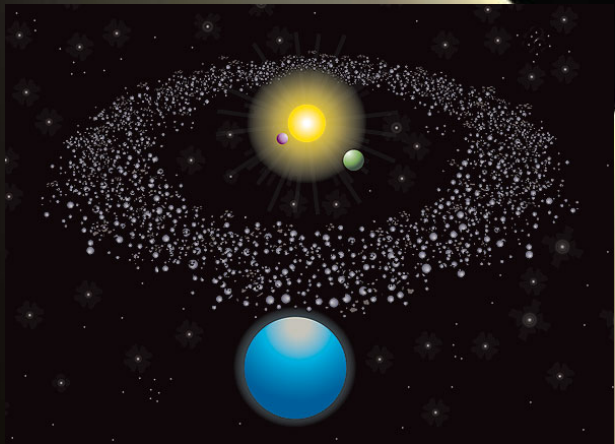






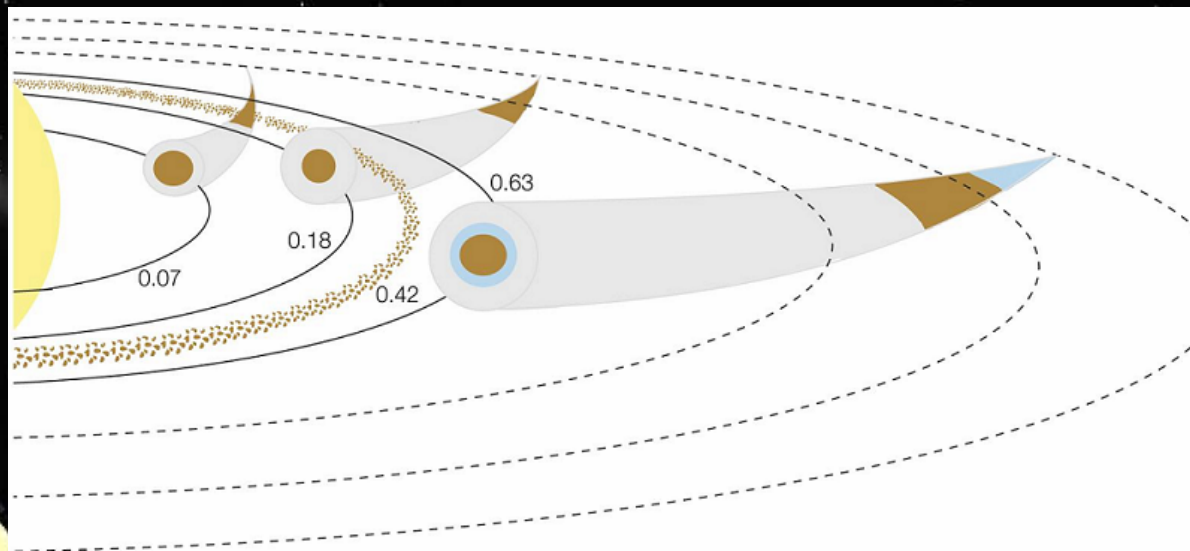
Wavelength [microns]

# HD 69830



Radio del cinturón = 0.3-0.5 UA

Masa del cinturón = 1000  $M_{\text{Kuiper}}$

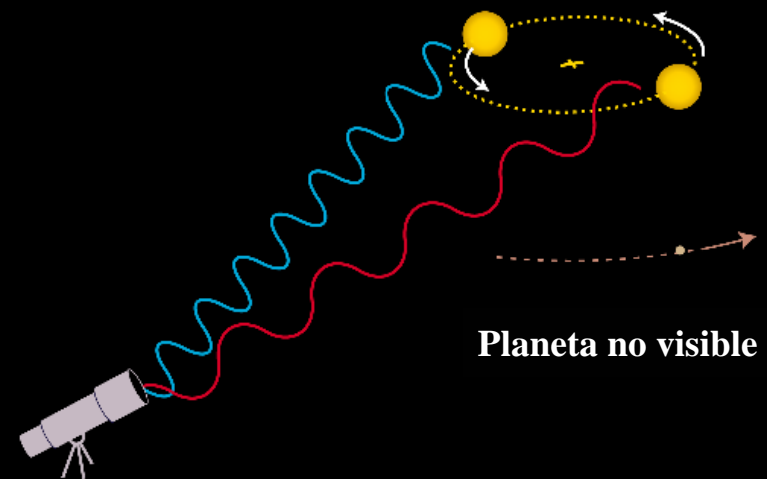
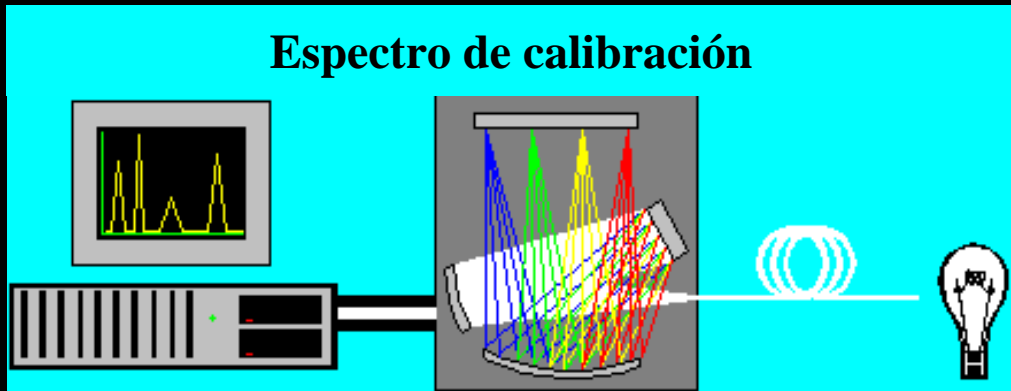
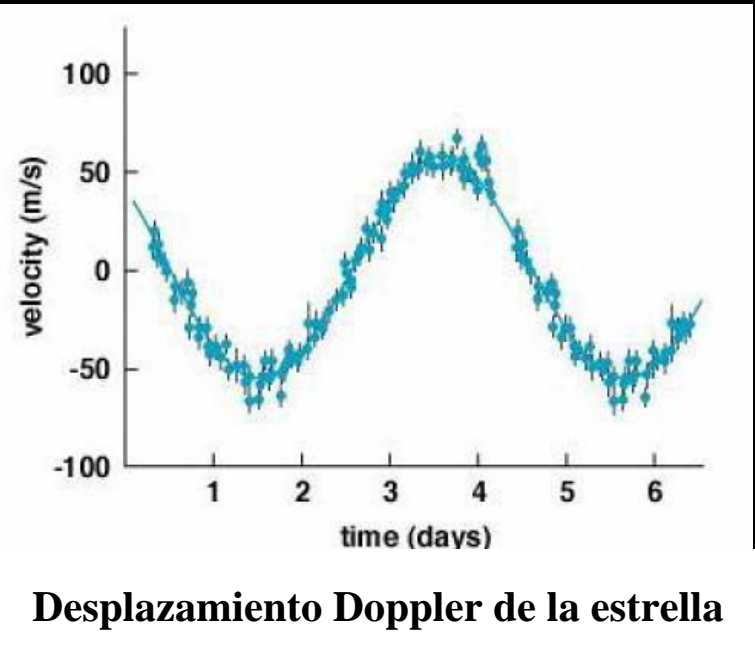
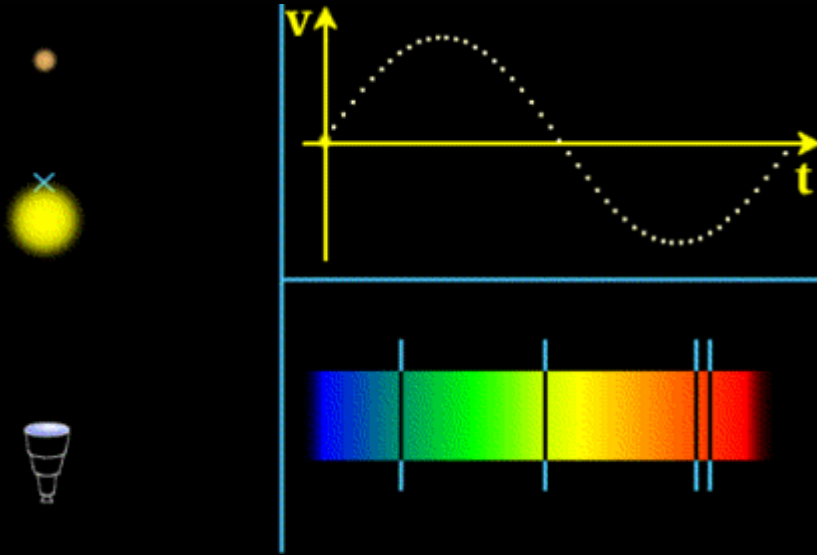


Planeta en zona habitable  
**Planetas**

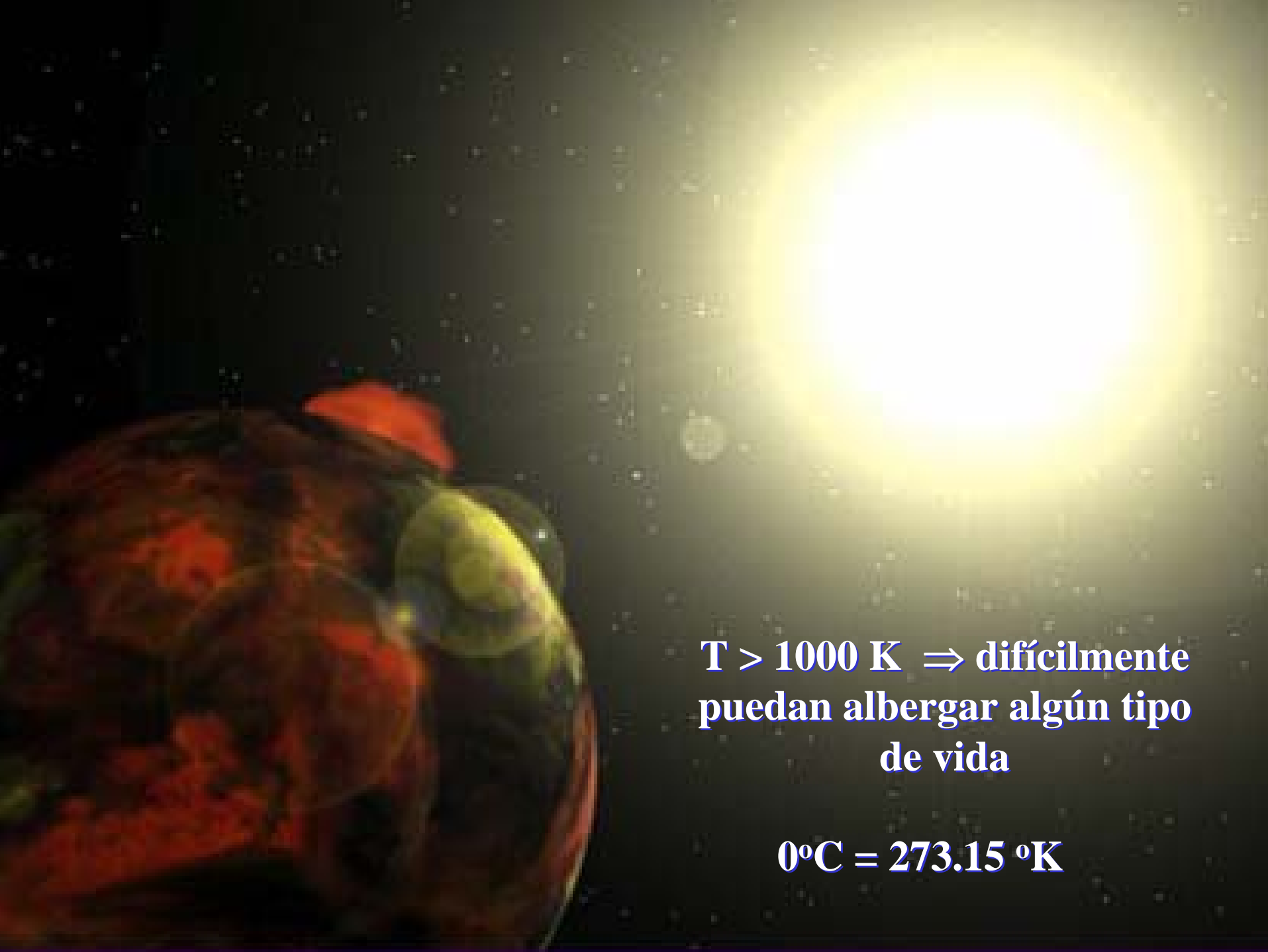
$M_{\text{semi}}$	10.2 $M_{\text{Tierra}}$	11.8 $M_{\text{Tierra}}$	18.1 $M_{\text{Tierra}}$
a	0.00785 UA	0.186 UA	0.630 UA
P	8.667 días	31.56 días	193 días
e	0.10	0.13	0.07

Lovis et al. (2006)

# Velocidades radiales de alta precisión: Efecto Doppler

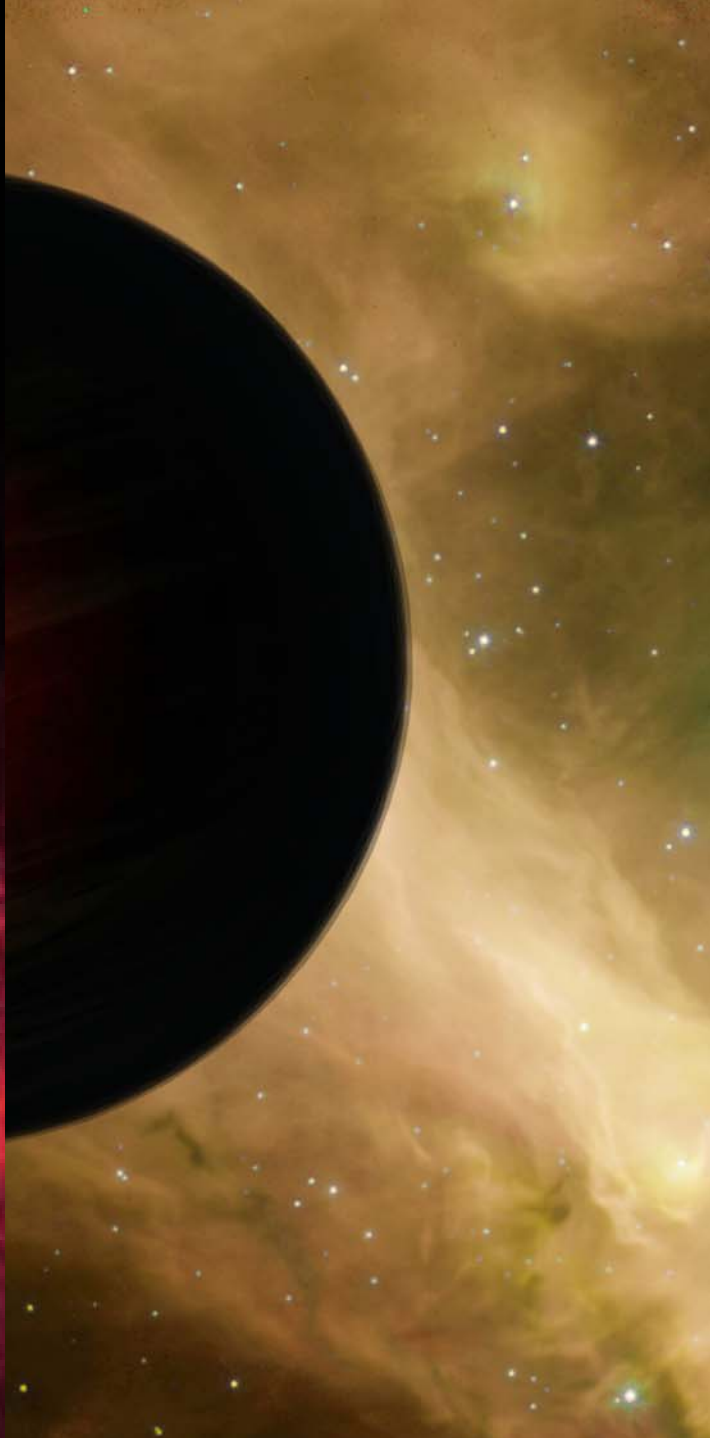
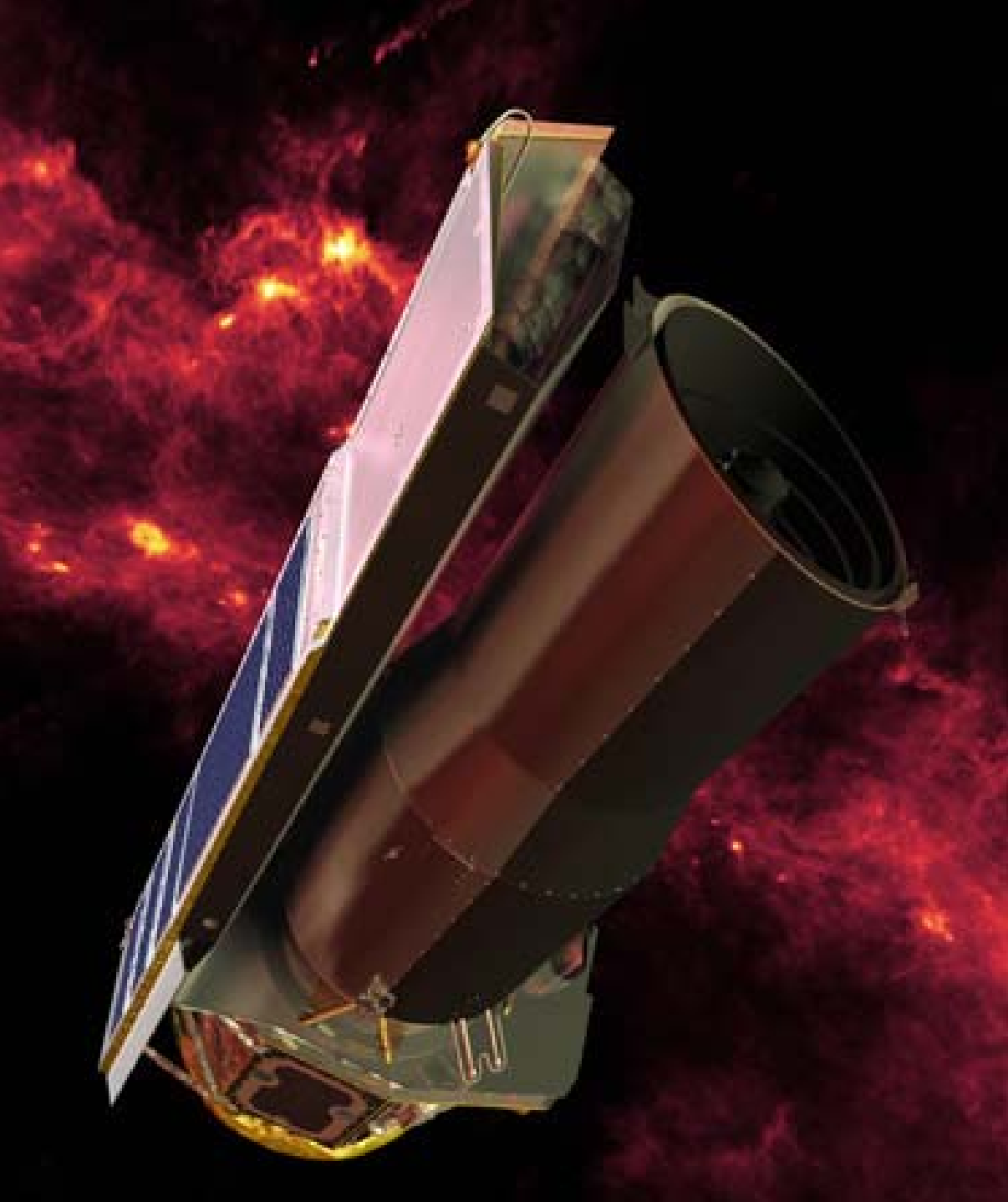


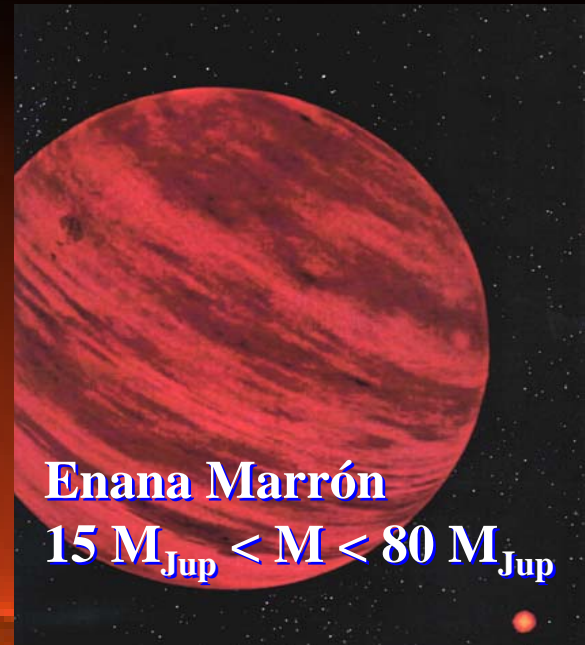
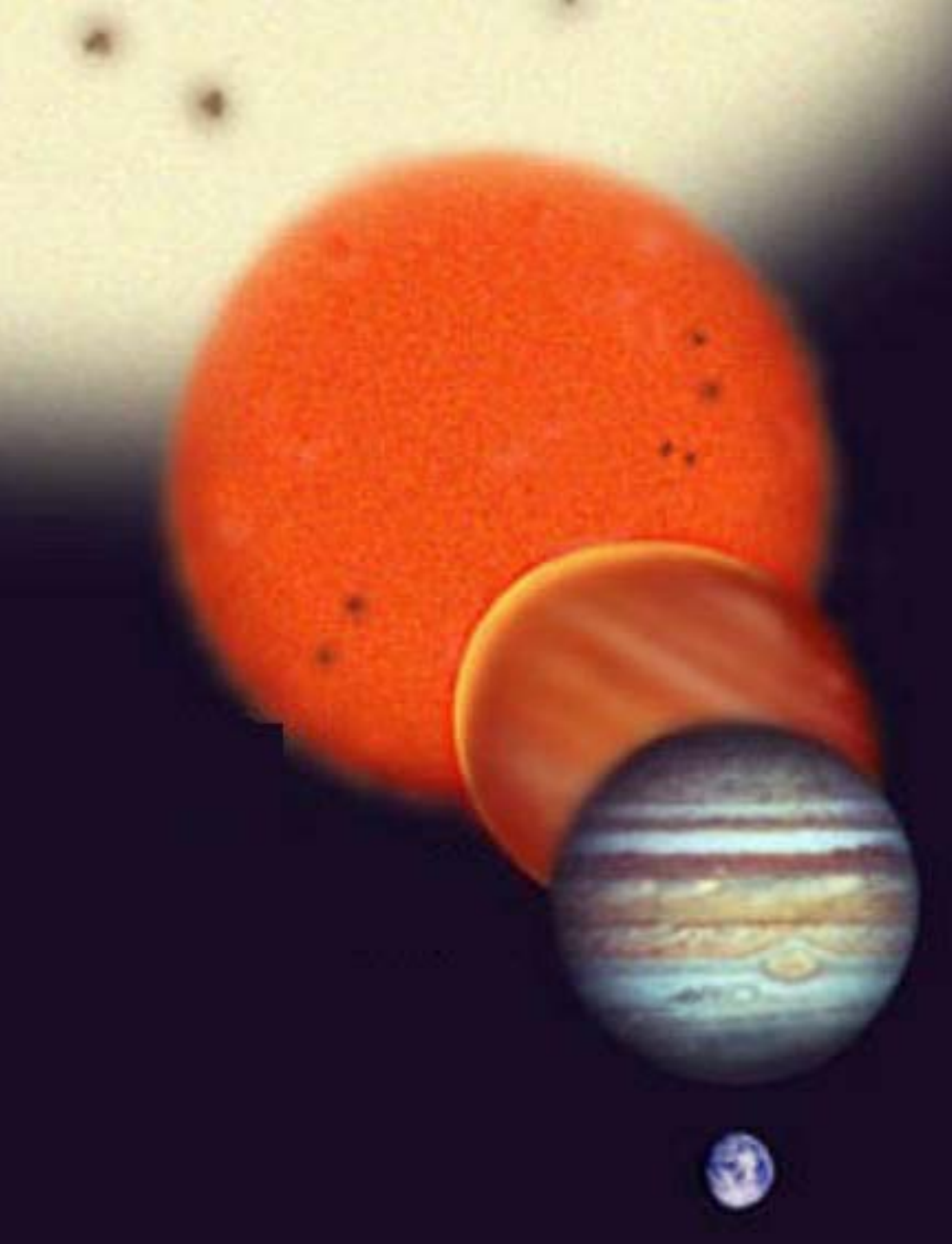




**$T > 1000 \text{ K} \Rightarrow$  difícilmente  
puedan albergar algún tipo  
de vida**

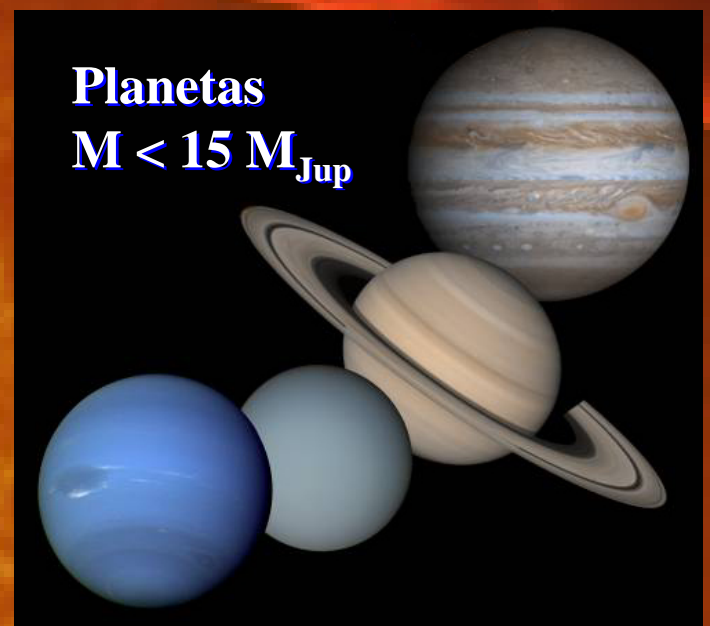
$$\mathbf{0^{\circ}\text{C} = 273.15 \text{ }^{\circ}\text{K}}$$





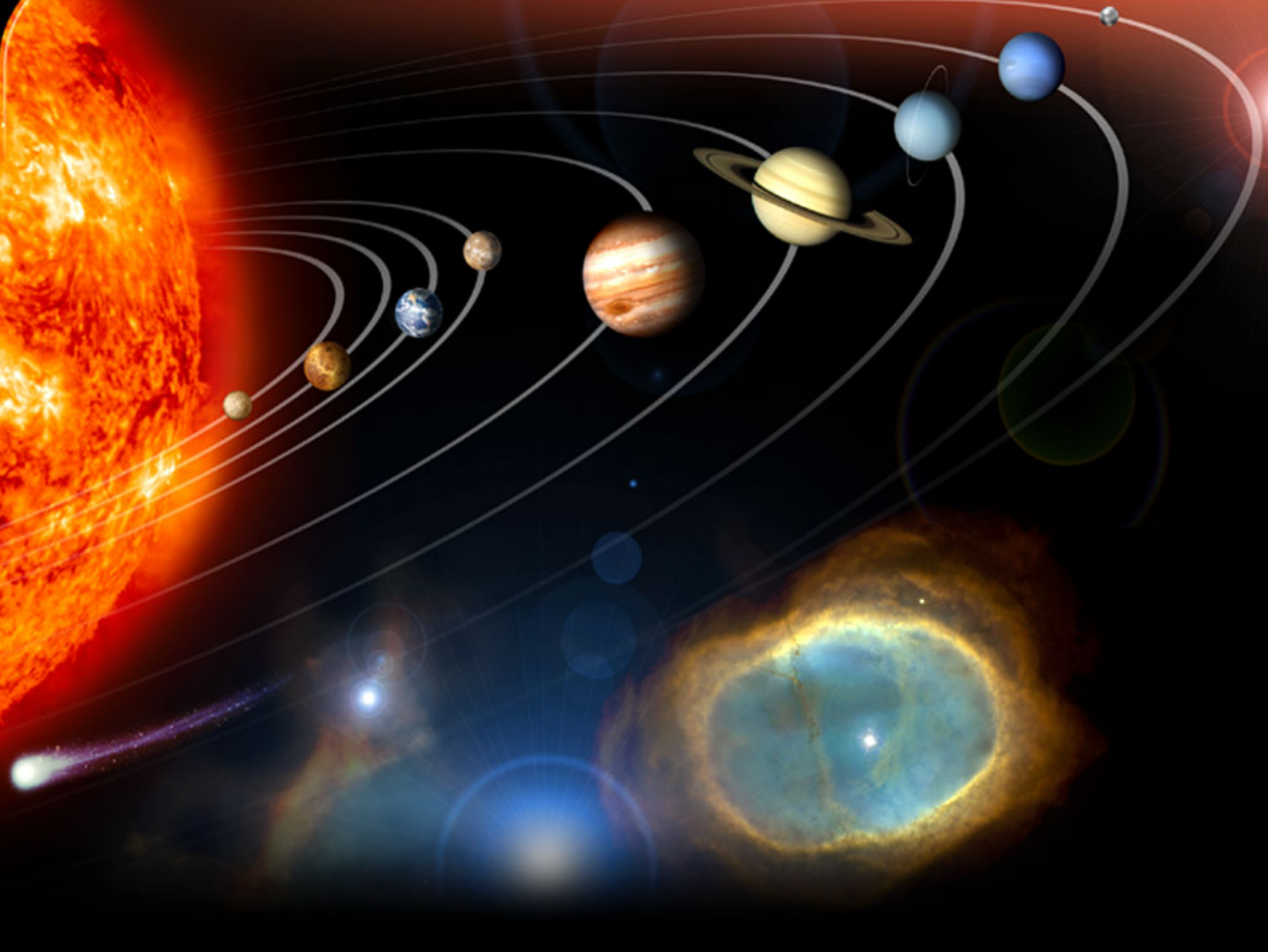
**Enana Marrón**

$$15 M_{\text{Jup}} < M < 80 M_{\text{Jup}}$$



**Planetas**

$$M < 15 M_{\text{Jup}}$$





47 Uma

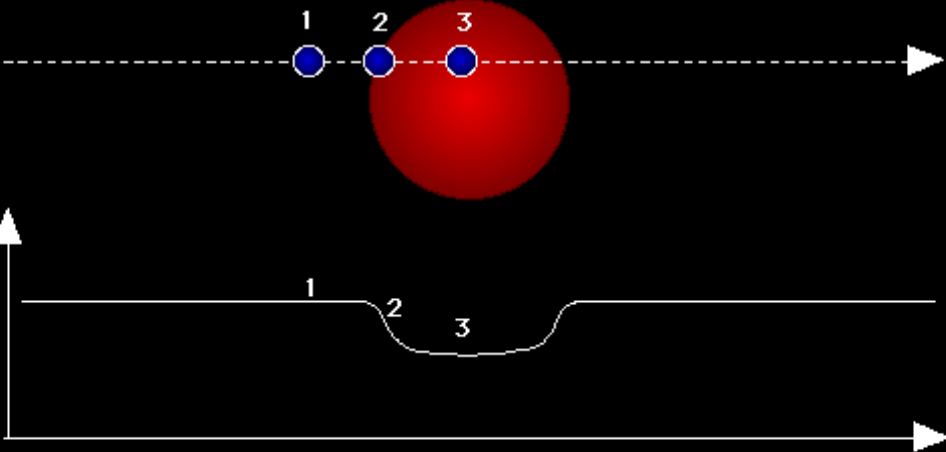
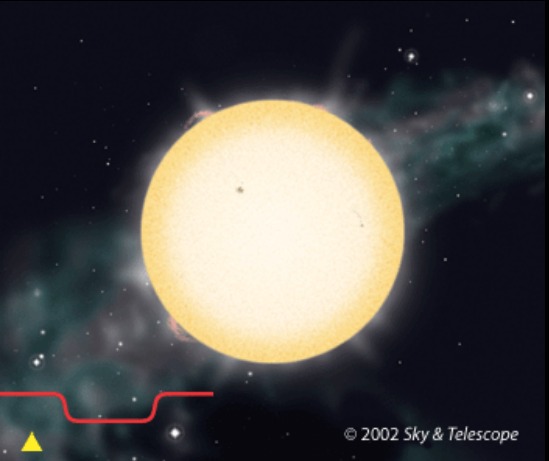
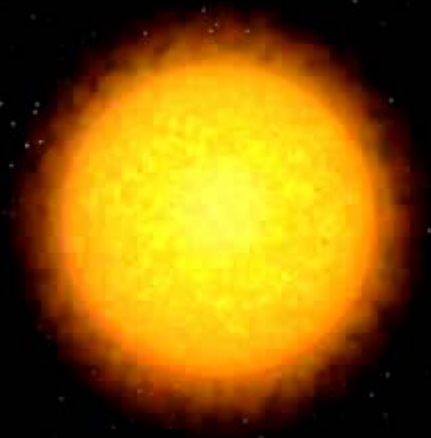
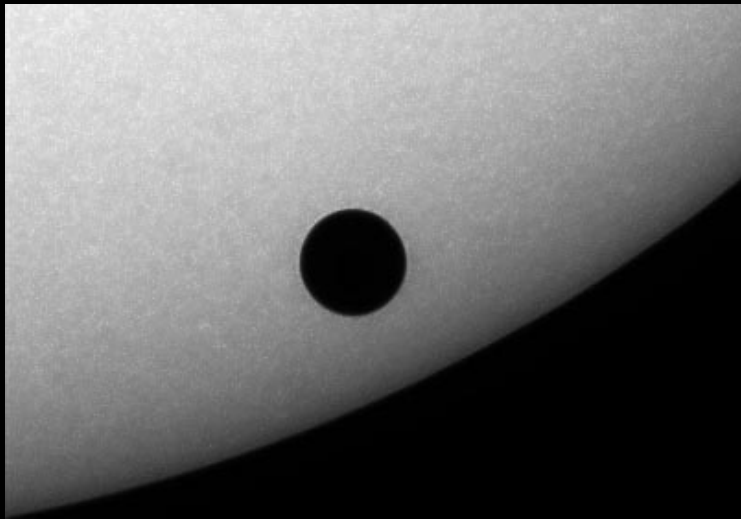
A diagram of the 47 Uma system. On the left is a bright yellow star. Two planets are shown in elliptical orbits around it, connected by green lines. The inner planet is a reddish-brown sphere, and the outer planet is a blue sphere.



Sistema Solar

A diagram of the Solar System. On the left is a bright yellow star (the Sun). Several planets are shown in elliptical orbits around it, connected by blue lines. From left to right, the planets are Mercury, Venus, Earth, Mars, Jupiter, and Saturn. Saturn is shown with its characteristic rings. The orbits are represented by concentric blue lines.

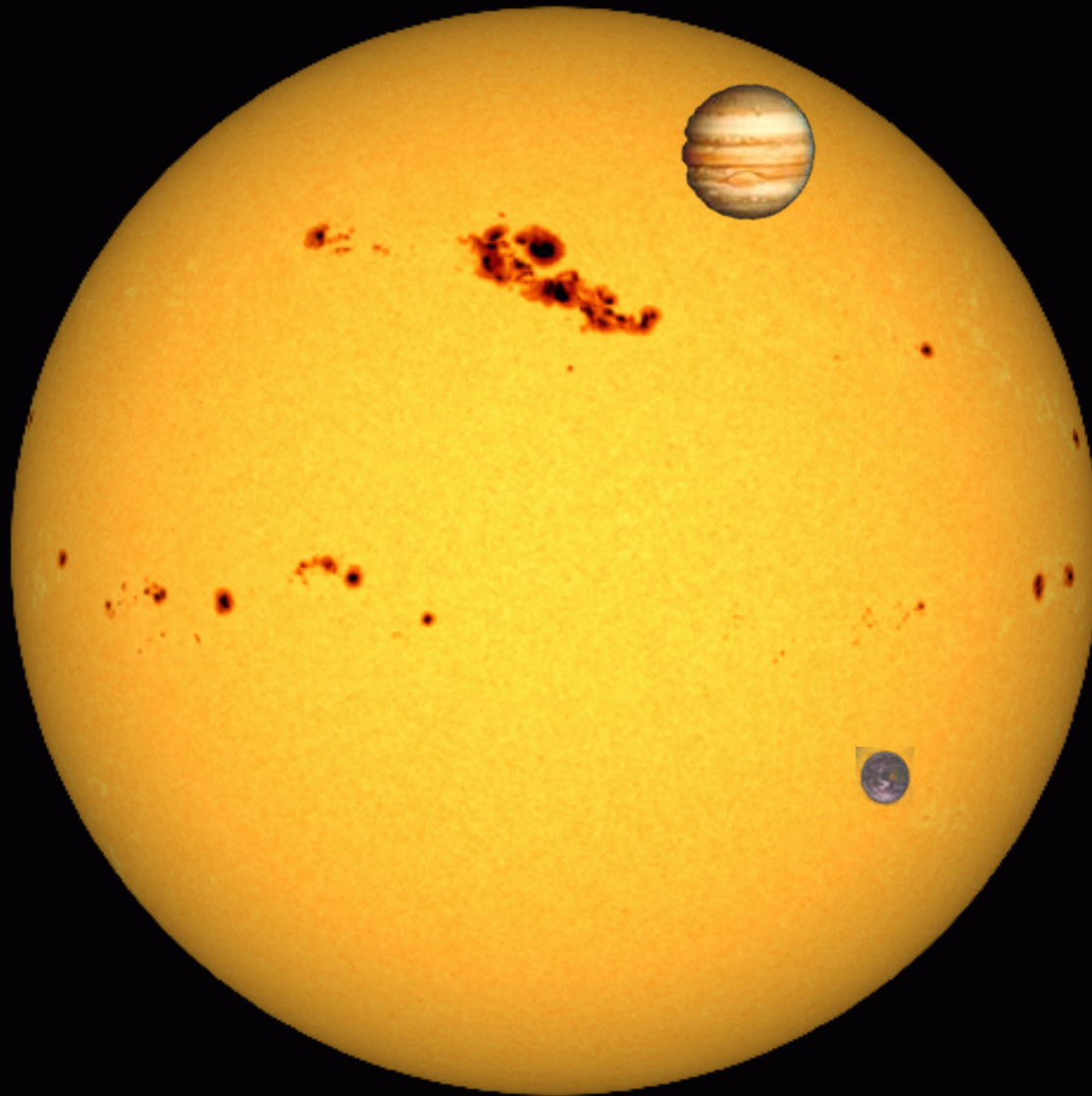
# Tránsitos Planetarios



Intensidad

Tiempo

# Tránsitos de Júpiter y de la Tierra



Júpiter ~1%

Tierra ~0.01%

# HD 209458

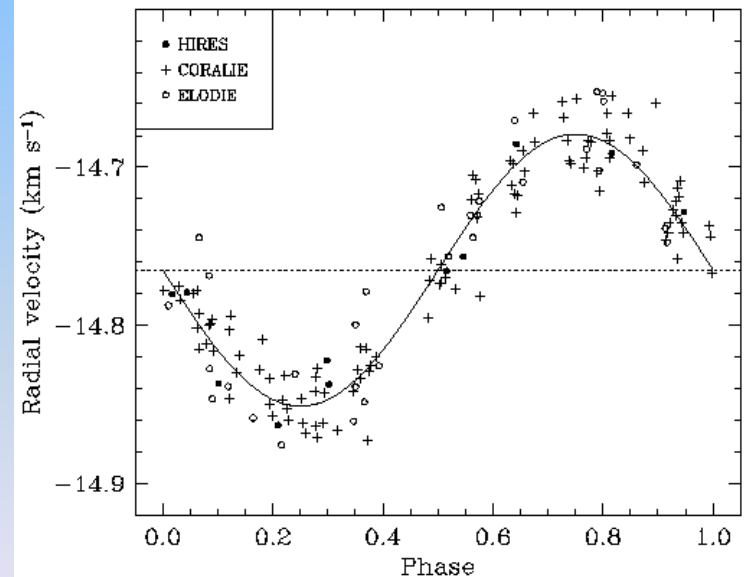
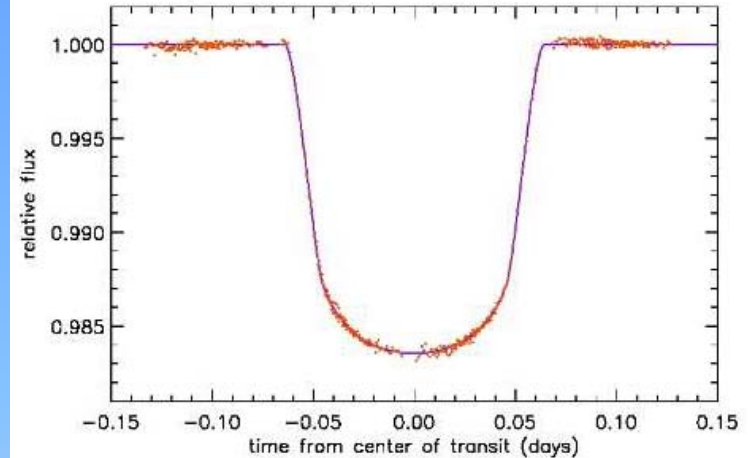
## Estrella

Distancia	47 pc
V	7.65
T <sub>ef</sub>	5942 K

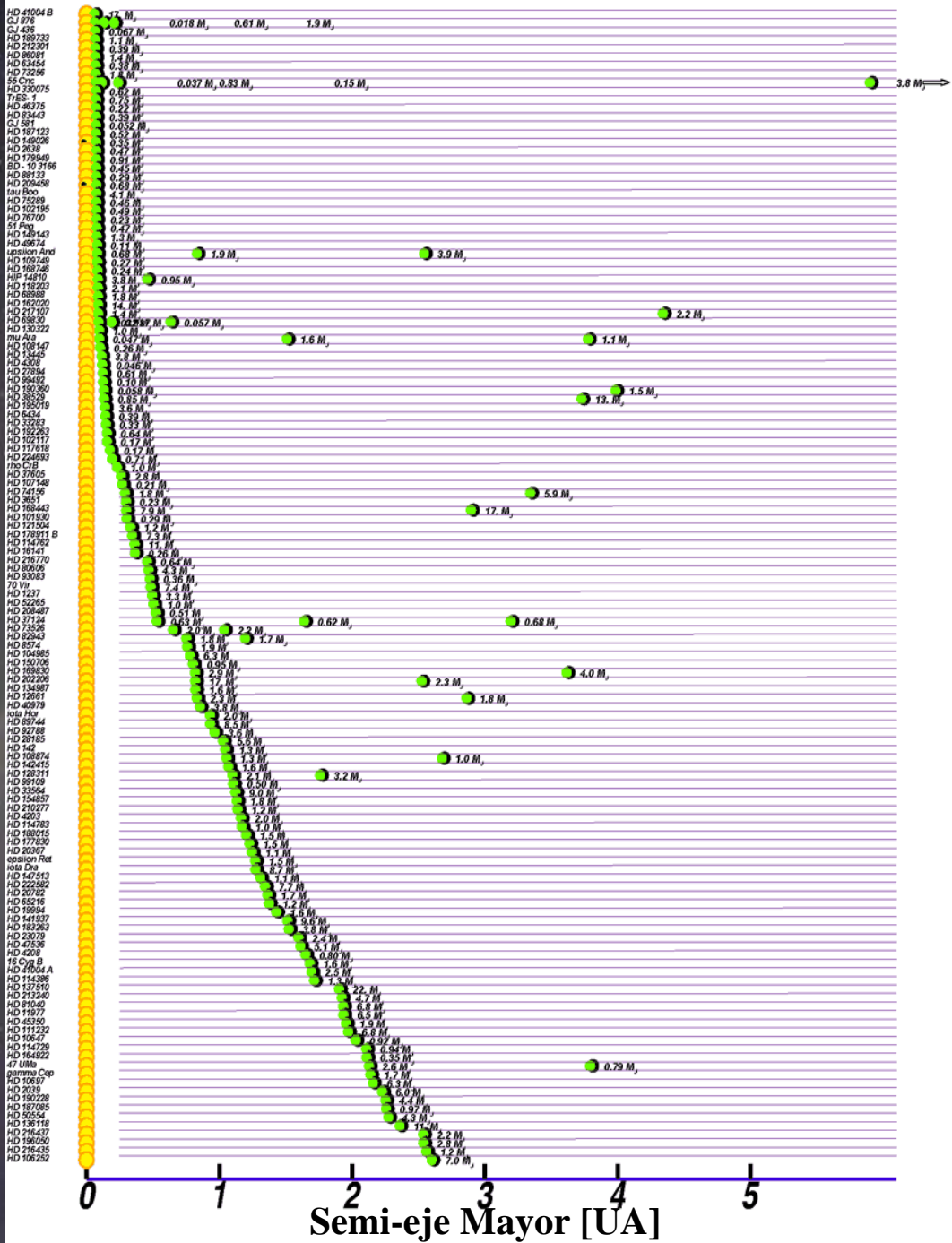
## Planeta Osiris

M	$0.69 \pm 0.05 M_{\text{Jup}}$
a	0.045 AU
P	$3.52474859 \pm 0.0000038$ días
e	0.07
R	$1.40 \pm 0.17 R_{\text{Jup}}$
$\rho$	$0.31 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$
i	$86.1^\circ \pm 1.6^\circ$

$$\rho_{\text{Saturno}} = 0.70 \text{ g/cm}^3$$



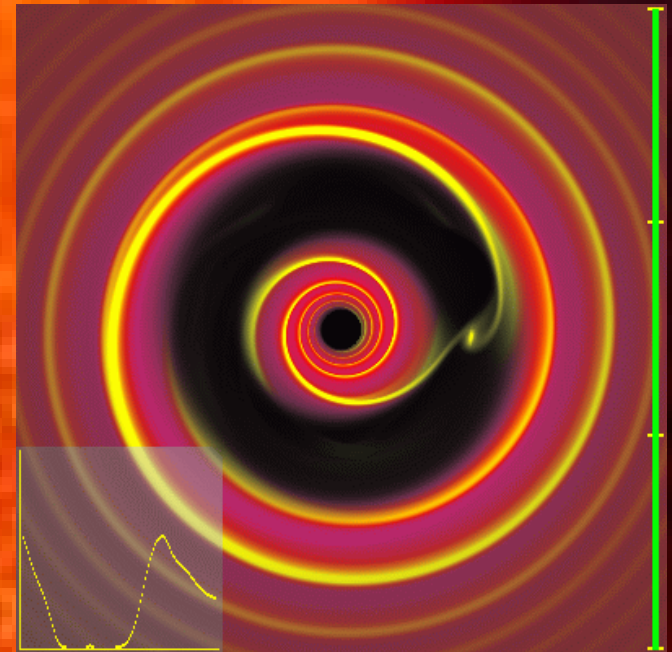
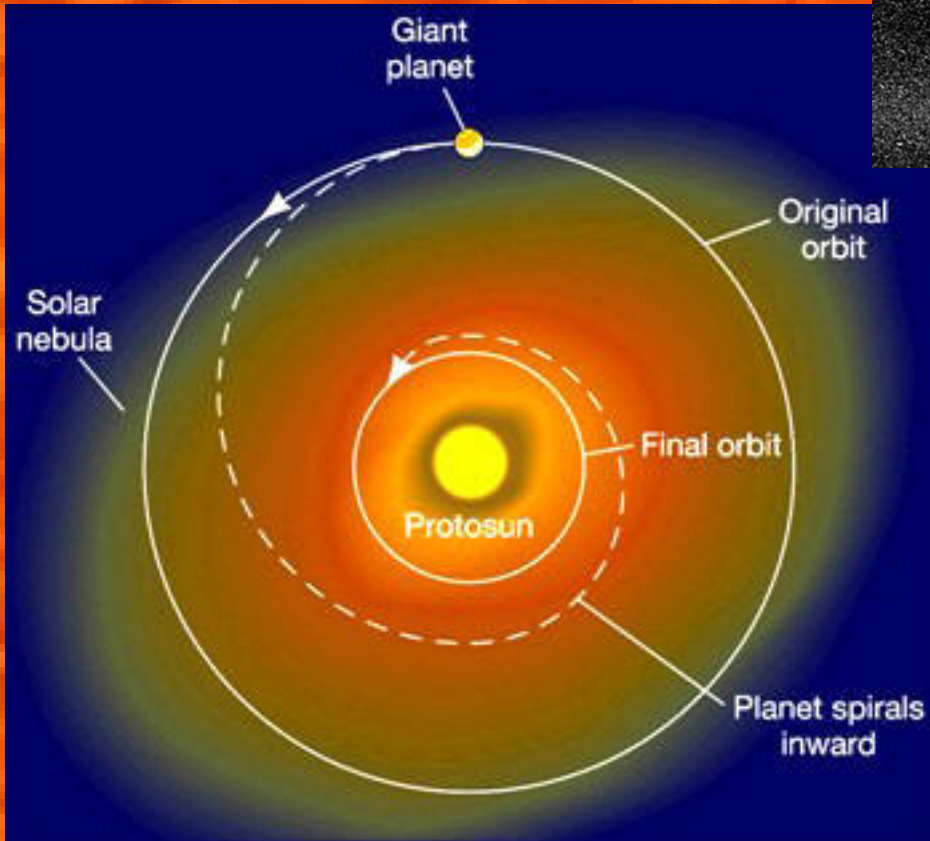
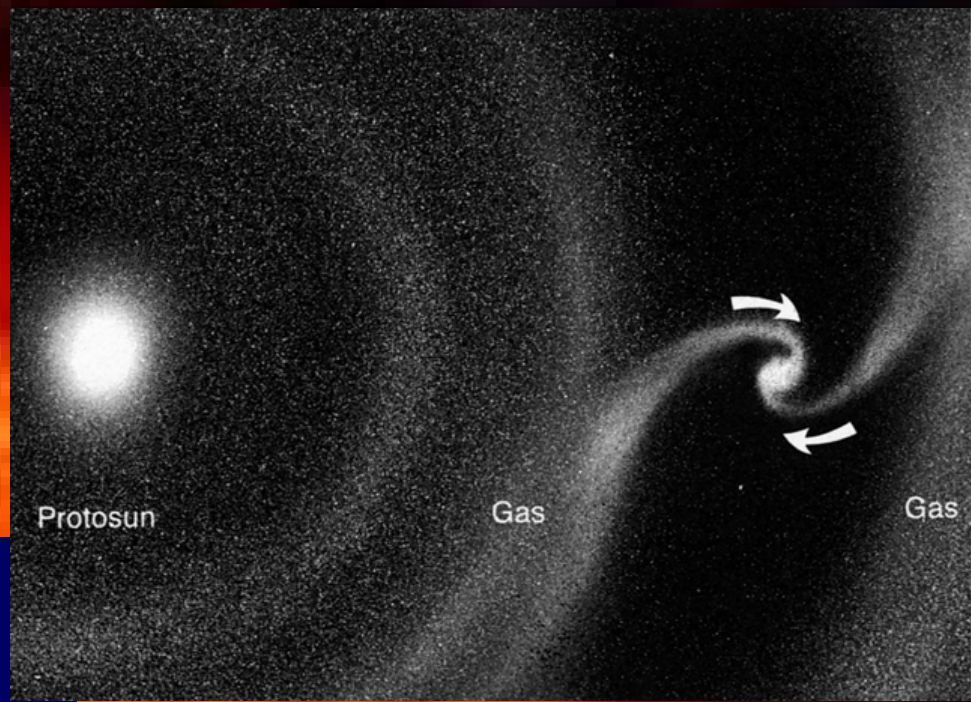
Charbonneau et al. (2000),  
Henry et al. (2000)



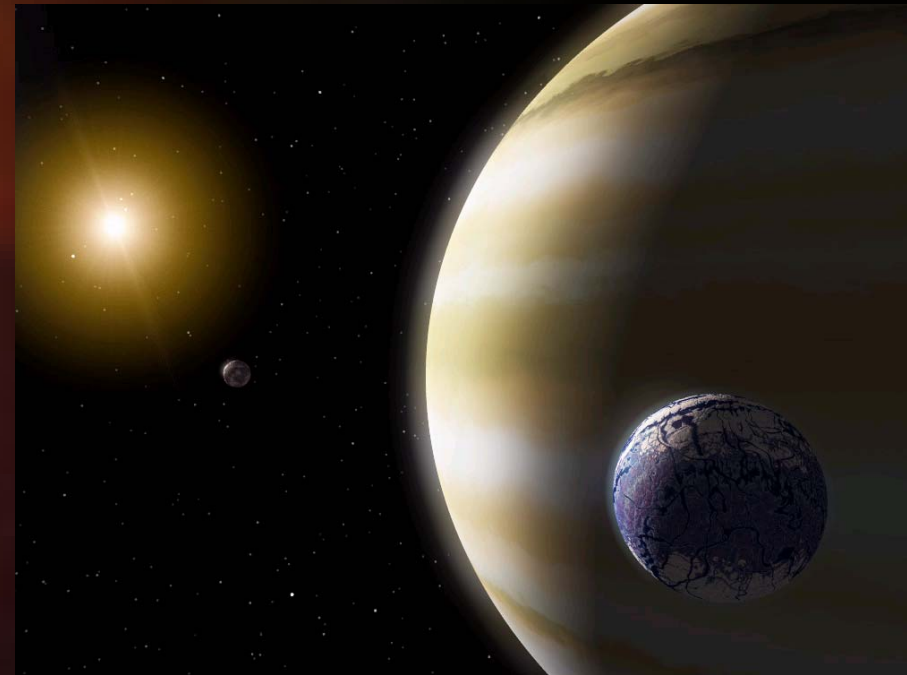
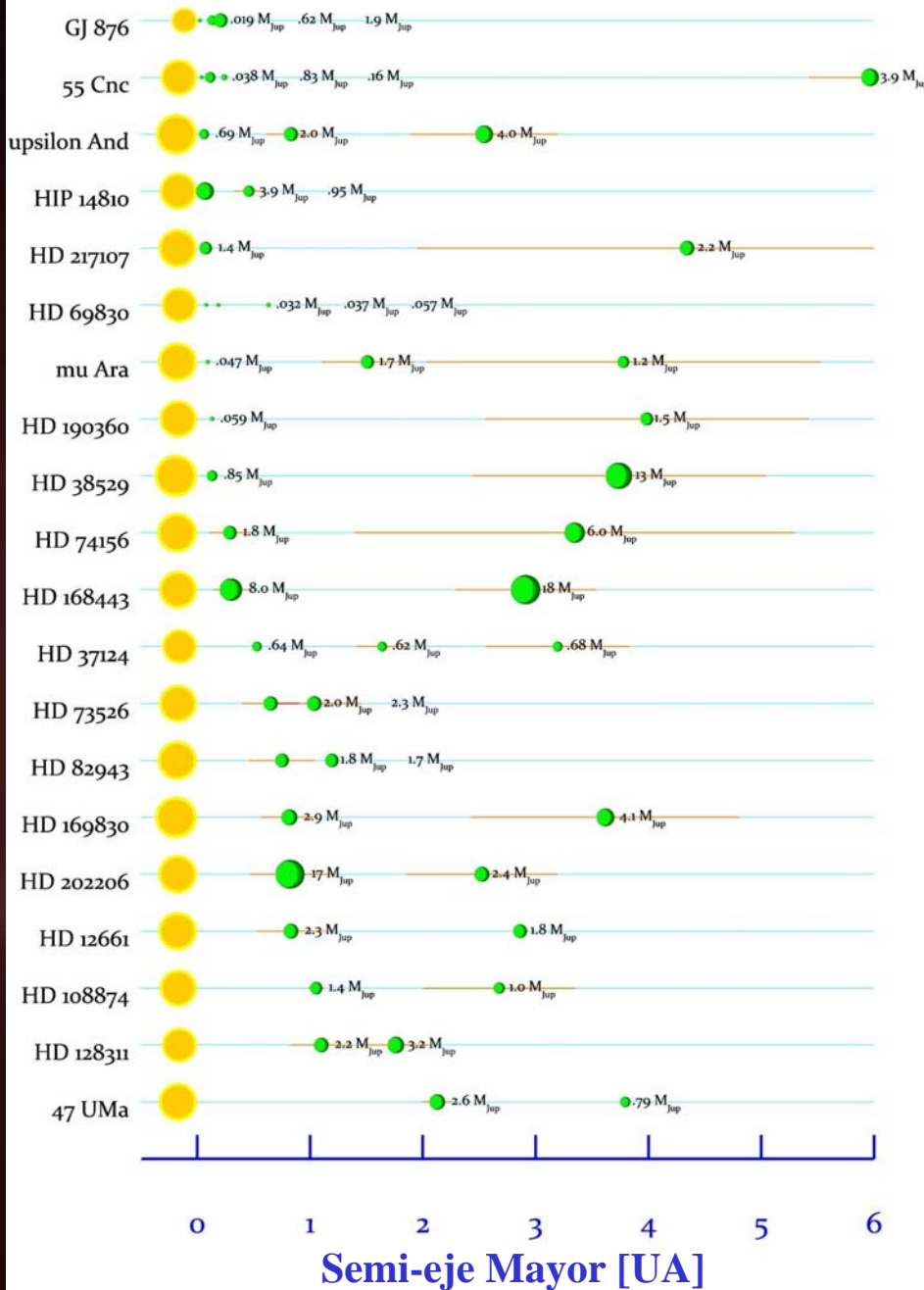
**Técnica de  
Velocidades Radiales:  
255 planetas,  
25 sistemas  
planetarios múltiples**

**Tránsitos Planetarios:  
34 planetas**

# Migración planetaria: Los ``Hot Jupiter`` no se formaron ``in-situs``



# Sistemas Planetarios Múltiples



Hoy son 25 los sistemas múltiples

# Gl 581

Distancia	6.26 pc
V	10.55
T <sub>ef</sub>	3470 K



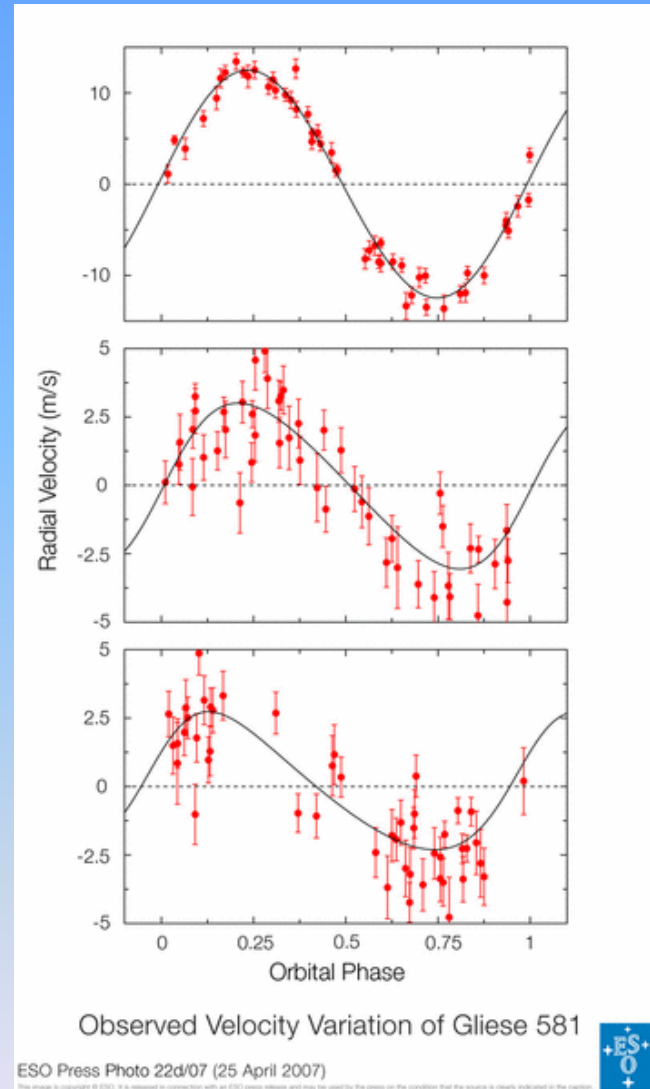
## Planetas

Msini	17.2 M <sub>T</sub>	5 M <sub>T</sub>	7 M <sub>T</sub>
a	0.041 AU	0.073 AU	0.25 AU
P	5.3683 días	12.932 días	83.6 días
e	0.02	0.16	0.2

Super-Tierra

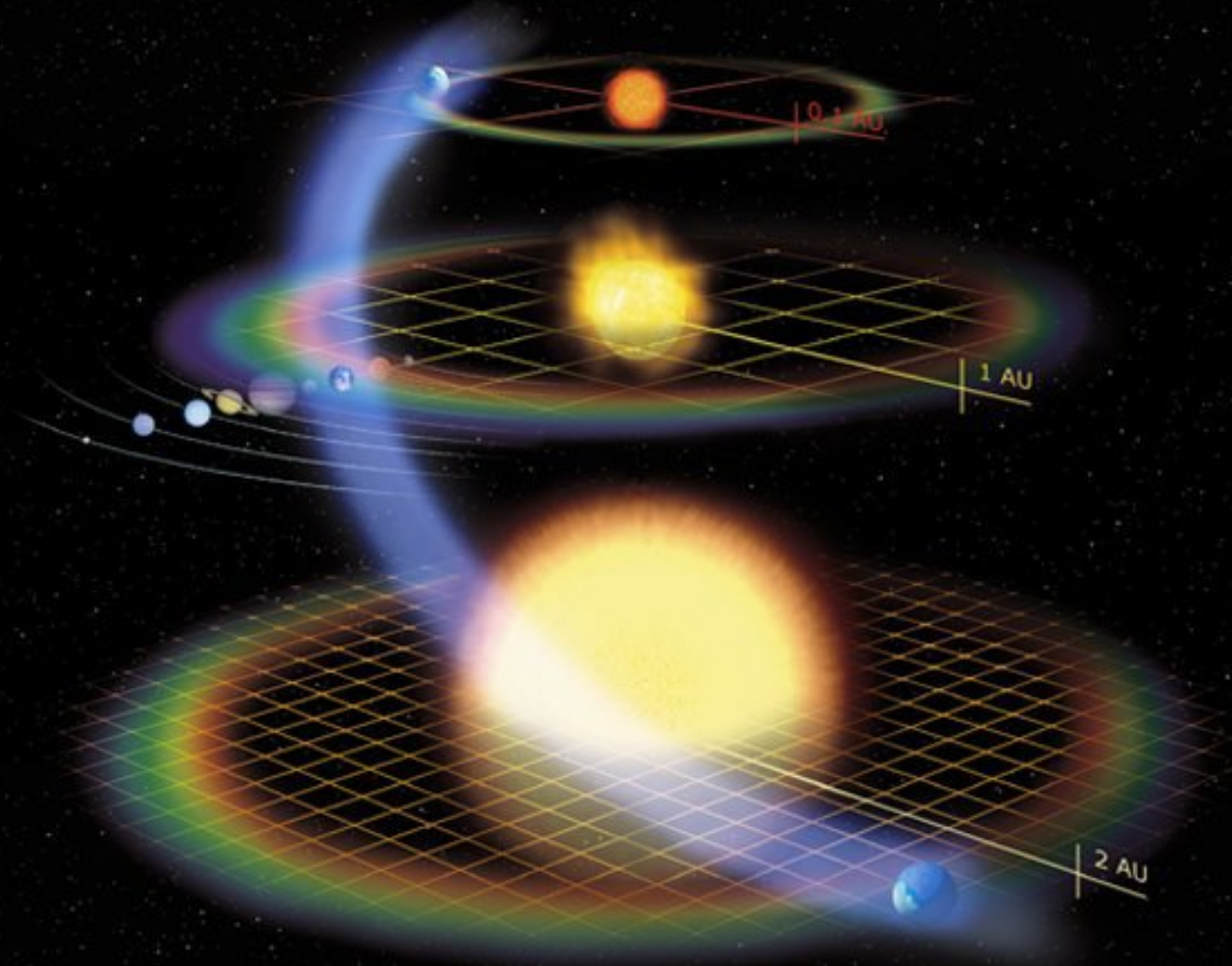
Planeta en la zona habitable

T<sub>ef\_Sol</sub> = 5770 K



Udry et al. (2007)

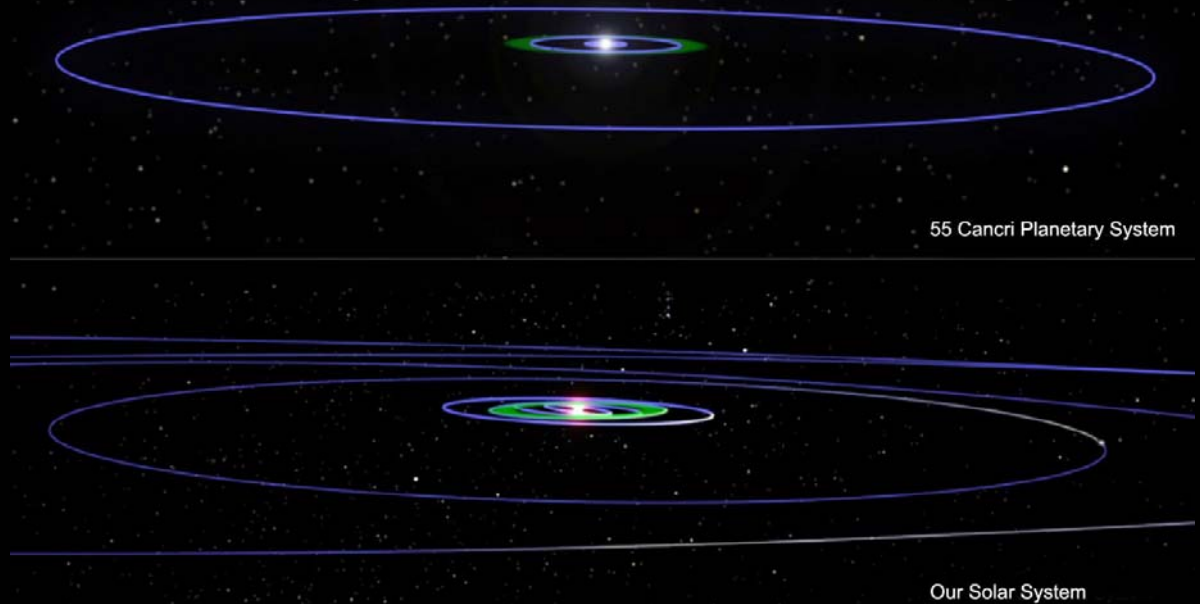
# Zona de Habitabilidad $\Rightarrow$ Presencia de Agua Líquida en la superficie del planeta



# 55 Cnc

<b>Distancia</b>	<b>13.4 pc</b>
<b>V</b>	<b>5.95</b>
<b>T<sub>ef</sub></b>	<b>5243±93 K</b>

**Compañera binaria  
Enana Marrón o  
Estrella de Muy Baja  
Masa a 1000 UA de  
distancia**

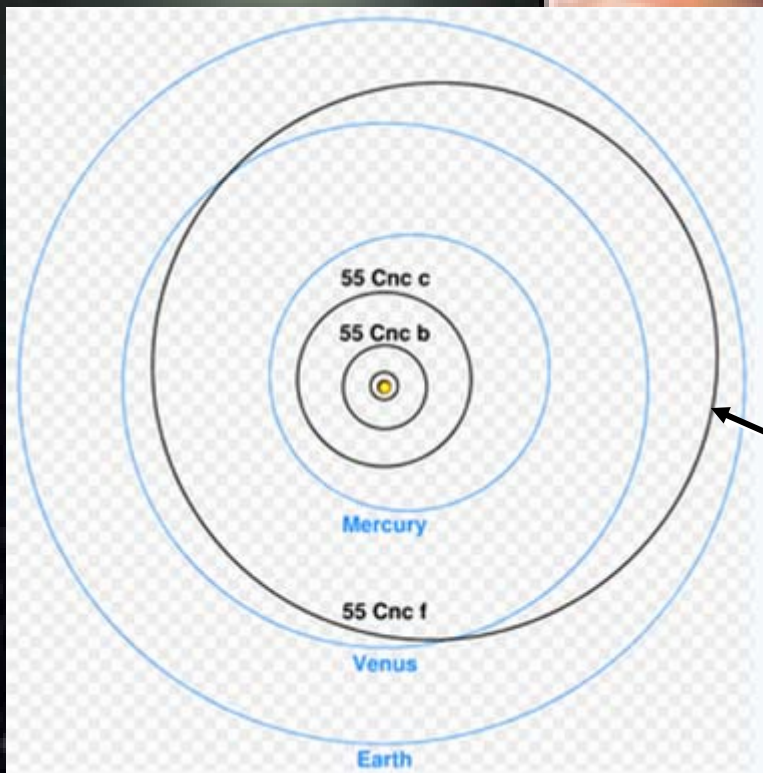


<b>M<sub>seni</sub></b>	<b>216.9 M<sub>T</sub></b>	<b>53.7 M<sub>T</sub></b>	<b>1218.9 M<sub>T</sub></b>	<b>10.8 M<sub>T</sub></b>	<b>45.8 M<sub>T</sub></b>
<b>a</b>	<b>0.115 UA</b>	<b>0.24 UA</b>	<b>5.77 UA</b>	<b>0.038 UA</b>	<b>0.781 UA</b>
<b>e</b>	<b>0.014</b>	<b>0.086</b>	<b>0.025</b>	<b>0.07</b>	<b>0.2</b>
<b>P</b>	<b>14.6 días</b>	<b>44.3 días</b>	<b>5218 días</b>	<b>2.8 días</b>	<b>260 días</b>

$$M_{\text{Nep}} = 17 M_{\text{T}}$$

$$T_{\text{ef\_Sol}} = 5770 \text{ K}$$

# 55 Cnc



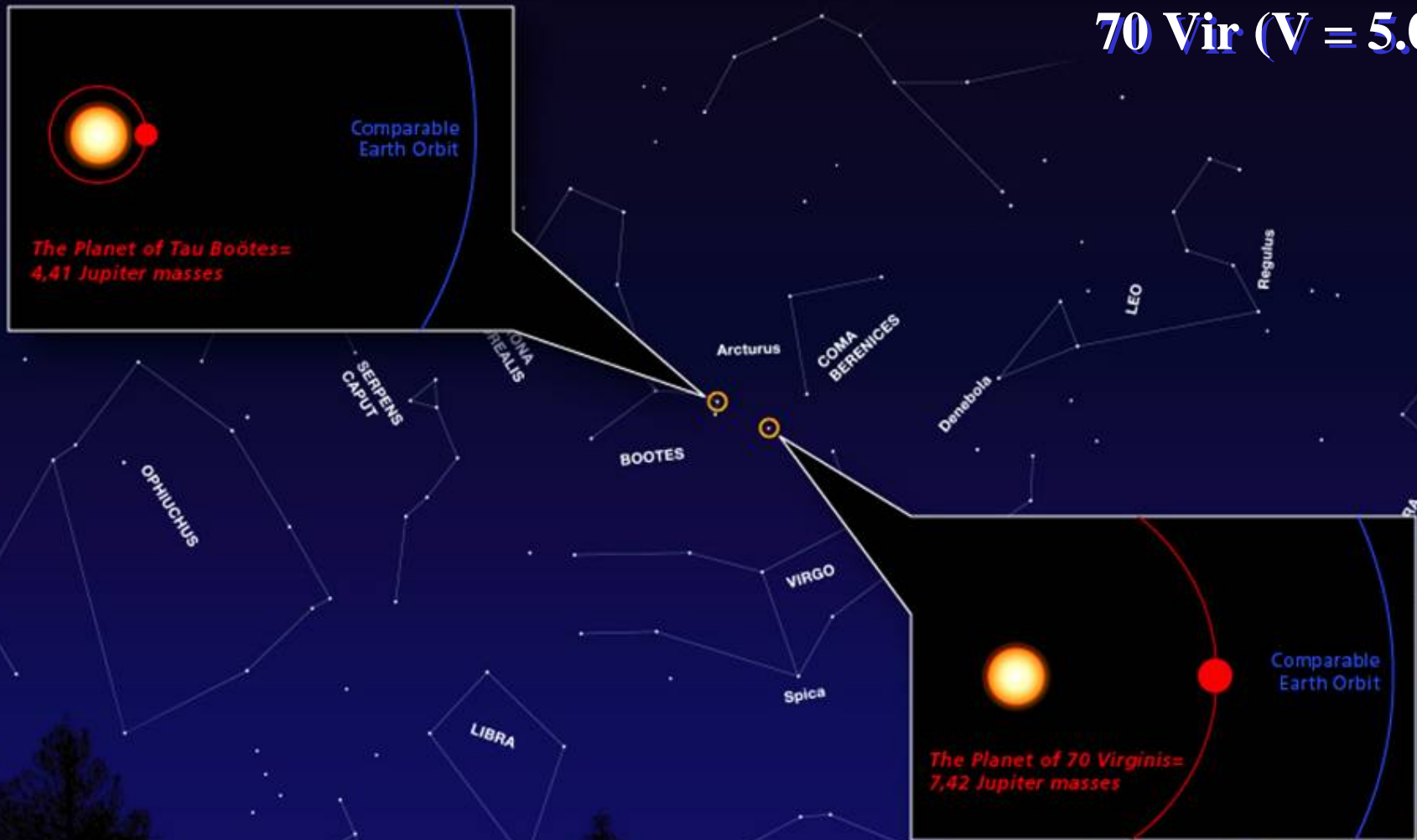
Quinto Planeta en la zona habitable de 55 Cnc

# *Algunas de las estrellas con planetas son visibles a simple vista*

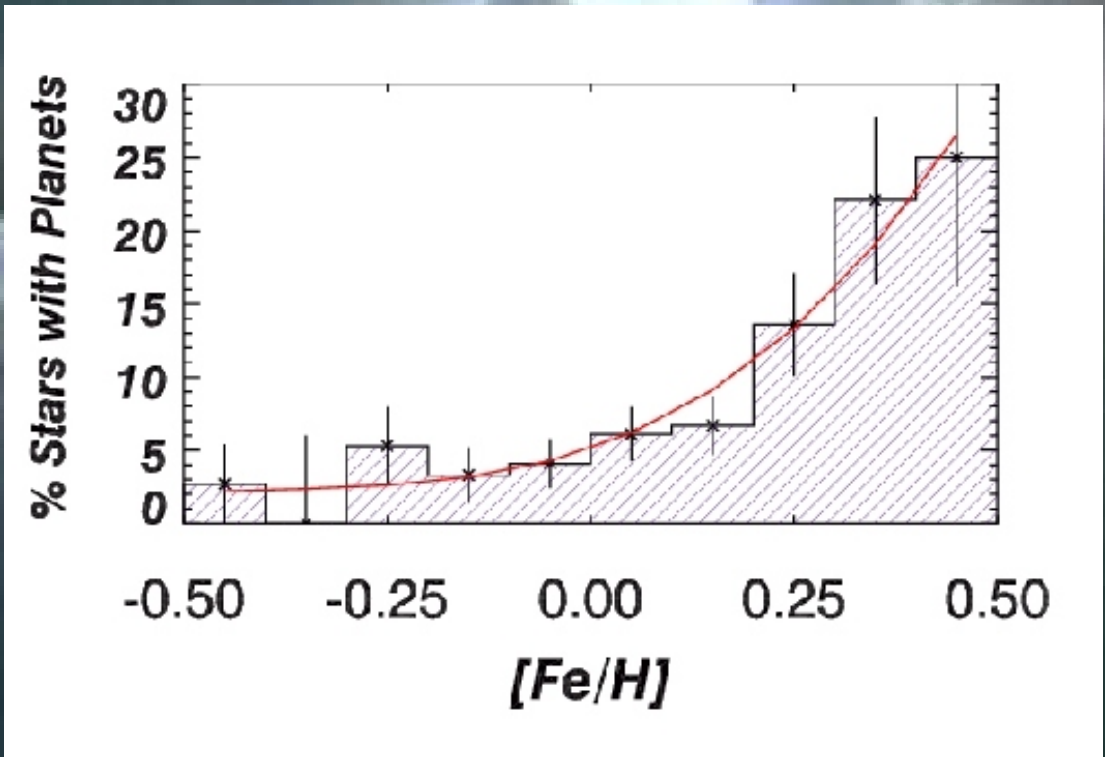
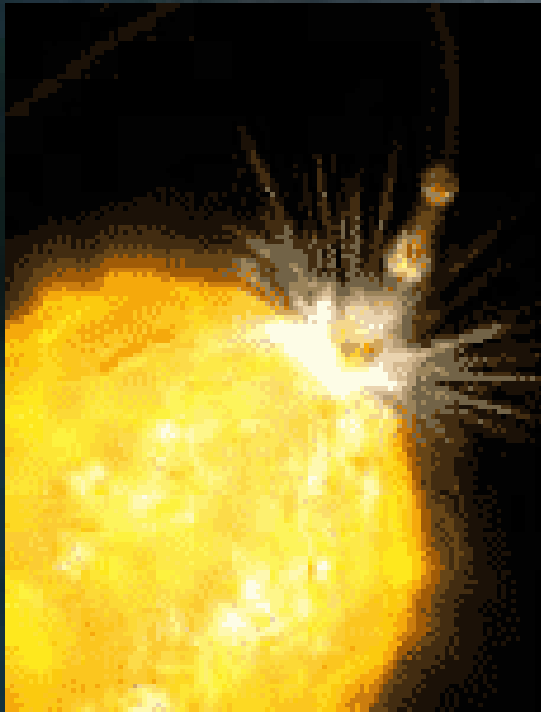


**Tau Boo (V = 4.5)**

**70 Vir (V = 5.0)**



# Metalicidad de las Estrellas con Exoplanetas



En promedio las estrellas que albergan planetas extrasolares son más ricas en metales que aquellas que no están asociadas con planetas detectados por la técnica Doppler.

- Hipótesis Primordial
- Acrección

**Las estrellas son miles de millones**

**de veces más brillantes**



**¿Imagen directa?**

**que los planetas**

**escondidos en el  
fulgor  
del planeta**



como esta luciérnaga



El brillo de un estrella  
de tipo solar oculta al planeta



El menor brillo de una estrella de baja  
masas posibilita la detección del planeta



$$M_{\text{enana marrón}} \sim 25 M_{\text{Jup}}$$

$$M_{\text{planeta}} \sim 5 M_{\text{Jup}}$$

$$b_{\text{enana}} / b_{\text{planeta}} \sim 100$$

Chauvin et al. (2004)



# Dos Soles en el Cielo: Estrellas Binarias con Exoplanetas

Efecto de selección  
contra los sistemas  
binarios

Sistemas simples  
que resultaron ser  
binarios

Actualmente hay  
alrededor de 35  
sistemas binarios  
visuales con planetas



Representan ~20%  
de las estrellas con  
planetas extrasolares

Desidera & Barbieri (2007)



La Guerra de  
las Galaxias

Luke Skywalker y el  
planeta Tatooine

# Confirmación de los sistemas binarios

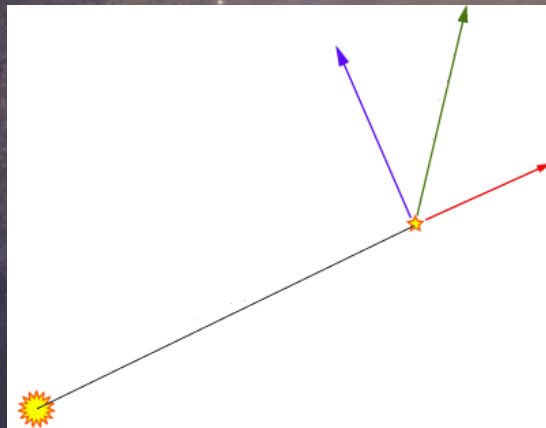
Ejemplo:  
GJ 3021

Objeto	GJ 3021	GJ 3021B	R
Distancia	18 pc		
$\mu_{\alpha} \cos(\delta)$	$433.88 \pm 0.55 \text{ mas/año}$	$368 \pm 68 \text{ mas/año}$	$1.8 \pm 5.9 \text{ mas/año}$
$\mu_{\delta}$	$-57.91 \pm 0.45 \text{ mas/año}$	$-48 \pm 68 \text{ mas/año}$	$-24.9 \pm 6.1 \text{ mas/año}$

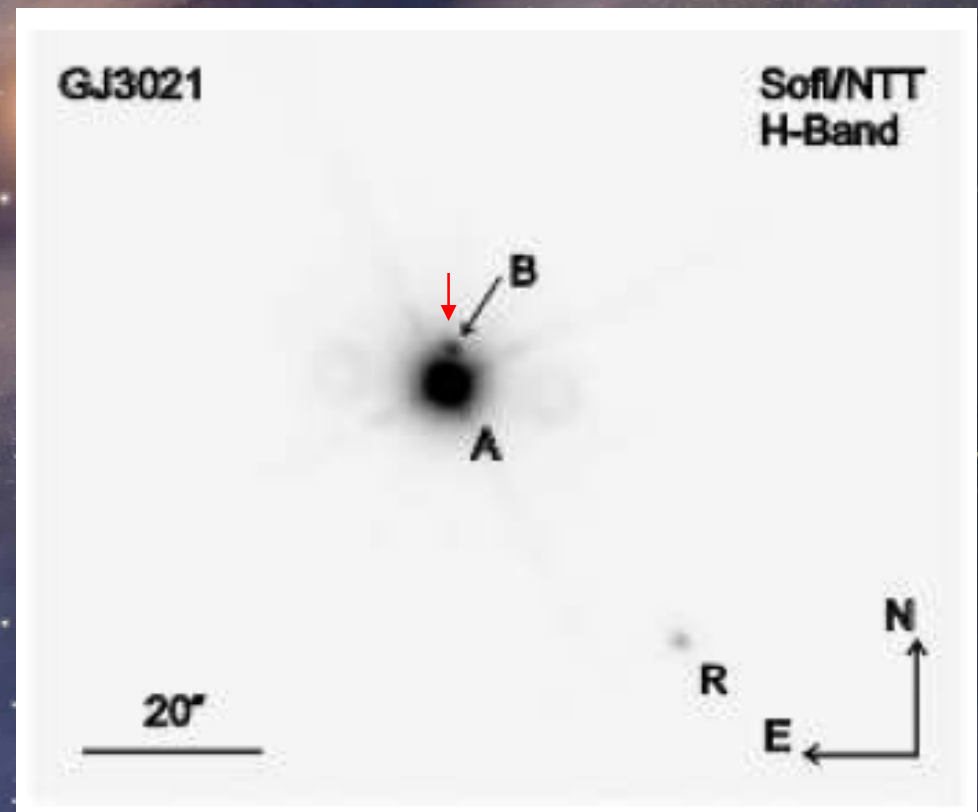
Se toman imágenes con una dada diferencia de tiempo.

Comparando imágenes pueden distinguirse compañeras de estrellas de fondo.

Se miden los movimientos propios para confirmar que se trata de un par físico.



Mugrauer et al. (2007)



# Confirmación de los sistemas binarios

Movimientos propios típicos de una estrella con planetas extrasolares:

55 Cnc ~ 0.5"/año

## Instrumentación

**SOFI+NTT** (La silla, Chile)

Cámara infrarroja (1-3 $\mu$ m)

Telescopio de 3.55m

Seeing promedio

0.6"/pixel

Buen seeing

0.2-0.3"/pixel

## Óptica adaptativa

**Gemini + NIRI + Altair** (Hawaii)

0.022"/pixel

Telescopio de 8m

Cámara infrarroja

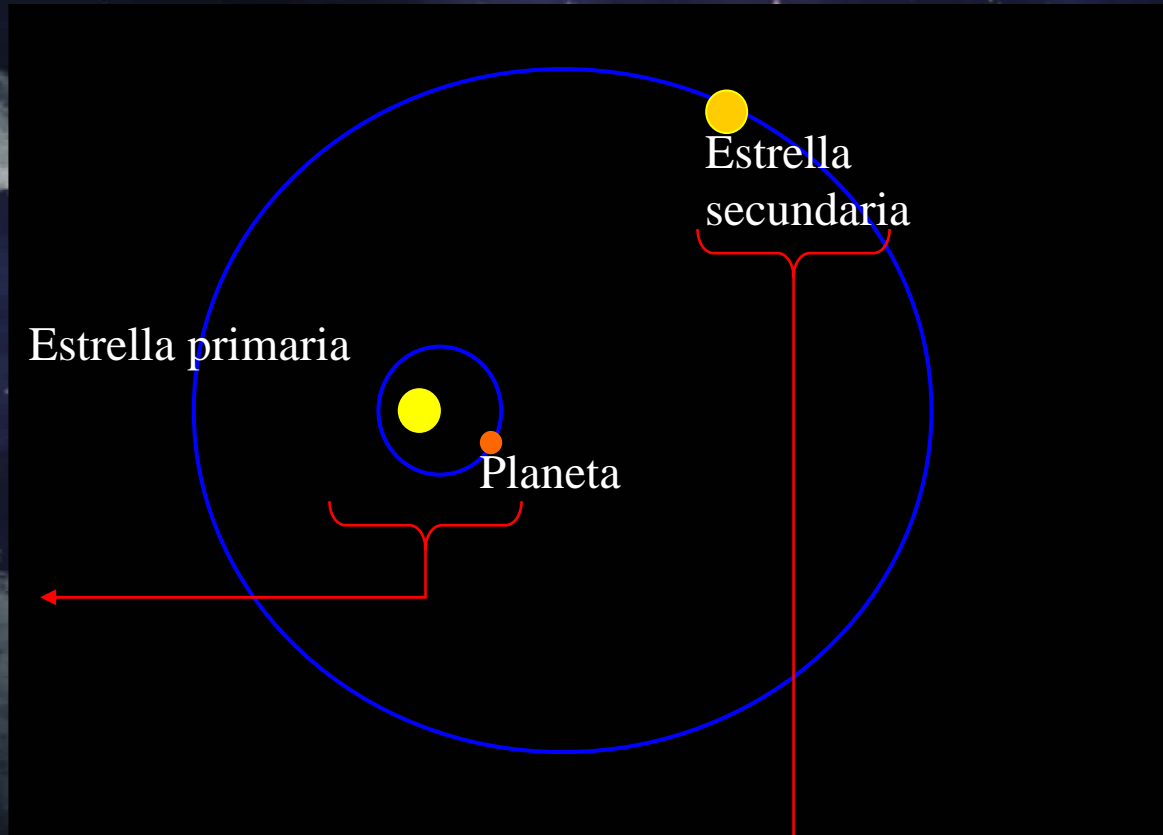
Sistema de óptica adaptativa

**VLT + CONICA + NACO**

(Paranal, Chile)

0.056"/pixel

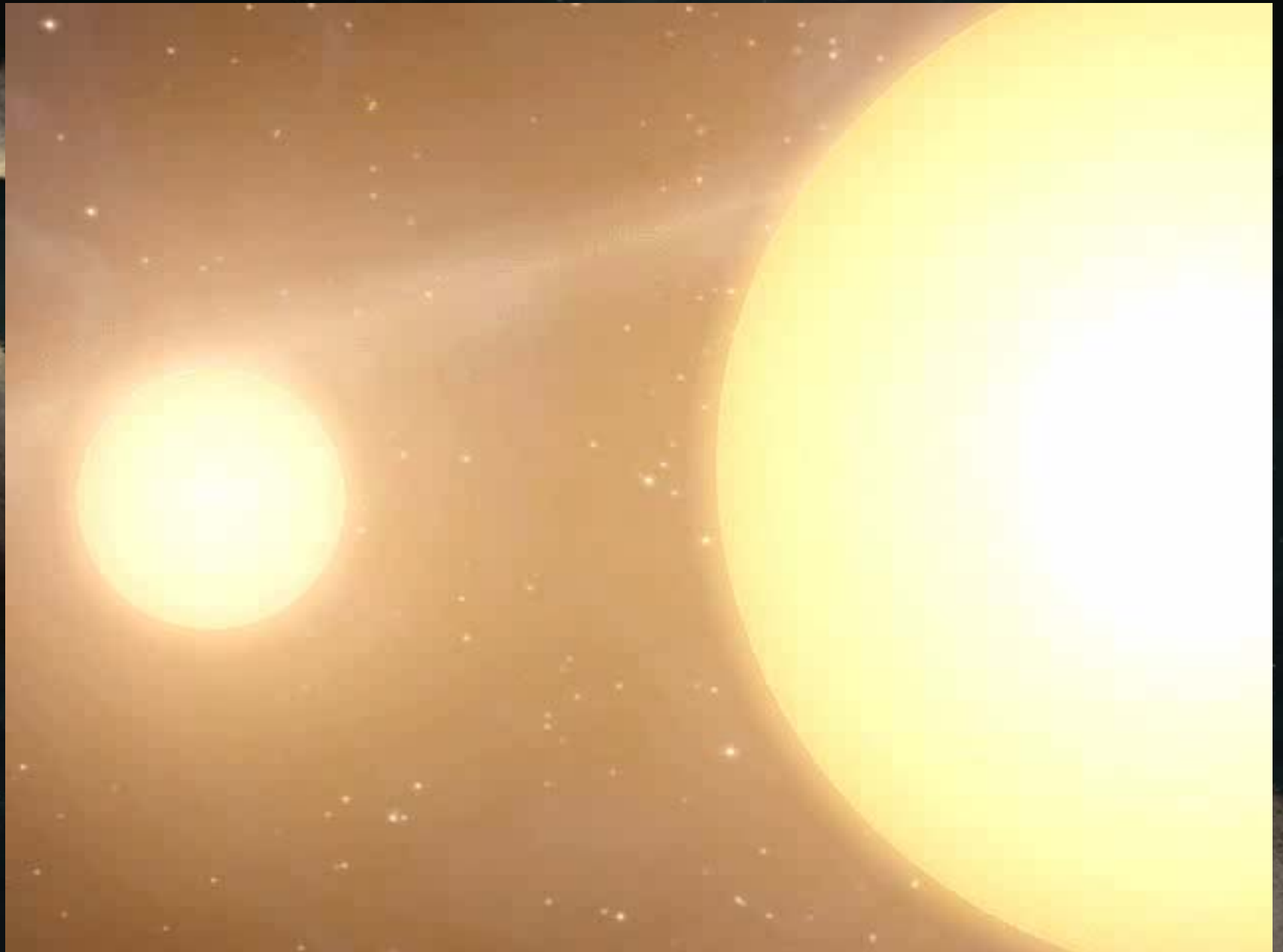
# Sistemas binarios



**Planeta orbita la componente primaria, en general similar al Sol**

**Compañera estrella, más fría que el Sol**

# Discos en sistemas binarios

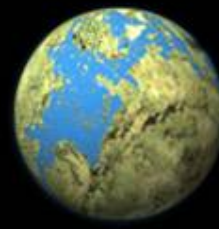




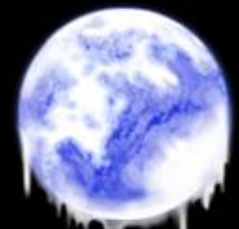
La mayoría de los planetas conocidos son demasiados fríos o calientes para albergar vida



¡Demasiado caliente!



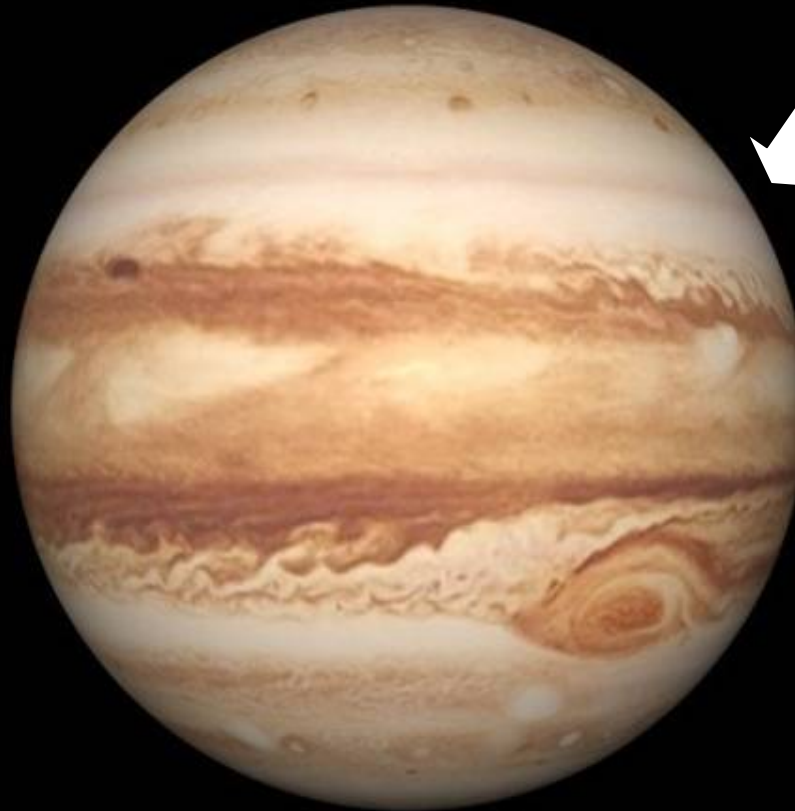
**Temperatura adecuada**



¡Demasiado frío!

Muchos de ellos tienen órbitas muy elípticas y están muy cerca de su estrella central

# Los planetas descubiertos son similares a Júpiter



Lo que encontramos



Lo que buscamos

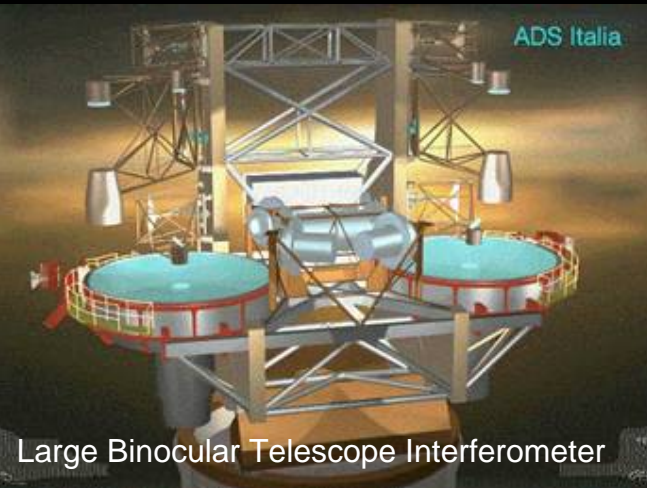


Júpiter es 11 veces más grande que la Tierra y su masa es más de 300 veces mayor

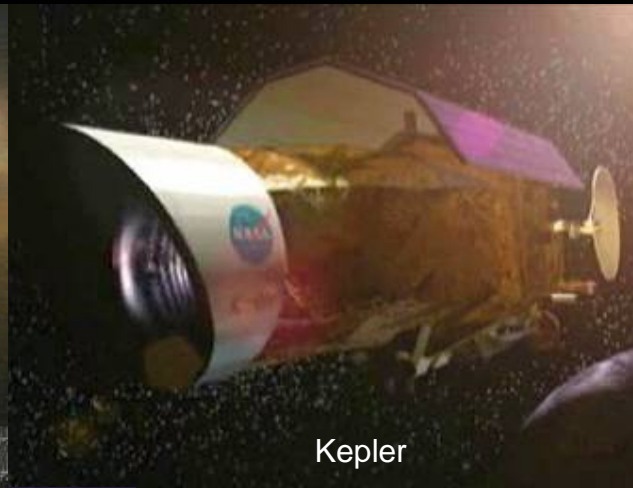
# *La búsqueda de los planeta tipo Tierra*



Keck Interferómetro



Large Binocular Telescope Interferometer



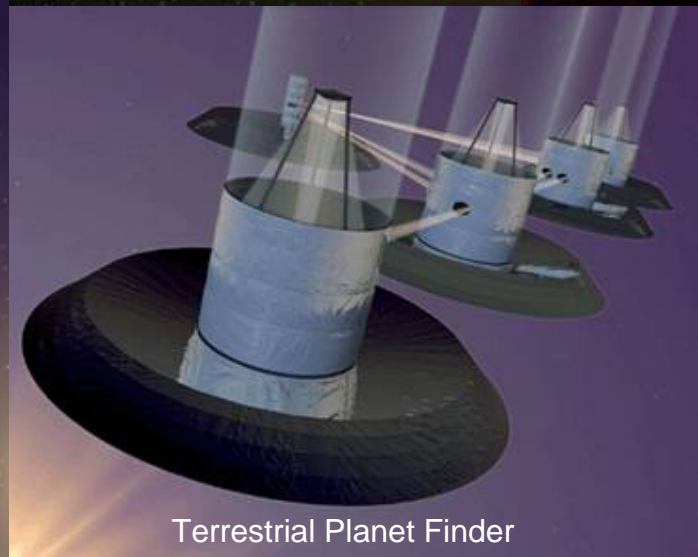
Kepler



Spitzer Space Telescope



Space Interferometry Mission

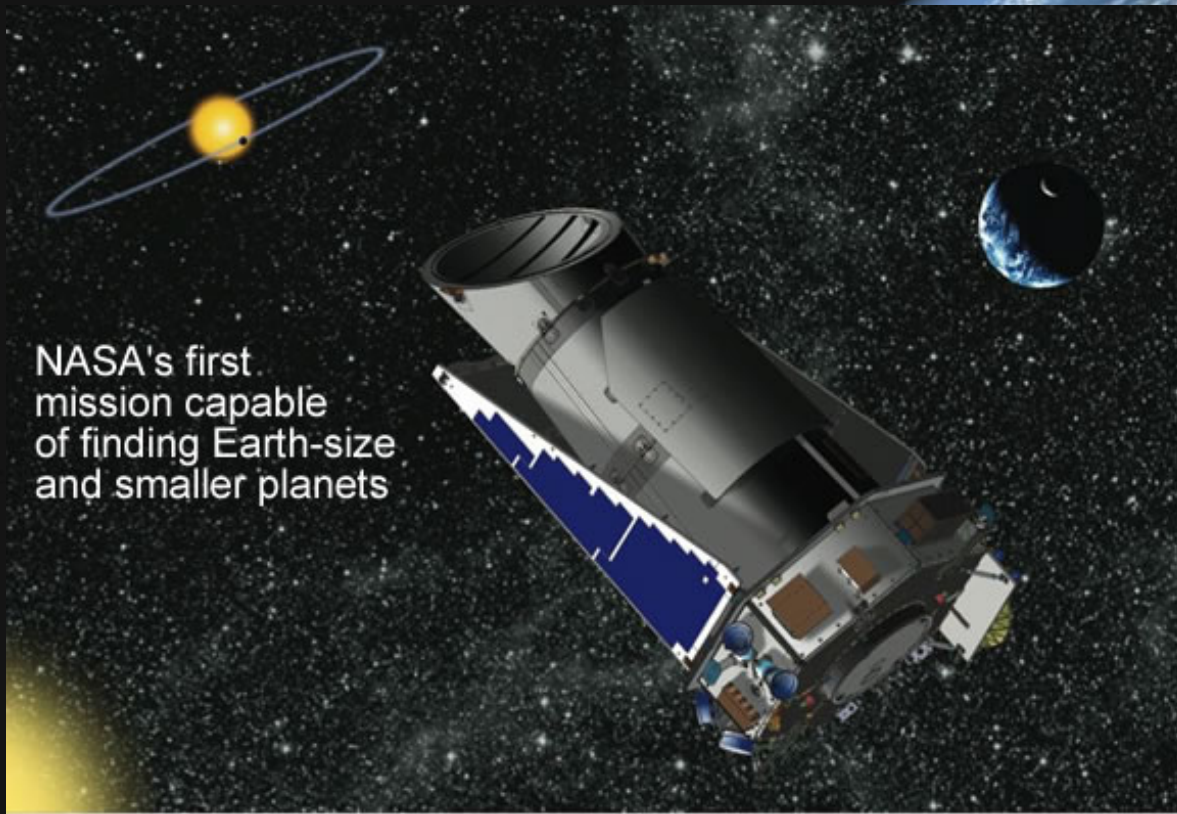


Terrestrial Planet Finder

*... desde tierra y el espacio ...*

# Misión Kepler (USA)

Fecha de lanzamiento Junio 2008



NASA's first mission capable of finding Earth-size and smaller planets



Misión óptica  
(0.5-1.0  $\mu\text{m}$ )

## Tránsitos Planetarios

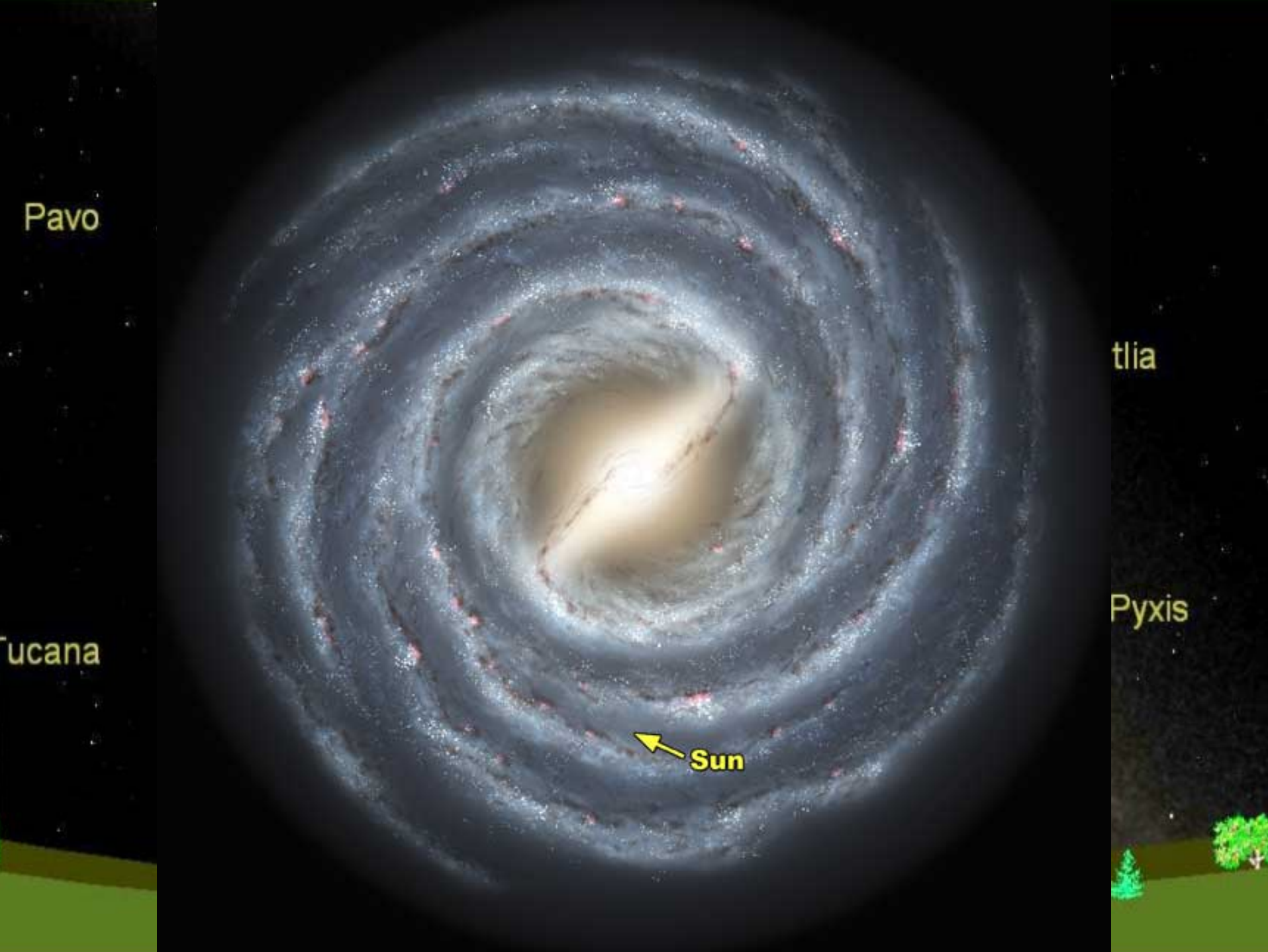
Planetas de tipo Tierra



# Kepler: Algunas Características

- ❖ Telescopio = 95 cm.
- ❖ CCD con un campo de 105 grados cuadrados.
- ❖ Monitoreo de 100,000 estrellas.
- ❖ 4 mediciones por objeto.
- ❖ Duración de la Misión = 4 años  $\Rightarrow$  Mide 4 Tránsitos de un Planeta tipo Tierra a 1 UA de su Sol.
- ❖ Rango dinámico  $\Rightarrow V = 9 - 15$  mag.
- ❖ Precisión  $V = 12 \pm 0.00001$  mag.
- ❖ Eclipse de Tierra  $\Delta m = 0.0001$  mag con una duración de 2 a 16 hs.
- ❖ Eclipse: Repetitivos y  $\Delta m = C'TE$ .





Pavo

tlia

Pyxis

Tucana

Sun

# Tránsitos

- ❖ Para que un tránsito ocurra la inclinación orbital debe ser cercana a  $90^\circ$ ;  $\tan i > a/R_*$  donde  $a$  es el semieje del planeta y  $R_*$  el radio de la estrella. Por ejemplo para un planeta con  $1R_{\text{Jup}}$ , orbitando a  $0.1$  UA,  $i$  debe estar entre  $87.3^\circ$  y  $90^\circ$ .
- ❖ Para orientaciones al azar  $P(i' \approx 90^\circ) = \cos i'$ .
- ❖ Sólo el 4.7% de los "Hot Jupiter" tendrán tránsitos.
- ❖ Sólo el 5% de las estrellas de tipo solar tienen "Hot Jupiter".
- ❖  $0.05 \times 0.047 \sim 0.00235 \Rightarrow$  Sólo  $\sim 2$  en 1000 estrellas tendrán tránsitos. Para detectar tránsitos es necesario observar varios miles de estrellas.

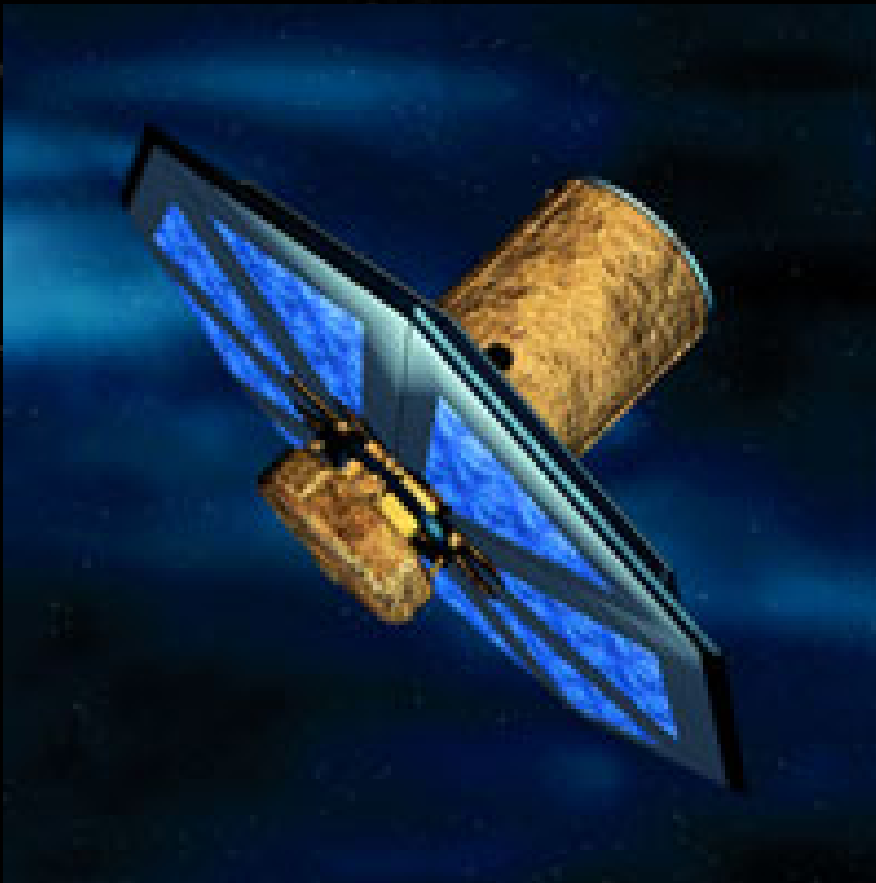
**DARWIN (ESA)**

**TPF – Terrestrial Planet  
Finder (NASA)**

“Proyecto”

Búsqueda en el  
**infrarrojo medio** de  
Planetas tipo Tierra en  
estrellas cercanas

Infrarrojo medio (5-20  $\mu\text{m}$ )

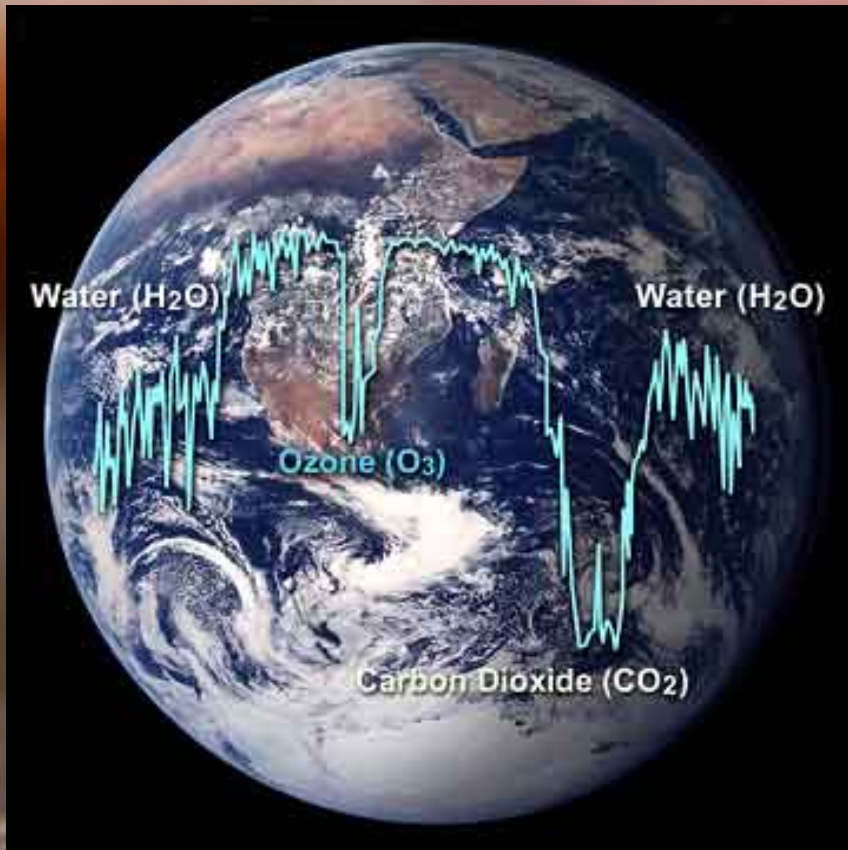


# Darwin/TPF : Algunas Características

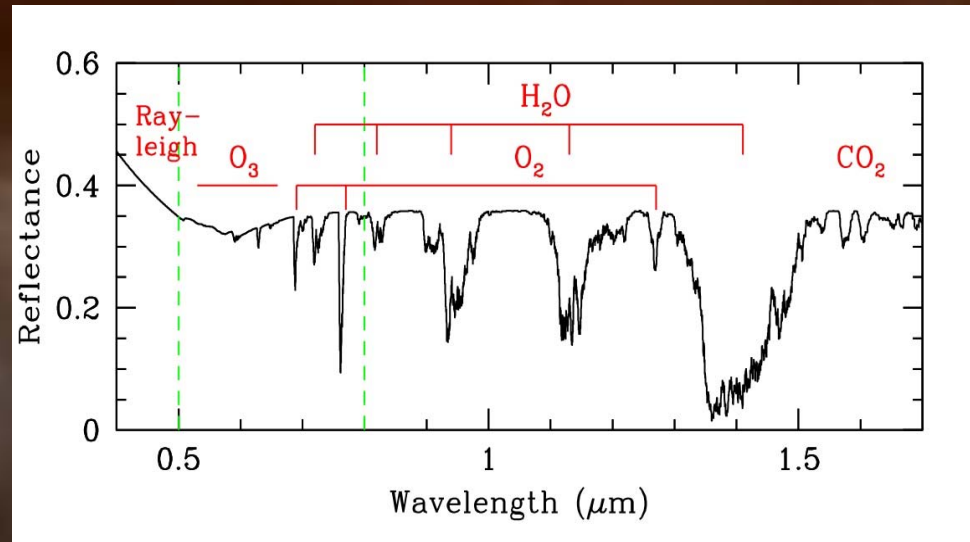
- ❖ 4 o 5 naves con 3 o 4 telescopios de 3-4 m en n-1 naves y una nave central.
- ❖ Imágenes de alta resolución y espectroscopía de planetas extra-solares (diámetro efectivo de 100 m).
- ❖ Modo coronográfico.
- ❖ “Anulamiento Interferométrico”.



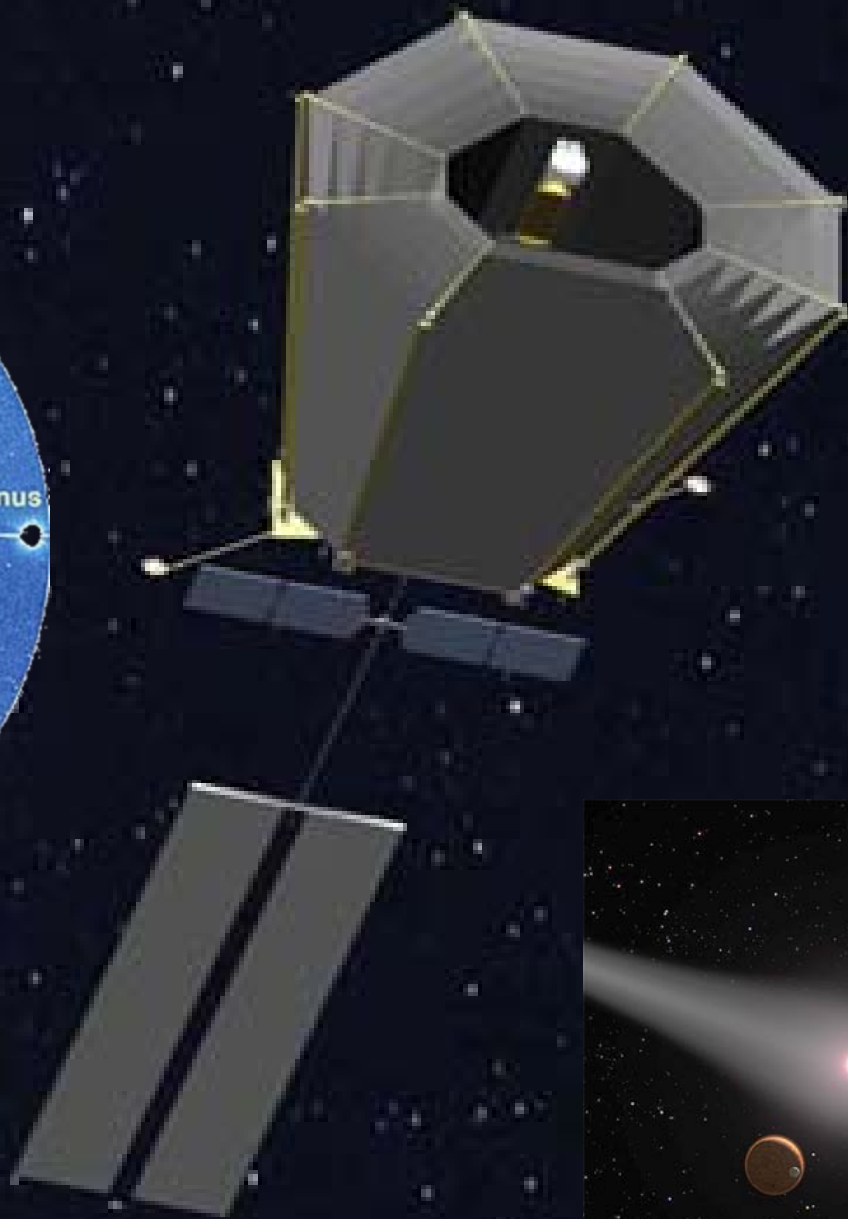
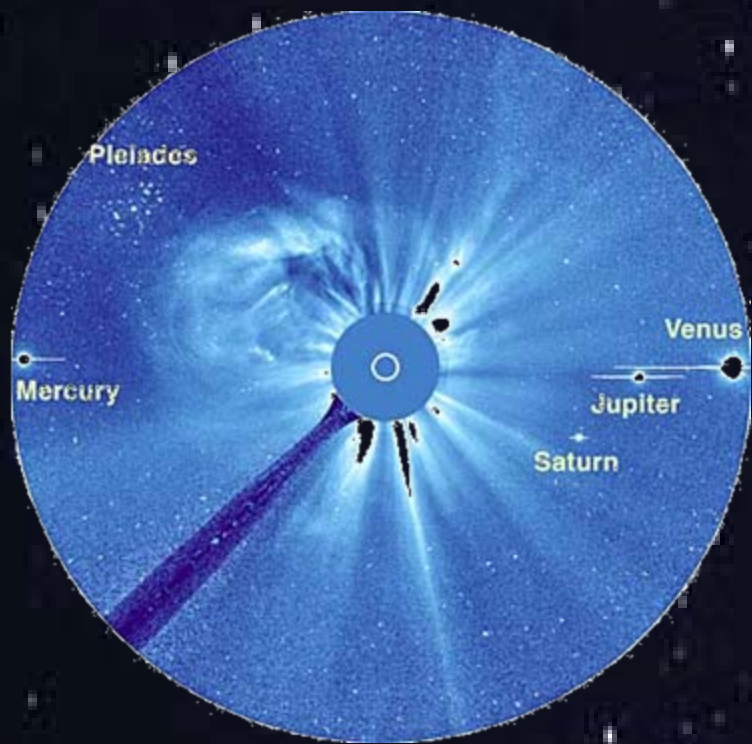
# Espectroscopía de Planetas Extra-solares



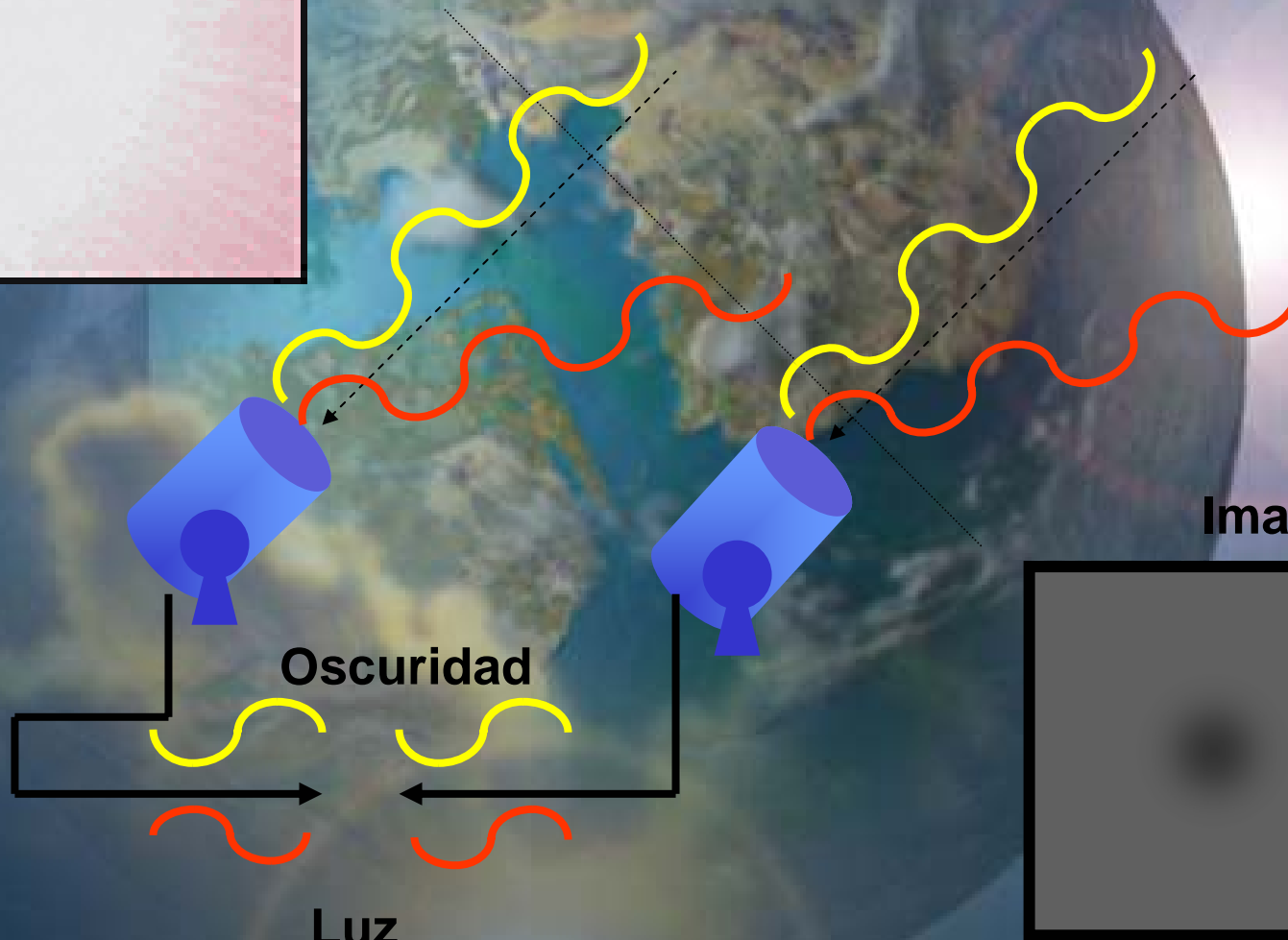
## Condiciones físicas en las atmósferas de los planetas



# Coronógrafo



# Anulamiento Interferométrico



Imagen

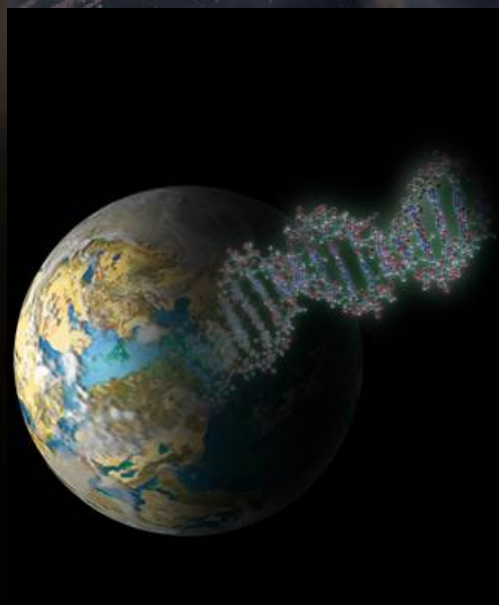


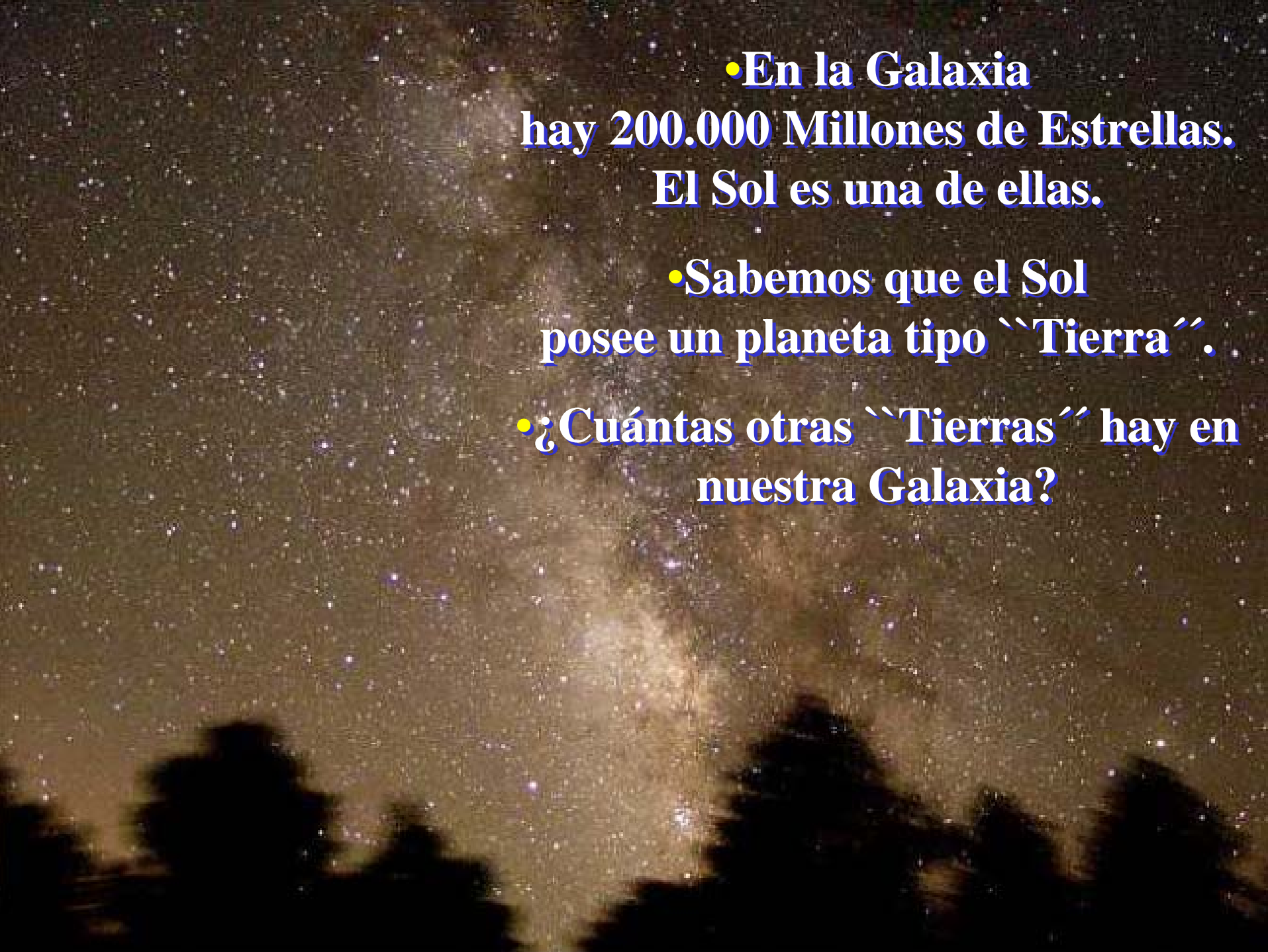
Oscuridad

Luz

**Los planetas se forman con las estrellas y acompañan la vida de las mismas**

**Dos caras de la misma moneda**



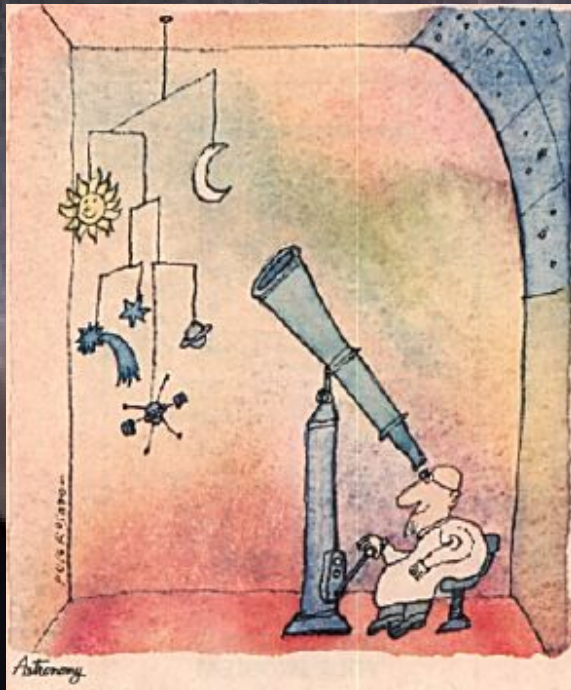


- **En la Galaxia hay 200.000 Millones de Estrellas. El Sol es una de ellas.**

- **Sabemos que el Sol posee un planeta tipo ``Tierra``.**

- **¿Cuántas otras ``Tierras`` hay en nuestra Galaxia?**

¡Muchas  
Gracias!



EL UNIVERSO  
PARA QUE LO DESCUBRAS



AÑO INTERNACIONAL DE LA  
ASTRONOMÍA  
2009