



# Planetas Extrasolares

Curso "Introducción a las Ciencias de la Tierra y el Espacio II"

(Presentación basada en la disertación de Alvaro Gímenez (Centro de Astrobiología de Madrid), durante la *Segunda Escuela Iberoamericana de Astrobiología*, Montevideo, 2009)

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

1

## Temario

- Evolución de las ideas acerca de la existencia de otros mundos
- Métodos de detección
  - Descripción
  - Ventajas y Limitaciones
  - Programas de búsqueda
- Resultados y Análisis
- Búsqueda de planetas habitables
- Resumen y perspectivas futuras

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

2

## Un viejo debate..

*“Deben existir otros mundos, con plantas y seres vivos, algunos de ellos similares y otros diferentes del nuestro ...”*

Epicuro (341–270 aC).

*“No puede haber más que un mundo, el Nuestro...”*

Aristóteles (384–322 aC)

...posteriormente surgieron ideas avanzadas:

*“Existen innumerables soles e innumerables tierras, todas ellas rotando en torno a sus soles en la misma forma que lo hacen los siete planetas de nuestro sistema. Sólo vemos los soles, porque son los cuerpos más grandes y más luminosos, pero sus planetas resultan invisibles al ser pequeños y poco luminosos. Los innumerables mundos en el Universo no son peores ni están más deshabitados que nuestra Tierra.”*

Giordano Bruno

*(La pluralidad de los mundos, 1584)*

## La “Hipótesis Nebular”

- A principios del S. XVII comienzan a evolucionar las ideas sobre la existencia de planetas extrasolares:
  - Galileo introduce el telescopio en la observación astronómica, y aporta pruebas de que existen objetos que giran en torno a cuerpos distintos a la Tierra (satélites galileanos, fases de Venus, etc.).
  - También muestra que la Vía Láctea está compuesta por miríadas de puntos que podrían ser otros soles.
- Kant y Laplace proponen una teoría para la formación del Sistema Solar a partir de la contracción de una nube de gas y polvo.

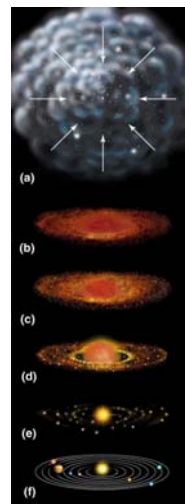


Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

5

## La “Hipótesis Nebular”

- La teoría de la nebulosa solar explica la coplanaridad y la (cuasi) circularidad de las órbitas planetarias.
- Si el Sol se formó de esta forma, entonces alrededor de otras estrellas también se podrían haber formado otros sistemas planetarios.

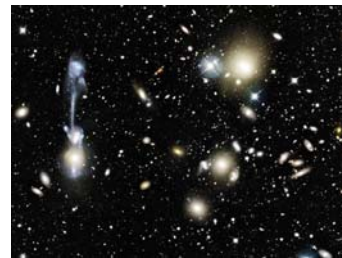


Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

6

## Existen otras galaxias..

- El siguiente salto evolutivo lo dió Herschel, quien a partir de estudios sistemáticos y estadísticos de la distribución espacial de las estrellas deduce que las mismas se encuentran formando parte de una estructura, que recibió el nombre de *galaxia*.
- El “universo” pasó a ser la galaxia, y no el Sol con los planetas conocidos a su alrededor.
- En el S. XX se descubre que existen otras galaxias.
- El Sol deja de ocupar un lugar especial en el universo, pasando a ser una estrella vulgar, y además nuestra galaxia es también una galaxia más entre tantas (existirían unas  $10^{11}$  galaxias, y nuestra galaxia contiene unos  $2 \times 10^{11}$  estrellas).



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

7

## Las técnicas de detección

- En 1952 Struve se plantea la existencia de los planetas extrasolares y el problema de su detección.
- Propone dos métodos:
  - **Método espectroscópico (o de las velocidades radiales)**, basado en la medición de la oscilación de la estrella (causada por la presencia del planeta) a partir del corrimiento Doppler de sus líneas espectrales.
  - **Método fotométrico (o de los tránsitos)**, basado en la medición de la luz de la estrella durante el pasaje del planeta por delante de su disco.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

8

## El método astrométrico

- Durante el S. XX surge también el **método astrométrico**.
- **Antecedentes:** descubrimiento del efecto perturbatorio en la posición astrométrica de Sirio debido una compañera enana blanca ("Sirio B"), por Bessel.
- La oscilación en la posición de Sirio podía interpretarse suponiendo un cuerpo "invisible" revolucionando en torno a la estrella.
- El método **consiste entonces en detectar la oscilación de la estrella (causada por la atracción gravitacional del o de los planetas) en torno al centro de masas del sistema.**
- **Van de Kamp** intentó aplicar esta técnica a detectar planetas extrasolares.
- Estudió la estrella de Barnard (mov. propio 10.3"/año) durante 25 años.
- En 1964 anuncia el descubrimiento de dos planetas de tipo joviano. Lamentablemente se comprueba que se había tratado de un error instrumental.

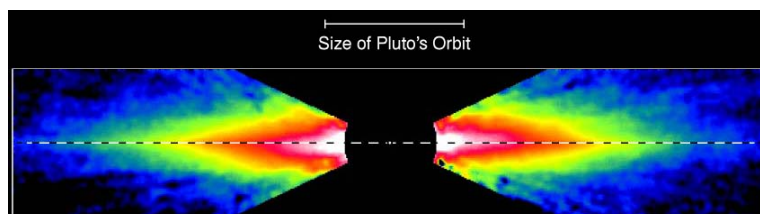


Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

9

## Discos protoplanetarios

- En 1980 se obtiene la **primera evidencia observacional** de que la formación planetaria ocurre en otras estrellas.
- Se mide el **exceso infrarrojo** de la estrella Vega y se observa (mediante el satélite IRAS) un **disco circumestelar** ( o protoplanetario) en torno a la estrella **Beta Pictoris**.
- Actualmente **se conocen muchos discos** en torno a otras estrellas, con aspectos muy similares a los que esperaríamos si estuvieran formando planetas.
- Entonces, **tendrán que existir planetas** donde los discos hayan desaparecido.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

10

**HD 141569**

**HR 4796**

**Discos alrededor de estrellas** **HST • NICMOS**

PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999  
 B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),  
 E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR 11

## Pulsar Timing

- En 1991 se descubre el **primer planeta extrasolar**, por un mecanismo distinto a los tres mencionados.
- Analizando observaciones del **púlsar PSR 1257+12** realizadas desde el radiotelescopio de Arecibo se descubrió una modulación en el período de oscilación del púlsar, la cual se atribuyó a la presencia de tres planetas.

M (m $\oplus$ )	a (ua)	periodo (d)
0.015	0.19	25.34
3.4	0.36	66.54
2.8	0.47	98.22

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR 12

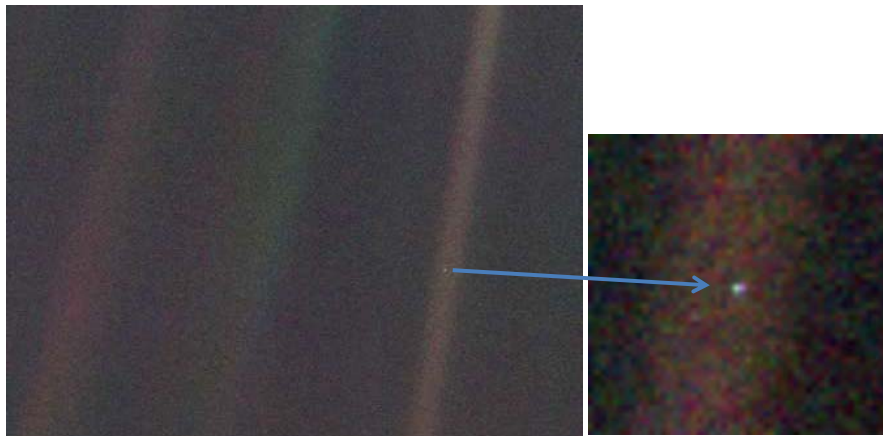
## Primeros descubrimientos

- La búsqueda de planetas en sistemas como el nuestro prosiguió.
- Dicha búsqueda tiene **dos problemas fundamentales**:
  - **La diferencia de brillo** (un planeta es mil millones de veces menos brillante que la estrella).
  - **La proximidad del planeta a la estrella.**

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

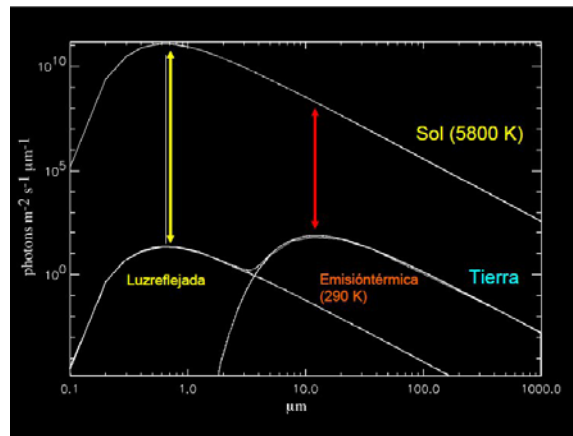
13





**Imagen de la Tierra tomada en 1990 desde el Voyager, a más de 6 mil millones de km.**





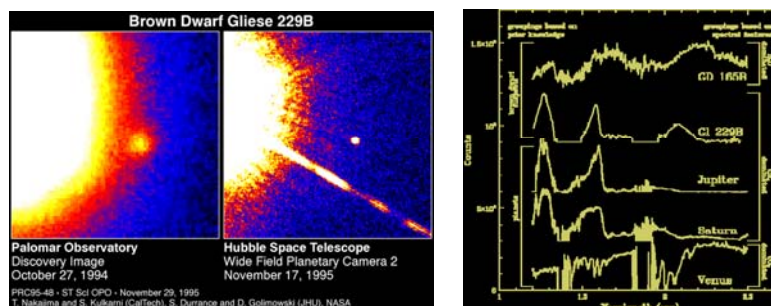
### Distribución espectral de las energías radiadas por el Sol y por la Tierra.

Los dos máximos de intensidad de radiación terrestres son varios órdenes de magnitud menores que la intensidad de radiación solar, en todo el espectro.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

17

- **“Estrategia”**: buscar en estrellas más frías (menor emisividad), y/o planetas más grandes, para mejorar el contraste entre la luz emitida por la estrella y la reflejada por el planeta.
- A mediados de los '90s se inicia una búsqueda de estrellas de baja masa.
- Por el método de los cúmulos estelares se descubren las **enanas marrones**.
- Se trata de objetos poco masivos ( $13 M_{\text{jup}} < M < 80 M_{\text{jup}}$ ), con  $T \sim 1000$  K.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

18

## Hitos

- **1980:** Primer disco protoplanetario observado en una estrella ( $\beta$  Pictoris)
- **1991:** Primer planeta orbitando en torno a un púlsar (PSR 1257+12).
- **1995:** Descubrimiento de las enanas marrones.
- **1995:** Primera enana marrón observada por imagen directa (Gliese 229B).
- **1995:** Primer planeta orbitando en torno a una estrella normal (51 Pegasi).
- **2004:** Primer planeta en torno a una enana marrón (2M1207).
- **2008:** Primer planeta rocoso (CoRoTExo 7b).
- **2008:** Primera imagen óptica de un exoplaneta (Fomalhaut b).
- **2011:** a la fecha (26 de octubre) se conocen 694 exoplanetas y 570 sistemas planetarios (*Enciclopedia de los Planetas Extrasolares*, J. Schneider, Obs. París, [exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)).

## Métodos de Detección

- **Astrométrico**
  - Consiste en medir la variación de la posición de la estrella en el cielo debida a su movimiento propio.
  - Primeros intentos por van de Kamp.
- **Espectroscópico**
  - Consiste en medir la oscilación en la velocidad radial de la estrella a partir del corrimiento Doppler de sus líneas espectrales.
  - **Primer descubrimiento por Mayor y Queloz (1995), de un planeta en torno a una estrella normal (51 Pegasi).**
  - Al 26/10/11, hay 643 planetas descubiertos por este método y por astrometría ([exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)).
  - Es el **método más prolífico** al momento.
- **Fotométrico**
  - Consiste en medir la disminución de la luz de la estrella durante el pasaje del planeta delante de su disco.
  - Primer tránsito observado de un exoplaneta en la estrella HD 20958 (descubierto antes por espectroscopía).
  - Al 26/10/11, hay 184 planetas descubiertos por este método ([exoplanet.eu](http://exoplanet.eu)).
  - **Es el único método práctico para encontrar planetas como la Tierra en la Zona Habitable (HZ).**

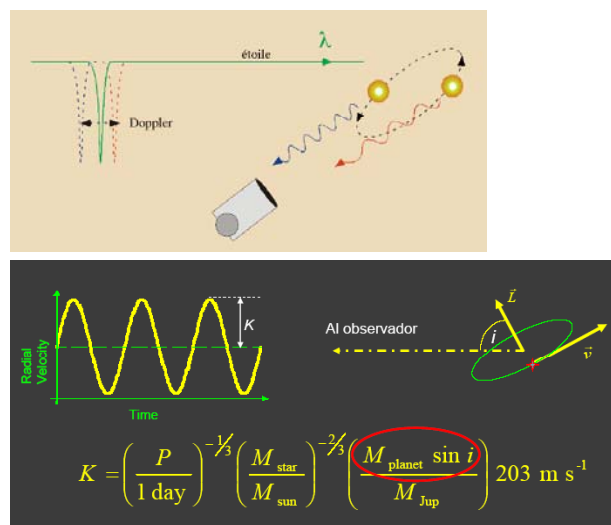
## Métodos de Detección

- **Detección Directa**
  - Consiste en anular la luz de la estrella mediante un coronógrafo o interferometría de anulación.
  - Al 26/10/11, hay 26 planetas descubiertos por este método (exoplanet.eu).
- **Micro lente gravitacional**
  - Consiste en estudiar la curva de luz de muchas estrellas para detectar un cambio eventual.
  - Al 26/10/11, hay 13 planetas descubiertos por este método (exoplanet.eu).
- **Pulsar timing**
  - Consiste en medir variaciones en la periodicidad de los púlsares.
  - El primer exoplaneta fue descubierto en 1991 en torno a PSR1257+12, a partir de radio-observaciones (Arecibo).
  - Al 26/10/11, hay 12 planetas descubiertos por este método (exoplanet.eu).

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

21

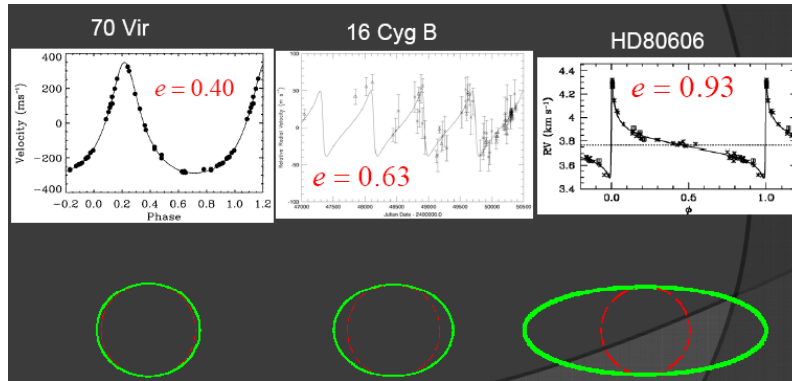
## Detección por espectroscopía



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

22

## Detección por espectroscopía

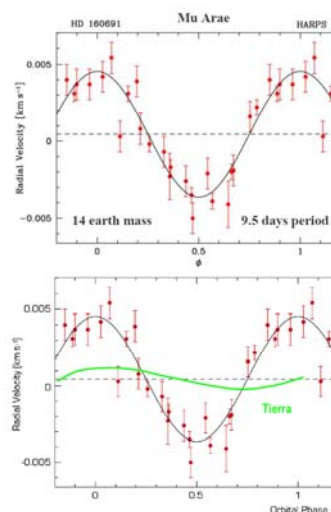
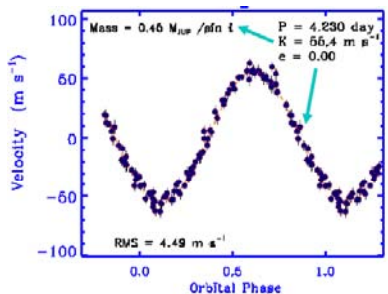


Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

23

## Detección por espectroscopía

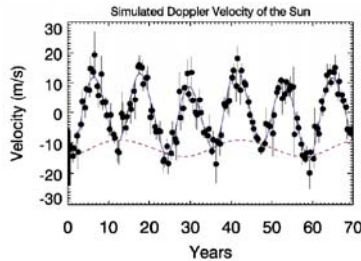
**51 Pegasi:**  
 $K \sim 50 \text{ m/s}$ ,  
 $P = 4.2 \text{ d}$ ,  
 $M \cdot \sin(i) = 0.47 M_{\text{Jup}}$  (1  $M_{\text{Jup}} \sim 318 M_{\text{Tierra}}$ )



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

24

## ¿Cómo veríamos al Sistema Solar?



Planeta	FSol/FP (óptico)	FSol/FP (IR)	Separación angular (") a 10 pc
Júpiter	~1e9	~1e5	~0.5
Tierra	~1e10	~1e6	~0.1

- La amplitud (~10 m/s) y el período de la oscilación se deberían fundamentalmente a Júpiter.
- El efecto de la Tierra sería indetectable ( $K \sim 0.4$  m/s) para la precisión actual (3 m/s, HARPS ~1-2 m/s).
- La detección directa es difícil por la disparidad de brillo y cercanía al Sol.
- A 10 pc de distancia, el Sol presentaría un movimiento propio de  $\sim 200 \mu\text{a/año}$ , menor que la precisión astrométrica actual ( $1000 \mu\text{a} = 0.001$  segundo de arco, *Hiparco*).
- *Gaia* medirá 10-20  $\mu\text{a}$  (hasta  $V \sim 15$ )

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

25

## Detección por tránsitos

- La forma del tránsito permite conocer la inclinación de la órbita, y el tamaño del planeta (la masa y el tamaño de la estrella se conocen a partir del tipo espectral y luminosidad).

$$\frac{\Delta L}{L} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2$$

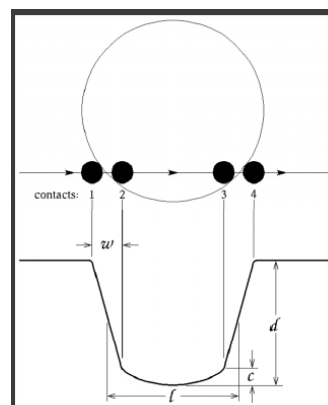
- La duración del tránsito depende del tamaño de la estrella y del tamaño de la órbita.

$$T = 13 \times 2R_* \left( \frac{a}{M_*} \right)^{1/2}$$

- Conocido el tamaño de la órbita se puede hallar el período orbital.

$$P^2 = \frac{a^3}{M_*}$$

(período orbital en años, masa en masas solares, radio estelar en radios solares, radio orbital en UA, duración en horas)

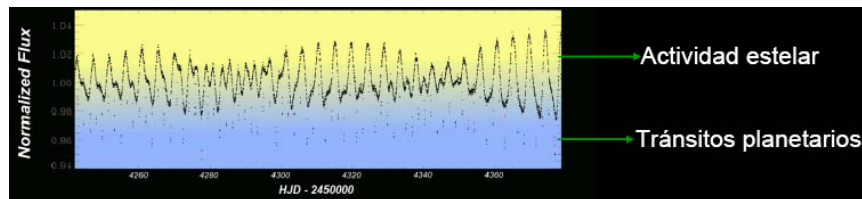


Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

26

## Detección de tránsitos

- Técnica restringida a órbitas en la dirección de la visual.
- Se pueden monitorear muchas estrellas a la vez.
- Actualmente los tránsitos suelen confirmarse por la observación espectroscópica para descartar otros efectos como manchas estelares, eclipses de otra estrella, etc..

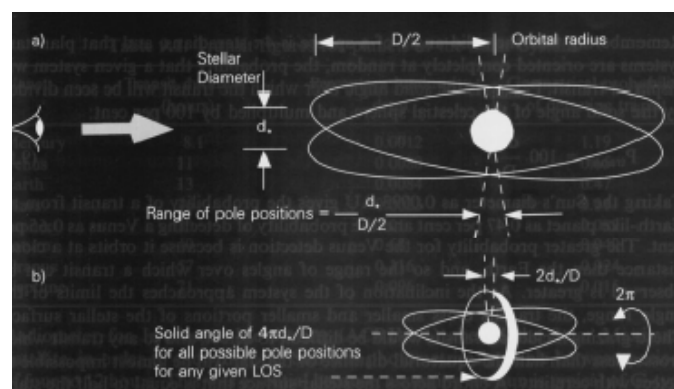


Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

27

## Probabilidad de detección

$$\text{Prob} \approx \frac{R_*}{a} \quad (\text{Borucki \& Summers 1984, Koch \& Borucki 1996})$$



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

28

# Tránsitos en el Sistema Solar

(kepler.nasa.gov)

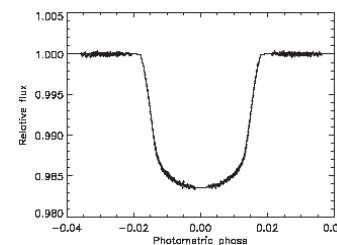
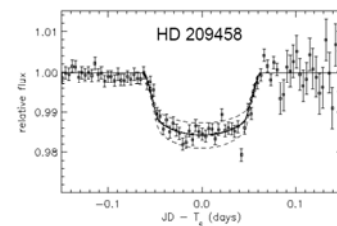
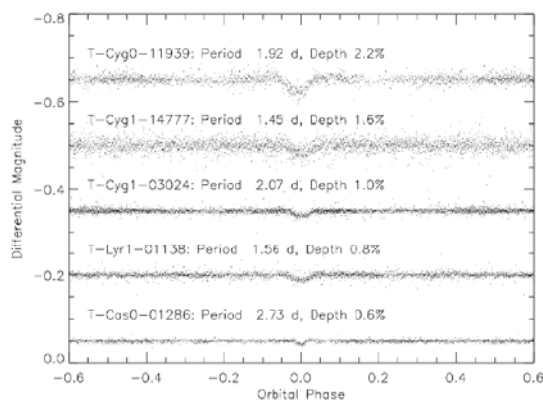
Planeta	P (años)	a (UA)	T ~ √a (horas)	Prof. ~ (Rp/R*) <sup>2</sup> (%)	Prob. ~ R*/a (%)
Mercurio	0.241	0.39	8.1	0.0012	1.19
Venus	0.615	0.72	11.0	0.0076	0.65
<b>Tierra</b>	<b>1.000</b>	<b>1.00</b>	<b>13.0</b>	<b>0.0084</b>	<b>0.47</b>
Marte	1.880	1.52	16.0	0.0024	0.31
<b>Júpiter</b>	<b>11.86</b>	<b>5.20</b>	<b>29.6</b>	<b>1.01</b>	<b>0.089</b>
Saturno	29.5	9.5	40.1	0.75	0.049
Urano	84.0	19.2	57.0	0.135	0.024
Neptuno	164.8	30.1	71.3	0.127	0.015

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

29

# Tránsitos extrasolares

Los tránsitos favorecen a planetas gigantes con órbitas pequeñas.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

30

## Propiedades inferidas de los tránsitos con seguimiento de velocidades radiales

- Determinación de densidades planetarias, a partir de la masa y el tamaño.
- Temperatura planetaria a partir de la observación del tránsito secundario ([más adelante](#)).
- Composición química de las atmósferas planetarias ([más adelante](#)).
- Las observaciones de tránsitos también han puesto de manifiesto una anomalía en los radios de los exoplanetas (Torres, Winn & Holman 2008): la dispersión observada en los radios de los exoplanetas es inconsistente con las predicciones teóricas más simples.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

31

## Probabilidad de que una estrella albergue planetas en función de la metalicidad

- Una búsqueda mediante tránsitos con el HST en 34,000 estrellas del cúmulo globular *47 Tucanae* dio resultados negativos.
- Podría deberse en principio a la baja metalicidad ( $Fe/H = -0.7$ ), pues se ha observado en estrellas con planetas una correlación con la metalicidad (Fischer y Valenti 2005).
- No hay todavía una explicación para dicha correlación.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

32



## Probabilidad de que una estrella albergue planetas en función de la metalicidad

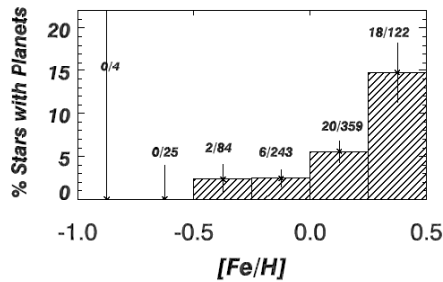
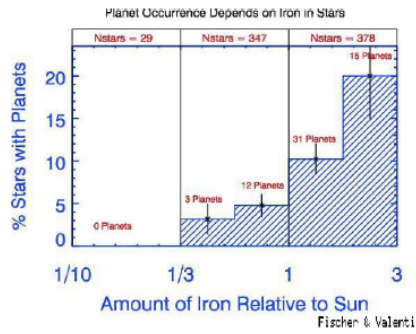
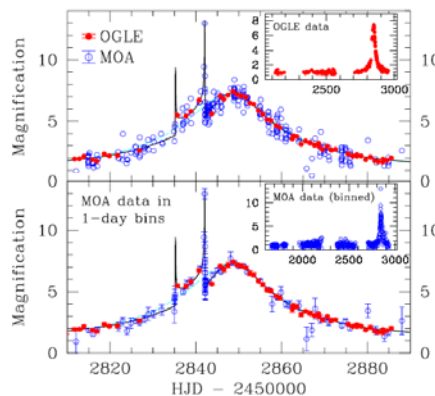
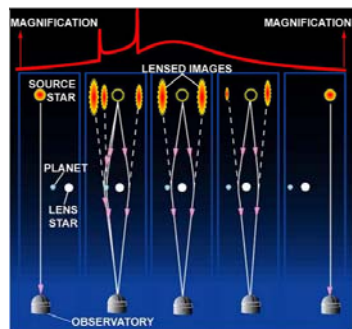


FIG. 4.—Percentage of stars with detected planets rises with iron abundance. In all, a subset of 850 stars were grouped according to metallicity. This subset of stars had at least 10 Doppler measurements over 4 yr, providing uniform detectability for the presence of planets with velocity amplitudes greater than  $30 \text{ m s}^{-1}$  and orbital periods less than 4 yr. The numbers above each bar on the histogram indicate the ratio of planets to stars in each bin. Thirteen stars had  $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.0$ , and no planets have been discovered around these stars.

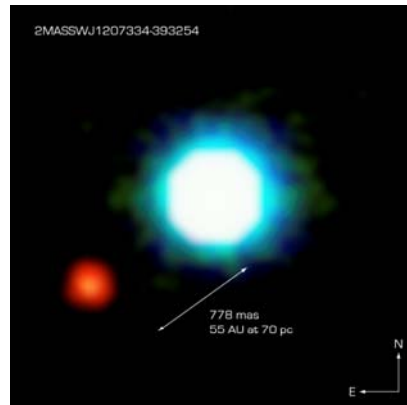


## Detección por efecto de microlente



- Microlensing event OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53. "In this event a short duration ( $\sim 7$  days) low amplitude deviation in the light curve due a single lens profile was observed in both the MOA and OGLE survey observations. We find that the observed features of the light curve can only be reproduced using a binary microlensing model (...). If the lens system comprises a main sequence primary, we infer that the secondary is a planet of about 1.5 Jupiter masses with an orbital radius of  $\sim 3 \text{ AU}$ " ( $M_{\text{star}} \sim 0.4 M_{\text{sol}}$ ,  $d = 5.2 \text{ kpc}$ ) (Bond et al 2004).
- Actualmente es el método más rápido para encontrar planetas pequeños y de masa  $\sim$  terrestre.
- Requiere observar gran cantidad de estrellas (millones).
- El fenómeno no se vuelve a repetir.

## Detección directa



The Brown Dwarf 2M1207 and its Planetary Companion  
(VLT/NACO)

ESO PR Photo 14a/05 (30 April 2005)

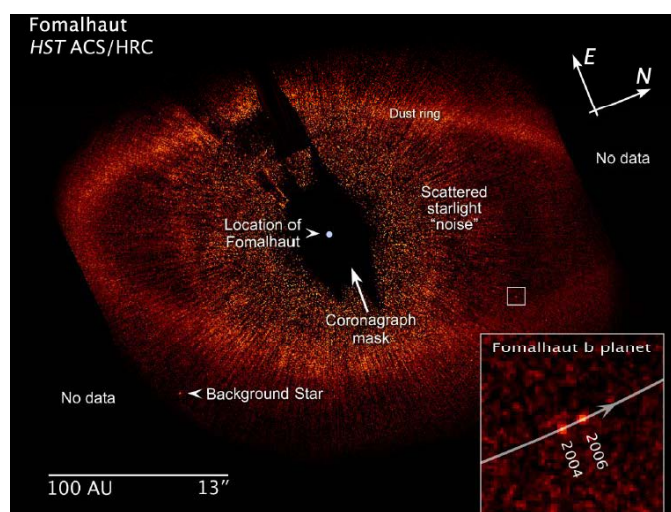
© ESO

- 2004: primeras imágenes de un exoplaneta en torno a una enana marrón.
- Imagen IR desde el 8.2m VLT/ESO (Paranal) con óptica adaptativa.
- Planeta de  $\sim 5$  MJ en torno a 2M1207 (25 MJ).
- Radio orbital  $\sim 55$  UA.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

35

## Detección directa

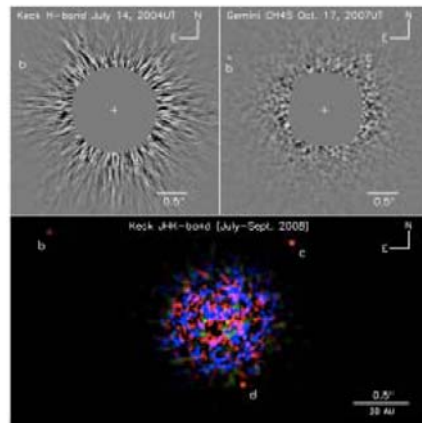


- **Nov/2008:** primera imagen óptica de un exoplaneta, en torno a una estrella normal (Fomalhaut, 7.7 pc). La luz de la estrella es anulada por un coronógrafo.
- **Fomalhaut b** tiene  $\sim 3$  MJ y un radio orbital  $\sim 115$  UA.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

36

## Detección Directa

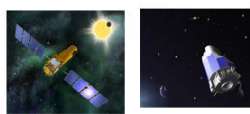

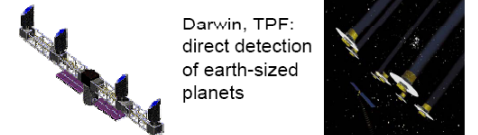


- También se han observado sistemas planetarios múltiples.
- Descubrimiento de dos planetas al ocultar la luz de la estrella HD 8799.
- En Sep/2009 se descubrió el tercer planeta (HR 8799 d), mediante interferometría de anulación.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

37

## Programas de búsqueda

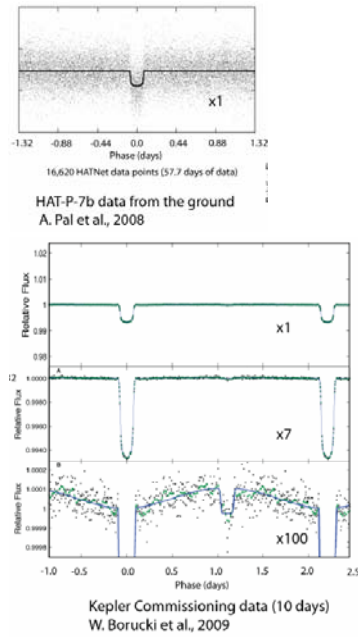
 <p>COROT, Kepler: search for transits of earth-sized planets</p>	 <p>Gaia, SIM: micro-arc-sec astrometry, looking for wobble</p>
 <p>Darwin, TPF: direct detection of earth-sized planets</p>	

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

38

## Primeros resultados

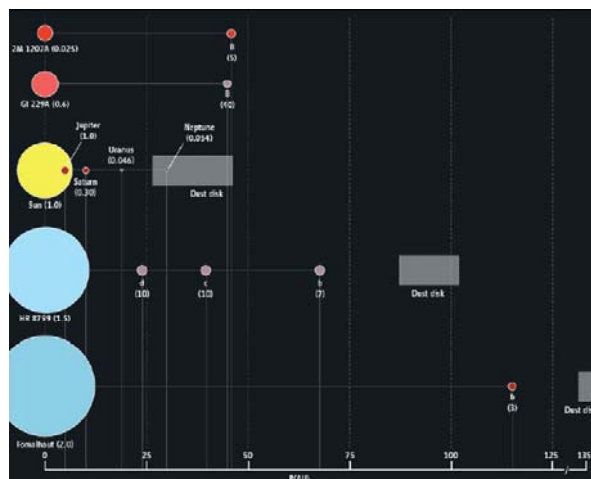
- Descubrimiento del primer planeta rocoso por tránsitos (2008).
  - CoRoTExo 7b: 5-11  $M_{\oplus}$ ,  $P=20.4$  hs,  $a = 0.0167$  UA ( $T \sim 1000$  °C!),  $R = 1.7 R_{\oplus}$ .
- Observación del tránsito de HAT-P-7b por *Kepler* (2009).
  - Aumento substancial de la sensibilidad: observación de tránsito secundario y del efecto de fase.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

39

## Propiedades de los exoplanetas



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

40

## Propiedades de los exoplanetas

- (Problemas de efectos de selección, distintas sensibilidades de los surveys, diferentes grados de completitud, diferentes criterios estadísticos, inhomogeneidad de las muestras, etc.)
- La frecuencia de planetas disminuye a medida que aumenta la masa del planeta (tendencia opuesta a la esperada para una muestra sesgada).
- No se observa una fuerte correlación entre excentricidades y masas (Marcy et al 2005).
- Las órbitas excéntricas son comunes para semiejes mayores > radio de circularización por mareas. Mediana  $e \sim 0.28$  ( $1 < a < 3$  UA) (Marcy et al 2005).

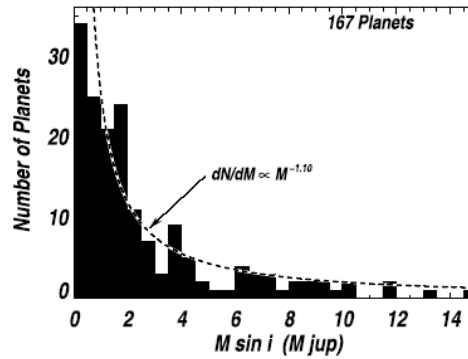


FIG. 6.—Minimum mass distribution of the 167 known nearby exoplanets with  $M \sin i < 15M_J$ . The mass distribution shows a dramatic decrease in the number of planets at high masses, a decrease that is roughly characterized by a power law,  $dN/dM \propto M^{-1.10}$ . Lower mass planets have smaller Doppler amplitudes and are thus more difficult to detect. This distribution results from many surveys and so is drawn from an inhomogeneous sample.

(“Catalog of Nearby Exoplanets”, Butler et al 2006)

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

41

## Excentricidades vs Masas, Masas vs Distancias

(Butler et al 2006)

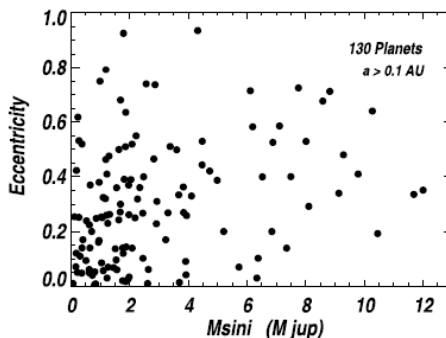


FIG. 11.—Distribution of orbital eccentricities as a function of minimum mass for the 130 known nearby exoplanets with  $M \sin i < 13M_J$ , excluding those for which  $a < 0.1$  AU, i.e., those planets that may have been tidally circularized. High-mass exoplanets ( $M \sin i > 5M_J$ ) have a slightly higher median eccentricity than lower mass exoplanets. The completeness of Doppler surveys increases with  $M \sin i$  and is generally insensitive to eccentricity. This distribution represents results from many surveys and so is drawn from an inhomogeneous sample.

(Armitage 2009)

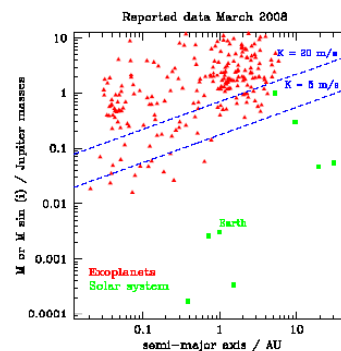


FIG. 5 The distribution of known extrasolar planets in semi-major axis and minimum mass. Lines of constant semi-amplitude radial velocity perturbation are plotted assuming a Solar mass host. It is clear by eye that the typical extrasolar planet detected so far is not a hot Jupiter but rather orbits at  $a > 1$  AU.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

42

## Semiejes mayores

- La frecuencia de planetas disminuye a medida que aumenta la distancia a la estrella.
- Hay un número importante de planetas a grandes distancias.

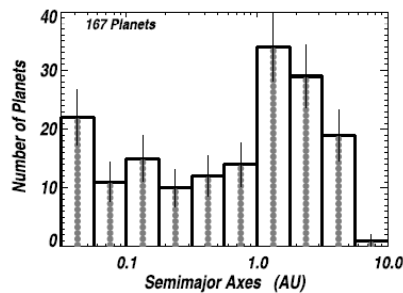
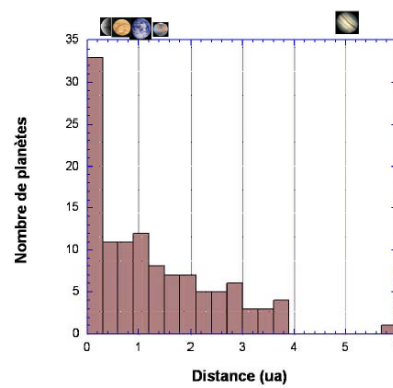


FIG. 7.—Orbital distance distribution of the 167 known nearby exoplanets with  $0.03 \text{ AU} < a < 10 \text{ AU}$  in *logarithmic* distance bins. Planets with  $a > 3 \text{ AU}$  have periods comparable to or longer than the length of most Doppler surveys, so the distribution is incomplete beyond that distance. This distribution represents results from many surveys and so is drawn from an inhomogeneous sample.

(Butler et al 2006.)



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

43

## Resumen de propiedades

- Existen sistemas múltiples.
- Algunos sistemas binarios/triples tienen planetas.
- Las estrellas ricas en metales tienen más planetas.
- Se empiezan a observar planetas con masas como Neptuno (“Super-Tierras”).
- 5 – 10 % de las estrellas F y M tienen planetas dentro de las 3 UA.
- Muchas órbitas son muy excéntricas.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

44

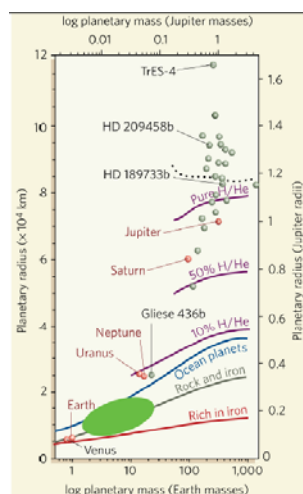
## Cuestiones para los modelos

- La existencia de los “*Hot Jupiters*” parece contradecir la teoría estándar de formación de nuestro sistema solar. Posibles explicaciones:
  - Formación similar a la de una enana marrón.
  - Migración planetaria hacia el interior por interacción con un disco protoplanetario asimétrico.
- Estabilidad de los sistemas extrasolares, en particular de los que se encuentran en torno a estrellas binarias.
- Posibles explicaciones a las altas excentricidades contemplan la interacción del planeta con el disco protoplanetario, o con el disco de planetesimales, o con otro planeta, o con estrellas próximas.

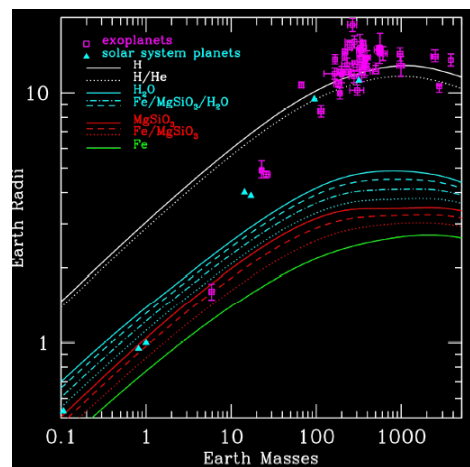
Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

45

## Características físicas de los exoplanetas



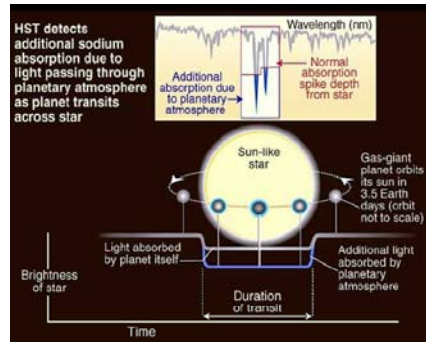
- La mayoría de los exoplanetas que conocemos son gaseosos (H y He).



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

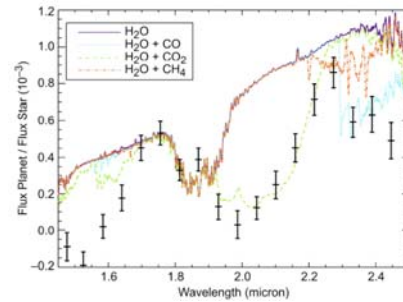
46

## Características físicas de los exoplanetas



- Diagnóstico de atmósferas planetarias durante los tránsitos

HD 189733 b

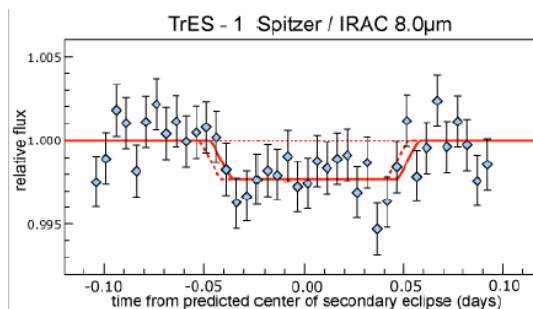


Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFCC, UDELAR

47

## Características físicas de los exoplanetas

- La variación en el flujo recibido de la estrella durante de un tránsito secundario permite diagnosticar la temperatura del planeta (Chabornneau et al 2005).



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFCC, UDELAR

48



## Estudio de la Habitabilidad

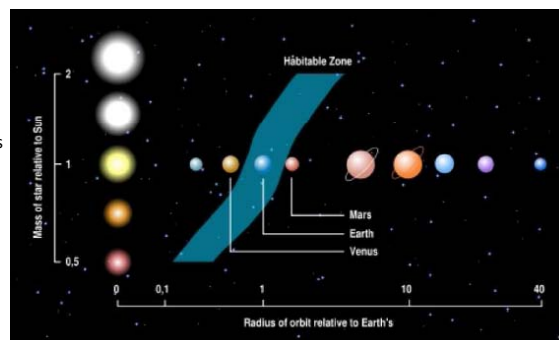
- Requisitos básicos para que un planeta sea habitable:
  - Su sol debe ser estable.
  - Encontrarse en la Zona Habitable (HZ).
  - Poseer atmósfera estable y agua líquida.
  - Haber tenido tiempo para evolucionar.

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

49

## La Zona Habitable

- La habitabilidad depende de:
  - La distancia a la estrella.
  - La masa y la fase evolutiva (irradiación) de la estrella.
  - El tamaño y masa del planeta (placas tectónicas, retención de atmósfera, etc...)
  - La temperatura del planeta.
  - Existencia de campo magnético.
- No es una definición rigurosa pues pueden existir planetas habitables fuera de la HZ (e.g. satélites de planetas gigantes), y pueden existir planetas no habitados en la HZ.
- La "Paradoja del Sol": los modelos actuales indican que hace  $\sim 2e9$  años se dieron las condiciones para la existencia de agua líquida en la Tierra (en esa época el Sol irradiaba menos calor, aunque más radiación energética).



$$R \sim (0.7 - 3.0) R_{\text{Tierra}} \quad T = (0 - 100) ^\circ\text{C}$$

Pérdida de atmósfera,  
Falta de tectónica de placas

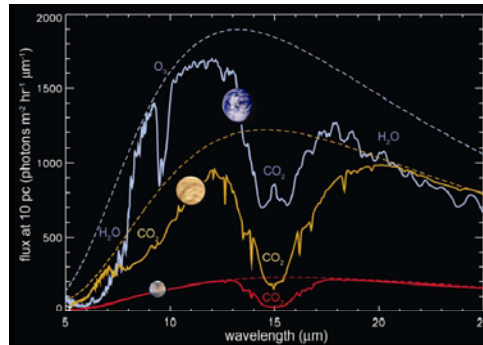
Desarrollo como  
gigante gaseoso

Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

50

## Habitabilidad de exoplanetas

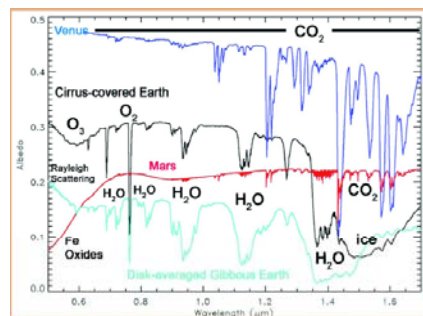
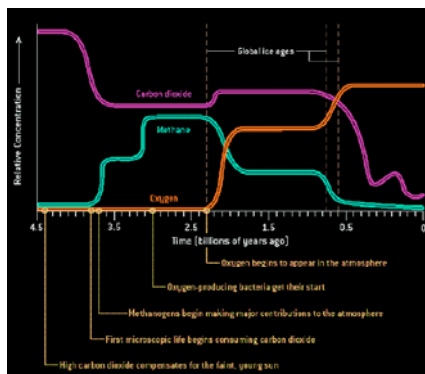
- El material básico para la vida es común en el universo:
  - Se conocen moléculas prebióticas en regiones de formación estelar y planetaria.
  - Se han identificado moléculas orgánicas y de agua en discos protoplanetarios.
- Luego... la vida debe ser algo normal en todas partes.. ¿Cómo la buscamos?
- Separamos los espectros de los planetas de sus estrellas, y analizamos su composición química buscando biomarcadores (O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>).
- ¿Dónde la buscamos?
  - Las estrellas poco masivas (K,M) abundan en la vecindad del Sol y ofrecen mejor contraste.
  - Pero permanecen activas mucho más tiempo que el Sol.
- La misión *Darwin* permitirá tomar los espectros individuales de los planetas, mediante interferometría de anulación en el IR. Dentro de unos 10-20 años estaremos analizando atmósferas de exoplanetas.
- Para analizar estos espectros, se deberá tener en cuenta el tipo espectral de la estrella, así como también la dependencia de la reflectancia con las nubes, la vegetación, el océano, arena, basalto, nieve, etc.. además de la fase del planeta.
- También influye la fase evolutiva del planeta.



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

51

## Habitabilidad de exoplanetas



Introducción a CTE II (2011), Depto. de Astronomía, IFFC, UDELAR

52

## Resumen y perspectivas futuras

- Sabemos que existen planetas en torno a otras estrellas.
- Todavía no hemos encontrado al "hermano gemelo" de la Tierra.
- Existen unos mil millones de planetas en la galaxia (y existen unos cien mil millones de galaxias).
- Deben existir planetas parecidos a la Tierra, y con condiciones ambientales similares (*Kepler* empezará en 2012 a observar por 5 años unas cien mil estrellas en nuestra vecindad, donde se espera que descubra unos 50 planetas de tamaño terrestre).
- En los próximos cinco años comenzaremos a descubrirlos.
- En 2020 comenzaremos a analizar sus atmósferas buscando trazas de vida.
- *¡Lo raro sería no encontrarla!*



Introducción a CTE II (2011), Depto. de  
Astronomía, IFFC, UDELAR

53