

Planetas Extra-Solares (Exoplanetas)

Tatiana A. Michtchenko (IAG, Universidade de São Paulo, Brasil)

Em alguns mundos não há Sol e Lua, em outros eles são maiores do que em nosso mundo, e em outros mais numerosos. Em algumas partes há mais mundos, em outras menos (...); em algumas partes eles estão surgindo, em outras falhando. Existem alguns mundos desprovidos de criaturas vivas ou plantas ou qualquer umidade. [Democritus \(~460-370 B.C.\)](#)

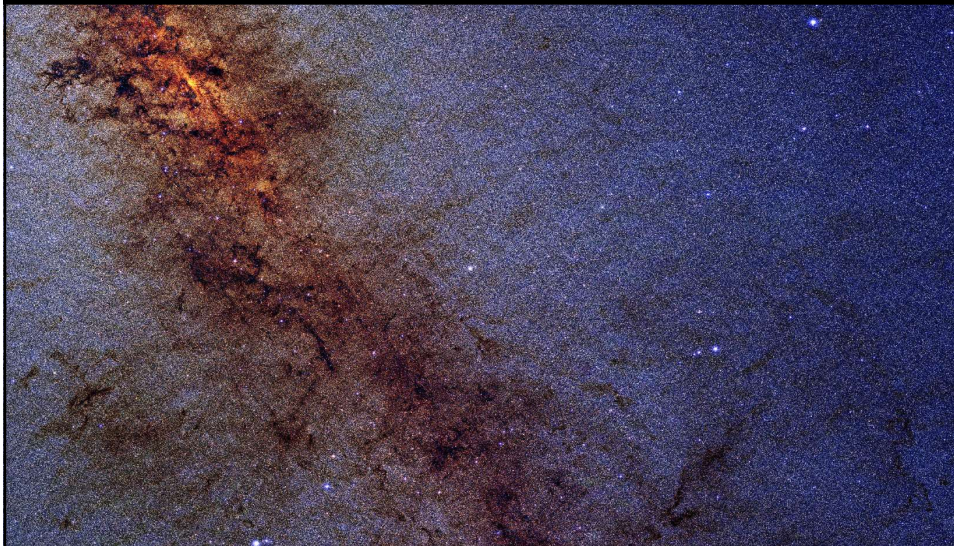
Não pode haver mais mundos do que um.

[Aristotle \(384-322 B.C.\)](#)

Existem infinitos mundos, iguais e diferentes deste nosso mundo. Para os átomos sendo infinitos em número, como já foi comprovado (...), não existe um obstáculo para o número infinito de mundos.

[Epicurus \(341-270 B.C.\)](#)

Existem 200 bilhões de estrelas em nossa Galáxia....

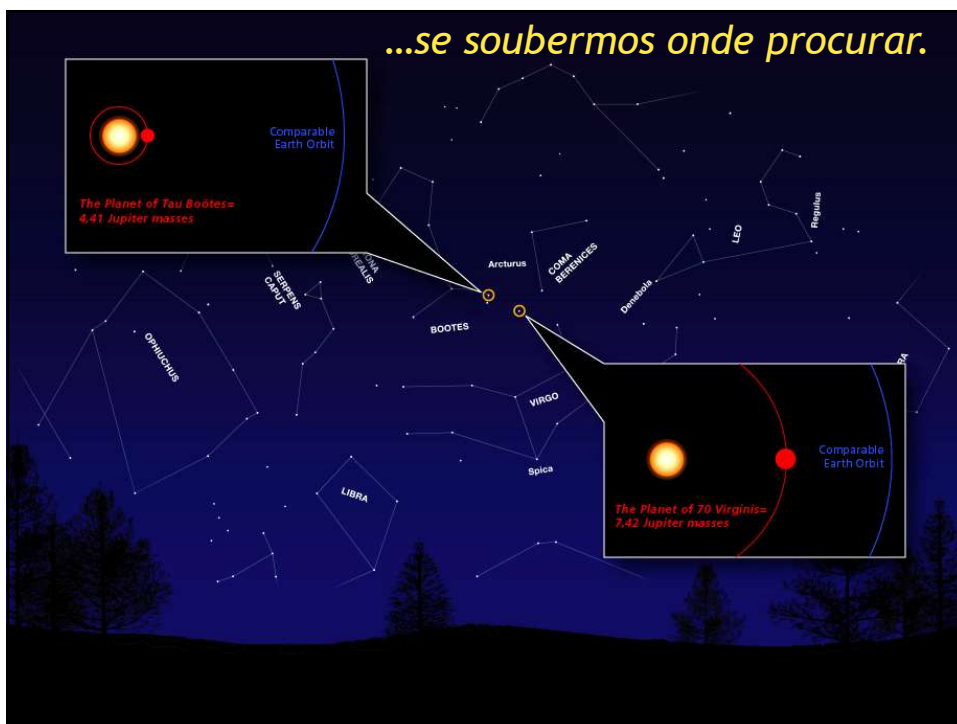


...uma delas é o nosso Sol.

Podemos até ver no céu noturno algumas das estrelas que têm planetas...



...se soubermos onde procurar.



Detecção dos planetas extra-solares; determinação de suas características físicas e parametros orbitais: catálogos.

The Extrasolar Planets Encyclopaedia

Criado em fevereiro 1995 por [Jean Schneider](http://exoplanet.eu) (CNRS - Paris Observatory)
<http://exoplanet.eu>

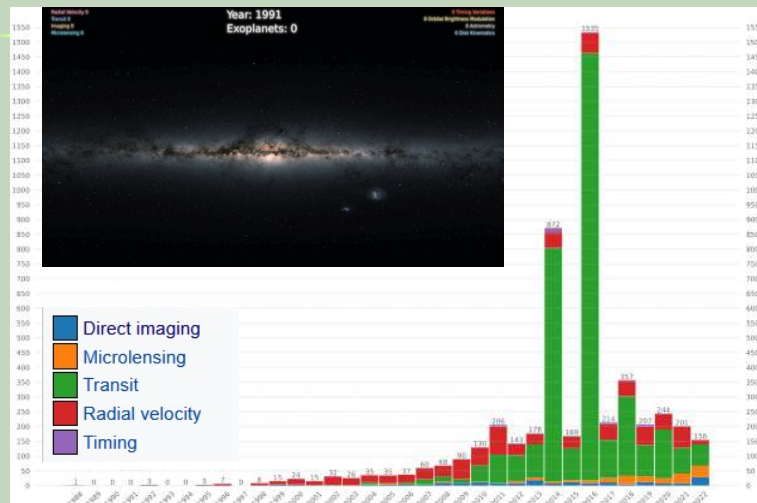
Open Exoplanet Catalogue

<http://www.openexoplanetcatalogue.com/>

NASA Exoplanet Archive

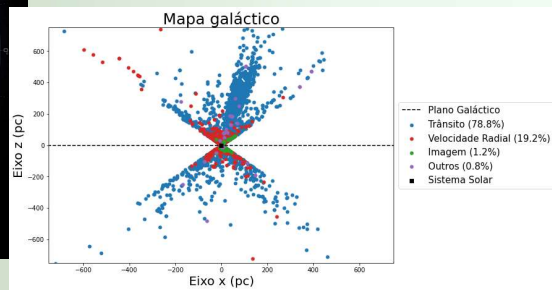
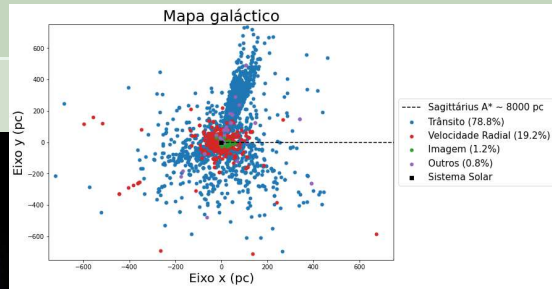
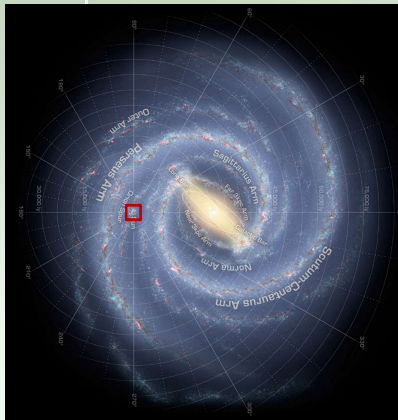
<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>

Descoberta de planetas extra-solares de 1995 até o presente (total é mais de 5500 planetas)



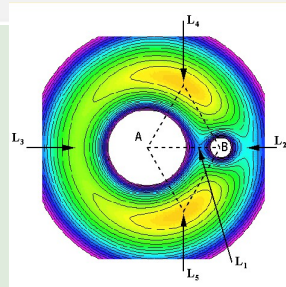
Onde estão as estrelas com planetas conhecidos?

Galáxia



Definição do termo *planeta* pela União Astronômica Internacional (2006)

- Objetos com massas verdadeiras abaixo da massa limite para fusão termonuclear de deutério (atualmente calculada em 13 massas de Júpiter para objetos de metalicidade solar) que orbitam estrelas, anãs marrons ou remanescentes estelares e que têm uma razão de massa com o objeto central abaixo da *instabilidade L4/L5* ($M/M_{\text{central}} < 2/(25 + \sqrt{621})$) são "planetas" (não importa como eles se formam).
- A massa/tamanho mínimo necessário para que um objeto extra-solar seja considerado um planeta deve ser o mesmo usado em nosso Sistema Solar.



Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total:

10 de maio de 2024

5668 planets

Velocidade radial

1107 planetas

Transito

3902 planetas

Microlensing

278 planetas

Imagem direta

249 planetas

Timing

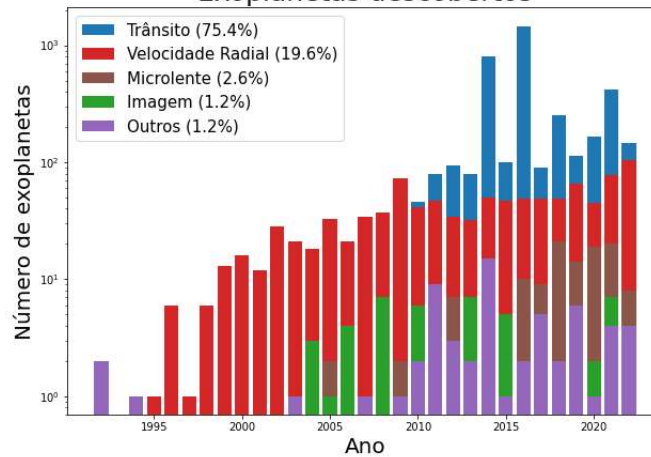
53 planetas

Astrometria

24 planetas

Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Exoplanetas descobertos



Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total:

10 de maio de 2024

5668 planets

Velocidade radial

1107 planetas

Transito

3902 planetas

Microlensing

278 planetas

Imagem direta

249 planetas

Timing

53 planetas

Astrometria

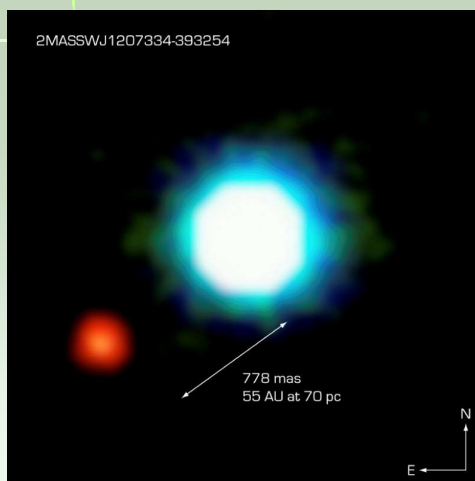
24 planetas

*As estrelas são um bilhão de vezes mais brilhantes
que os planetas ...*





Planet Detection Methods: Direct Imaging



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

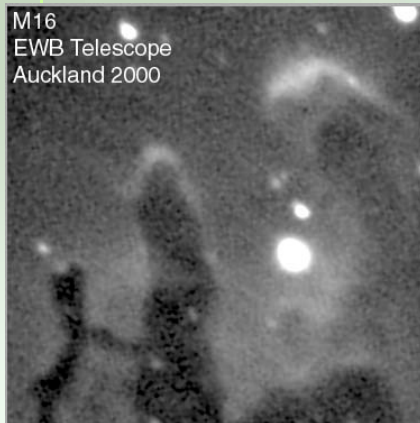
ESO PR Photo 14a/05 (30 April 2005)

©ESO

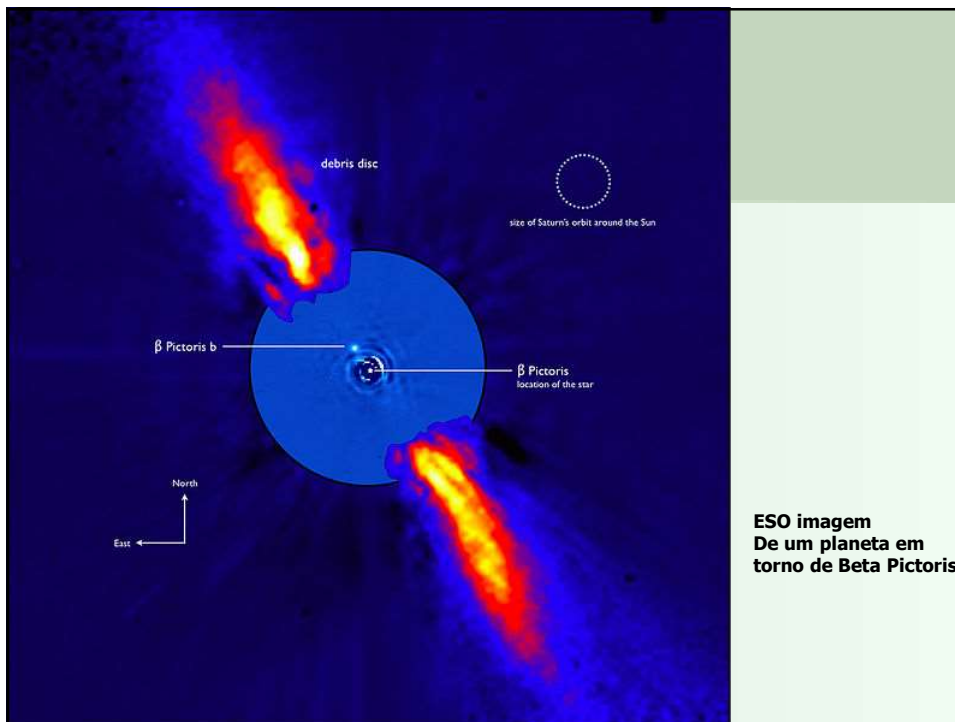
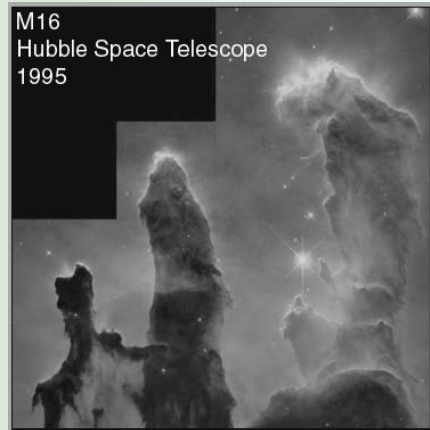
- Planets are $\sim 10^9$ - 10^{11} times fainter in the visible range and $\sim 10^5$ - 10^6 in infrared compared to their host stars
- Extremely difficult to image due to glare!
- Primeira imagem do planeta (em IR)
 - A distância é duas vezes a distância do Netuno
 - Planeta é $\sim 5 M_{\text{Jupiter}}$

*Colocando telescópios no espaço
ajudará a busca.*

Visto do chão

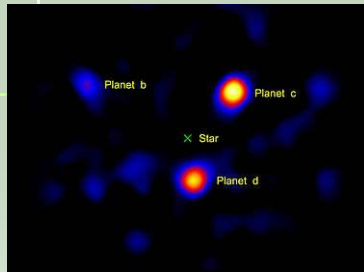


Visto do espaço

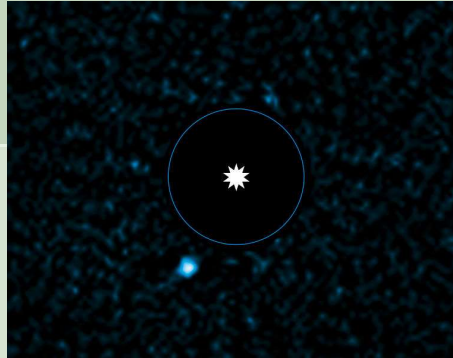


**ESO imagem
De um planeta em
torno de Beta Pictoris**

Direct imaging



Estrela jovem HD8799 e seus três planetas gigantes.



Estrela jovem HD95086 (removida) e seu planeta gigante

Concepção artística dos outros mundos



Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total: **5668 planets**

10 de maio de 2024

Velocidade radial 1107 planetas

Transito 3902 planetas

Microlensing 278 planetas

Imagem direta 249 planetas

Timing 53 planetas

Astrometria 24 planetas

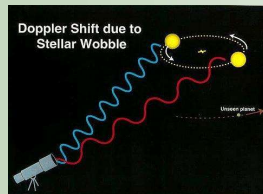
Stellar Radial Velocity Technique explores the dynamical effects that the planets produce in their parent star's motion.

Uses the **Doppler Effect** to measure changes in the radial velocity of a star caused by the small gravitational force of an unseen orbiting planet

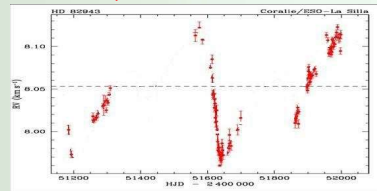
A planet and its parent star orbit around their common centre of gravity.



A massive planet in a close orbit gives its star a reflex velocity of a few tens of ms^{-1} . This gives a small but measurable **Doppler shift**.



Velocity vs. Time (observation data)



VERY high precision is needed to measure these very small velocity changes!



Absorption lines shift left or right if star moves toward or away from us

Multi-Keplerian fitting of the observation data:

Solving 2-body problem, we have

$$V_r(t) = - \sum_{i=1}^N \mathcal{K}_i \left[\cos(f_i + \omega_i) + e_i \cos \omega_i \right] + V_{0r}$$

where

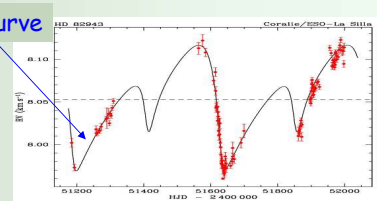
$$\mathcal{K}_i = \frac{m_i \sin I_i}{\mathcal{M}} \frac{2\pi a_i}{T_i \sqrt{1 - e_i^2}},$$

and

$$\frac{m_i \sin I_i}{\mathcal{M}}$$

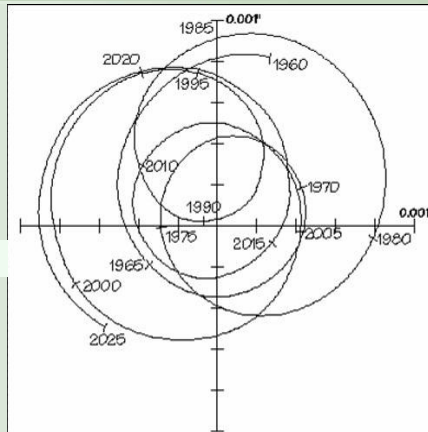
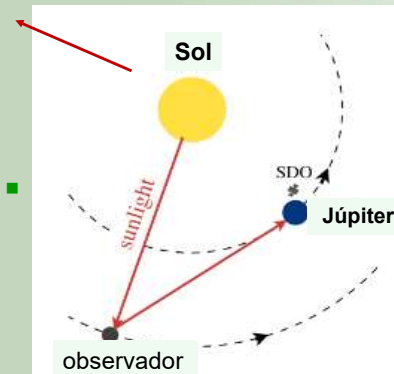
Note: Derived mass of the planet is always less than true mass [by $1/\sin(i)$]!

Velocity vs. Time (observation data)



Radial velocity data points of the **HD82943** star, together with an orbital fit with two planets.

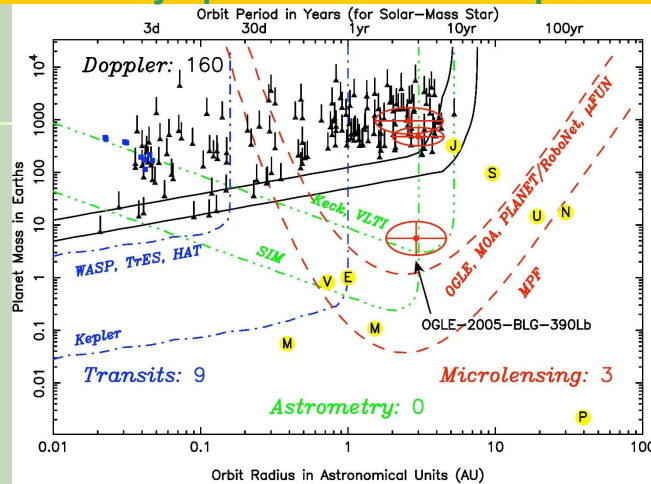
Movimento do Sol visto da distância de 10pc (32anos-luz)



■ **Escala é arcosegundos**

http://planetquest.jpl.nasa.gov/Navigator/material/sim_material.cfm

Discovery space for extra-solar planets

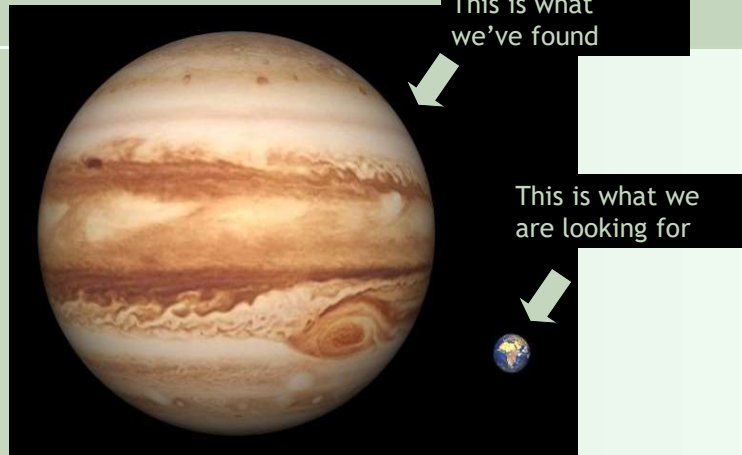


Discovered exoplanets and detection limits for various techniques as function of mass and orbital radius or Period **P**:

radial velocity (Doppler wobble), **astrometry**, **eclipsing transits** and **microlensing**.

The planets of our Solar system are indicated by letters (M-V-E-M-J-S-U-N-P).

The planets discovered so far are closer in mass to Jupiter.

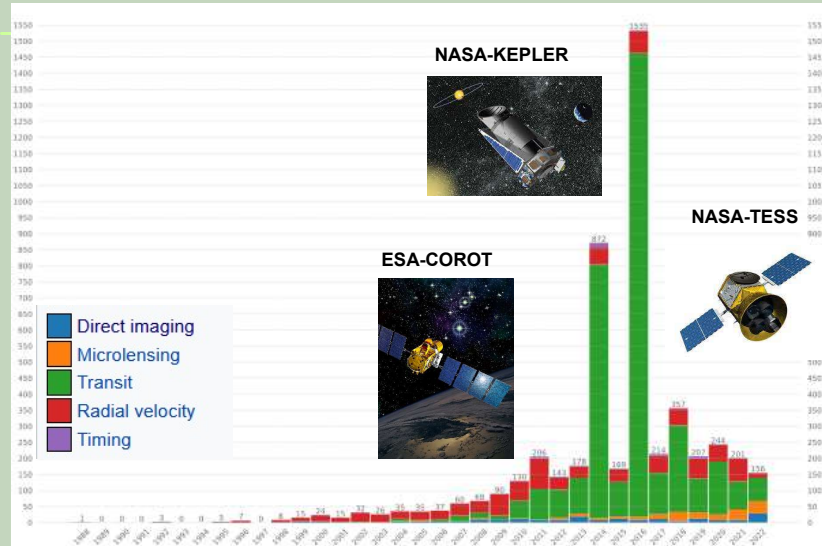


Jupiter's diameter is eleven times greater than the Earth's, and it has over 300 times the mass.

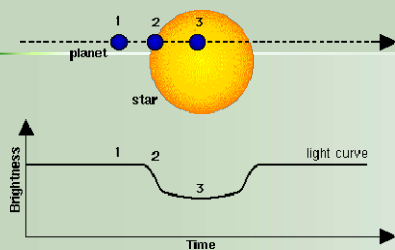
Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total: <i>10 de maio de 2024</i>	5668 planets
<u>Velocidade radial</u>	1107 planetas
<u>Transito</u>	3902 planetas
<u>Microlensing</u>	278 planetas
<u>Imagem direta</u>	249 planetas
<u>Timing</u>	53 planetas
<u>Astrometria</u>	24 planetas

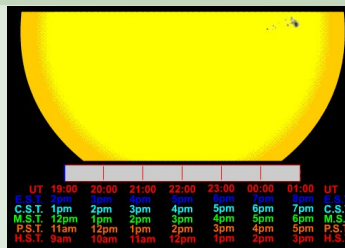
Descoberta de planetas extra-solares de 1995 até o presente



Planetary Transit measures dimming of star light as planet passes in front of star

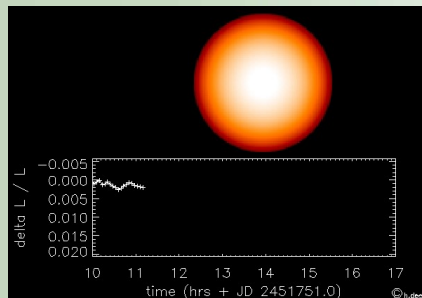


Transit of Mercury



Star-light may dim by only 0.000001 (10^{-6})

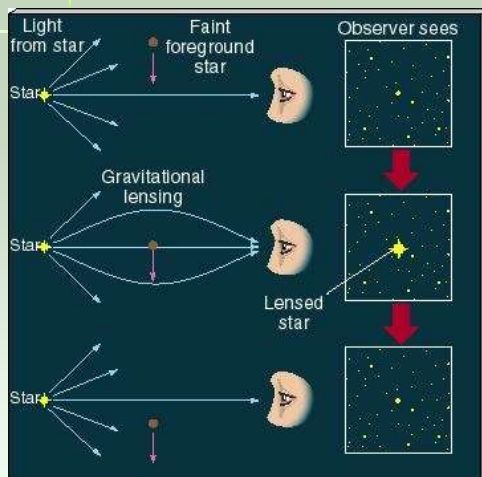
28 planets have been detected by the transit technique



Métodos de detecção dos planetas extra-solares

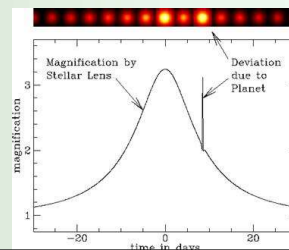
Número total: <i>10 de maio de 2024</i>	5668 planets
Velocidade radial	1107 planetas
Transito	3902 planetas
Microlensing	278 planetas
Imagem direta	249 planetas
Timing	53 planetas
Astrometria	24 planetas

Microlentes gravitacionais



Baseia-se num efeito notável predito pela Teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein.

Quando há a observação de uma estrela precisamente posicionada atrás de outra, a estrela mais próxima causa um efeito de "lente" na luz emitida pela estrela mais distante, fazendo com que a mais próxima aparente brilhar até 1000 vezes mais do que o normal.



Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total: <i>10 de maio de 2024</i>	5668 planets
<u>Velocidade radial</u>	1107 planetas
<u>Transito</u>	3902 planetas
<u>Microlensing</u>	278 planetas
<u>Imagem direta</u>	249 planetas
<u>Timing</u>	53 planetas
<u>Astrometria</u>	24 planetas

Pulsar timing

Tempo de pulsar

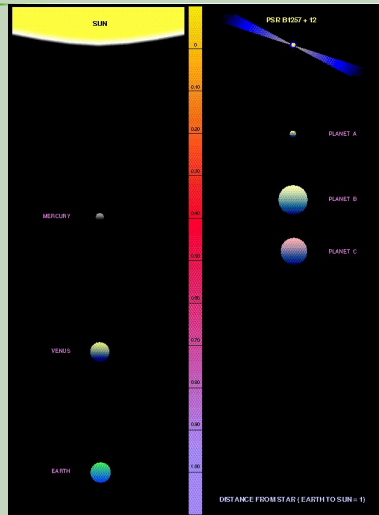
Ver também: [Lista de exoplanetas detectados por tempo](#)

Um pulsar é uma [estrela de nêutrons](#): o pequeno e ultradenso remanescente de uma [estrela](#) que explodiu como uma [supernova](#). [Os pulsares emitem ondas de rádio com extrema regularidade à medida que giram](#). Como a rotação intrínseca de um pulsar é tão regular, pequenas anomalias no tempo de seus pulsos de rádio observados podem ser usadas para rastrear o movimento do pulsar. Como uma estrela comum, um pulsar se moverá em sua própria [órbita](#) pequena se tiver um [planeta](#). Cálculos baseados em observações de tempo de pulso podem então revelar os parâmetros dessa órbita.^[35]



Impressão artística do sistema planetário do pulsar PSR B1257+12

First Extra-solar Planet Detection 3 (or 4) planets surrounding pulsar PSR1257+12 (Wolszczan, A. & Frail, D., 1992, Nature)



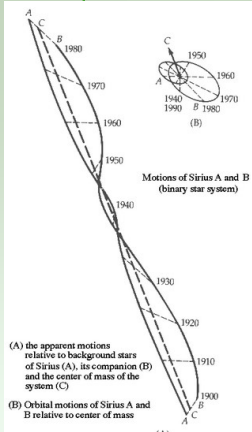
Pulsar 1257+12
Period 6.2 msec
Mass 0.29 Msun
Distance 800 pc.

N.B. Planets probably could not have survived SN explosion, were likely formed from SN debris!

Métodos de detecção dos planetas extra-solares

Número total: <i>10 de maio de 2024</i>	5668 planets
<u>Velocidade radial</u>	1107 planetas
<u>Transito</u>	3902 planetas
<u>Microlensing</u>	278 planetas
<u>Imagem direta</u>	249 planetas
<u>Timing</u>	53 planetas
<u>Astrometria</u>	24 planetas

Descoberta do companheiro de Sirius (exemplo clássico de astrometria)

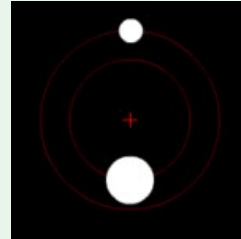


- em 1718, Halley descobre que Sirius tem **movimento próprio**;

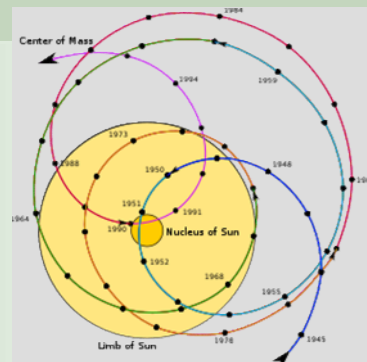
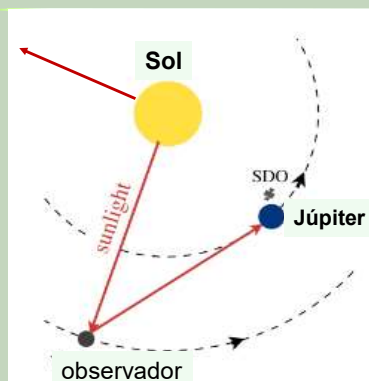
- em 1844, Bessel constata que movimento aparente de Sirius não é linear e prevê o companheiro **invisível** que é descoberto em 1862;

- a massa de 'pequeno' Sirius B pode ser calculada considerando o movimento **retilíneo e uniforme** do centro de massa da binária;

- essa massa é similar a massa do Sol; assim foi descoberto um novo tipo de estrelas, '**anãs brancas**'

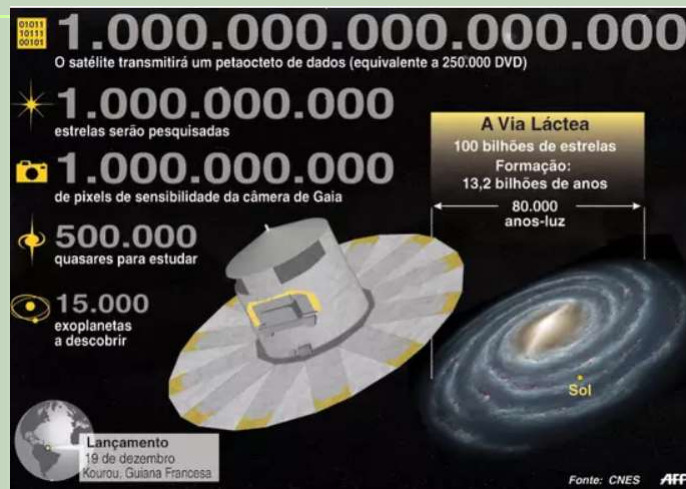


Movimento do Baricentro do Sistema Solar

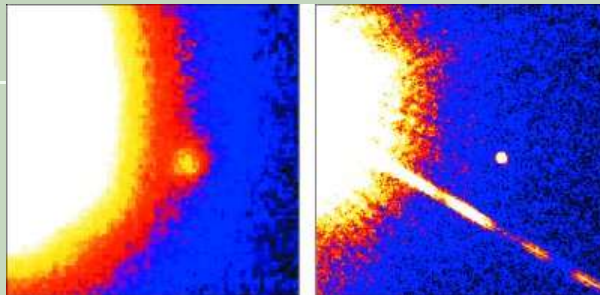


Método astrométrico

Gaia ESA – Observatório espacial



Imagens diretas dos outros mundos



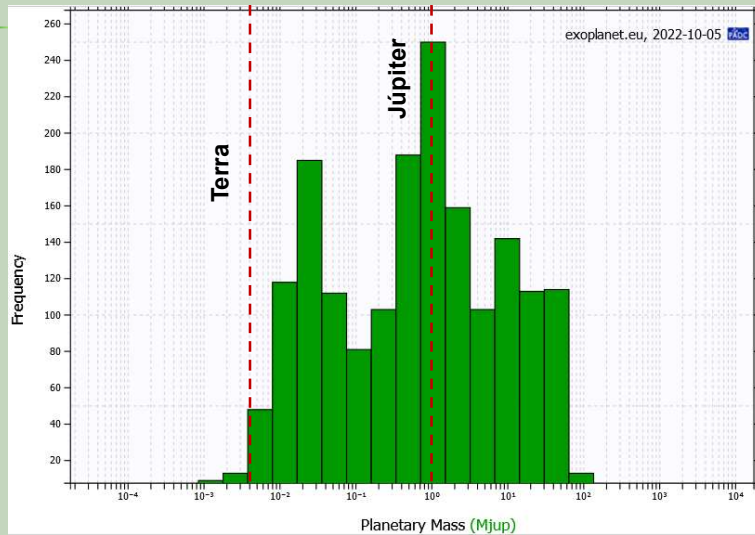
X

Concepção artística dos outros mundos



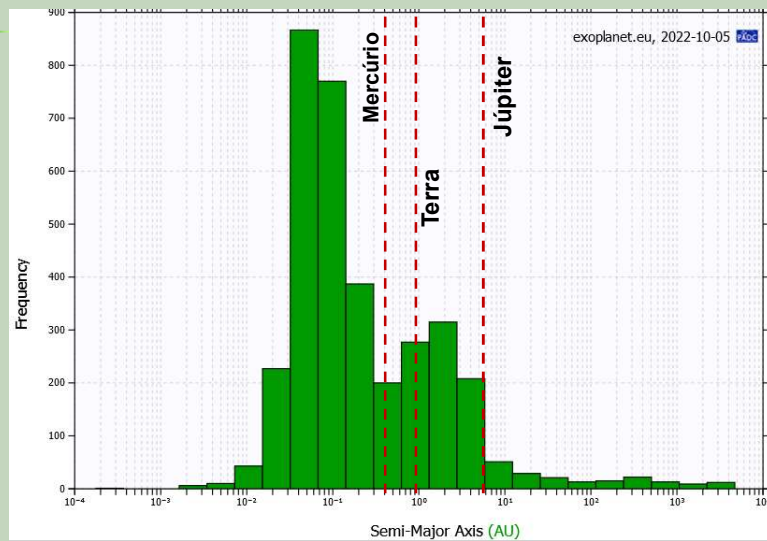
Variedade de parâmetros físicos e orbitais

- Massas planetárias



Variedade de parâmetros físicos e orbitais

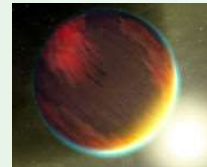
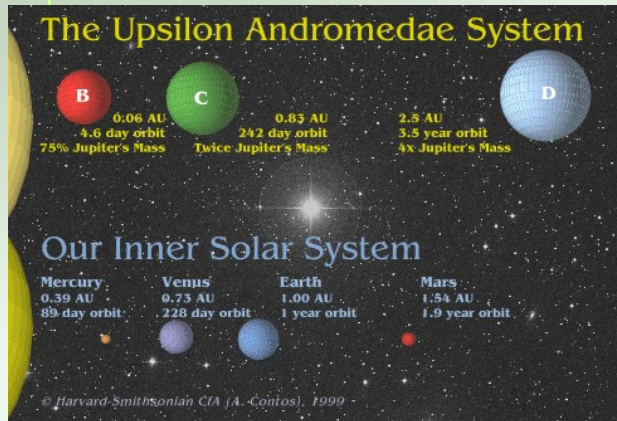
- distâncias até estrela central



Variedade de parâmetros físicos e orbitais

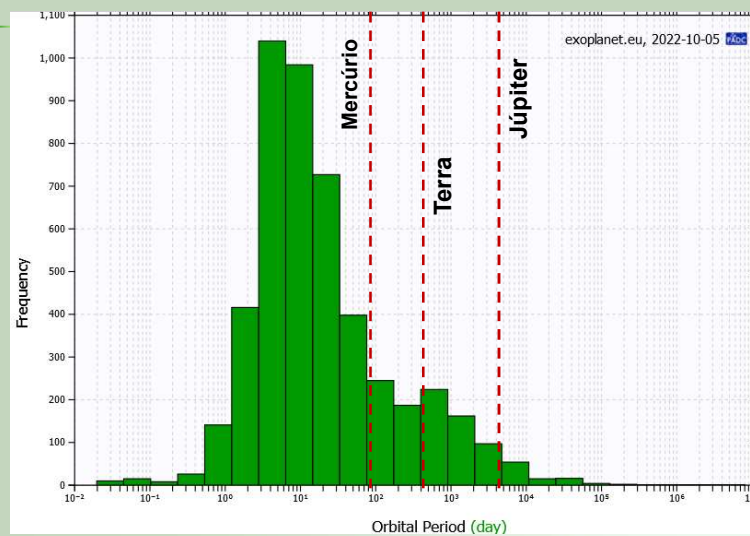
- grandes massas
- muito pequenas distâncias até estrela central

Júpiteres quentes (visão artística)



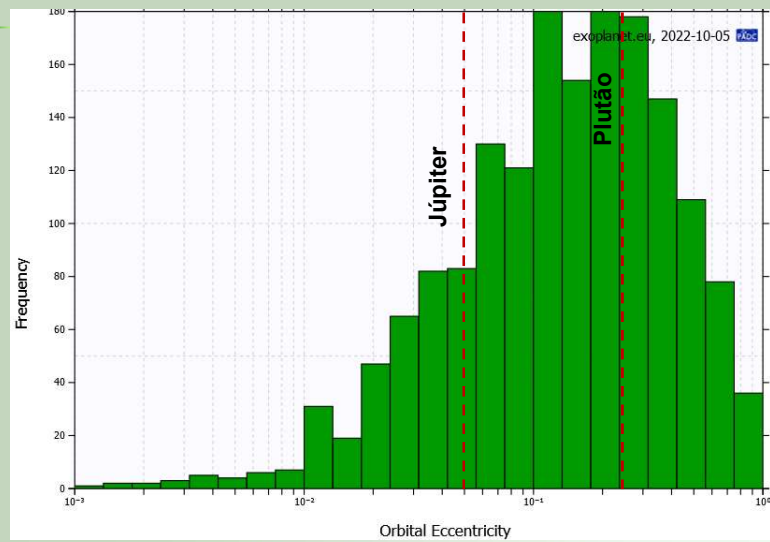
Variedade de parâmetros físicos e orbitais

- período orbital



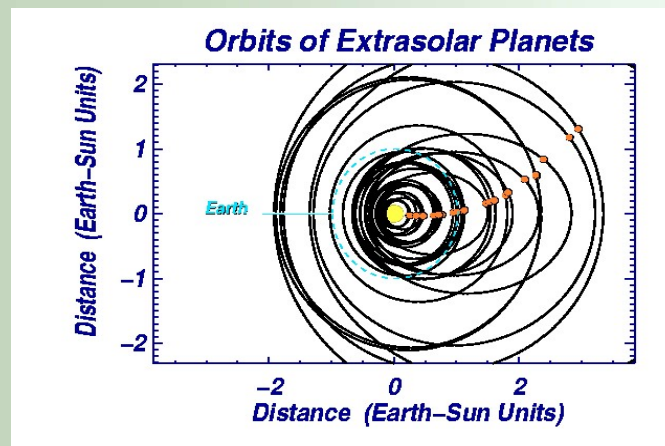
Variedade de parâmetros físicos e orbitais

- **excentricidades das órbitas planetárias**

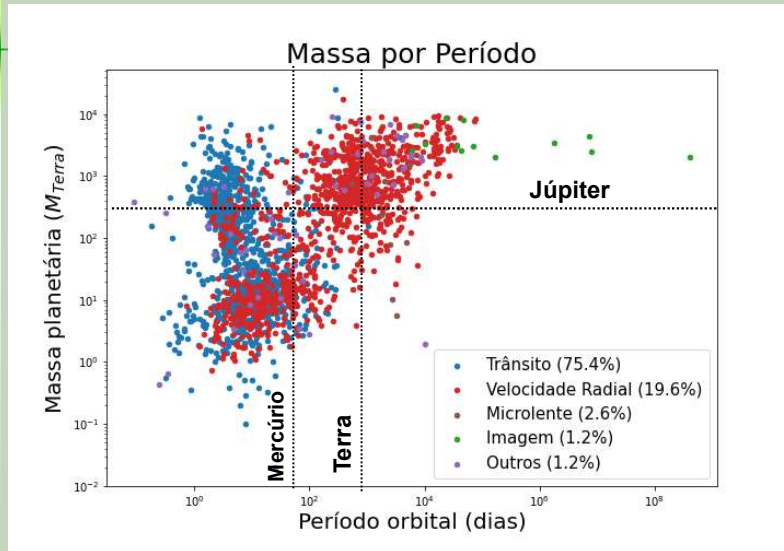


Variety of physical and orbital patterns:

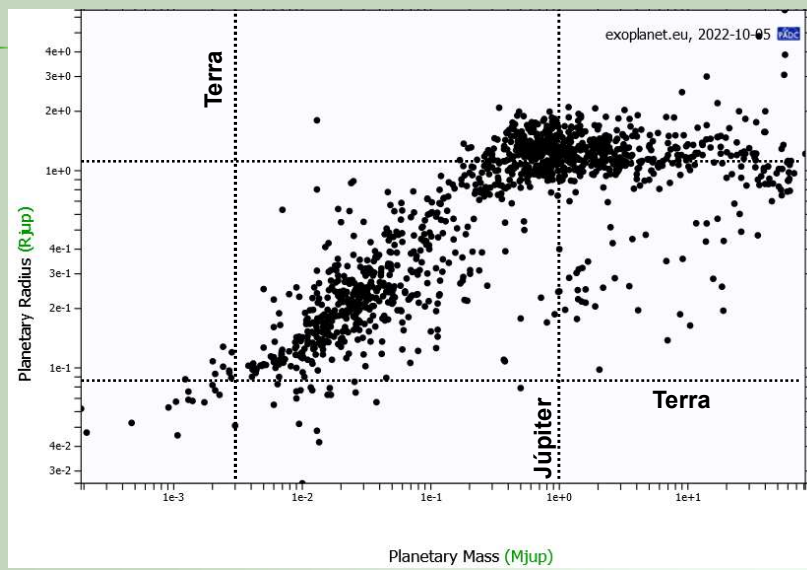
- large masses
- very small distances to the central star
- **high eccentricities**



Período orbital vs. Massa

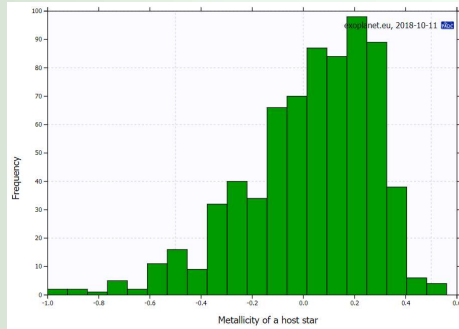


Exoplanet Radius vs. Massa



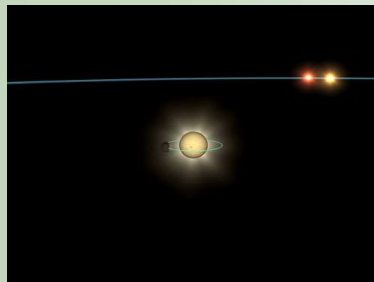
Exoplanetas vs. Metalicidade Estelar

- This plot, for the planets discovered with the radial velocity method, shows that planets are strongly favored for stars with greater "metallicity" than the Sun, which implies that the cloud they were formed from was more enriched in heavier elements.
- That makes sense, because then there is more stuff to make planets from!
- If we include also planets detected by Kepler, it messes up the distribution, because Kepler was looking only in the plane of the galaxy, where most stars are like the Sun (metallicity of 0.0)



Planets in Multiple-Star Systems

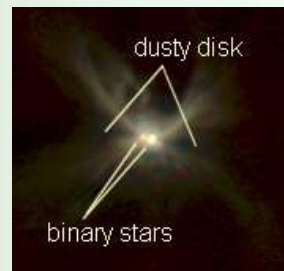
Triple-star system HD188753 (in the Cygnus constellation) has a "gas giant" planet orbiting the main star every 3.3 days, while the two other stars orbit the main star every 25.7 years



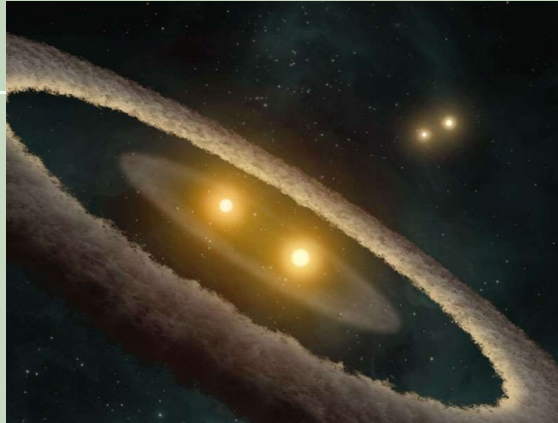
Artist's view of the HD188753 system



- ❖ About 20% of all known extra-solar planets are believed to be in binary- or multiple-star systems



Planets in Multiple-Star Systems



HD 98800 é um sistema de quatro estrelas numa distância de 150 anos-luz da Terra. As estrelas formam dois pares de binárias, com distância mútua de 50 UA (comparável com órbita do Plutão). Um dos pares é cercado pelo disco de poeira. Os dados recentes do [Spitzer Space Telescope](#) em infravermelho indicam a existência de uma falha no disco, compatível com a existência de um planeta numa distância de órbita de Marte. Figura acima é uma concepção artística de como o sistema HD 98800 poderia ser vista de uma distância próxima.



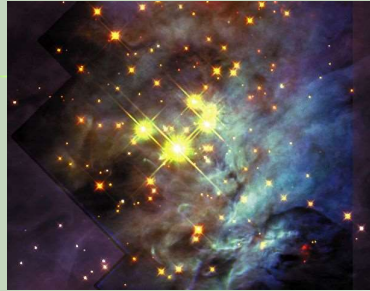
Extreme Planets

This artist's concept depicts the pulsar planet system discovered by Aleksander Wolszczan in 1992. Wolszczan used the Arecibo radio telescope in Puerto Rico to find three planets - the first of any kind ever found outside our solar system - circling a pulsar called PSR B1509-58. Pulsars are rapidly rotating neutron stars, which are the collapsed cores of exploded massive stars. They spin and pulse with radiation, much like a lighthouse beacon. Here, the pulsar's twisted magnetic fields are highlighted by the blue glow.

All three pulsar planets are shown in this picture; the farthest two from the pulsar (closest in this view) are about the size of Earth. Radiation from charged pulsar particles would probably rain down on the planets, causing their night skies to light up with auroras similar to our Northern Lights. One such aurora is illustrated on the planet at the bottom of the picture.

Since this landmark discovery, more than 160 extrasolar planets have been observed around stars that are burning nuclear fuel. The planets spotted by Wolszczan are still the only ones around a dead star. They also might be part of a second generation of planets, the first having been destroyed when their star blew up. The Spitzer Space Telescope's discovery of a dusty disk around a pulsar might represent the beginnings of a similarly "reborn" planetary system.

Mystery of free-floating 'planets'



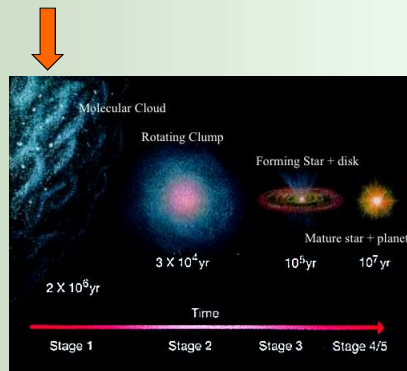
A possible planet free-floating in Orion (Image: Science)

The young Trapezium star cluster in the Orion Nebula, where have been identified over 100 extremely low mass objects. These drifting, "free-floating planets" are perhaps as little as 8 times as massive as Jupiter and likely formed along with the cluster stars a million or so years ago. They are detectable in the infrared because they are still hot from formation, but will eventually cool and fade. If the Trapezium is typical of young star cluster, then the survey results suggest that brown dwarfs and free-floating planets may be fairly common.

Teorias de formação/migração dos planetas



← nuvem molecular – concentração fria e densa de gás e poeira no espaço interestelar



Teorias de formação/migração dos planetas

glóbulos em rotação – concentração mais quente e densa

The diagram illustrates the stages of star and planet formation over time:

- Stage 1:** Molecular Cloud (Time: 2×10^6 yr)
- Stage 2:** Rotating Clump (Time: 3×10^4 yr)
- Stage 3:** Forming Star + disk (Time: 10^5 yr)
- Stage 4/5:** Mature star + planets (Time: 10^7 yr)

On the left side, a vertical sequence of images shows the progression from a Galaxy to a Molecular Cloud Complex, a Star-Forming "Globule", a Circumstellar Disk, and finally an Extrasolar System.

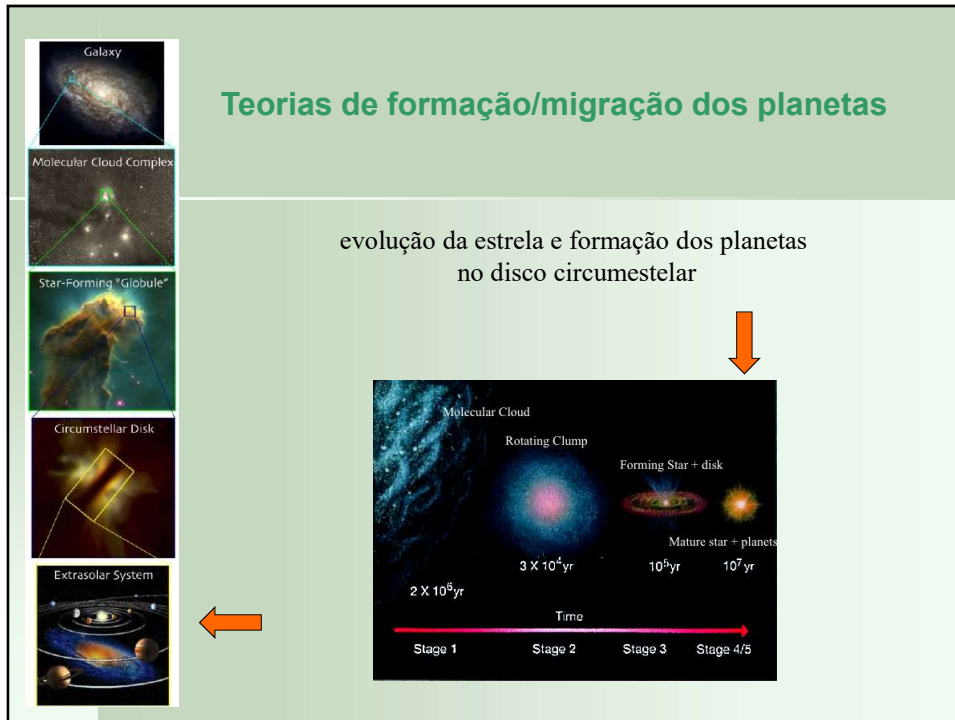
Teorias de formação/migração dos planetas

colapso gravitacional do glóbulo, formação da estrela e disco circumestelar

The diagram illustrates the stages of star and planet formation over time:

- Stage 1:** Molecular Cloud (Time: 2×10^6 yr)
- Stage 2:** Rotating Clump (Time: 3×10^4 yr)
- Stage 3:** Forming Star + disk (Time: 10^5 yr)
- Stage 4/5:** Mature star + planets (Time: 10^7 yr)

On the left side, a vertical sequence of images shows the progression from a Galaxy to a Molecular Cloud Complex, a Star-Forming "Globule", a Circumstellar Disk, and finally an Extrasolar System.



TWO PLANET FORMATION SCENARIOS

Accretion model

Central star
Dust disk

Orbiting dust grains accrete into "planetesimals" through nongravitational forces.

Planetesimals grow, moving in near-coplanar orbits, to form "planetary embryos."

Gas-giant planets accrete gas envelopes before disk gas disappears.

Gas-giant planets scatter or accrete remaining planetesimals and embryos.

Gas-collapse model

A protoplanetary disk of gas and dust forms around a young star.

Planet-formation nexus
Gravitational disk instabilities form a clump of gas that becomes a self-gravitating planet.

Gas giant
Dust grains coagulate and sediment to the center of the protoplanet, forming a core.

The planet sweeps out a wide gap as it continues to feed on gas in the disk.

Formação planetária

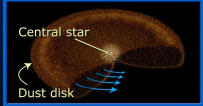

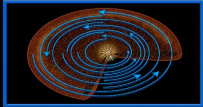
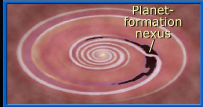




Dois modelos em desenvolvimento:

- acreção (agregação)
- colapso gasoso

Modelo de acreção:

- Agregação (por colisão e acumulação) de poeira do disco estelar em "planetesimos" (tamanho ~10km)
- Crescimento 'gravitacional' de planetesimos até formar os planetas terrestres e núcleos ("protoplanetas") dos planetas gigantes
- Formação dos planetas gigantes: massa crítica de protoplanetas ~ 5-15 M_{Terra} , captura do envelope gasoso
- Dissipação do disco de gás e planetesimos

TWO PLANET FORMATION SCENARIOS

Accretion model	Gas-collapse model
 <p>Central star Dust disk</p> <p>Orbiting dust grains accrete into "planetesimals" through nongravitational forces.</p>	 <p>A protoplanetary disk of gas and dust forms around a young star.</p>
 <p>Planetesimals grow, moving in near-coplanar orbits, to form "planetary embryos."</p>	 <p>Planet-formation nexus</p> <p>Gravitational disk instabilities form a clump of gas that becomes a self-gravitating planet.</p>
 <p>Gas-giant planets accrete gas envelopes before disk gas disappears.</p>	 <p>Gas giant</p> <p>Dust grains coagulate and sediment to the center of the protoplanet, forming a core.</p>
 <p>Gas-giant planets scatter or accrete remaining planetesimals and embryos.</p>	 <p>The planet sweeps out a wide gap as it continues to feed on gas in the disk.</p>

Formação planetária

Dois modelos em desenvolvimento:


- acreção (agregação)
- colapso gasoso

Modelo de colapso gasoso:

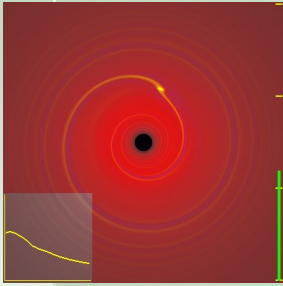
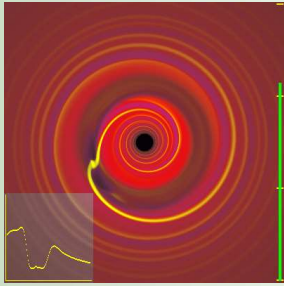
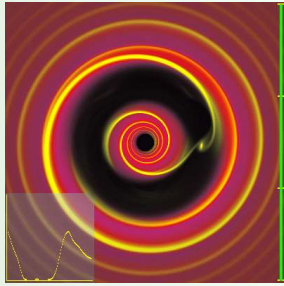
- Formação de nexus (nodos) no disco de poeira e gás, devido às instabilidades gravitacionais
- Incorporação (sedimento) de poeira nos nodos, formando núcleos dos planetas gigantes
- Formação dos planetas gigantes: massa crítica de protoplanetas ~ 5-15 M_{Terra} , captura do envelope gasoso
- Dissipação do disco de gás e poeira

Migração planetária

O que causa?

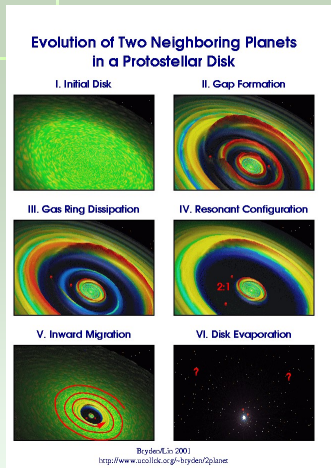


- Interação do planeta em formação com disco protoplanetário de gás e poeira
- Interação do planeta recém-formado com o disco de planetesimais
- Interação entre os planetas em formação
- Mare com estrela central

 <p>Protoplaneta de massa baixa migração tipo I</p>	 <p>Crescendo, o protoplaneta gera "gap"</p>	 <p>Migração tipo II: "gap" aumenta, mas o planeta continua crescendo</p>
--	---	---



Interação de dois planetas em formação com disco protoplanetário



estrela e disco planetário

dois planetas em formação gerando "gaps"

disco intermediário é vaporizado, o planeta externo migra para dentro

o planeta interno é capturado na ressonância orbital 2/1



Estudos sobre a habitabilidade de planetas; busca pela vida.

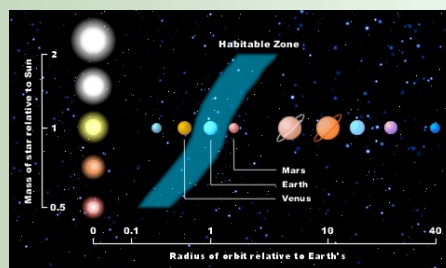


Zonas habitáveis:

The regions of a planetary system where the temperature is in the range between 273K (0°C) and 373K (100°C) is called **the habitable zone**.

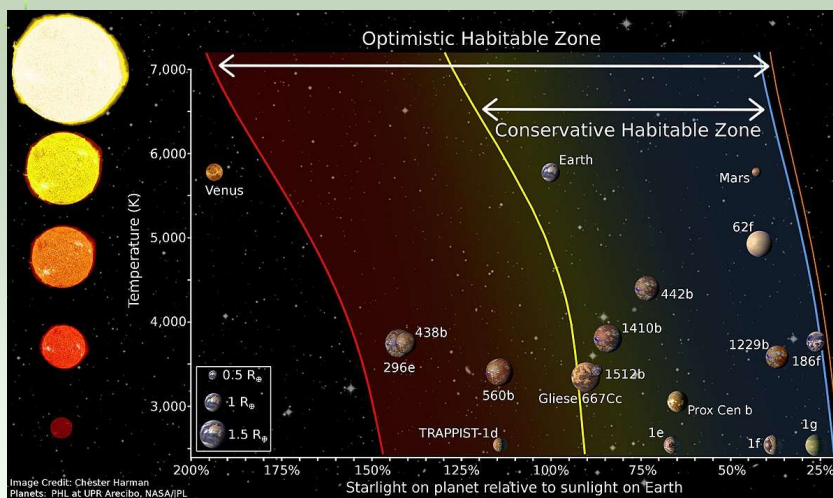
Calculation of the edges of CHZ:

planetary luminosity ($\sim T^4$) = solar irradiance (L/D^2),
where T is the planet temperature, L is the solar luminosity and D is the distance to the star.



Solar System

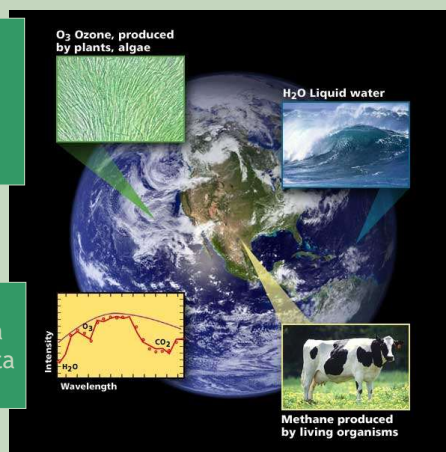
Planetas em zonas habitáveis



Como saberemos que um planeta suporta a vida?

Procurando por evidência de oxigênio

Analisando a luz refletida do planeta para ver se o planeta tem atmosfera



Procurando por água na forma líquida

Procurando sinais de atividade biológica (methane)

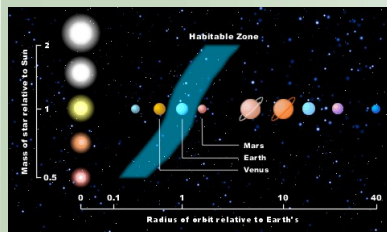


17

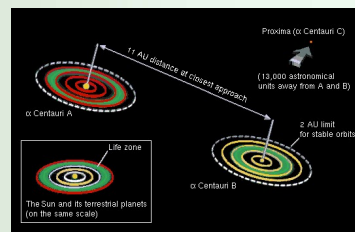
Estudos sobre a habitabilidade de planetas; busca pela vida.

Effects to take into account:

- stellar properties (mass, age, metallicity and Galactic orbit);
- long-term dynamical stability;
- albedo of the planet;
- greenhouse effect;
- tidal lock radius;
- etc.



Alpha Centauri 3



4. Planetary habitability studies, search for life.

Effects to take into account:

- stellar properties (mass, age, metallicity and Galactic orbit)
- albedo of the planet
- greenhouse effect
- tidal lock radius
- long-term dynamical stability
- etc

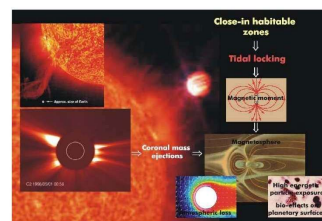
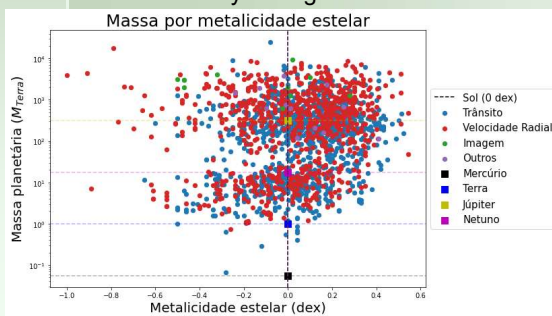


Fig. 6.3 Illustration of the expected impact of stellar winds and CME plasma on terrestrial exoplanets in orbits within close-in habitable zones of low mass M and K-type stars courtesy of N.K. Belisheva and N. Terada, SOHO/LASCO, ESA/NASA).

Star Metallicity Histogram



Carbon cycle diagram

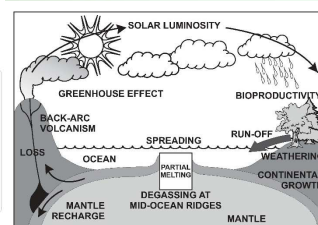


Fig. 11.1 The global carbon cycle as part of the general volatile exchange between mantle and surface reservoirs.

4. Planetary habitability studies, search for life.

Effects to take into account:

- stellar properties (mass, age, metallicity and Galactic orbit)
- albedo of the planet
- greenhouse effect
- tidal lock radius
- long-term dynamical stability

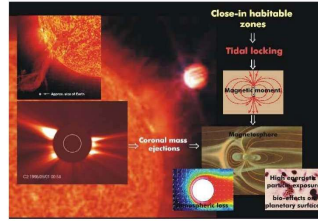
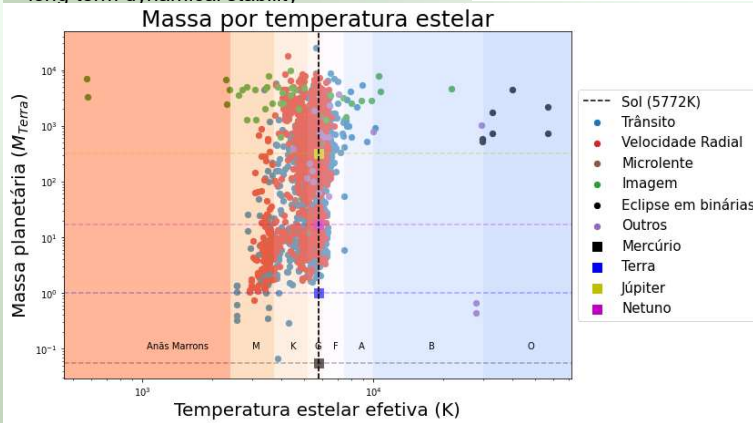
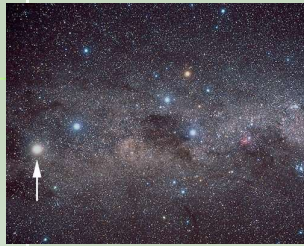


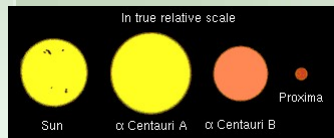
Fig. 6.3 Illustration of the expected impact of stellar winds and CME plasma on terrestrial exoplanets in orbits within close-in habitable zones of low mass M and K-type stars courtesy of N.K. Belisheva and N. Terada, SOHO/LASCO, ESA/NASA).



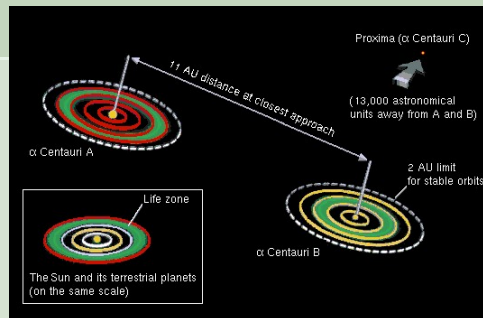
Alpha Centauri 3



Alpha Centauri is the brightest star in Constellation Centaurus.



Tamanhos das estrelas da Alpha Centauri



Zonas Habitáveis

Paradóxo de Fermi:

De onde viemos e para onde vamos?

Paradoxo de Fermi é a aparente contradição entre as altas estimativas de [probabilidade](#) de existência de civilizações [extraterrestres](#) e a falta de evidências para, ou contato com, tais civilizações.

Base

O paradoxo de Fermi é um conflito entre um argumento de escala e probabilidade e a falta de evidências. Uma definição mais completa poderia ser apresentada como:

O aparente tamanho e idade do universo sugerem que muitas civilizações extraterrestres tecnologicamente avançadas deveriam existir.

Entretanto, esta hipótese parece inconsistente com a falta de evidência observacional para suportá-la.

O primeiro aspecto do paradoxo, "o argumento de escala", é uma função dos números envolvidos: há aproximadamente 200-400 bilhões ($2 - 4 \times 10^{11}$) de estrelas na Via Láctea^[11] e 70 sextilhões (7×10^{22}) no universo visível.^[12] Mesmo que a vida inteligente ocorra em uma minúscula porcentagem de planetas, ainda haveria um grande número de civilizações existentes na Via Láctea. Este argumento também assume o [princípio da mediocridade](#), que afirma que a Terra não é especial, mas simplesmente um planeta típico, submetido às mesmas leis, efeitos e resultados prováveis que qualquer outro planeta.

