



# FUNDAMENTOS DE ASTROBIOLOGIA

## AST - 416 - 3

### Aula 6

### Sistema Solar e exoplanetas

C.A.Wuensche

INPE - Divisão de Astrofísica

<http://www.das.inpe.br/~alex>





# Sistema Solar e exoplanetas

Leitura:

- ☑ Caps. 5 e 6 do livro “Astrobiologia: uma ciência emergente” (Galante, Avellar, Horvath, Rodrigues)
- ☑ Cap. 9 do livro “Astrobiology: a multidisciplinary approach” (Lunine)



# Procurando vida...

- ☑ Não inteligente...
  - ✓ Busca de bio-traçadores no Sistema Solar.
  - ✓ Busca de planetas extra-solares.
  - ✓ Busca de bio-traçadores em planetas extra-solares.
  
- ☑ Inteligente...
  - ✓ Busca de sinais “não-naturais” vindos de outro local do Universo (SETI).



# Duas estratégias clássicas

- ☑ **Siga a água!**
  
- ☑ **Busque fontes abundantes e disponíveis de energia!**
  - ✓ Condição fundamental para habitabilidade
  - ✓ Disponibilidade de energia torna possível a reprodução de estados “químicos” de baixíssima probabilidade (=vida!?!?!)
  - ✓ Identificação de biotraçadores pode ser muito mais eficiente (vida é moldada e, ao mesmo tempo, molda o meio ambiente).

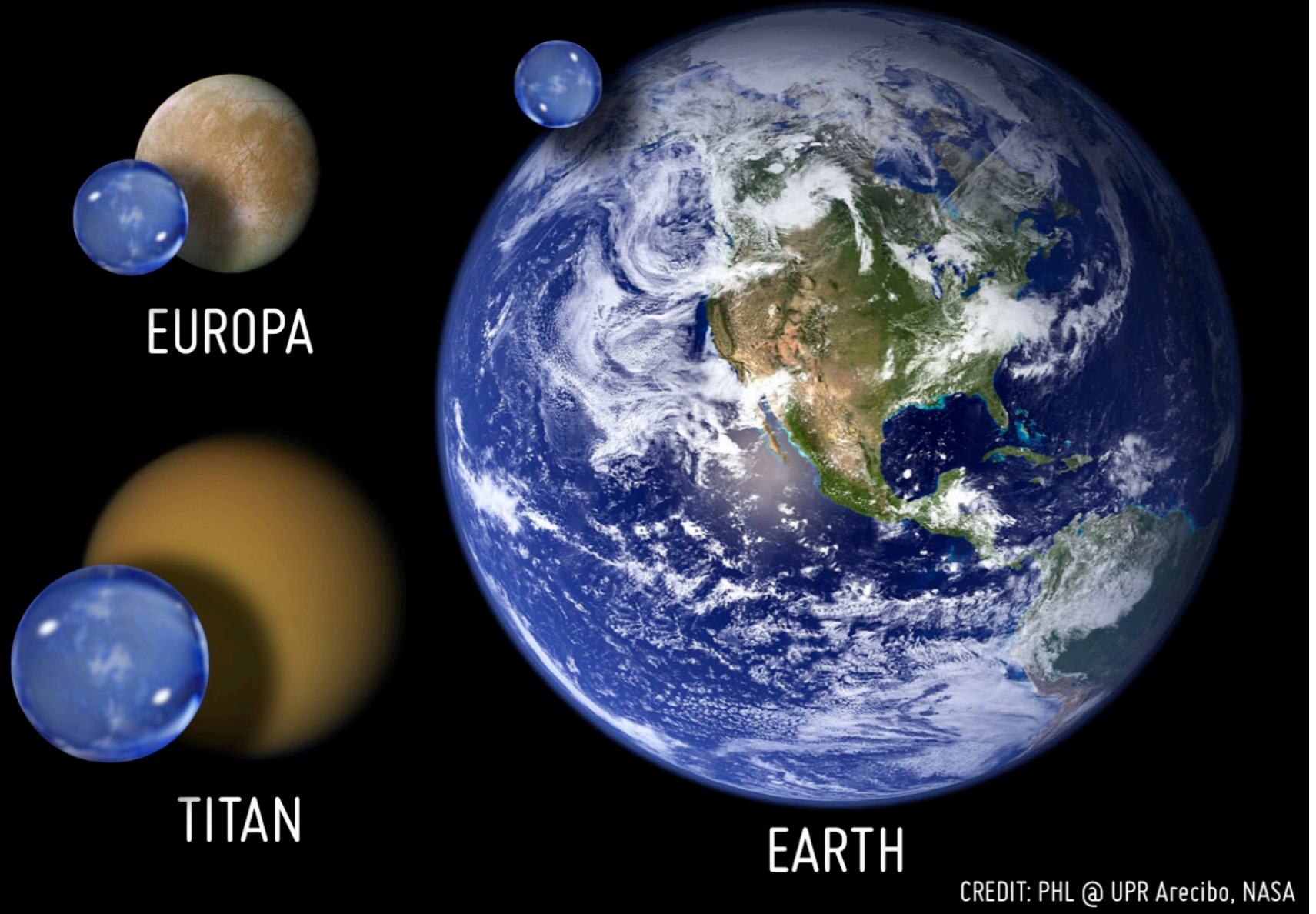


# Nosso Sistema Solar..

- Vários locais no nosso Sistema Solar podem ter sido, ou ainda ser, favoráveis à vida.
  - Marte?
  - Europa?
  - Titã?
  - Encelado?



# Liquid Water in the Solar System



CREDIT: PHL @ UPR Arcibo, NASA

# Marte

- 
- A large, detailed image of the Mars surface, showing various craters, valleys, and polar ice caps, serving as a background for the text.
- ☑ **NASA(principais)**
    - ✓ **Mars Rovers: Spirit e Opportunity 2003, Curiosity (2012)**
    - ✓ **Mars Observer/Global Surveyor/Pathfinder: 92, 96 e 97**
    - ✓ **Viking, Mariner - anos 60 e 70**
  - ☑ **URSS (principais)**
    - ✓ **Zond, Sputnik, Mars, Cosmos, Phobos - anos 60 a 80**
  - ☑ **ESA**
    - ✓ **Mars Express, Beagle, Rosetta - anos 2000**
    - ✓ **Insight (2018)**

# A exploração recente de Marte



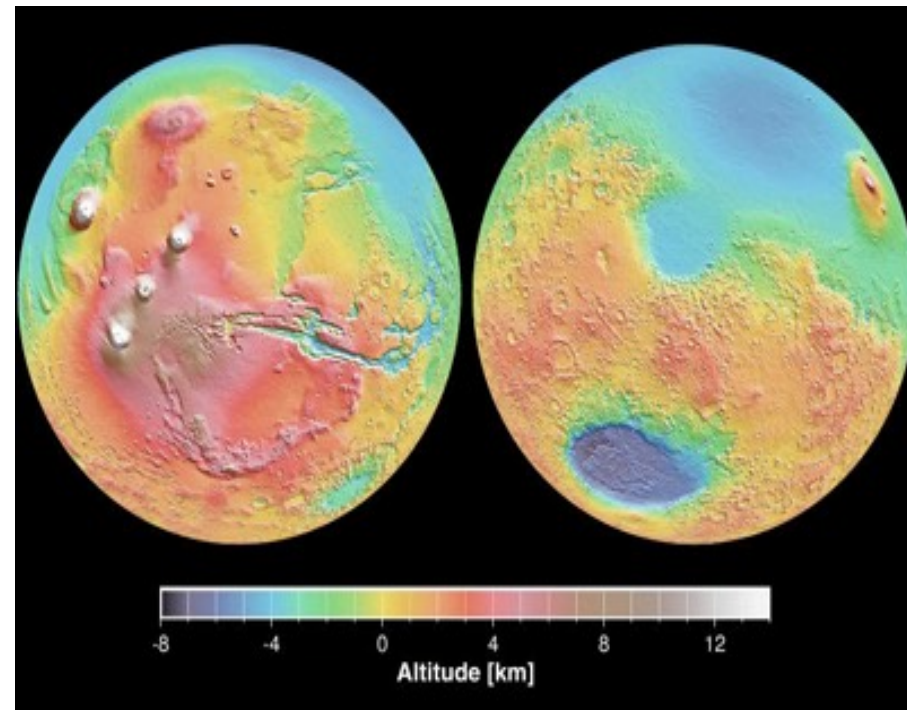
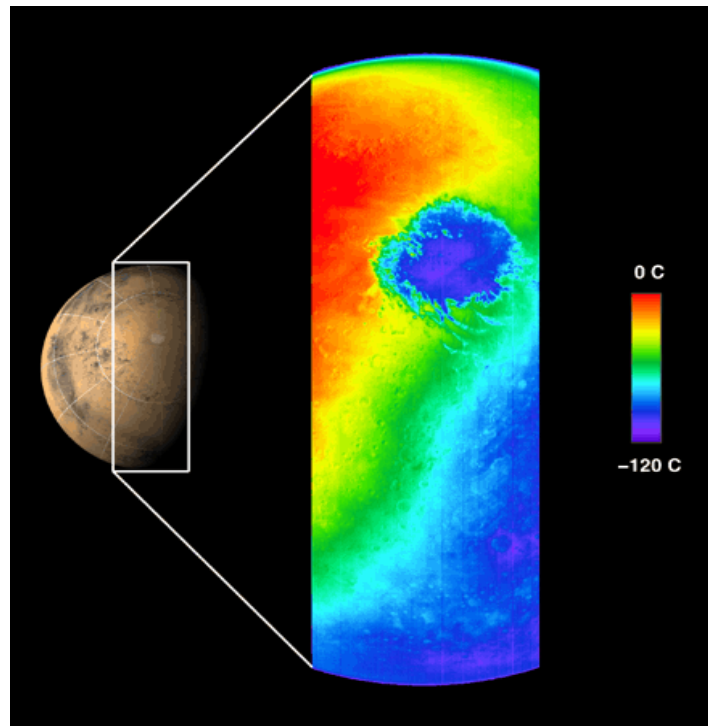
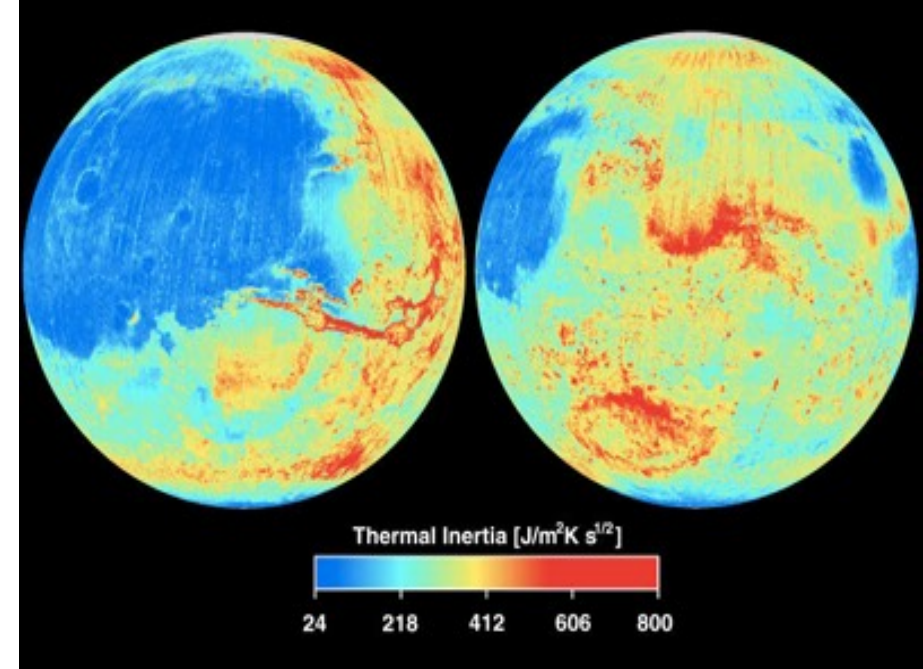
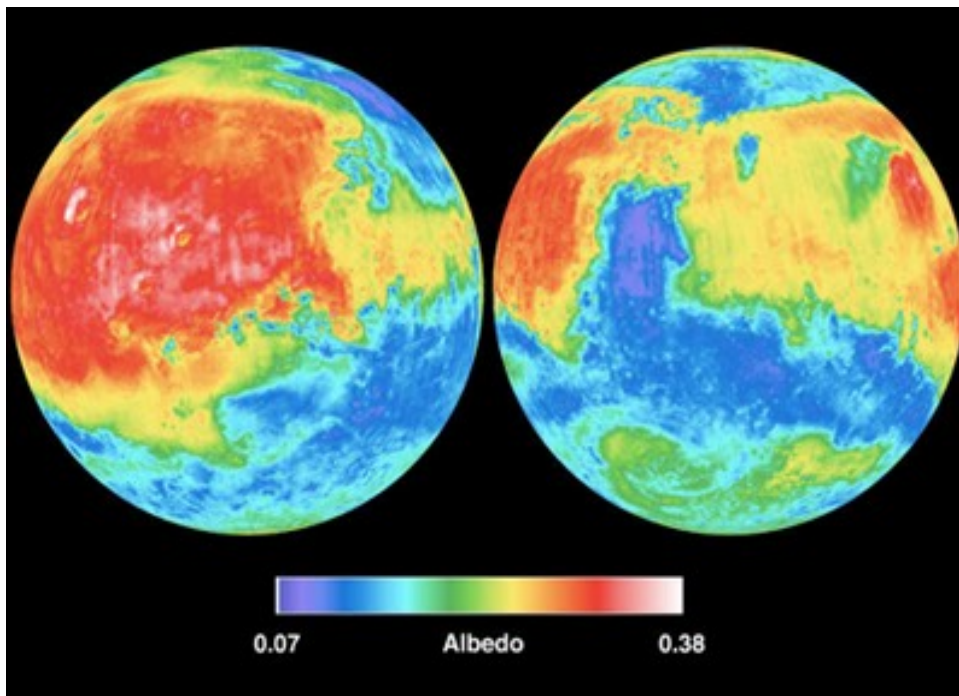
## ☑ NASA

- ✓ Mars Rovers: Spirit e Opportunity
- ✓ Mars Global Surveyor/Mars Pathfinder (Sojourner)

## ☑ ESA

- ✓ Mars Express: Beagle 2







# Água em Marte?

doi:10.1038/nature07097

nature

LETTERS

---

## Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument

John F. Mustard<sup>1</sup>, S. L. Murchie<sup>2</sup>, S. M. Pelkey<sup>1</sup>, B. L. Ehlmann<sup>1</sup>, R. E. Milliken<sup>3</sup>, J. A. Grant<sup>4</sup>, J.-P. Bibring<sup>5</sup>, F. Poulet<sup>5</sup>, J. Bishop<sup>6</sup>, E. Noe Dobrea<sup>3</sup>, L. Roach<sup>1</sup>, F. Seelos<sup>2</sup>, R. E. Arvidson<sup>7</sup>, S. Wiseman<sup>7</sup>, R. Green<sup>3</sup>, C. Hash<sup>8</sup>, D. Humm<sup>2</sup>, E. Malaret<sup>8</sup>, J. A. McGovern<sup>2</sup>, K. Seelos<sup>2</sup>, T. Clancy<sup>9</sup>, R. Clark<sup>10</sup>, D. Des Marais<sup>6</sup>, N. Izenberg<sup>2</sup>, A. Knudson<sup>7</sup>, Y. Langevin<sup>5</sup>, T. Martin<sup>3</sup>, P. McGuire<sup>7</sup>, R. Morris<sup>11</sup>, M. Robinson<sup>12</sup>, T. Roush<sup>6</sup>, M. Smith<sup>13</sup>, G. Swayze<sup>9</sup>, H. Taylor<sup>2</sup>, T. Titus<sup>14</sup> & M. Wolff<sup>9</sup>



# Água em Marte?

doi:10.1038/nature07097

nature

LETTERS

## Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument

John F. Mustard<sup>1</sup>, S. L. Murchie<sup>2</sup>, S. M. Pelkey<sup>1</sup>, B. L. Ehlmann<sup>1</sup>, R. E. Milliken<sup>3</sup>, J. A. Grant<sup>4</sup>, J.-P. Bibring<sup>5</sup>, F. Poulet<sup>5</sup>, J. Bishop<sup>6</sup>, E. Noe Dobrea<sup>3</sup>, L. Roach<sup>1</sup>, F. Seelos<sup>2</sup>, R. E. Arvidson<sup>7</sup>, S. Wiseman<sup>7</sup>, R. Green<sup>3</sup>, C. Hash<sup>8</sup>, D. Humm<sup>2</sup>, E. Malaret<sup>8</sup>, J. A. McGovern<sup>2</sup>, K. Seelos<sup>2</sup>, T. Clancy<sup>9</sup>, R. Clark<sup>10</sup>, D. Des Marais<sup>6</sup>, N. Izenberg<sup>2</sup>, A. Knudson<sup>7</sup>, Y. Langevin<sup>5</sup>, T. Martin<sup>3</sup>, P. McGuire<sup>7</sup>, R. Morris<sup>11</sup>, M. Robinson<sup>12</sup>, T. Roush<sup>6</sup>, M. Smith<sup>13</sup>, G. Swayze<sup>9</sup>, H. Taylor<sup>2</sup>, T. Titus<sup>14</sup> & M. Wolff<sup>9</sup>

Phyllosilicates, a class of hydrous mineral first definitively identified on Mars by the OMEGA (Observatoire pour la Mineralogie, L'Eau, les Glaces et l'Activité) instrument<sup>1,2</sup>, preserve a record of the interaction of water with rocks on Mars. Global mapping showed that phyllosilicates are widespread but are apparently restricted to ancient terrains and a relatively narrow range of mineralogy (Fe/Mg and Al smectite clays). This was interpreted to indicate that phyllosilicate formation occurred during the Noachian (the earliest geological era of Mars), and that the conditions necessary for phyllosilicate formation (moderate to high pH and high water activity<sup>3</sup>) were specific to surface environments during the earliest era of Mars's history<sup>4</sup>. Here we report results from the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM)<sup>5</sup> of phyllosilicate-rich regions. We expand the diversity of phyllosilicate mineralogy with the identification of kaolinite, chlorite and illite or muscovite, and a new class of hydrated silicate (hydrated silica). We observe diverse Fe/Mg-OH phyllosilicates and find that smectites such as nontronite and saponite are the most common, but chlorites are also present in some locations. Stratigraphic relationships in the Nili Fossae region show olivine-rich materials overlying phyllosilicate-bearing units, indicating the cessation of aqueous alteration before emplacement of the olivine-bearing unit. Hundreds of detections of Fe/Mg phyllosilicate in rims, ejecta and central peaks of craters in the southern highland Noachian cratered terrain indicate excavation of altered crust from depth. We also find phyllosilicate in sedimentary deposits clearly laid by water. These results point to a rich diversity of Noachian environments conducive to habitability.



# Água em Marte?

nature.com | Publications A-Z index | Browse by subject

ADVERTISEMENT Now open for submissions! nature human behaviour

ADVERTISEMENT My account Submit manuscript Register Subscribe

Full text access provided to Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais by library

nature International weekly journal of science

Search go Advanced search

Journal home > Archive > Letter > Full Text

**Journal content**

- Journal home
- Advance online publication
- Current issue
- Nature News
- Archive**
- Supplements
- Web focuses
- Podcasts
- Videos
- News Specials

**Journal information**

- About the journal
- For authors
- Online submission
- Nature Awards
- Nature history

**NPG services**

- Advertising
- work@npg
- Reprints & permissions
- For librarians
- Authors & referees

**Letter**

Nature 459, 401-404 (21 May 2009) | doi:10.1038/nature07978; Received 19 August 2008; Accepted 16 March 2009

**Stability against freezing of aqueous solutions on early Mars**

Alberto G. Fairén<sup>1</sup>, Alfonso F. Davila<sup>1</sup>, Luis Gago-Duport<sup>2</sup>, Ricardo Amils<sup>3,4</sup> & Christopher P. McKay<sup>1</sup>

1. Space Science and Astrobiology Division, NASA Ames Research Center, Moffett Field, California 94035, USA
2. Departamento de Geociencias Marinas, Universidad de Vigo, Lagoas Marcosende, Vigo 36200, Spain
3. Centro de Astrobiología, CSIC-INTA, Torrejón de Ardoz 28850, Madrid, Spain
4. Centro de Biología Molecular Severo Ochoa, CSIC-UAM, Cantoblanco 28049, Madrid, Spain

Correspondence to: Alberto G. Fairén<sup>1</sup> Correspondence and requests for materials should be addressed to A.G.F. (Email: [alberto.g.fairen@nasa.gov](mailto:alberto.g.fairen@nasa.gov)).

**Many features of the Martian landscape are thought to have been formed by liquid water flow<sup>1,2</sup> and water-related mineralogies on the surface of Mars are widespread and abundant<sup>3</sup>. Several lines of evidence, however, suggest that Mars has been cold with mean global temperatures well below the freezing point of pure water<sup>4</sup>. Martian climate modellers<sup>5,6</sup> considering a combination of greenhouse gases at a range of partial pressures find it challenging to simulate global mean Martian surface temperatures above 273 K, and local thermal sources<sup>7,8</sup> cannot account for the widespread distribution of hydrated and evaporitic minerals throughout the Martian landscape<sup>3</sup>. Solutes could depress the melting point of water<sup>9,10</sup> in a frozen Martian environment, providing a plausible solution to the early Mars climate paradox. Here we model the freezing and evaporation processes of Martian fluids with a composition resulting from the weathering of basalts, as reflected in the chemical compositions at Mars landing sites. Our results show that a significant fraction of weathering fluids loaded with Si, Fe, S, Mg, Ca, Cl, Na, K and Al remain in the liquid state at temperatures well below 273 K. We tested our model by analysing the mineralogies yielded by the evolution of the solutions: the resulting mineral assemblages are analogous to those actually identified on the Martian surface. This stability against freezing of Martian fluids can explain saline liquid water activity on the surface of Mars at mean global temperatures well below 273 K.**

subscribe to nature

**FULL TEXT**

- Previous | Next
- Table of contents
- Download PDF
- View interactive PDF in ReadCube
- Share this article
- CrossRef lists 53 articles citing this article
- Scopus lists 63 articles citing this article
- Export citation
- Export references
- Rights and permissions
- Order commercial reprints
- Abstract
- Methods Summary
- References
- Acknowledgements
- Figures and tables
- Supplementary info

**SEE ALSO**

- Editor's Summary



# Água líquida!!!

- ❑ Excesso de sais pode ter impedido a água em Marte de congelar-se facilmente
- ❑ Interações químicas entre a água e sais compostos de Enxofre, Ferro, Silício, Magnésio, Cálcio, Cloro, Sódio, Potássio e Alumínio, em 4 regiões diferentes de Marte, fazem a água congelar a temperaturas muito inferiores a 0°C (Fairén et al., Nature, 2009)
- ❑ Observações feitas ao vivo (jipes Spirit e Opportunity) e por sensoriamento remoto (sondas Viking 1 e Pathfinder)

ScienceNOW Daily News - 20 May 2009

# Água líquida 2009 e 2015!!!!

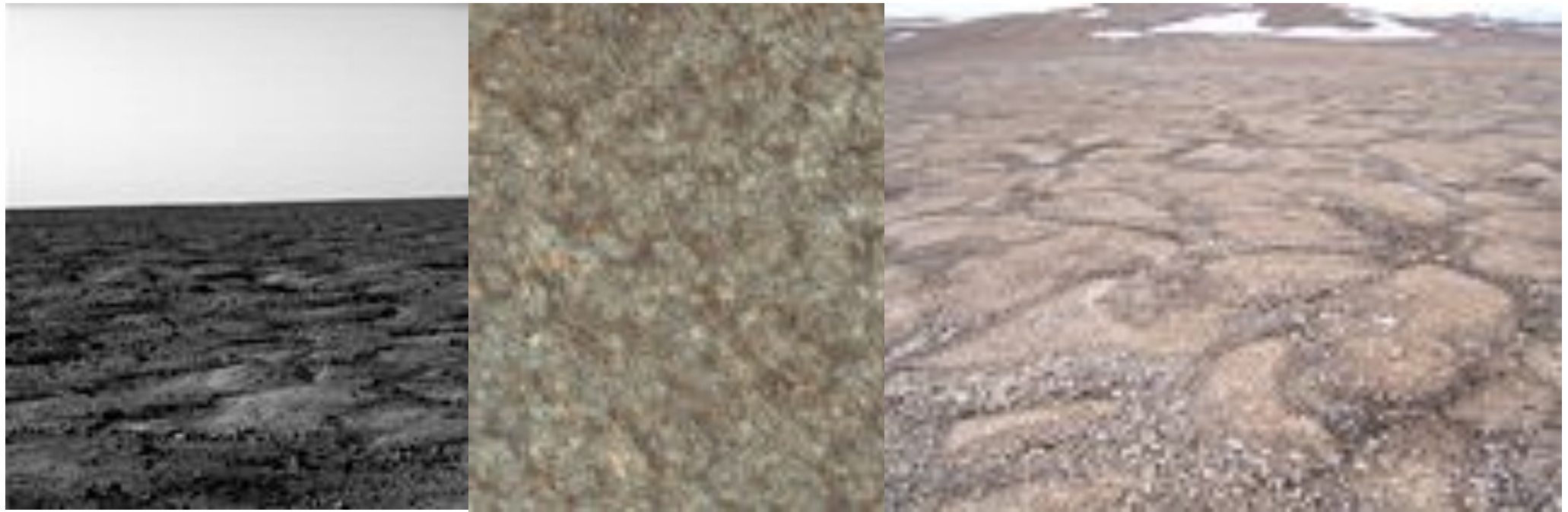


- ☑ Perclorato de sodio, magnésio e cálcio (0,4% a 0,6% peso total)
- ☑ Medidas do instrumento REMS
- ☑ Jipe Curiosity, no Lago Gale (Marte)

<http://phys.org/news/2015-04-mars-liquid-curiosity-rover-brine.html>



# A superfície de Marte e da Terra..



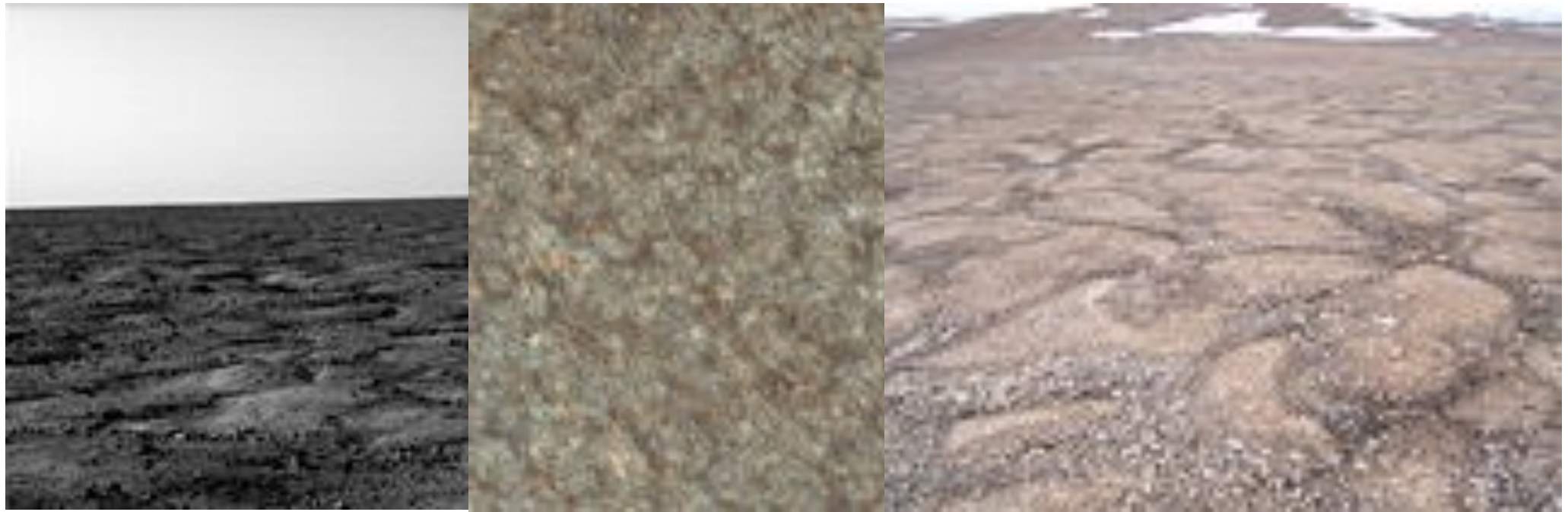
Polígonos fotografados pela **Phoenix** em **Marte**...

... e fotografados (em cor falsa) da órbita de **Marte**

.. comparados com um padrão de solo nas **Ilhas Devon, no Ártico Canadense**



# A superfície de Marte e da Terra..



Polígonos fotografados  
pela *Phoenix* em *Marte*...

... e fotografados (em  
cor falsa) da órbita de  
*Marte*

.. comparados com um padrão  
de solo nas *Ilhas Devon*, no  
*Ártico Canadense*

**Perfeitamente explicado pelo processo de  
congelamento e degelo, em ambos os casos!**



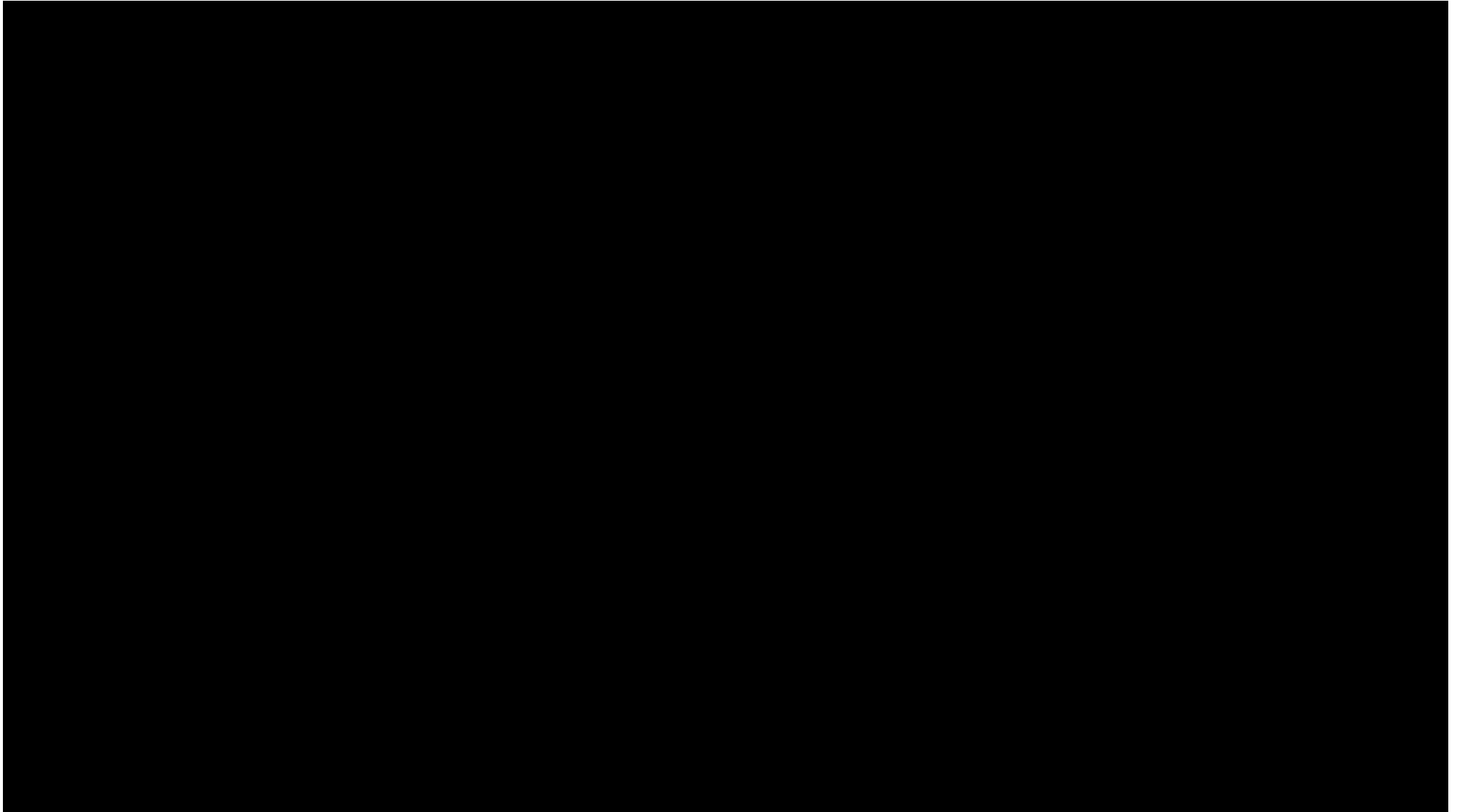


# E a existência de gás metano?

- ☑ Detectado depois de anos (marcianos...) de observação da atmosfera (15/01/2009)
- ☑ Impossível de existir por longos períodos de tempo nas condições atmosféricas de Marte
- ☑ Origem geológica ou biológica recente!
- ☑ Níveis comparáveis aos emitidos por poços de petróleo na Terra

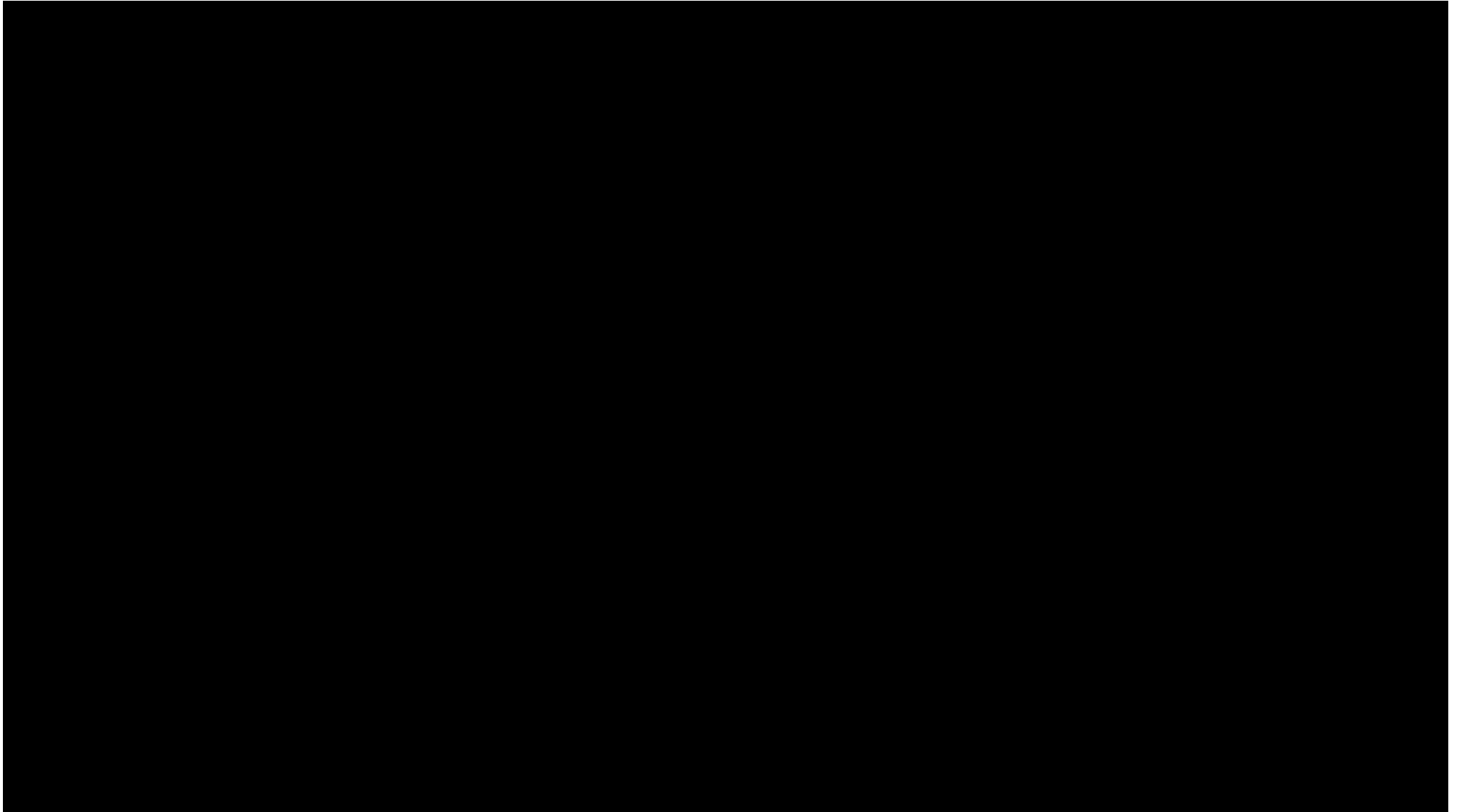


# Como é produzido?



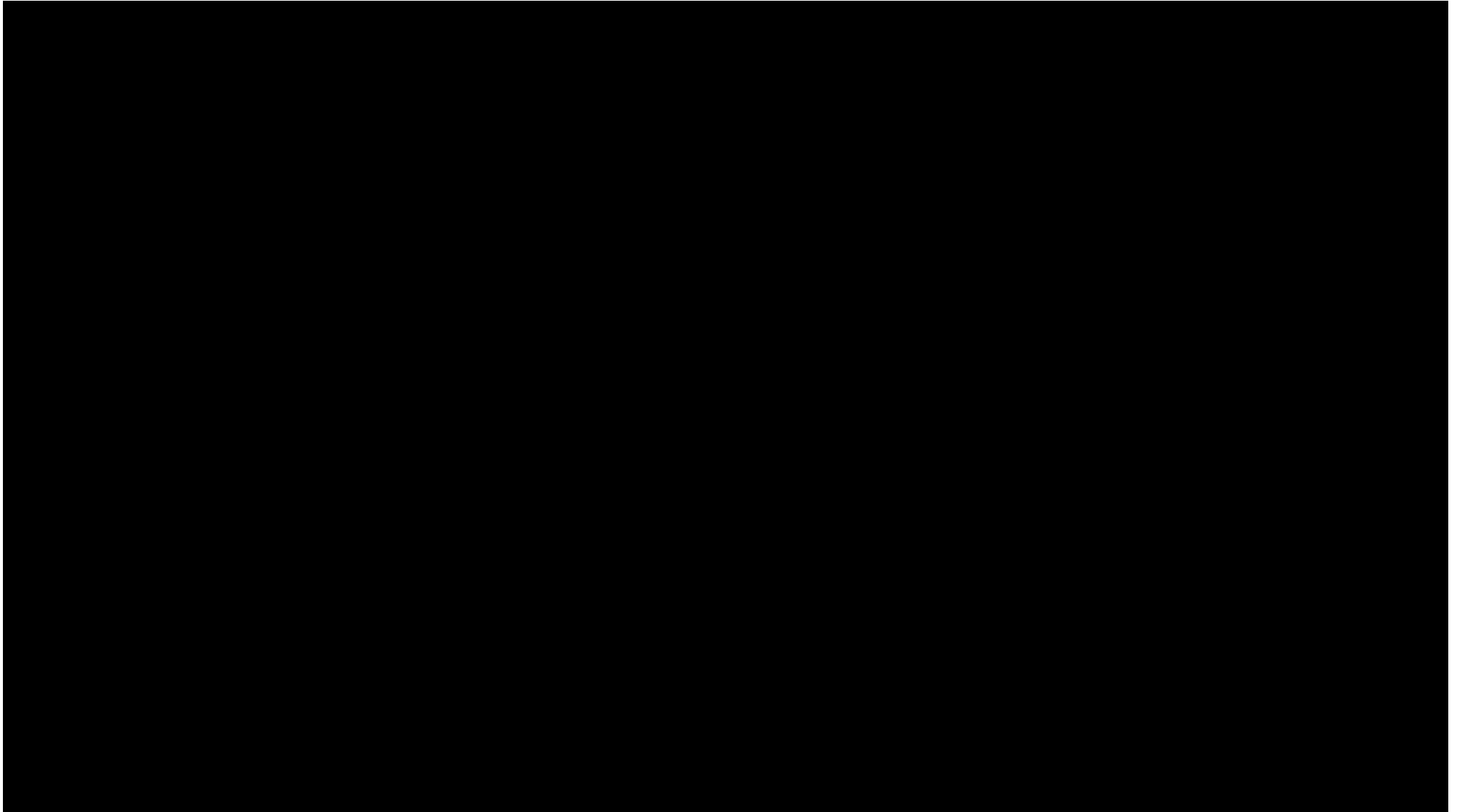


# Como é produzido?



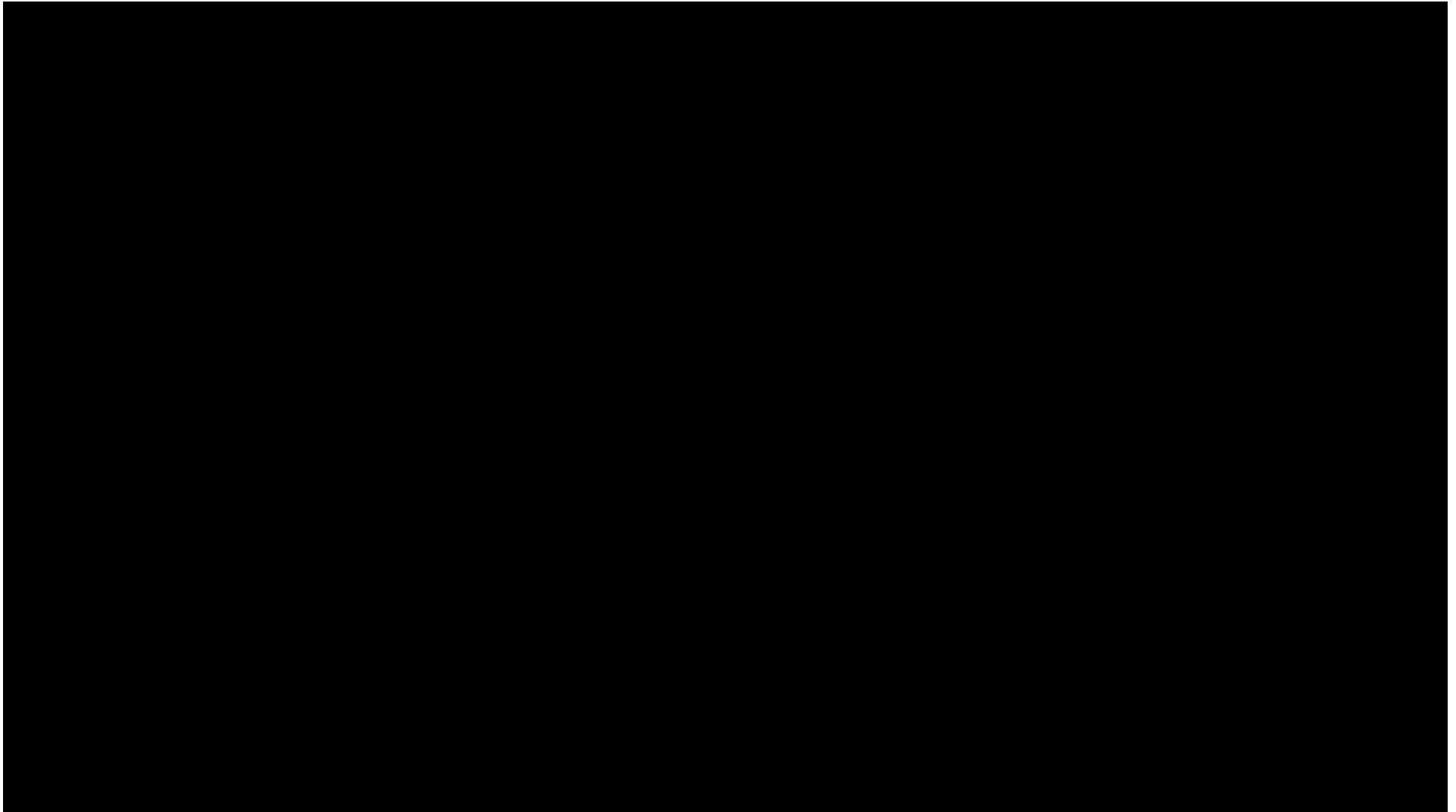


# Como é produzido?



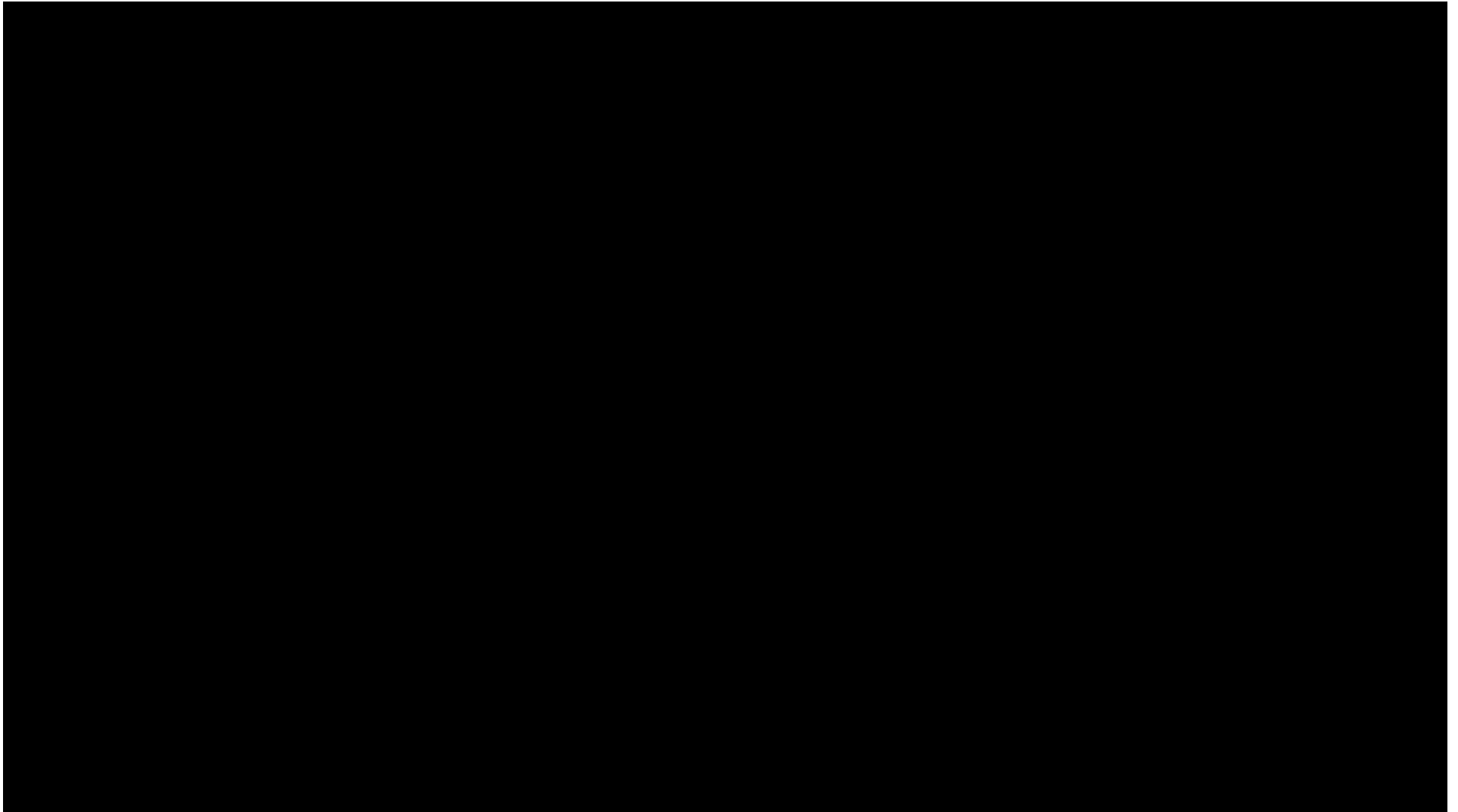


Onde é produzido?  
O que é produzido?



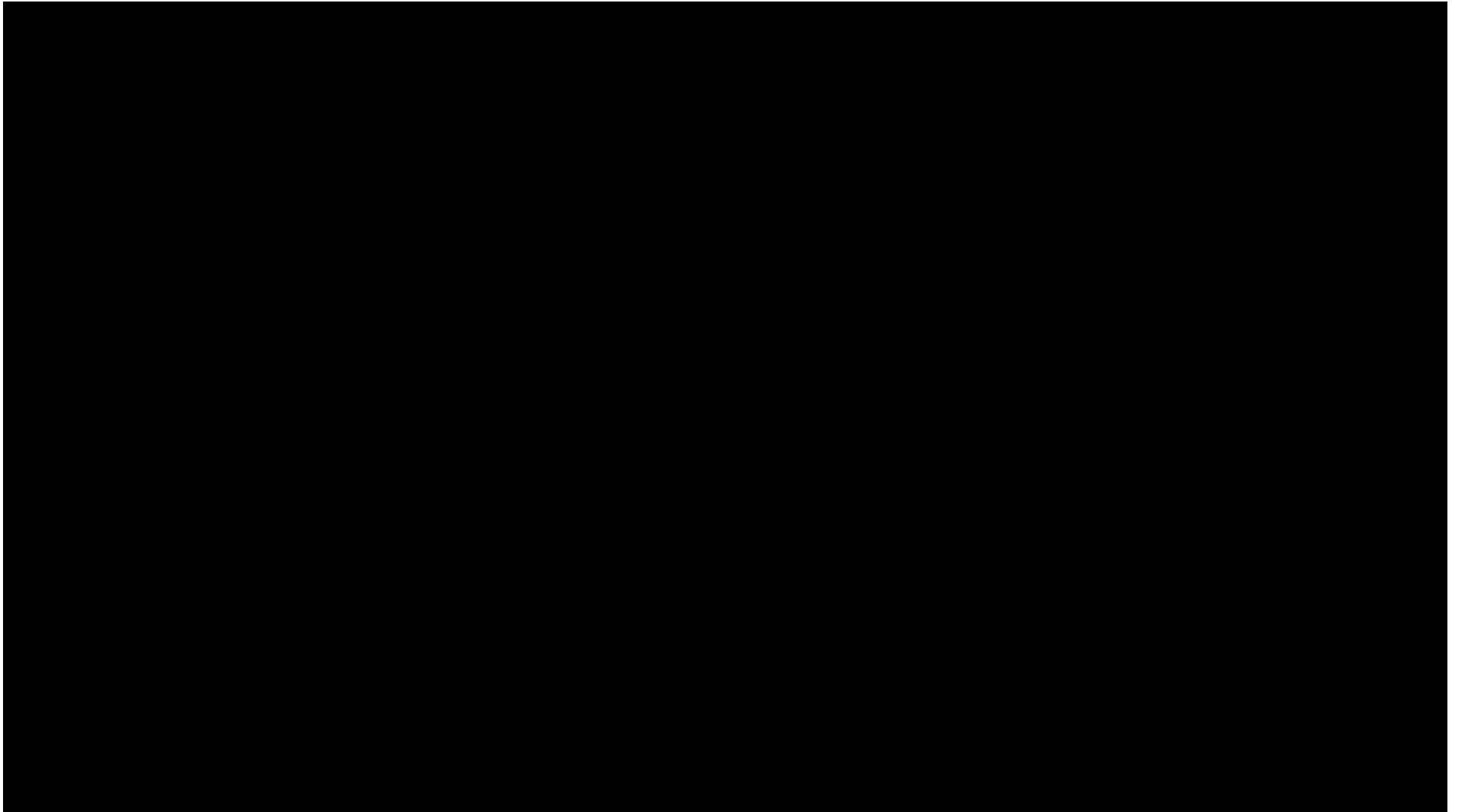


Onde é produzido?  
O que é produzido?





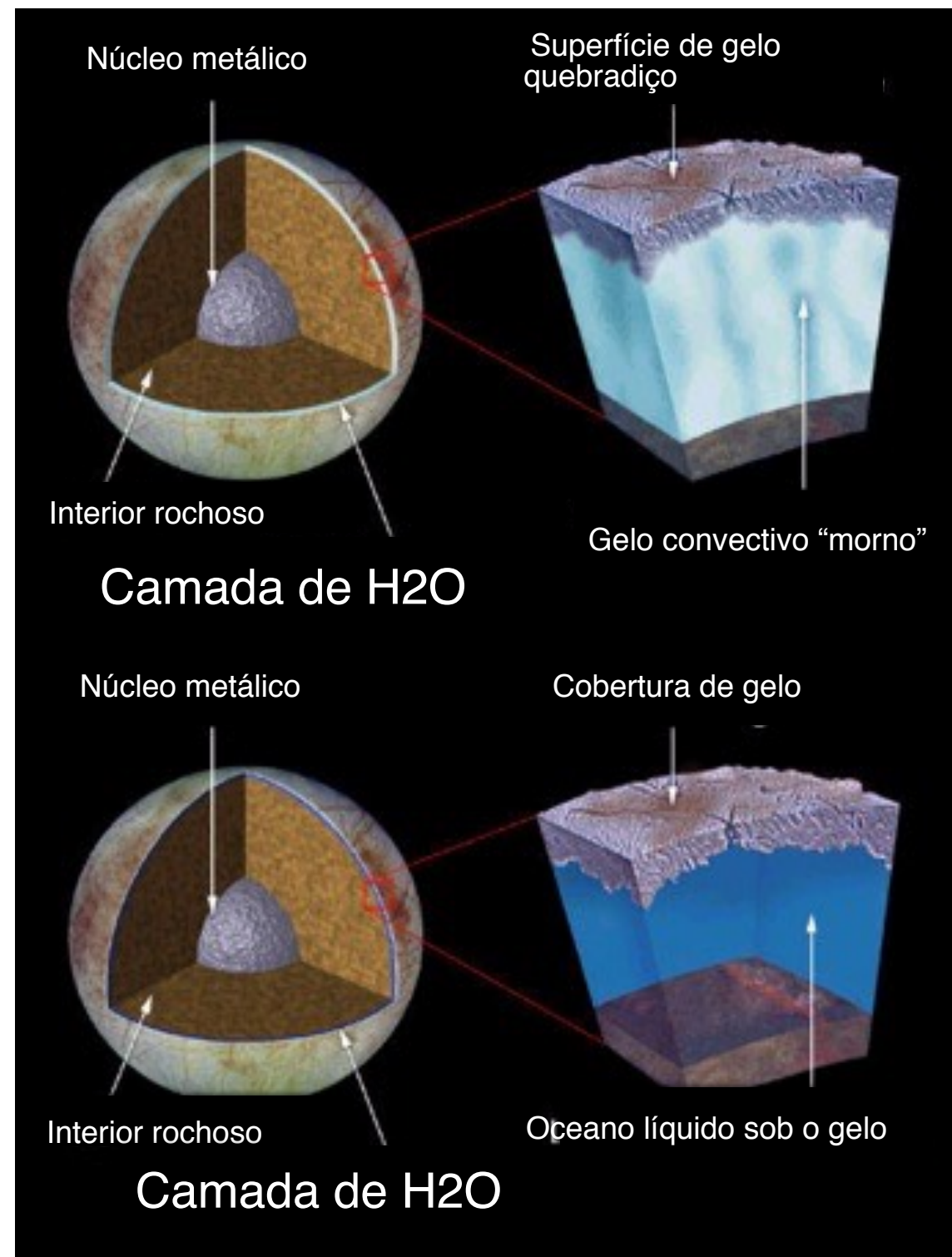
Onde é produzido?  
O que é produzido?



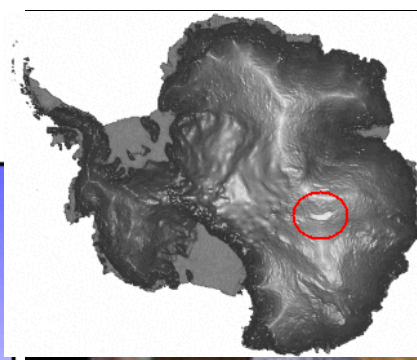
# EUROPA (Satélite de Júpiter)

Capa de gelo?

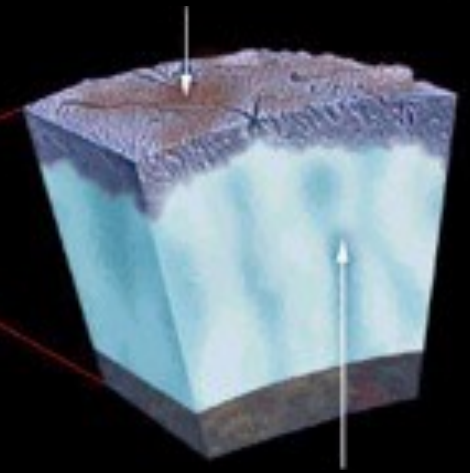
Ou um oceano submerso?



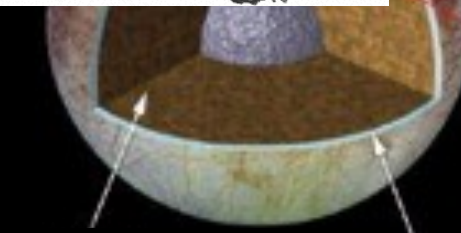




Superfície de gelo quebradiço



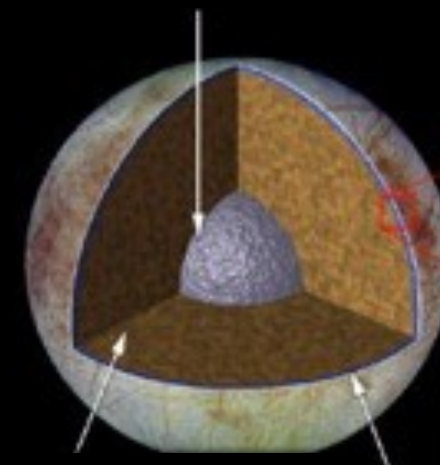
Gelo convectivo "morno"



Interior rochoso

Camada de H<sub>2</sub>O

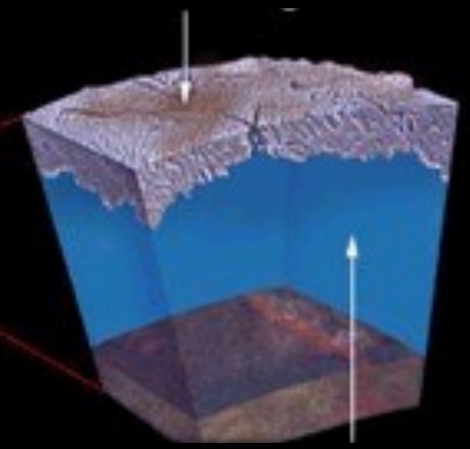
Núcleo metálico



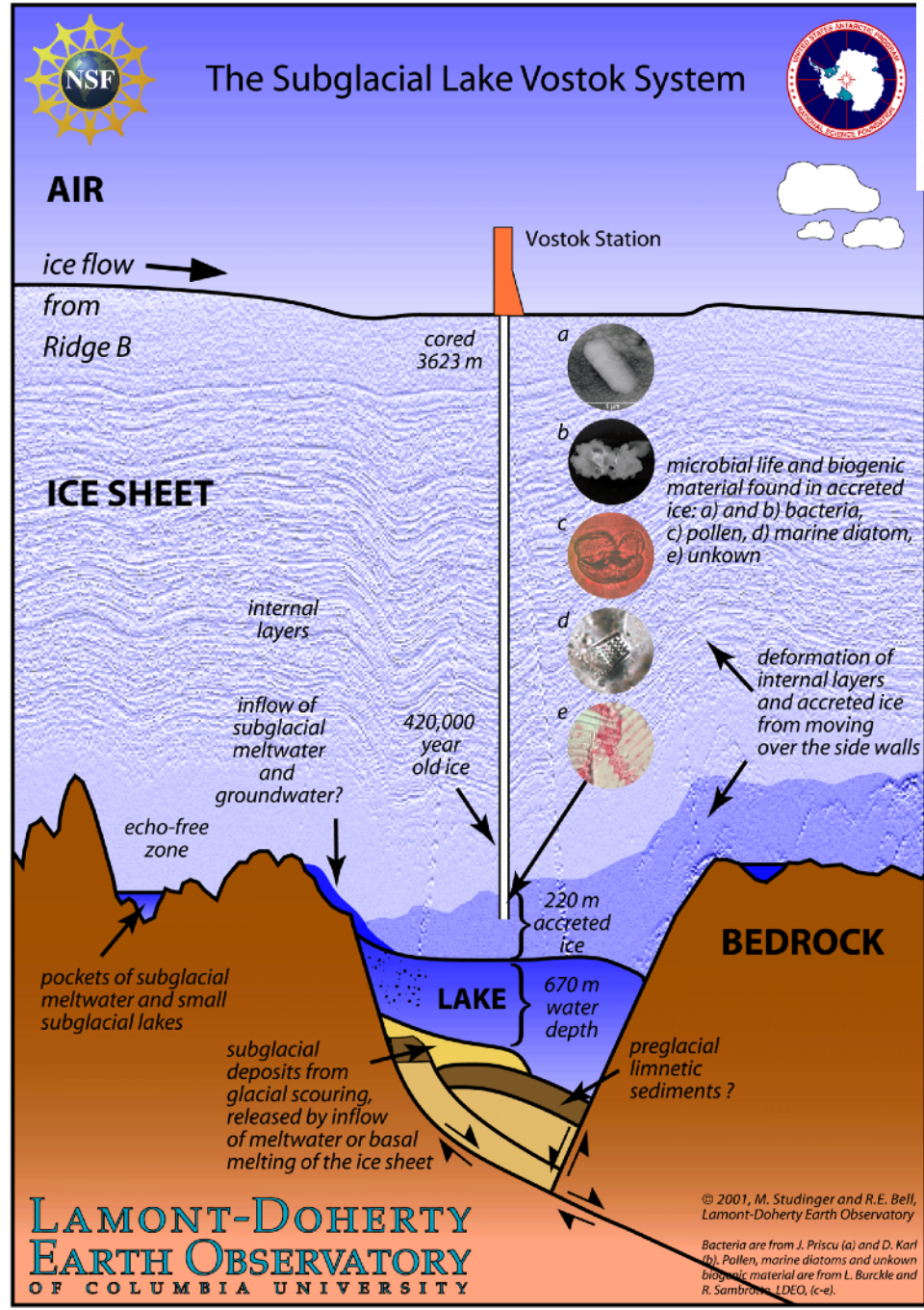
Interior rochoso

Camada de H<sub>2</sub>O

Cobertura de gelo

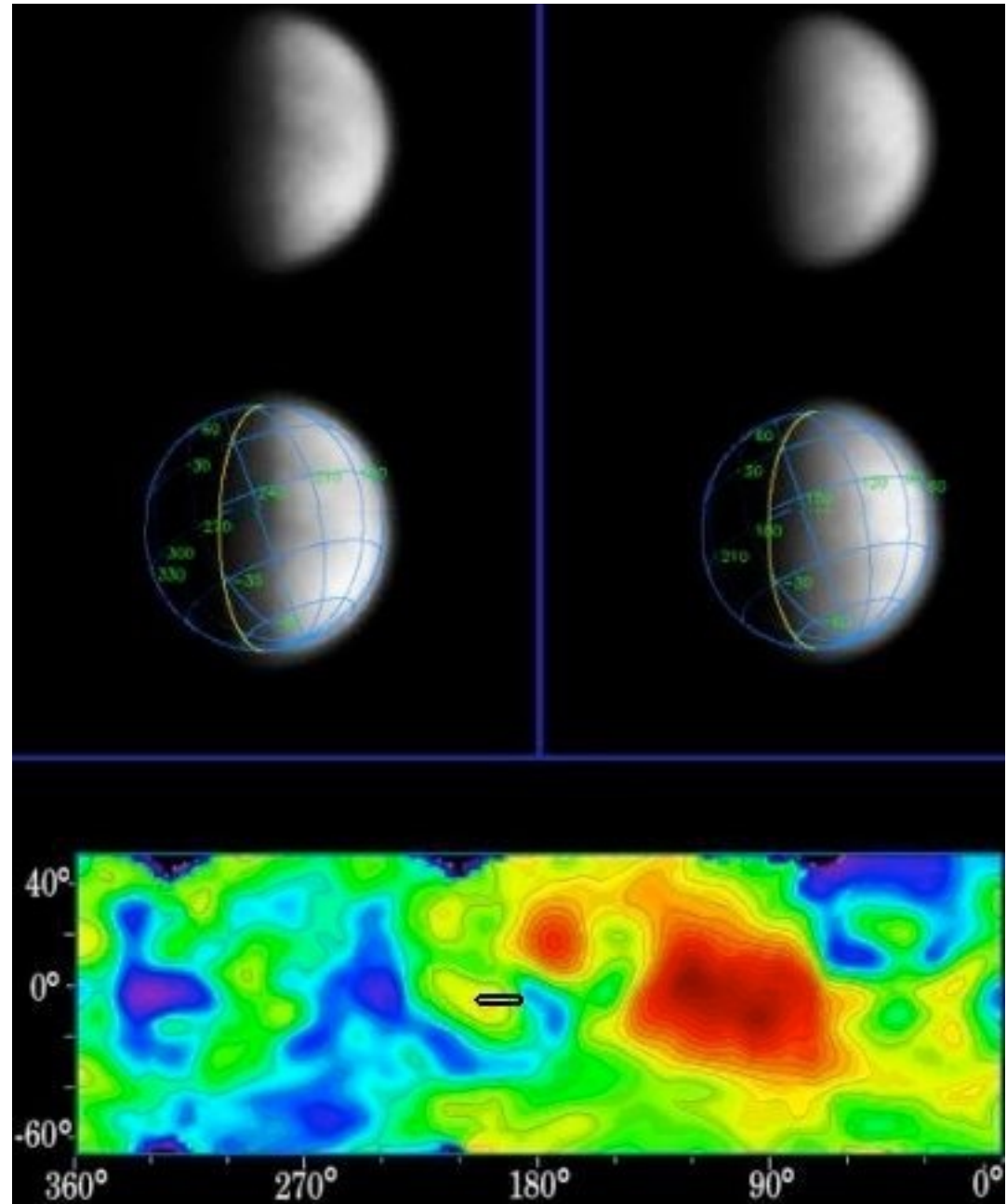
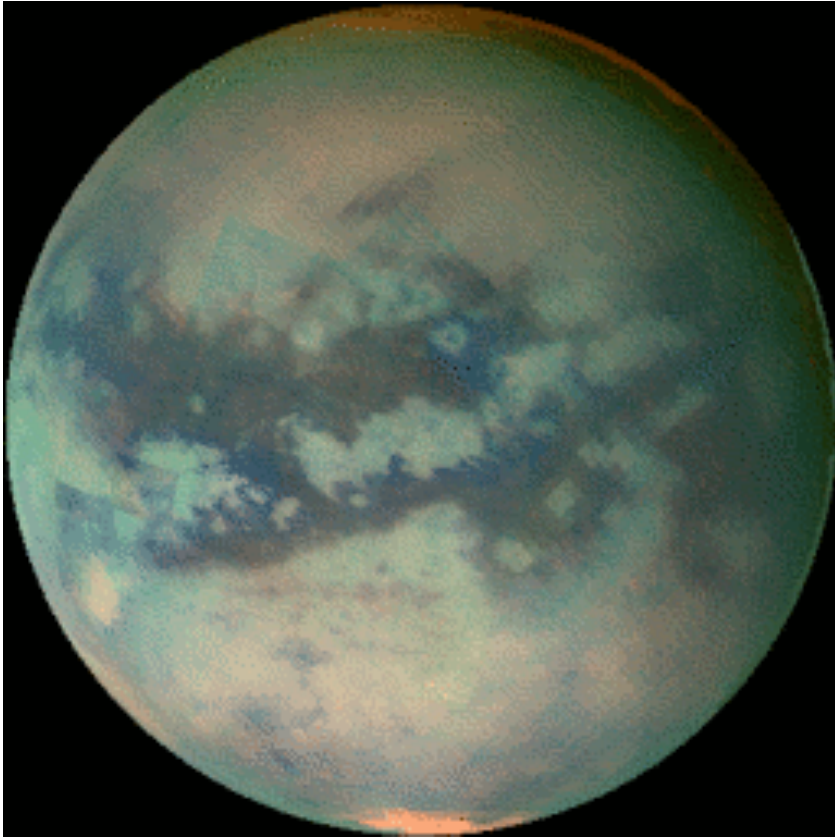


Oceano líquido sob o gelo

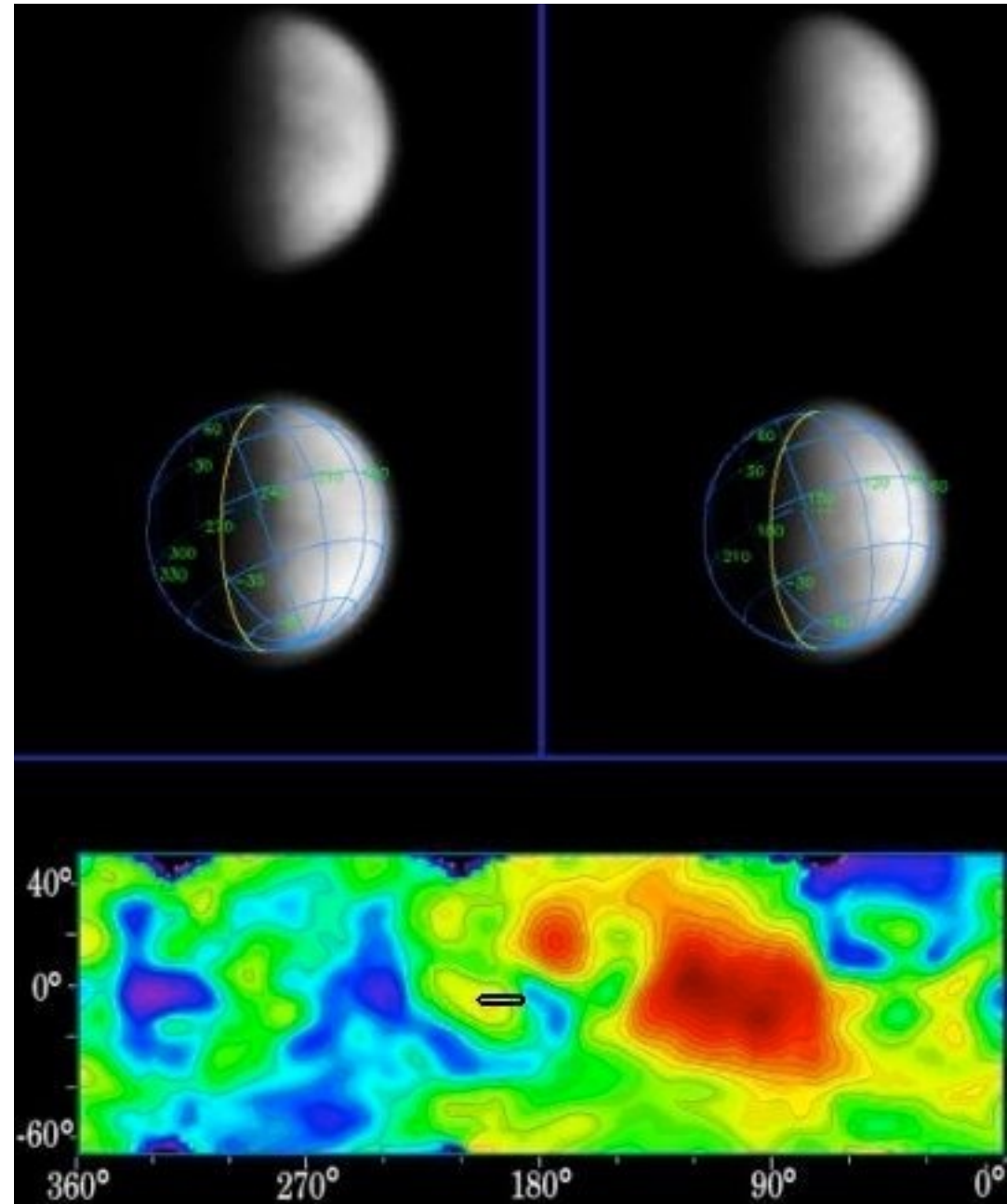
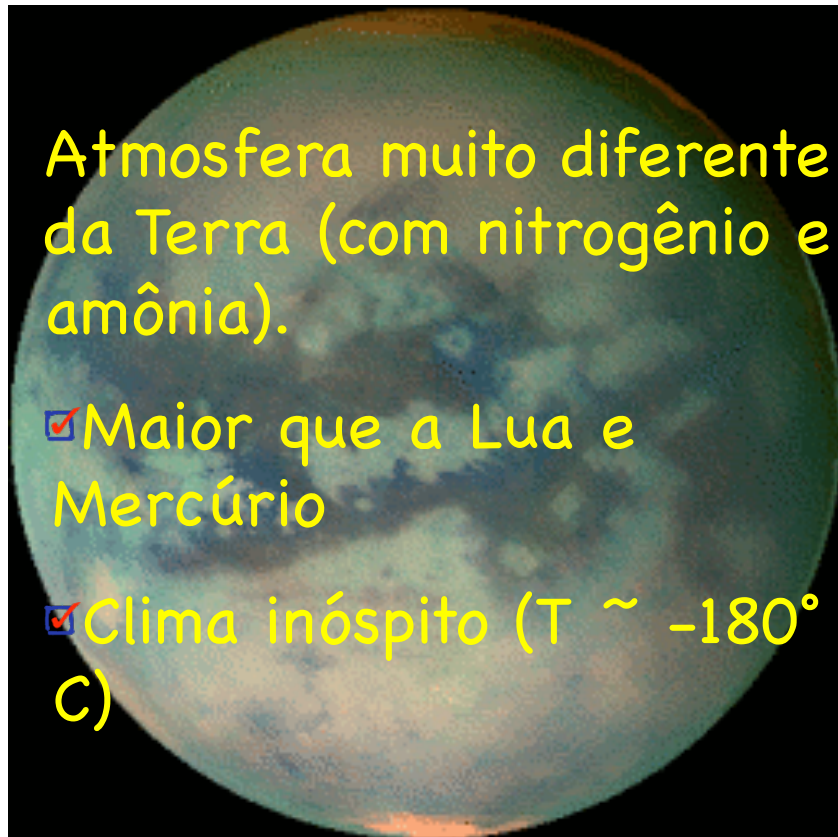




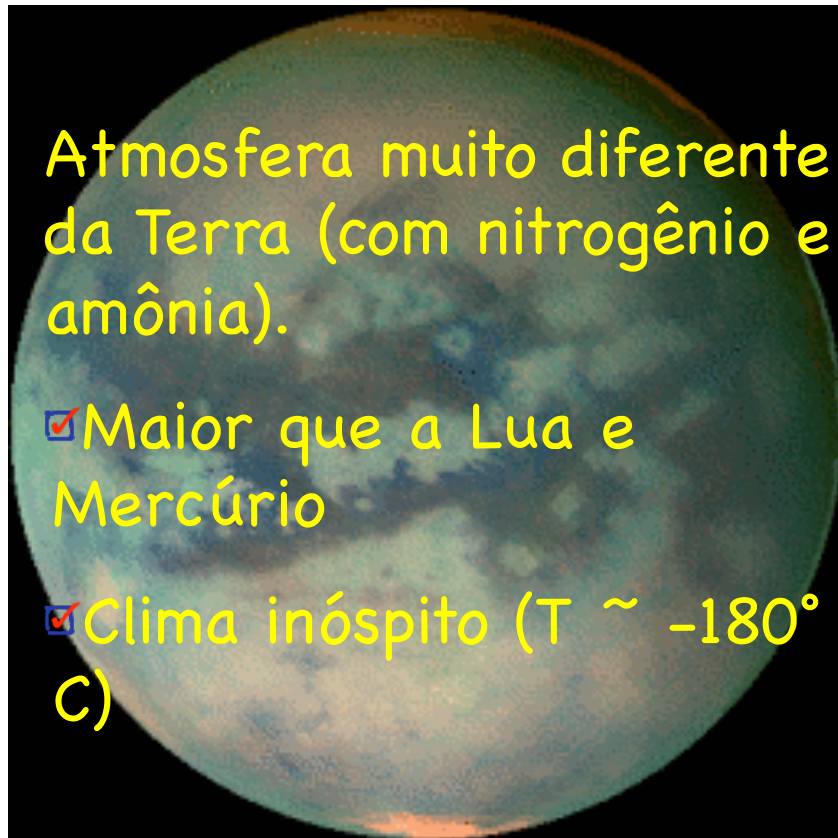
# Titã - A Lua de Saturno



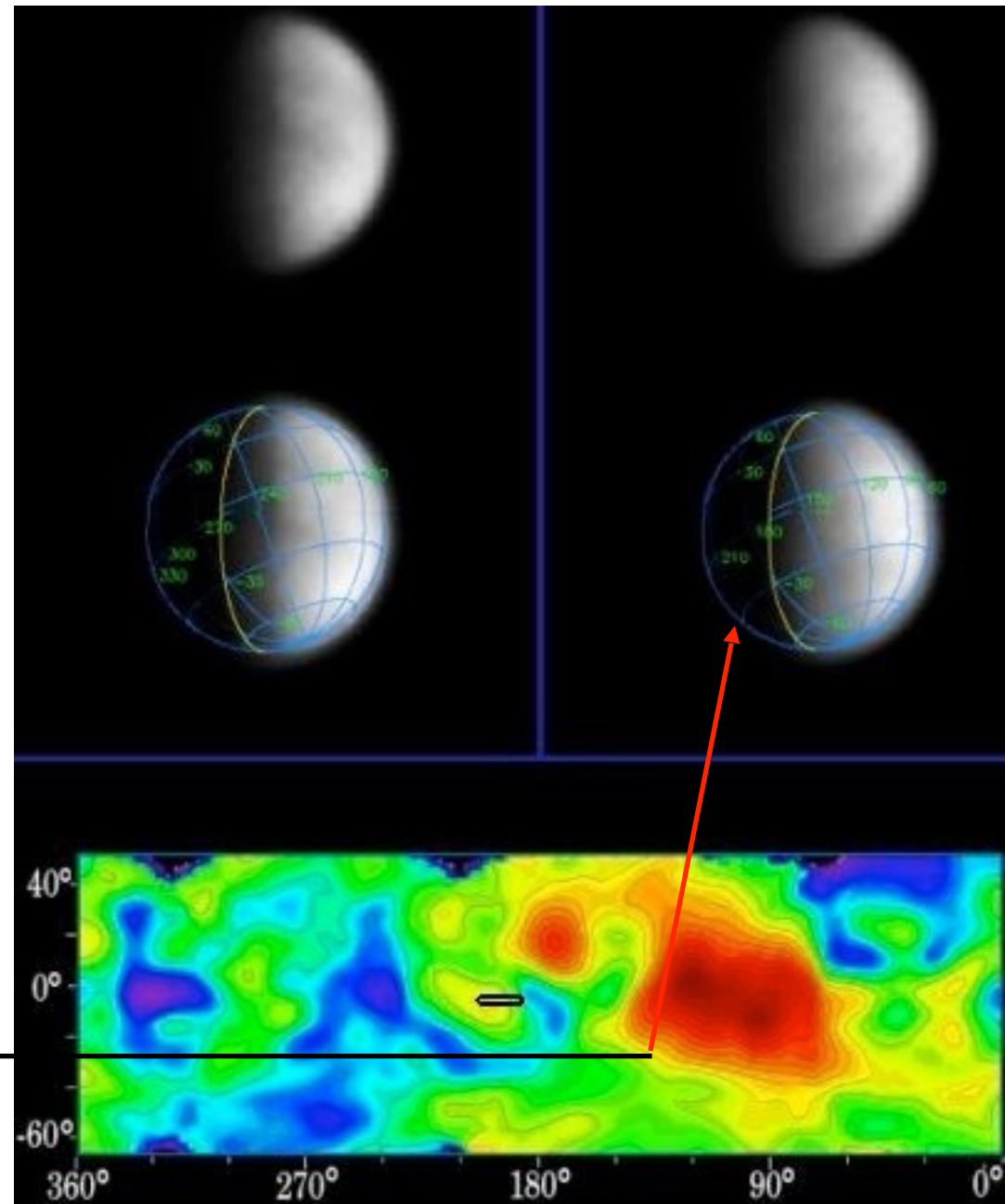
# Titã – A Lua de Saturno



# Titã – A Lua de Saturno

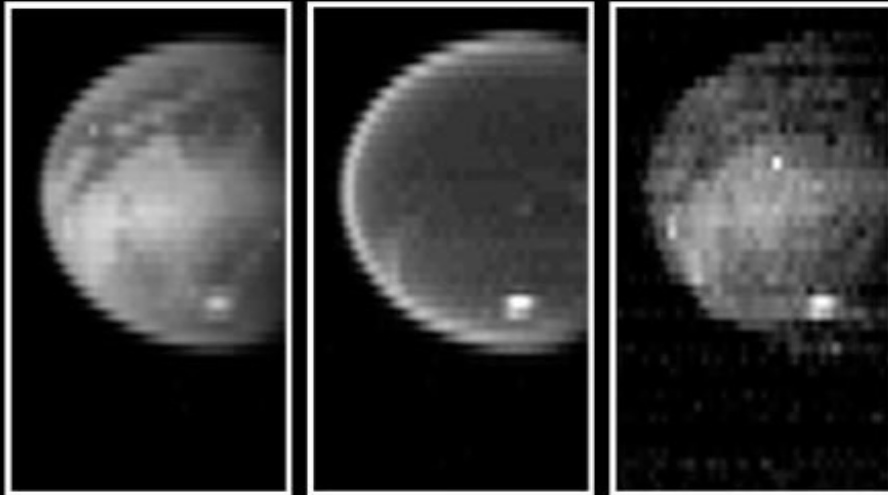
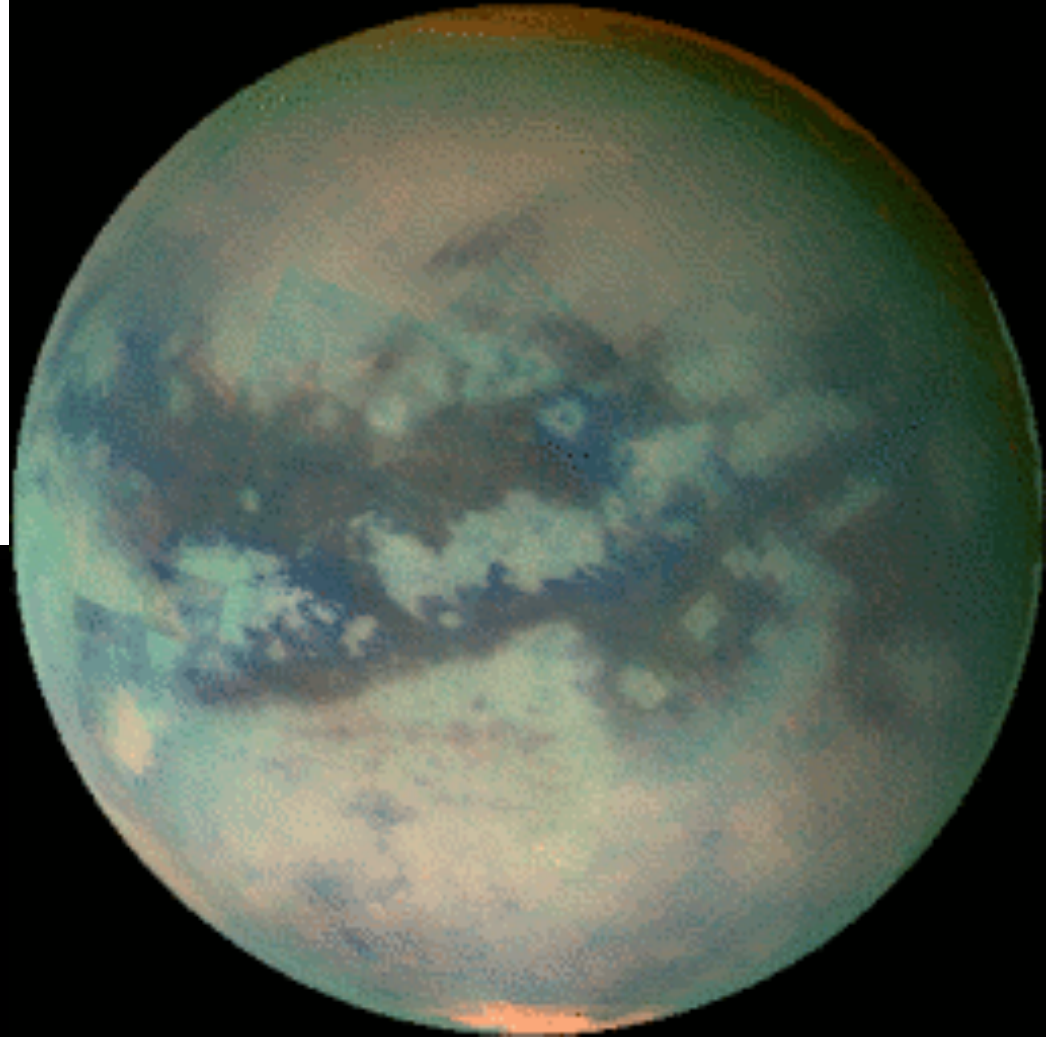


Variação de brilho nas imagens à direita sugerem a existência de um "continente" em Titã





# Titã visto pela Cassini Julho/2004



surface

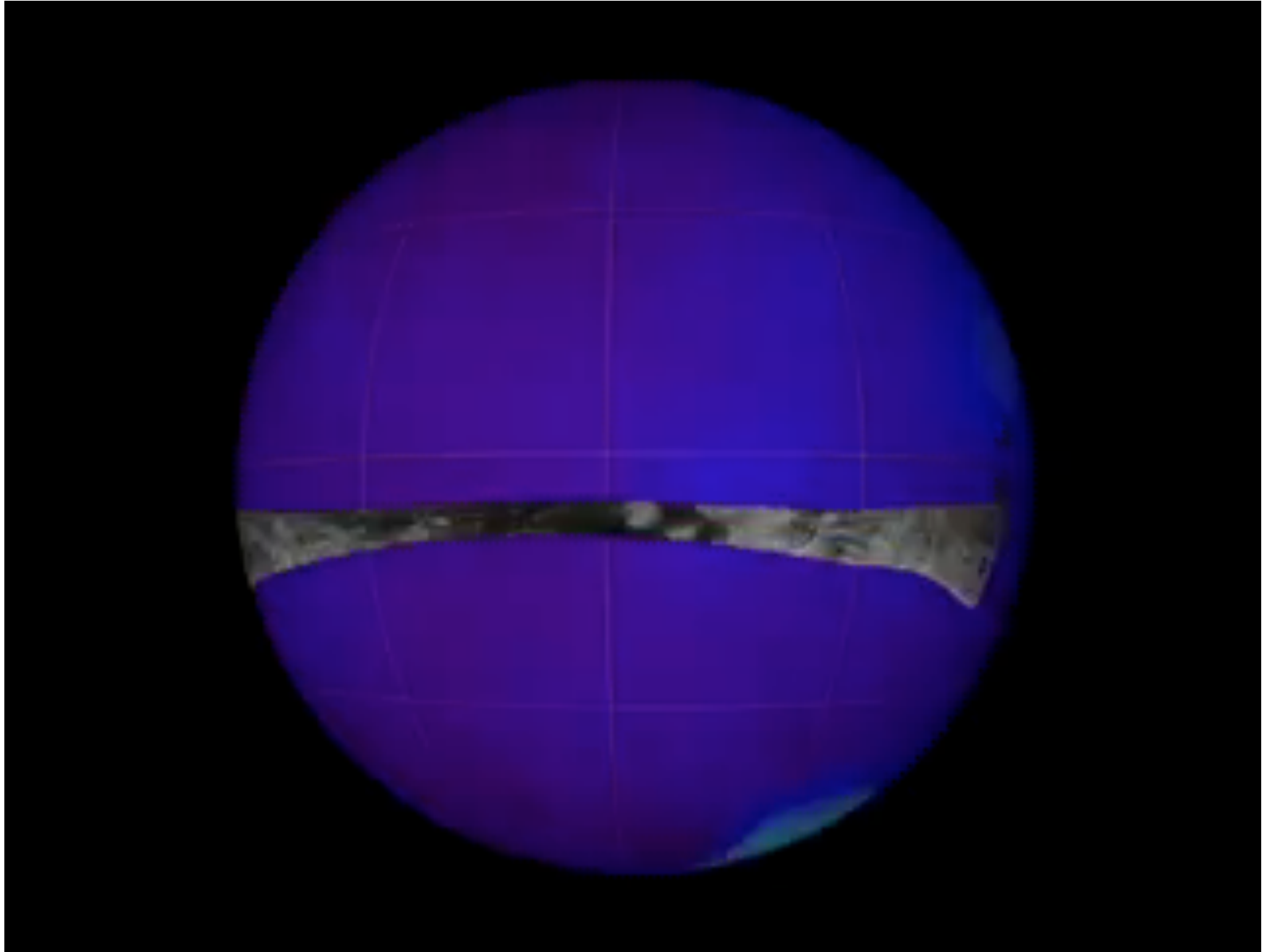
ices

organics?

Cortesia: NASA/JPL/Univ. of Arizona

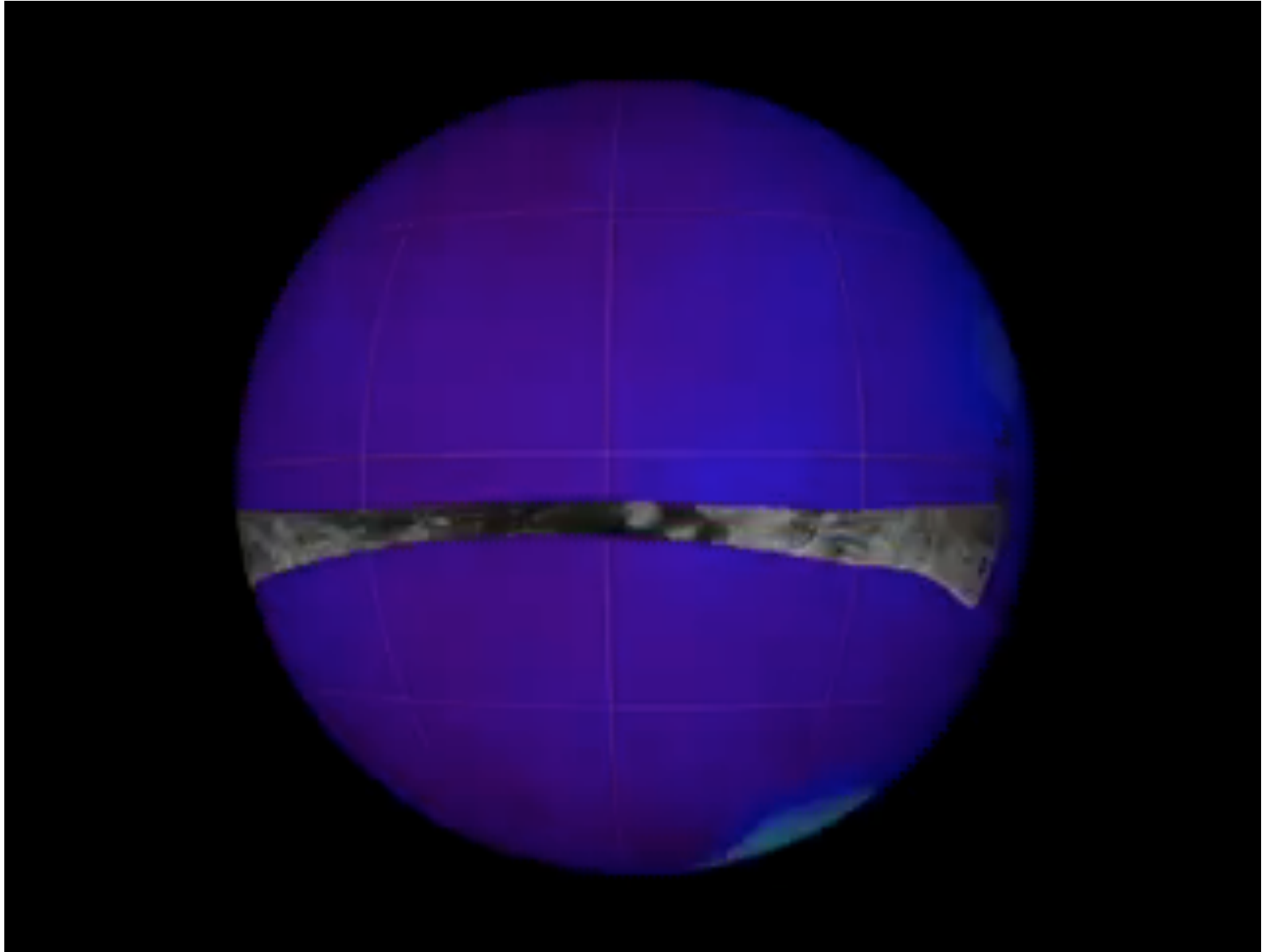


# Titã



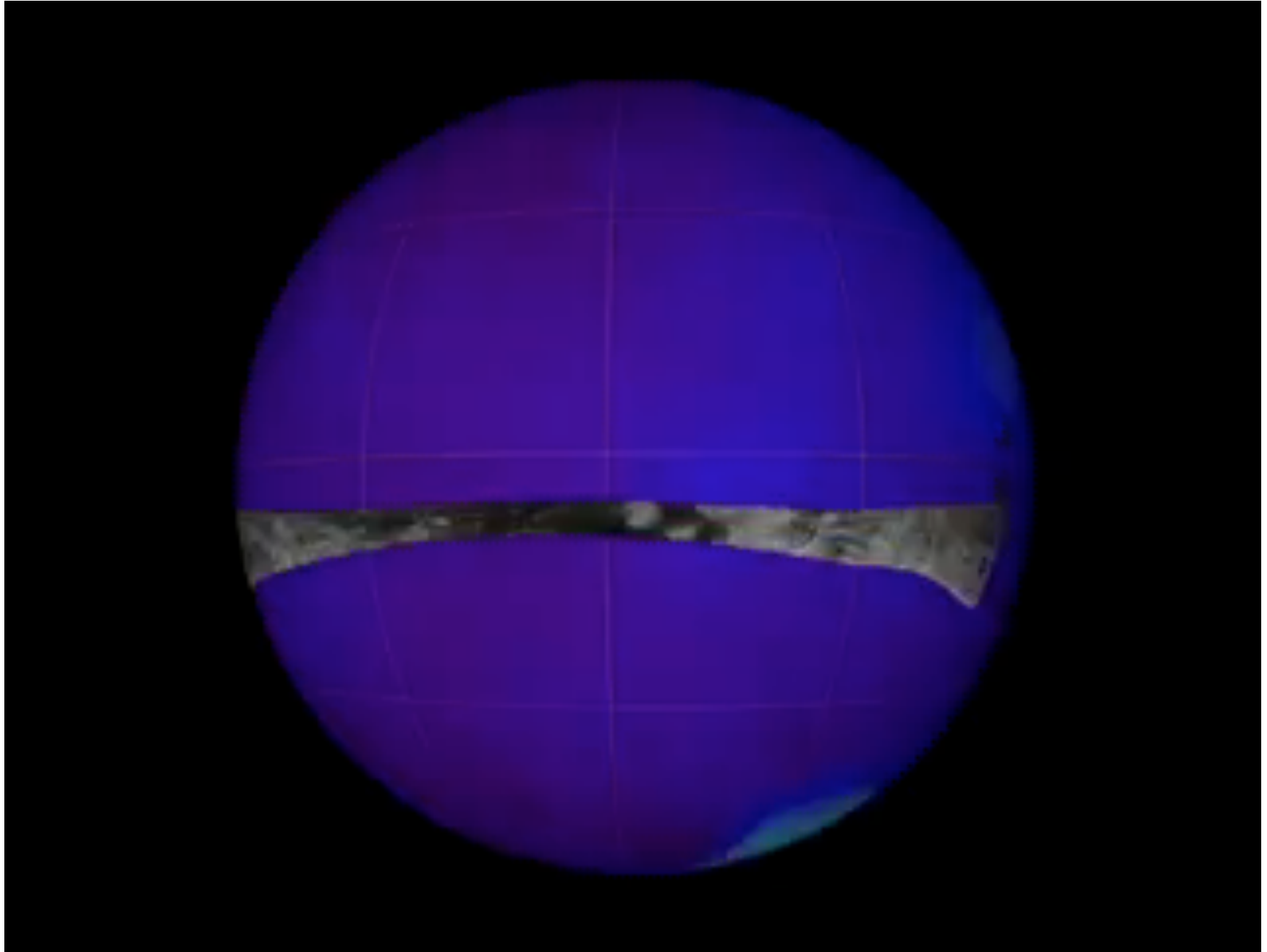


# Titã





# Titã



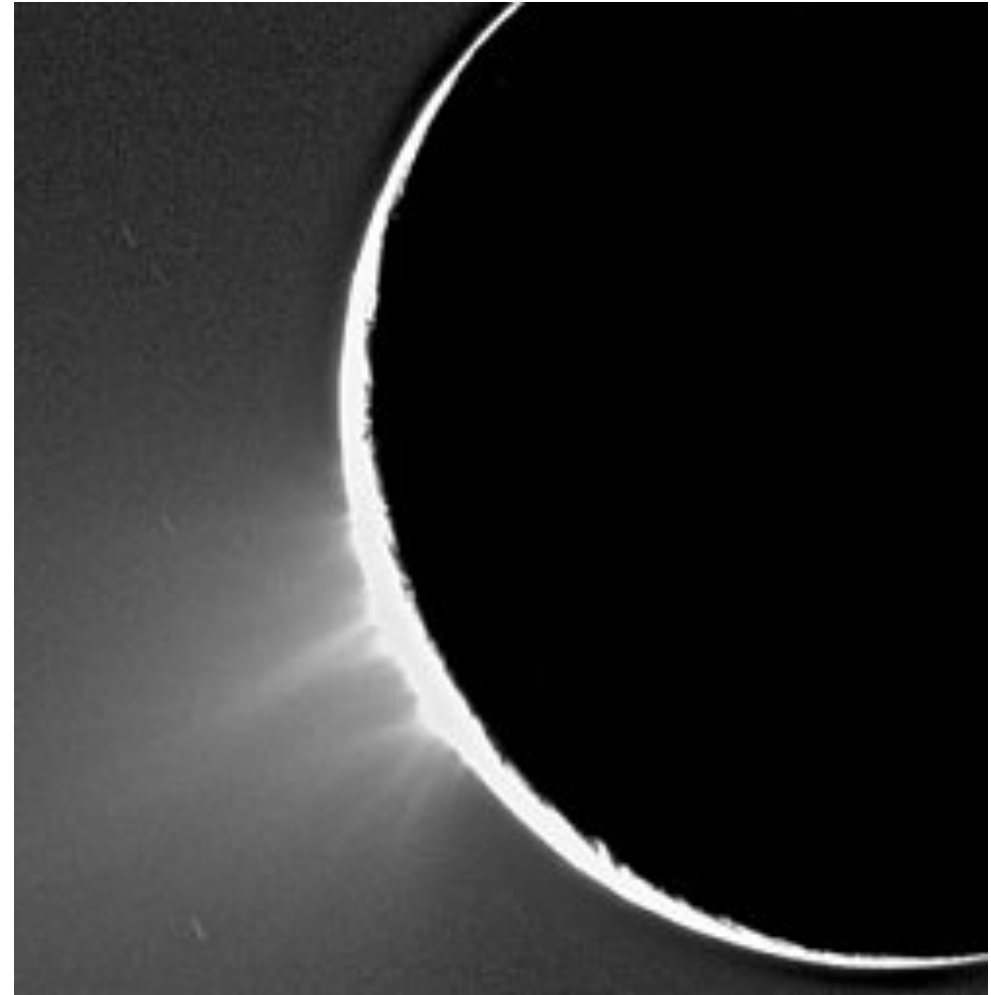




# Água em Enceladus?

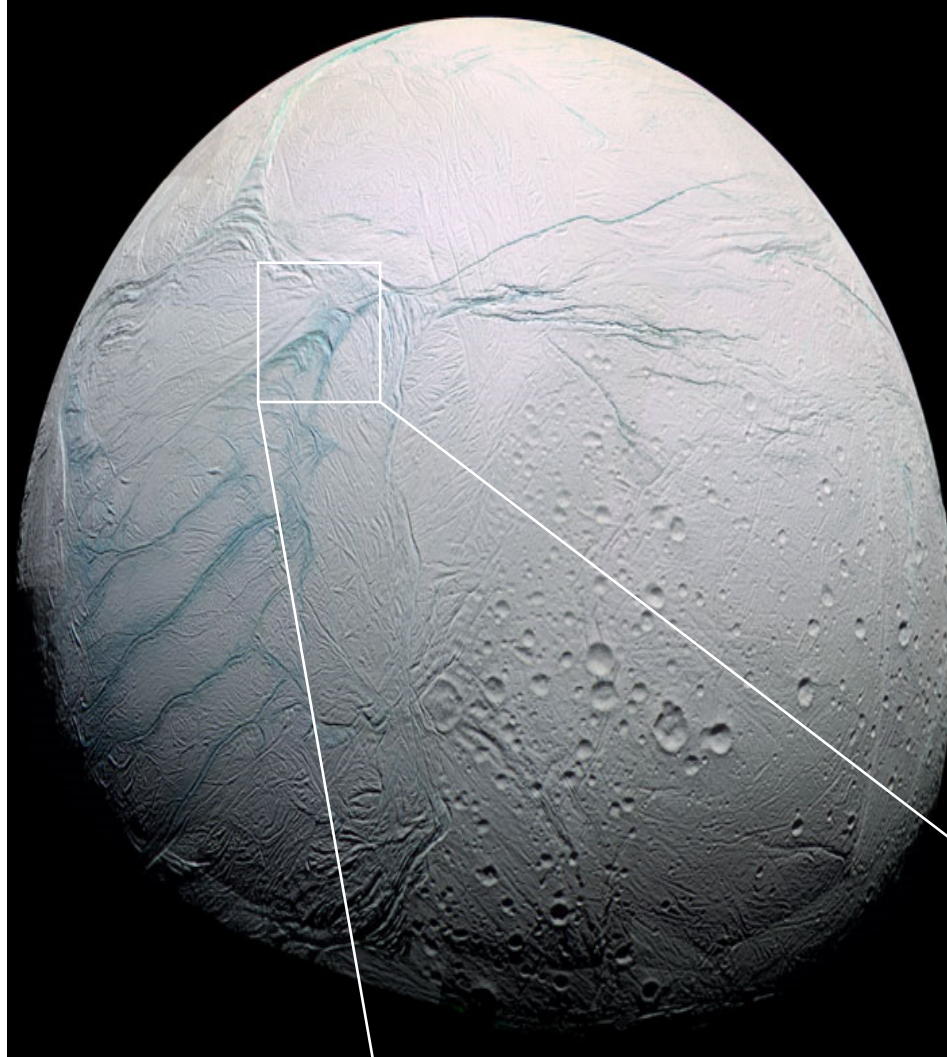
Observações da sonda Cassini indicam grande possibilidade da presença de água LÍQUIDA numa erupção (Nasa News, 09/03/2006).

Existência de vulcanismo (anteriormente, somente a Terra, Io e Tritão).

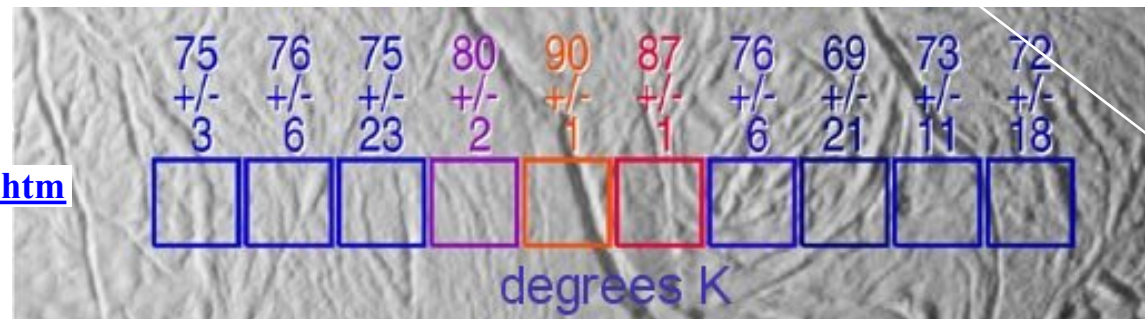


[http://science.nasa.gov/headlines/y2006/09mar\\_enceladus.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2006/09mar_enceladus.htm)

Provável região  
de onde a água é  
ejetada pela  
superfície de  
Enceladus.

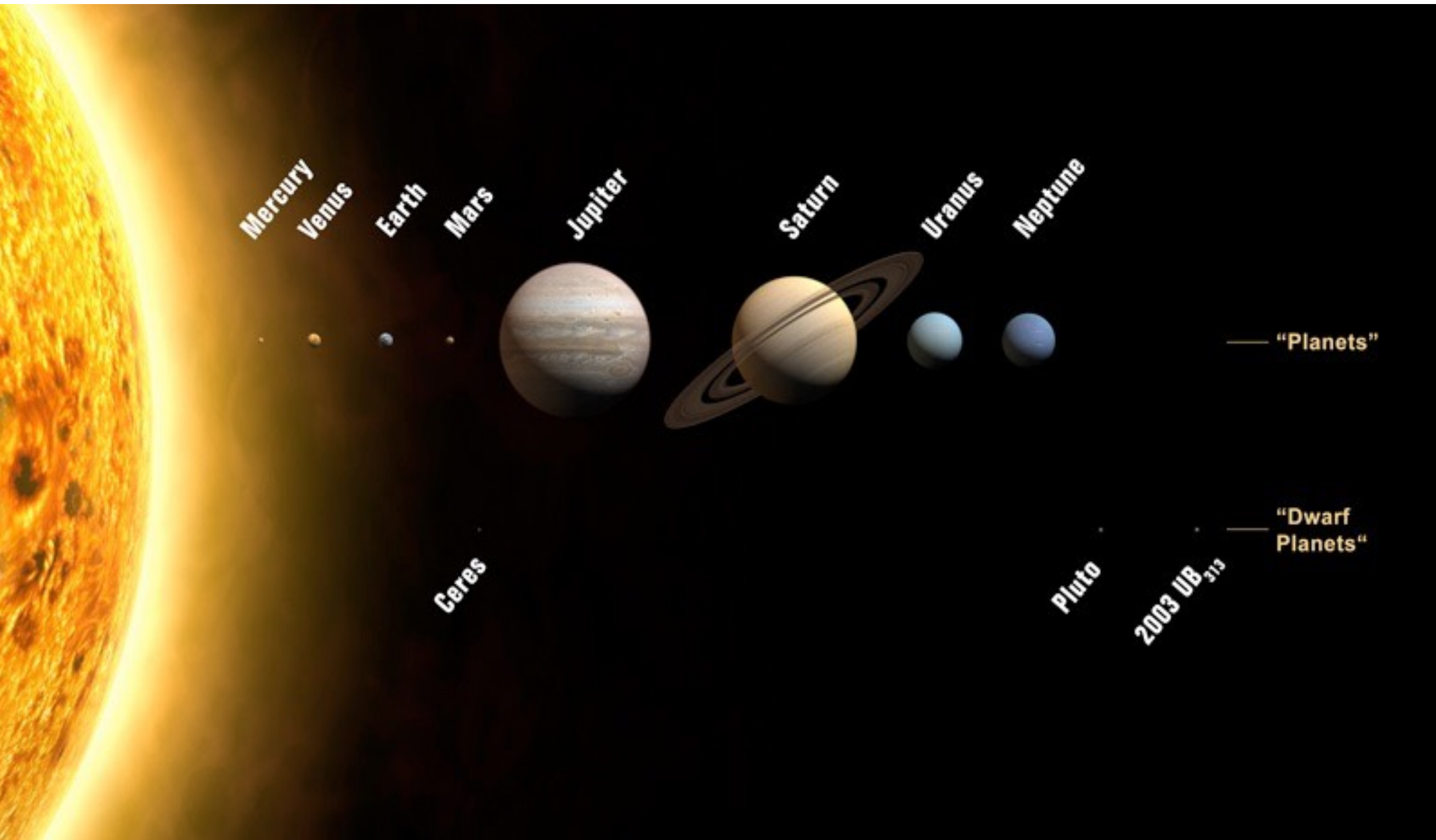


[http://science.nasa.gov/headlines/y2006/09mar\\_enceladus.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2006/09mar_enceladus.htm)



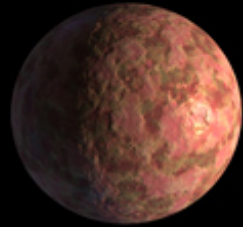


# Saindo do Sistema Solar...





Circa 2008



**Sedna**  
800-1100 miles  
in diameter



**Quaoar**  
(800 miles)



**Pluto**  
(1400 miles)

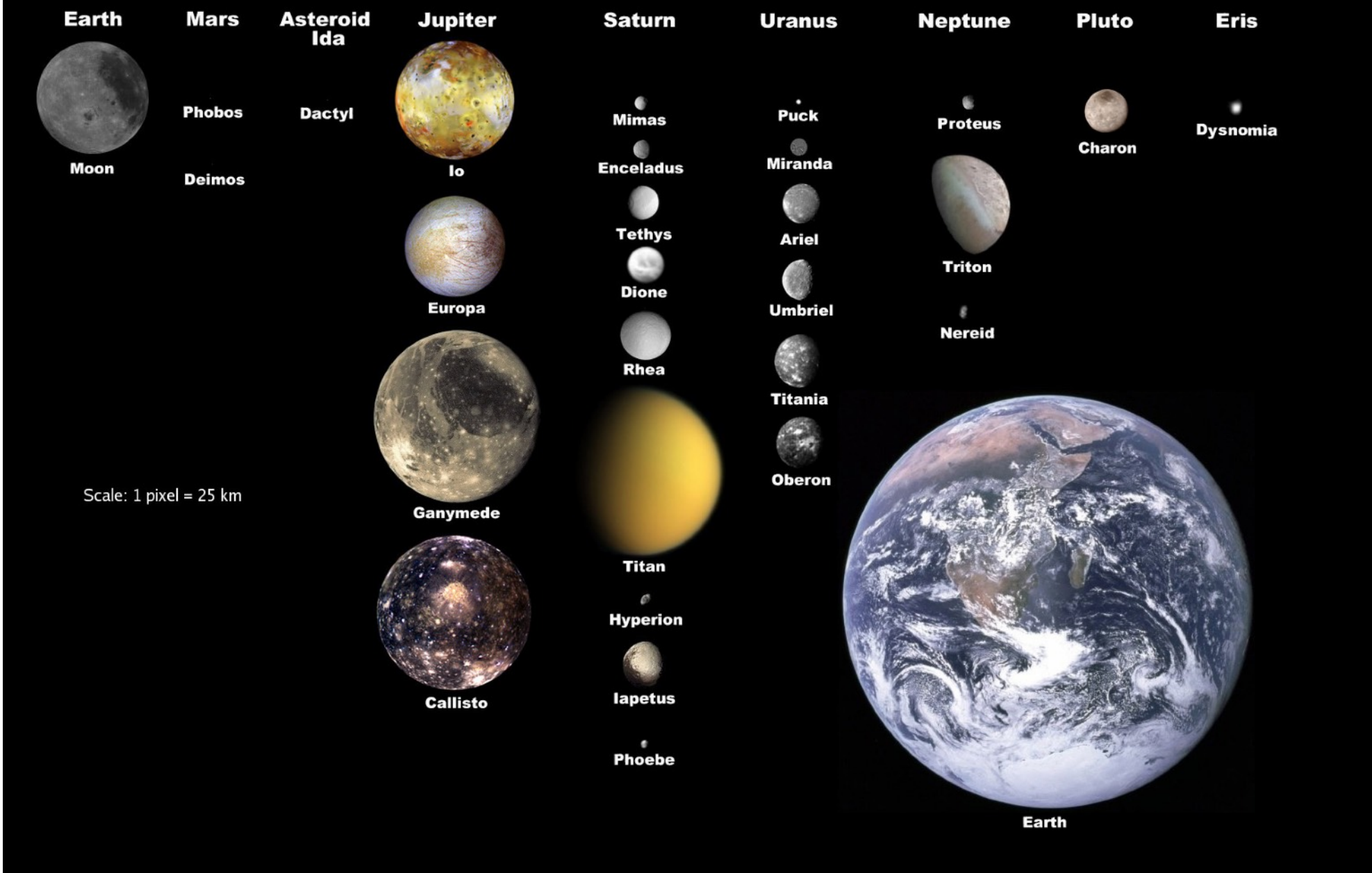


**Moon**  
(2100 miles)



**Earth**  
(8000 miles)

# Luas selecionadas do Sistema Solar (Terra em escala)



# Maiores objetos transnetunianos conhecidos (Terra em escala)



# Maiores objetos transnetunianos conhecidos (Terra em escala)





## Outros alvos em potencial para exploração "in situ"....

- ☑ Ganimedes (Júpiter)

### E paramos por aí...

- ☑ A viagem até estrela mais próxima, Alfa Centauri, situada a 4,5 anos-luz (42,5 trilhões de km), levaria cerca de 173,5 mil anos para ser percorrida no ônibus espacial, a uma velocidade de 28000 km/h
- ☑ A sonda Juno é o objeto mais veloz produzido pelo homem e se move a 264.000 km/h





# Fora do Sistema Solar: exoplanetas (ou planetas extra-solares)

- ☑ detecção direta difícil
- ☑ detecção indireta por diferentes processos físicos
- ☑ Enciclopédia de planetas extrasolares
  - ✓ <http://www.obspm.fr/encycl/encycl.html>
- ☑ The Extrasolar Planet Encyclopedia: talvez a melhor fonte de informações disponível na rede sobre exoplanetas <http://exoplanet.eu/>

## First Earth-Like Planet Spotted Outside Solar System Likely a Volcanic Wasteland

*ScienceDaily (Jan. 7, 2010)* — When scientists confirmed in October that they had detected the first rocky planet outside our solar system, it advanced the longtime quest to find an Earth-like planet hospitable to life.

### See Also:

#### Space & Time

- [Extrasolar Planets](#)
- [Solar System](#)
- [Pluto](#)
- [Astronomy](#)
- [Jupiter](#)
- [Kuiper Belt](#)

#### Reference

- [Gas giant](#)
- [Equatorial bulge](#)
- [Neptune's natural satellites](#)
- [Asteroid belt](#)

Rocky planets -- Earth, Mercury, Venus and Mars -- make up half the planets in our solar system. Rocky planets are considered better environments to support life than planets that are mainly gaseous, like the other half of the planets in our system: Jupiter, Saturn, Uranus and Neptune.

The rocky planet CoRoT-7 b was discovered circling a star some 480 light years from Earth. It is, however, a forbidding place and unlikely to harbor life. That's because it is so close to its star that temperatures might be above 4,000 degrees F (2,200 C) on the surface lit by its star and as low as minus 350 F

(minus 210 C) on its dark side.



*How similar is exoplanet CoRoT-7b to Earth? The newly discovered extra-solar planet (depicted in the above artist's illustration) is the closest physical match yet, with a mass about five Earths and a radius of about 1.7 Earths. Also, the home star to CoRoT-7b, although 500 light years distant, is very similar to our Sun. Unfortunately, the similarities likely end there, as CoRoT-7b orbits its home star well inside the orbit of Mercury, making its year last only 20 hours, and making its peak temperature much hotter than humans might find comfortable. (Credit: ESO/L. Calçada)*



# Os primeiros exoplanetas encontrados

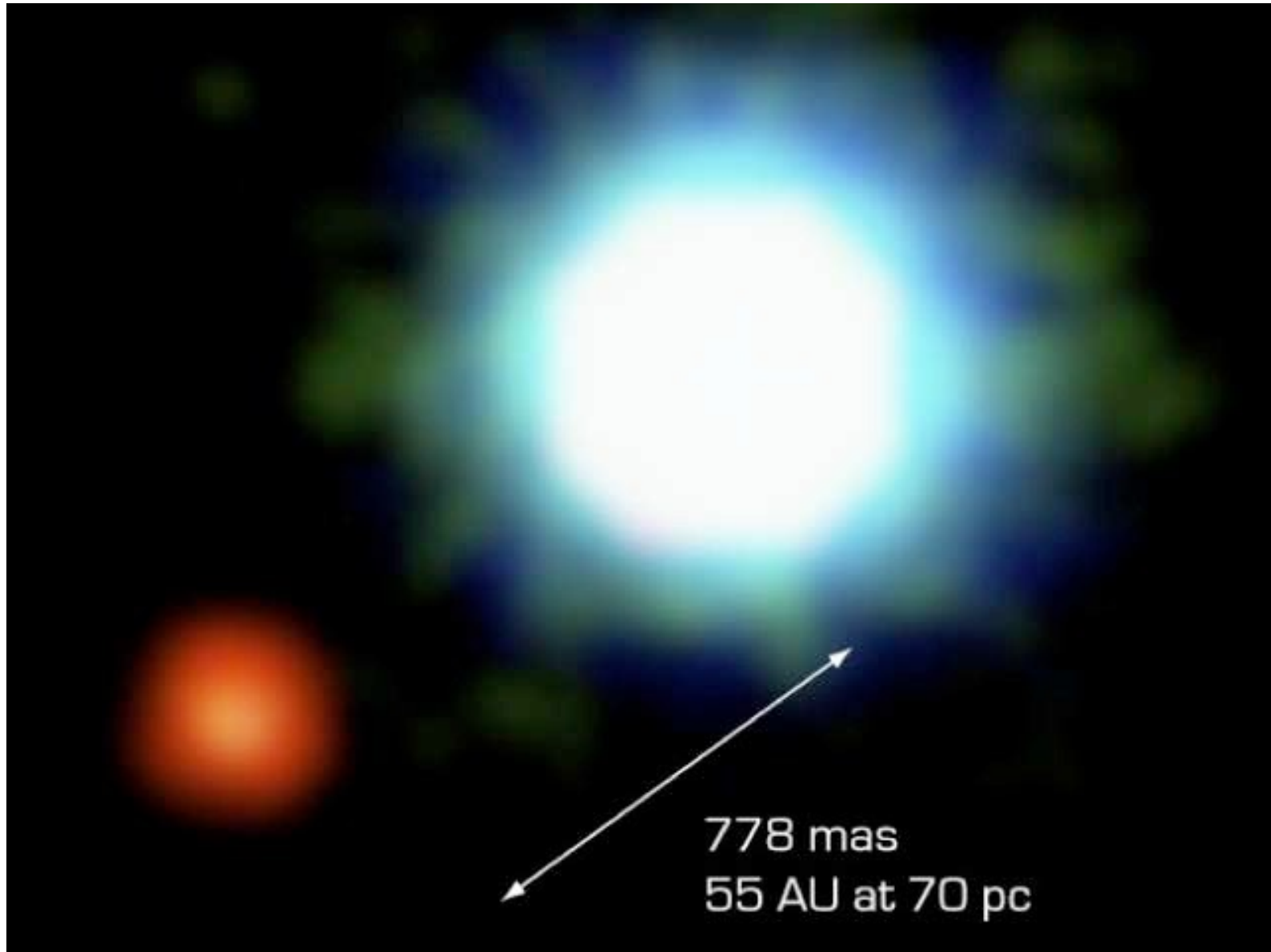
## ✦ Sistema 2M1207

- ✦ **Primeira observação direta de um planeta extra-solar**
- ✦ Objeto branco: anã marrom
- ✦ Objeto vermelho: planeta com  **$5 M_J$**
- ✦ Distância do planeta a 2M1207: 55 UA
- ✦ Distância: 70 pc



# 2M1207

Primeira observação direta de um planeta extra-solar





# Os primeiros exoplanetas encontrados

- ☑ Gliese 876 (sistema múltiplo: 5 planetas – 4 “Júpiteres”)
  - ✓ Contém o **1o. planeta extrasolar semelhante à Terra**
  - ✓ Estrela anã, tipo espectral: M
  - ✓  $T_{\text{sup}}$ :  $\sim 200^\circ \text{C}$ , Massa:  **$5,9 M_{\text{terra}}$** , Translação: 1,94 dias
  
- ☑ Distância do planeta a Gliese: 0,021 U.A (3,2 milhões de km)
  - ✓ Instrumento: Telescópio Keck
  - ✓ <http://www2.keck.hawaii.edu>

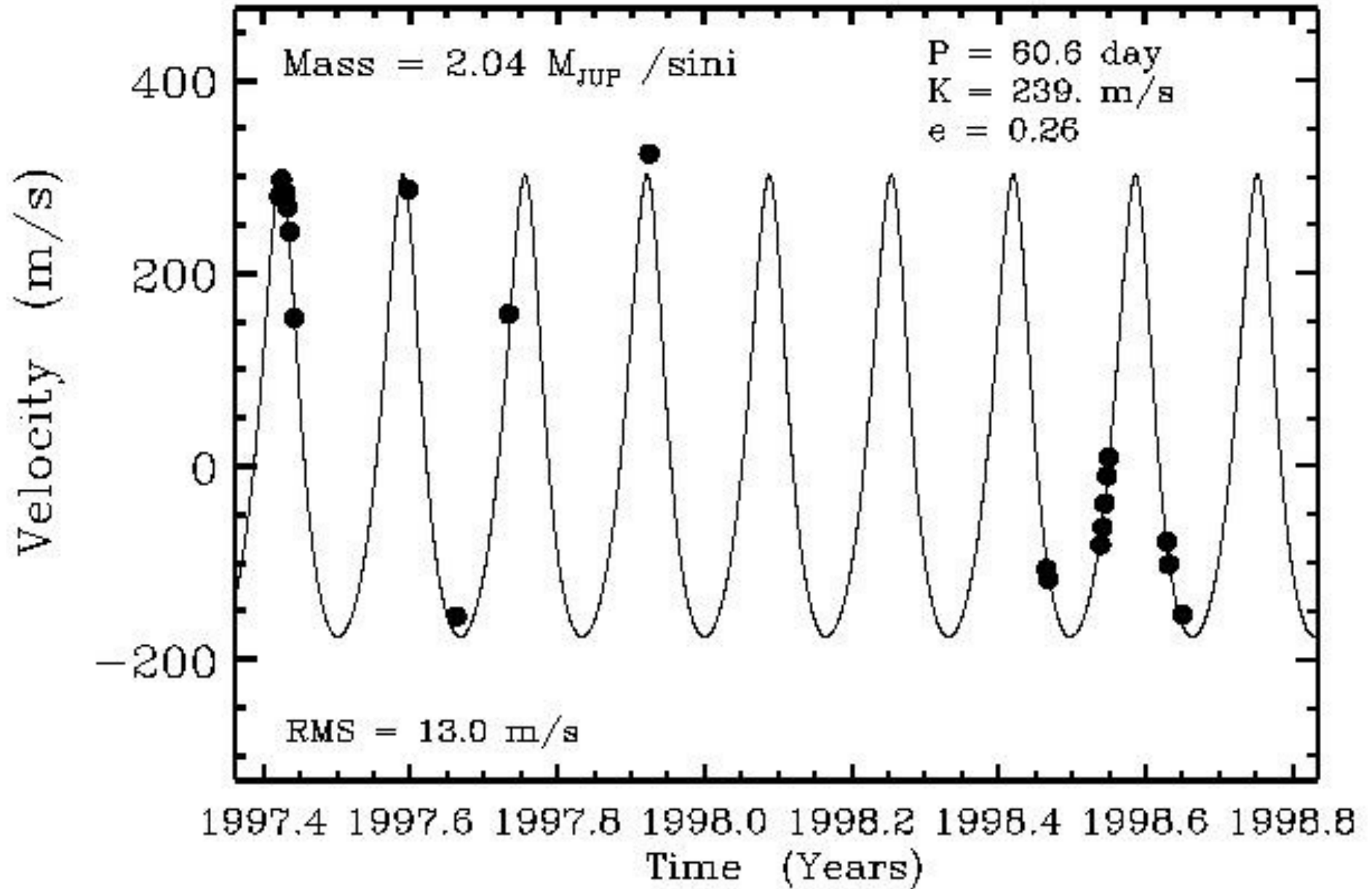


# Gliese 876d: 1o. Planeta extrasolar semelhante à Terra (2005)

- ☑ Gliese 876: estrela anã
- ☑ Tipo espectral: M
- ☑  $T_{\text{sup}}$ :  $\sim 200$  C; Massa:  $5,9 M_{\text{terra}}$ ; Translação: 1,94 dias
- ☑ Distância de Gliese: 0,021 U.A (3,2 milhões de km)
- ☑ Gliese 876: 5 planetas, sendo 4 do tipo Júpiter confirmados, dois em avaliação
- ☑ 1o. Planeta de Gliese descoberto em 1998
- ☑ Distância: cerca de 15 anos luz e visível com binóculos na constelação de Aquarius
- ☑ Observação: Telescópio Keck (<http://www2.keck.hawaii.edu>)



# Gliese 876 (M4V)



# Gliese 876

Planetas tipo Júpiter

Gliese 876c

Vista do planeta tipo terrestre a partir de uma hipotética lua de um dos planetas semelhantes a Júpiter

© 2005 Lynette Cook

Fonte: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap050614.html>





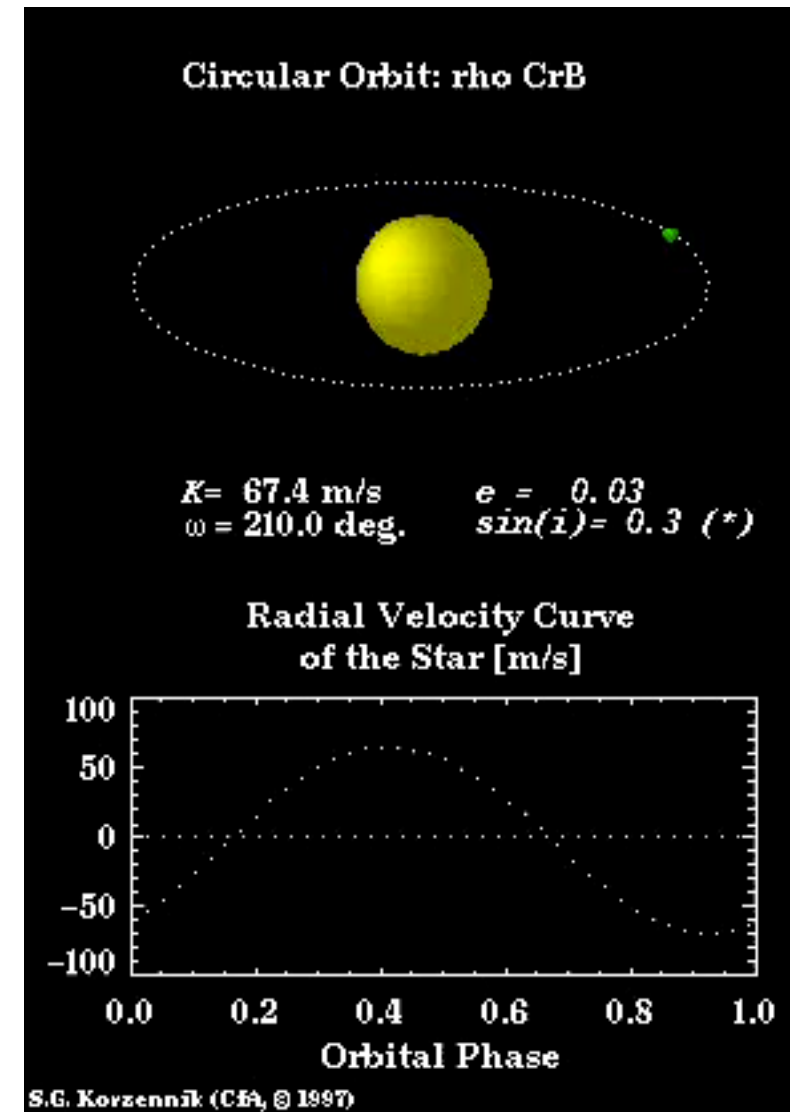
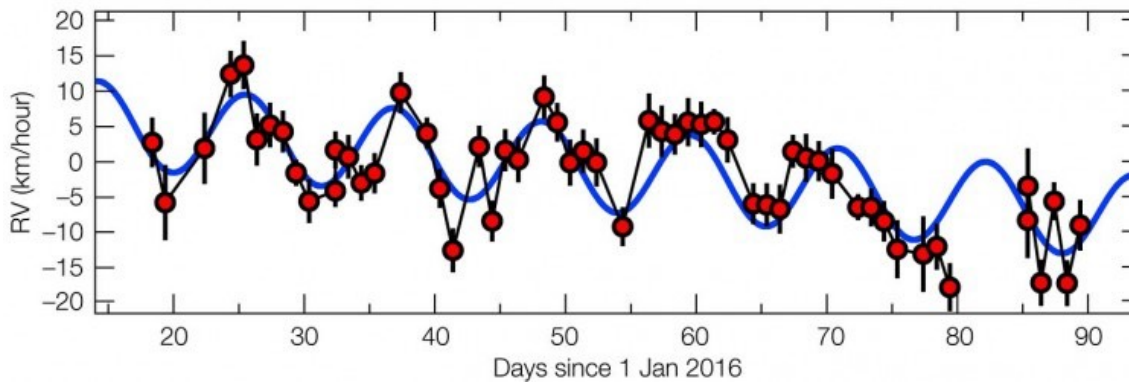
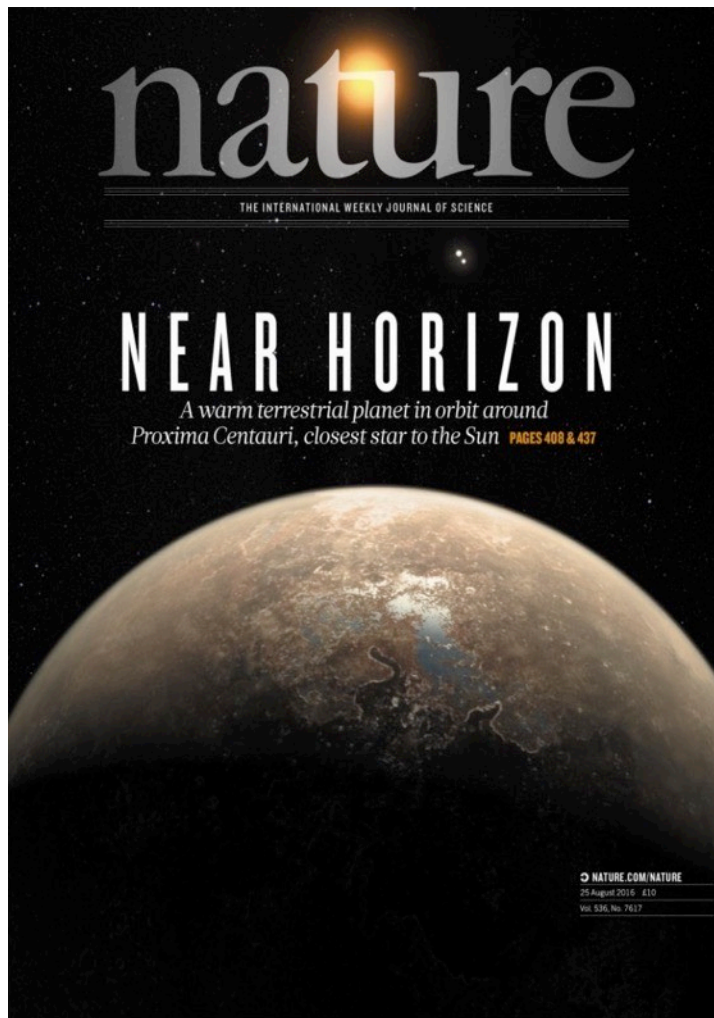
# Proxima Centauri b

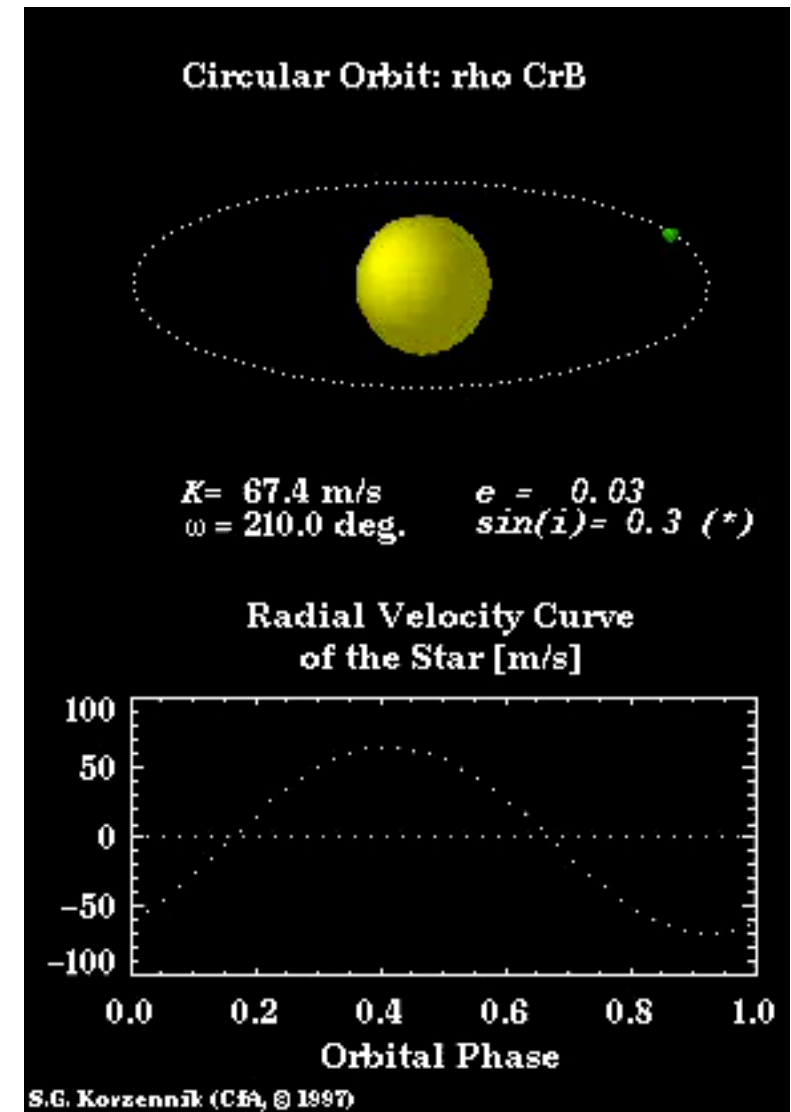
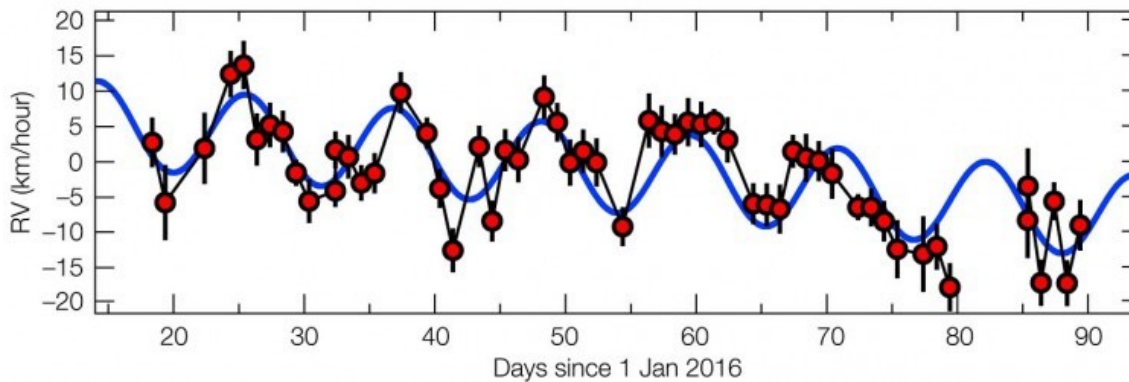
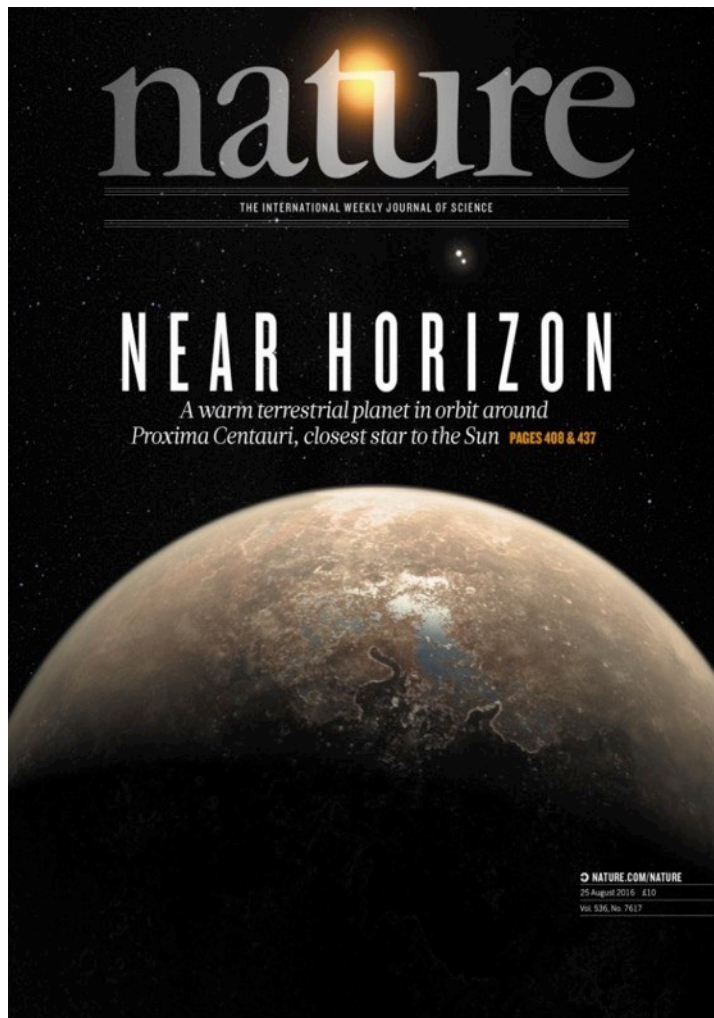
- ☑ O exoplaneta rochoso mais próximo da Terra
- ☑ Estrela Hospedeira: anã vermelha ( $0,15 M_{\text{Sol}}$ )
- ☑ Período anual: 11,2 dias
- ☑ Massa:  $1,3 M_{\text{T}}$
- ☑ Distância: 4,2 anos luz
- ☑ Distância à estrela: 7,5 milhões de km
- ☑ G. Anglada-Escudé et al. Nature (2016)



Créditos: ESO

Carlos Alexandre Wuensche (2019)

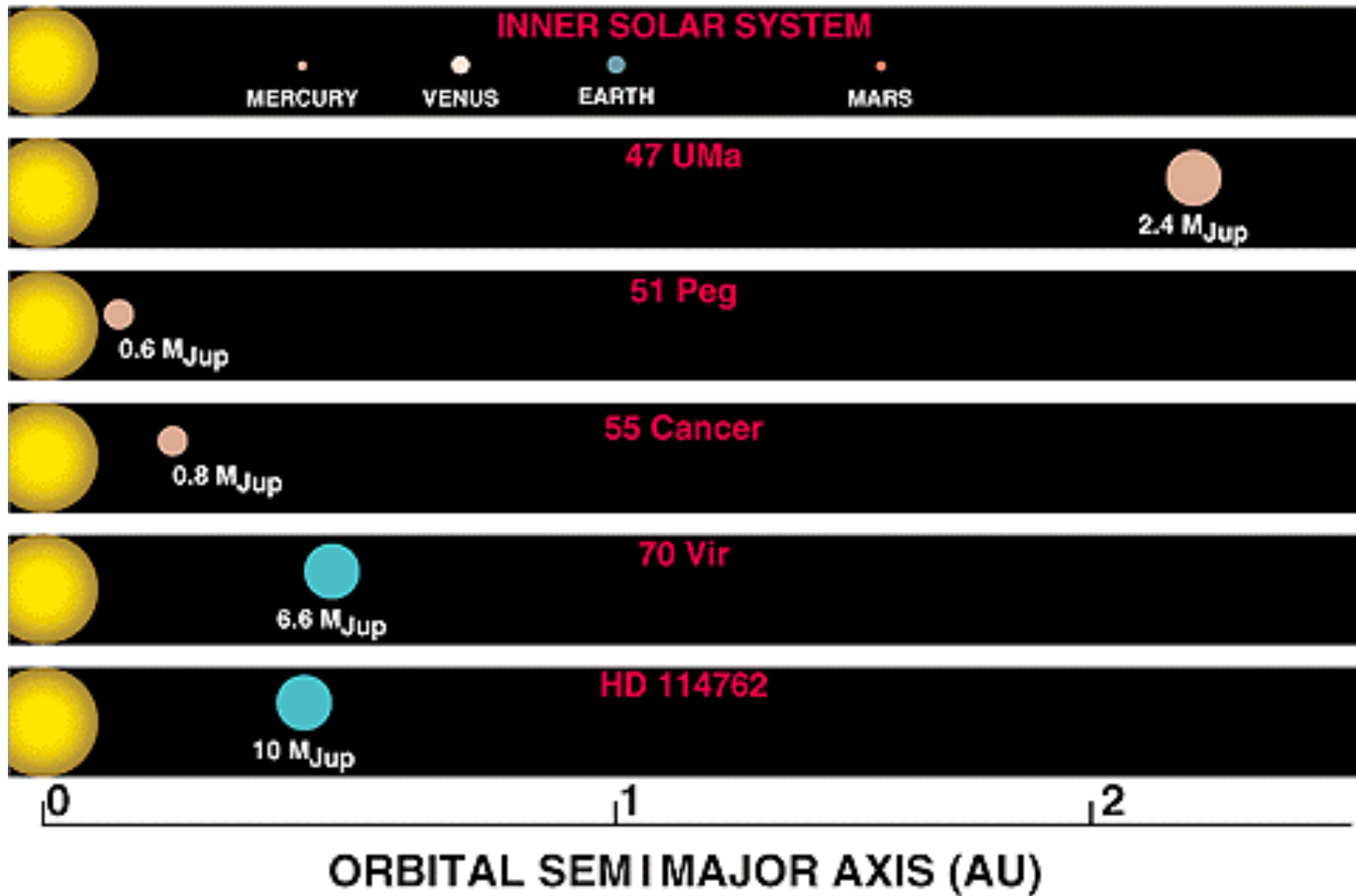






# UM HISTÓRICO DAS DESCOBERTAS DE PLANETAS EXTRA-SOLARES

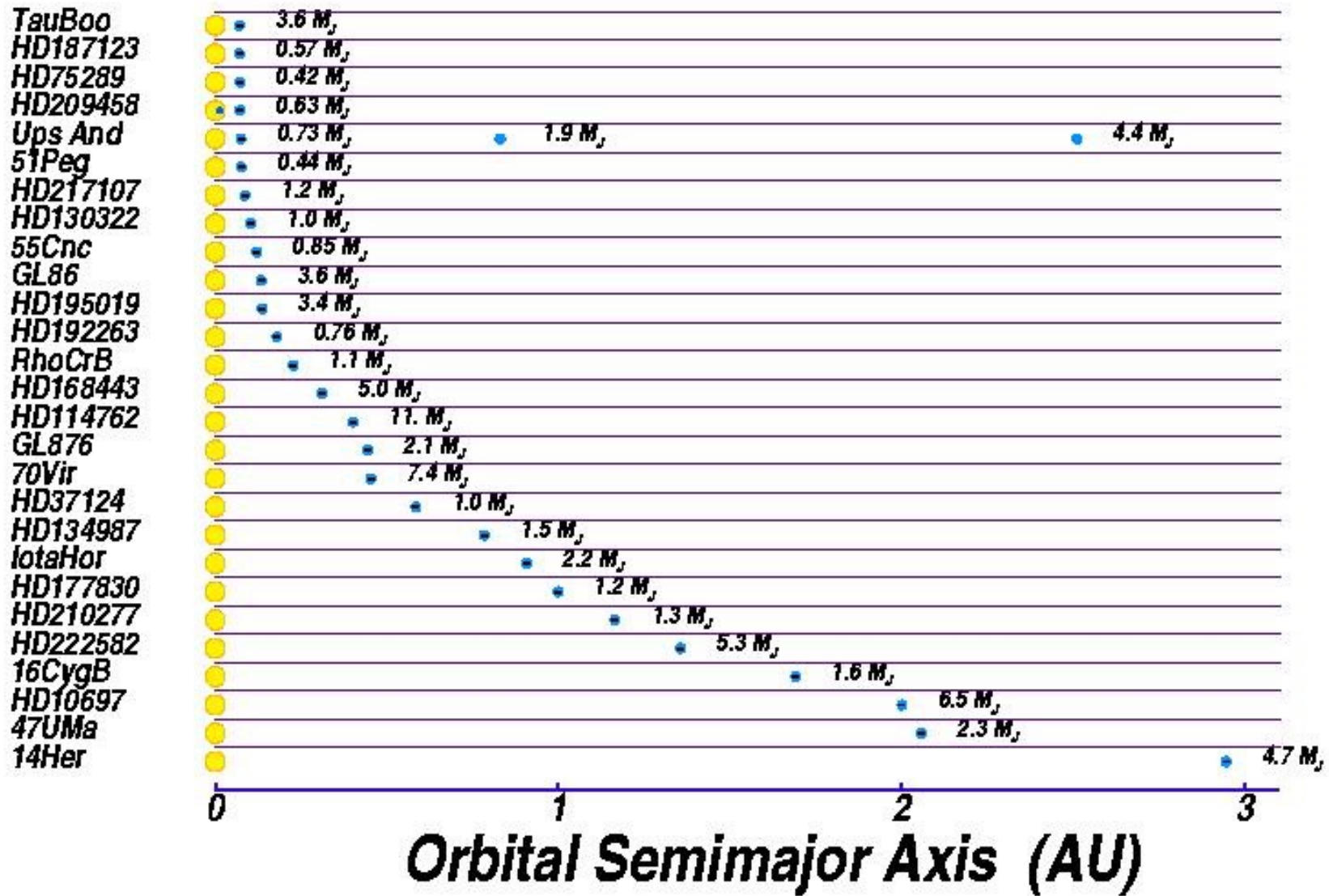
# 1995 - 1997



Fonte: [http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/multi\\_panel.jpg](http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/multi_panel.jpg)



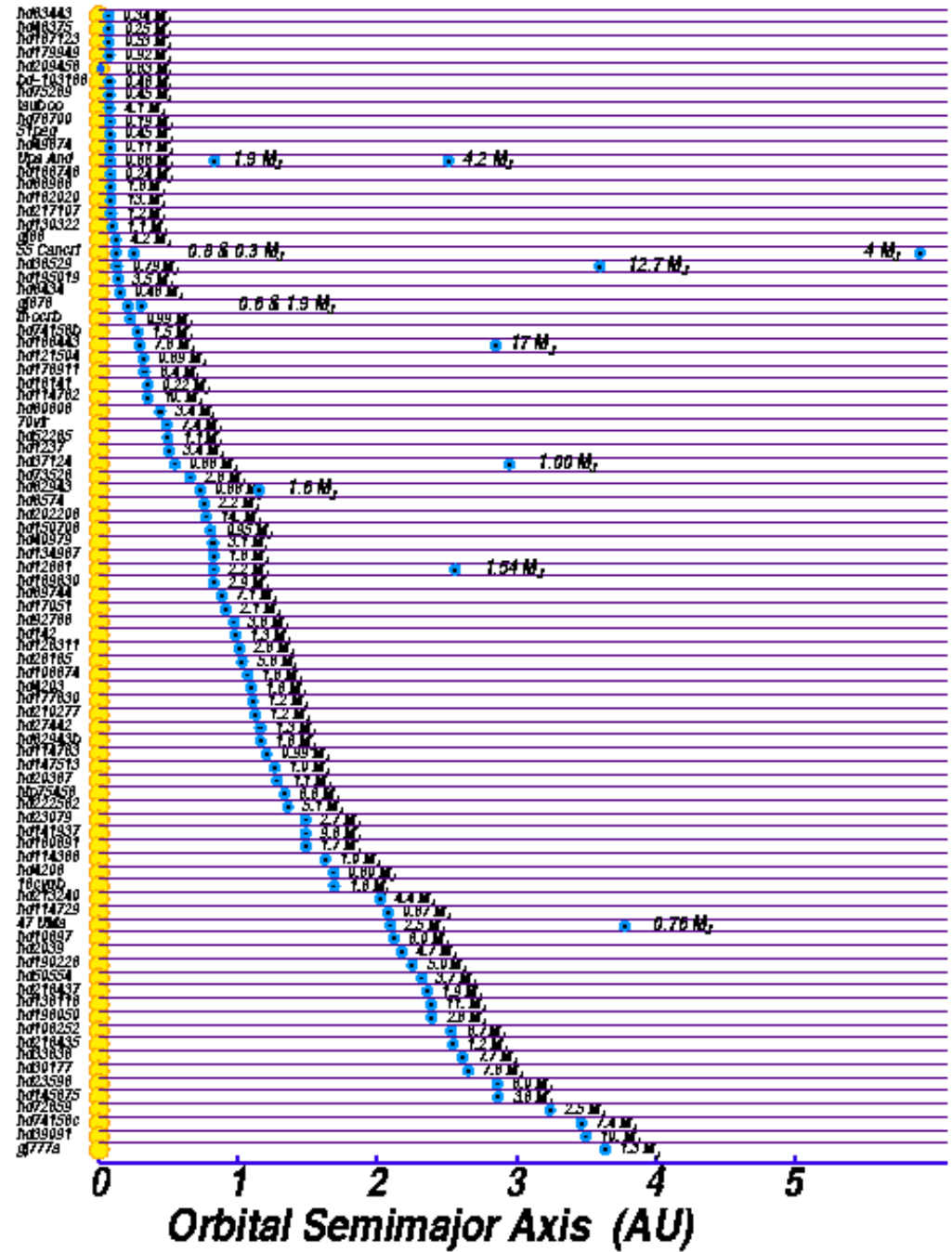
# Por volta de 1999



[http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/multi\\_panel.jpg](http://cannon.sfsu.edu/~gmarcy/planetsearch/multi_panel.jpg)



# Por volta de 2000 - 2001



Fonte: <http://exoplanets.org/>



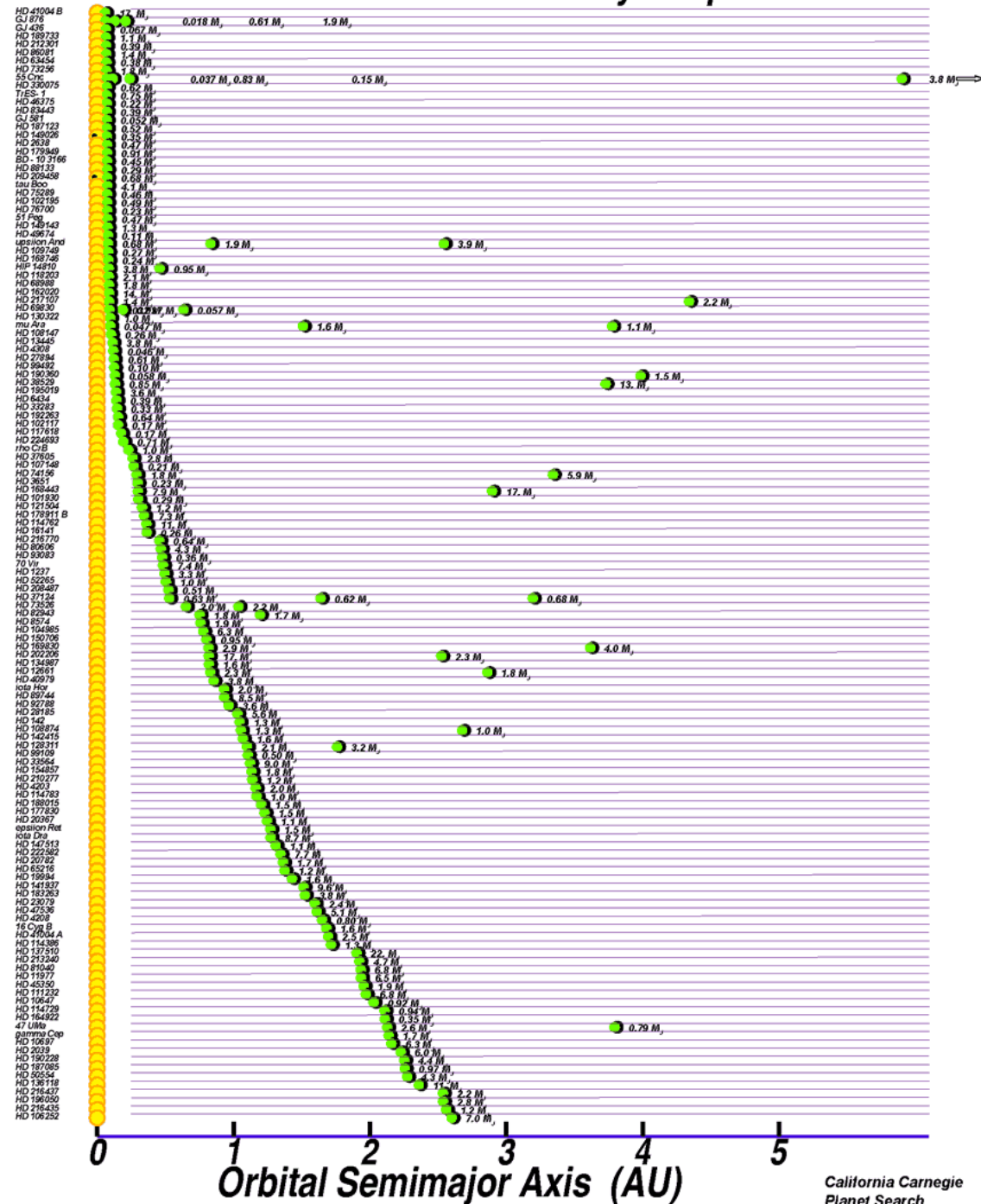


# Por volta de 2002

178 planetas conhecidos até 2002

Distância máxima: 200 pc

## The 178 Known Nearby Exoplanets





<http://exoplanet.eu/catalog.php>



<http://exoplanet.eu/catalog.php>

**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados

151 sistemas planetários

19 sistemas com múltiplos planetas



<http://exoplanet.eu/catalog.php>

**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados

151 sistemas planetários

19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados

388 sistemas planetários

45 sistemas com múltiplos planetas



**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados

151 sistemas planetários

19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados

388 sistemas planetários

45 sistemas com múltiplos planetas

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados

1160 sistemas planetários

471 sistemas com múltiplos planetas



**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados

151 sistemas planetários

19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados

388 sistemas planetários

45 sistemas com múltiplos planetas

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados

1160 sistemas planetários

471 sistemas com múltiplos planetas

**Em 12/03/2015**

1894 planetas confirmados

1192 sistemas planetários

478 sistemas com múltiplos planetas



**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados  
151 sistemas planetários  
19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados  
388 sistemas planetários  
45 sistemas com múltiplos planetas

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados  
1160 sistemas planetários  
471 sistemas com múltiplos planetas

**Em 12/03/2015**

1894 planetas confirmados  
1192 sistemas planetários  
478 sistemas com múltiplos planetas

**Em 08/12/2016**

3545 planetas confirmados  
2660 sistemas planetários  
597 sistemas com múltiplos planetas



**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados  
151 sistemas planetários  
19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados  
388 sistemas planetários  
~~45 sistemas com múltiplos planetas~~

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados  
1160 sistemas planetários  
471 sistemas com múltiplos planetas

**Em 12/03/2015**

1894 planetas confirmados  
1192 sistemas planetários  
478 sistemas com múltiplos planetas

**Em 08/12/2016**

3545 planetas confirmados  
2660 sistemas planetários  
~~597 sistemas com múltiplos planetas~~

**Em 23/01/2019**

3971 planetas confirmados  
2967 sistemas planetários  
652 sistemas com múltiplos planetas





**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados  
151 sistemas planetários  
19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados  
388 sistemas planetários  
45 sistemas com múltiplos planetas

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados  
1160 sistemas planetários  
471 sistemas com múltiplos planetas

**Em 12/03/2015**

1894 planetas confirmados  
1192 sistemas planetários  
478 sistemas com múltiplos planetas

**Em 08/12/2016**

3545 planetas confirmados  
2660 sistemas planetários  
~~597 sistemas com múltiplos planetas~~

**Em 23/01/2019**

3971 planetas confirmados  
2967 sistemas planetários

**Em 19/05/2019**

4069 planetas confirmados  
3041 sistemas planetários  
659 sistemas com múltiplos planetas



**Em 25/07/2006**

185 planetas confirmados  
151 sistemas planetários  
19 sistemas com múltiplos planetas

**Em 30/09/2010**

492 planetas confirmados  
388 sistemas planetários  
45 sistemas com múltiplos planetas

**Em 15/11/2014**

1849 planetas confirmados  
1160 sistemas planetários  
471 sistemas com múltiplos planetas

**Em 12/03/2015**

1894 planetas confirmados  
1192 sistemas planetários  
478 sistemas com múltiplos planetas

**Em 08/12/2016**

3545 planetas confirmados  
2660 sistemas planetários  
~~597 sistemas com múltiplos planetas~~

**Em 23/01/2019**

3971 planetas confirmados  
2967 sistemas planetários

**Em 19/05/2019**

4069 planetas confirmados  
3041 sistemas planetários  
659 sistemas com múltiplos planetas

**Em 27/05/2019**

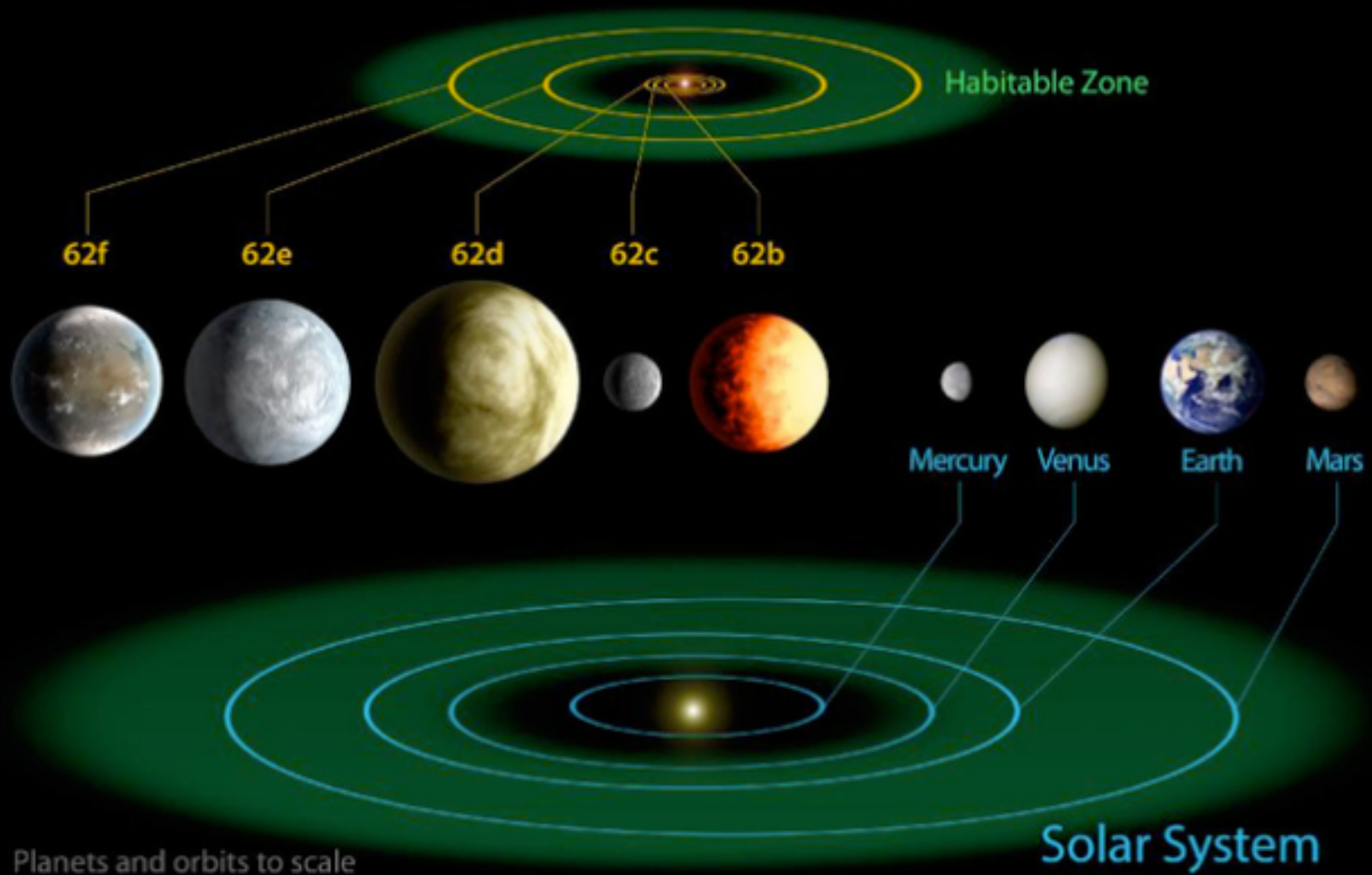
2486 dias desde o pouso da Curiosity

**10000 dias desde a descoberta  
do primeiro exoplaneta!!!**

# Uma comparação rápida

## Kepler-62 System

Borucki et al. Science, 340, 6132, pp. 587-590 (3 May 2013)



Planets and orbits to scale

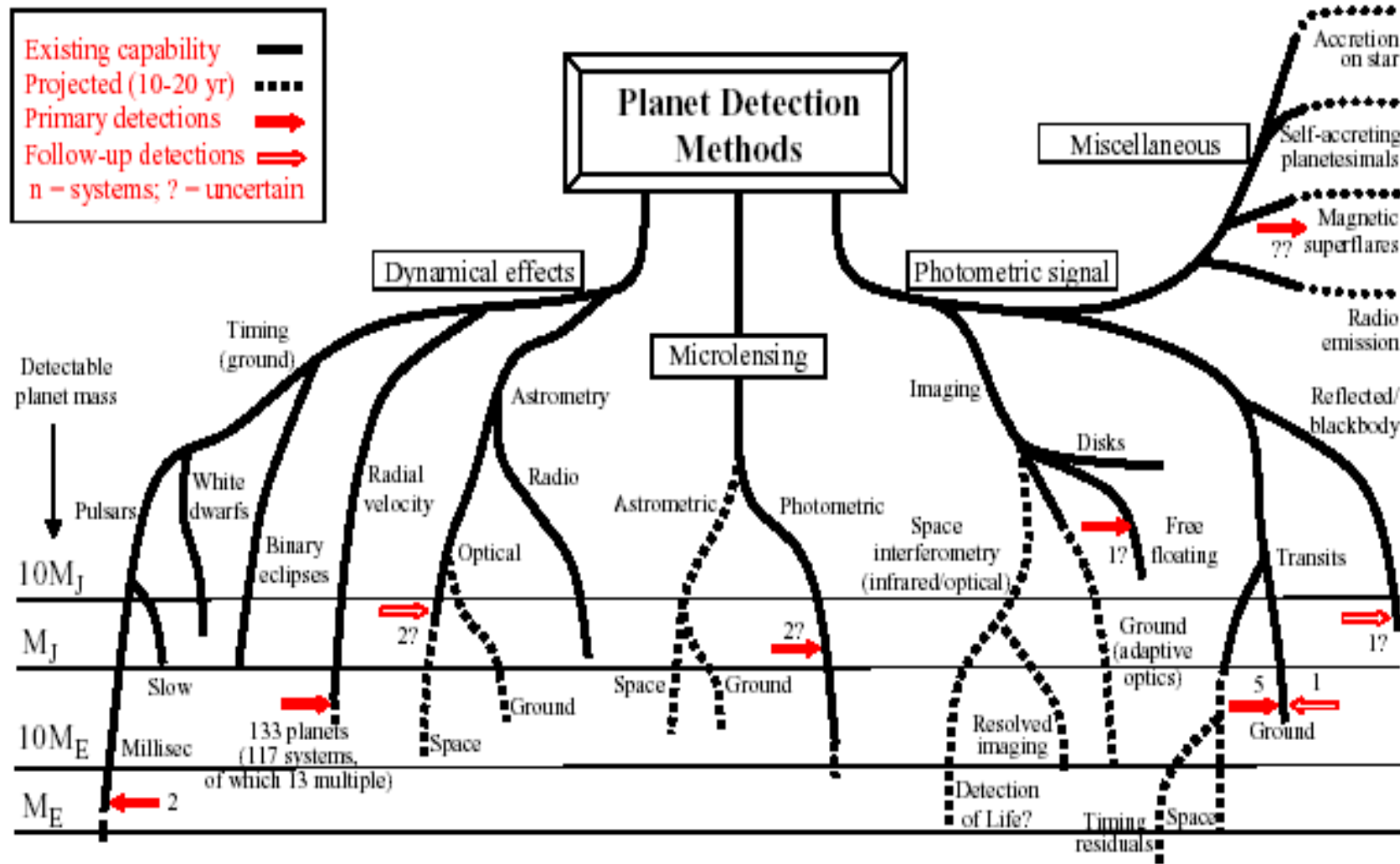
Solar System

EXPAND



Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated November 2004)

[corrections or suggestions please to michael.perryman@esa.int]



<https://exoplanets.nasa.gov/interactable/11/>



November 2013  
 1030 exoplanets  
 (784 systems, 170 multiple)  
 (numbers from exoplanet.eu)

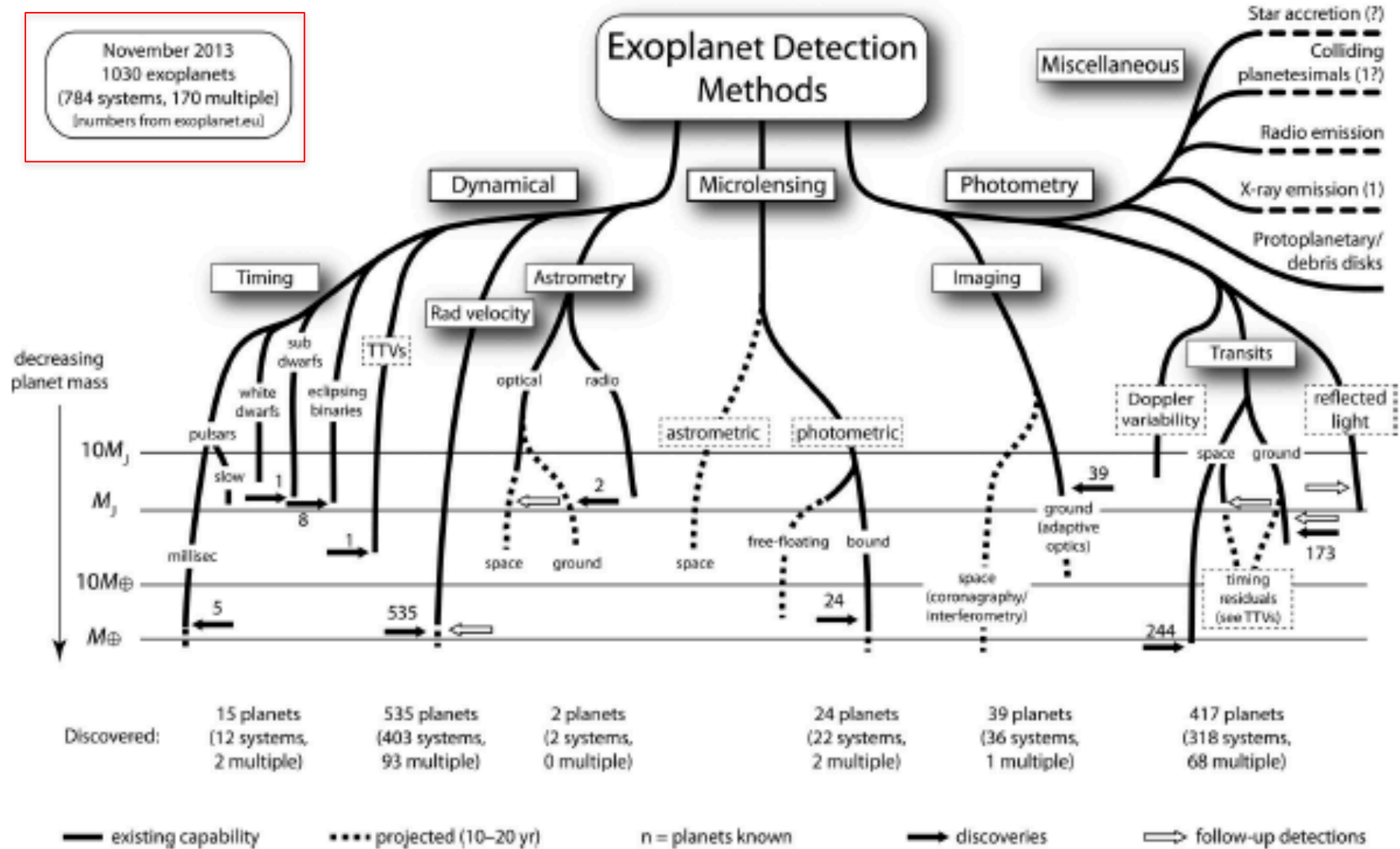


Fig. 1. Detection methods for exoplanets. The lower limits of the lines indicate masses that are detectable by present measurements (solid lines), and those that might be expected within the next 10 years (dashed). The (logarithmic) mass scale is shown at left. The miscellaneous signatures to the upper right are less well quantified in mass terms. Solid arrows indicate detections according to approximate mass. Open arrows indicate that relevant measurements of previously-detected systems have been made. The figure takes no account of the numbers of planets that may ultimately be detectable by each method.

M. Perryman, Resource Letter Exo-1: Exoplanets, Am. J. of Phys., 82, 552 (2014)



# Detecção X Caracterização

- ☑ Detecção (COROT e Kepler)
  - ✓ Detectar presença de exoplaneta em torno de uma estrela
  - ✓ Determinar massa para distinguir das anãs marrons
  - ✓ Determinar órbita em torno da estrela
  
- ☑ Caracterização (Hubble, MOST, Spitzer e Kepler)
  - ✓ Determinar raio
  - ✓ Determinar propriedades da superfície
  - ✓ Determinar propriedades da atmosfera



# Quais parâmetros físicos são determinados?

## ☑ Velocidade radial (oscilação):

- ✓ Período
- ✓ semi-eixo maior
- ✓ Excentricidade
- ✓ limite inferior para massa

## ☑ Trânsitos (ocultação):

- ✓ Período
- ✓ semi-eixo maior
- ✓ Inclinação
- ✓ Raio
- ✓ temperatura do planeta
- ✓ atmosfera do planeta

C. U. Keller, *Astronomical Data Analysis* (2011)



# Cinco maneiras de caracterizar um planeta extra-solar (em 2019)

1. Velocidade radial (oscilação)
2. Obscurecimento da luz da estrela (trânsito)
3. Amplificação da luz de uma fonte (microlenteamento gravitacional)
4. Movimento em relação a estrelas vizinhas (astrometria)
5. Visualização direta (obscurecimento da estrela central)

<https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/>





# 1 - Velocidade Radial

- ☑ Ambos (estrela e planeta) giram em torno do centro de massa do sistema.
- ☑ O desvio Doppler da luz emitida pela estrela será maior quanto maior a massa do planeta ou menor a distância entre o planeta e a estrela.

$$K = \frac{2\pi G^{1/3}}{P_{orb}} \frac{M_P \sin(i)}{(M_* + M_P)^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}}$$

- $P_{orb}$  - período orbital
- $G$  - constante gravitacional
- $i$  - inclinação da órbita

- $e$  - excentricidade da órbita
- $M_p$  - massa do planeta
- $M_*$  - massa da estrela



# 1 - Velocidade Radial

- ☑ Para órbitas aprox. circulares e  $M_p \ll M_*$ , temos:

$$v_{obs} = 28,4 \frac{M + P \sin(i)}{P_{orb}^{1/3} M_*^{2/3}}$$

- $P_{orb}$  - período orbital em anos
- $M_p$  - em massas de Júpiter
- $M_*$  - em massas solares

- Júpiter - 12,4 m/s
- Saturno - 2,8 m/s
- Terra - 9 cm/s
- Estrelas massivas reduzem o sinal
- Estrelas de baixa massa aumentam o sinal



# 1 - Velocidade Radial



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# 1 - Velocidade Radial



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



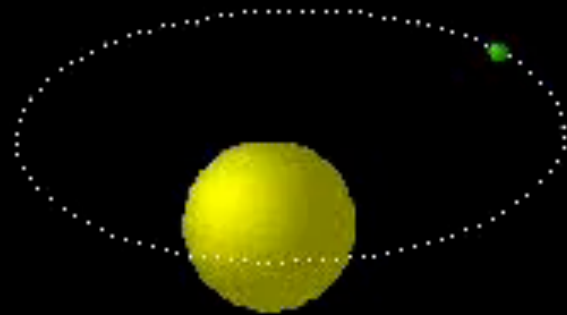
# 1 - Velocidade Radial



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

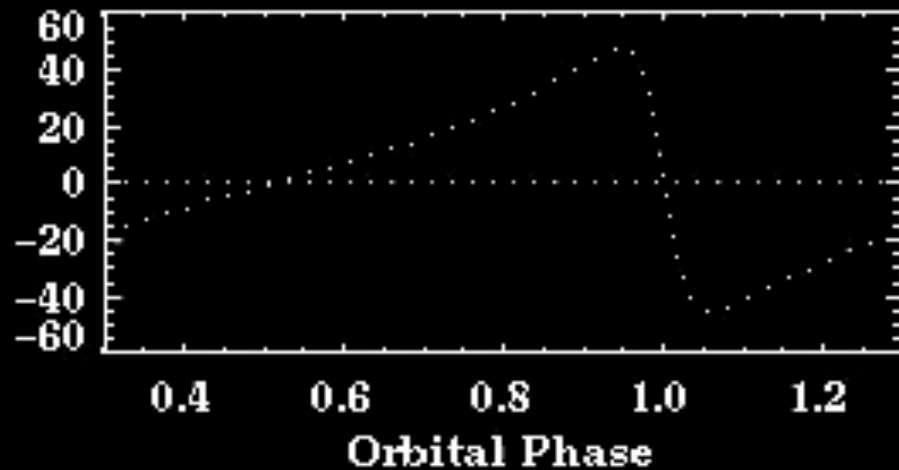
# 1 - Velocidade radial

Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



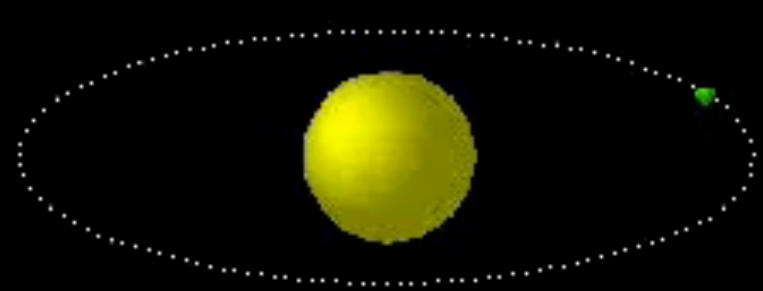
$K = 46.6 \text{ m/s}$        $e = 0.67$   
 $\omega = 86.8 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]



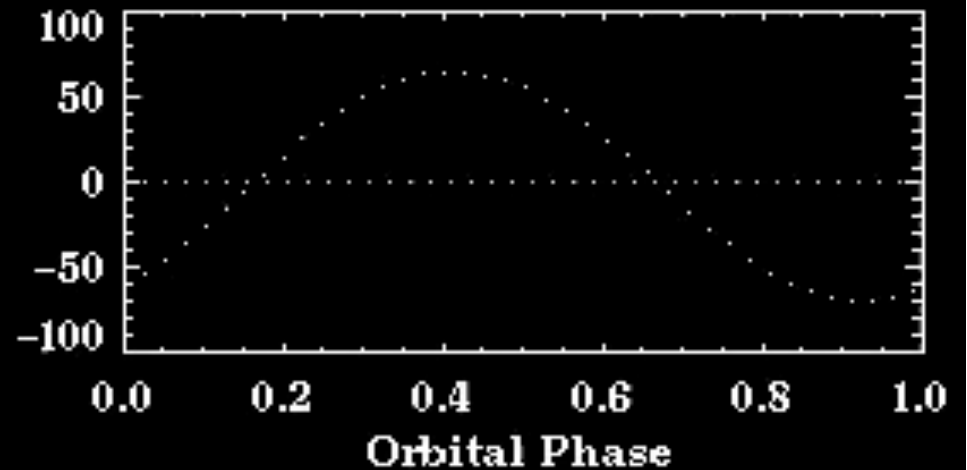
S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$        $e = 0.03$   
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

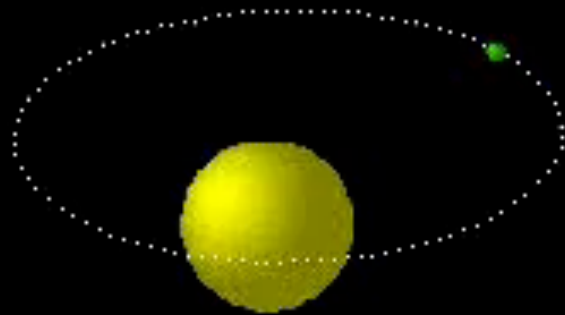
Radial Velocity Curve  
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

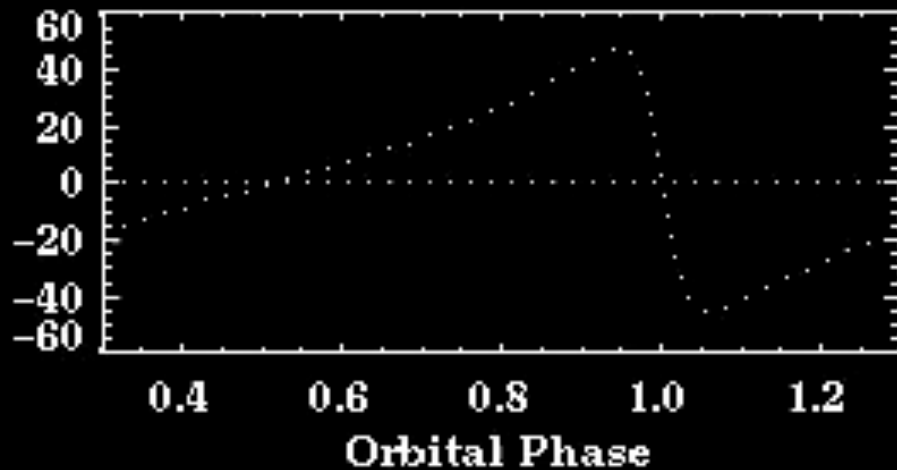
# 1 - Velocidade radial

Highly Eccentric Orbit: 16 Cyg B



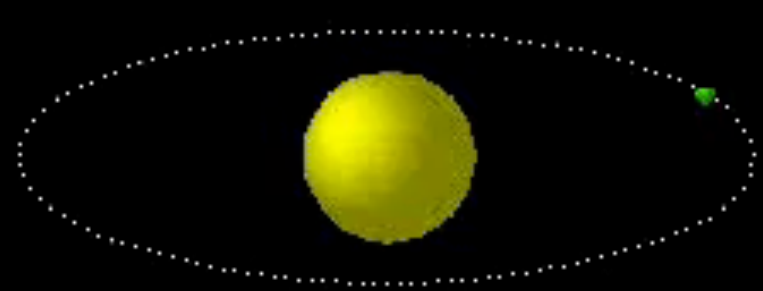
$K = 46.6 \text{ m/s}$        $e = 0.67$   
 $\omega = 86.8 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve of the Star [m/s]



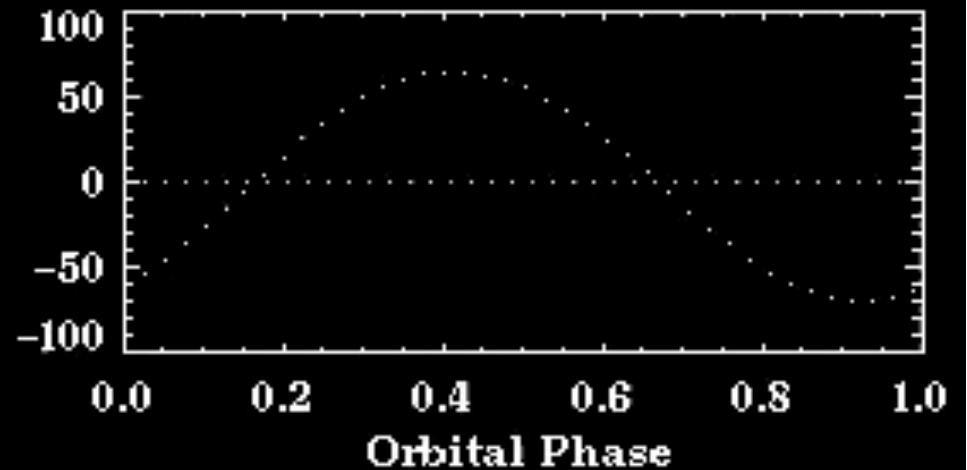
S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$        $e = 0.03$   
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$        $\sin(i) = 0.3 (*)$

Radial Velocity Curve of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)



# Velocidade radial: problemas

- ☑ Correção para o movimento orbital da terra (até 30 km/s) e rotação da terra (0,5 km/s)
- ☑ Análise do período orbital
- ☑ Apenas bom para estrelas legais como o Sol
- ☑ Estrelas quentes (O, B, A) não possuem linhas espectrais
- ☑ Rotação estelar, manchas estelares, oscilações, convecção impactam a amplitude do sinal Doppler
- ☑ Estatística
  - ✓ Efeitos de seleção: alguns aspectos das distribuições observadas são inconsistentes com a população real de exoplanetas
  - ✓ dependem da abordagem de detecção de exoplanetas
  - ✓ a massa é principalmente um limite inferior para a massa real





## 2 - Trânsito

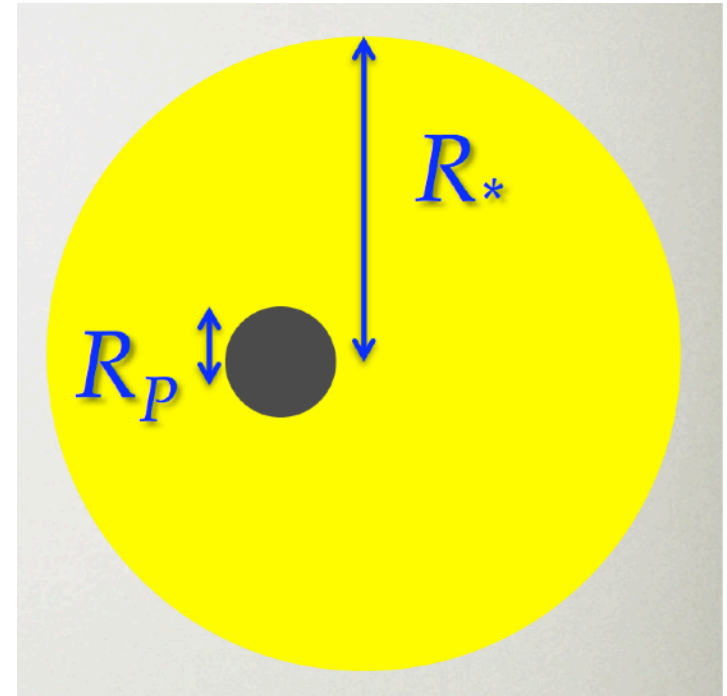
- ☑ Órbitas praticamente perpendiculares ao plano do céu ( $i=90^\circ$ ).
- ☑ Obtém-se a massa do planeta por velocidade radial e o raio do planeta pelo trânsito.
- ☑ Telescópios no solo conseguem detectar apenas planetas grandes, para planetas telúricos é necessário observar com satélites.
- ☑ Possível de detectar com pequenos telescópios (< 1 m diâmetro)
- ☑ Variações no tempo de trânsito podem revelar outro planeta escondido

## 2 - Trânsito

- ☑ Intensidade do sinal

$$\frac{\Delta I}{I} = \left(\frac{R_P}{R_*}\right)^2$$

- ✓ Raio da estrela  $R_*$
  - ✓ raio do planeta  $R_p$
- ☑ Cerca de 1% para Júpiter e Sol
  - ☑ Duração do trânsito proporcional a  $P_{\text{orb}}^{1/3} (R_*/M_*)^{1/3}$
  - ☑ Duração do trânsito permite também estimativa de  $R_*$
  - ☑ Mudança de intensidade fornece raio do planeta





# Trânsito - 1 planeta





# Trânsito - 1 planeta





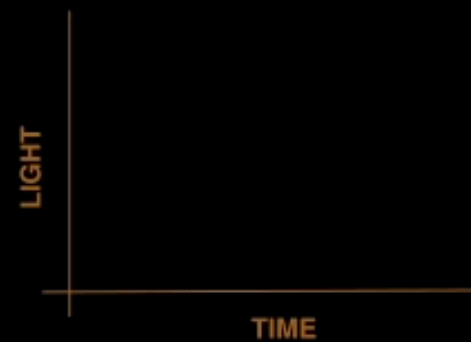
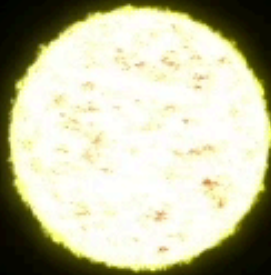
# Trânsito - 1 planeta





# Trânsito - 2 planetas

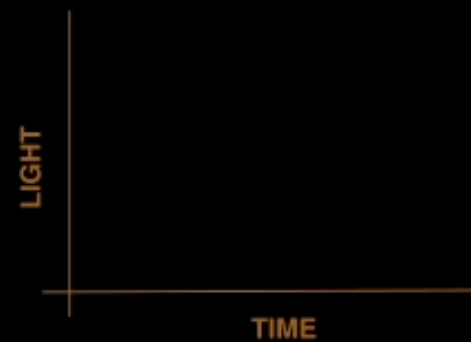
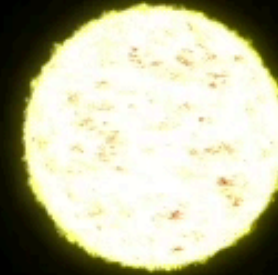
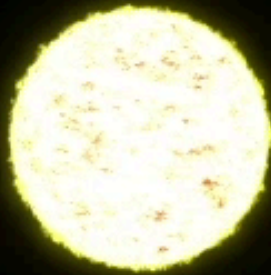
PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH





# Trânsito - 2 planetas

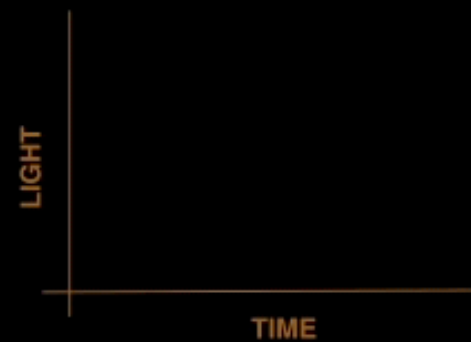
PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH





# Trânsito - 2 planetas

PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH







# Trânsito - vários planetas



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# Trânsito - vários planetas



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# Trânsito - vários planetas

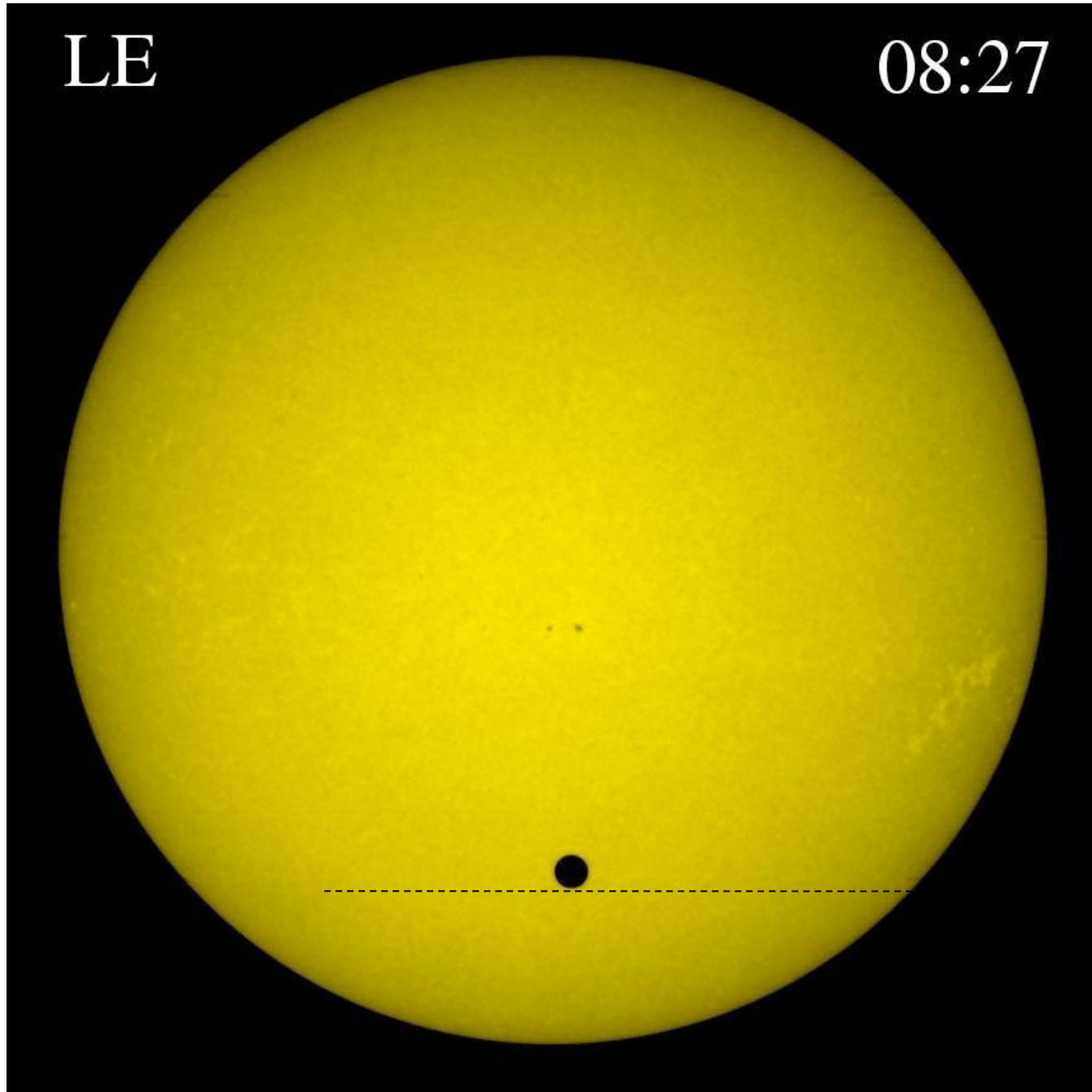


PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# Trânsito: observáveis derivados

- ☑ Período
- ☑ Inclinação da órbita ( $i \approx 90^\circ$ )
- ☑ Raio do planeta
- ☑ Temperatura do planeta a partir do eclipse secundário
- ☑ Escurecimento do limbo da estrela
- ☑ Bom para grandes planetas próximos à estrela

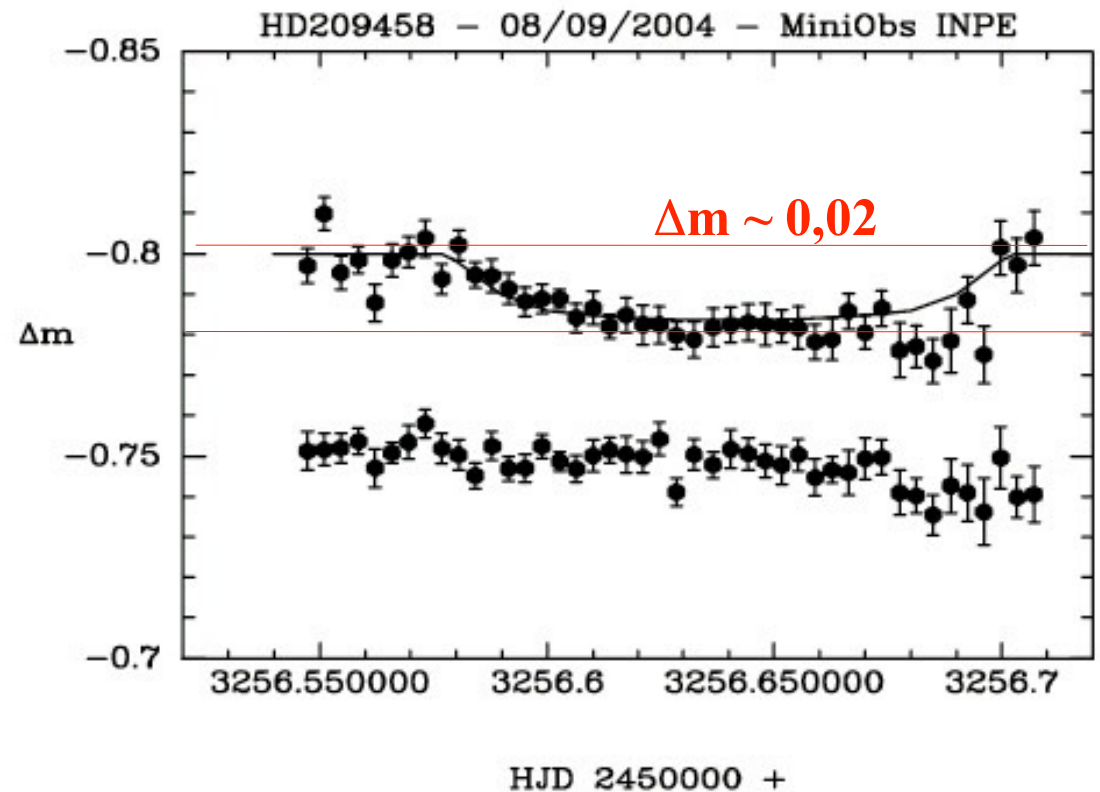




# Trânsito do planeta extrasolar HD209458

Observação do trânsito de HD209458, usando o telescópio de 28 cm do Miniobservatório do INPE (Eder Martioli e Julio Tello)

- ✓ Duração: 2h30
- ✓ Método: fotometria diferencial
- ✓ Variação na intensidade: < 2%
- ✓ Data: 07-08/09/2004
- ✓ Período: 3,5 dias

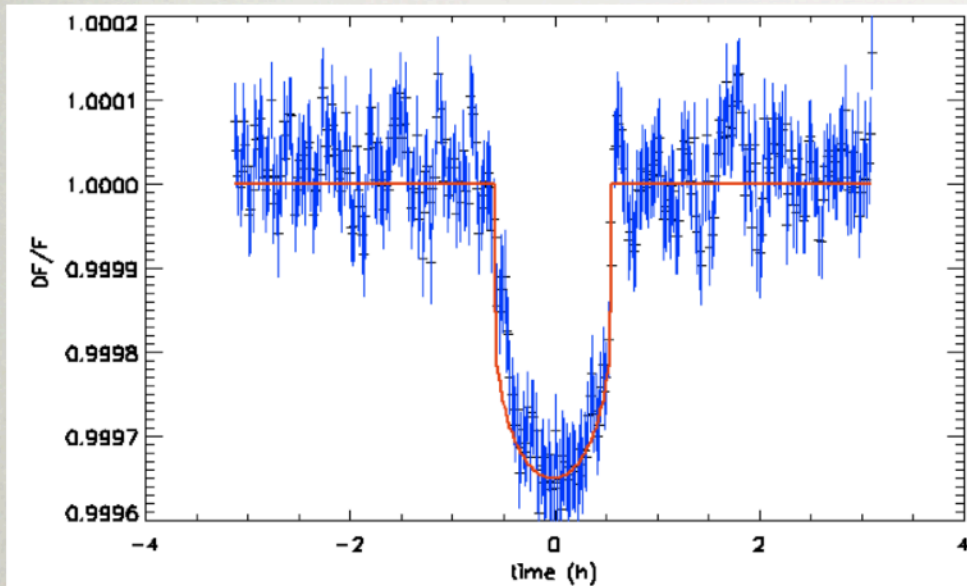


<http://www.das.inpe.br/miniobservatorio/projetos/transito.htm>

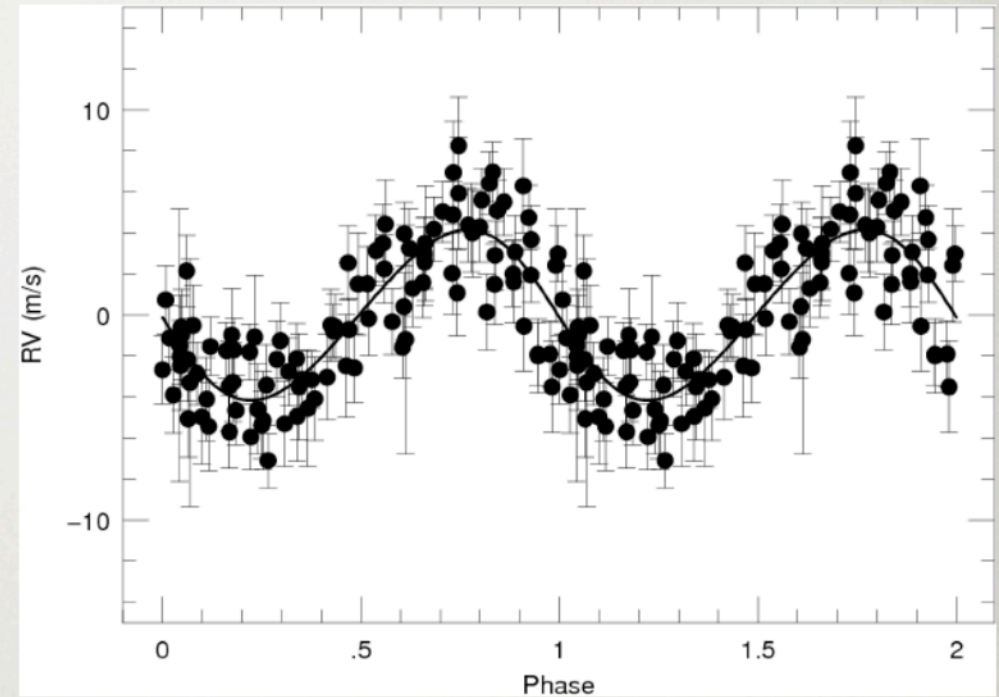


# Primeira detecção de planeta do tipo terrestre

CoRoT (Leger et al. 2009)



HARPS (Queloz et al. 2009)

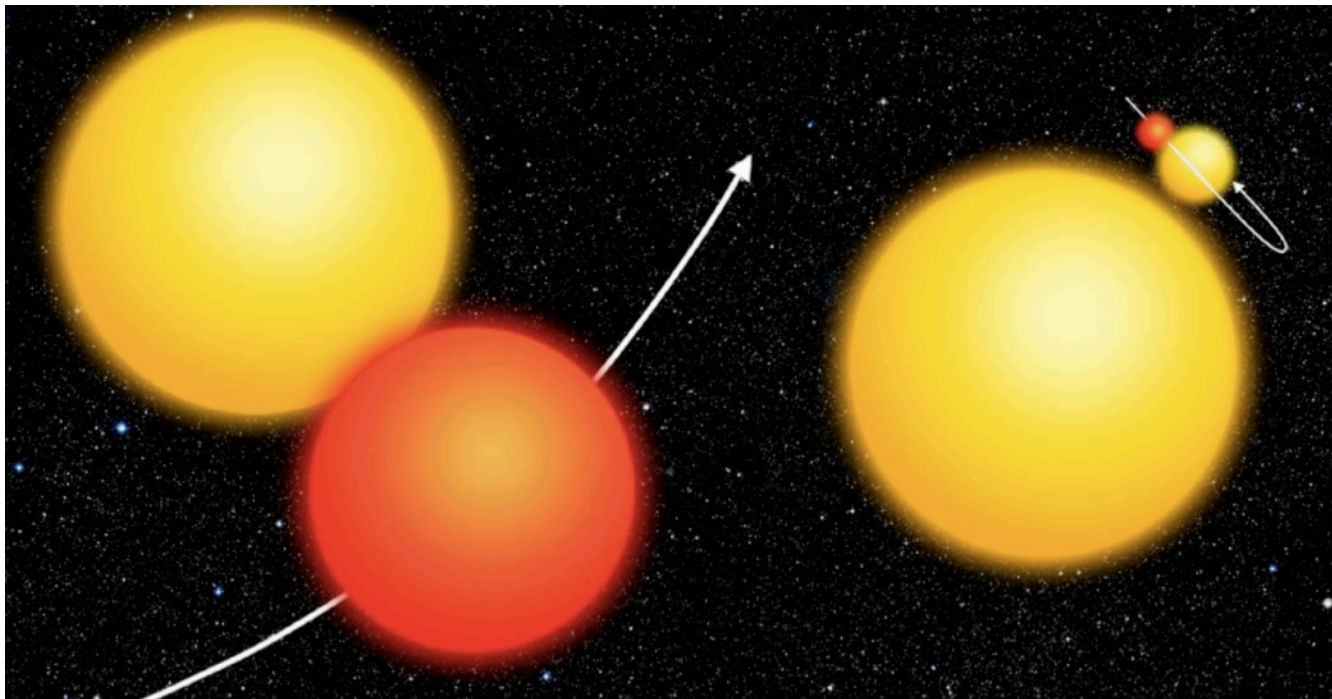


Massa: 4,8  $M_{\text{Terra}}$

Densidade: 5,6  $\text{g/cm}^3$

# Trânsito: problemas

- ☑ Baixa probabilidade, mas simples observação
- ☑ Muitos falsos positivos:
  - ✓ Eclipse tangencial da estrela da sequência principal
  - ✓ Binárias eclipsante (gigante e sequência principal)
  - ✓ Eclipsando binária próxima (foreground ou background)

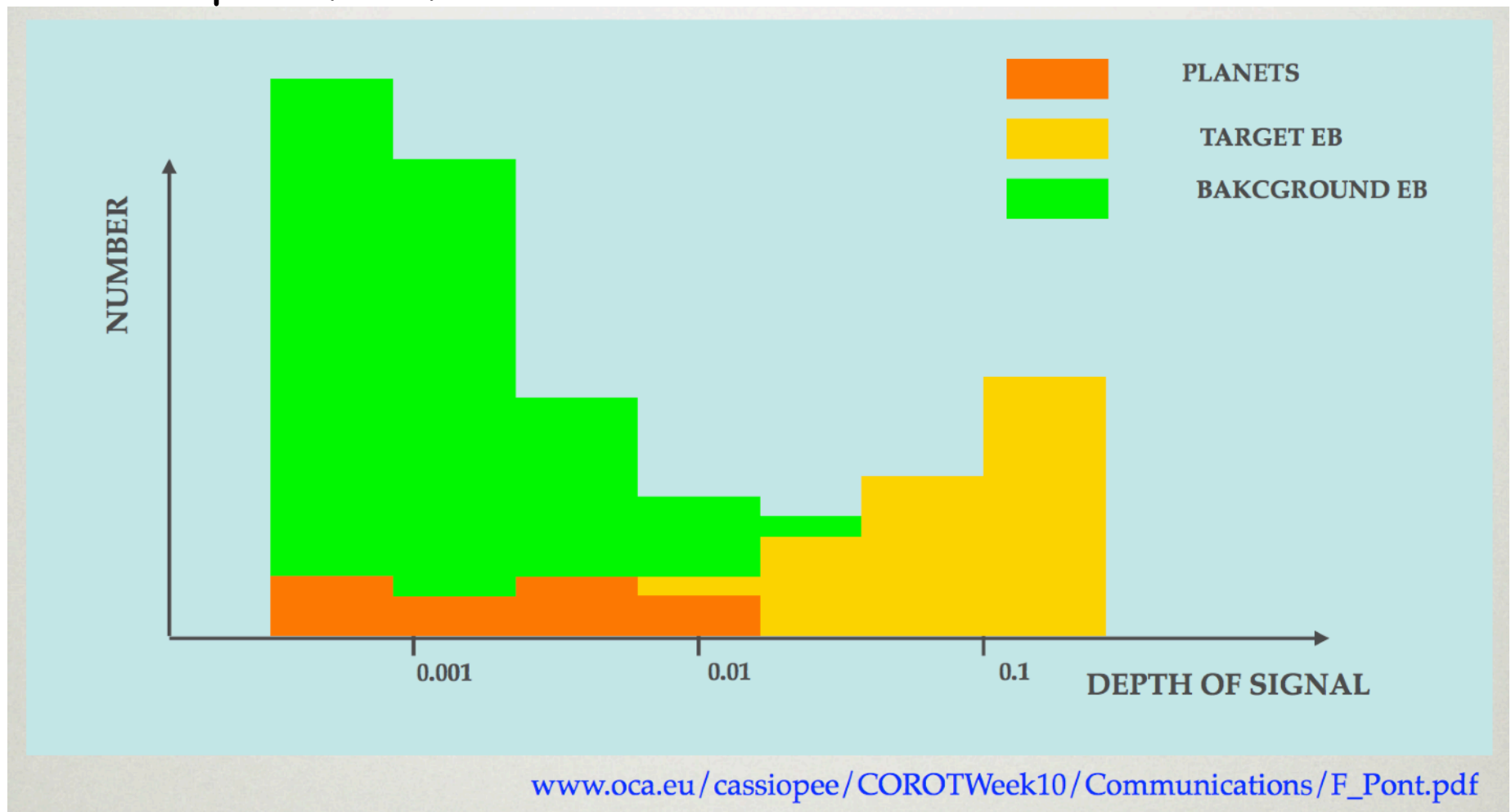






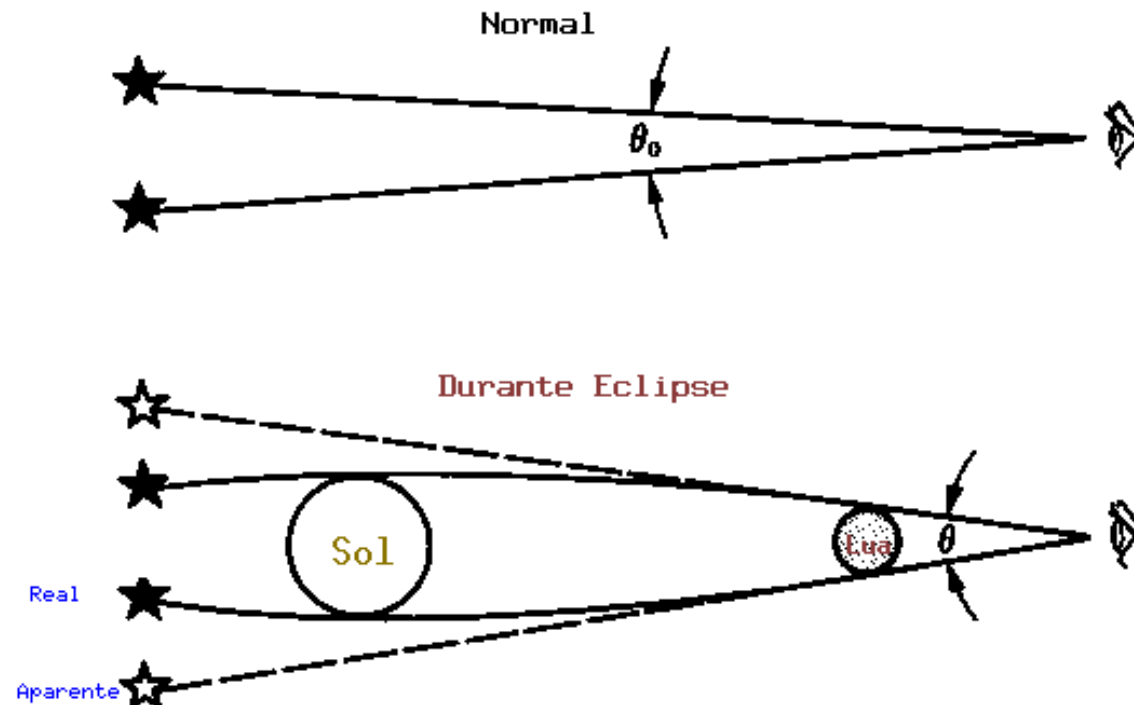
# Trânsito: problemas

- ☑ Apenas alguns por cento dos candidatos são exoplanetas reais
- ☑ Precisa de confirmação de velocidade radial com grandes telescópios ( $\geq 4m$ )



# 3 - Microlenteamento

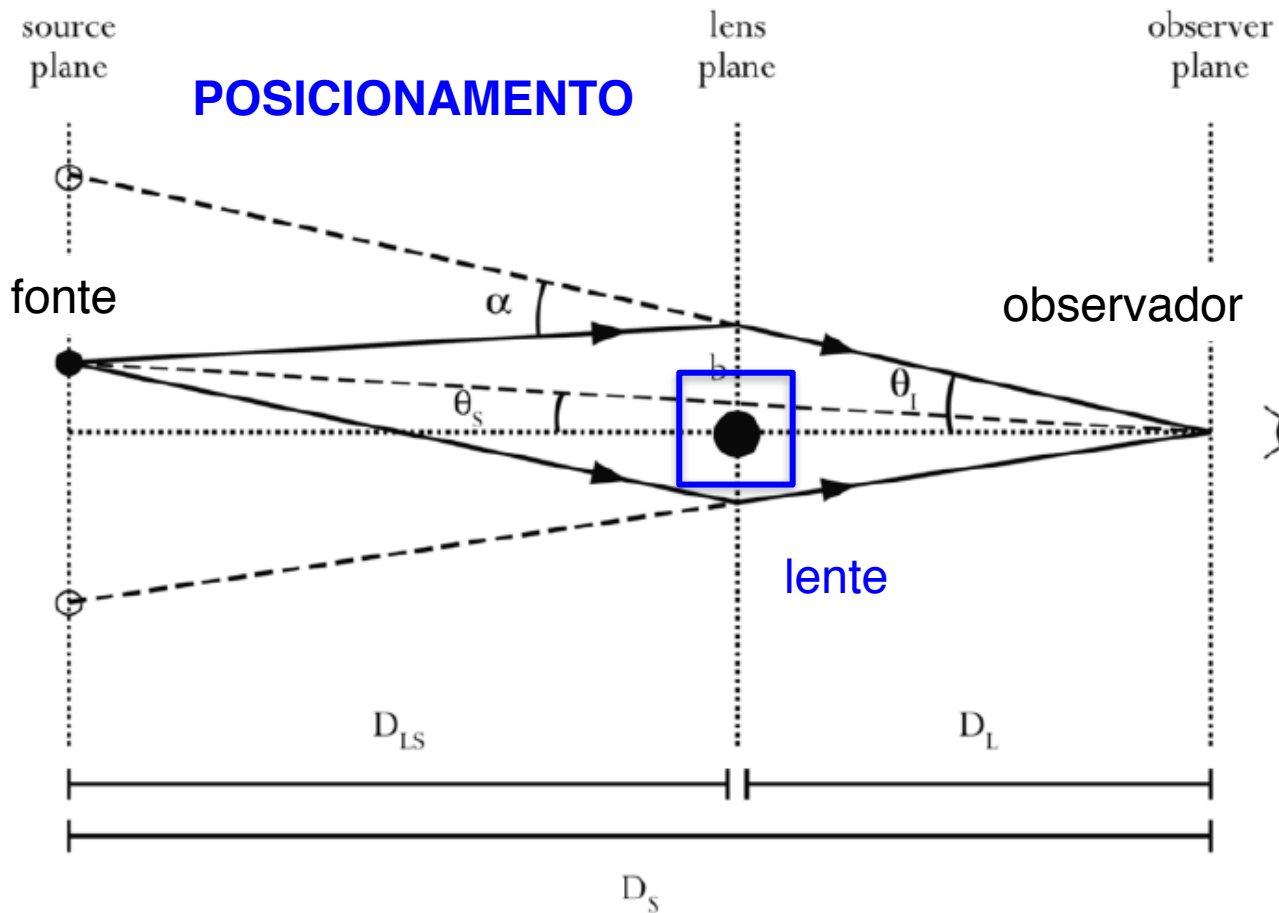
- ☑ A luz de um objeto distante é curvada e amplificada devido à gravidade de um objeto situado na linha de visada entre nós e o objeto.
- ☑ Objetos massivos no halo da nossa galáxia podem agir como lentes gravitacionais



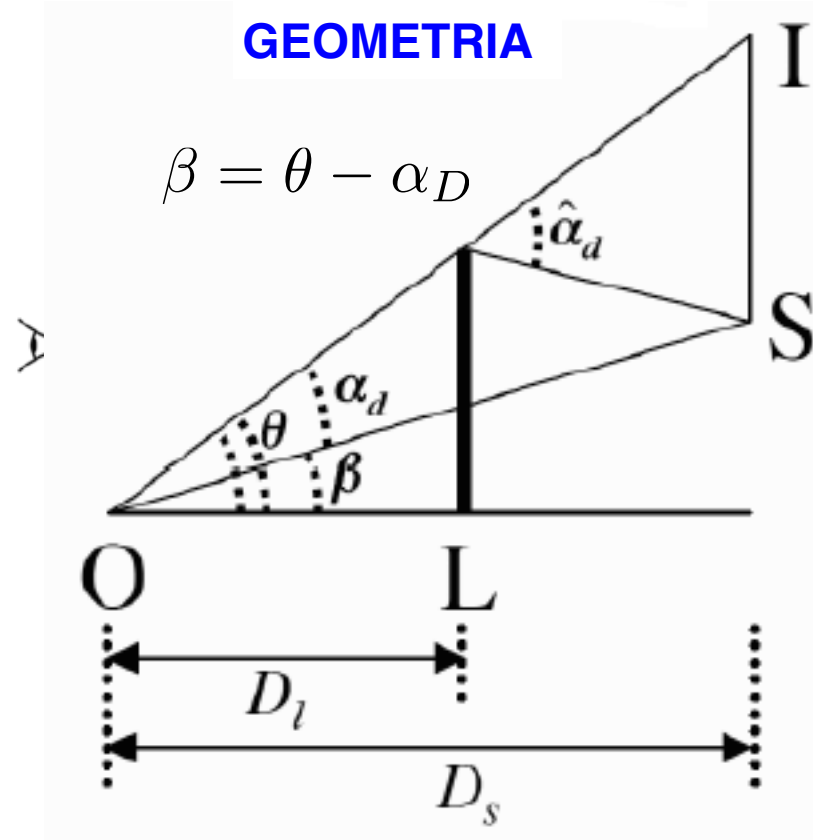
$$\hat{\alpha}_D = \frac{4GM}{D_l \theta c^2}$$

- $\alpha$  – ângulo de lenteamento
- $\theta$  – semi-ângulo de deflexão
- $M$  – massa do objeto (lente)
- $D_l$  – distância lente – observador
- $D_{lS}$  – distância lente – fonte
- $D_s$  – distância fonte – observador

### POSICIONAMENTO



### GEOMETRIA





$$D_{rel}^{-1} = D_l^{-1} - D_s^{-1}$$

$$R_{Schw} = \frac{2GM}{c^2}$$

$$\theta_E = \sqrt{\frac{2R_{Schw}}{D_{rel}}}$$

+

$$u = \frac{\beta}{\theta_E}$$

Amplificação  
da imagem

$$A(u) = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$



# 3 – Microlenteamento

PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# 3 – Microlenteamento

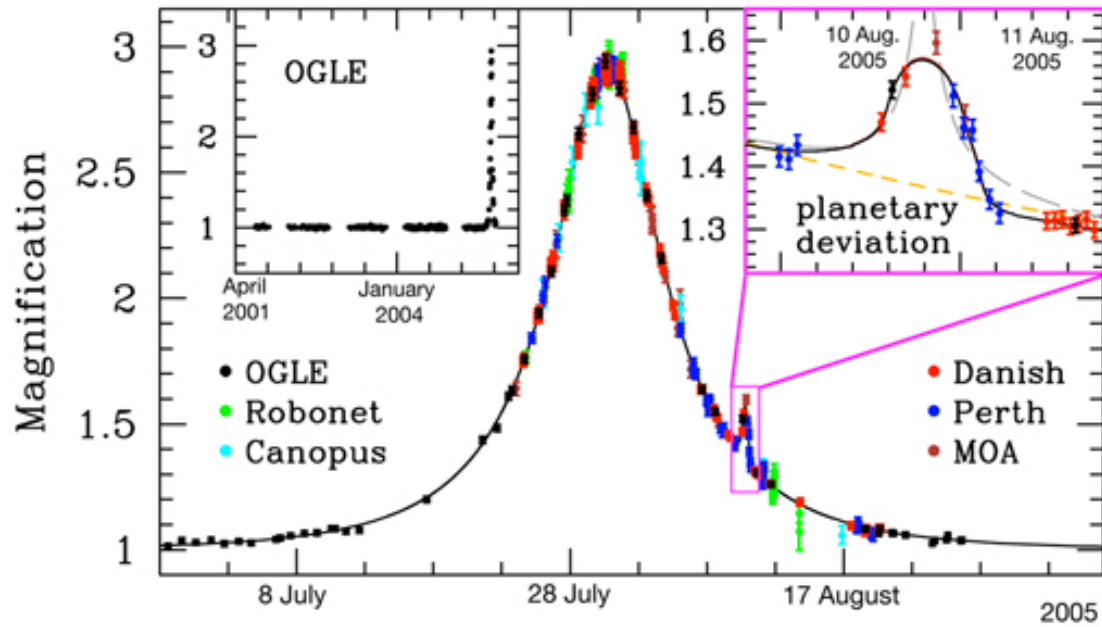
PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# 3 – Microlenteamento

PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

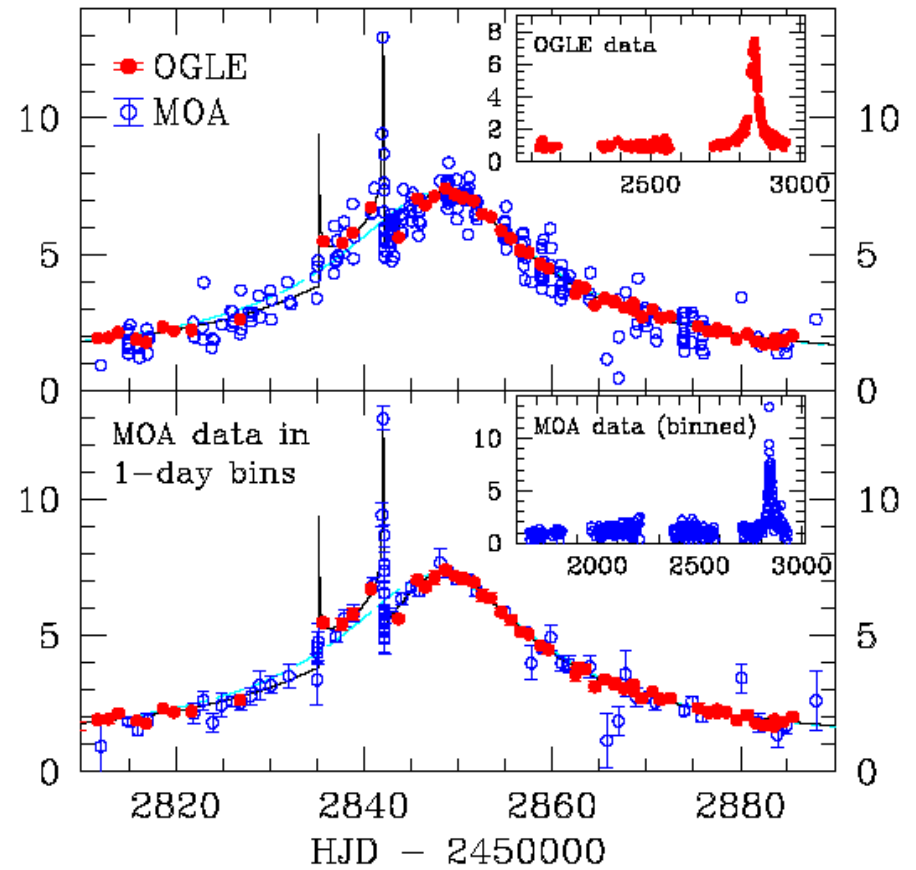
# Detecção de planetas por microlenteamento



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

ESO PR Photo 03b/06 (January 25, 2006)

© ESO



Bond et al. 2004 astro-ph/0404309

OGLE - Optical Gravitational Lensing Experiment





# Microlenteamento: vantagens

- ☑ Capaz de encontrar os planetas mais distantes e menores de qualquer método atualmente disponível
- ☑ Mais sensível aos planetas que orbitam em distâncias moderadas a grandes de suas estrelas (complementar a velocidade radial e trânsito),
- ☑ Capaz de observar dezenas de milhares de planetas simultaneamente. Se um evento de microlente ocorrer em qualquer lugar dentro do campo de estrelas observado, ele será detectado.

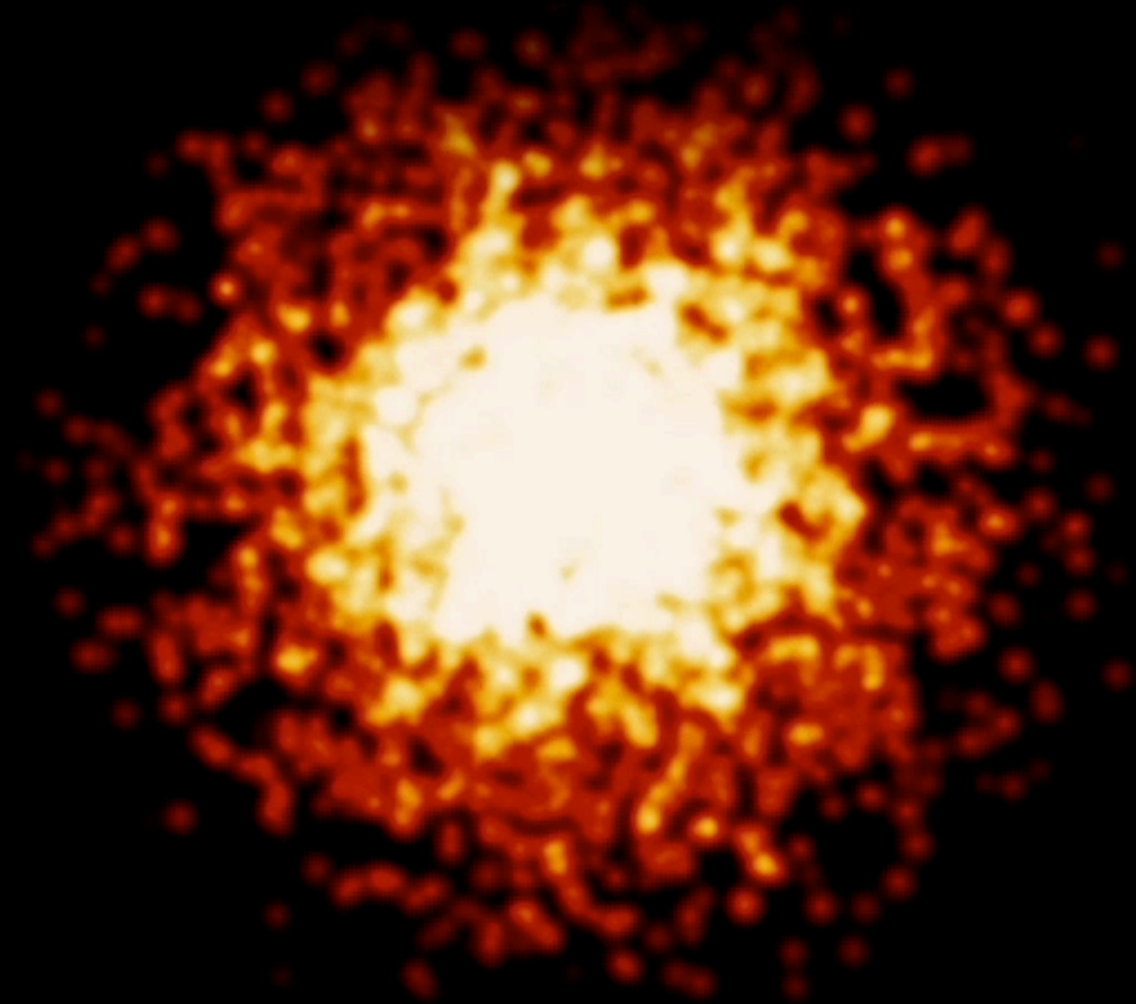


# Microlenteamento: desvantagens

- ☑ Eventos ocorrem uma única vez
- ☑ Distância do planeta detectado da Terra é conhecida apenas por aproximação grosseira. Ao lidar com planetas a dezenas de milhares de anos-luz de distância, isso poderia significar erros de milhares de anos-luz!
- ☑ Eventos raros e aleatórios - a passagem de uma estrela precisamente na frente de outra vista da Terra.
- ☑ Imprevisível!!!
- ☑ Detecções por microlenteamento até a 24/01/2019: 89 planetas



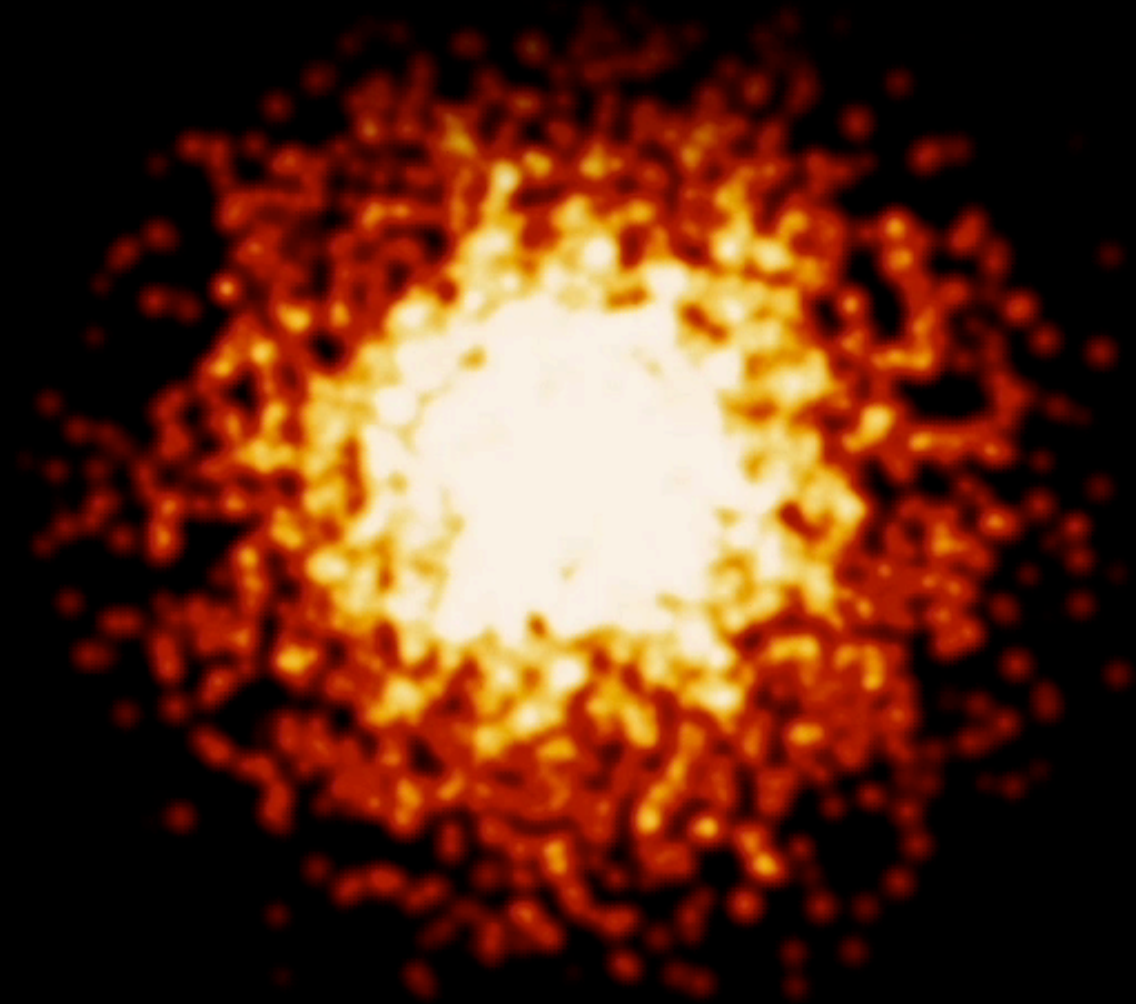
# 4 - Imageamento direto



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



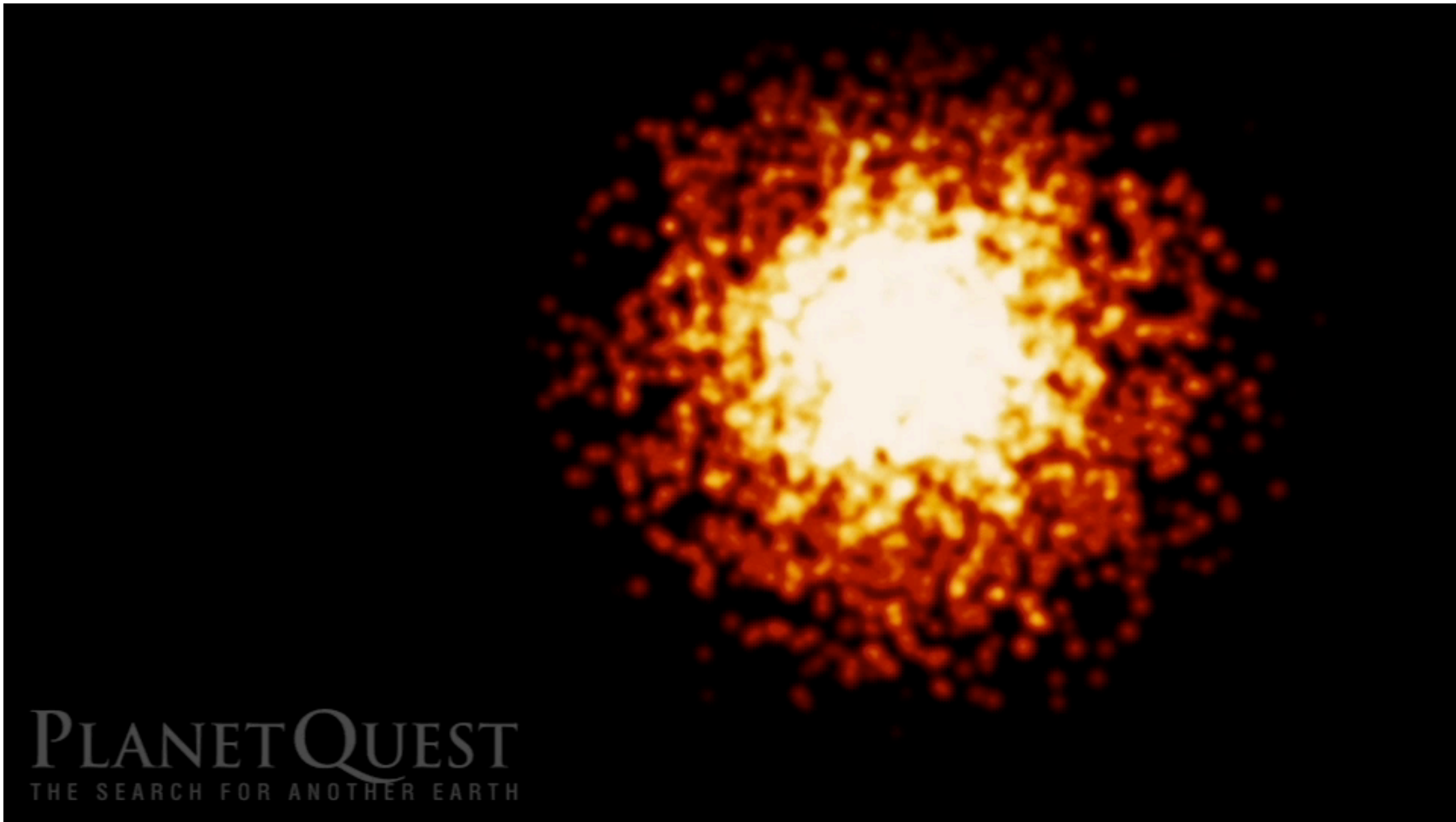
# 4 - Imageamento direto



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH

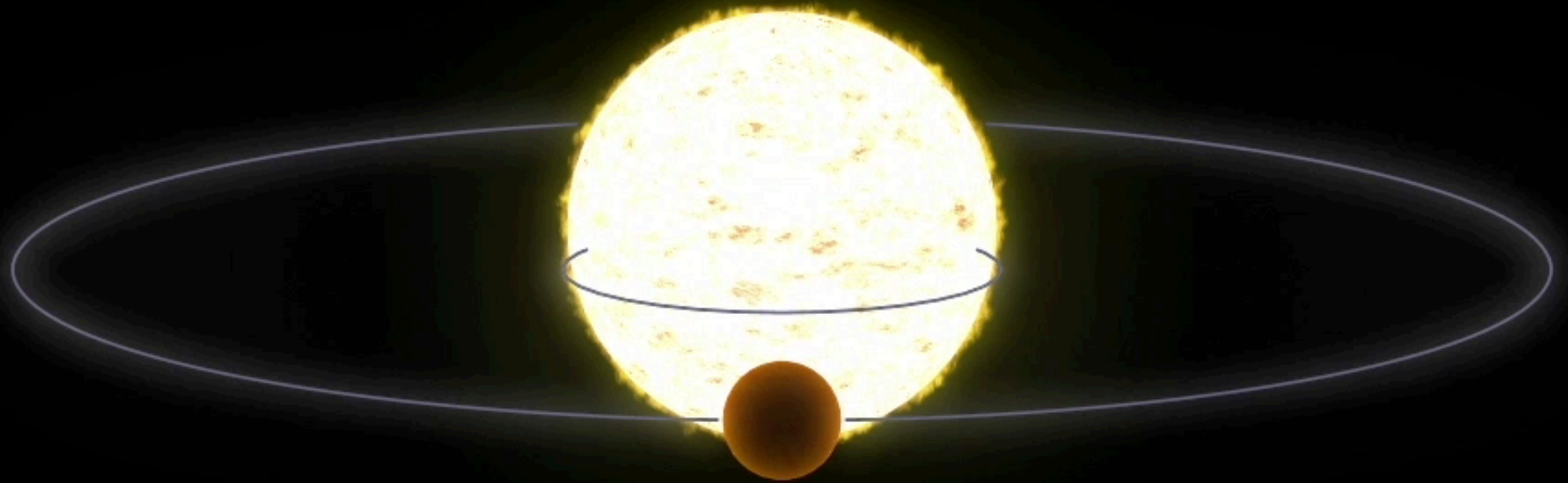


# 4 - Imageamento direto





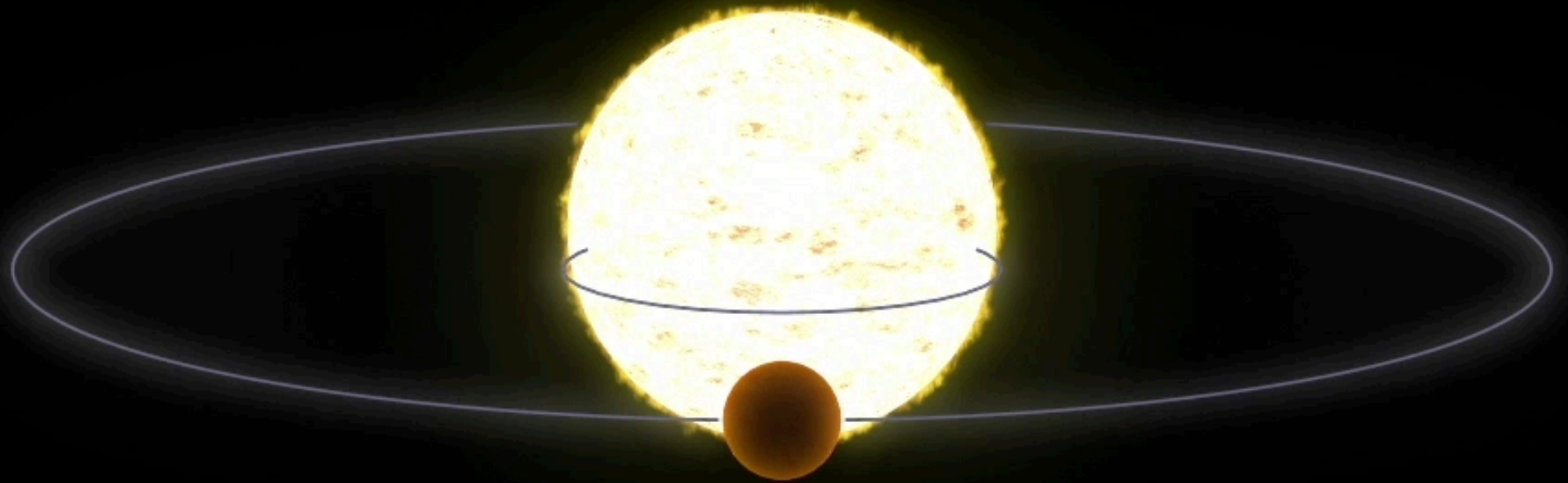
# 5 - Astrometria



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



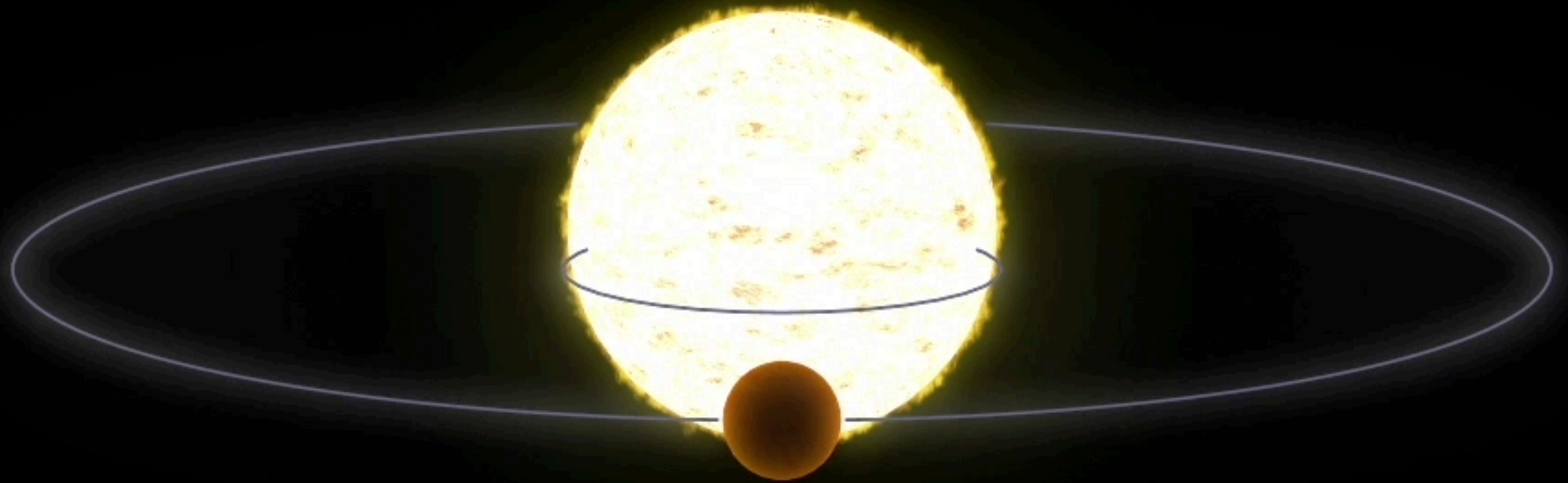
# 5 - Astrometria



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH



# 5 - Astrometria



PLANET QUEST  
THE SEARCH FOR ANOTHER EARTH





# Sumário das técnicas de detecção

| Observável                          | Júpiter                          | Terra                             | Possível detectar hoje?      |
|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| Detecção direta                     |                                  |                                   |                              |
| separação angular no céu            | 1 arcsec                         | 0,2 arcsec                        | Não (Júpiter) / Não (Terra)  |
| Razão de brilho estrela/<br>planeta | $10^{-9}$ (V)/ $10^{-4}$<br>(IR) | $10^{-10}$ (V)/ $10^{-6}$<br>(IR) | Não (Júpiter) / Não (Terra)  |
| Velocidade radial                   | 13 m/s                           | 3 cm/s                            | Sim (Júpiter) / Sim (Terra)  |
| Oscilação astrométrica              | 1 miliarcsec                     | 0,6 microarcsec                   | Sim (Júpiter) / Sim (Terra)  |
| Trânsito                            |                                  |                                   |                              |
| Precisão fotométrica                | 1%                               | 0,01%                             | Sim (Júpiter) / Sim (Terra)  |
| Duração                             | 25 h                             | 11 h                              |                              |
| Microlenteamento                    |                                  |                                   |                              |
| Amplificação a 4 kpc                | < 10% (V)                        | < 1%                              | Sim (Júpiter)<br>Não (Terra) |
| Duração                             | < 3 dias                         | < 4 h                             |                              |

Lunine (2005), update C.A. Wuensche (2019)

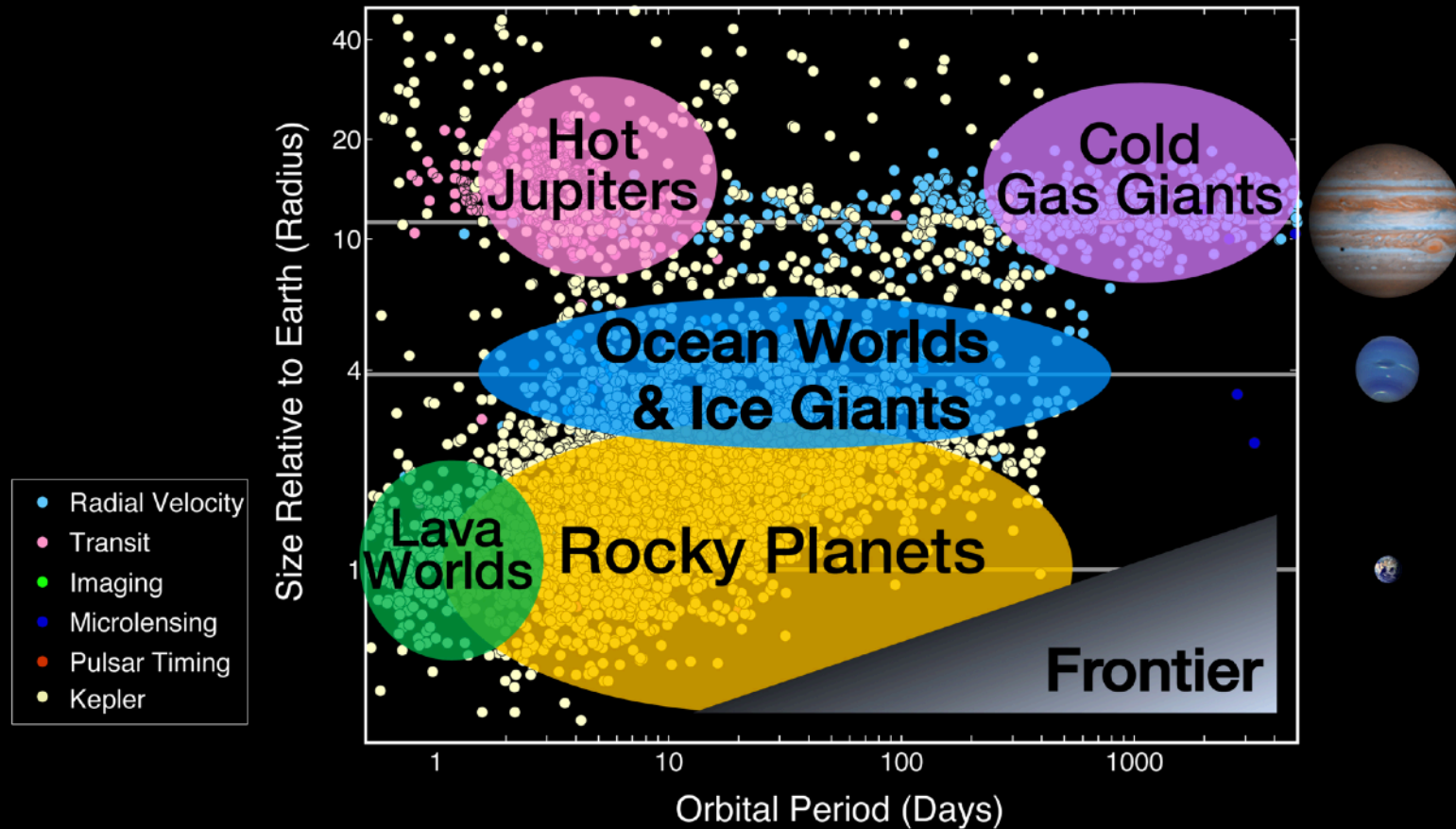


# Sumário por técnica de detecção

(em 20/05/2019)

| MÉTODO                         | PLANETAS | SISTEMAS PLANETÁRIOS | SISTEMA COM MÚLTIPLOS PLANETAS |
|--------------------------------|----------|----------------------|--------------------------------|
| Velocidade radial              | 838      | 630                  | 144                            |
| Pulsar timing                  | 42       | 35                   | 6                              |
| Lenteamento                    | 95       | 90                   | 3                              |
| Imageamento direto             | 126      | 100                  | 2                              |
| Trânsito                       | 2947     | 2212                 | 481                            |
| Astrometria                    | 8        | 1                    | 0                              |
| Transit Timing Variation (TTV) | 10       | 9                    | 1                              |
| OUTROS                         | 4        | 3                    | 1                              |
| TOTAL                          | 4069     | 3041                 | 659                            |

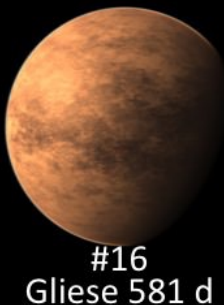
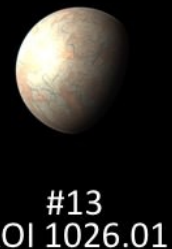
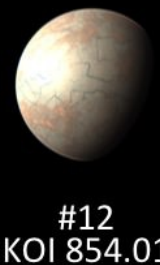
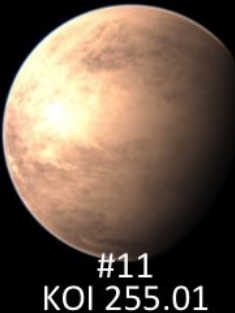
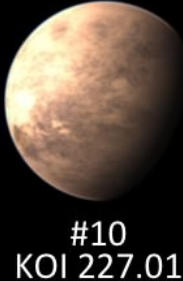
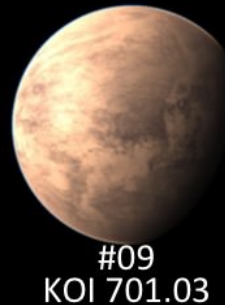
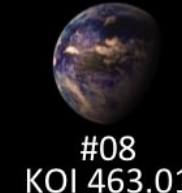
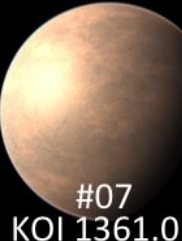
# Exoplanet Populations



<https://www.nasa.gov/image-feature/ames/kepler/exoplanet-populations>

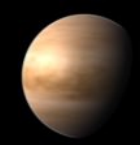


# Potenciais mundos habitados "no Universo"



Scientists are starting to identify potential habitable exoplanets in over 2,000 exoplanets that have been detected so far. Here is the current working list of 16 potential habitable exoplanets candidates ranked by similarity to Earth, from best to worst. All are to scale and can be compared to Earth, Venus, Mars, and Mercury below.

## Solar System Terrestrial Planets



Earth

Venus



Mars

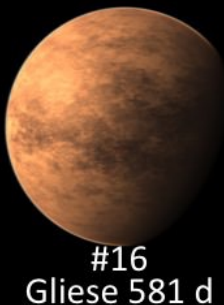
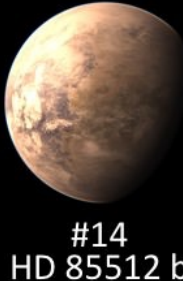
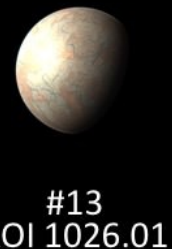
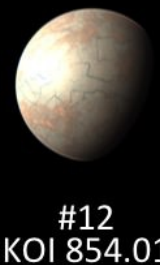
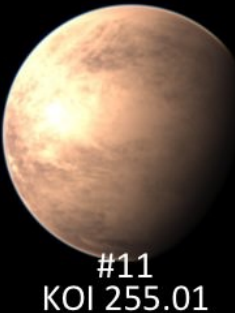
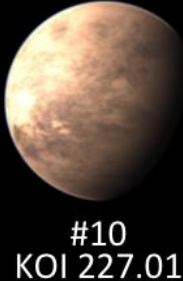
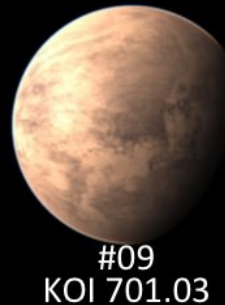
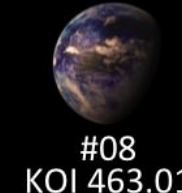
Mercury

Updated: Dec 5, 2011

CREDIT: The Habitable Exoplanets Catalog, Planetary Habitability Laboratory @ UPR Arcibo (phl.upr.edu)

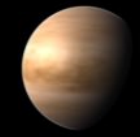


# Potenciais mundos habitados "no Universo"



Scientists are starting to identify potential habitable exoplanets in over 2,000 exoplanets that have been detected so far. Here is the current working list of 16 potential habitable exoplanets candidates ranked by similarity to Earth, from best to worst. All are to scale and can be compared to Earth, Venus, Mars, and Mercury below.

## Solar System Terrestrial Planets



Earth

Venus



Mars

Mercury

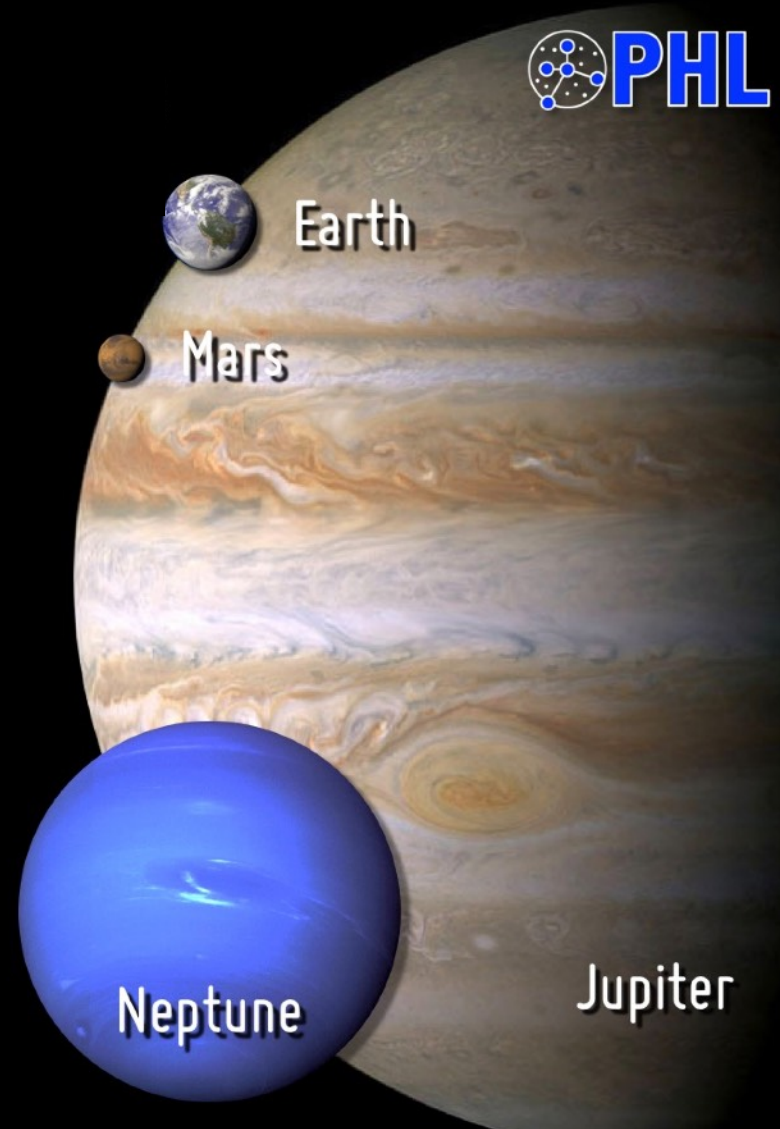
Updated: Dec 5, 2011

CREDIT: The Habitable Exoplanets Catalog, Planetary Habitability Laboratory @ UPR Arcibo (phl.upr.edu)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)

# Planetas potencialmente habitáveis

Organizados por distância à Terra (anos luz)

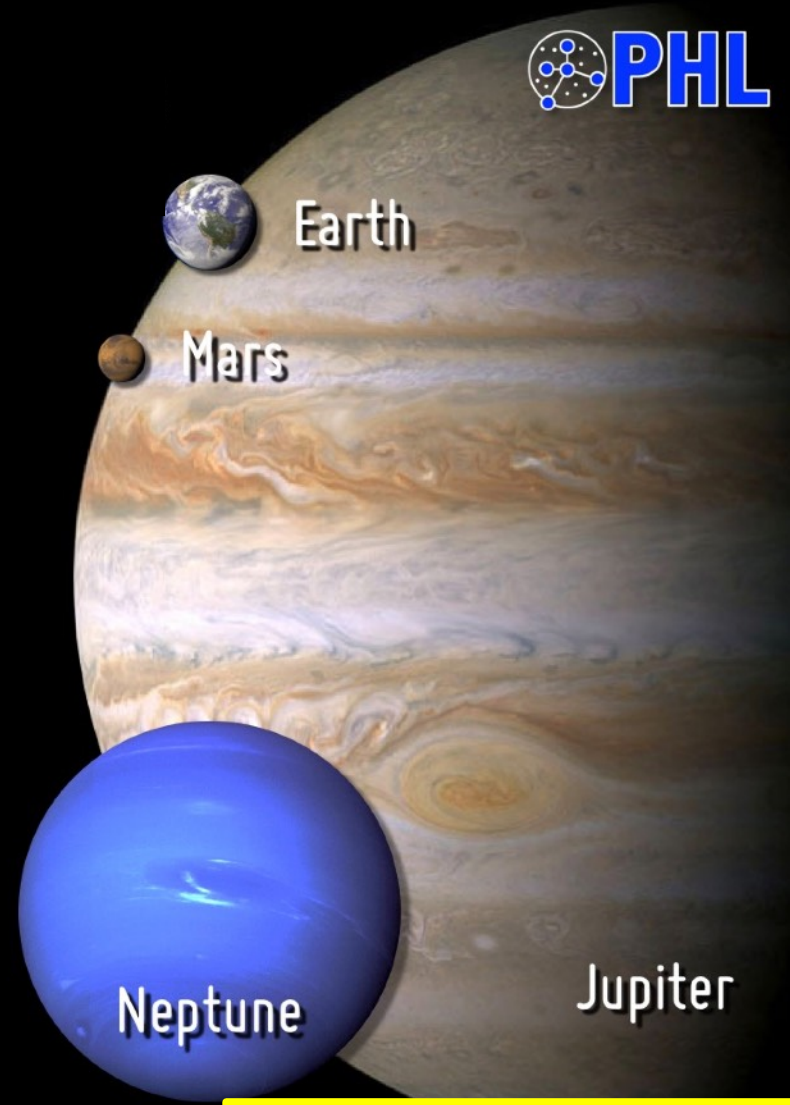


Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) Feb 1, 2019

# Planetas potencialmente habitáveis

Organizados por distância à Terra (anos luz)



Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) Feb 1, 2019



# Lista de planetas potencialmente semelhantes à Terra

| Nome                          | Tipo          | Massa       | Raio      | Fluxo     | $T_{eq}$ | Período | Distância | ESI  |
|-------------------------------|---------------|-------------|-----------|-----------|----------|---------|-----------|------|
|                               |               | ( $M_E$ )   | ( $R_E$ ) | ( $S_E$ ) | (K)      | (dias)  | (a.l.)    |      |
| <a href="#">TRAPPIST-1 e</a>  | M-Warm Terran | 0.62        | 0.92      | 0.70      | 233      | 6.1     | 39        | 0.87 |
| <a href="#">GJ 667 C f</a>    | M-Warm Terran | $\geq 2.54$ | —         | 0.85      | 245      | 39.0    | 22        | 0.87 |
| <a href="#">Proxima Cen b</a> | M-Warm Terran | $\geq 1.27$ | —         | 0.69      | 227      | 11.2    | 4.2       | 0.87 |
| <a href="#">Kepler-442 b</a>  | K-Warm Terran | —           | 1.35      | 0.72      | 235      | 112.3   | 1115      | 0.85 |
| <a href="#">Kepler-1229 b</a> | M-Warm Terran | —           | 1.40      | 0.49      | 213      | 86.8    | 769       | 0.73 |
| <a href="#">GJ 667 C e</a>    | M-Warm Terran | $\geq 2.54$ | —         | 0.46      | 210      | 62.2    | 22        | 0.71 |
| <a href="#">TRAPPIST-1 f</a>  | M-Warm Terran | 0.68        | 1.04      | 0.40      | 203      | 9.2     | 39        | 0.70 |
| <a href="#">Kepler-62 f</a>   | K-Warm Terran | —           | 1.41      | 0.42      | 205      | 267.3   | 1200      | 0.69 |
| <a href="#">TRAPPIST-1 g</a>  | M-Warm Terran | 1.34        | 1.13      | 0.27      | 184      | 12.4    | 39        | 0.59 |
| <a href="#">Kepler-186 f</a>  | M-Warm Terran | —           | 1.17      | 0.26      | 182      | 129.9   | 561       | 0.58 |

Número atual de exoplanetas potencialmente habitáveis

- Subterran (tamanho de Marte) - 1
- Terran (tamanho da Terra) - 16
- Superterran (Super-Terras/Mini-Netunos) - 32
- Total – 49

Referência: <http://phl.upr.edu/>

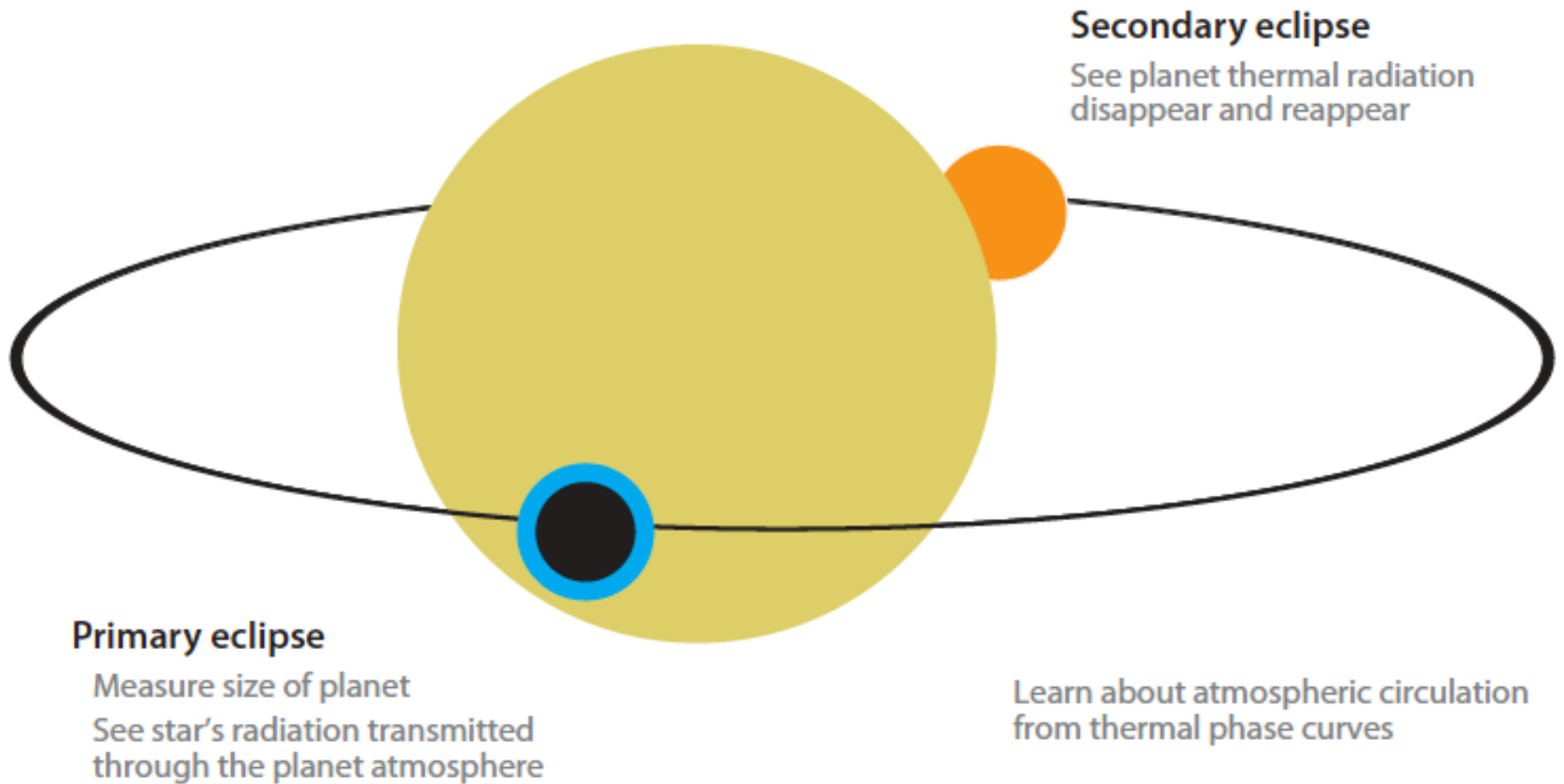
Carlos Alexandre Wuensche (2019)





# Observação de atmosferas de exoplanetas

- ☑ Trânsito: raio do planeta
- ☑ Emissão térmica: atmosfera emissora, temperatura e gradiente, curva de fase térmica
- ☑ Espectros de transmissão: alta atmosfera, exosfera
- ☑ Reflexão: albedo, curva da fase de luz refletida (polarização), atmosfera com espalhamento
- ☑ Curva de luz fornece informações sobre estrela + planeta
- ☑ Eclipse Secundário: sem luz do planeta -> albedo
- ☑ Diferença em diferentes comprimentos de onda -> espectro do exoplaneta -> composição da atmosfera



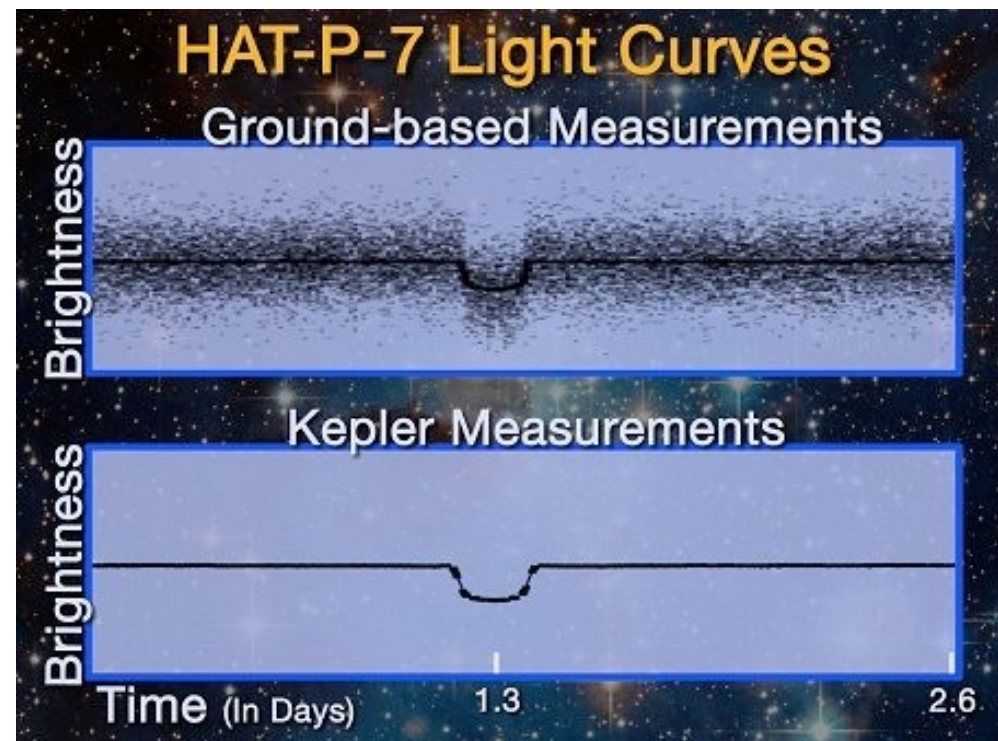
Seager & Demming (2010)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)



# Primeira observação da atmosfera de um exoplaneta pelo satélite Kepler (06/08/2009)

- ✓ Localizado em torno de uma estrela cerca de 1000 anos-luz da Terra
- ✓ Translação: 2,2 dias
- ✓ Massa  $\sim M_{\text{Júpiter}}$  ( $\sim 318 M_{\text{Terra}}$ )
- ✓ raio da órbita: 5,7 milhões de km (26 vezes mais próxima da estrela do que a Terra do Sol)





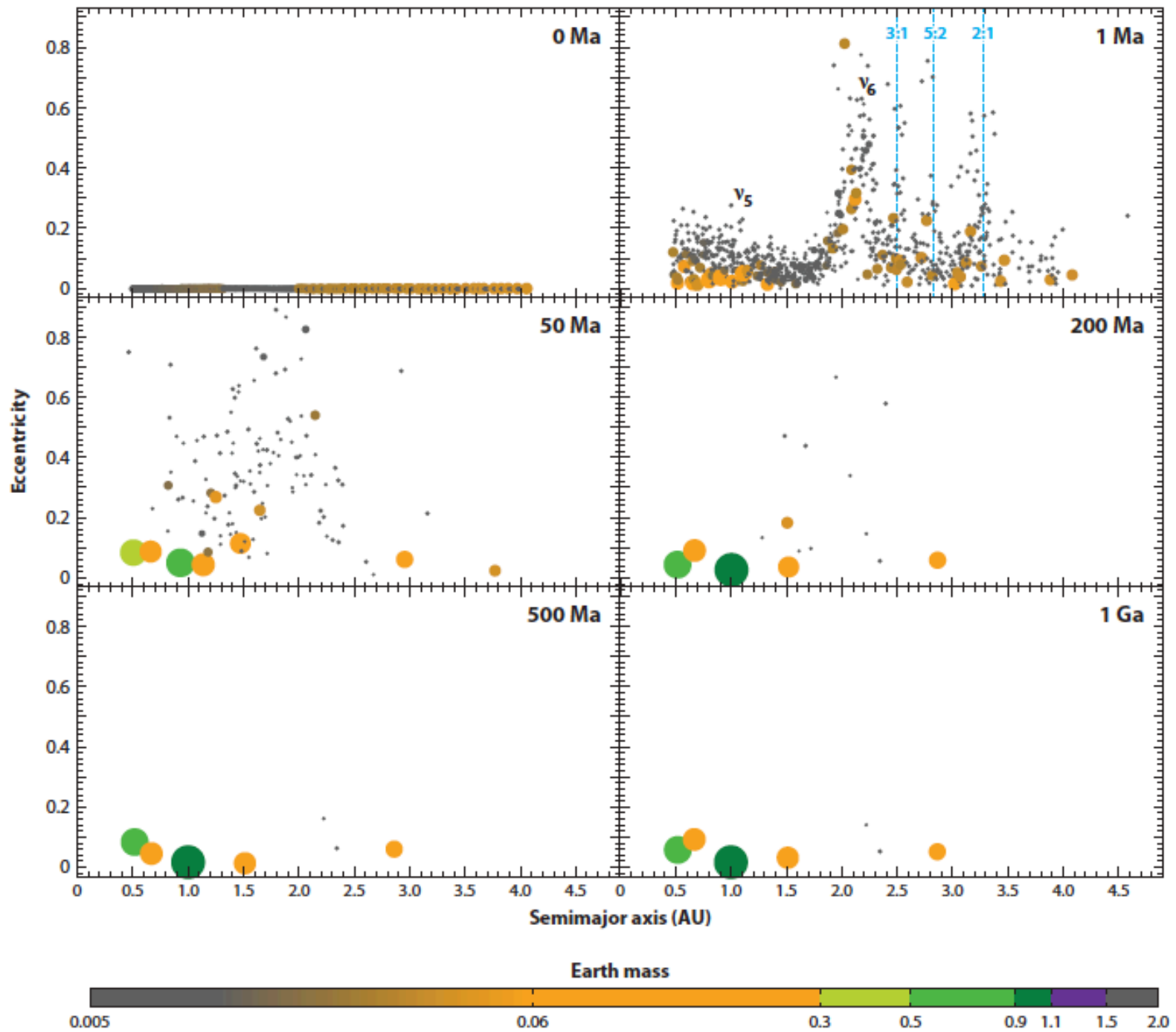
# Super-Terras

- ☑ Objetos com até cerca de  $10 M_{\text{Terra}}$  (mini-Netunos...)
- ☑ Observações indicam que eles devem ser comuns em torno de estrelas mais frias que o Sol (tipos espectrais K e M)
- ☑ Formação e evolução: novos modelos de formação planetária (devido à diversidade de posições em relação à estrela hospedeira)?
  
- ☑ Janeiro de 2019: cerca de 100 objetos encontrados



# Super-terras

- ☑ Mecanismo de formação: disco circunstelar que evolui a partir de partículas de poeira para objetos maiores (nebulosa protoplanetária).
1. coagulação de partículas de poeira através de batidas suaves e colagem, o que resulta na formação de objetos do tamanho de centímetros e decímetros;
  2. crescimento de corpos do tamanho de centímetros e decímetros para planetesimais do tamanho de um quilômetro;
  3. colisão e acreção de planetesimais a embriões planetários (objetos do tamanho de lua a estrela) na parte interna do Sistema Solar e nos núcleos de planetas gigantes nas partes externas; e
  4. acréscimo de gás e formação de planetas gigantes, seguido do crescimento colisional de embriões planetários para corpos de classe terrestre

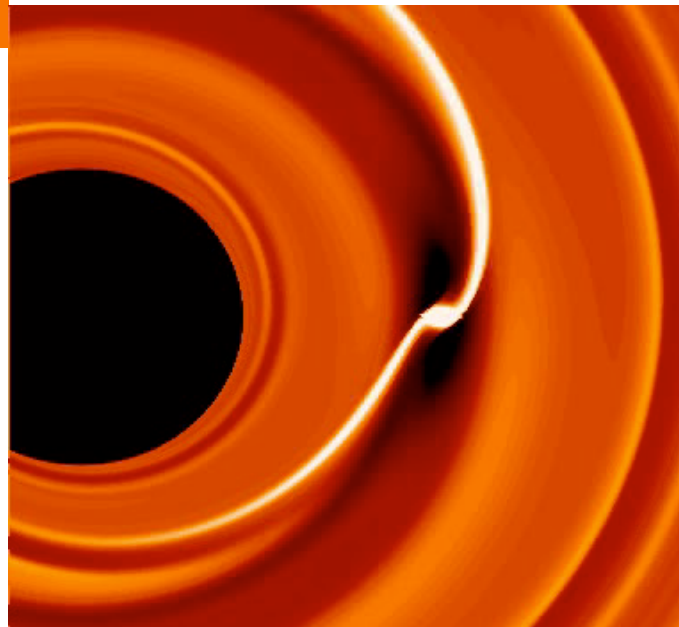
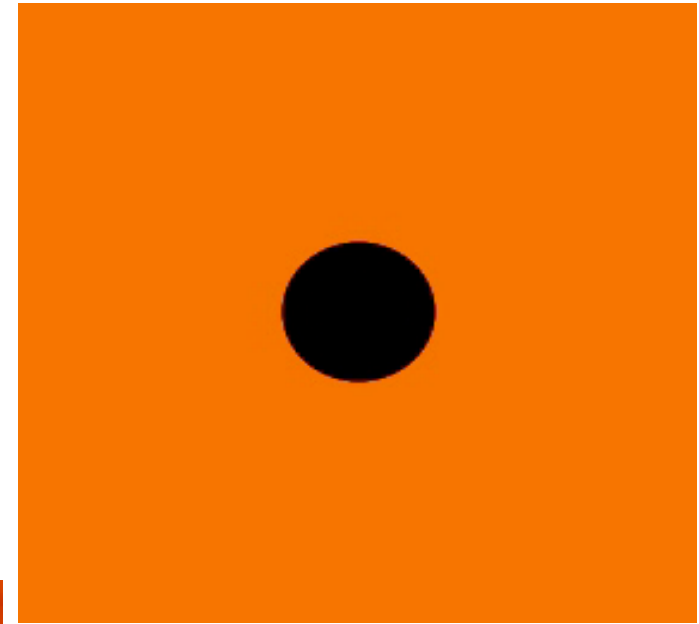
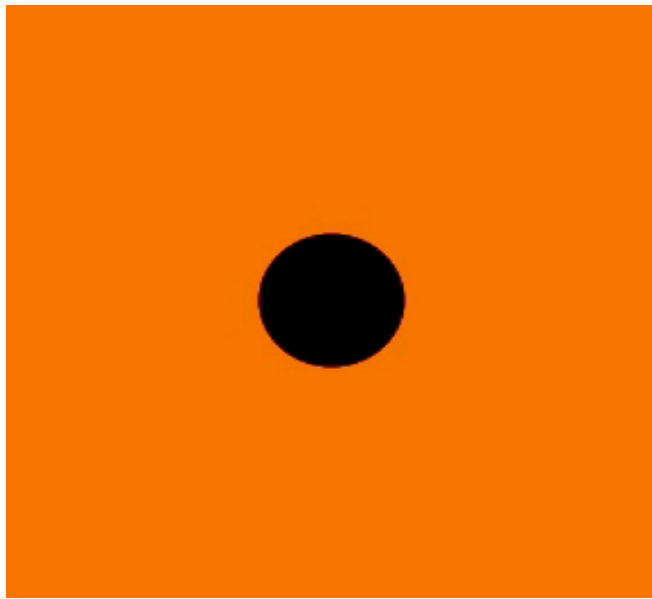


Raghighipour, Ann. Rev. Earth and Plan. Sciences (2013)

Carlos Alexandre Wuensche (2019)



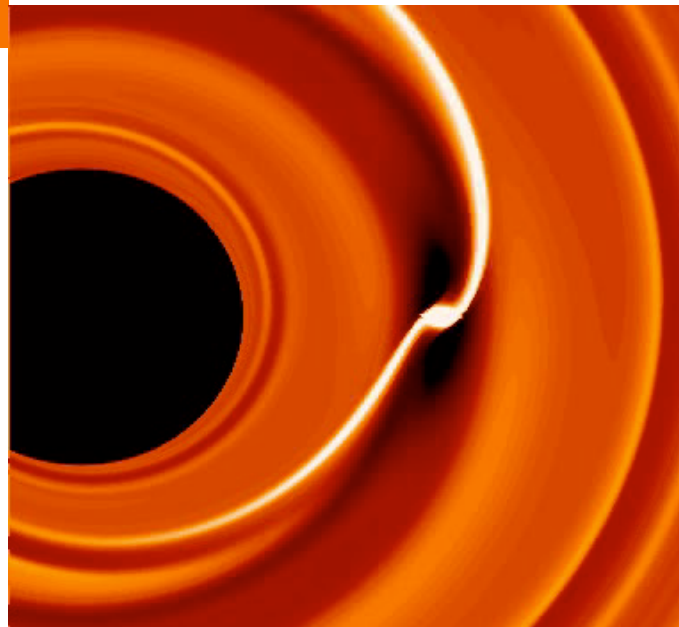
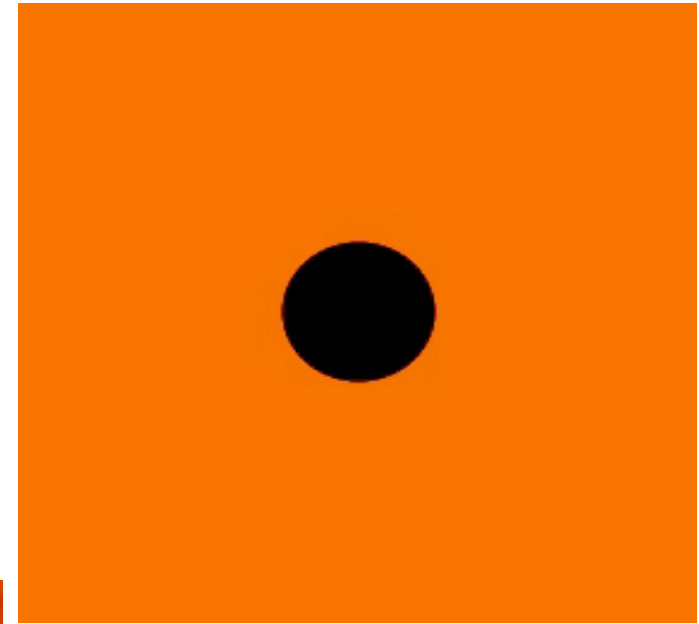
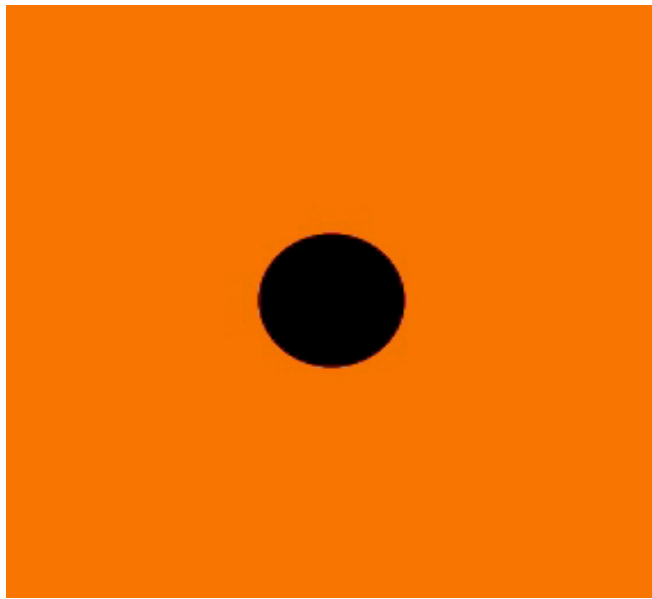
# Migrações de super-Terras



<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>



# Migrações de super-Terras

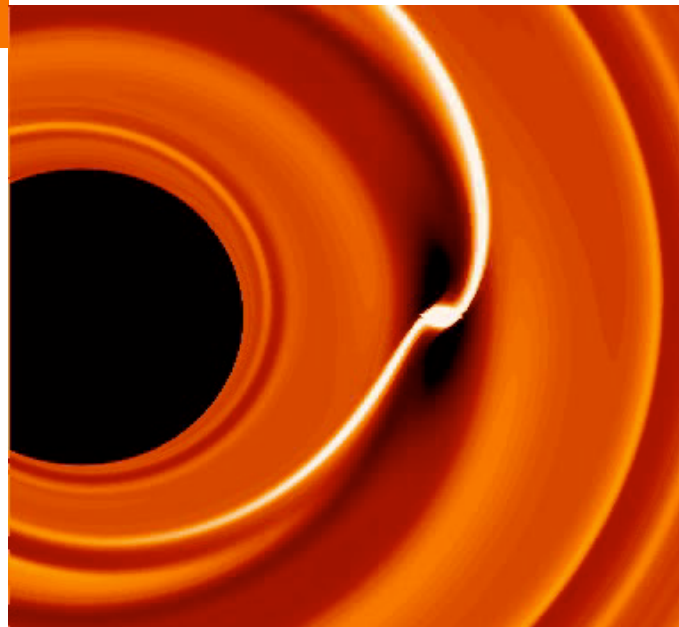
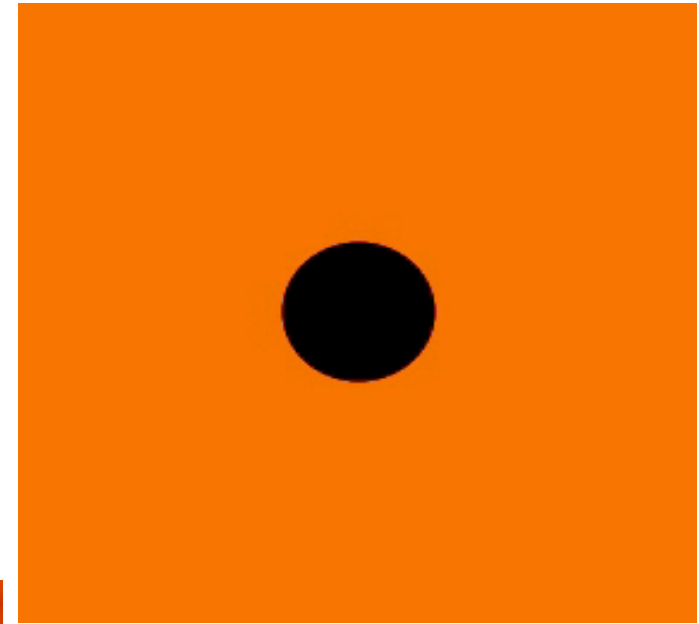
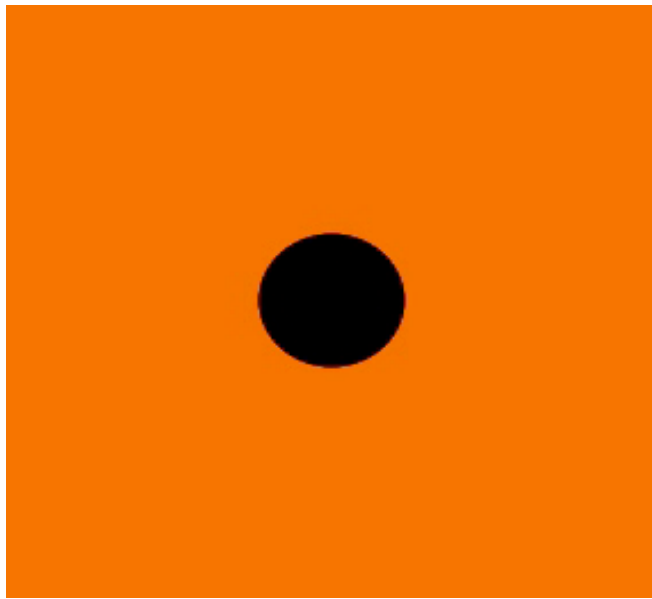


<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>





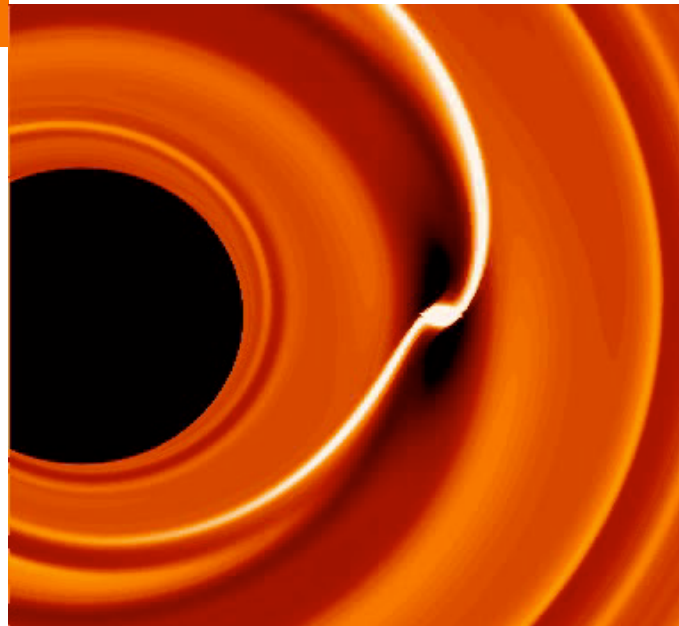
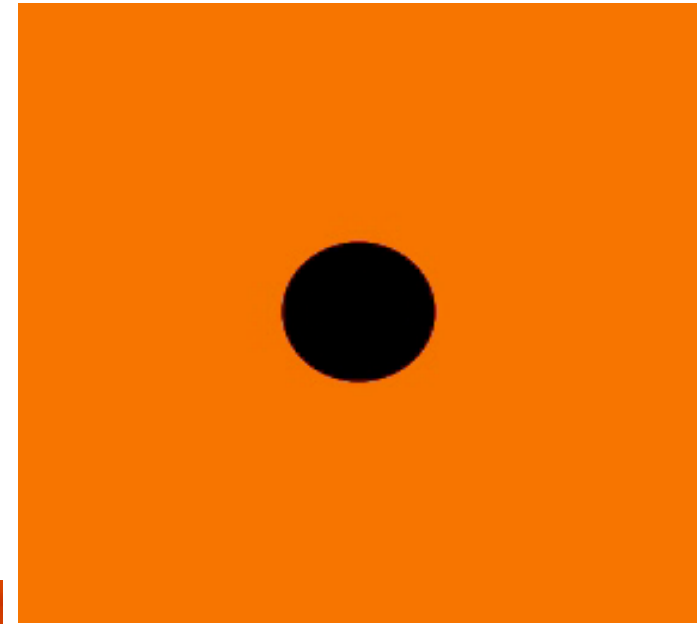
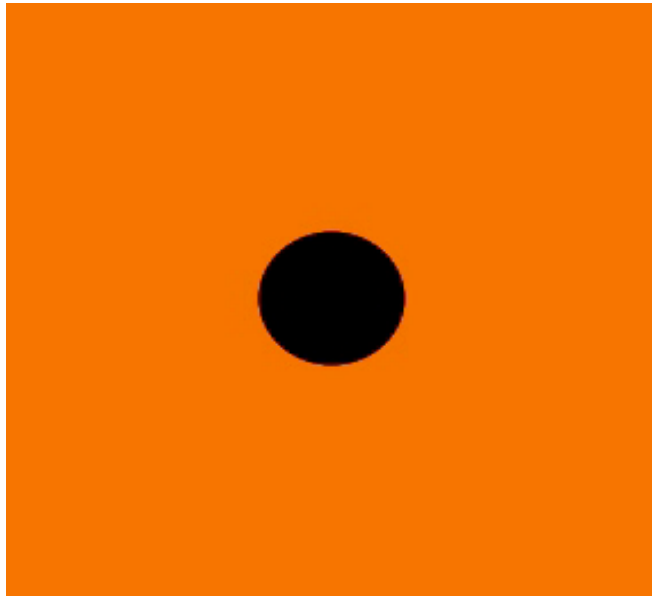
# Migrações de super-Terras



<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>



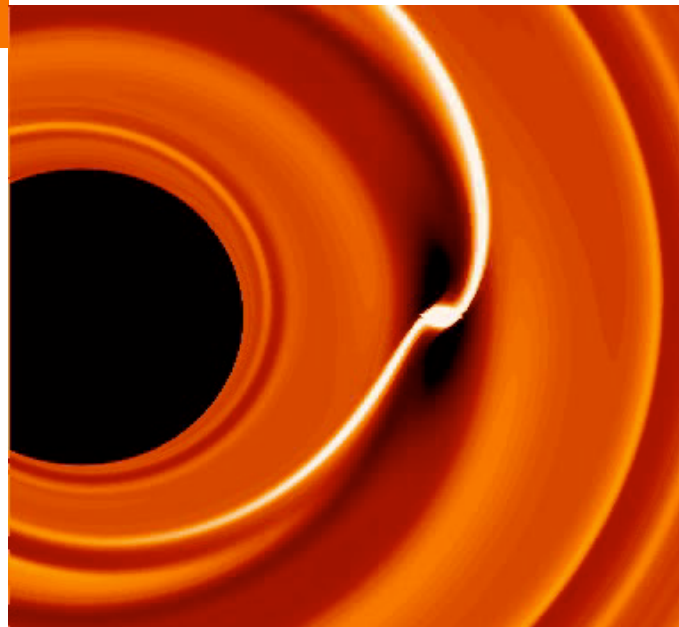
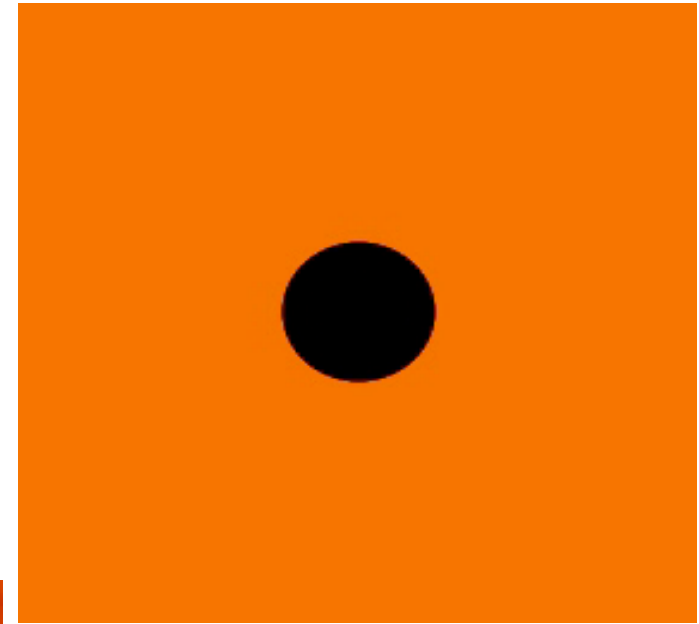
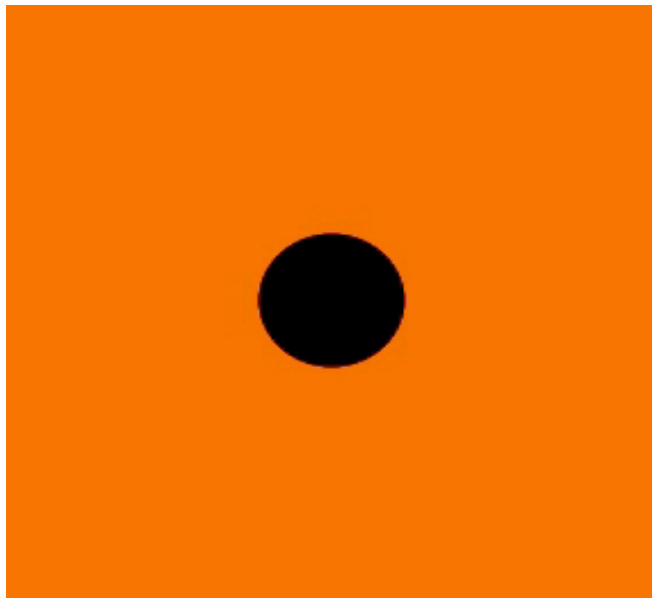
# Migrações de super-Terras



<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>



# Migrações de super-Terras



<https://www.fis.unam.mx/~masset/moviesmpegs.html>



# Migrações de super-Terras

## ☑ Efeitos importantes

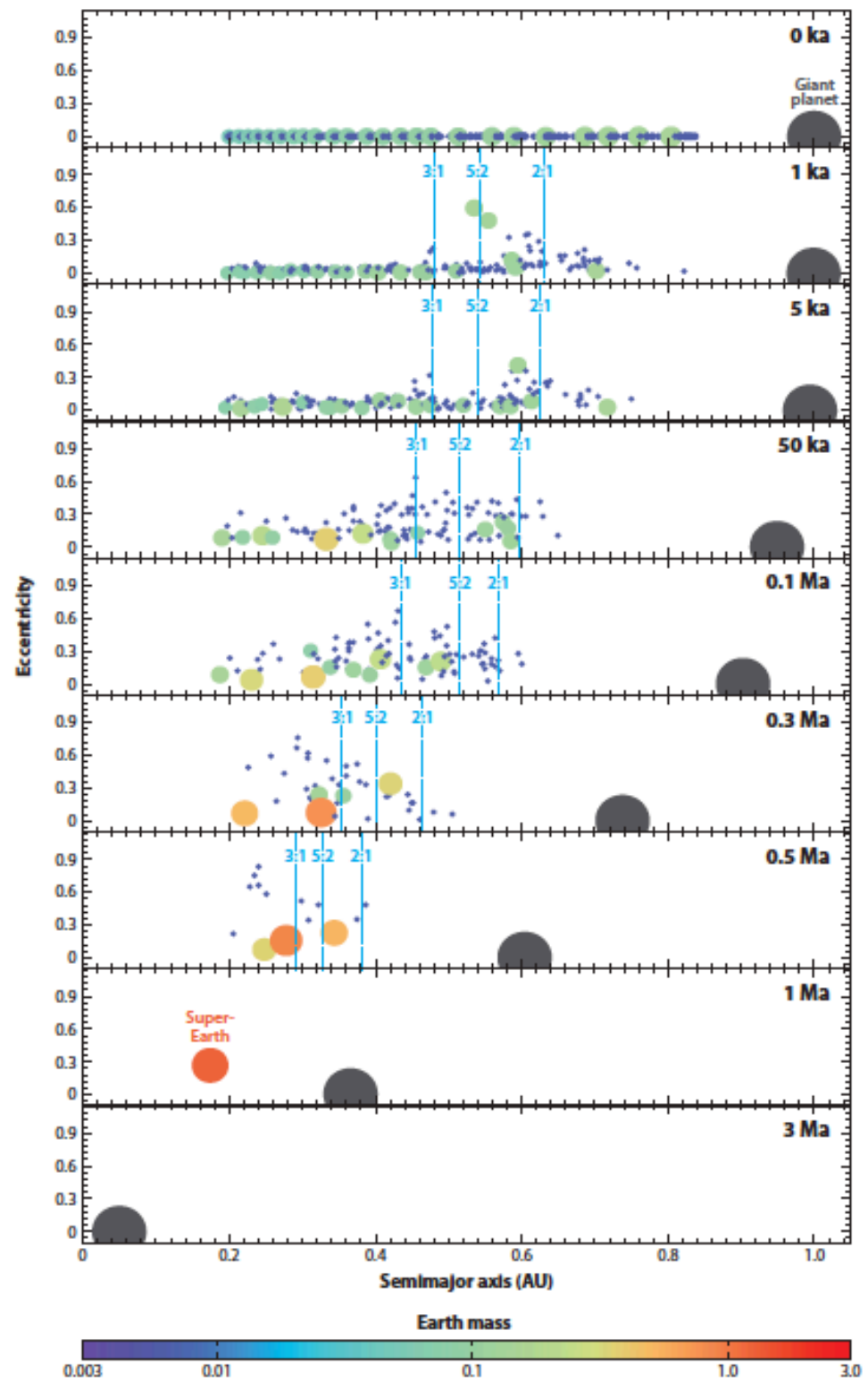
- ✓ Em estrelas do tipo solar, planetesimais podem permanecer no disco protoplanetário durante a migração de um planeta gigante, sendo acretados a ele, ou aglutinar-se em embriões protoplanetários para formar uma super-Terra
- ✓ Em estrelas menores, os planetesimais são ejetados do disco durante a migração do planeta gigante para dentro do sistema planetário
- ✓ A presença de pequenos planetas próximos à estrela hospedeira pode ser explicada por um “espalhamento” para dentro, a partir de órbitas externas, ou por uma ressonância na migração do planeta gigante, sendo arrastado para dentro com ele.



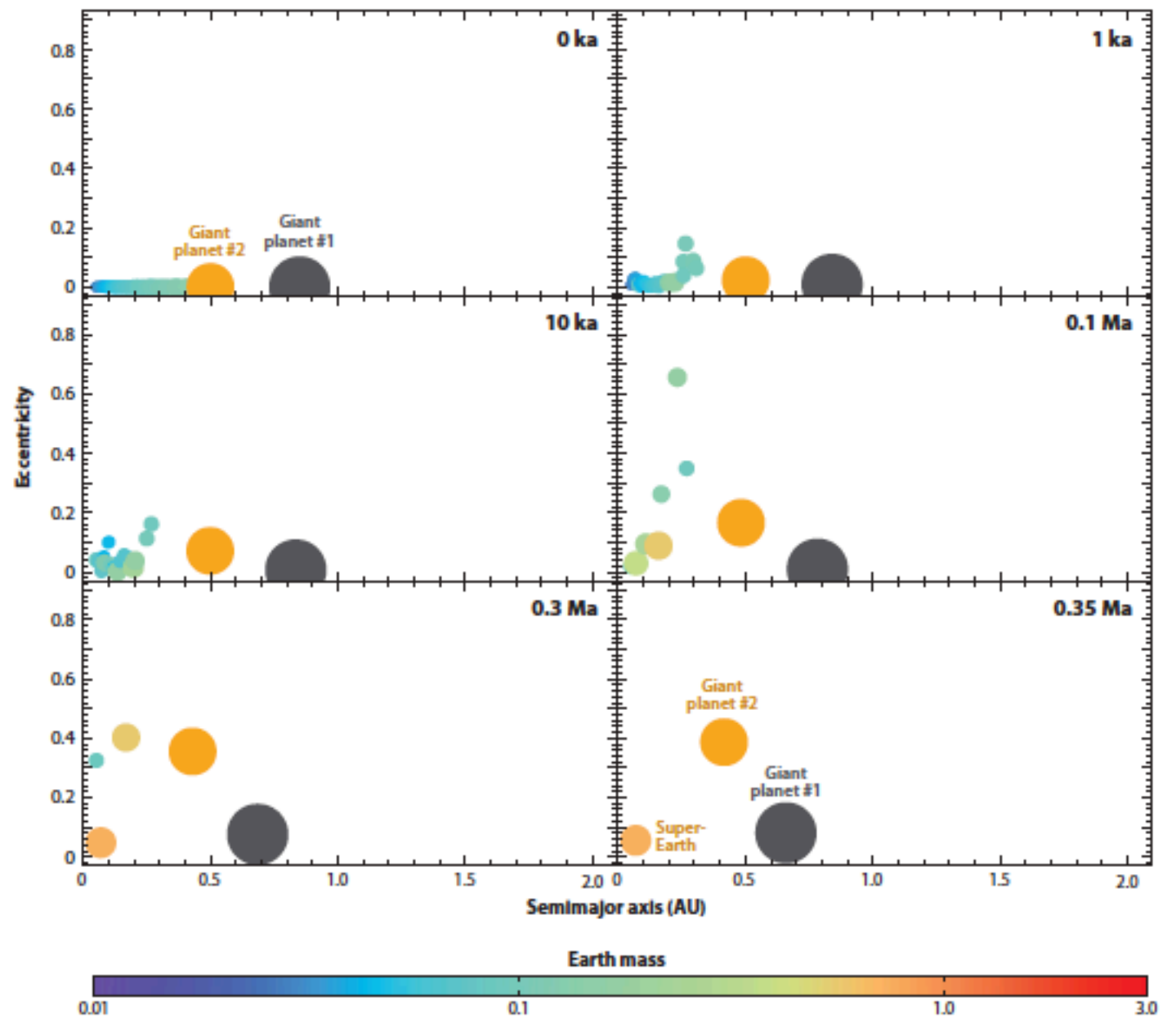
Figure 4

Accretion of protoplanetary bodies during the migration of a giant planet around a  $0.3-M_{\odot}$  M star (Haghighipour & Rastegar 2011).

Note as ressonâncias a partir de 1000 anos, que vão acabar ejetando os planetesimais, impedindo que eles se aglutinem para formar mais super-Terras.



Raghighipour, Ann. Rev. Earth and Plan. Sciences (2013)



**Figure 5**

Accretion of protoplanetary bodies during the migration of two giant planets around a  $0.3-M_{\odot}$  star. As shown here, the system becomes stable with two giant planets in a 1:2 MMR and a super-Earth in a short-period orbit (e.g., GJ 876).

Raghighipour, Ann. Rev. Earth and Plan. Sciences (2013)

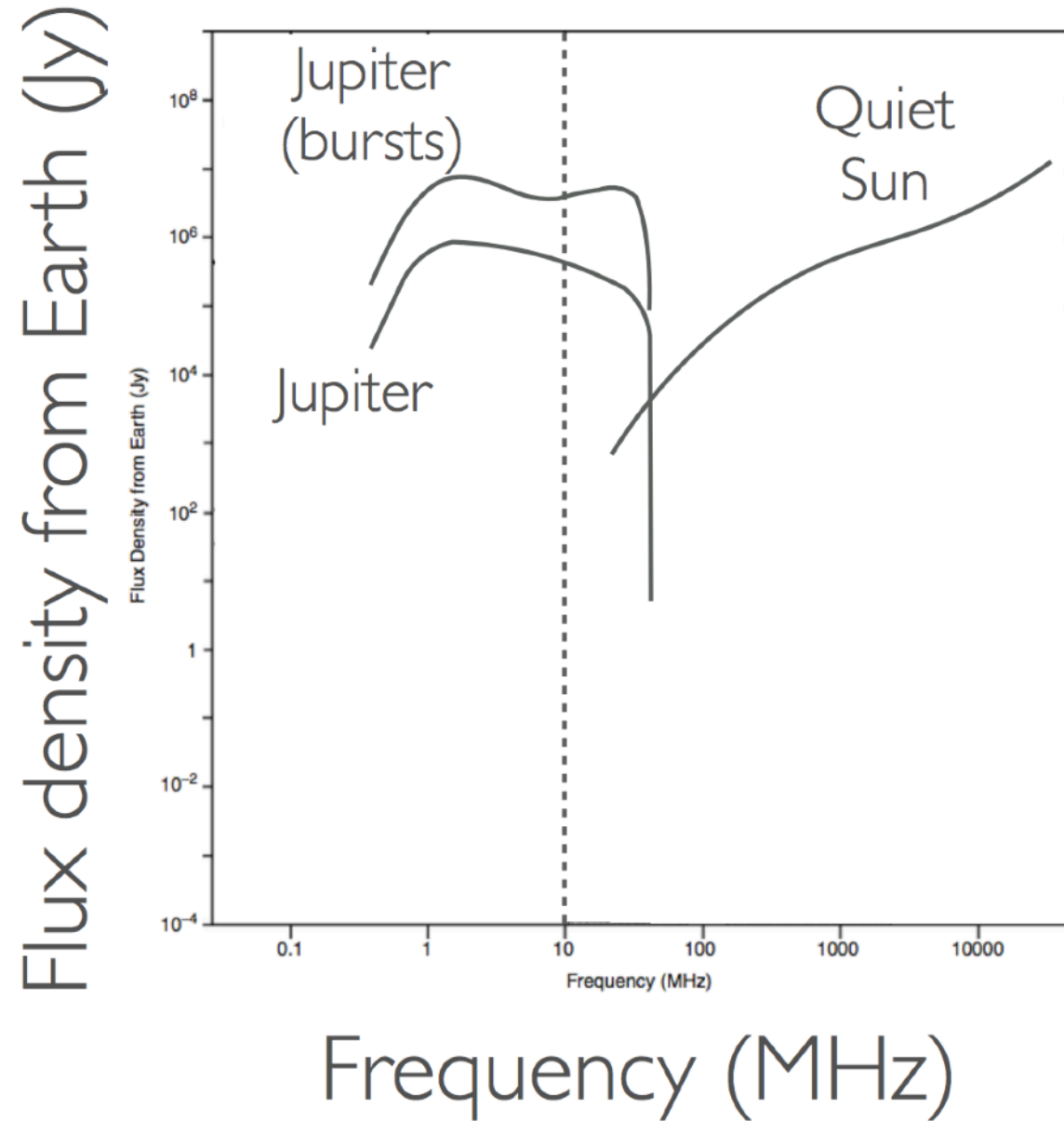


# Magnetosfera de exoplanetas

- ☑ Qual o interesse?
  - ✓ Detecção
  - ✓ Caracterização além do espectro
  - ✓ Massa, taxa de rotação, satélites, dinâmica atmosférica, estrutura interna
  - ✓ Habitabilidade?



Emissões aurorais...

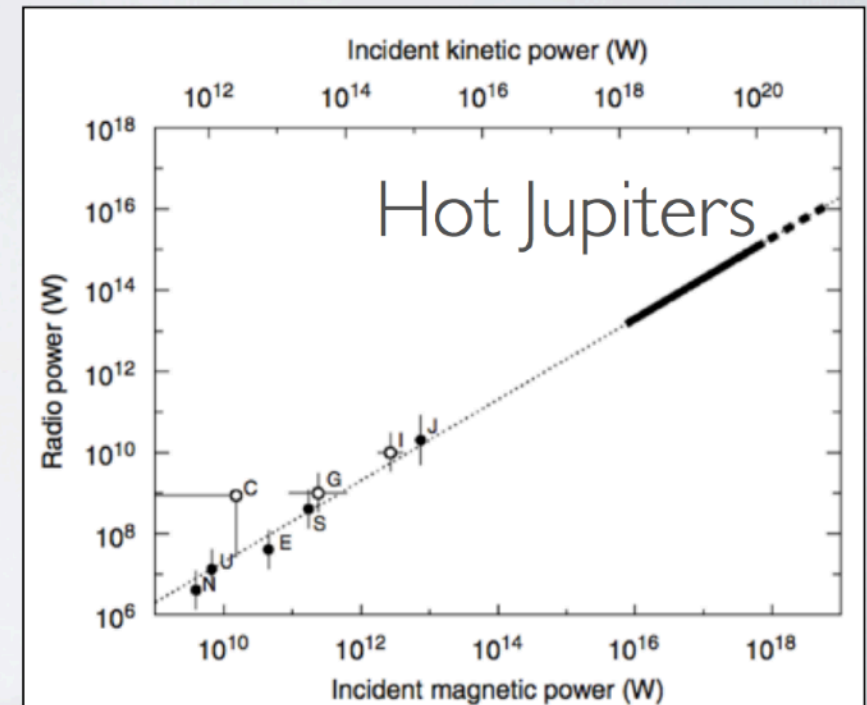


Adapted from Zarka et al. (2007)

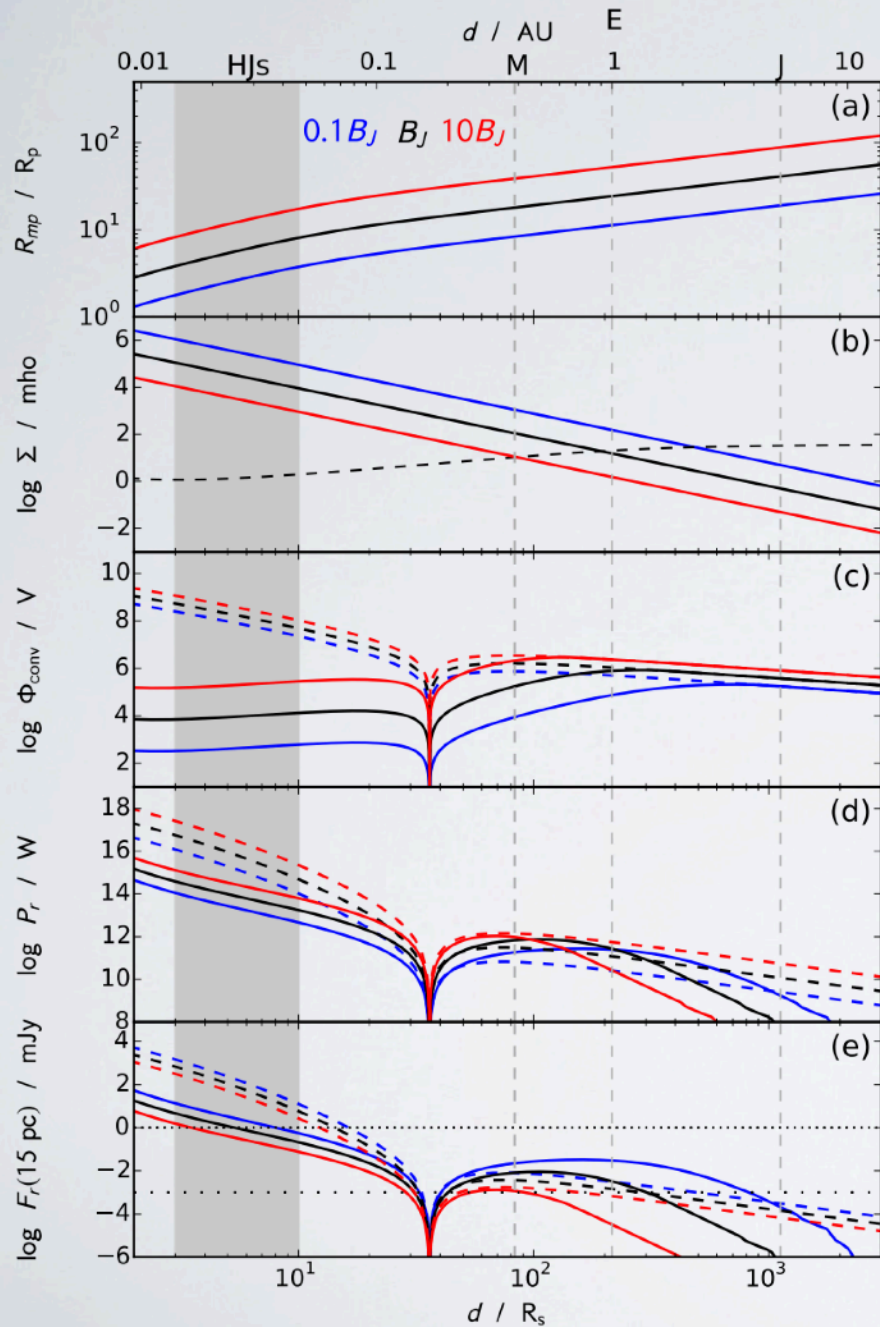


# Radiometric Bode's Law

- Widely used empirical scaling relation (e.g. Farrell et al. 1999, 2004; Zarka et al. 2001, 2007; Lazio et al. 2004; Grießmeier et al. 2005, 2007; Jardine & Cameron 2008; Fares et al. 2010)
- Based on observations of solar system bodies
- Relates input solar wind kinetic/ electromagnetic energy flux to output radio power
- Extrapolation to hot Jupiters implies potentially detectable emission from a number of planets



From Zarka et al. (2007)



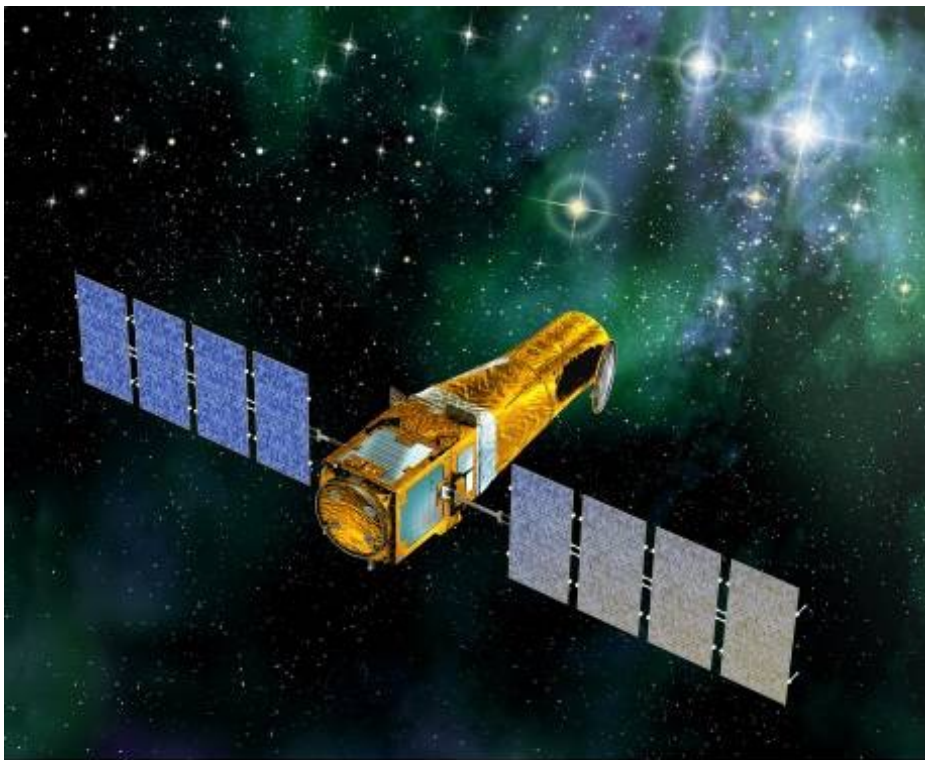
Sub-solar magnetosphere radius

Alfvén, Pedersen conductance

Convection voltage

Total radio power - our model (solid line), RBL (dashed line)

Flux density - our model (solid line), RBL (dashed line)



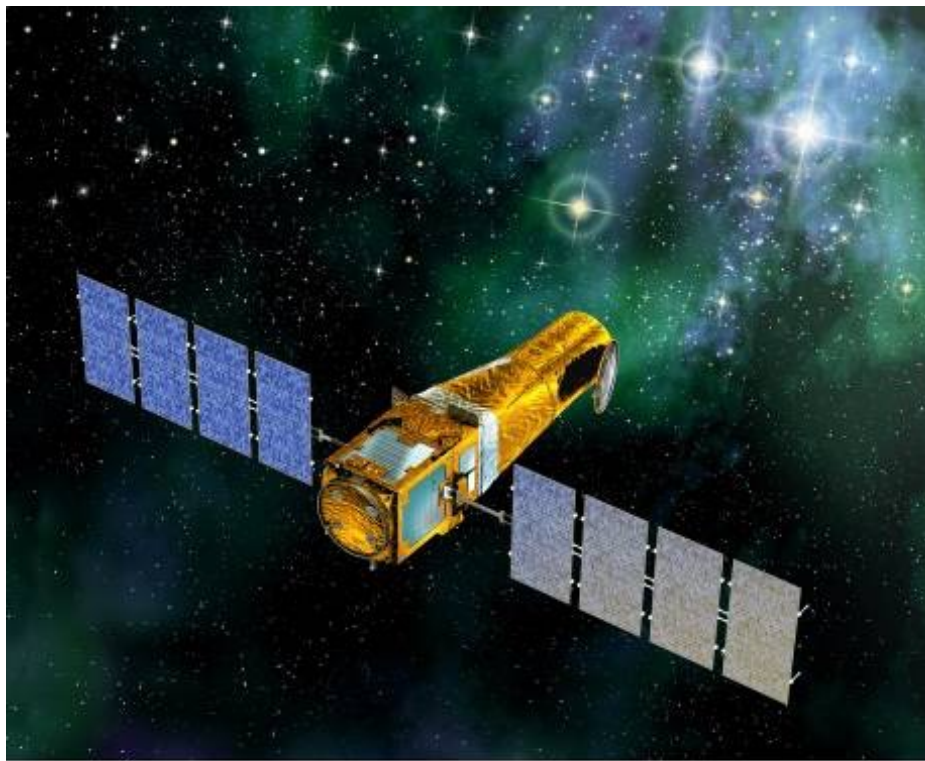
© CNES - Octobre 2005/illus. D. Ducros

# MISSÕES RECENTES

## COROT

### ☑ Objetivos científicos

- ✓ Estudar a estrutura interna de estrelas usando técnicas fotométricas.
- ✓ Detecção de planetas orbitando em torno de estrelas, por meio de medidas na flutuação da intensidade da luz.



© CNES - Octobre 2005/illus. D. Ducros

# MISSÕES RECENTES

## COROT

Participação brasileira em ordem alfabética:

INPE, LNA, ON, UFMG,  
UFRGS, UFRJ, UFRN,

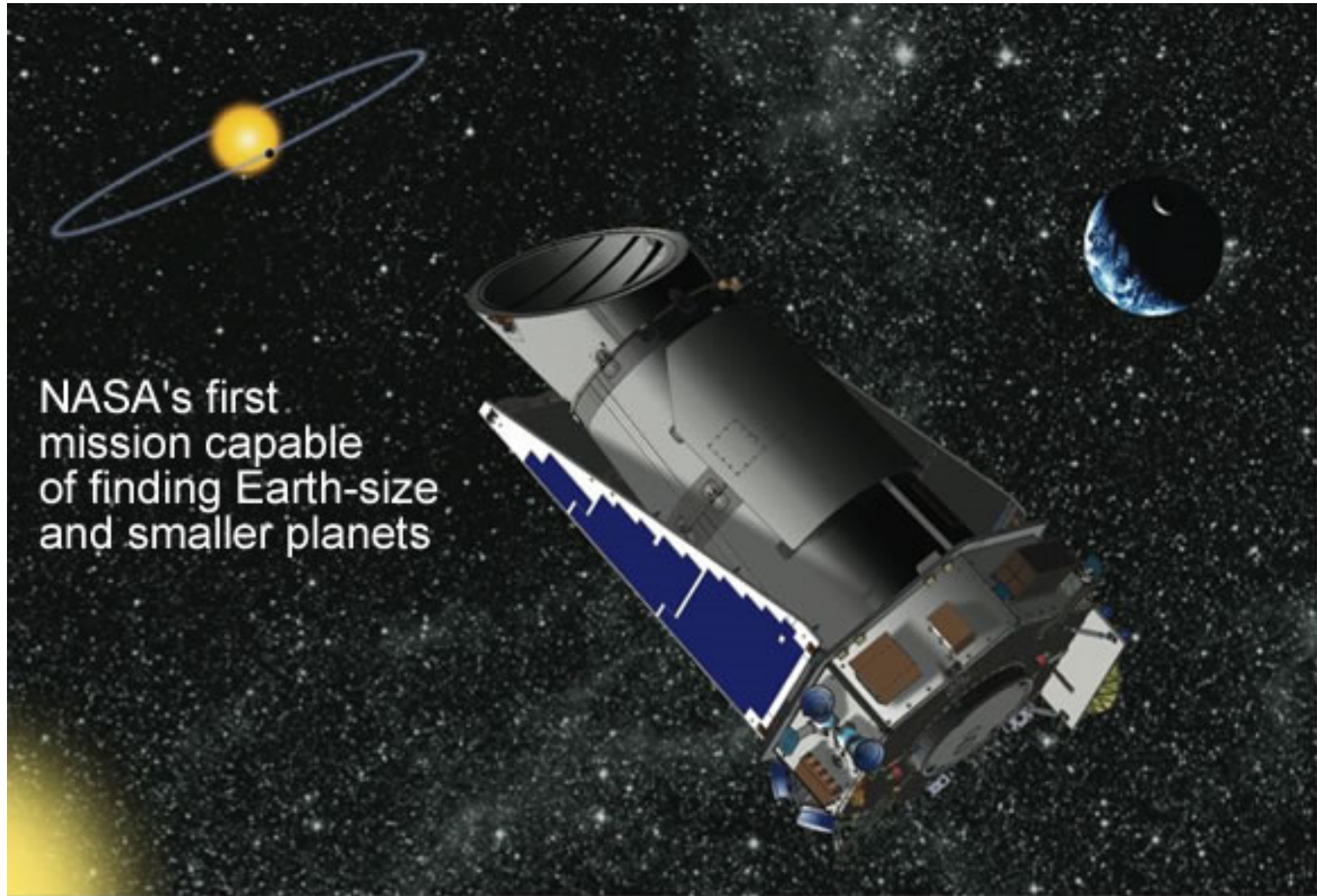
UFSC, U. Mackenzie, USP

### ☑️ Objetivos científicos

✓ Estudar a estrutura interna de estrelas usando técnicas fotométricas.

✓ Detecção de planetas orbitando em torno de estrelas, por meio de medidas na flutuação da intensidade da luz.

# O Satélite KEPLER





# Kepler's Six Years In Science (and Counting)

By The Numbers\*

2,258 DAYS  
IN SPACE

2 MISSIONS  
Kepler and K2

306,604  
STARS OBSERVED

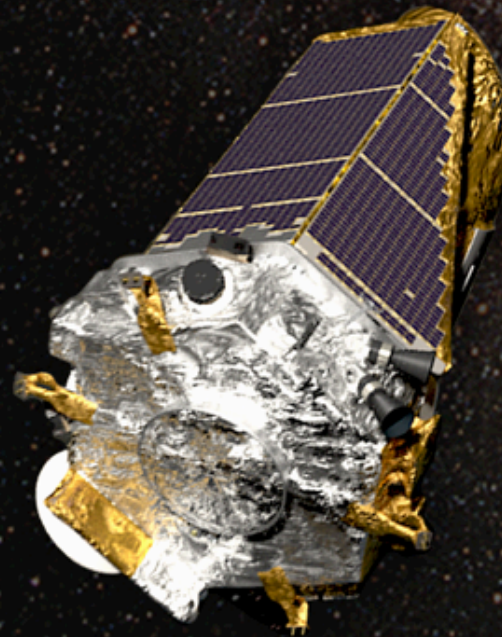
4,601  
CANDIDATE  
exoplanets

12.5 BILLION  
brightness  
measurements of stars

1,024  
CONFIRMED  
exoplanets

20.9  
TERABYTES  
publicly available data

8 CONFIRMED  
SMALL HABITABLE ZONE  
EXOPLANETS



64 MILLION MILES AWAY  
trailing Earth around the sun



[www.nasa.gov/kepler](http://www.nasa.gov/kepler)

\* As of May 12, 2015



# Kepler's Six Years In Science (and Counting)

By The Numbers\*

2,258 DAYS  
IN SPACE

2 MISSIONS  
Kepler and K2

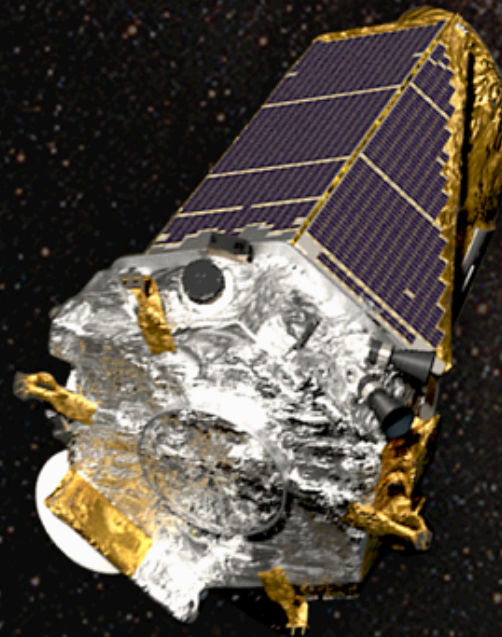
306,604  
STARS OBSERVED

4,601  
CANDIDATE  
exoplanets

12.5 BILLION  
brightness  
measurements of stars

1,024  
CONFIRMED  
exoplanets

20.9  
TERABYTES  
publicly available data



64 MILLION MILES AWAY  
trailing Earth around the sun

8 CONFIRMED  
SMALL HABITABLE ZONE  
EXOPLANETS



[www.nasa.gov/kepler](http://www.nasa.gov/kepler)

\* As of May 12, 2015

# Kepler

BY THE NUMBERS



**9.6** YEARS IN SPACE



**530,506**  
STARS OBSERVED



**2,662**  
PLANETS CONFIRMED



**61** SUPERNOVAE DOCUMENTED

FROM EARLIEST STAGES OF EXPLOSION



**2** MISSIONS COMPLETED

**678**  SCIENCE DATA COLLECTED

**2,946** SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED

**94** MILLION MILES AWAY

**3.12** GALLONS FUEL USED



**732,128**  
COMMANDS EXECUTED



[www.nasa.gov/kepler](http://www.nasa.gov/kepler)

As of October 24, 2018

@NASAKepler

Fim das operações em 2018





# Resultados científicos do Kepler

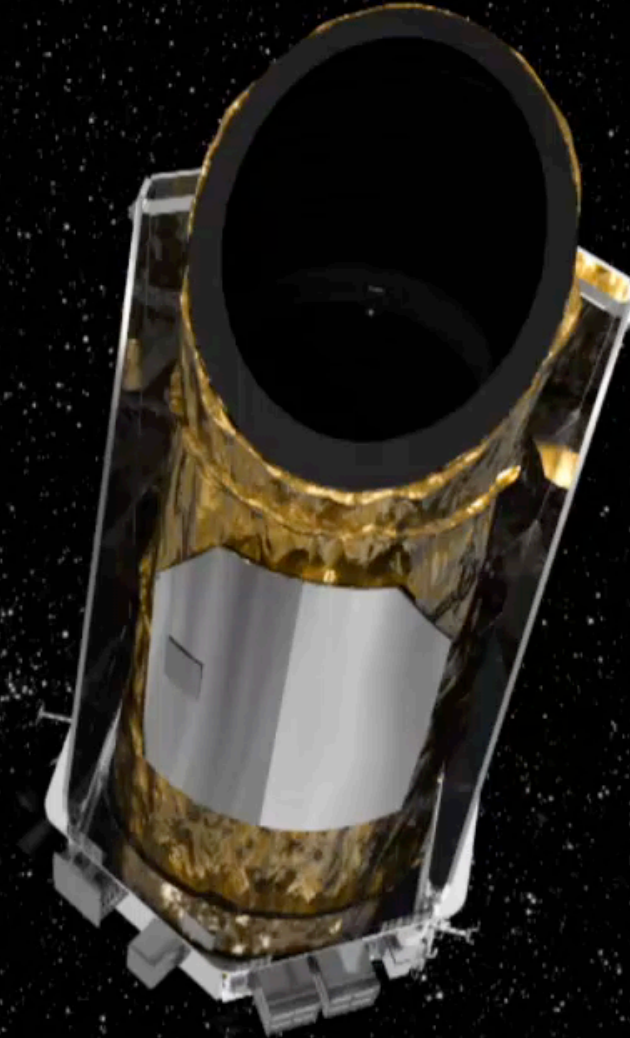
ARTIST'S CONCEPT





# Resultados científicos do Kepler

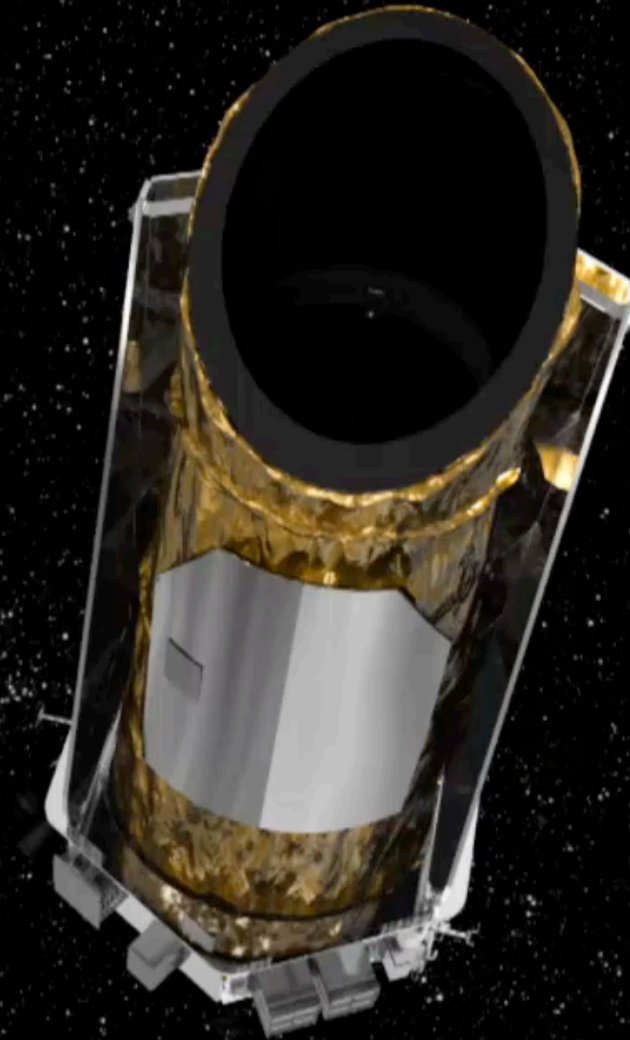
ARTIST'S CONCEPT





# Resultados científicos do Kepler

ARTIST'S CONCEPT





# Sumário dos resultados

- ☑ Há mais planetas do que estrelas na Via Láctea
- ☑ Planetas pequenos (do tipo terrestre) são comuns.
- ☑ Planetas são diversos (em massa, raio e órbita)
- ☑ Os sistemas solares são diversos também (em número de planetas rochosos versus gasosos, em distância à estrela hospedeira e em número de planetas)
- ☑ Novos ideias sobre as estrelas (incluindo diversos detalhes de explosões de supernovas)

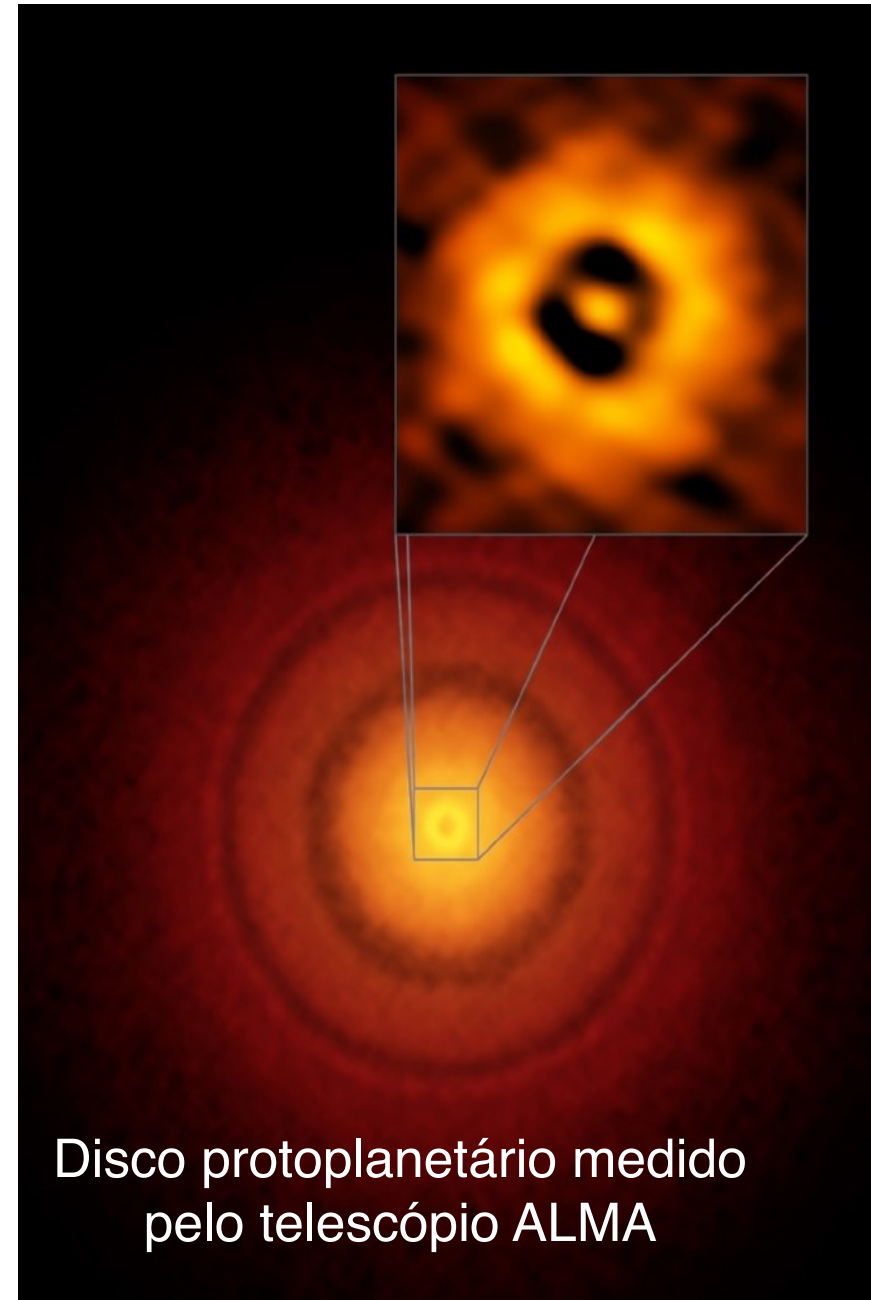


Ambos os programas estão suspensos

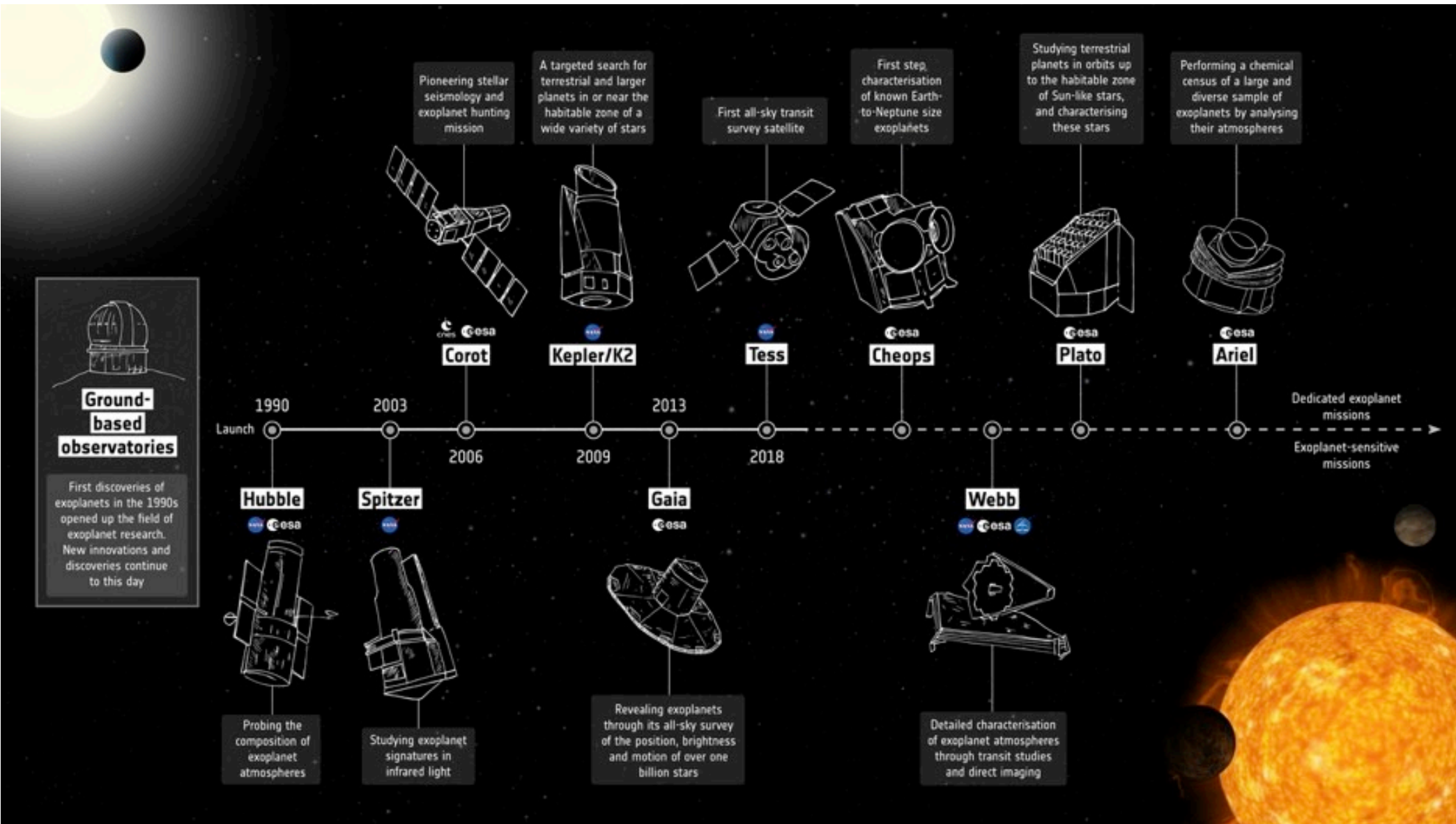


# O futuro

- ☑ Medidas de trânsitos planetários
- ☑ Medidas de atmosferas planetárias
- ☑ Caracterização de objetos e atmosferas
- ☑ Busca de bioassinaturas, a partir da confirmação das condições de habitabilidade



# O futuro no espaço...



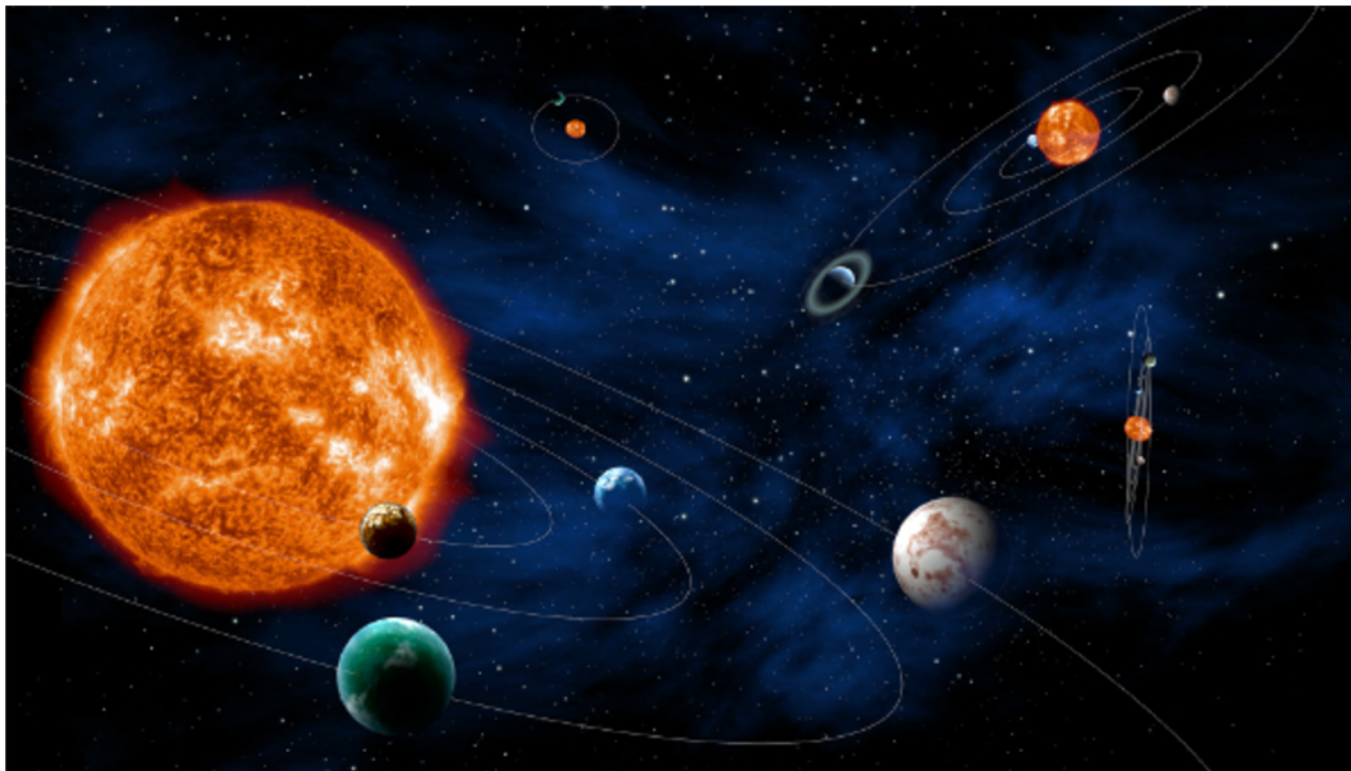




# O futuro próximo: PLATO

## SCIENCE GOALS

The primary goal of PLATO is to open a new way in exoplanetary science, by detecting terrestrial exoplanets in the habitable zone of solar-type stars and characterising their bulk properties. PLATO will provide the key information (planet radii, mean densities, stellar irradiation, and architecture of planetary systems) needed to determine the habitability of these unexpectedly diverse new worlds. PLATO will answer the profound and captivating question: how common are worlds like ours and are they suitable for the development of life?





# O futuro próximo: PLATO

## SUMMARY

| <b>PLATO</b><br><b>PLANetary Transits and Oscillations of stars</b> |  |
|---|--|
| <b>Theme</b>  | What are the conditions for planet formation and the emergence of life?  |
| <b>Primary Goal</b>   | Detection and characterisation of terrestrial exoplanets around bright solar-type stars, with emphasis on planets orbiting in the habitable zone.  |
| <b>Measurements</b>   | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ Photometric monitoring of a large number of bright stars for the detection of planetary transits and the determination of the planetary radii (around 3% accuracy)</li><li>▪ Ground-based radial velocity follow-up observations for the determination of the planetary masses (around 10% accuracy)</li><li>▪ Asteroseismology for the determination of stellar masses, radii, and ages (up to 10% of the main sequence lifetime)</li><li>▪ Identification of bright targets for spectroscopic follow-up observations of planetary atmospheres with other ground and space facilities</li></ul> |
| <b>Wavelength</b>   | Optical  |
| <b>Telescope</b>  | A number of small, optically fast, wide-field telescopes   |
| <b>Orbit</b>  | Large amplitude libration orbit around Sun-Earth Lagrangian point, L2  |
| <b>Lifetime</b>   | 4 years of nominal science operations; satellite built and verified for an in-orbit lifetime of 6.5 years  |
| <b>Type</b>   | M-class Mission  |



FIM DA AULA 6