



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. 17 e 18 do Livro *Astrobiology* (Charles Cockel)
- ✓ Cap. 9 do livro "Astrobiology: a multidisciplinary approach" (Lunine)
- ✓ Caps. 5 e 6 do livro "Astrobiologia: uma ciência emergente" (Galante, Avellar, Horvath, Rodrigues)



Procurando vida...

- ☑ Não inteligente...
 - ✓ Busca de bioassinaturas no Sistema Solar.
 - ✓ Busca de planetas extra-solares.
 - ✓ Busca de bioassinaturas 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 bioassinaturas 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?

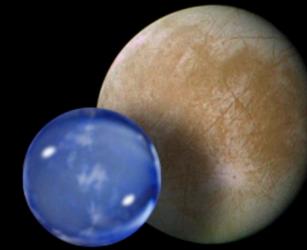
✓ Titã?

✓ Encelado?

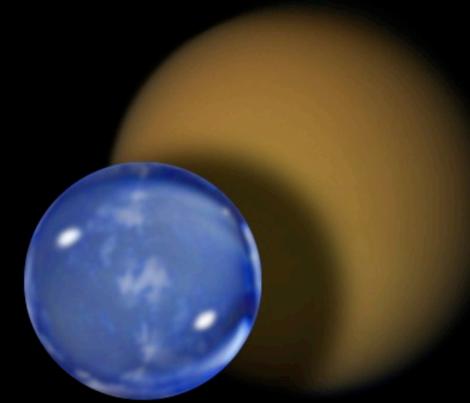




Liquid Water in the Solar System



EUROPA



TITAN



EARTH

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo, NASA

Oceans in the Solar System



Ganymede
(5.4% Liquid Water)



Enceladus
(14% Liquid Water)



Europa
(6.4% Liquid Water)



Titan
(11% Liquid Water)



Mars' Past
(0.01% Liquid Water)



Earth
(0.02% Liquid Water)

(mass percent of liquid water between parenthesis, excluding water ice)

Credit: PHL @ UPR Arcibo, NASA



Missões a Marte

- ☑ 50 missões já lançadas (1a. Em 10/10/1960)
 - ✓ 19 da URSS/Rússia
 - ✓ 24 dos EUA
 - ✓ ESA (3), China (2), Índia (1), Japão (1) e Emirados Árabes (1)
- ☑ Bem sucedidos: 27
 - ✓ Parcialmente: 3
 - ✓ Ainda operacionais: 13
- ☑ Falhas
 - ✓ foguete: 15
 - ✓ aterrissagem: 1
 - ✓ lançamento: 9
 - ✓ instrumento: 10
- ☑ 8 jipes desceram em Marte, 6 foram bem sucedidos e 3 ainda estão operacionais (Curiosity, Perseverance e Zhurong)
- ☑ Tipos de missão: flybys, orbiters, landers e 1 helicóptero

Obs: a soma é maior do que o número de missões devido à uma única missão poder contar vários experimentos/instrumentos



A exploração recente de Marte

☑ NASA

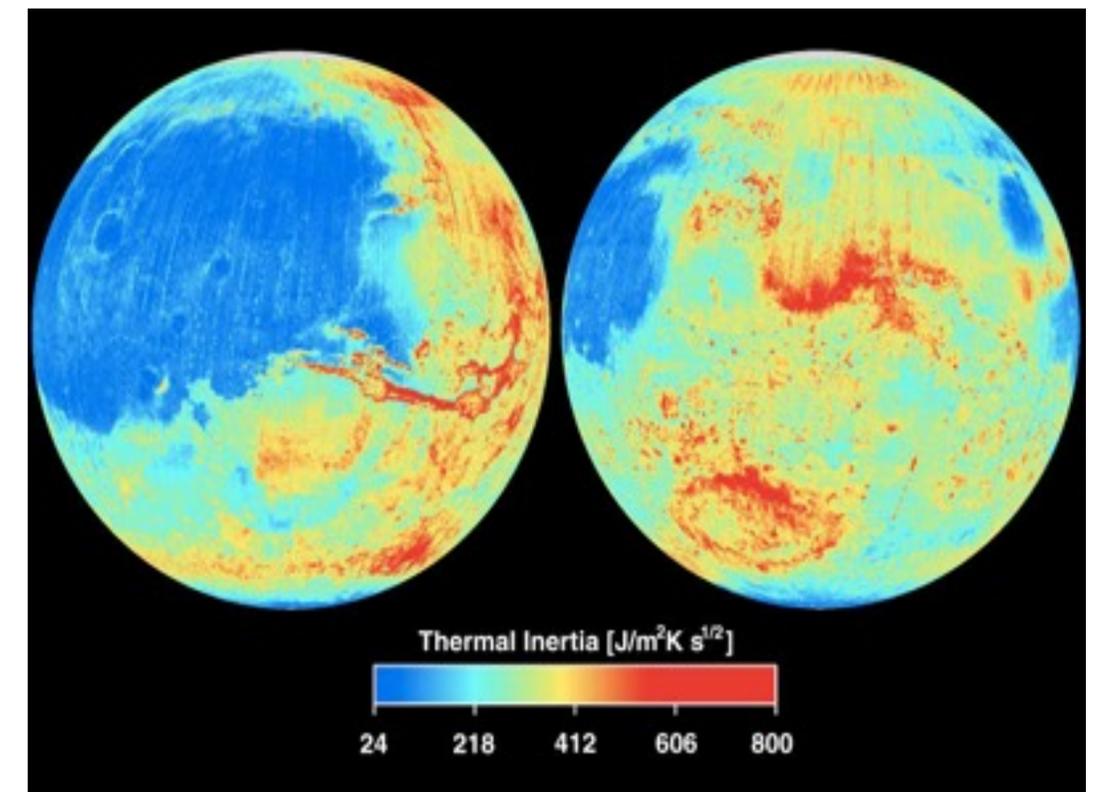
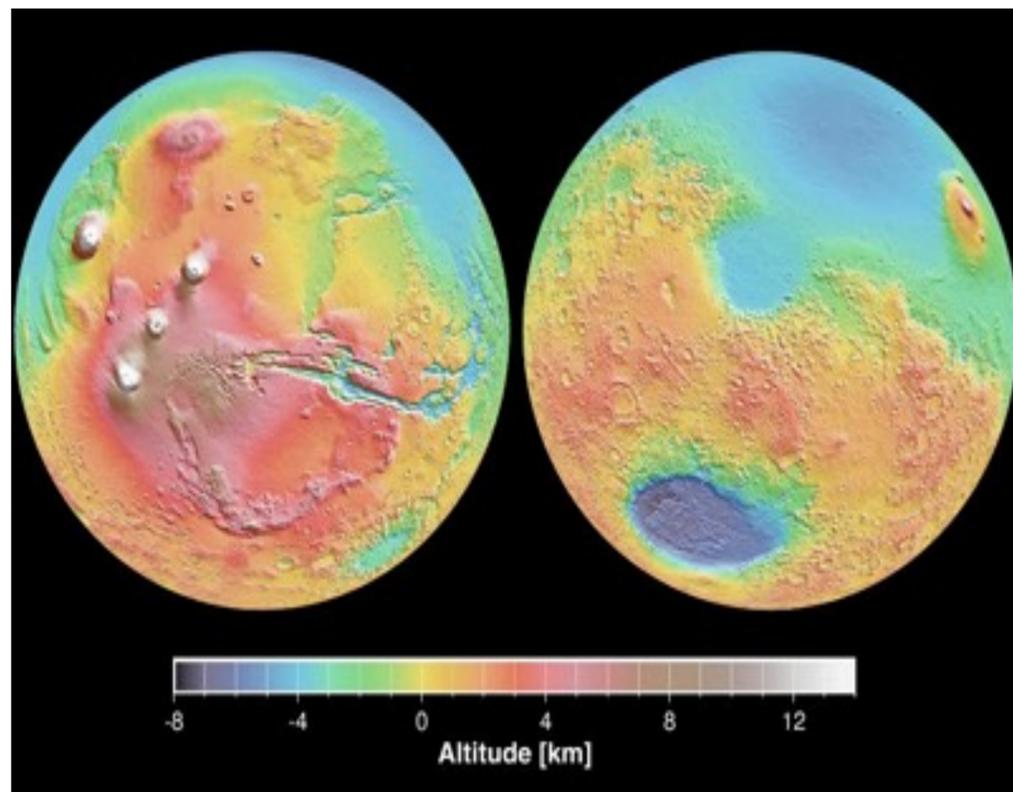
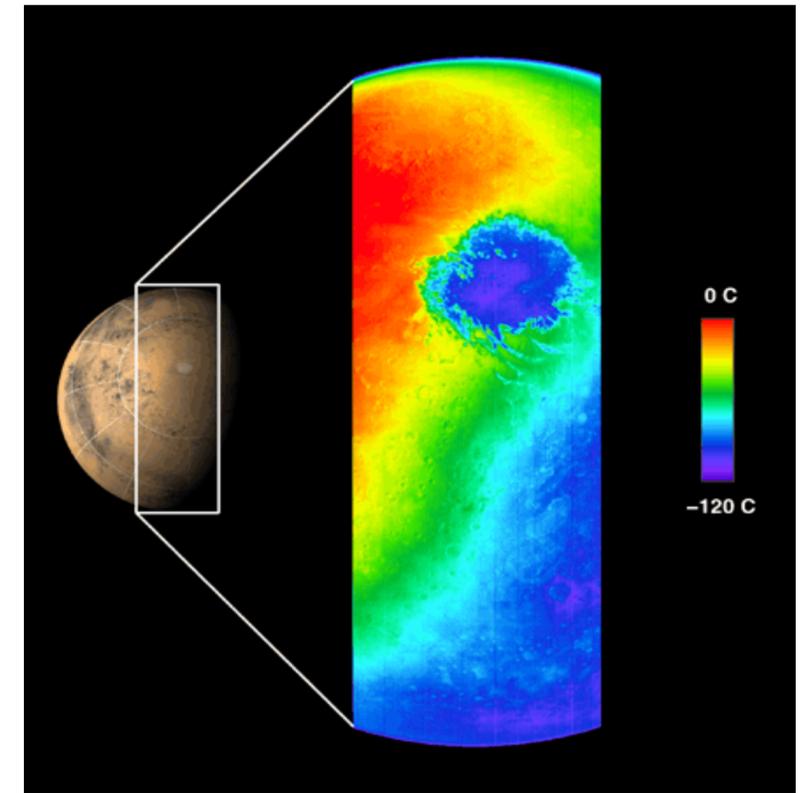
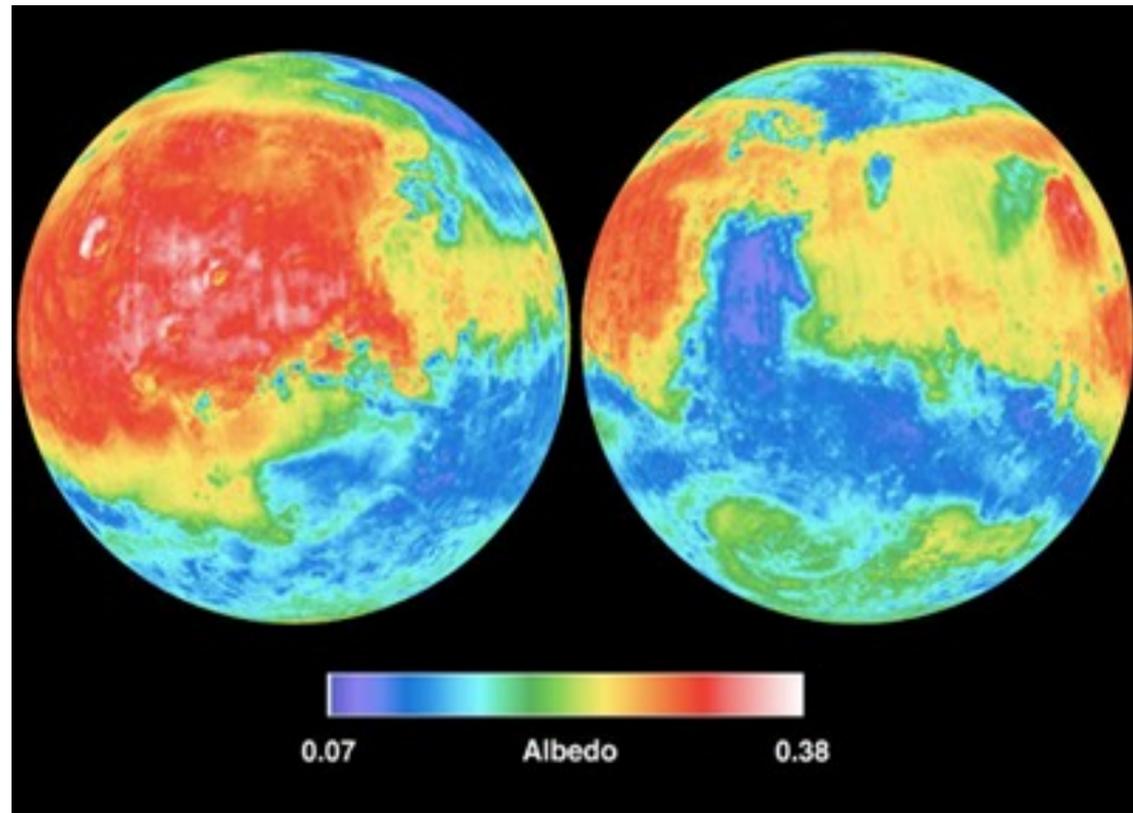
- ✓ Mars Rovers: Spirit, Opportunity, Curiosity, Perseverance
- ✓ Mars Global Surveyor/Mars Pathfinder (Sojourner)

☑ ESA

- ✓ Mars Express: Beagle 2



As várias faces de Marte





Água em Marte?

doi:10.1038/nature07097

nature

LETTERS

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

John F. Mustard¹, S. L. Murchie², S. M. Pelkey¹, B. L. Ehlmann¹, R. E. Milliken³, J. A. Grant⁴, J.-P. Bibring⁵, F. Poulet⁵, J. Bishop⁶, E. Noe Dobrea³, L. Roach¹, F. Seelos², R. E. Arvidson⁷, S. Wiseman⁷, R. Green³, C. Hash⁸, D. Humm², E. Malaret⁸, J. A. McGovern², K. Seelos², T. Clancy⁹, R. Clark¹⁰, D. Des Marais⁶, N. Izenberg², A. Knudson⁷, Y. Langevin⁵, T. Martin³, P. McGuire⁷, R. Morris¹¹, M. Robinson¹², T. Roush⁶, M. Smith¹³, G. Swayze⁹, H. Taylor², T. Titus¹⁴ & M. Wolff⁹



Água em Marte?

doi:10.1038/nature07097

nature

LETTERS

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

John F. Mustard¹, S. L. Murchie², S. M. Pelkey¹, B. L. Ehlmann¹, R. E. Milliken³, J. A. Grant⁴, J.-P. Bibring⁵, F. Poulet⁵, J. Bishop⁶, E. Noe Dobrea³, L. Roach¹, F. Seelos², R. E. Arvidson⁷, S. Wiseman⁷, R. Green³, C. Hash⁸, D. Humm², E. Malaret⁸, J. A. McGovern², K. Seelos², T. Clancy⁹, R. Clark¹⁰, D. Des Marais⁶, N. Izenberg², A. Knudson⁷, Y. Langevin⁵, T. Martin³, P. McGuire⁷, R. Morris¹¹, M. Robinson¹², T. Roush⁶, M. Smith¹³, G. Swayze⁹, H. Taylor², T. Titus¹⁴ & M. Wolff⁹

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^{1,2}, 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 activity³) were specific to surface environments during the earliest era of Mars's history⁴. Here we report results from the Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM)⁵ 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?

- ☑ 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)

The screenshot shows the Nature journal website interface. At the top, there are navigation links for 'nature.com', 'Publications A-Z index', and 'Browse by subject'. A banner for 'nature human behaviour' is visible. The main header features the 'nature' logo and the tagline 'International weekly journal of science'. A search bar is located on the right side of the header.

The article page is titled 'Letter' and 'Stability against freezing of aqueous solutions on early Mars'. The authors listed are Alberto G. Fairén¹, Alfonso F. Davila¹, Luis Gago-Duport², Ricardo Amils^{3,4} & Christopher P. McKay¹. The article is dated 21 May 2009.

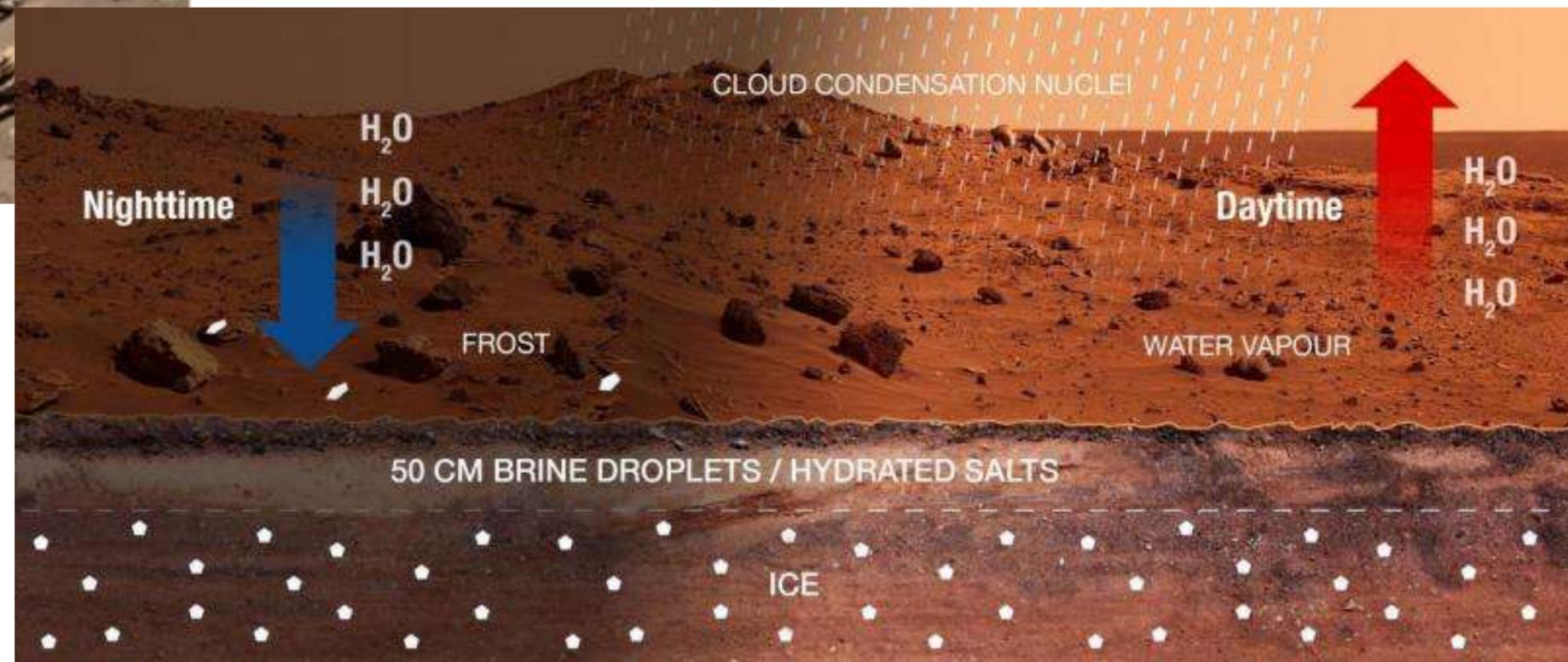
The abstract text reads: "Many features of the Martian landscape are thought to have been formed by liquid water flow^{1, 2} and water-related mineralogies on the surface of Mars are widespread and abundant³. Several lines of evidence, however, suggest that Mars has been cold with mean global temperatures well below the freezing point of pure water⁴. Martian climate modellers^{5, 6} 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^{7, 8} cannot account for the widespread distribution of hydrated and evaporitic minerals throughout the Martian landscape³. Solutes could depress the melting point of water^{9, 10} 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."

On the right side of the page, there is a 'FULL TEXT' section with various options: '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', and 'Order commercial reprints'. There is also a 'SEE ALSO' section with 'Editor's Summary'.

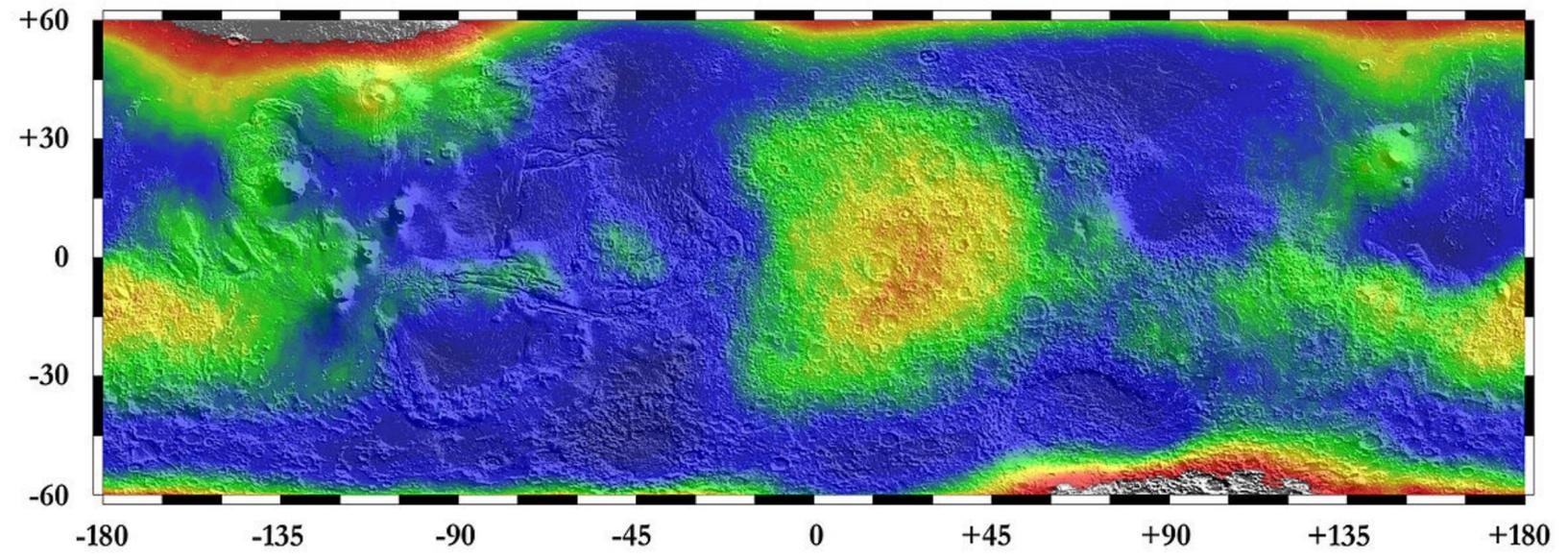
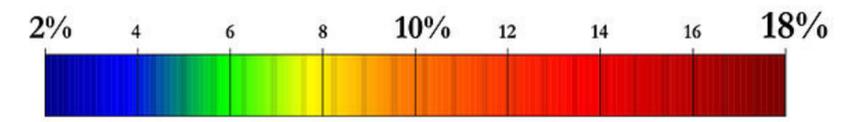
Água líquida 2009 e 2015!!!!



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



Water Equivalent Hydrogen Abundance



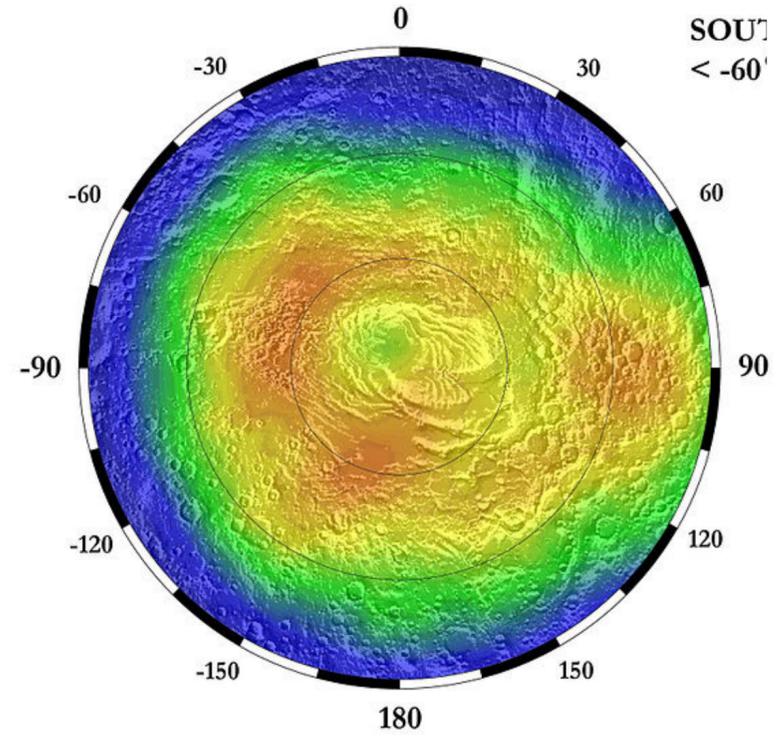
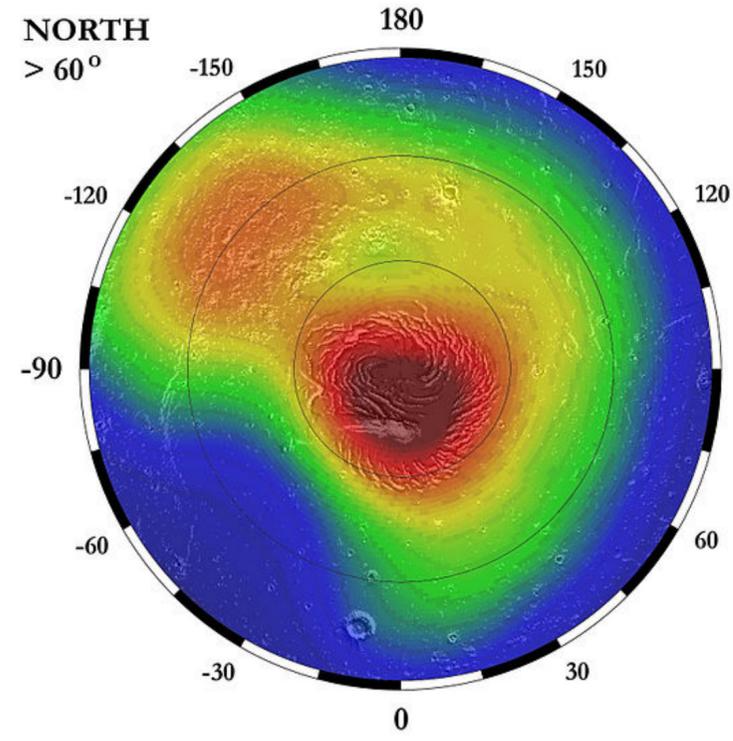
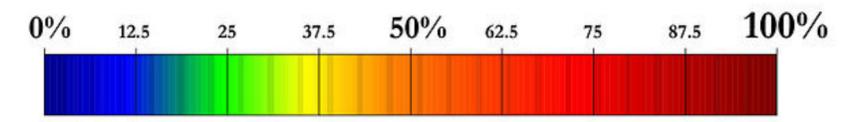
Distribution of Water on Mars: Overlay of water equivalent hydrogen abundances and a shaded relief map derived from MOLA topography. Mass percents of water were determined from epithermal neutron counting rates using the Neutron Spectrometer aboard Mars Odyssey between Feb. 2002 and Apr. 2003.

These data were generated by the Planetary Science Team at Los Alamos: B. Barraclough, D. Bish, D. Delapp, R. Elphic, W. Feldman, H. Funsten, O. Gasnault*, D. Lawrence, S. Maurice*, G. McKinney, K. Moore, T. Prettyman, R. Tokar, D. Vaniman, and R. Wiens. * Also at Observatoire Midi-Pyrénées, France

Reference: Feldman W. C., T. H. Prettyman, S. Maurice, J. J. Plaut, D. L. Bish, D. T. Vaniman, M. T. Mellon, A. E. Metzger, S. W. Squyres, S. Karunatillake, W. V. Boynton, R. C. Elphic, H. O. Funsten, D. J. Lawrence, and R. L. Tokar, The global distribution of near-surface hydrogen on Mars, *JGR-planet*, submitted July 2003.

The neutron spectrometer aboard Mars Odyssey, a component of the Gamma-ray Spectrometer suite of instruments, was designed and built by the Los Alamos National Laboratory and is operated by the University of Arizona in Tucson. The Mars Odyssey mission is managed by the Jet Propulsion Laboratory.

Water Equivalent Hydrogen Abundance



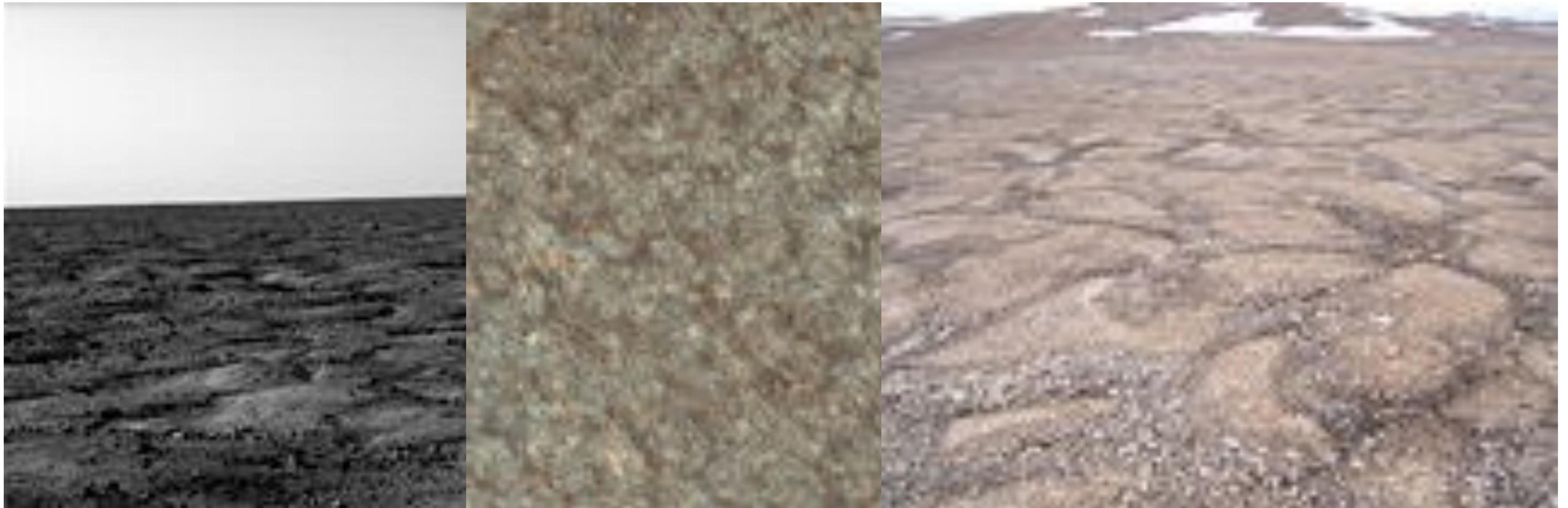
Distribution of Water on Mars: Overlay of water equivalent hydrogen abundances and a shaded relief map derived from MOLA topography. Mass percents of water were determined from epithermal neutron counting rates using the Neutron Spectrometer aboard Mars Odyssey between Feb. 2002 and Apr. 2003.

These data were generated by the Planetary Science Team at Los Alamos: B. Barraclough, D. Bish, D. Delapp, R. Elphic, W. Feldman, H. Funsten, O. Gasnault*, D. Lawrence, S. Maurice*, G. McKinney, K. Moore, T. Prettyman, R. Tokar, D. Vaniman, and R. Wiens. * Also at Observatoire Midi-Pyrénées, France

Reference: Feldman W. C., T. H. Prettyman, S. Maurice, J. J. Plaut, D. L. Bish, D. T. Vaniman, M. T. Mellon, A. E. Metzger, S. W. Squyres, S. Karunatillake, W. V. Boynton, R. C. Elphic, H. O. Funsten, D. J. Lawrence, and R. L. Tokar, The global distribution of near-surface hydrogen on Mars, *JGR-planet*, submitted July 2003.

The neutron spectrometer aboard Mars Odyssey, a component of the Gamma-ray Spectrometer suite of instruments, was designed and built by the Los Alamos National Laboratory and is operated by the University of Arizona in Tucson. The Mars Odyssey mission is managed by the Jet Propulsion Laboratory.

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



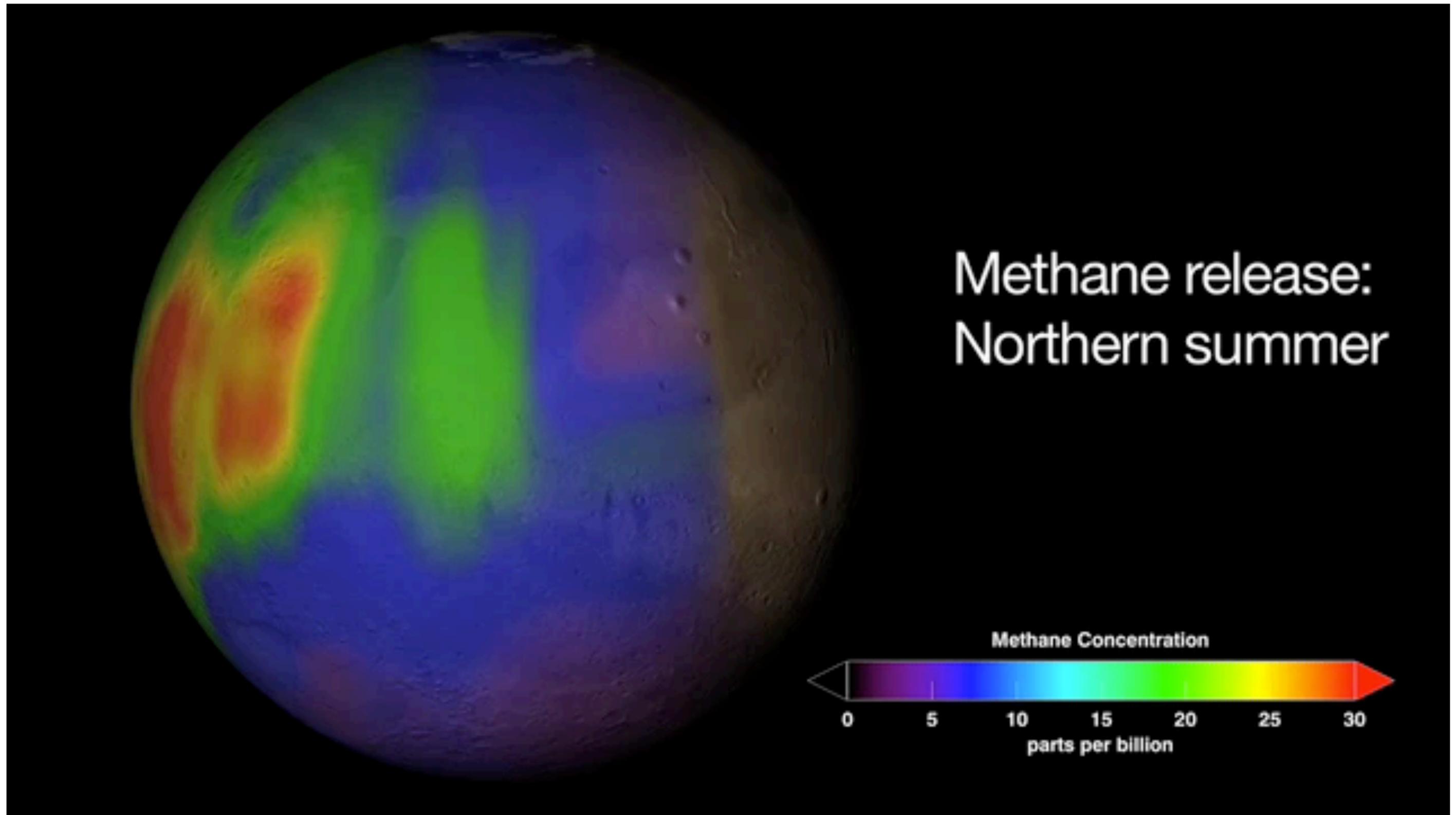
.. comparados com um padrão de solo nas Ilhas Devon, no Ártico Canadense

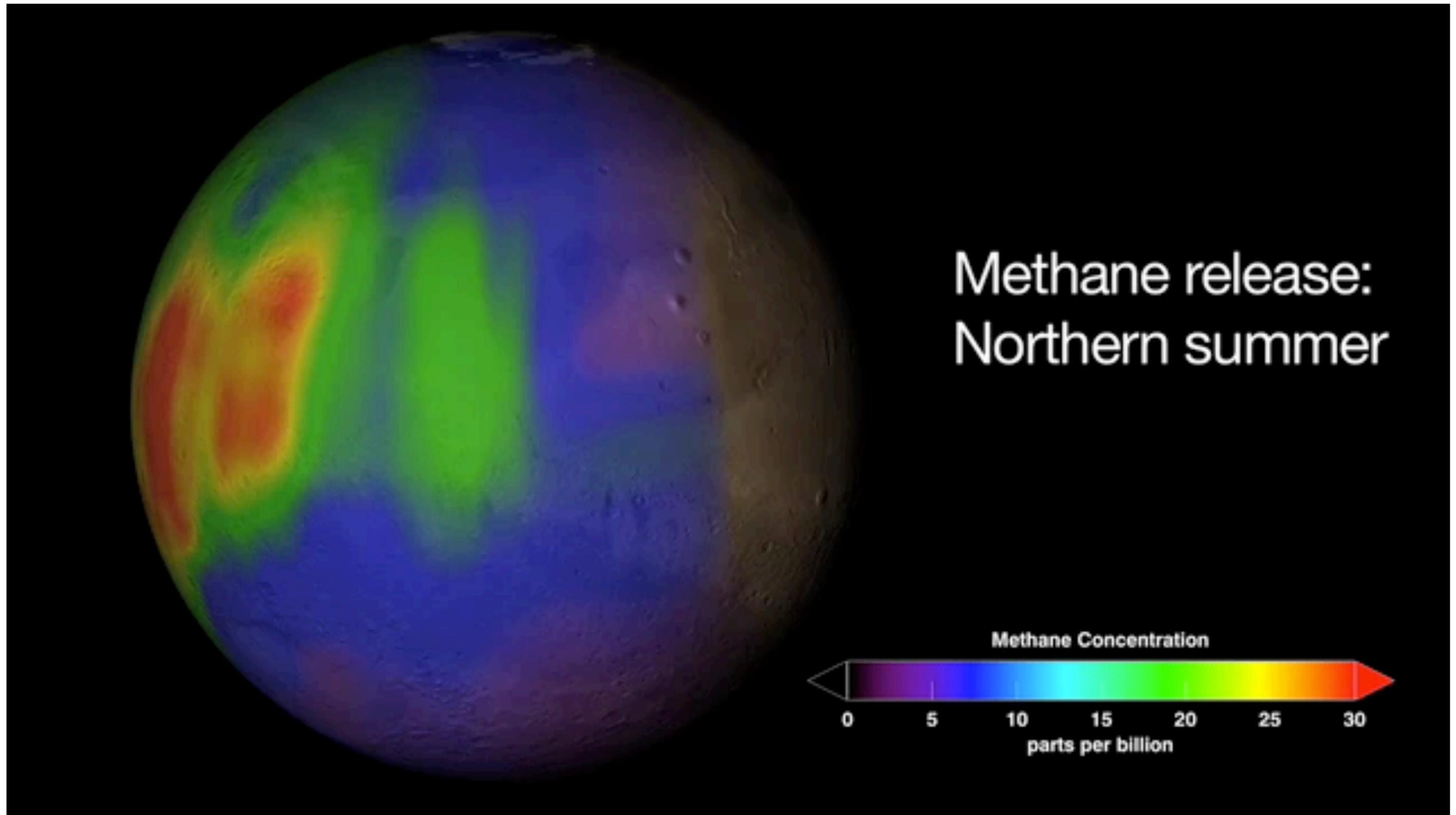
Perfeitamente explicado pelo processo de congelamento e degelo, em ambos os casos!



E a existência de gás metano?

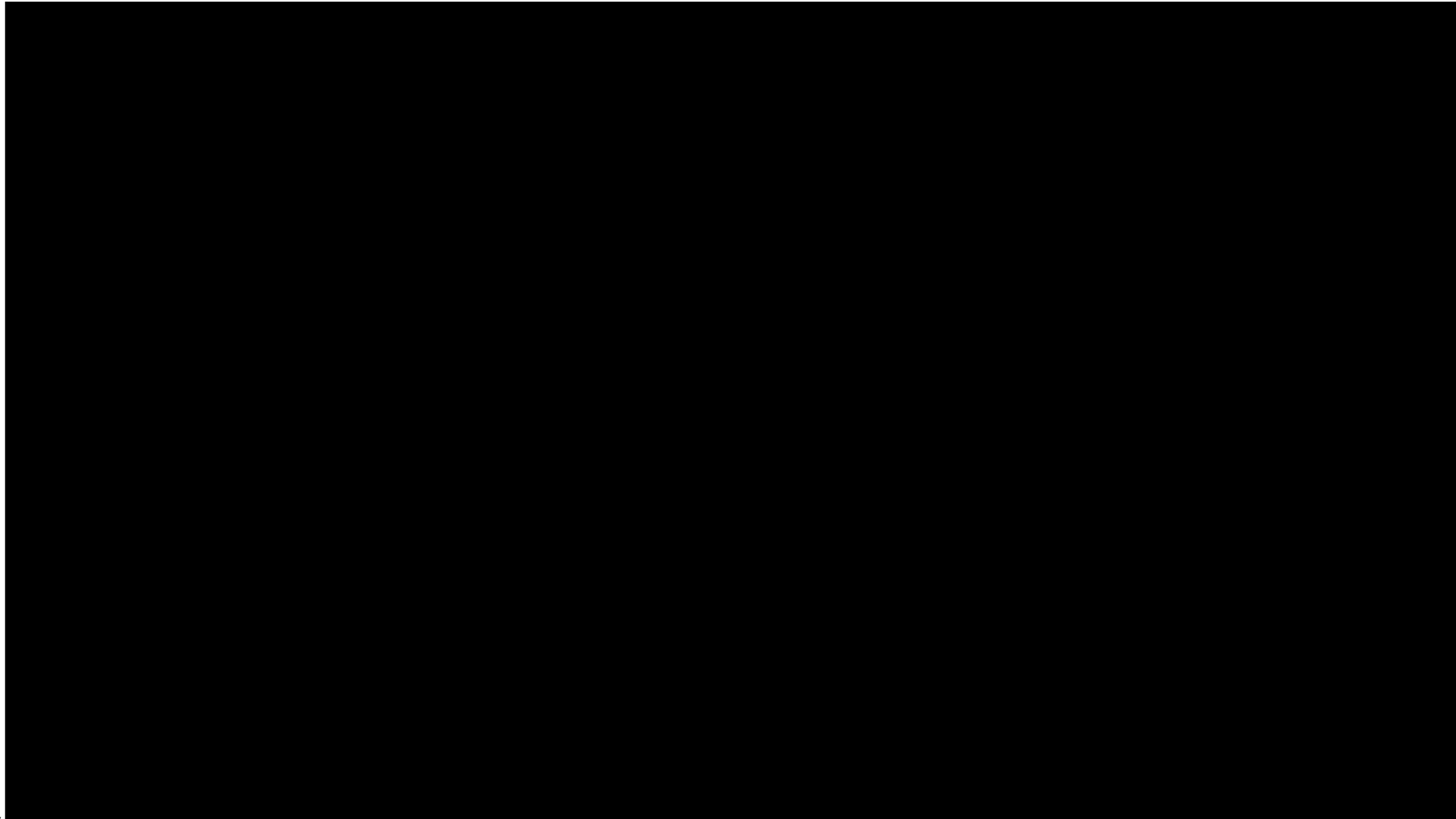
- ☑ Detectado depois de anos (marcianos...) de observação da atmosfera (15/01/2009)
- ☑ Impossível de existir por longos períodos de tempo nas condições atmosféricas de Marte
- ☑ Origem geológica ou biológica recente!
- ☑ Níveis comparáveis aos emitidos por poços de petróleo na Terra





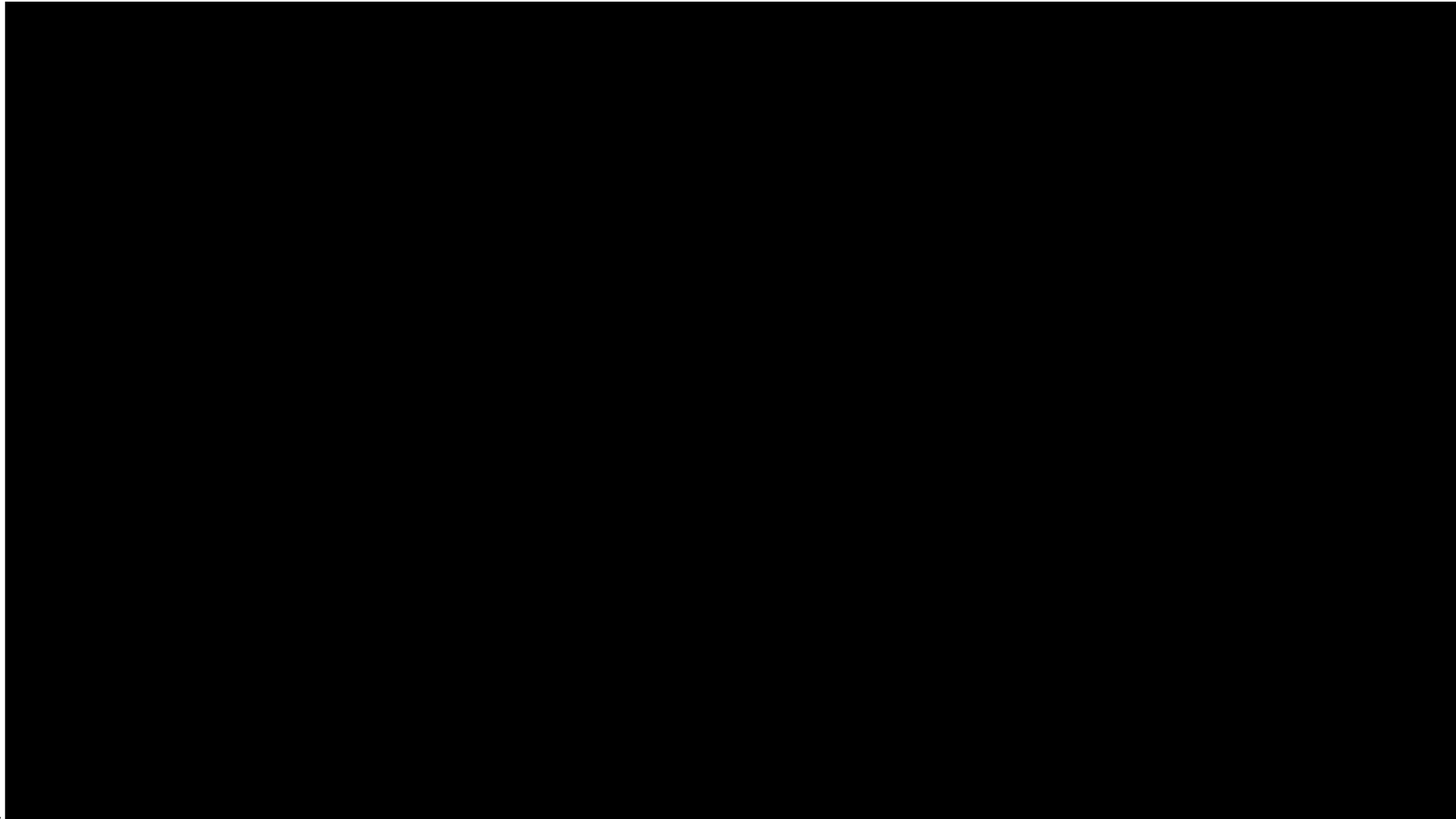


Como é produzido?



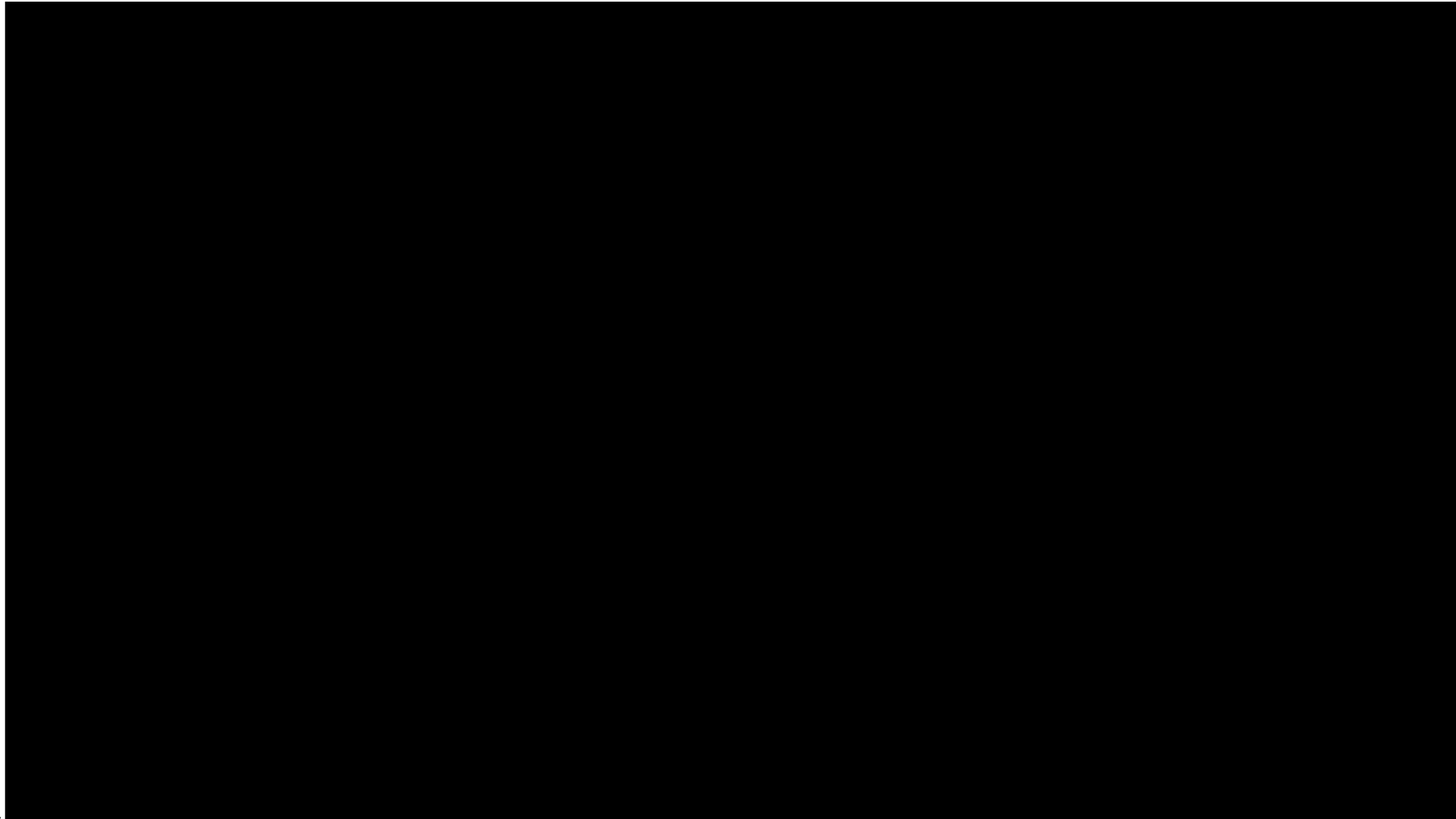


Como é produzido?



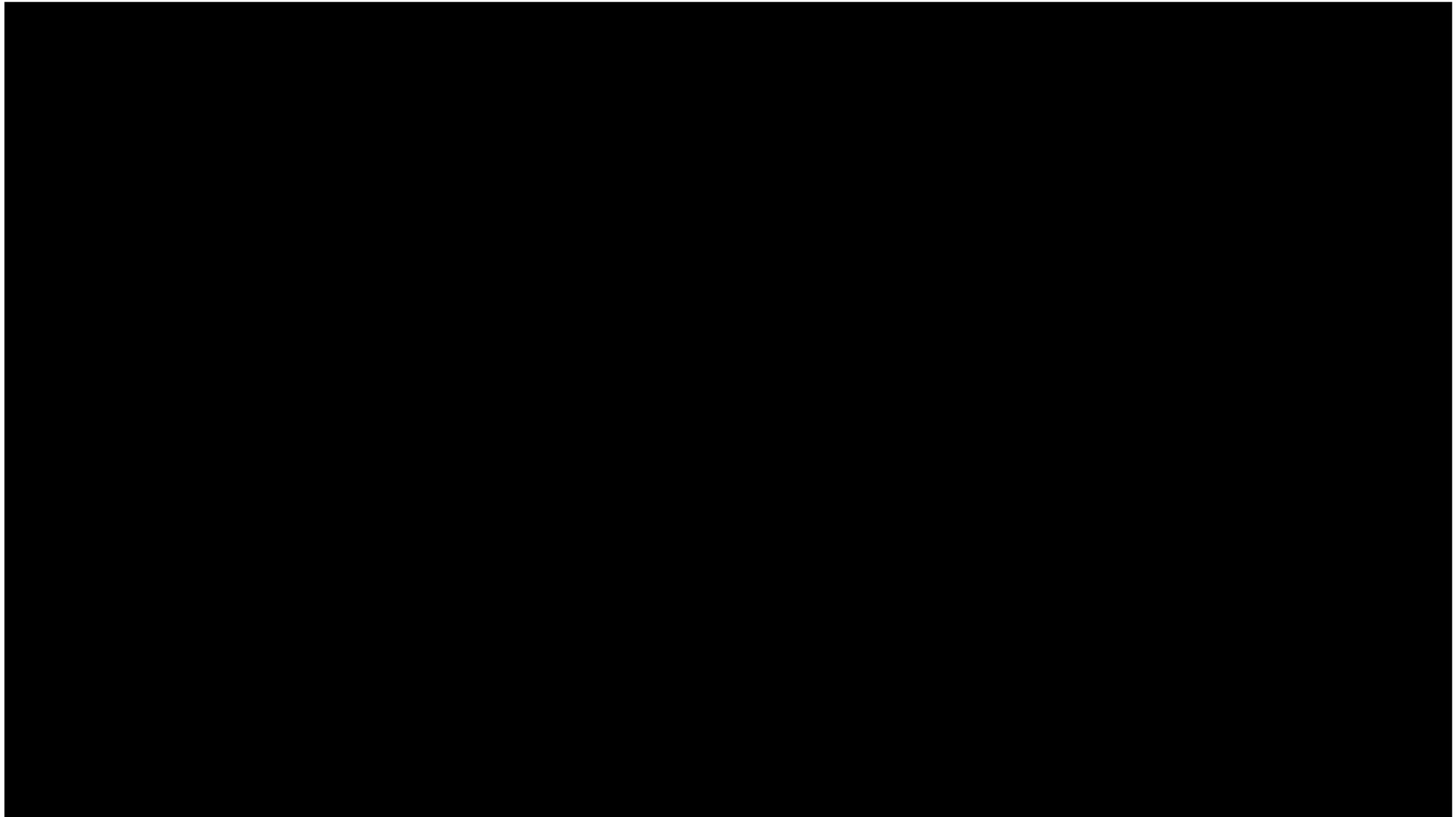


Como é produzido?



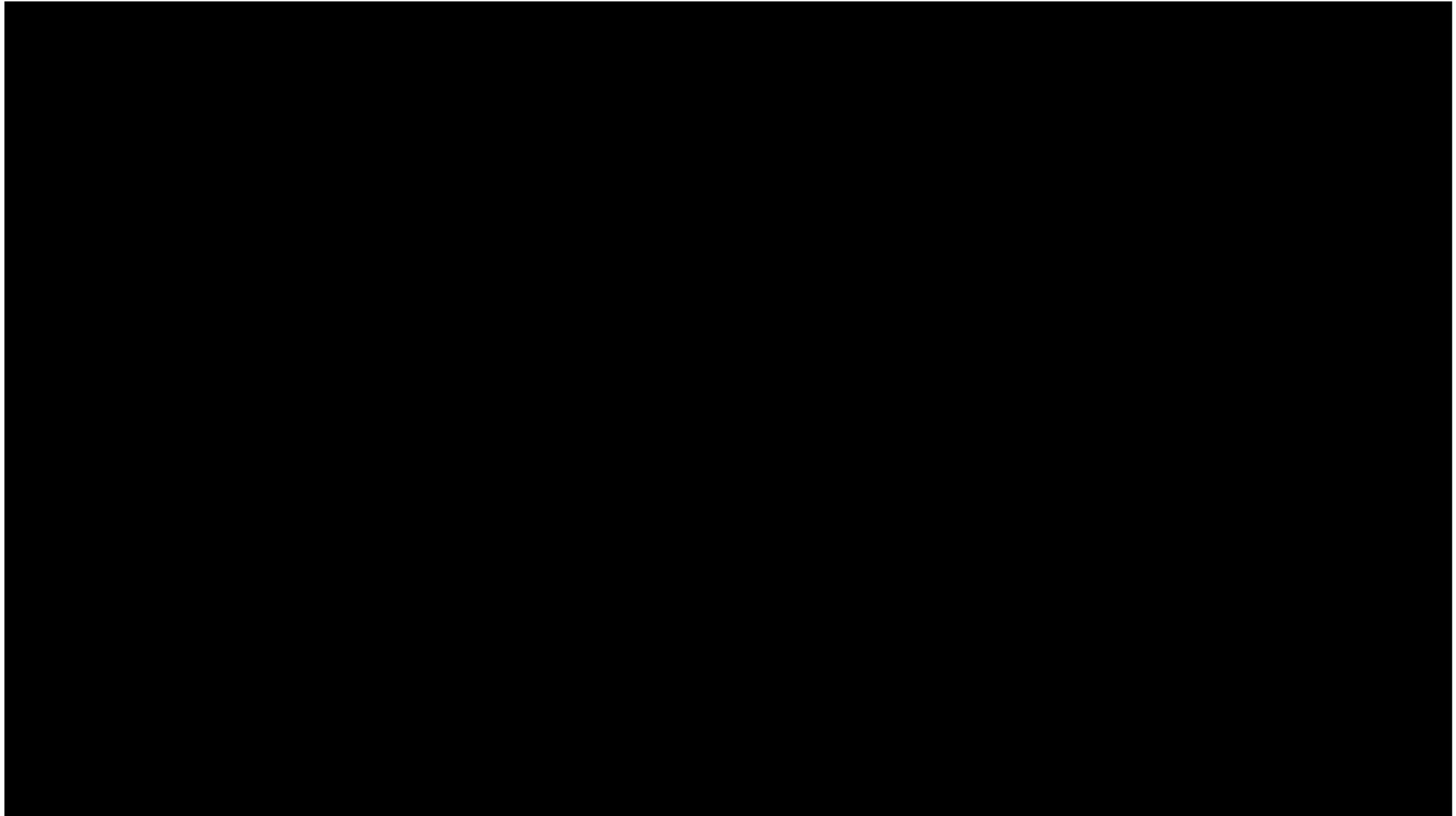


Onde (e o que) é produzido?



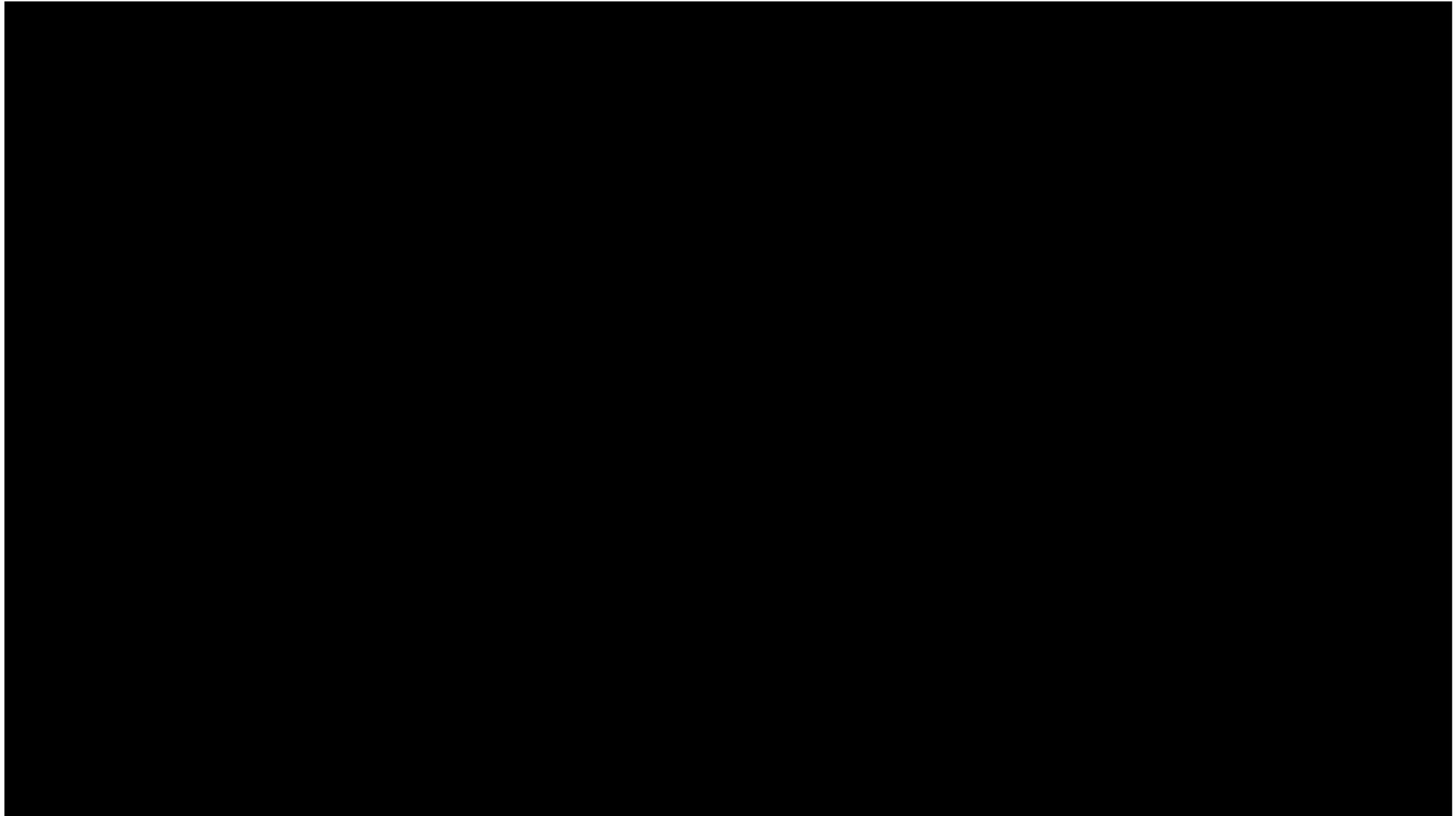


Onde (e o que) é produzido?





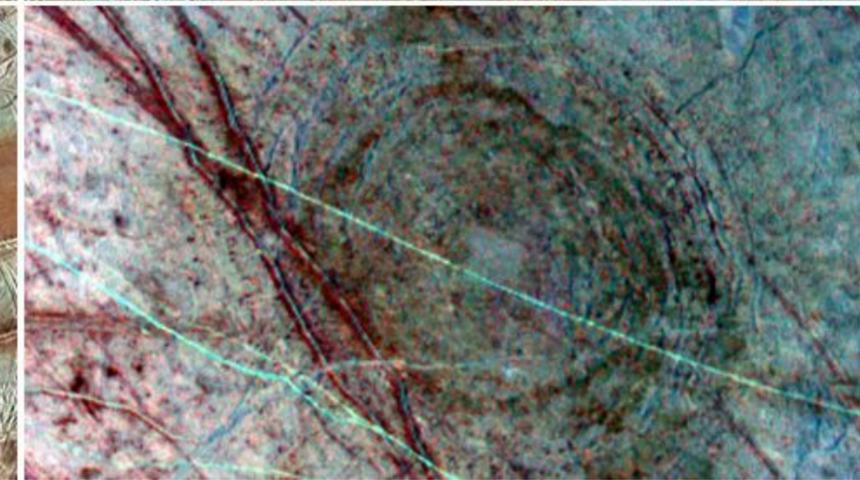
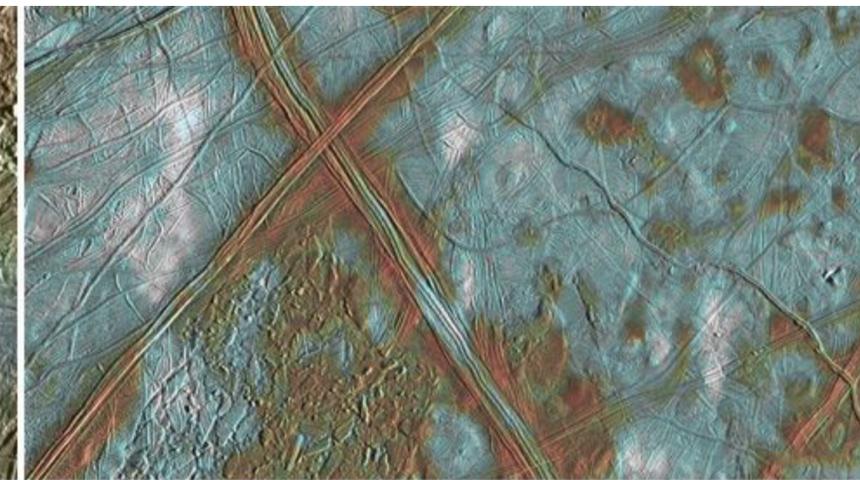
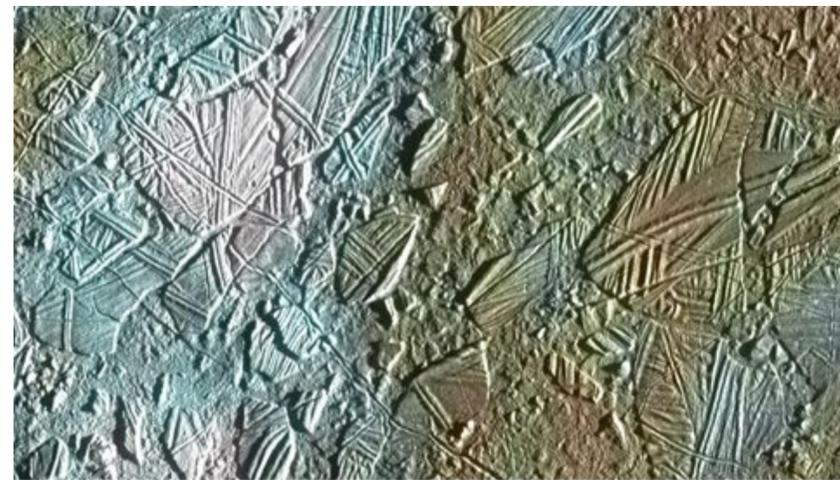
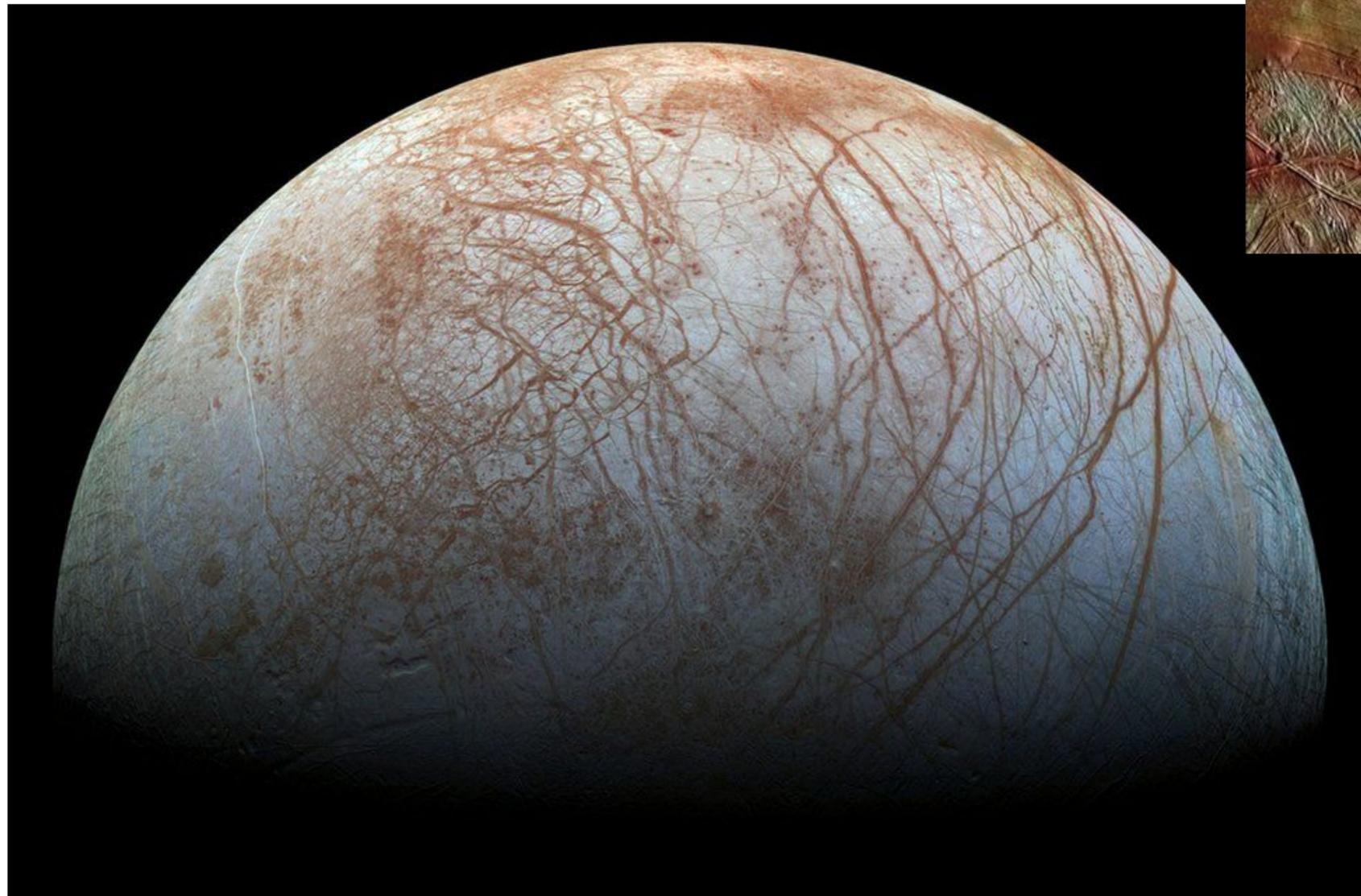
Onde (e o que) é produzido?



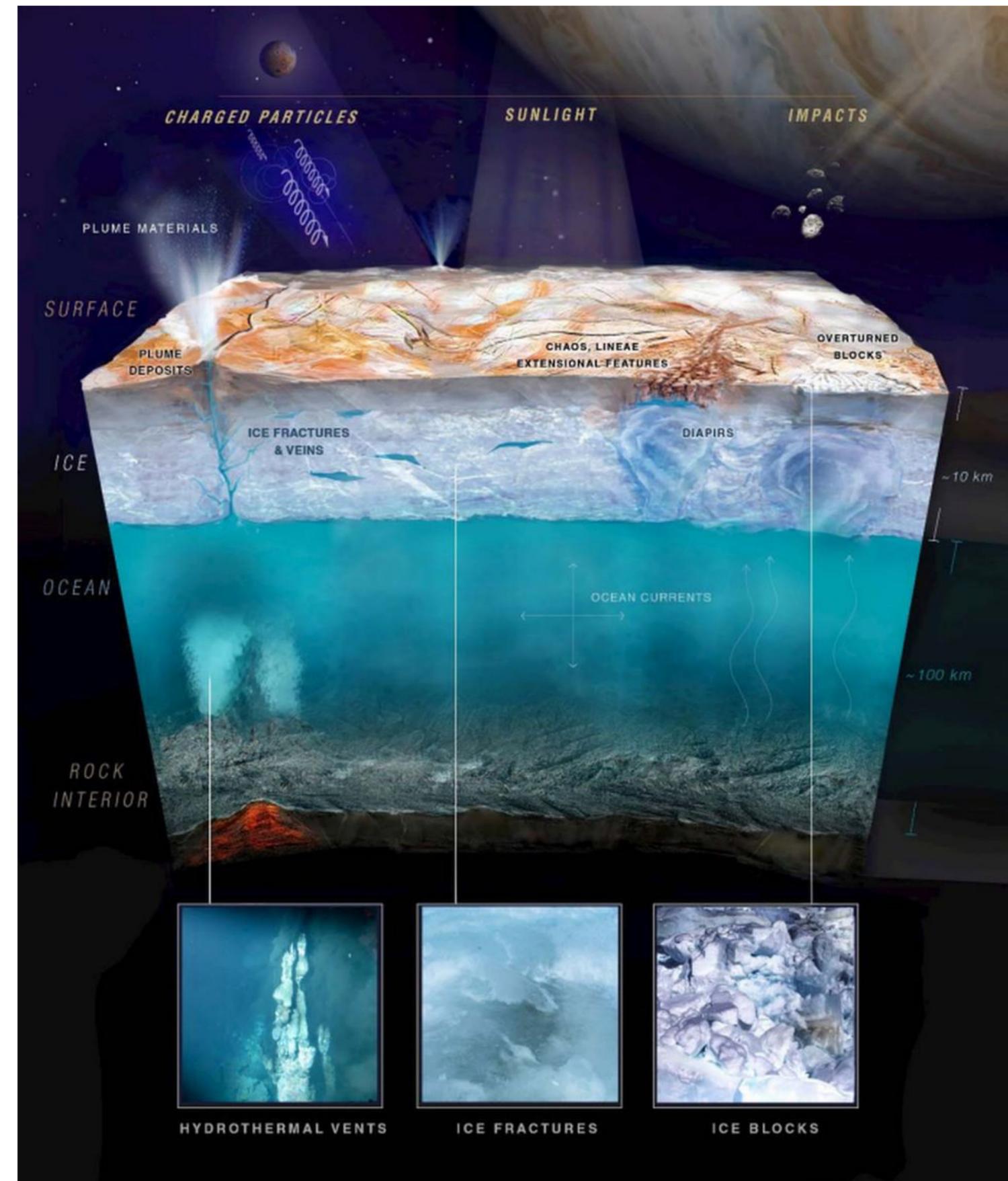
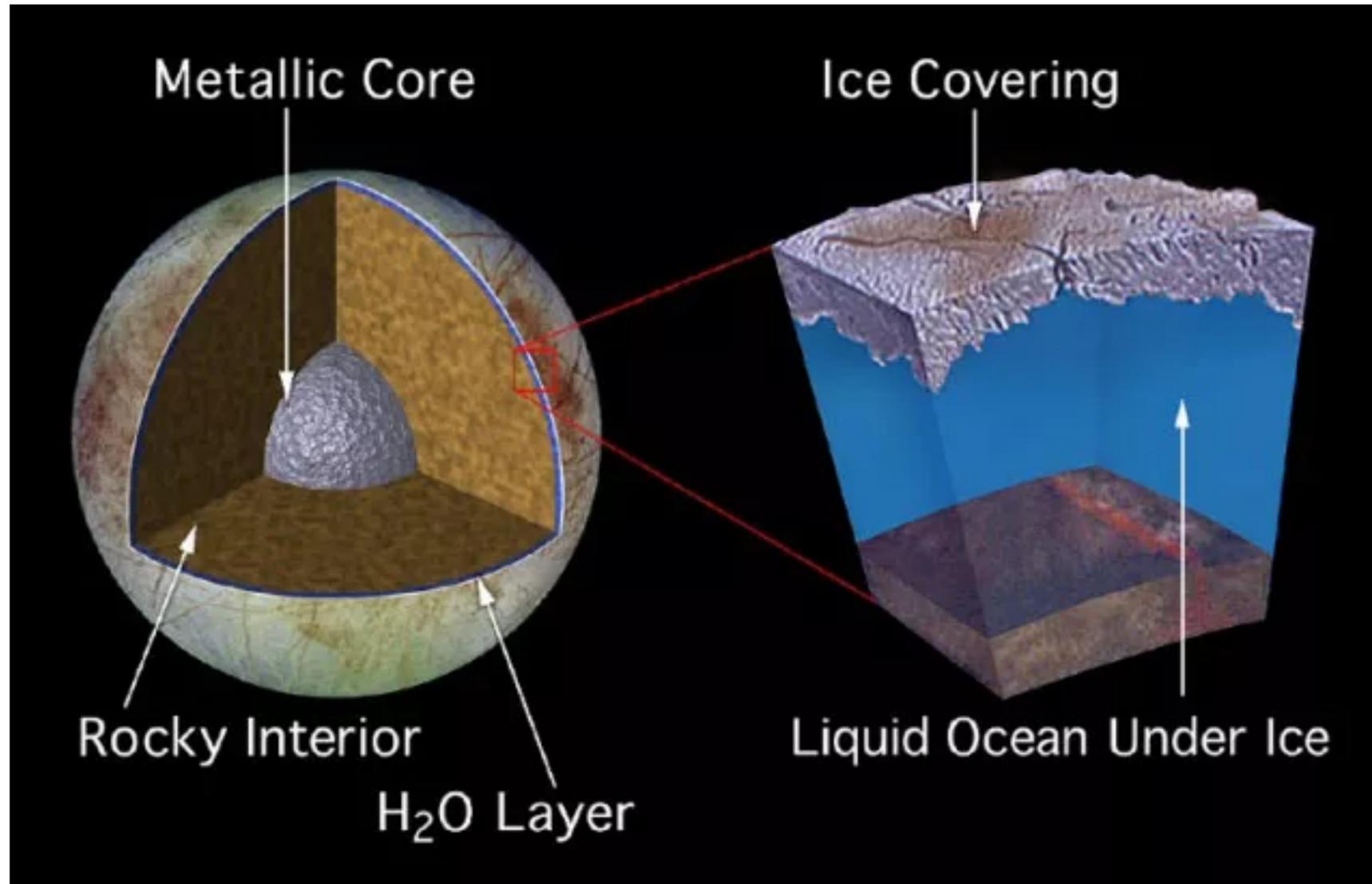


EUROPA (Satélite de Júpiter)

Oceano submerso?



Fonte: NASA/JPL



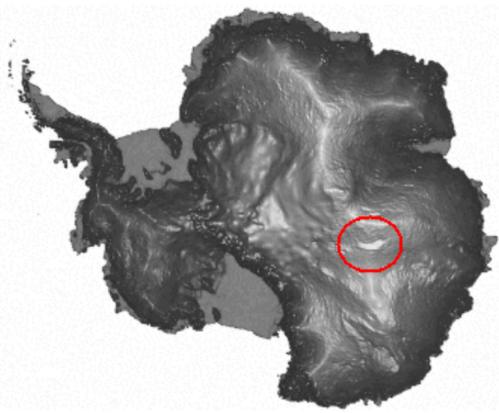
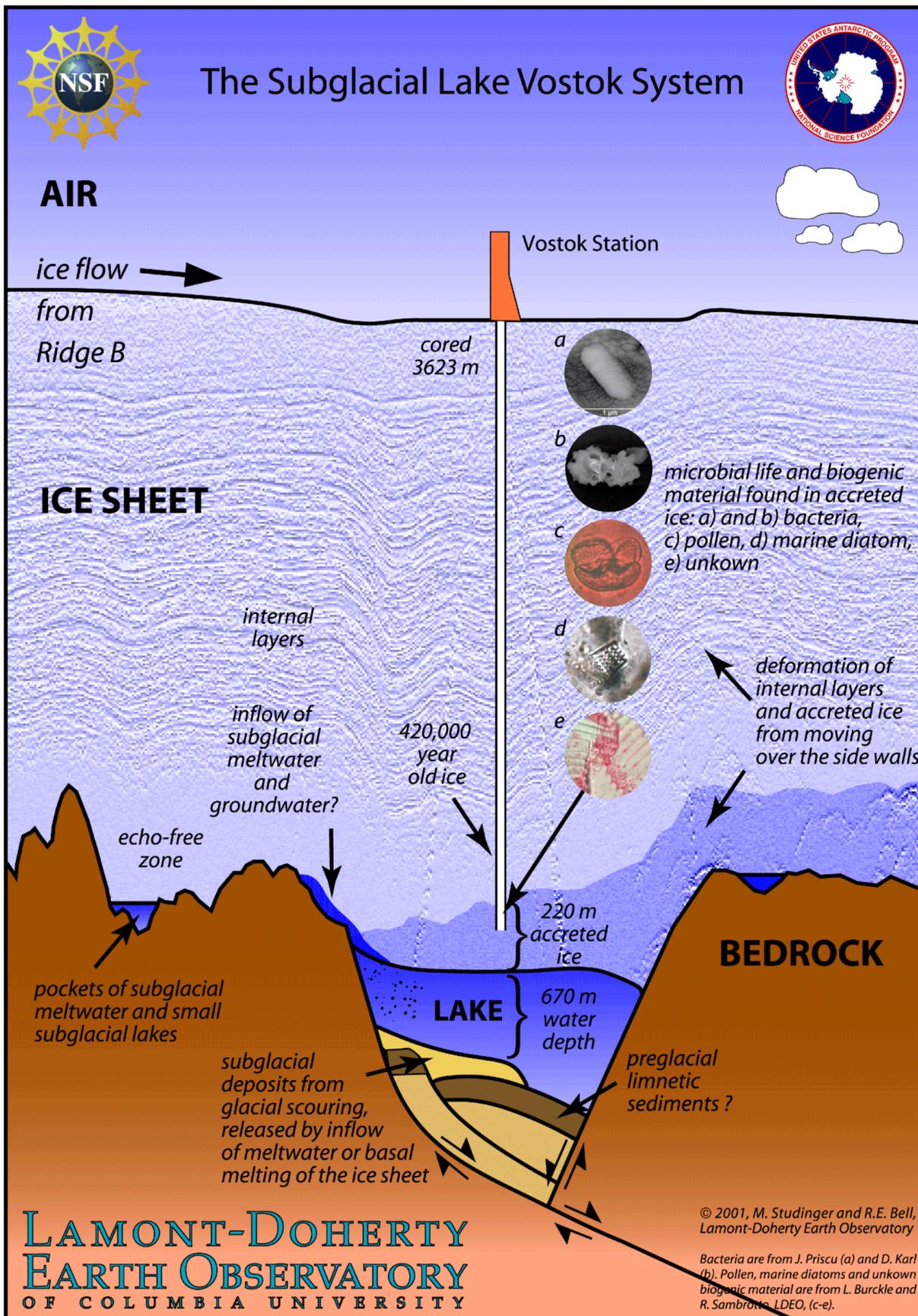
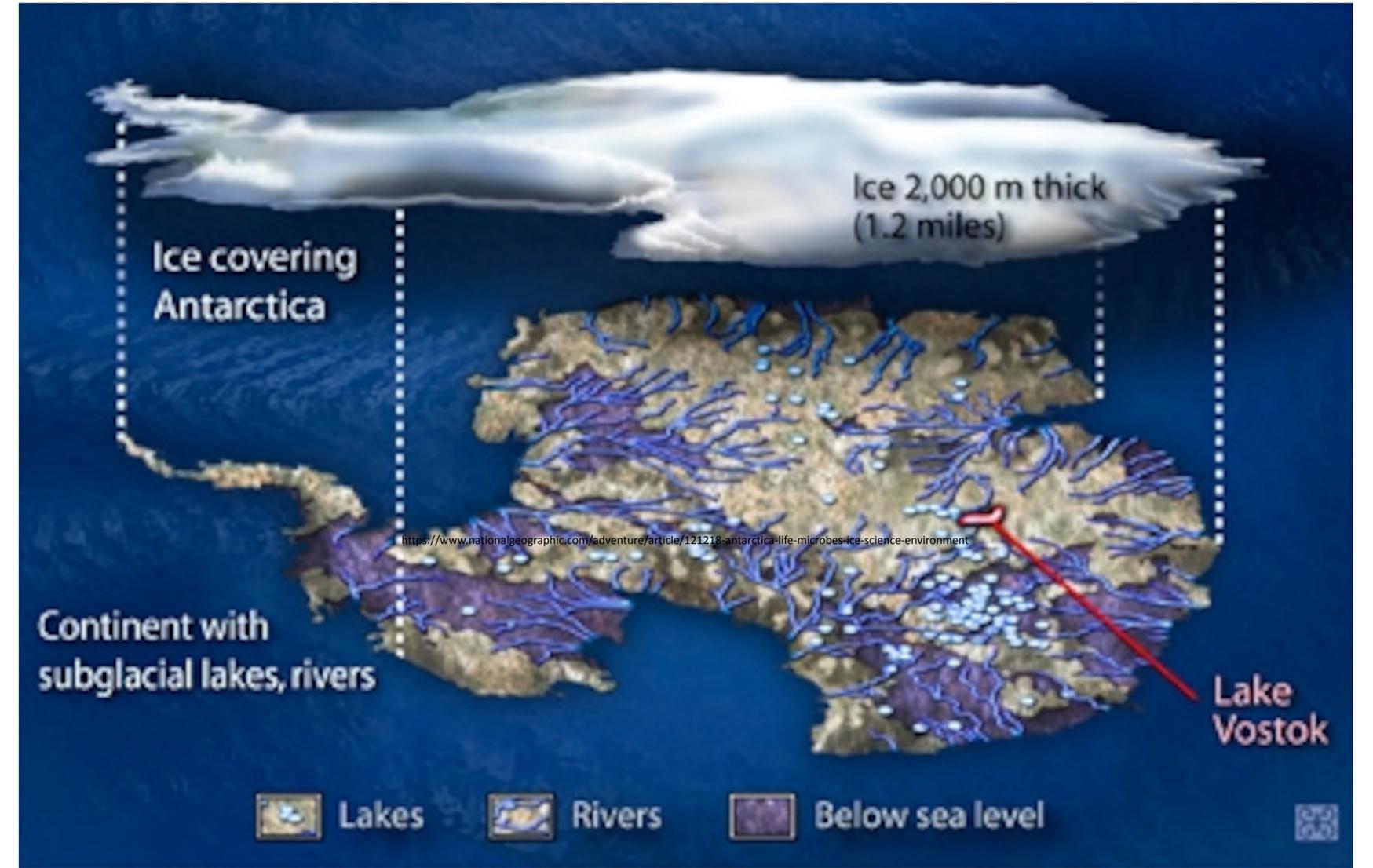
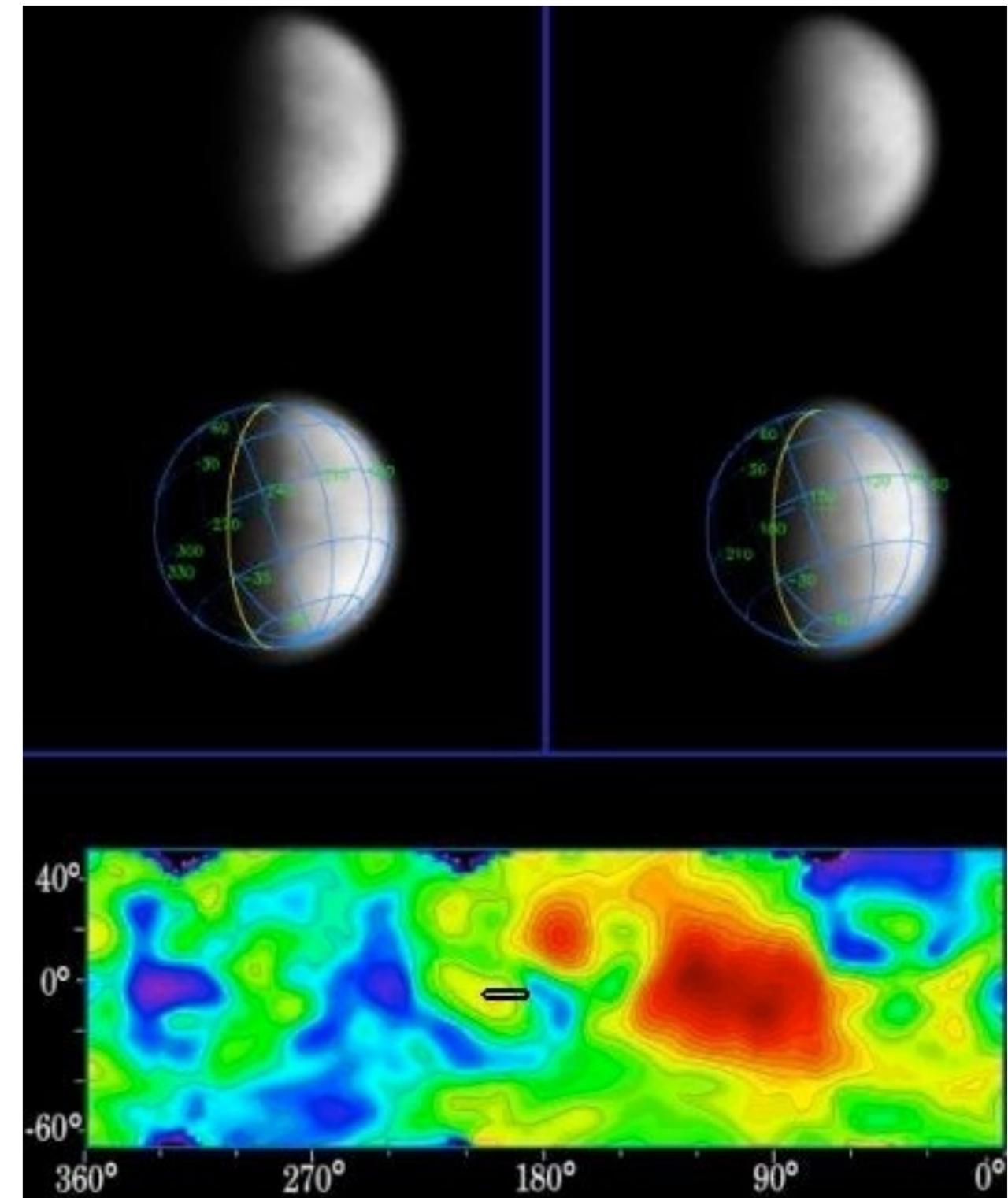
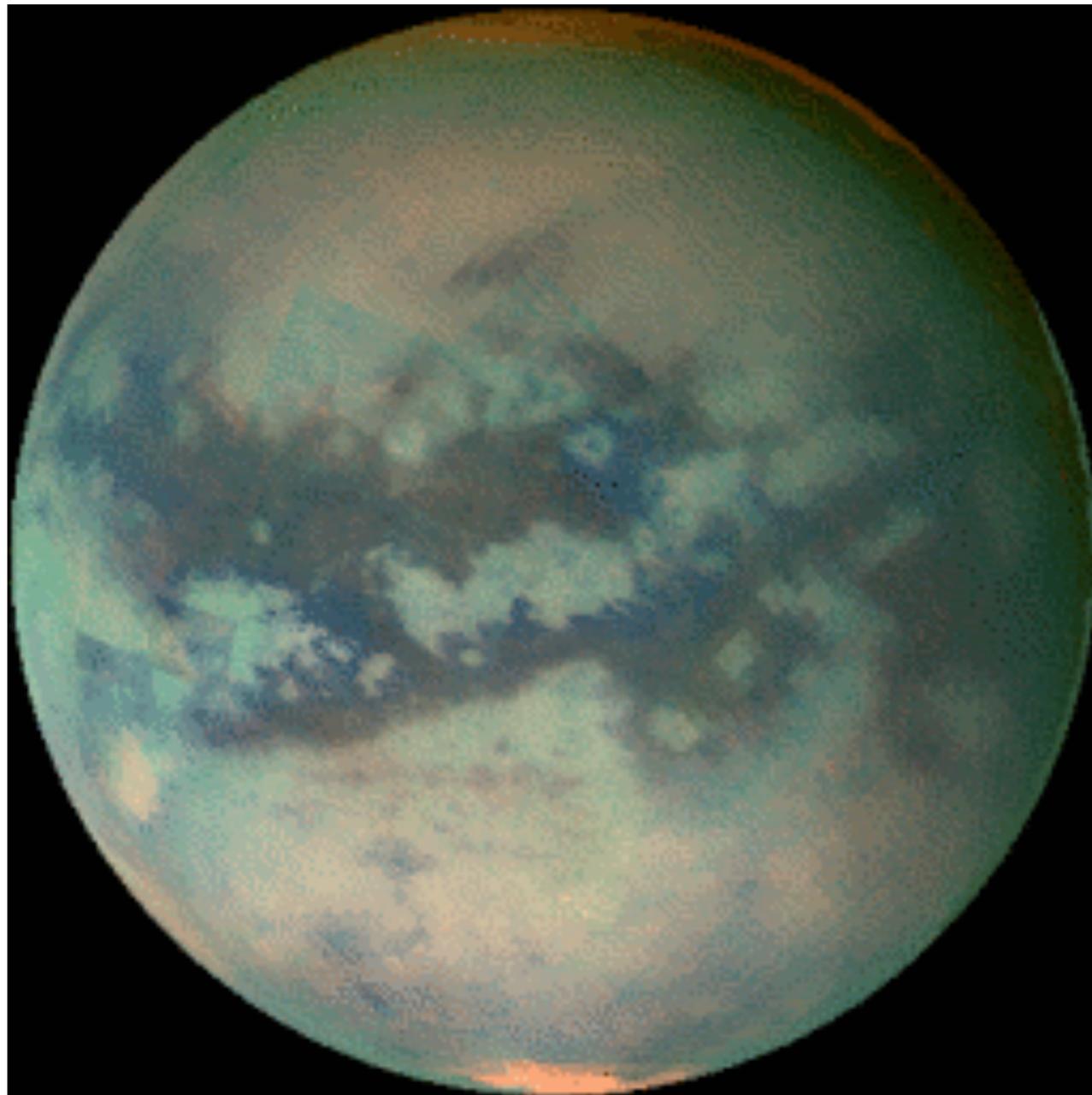


ILLUSTRATION COURTESY ZINA DERETSKY, NSF



<https://www.nationalgeographic.com/adventure/article/121218-antarctica-life-microbes-ice-science-environment>

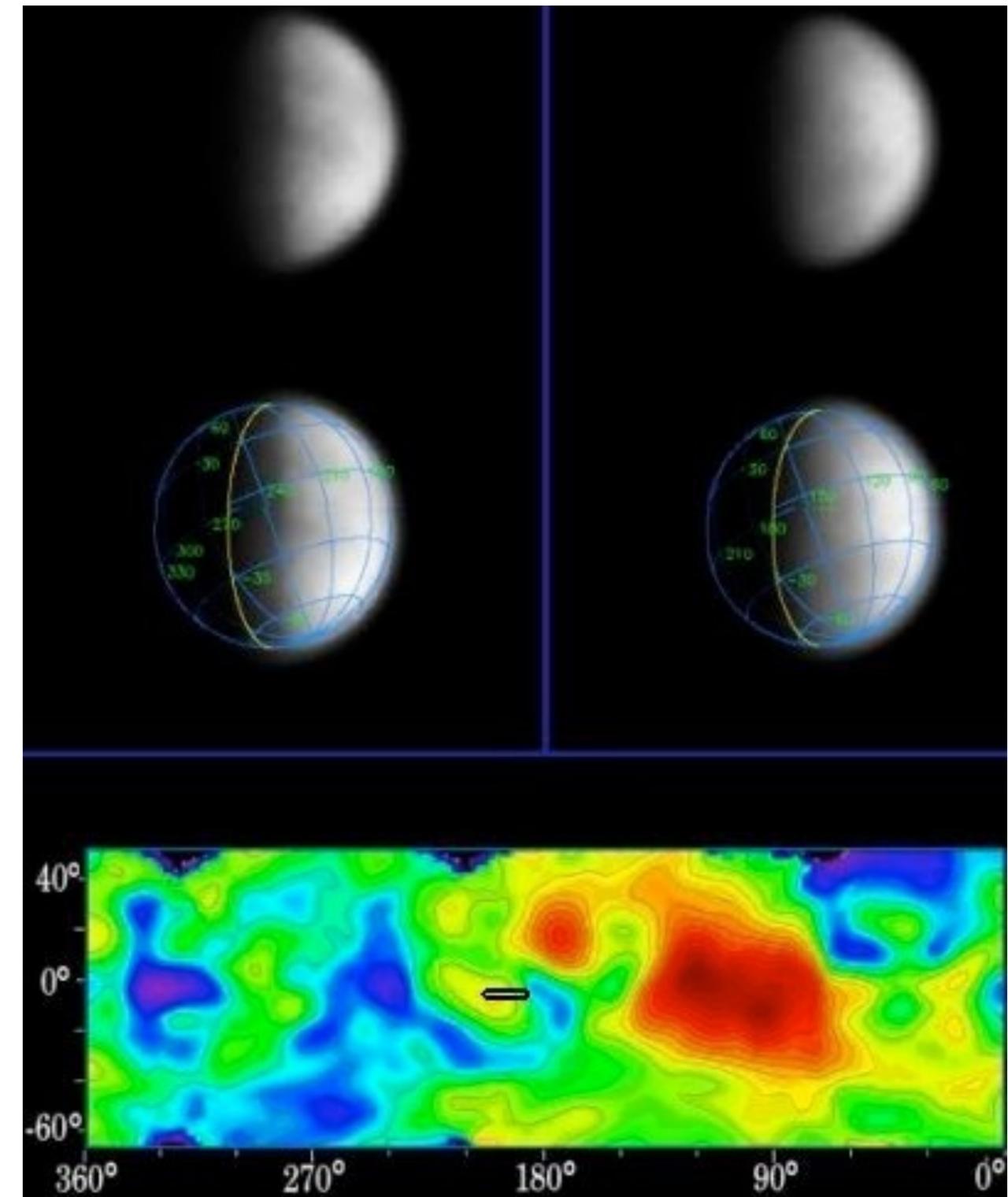
Titã – A Lua de Saturno



Titã – A Lua de Saturno

Atmosfera muito diferente da Terra (com nitrogênio e amônia).

- ✓ Maior que a Lua e Mercúrio
- ✓ Clima inóspito ($T \sim -180^{\circ} \text{C}$)



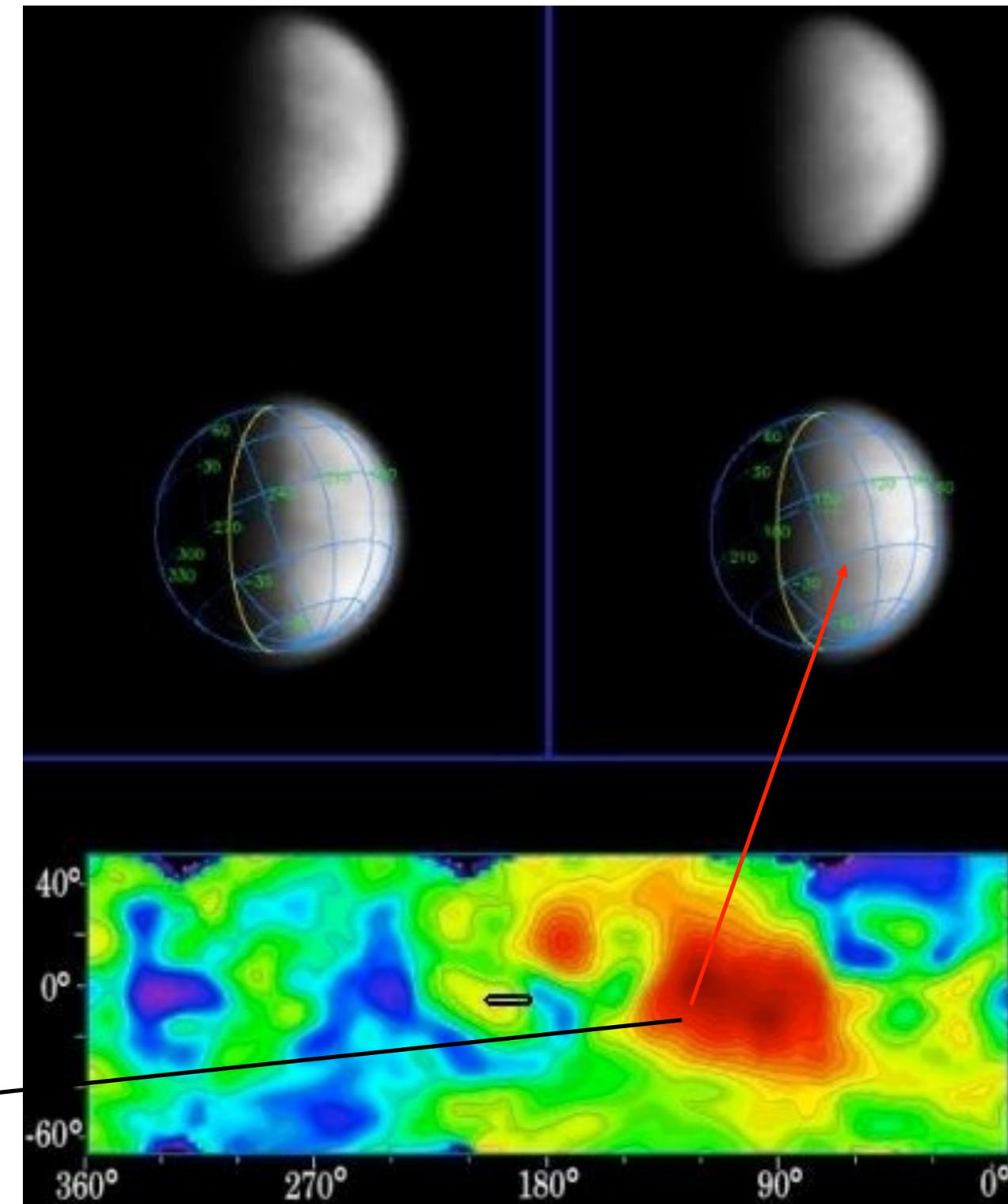
Titã – A Lua de Saturno



Atmosfera muito diferente da Terra (com nitrogênio e amônia).

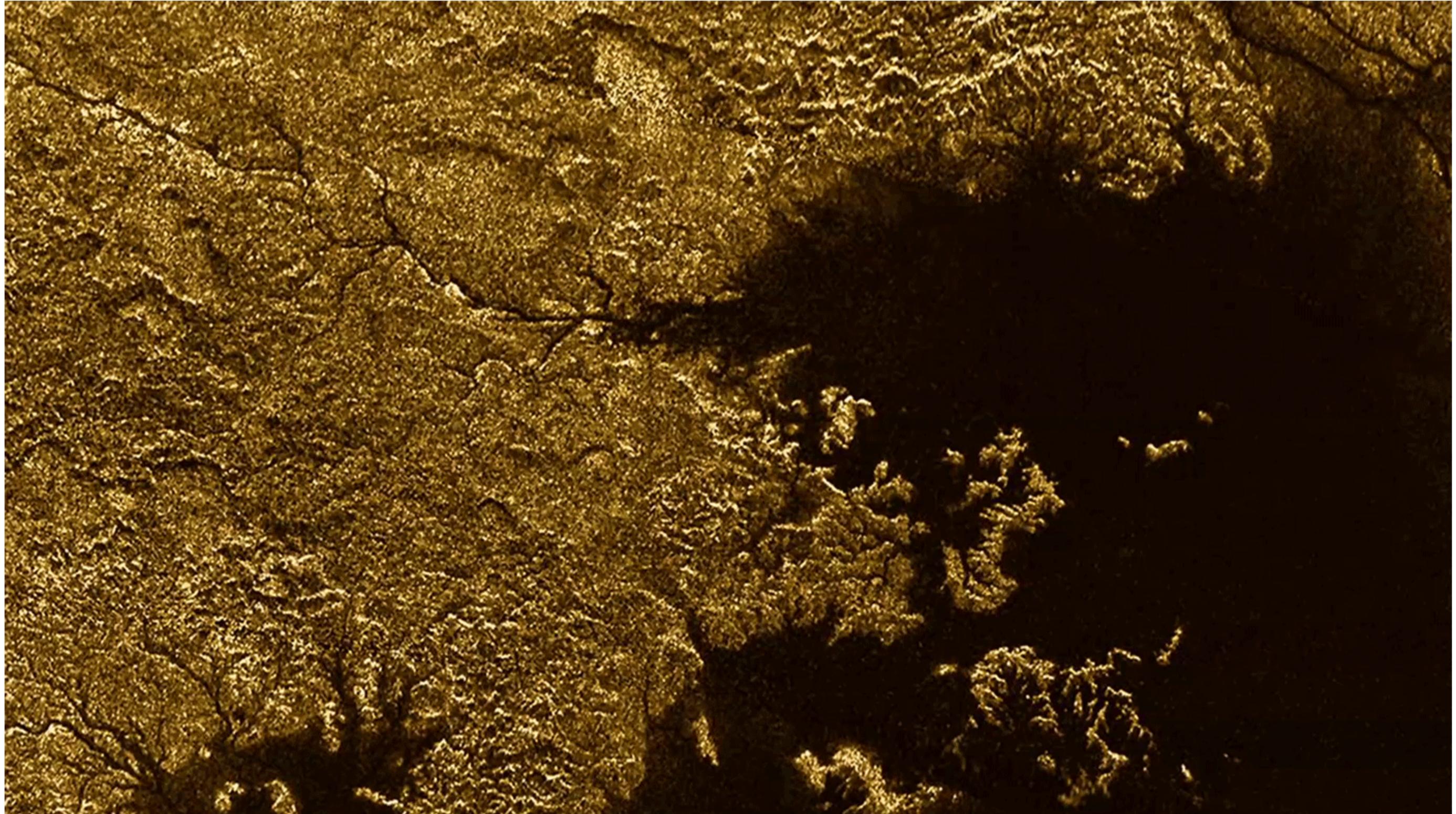
- ✓ Maior que a Lua e Mercúrio
- ✓ Clima inóspito ($T \sim -180^\circ \text{C}$)

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



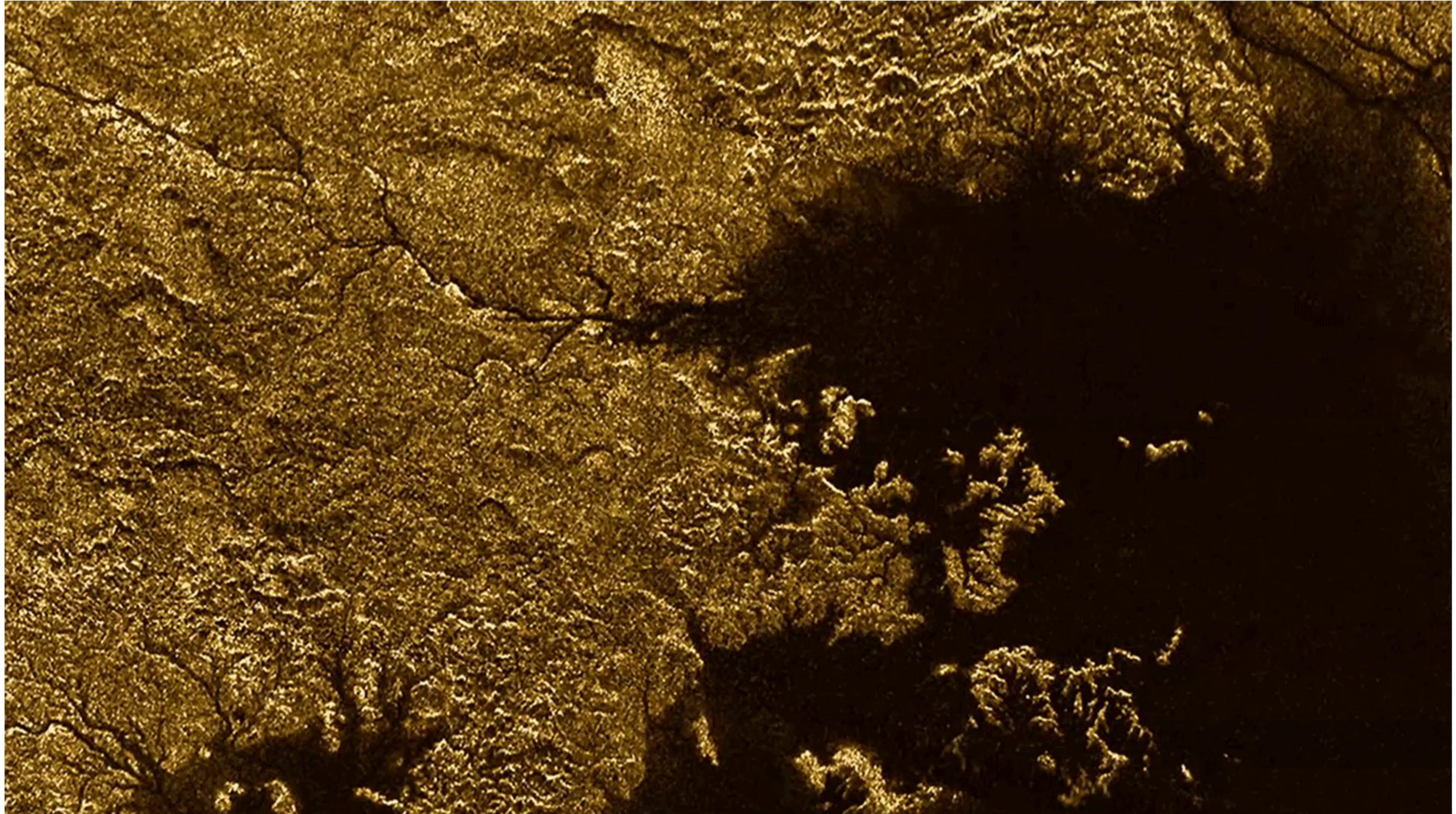


Titã visto pela Cassini



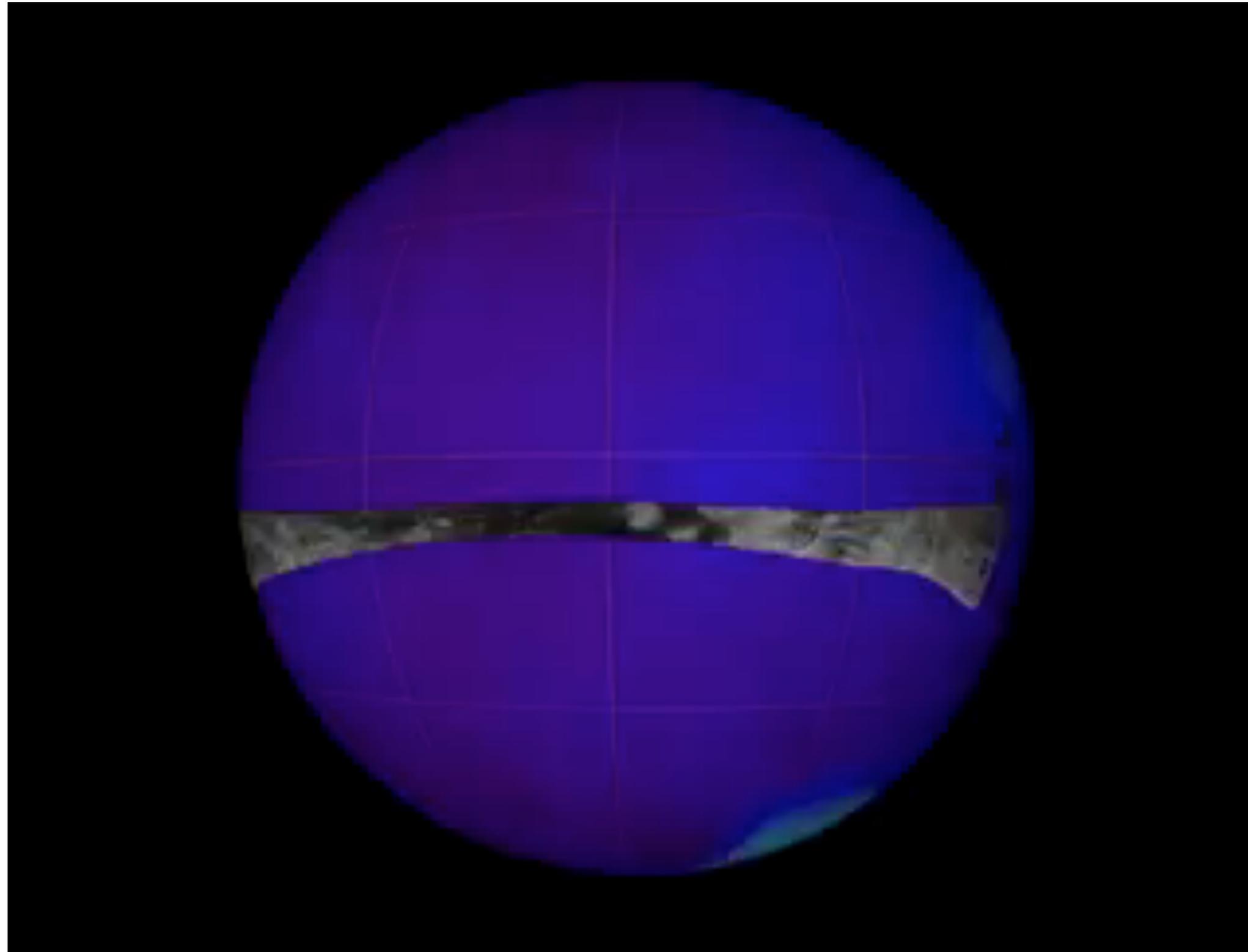


Titã visto pela Cassini



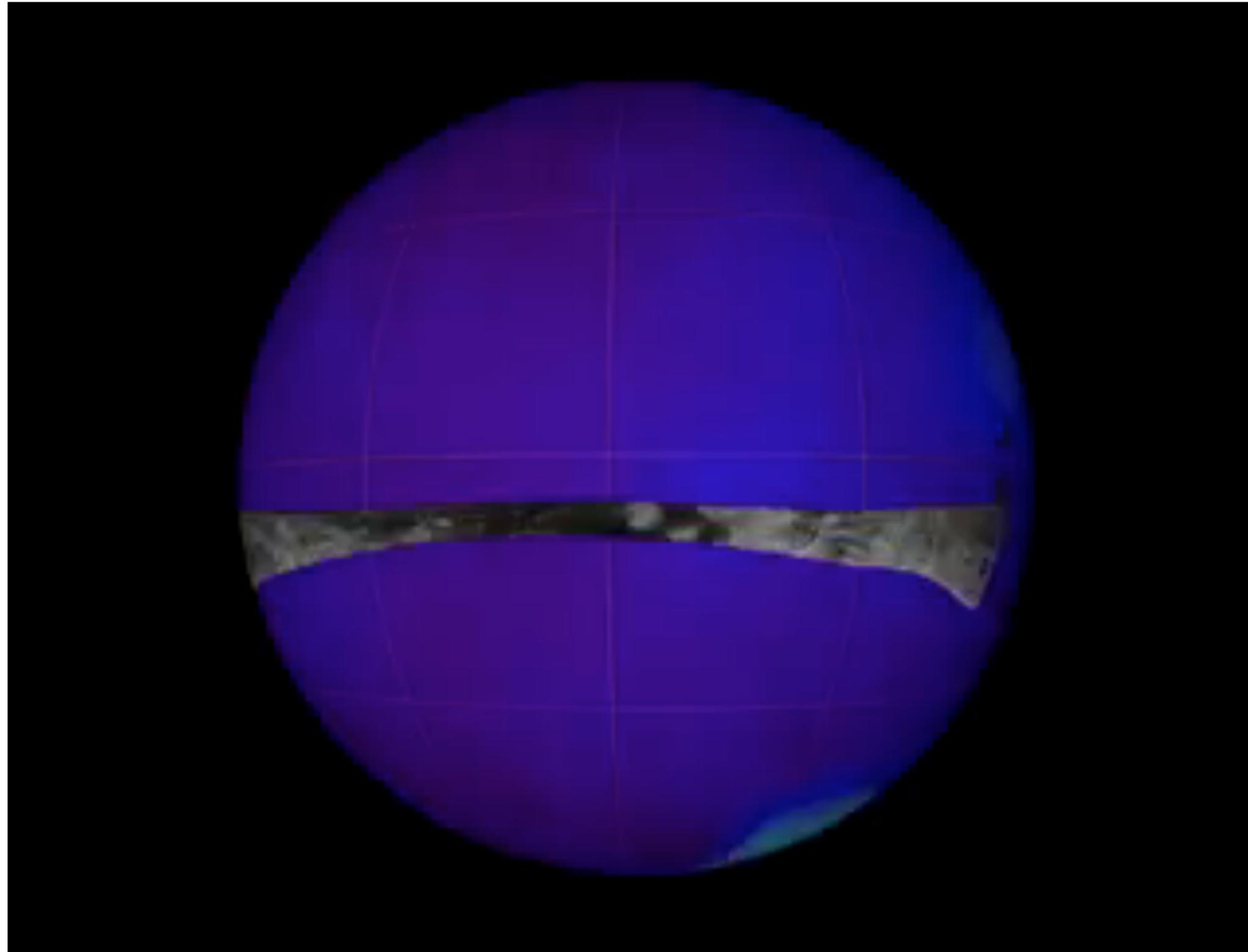


Titã (em 2006)



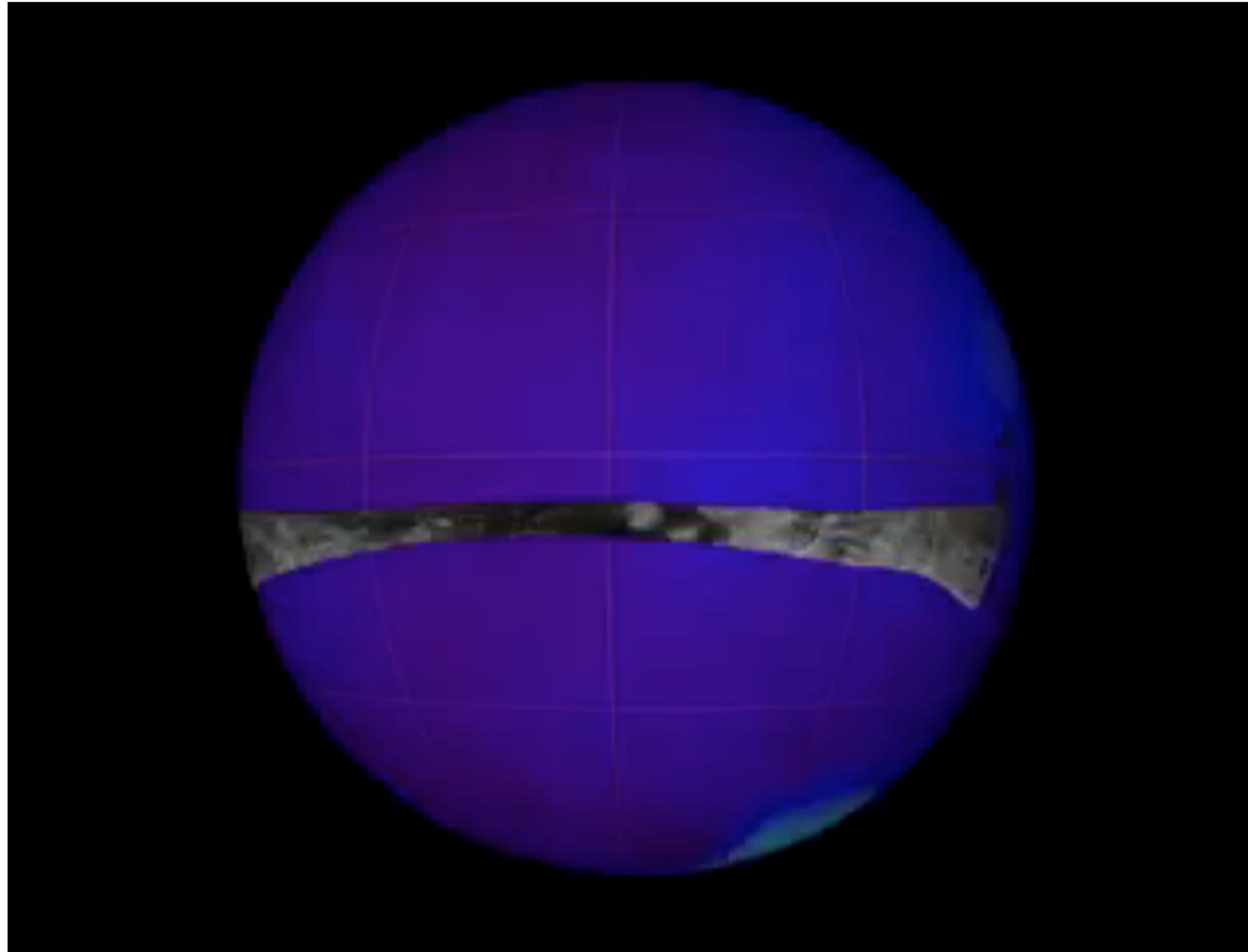


Titã (em 2006)



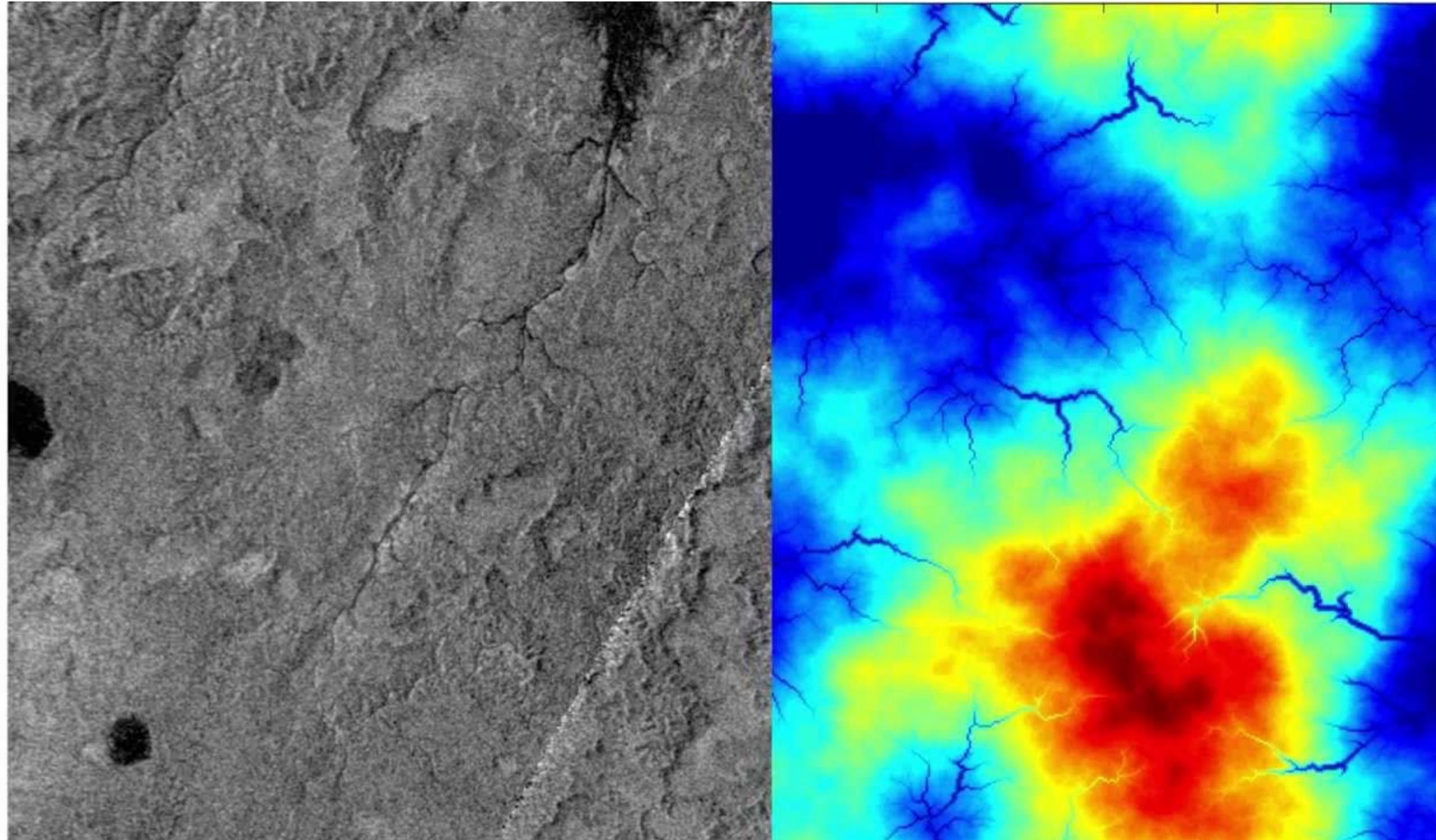


Titã (em 2006)



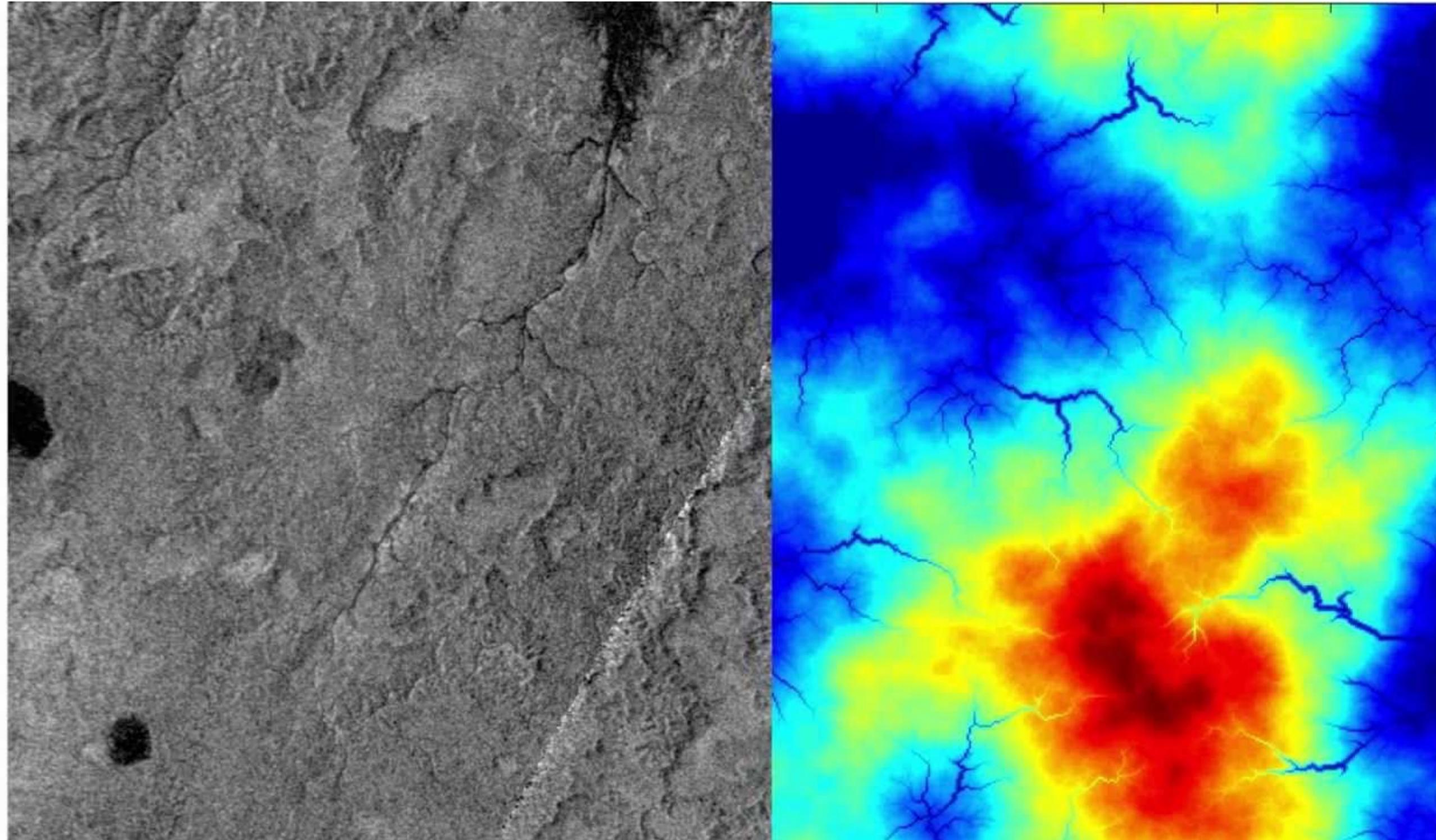


Titã (em 2012)



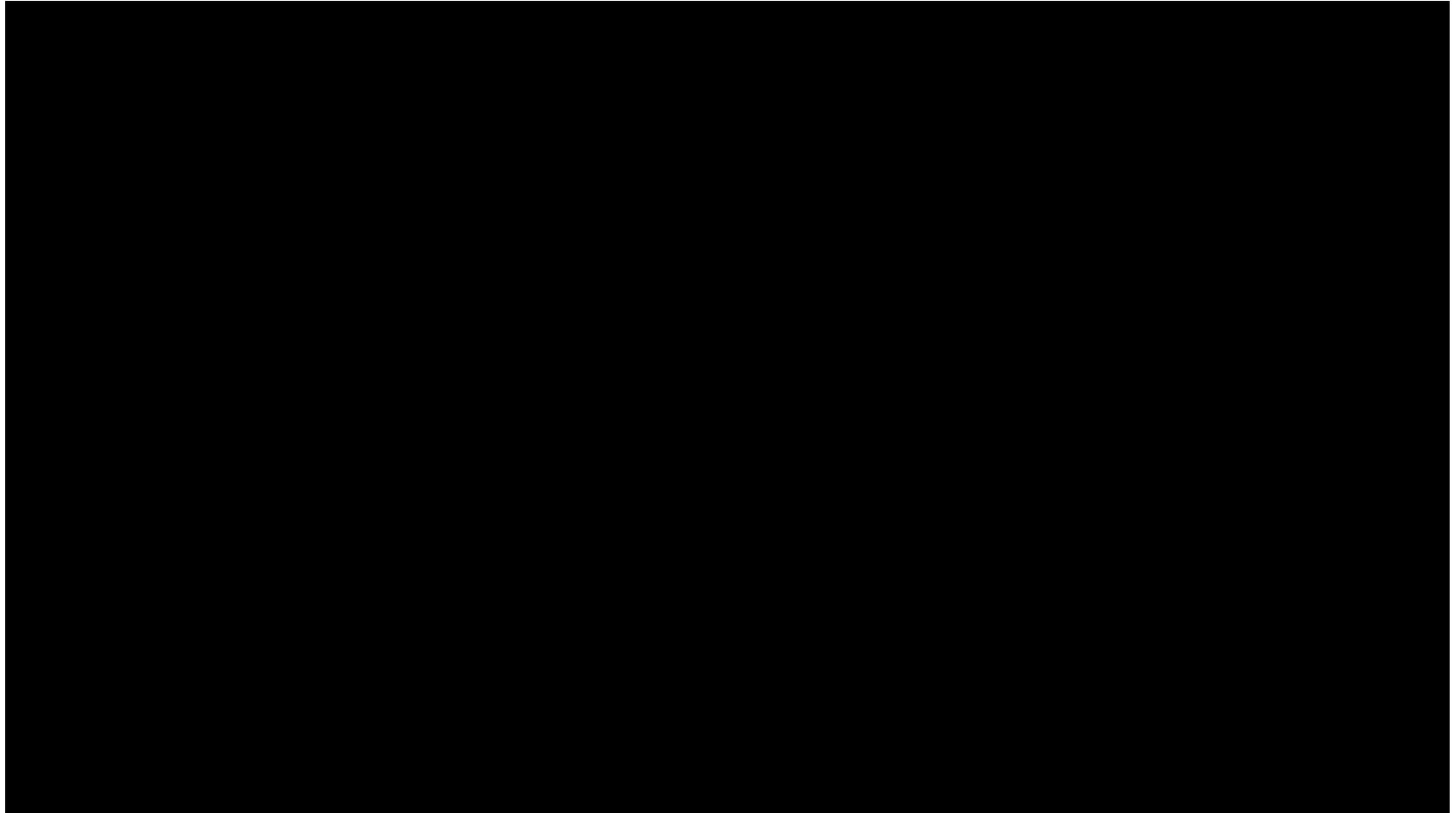


Titã (em 2012)



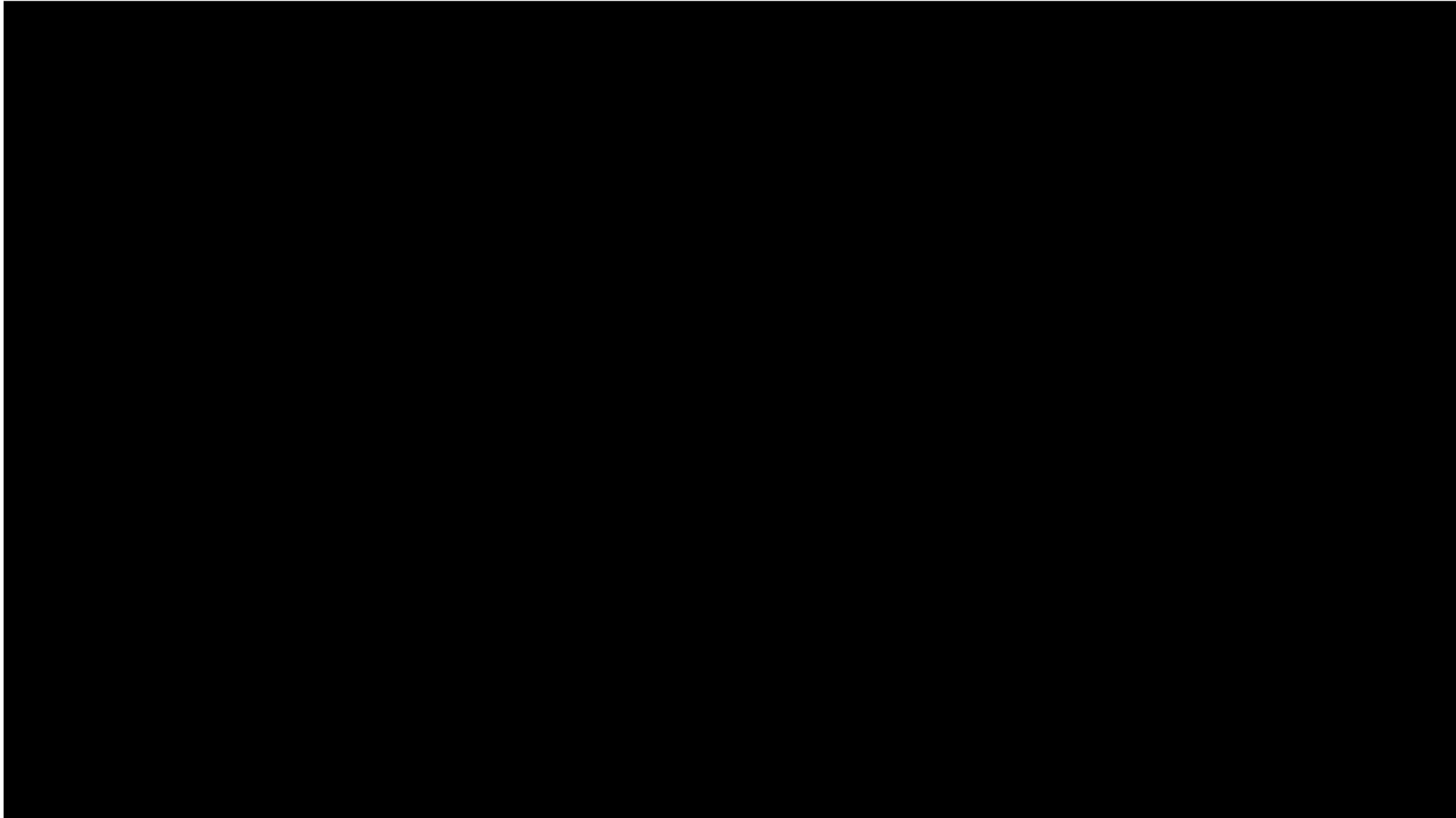


Titã (em 2013)





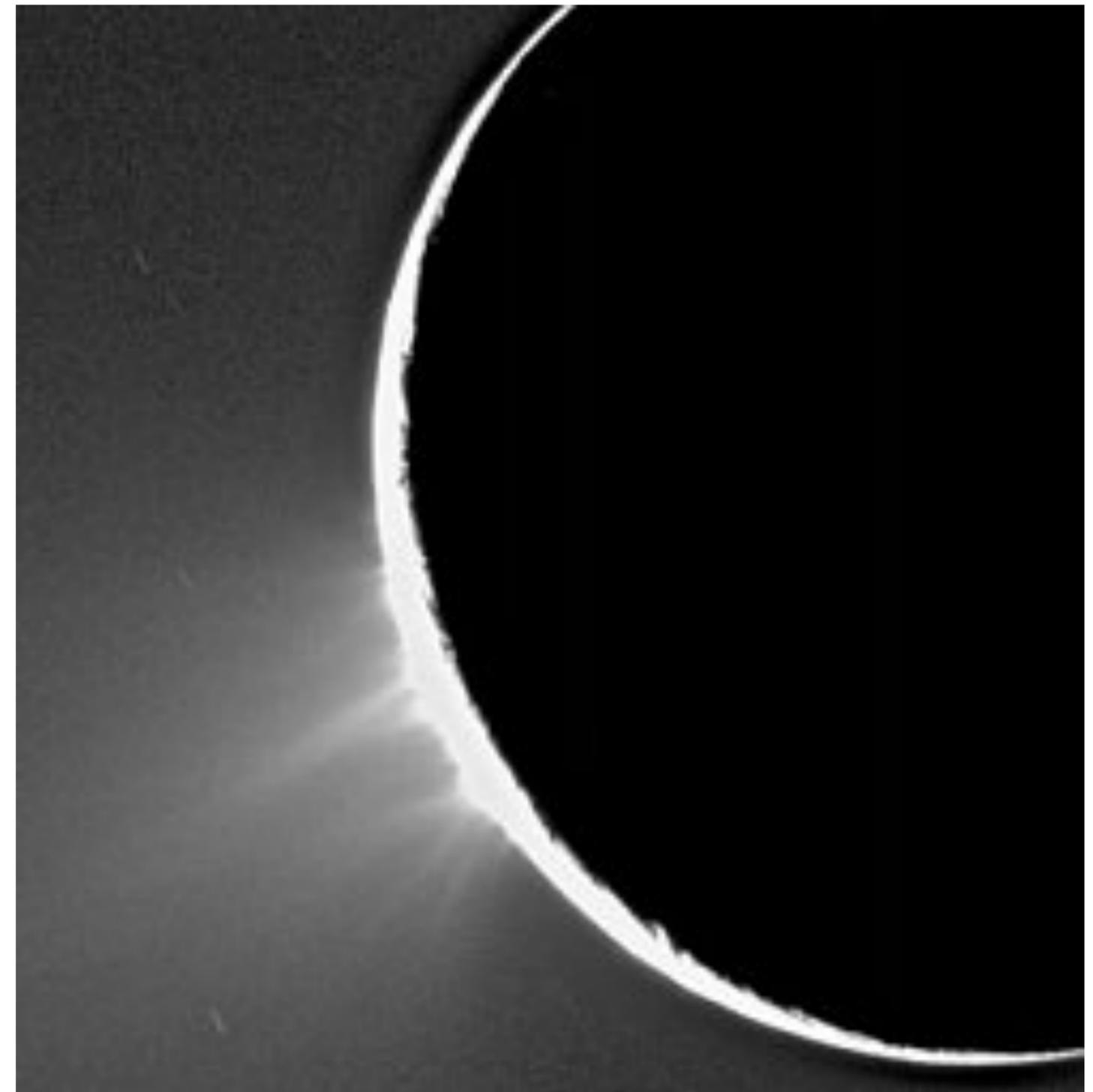
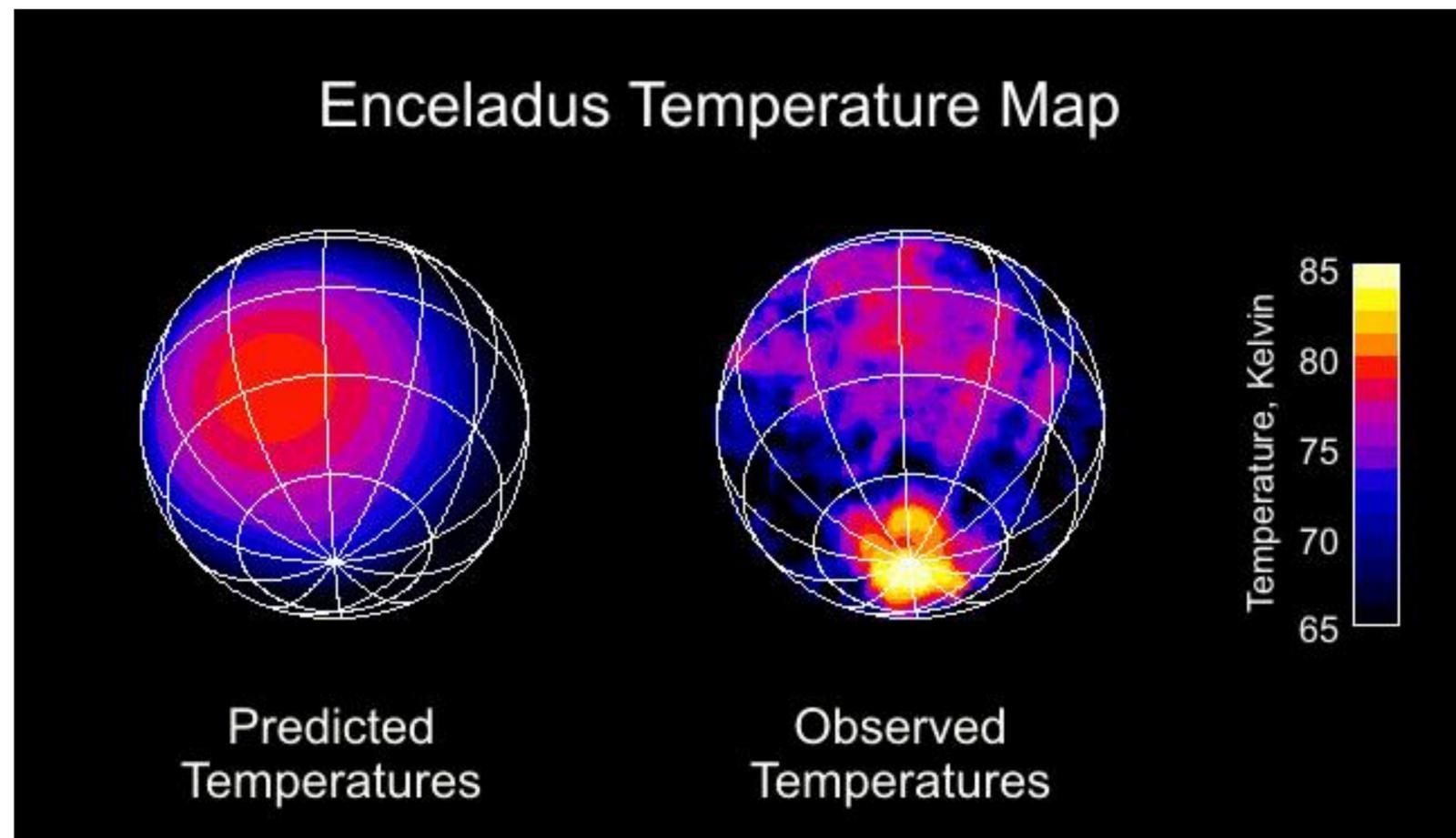
Titã (em 2013)

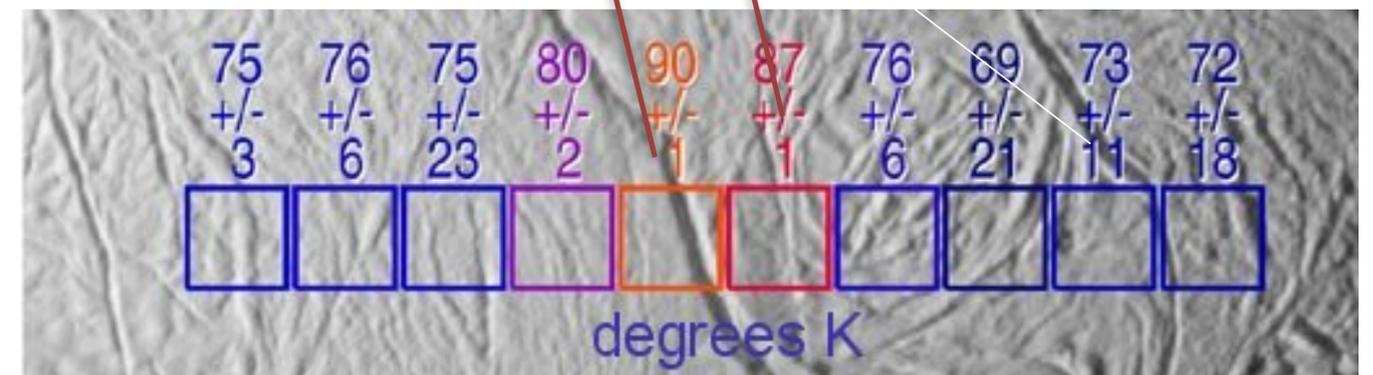
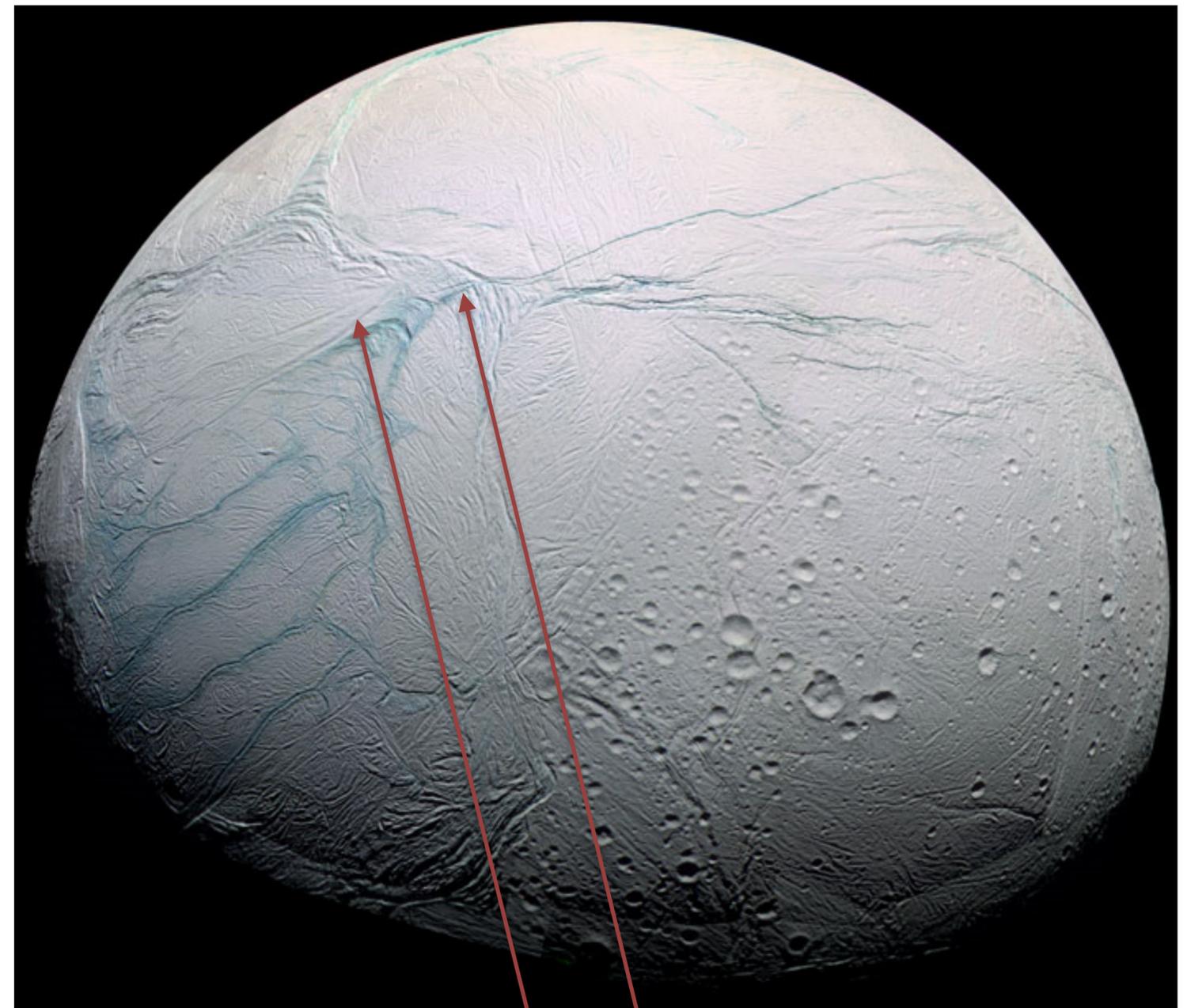
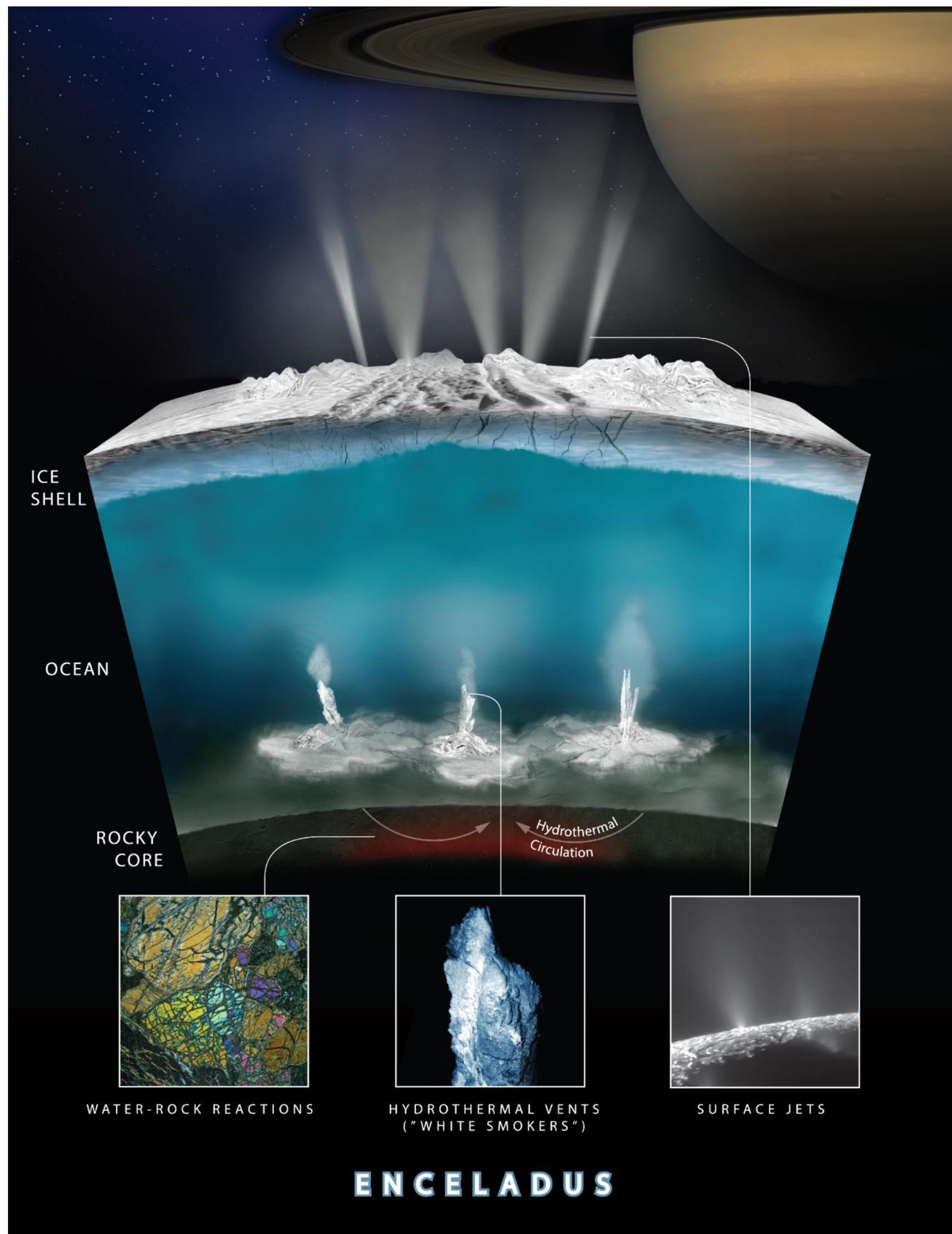


Água em Enceladus?

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).



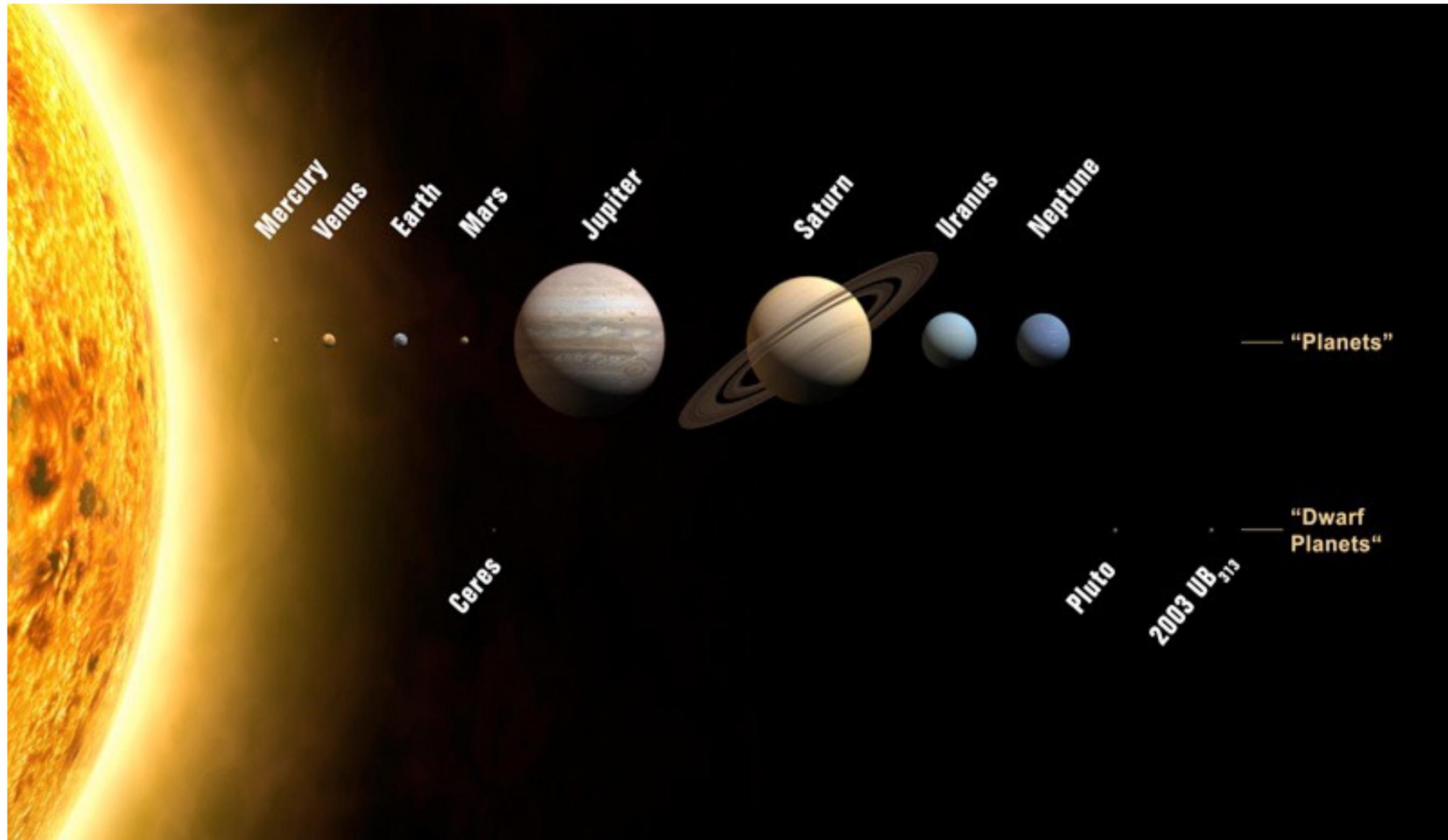




Outros alvos em potencial para exploração "in situ"....

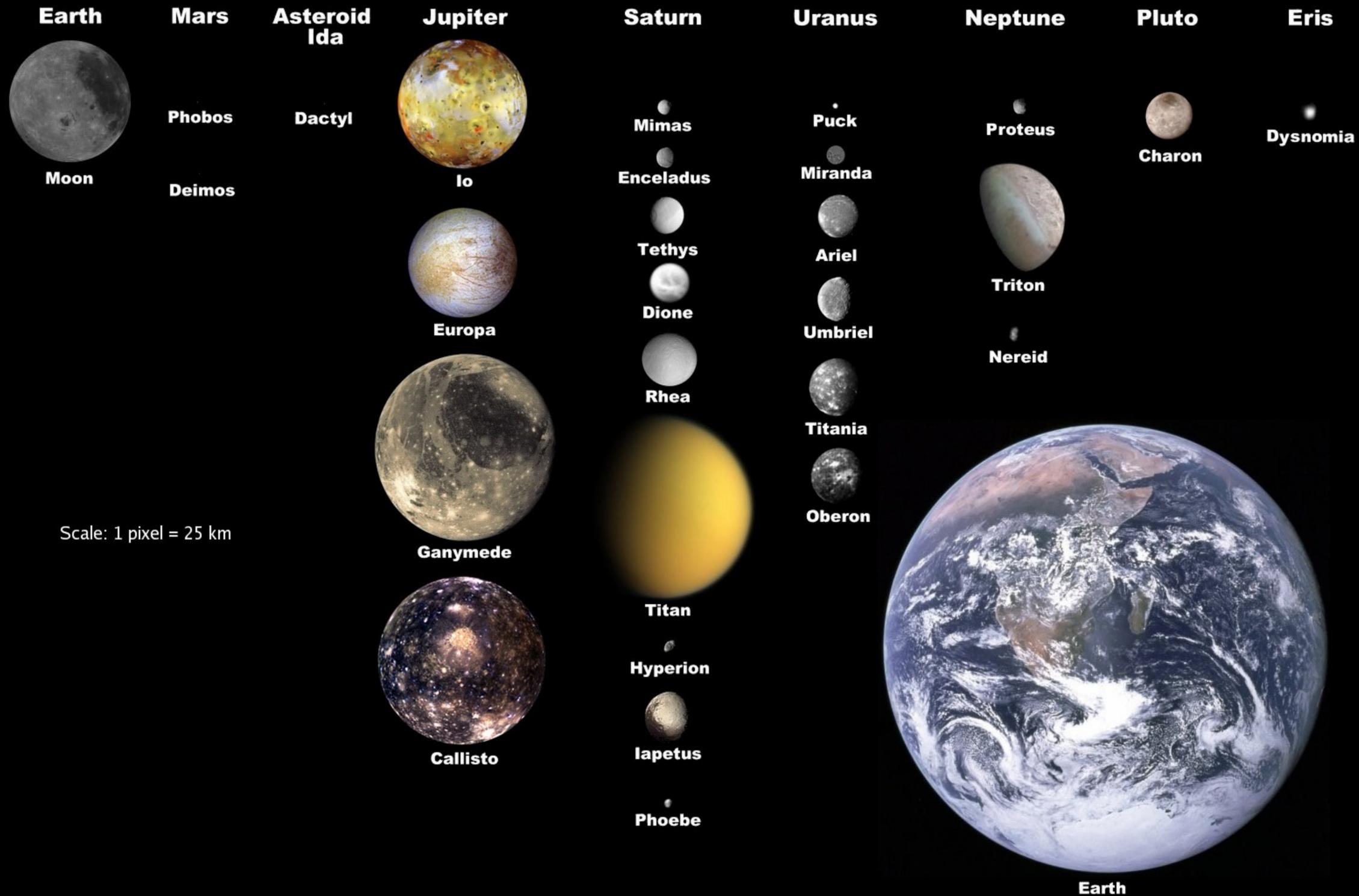
- ☑ Ganímedes (Júpiter)
- ☑ E paramos por aí...
- ☑ A viagem até estrela mais próxima, Alfa Centauri, situada a 4,5 anos-luz (42,5 trilhões de km), levaria cerca de 173,5 mil anos para ser percorrida no ônibus espacial, a uma velocidade de 28000 km/h
- ☑ A sonda Juno é o objeto mais veloz produzido pelo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

Saindo do Sistema Solar





Selected Moons of the Solar System, with Earth for Scale





Planetas e planetas anões

- ☑ A União Astronômica Internacional, definiu em Agosto/2006, que, no Sistema Solar, um planeta é um corpo celeste que:
 - ✓ está em órbita em torno do Sol
 - ✓ tem massa suficiente para assumir o equilíbrio hidrostático (forma aproximadamente esférica), e
 - ✓ "limpou" a vizinhança em torno de sua órbita



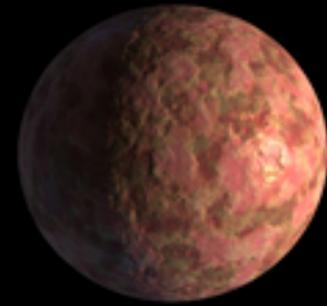
Planetas e planetas anões

- ☑ A União Astronômica Internacional, definiu em Agosto/2006, que, no Sistema Solar, um planeta é um corpo celeste que:
 - ✓ está em órbita em torno do Sol
 - ✓ tem massa suficiente para assumir o equilíbrio hidrostático (forma aproximadamente esférica), e
 - ✓ “limpou” a vizinhança em torno de sua órbita

E fora do sistema solar?



Circa 2008



Sedna
800-1100 miles
in diameter



Quaoar
(800 miles)



Pluto
(1400 miles)



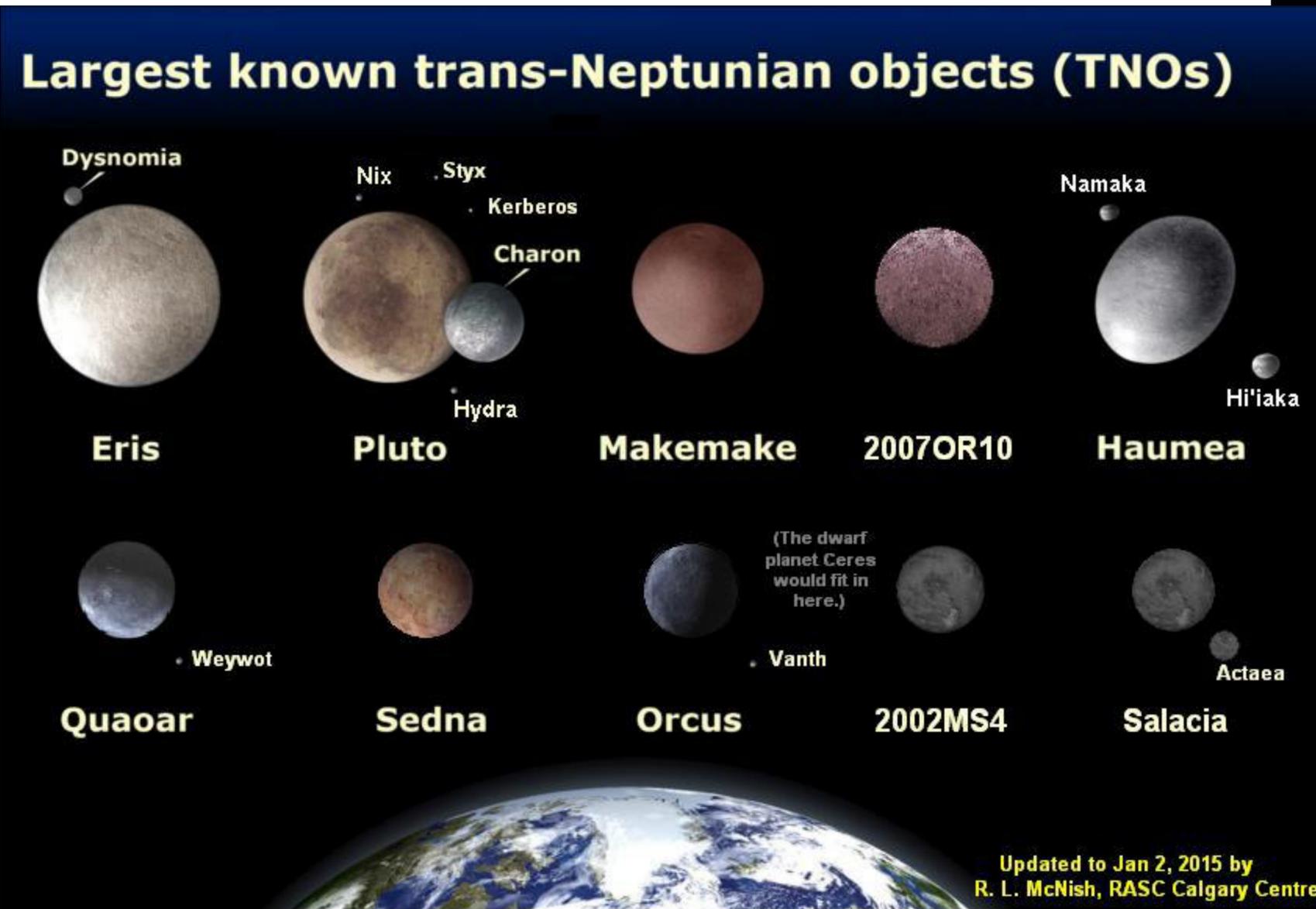
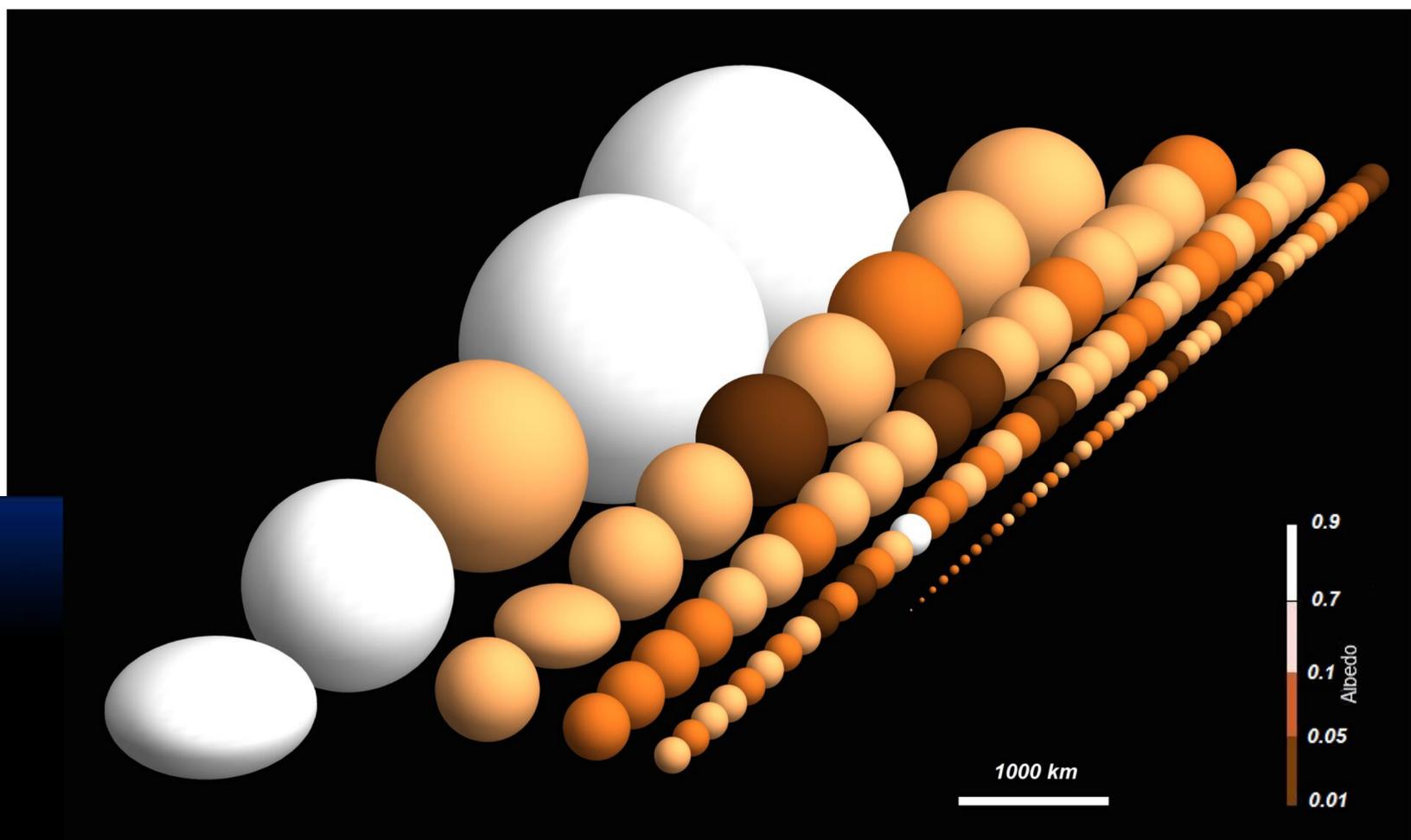
Moon
(2100 miles)



Earth
(8000 miles)



https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/06/Herschel_s_population_of_trans-Neptunian_objects



2014 - O satélite Herschel (ESA) observou 132 dos 1400 planetas-anões localizados além da órbita de Netuno (4.5–7.5 bilhões de km do Sol)



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

- ☑ detecção direta difícil
- ☑ detecção indireta por diferentes processos físicos
- ☑ Fontes de referência sobre exoplanetas
 - ✓ <http://exoplanet.eu>
 - ✓ <https://exoplanets.nasa.gov>

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

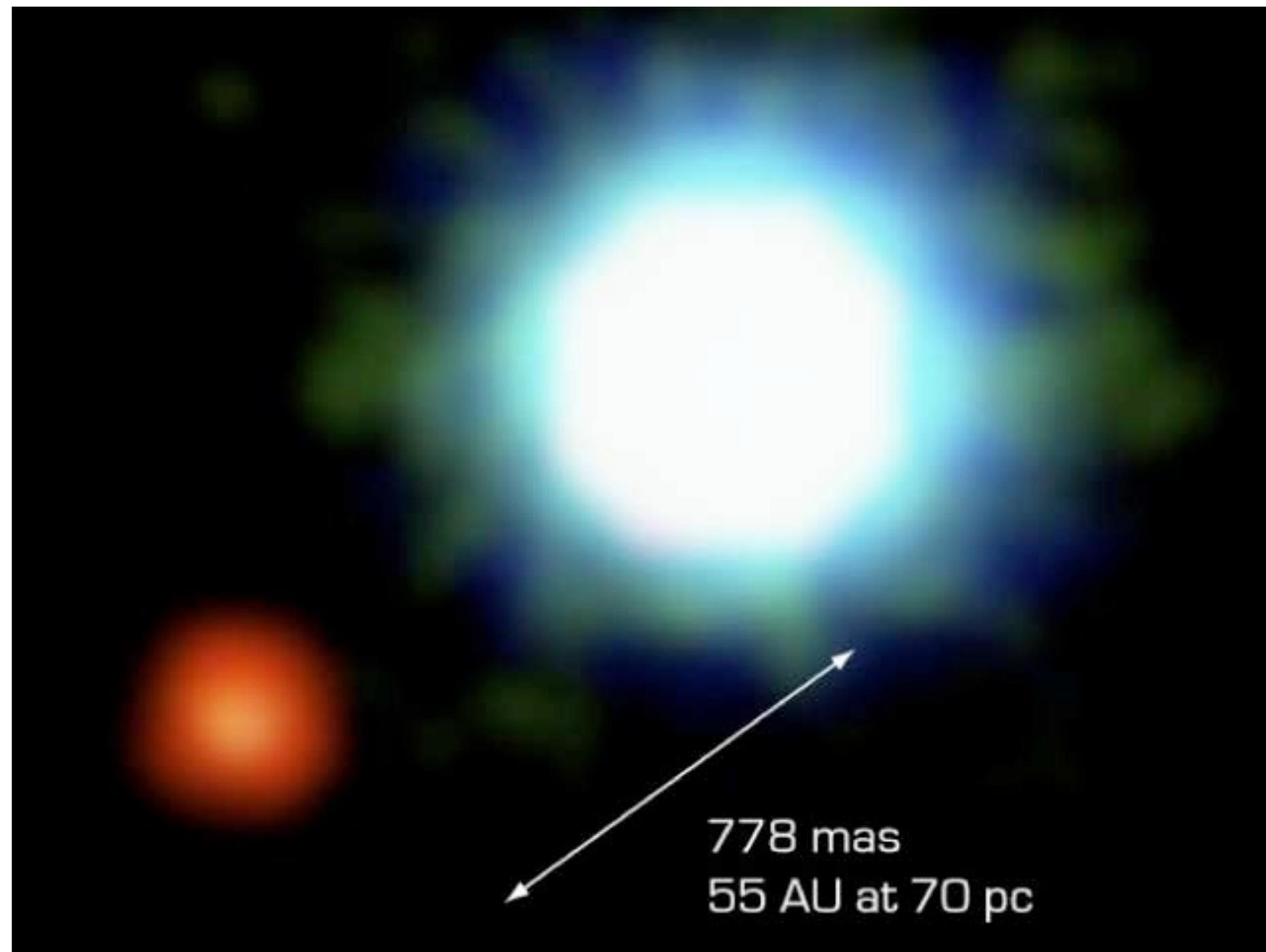
(minus 210 C) on its dark side.



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)

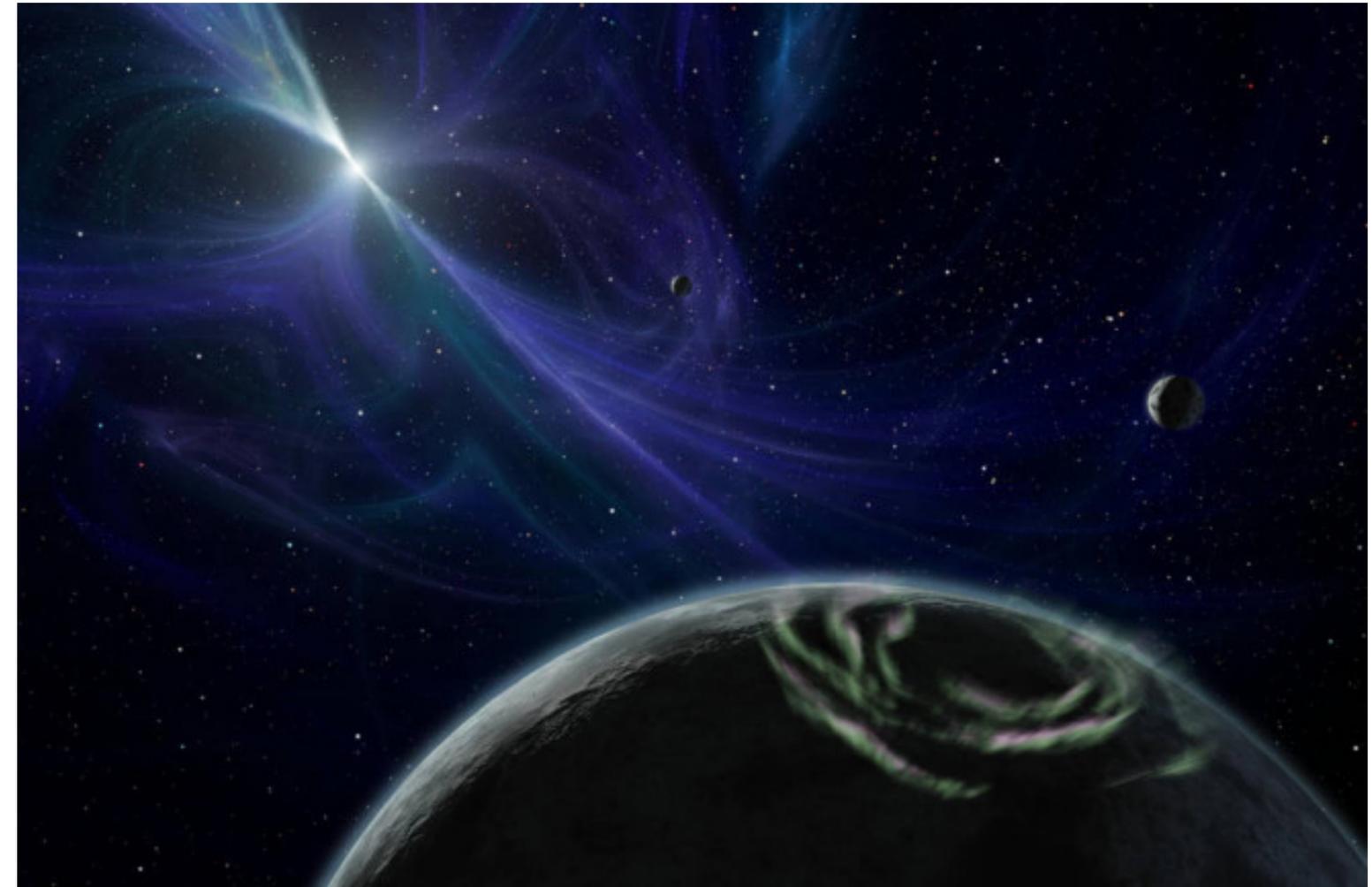
Os primeiros exoplanetas encontrados

- ☑ Sistema 2M1207 (na constelação do Centauro)
- ✓ Primeira observação direta de um planeta extra-solar (2004)
- ✓ Distância: 170 a.l.
- ✓ Instrumento: Very Large Telescope (VLT)
- ✓ Objeto branco: anã marrom
- ✓ Objeto vermelho: planeta com 3 - 10 MJ
- ✓ Distância do planeta a 2M1207: 40 UA



Os primeiros exoplanetas encontrados

- ☑ Em torno do pulsar PSR1257+12 (1992)
 - ✓ Distância: 2300 a.l.
 - ✓ Primeira observação de um planeta extra-solar e de um sistema com múltiplos (2) planetas, com 3 e 4 M_{T}
 - ✓ Periodicidade dos planetas: 67 e 98 dias
 - ✓ Detectado devido à irregularidade nos pulsos
 - ✓ Descobridores: Astronomers Aleksander Wolszczan & Dale Frail (**"A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12"**, Nature, 1992)





Os primeiros exoplanetas encontrados

- ☑ Fora da Galáxia!!!
 - ✓ Distância do objeto: 28 milhões de anos-luz
 - ✓ Local: Galáxia do Redemoinho (M51)
 - ✓ Instrumento: Chandra e XMM-Newton
 - ✓ Método: trânsito (!!!)
 - ✓ **"M51-ULS-1b: The First Candidate for a Planet in an External Galaxy", arXiv:2009:08987**

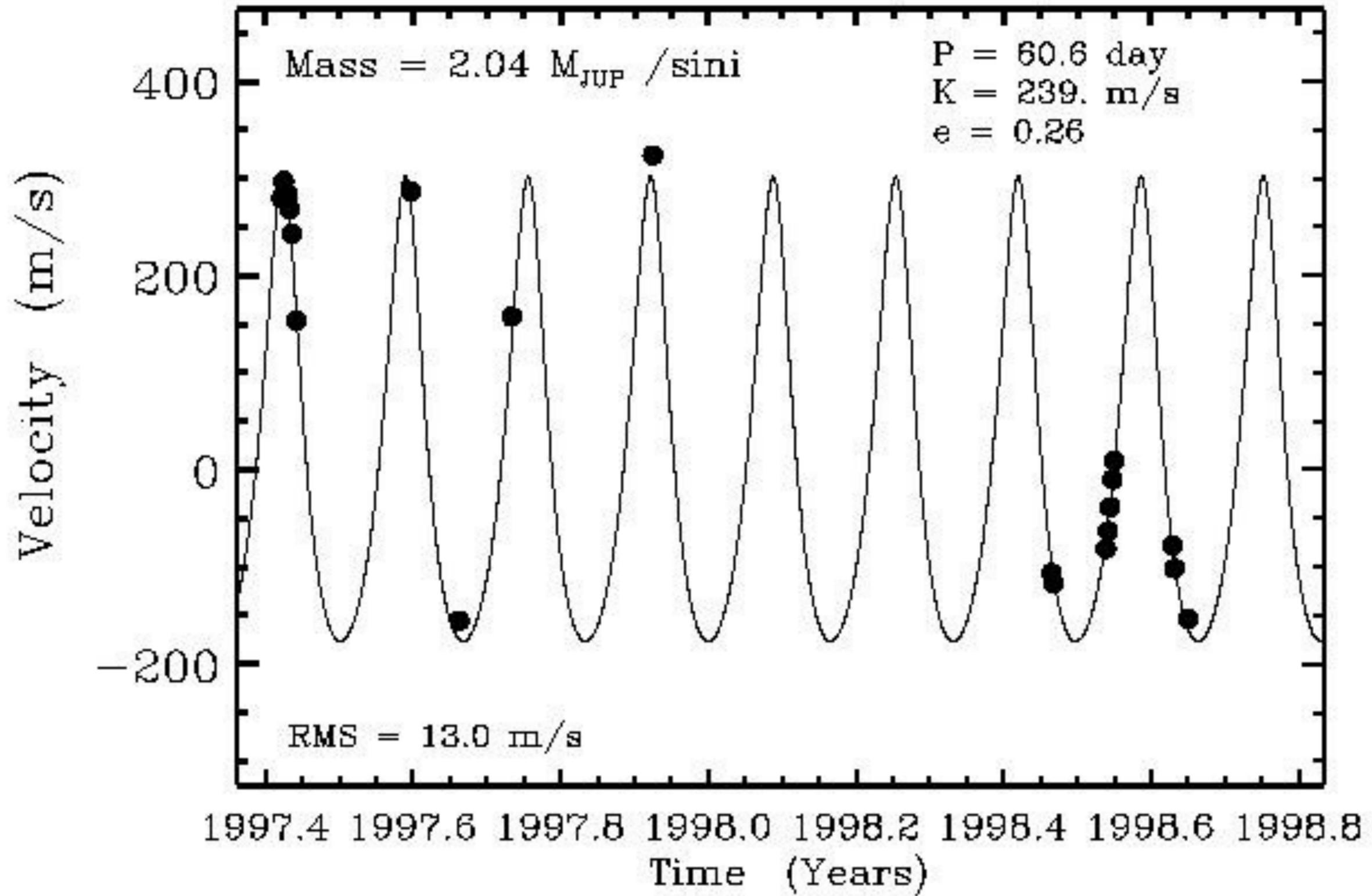


Gliese 876d: 1o. Planeta extrasolar semelhante à Terra (2005)

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



Gliese 876 (M4V)



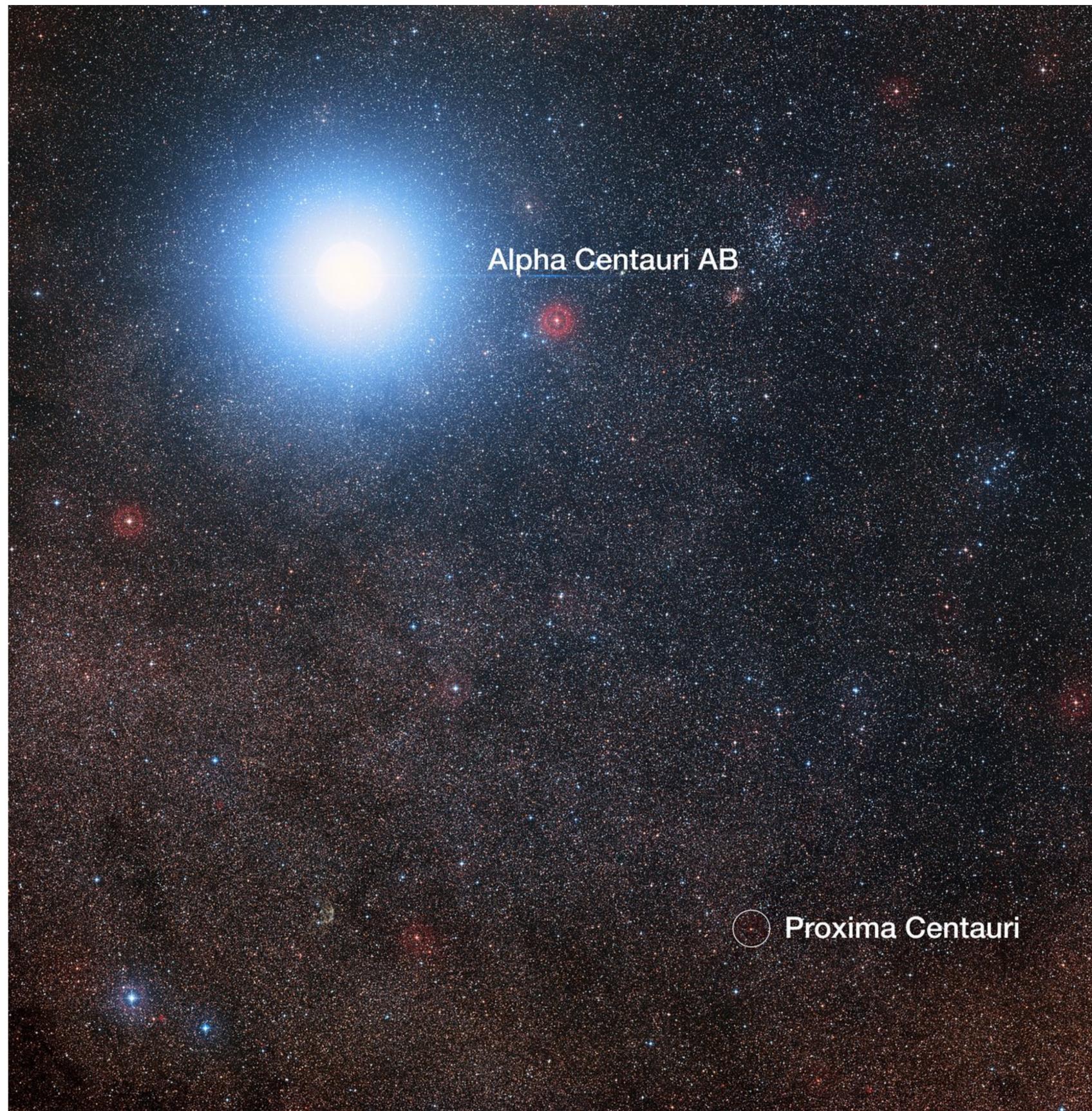
Gliese 876





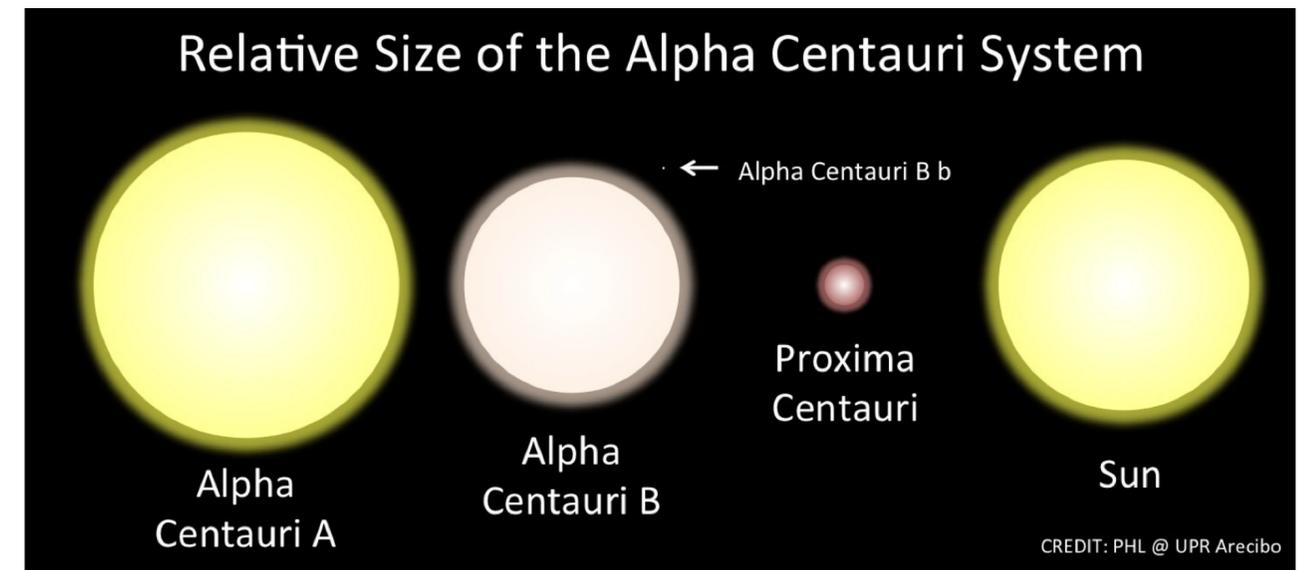
Proxima Centauri b

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

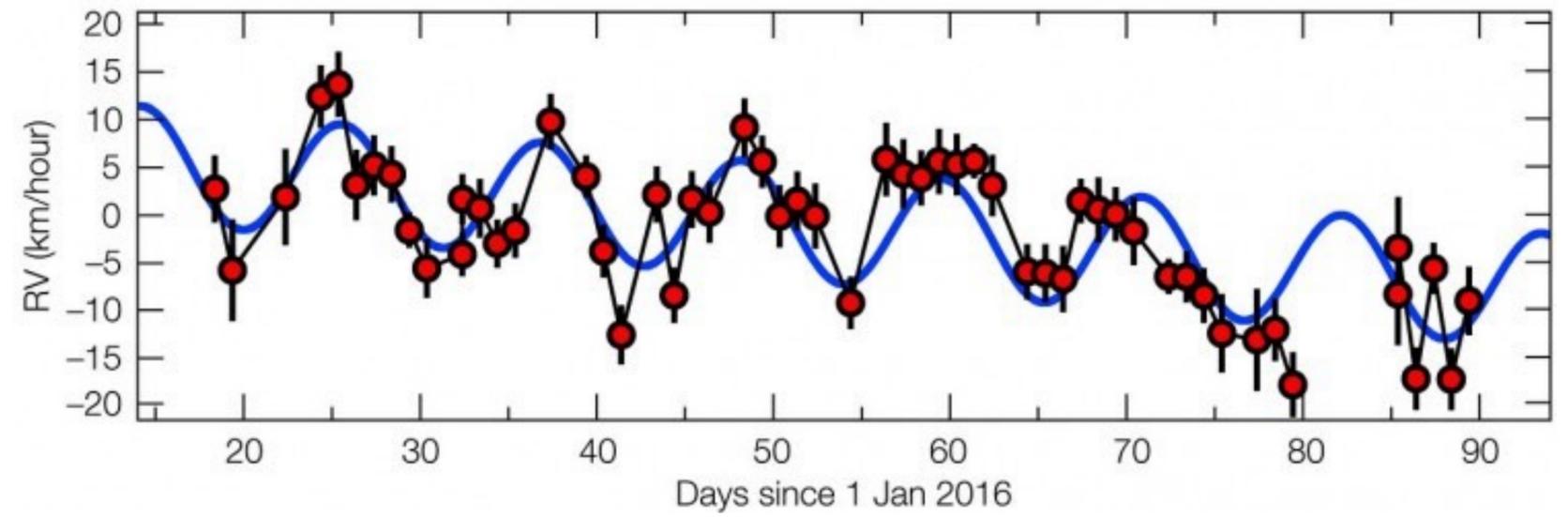
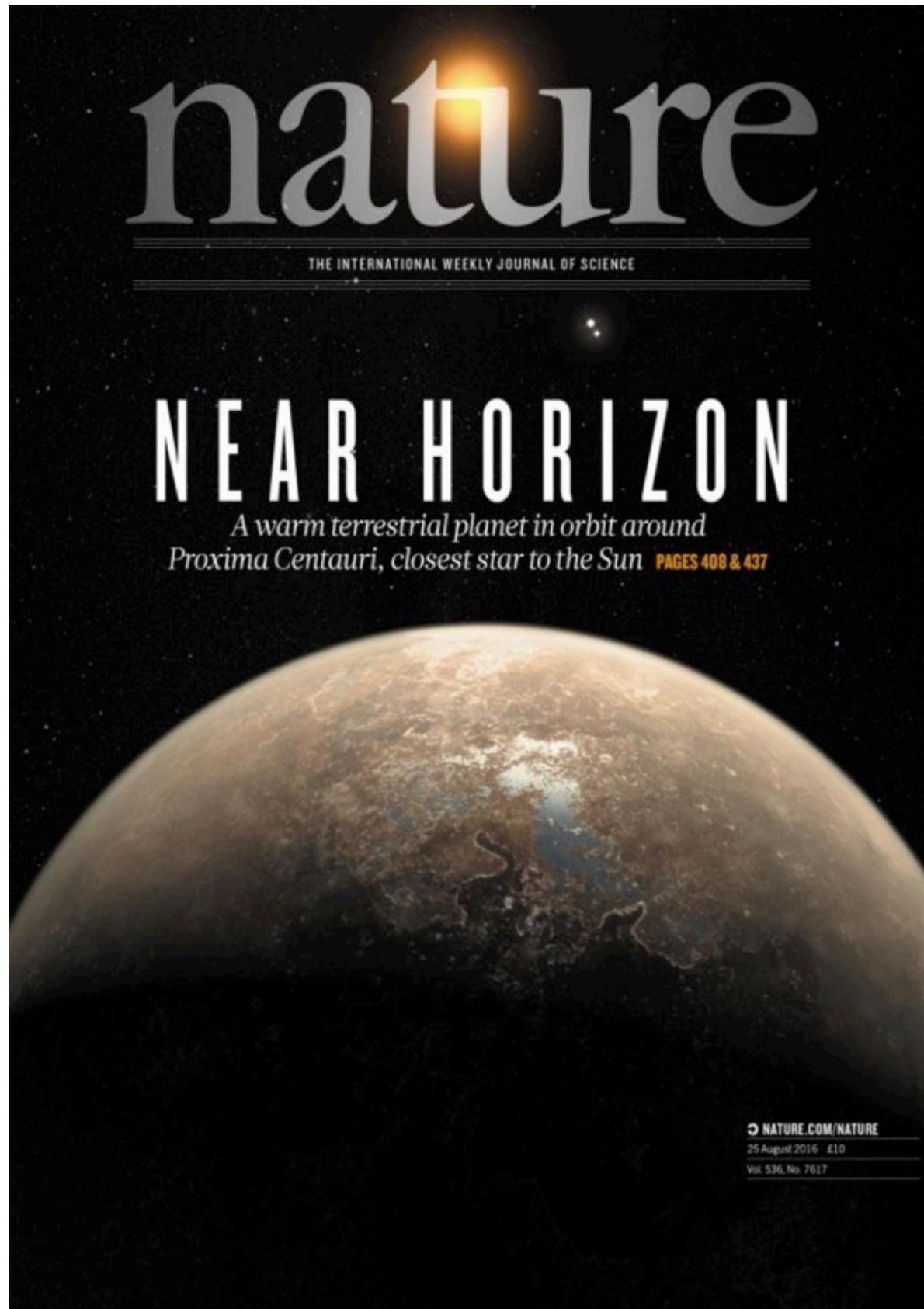


Créditos: ESO

C. A. Wuensche (2022)



Créditos: PHL (Arecibo)



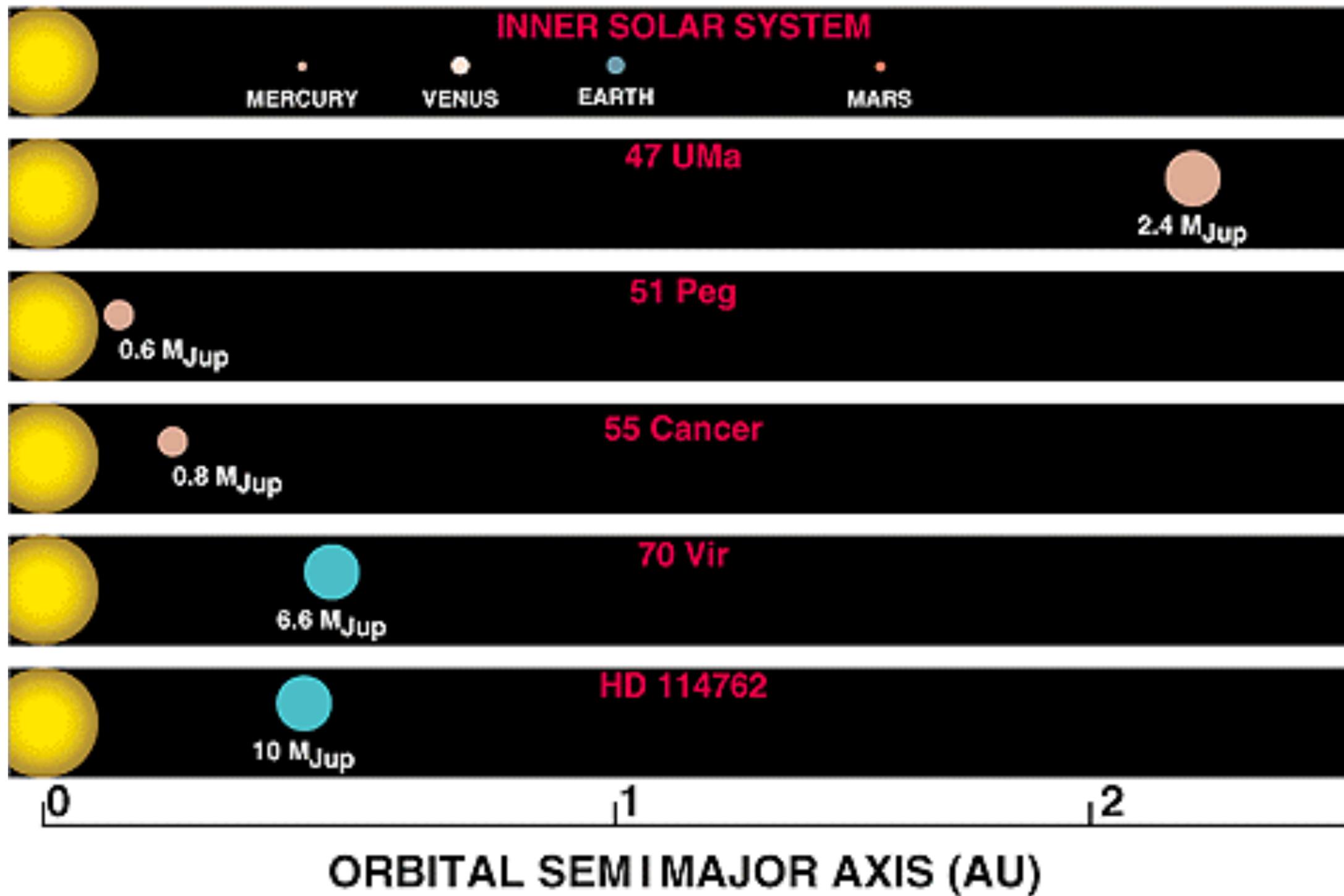
Créditos: ESO



UM HISTÓRICO DAS DESCOBERTAS DE PLANETAS EXTRA-SOLARES

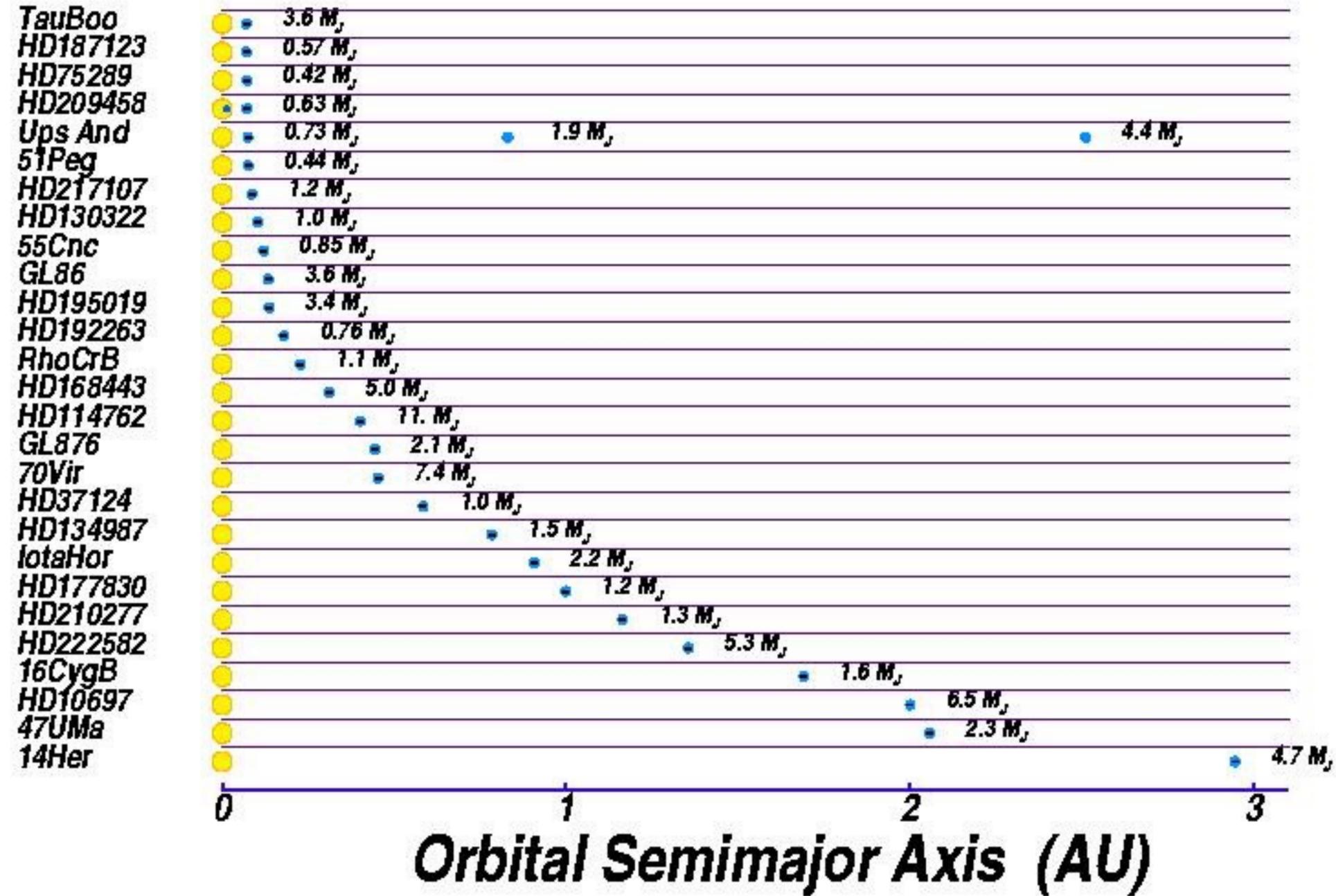


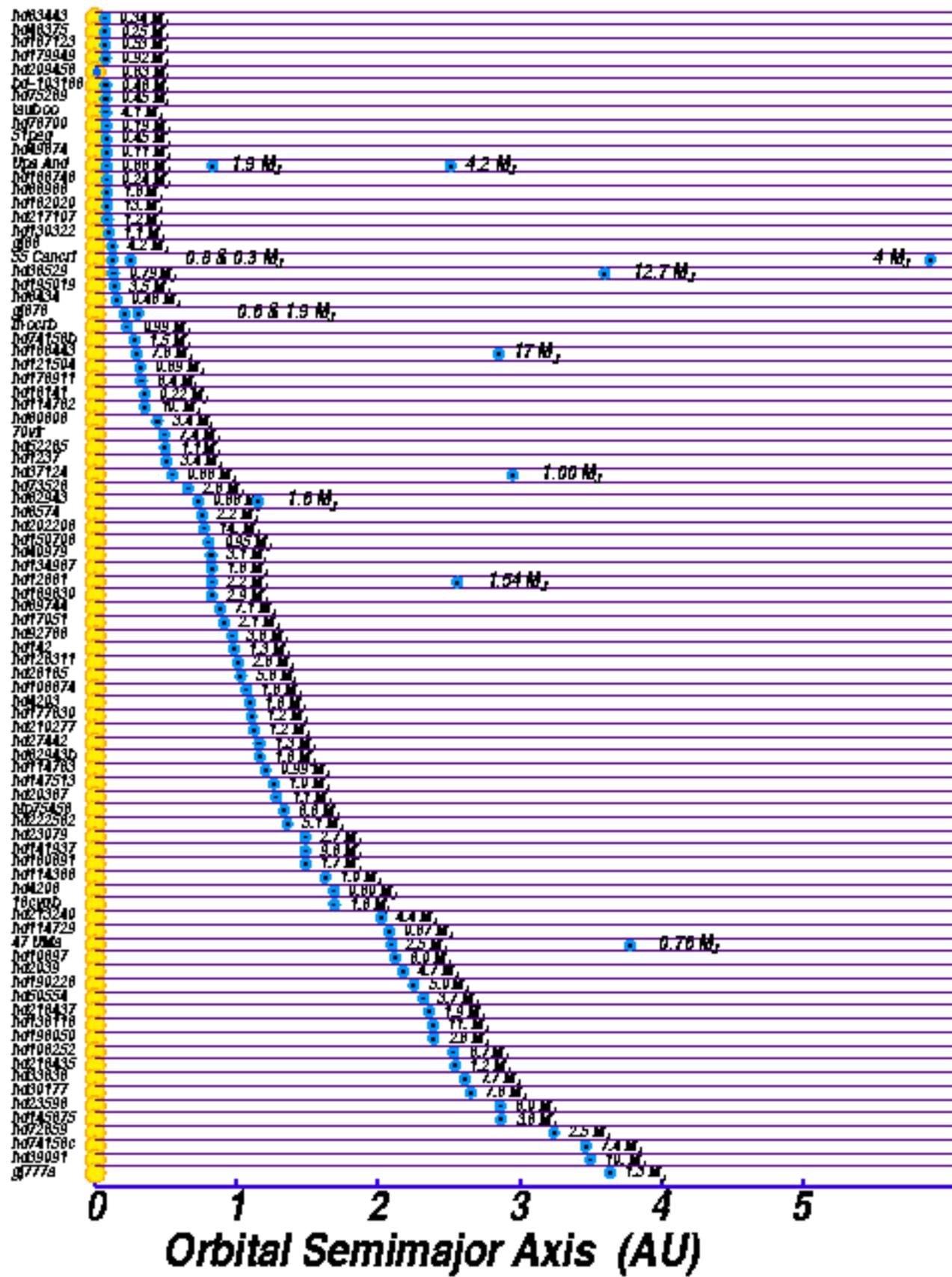
1995 - 1997





Por volta de 1999

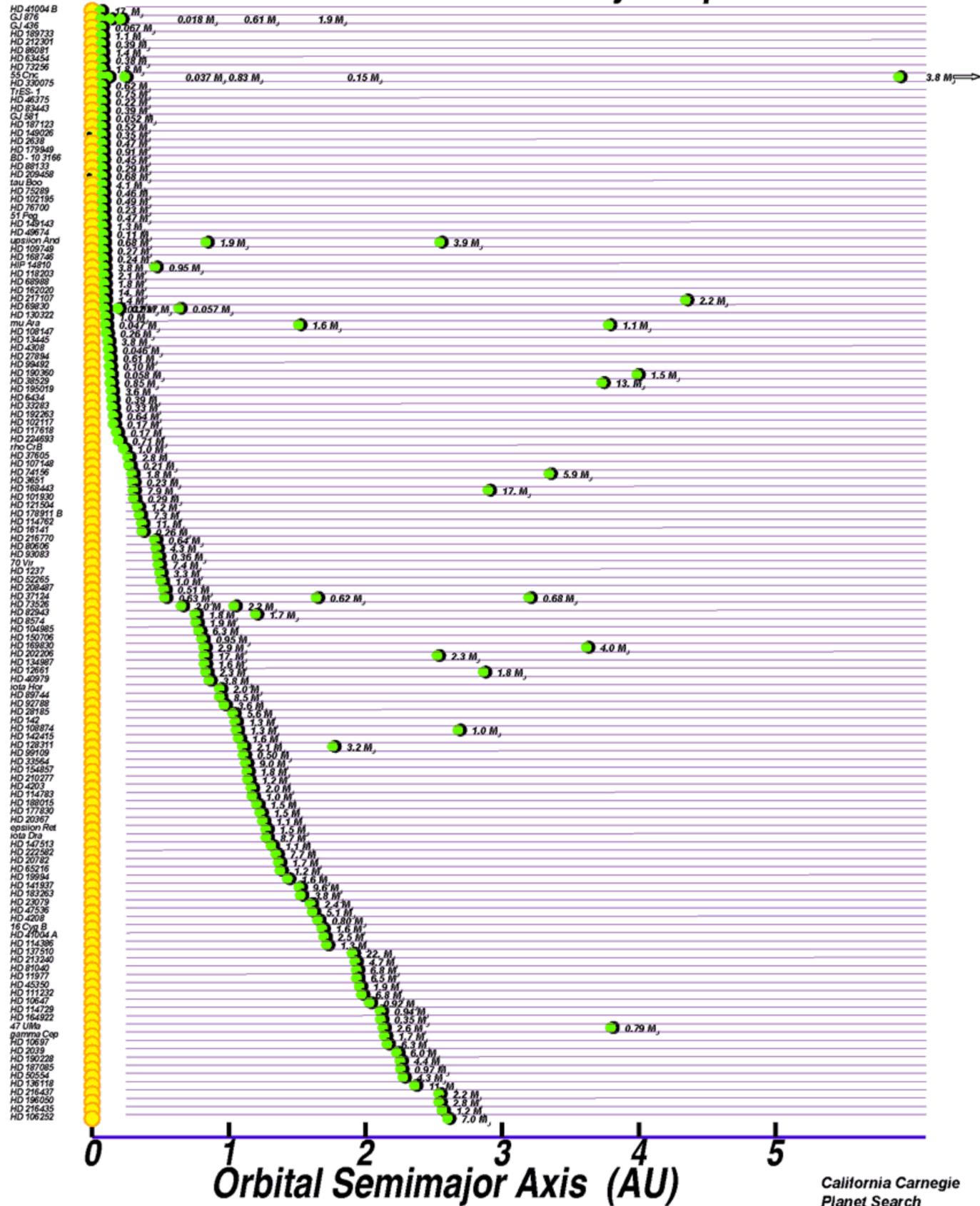




Por volta de 2000 - 2001



The 178 Known Nearby Exoplanets



Por volta de 2002

178 planetas conhecidos até 2002

Distância máxima: 200 pc



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 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!!!



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

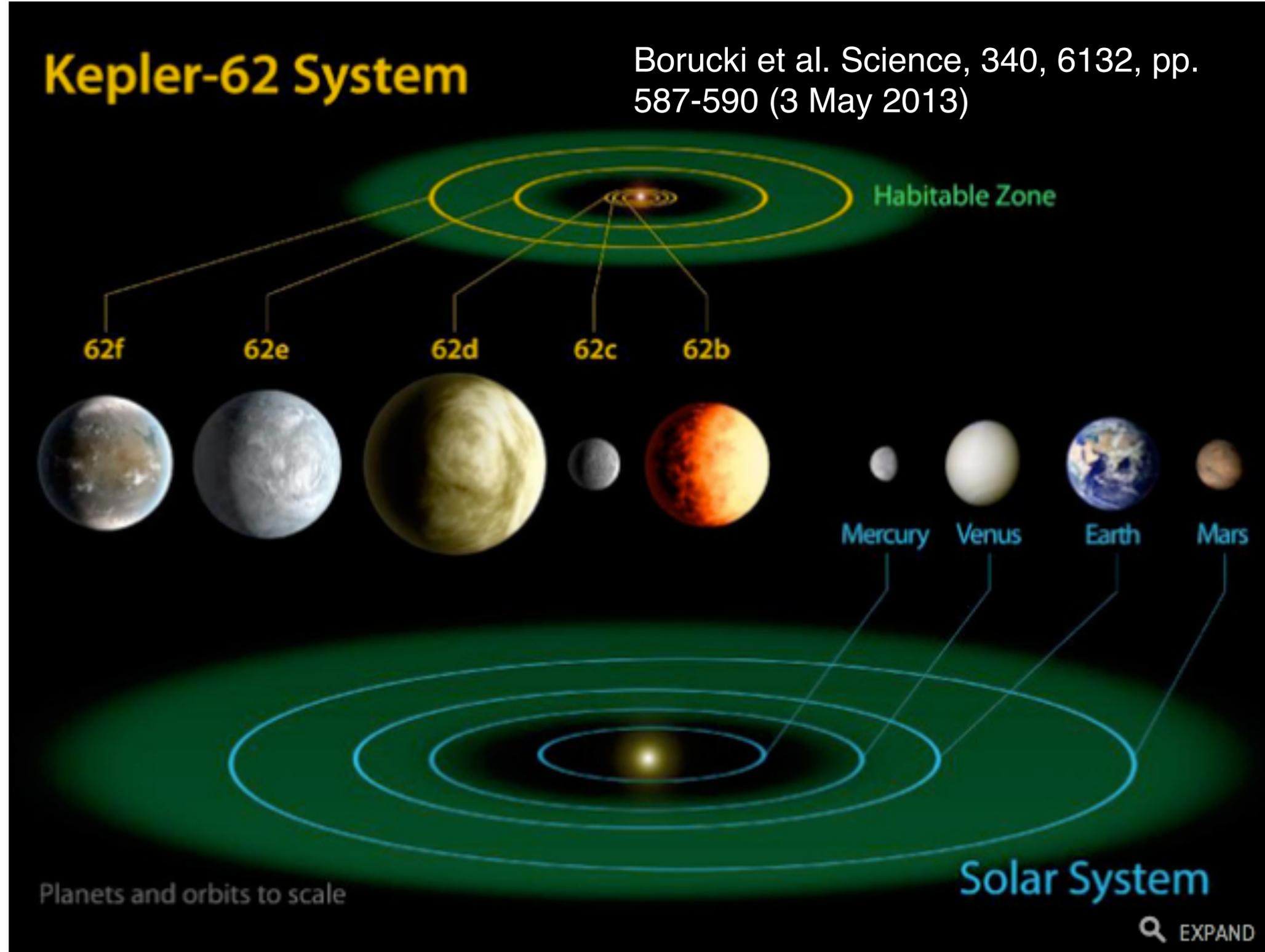
Em 19/05/2019
 4069 planetas confirmados
 3041 sistemas planetários
 659 sistemas com múltiplos planetas

Em 19/05/2022
 5037 planetas (+2640 candidatos)
 3713 sistemas planetários
 823 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

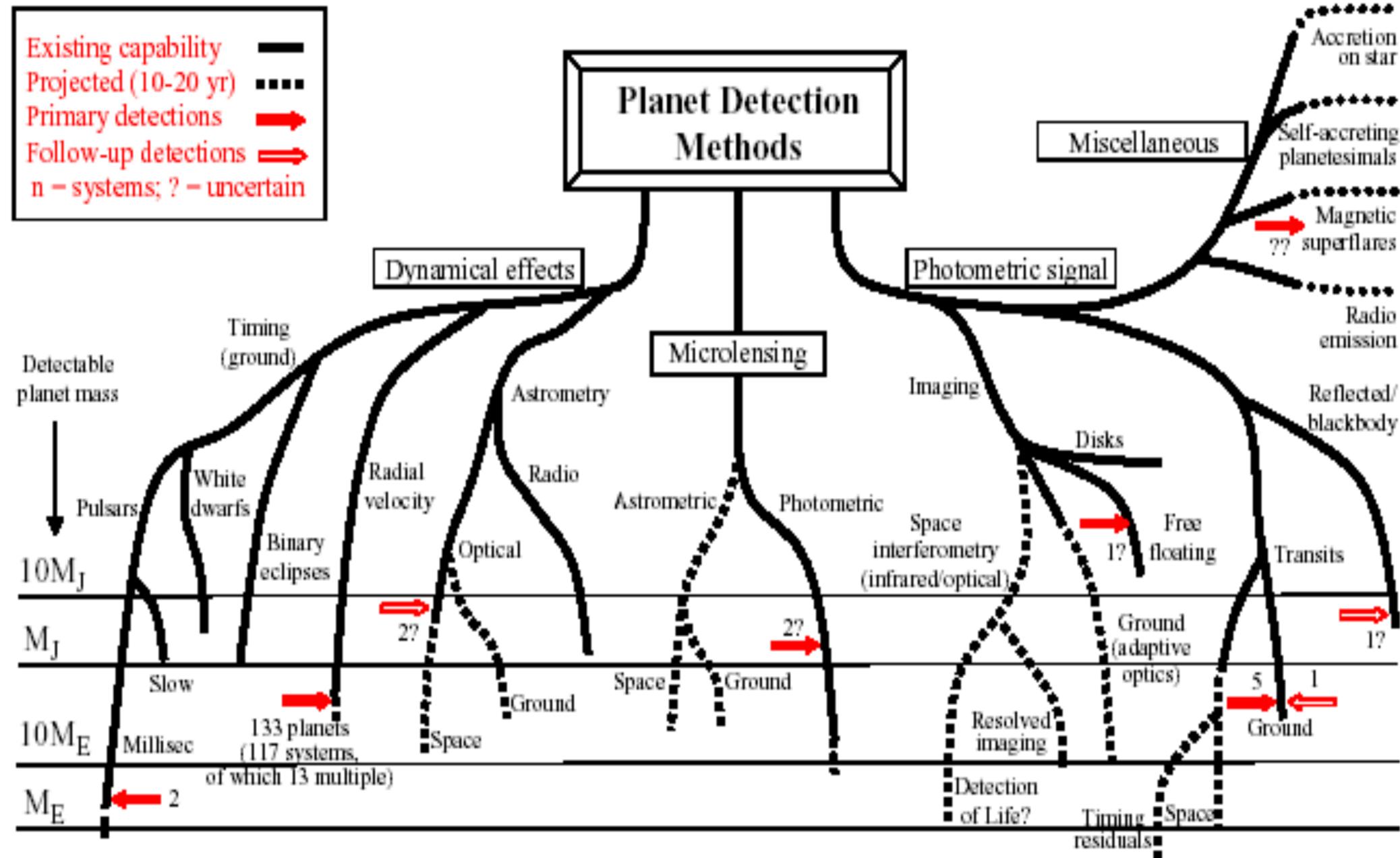




Planet Detection Methods

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

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





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

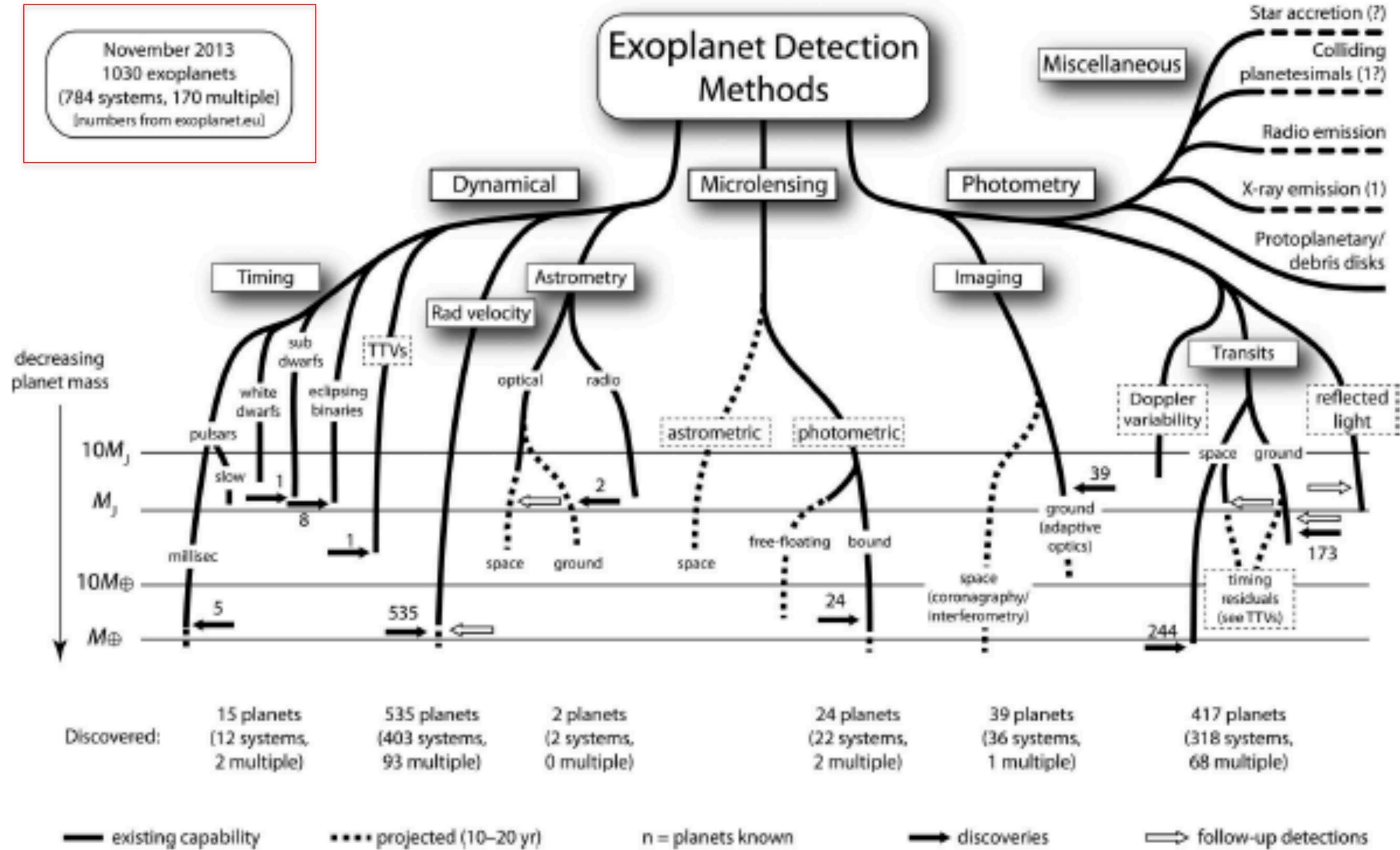


Fig. 1. Detection methods for exoplanets. The lower limits of the lines indicate masses that are detectable by present measurements (solid lines), and those that might be expected within the next 10 years (dashed). The (logarithmic) mass scale is shown at left. The miscellaneous signatures to the upper 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.



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



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

- ☑ Velocidade radial (oscilação)
- ☑ Obscurecimento da luz da estrela (trânsito)
- ☑ Amplificação da luz de uma fonte (microlenteamento gravitacional)
- ☑ Movimento em relação a estrelas vizinhas (astrometria)
- ☑ Visualização direta (obscurecimento da estrela central)



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





1 - Velocidade Radial



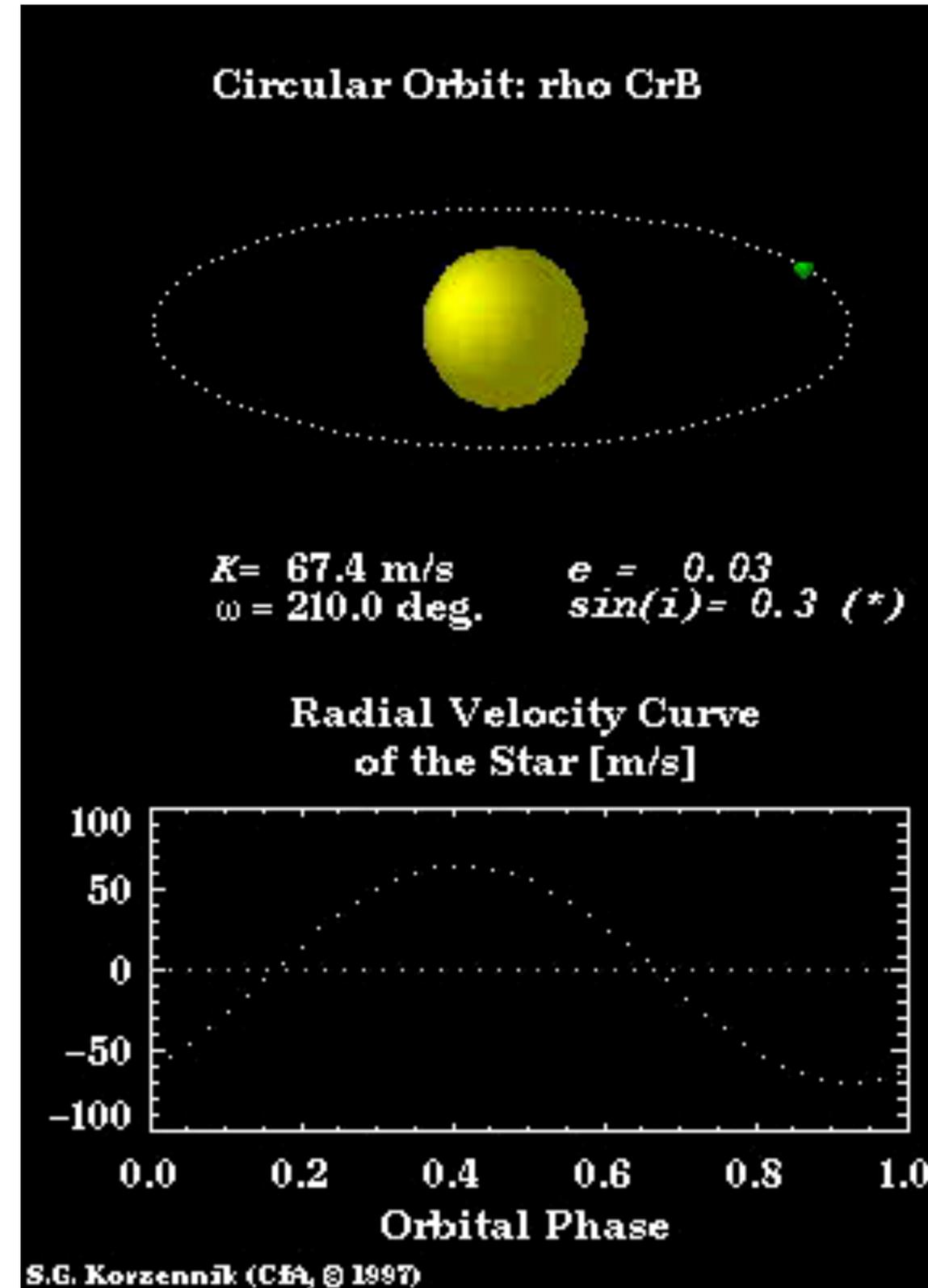
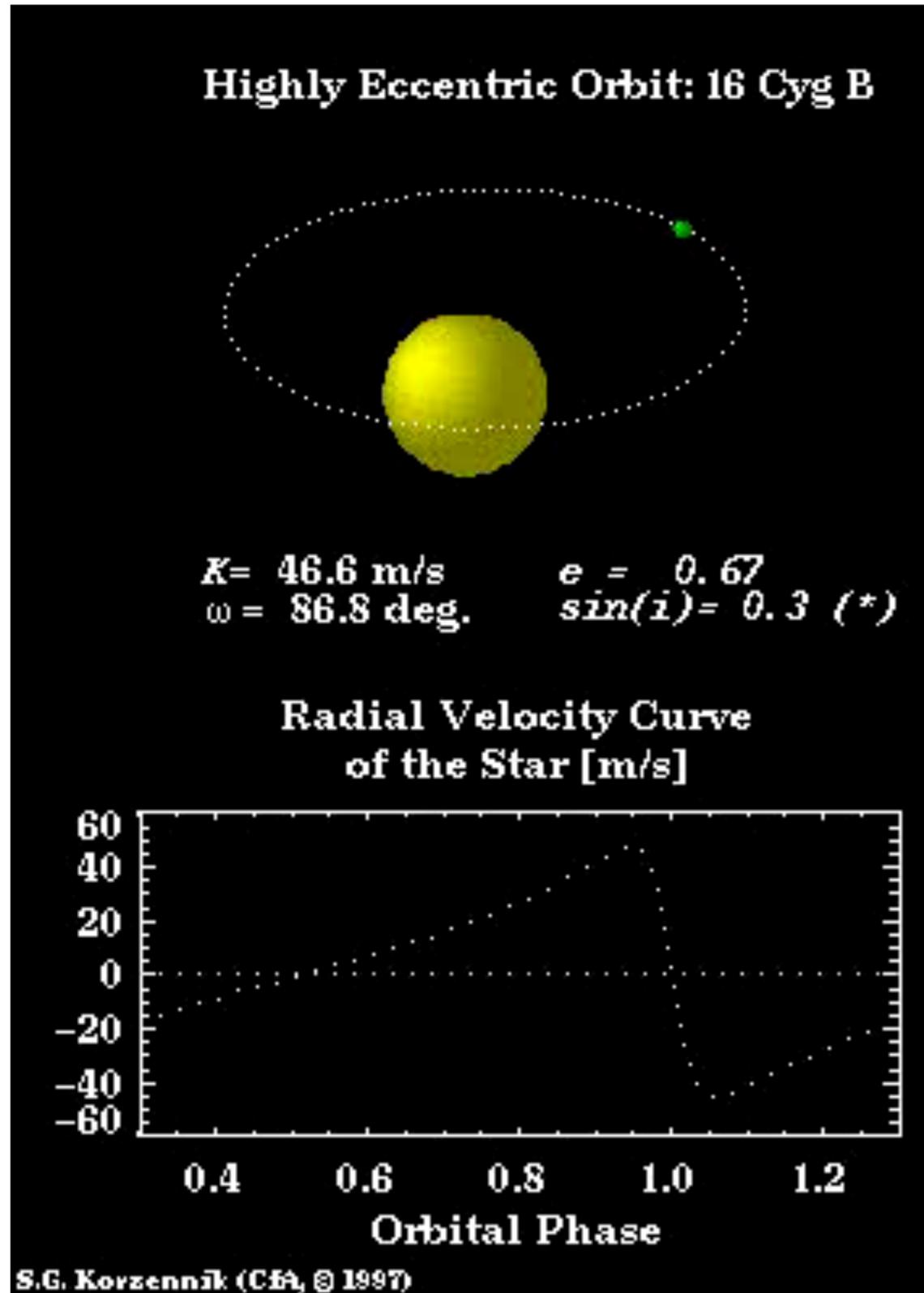


1 - Velocidade Radial



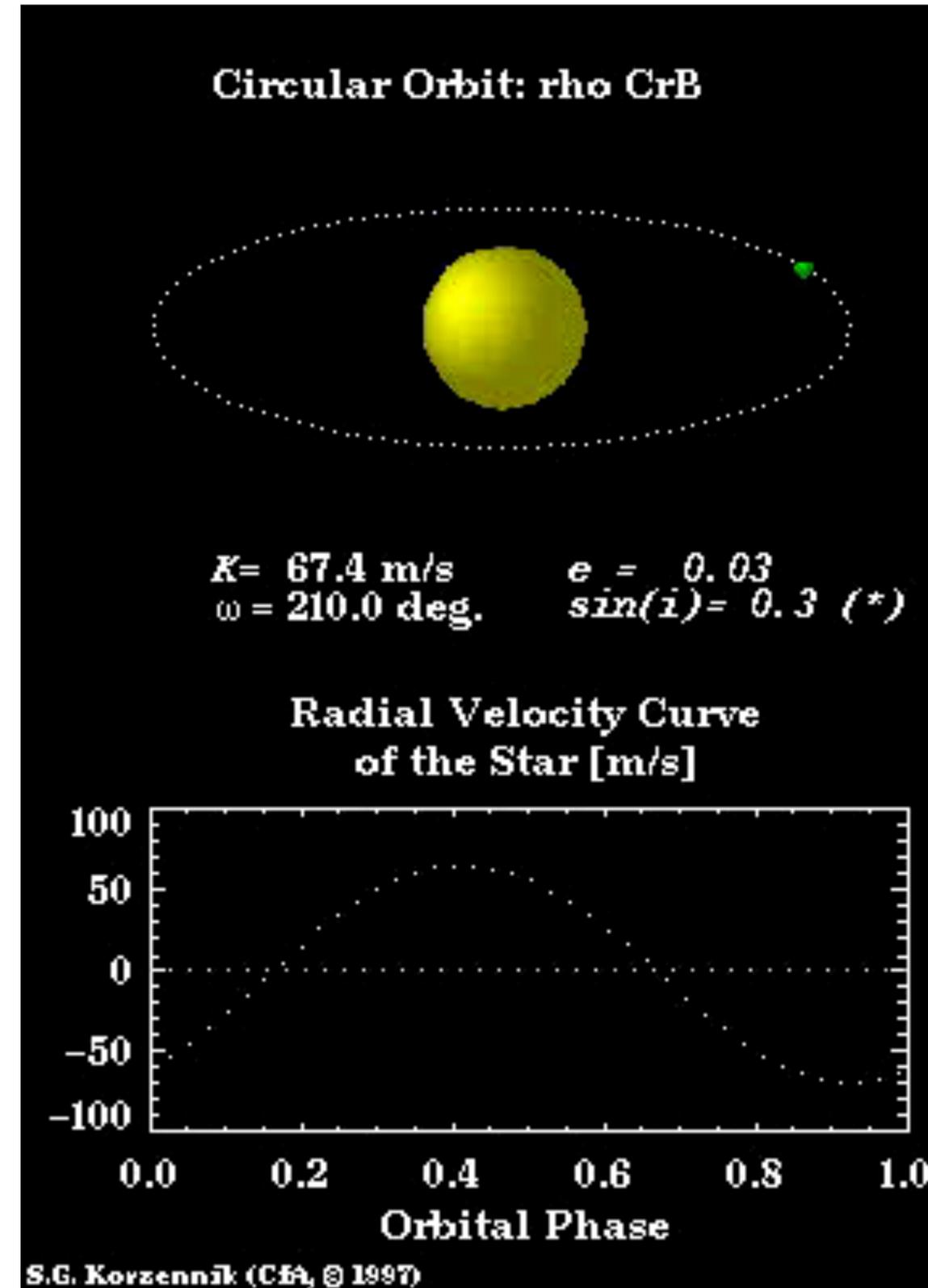
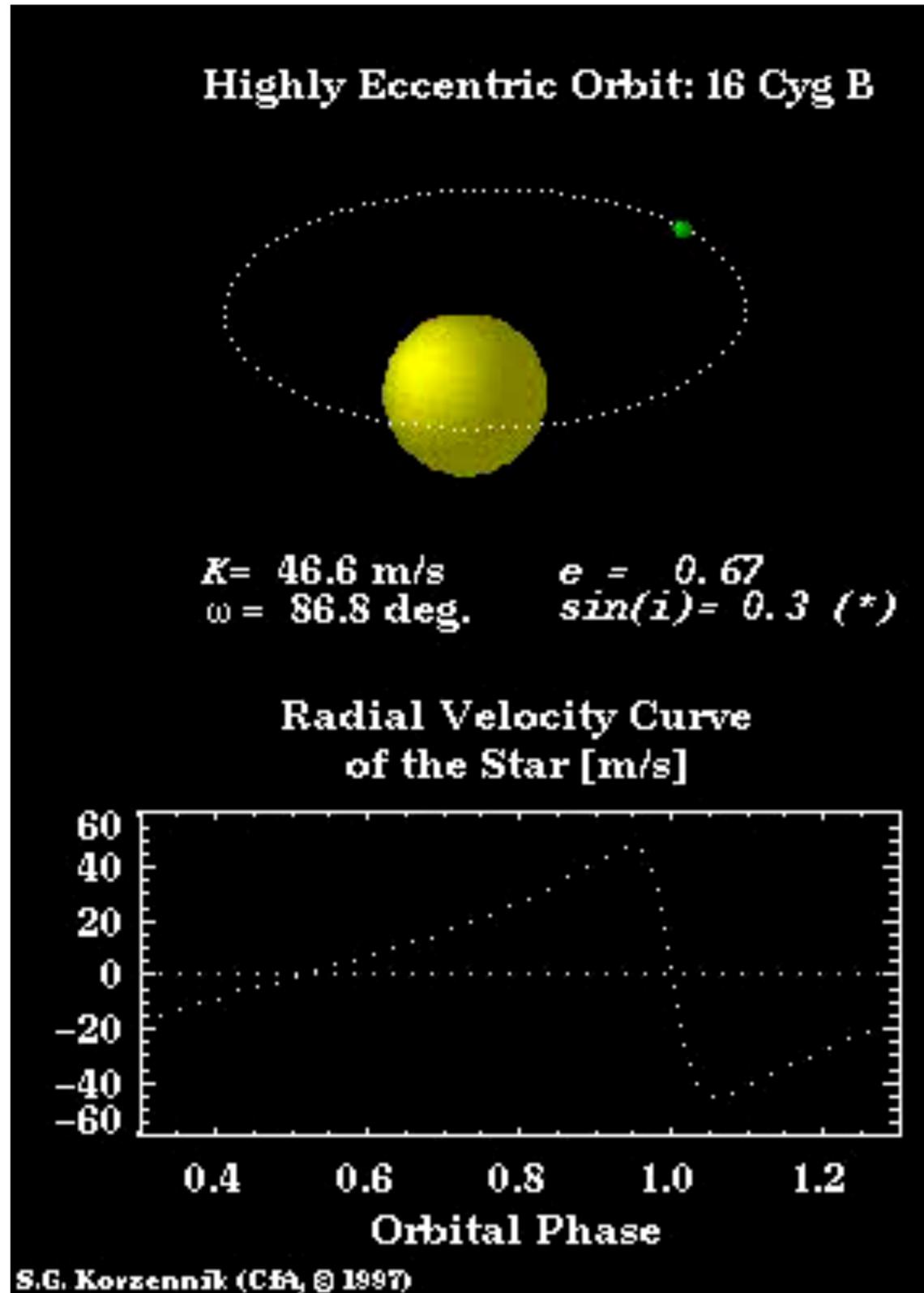


1 - Velocidade radial





1 - Velocidade radial





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

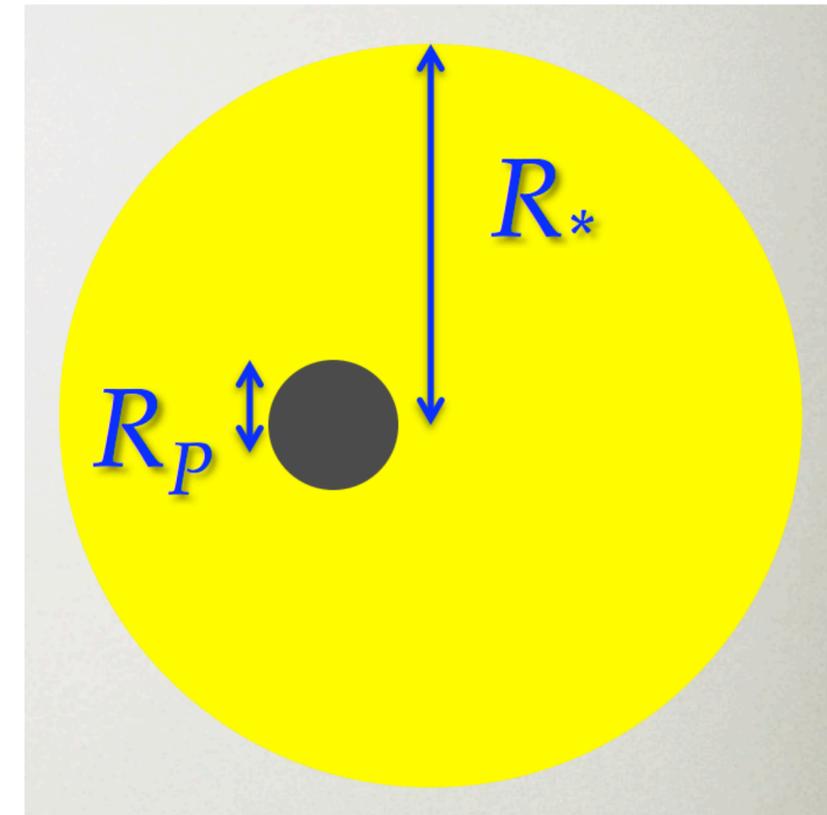
- ❑ Órbitas praticamente perpendiculares ao plano do céu ($i=90^\circ$).
- ❑ Obtém-se a massa do planeta por velocidade radial e o raio do planeta pelo trânsito.
- ❑ Telescópios no solo conseguem detectar apenas planetas grandes, para planetas telúricos é necessário observar com satélites.
- ❑ Possível 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 $P_{orb}^{1/3} (R_*/M_*)^{1/3}$
- ✓ 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





Trânsito - 2 planetas





Trânsito – 2 planetas





Trânsito – vários planetas





Trânsito – vários planetas





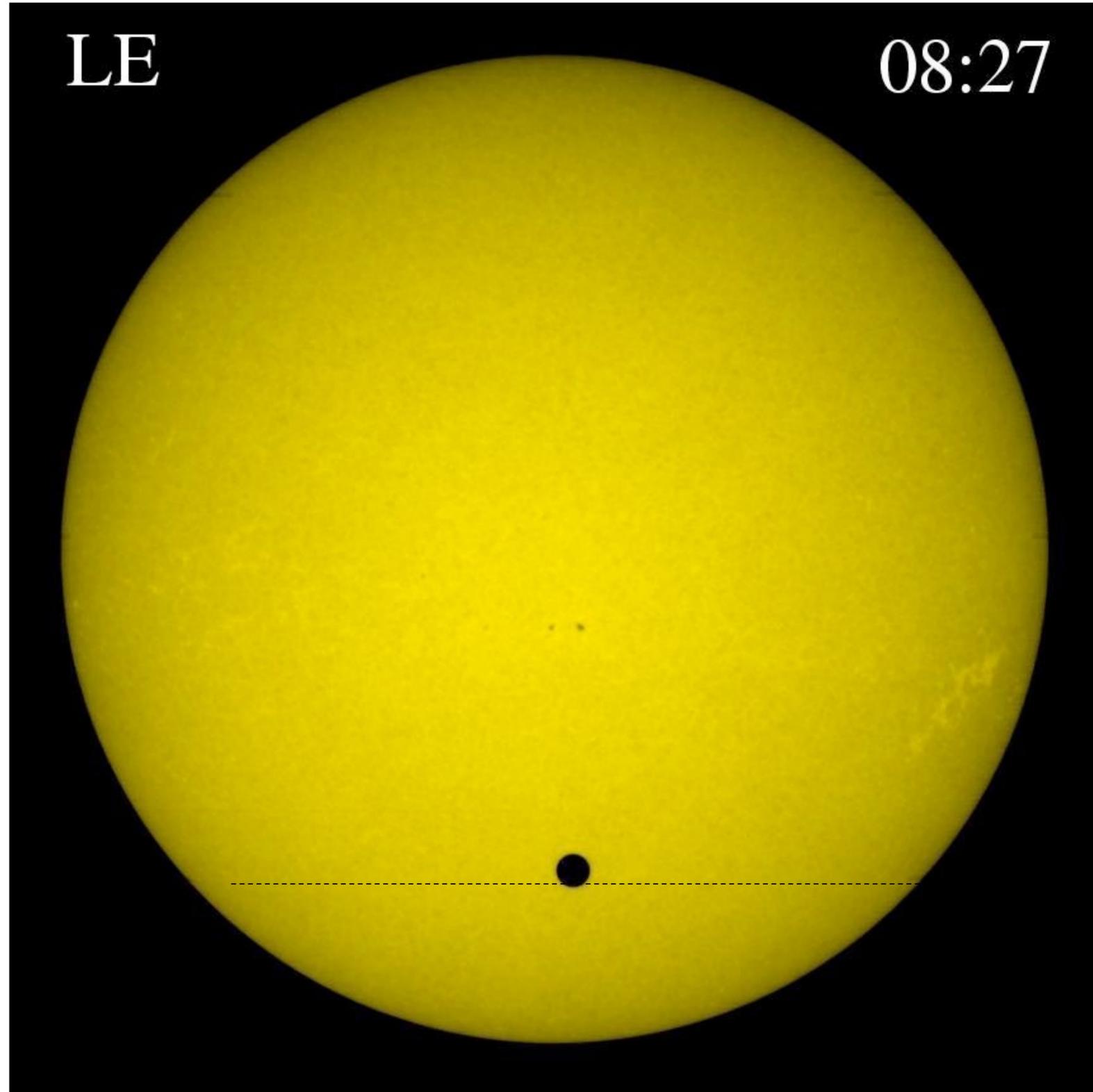
Trânsito – vários planetas





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



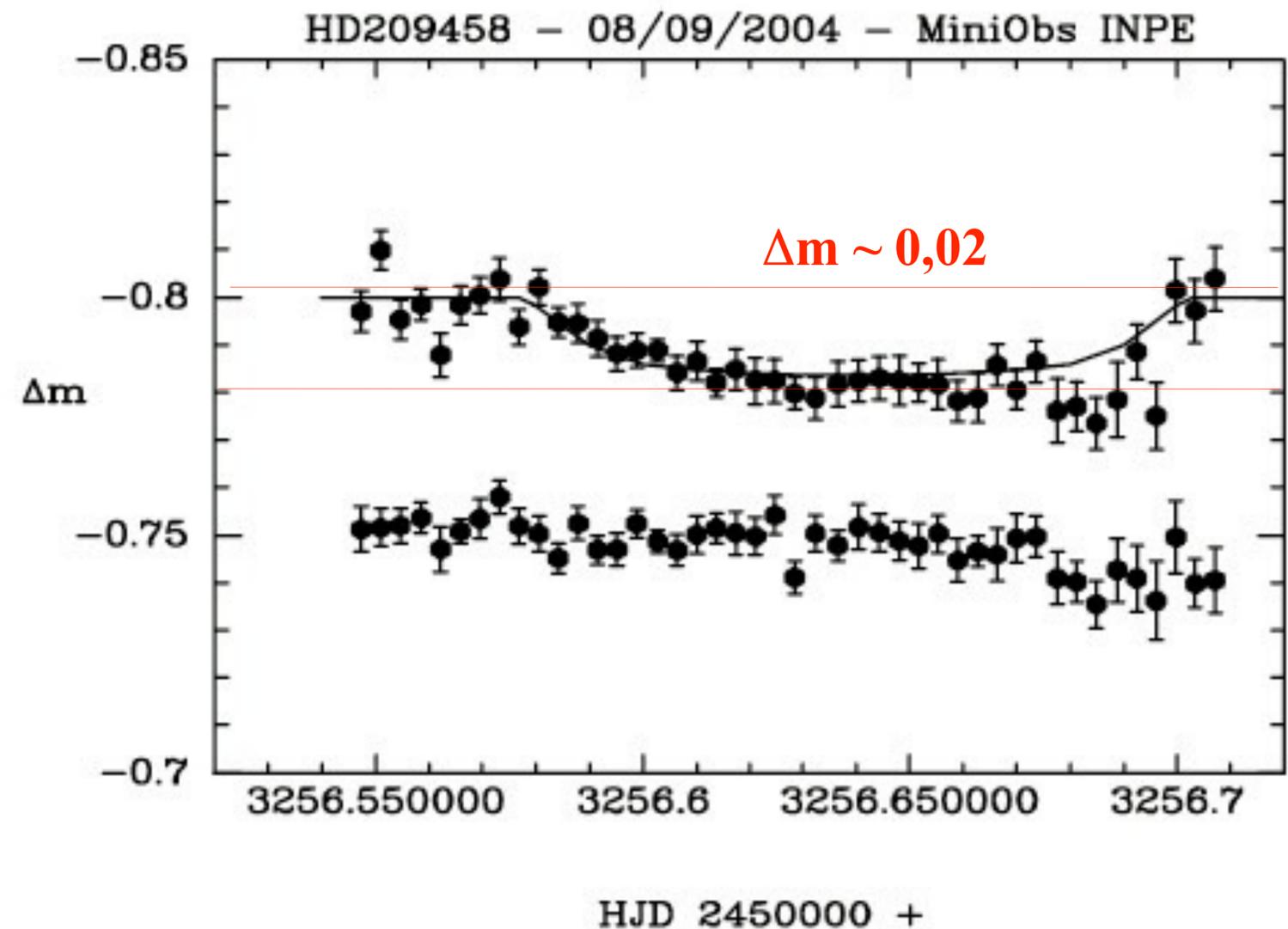
Trânsito de Vênus - 8 Junho 2004



Trânsito do planeta extrasolar HD209458

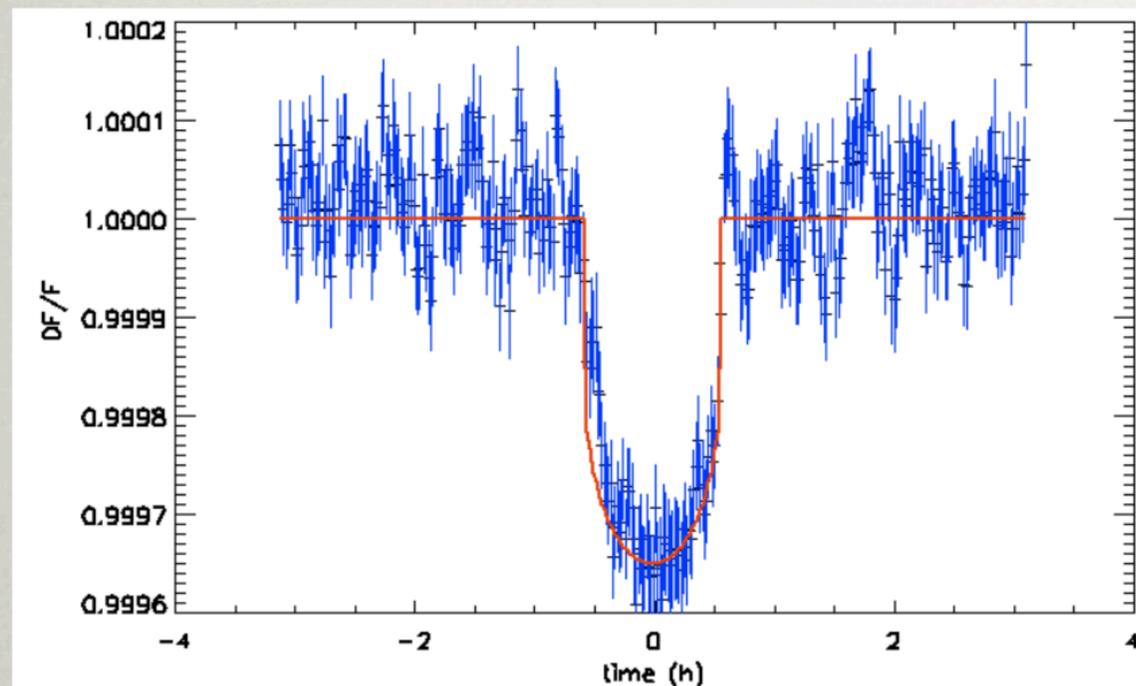
Observação do trânsito de HD209458, usando o telescópio de 28 cm do Miniobservatório do INPE (Eder Martioli e Julio Tello)

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

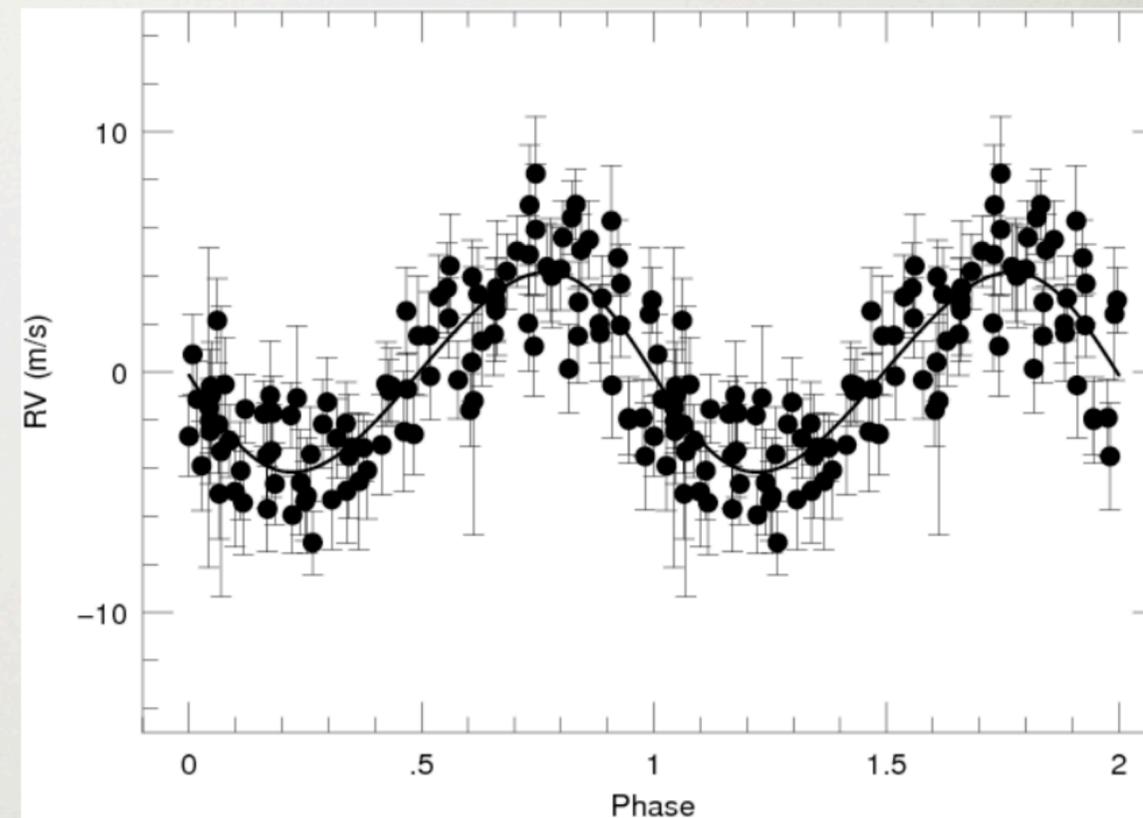


Primeira detecção de planeta do tipo terrestre

CoRoT (Leger et al. 2009)



HARPS (Queloz et al. 2009)

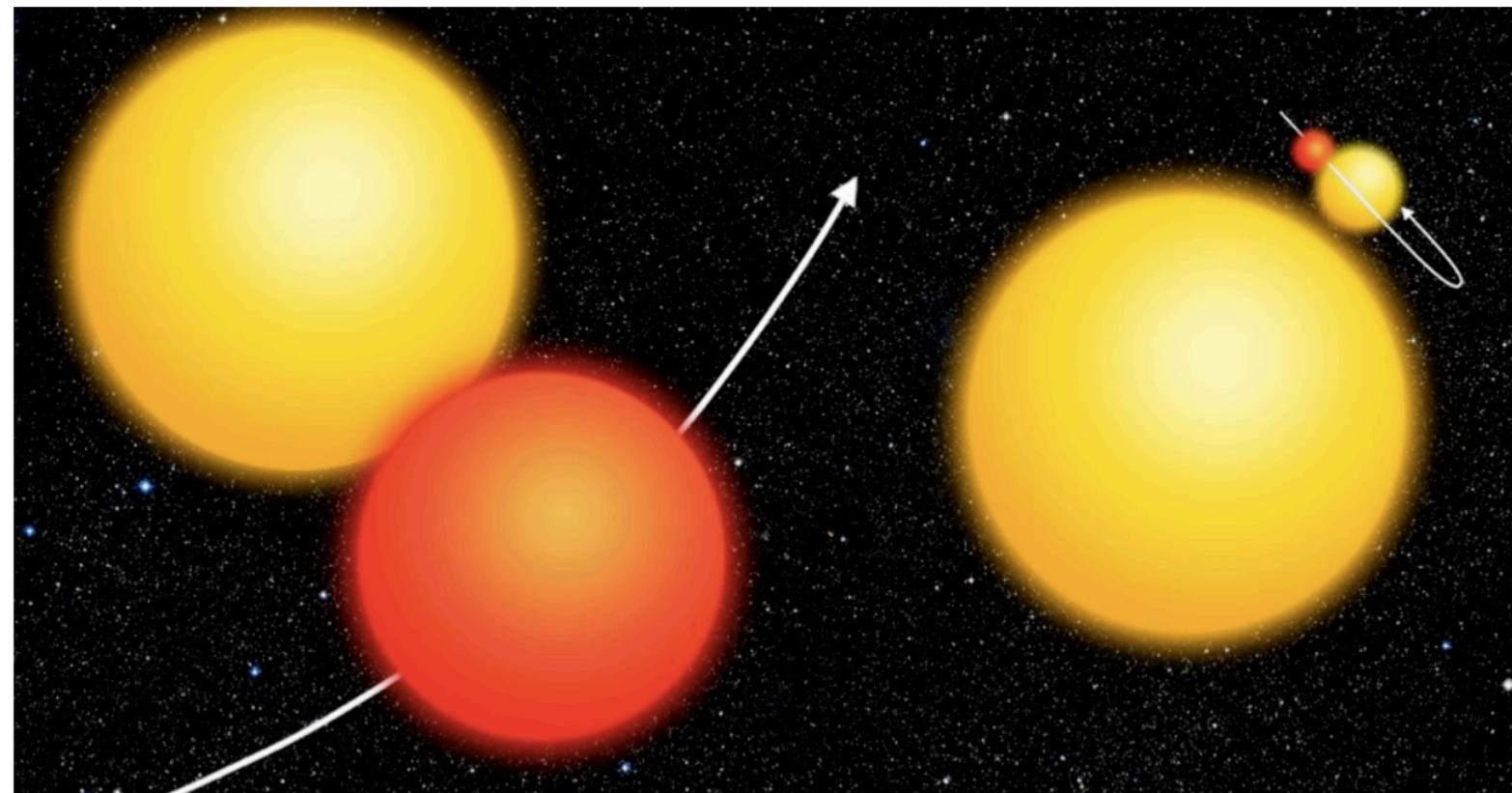


Massa: $4,8 M_{\text{Terra}}$

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

Trânsito: problemas

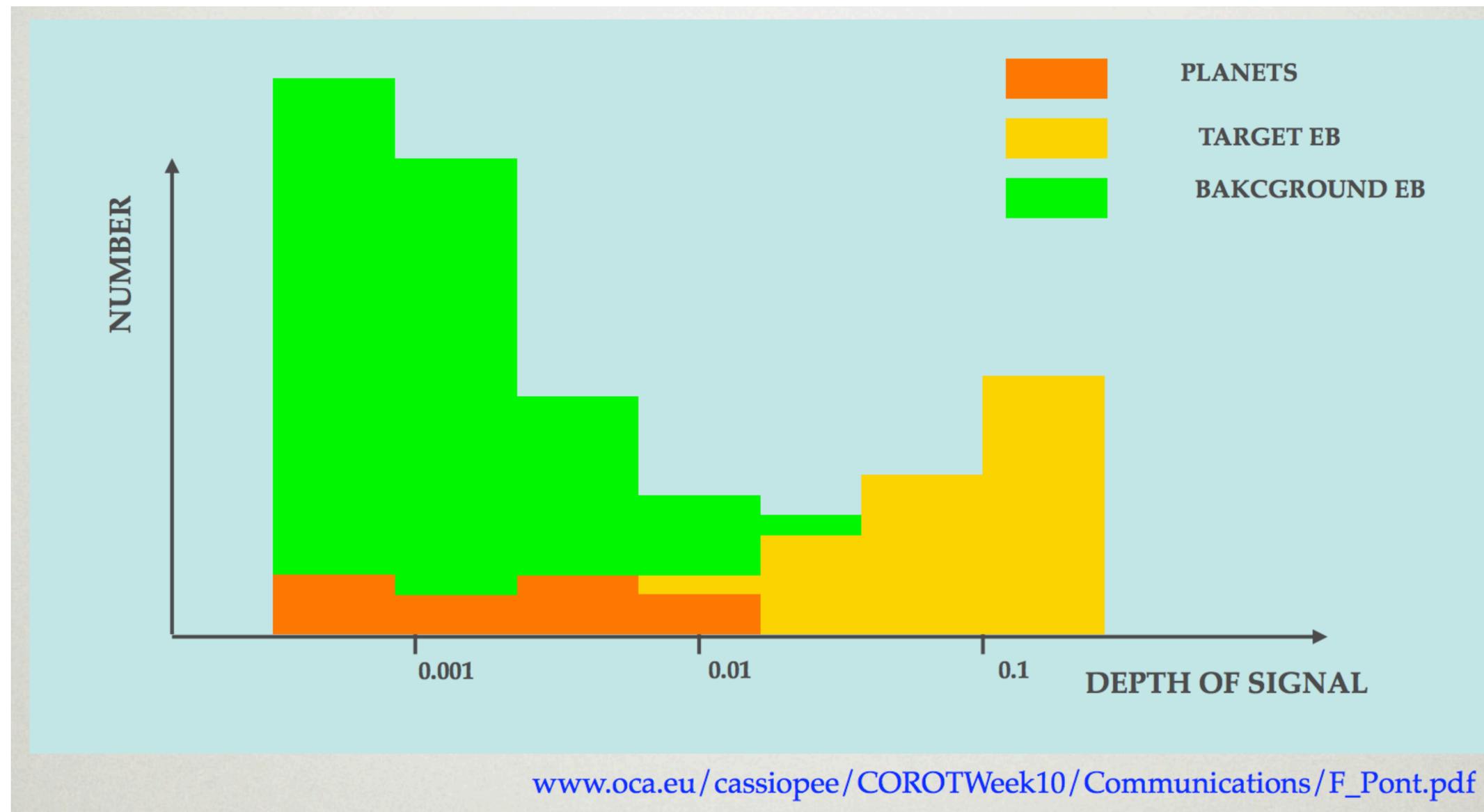
- ☑ Baixa probabilidade, mas simples observação
- ☑ Muitos falsos positivos:
 - ✓ Eclipse tangencial da estrela da sequência principal
 - ✓ Binárias eclipsante (gigante e sequência principal)
 - ✓ Eclipsando binária próxima (foreground ou background)





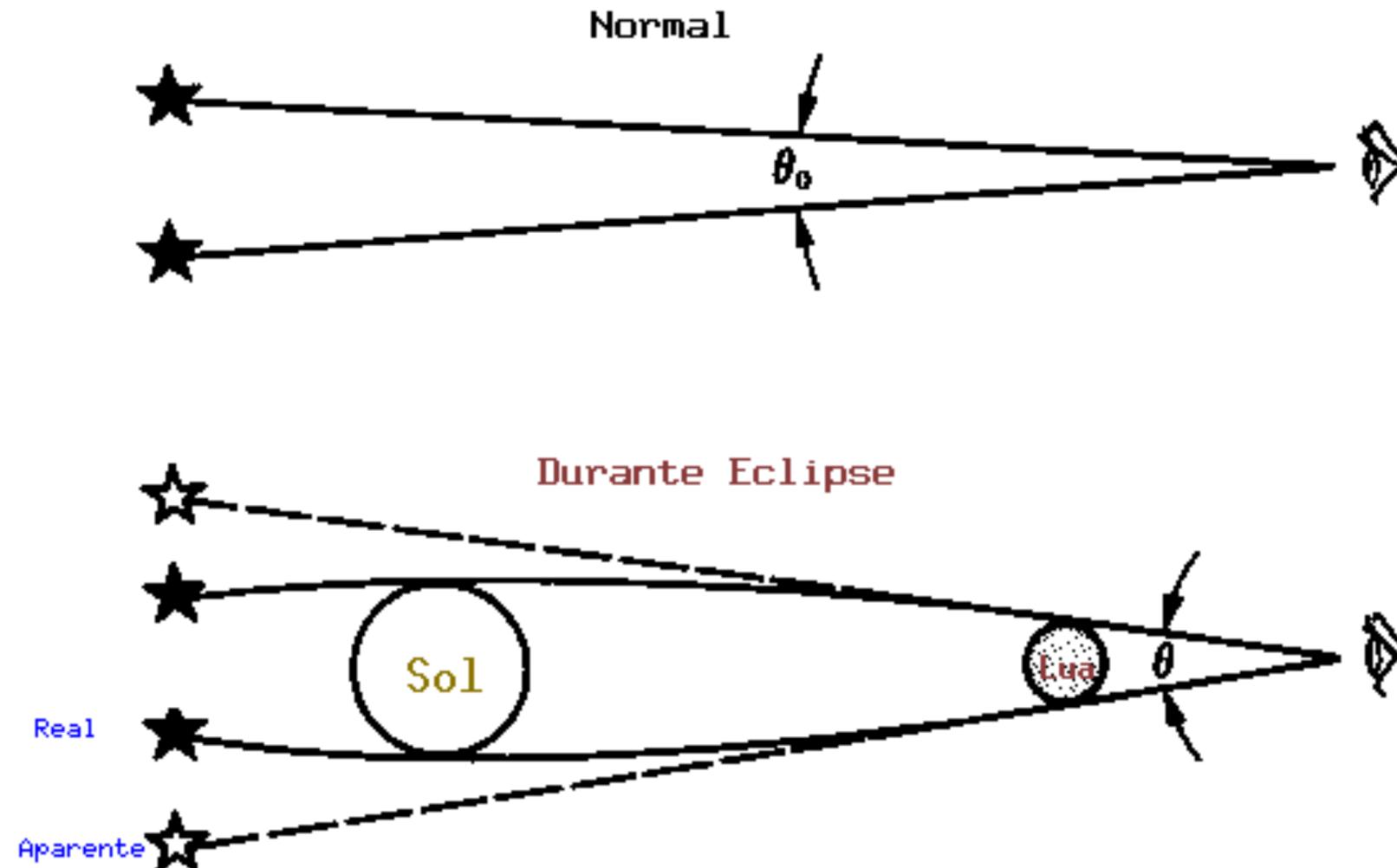
Trânsito: problemas

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



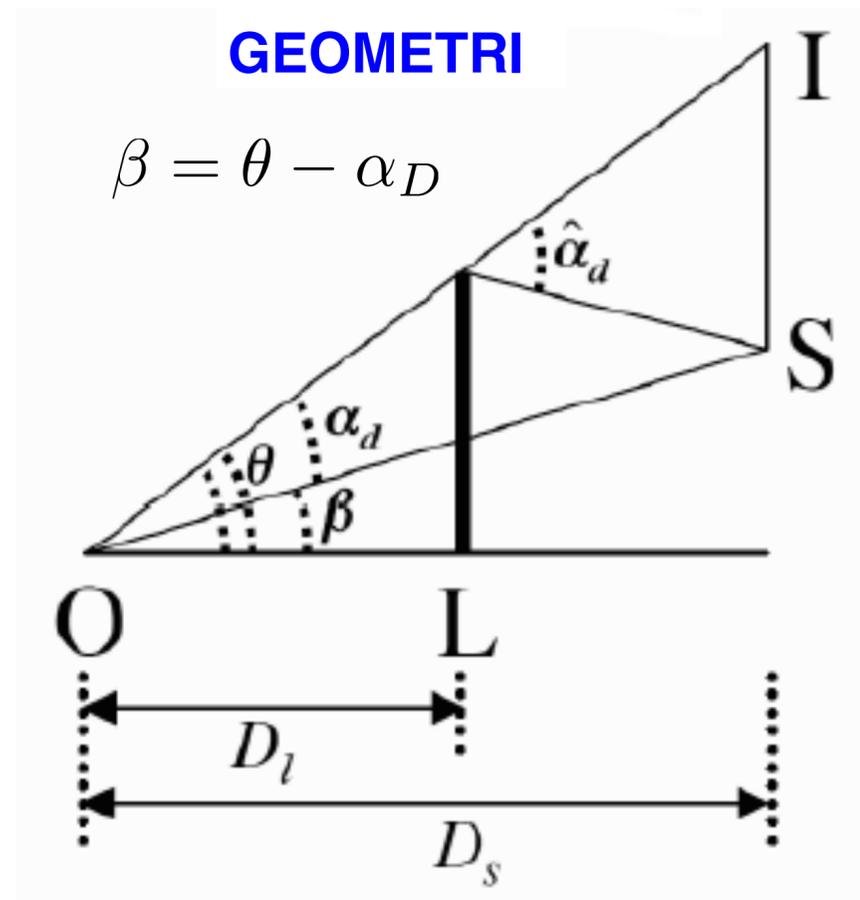
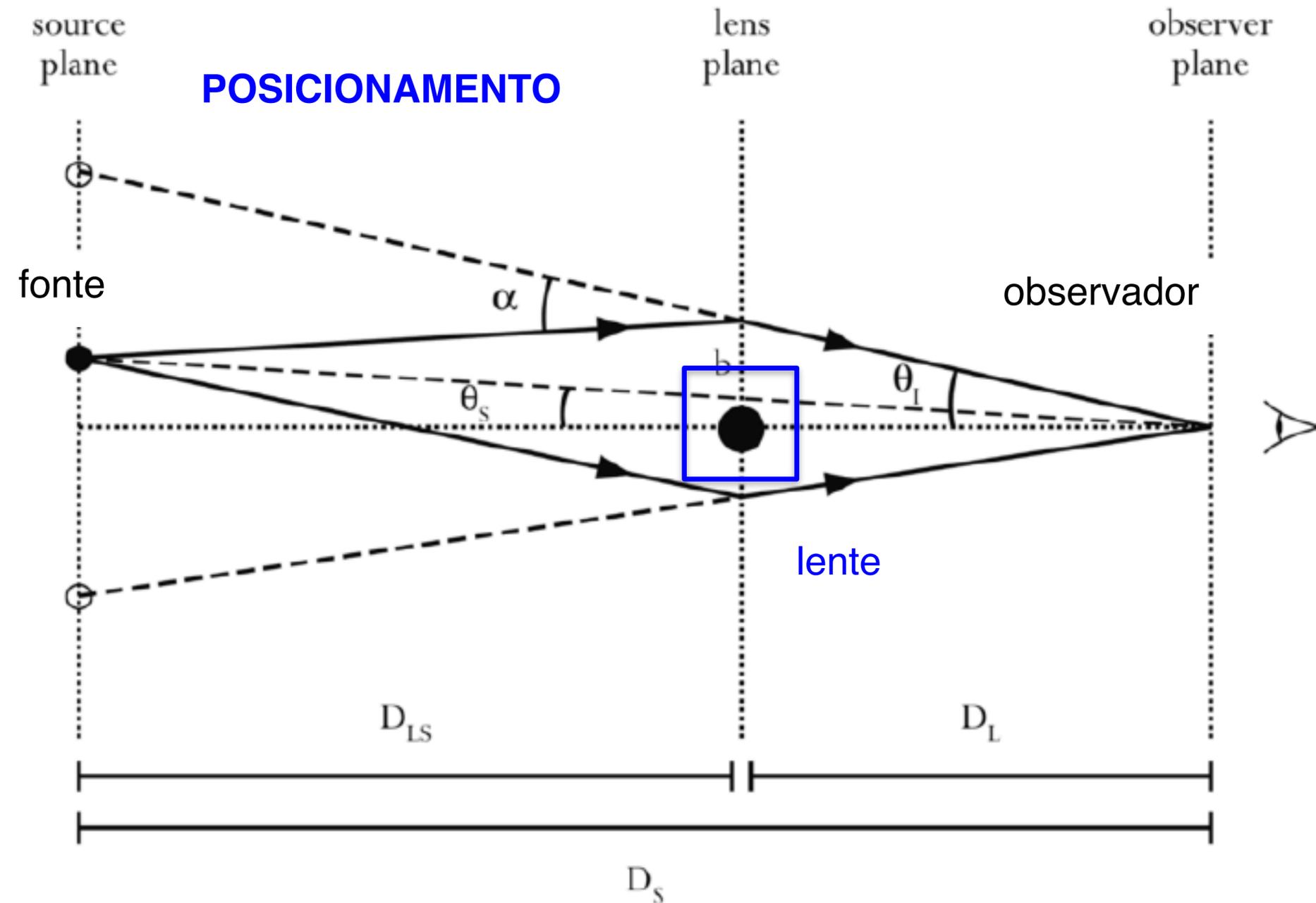
3 – Microlenteamento

- ☑ 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.



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

- α – ângulo de lenteamento
- θ – semi-ângulo de deflexão
- M – massa do objeto (lente)
- D_l – distância lente – observador
- D_{ls} – distância lente – fonte
- D_s – distância fonte – observador





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

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

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

+

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

Amplificação da imagem

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



3 – Microlenteamento





3 – Microlenteamento



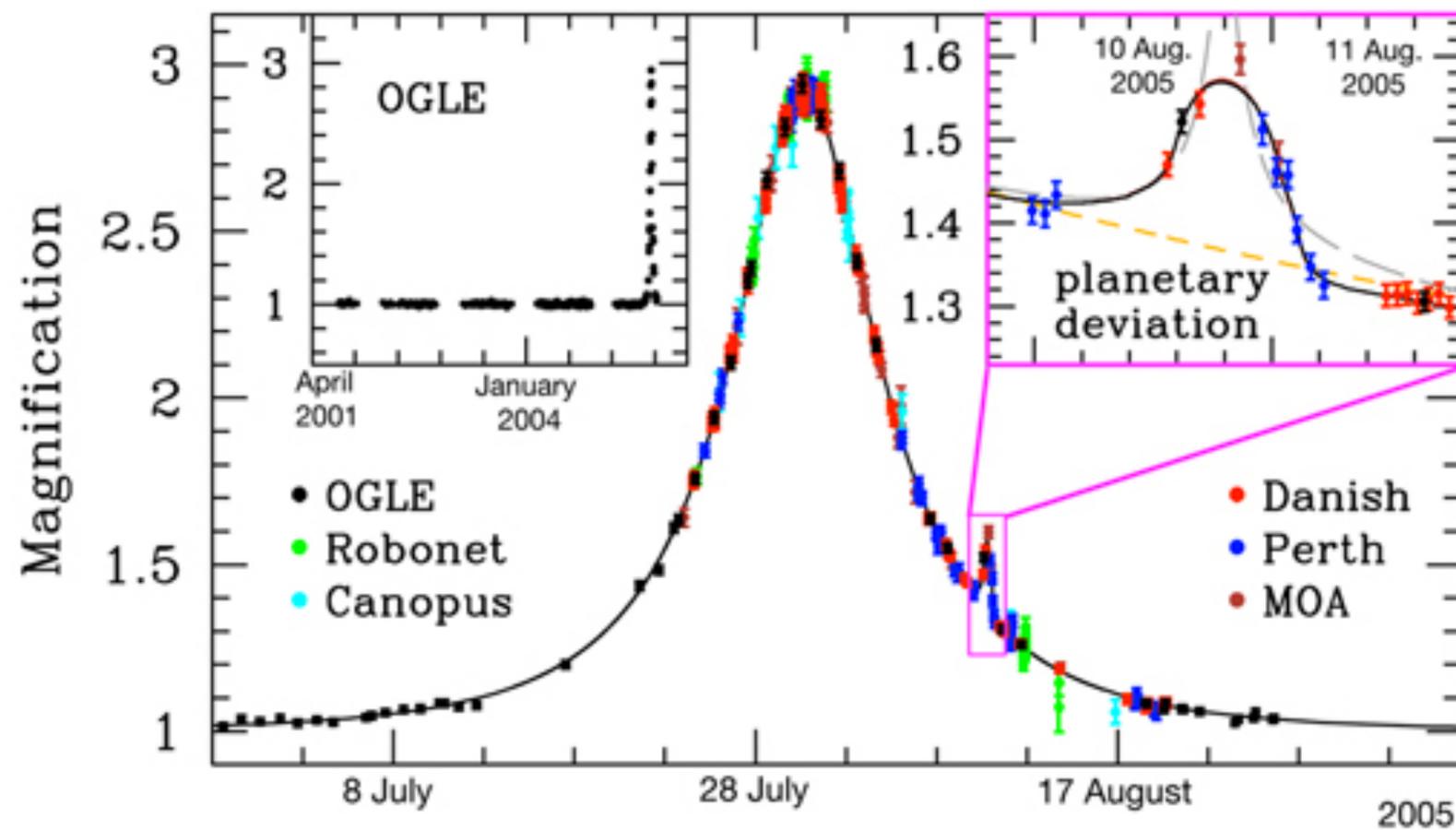


3 – Microlenteamento



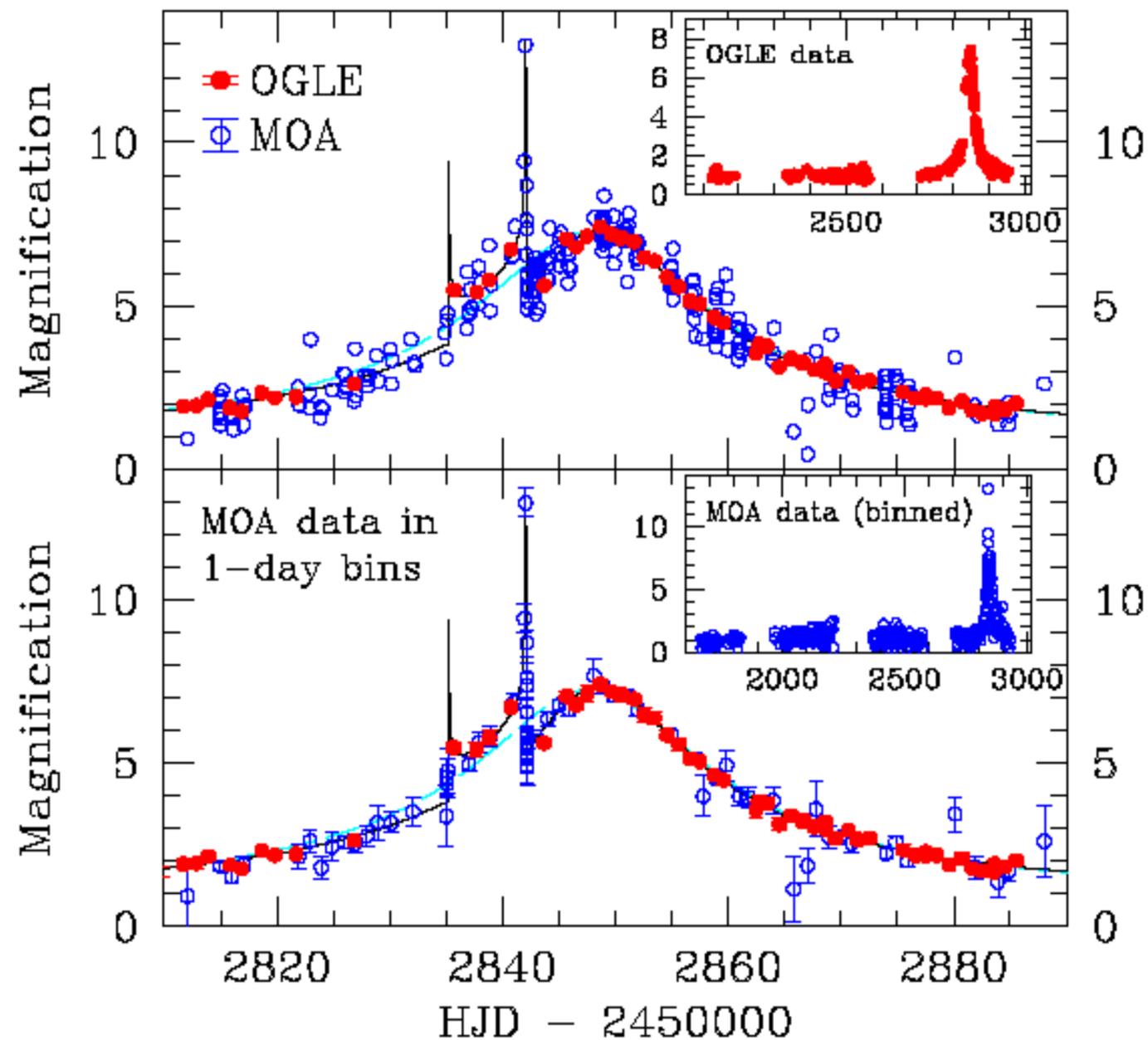


Detecção de planetas por microlenteamento



Light Curve of OGLE-2005-BLG-390

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



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





4 - Imageamento direto





4 - Imageamento direto





5 - Astrometria





5 - Astrometria





5 - Astrometria





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/planeta	10^{-9} (V)/ 10^{-4} (IR)	10^{-10} (V)/ 10^{-6} (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)
Duração	< 3 dias	< 4 h	Não (Terra)



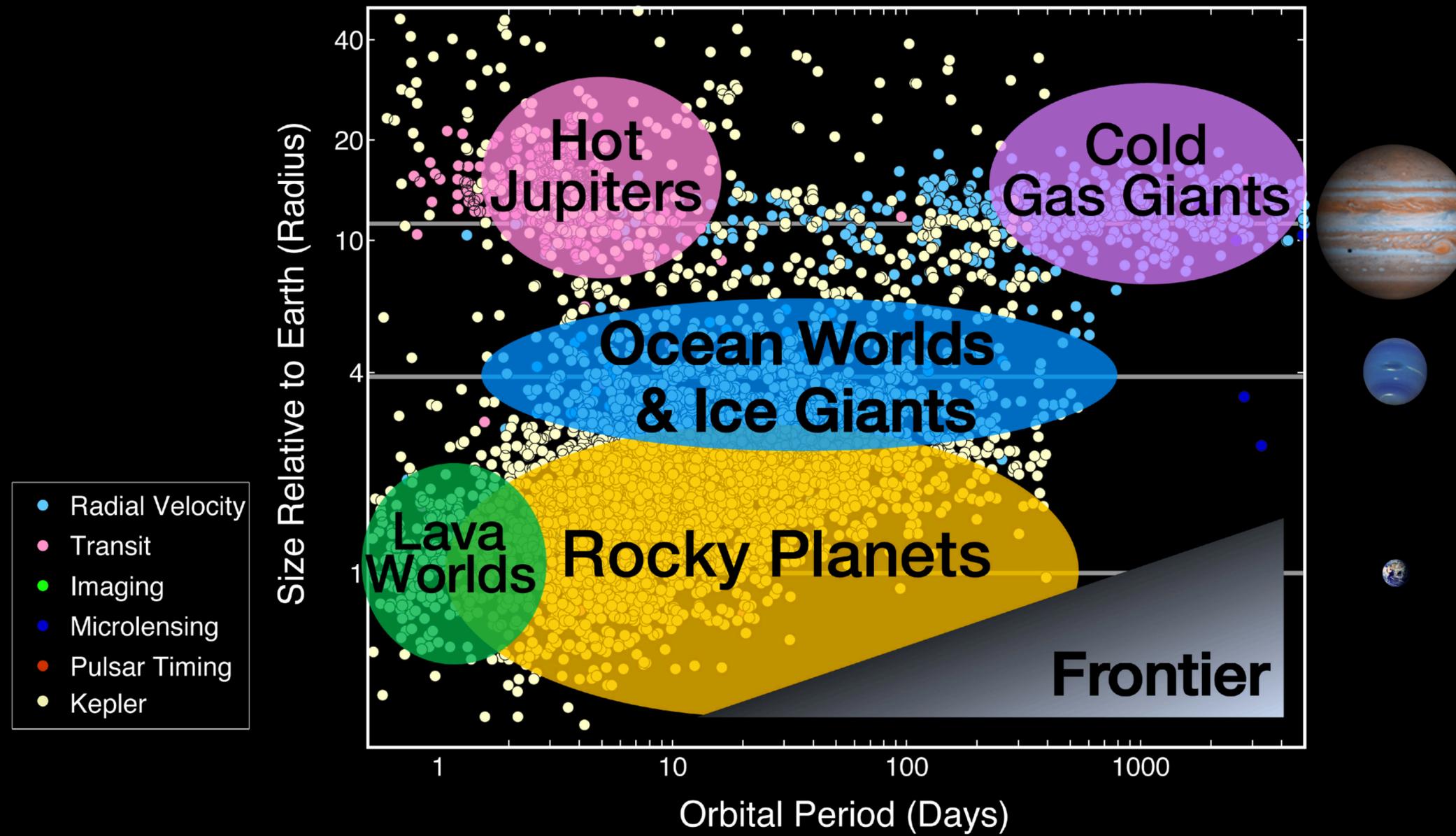
Sumário por técnica de detecção

(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

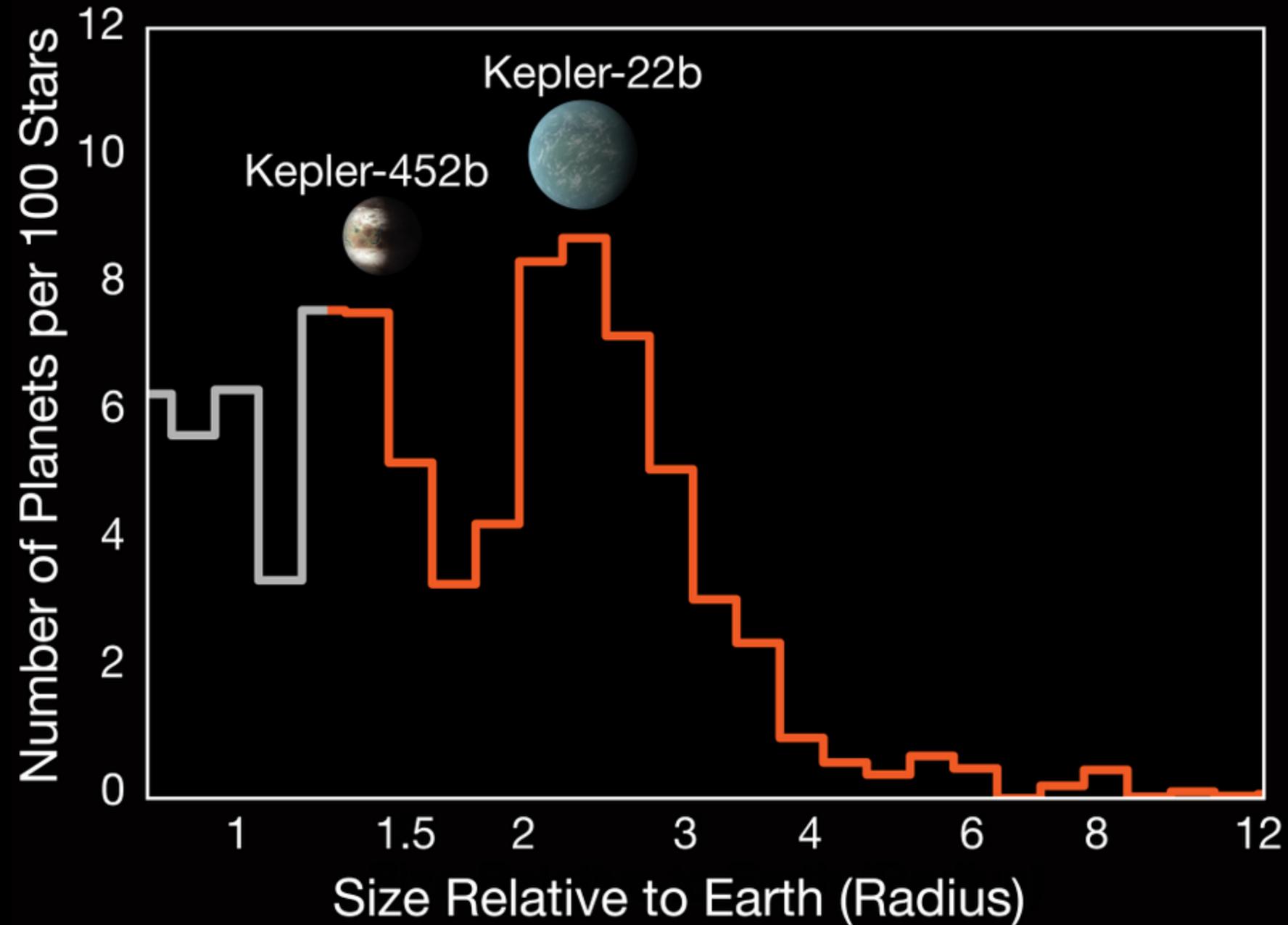


Exoplanet Populations





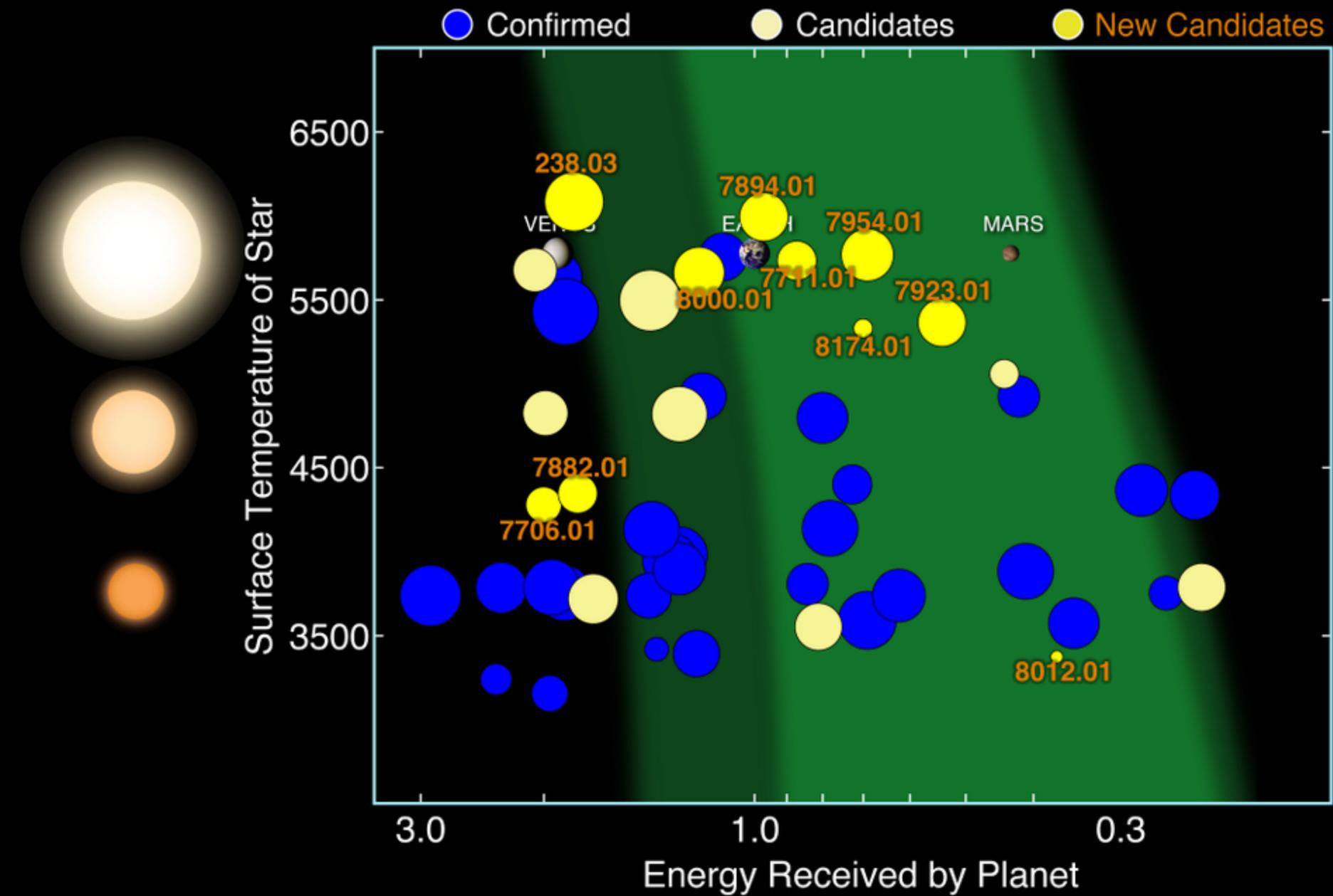
Small Planets Come in Two Sizes





Kepler Habitable Zone Planets

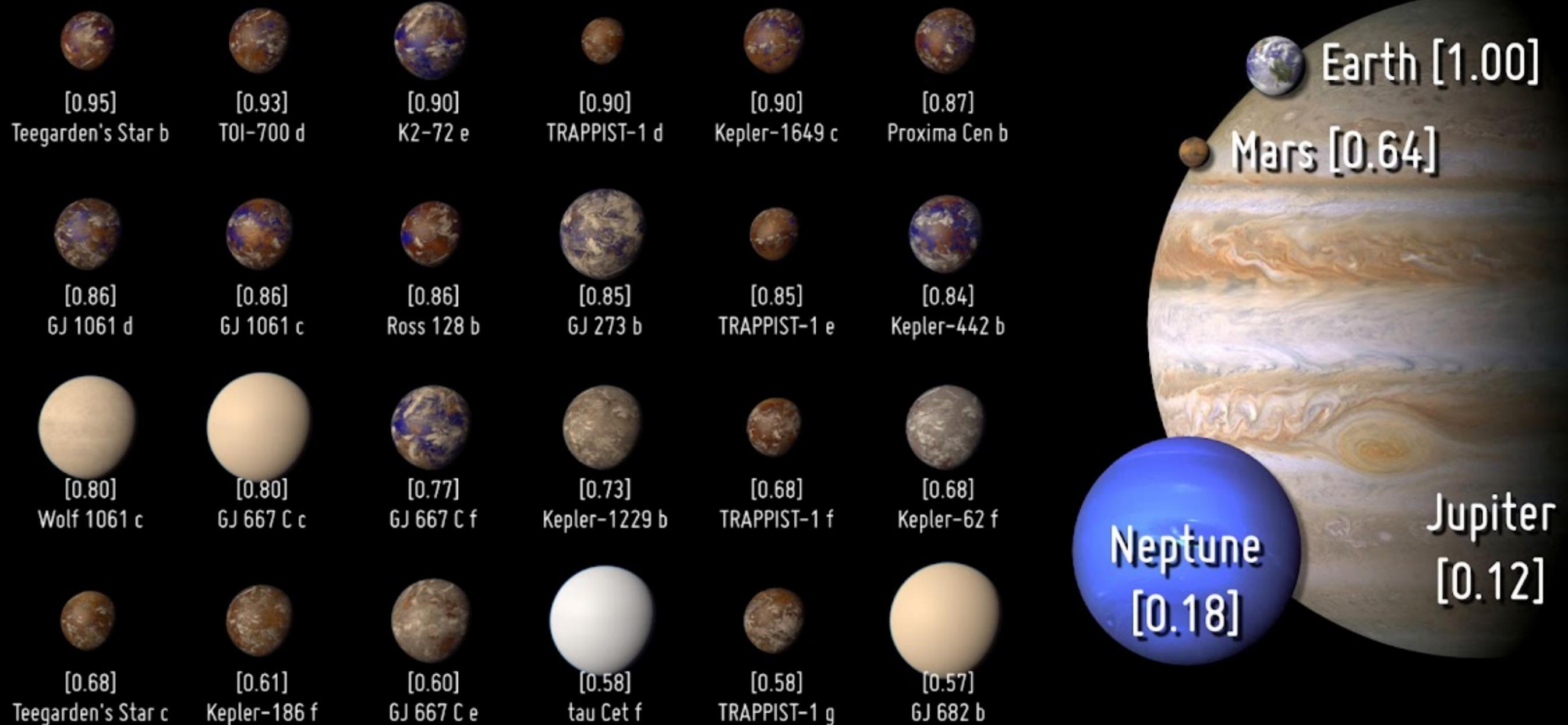
As of June 2017





Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)



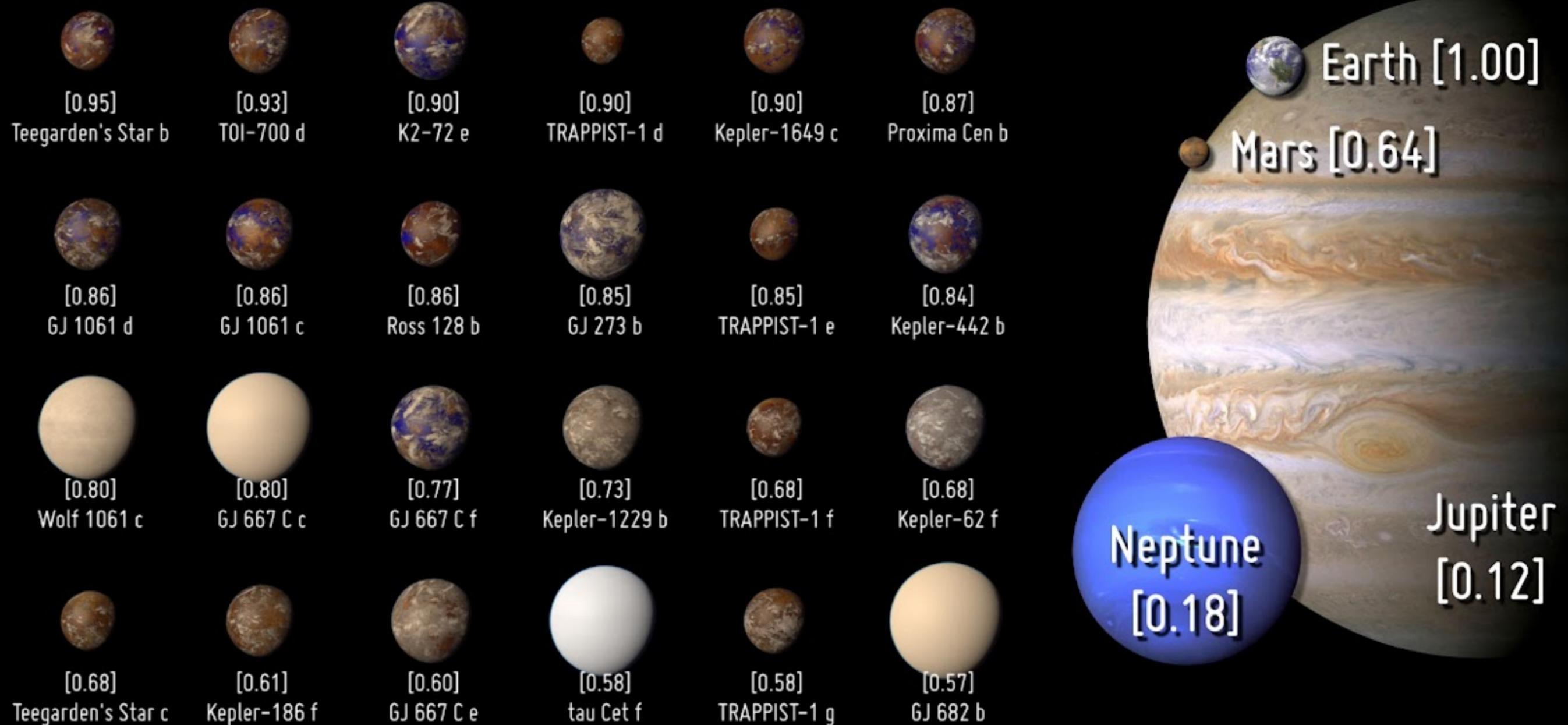
Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. ESI measures similarity to Earth size and insolation.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 5, 2020



Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by the Earth Similarity Index (ESI)

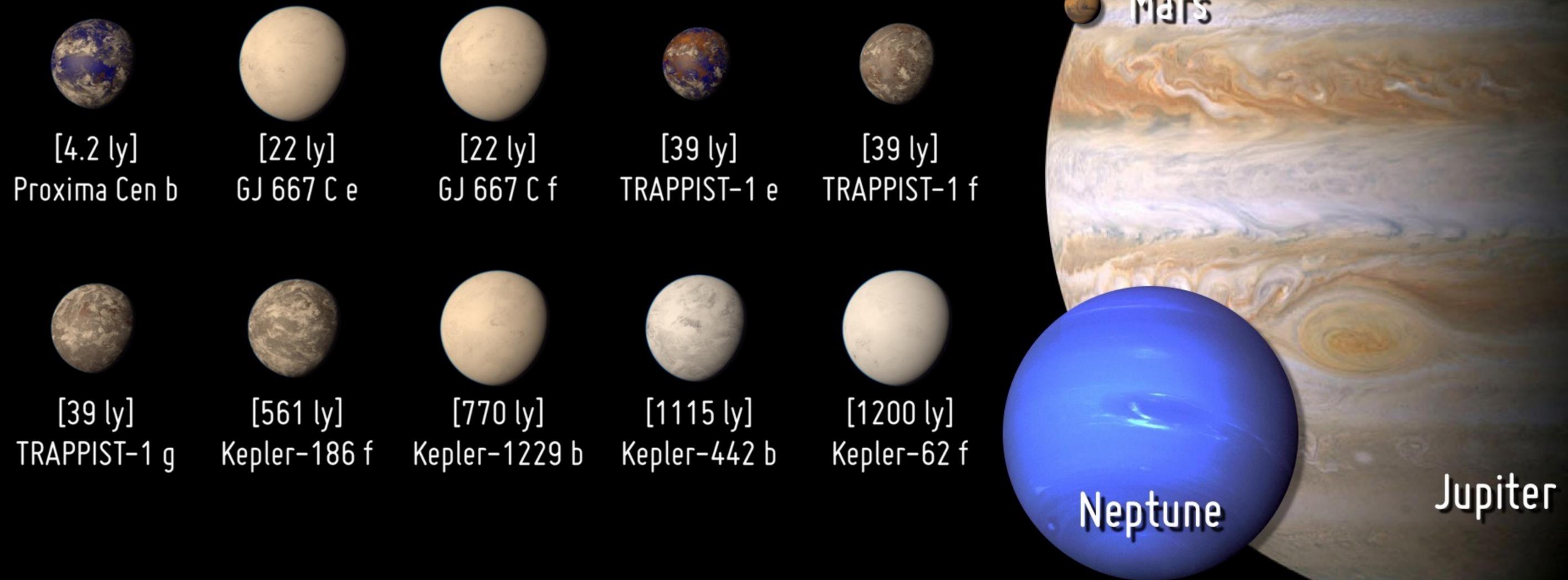


Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. ESI measures similarity to Earth size and insolation.

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Oct 5, 2020

Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by Distance from Earth (light years)

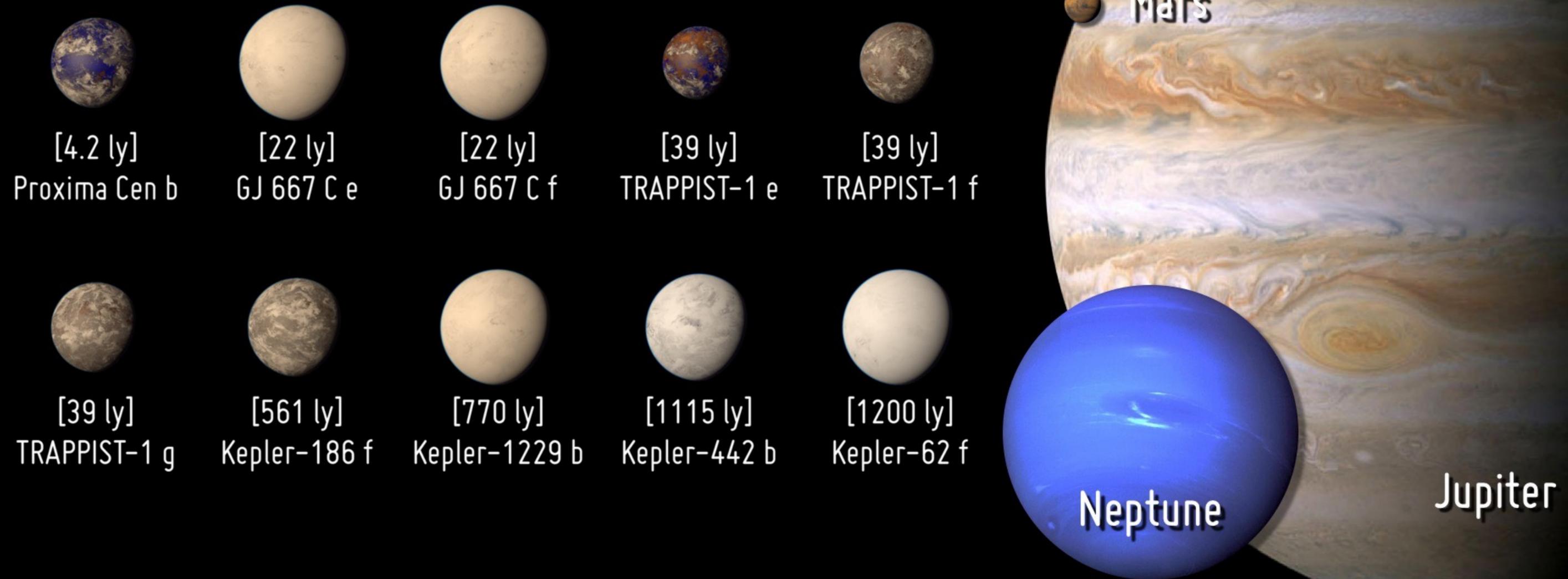


Artistic representations. Earth, Mars, Jupiter, and Neptune for scale. Distance from Earth is between brackets.

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

Potentially Habitable Exoplanets

Ranked by Distance from Earth (light years)



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

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



Lista de planetas potencialmente habitável (conservadora 05/2022)

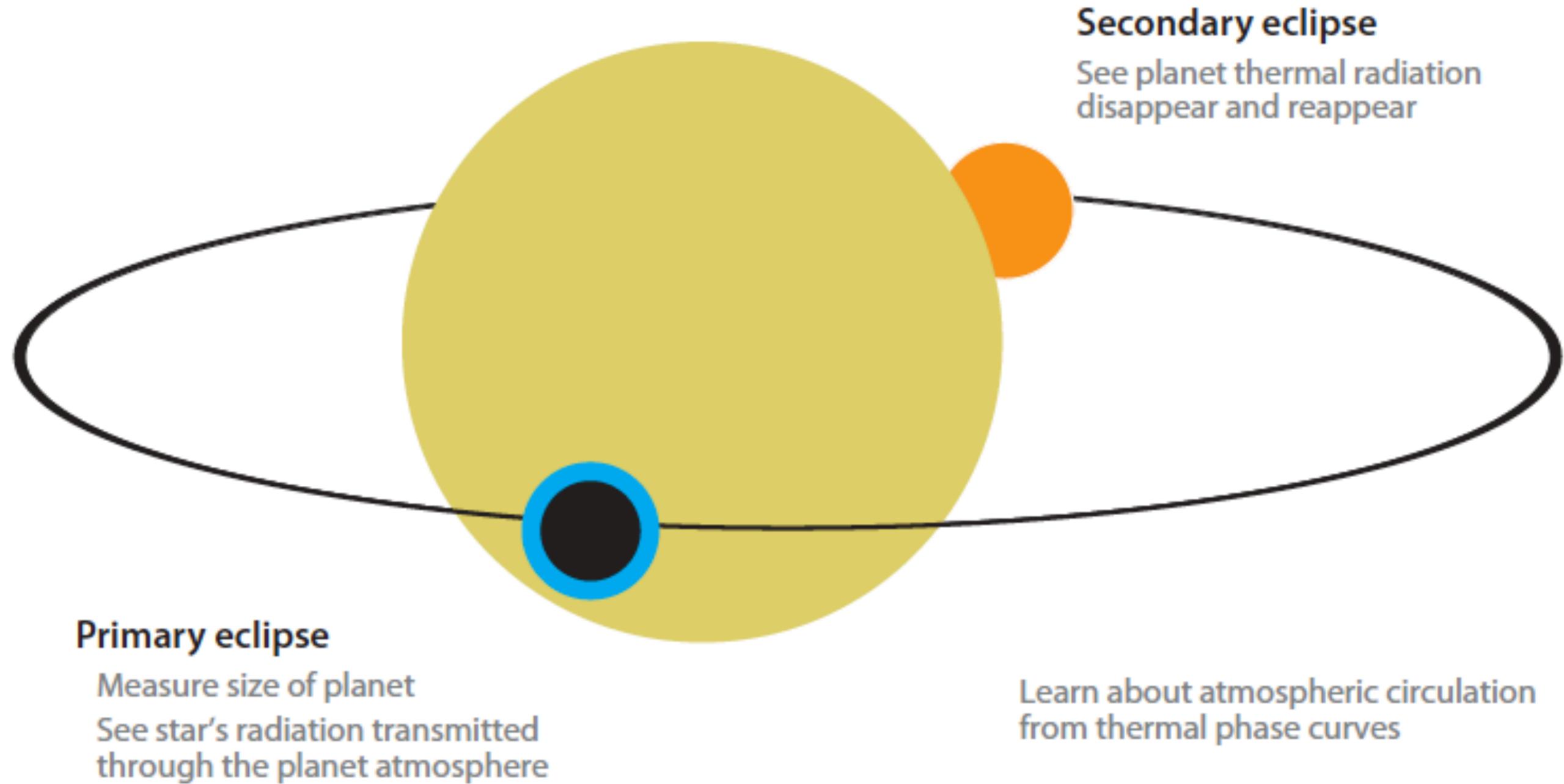
Name	Type	Mass (M _E)	Radius (R _E)	Flux (S _E)	T _{surf} (K)	Period (days)	Distance (ly)	ESI
001. Teegarden's Star b	M-Warm Terran	≥ 1.05	~ 1.02	1.15	~ 298	4.9	12	0.95
002. TOI-700 d	M-Warm Terran	~ 1.57	1.14	0.87	~ 278	37.4	101	0.93
003. Kepler-1649 c	M-Warm Terran	~ 1.20	1.06	1.23	~ 303	19.5	301	0.92
004. TRAPPIST-1 d	M-Warm Subterran	0.39	0.78	1.12	~ 296	4.0	41	0.91
005. Proxima Cen b	M-Warm Terran	≥ 1.27	~ 1.08	0.70	~ 257	11.2	4.2	0.87
006. K2-72 e	M-Warm Terran	~ 2.21	1.29	1.30	~ 307	24.2	217	0.87
007. GJ 1061 d	M-Warm Terran	≥ 1.64	~ 1.15	0.69	~ 247	13.0	12	0.86
008. GJ 1061 c	M-Warm Terran	≥ 1.74	~ 1.18	1.45	~ 311	6.7	12	0.86
009. Ross 128 b	M-Warm Terran	≥ 1.40	~ 1.11	1.48	~ 317	9.9	11	0.86
010. GJ 273 b	M-Warm Terran	≥ 2.89	~ 1.51	1.06	~ 292	18.6	19	0.85
011. Kepler-296 e	M-Warm Terran	~ 2.96	1.52	1.00	~ 282	34.1	544	0.85
012. TRAPPIST-1 e	M-Warm Terran	0.69	0.92	0.65	~ 258	6.1	41	0.85
013. Kepler-442 b	K-Warm Terran	~ 2.36	1.35	0.70	~ 263	112.3	1193	0.84
014. GJ 667 C f	M-Warm Terran	≥ 2.54	~ 1.45	0.56	~ 249	39.0	24	0.76
015. Kepler-62 f	K-Warm Terran	—	1.41	0.41	~ 230	267.3	981	0.68
016. TRAPPIST-1 f	M-Warm Terran	1.04	1.04	0.37	~ 225	9.2	41	0.68
017. Teegarden's Star c	M-Warm Terran	≥ 1.11	~ 1.04	0.37	~ 225	11.4	12	0.68
018. Kepler-1229 b	M-Warm Terran	~ 2.54	1.40	0.32	~ 217	86.8	865	0.62
019. Kepler-186 f	M-Warm Terran	~ 1.71	1.17	0.29	~ 212	129.9	579	0.61
020. GJ 667 C e	M-Warm Terran	≥ 2.54	~ 1.45	0.30	~ 213	62.2	24	0.60
021. TRAPPIST-1 g	M-Warm Terran	1.32	1.13	0.25	~ 204	12.4	41	0.58

Subterrans (Mars-sized)	1
Terran (Earth-sized)	20
Superterrans (Super-Earths/Mini-Neptunes)	38
Total	59



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

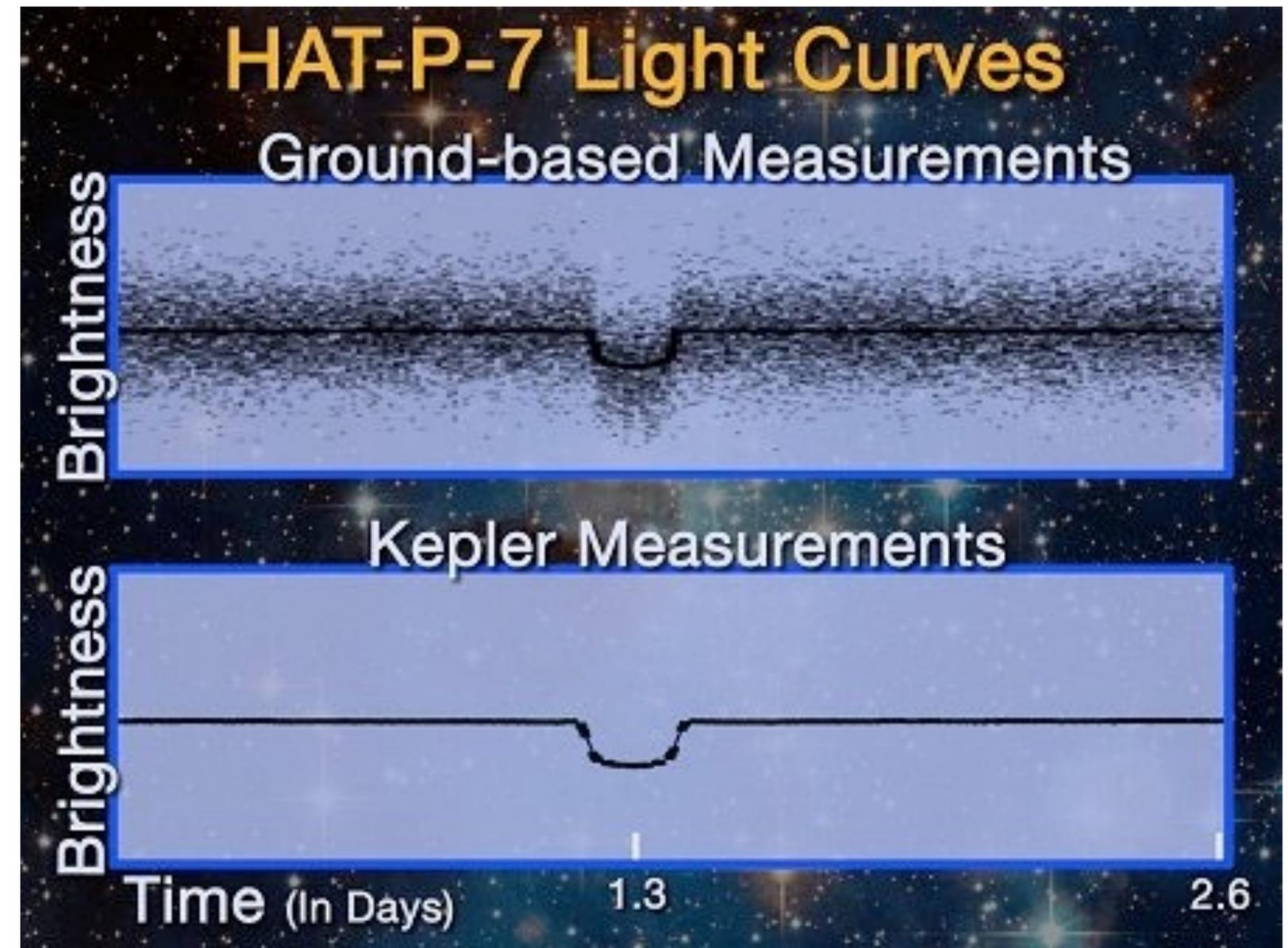


Seager & Demming (2010)



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)





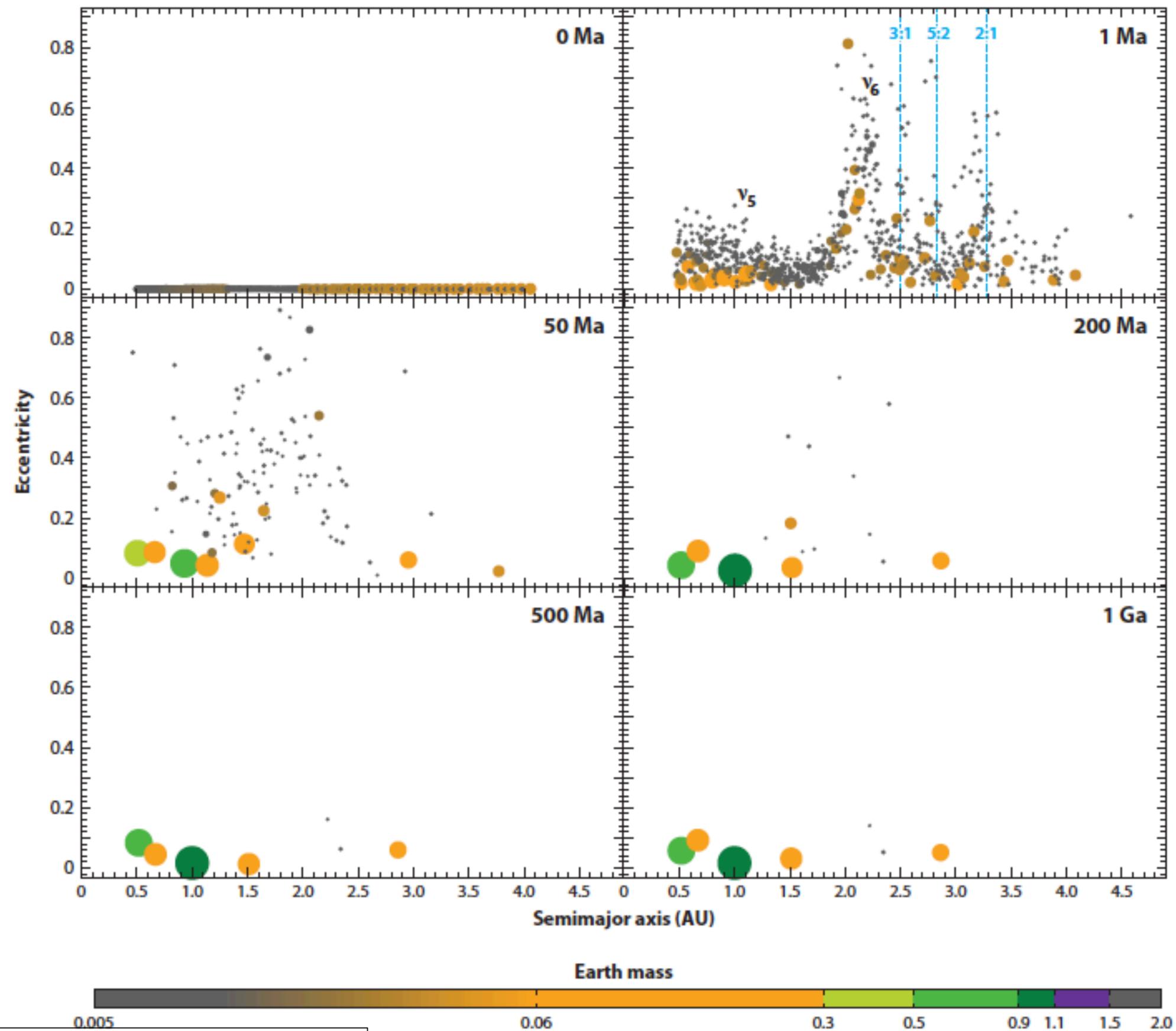
Super-Terras (05/2022)

- ☑ 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)?
- ☑ Super-Terras: cerca de 38 objetos encontrados (fonte: phl.upr.edu)



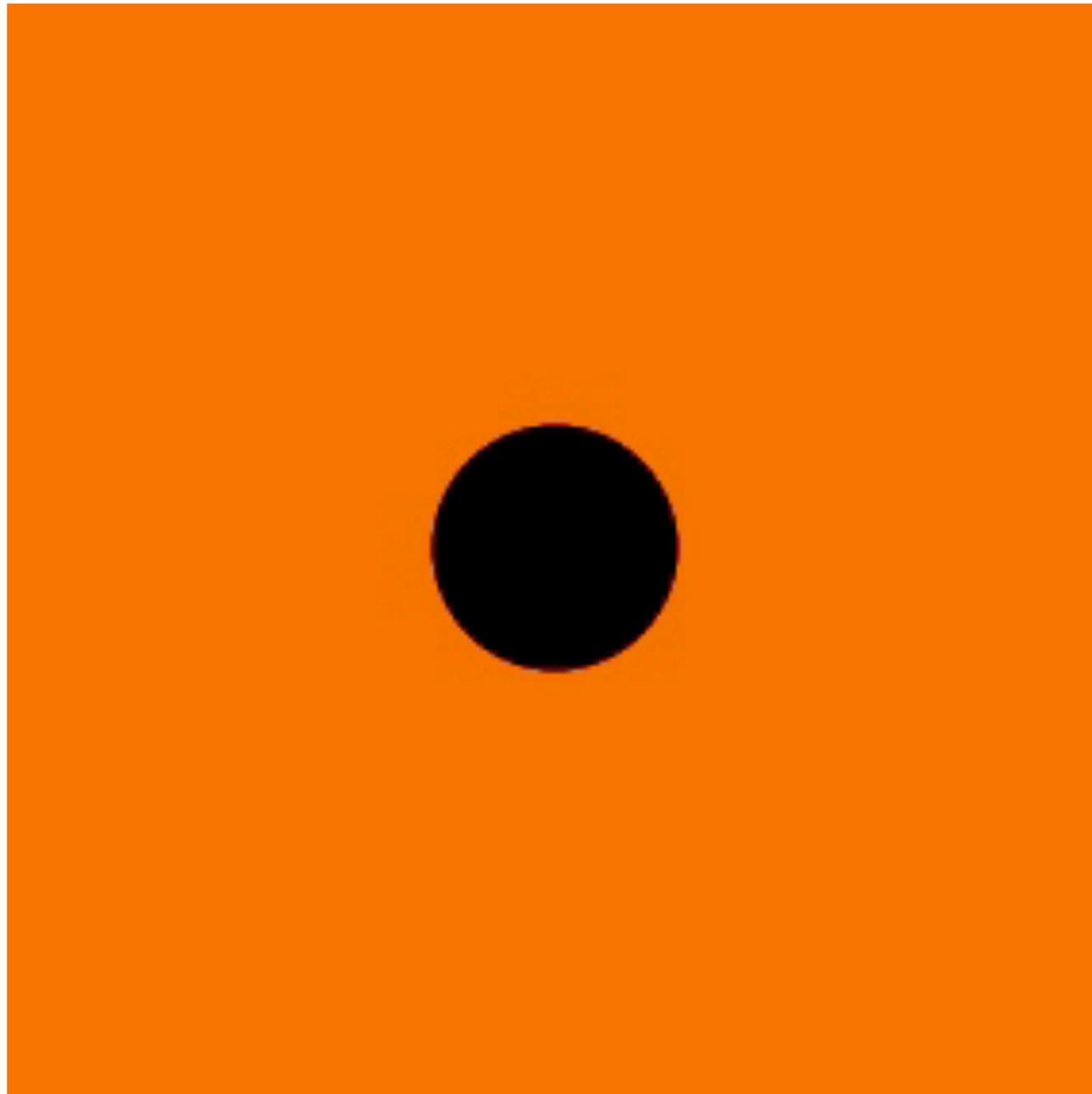
Super-terras

- ☑ Mecanismo de formação: disco circunstelar que evolui a partir de partículas de poeira para objetos maiores (nebulosa protoplanetária).
- ✓ coagulação de partículas de poeira através de batidas suaves e colagem, o que resulta na formação de objetos do tamanho de centímetros e decímetros;
- ✓ crescimento de corpos do tamanho de centímetros e decímetros para planetesimais do tamanho de um quilômetro;
- ✓ 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
- ✓ acréscimo de gás e formação de planetas gigantes, seguido do crescimento colisional de embriões planetários para corpos de classe terrestre

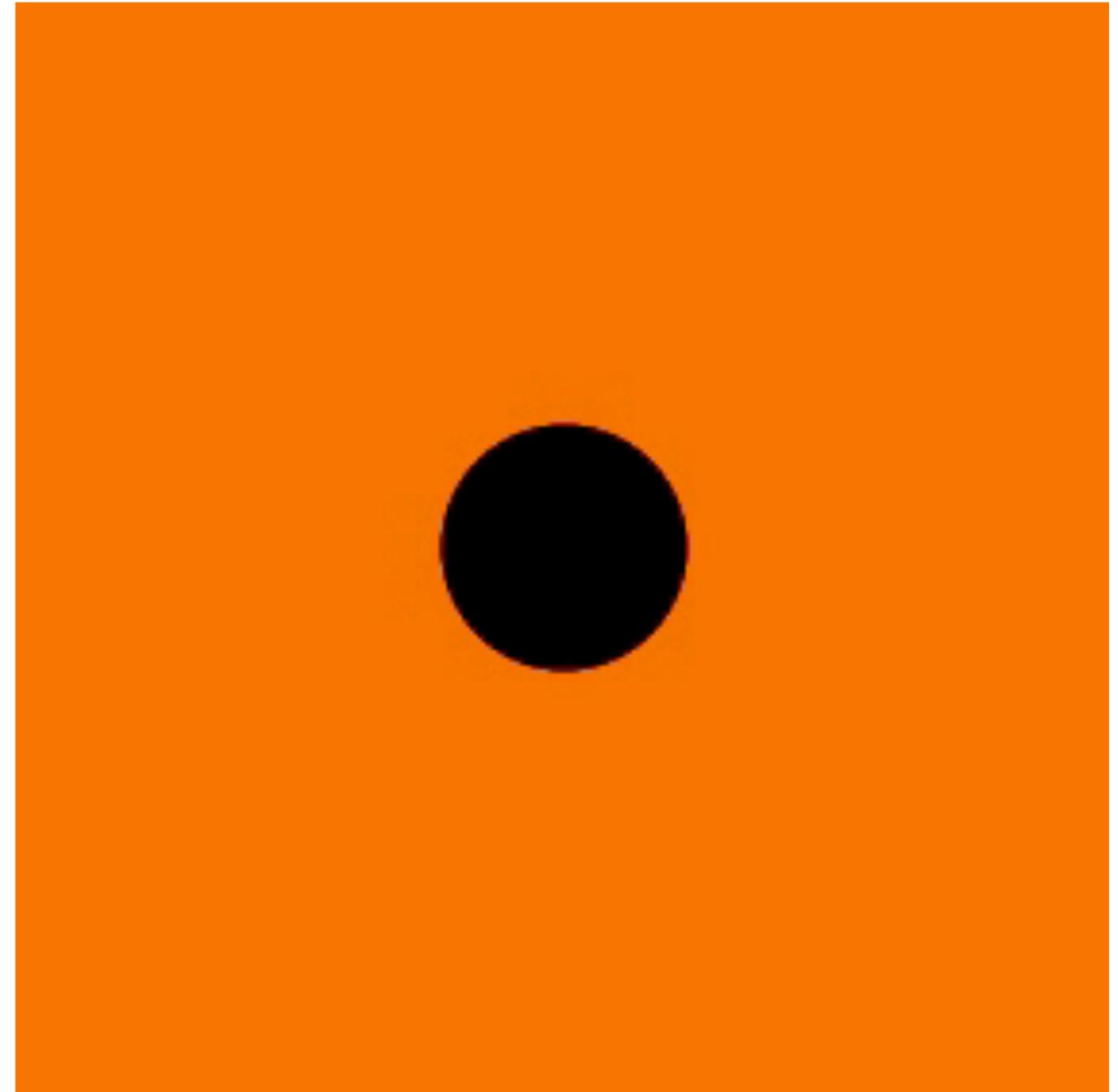


Migrações de super-Terras

Spiral arm appearance

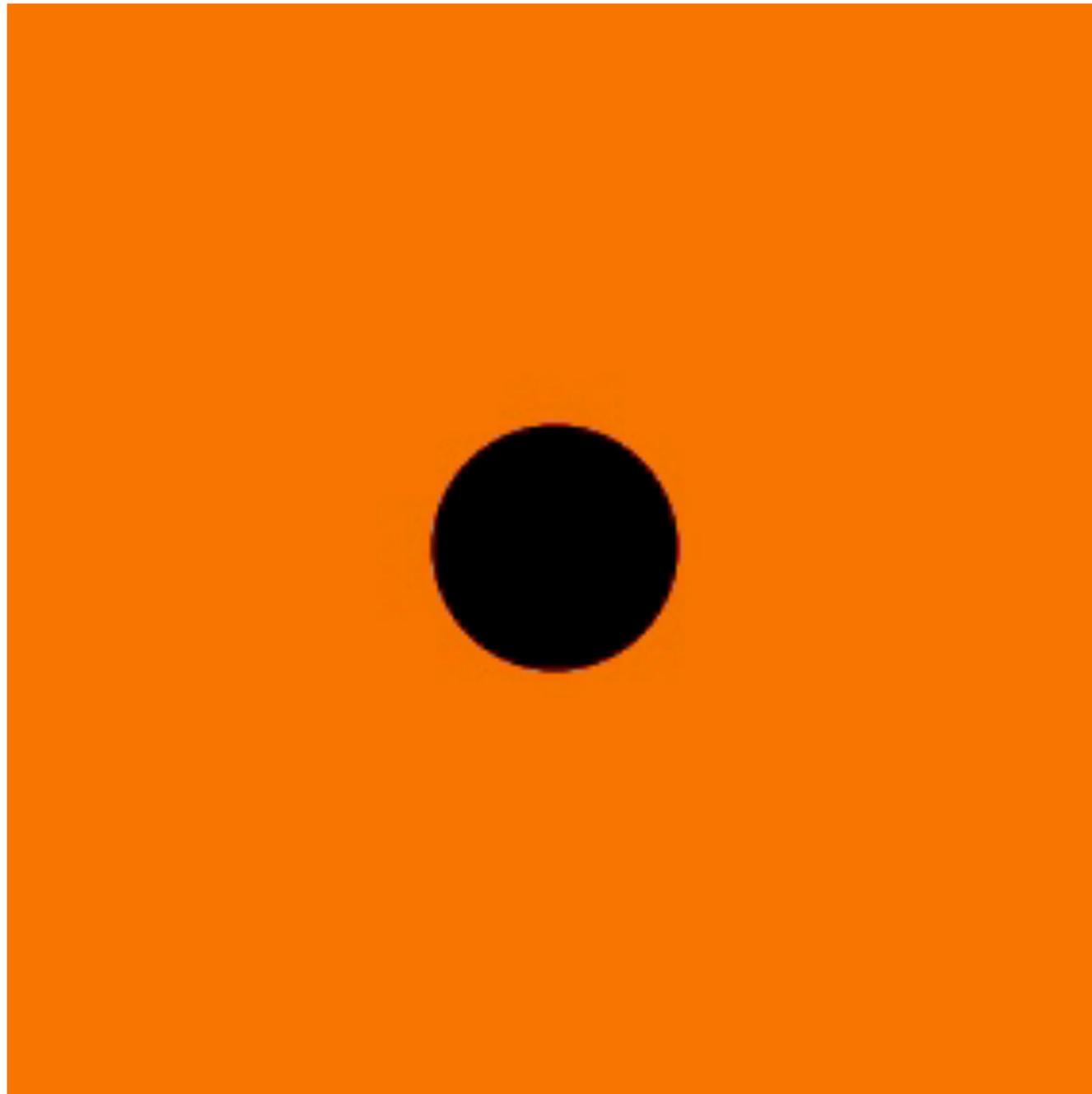


Type I migration

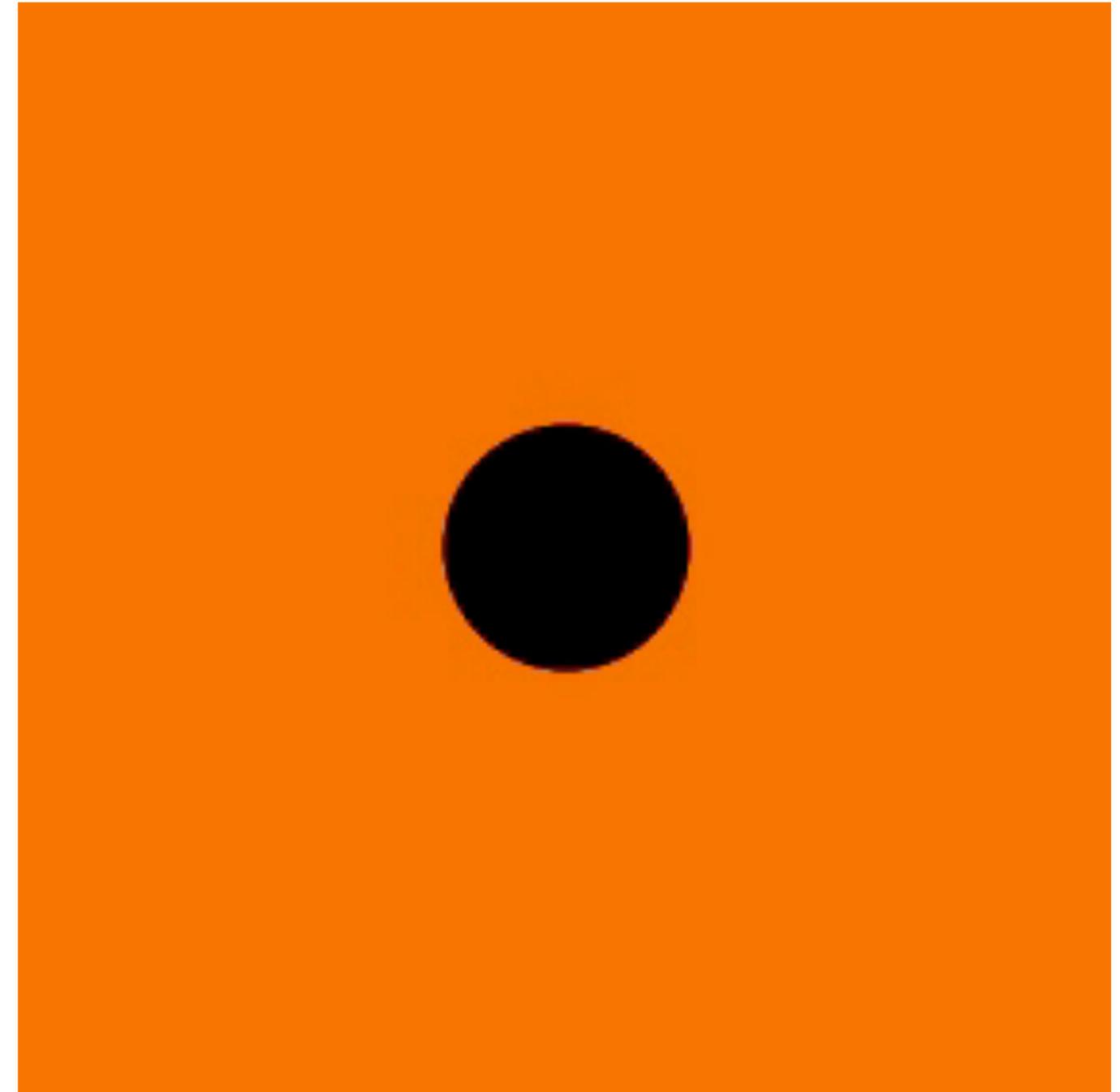


Migrações de super-Terras

Spiral arm appearance

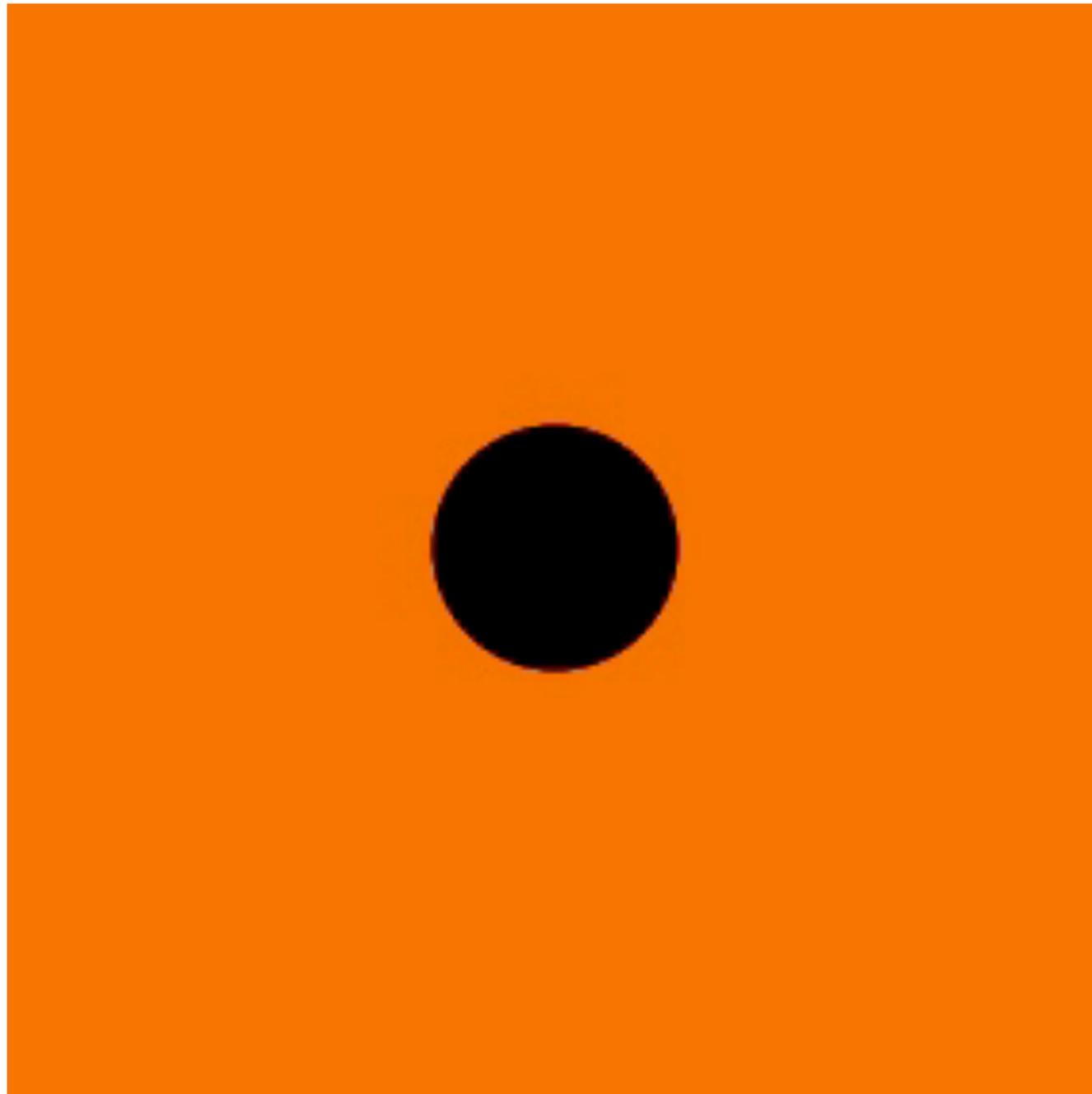


Type I migration

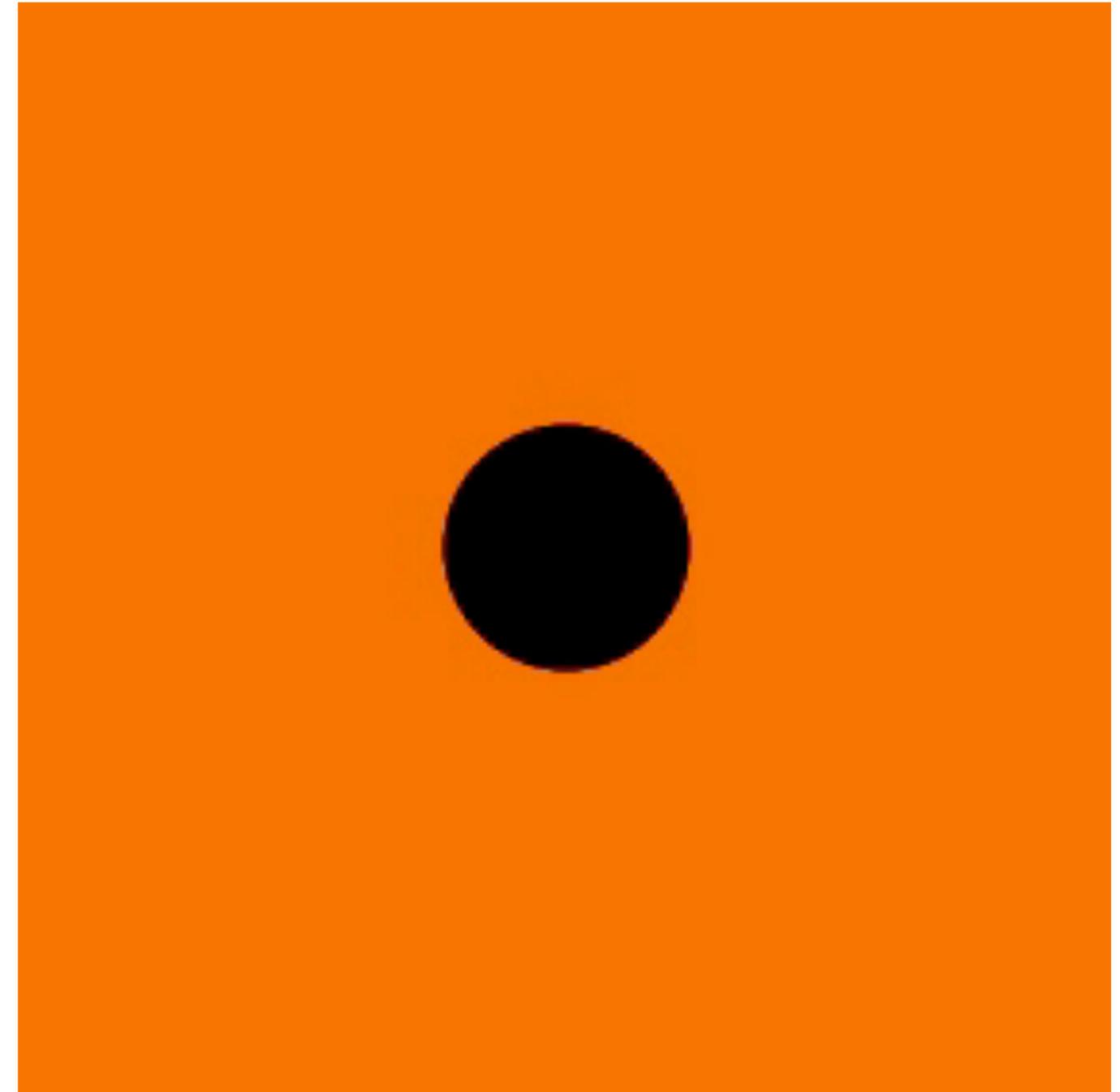


Migrações de super-Terras

Spiral arm appearance



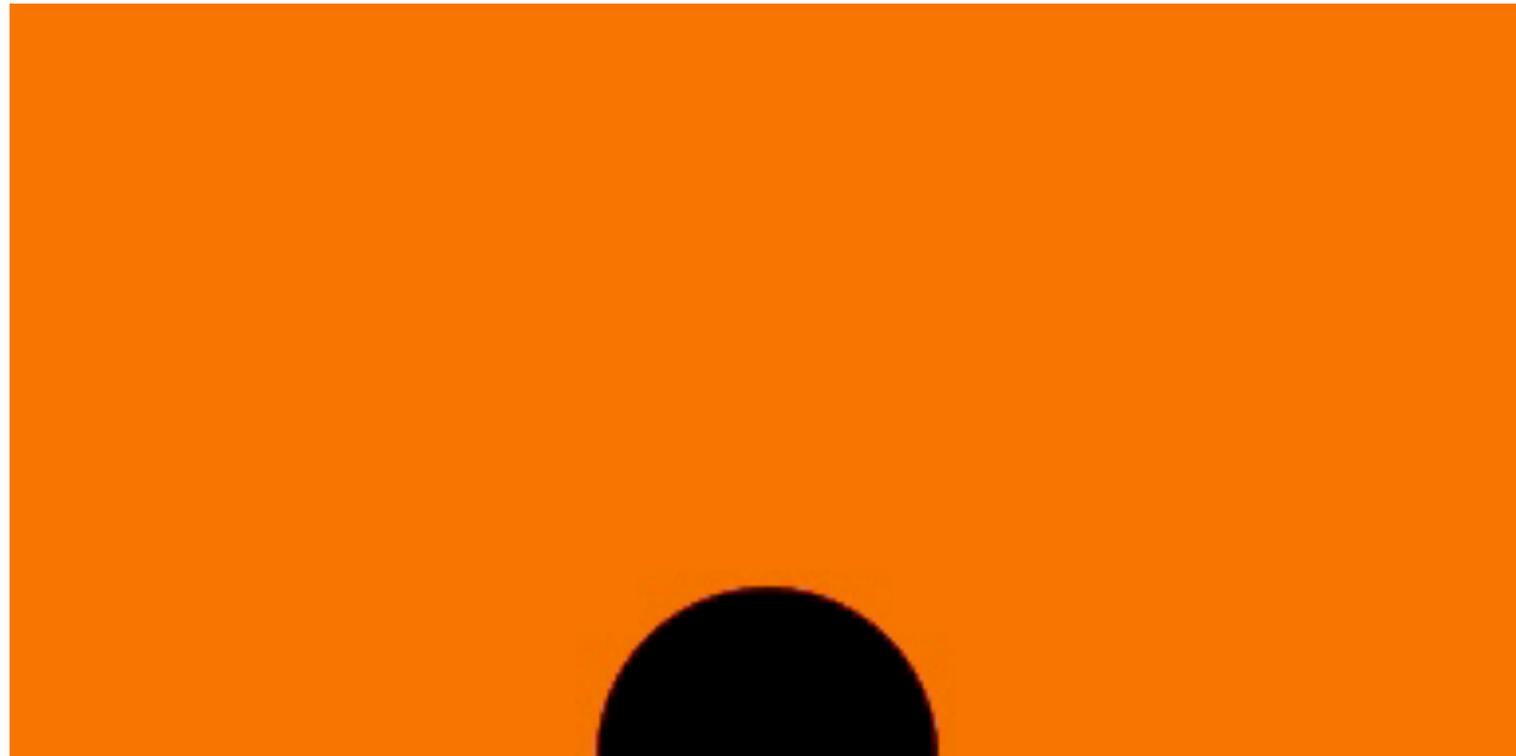
Type I migration



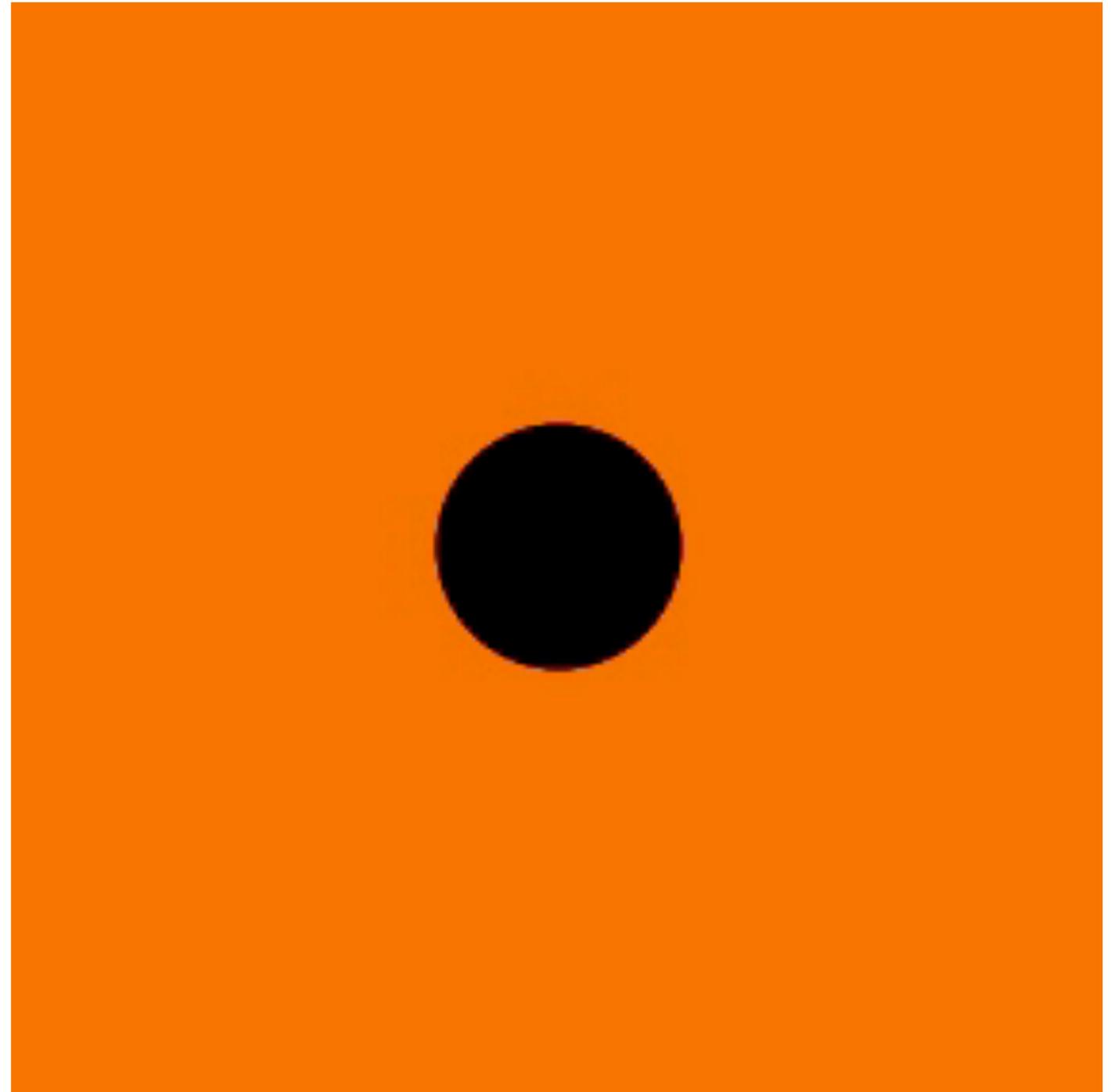


Migrações de super-Terras

Type I migration & Migration curve



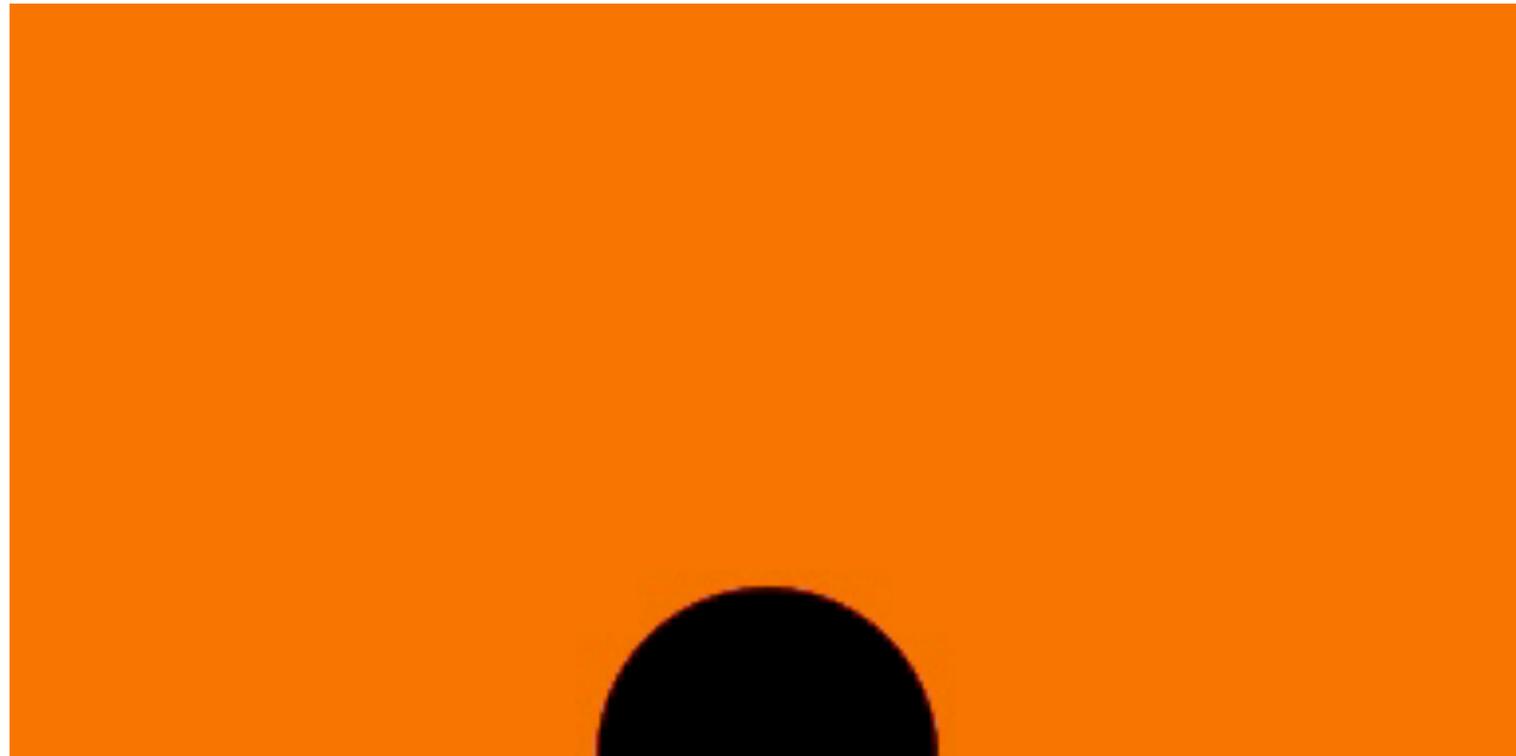
Type I to Type II transition



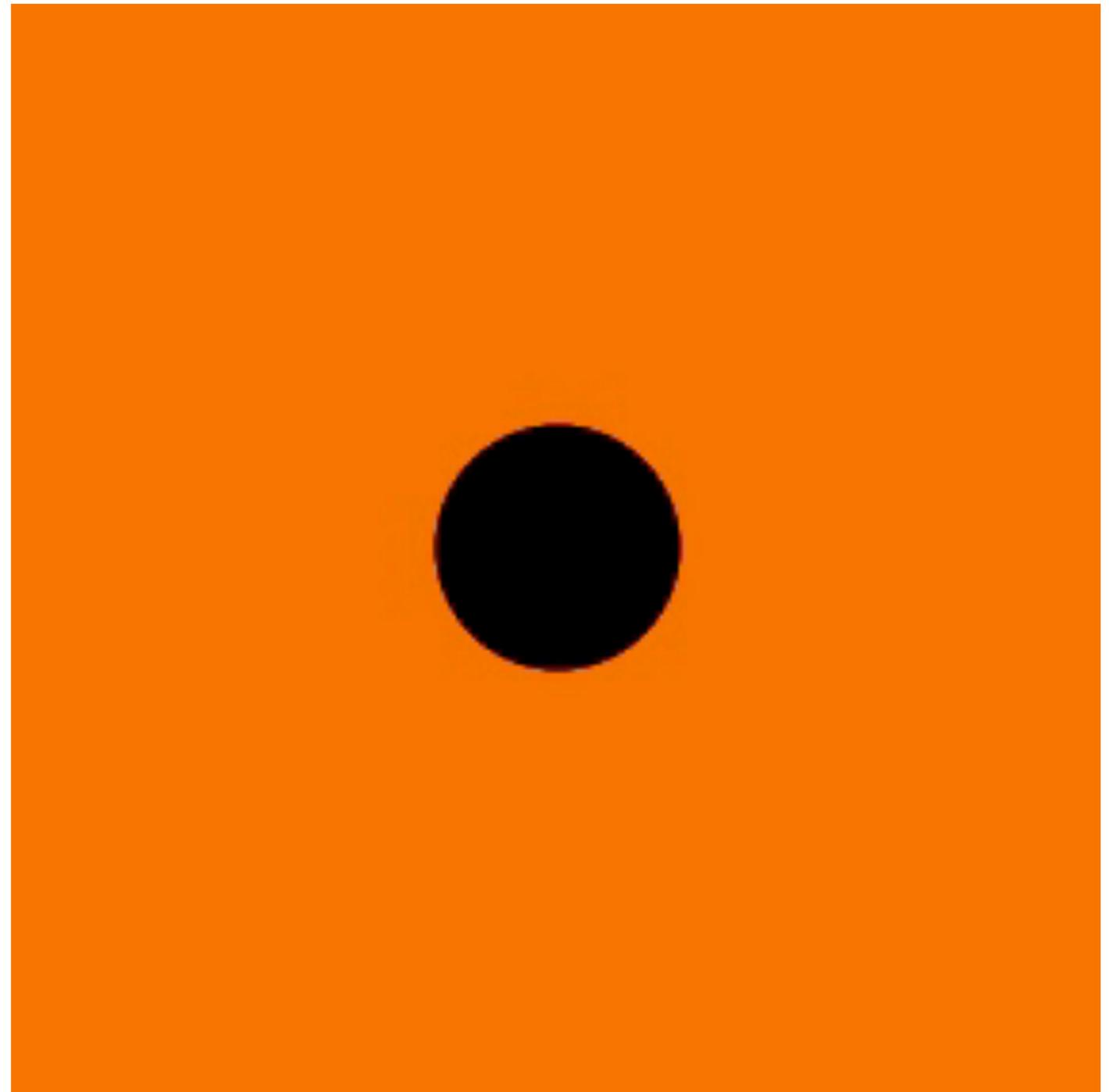


Migrações de super-Terras

Type I migration & Migration curve



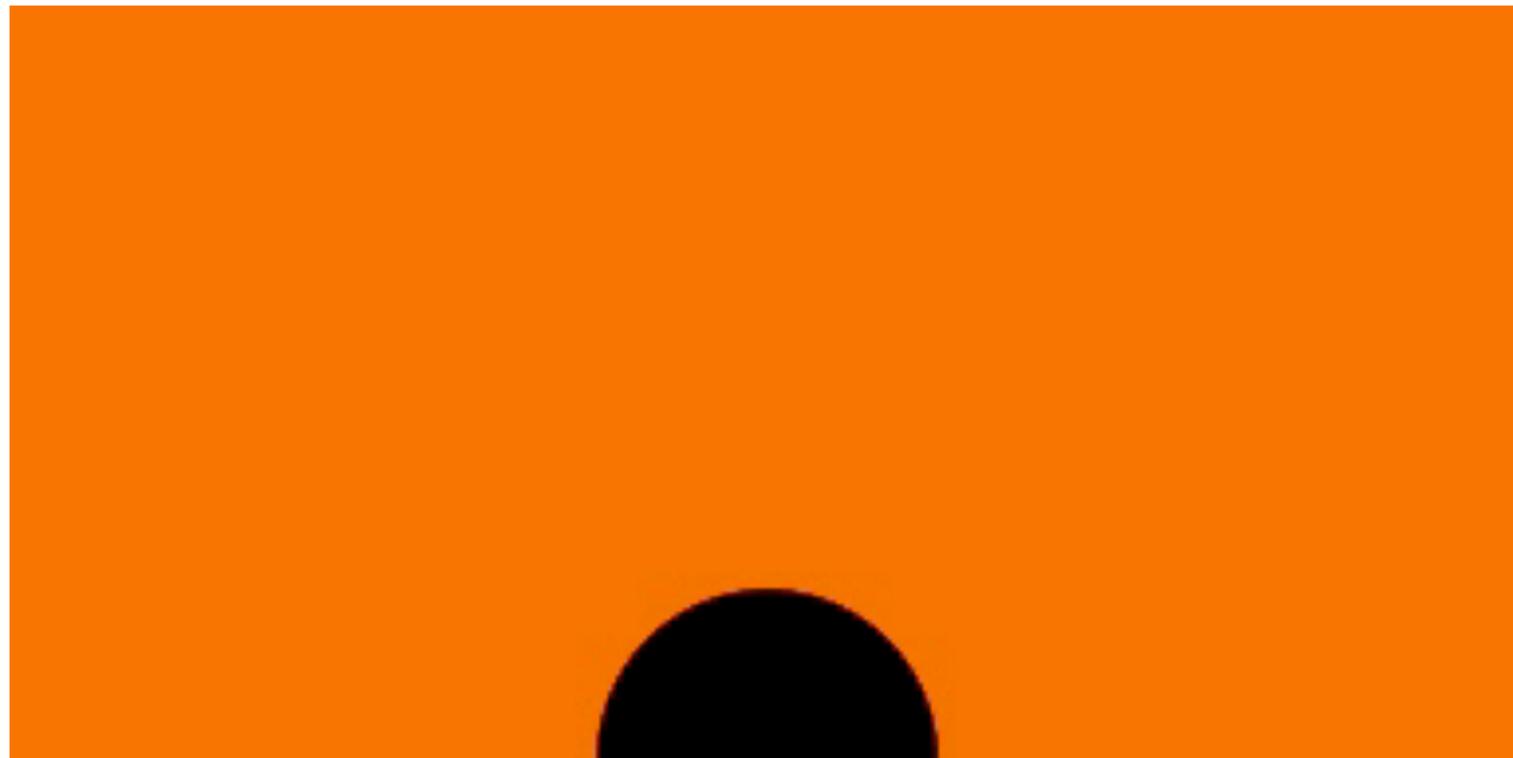
Type I to Type II transition



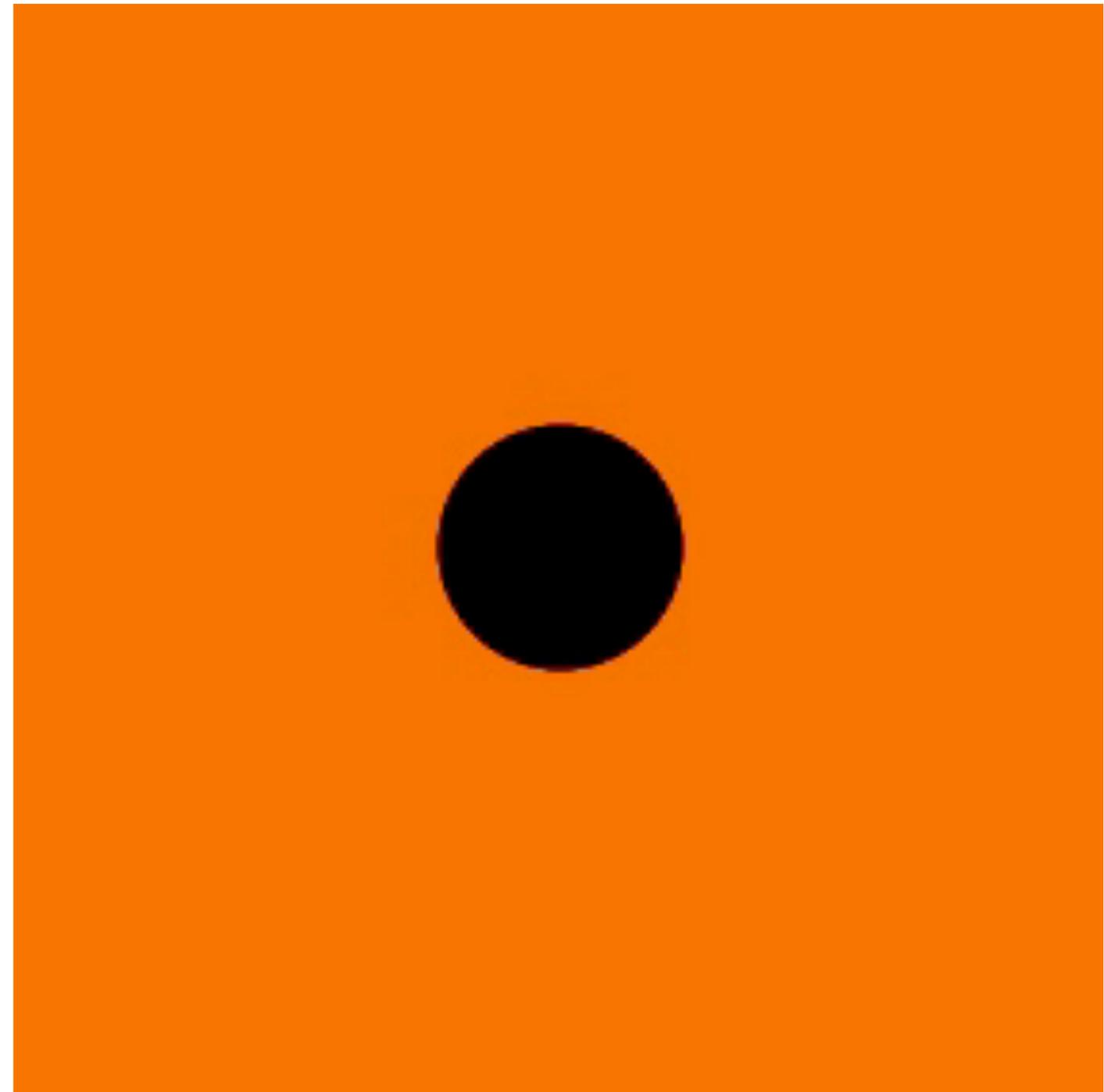


Migrações de super-Terras

Type I migration & Migration curve



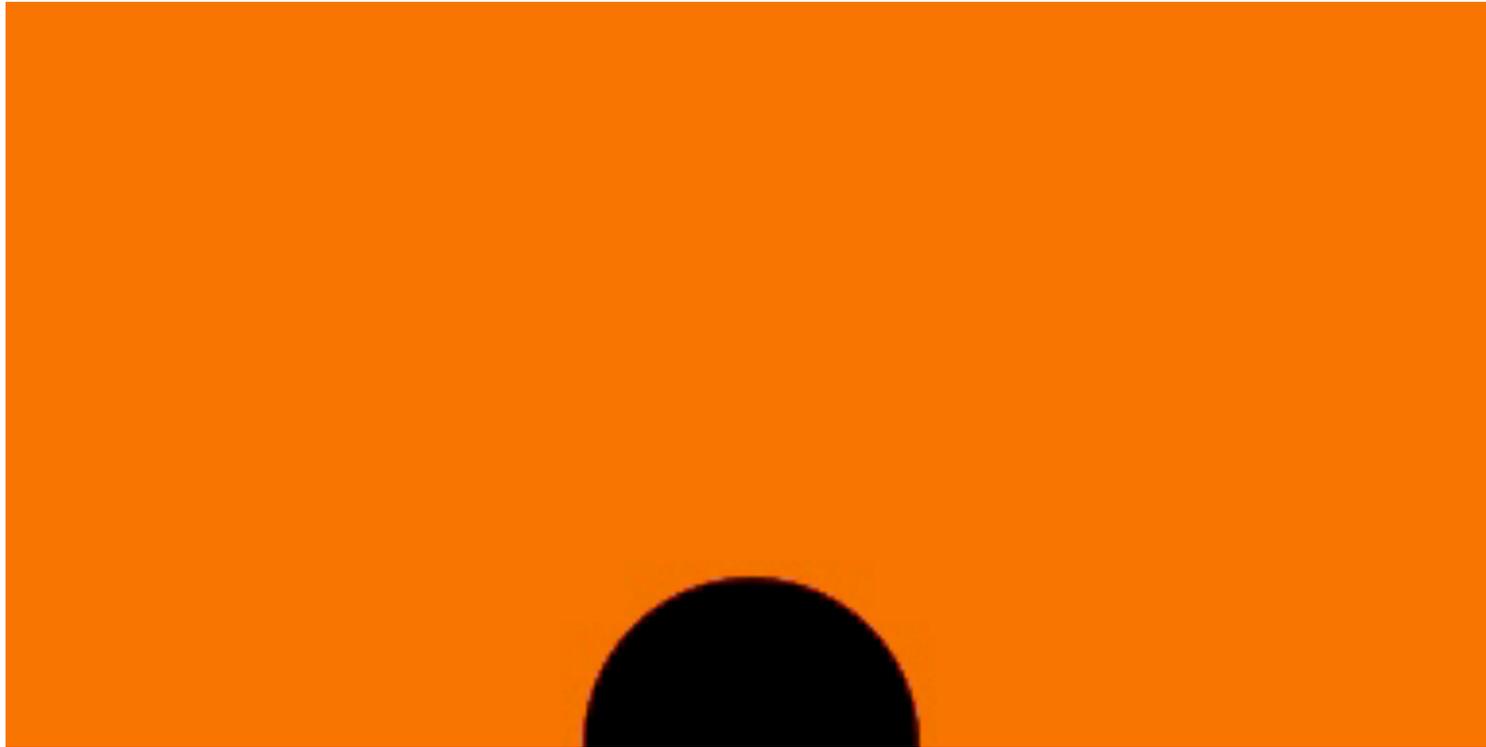
Type I to Type II transition



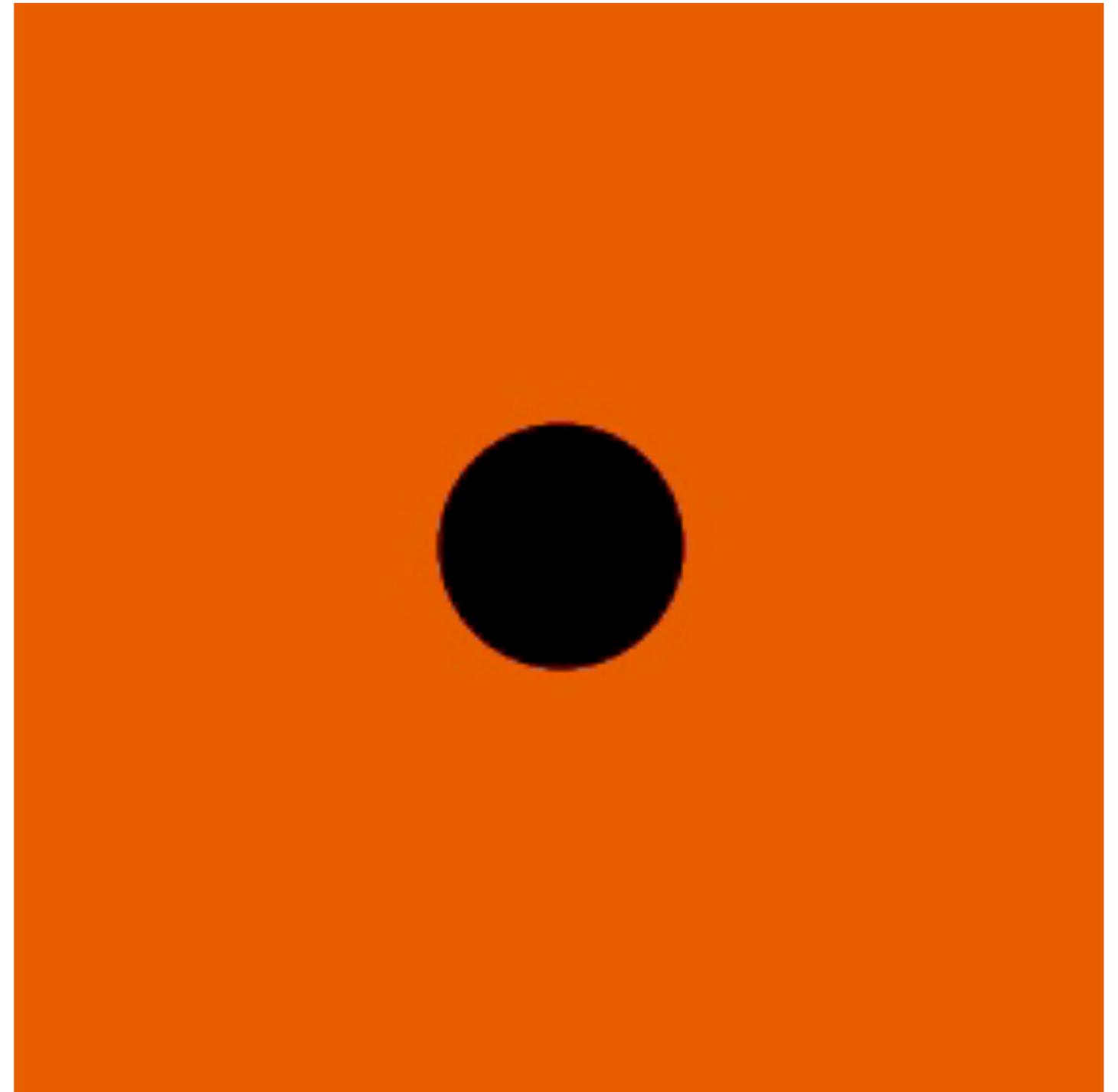


Migrações de super-Terras

Type I to Type II transition & Migration curve



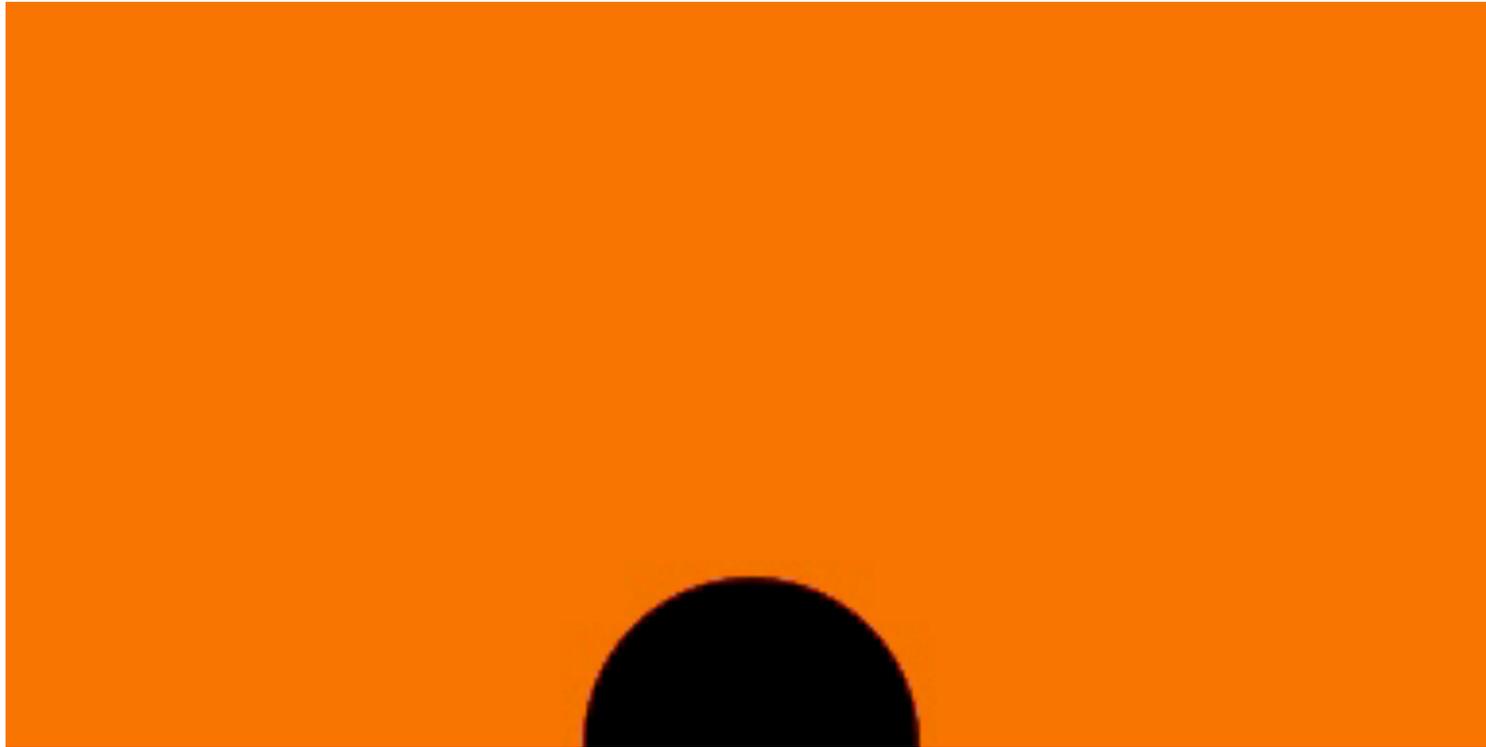
Gap opening



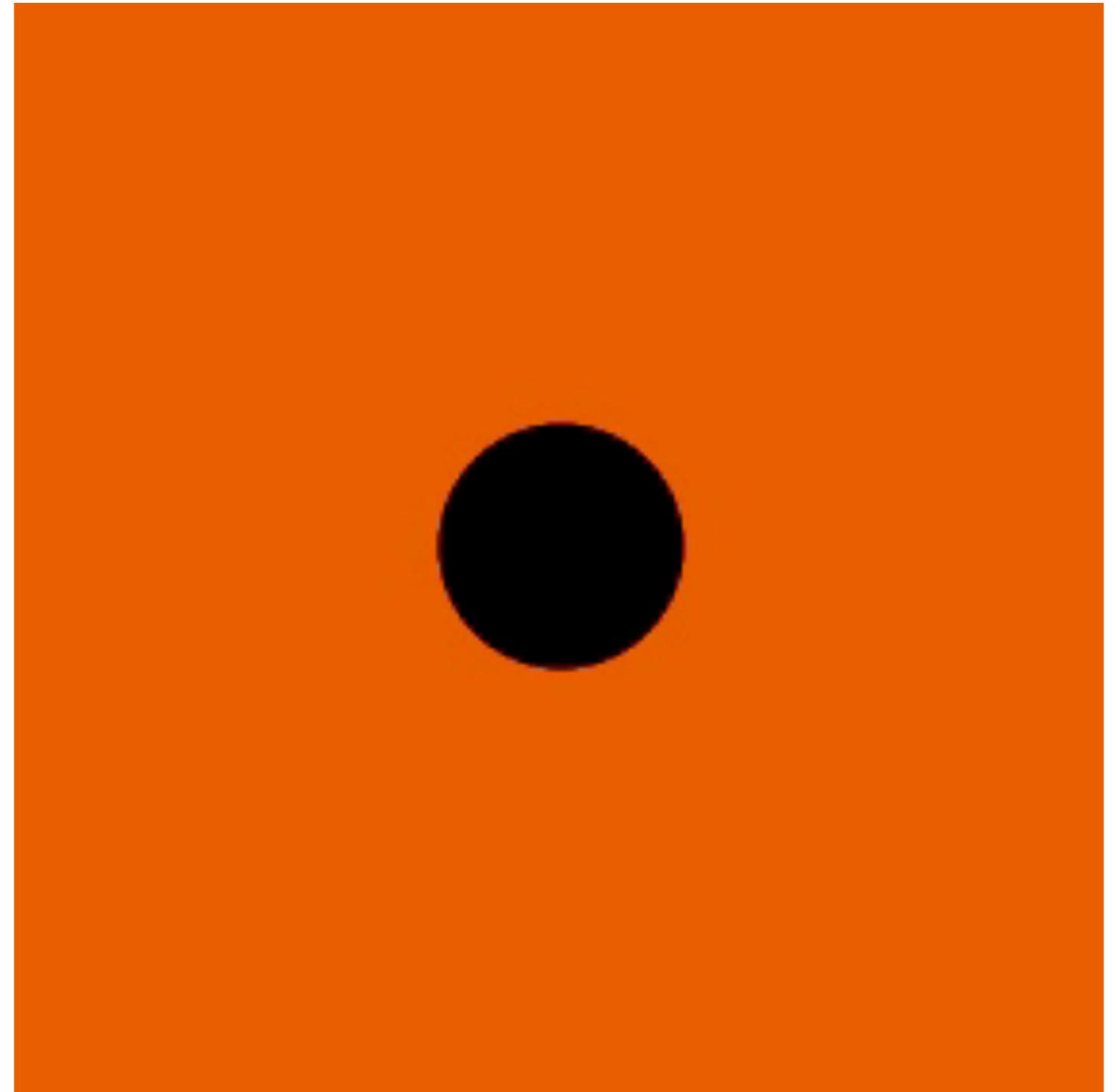


Migrações de super-Terras

Type I to Type II transition & Migration curve



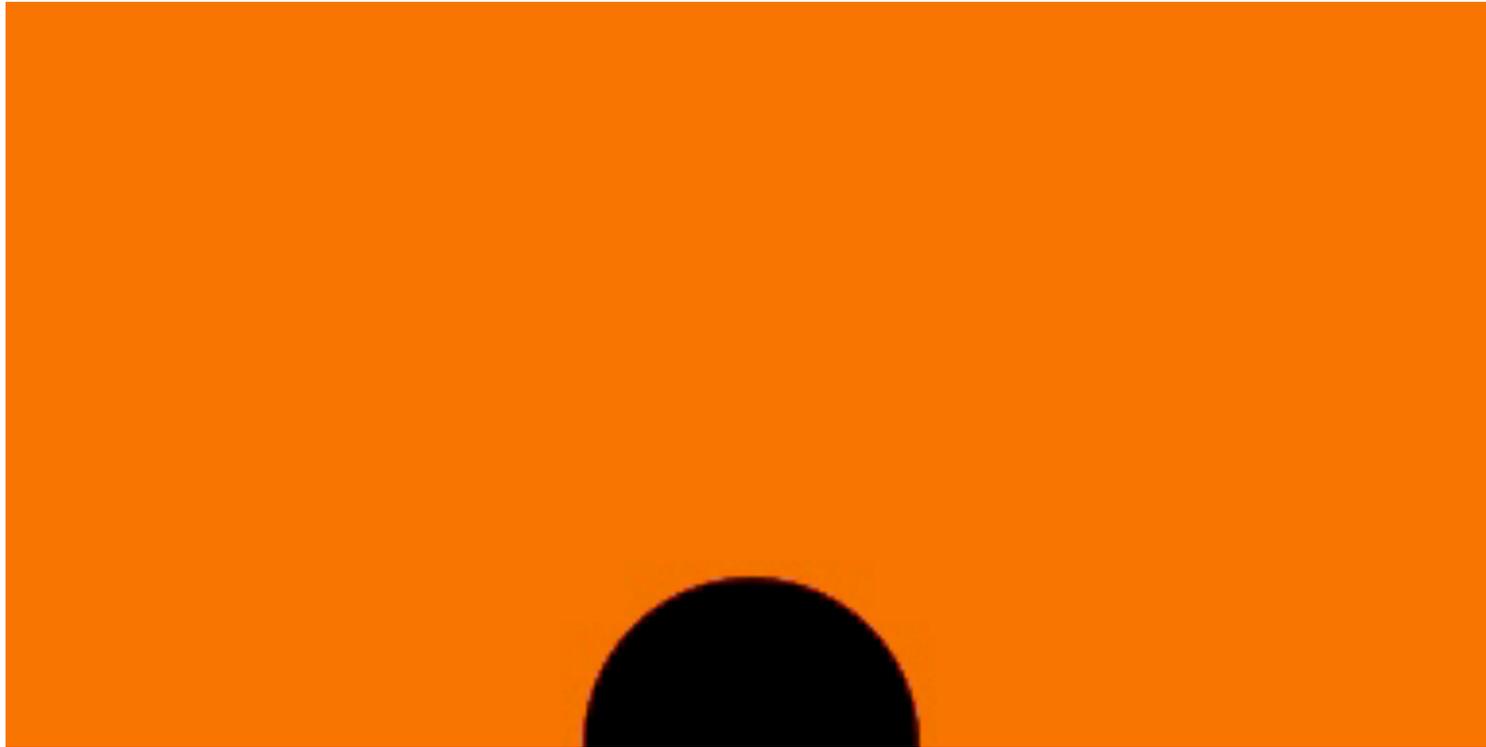
Gap opening



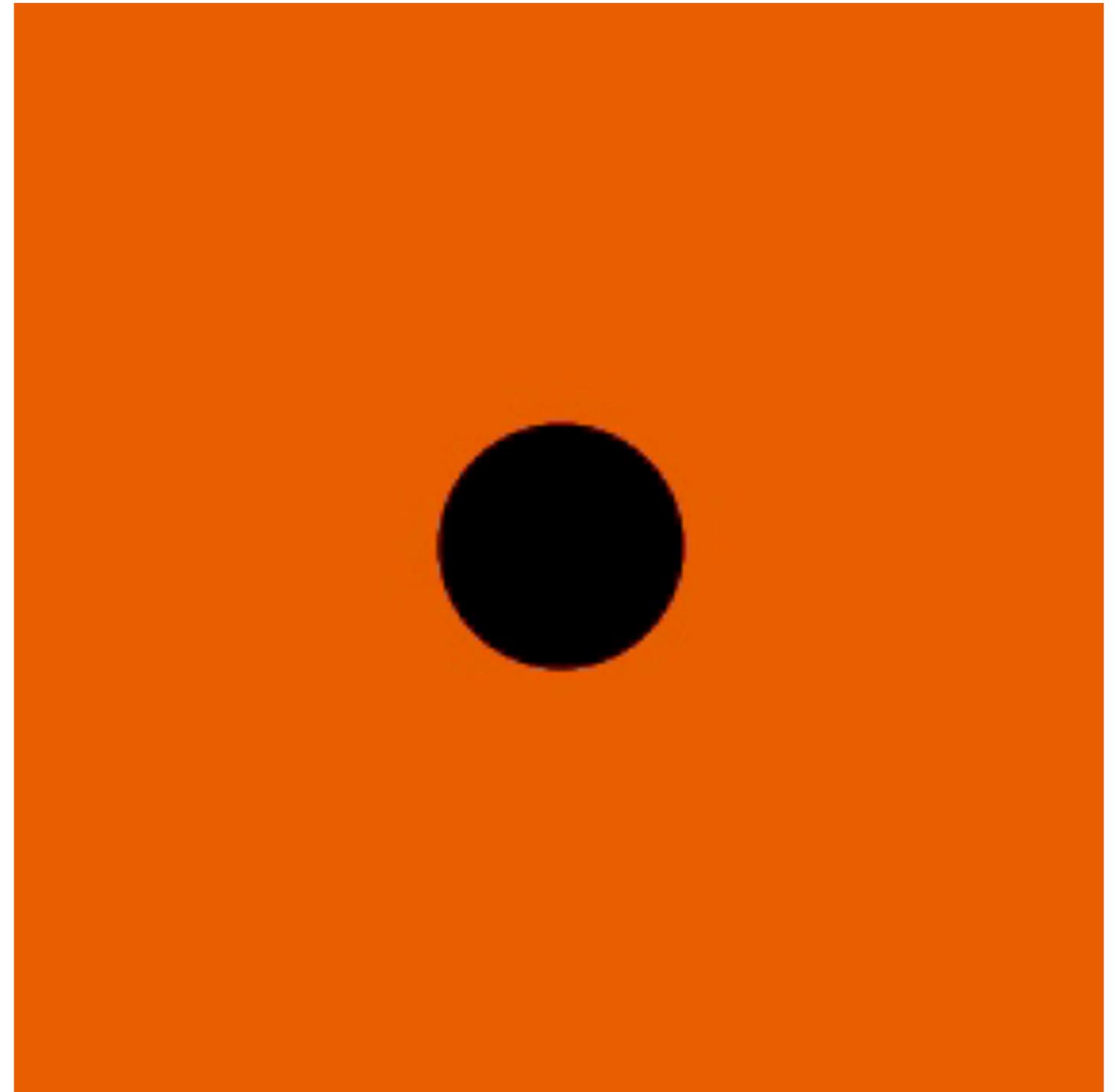


Migrações de super-Terras

Type I to Type II transition & Migration curve

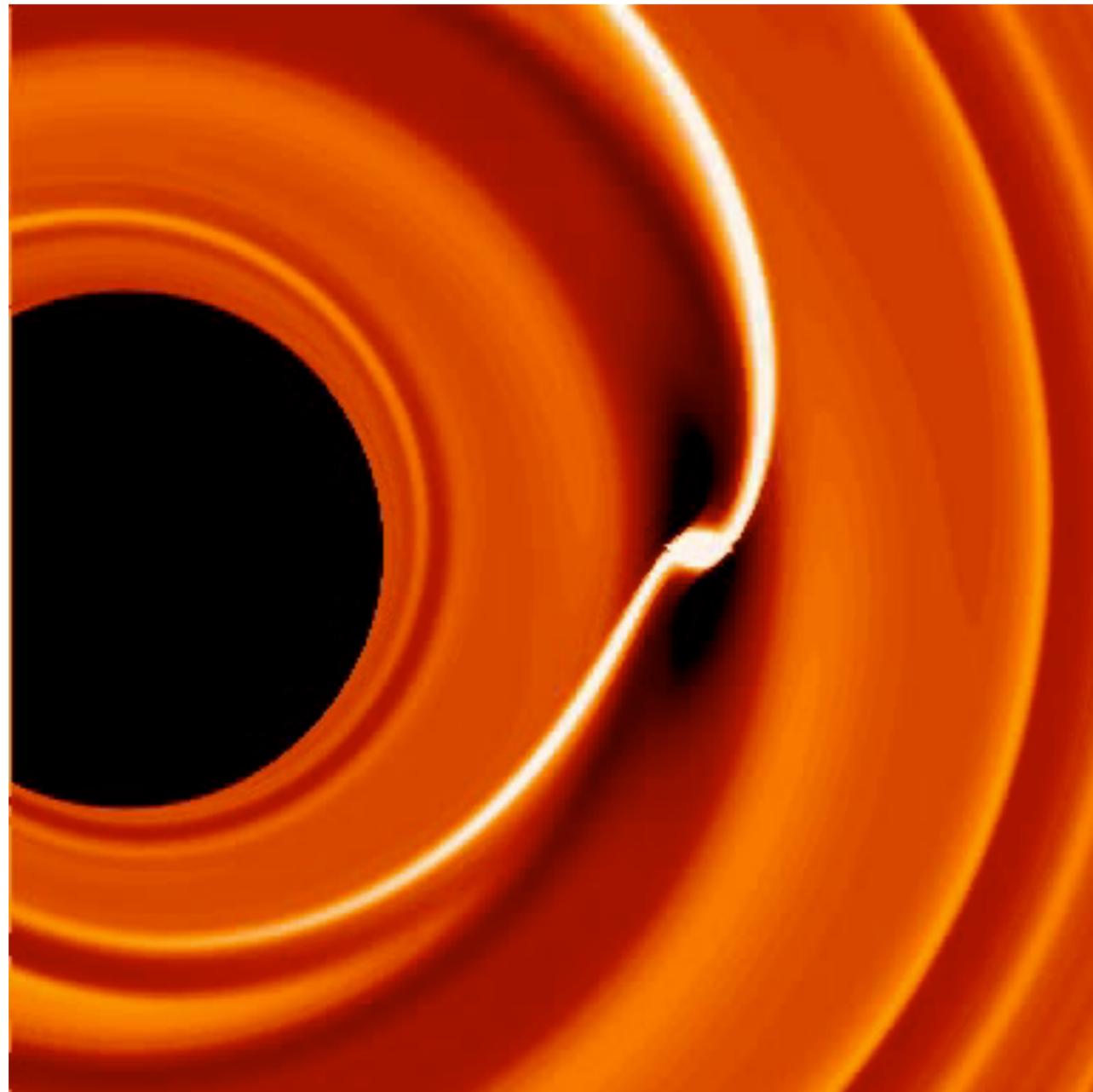


Gap opening

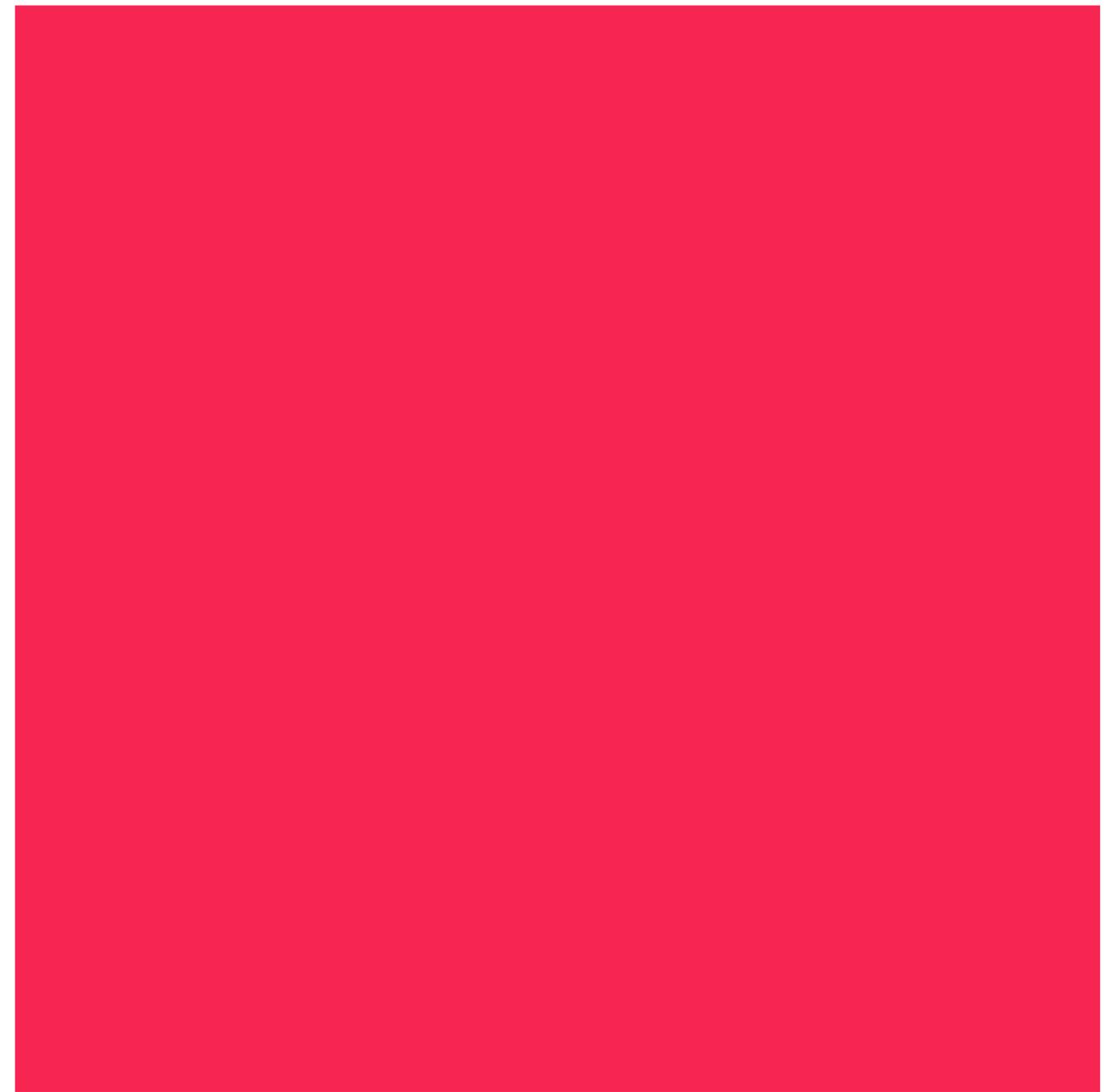


Migrações de super-Terras

Type III migration

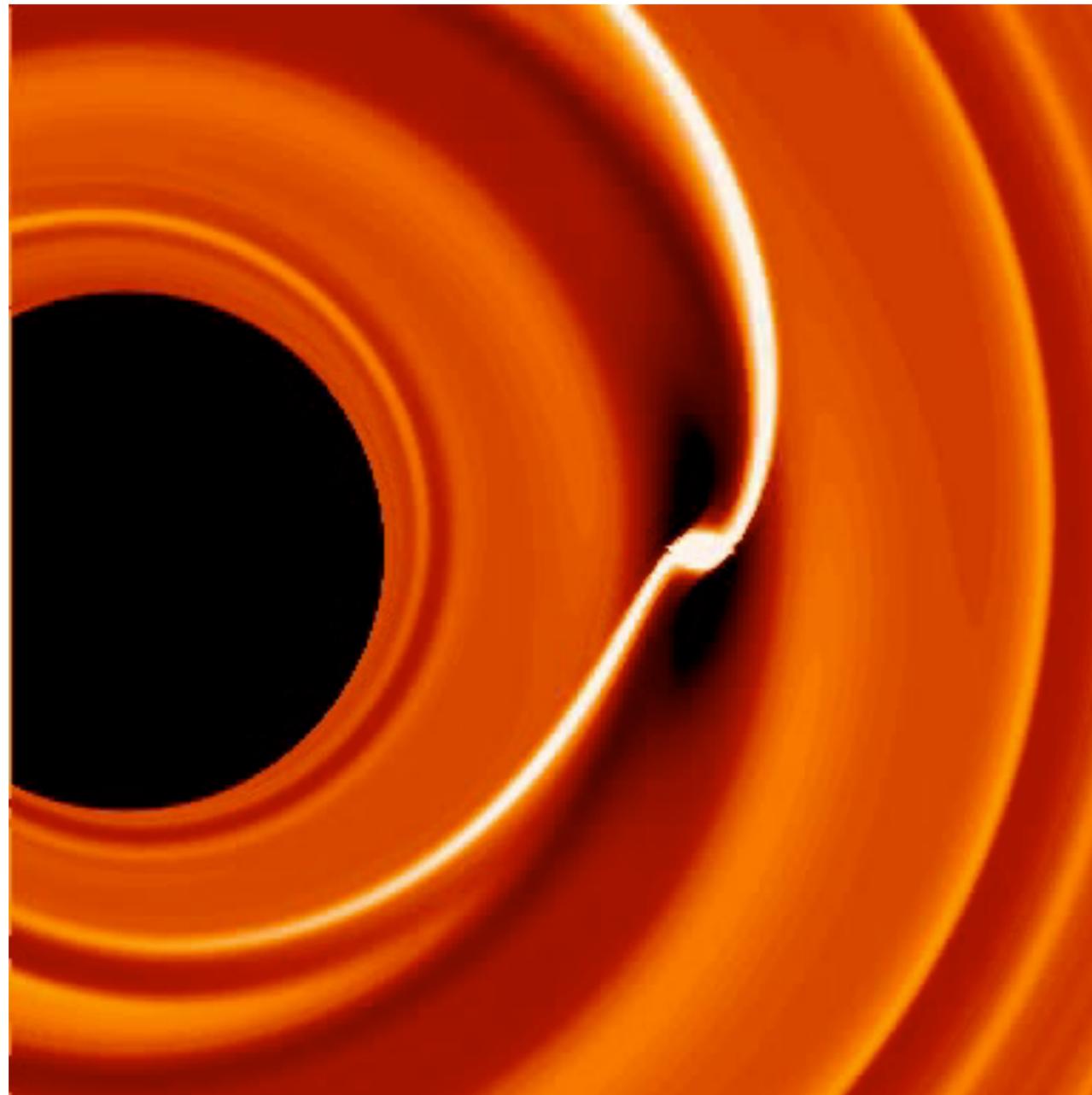


Type III migration



Migrações de super-Terras

Type III migration

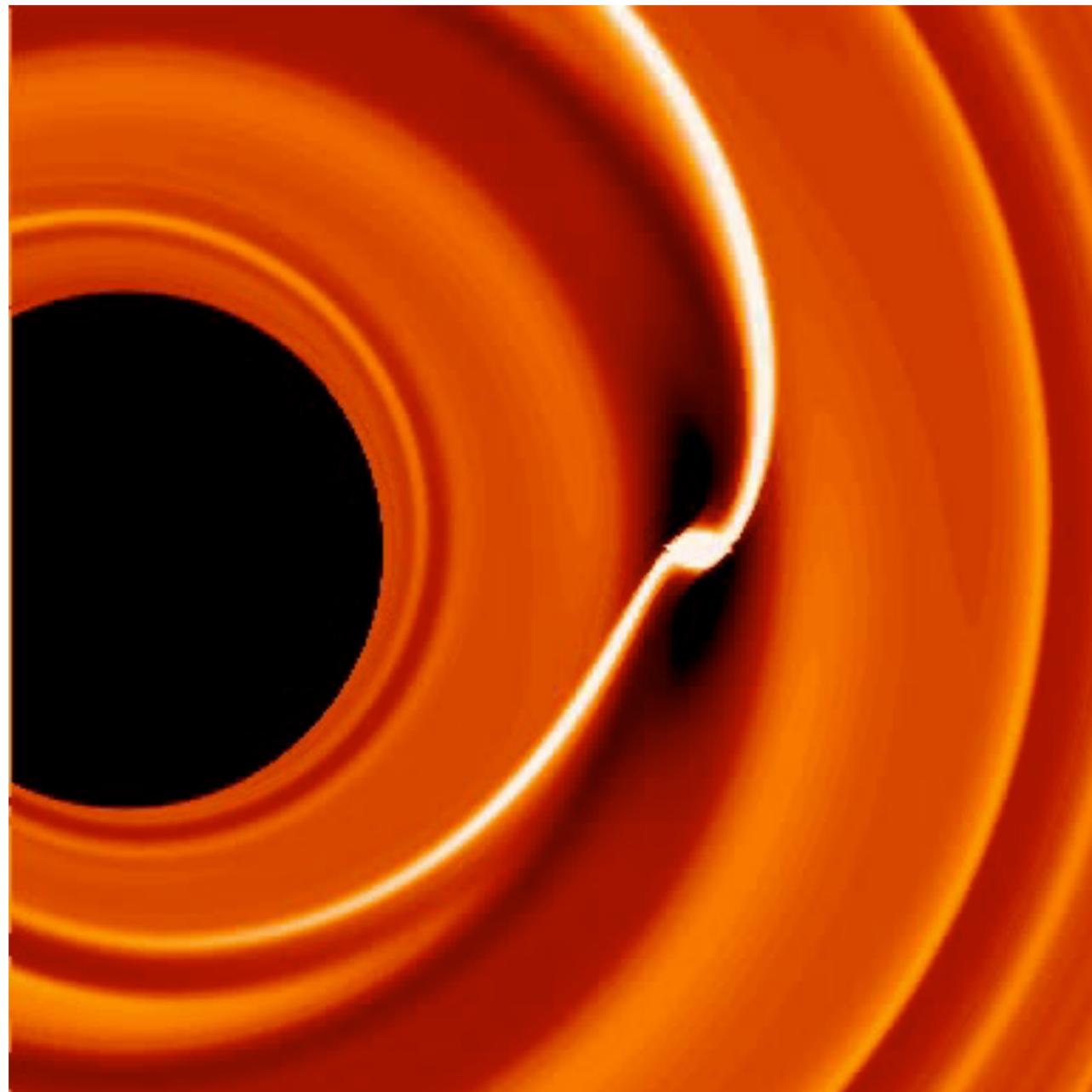


Type III migration



Migrações de super-Terras

Type III migration



Type III migration





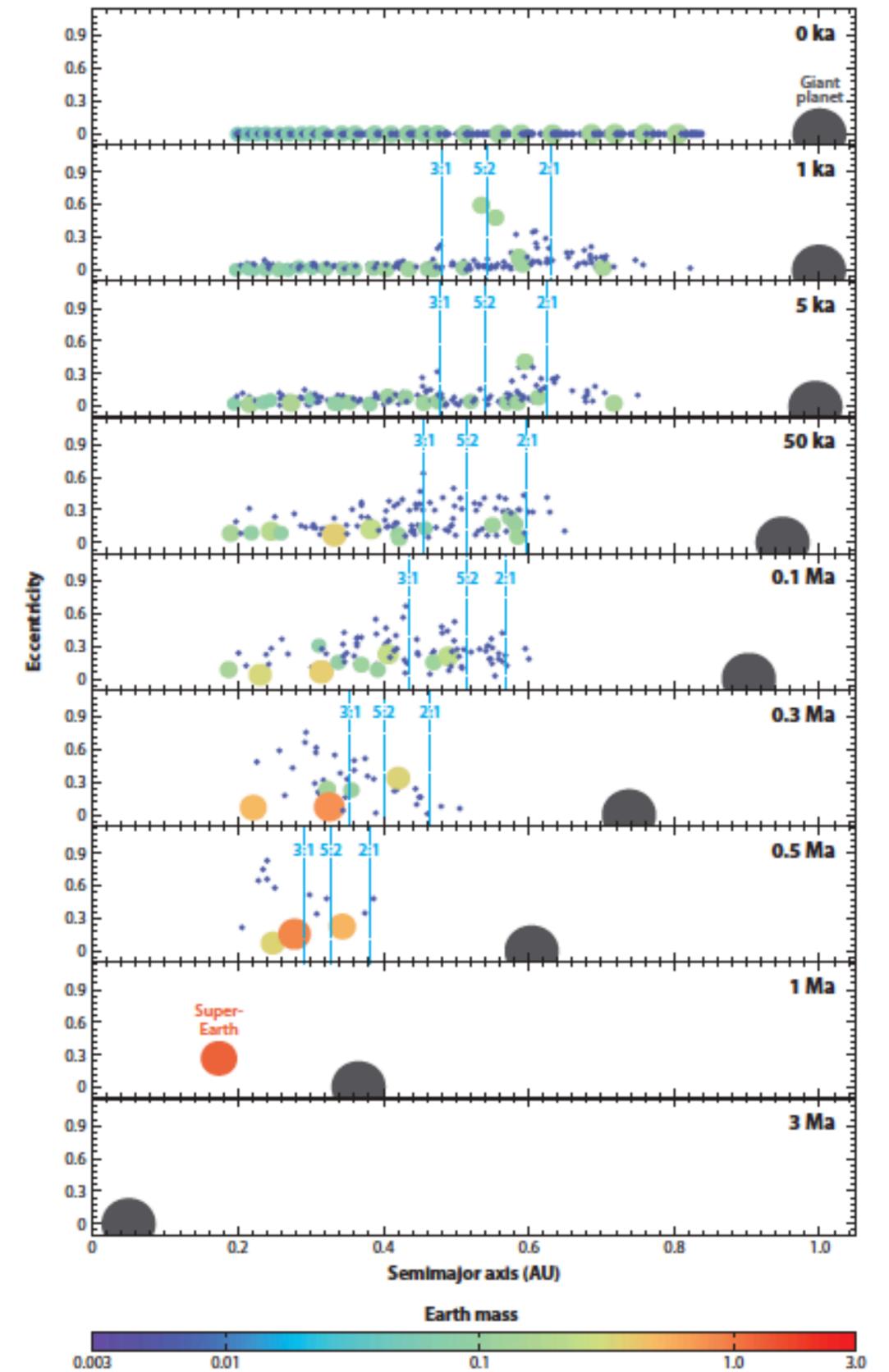
Migrações de super-Terras

- ☑ 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.



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

Figure 4
Accretion of
protoplanetary bodies
during the migration
of a giant planet
around a $0.3-M_{\odot}$
M star (Haghighipour
& Rastegar 2011).



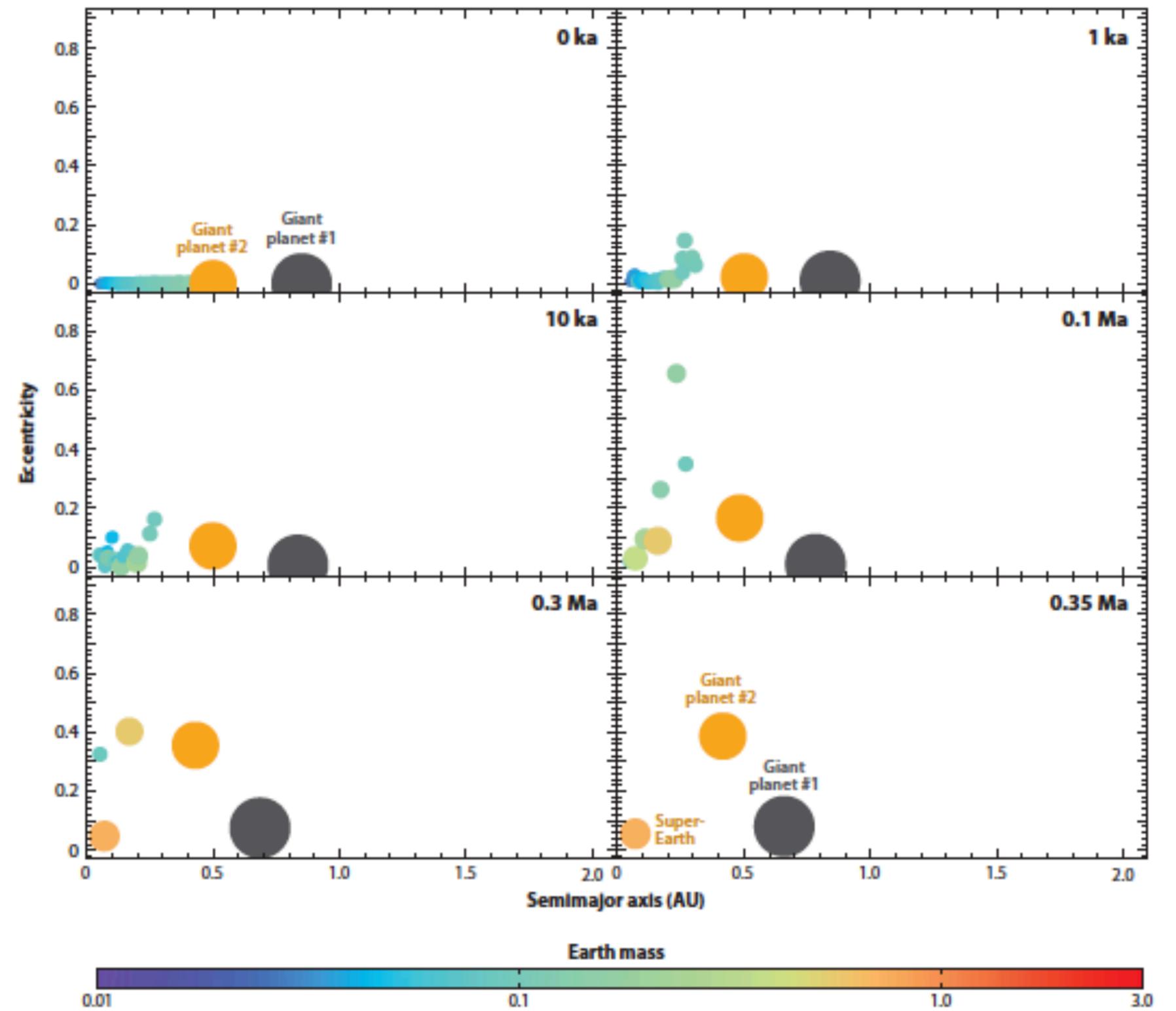


Figure 5

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).



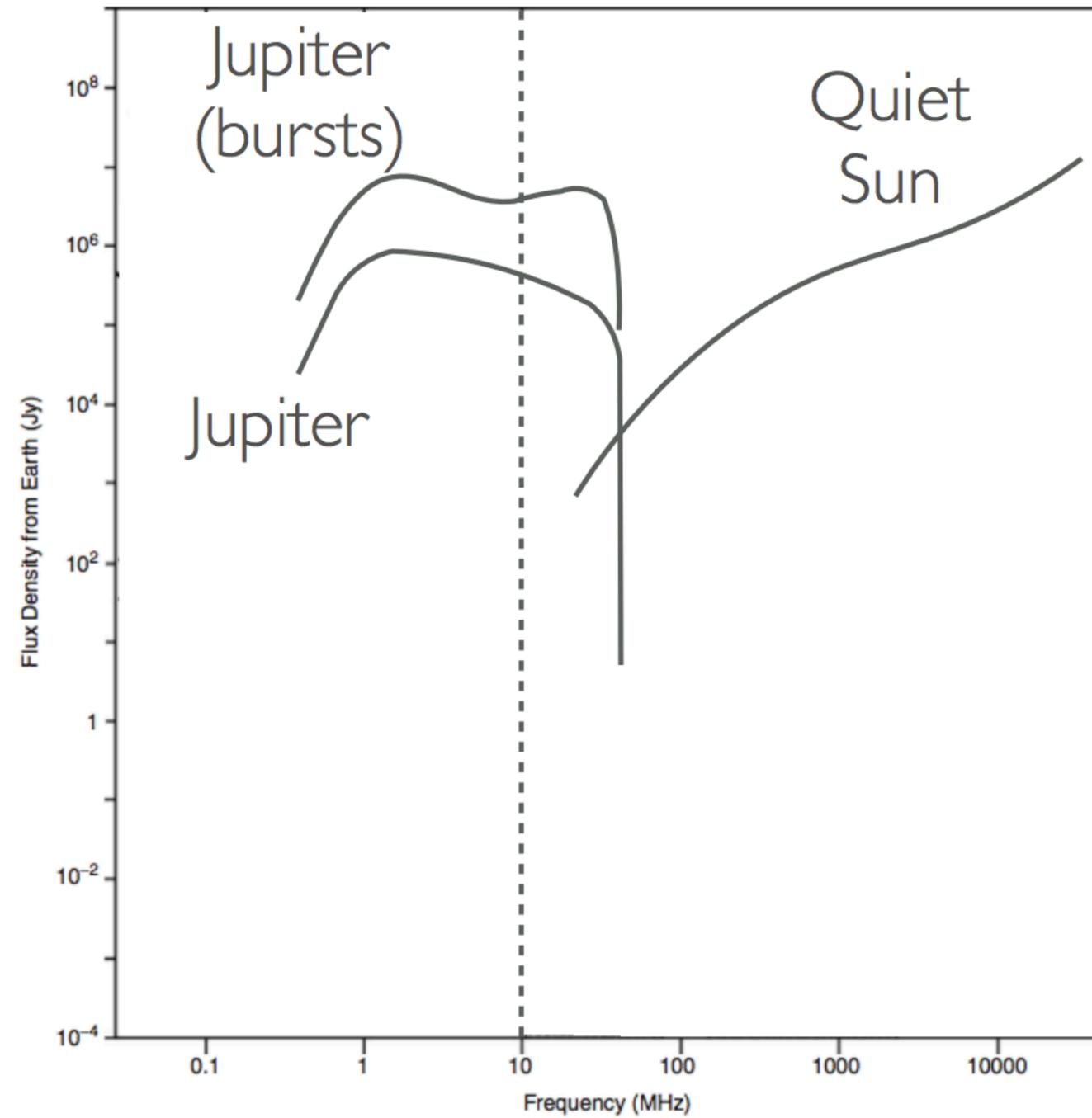
Magnetosfera de exoplanetas

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



Emissões aurorais...

Flux density from Earth (Jy)

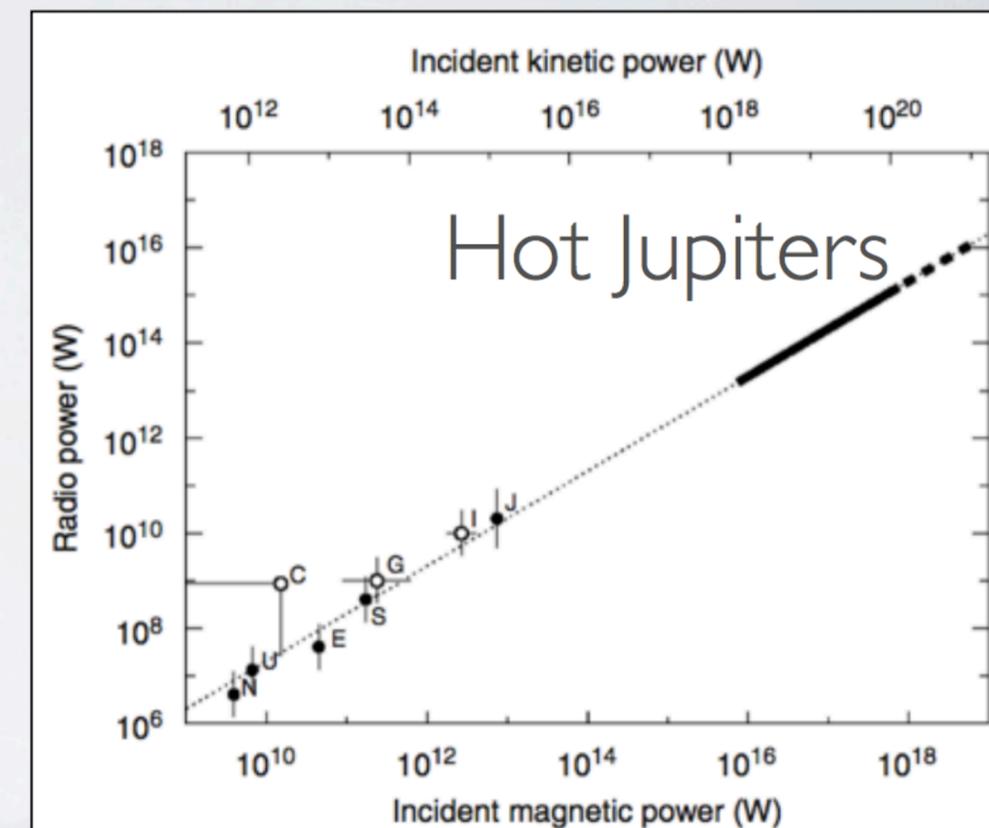


Frequency (MHz)

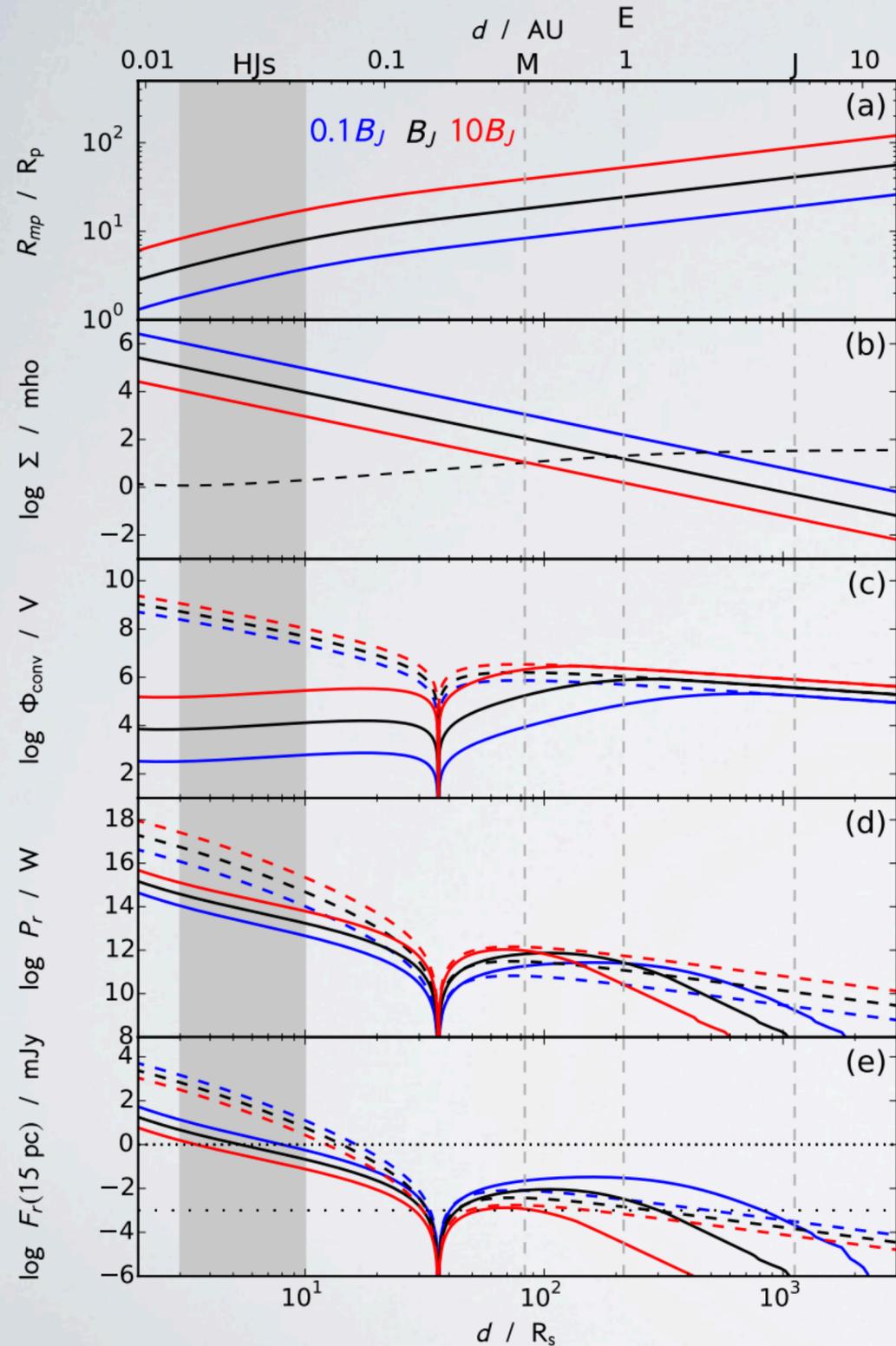
Adapted from Zarka et al. (2007)

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

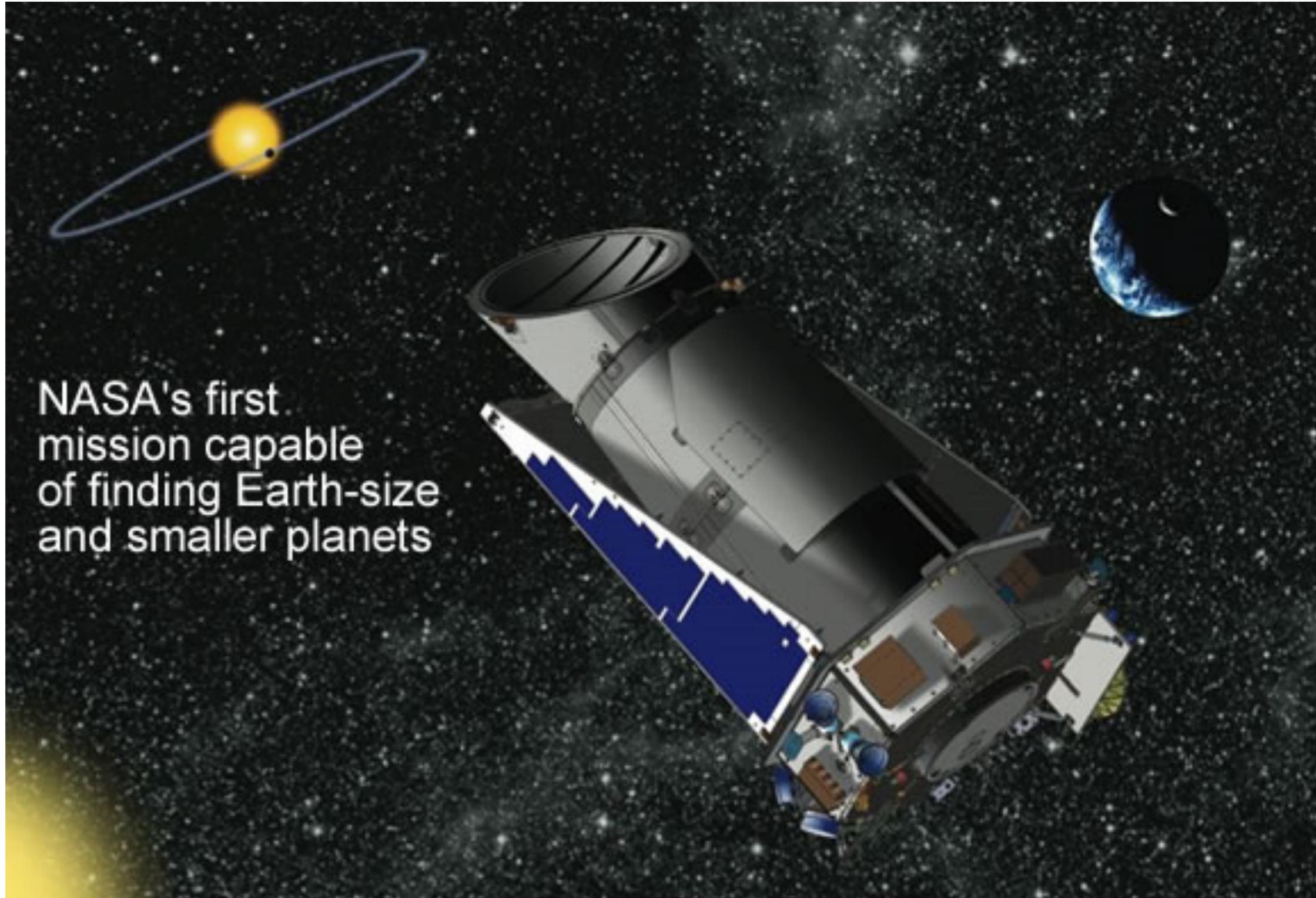
Participação brasileira em ordem alfabética:
INPE, LNA, ON, UFMG, UFRGS, UFRJ,
UFRN, UFSC, U. Mackenzie, USP

☑ Objetivos científicos

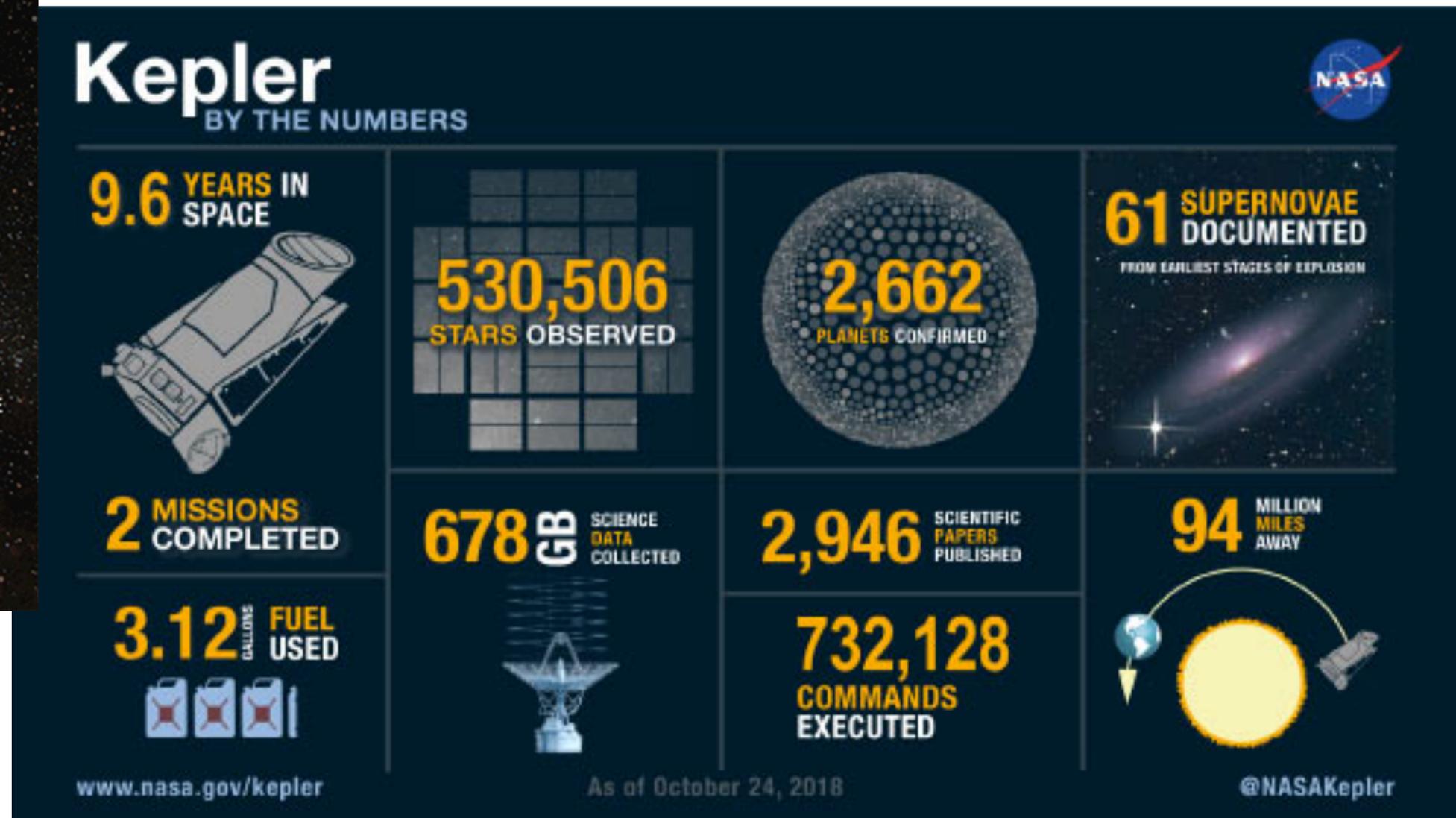
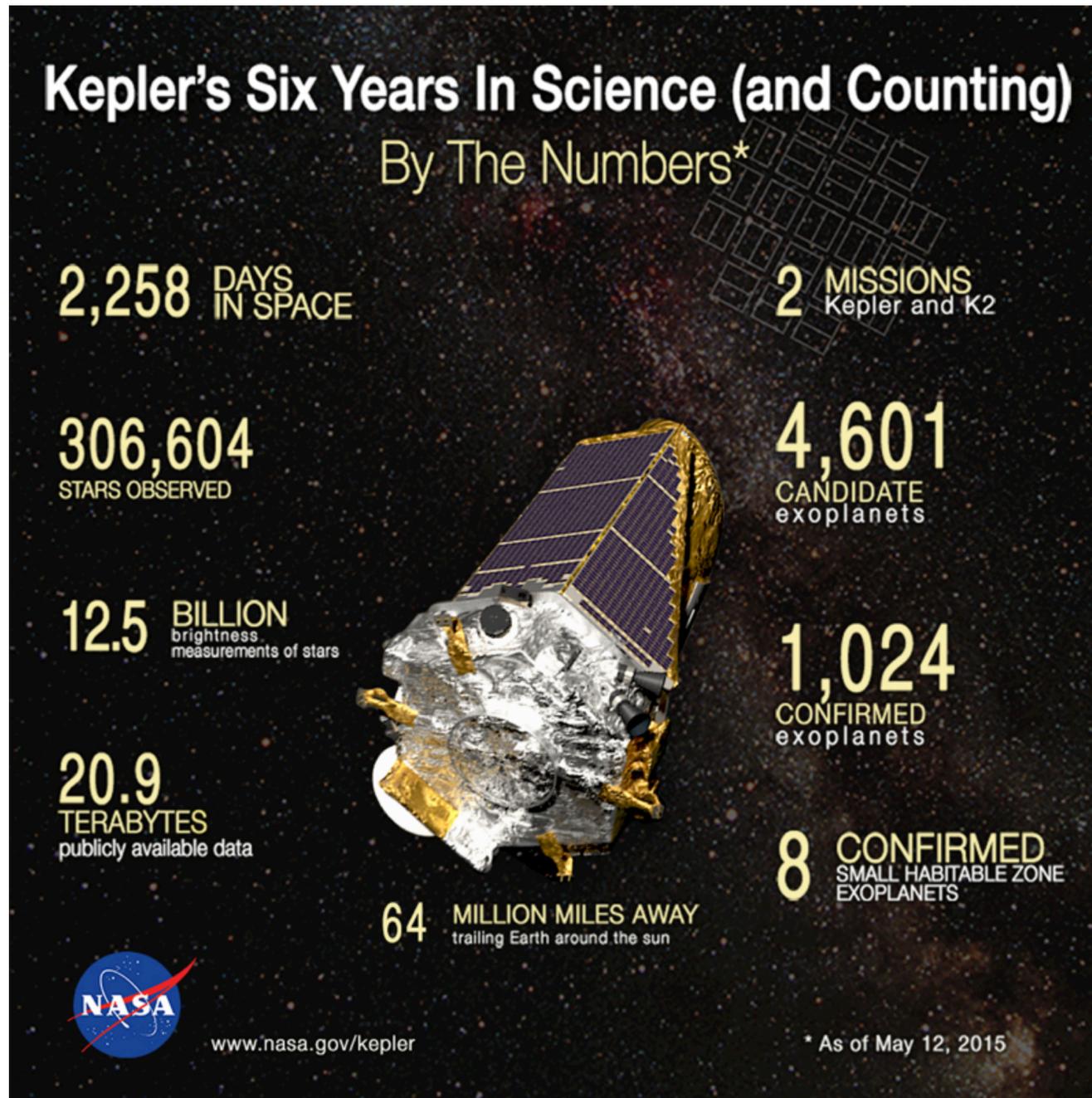
- ✓ Estudar a estrutura interna de estrelas usando técnicas fotométricas.
- ✓ Detecção de planetas orbitando em torno de estrelas, por meio de medidas na flutuação da intensidade da luz.



O Satélite KEPLER



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



Fim das operações em 2018

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

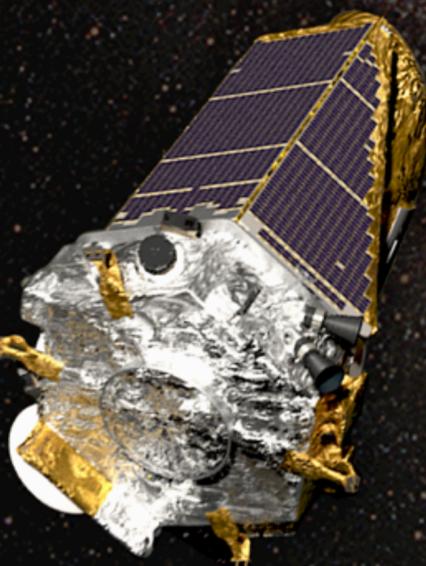
4,601 CANDIDATE exoplanets

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

* 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 GB SCIENCE DATA COLLECTED

2,946 SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED

94 MILLION MILES AWAY

3.12 GALLONS FUEL USED



732,128 COMMANDS EXECUTED



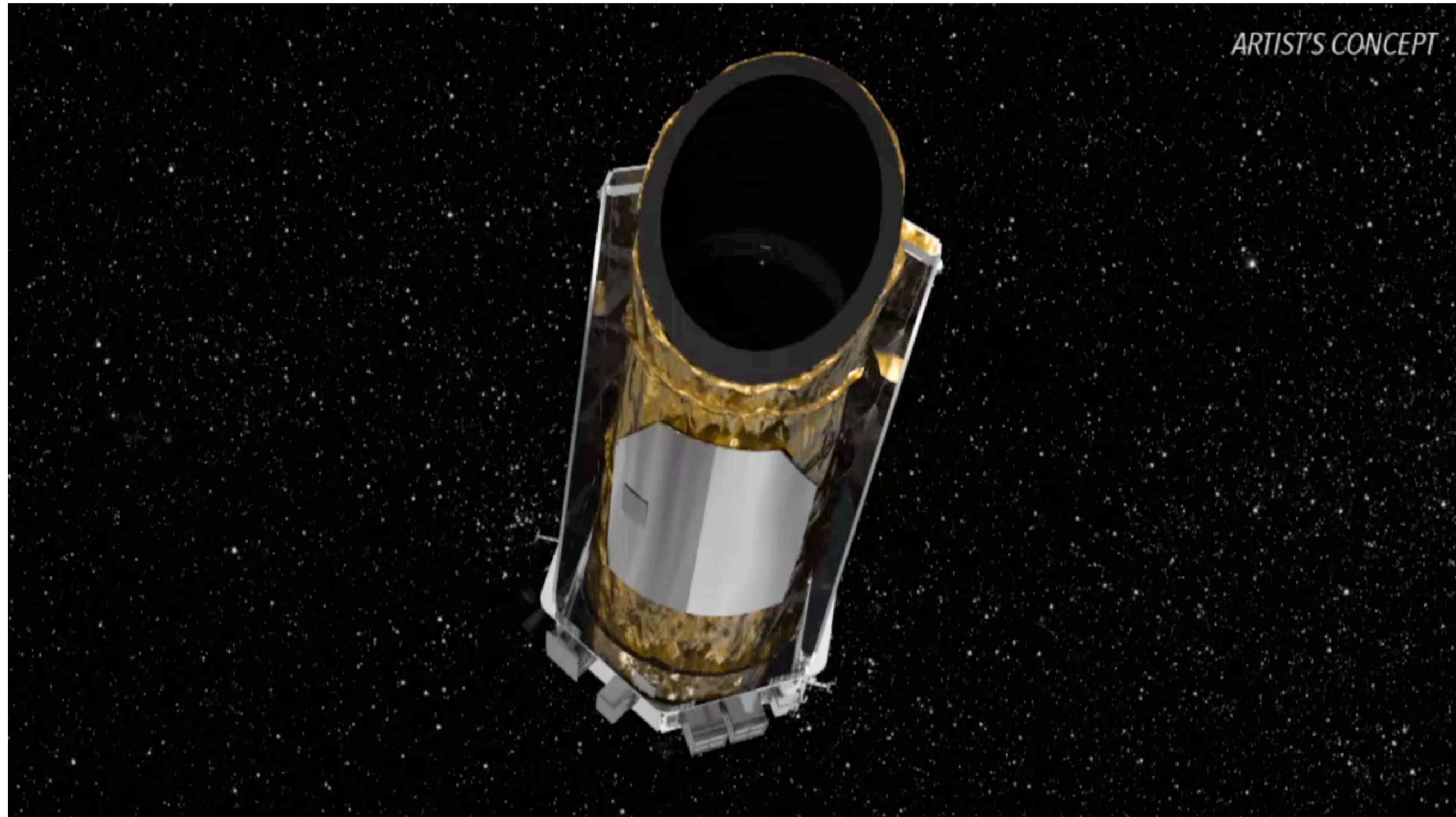
www.nasa.gov/kepler

As of October 24, 2018

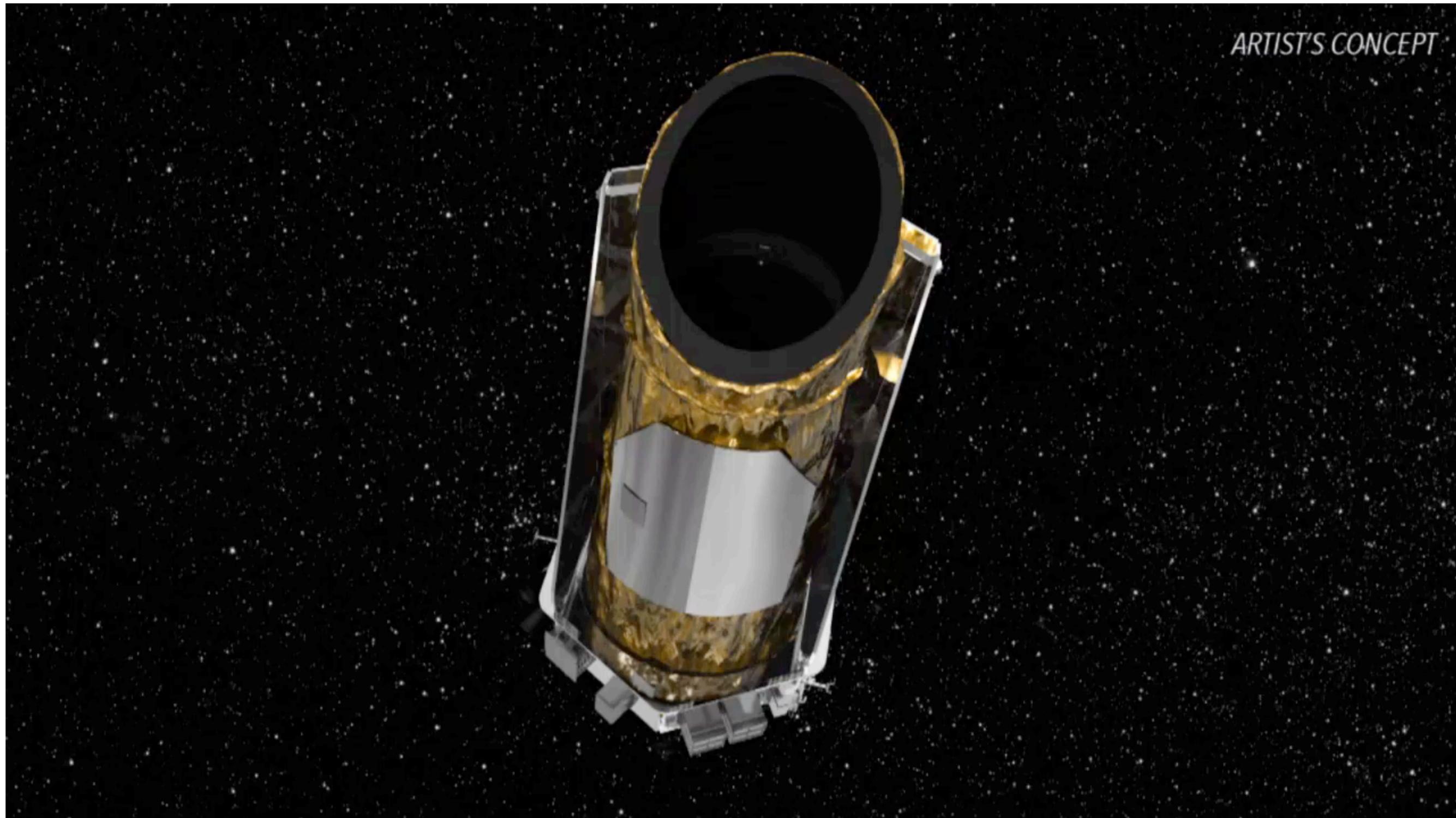
@NASAKepler

Fim das operações em 2018

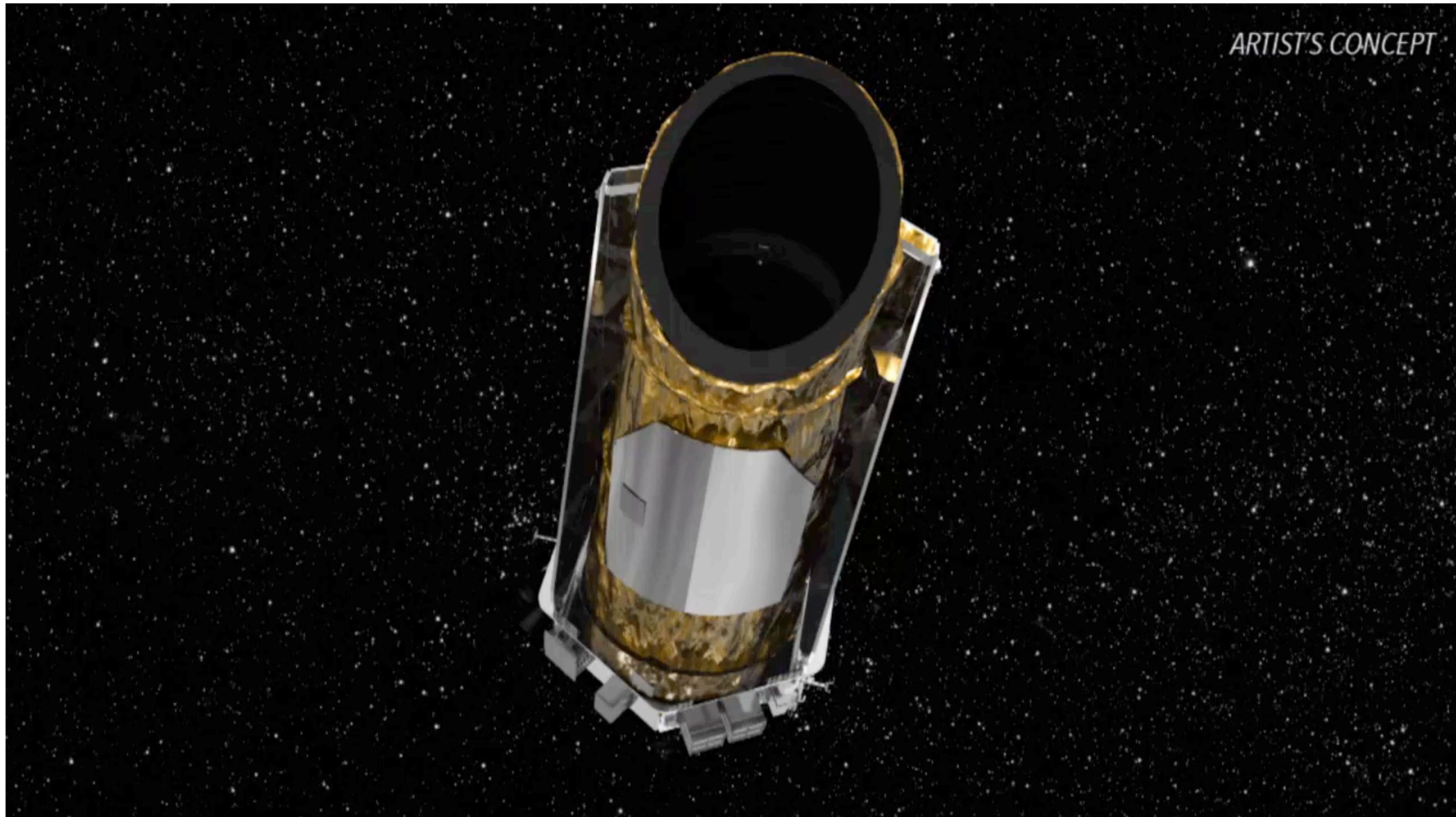
Resultados científicos do Kepler



Resultados científicos do Kepler



Resultados científicos do Kepler





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)



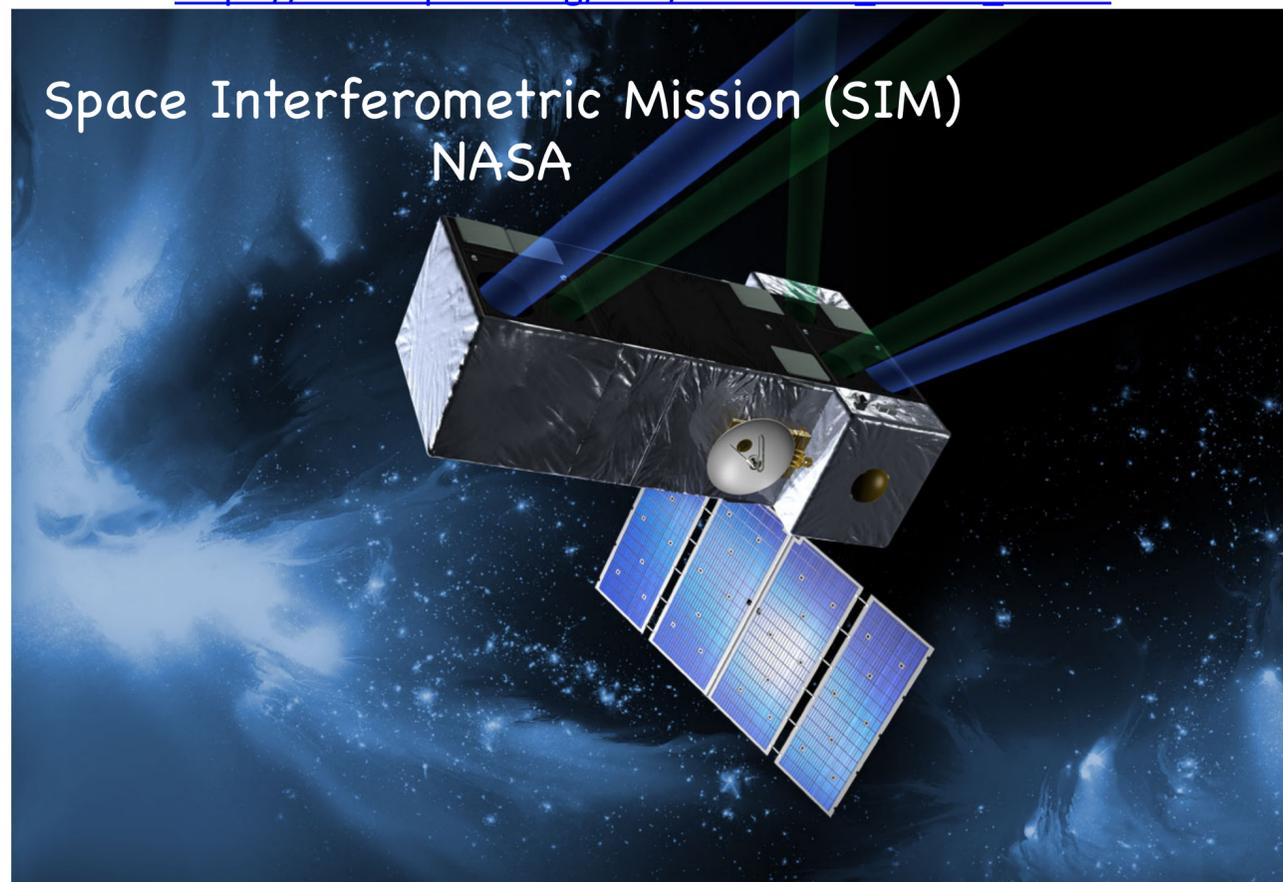
Terrestrial Planet Finder
NASA

Todos os programas estão suspensos

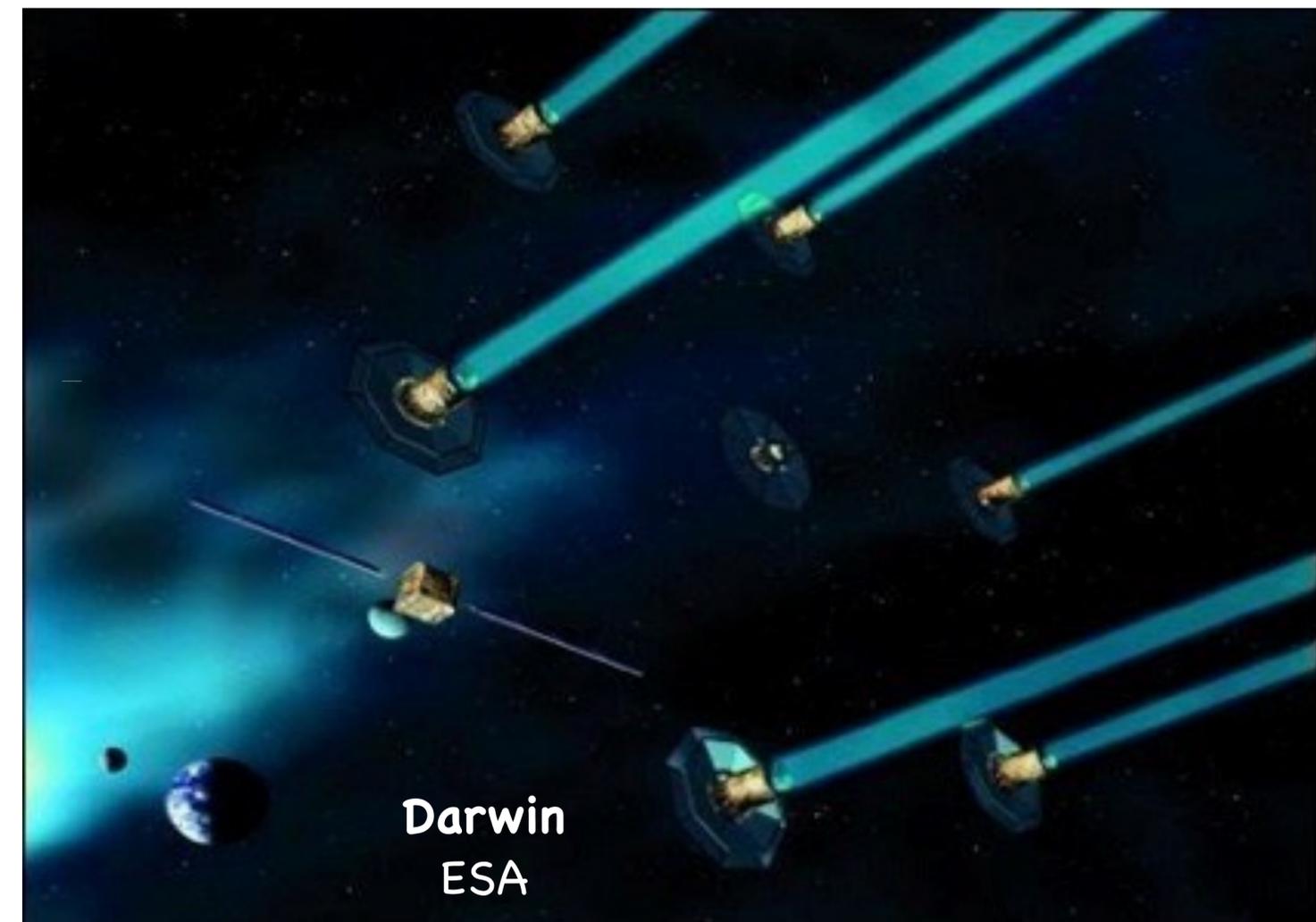
https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Darwin_factsheet

Status: Study ended in 2007, no further activities planned.

https://en.wikipedia.org/wiki/Terrestrial_Planet_Finder



Space Interferometric Mission (SIM)
NASA



Darwin
ESA

https://en.wikipedia.org/wiki/Space_Interferometry_Mission

C. A. Wuensche (2022)

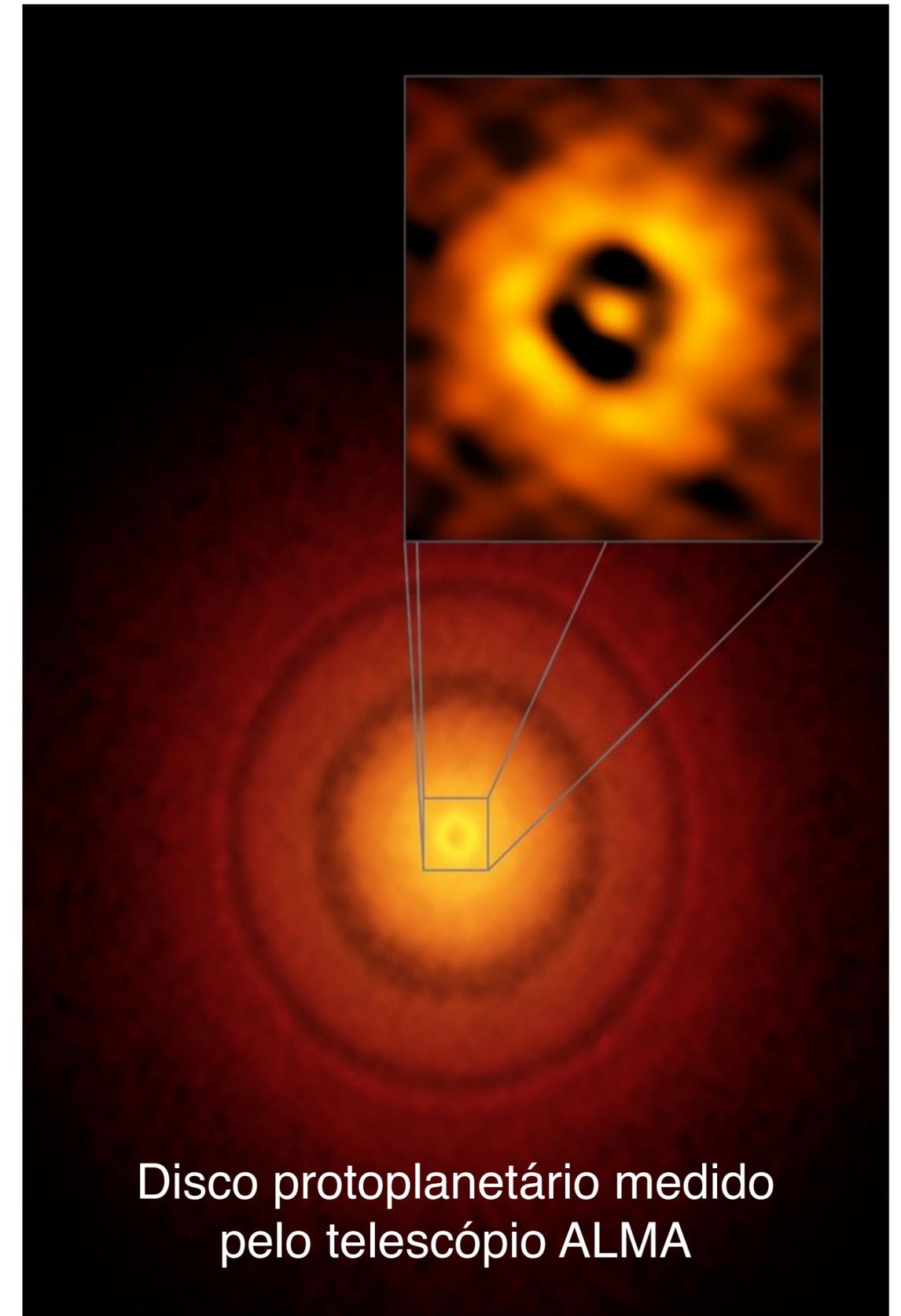


O futuro

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

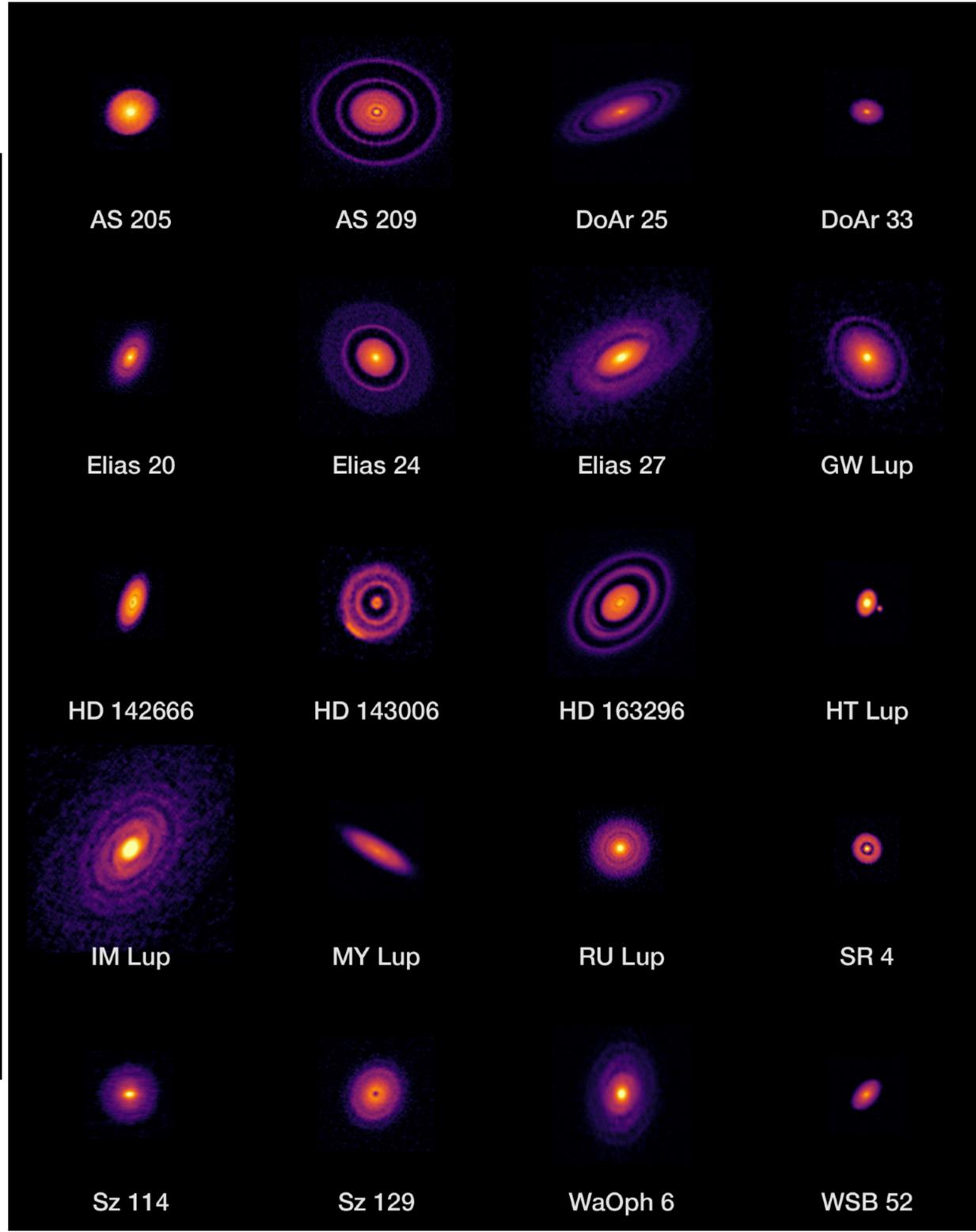
Créditos: ESO

C. A. Wuensche (2022)



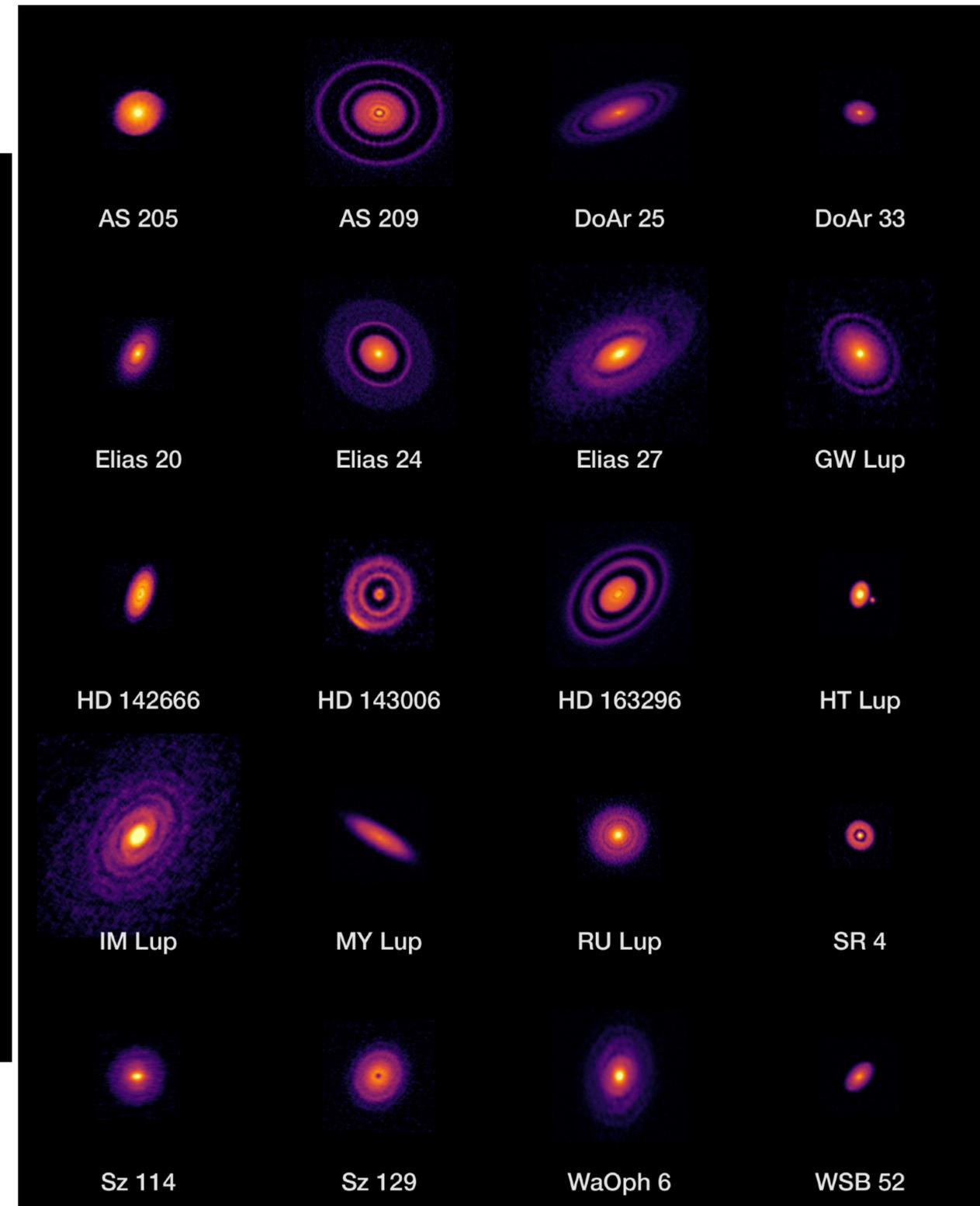
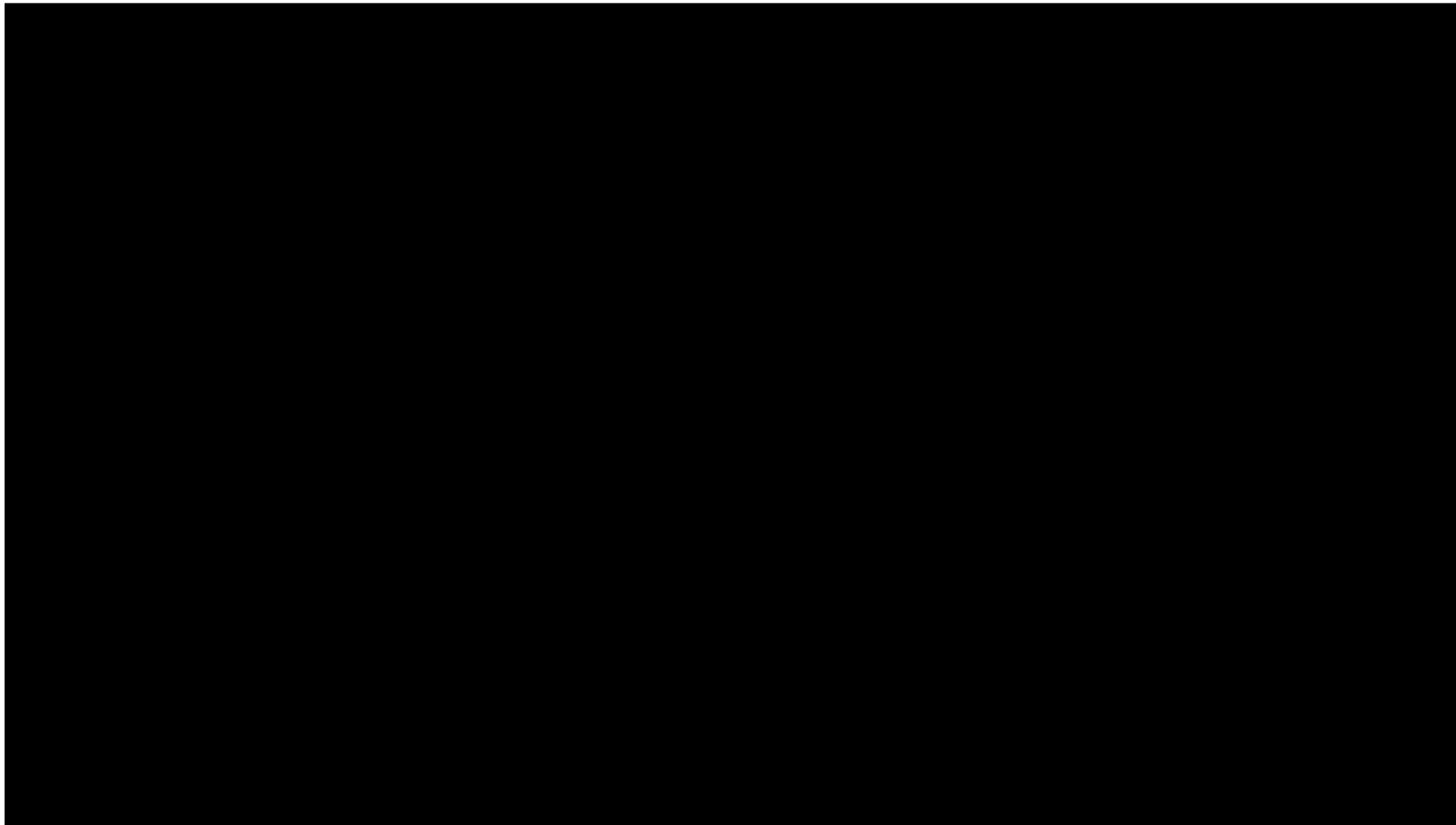


Os discos protoplanetários HOJE

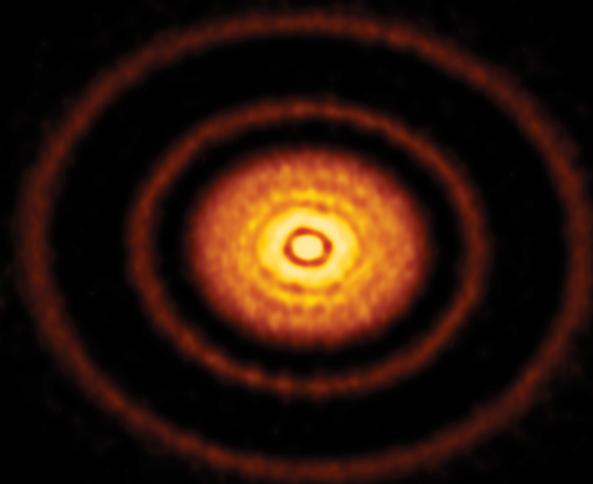




Os discos protoplanetários HOJE

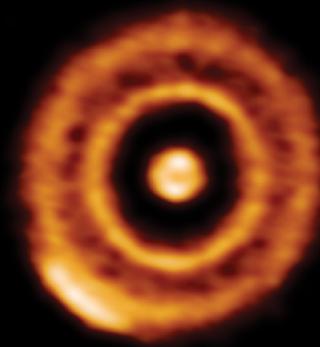


Álbuns de família (12/2018)



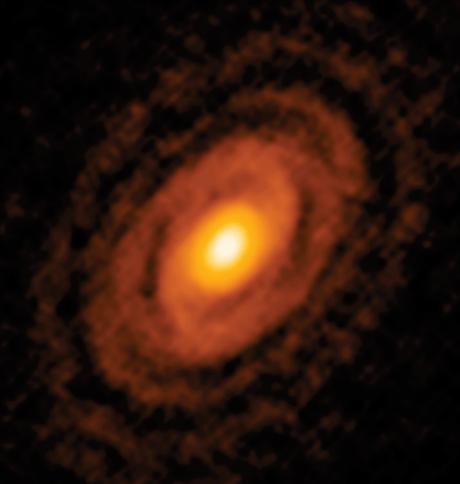
AS 209

AS 209 is a star hosting a disk that is 1 million years old and located about 400 light-years from Earth



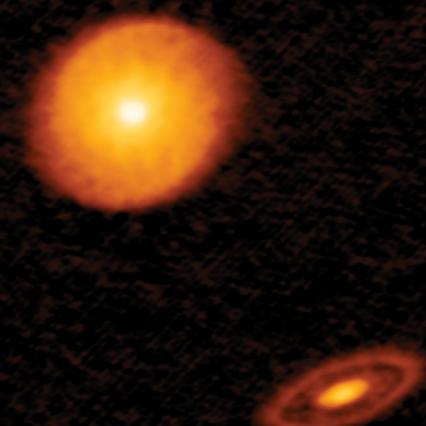
HD 143006

HD 143006 is about 5 million years old and resides 540 light-years from Earth



IM Lup

ALMA reveals sweeping spiral arms in the dust disk orbiting IM Lup, a young star located about 515 light-years from Earth

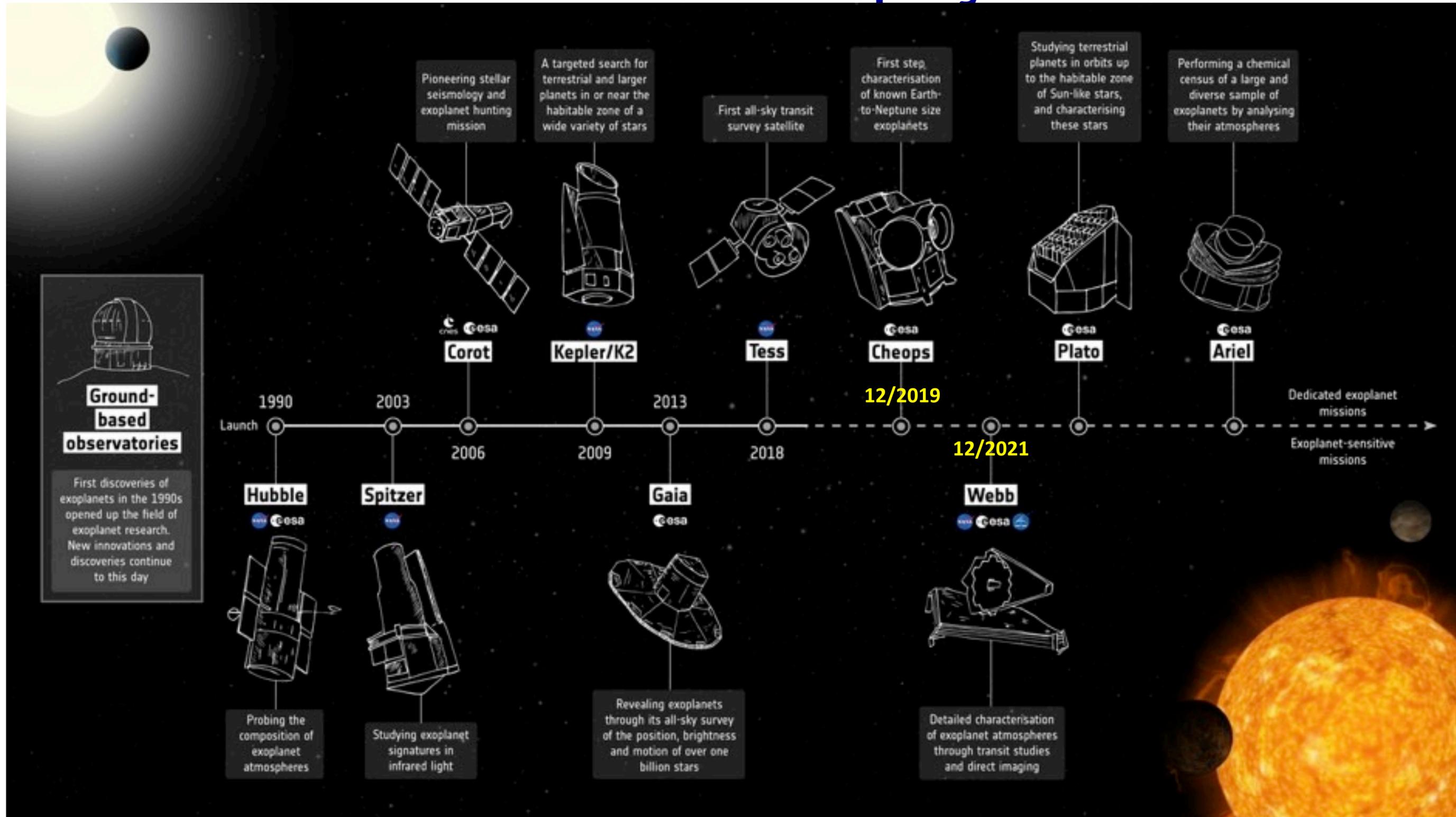


AS 205

AS 205 is a multiple star system, with each star sporting its own dusty disk. Since most stars in the Milky Way are multiples, this observation provides clues to the potential for planets in such systems. This system is located about 420 light-years from Earth

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) S. Andrews et al.; NRAO/AUI/NSF, S. Dagnello

O futuro no espaço...



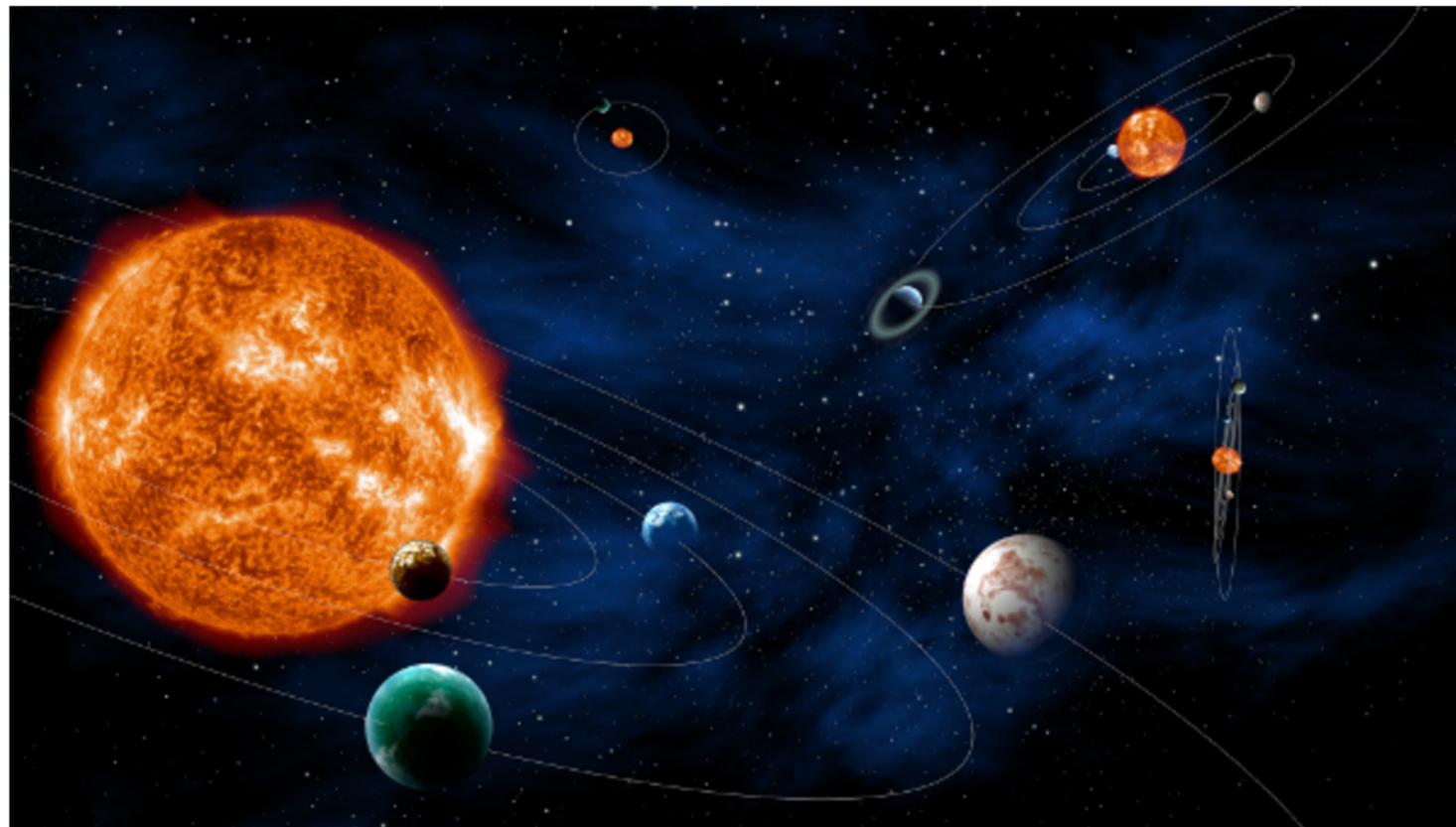




O futuro próximo: PLATO

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?



Artist's impression of planetary systems. Credit: ESA

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



FIM DA AULA 6