

# L'exploration des mondes extrasolaires

Franck Selsis

Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux

(CNRS, Université Bordeaux 1) [fselsis@gmail.com](mailto:fselsis@gmail.com)





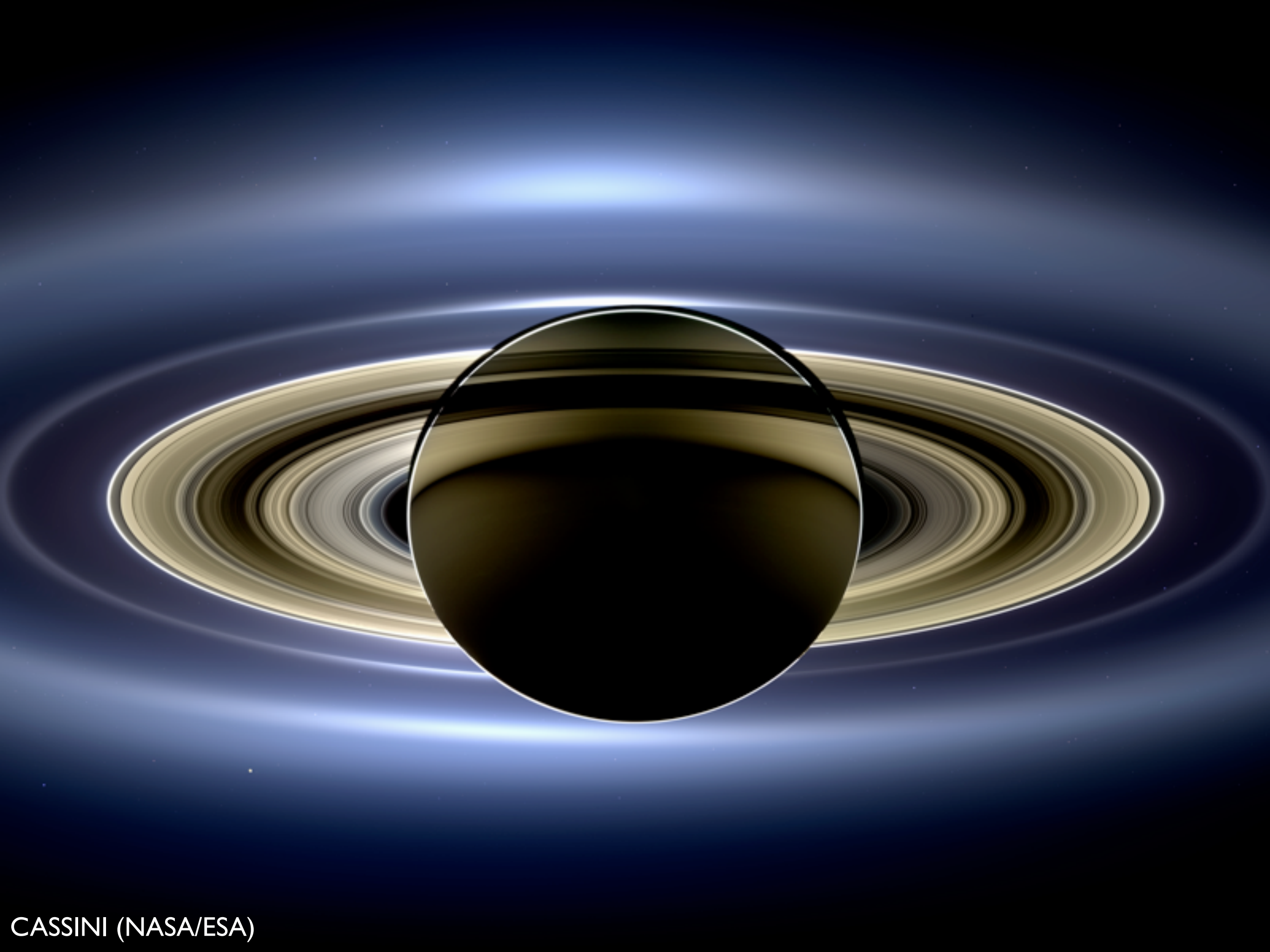




Mars Express (ESA)

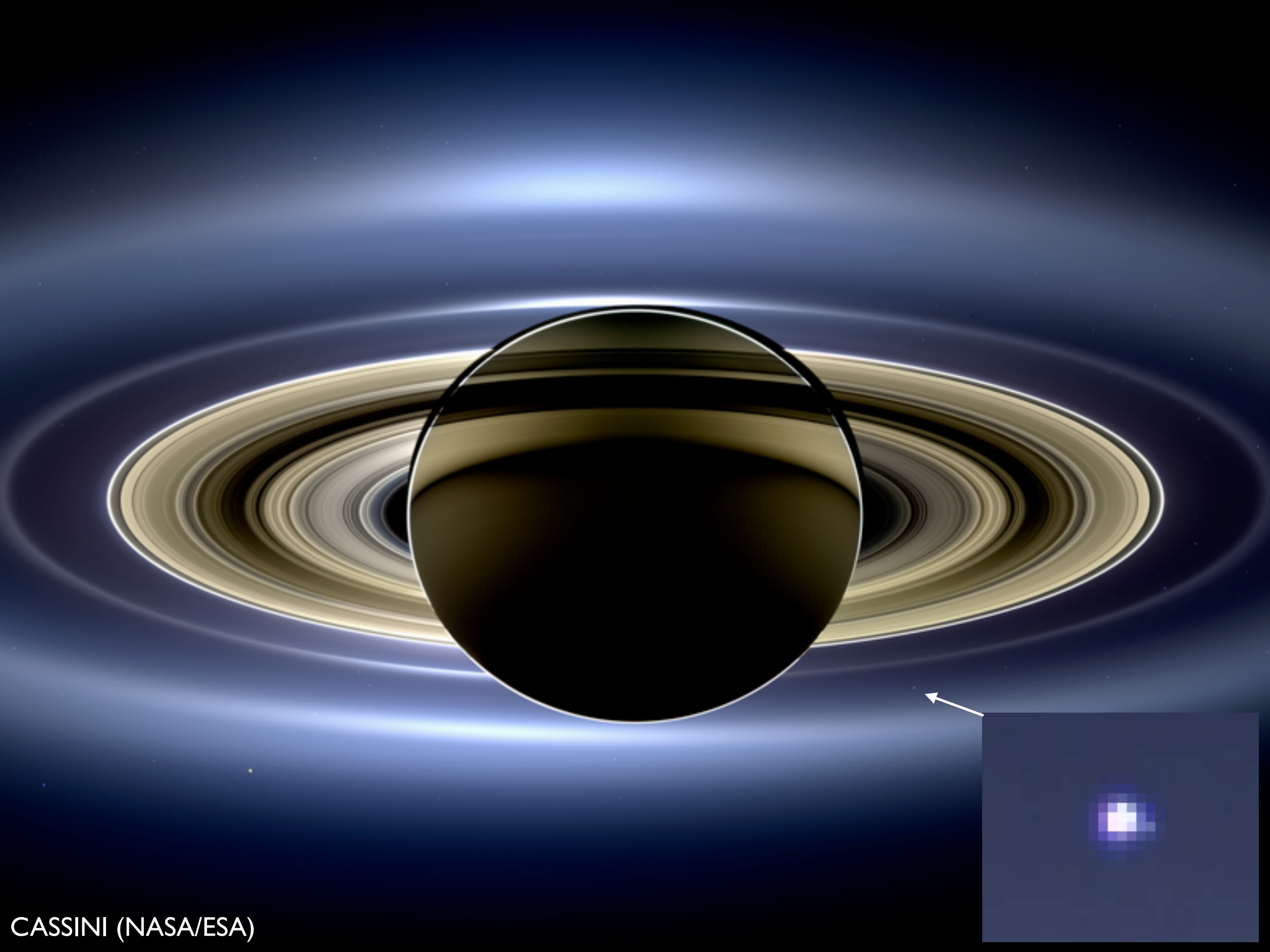


MESSENGER (NASA)



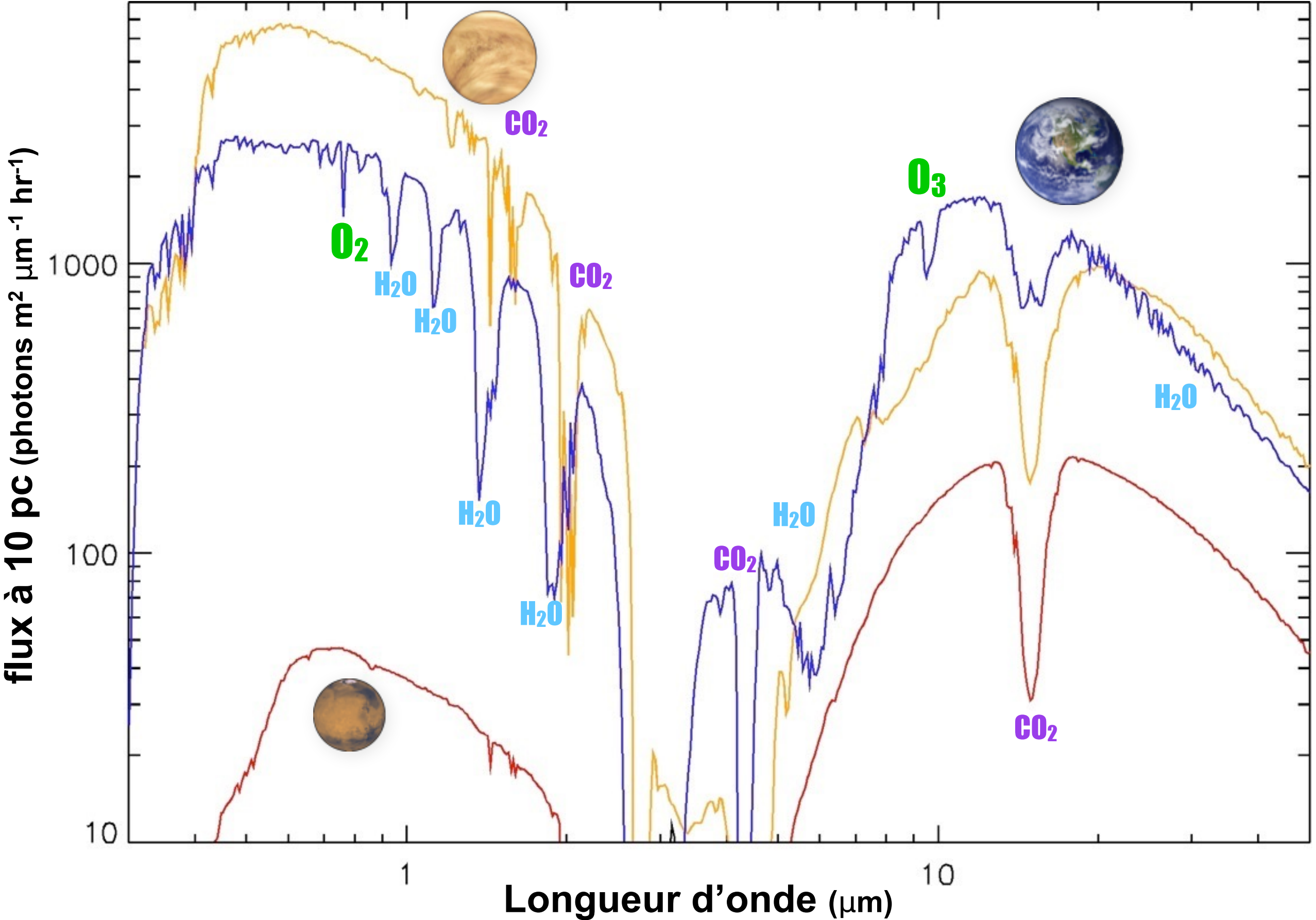
CASSINI (NASA/ESA)





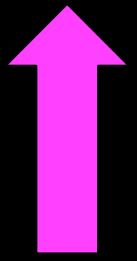
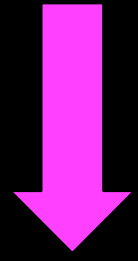
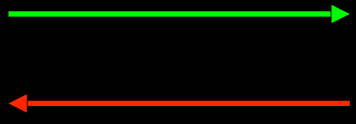
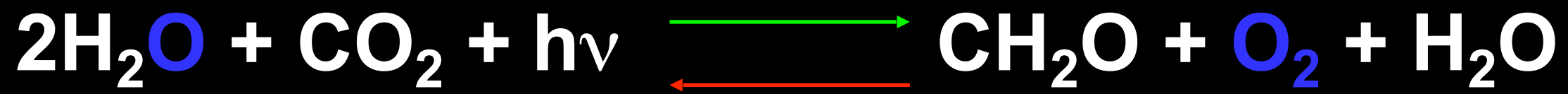
CASSINI (NASA/ESA)

Selsis & Tinetti (2005)





**x10<sup>12</sup>**





## MÉMOIRES ET OBSERVATIONS.

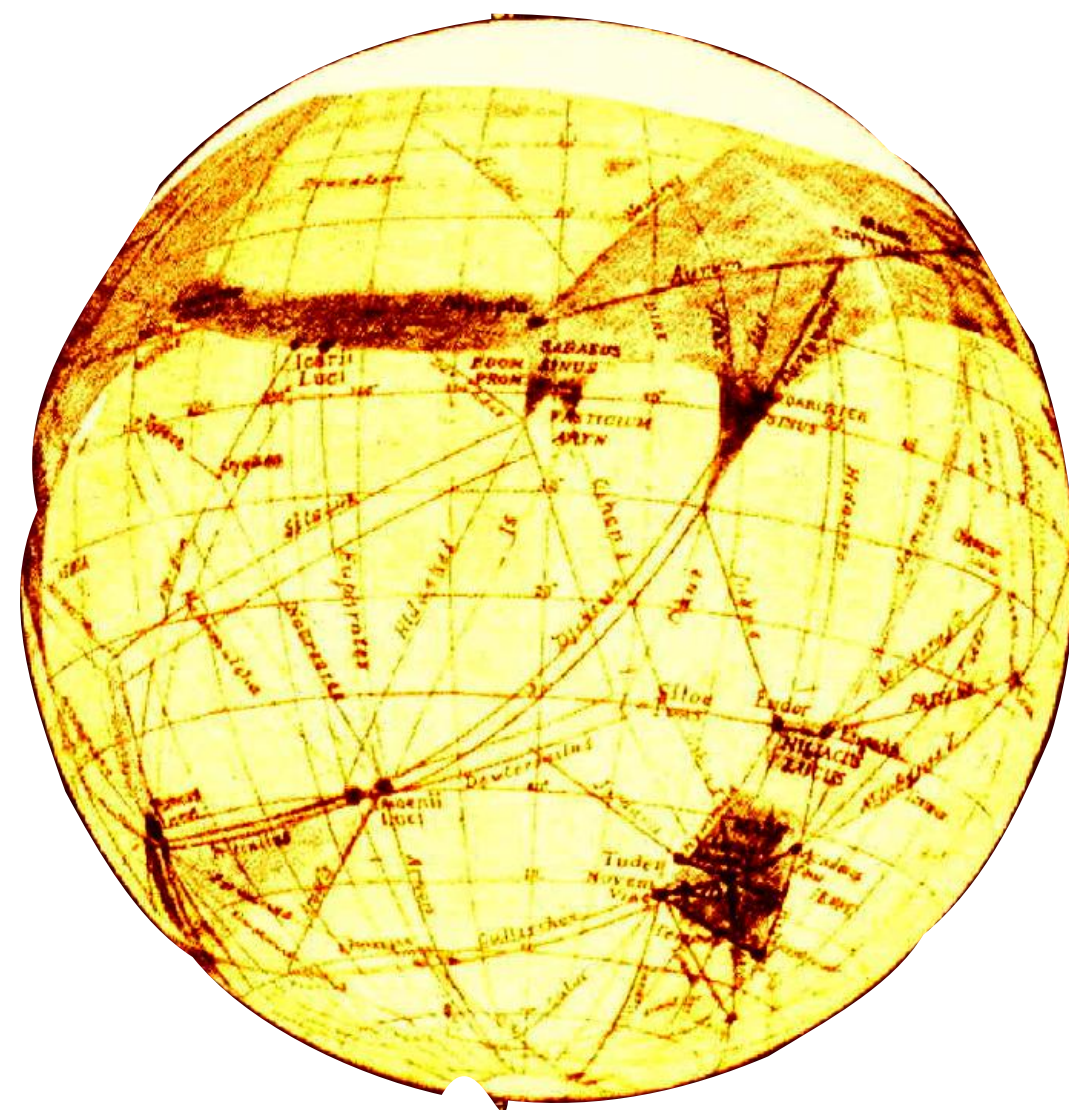
### PRIX PROPOSÉS PAR L'ACADÉMIE DES SCIENCES.

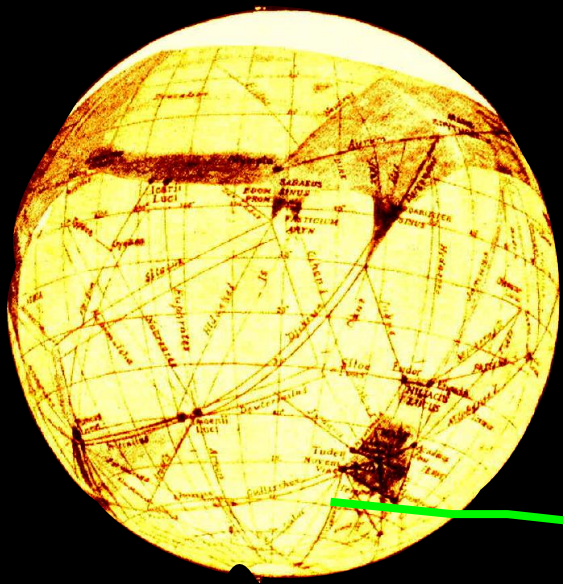
#### Prix Pierre Guzman (100 000<sup>fr.</sup>).

M<sup>me</sup> V<sup>te</sup> *Guzman* a légué à l'Académie des Sciences une somme de *cent mille francs* pour la fondation d'un prix qui portera le nom de *prix Pierre Guzman*, en souvenir de son fils, et sera décerné à celui qui aura trouvé le moyen de communiquer avec un astre autre que la planète Mars.

Prévoyant que le prix de *cent mille francs* ne serait pas décerné tout de suite, la fondatrice a voulu, jusqu'à ce que ce prix fût gagné, que les intérêts du capital, cumulés pendant cinq années, formassent un prix, toujours sous le nom de *Pierre Guzman*, qui serait décerné à un savant français, ou étranger, qui aurait fait faire un progrès important à l'Astronomie.

Le prix *quinquennal*, représenté par les intérêts du capital, sera décerné, s'il y a lieu, en 1910.



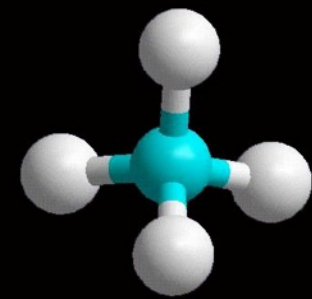


**Biosphère  
martienne**

**pouvoir  
d'observation**

1869

aujourd'hui

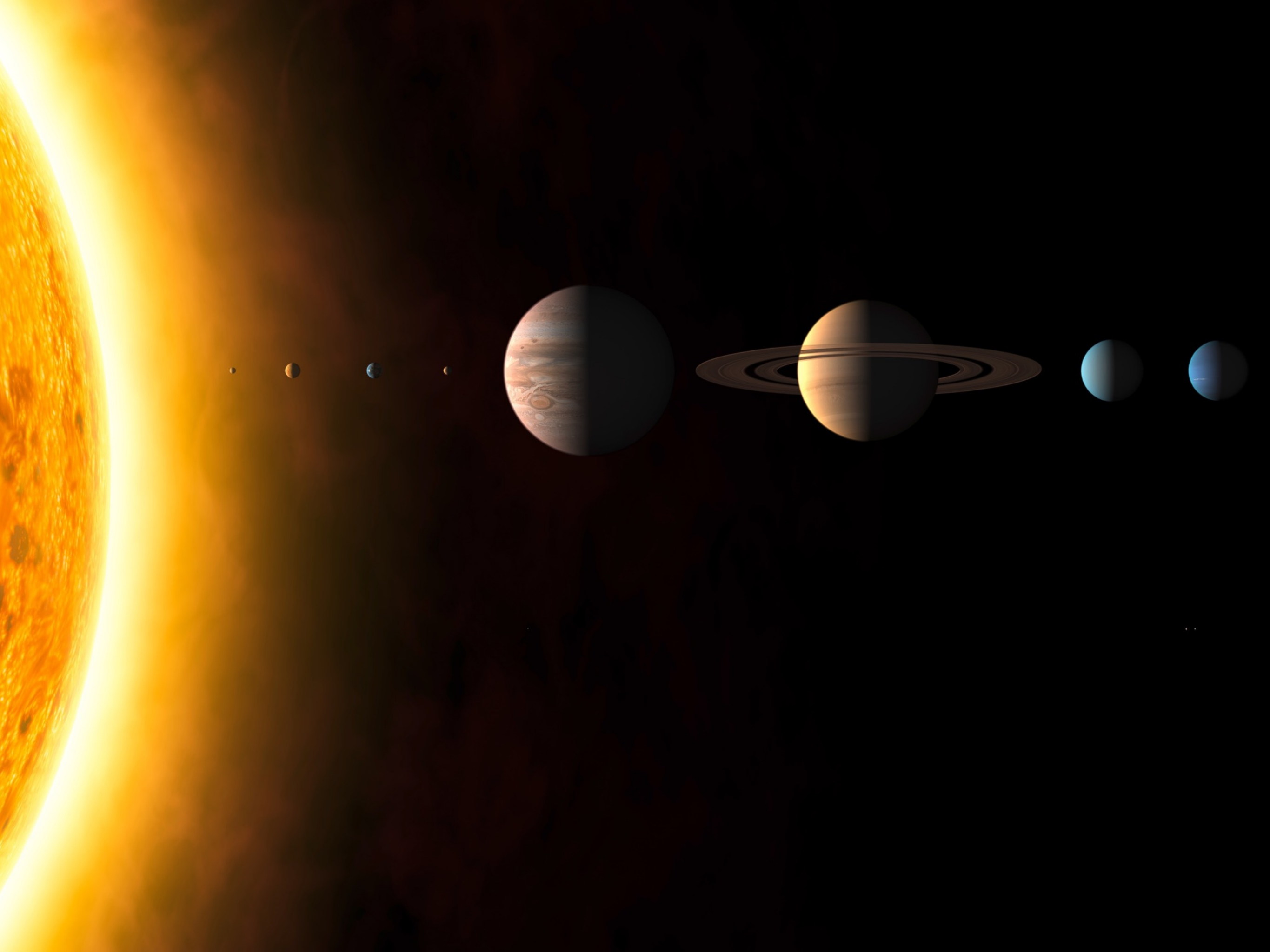


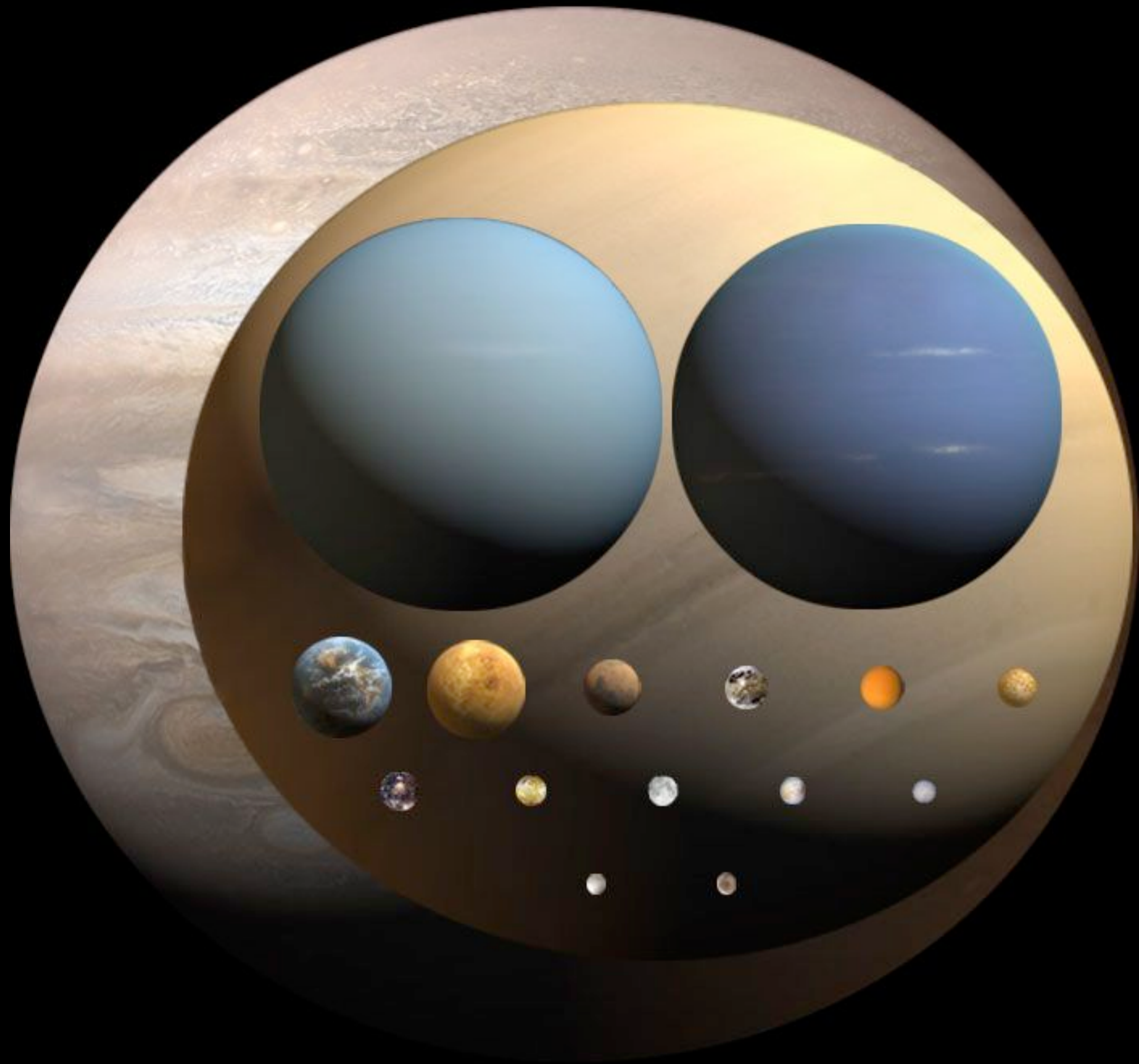




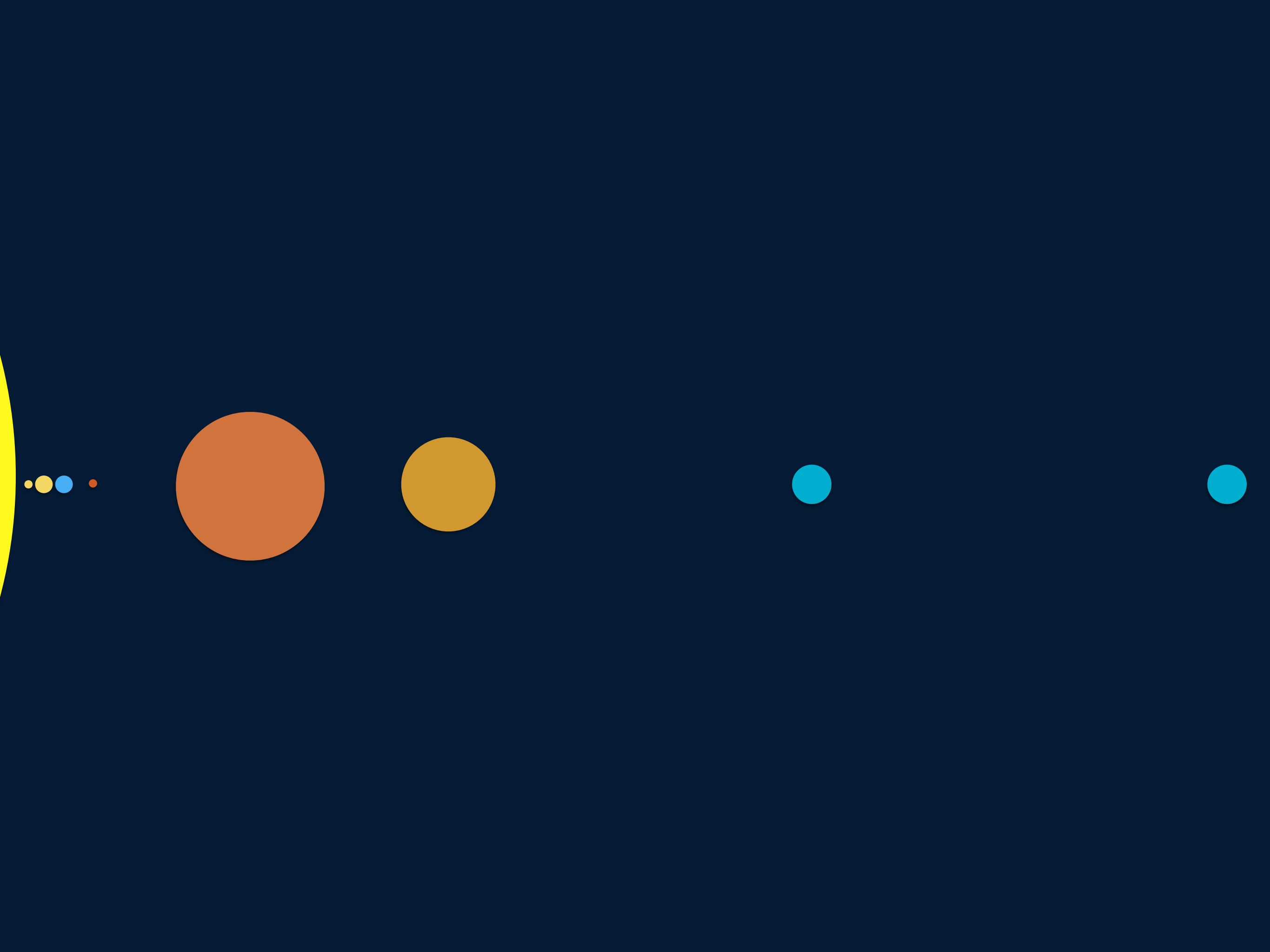








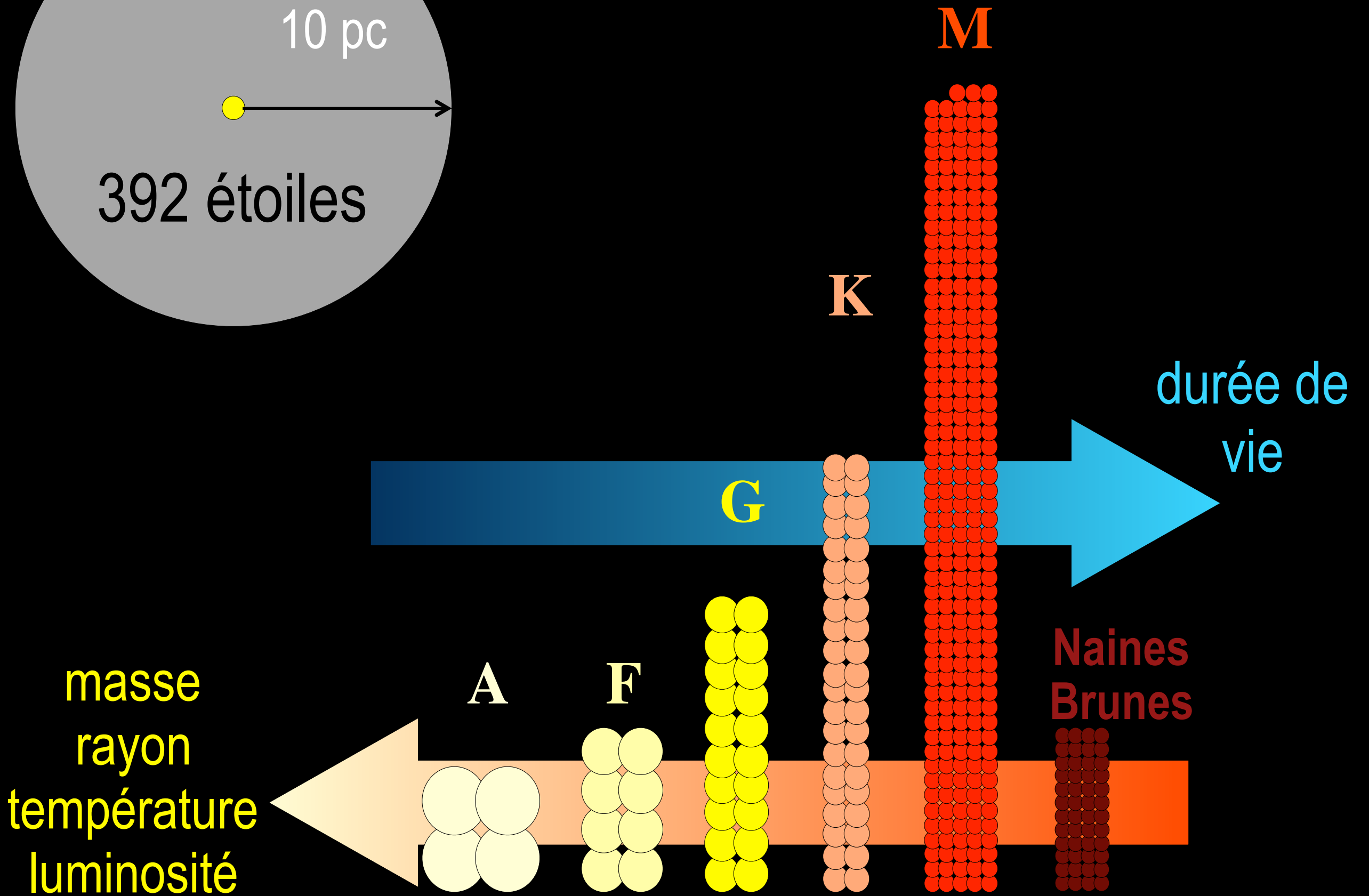
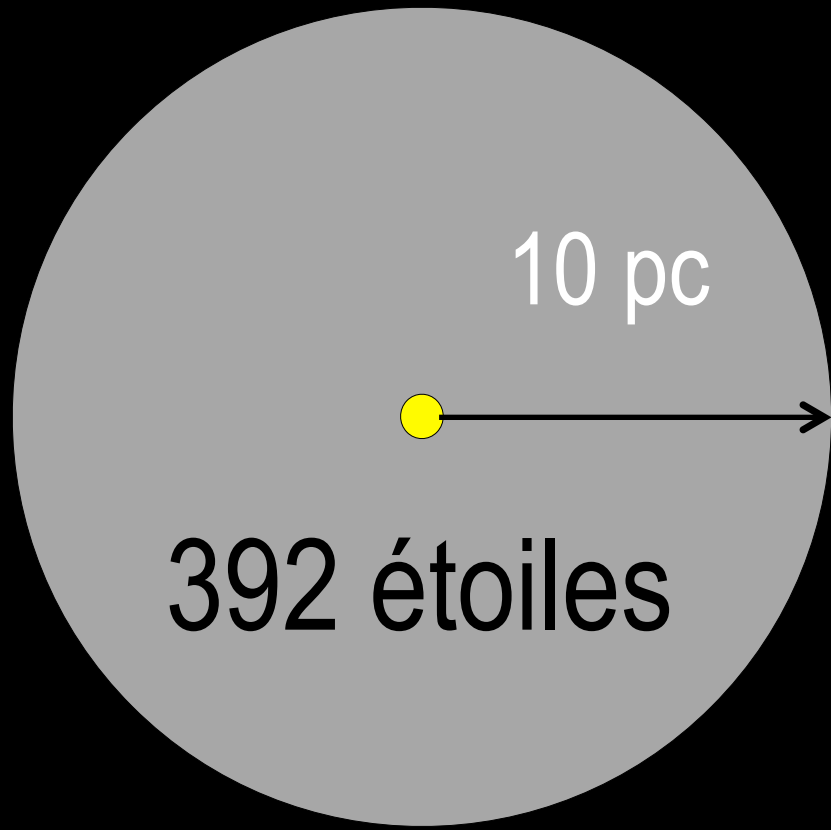








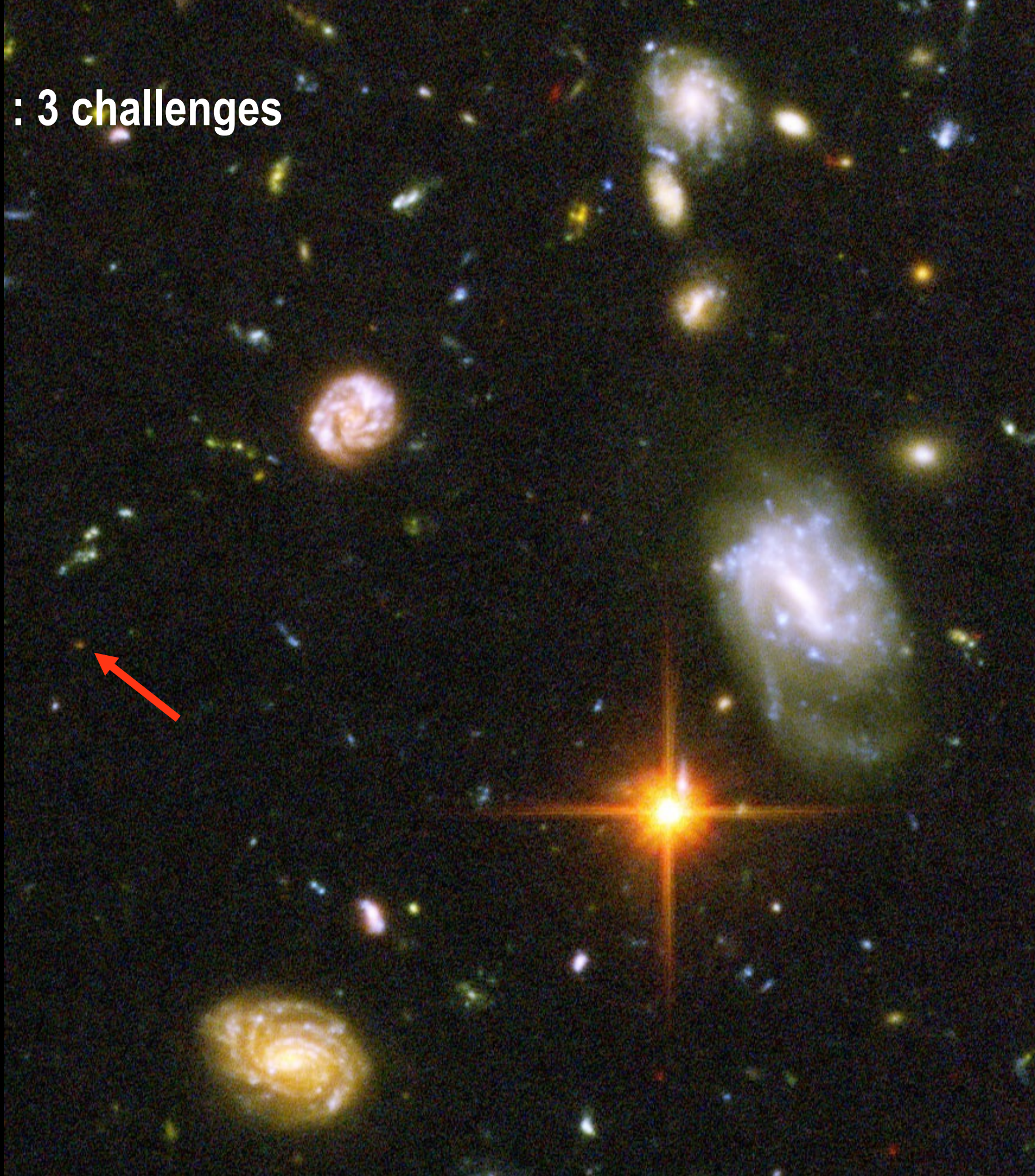






## «voir» une exoplanète : 3 challenges

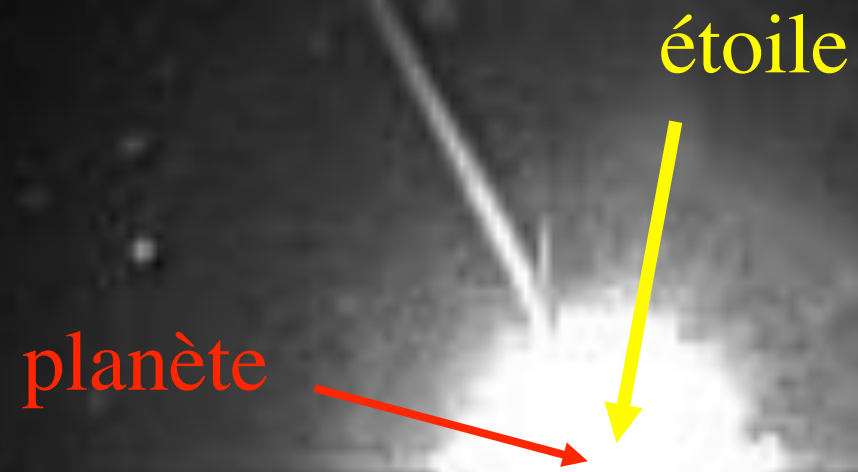
- la luminosité de la planète
- le contraste planète/étoile
- la résolution angulaire





## «voir» une exoplanète : 3 challenges

- la luminosité de la planète
- le contraste planète/étoile
- la résolution angulaire

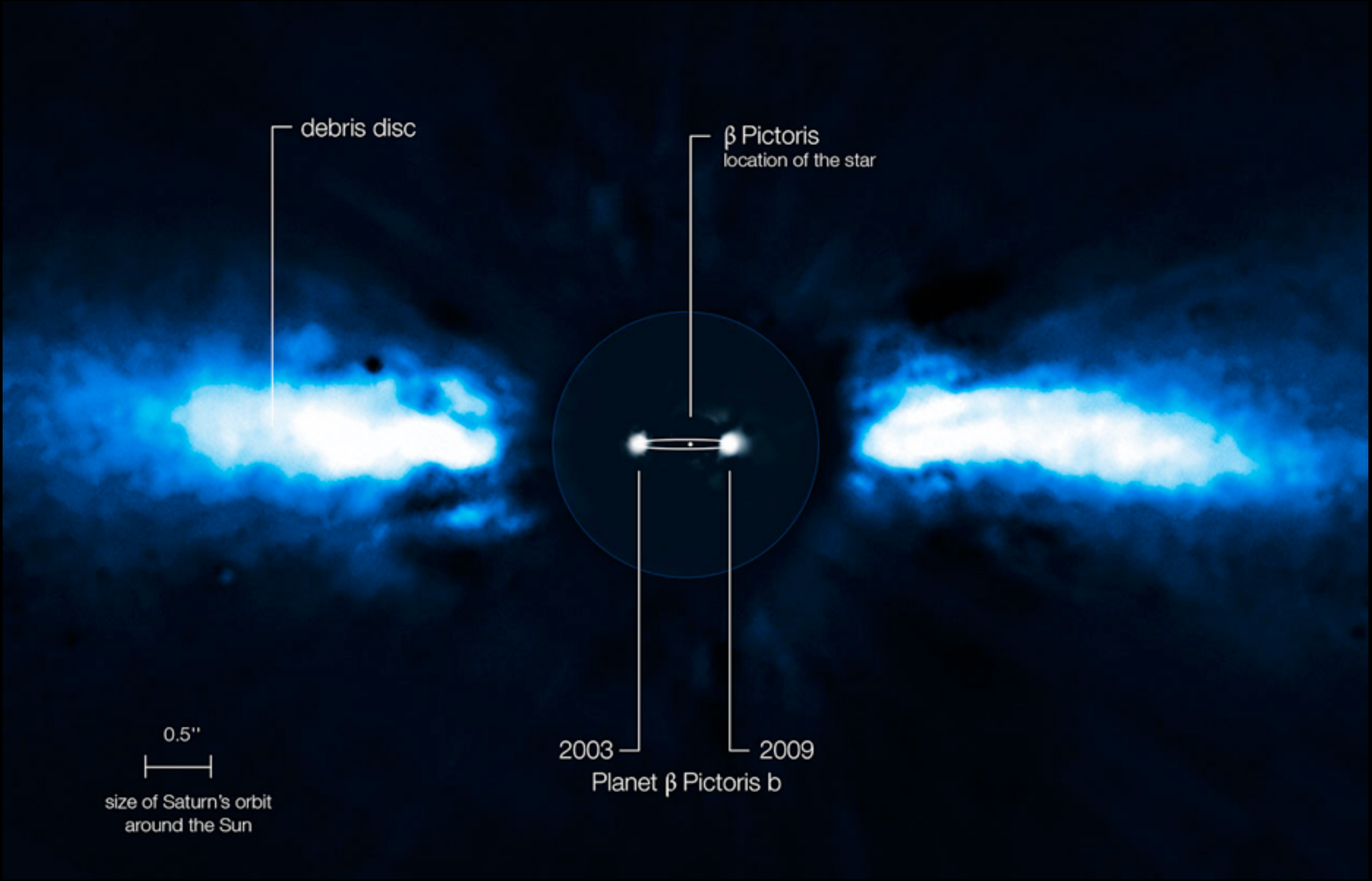












debris disc

$\beta$  Pictoris  
location of the star

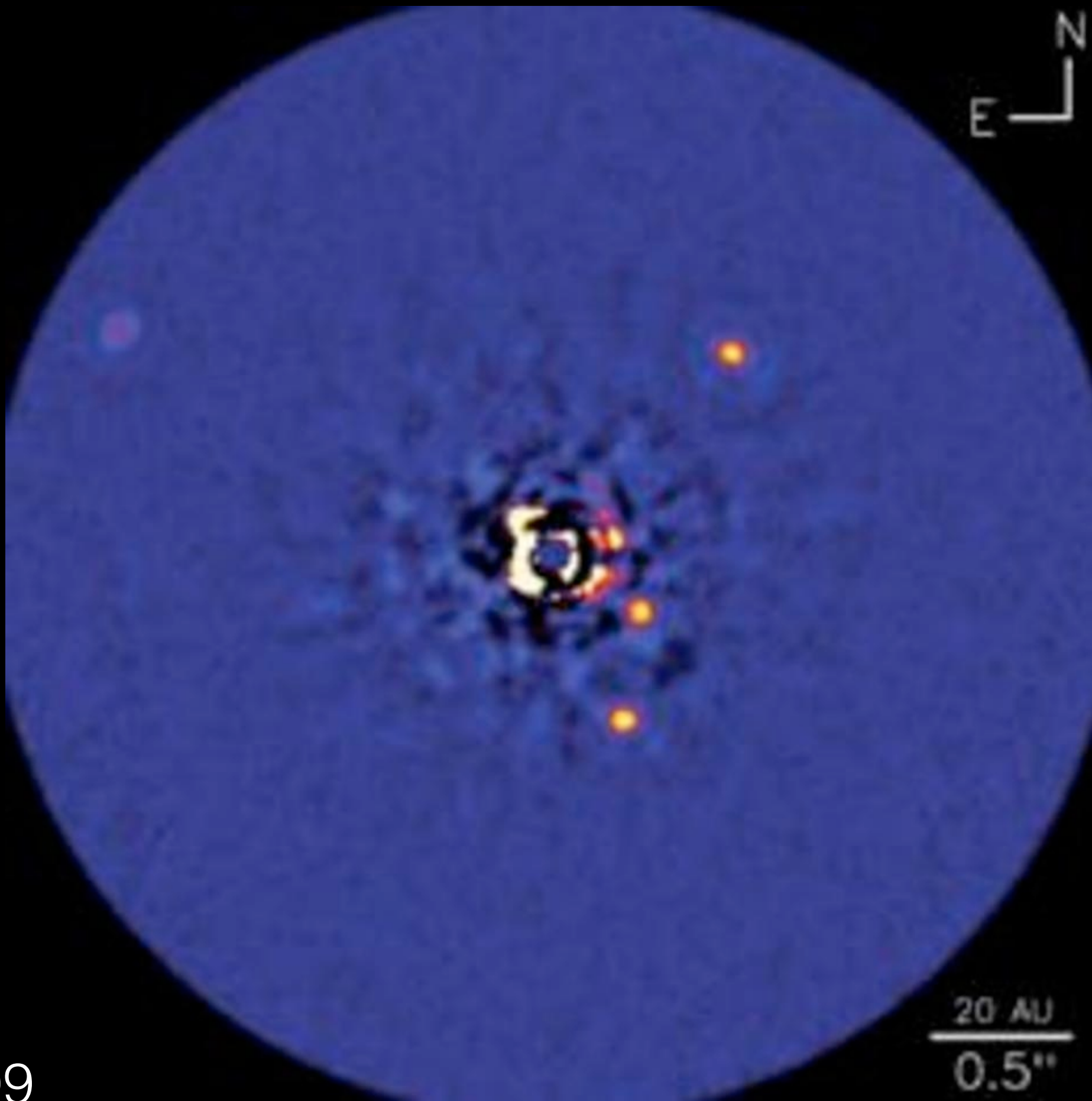
0.5"

size of Saturn's orbit  
around the Sun

2003

2009

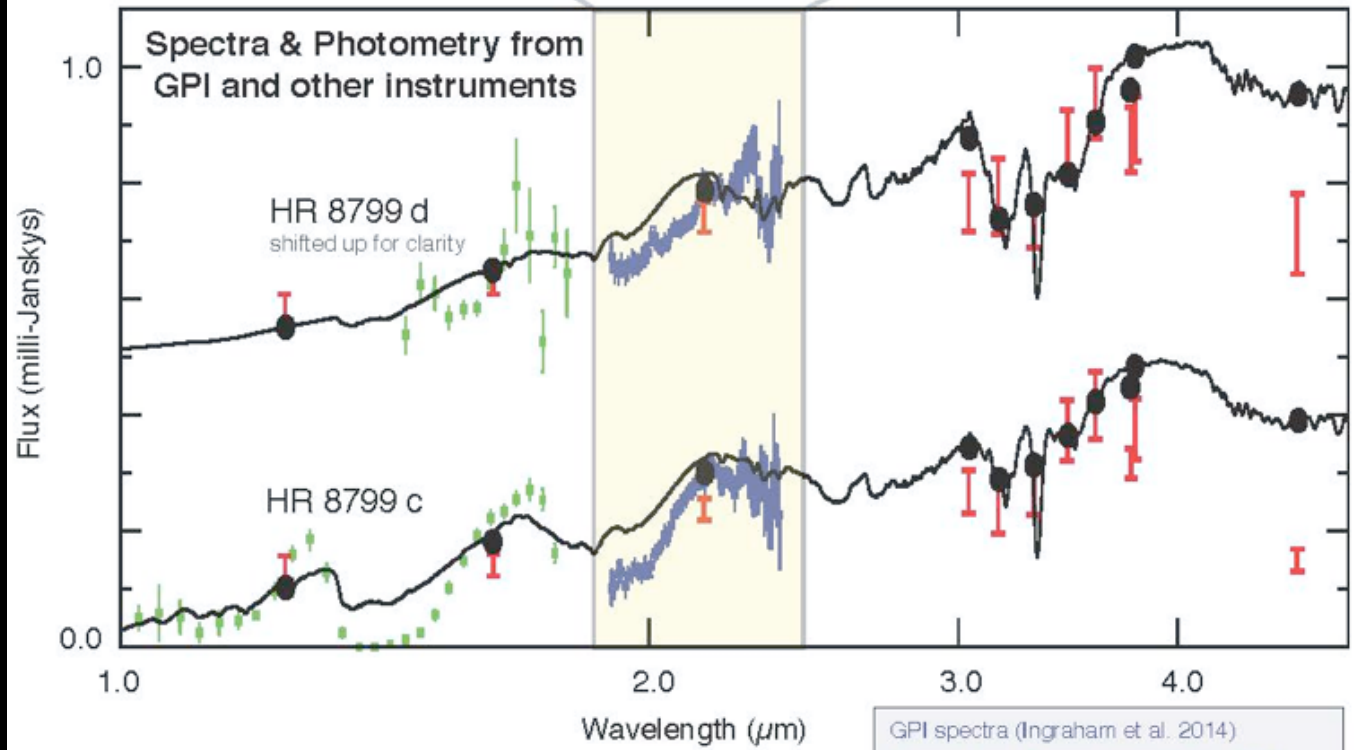
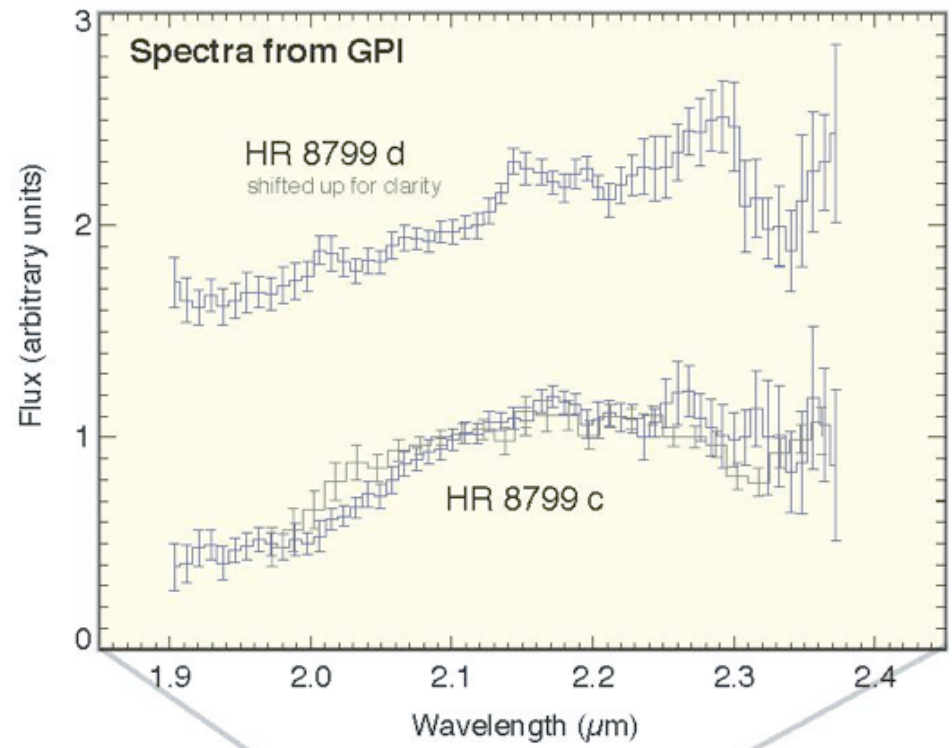
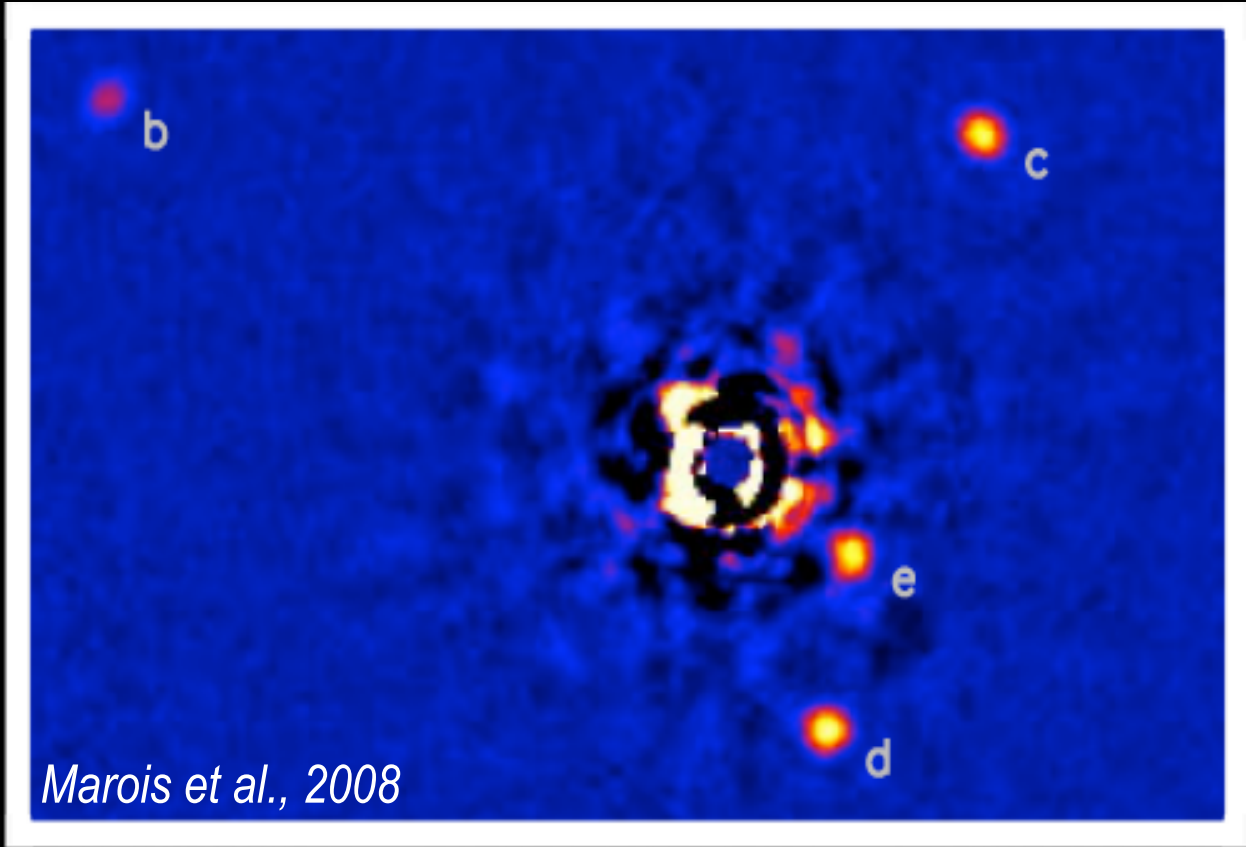
Planet  $\beta$  Pictoris b



HR 8799

20 AU  
0.5''





GPI spectra (Ingraham et al. 2014)  
 Spectra from Oppenheimer et al. (2013)  
 Photometry compiled in Skemer et al. 2014  
 Cloudy atmosphere models

140 м

120 м

100 м

80 м

60 м

40 м

20 м



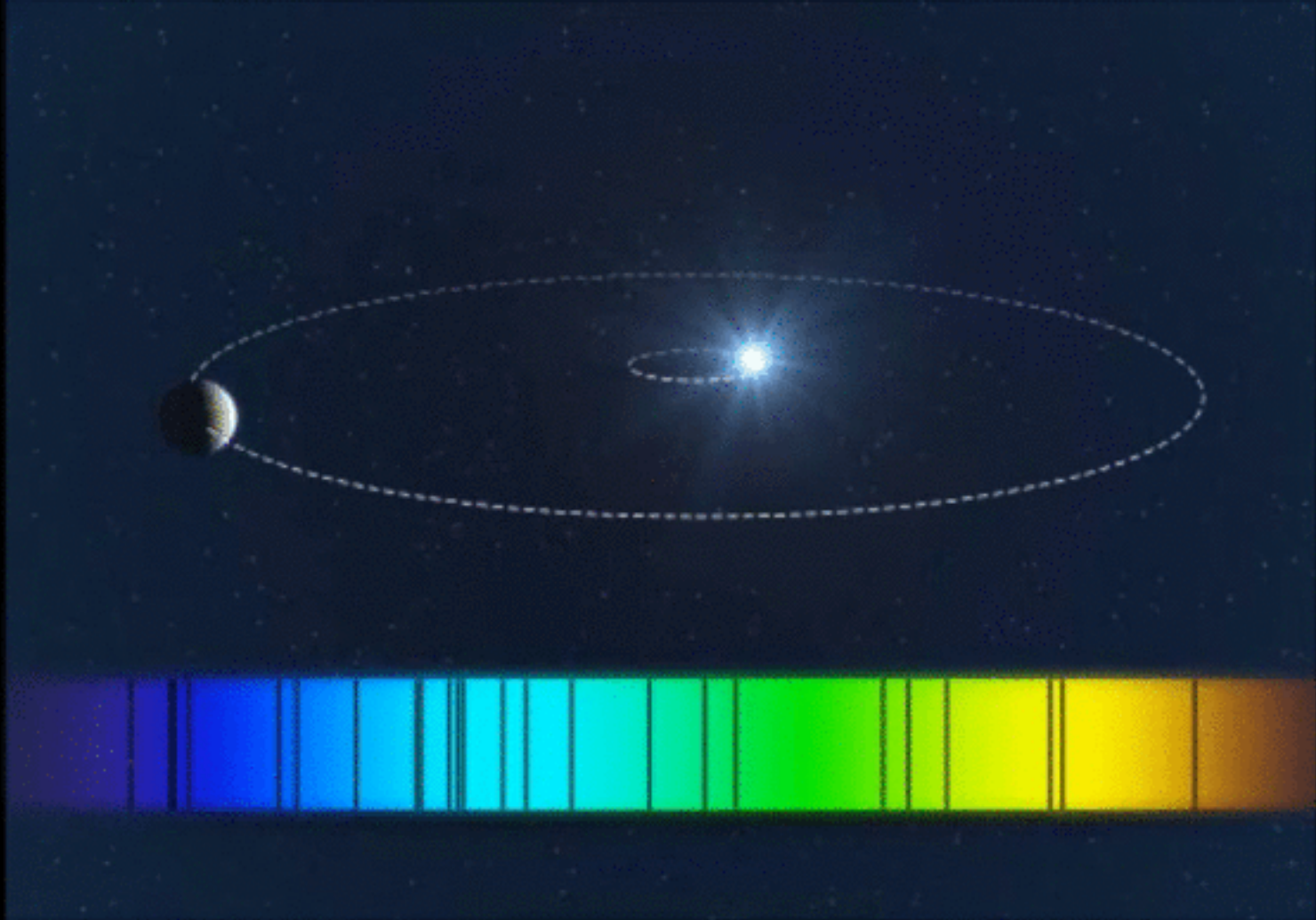








Credit: Marcy



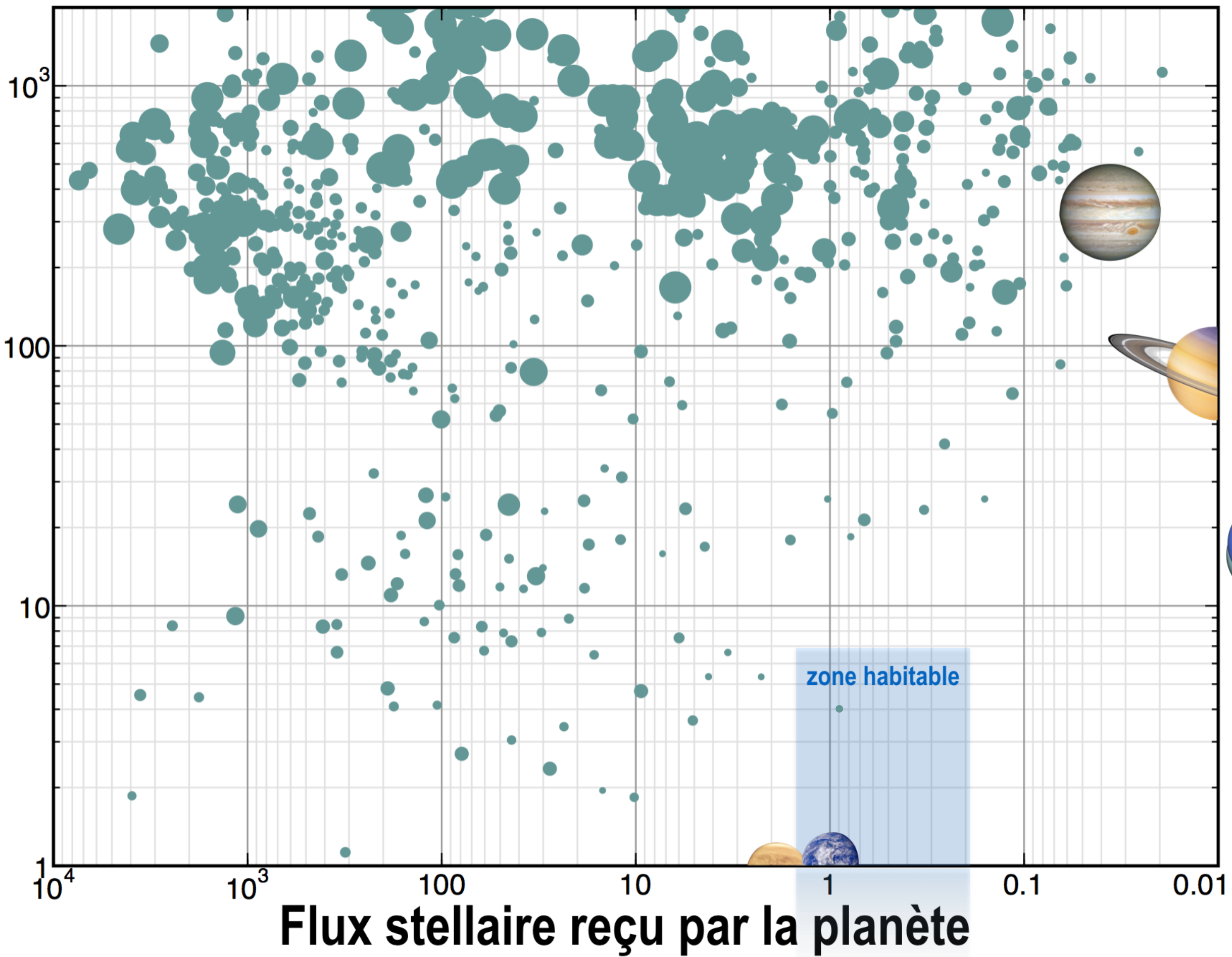




Telescope de 3.6m a l'ESO, Chile

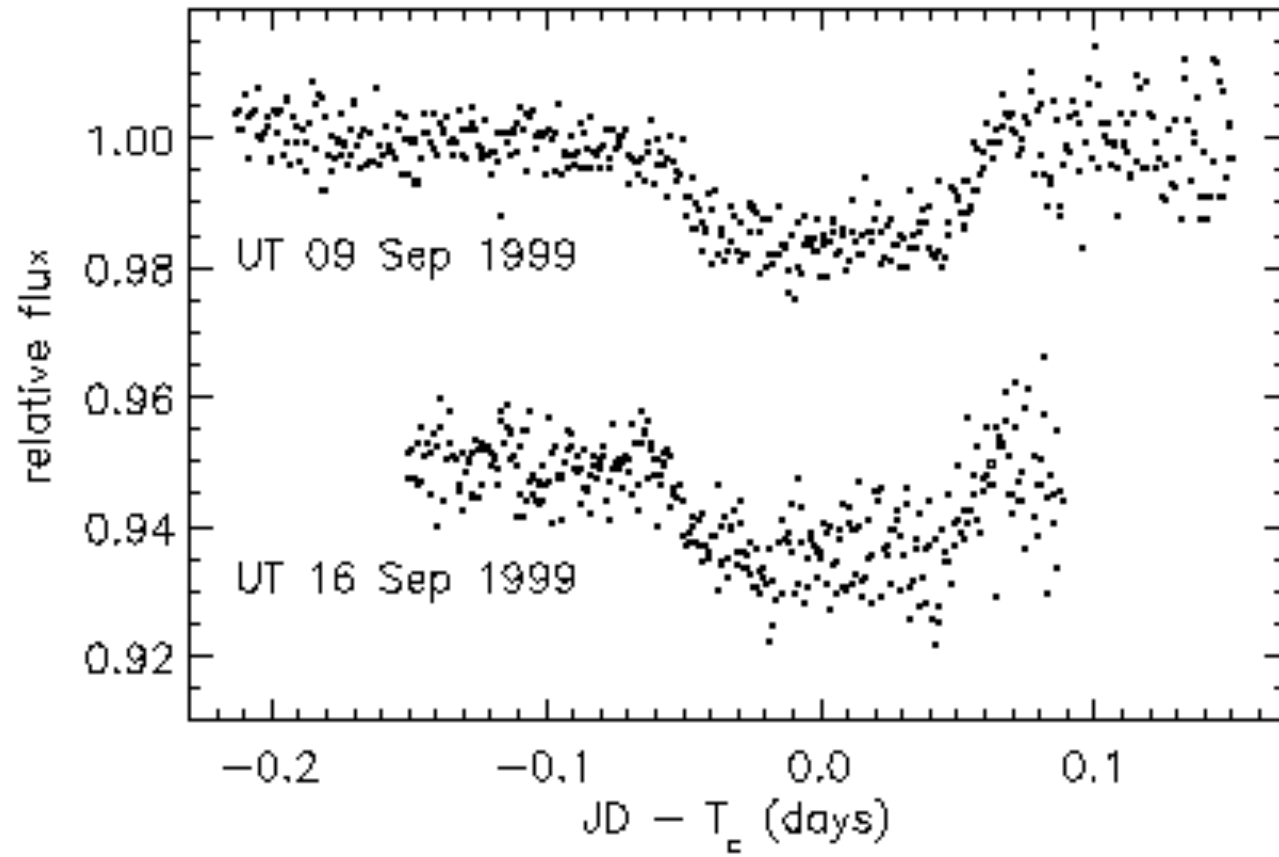


**Masse de la planète ( $M_{\text{Terre}}$ )**

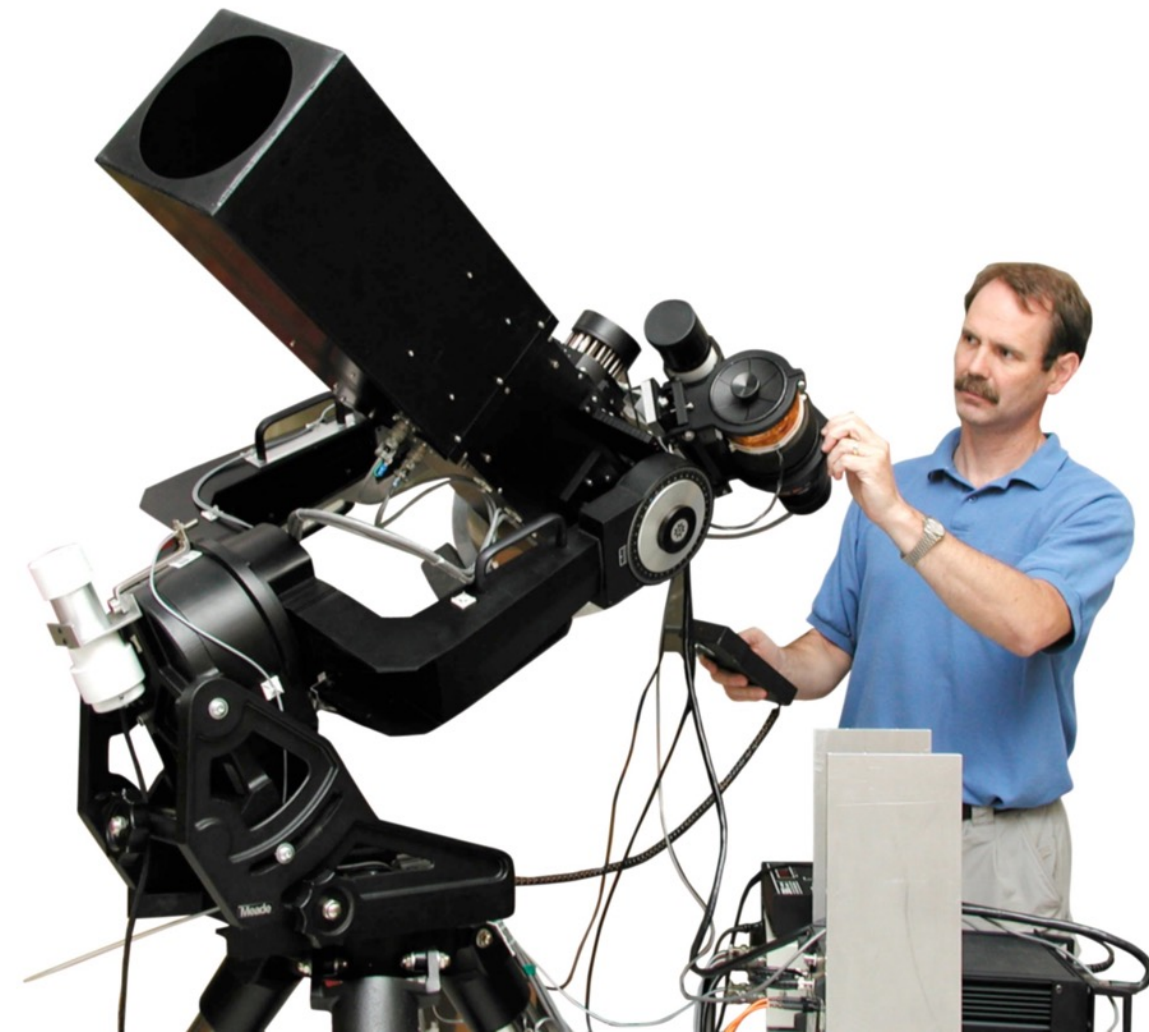


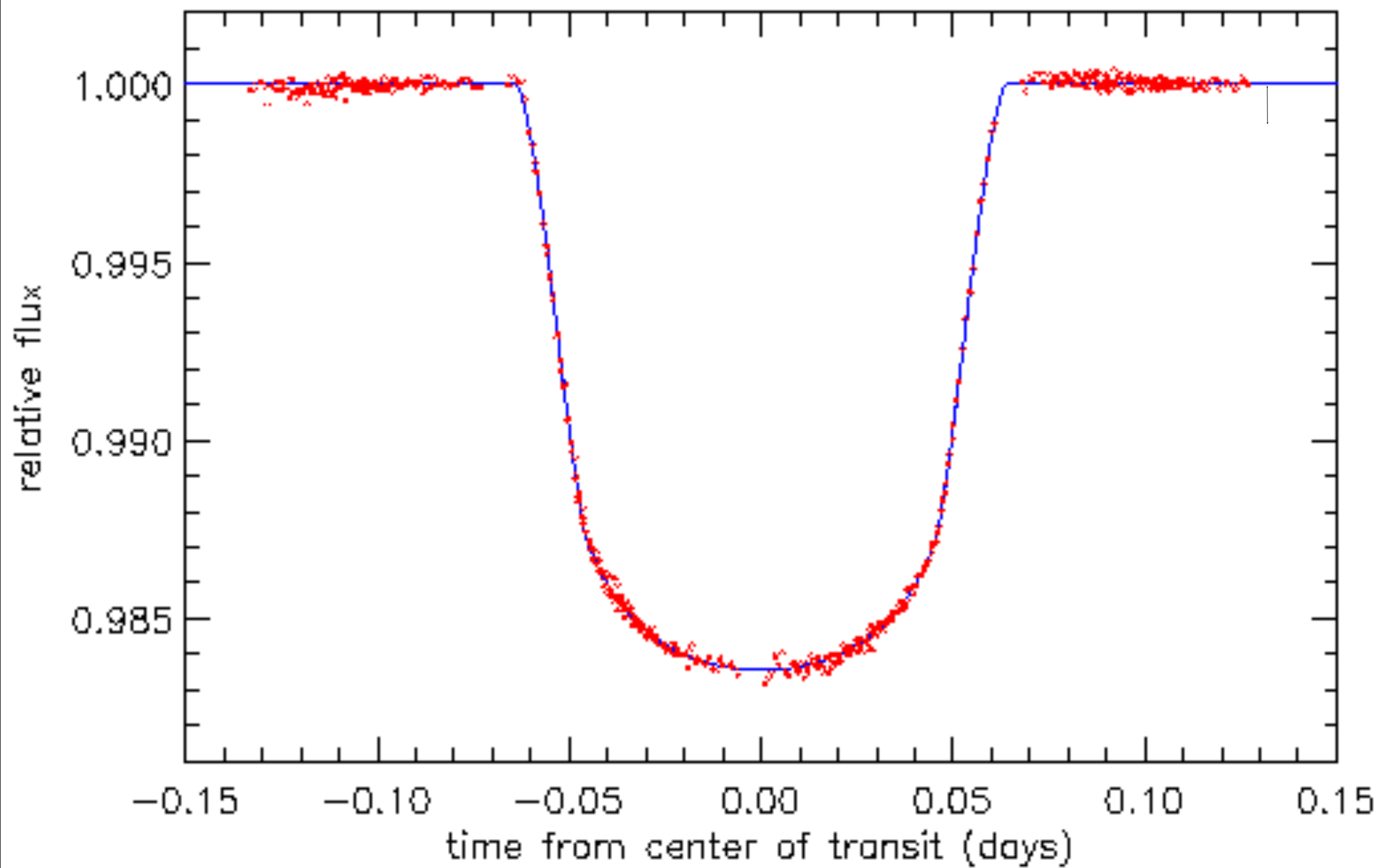


# 1999 -- Premier transit



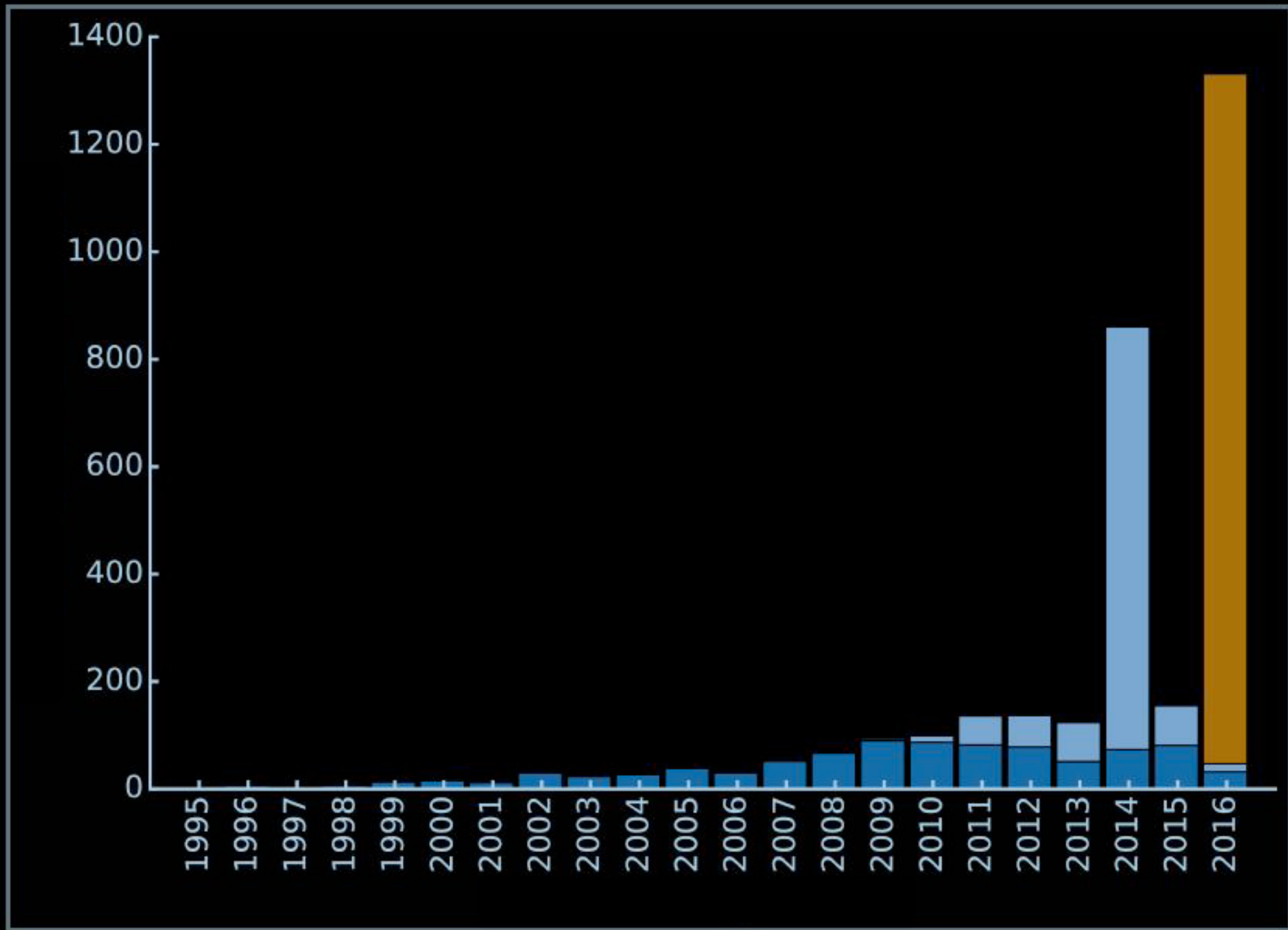
HD 209458



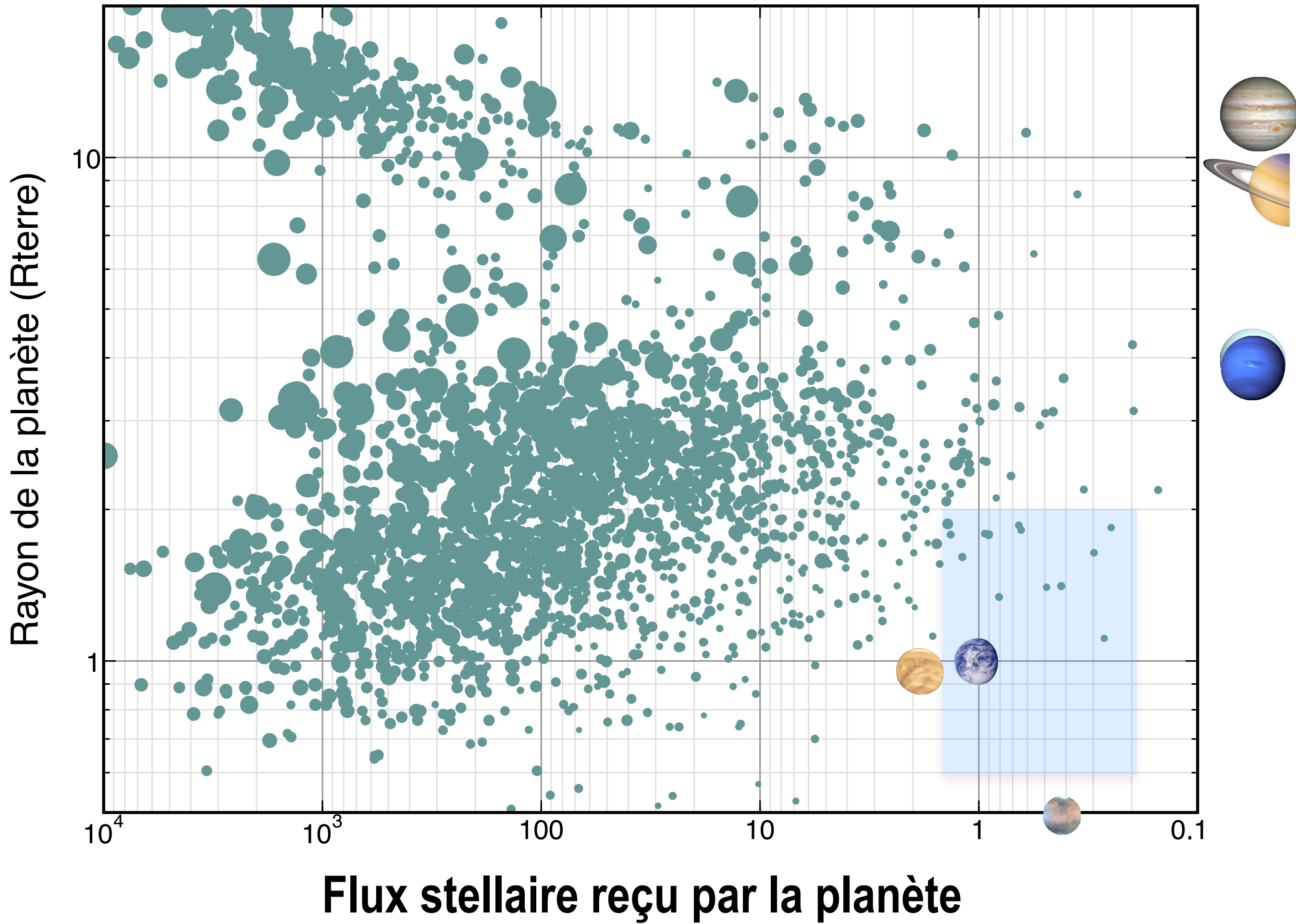


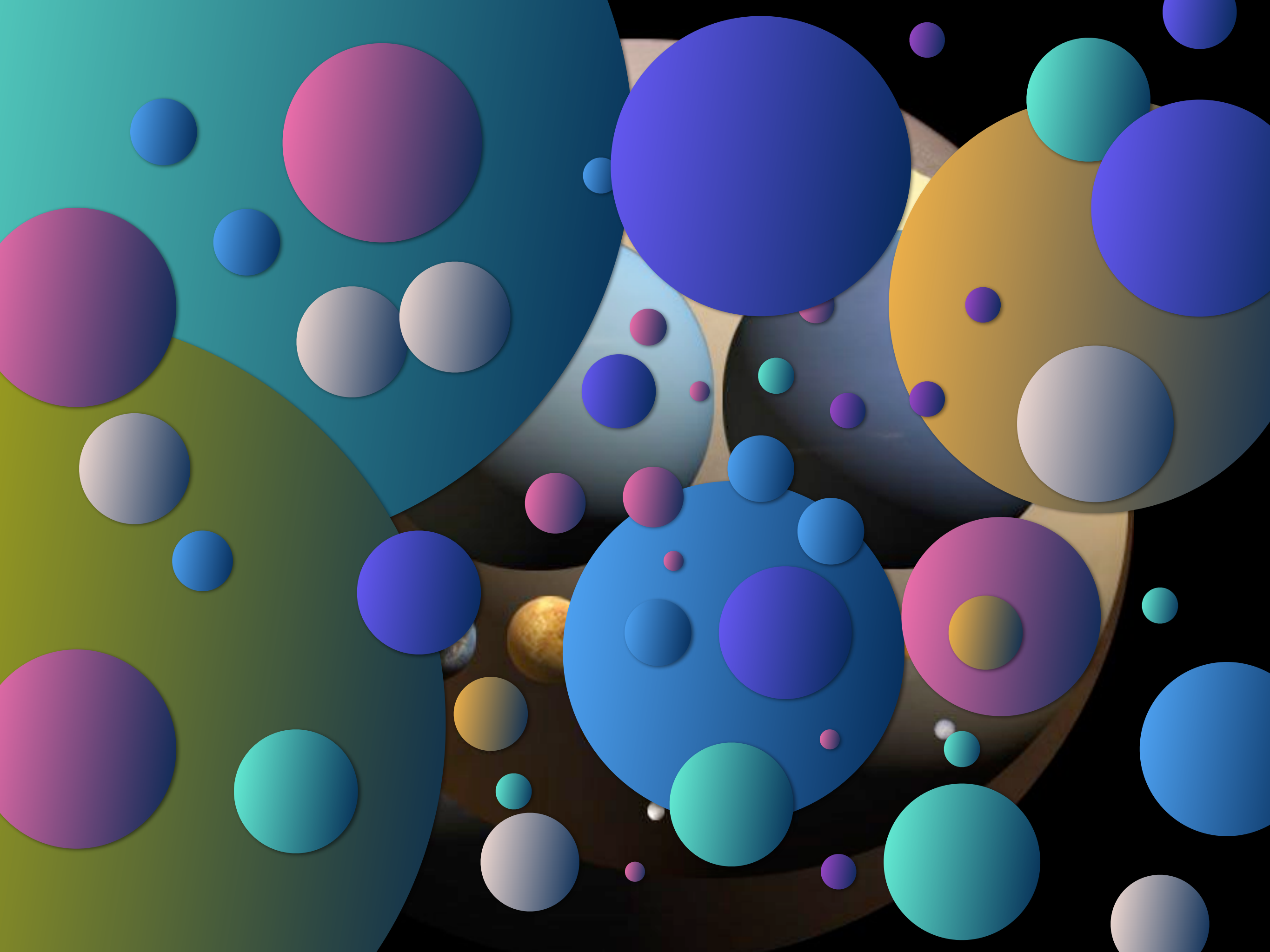






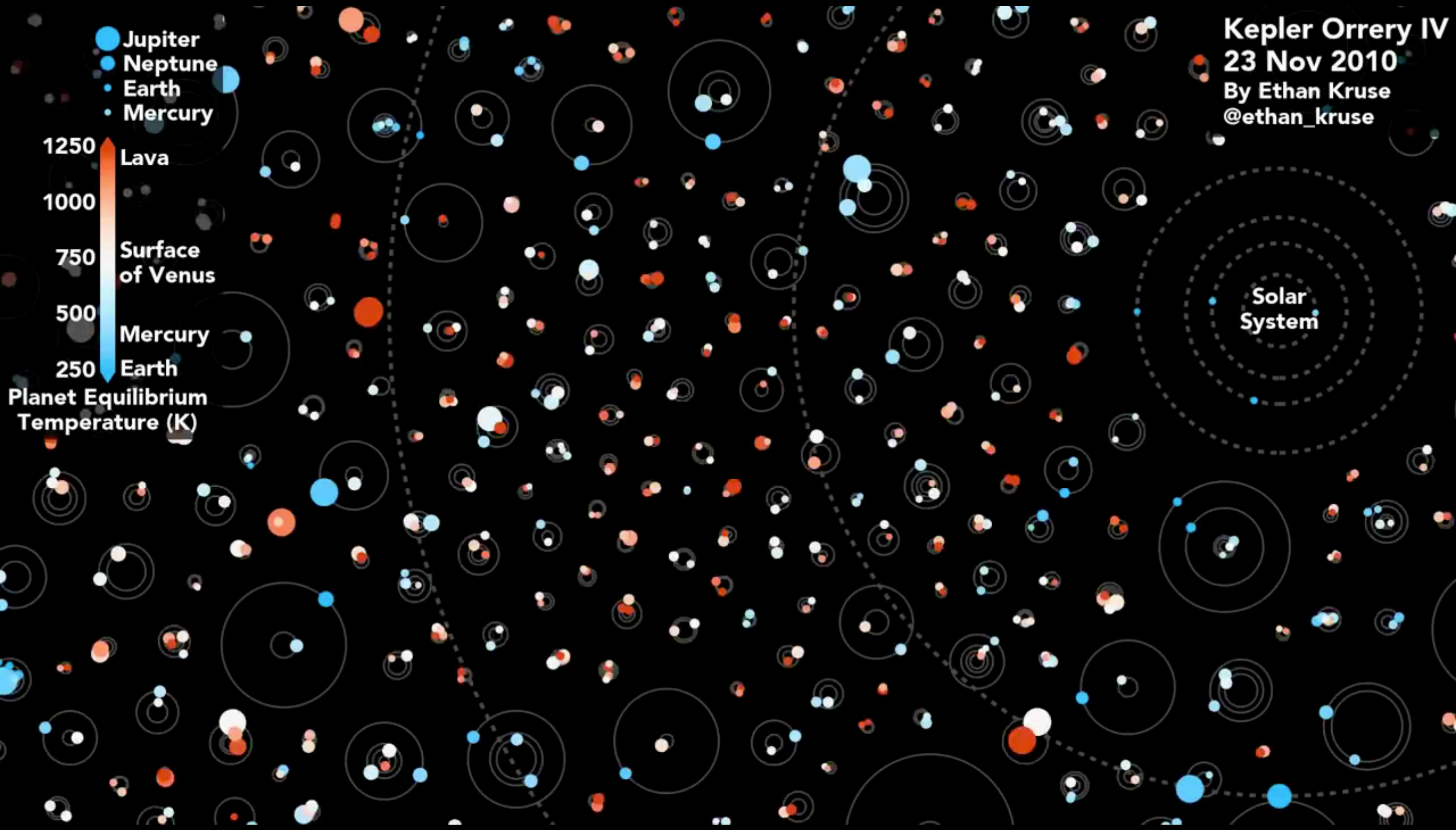








Kepler Orrery IV  
23 Nov 2010  
By Ethan Kruse  
@ethan\_kruse

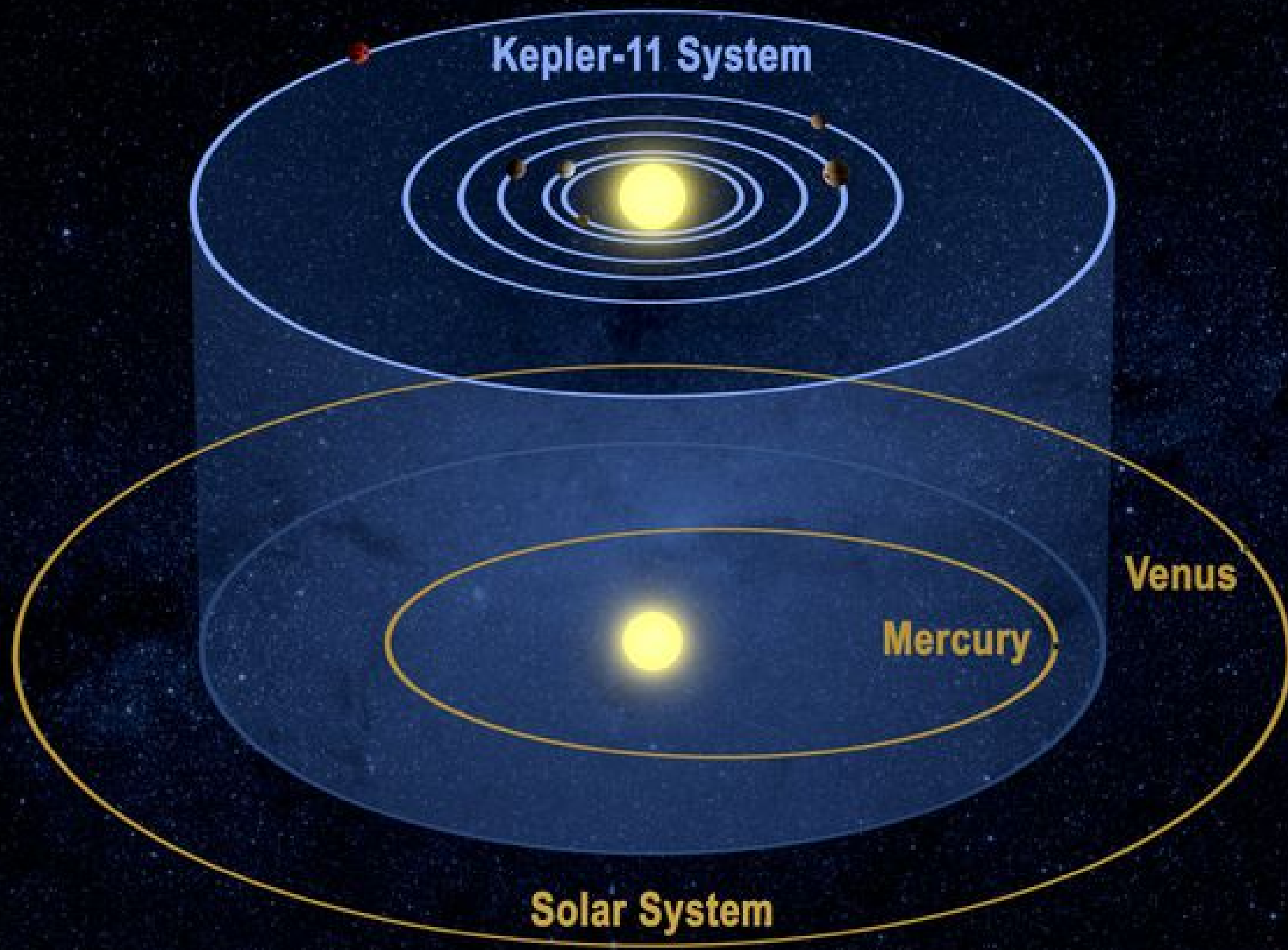


● Jupiter  
● Neptune  
● Earth  
● Mercury

1250  
1000  
750  
500  
250

Lava  
Surface of Venus  
Mercury  
Earth

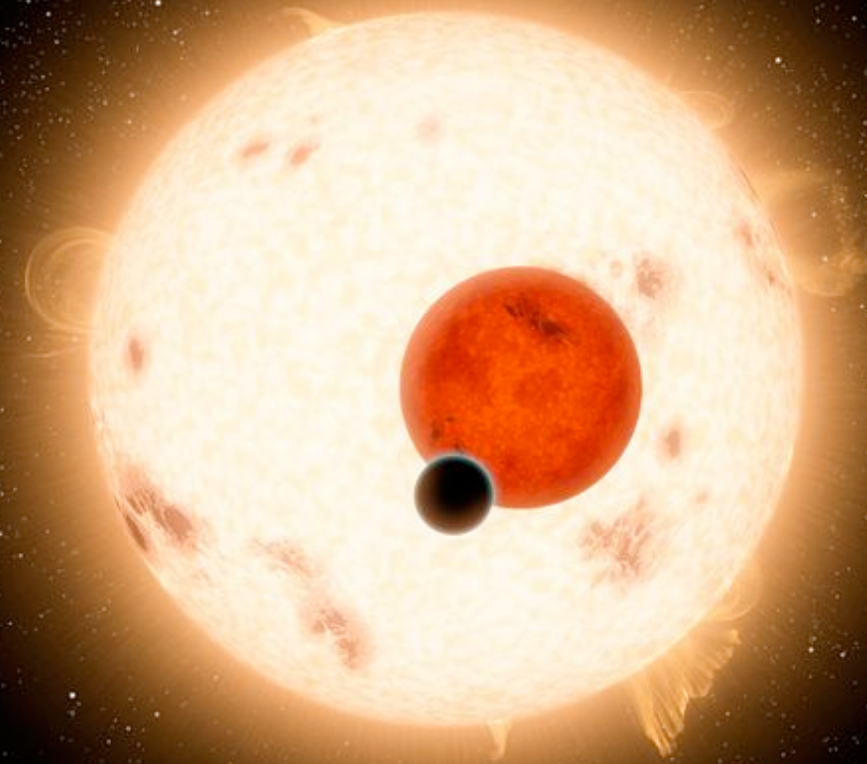
Planet Equilibrium Temperature (K)

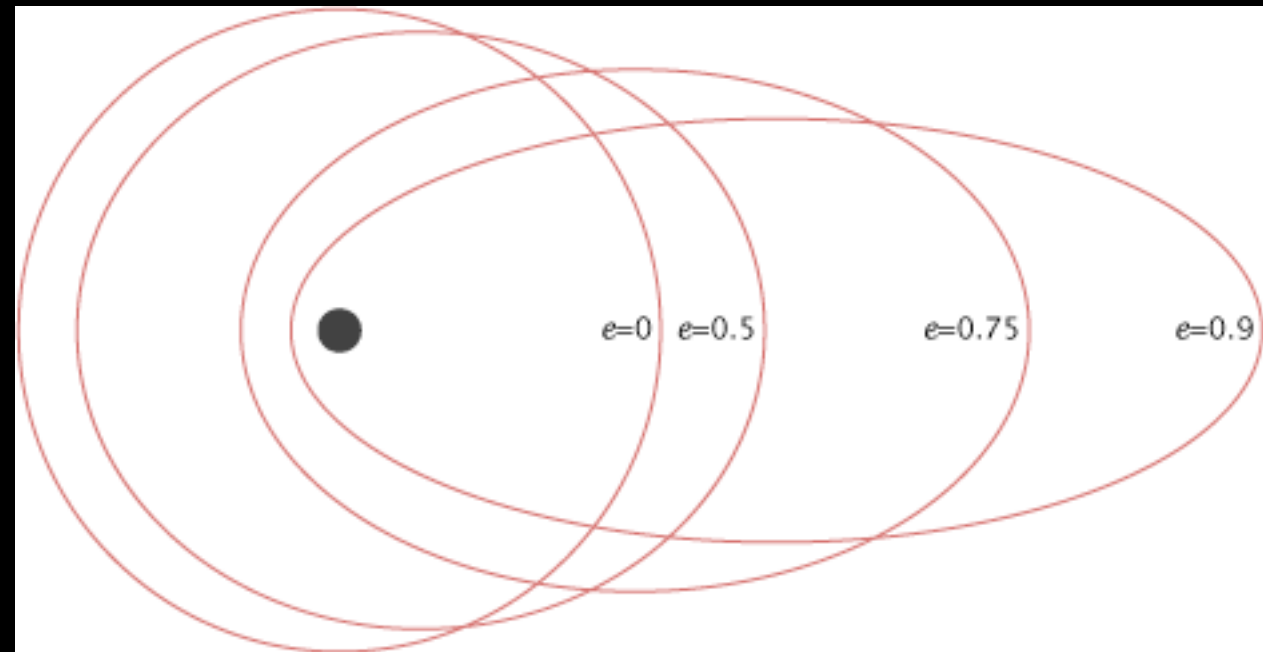
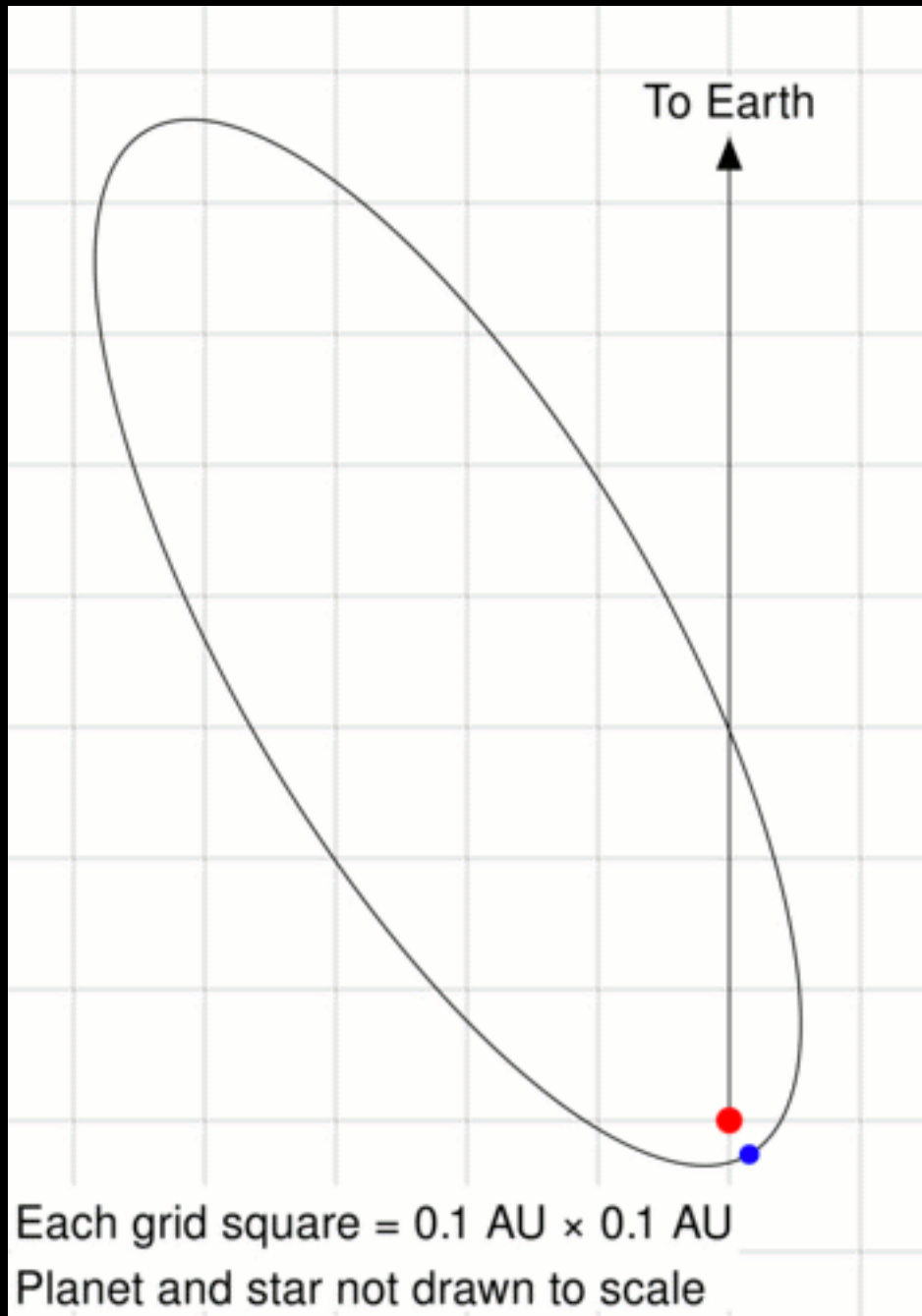




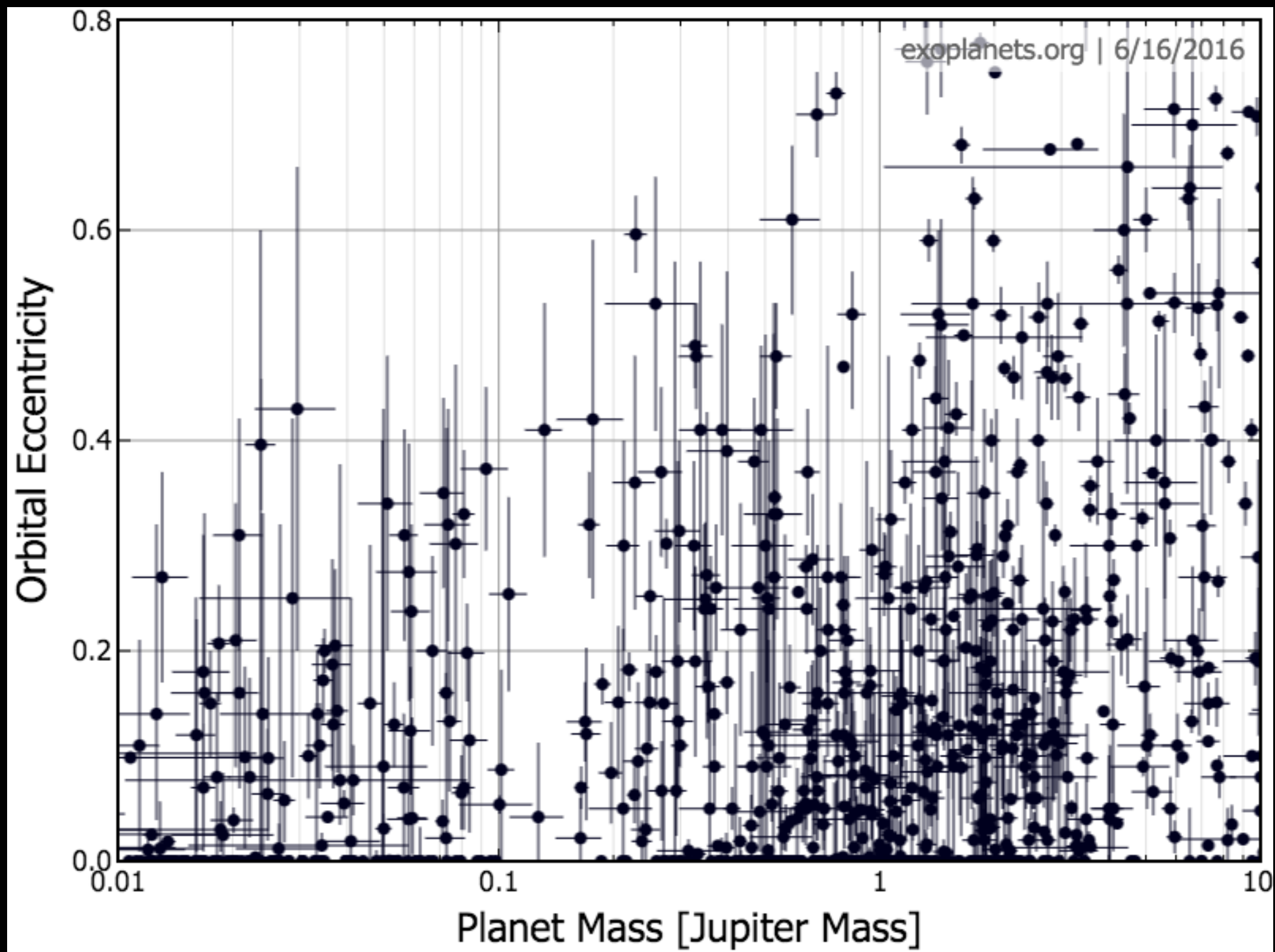
# Kepler-16b

- Planète qui orbite une étoile binaire serrée
- Masse planétaire  $\sim$  Saturne

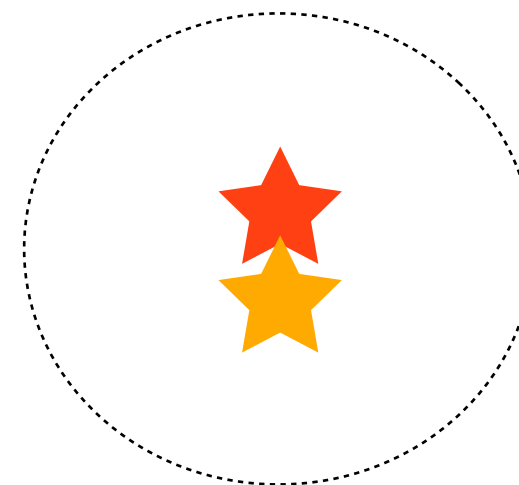
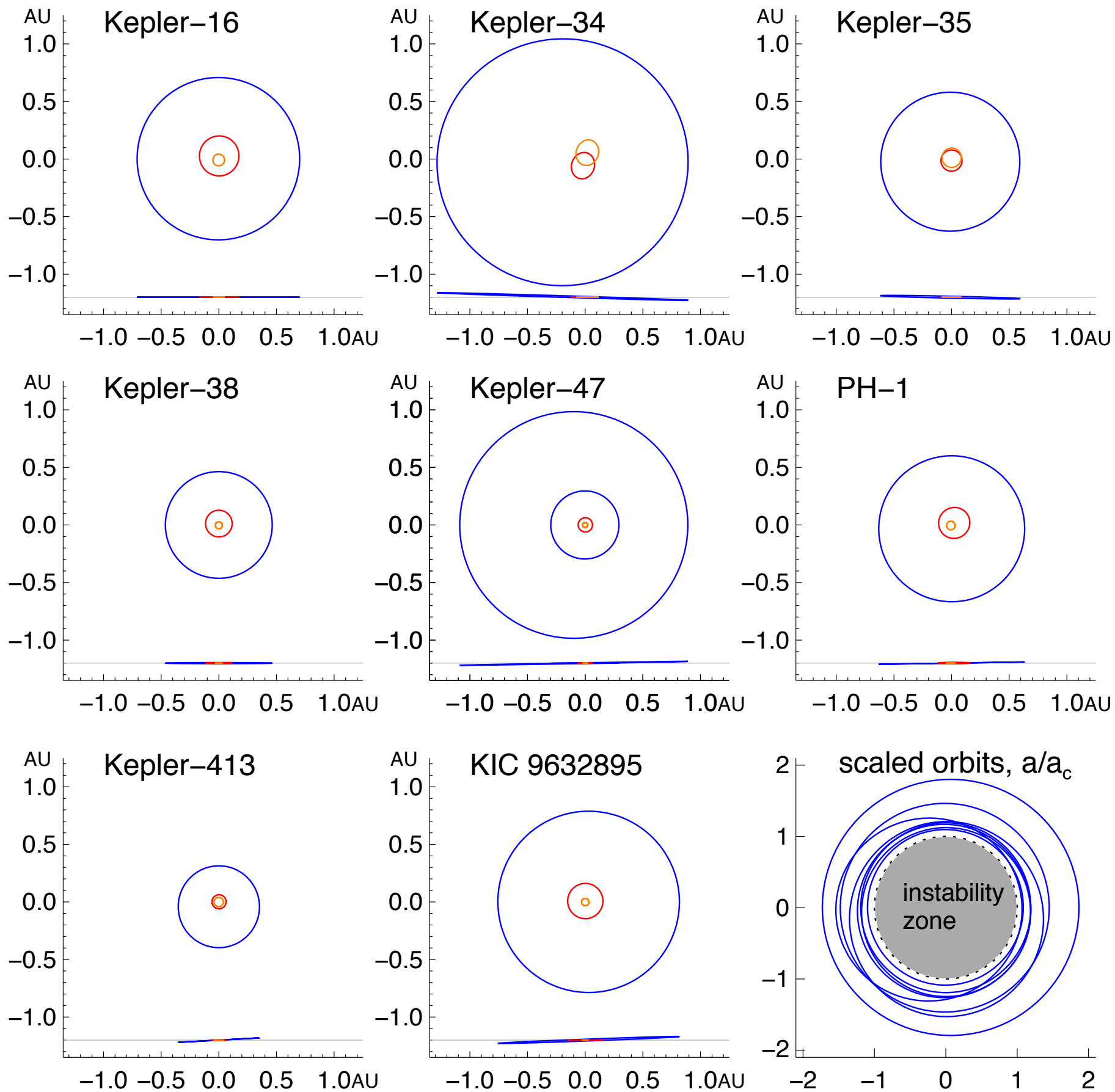






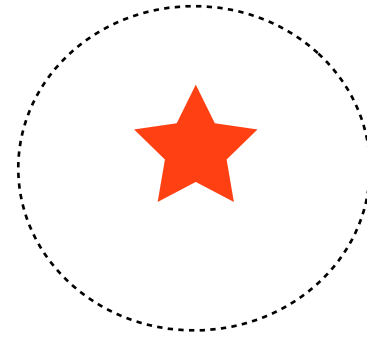


# Systemes circumbinaires (type p)





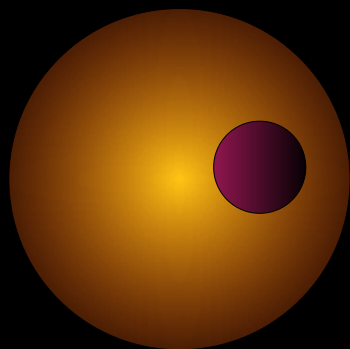
## type S



~70 systèmes connus  
mais seulement 5 avec moins de 50 UA entre les deux étoiles

# GJ436 b

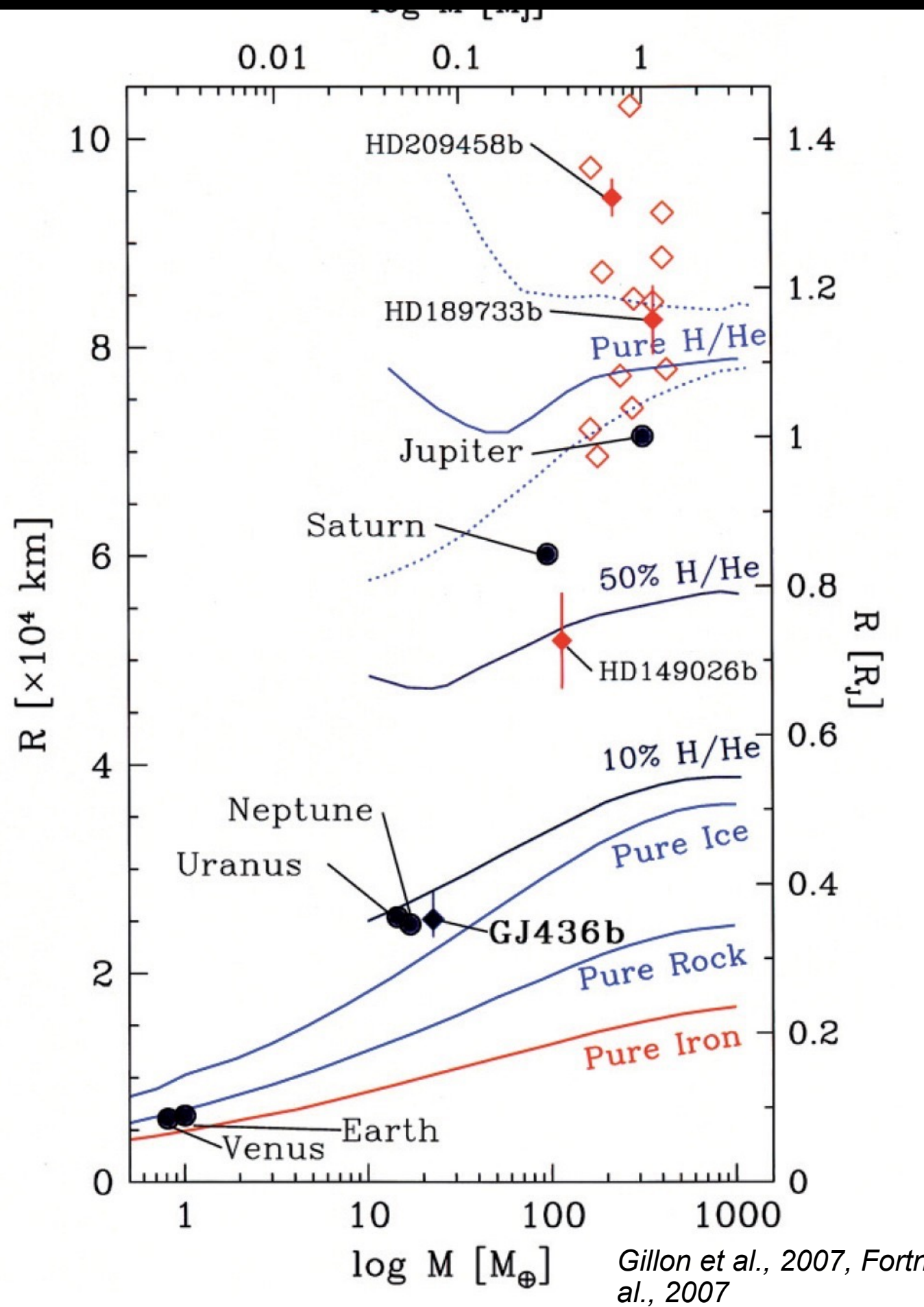
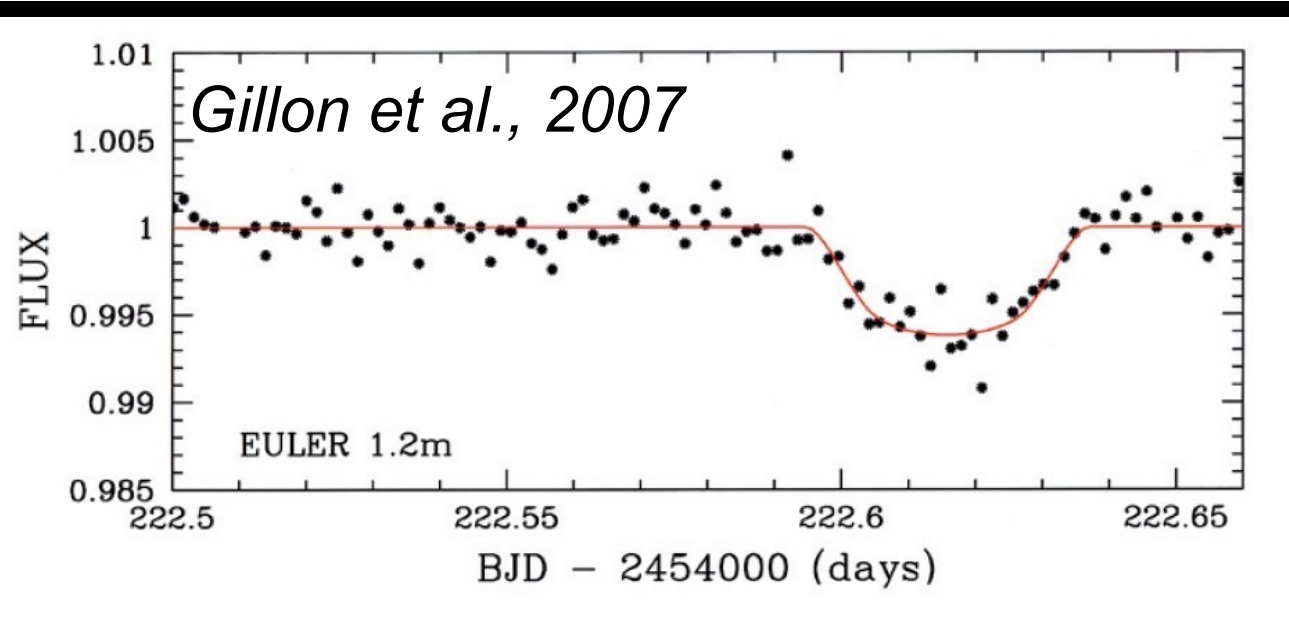
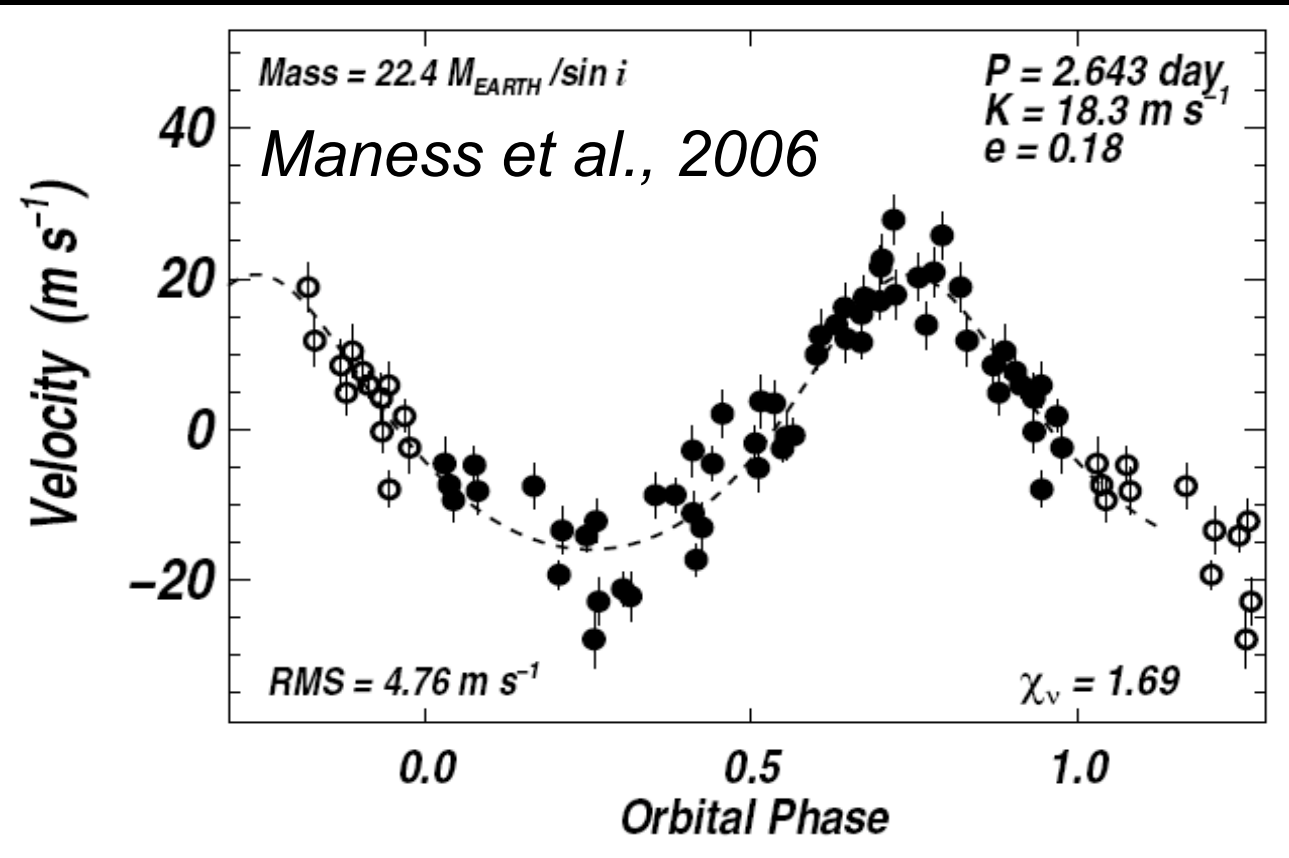
0.45  $M_{\text{Sun}}$



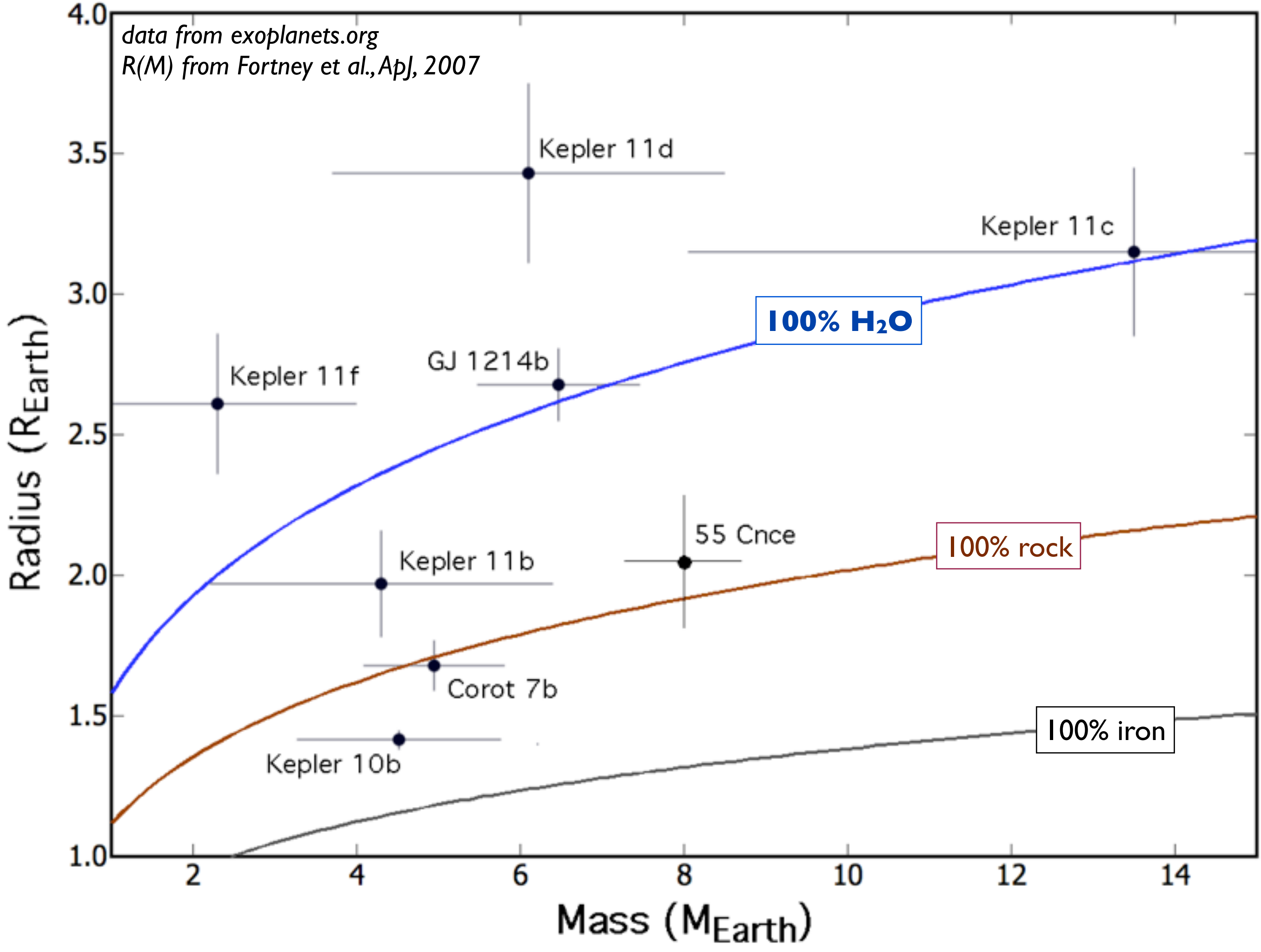
22  $M_{\text{Earth}}$

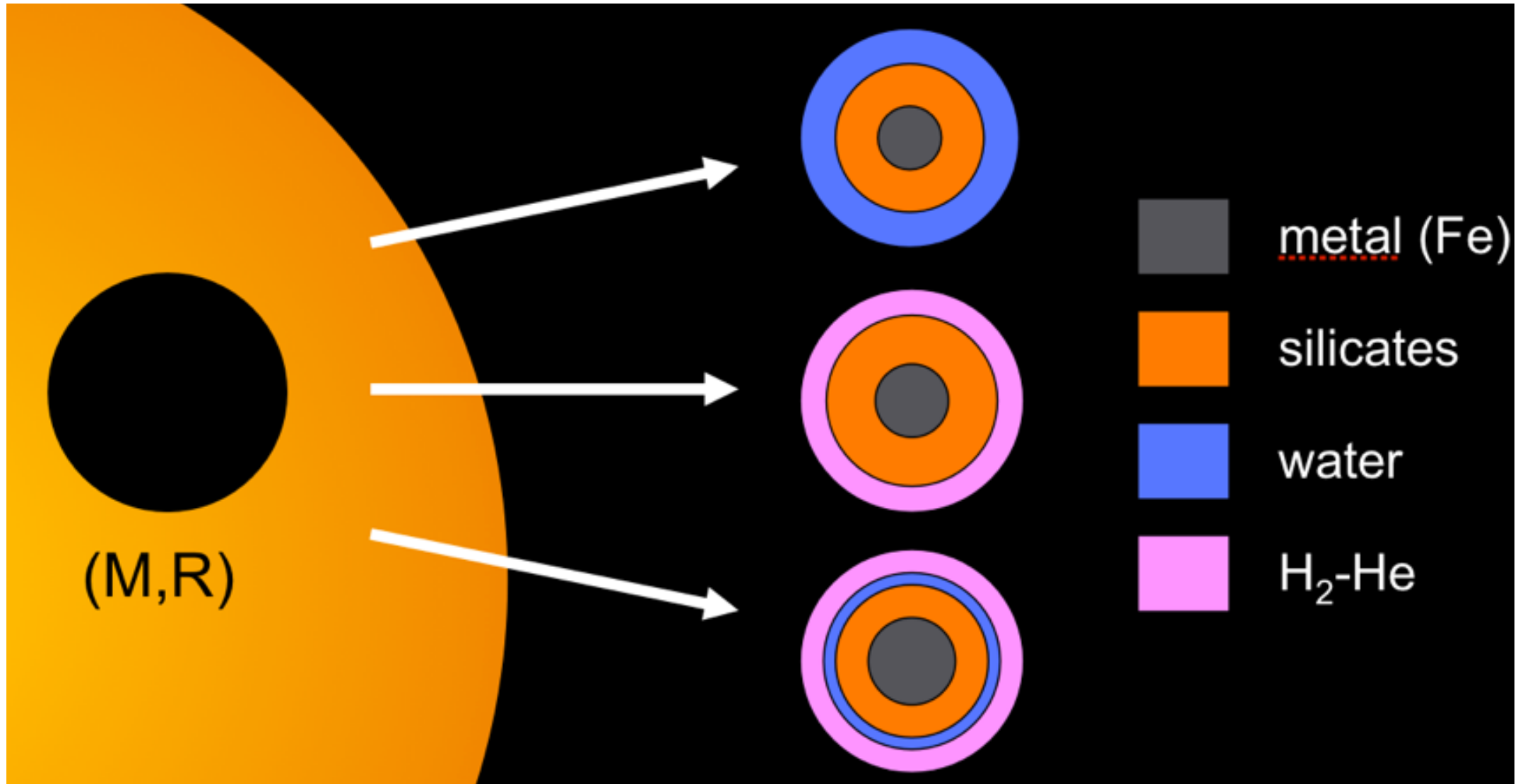
$\sim 1 R_{\text{Nept}}$

0.029 AU

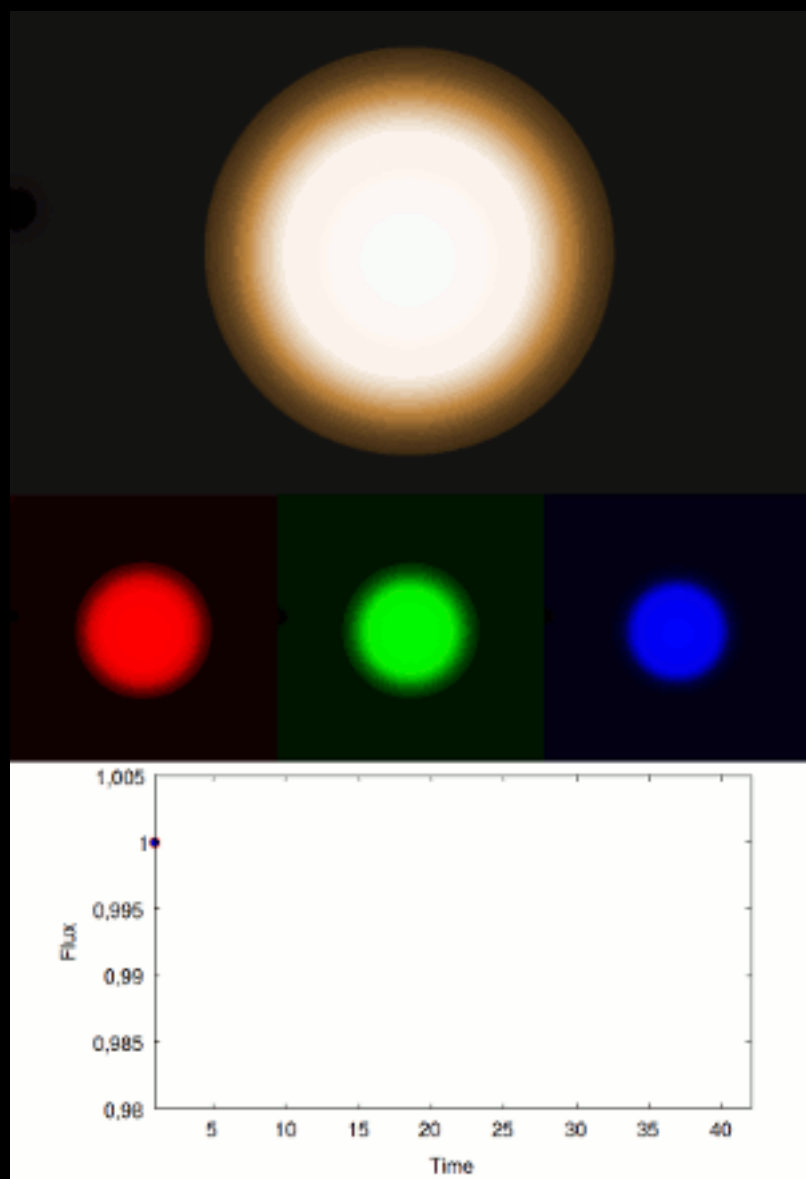








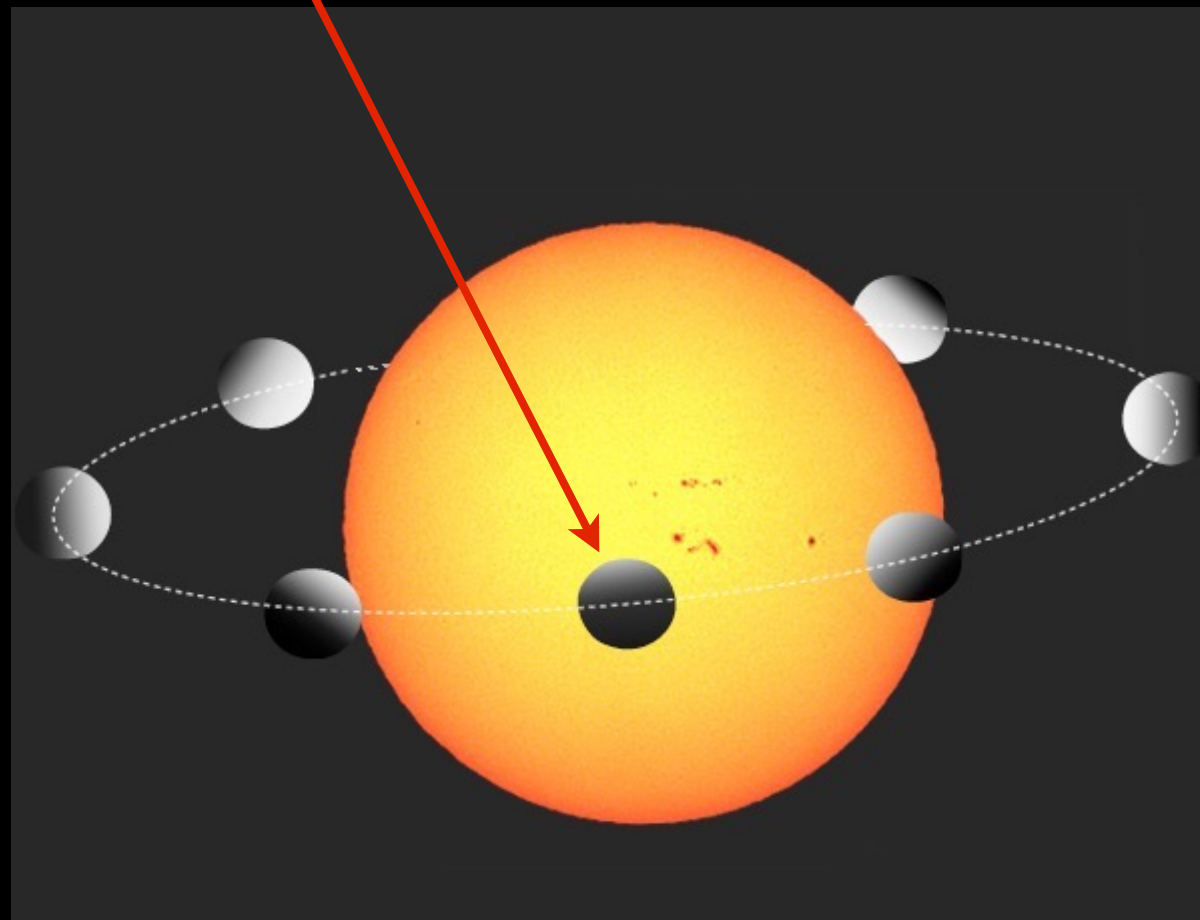
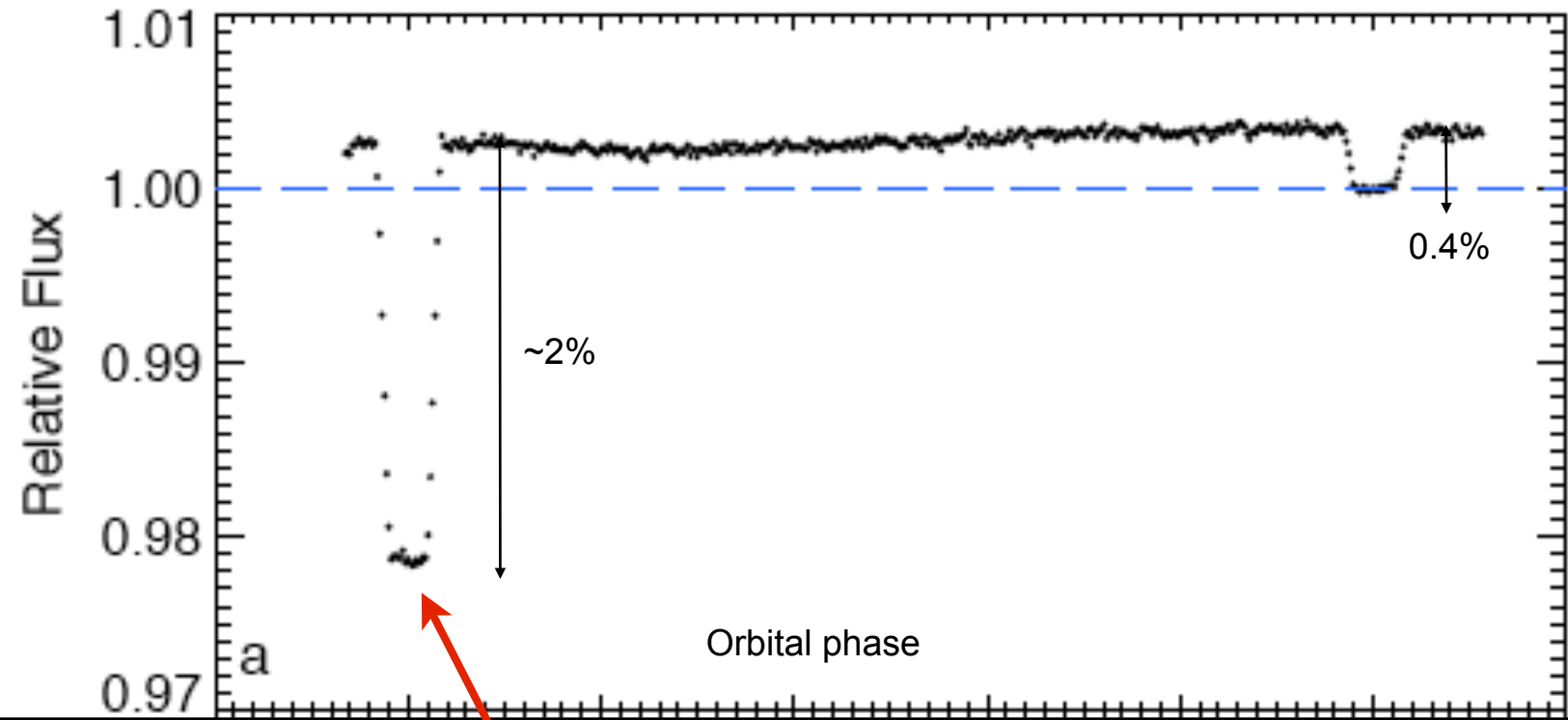




HD189733

8 microns

*Knutson et al.,  
2008*



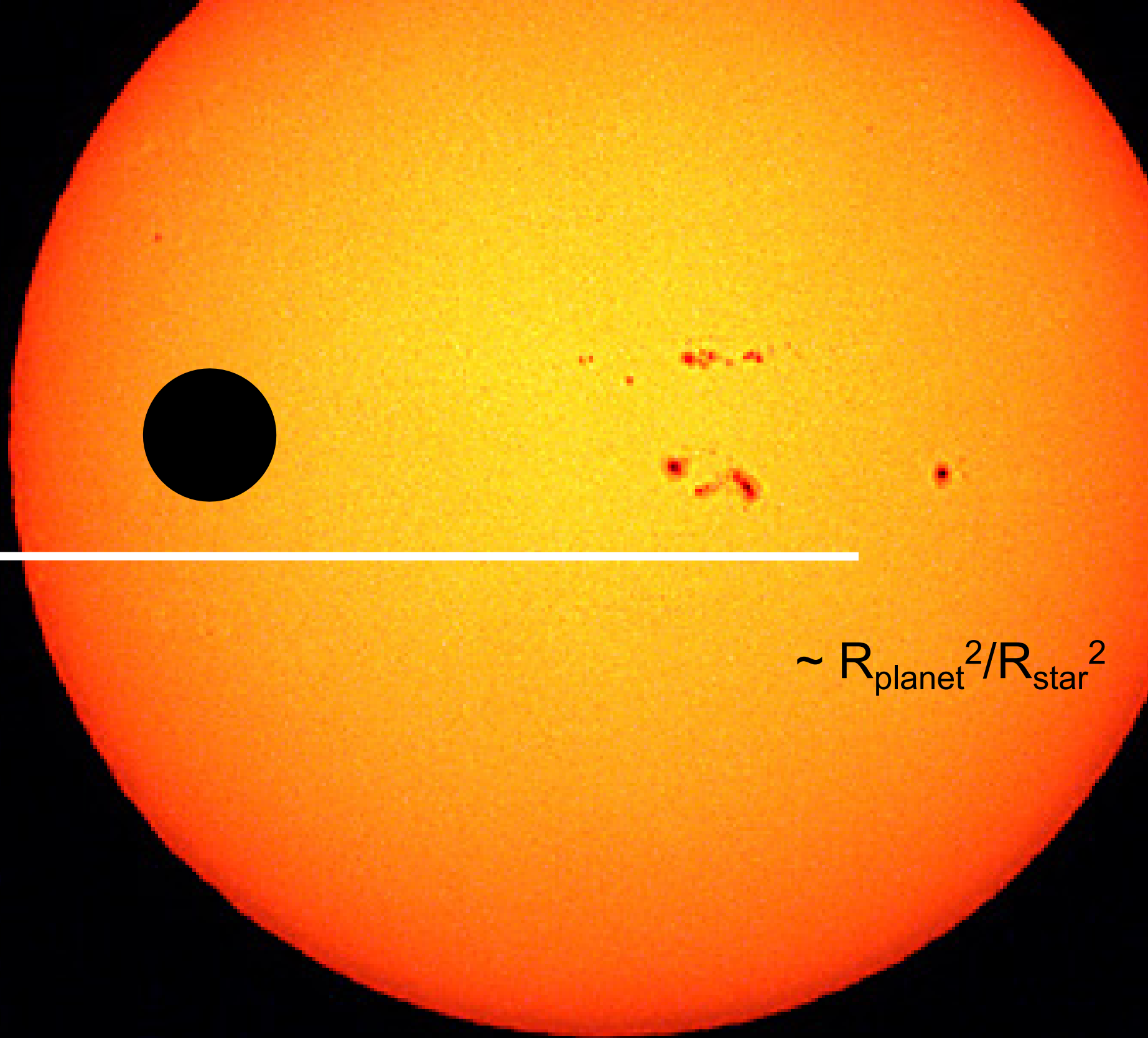


Star flux

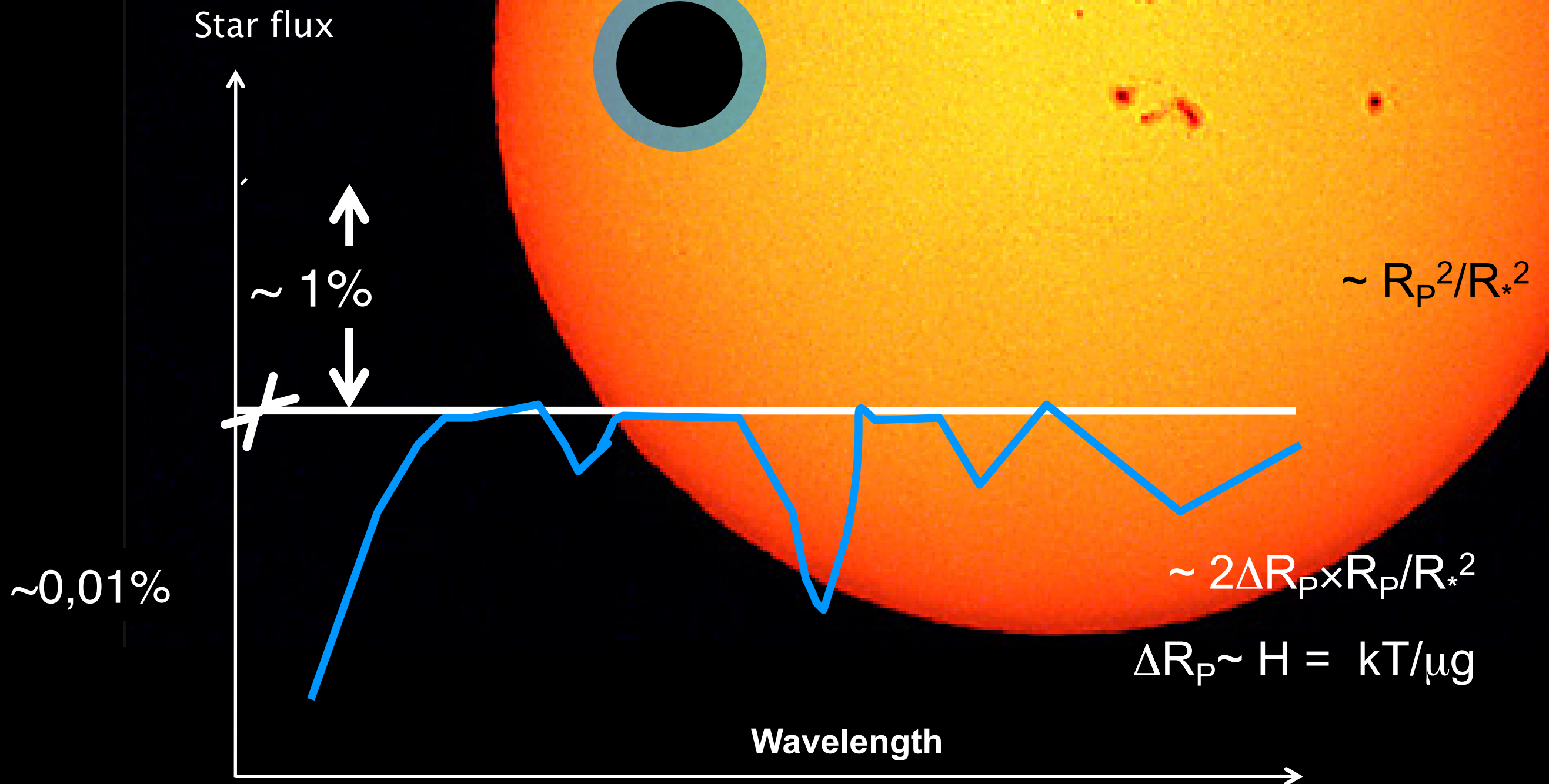


↑  
~ 1%  
↓

Wavelength



$$\sim R_{\text{planet}}^2 / R_{\text{star}}^2$$

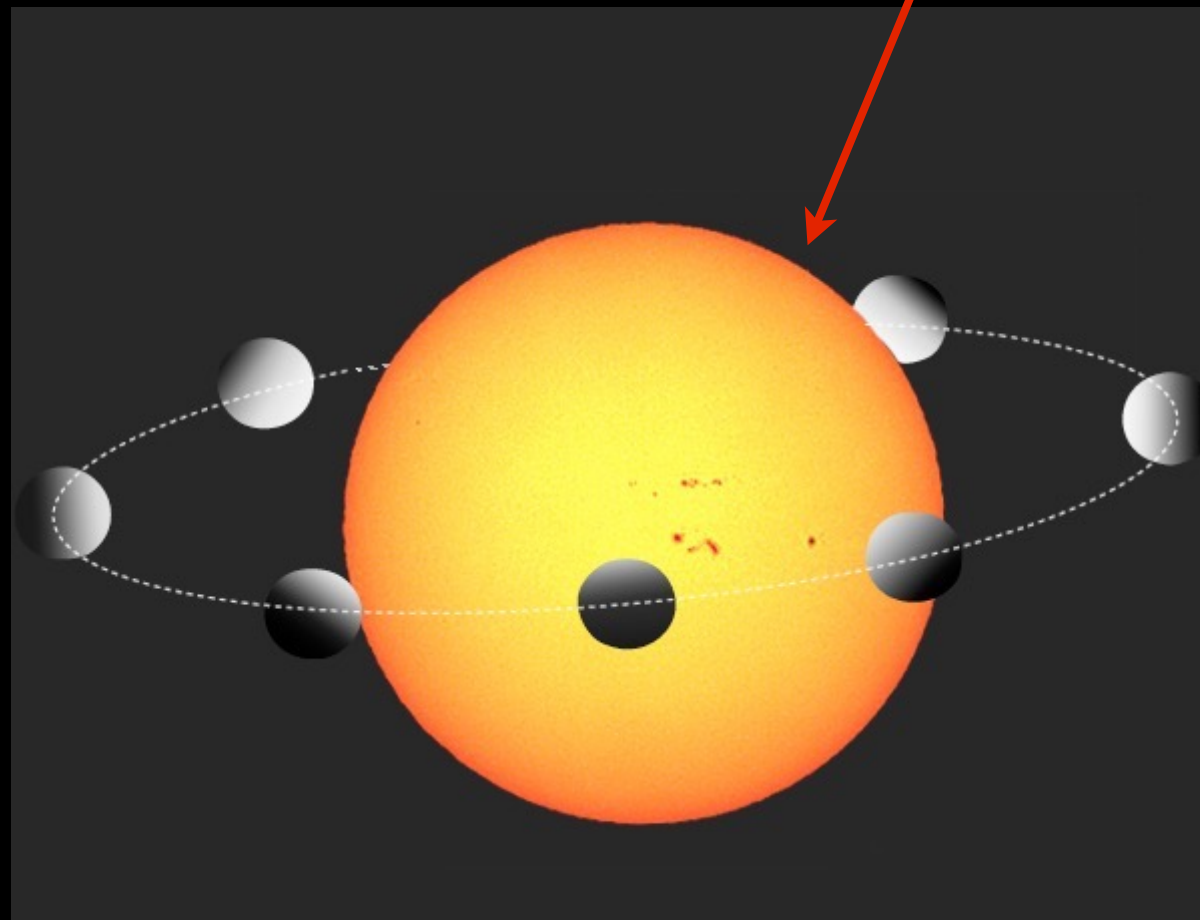
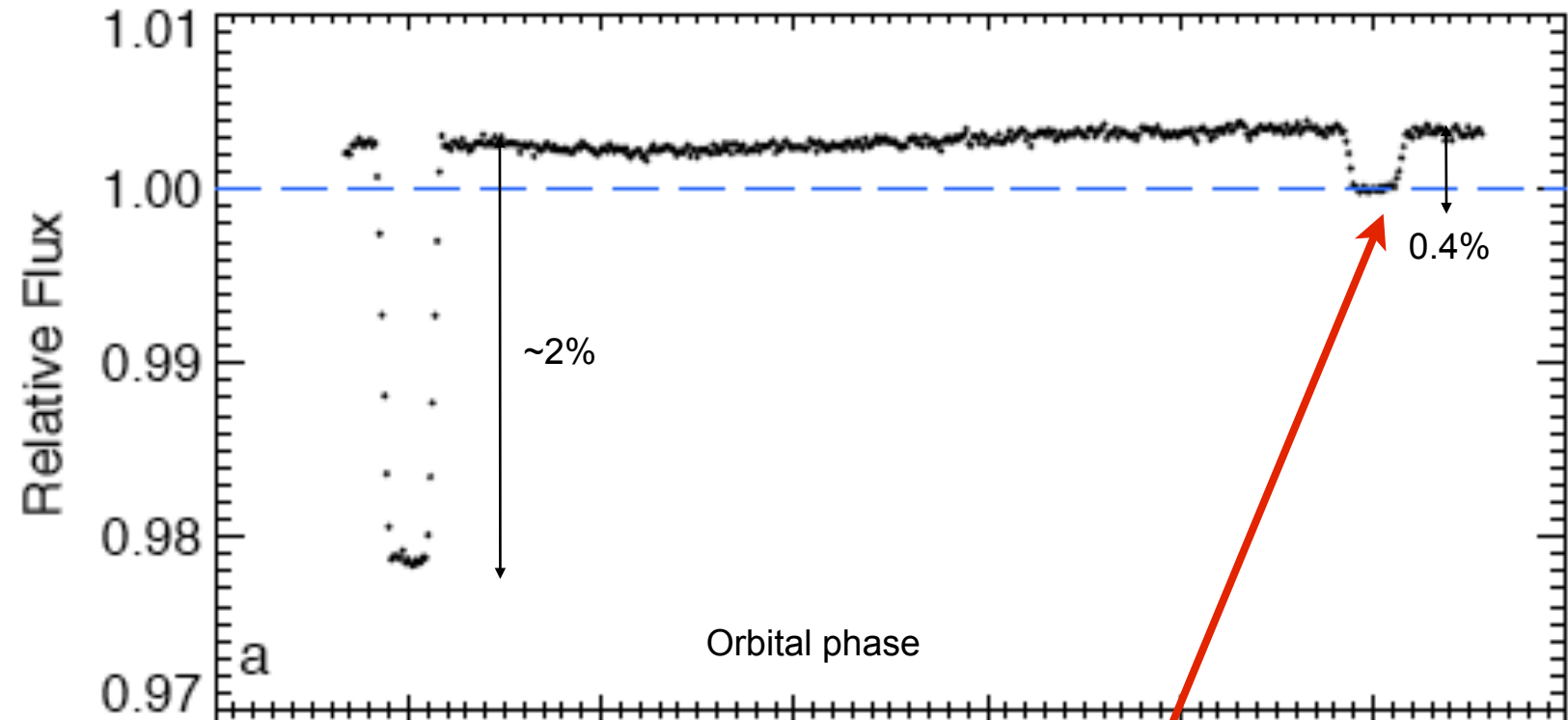


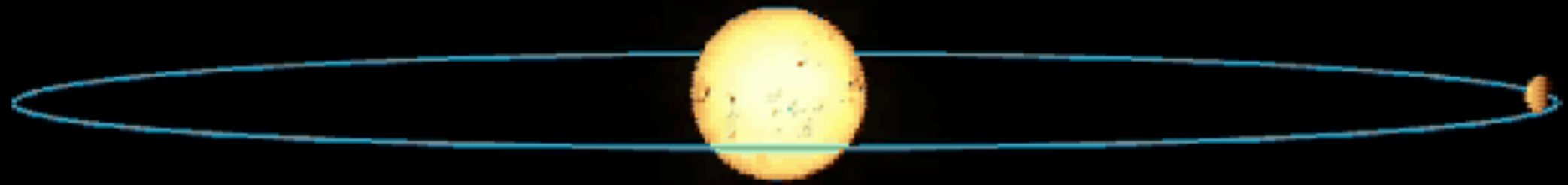


HD189733

8 microns

*Knutson et al.,  
2008*



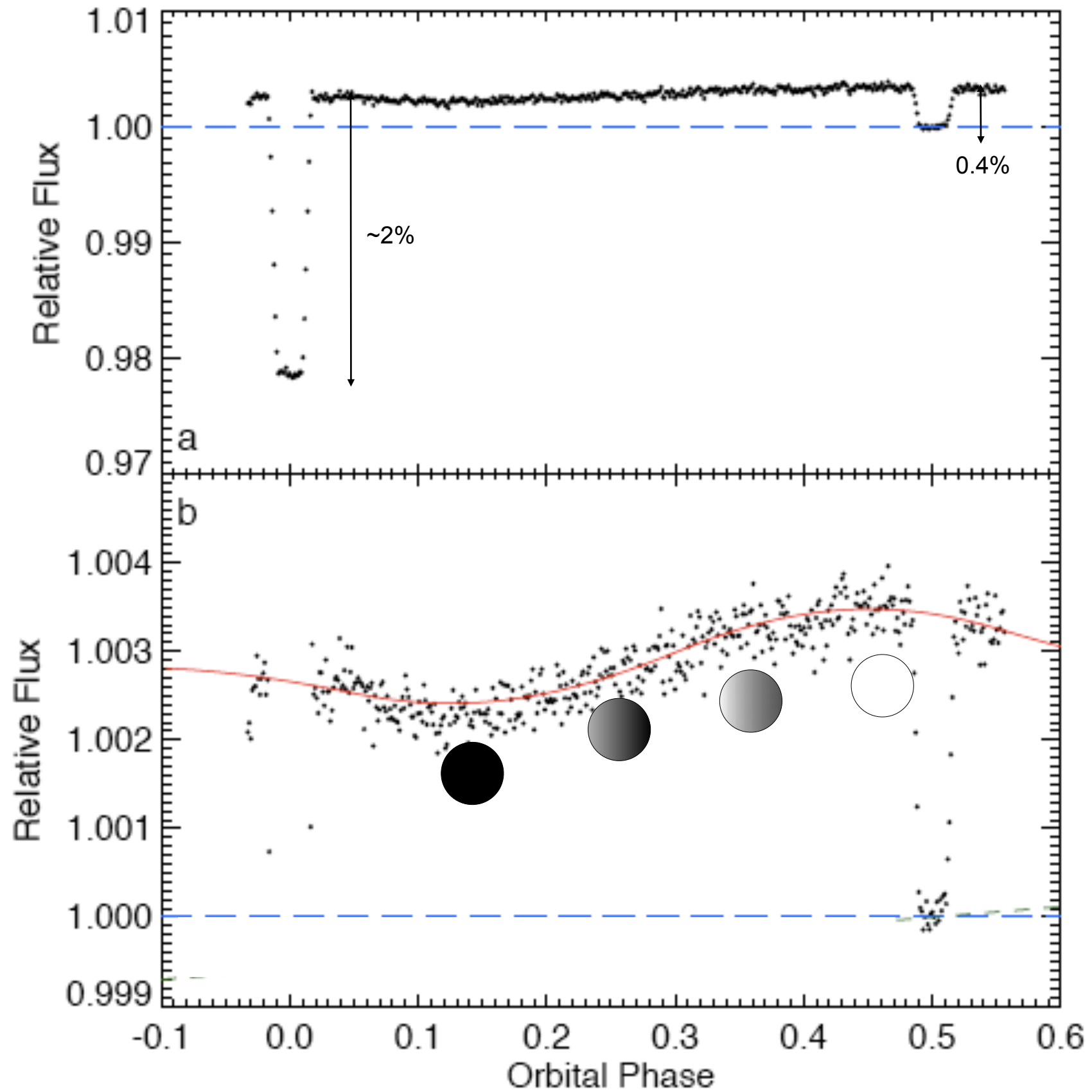




HD189733

8 microns

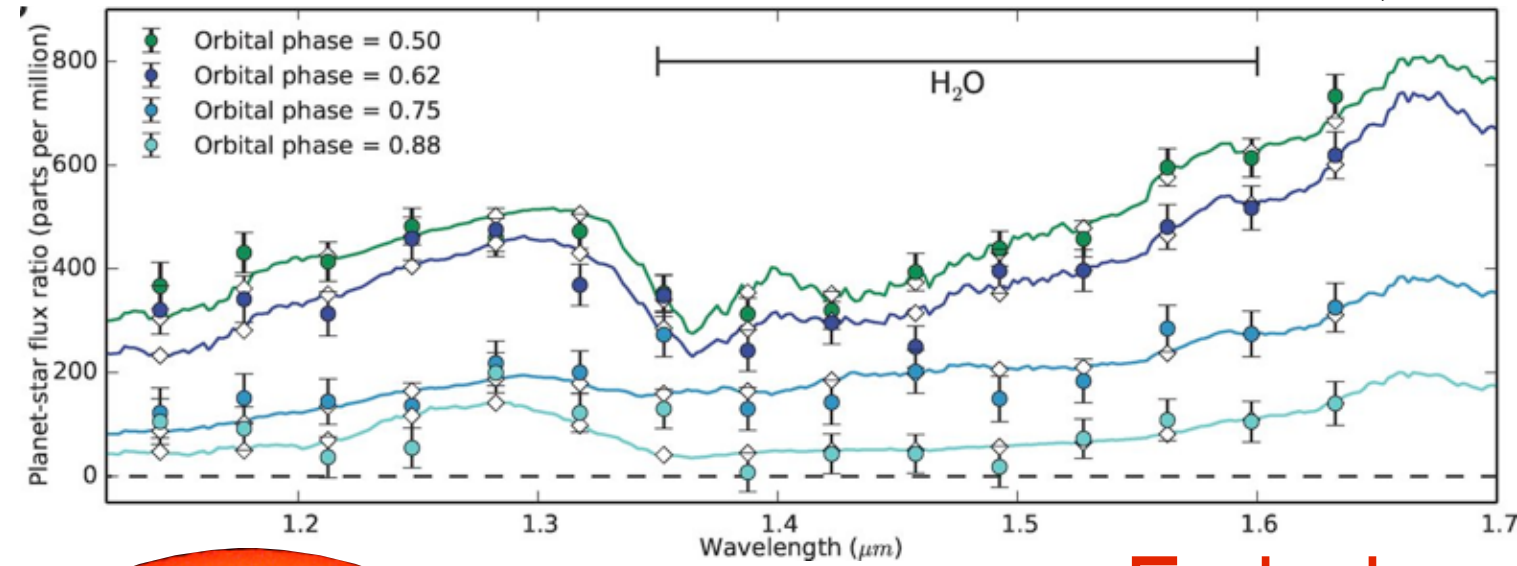
*Knutson et al.,  
2008*



# 4) Caractérisation des exoplanètes : atmosphères

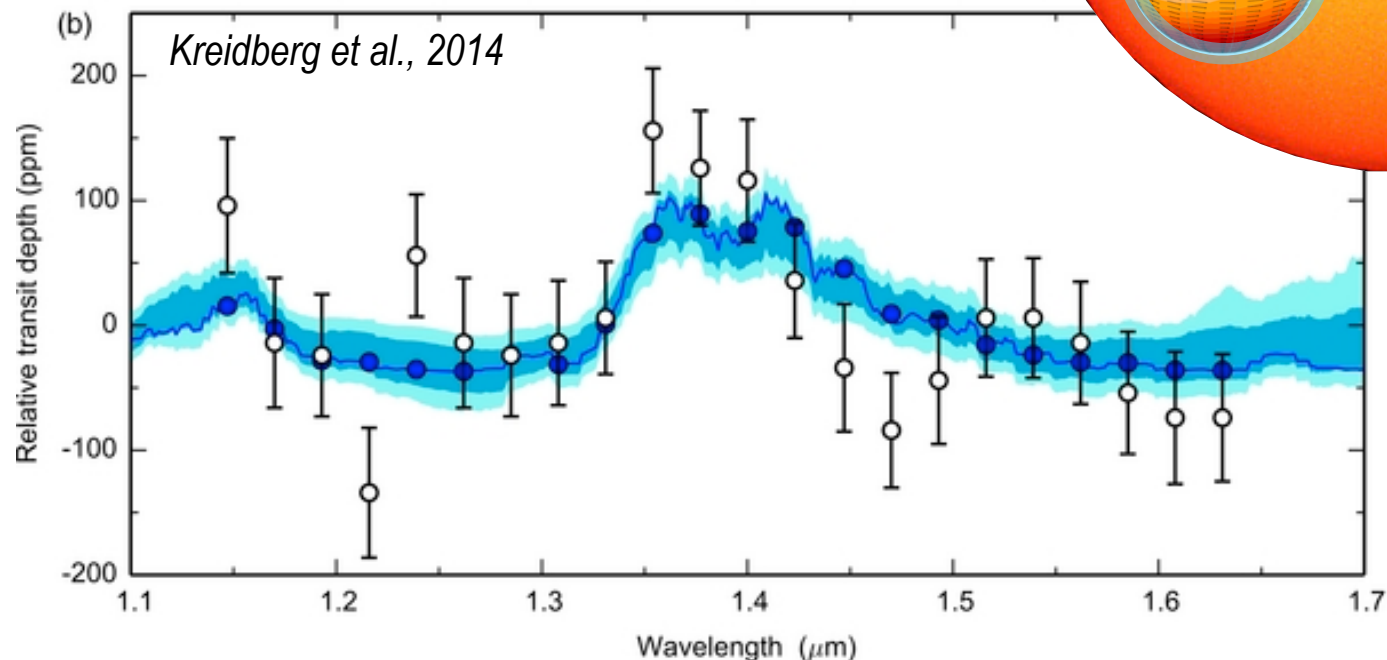
- composition moléculaire et élémentaire des atmosphères (chaudes)
- étude des climats (dynamique, nuages)
- comprendre l'origine et l'évolution des atmosphères

Stevenson et al., 2014



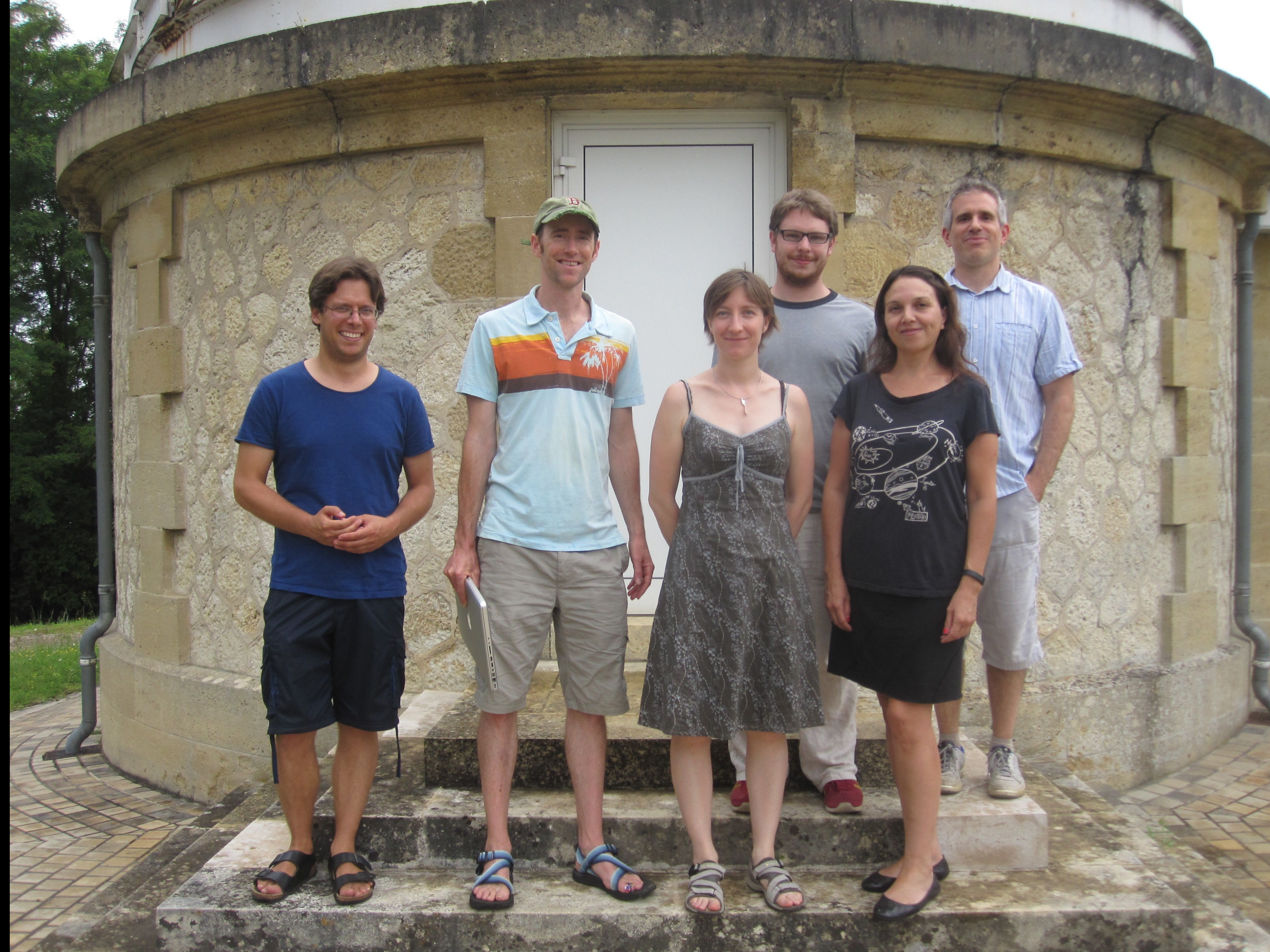
Emission

Transmission



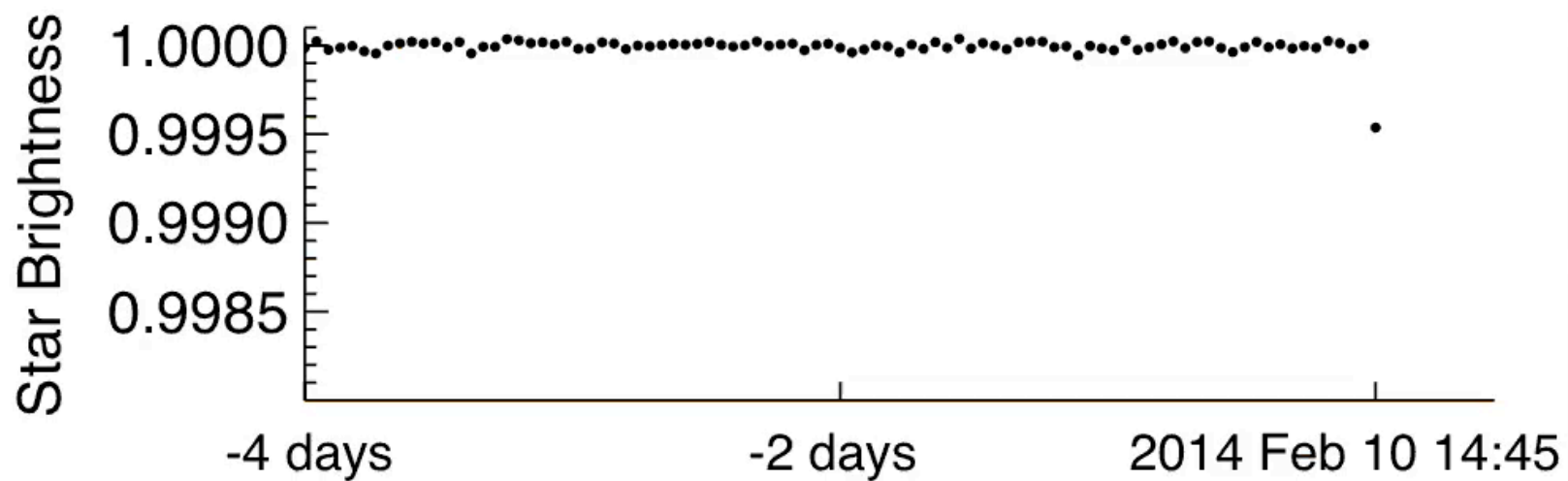
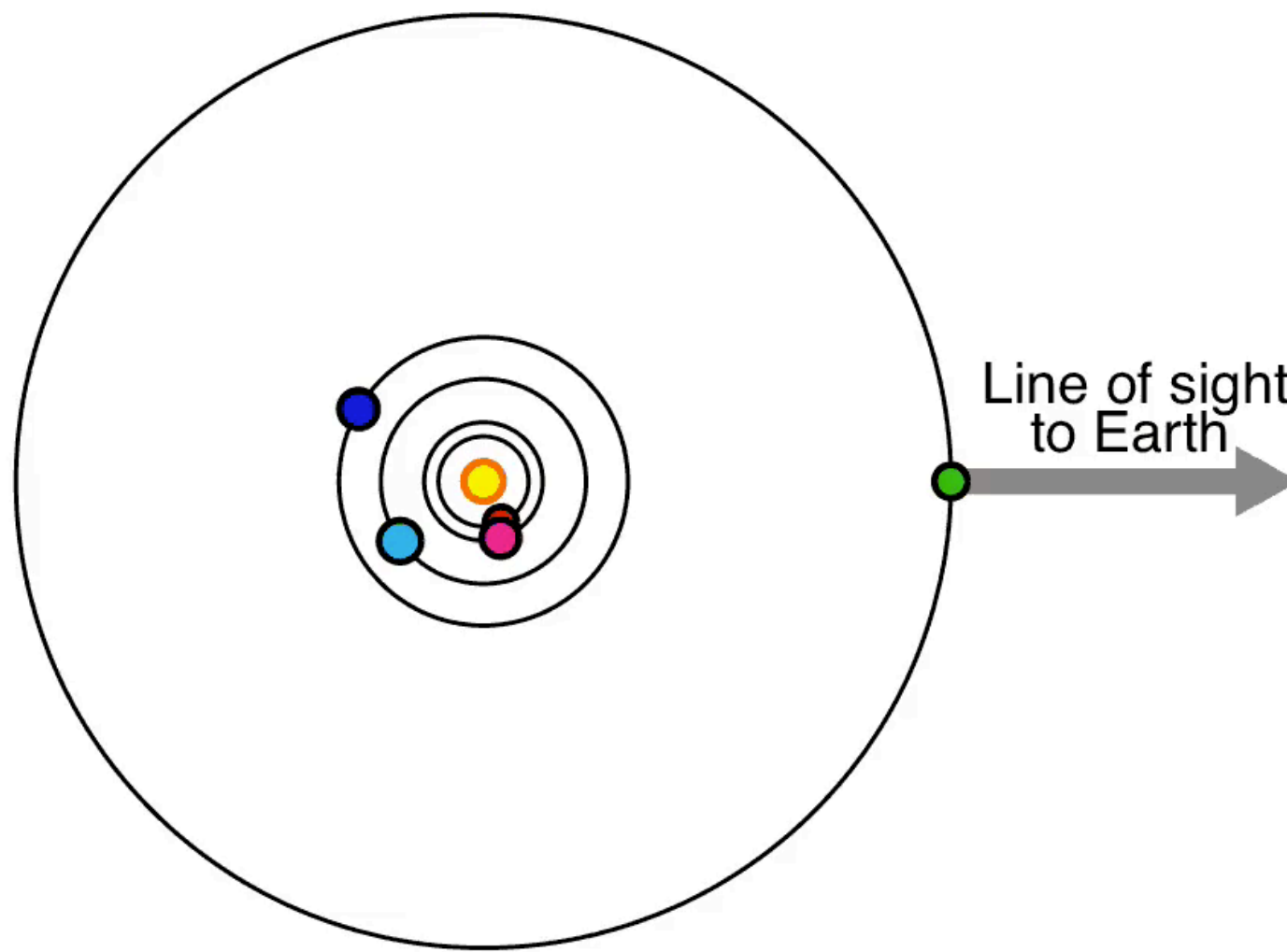
pré-requis indispensable pour la future recherche de biosignatures







# The Kepler-186 planetary system







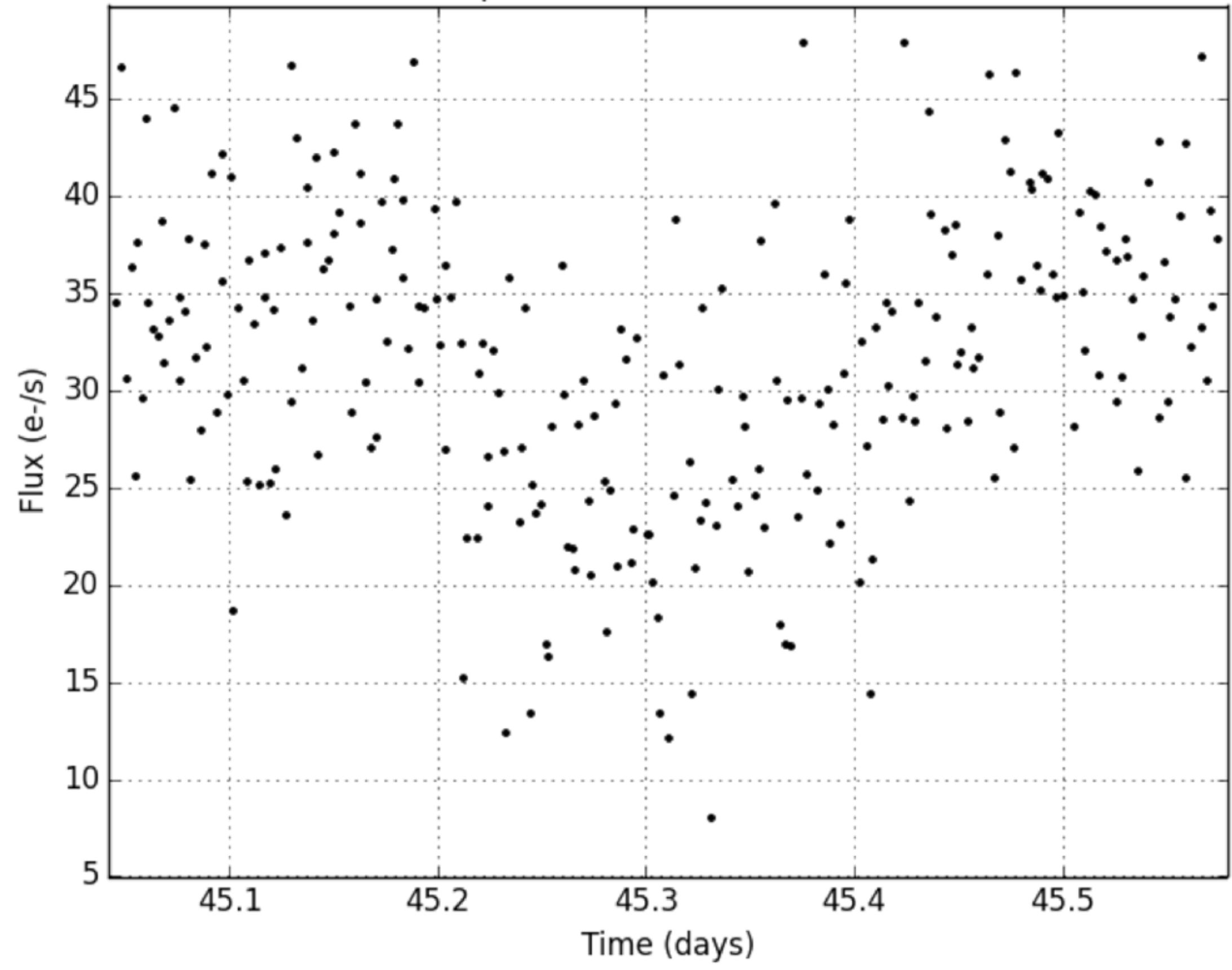
# Google/images : Kepler 186 f



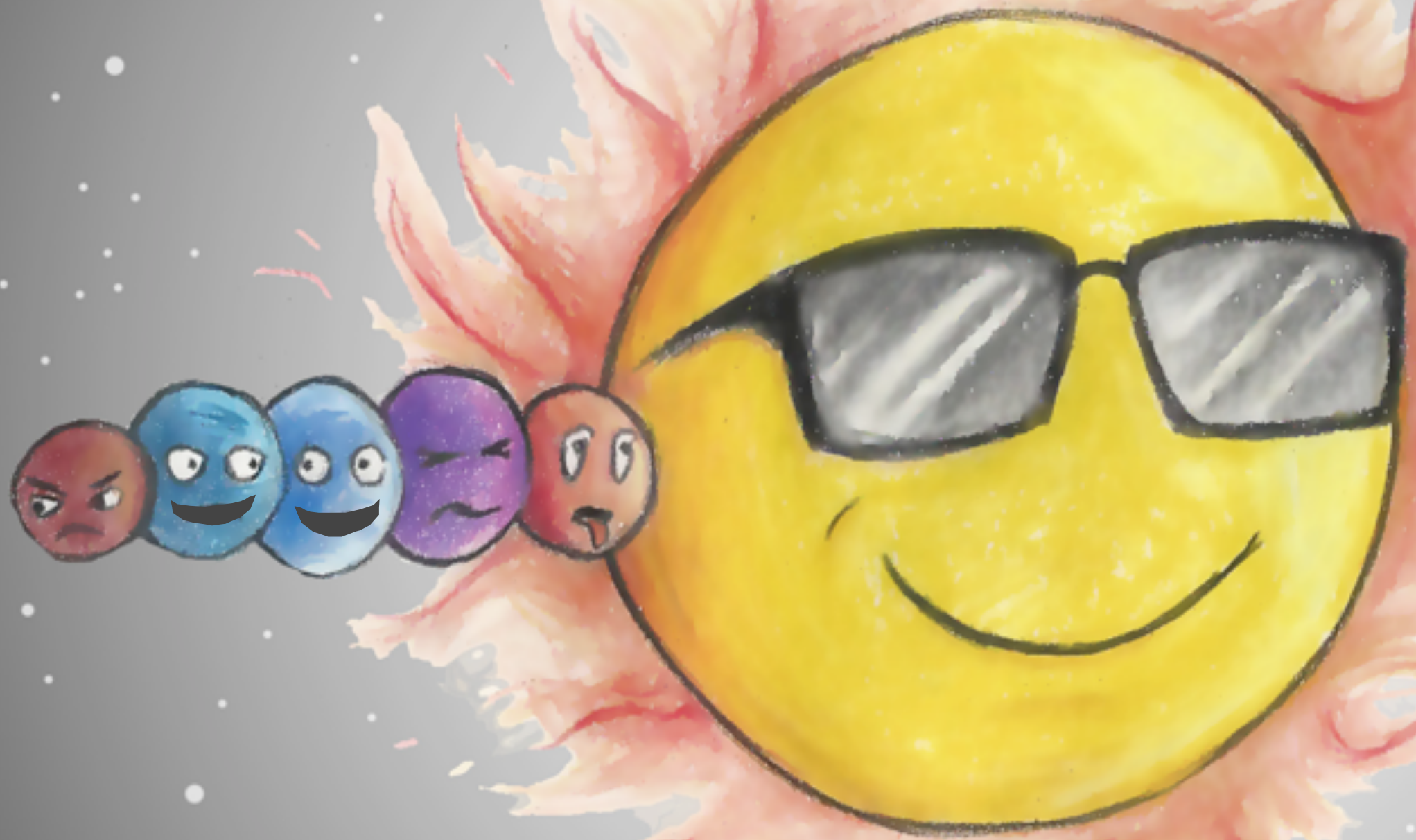


+1.997e4

# Kepler-186 f folded transit



# *La zone habitable*



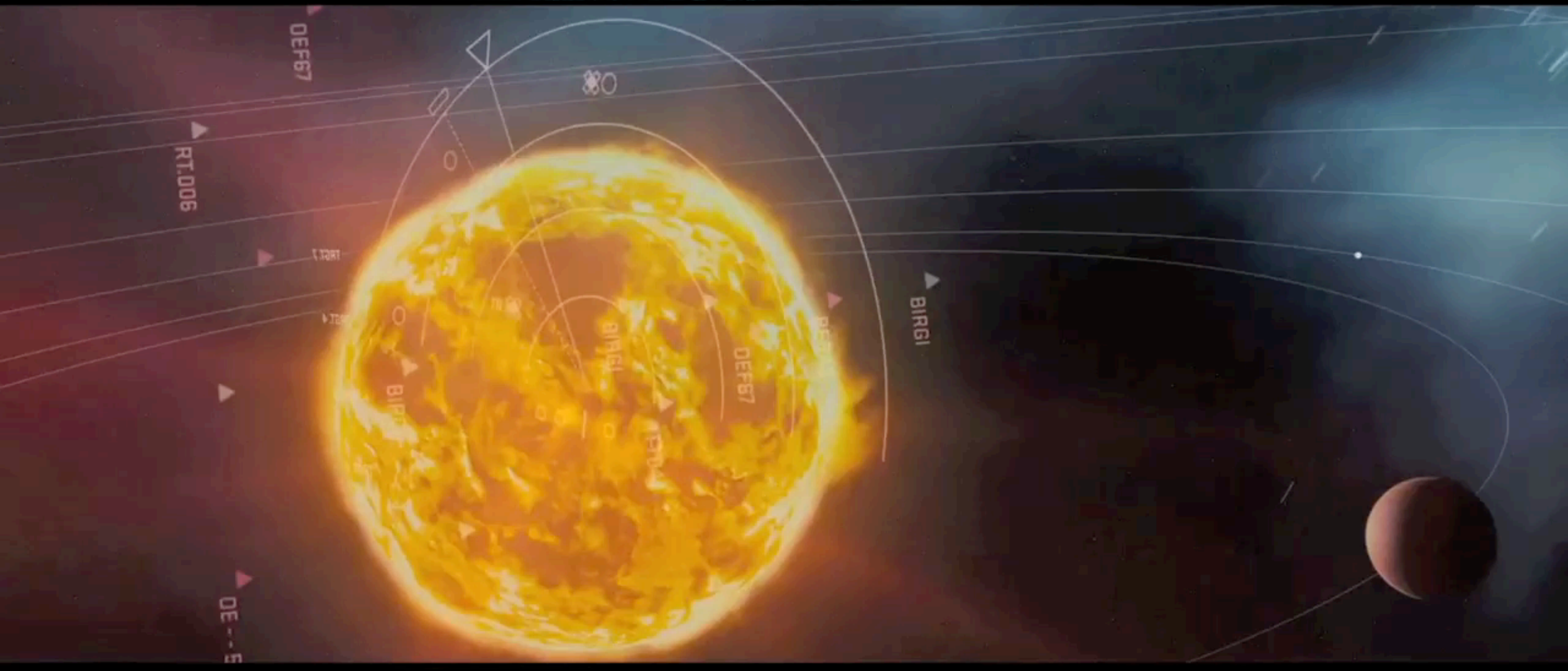


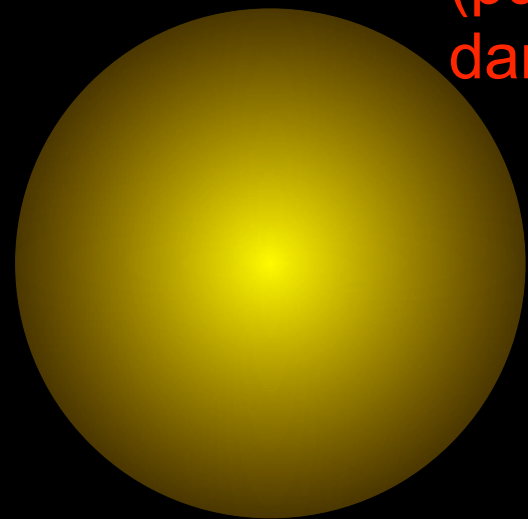
THE BATTLE FOR EARTH  
BEGINS AT SEA



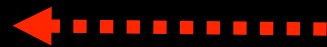
# BATTLESHIP

MAY 2012





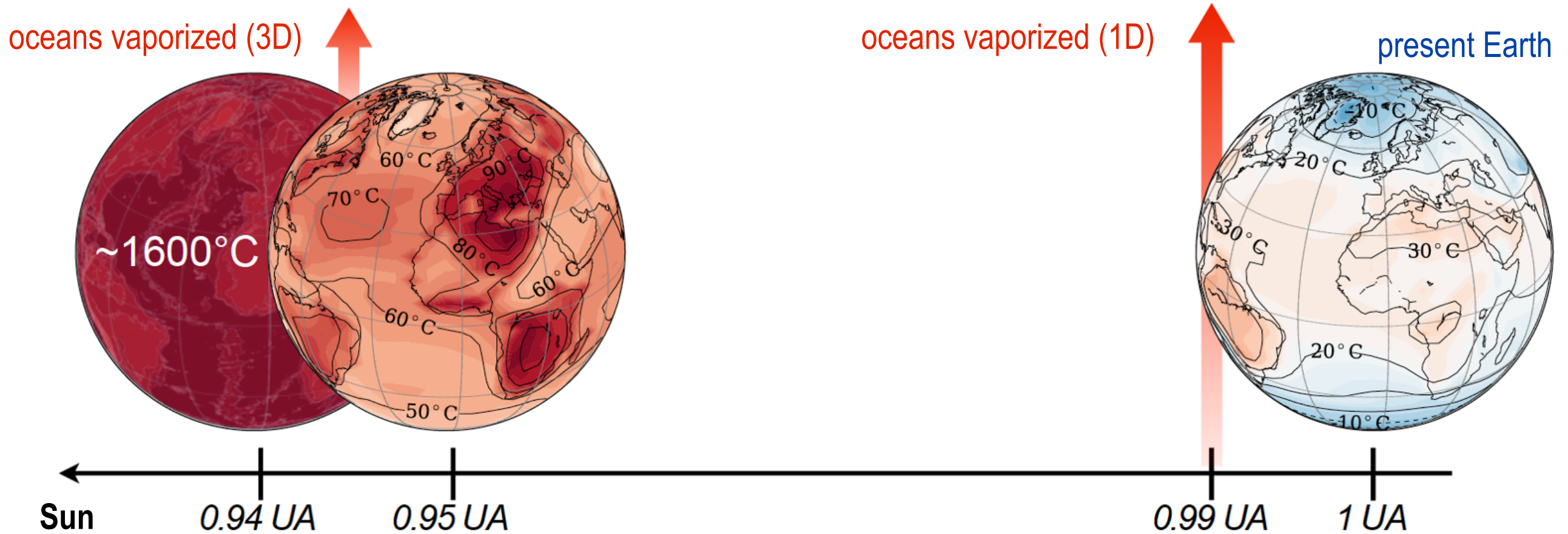
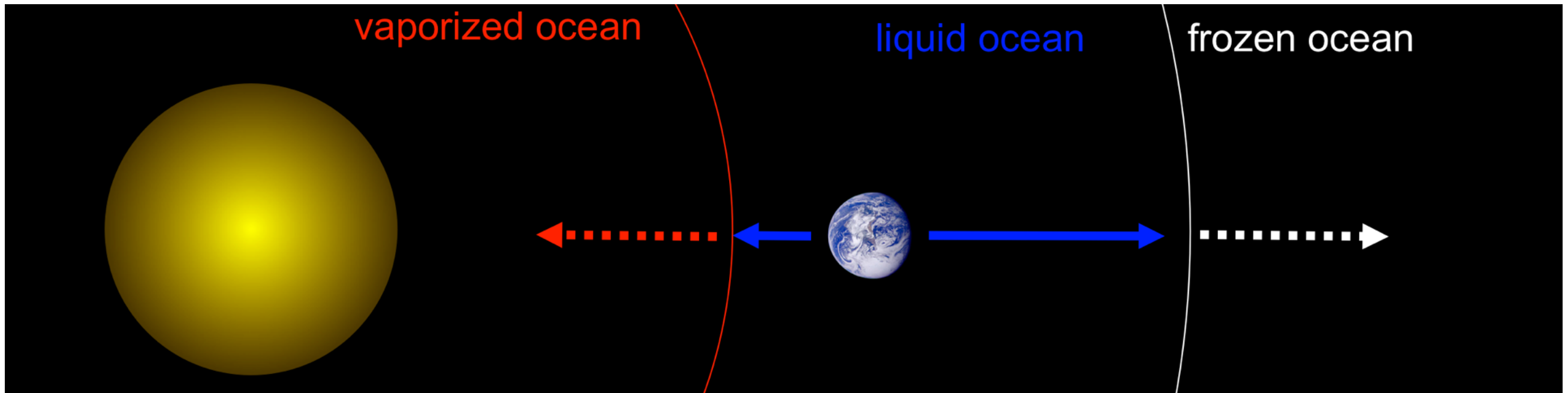
Océan vaporisé  
(puis perdu  
dans l'espace)



Océan liquide

Océan gelé

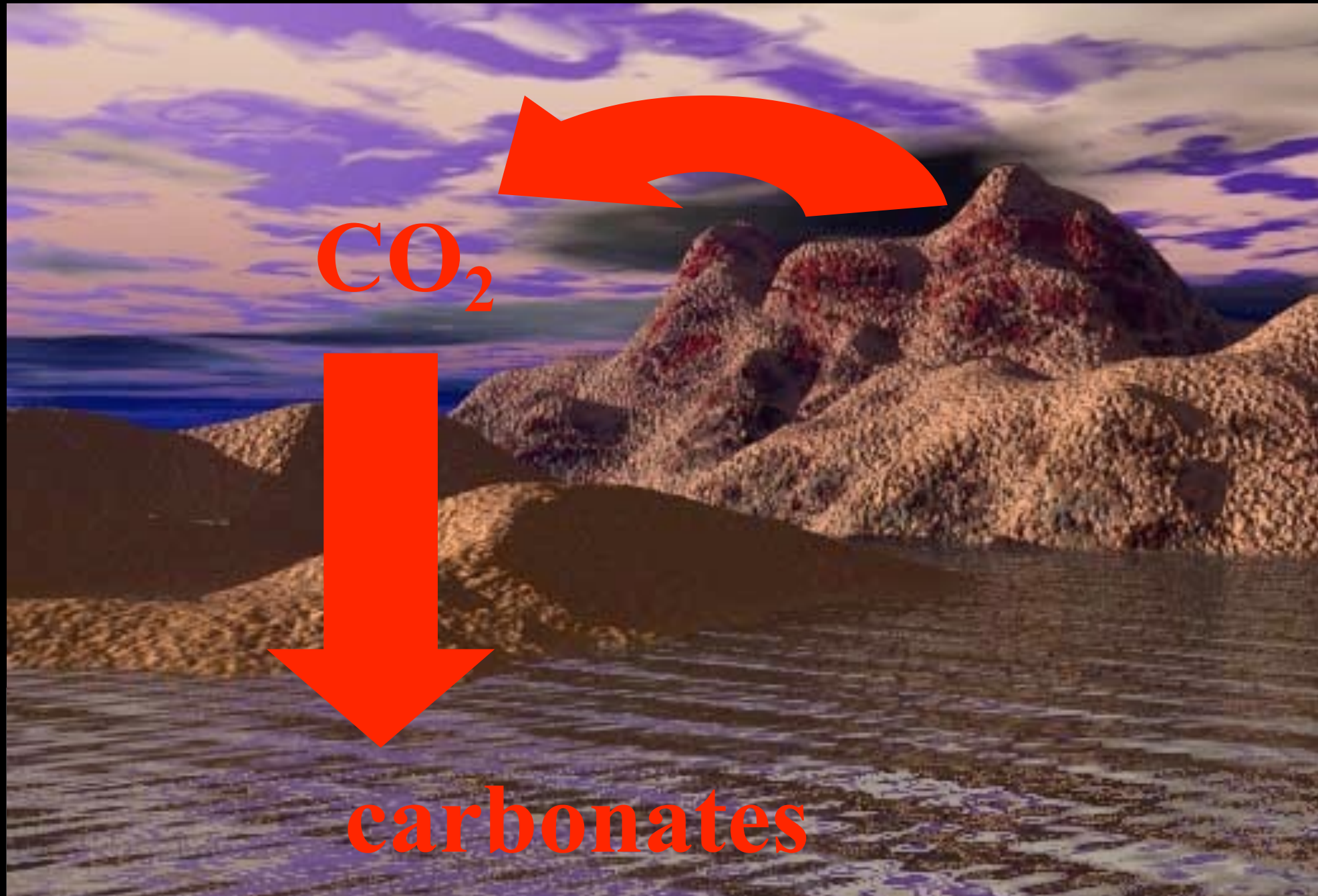




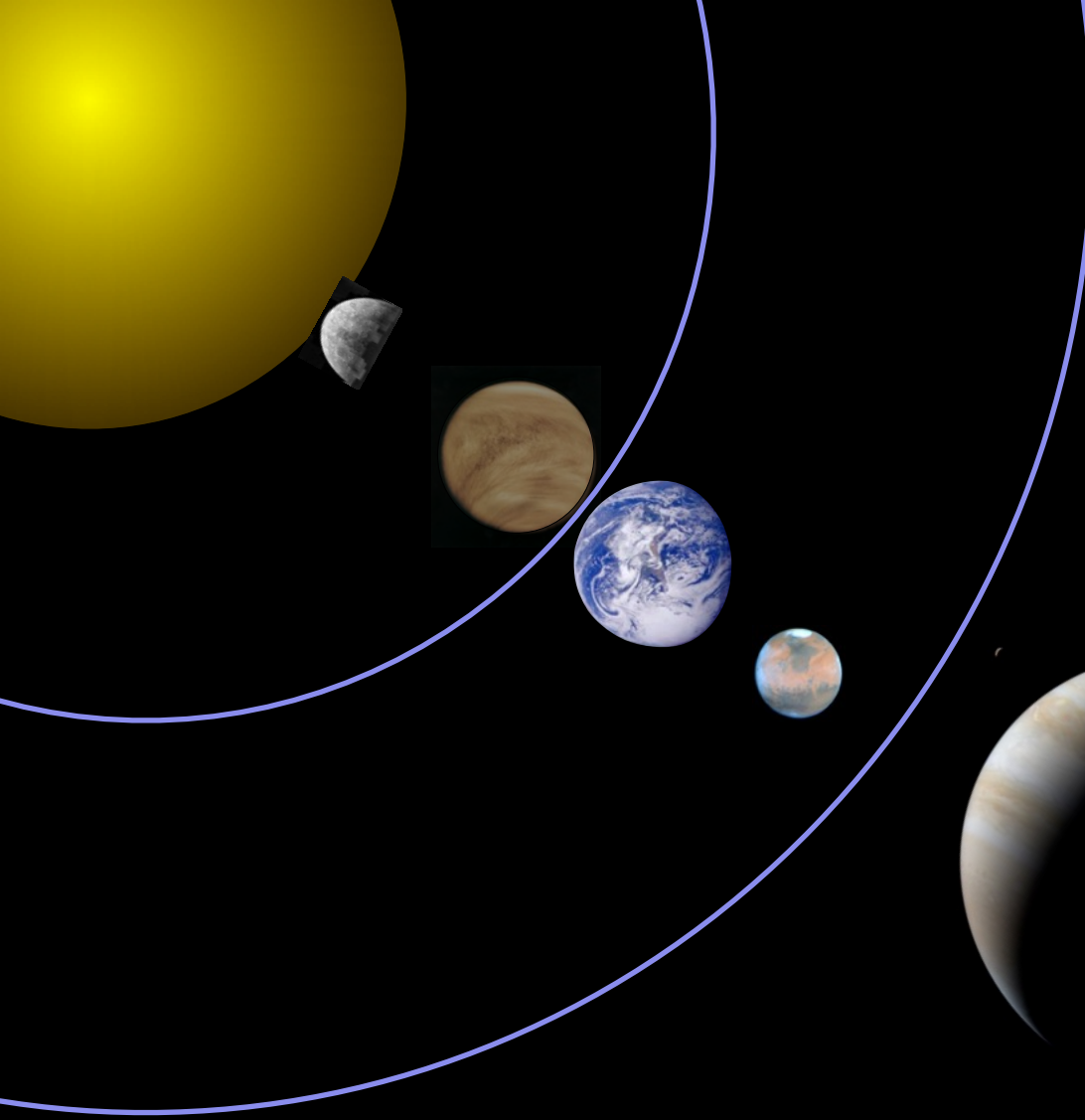
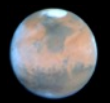
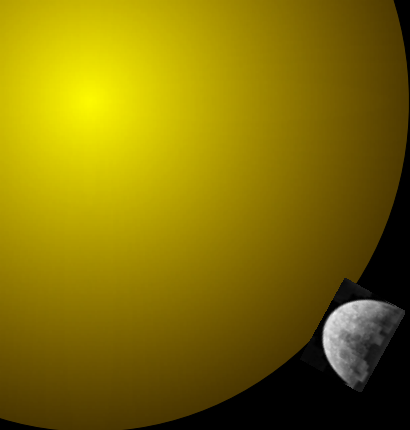
*Leconte et al., Nature 2013*

# carbonate-silicate cycle

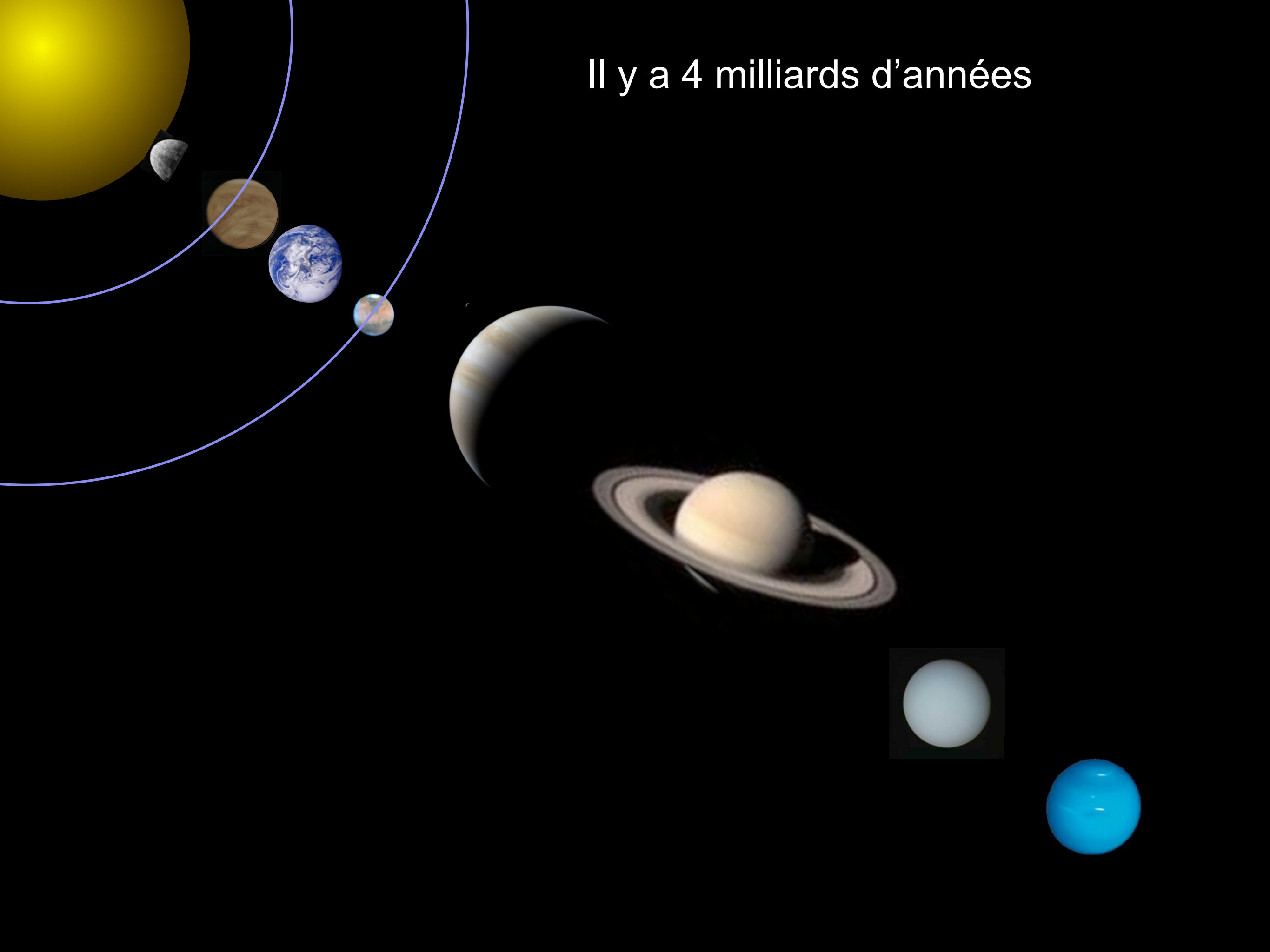
*Walker et al., 1981*





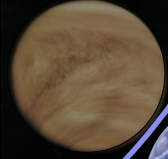
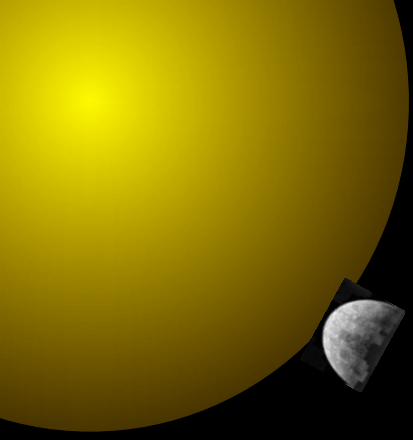


Il y a 4 milliards d'années

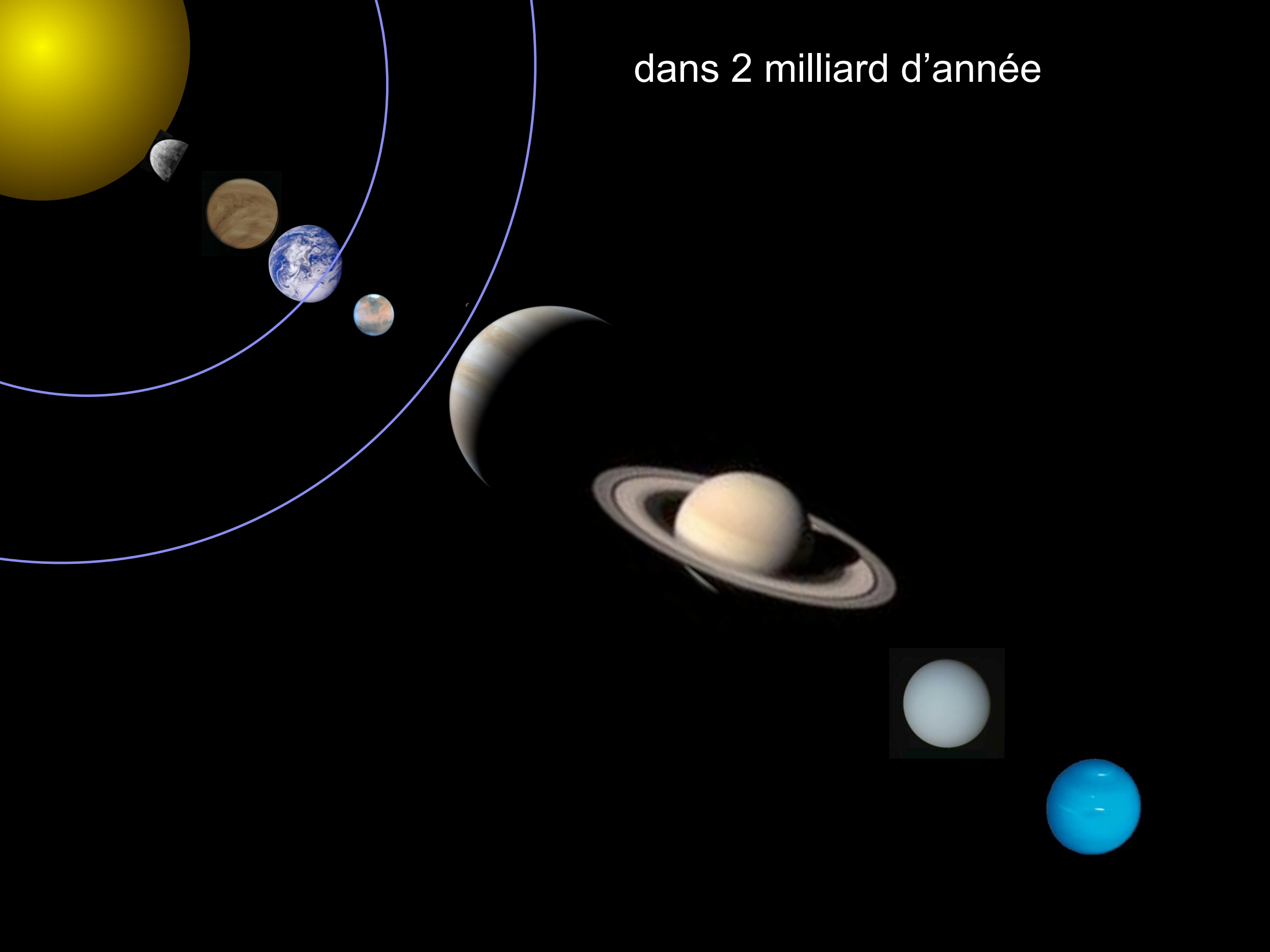




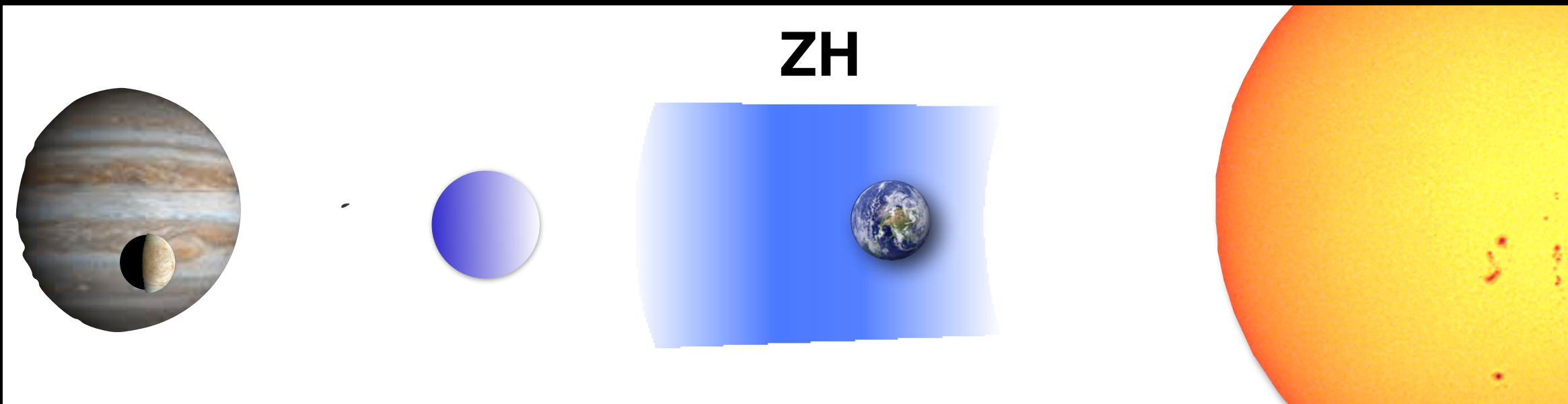
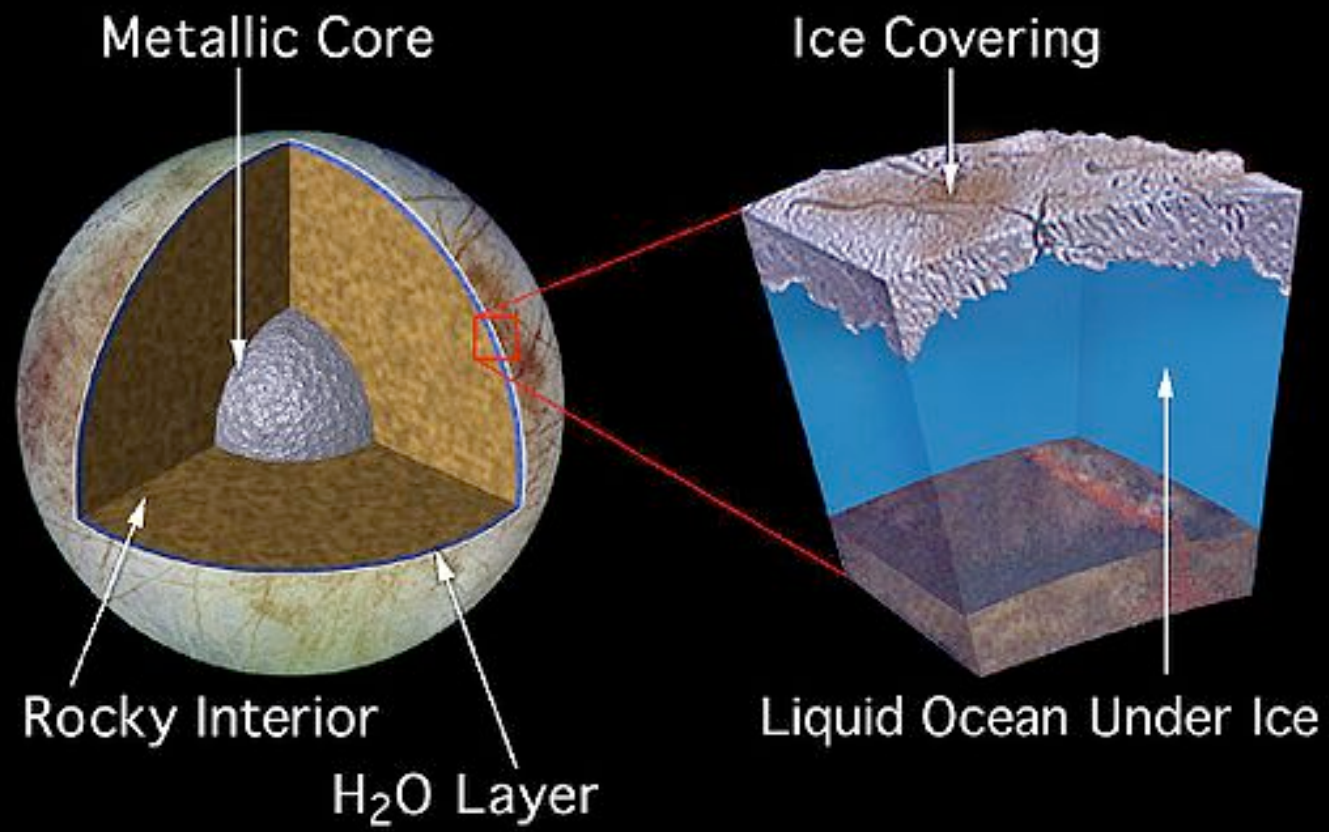
aujourd'hui



dans 2 milliard d'année





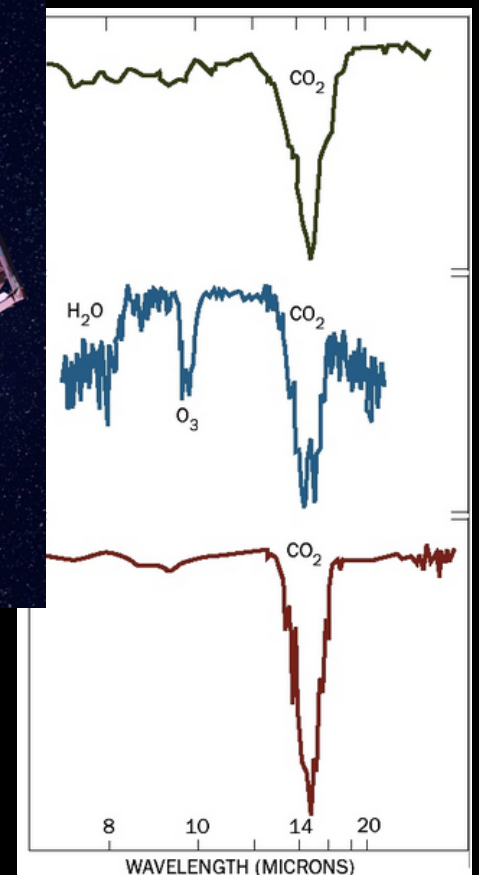
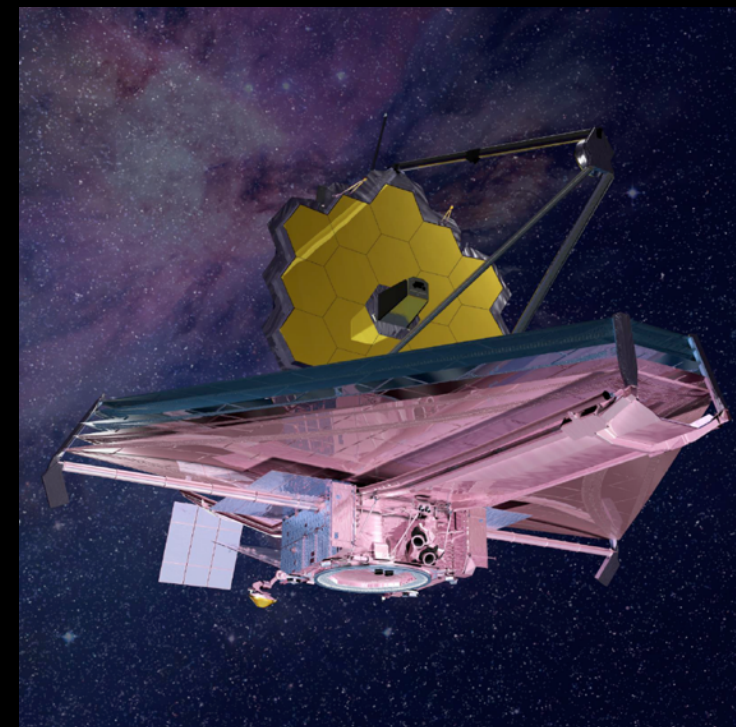
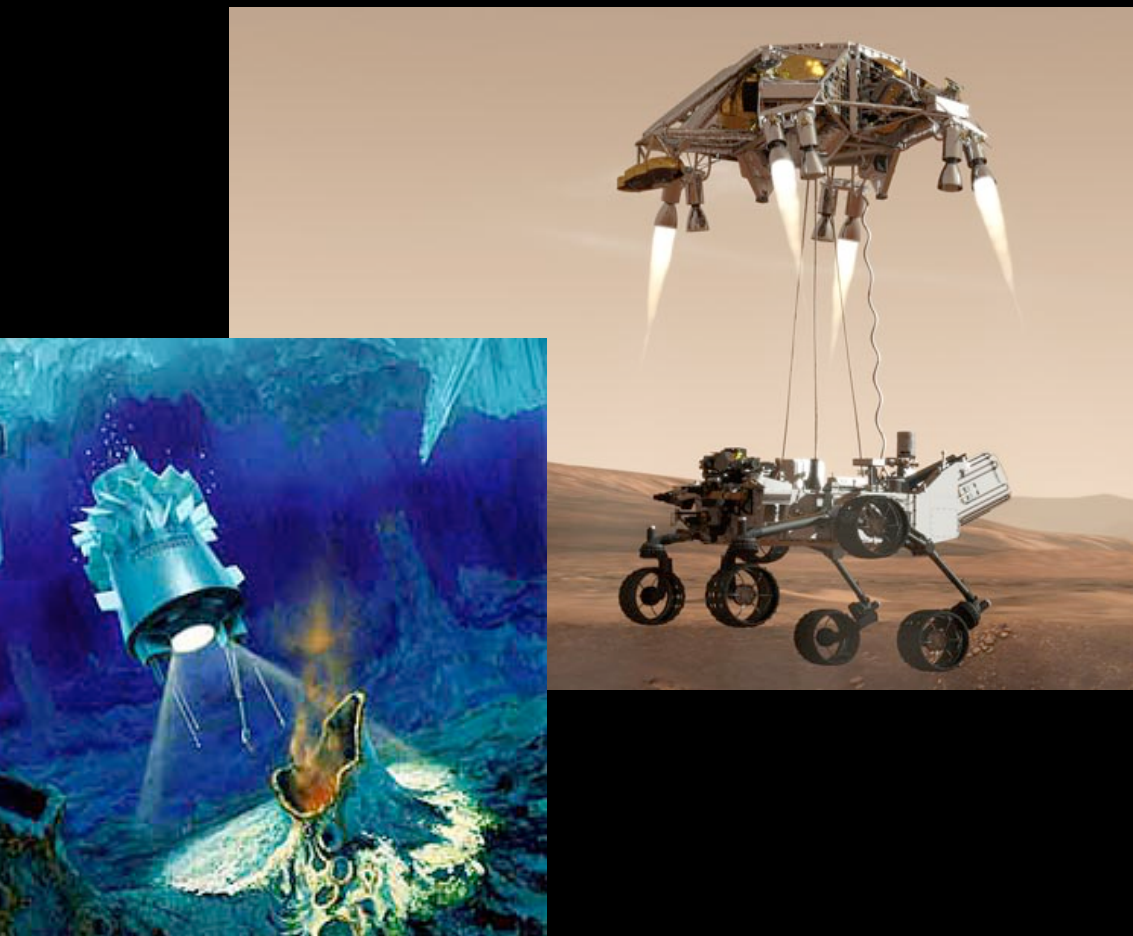


# Habitabilité

Où la vie peut exister ou Où l'on peut trouver la vie

système solaire

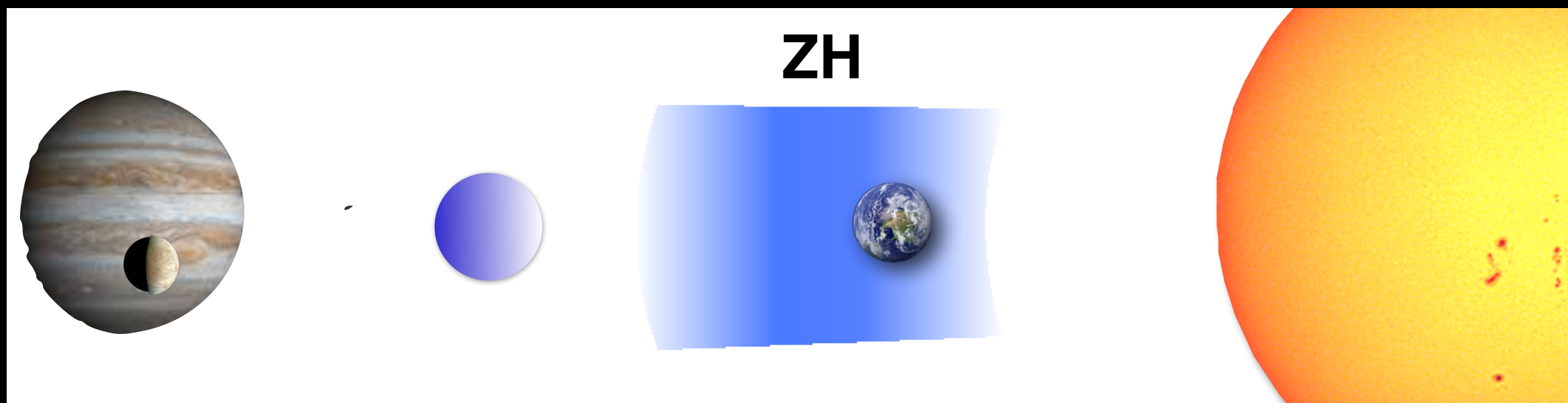
exoplanètes





**C'est la zone où la photosynthèse est possible  
(eau et rayonnement stellaire disponibles simultanément)**

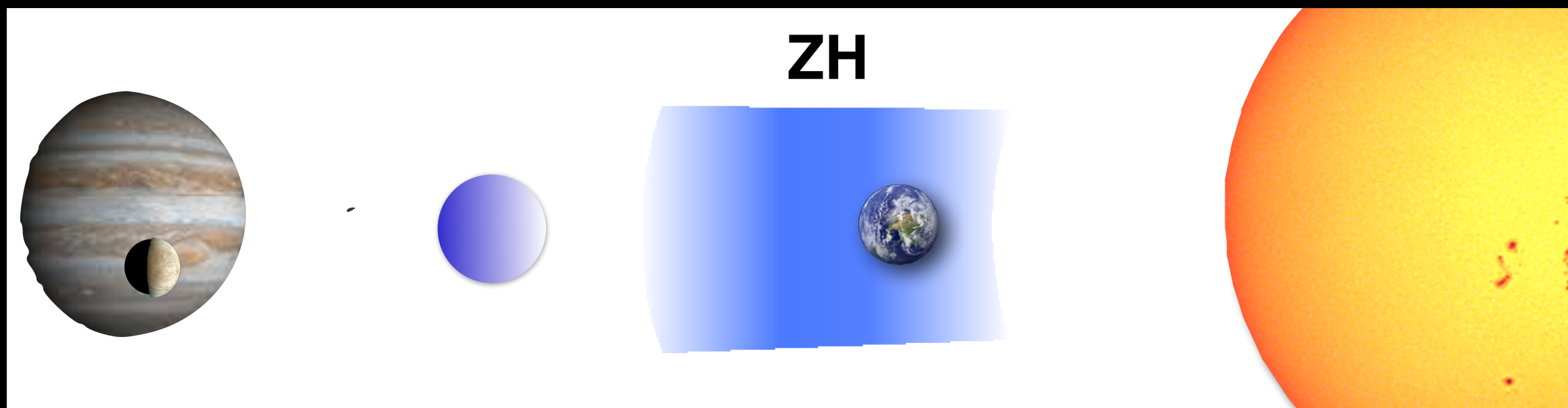
**C'est la zone privilégiée pour une future recherche de  
signatures spectrales atmosphériques liées à la vie**



~~Habitable zone~~

~~Aquazone~~

Surfzone ?





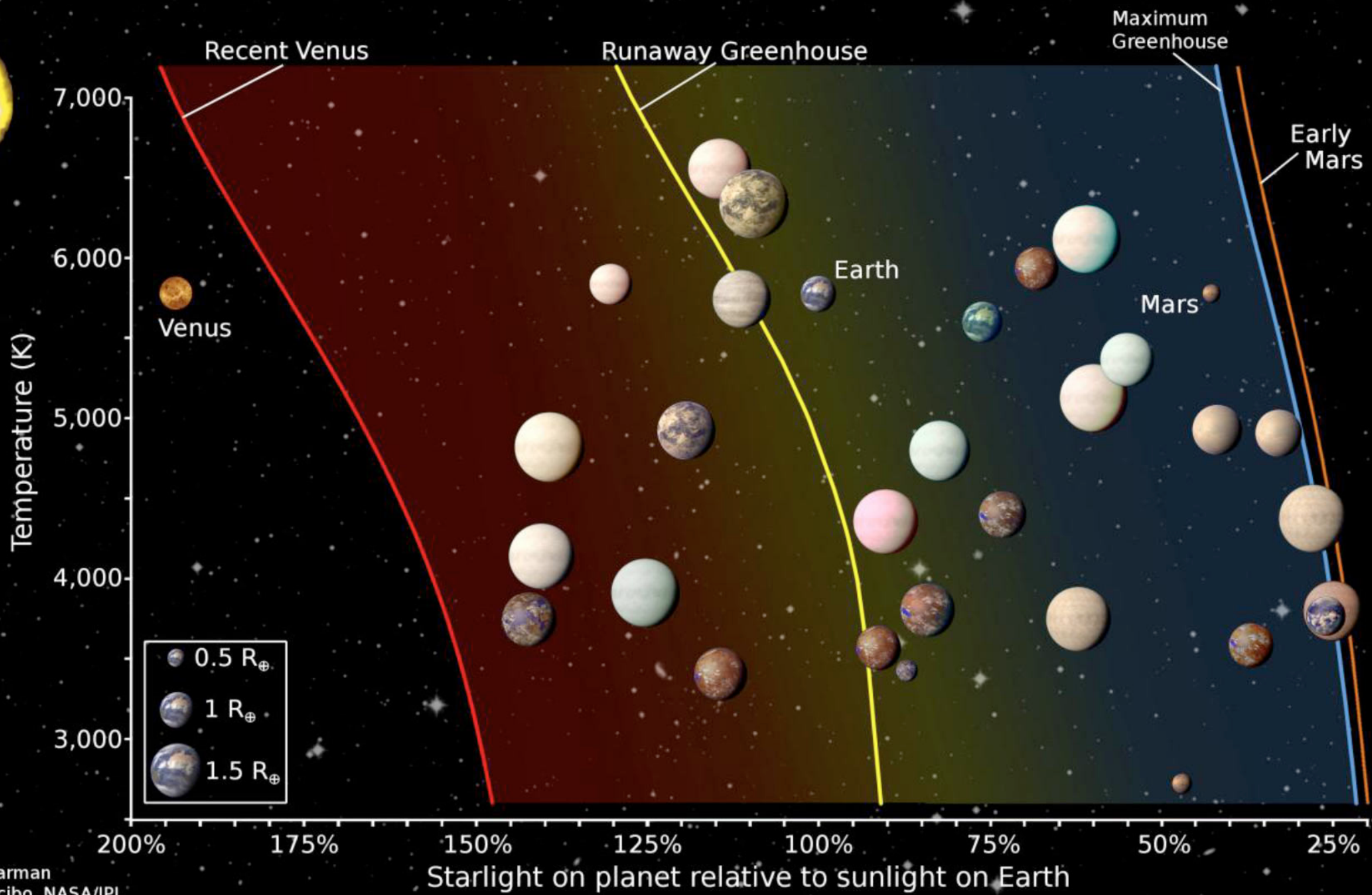
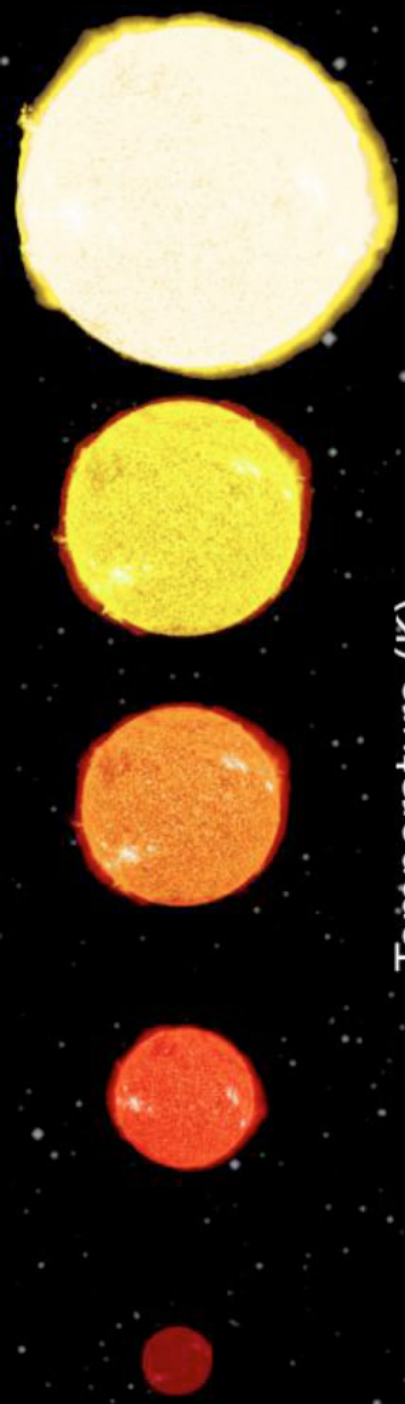


Image Credit: Chester Harman  
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPL





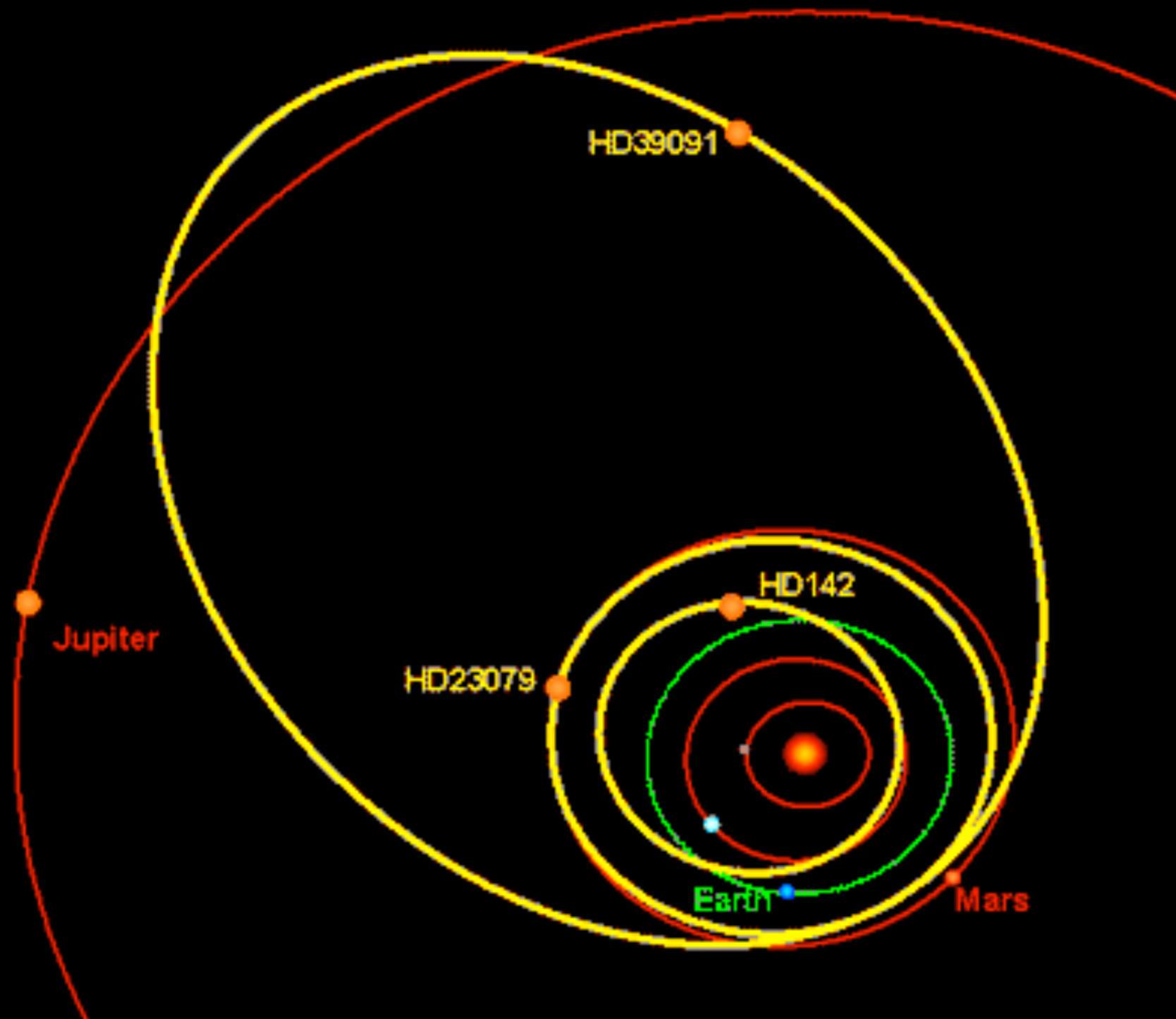












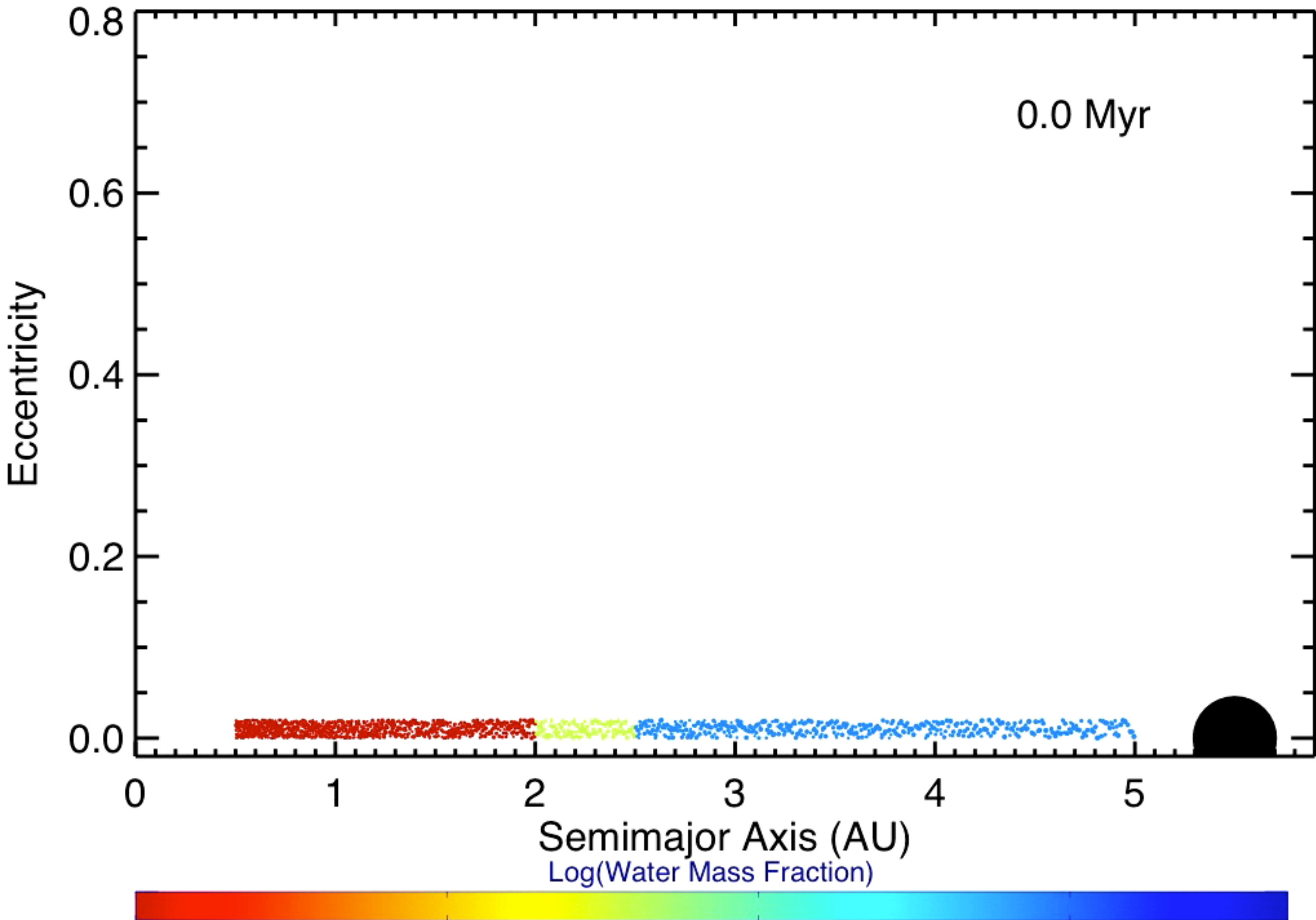




**1 étoile sur 1000 dans la Galaxie possède une planète géante sur une orbite circulaire**

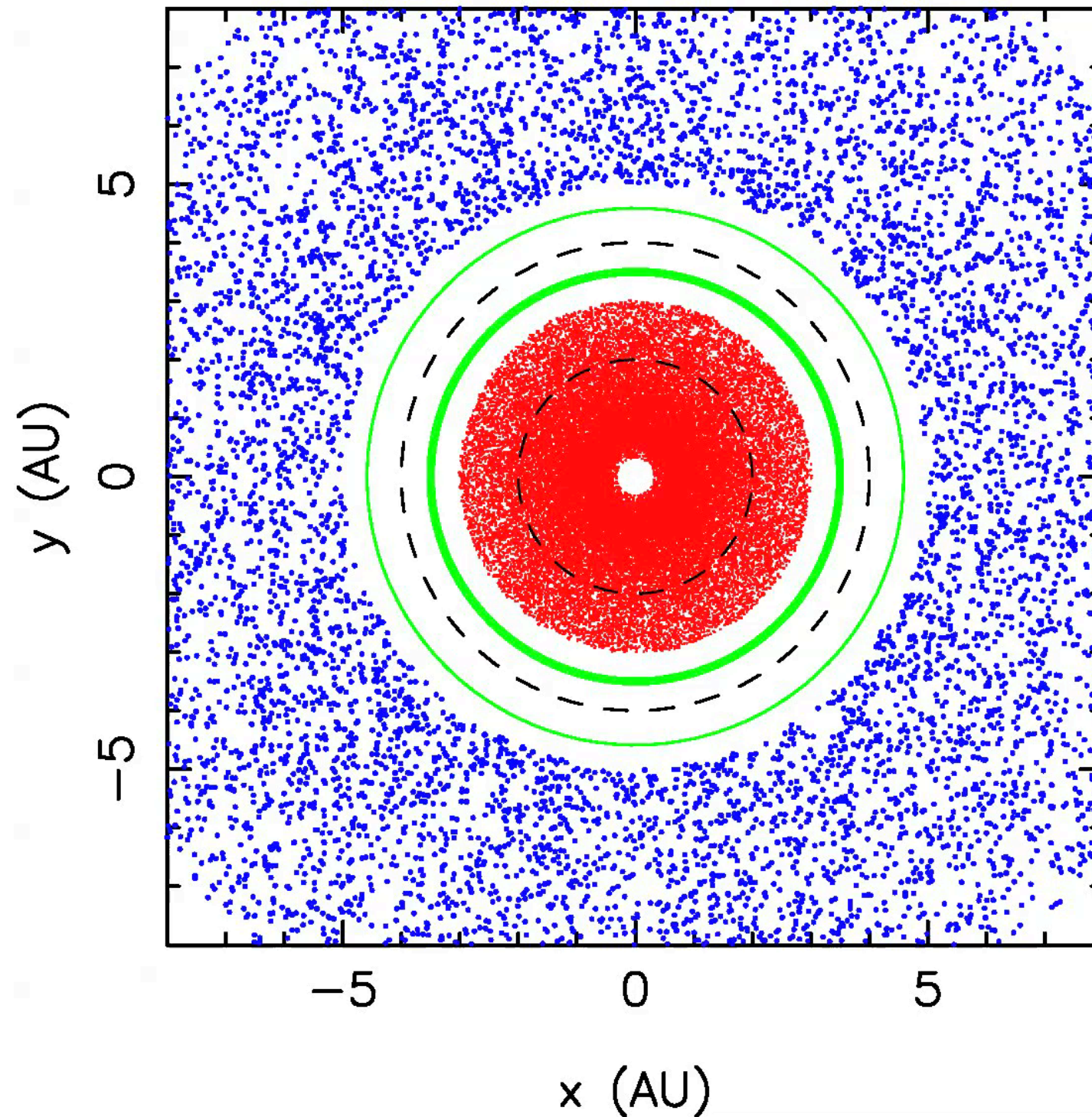






# Le “Grand Tack”

$T = 0.0$  ky



Walsh, Morbidelli,  
Raymond, O'Brien, Mandell  
2011, Nature, 475, 206















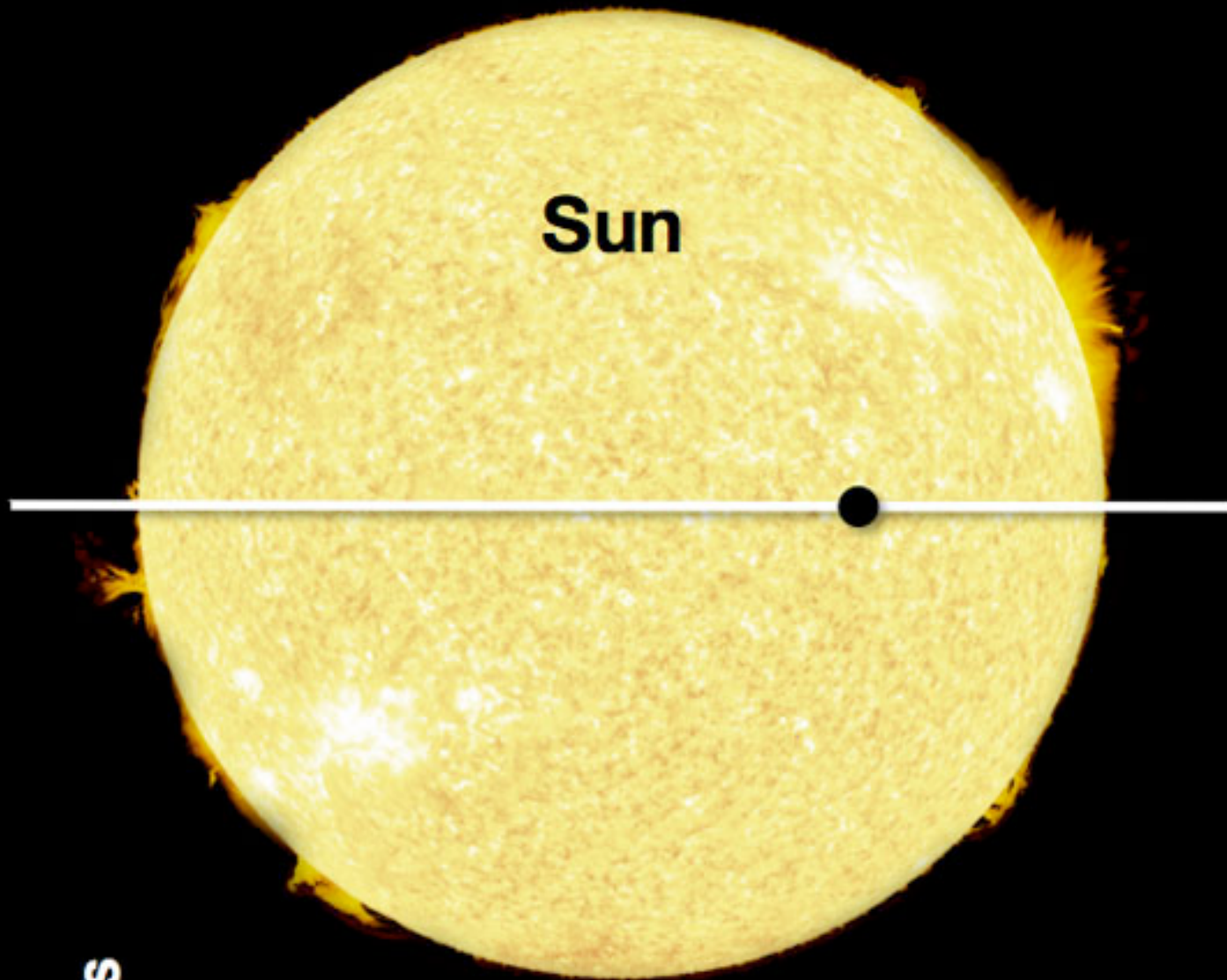


- les étoiles M sont les plus abondantes : ~80% des étoiles
- la majorité possède des planètes telluriques (>1 par étoile)
- les techniques d'observations marchent mieux pour les étoiles M



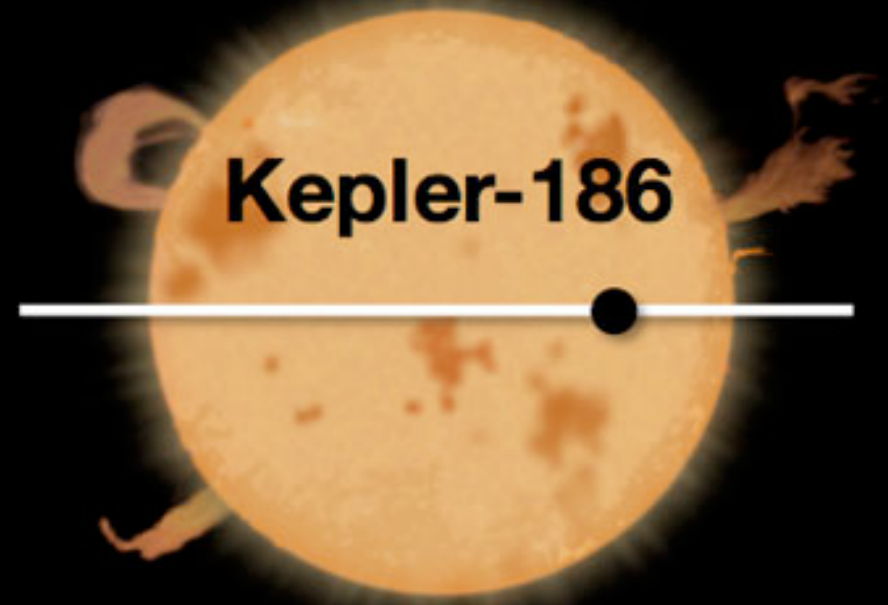


**Sun**



**M dwarf**

**Kepler-186**



**BRIGHTNESS**



**TIME**

**BRIGHTNESS**



**TIME**



- 
- les étoiles M sont les plus abondantes : ~80% des étoiles
  - la majorité possède des planètes telluriques (>1 par étoile)
  - les techniques d'observations marchent mieux pour les étoiles M

- Mais une planète dans la zone *habitable* est forcément très différente de notre planète

- étoiles actives : forte émission X, extrême UV, flares, éjections coronale
- évolution : luminosité décroissante





- les étoiles M sont les plus abondantes : ~80% des étoiles
- la majorité possède des planètes telluriques (>1 par étoile)
- les techniques d'observations marchent mieux pour les étoiles M

- Mais une planète dans la zone *habitable* est forcément très différente de notre planète

- étoiles actives : forte émission X, extrême UV, flares, éjections coronale
- évolution : luminosité décroissante
- spectre différent du Soleil : plus (infra)rouge





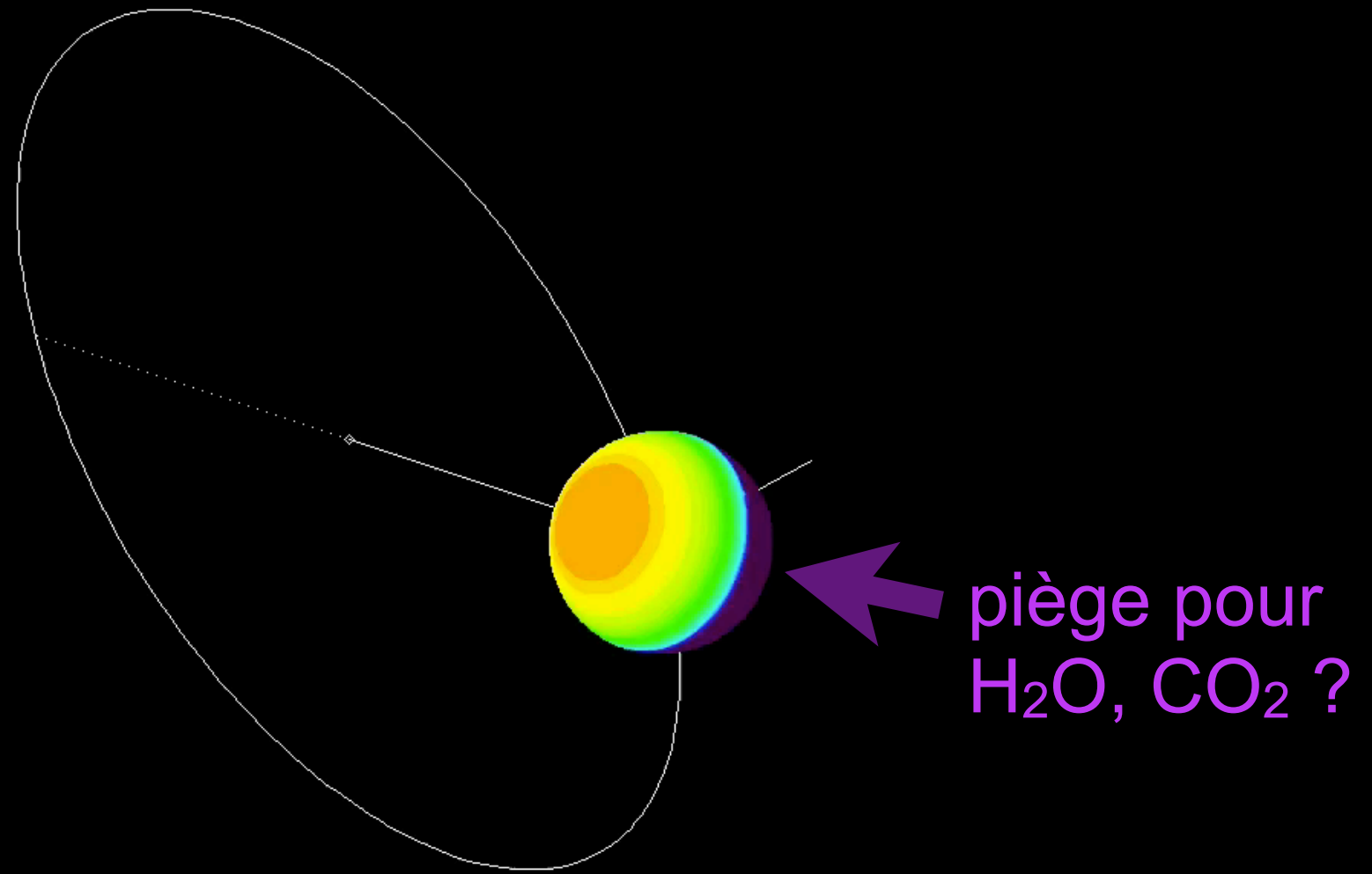
- les étoiles M sont les plus abondantes : ~80% des étoiles
- la majorité possède des planètes telluriques (>1 par étoile)
- les techniques d'observations marchent mieux pour les étoiles M

- Mais une planète dans la zone *habitable* est forcément très différente de notre planète

- étoiles actives : forte émission X, extrême UV, flares, éjections coronale
- évolution : luminosité décroissante
- spectre différent du Soleil : plus (infra)rouge
- forts effets de marées dans la Zone *Habitable*

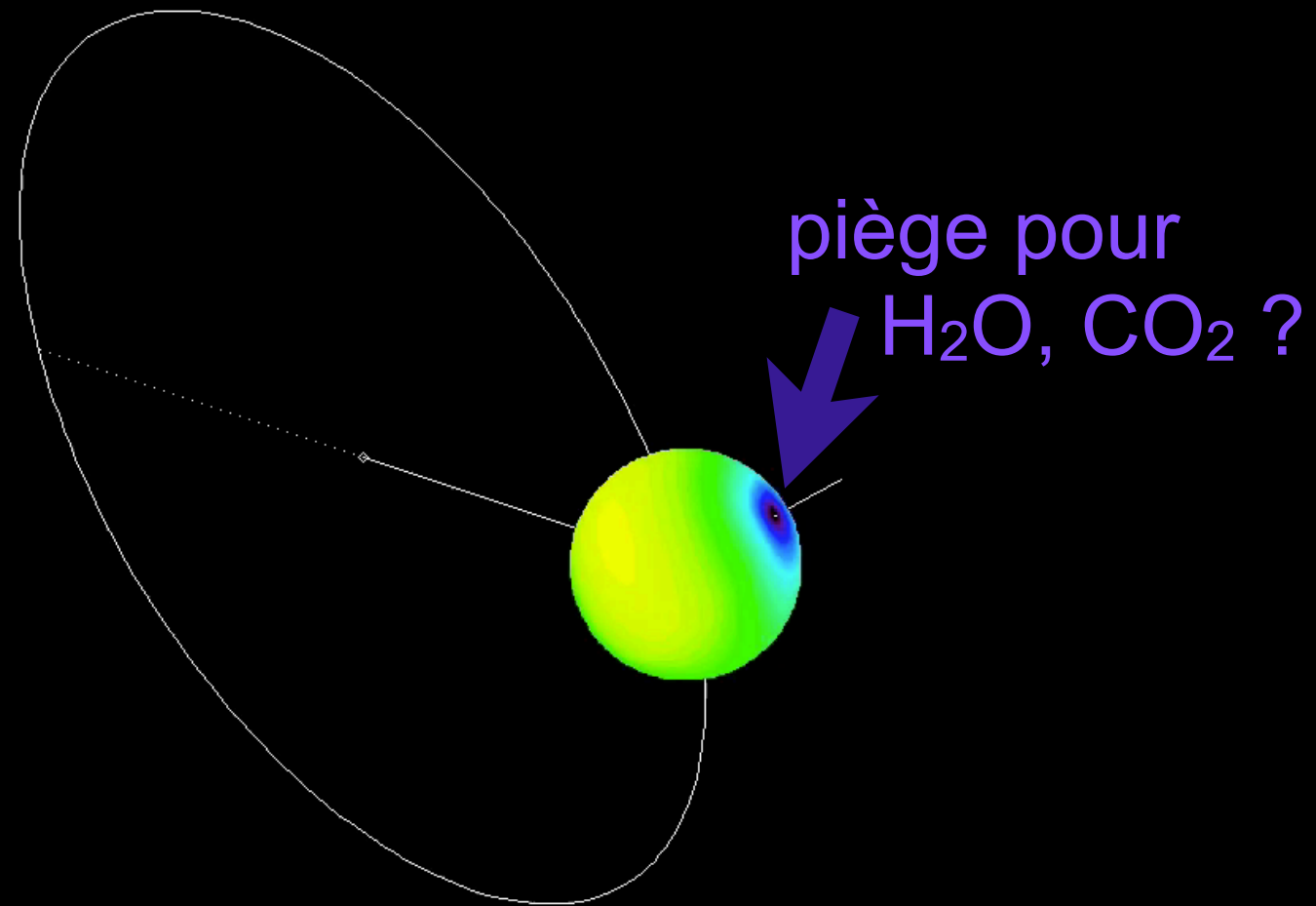


# rotation lente, synchrone résonance spin-orbite ?



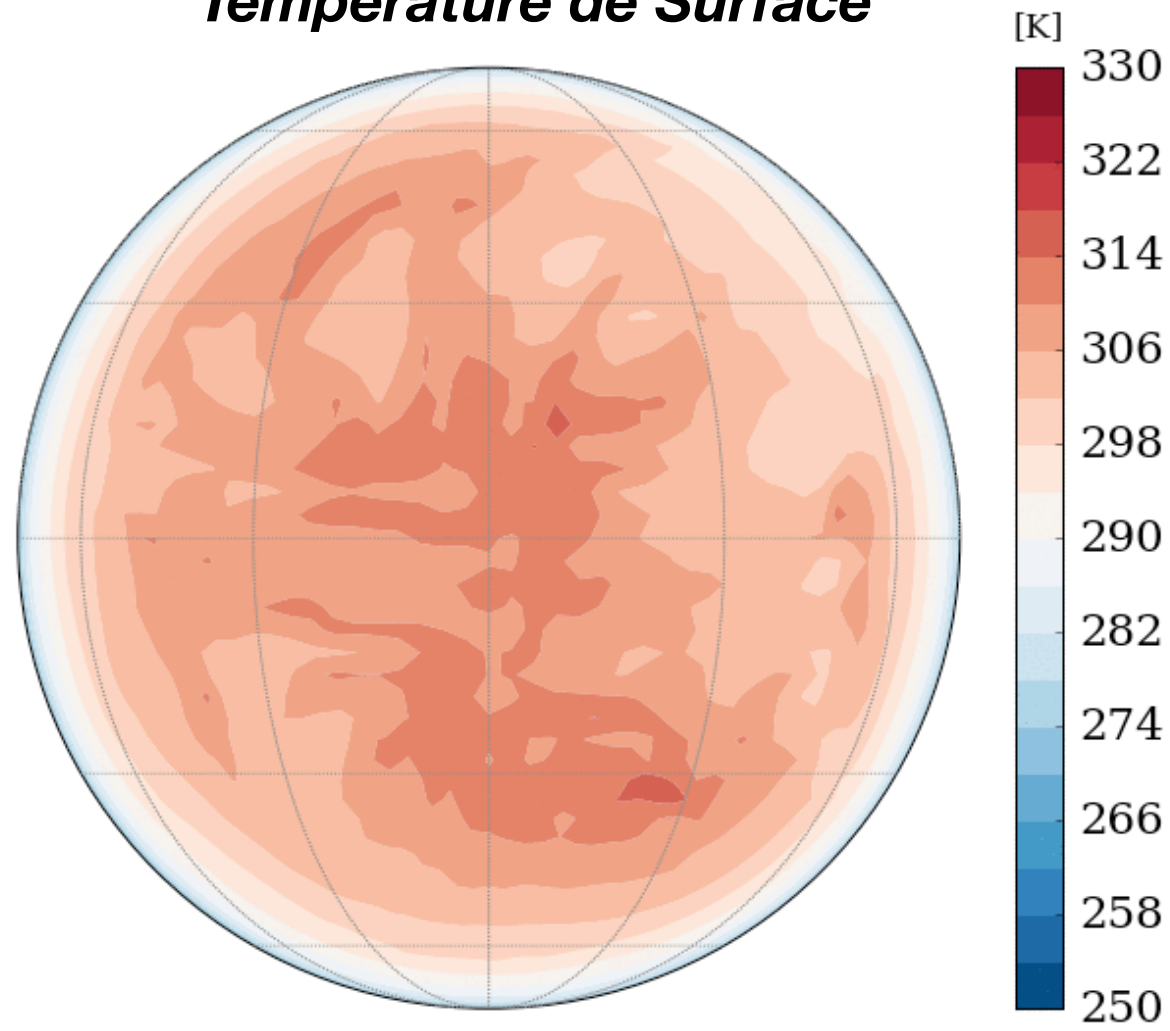


obliquité = 0°





# Température de Surface





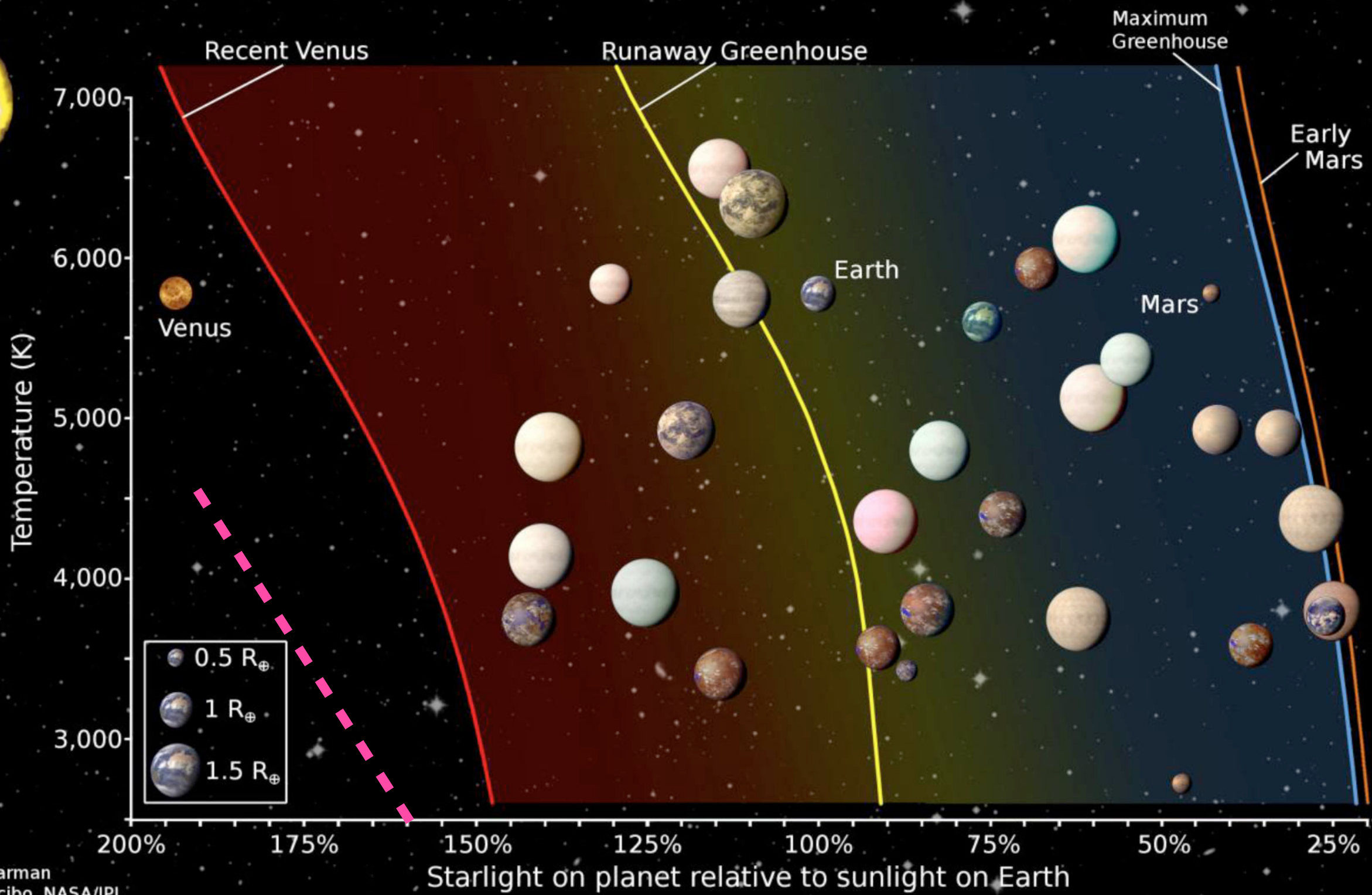
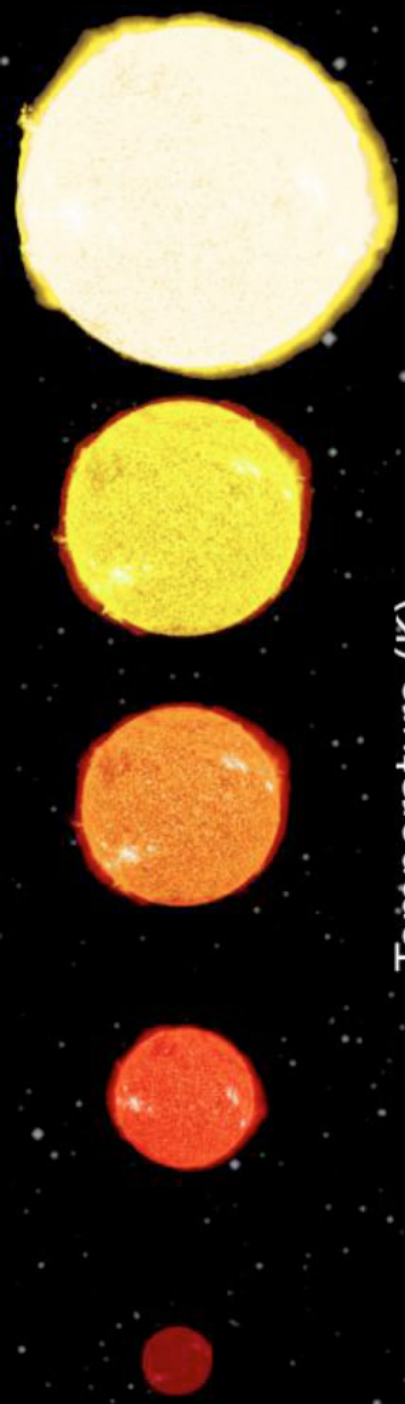


Image Credit: Chester Harman  
 Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPL





- les étoiles M sont les plus abondantes : ~80% des étoiles
- la majorité possède des planètes telluriques (>1 par étoile)
- les techniques d'observations marchent mieux pour les étoiles M

- Mais une planète dans la zone *habitable* est forcément très différente de notre planète

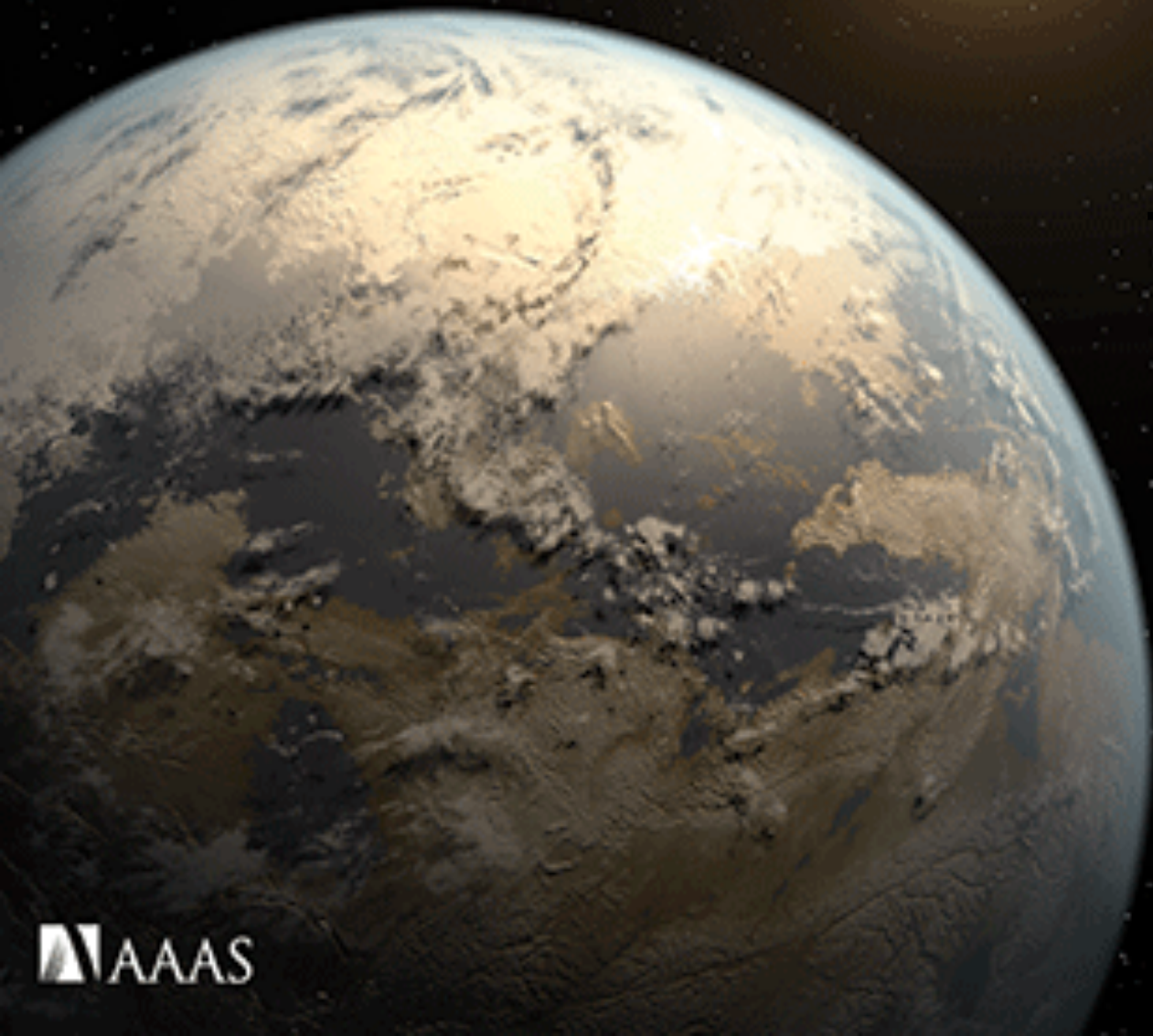
- étoiles actives : forte émission X, extrême UV, flares, éjections coronale
- évolution : luminosité décroissante
- spectre différent du Soleil : plus (infra)rouge
- forts effets de marées dans la Zone *Habitable*
- pas de planètes géantes
- formation des planètes très « violente »



# Science

18 April 2014 | \$10

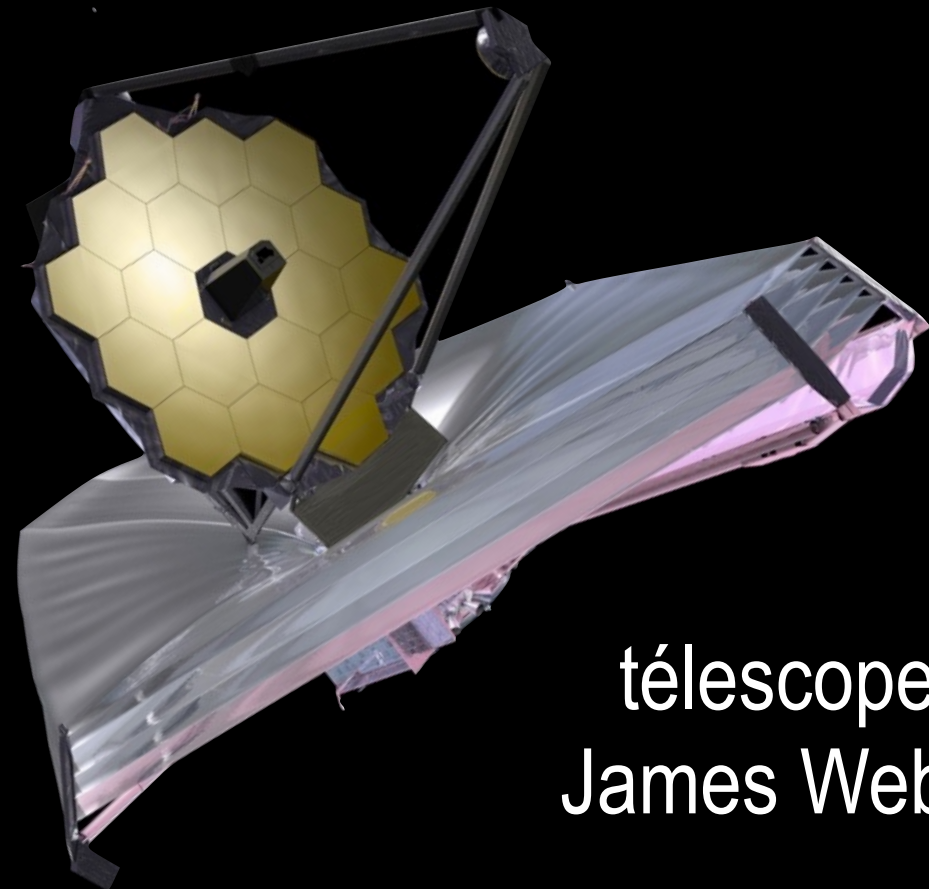
A Wink in the Sky



AAAS







télescope spatial  
James Webb (2018)