

# Introduction à l'astrophysique

## Les exoplanètes

Elsa Ducrot : [elsa.ducrot@cea.fr](mailto:elsa.ducrot@cea.fr) / [elsa.ducrot@obspm.fr](mailto:elsa.ducrot@obspm.fr)

# Organisation des sessions

- 4 séances de 2hr (au tableau + des slides)
- Cours + TD
- Questionnaires interactifs
- Vidéo support à regarder à la maison

# Plan de cours

1. Introduction générale: le système solaire, les étoiles et les exoplanètes - **cours 1**
2. Les différentes méthodes de détection d'exoplanètes - **cours 1/2**
3. Les missions dédiées à l'étude des exoplanètes (passé, présent, futur) - **cours 2**
4. Caractérisation des exoplanètes (atmosphère et intérieurs) - **cours 2/3**
5. Zoom sur quelques systèmes exoplanétaires connus - **cours 3**
6. Introduction à l'astrobiologie - **cours 4**

# Wooclap questions générales

## Comment participer ?



- 1 Allez sur [wooclap.com](https://wooclap.com)
- 2 Entrez le code d'événement dans le bandeau supérieur

Code d'événement  
**QCBGKX**

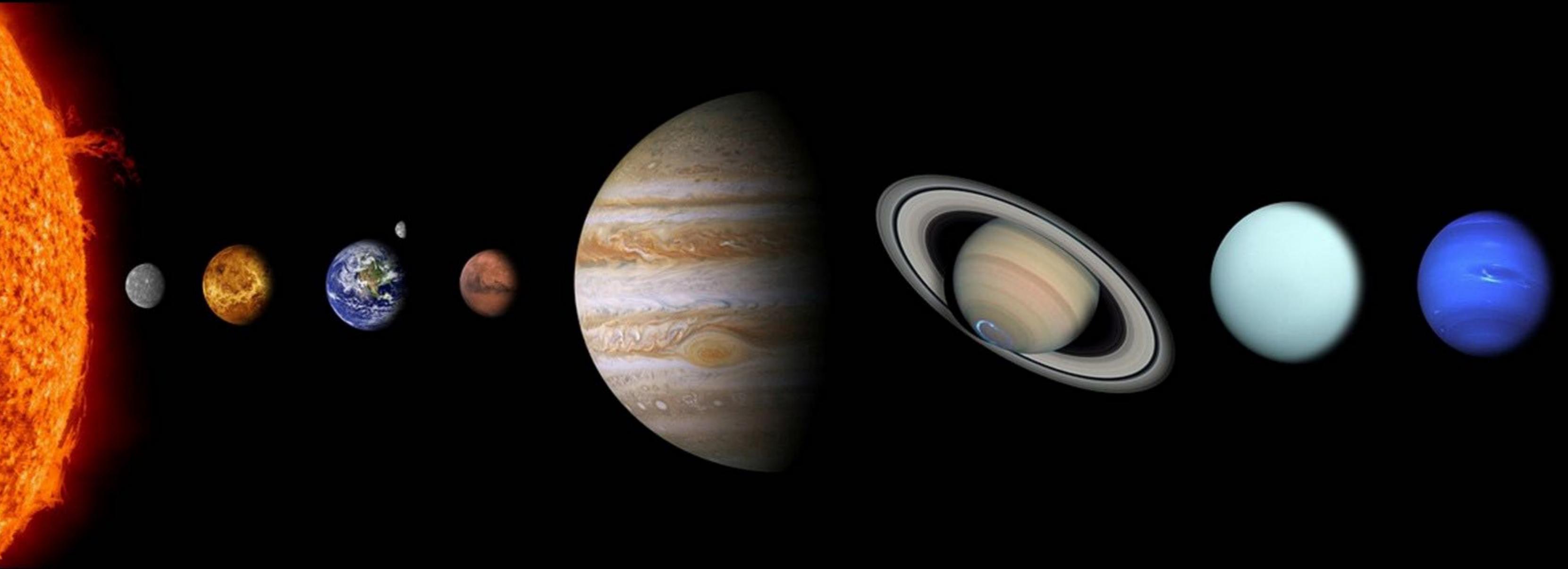


- 1 Envoyez **@QCBGKX** au **06 44 60 96 62**
- 2 Vous pouvez participer

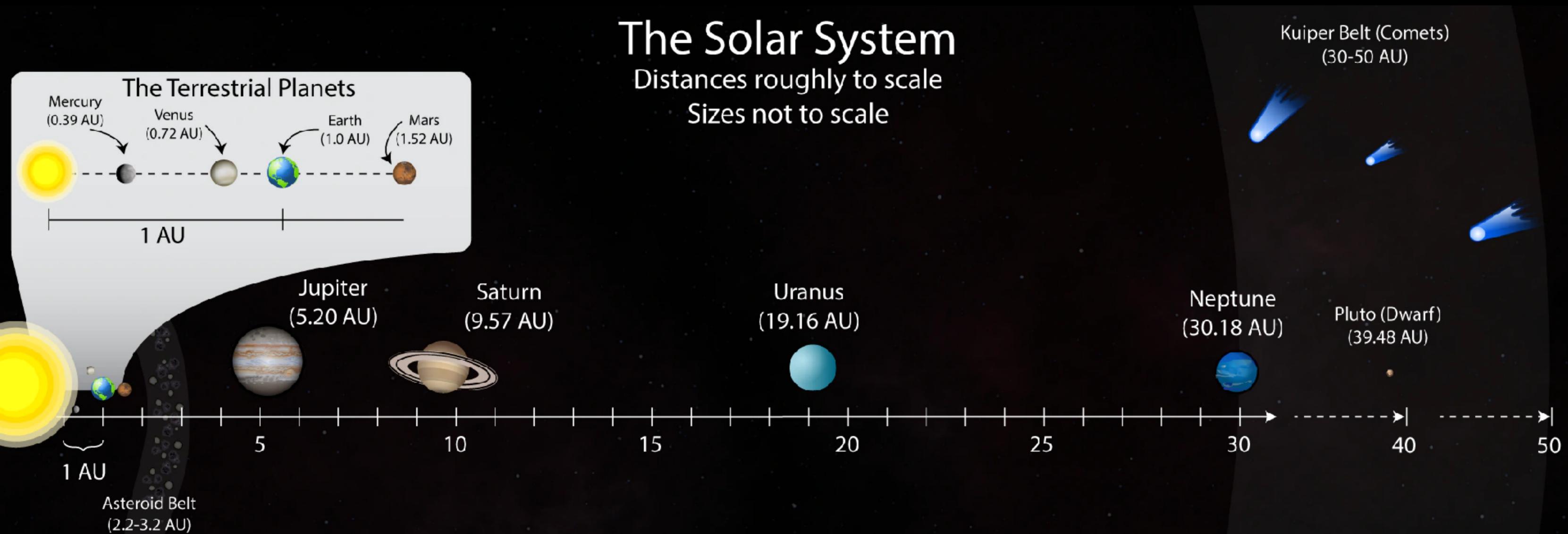
 Désactiver les réponses par SMS

Définition d'une exoplanète : « Une exoplanète est une planète qui orbite autour d'une étoile autre que notre Soleil, située en dehors du système solaire. »

# Le système solaire



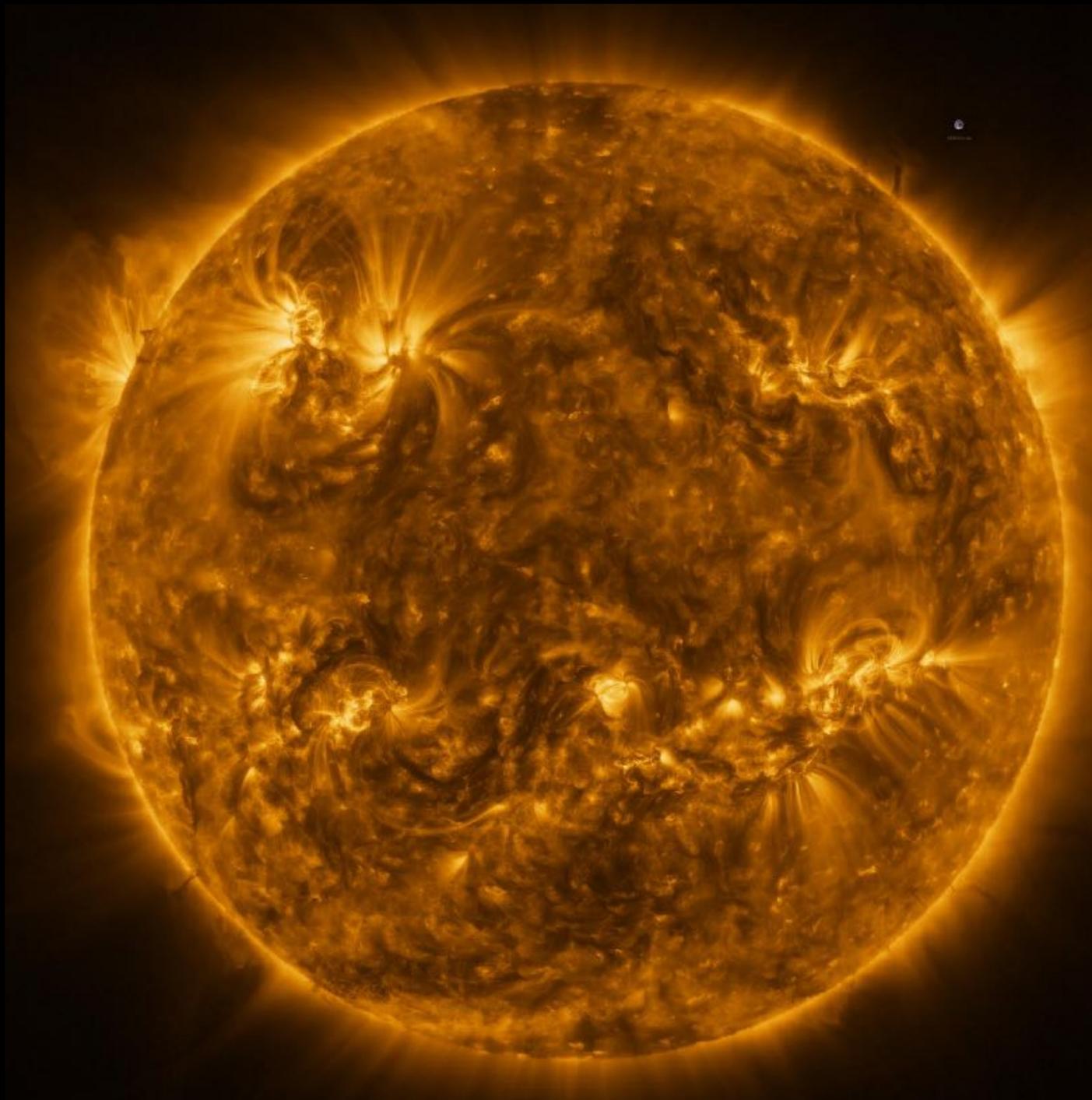
# Les distances dans le système solaire



Définition unité astronomique : L'unité astronomique (au en anglais) est égale à la distance Terre-Soleil, soit 149 597 870.7 km exactement.

Credit: Dr. Bruce Banerdt

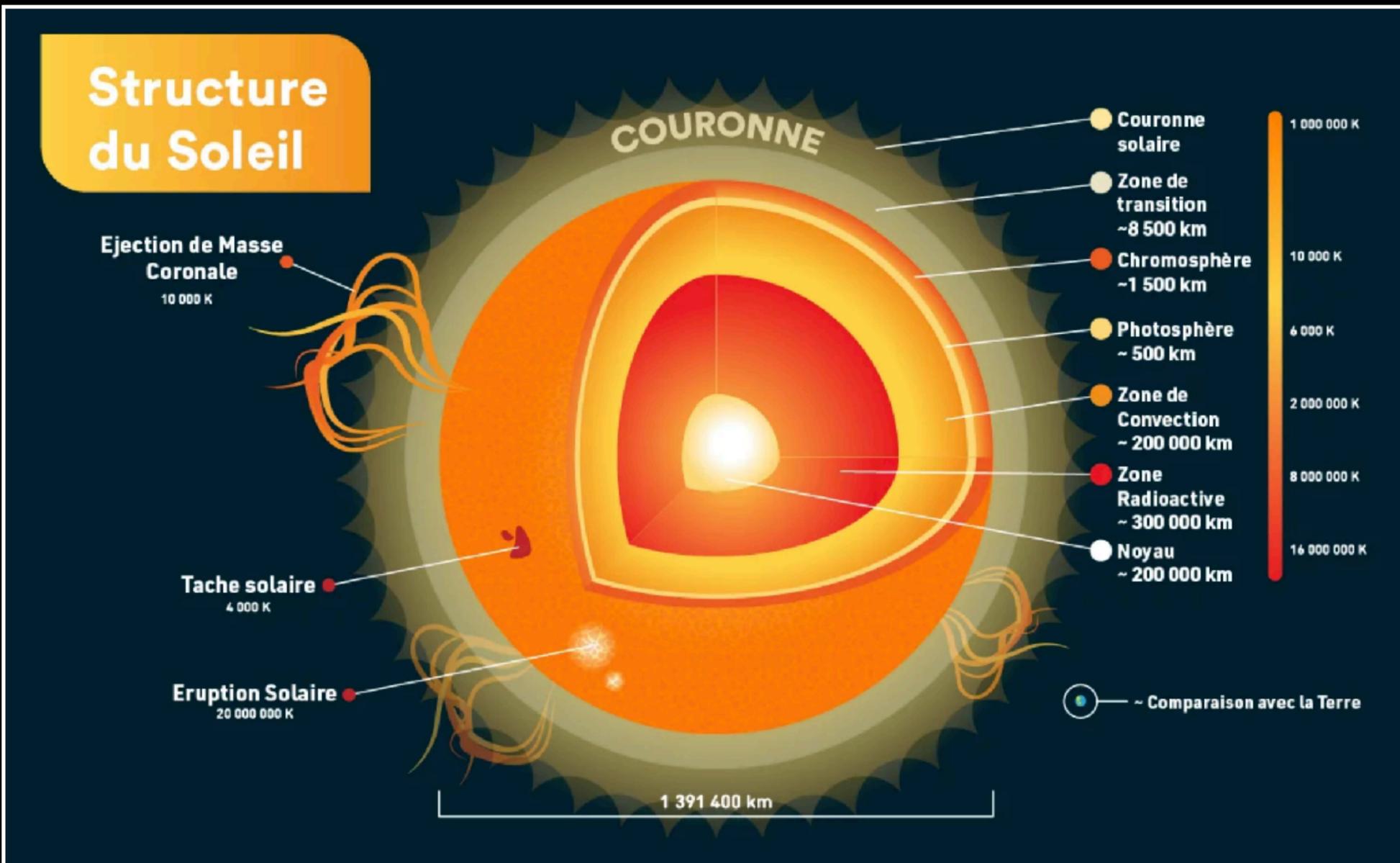
# Le soleil



- Une étoile de type G2 ( $T_{\text{eff}} = 5970\text{K}$ )
- 99% la masse du système solaire
- Masse = 332000 Terres
- Rayon = 695980 km
- Composition: principalement de l'hélium et de l'hydrogène
- Pas solide
- Cycle d'activité de 11
- Période de rotation : 25-35 jours

Pour voir des jolies images (et graphiques) du soleil vous pouvez suivre l'astronome Adam Finley: @AdamF\_Astro

# Le soleil

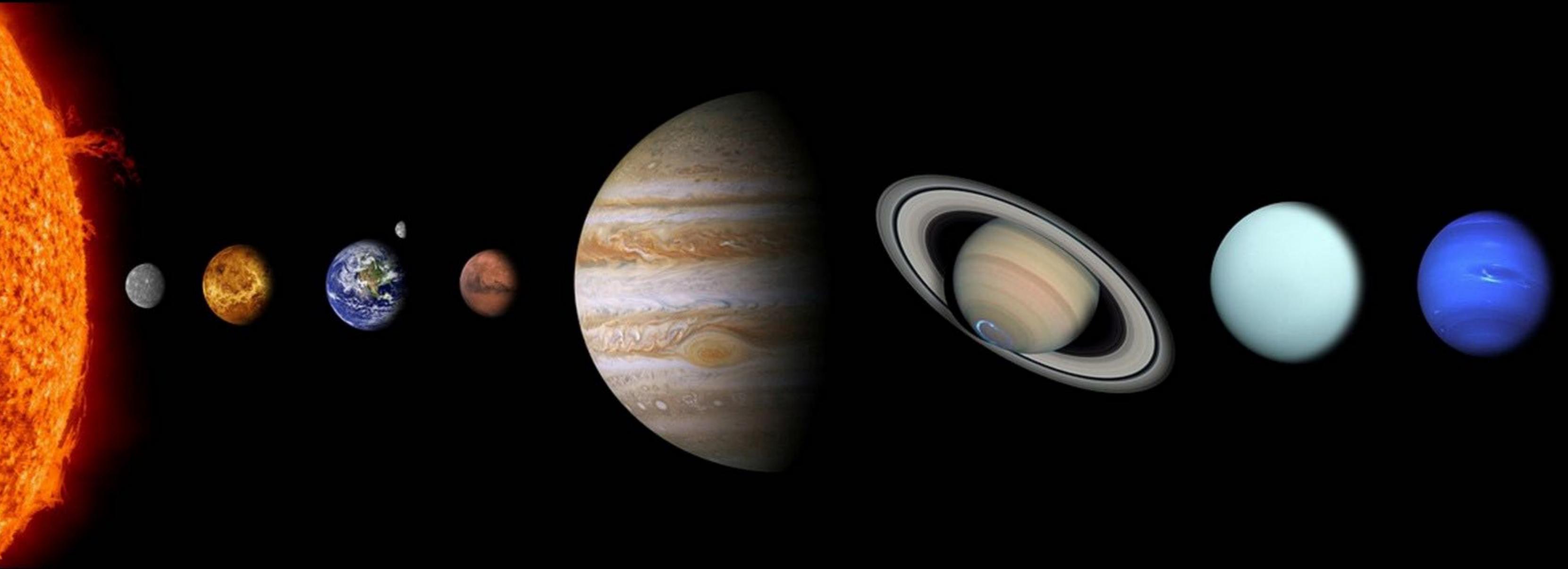


- Présence de tâches sur la photosphère
- Elles apparaissent dans les régions actives
- Au dessus des tâches se produisent des éruptions solaires
- Pour étudier l'activité du soleil on compte les tâches
- Le vent solaire créer des aurores boréales sur Terre

Credit: NASA

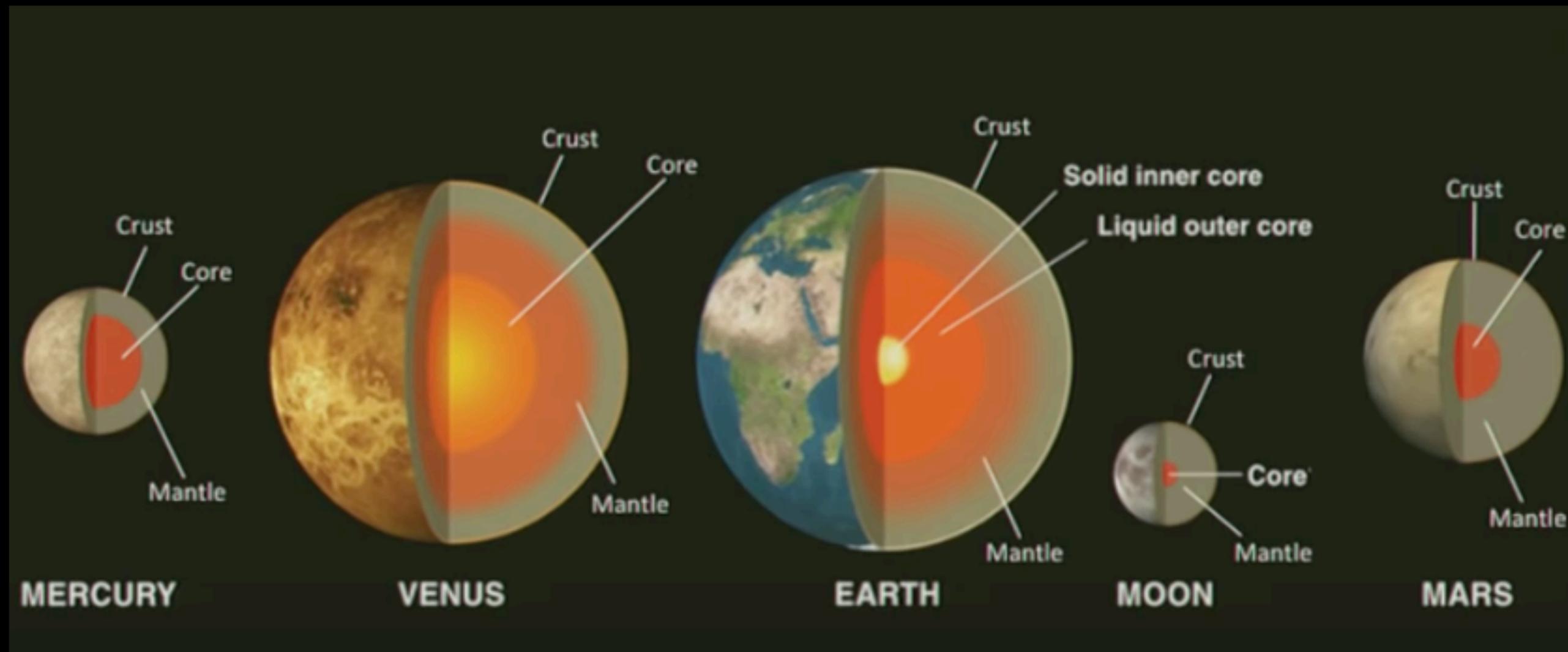


# Le système solaire



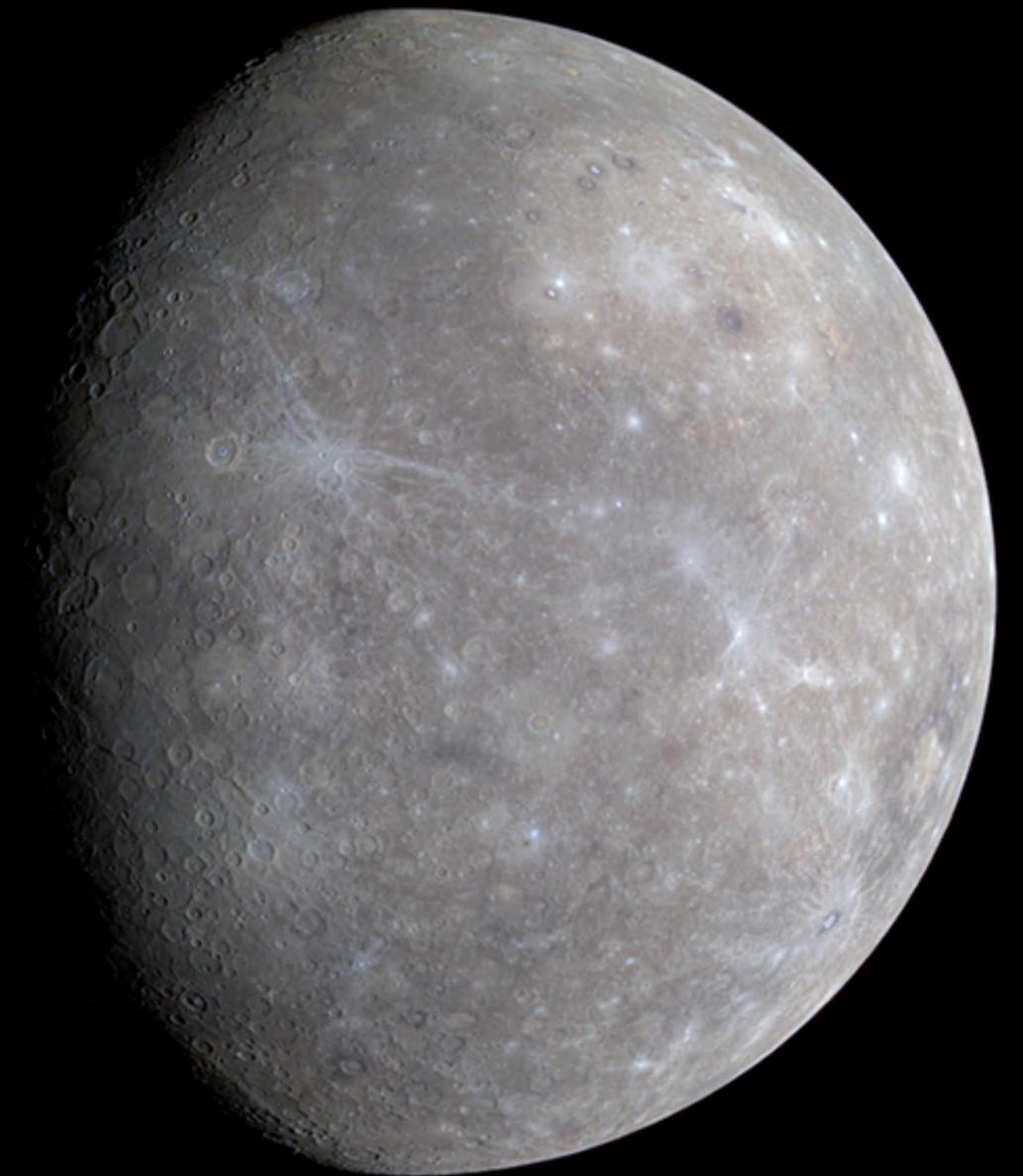
# Les planètes telluriques

- Petites en taille et masse, composée de roches et de métaux, surface solide, structure interne en couche concentriques (noyau, manteau, croûte)



# Mercure

- Plus petite du système solaire (2440 km)
- Quasiment pas atmosphère
- Couverte de cratères
- Très faible champ magnétique
- En résonance spin/orbite 3/2 (3 tours sur elle-même = 2 tour du Soleil)
- Grande variation de température entre le côté jour et le nuit



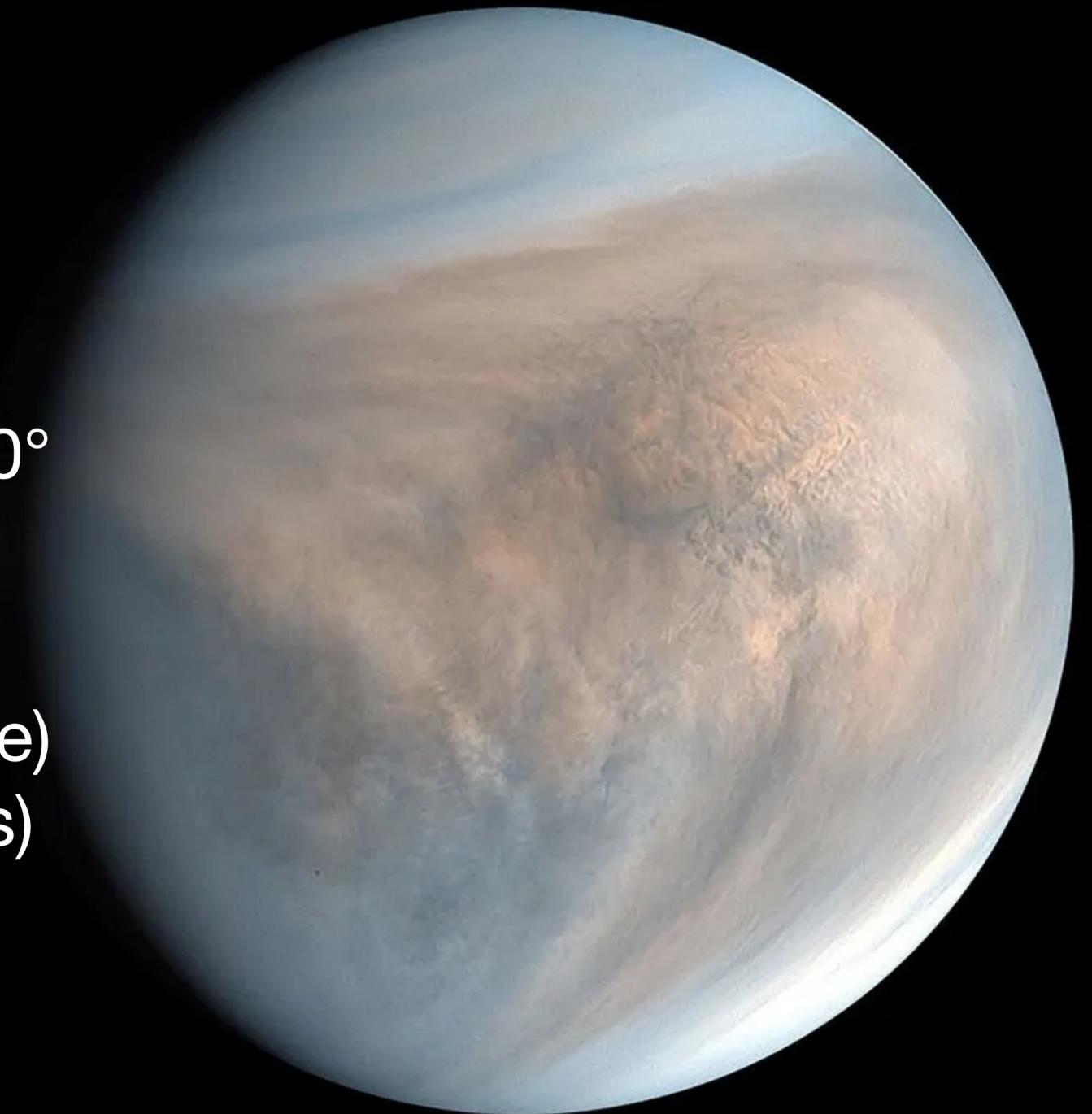
# Passage de Mercure vu depuis la Terre

**MERCURY TRANSIT**

11.11.18

# Venus

- Taille similaire à la Terre 6052km
- Atmosphère très épaisse, 96% CO<sub>2</sub>
- Température de surface très élevée (470° C) due à un fort effet de serre
- Présence de Volcans actifs
- 1 jour sur Vénus (243 jours terrestre)  
presque égal à 1 an sur Vénus (224 jours)
- Rotation rétrograde



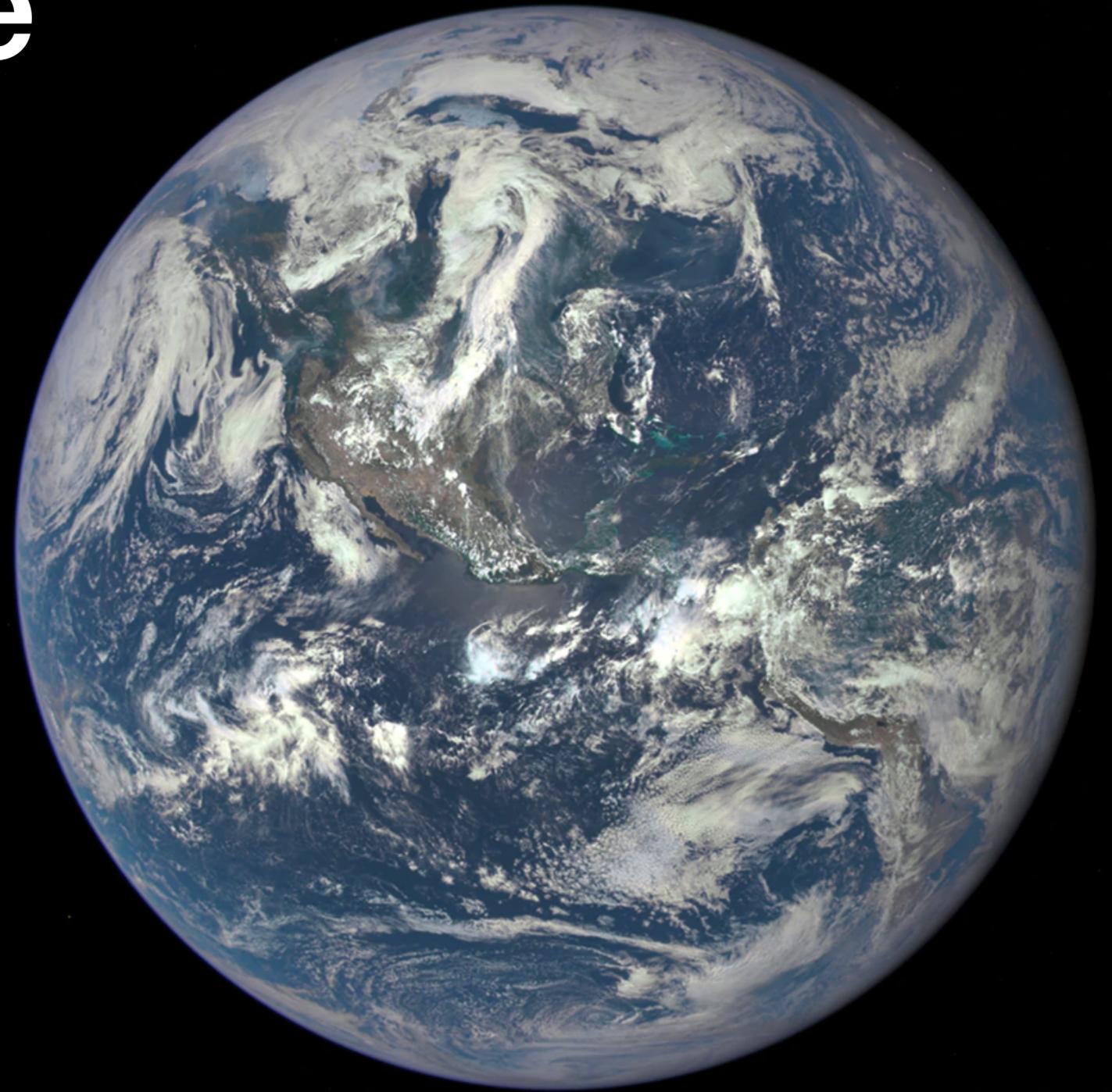
# Venus



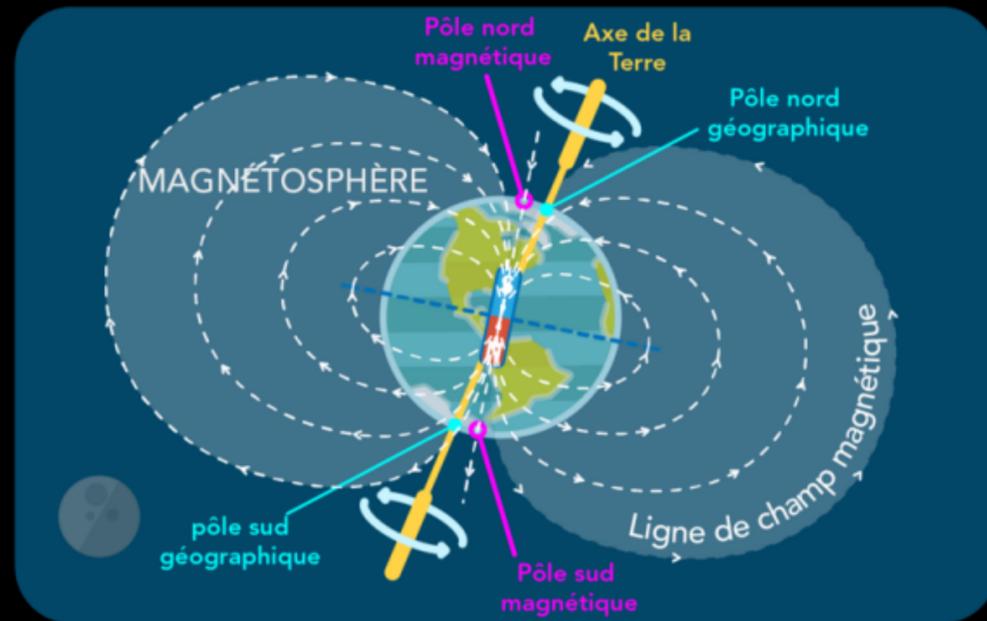
Credit: Sonde Venera 13 1982

# Terre

- Bleue car grande quantité d'eau (71%)
- L'unique planète habitée connue
- Structure : noyau, manteau, croûte
- Comme un aimant : Champ magnétique
- Seule planète du système avec de la technique des plaques
- Atmosphère épaisse : 78 N<sub>2</sub>, 21% O<sub>2</sub>
- Atmosphère : protège des UV et réchauffe
- Le champ magnétique nous projète aussi



# CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE

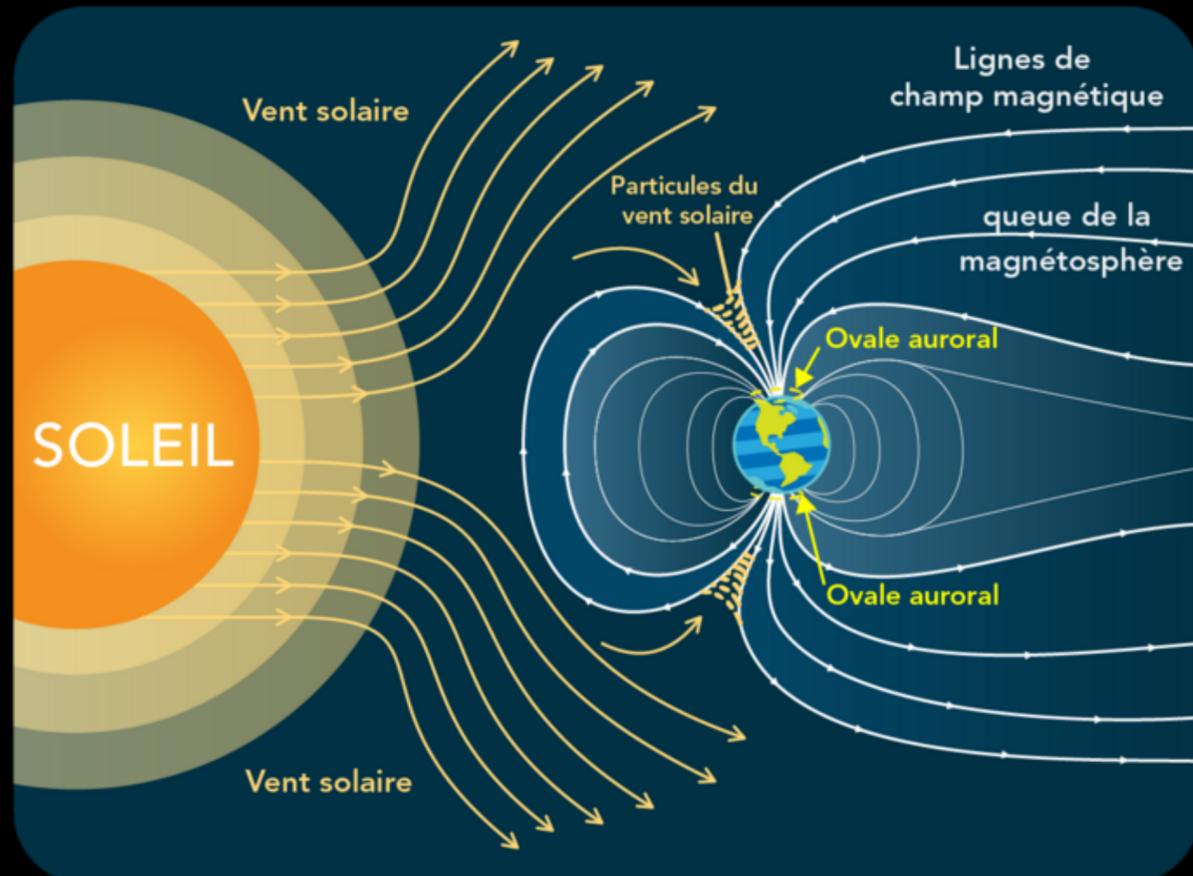


# Terre

Credit: NASA



# Vent solaire et la magnétosphère



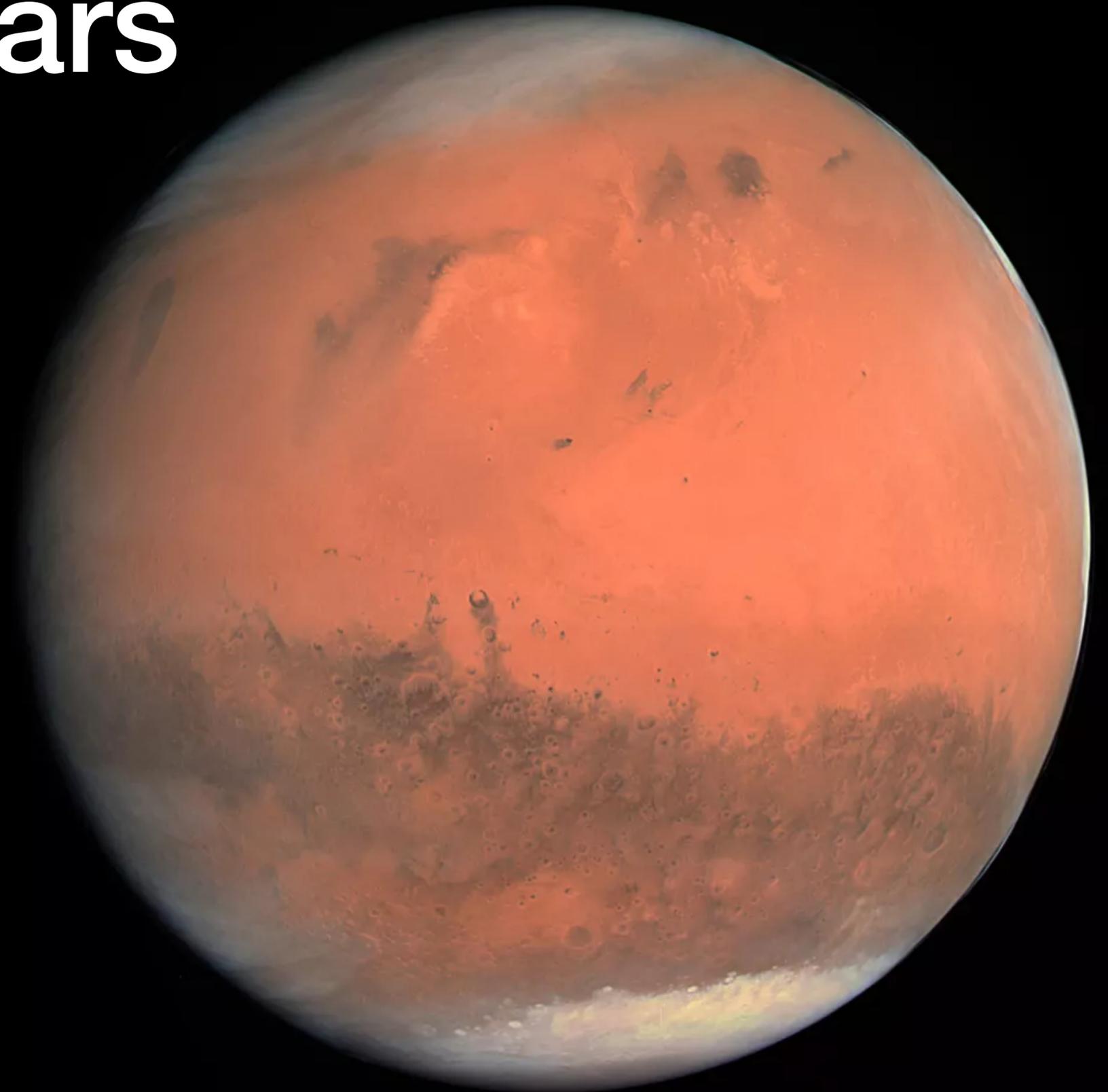
Pour voir des jolies images et vulgarisation astronomie : @EricLagadec

# Terre vue depuis Saturne



# Mars

- Beaucoup plus petite que la Terre
- Orbite plus elliptique que la Terre
- Température moyenne  $-63^{\circ}\text{C}$
- Atmosphère très fine 95%  $\text{CO}_2$  et un peu de CO, vents très forts
- 2 satellites : Phobos et Deimos
- Plus de champ magnétique
- Mars est la planète la plus explorée de notre Système solaire.



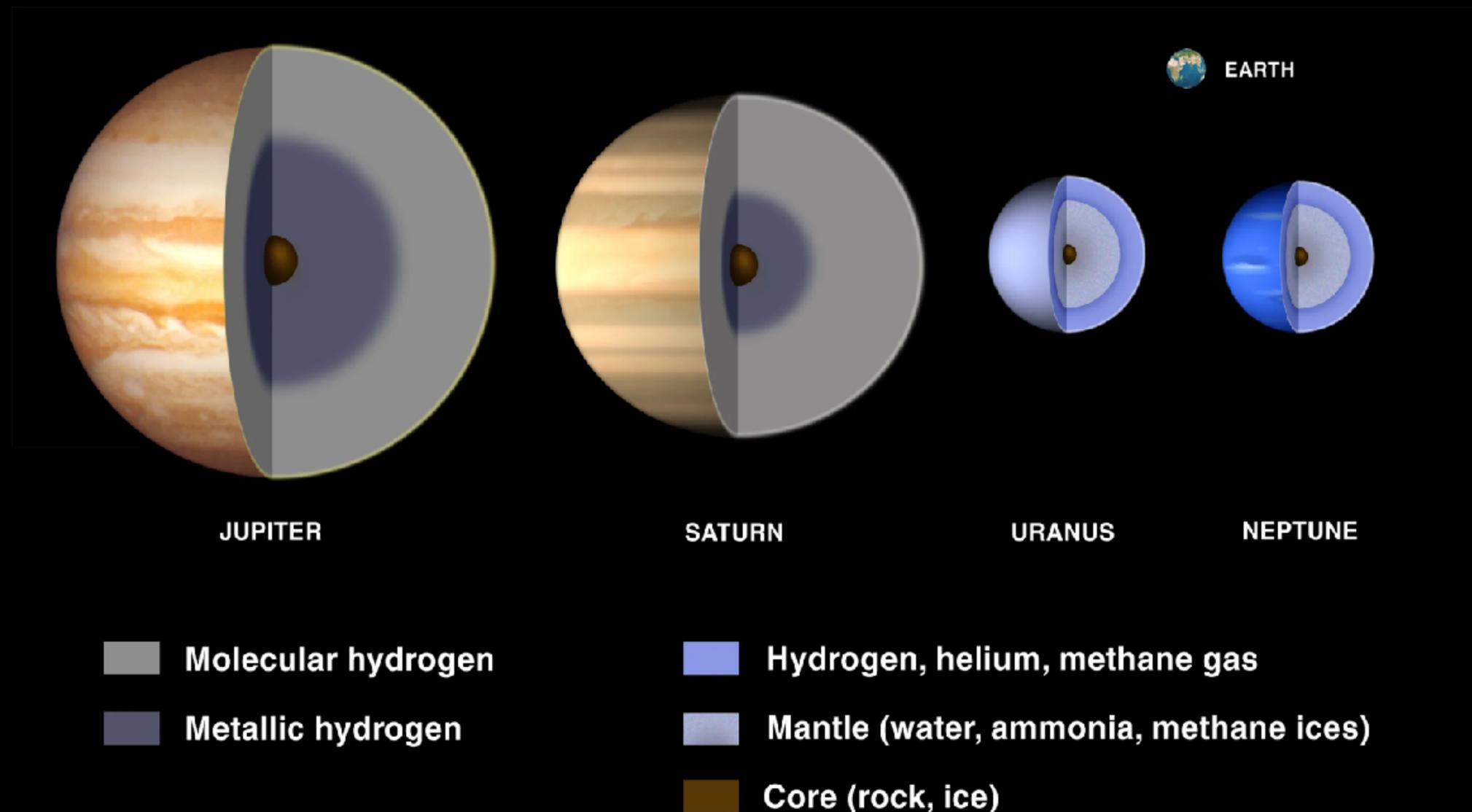
# Mars



Credit: Dr. Bruce Banerdt

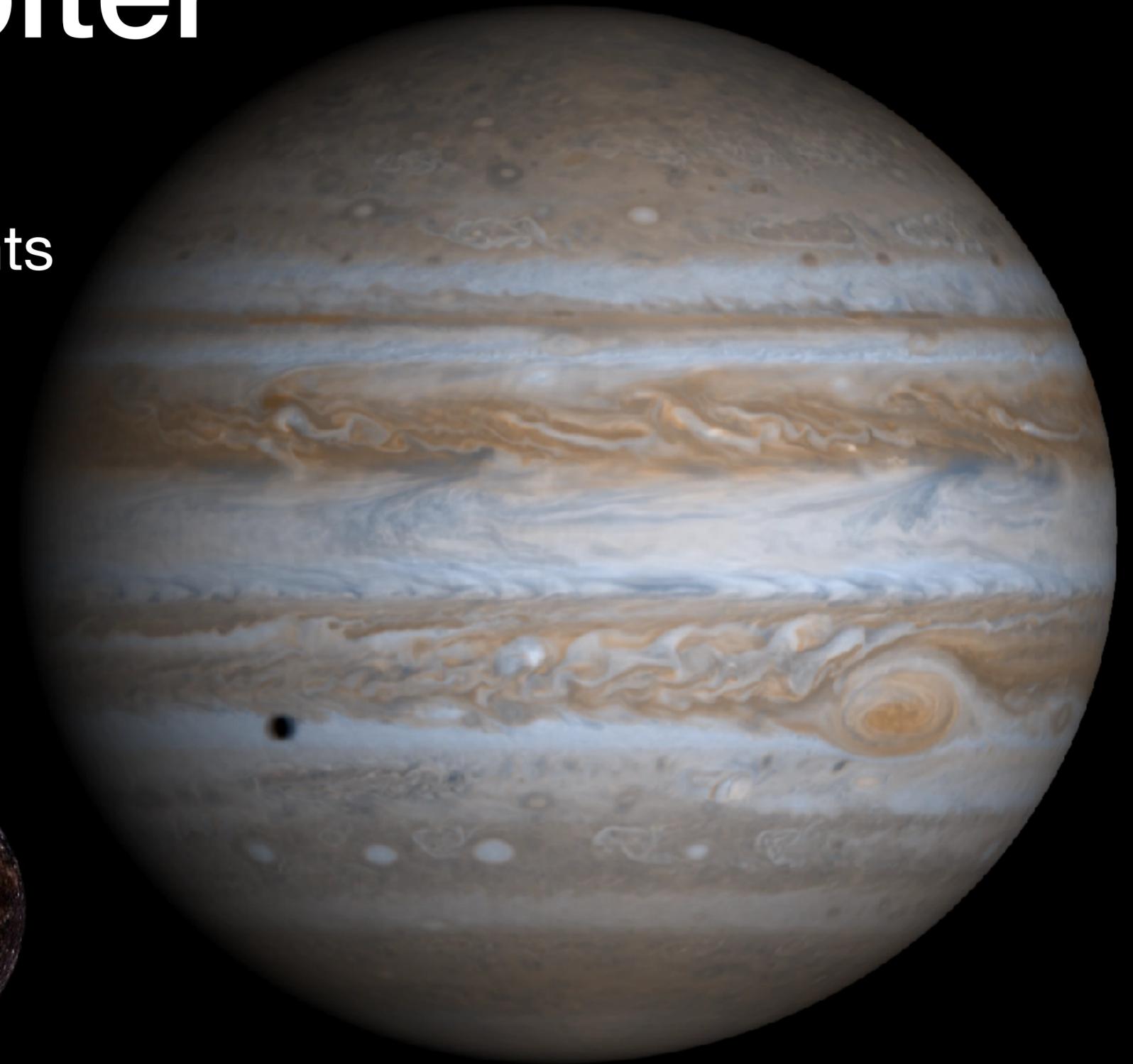
# Les planètes Gazeuses

- Principalement constituées de gaz (dominée par l'hydrogène et l'hélium), sans surface solide, grand taille et masse, structure interne pour Jupiter/Saturne (noyau rocheux, puis couche d'hydrogène métallique, puis couche d'hydrogène gazeux), structure pour Uranus/Neptune (noyau rocheux, manteau de glaces, puis couche d'hydrogène gazeux)



# Jupiter

- La plus grande
- Boule de gaz et de liquide (H<sub>2</sub>, He)
- Rotation rapide stimule vents violents
- Grande tâche : ouragan
- Champ magnétique très fort
- Anneaux invisibles
- Entourée de 95 lunes !
- Dont 4 ~ taille d'une planète





Credit: NASA/JWST

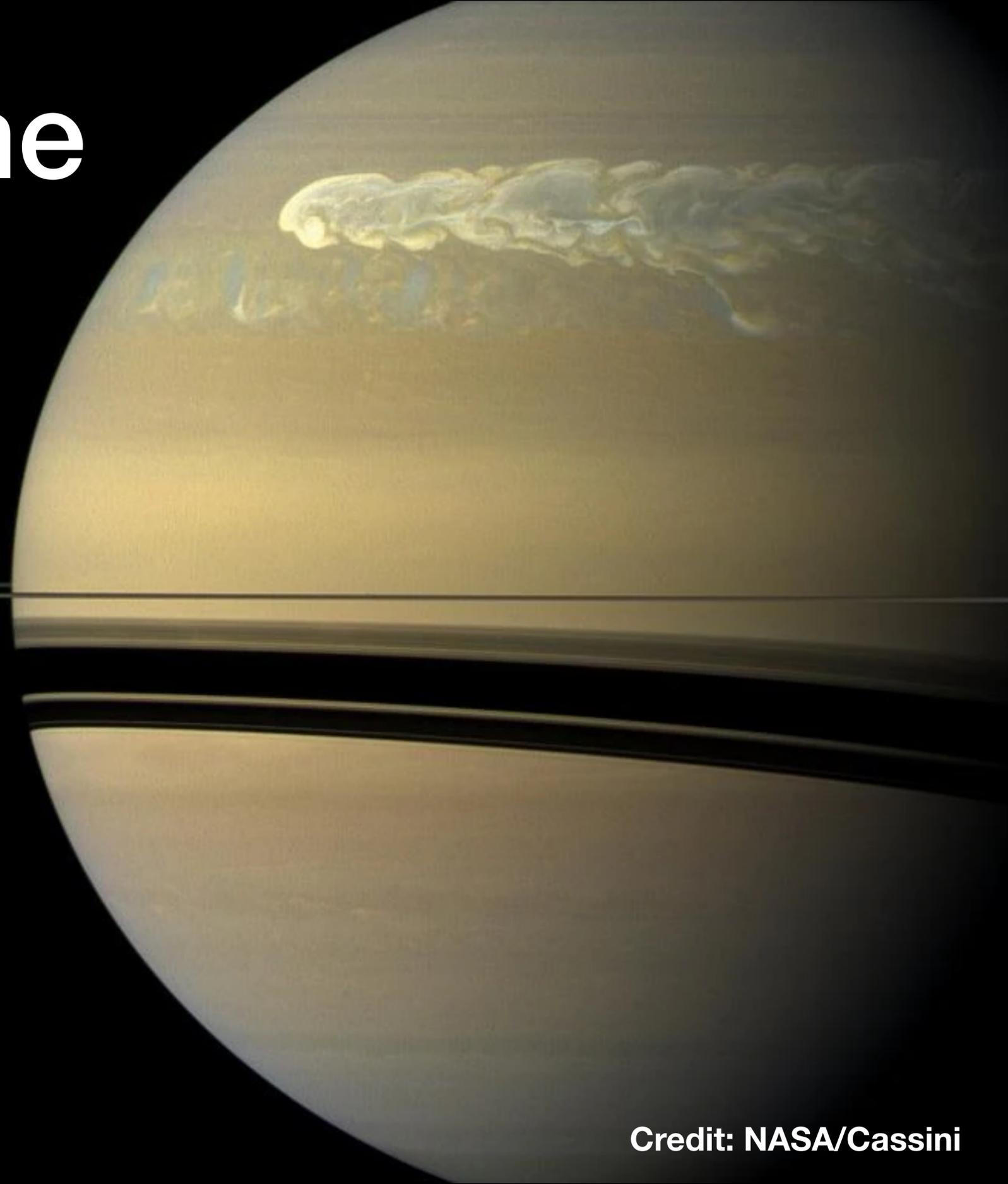
# Jupiter



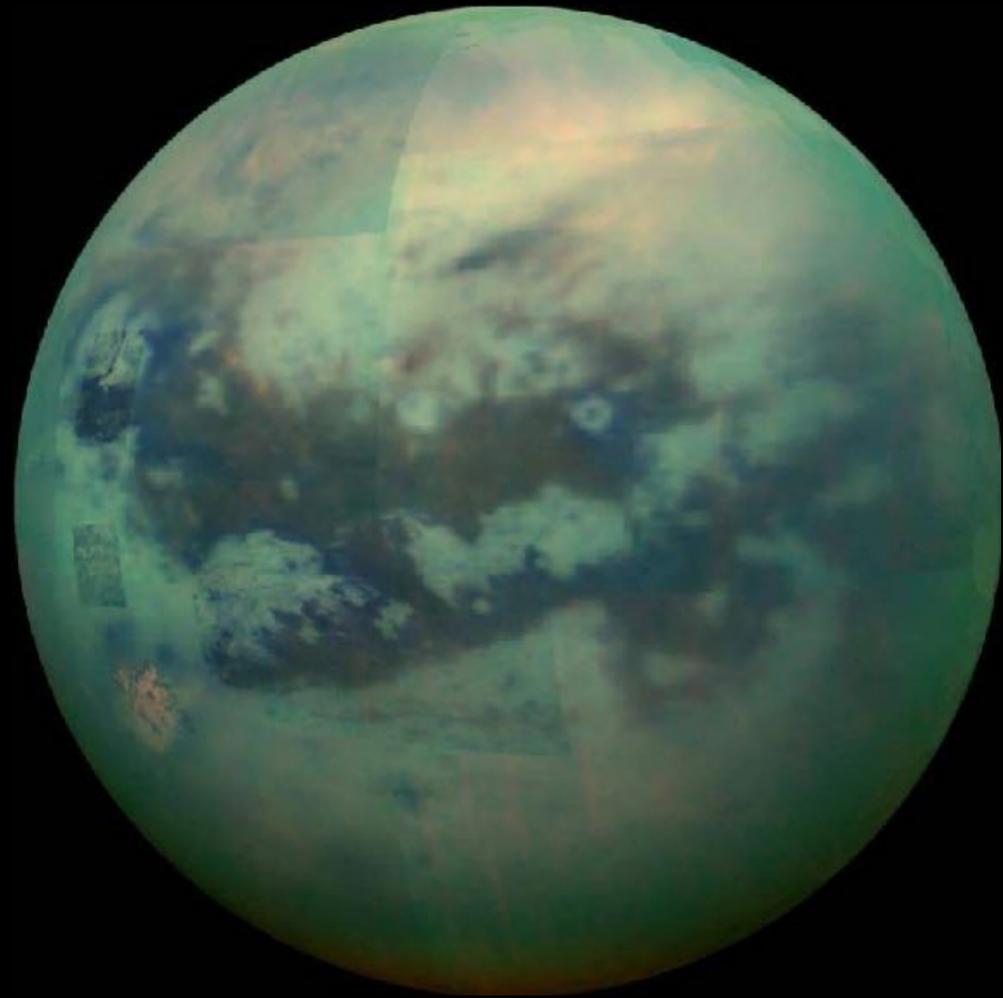
Credit: NASA/JUNO

# Saturne

- Boule de gaz et de liquide (H<sub>2</sub>, He)
- Très peu dense (moins que l'eau)
- De nombreuses tempêtes
- Axe de rotation incliné à 27°
- Entourées d'anneaux: composés de milliards de grains de glace d'eau, de 1 cm à plusieurs mètres
- Anneaux nommés de A à G suivant l'ordre de leur découverte
- 150 lunes
- Les deux plus connues : Titan et Encelade



# Titan et Encelade



# Saturne



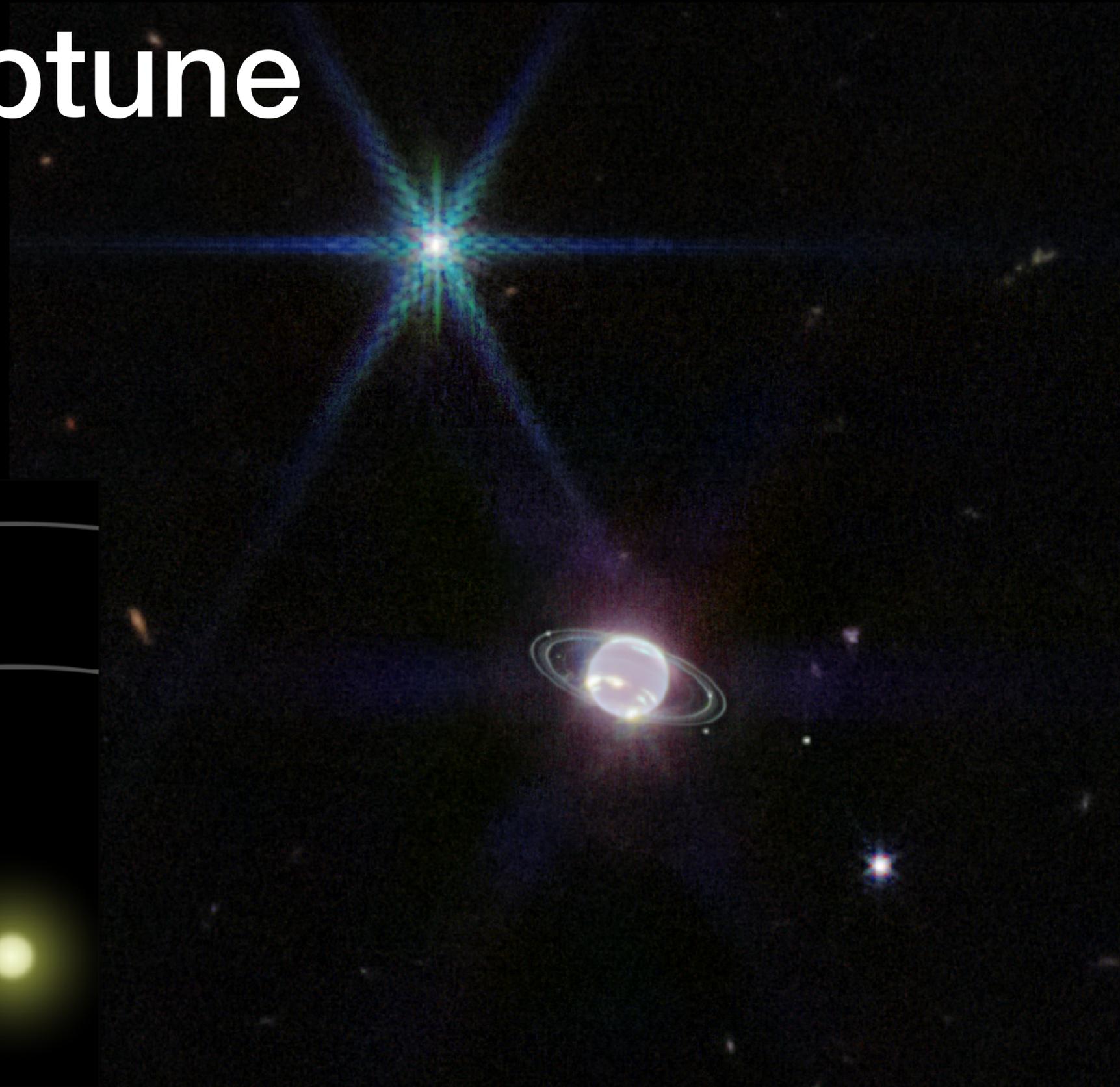
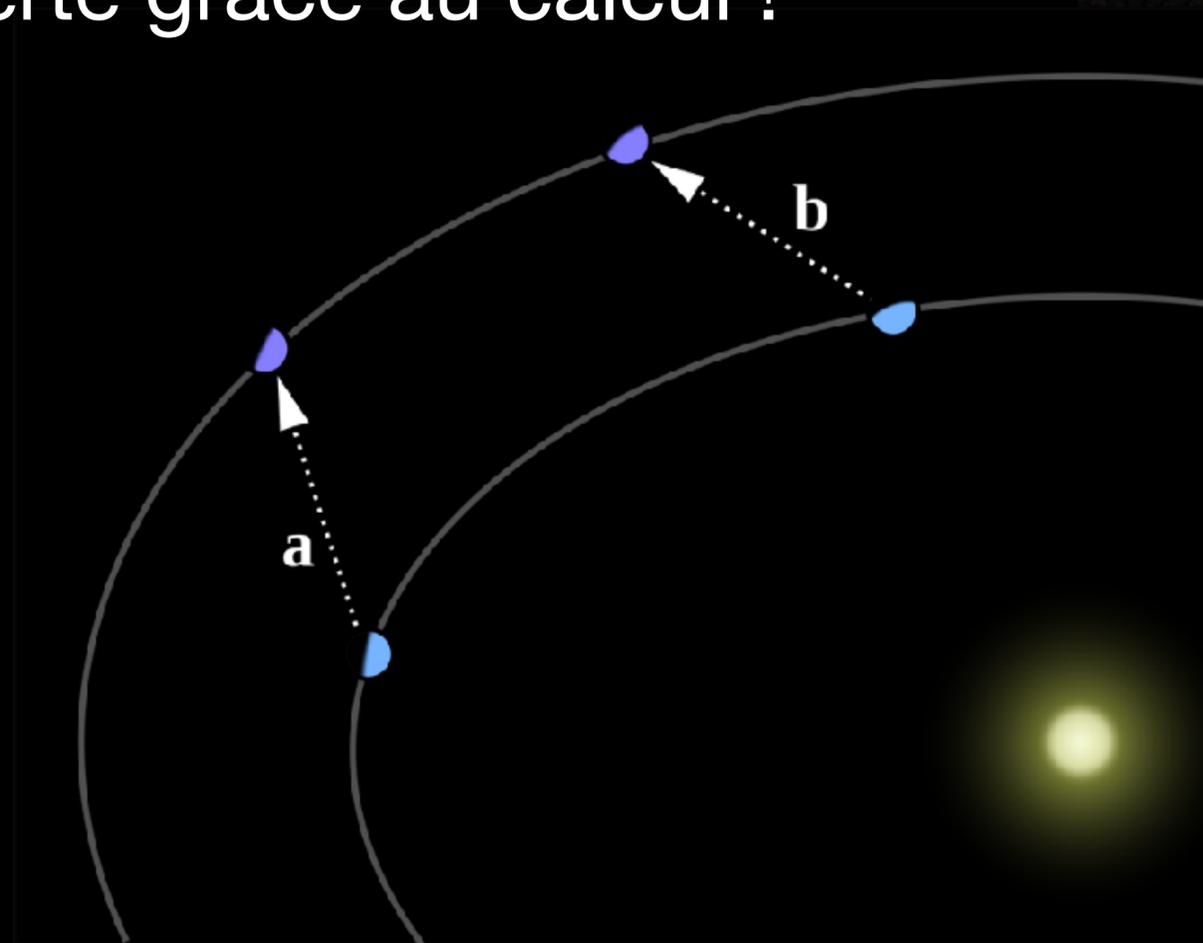
# Uranus



- Géante glacée
- Composée d'He, H et de glaces (de méthane, d'eau et d'ammoniac)
- Vents extrêmes
- Axe incliné à  $97.8^\circ$
- Se traduit par de long étés/hivers

# Neptune

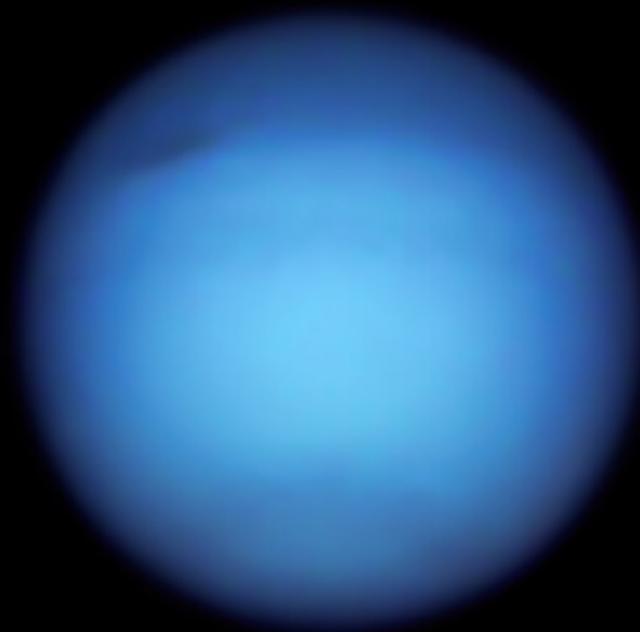
- Ressemble beaucoup à Uranus
- Composée d'He, H, et de glaces de méthane, ammoniac et eau
- Tempêtes les plus violentes
- Découverte grâce au calcul !



# Neptune



Voyager 2 (1989)

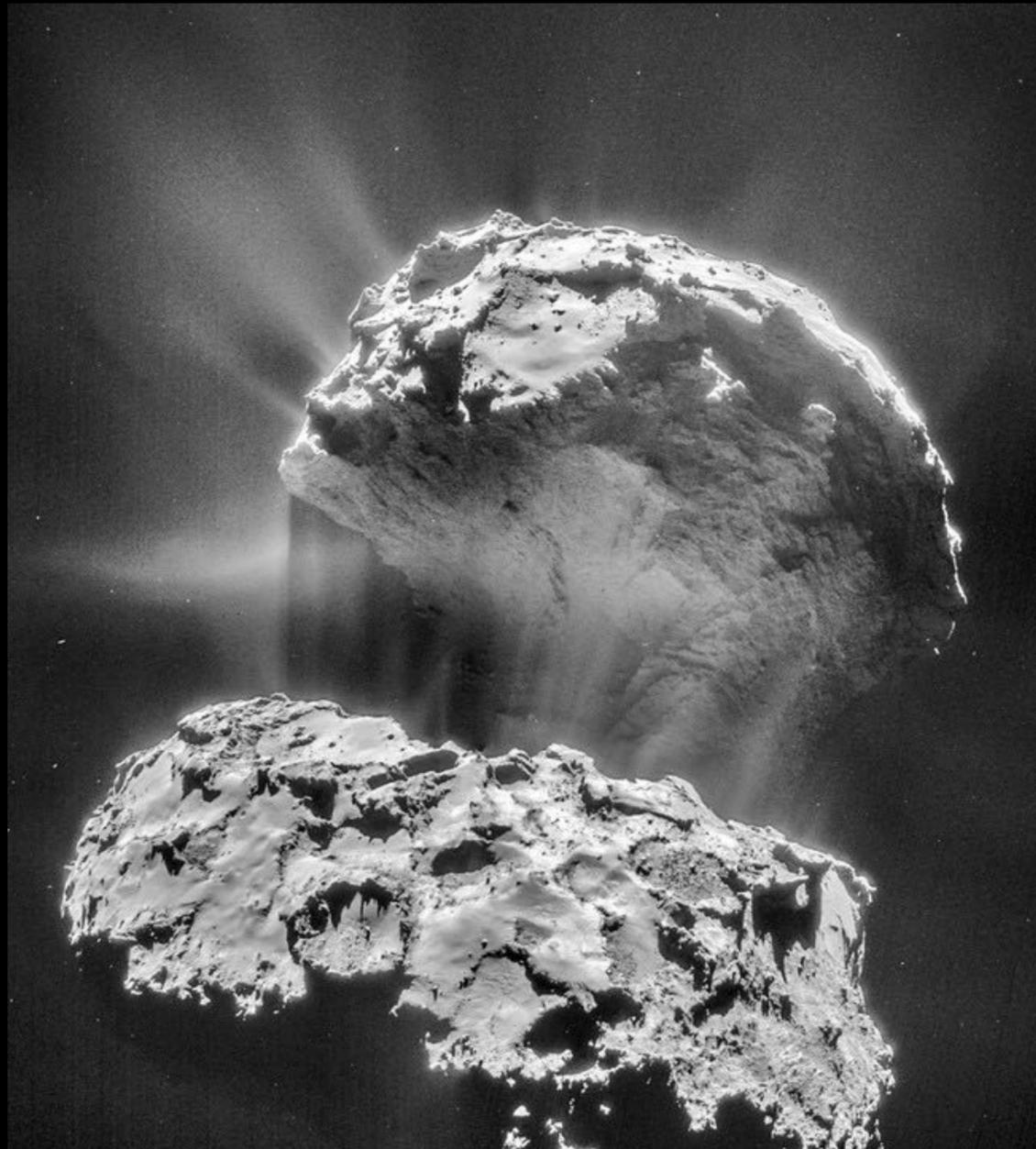


Hubble (2021)



Webb (2022)

# Autres corps du système solaire



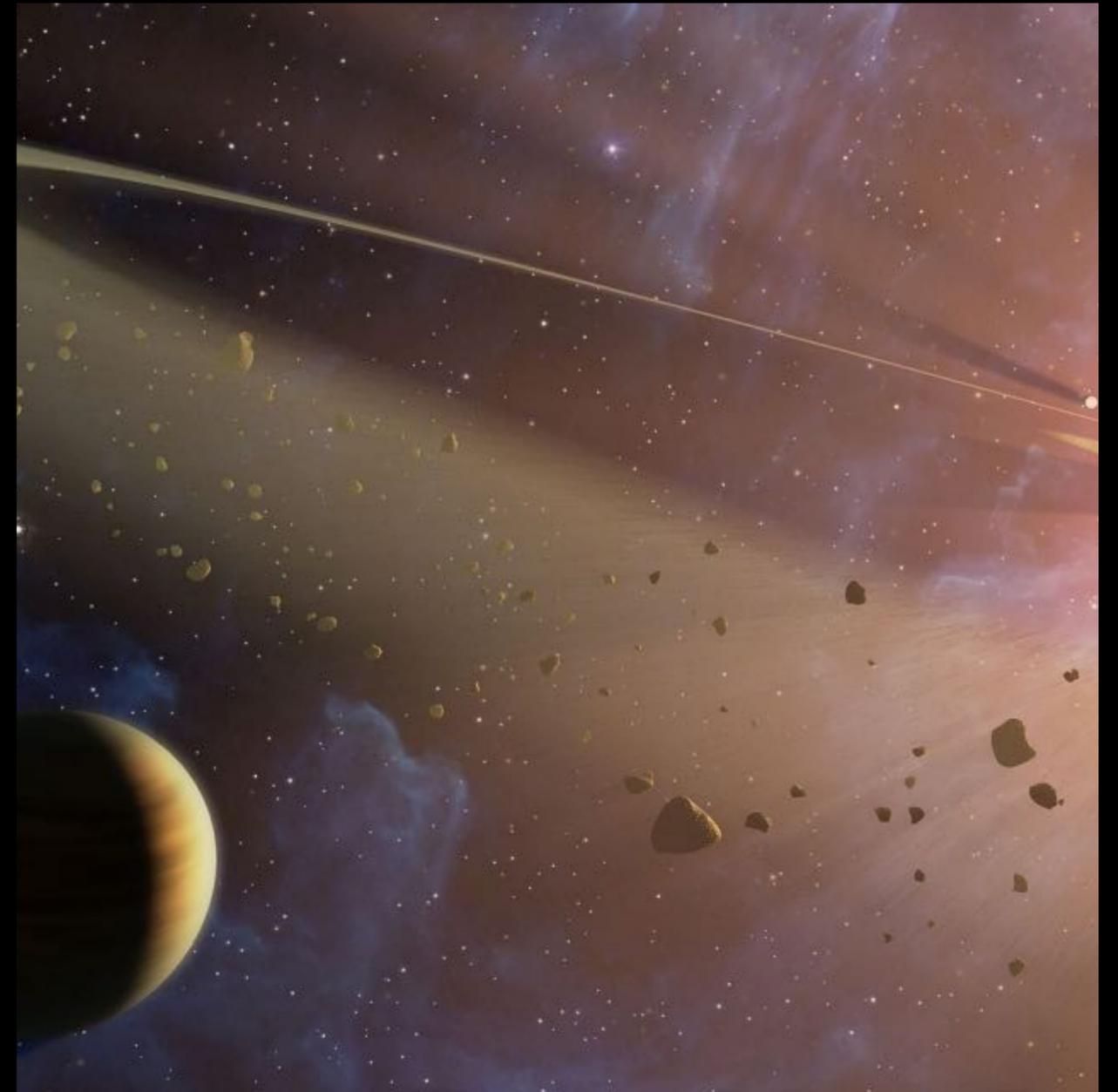
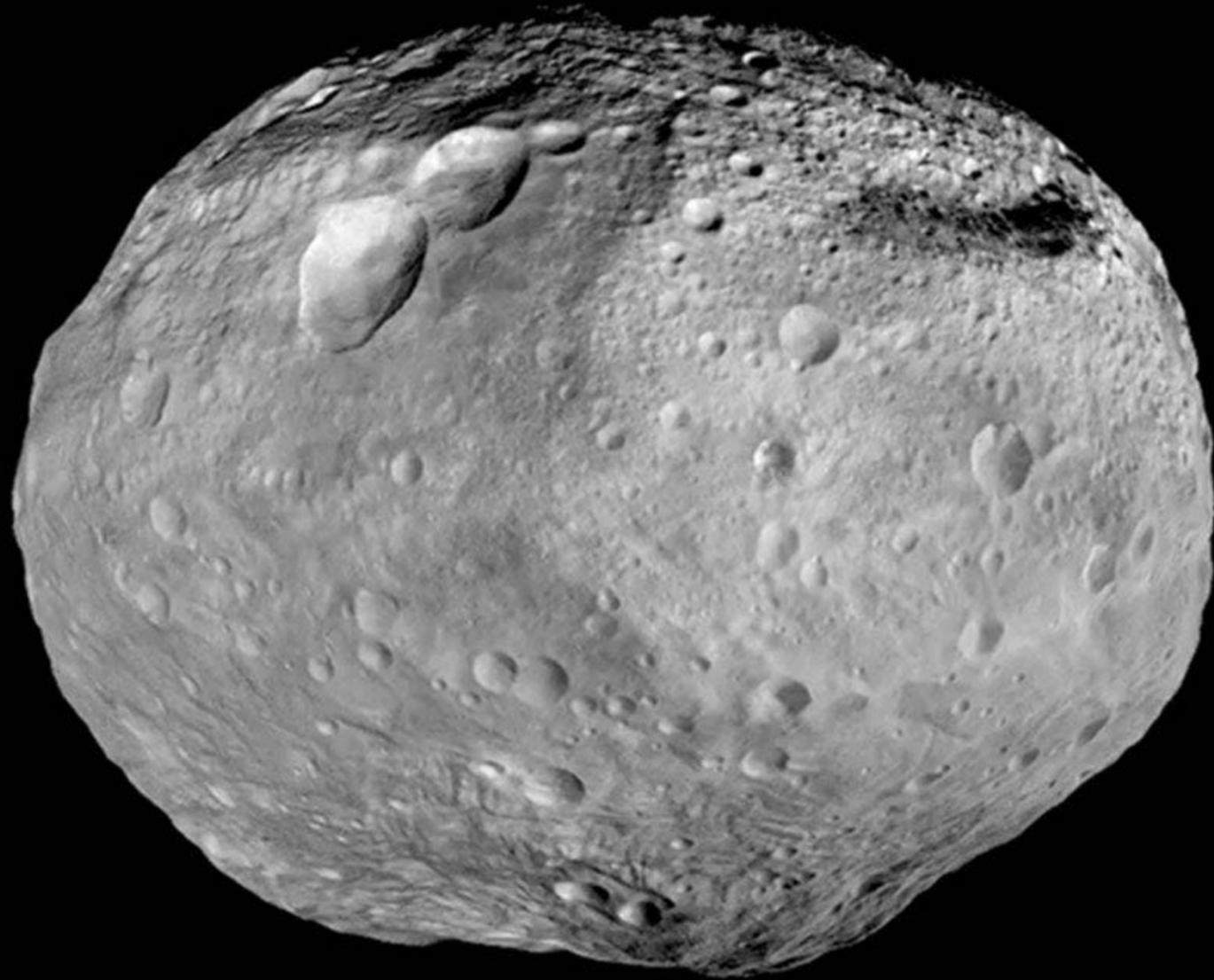
Credit: ESA/Rosetta



Rogelio Bernal Andreo  
www.DeepSkyColors.com

Credit: Rogelio Bernal Andreo (14/10/2024)

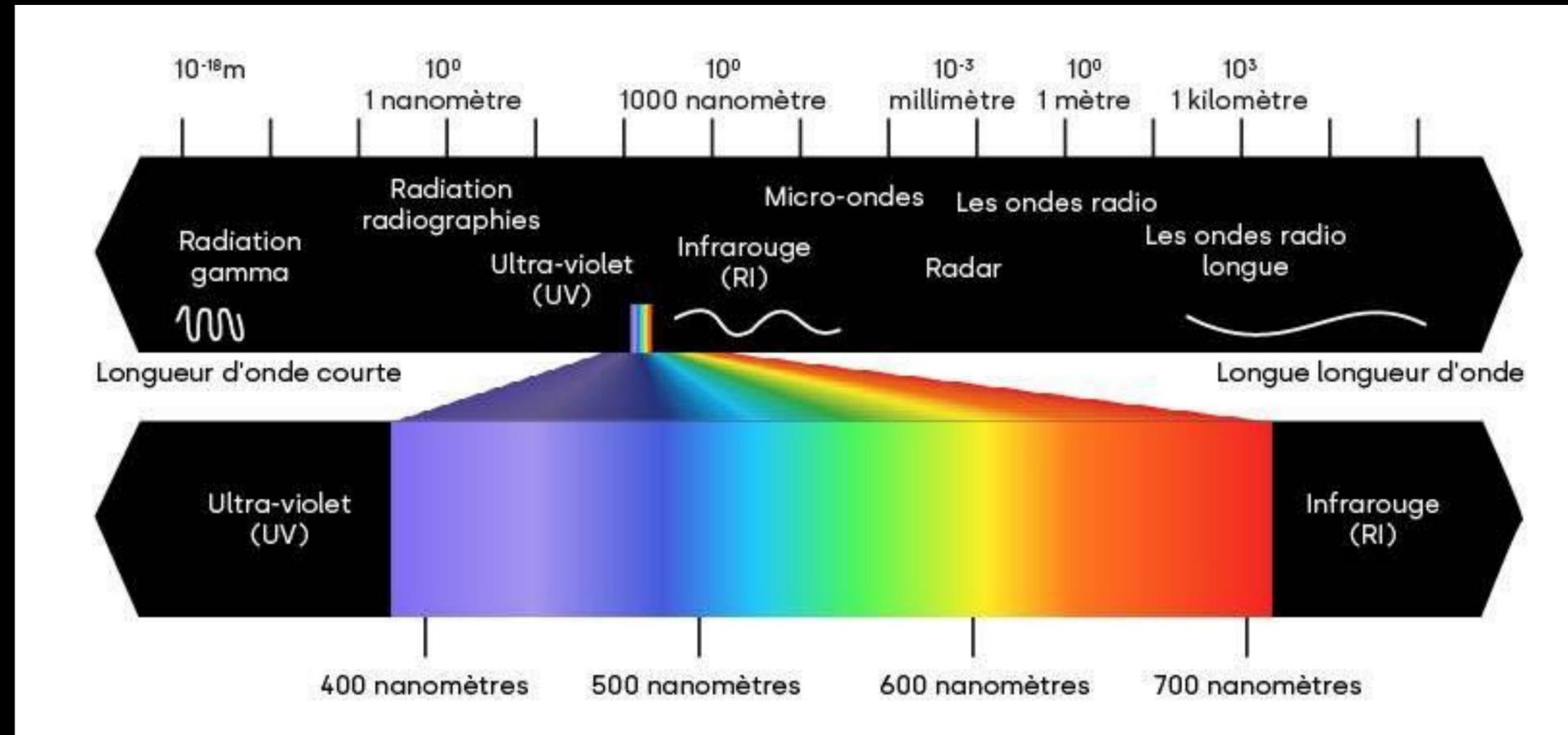
# Autres corps du système solaire



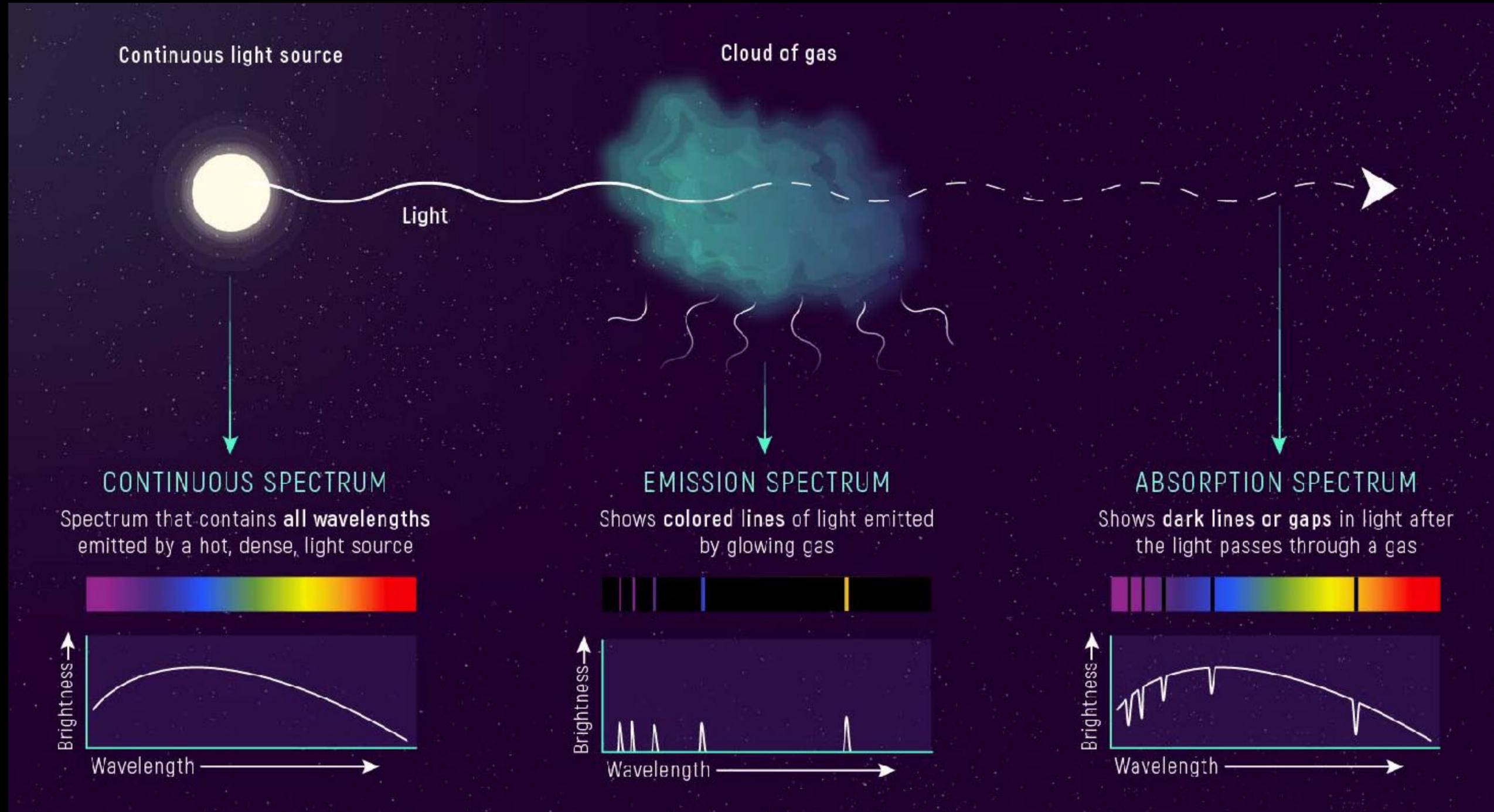
# L'appel des étoiles

Définition d'une étoile : « Une étoile est un corps céleste lumineux composé principalement de gaz (hydrogène et hélium), qui produit de l'énergie et de la lumière par des réactions de fusion nucléaire dans son noyau. »

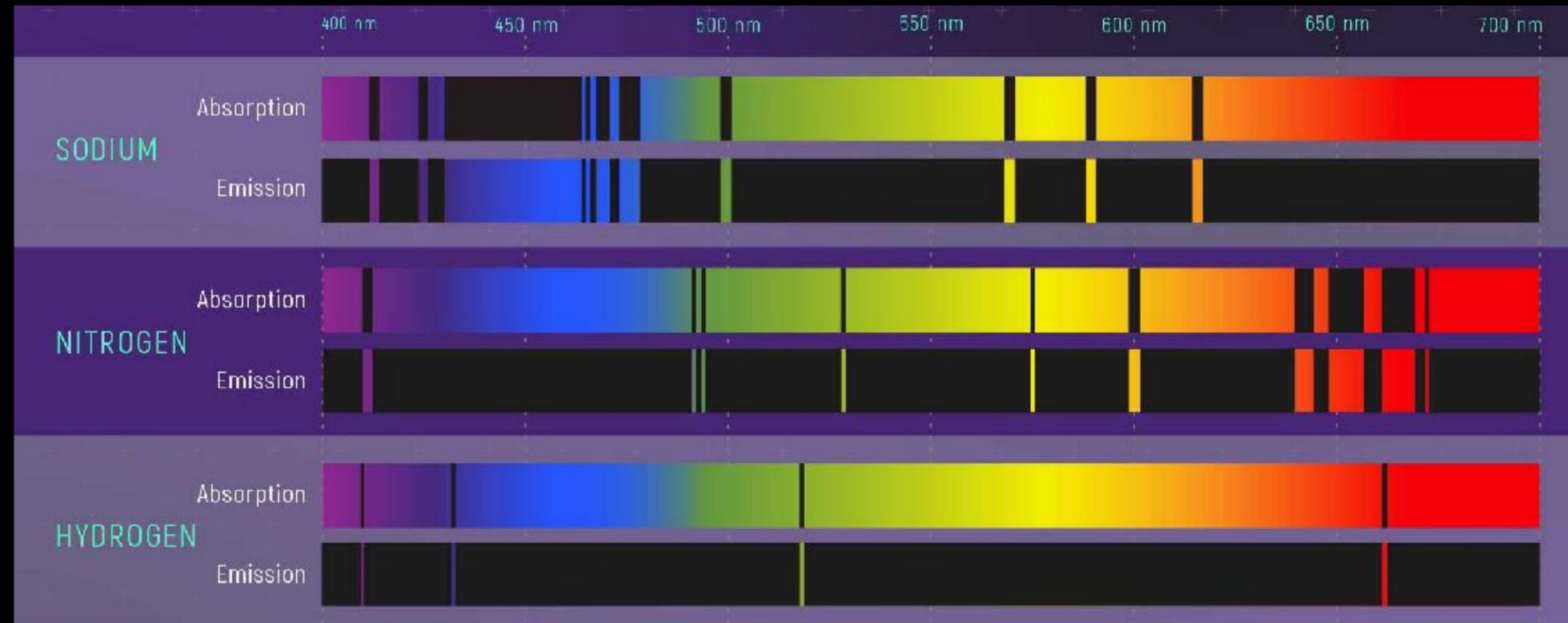
# Qu'est ce qu'un spectre ?



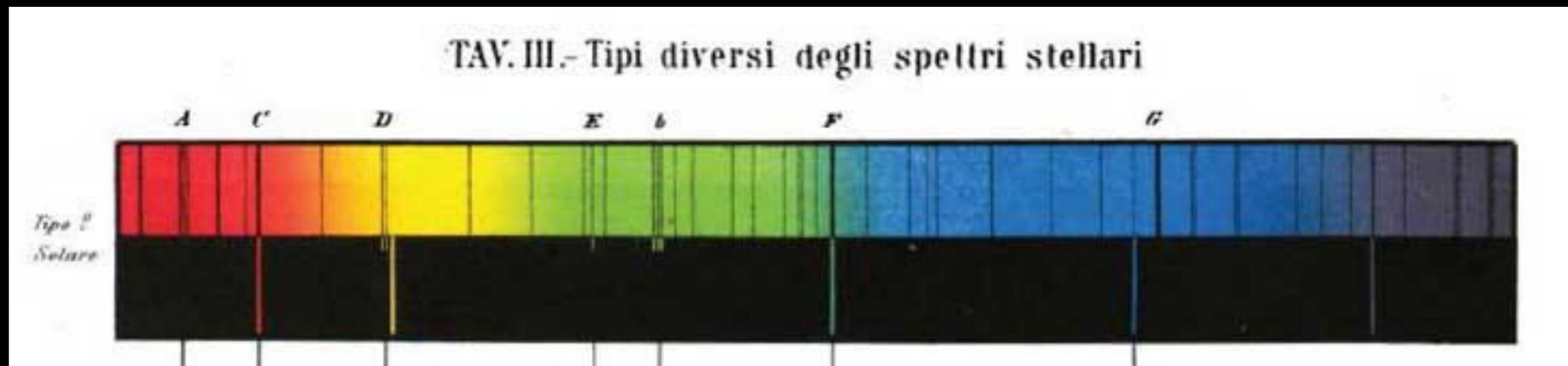
# Qu'est ce qu'un spectre



# Les raies d'absorption et d'émission

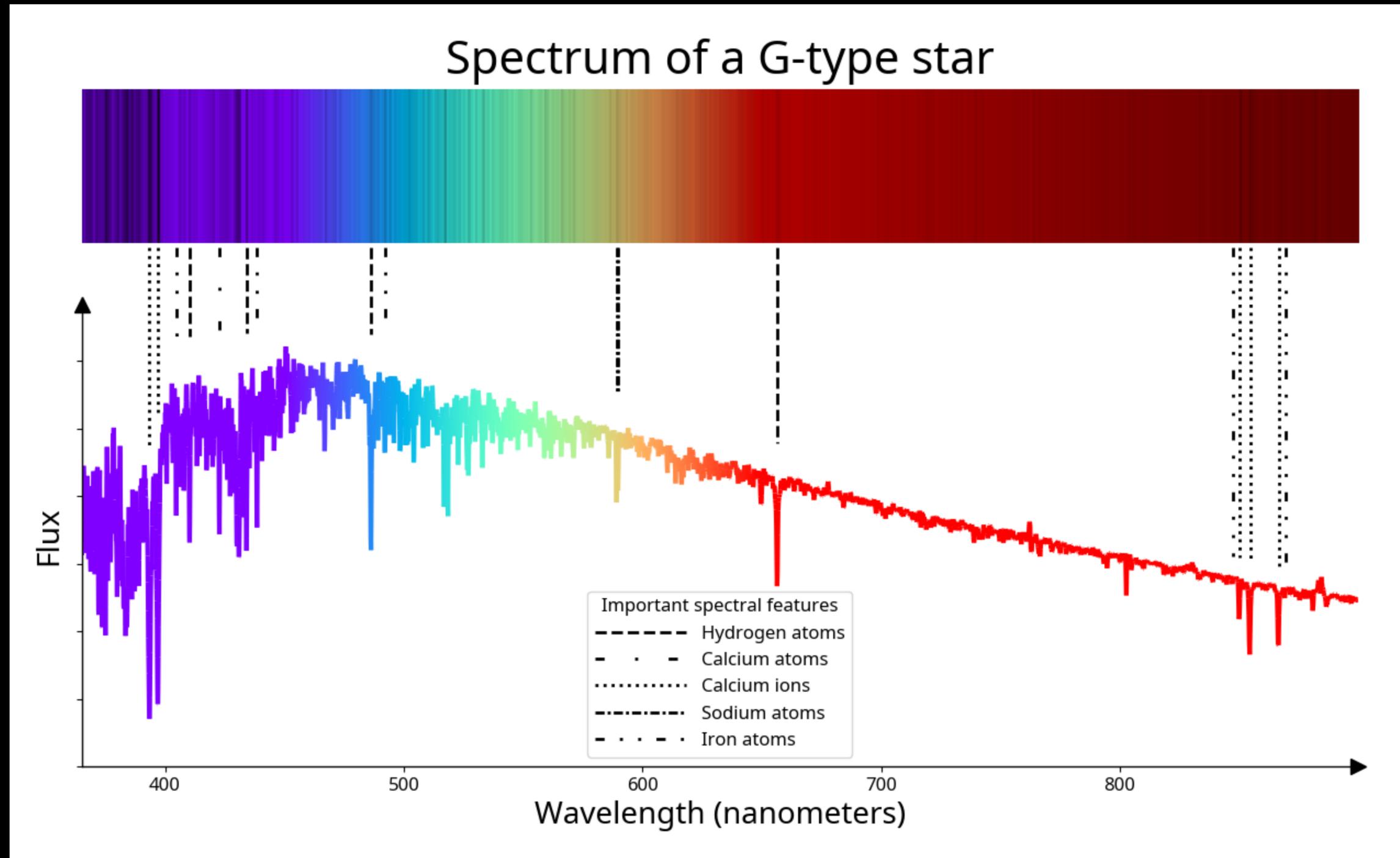


Credit: NASA

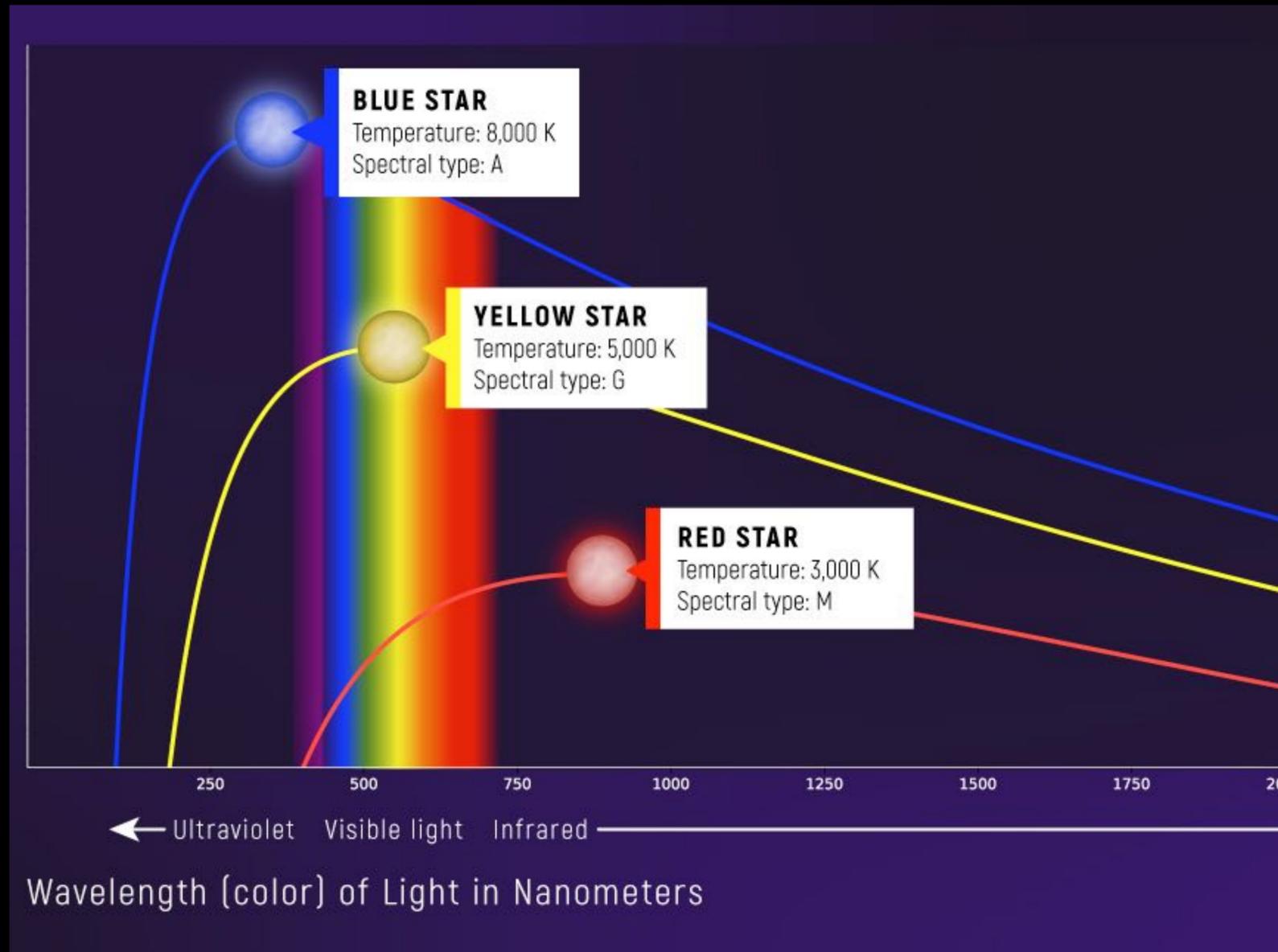


Credit: P.A. Secchi, *Le Stelle: Saggio di Astronomia Siderale*, Milan, 1877.

# Spectre d'une étoile type solaire

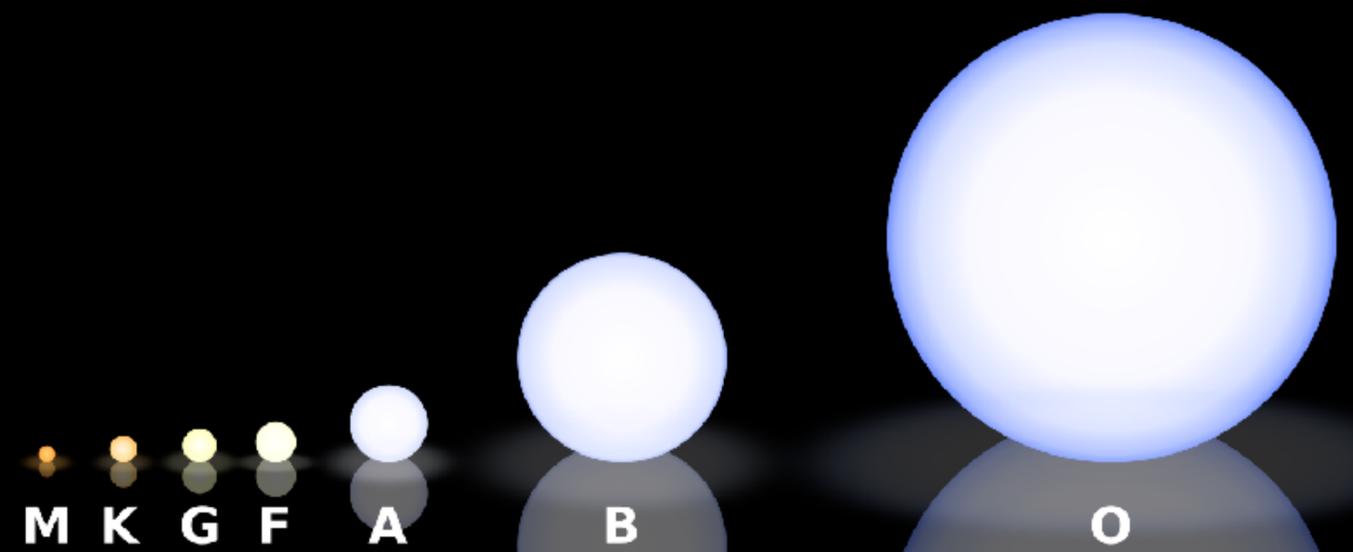


# Les différents types d'étoiles



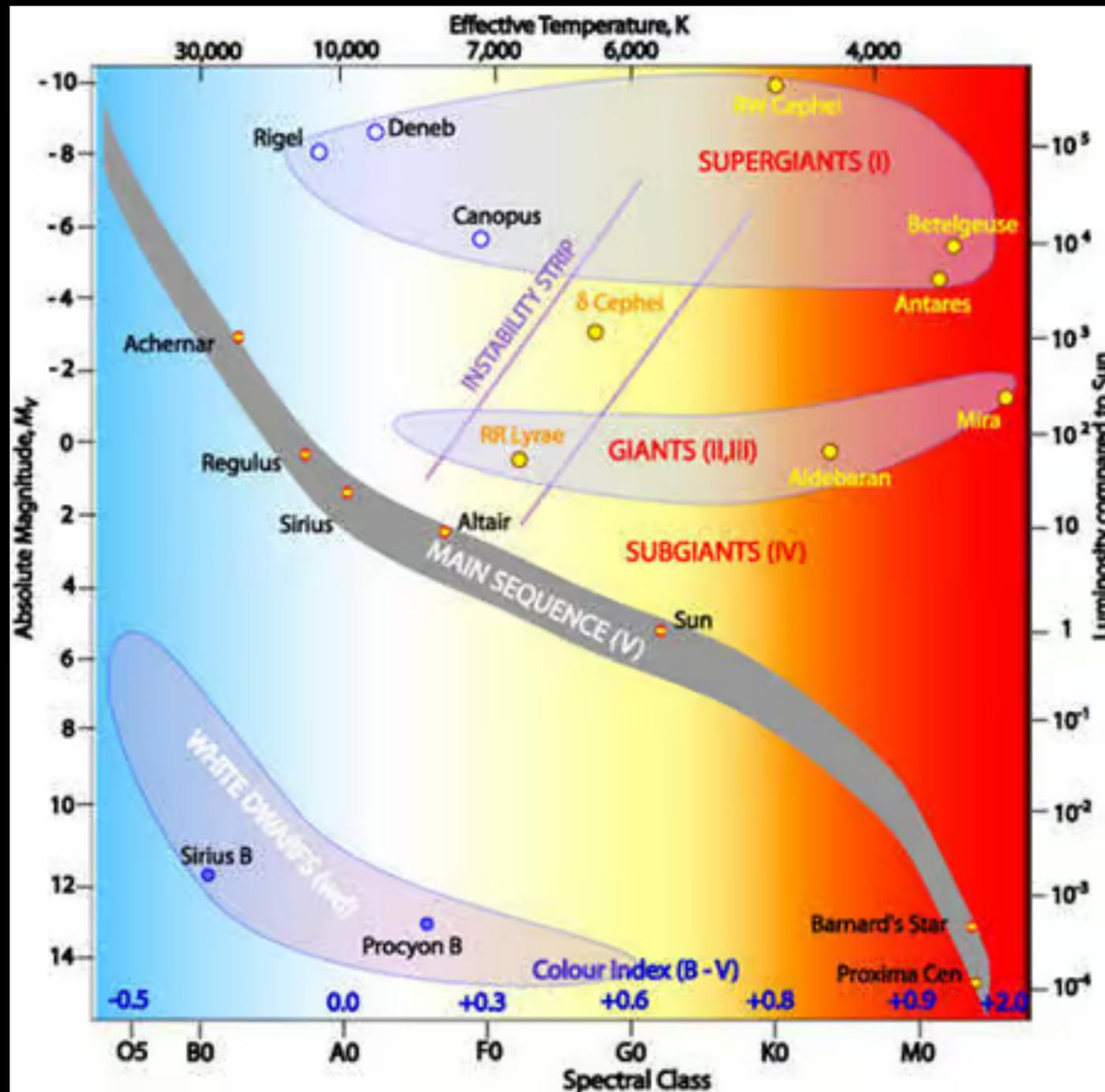
Credit: NASA

- Classification d'Harvard
- OBAFGKM : « " Oh, Be A Fine Girl/Guy, Kiss Me! »
- Le type dépend de la température effective



Credit: Wikipédia

# Diagramme d'Hertzsprung-Russell



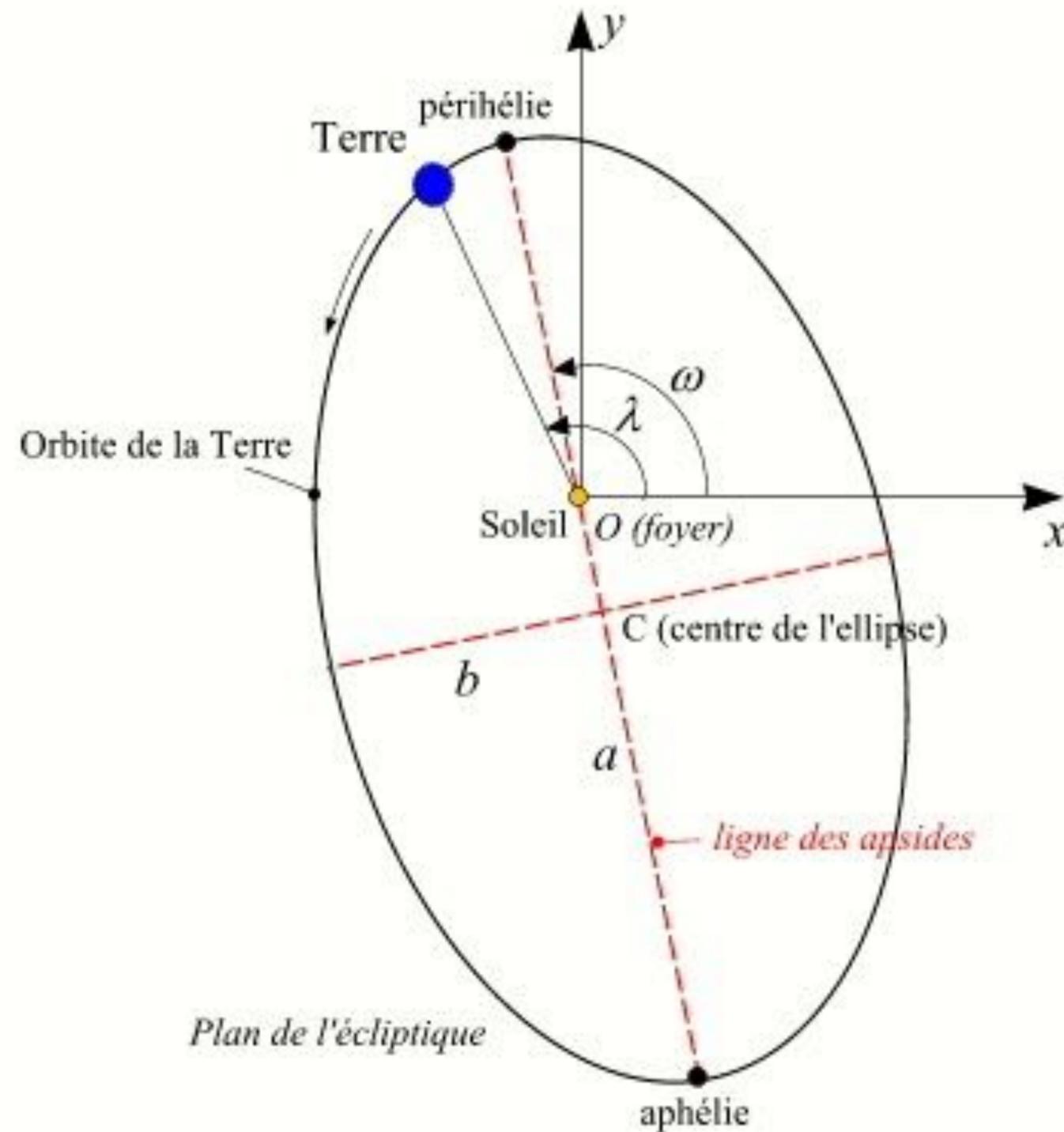
- En rapportant les propriétés des étoiles un diagramme a été fait
- Séquence principale
- Branche des géantes rouges
- Séquence des naines blanches

# Les orbites planétaires

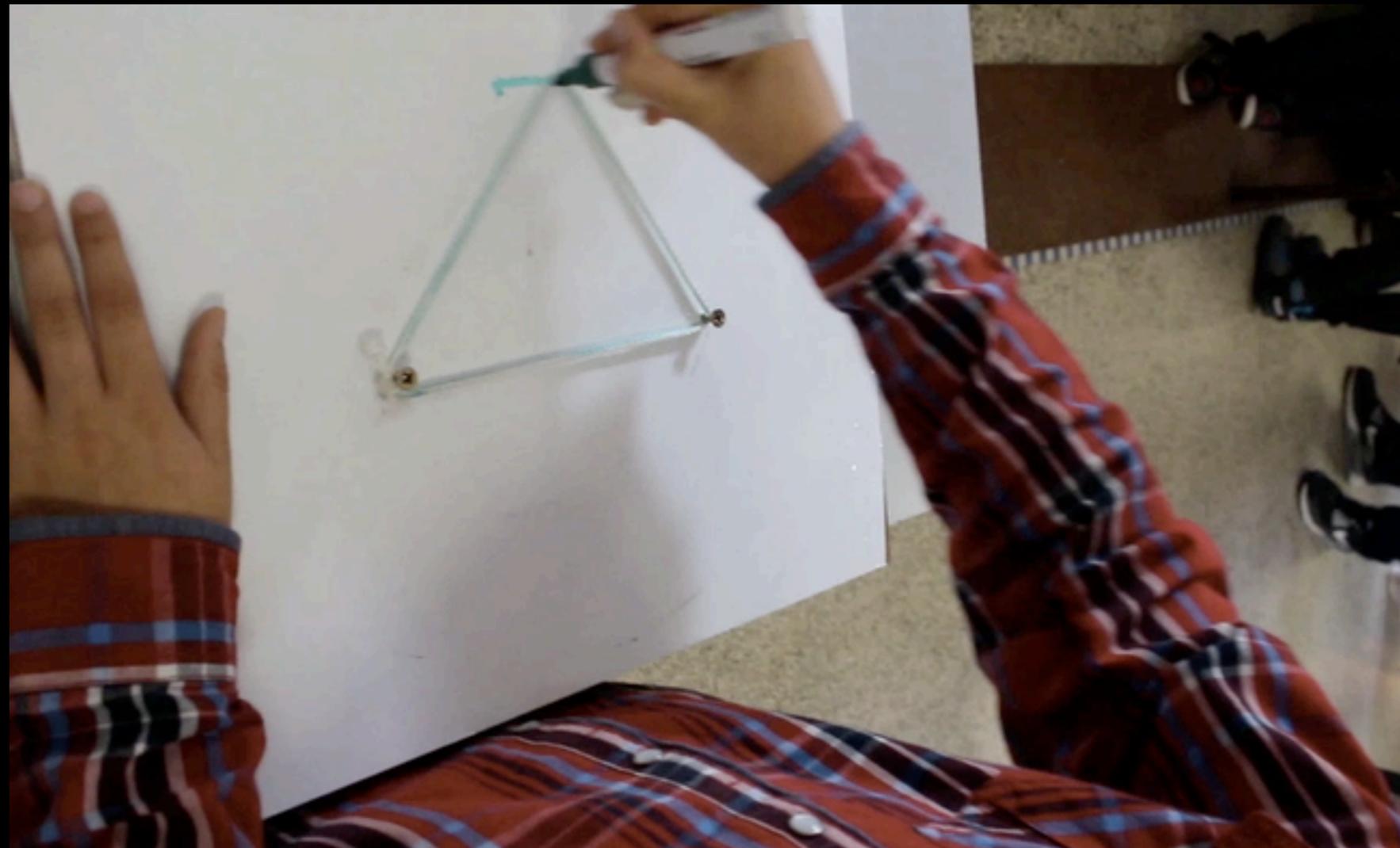
*« Les planètes décrivent autour du Soleil des orbites en forme d'ellipse. Le soleil n'est pas au centre mais sur le côté. »*

Johannes Kepler/1571-1630

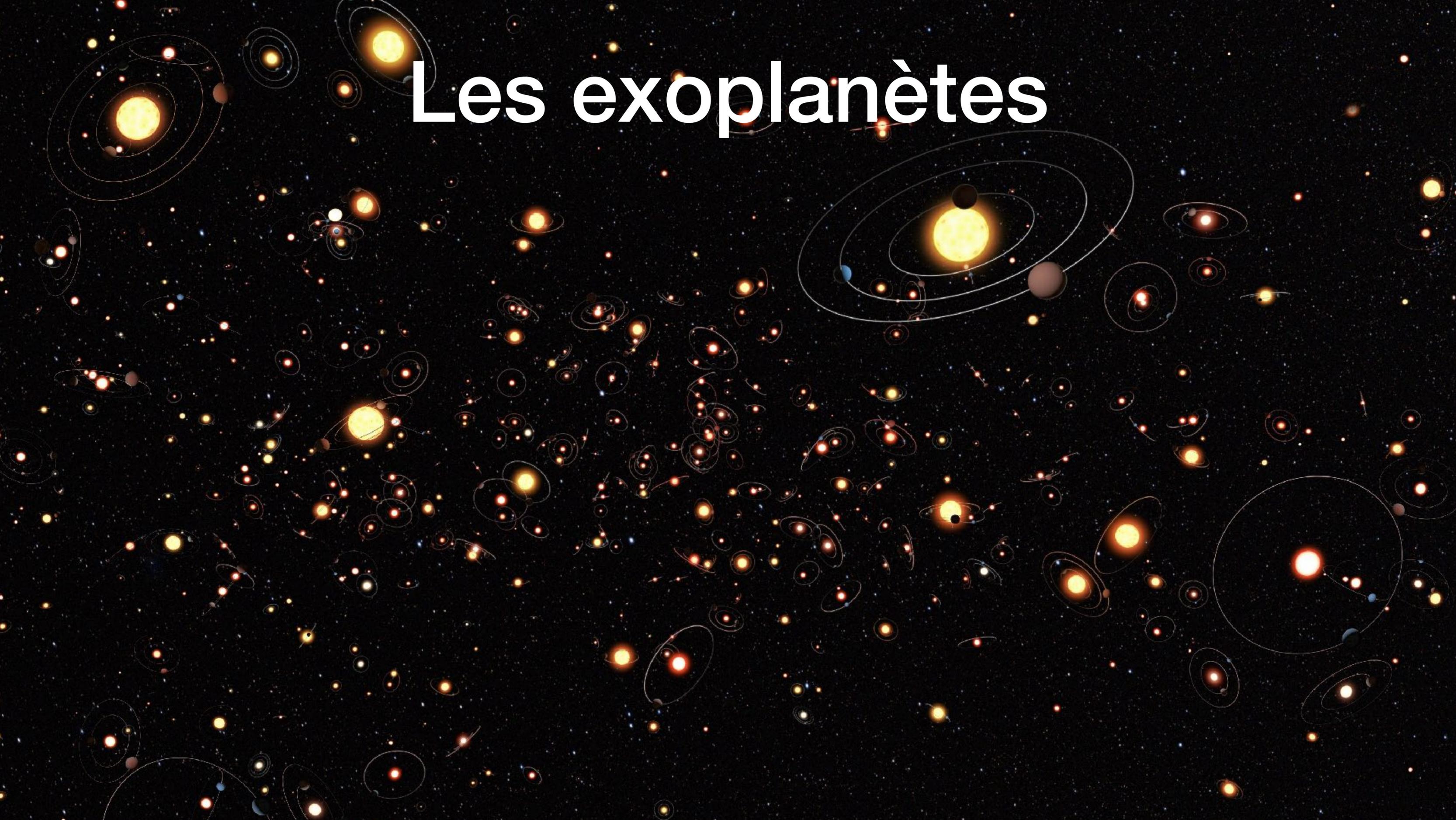
# Les ellipses



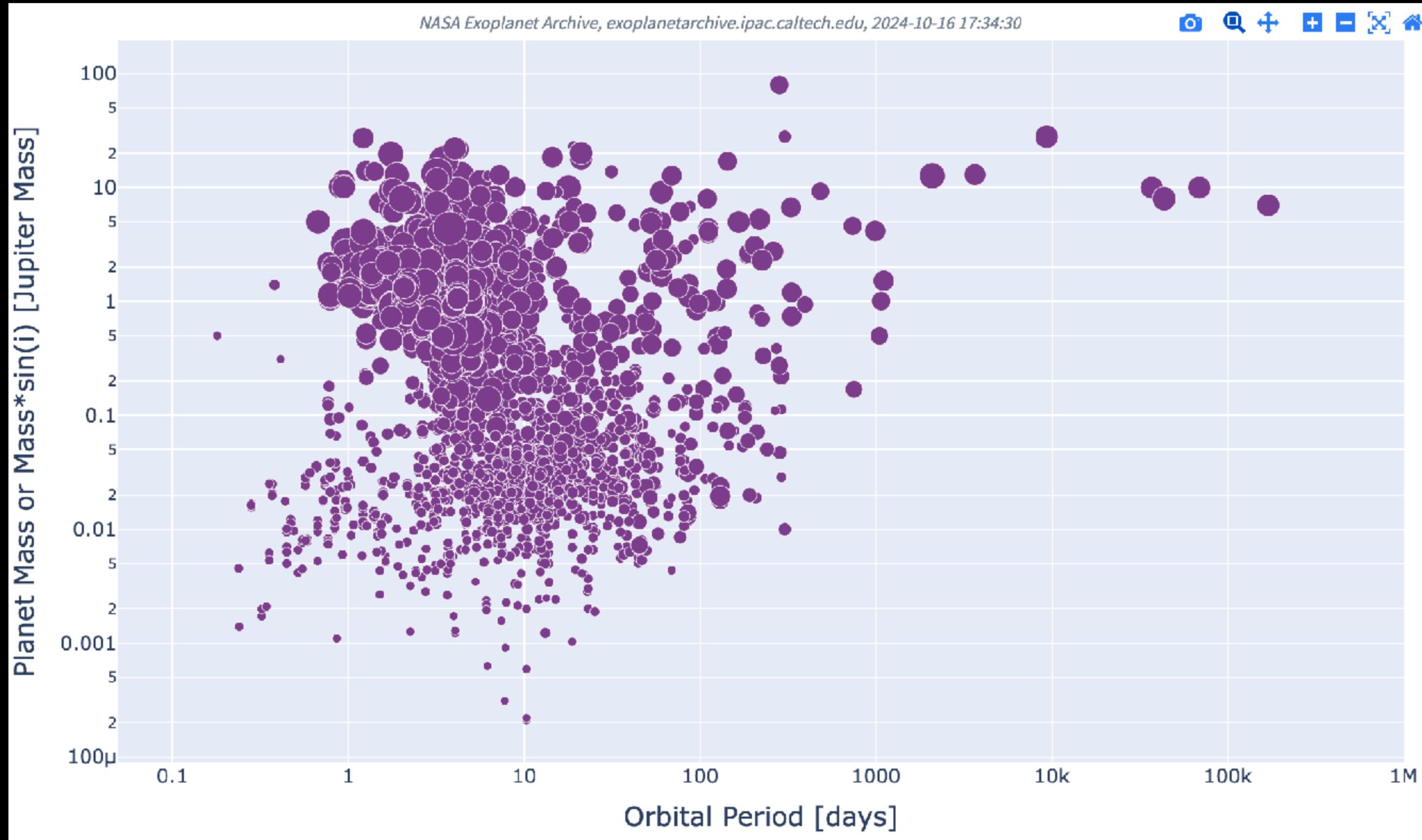
# Les ellipses



# Les exoplanètes



# 5766 exoplanètes détectées



# Sub-Terre : GJ 367 b



# Terres : TRAPPIST-1 b



# Super-Terre : K2-18 b



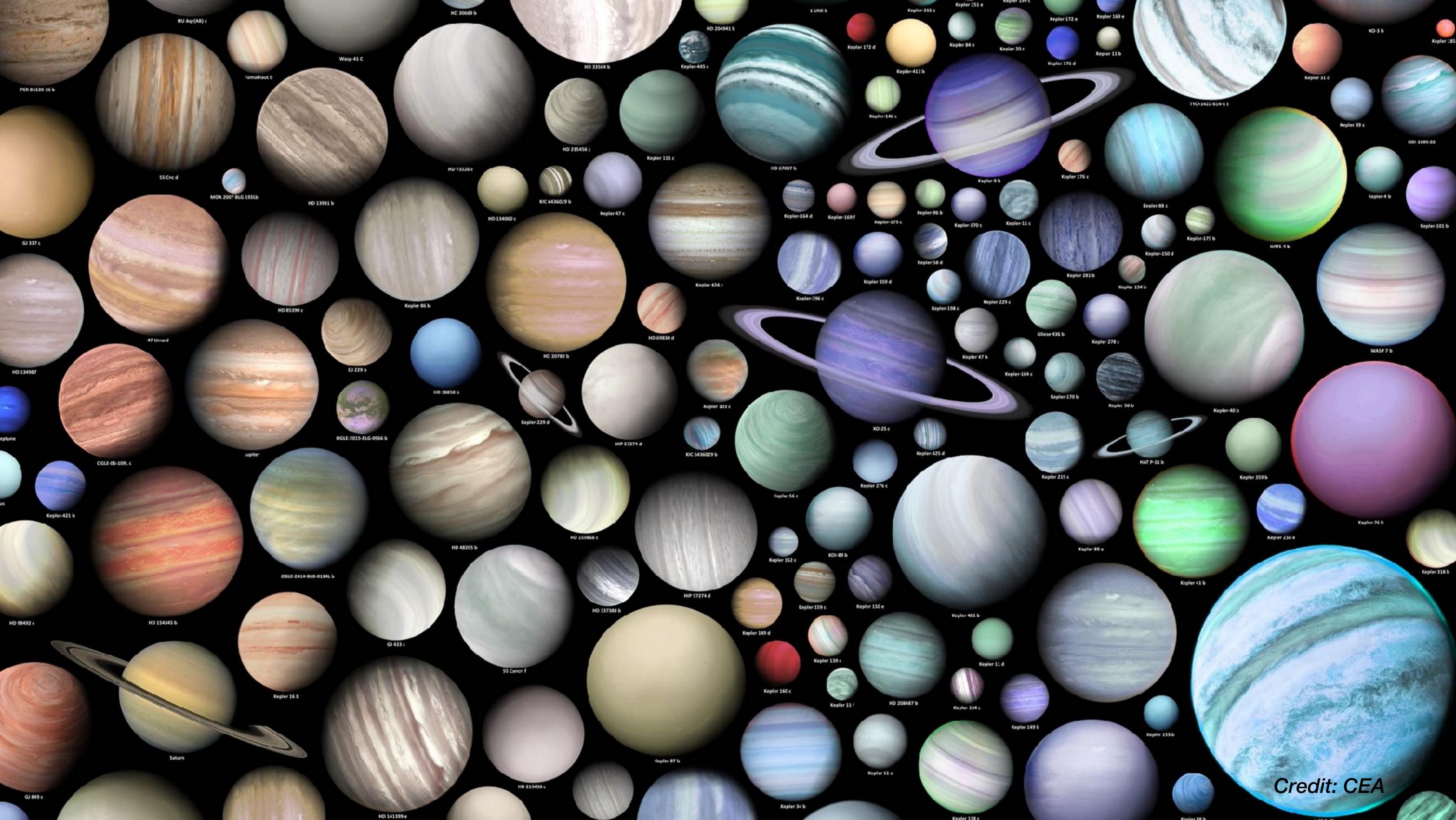
# Sub-Neptune : K2-18 b



# Neptune : WASP-107 b

# Jupiter : WASP-121 b

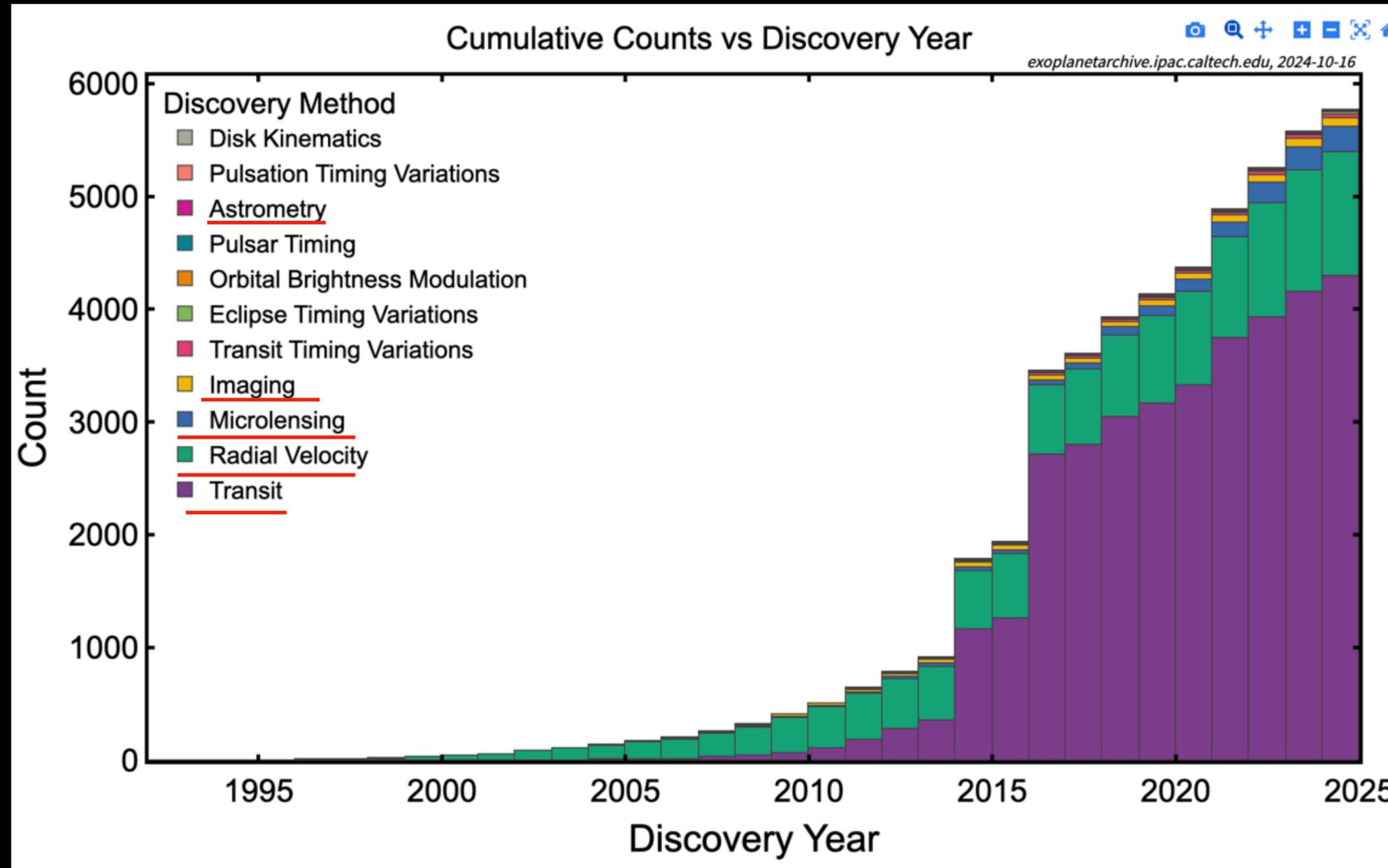




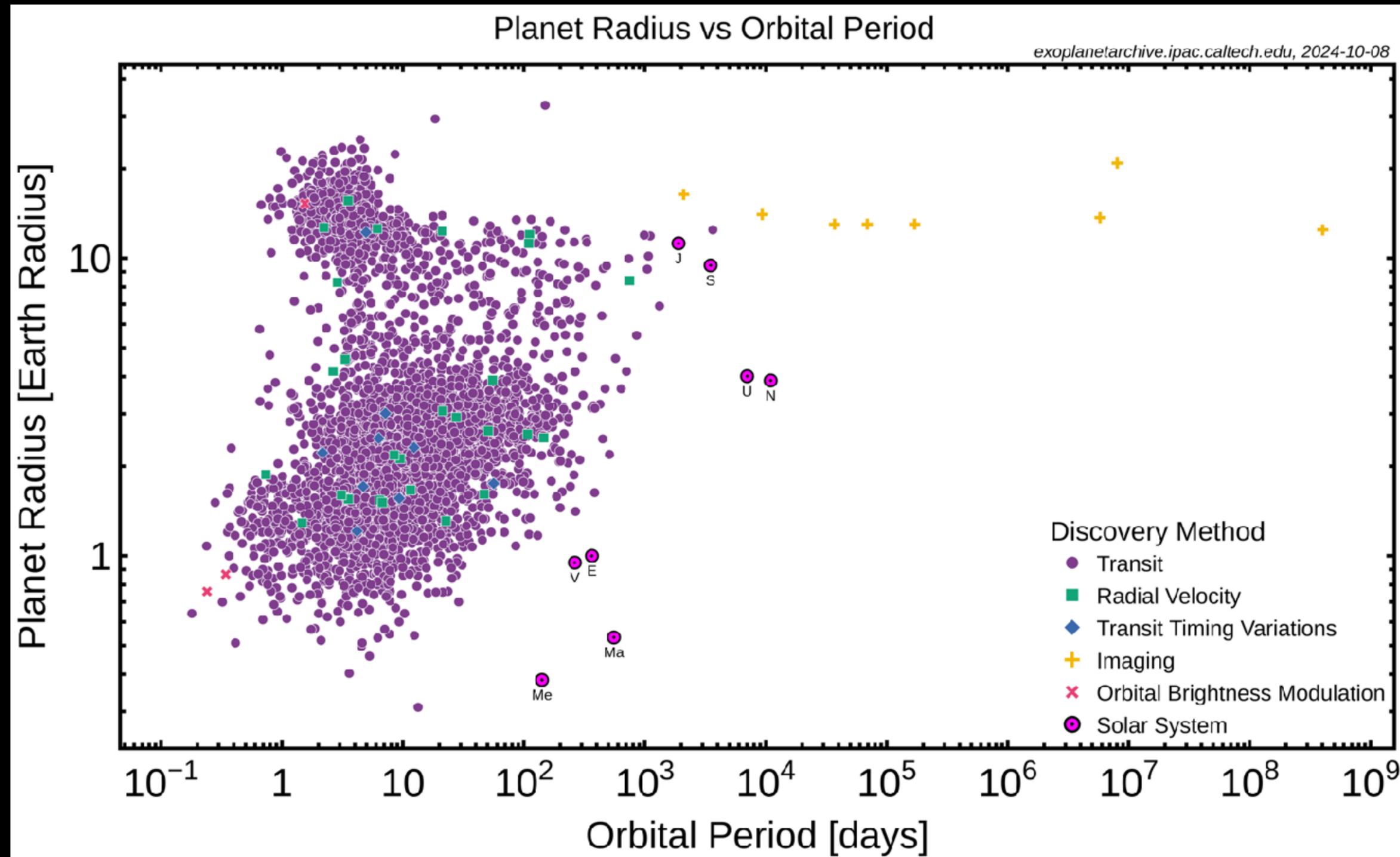
Credit: CEA

Comment les détecter?

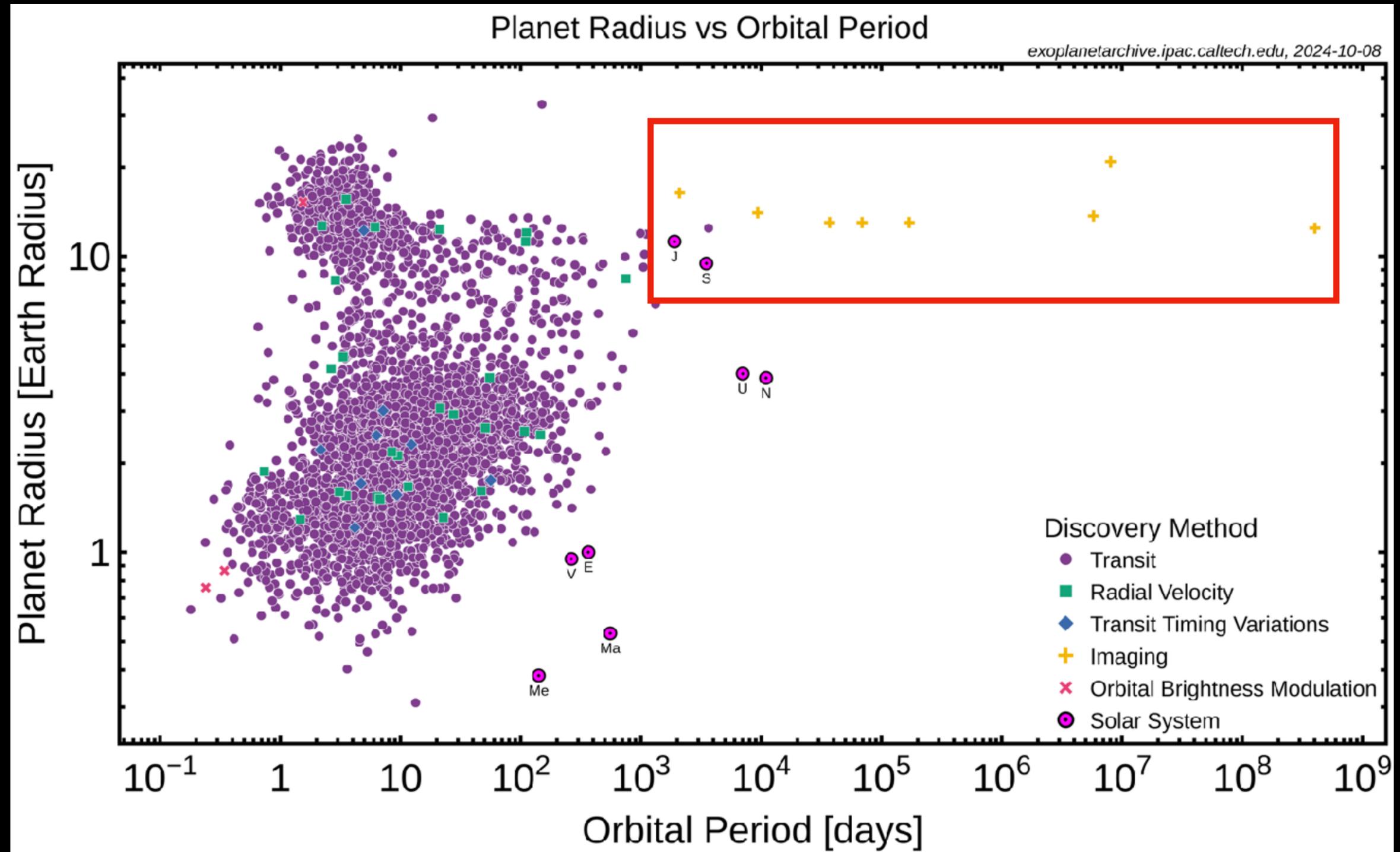
# Les méthodes de détection



# Chaque semble avoir son espace de paramètres



# L'imagerie directe



# L'imagerie directe ?



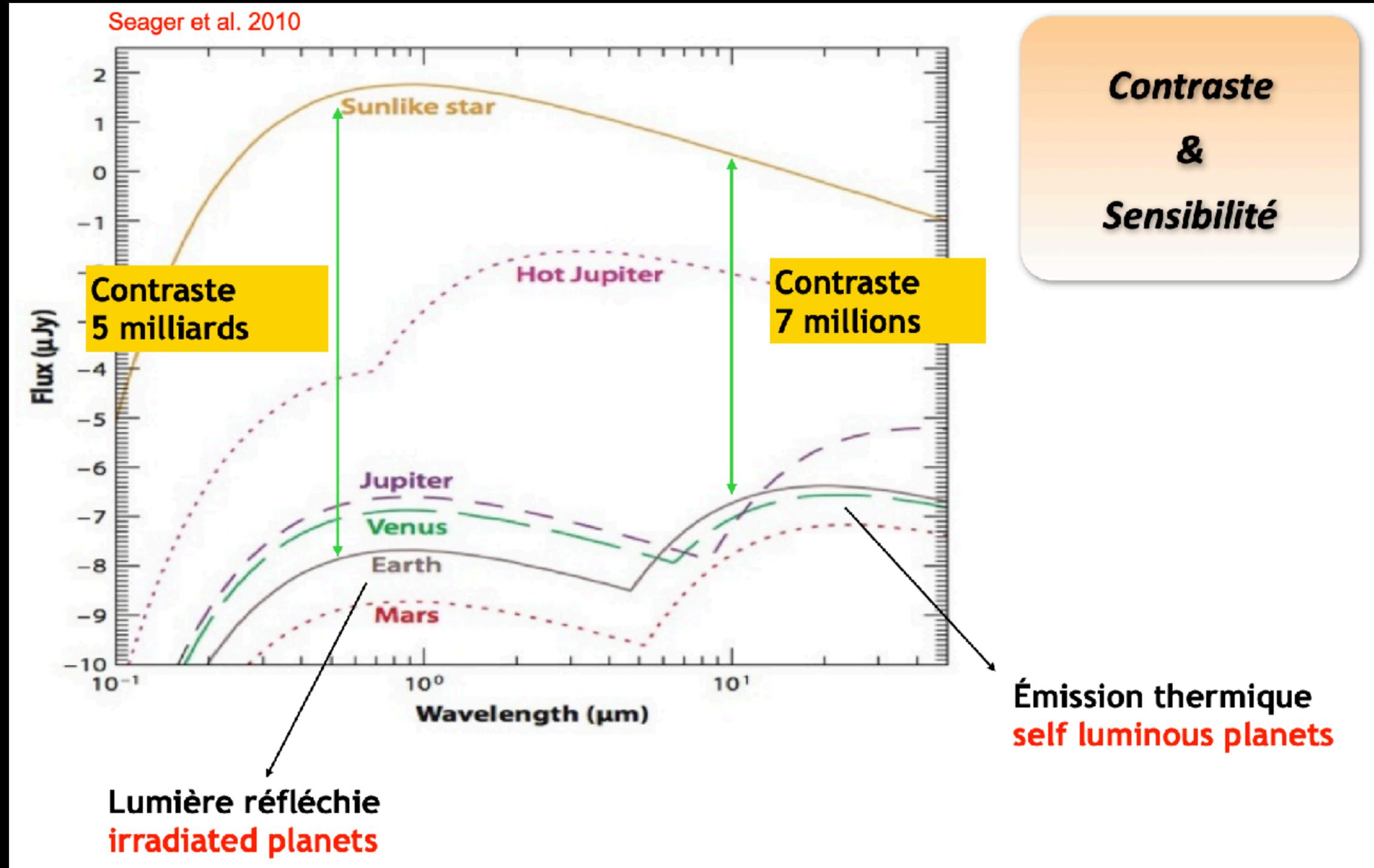
Images d'artistes!

Credit: NASA





# Problème de contraste

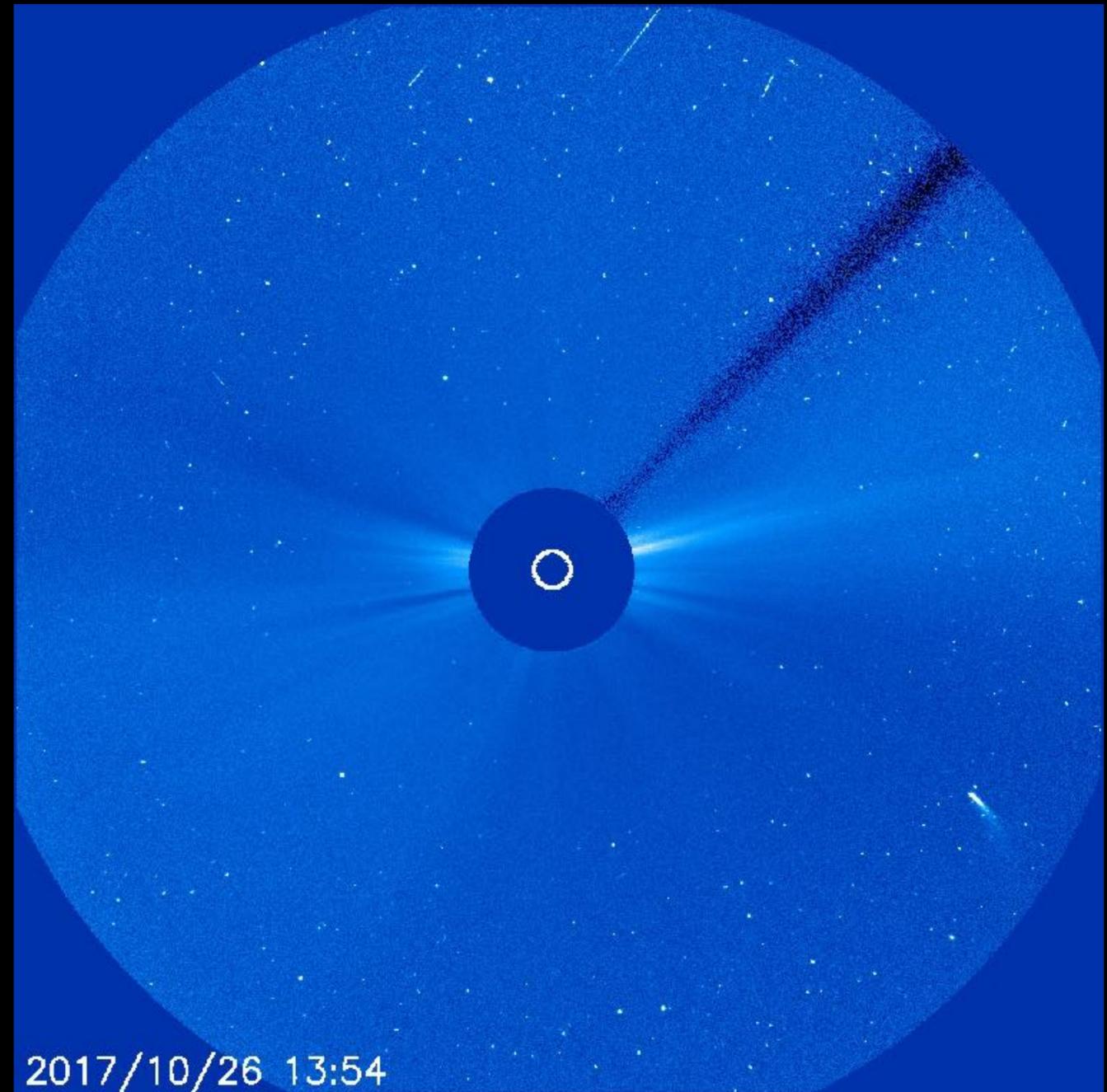
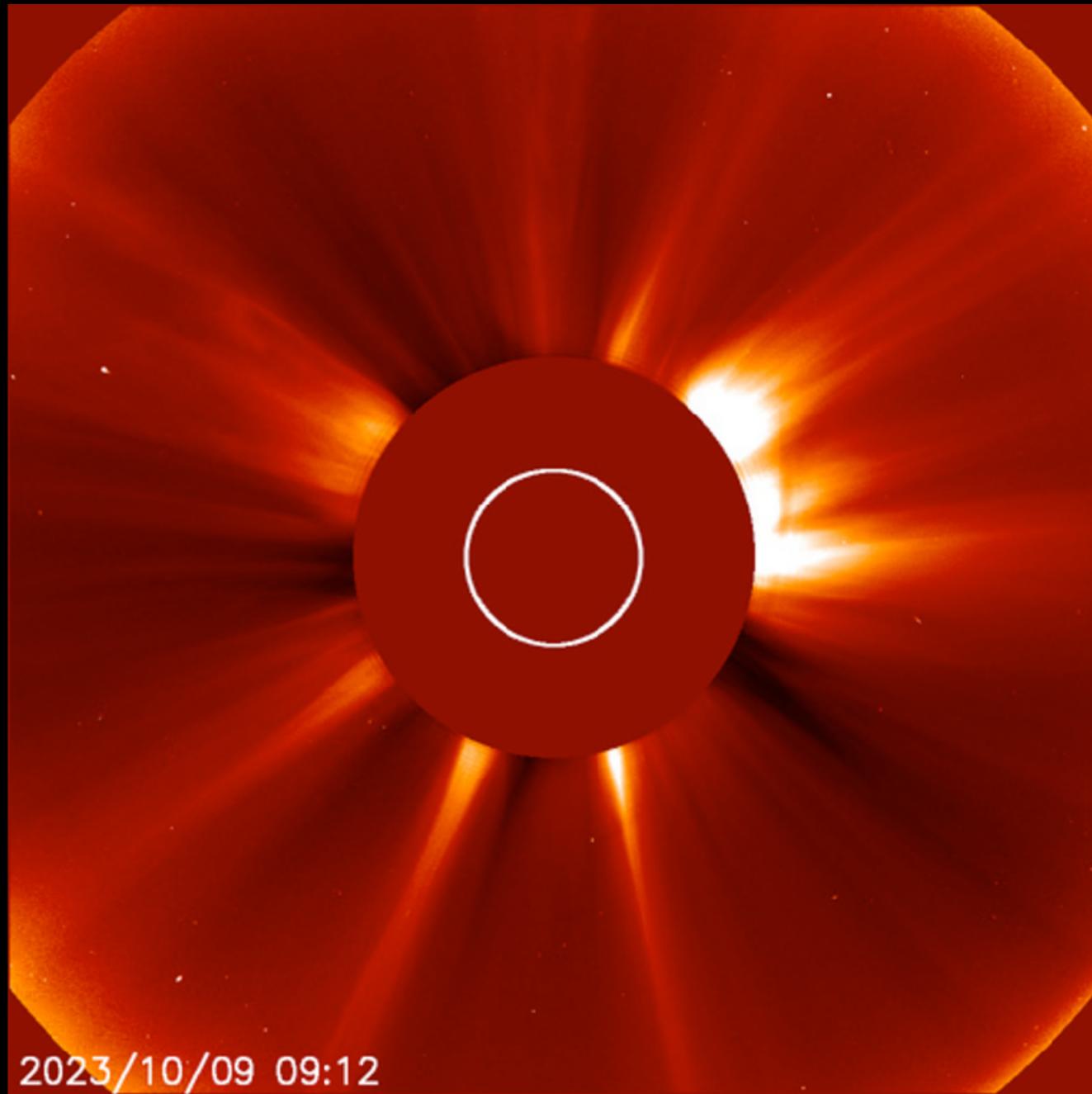


# Invention du coronographe de Lyot

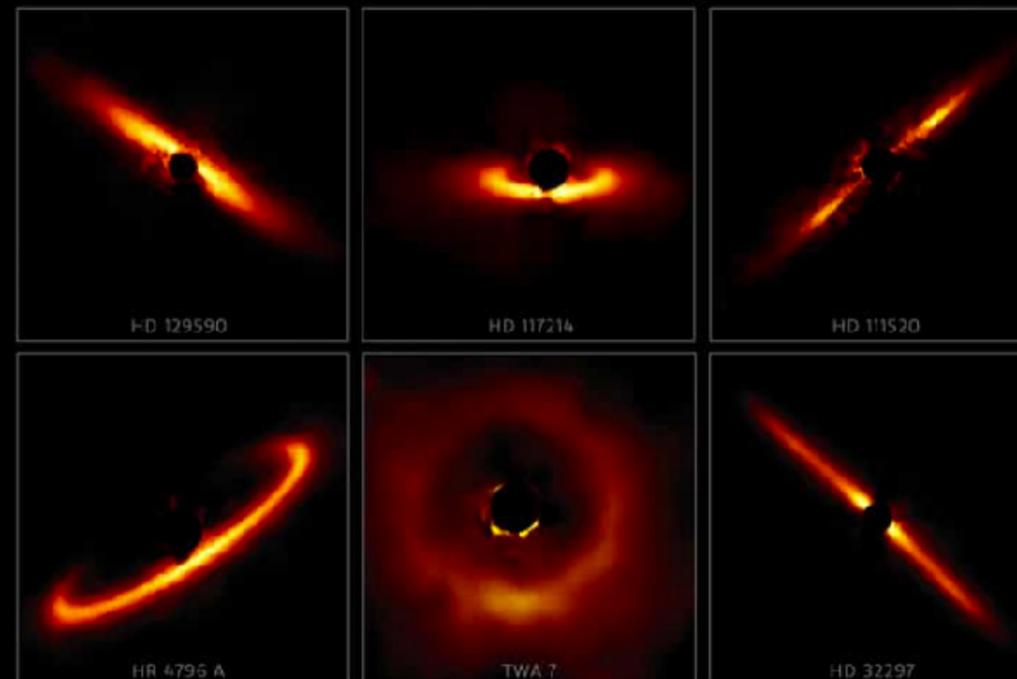
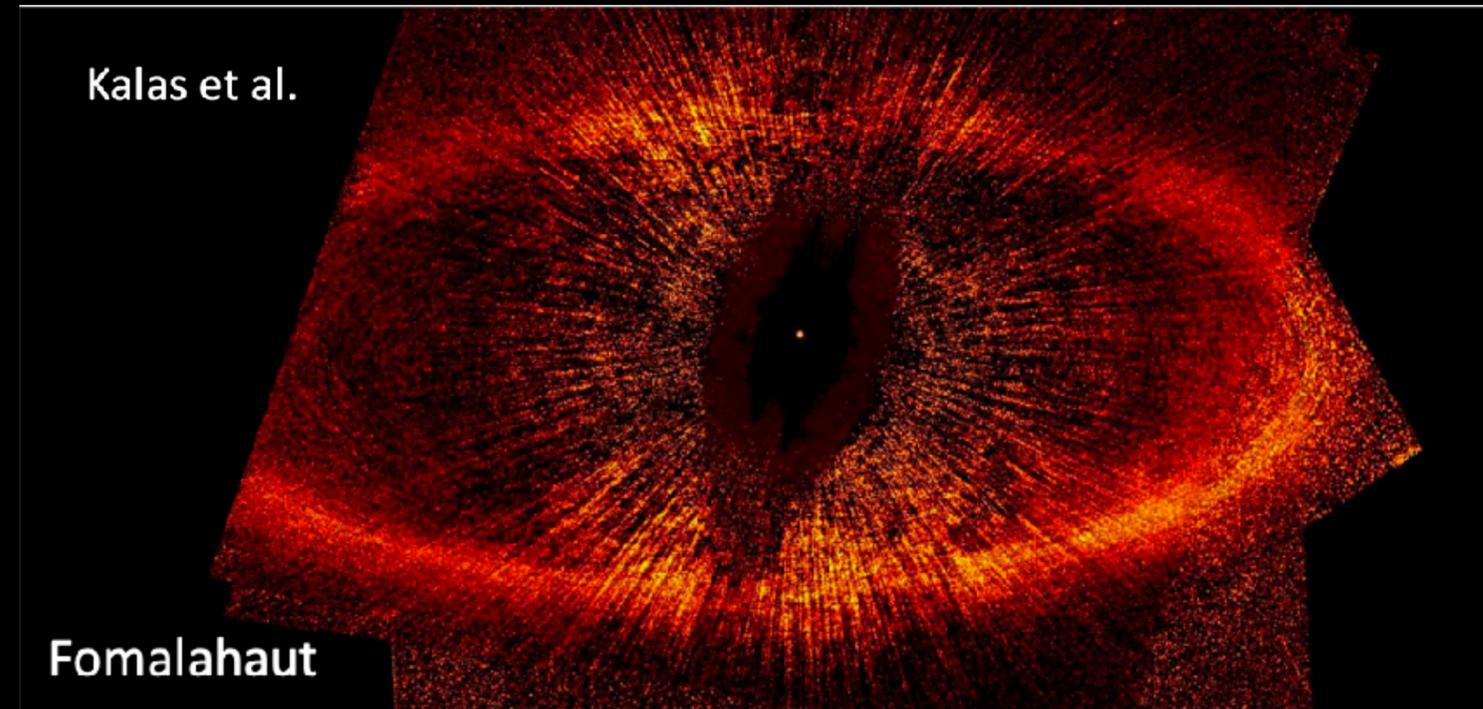


- Coronographe (**Bernard Lyot**, 1930) : observations de la couronne Solaire en l'absence d'éclipse

# Invention du coronographe de Lyot



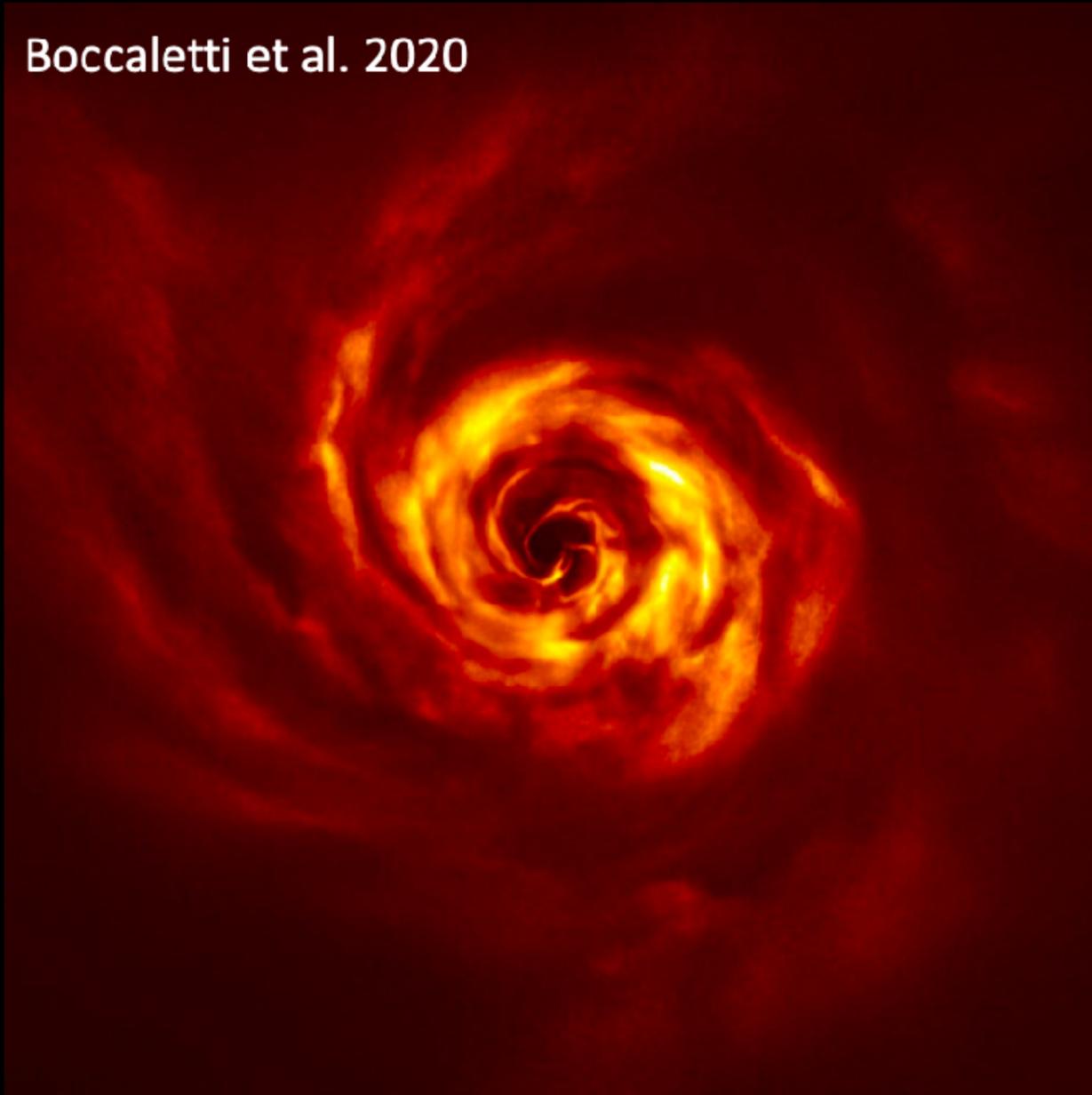
# Pour les disques de poussières



Esposito et al. 2020

# En même les exoplanètes en formation

Boccaletti et al. 2020



Keppler et al. 2018

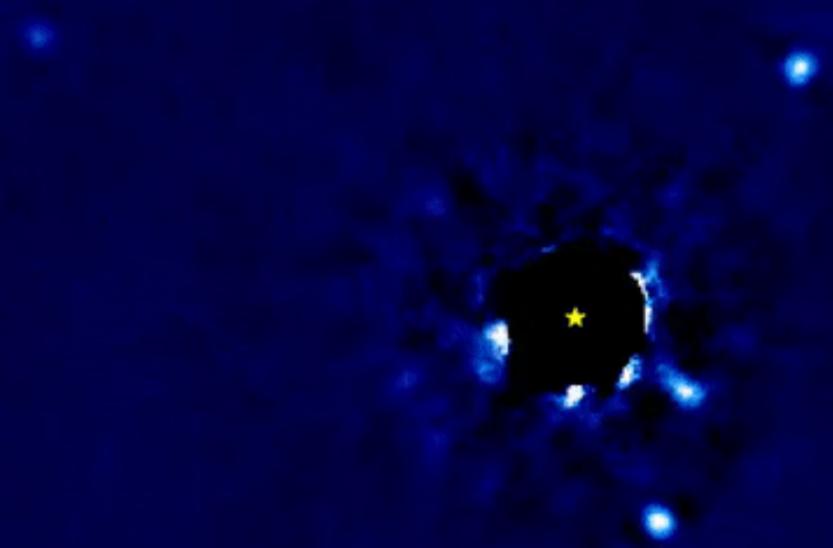


Et les exoplanètes « formées »?

# L'imagerie directe

Jason Wang

HR 8799 system

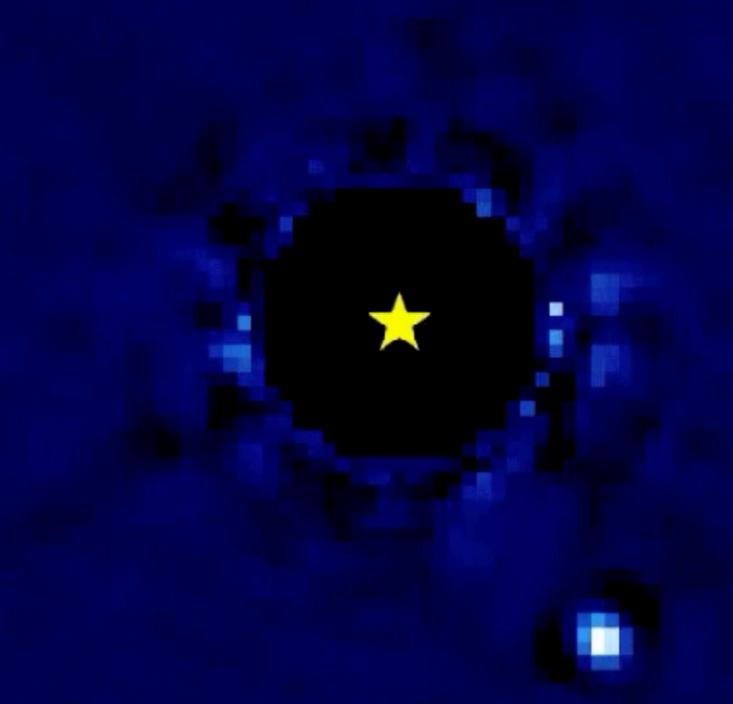


2009-08-26

20 au

Jason Wang /  
Christian Marois

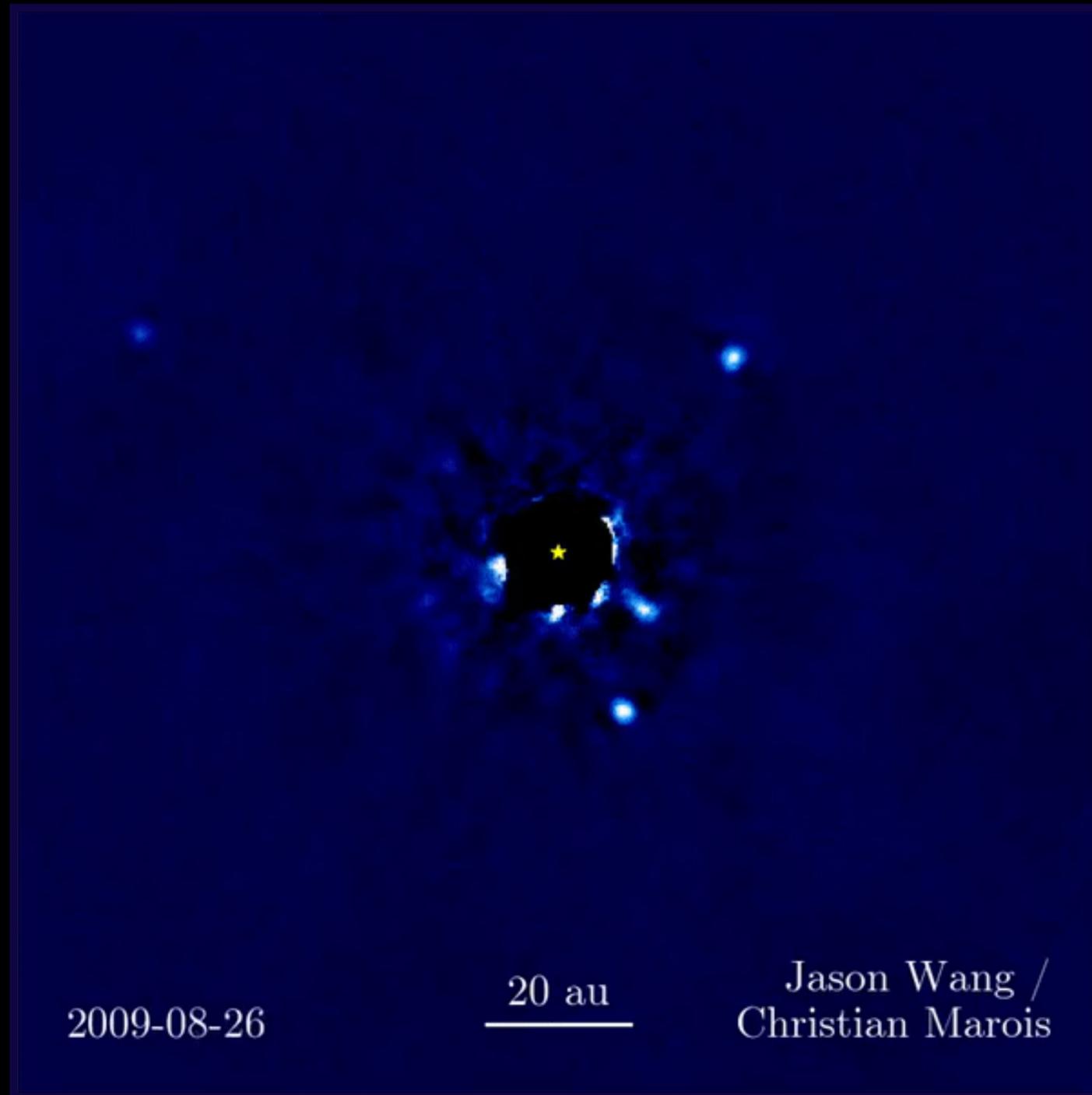
$\beta$  Pictoris system



2014-08-12

5 au

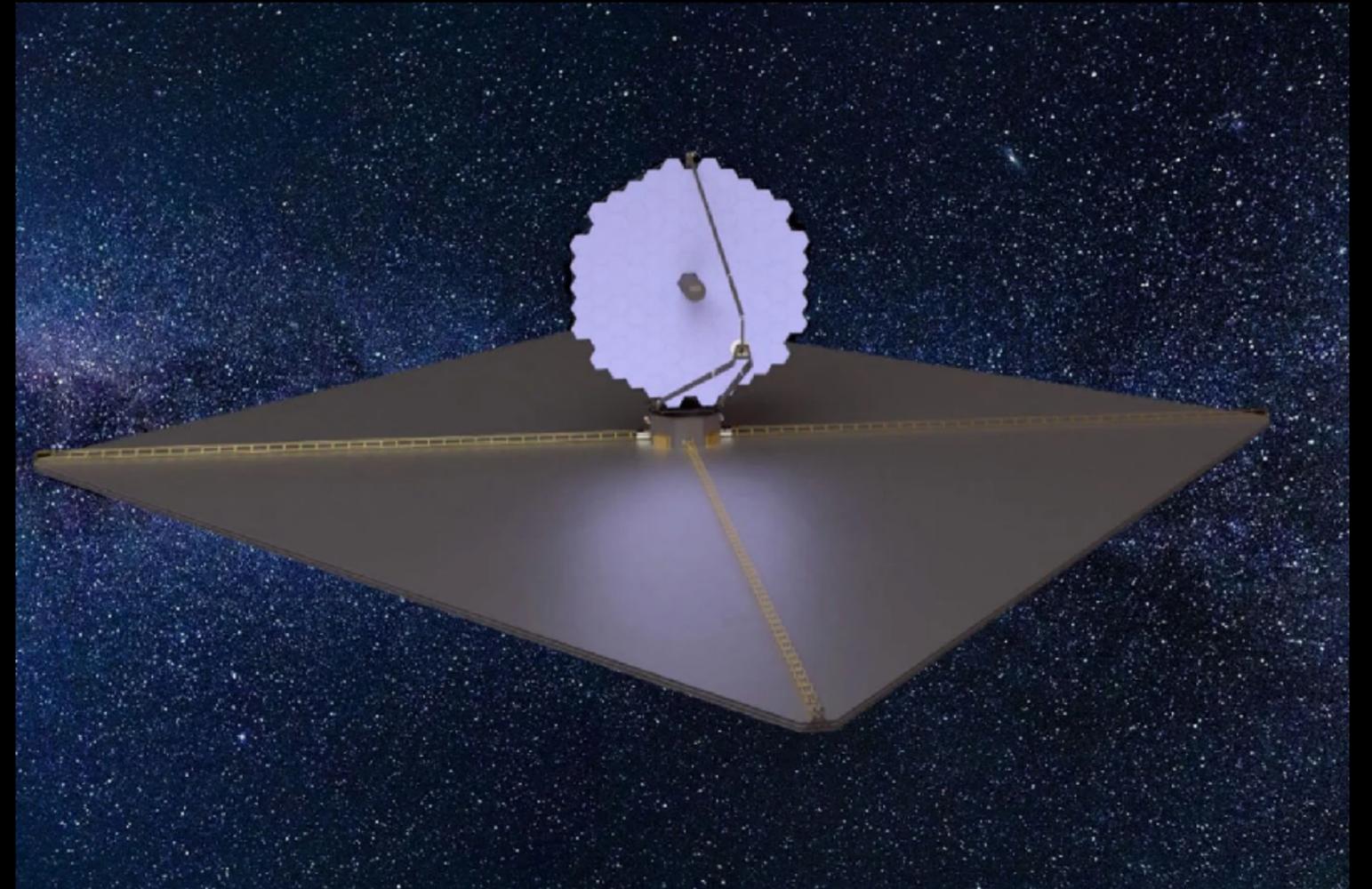
# Un peu différent ...



# Le futur de l'imagerie directe

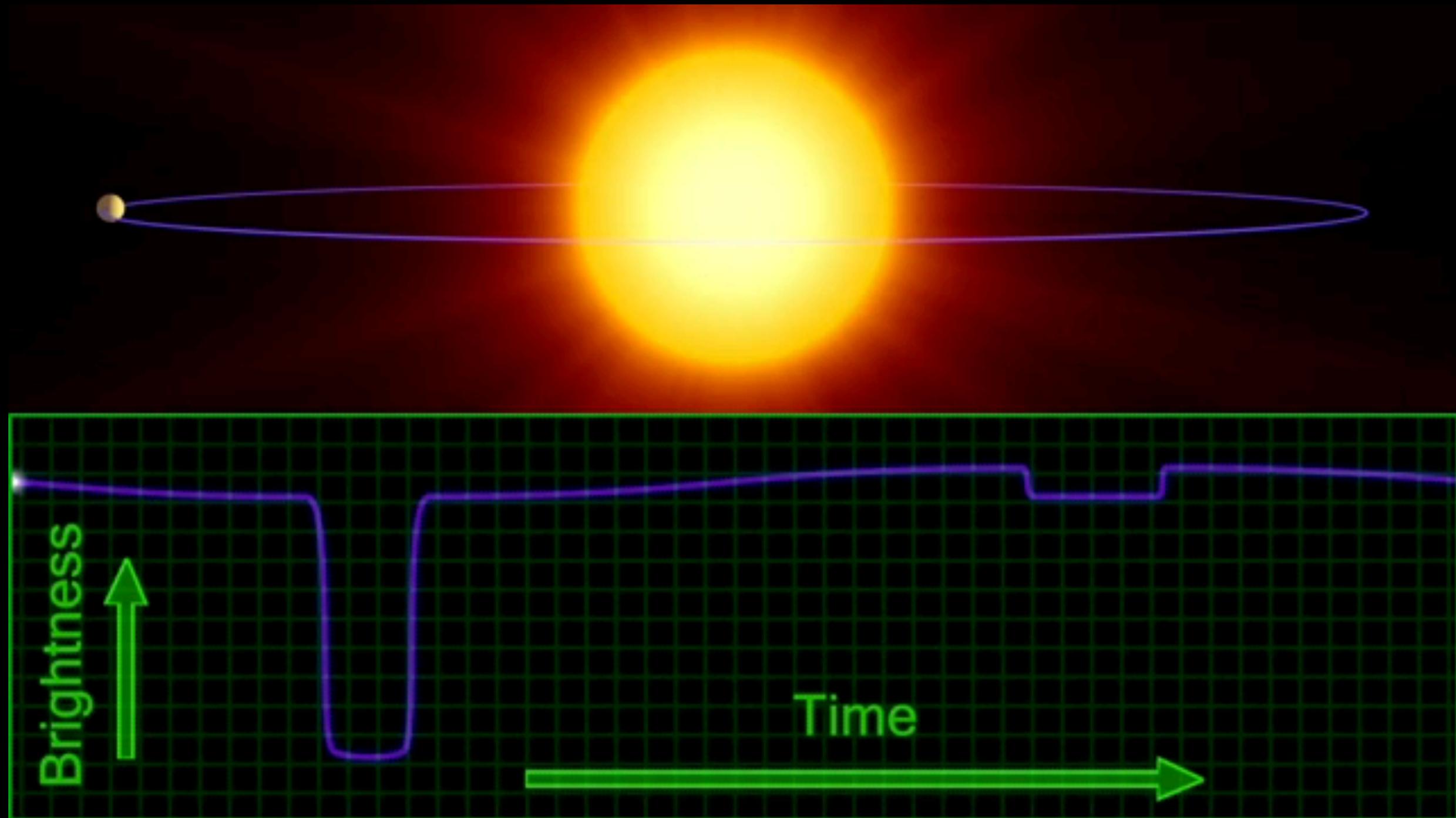


Credit: ESO

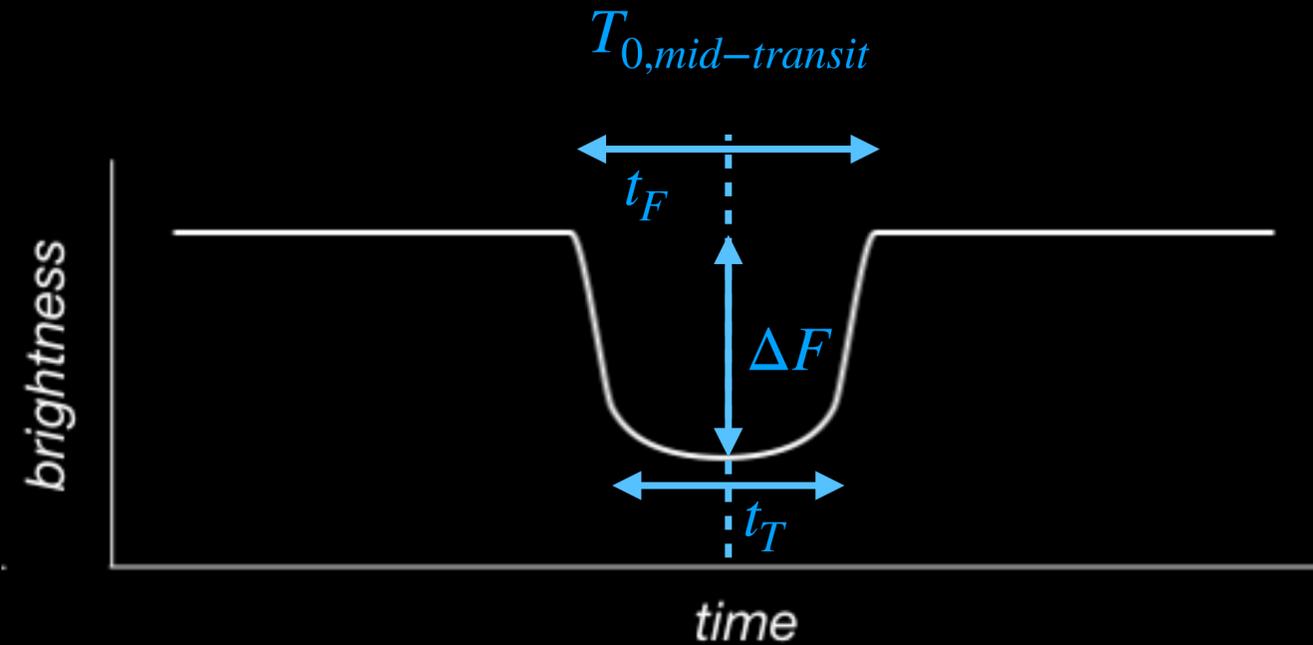


Credit: NASA

# La méthode des transits



# Les transit



## Observables;

- the transit depth  $\Delta F$
- Durées partielle et totale du transit  $t_F, t_P$
- Temp de mi-transit

## Paramètres physiques associés:

- Rapport des rayons  $R_p/R_\star$
- Période de la planète
- Demi-grand axe
- Parametre d'impact
- Densité stellaire

# La 3ème loi de Kepler

Le carré de la période sidérale d'une planète (temps entre deux passages successifs devant une étoile) est directement proportionnel au cube du demi-grand axe de la trajectoire elliptique de la planète.

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G(M_{\star} + M_p)}{4\pi^2}$$

$G$  = constante gravitationnelle  $6,67428 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}/\text{s}^2$

$M_{\star}$  = masse de l'étoile

$M_p$  = masse de la planète, souvent on fait l'hypothèse que  $M_p \ll M_{\star}$

# Probabilité de transit

Longueur de la région =  $2\pi(a + L)$

Largeur de la région =  $\alpha L$

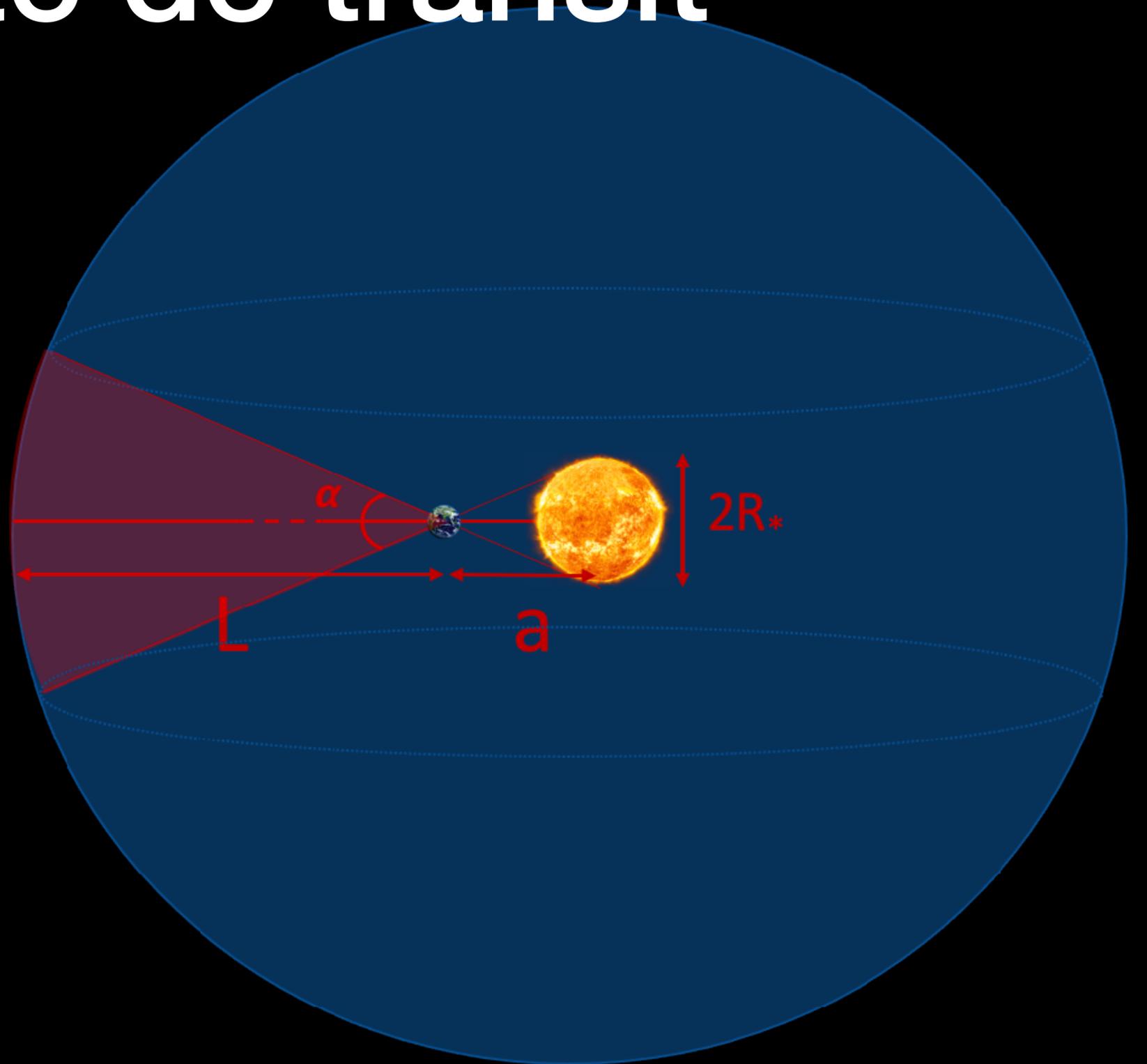
$$\text{avec } \alpha \simeq \frac{2R_{\star}}{a}$$

Surface de la sphère =  $4\pi(a + L)^2$

Probabilité de transit:

$$p = \frac{2\pi(a + L)\alpha L}{4\pi(a + L)^2}, \text{ avec } L \gg a$$

$$\text{Donc } p \simeq \frac{\alpha}{2} = \frac{R_{\star}}{a}$$



# TD Transits (facultatif)

Énoncé 1: La première planète découverte par la méthode des transits est HD 209458 b. Cette planète possède une période orbitale de 3.53 jours. Son étoile hôte a une masse de  $1.12 \times M_{\odot}$  et un rayon de  $1.146 \times R_{\odot}$ . Où  $M_{\odot}$  représente la masse du Soleil ( $1.99 \times 10^{30}$  kg) et  $R_{\odot}$  son rayon ( $6.96 \times 10^8$  m).

Question : Calculer la probabilité qu'une telle planète transite devant son étoile