

Credit illustration: Dr. Lionel Garcia

Introduction à l'astrophysique

Les exoplanètes

Elsa Ducrot : elsa.ducrot@cea.fr / 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**

Credit illustration: Dr. Lionel Garcia

Wooclap questions générales

Comment participer ?




- 1 Allez sur 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

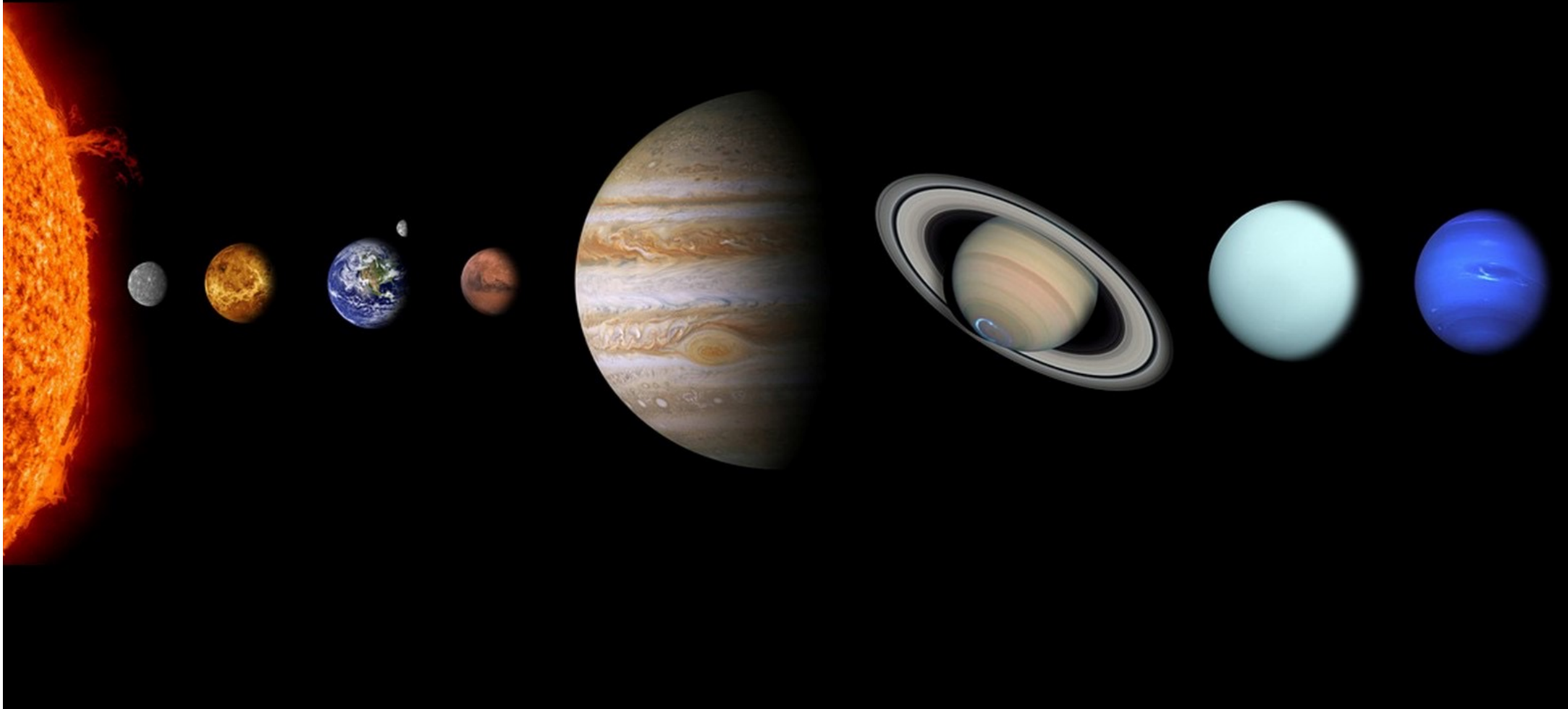
 Désactiver les réponses par SMS



Credit illustration: Dr. Lionel Garcia

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. »

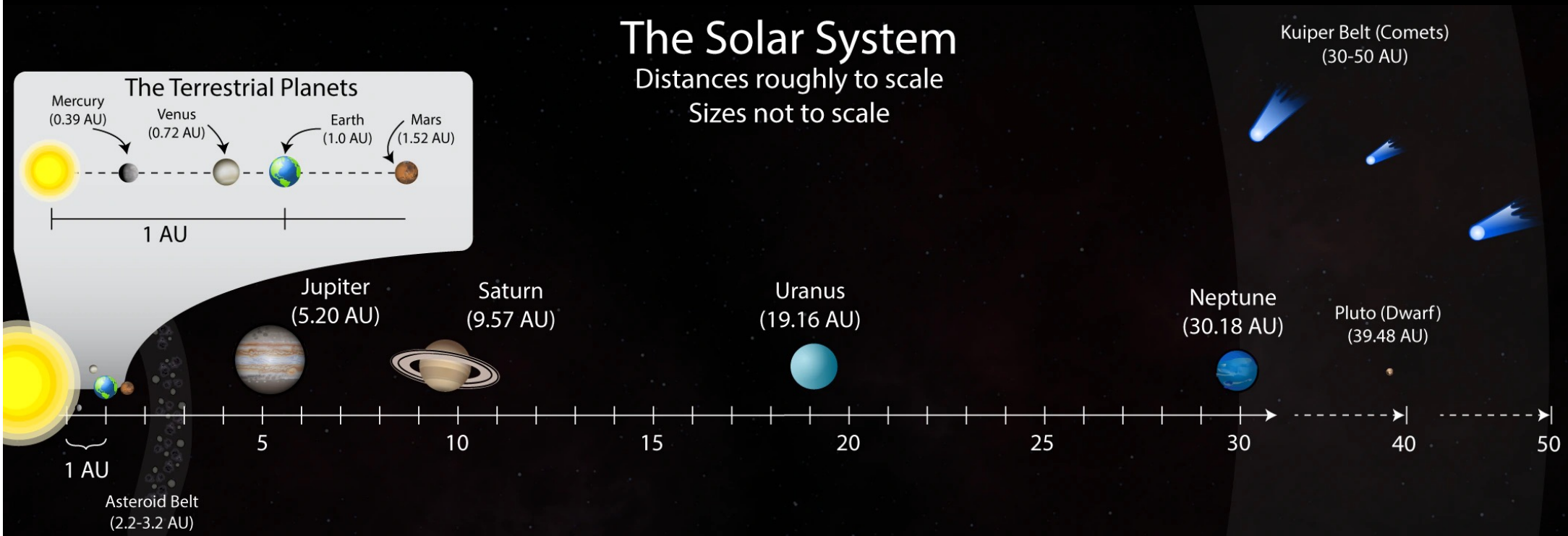
Le système solaire



Les distances dans le système solaire

The Solar System

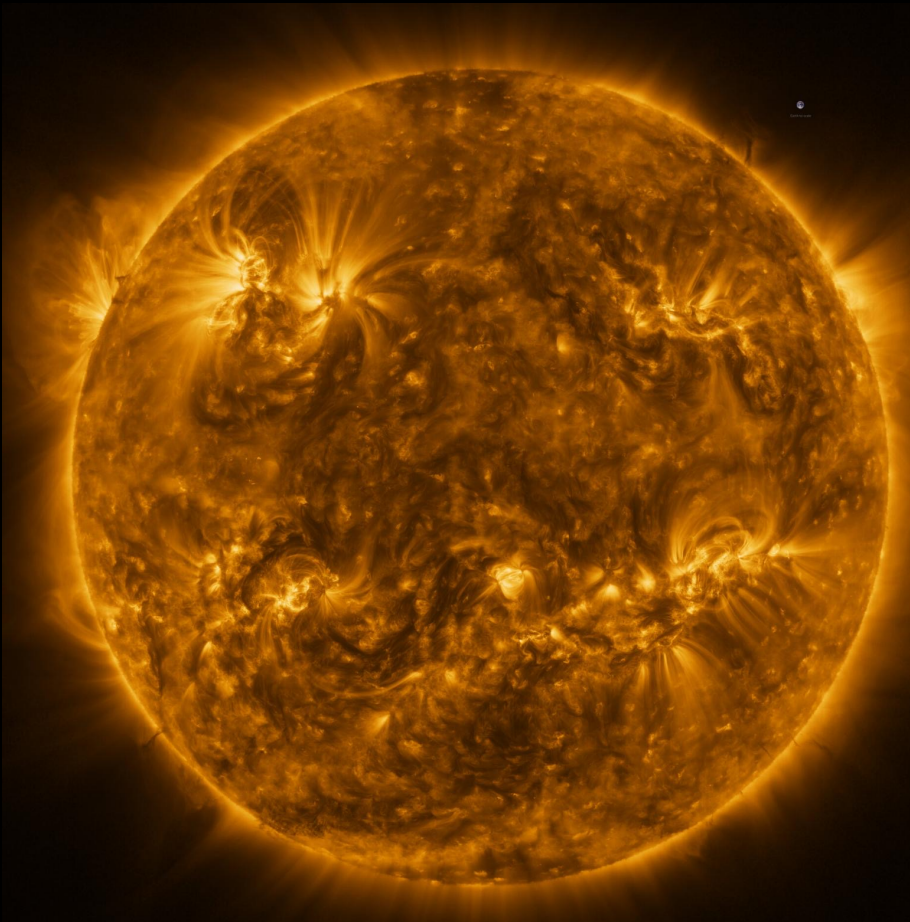
Distances roughly to scale
Sizes not to scale



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

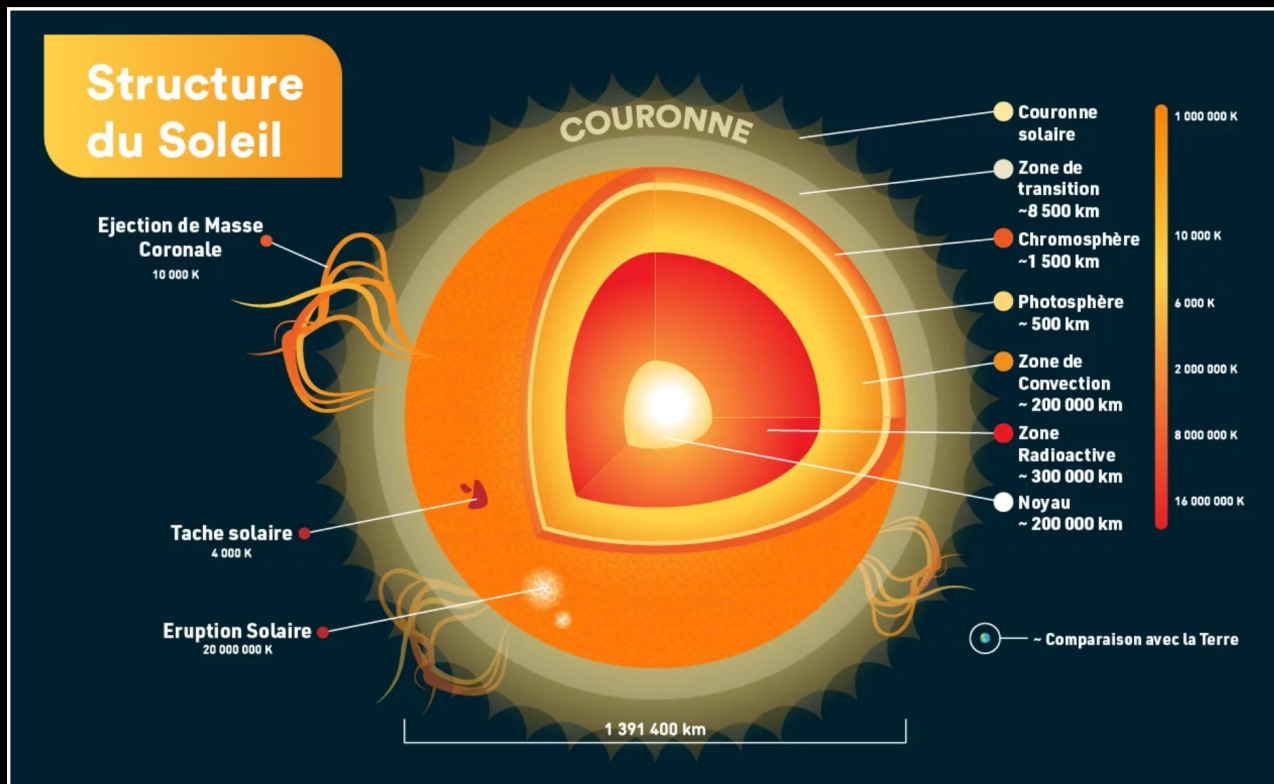
Le soleil



- 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

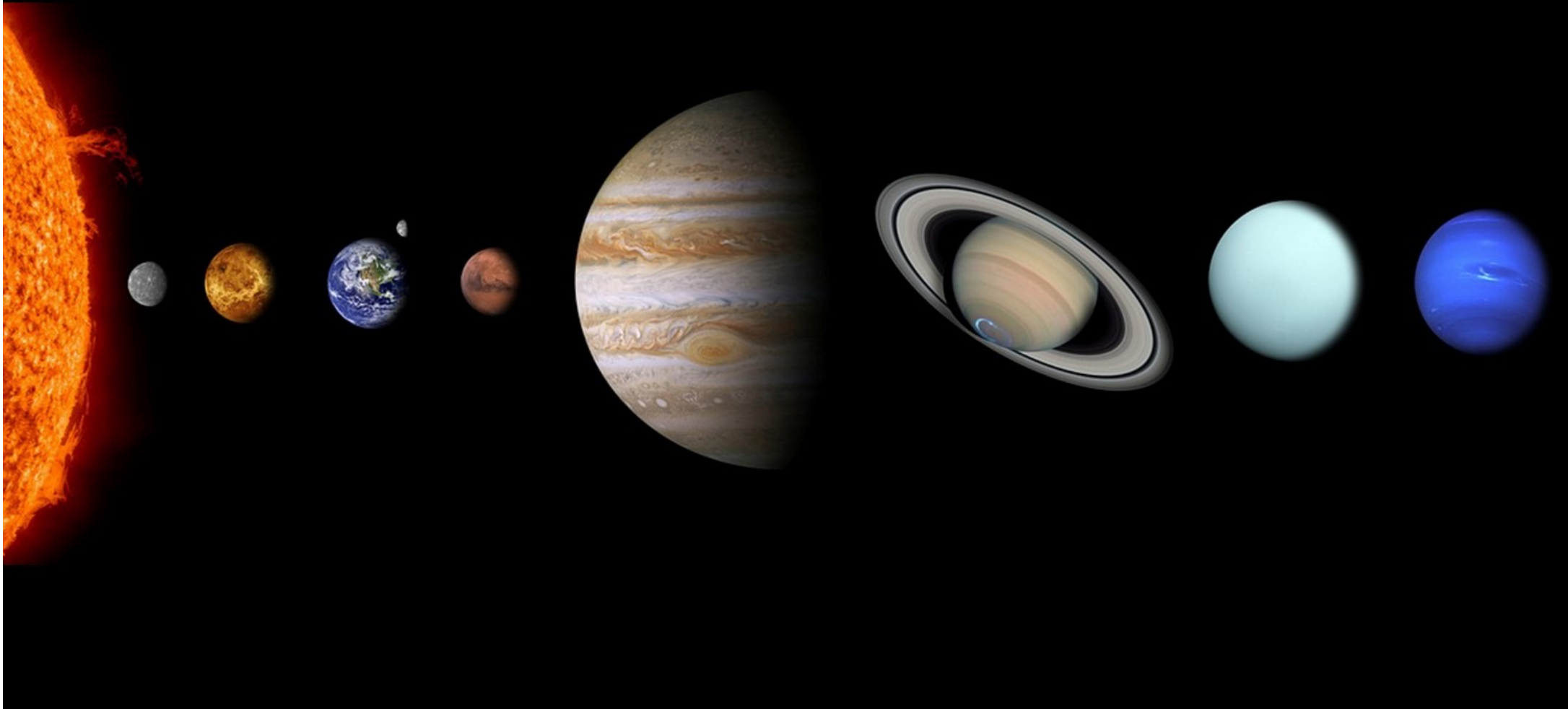


- Présence de tâches sur la photosphère
- Elles apparaissent dans les régions actives
- Au dessus des tâches se produisent des éruptions solaires
- Pour étudier l'activité du soleil on compte les tâches
- Le vent solaire créer des aurores boréales sur Terre

Credit: NASA

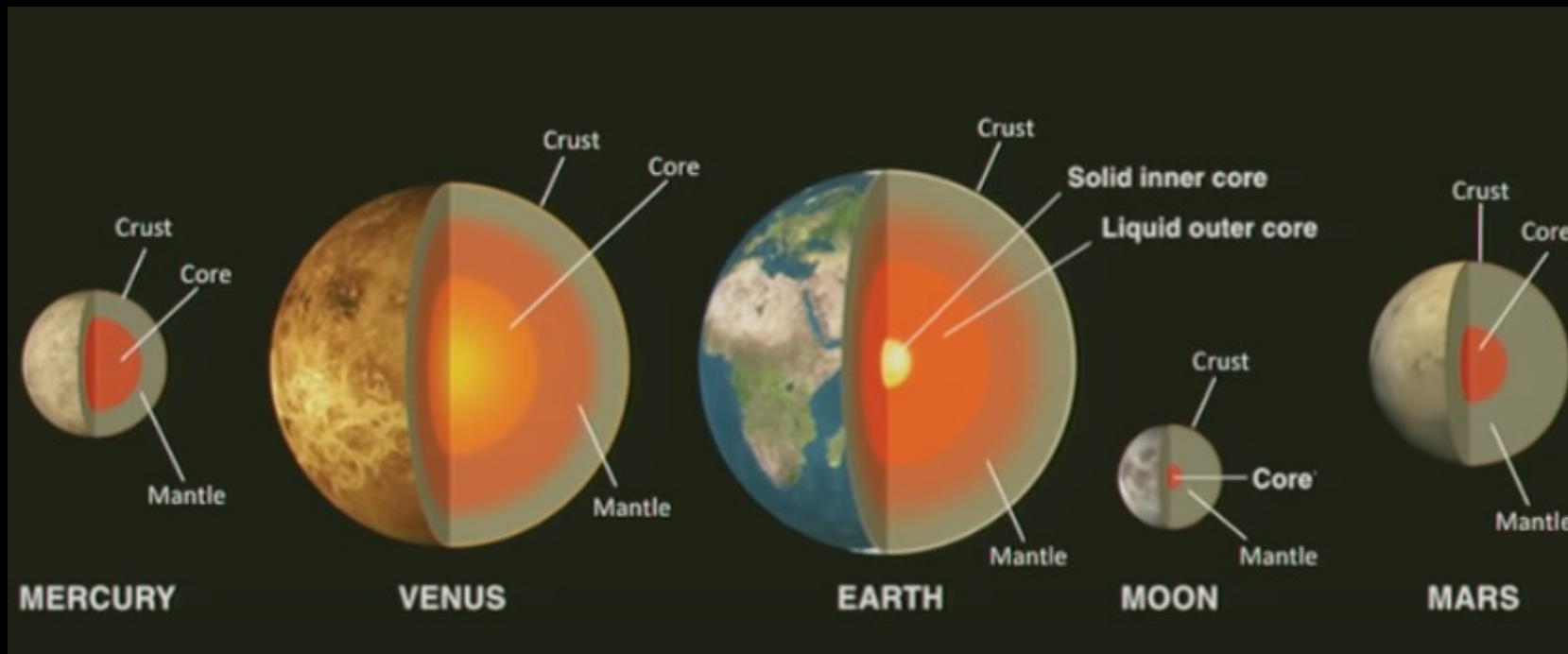


Le système solaire



Les planètes telluriques

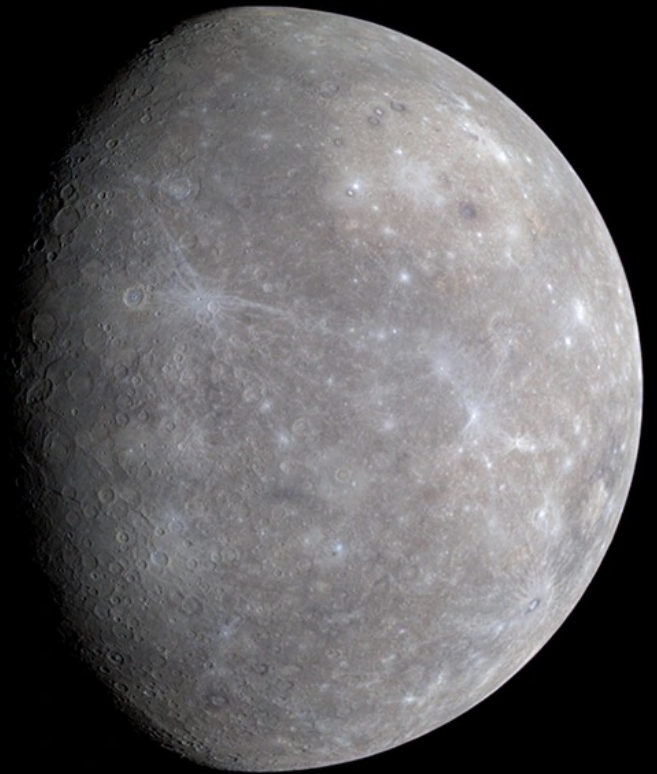
- Petites en taille et masse, composée de roches et de métaux, surface solide, structure interne en couche concentriques (noyau, manteau, croûte)



Credit: Dr. Bruce Banerdt

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



Credit: NASA

Passage de Mercure vu depuis la Terre

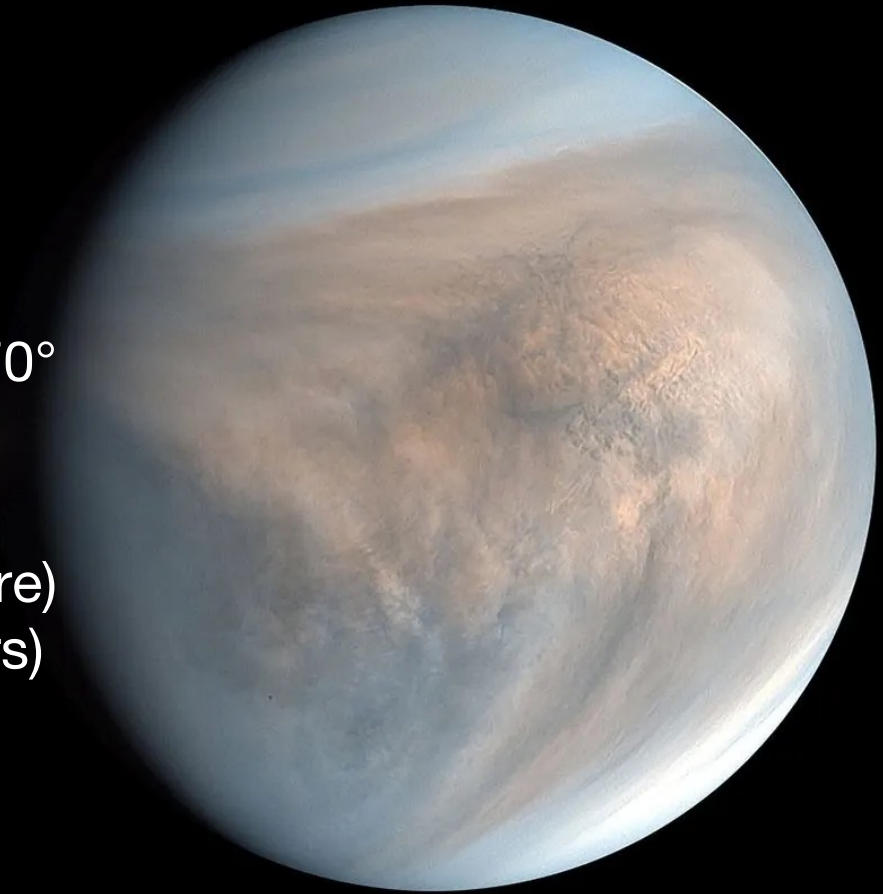
MERCURY TRANSIT

11.11.18

Credit: NASA

Venus

- Taille similaire à la Terre 6052km
- Atmosphère très épaisse, 96% CO₂
- 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



Credit: NASA

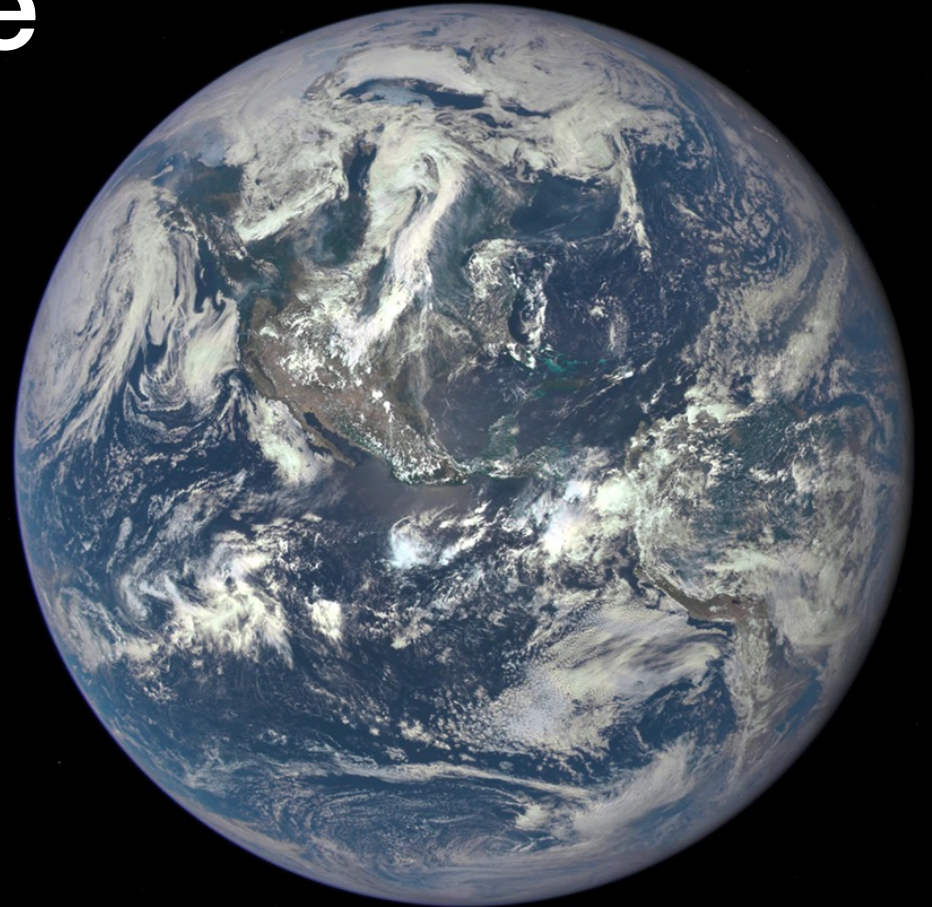
Venus



Credit: Sonde Venera 13 1982

Terre

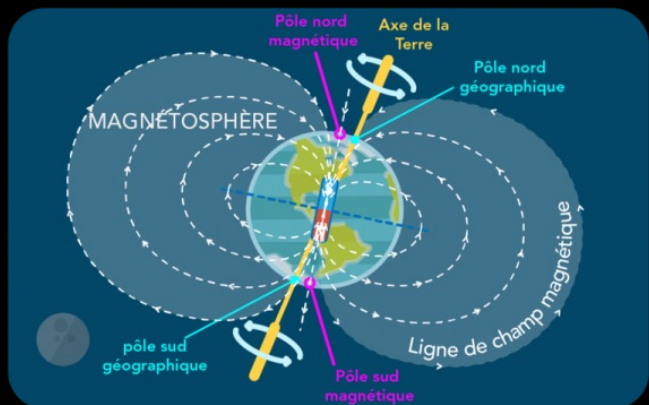
- Bleue car grande quantité d'eau (71%)
- L'unique planète habitée connue
- Structure : noyau, manteau, croûte
- Comme un aimant : Champ magnétique
- Seule planète du système avec de la technique des plaques
- Atmosphère épaisse : 78 N₂, 21% O₂
- Atmosphère : protège des UV et réchauffe
- Le champ magnétique nous projète aussi



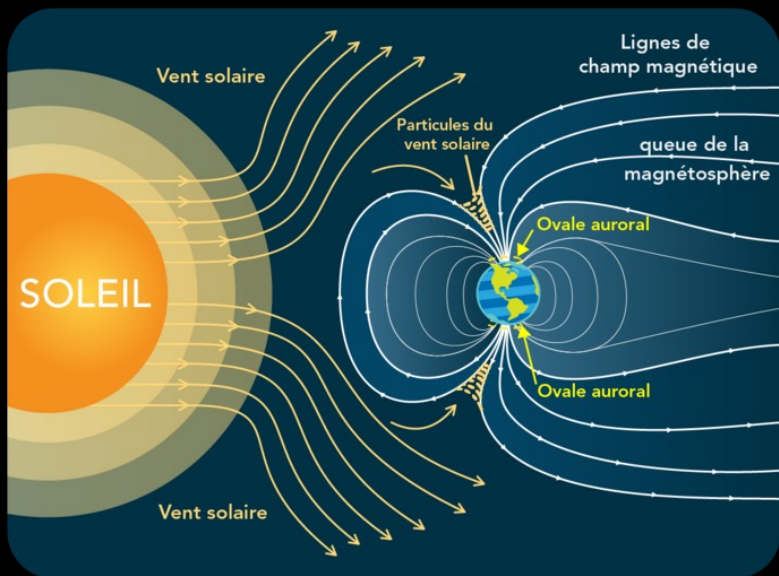
Terre

Credit: NASA

CHAMP MAGNÉTIQUE TERRESTRE



Vent solaire et la magnétosphère



Pour voir des jolies images et vulgarisation astronomie : @EricLagadec

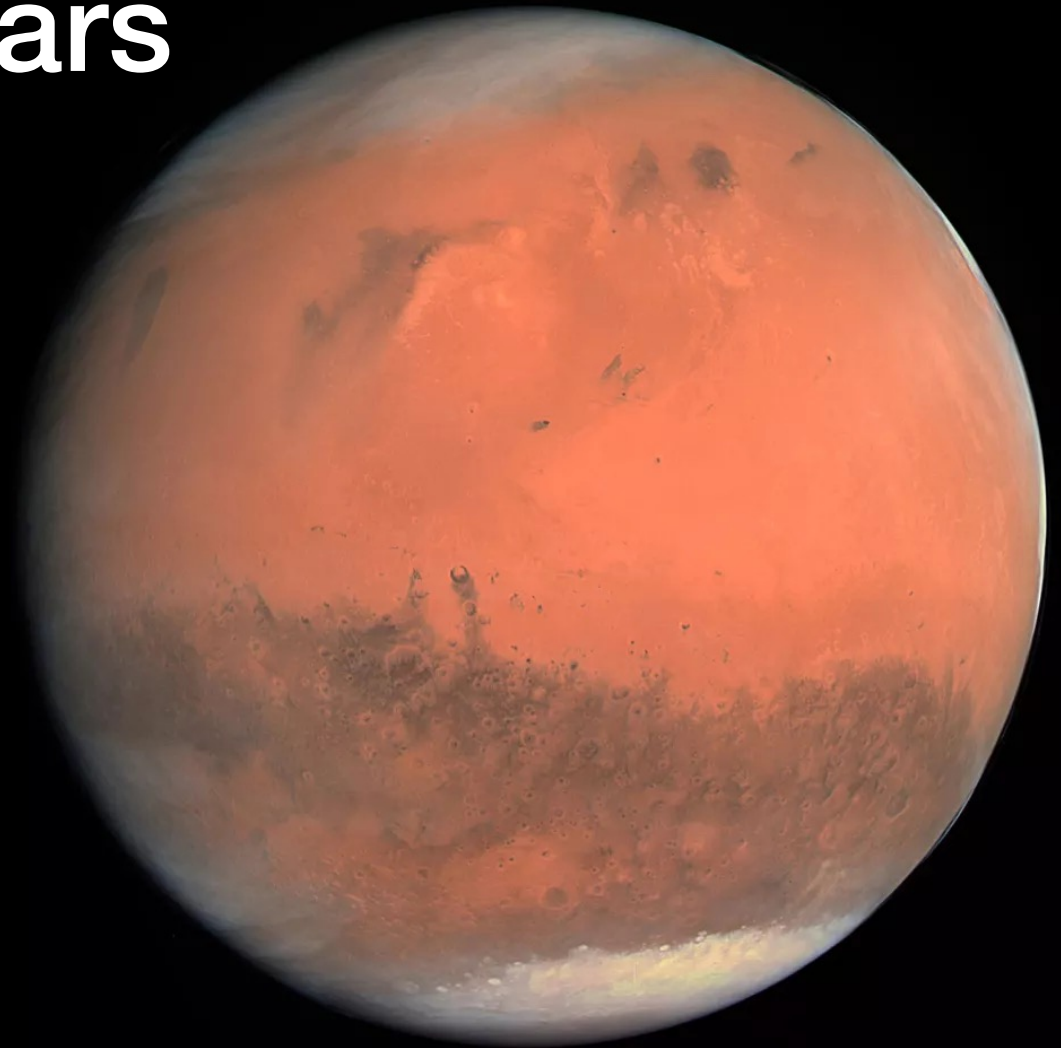
Credit: VectorMine

Terre vue depuis Saturne



Mars

- Beaucoup plus petite que la Terre
- Orbite plus elliptique que la Terre
- Température moyenne -63°C
- Atmosphère très fine 95% 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.



Credit: CNES

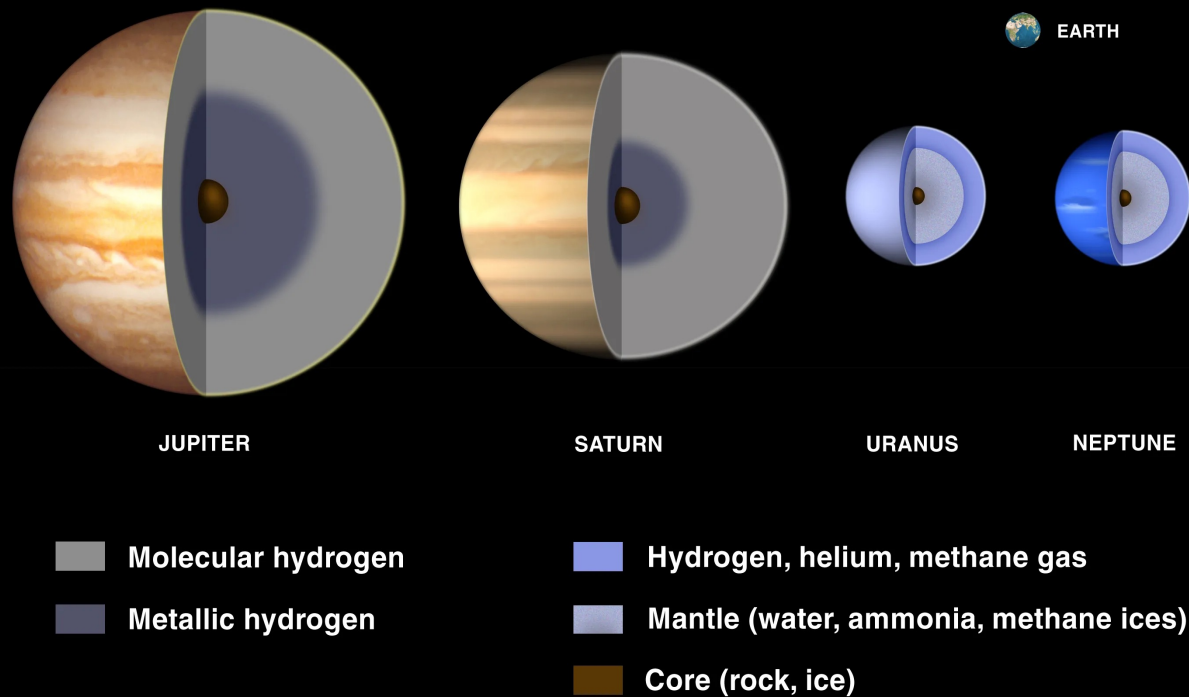
Mars



Credit: Dr. Bruce Banerdt

Les planètes Gazeuses

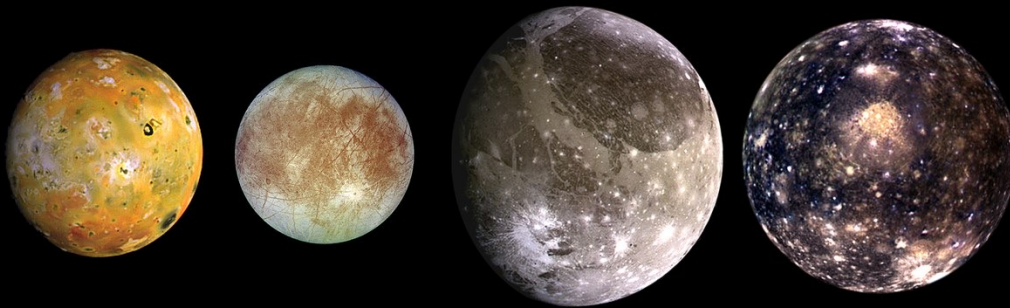
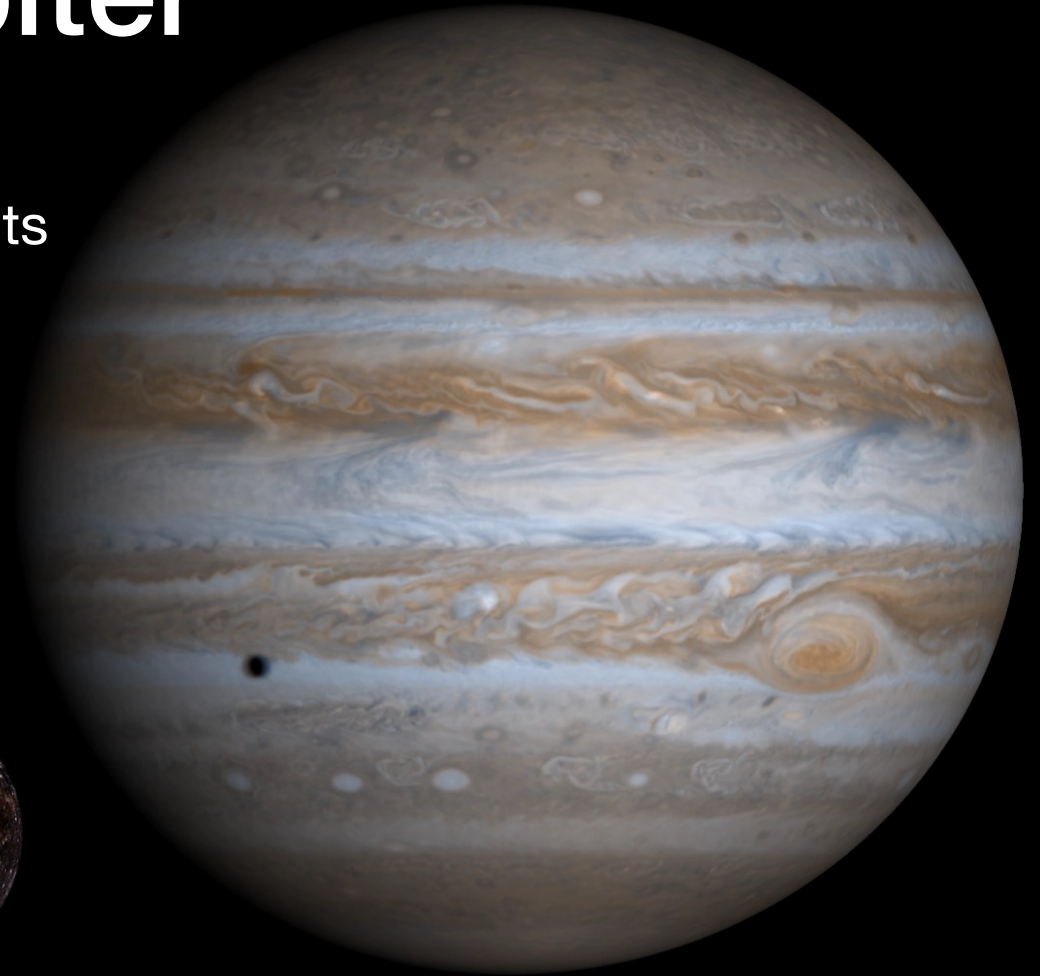
- Principalement constituées de gaz (dominée par l'hydrogène et l'hélium), sans surface solide, grand taille et masse, structure interne pour Jupiter/Saturne (noyau rocheux, puis couche d'hydrogène métallique, puis couche d'hydrogène gazeux), structure pour Uranus/Neptune (noyau rocheux, manteau de glaces,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



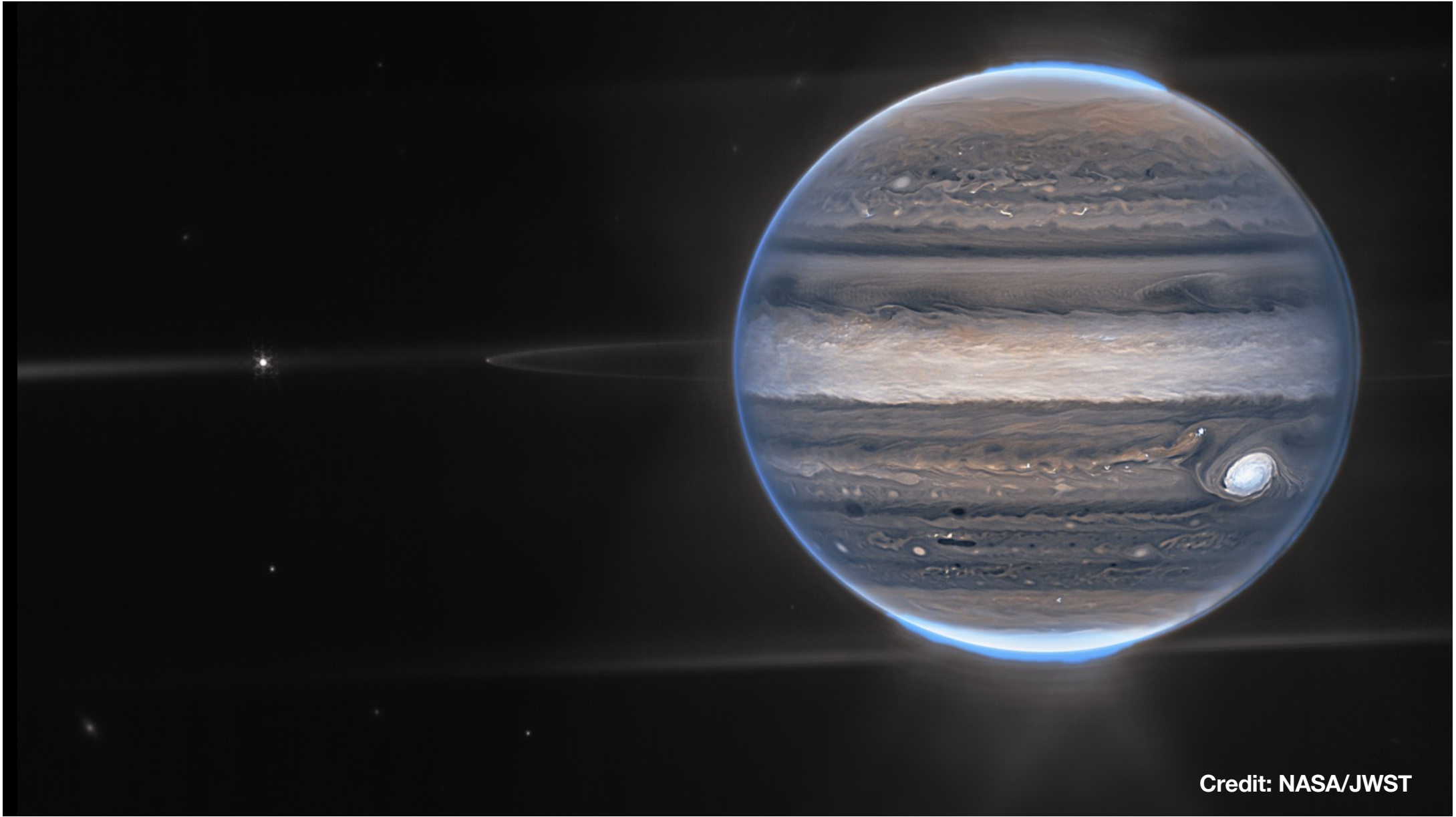
Credit: NASA

Jupiter

- La plus grande
- Boule de gaz et de liquide (H₂, He)
- Rotation rapide stimule vents violents
- Grande tache : ouragan
- Champ magnétique très fort
- Anneaux invisibles
- Entourée de 95 lunes !
- Dont 4 ~ taille d'une planète



Credit: NASA/JUNO



Credit: NASA/JWST

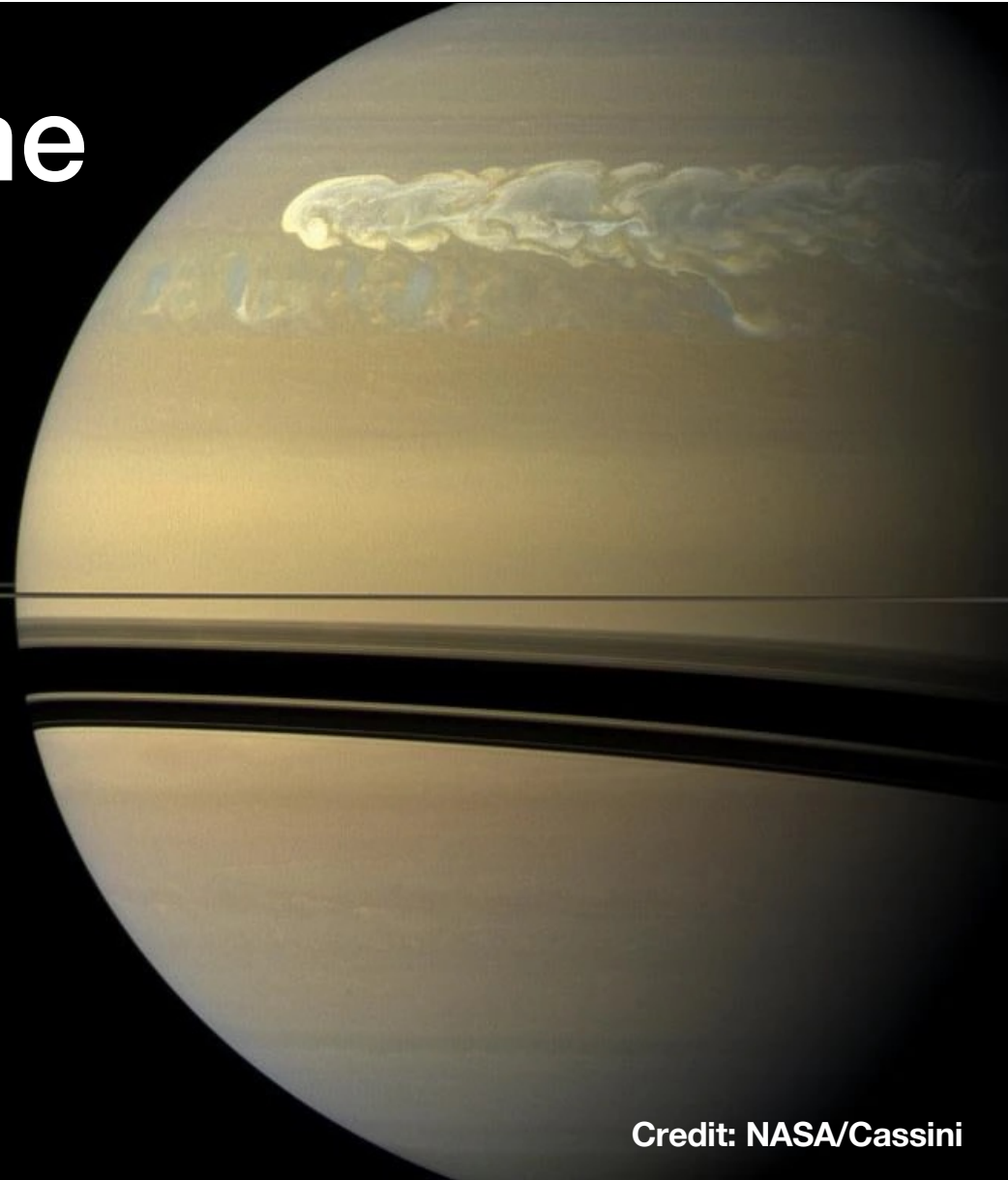
Jupiter



Credit: NASA/JUNO

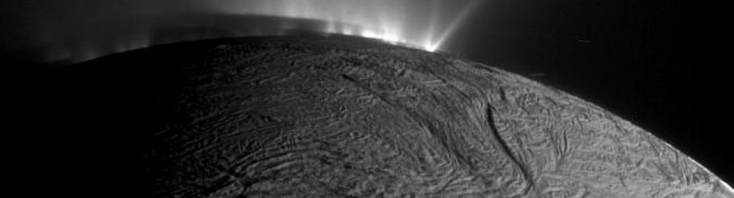
Saturne

- Boule de gaz et de liquide (H₂, 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



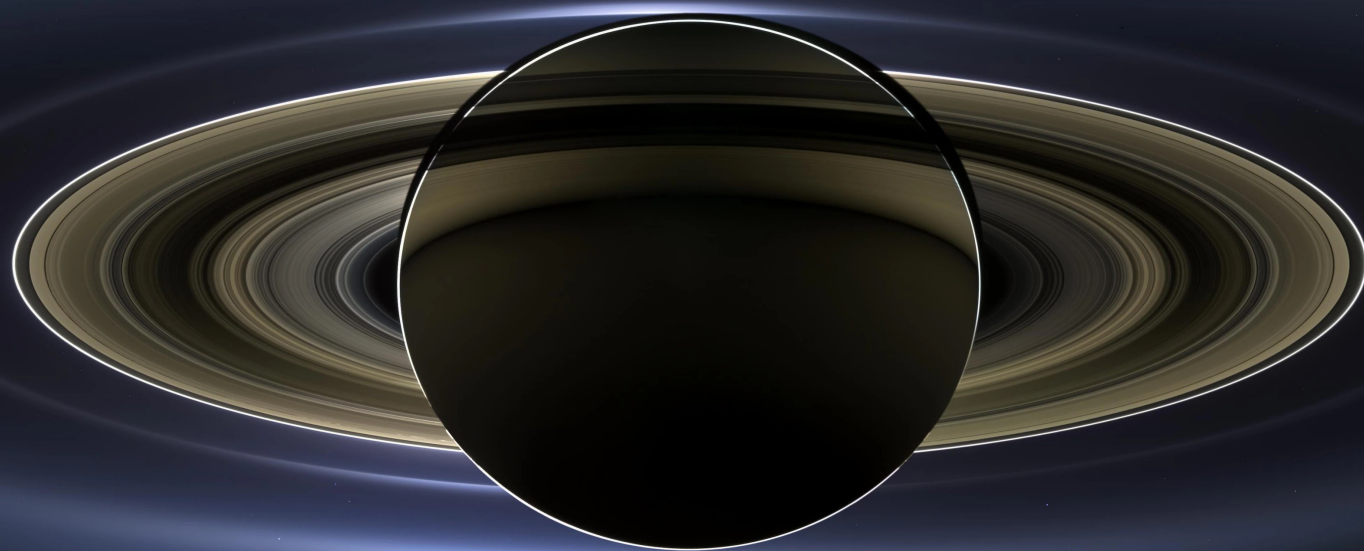
Credit: NASA/Cassini

Titan et Encelade



Credit: NASA/Cassini

Saturne



Credit: NASA/Cassini

Credit: NASA/JWST

Uranus

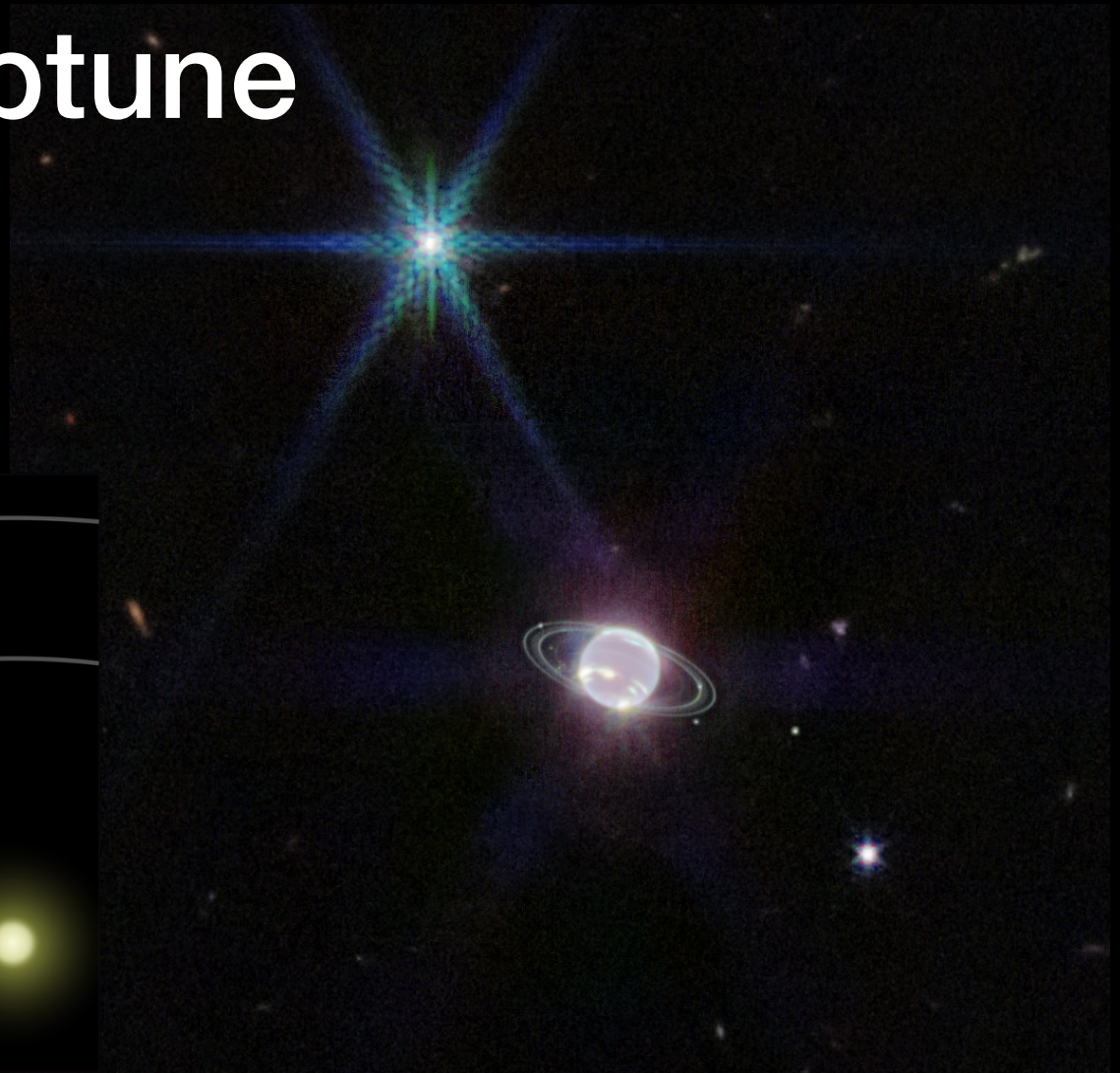
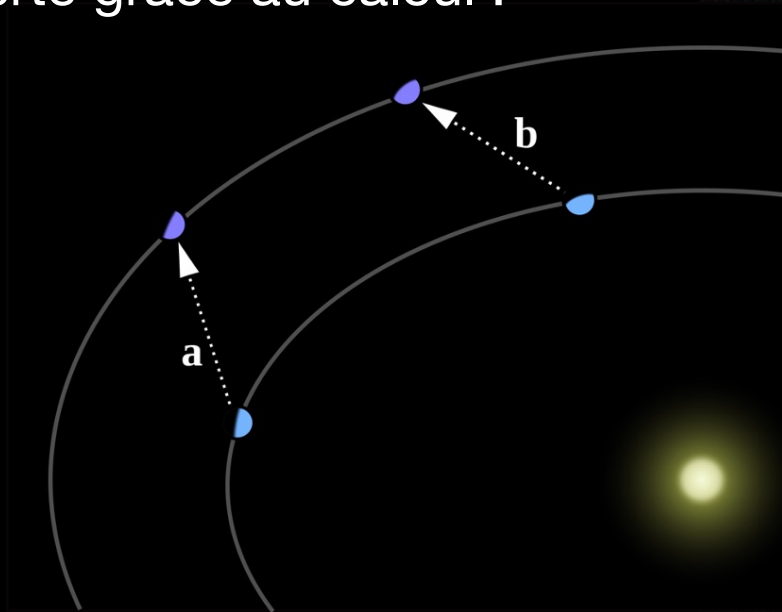
- Géante glacée
- Composée d'He, H et de glaces (de méthane, d'eau et d'ammoniac)
- Vents extrêmes
- Axe incliné à 97.8°
- Se traduit par de long étés/hivers



Credit: NASA/JPL

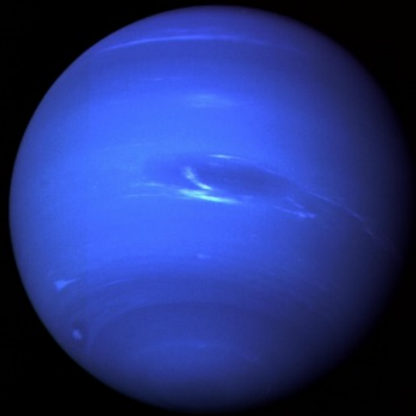
Neptune

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

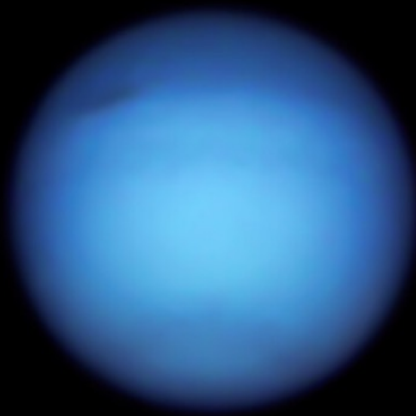


Credit: NASA/JWST

Neptune



Voyager 2 (1989)



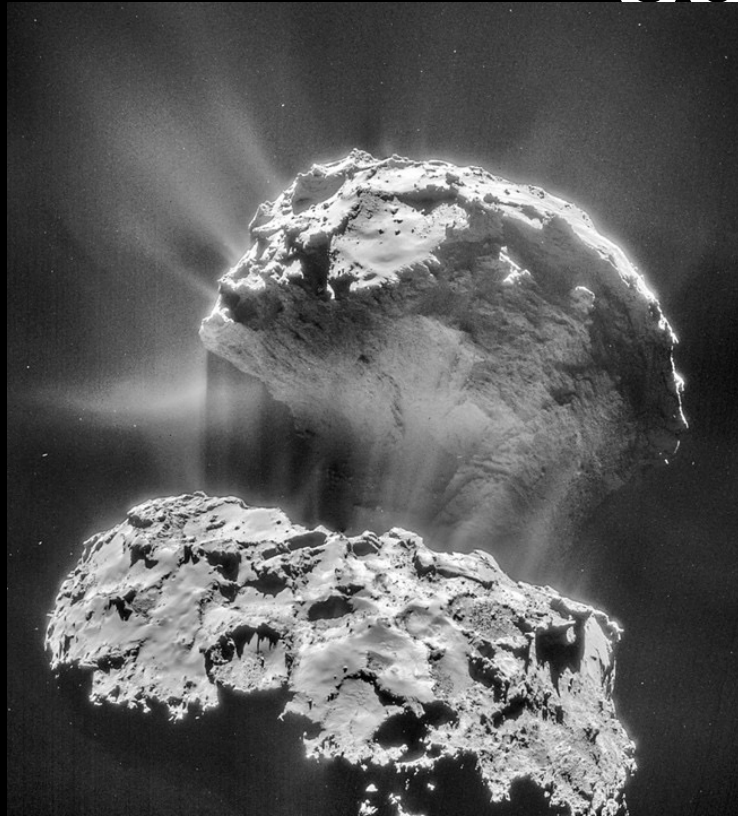
Hubble (2021)



Webb (2022)

Credit: NASA/JWST

Autres corps du système solaire

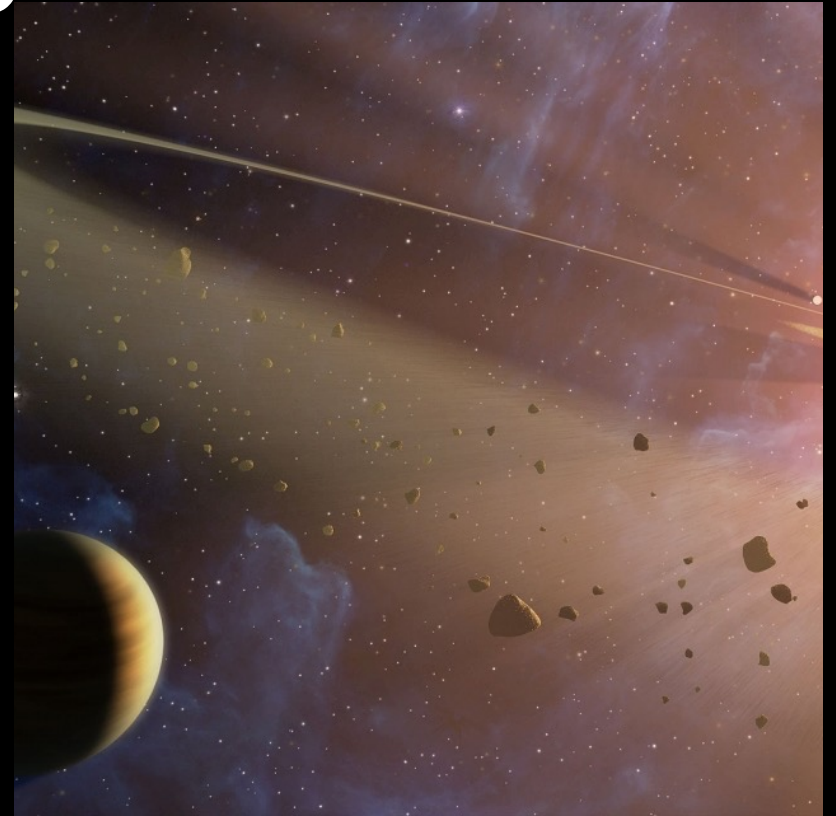
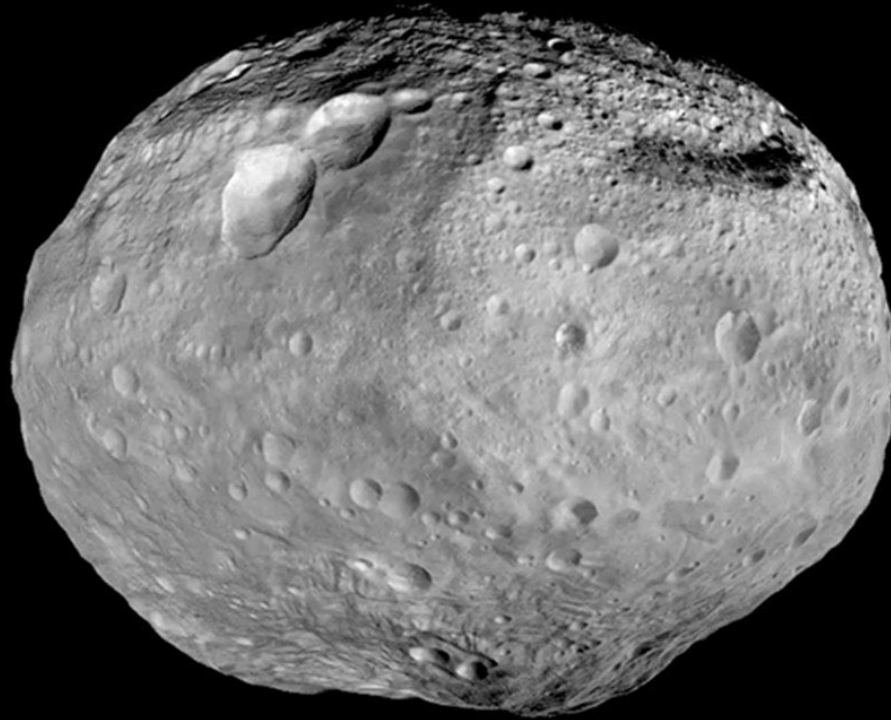


Credit: ESA/Rosetta



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

Autres corps du système solaire

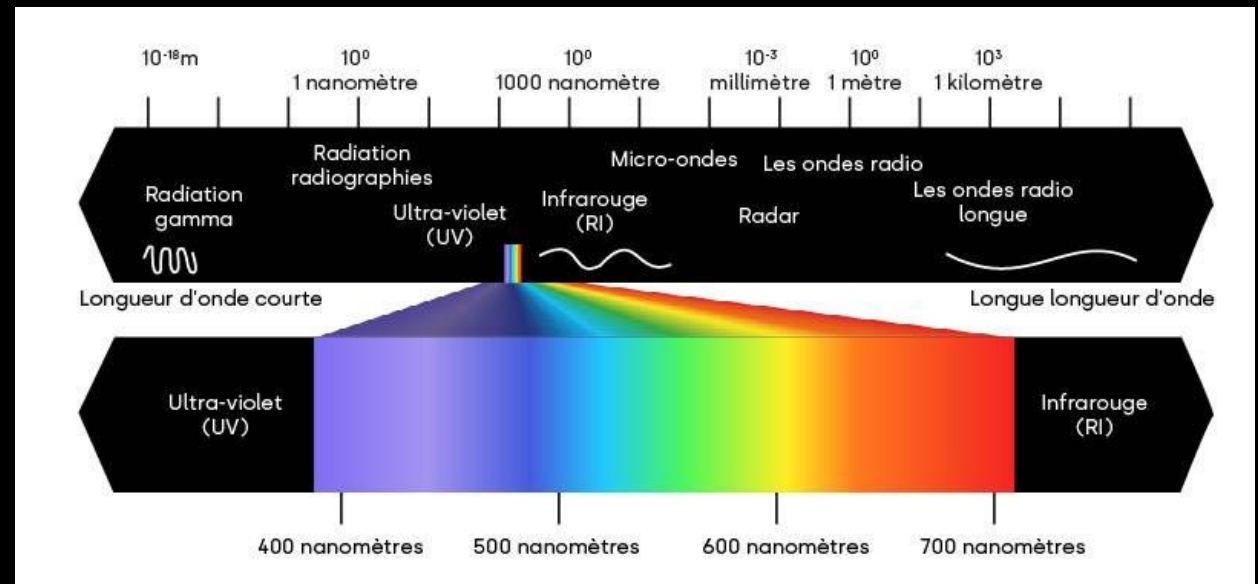


Credit: Labex

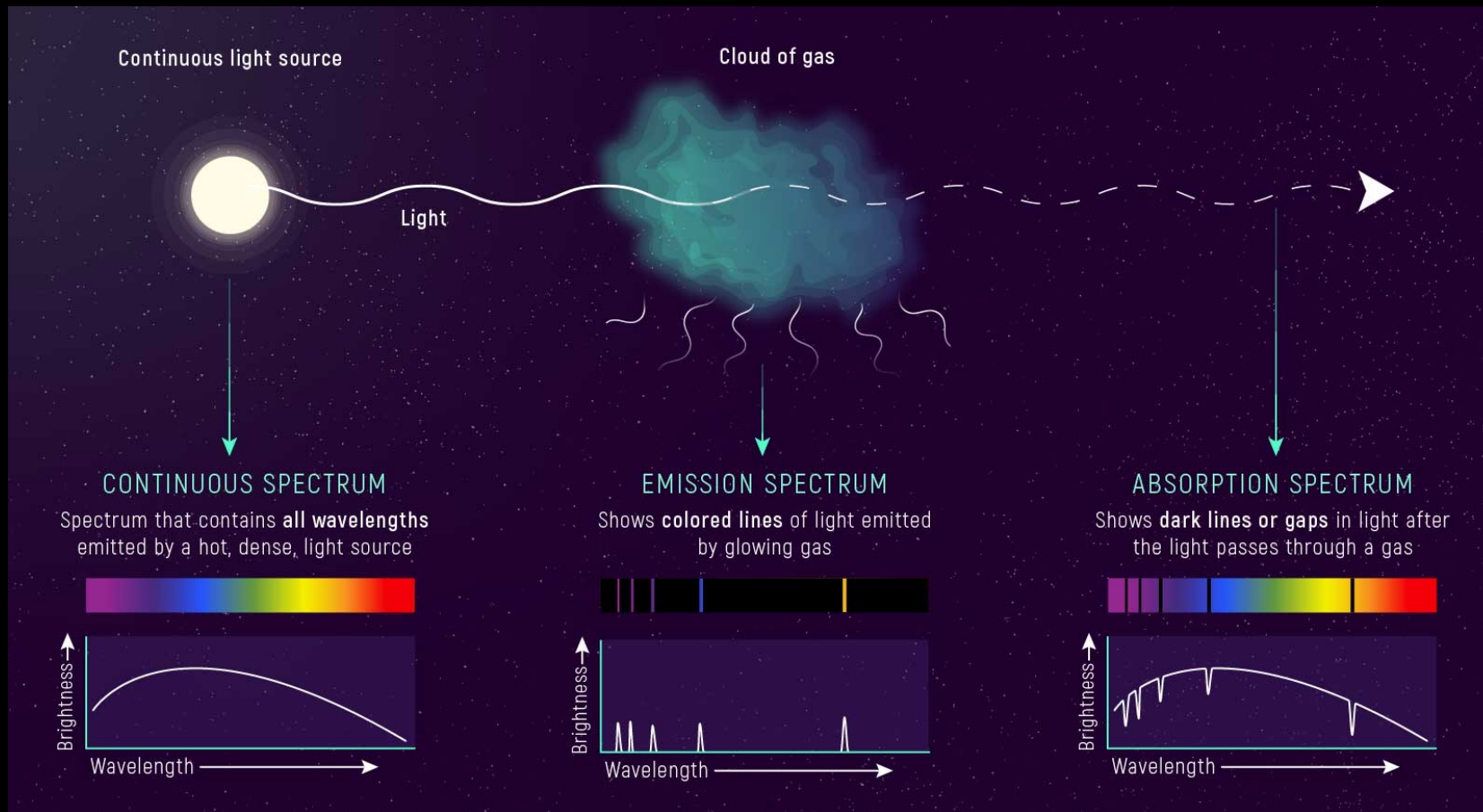
L'appel des étoiles

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 ?

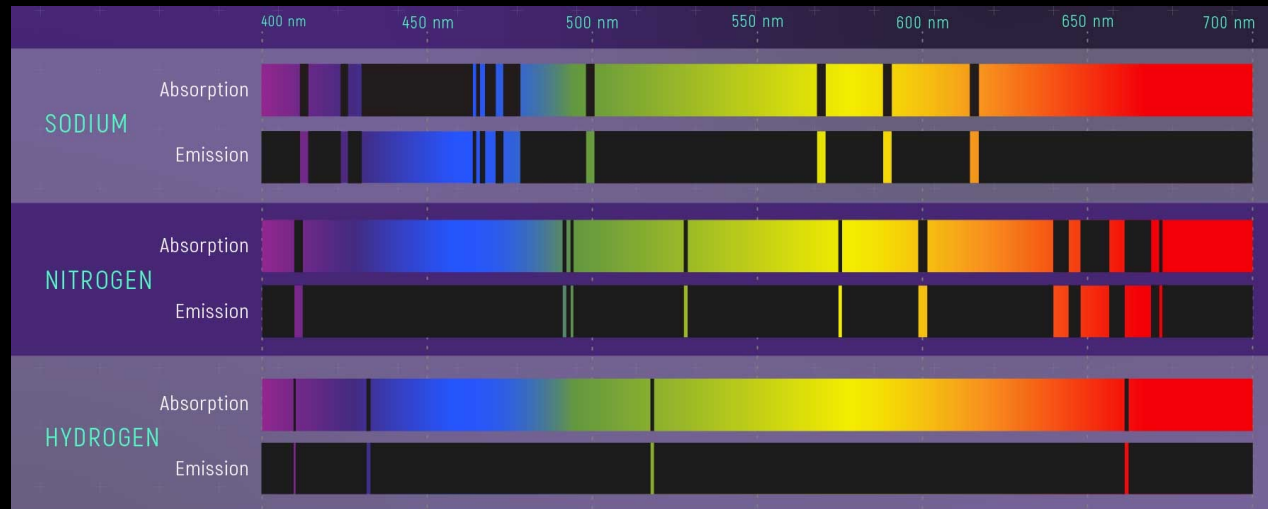


Qu'est ce qu'un spectre

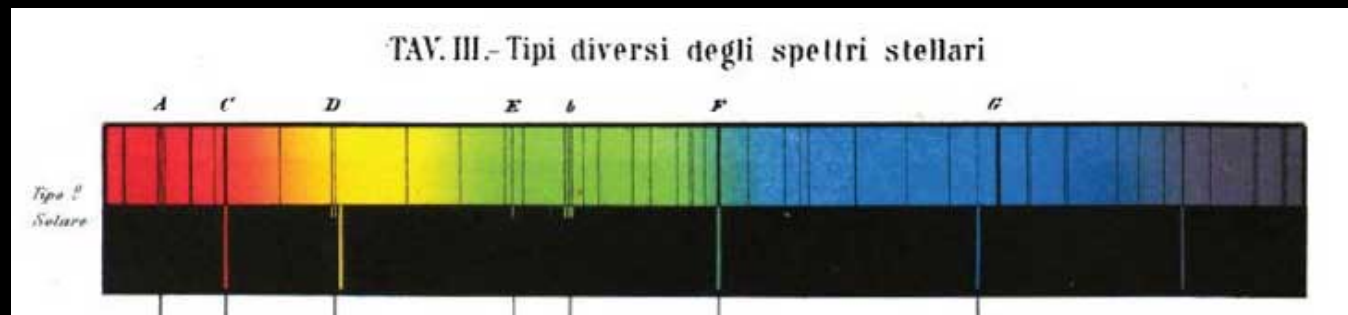


Credit: NASA

Les raies d'absorption et d'émission

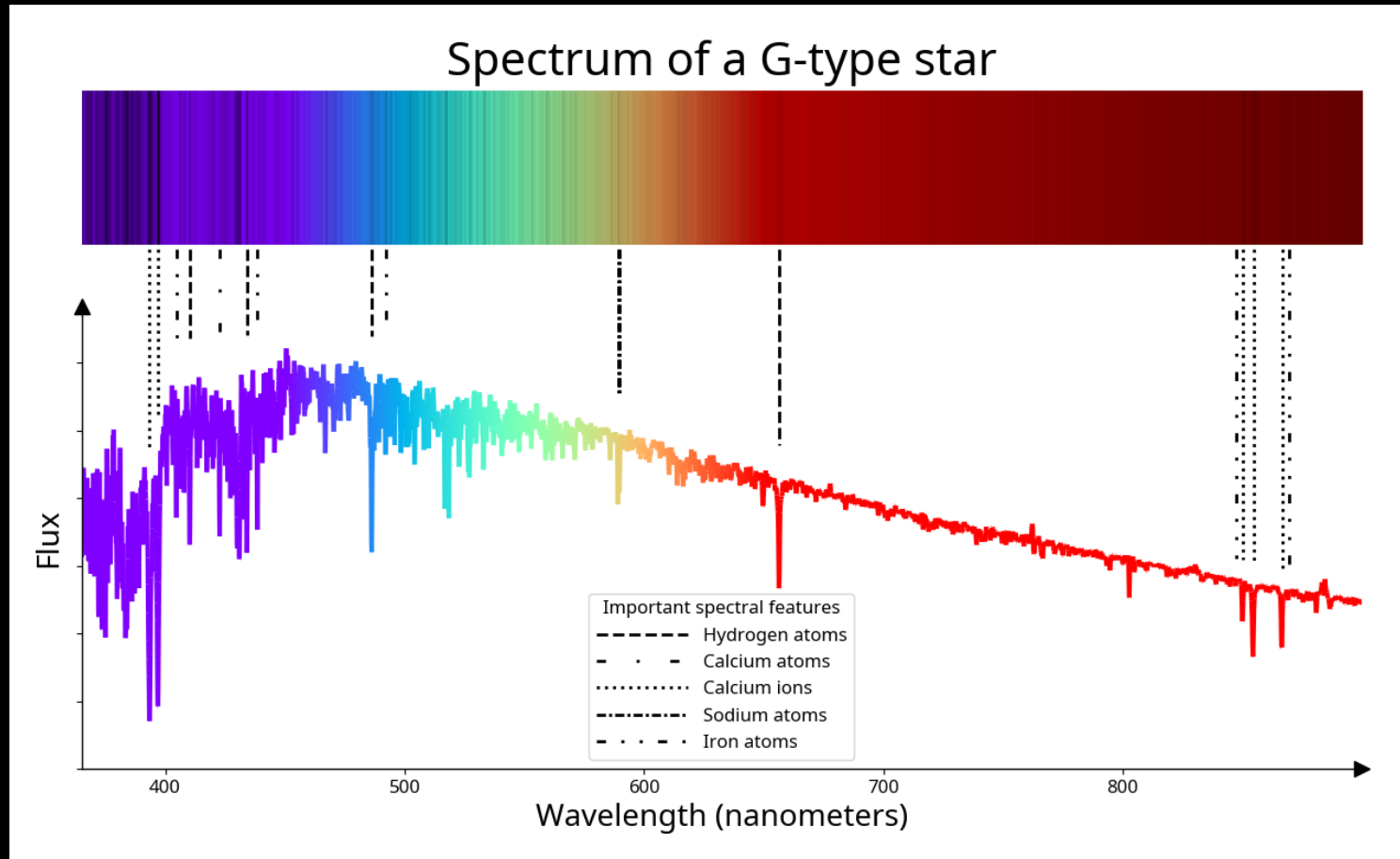


Credit: NASA



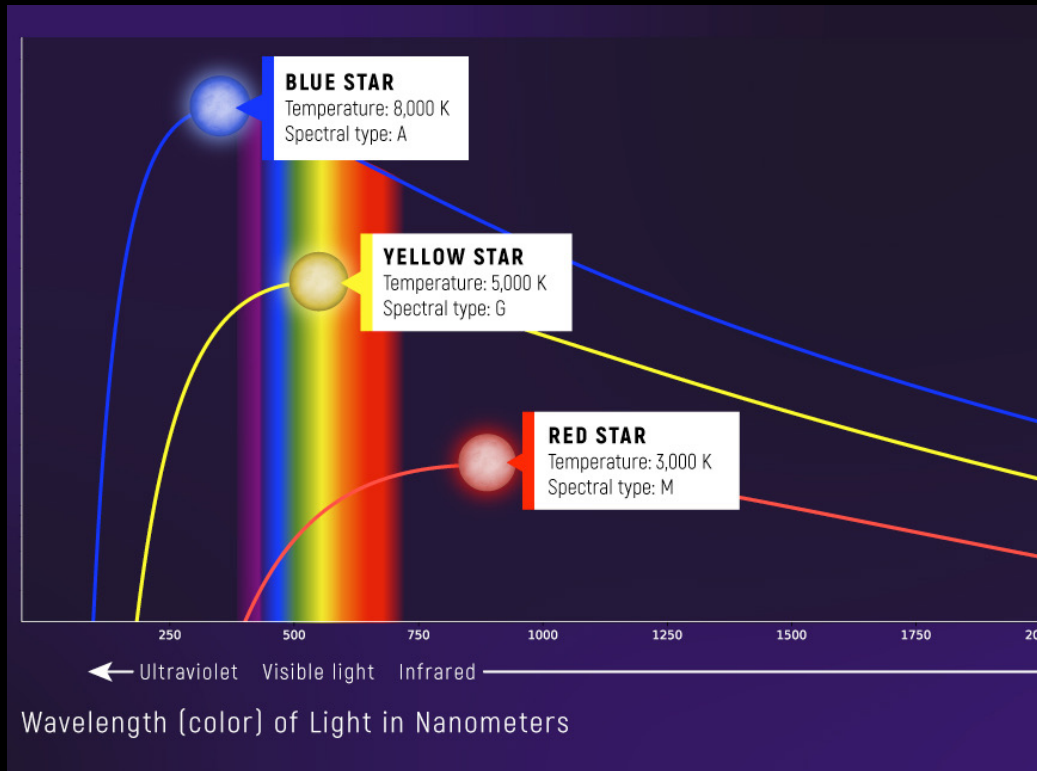
Credit: P.A. Secchi, *Le Stelle: Saggio di Astronomia Siderale*, Milan, 1877.

Spectre d'une étoile type solaire



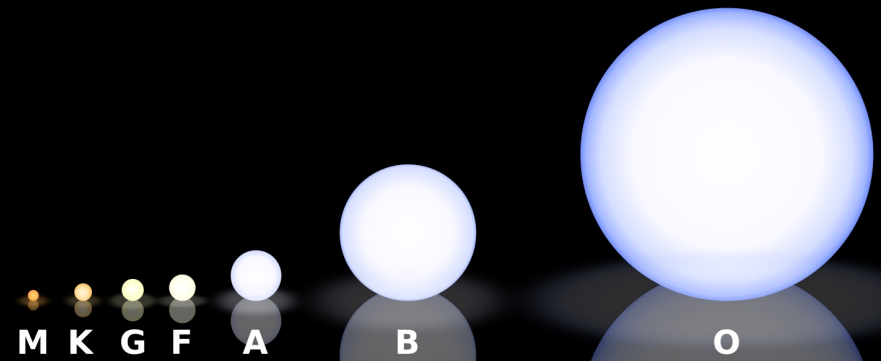
Credit: IAU OAE/SDSS/Niall Deacon.

Les différents types d'étoiles



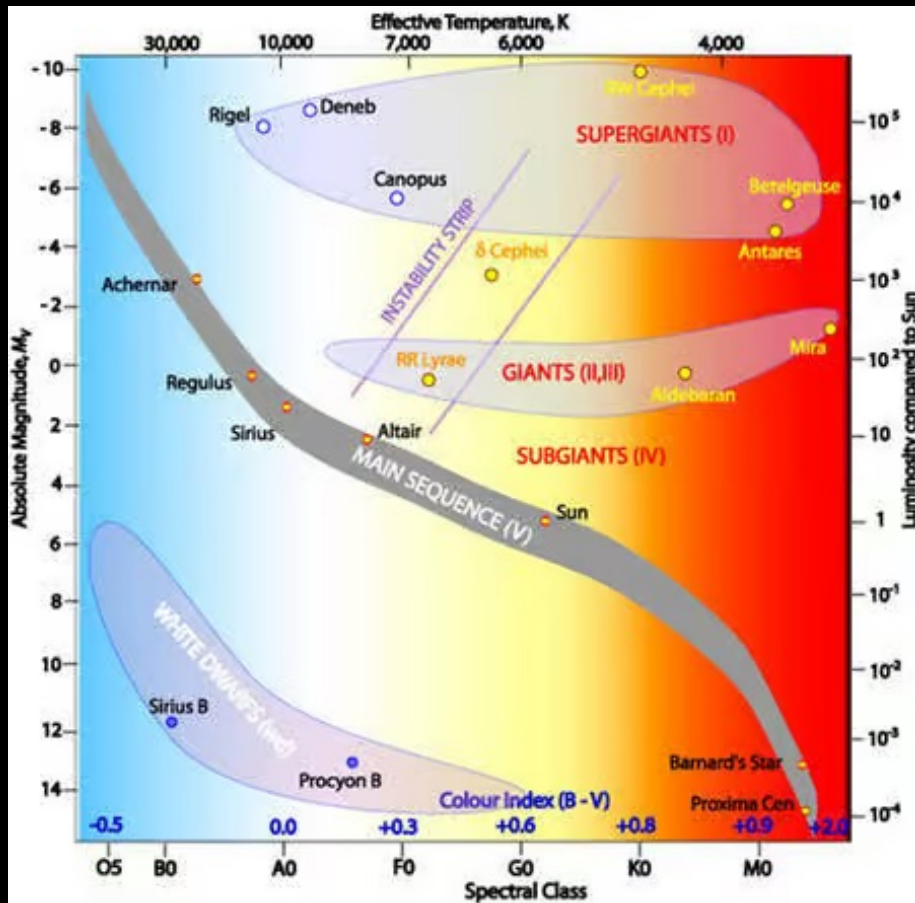
Credit: NASA

- 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



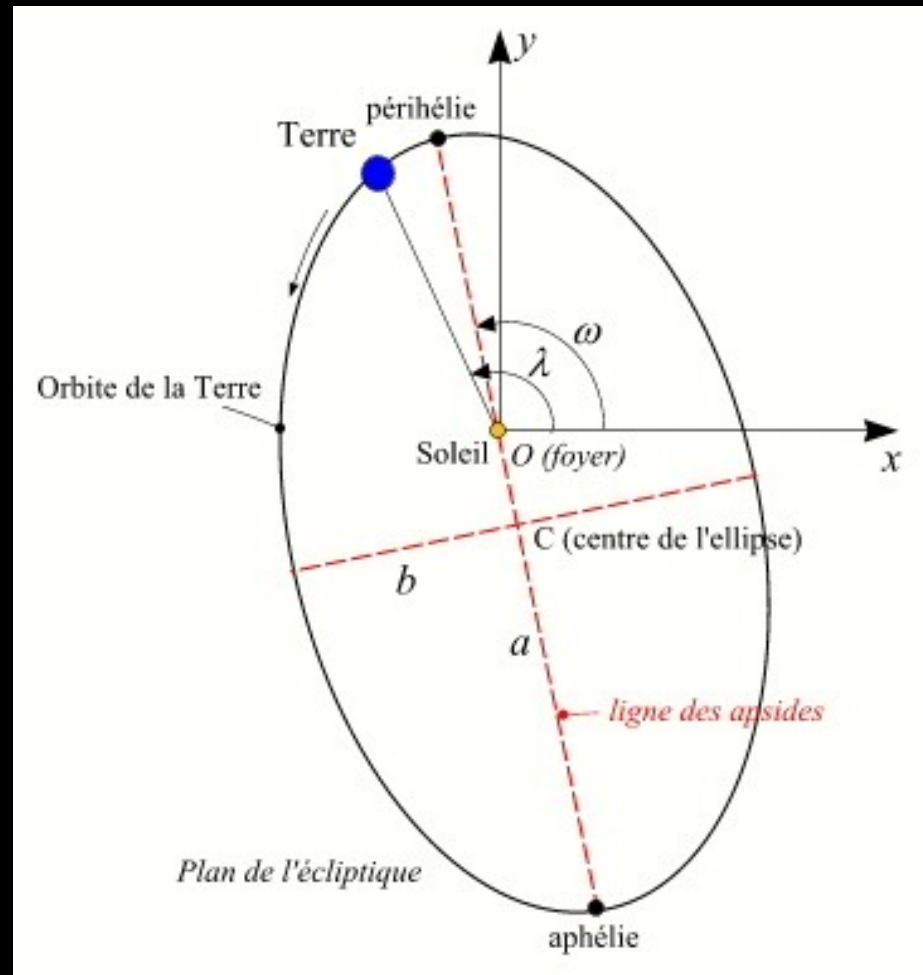
- En rapportant les propriétés des étoiles un diagramme a été fait
- Séquence principale
- Branche des géantes rouges
- Séquence des naines blanches

Les orbites planétaires

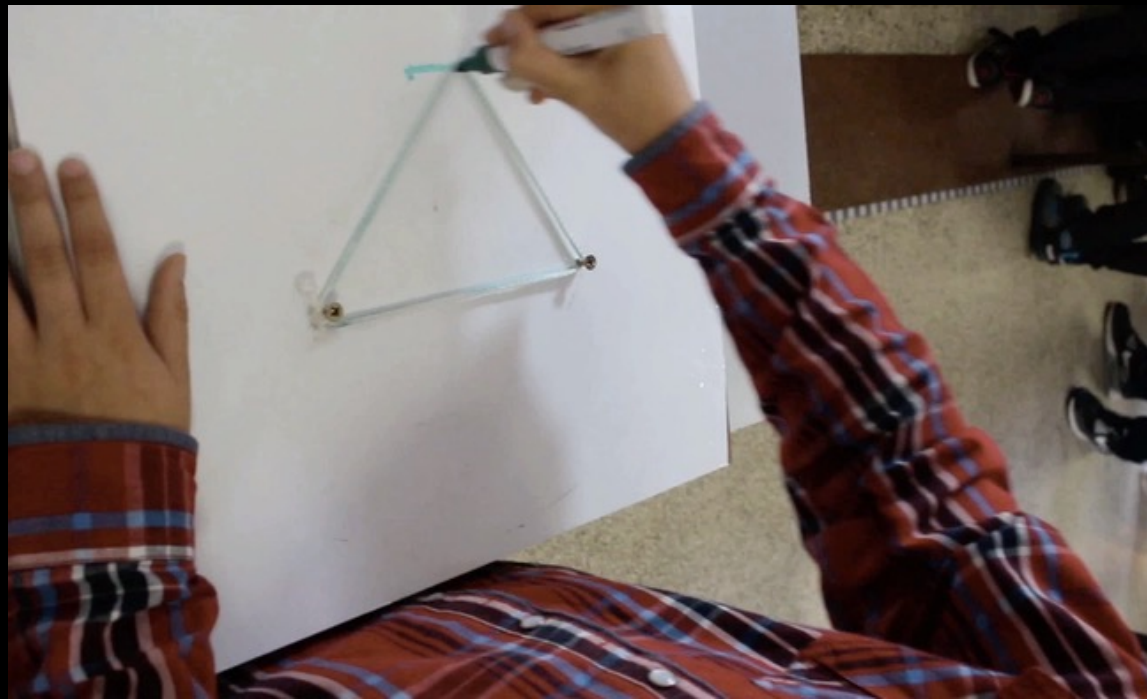
« Les planètes décrivent autour du Soleil des orbites en forme d'ellipse. Le soleil n'est pas au centre mais sur le côté. »

Johannes Kepler/1571-1630

Les ellipses

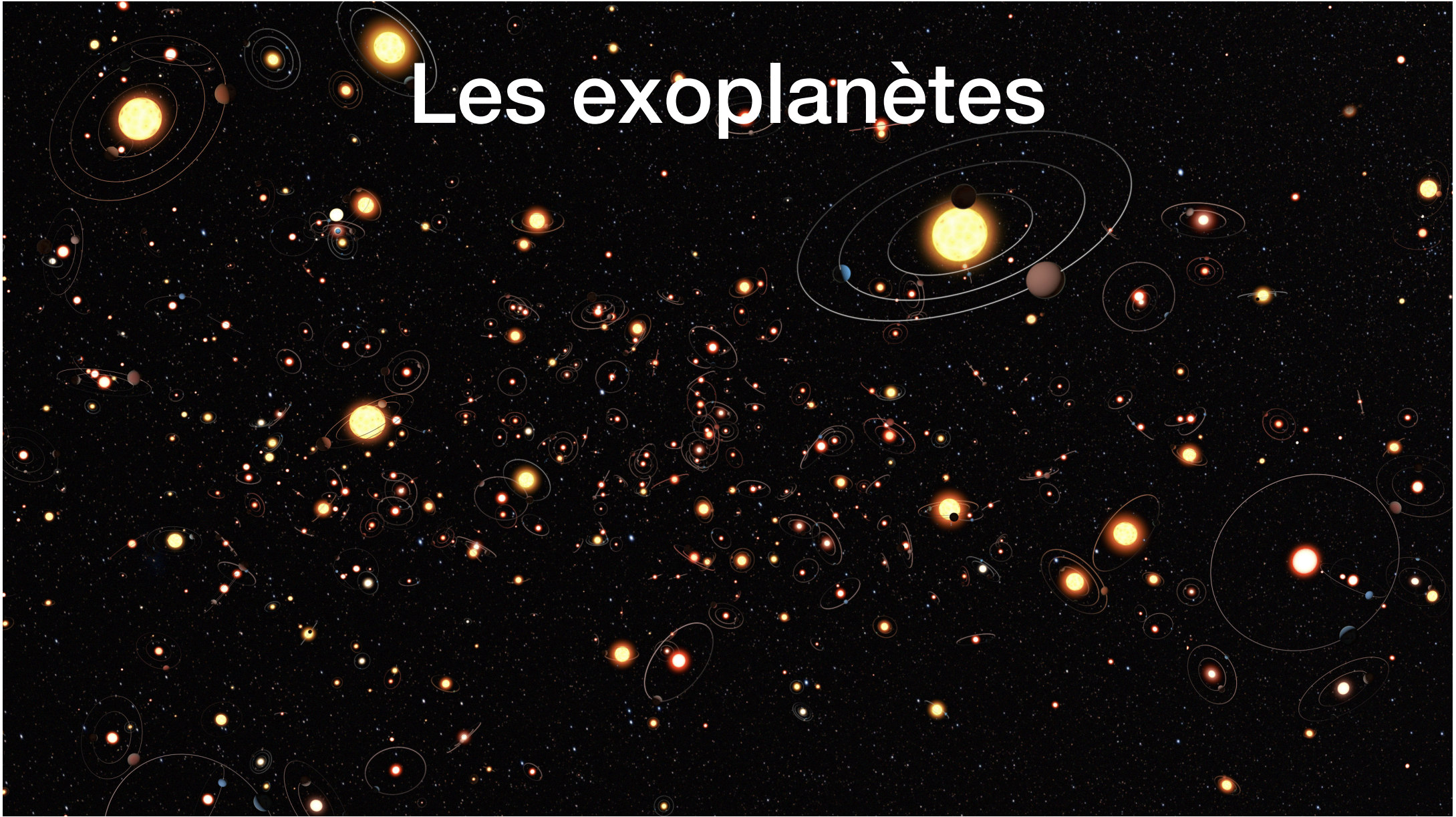


Les ellipses

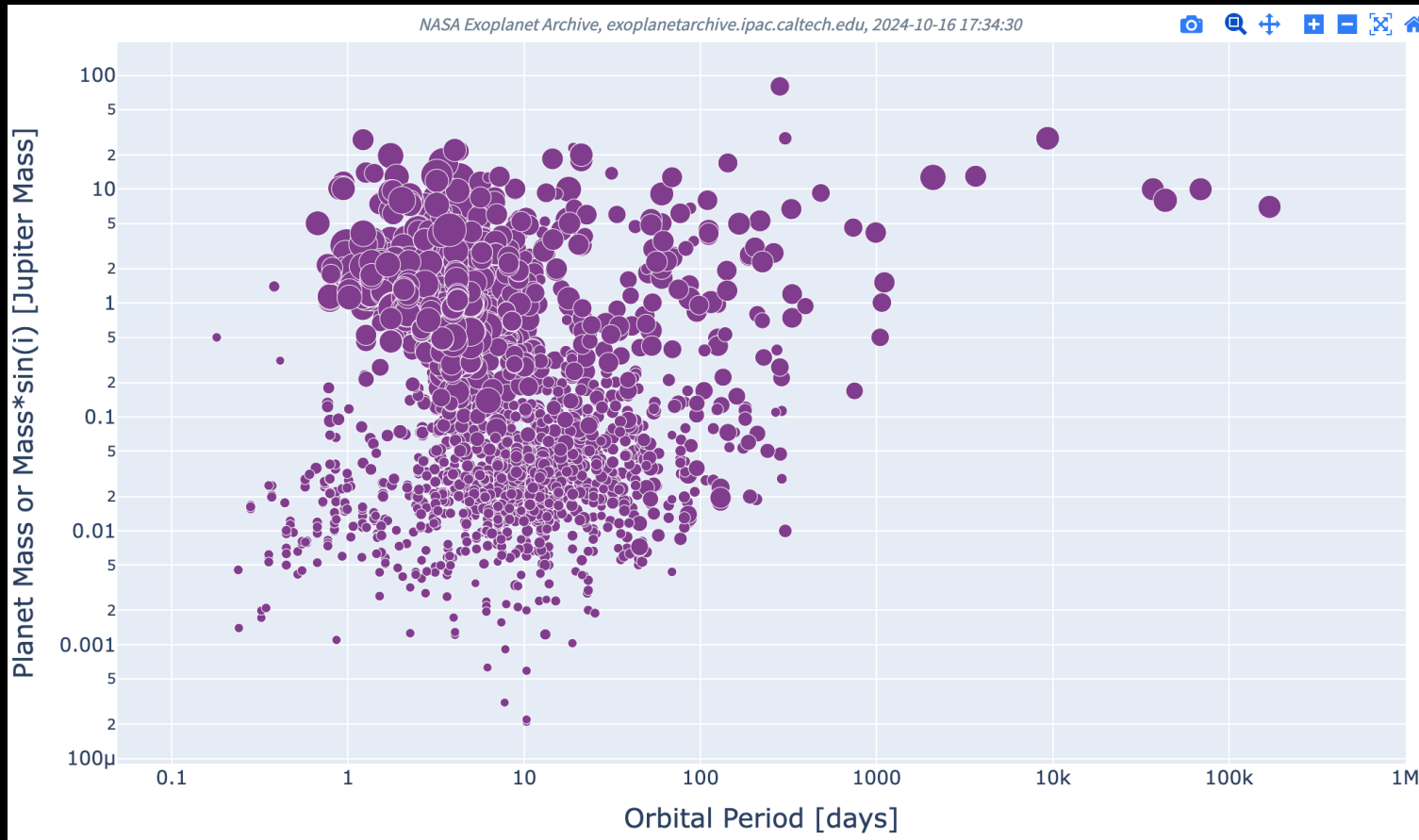


Credit: P. Collin

Les exoplanètes

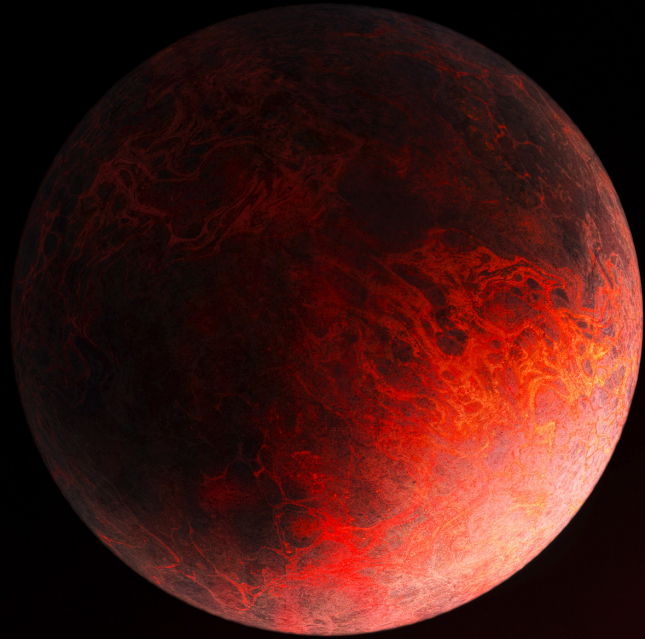


5766 exoplanètes détectées



Credit: NASA Exoplanet Archive

Sub-Terre : GJ 367 b



Credit: CEA

Terres : TRAPPIST-1 b



Super-Terre : K2-18 b



Credit: CEA

Sub-Neptune : K2-18 b



Credit: NASA

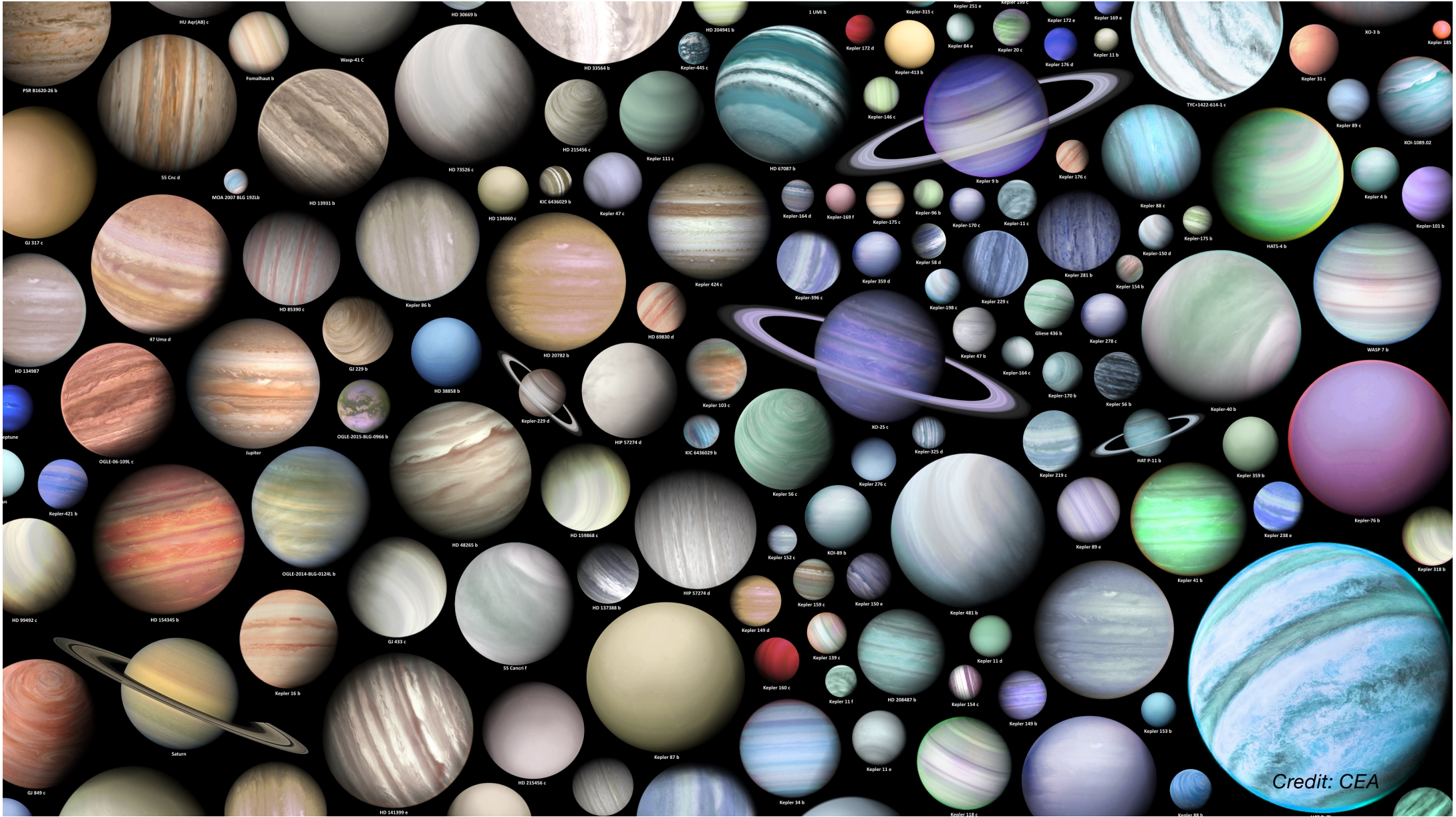
Neptune : WASP-107 b

Credit: CEA

Jupiter : WASP-121 b



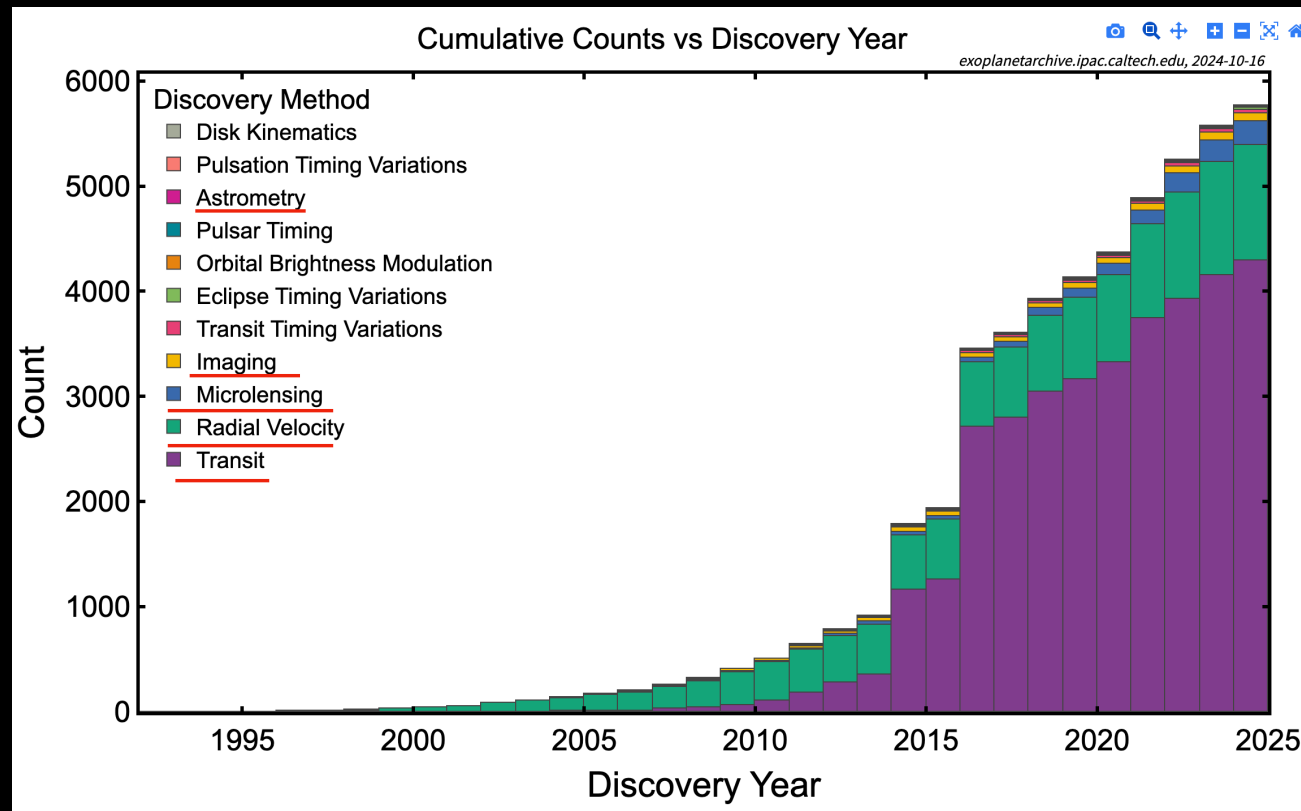
Credit: CEA



Credit: CEA

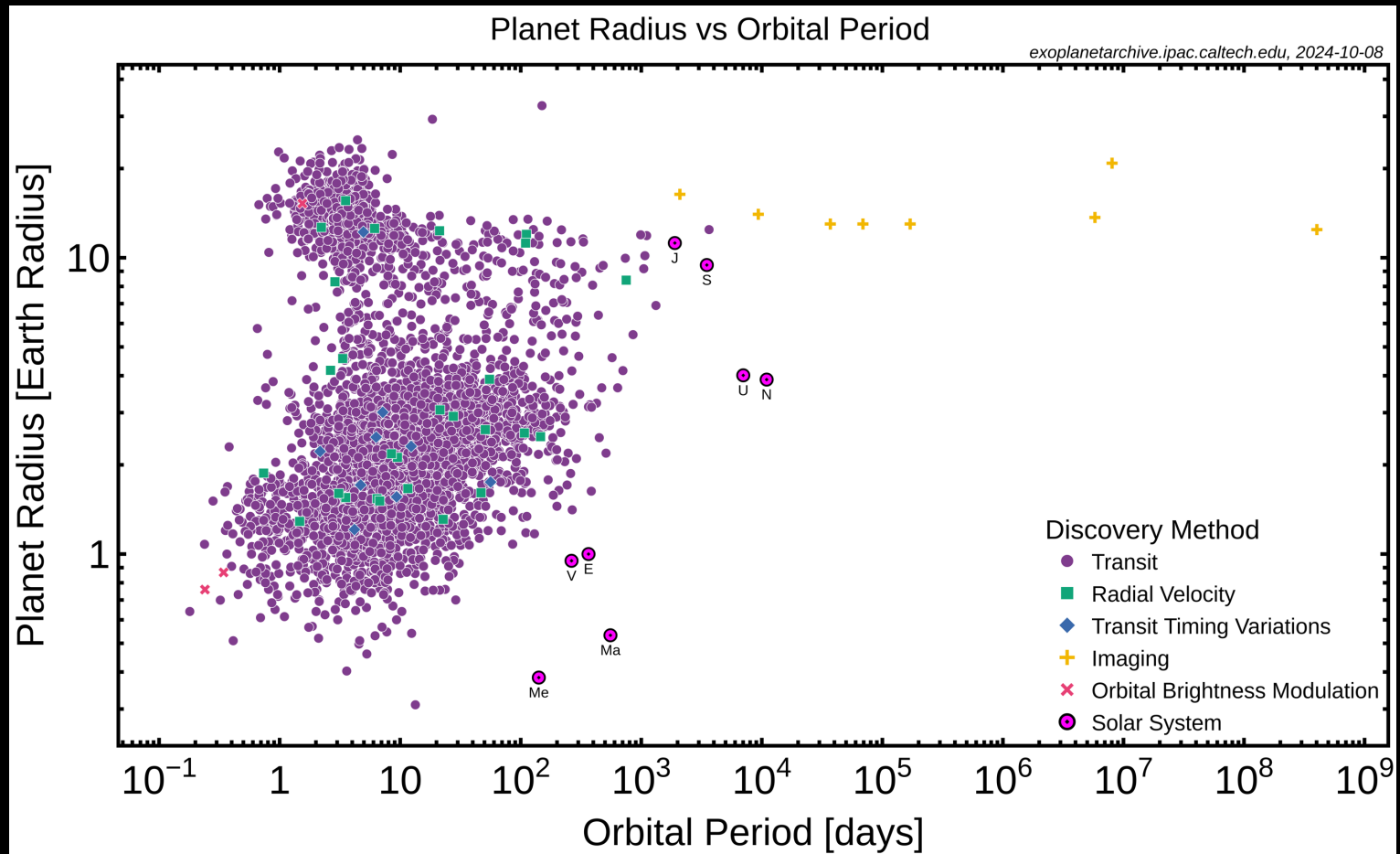
Comment les détecter?

Les méthodes de détection



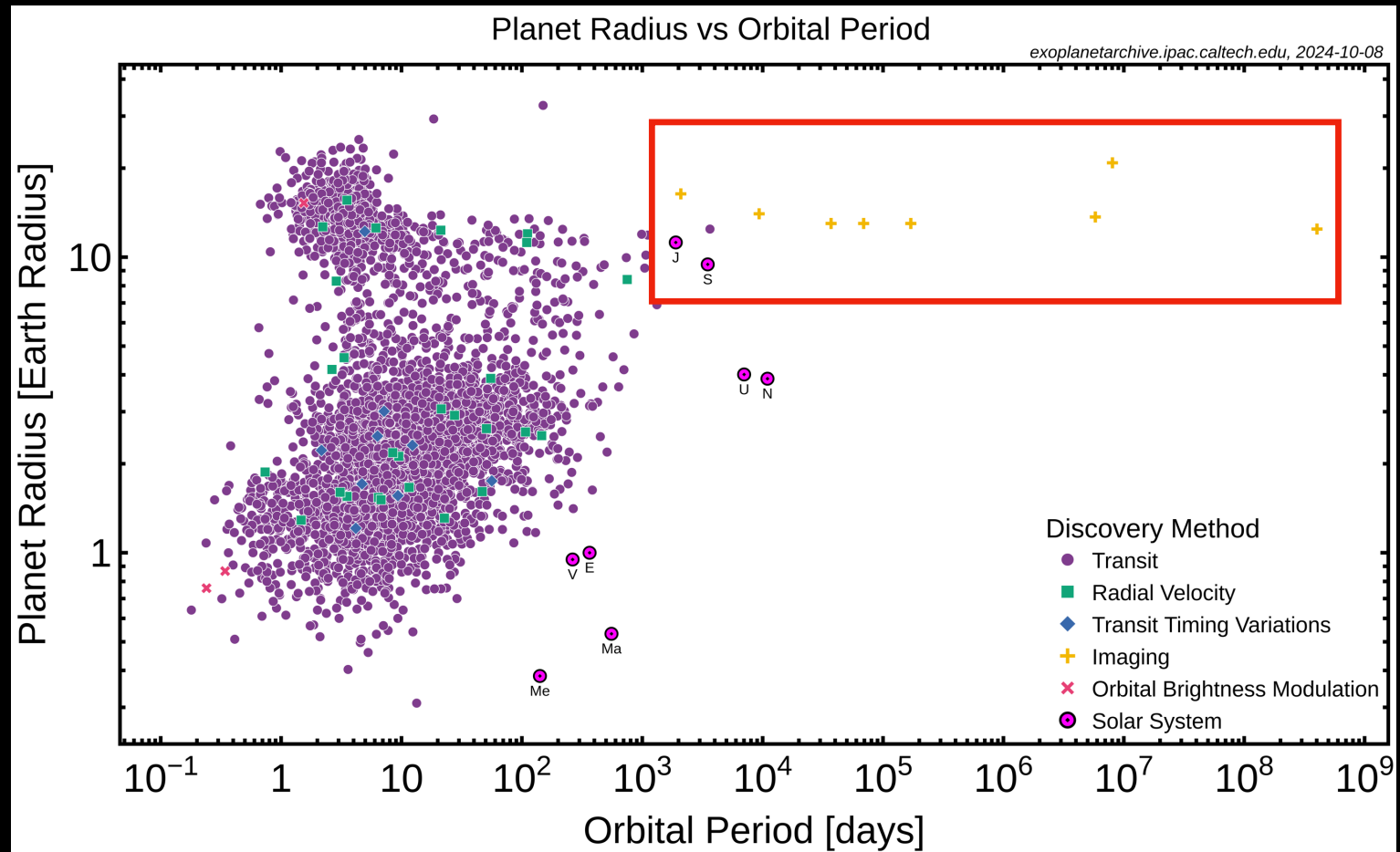
Credit: NASA Exoplanet Archive

Chaque semble avoir son espace de paramètres



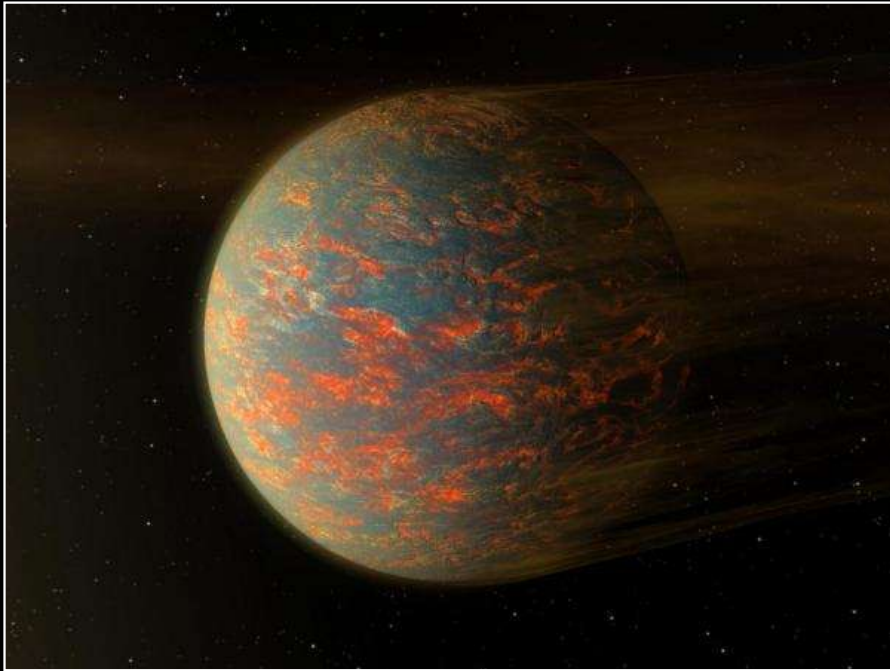
Credit: NASA Exoplanet Archive

L'imagerie directe



Credit: NASA Exoplanet Archive

L'imagerie directe ?



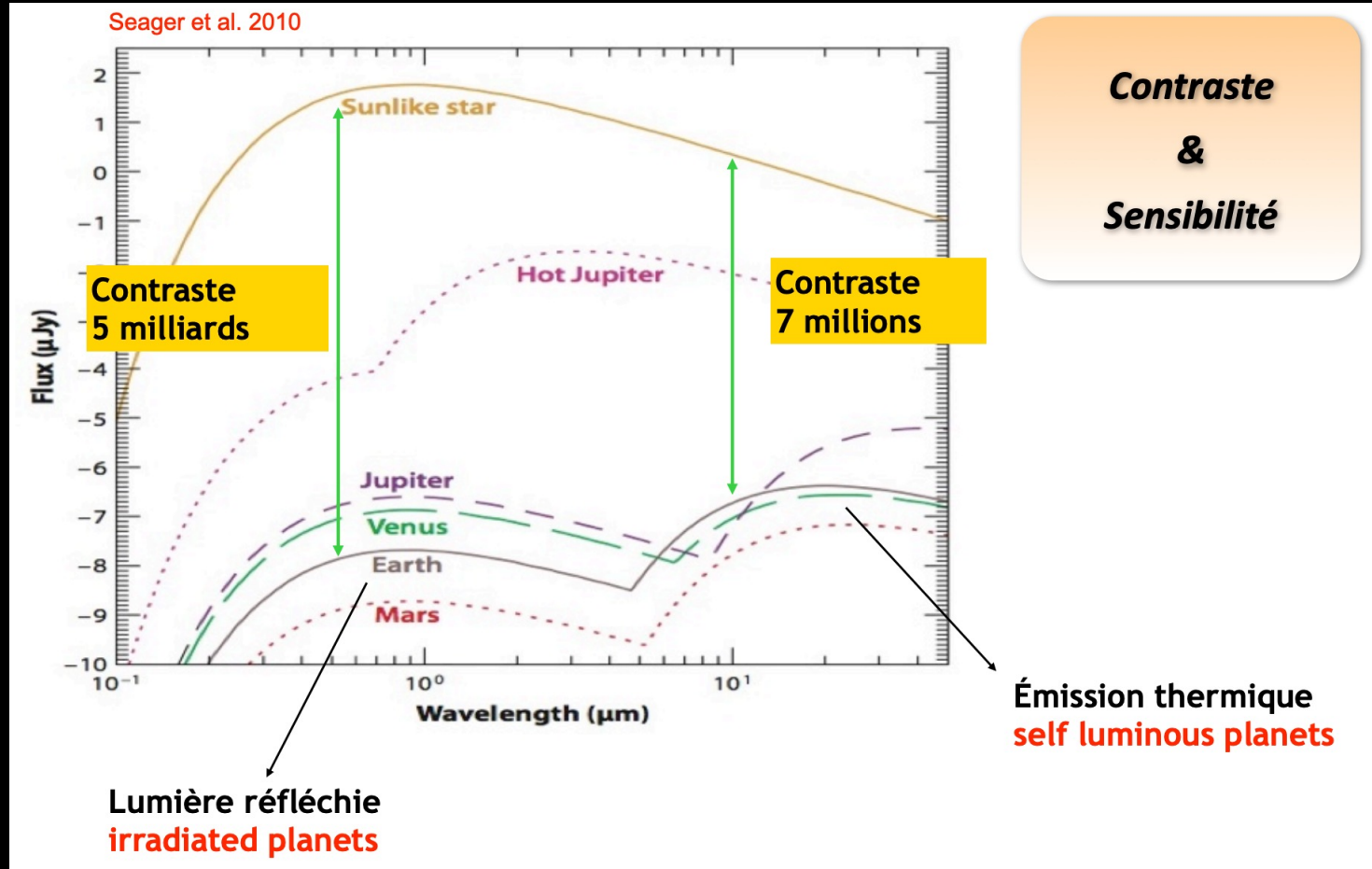
Images d'artistes!

Credit: NASA





Problème de contraste



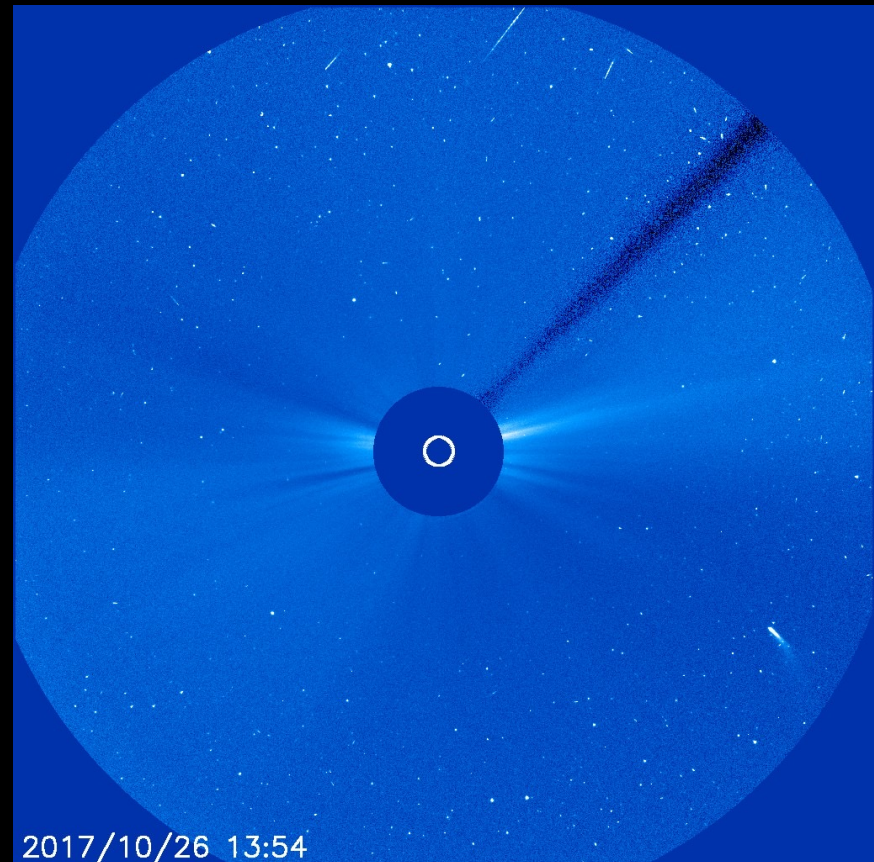
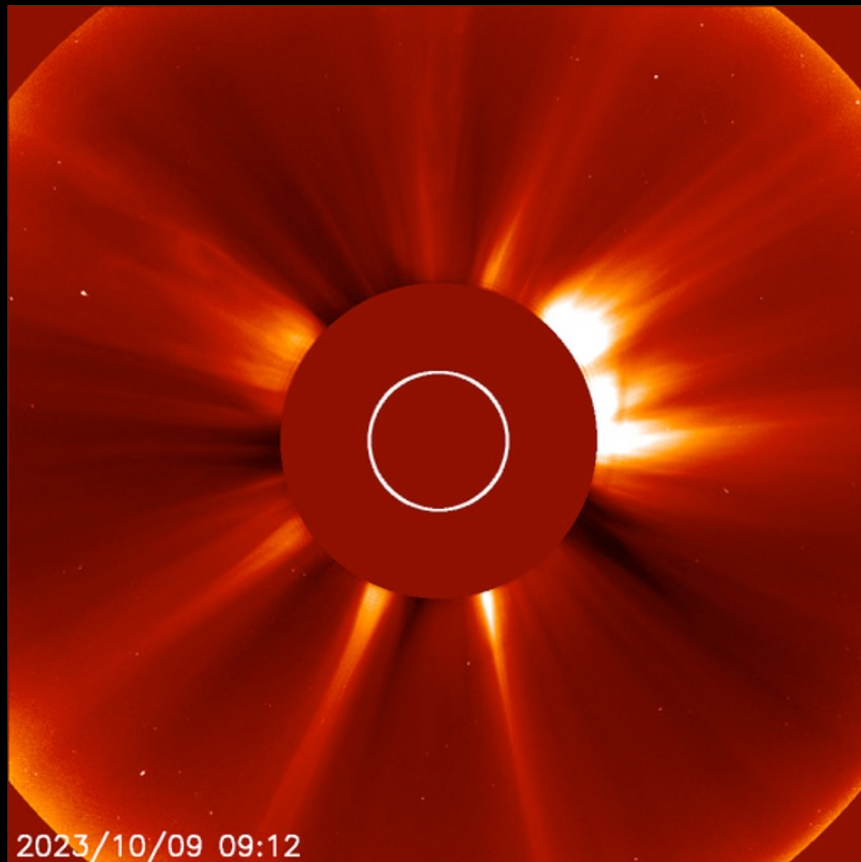
Credit: Dr A. Boccaletti

Invention du coronographe de Lyot



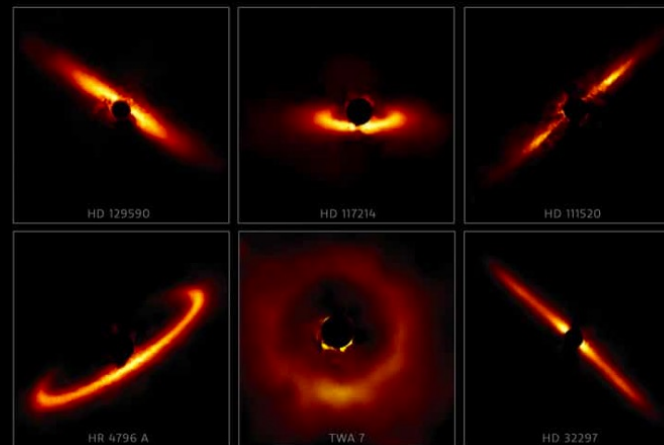
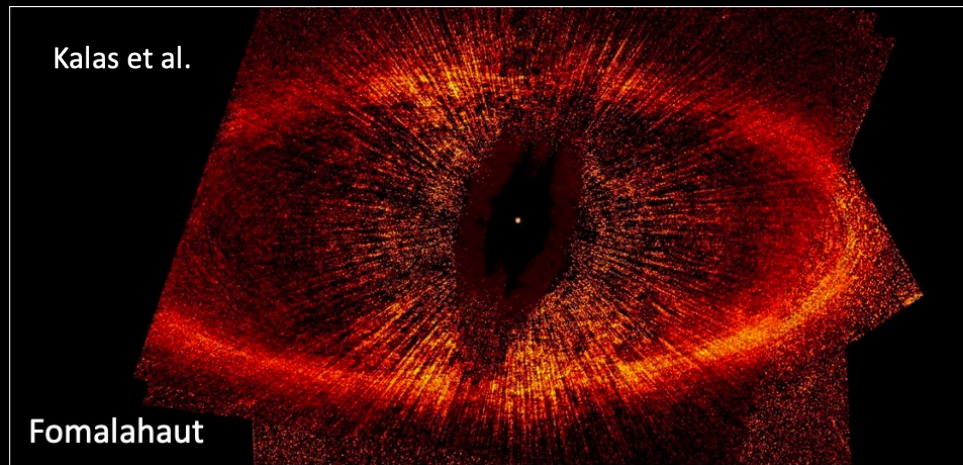
- Coronographe (**Bernard Lyot**, 1930) : observations de la couronne Solaire en l'absence d'éclipse

Invention du coronographe de Lyot



Credit: Mission SOHO

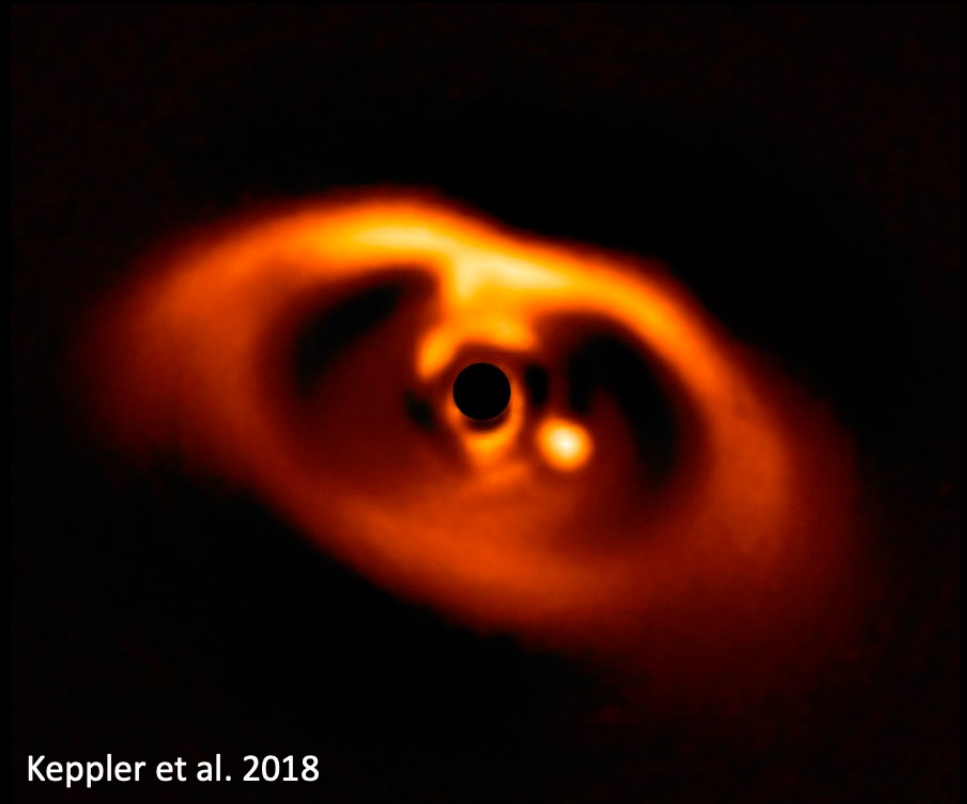
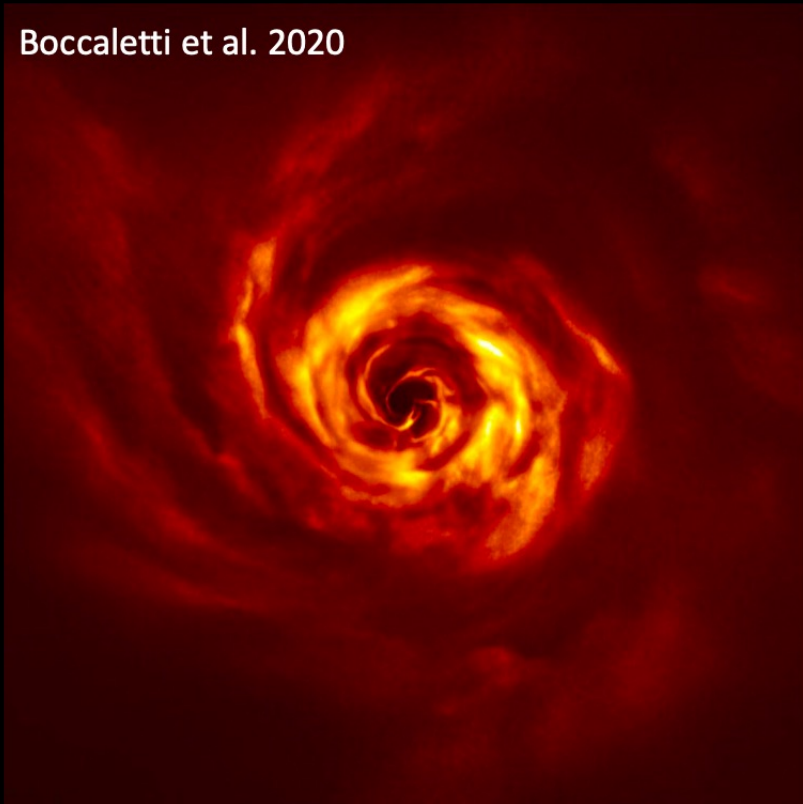
Pour les disques de poussières



Esposito et al. 2020

En même les exoplanètes en formation

Boccaletti et al. 2020



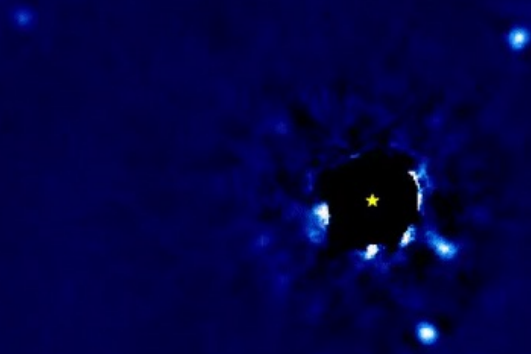
Keppler et al. 2018

Et les exoplanètes « formées »?

L'imagerie directe

Jason Wang

HR 8799 system

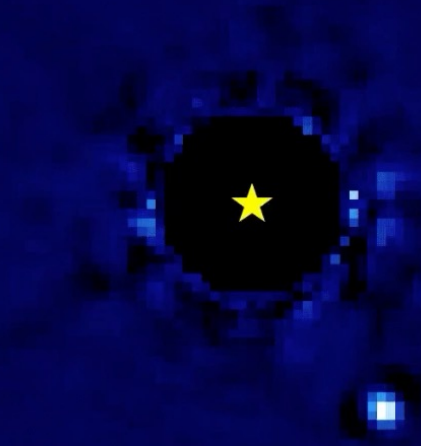


2009-08-26

20 au

Jason Wang /
Christian Marois

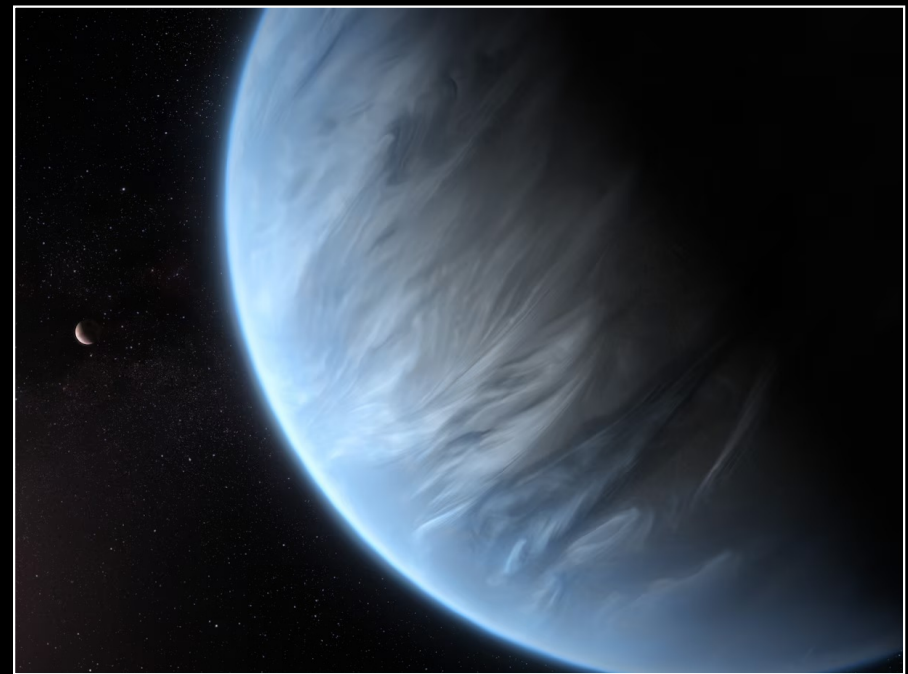
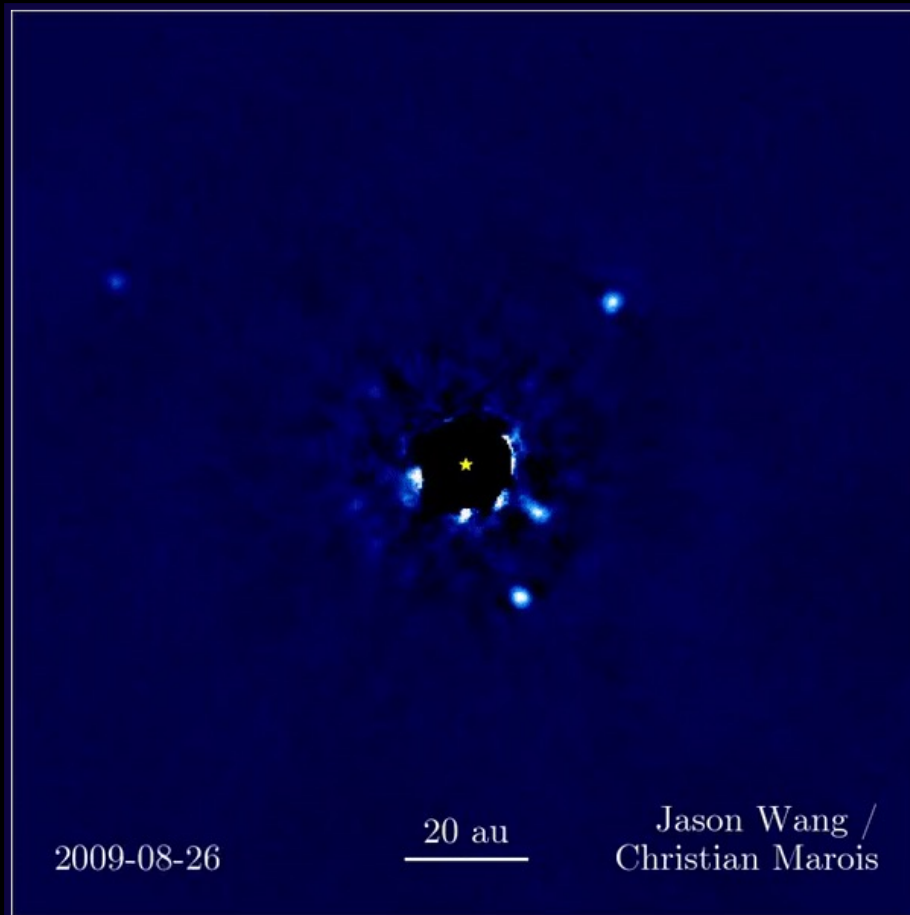
β Pictoris system



2014-08-12

5 au

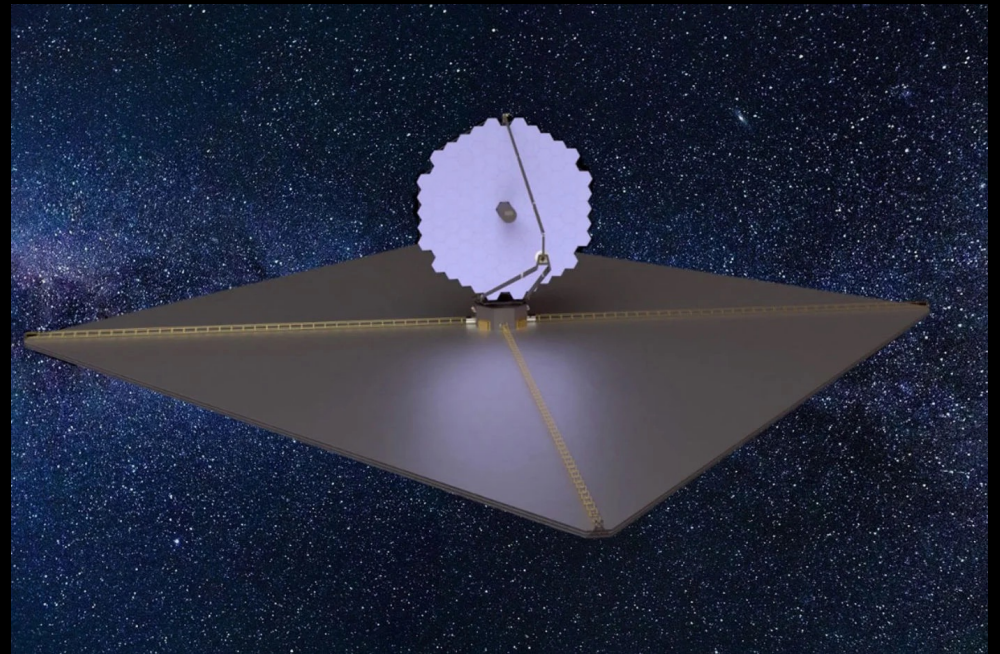
Un peu différent ...



Le futur de l'imagerie directe

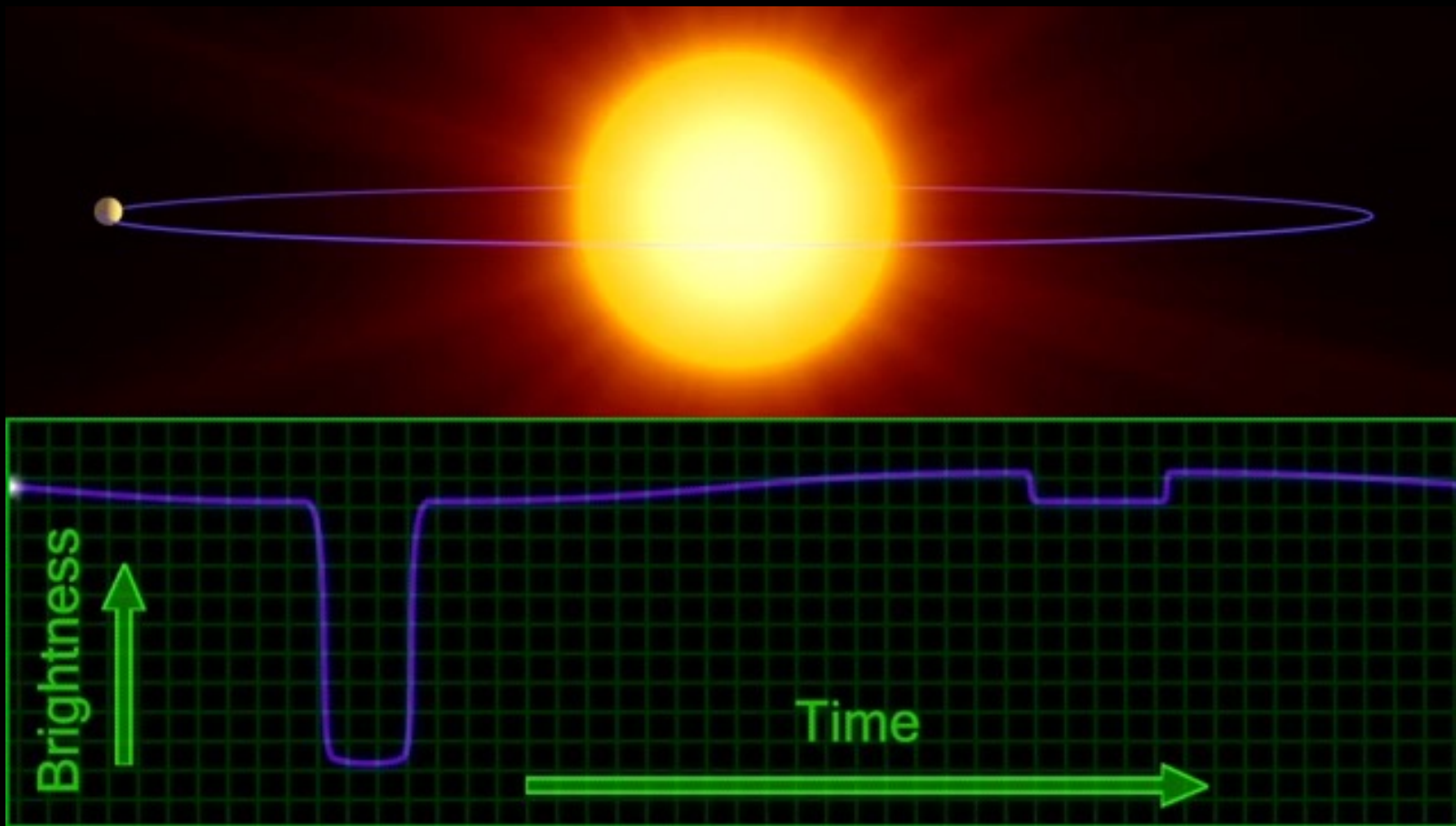


Credit: ESO

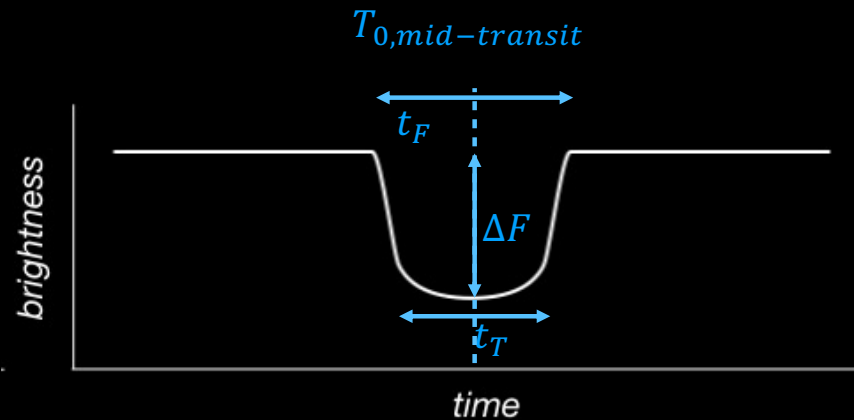


Credit: NASA

La méthode des transits



Les transit



Observables;

- the transit depth ΔF
- 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 $6,67428 \times 10^{-11} m^3 / kg / s^2$

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 = αL

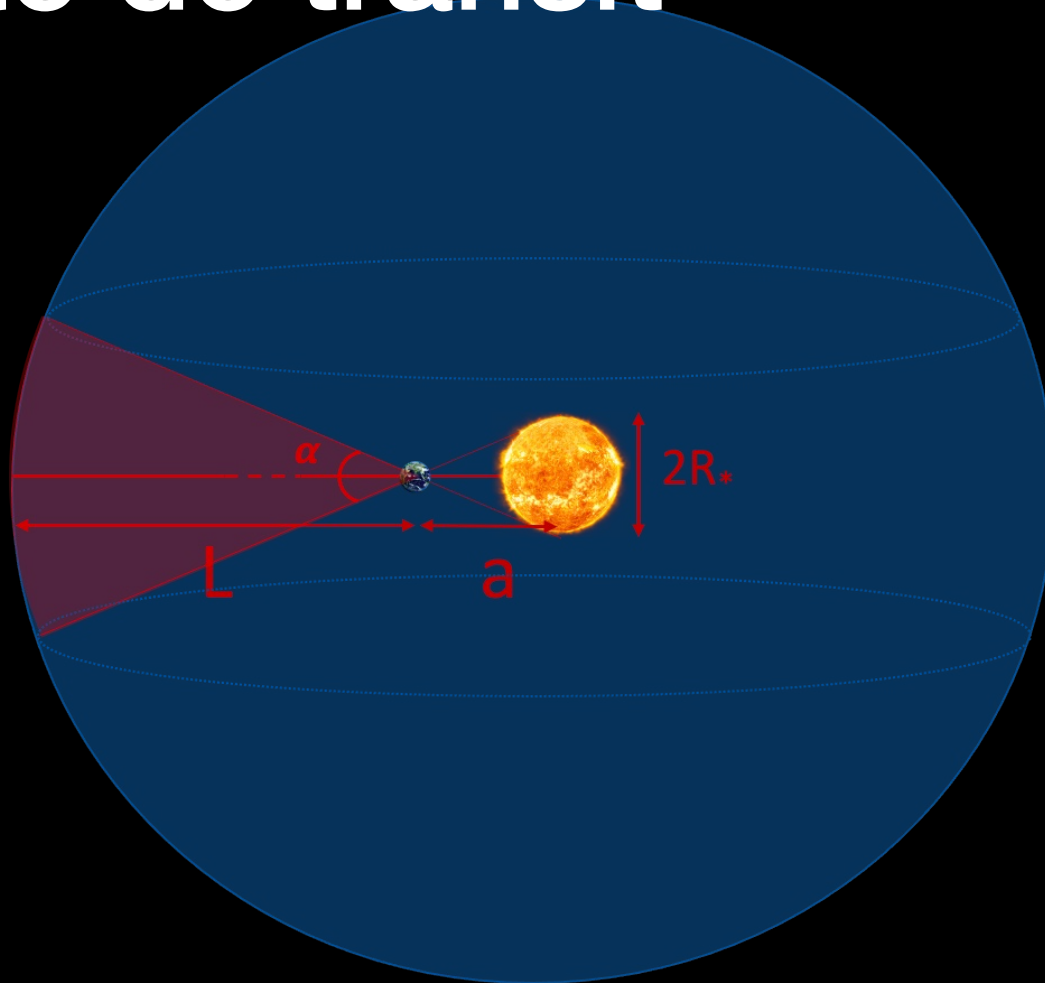
$$\text{avec } \alpha \simeq \frac{2R_{\star}}{a}$$

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

Probabilité de transit:

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

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



Credit: Dr Johan Mazoyer

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 ($1.99 * 10^{30}$ kg) et R_{\odot} son rayon ($6.96 * 10^8$ m).

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

Credit illustration: Dr. Lionel Garcia

Introduction à l'astrophysique

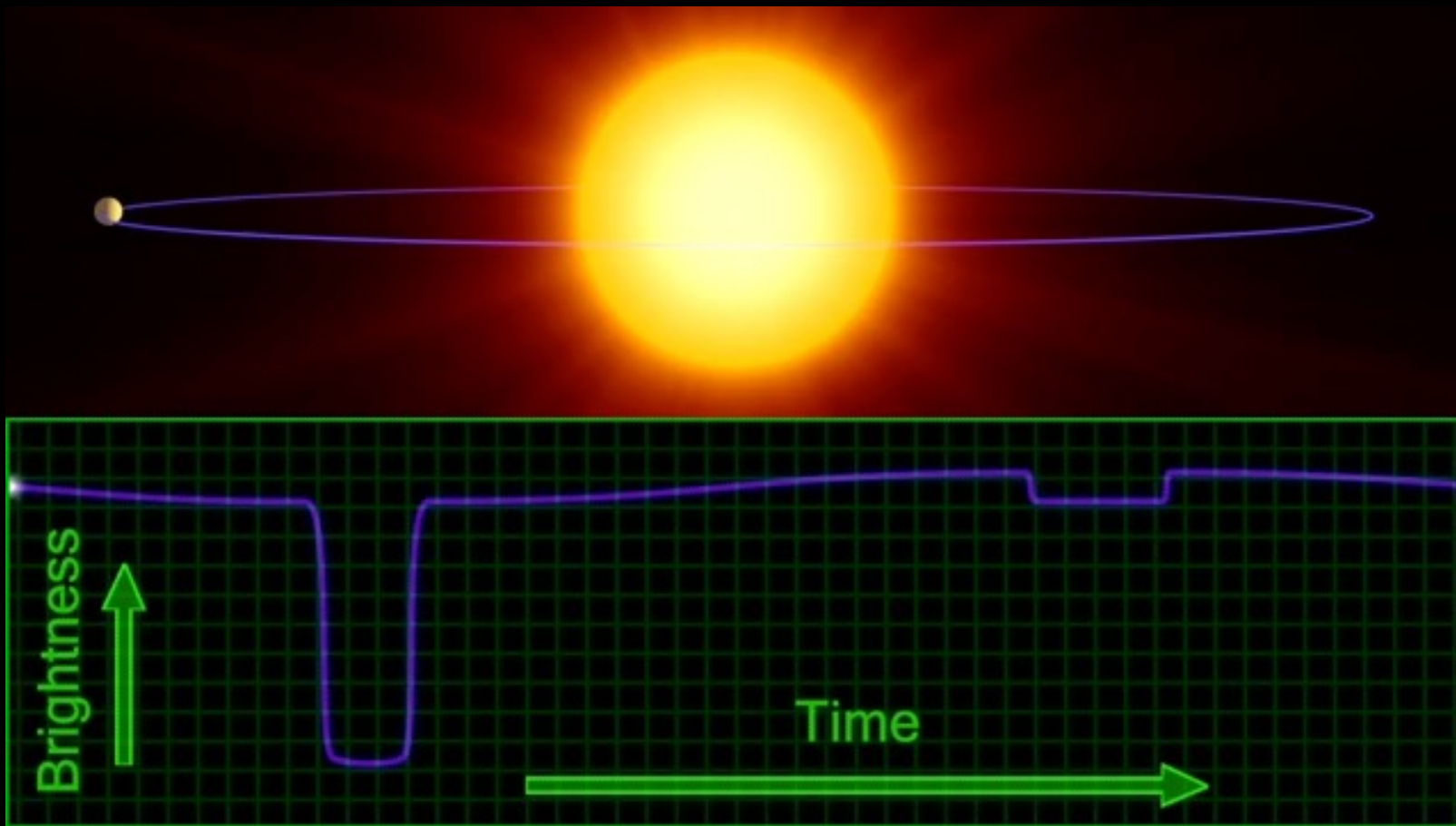
Les exoplanètes - séance 2

Elsa Ducrot : elsa.ducrot@cea.fr / elsa.ducrot@obspm.fr

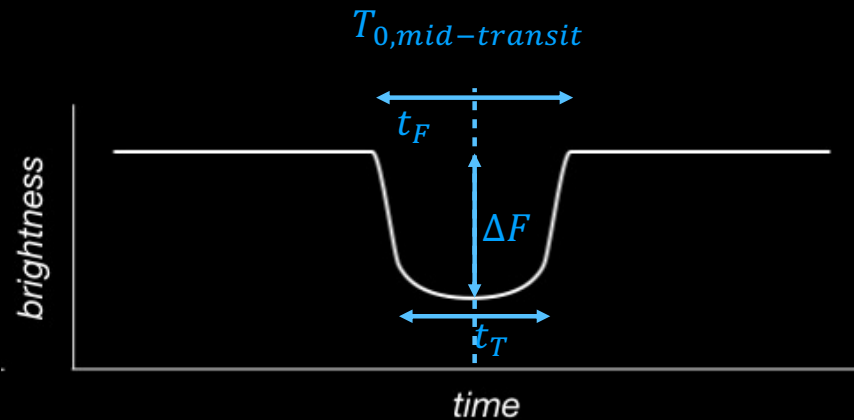
Plan de cours

- ~~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

La méthode des transits



Les transits



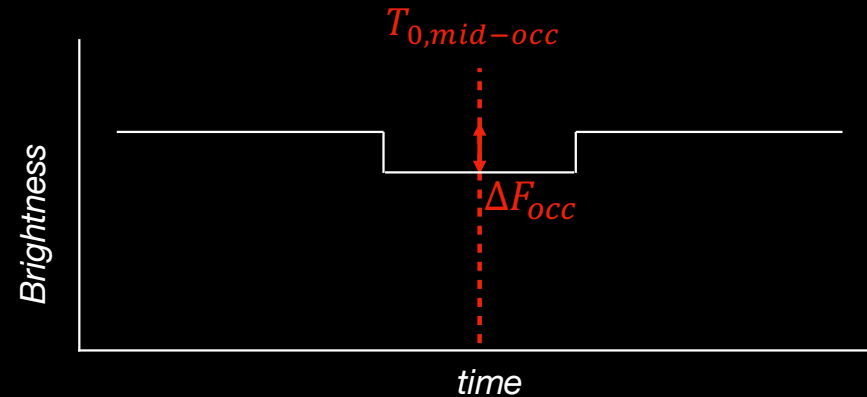
Observables :

- the transit depth ΔF
- 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

Occultations



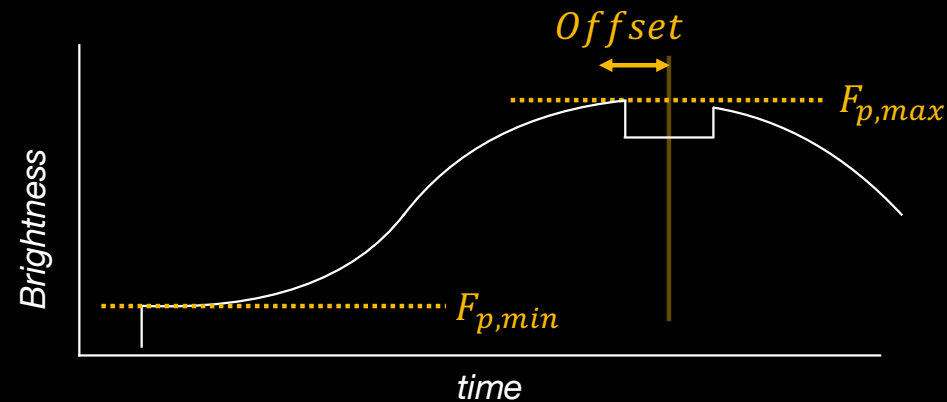
Les observables telles que :

- la profondeur d'occultation dans le visible et dans l'infrarouge
- L'heure du milieu de l'occultation
- l'inclinaison de l'ingress et l'egress

Nous permettent de dériver des propriétés physiques :

- Rapport de flux qui nous informe sur la lumière réfléchiée et l'émission thermique de la planète
- Température de brillance de l'hémisphère diurne
- Contrainte sur l'excentricité de la planète
- Obtenir une carte de température du côté jour de la planète

Courbe de phase



Observables telles que :

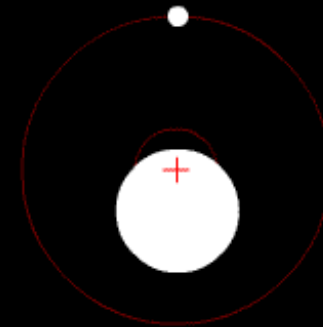
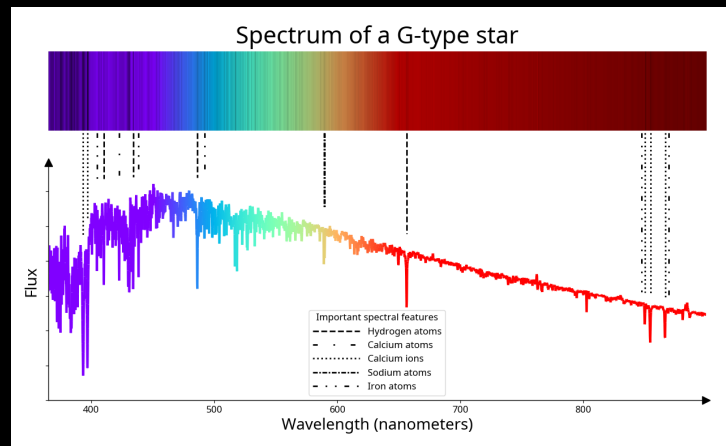
- Le flux minimum,
- le flux maximal,
- Décalage entre le milieu de l'occultation et le maximum du flux

Permettent de déduire des propriétés physiques :

- Contraste de luminosité entre l'hémisphère le plus lumineux et l'hémisphère le plus sombre
- Contraste de température jour/nuit
- Longitude de l'hémisphère le plus lumineux de la planète, peut indiquer la présence de vents.

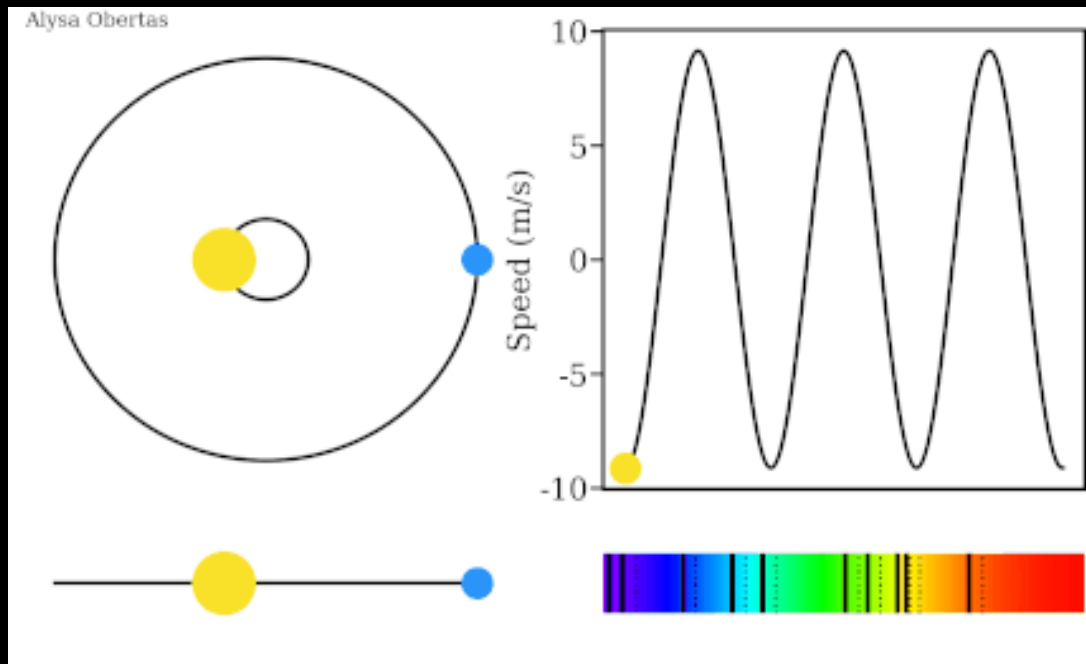
La méthode des vitesses radiales

- Cette méthode consiste à observer des décalages dans les lignes d'absorption du spectre d'une étoile, ces décalages sont dues à la présence d'une planète qui fait bouger l'étoile autour de leur barycentre commun
- La méthode qui a permis de découvrir la première exoplanète



[Simuler des planètes et leur signaux en transit et vitesse radiales :](https://exoplanet.lam.fr/exoPindir-en.html)
<https://exoplanet.lam.fr/exoPindir-en.html>

La méthode des vitesses radiales



- L'amplitude des variations de vitesse radiale est proportionnelle à la masse de l'exoplanète

- $$K = \left(\frac{2\pi G}{P}\right)^{1/3} \frac{M_p \sin(i)}{M_\star^{2/3}} \frac{1}{\sqrt{1-e^2}}$$

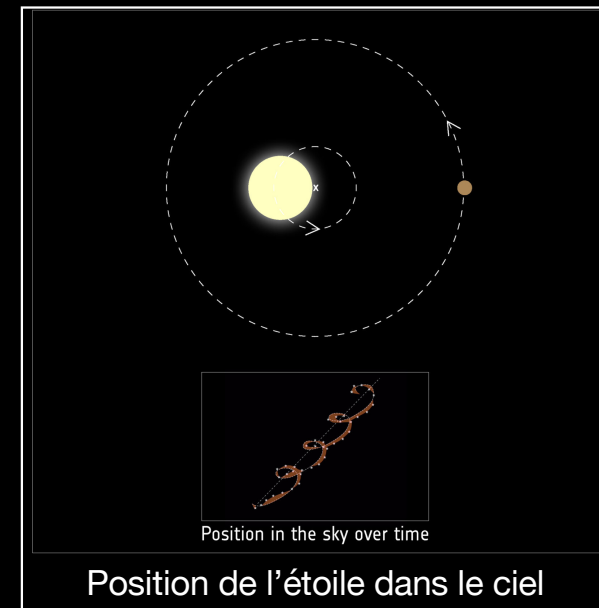
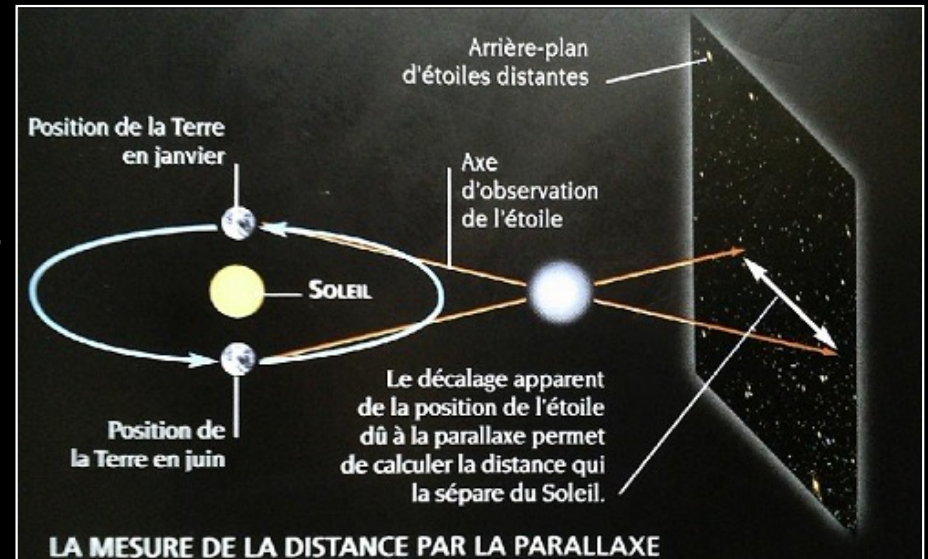
Ne pas connaître par coeur

À retenir: la méthode des vitesses radiales donne la masse minimale

[Simuler des planètes et leur signaux en transit et vitesse radiales :](https://exoplanet.lam.fr/exoPindir-en.html)
<https://exoplanet.lam.fr/exoPindir-en.html>

L'astrométrie

- L'astrométrie est la méthode qui permet de détecter le mouvement d'une étoile en mesurant précisément sa position dans le ciel.
- Parallaxe : Déplacement de la position apparente (d'un corps céleste) dû au changement de position de l'observateur ; angle qui le mesure.
- Avec l'astrométrie on peut détecter des exoplanètes en mesurant les infimes changements de position de l'étoile lorsqu'elle oscille autour du centre de masse du système planétaire.
- Cette méthode permet d'estimer la masse de la planète
- Pour le moment seulement 3 planètes détecter car demande beaucoup de précision



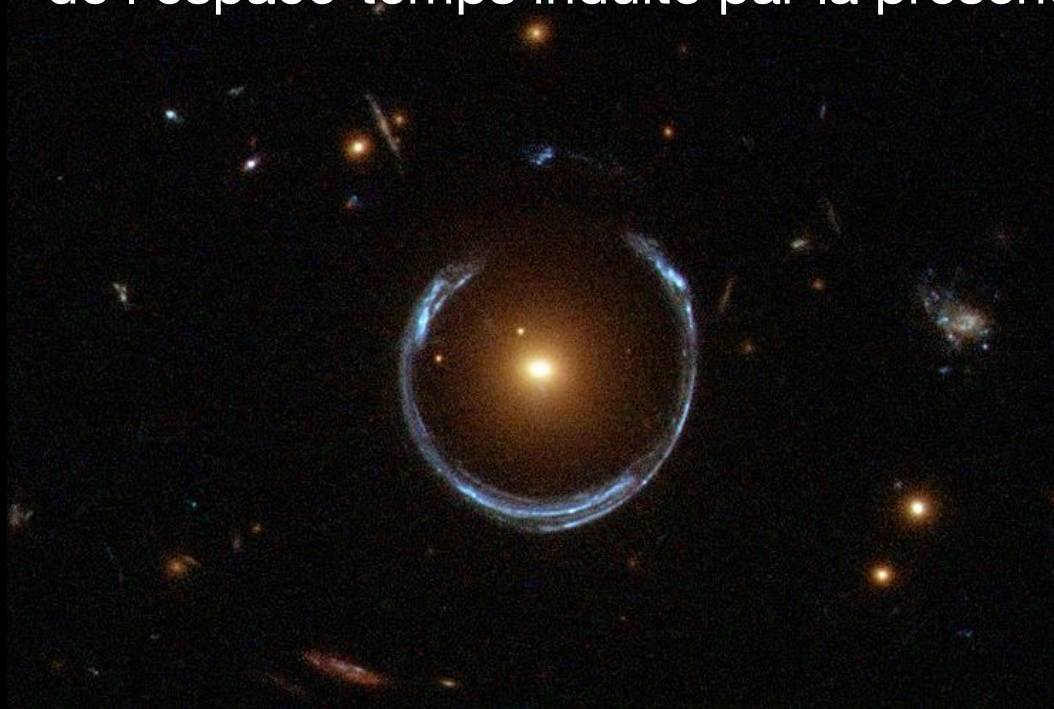
L'astrométrie



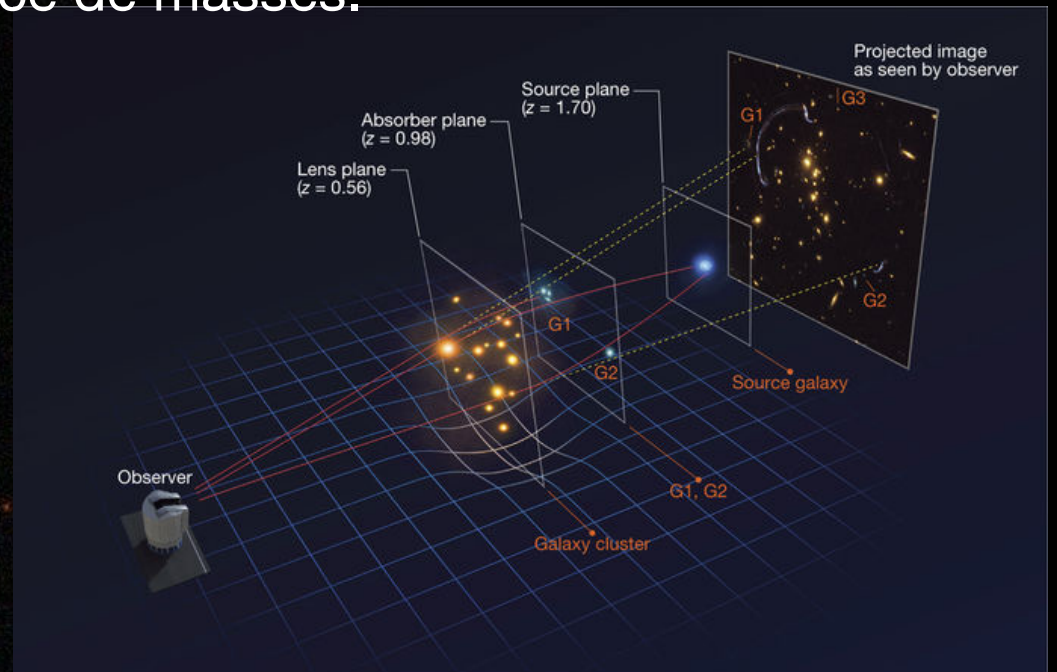
The observed path of a star across the sky over four years.

Les lentilles gravitationnelles

La méthode des microlentilles gravitationnelles repose sur l'amplification de la lumière causée par la déviation des rayons lumineux sous l'effet de la courbure de l'espace-temps induite par la présence de masses.



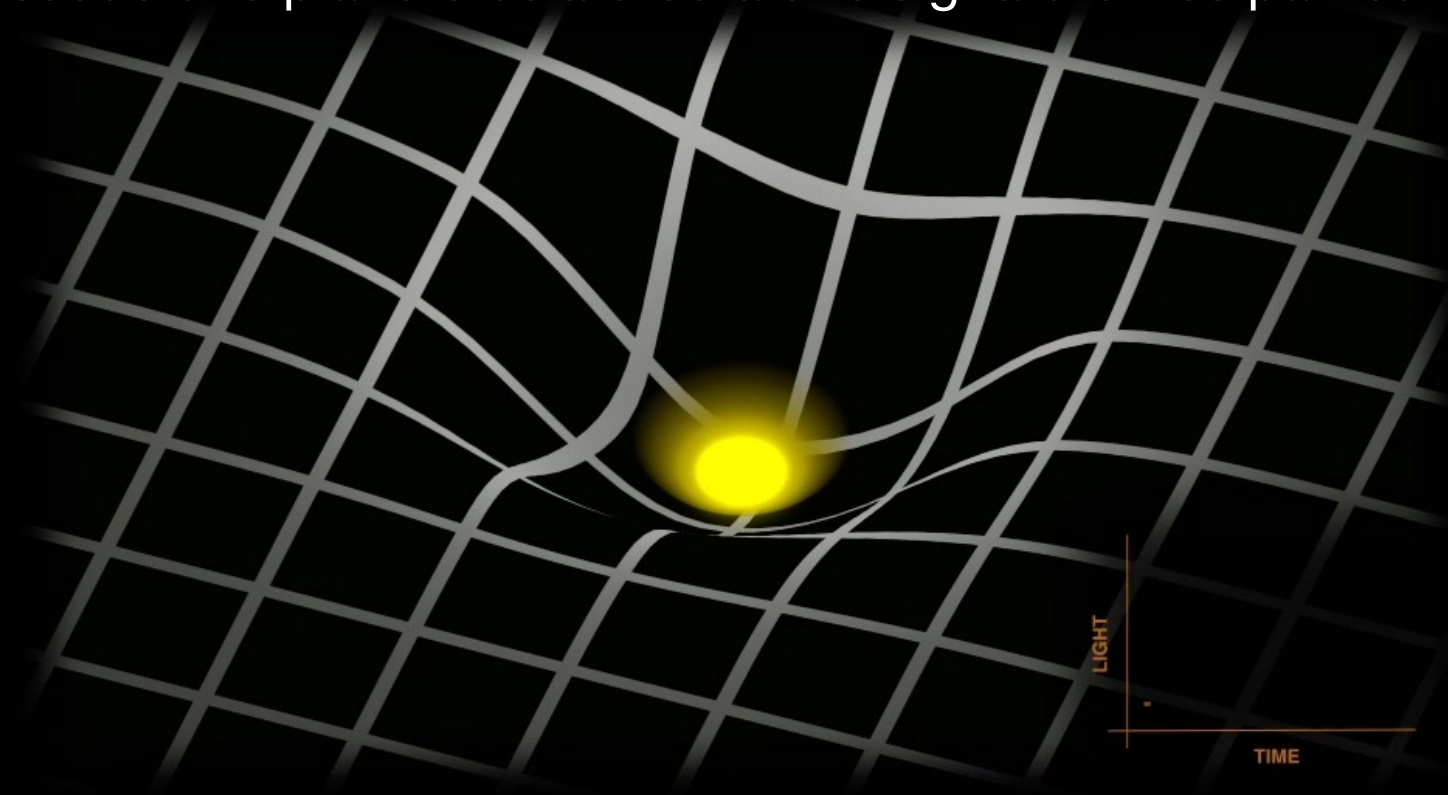
Credit: Hubble NASA



Credit: Observatoire côte d'azur

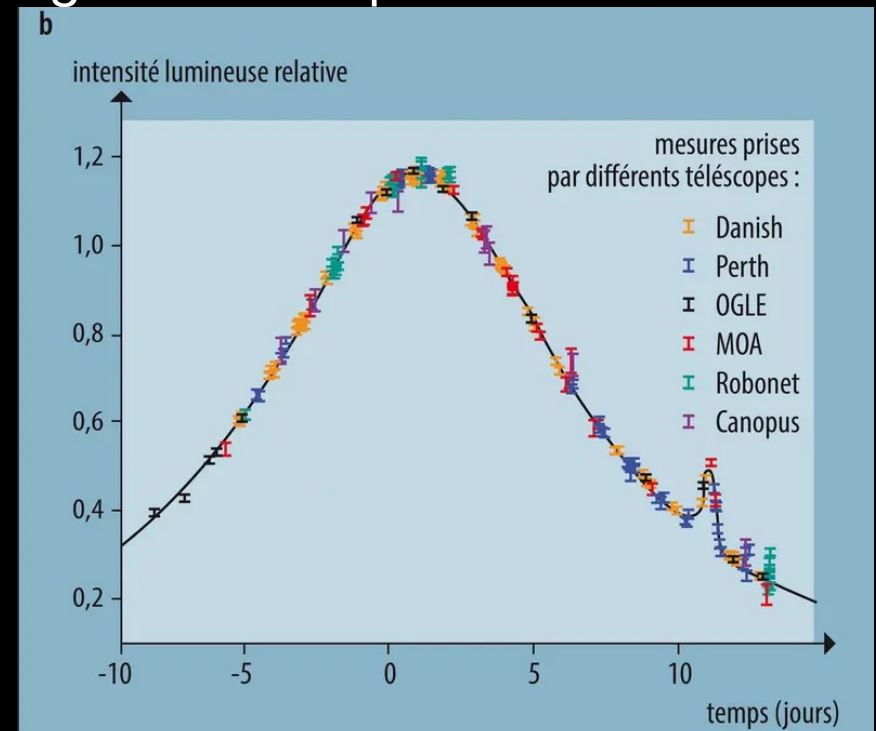
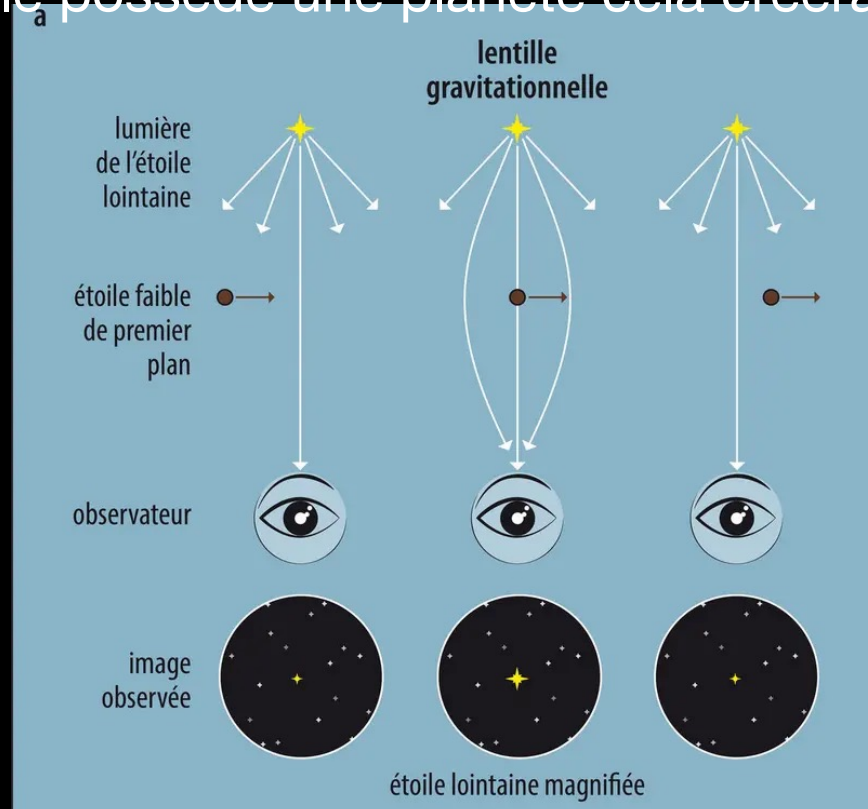
Les lentilles gravitationnelles

Le même phénomène se produit avec deux étoiles, et si l'étoile qui sert de lentille possède une planète cela créera une signature très particulière



Les lentilles gravitationnelles

Le même phénomène se produit avec deux étoiles, et si l'étoile qui sert de lentille possède une planète cela créera une signature très particulière



Resume des méthodes les plus répandues

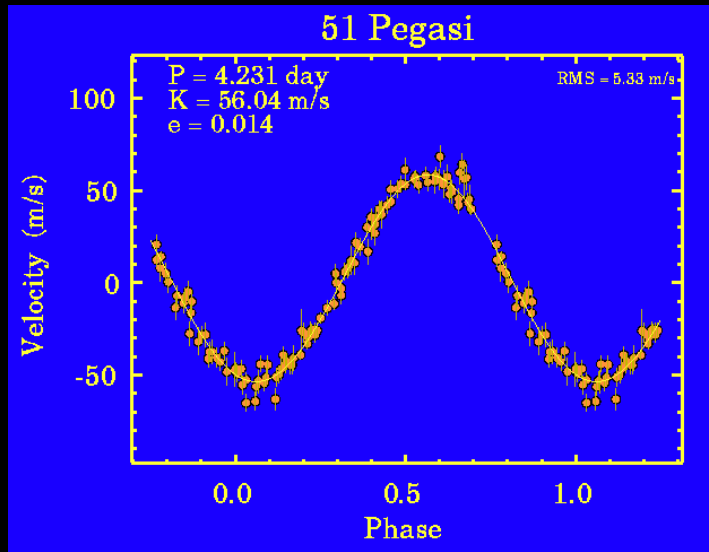
	Atouts	Limitations	Nombre de planetes detectees
Transits	Rayon, étude atmosphères possible, sensible aux petites planètes	Pas la masse, probabilité de transit	$\approx 4400/5800$
Vitesses radiales	Masse minimale, toute étoile	Pas le rayon, mieux pour les système proches	≈ 1110
Imagerie directe	Vraie image de la planète, étude atmosphère possible	Dégénéré avec le rayon, contraste, resolution, système proches	≈ 20
Astrométrie	Masse, orbite de la planète	Précision, pas le rayon, observations longues	≈ 3
Lentilles gravitationnelles	Petites planètes détectables, même hors galaxie	Pas le rayon, événement unique non répétable	≈ 200

Les premières detections

- La première détection d'une exoplanète a eu lieu en 1992. Aleksander Wolszczan et Dale Frail, ont annoncé la découverte de planètes autour du pulsar PSR B1257+12, une étoile à neutrons (avec le télescope Arecibo à Puerto Rico)
- La première détection d'une exoplanète autour d'une étoile de la séquence principale en 1995 par Michel Mayor et Didier Queloz. Nommée 51 Pegasi b, une planète géante gazeuse -> prix Nobel de physique 2019 (avec l'instrument ELODIE à l'Observatoire de Haute-Provence)
- La première détection d'un transit exoplanétaire a eu lieu en 2000, c'est la planète HD 209458 b (déjà découverte en vitesse radiale), équipe menée par David Charbonneau (avec le télescope Hubble)
- La première détection en imagerie directe a eu lieu en 2008, avec les planètes HR 8799 b, c et d, équipe menée par Christian Marois (télescope Keck à Hawaï)

La première* découverte : 51 Pegasi b

* autour d'une étoile de la séquence principale



THE **FIRST PLANET** DISCOVERED
AROUND A **SUN-LIKE** STAR



51 Pegasi b

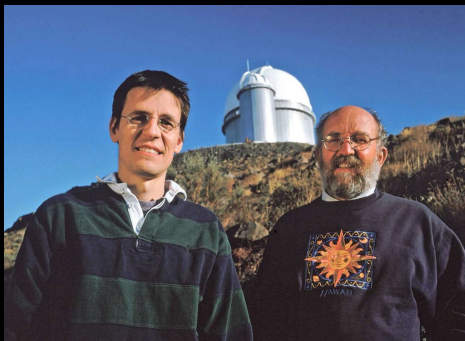
Discovered October 6, 1995

This year we celebrate the discovery of 51 Pegasi b in October, 1995. This giant planet is about half the size of Jupiter and orbits its star in about 4 days. '51 Peg' helped launch a whole new field of exploration.

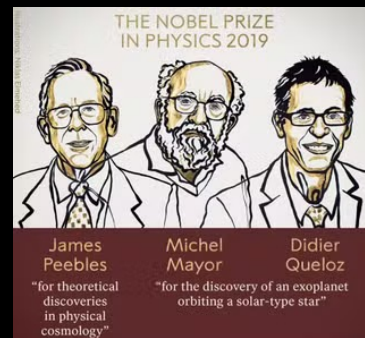
TEMPERATURE
51 Pegasi b has a temperature of 1000C°/1800F°.

ORBITAL PERIOD
51 Pegasi b orbits its host star every 4 days.

DISTANCE FROM EARTH
51 Pegasi b is 50 light-years from Earth.



Michel Mayor & Didier Queloz



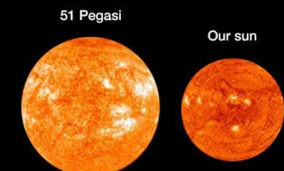
Prix Nobel 2019

PLANET COMPARISON



51 Pegasi b is 47% less massive, but 50% larger than Jupiter.

STAR COMPARISON

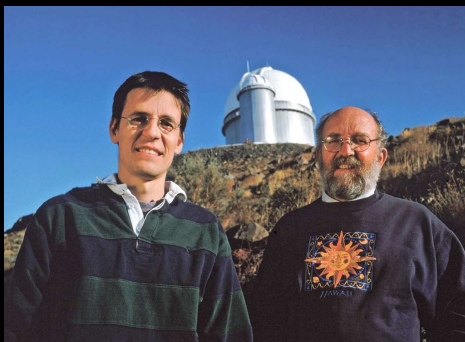
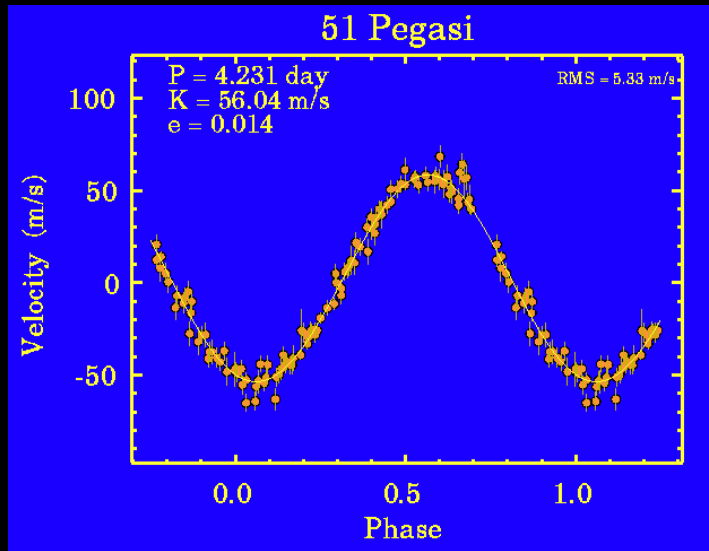


51 Pegasi is 11% more massive and 23% larger than our sun.

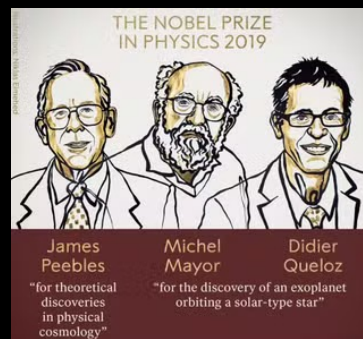
Credit: NASA

La première* découverte : 51 Pegasi b

* autour d'une étoile de la séquence principale



Michel Mayor & Didier Queloz



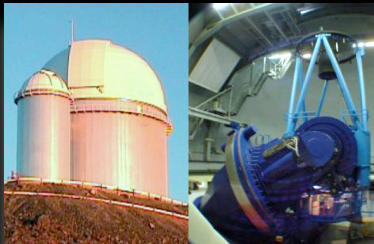
Prix Nobel 2019



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**

Suivi au sol vitesses radiales



HARPS



SPIROU



ELODIE



CARMENES



NIRPS

Suivi au sol transits



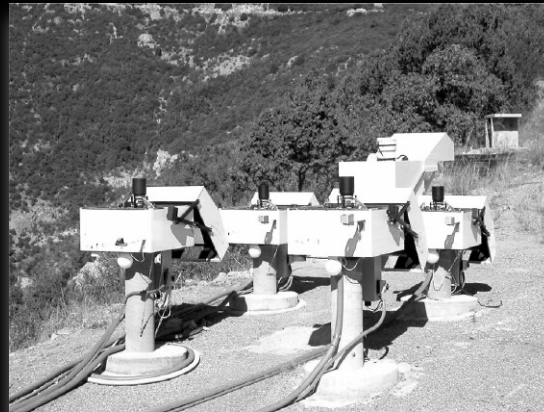
WASP



NGTS



M-Earth



HATNet



SPECULOOS

Suivi au sol en imagerie direct



**Very Large Telescope :
instruments SPHERE et NACO**



KECK l'instrument NIRC2

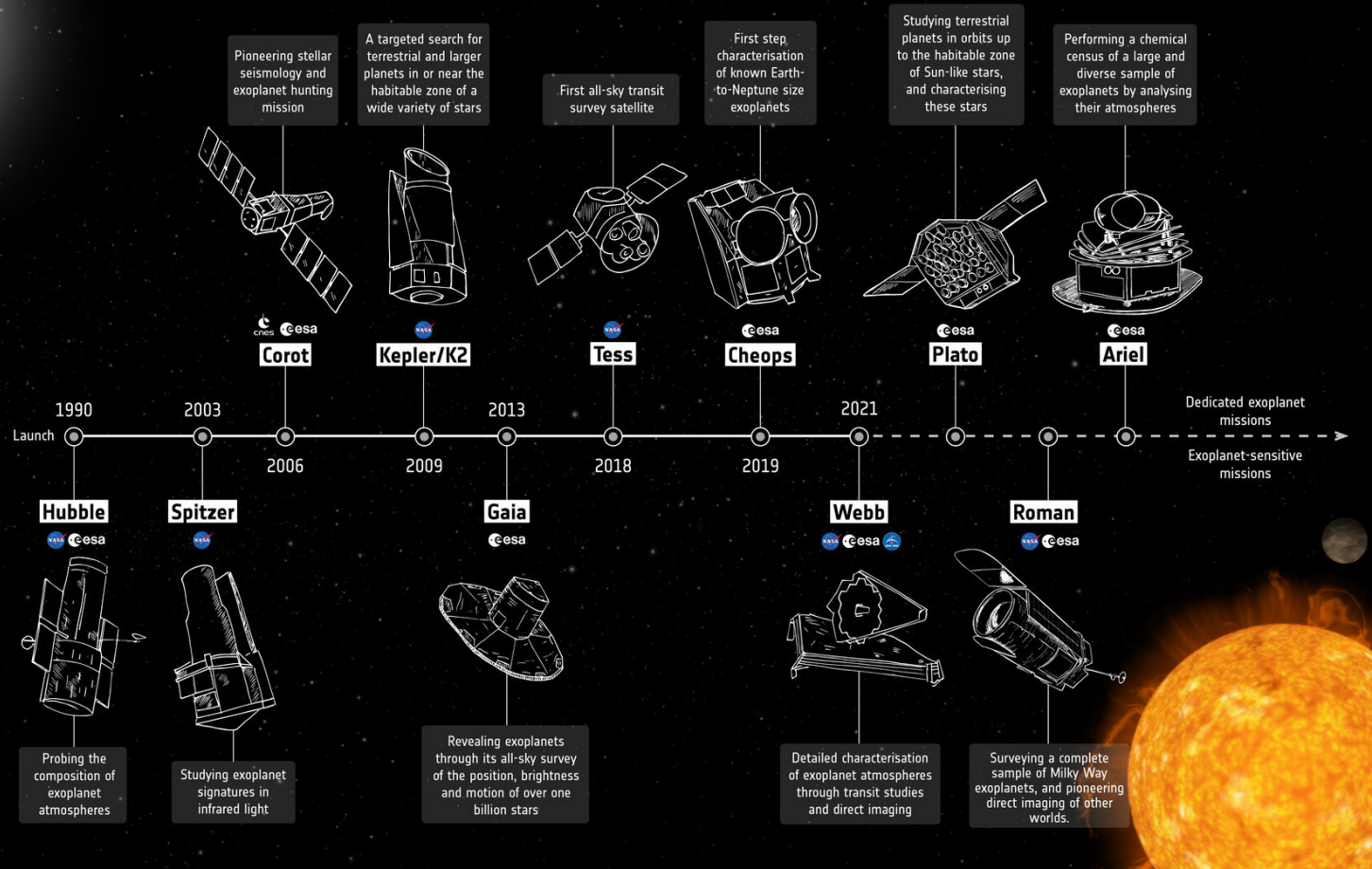


**GEMINI-south
GPI**

Les missions spatiales

Ground-based observatories

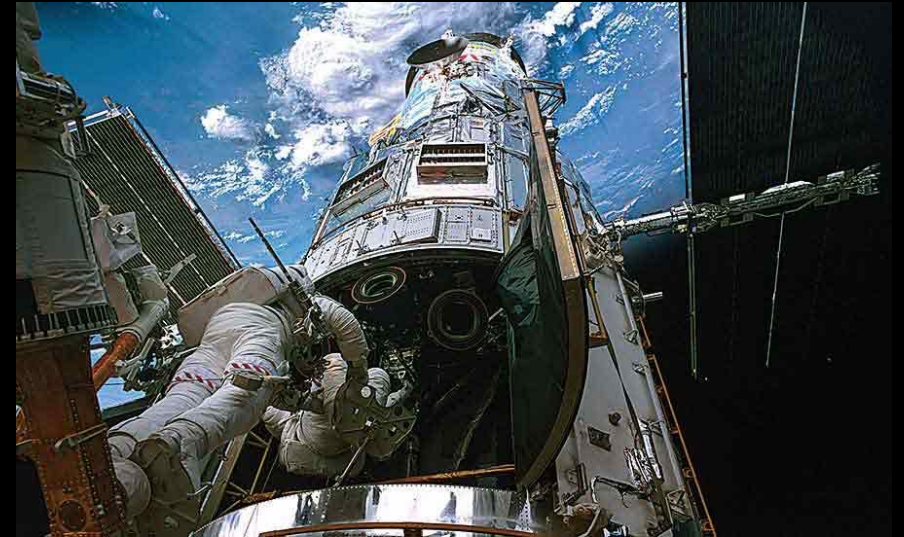
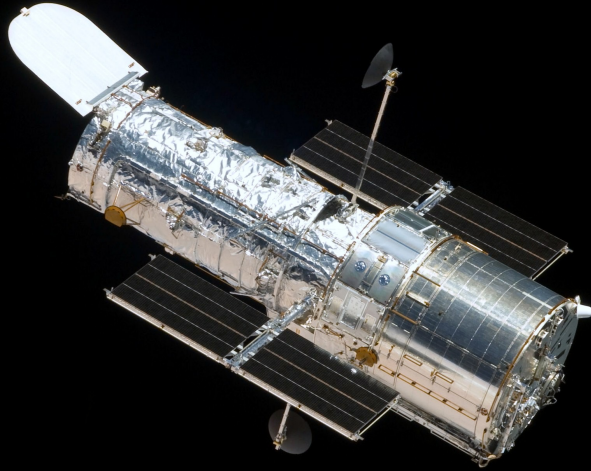
First discoveries of exoplanets in the 1990s opened up the field of exoplanet research. New innovations and discoveries continue to this day



Les missions spatiales



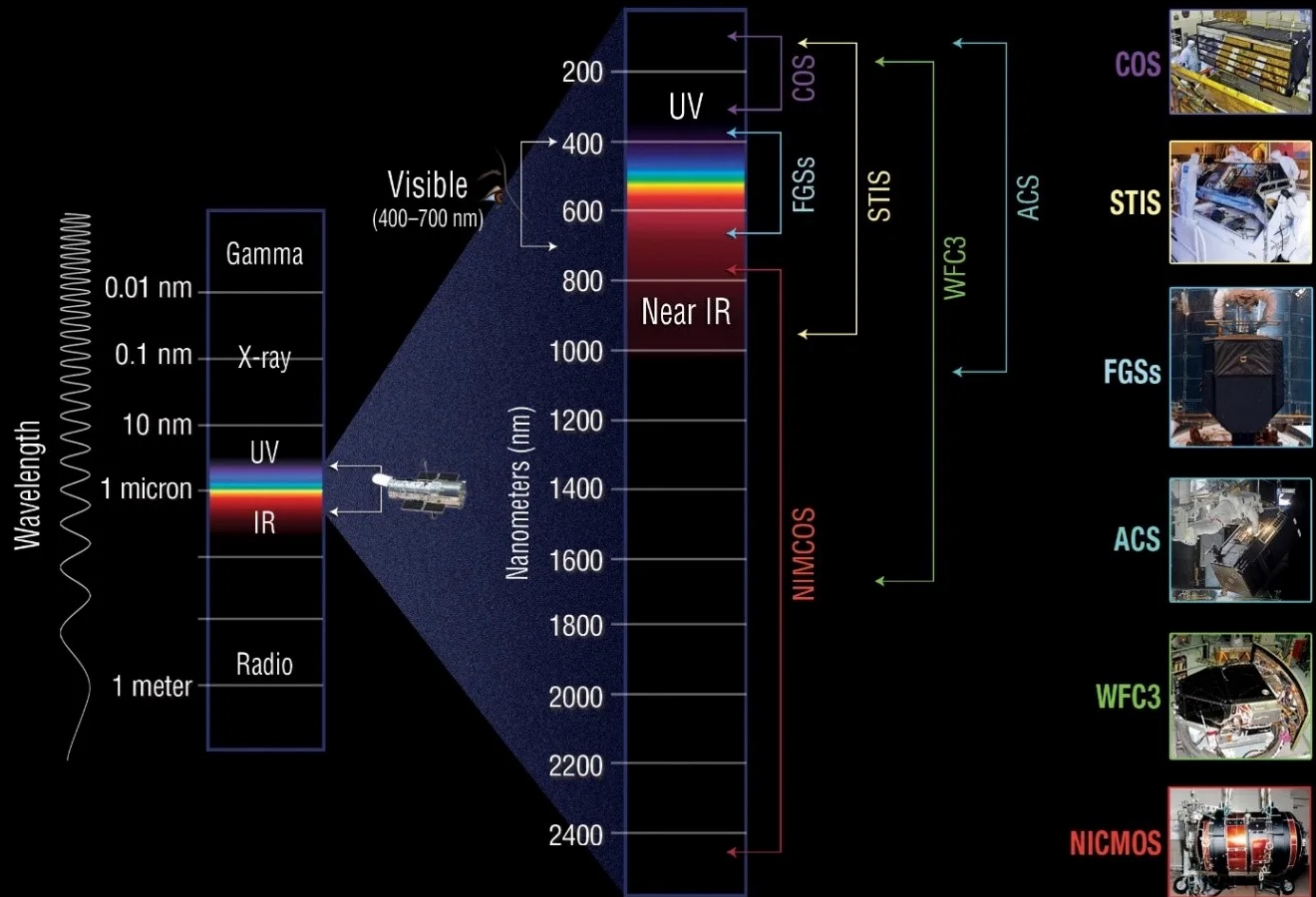
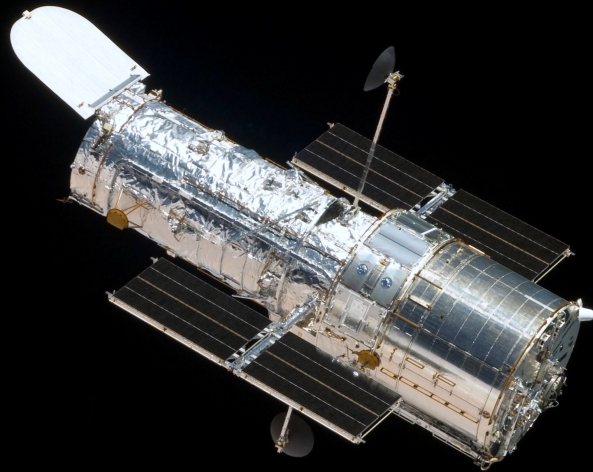
Hubble Space Telescope (HST)

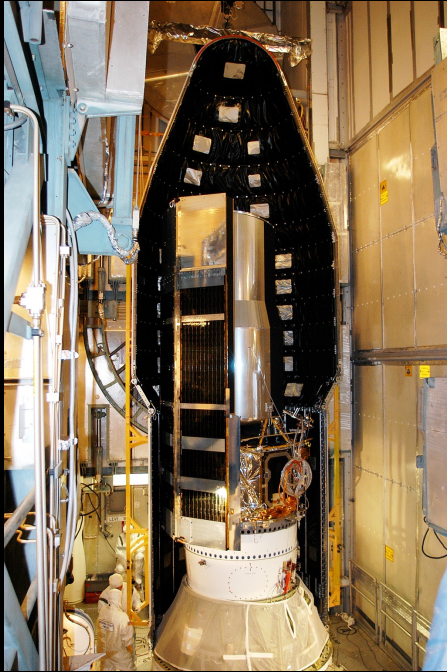


- Lancé en 1990, Taille M1= 2.4m, observe dans UV, visible et proche infrarouge
- en orbite autour de la Terre
- But initial : étude des galaxies, des étoiles, des trous noirs, le système solaire
- Premières images étaient floues ! Réparations ont eu lieu entre 1993 et 2009 (5 missions)
- Hubble a permis la toute première observation de l'atmosphère d'une exoplanète, la fameuse HD 209458 b

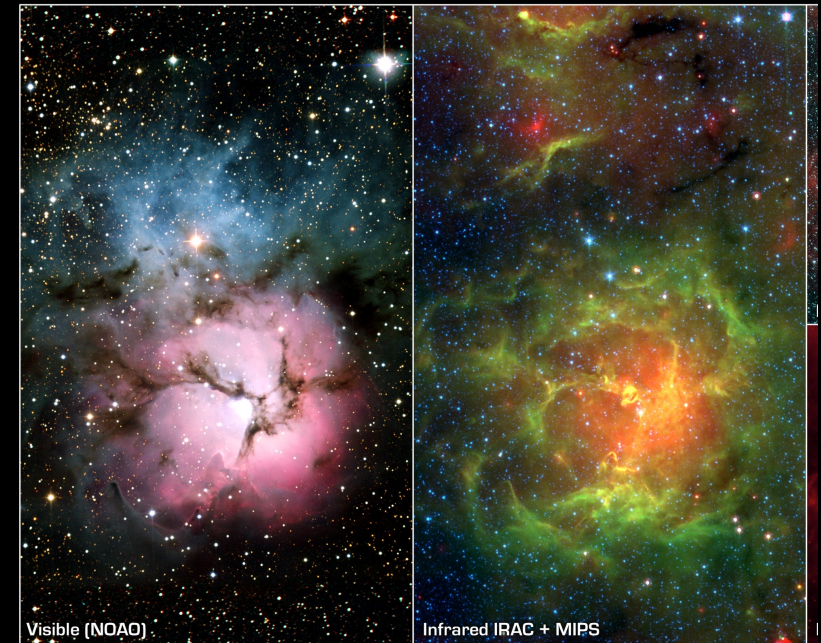
Plus de détails partie 4

Hubble Space Telescope (HST)





Spitzer



Trifid Nebula/Messier 20
NASA / JPL-Caltech / J. Rho (SSC/Caltech)

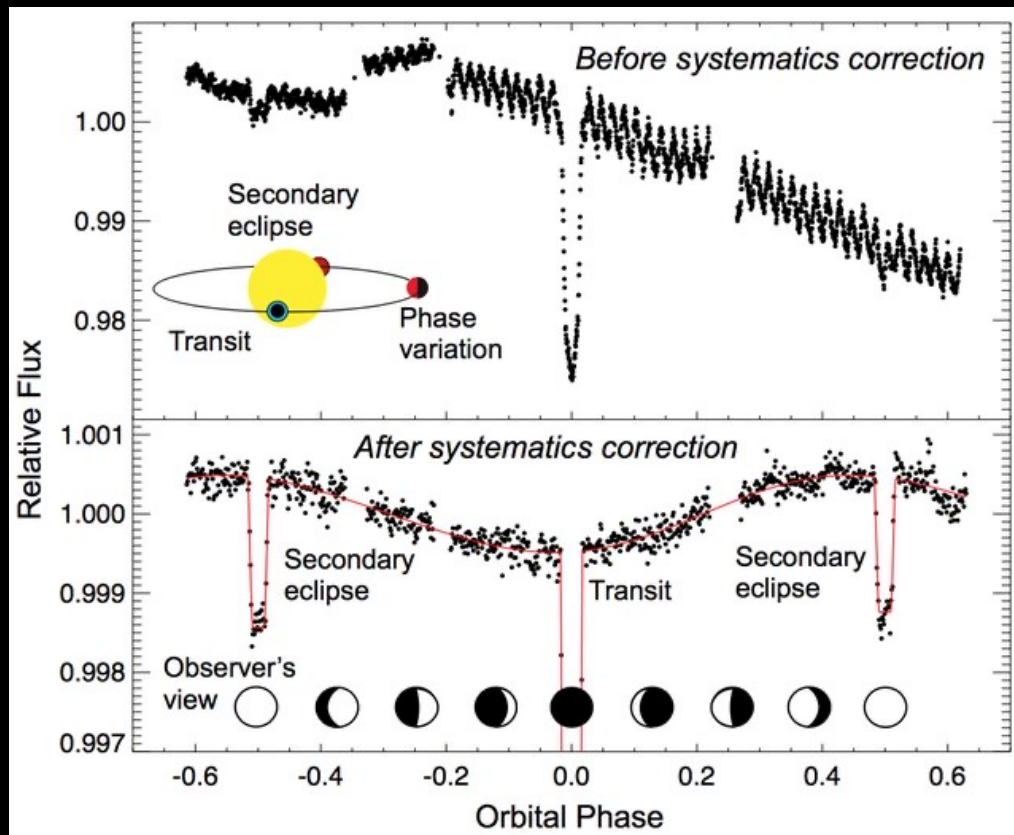
Spitzer Space Telescope

- Lancé en 2003, Taille M1= 85cm, orbite héliocentrique, capacités **infrarouge**
- But initial : exploiter sa capacité à observer l'univers dans le spectre infrarouge pour la cosmologie, les galaxies, la formation planétaire et la caractérisation d'atmosphère
- En 2009, Spitzer a épuisé son liquide de refroidissement et a entamé sa mission « warm Spitzer » qui a duré jusqu'au 30 Janvier 2020
- Spitzer a permis la première détection de l'occultation d'une exoplanète, encore HD 209458 b, cette observation a permis de déduire une température $\sim 1100\text{K}$ pour la planète

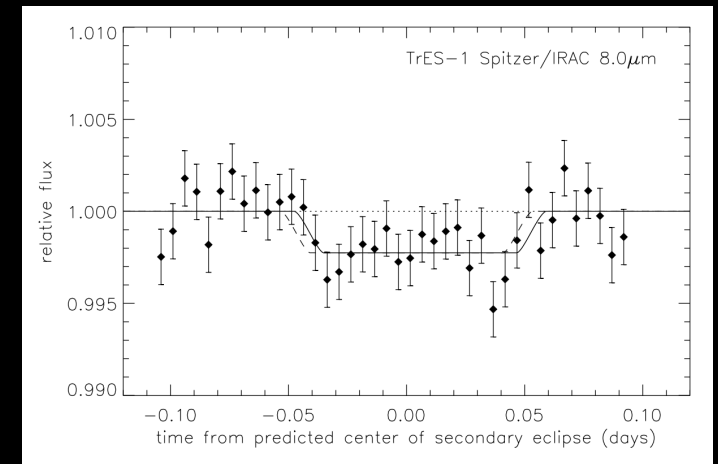
Spitzer

Charbonneau et al. 2005

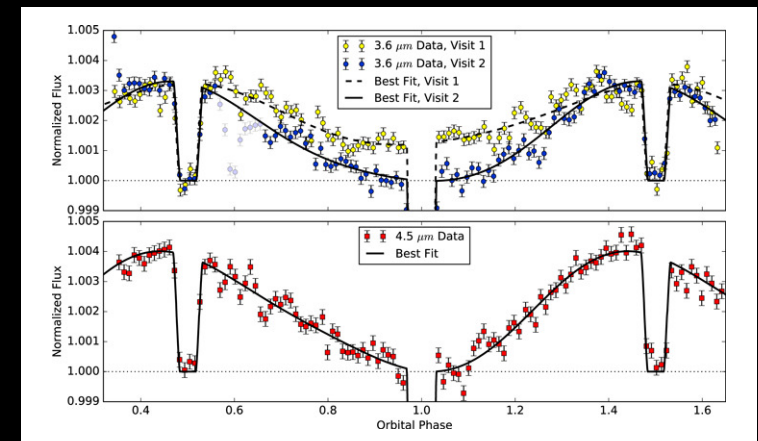
Charbonneau et al. 2005



Courbes de phase de HD 189733 b



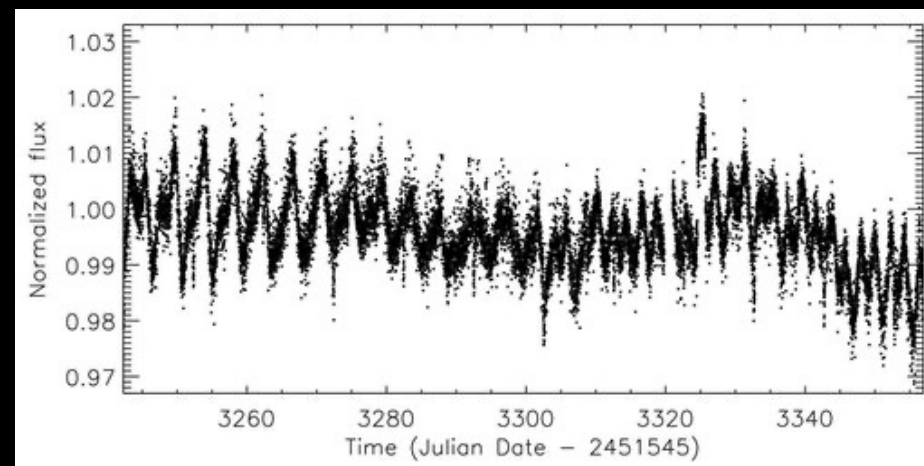
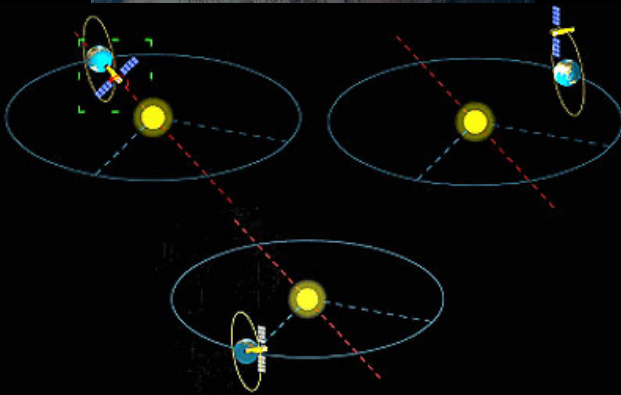
Première détection d'une éclipse secondaire d'exoplanète



Courbes de phase de WASP-43b

CoRoT (Convection, Rotation et Transits planétaires),)

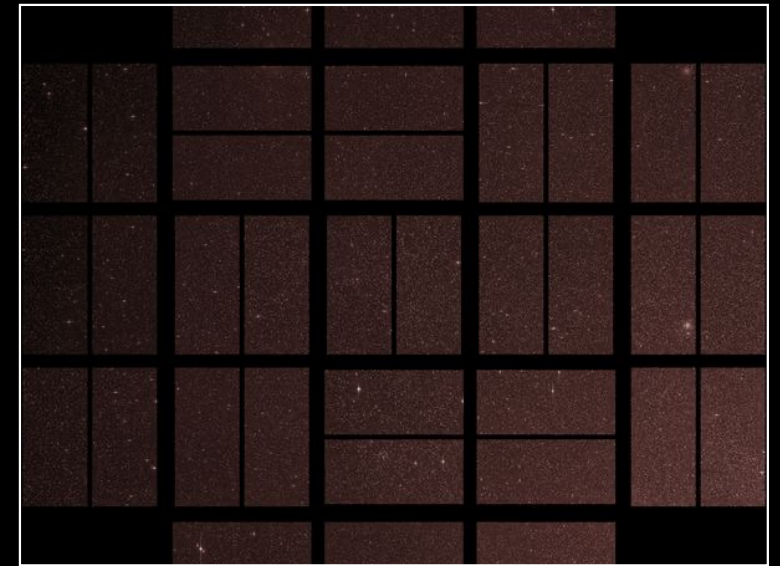
- Lancé en 2006, arrêté en 2014, taille M1= 27 cm, dans le visible, orbite circulaire polaire
- Avec cette orbite observation continue de deux régions (plus de 150 jours chacune)
- But : Recherche d'exoplanètes et astérosismologie
- Découverte de 33 exoplanètes dont CoRoT-7b la première planète rocheuse (en 2009)



Exemple courbe de lumière CoRoT



Kepler



Exemple d'image de Kepler

- Lancé en 2009, arrêt en 2018, taille M1= 1.4 m, dans le visible, orbite héliocentrique
- But : Découvrir des exoplanètes par la méthodes des transits
- Kepler a observé des larges zone du ciel en continu pendant plusieurs années (4ans pour la mission principale puis ~80jours), une image toute les 30min environ
- Kepler a révolutionné le domaine de l'exoplanétologie, près de 2000 planètes confirmées
- En 2013 panne du système de pointage -> mission K2, temps de pointage réduit

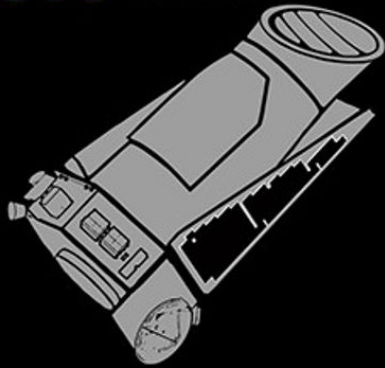
Kepler

BY THE NUMBERS

Kepler

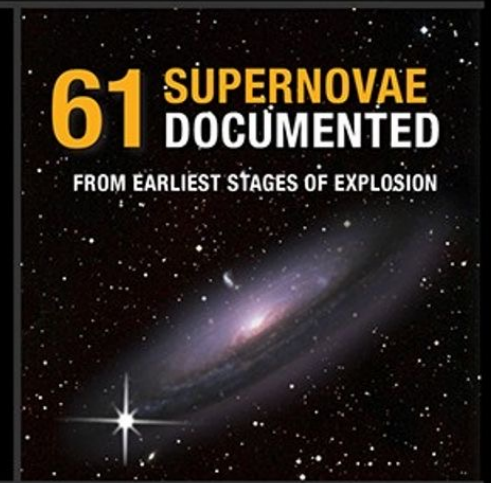


9.6 YEARS IN SPACE



61 SUPERNOVAE DOCUMENTED

FROM EARLIEST STAGES OF EXPLOSION



2 MISSIONS COMPLETED

678 GB SCIENCE DATA COLLECTED

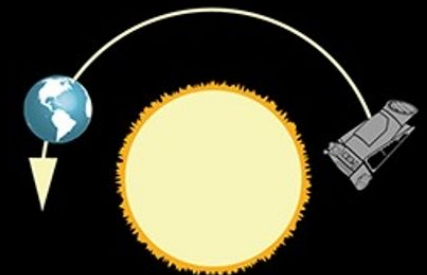
2,946 SCIENTIFIC PAPERS PUBLISHED

94 MILLION MILES AWAY

3.12 GALLONS FUEL USED



732,128 COMMANDS EXECUTED

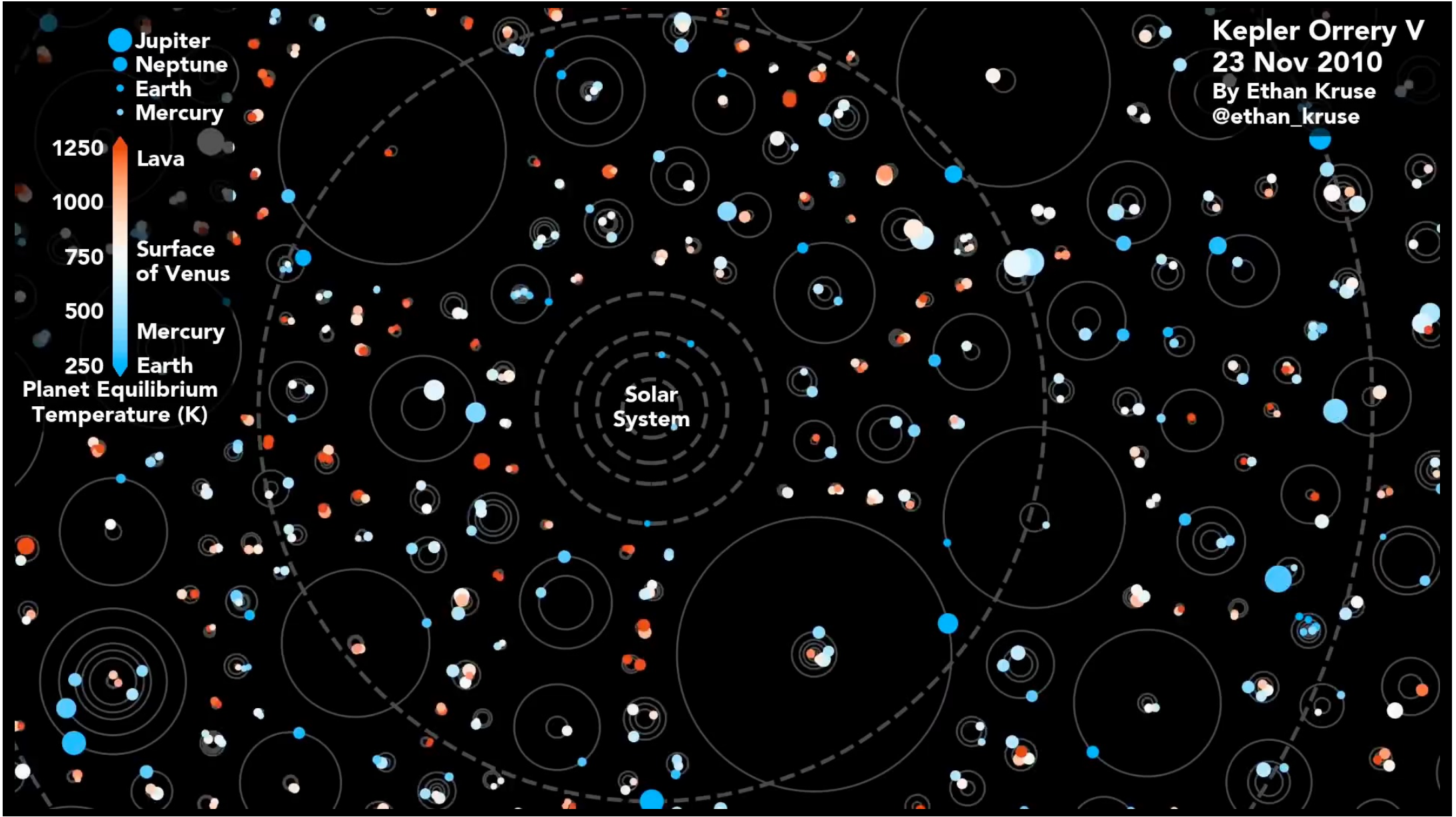
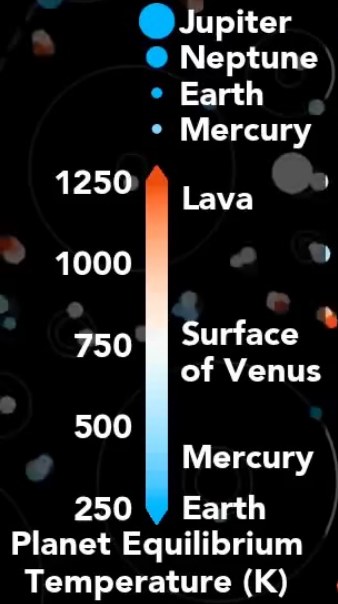


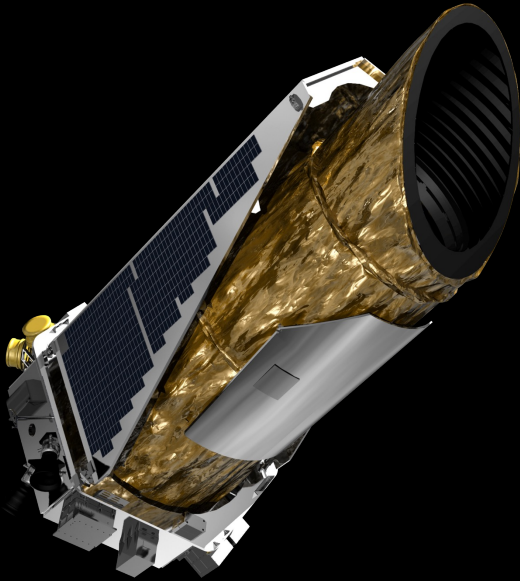
www.nasa.gov/kepler

As of October 24, 2018

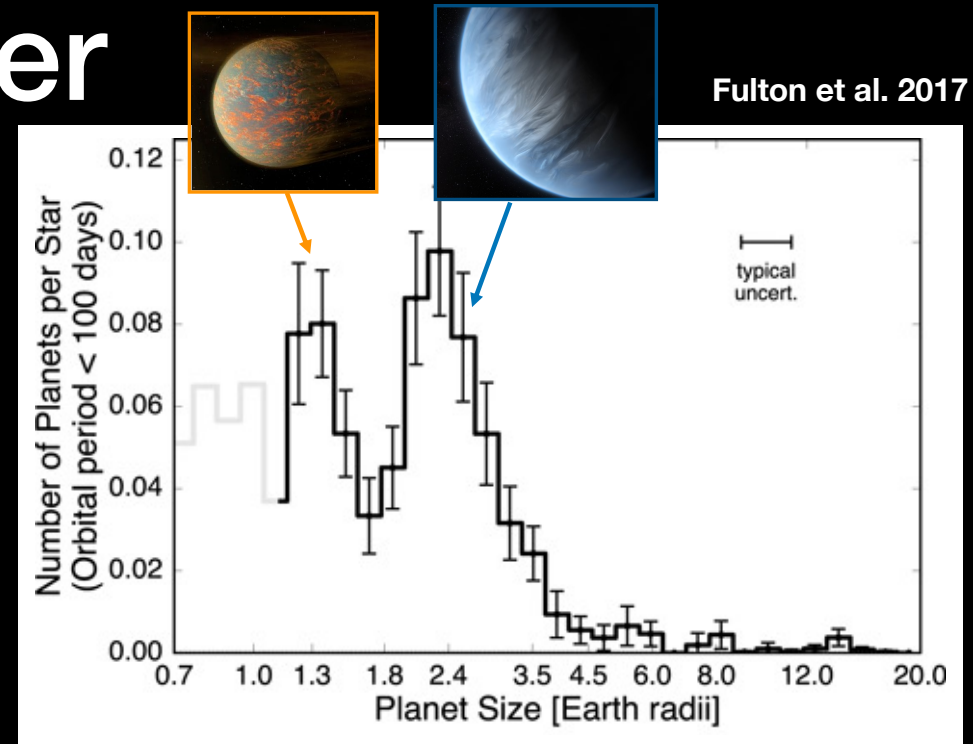
@NASAKepler

Kepler Orrery V
23 Nov 2010
By Ethan Kruse
@ethan_kruse





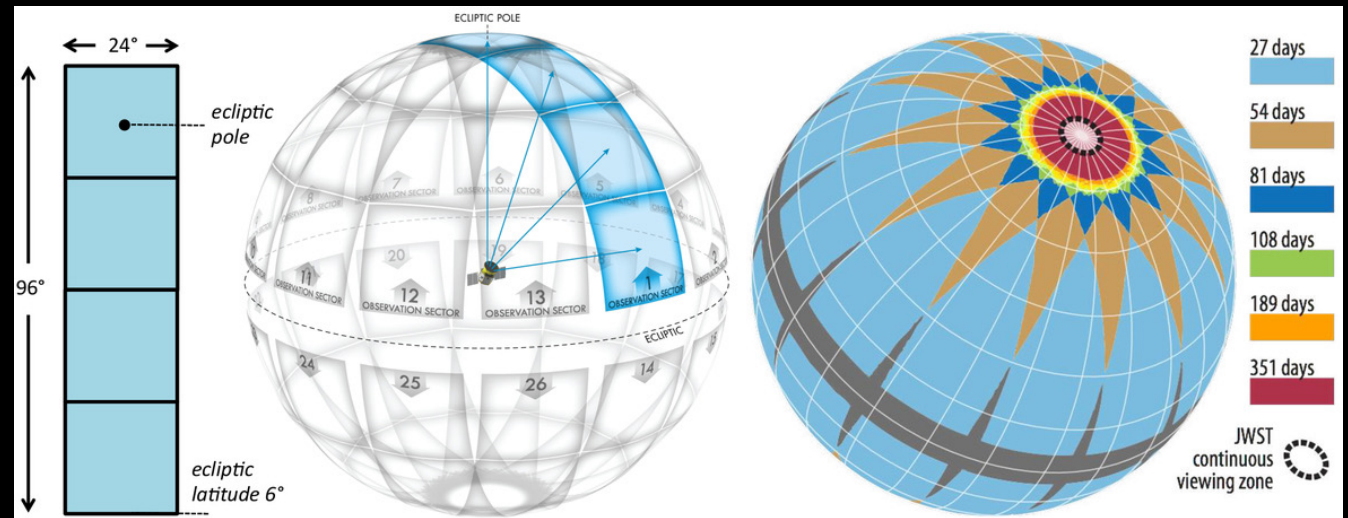
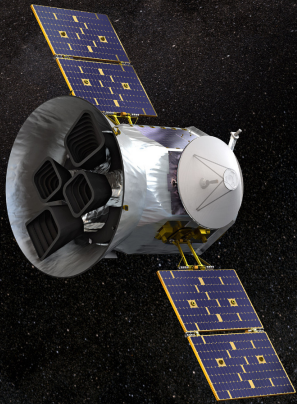
Kepler



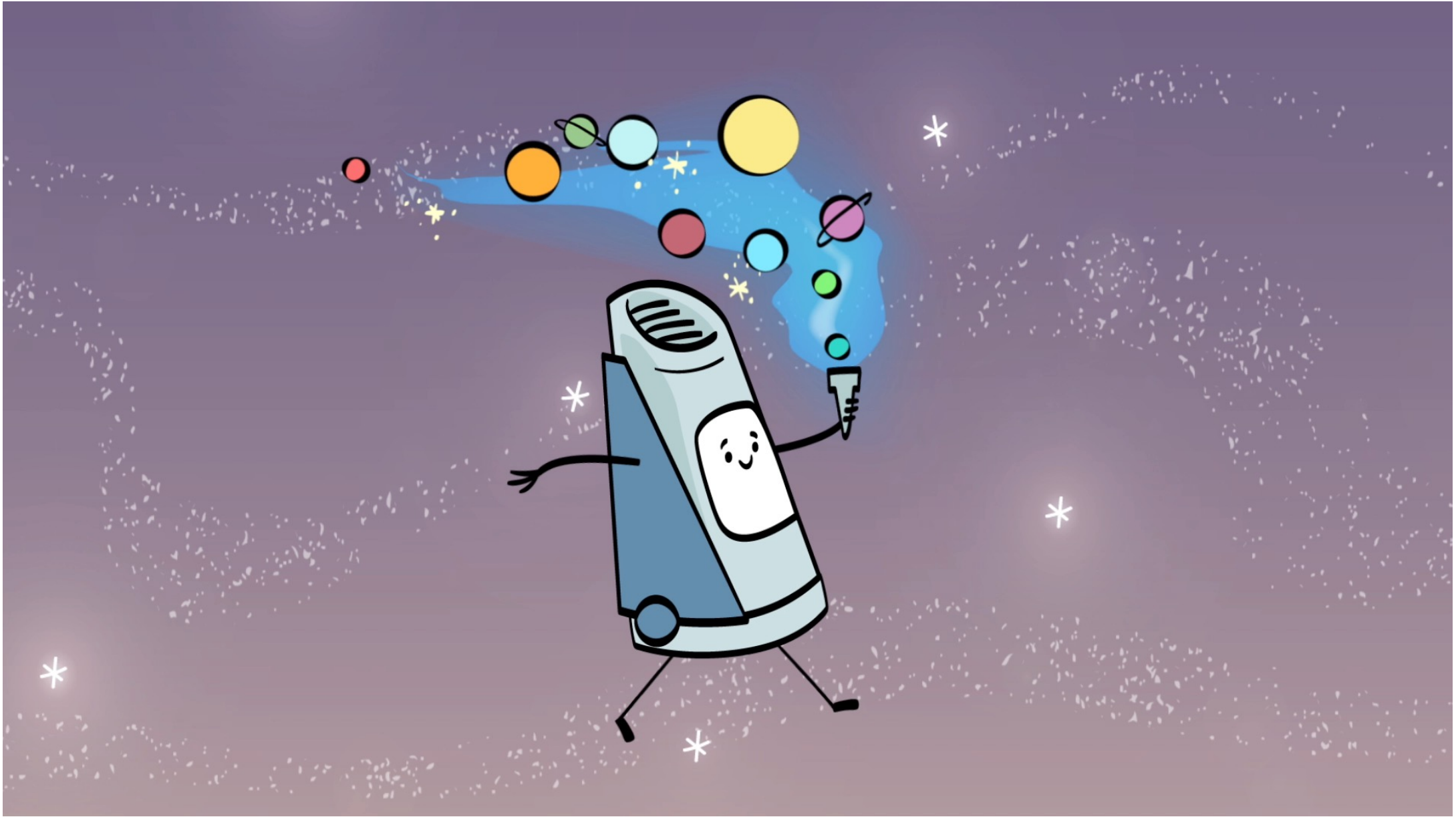
- Les statistiques des planètes découverte par Kepler montre l'existence de deux populations en abondance : les planètes Super-terres, et les planètes Sous-Neptune
- Transition à planètes rocheuses et planètes gazeuses à 1.8 R_E
- Ces résultats ont généré la question suivante : Pourquoi y'a t il un trou autour de 1.8 rayon terrestre? Quelles causes physiques explique cette observation ?

Plus de détails partie 4

TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite)



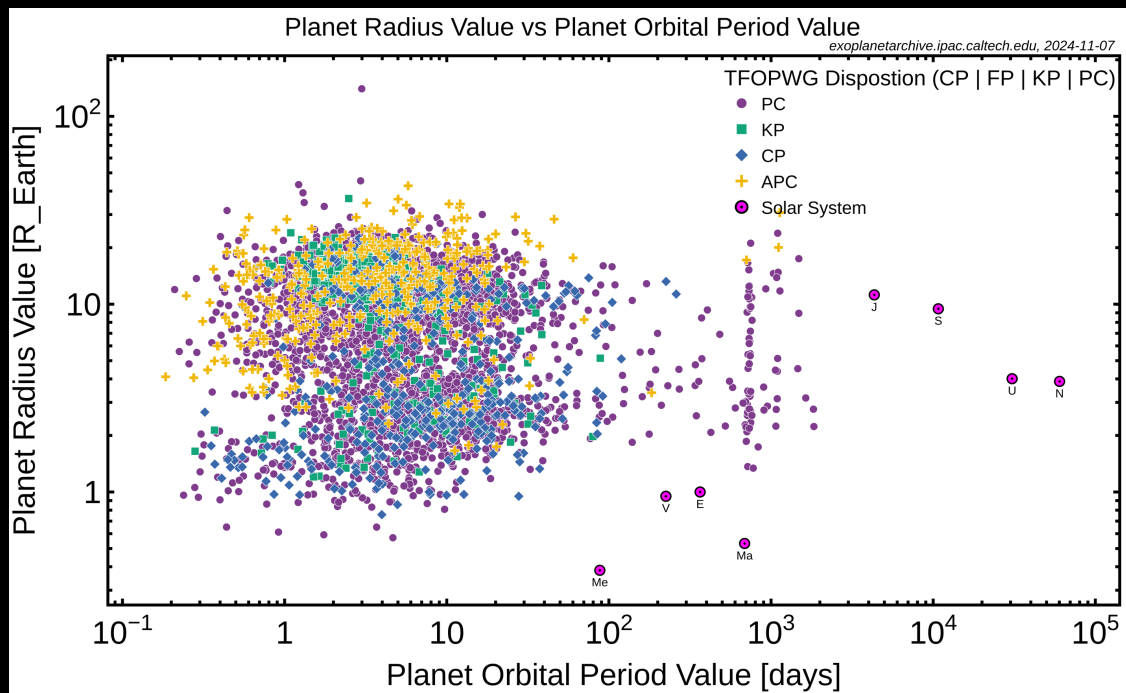
- Lancé en 2018, toujours en fonctionnement
- 4 caméras identiques, dans le proche infrarouge
- But : discover thousands of planets and is further specially designed to find a pool of small planets transiting small star
- Observe chaque secteur 27 jours, 26 secteurs
- La mission a déjà été étendue 2 fois



TESS



TESS



7021 TOIs (so far!)

70 sectors

1386 TOIs with TESS $R_p < 4 R_e$

1645 false positives

410 confirmed TESS Planets

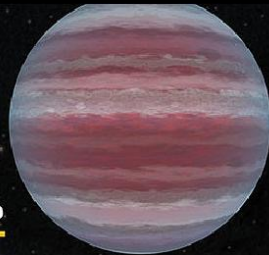
Last updated: 12/15/2023

En Décembre 2023*

TESS

30%
GAS GIANT

The size of Saturn or Jupiter (the largest planet in our solar system), or many times bigger. They can be hotter than some stars!



31%
SUPER-EARTH

Planets in this size range between Earth and Neptune don't exist in our solar system. Super-Earths, a reference to larger size, might be rocky worlds like Earth, while mini-Neptunes are likely shrouded in puffy atmospheres.



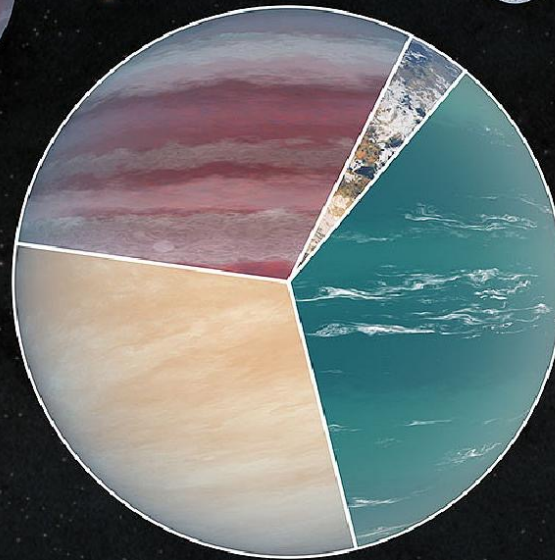
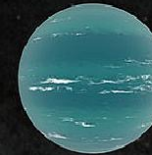
4%
TERRESTRIAL

Small, rocky planets. Around the size of our home planet, or a little smaller.



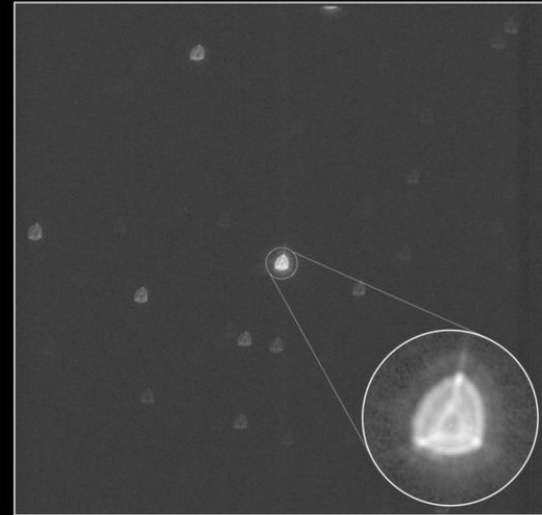
35%
NEPTUNE-LIKE

Similar in size to Neptune and Uranus. They can be ice giants, or much warmer. "Warm" Neptunes are more rare.



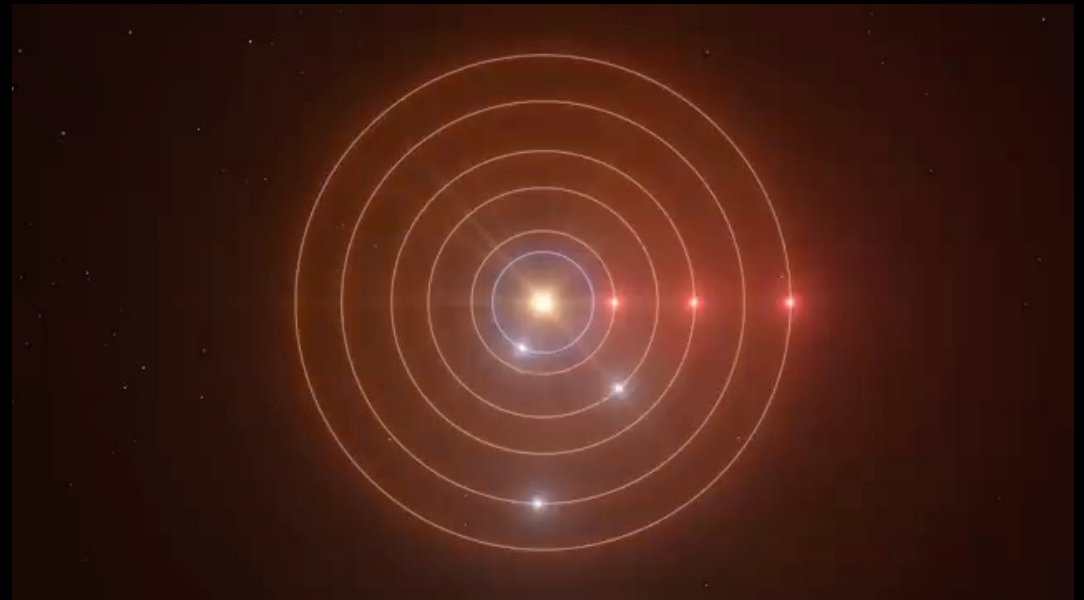
5000+
PLANETS FOUND

CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)



- Lancé en 2019, observe dans le visible, 30cm, toujours en fonctionnement
- Première mission dédié essentiellement à la caractérisation d'exoplanètes connues
- But : étudier la structure des exoplanètes de la taille des super-Terres à celle des Neptunes, en orbite autour d'étoiles brillantes avec une période < 50 jours.

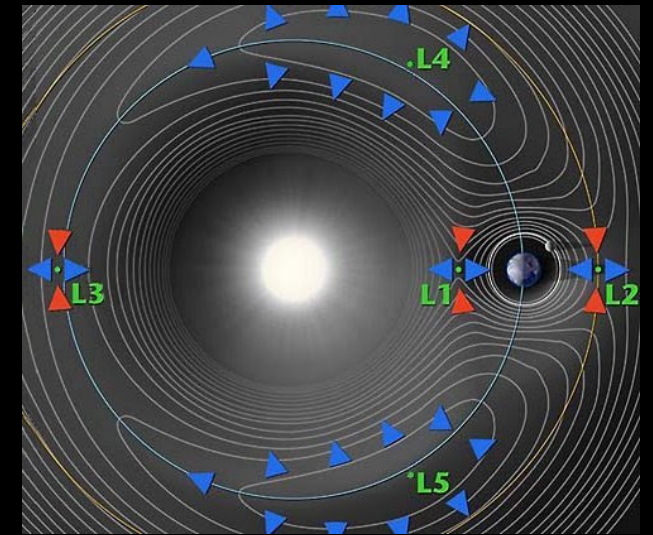
CHEOPS (CHaracterising ExOPlanet Satellite)



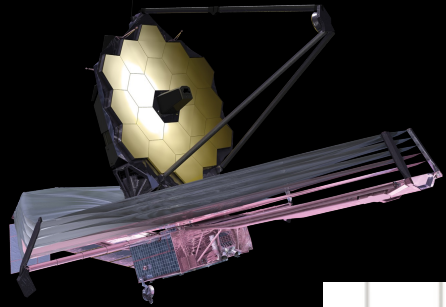
Compréhension du système résonnant TOI-178 grâce à CHEOPS



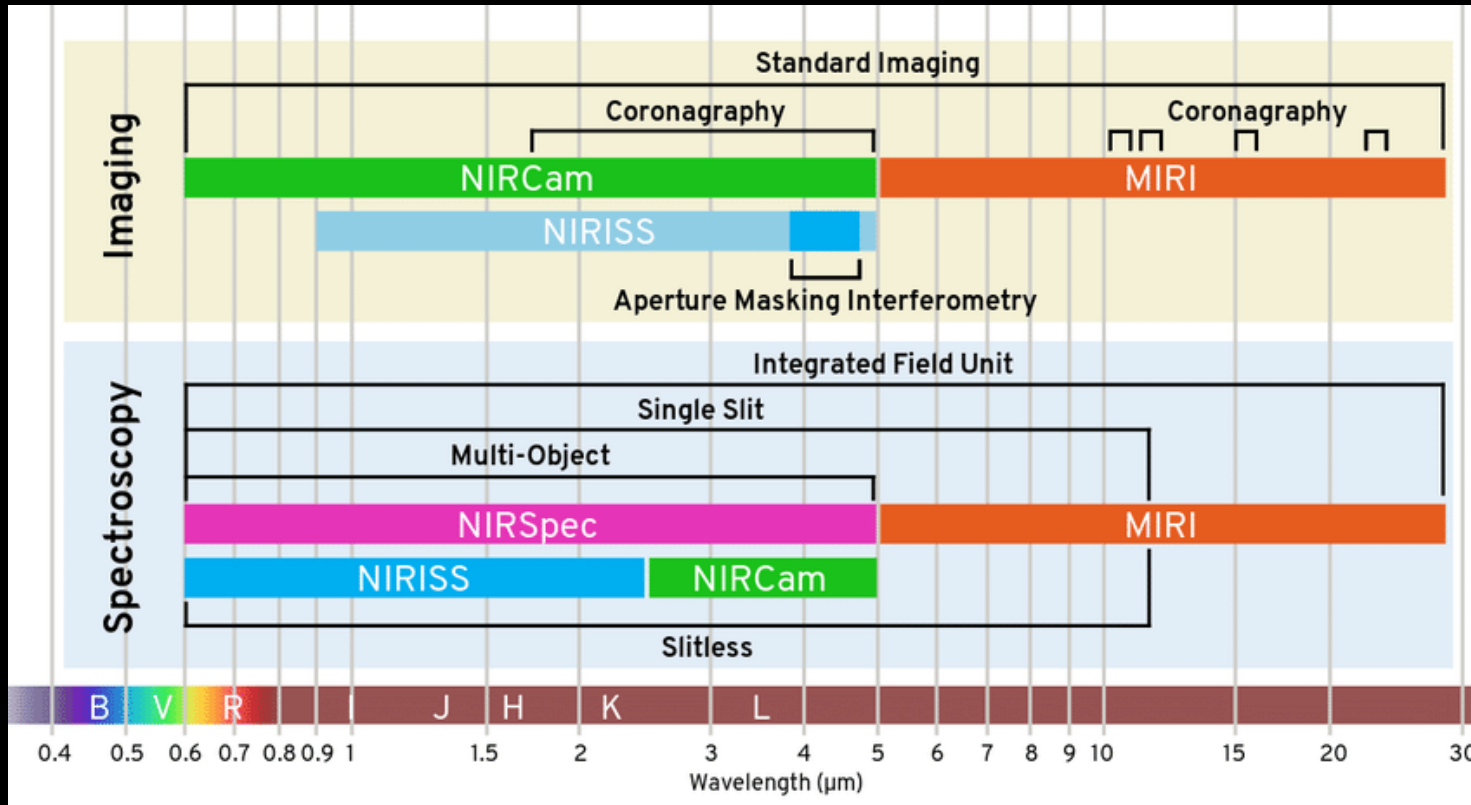
JWST



- Lancé le 25 décembre 2022, miroir M1 segmenté de 6.5 m
- Orbite au point de Lagrange L2 (à 1.5 millions de km de la Terre), lancement parfait de Ariane 5 (gain de 5ans de vie)
- Équipé de 4 instruments, majoritairement dans l'infrarouge
- Objectifs : formations des étoiles et système planétaires, origine et évolution des galaxies, observation des toutes premières étoiles, système solaire, caractérisation des exoplanètes (25% de son temps)
- Première mission d'étudier l'atmosphère de planète rocheuses de la taille de la Terre (autour d'étoiles M)



JWST

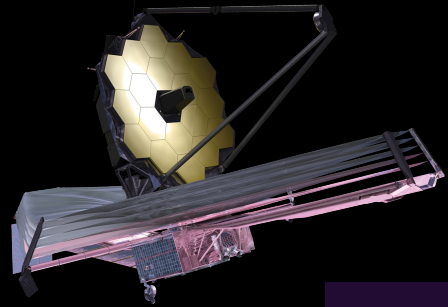


Visible

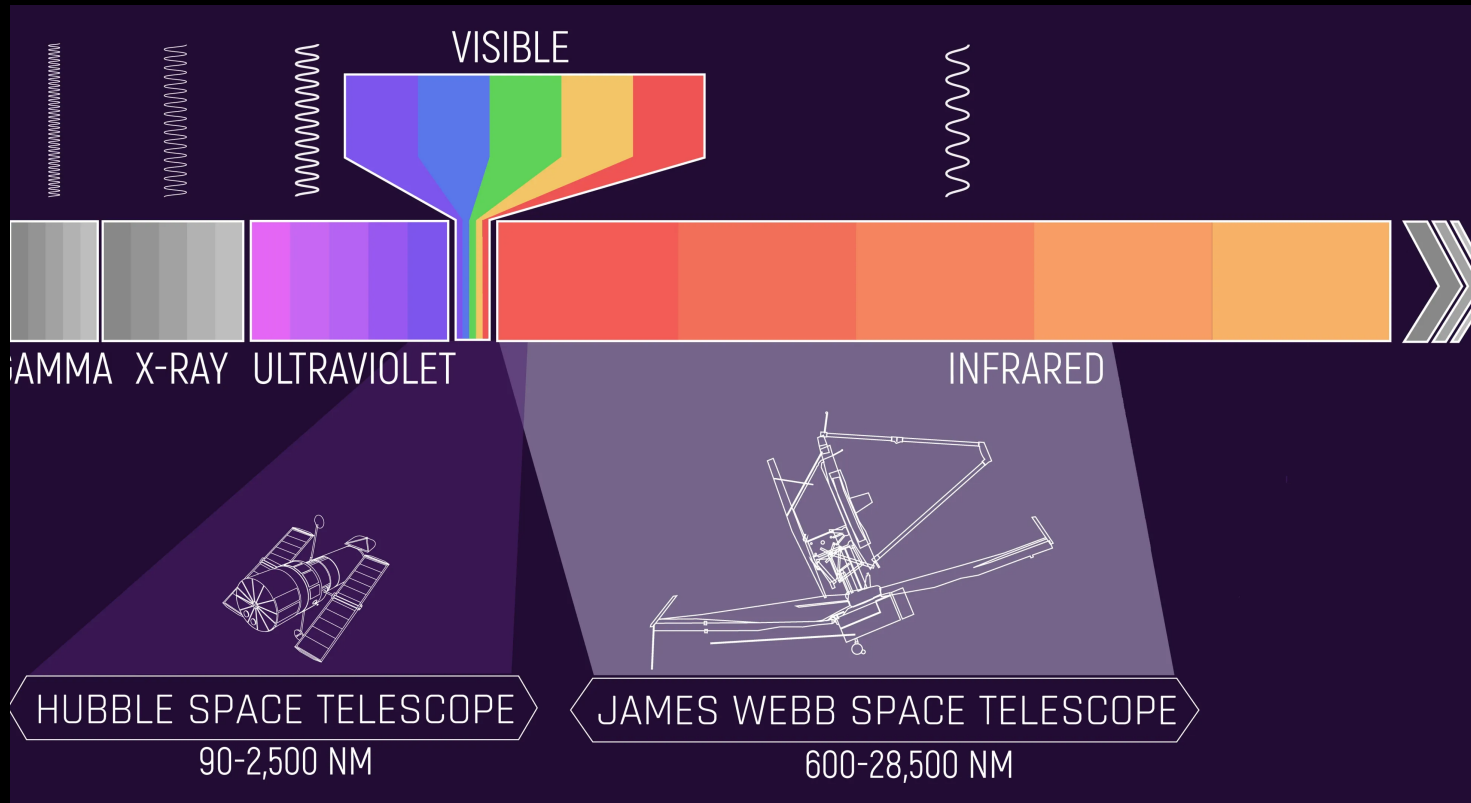
Proche infra-rouge

Infra-rouge

→ Longueur d'onde



JWST vs Hubble





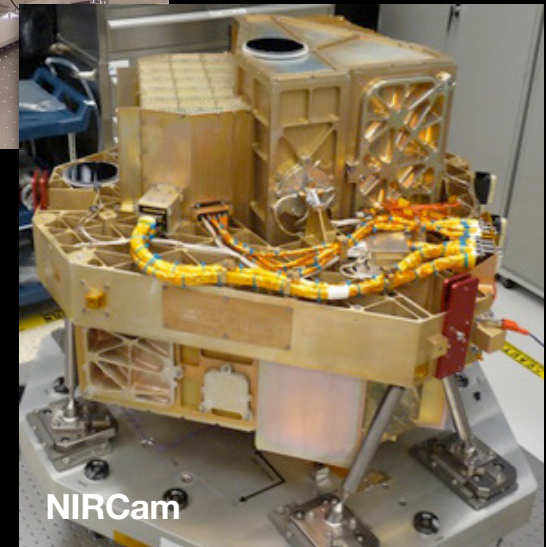
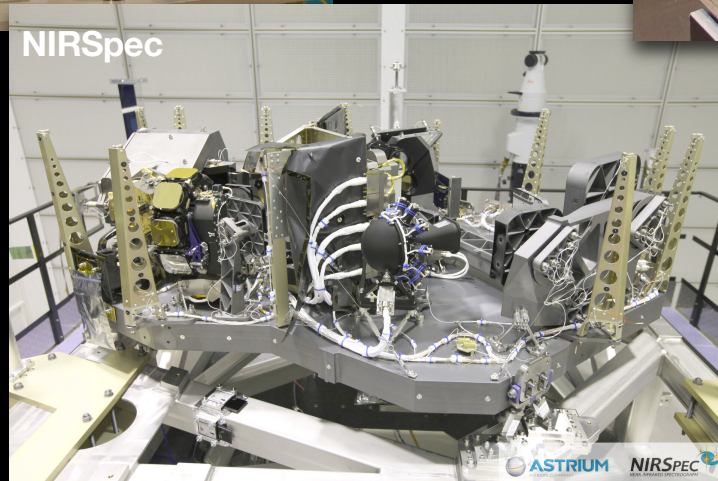
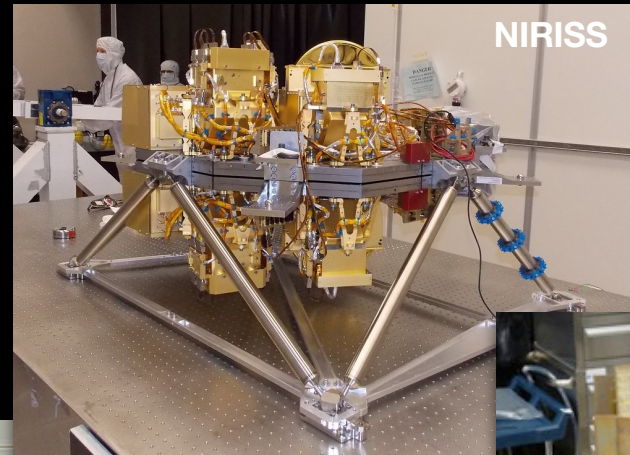
-00:00:32



JWST's orbit

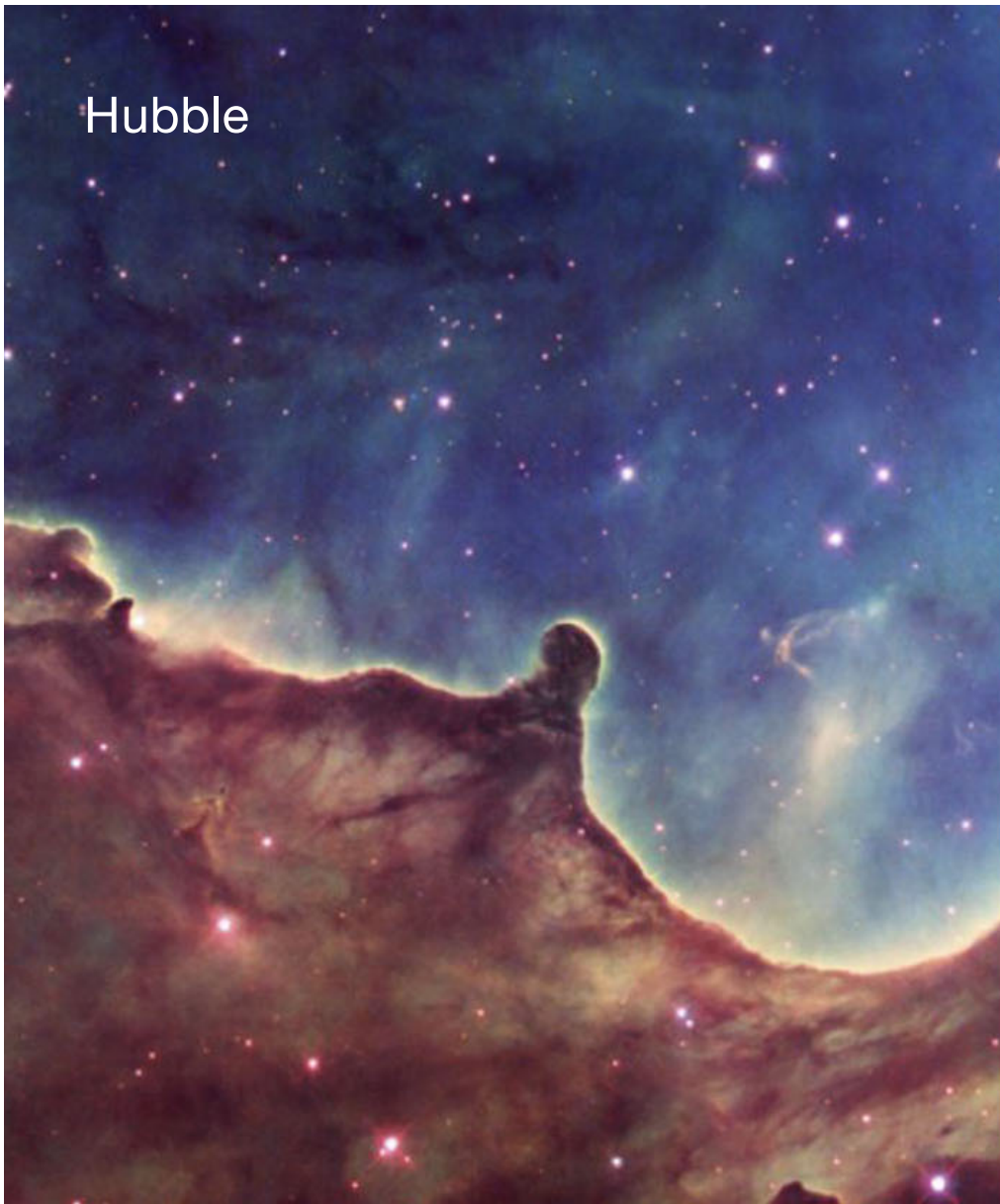


Instruments

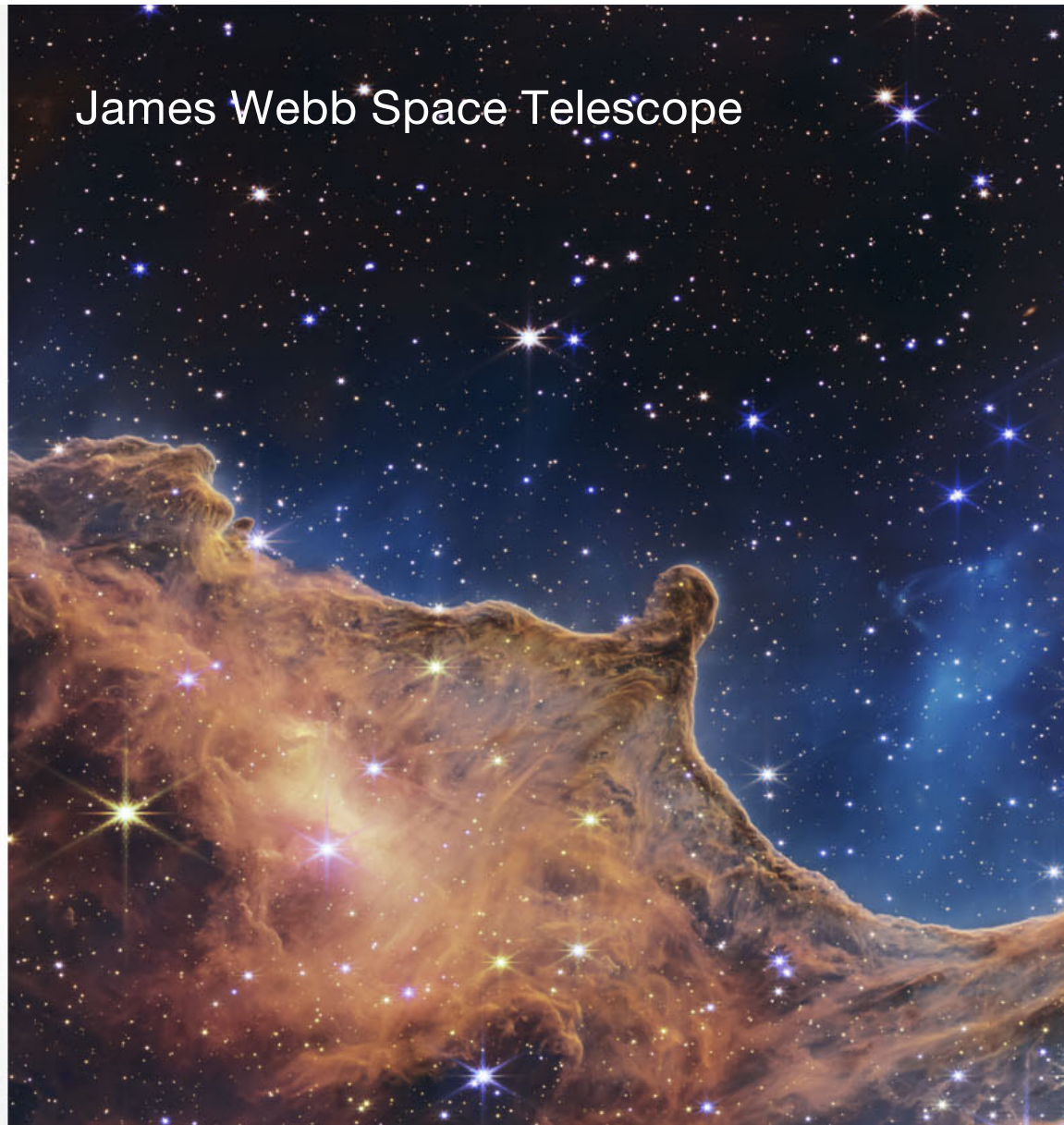




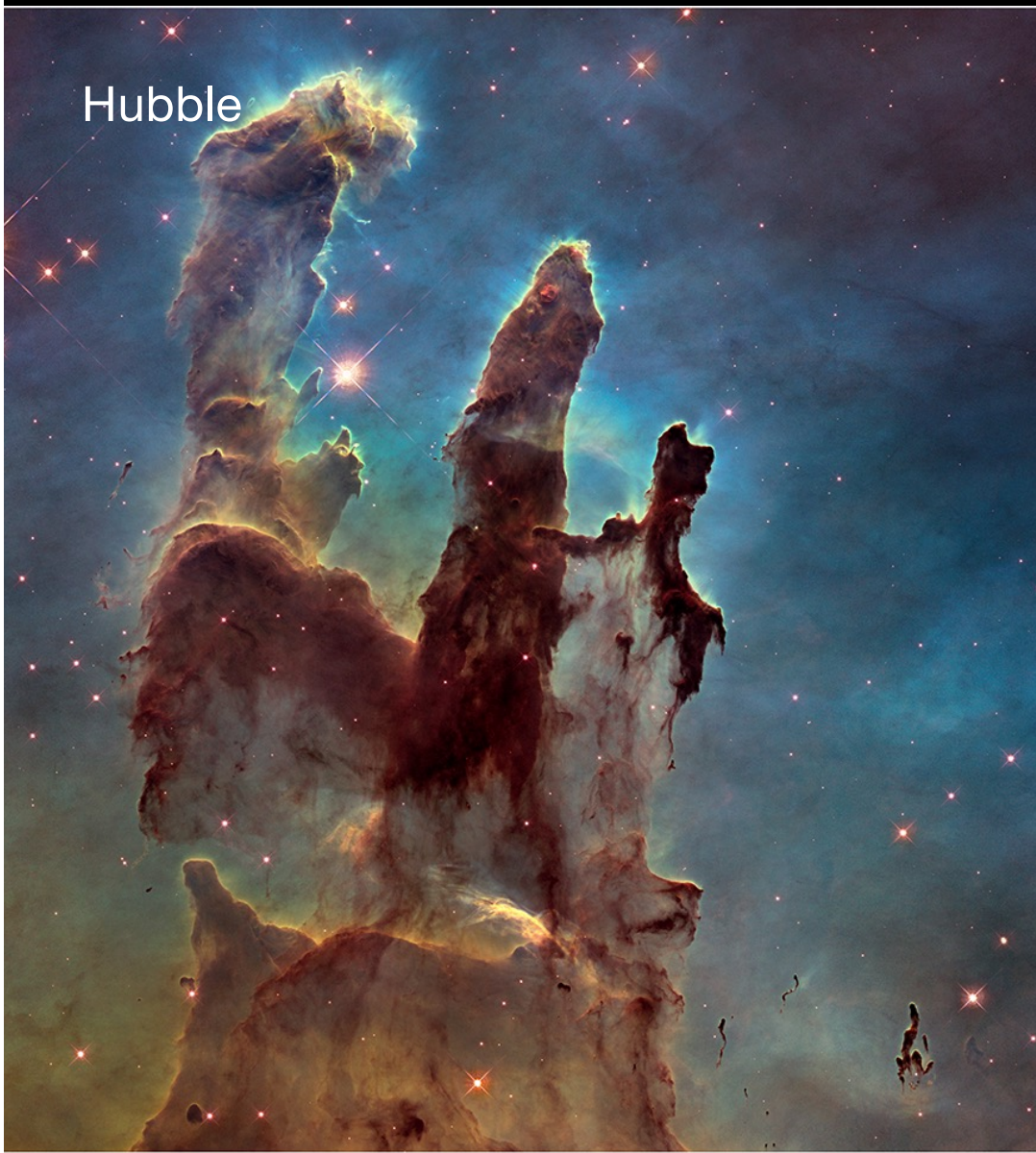
Hubble



James Webb Space Telescope



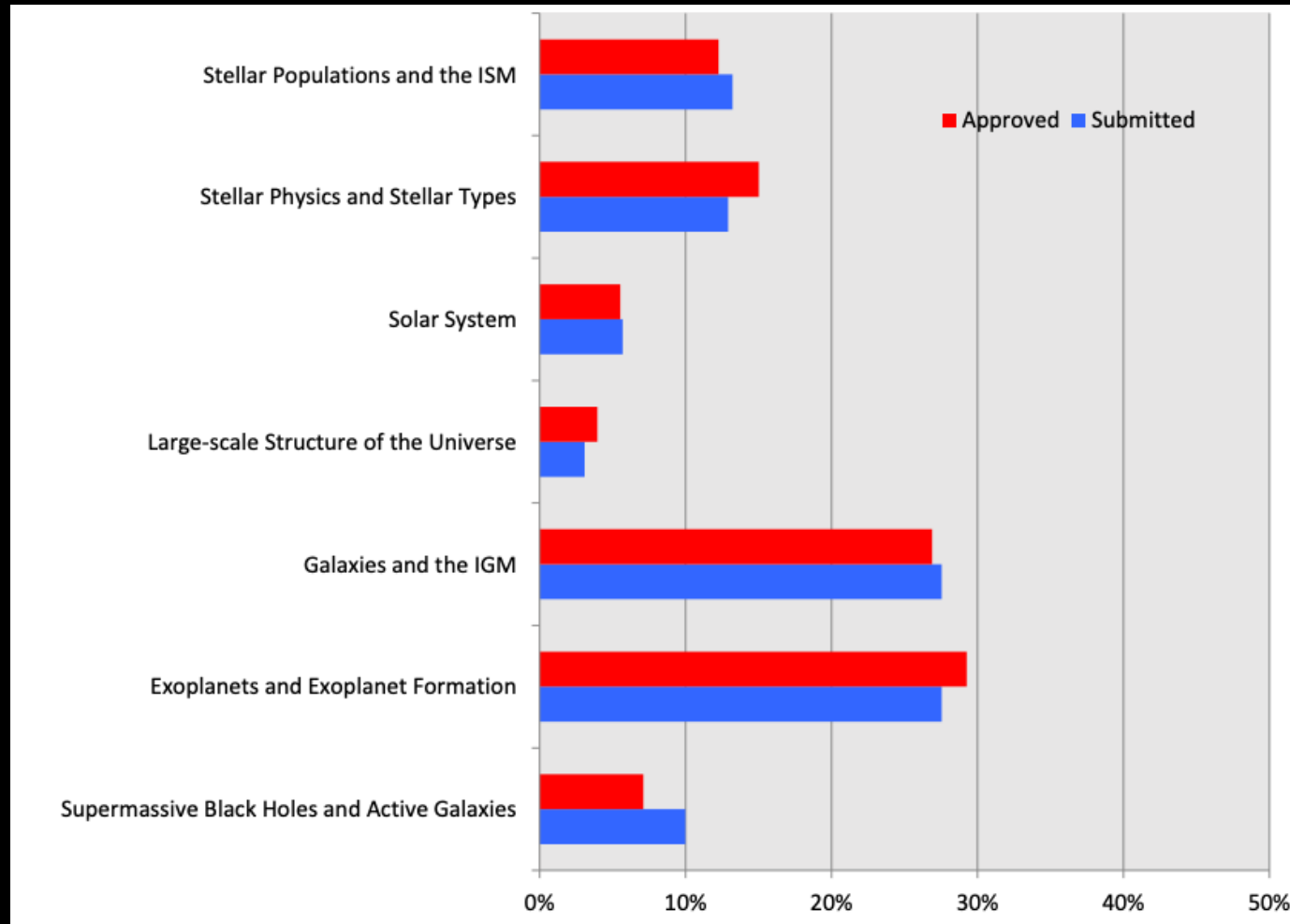
Hubble



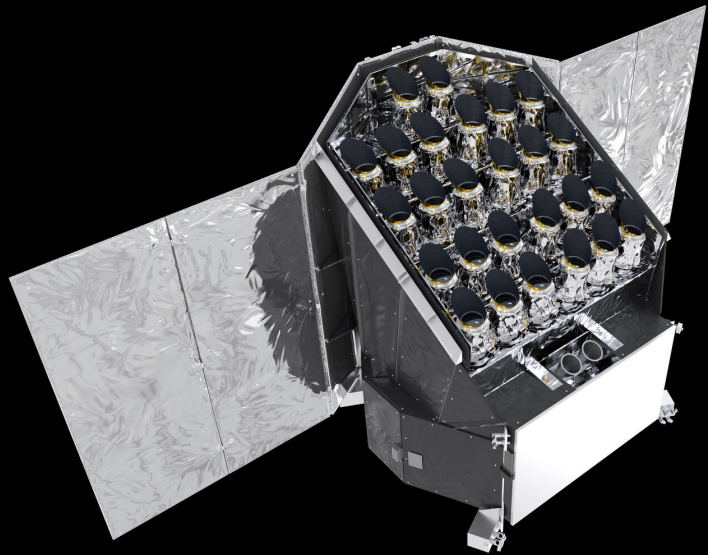
James Webb Space Telescope



Les différents domaines qui utilisent le JWST

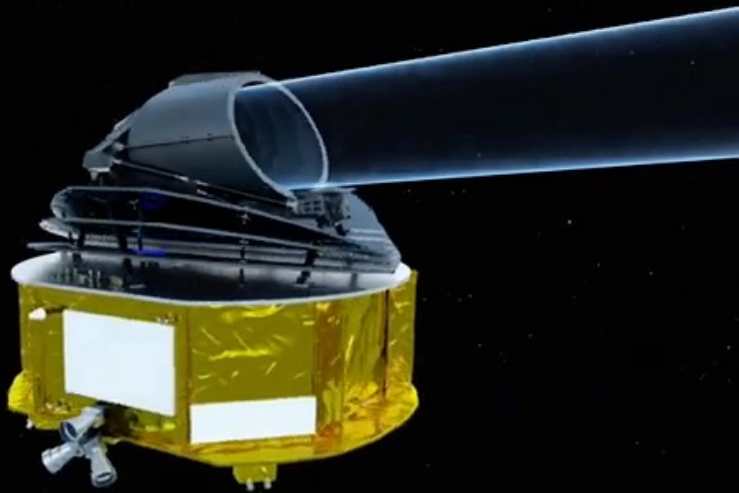


Futur : PLATO



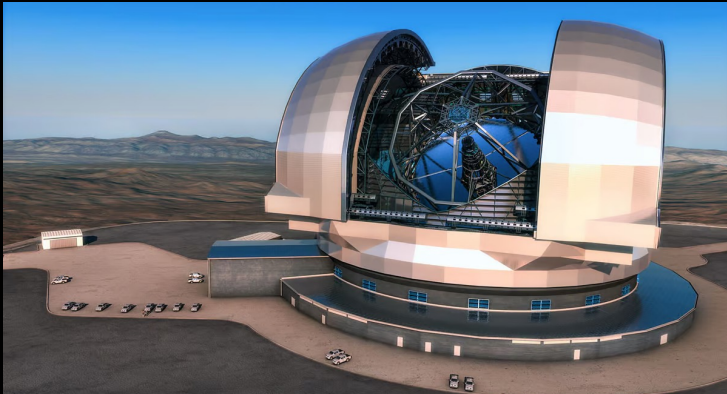
- Lancement prévu en 2026, point L2
- Lancement avec Ariane 6
- 26 caméras au total (24 pour la science)
- Objectifs : Détection et caractérisation d'exoplanètes terrestres en zone habitables autour d'étoiles brillantes de type solaire
- Mission prévue pour 4 ans
- Observation en continue de 2 ans minimum

Futur : Ariel



- Lancement prévu en 2029/2030
- Miroir primaire de 1m, observe dans l'infrarouge comme JWST
- Objectifs : observer >1000 exoplanètes, des planètes rocheuses aux géantes gazeuses. Étudier la nature de ces exoplanètes, à la fois en tant qu'individus et en tant que populations.

Futur : Extremely Large telescope

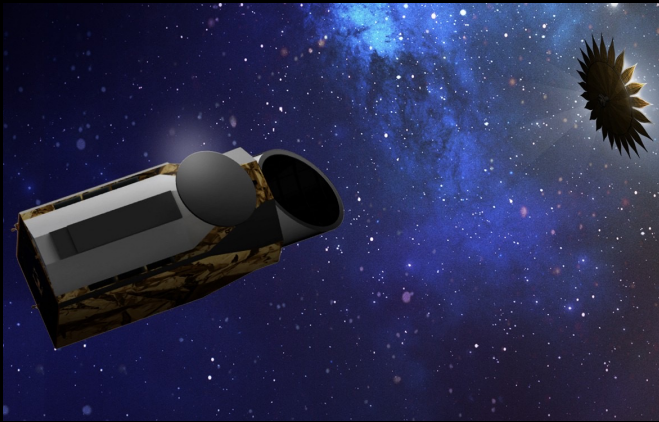
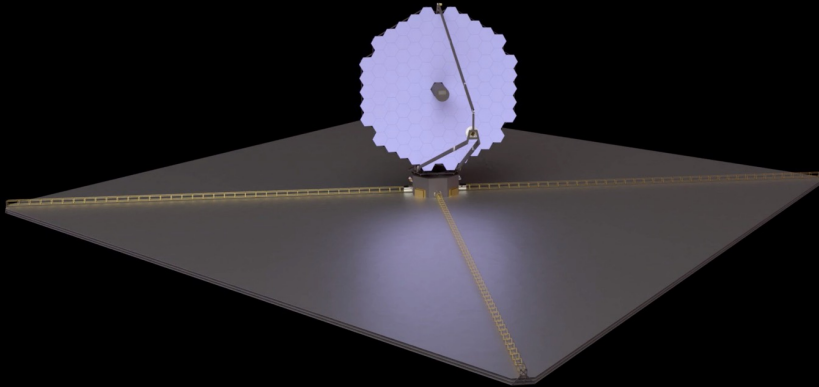


- Première lumière prévue en 2029/2030
- Miroir primaire de 39m de diamètre !!
- Plus grand télescope optique au monde
- Plusieurs générations d'instruments ultra précis
- Objectifs : tous les domaines de l'astrophysique sont concernés (exoplanètes, galaxies, matière noire, formation stellaire, système solaire, etc)



[Images en live de la construction](#) (site de l'ESO)

Futur : HWO (Habitable Worlds Observatory)



- Lancement horizon 2040
- Taille, instruments et domaine de longueur d'onde à définir (surement UV/visible)
- Objectifs : identifier et imager directement au moins 25 mondes potentiels habitables. Rechercher des « biosignatures » chimiques dans l'atmosphère de ces planètes,

Futur : Habitable Worlds Observatories

Habitable Worlds Observatory
Simulated Solar System Time-lapse
Observed from 33 light-years away
Time = 10 years, 1 second = 72 days



Credit illustration: Dr. Lionel Garcia

Introduction à l'astrophysique

Les exoplanètes - séance 3

Elsa Ducrot : elsa.ducrot@cea.fr / elsa.ducrot@obspm.fr

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 3
5. Zoom sur quelques systèmes exoplanétaires connus - cours 3
6. Introduction à l'astrobiologie - cours 4

À faire : 1) regarder les vidéos du CEA :

<https://www.explore-exoplanets.eu/playlist/exoplanetes-recherche-spatiale/>

Voir le fichier « [L1 Phys131 2024 syllabus.pdf](#) » sur ecampus

2) regarder les vidéos plus spécifique :

<https://www.explore-exoplanets.eu/mooc-en/6-2-1-the-study-of-exoplanet-atmospheres/>

Regarder les vidéos de la section 5.1, 5.2, 6.2.1, 6.2.1, 6.2.3