

LA PLANETE HIP41378F A-T-ELLE DES ANNEAUX ?

Paul CHARPENTIER

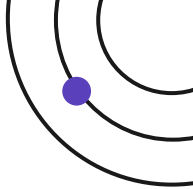


IMCCE



Conférence de l'Astronéf

Au programme



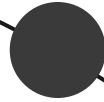
Comment
trouver des
exoplanètes ?



Le modèle de
formation
planétaire



Un monde
tournant,
Un monde
résonnant.



Lunes et forces
de marée

**COMMENT TROUVER
DES EXOPLANETES?**



Prendre une photo → Imagerie directe



Pas si simple:

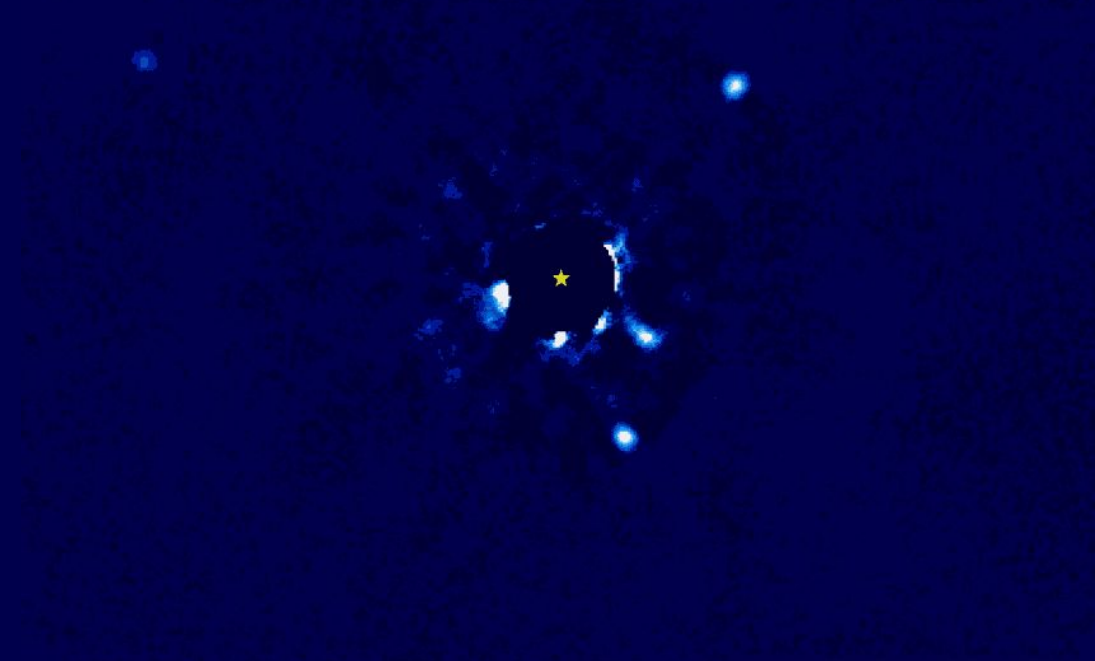
- Les planètes sont petites et très peu brillantes
- Leurs soleil nous éblouit

→ **On a un problème de contraste !**

C'est comme essayé de prendre en photo un luciole posé sur un lampadaire à plusieurs kilomètres de distance.



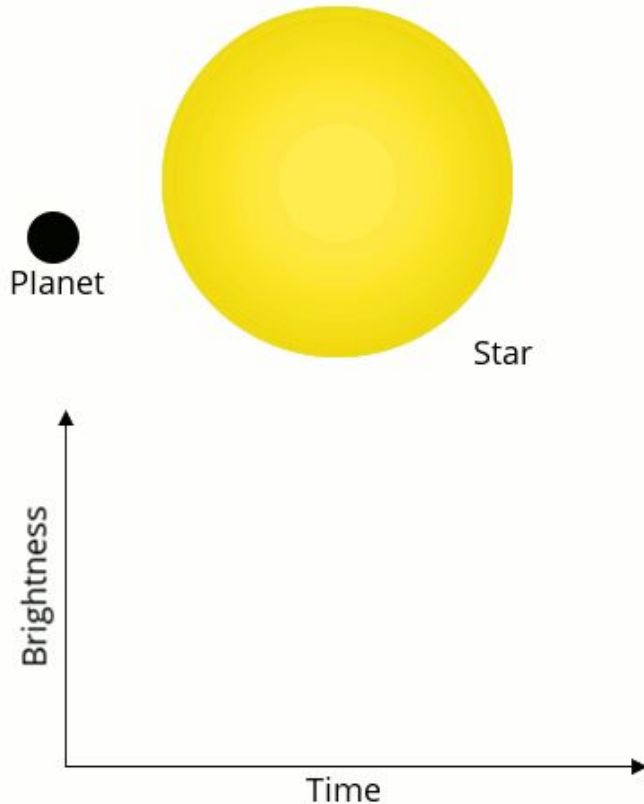
HR 8799 et ses 4 planètes



2009-07-31

20 au

Regarder l'étoile s'éclipser → Transit



Lorsqu'une planète passe devant son étoile cela produit une mini éclipse. La luminosité de l'étoile baisse pendant un certain temps avant de revenir à la normale.

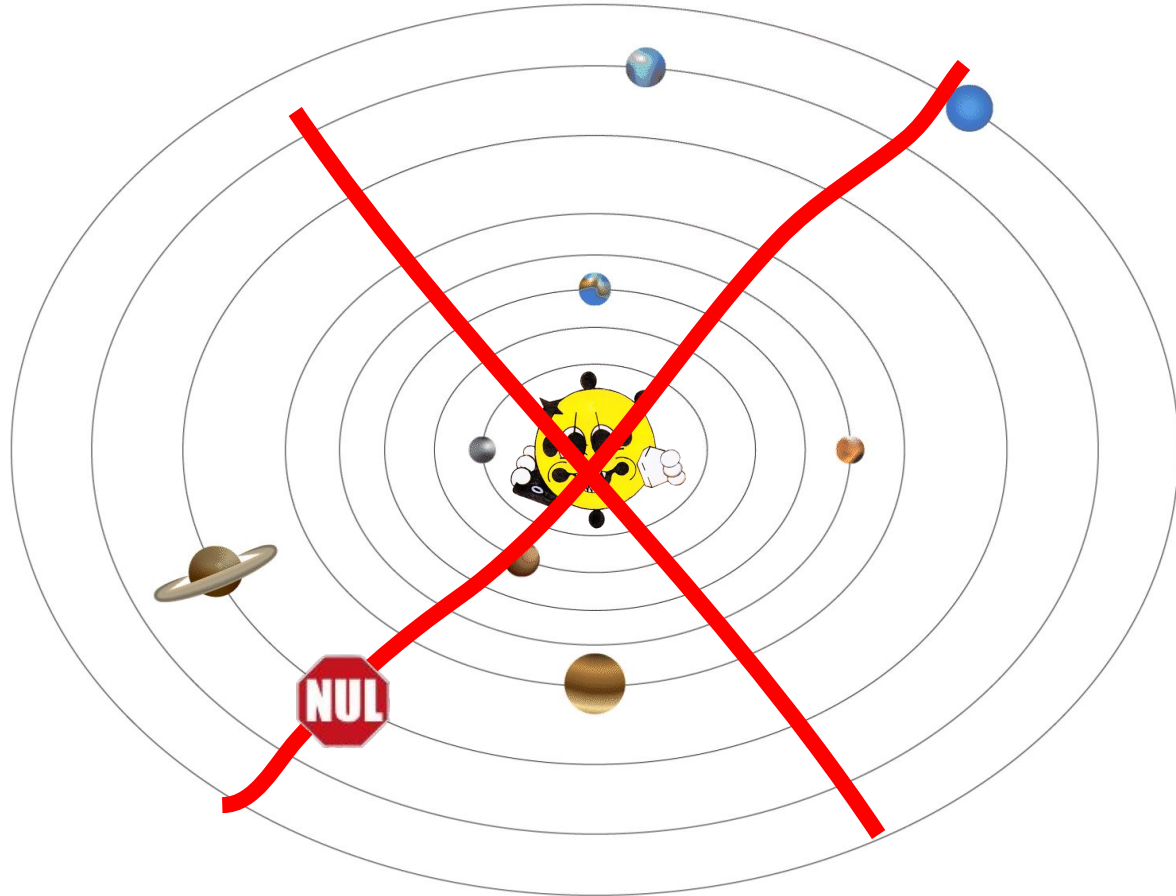
→ Avec un peu de géométrie on peut **déterminer le rayon de la planète** qui est passé devant

C'est LA technique la plus prolifique. Aujourd'hui, $\frac{3}{4}$ des planètes ont été découverte comme cela.

→ On doit littéralement attendre que les astres s'alignent



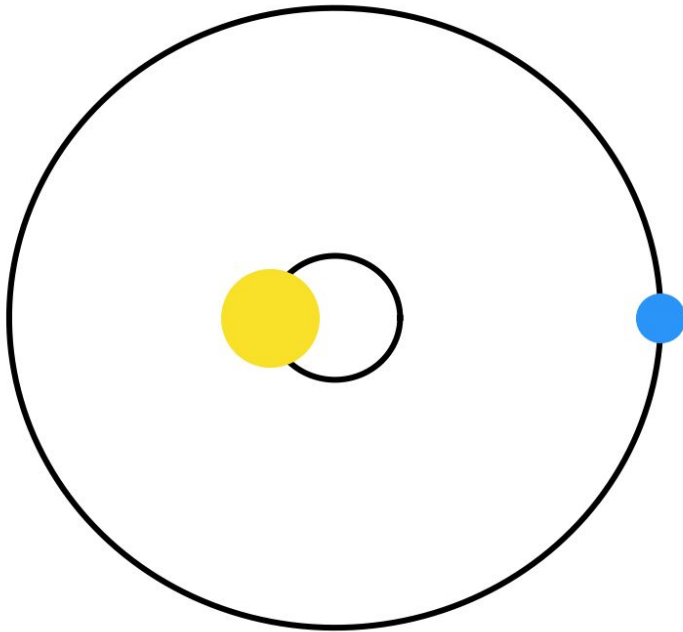
L'influence des planètes sur l'étoile I



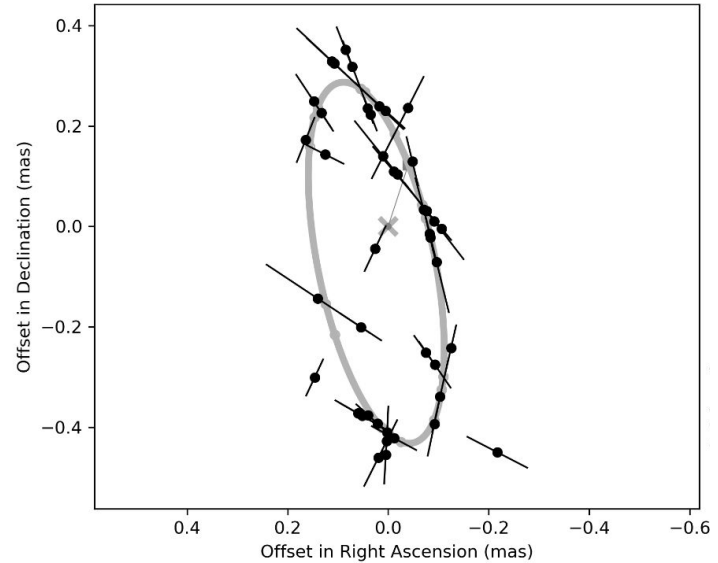
L'influence des planètes sur l'étoile I



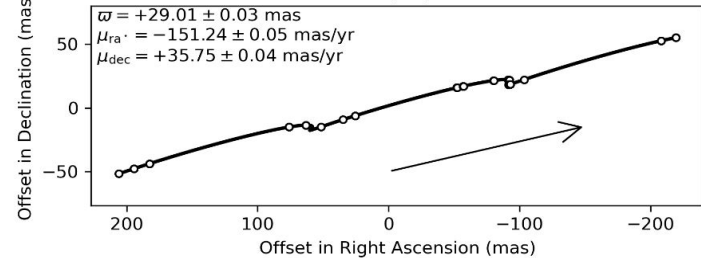
→ l'Astrométrie



Astrometric orbit of HD81040



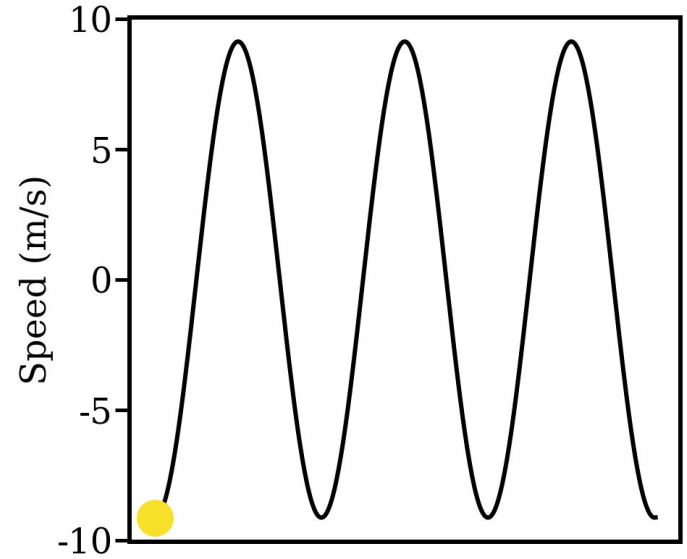
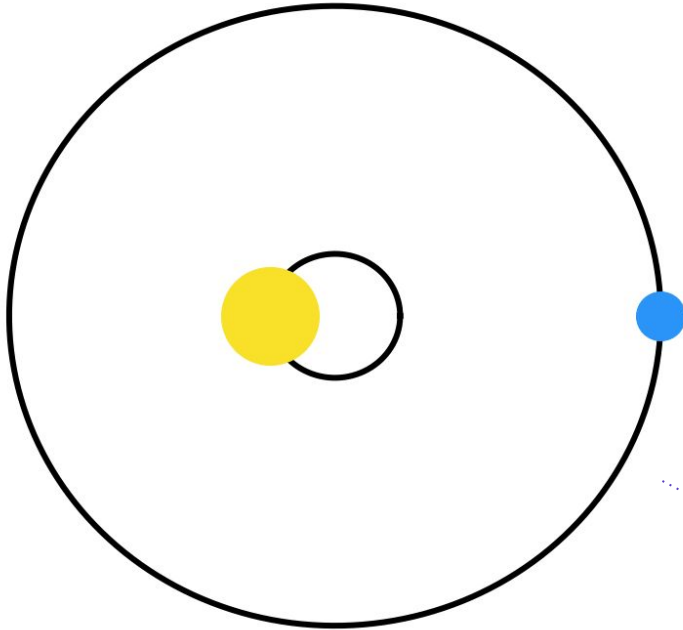
Parallax and proper motion



L'influence des planètes sur l'étoile II



→ les Vitesses Radiales

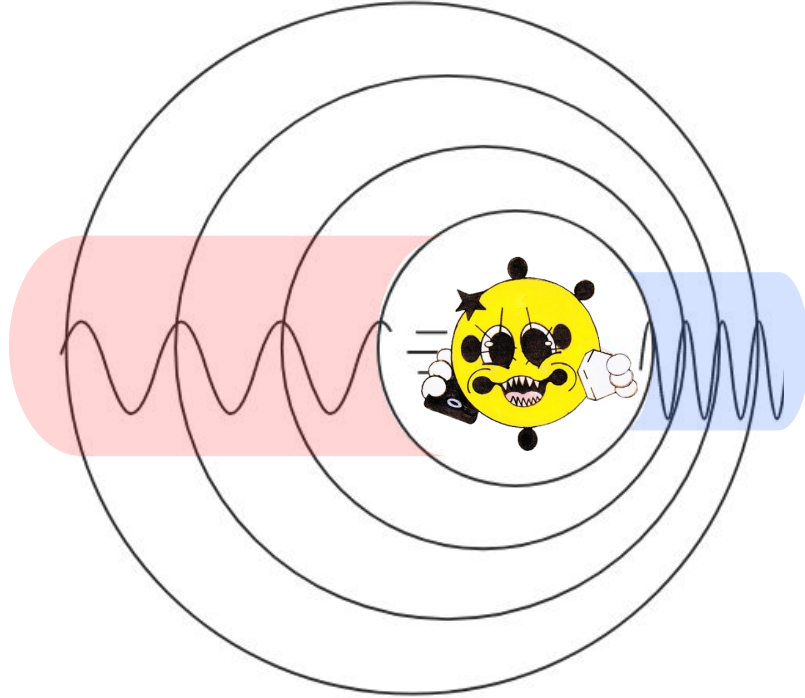


L'amplitude du signal nous donne la masse de la planète



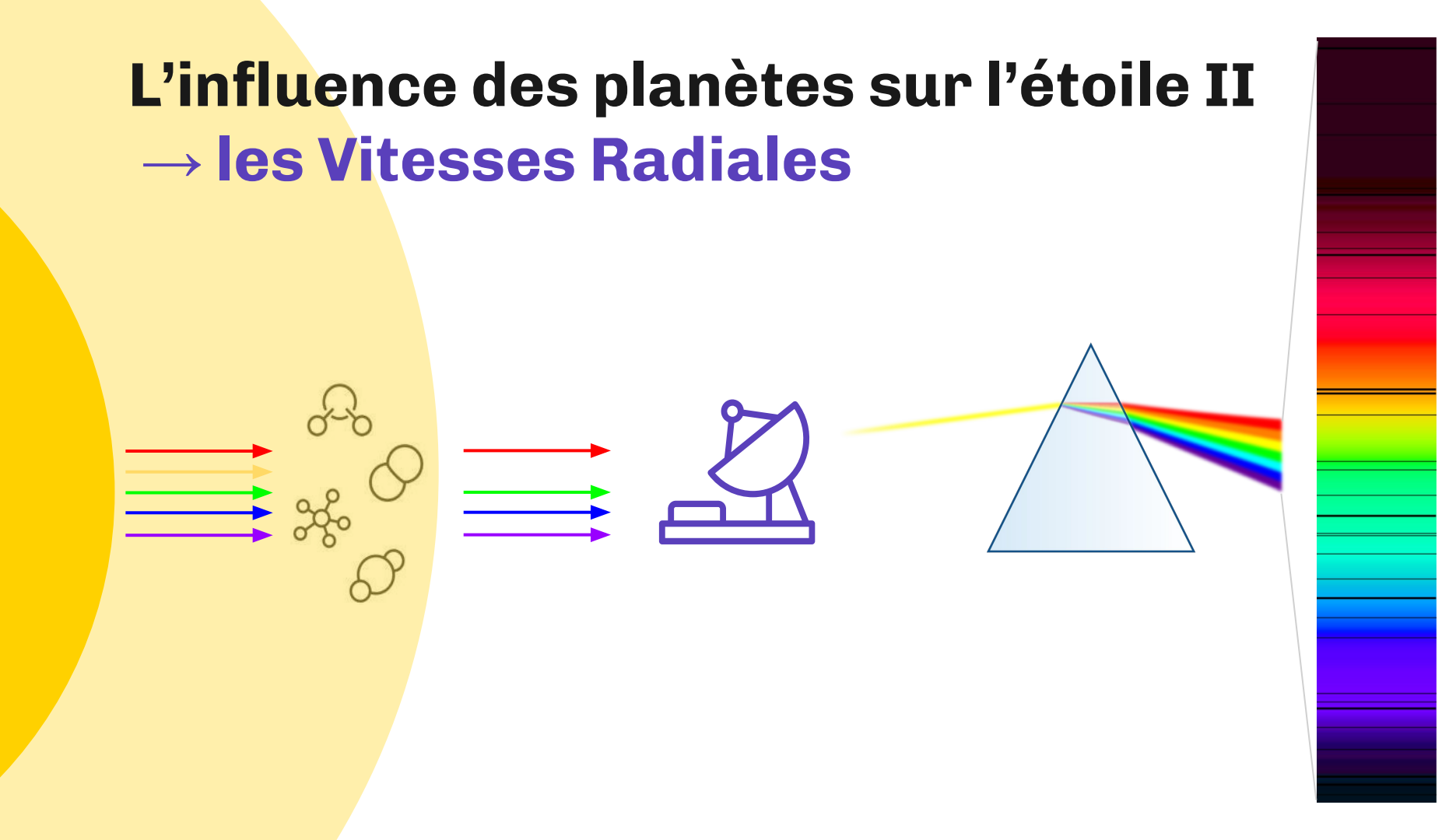
L'influence des planètes sur l'étoile II

→ les Vitesses Radiales



L'influence des planètes sur l'étoile II

→ les Vitesses Radiales

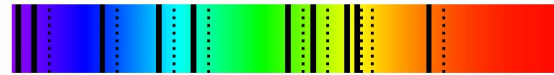
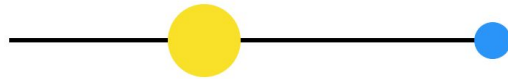
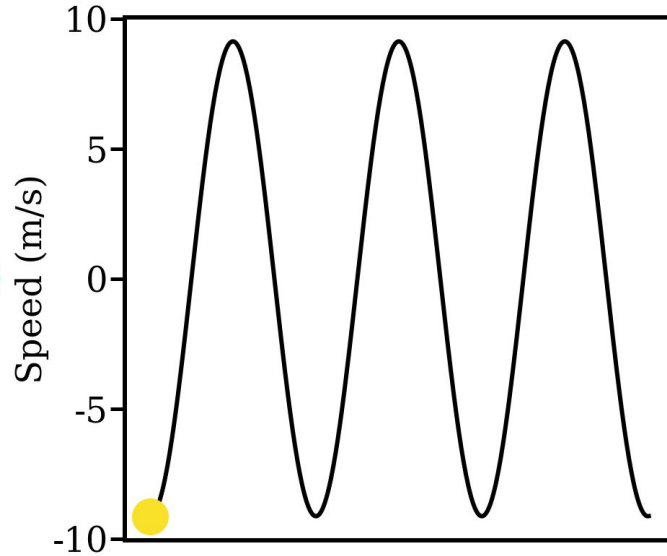
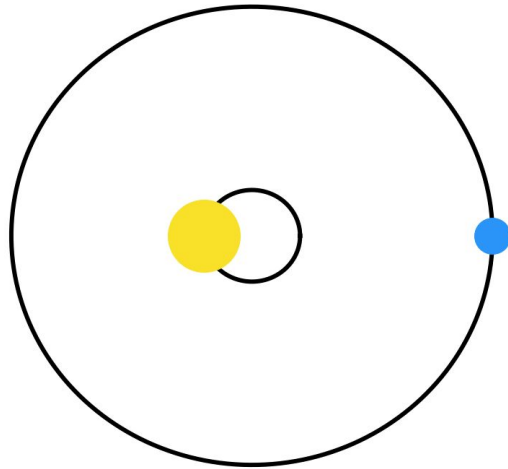


L'influence des planètes sur l'étoile II

→ les Vitesses Radiales

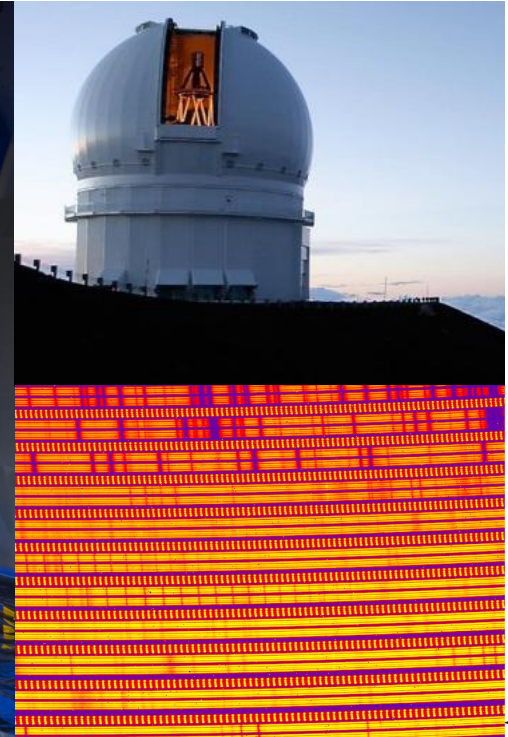
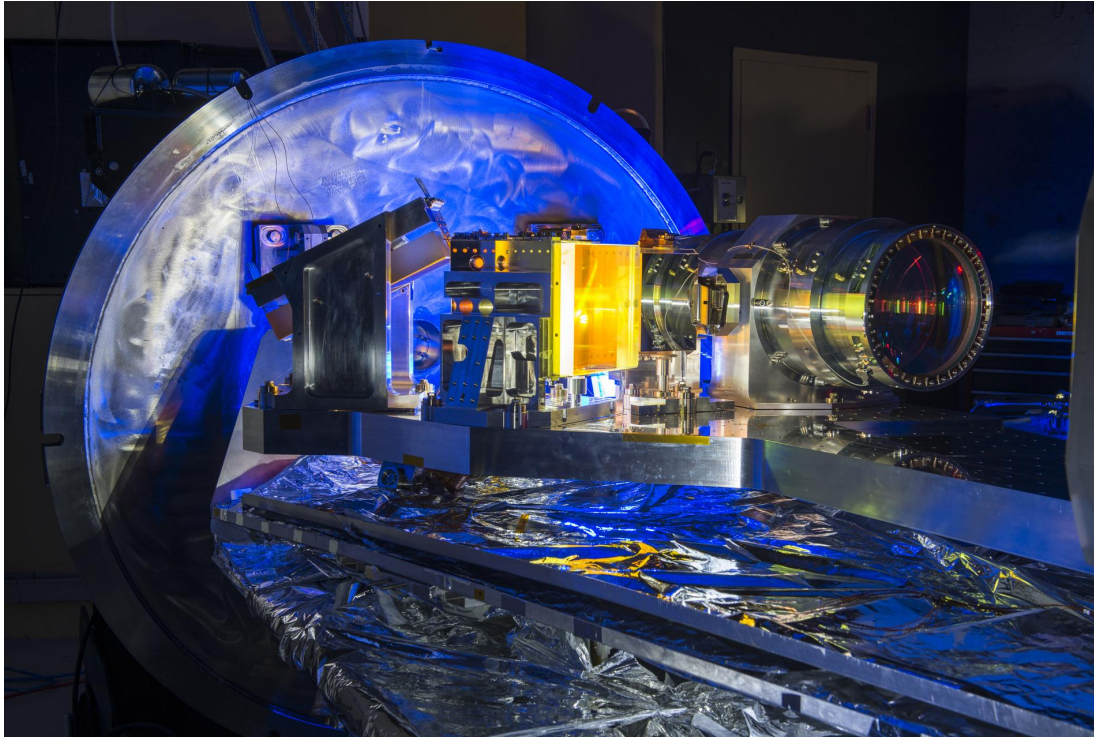


Alysa Obertas (@AstroAlysa)



L'influence des planètes sur l'étoile II

→ les Vitesses Radiales

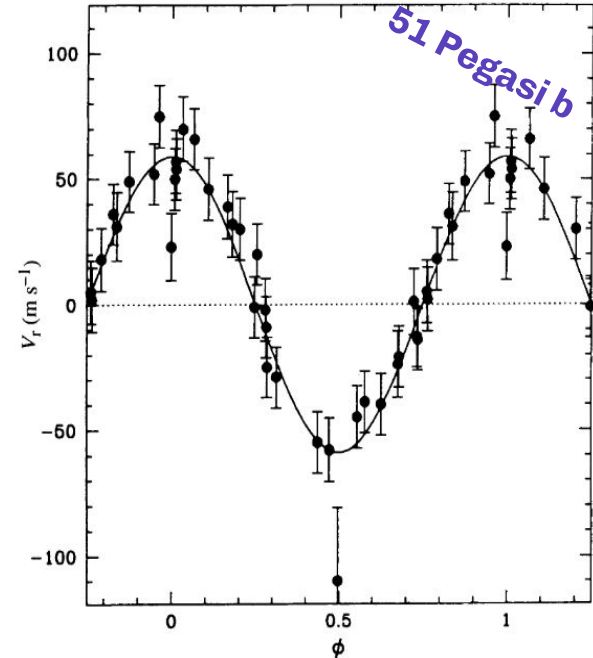


L'influence des planètes sur l'étoile II

→ les Vitesses Radiales



Prix Nobel de physique 2019



Mayor & Queloz (1995)



Les règles pour nommer les exoplanètes ✨

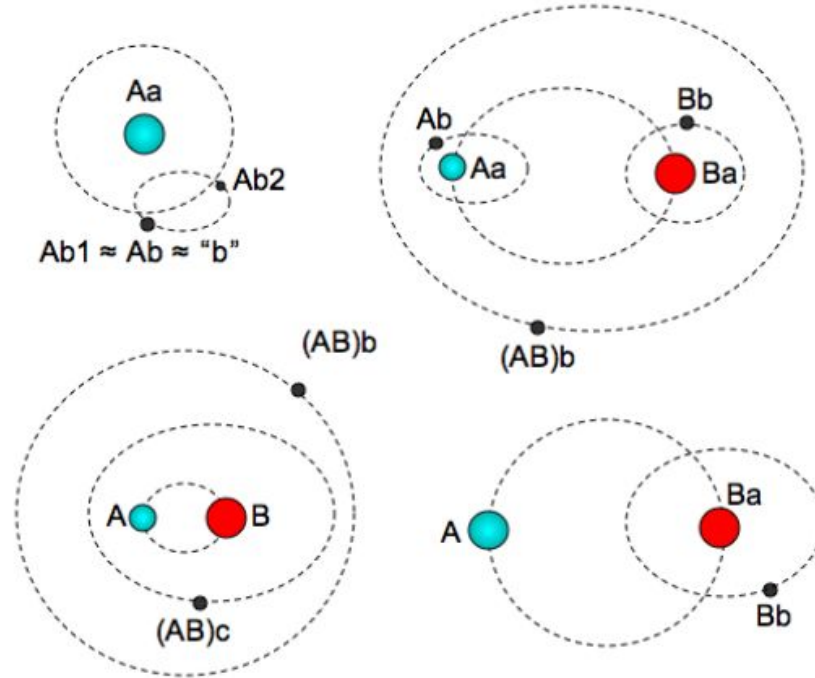
51 Pegasi b

Nom de l'étoile
autour de laquelle
orbite la planète.

Lettre indiquant
dans quel ordre
elle a été trouvée



Les règles pour nommer les exoplanètes ✦

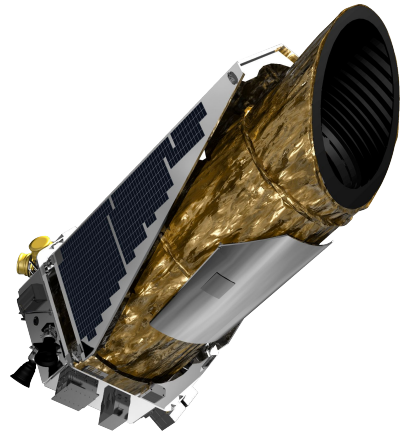


Hessman et al. (2010)

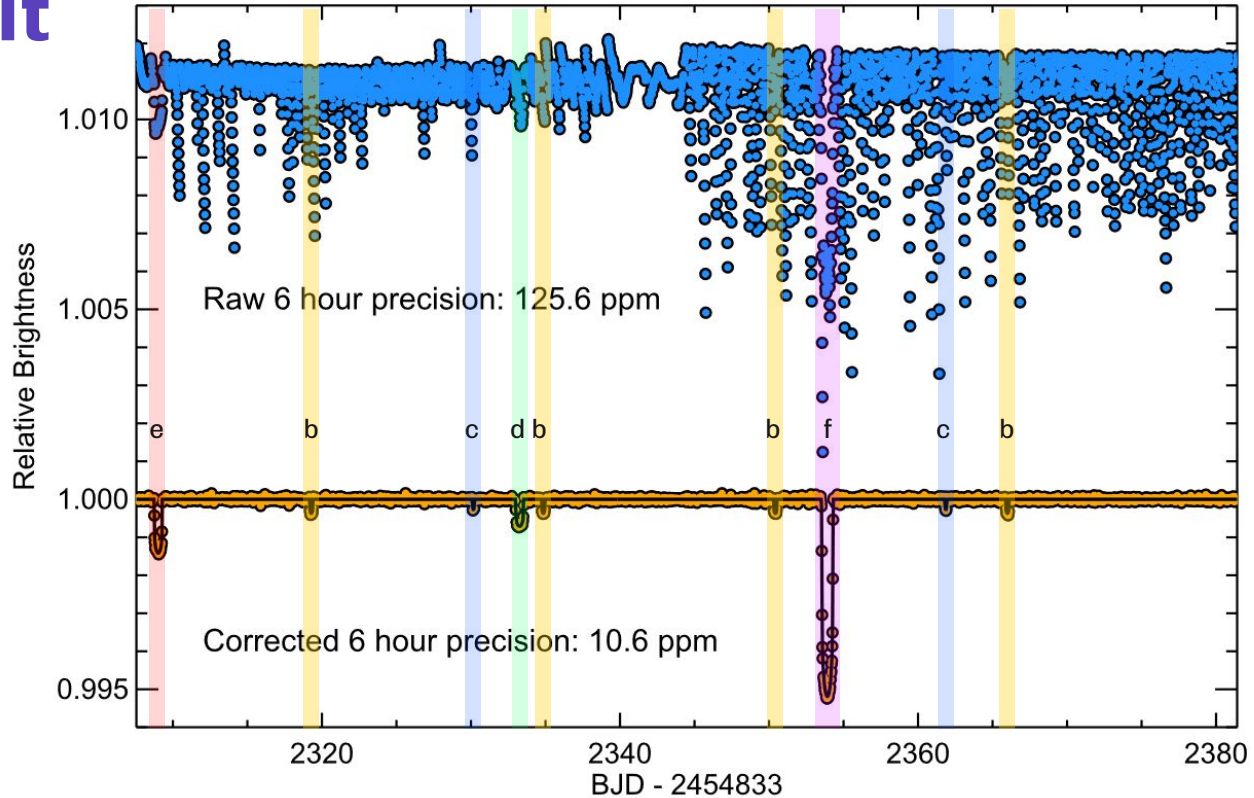


Mise en pratique : le système HIP 41378 ✨

→ Transit



Télescope spatial Kepler

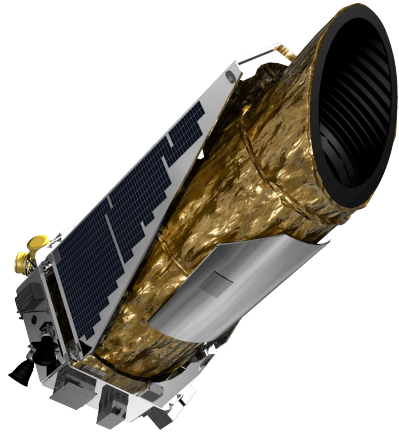


Vanderburg et al. (2016)

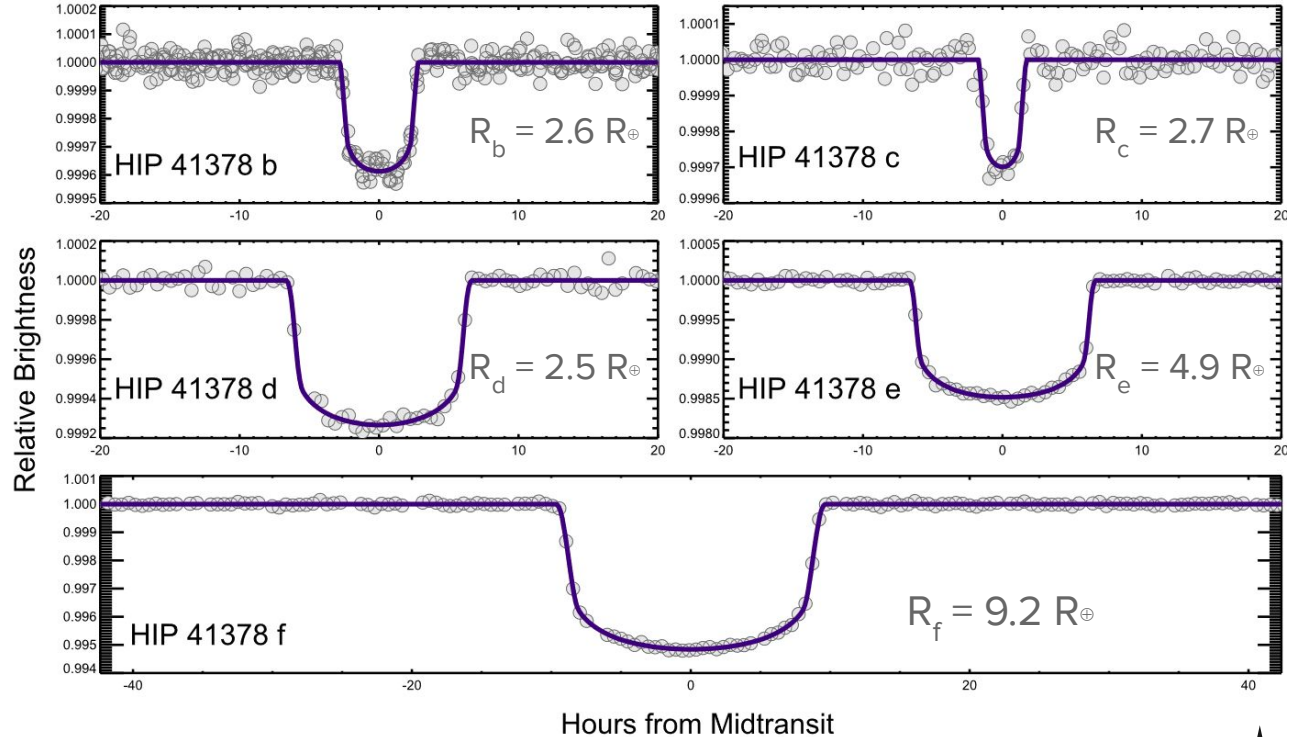


Mise en pratique : le système HIP 41378 ✦

→ Transit



Télescope spatial Kepler

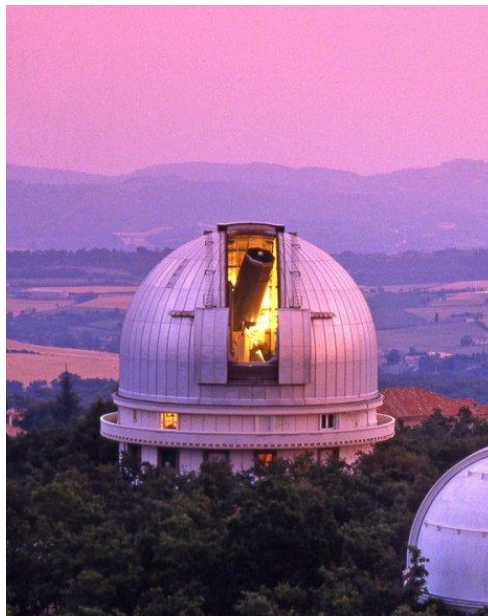


Vanderburg et al. (2016)

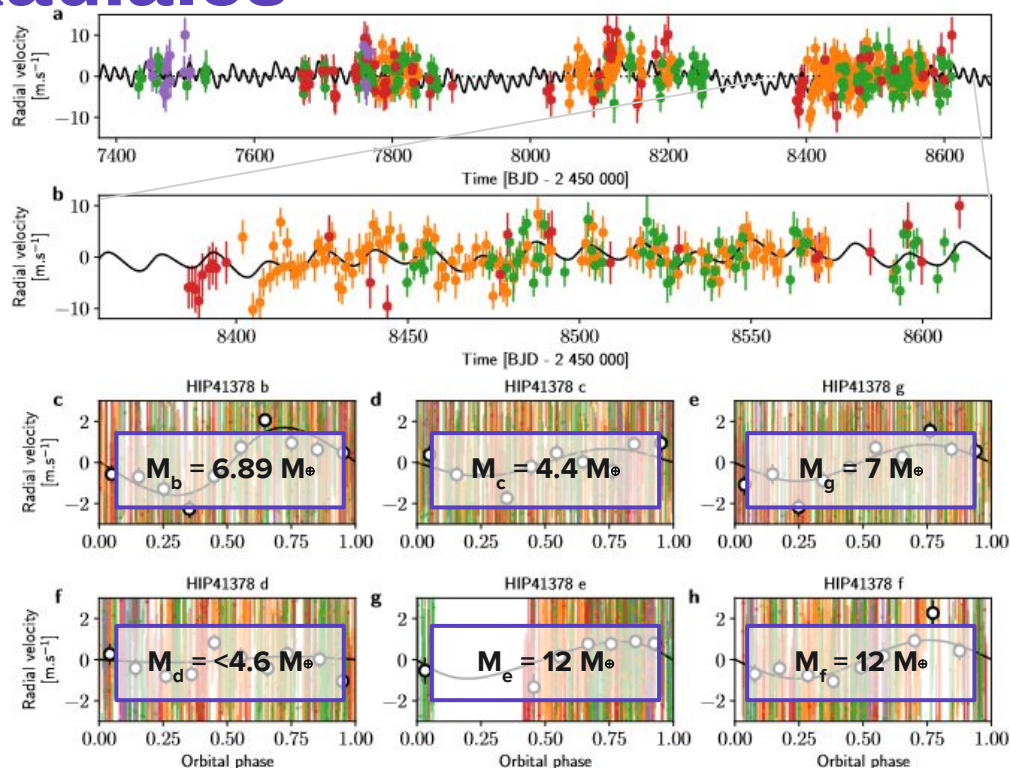


Mise en pratique : le système HIP 41378 ✦

→ Vitesses Radiales



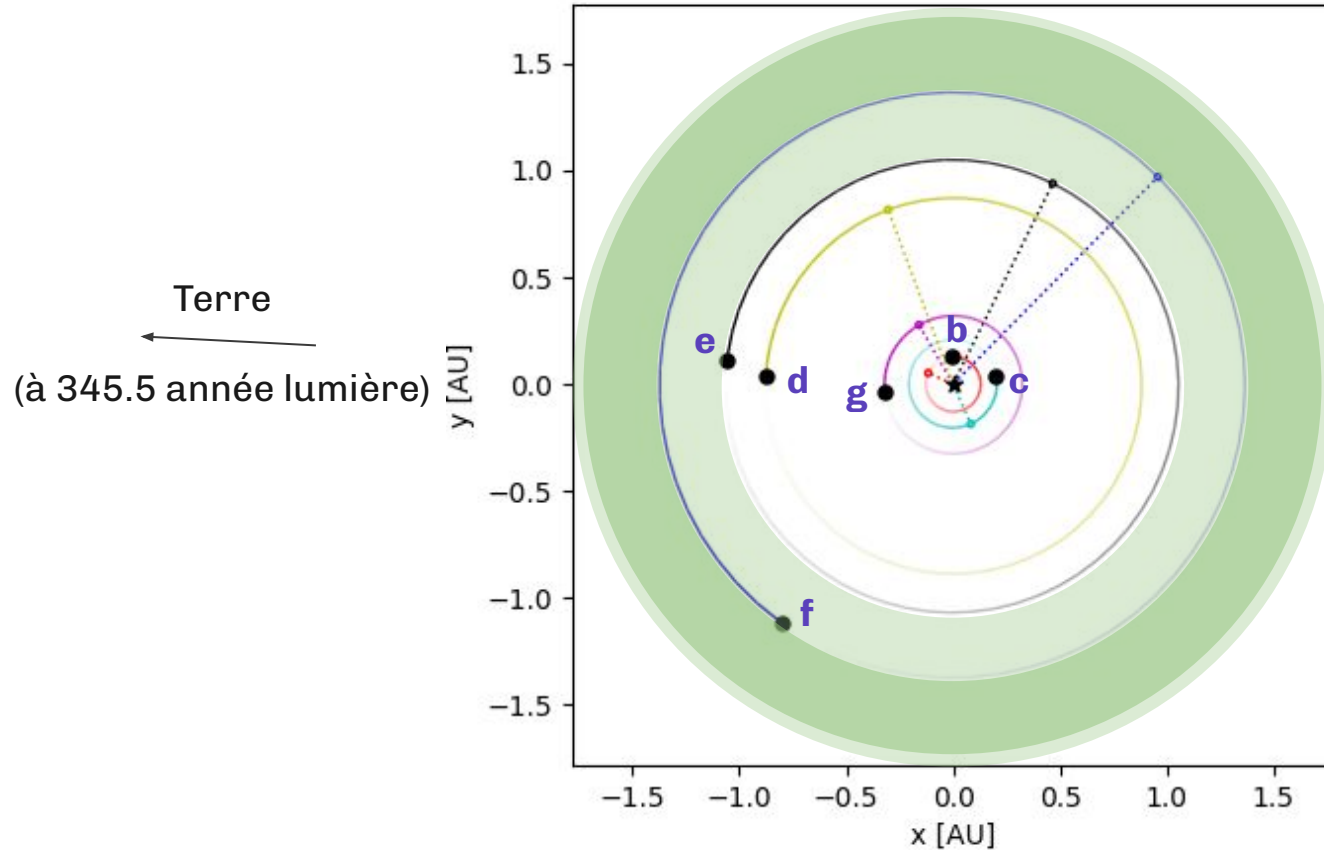
SOPHIE @ T193 - OHP



Santerne et al. (2019)



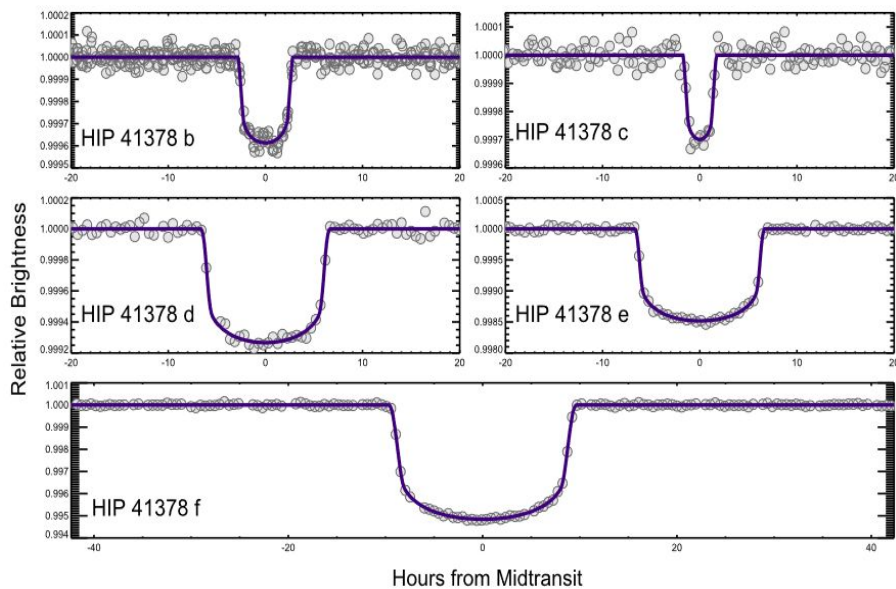
Mise en pratique : le système HIP 41378 ✨



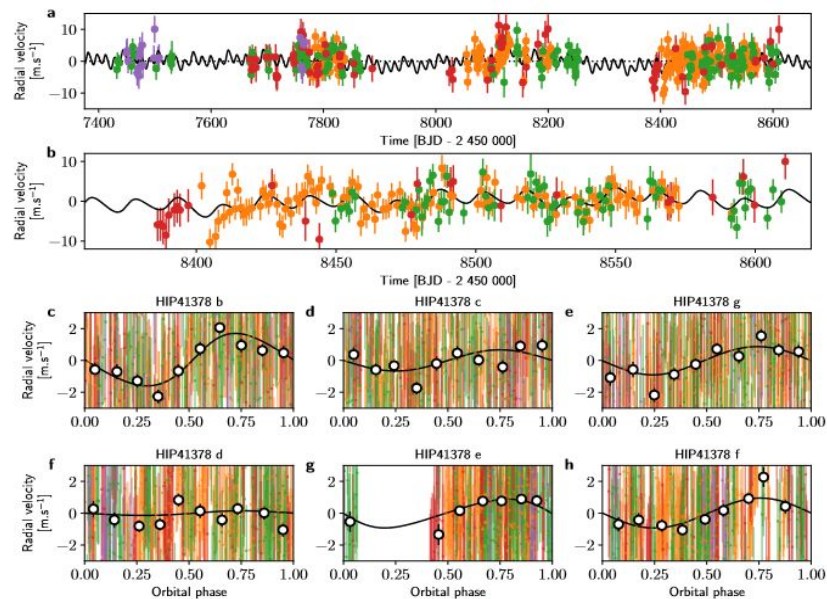
22 Avril 2015
(Transit de la planète e)



Focus sur la planète HIP 41378 f



Rayon de la planète f : $9.2 \pm 0.1 R_{\oplus}$

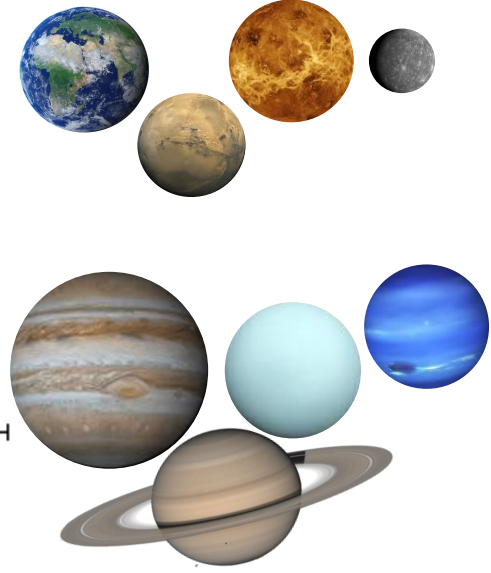
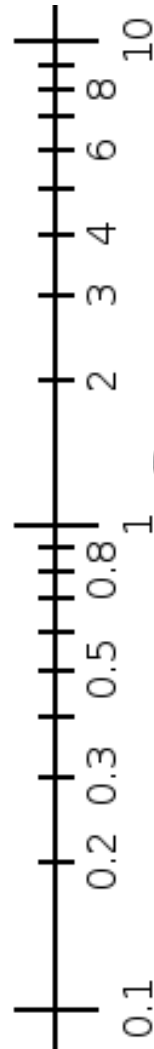


Masse de la planète f: $12 \pm 3 M_{\oplus}$

Densité de la planète f: $\sim 0.09 \text{ g/cm}^3$



Comparons



Densité de la planète f: $\sim 0.09 \text{ g/cm}^3$

A composite image of Saturn and its rings against a starry background. On the left, a bright star with a lens flare is visible. The planet Saturn is shown in the center-right, with its rings extending across the frame. The text 'COMMENT EXPLIQUER CETTE FAIBLE DENSITE?' is overlaid in white, bold, sans-serif font at the bottom right.

**COMMENT EXPLIQUER
CETTE FAIBLE DENSITE?**

Hypothèse I → Une planète chaude ?



Est-ce crédible ?

- Un gaz chaud se détend
- On connaît des planètes chaudes

→ **Jupiters chauds; Planètes jeunes/en formation**

Mais ça ne matche pas ici:

- Le système est relativement vieux, **3.1Gyr**
- La planète est dans une zone tempérée de son étoile



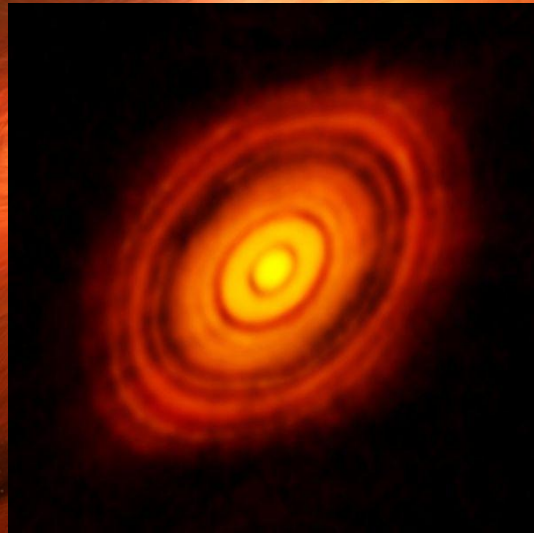
Hypothèse II → Accrétion tardive



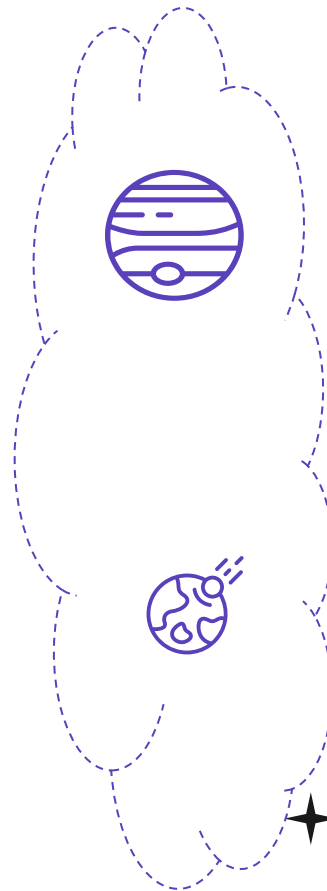
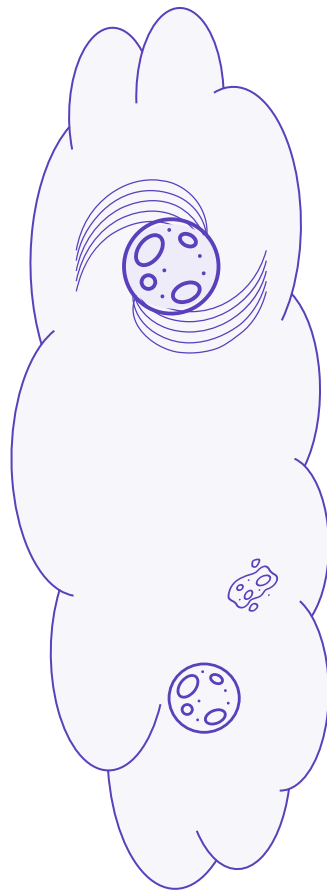
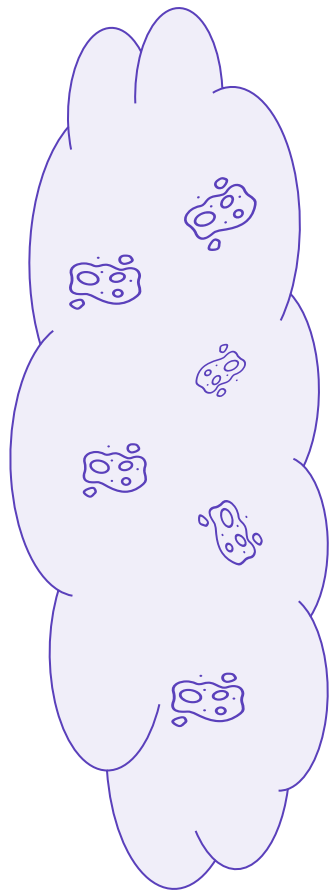
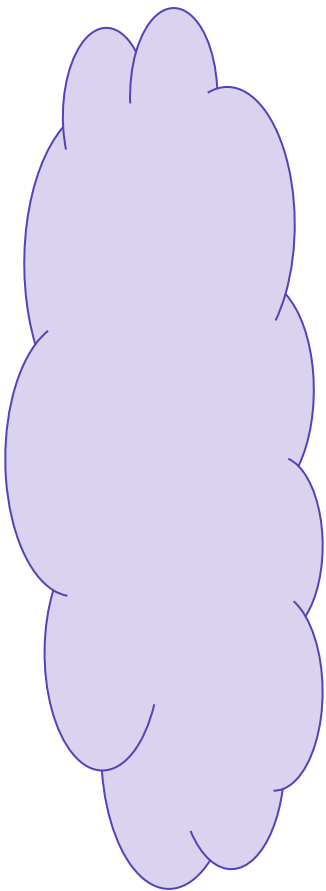
Il y'a 5 milliard d'années

A vibrant, multi-colored nebula with orange, red, and blue hues, set against a starry night sky. The text "Il y'a 5 milliard d'années" is overlaid in white with a blue underline.

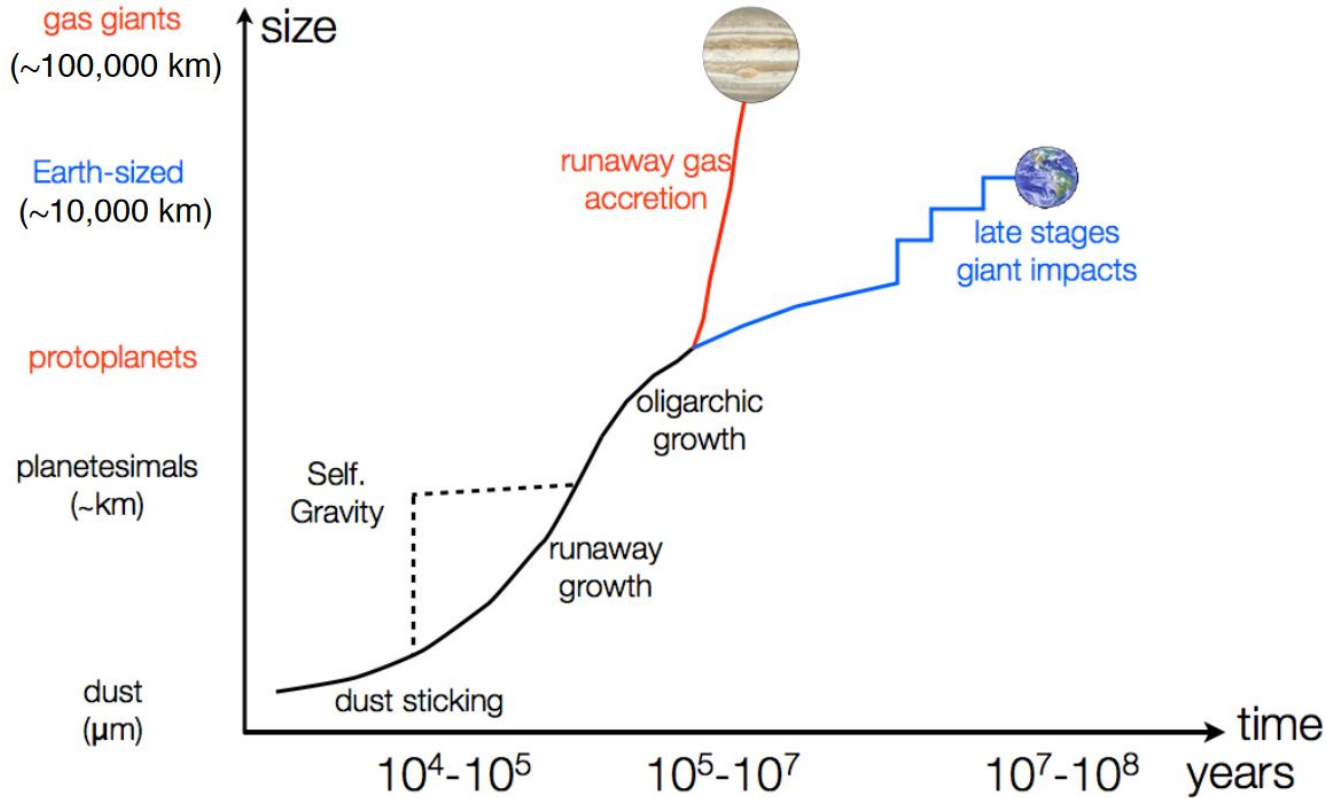
Et l'étoile s'allume !



Le modèle de Nice

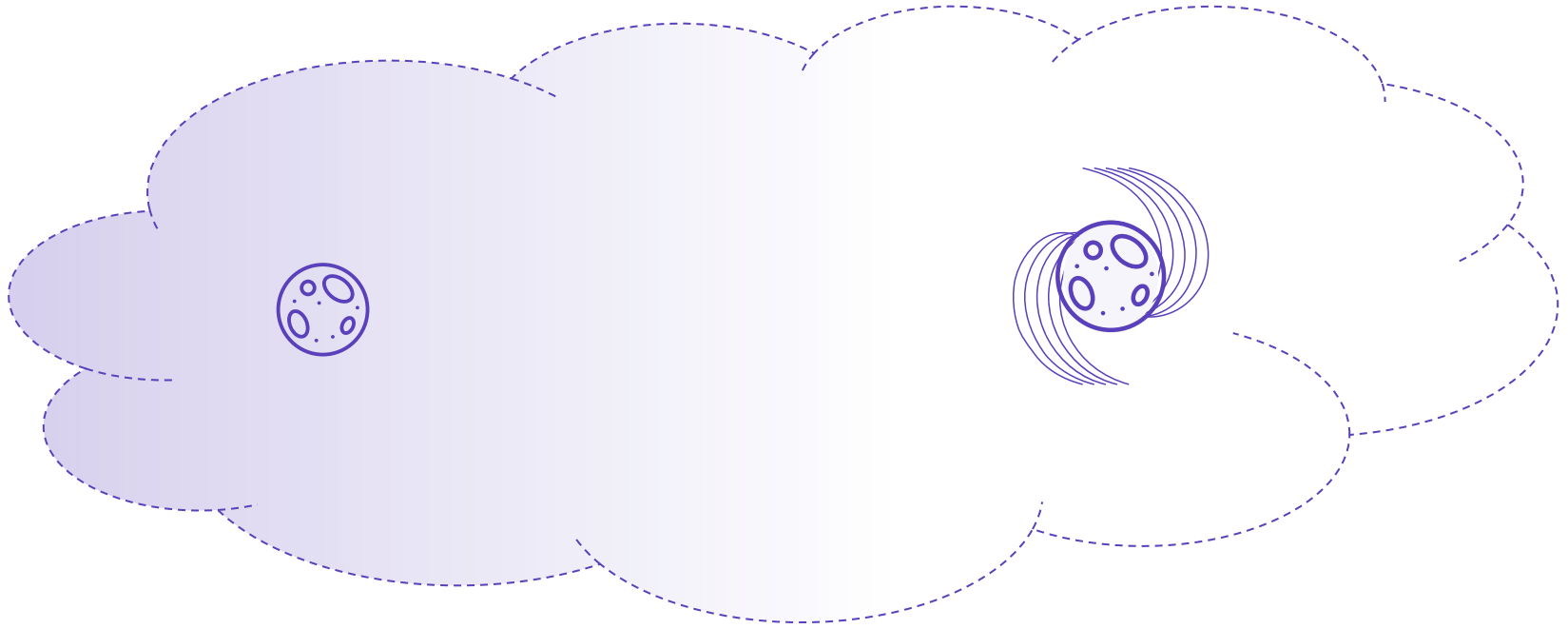


Le modèle de Nice



Lee & Chiang (2016)

Hypothèse II → Accrétion tardive



Hypothèse II → Accrétion tardive

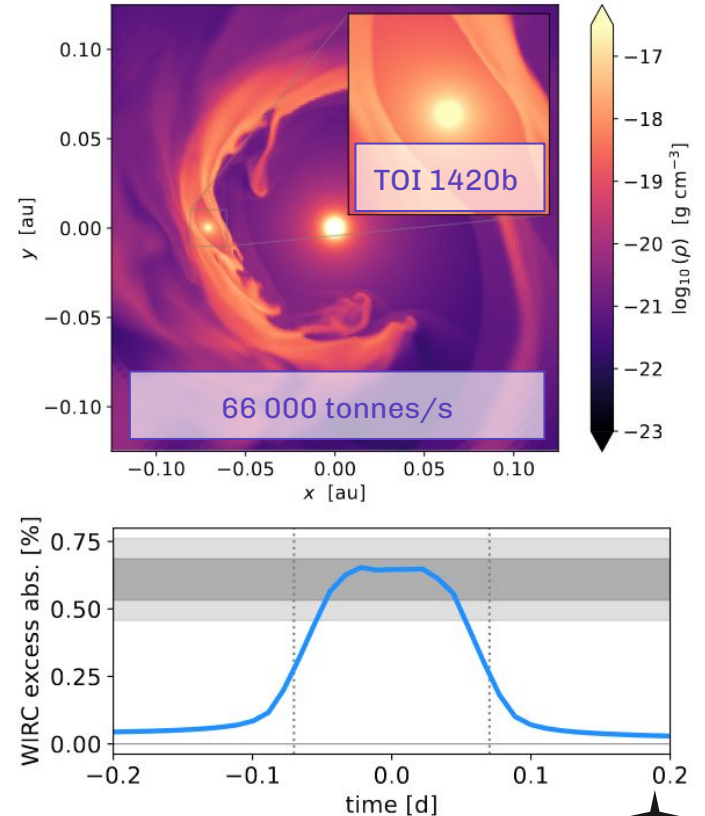


Hypothèse II → Accrétion tardive



Est-ce crédible?

- Le **timing est très serré** mais avec de la chance ou des phénomènes de migration, pourquoi pas.
- Ce genre de planète risque de se faire **souffler son atmosphère** par le vent solaire si la planète est trop légère ($< 10\text{-}15M_{\oplus}$)
- **Pas de signature d'atmosphère** trouvée avec Hubble



Vissapragada et al. (2024)

Hypothèse III :

**Anneau
exoplanétaire**

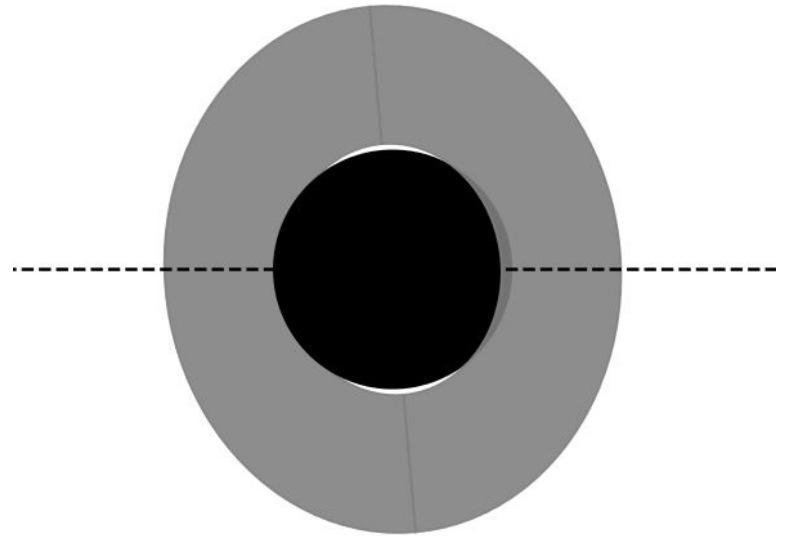


Hypothèse III → Anneau exoplanétaire ✨

La véritable planète ferait la taille d'Uranus avec une densité similaire

Est-ce crédible?

- Les anneaux existent dans le système solaire (**Saturne** et toutes les géantes en ont) et possiblement en dehors (*Kenworthy & Mamajek 2015; cf Vidéo*).



Akinsanmi et al. (2020)



Modelling Giant Extrasolar Ring Systems in Eclipse and the Case of J1407b: Sculpting by Exomoons?

2007-03-31

M.A. Kenworthy and E.E. Mamajek

To be published in
the Astrophysical Journal

The star J1407

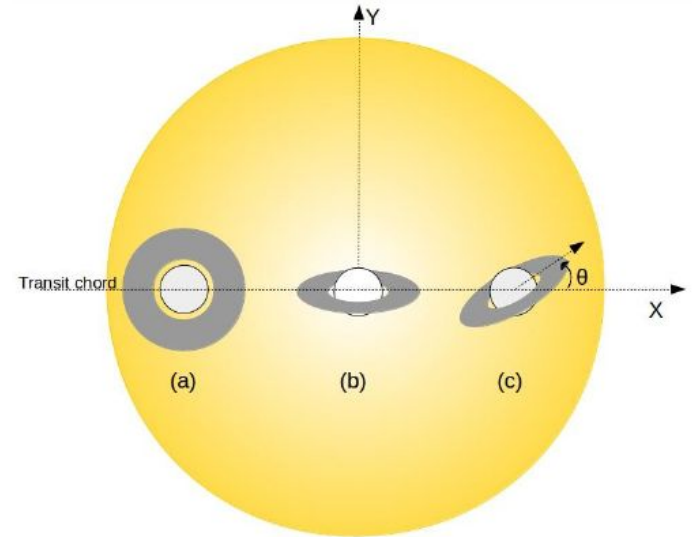


Hypothèse III → Anneau exoplanétaire ✦

La véritable planète ferait la taille d'Uranus avec une densité similaire

Est-ce crédible?

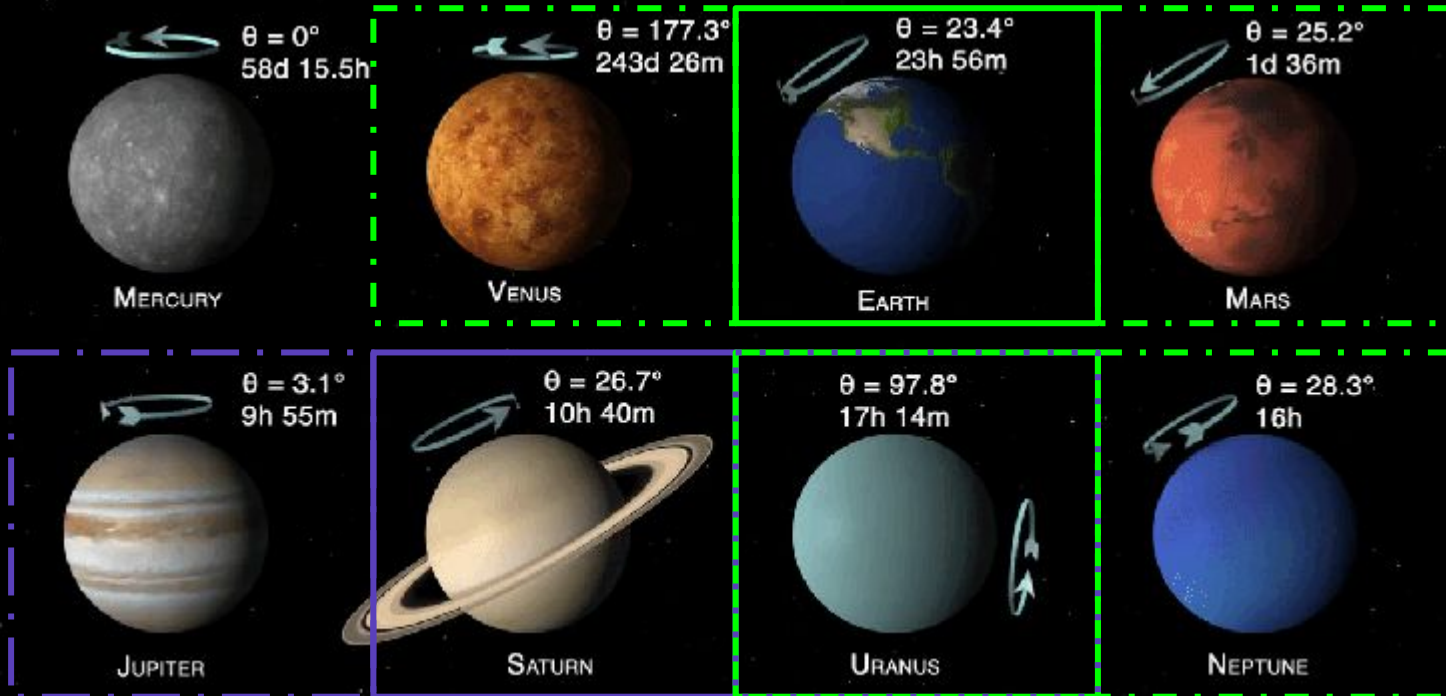
- Les anneaux existent dans le système solaire (**Saturne** et toutes les géantes en ont) et possiblement en dehors (*Kenworthy & Mamajek 2015; cf Vidéo*).
- Mais dans le cas d'HIP 41378 f, il serait dans une **configuration très singulière** qu'il faut expliquer



Akinsanmi et al. (2020)



L'inclinaison des planètes du système solaire



MÉCANISME DE RÉSONANCES SPIN-ORBITE SÉCULAIRES



Qu'est-ce qu'une **résonance** ?



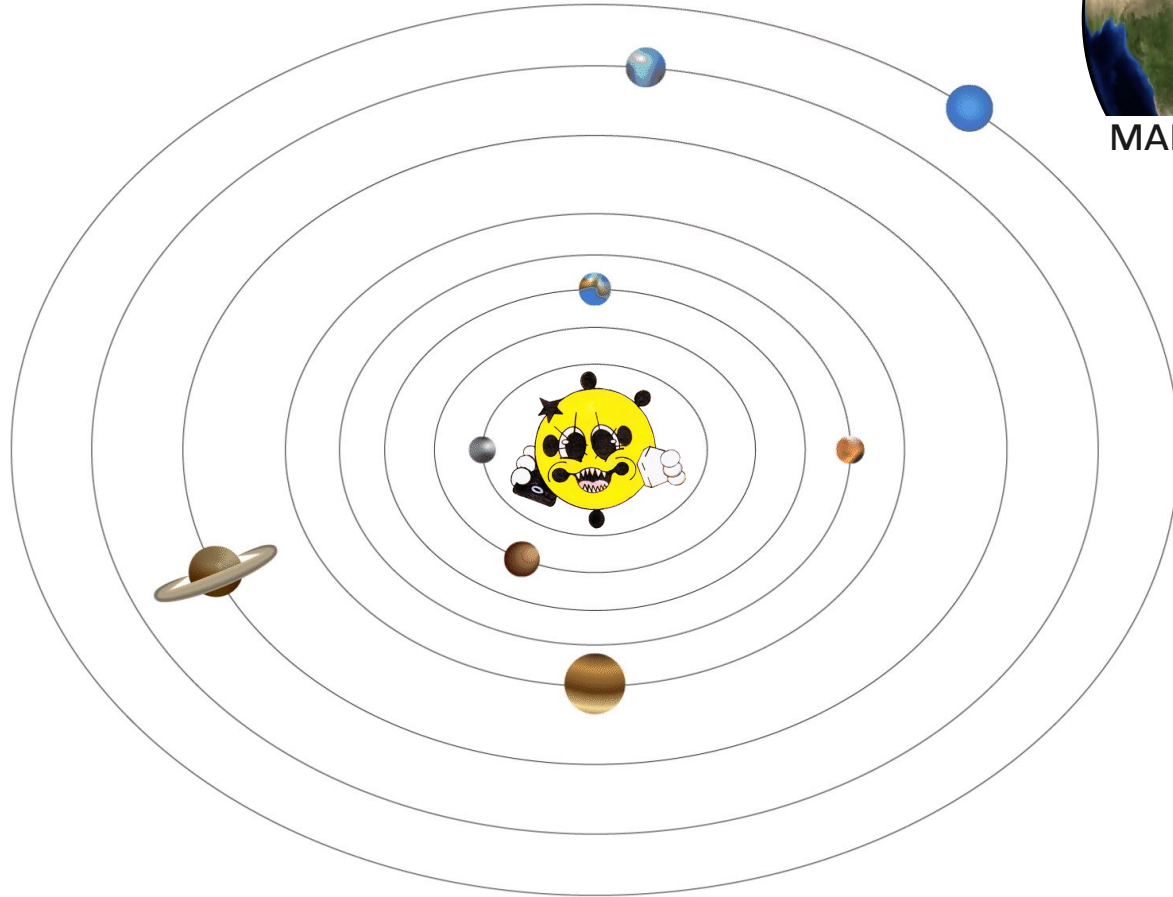
Spin → Rotation des planètes



Orbite → Révolution des planètes

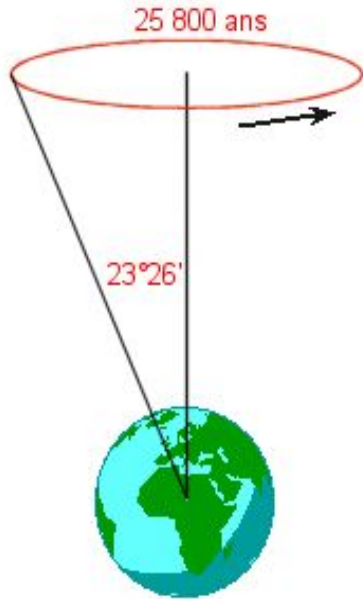


MANON, EXPLOSION !!!



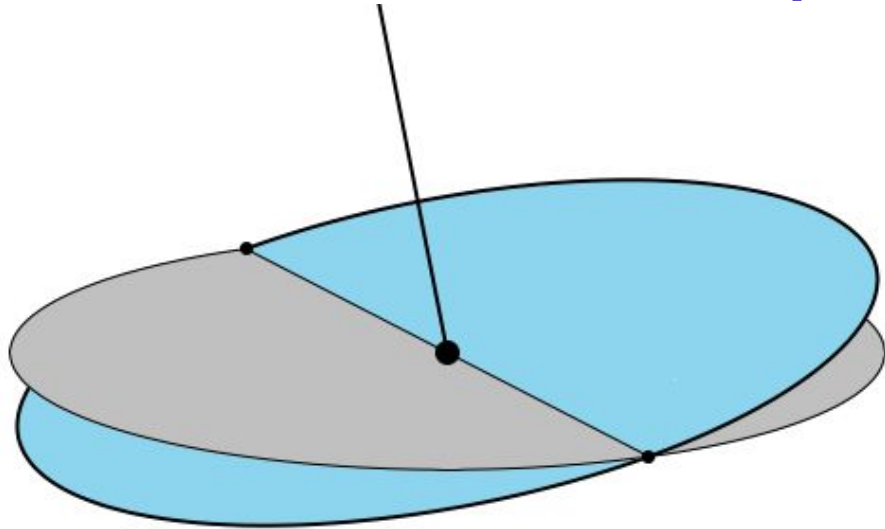
Mouvement séculaire de l'axe de Spin

→ Précession des équinoxes

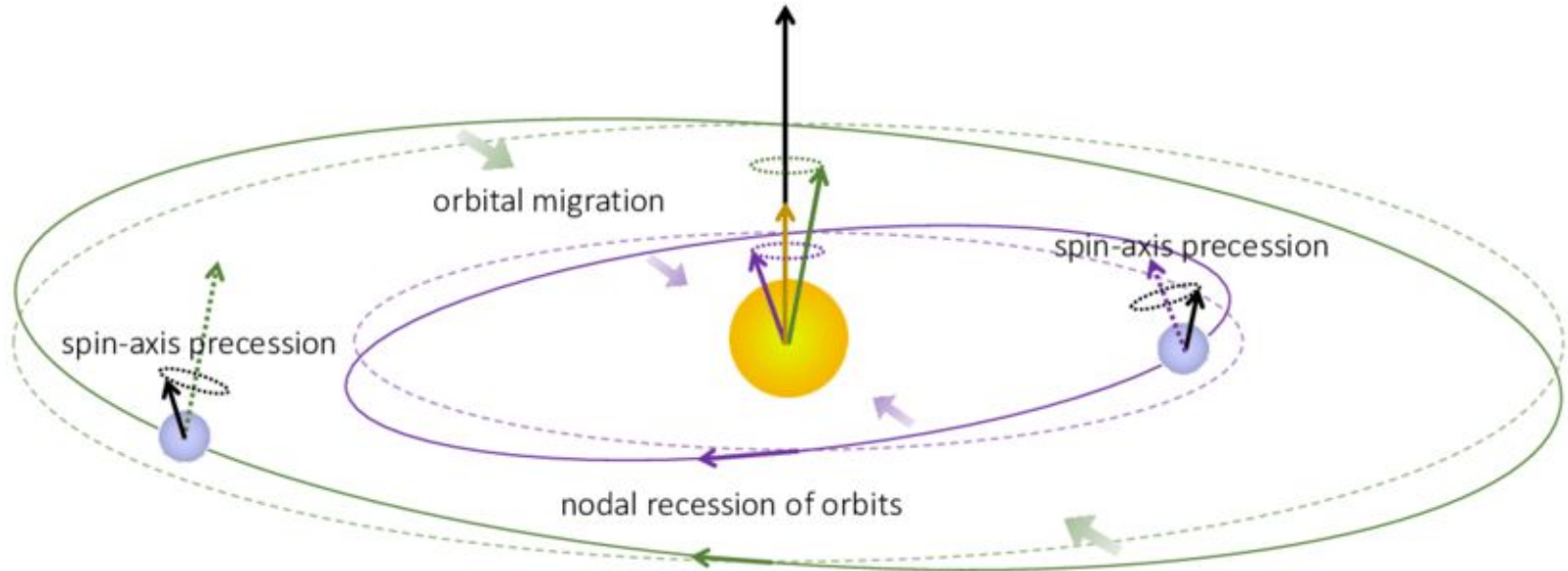


Mouvement séculaire de l'orbite

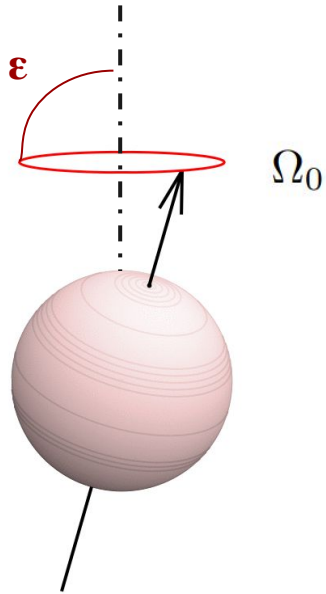
→ **Précession nodale/orbitale**



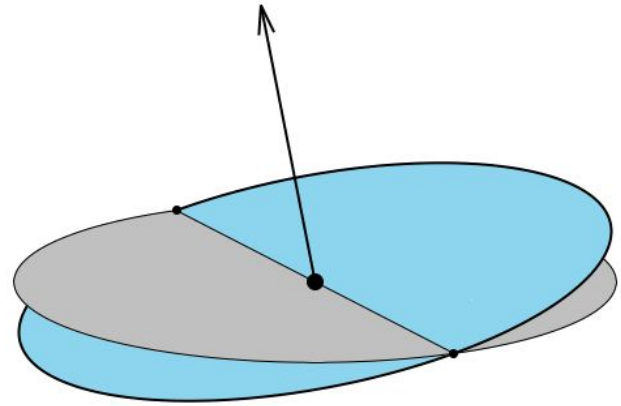
Résonance spin-orbite



Résonance spin-orbite



$$\Omega_0 = \alpha \text{Forme-Structure} \cos \epsilon$$

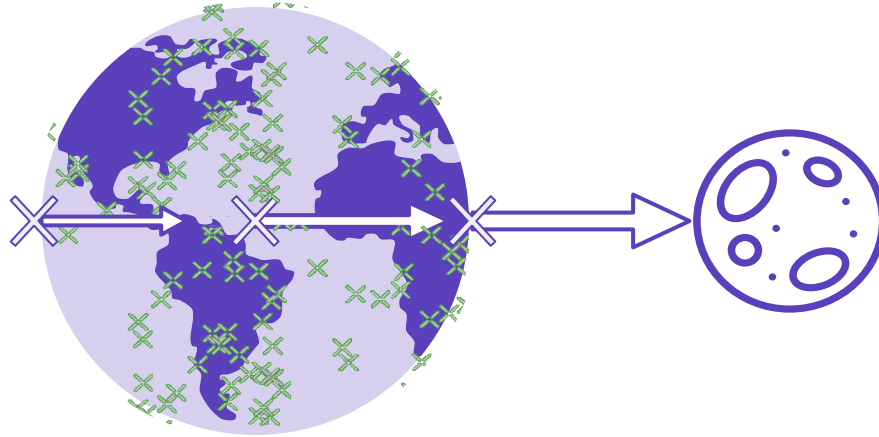


Déterminé par la structure du système planétaire
(Nombre de planètes, leurs positions etc..)

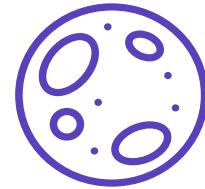
Résonance spin-orbite → Influence d'une lune massive



Les forces de marées



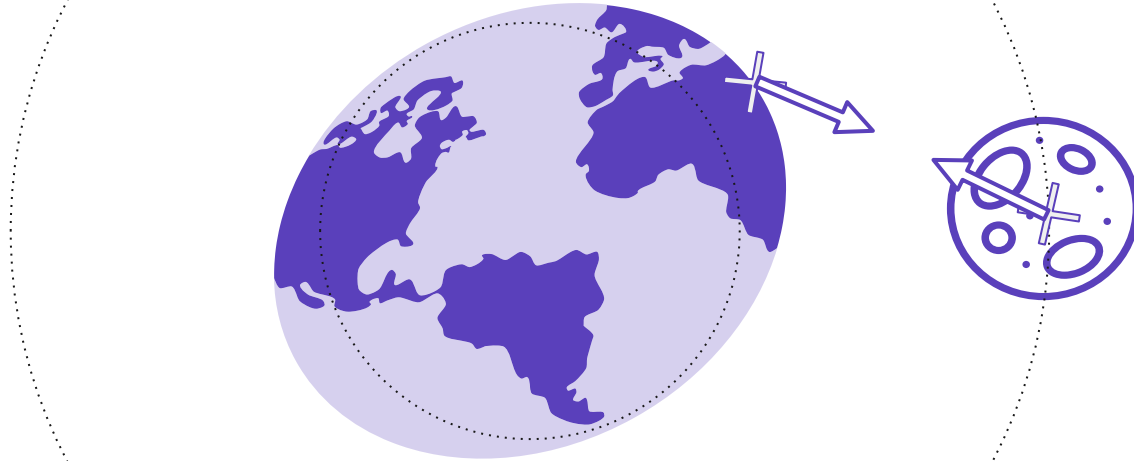
Les forces de marées



La forme et la structure de la planète va changer !



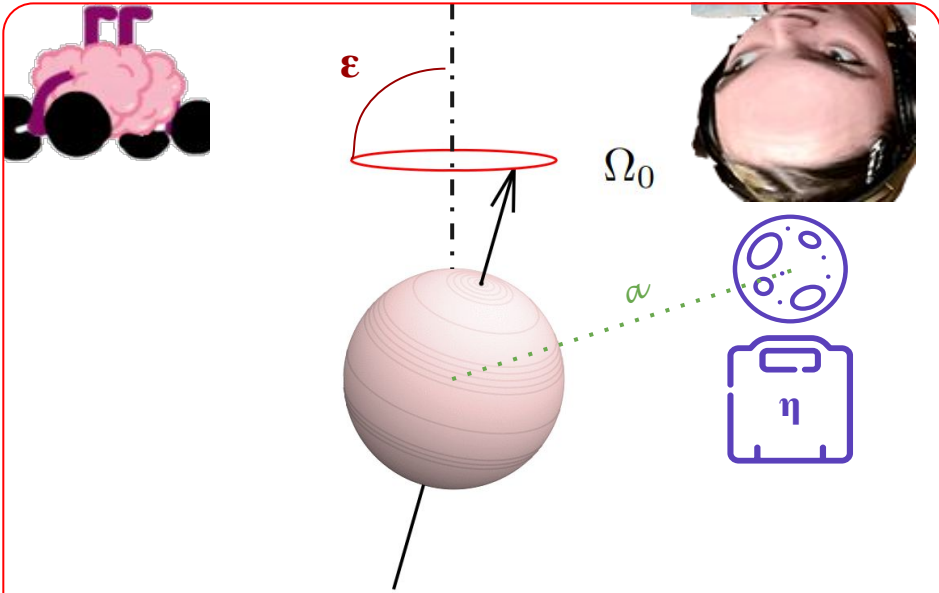
Les forces de marées



Une lune massive, par force de marée, peut migrer !
Ce faisant elle change également la période de rotation de la planète

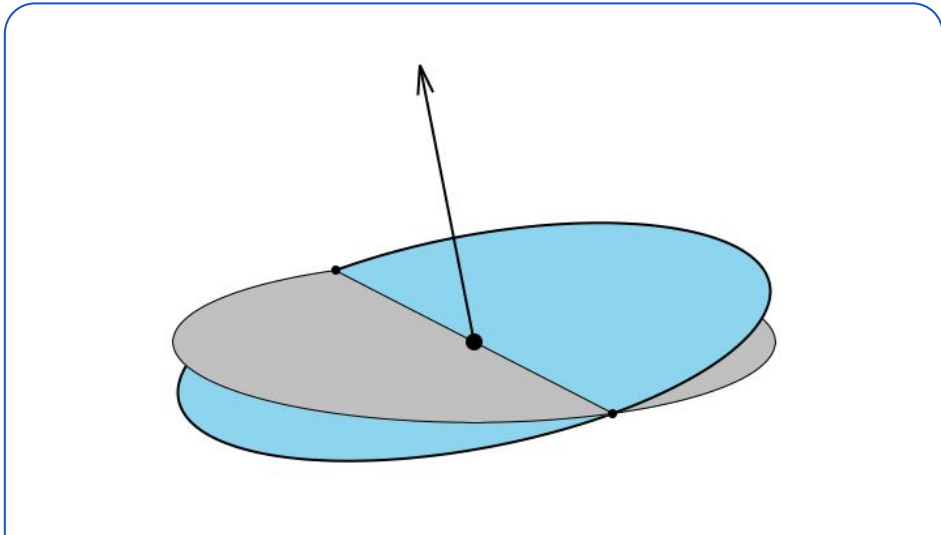


Résonance spin-orbite → Influence d'une lune massive

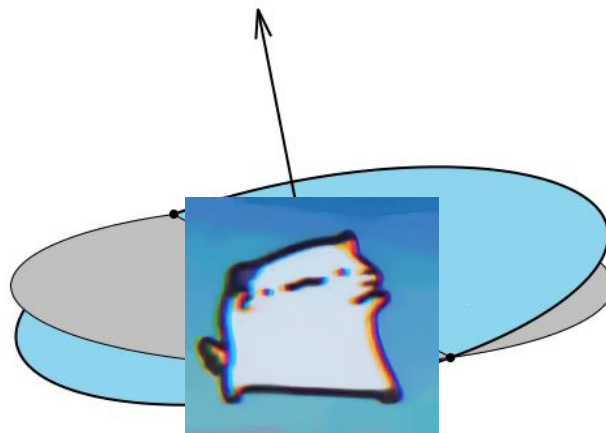
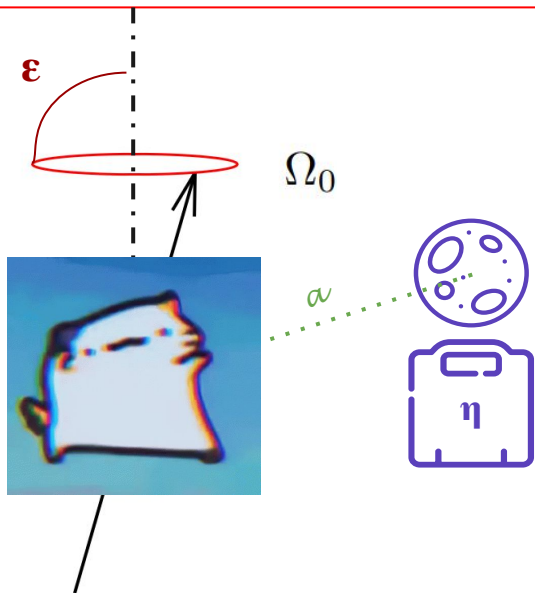


$$\Omega_0 \rightarrow \alpha \left(1 - \frac{a^2}{r_{\text{idem}}^2} \right)^{-3/2} \left(\cos \epsilon + \frac{a^2 \sin(2\epsilon)}{2 \sin \epsilon} \right)$$

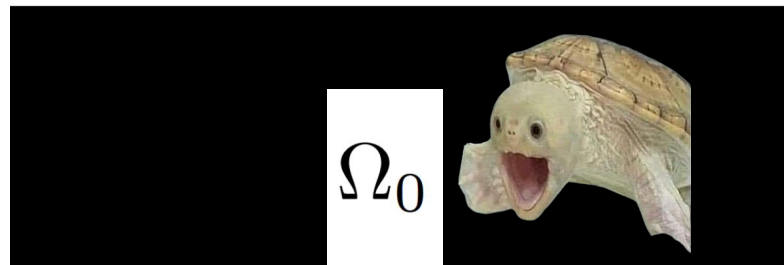
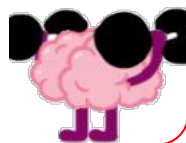
Balek Pareil



EUuuuuuh EN GROS



$$\Omega_0 = \frac{\eta \times a}{\varepsilon}$$

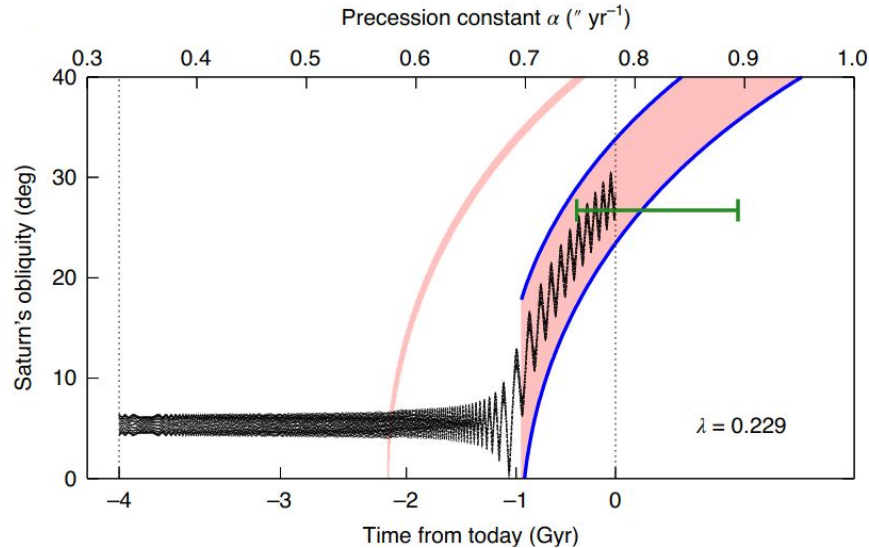


Mécanisme de résonance spin-orbite séculaire

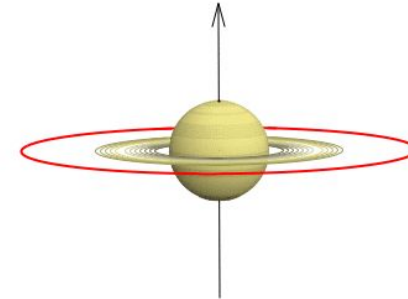


orbite de Titan — (redimensionnée d'un facteur $\sim 1/2$)

Le repère tourne avec S_8 .



Saillenfest et al. (2021)



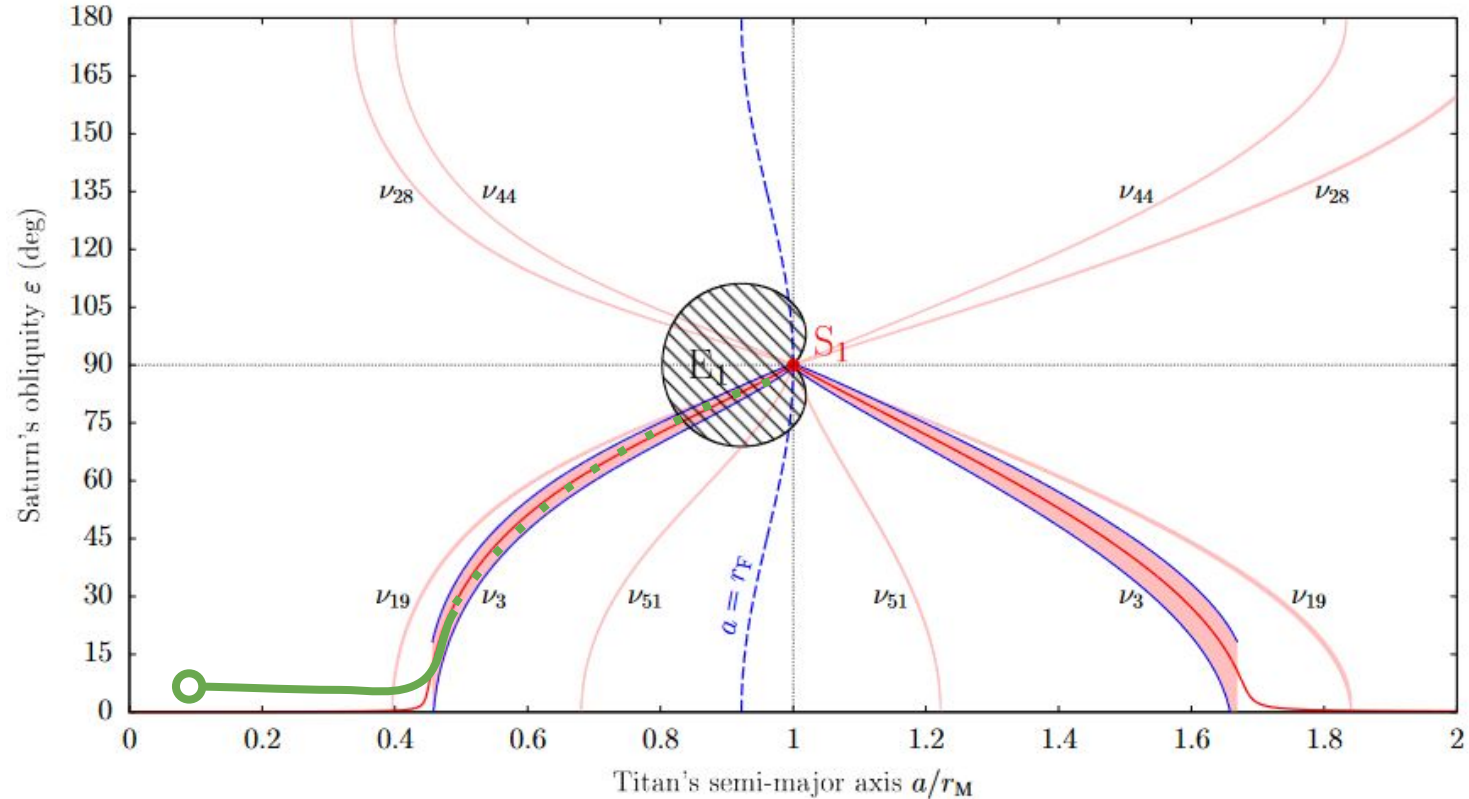
- Début : il y a environ 4 Ga
- Entrée en résonance : il y a environ 1 Ga
- Fin : aujourd'hui



Mécanisme de résonance spin-orbite séculaire



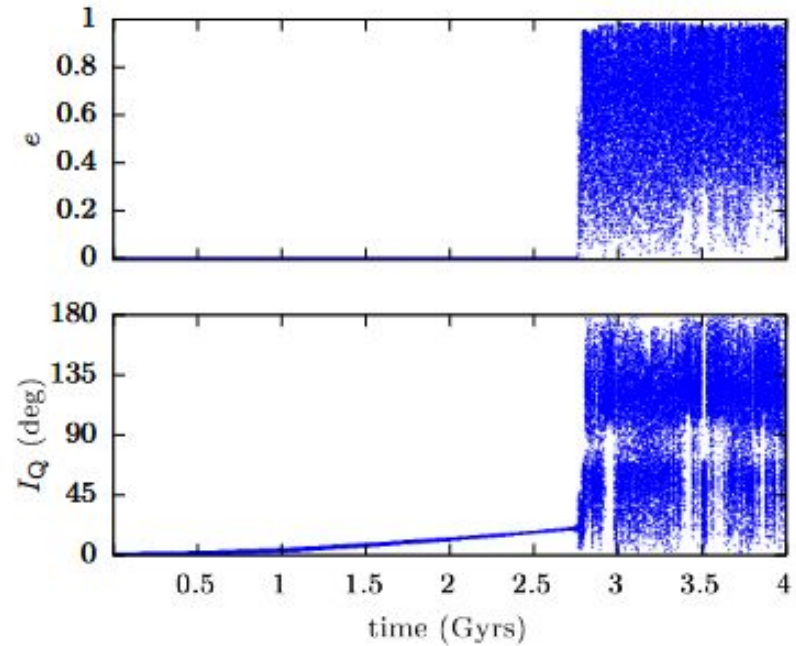
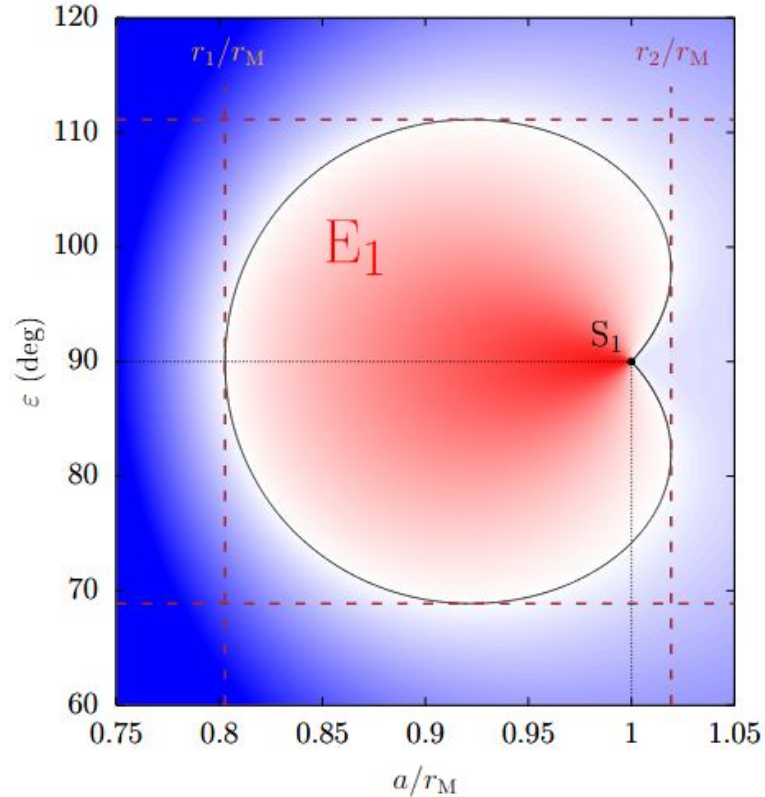
Saillenfest et al. (2021)



Mais ... et l'anneau dans tout ça ???



Qu'advient-il de la lune ?



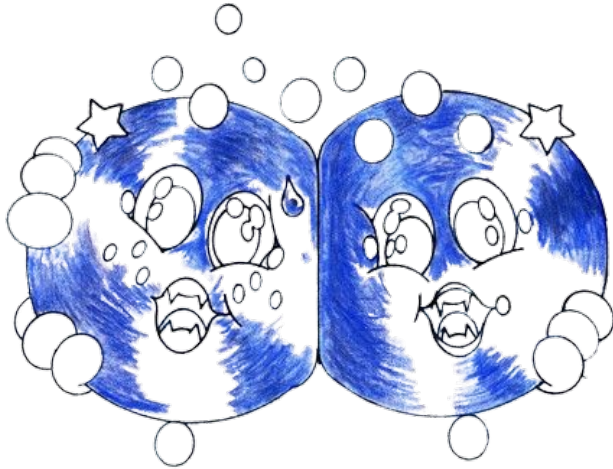
Saillenfest & Lari. (2021)
Saillenfest et al. (2022)



Qu'advient-il de la lune ?



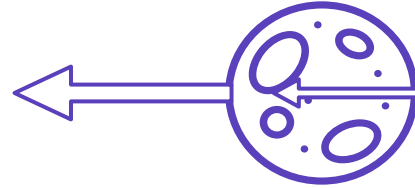
Option 1 : Collision



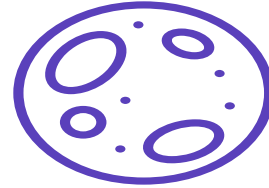
Option 2 : Ejection



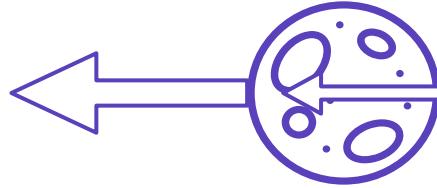
Option 3 → La limite de Roche



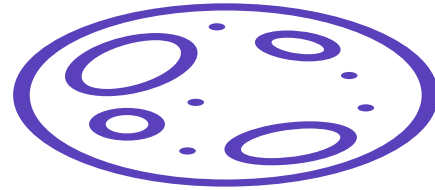
Option 3 → La limite de Roche



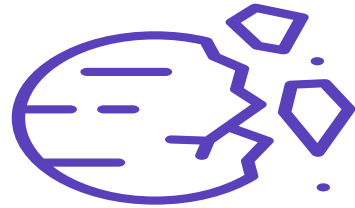
Option 3 → La limite de Roche



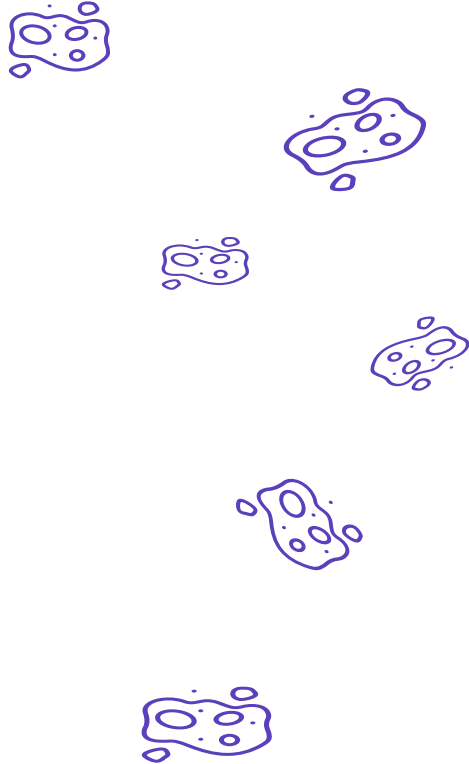
Option 3 → La limite de Roche



Option 3 → La limite de Roche



Option 3 → La limite de Roche



Option 3 → La limite de Roche



Tadaaaaaa !!!



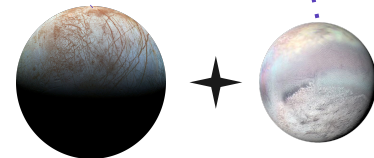
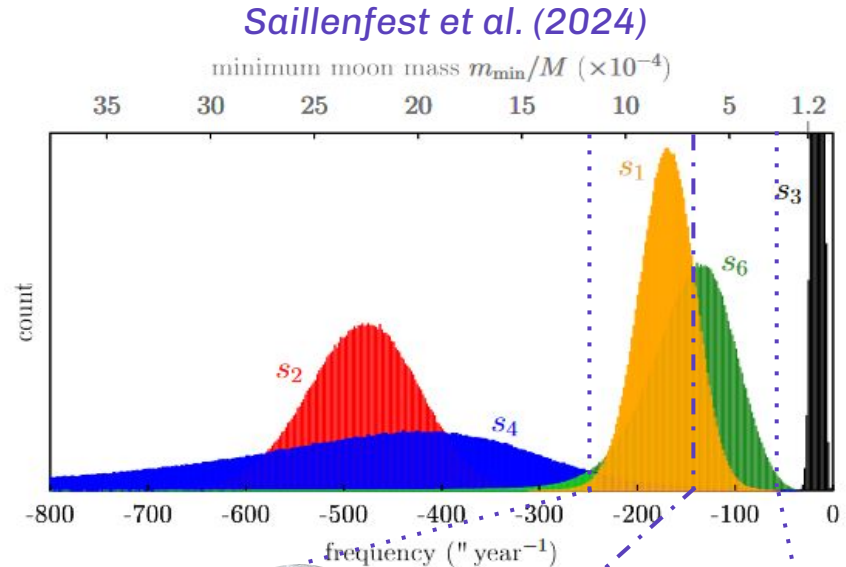
Comment sait on quelles sont les fréquences de résonance d'HIP41378 ?



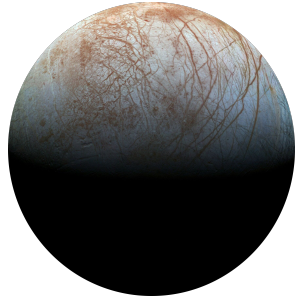
Et bah en fait on sait pas

- Dans le cas du **système solaire**, on connaît très précisément tous les paramètres orbitaux des chacune des planètes
- Pour les **exoplanètes** en revanche, on a au mieux qu'une **estimation grossière** de ceux-ci, avec des barres d'erreur t'as peur

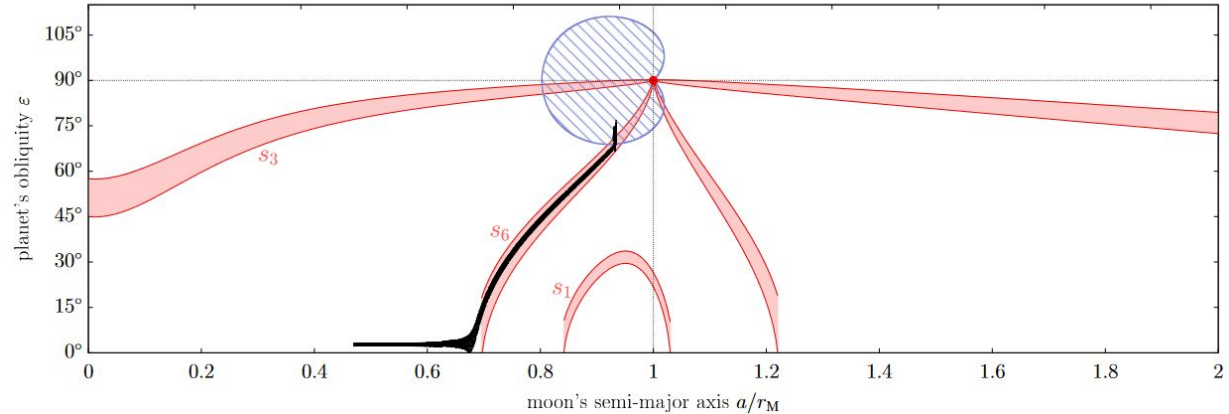
→ On a donc calculé pour TOUS les cas de figures possible étant donné les barres d'erreur



Le scénario que l'on propose



Saillenfest et al. (2024)



Dans la passé, **la migration d'une lune de la taille d'Europe** a déclenché un **mécanisme de résonance spin-orbite séculaire** qui a incliné la planète HIP 41378 f jusqu'à un obliquité de 95°.

Dans cette position, **l'orbite de la lune est devenue instable**, provoquant sa **dislocation en un anneau de débris**.

Anneau de débris que l'on observe aujourd'hui et qui fait apparaître la planète plus grande qu'elle ne l'est en réalité.



Ce scénario est-il plausible ?



Les questions à se poser:

- **Le mécanisme a-t-il eu le temps d'avoir été complété ?**
 - Oui ! d'après nos calculs il aurait fallu 1Gyr, or le système est âgé de 3.1Gyr
- **Une telle lune peut-elle exister ?**
 - D'un point de vu formation, on s'attendrai à ce que le rapport de masse entre la lune et la planète soit entre 1 et 2/10 000.
 - C'est compatible avec la fourchette basse de nos estimations, mais commence à être un peu douteux pour des masses telles que Europe ou plus (le ratio de masse Europe/HIP41378f est de 6/10 000) .
- **Quelle est la probabilité que la lune finisse en anneau de débris ?**
 - $\sim \frac{1}{10^4}$



HIP 41378 f a-t-elle des anneaux ?



Mais si elle en a on a un scénario possible de sa formation

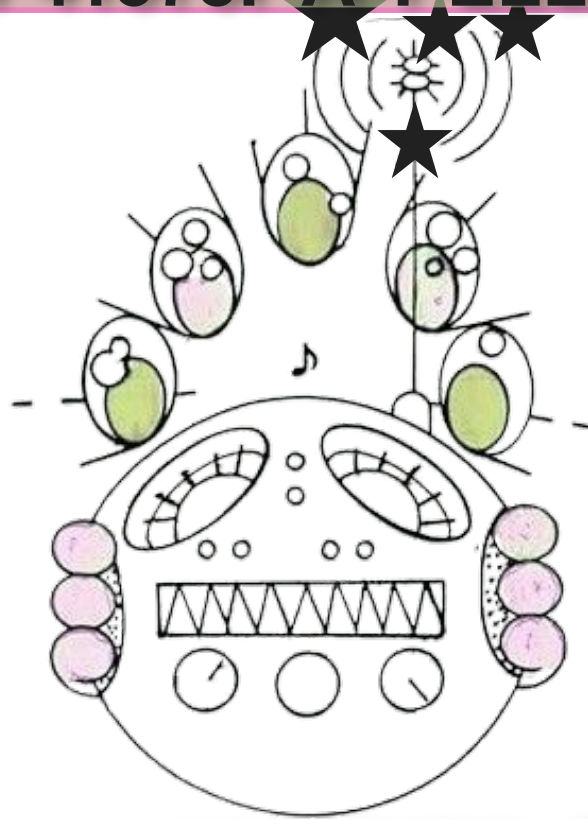
c'est décevant hein ? tout ça pour ça bref



BISOOOOUUUUUUUS !!!



LA PLANETE HIP41378F A-T-ELLE DES ANNEAUX ?



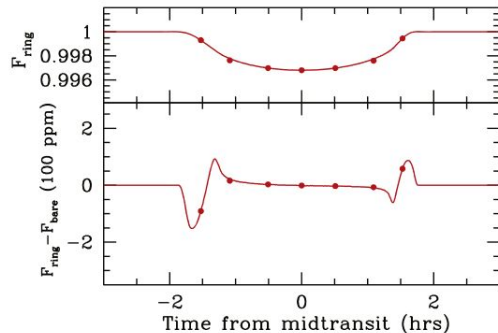
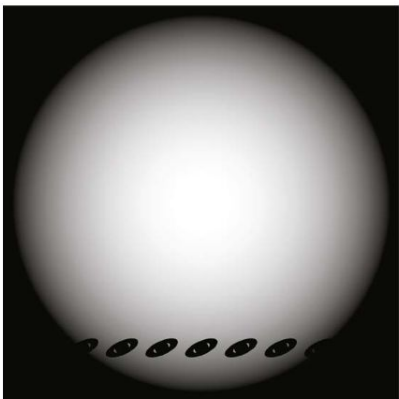
ANNEXES ★



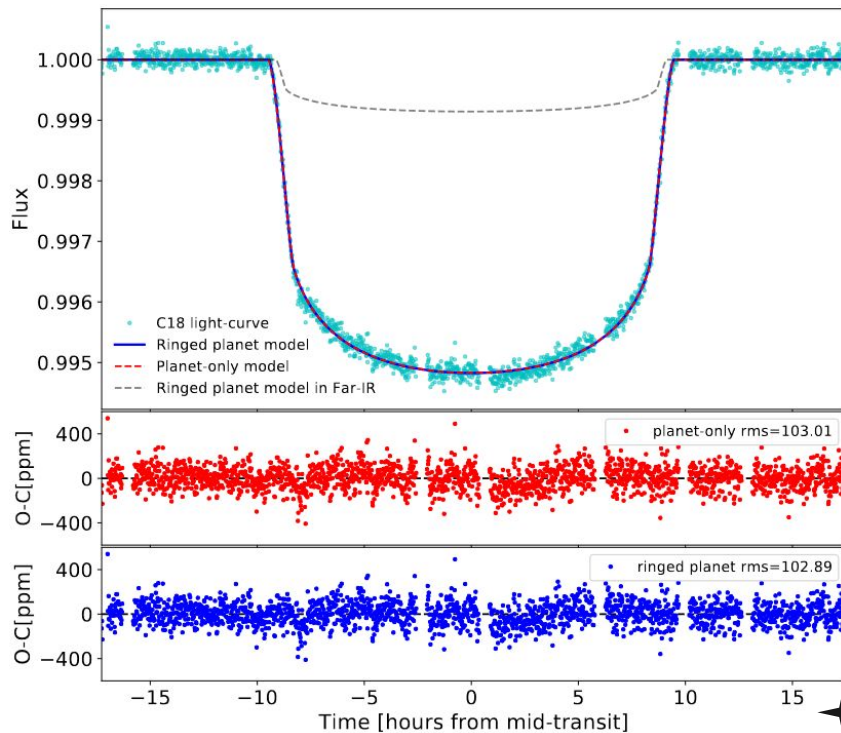
Comment trancher définitivement ?



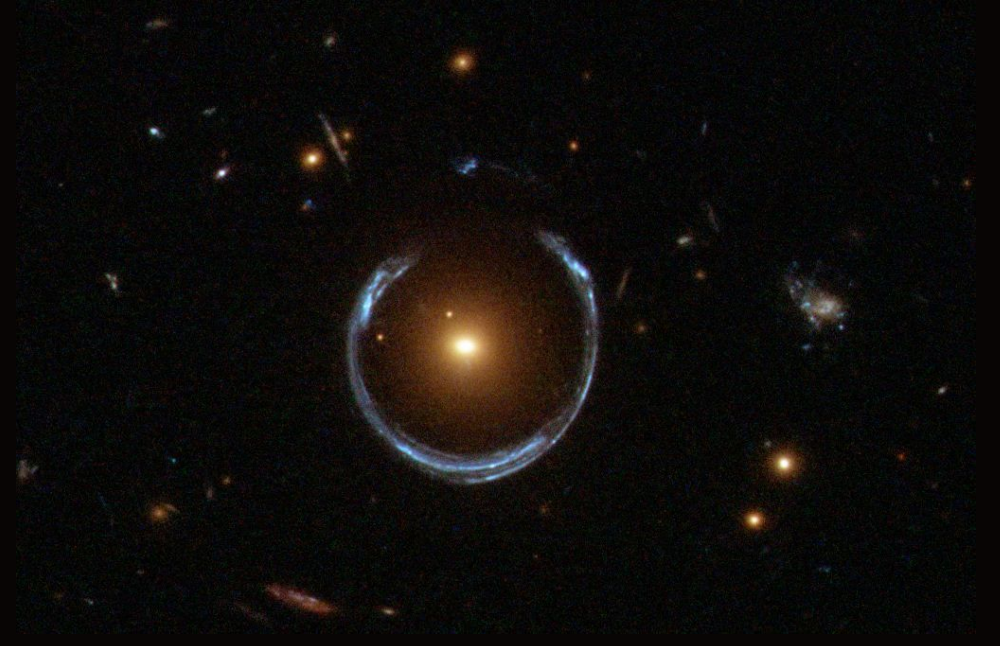
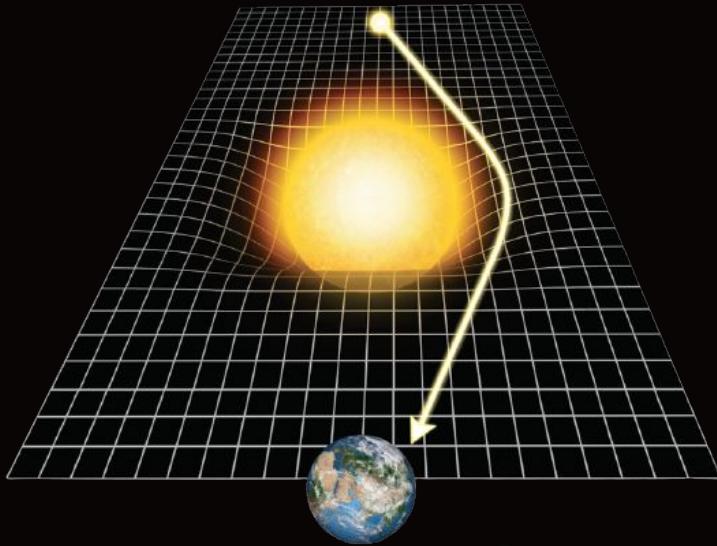
Option 1 : Traquer les anomalies



Option 2 : Regarder autrement



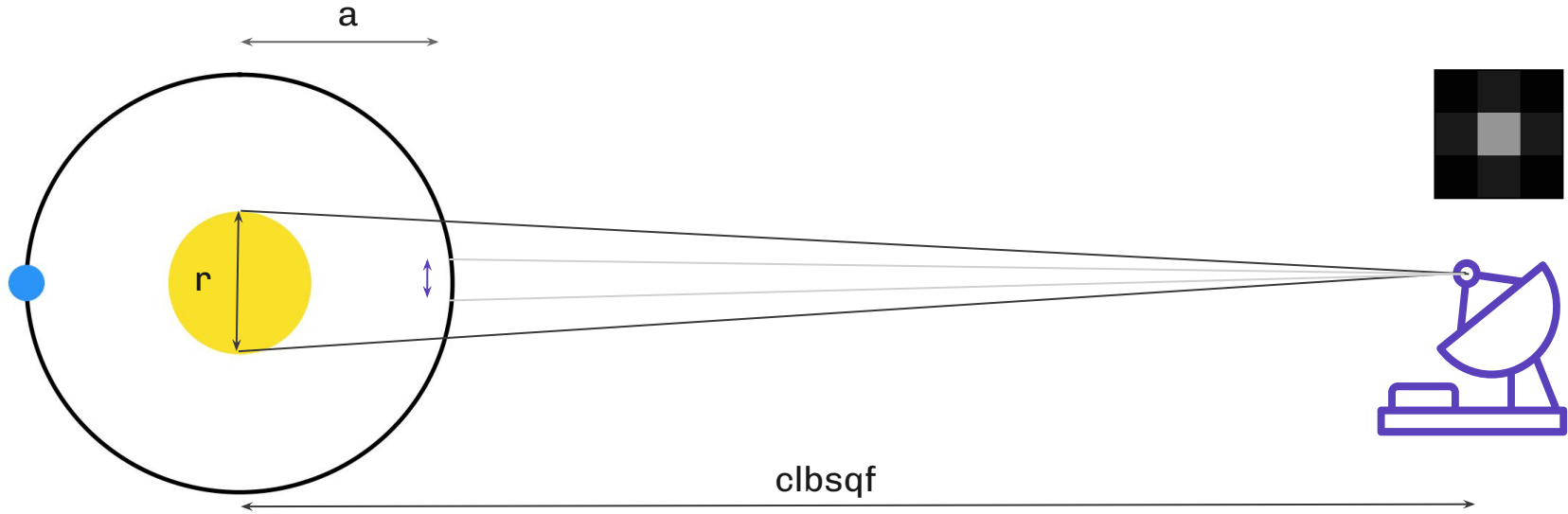
Lentille Gravitationnelle



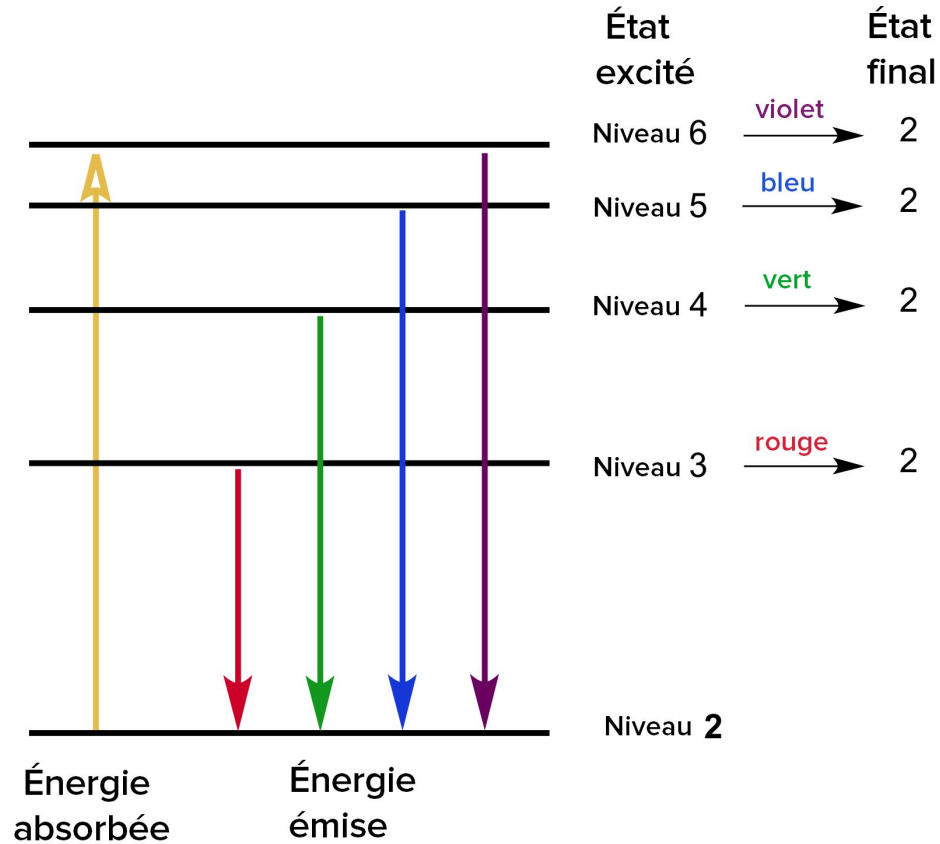
Lentille Gravitationnelle



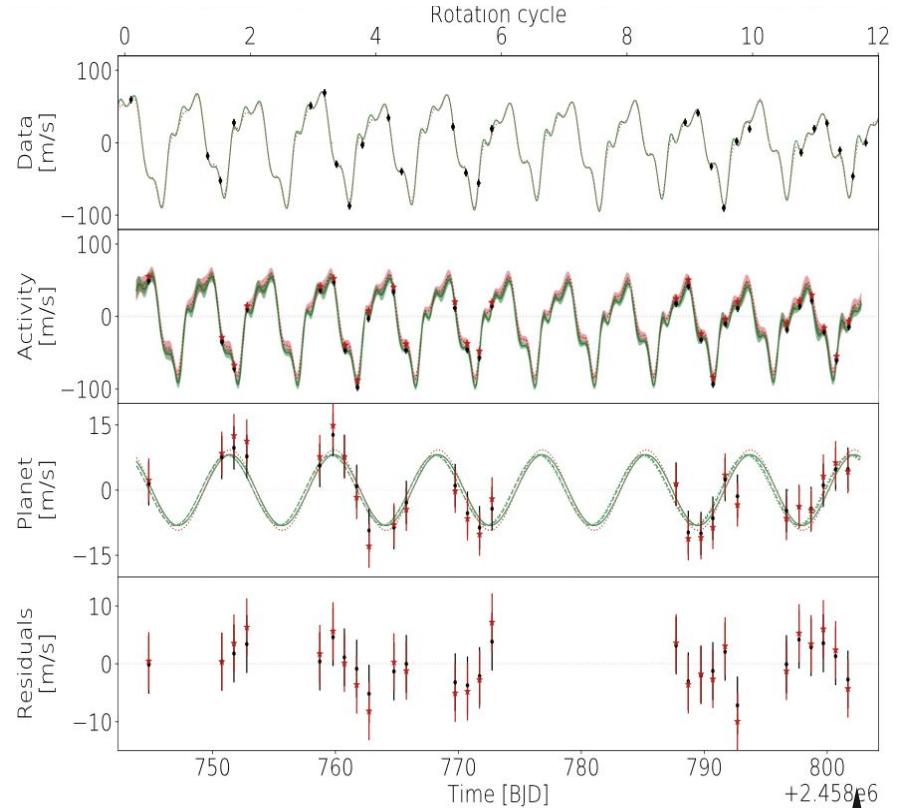
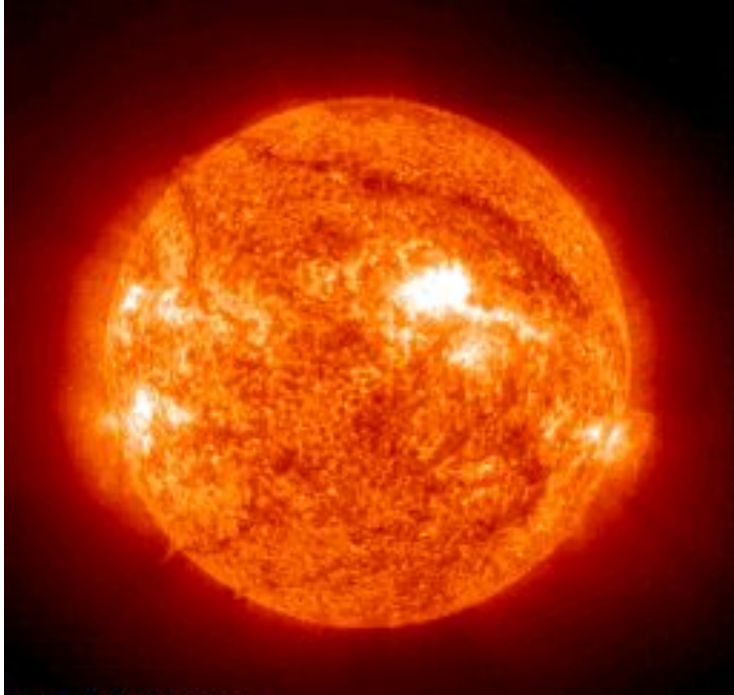
Géométrie du transit



Transition atomique



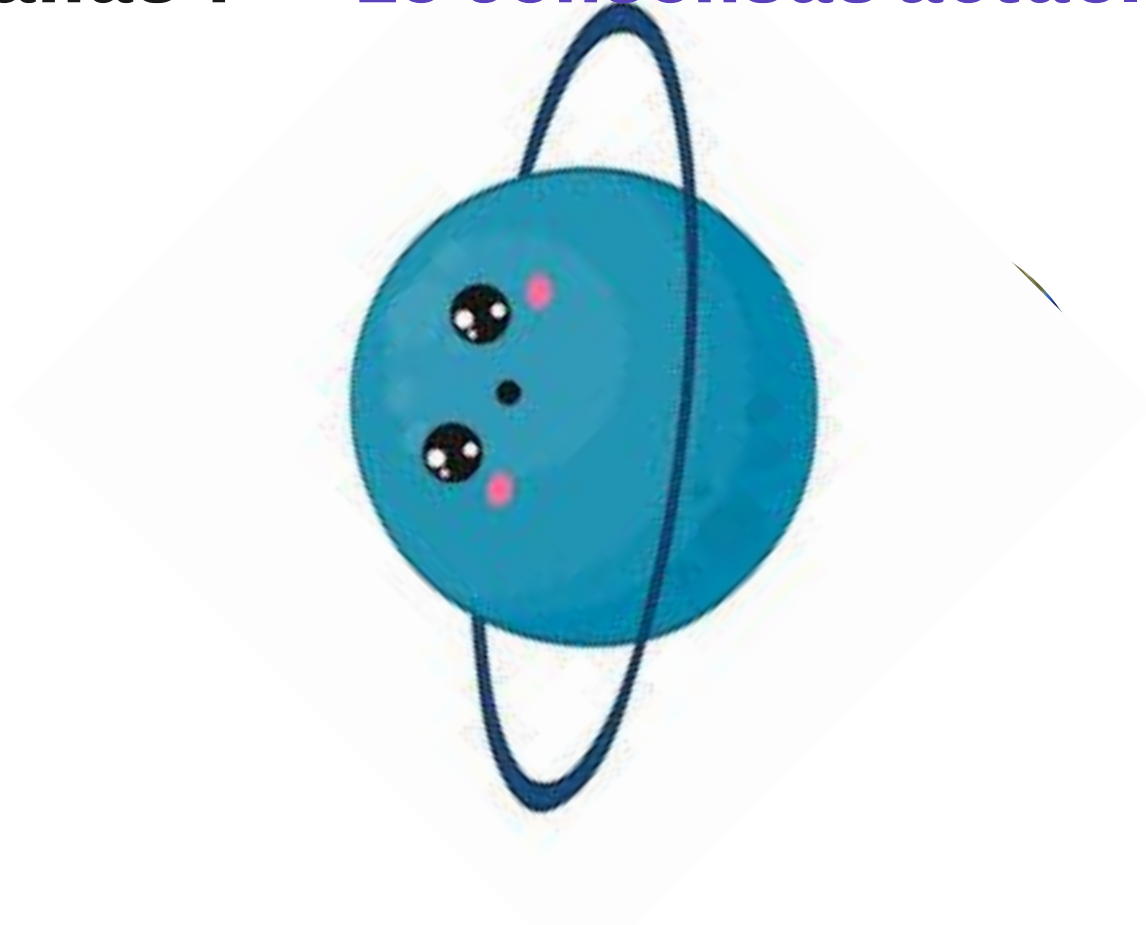
Ma thèse → filtrer l'activité magnétique ✦



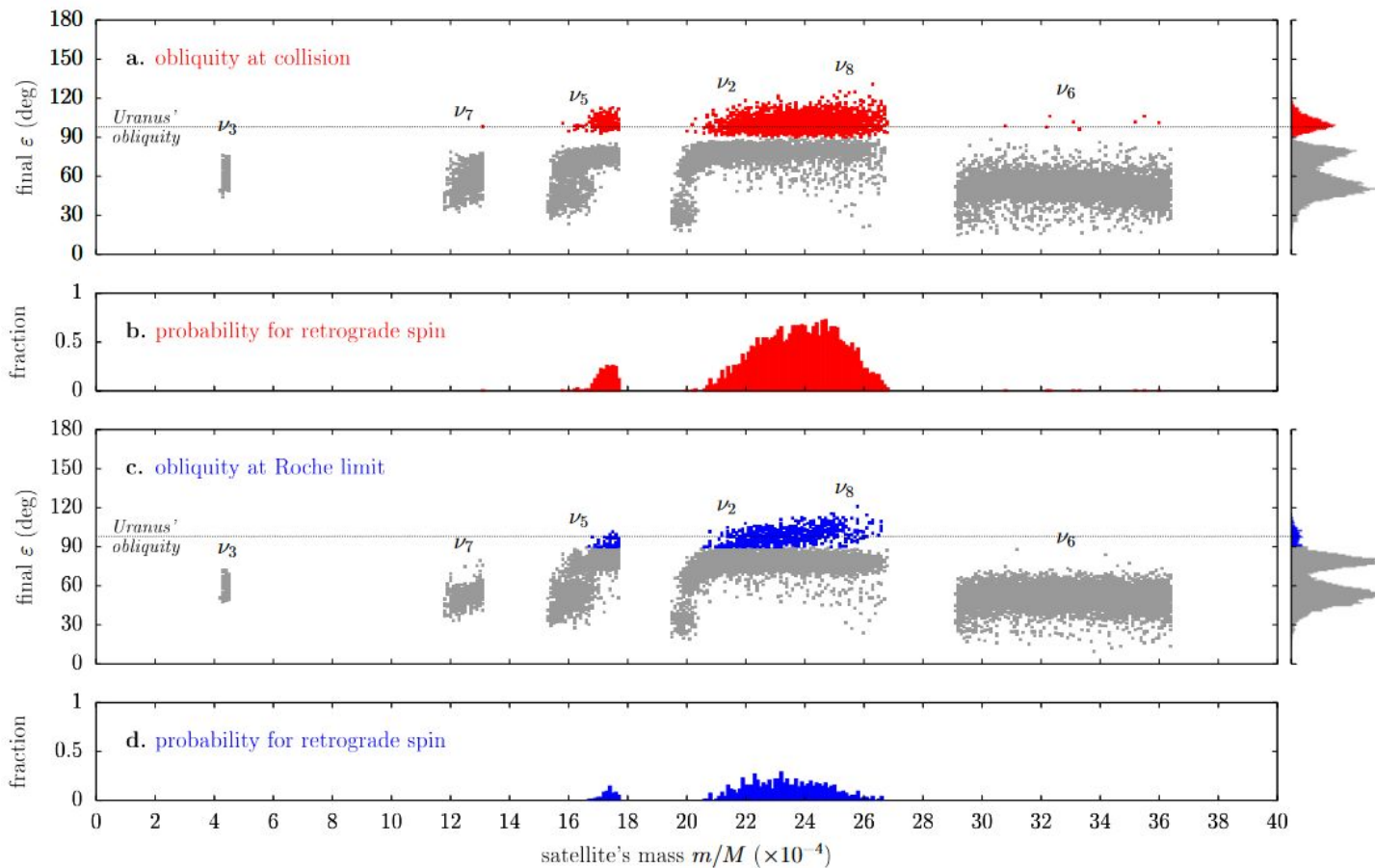
Klein et al. 2020



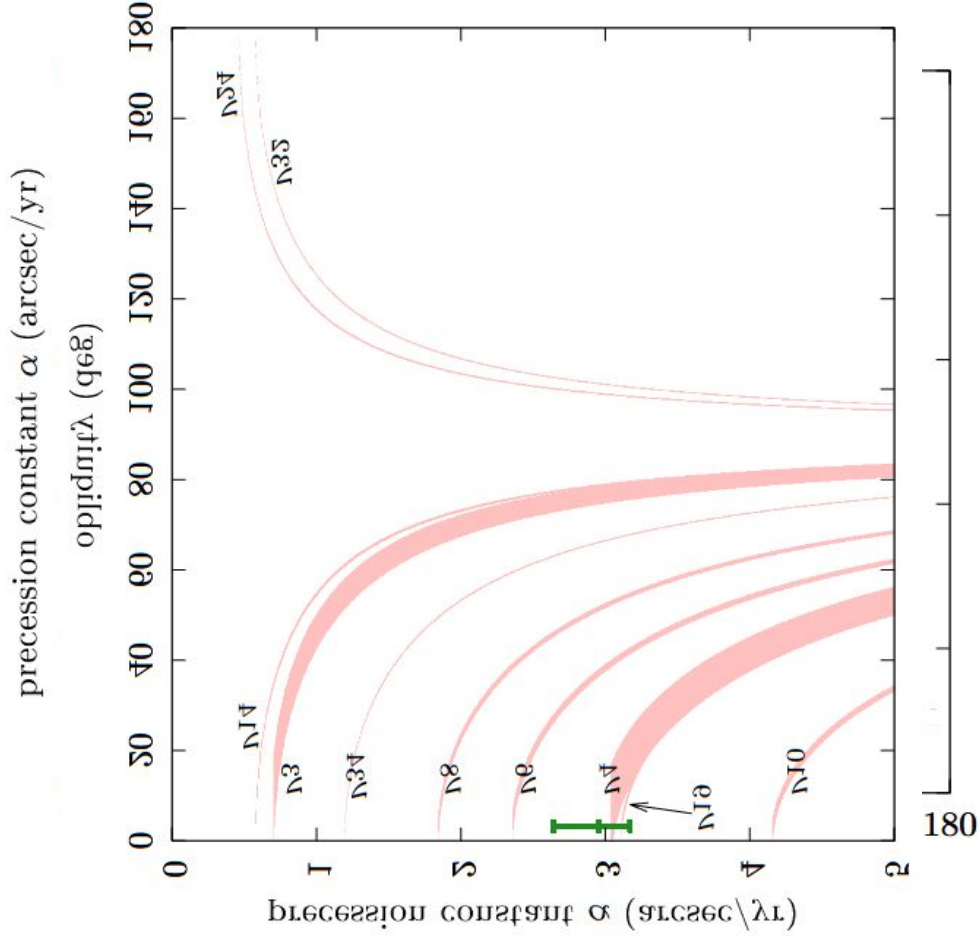
Et Uranus ? → Le consensus actuel



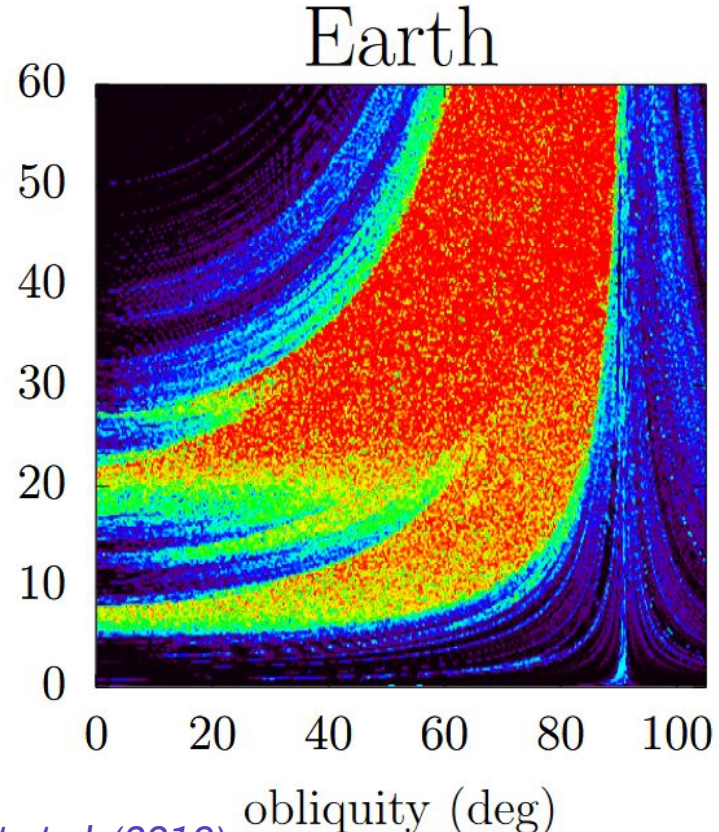
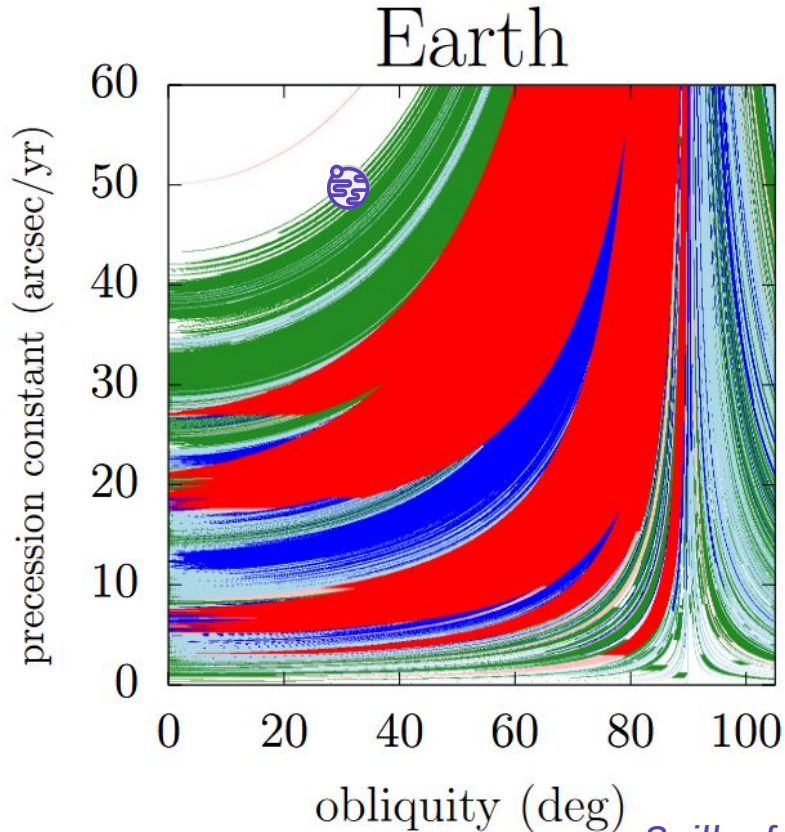
Et Uranus ? → Saillenfest et al. 2022



Et Jupiter ? → Saillenfest et al. 2020



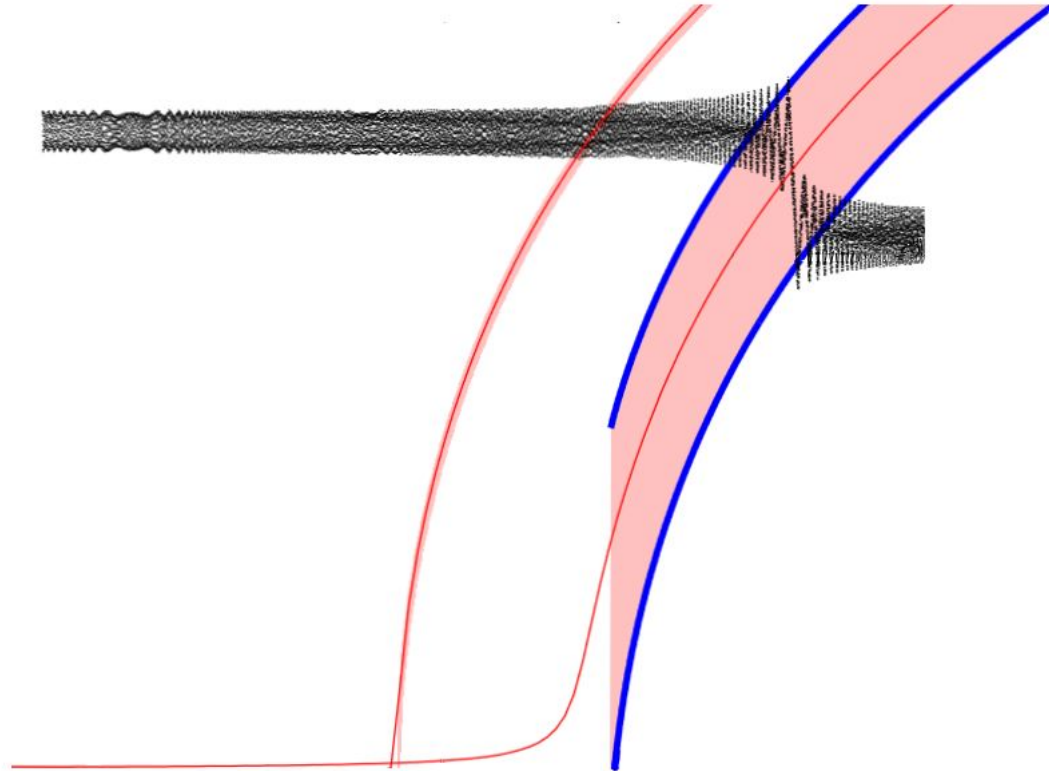
Et la Terre ? → Laskar et al. 1993



Saillenfest et al. (2019)



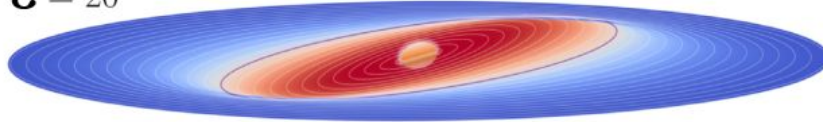
Et la Terre ? → Laskar et al. 1993



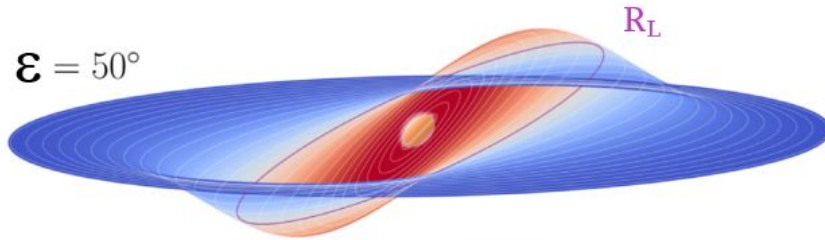
Plan de Laplace



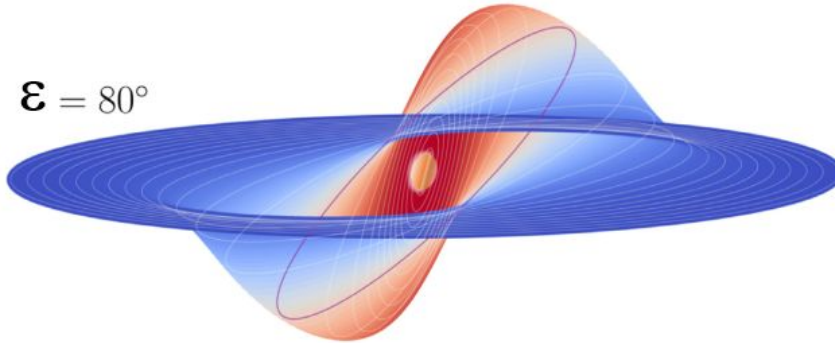
$$\varepsilon = 20^\circ$$



$$\varepsilon = 50^\circ$$



$$\varepsilon = 80^\circ$$

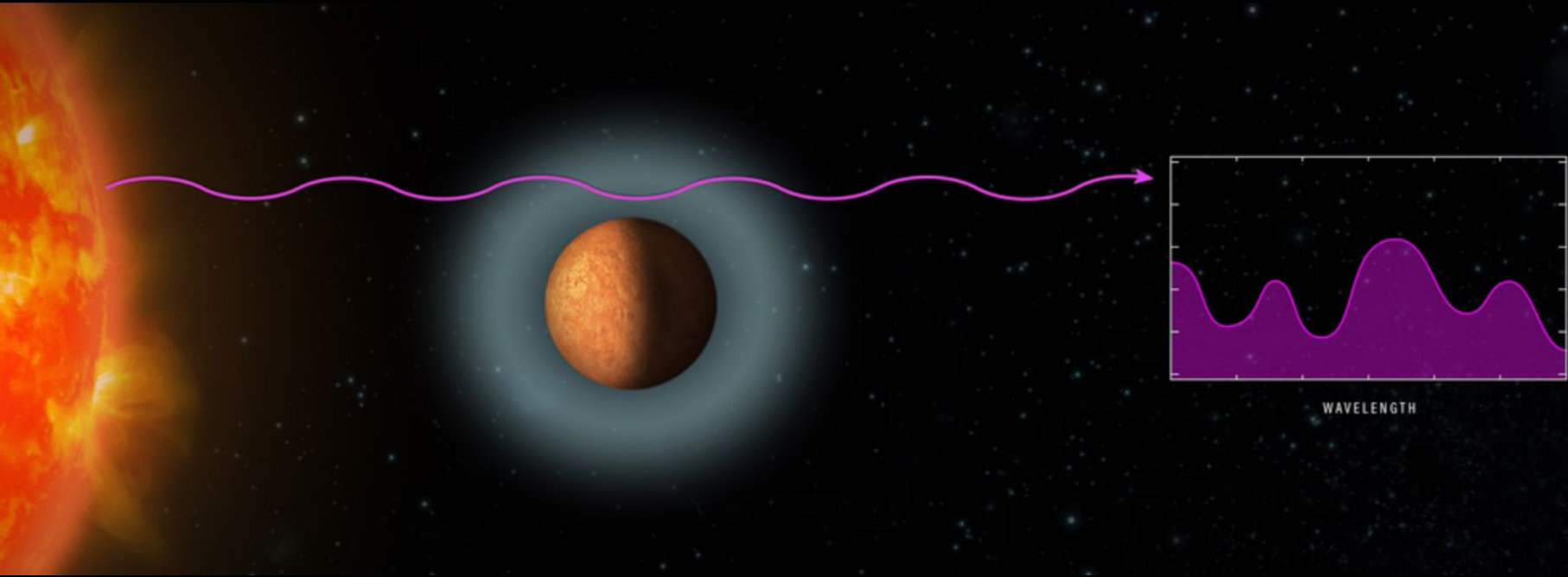


Un astre en rotation et à l'équilibre hydrostatique n'est **pas parfaitement sphérique**, il est aplati aux pôles. Par conséquent, le potentiel gravitationnel n'est donc pas uniforme. **Il existe donc un plan préférentiel pour orbiter autour.**

→ Dans le cas du soleil, ce plan est appelé le **plan de l'écliptique**. Toutes les planètes se déplacent sur ce plan



Sonder l'atmosphère des exoplanètes



→ Conférence de Thea

