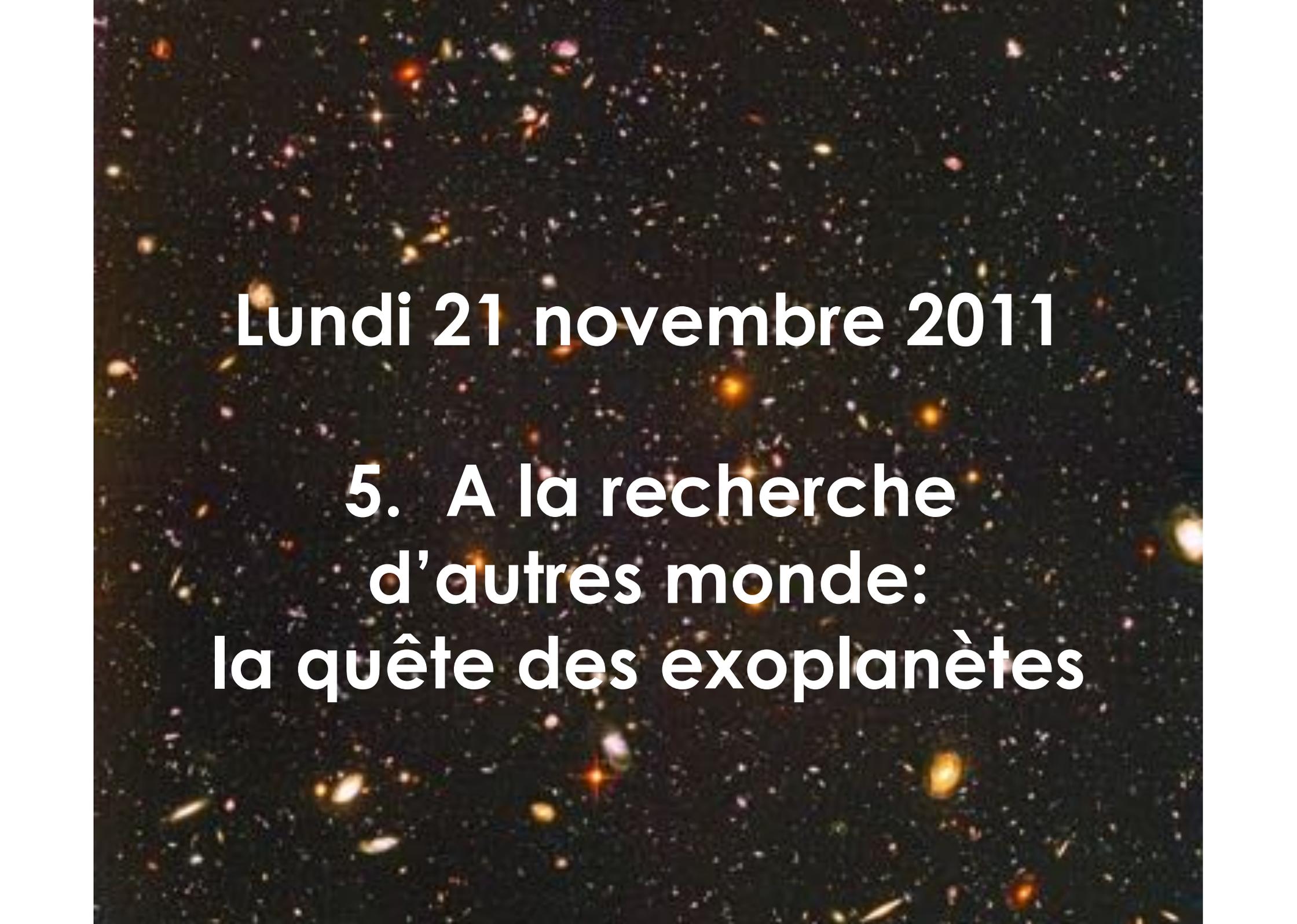


Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie
Institut Universitaire de France



Lundi 21 novembre 2011

**5. A la recherche
d'autres monde:
la quête des exoplanètes**

A la recherche d'autres mondes: la quête des exoplanètes

Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

A la recherche d'autres mondes: la quête des exoplanètes



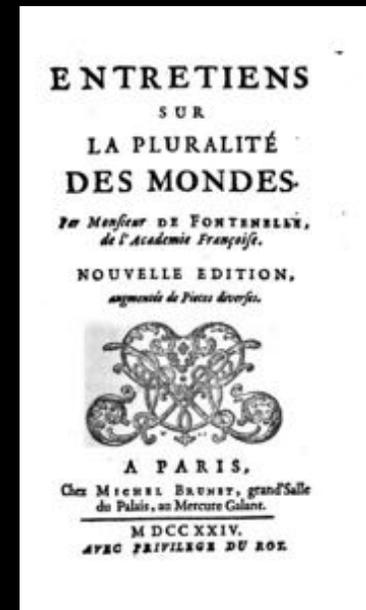
La pluralité des mondes : un idée ancienne

- Epicure (lettre à Hérodote, 300 av JC) :
« Les mondes sont en nombre infini, les uns semblables à celui-ci, les autres dissemblables; [...] il n'y a nulle part d'obstacle à cette infinité; (...) il n'y a aucune nécessité à ce qu'ils aient la même forme. »
- Giordano Bruno (1548-1600) - *De l'infinito universo et Mondi* (1584)
- Bovier de Fontenelle (1657-1757) – *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686)

Le Philosophe : il existe d'autres mondes habités dans l'Univers, même sur la Lune

La Marquise : si c'était le cas, les habitants de la Lune auraient dû nous rendre visite maintenant

Le Philosophe : le temps nécessaire pour maîtriser le voyage spatial est très long ; s'il est supérieur à 6000 ans on comprend pourquoi ils n'ont pas pu encore arriver ici.



- Pourtant, il a fallu attendre la fin du XX^{ème} siècle pour commencer à apporter une réponse scientifique à la question de la pluralité des mondes...

Changement d'échelle...

Une exoplanète (ou planète extrasolaire) est une planète située en dehors du système solaire (exo = « hors de » en grec). Les exoplanètes sont recherchées autour des autres étoiles de la Galaxie.

- Planètes du système solaire : distance = quelques unités astronomiques

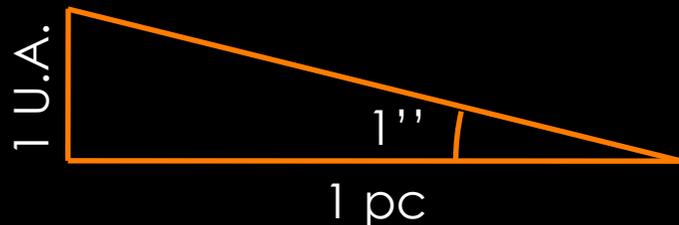
Rappel (cf. cours n°1) : 1 U.A. = 150 millions de km

- Etoiles « proches » : distances = quelques dizaines/centaines d'années lumière

Rappel (cf. cours n°1) : 1 a.l. = 9 500 milliards de km
= 63 000 unités astronomiques

- Une autre unité commode : le parsec (parallaxe - seconde d'arc)

Définition: une étoile vue avec une parallaxe annuelle de 1'' est à une distance de 1 pc.



1 pc = 3,26 a.l. = 31 000 milliards de km

Les exoplanètes : extrême difficulté de la détection

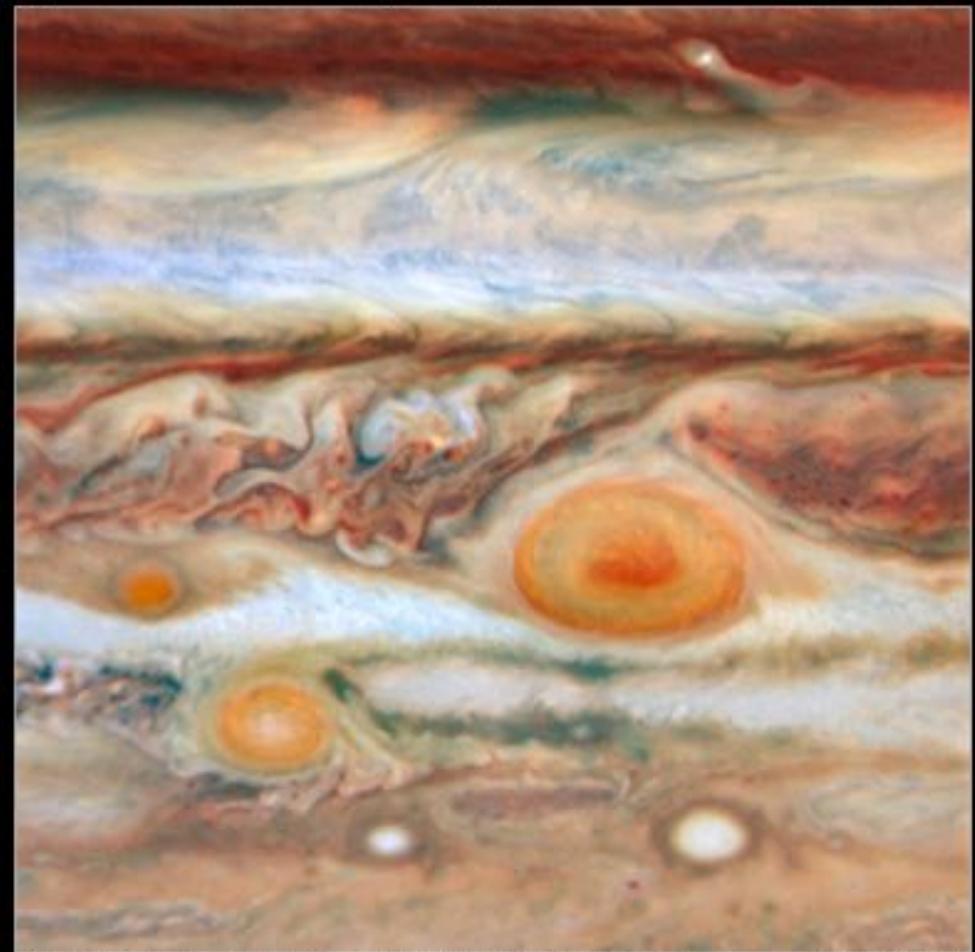
Les exoplanètes sont des objets faibles, à très grande distance, que l'on doit trouver en étant ébloui par la lumière de l'étoile.

- Jupiter – Soleil : 5,2 U.A.
(Jupiter = la plus grosse planète du système solaire)
- Imaginons notre système solaire observé à 10 pc :
Séparation angulaire J-S = 0,52''
- *Hubble Space Telescope* :
Résolution angulaire $\sim 0,1''$

Alors, c'est facile ?

Jupiter's Red Spots • May 9–10, 2008

HST • WFPC2



NASA, ESA, M. Wong and I. de Pater (University of California, Berkeley)

STScI-PRC08-23

Les exoplanètes : extrême difficulté de la détection

Les exoplanètes sont des objets faibles, à très grande distance, que l'on doit trouver en étant ébloui par la lumière de l'étoile.

- Le problème vient de la différence de luminosité entre l'étoile et la planète.

- La puissance rayonnée par un corps par unité de surface vaut σT^4

- La puissance totale rayonnée (luminosité) est donc proportionnelle à $R^2 T^4$

- Les planètes sont plus petites que les étoiles : $R_{\text{Jupiter}}/R_{\text{Soleil}} = 0,1$

Les planètes sont plus froides que les étoiles : $T_{\text{Jupiter}}/T_{\text{Soleil}} = 0,02$

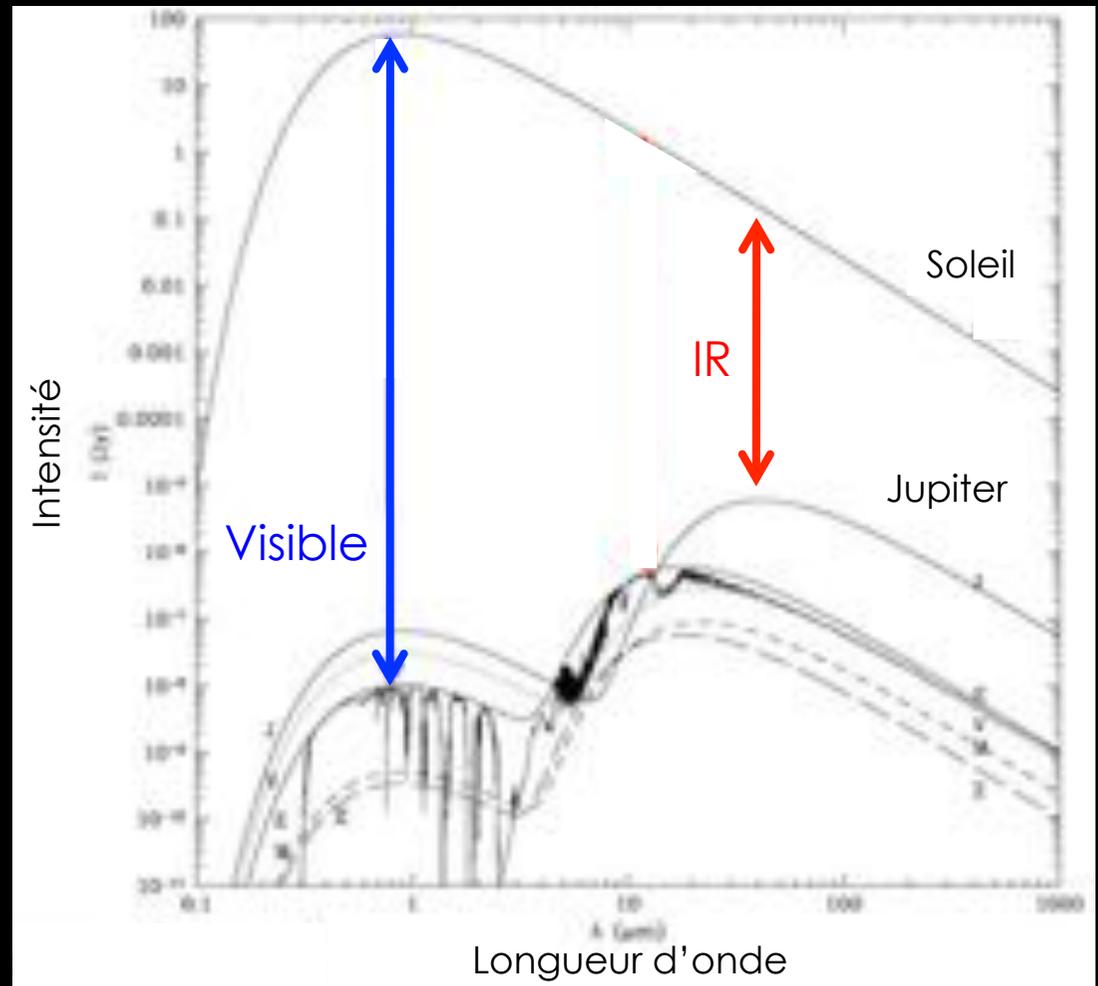
Les planètes rayonnent donc beaucoup moins : $L_{\text{Jupiter}}/L_{\text{Soleil}} = 1/460 \text{ millions}$

Les exoplanètes : extrême difficulté de la détection

Les exoplanètes sont des objets faibles, à très grande distance, que l'on doit trouver en étant ébloui par la lumière de l'étoile.

Système solaire à 10 pc

- Les planètes rayonnent beaucoup moins que leur étoile.
- Jupiter / Soleil :
 - Dans le visible : un milliard de fois plus faible
 - Dans l'infrarouge : 10 000 fois plus faible (à 30-40 μm)

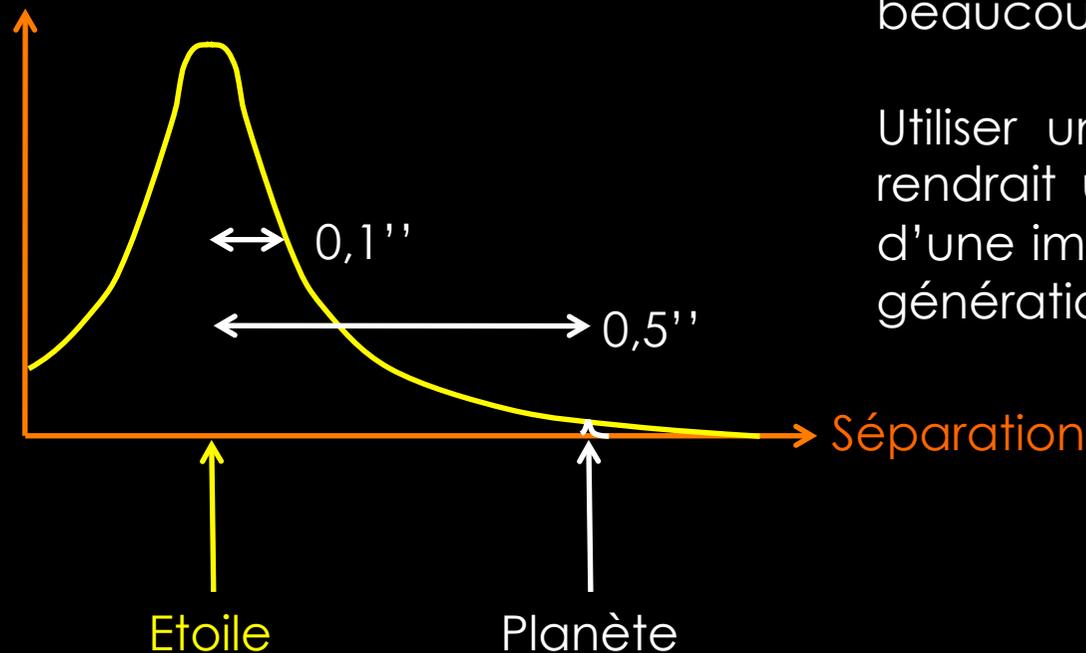


Les exoplanètes : extrême difficulté de la détection

Les exoplanètes sont des objets faibles, à très grande distance, que l'on doit trouver en étant ébloui par la lumière de l'étoile.

- Rappel : dans un télescope, l'image d'une source ponctuelle est une tache circulaire (cf. cours n°3).

Intensité



A $0,5''$ de sa position, l'étoile reste beaucoup plus brillante que la planète.

Utiliser un télescope dans l'infrarouge rendrait un peu plus facile l'obtention d'une image de la planète : prochaine génération d'instruments.

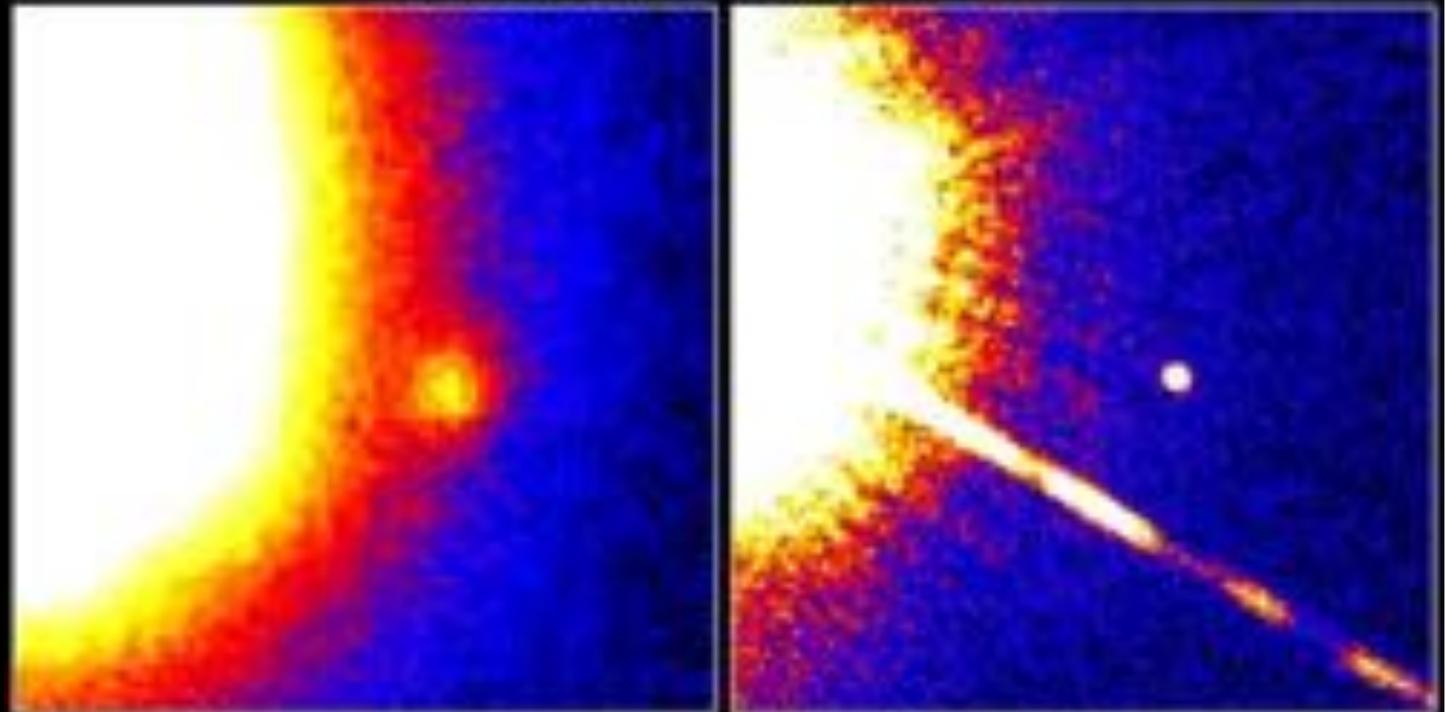
Les exoplanètes : extrême difficulté de la détection

Les exoplanètes sont des objets faibles, à très grande distance, que l'on doit trouver en étant ébloui par la lumière de l'étoile.

- Exemple:
détection d'une
naine brune
autour d'une
étoile *naine rouge*

Jupiter serait
2000 × plus faible
et
8 × plus proche

Brown Dwarf Gliese 229B



Palomar Observatory
Discovery Image
October 27, 1994

Hubble Space Telescope
Wide Field Planetary Camera 2
November 17, 1995

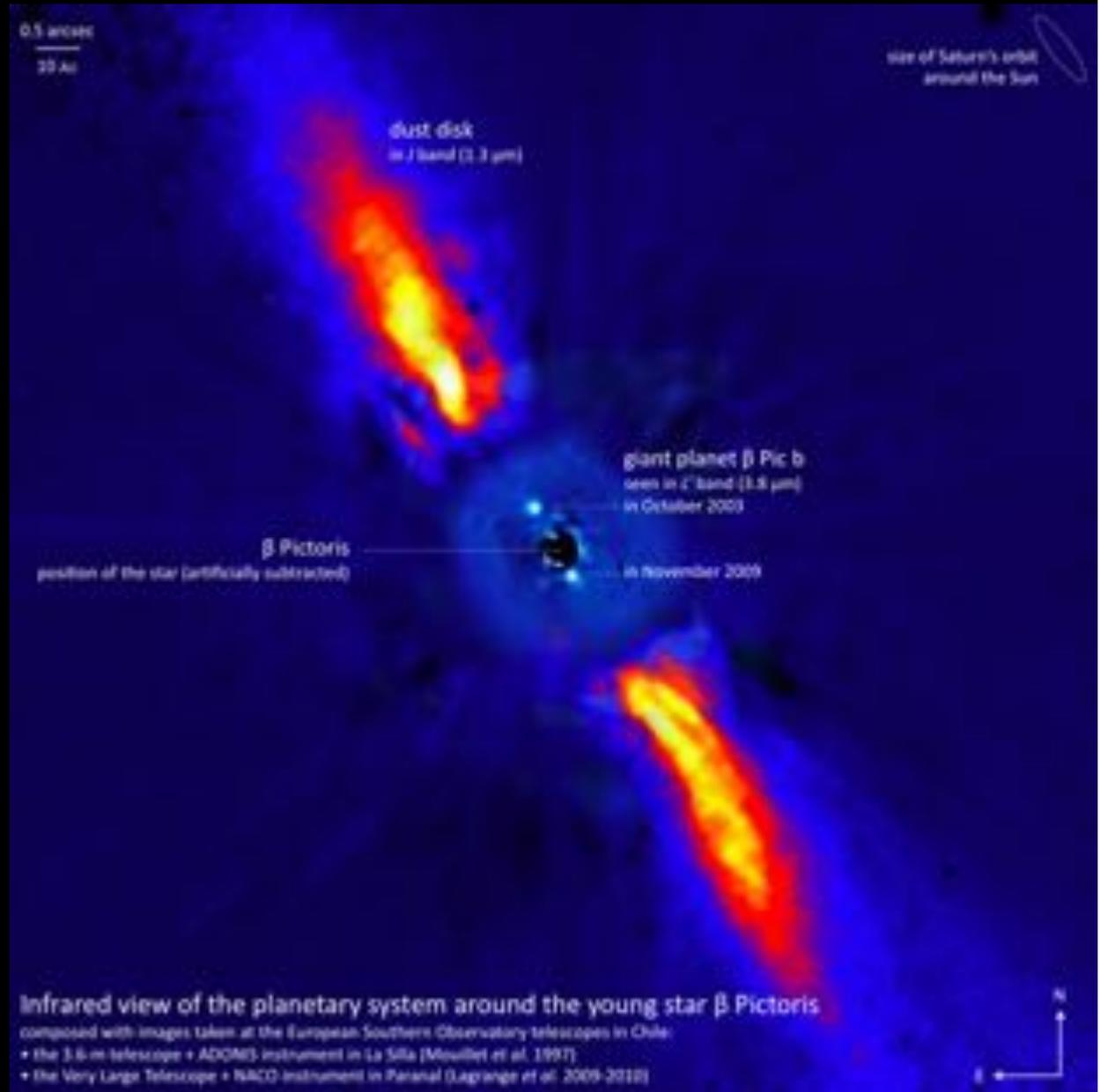
PRC95-48 - ST Sci OPO - November 29, 1995

T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Dumasque and O. Golinowski (JHU), NASA

Imagerie directe

L'observation directe des exoplanètes reste exceptionnelle car extrêmement difficile...

La planète β Pic b
observée par le VLT(ESO) en 2010
Distance : 8 à 15 U.A. U.A.
Très grosse planète $\sim 9 M_{\text{Jupiter}}$



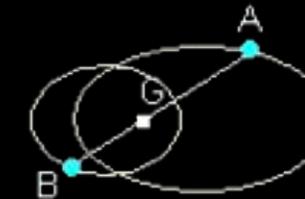
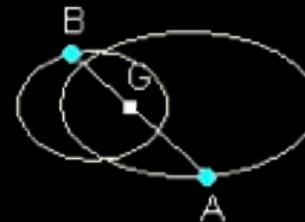
Comment contourner la difficulté ?

La première méthode indirecte utilisée demande d'oublier quelque chose que l'on a toujours cru vrai : « *la planète tourne autour de l'étoile* ».

- Les lois de Newton nous disent que « *la planète et l'étoile tournent autour de leur centre de gravité commun G* ».



Alexandros Papadimitriou,
3^{ème} au concours de lancer de marteau
(Championnats d'Europe 2002)

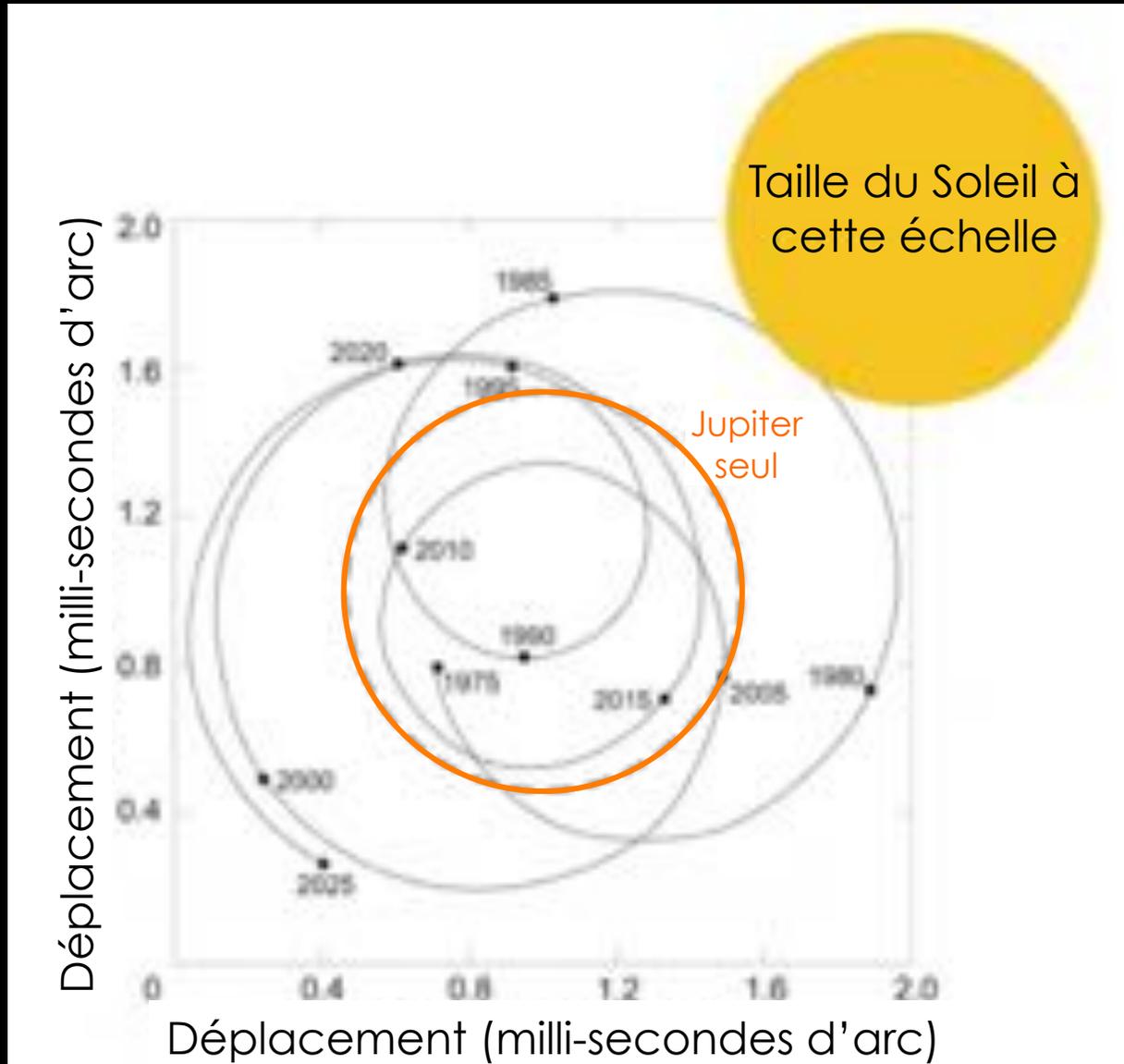


Système de deux étoiles
A et B de masse proche

- Système Soleil-Jupiter : distance Soleil-G = 1 millième distance Soleil-Jupiter
G est presque confondu avec le Soleil, d'où la formulation simplifiée courante :
« *Jupiter tourne autour du Soleil* ».

Le mouvement du Soleil

Le mouvement du Soleil autour du centre de gravité du système solaire, vu à une distance de 10 pc.



B.W. Jones, 2008

Rappel:
résolution angulaire
du *HST* $\sim 1''$

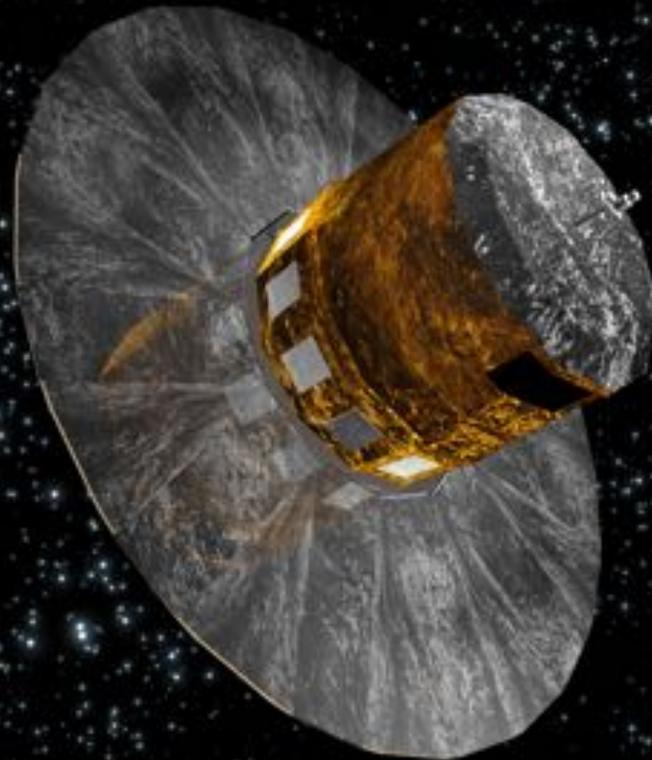
Comment contourner la difficulté ?

Idée : si une étoile possède une planète (ou plusieurs), elle doit effectuer un faible mouvement orbital comparé à une étoile isolée. Peut-on détecter ce mouvement ?

- Soleil: déplacement orbital autour du centre de gravité du système solaire de quelques 5 millièmes d'unité astronomique.
- A une distance de 10 pc, il faut mesurer une orbite d'une taille angulaire de l'ordre du millième de seconde d'arc !

- Satellite d'astrométrie GAIA (lancement 2013) :
résolution angulaire = de 7 à 300 millièmes de seconde d'arc (selon l'intensité de la source).

On prévoit la mesure des orbites d'environ un millier de systèmes étoile-exoplanète(s).



Comment contourner la difficulté ?

Si le déplacement orbital de l'étoile n'est pas directement observable, peut-on mesurer sa vitesse ?

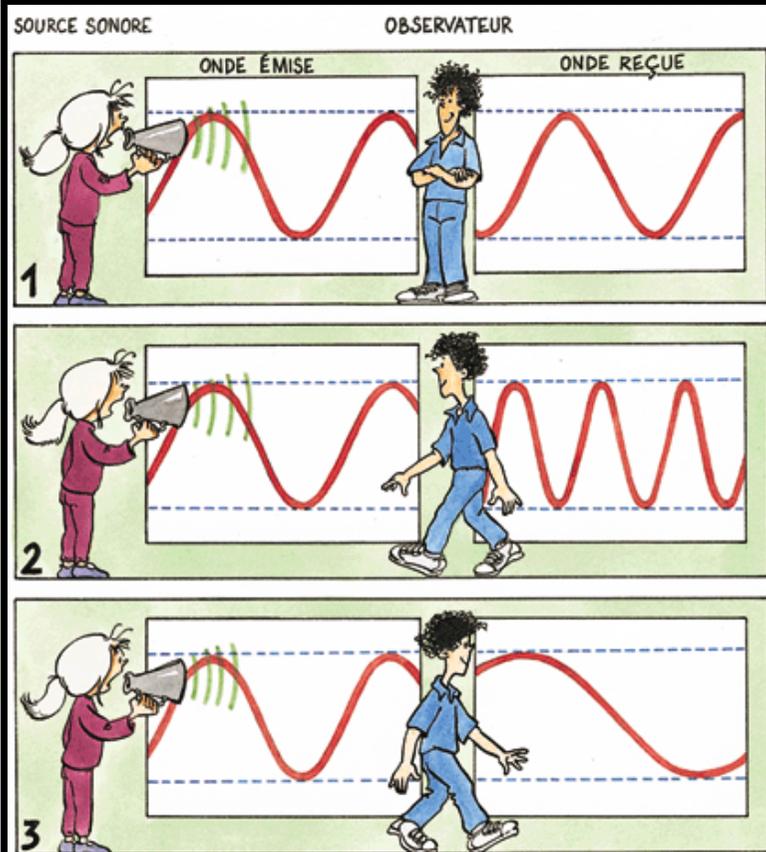
- OUI ! Grâce à l'effet Doppler ...
- Effet Doppler (1842) : décalage en fréquence d'une onde lorsque la source et/ou le détecteur sont en mouvement.

Onde sonore : la source se rapproche de nous : le son devient plus aigu
 la source s'éloigne de nous : le son devient plus grave

Onde lumineuse : la source se rapproche : la lumière devient plus bleue
 la source s'éloigne : la lumière devient plus rouge

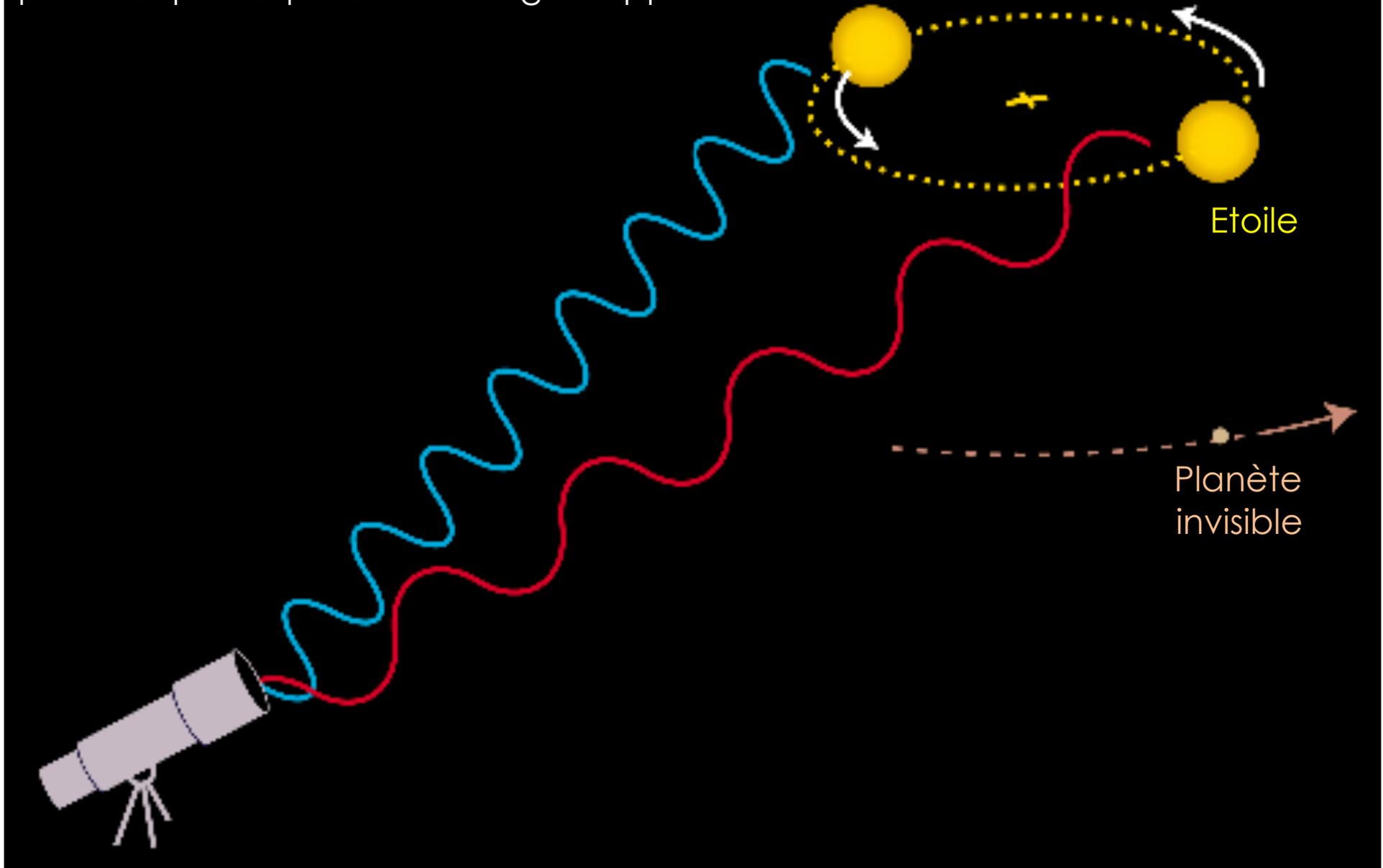
La mesure de décalage permet de déduire la vitesse.

Effet Doppler



Décalage Doppler d'une étoile

Le mouvement de l'étoile autour du centre de gravité du système étoile-planètes provoque un décalage Doppler de sa lumière.



Décalage Doppler d'une étoile

L'effet est très faible et difficile à mesurer...

- L'effet dépend de l'orientation du système



- Dans le cas idéal (système vu de côté) :

Soleil – Jupiter : vitesse de 12 m/s décalage $\Delta\lambda/\lambda = 0,00\ 000\ 004$

Soleil – Terre : vitesse de 8,6 cm/s décalage $\Delta\lambda/\lambda = 0,0\ 000\ 000\ 003$

- Comment la mesure est-elle possible ?

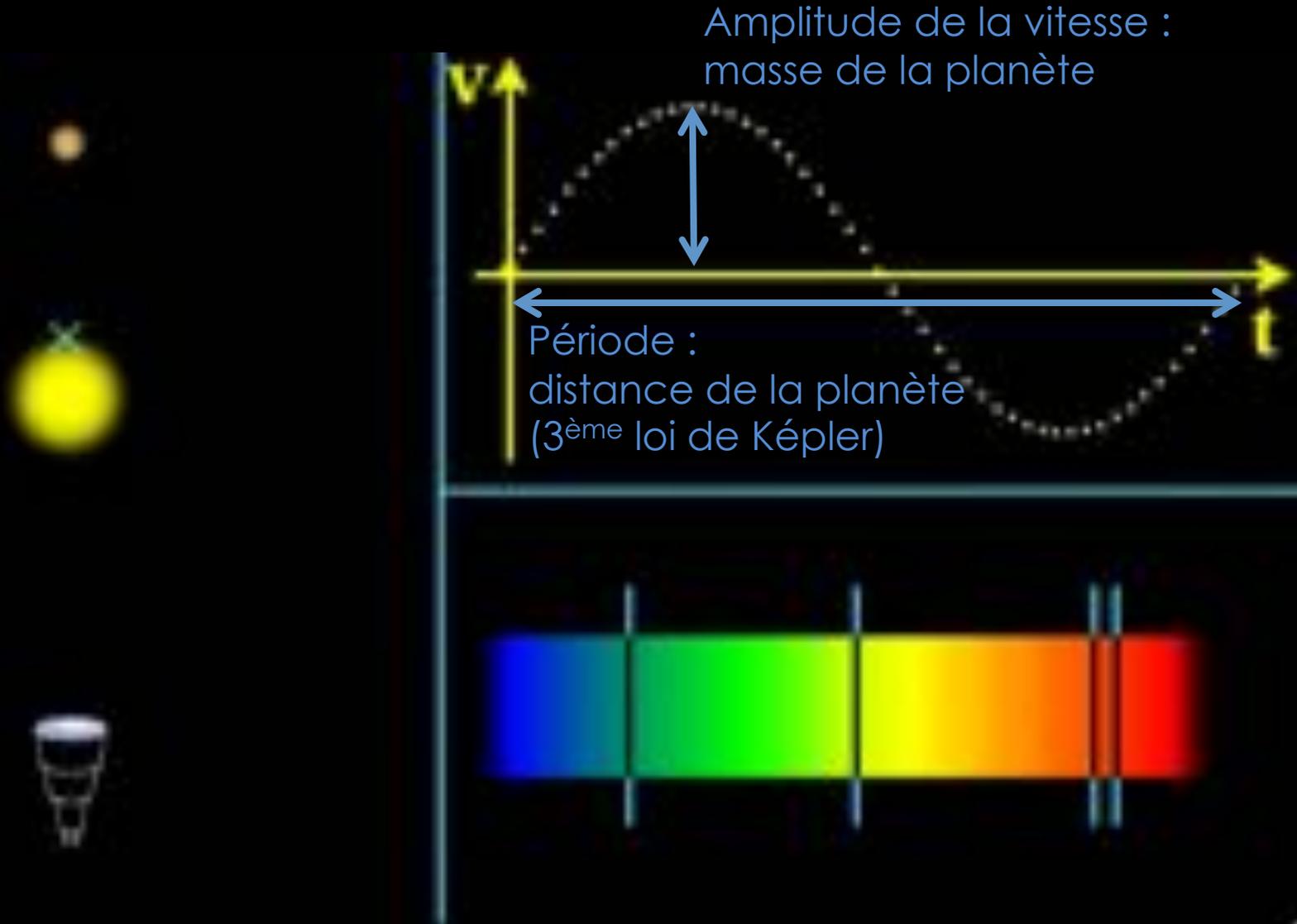
– parce qu'elle n'est pas effectuée sur une seule raie dans le spectre de l'étoile, mais en utilisant les milliers de raies présentes dans ce spectre.

– parce que l'effet recherché est périodique (mouvement orbital).

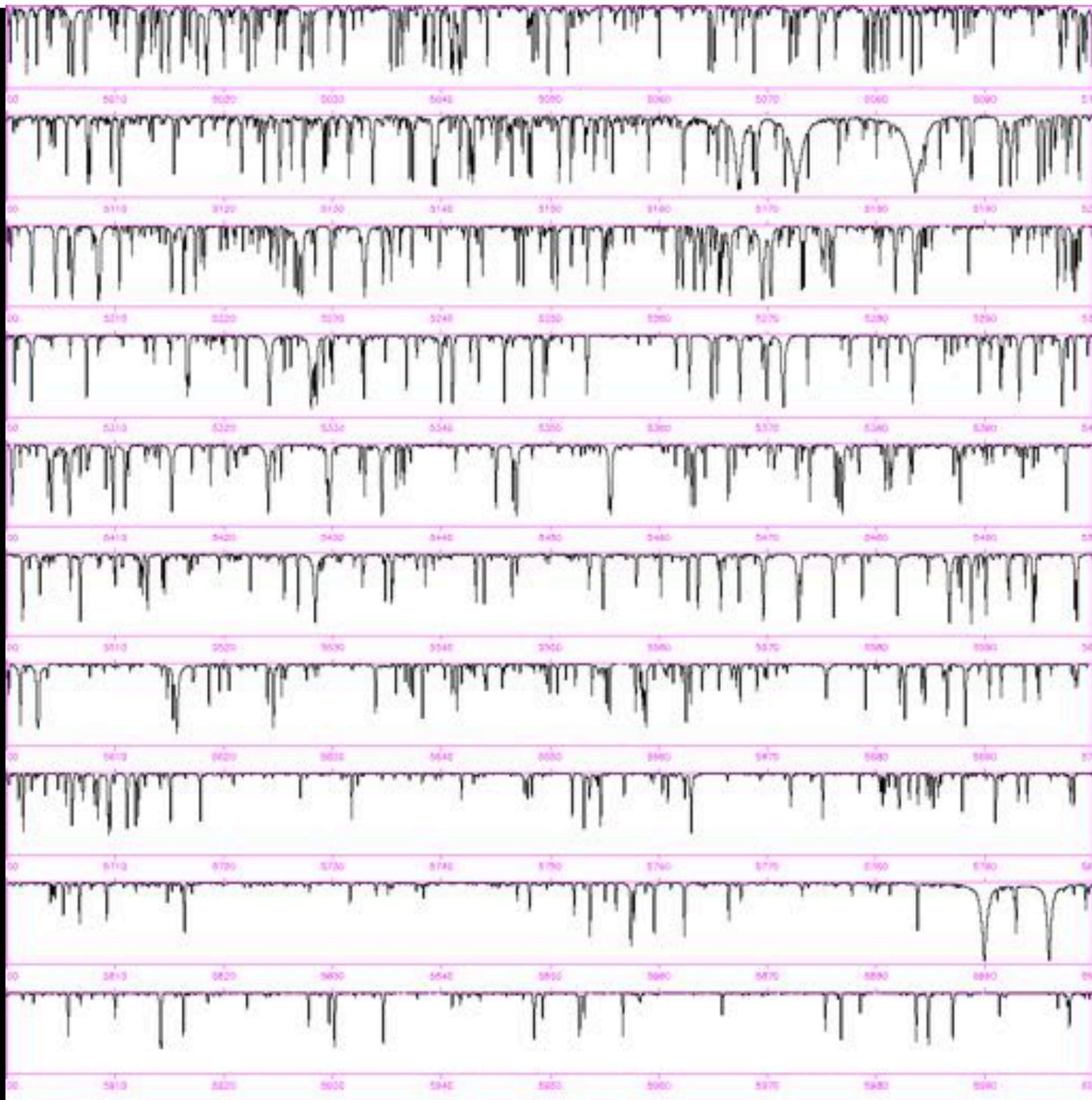
- Cette méthode, dite *méthode des vitesses radiales*, ou de *vélocimétrie* a permis la découverte des premières planètes extrasolaires.

Méthode des vitesses radiales

Mesurer la vitesse d'une étoile pour détecter son mouvement orbital dû à la présence de planètes...



Exemple de spectre stellaire



Méthode des vitesses radiales

Mesurer la vitesse d'une étoile pour détecter son mouvement orbital dû à la présence de planètes...

- La méthode des vitesses radiales est donc avant tout une méthode spectroscopique. Elle est mise en œuvre en utilisant des spectrographes d'une grande précision et stabilité, conçus spécialement pour ces études.
- Un avantage de cette méthode : à partir des quantités mesurées (amplitude de la vitesse, période de l'orbite, ...), on peut déduire – à *partir des lois de Newton* – la masse de la planète, ainsi que sa distance à l'étoile.

(il y a une incertitude liée à l'orientation inconnue du système)

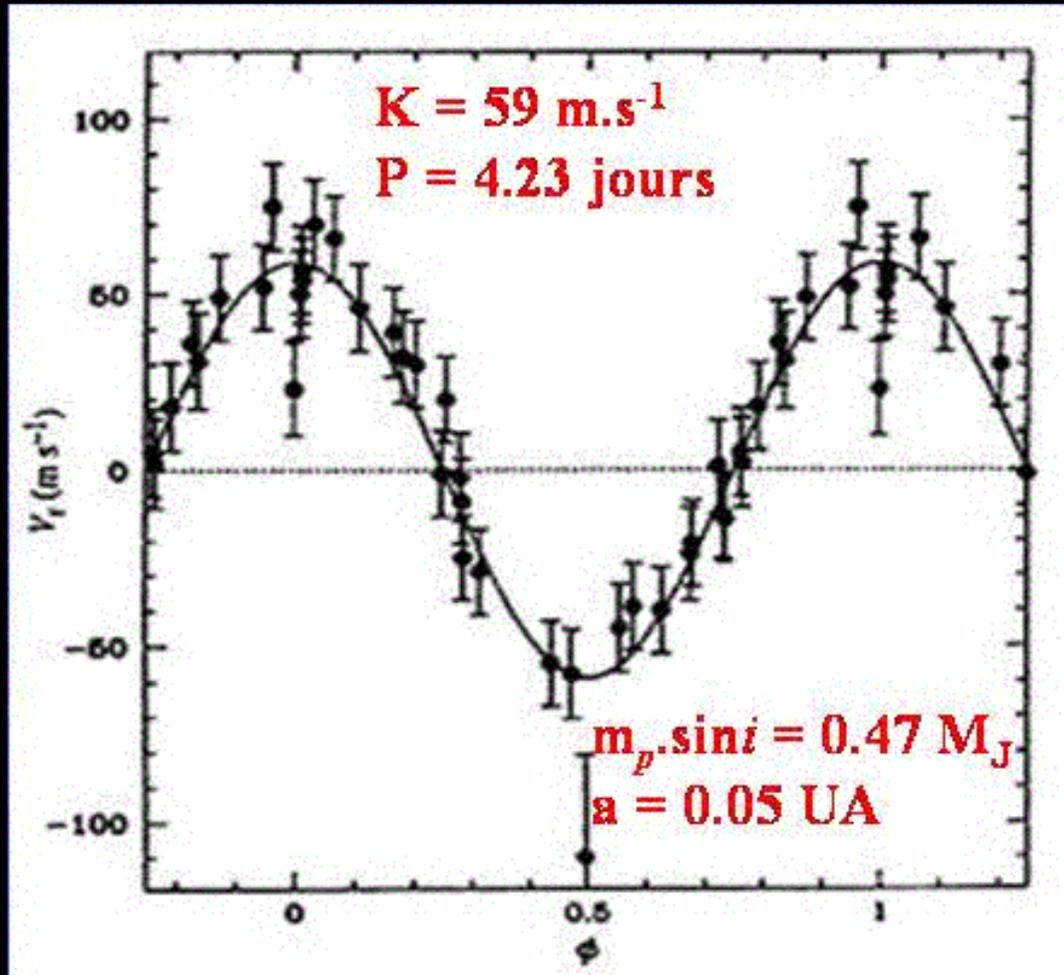
- Si on exclut un système très particulier constitué de planètes autour d'un pulsar (→ cours n°7) découvert en 1991, la première découverte d'une planète extrasolaire autour d'une étoile « normale » a eu lieu en 1995.

La découverte

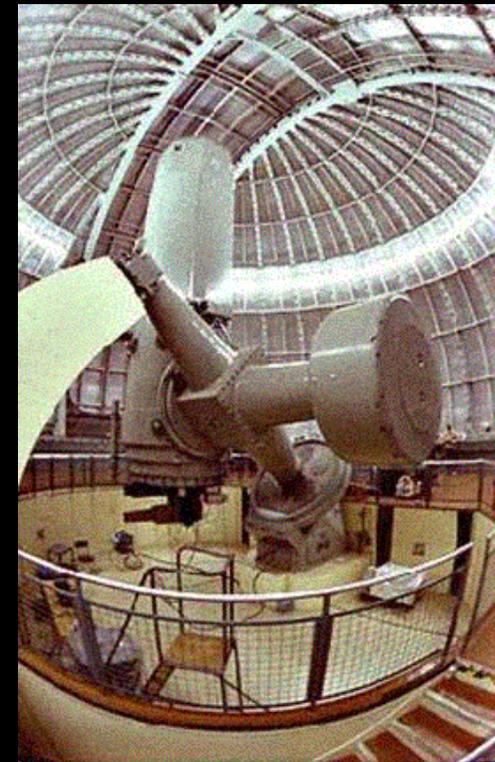
En 1995, deux astronomes suisses, M. Mayor et D. Queloz, ont découvert une planète autour de l'étoile 51 Pegasi en utilisant la méthode des vitesses radiales.

- Découverte de la planète 51 Peg b

Vitesse de l'étoile



Phase, i.e. temps « replié » sur une période



Spectrographe ELODIE au foyer du T193 à l'OHP

La découverte

En 1995, deux astronomes suisses, M. Mayor et D. Queloz, ont découvert une planète autour de l'étoile 51 Pegasi en utilisant la méthode des vitesses radiale.

- La découverte n'était pas attendue aussi vite ... mais, surprise !

La vitesse orbitale de l'étoile 51 Peg due à la planète 51 Peg b est de l'ordre de 60 m/s, soit 5 fois plus que pour le système Soleil-Jupiter.

- La planète 51 Peg est un « Jupiter chaud » :

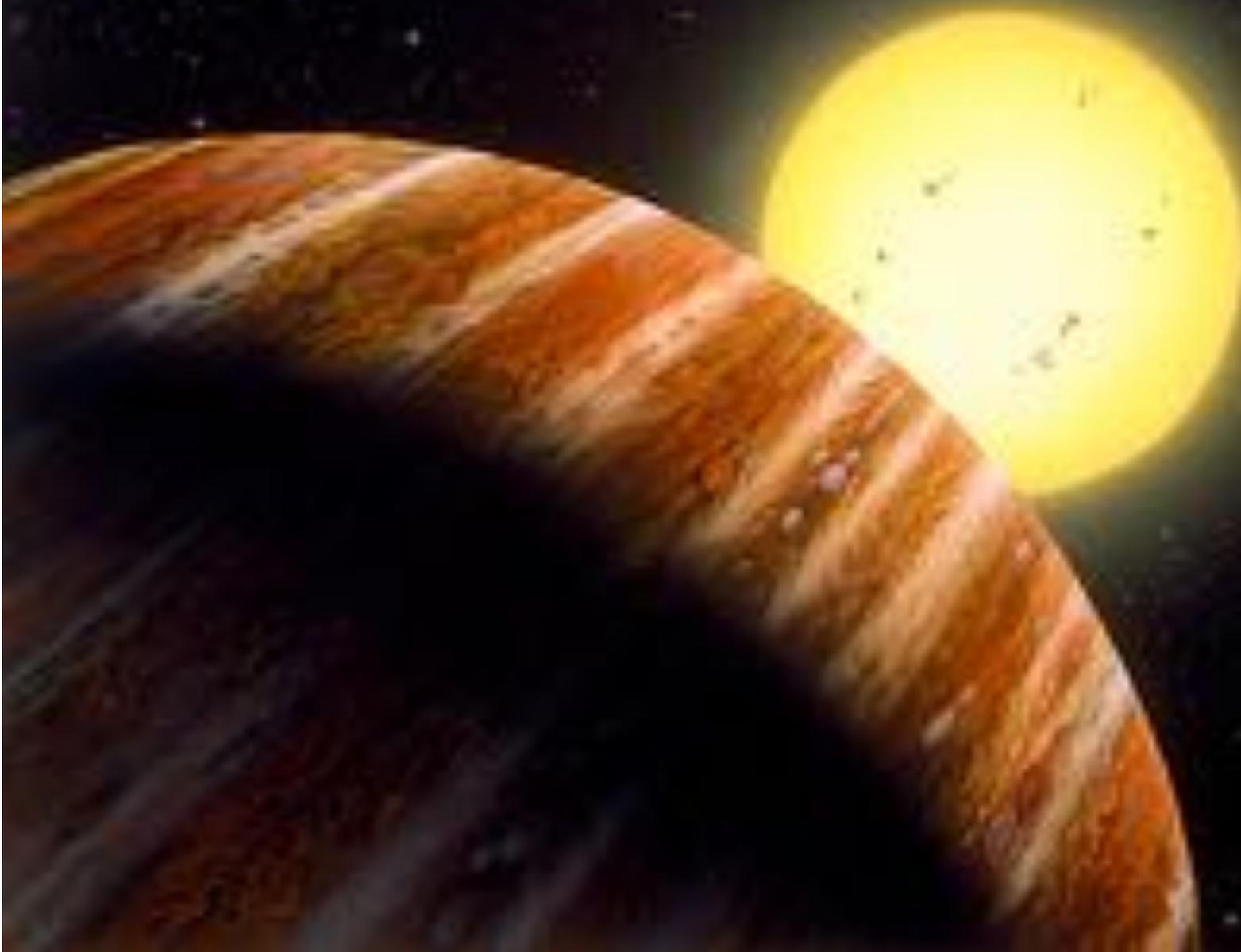
- sa masse est de $0,47 \times$ la masse de Jupiter :
c'est a priori une géante gazeuse

mais ...

- sa distance est de 0,05 U.A. !
(100 fois moins que Jupiter, 10 fois moins que Mercure)

Un Jupiter chaud

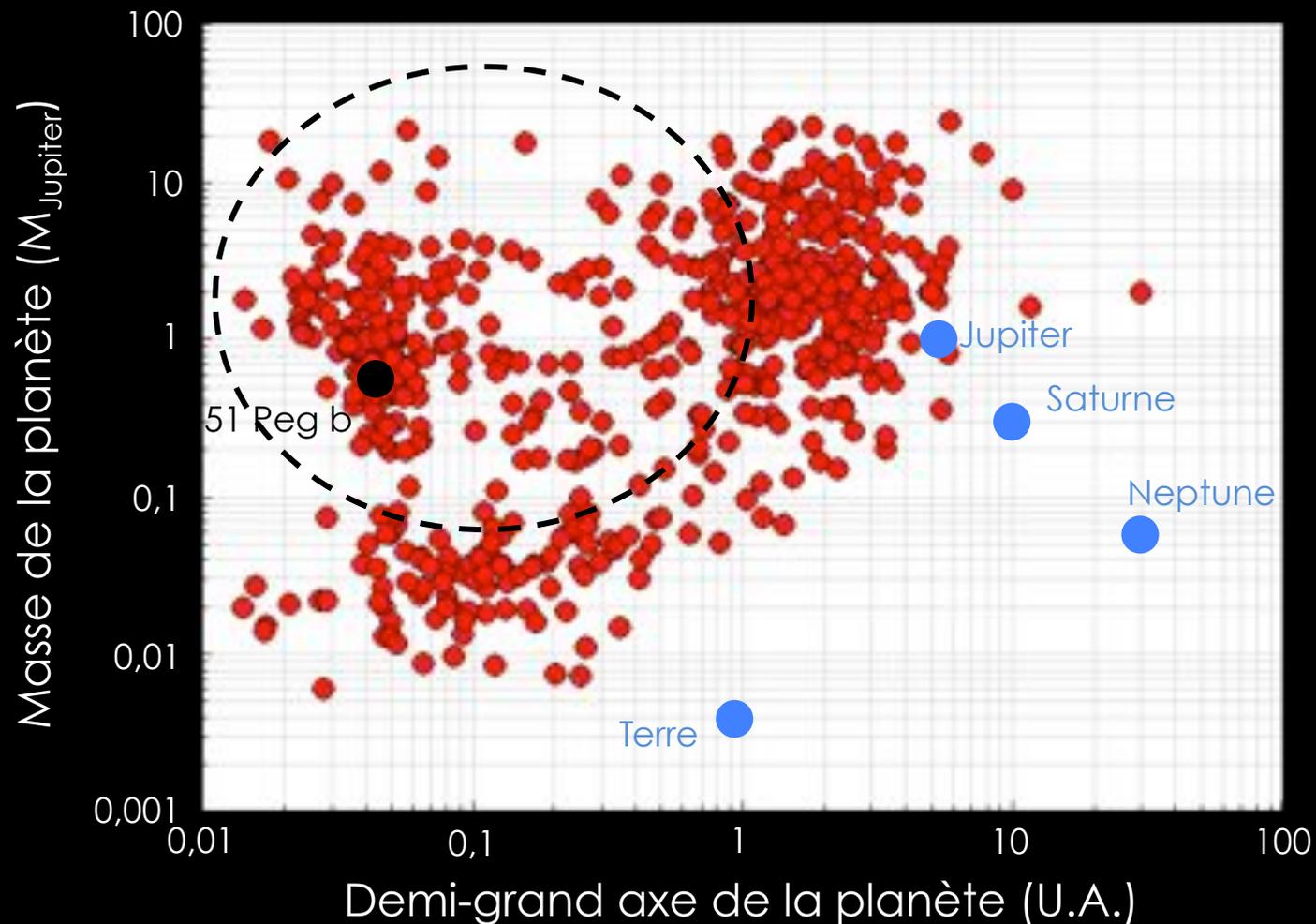
Vue d'artiste ...



Beaucoup d'autres Jupiters chauds

Depuis 1995, beaucoup d'autres exoplanètes ont été découvertes avec la méthode des vitesses radiales.

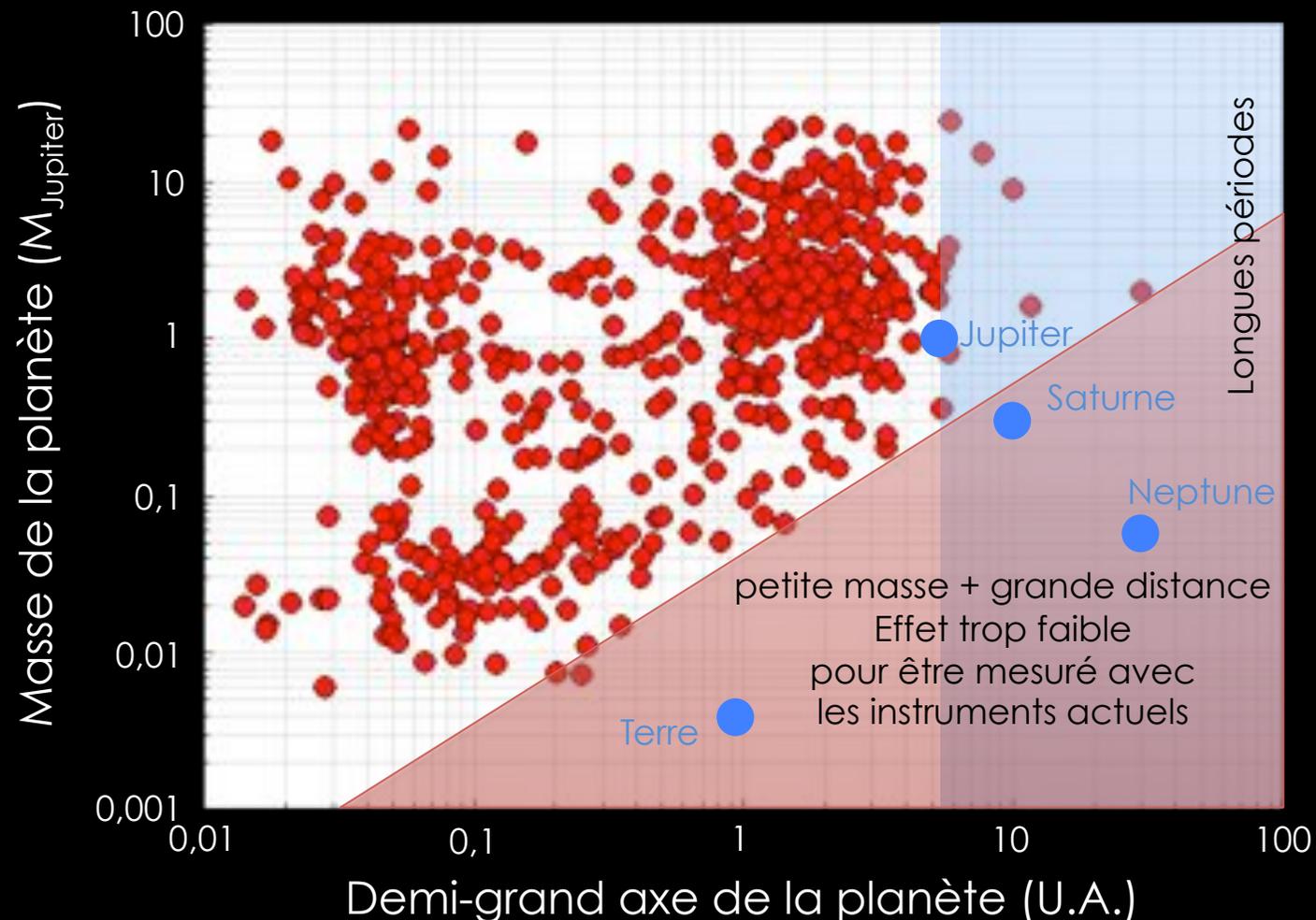
- Au 19 novembre 2011 : >600 planètes observées par cette méthode
- Beaucoup de Jupiters chauds mais aussi des Jupiters à la « bonne place »...



Beaucoup d'autres Jupiters chauds

Depuis 1995, beaucoup d'autres exoplanètes ont été découvertes avec la méthode des vitesses radiales.

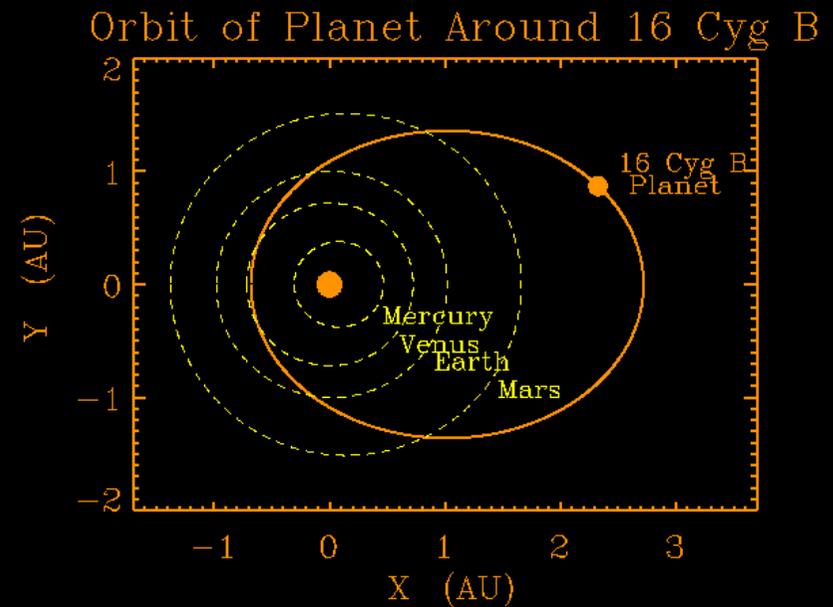
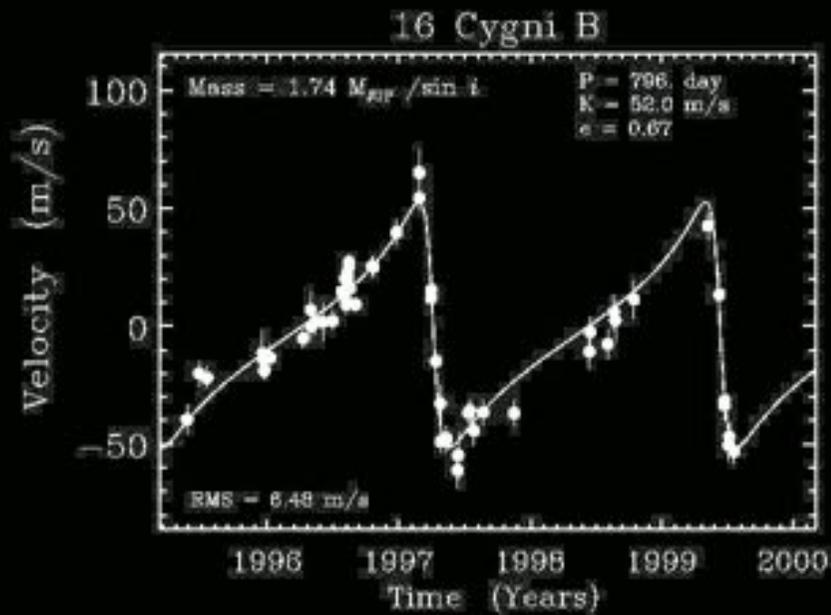
- Au 19 novembre 2011 : >600 planètes observées par cette méthode
- Beaucoup de Jupiters chauds mais aussi des Jupiters à la « bonne place »...



D'autres bizarreries...

La méthode des vitesses radiales permet aussi de mesurer l'excentricité de l'orbite de la planète.

- Beaucoup d'exoplanètes ont des orbites beaucoup moins circulaires que dans le système solaire.
- Exemple : la planète 16 Cyg b



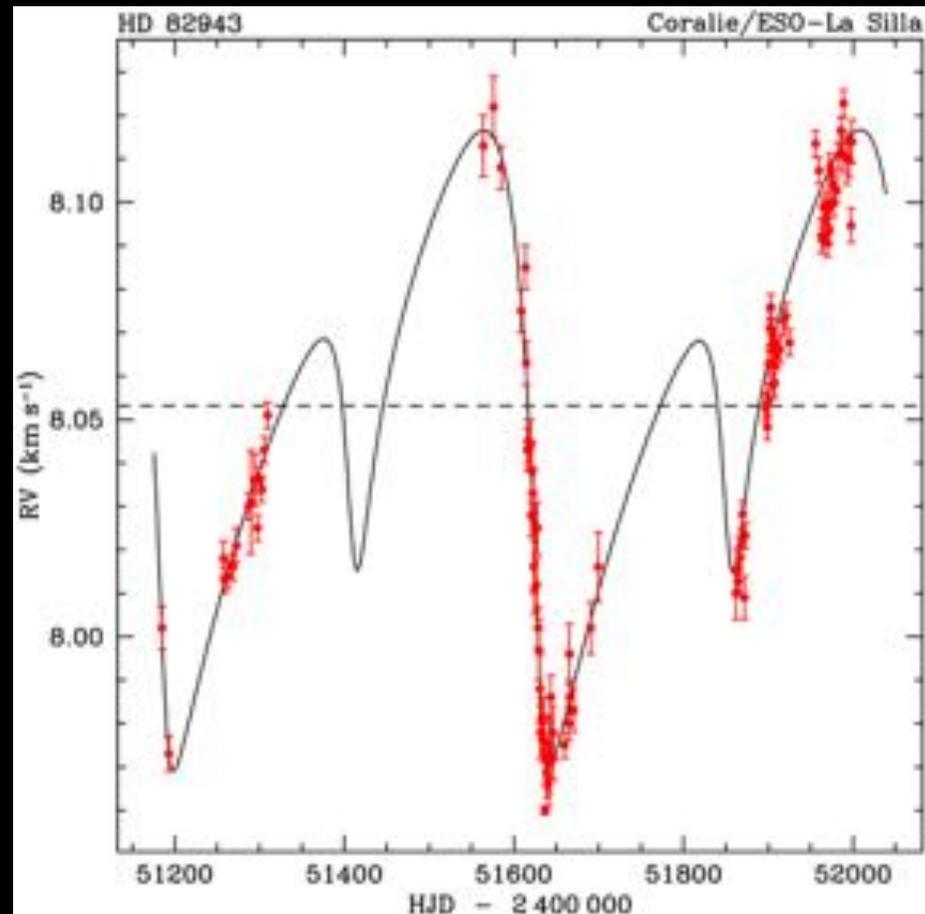
Des systèmes multiples

La méthode des vitesses radiales permet de détecter des systèmes avec plusieurs exoplanètes.

- La forme de la courbe donnant l'évolution de la vitesse de l'étoile avec le temps peut alors être très compliquée.

- Exemple : deux planètes autour de l'étoile HD 82943 avec une résonance 1:2 (cf. cours n°3)

planète 1 : période 220 jours
planète 2 : période 440 jours



Crédits : Observatoire de Genève

Les limites de la méthode des vitesses radiales

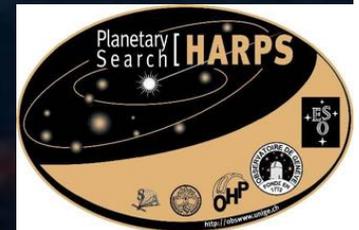
La méthode ne permet pas :

- de connaître la taille de la planète
- de déterminer précisément la nature de la planète (roche ou gaz)
(selon les modèles, une planète rocheuse a une masse maximum de l'ordre de $15 \times$ la masse de la Terre, soit 5% de la masse de Jupiter)
- de savoir si la planète a une atmosphère et quelle est sa composition...
- de détecter des petites planètes éloignées de l'étoile :
 - Limite actuelle : $\sim 1 \text{ m/s}$
 - Pour détecter une « super-Terre » proche de l'étoile : $\sim 1,4 \text{ m/s}$
(5 masses terrestres – 0,1 U.A.)
 - Pour détecter une « super-Terre » à 1 U.A. : $\sim 0,45 \text{ m/s}$
 - Pour détecter une Terre : $\sim 0,09 \text{ m/s}$

HARPS, le spectrographe le plus précis au monde

Limite ~ 1 m/s

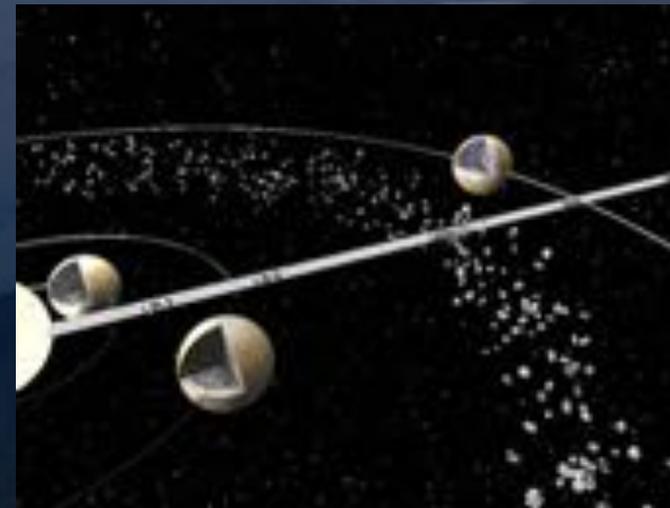
Observatoire de La Silla (ESO)



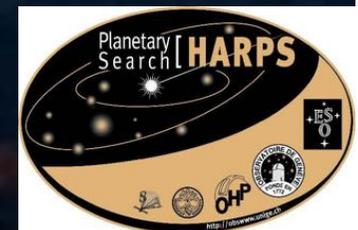
HARPS, le spectrographe le plus précis au monde

Limite ~ 1 m/s

T360



Le trident de Neptune découvert
en 2006 autour de HD69830
3 planètes (10,12 & 18 M_{Terre})
+ une ceinture d'Astéroïde



La méthode des transits

Depuis 2000, une seconde méthode est utilisée pour la détection des exoplanètes : la méthode des transits planétaires.

- Qu'est-ce qu'un transit planétaire ?
C'est le passage d'une planète devant son étoile...
- Un exemple célèbre : le passage de Vénus devant le Soleil (cf. cours n°1).



Dutch Open Telescope White Light 07:25:19

▪ Quand une planète passe devant son étoile, la luminosité de l'étoile diminue. La méthode des transits consiste à mesurer cette baisse du flux. Contrairement à la méthode précédente, c'est donc une méthode photométrique.

- Exemples: Vénus devant le Soleil : baisse de 0,008 % !
Terre : ~0,01%
Jupiter : ~1%

La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

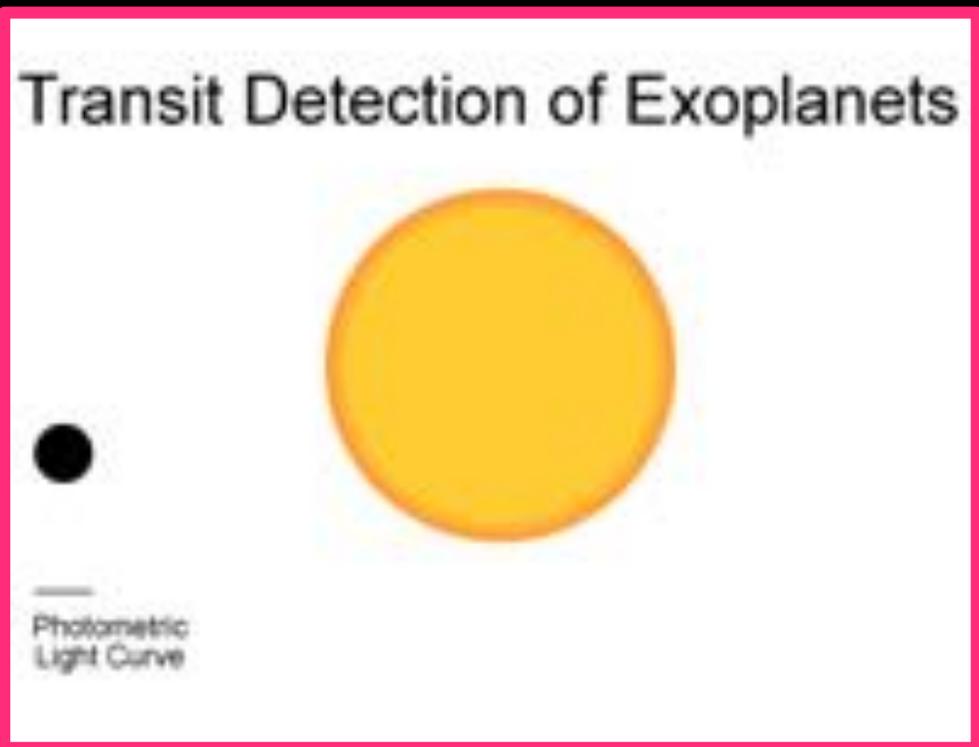
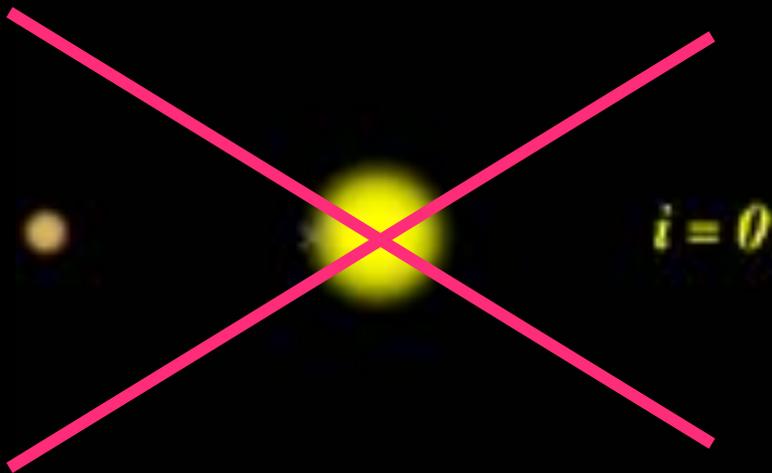
- Une question d'orientation
- Une question de précision photométrique



La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

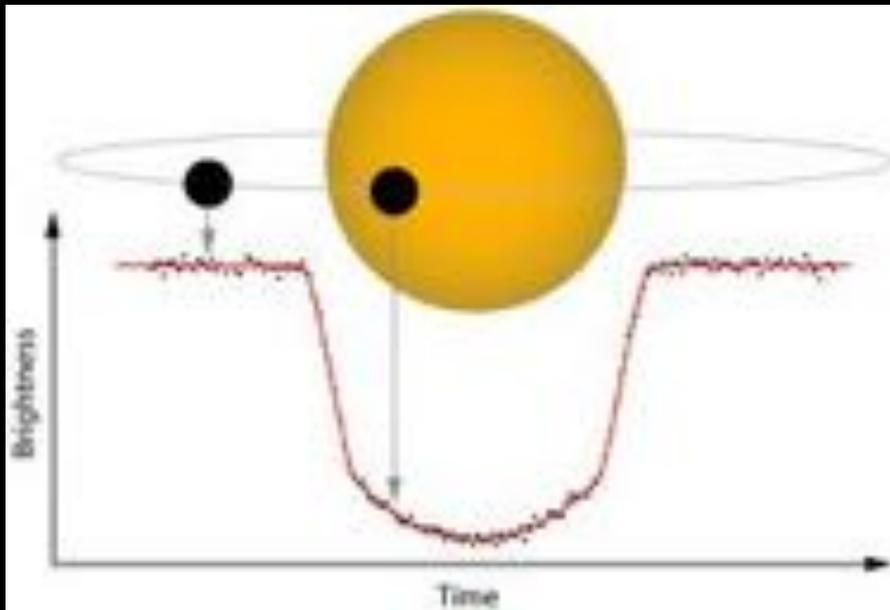
- Une question d'orientation
- Une question de précision photométrique



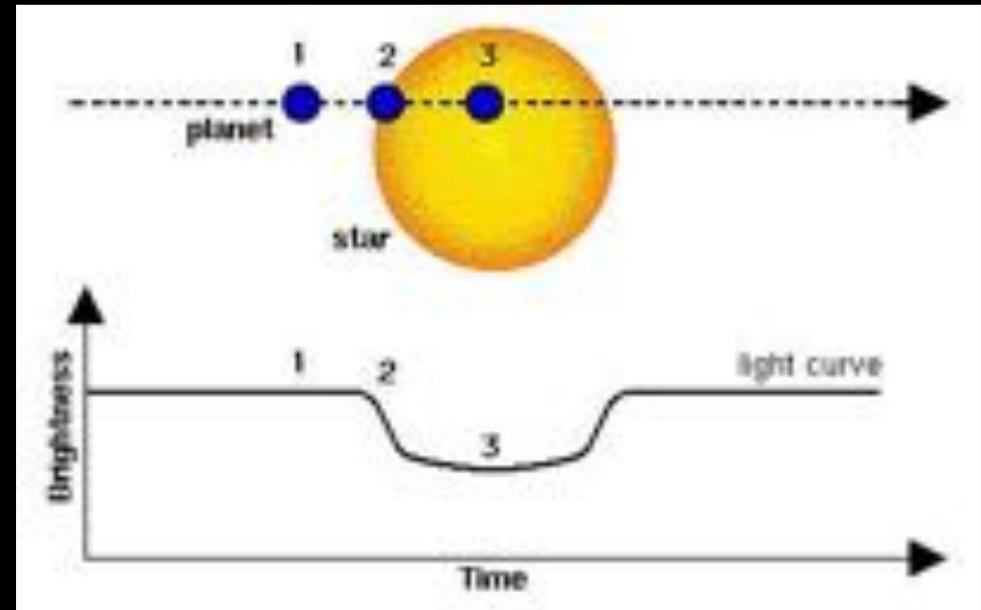
La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

- La forme de la courbe donne la taille de la planète
- La période donne la distance (3^{ème} loi de Képler)



La précision des mesures de flux doit être bien meilleure que la profondeur du transit



La forme de la courbe dépend
- de la taille de la planète
- de l'effet centre-bord sur l'étoile

La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

- La première détection par cette méthode a eu lieu en 2000 (D. Charbonneau et al.) : planète HD209458-b = « Osiris »

- Jupiter chaud : $1,3 R_{\text{Jupiter}} - 0,045 \text{ U.A.}$

- La méthode est complémentaire de celle des vitesses radiales :

- on mesure la taille;

- on lève l'incertitude sur l'inclinaison du système pour la mesure de masse par la méthode des vitesses radiales

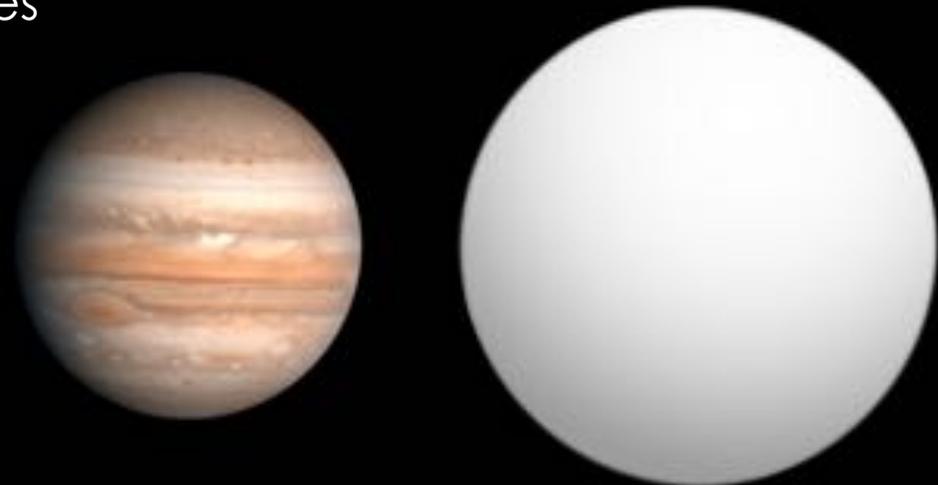
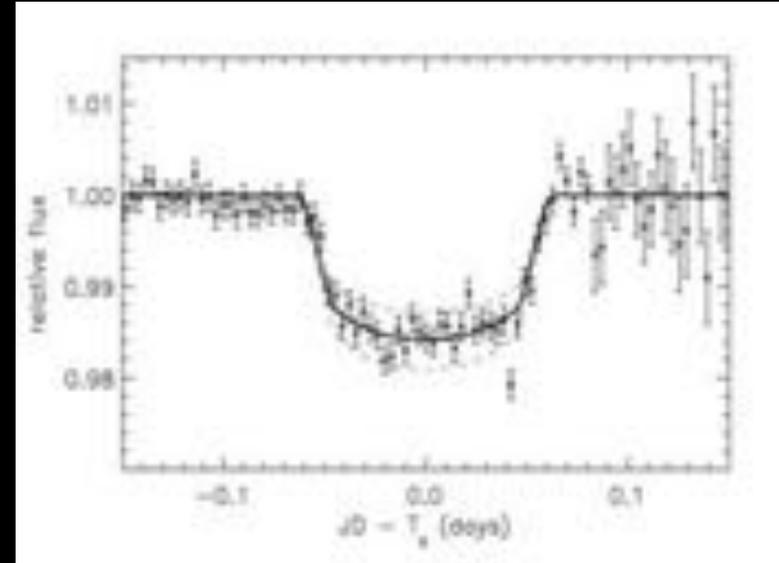
- taille + masse \Rightarrow densité
 \Rightarrow nature de la planète (roche ou gaz)

- Exemple d'Osiris :

$R \sim 1,3 R_{\text{Jupiter}}$ (transit)

$M \sim 0,69 M_{\text{Jupiter}}$ (vitesses radiales)

densité $\sim 0,37$ (gaz)



La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

- A cette distance Osiris doit avoir une température de ~ 1500 K
- La méthode permet aussi de sonder l'atmosphère planétaire

on compare le spectre de la lumière lorsque la planète est devant puis derrière l'étoile

la différence est due à l'atmosphère de la planète

mesure : composition chimique, profil de température, ...

- Application à Osiris :
 - L'hydrogène de l'atmosphère s'évapore (Vidal-Madjar et al.)
 - Débat : présence d'eau ?



Coucher de soleil sur Osiris

Simulation réalisée par A. Lecavelier (IAP)



Cette simulation utilise toutes les informations collectées sur Osiris :

- Distance, taille, température
- Information sur la composition de l'atmosphère :
molécule H_2 , sodium, oxydes divers

Retour sur quelques questions posées à la fin du cours n°4...

Sur Terre, pourquoi le ciel est bleu ? Pourquoi le Soleil qui se lève ou se couche est rouge ? Pourquoi les nuages sont blancs ?

- Expérience : on fait passer un faisceau lumineux dans un aquarium rempli d'eau dans lequel on fait précipiter du thiosulfate de sodium ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$) avec de l'acide chlorhydrique...

- Réaction : $3 \text{S}_2\text{O}_3^{2-} + 2\text{H}^+ \rightarrow 2 \text{SO}_4^{2-} + 4 \text{S} + \text{H}_2\text{O}$

Précipité de soufre



- Analogie : le faisceau lumineux joue le rôle du Soleil
L'aquarium joue le rôle de l'atmosphère...

Retour sur quelques questions posées à la fin du cours n°4...

Sur Terre, pourquoi le ciel est bleu ? Pourquoi le Soleil qui se lève ou se couche est rouge ? Pourquoi les nuages sont blancs ?

- Explication : la lumière est diffusée par les particules de l'atmosphère
- La diffusion n'affecte pas de la même façon toutes les longueurs d'onde
- Lorsque les particules sont petites : diffusion Rayleigh

Le bleu est plus diffusé que le rouge (particules = molécules de l'atmosphère)

- Le ciel est bleu : on voit la lumière diffusée du Soleil
- Le coucher de Soleil est rouge : l'épaisseur d'atmosphère est plus élevée, la diffusion plus importante, il ne reste que le rouge...

- Lorsque les particules sont plus grosses : diffusion de Mie

Toutes les couleurs sont affectées de la même façon,

- Les nuages sont blancs (particules = gouttes d'eau)

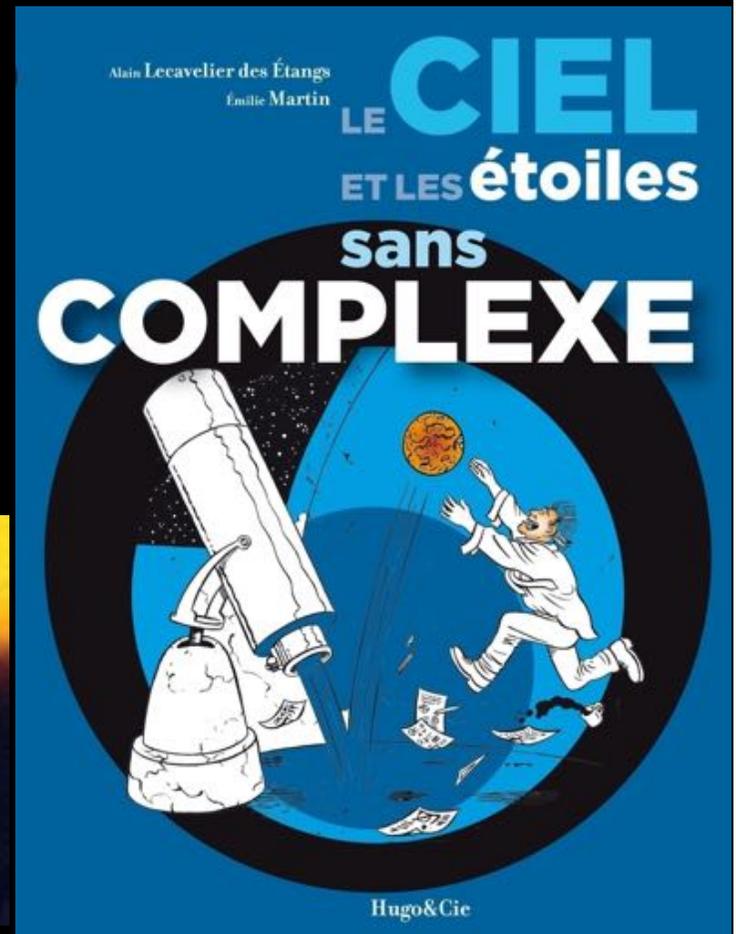
Retour sur quelques questions posées à la fin du cours n°4...

Sur Terre, pourquoi le ciel est bleu ? Pourquoi le Soleil qui se lève ou se couche est rouge ? Pourquoi les nuages sont blancs ?

- En savoir plus ... (et aussi : l'arc en ciel, le rayon vert, ...)

Le ciel et les étoiles sans complexe

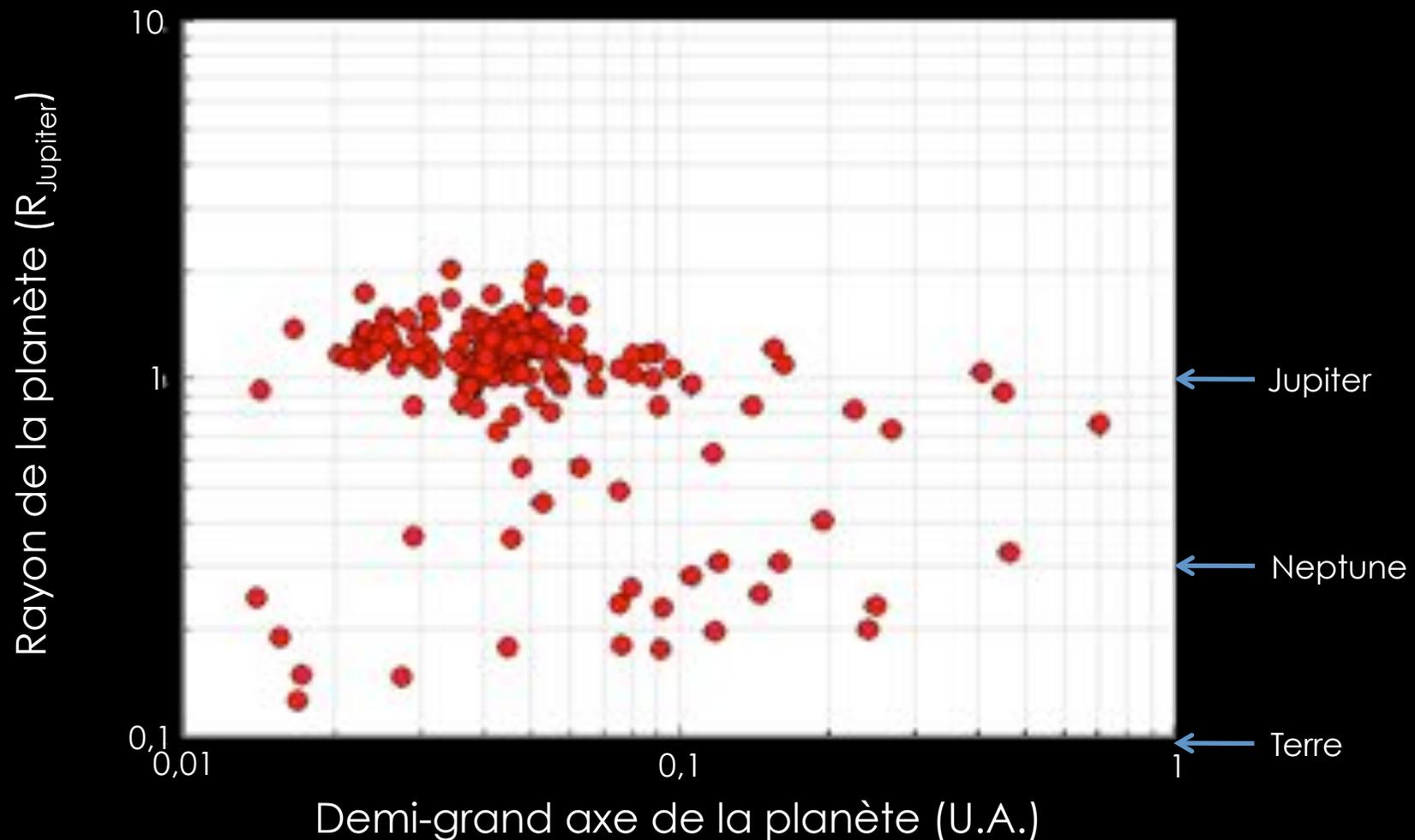
A. Lecavelier & E. Martin
Hugo&Cie



La méthode des transits

Détecter une planète qui passe devant son étoile...

- Depuis 2000, plus de 185 transits planétaires observés, dont 16 systèmes multiples
Beaucoup de Jupiter chauds, quelques super-Neptune...

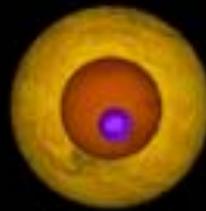
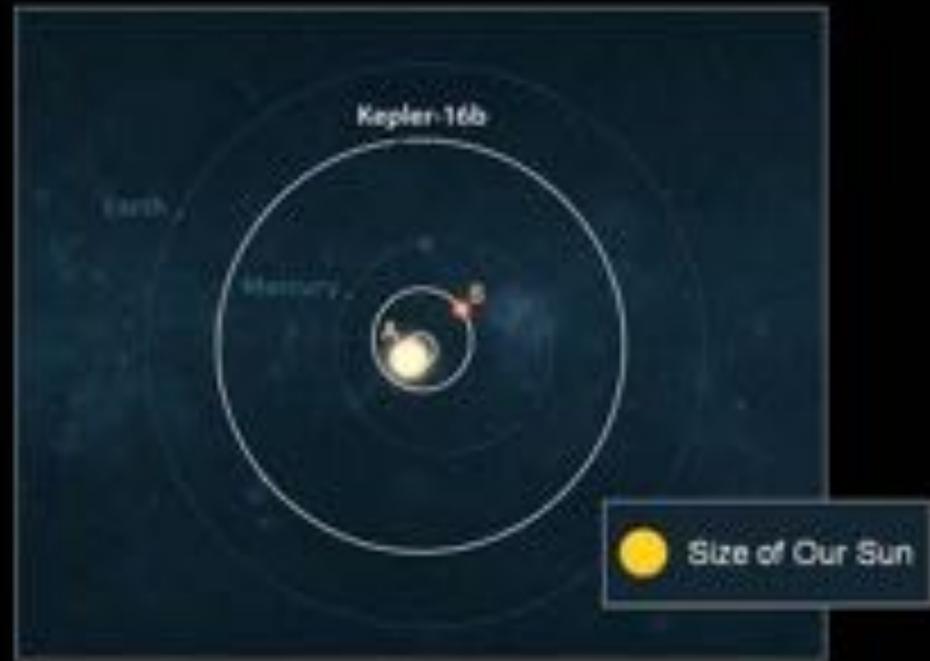


Une planète autour de 2 étoiles...

Récemment a été annoncée la découverte par la des transits d'une planète qui orbite autour de deux étoiles...



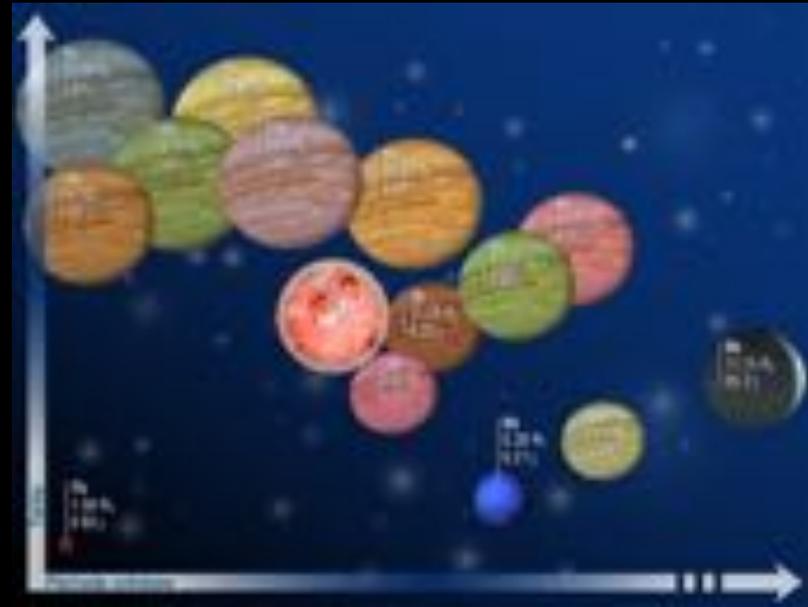
La planète Tatooine dans Star Wars...



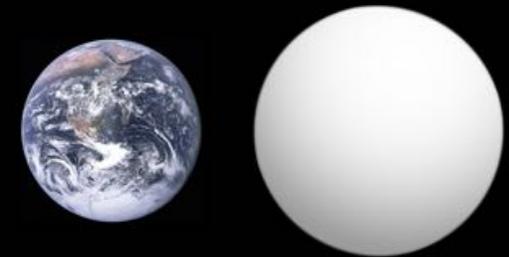
La méthode des transits

Deux missions spatiales détectent actuellement des planètes par la méthode des transits.

- CoRoT (France, lancé en 2006) : déjà plus de 24 découvertes d'exoplanètes dont une petite planète tellurique : CoRoT-7 $\sim 1,7R_{\text{Terre}}$

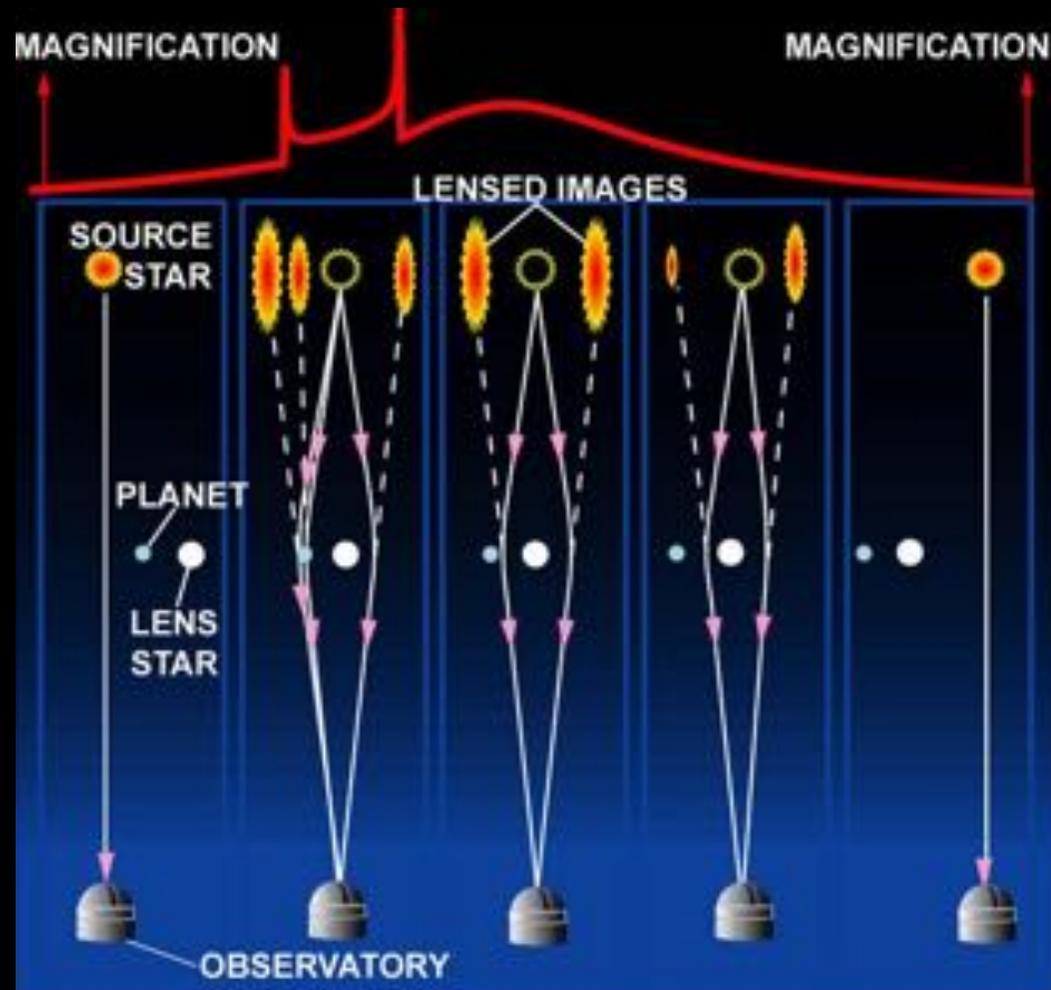


- Kepler (NASA, lancé en 2009) : déjà plus de 19 découvertes d'exoplanètes dont la plus petite planète tellurique détectée : Kepler-10b $\sim 1,4 R_{\text{Terre}}$



La méthode des microlentilles gravitationnelles

Une autre méthode photométrique est utilisée pour détecter les exoplanètes: elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle (Relativité Générale).



← Ces images sont trop rapprochées pour être observées séparément.

On observe la variation de la luminosité de l'étoile de fond.

La méthode des microlentilles gravitationnelles

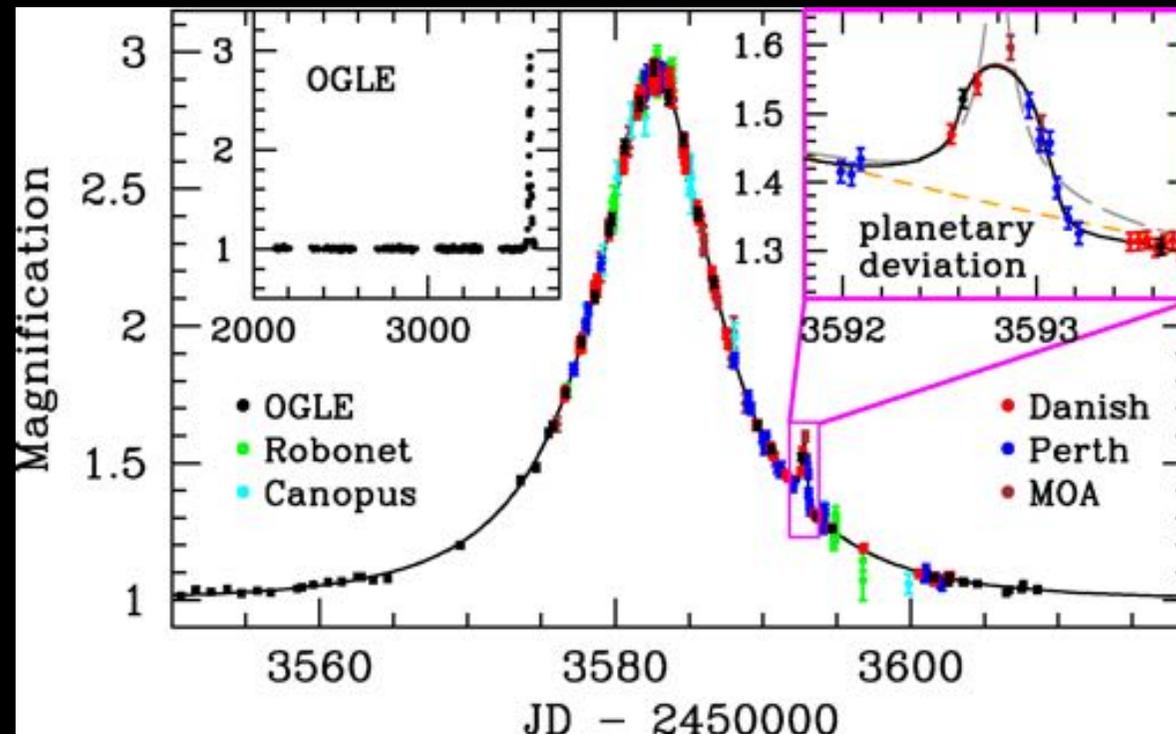
Une autre méthode photométrique est utilisée pour détecter les exoplanètes: elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle (Relativité Générale).

- La méthode consiste à suivre un grand nombre d'étoiles éloignées et à repérer un effet d'amplification due au passage sur la ligne de visée d'un système planétaire.
- Avantage de la méthode : elle n'utilise pas la lumière de l'étoile ou de la planète, elle est donc sensible aussi aux petites planètes.
- Inconvénient :
 - les objets détectés sont plus lointains
 - le phénomène ne se produit qu'une fois

La méthode des microlentilles gravitationnelles

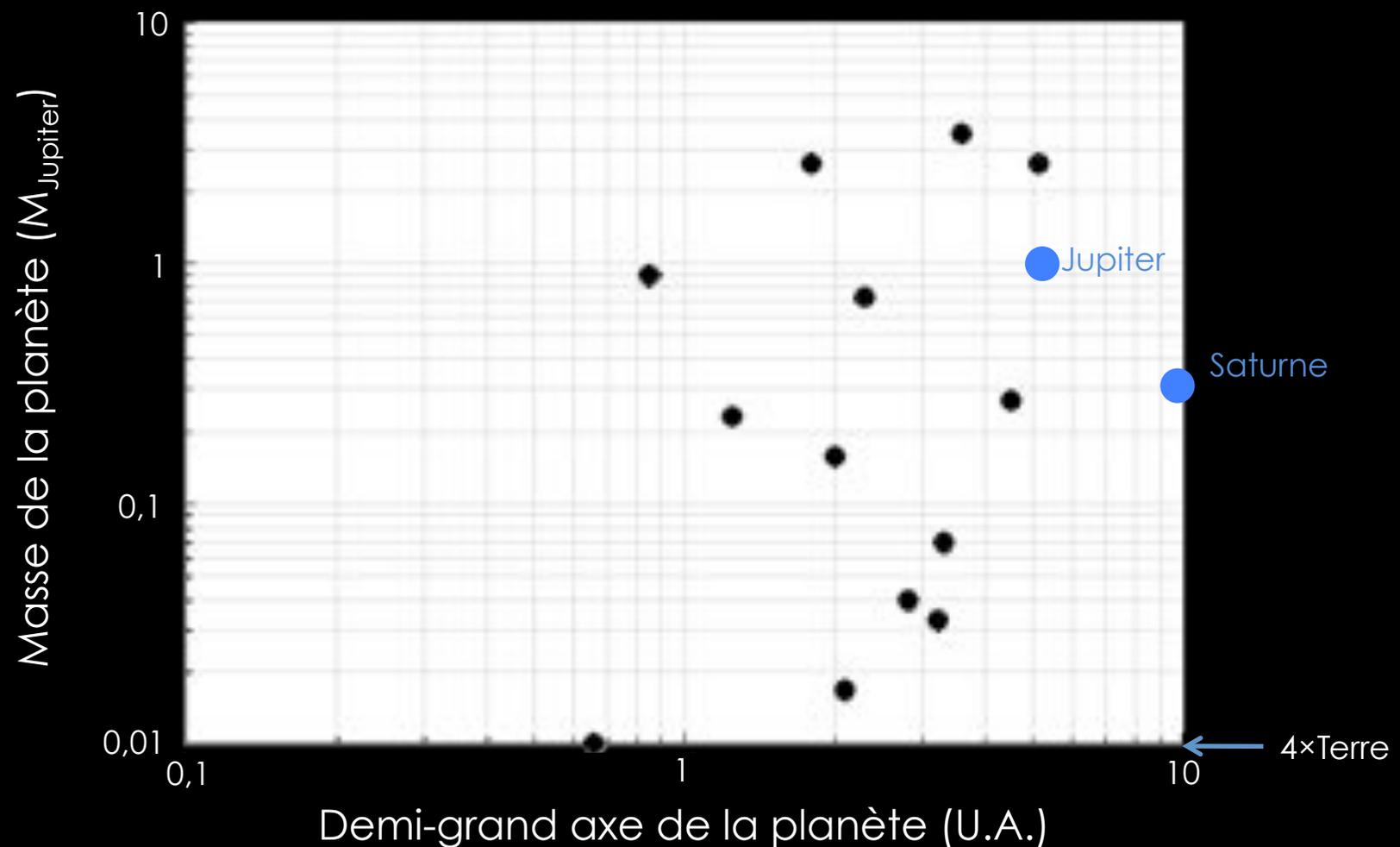
Une autre méthode photométrique est utilisée pour détecter les exoplanètes: elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle (Relativité Générale).

- Première détection : 2002 par la collaboration OGLE
- Depuis 2002, 13 planètes détectées, 1 système multiple (OGLE, PLANET, ...)
- 2005 : première planète tellurique (Baulieu et al.) : OGLE-2005-BLG-390lb à 22 000 ly de la Terre ; masse = $5 M_{\text{Terre}}$



La méthode des microlentilles gravitationnelles

Une autre méthode photométrique est utilisée pour détecter les exoplanètes: elle utilise l'effet de lentille gravitationnelle (Relativité Générale).



Des planètes sans étoile ?

Récemment la technique de microlentille gravitationnelle a pu mettre en évidence des planètes sans étoiles...

- Découverte récente de 10 planètes de la taille de Jupiter qui ne sont associées à aucune étoile...
- En cas de confirmation, cela indique qu'il y a sans doute des milliards de planètes flottantes de ce type dans la Galaxie...
- Les études de la dynamique des systèmes planétaires jeunes montrent beaucoup d'éjections : ces planètes flottantes en sont-elles les traces ?



Vue d'artiste

Bilan des détections

Depuis 1995, c'est plus de 700 exoplanètes qui ont été détectées. Le rythme de découverte est très rapide et plusieurs techniques sont exploitées. Lorsque c'est possible, on détecte la même planète avec plusieurs techniques. La grande cohérence des résultats valide l'ensemble de l'approche.

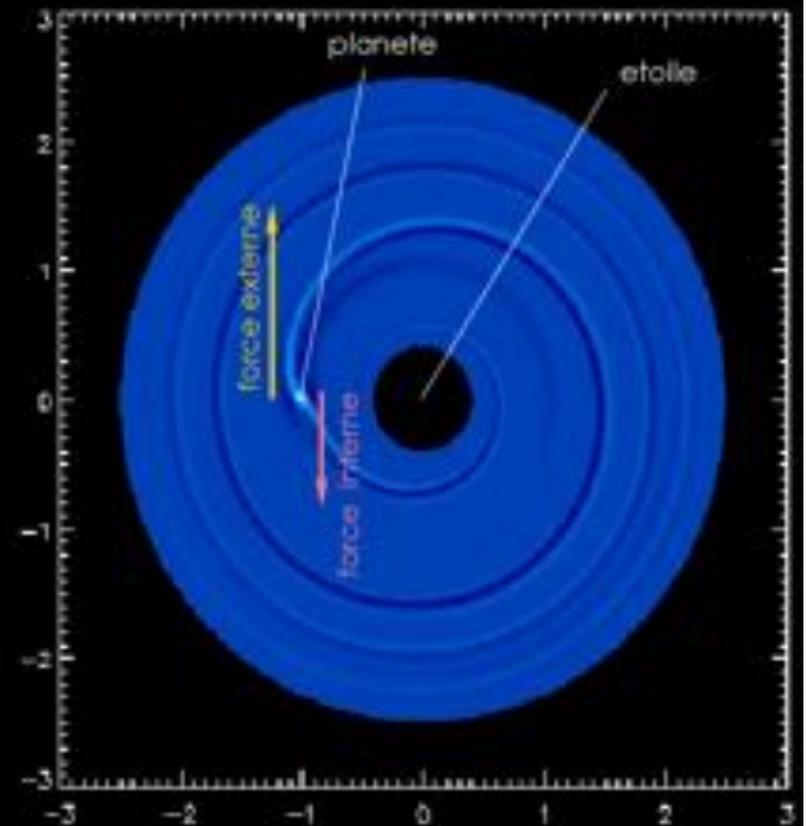
- Plutôt des grosses planètes (Jupiter)
- De plus en plus de Neptune
- Des super-Terre
- Bientôt des Terres ?

Bilan des détections

Depuis 1995, c'est plus de 700 exoplanètes qui ont été détectées. Le rythme de découverte est très rapide et plusieurs techniques sont exploitées. Lorsque c'est possible, on détecte la même planète avec plusieurs techniques. La grande cohérence des résultats valide l'ensemble de l'approche.

- Une distribution de paramètres inattendue (distance, excentricité, ...)
- Beaucoup de nouvelles idées sur la formation des systèmes planétaires
- Un exemple : les scénarios de migration planétaire

Les planètes géantes peuvent se former à grande distance et migrer vers l'étoile en raison d'une interaction complexe avec le disque protoplanétaire de gaz et de poussière.



Et la vie ?

Sommes-nous un cas unique ou la vie est-elle présente dans d'autres systèmes planétaires ?

- Cette question n'a pas de réponse scientifique pour l'instant.
- Cependant, depuis quelques décennies, une stratégie d'étude se développe (naissance d'une discipline : l'exo-biologie)
- Un problème : définir la vie ...

- Un premier point de vue : ne pas faire preuve de géocentrisme

Par exemple en envisageant une vie fondée sur autre chose que la chimie du Carbone dans l'eau

(exemples : Silicium au lieu de Carbone, ammoniac au lieu de l'eau, ...)

- Un second point de vue : la vie doit ressembler à celle sur Terre

les molécules carbonées sont les plus courantes dans le milieu interstellaire...

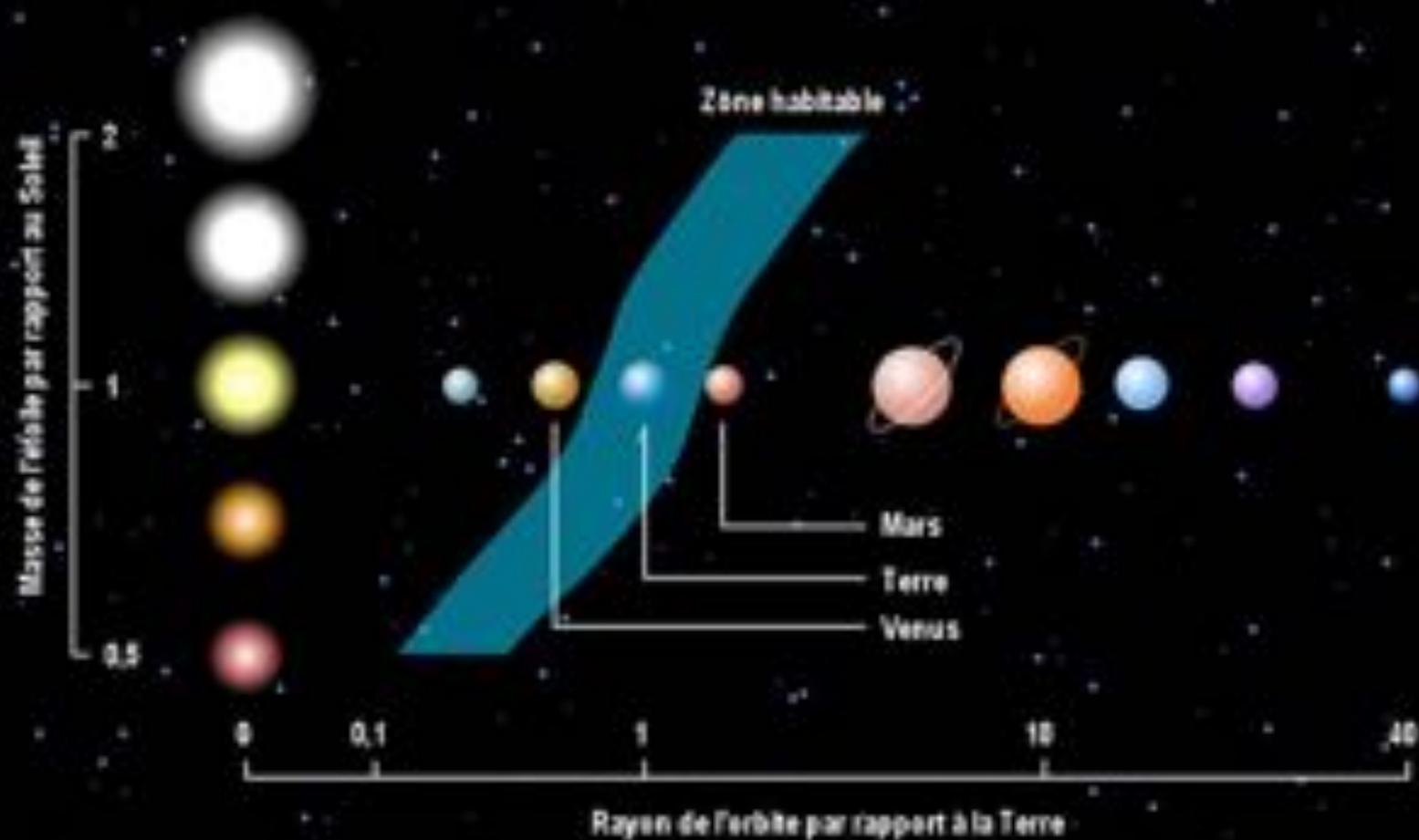
la vie dans le champ gravitationnel d'une planète rocheuse doit évoluer avec des contraintes similaires...

- En pratique, on cherchera d'abord plutôt une vie semblable à celle sur Terre car on sait comment faire (ex: chercher O₂, O₃ dans l'atmosphère)

Et la vie ?

Sommes-nous un cas unique ou la vie est-elle présente dans d'autres systèmes planétaires ?

- Un travail théorique : par exemple, définir un critère « d'habitabilité » pour les planètes, i.e. la région ni trop près ni trop loin de l'étoile où une atmosphère, l'eau liquide, etc. sont possibles.



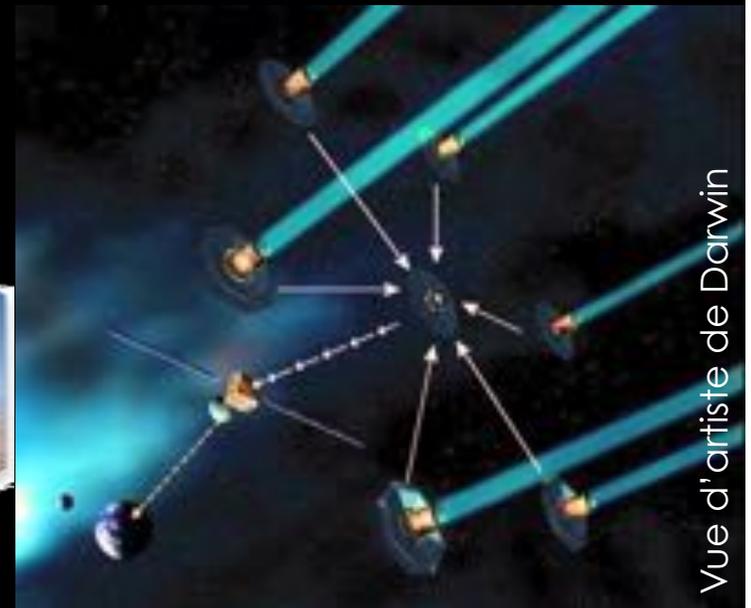
Et la vie ?

Sommes-nous un cas unique ou la vie est-elle présente dans d'autres systèmes planétaires ?

- Un travail observationnel :
 - améliorer les techniques actuelles pour détecter des Terres
 - imaginer des techniques pour sonder l'atmosphère des exoplanètes (au-delà des quelques informations obtenues avec les transits)
- Projets :
 - DARWIN (ESA, horizon 2020, abandonné) : observation directe et spectroscopie de l'atmosphère pour des planètes « habitables ».
 - projet ELT (téléscope \varnothing 40 m, ESO, 2018 ?) : imagerie + spectroscopie ?



Vue d'artiste de l'ELT



Vue d'artiste de Darwin

L'équation de Drake

En 1961, l'astrophysicien américain Frank Drake a écrit une équation célèbre, qui donne la probabilité de l'existence d'une vie intelligente ailleurs...

- Nombre de civilisations intelligentes dans la Galaxie qui voudrait communiquer avec l'extérieur ...

$$\begin{aligned} &= \text{Nombre d'étoiles dans la Galaxie} \\ &\times \text{Fraction des étoiles ayant des planètes} \\ &\times \text{Nombre moyen de planètes habitables} \\ &\quad \text{dans un système planétaire} \\ &\times \text{Probabilité – si la vie démarre – d'une vie intelligente} \\ &\times \text{Probabilité qu'une vie intelligente cherche à communiquer} \\ &\quad \text{et en ait les moyens} \\ &\times \text{Fraction du temps de vie d'une étoile pendant laquelle} \\ &\quad \text{la vie intelligente avec moyens de communication existe} \end{aligned}$$

L'équation de Drake

En 1961, l'astrophysicien américain Frank Drake a écrit une équation célèbre, qui donne la probabilité de l'existence d'une vie intelligente ailleurs...

- Nombre de civilisations intelligentes dans la Galaxie qui voudrait communiquer avec l'extérieur ...

=	Nombre d'étoiles dans la Galaxie	CONNU	
×	Fraction des étoiles ayant des planètes		?
×	Nombre moyen de planètes habitables dans un système planétaire		?
×	Probabilité – si la vie démarre – d'une vie intelligente		?
×	Probabilité qu'une vie intelligente cherche à communiquer et en ait les moyens		?
×	Fraction du temps de vie d'une étoile pendant laquelle la vie intelligente avec moyens de communication existe		?

Résultat en 1961 : entre 0 et 100 % ...

L'équation de Drake

En 1961, l'astrophysicien américain Frank Drake a écrit une équation célèbre, qui donne la probabilité de l'existence d'une vie intelligente ailleurs...

- Nombre de civilisations intelligentes dans la Galaxie qui voudrait communiquer avec l'extérieur ...

=	Nombre d'étoiles dans la Galaxie	CONNU	
×	Fraction des étoiles ayant des planètes	BIENTÔT CONNU	
×	Nombre moyen de planètes habitables dans un système planétaire	SERA CONNU ?	
×	Probabilité – si la vie démarre – d'une vie intelligente		?
×	Probabilité qu'une vie intelligente cherche à communiquer et en ait les moyens		?
×	Fraction du temps de vie d'une étoile pendant laquelle la vie intelligente avec moyens de communication existe		?

En 2011 (50 ans après) : des progrès mais le résultat est toujours entre 0 et 100 % !

- Scénario « optimiste - pessimiste » : (la civilisation dure 200 ans)
 $300 \text{ milliards} \times 100 \% \times 1 \times 100\% \times 100\% \times 0.000025 \% = 25\,000 \text{ civilisations}$
- Scénario « optimiste - optimiste » : (la civilisation dure 5 milliards d'années)
 $300 \text{ milliards} \times 100 \% \times 1 \times 100\% \times 100\% \times 50\% = 50 \text{ milliards de civilisations}$
- Sans être très pessimiste, on peut tomber en dessous de 1 ...
- Programme SETI ou paradoxe de Fermi ?

Résumé du cours n°5

C'est en 1995 que la première exoplanète autour d'une étoile « normale » a été découverte. Cette observation est très délicate : la planète est plus petite et bien moins lumineuse que son étoile. Plusieurs méthodes sont exploitées :

- Imagerie directe : encore très rare car très difficile.
- Méthode des vitesses radiales : détection par spectrométrie du mouvement orbital de l'étoile dû à la planète (mesure de la vitesse par effet Doppler). Cette méthode permet de mesurer la masse de la planète et sa distance à l'étoile.
- Méthode des transits : détection de la baisse du flux de l'étoile lorsque la planète passe devant. Cette méthode permet de mesurer le rayon de la planète et sa distance, ainsi que de sonder grossièrement son atmosphère.
- Méthode des microlentilles gravitationnelles : détection de l'amplification de la lumière d'une étoile lointaine lorsqu'un système planétaire passe devant. Cette méthode a l'avantage d'être sensible aux planètes de faible masse.
- Méthode astrométrique : mesure directe du déplacement orbital de l'étoile. Cette méthode sera exploitée par le futur satellite GAIA.

De nombreuses exoplanètes ont été détectées, avec des paramètres souvent inattendus, ce qui conduit à revoir en partie les scénarios de formation. La plus petite planète détectée est tellurique avec $\sim 4 M_{\text{Terre}}$. A court terme, la détection d'une exo-Terre semble réalisable. A moyen-long terme, la recherche d'éventuelles traces de vie sur des exo-planètes « habitables » semble elle aussi envisageable...

Deux livres

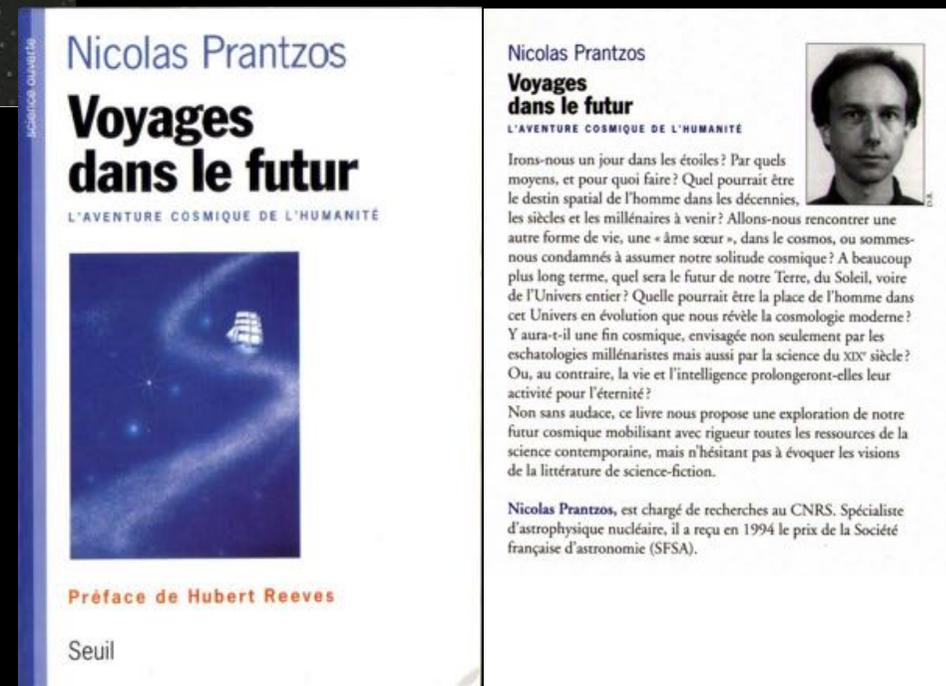


Mais où est donc le temple du Soleil ?
Enquête scientifique au pays d'Hergé

R. Lehoucq & R. Mochkovitch
Flammarion

Voyages dans le futur
L'aventure cosmique de l'humanité

N. Prantzos
Seuil



Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Cours n°6 – Vie et mort des étoiles (lundi 5 déc.) [pas de cours lundi 28 nov.]

Cours n°7 – Explosions et monstres cosmiques (lundi 12 déc.)

Etoile
polaire

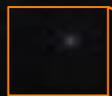


Les « 7 sœurs »
des Pléiades

Sirius



L'amas ouvert des Pléiades
à 440 années lumière



Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr