

# Planètes extra-solaires

## De leur naissance à leur détection

Xavier Delfosse  
Laboratoire d'Astrophysique  
Observatoire de Grenoble

Université J. Fourier  
CNRS

Illustrations d'artistes : Lynette Cook



# Planètes extra-solaires

## Références :

Démonstration :

cours de Goutelas 2000 “Étoiles doubles”

<http://astro.u-strasbg.fr/goutelas/g2000/>

Présentation générale des étoiles doubles (J.L.Halbwachs)

cours de Goutelas 2005 “Formation planétaire et exoplanètes”

<http://astro.u-strasbg.fr/goutelas/g2005/>

Détection des exoplanètes par mesures de vitesses radiales (F. Bouchy)

# Planètes extra-solaires

Plan :

- Un peu Histoire
- Formation des planètes extra-solaire
- Méthode de détection
- Statistique des systèmes planétaires détectés

# Un peu d 'histoire

## Babylone (-3000)

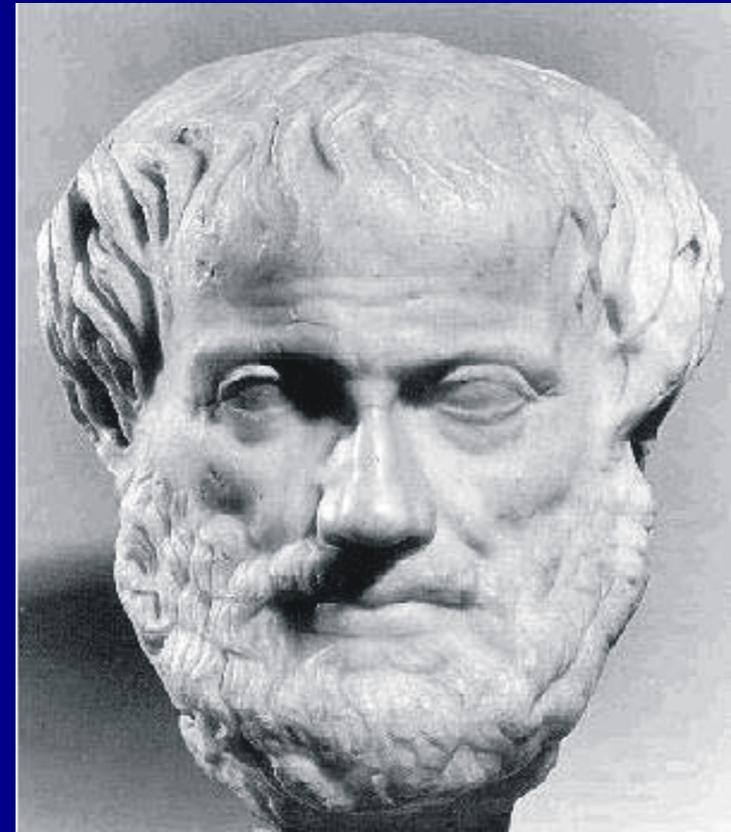
Mercure, Vénus, Mars, Jupiter et Saturne repérées comme des astres errants par rapport aux étoiles fixes. Nommées « chèvres sauvages » par les babyloniens, elles prennent le nom de « planètes » (littéralement vagabonds) sous les grecs.

## Aristote (384-322 av JC)

- Espace fini et divisé en deux : monde supra et infra-lunaire

- Sur Terre 4 éléments (terre, air, eau, feu)
- Au delà de la Lune; un cinquième élément

Une physique qui sera la base jusqu'à Galilée

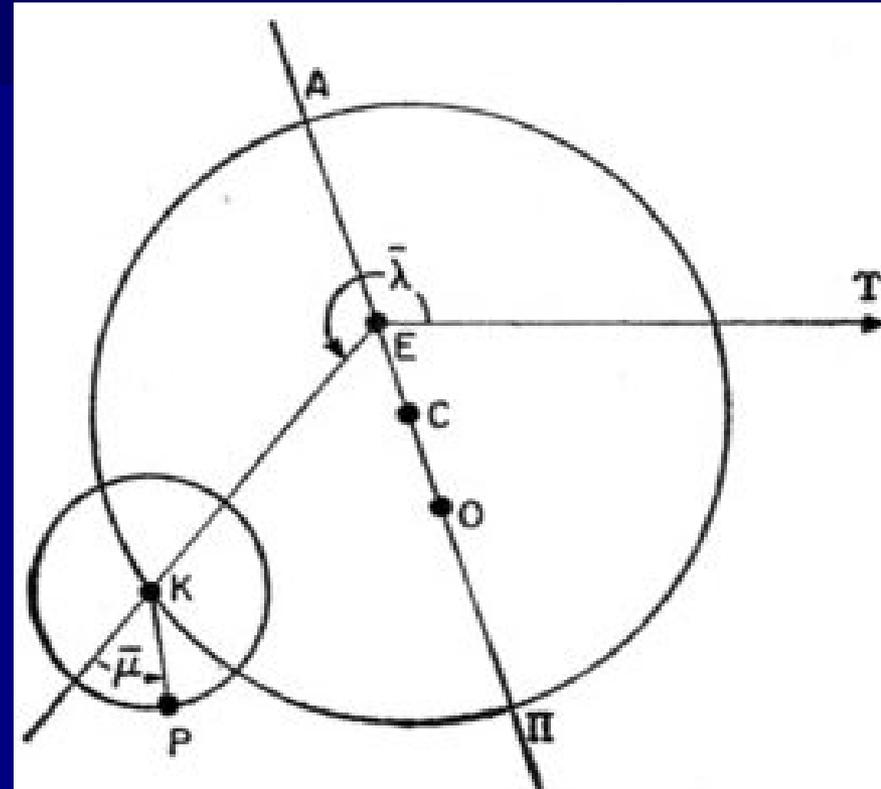


# Un peu d 'histoire

## Ptolémé (100-180 ap JC)

- La Terre occupe une place centrale
- Les autres astres suivent des  
Combinations complexes de trajectoires  
Circulaires

Un système amélioré par les astronomes arabes qui sera la référence pendant 1500 ans.



# Un peu d 'histoire

## Une sphère des étoiles

- Dans cette vision la sphère des étoiles tourne autour de la Terre. Les étoiles ont un statut très différents de celui du Soleil.
- On ne peut imaginer des planètes tournant autour de ces étoiles.
- Une vision nouvelle de l'univers est nécessaire pour concevoir la possibilité d'existence de planètes autour d'autres étoiles.

# Un peu d 'histoire

Même parmi les voix discordantes des atomistes

Epicure (~300 av JC)

« Ce n 'est pas seulement le nombre des atomes, c'est celui des mondes qui est infini dans l 'Univers. Il y a nombre infini de mondes semblables au notre et un nombre infini de mondes différents ...

... On doit admettre que dans tous les mondes, sans exception, des plantes et tous les autres êtres que nous observons...»

Mais ce sont tous des mondes entourées de leur propres sphères des étoiles. Des systèmes au delà de « notre » sphère des étoiles

# Un peu d 'histoire

## Fin du Moyen age

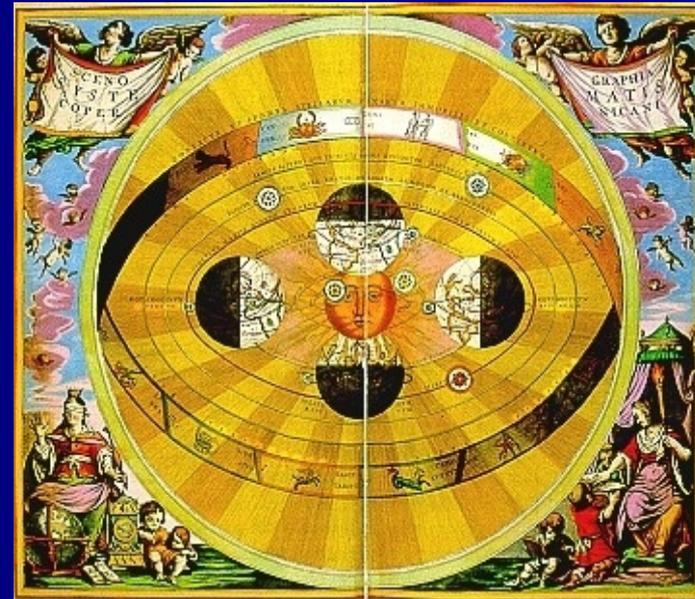
- Vie intellectuelle lancée par la création des universités. Renouveau de la discussion des idées (avec prudence, ne pas heurter le pouvoir religieux).
- Buridan (né en 1295 en France) : Evoque la possibilité d'autres mondes habités dans l'espace
- Thomas Bardwardine : possibilité que l'univers soit infini.
- Nicola De Cusa (prêtre 1401-1464) : « De la docte assurance », écrit en 1440, publié en 1514. Le monde est infini et n'a pas de frontière. Donc pas de centre. **La Terre ne peut occuper un centre.** Convaincu que les astres sont fait de la même matière que la Terre, et qu'ils sont habités d'être ni meilleurs ni pires.

# Un peu d'histoire



## Nicolas Copernic (1473-1543)

- Fin du géocentrisme; le Soleil est placé au centre du système
- La Terre suit une trajectoire équivalente à celles des autres planètes
- Les preuves de ce système sont « partiellement » apportées par Galilée (1564-1642)...



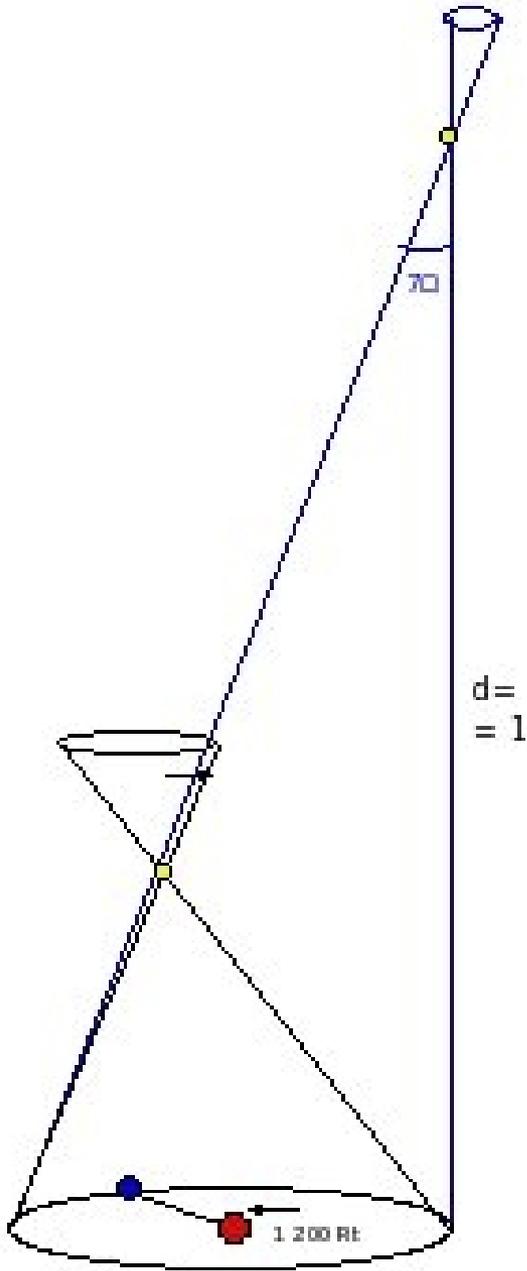
# Un peu d'histoire

## Nicolas Copernic (1473-1543)

- Fin du géocentrisme; le Soleil est placé au centre du système
- La Terre suit une trajectoire équivalente à celles des autres planètes
- Les preuves de ce système sont « partiellement » apportées par Galilée (1564-1642)...

## Geo-centrisme :

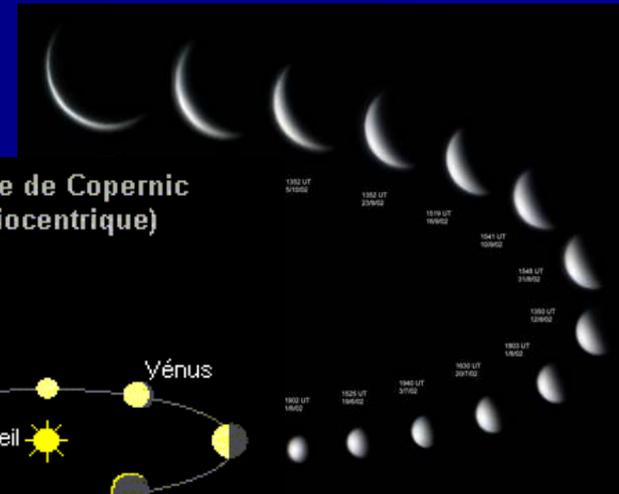
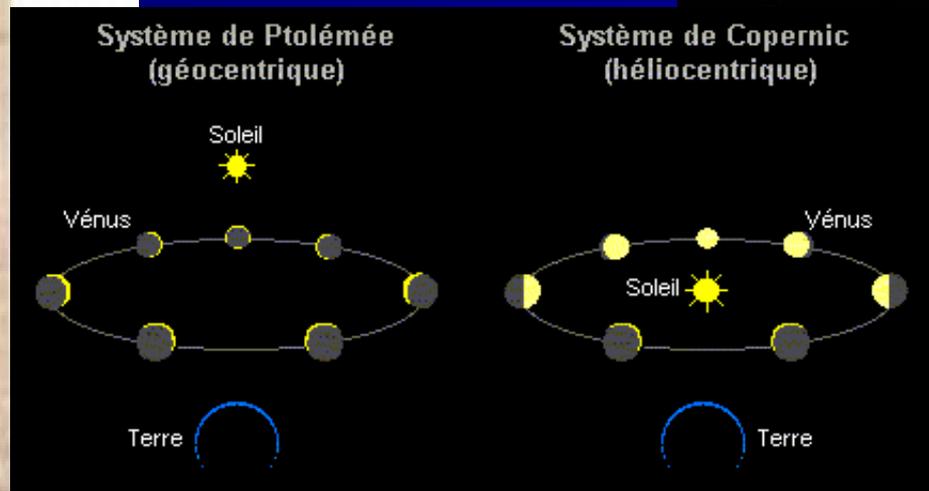
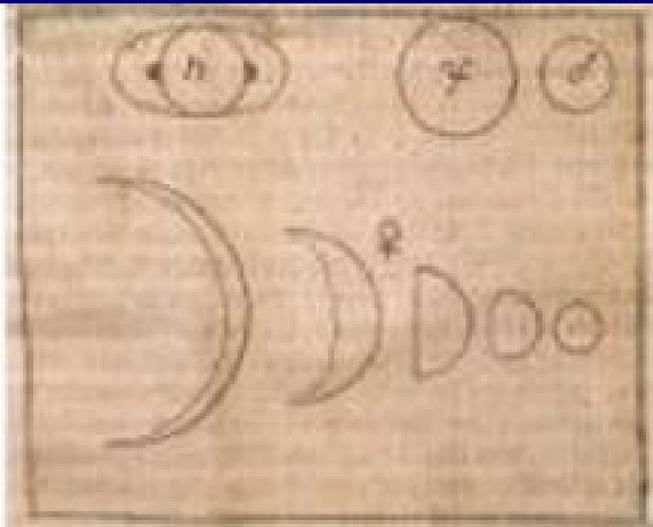
Si on accepte le géo-centrisme, l'apparente fixité des étoiles ne peut s'expliquer que par leur distance très grande... Univers très vaste



# Un peu d'histoire

## Galilée (1564-1642)

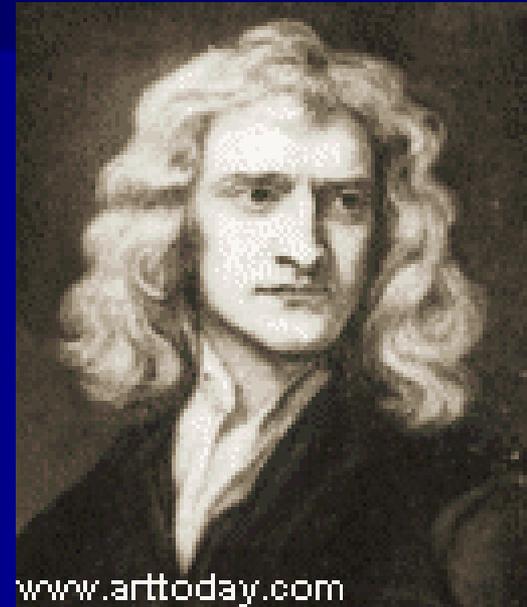
- satellites de Jupiter (astres médicéens) : maintenant appelé satellites galiléens. Un autre centre que la Terre est prouvé observationnellement.
- Les phases de Vénus : preuve que Vénus tourne autour du Soleil, rejette le modèle de Ptolémée.



# Un peu d 'histoire

## Newton (1642 - 1727)

- Les trajectoires des planètes sont causées par la même loi que la chute des corps sur Terre : la GRAVITE
- Ciel et Terre sont régis par les mêmes lois
- Plus aucun obstacle conceptuel à l'existence d'autres systèmes planétaires que le notre



## XVIII et XIX<sup>ième</sup> siècle

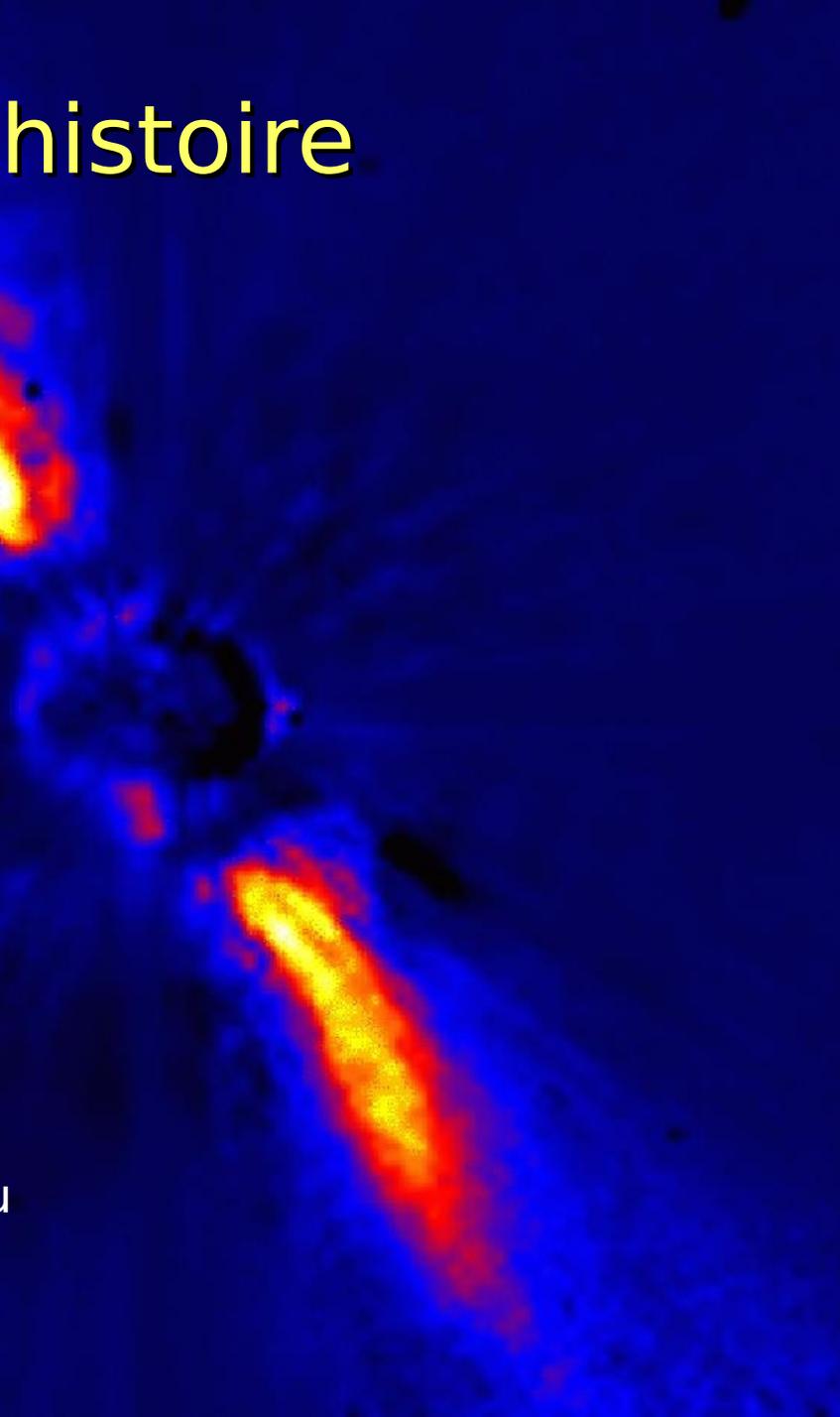
- Mesure de la distance des étoiles = preuve qu'elles sont similaires au Soleil
- Développement de la physique stellaire (initié par Halley)

# Un peu d 'histoire

Mais il fallut encore attendre pour avoir la preuve observationnelles de la pluralité des mondes.

1984 : Découverte d'un disque proto-planétaire autour de l'étoile Pictoris

1992 : Découverte de 3 planètes autour du pulsar PSR 1257+12



# Un peu d'histoire



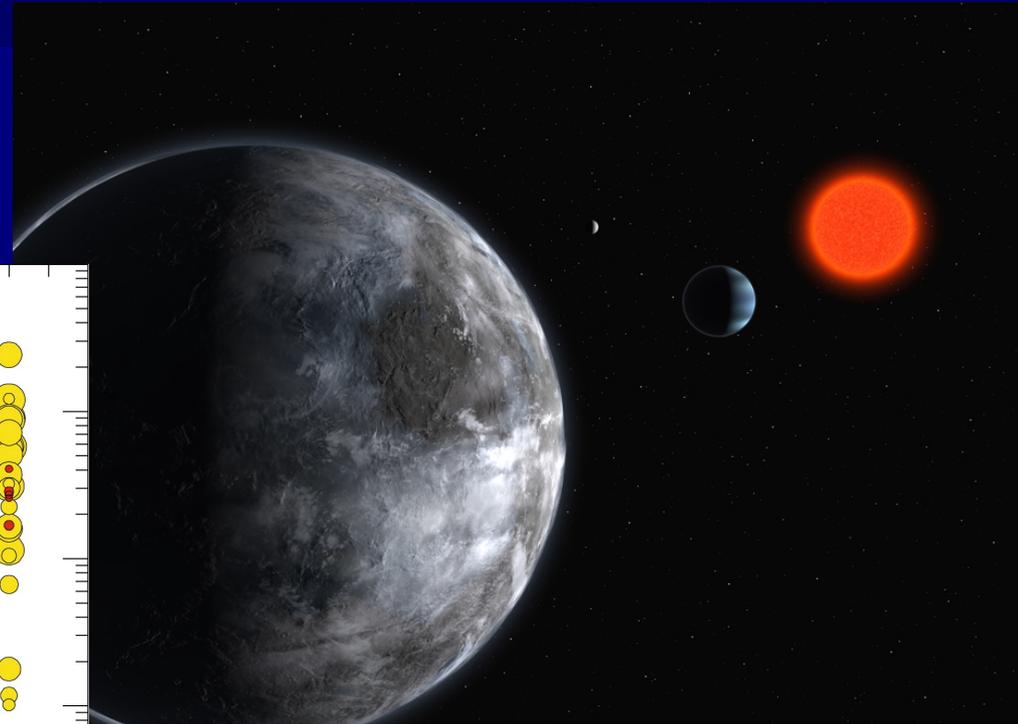
## 1995 : 51 Peg

Découverte de la première planète extra-solaire autour d'une étoile de la séquence principale par les Suisses M. Mayor et D. Queloz à l'Observatoire de Haute Provence



# Un peu d 'histoire

Aujourd'hui : plus de 450 planètes extra-solaires détectées



The Planetary System in Gliese 581

(Artist's Impression)

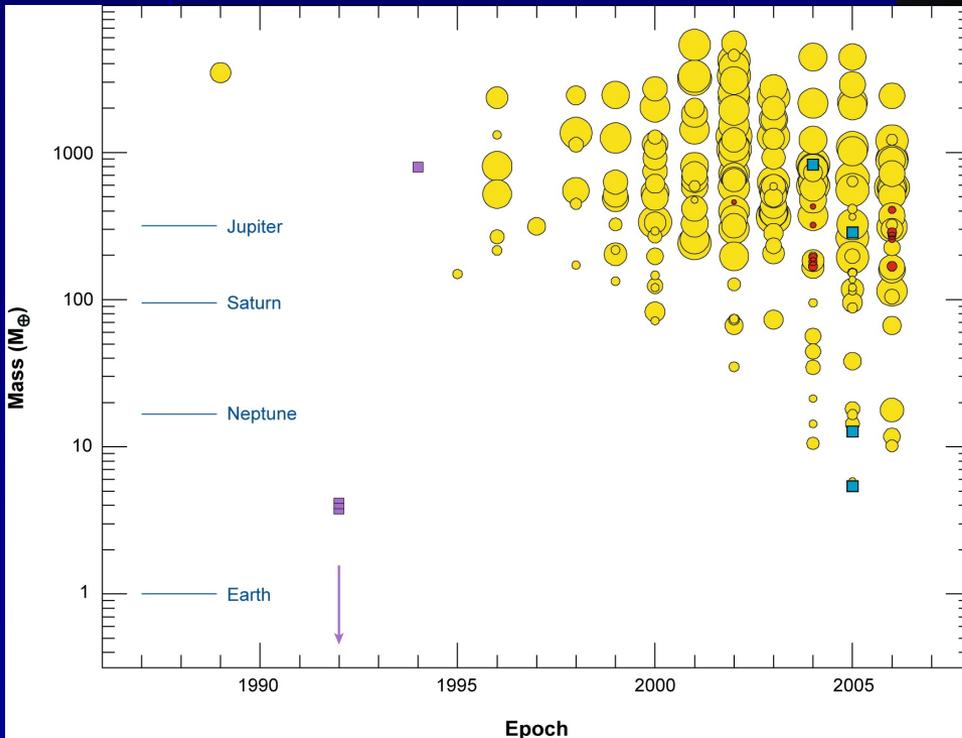
Press Photo 22a/07 (25 April 2007)

Copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



Dont certaines à peine plus massives  
que la Terre et « potentiellement »  
habitables

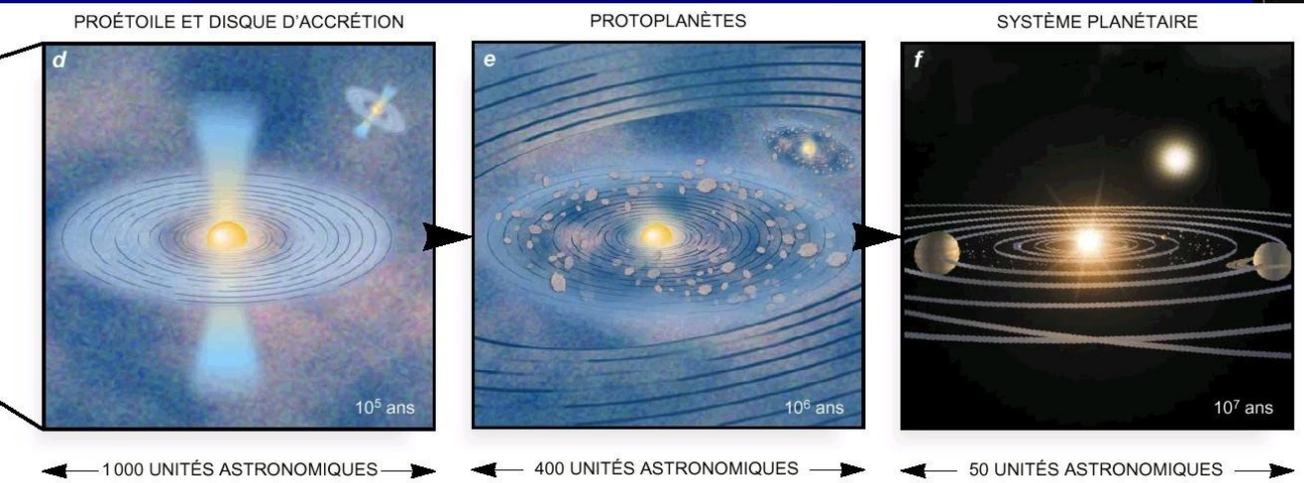
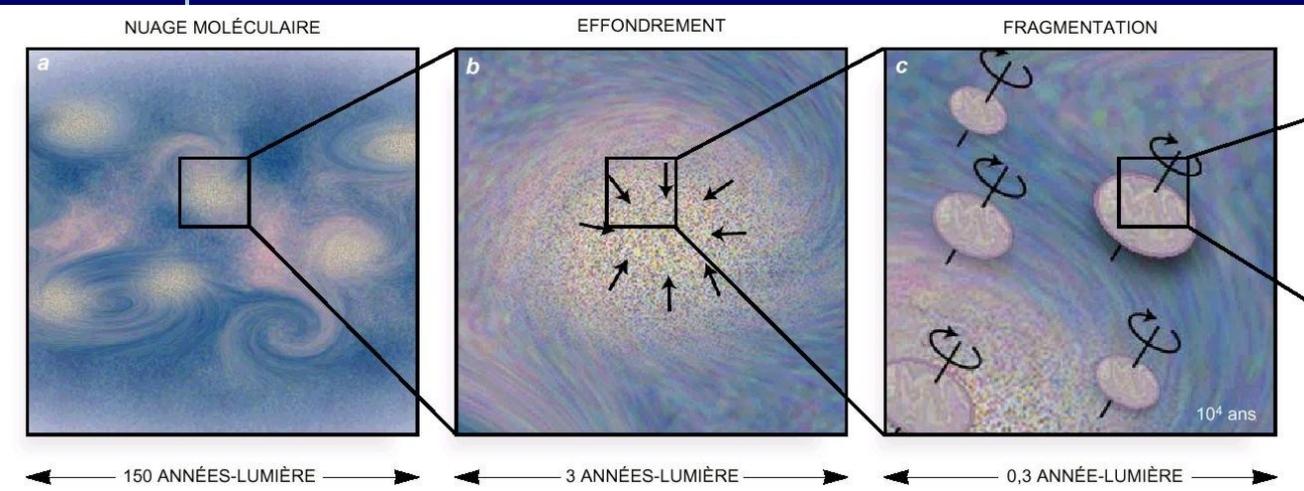
15



# Formation des planètes



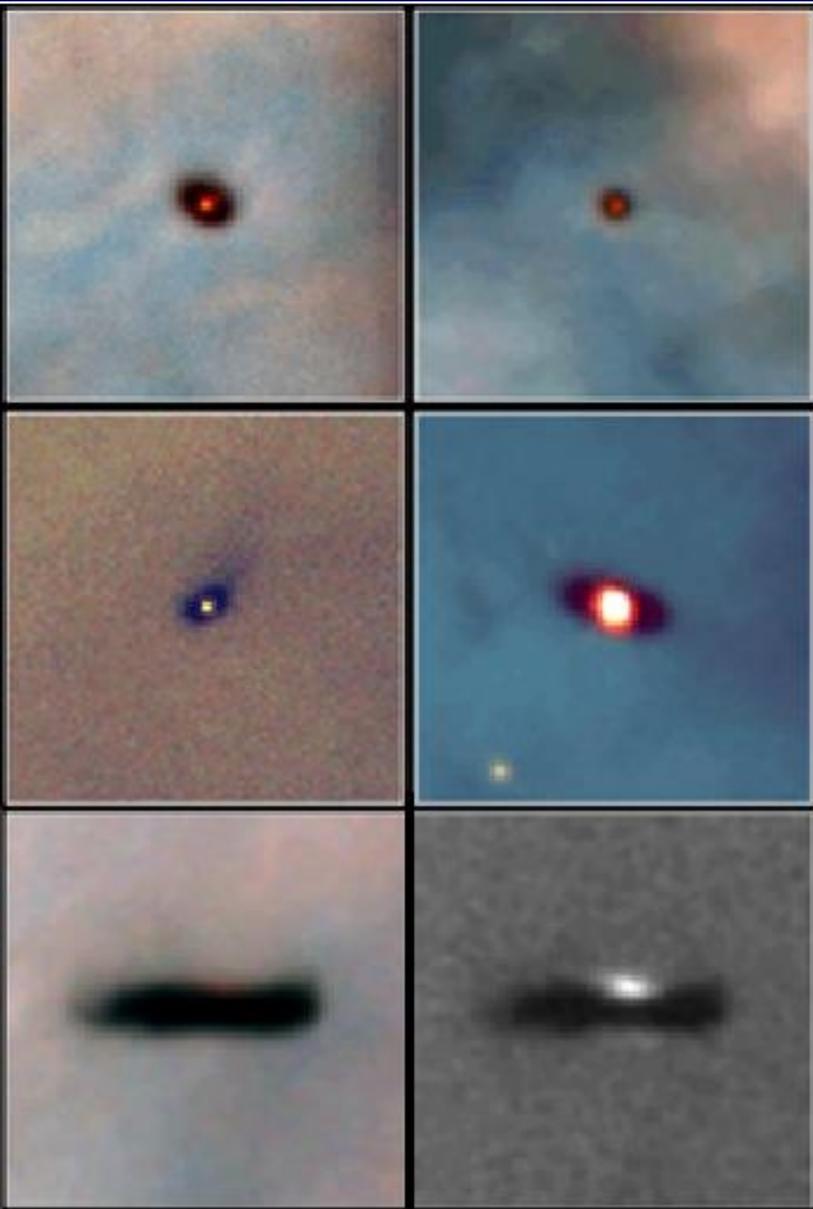
# Formation des planètes



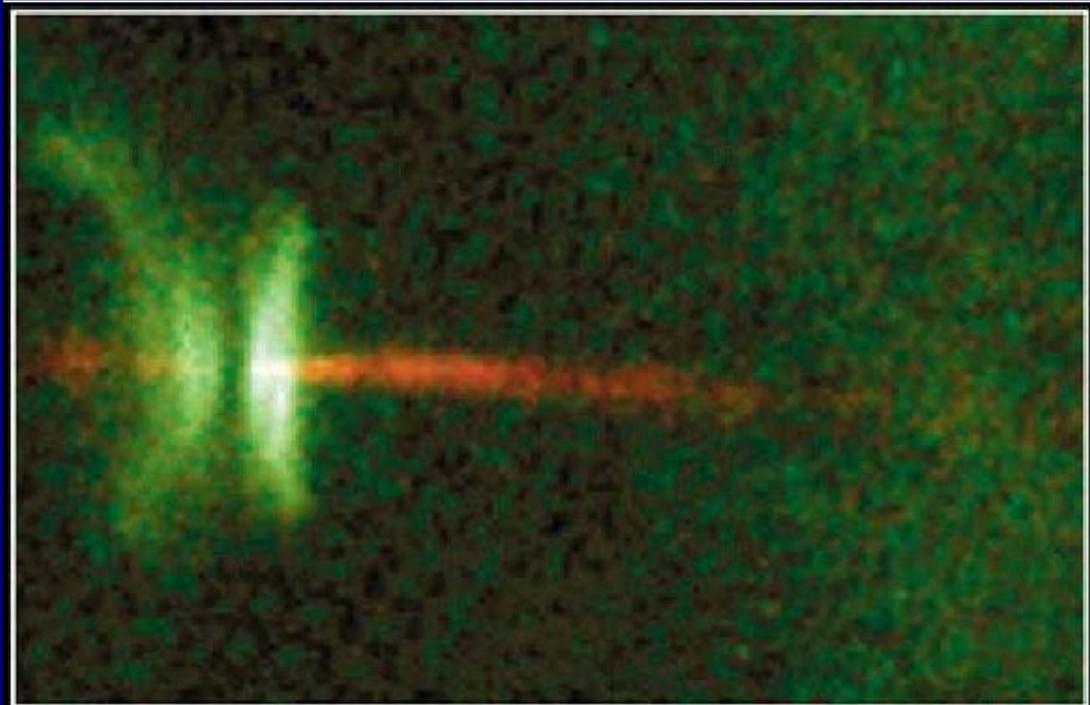
# Formation des planètes



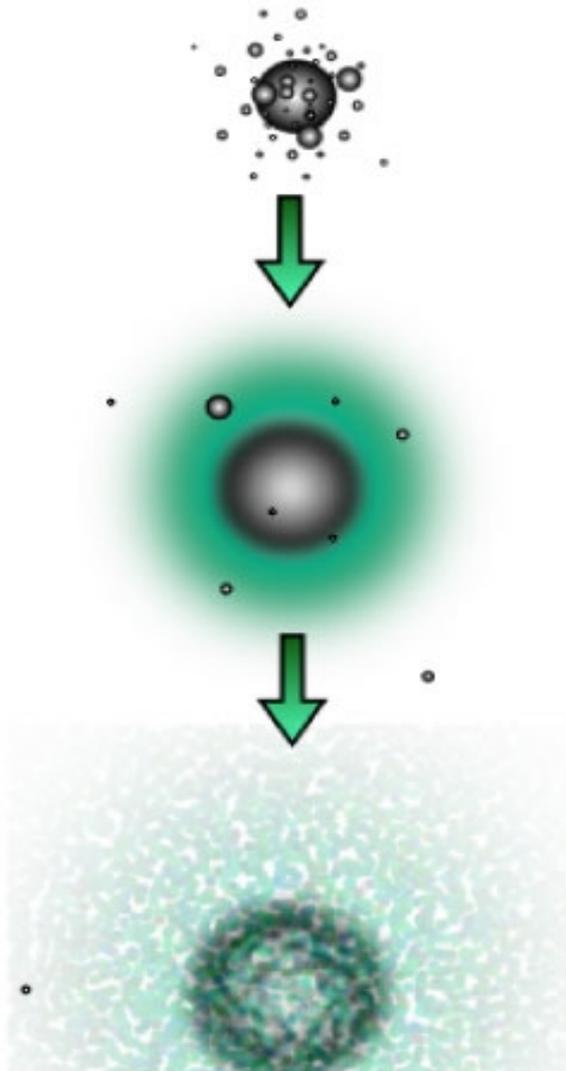
# Formation des planètes



Disques de gaz autour d'étoiles jeunes dans Orion et dans le Taureau



# Formation des planètes

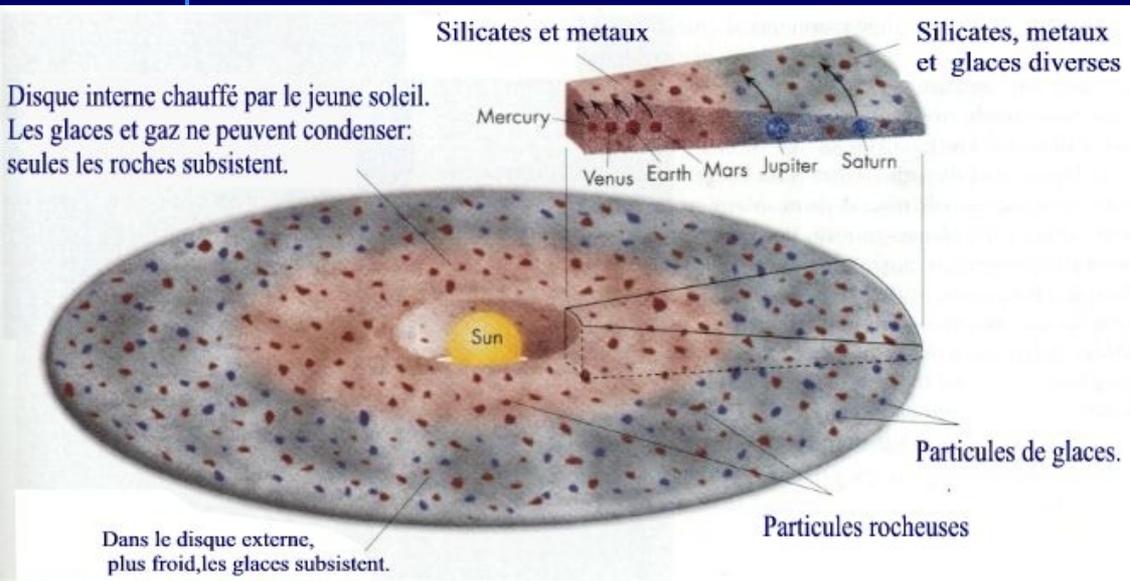


1./ formation du cœur par agrégation de matériaux solides

- Cœurs rocheux pour les planètes internes
- Cœurs de glaces pour les planètes externes

2./ accrétion du gaz, pour les planètes les plus massives

# Formation des planètes



1./ formation du cœur par agrégation de matériaux solides

- Cœurs rocheux pour les planètes internes
- Cœurs de glaces pour les planètes externes

2./ accrétion du gaz, pour les planètes les plus massives



# Formation des planètes

1./ accrétion du gaz sur la planète  
une fois le coeur « solide » formé :

via des bras spiraux + formation de  
sillons



# Formation des planètes

1./ accrétion du gaz sur la planète :  
via des bras spiraux

2./ Puis ouverture d'un sillon



# Formation des planètes

- 1./ accrétion du gaz sur la planète :  
via des bras spiraux
- 2./ Puis ouverture d'un sillon
- 3./ Migration : la planète ne reste  
pas à une position constante durant  
ces phénomènes



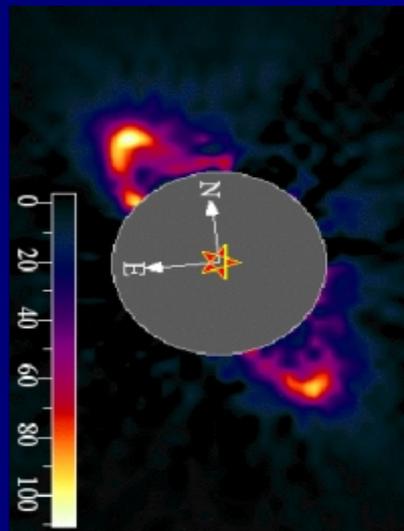
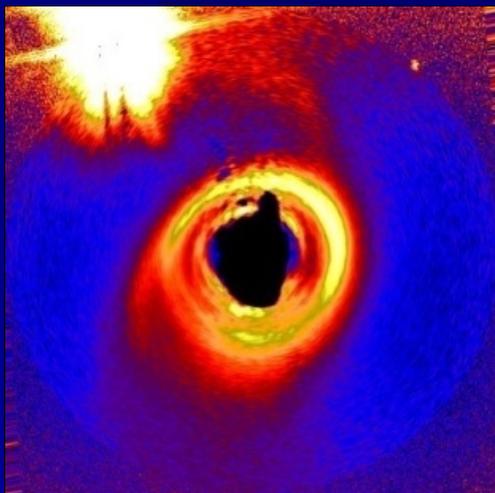
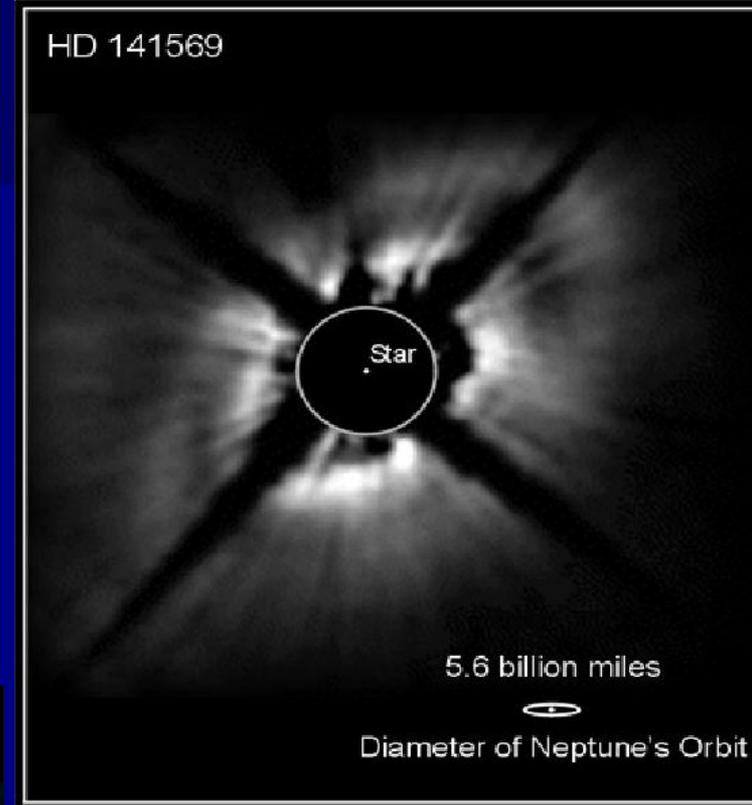
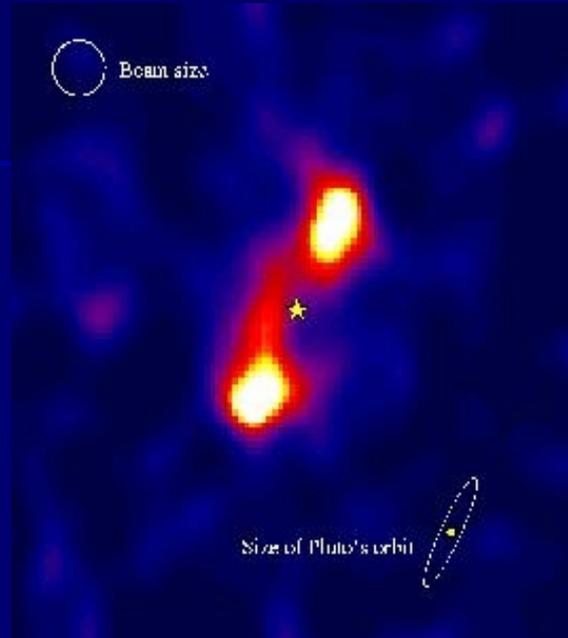
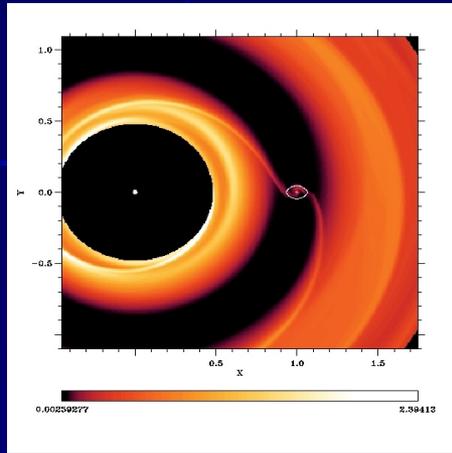
# Formation des planètes

- 1./ accrétion du gaz sur la planète :  
via des bras spiraux
- 2./ Puis ouverture d'un sillon
- 3./ Migration : la planète ne reste  
pas à une position constante durant  
ces phénomènes

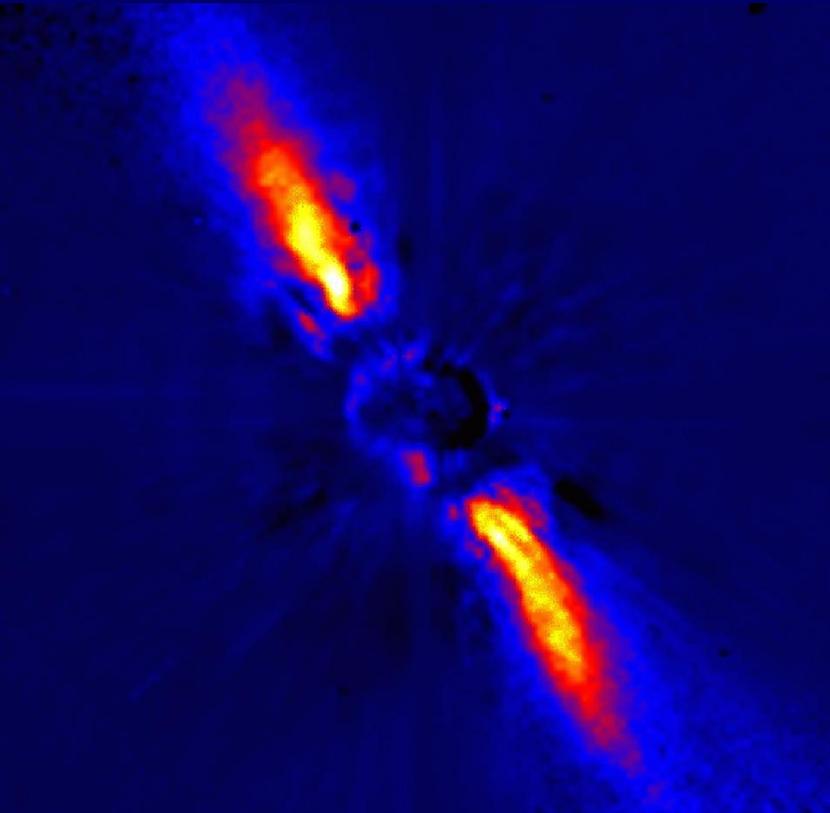
Cela peut être beaucoup plus compliqué si plusieurs planètes se forment dans le disque et interagissent entre elles.



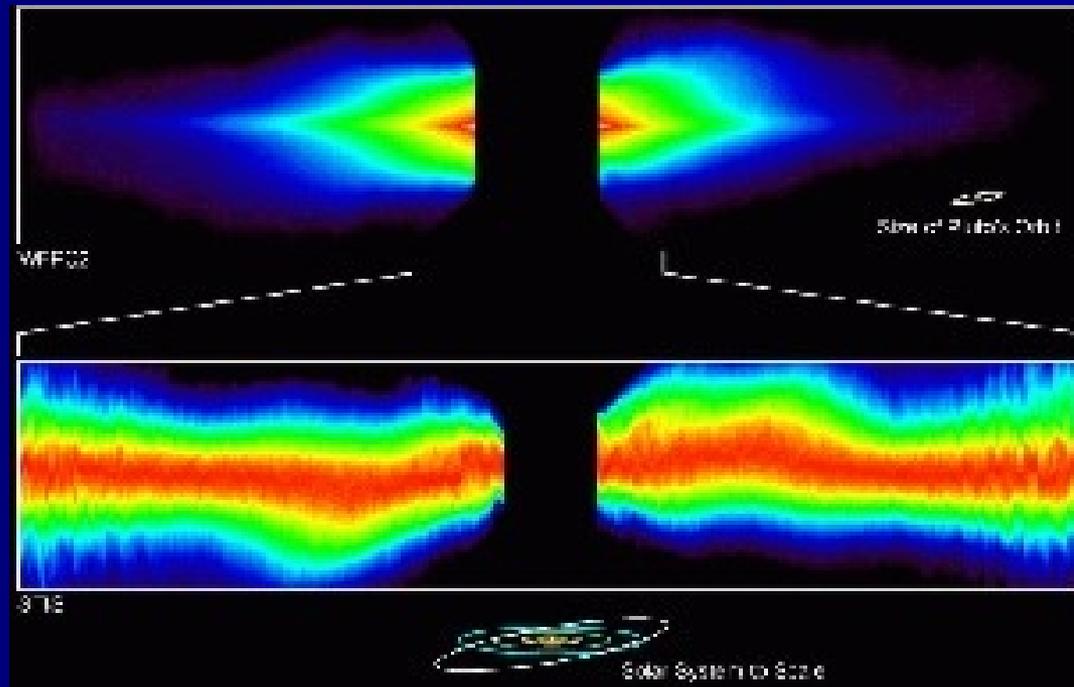
# Formation des planètes



# Formation des planètes



$\beta$  Pictoris : disque déformé (présence d'une planète ?)



# Formation des planètes: pour résumer

1./ formation du cœur par  
agrégation de matériaux  
solides (roches ou glaces)



Planètes telluriques



2./ accrétion du gaz, pour  
les planètes les plus  
massives  
(si cœur  $> 10 M_{\text{Terre}}$ )



Géantes gazeuses



3./ compétition pour le gaz,  
entre les différentes  
planètes en formation dans  
le disque. Dans le temps...



Géantes de glace  
(Neptune-Uranus)

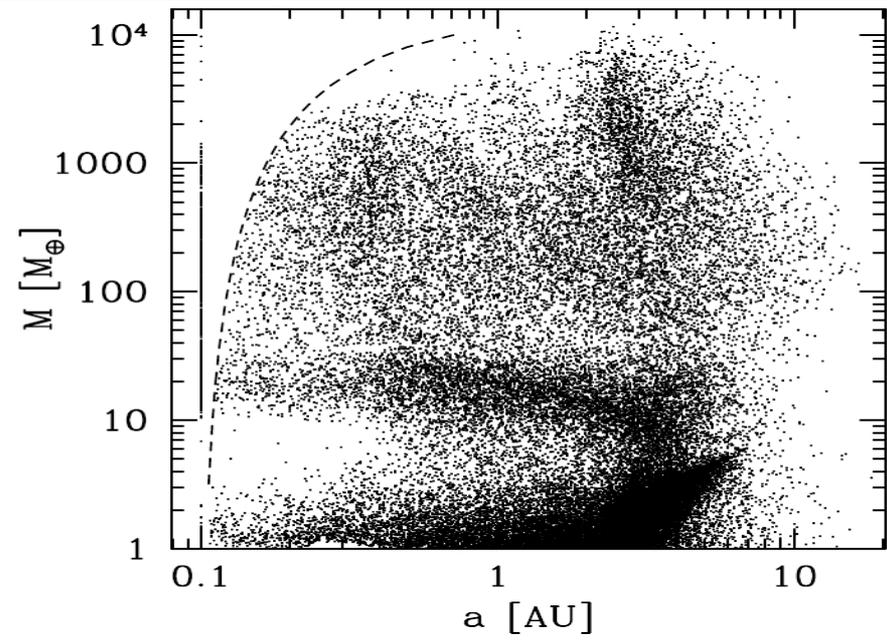
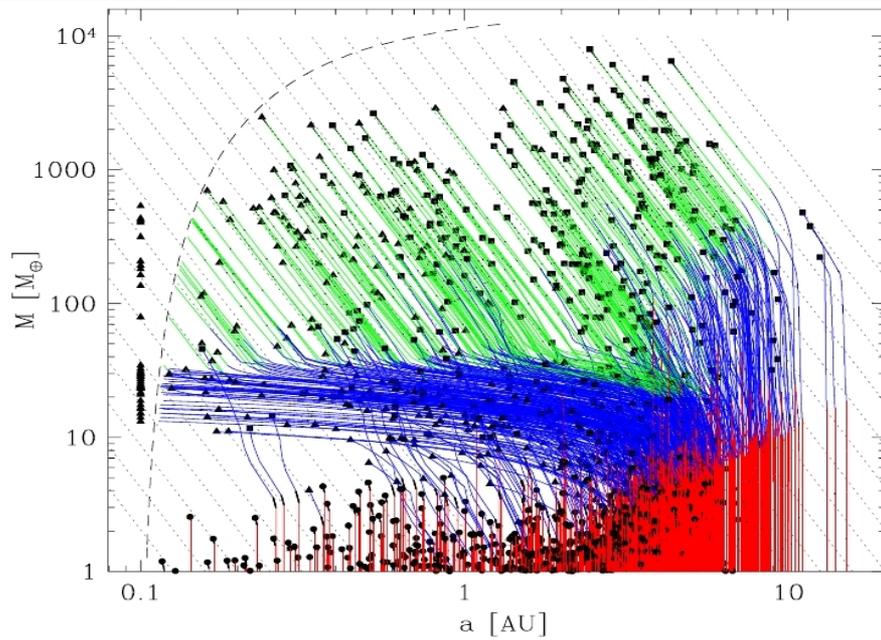
# Formation des planètes: pour résumer

## Simulation de formations de planètes

Si on domine tout les éléments :

- Temps de formation des planètes
- Temps typique d'accrétion
- Vitesse typique de migration

On peut simuler les formations de planètes et comparer aux planètes détectées (cf Mordasini et al. 2009)



# Formation des planètes: pour résumer

Simulation de formations de planètes



# Formation des planètes: pour résumer

## Simulation de formations de planètes

Si on domine tout les éléments :

- Mais encore beaucoup des processus à l'oeuvre dans les disques, lors de la formation planétaire, sont mal connu :

cf article d'A.Crida et A.Morbidelli dans « Le Ciel à découvert » (édition du CNRS, sous la direction de J. Audouze).

Ces travaux initient un domaine scientifique. Ils doivent être pris comme les premiers pas.

Il faut détecter des planètes en nombre pour comparer leur distribution (en masse, périodes, excentricité, etc...) aux prévisions.....

### Astrometric Method

$$\theta'' = \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \left( \frac{a}{r} \right) \approx \frac{10^{-3}}{r(\text{pc})} \left[ \frac{P(\text{yr})}{M_*(\odot)} \right]^{2/3} M_p (J)$$

$$V_r (m/s) \approx \frac{30}{[P(\text{yr})]^{1/3}} \frac{M_p (J) \sin i}{[M_*(\odot)]^{2/3}}$$

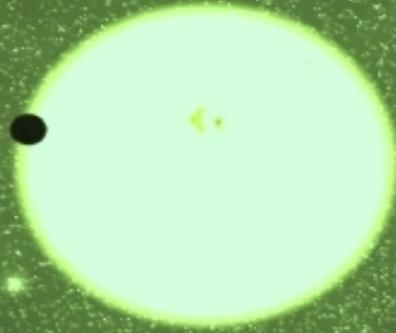
### Microlensing Method

$$R_E^2 = \frac{4GMD}{c^2}, \quad D = \frac{D_s D_d}{D_s}, \quad t_0 = \frac{R_E}{V_e}$$

$$t_0 = \frac{2D_L \theta_E}{V_L} = \frac{2D_L}{V_L} \sqrt{\frac{4GM(1-D_d/D_s)}{c^2 D_d}}$$

$$A = \frac{u^2 + 2}{u(u^2 + 4)^{1/2}}, \quad u = \text{impact parameter}$$

$$B \geq \frac{\lambda D}{r} \approx \left( \frac{\lambda}{10 \mu\text{m}} \right) \left( \frac{D}{10 \text{ pc}} \right) \left( \frac{r}{1 \text{ AU}} \right)^{-1} m$$



### Radial Velocity Method

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

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

### Direct Detection

### Effective Temperature

$$T_p = \frac{(1-A)^{1/4}}{\sqrt{2}} \left( \frac{R_*}{r} \right)^{1/2} T_*$$

$$A_{\oplus} \sim 0.39, \quad T_* \sim 5770 \text{ K}, \quad r_{\oplus} \sim 1 \text{ AU} \\ \Rightarrow T_p \sim 280 \text{ K} \Rightarrow \text{Greenhouse Effect!}$$

### Transit Method

$$\frac{\Delta F}{F} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad t = \frac{P_p}{\pi} \left( \frac{R_* \cos \delta + R_p}{a_p} \right)$$

$$i_{\min} = \cos^{-1} \left( \frac{R_*}{a_p} \right), \quad \cos i = \frac{R_* \sin \delta}{a_p}$$

# Détection des planètes extra-solaires

# Détection des planètes extra-solaires

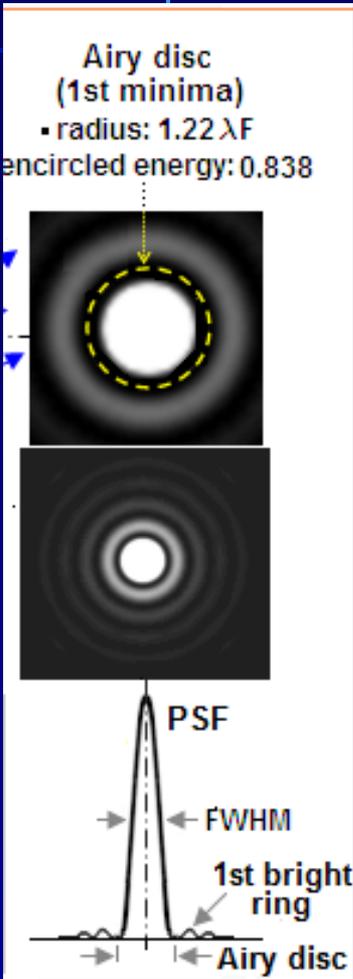
## 1 Imagerie directe :

Il faut d'abord être capable de séparer l'étoile et sa planète :

Pouvoir de résolution :  
capacité pour un télescope de séparer la planète de son étoile

$$\theta = 25\text{mas} \left( \frac{\lambda}{1\mu\text{m}} \right) \left( \frac{10\text{m}}{D} \right) \quad (1)$$

Télescope de 8m (VLT) en infrarouge (1.5 micromètre) :  
Pouvoir de séparation : 0.046 seconde d'arc



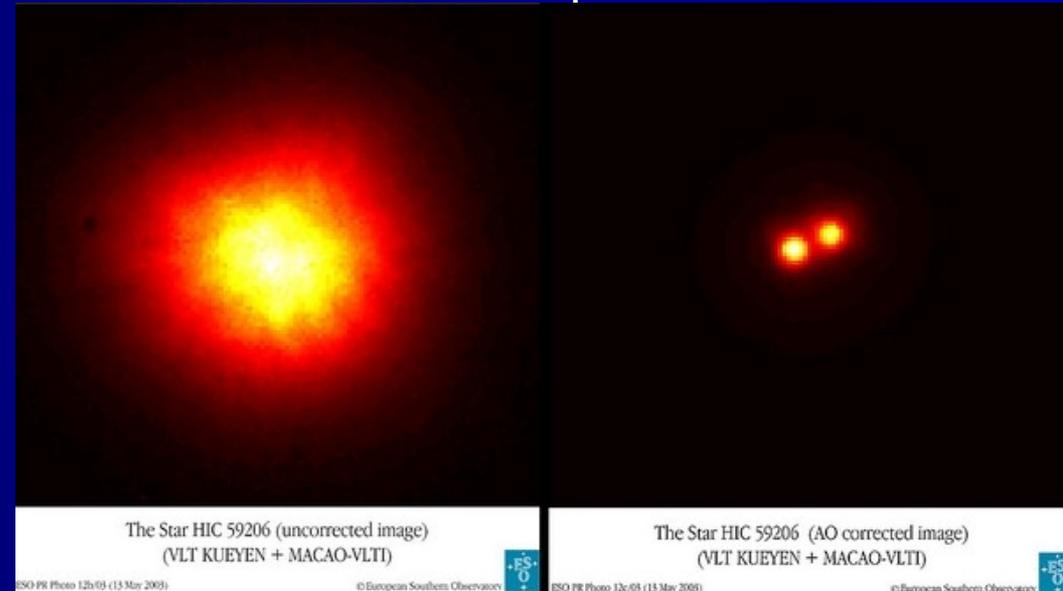
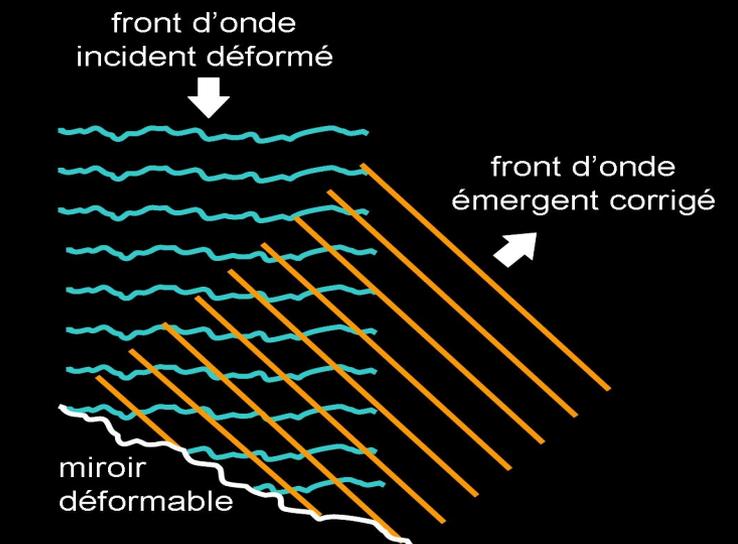
# Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Il faut d'abord être capable de séparer l'étoile et sa planète :

Mais turbulence atmosphérique  $\sim 1$  seconde d'arc. Il faut la corriger pour atteindre le pouvoir de résolution du télescope

### principe de base de l'optique adaptative



# Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Séparation d'un couple étoile-planète :  $\text{sep}["'] = a[\text{a.u.}]/d[\text{pc}]$

(a = demi-grand axe de l'orbite; d = distance du système au Soleil)

Table 1.: *Résolution spatiale nécessaire pour séparer angulairement des planètes d'orbites et de distances différentes.*

	0.1 AU	1 AU	5 AU	30 AU	
3 pc	30 mas	0.3"	1.5"	9"	<i>Télescope</i>
10 pc	10 mas	0.1"	0.5"	3"	<i>spatial ou</i>
25 pc	4 mas	40 mas	0.2"	1.2"	<i>optique</i>
100 pc	1 mas	10 mas	50 mas	0.3"	<i>adaptative au sol</i>
	<i>Interférométrie</i>				

Pour des planètes à plus de qq a.u. de leurs étoiles; le couple peut être séparé avec des télescopes monolithique.

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Contraste entre l'étoile et sa planète :  
1./ Lumière réfléchie par la planète

Plus une planète est lointaine, moins elle réfléchit de lumière de son étoile

Flux réfléchi par la planète :

$$L_P = \frac{L_*}{4} \left( \frac{R_P}{a} \right)^2 \times A(\lambda) \times \phi(t)$$

$L_*$  : Luminosité de l'étoile

$L_P$  : Luminosité de la planète

$R_P$  : Rayon de la planète

$a$  : séparation orbitale (UA)

$\phi(t)$  : effet de phase (comme pour la Lune)

Pour Jupiter :

$$a = 5.2au = 778.10^6 km$$

$$A = 0.52$$

$$R_P = 69000 km$$

$$\frac{L_P}{L_*} = 1.02.10^{-9} \phi(t)$$

# Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Contraste entre l'étoile et sa planète :

2./ Emission thermique; la planète est chauffée par son étoile et ré-émet à une autre longueur d'onde

Plus la planète est loin, moins elle ré-émet l'énergie absorbée de son étoile.

Mais à une longueur d'onde très différente

Flux thermique réémis :

$$L_{Pth} = \frac{L_*}{4} \left( \frac{R_P}{a} \right)^2 \times (1 - A)$$

Réémis à une longueur d'onde différente de la lumière recue

$$T_P = T_{eff}^* \sqrt{\frac{R_*}{2.a}} \times (1 - A)^{1/4}$$

$T_{eff}^*$  : Température effective de l'étoile

$R_*$  : rayon de l'étoile

En supposant que la planète est un corps noir, elle réémet à une longueur d'onde de :

$$\lambda_{max} = 2.898.10^{-3} / T_P$$

# Détection des planètes extra-solaires

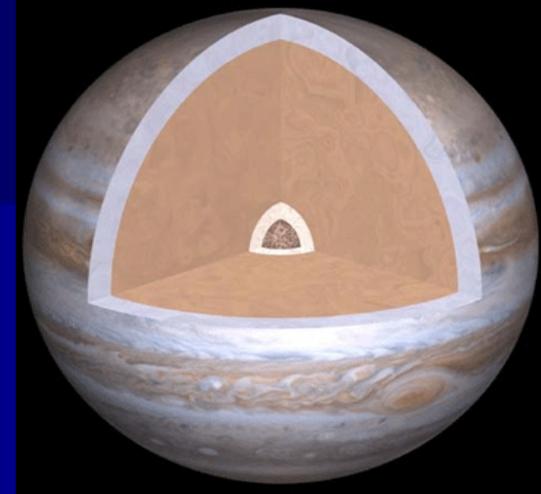
## 1 Imagerie directe :

Contraste entre l'étoile et sa planète :

3./ Une planète possède une énergie interne  
---> contraction et sédimentation du coeur de la planète.

$$E_{\text{JUPITER}}/E_{\text{SOLEIL}} = 5.10^{-9}$$

Jupiter émet plus d'énergie (dans l'Infra-rouge) qu'elle n'en reçoit du Soleil



D'autant plus grande que la planète est jeune : les planètes jeunes sont plus faciles à détecter.

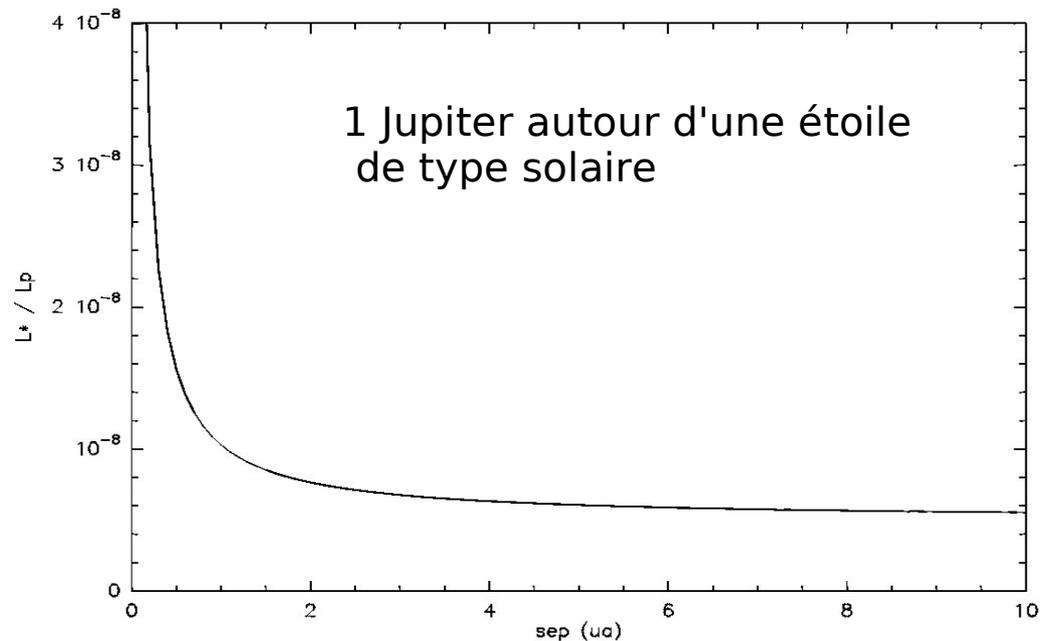
# Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Contraste entre l'étoile et sa planète :

3./ Une planète possèdent une énergie interne (contraction du coeur)

$$E_{\text{JUPITER}}/E_{\text{SOLEIL}} = 5.10^{-9}$$



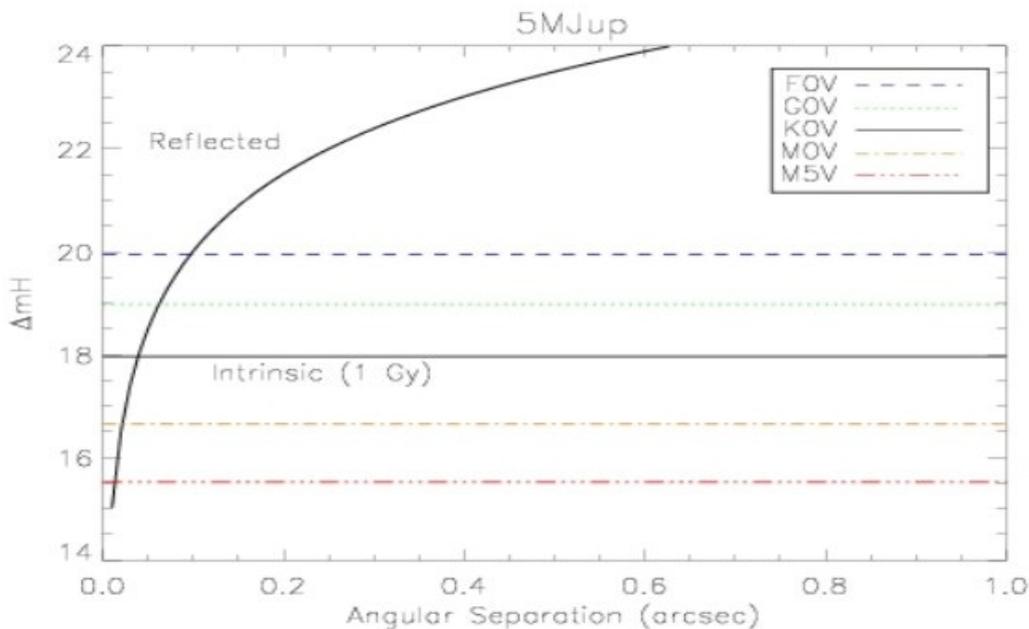
Une planète telle que Jupiter autour d'un Soleil : au delà de 3 au la lumière réfléchié ou ré-émise par la planète est négligeable. L'énergie interne domine

# Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Contraste entre l'étoile et sa planète :

Une planète possèdent une énergie interne (contraction du coeur)



Contraste étoiles et planètes (5Mj)  
pour des système à 10pc

En fonction de l'étoile centrale :  
être capable de détecter un  
compagnon 1,5 à 100 millions de  
fois plus faible

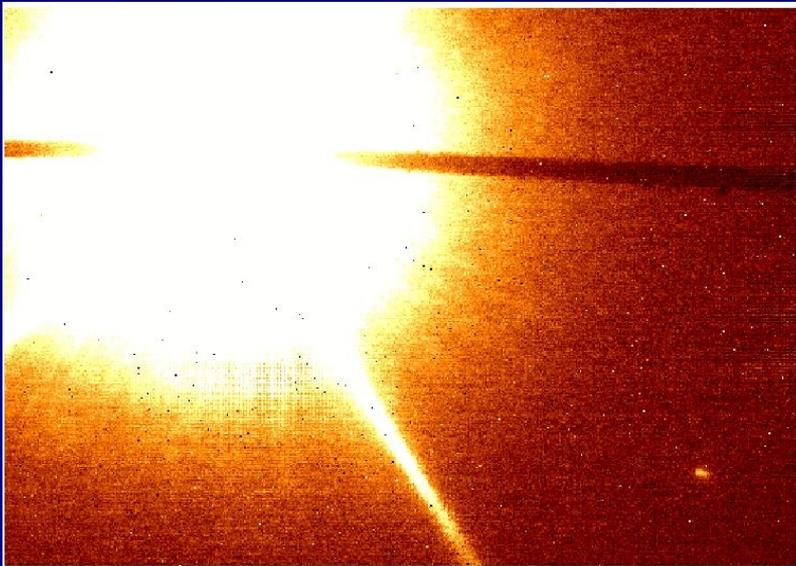
A 10pc et plus, au delà de 0.05'' de séparation étoile-planète le flux  
intrinsèque domine.

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 1 Imagerie directe :

Planètes à plusieurs A.U. de leurs étoiles : avec les télescopes monolithiques

*Image obtenue au VLT/NAOS d'une étoile et de son compagnon naine brune (40-50 fois la masse de Jupiter)*



Jupiter autour d'un Soleil:  
Pas faisable aujourd'hui, contraste en flux trop important et trop proche de l'étoile.

Les systèmes d'optique adaptative actuels ne le permettent pas

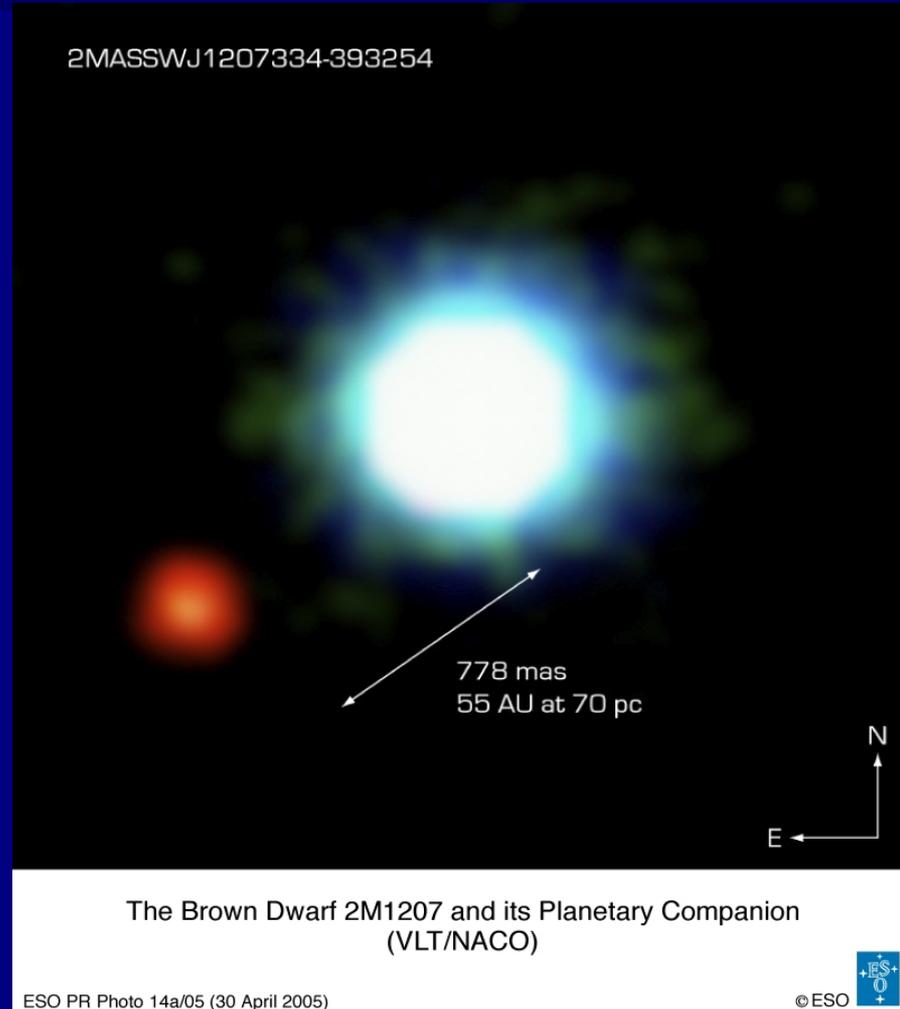
# II Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Imagerie directe :

Cependant quelques cas très favorables :

- 2M1207 : un rapport de luminosité de « seulement » 100
- Objet centrale naine brune; planète massive (7M<sub>jup</sub>)
- Objet jeune

Découverte avec le VLT par des chercheurs grenoblois



# II Détection des planètes extra-solaires

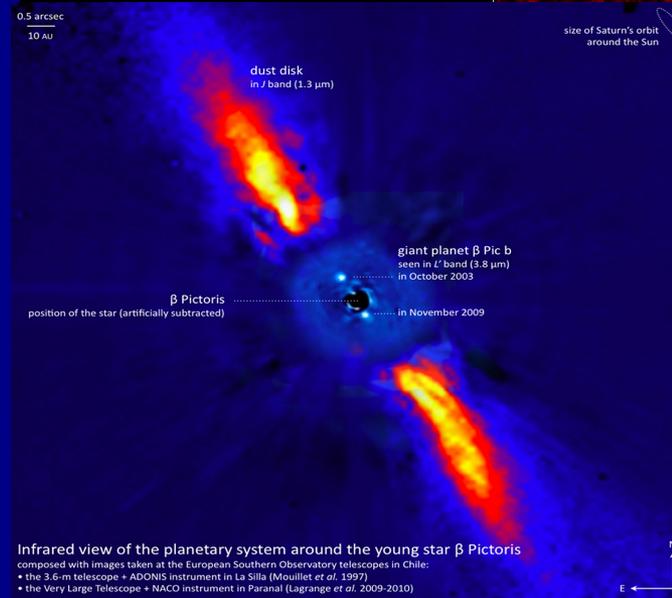
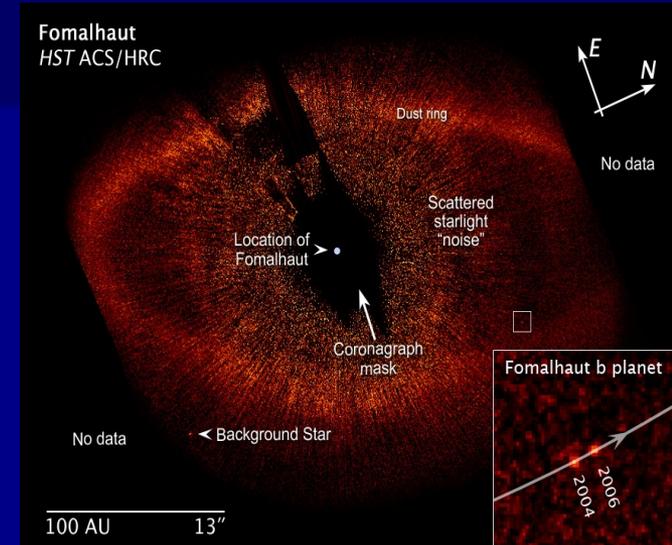
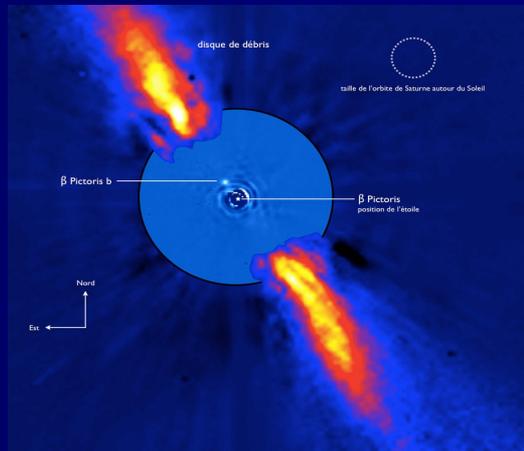
## 2.1 Imagerie directe :

Cependant quelques cas très favorables :

Détection récente « probable » de planète géantes (5 à 8 masses de Jupiter) dans des disques de poussières (résidus de la formation planétaire)

Fomalhaut : HST, Kalas et al. 2008

Beta Pictoris : NACO/VLT, Lagrange et al. 2008, 2010



# II Détection des planètes extra-solaires

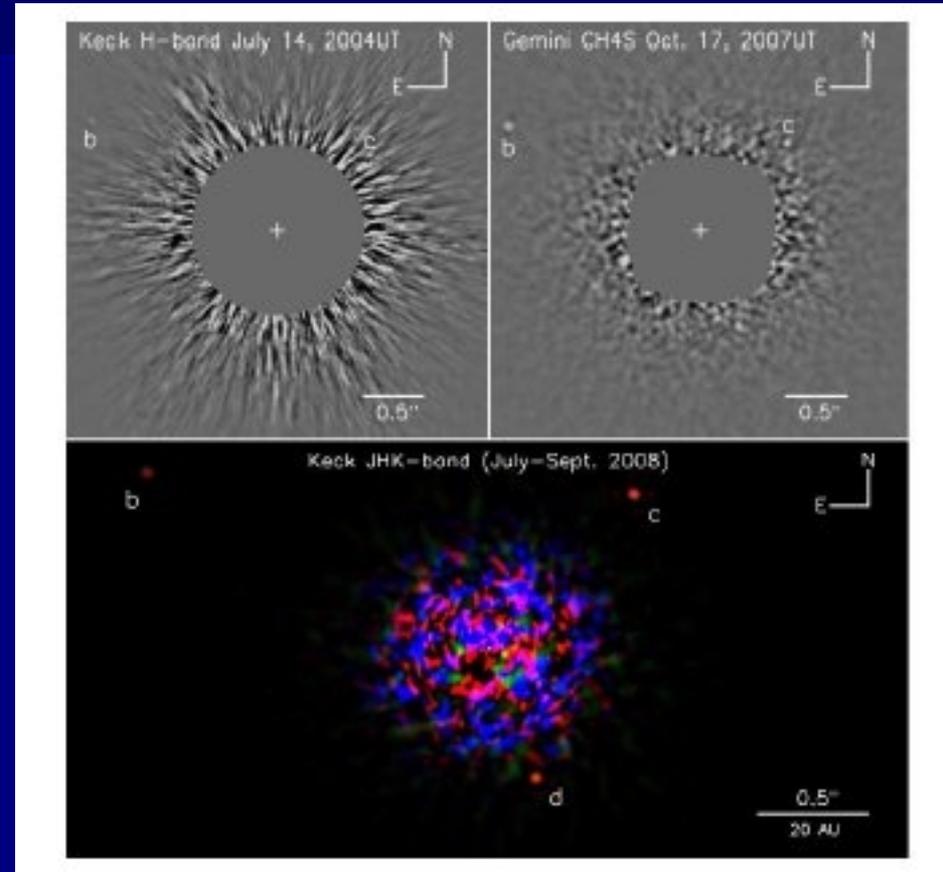
## 2.1 Imagerie directe :

Cependant quelques cas très favorables :

Détection récente de planète géantes (6 à 13 masses de Jupiter) autour d'une étoile massive (type spectral A)

HR8799 : Marois et al. 2008 (Keck et Gemini télescope)

Les planètes autour de Beta Pictoris, Fomalhaut et HR8799 sont dans des disques de débris « déformés »



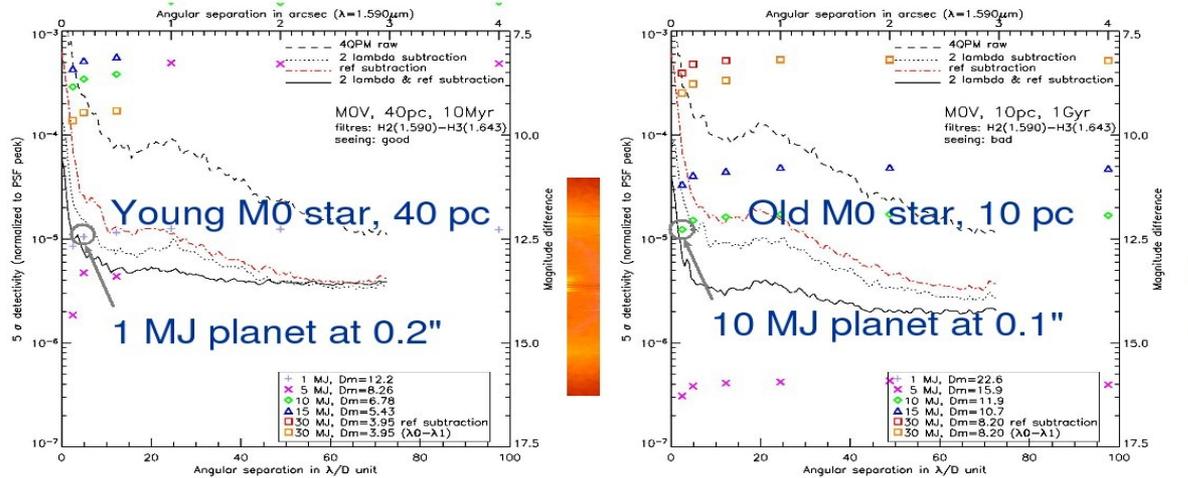
# II. Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Imagerie directe :

Actuellement : planète très massive, jeunes et loin de leurs étoiles

Vers ~2012 (SPHERE sur le VLT); un pas de plus pour détecter des Planètes avec un plus haut contraste de flux

### IRDIS dual beam imager

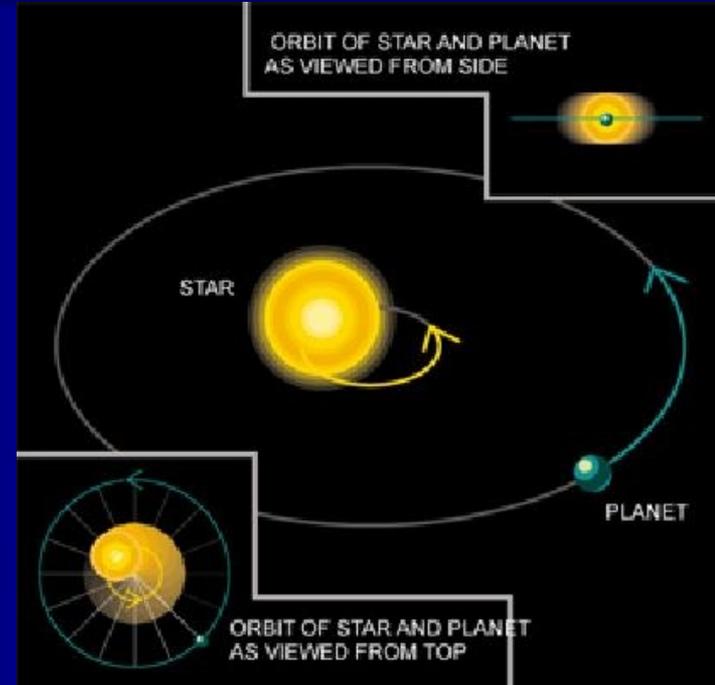


# Détection des planètes extra-solaires

## 2 Détection indirecte :

⇒ planète et étoile tournent autour de leur centre de masse commun

Système Soleil-Jupiter : le centre de masse est à l'intérieur du Soleil mais pas en son centre



L'étoile subit un mouvement orbital détectable même si la planète est invisible

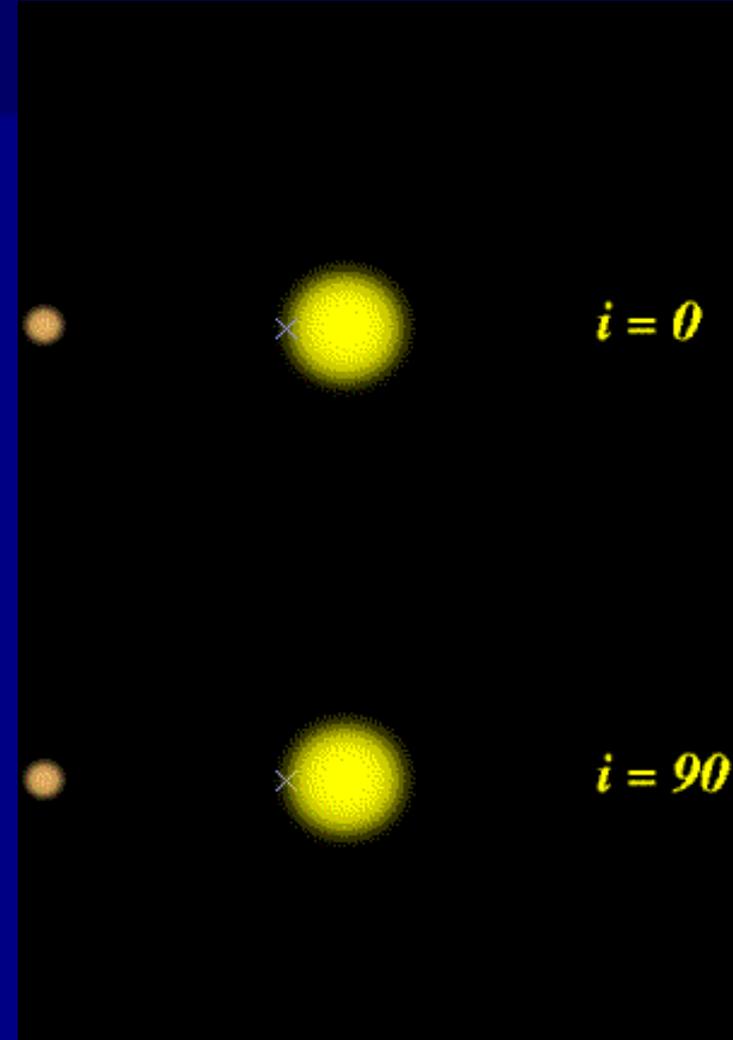
# Détection des planètes extra-solaires

## 2 Détection indirecte :

⇒ planète et étoile tournent autour de leur centre de masse commun

Système Soleil-Jupiter : le centre de masse est à l'intérieur du Soleil mais pas en son centre

L'étoile subit un mouvement orbital détectable même si la planète est invisible



# Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Détection indirecte par astrométrie :



Mesure du déplacement de l'étoile dans le plan du ciel

Valeur typique de ce déplacement : 0.01 milli-seconde d'arc

Angle sous lequel apparaîtrait, vu depuis la Terre, une pièce de 5F placée sur Jupiter

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Détection indirecte : astrométrie

Mesure du déplacement d'une étoile par rapport aux étoiles du fond

$$\theta = \frac{a}{d} \frac{m/M_*}{1 + m/M_*} \quad (2)$$

En négligeant  $m$  devant  $M_*$

$$\theta = \frac{a}{d} \frac{m}{M_*} \quad (3)$$

$\theta$  : déplacement de l'étoile sur le fond du ciel

$m$  : masse de la planète

$M_*$  : masse de l'étoile

$a$  : séparation orbitale

$d$  : distance du système au Soleil

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Détection indirecte : astrométrie

Mesure du déplacement d'une étoile par rapport aux étoiles du fond

La troisième loi de Kepler permet de lier la période  $P$  à la distance orbitale  $a$ .

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{(2\pi)^2}{G(M_* + m)} \quad (4)$$

$$\theta = \frac{G^{1/3} P^{2/3} \cdot m}{d \cdot (2\pi)^{2/3} M_*^{2/3}} \quad (5)$$

ou en unité usuelle astronomique :

$$\theta["] = \frac{10^{-3}}{d[\text{pc}]} \left( \frac{P[\text{ans}]}{M_*[M_\odot]} \right)^{2/3} \cdot m[M_{Jup}] \quad (6)$$

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Détection indirecte : astrométrie :

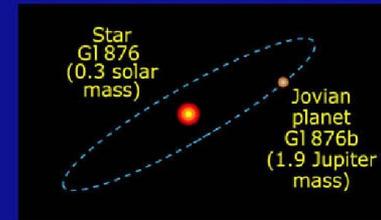
Table 1.: *Demi-grand axe de l'orbite astrométrique en fonction de la période et de la masse du compagnon; cas d'une composante primaire de  $M_1 = 1 M_\odot$ , vue à une distance de 10 pc.*

$M_2$	$P = 10 \text{ j}$	$P = 100 \text{ j}$	$P = 1 \text{ an}$	$P = 10 \text{ ans}$
$0,08 M_\odot$	0,69 mas	3,2 mas	7,6 mas	35 mas
$1 M_{\text{Jupiter}}$	$8,7 \mu\text{as}$	$40 \mu\text{as}$	$95 \mu\text{as}$	$440 \mu\text{as}$
$1 M_{\text{Terre}}$	$0,03 \mu\text{as}$	$0,13 \mu\text{as}$	$0,30 \mu\text{as}$	$1,4 \mu\text{as}$

Mesuré pour la première fois en 2002

- ⇒ avec télescope Hubble (NASA-ESA), équipe USA-Grenoble-Genève
- ⇒ Déplacement de 0.5 milli-seconde d'arc (pièce de 2 euros placée sur La Lune)

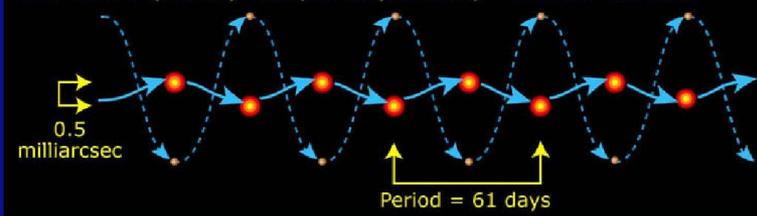
Hubble measures minute variation in star's motion due to gravitational pull from companion planet G1 876b



Star G1 876 without planet: Moves in straight line



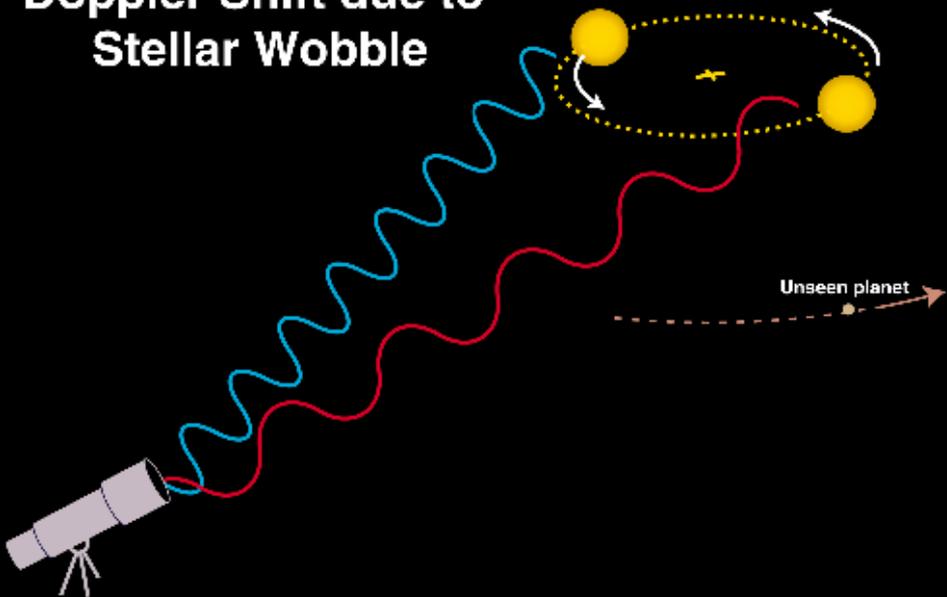
Star G1 876 (visible) with planet (invisible): "Wobble" detected



# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

**Doppler Shift due to Stellar Wobble**

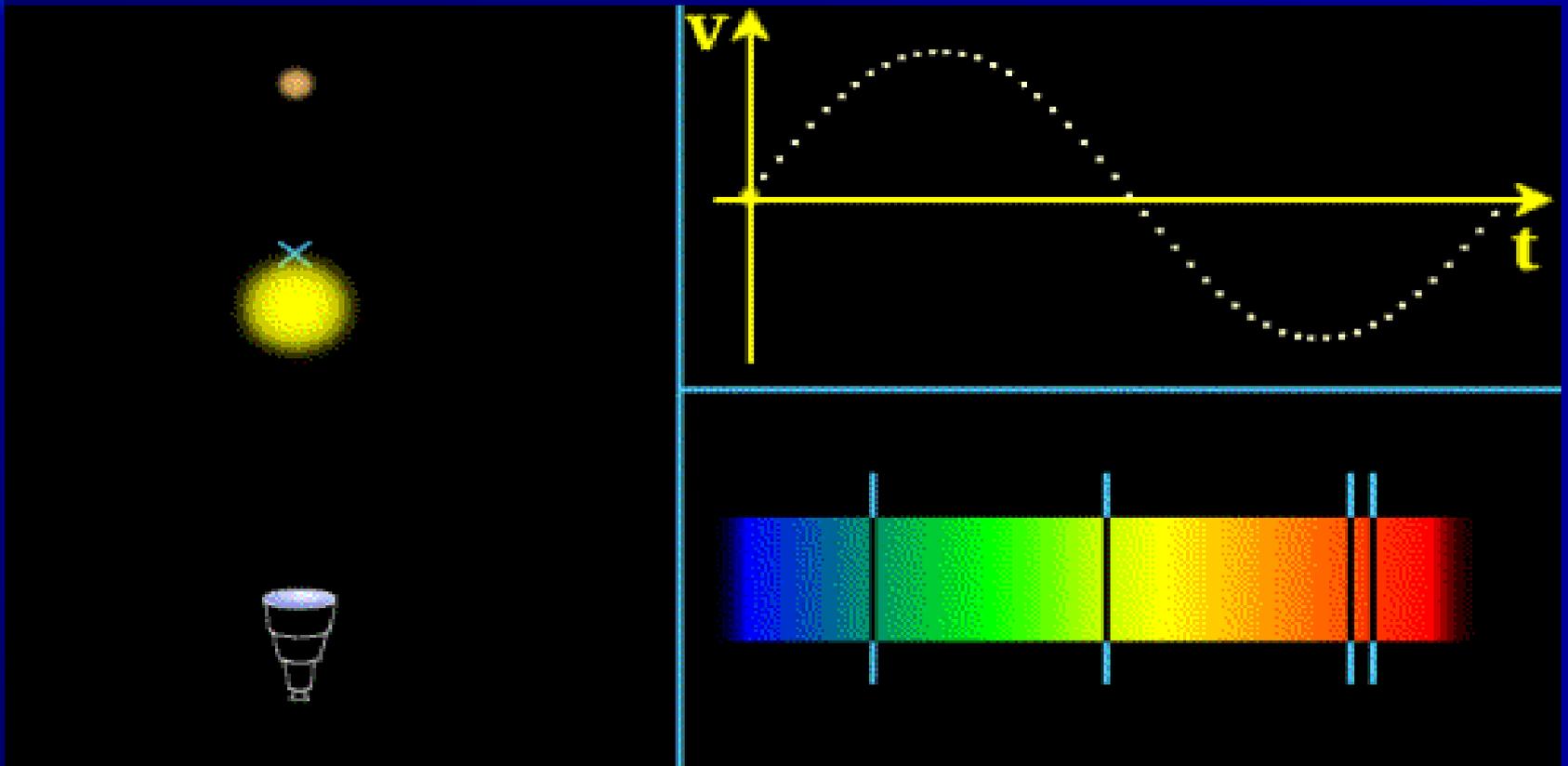


Mesure de la vitesse de l'étoile dans l'axe de visée

Jupiter produit des variations de la vitesse du Soleil de 43 km/h

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte par vitesse radiale



# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

$$K = \frac{m \cdot \sin i}{(M_* + m)^{2/3}} \cdot \frac{(2\pi G)^{1/3}}{P^{1/3} \sqrt{1 - e^2}} = \frac{m \cdot \sin i}{(M_* + m)^{1/2}} \cdot \frac{G^{1/2}}{a^{1/2} \sqrt{1 - e^2}} \quad (6)$$

Dans le cas d'une orbite circulaire, en négligeant  $m$  devant  $M_*$ , et dans les unités usuelles de l'Astronomie :

$$K[m/s] = 203 \cdot \frac{m[M_{Jup}] \cdot \sin i}{M_*^{2/3}[M_\odot] \cdot P^{1/3}[j]} = 28.45 \cdot \frac{m[M_{Jup}] \cdot \sin i}{\sqrt{a[UA]} \cdot M_*[M_\odot]} \quad (7)$$

$K$  : semi-amplitude de la vitesse radiale

$m$  : masse de la planète

$M_*$  : masse de l'étoile

$P$  : Période orbitale

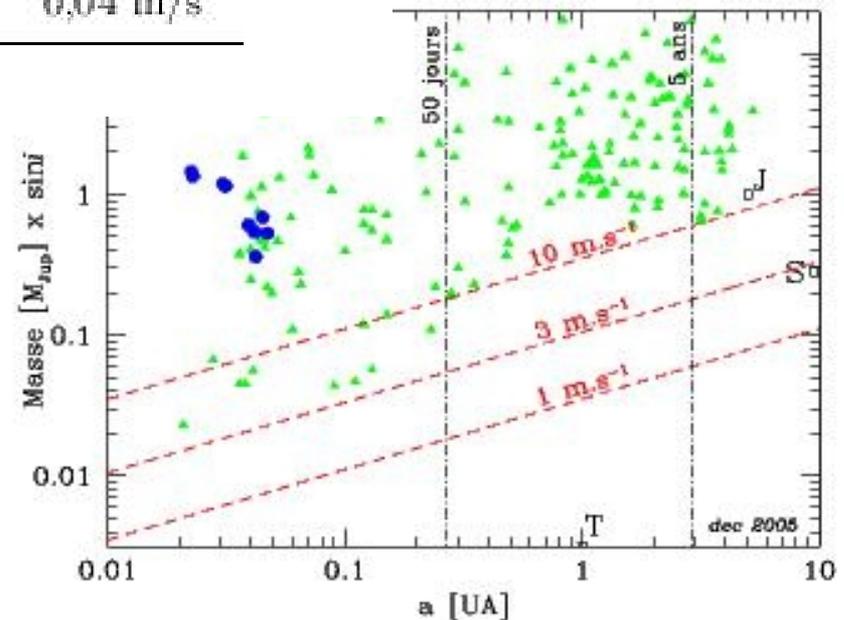
$a$  : séparation orbitale

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

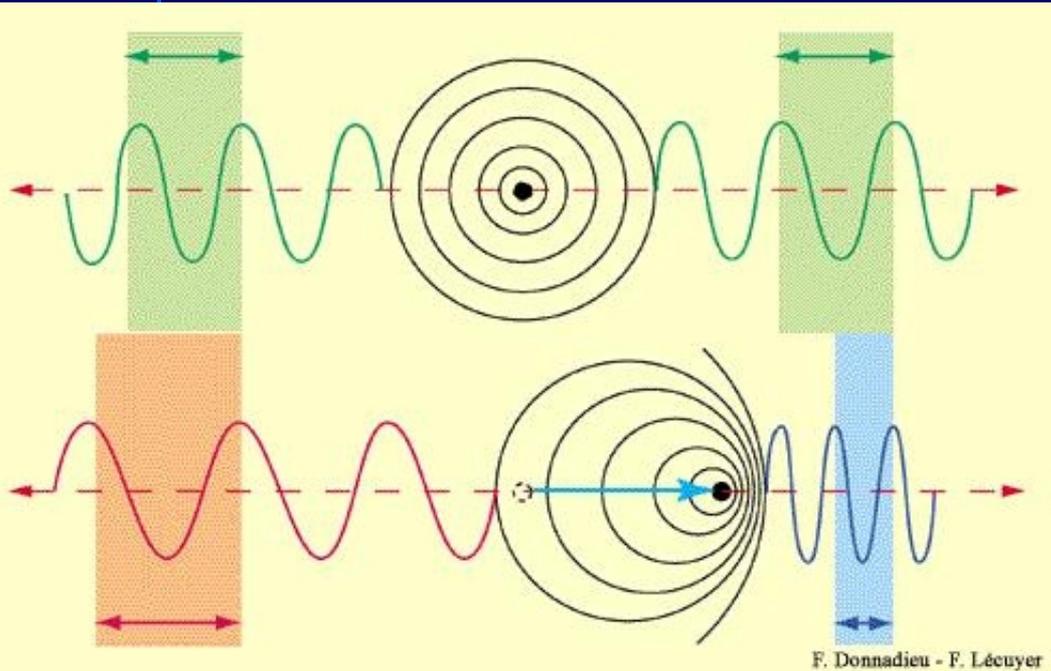
Table 2.: Amplitude de vitesse radiale en fonction de la période et de la masse du compagnon; cas d'une composante primaire de  $M_1 = 1 M_\odot$ , avec une orbite circulaire et une inclinaison de 90 degrés.

$M_2$	$P = 10 \text{ j}$	$P = 100 \text{ j}$	$P = 1 \text{ an}$	$P = 10 \text{ ans}$
$1 M_\odot$	62 km/s	29 km/s	19 km/s	9 km/s
$0,08 M_\odot$	7,5 km/s	3,5 km/s	2,3 km/s	1,1 km/s
$1 M_{\text{Jupiter}}$	94 m/s	44 m/s	28 m/s	13 m/s
$1 M_{\text{Terre}}$	0,3 m/s	0,14 m/s	0,09 m/s	0,04 m/s



# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale



Mesure de la vitesse radiale :  
par effet Fizeau- Doppler

$$\lambda_{recue} = \lambda_{emis}(1 - v_*/c) \quad (8)$$

$\lambda_{recue}$  : longueur d'onde dans le referentiel de l'observateur

$\lambda_{emis}$  : longueur d'onde dans le referentiel de l'étoile

$v_*$  : vitesse de l'étoile par rapport à la Terre

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

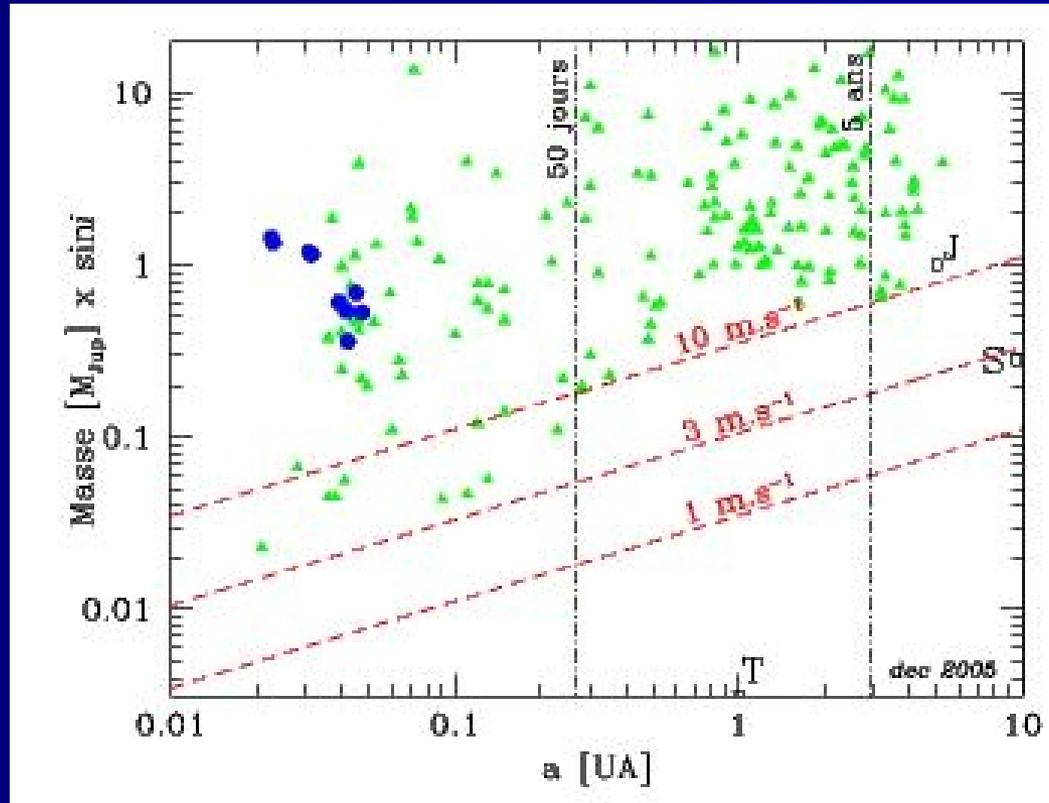
Mesure de la vitesse radiale :  
par effet Fizeau- Doppler



# Détection des planètes extra-solaires

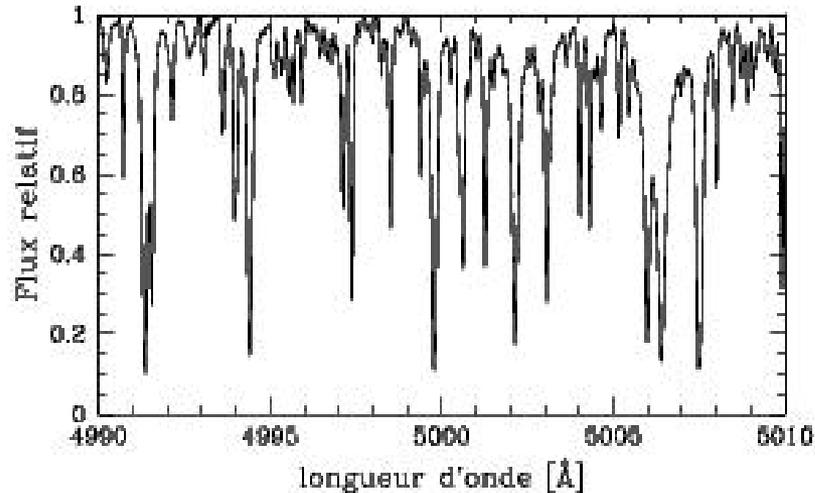
## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

Si précision de 1m/s requis :  
déplacement du spectre de  
 $\Delta\lambda / \lambda = 1 / (3 \cdot 10^8)$



# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte : vitesse radiale



Si précision de 1m/s requis :

déplacement du spectre de  
 $\Delta\lambda/\lambda = 1/(3 \cdot 10^8)$



The HARPS Spectrograph and the 3.6m Telescope

ESO PR Photo 25a/04 (25 August 2004)

© European Southern Observatory



Extrêmement difficile, nécessite un spectroscopie très stable...

Heureusement des milliers de raies disponibles dans le spectre optique

# Détection des planètes extra-solaires

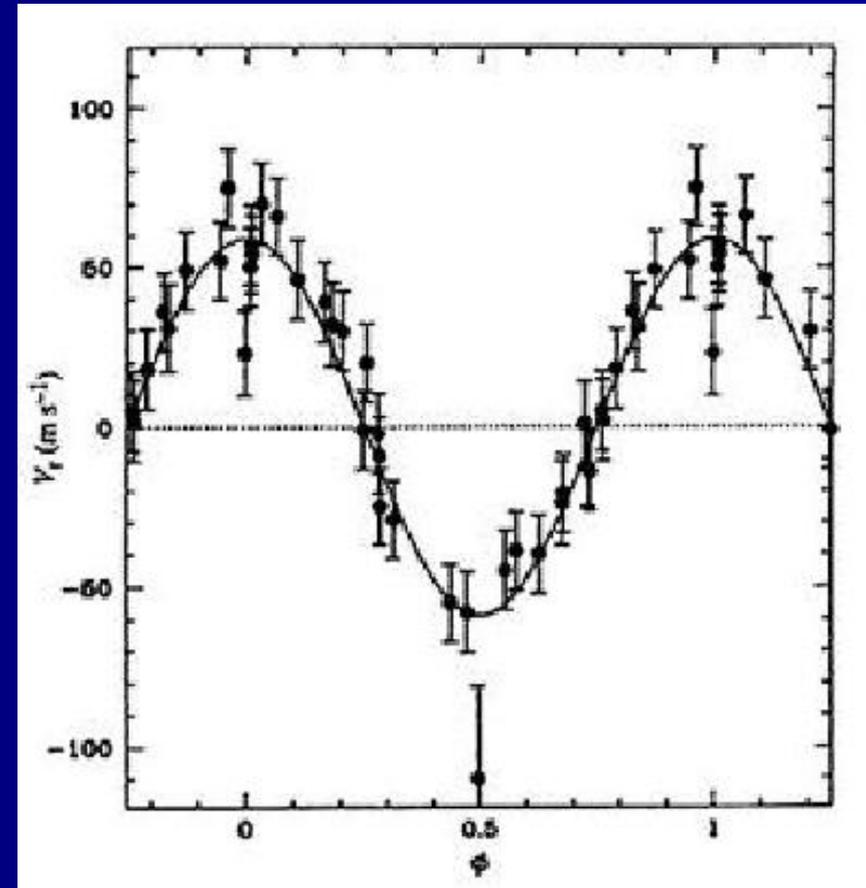
## 2.2 Détection indirecte par vitesse radiale

Découverte en 1995 d'une planète autour de 51 Pégase

⇒ Observatoire de Haute-Provence, équipe genevoise

⇒ la moitié de la masse de Jupiter

⇒ 20 fois plus proche de son étoile que la Terre ne l'est du Soleil

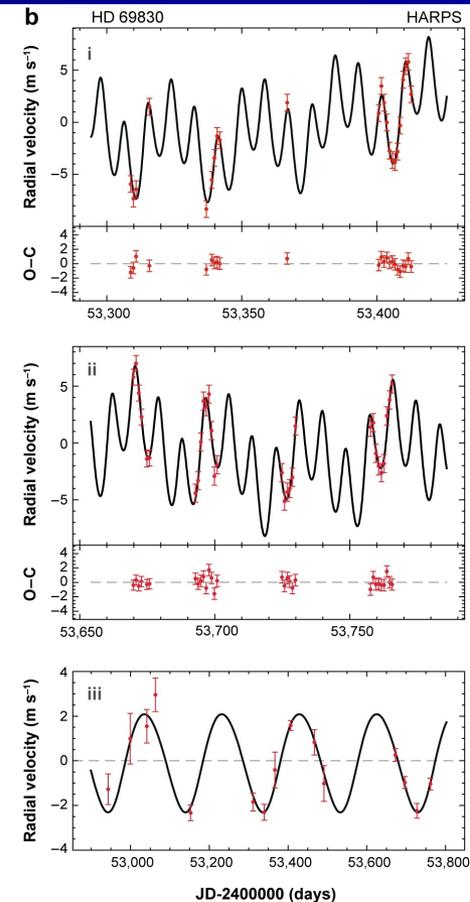
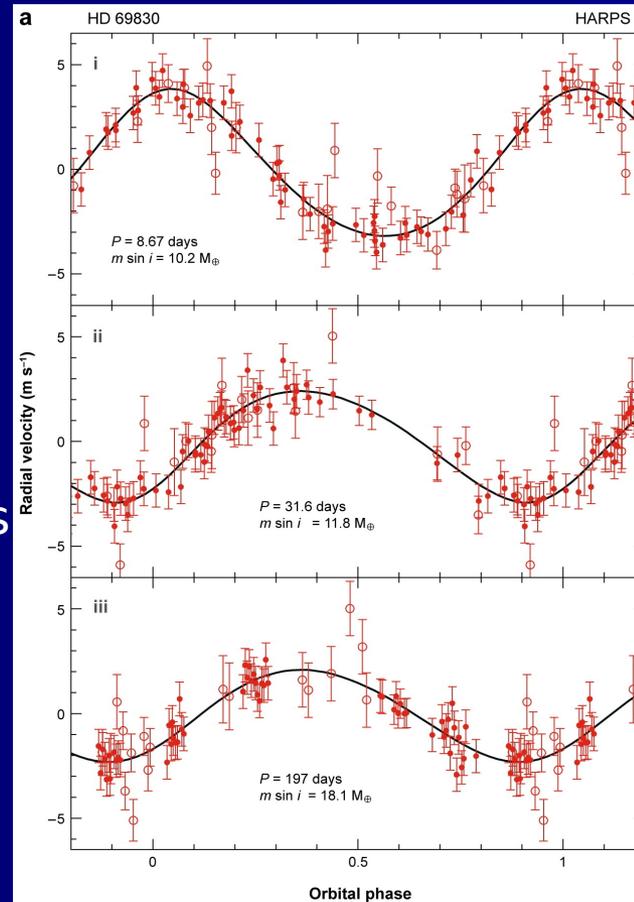


# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte par vitesse radiale

Dans le cas de systèmes multiples : plus complexes

Eventuellement des interactions dynamiques compliquent le signal



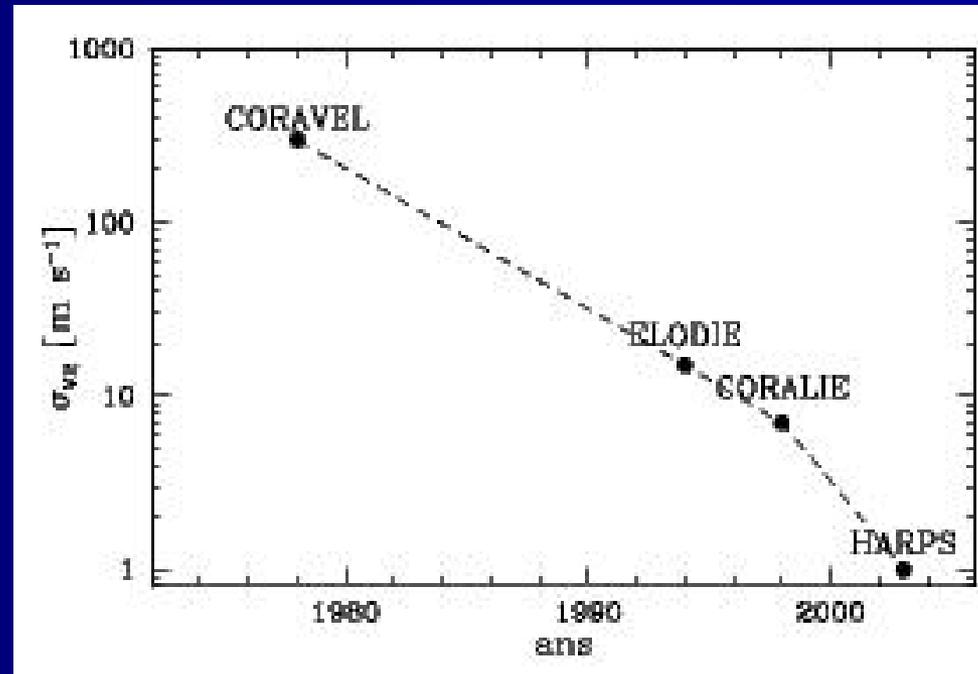
# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte par vitesse radiale

- Etat des lieux et futur :

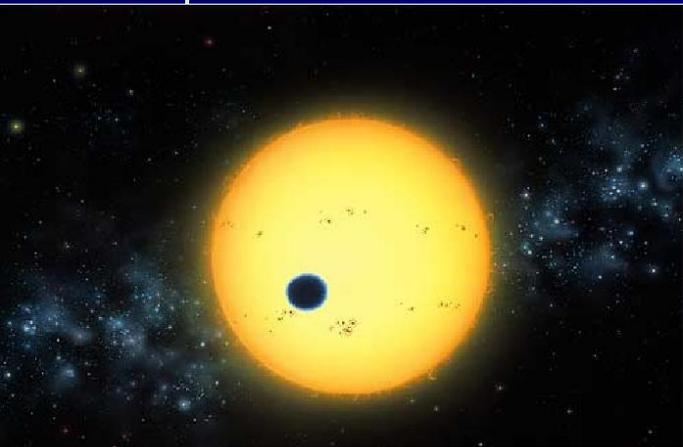
Actuellement : HARPS  $\sim 1\text{m/s}$  sur le long terme

Futur : ESPRESSO (VLT)  $\sim 10\text{ cm/s}$   
SPIROU (CFHT)  $\sim 1\text{m/s}$  en infra-rouge



# Détection des planètes extra-solaires

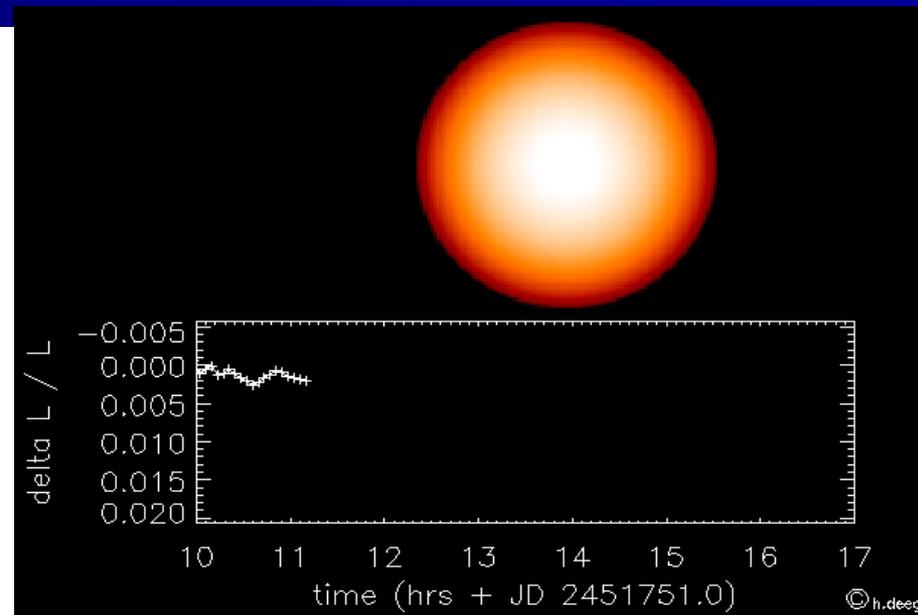
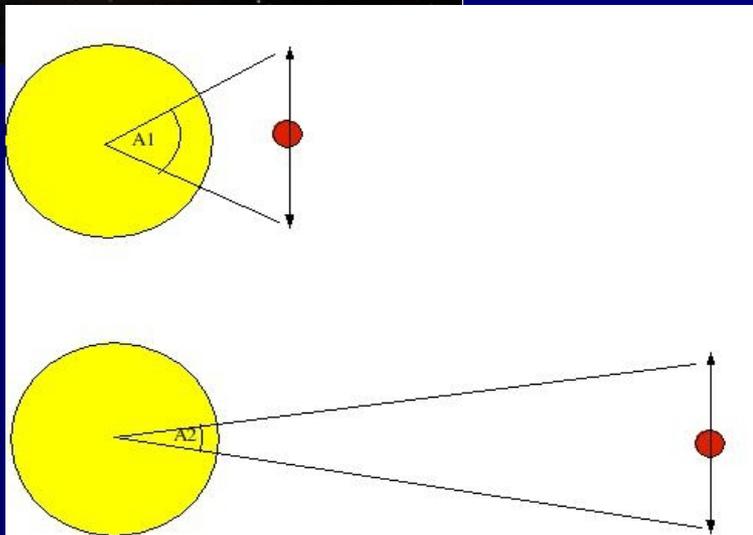
## 3 Détection par éclipse :



La planète passe devant son étoile et en fait diminuer l'éclat

Ce sont des cas particuliers

Plus probable si la période de la planète est très courte



# Détection des planètes extra-solaires

## 3 Détection par éclipse (ou transit) :

Profondeur du transit :

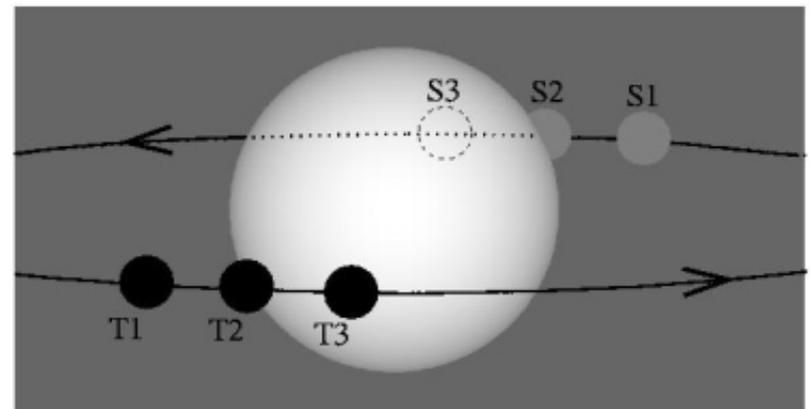
$$\Delta F = \frac{F_{off} - F_{on}}{F_{off}} = (r/R)^2 \quad (10)$$

$F_{off}$  : Flux stellaire en dehors du transit

$F_{on}$  : Flux stellaire au maximum du transit

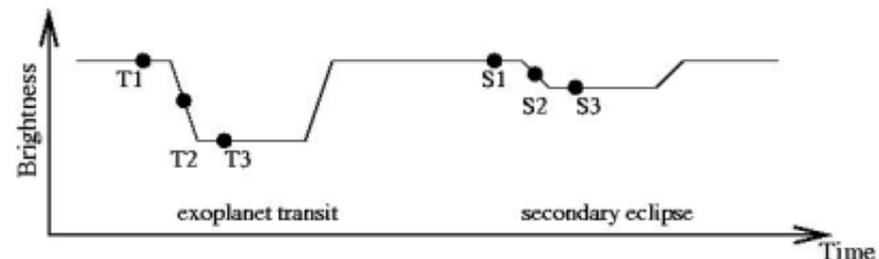
$r$  : rayon de la planète

$R$  : rayon de l'étoile



Permet de mesurer le rayon de la planète.

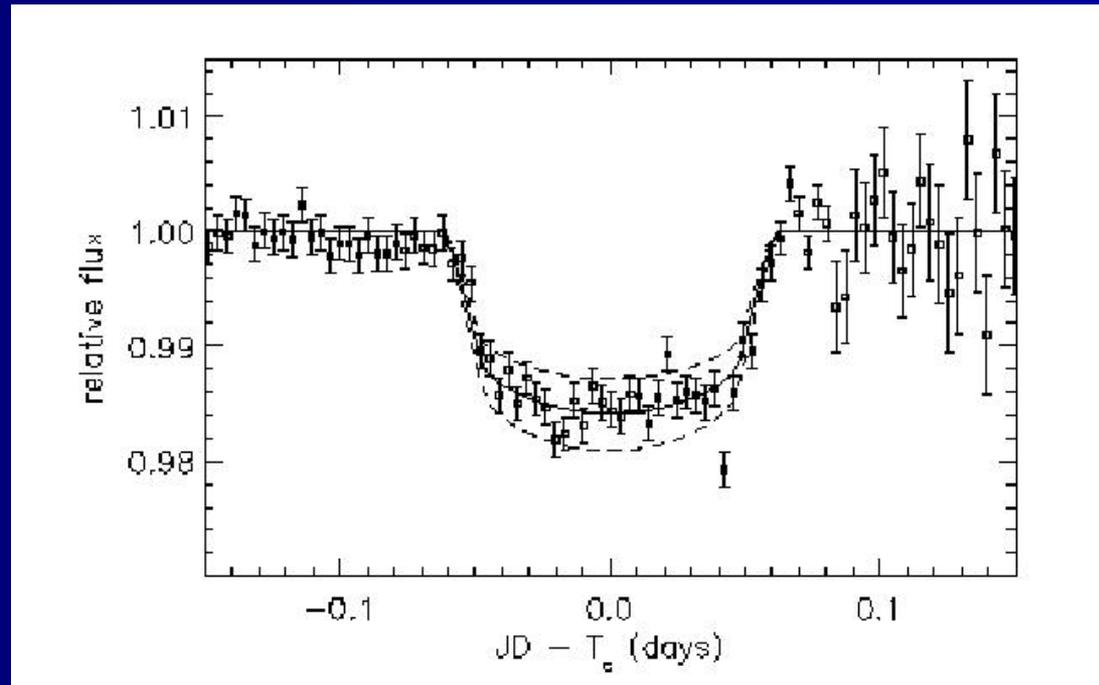
Si masse déterminée (Vitesse radiale) ---> densité et donc « constitution »



# Détection des planètes extra-solaires

## 3 Détection par éclipse :

Permet la mesure du rayon de la planète



Premier cas observé en 2000

⇒ équipe USA-Genève-Grenoble-Israel

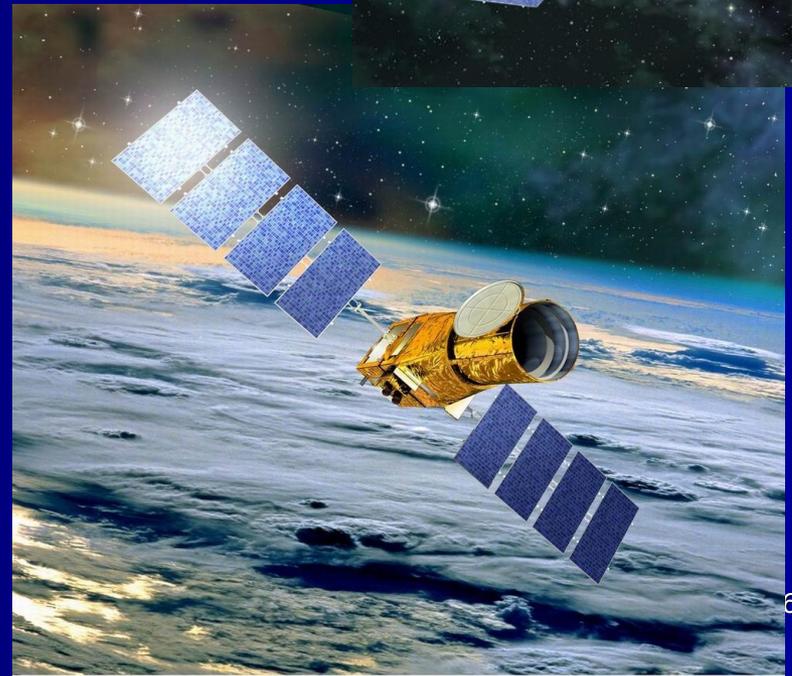
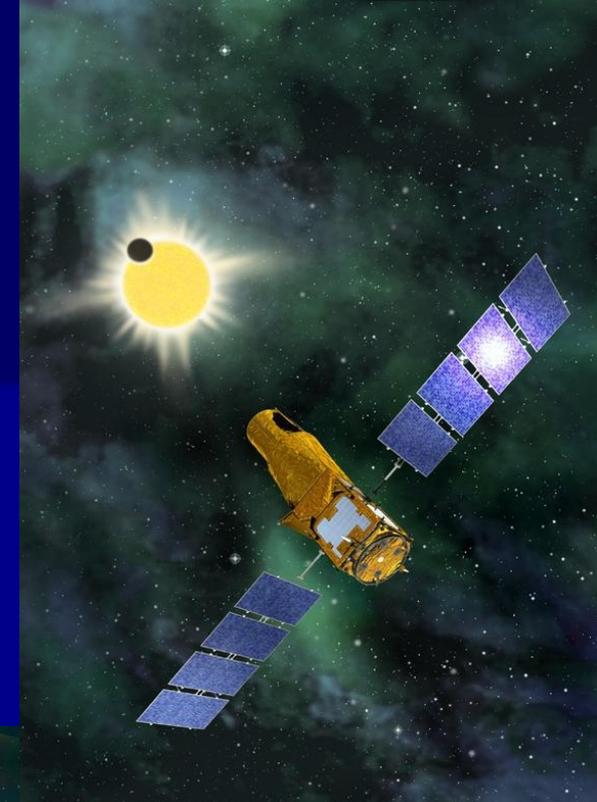
⇒ HD 209458

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.3 Eclipses depuis l'espace :

Espace : satellites surveillant ~100000 étoiles; capable de détecter le passage d'une "Terre" devant son étoile.

COROT en 2006 (ESA); Kepler en 2010 (NASA)



# Détection des planètes extra-solaires

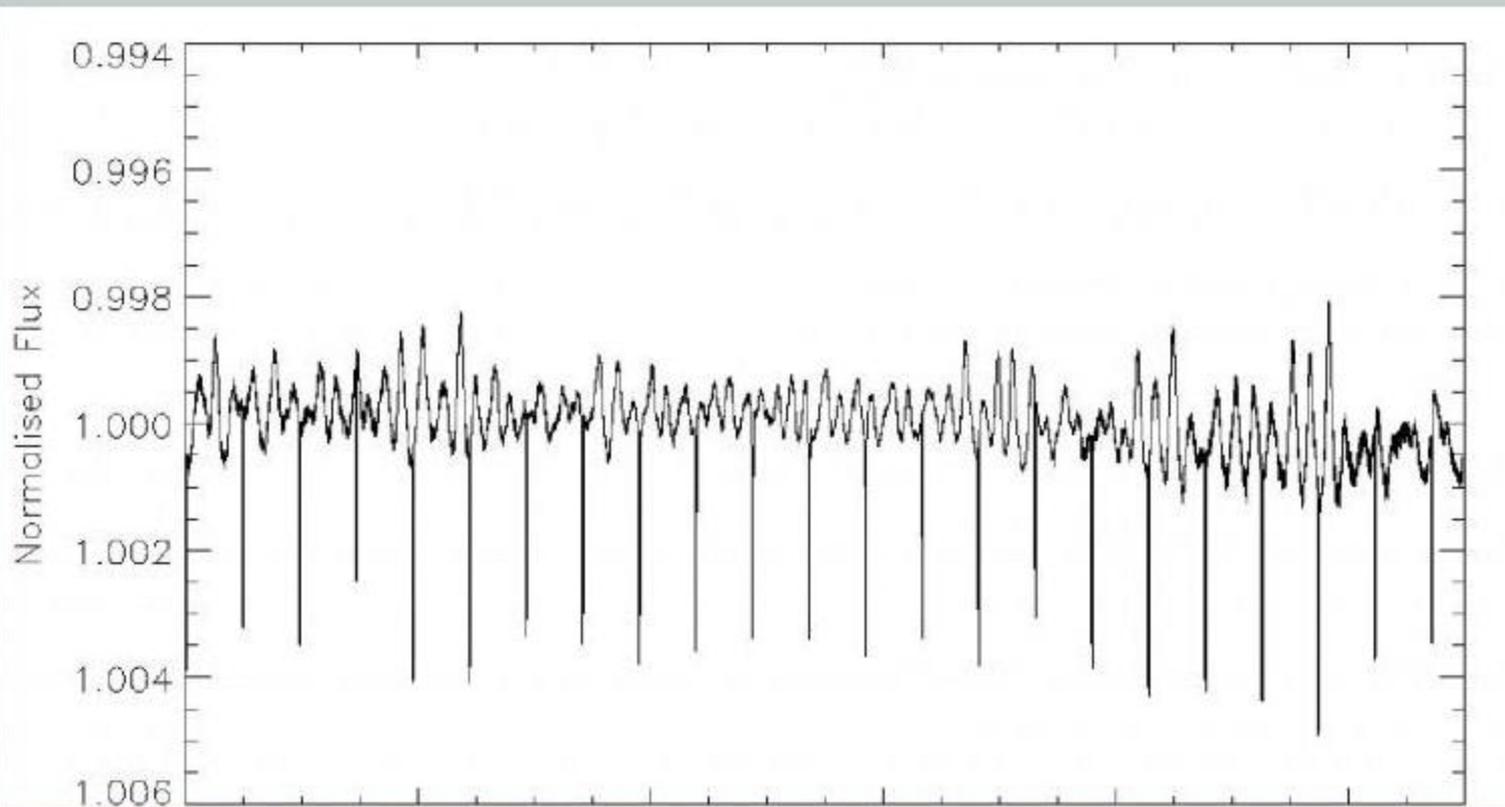
## 3 Eclipses depuis l'espace :

COROT en 2006 (ESA); Kepler en 2010 (NASA)

Pour fermer cliquer ici ou en dehors du cadre

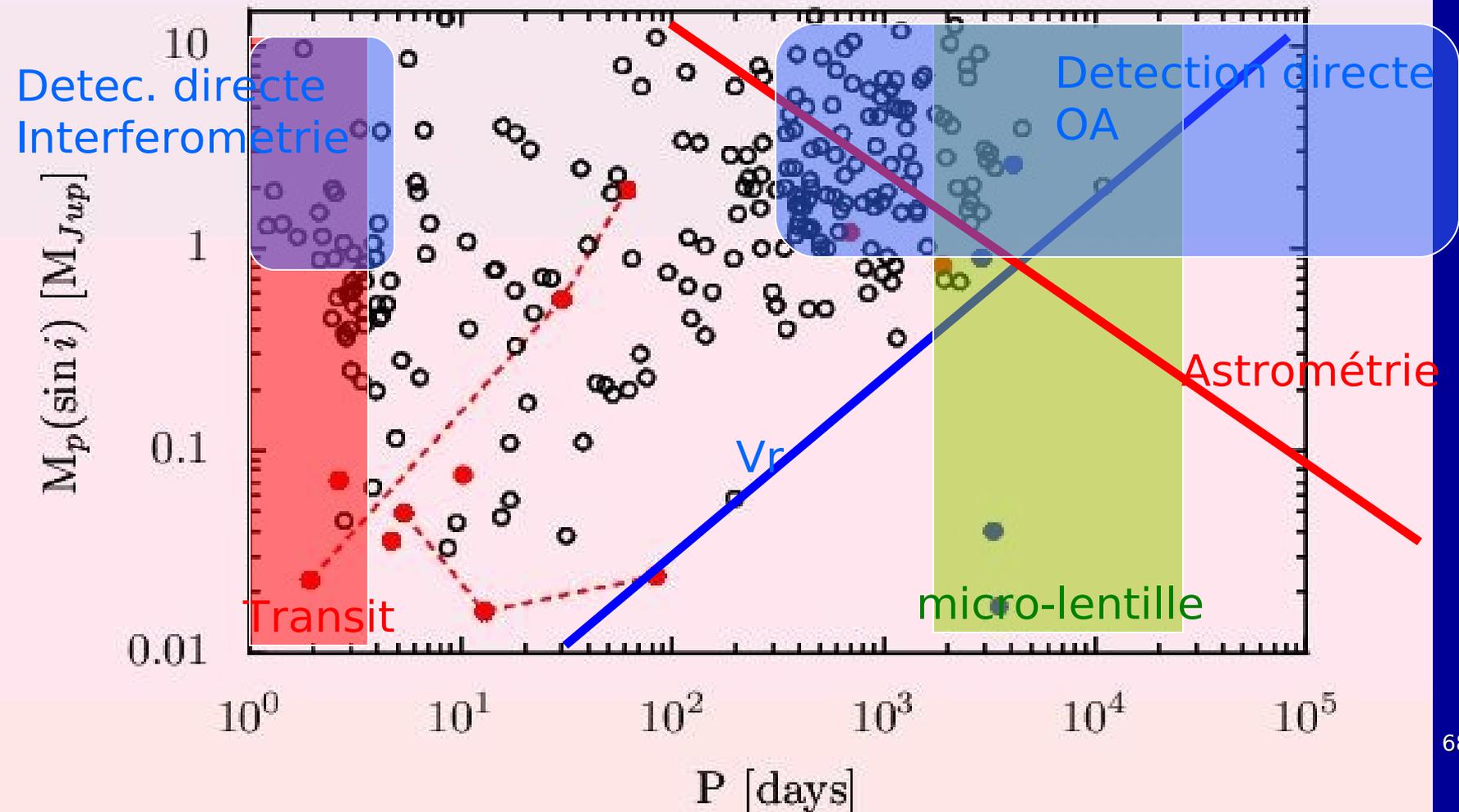
Courbe de lumière de CoRoT.

© CNES.



# Détection des planètes extra-solaires

4 Bilan :



# Détections de planètes extra-solaires

Paramètres mesurés

## 4 Bilan

Transit	Rayon (densité si masse connue par $V_r$ ) Période
$V_r$	Masse (densité si rayon connu par transit) Paramètres orbitaux (périodes, excentricité, etc...)
Astrométrie	Masse Paramètres orbitaux
Détection directe	Données sur le spectre émis

# Détections de planètes extra-solaires

## 4 Bilan

	+	-
Transit	- caractérisation physique structure et spectre	-cas particulier (P court, planète chaude) -besoin de confirmation Vr
Vr	- Efficace, couverture d'un grand espace de paramètre	Pas de caractérisation physique (besoin de transit)
Astrométrie	- couverture d'un grand espace de paramètre (complémentaire de Vr)	Pas de caractérisation physique (besoin d'imagerie)
Détection directe	- Information spectrale - couverture espace paramètre complémentaire de Vr	- Pas de mesure de masse - objets massifs (au moins dans un 1 <sup>er</sup> temps)

# Statistiques des planètes détectées

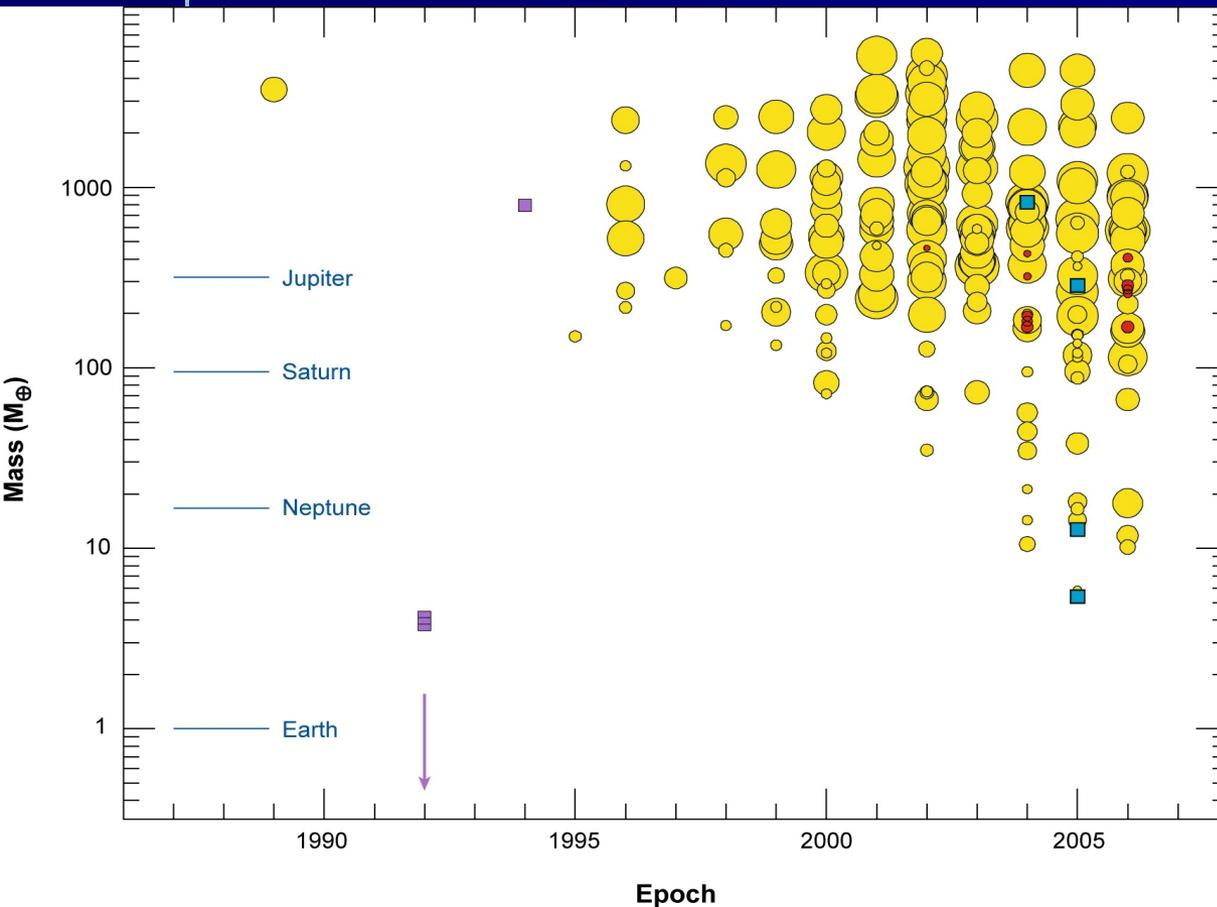
A large, detailed image of a gas giant planet, likely Jupiter, with prominent orange and brown bands. A small blue planet, representing Earth, is visible in the distance on the right side of the frame. The background is a dark space with a bright star on the left.

Copyright Lynette R. Cook

<http://extrasolar.spaceart.org/>

# Découvertes

## Planètes découvertes :



Super-Jupiter ( $10-13 M_{\text{Jup}}$ )

15 planètes

Géantes ( $0.1 - 10 M_{\text{Jup}}$ ) :

Depuis 1995 >400 planètes

Neptune ( $10-30 M_{\text{Terre}}$ ) :

Depuis 2004 ~24 planètes

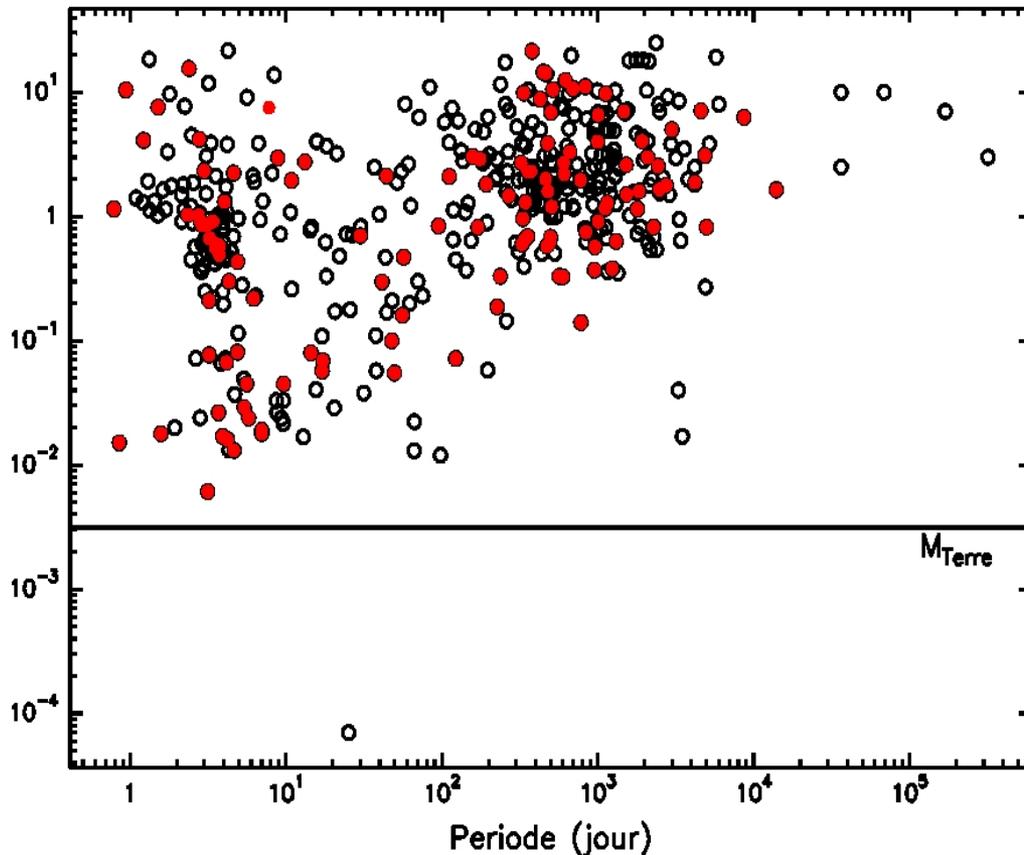
Super-Terre ( $2-10 M_{\text{Terre}}$ ) :

Depuis 2005 : ~25 planètes

⇒ Nous «détectons» des planètes géantes autour de 6% des étoiles observées

# Découvertes

Planètes découvertes :



Super-Jupiter ( $10-13M_{\text{jup}}$ )

15 planètes

Géantes ( $0.1 - 10 M_{\text{jup}}$ ) :

Depuis 1995 >400 planètes

Neptune ( $10-30 M_{\text{Terre}}$ ) :

Depuis 2004 ~24 planètes

Super-Terre ( $2-10 M_{\text{Terre}}$ ) :

Depuis 2005 : ~25 planètes

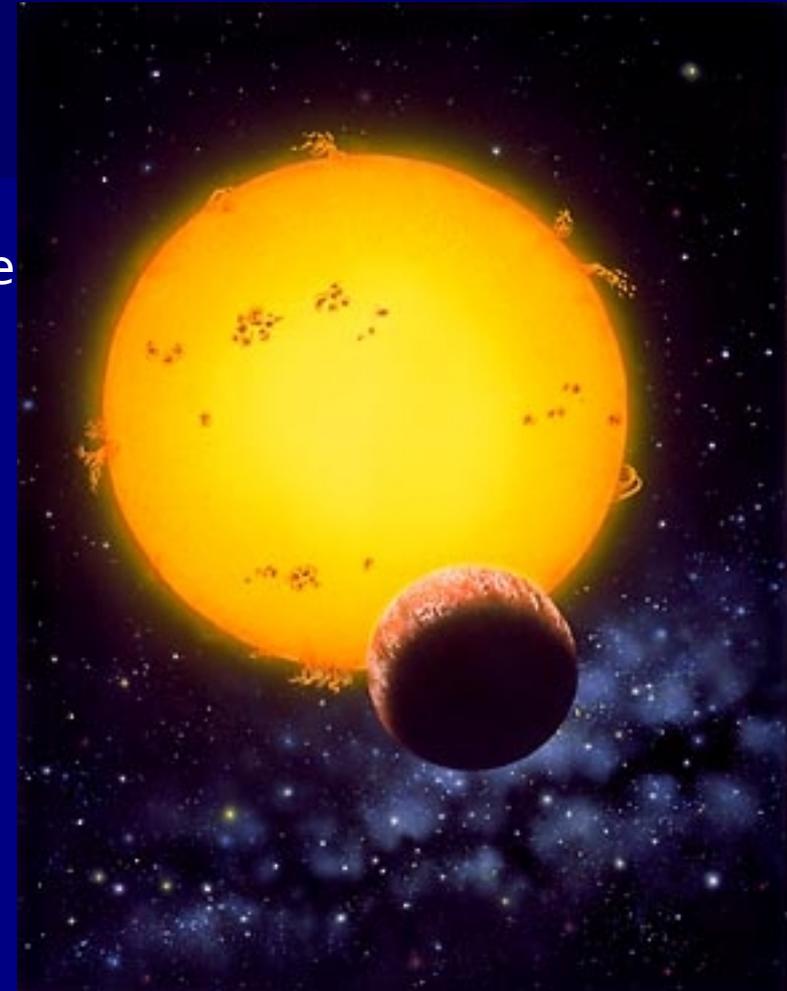
⇒ Nous «détectons» des planètes géantes autour de 6% des étoiles observées

# Découvertes

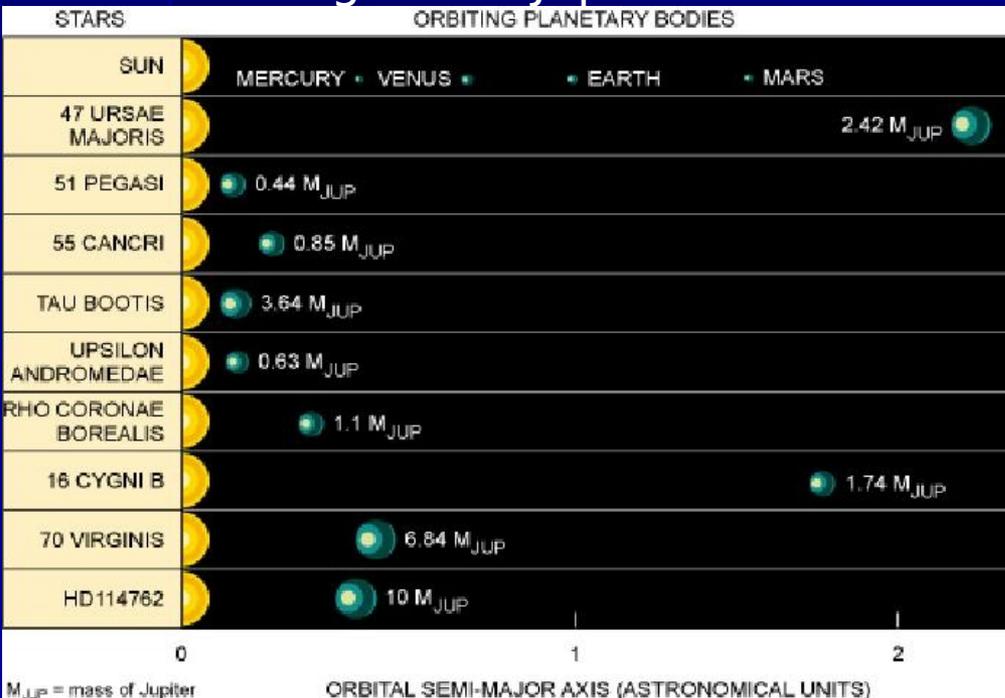
## Jupiters Chauds

Des planètes géantes très proches de leurs étoiles

1% des étoiles de type solaire hébergent un Jupiter chaud

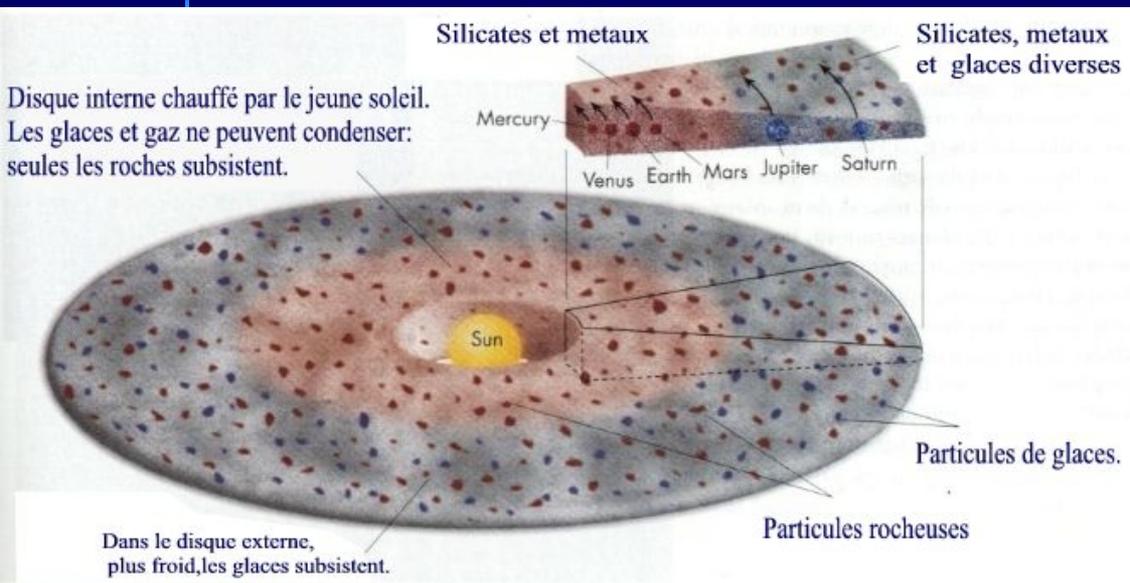


20 fois plus proches de leurs étoiles que La Terre ne l'est du Soleil



# Découvertes

## Jupiters Chauds et migration

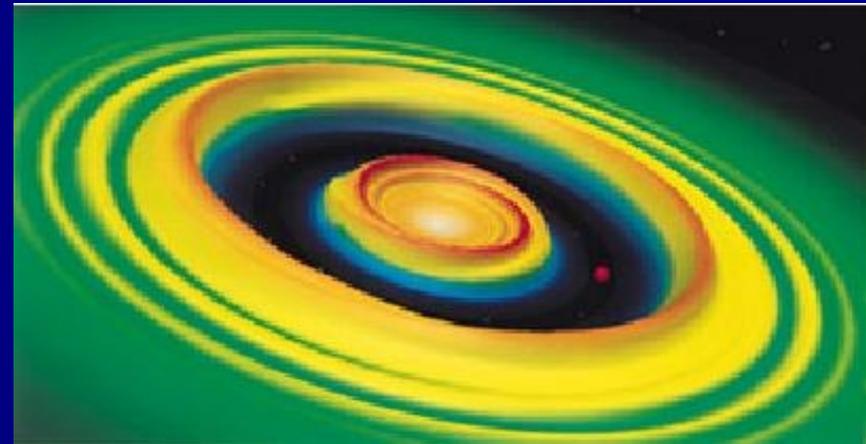


1./ formation du cœur par agrégation de matériaux solides

- Cœurs rocheux pour les planètes internes
- Cœurs de glaces pour les planètes externes

2./ accrétion du gaz, pour les planètes les plus massives si le cœur fait plus que  $10 M_{\text{terre}}$  (donc de glace)

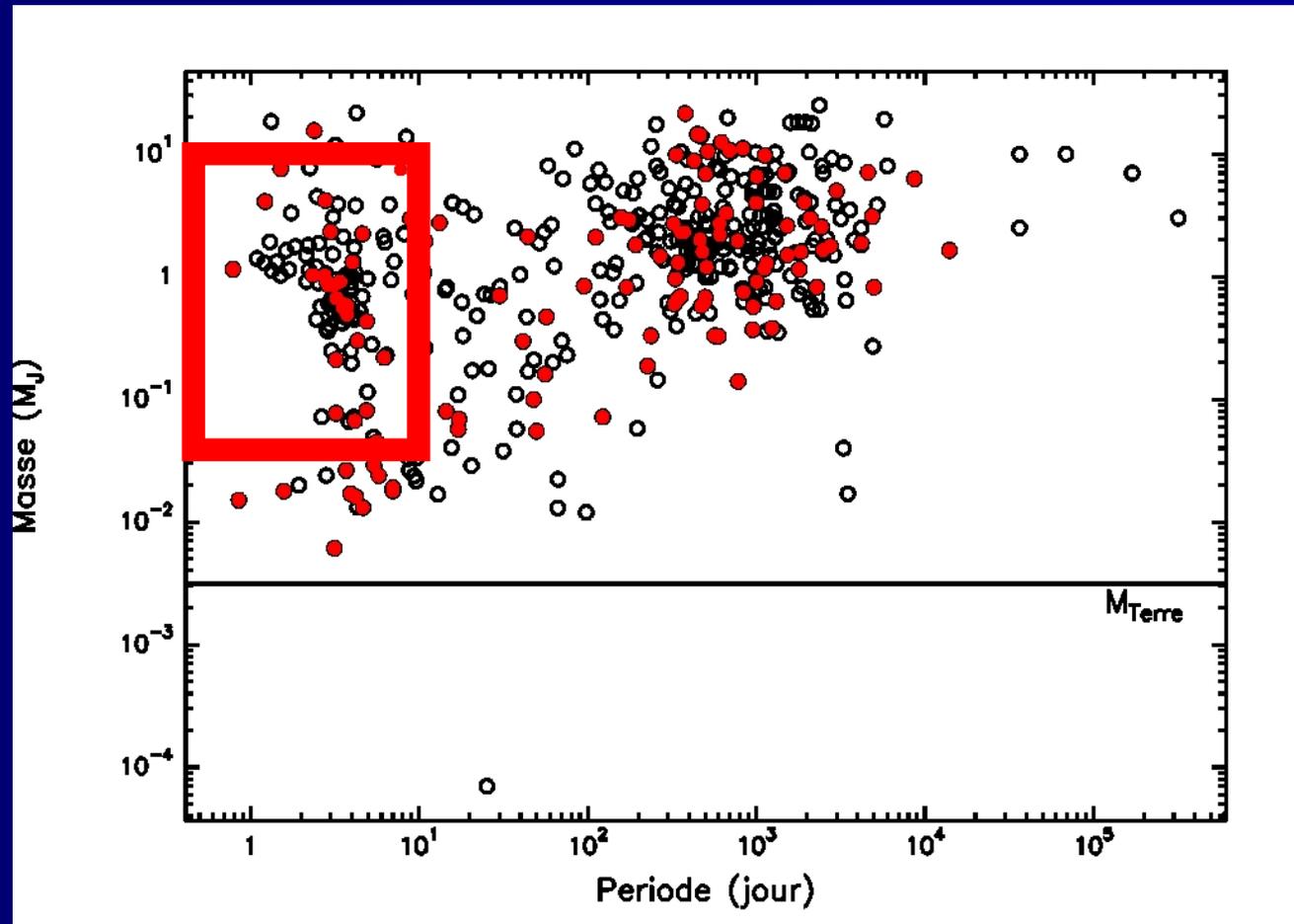
⇒ Le cœur des planètes les plus massives s'est formé dans une zone externe



# Découvertes

## Jupiters Chauds et migration

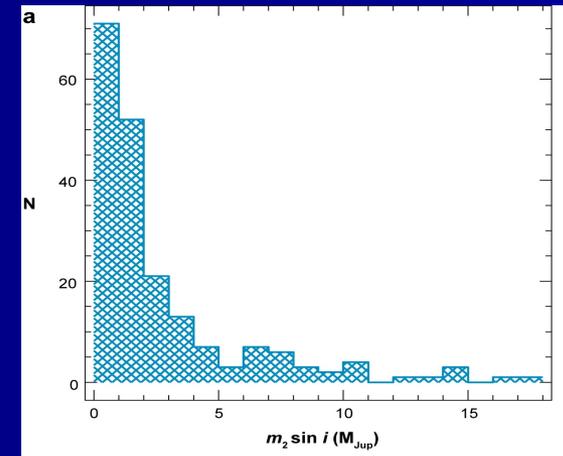
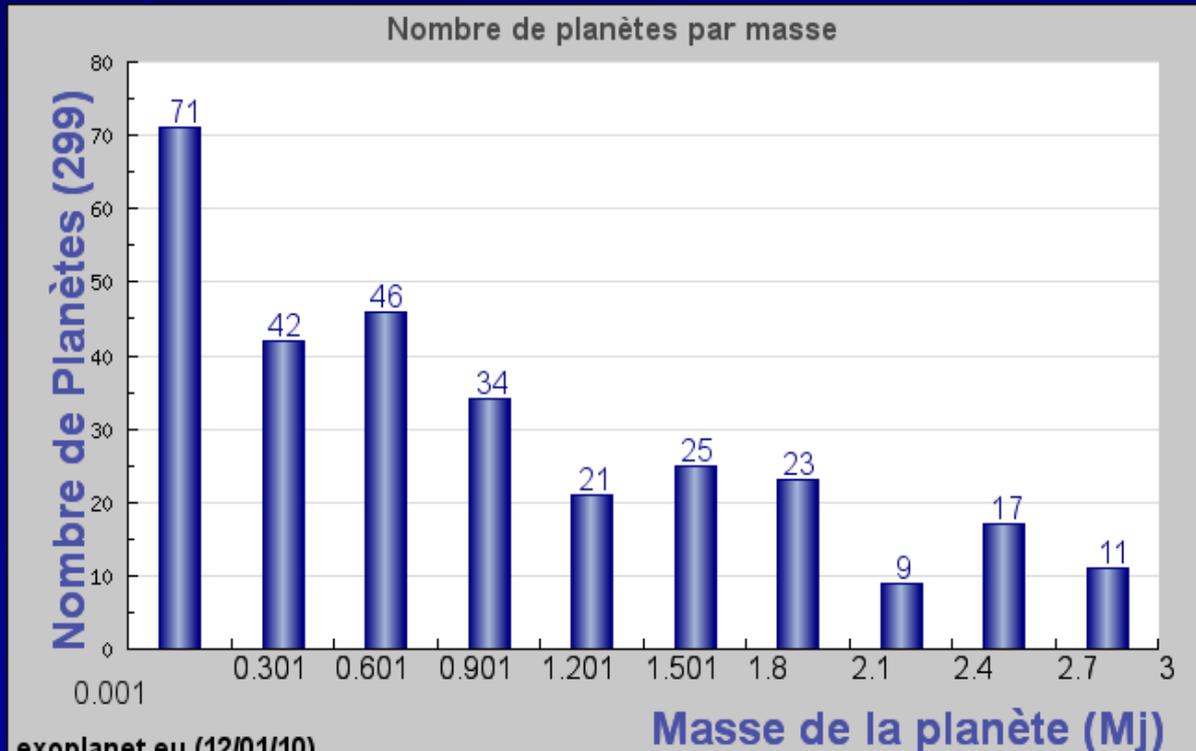
La migration planétaire joue un très grand rôle dans la formation planétaire



# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

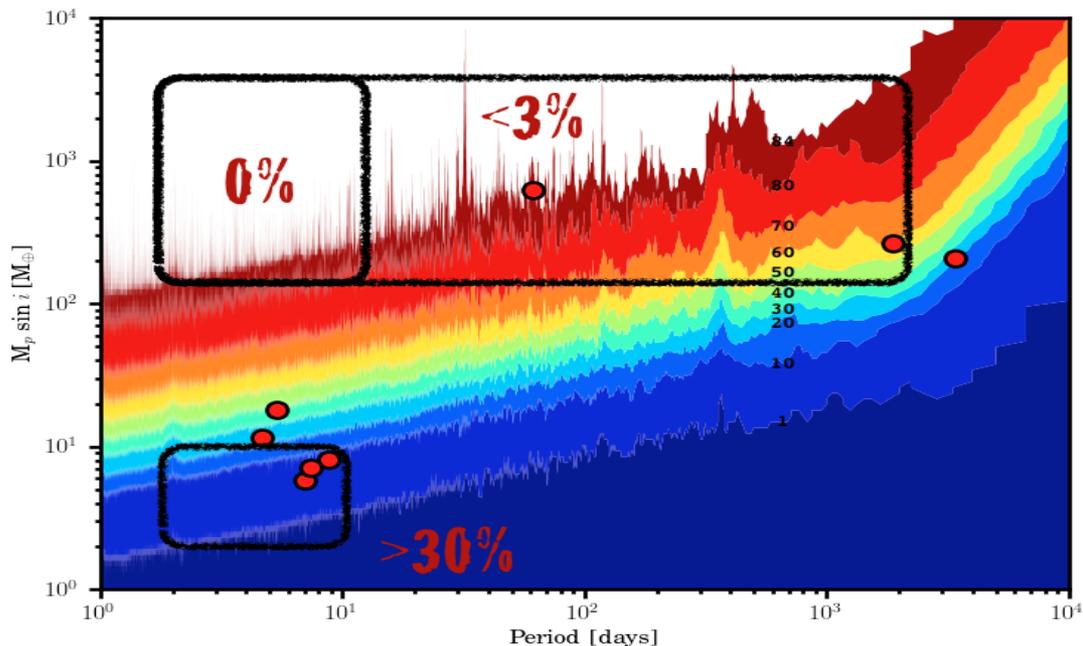
- Planètes peu massives sont les plus nombreuses



# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Planètes peu massives sont les plus nombreuses
- 30% des étoiles possèdent des planètes entre  $2-3M_{\text{Terre}}$  et  $10 M_{\text{Terre}}$  à courte période ( $P \sim 20j$ ).... Le système solaire n'en fait pas partie...



- Les systèmes planétaires sont très courants. La formation planétaire est plus efficace pour les petites planètes.
- Les Terres sont fréquentes ?

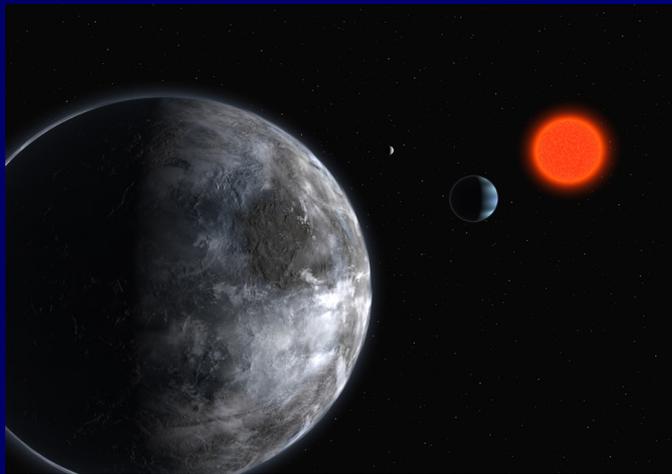
# Découvertes

Les Super-Terres : Sur les 25 Super-Terres connues aujourd'hui : 15 ont été découvertes par la communauté française...

>30% des étoiles de type solaires possèdent des super-Terre à courte période

80% des Super-Terre sont dans des systèmes Multi-planétaires ;  
Contre 23% pour l'ensemble des planètes.

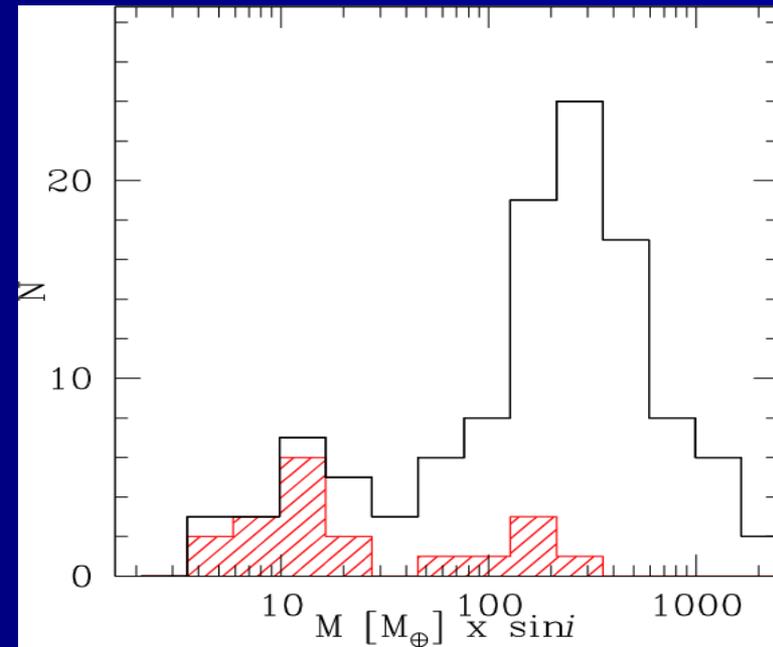
Distribution bi-modale des masses .



The Planetary System in Gliese 581  
(Artist's Impression)

ESO Press Photo 22a/07 (25 April 2007)

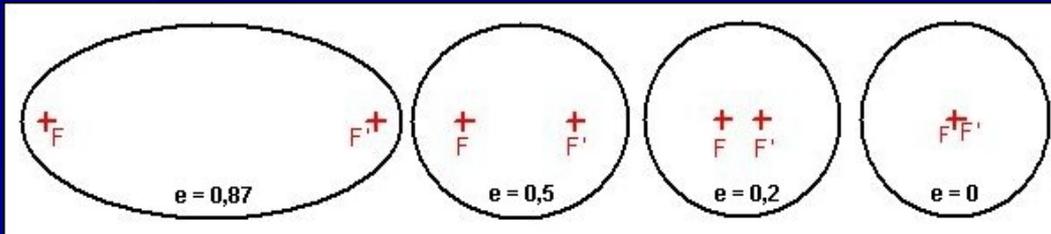
This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.



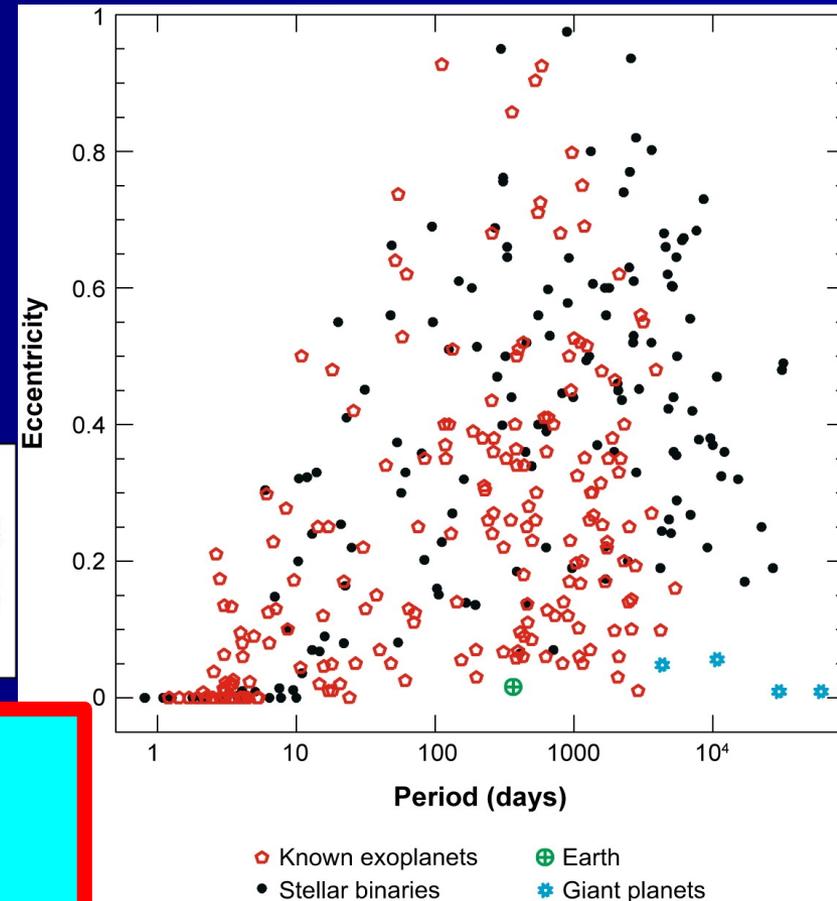
# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Contrairement aux systèmes solaires : beaucoup de planètes excentriques
- Perturbation gravitationnelles planète-planète; ou rencontre avec des étoiles proches
- La distribution des excentricités des planètes différente de celle des étoiles



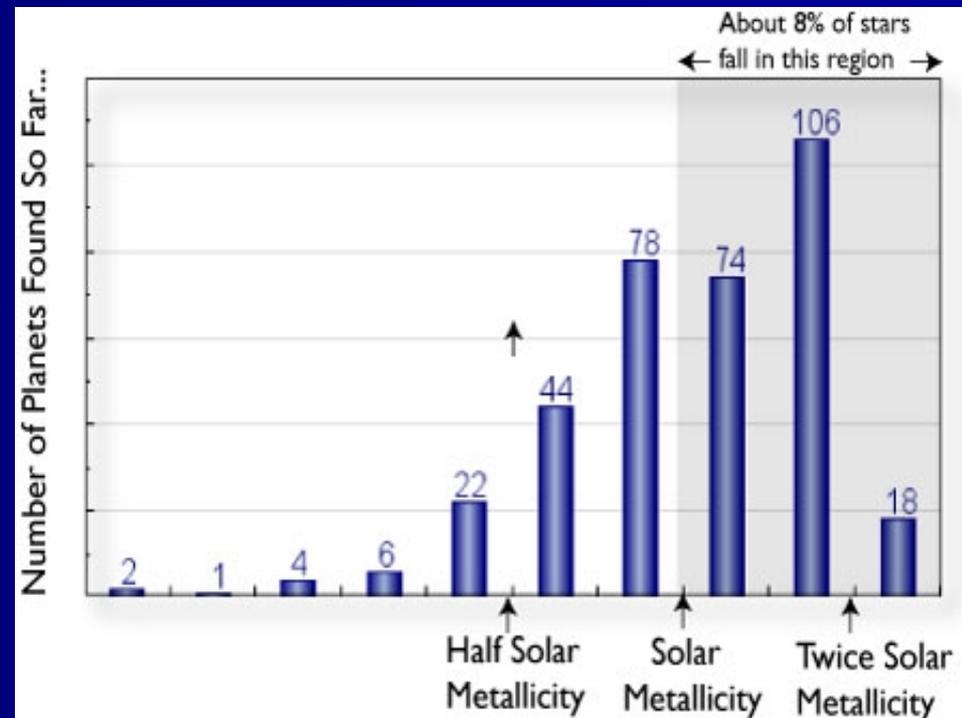
Les perturbation gravitationnelles sont souvent plus importantes que dans la cas du système solaire



# III. Découvertes

## 3.3 Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Les étoiles riches en métaux ont plus de planètes
- Rôle de la composition chimique sur la formation
- A priori, formation du cœur plus aisé dans les disques riches en métaux (plus de particules solides ? )

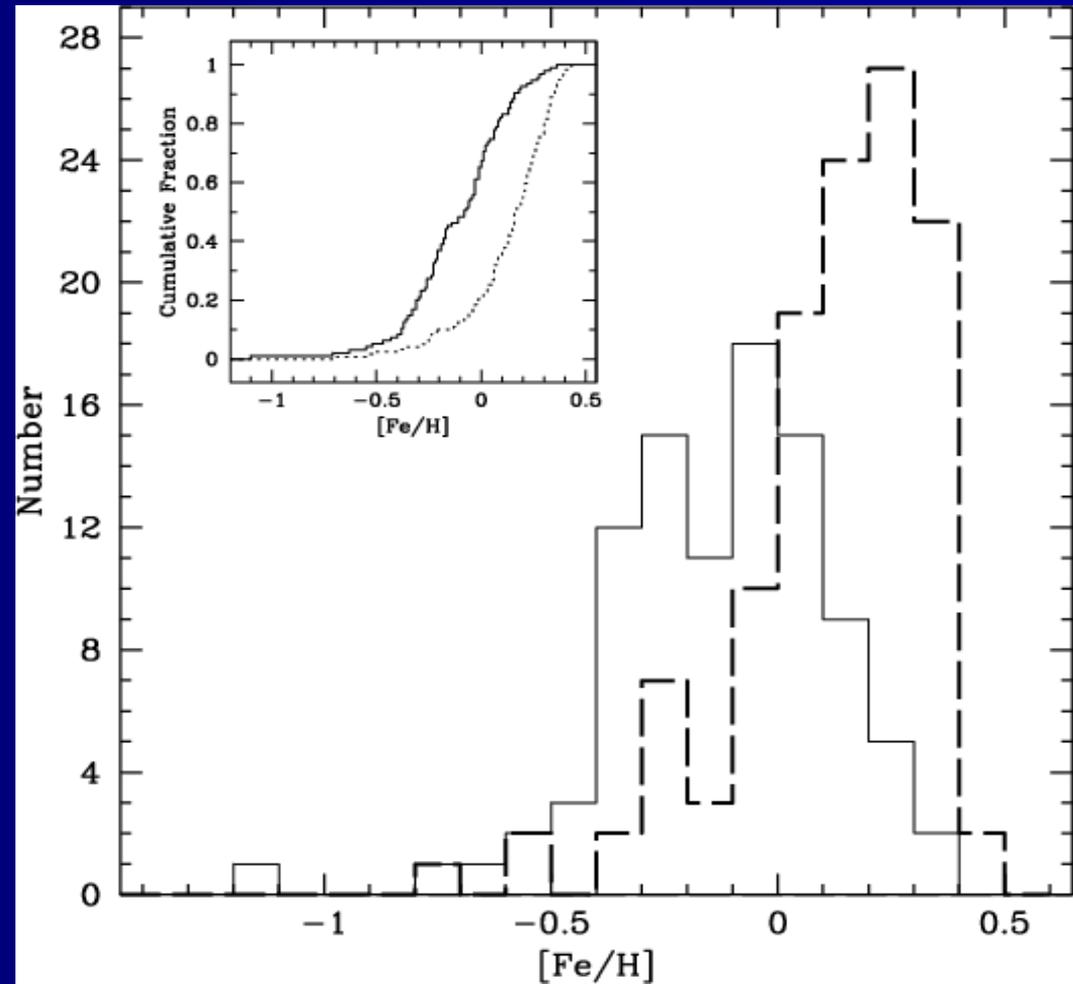


# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Ligne continue : étoiles sans planète
- Ligne pointillée : étoile avec planète

• La composition chimique du disque joue un rôle essentiel pour la formation planétaire

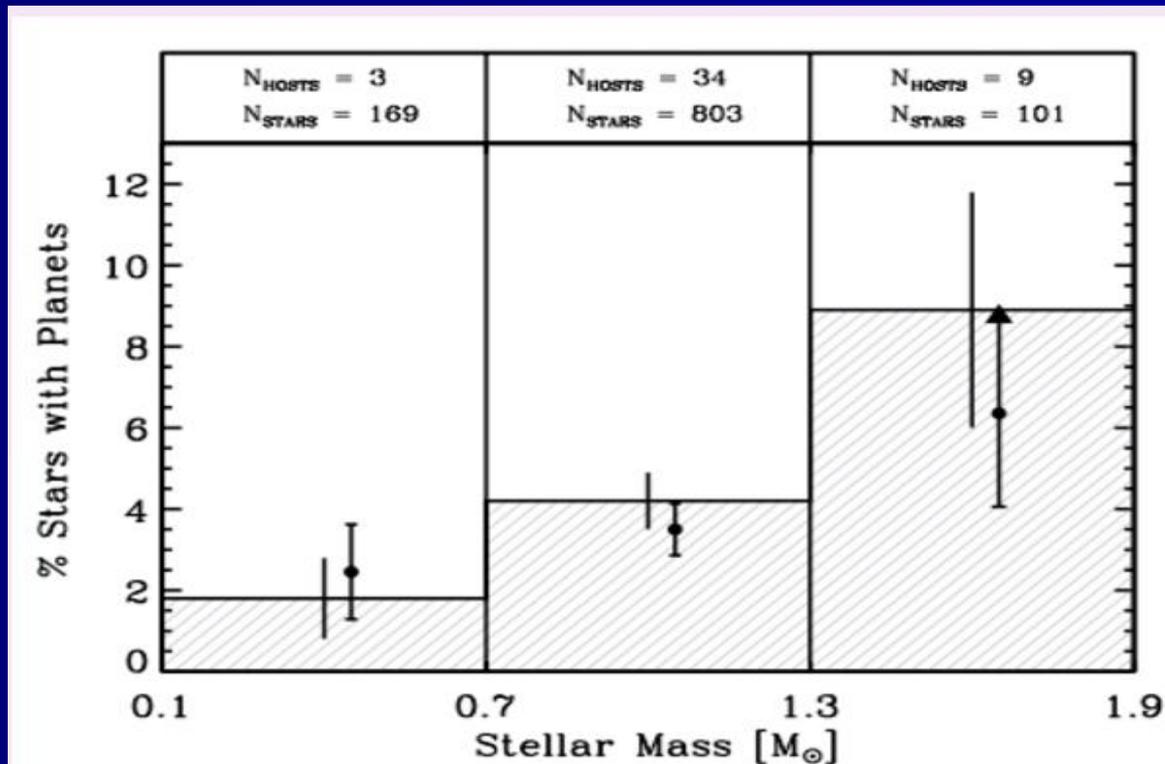


# Découvertes

## 3.3 Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Planètes en fonction de la masse de l'étoile centrale

- Pourcentage des étoiles avec des planètes massives

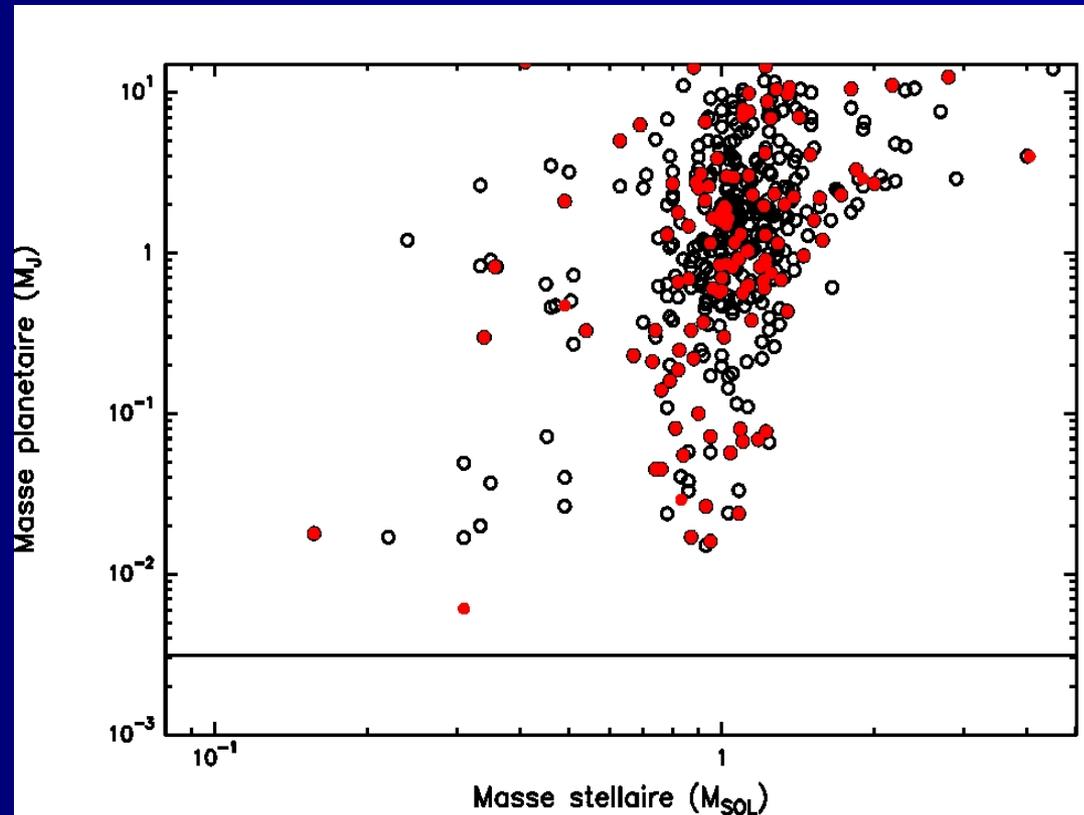


# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

### • Planètes en fonction de l'étoile centrale

- Autour des étoiles de type solaire : les planètes de  $M > 0,5 M_J$  dominant les objets découverts
- Autour des étoiles de très faible masse : les planètes de  $M < 20 M_T$  dominant les objets découverts



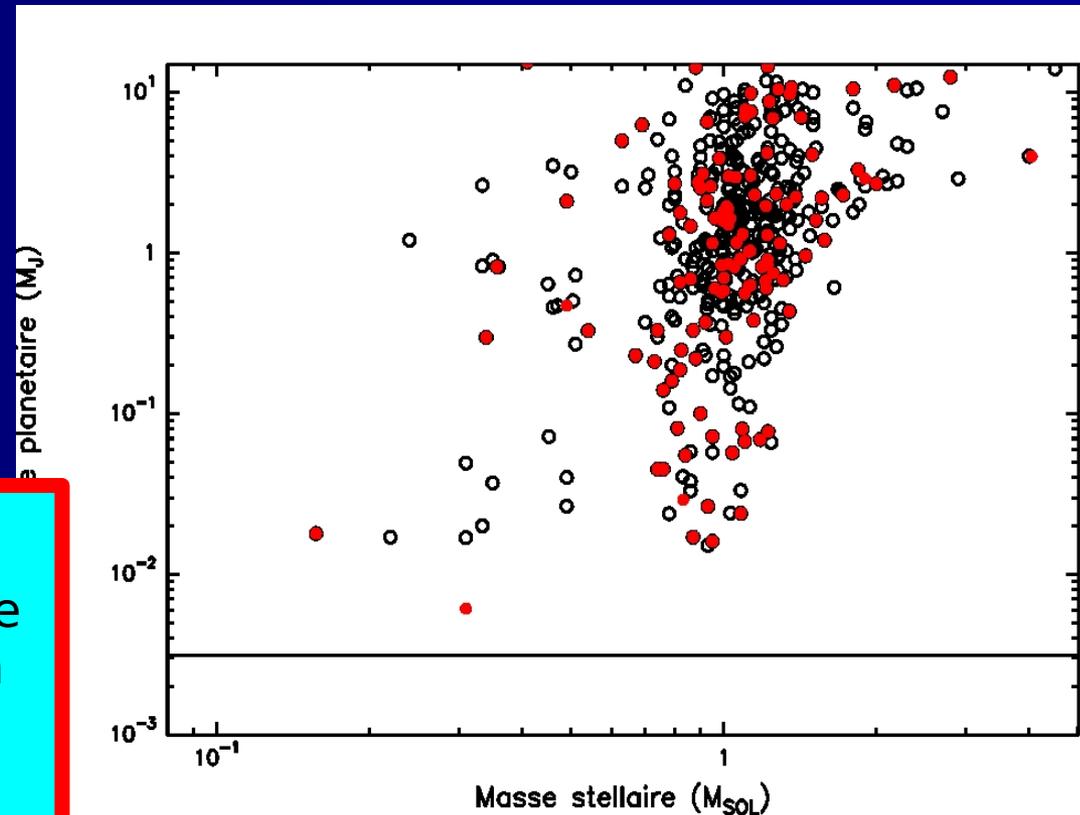
# Découvertes

## 3.3 Statistiques : contraintes de la formation stellaires

### • Planètes en fonction de l'étoile centrale

- Peu de planètes massives autour des étoiles de très faible masse
- Mais beaucoup de petites planètes autour des étoiles de très faible masse

- La masse de l'étoile centrale est un paramètre qui joue un grand rôle pour la formation des planètes



# Découvertes

Statistiques : contraintes de la formation stellaires

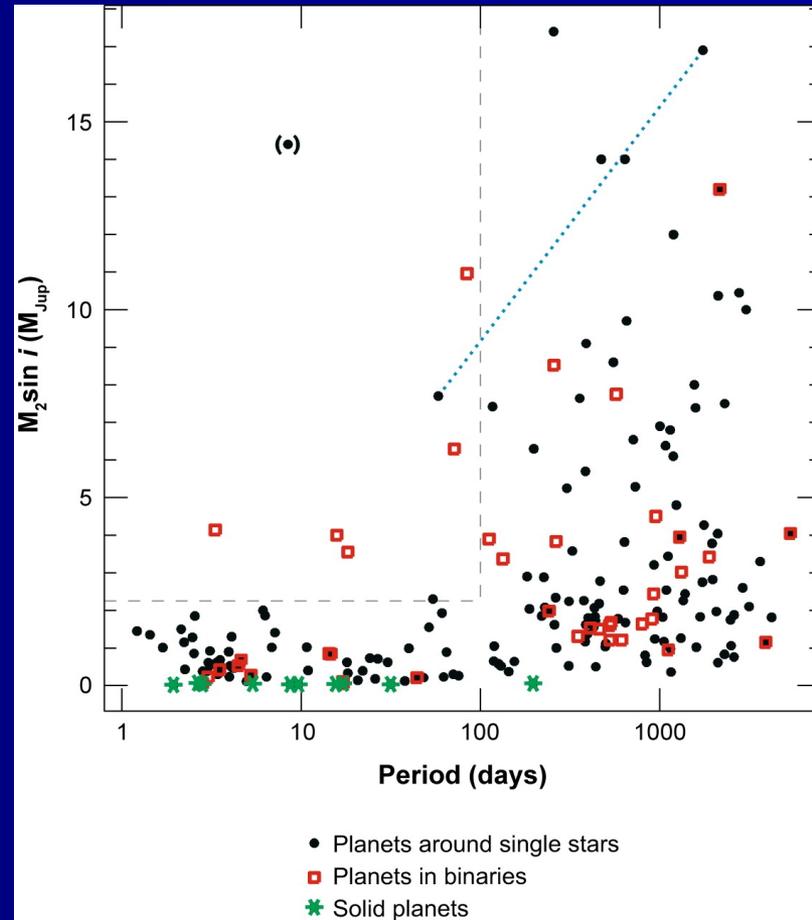


Rare !!!

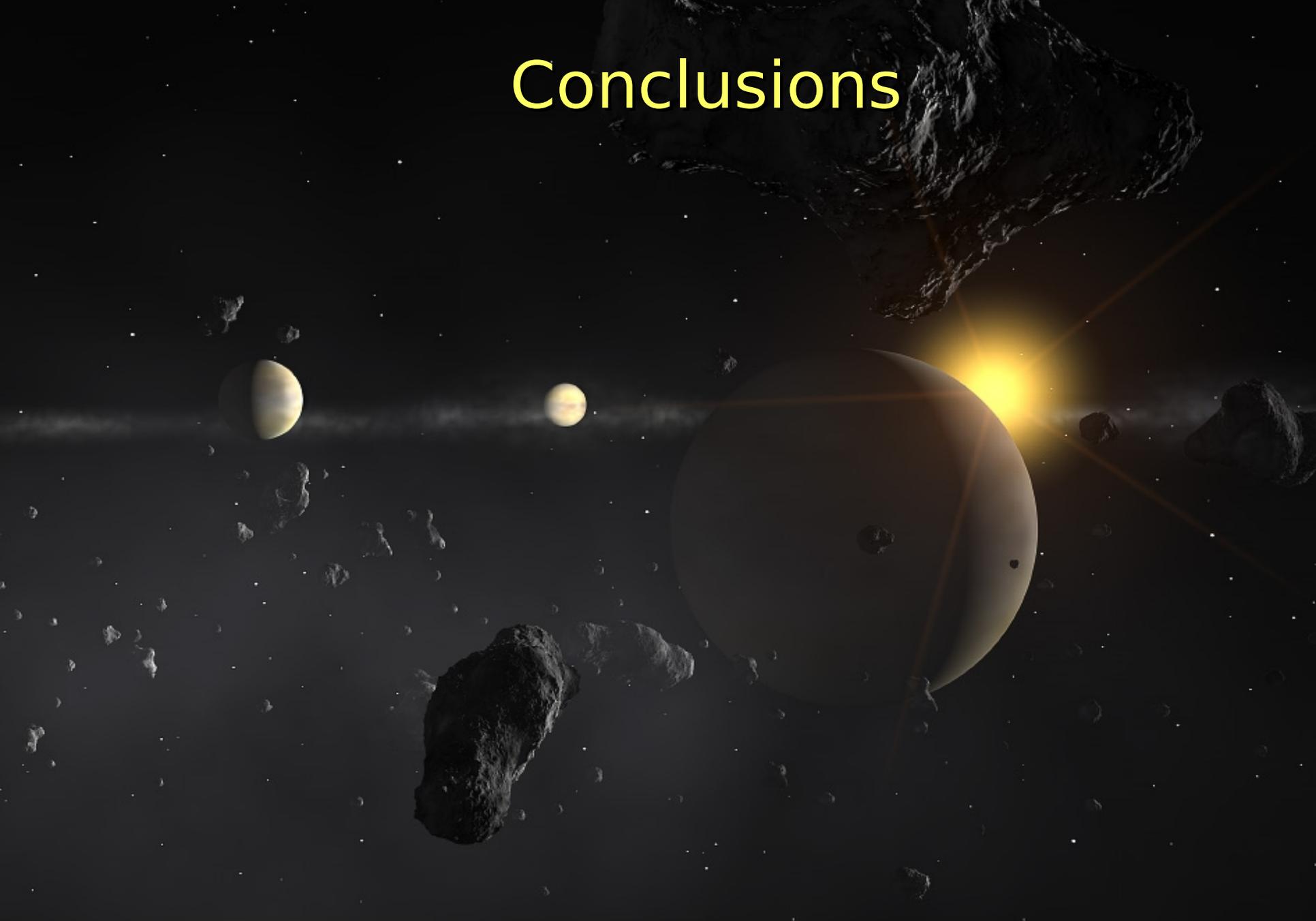
# Découvertes

## Statistiques : contraintes de la formation stellaires

- Grande diversité de planètes mais tout n'existe pas...
- Peu de planètes  $M > 2.5M_{\text{Jup}}$  pour  $P < 100$  jours
- Sauf dans les systèmes multiples
- Migration plus efficace pour  $M < 2.5M_{\text{Jup}}$



# Conclusions

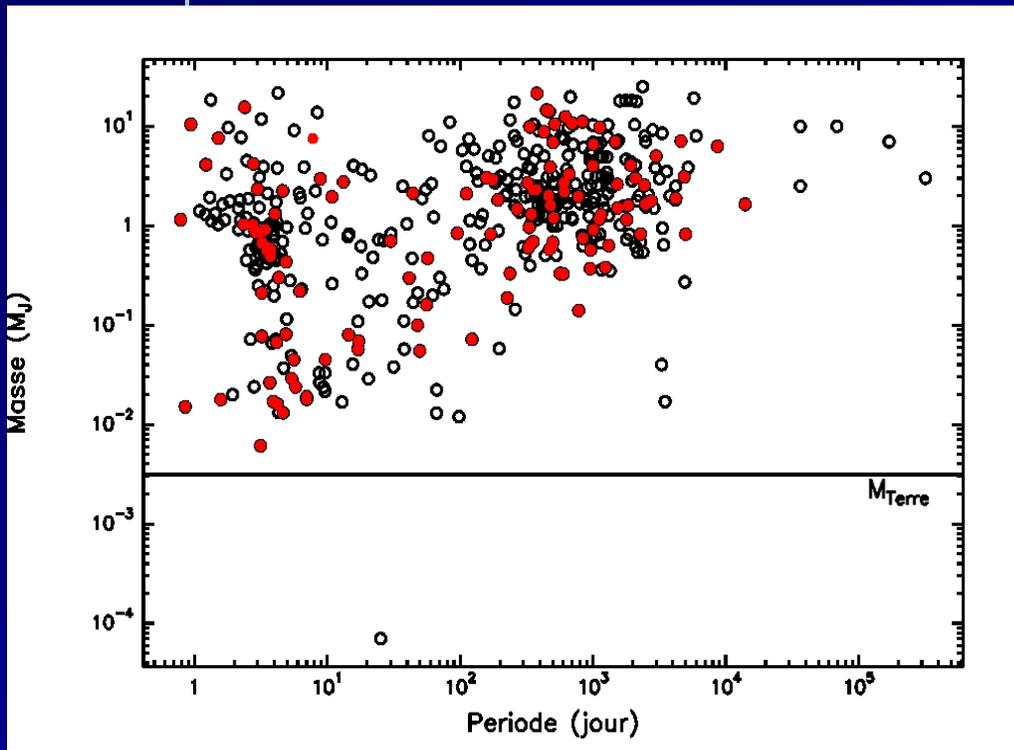


Artist View of Planetary System Around HD 69830

# Conclusions

- Nous commençons à avoir une « vue » de systèmes planétaires existants.
- Ils sont fréquents, voir très fréquents. Notamment les « petites planètes »
- Les systèmes planétaires dépendent : de la masse de l'étoile, de sa composition chimique.
- Notre système solaire n'est peut être pas typique (pas de Super-Terre à courte période, faible excentricité des orbites planétaire)

# Conclusions



## • Mais :

- La détection directe n'en est qu'à ses débuts : nous n'avons que peu d'idées de la fréquence des planètes à plus de  $\sim 10$  ans de périodes
- La technique des vitesses radiales est surtout sensible aux courtes périodes. Notre connaissance des planètes de faible masse est circonscrites aux périodes de moins  $\sim 50j-100j$

# Conclusions



AT1 and AT2 with Open Domes



- Les détections par astrométrie (SIM/espace ou PRIMA/sol) et l'arrivée de systèmes d'imagerie extrêmement performant : devrait changer cette vision

- Vitesses radiales ultra-précises : vers la détection des planètes de la masse de la Terre à 1an de période....

- De quoi sont constitués ces planètes et autour desquelles pouvons nous espérer la présence de vie ?

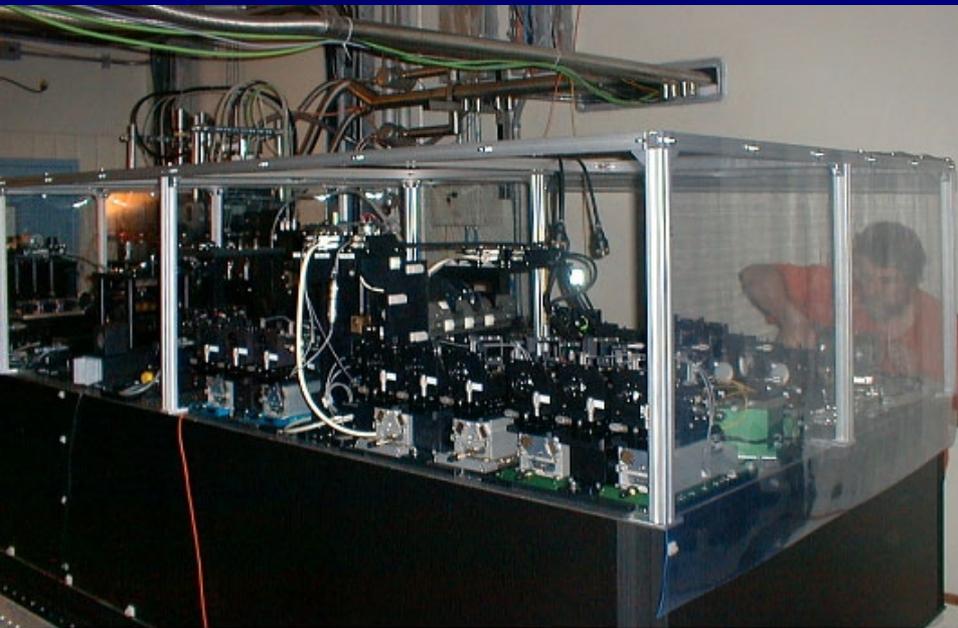
Rendez-vous à 14h30....

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Imagerie directe :

Planètes proches de leurs étoiles : avec les interféromètres

Obtention de résolution de quelques milli-arcsecondes



The AMBER Instrument at the VLT Interferometer



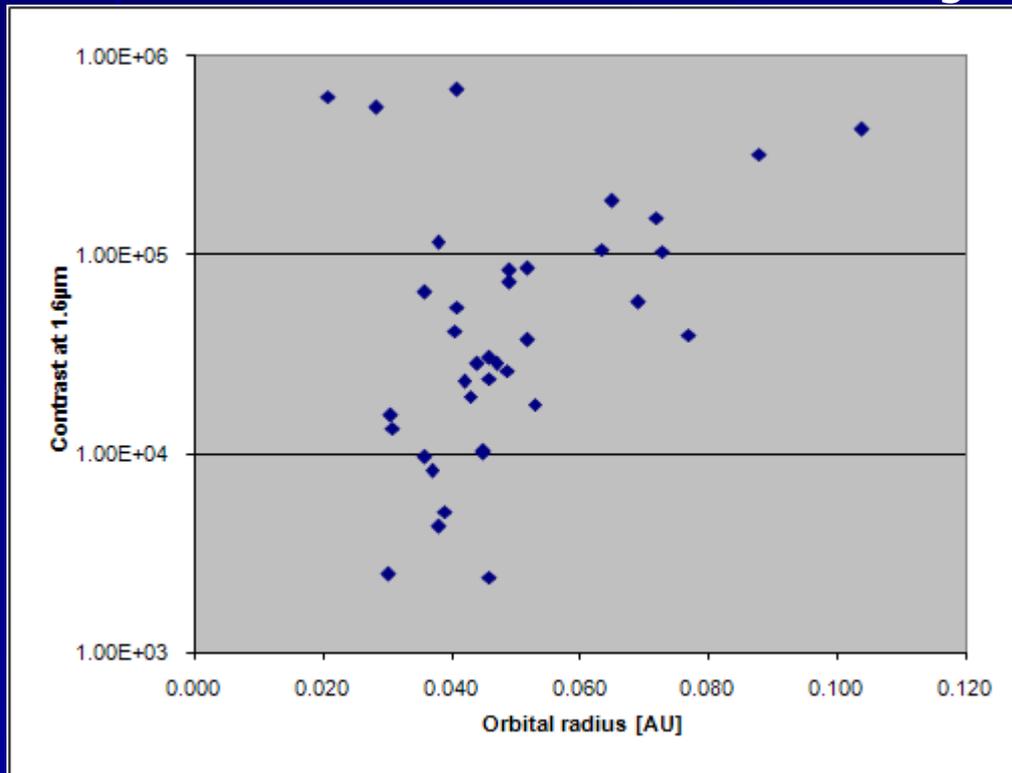
Paranal Observing Platform with AT1 and AT2

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 2.1 Imagerie directe :

Planètes proches de leurs étoiles : avec les interféromètres

Mais besoin aussi de mesurer de grands contrastes de luminosité



Contraste attendue à 1.6 μm pour toutes les planètes aujourd'hui connues à moins de 0.1 a.u. de leurs étoiles

**Pas encore faisable**

# II. Détection des planètes extra-solaires

## 2.2.2 Détection indirecte : vitesse radiale

Mesure de la vitesse radiale : par effet Doppler :

$$CCF(v) = \sum_i \sum_l M_{li}(v) \cdot A_i \cdot w_l \quad (9)$$

$l$  : trou du masque

$i$  : pixel

$M_{li}$  : fraction du trou du masque  $l$  tombant sur le pixel  $i$

$A_i$  : Flux du spectre sur le pixel  $i$

$w_l$  : Eventuelle pondération du trou du masque  $l$

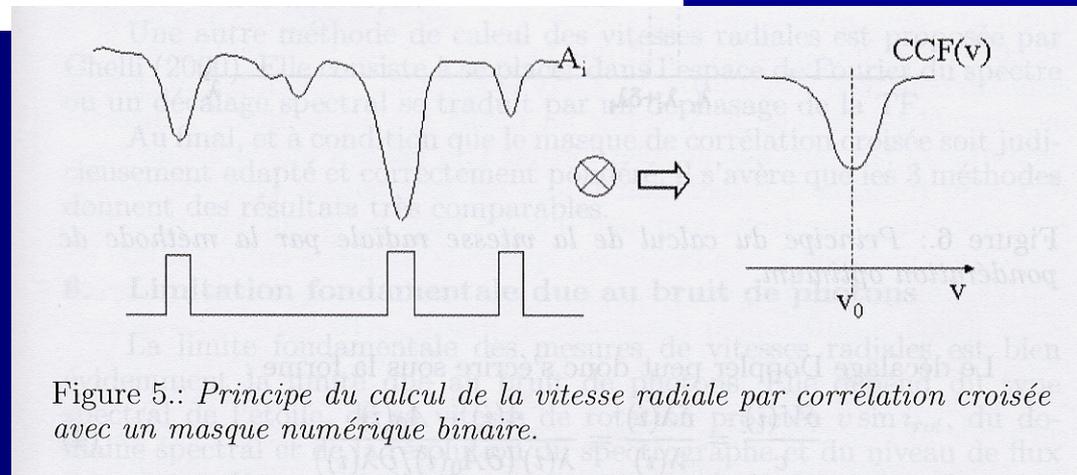
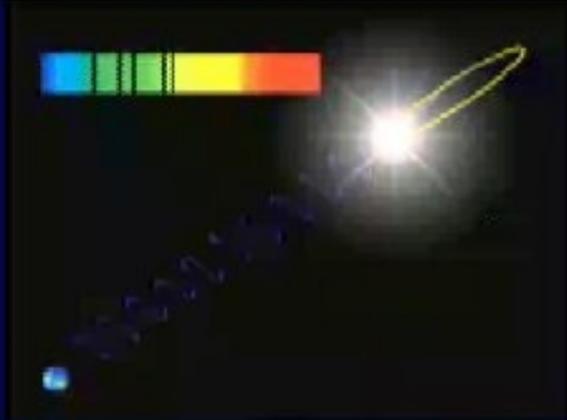
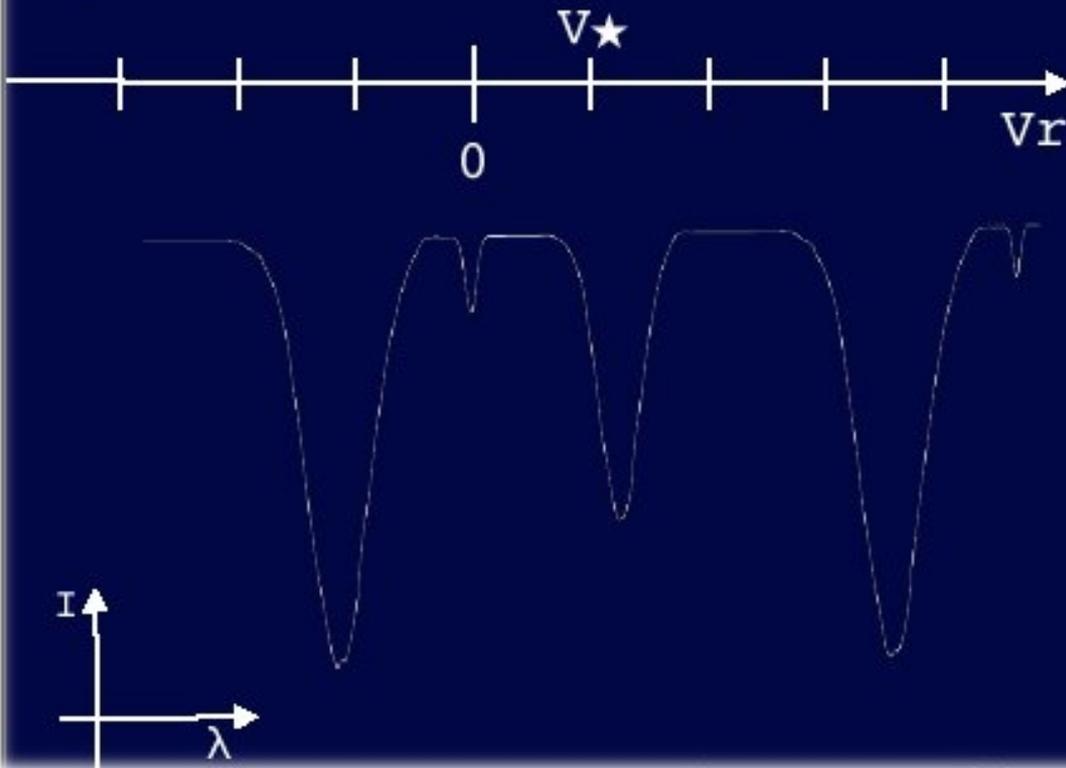


Figure 5.: Principe du calcul de la vitesse radiale par corrélation croisée avec un masque numérique binaire.

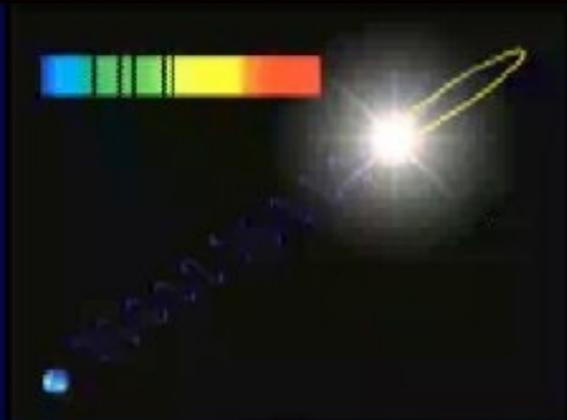
## Méthode : II.1 La méthode



- mesure du décalage Doppler
  - chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
  - on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

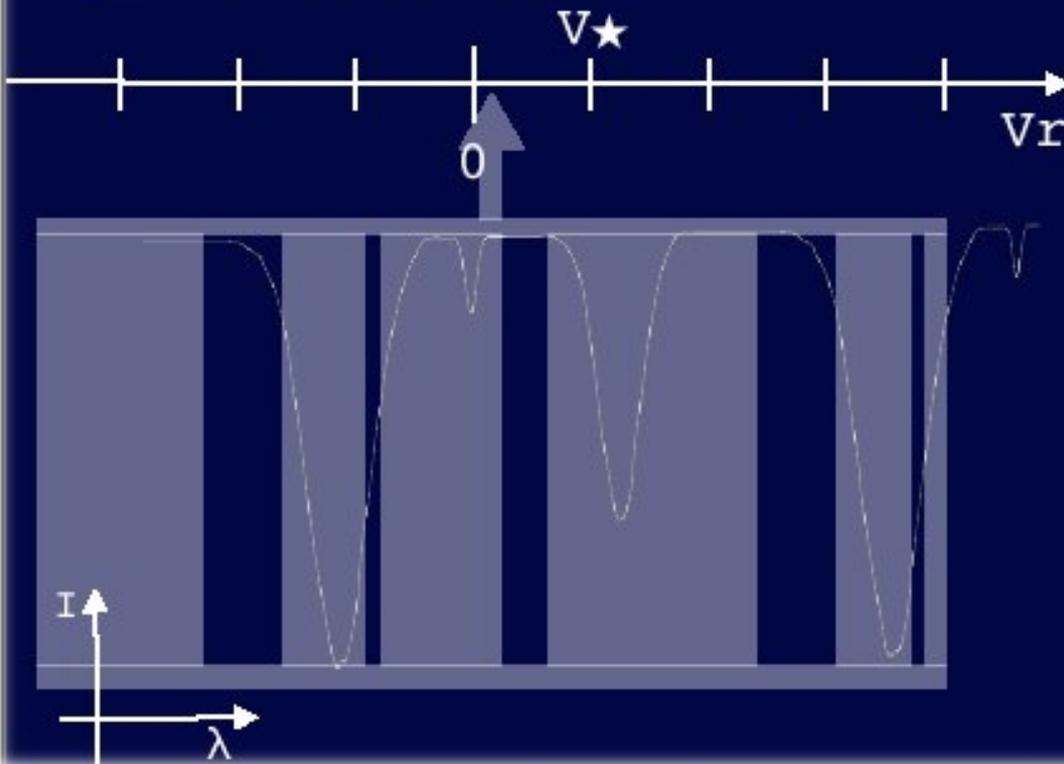


## Méthode : II.1 La méthode

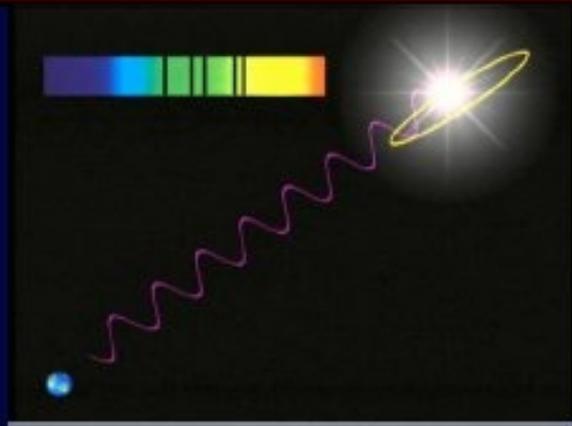


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

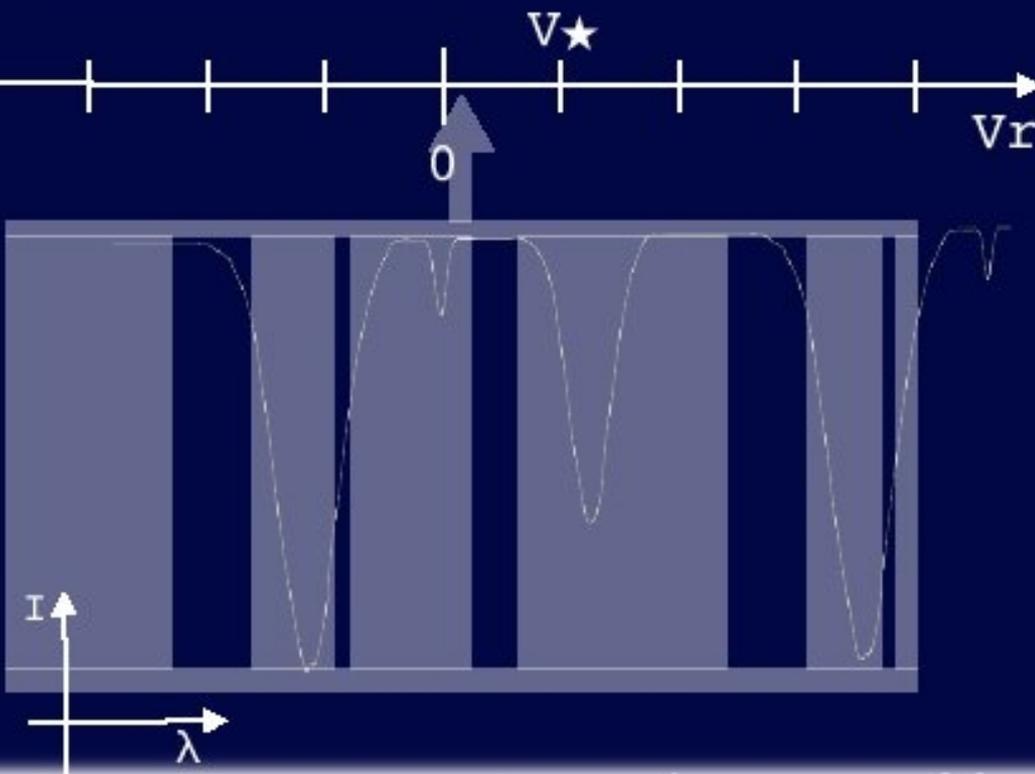


## Méthode : II.1 La méthode

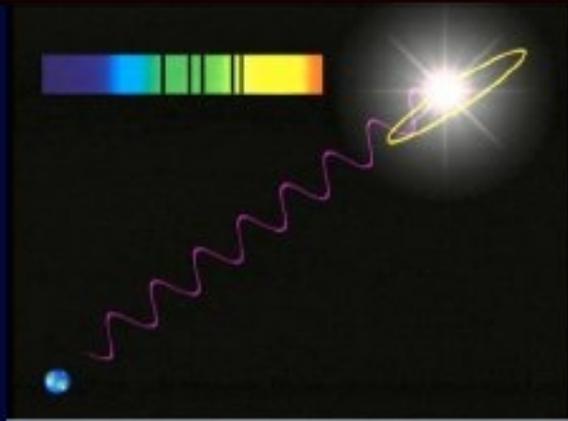


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

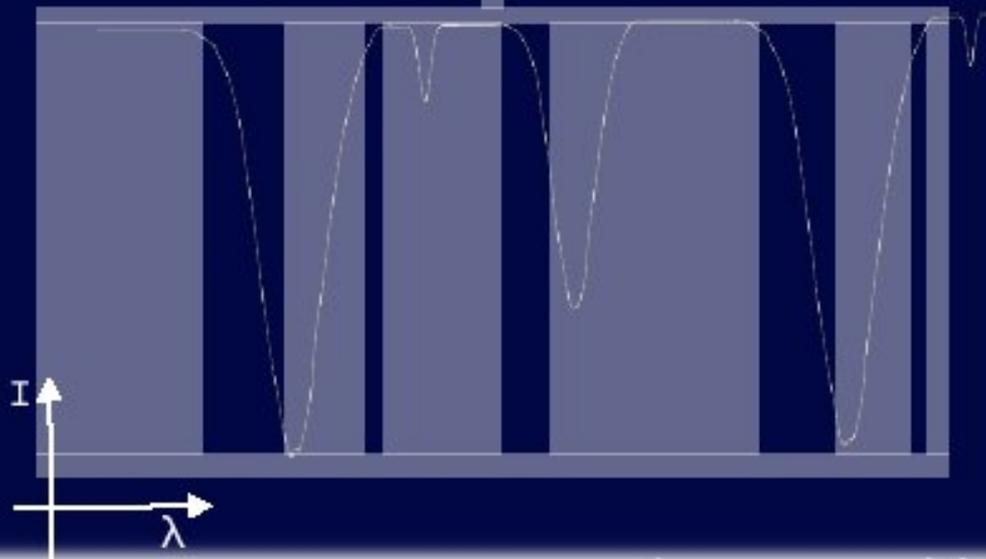


## Méthode : II.1 La méthode

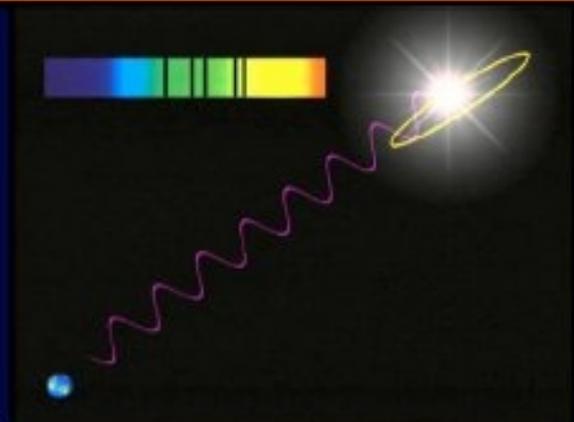


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

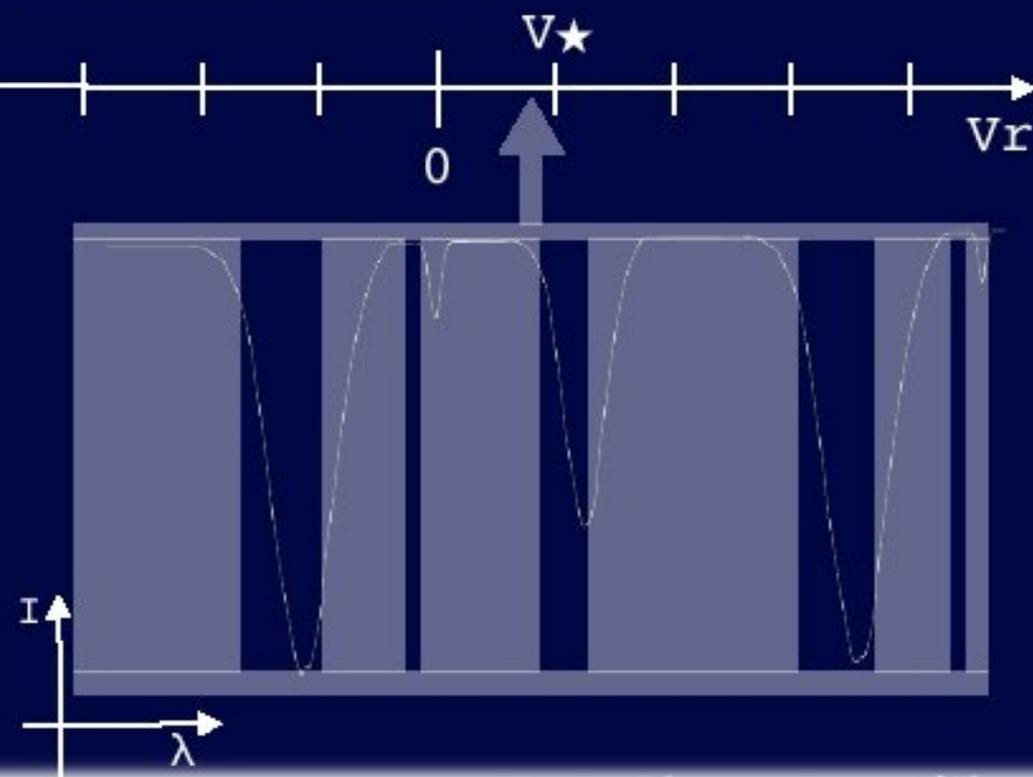


## Méthode : II.1 La méthode

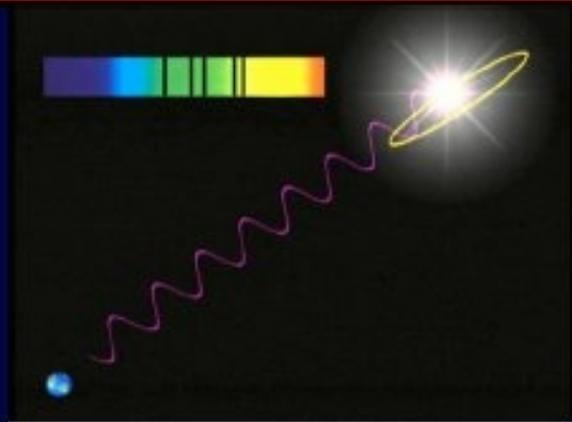


- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

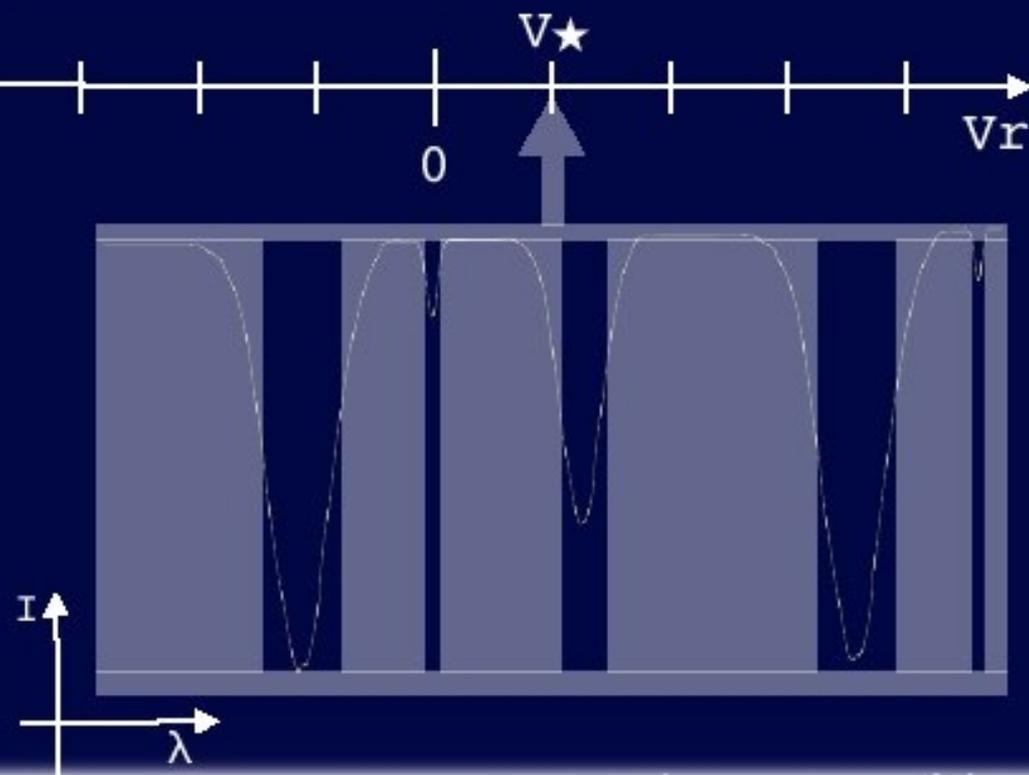


## Méthode : II.1 La méthode

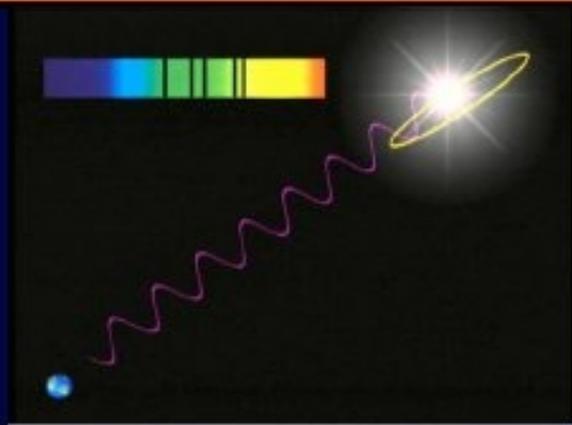


- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique



## Méthode : II.1 La méthode



- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

$V_{\star}$

0

$V_r$

I

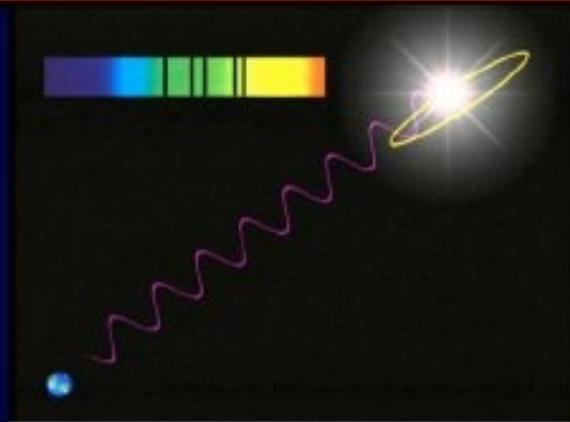
$\lambda$

I

$V_r$



## Méthode : II.1 La méthode



- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

$V_{\star}$

0

$V_r$

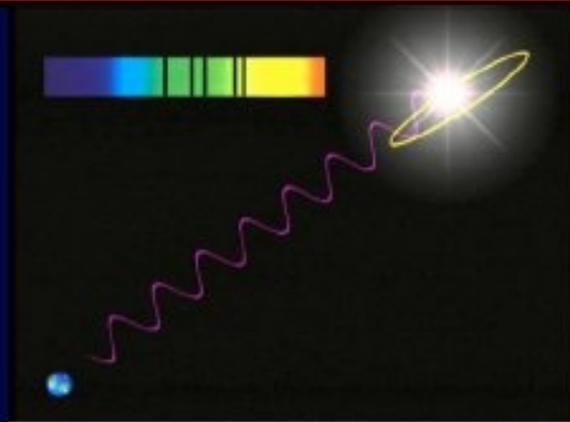
I

$\lambda$

I

$V_r$

## Méthode : II.1 La méthode



- **mesure du décalage Doppler**

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

$V_{\star}$

0

$V_r$

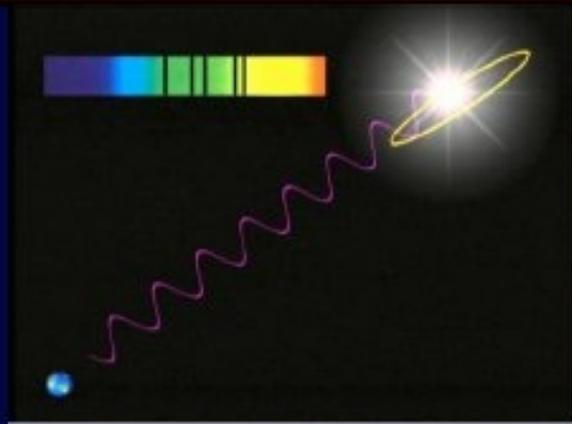
I

$\lambda$

I

$V_r$

## Méthode : II.1 La méthode



- mesure du décalage Doppler

- chaque raie spectrale est affectée par ce décalage
- on procède à une mesure statistique du déplacement de toutes les raies grâce à la corrélation croisée numérique

$V_{\star}$

$V_r$

0

I

$\lambda$

$V_{\star}$

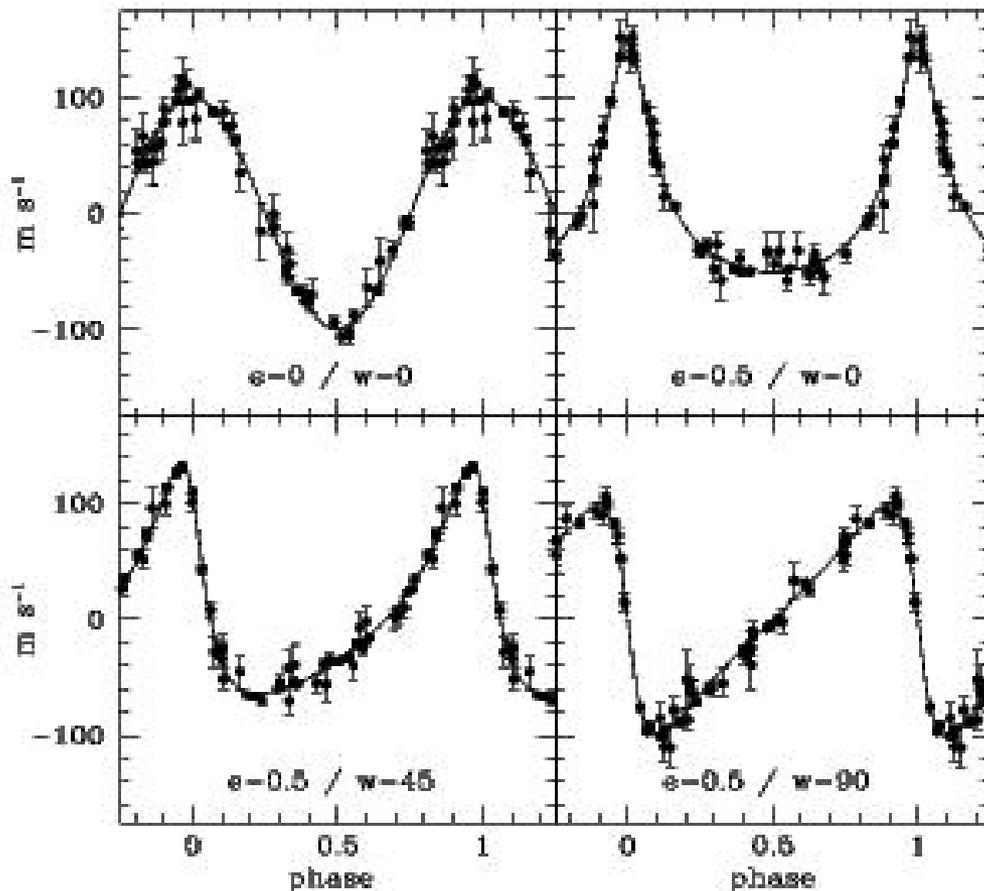
I

$V_r$

# Détection des planètes extra-solaires

## 2.2 Détection indirecte par vitesse radiale

- Extraire les paramètres orbitaux :



Le fit permet d'extraire :

Période  
Masse (modulo  $\sin i$ )  
Eccentricité

Ouvre la porte aux études statistiques.