

A la recherche des terres célestes

A. Jorissen

Institut d'Astronomie et d'Astrophysique
Université Libre de Bruxelles

A la recherche des terres célestes

- Une préoccupation presque aussi vieille que la science
(Bref historique)

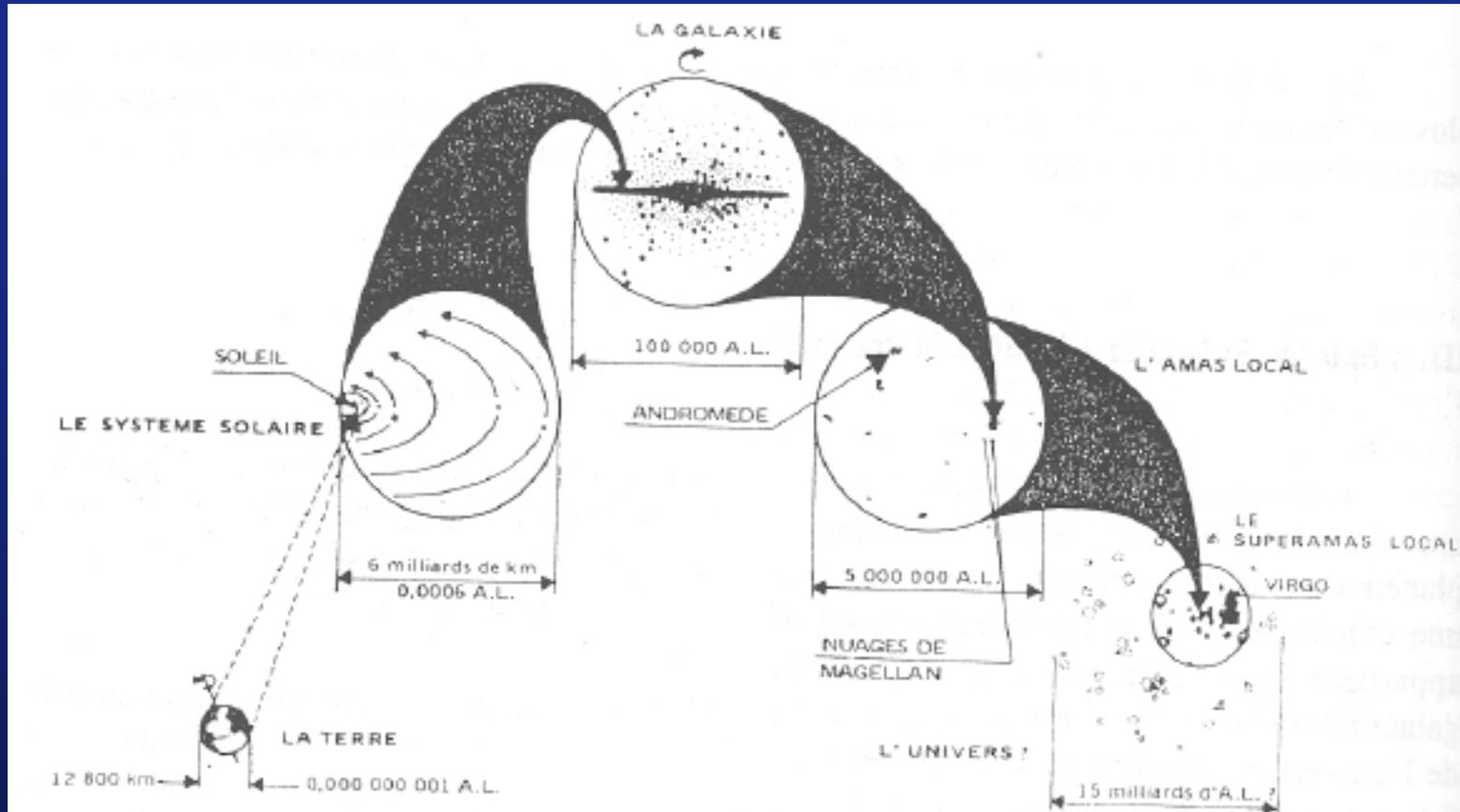
A la recherche des terres célestes

- Une préoccupation presque aussi vieille que la science
(Bref historique)
- Comment trouver des exoplanètes?

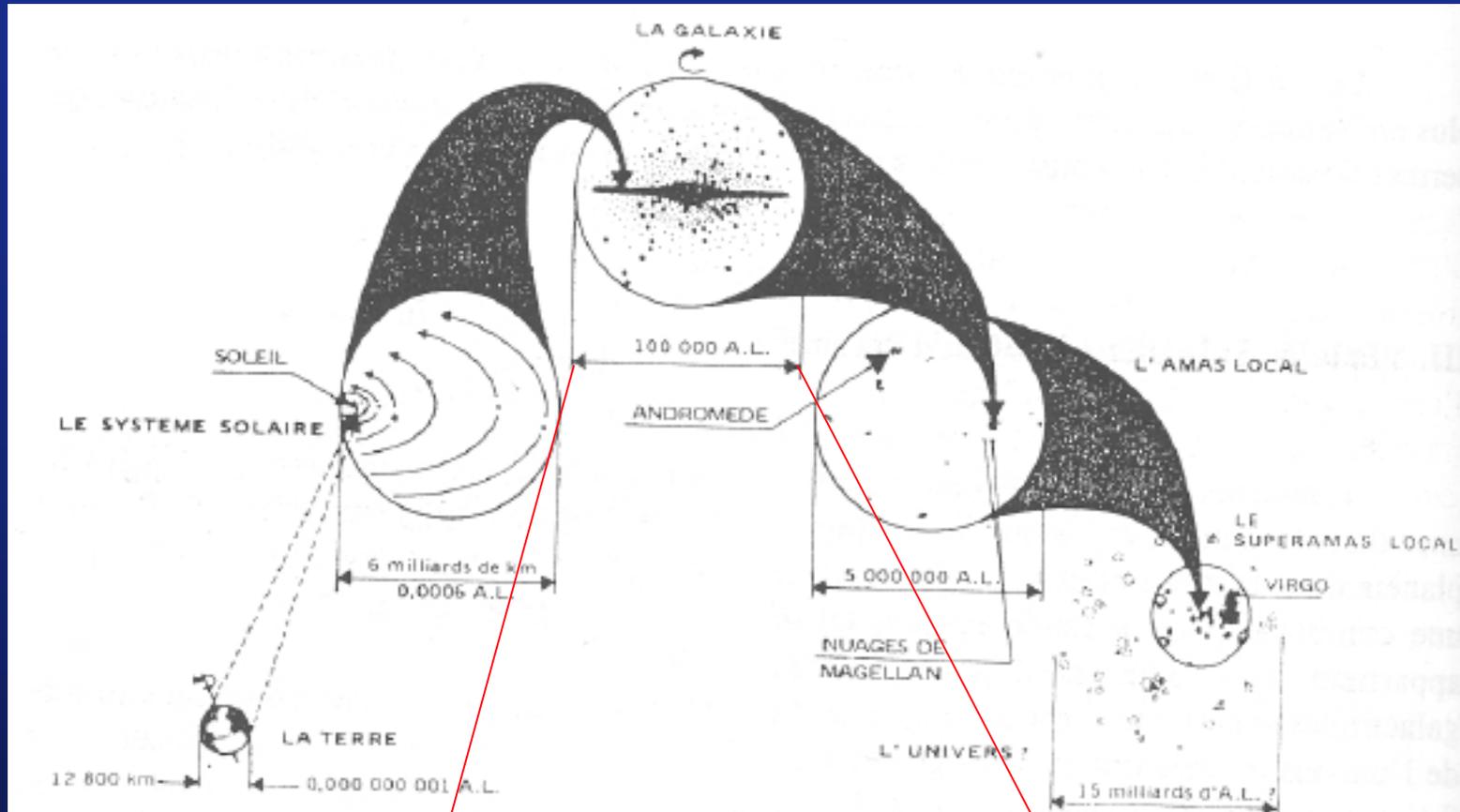
[Planètes en orbite autour d'étoiles autres que le soleil]

(Méthodes de détection)

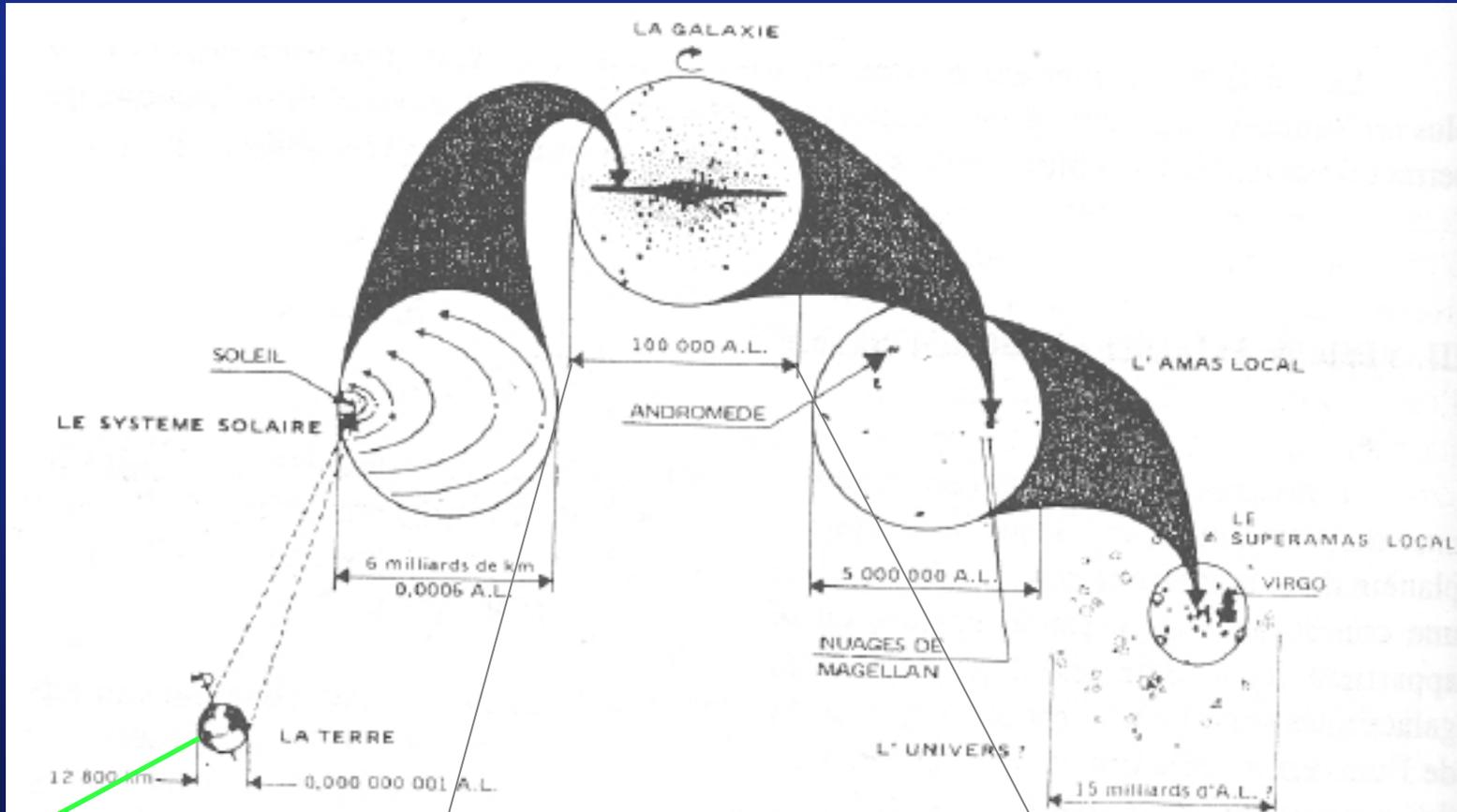
L'univers hiérarchisé



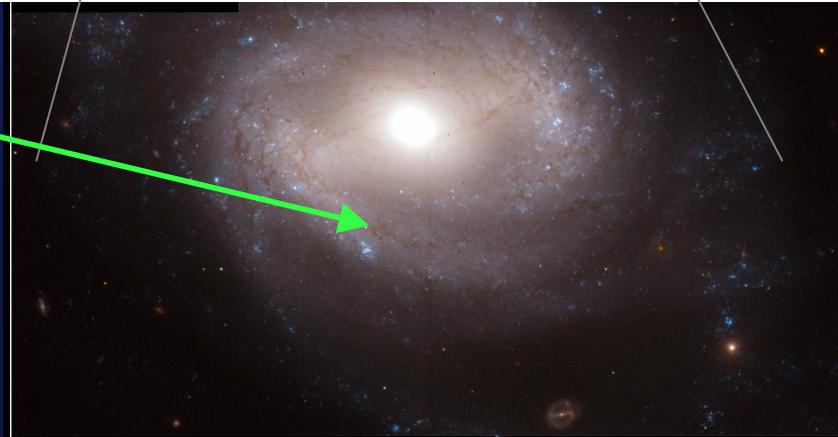
L'univers hiérarchisé



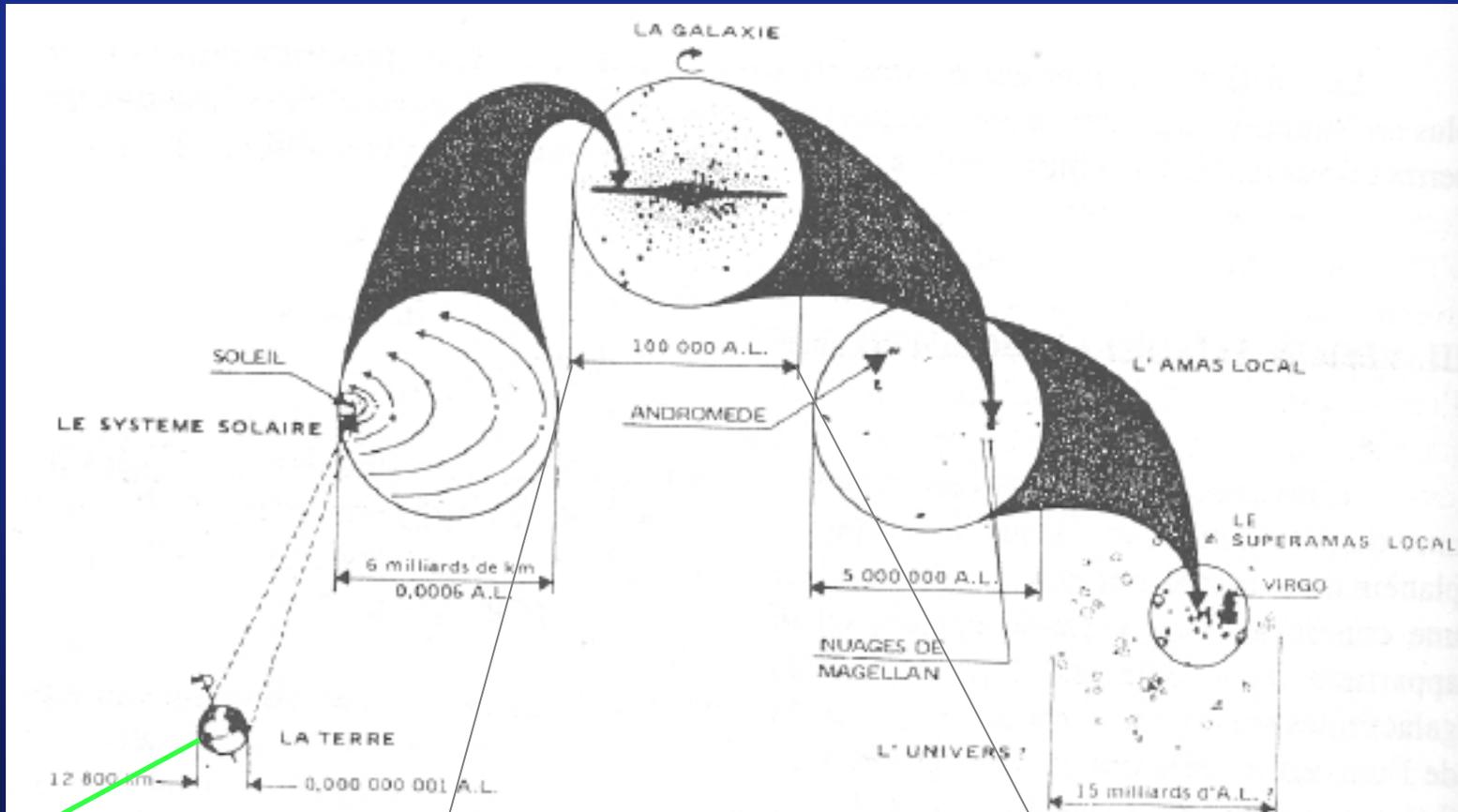
L'univers hiérarchisé



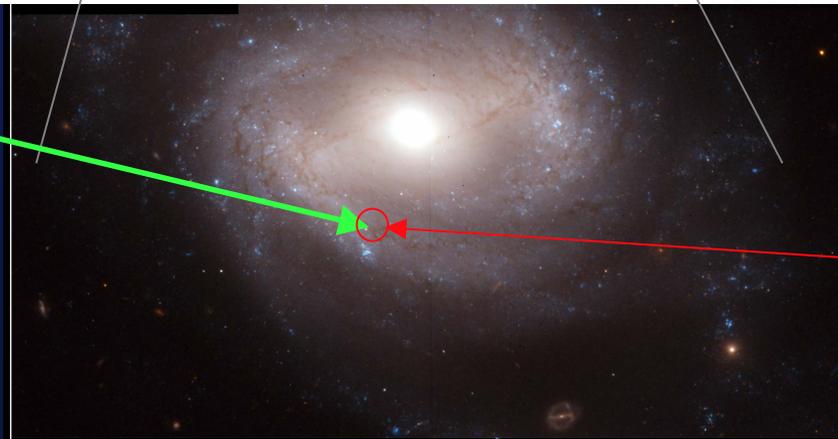
Vous êtes ici,
en orbite autour
d'une étoile parmi les
~ 200 milliards
d'étoiles de la
Voie Lactée



L'univers hiérarchisé



Vous êtes ici,
en orbite autour
d'une étoile parmi les
~ 200 milliards
d'étoiles de la
Voie Lactée



Sphère de recherche
des exoplanètes
(d ~ 50 à 100 al)

A la recherche des terres célestes

- Une préoccupation presque aussi vieille que la science
(Bref historique)

- Comment trouver des exoplanètes?

[Planètes en orbite autour d'étoiles autres que le soleil]

(Méthodes de détection)

- Que trouve-t-on?

(Résultats et surprises, en particulier
Révision des théories de formation
des systèmes planétaires)

A la recherche des terres célestes

- Une préoccupation presque aussi vieille que la science
(Bref historique)

- Comment trouver des exoplanètes?

[Planètes en orbite autour d'étoiles autres que le soleil]

(Méthodes de détection)

- Que trouve-t-on?

(Résultats et surprises, en particulier
Révision des théories de formation
des systèmes planétaires)

- Questions ouvertes et perspectives

*Il y a d'innombrables soleils
et d'innombrables terres,
toutes tournant autour de leur soleil
comme le font les sept planètes de notre système.*

*Nous n'en voyons que les soleils
parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux,
mais leurs planètes nous restent invisibles
parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.*

*Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires
et moins habités que notre Terre.*

*Il y a d'innombrables soleils
et d'innombrables terres,
toutes tournant autour de leur soleil
comme le font les sept planètes de notre système.*

*Nous n'en voyons que les soleils
parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux,
mais leurs planètes nous restent invisibles
parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.*

*Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires
et moins habités que notre Terre.*

L'existence d'exoplanètes: une préoccupation presque aussi vieille que la science!



- **Epicure**
Lettre à Hérodote (-300)
- **Lucrèce**
De Rerum Natura (-50)
- **Bruno**
De L'Infinito Universo e Mundi (1584)
- **Fontenelle**
Entretiens sur la Pluralité des Mondes (1686)
- **Doppelmaier**
Atlas Novus Coelestis (1742)
- ...

*Il y a d'innombrables soleils
et d'innombrables terres,
toutes tournant autour de leur soleil
comme le font les sept planètes de notre système.*

*Nous n'en voyons que les soleils
parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux,
mais leurs planètes nous restent invisibles
parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.*

*Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires
et moins habités que notre Terre.*

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes directes

(Les voir)

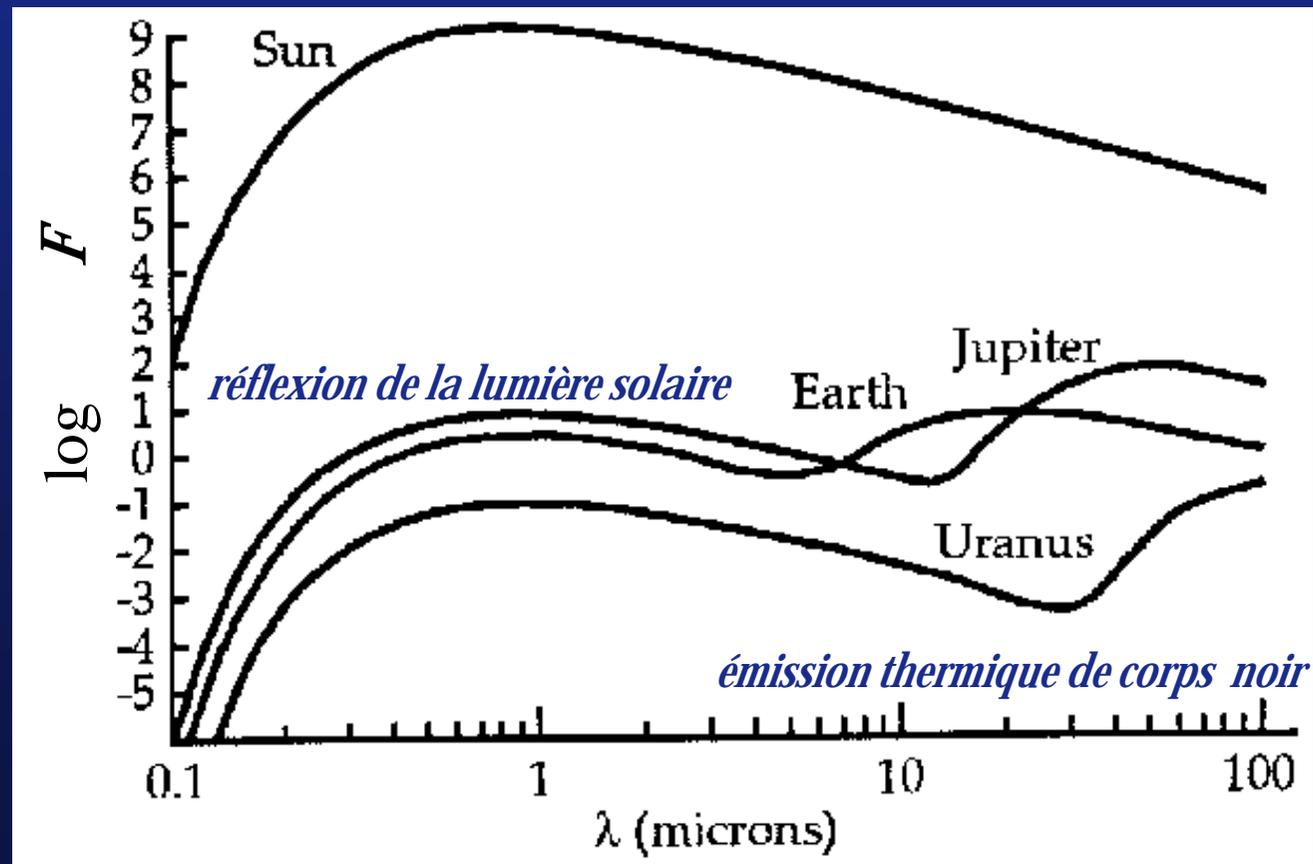
Problème majeur: CONTRASTE

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes directes

(Les voir)

Problème majeur: CONTRASTE

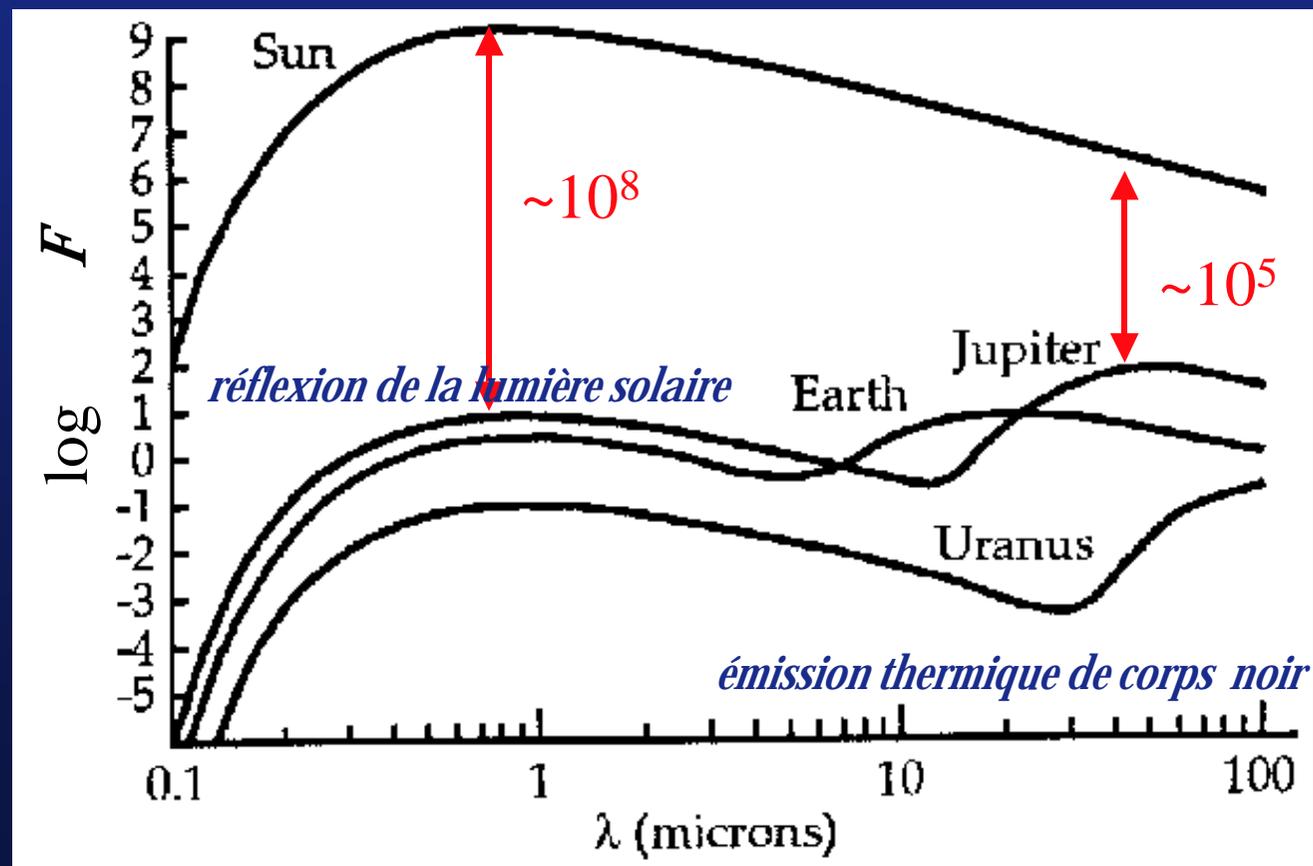


Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes directes

(Les voir)

Problème majeur: CONTRASTE



Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes directes

(Les voir)

Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE

Méthodes de détection des exoplanètes

● Méthodes directes

(Les voir)

Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE

Planète distante de 5 UA de son étoile, à 10 pc (33 a-l) du soleil: $\sim 0''5$

1 UA ("unité astronomique") = distance moyenne Terre - Soleil

5 UA \sim distance Jupiter - Soleil

1 pc ("parsec") = 206265 UA = distance à laquelle 1 UA apparaît sous un angle de 1''



Méthodes de détection des exoplanètes

● Méthodes directes

(Les voir)

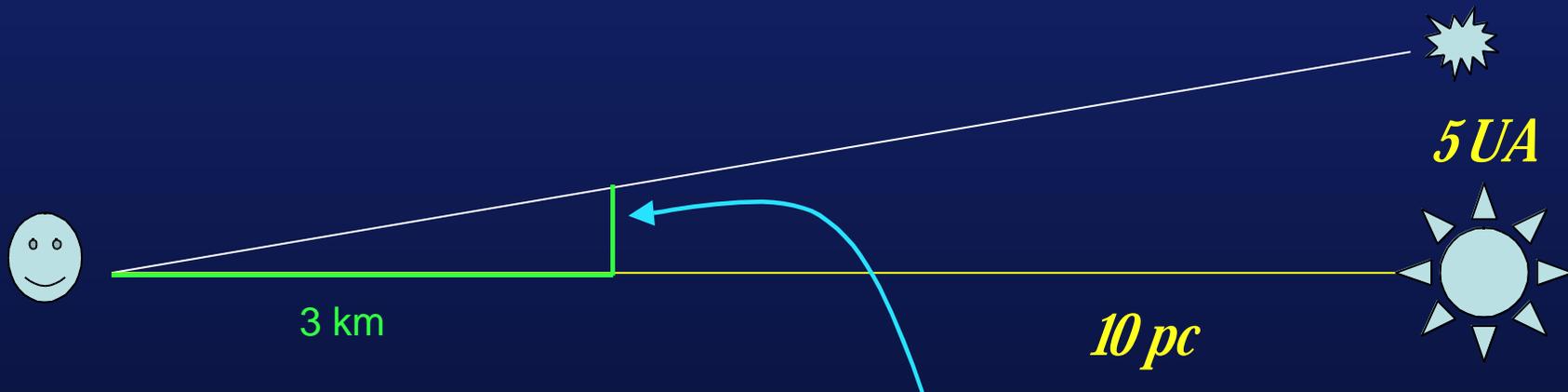
Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE

Planète distante de 5 UA de son étoile, à 10 pc (33 a-l) du soleil: $\sim 0''5$

1 UA ("unité astronomique") = distance moyenne Terre - Soleil

5 UA \sim distance Jupiter - Soleil

1 pc ("parsec") = 206265 UA = distance à laquelle 1 UA apparaît sous un angle de 1"



: angle sous-tendu par une pièce de 5 BEF vue à 3 km

Méthodes de détection des exoplanètes

● Méthodes directes

(Les voir)

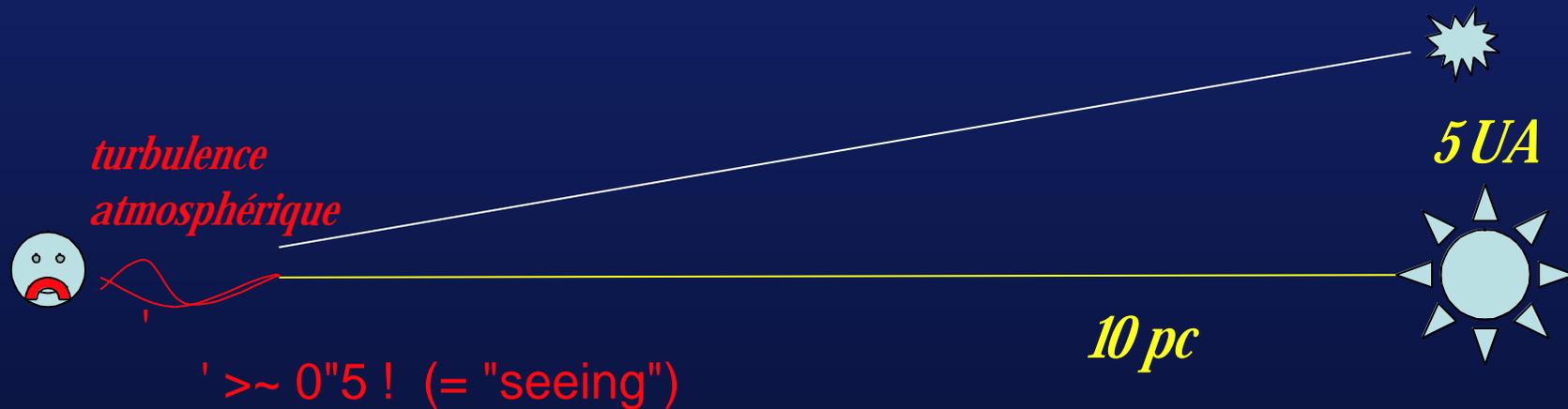
Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE

Planète distante de 5 UA de son étoile, à 10 pc (33 a-l) du soleil: $\sim 0''5$

1 UA ("unité astronomique") = distance moyenne Terre - Soleil

5 UA \sim distance Jupiter - Soleil

1 pc ("parsec") = 206265 UA = distance à laquelle 1 UA apparaît sous un angle de 1"



Méthodes de détection des exoplanètes

● Méthodes directes

(Les voir)

Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE

Planète distante de 5 UA de son étoile, à 10 pc (33 a-l) du soleil: $\sim 0''5$

1 UA ("unité astronomique") = distance moyenne Terre - Soleil

5 UA \sim distance Jupiter - Soleil

1 pc ("parsec") = 206265 UA = distance à laquelle 1 UA apparaît sous un angle de 1"



$\theta > \sim 0''5$! (= "seeing")

⇒ nécessité d'observer depuis l'espace

Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (Les voir)

Les contraintes de
CONTRASTE et de SEPARATION
ANGULAIRE

peuvent être satisfaites par
interférométrie infrarouge
en opposition de phases

("infrared nulling interferometry")

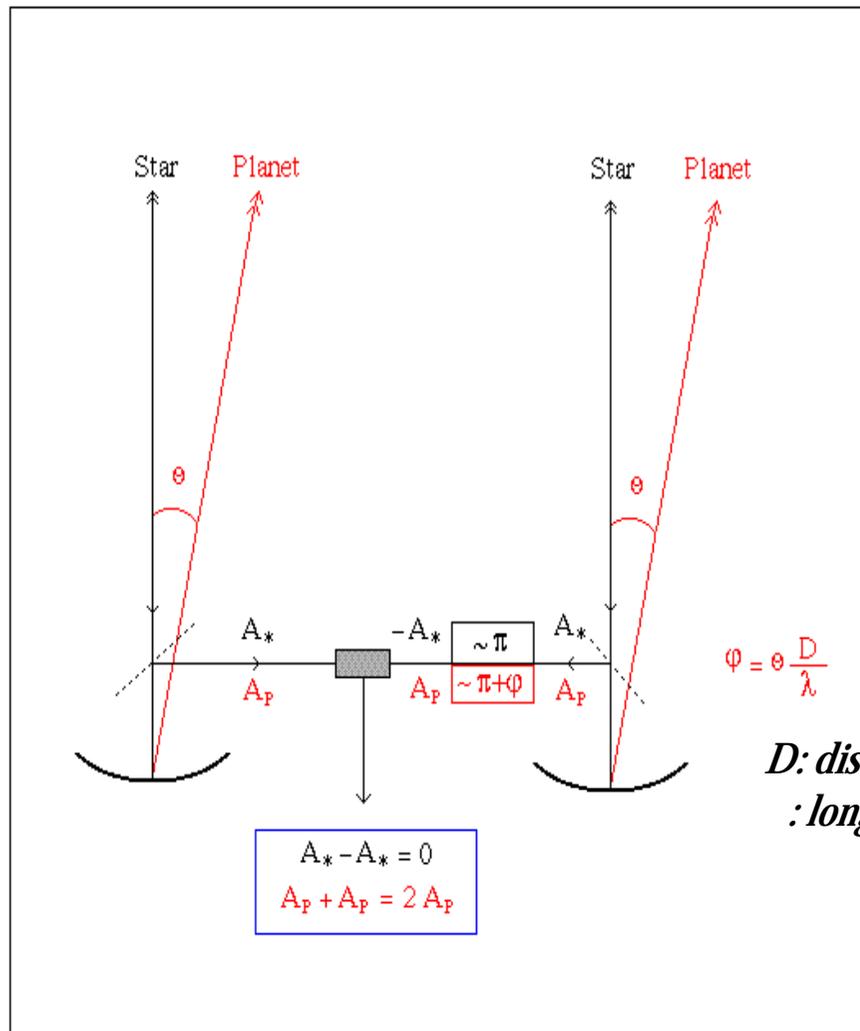
Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (Les voir)

Les contraintes de
CONTRASTE et de **SEPARATION
ANGULAIRE**

peuvent être satisfaites par
interférométrie infrarouge
en opposition de phases

("infrared nulling interferometry")



Méthodes de détection des exoplanètes



- Méthodes directes (Les voir)
interférométrie infrarouge
en opposition de phases

Mission *Darwin* de l'Agence Spatiale Européenne
(après 2014)

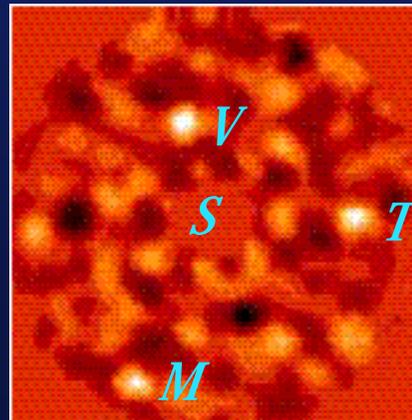
Méthodes de détection des exoplanètes



- Méthodes directes (Les voir)
interférométrie infrarouge
en opposition de phases

Mission *Darwin* de l'Agence Spatiale Européenne
(après 2014)

*Simulation de l'observation par
Darwin (60h) du système solaire
vu à 10 pc*



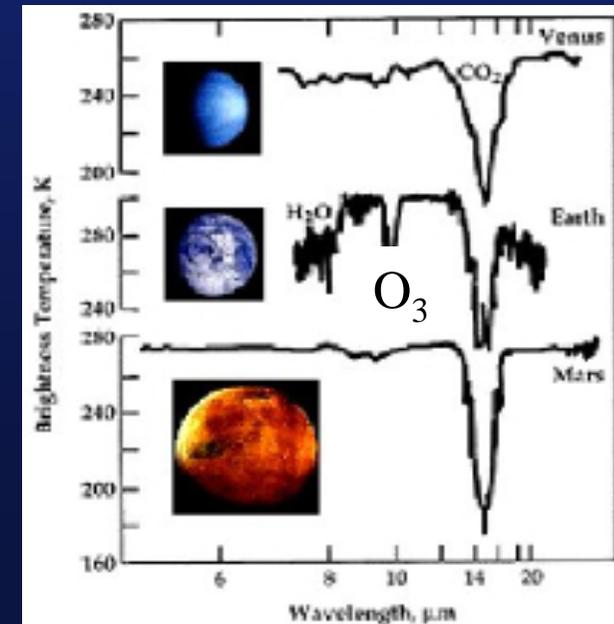
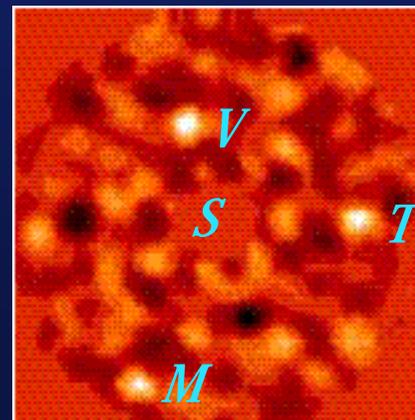
Méthodes de détection des exoplanètes



- Méthodes directes (Les voir)
interférométrie infrarouge
en opposition de phases

Mission *Darwin* de l'Agence Spatiale Européenne
(après 2014)

*Simulation de l'observation par
Darwin (60h) du système solaire
vu à 10 pc*



Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

- micro-lentilles gravitationnelles



- transits planétaires



- mouvement d'oscillation de l'étoile sur le ciel causé par la planète

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

- micro-lentilles gravitationnelles

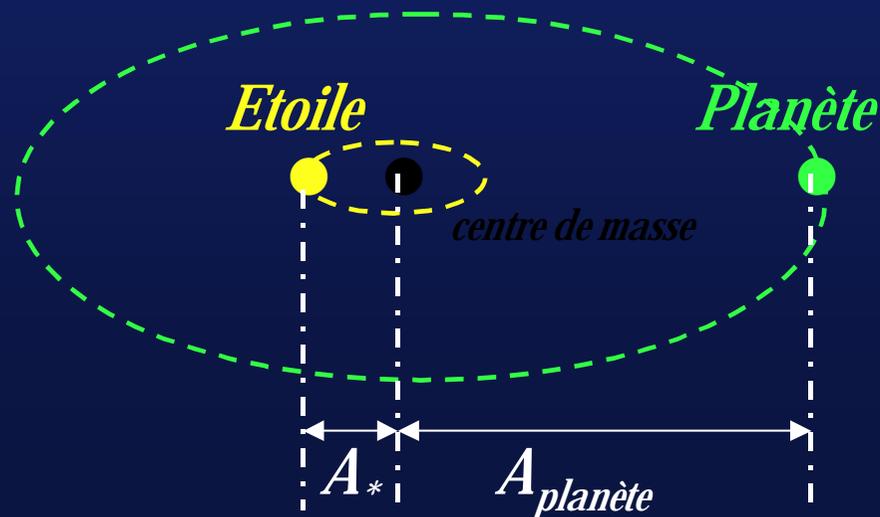


- transits planétaires



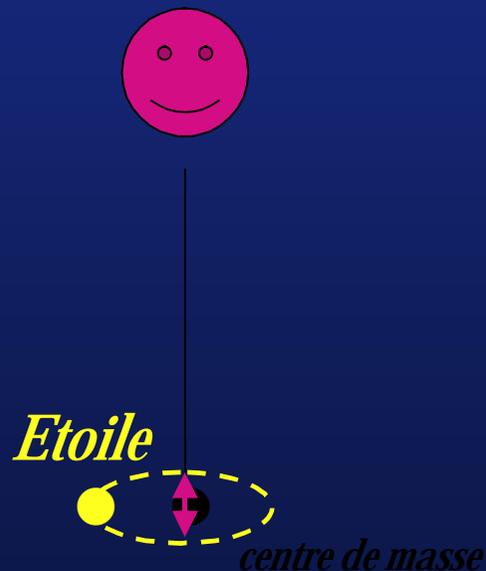
- mouvement d'oscillation de l'étoile sur le ciel causé par la planète

$$\frac{A_{\text{planète}}}{A_*} = \frac{M_*}{M_{\text{planète}}}$$



Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes (Voir leur effet)
 - mouvement d'oscillation de l'étoile causé par la planète:
 - mouvement le long de la ligne de visée (spectroscopie Doppler)



$$\frac{A_{\text{planète}}}{A_*} = \frac{M_*}{M_{\text{planète}}}$$

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

- mouvement d'oscillation de l'étoile causé par la planète:

- mouvement le long de la ligne de visée (spectroscopie Doppler)
- mouvement apparent sur le ciel (astrométrie)



$$\frac{A_{\text{planète}}}{A_*} = \frac{M_*}{M_{\text{planète}}}$$

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

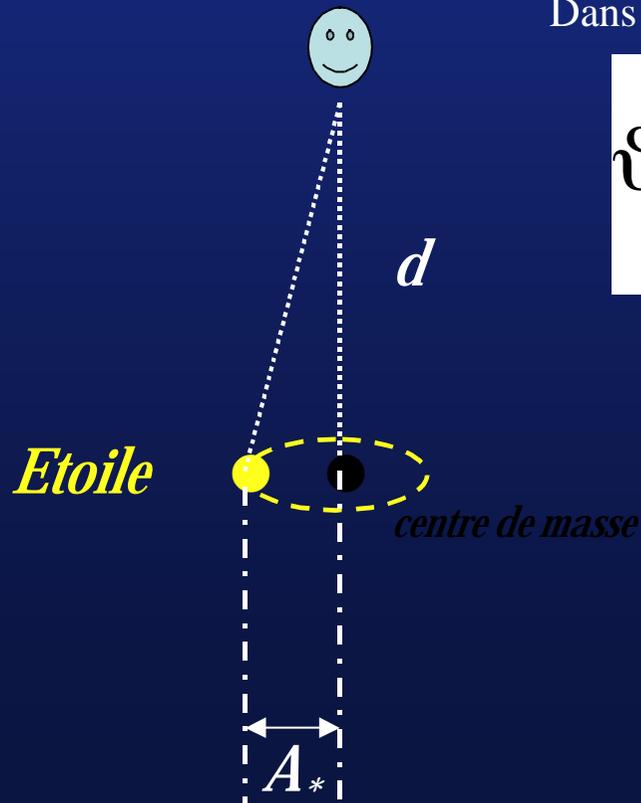
- mouvement d'oscillation de l'étoile causé par la planète:

- mouvement apparent sur le ciel

(astrométrie)

Dans le cas d'un plan orbital perpendiculaire à la ligne de visée:

$$\vartheta = \frac{A_{\text{étoile}}}{d} = \frac{M_{\text{planète}}}{M_{\text{étoile}}} \frac{A_{\text{planète}}}{d}$$



avec ϑ en secondes d'arc,

si $A_{\text{planète}}$ en UA

et d en pc

→ typiquement $< 0''001!$

→ satellite GAIA (~2010)

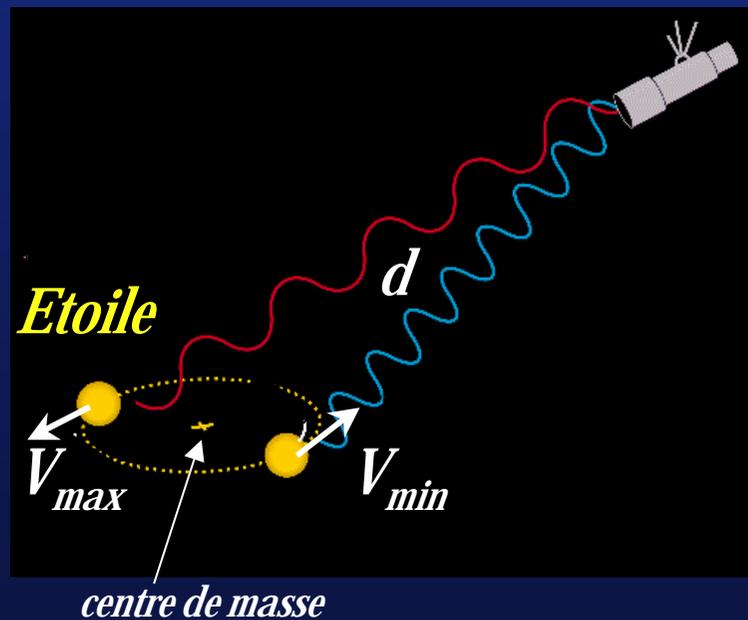
Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

- mouvement d'oscillation de l'étoile causé par la planète:

- mouvement le long de la ligne de visée (spectroscopie Doppler)



$$K = 0.5 [V_{max} - V_{min}]$$

$$K = 28.4 \quad P^{-1/3} \quad M_*^{-2/3} \quad M_{pl} \quad \sin i$$

[m/s] [années] [M_\odot] [M_J]

(orbite circulaire avec $M_{pl} \ll M_*$)

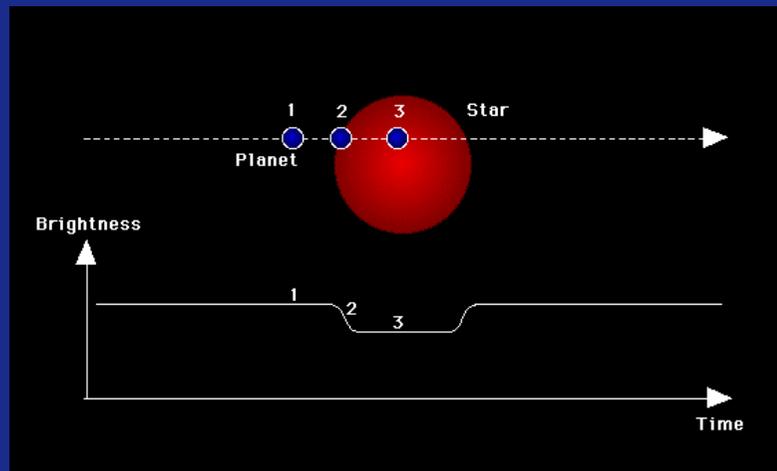
indépendant de d (distance du système au soleil)

dépendant de i (inclinaison plan orbital sur le ciel)

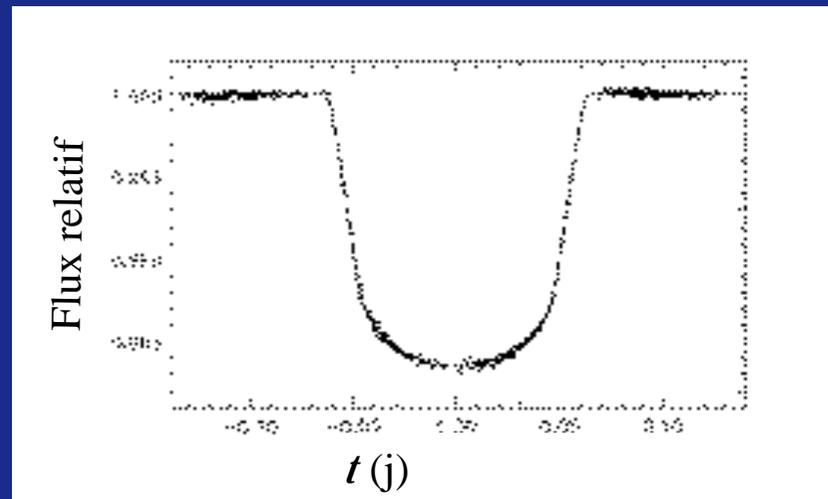
Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes
transits planétaires

(Voir leur effet)



Le premier exemple : HD 209458

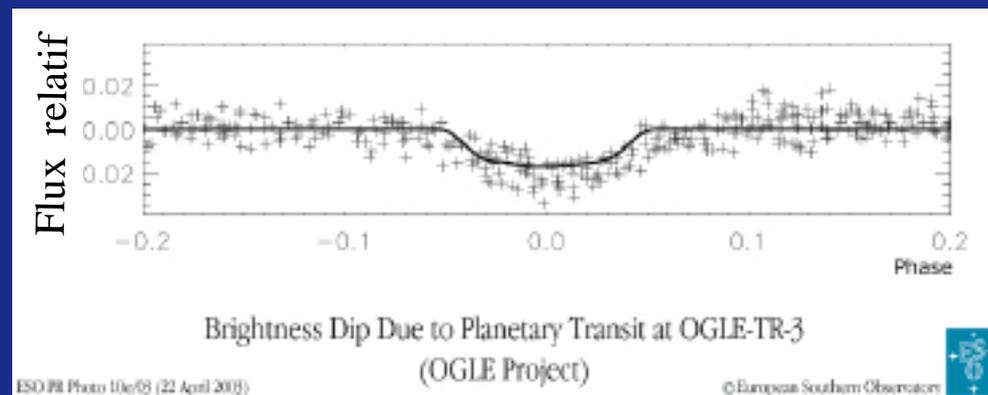
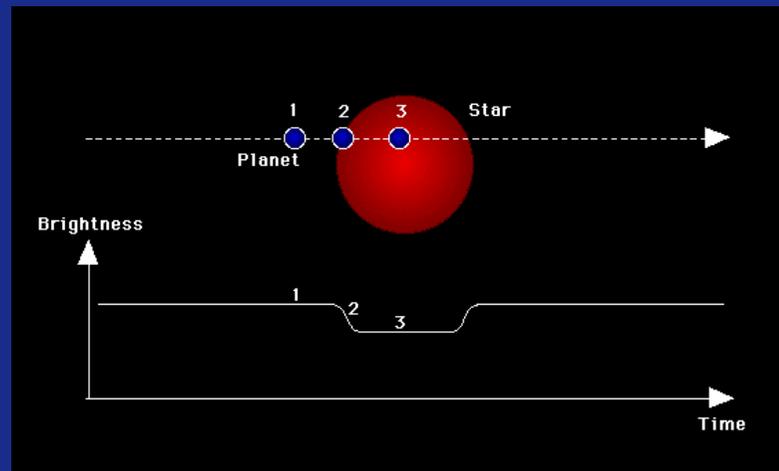


Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes
transits planétaires

(Voir leur effet)

Un autre exemple : OGLE-TR-3



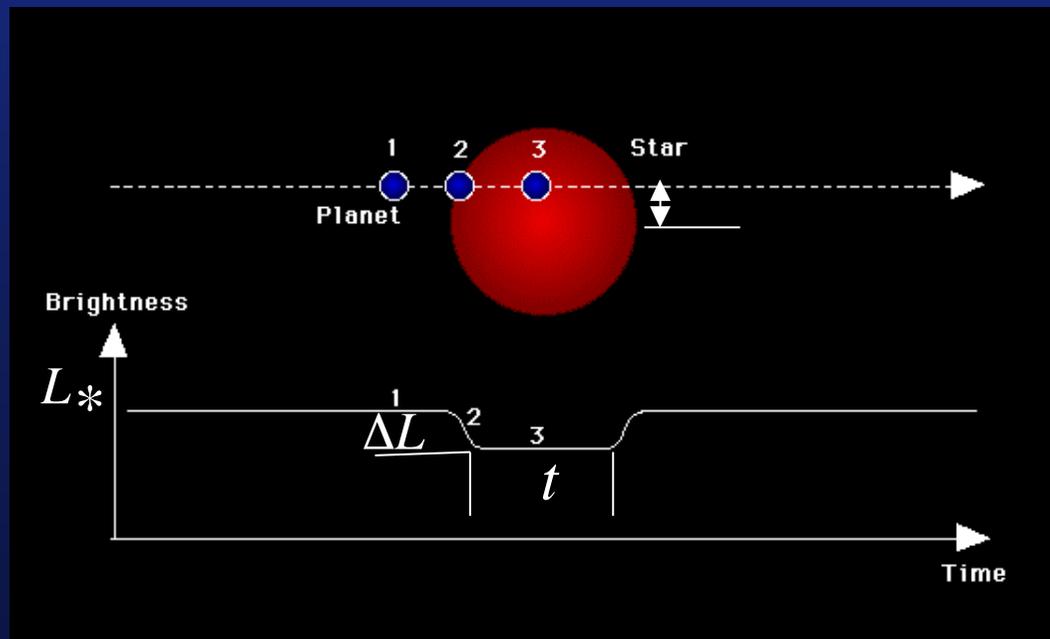
Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

- transits planétaires

rayons planète & étoile, densité de la planète !



$$R_* \cos i = A t / P$$
$$R_{pl} = R_* (L / L_*)^{1/2}$$

$$\rho_{pl} = M_{pl} / (4/3 R_{pl}^3)$$

Dans le futur: satellites COROT, MONS, MOST, Eddington...

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

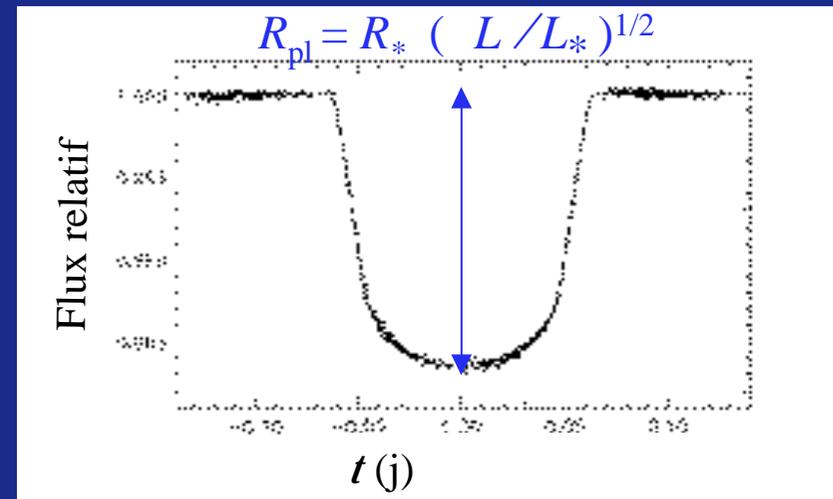
- transit planétaire: HD 209458, $P = 3.524$ j

$$R_* = 1.2 \pm 0.1 R_o \quad M_* = 1.1 \pm 0.1 M_o$$

$$\rightarrow R_{pl} = 1.40 \pm 0.17 R_J \quad M_{pl} = 0.69 \pm 0.05 M_J$$

$$\rightarrow \rho_{pl} = 0.31 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$$

\rightarrow planète gazeuze ($\sim \rho_{\text{Saturne}} / 2$)

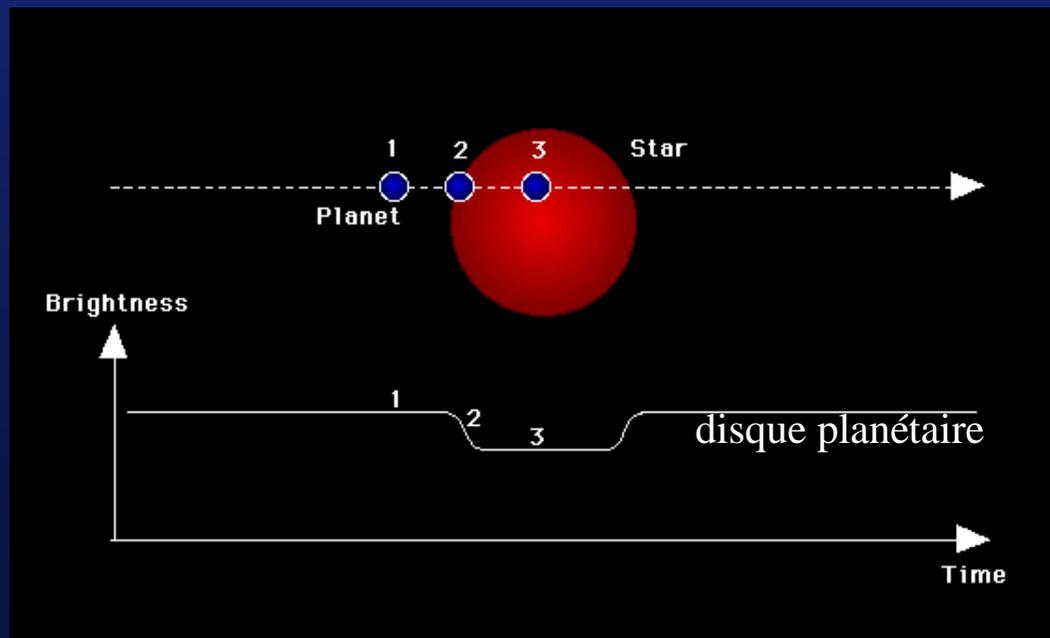


Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

- transits planétaires

← détection de l'atmosphère!

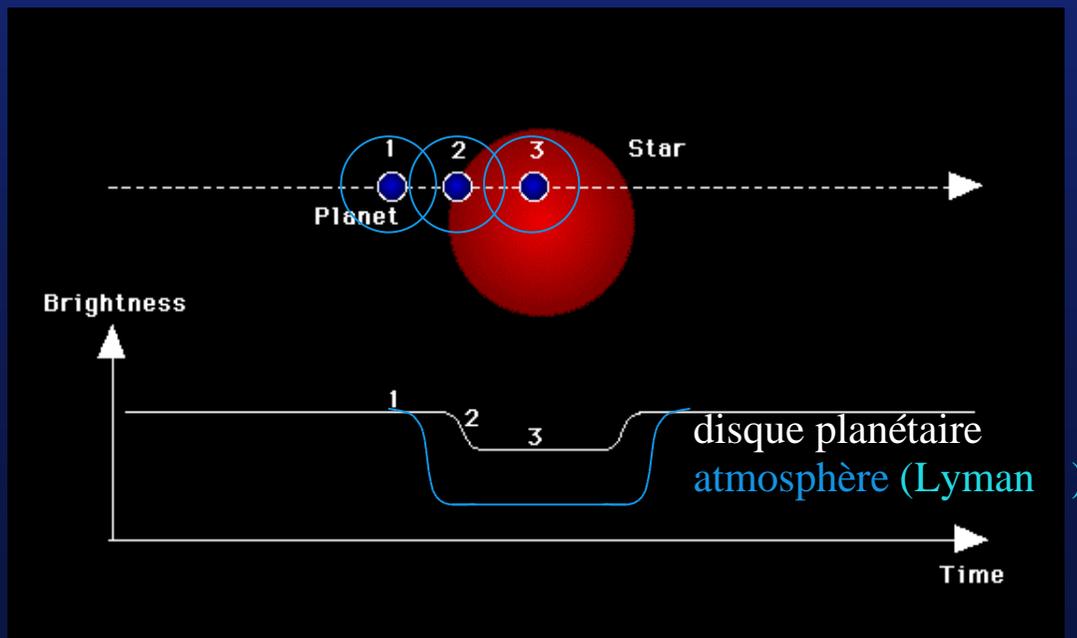


Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

- transits planétaires

← *détection de l'atmosphère!*



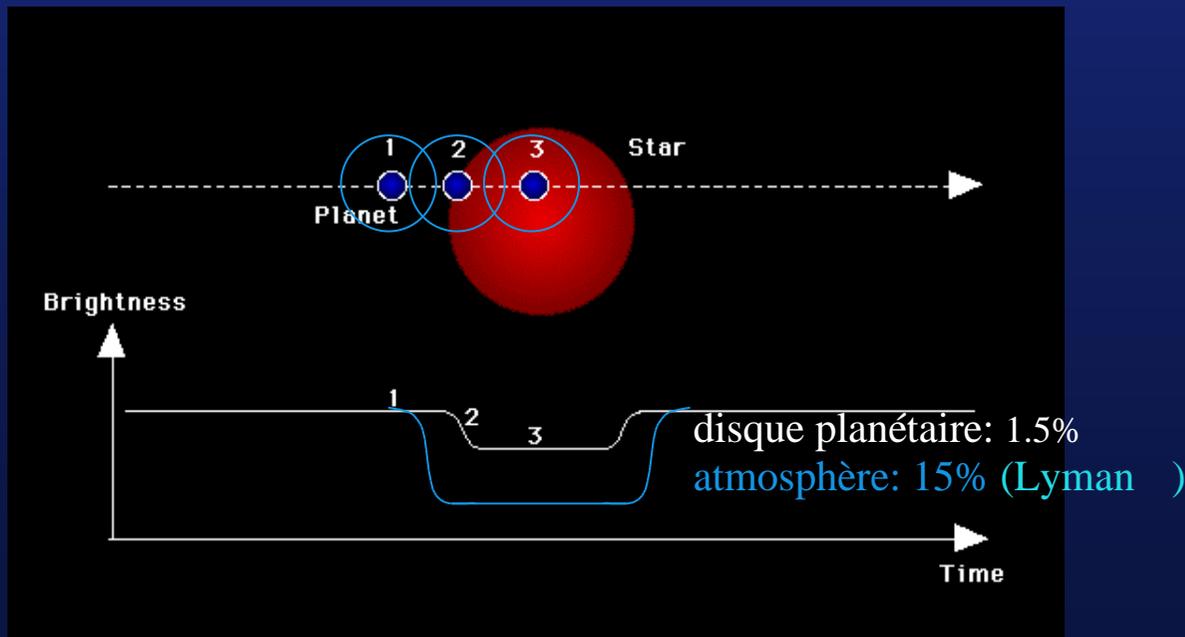
Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

- transits planétaires

← *détection de l'atmosphère!*

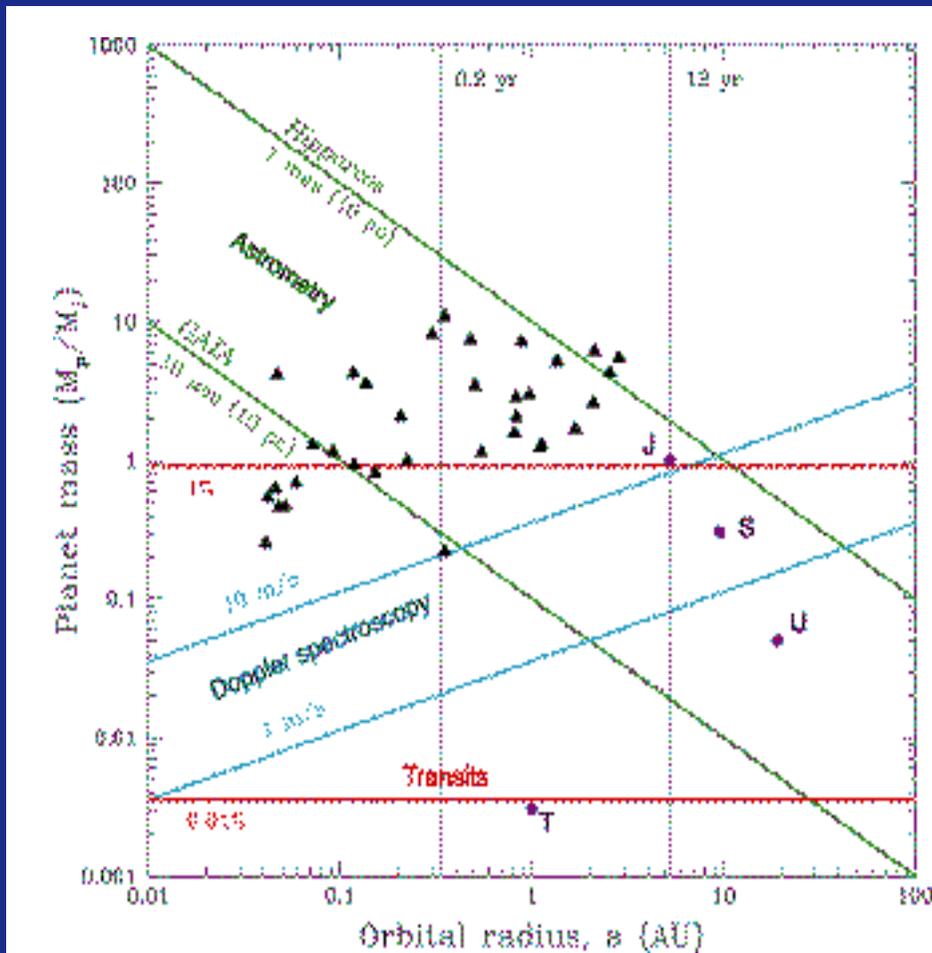
(HD 209458b)



Lyman

Méthodes de détection des exoplanètes

Les trois méthodes indirectes (transits, spectroscopie Doppler, astrométrie) sont complémentaires:



transits:

détection de planètes telluriques possibles si précision suffisante ($\Delta L/L < 0.01\%$)

→ missions spatiales:

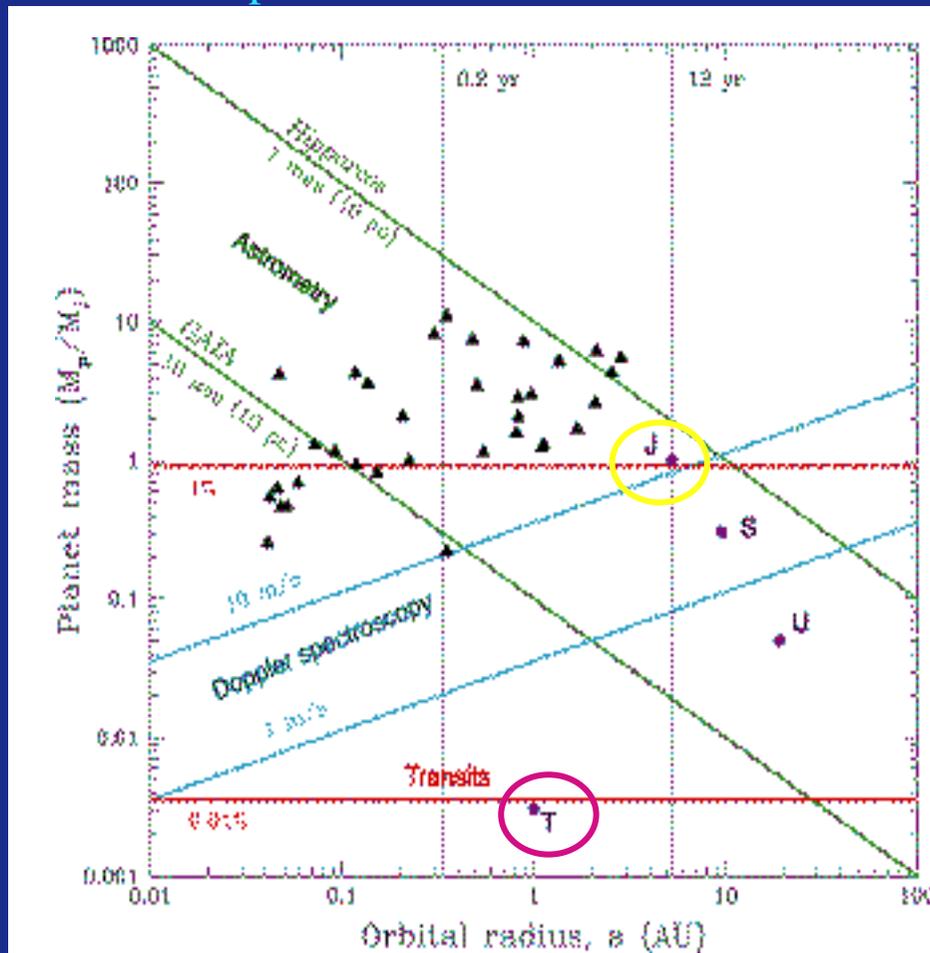
COROT, MONS, Eddington...

Méthodes de détection des exoplanètes

- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

Les trois méthodes indirectes (transits, spectroscopie Doppler, astrométrie) sont complémentaires:



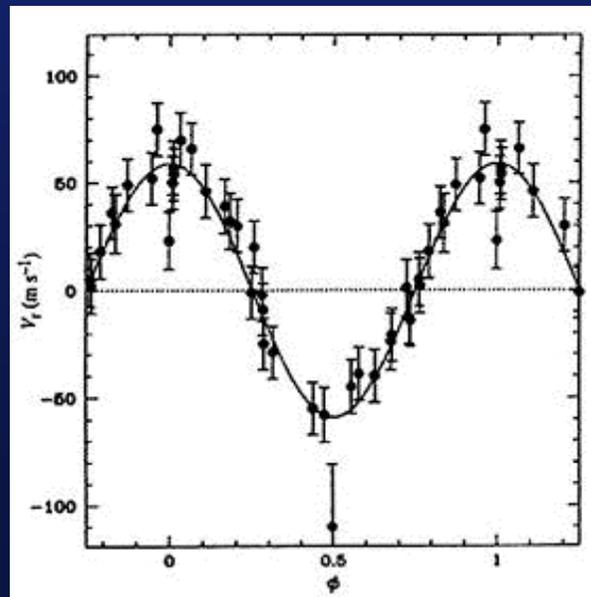
spectroscopie Doppler:
surtout sensible aux planètes
proches de l'étoile

Jupiter à 5 UA: $K = 12$ m/s
Terre à 1 UA: $K = 8$ cm/s

précision actuelle:
1 m/s

Résultats et surprises (octobre 1995)

Annnonce de la **découverte de la première exoplanète**
orbitant autour de l'étoile **51 Peg**
par Mayor et Queloz (Genève),
à l'Observatoire de Haute Provence, sur le télescope de 1.93 m
au moyen de la **spectroscopie Doppler**



$$P = 4.23 \text{ j} !!$$

$$M_{pl} \sin i = 0.45 M_J !!$$

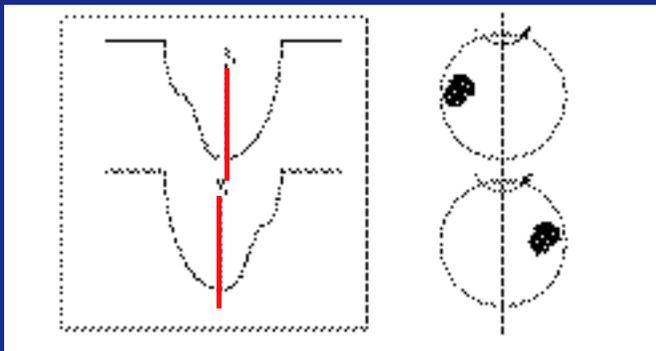
→ " Jupiters chauds"

Méthodes de détection des exoplanètes

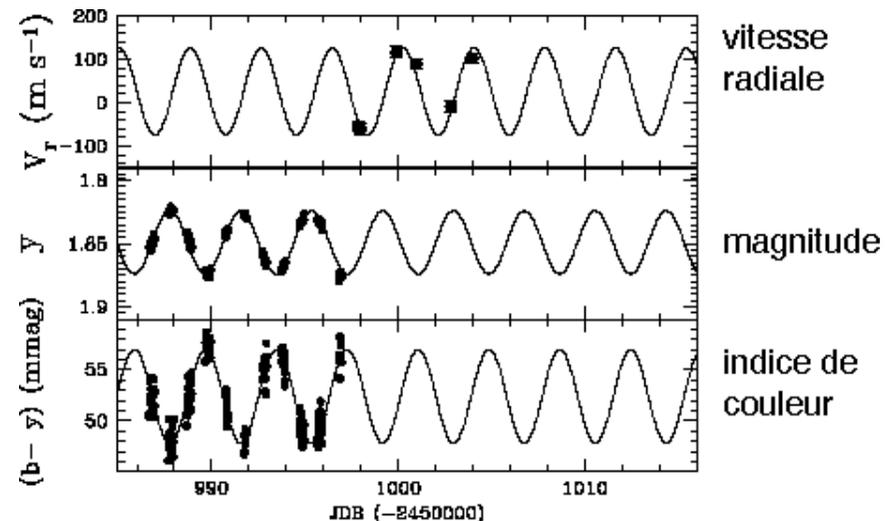
- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

spectroscopie Doppler: pas à l'abri de fausses détections (taches, pulsation)



Un exemple de fausse détection: HD 166435



Méthodes de détection des exoplanètes

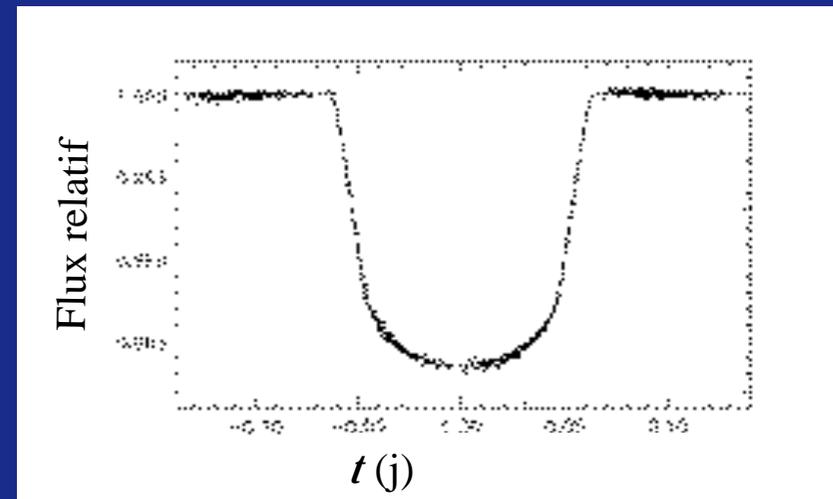
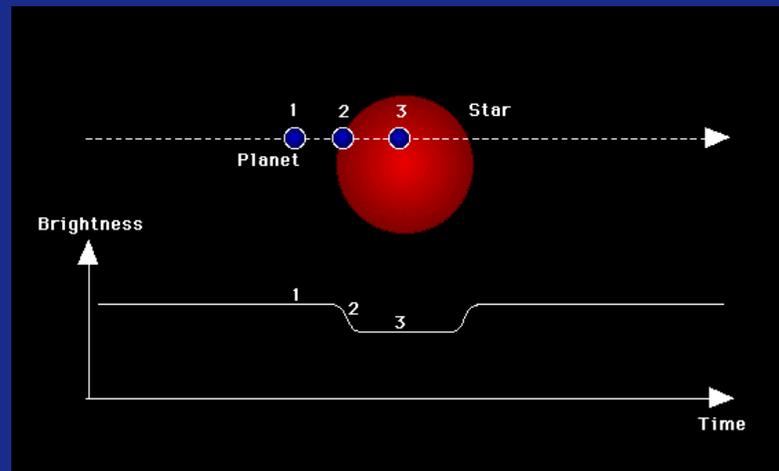
- Méthodes indirectes

(Voir leur effet)

spectroscopie Doppler: pas à l'abri de fausses détections (taches, pulsation)

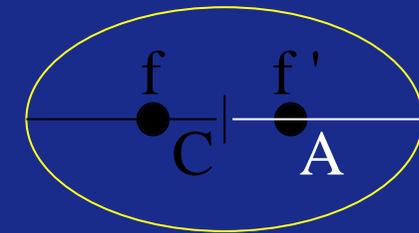
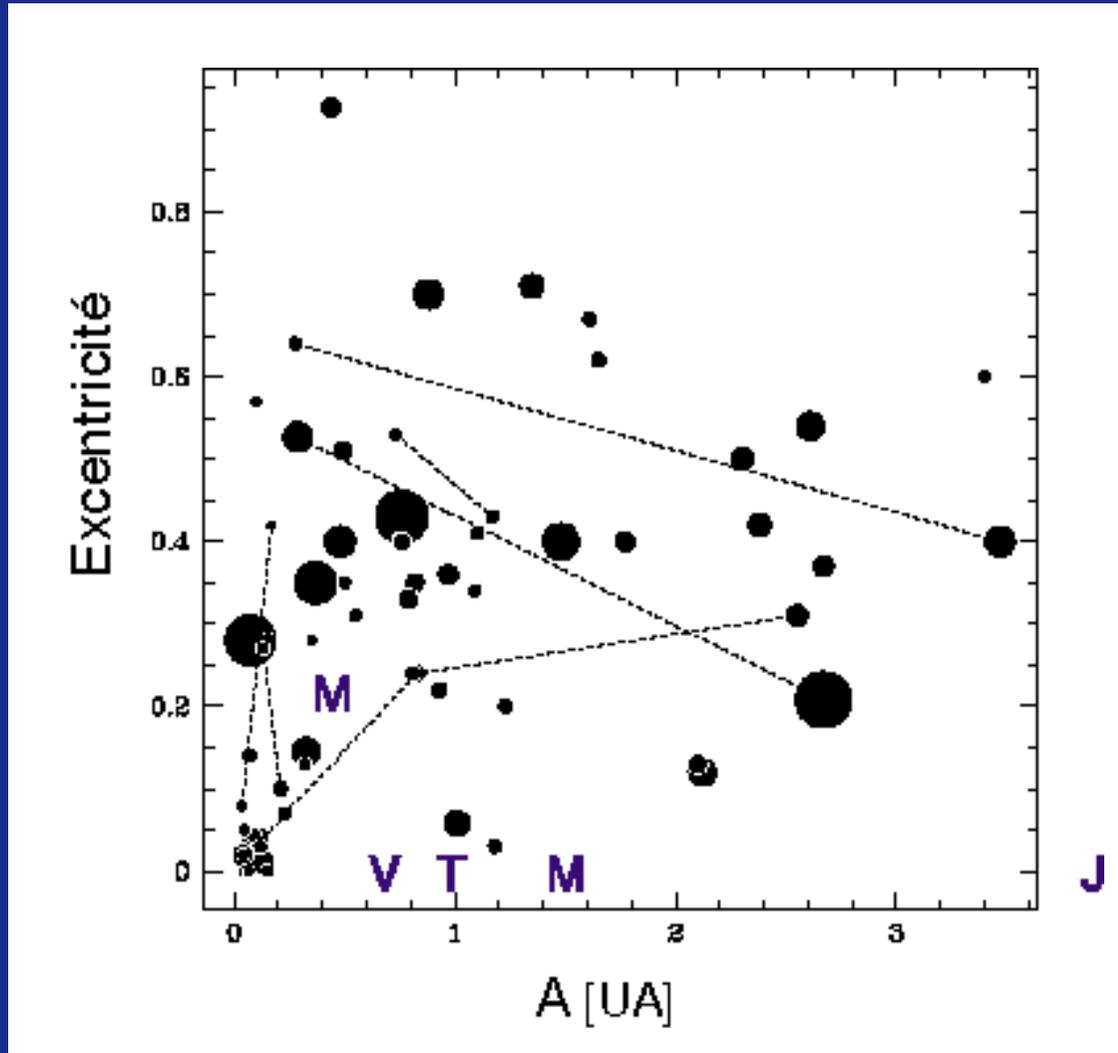
transit: permet de confirmer les détections spectroscopiques

Un exemple de confirmation: HD 209458



Résultats et surprises (décembre 2002)

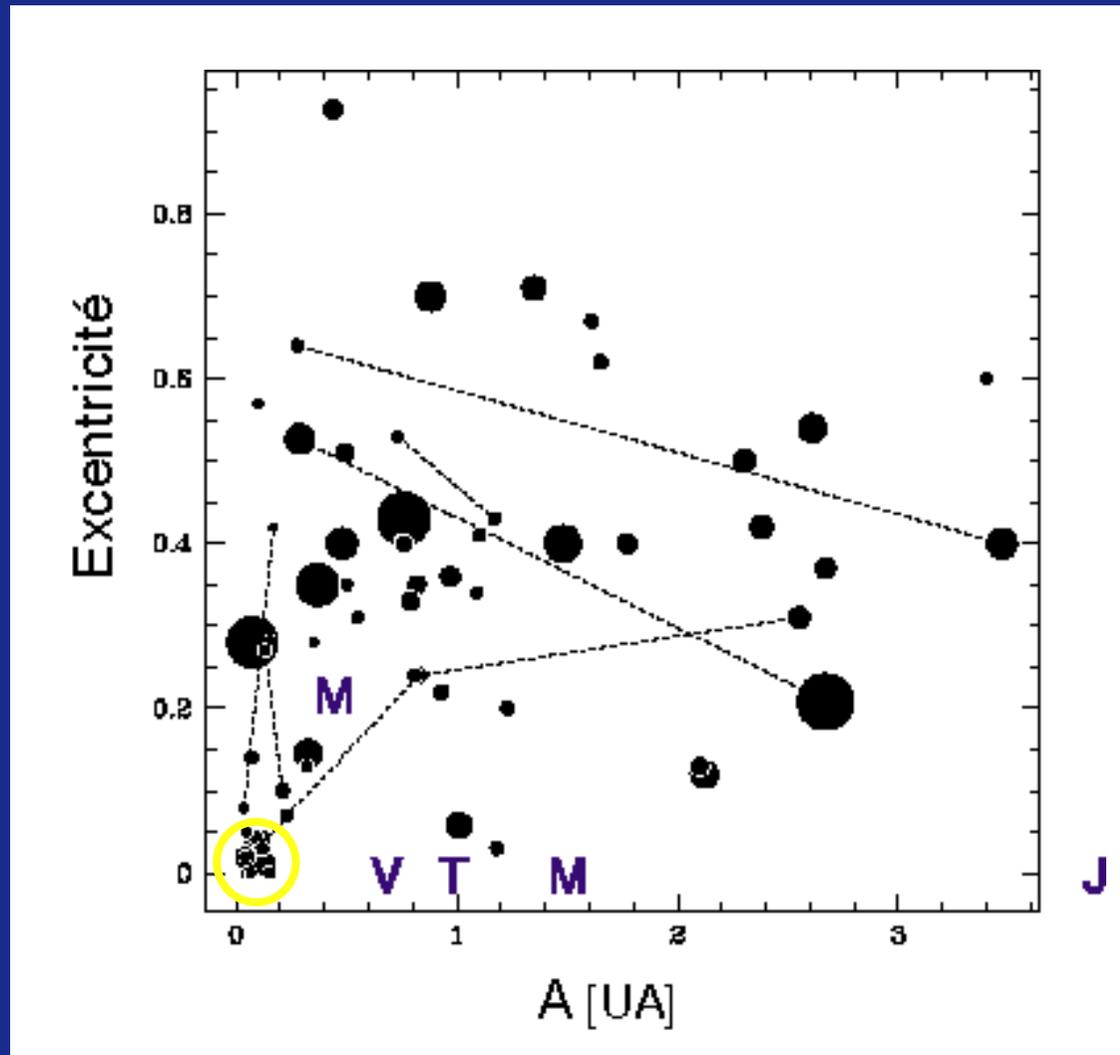
101 exoplanètes connues parmi lesquelles 7 systèmes de 2 ou 3 planètes
(résonances 1:2, 1:10)



Excentricité = C/A
= 'écart' au cercle

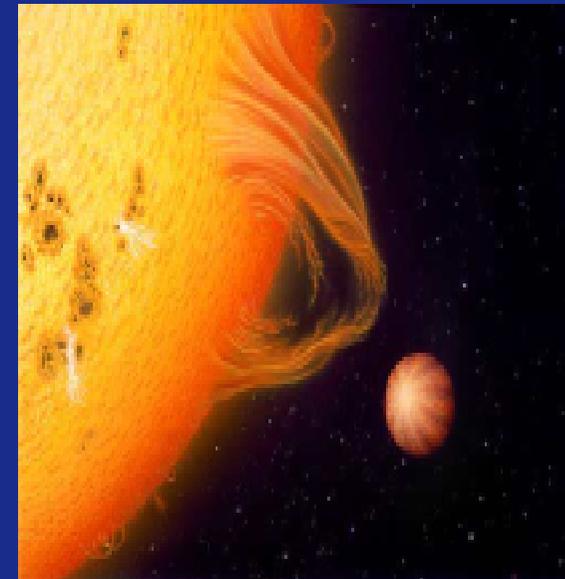
Résultats et surprises (décembre 2002)

101 exoplanètes connues parmi lesquelles 7 systèmes de 2 ou 3 planètes (résonances 1: 2, 1: 10)



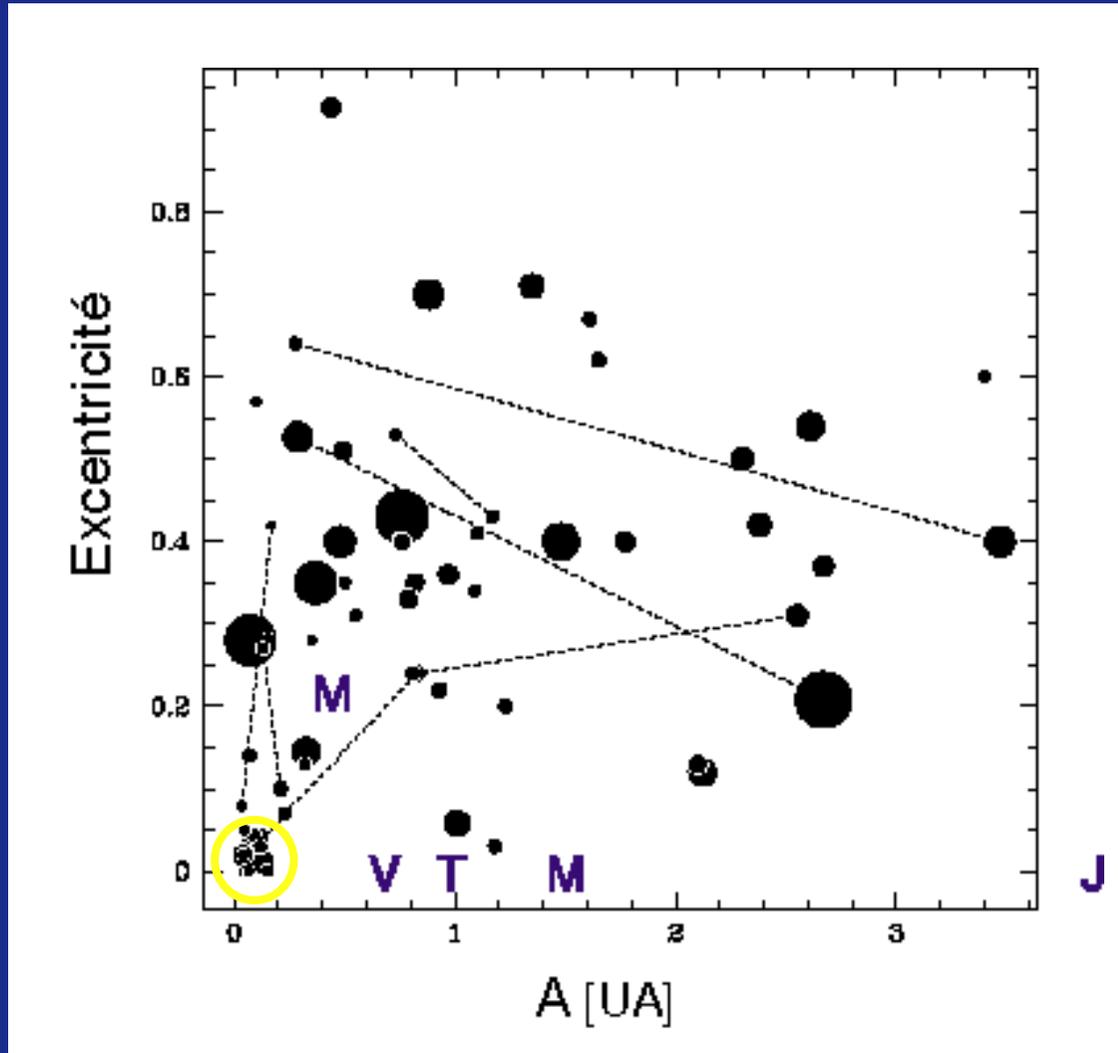
Deux catégories d'exoplanètes:

- Jupiters chauds



Résultats et surprises (décembre 2002)

101 exoplanètes connues parmi lesquelles 7 systèmes de 2 ou 3 planètes (résonances 1:2, 1:10)



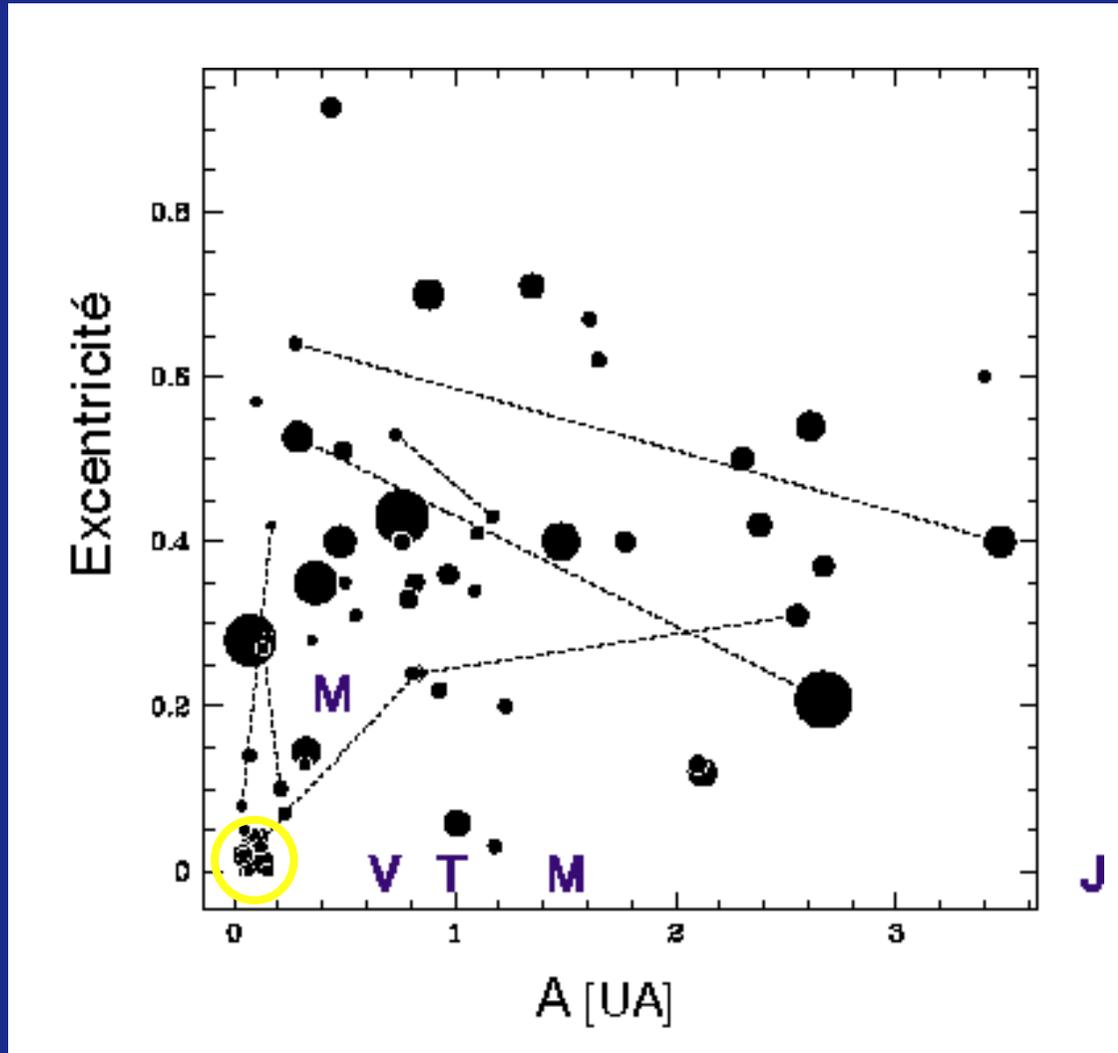
Deux catégories d'exoplanètes:

- Jupiters chauds

- Planètes géantes sur orbites excentriques

Résultats et surprises (décembre 2002)

101 exoplanètes connues parmi lesquelles 7 systèmes de 2 ou 3 planètes (résonances 1: 2 , 1: 10)



Deux catégories d'exoplanètes:

- Jupiters chauds

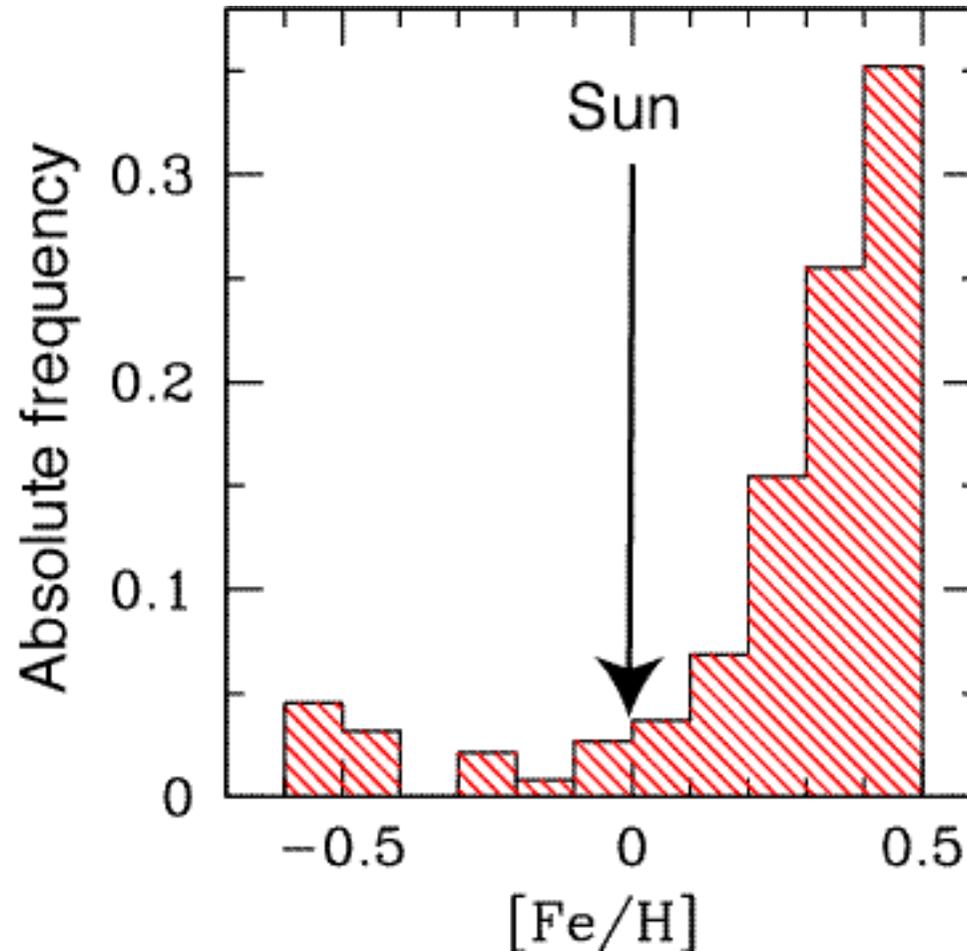
- Planètes géantes sur orbites excentriques

- Pas d'analogue du système solaire connu à ce jour!

Résultats et surprises (décembre 2002)

La proportion d'étoiles entourées de planètes dépend fortement de leur métallicité

$$[Fe/H] = \log \left((Fe/H)_* / (Fe/H)_o \right)$$

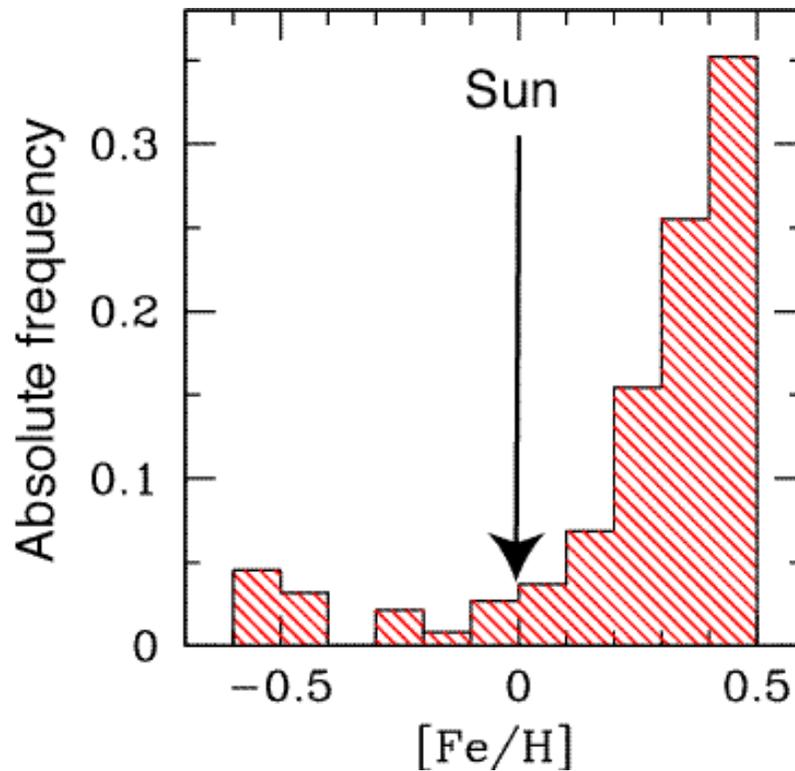


Résultats et surprises (décembre 2002)

La proportion d'étoiles entourées de planètes dépend fortement de leur métallicité

$$[Fe/H] = \log \left((Fe/H)_* / (Fe/H)_o \right)$$

un environnement riche en 'éléments lourds' favorise la formation de planètes



Résultats et surprises (décembre 2002)

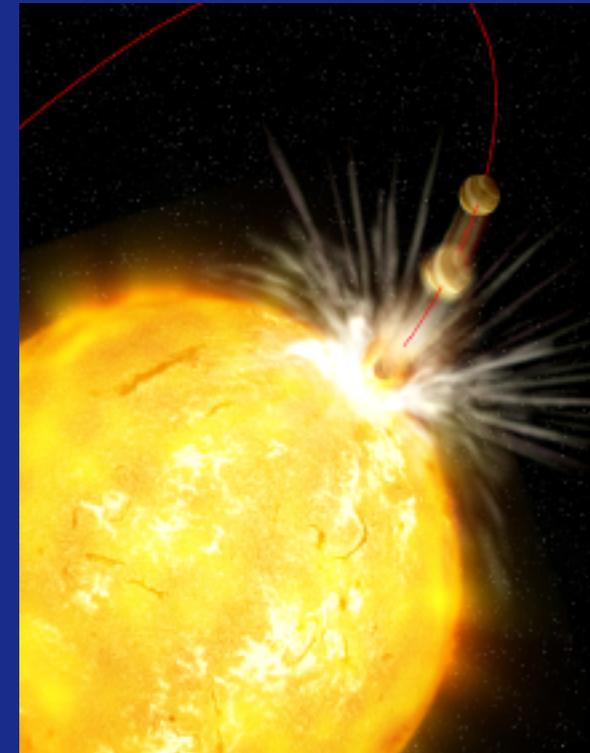
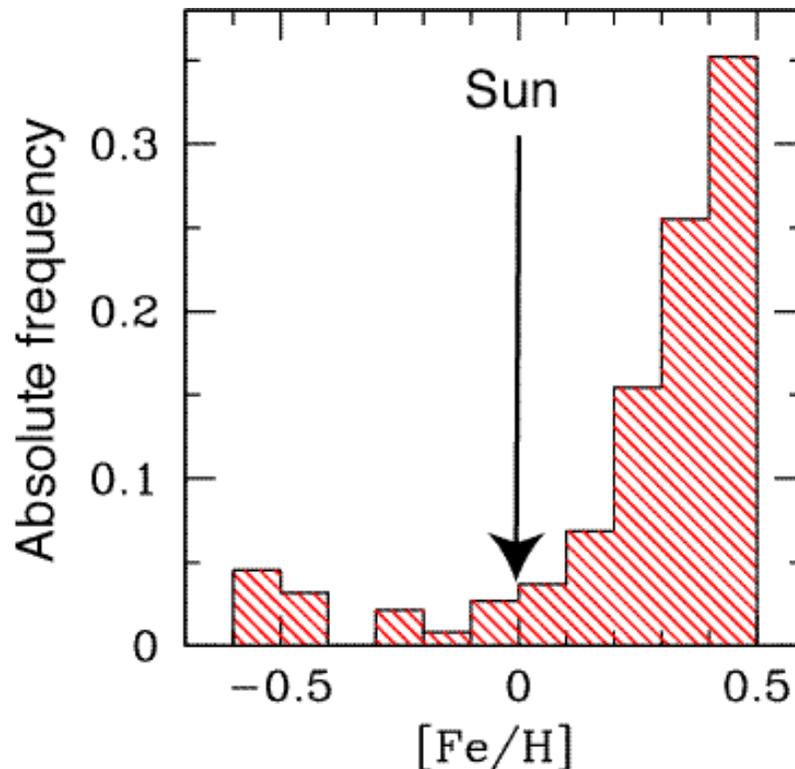
La proportion d'étoiles entourées de planètes dépend fortement de leur métallicité

$$[Fe/H] = \log \left((Fe/H)_* / (Fe/H)_\odot \right)$$

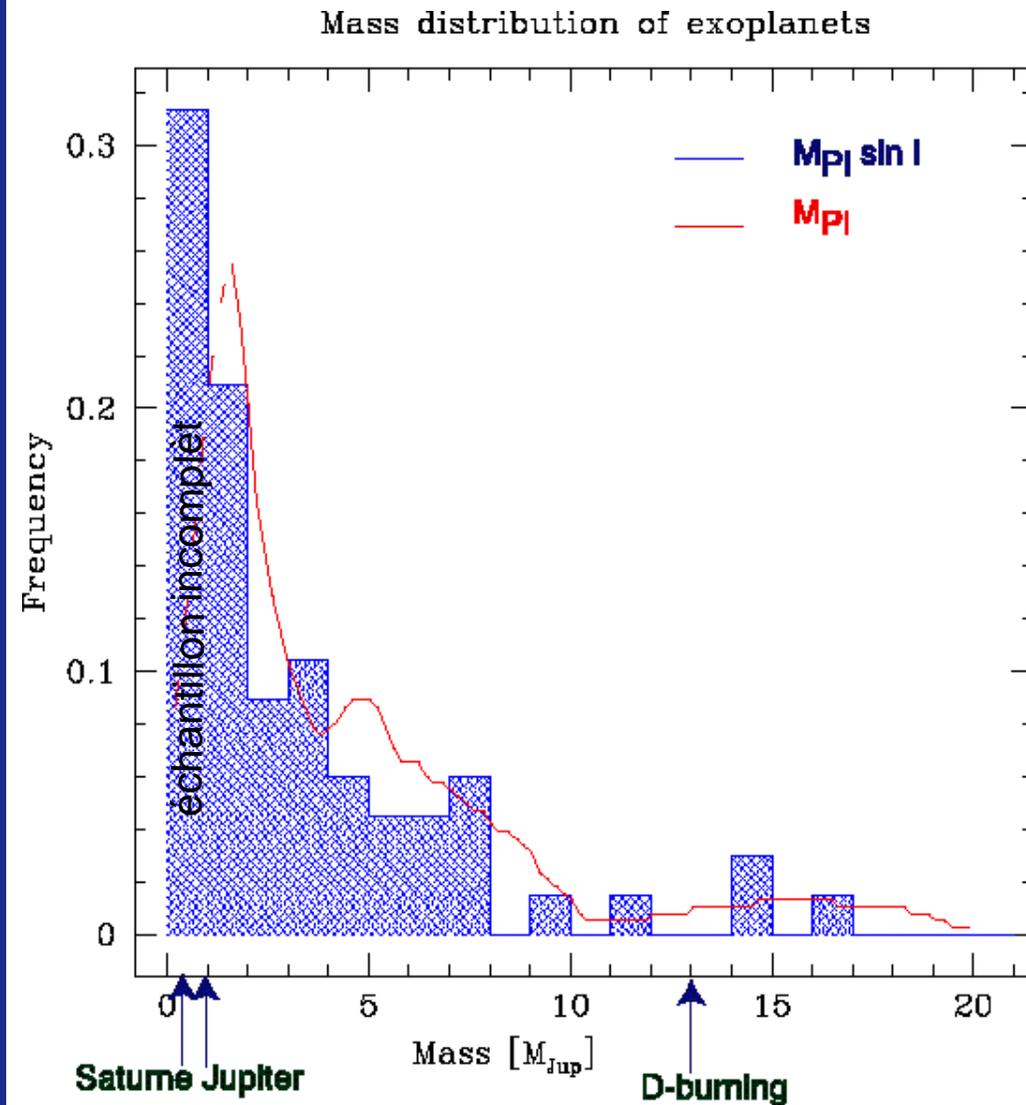
un environnement riche en 'éléments lourds' favorise la formation de planètes

ou ?

l'étoile a été enrichie en 'éléments lourds' par l'accrétion de planètes



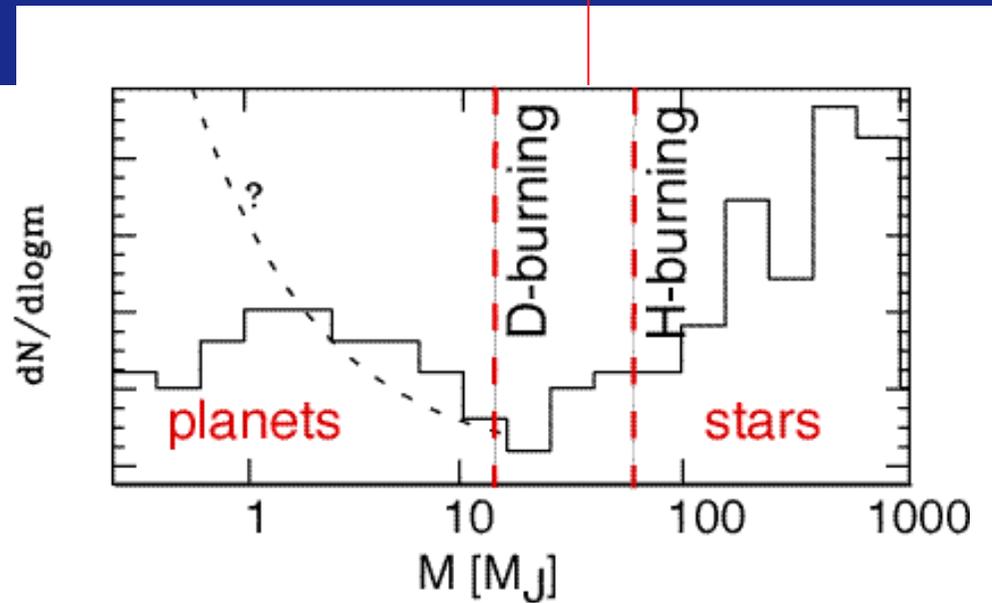
Résultats et surprises (décembre 2002)



$$\begin{aligned} & (M_{PI} \sin i) \\ = & (M_{PI}) P(\sin i) \end{aligned}$$

Résultats et surprises (décembre 2002)

désert des naines brunes



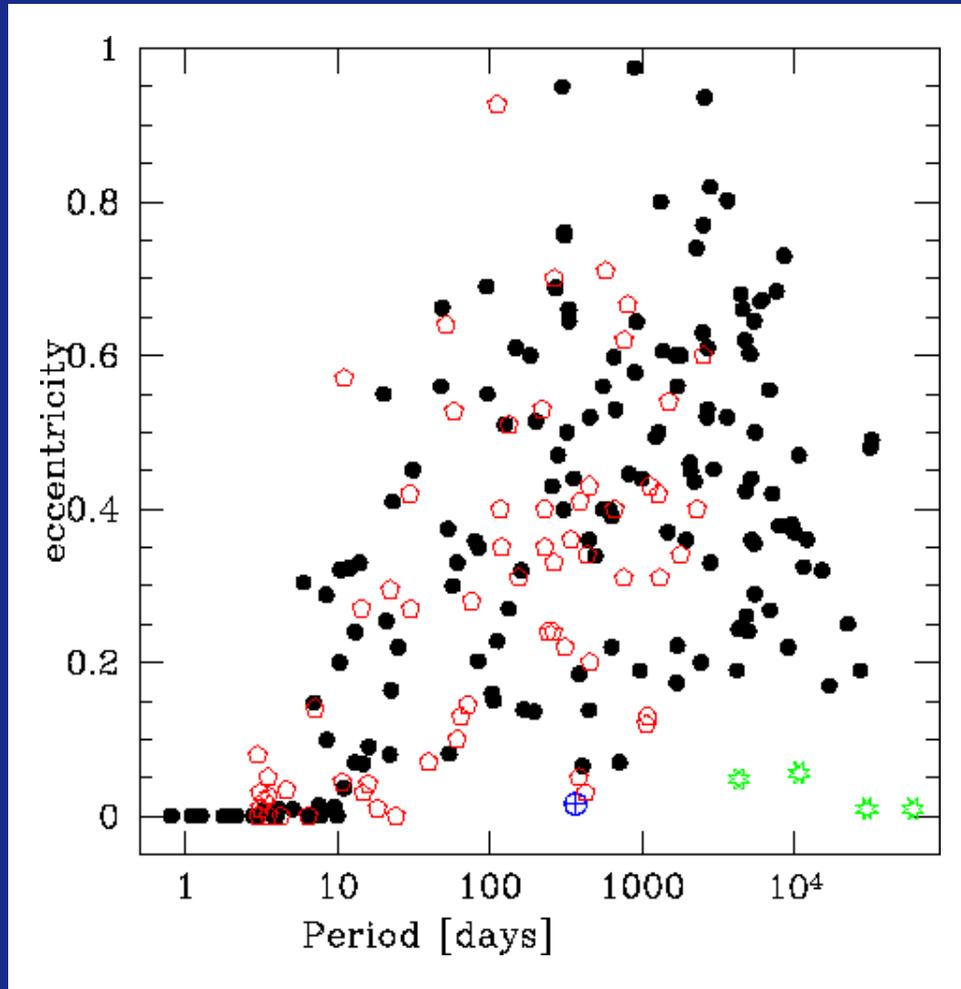
Deux populations distinctes?

- *planètes géantes gazeuses:*
formation par agglomération
dans un disque protoplanétaire

- *compagnons stellaires:*
formation par fragmentation d'un
nuage de gaz/poussières

Et pourtant...

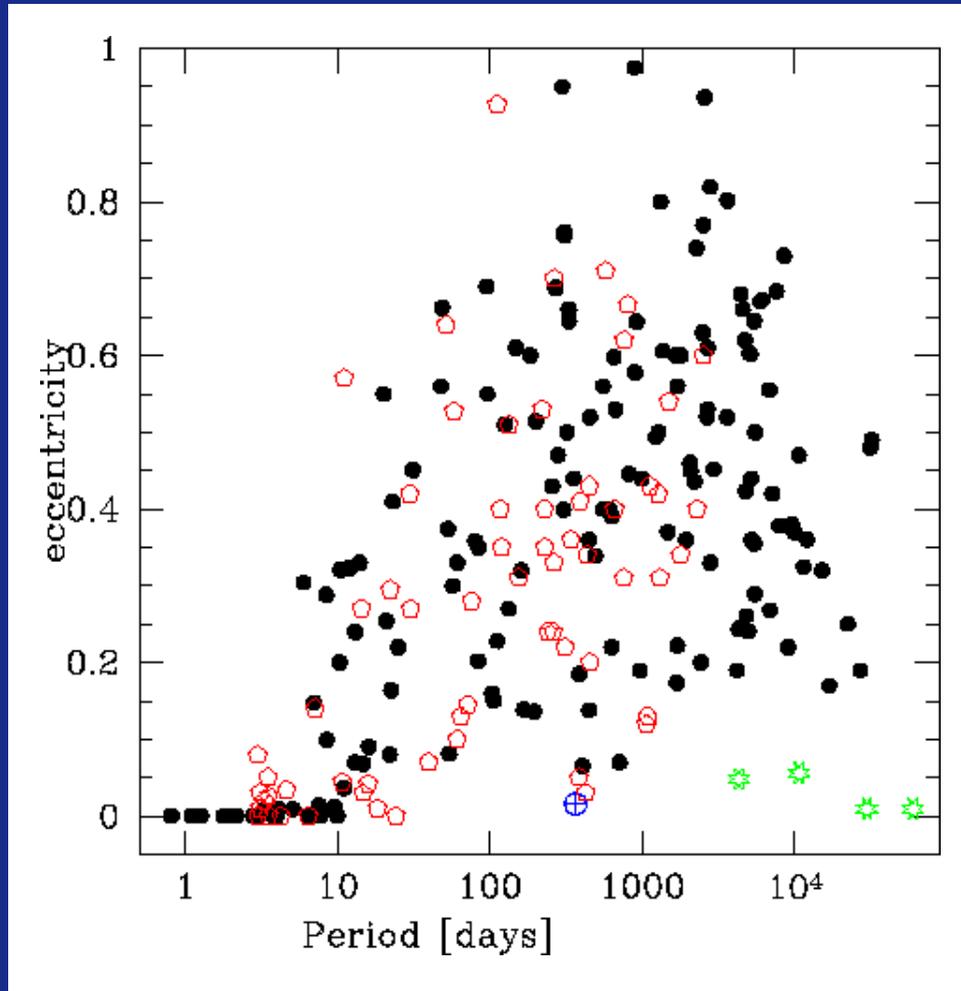
Résultats et surprises (décembre 2002)



Surprenante similitude entre
planètes géantes gazeuses
et
compagnons stellaires

→ processus de formation identique?

Résultats et surprises (décembre 2002)



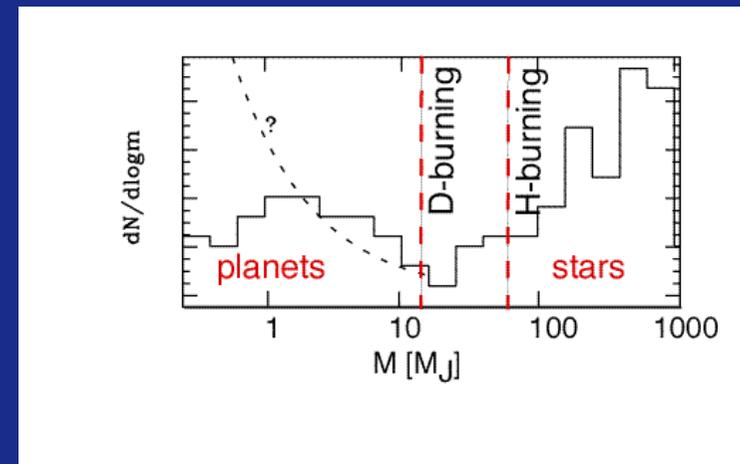
Surprenante similitude entre

planètes géantes gazeuses
et

compagnons stellaires

→ processus de formation identique?

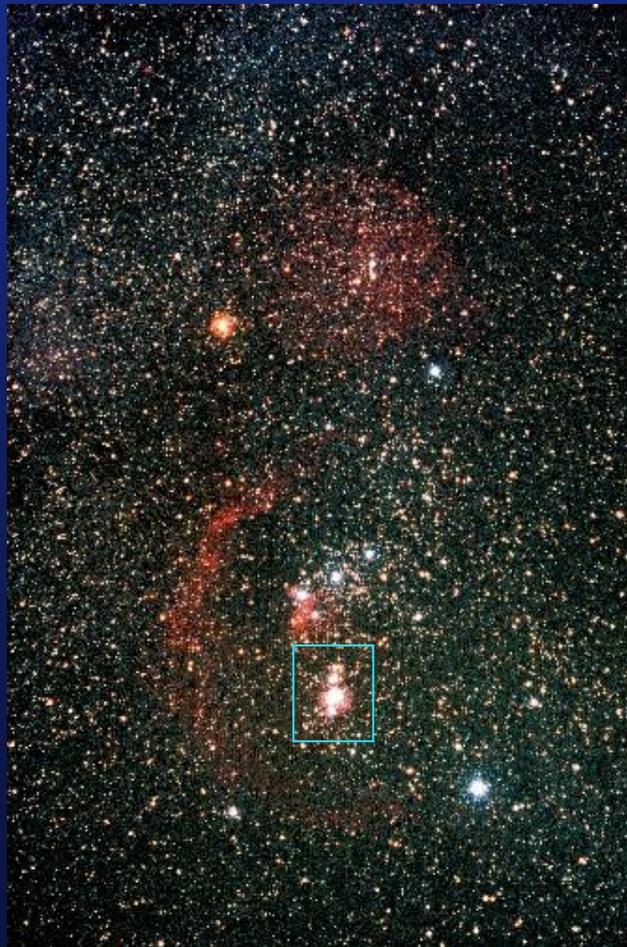
Pourtant:



Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

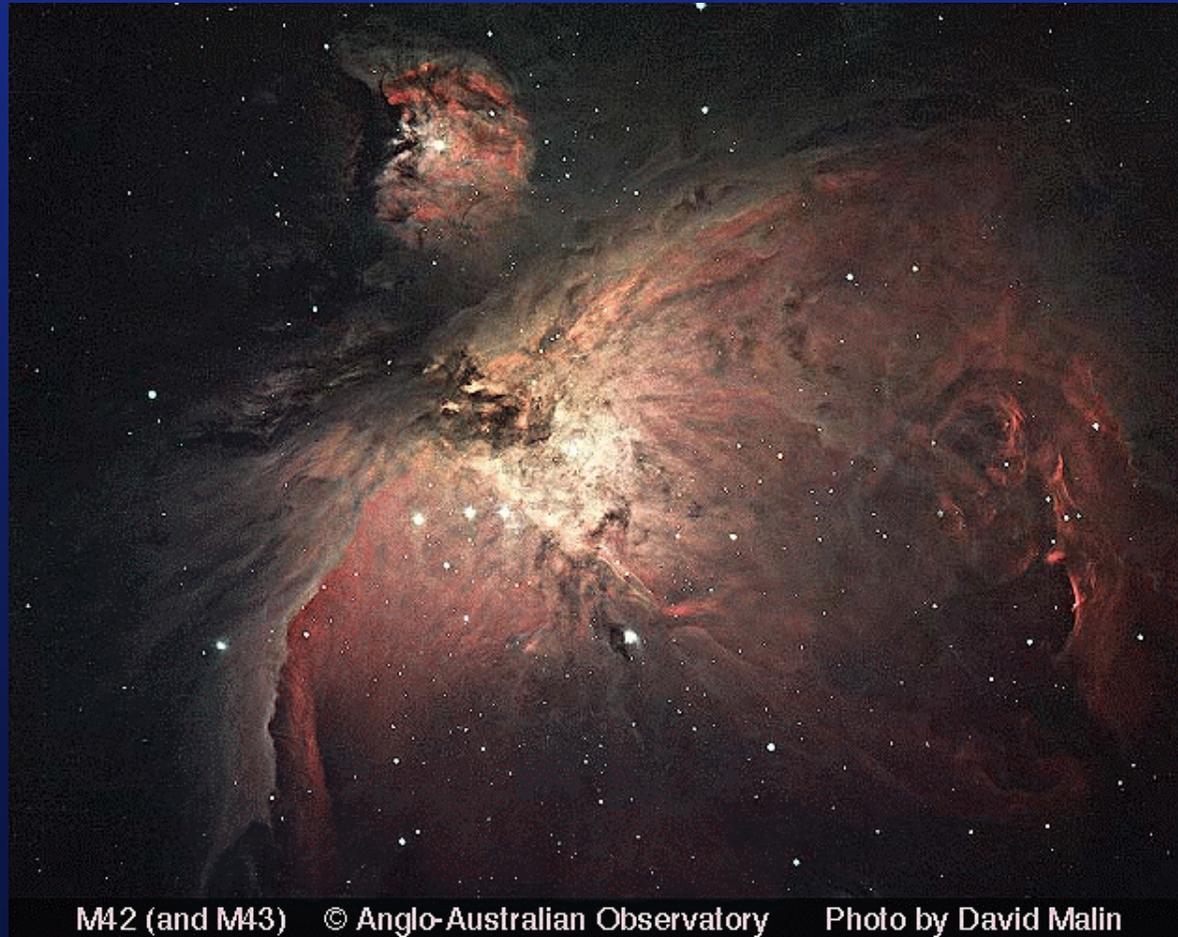
Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

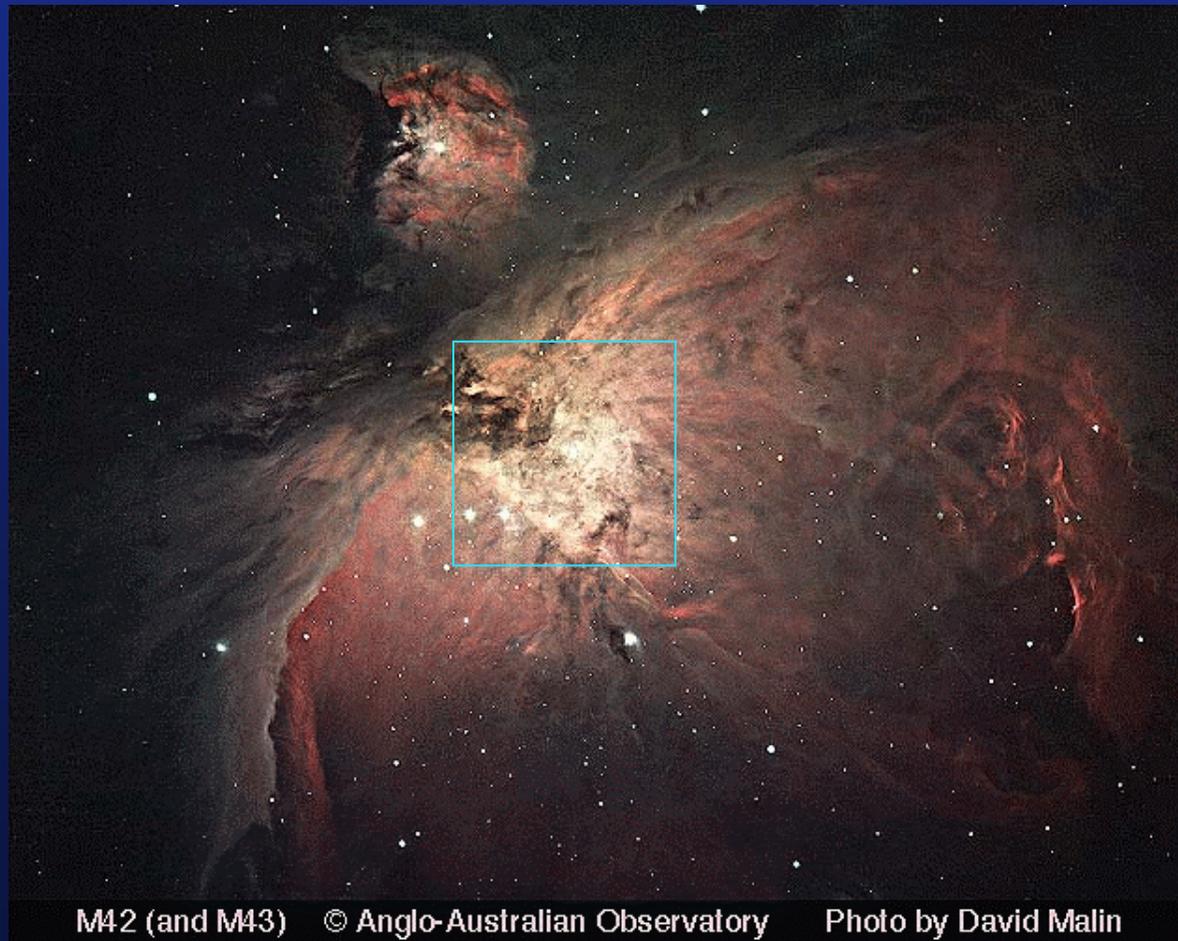
Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



M42 (and M43) © Anglo-Australian Observatory Photo by David Malin

Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



M42 (and M43) © Anglo-Australian Observatory Photo by David Malin

Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



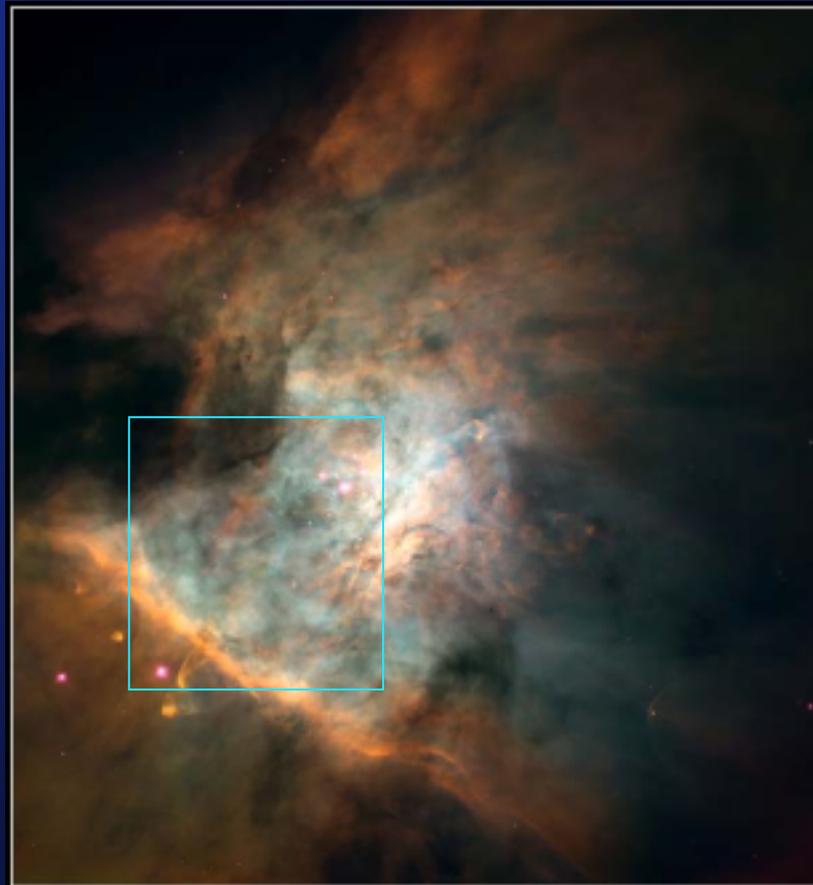
Orion Nebula Mosaic

HST - WFPC2

PRC95-45a - ST ScI OPO - November 20, 1995
C. R. O'Dell and S. K. Wong (Rice University), NASA

Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



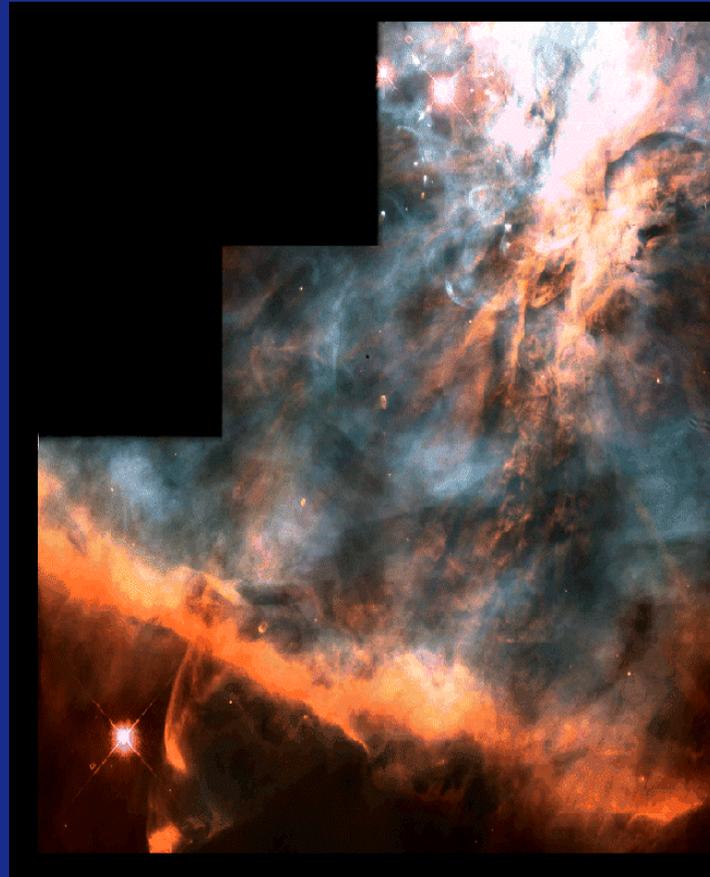
Orion Nebula Mosaic

HST - WFPC2

PRC95-45a - ST ScI OPO - November 20, 1995
C. R. O'Dell and S. K. Wong (Rice University), NASA

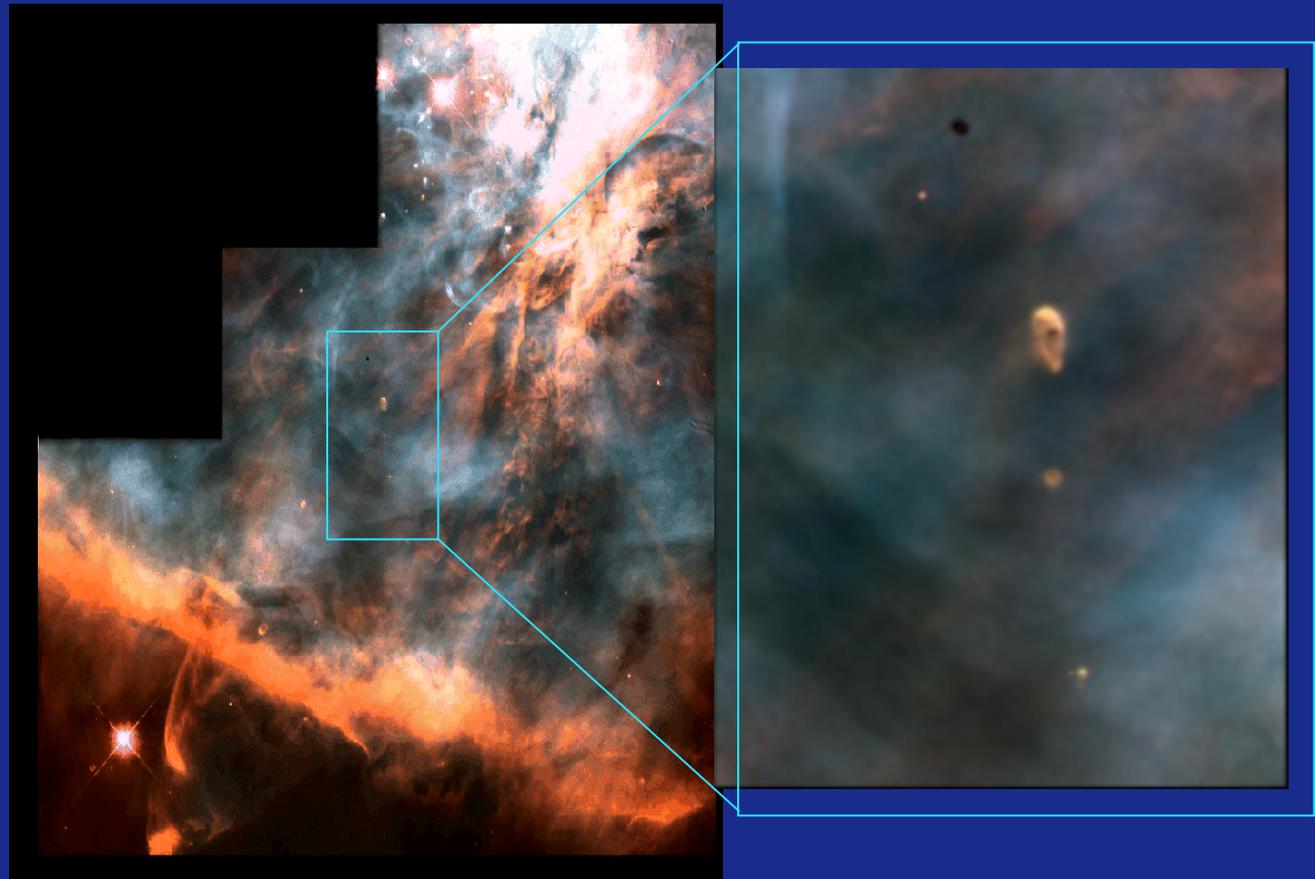
Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



Que sait-on aujourd'hui des mécanismes de formation stellaires/planétaires?

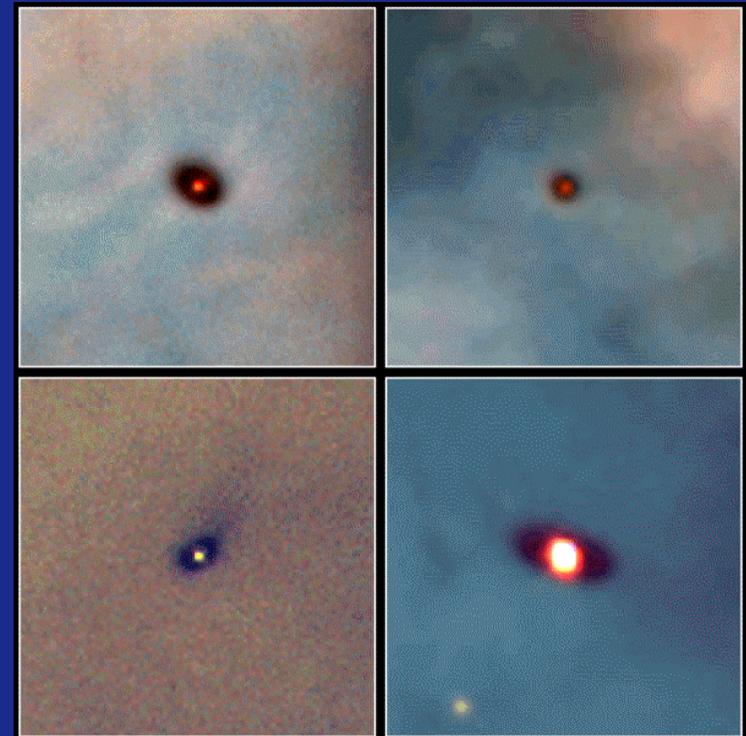
Un exemple de région de formation stellaire:
la nébuleuse d'Orion



disques protoplanétaires (*Proplyds*)

Planètes = sous-produits naturels de la formation d'étoiles

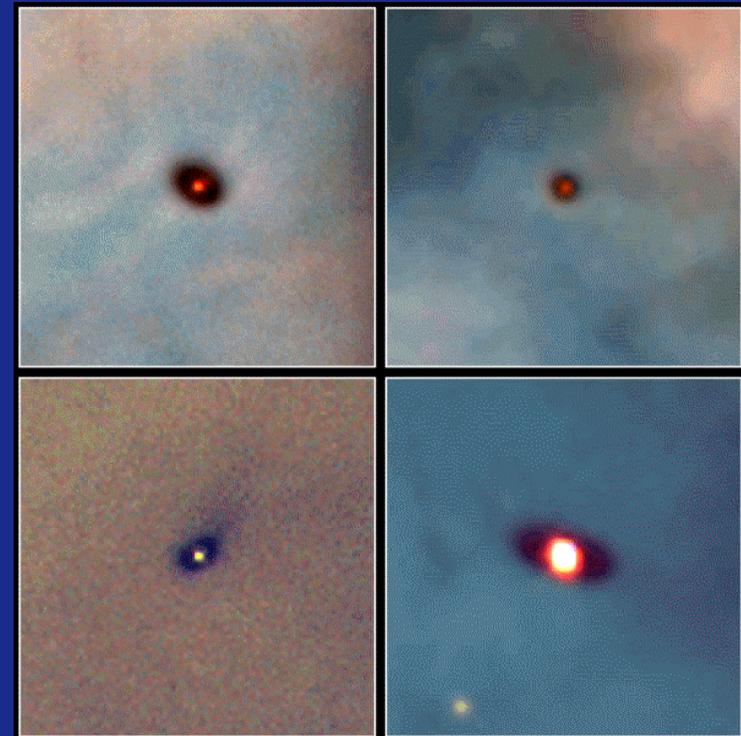
disques protoplanétaires (*Proplyds*)



Planètes = sous-produits naturels de la formation d'étoiles

disques protoplanétaires (*Proplyds*)

~1 million d'années

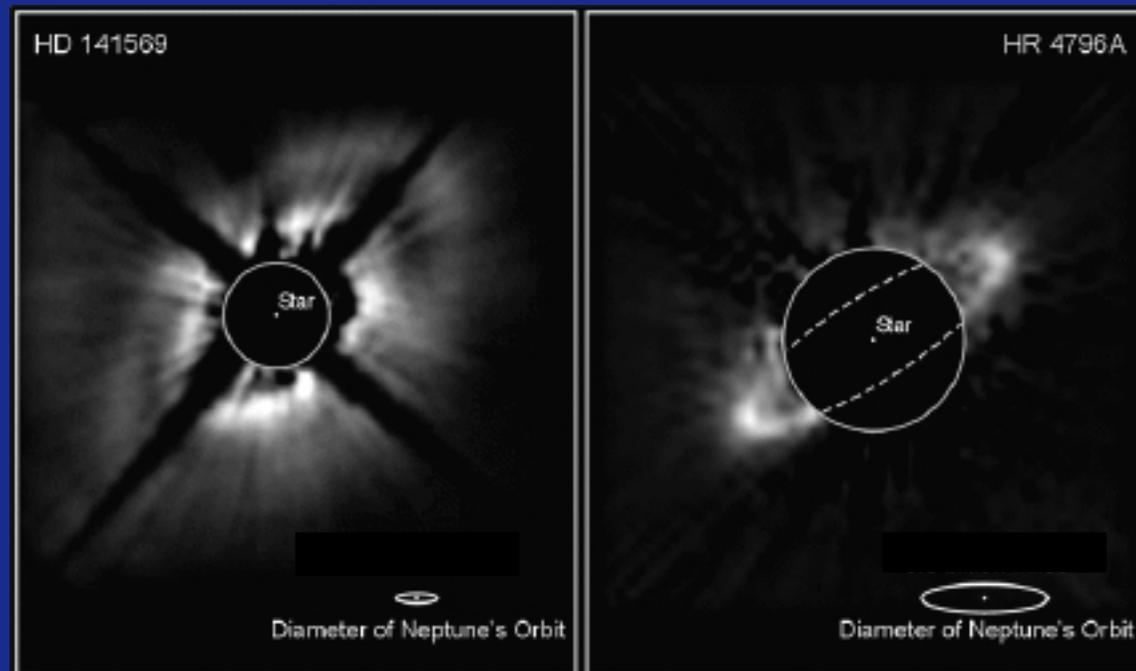


Planètes = sous-produits naturels de la formation d'étoiles

~3

~10

millions d'années



Dust Disks around Stars

HST • NICMOS

PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999

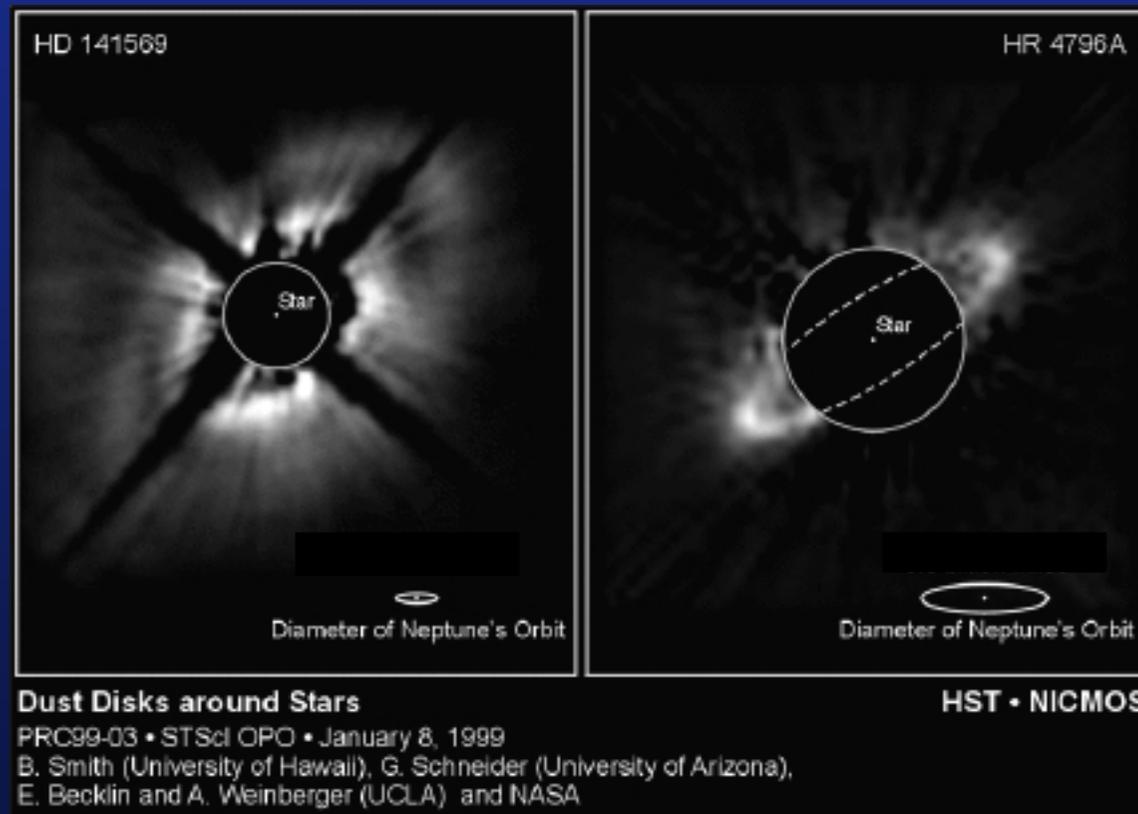
B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),
E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

Planètes = sous-produits naturels de la formation d'étoiles

~3

~10

millions d'années



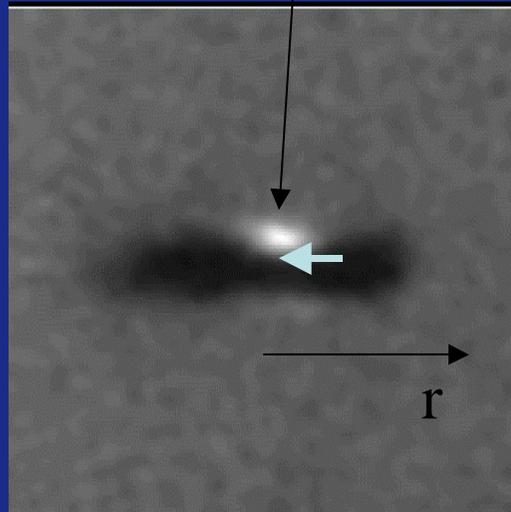
Les planètes géantes sont formées

Théorie standard de formation de systèmes planétaires

On peut montrer (exercice!) que la température au sein d'un disque d'accrétion stationnaire à l'équilibre thermique s'exprime par:

$$T(r) = \frac{G M_* \dot{M}}{8 \pi \sigma R_*^3} \frac{R_*}{r}^{3/4} \quad \text{où} \quad \sigma: \text{constante de Stefan - Boltzmann}$$

R_*, M_* : rayon et masse de l'étoile
 \dot{M} : taux d'accrétion sur l'étoile

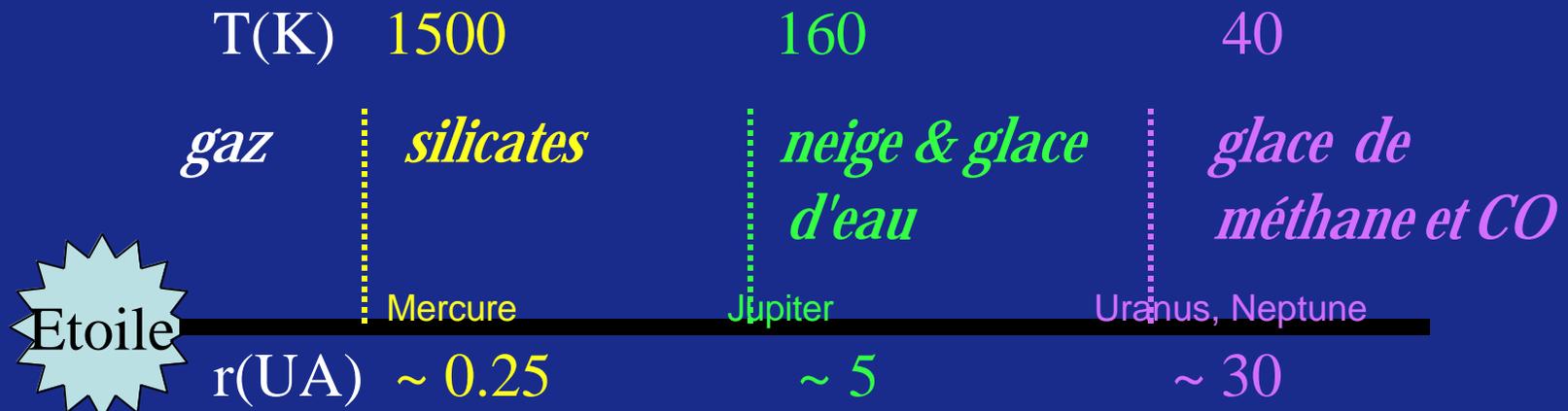


Théorie standard de formation de systèmes planétaires

On peut montrer (exercice!) que la température au sein d'un disque d'accrétion stationnaire à l'équilibre thermique s'exprime par:

$$T(r) = \frac{G M_* \dot{M}}{8 \pi \sigma R_*^3} \frac{R_*}{r}^{3/4} \quad \text{où}$$

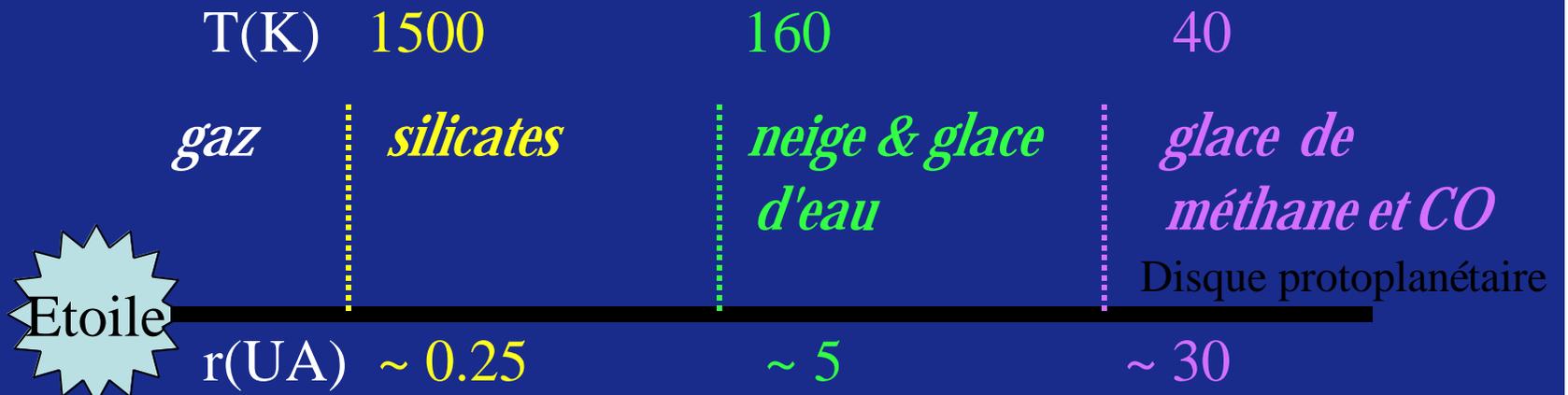
σ : constante de Stefan - Boltzmann
 R_*, M_* : rayon et masse de l'étoile
 \dot{M} : taux d'accrétion sur l'étoile



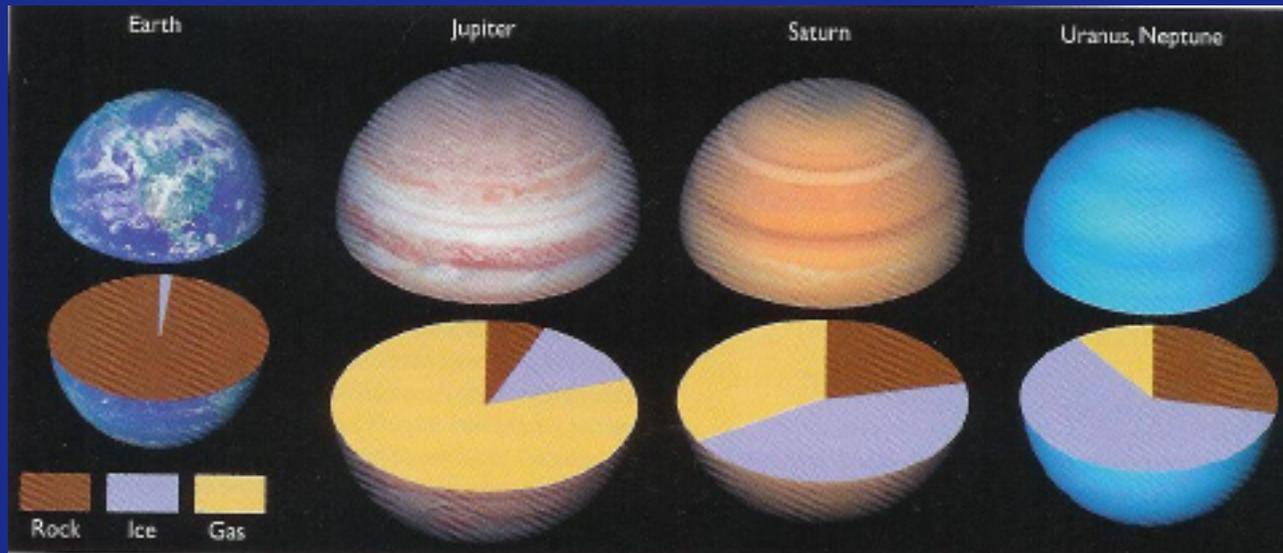
Théorie standard de formation des planètes géantes



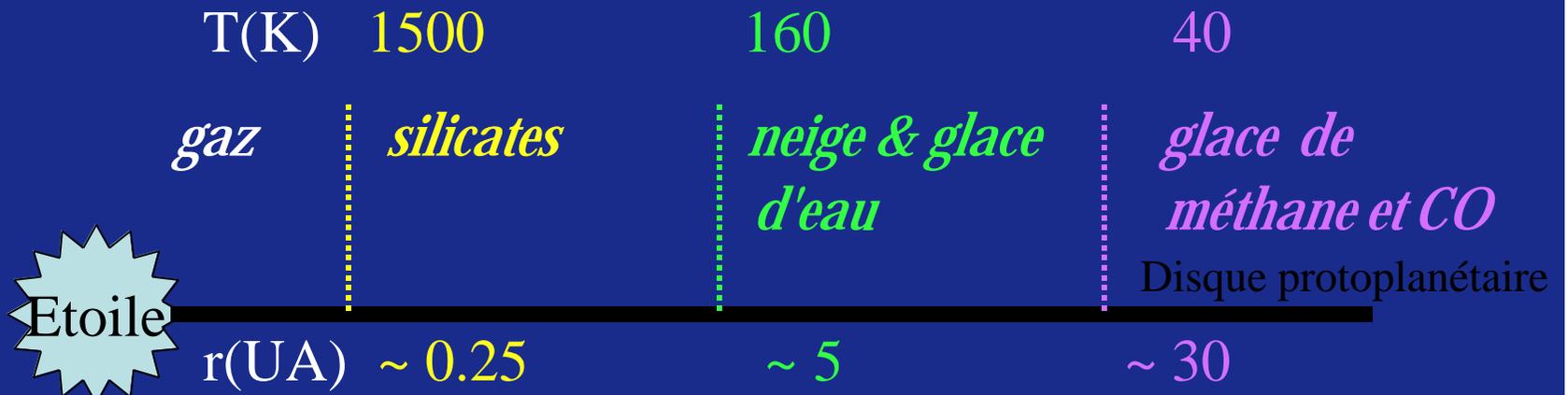
Les planètes géantes se forment **vraisemblablement** par accrétion rapide de gaz autour de noyaux de neige/glace apparaissant à ~ 5 UA ($T \sim 160$ K):



Théorie standard de formation des planètes géantes

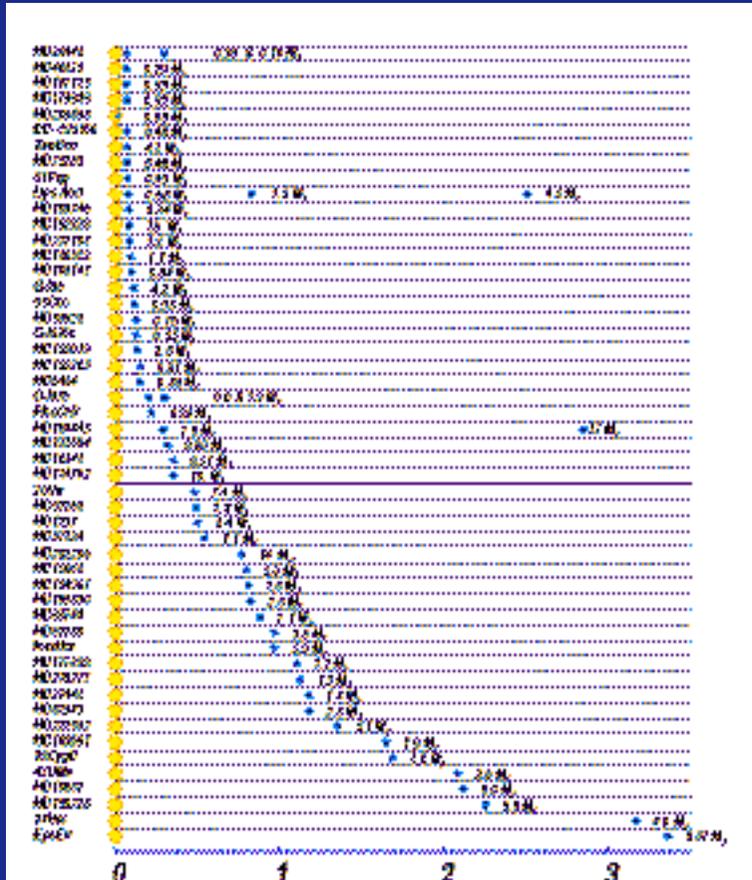


Les planètes géantes se forment **vraisemblablement** par accrétion rapide de gaz autour de noyaux de neige/glace apparaissant à ~ 5 UA ($T \sim 160$ K):



Théorie **révisée** de formation de systèmes planétaires

Formation des planètes géantes à ~ 5 UA, puis migration vers l'étoile?



~ 5 UA
blizzard de neige & glace d'eau

migration ?

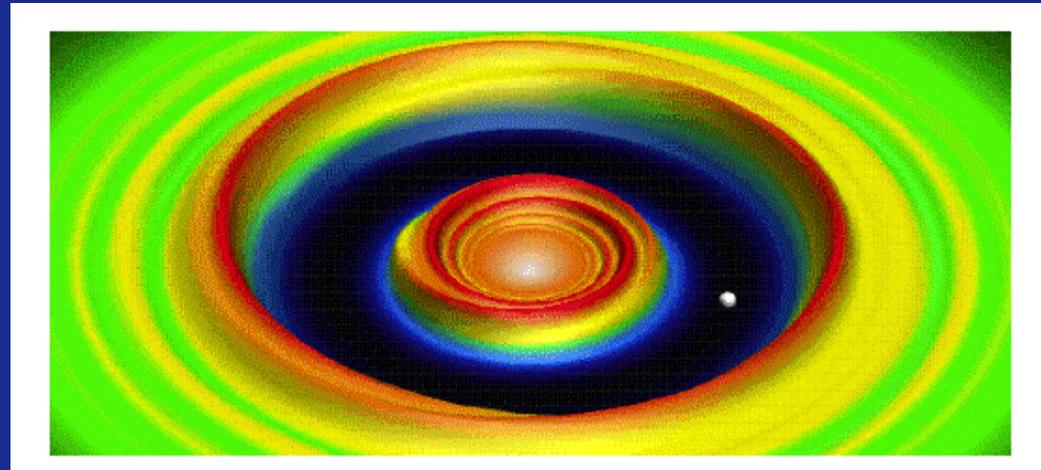
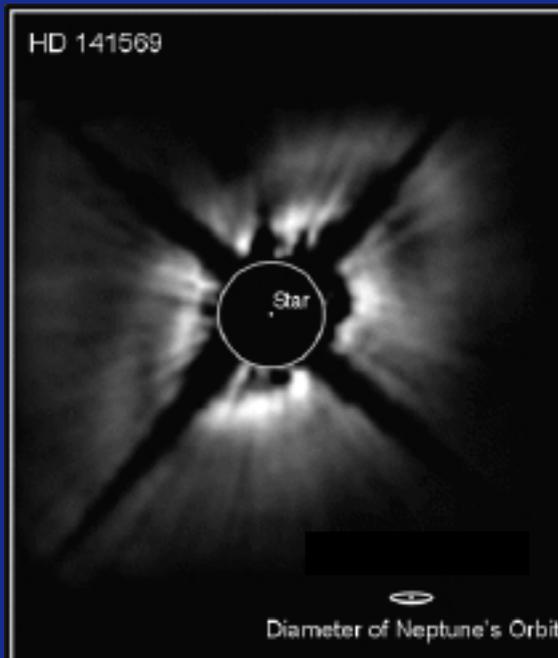


Etoile

Disque protoplanétaire

T ~ 160 K

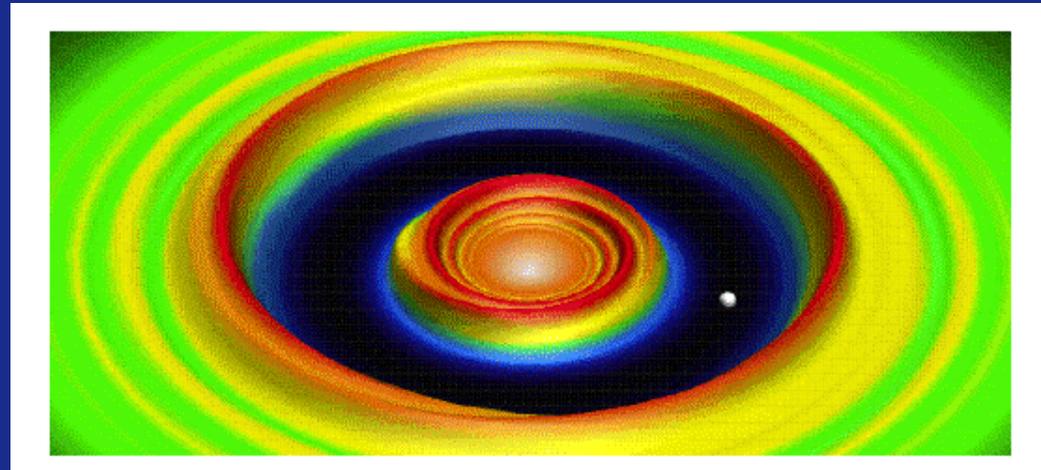
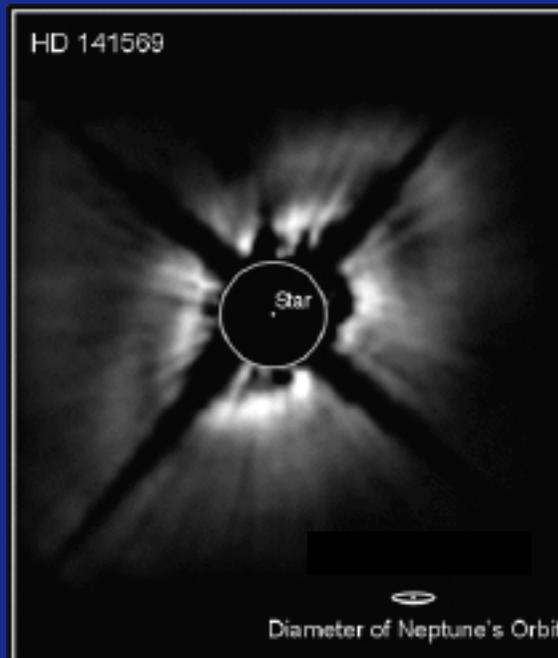
Théorie **révisée** de formation de systèmes planétaires



Un transfert de moment angulaire de la planète vers le disque peut conduire à la migration de la planète vers l'étoile

La **théorie détaillée** de ces processus sort du cadre de la présente leçon!

Théorie révisée de formation de systèmes planétaires



Un transfert de moment angulaire de la planète vers le disque peut conduire à la migration de la planète vers l'étoile

La théorie détaillée de ces processus sort du cadre de la présente leçon!

ondes de densité spirales induites dans le disque par la planète et résonances - "de Lindblad" -

entre la vitesse angulaire de la planète

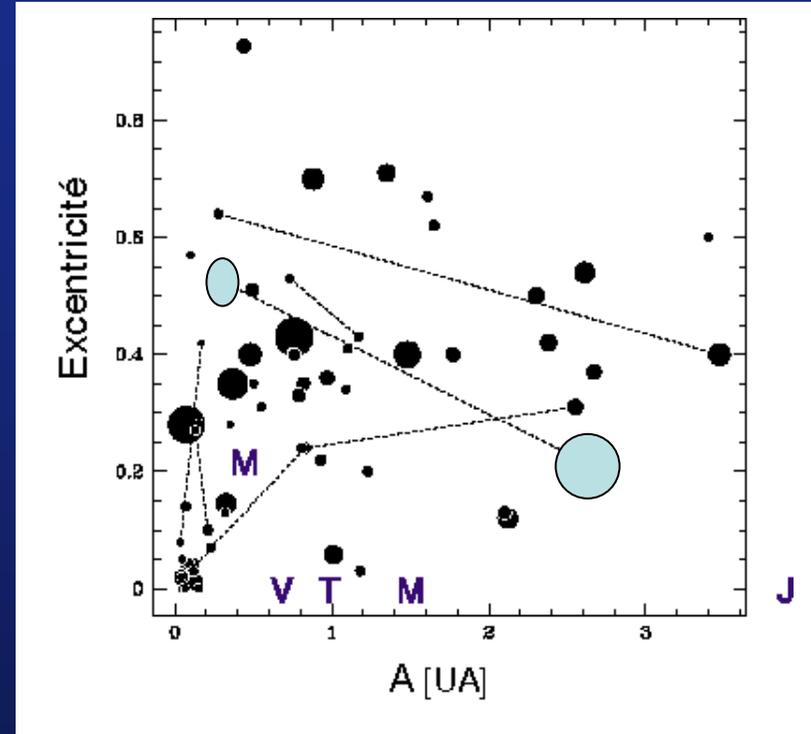
et l'oscillation radiale des particules du disque formant ces ondes de densité

Théorie **révisée** de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

- HD 168433: 2 planètes:
 $M_1 > 7.4 M_J$ à 0.29 UA
 $M_2 > 16.9 M_J$ à 2.8 UA

migration simultanée?

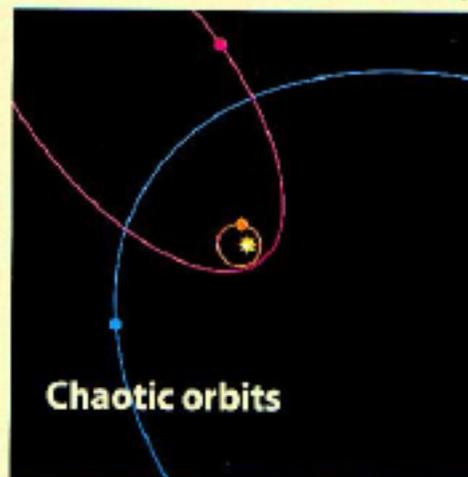
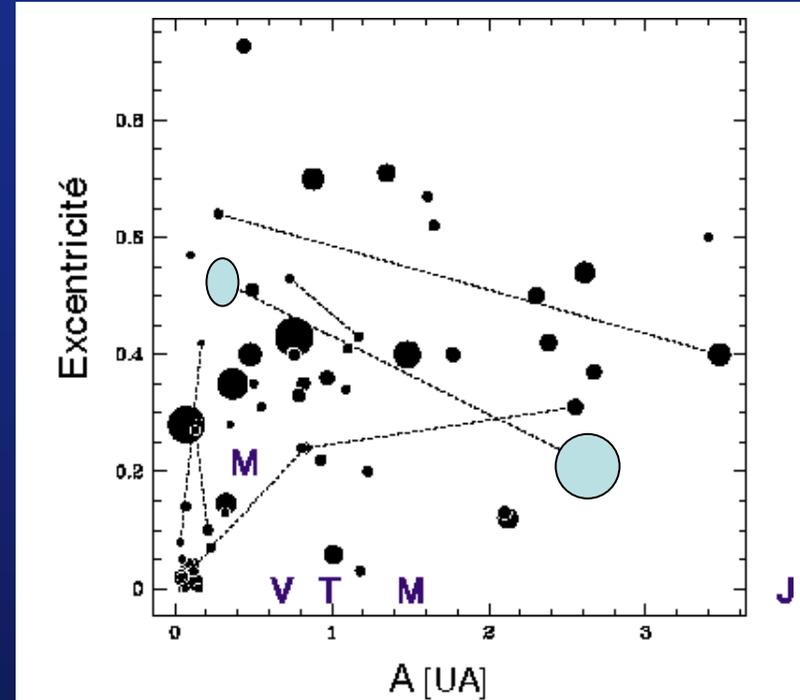


Théorie révisée de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

- HD 168433: 2 planètes:
 $M_1 > 7.4 M_J$ à 0.29 UA
 $M_2 > 16.9 M_J$ à 2.8 UA

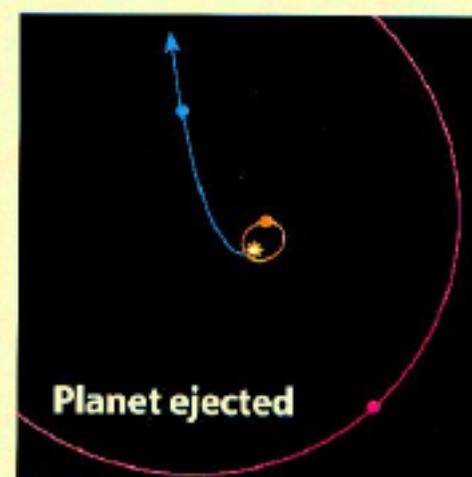
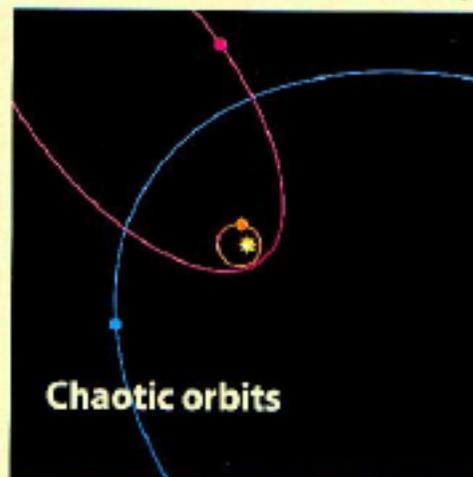
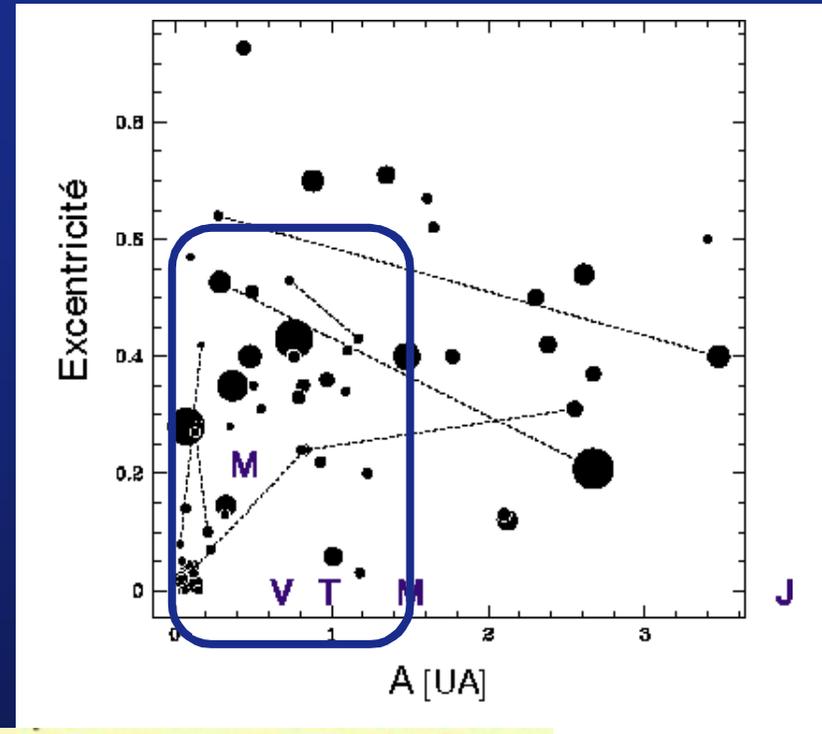
migration simultanée
ou plutôt
interactions gravitationnelles
planète-planète?



Théorie *révisée* de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

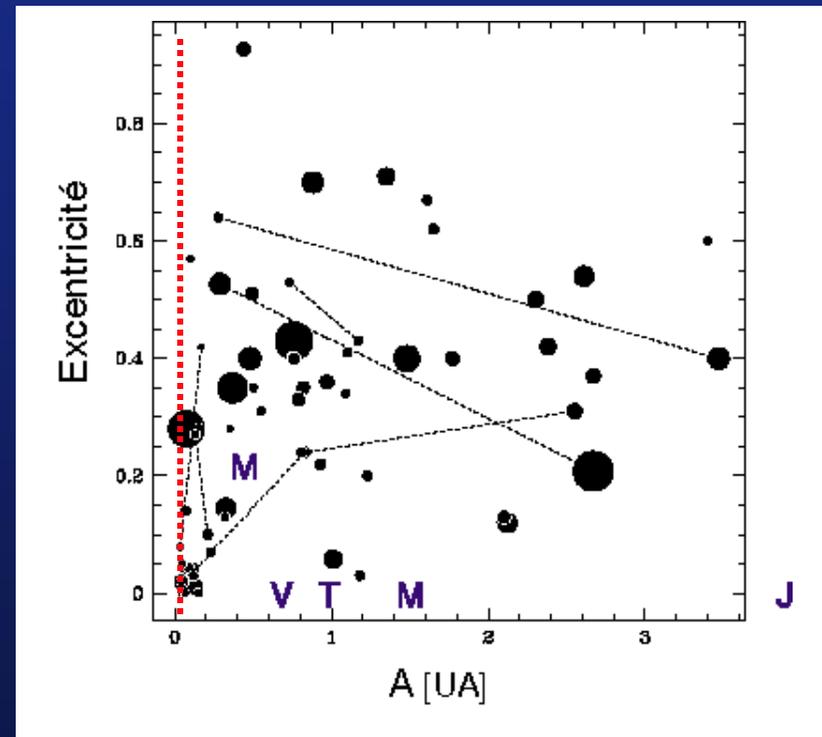
- origine des Jupiters chauds sur orbites excentriques?



Théorie **révisée** de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

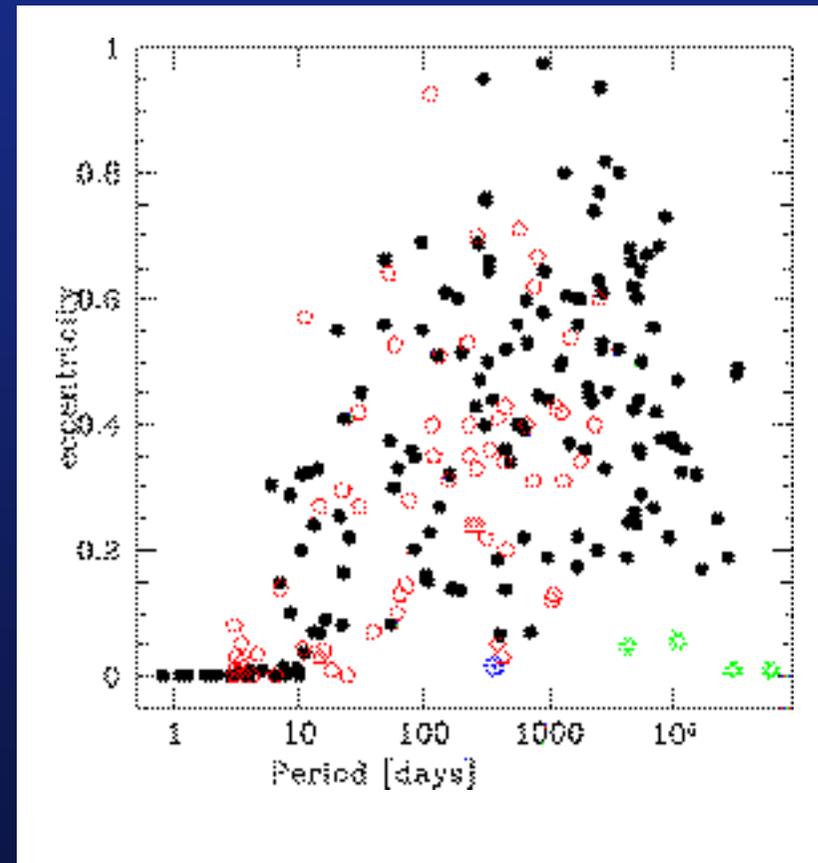
- arrêt de la migration?



Théorie **révisée** de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

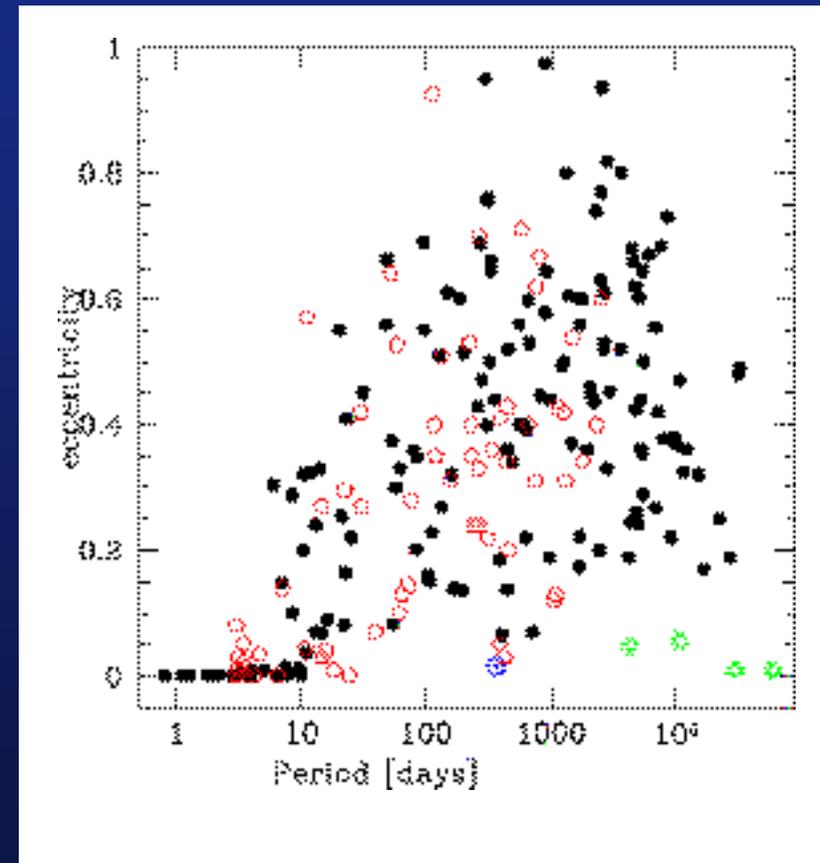
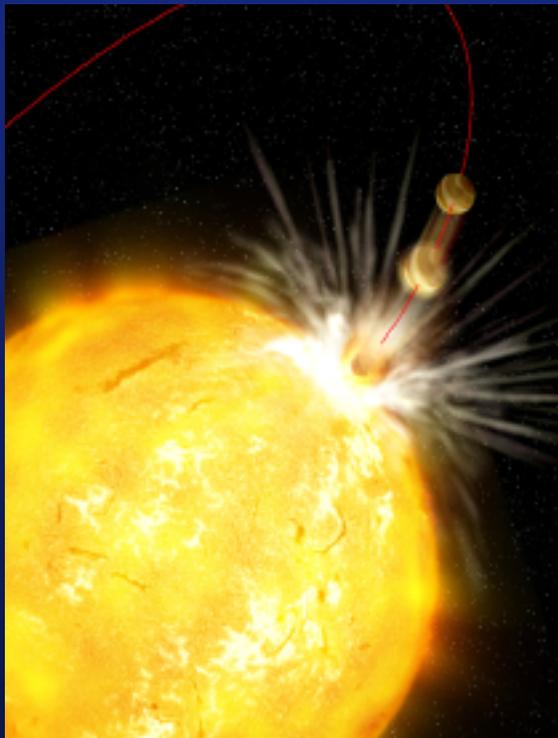
- arrêt de la migration?



Théorie révisée de formation de systèmes planétaires

Quelques problèmes!

- arrêt de la migration?



Conclusions

Questions ouvertes:

- mécanismes de formation des planètes/compagnons stellaires de faible masse:
 - distribution de masse bimodale, mais (e, log P) semblable!?
 - formation in situ des Jupiters chauds?
 - § **ou** migration progressive par transfert de moment angulaire avec le disque?
 - § **ou** migration brutale par interactions planète-planète?
 - corollaire: origine des grandes excentricités
 - rôle de la métallicité
- stabilité des systèmes planétaires avec orbites fortement excentriques?
- Pourquoi n'y a-t-il pas de Jupiters chauds dans notre système solaire?

Conclusions

Perspectives:

- détection de planètes telluriques (interférométrie spatiale)
- spectroscopie de leur atmosphère
- traces de vie (bandes d'ozone)

