

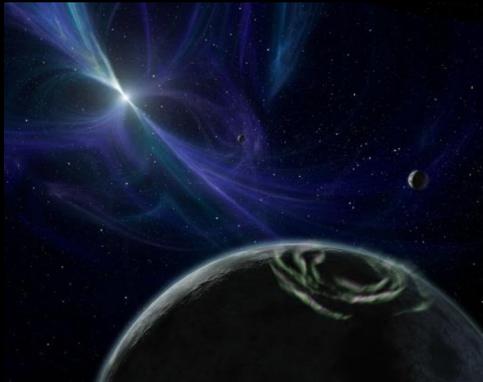
*La quête de  
nouvelles terres*



# Définition et petite histoire

Une exoplanète, ou planète extrasolaire, est une planète gravitant autour d'une autre étoile que le Soleil.

- La première découverte a eu lieu en 1990, par l'astronome A.Wolzcjan avec le radiotélescope d'Arecibo. Il s'agit de 4 planètes autour d'un pulsar situé à 980 a-l, PSR-B1257+12. Leur masse est comprise entre 0.025 et 4.3 MT.



- En 1995, M. Mayor et D.Queloz découvrent autour de l'étoile 51 Peg. Il s'agit de la première détection par la méthode radiale.



Au 1er juillet 2014, on recense environ 1800 exoplanètes.

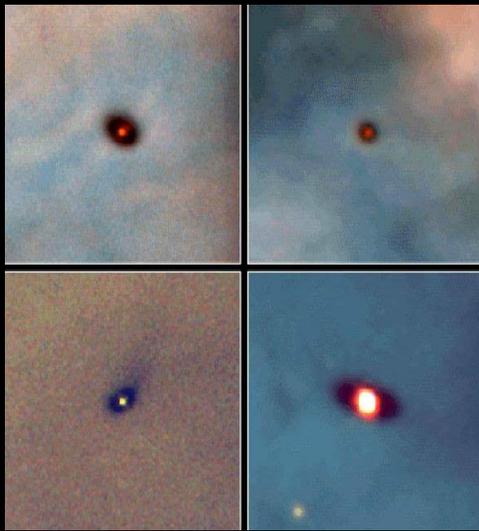
# Quelques découvertes importantes

Les premières exoplanètes découvertes étaient des Jupiters chauds, situées très près de leur étoile.

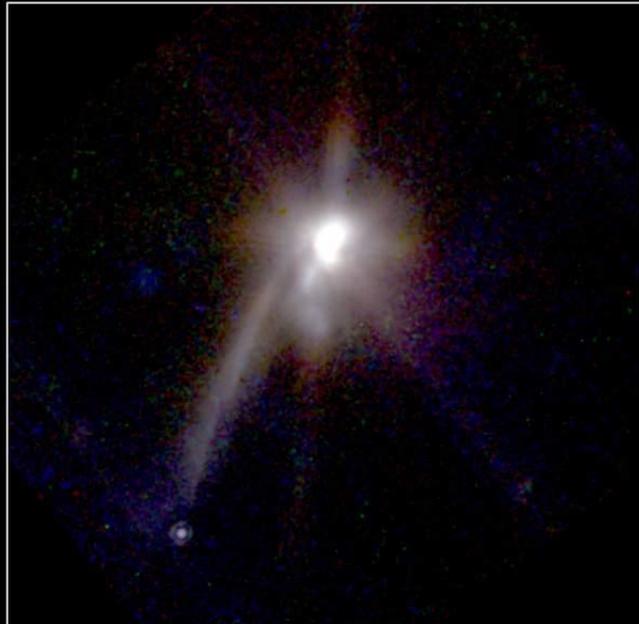
- **octobre 1995** : 51 Peg ; 0.5 masse de Jupiter à seulement 0.05 UA de son étoile.
- **27/11/2001** : découverte de la planète Osiris, qui possède une atmosphère, composée de sodium, d'hydrogène, d'oxygène et de carbone qui s'évapore due à la proximité à son étoile.
- **25/08/2004** : première planète tellurique (14 masses terrestres). 2004 est l'année de découverte des premières superterres.
- **04/04/2007** : découverte d'une quatrième planète autour de la naine rouge Gliese 581 (20.5 a-l), dans la zone d'habitabilité et dont la masse serait de 1.5 x la masse de la Terre. Sa température pourrait être comprise entre 40 et 100 °C.
- **2008** : premières photos directes d'une exoplanète
- **10/01/2011** : découverte par le télescope Képler de la plus petite exoplanète (1.4 x le diamètre de la Terre), Kepler – 10b
- **03/03/2011** : découverte du système planétaire Képler 11, contenant 6 planètes
- **11/01/2012** : découverte de 3 planètes dont la taille est comprise entre Mars et la Terre.



# Premiers indices et fausses découvertes...

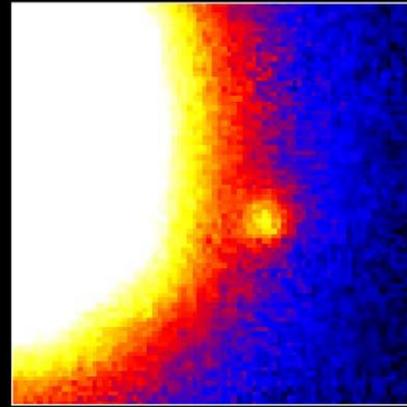


1995 : le télescope Hubble découvre des disques protoplanétaires au sein de la nébuleuse d'Orion.

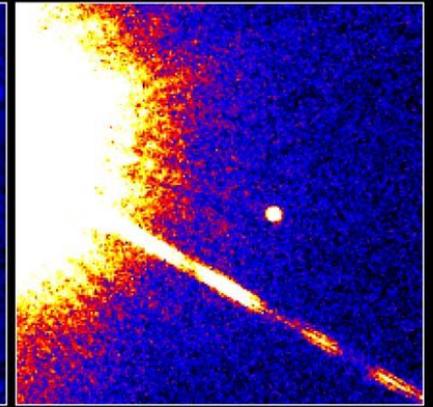


**TMR-1C • Protoplanet in Taurus** HST • NICMOS  
 PRC98-19 • ST ScI OPO • May 28, 1998  
 S. Terebey (Extrasolar Research Corp.) and NASA

## Brown Dwarf Gliese 229B

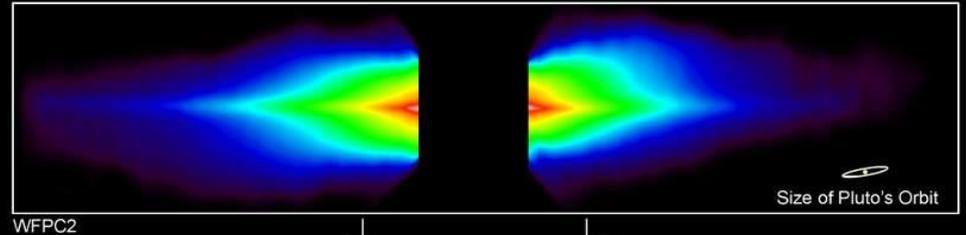


**Palomar Observatory**  
 Discovery Image  
 October 27, 1994



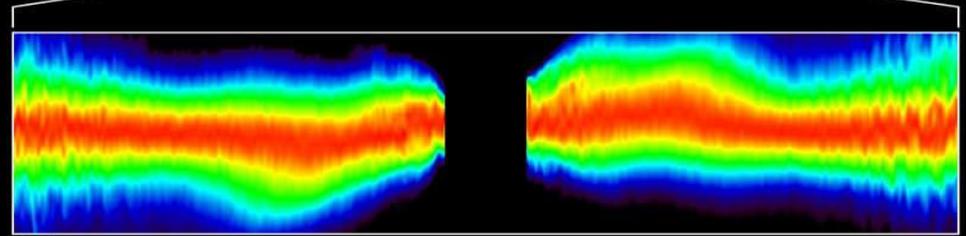
**Hubble Space Telescope**  
 Wide Field Planetary Camera 2  
 November 17, 1995

PRC95-48 • ST ScI OPO • November 29, 1995  
 T. Nakajima and S. Kulkarni (CalTech), S. Durrance and D. Golimowski (JHU), NASA



WFPC2

Size of Pluto's Orbit



STIS

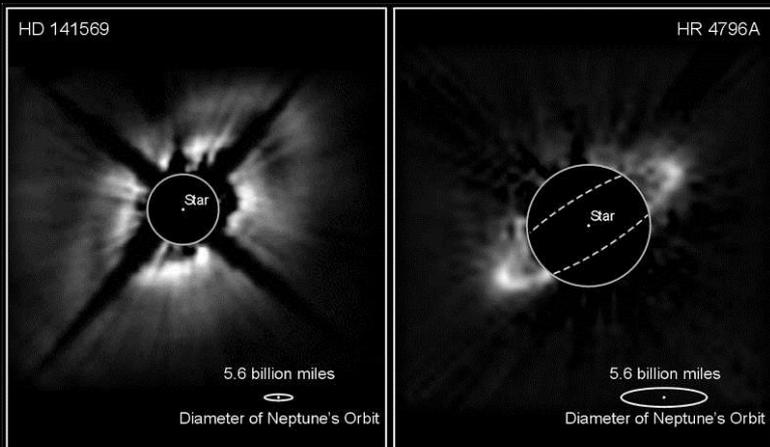


Solar System to Scale

**Beta Pictoris** HST • WFPC2 • STIS  
 PRC98-03 • January 8, 1998 • ST ScI OPO  
 A. Schultz (Computer Sciences Corp.), S. Heap (NASA Goddard Space Flight Center) and NASA

# La formation des planètes

Pendant longtemps, les astronomes se sont posés la question sur l'abondance ou la rareté des systèmes planétaires. La découverte des premiers disques de poussière et de disques protoplanétaires permet de comprendre qu'ils étaient fréquents.



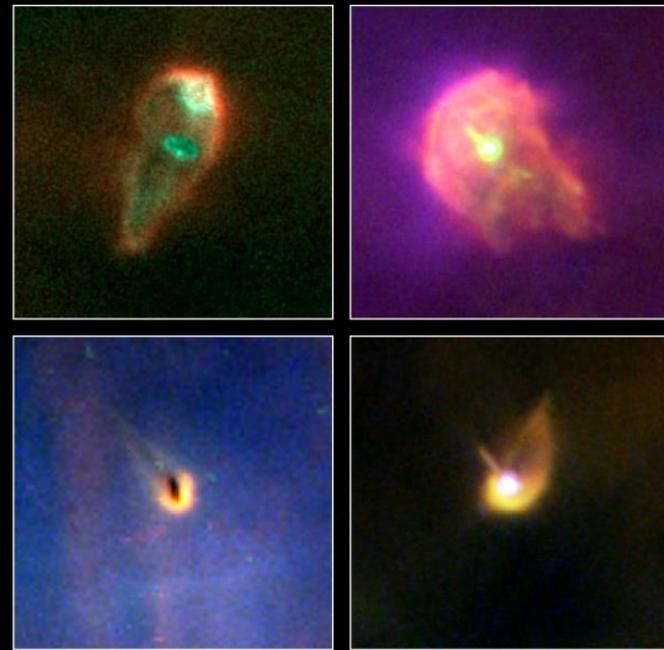
## Dust Disks around Stars

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

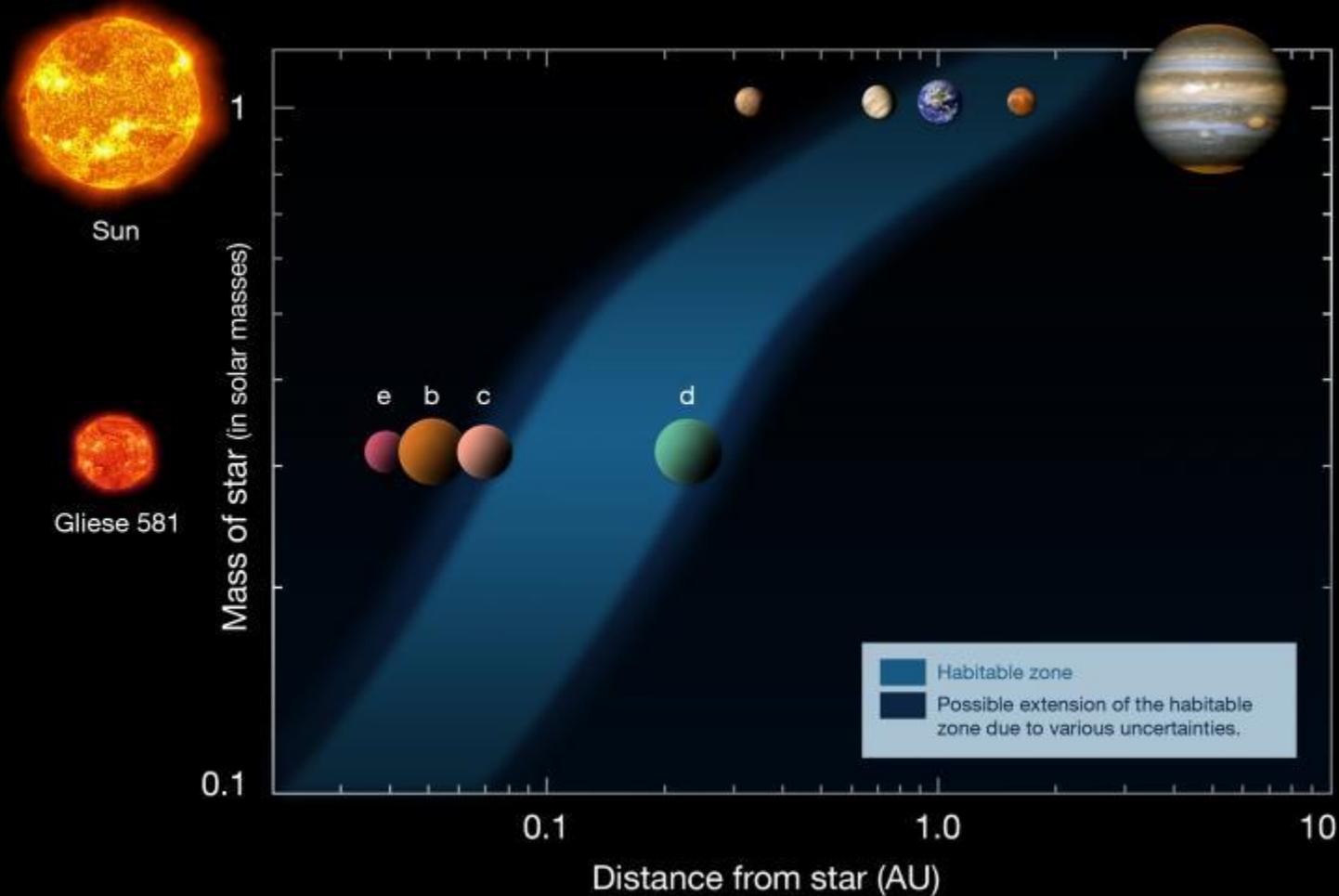
HST • NICMOS



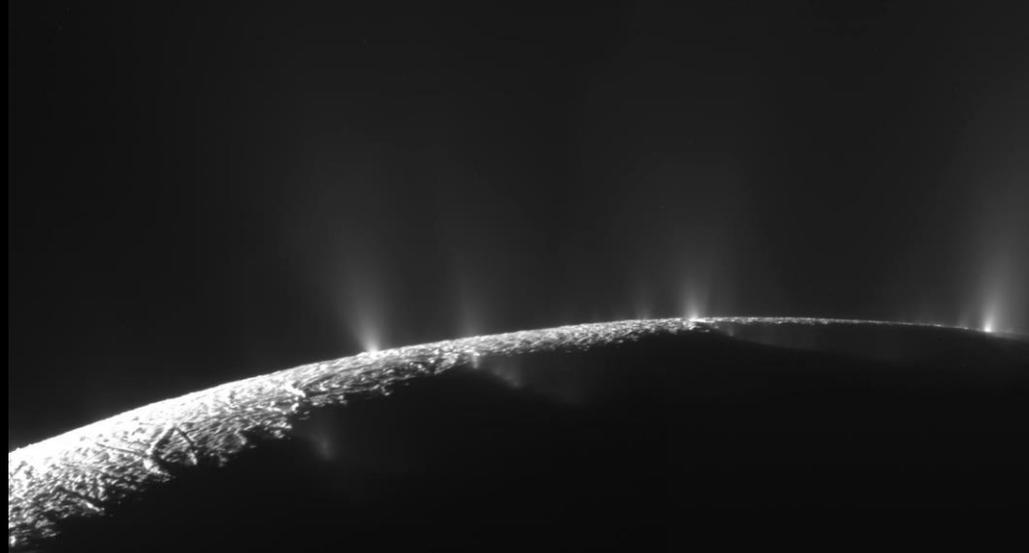
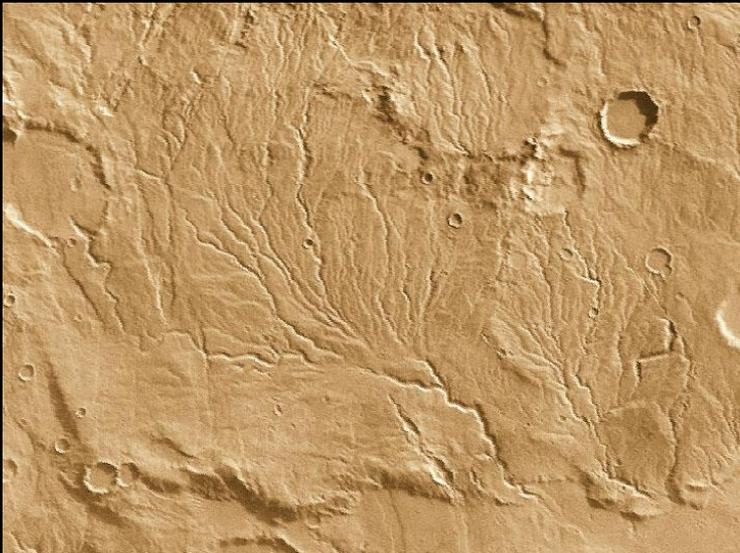
*La nébuleuse d'Orion, véritable  
laboratoire pour les chercheurs.*



# *La zone d'habitabilité : un concept anthropocentrique ?*



- Cette zone d'habitabilité est liée à la masse de l'étoile et à son énergie rayonnée.
- C'est un critère basé sur la vie terrestre qui sous entend que la vie a obligatoirement besoin d'eau.
- Cette notion est valable avant tout pour une vie en surface.
- La température clémente et l'eau liquide à la surface d'une planète, nécessite aussi des conditions particulières : présence d'une atmosphère suffisamment dense (d'un effet de serre dans certains cas) et d'un champ magnétique.
- La zone d'habitabilité évolue au cours de la vie d'une étoile.

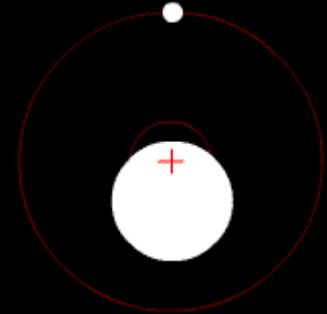


# *Méthodes de détection*



1. **Vitesse radiale**
2. **Transit**
3. **Effet de microlentille gravitationnelle**
4. **Observation directe**
5. **Astrométrie**

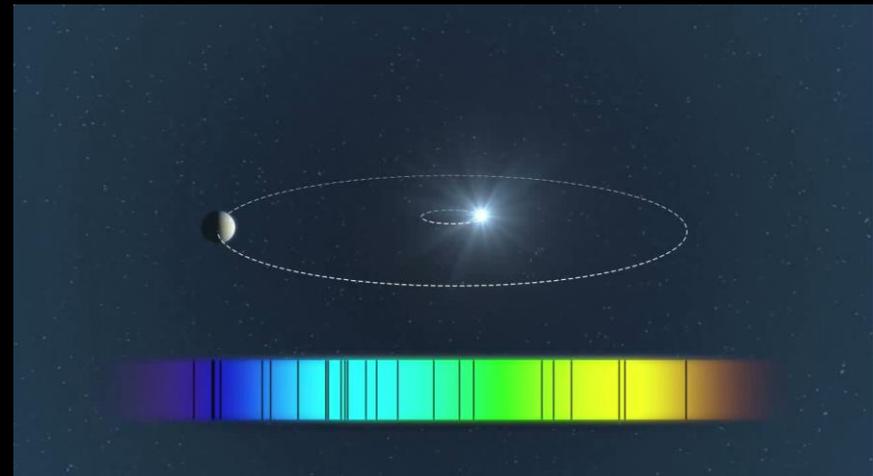
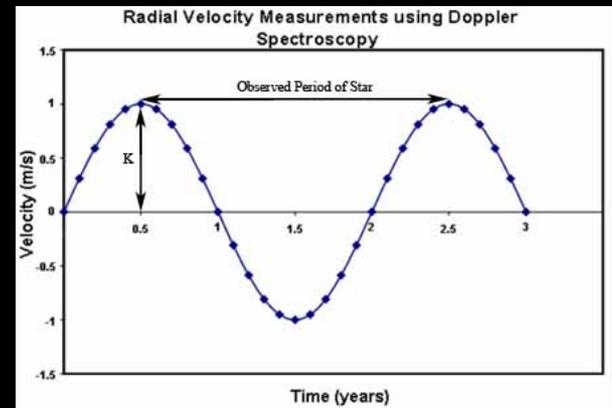
# Méthode des vitesses radiales



- Observation faite par spectroscopie d'une étoile. Grâce à l'effet Doppler-Fizeau, mise en évidence de sa vitesse radiale
- Met en évidence le déplacement du centre de masse d'une étoile entourée de planètes.
- Les spectroscopes actuels sont capables de mesurer des déplacements de 10 m/s, alors que pour les planètes de type terrestres, les déplacements sont de quelques cm/an

## Les limites de cette méthode

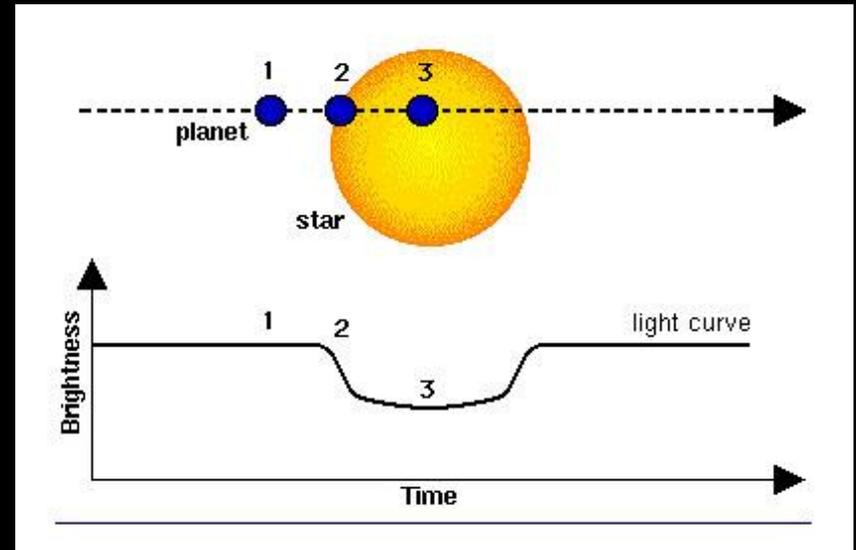
- Vu la sensibilité des détecteurs, cette méthode ne permet que de détecter des planètes géantes, proches de leur étoile.
- Il faut que le plan orbital de la planète soit aligné avec l'observateur.
- Difficilement applicable avec des étoiles variables, dont l'enveloppe de gaz varie de diamètre.



➔ C'est malgré tout la méthode la plus utilisée et qui donne le plus de résultat.

# Méthode des transits

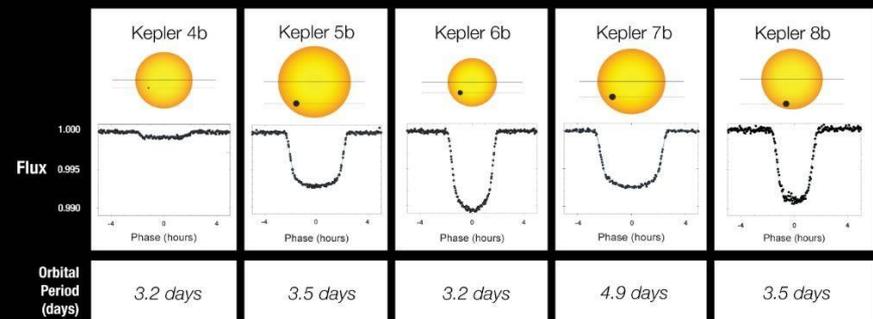
- Observation de l'atténuation de la luminosité de l'étoile, lorsqu'une planète passe devant son étoile.
- Ne nécessite pas des instruments de grand diamètre.
- La baisse de luminosité est environ 1%.
- Une des missions de Corot était d'observer de grands champs d'étoiles à différents moments pour mettre en évidence ces transits. Il peut détecter des baisses de luminosité d'une étoile de  $1/10000^{\text{ème}}$ . Compte tenu de la durée d'observation (6 mois) par champ, Corot ne peut détecter que des planètes proches de leur étoile.
- Possibilité d'utiliser la technique de transit secondaire (la planète passe derrière son étoile).



## Les limites de cette méthode

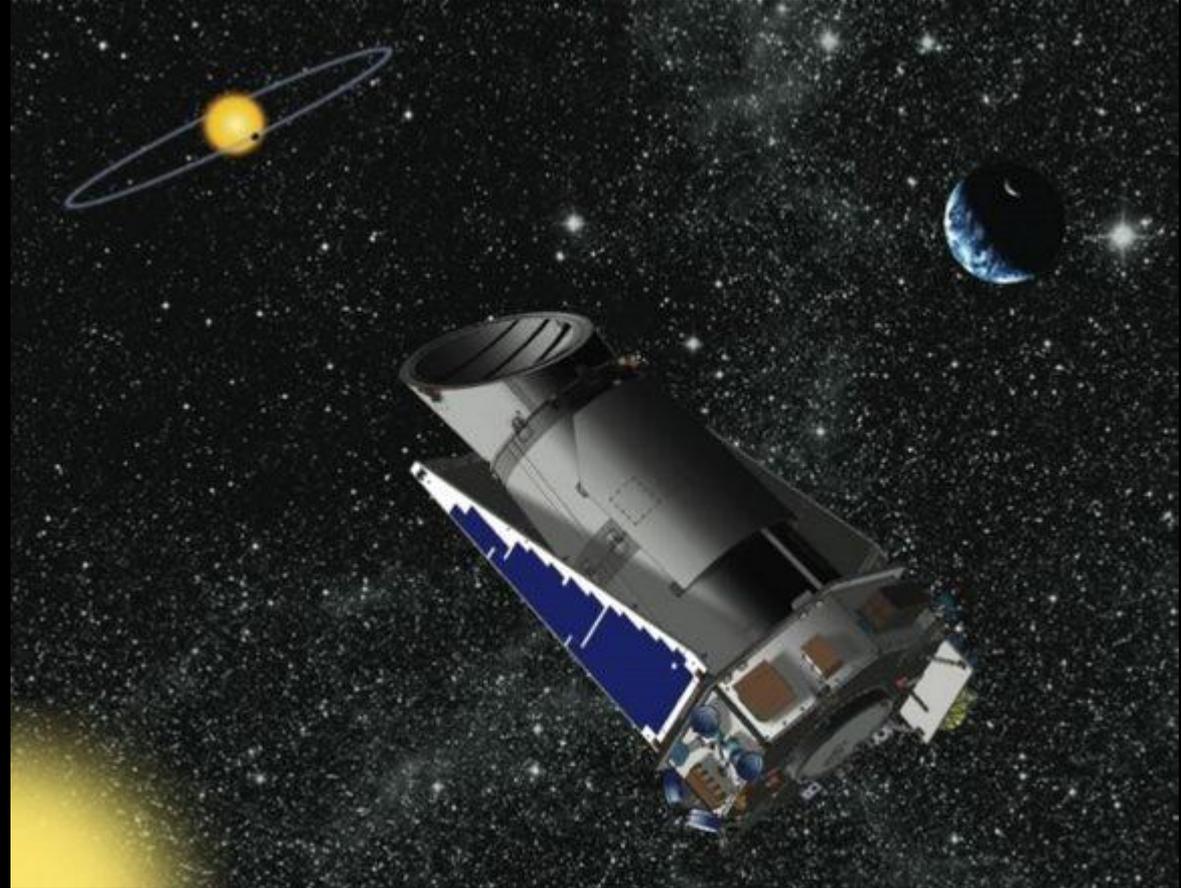
- Les orbites des systèmes planétaires doivent être visibles quasiment par la tranche (on estime à 5 % des étoiles possédant cette caractéristique)
- Le nombre de découverte est limité, car il faut passer beaucoup de temps à observer un même champ stellaire.

## Transit Light Curves



# Le télescope spatial Kepler

- télescope américain, lancé en 2009
- miroir de 1.4 m ; champ de  $12^\circ$  !
- La baisse de luminosité est environ 1%.
- Il observe 150000 étoiles entre les constellations du Cygne et de la Lyre (1/400è du ciel). Il prend une photo toutes les 30 minutes.
- 2013, les responsables de la mission annonce avoir détecté 2740 exoplanètes ! Reste à confirmer !
- 3 passages sont nécessaires pour confirmer une découverte.

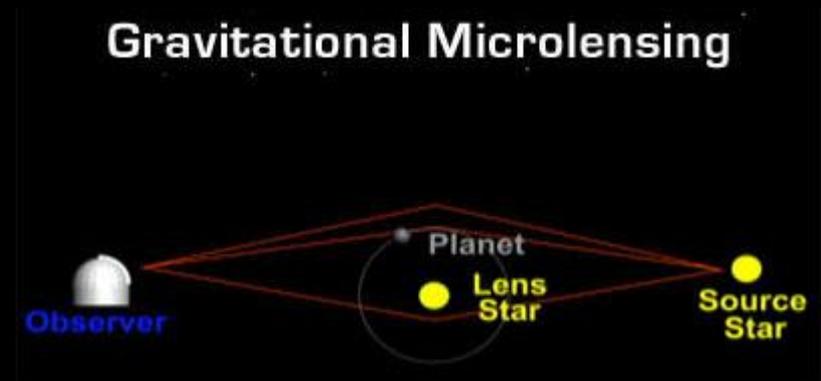


# Méthode de lentille gravitationnelle

- Utilise les effets de la gravité : un objet massif déforme l'espace autour de lui. Un astre situé derrière verra sa lumière « courbée » et amplifiée. Cette courbure sera amplifiée par la présence de la planète. A partir de là, on détermine la masse de la planète
- Permet de détecter des planètes de plus petites tailles et plus éloignées de leur étoile.
- Permet de détecter des exoplanètes autour d'étoiles lointaines.

## Les limites de cette méthode

- Nécessite un alignement parfait entre deux étoiles, ce qui est rare.

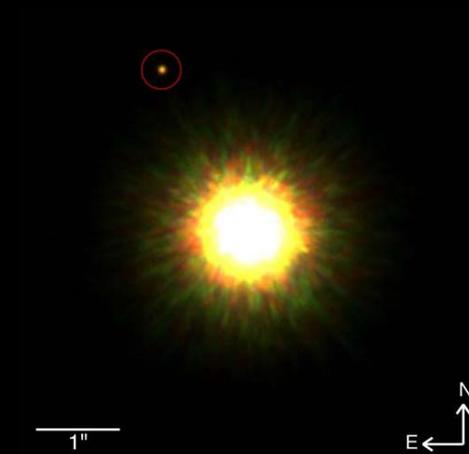
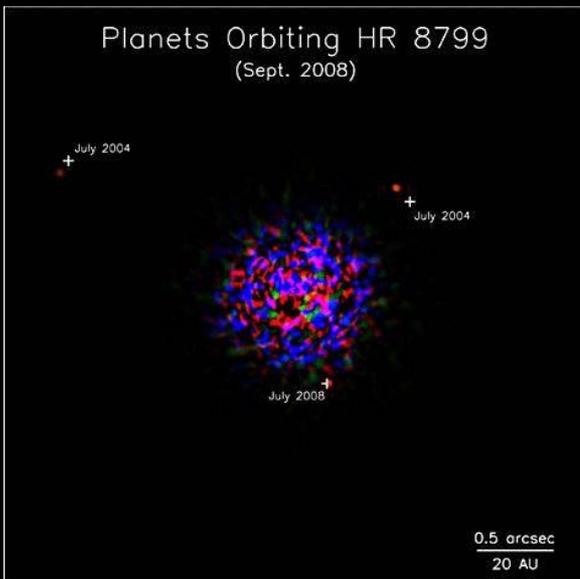
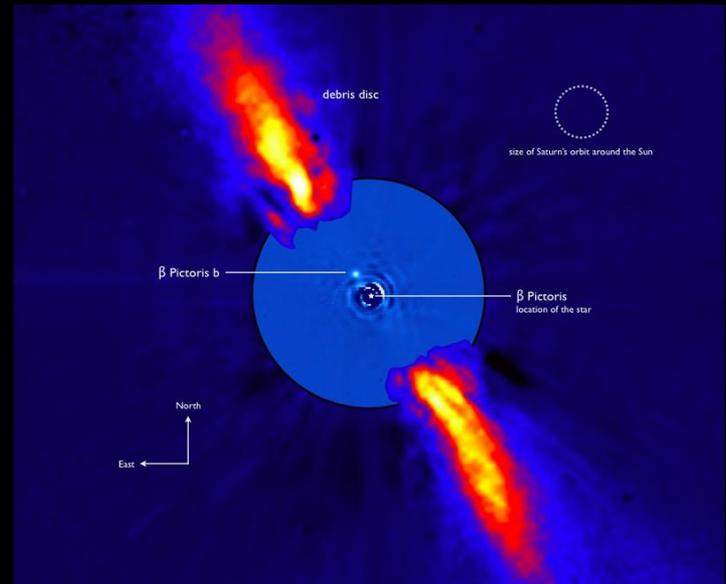


## Méthode par observation directe

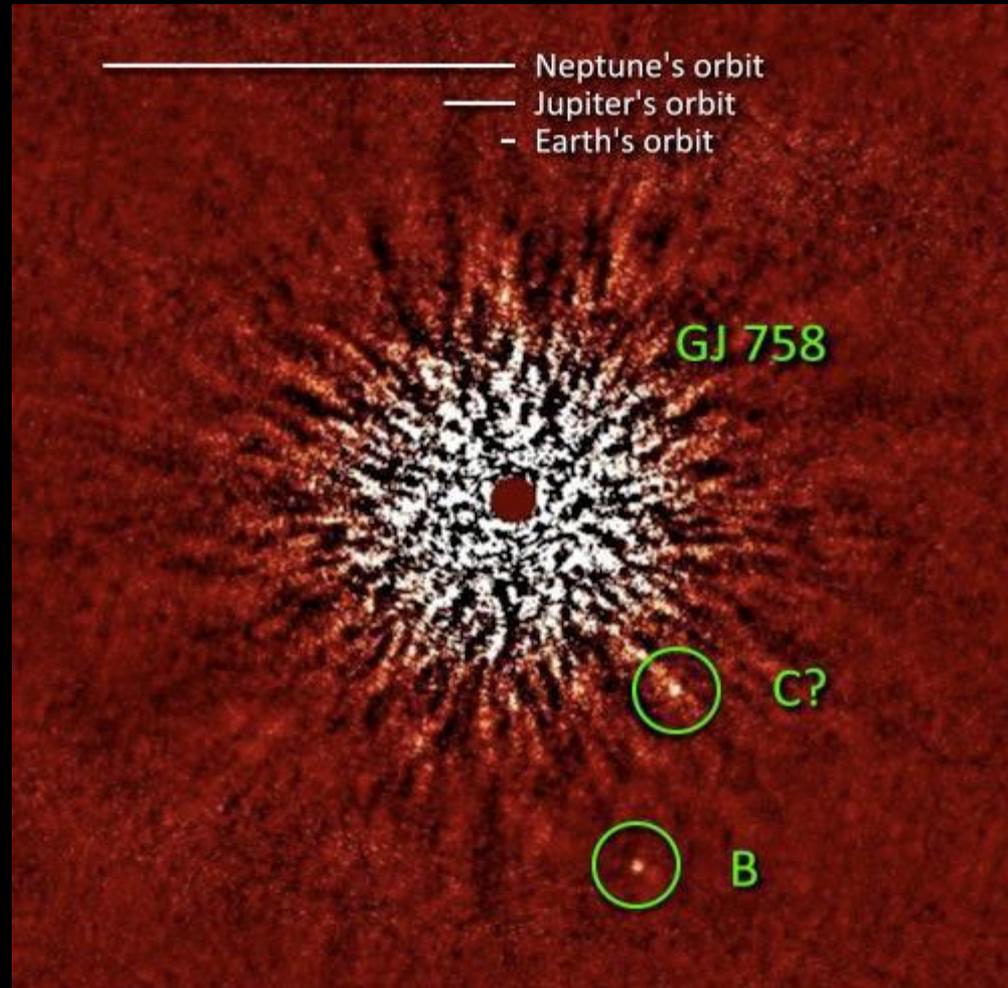
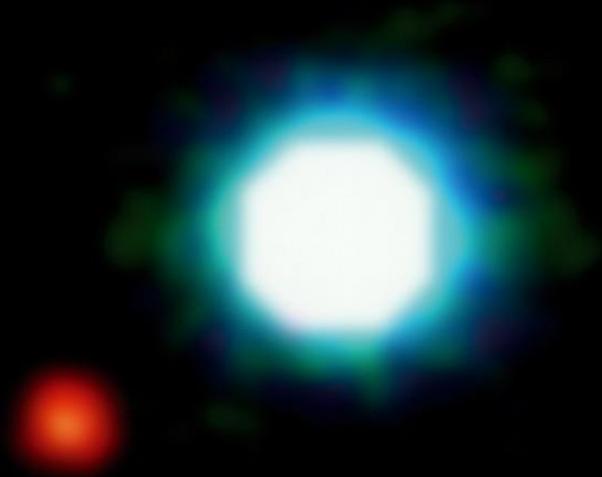
- Utilise les techniques d'interférométrie stellaire et d'optique adaptative
- Possible seulement autour d'étoiles du type naine rouge ou naine brune.
- Aujourd'hui, très peu de découvertes et il est difficile d'affirmer que les photos prises sont bien des exoplanètes.

### Les limites de cette méthode

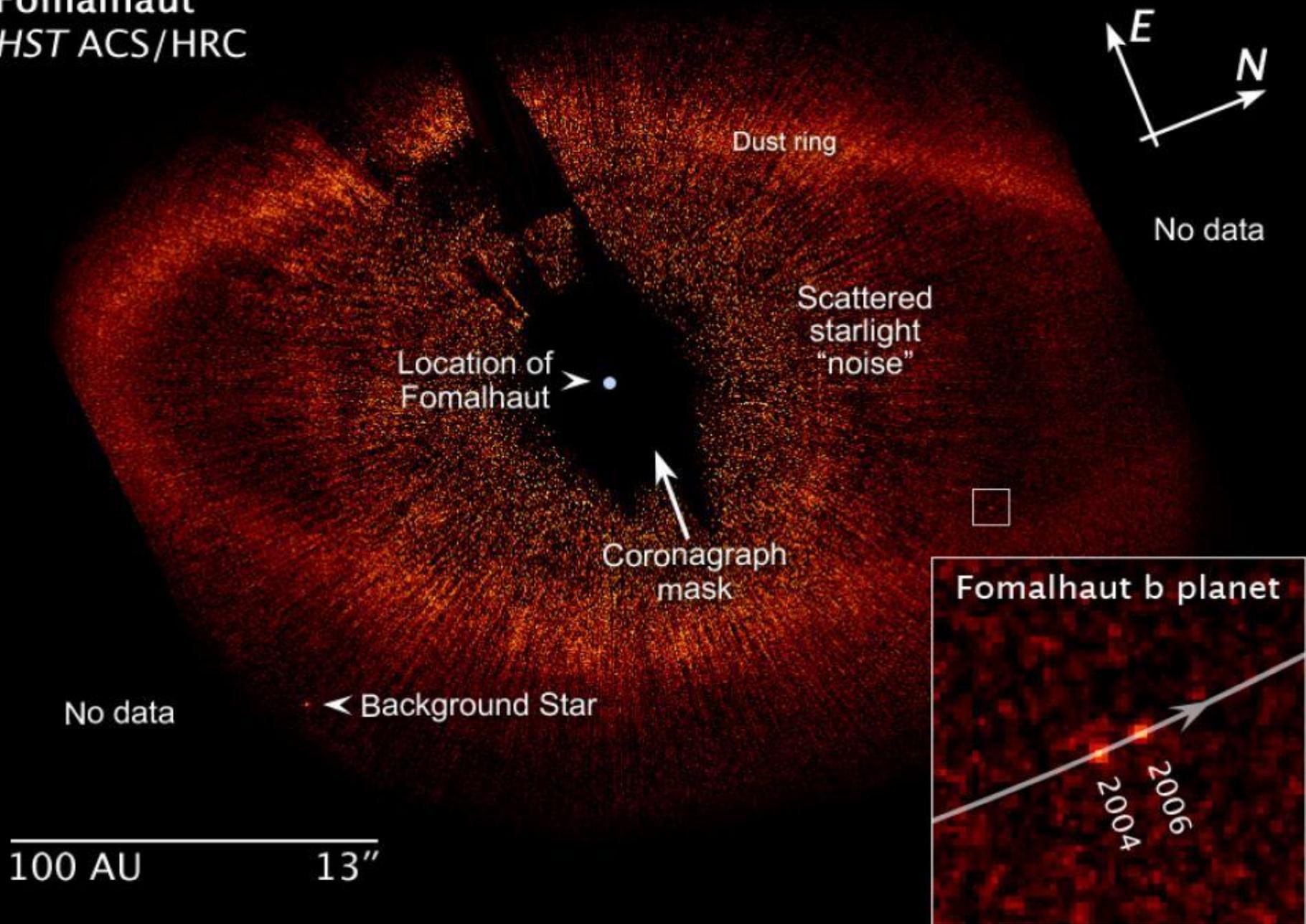
- Énorme différence d'éclat entre une étoile et une planète
- Distance angulaire entre l'étoile et une planète extrêmement faible.

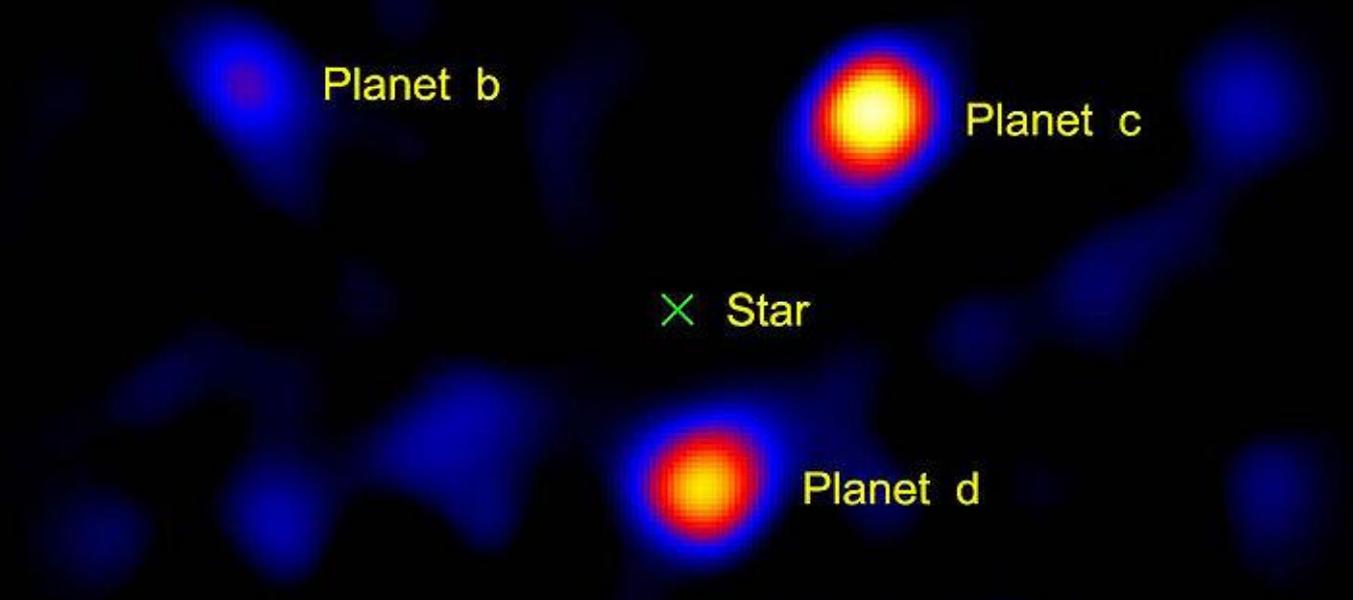


# Exoplanètes autour d'étoiles ????



Fomalhaut  
HST ACS/HRC





Planet b

Planet c

X Star

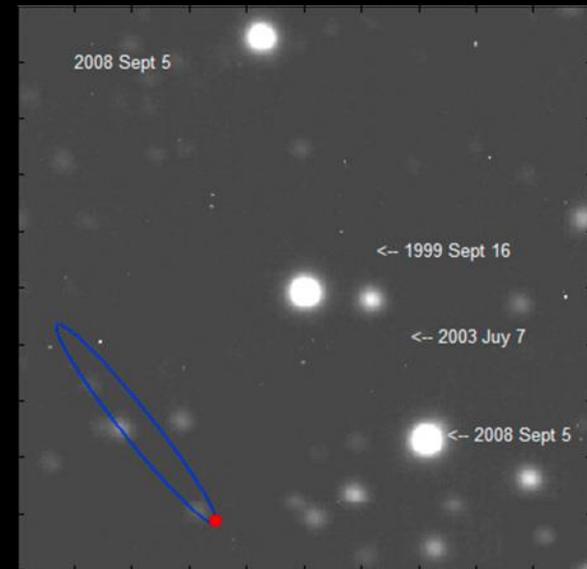
Planet d

# Méthode par astrométrie

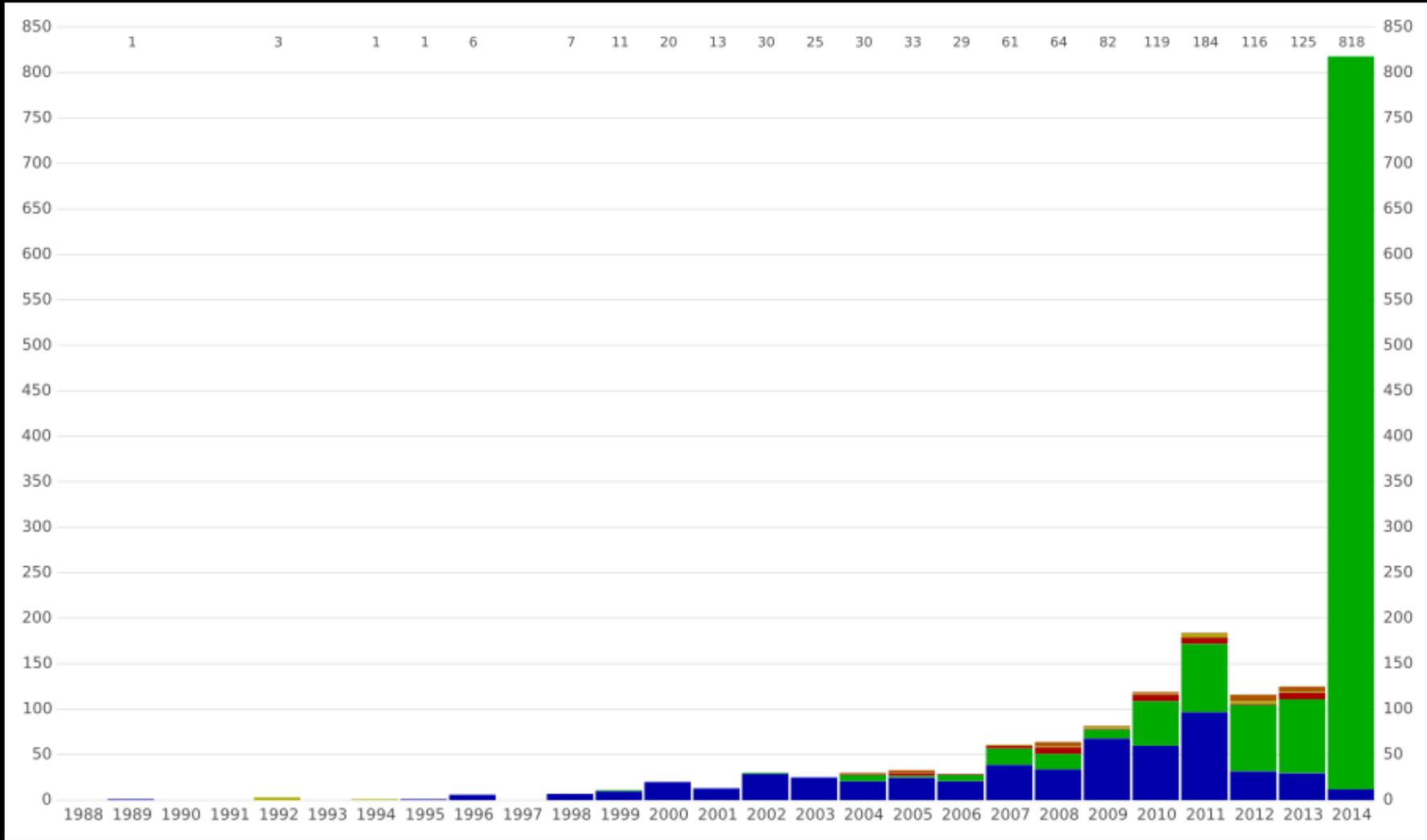
- Consiste à observer le déplacement propre de l'étoile au sein de la galaxie
- Si une ou plusieurs planètes tournent autour d'une étoile, celle-ci ne se déplace pas en ligne droite.
- Technique connue depuis très longtemps, mais dont les limites techniques ont empêchées l'exploitation.

## Les limites de cette méthode

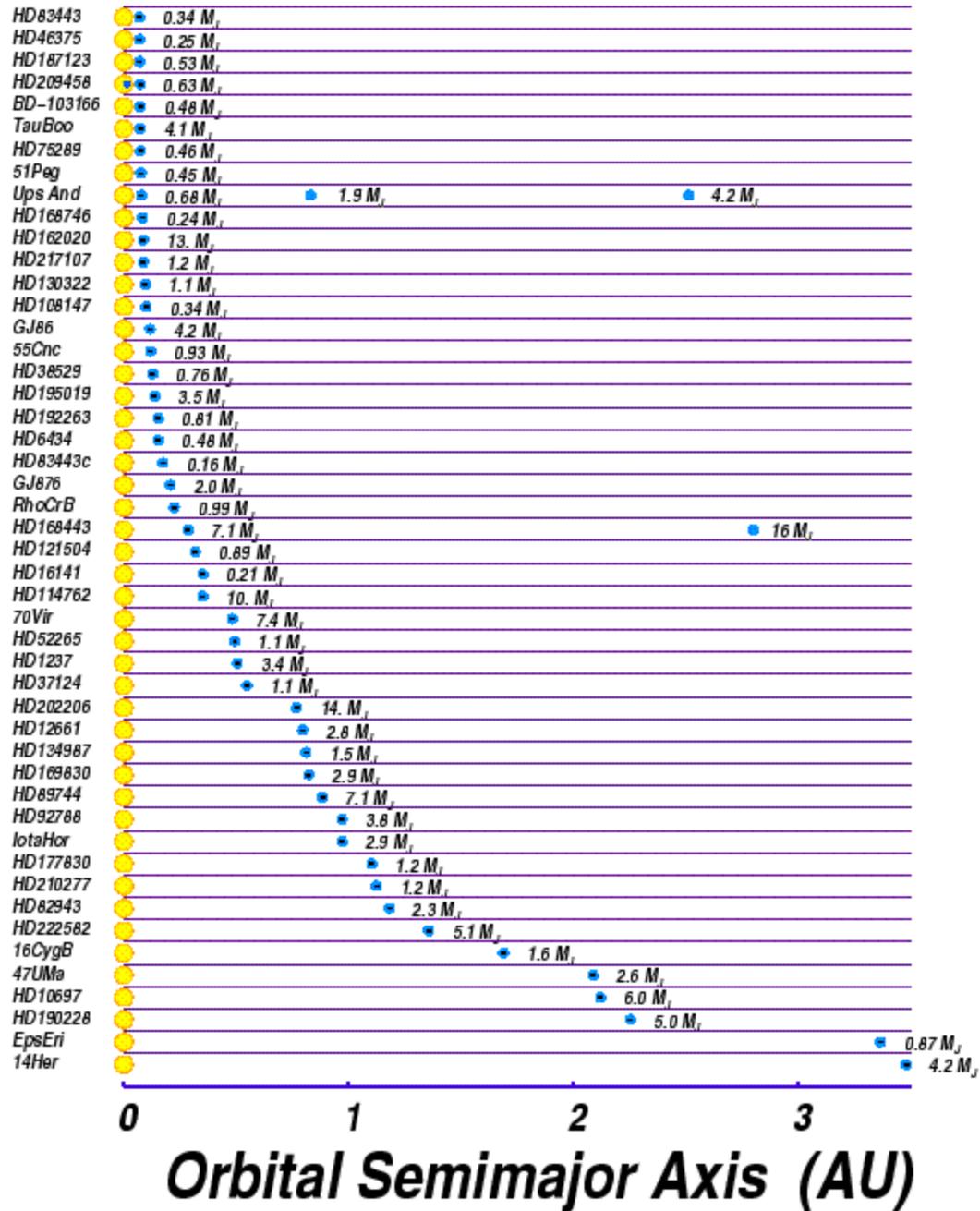
- Nécessite des relevés d'une très grande précision, vu les infimes variations.



# Nombre de planètes découvertes par ces différentes techniques



En **bleu**, découverte par les vitesses radiales, en **vert** par transit, en **rouge**, en observation directe et en **orange** par microlentilles.



# PLANETS AROUND NORMAL STARS

## INNER SOLAR SYSTEM

MERCURY

VENUS

EARTH

MARS

47 UMa

2.4 MJup

51 Peg

0.47 MJup

55 Cancer

0.84 MJup

Tau Bootis

3.8 MJup

Upsilon Andromedae

0.68 MJup

70 Vir

6.6 MJup

HD 114762

10 MJup

16 Cyg B

1.7 MJup

Rho Cr B

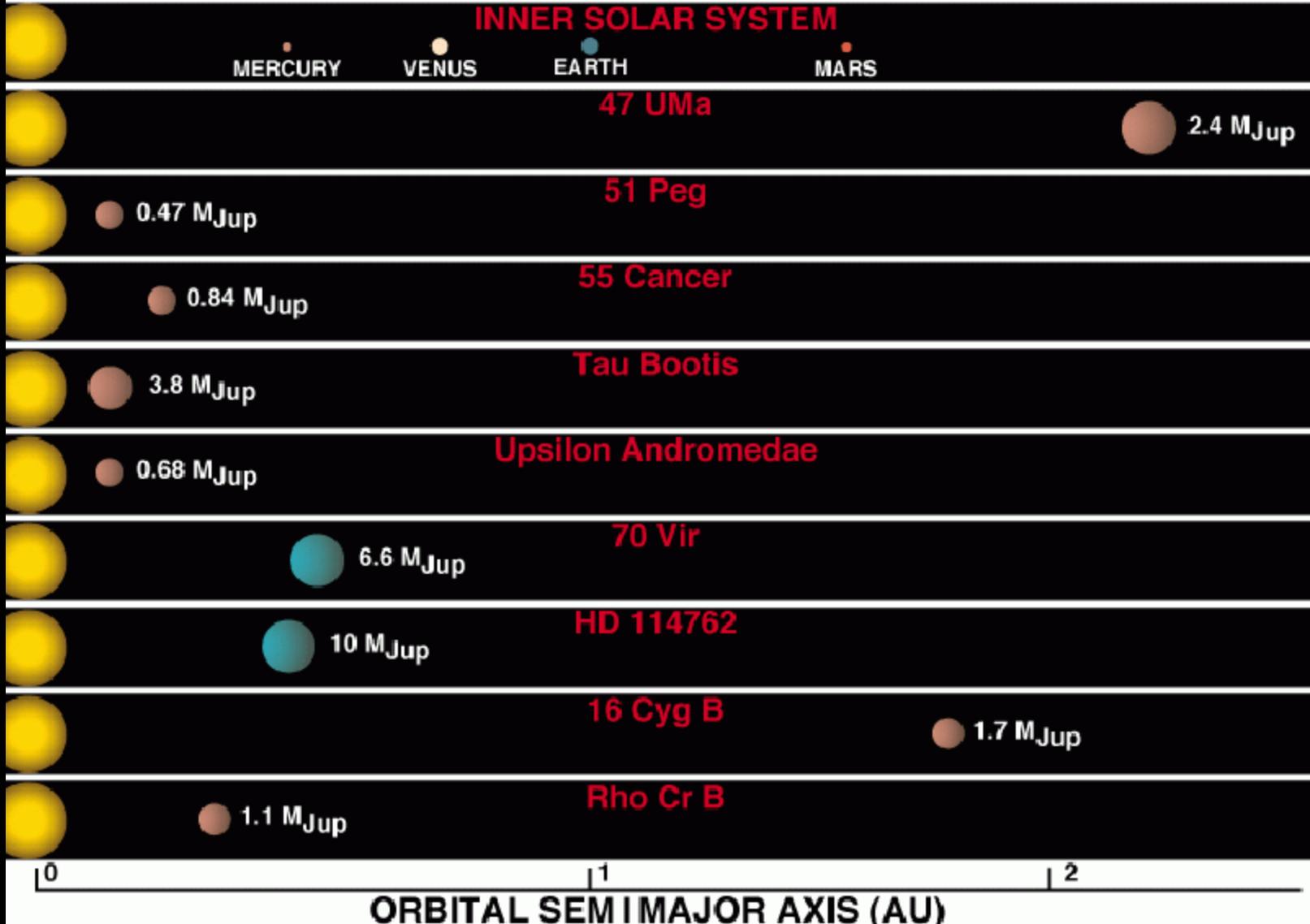
1.1 MJup

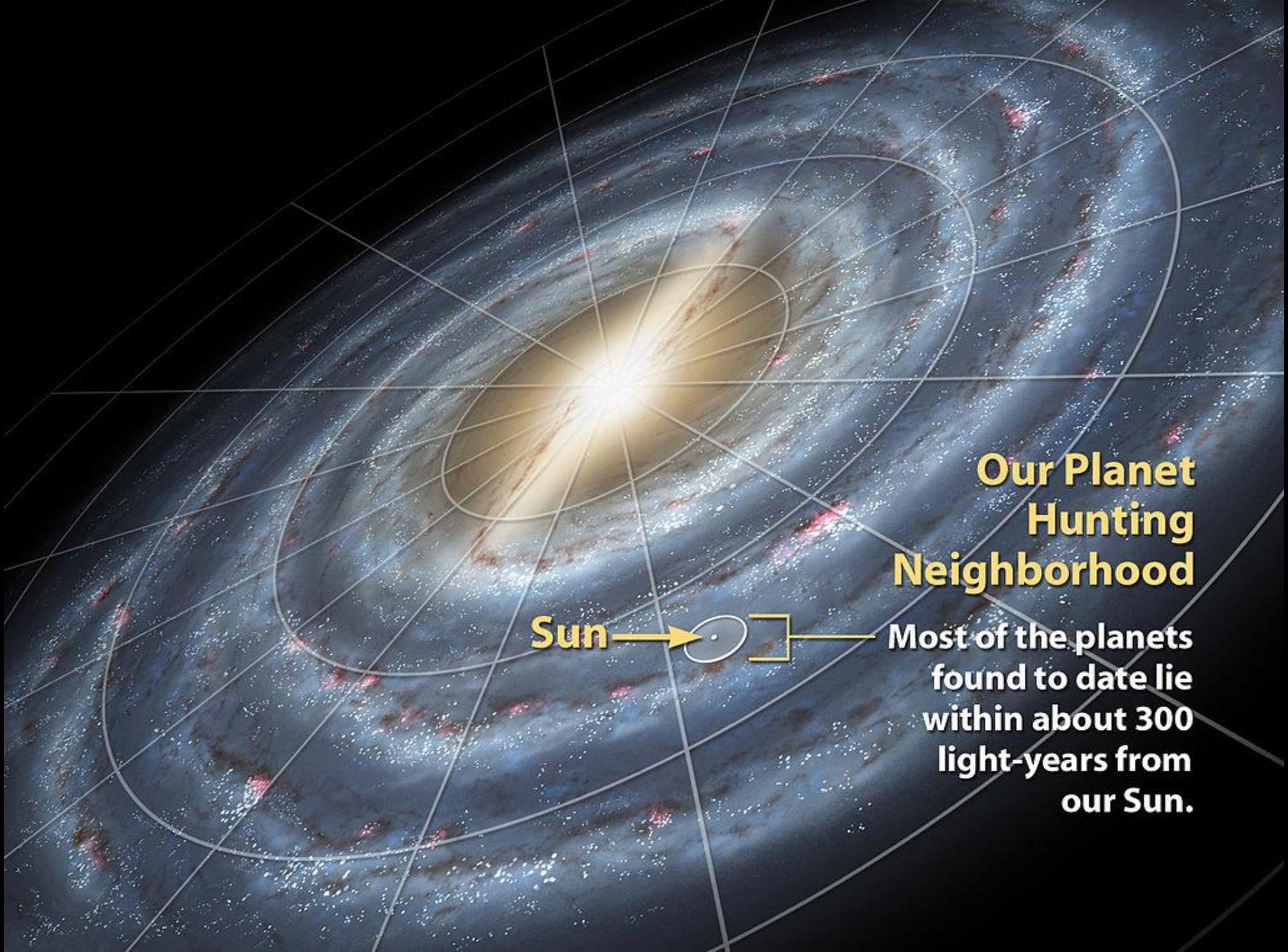
0

1

2

ORBITAL SEMI MAJOR AXIS (AU)





## **Our Planet Hunting Neighborhood**

**Sun** →



Most of the planets  
found to date lie  
within about 300  
light-years from  
our Sun.

## Quelques exoplanètes particulières...

Képler 22b : située à 600 a-l de nous

2.4 x la taille de la Terre

Période de révolution 290 j.

UCF- 1.01 : distance 33 a-l , 1/3 de la masse de la Terre

Distance à son étoile : 2.7 millions de km

Période de révolution : 1.4 j

Température de surface : 600 °C

Kepler 36a : distance 1200 a-l

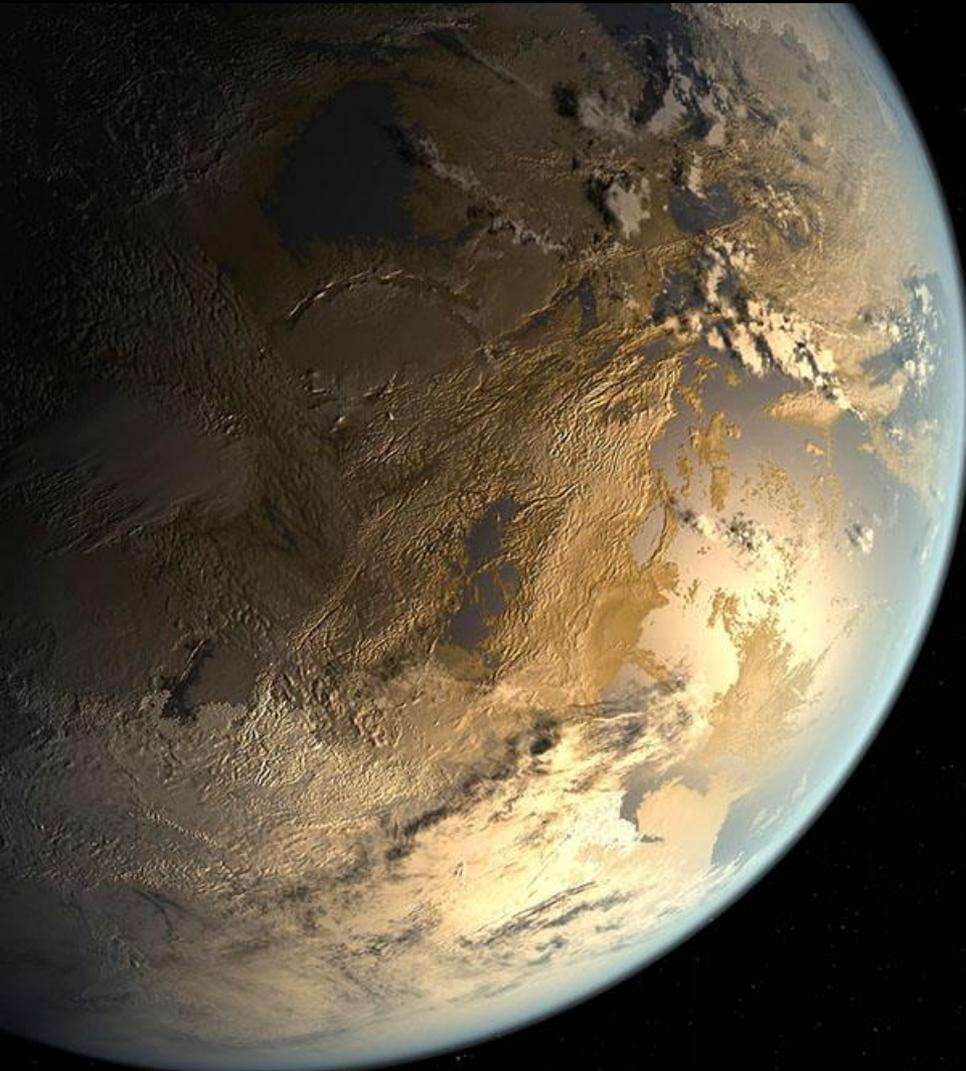
Une planète rocheuse de 1.5 x la masse de la Terre et une planète gazeuse de la masse de Neptune. Cette dernière orbite à 2 millions de km l'une de l'autre !

Système de Tau Ceti : 12 a-l

Cinq planètes, dont la masse serait comprise entre 2 et 6.6 masses terrestres, qui gravitent autour d'une étoile similaire au Soleil. Deux seraient dans la zone habitable.



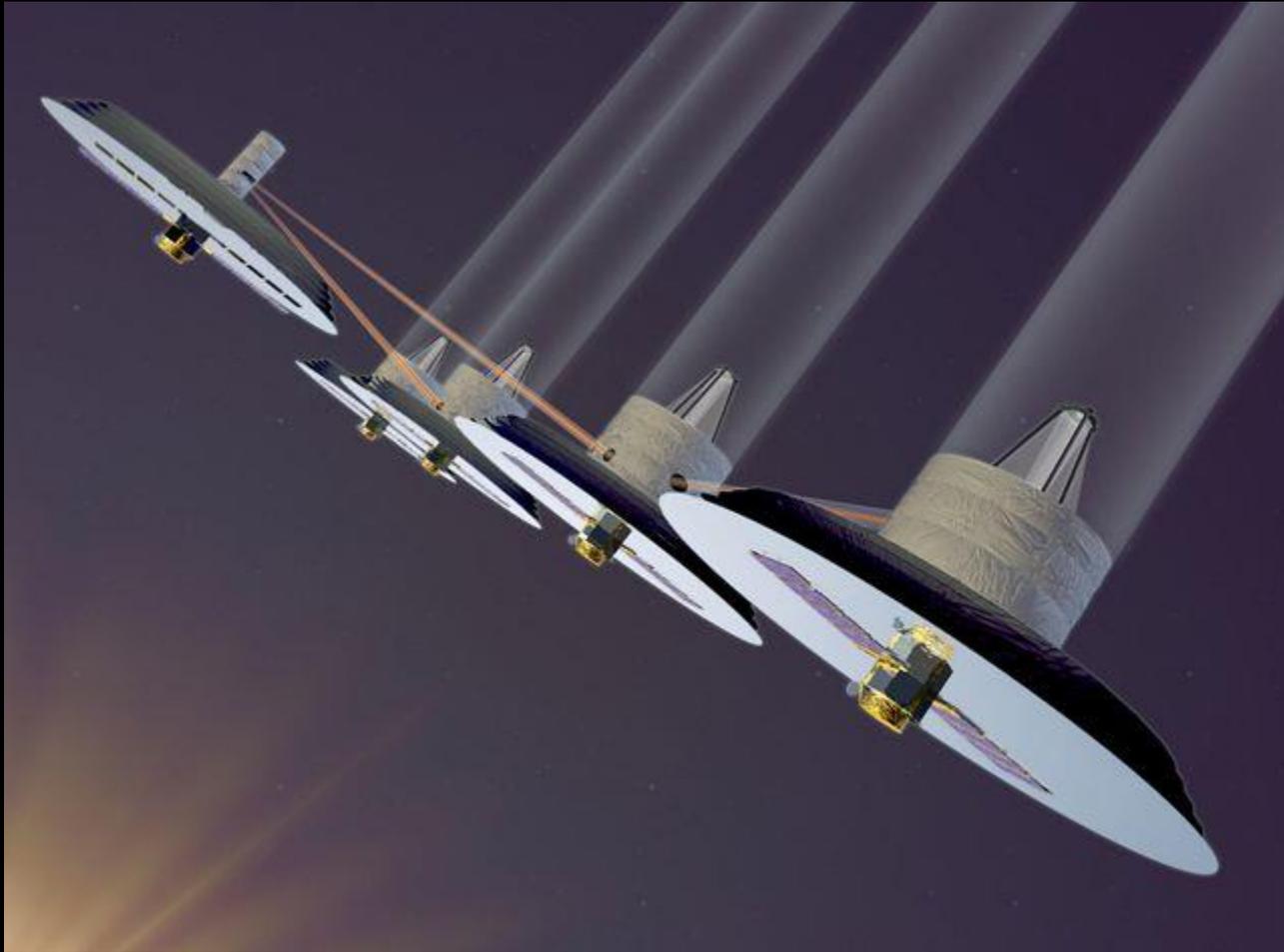
## Système Kepler 186



Kepler 186 est une naine rouge deux fois moins massive que le Soleil, située à environ 500 a-l.

Elle posséderait au moins 5 exoplanètes. En avril 2014, on annonce la découverte de 187f, une planète solide de 1.1 masse terrestre, qui orbite à 50 millions de km de son étoile, en 130 jours et qui se situe dans la zone d'habitabilité.

# Dans l'avenir, quelles techniques ?

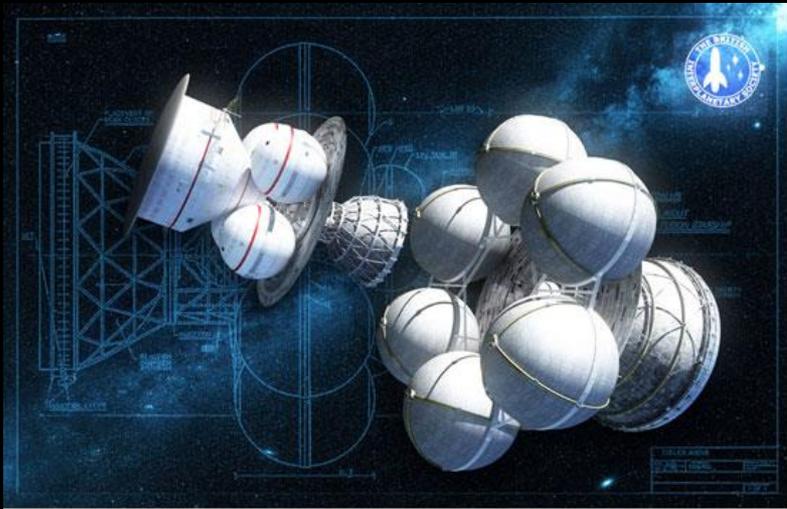


Vers 2030, des hypertélescopes infrarouges dans l'espace...

# Voyager vers les étoiles...



**Projet Icare** : Propulsion fusion nucléaire pour atteindre 10 % de la vitesse de la lumière et permettre un voyage vers les étoiles les plus proches en moins de 60 ans.



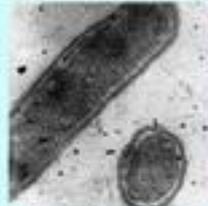
**Projet Dédale** (1973 - 1978) : 190 m de haut, 50000 tonnes de carburant pour atteindre 12 % de la vitesse de la lumière.

44 ans de voyage pour atteindre l'étoile de Barnard

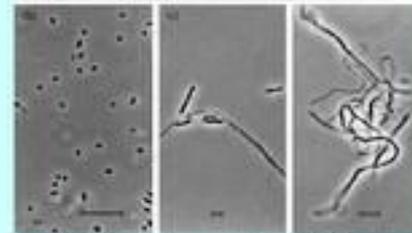


*Et la vie ?....*

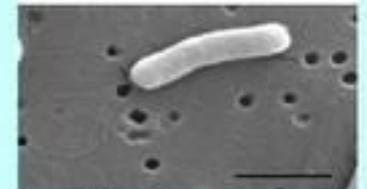
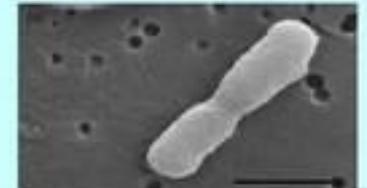
# Les extrêmophiles



*Caminicella  
sporogenes*



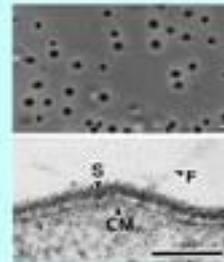
*Marinitoga piezophila*



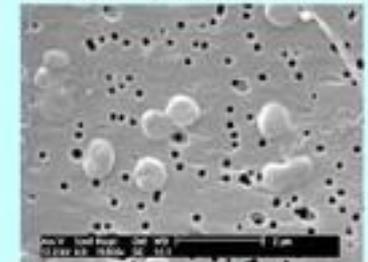
*Caminibacter  
hydrogenophilus*



*Thermodesulfatator  
indicus*



*Methanococcus vulcanius*



*Thermococcus atlanticus*

Certaines bactéries sont capables de résister à des températures allant jusqu'à 110 °C et meurent (de froid) en dessous de 80 °C !

Elles affectionnent les pressions de 520 bars et peuvent se reproduire jusqu'à 1200 bars !

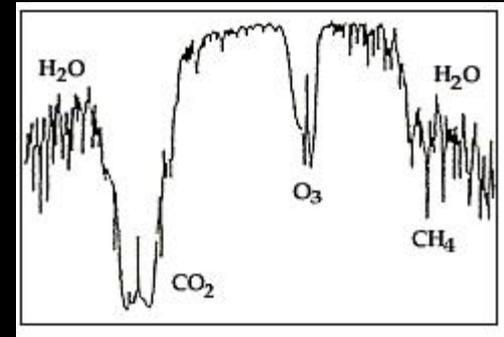
# Identifier les biosignatures

Ces signaux pourraient être détectées dans les années à venir, avec les futures générations de télescopes spatiaux dédiés à la recherche d'exoplanètes.

Il serait possible de détecter, dans le spectre d'une exoplanète, les éléments suivants :

- Oxygène
- Oxyde d'azote
- Ozone
- Méthane
- Eau

Mais, les planètes habitables sont géologiquement actives et c'est la raison pour laquelle elles peuvent créer des entités non biologiques simulant des biosignatures.



# *L'équation de Drake*

$$N = R^* \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

$N$  est le nombre de civilisations extraterrestres dans notre galaxie avec lesquelles nous pourrions entrer en contact.

$R^*$  est le nombre d'étoiles en formation par an dans notre galaxie,

$f_p$  est la fraction de ces étoiles possédant des planètes,

$n_e$  est le nombre moyen de planètes par étoile potentiellement propices à la vie,

$f_l$  est la fraction de ces planètes sur lesquelles la vie apparaît effectivement,

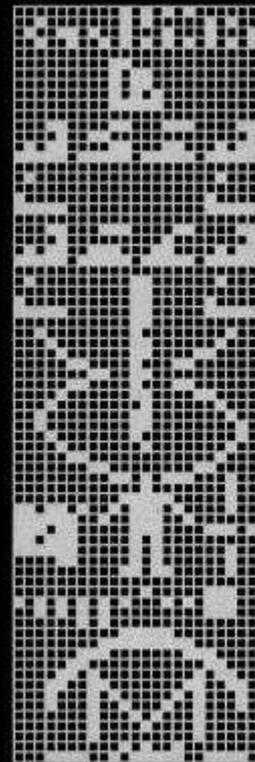
$f_i$  est la fraction de ces planètes sur lesquelles apparaît une vie intelligente,

$f_c$  est la fraction de ces planètes capables et désireuses de communiquer,

$L$  est la durée de vie moyenne d'une civilisation.



# Communiquer ?



Numbers 1 to 10, reading right to left

Atomic numbers of key biological elements

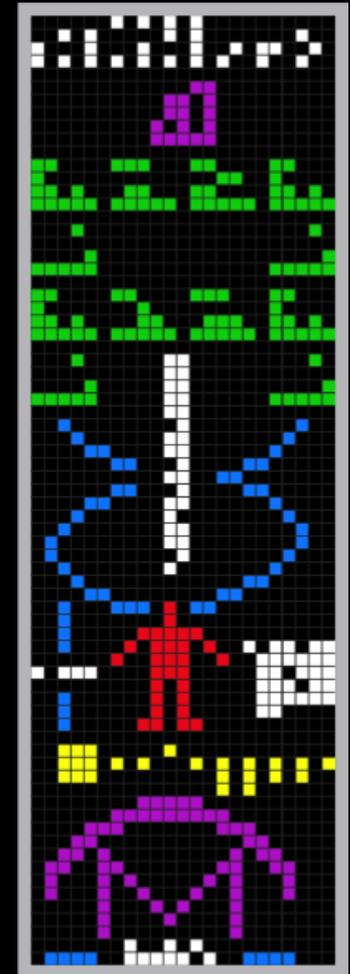
Formulas for sugars and bases in nucleotides of DNA

Double helix of DNA. Vertical bar indicates number of nucleotides in DNA

Human figure, height of human (right), human population (left)

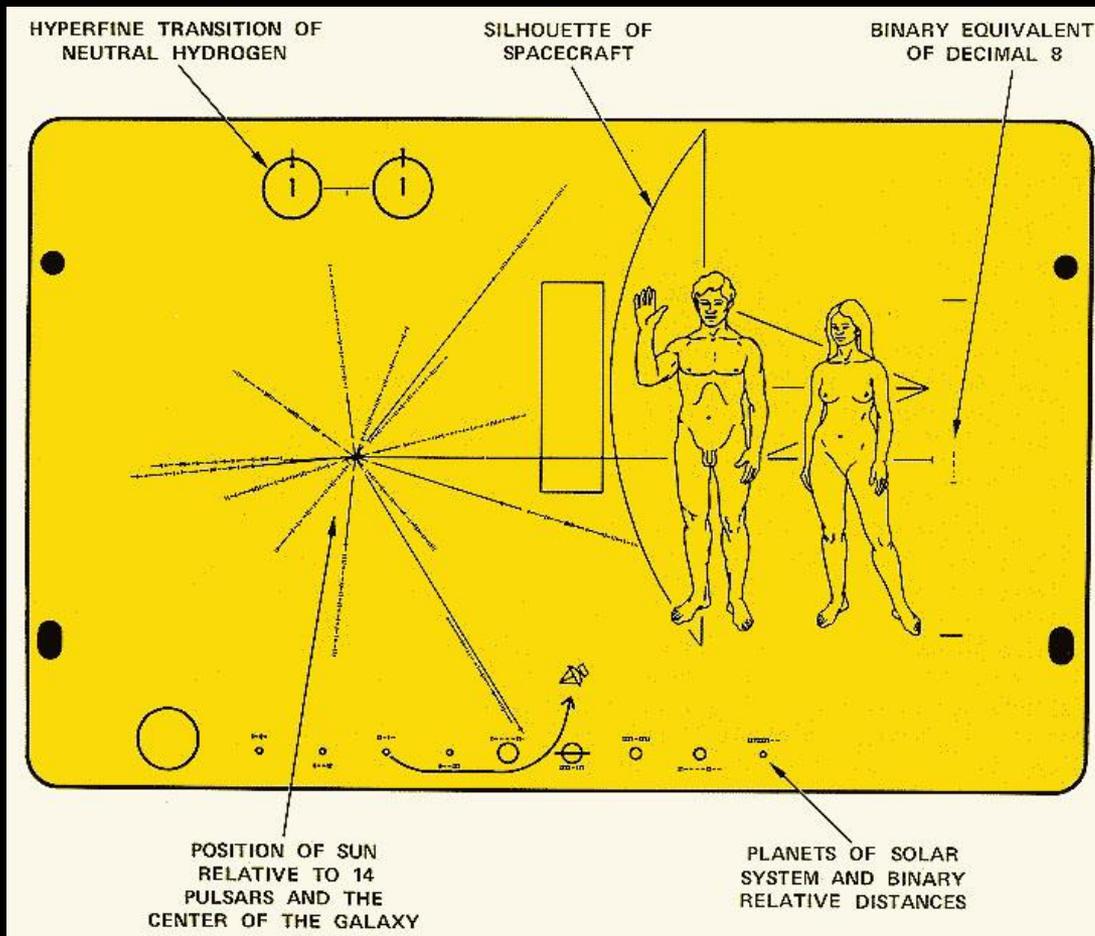
Solar System, with Earth displaced upward

Arecibo dish, with diameter

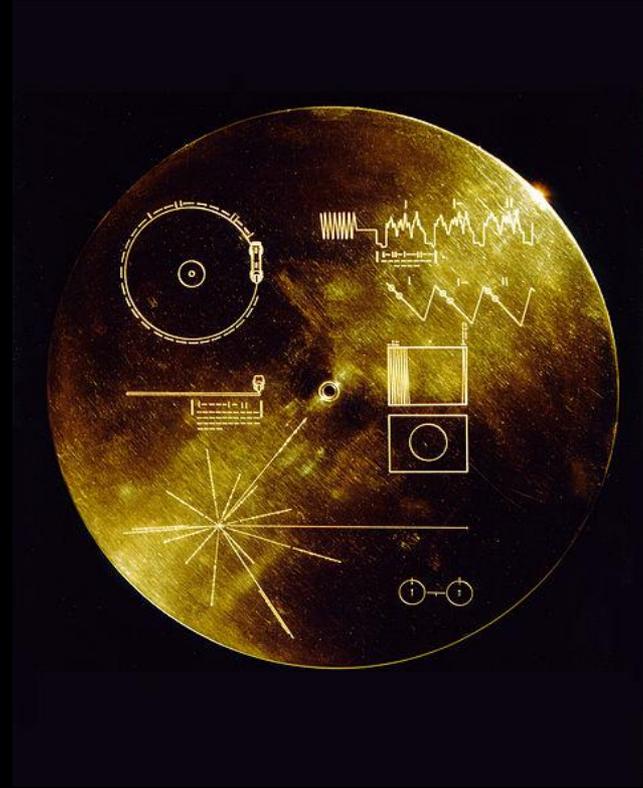


*« La preuve qu'il y a des êtres intelligents ailleurs que sur Terre est qu'ils n'ont jamais essayé de nous contacter. » Calvin & Hobbes*

# Plaques embarquées sur les sondes Pionner 10 et 11



# Les disques de Voyager 1 et 2



110 minutes d'enregistrement

« bonjour » en 55 langues

116 images et illustrations de la Terre