

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – SOMMES-NOUS SEULS ?

Vincent Minier

CEA/Irfu, Laboratoire AIM Paris Saclay

Université de Nantes, Centre François Viète

Email: vincent.minier@cea.fr

Site Web: <http://explornova.cea.fr/cours>



UNIVERSITÉ DE NANTES



22 novembre 2013

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES

5 séances

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
2. Le cycle de la naissance des étoiles.
3. Les planètes naissent dans un disque.
4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs.
5. Sommes-nous seuls ? Imaginaire (représentations) et science (connaissances). Ex: Nébuleuses, Exoplanètes.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

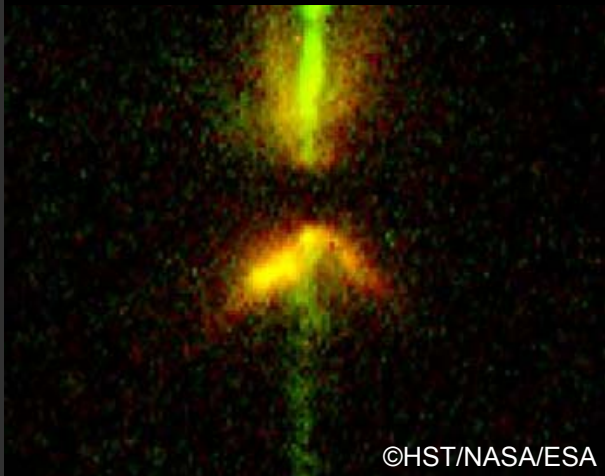
Séance #3

3. Les planètes naissent dans un disque.

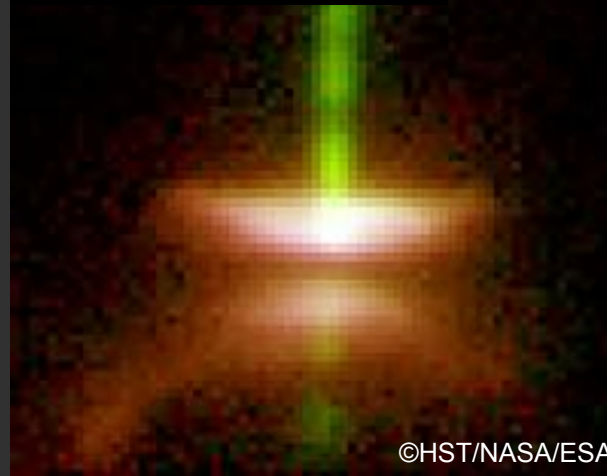
- A. Disque protostellaire.
- B. Disque protoplanétaire.
- C. Disque de débris.
- D. Le système solaire.
- E. Les autres systèmes planétaires.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

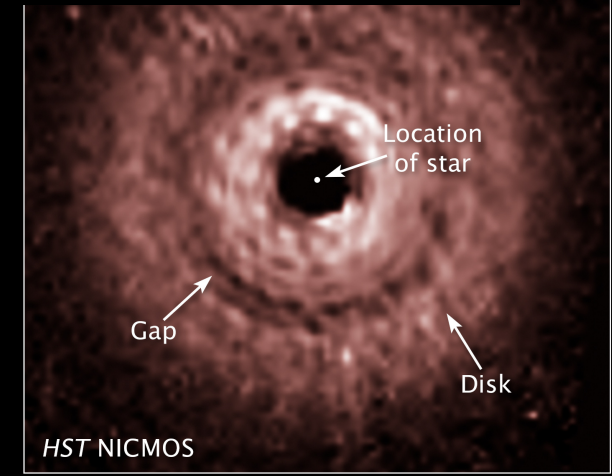
Étoile en formation
 $10^4 - 10^5$ ans



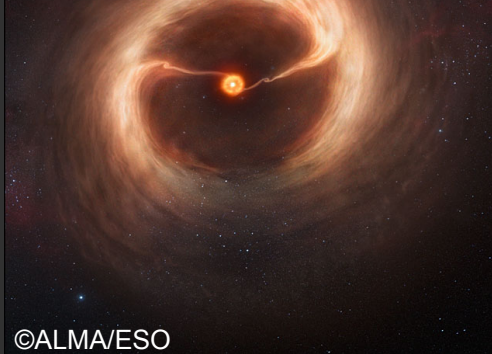
Disque d'accrétion
 $10^5 - 10^6$ ans



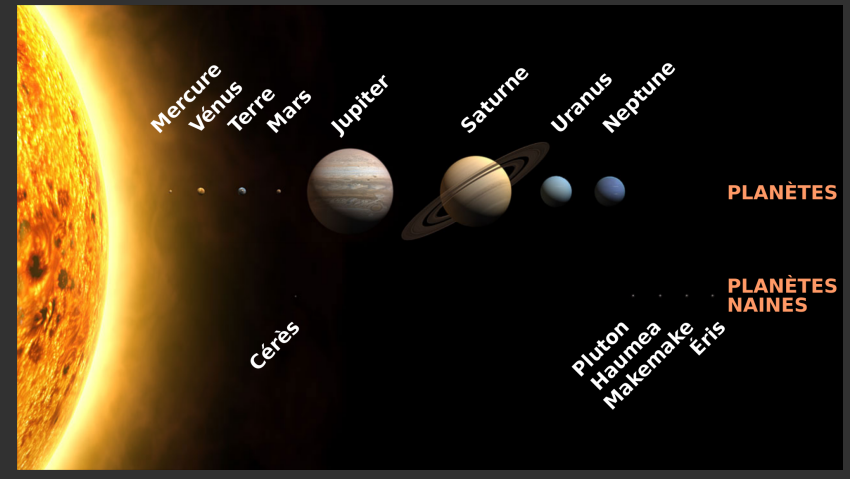
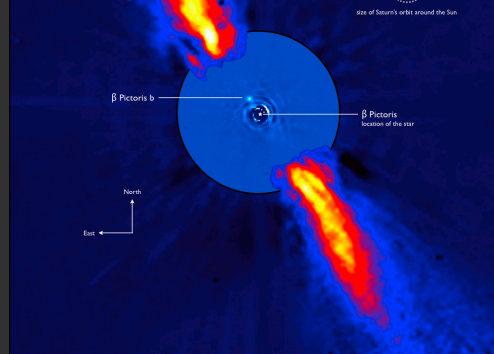
Disque protoplanétaire
 $10^6 - 10^7$ ans



Formation de
planètes géantes

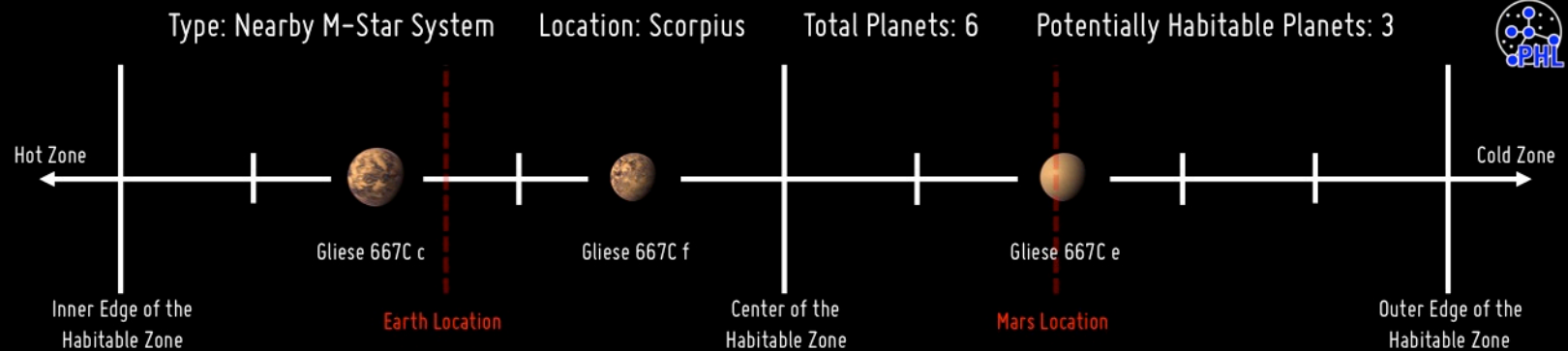


Disque de débris
 $10^7 - 10^9$ ans

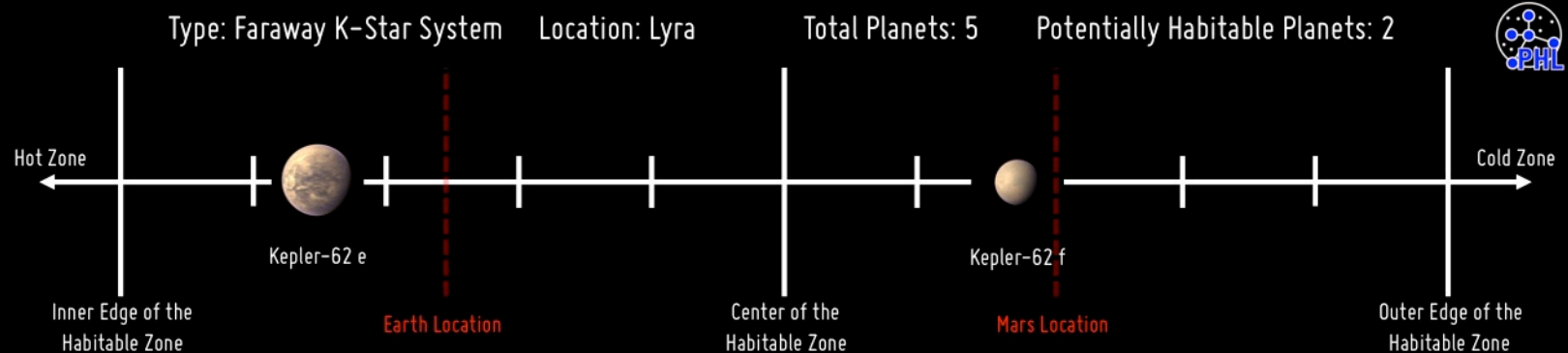


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

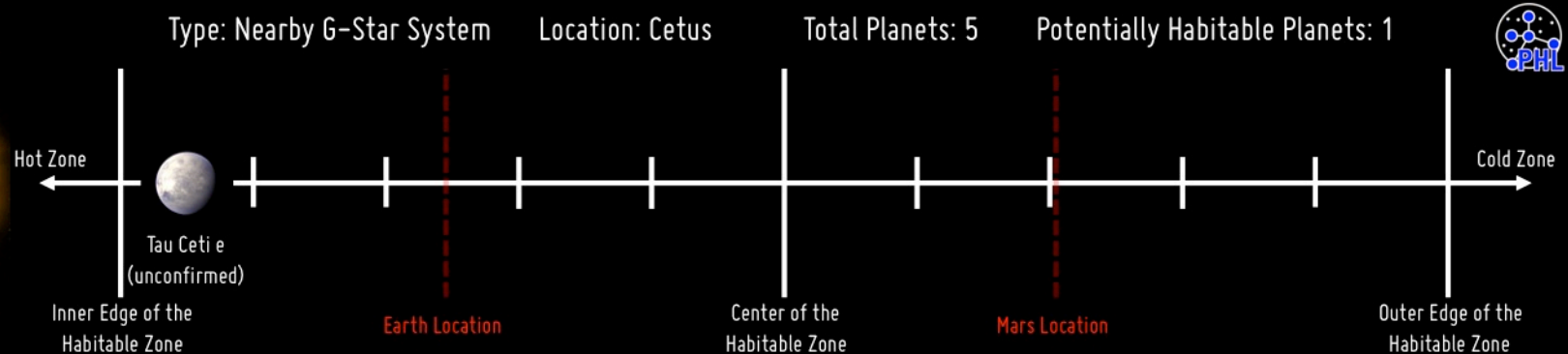
Gliese 667C



Kepler-62

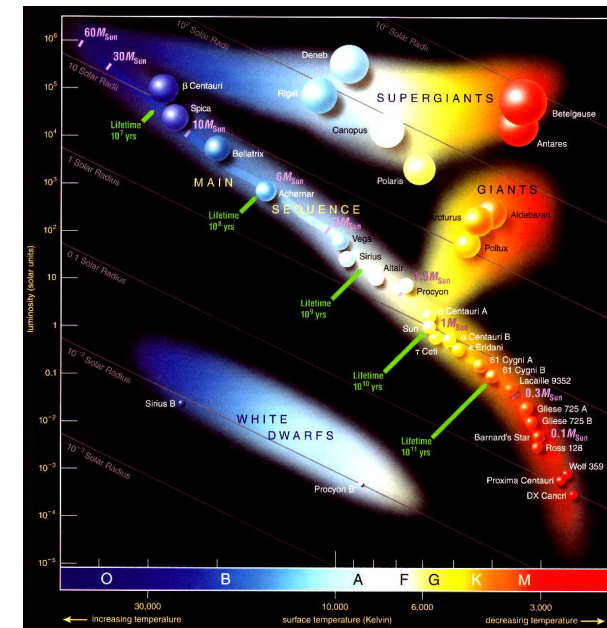
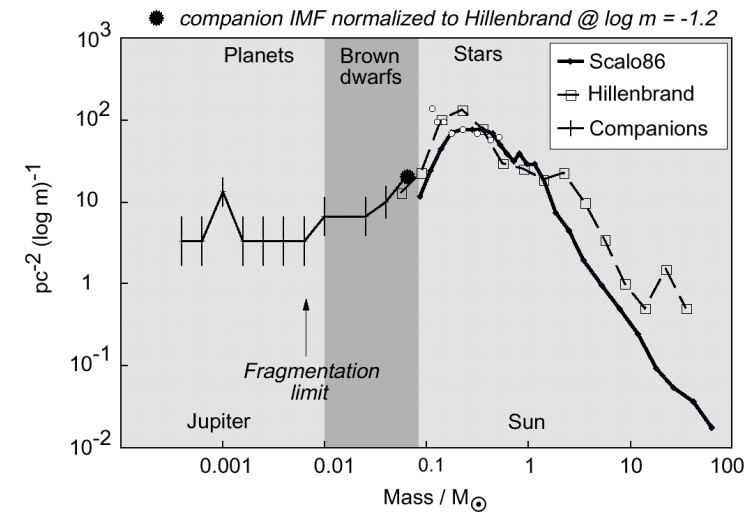


Tau Ceti



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

- 100 milliards de galaxies
- 100 milliards d'étoiles par galaxie
- Classification des étoiles par masse/luminosité:
O, B, A, F, G(soleil), K, M(naine rouge), naine brune.
- Fonction de masse initiale des étoiles à la naissance (IMF): plus d'étoiles de type M que de type naine brunes ou OB. 80% étoiles de type G-K-M, surtout M.
- Durée de vie d'une étoile dépend de sa masse:
OB (1-10 Md ans), G-K-M (1-20 Md ans).
→ Grande proportion d'étoiles M dans l'univers.
- Soleil – Terre (age: 4,6-4,5 Md ans)
- Emergence de la vie: il y a ~3 Md ans à ~1 Md ans pour notre espèce)
→ Privilégie les étoiles de durée de vie longue



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.

Séance #4

4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

- A. Les exoplanètes.
- B. La zone circumstellaire habitable.
- C. La composition chimique en élément lourd.
- D. Le champ magnétique.
- E. Combien d'autres mondes ?

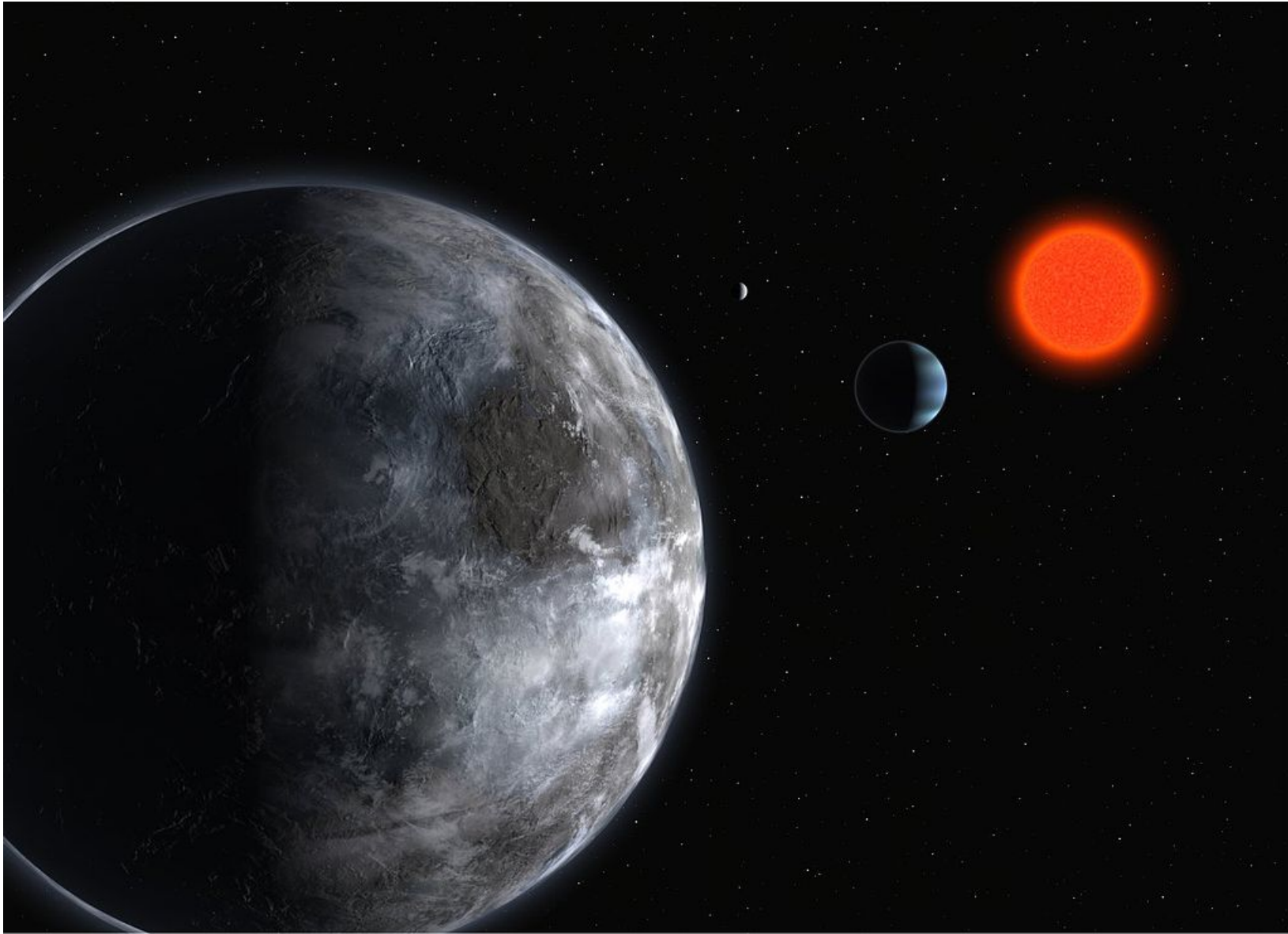
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

Séance #4

4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

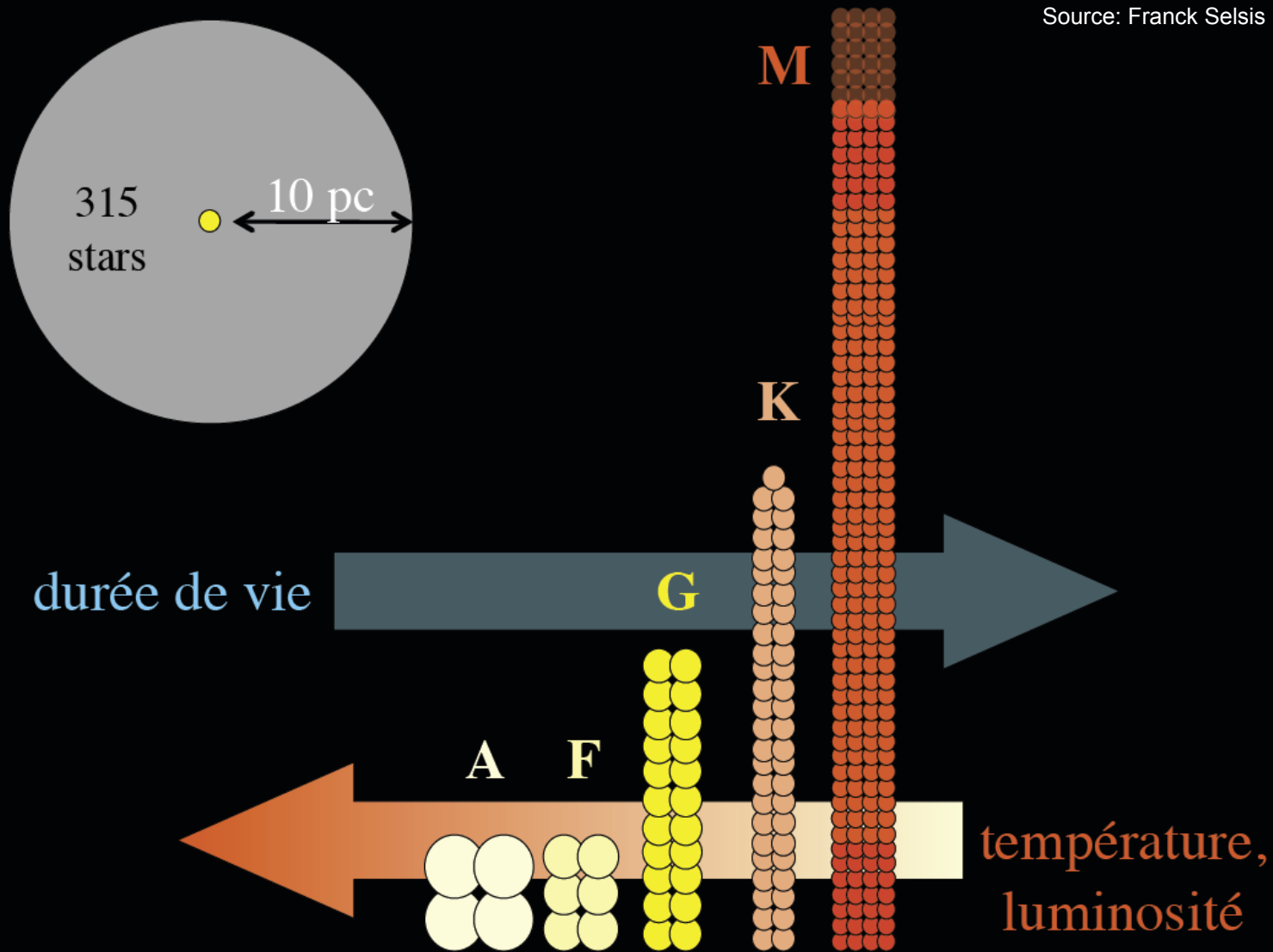
- A. Les exoplanètes.**
- B. La zone circumstellaire habitable.
- C. La composition chimique en élément lourd.
- D. Le champ magnétique.
- E. Combien d'autres mondes ?

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

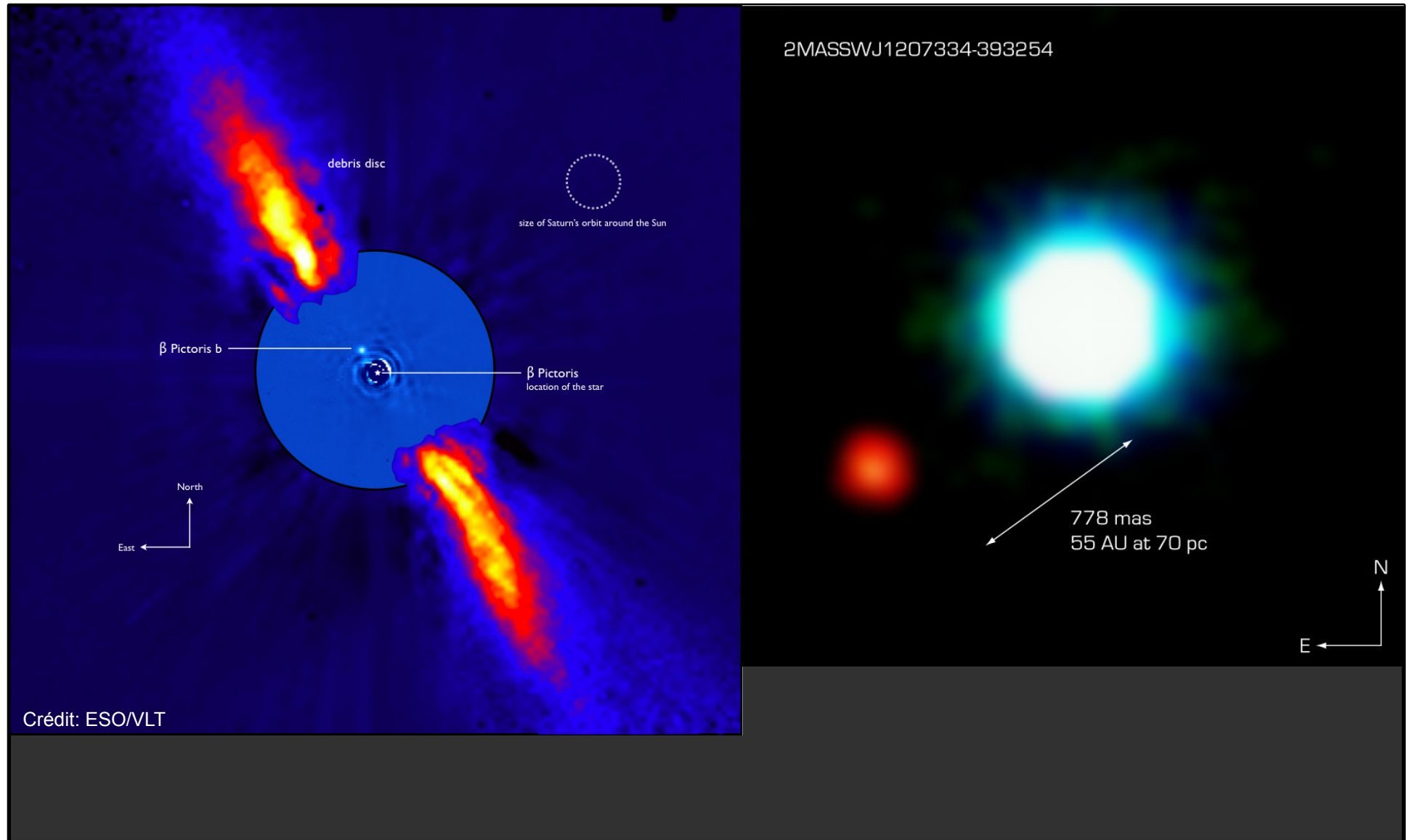


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

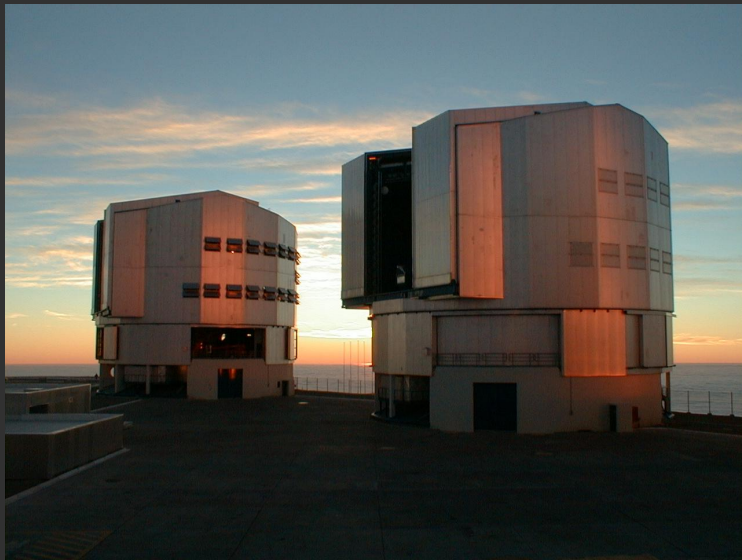
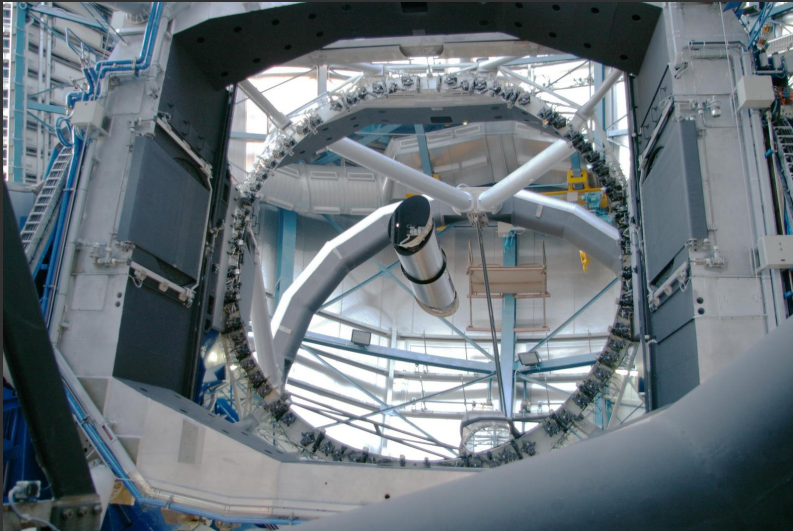
Source: Franck Selsis



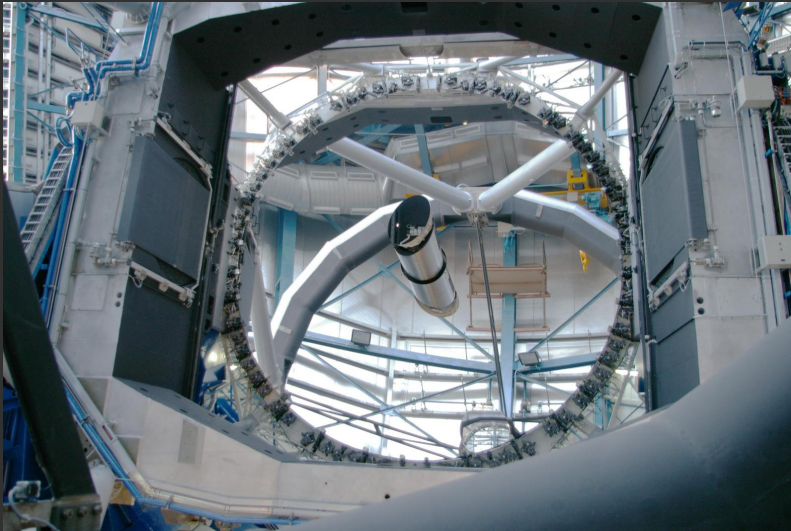
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



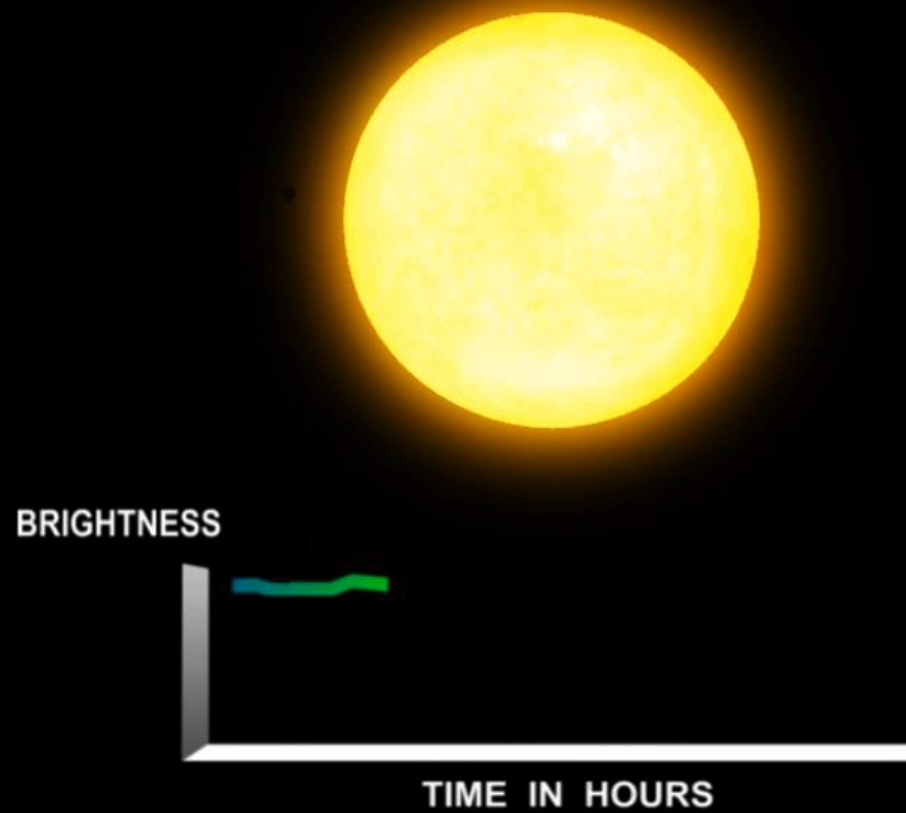
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



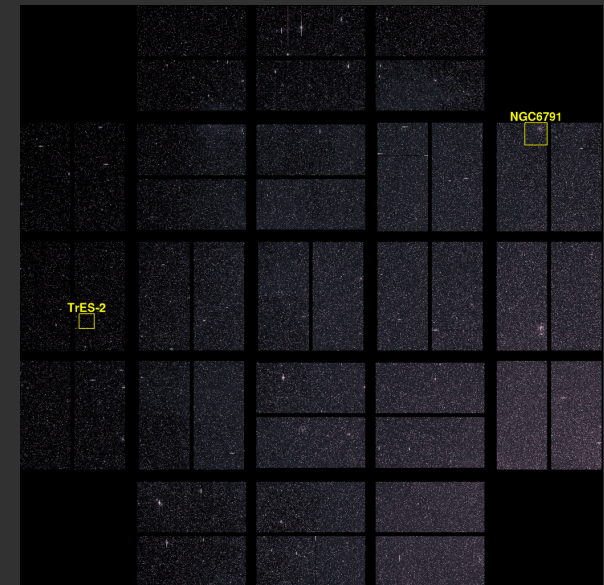
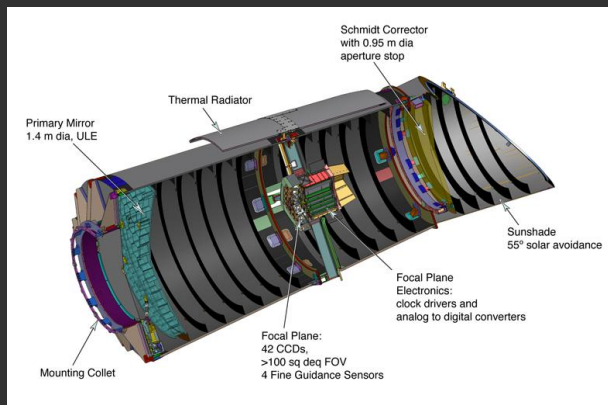
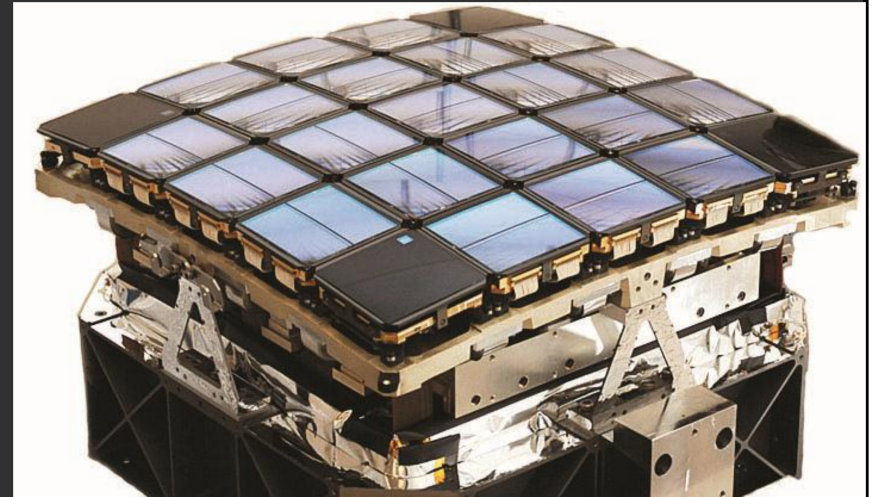
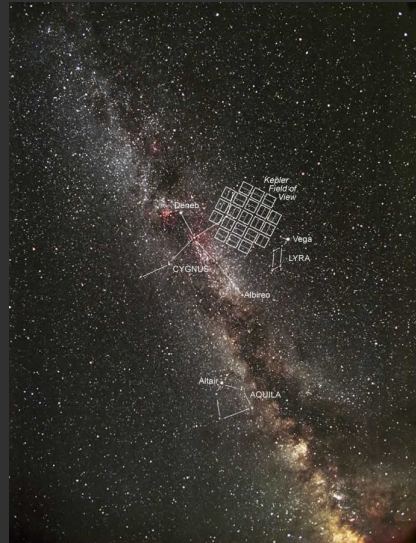
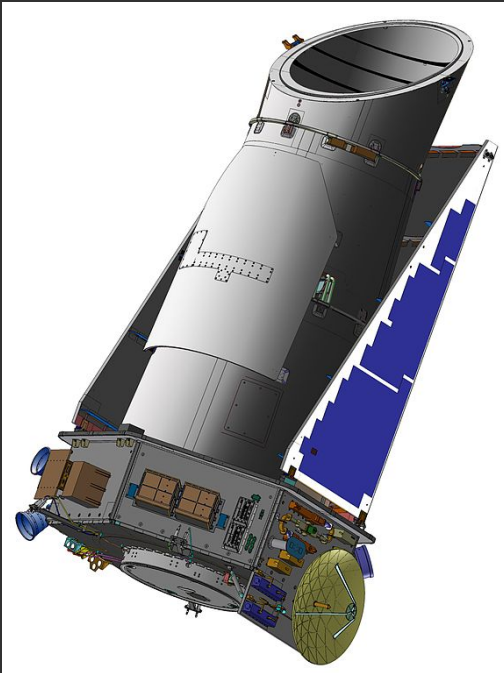
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



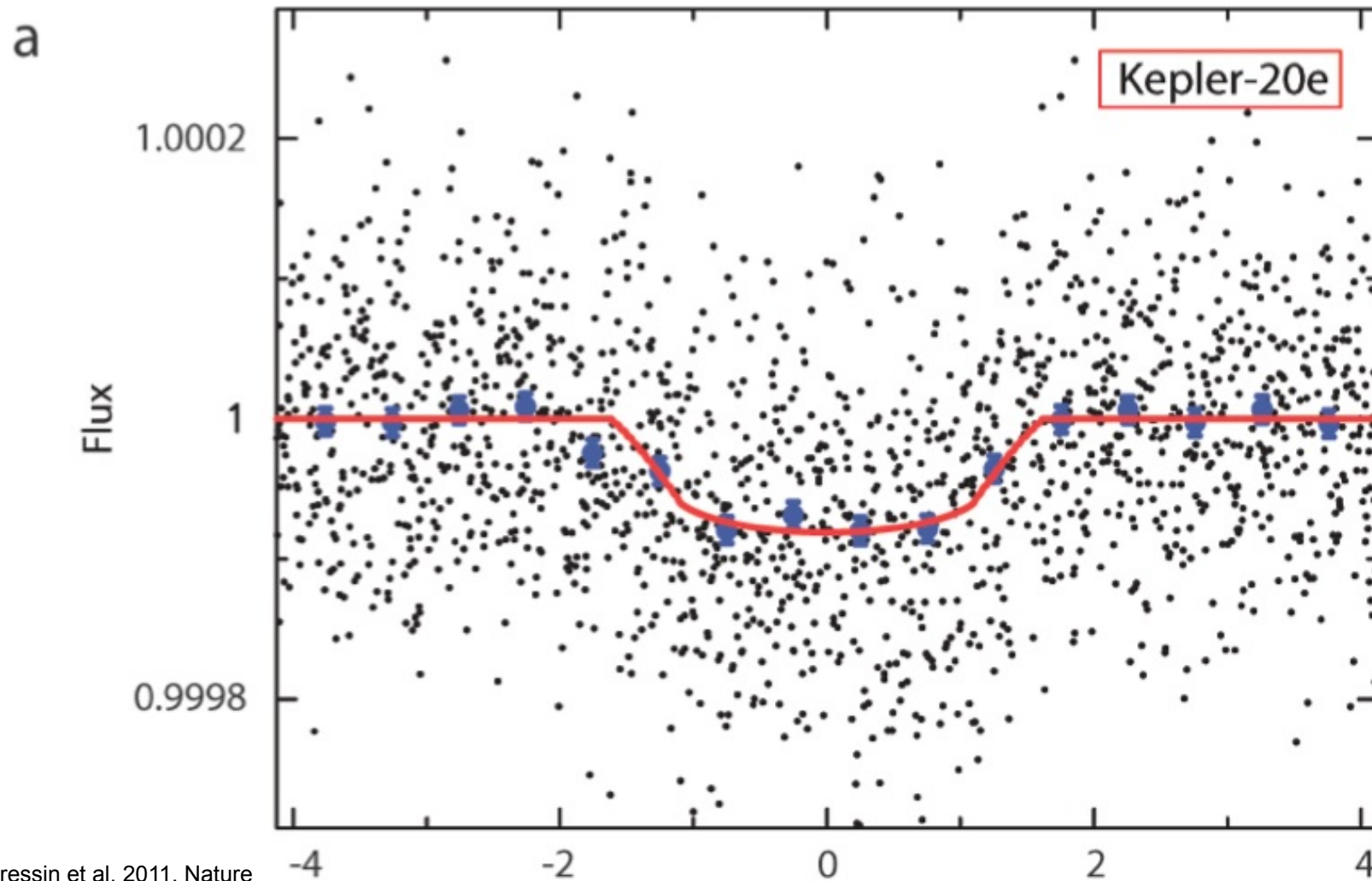
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



Fressin et al. 2011, Nature

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

- Basic data :

Name	Kepler-20
Distance	290 (± 30) pc ref.
Spectral Type	G8
Apparent Magnitude V	12.5
Mass	0.912 (± 0.035) M_{sun} ref.
Age	8.8 ($_{-2.7}^{+4.7}$) Gyr ref.
Effective Temperature	5466 (± 93) K ref.
Radius	0.944 ($_{-0.095}^{+0.06}$) R_{sun} ref.
Metallicity [Fe/H]	0.02 (± 0.04) ref.
Right Asc. Coord.	19 10 48
Decl. Coord.	+42 20 19

- More data :

- [Basic data](#) (from [Simbad](#))

Planète	Masse (M_{\oplus})	Rayon (R_{\oplus})	Demi-grand axe (UA)	Période orbitale (d)	Masse volumique (g/cm^3)
Kepler-20b	$\sim 8,7$	$\sim 1,91$	$\sim 0,04537$	$\sim 3,6961219$	$\sim 6,5$
Kepler-20e	0,39 à 1,67	$\sim 0,868$	$\sim 0,0507$	$\sim 6,098493$?
Kepler-20c	$\sim 16,1$	$\sim 3,07$	$\sim 0,0930$	$\sim 10,854092$	$\sim 2,91$
Kepler-20f	0,66 à 3,04	$\sim 1,034$	$\sim 0,1104$	$\sim 19,57706$?
Kepler-20d	$< 20,1$	$\sim 2,75$	$\sim 0,3453$	$\sim 77,61184$	$< 4,07$

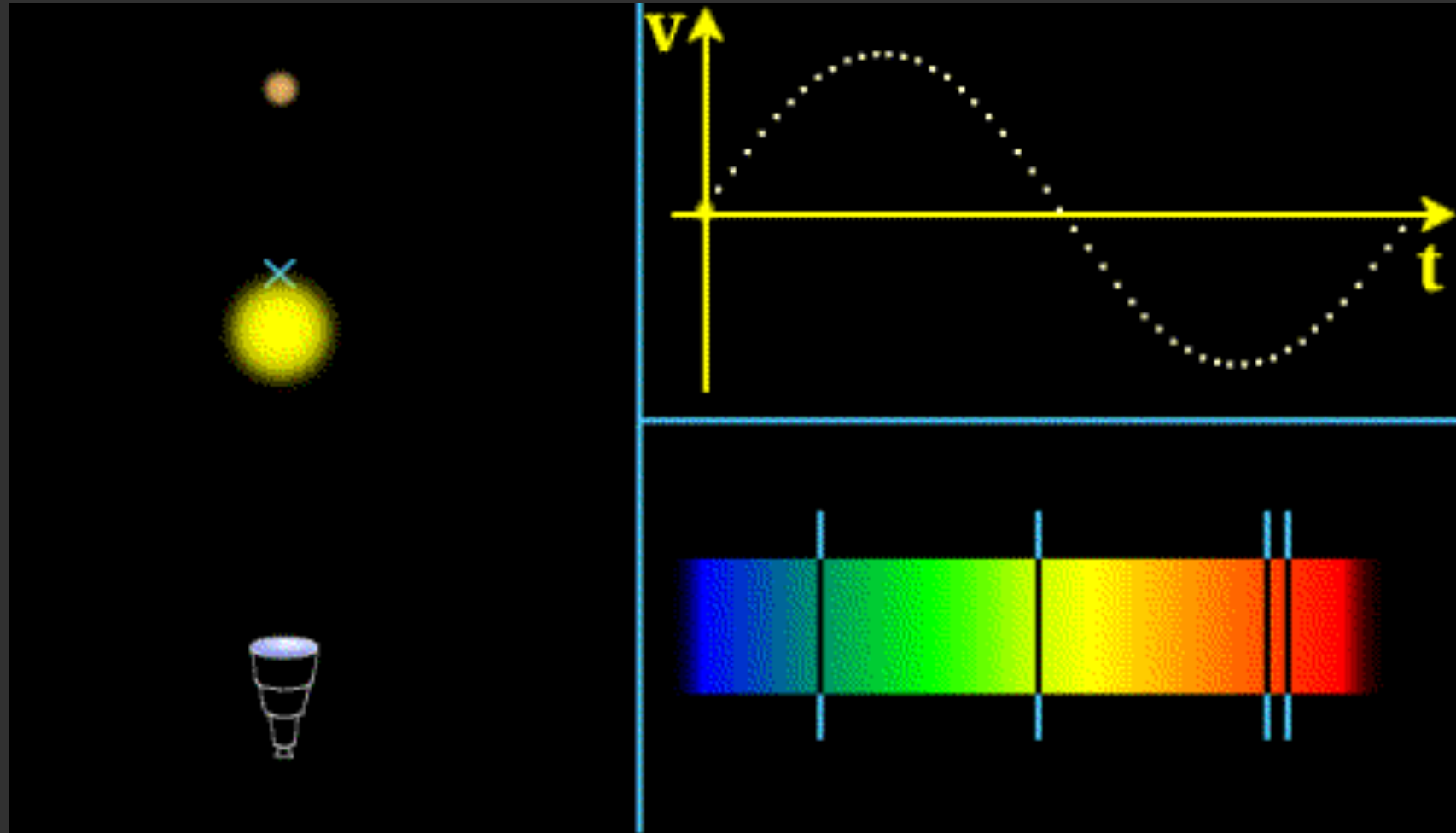
Système planétaire de Kepler-20⁶.

5 PLANETS

- Basic data :

Name	Kepler-20 b	Kepler-20 c	Kepler-20 d	Kepler-20 e	Kepler-20 f
Discovered in	2011	2011	2011	2011	2011
Mass	0.027 (± 0.007) M_J ref.	0.051 (± 0.01) M_J ref.	0.06 M_J ref.	$< 0.0097 M_J$ ref.	0.045 M_J ref.
Semi major axis	0.04537 (± 0.0006) AU ref.	0.093 (± 0.001) AU ref.	0.3453 (± 0.0046) AU ref.	0.0507 ($_{-0.0067}^{+0.0063}$) AU ref.	0.11 ($_{-0.01}^{+0.01}$) AU ref.
Orbital period	3.6961219 days ref.	10.854092 ($\pm 1.3e-05$) days ref.	77.61185 ($_{-0.00037}^{+0.00015}$) days ref.	6.098493 ($\pm 6.5e-05$) days ref.	19.57706 (± 0.00052) days ref.
Eccentricity	< 0.32 ref.	< 0.4 ref.	< 0.6 ref.	-	-
Radius	0.17 ($_{-0.02}^{+0.01}$) R_J ref.	0.27 (± 0.02) R_J ref.	0.25 ($_{-0.027}^{+0.015}$) R_J ref.	0.078 ($_{-0.09}^{+0.07}$) R_J ref.	0.09 (± 0.01) R_J ref.
$T_{transit}$	2454967.50027 ($_{-0.00068}^{+0.00058}$) ref.	2454971.60758 (± 0.00046) ref.	2454997.7271 (± 0.0019) ref.	245968.9336 (± 0.0039) ref.	2454968.219 (± 0.011) ref.
Inclination	86.5 ($_{-0.31}^{+0.36}$) deg. ref.	88.39 (± 0.16) deg. ref.	89.57 (± 0.0048) deg. ref.	87.5 (± 0.34) deg. ref.	88.68 (± 0.17) deg. ref.
Update	21/12/11	21/12/11	21/12/11	23/12/11	23/12/11

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

No. 1, 2010

A SUPER-EARTH IN THE HZ OF GJ 581

961

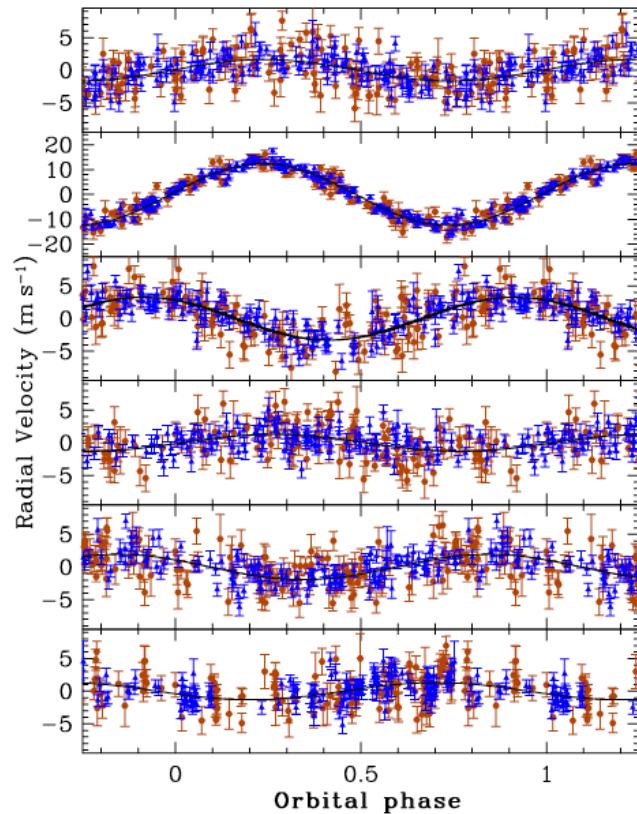


Figure 5. Phased reflex barycentric velocities of the host star due individually to the planets at 3.15 days, 5.37 days, 12.9 days, 37 days, 67 days, and 433 days from the all-circular fit of Table 2. Filled (red) hexagon points are from Keck while filled (blue) triangles are from HARPS.

and 37-day planets' orbits with these two planets participating in a secular resonance.

We also carefully examined the effects of including dynamics

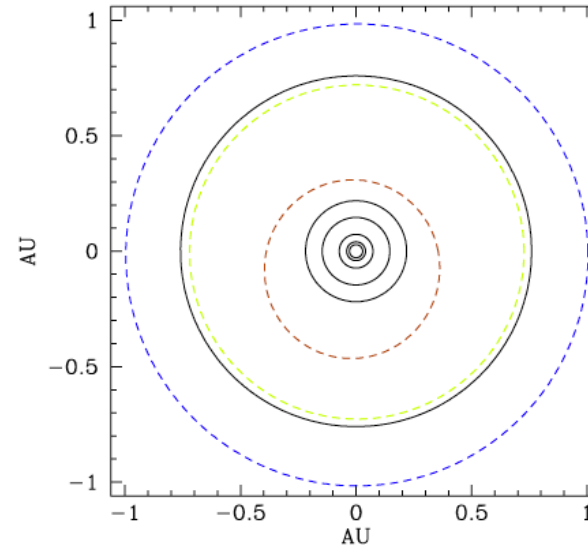


Figure 6. Top view of the GJ 581 system. For reference, the orbits of Earth, Venus, and Mercury are overlaid as dashed blue, green, and red lines, respectively.

Table 3
Photometric Semiamplitudes Modulo the Radial Velocity Periods

Planet	Planetary Period (days)	Semiamplitude (mag)
b	5.36841	0.00045 ± 0.00044
c	12.9191	0.00083 ± 0.00044
d	66.87	0.00129 ± 0.00044
e	3.14867	0.00061 ± 0.00045
f	433	...
g	36.562	0.00058 ± 0.00047

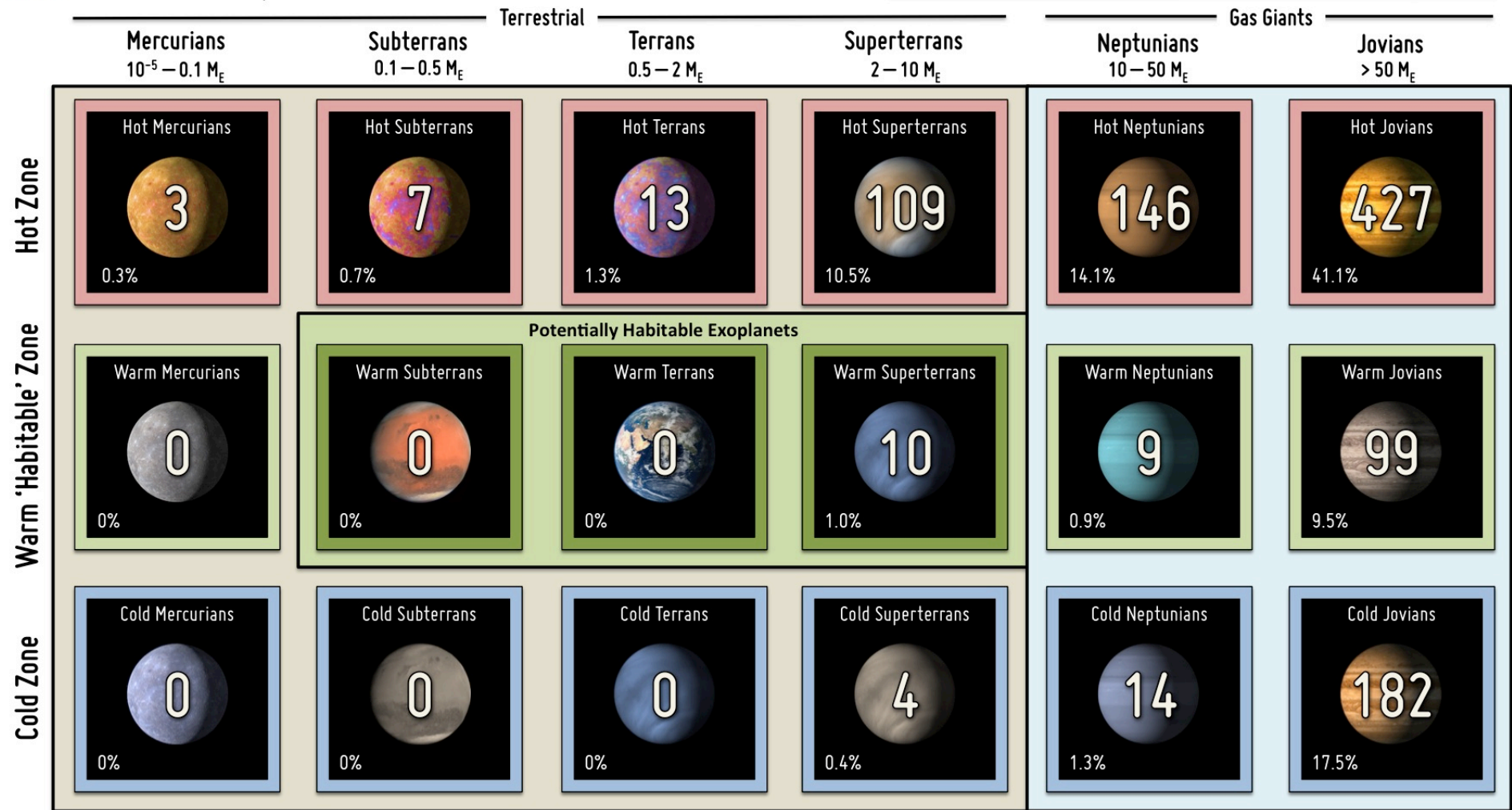
Note. The data set is insufficient to address the 433-day period.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



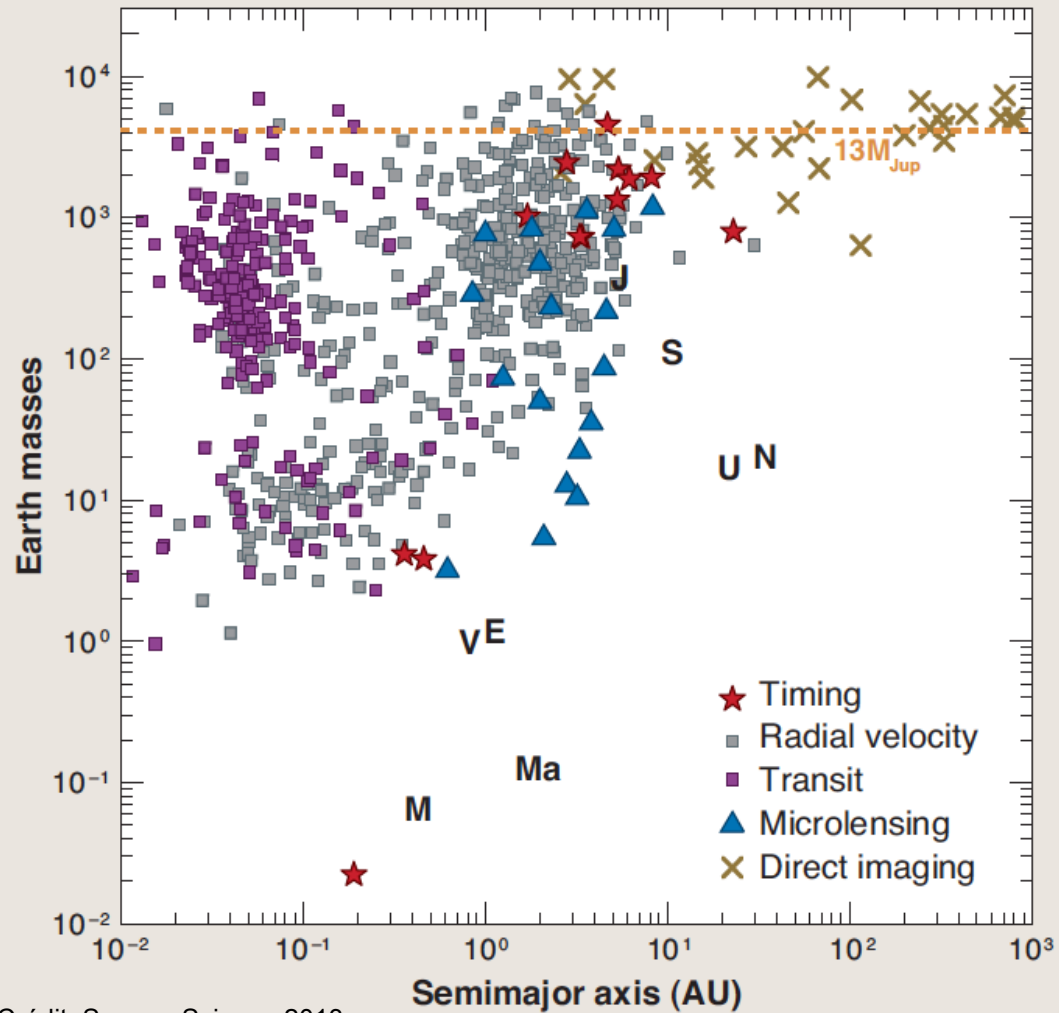
1,039 Confirmed Exoplanets

The Periodic Table of Exoplanets



CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Nov 2013

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



Crédit: Seager, Science 2013

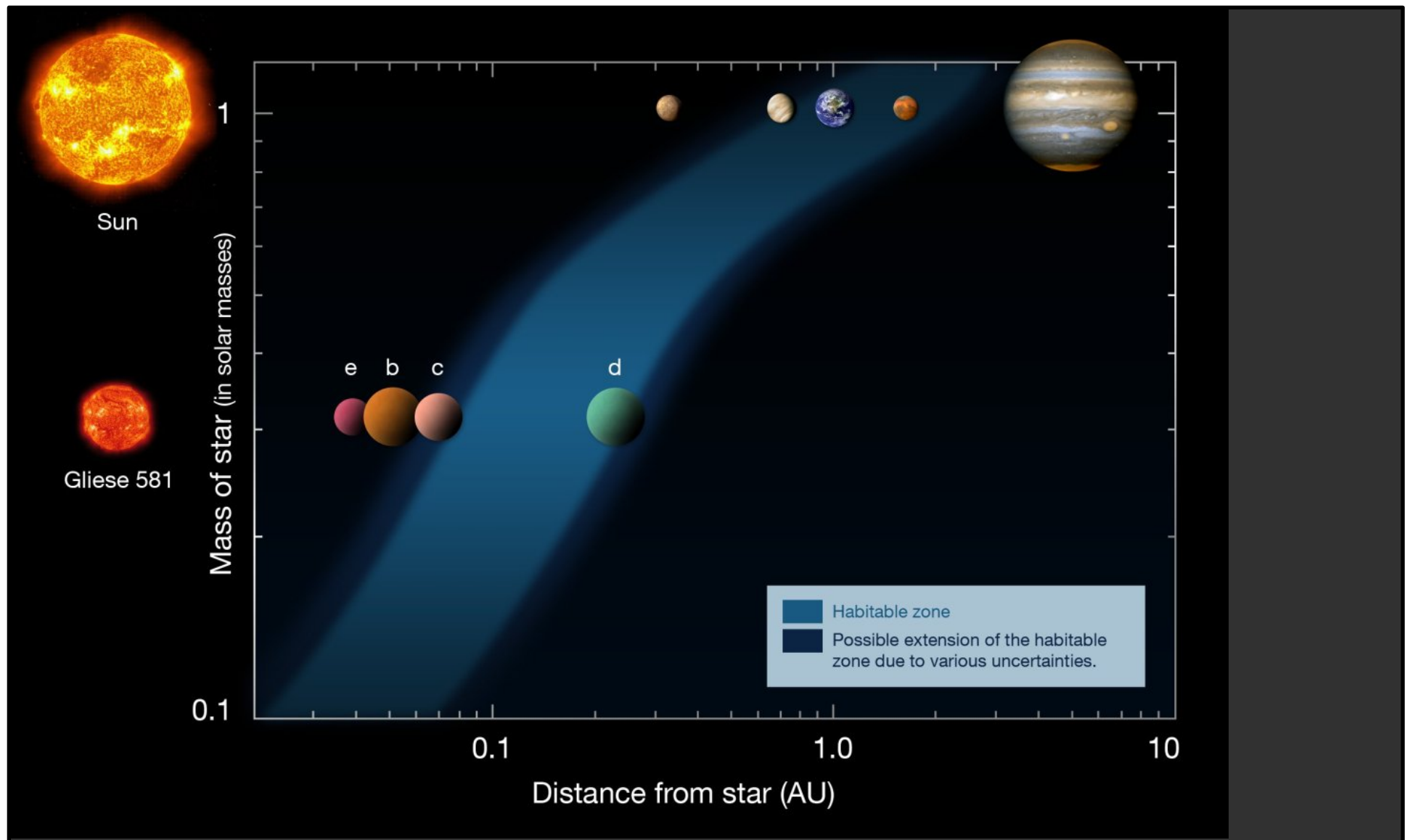
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

Séance #4

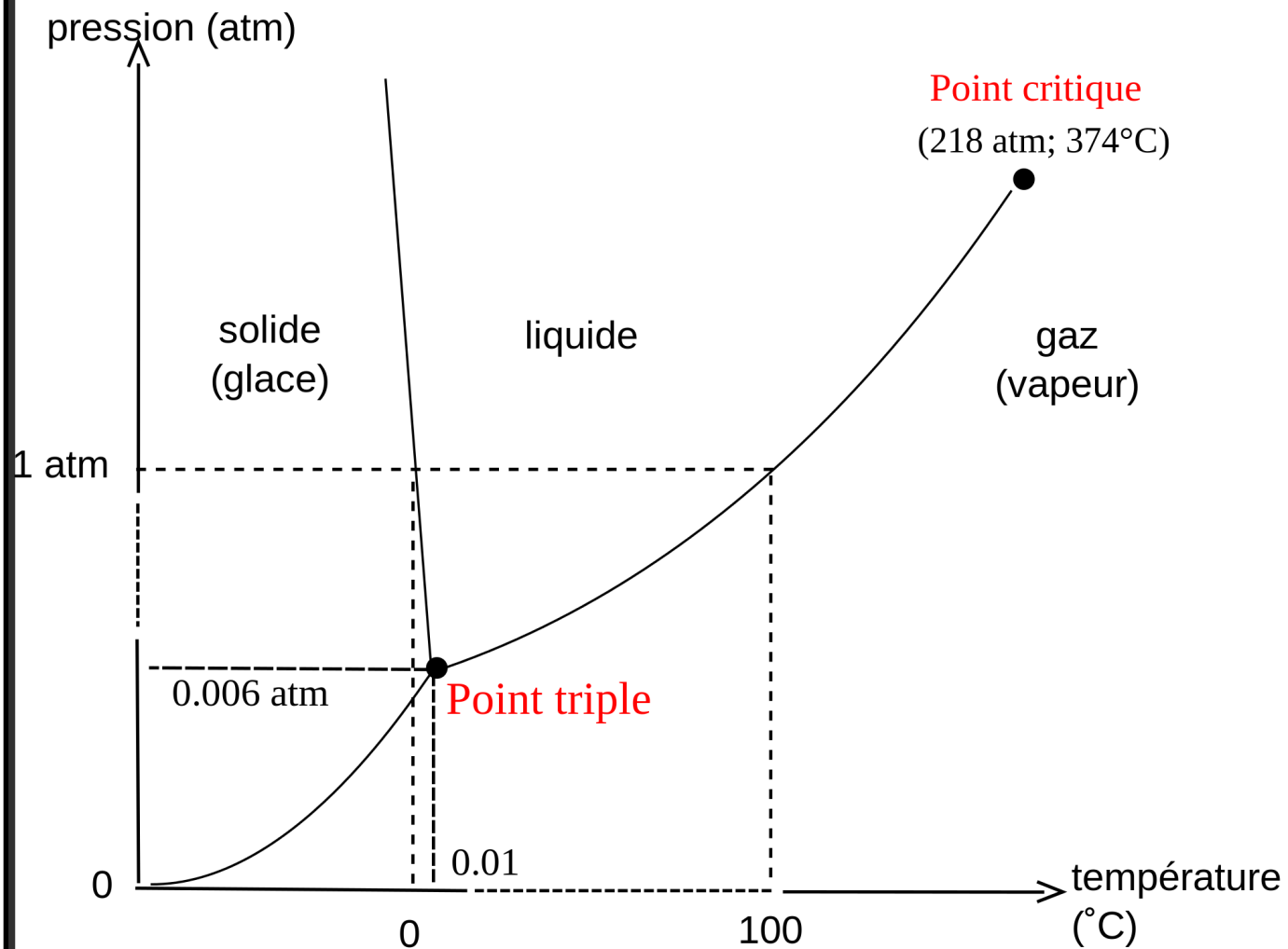
4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

- A. Les exoplanètes.
- B. La zone circumstellaire habitable.**
- C. La composition chimique en élément lourd.
- D. Le champ magnétique.
- E. Combien d'autres mondes ?

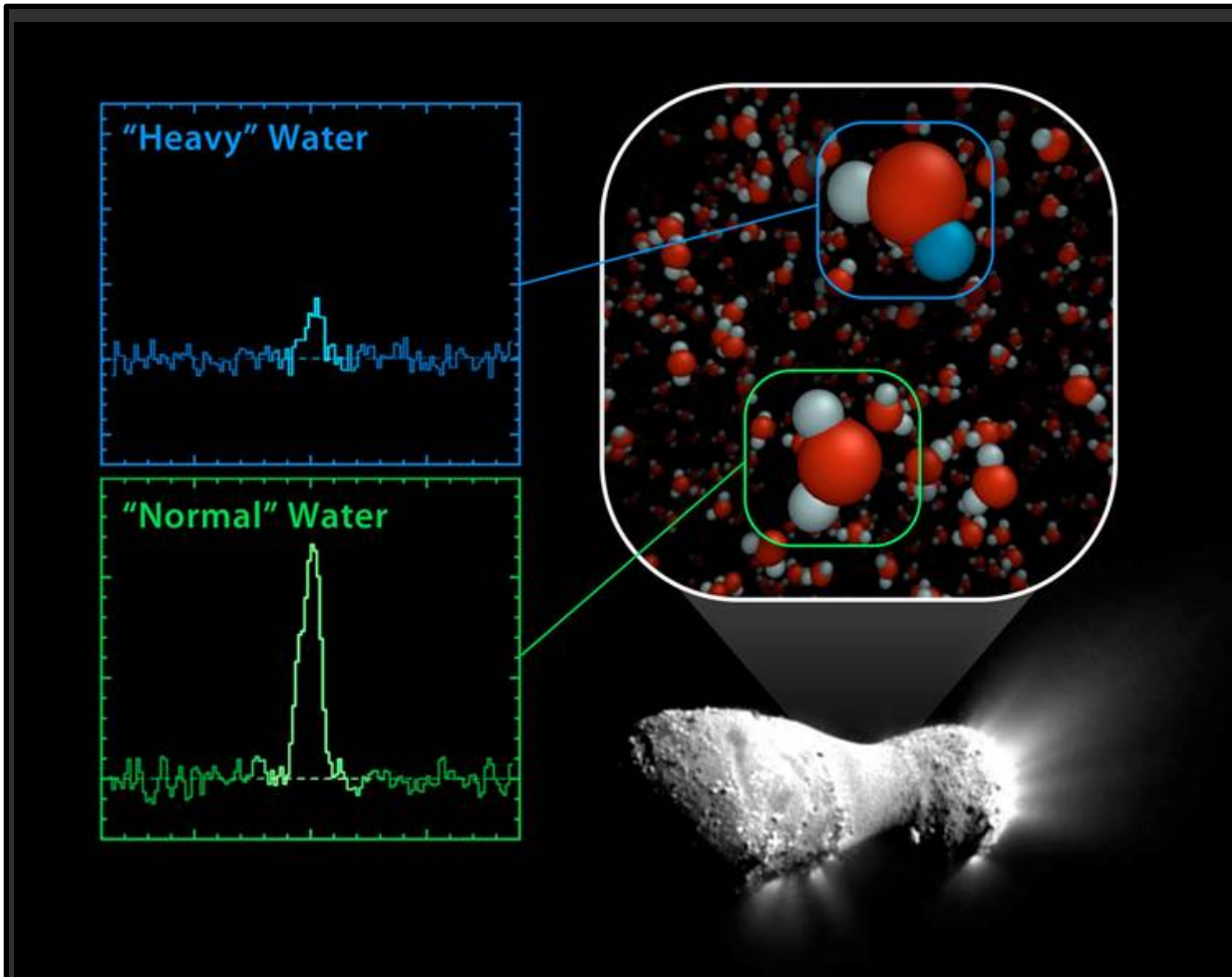
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



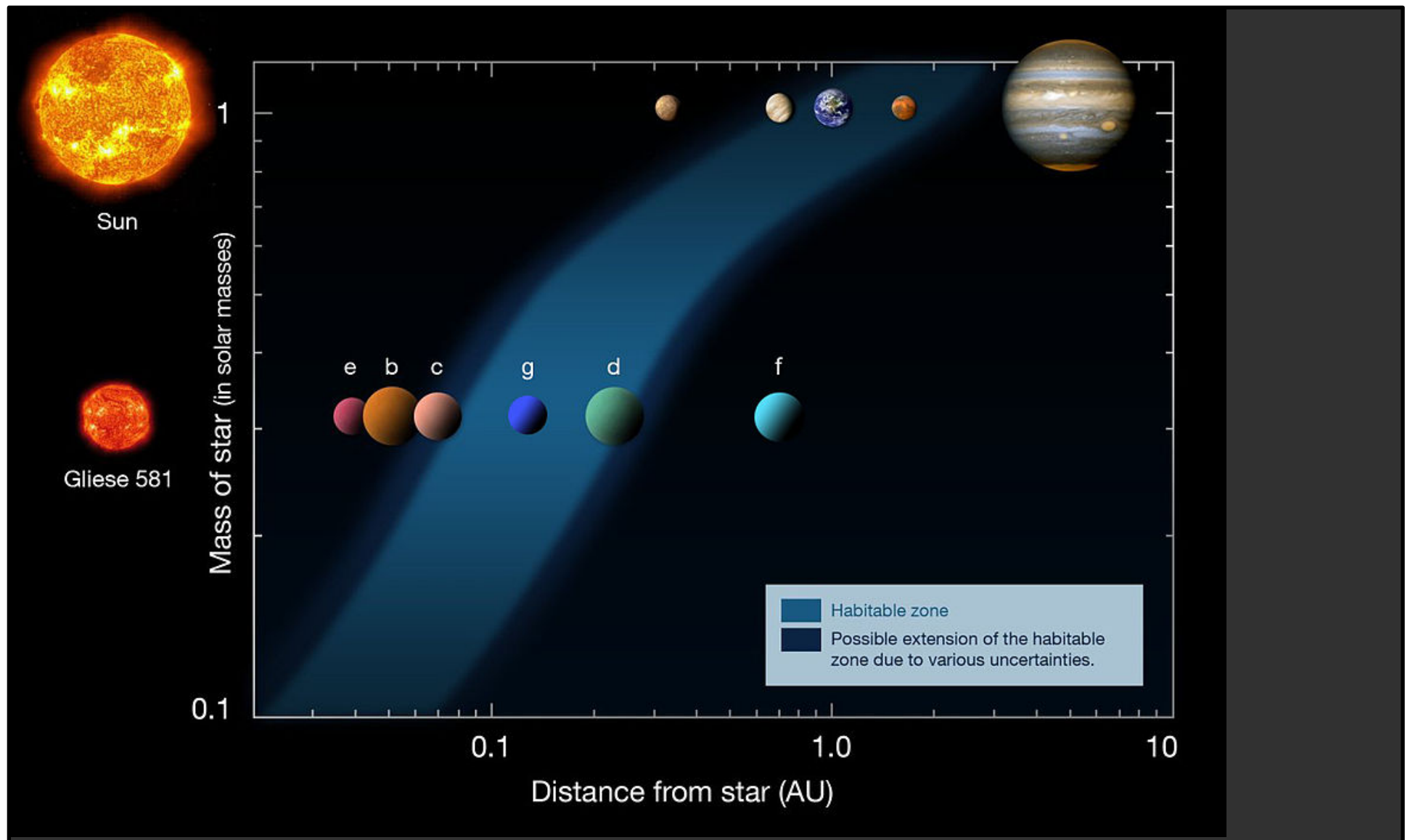
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

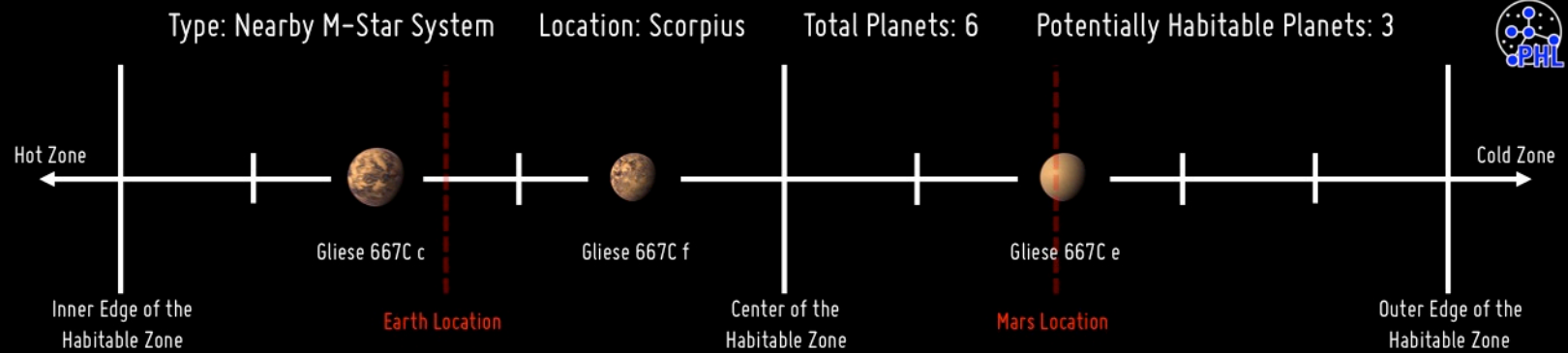


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

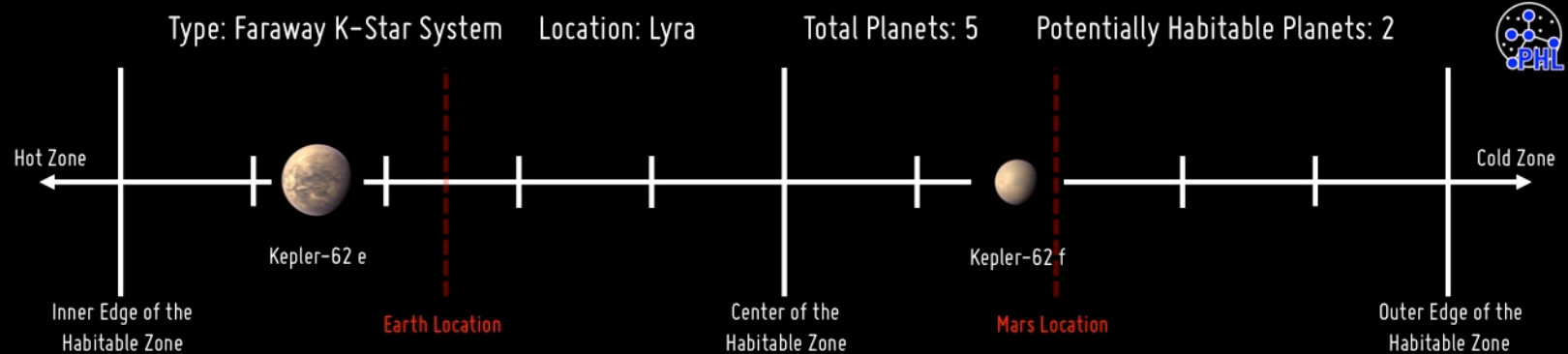


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

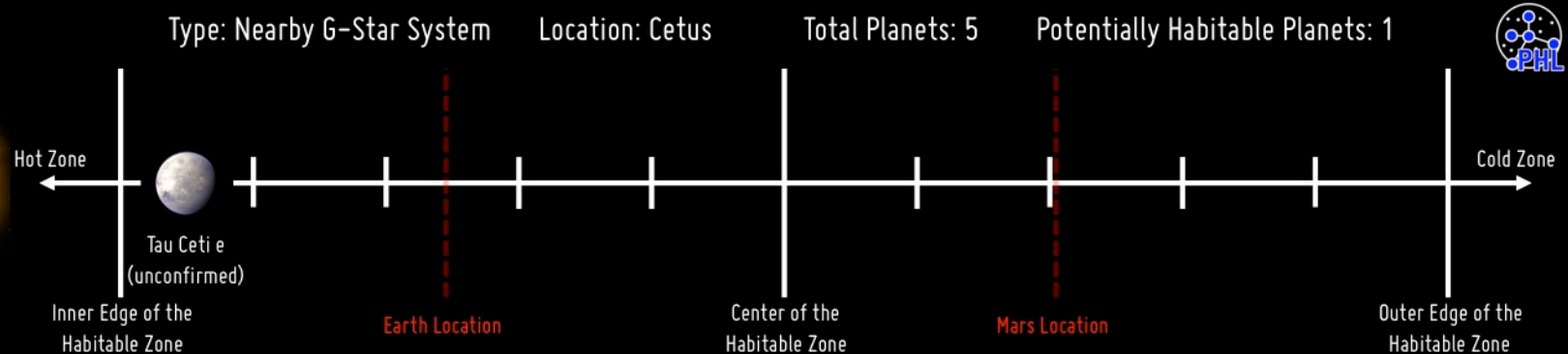
Gliese 667C



Kepler-62



Tau Ceti



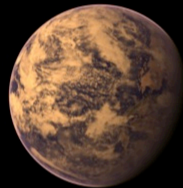
Potentially Habitable Exoplanets



Earth



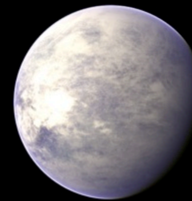
Kepler-62 e



Gliese 667C c



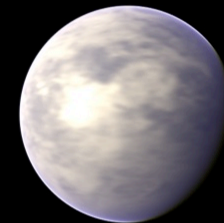
Gliese 581 g*



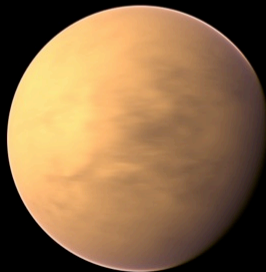
Tau Ceti e*



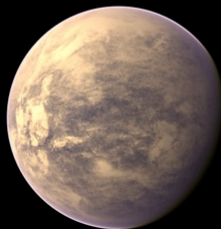
Gliese 667C f



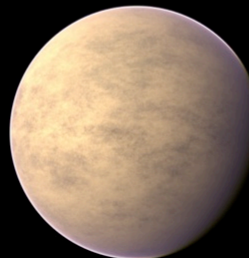
Kepler-22 b



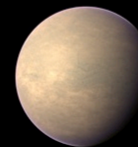
Gliese 163 c



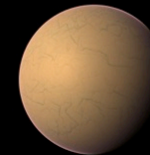
Kepler-61 b



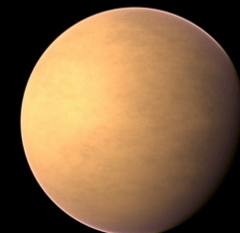
HD 40307 g*



Kepler-62 f



Gliese 667C e

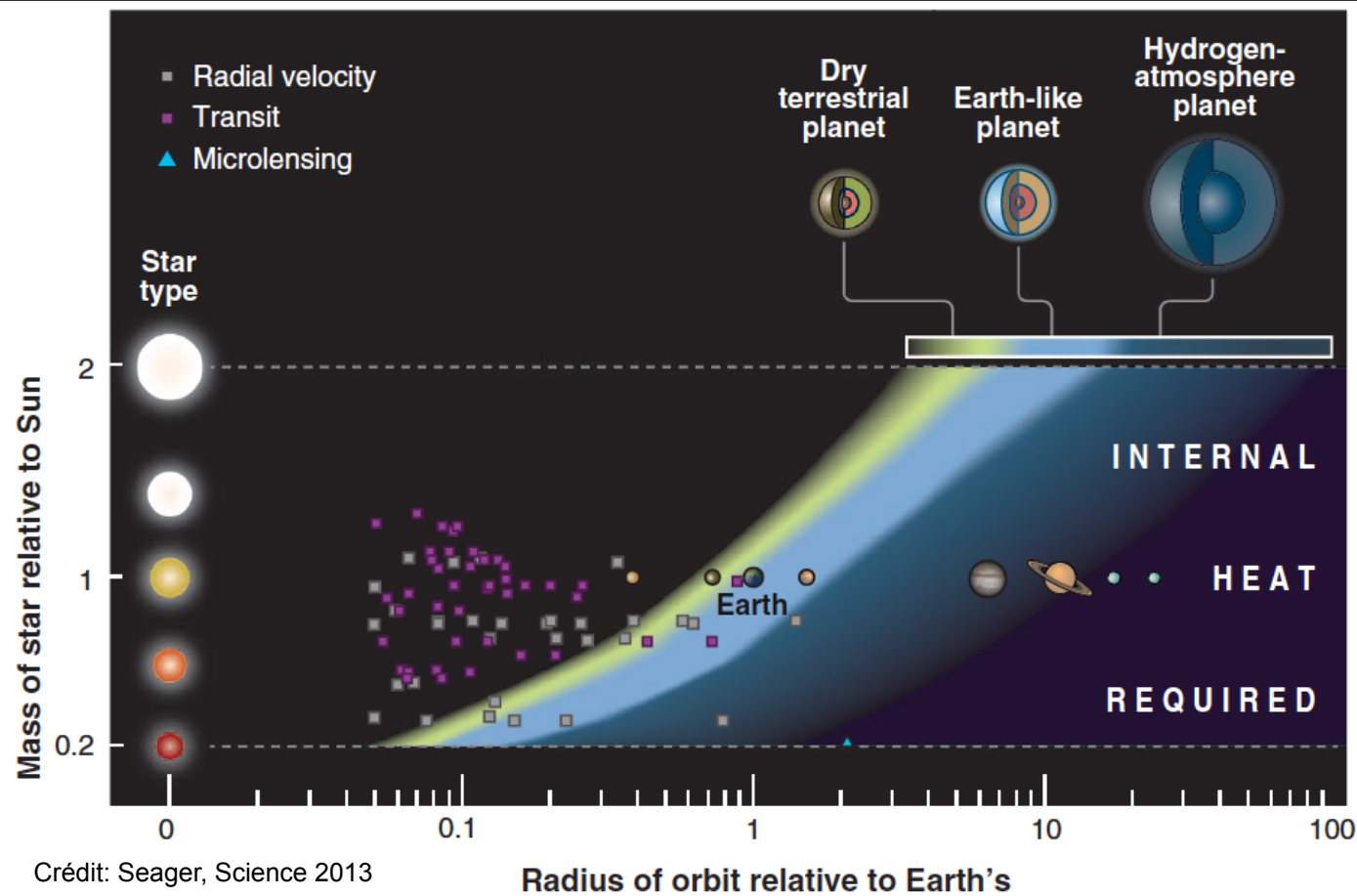


Gliese 581 d

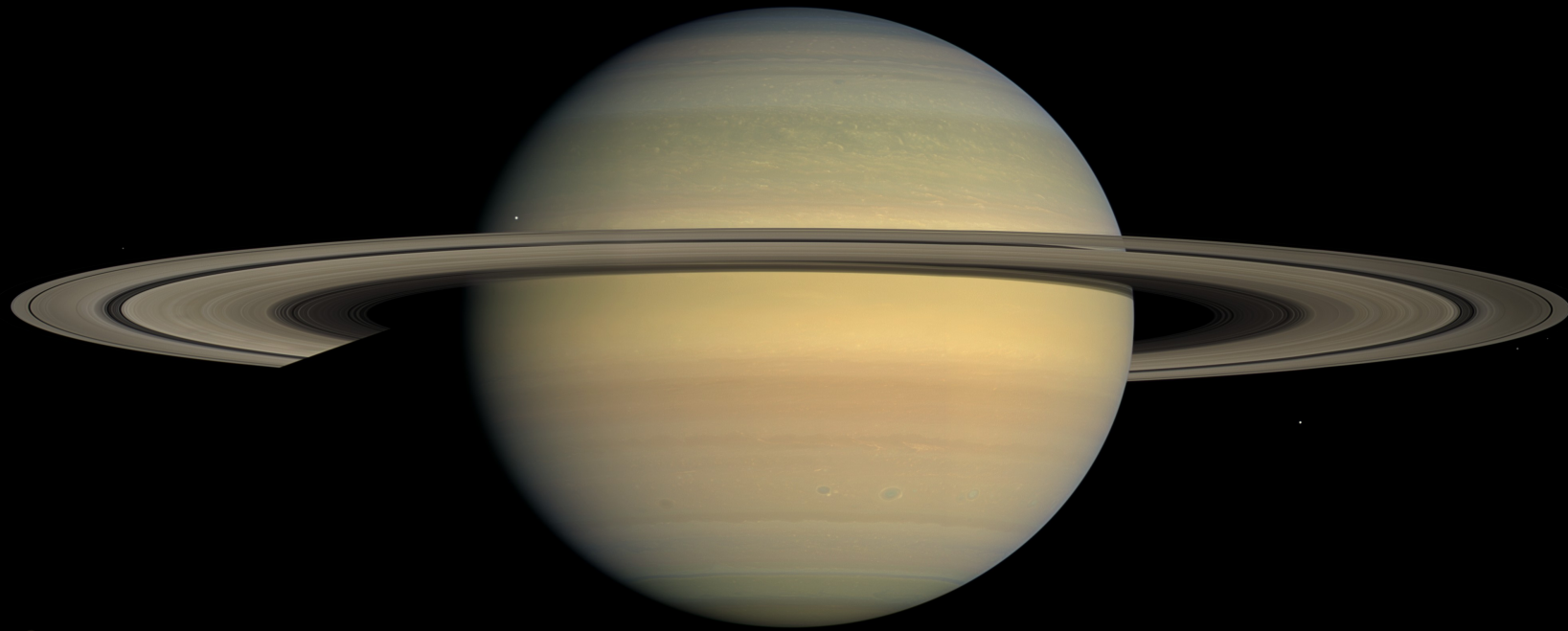
*planet candidates

CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) July 29, 2013

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.

Séance #4

4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

- A. Les exoplanètes.
- B. La zone circumstellaire habitable.
- C. La composition chimique en élément lourd.**
- D. Le champ magnétique.
- E. Combien d'autres mondes ?

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.

Etoiles de masse inférieure à 0,1x celle du Soleil :

Elles ne peuvent déclencher la fusion de l'hydrogène

Etoiles de masse inférieure ou égale à celle du Soleil : $T = 15$ millions de degrés

hélium (He), lithium (Li), bore (B) et béryllium (Be)

Etoiles de masse de 2x à 8x celle du Soleil : $T = 200$ millions de degrés

hélium (He), lithium (Li), bore (B) et béryllium (Be)
carbone (C), azote (N), oxygène (O), néon (Ne) et magnésium (Mg)

Etoiles de masse de 8x à 10x celle du Soleil : $T =$ milliard de degrés

hélium (He), lithium (Li), bore (B) et béryllium (Be)
carbone (C), azote (N), oxygène (O), néon (Ne) et magnésium (Mg)
sodium (Na), soufre (S), silicium (Si)

Etoiles de masse supérieure à 10x celle du Soleil : $T =$ plusieurs milliards de degrés

hélium (He), lithium (Li), bore (B) et béryllium (Be)
carbone (C), azote (N), oxygène (O), néon (Ne) et magnésium (Mg)
sodium (Na), soufre (S), silicium (Si)
Nickel (Ni), cobalt (Co), fer (Fe)

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba		Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra																
			La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
			Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Big Bang

Supernovae

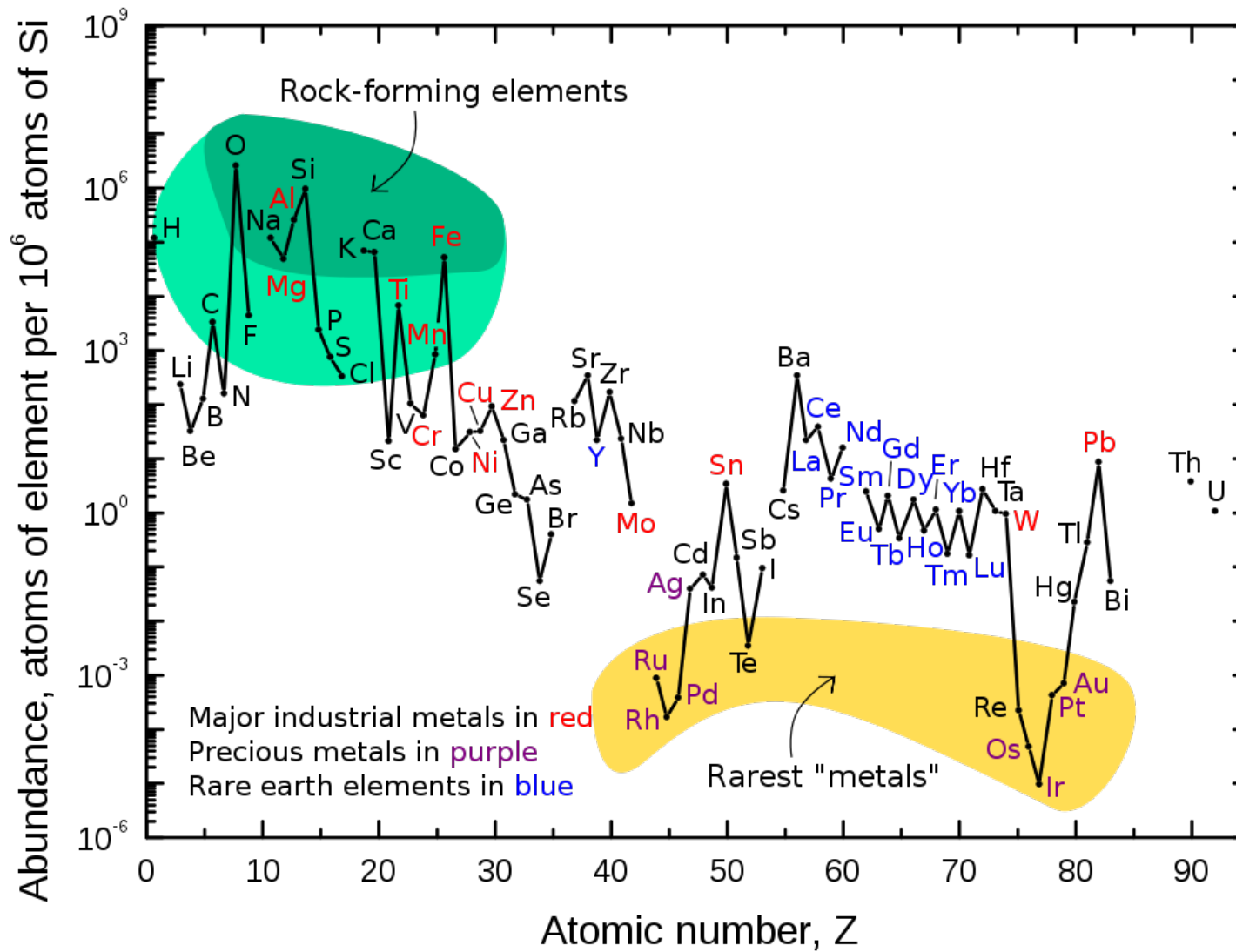
Large Stars

Small Stars

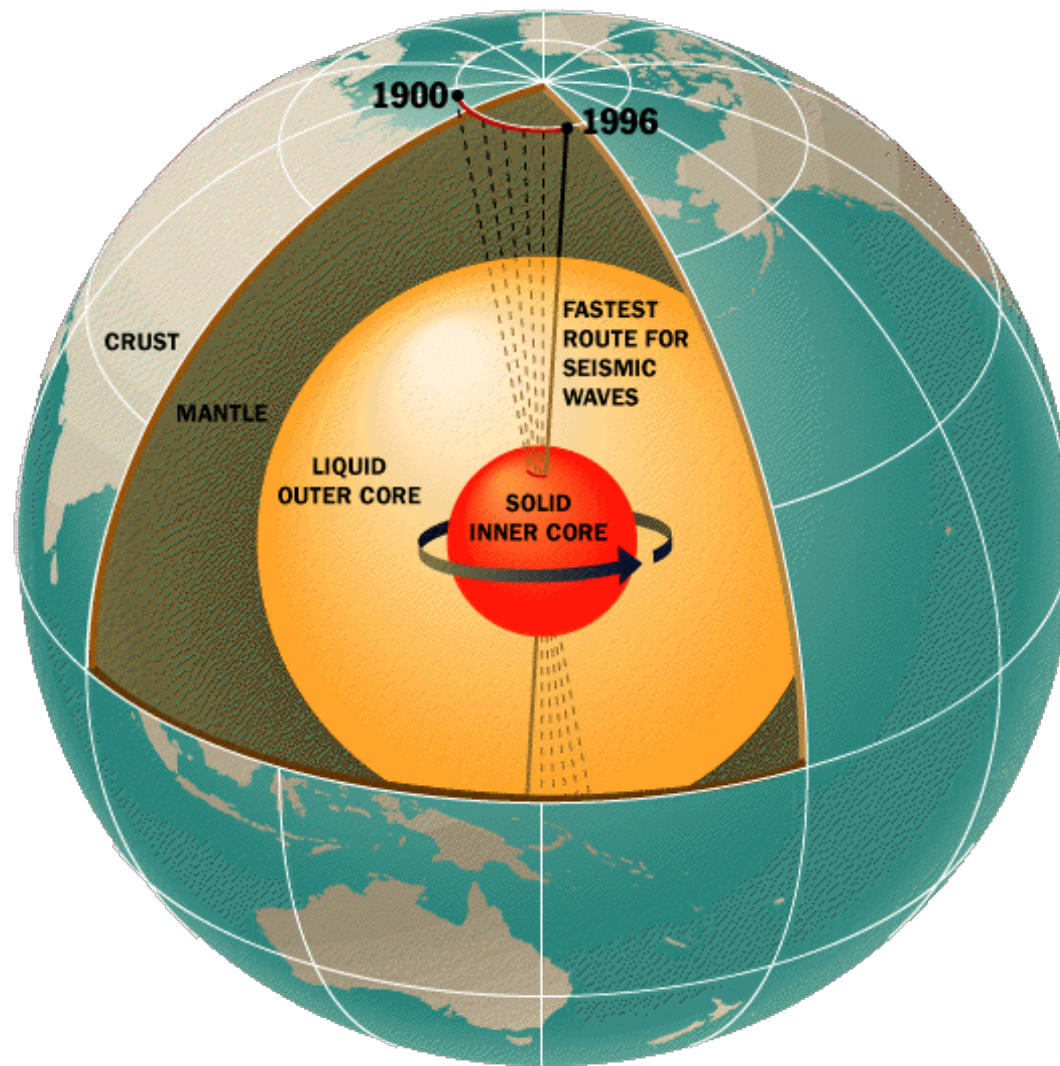
Cosmic Rays

Big Bang
 Supernovae
 Large Stars
 Small Stars
 Cosmic Rays

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.



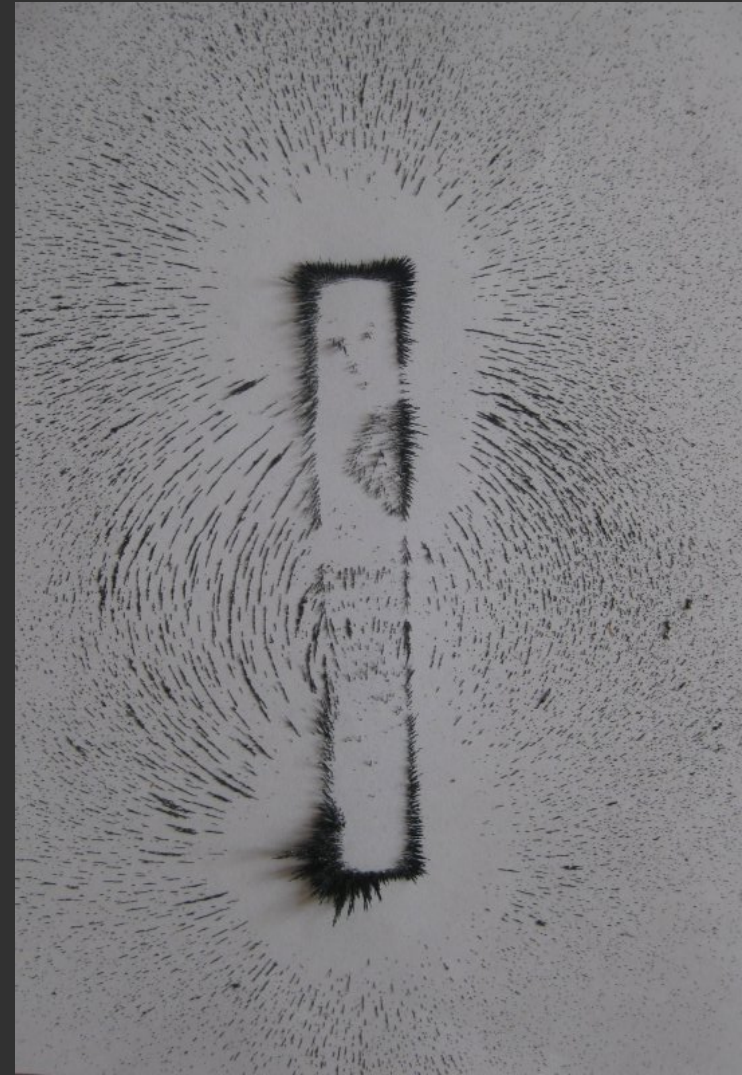
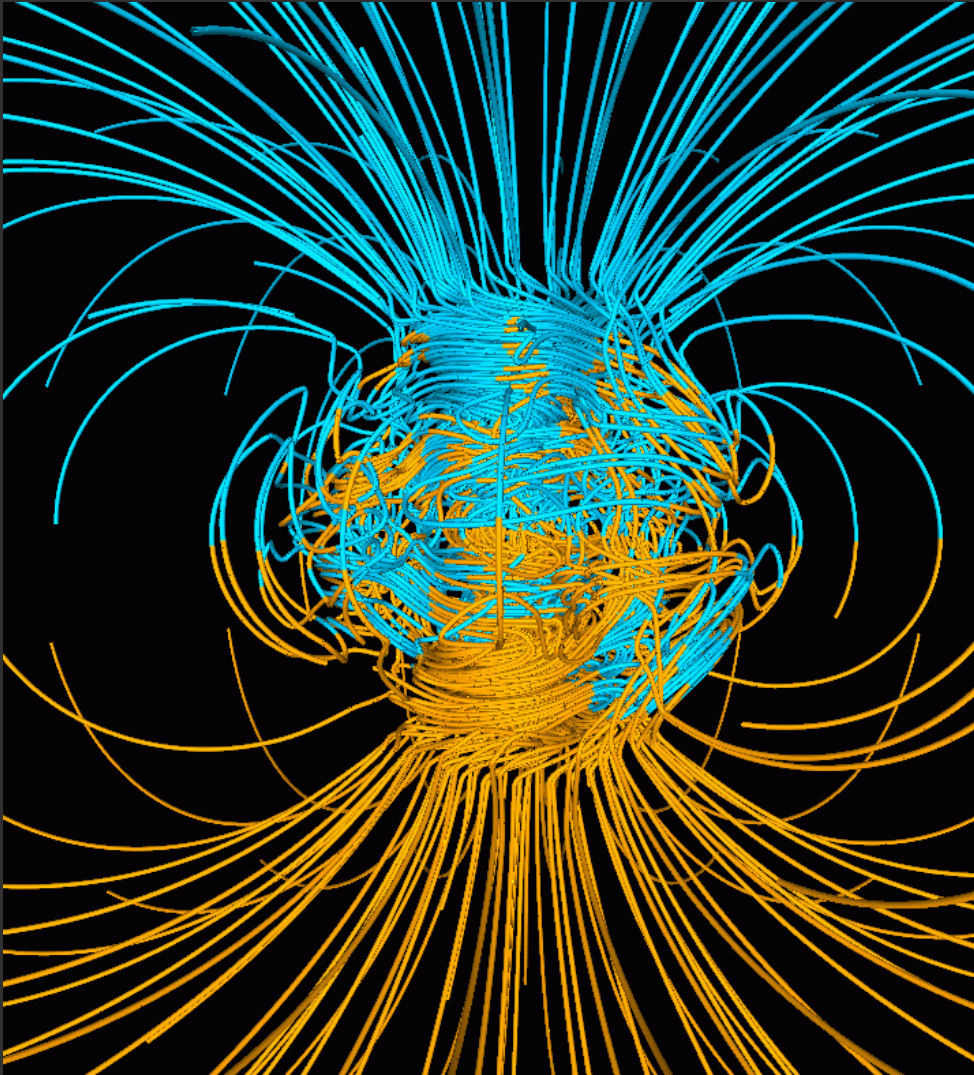
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.

Séance #4

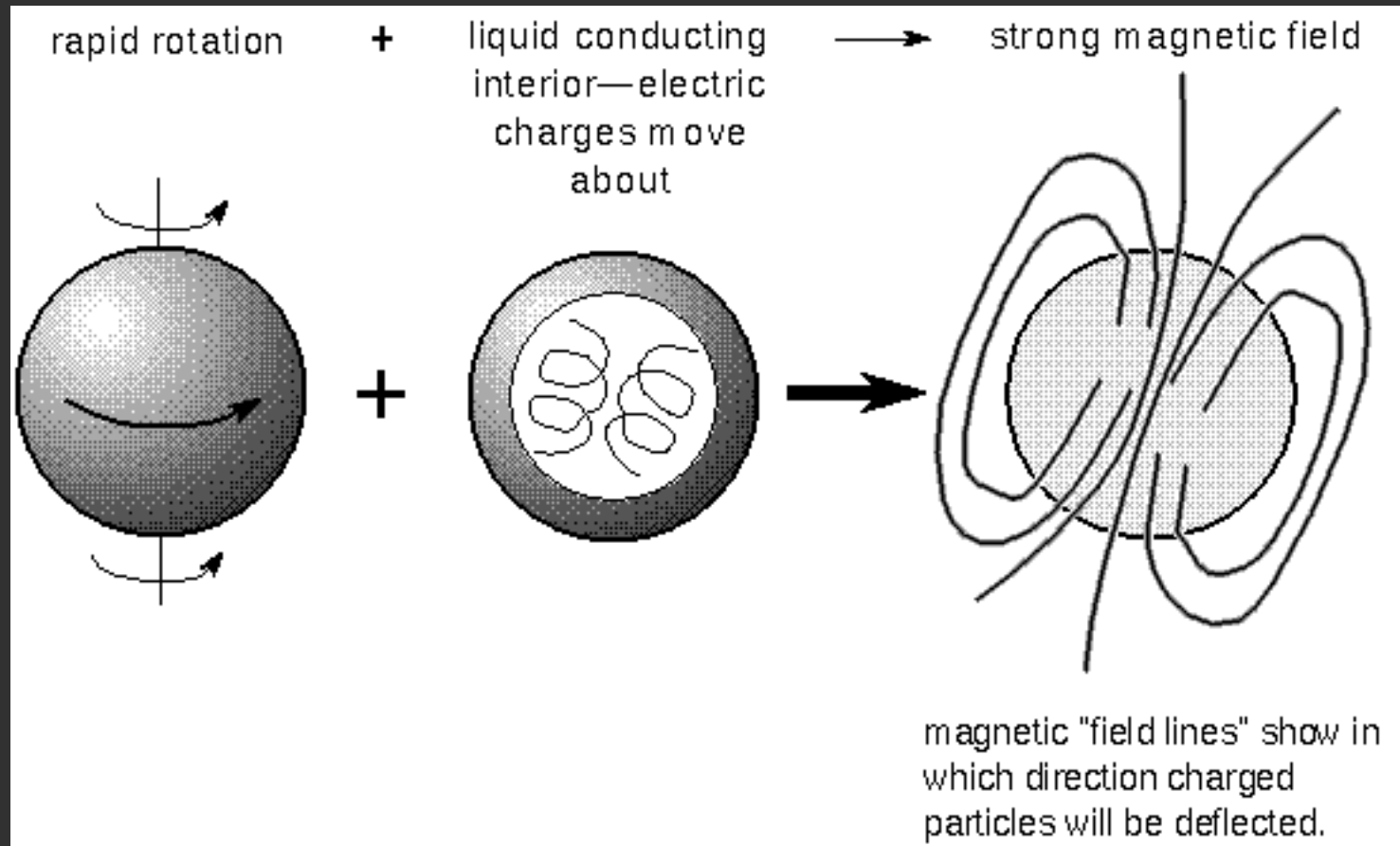
4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

- A. Les exoplanètes.
- B. La zone circumstellaire habitable.
- C. La composition chimique en élément lourd.
- D. Le champ magnétique.**
- E. Combien d'autres mondes ?

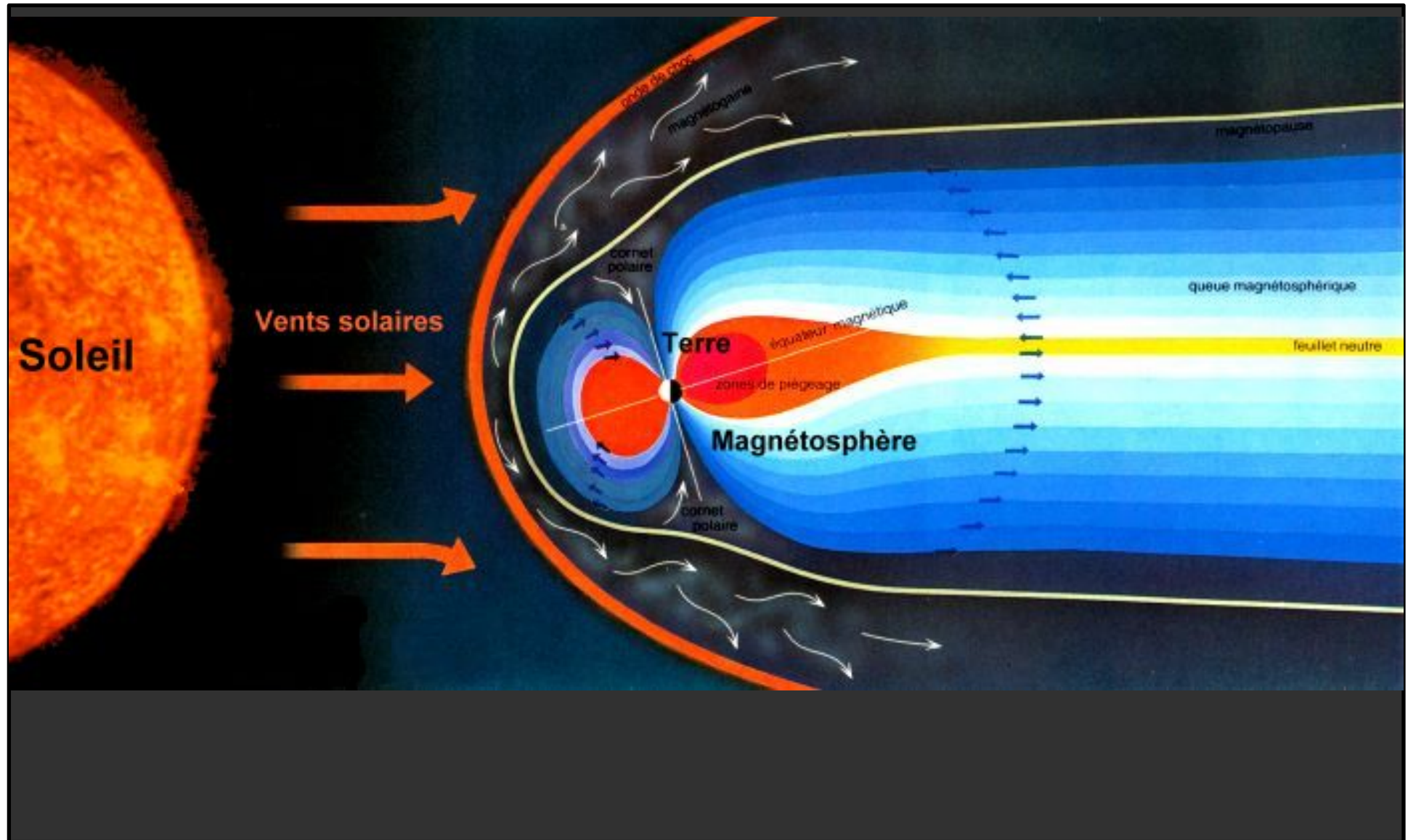
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



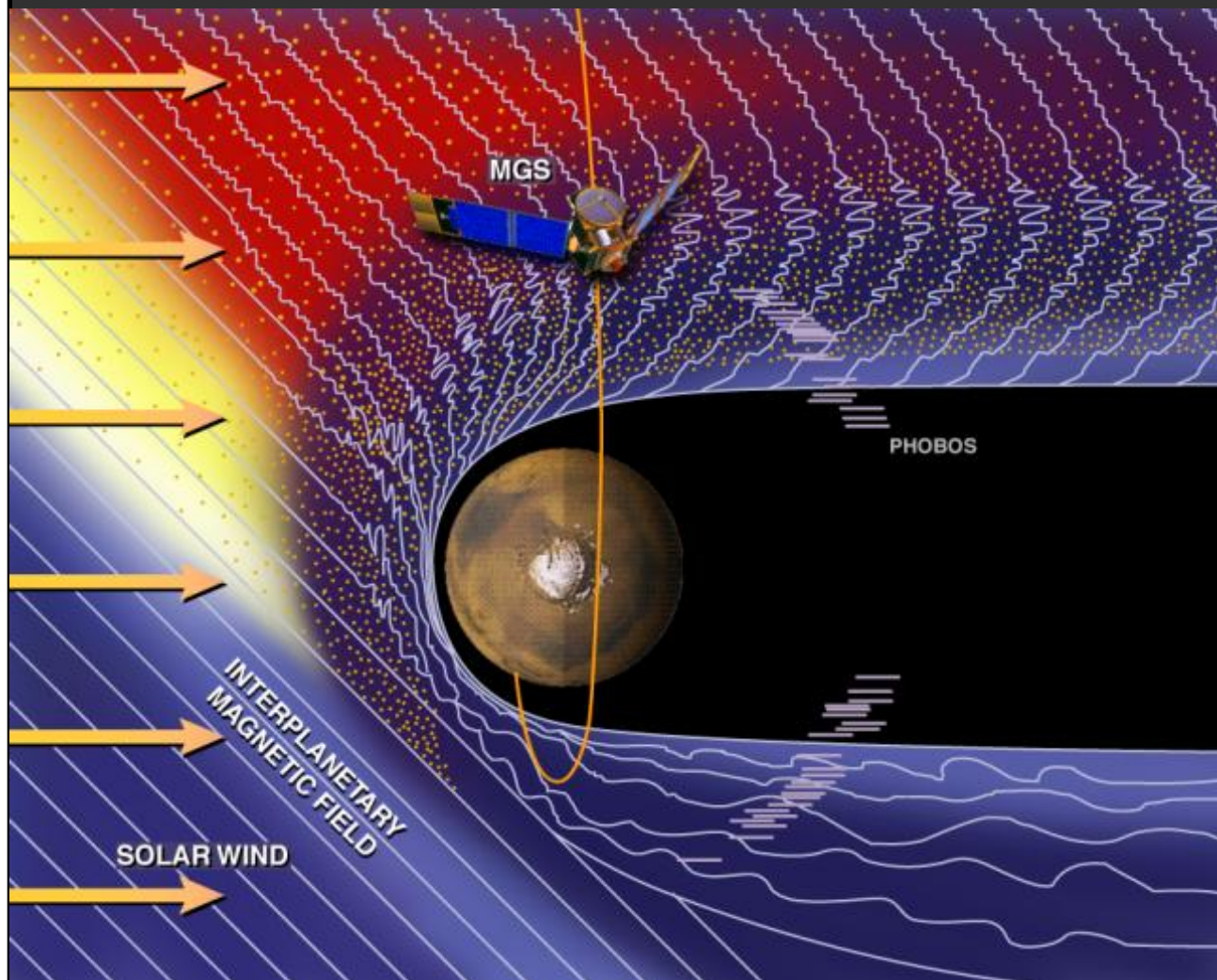
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.

Séance #4

4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs

- A. Les exoplanètes.
- B. La zone circumstellaire habitable.
- C. La composition chimique en élément lourd.
- D. Le champ magnétique.
- E. **Combien d'autres mondes ?**

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.

≈100 milliards d'étoiles dans la Voie Lactée

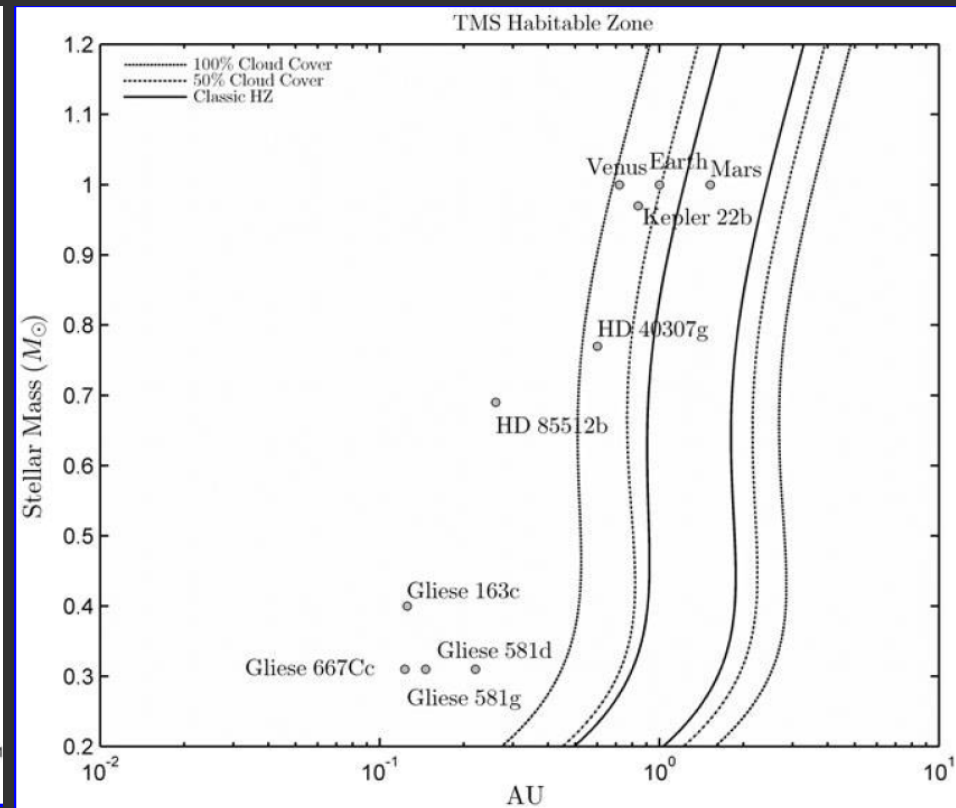
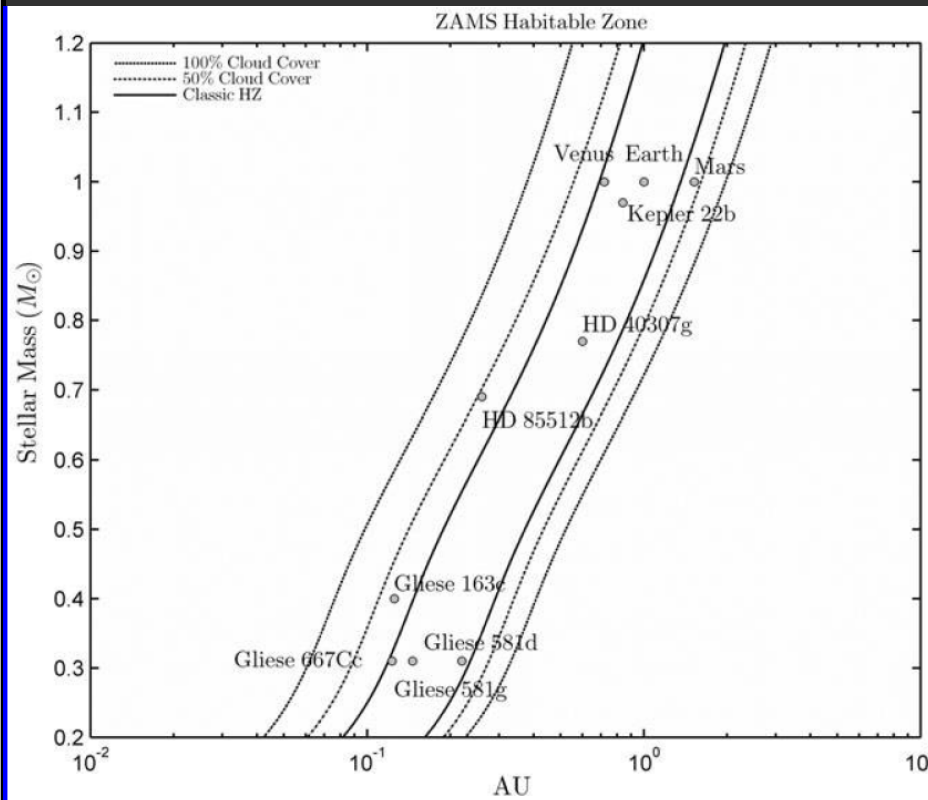
≈10-100 milliards de planètes habitables ?

16,5% des étoiles auraient autour d'elles une planète de type Terre
(Cassan et al. 2011, Howard et al; 2012, Fressin et al. 2013, Bonfils et al. sub)

x 100 milliards de galaxie dans l'Univers...

Earth-like Planets Around M-Stars	η_{Earth}	δ_{Earth}	p^{10}_{Earth}
	48%	6.4ly	94%

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.



©Rushby+2013, Astrobiology

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.

$$N_{\text{civ}} = F_{\text{ét}} \times P_{\text{pla}} \times N_{\text{pla}} \times P_{\text{vie}} \times P_{\text{int}} \times P_{\text{com}} \times T$$

The equation is presented on a light blue background. Above the terms are several icons: a spiral galaxy for $F_{\text{ét}}$, a solar system with a yellow star and planets for P_{pla} , a blue and white Earth globe for N_{pla} , a DNA double helix for P_{vie} , a human brain for P_{int} , a red satellite dish for P_{com} , and a black silhouette of a submarine for T .