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.

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

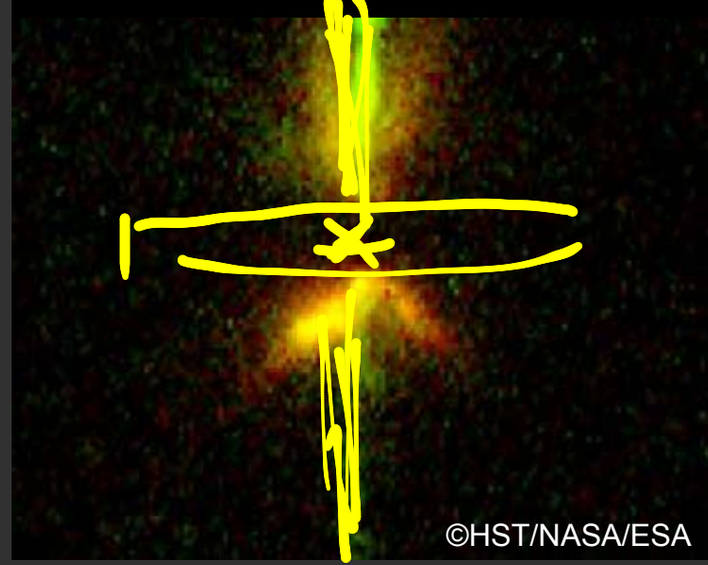
Séance #3

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.

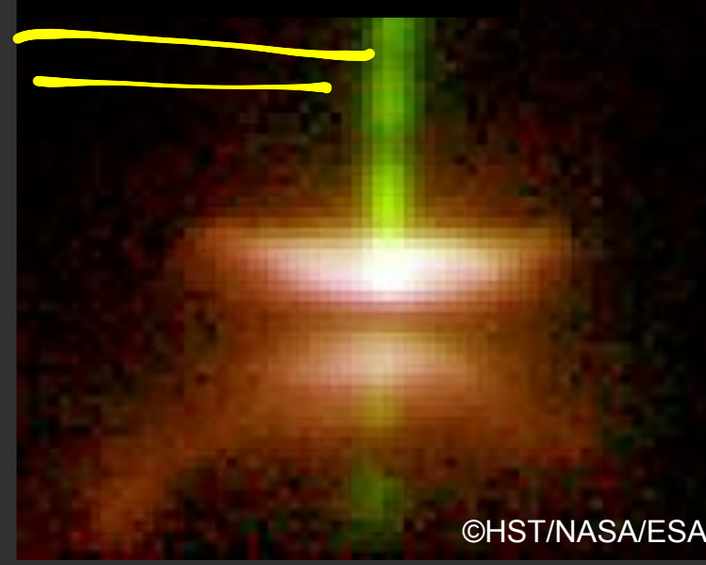
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ

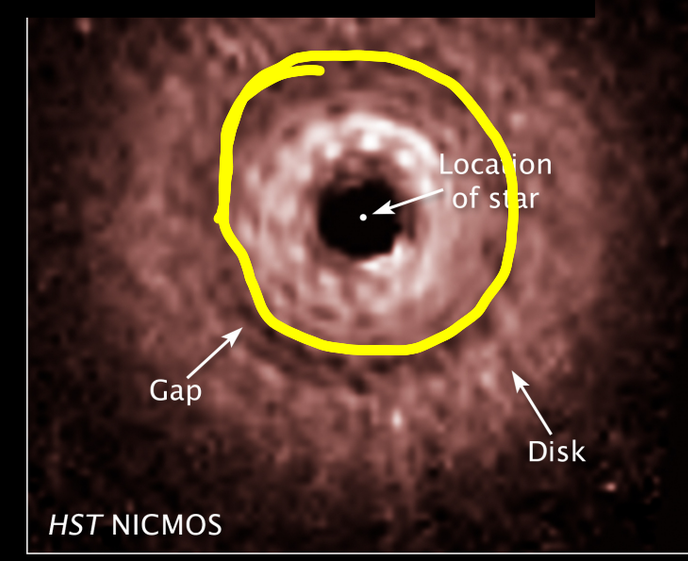
Étoile en formation
10^4 – 10^5 ans



Disque d'accrétion
10^5 – 10^6 ans

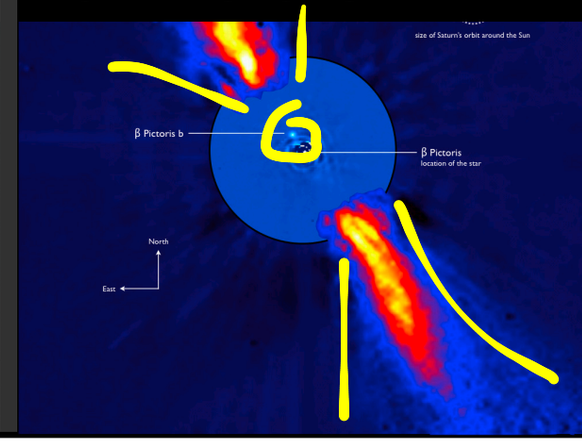


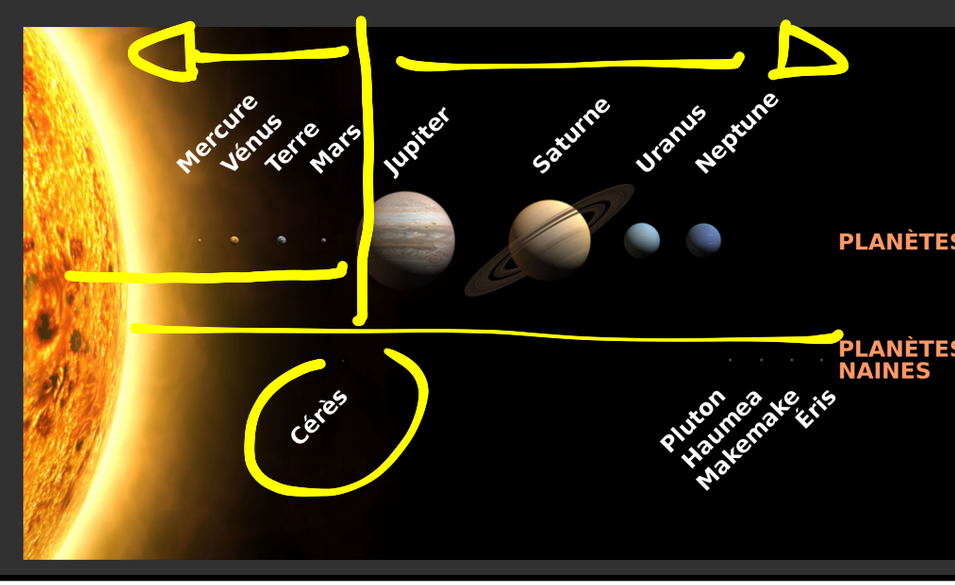
Disque protoplanétaire
10^6 – 10^7 ans



Formation de planètes géantes

Disque de débris
10^7 – 10^9 ans



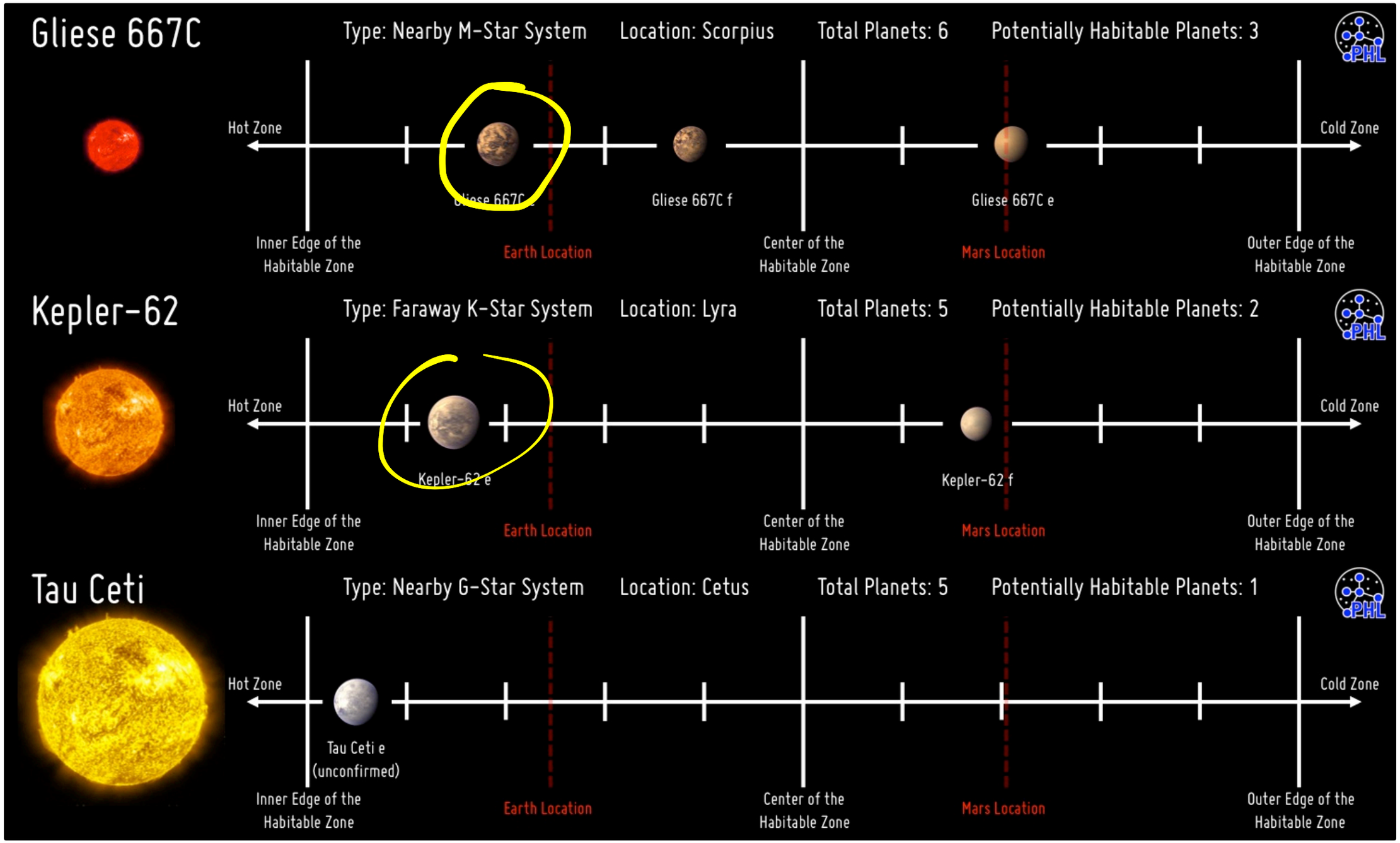


Auteur: Vincent Minier

EXPLOR NOVA

UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 3. RÉSUMÉ



Auteur: Vincent Minier

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.

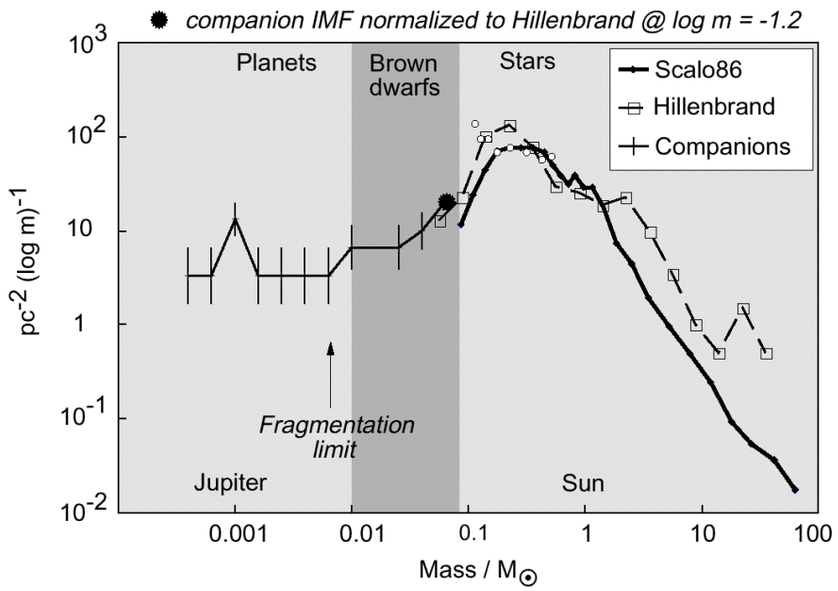
- Fonction de masse initiale des étoiles à la naissance (IMF): plus d'étoiles de type M que de type naine brunes ou OB. 80% étoiles de type G-K-M, surtout M.
- Durée de vie d'une étoile dépend de sa masse:

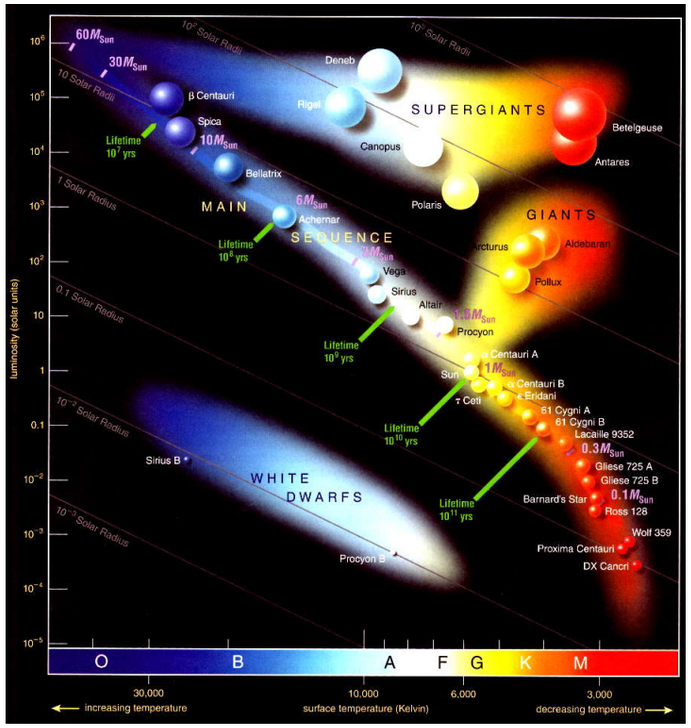
OB (1-10 Mans), G-K-M (1-20 Md ans).

➔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 Mans pour notre espèce)

➔ Privilégie les étoiles de durée de vie longue





Auteur: Vincent Minier

UNIVERSITÉ DE NANTES

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 ?

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

Séance #4

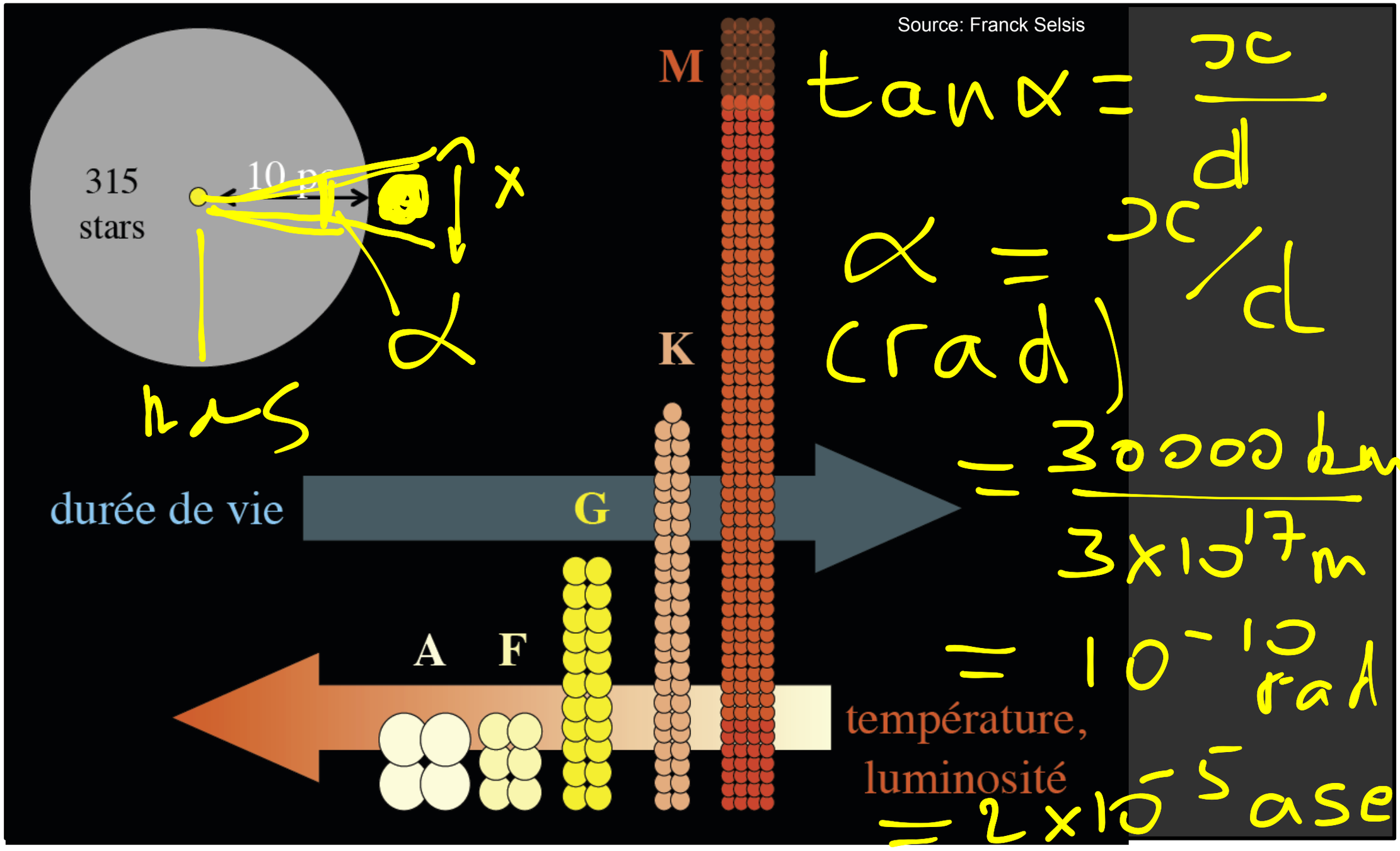
4. Les conditions de l’habitabilité ici et ailleurs
   - **A. Les exoplanètes.**
   - B. La zone circumstellaire habitable.
   - C. La composition chimique en élément lourd.
   - D. Le champ magnétique.
   - E. Combien d’autres mondes ?

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

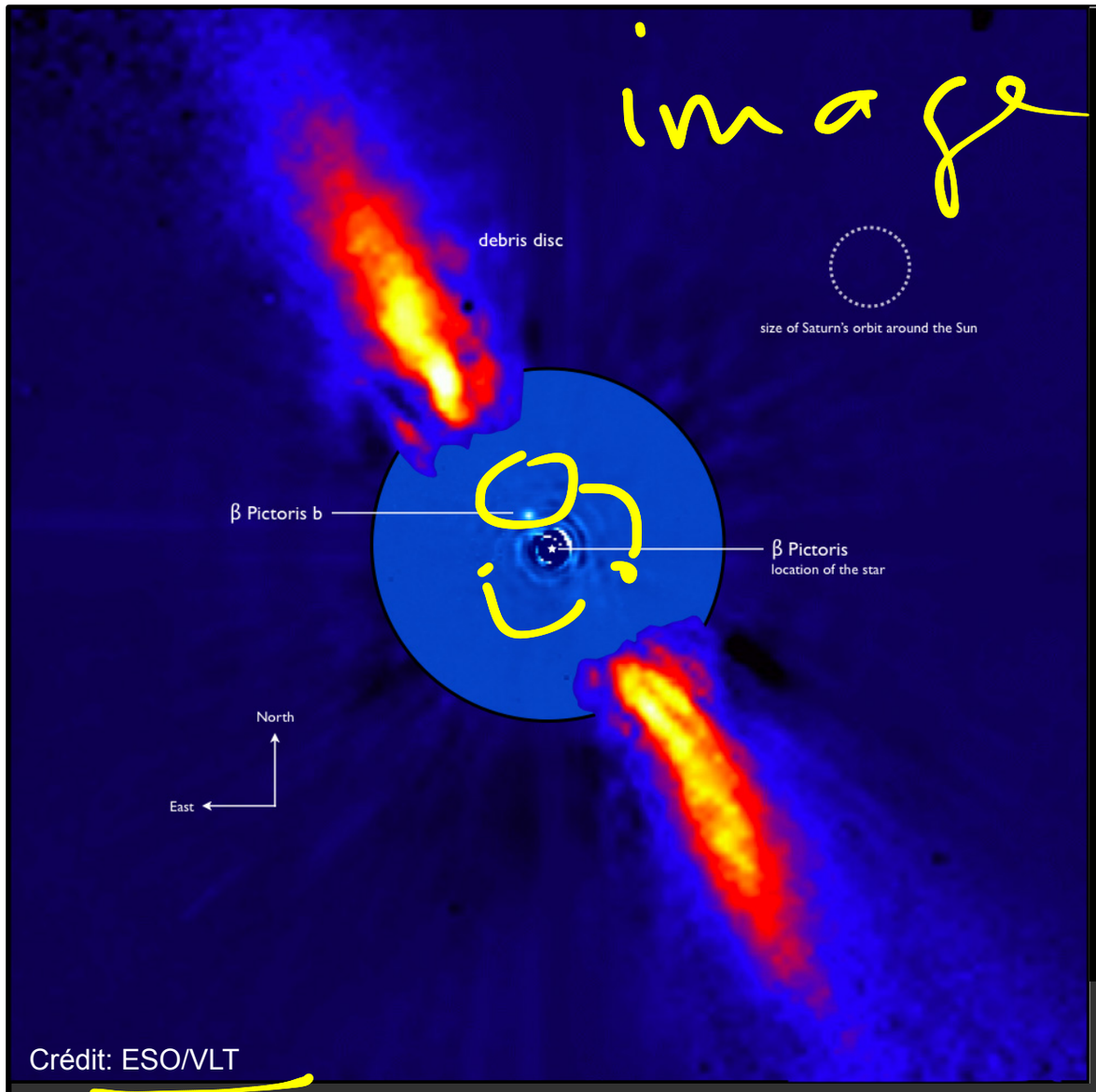
Auteur: Vincent Minier

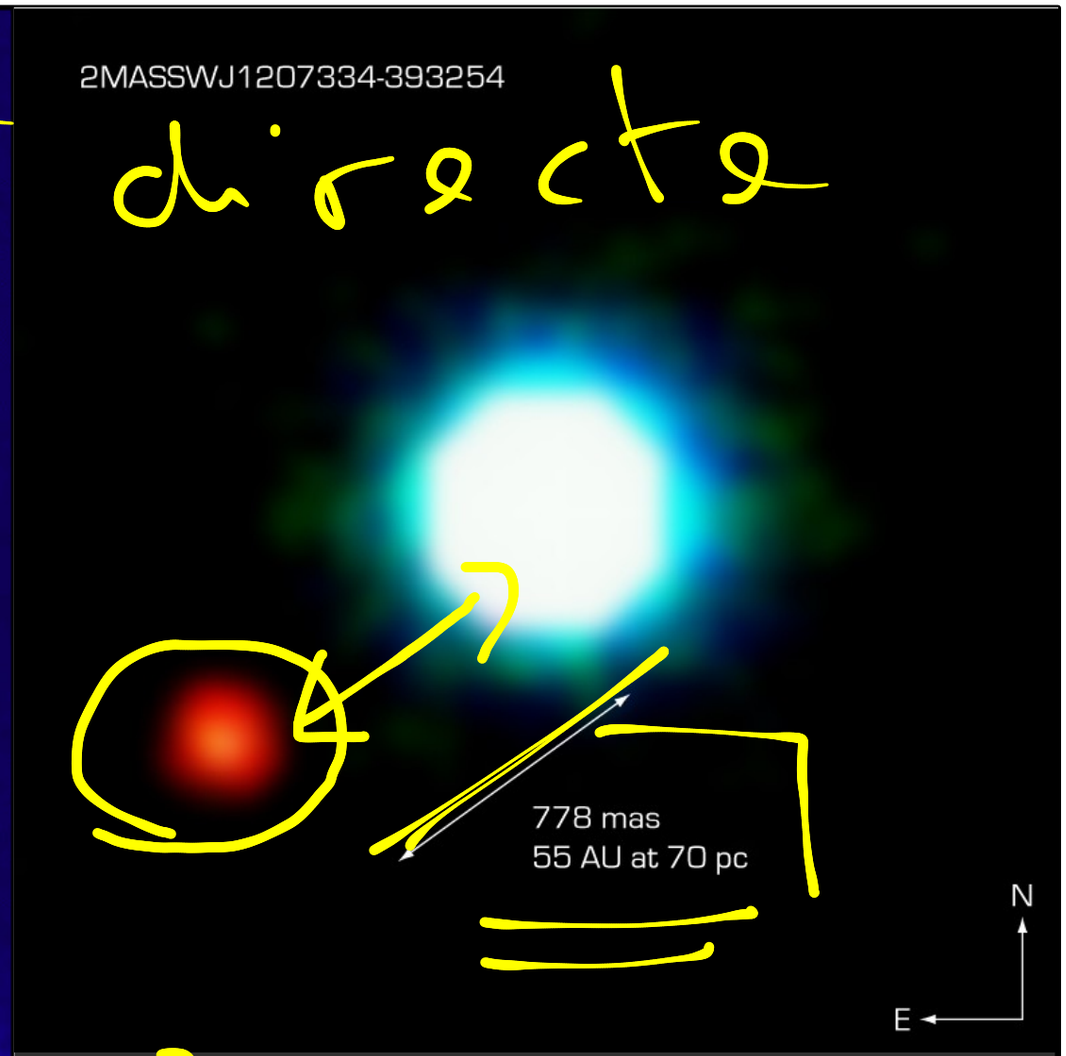
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



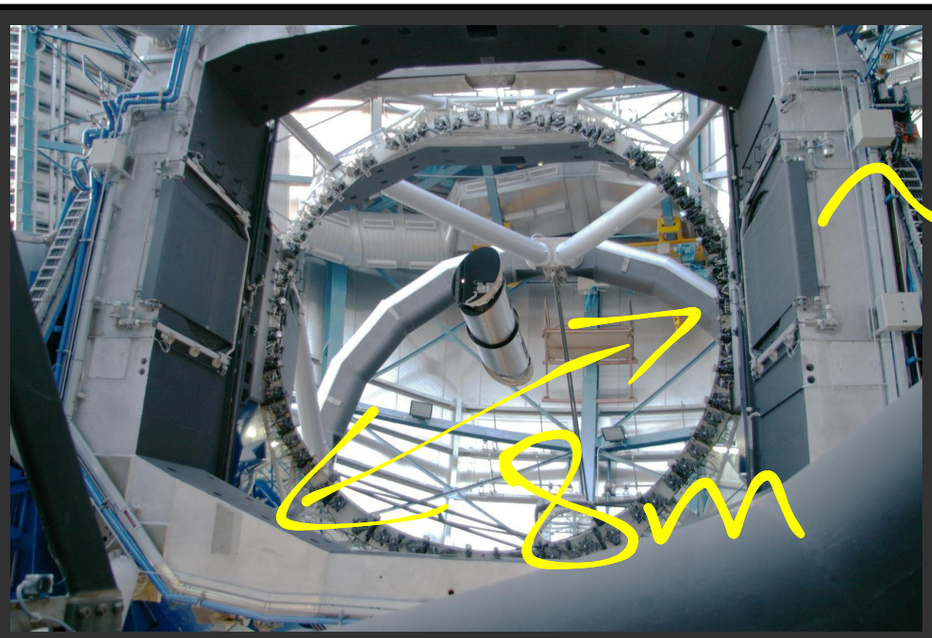


0,7 arc sec

Very Large Telescope

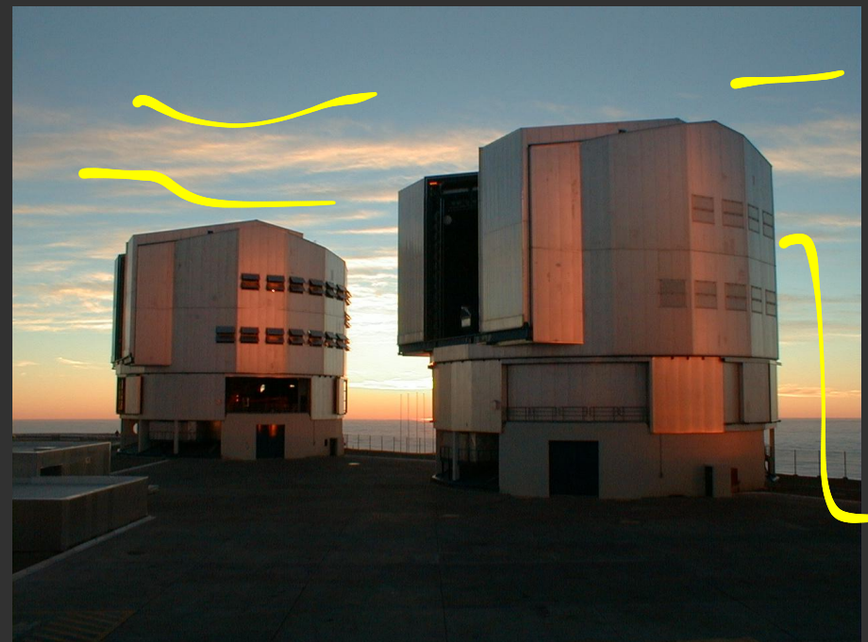
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



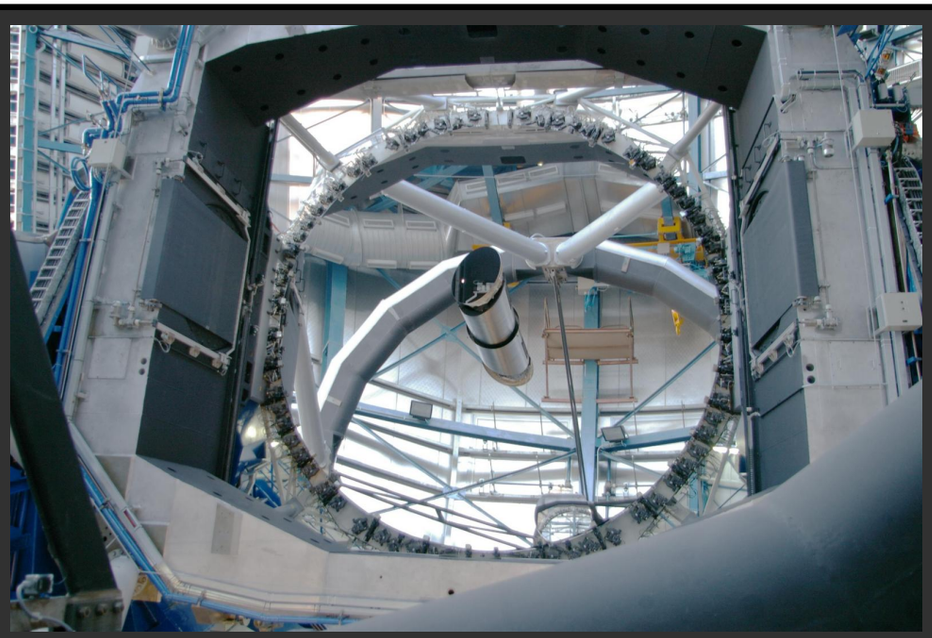
$$\sim \lambda / D = \frac{10^{-6}}{10^{4}} = 10^{-7}\,\text{rad}$$

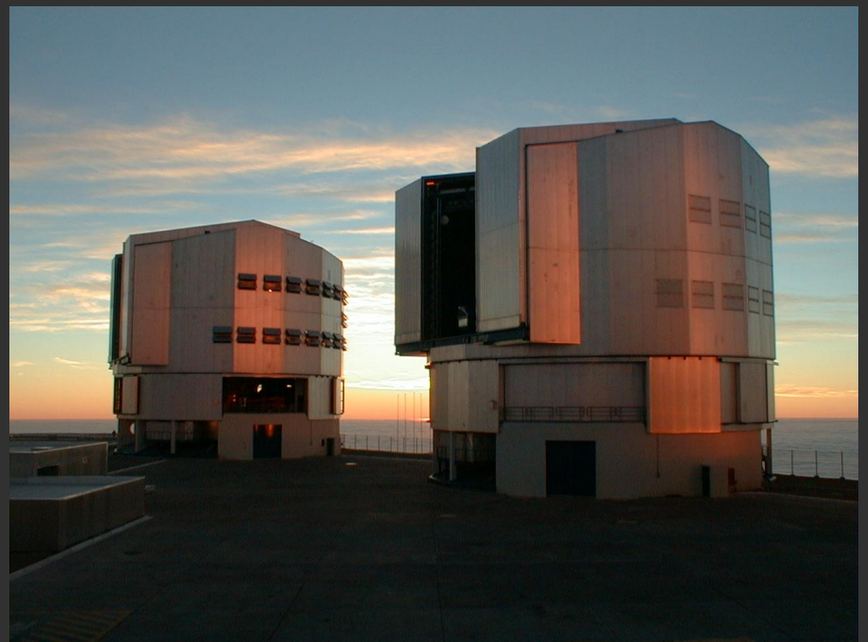
$$\boxed{\simeq 0{,}01\,\text{arcsec}}$$



$\rightarrow$ 0,3 arcsec

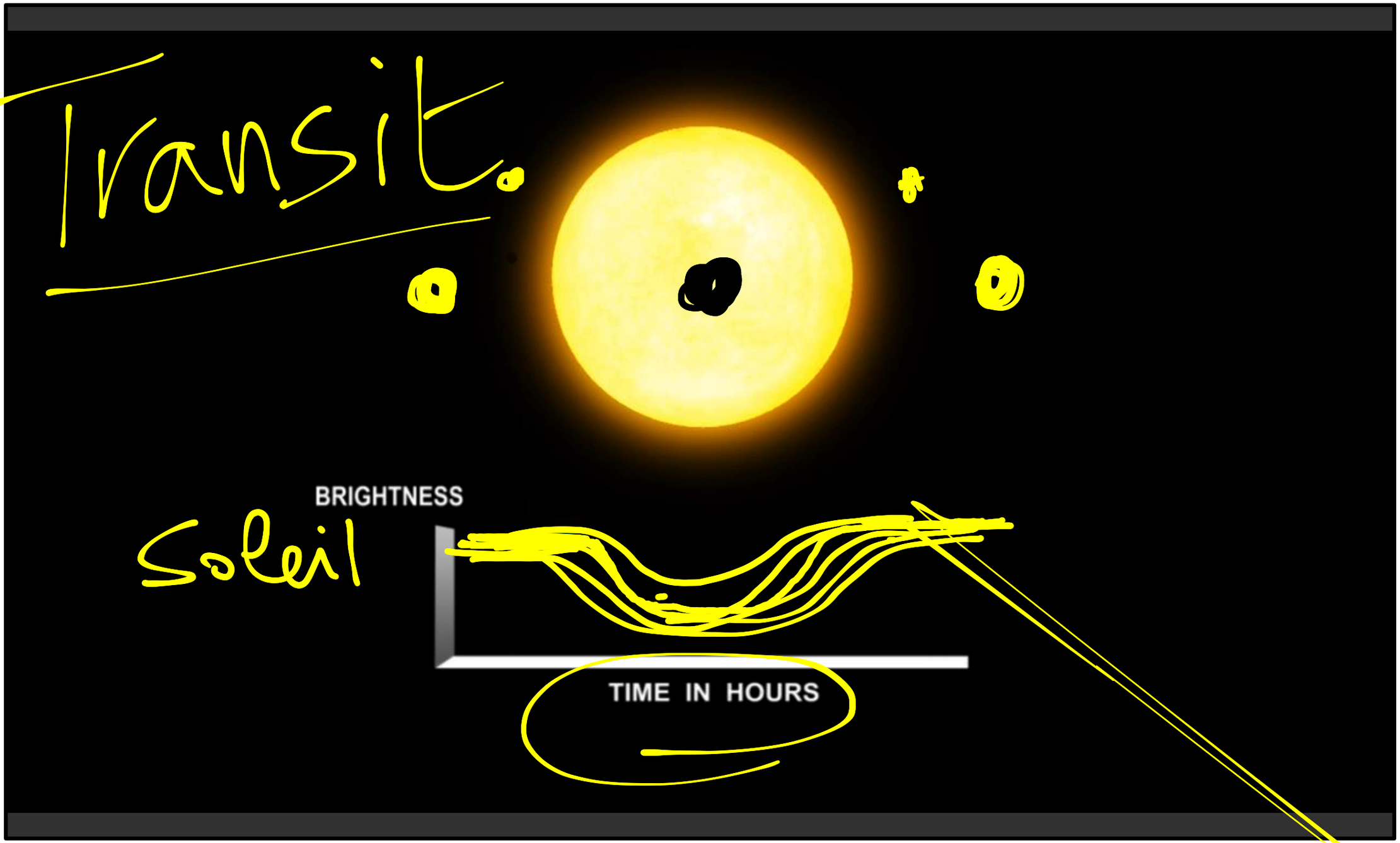
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.





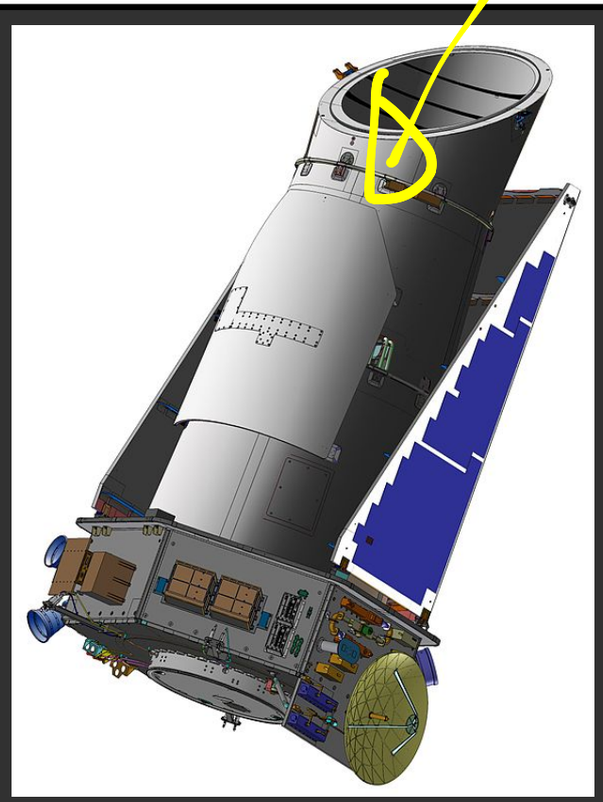
Auteur: Vincent Minier

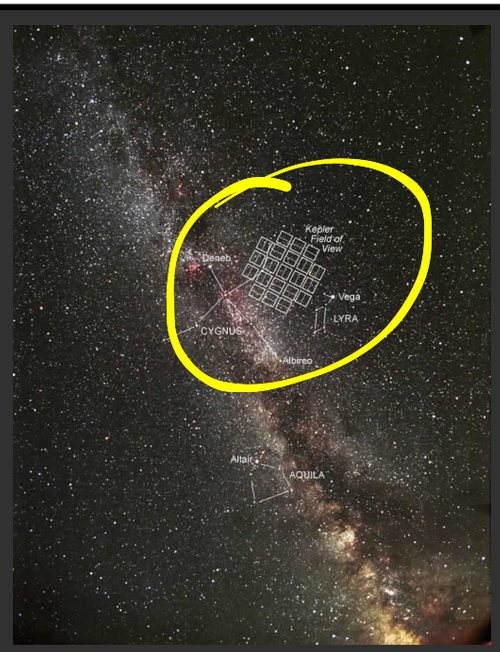
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

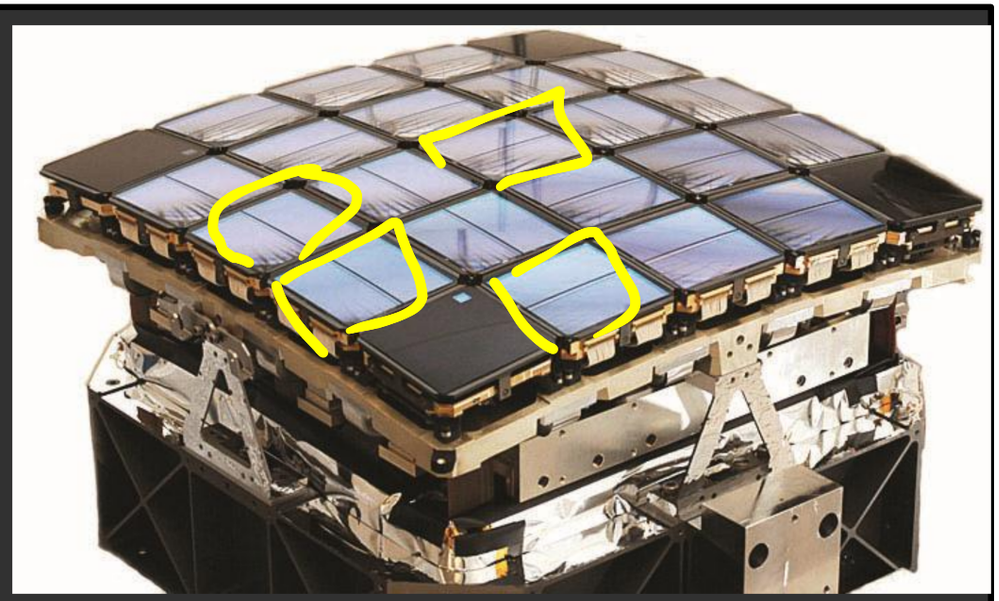


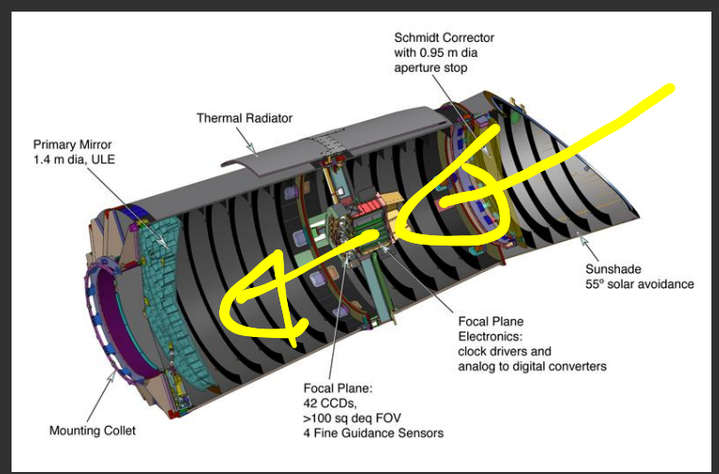
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

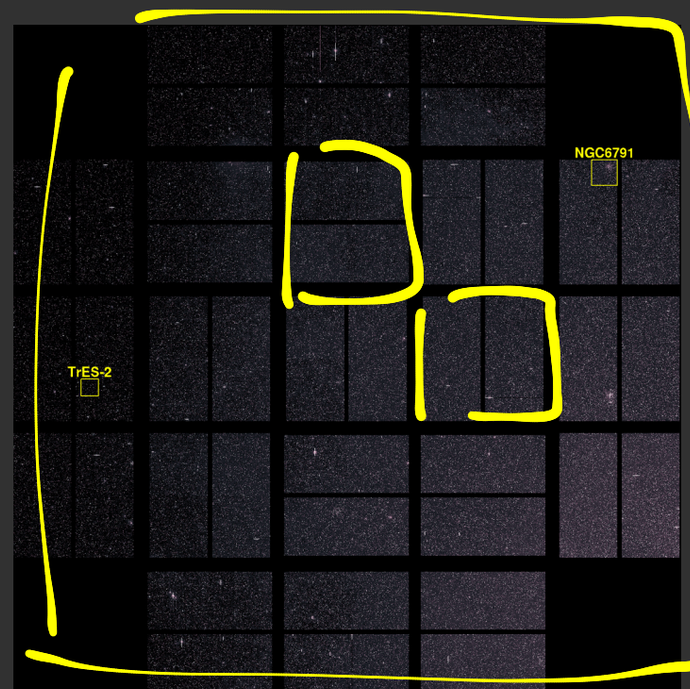






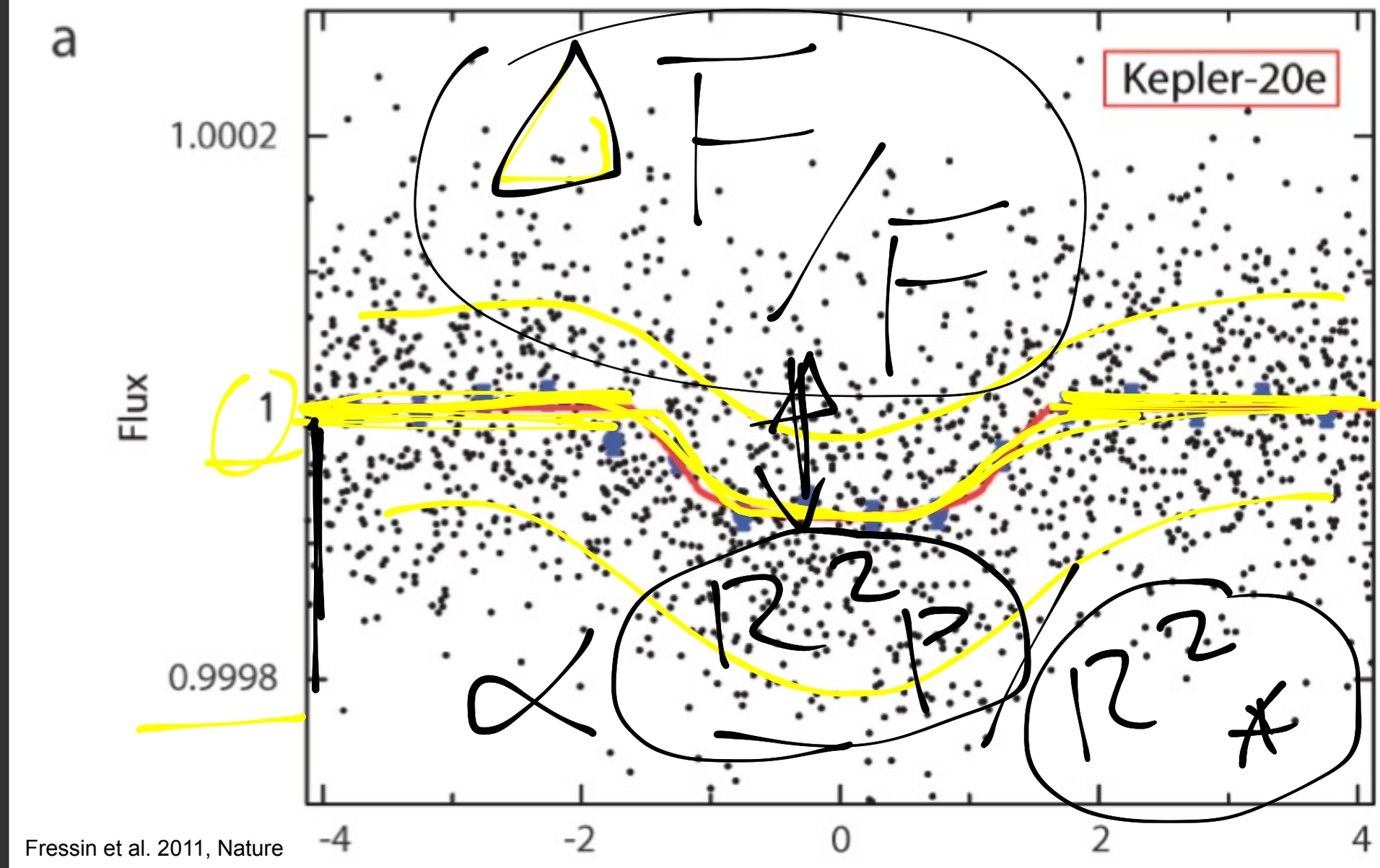


Kepler
145 000
étoile



Auteur: Vincent Minier

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	

Etoile

- **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	~ 8,7	~ 1,91	~ 0,04537	~ 3,6961219	~ 6,5
Kepler-20e	0,39 à 1,67	~ 0,868	~ 0,0507	~ 6,098493	?
Kepler-20c	~ 16,1	~ 3,07	~ 0,0930	~ 10,854092	~ 2,91
Kepler-20f	0,66 à 3,04	~ 1,034	~ 0,1104	~ 19,57706	?
Kepler-20d	< 20,1	~ 2,75	~ 0,3453	~ 77,61184	< 4,07

Système planétaire de Kepler-20[6].

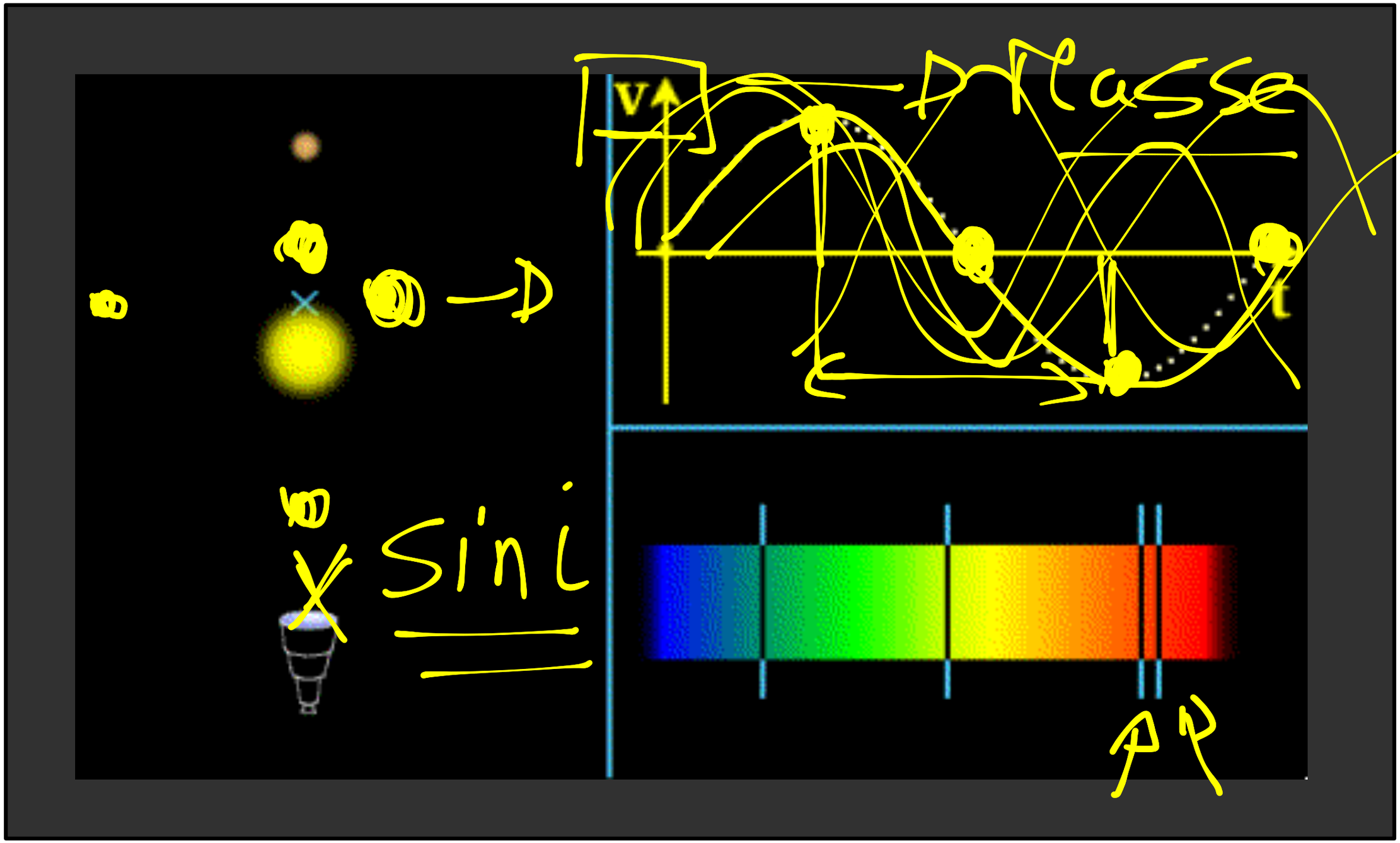
↑ Planète

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 (± 1.3e-05) *days* ref.	77.61185 ($_{-0.00037}^{+0.00015}$) *days* ref.	6.098493 (± 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.



Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.

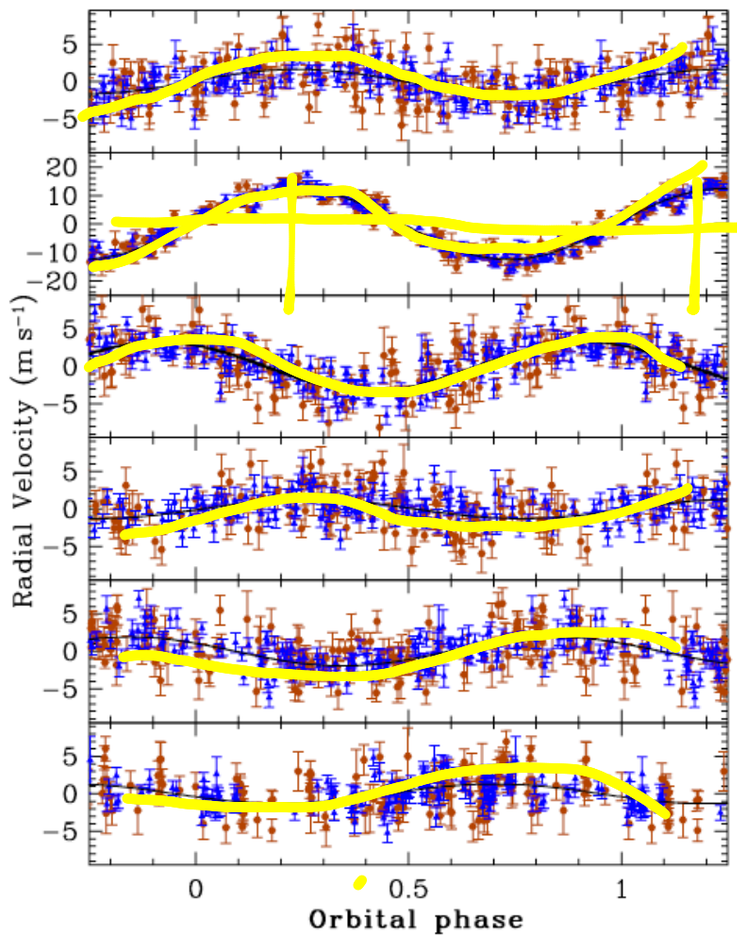


Figure 5. Phased reflex barycentric velocities of the host star due individually to the planets at 3.15 days, 5.37 days, 12.9 days, 37 days, 67 days, and 433 days from the all-circular fit of Table 2. Filled (red) hexagon points are from Keck while filled (blue) triangles are from HARPS.

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

We also carefully examined the effects of including dynamics

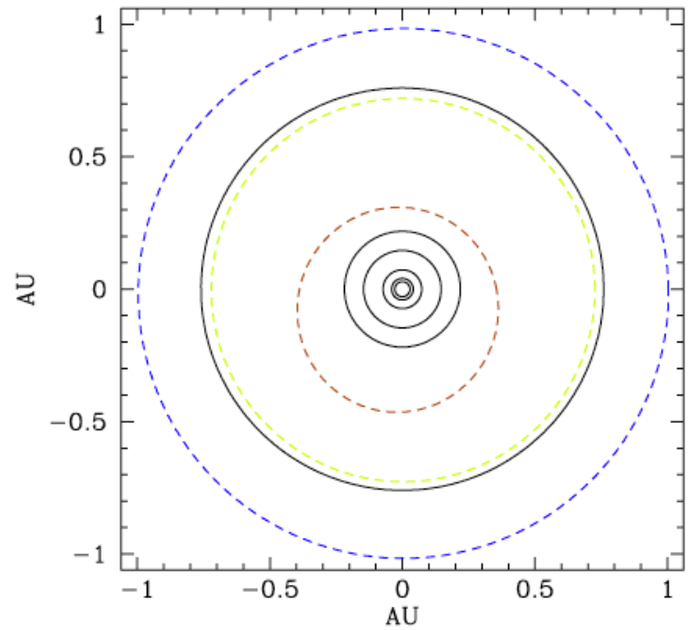


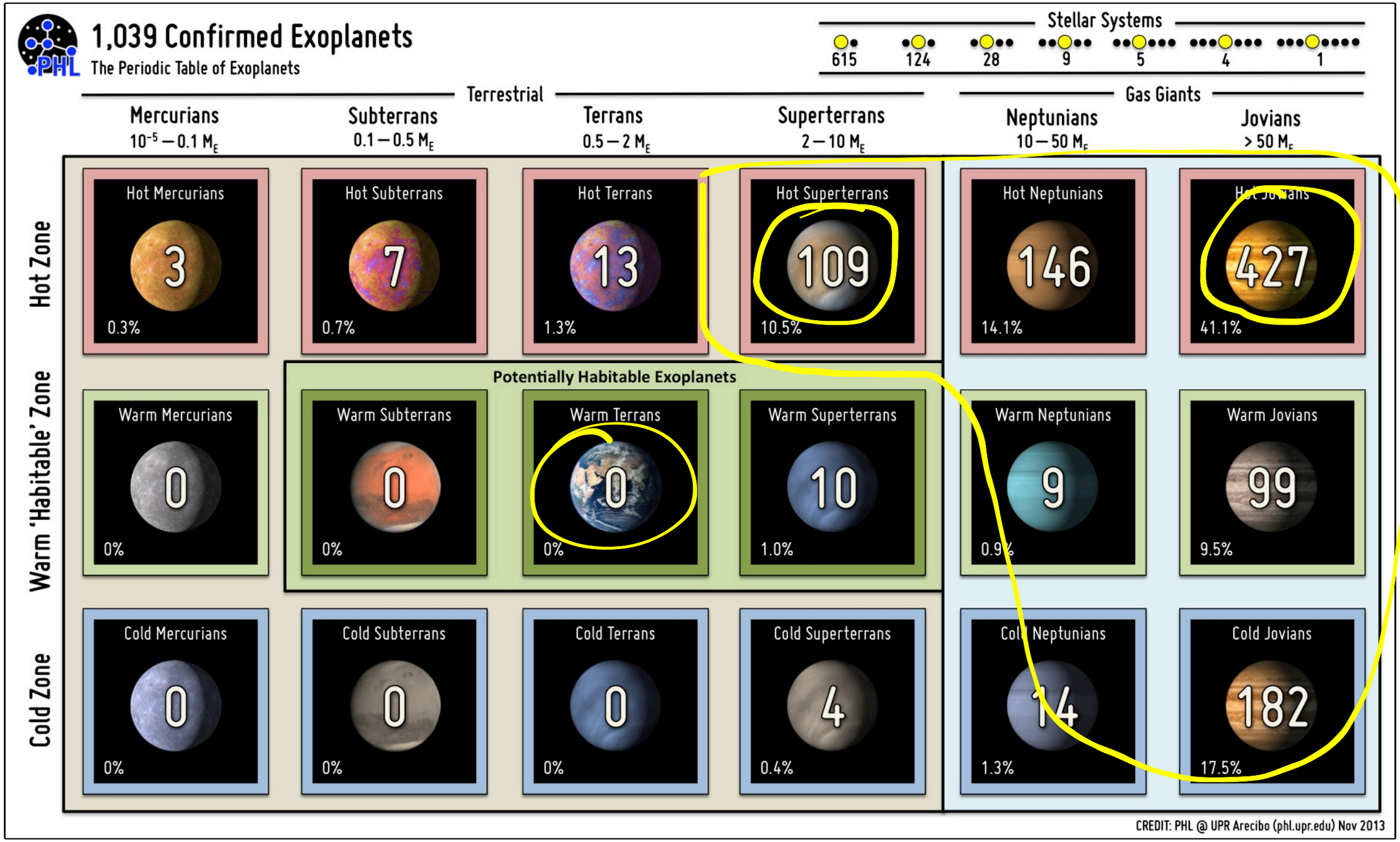
Figure 6. Top view of the GJ 581 system. For reference, the orbits of Earth, Venus, and Mercury are overlaid as dashed blue, green, and red lines, respectively.

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.

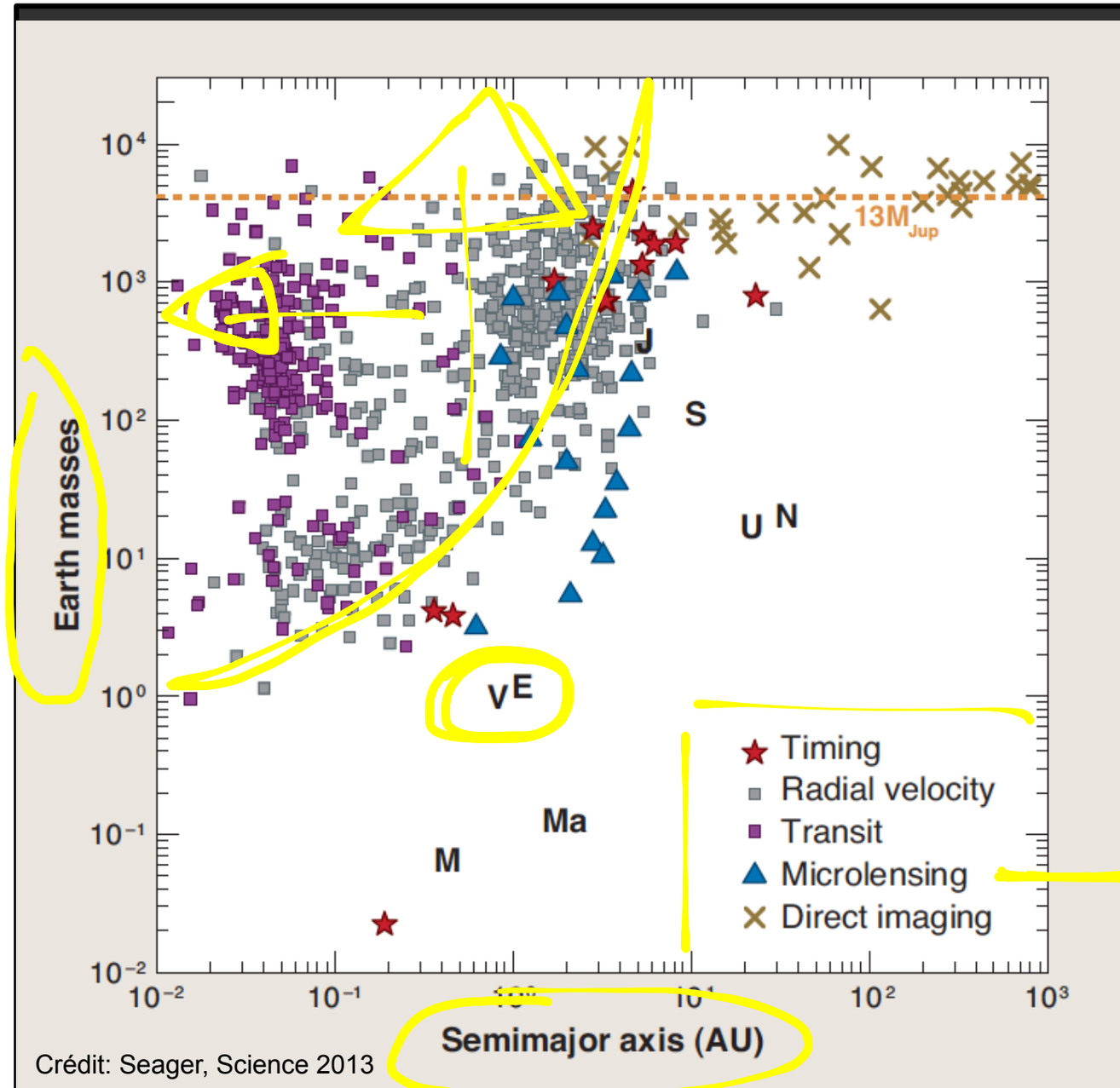


Auteur: Vincent Minier

EXPLOR NOVA

UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.A.



Crédit: Seager, Science 2013

Auteur: Vincent Minier

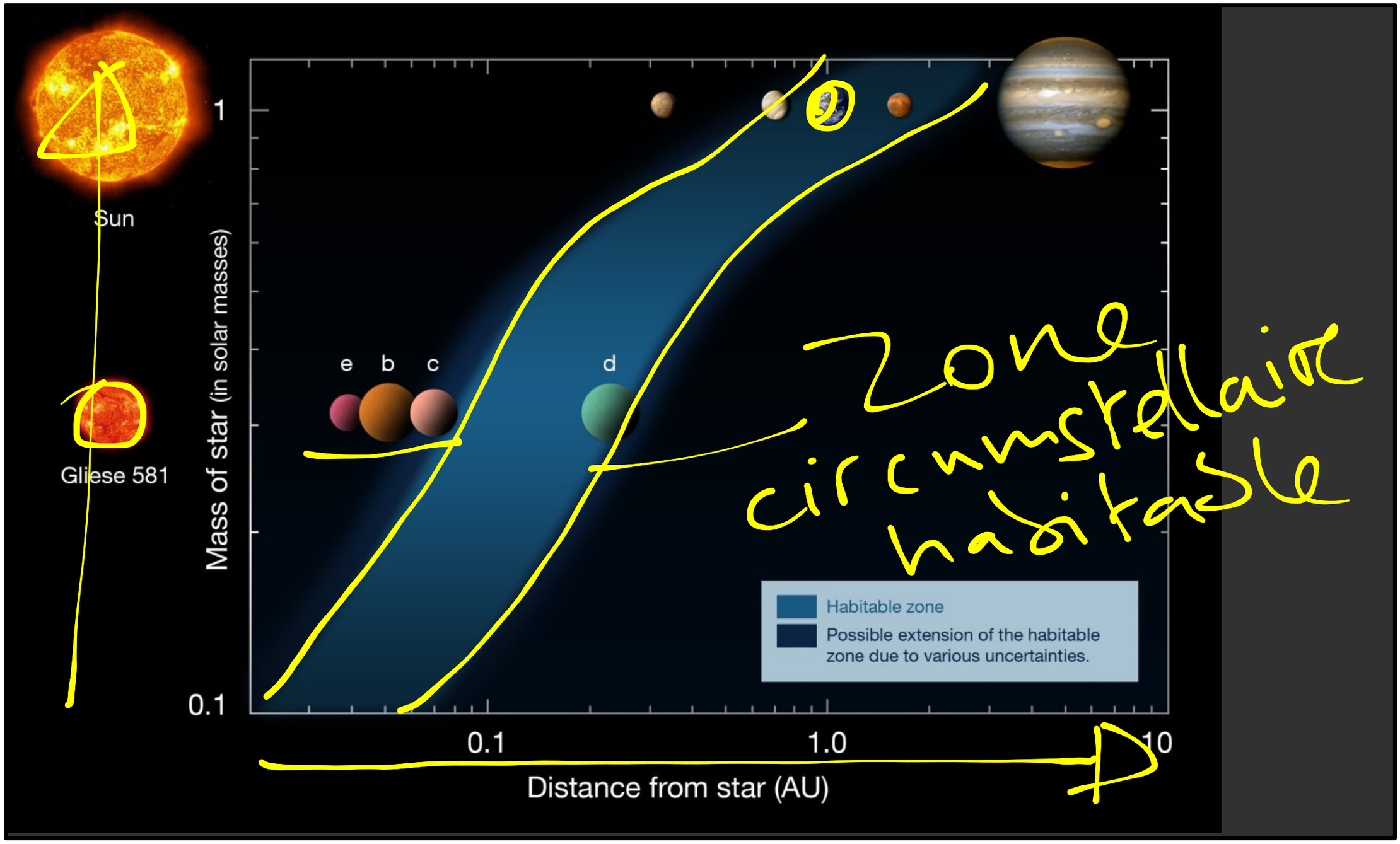
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

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 ?

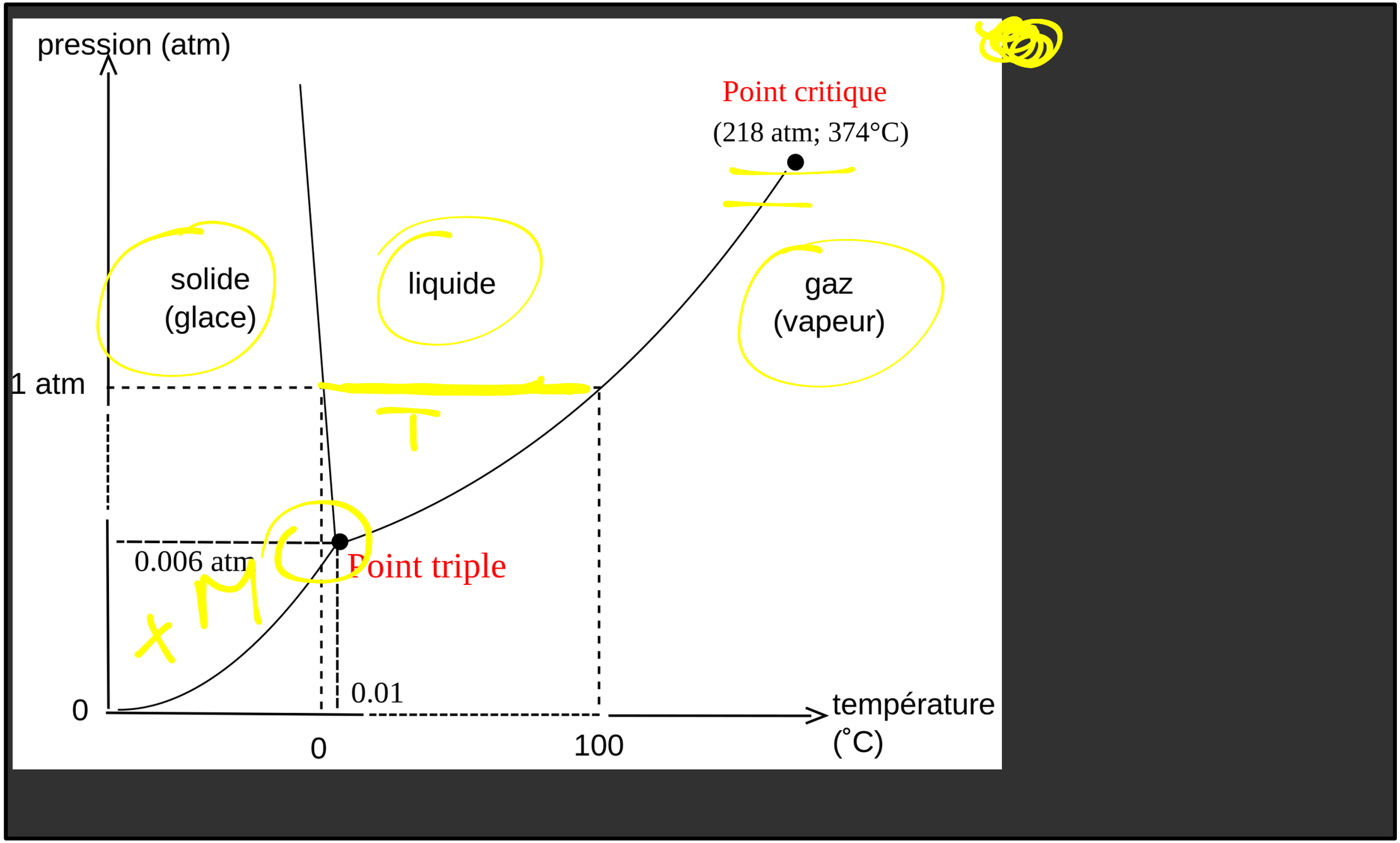
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



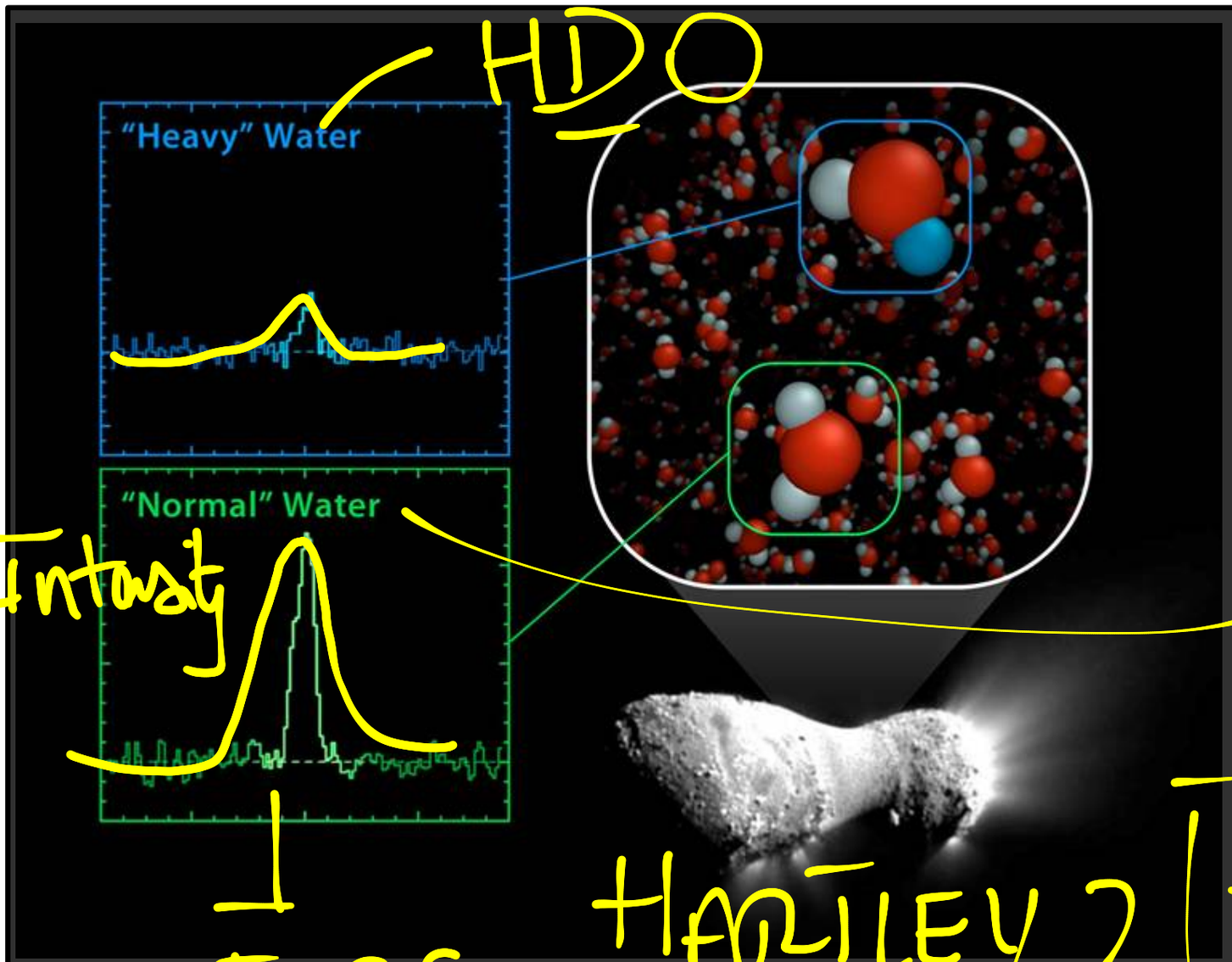
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



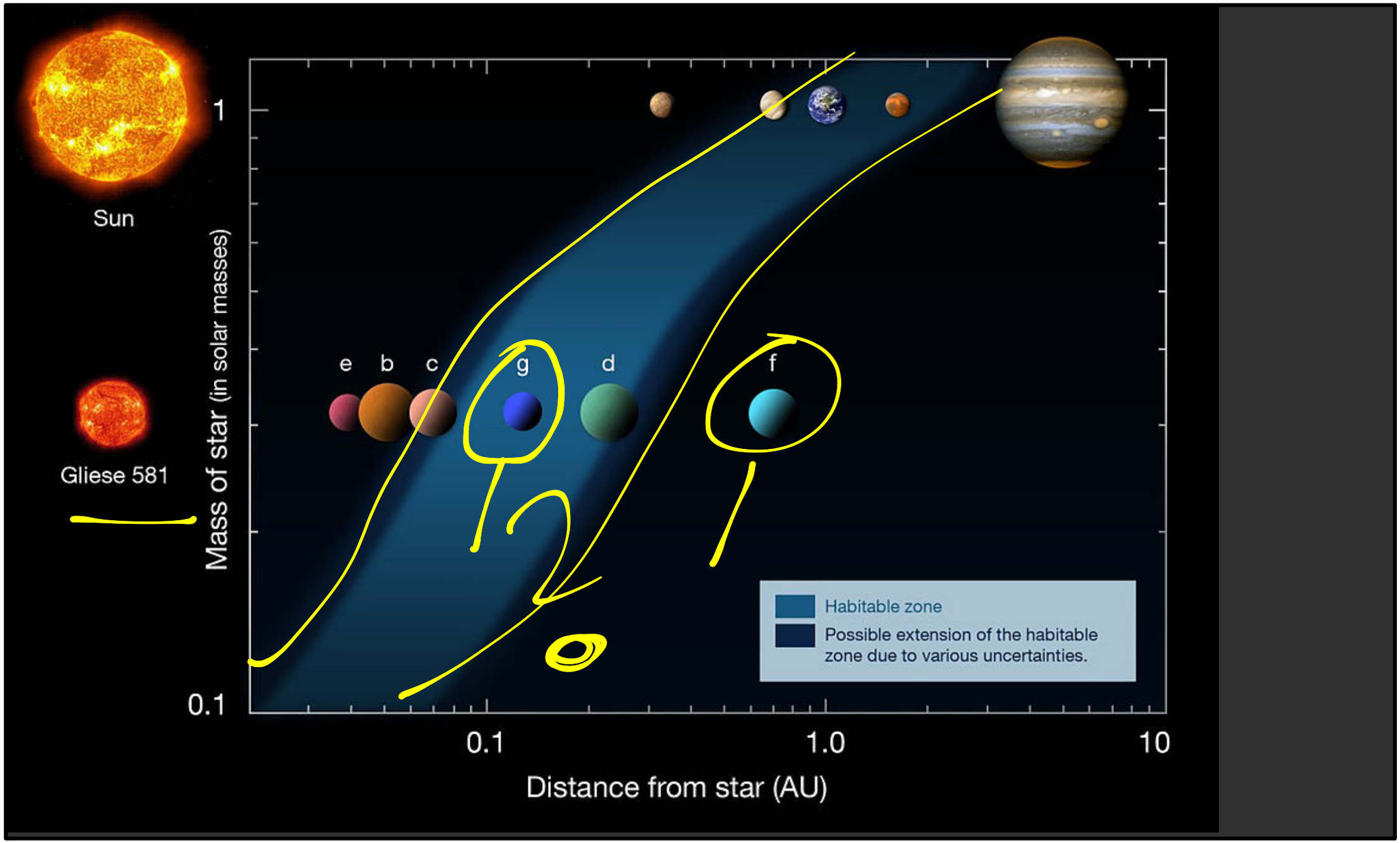
eau ?

H_2O ?

$D/H = 1{,}56 \times 10^{-4}$

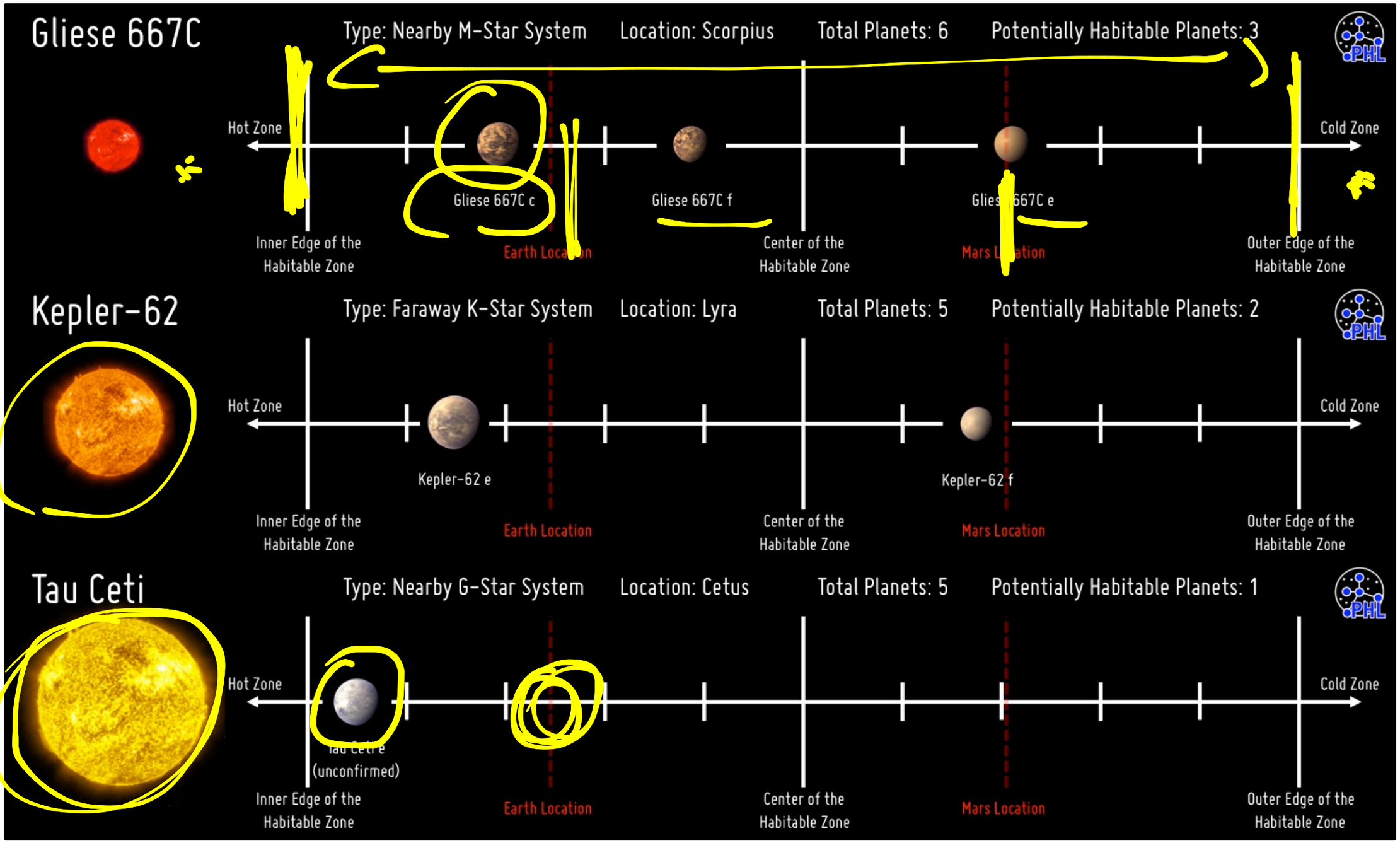
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.

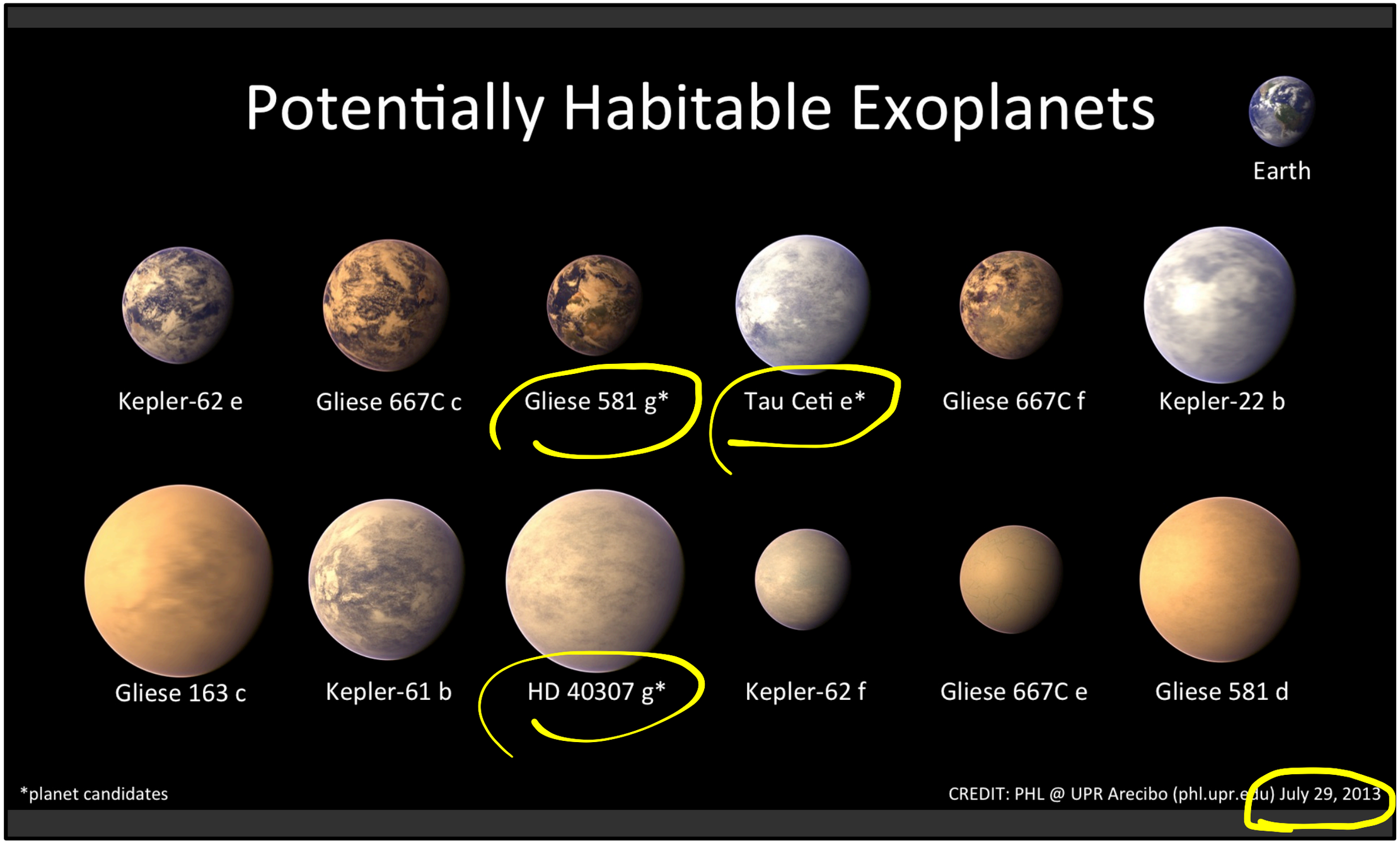


Auteur: Vincent Minier

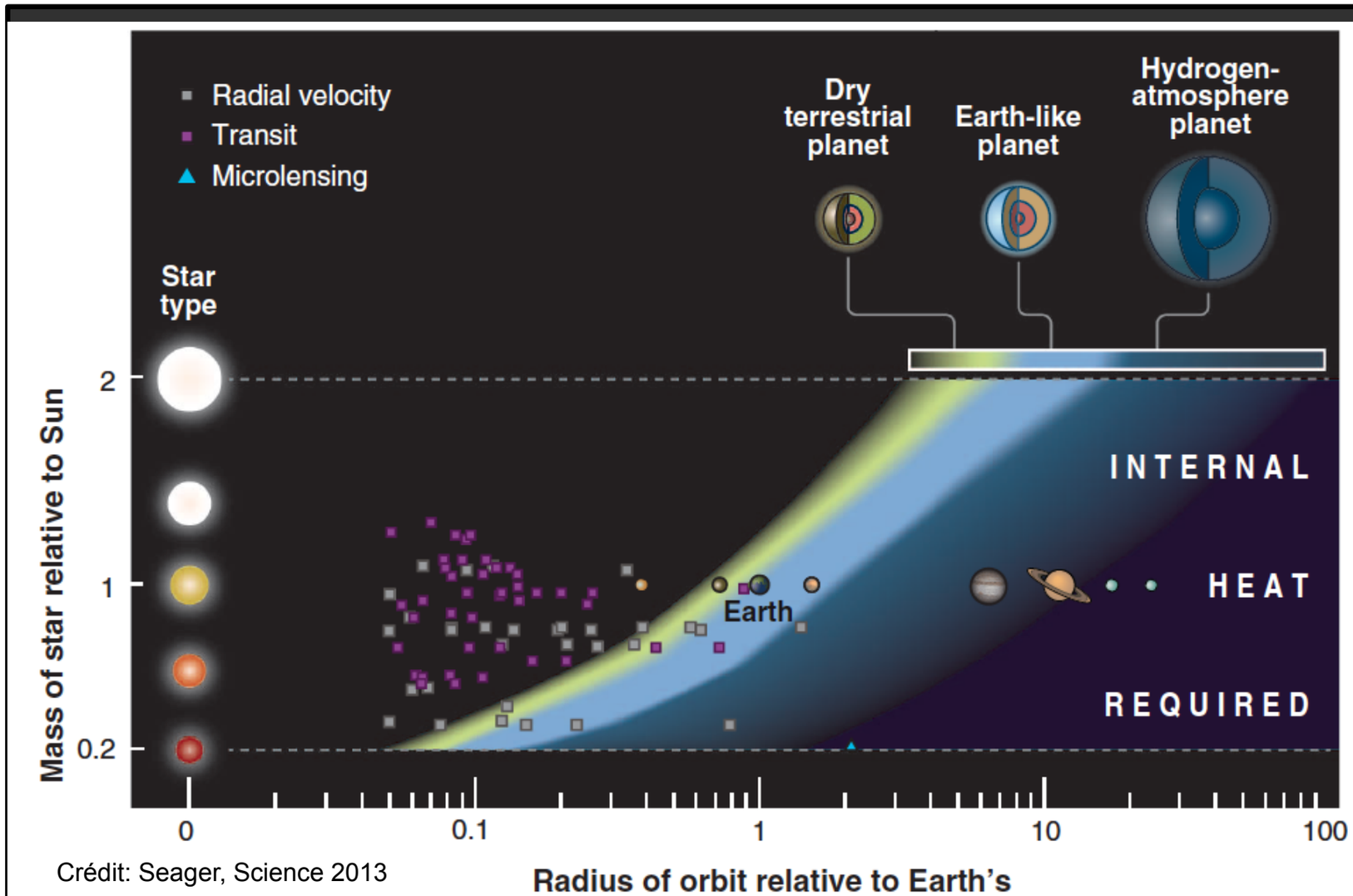
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



Auteur: Vincent Minier


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

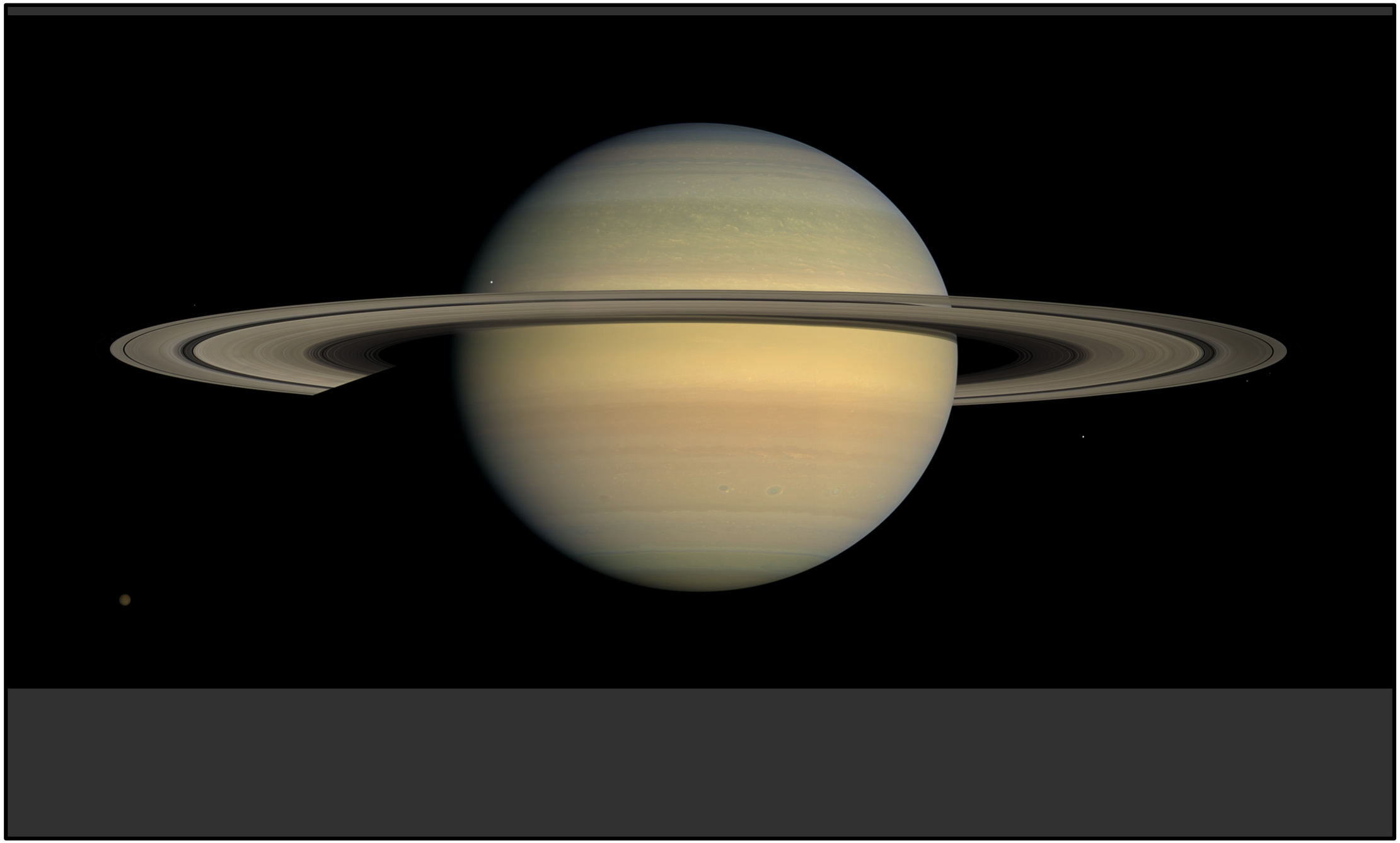
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



Crédit: Seager, Science 2013

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.B.



Auteur: Vincent Minier

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 ?

Auteur: Vincent Minier

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)

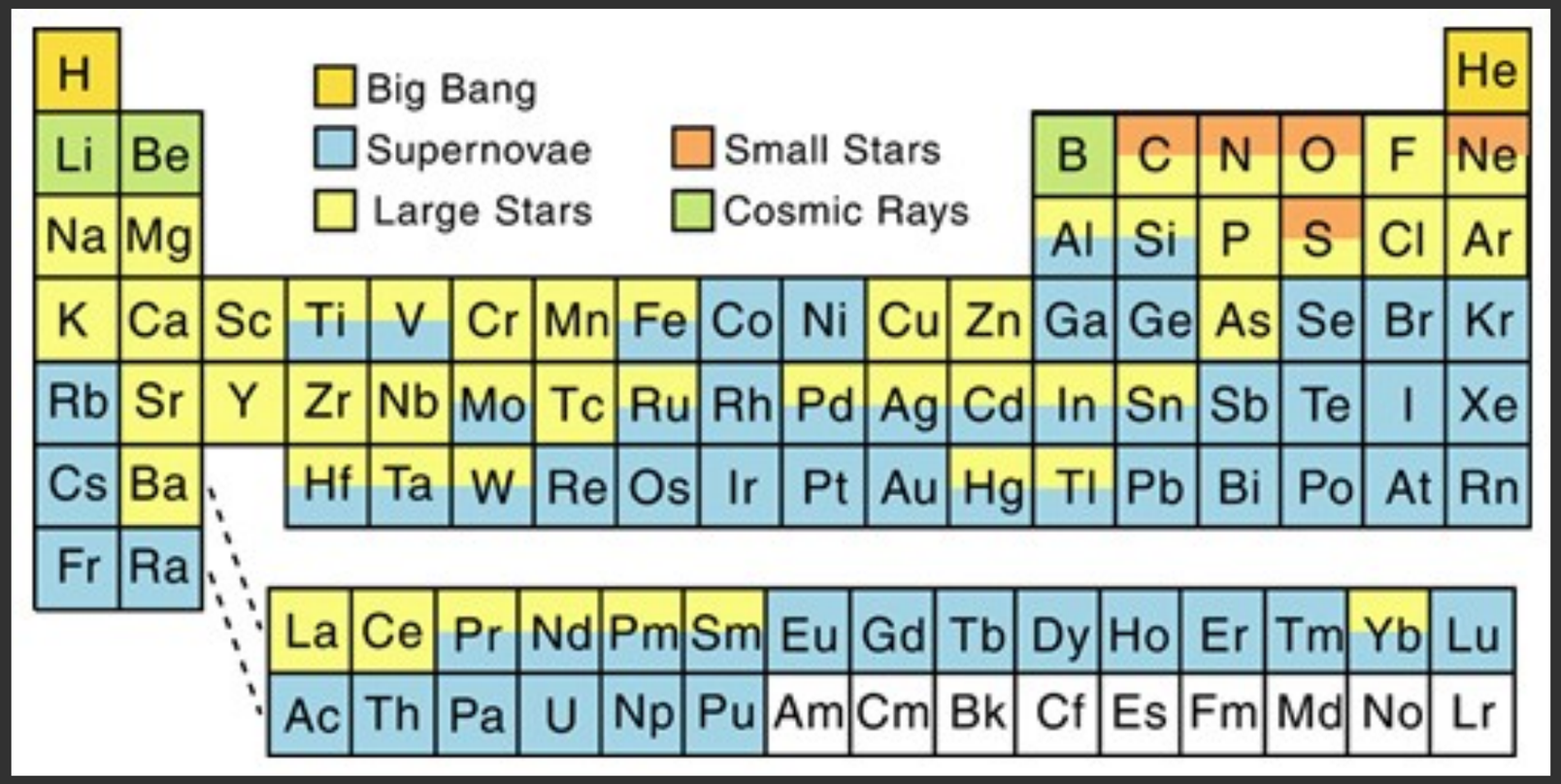
Etoiles de masse de 8x à 10x celle du Soleil : T = milliard de degrés

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

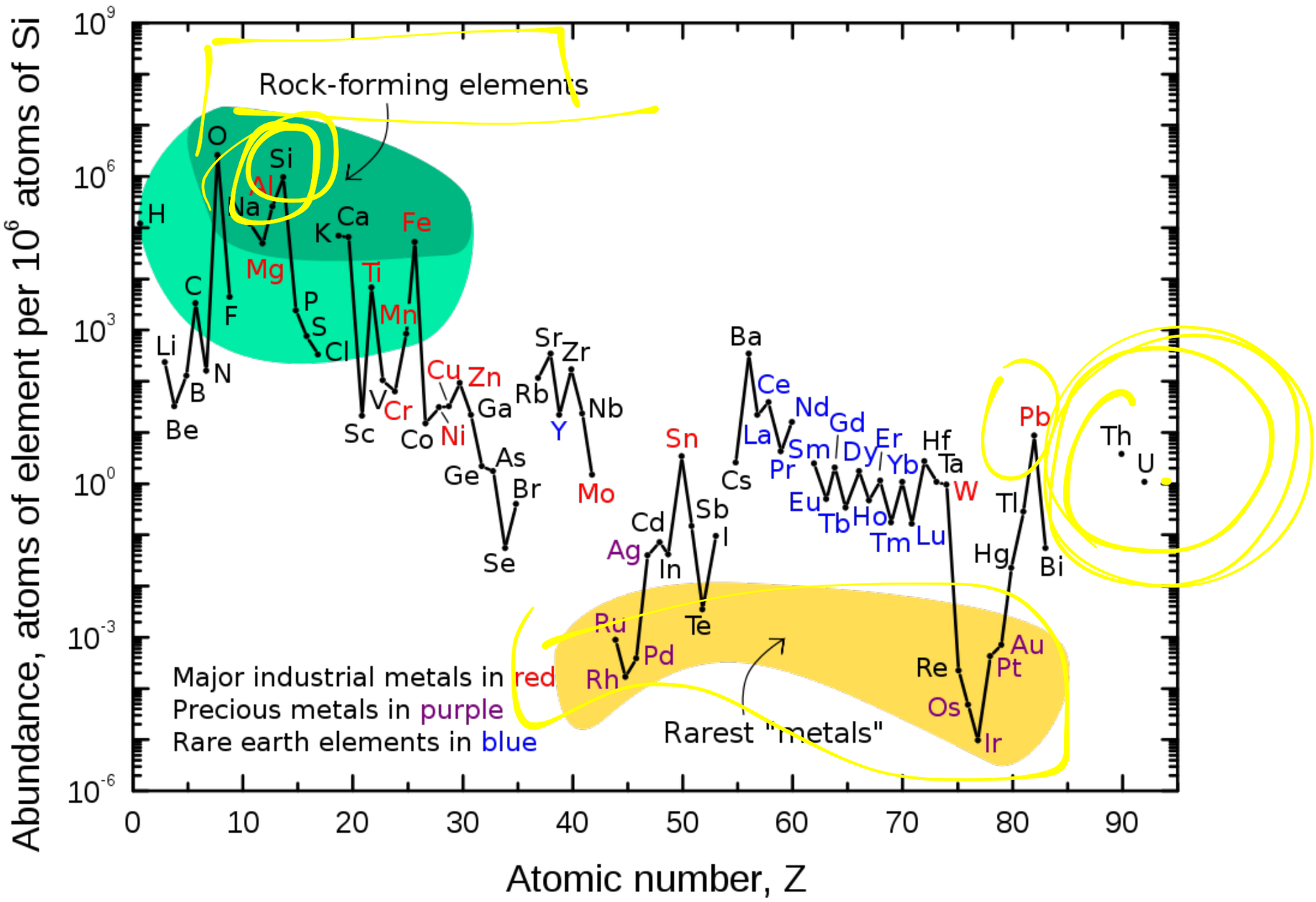
hélium (He), lithium (Li), bore (B) et béryllium (Be)
carbone (C), azote (N), oxygène (O), néon (Ne) et magnésium (Mg)
sodium (Na), soufre (S), silicium (Si)
Nickel (Ni), cobalt (Co), fer (Fe)

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.



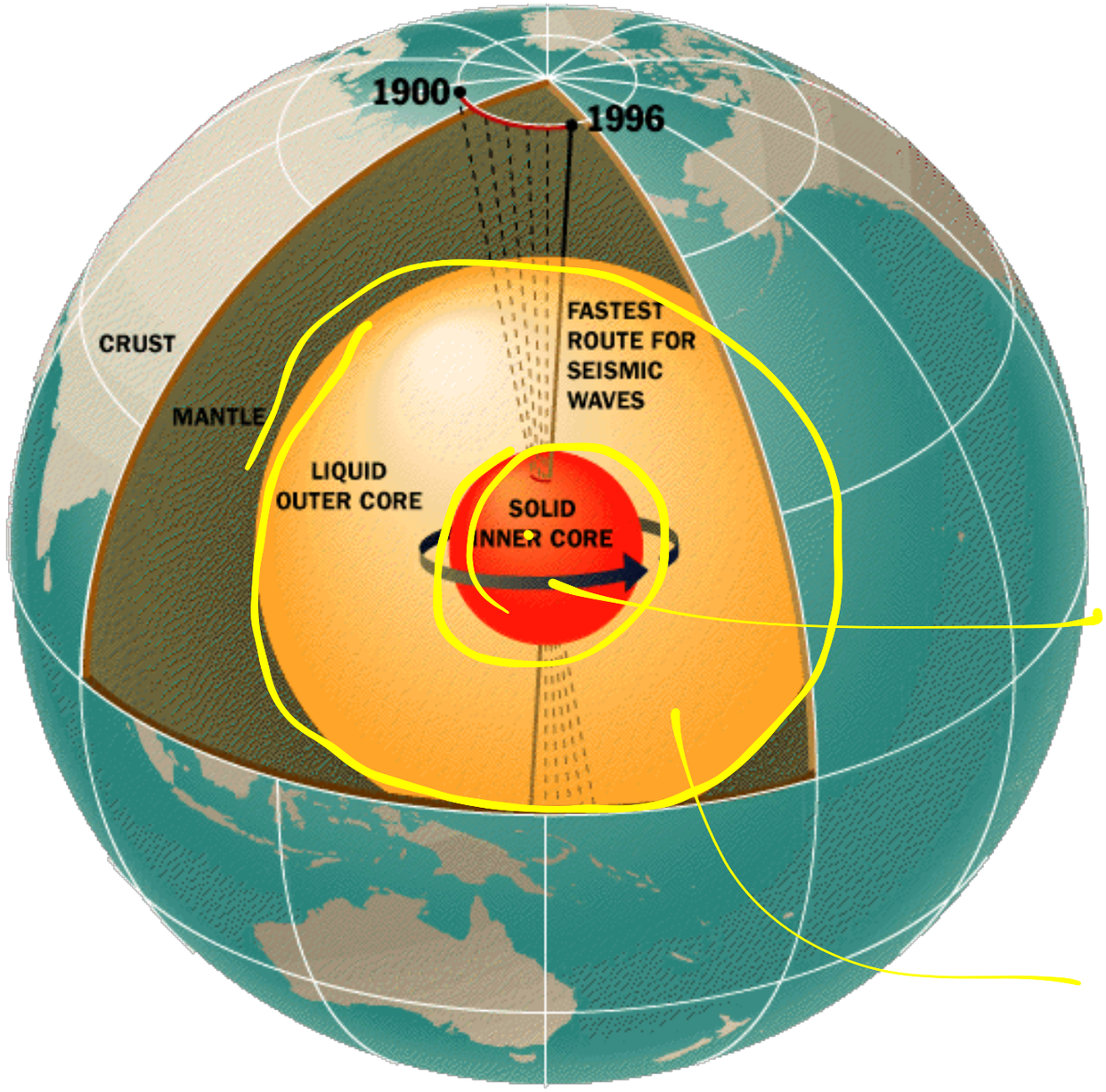
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.



Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.C.



6000 °C

4000 °C

Auteur: Vincent Minier

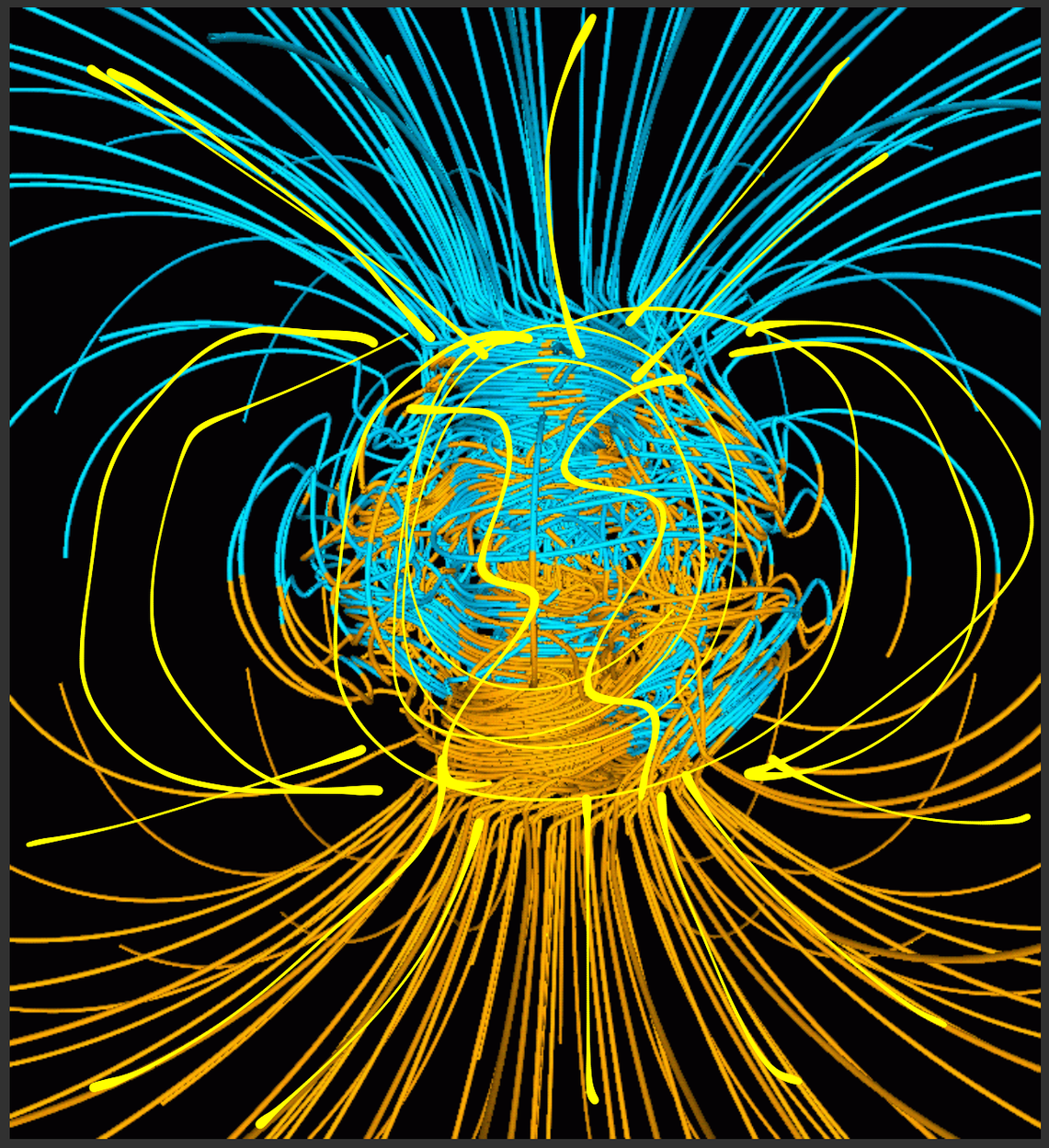
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.

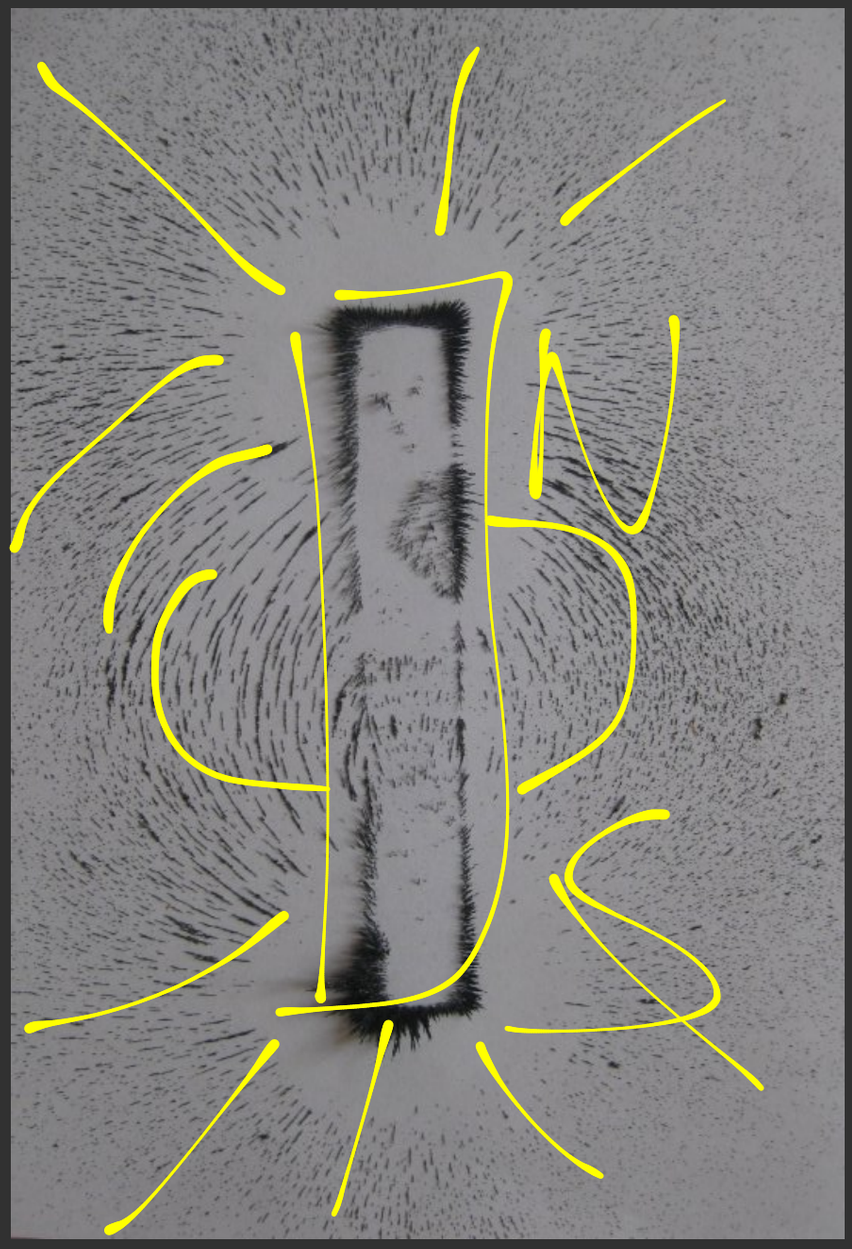
Séance #4

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 ?

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



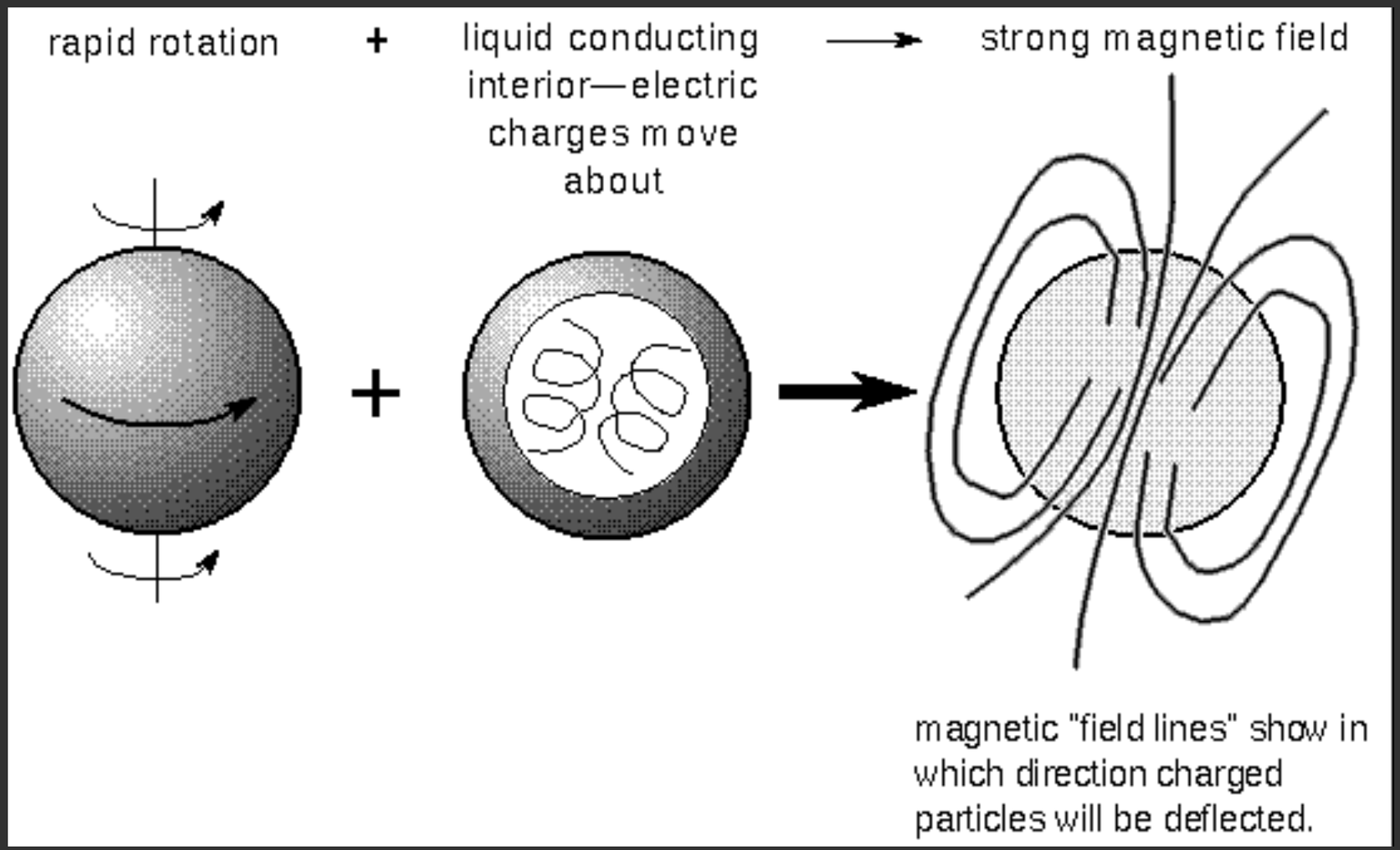


Auteur: Vincent Minier

EXPLOR NOVA

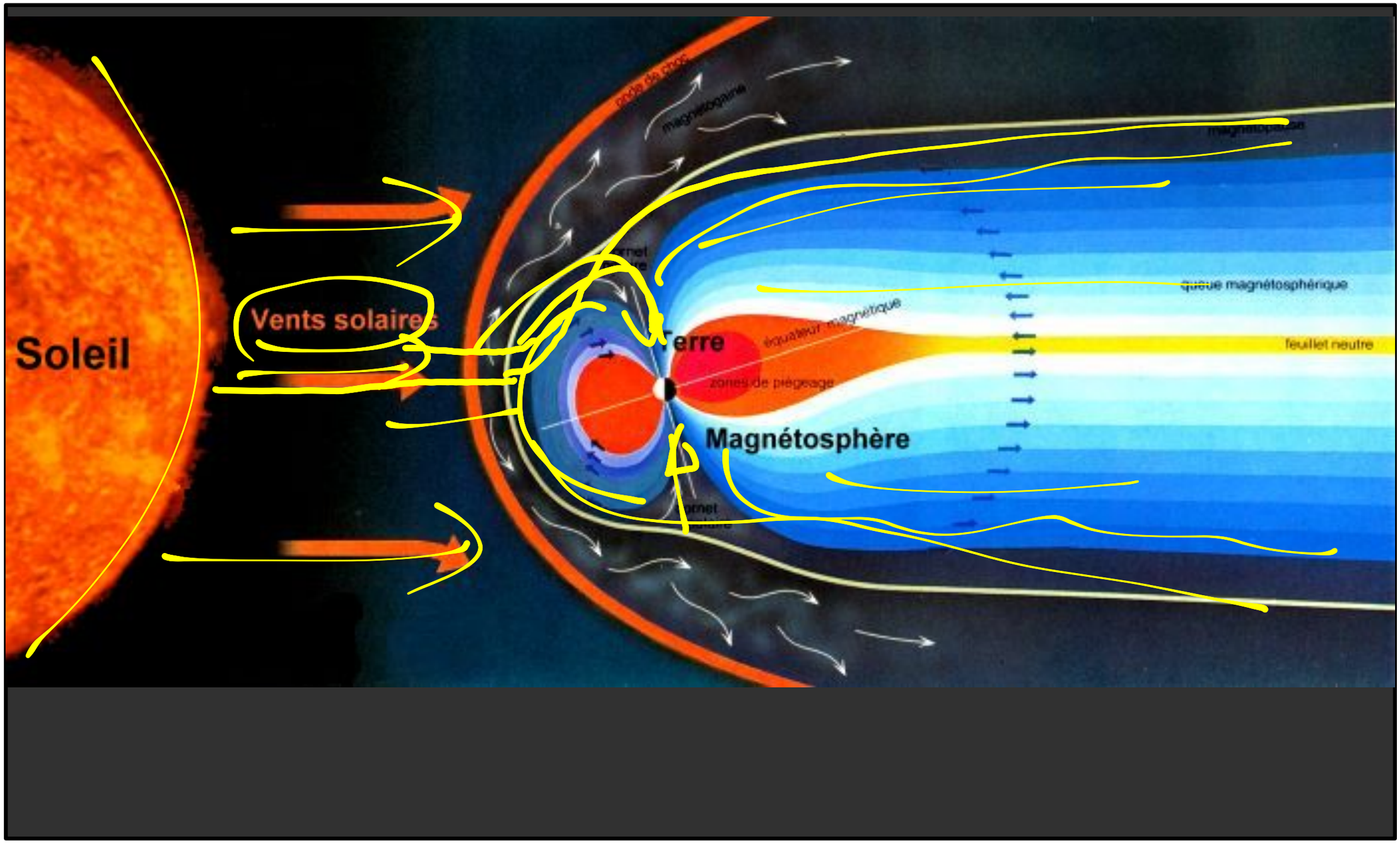
UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



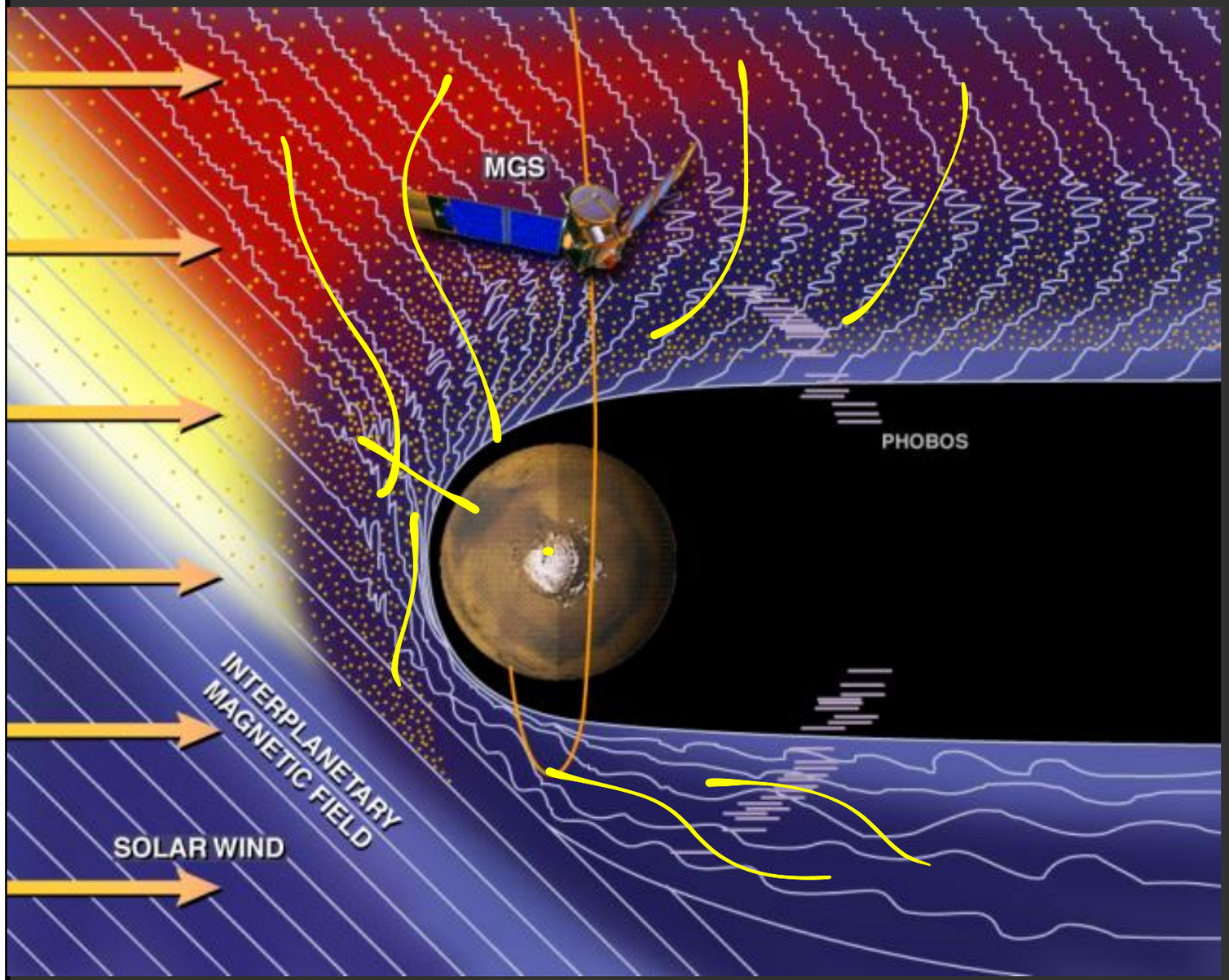
Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.D.



DABS

R

=3400 km

Auteur: Vincent Minier

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 ?

Auteur: Vincent Minier

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.

≈100 milliards d'étoiles dans la Voie Lactée

≈10-100 milliards de planètes habitables ?

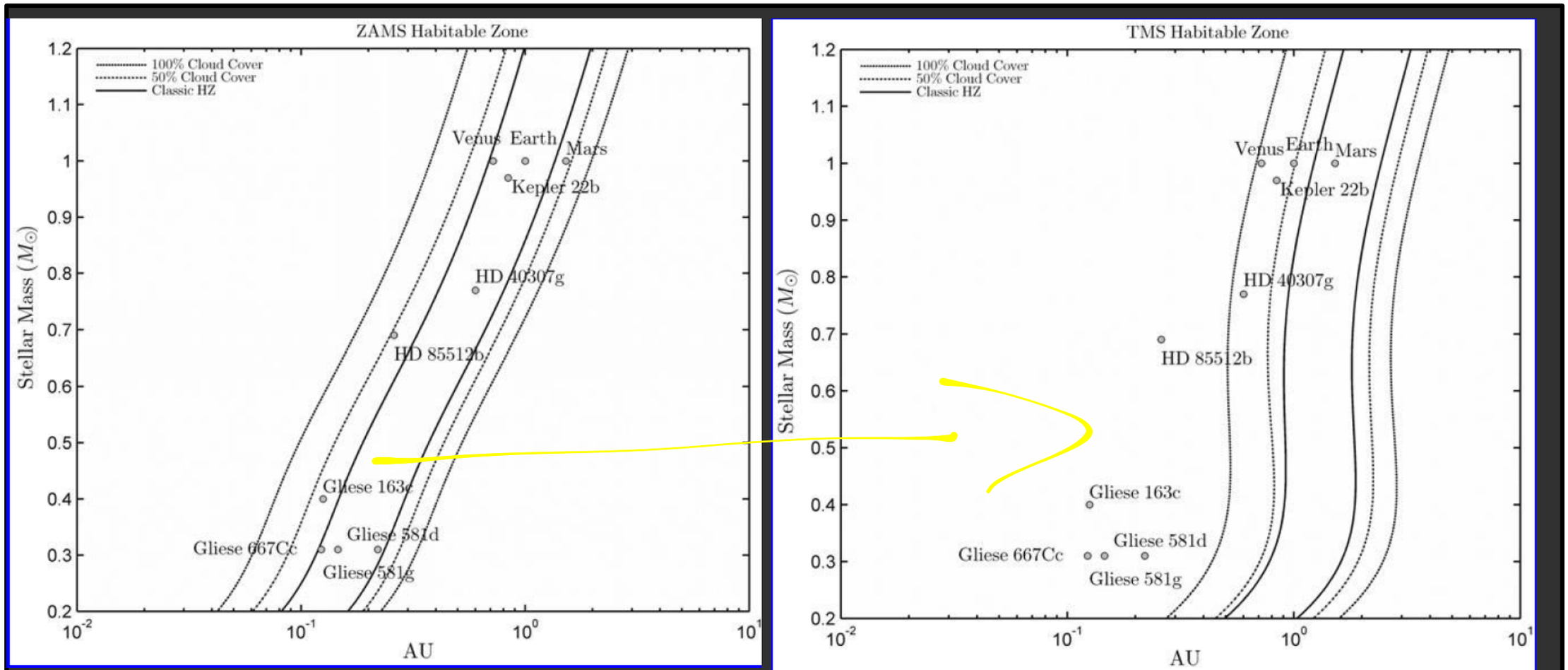
16,5% des étoiles auraient autour d'elles une planète de type Terre

(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	η_{Earth}	δ_{Earth}	$p10_{Earth}$
Around M-Stars	48%	6.4ly	94%

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.



©Rushby+2013, Astrobiology

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 4.E.

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

Equation Drake

$\hookrightarrow$?

Auteur: Vincent Minier