



LA CAPSULE DU DÉBUTANT



Les étoiles (2)

- ✓ **La naissance des étoiles : Partie 1**
- ✓ **La naissance des étoiles : Partie 2**
- ✓ **Le disque protoplanétaire**



LES OBJECTIFS

- ★ Au terme de cette présentation, le participant pourra :
 - Décrire la formation et l'évolution du disque protoplanétaire à partir de la nébuleuse protostellaire en effondrement.
 - Raconter les différentes étapes successives de la structuration du disque protoplanétaire.
 - Expliquer la formation des différents objets qui résultent de l'organisation du disque protoplanétaire.
 - Exposer les caractéristiques générales des différents systèmes stellaires rencontrés dans notre galaxie.

Tout commence par...

- ★ L'effondrement gravitationnel partiel d'un nuage moléculaire géant.

M 16 (Nébuleuse de l'Aigle)
Luc Bellavance

Et puis...

- ★ Obligatoirement, en s'effondrant, le nuage se fragmente en unités appelées *nébuleuses protostellaires*, chacune responsable de la naissance d'une seule étoile.

En conséquence...

- ★ Les étoiles naissent en essaims au sein de ces pouponnières.

Enfin...

- ★ Les nébuleuses protostellaires en rotation vont s'aplatir en cours d'effondrement pour finalement adopter une forme discoïde.



LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE

Un nuage enrichi de molécules et de poussières se contracte par la gravité

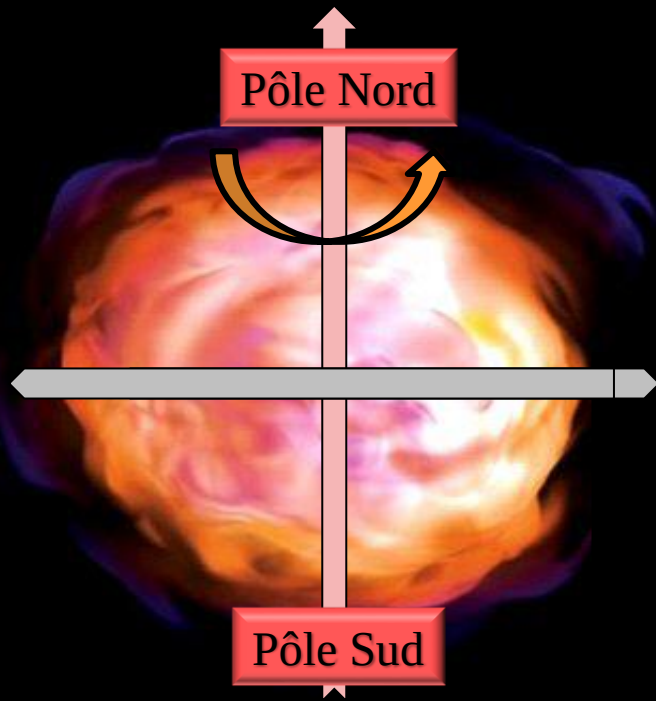


L'évolution vers une
forme discoïde

- Étendue : 1000 UA
- Masse ≈ 2 à $3 M_{\odot}$
- Très froid
- Contient 1 à 2% de « métaux »



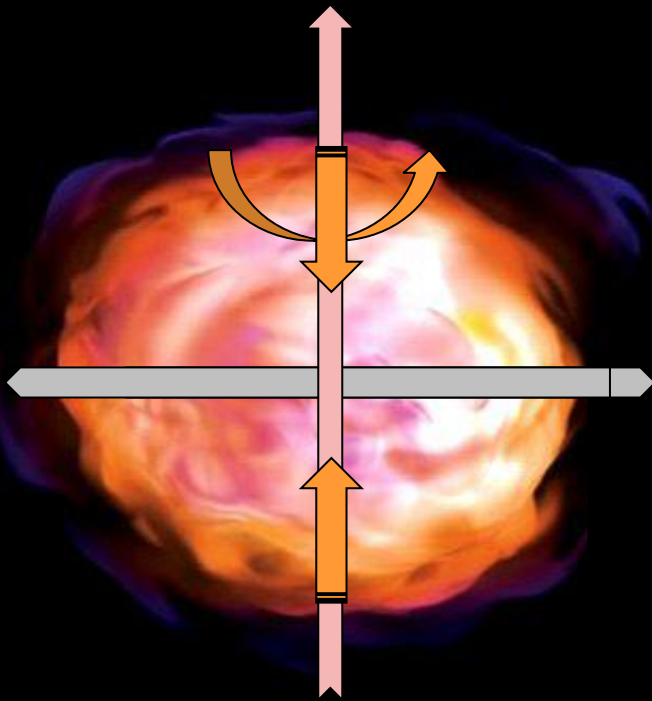
LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE



- Cette nébuleuse est en rotation.
- On peut y définir un axe autour duquel la nébuleuse tourne.
 - Déterminant des pôles.
 - Ainsi qu'un équateur.



LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE



- On conçoit que la vitesse d'effondrement est maximale aux pôles.
- À l'équateur, l'effondrement peut être positif, neutre ou négatif en fonction de l'effet centrifuge.



LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE





LE PRINCIPE PREMIER : LA NÉBULEUSE PROTOSTELLAIRE



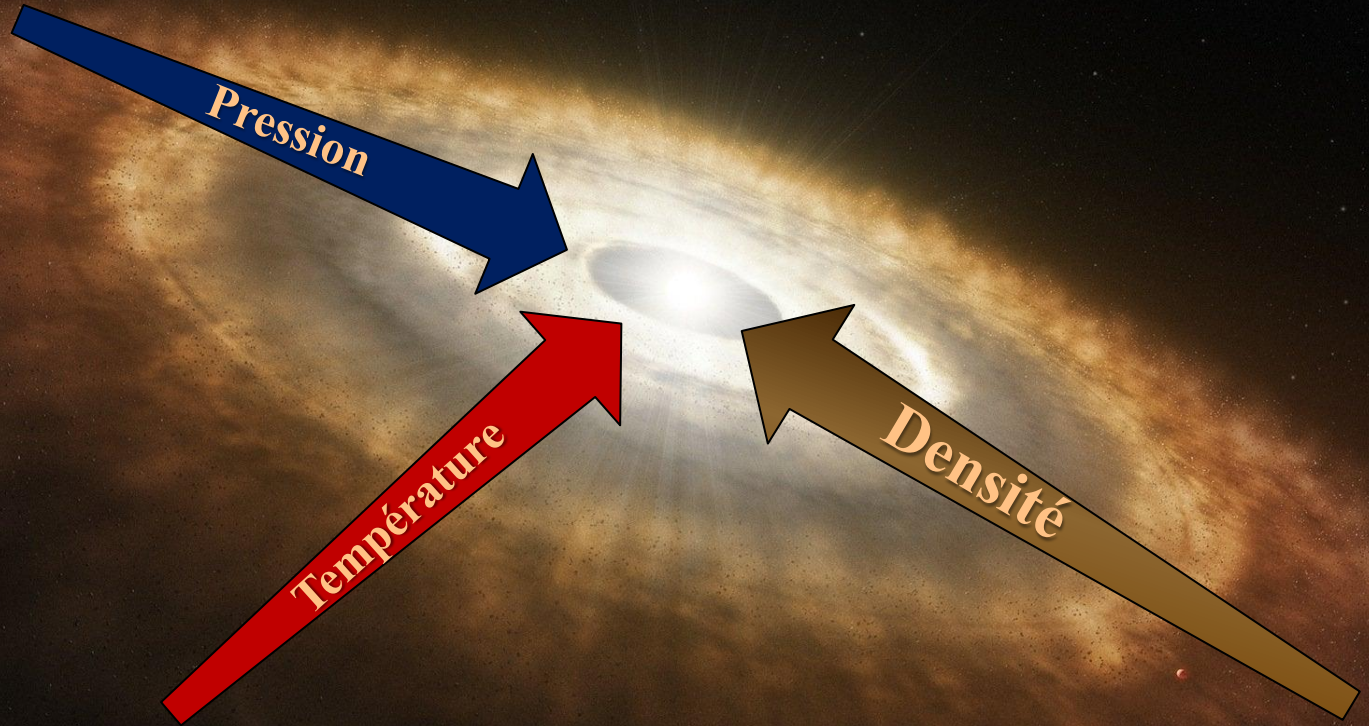
Le disque protoplanétaire

Le disque protoplanétaire



UN PEU DE PHYSIQUE

★ La différenciation initiale du disque.

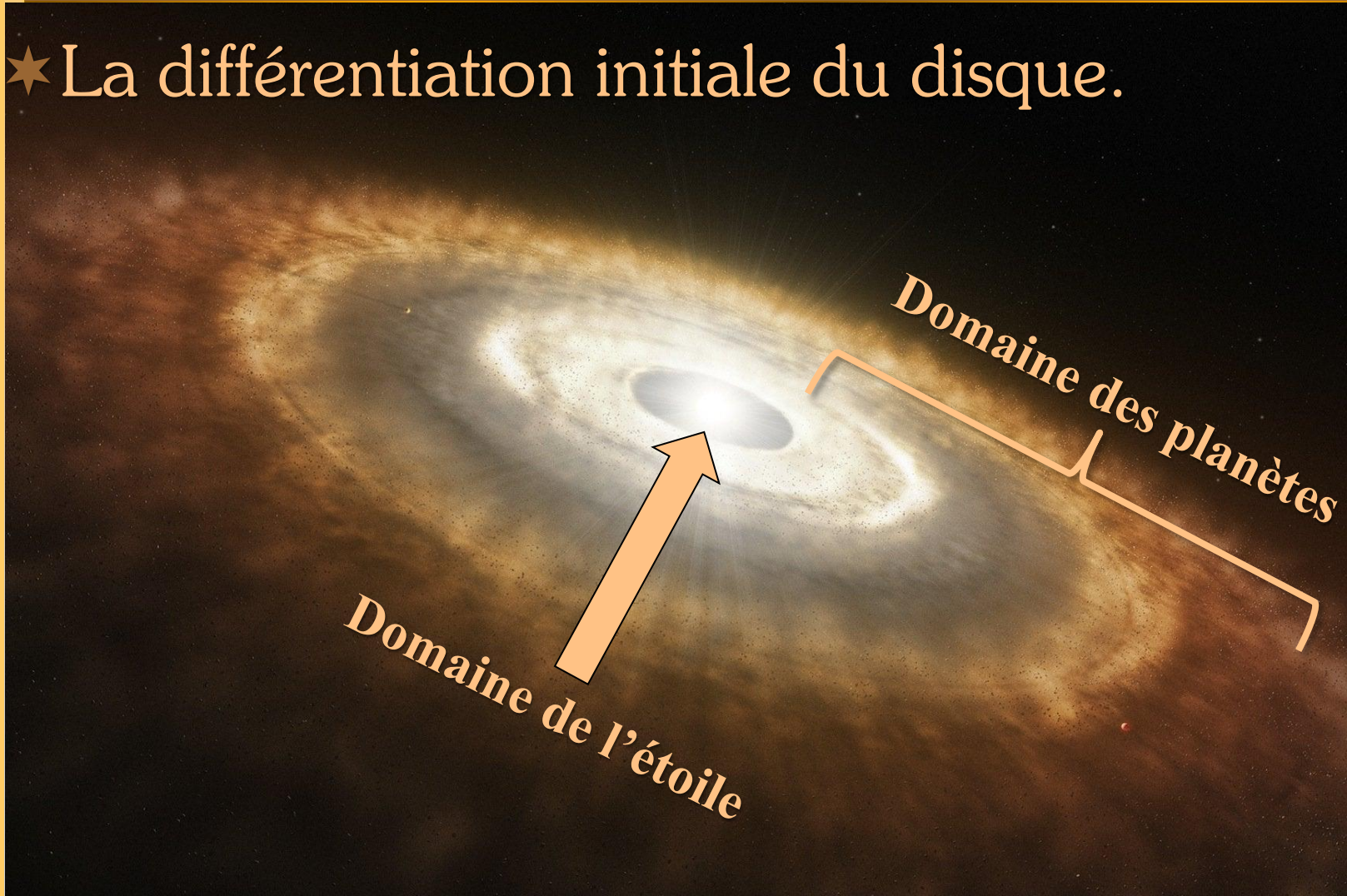




UN PEU DE PHYSIQUE



★ La différenciation initiale du disque.



LE DISQUE PROTOSTELLAIRE INDIFFÉRENTIÉ

- 
- The background image shows a protostellar disk, a cloud of gas and dust surrounding a young star. The central region is glowing brightly with orange and yellow light, indicating intense heat and radiation. The disk itself is dark, with some internal structure visible. The background is a deep red, suggesting a nebula or interstellar medium.
- À ce moment et au début, la région centrale s'illumine par irradiation électromagnétique.
 - Elle compte pour ≈ 90 à 95 % de la masse du disque.

LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE DIFFÉRENTIÉ

Un monde idéalisé
Le Système solaire

- Ce disque protoplanétaire va maintenant s'organiser, se différencier en structures distinctes menant à un système planétaire.

LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE INDIFFÉRENTIÉ

Un monde réaliste
Qu'il faut maintenant expliquer

- Ce disque protoplanétaire va maintenant s'organiser, se différencier en structures distinctes menant à un système planétaire.



UN PEU DE PHYSIQUE

★ La différenciation initiale du disque.

Aujourd'hui, nous parlerons
des objets produits par le
disque à l'exception de l'étoile

disque à l'exception de l'étoile

Domaine de l'étoile

Domaine des planètes





ET POUR CE FAIRE : UNE SOURCE D'INSPIRATION



- ★ Le domaine de la différenciation du disque protoplanétaire est un sujet d'étude complexe et en évolution rapide aujourd'hui.
- ★ Une source d'autorité :
le groupe de
l'***Observatoire de Nice.***
- ★ Sous la direction
scientifique :
Alessandro Morbidelli.





ET POUR CE FAIRE : UNE SOURCE D'INSPIRATION



★ Ma présentation d'aujourd'hui est essentiellement un résumé d'une conférence d'Aurélien Crida donnée en février 2015.



Formation du système solaire et évolution

<https://www.youtube.com/watch?v=HR4i4s2GbR8>

https://www.youtube.com/watch?v=jpFGGTWP_Co

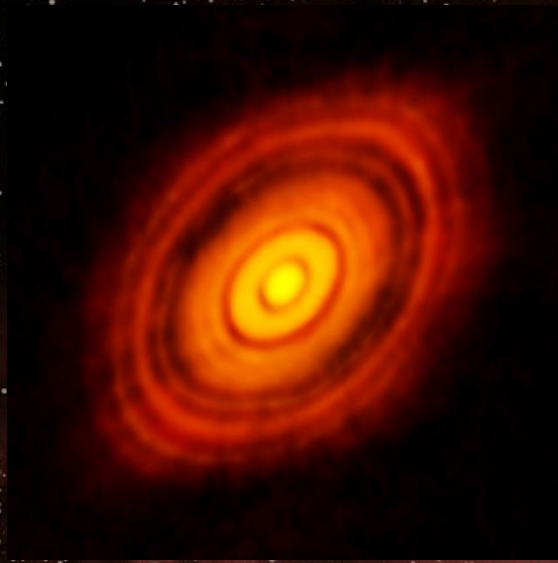


Les disques
protoplanétaires
ne sont pas une
vue de l'esprit.

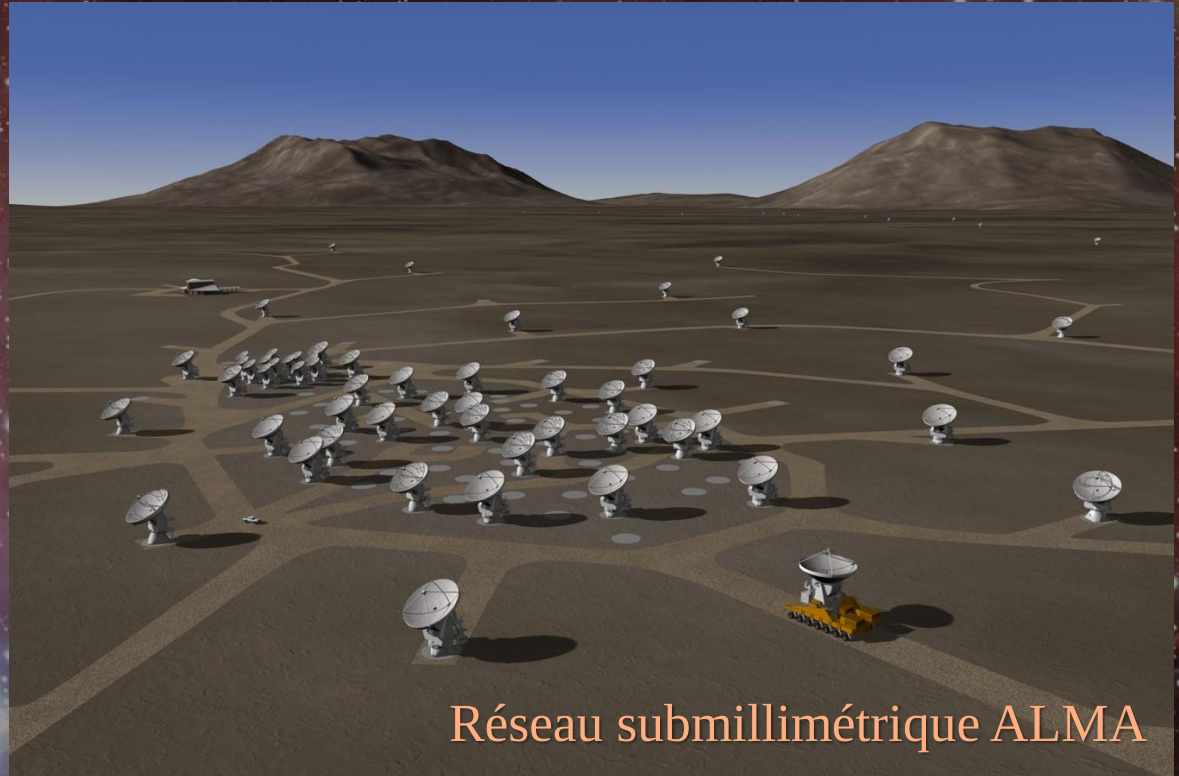


M 42 (Nébuleuse d'Orion)
Télescope Hubble

Les disques
protoplanétaires
ne sont pas une
vue de l'esprit.

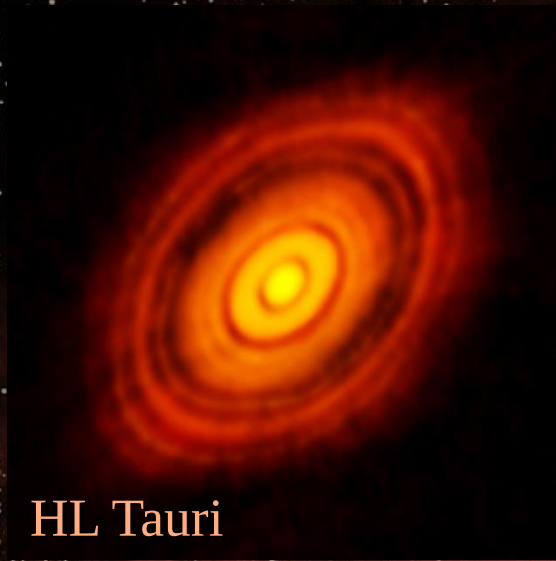


HL Tauri
ALMA

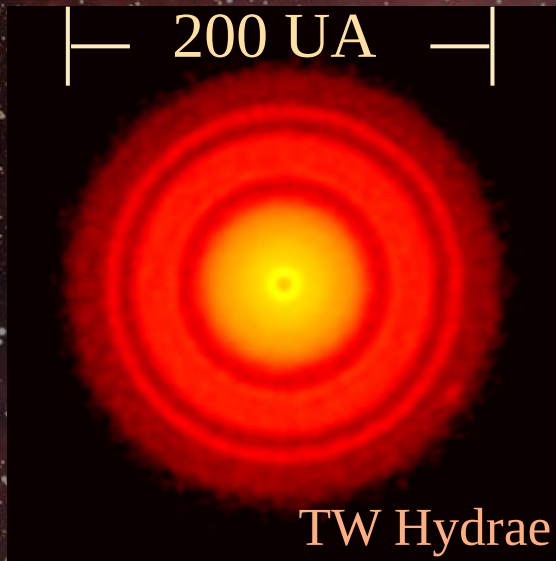


Réseau submillimétrique ALMA

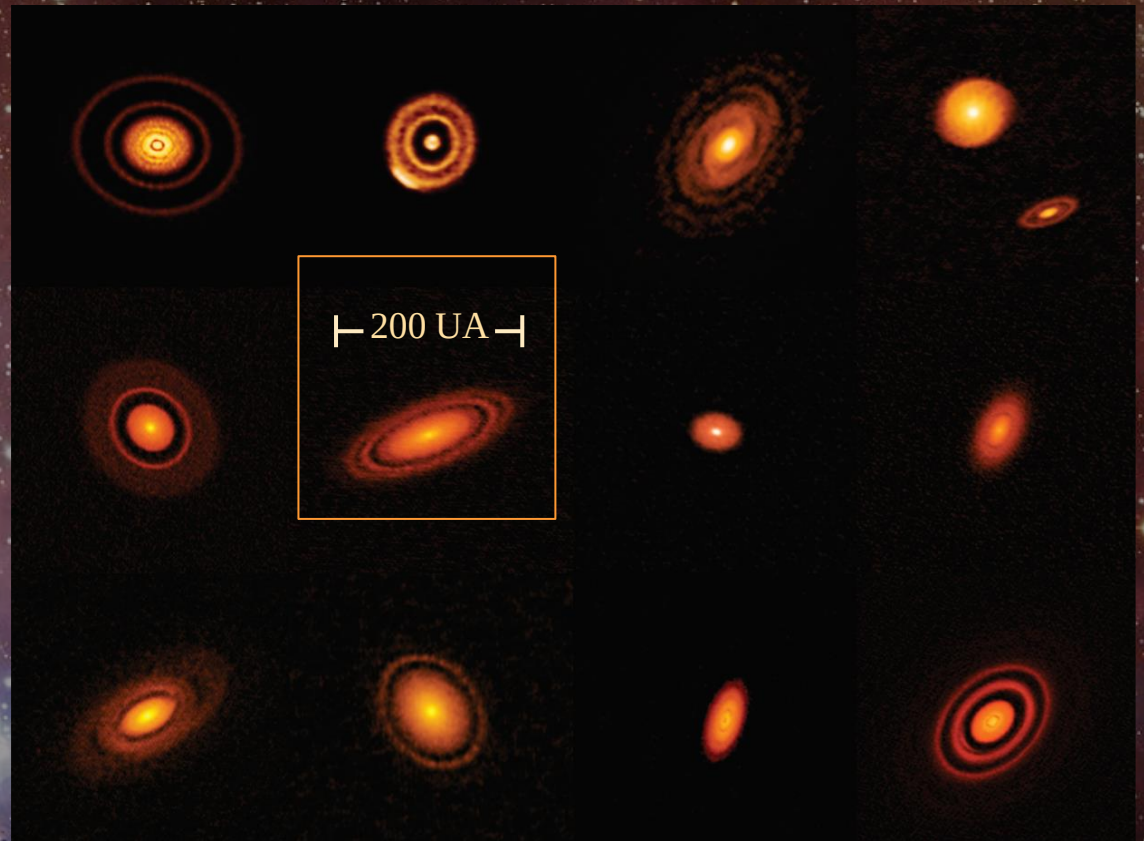
Les disques
protoplanétaires
ne sont pas une
vue de l'esprit.



HL Tauri
ALMA

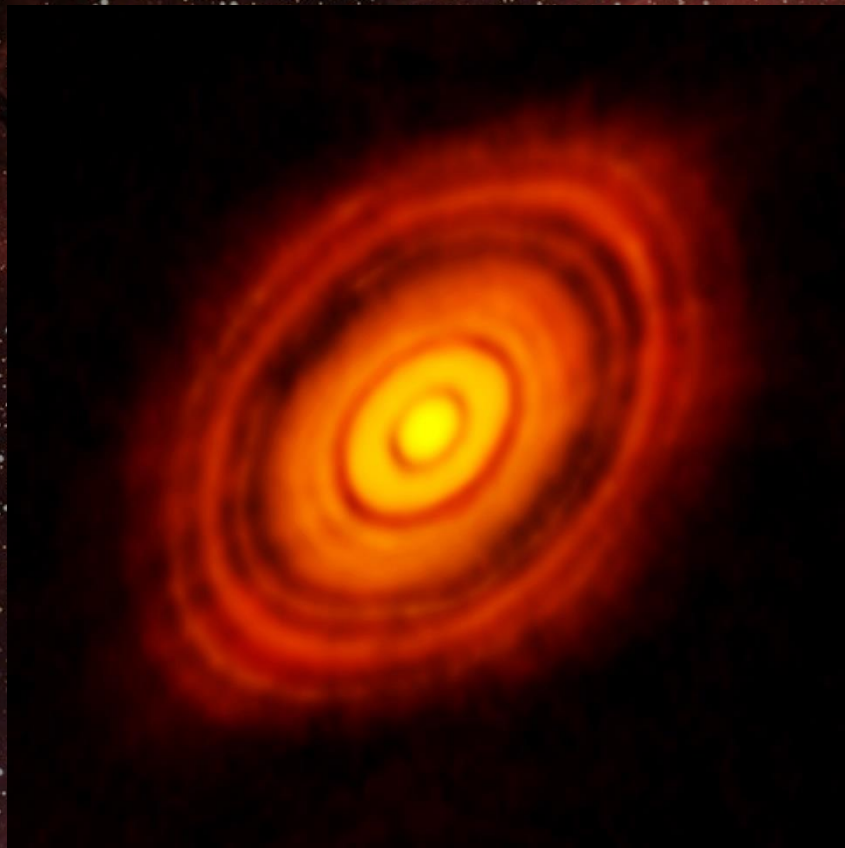


TW Hydrae
ALMA

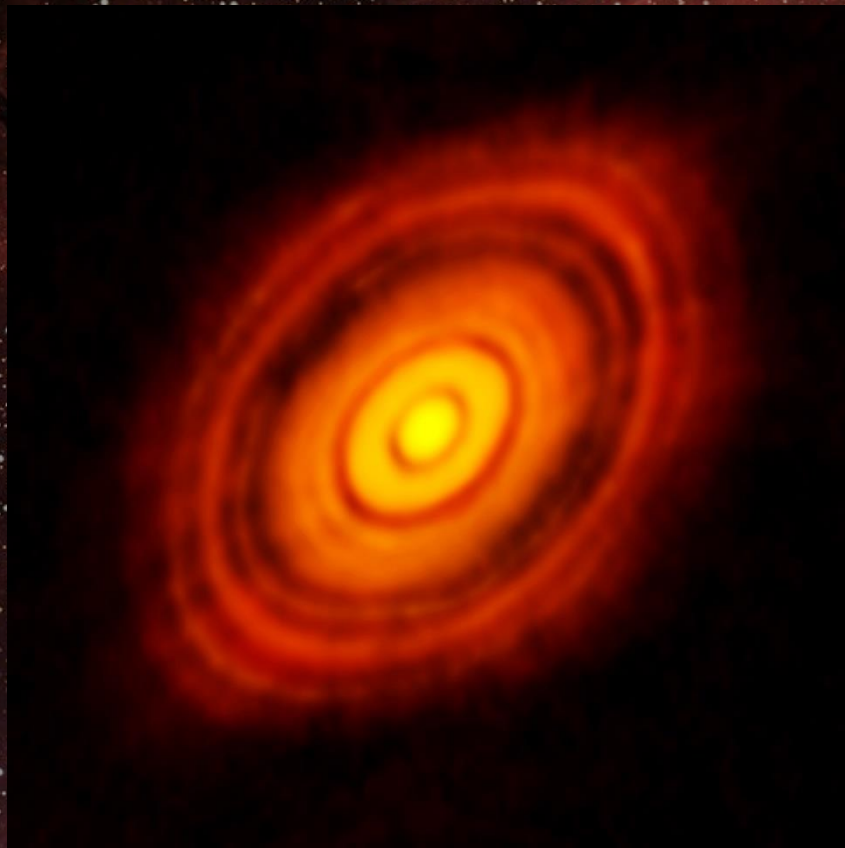


Caractéristiques des disques protoplanétaires à ce stade.

- ★ Diamètre ≈ 200 UA
- ★ Composition pour les étoiles de population 1 :
 - 99 % de gaz ($\frac{1}{1}H$, $\frac{4}{2}He$)
 - 1 % de poussières et molécules faites de combinaisons de O, C, N, Si, Mg, Fe, etc.
Dont des *volatiles* : H_2O , CO , CO_2 , CH_4 , NH_3 , etc.



Caractéristiques des disques protoplanétaires à ce stade.



- ★ Masse du disque ≈ 5 % de la masse de la densité centrale (domaine de l'étoile).
- ★ Taux de captation par effondrement persistant vers la densité centrale à partir du disque $\approx 10^{-8} M_{\odot} / \text{an}$.
 - $M_{\odot} = 1,989 \times 10^{30} \text{ Kg}$
 - Le Soleil = **99,854** % de la masse du Système solaire mature.

Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ La rotation du disque est différenciée.

- La partie interne tourne rapidement

- La partie externe tourne lentement



- ★ Il s'en suit des frictions qui ralentissent la partie interne ; accélérant sa chute sur l'étoile.

- ★ La partie externe s'accélère, s'éloigne et s'étale.

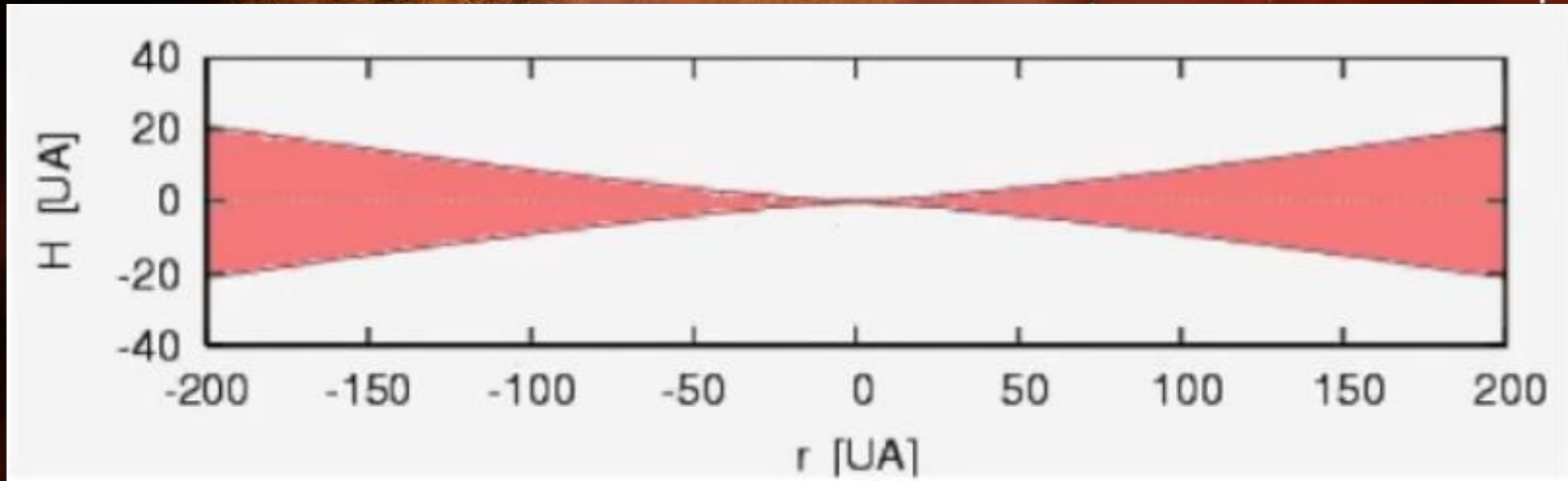
Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Il en résulte une baisse de la densité du disque.
- ★ La pression de lumière (vents stellaires) de l'étoile naissante va pousser les gaz et les volatiles légers vers l'extérieur du disque. On parle de photo-évaporation.
- ★ Les poussières et les molécules plus lourdes vont rester isolées dans la partie interne du disque protoplanétaire.



Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Le disque présente un rapport d'aspect.

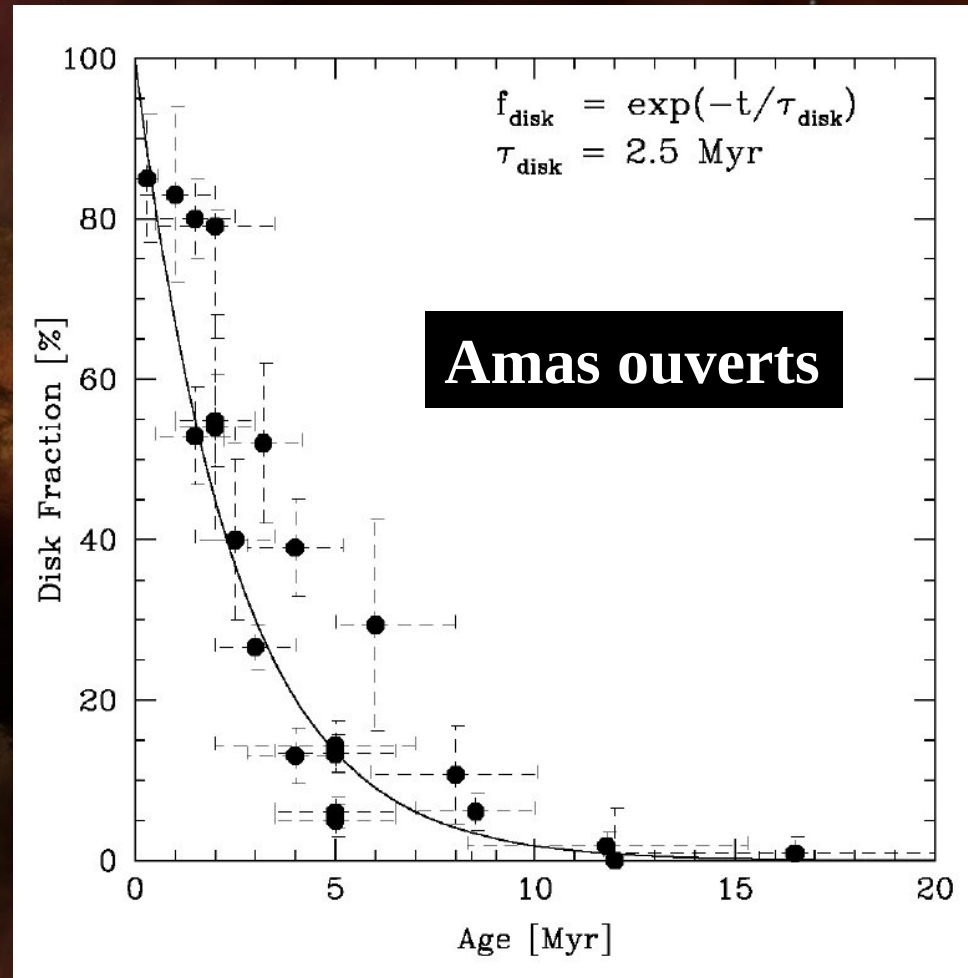


- ★ Le disque s'épaissit en fonction de sa distance au centre (région de l'étoile).

Évolution des disques protoplanétaires.

★ Une temporalité.

- Les disques ont une durée de vie *courte* de ± 5 Ma.
- Les objets du système stellaire mature doivent se former au cours de cette période : Planètes, Astéroïdes, Comètes, etc.

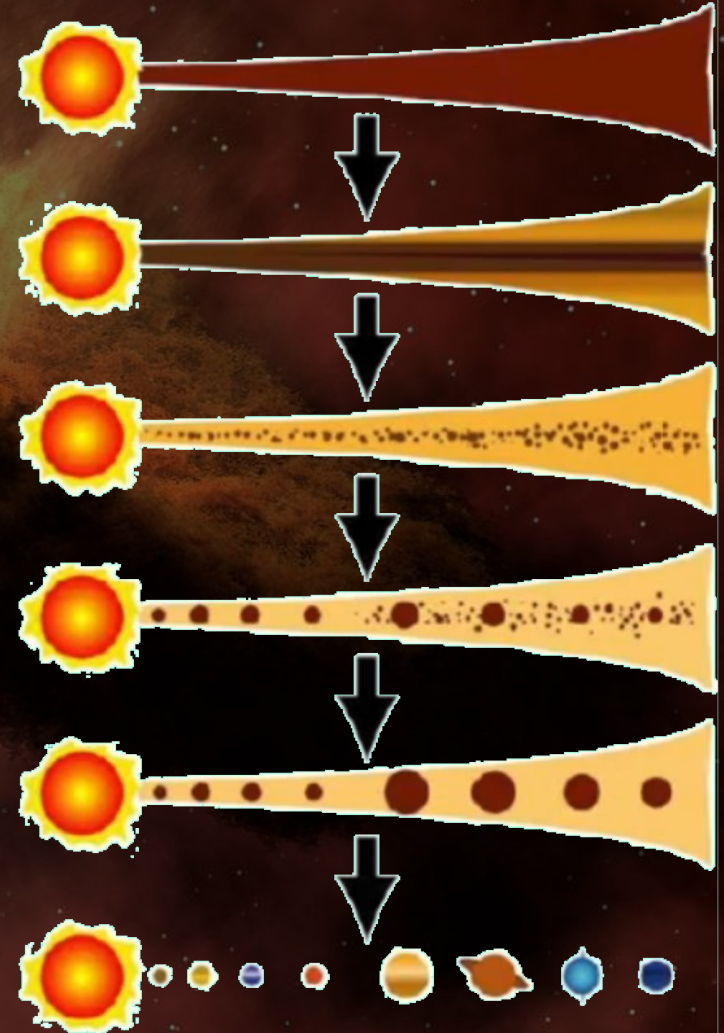


Pourcentage des étoiles jeunes qui ont un disque selon l'âge de l'amas ouvert

Évolution des disques protoplanétaires.

★ Une structuration ordonnée.

1. Condensation des solides
2. Sédimentation des grains dans le plan médian
3. Agrégation jusqu'à ≈ 1 cm
4. Formation de planétésimaux
➔ 10 km
5. Protoplanètes et cœurs
➔ 100 à 1 000 km
6. Dissipation du gaz



Évolution des disques protoplanétaires.

★ Une structuration ordonnée.

1. Condensation des solides
2. Sédimentation des grains

Important !

L'étape N dure $\approx 10^N$ ans

4. Formation de planétésimaux
➔ 10 km
5. Protoplanètes et cœurs
➔ 100 à 1 000 km
6. Dissipation du gaz





Évolution des disques protoplanétaires.

★ Étape 1 : Condensation des solides.

➤ Durée = $10^N = 10^1 = 10$ ans



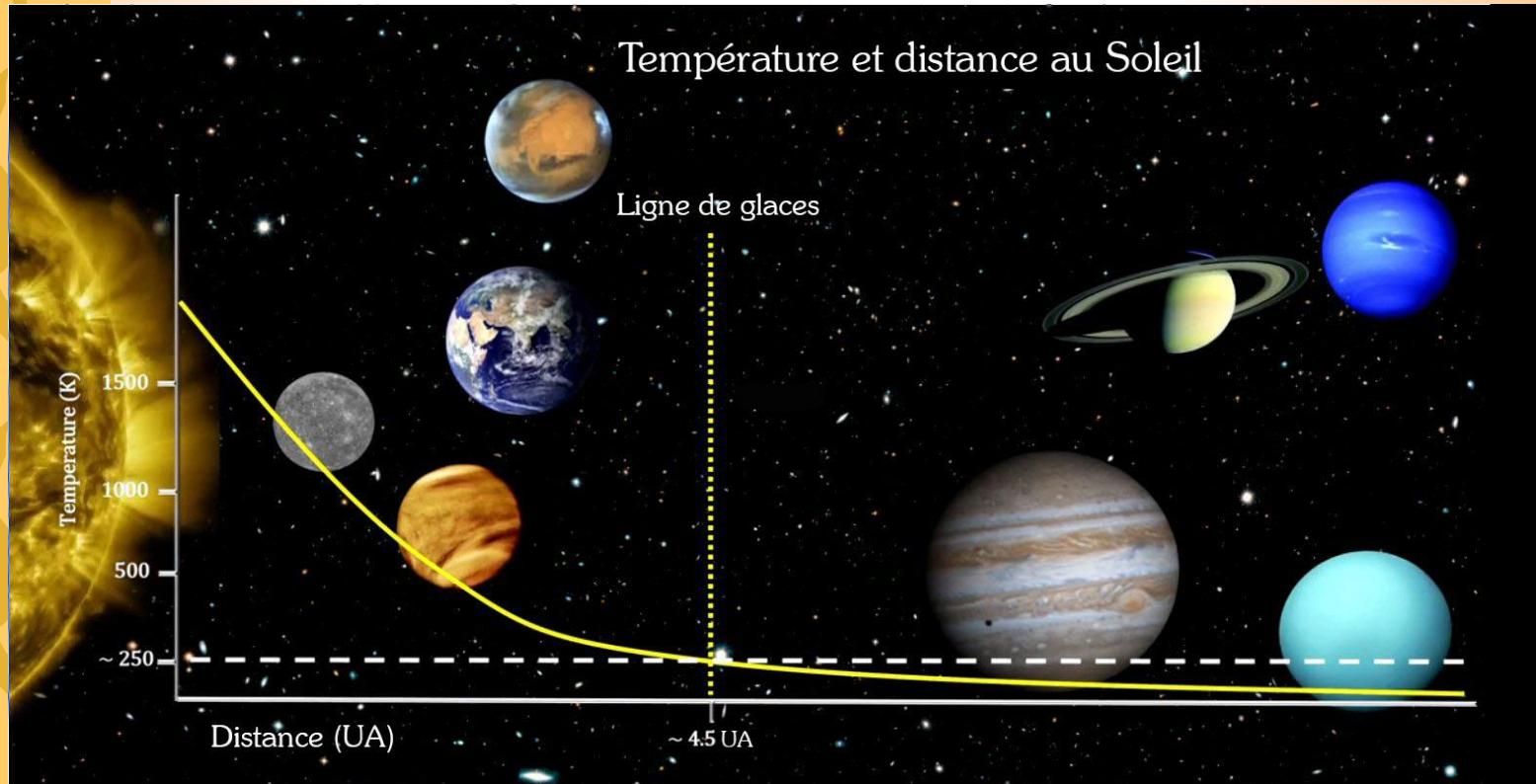
★ Il faut savoir que l'accrétion n'est possible qu'avec les éléments **solides**.

➤ Les gaz, les vapeurs ne peuvent former des agrégats (grains, planétésimaux, protoplanètes, cœurs planétaires, planètes).



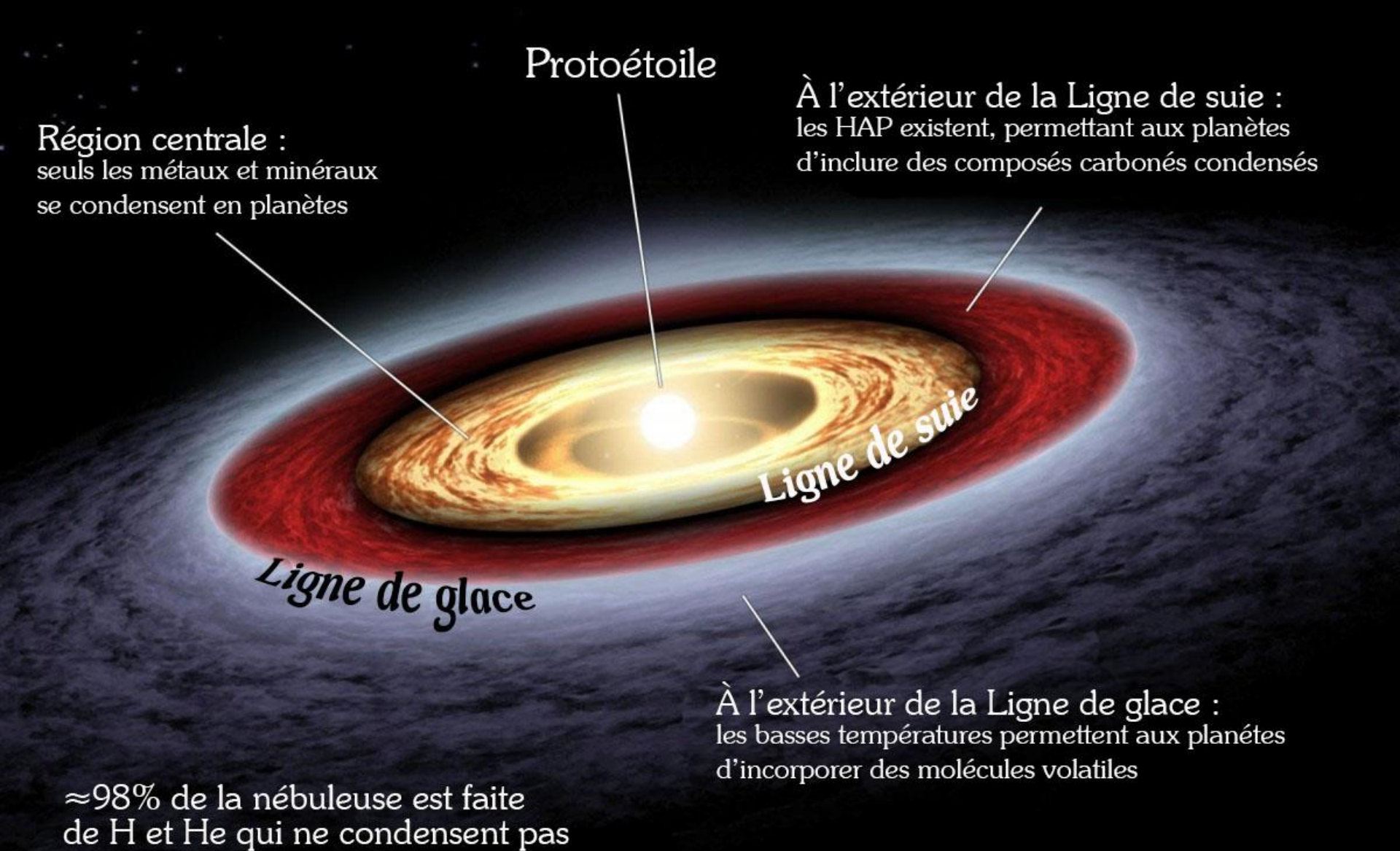
Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ La température dans le disque est fonction de la distance à la protoétoile.





Évolution des disques

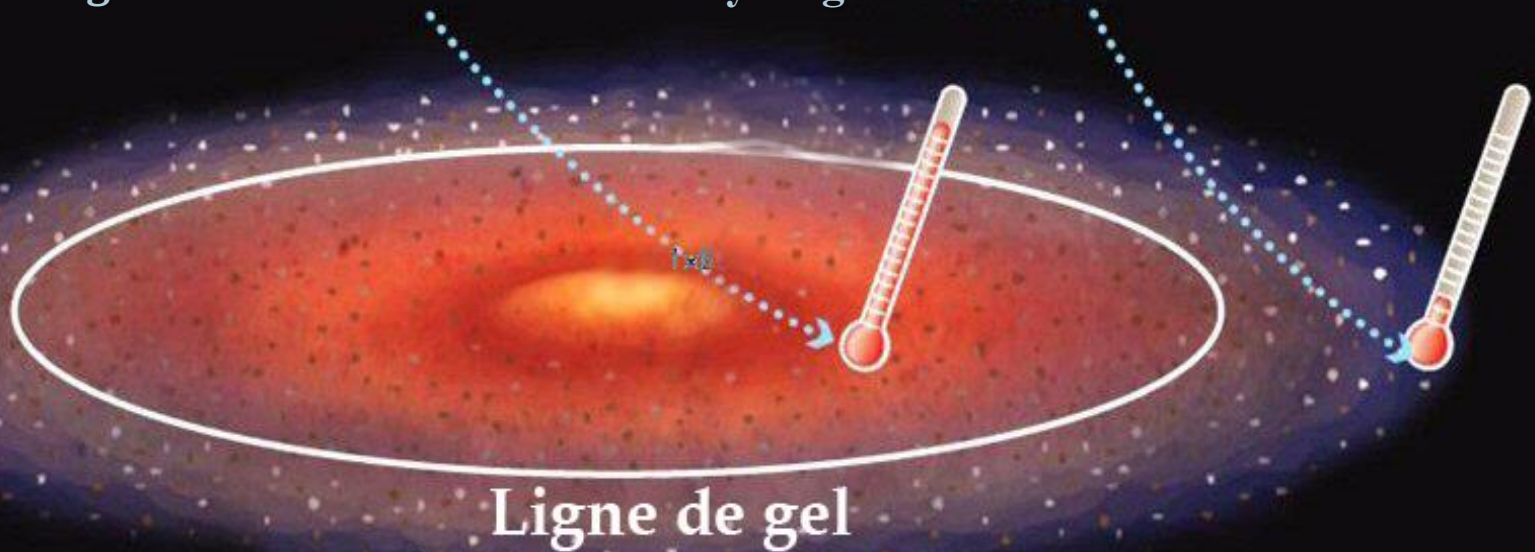




Évolution des disques protoplanétaires.

À l'intérieur de la ligne de gel, les roches et les métaux condensent. Les autres restent gazeux.

À l'extérieur de la ligne de gel, les roches, les métaux et les volatiles condensent, mais pas l'hydrogène et l'hélium.

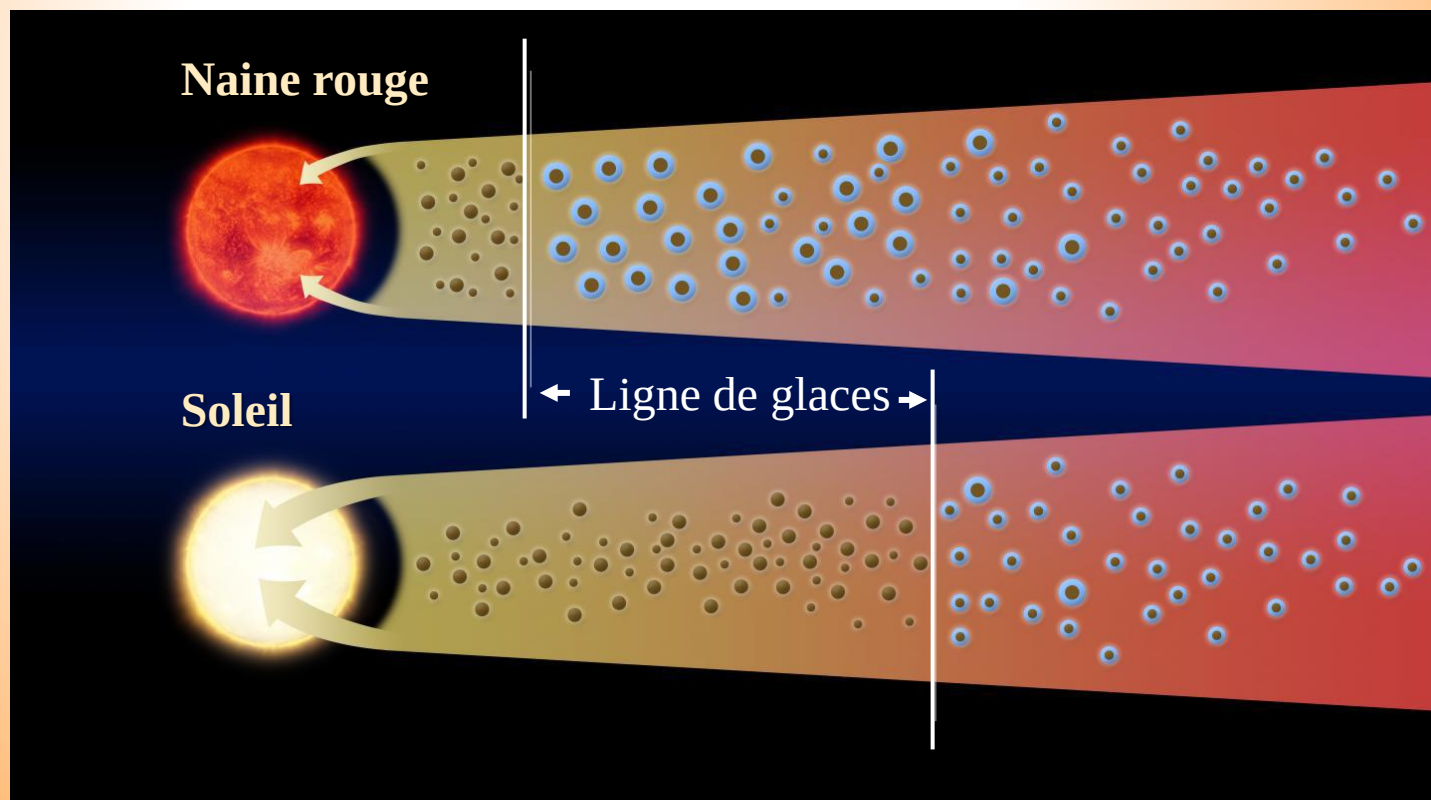


- À l'intérieur de la ligne de gel, la chaleur vaporise H_2O , CH_4 , CO , CO_2 , NH_3 .
- Les volatiles et les gaz sont soufflés par les vents stellaires au-delà de la ligne de gel.
- Éventuellement, il n'y aura plus de gaz et de volatiles < 3 U.A.
- Au-delà de la ligne de gel, les volatiles condensent en glace qui persiste.



Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ La distance de la ligne de glace dépend de la masse de la protoétoile.





Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Il y a différenciation des astres formés en fonction du gradient de température.
 - En deçà de la ligne de gel, les astres formés sont **secs**, faits de métaux et minéraux, surtout des silicates ➡ Planètes telluriques, astéroïdes rocheux.
 - Au-delà de la ligne de gel, les astres formés sont **mouillés**, faits aussi de volatiles ➡ Planètes liquides, objets transneptuniens, comètes (boules de neige sale).
 - Les planètes très massives peuvent retenir et s'entourer des gaz légers comme 1_1H et 4_2He .





Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Étape 2 : Sédimentation des grains dans le plan médian.

➤ Durée = $10^N = 10^2 = 100$ ans



- ★ Étape 3 : Agrégation jusqu'à 1 cm.

➤ Durée = $10^N = 10^3 = 1\ 000$ ans





Évolution des disques protoplanétaires.



- ★ L'agrégation des molécules, poussières et grains (phénomène de l'**accrétion**).
- ★ Le mécanisme initial de l'agrégation = les forces de **Van der Waals**.
 - Interaction électromagnétique de faible intensité (lien hydrogène) entre deux molécules agissant comme des dipôles. Ces liens assurent :
 - Cohésion
 - Attraction



Évolution des disques protoplanétaires.

★ Forces de Van der Waals :

➤ Exemple : la molécule d'eau (H_2O)





Évolution des disques protoplanétaires.

★ Forces de Van der Waals :

➤ Exemple : la molécule d'eau (H_2O)

- Ce qui explique la **cohésion** de la goutte.





Évolution des disques protoplanétaires.



★ Forces de Van der Waals :

- Ce qui explique l'adhésion du geiko.





Évolution des disques protoplanétaires.



- ★ Forces de Van der Waals :
 - L'adhésion en apesanteur.



Donald R. Pettit
Station spatiale
internationale,
2011

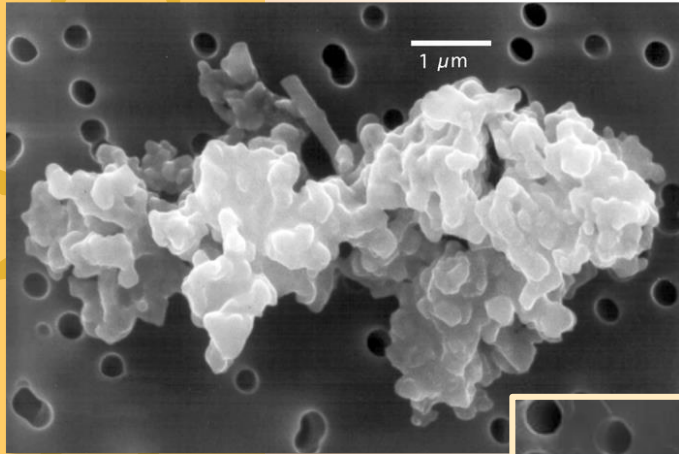


Évolution des disques protoplanétaires.

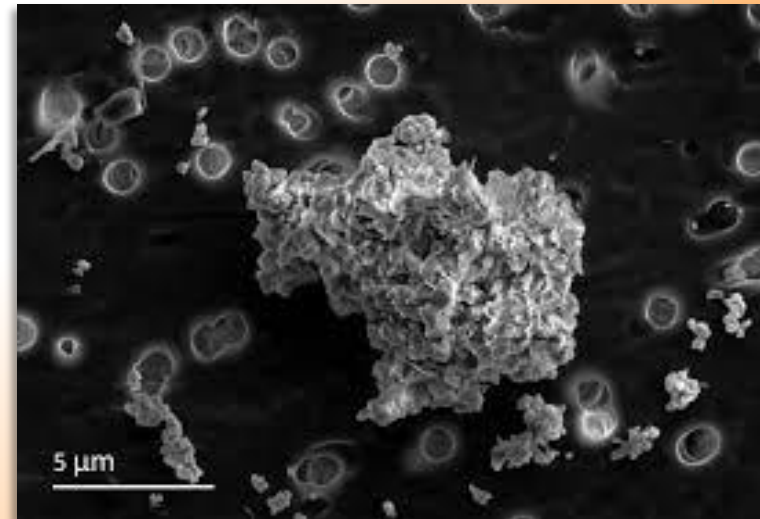
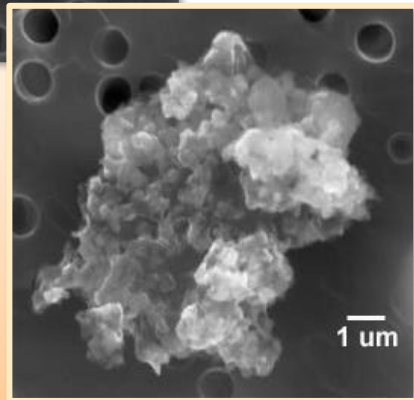


★ Étape 3 : Agrégation jusqu'à 1 cm.

➤ Durée = $10^N = 10^3 = 1\ 000$ ans



Grains



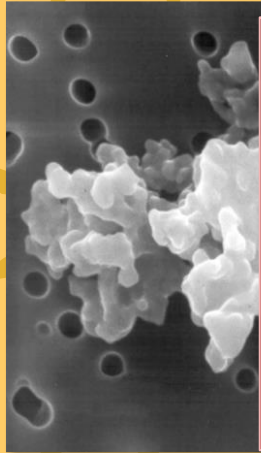


Évolution des disques protoplanétaires.

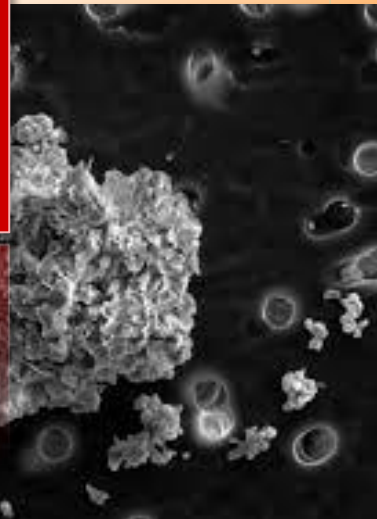


★ Étape 3 : Agrégation jusqu'à 1 cm.

➤ Durée = $10^N = 10^3 = 1\,000$ ans



Cette agrégation tranquille par les forces de tension de surface ne dépasse pas ≈ 10 centimètres. C'est la limite de la **cohésion**.





Évolution des disques protoplanétaires.



- ★ Étape 4 : Formation de planétésimaux (jusqu'à 10 km).

- Durée = $10^N = 10^4 = 10\ 000$ ans

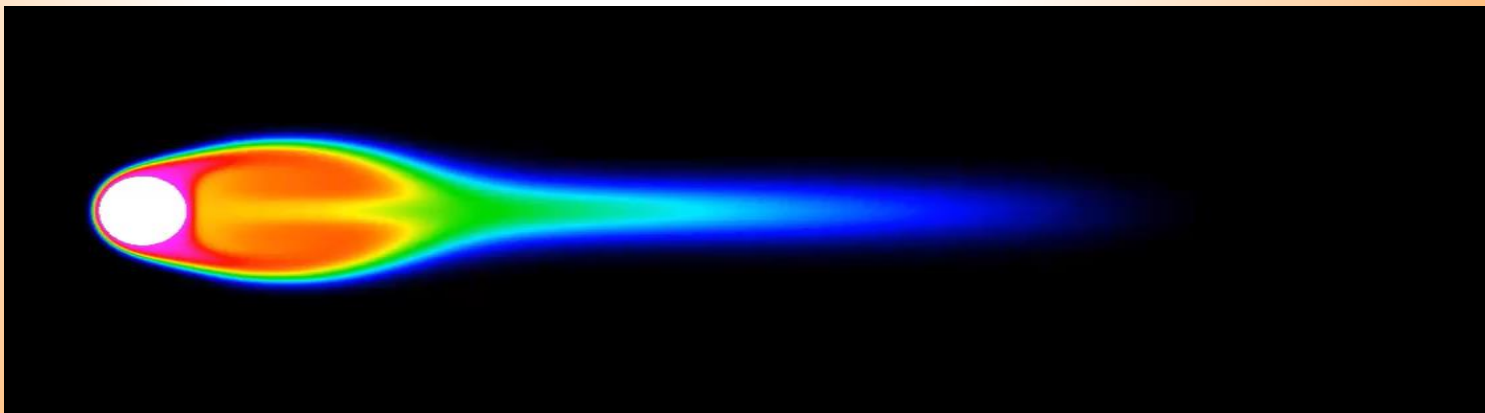
- ★ Pour obtenir des objets > 10 cm, il faut un autre mécanisme favorisant les rapprochement au-delà des possibilités adhésives des forces de tension de surface.

- Ce mécanisme est la **turbulence**



Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Les grains déjà formés freinent le gaz qui s'effondre et engendrent de la turbulence.
- ★ Allées de turbulence de Von Karman





Évolution des disques protoplanétaires.



- ★ La turbulence va permettre de construire des amalgames qui vont atteindre des tailles de ≥ 100 m ➡ jusqu'à la taille de Cérès (950 km) !
- ★ À partir de ce moment, c'est la **gravité** qui prend le relai pour construire des objets plus gros, plus massifs.

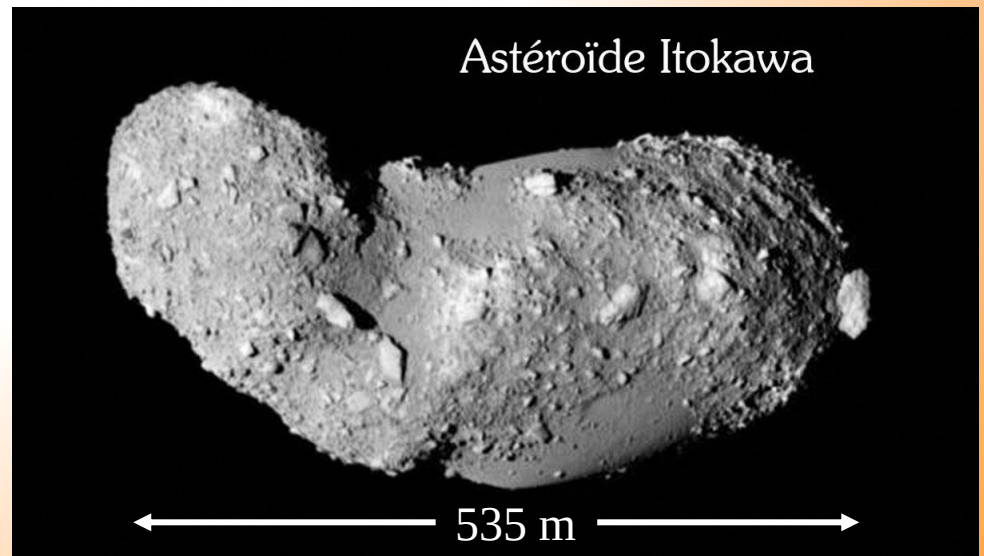


Évolution des disques protoplanétaires.



- ★ Les objets de l'étape 4 : les planétésimaux (10 km à 1 000 km)
 - En deçà de 3 UA ➡ objets rocheux et métalliques dépourvus de volatiles

Photo Sonde
Hayabusa

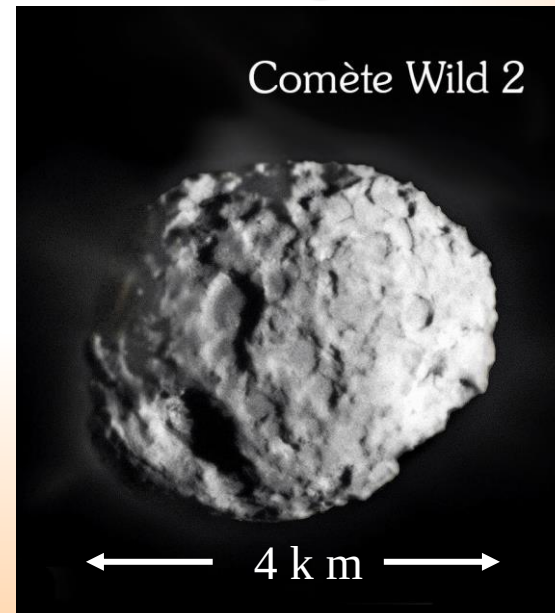




Évolution des disques protoplanétaires.

- ★ Les objets de l'étape 4 : les planétésimaux (10 km à 1 000 km)
 - Au-delà de 4,5 UA ➡ objets de roches, métaux et ≥ 50 % de glaces

Photo Sonde
Stardust
(NASA)



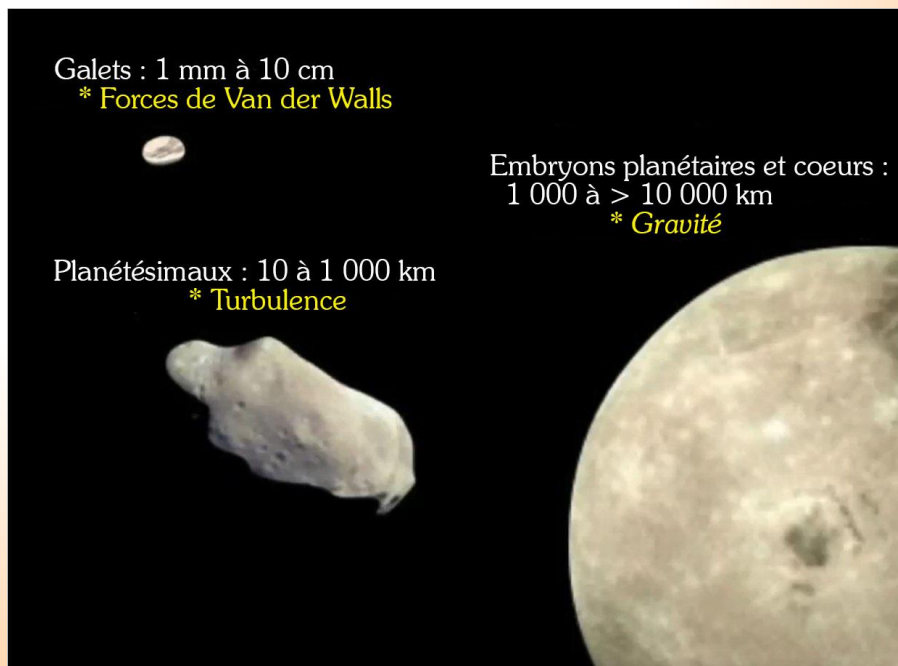


Évolution des disques protoplanétaires.



★ Étape 5 : Formation des protoplanètes et des cœurs planétaires

➤ Durée = $10^N = 10^5 = 100\,000$ ans

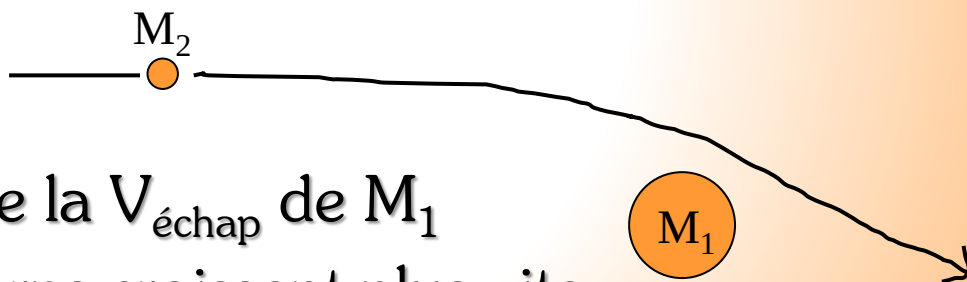




Évolution des disques protoplanétaires.

★ Comment dépasser le stade des planétésimaux ➡ formation des **planètes**.

➤ Mécanisme 1 : Impacts dus à la gravité seule.



- Fonction de la $V_{\text{échap}}$ de M_1
- Les gros corps croissent plus vite

➤ Masse finale = masse d'isolation, lorsqu'il n'y a plus de planétésimaux à bouffer aux alentours.



Évolution des disques protoplanétaires.



- Mécanisme 1 : Impacts dus à la gravité seule.





Évolution des disques protoplanétaires.

- Mécanisme 1 : Impacts dus à la gravité seule.

Formation
de la Lune





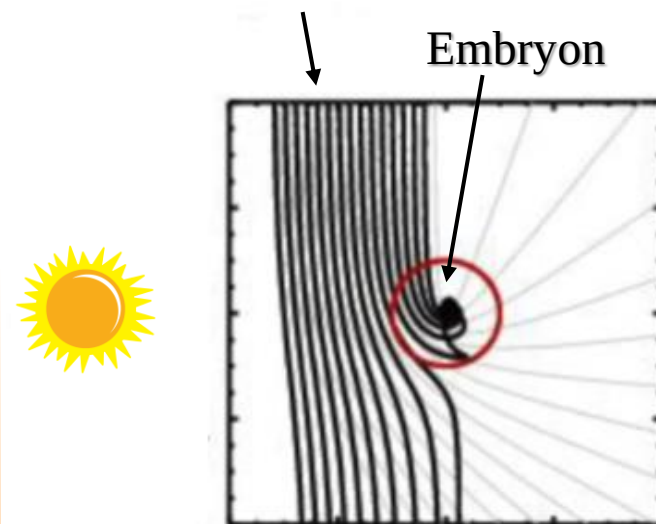
Évolution des disques protoplanétaires.

★ Comment dépasser le stade des planétésimaux ➡ formation des *planètes*.

➤ Mécanisme 2 : Accrétion de galets.

- Les galets plus facilement déviés par les objets massifs « frottent » contre les gaz, sont ralentis et projetés sur l'embryon qui grossit.
- L'embryon peut ainsi atteindre plusieurs fois la $M_{\oplus}$

Galets en orbite autour de l'étoile





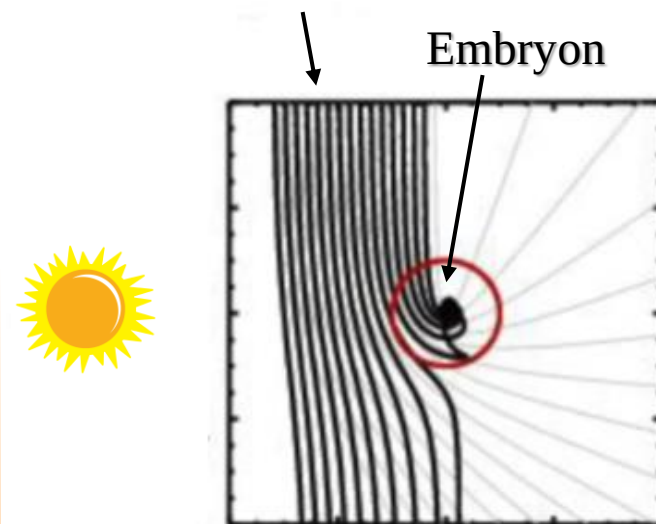
Évolution des disques protoplanétaires.

★ Comment dépasser le stade des planétésimaux ➡ formation des *planètes*.

➤ Mécanisme 2 : Accrétion de galets.

- La masse de ces galets est beaucoup $>$ que la masse des planétésimaux.
- Les objets « accrétables » sont beaucoup plus abondants au-delà de la ligne de glace.

Galets en orbite autour de l'étoile



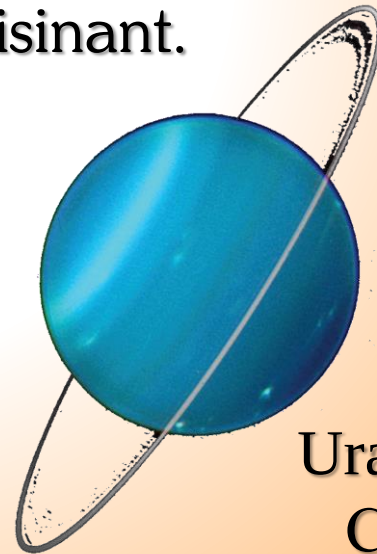


Évolution des disques protoplanétaires.

★ Ainsi se forment les planètes géantes

➤ Les géantes de glace

- Un cœur qui atteint une masse $\cong 10 M_{\oplus}$ commence à retenir les gaz du disque avoisinant.
- Il s'entoure d'une coque qui se refroidit et se densifie.
- Cette enveloppe de gaz (1_1H et 4_2He) peut atteindre plusieurs $M_{\oplus}$.



Uranus :

Cœur = $14 M_{\oplus}$

Gaz = $5 M_{\oplus}$

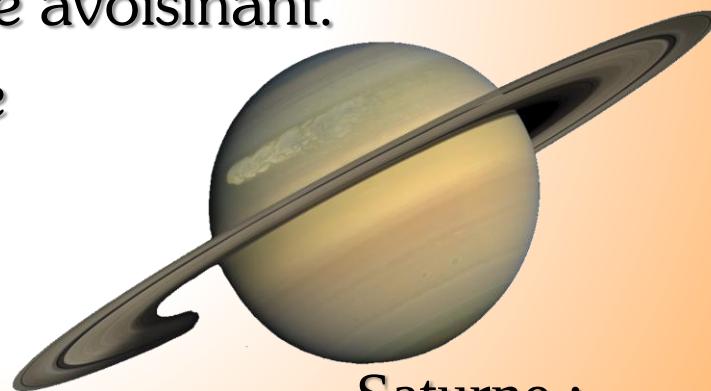


Évolution des disques protoplanétaires.

★ Ainsi se forment les planètes géantes

➤ Les géantes gazeuses

- Un cœur qui atteint une masse $\cong 10 M_{\oplus}$ commence à retenir les gaz du disque avoisinant.
- Si la masse du gaz $>$ que celle du cœur, il y a effondrement et la croissance s'emballe.
- La masse de l'ensemble $\gg \gg M_{\oplus}$. On obtient une planète gazeuse avec une énorme atmosphère.



Saturne :

Masse = $100 M_{\oplus}$

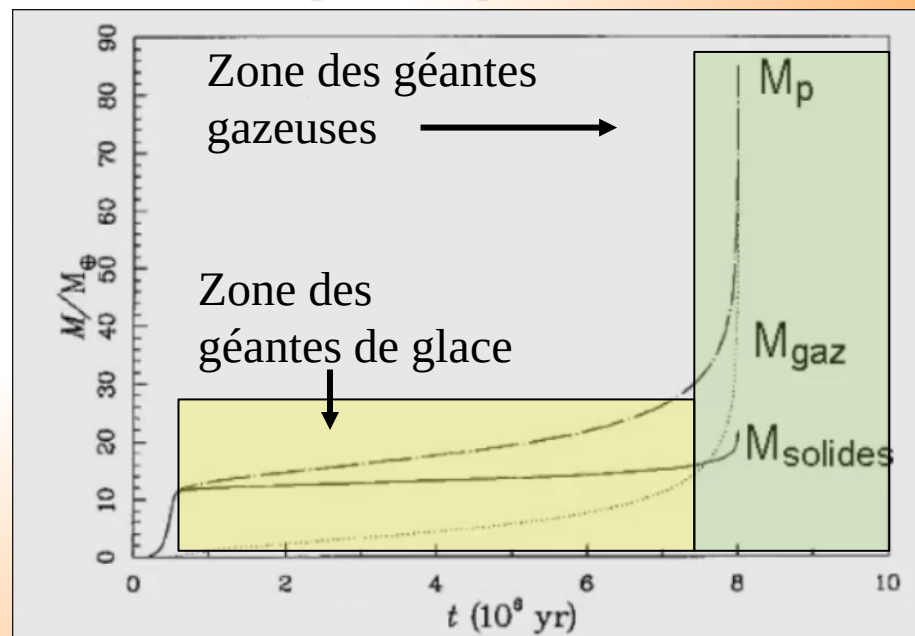


Évolution des disques protoplanétaires.

★ Ainsi se forment les planètes géantes

➤ Pour obtenir un gros cœur, il faut être situé au-delà de la ligne des glaces.

- Les volatiles sont solides et participent à la formation des cœurs.
- Les orbites sont plus grandes et il y a plus de matière.





Évolution des disques protoplanétaires.



★ Étape 6 : Dissipation des gaz

- Durée = $10^N = 10^6 = 1\,000\,000$ ans
 - Par accapARATION des gaz par des planètes géantes
 - Par expulsion systémique des gaz par les vents stellaires

Évolution des disques protoplanétaires.

★ Pour finalement obtenir un système
stellaire abouti qui ressemble à ceci...

Un monde idéalisé qui, le
hasard faisant bien les choses,
ressemble en tout point à
notre Système solaire !



... Or, ce n'est pas ce qu'on observe

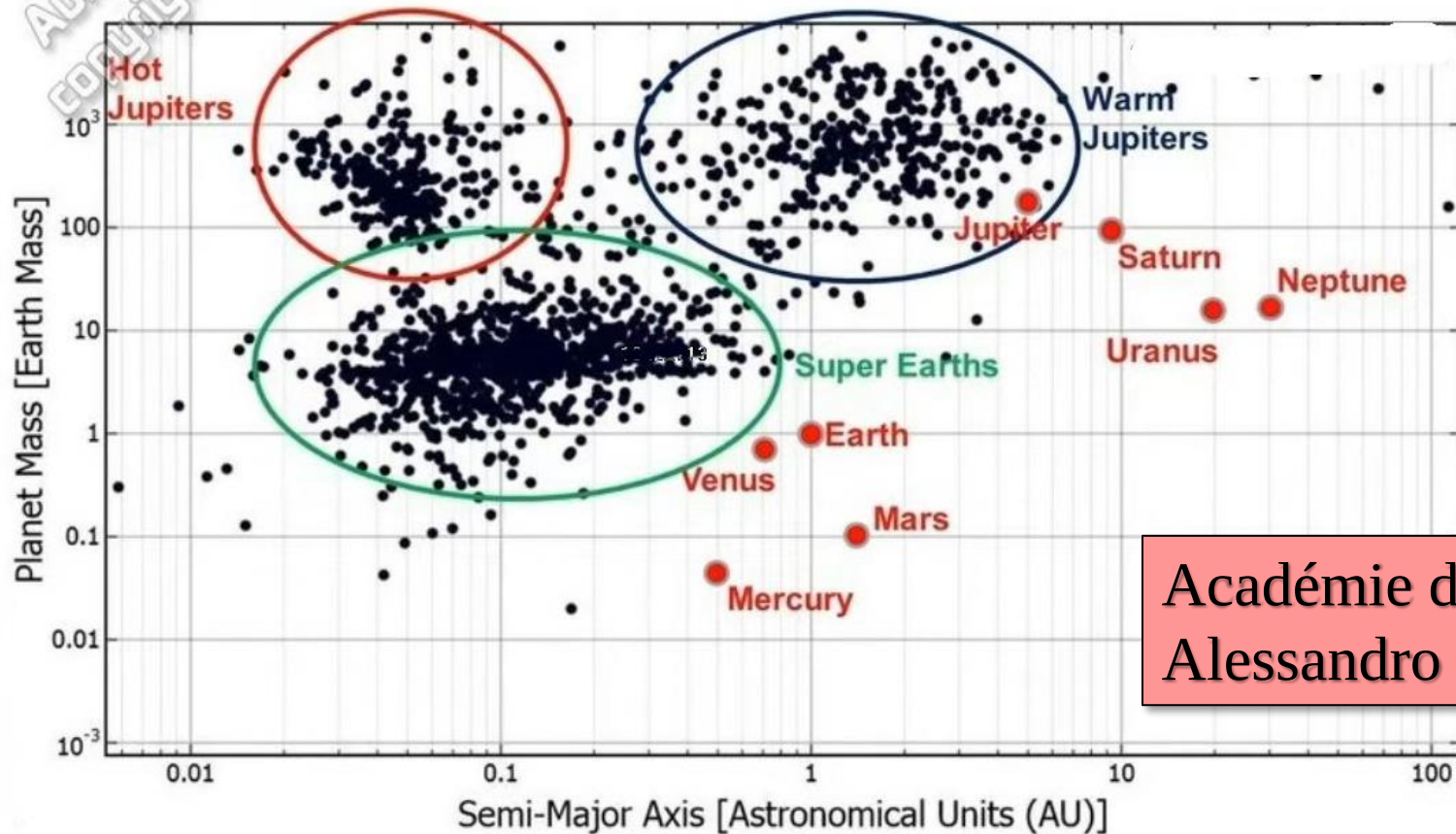
- ★ En date du 1^{er} février 2023, il y avait :
 - **5 307** exoplanètes confirmées dans 3 910 systèmes planétaires différents, dont 853 avec plus d'une planète...
 - ... prenant en compte que nos moyens d'observation ne peuvent toujours pas réaliser un inventaire exhaustif de tous les possibles...
 - Voici ce qu'on observe...





... Or, ce n'est pas
ce qu'on observe

The census of extrasolar planets



Académie des sciences
Alessandro Morbidelli

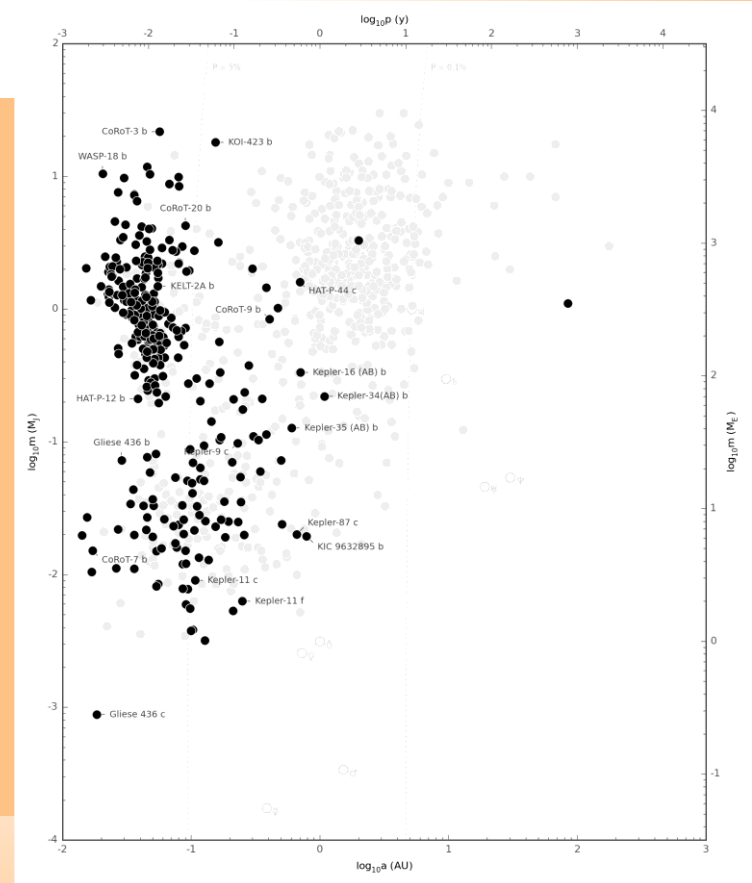


... Or, ce n'est pas ce qu'on observe



★ De grosse planètes gazeuses près de leur étoile.

- De grosses planètes formées au-delà de la ligne de glace sont descendues tout près de leur étoile, en bouffant les réserves de matière se trouvant entre elles et leur étoile, s'arrêtant sur la dernière orbite possible.
- On appelle ces planètes des « **Jupiters-chauds** » et ils sont la règle plutôt que l'exception.

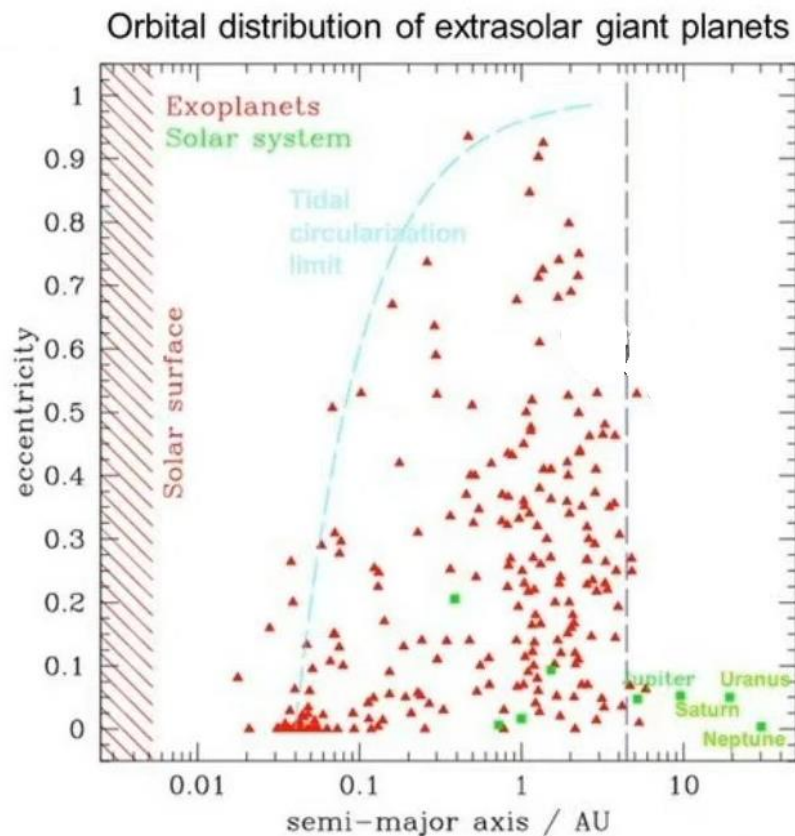
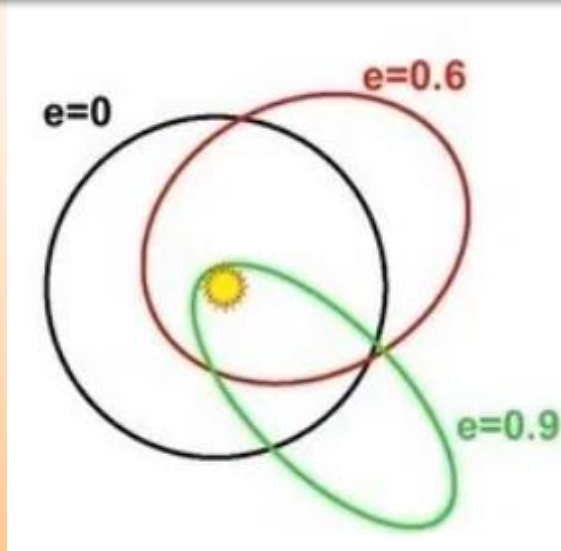




... Or, ce n'est pas ce qu'on observe

★ De grosse planètes gazeuses à orbites
très excentriques.

Académie des sciences
Alessandro Morbidelli





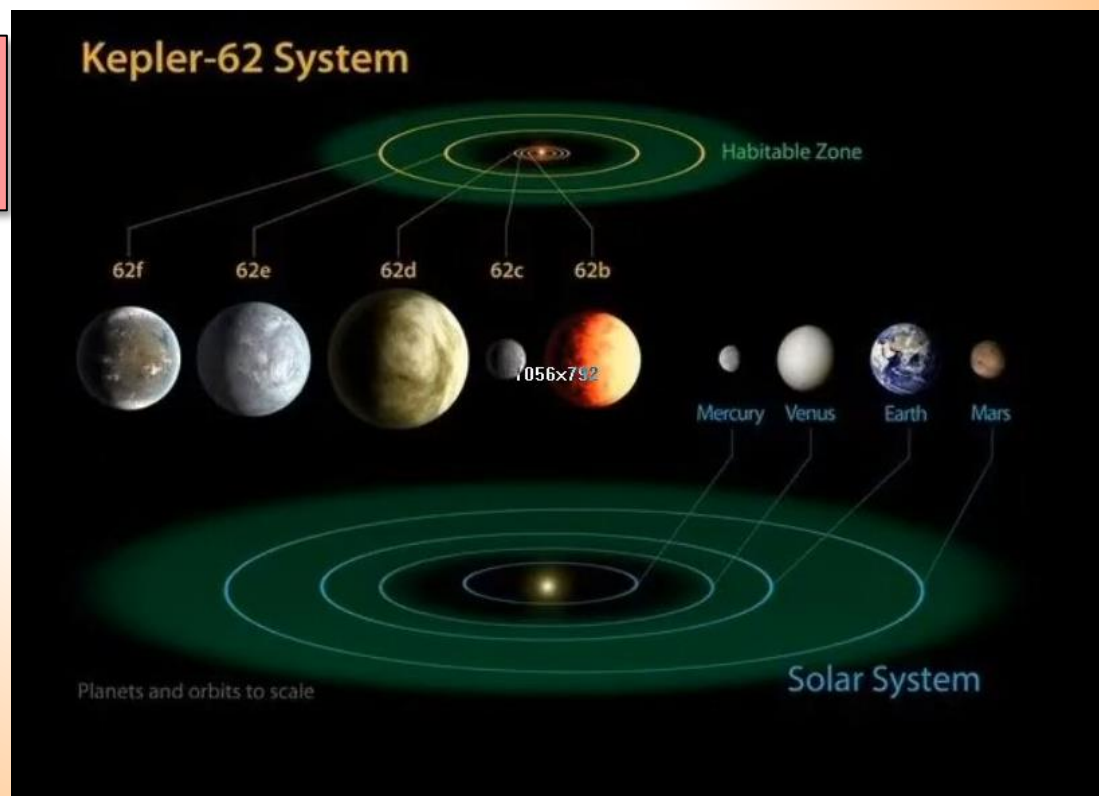
... Or, ce n'est pas ce qu'on observe



★ Des super-Terres en grappes dans des systèmes multiplanétaires.

Académie des sciences
Alessandro Morbidelli

➤ 30 à 50 % des étoiles de type solaire ont des super-Terres de type Neptune avec des orbites $<$ que 100 jours.





Ce qu'on observe

- ★ La grande majorité des étoiles possèdent des systèmes planétaires bien différents du nôtre.
- ★ Ainsi, le Système solaire n'est pas la norme dans l'Univers.
 - Si nous pensons bien connaître les processus et les étapes de la genèse planétaire, alors...

Pourquoi



Comment expliquer la grande diversité des systèmes



- ★ La grande diversité peut dépendre de :
 1. De la masse initiale de la nébuleuse protostellaire.
 - Étoiles de types variés
 - Quantité variable de matière
 2. Systèmes gravitationnels d'étoiles.
 - Étoiles solitaires
 - Étoiles binaires
 - Étoiles multiples



Comment expliquer la grande diversité des systèmes

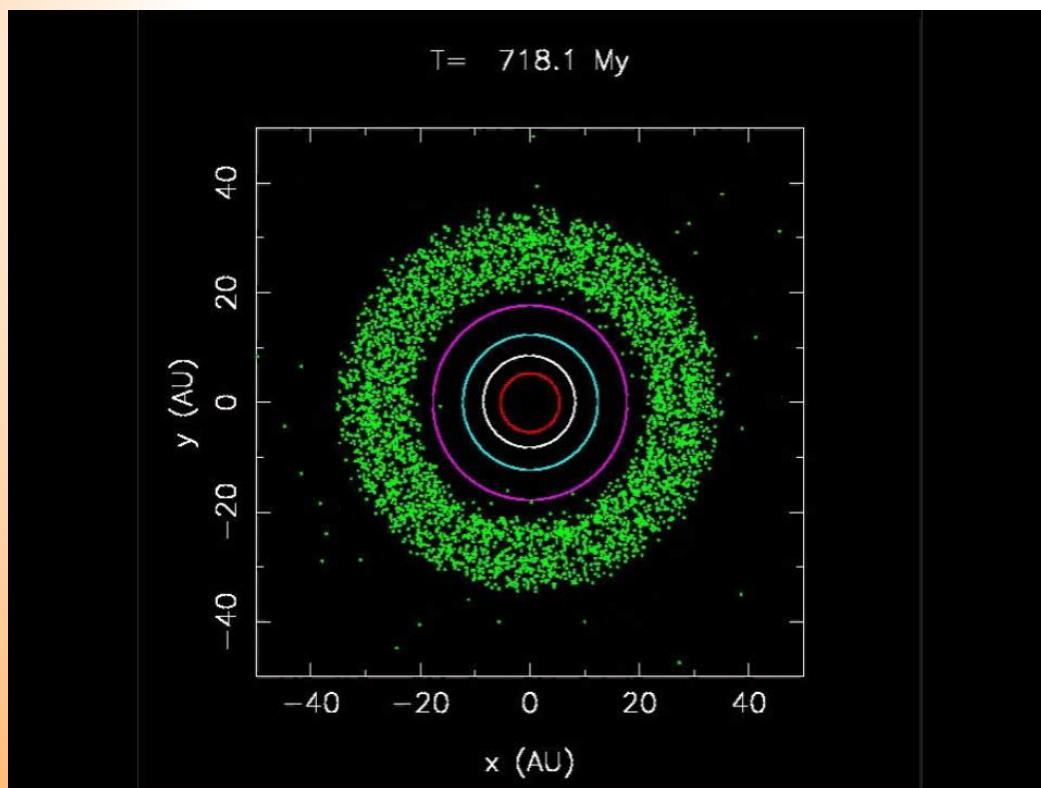
- ★ La grande diversité peut dépendre de :
 3. Répartition de la densité de matière dans le disque
 4. Historique de chacun des systèmes planétaires où le hasard joue un rôle fondamental.





Comment expliquer la grande diversité des systèmes

★ Les systèmes planétaires sont chaotiques.



Système solaire externe il y a 4 milliards d'années

➤ Rouge
➤ Blanc
➤ Bleu
➤ Violet

Avant

➤ Rouge
➤ Blanc
➤ Violet
➤ Bleu

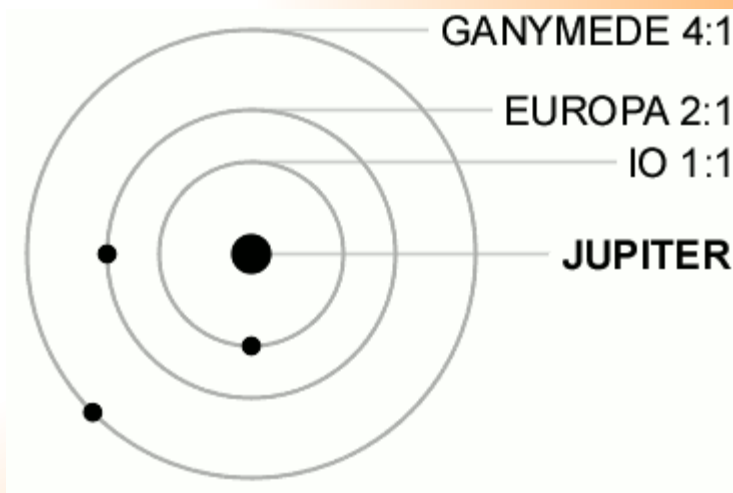
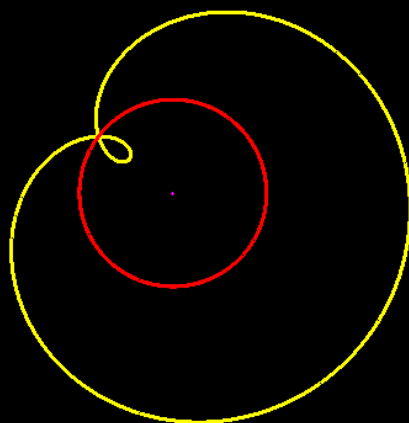
Après



Comment expliquer la grande diversité des systèmes

- ★ Des phénomènes de résonance orbitales modifient la position relative des planètes entre elles.

Jupiter-Saturne
résonance 2:5



Résonnances satellites
de Jupiter



MESSAGES CLÉS

- ★ L'effondrement de la nébuleuse protostellaire en rotation édifie obligatoirement une forme étalée le long de son axe équatorial qu'on appelle **disque protoplanétaire**.
- ★ À maturité, ce disque protoplanétaire ne contient plus qu'une fraction infime de la masse de la nébuleuse. La plus grande portion étant capturée par l'étoile naissante.
- ★ C'est cependant cette faible fraction qui formera les planètes, les astéroïdes, les comètes et tous les corps céleste constituant le Système stellaire.



MESSAGES CLÉS

- ★ Un gradient de température se développe dans le disque à partir de l'étoile. En fonction de leur point de fusion et de sublimation, les différentes espèces chimique vont devenir solides ou rester à l'état gazeux selon leur position dans le disque.
- ★ Le disque protoplanétaire se différencie et s'organise. La pression de lumière de l'étoile naissante crée les vents stellaires qui poussent les volatiles légers et les gaz au-delà d'une frontière appelée **ligne de glace** où les volatiles vont se solidifier.
- ★ Les objets solides vont pouvoir s'unir par accrétion et former des corps progressivement plus massifs.





MESSAGES CLÉS

- ★ Divers mécanismes sont impliqués dans ce processus qui va aboutir à la formation d'un système planétaire mature.
- ★ En deçà de la ligne de glace, les corps formés sont métalliques et secs. On les appelle **telluriques**.
- ★ Au-delà de la ligne de glace, les corps formés contiennent des volatiles solidifiés en plus des métaux. Ils forment les comètes, les astéroïdes *mouillés* et les **planètes géantes glacées** ou **gazeuses**.





MESSAGES CLÉS

- ★ Le modèle du Système solaire n'est pas représentatif de l'ensemble des systèmes stellaires.
- ★ Les systèmes stellaires sont très hétérogènes et leurs aboutissants dépendent de nombreux facteurs ayant des effets terminaux difficilement prévisibles.
- ★ On y trouve de tout, même si certains agencements montrent des tendances communes.





QUELQUES RÉFÉRENCES



- ★ Astronomie et Astrophysique, 2^e édition
Séguin M, Villeneuve B
Éditions du Renouveau Pédagogique Inc., 2002
- ★ Conférence d'Aurélien Crida
Formation du système solaire, parties 1 et 2
<https://www.youtube.com/watch?v=HR4i4s2GbR8>
https://www.youtube.com/watch?v=jpFGGTWP_Co
- ★ Conférence d'Alessandro Morbidelli
Le chaos et l'origine de la diversité des systèmes planétaires
<https://www.youtube.com/watch?v=2w4ZyGqWLAo>



QUELQUES RÉFÉRENCES

★ Wikipédia :

- Forces de van der Waals
https://fr.wikipedia.org/wiki/Force_de_van_der_Waals
- Turbulence
<https://www.youtube.com/watch?v=AgvjPPzy64I>

