

# INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE

Alain Bouquet

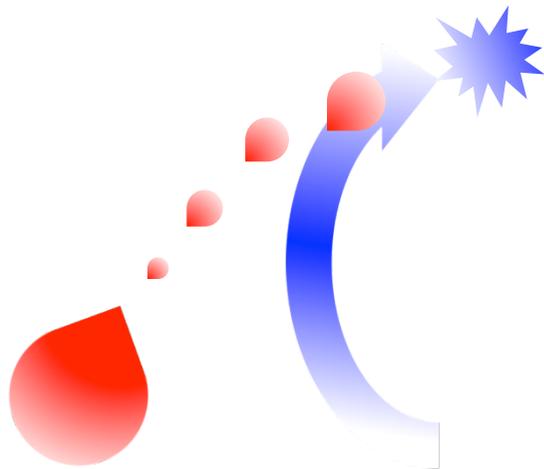
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



# Théorie de la collision avec une autre étoile

- Buffon : pourquoi les planètes tournent-elles
  - dans le même sens sur elles-mêmes
  - et autour du Soleil,
  - et dans le même plan ?
  - Collision du Soleil avec un autre astre ?
- Jeans : collision rasante arrachement (par effet de marée) d'un filament de matière formant les planètes

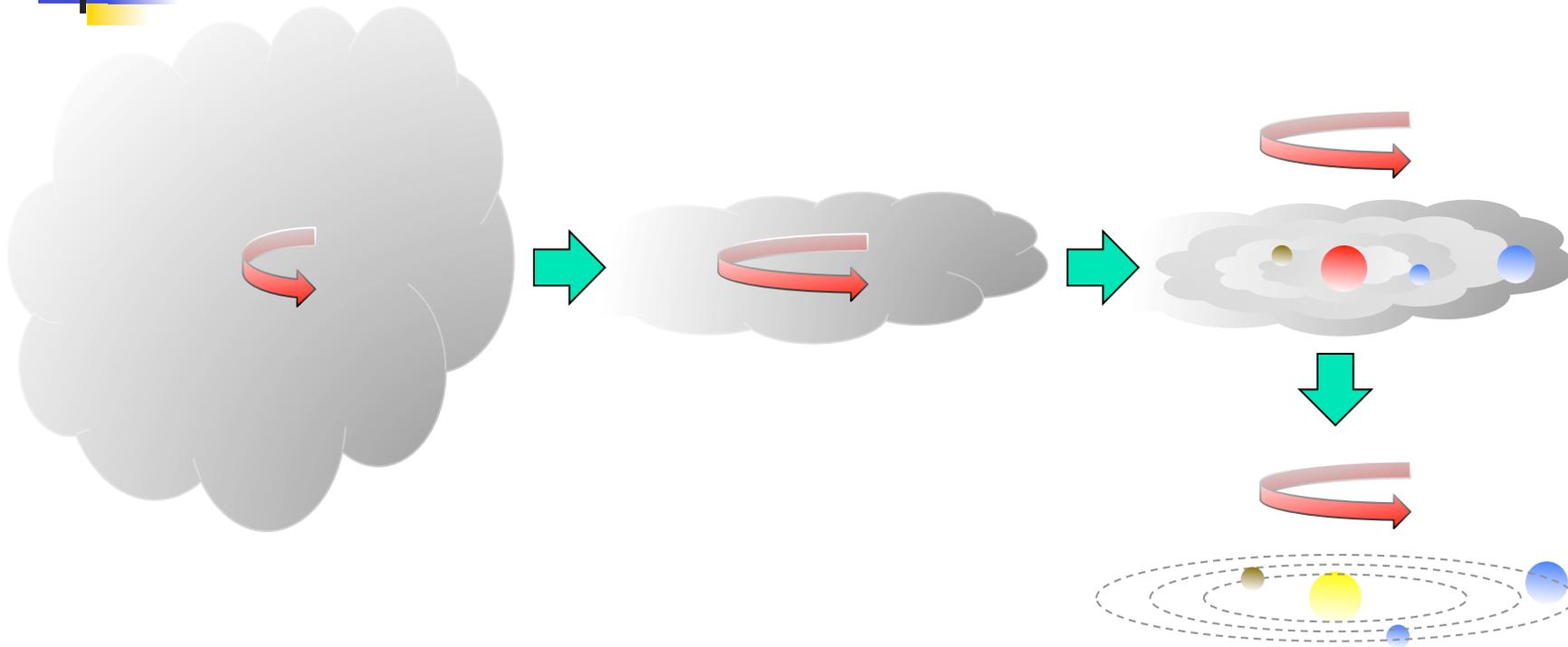


- Événement exceptionnel
  - ☞ très peu d'étoiles devraient être accompagnées de planètes
- Difficultés
  - Il n'est pas sûr que la matière arrachée se condense au lieu de se dissiper
  - La composition du Soleil est très différente de celle des planètes

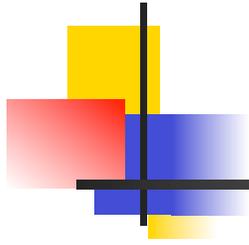


V838 Monocerotis ©HST: une collision d'étoiles ?

# Théorie de la nébuleuse primitive (Laplace)



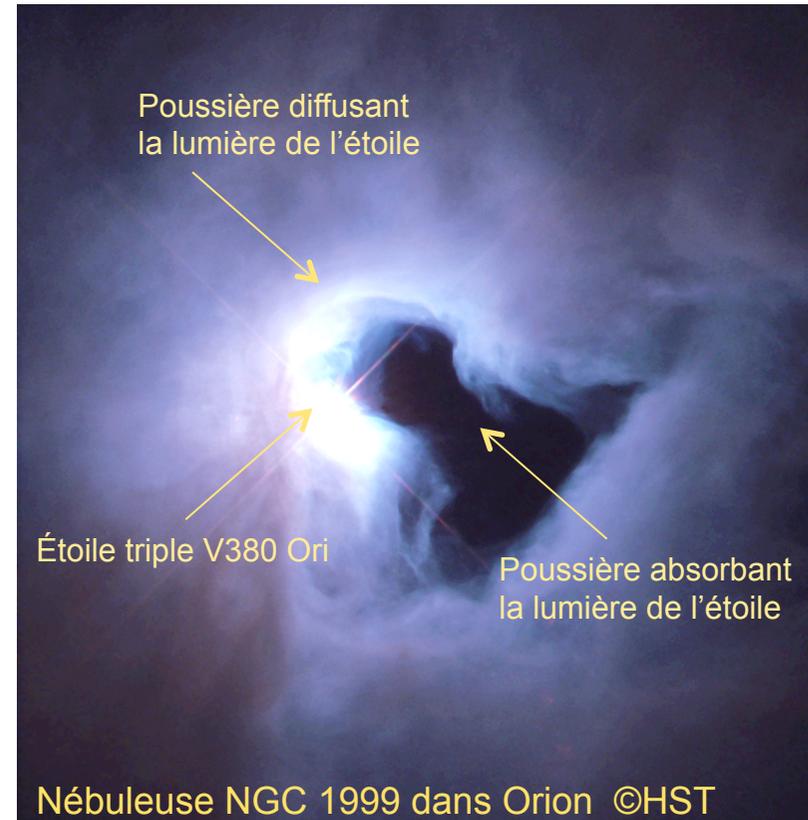
- a priori, toutes les étoiles devaient être accompagnées de planètes
- Difficultés
  - Le Soleil devrait tourner beaucoup plus vite sur lui-même
  - Rotation différentielle du disque -> cisaillement -> impossibilité de la formation de planètes (Maxwell)



# **LE BERCEAU: LE MILIEU INTERSTELLAIRE**

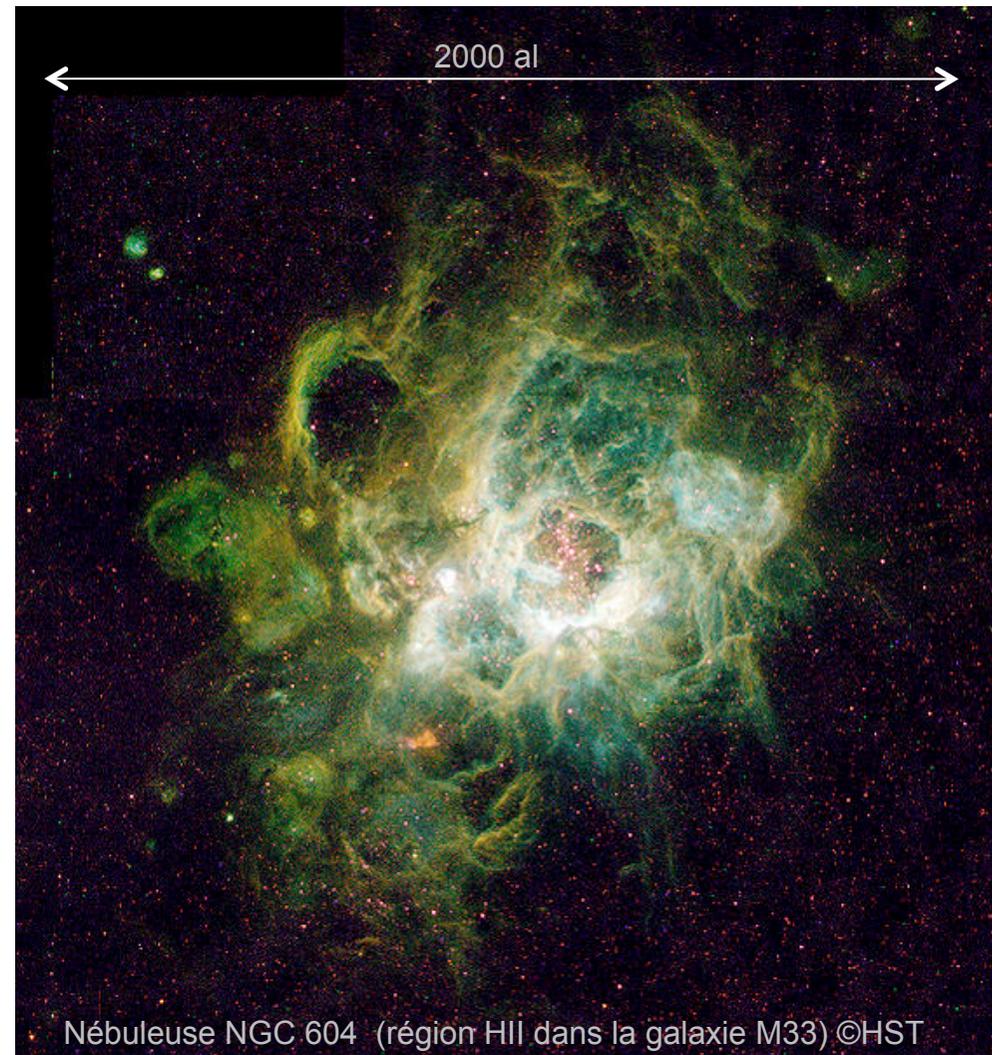
# Le berceau de la formation : le milieu interstellaire

- Hydrogène (90%)
  - Hydrogène moléculaire H<sub>2</sub>
    - Invisible directement (via CO)
  - Hydrogène atomique H (HI)
    - Visible en radio (21 cm)
  - Hydrogène ionisé H<sup>+</sup> (HII)
    - Visible en optique et UV
- Hélium (9%)
- Autres molécules (<1%)
  - CO
    - Visible en radio (1 mm)
  - H<sub>2</sub>O, OH, CN, hydrocarbures...
- Poussières (taille ~1 μm, <1%)
  - Carbonates
  - Silicates
  - Absorbe ou diffuse la lumière (de préférence dans le bleu) et la réémet en infrarouge
- À peu près autant de matière entre les étoiles que dans les étoiles, mais très diffuse



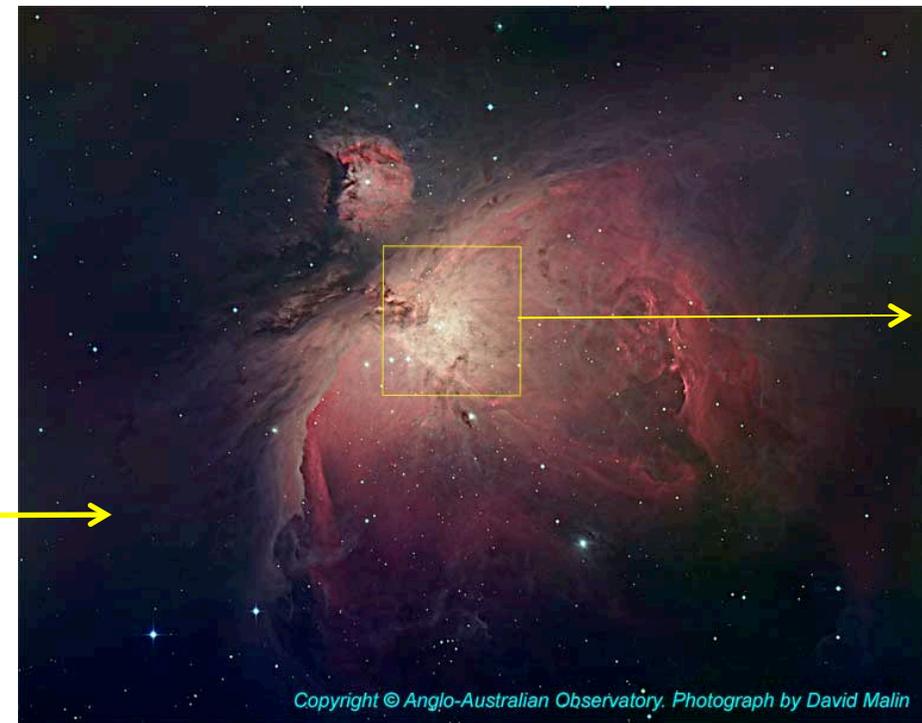
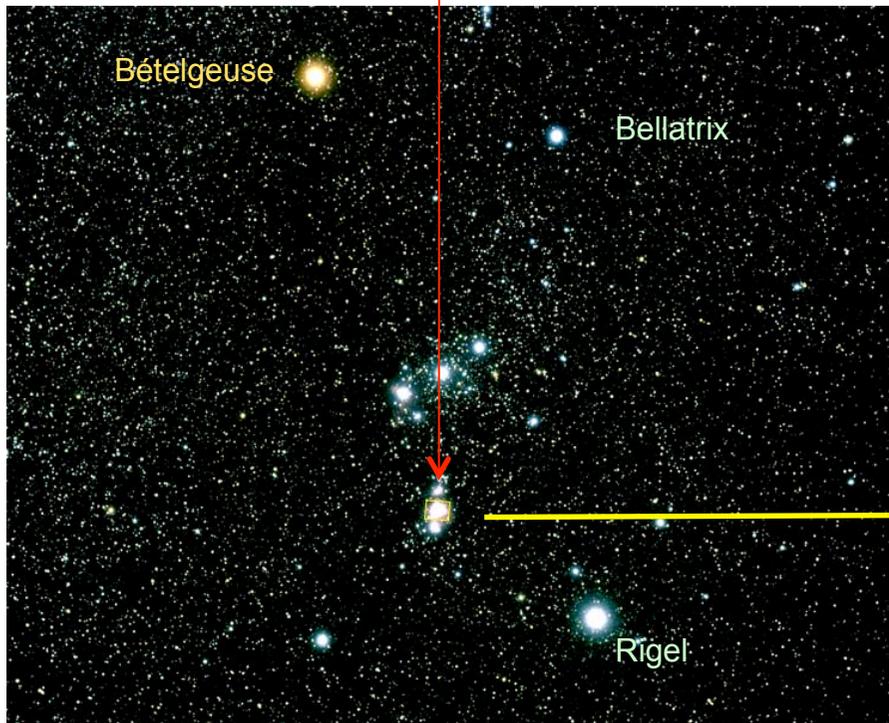
# Répartition de la matière dans la Galaxie

- Les plus faciles à observer
  - Poussières (absorption)
  - Régions HI (radio)
    - $n \sim 10$  atomes/cm<sup>3</sup>
    - $M \sim 100 M_{\odot}$ ,  $T \sim 50$  à  $100$  K
  - Régions HII (émission)
    - $n < 1$  atomes/cm<sup>3</sup>
    - $T \sim 10\,000$  K
- Nuages moléculaires
  - $n \sim 100$  à  $100\,000$  atomes/cm<sup>3</sup>
  - $M = 10^4$  à  $10^6 M_{\odot}$ ,  $T \sim 10$  à  $20$  K
  - Plusieurs milliers dans la galaxie
  - Structure très complexe
- En comparaison
  - Système solaire  $n \sim 1$  atome/cm<sup>3</sup>



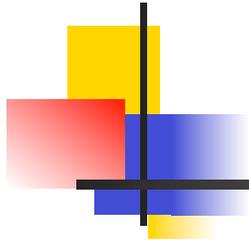
# Une pépinière d'étoiles : la nébuleuse d'Orion

- La nébuleuse d'Orion (M42) est un immense nuage de gaz et de poussières, éclairée par de jeunes étoiles.
- Située à 1500 al de nous, elle s'étend sur 40 al



# Comparaison optique % infrarouge



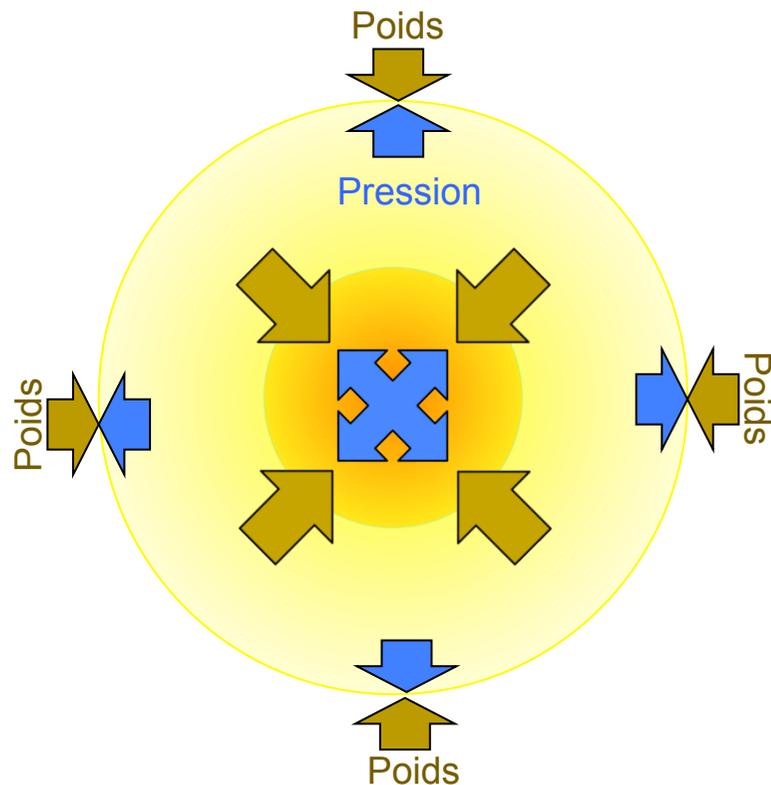


# UN CERTAIN MONSIEUR JEANS



# Stabilité d'un nuage de gaz : $T \sim M/D \sim \rho^{1/3} M^{2/3}$

- Équilibre gravitationnel entre poids et pression



- Énergie cinétique :  $E_c = 3/2 k T$

Température du nuage  $\uparrow$

- Énergie potentielle :  $E_p \sim - G M m / D$

Masse du nuage  $\uparrow$   
 Masse des molécules de gaz  $\uparrow$   
 Diamètre du nuage  $\uparrow$

- $\Rightarrow kT \sim G M m/D$

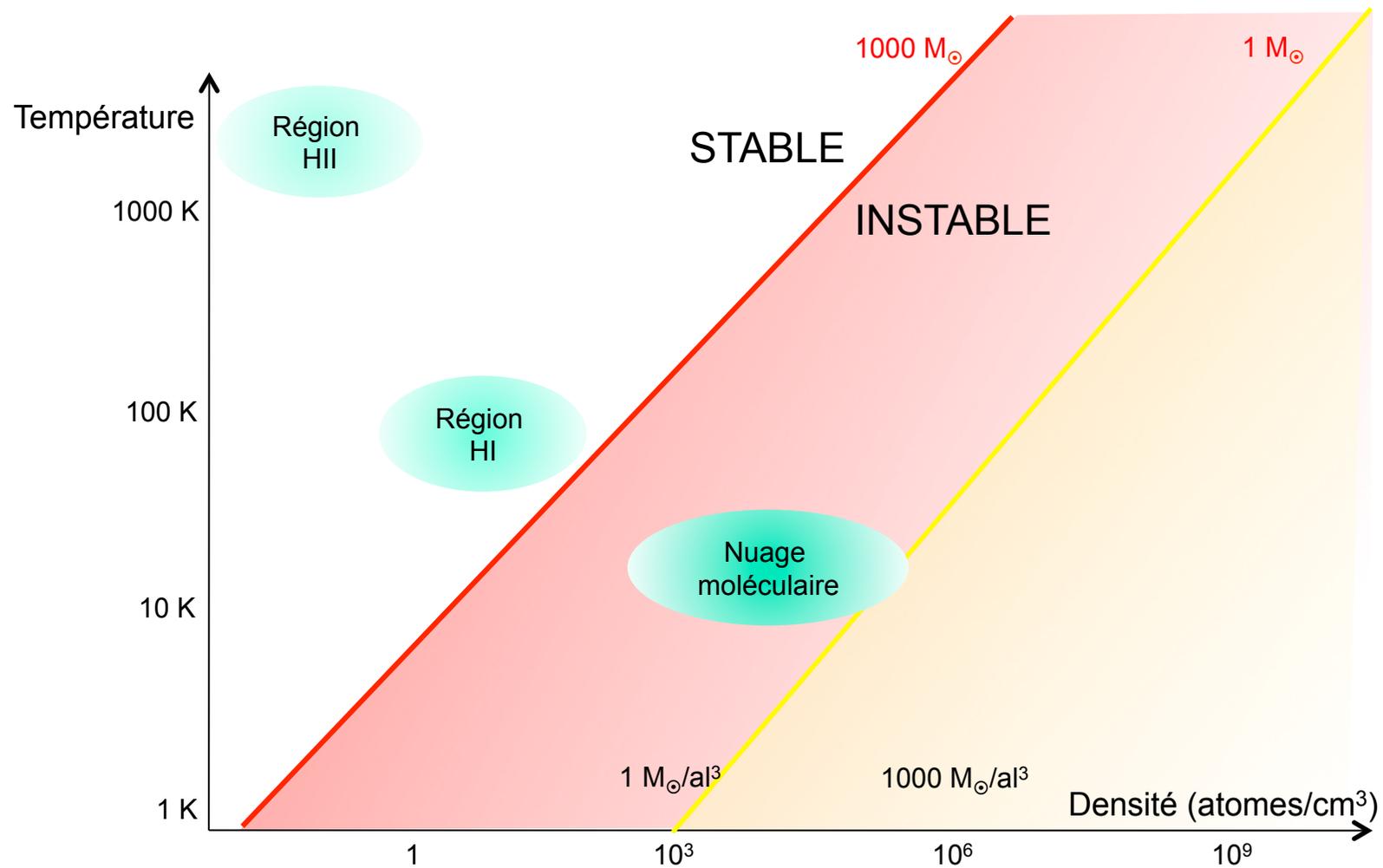
- Soit  $T \sim 1 \text{ K } (M/M_\odot)/(D/1 \text{ al})$

- Plus pratique d'utiliser la densité  $\rho \equiv M/D^3$

- $T_{\text{eq}} = M / [M/\rho]^{1/3} = \rho^{1/3} M^{2/3}$

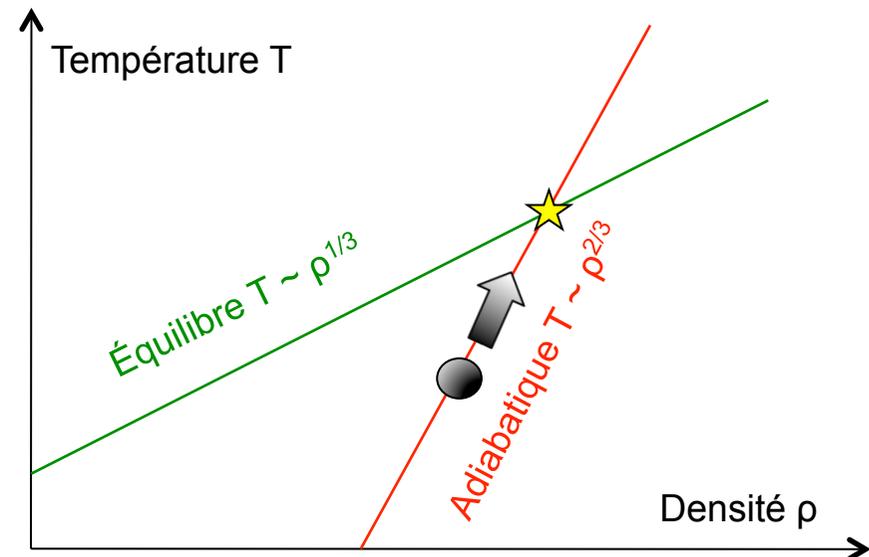
- $\rightarrow$  longueur « de Jeans », masse « de Jeans »...

# Stabilité ou instabilité gravitationnelle ?



# Refroidissement ou réchauffement ?

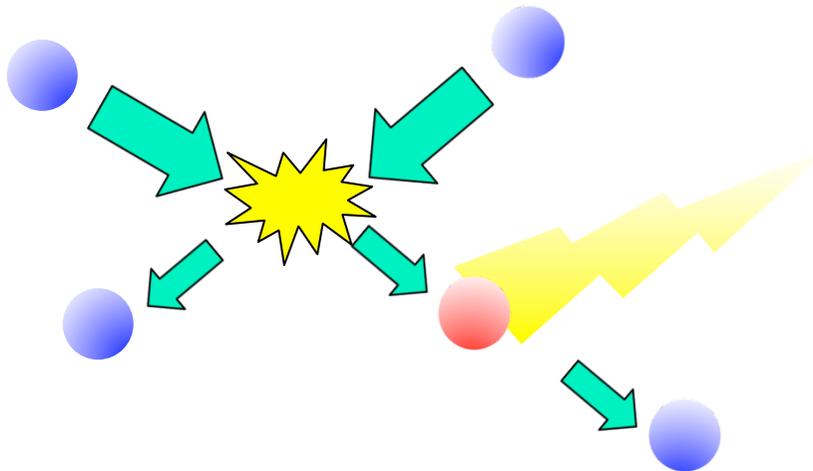
- La contraction d'un nuage libère de l'énergie gravitationnelle
- $E_p = -GM^2/D$
- Où va cette énergie ?
- Elle accélère les constituants du nuage  $\Leftrightarrow$  énergie cinétique  $\Leftrightarrow$  énergie thermique
- Si le gaz ne perd pas d'énergie par rayonnement, sa température augmente
- Contraction adiabatique  $\Leftrightarrow T \sim \rho^{2/3}$
- $\Rightarrow$  retour à l'équilibre ?
- Pas si simple !
- Un corps chaud rayonne
  - Rayonnement de corps noir
  - Excitations atomiques et moléculaires
- Tout dépend donc des mécanismes de refroidissement possibles



# Refroidissement

## ■ Mécanisme de base

- Lors d'une collision de deux atomes, l'un ou l'autre passe dans un état excité (collision inélastique)
- il perd de l'énergie cinétique ( $\Leftrightarrow T \downarrow$ )
- il se déexcite ensuite en émettant un photon



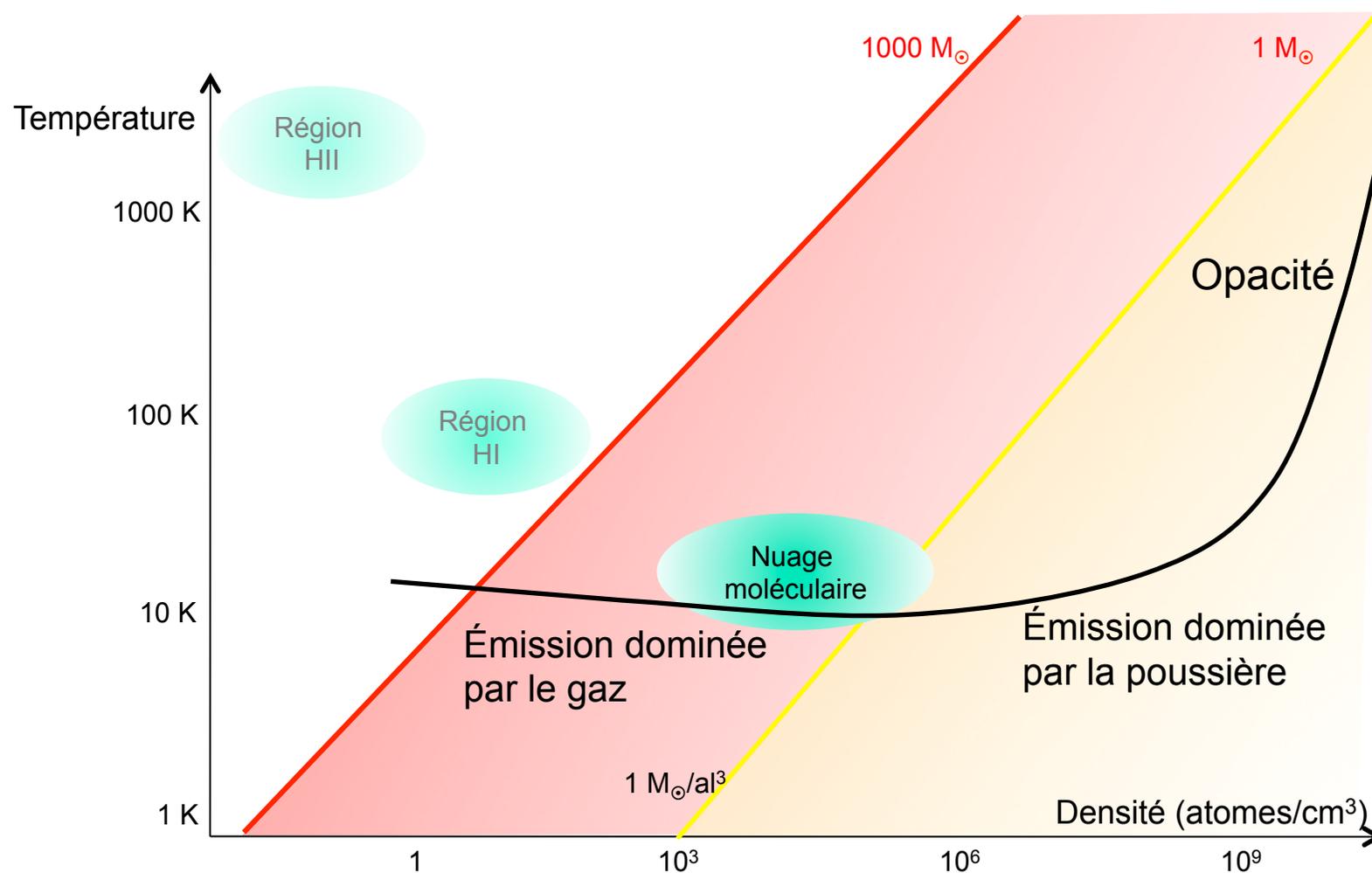
## ■ L'efficacité de refroidissement augmente

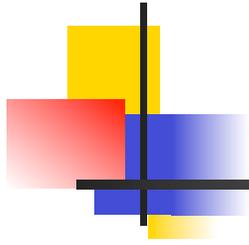
- avec la densité (collisions plus fréquentes)
- avec la température (excitations plus faciles)

## ■ Trois régimes différents

- Densité faible ( $< 10^5 \text{ cm}^{-3}$ ): refroidissement dû à l'hydrogène atomique et moléculaire
  - $\rightarrow T$  *diminue* lentement quand  $\rho$  croît
- Densité moyenne ( $10^5 < n < 10^{10}$ ): émission infrarouge de la poussière
  - $\rightarrow T$  *augmente* lentement quand  $\rho$  croît
- Densité forte ( $> 10^{10}$ ): la poussière devient opaque
  - $\rightarrow$  régime adiabatique  $T \sim \rho^{2/3}$

# Température, densité et refroidissement

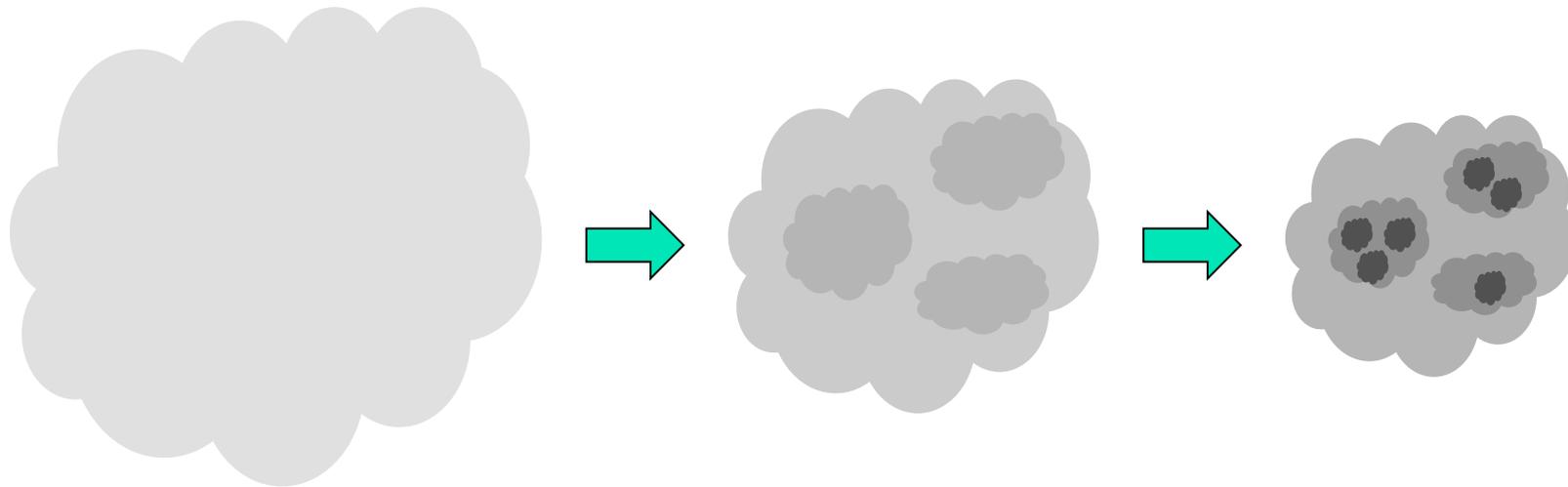




# PROTO-SOLEIL

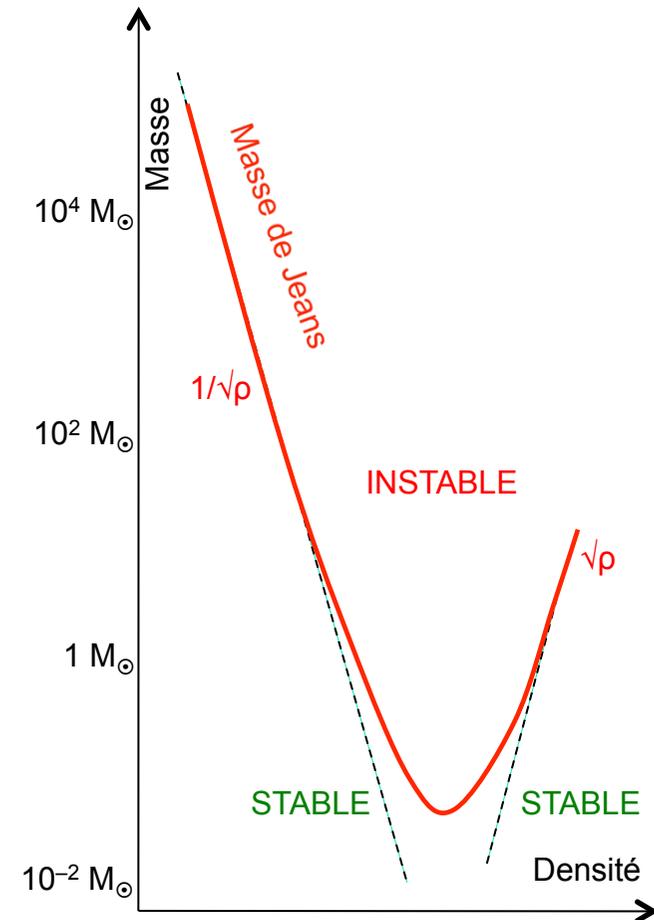
# Fragmentation

- Soit un nuage moléculaire de  $10^4 M_{\odot}$  de densité  $10^4 \text{ cm}^{-3}$  et de température  $T=10 \text{ K}$
- → instable gravitationnellement → il se contracte
- La densité augmente rapidement de plusieurs ordres de grandeur
- Mais sa température reste proche de  $10 \text{ K}$  (contraction quasi isotherme)
- → la masse de Jeans  $M_{\text{Jeans}} = T^{3/2}/\rho^{1/2}$  diminue rapidement
- → des zones de taille plus petite deviennent instables → **Fragmentation**



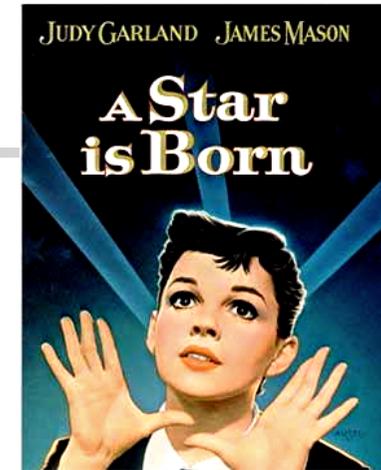
# Masse minimale

- La fragmentation doit s'arrêter quelque part
- Le nuage devient opaque au rayonnement quand la densité atteint  $\sim 10^{10}$  atomes/cm<sup>3</sup>
- → transition isotherme → adiabatique
- Régime adiabatique  $T \sim \rho^{2/3}$
- →  $M_{\text{Jeans}} = T^{3/2}/\rho^{1/2} = \rho^{1/2}$
- La masse de Jeans **augmente avec la densité** dans la phase adiabatique → il existe une masse minimale
- dont la valeur précise dépend de la composition chimique du milieu interstellaire

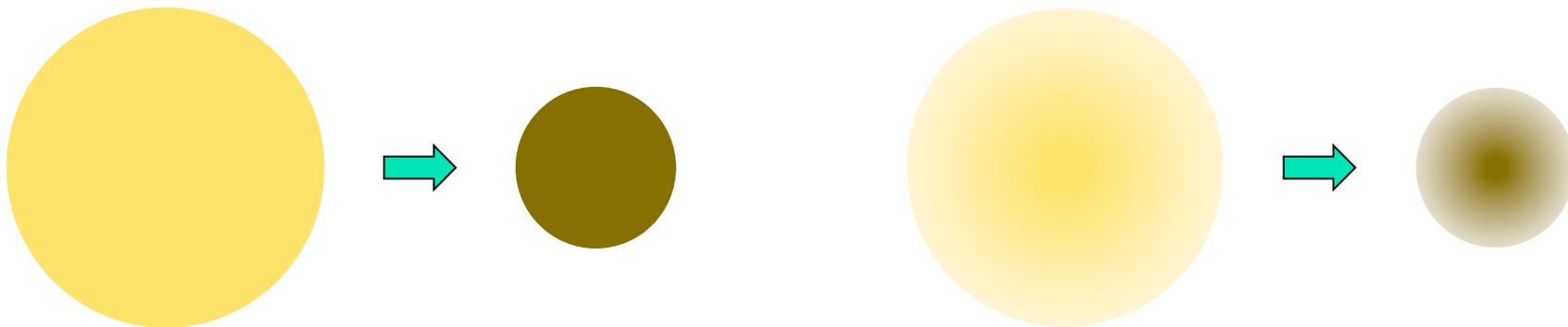


Transition isotherme → adiabatique

# Une étoile est née

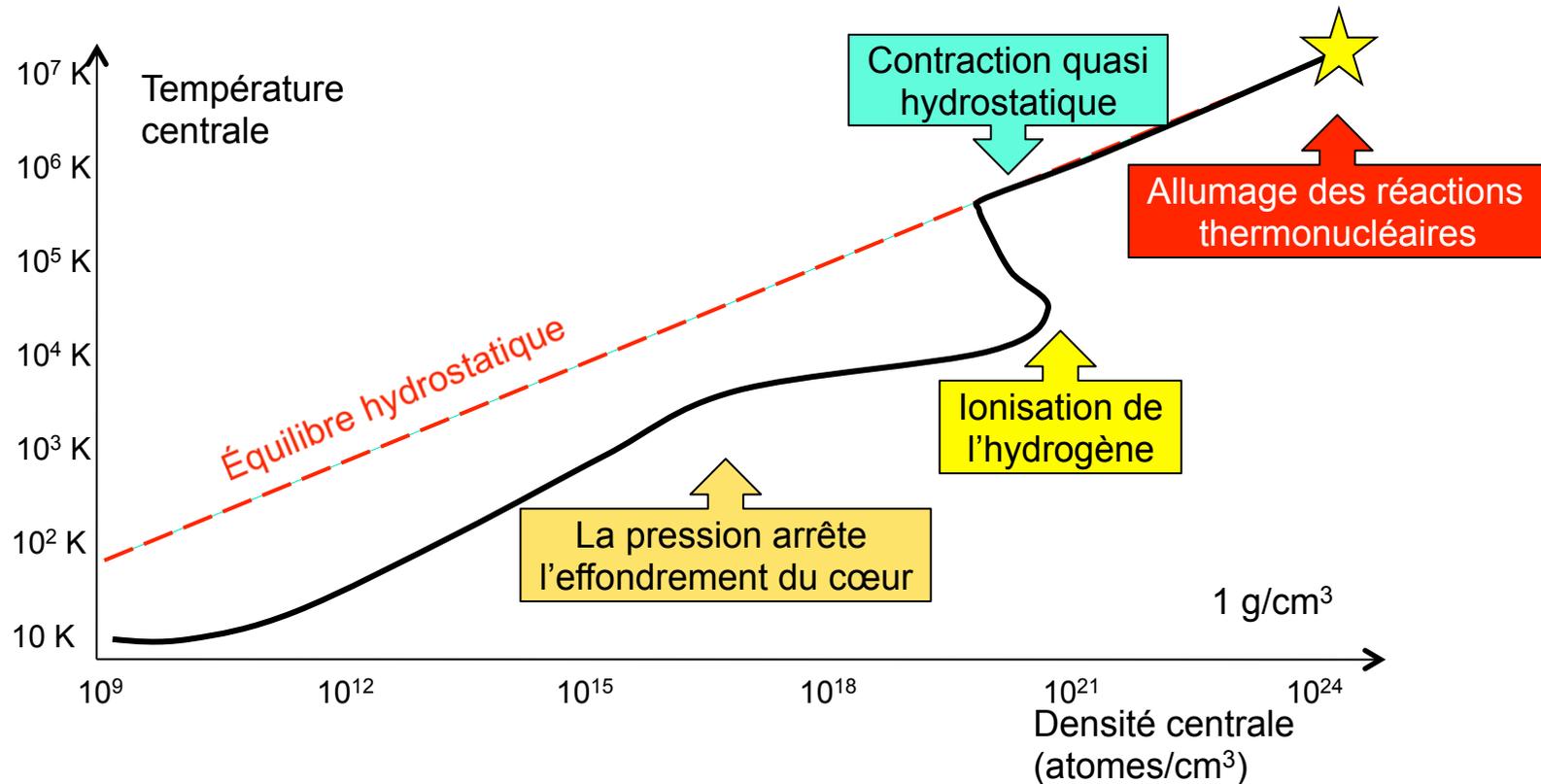


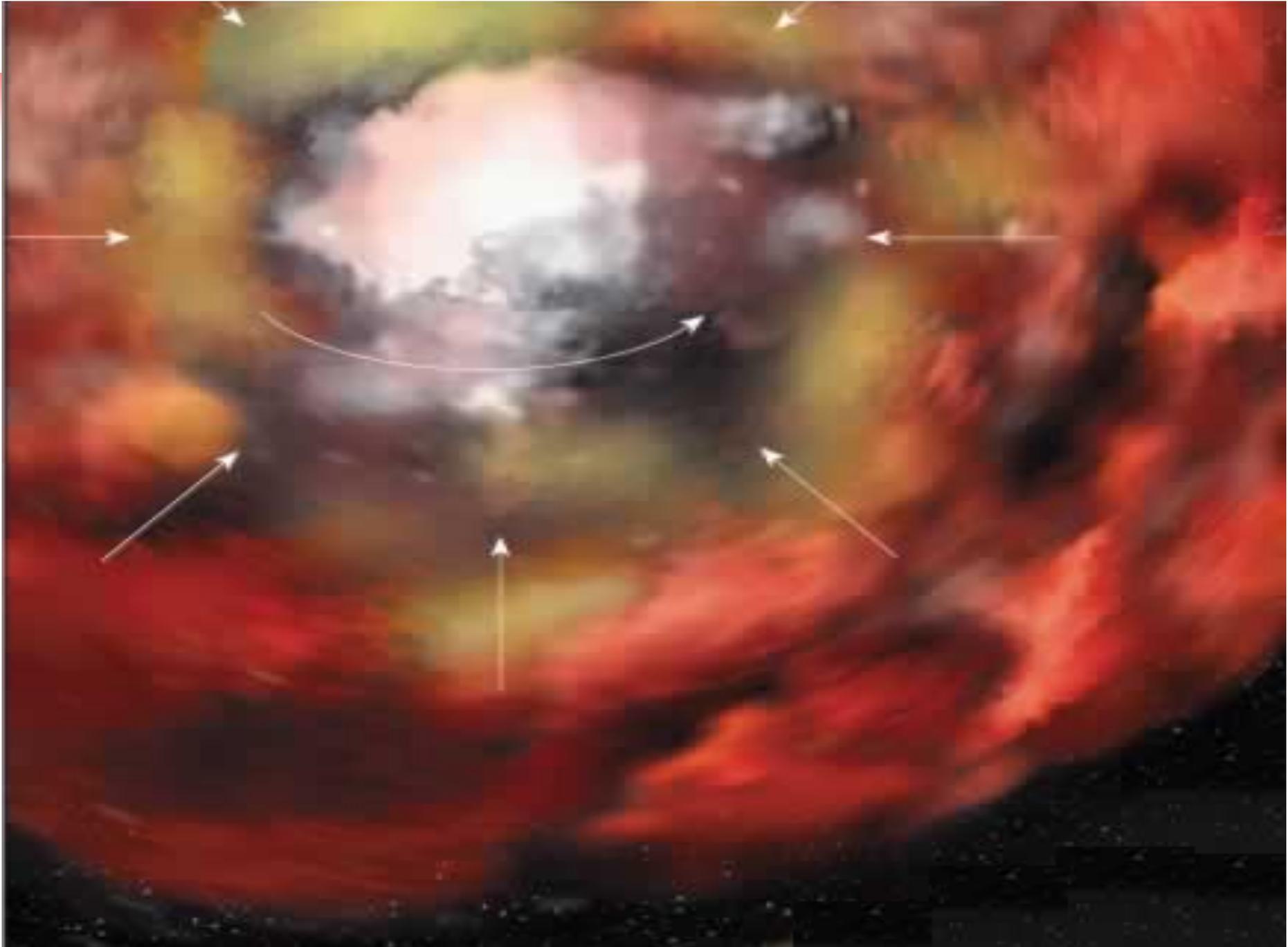
- Un nuage moléculaire se fragmente en nombreux petits nuages de masse allant de  $0,01 M_{\odot}$  à  $100 M_{\odot}$ 
  - → les étoiles naissent en groupes (amas d'étoiles)
  - → forte probabilité de systèmes binaires, triples ou quadruples
- La fragmentation cesse **mais pas la contraction**
  - → les régions les plus denses s'effondrent plus rapidement que les autres
  - → les différences (contrastes) de densité augmentent
  - → cela induit des **différences de température et de pression** (gradients)

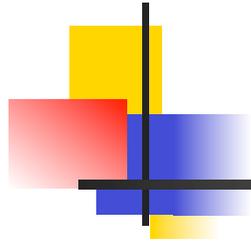


# La fin du commencement (W. Churchill)

- Le cœur ( $\sim 1\%$ ) du nuage de  $1 M_{\odot}$  finit par atteindre une densité et une température suffisante pour stopper son effondrement
- Mais ce n'est pas le cas de l'enveloppe qui continue à chuter sur le cœur







# LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE

# Le disque: une histoire de moment angulaire

- Le Soleil contient
  - plus de 99% de la masse totale du système solaire
  - mais moins de 3% du moment angulaire total
- Moment angulaire (ou cinétique)
- $L = M D \times V = M D^2 \times \omega$
- Le moment angulaire est conservé
- $\Rightarrow$  si  $D$  diminue,  $\omega$  augmente
- Inévitablement, le nuage proto-solaire tourne (un peu) sur lui-même
- Contraction  $\Rightarrow$  accélération de la rotation

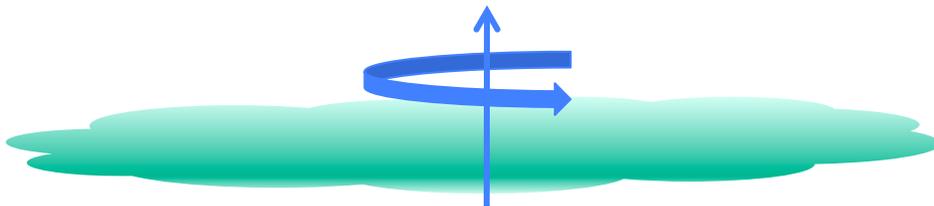
- Un exemple simple de conservation du moment angulaire



- Mais pourquoi un disque plutôt qu'une sphère compacte ?

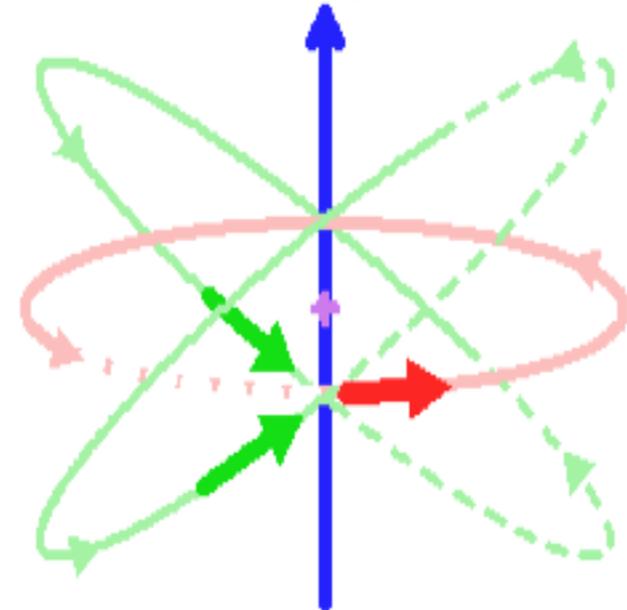
# Le disque : une conséquence des collisions

- Moment angulaire
  - direction privilégiée, celle du moment angulaire
  - $\Leftrightarrow$  plus d'objets tournant dans un sens que dans l'autre
- Collisions *plus fréquentes* entre objets de vitesses «verticales» opposées et de vitesses «horizontales» de même sens
  - $\Rightarrow$  les vitesses « verticales » se compensent
  - $\Rightarrow$  les vitesses « horizontales » s'additionnent
- $\Rightarrow$  la rotation d'ensemble est préservée, mais le nuage devient plus plat



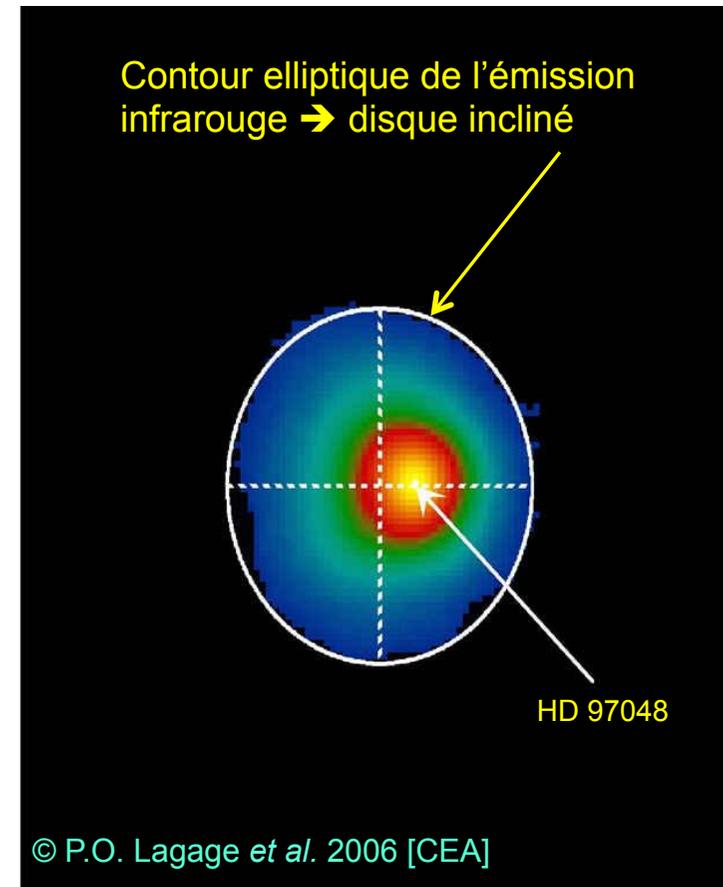
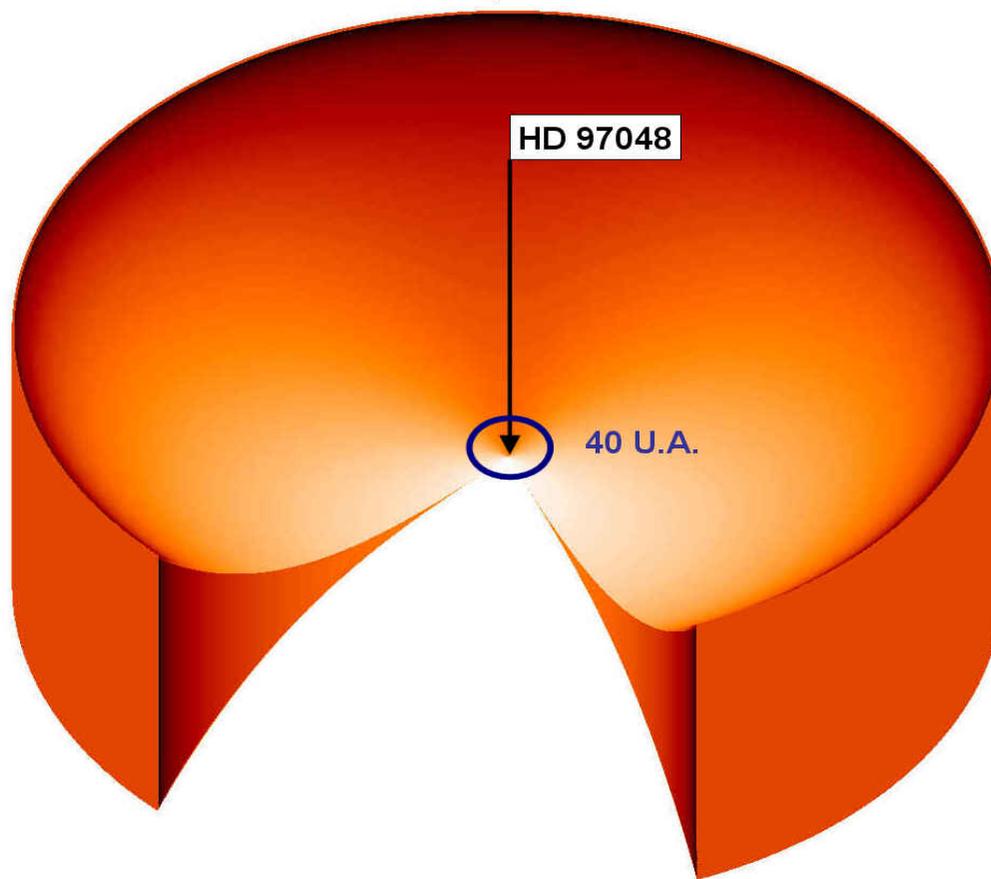
- $\Rightarrow$  disque protoplanétaire *orthogonal* au moment angulaire

## Moment angulaire



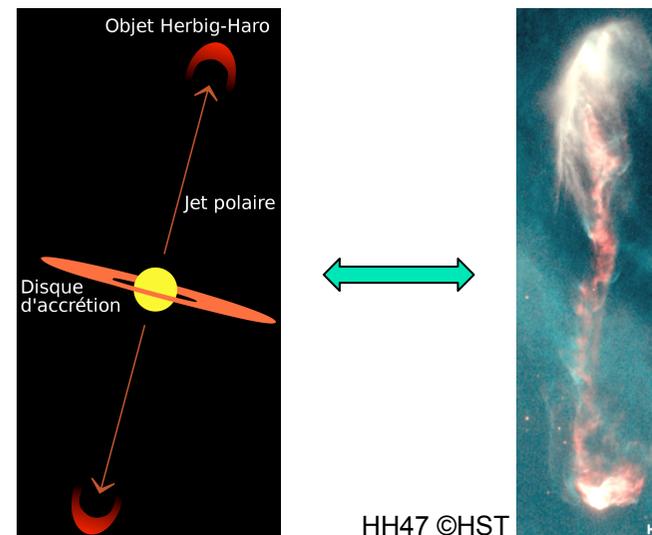
# Disques protoplanétaires

- Étoile HD 97048 vue en infrarouge (8,6  $\mu\text{m}$ ) par VISIR au VLT (ESO)

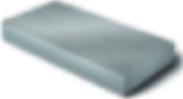


# Moment angulaire et magnétisme

- Contraction ⇨ augmentation de la température
- Température  $> 1000$  K ⇨ ionisation des atomes
- Particules chargées en mouvement
  - ⇨ courants électriques
  - ⇨ champs magnétiques
  - ⇨ force de Lorentz sur les particules
- Théorème d'Alfven :
- Dans un milieu conducteur, les lignes de champ magnétique se déplacent exactement comme la matière
- De façon imagée: les lignes de champ magnétique sont « gelées » dans la matière
- L'enroulement des lignes de champ transfère le moment angulaire du centre à la périphérie
- Autrement dit, la rotation du centre ralentit... et celle du disque augmente
- Parallèlement, cela crée deux jets de matière ionisée dans les directions polaires



# Composition du nuage proto-solaire

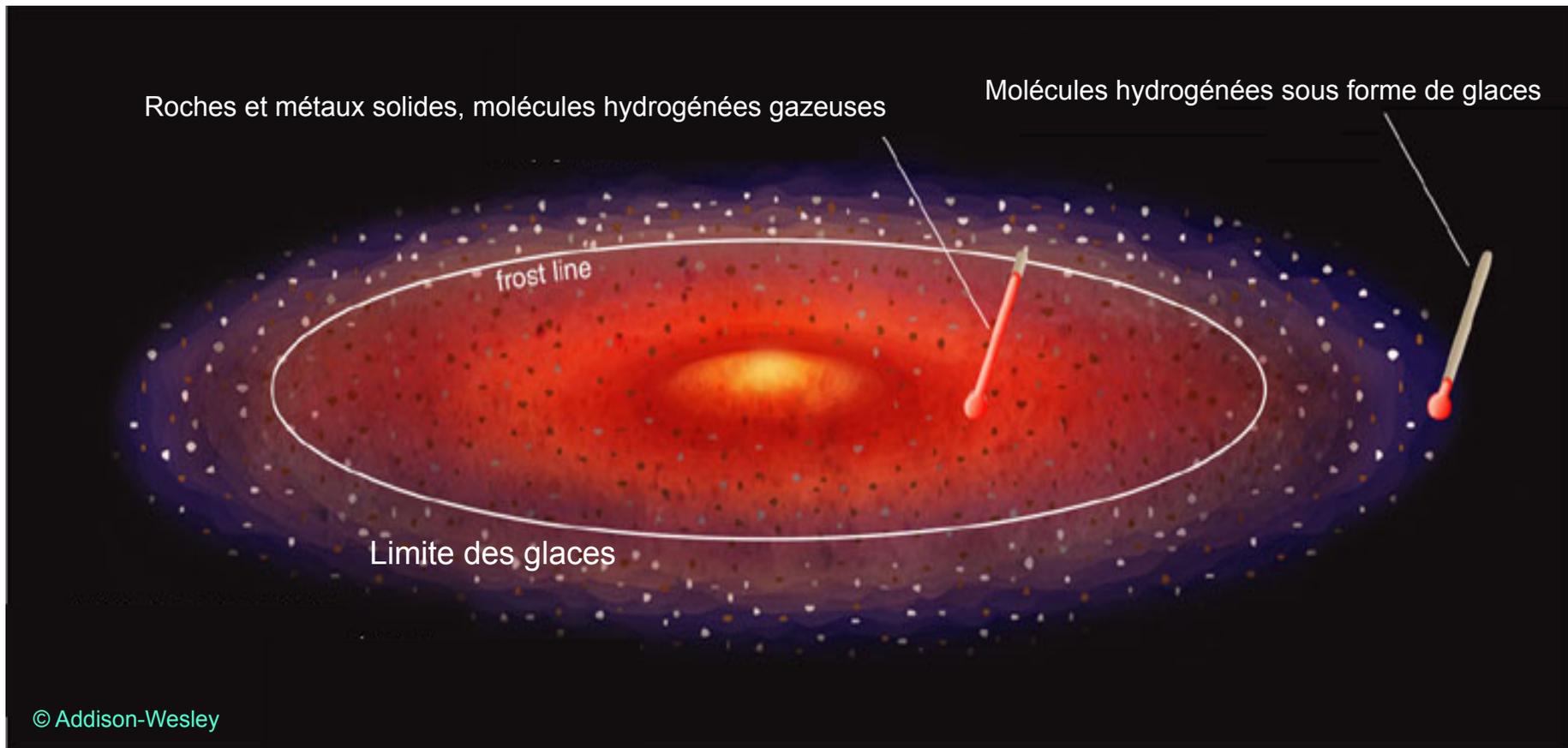
- |   |   |      |   |  |
|---|---|------|---|--|
| ■ | Hydrogène et hélium gazeux                                  | 98%  | $T_{\text{fusion}} \sim 1 \text{ K}$    |  |
| ■ | Glaces  |      | $T_{\text{fusion}} \sim 150 \text{ K}$  |  |
|   | eau $\text{H}_2\text{O}$                                    | 1,4% |   |   |
|   | méthane $\text{CH}_4$                                       |      |   |  |
|   | ammoniac $\text{NH}_3$                                      |      |   |  |
|   | monoxyde et dioxyde de carbone $\text{CO}$ et $\text{CO}_2$ |      |   |  |
| ■ | Pierres, rocs... silicates                                  | 0,4% | $T_{\text{fusion}} \sim 1000 \text{ K}$ |   |
| ■ | Métaux [fer, nickel, aluminium...]                          | 0,2% | $T_{\text{fusion}} \sim 1500 \text{ K}$ |  |

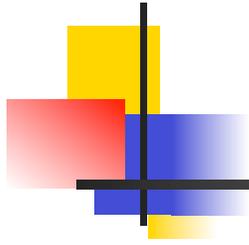
Distance  $D$  du (proto) Soleil  $\Leftrightarrow$  température d'équilibre  $T = T_{\odot} [R_{\odot}/2D]^{1/2}$

- $D = 1 \text{ UA} \Leftrightarrow T = 280 \text{ K}$     Jupiter :  $D = 5,2 \text{ UA} \Leftrightarrow T = 120 \text{ K}$     *aujourd'hui !*

## Région des glaces, région des roches

- Distance  $\leftrightarrow$  température ( $T = 1/\sqrt{D}$ )  $\rightarrow$  limite des glaces (frost line ou snow line)

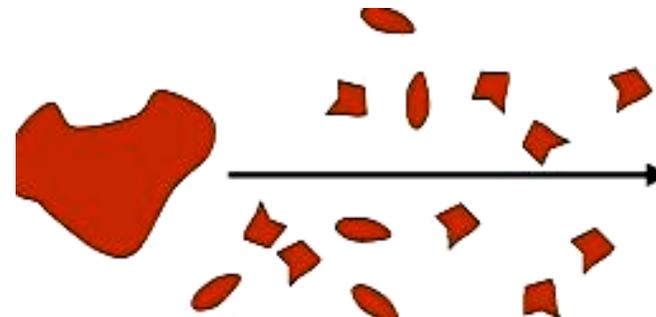
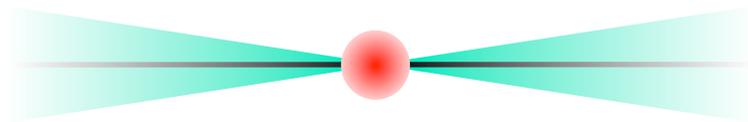




# DES PLANÉTÉSIMAUX AUX PLANÈTES

# Croissance des planétésimaux

- Mélange de grains microscopiques et de gaz
- Gaz en partie soutenu par la pression (à la différence des grains) ⇨ mouvement non képlérien (plus lent)
- ⇨ le gaz freine le mouvement des grains
- ⇨ disque mince de poussière dans un disque plus épais de gaz
- Les grains sont d'autant plus freinés par le gaz qu'ils sont petits
- ⇨ fort taux de collision entre grains de tailles différentes
  - les gros grains balayent les petits grains devant eux
  - ceux-ci rebondissent ou adhèrent
  - ⇨ les grains grossissent peu à peu : en 100 000 ans ils atteignent une taille de l'ordre du kilomètre

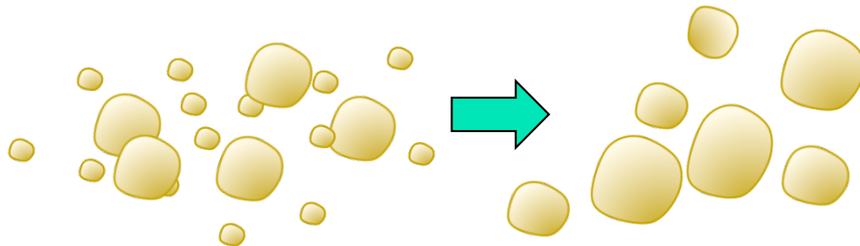




# Deux modèles de l'évolution des planétésimaux

- Croissance ordonnée, ou méthode russe (Safronov 1969)

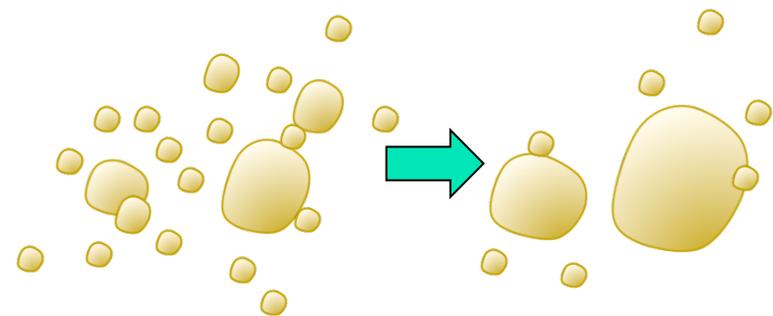
- petits grains
- ⇨ grains moyens
- ⇨ gros grains
- ⇨ planétésimaux stricto sensu
- ⇨ protoplanètes
- ⇨ planètes



- Problème : c'est très long !

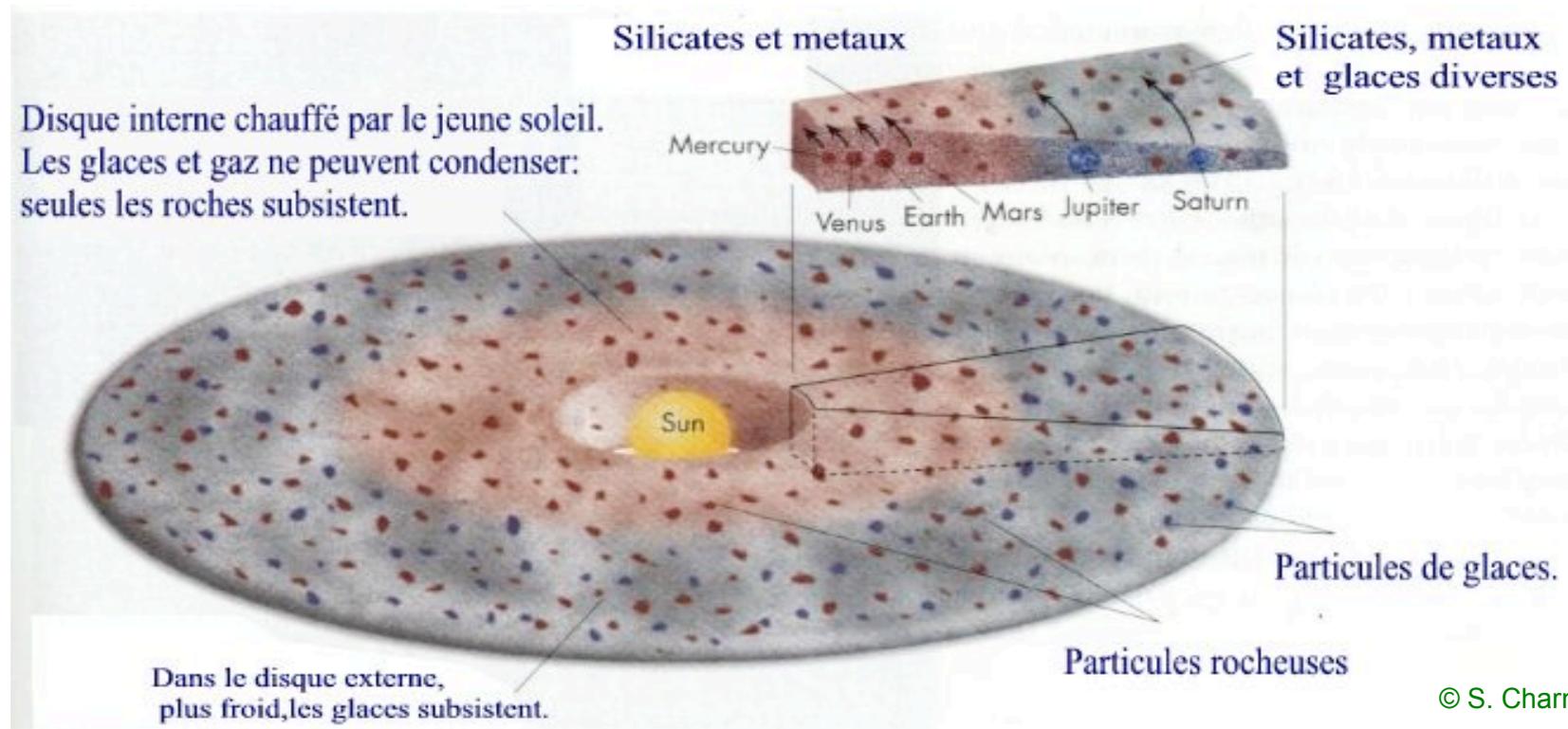
- Croissance exponentielle ou méthode américaine (Greenberg et al. 1978)

- le plus gros planétésimal d'une région absorbe tous ses voisins
- ⇨ son attraction gravitationnelle augmente d'autant plus
- ⇨ il absorbe des voisins de plus en plus éloignés
- ⇨ sa taille croît exponentiellement (effet boule de neige)



# Différentiation des planètes

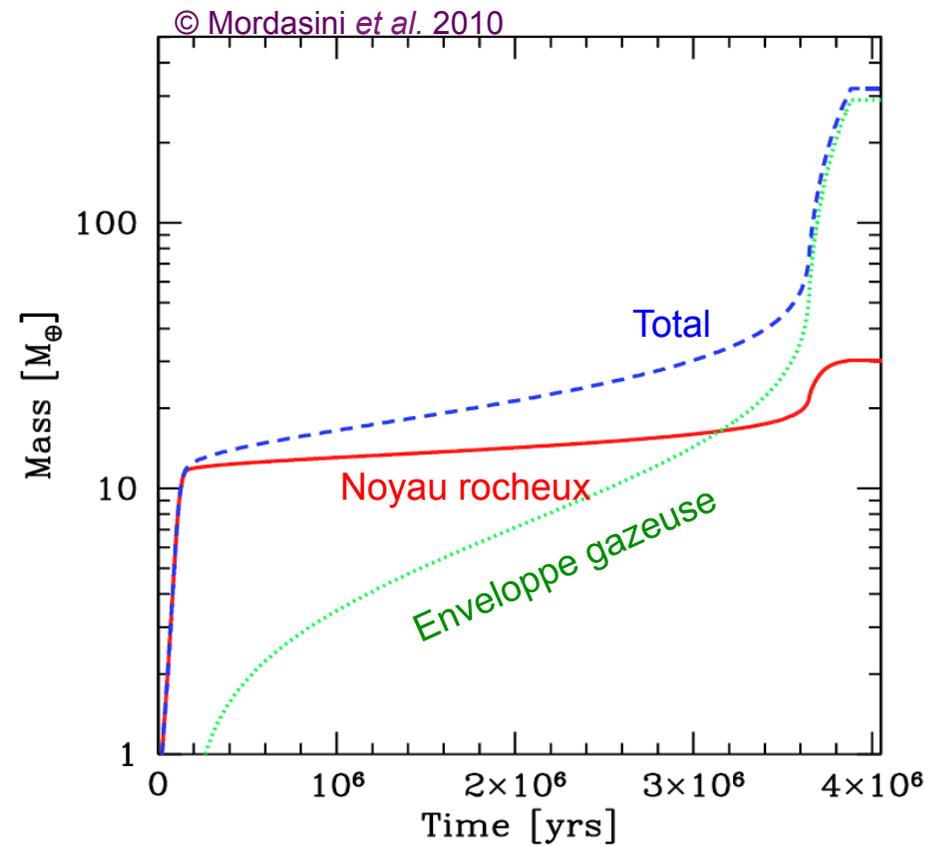
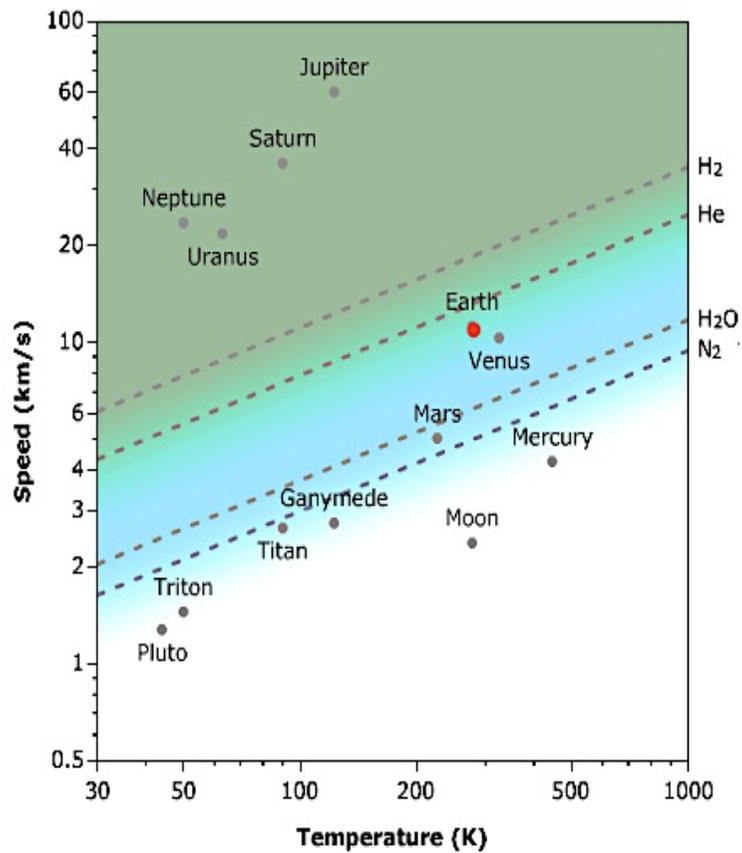
- Près du Soleil, planétésimaux riches en métaux et silicates
  - ☞ planètes telluriques
- Loin du Soleil, planétésimaux plus riches en glaces
  - ☞ noyau plus gros
  - ☞ accrétion ensuite possible d'hydrogène et d'hélium (gazeux)

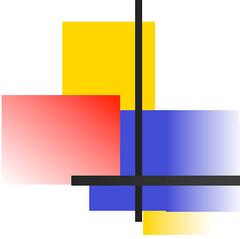


© S. Charnoz [AIM]

# Croissance des planètes géantes

- accrétion d'un noyau rocheux
- **puis** accrétion du gaz rendue possible





# Échelles de temps

---

- Problème dynamique complexe
  - plusieurs types d'objets (gaz, poussières, grains millimétriques, métriques ou kilométriques)
  - interactions gravitationnelle et électromagnétique
  - effets thermiques importants
  - turbulence probable
- Contraintes de temps
  - Datations radiochimiques
  - Météorites différenciées (chondrites) ⇨ existence de corps de taille  $> 1000$  km à  $t = 4$  Ma
  - Echelles de temps caractéristiques de l'effondrement gravitationnel et du refroidissement (dépendant fortement de la densité, de la température et de la composition chimique)
    - ⇨ protoétoile : 100 000 ans pour l'effondrement initial, 10 à 50 Ma pour l'allumage nucléaire
    - ⇨ durée de vie d'un disque protoplanétaire 5 à 10 Ma
    - ⇨ les noyaux des planètes doivent être formés avant
    - ⇨ fin de formation des planètes entre 10 Ma (géantes) et 100 Ma (telluriques)
- Bombardement « tardif » vers  $t = 500$  Ma
  - ⇨ réarrangement des planètes géantes ?

# Migration des planètes

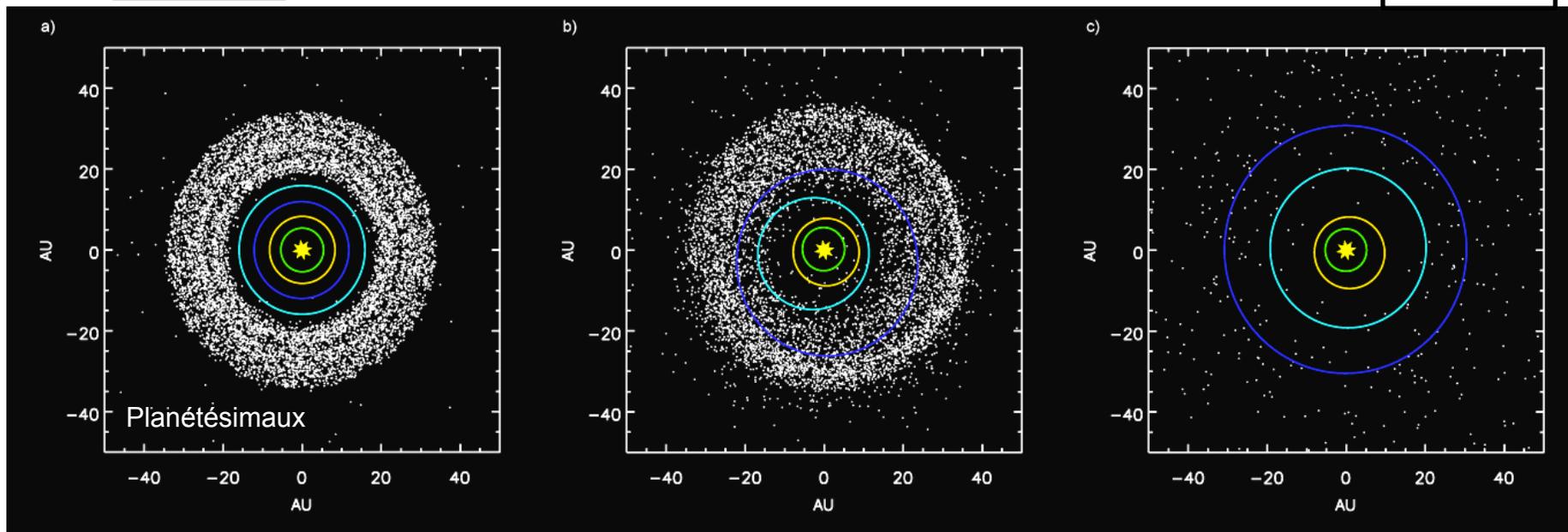
- Modèle de Nice (2005)

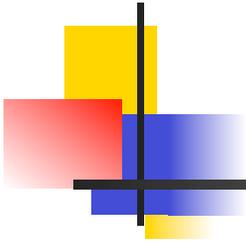
Jupiter  
Saturne  
Neptune  
Uranus

Explique

- absence relative d'objets transneptuniens
- ceinture de Kuiper, nuage de Oort
- **pluie tardive de météorites** dans le système solaire interne

Jupiter  
Saturne  
Uranus  
Neptune





Merci de votre attention !

