

# **ASTROPHYSIQUE**

## **10 – FORMATION DU SYSTÈME SOLAIRE**



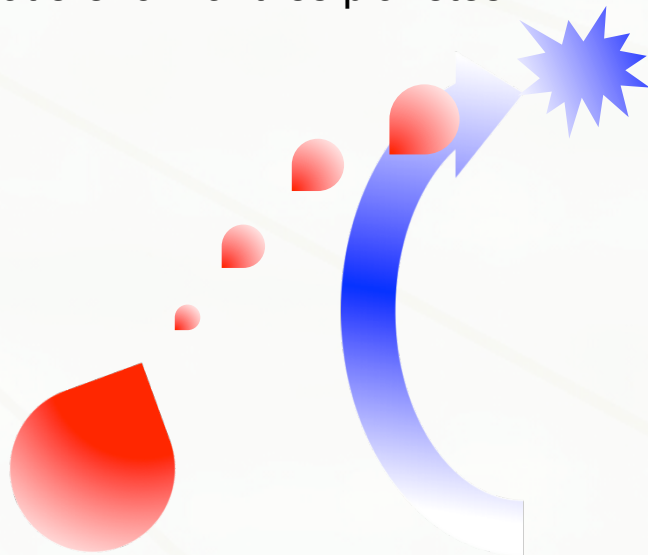
Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie  
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA



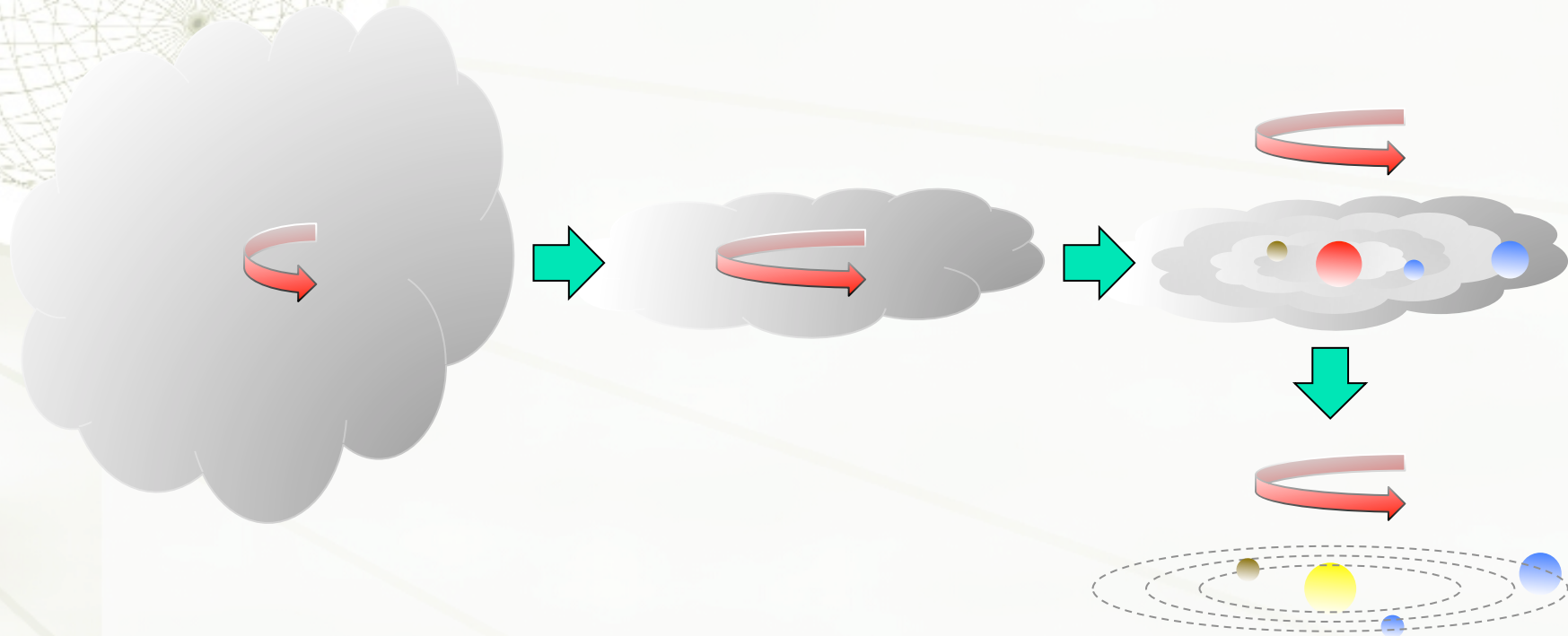
# THÉORIE DE LA COLLISION AVEC UNE AUTRE ÉTOILE

- 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

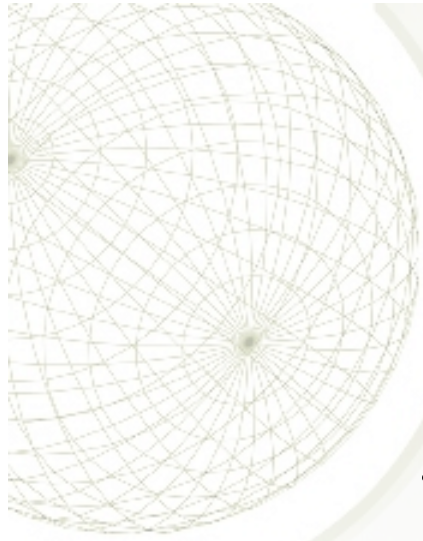


V838 Monocerotis ©HST: une collision d'étoiles ?

# THÉORIE DE LA NÉBULEUSE PRIMITIVE (LAPLACE)



- À 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)

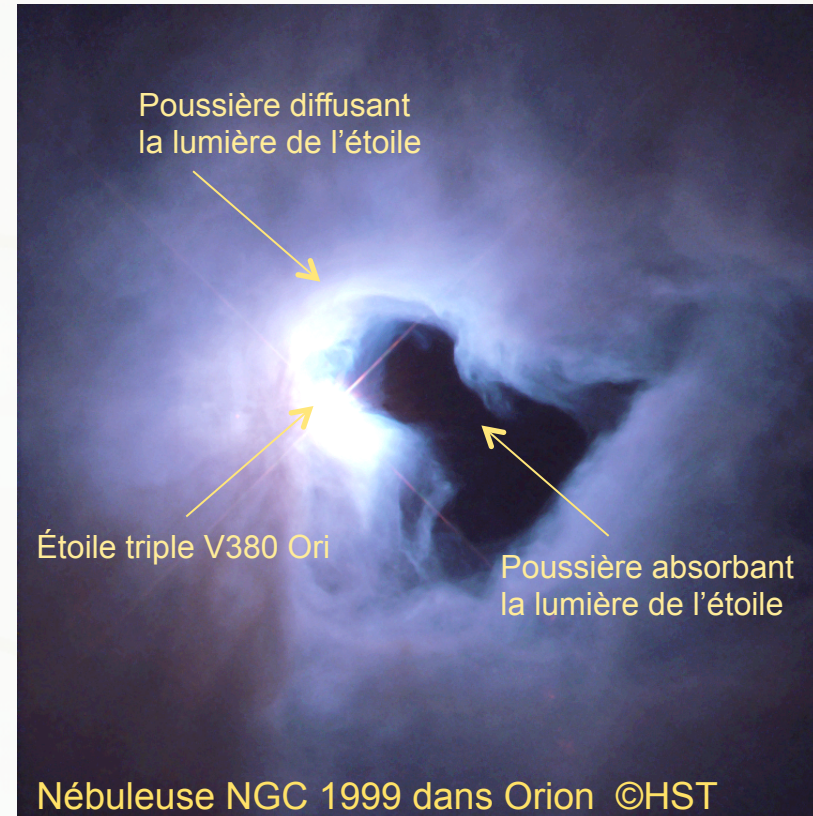


# **LE BERCEAU: LE MILIEU INTERSTELLAIRE**



# LE BERCEAU DE LA FORMATION : LE MILIEU INTERSTELLAIRE

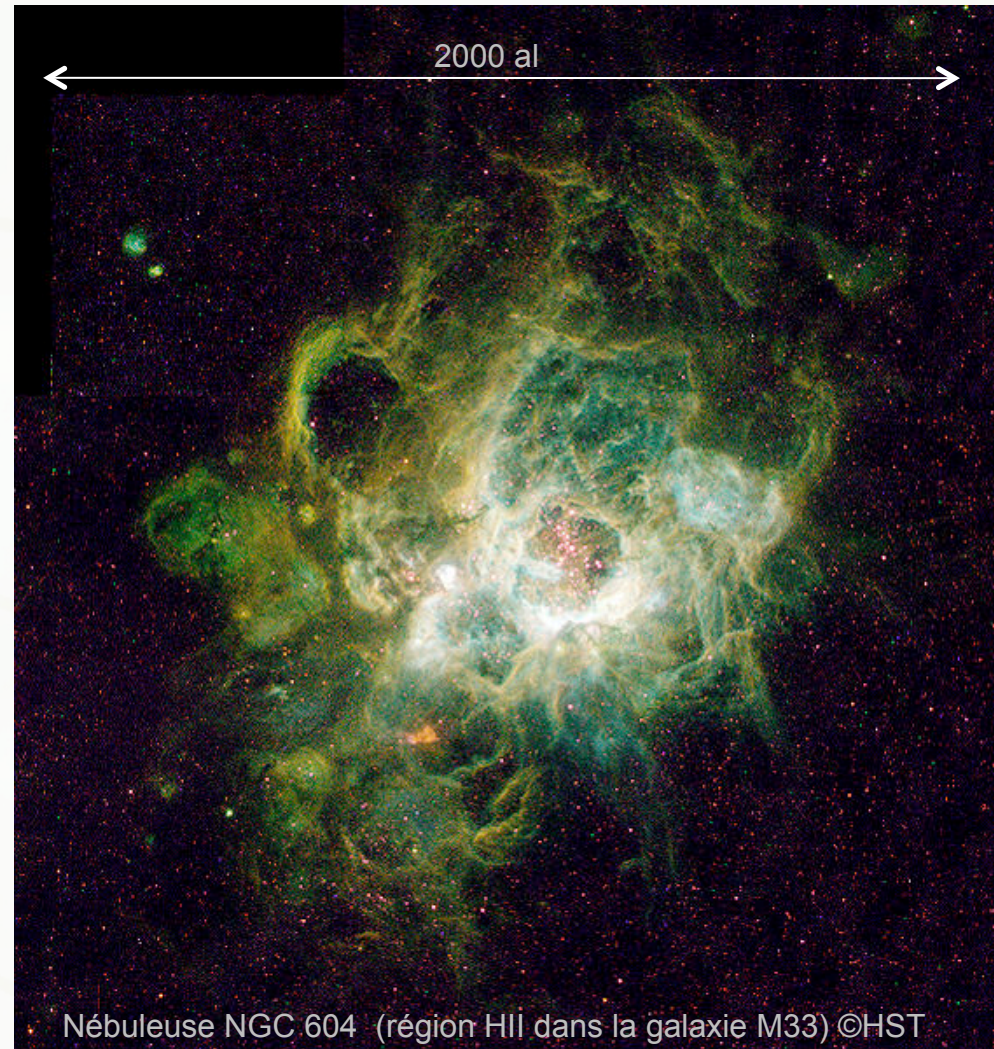
- Hydrogène (90%)
  - Hydrogène moléculaire  $H_2$ 
    - Invisible directement (via CO)
  - Hydrogène atomique H (HI)
    - Visible en radio (21 cm)
  - Hydrogène ionisé  $H^+$  (HII)
    - Visible en optique et UV
- Hélium (9%)
- Autres molécules (<1%)
  - CO
    - Visible en radio (1 mm)
  - $H_2O$ , OH, CN, hydrocarbures...
- Poussières (taille  $\sim 1 \mu m$ , <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

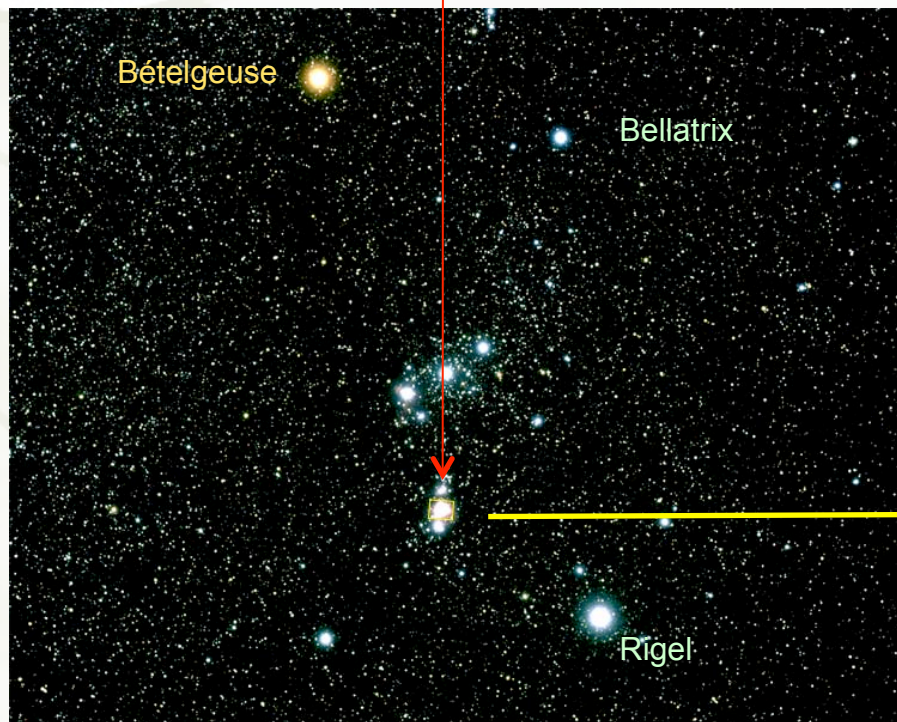
- Les plus faciles à observer
  - Poussières (absorption)
  - Régions HI (radio)  
 $n \sim 10 \text{ atomes/cm}^3$   
 $M \sim 100 M_{\odot}$ ,  $T \sim 50 \text{ à } 100 \text{ K}$
  - Régions HII (émission)  
 $n < 1 \text{ atomes/cm}^3$   
 $T \sim 10\,000 \text{ K}$
- Nuages moléculaires
  - $n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





# 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

Rouge = azote  
Vert = hydrogène  
Bleu = oxygène



© HST



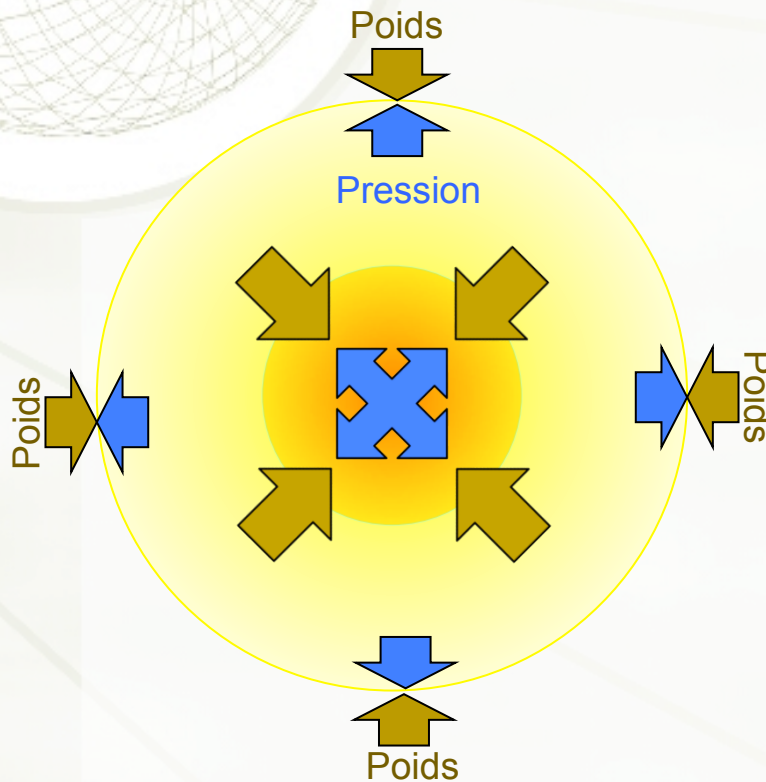


# UN CERTAIN MONSIEUR JEANS



# 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 =  $\frac{1}{2}$  |énergie potentielle|

- Énergie cinétique :  $E_c = \frac{3}{2} kT$

Température du nuage  $\uparrow$

- Énergie potentielle :  $E_p \sim -GMm/D$

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

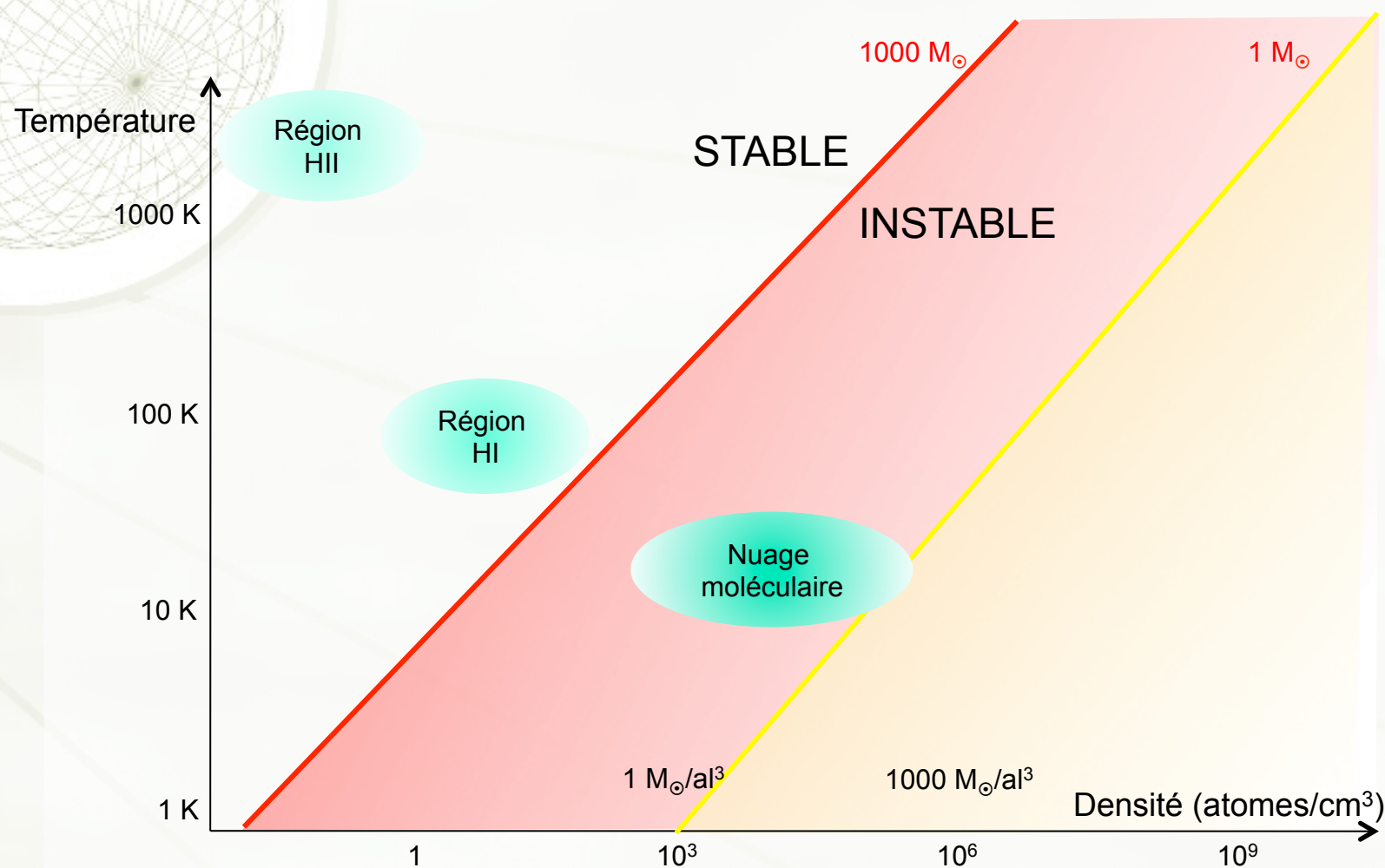
$$\Rightarrow kT \sim GMm/D$$

- Numériquement :  $T \sim 1 \text{ K } (M/M_\odot)/(D/1 \text{ al})$
- 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 »...

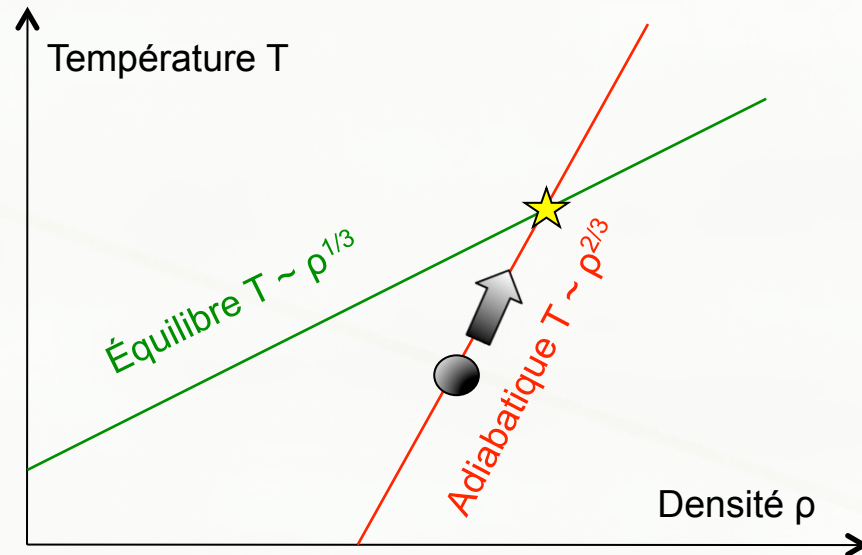
# STABILITÉ OU INSTABILITÉ GRAVITATIONNELLE



## 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



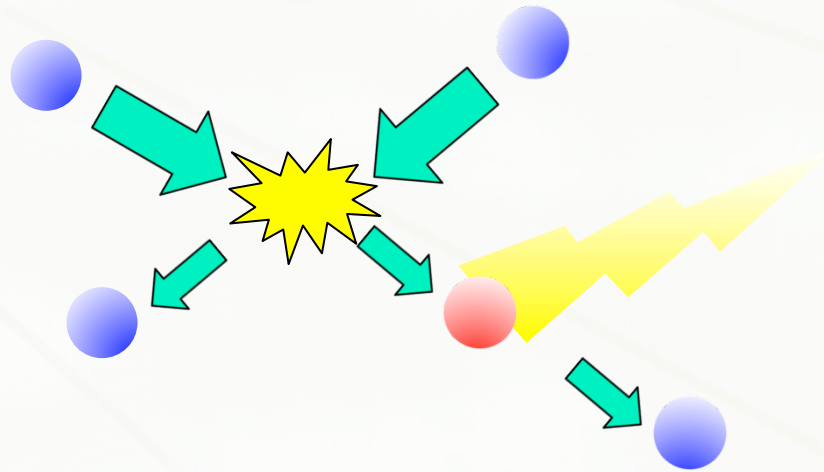
- **Tout dépend donc des mécanismes de refroidissement possibles**



# 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 désexcite ensuite en émettant un photon

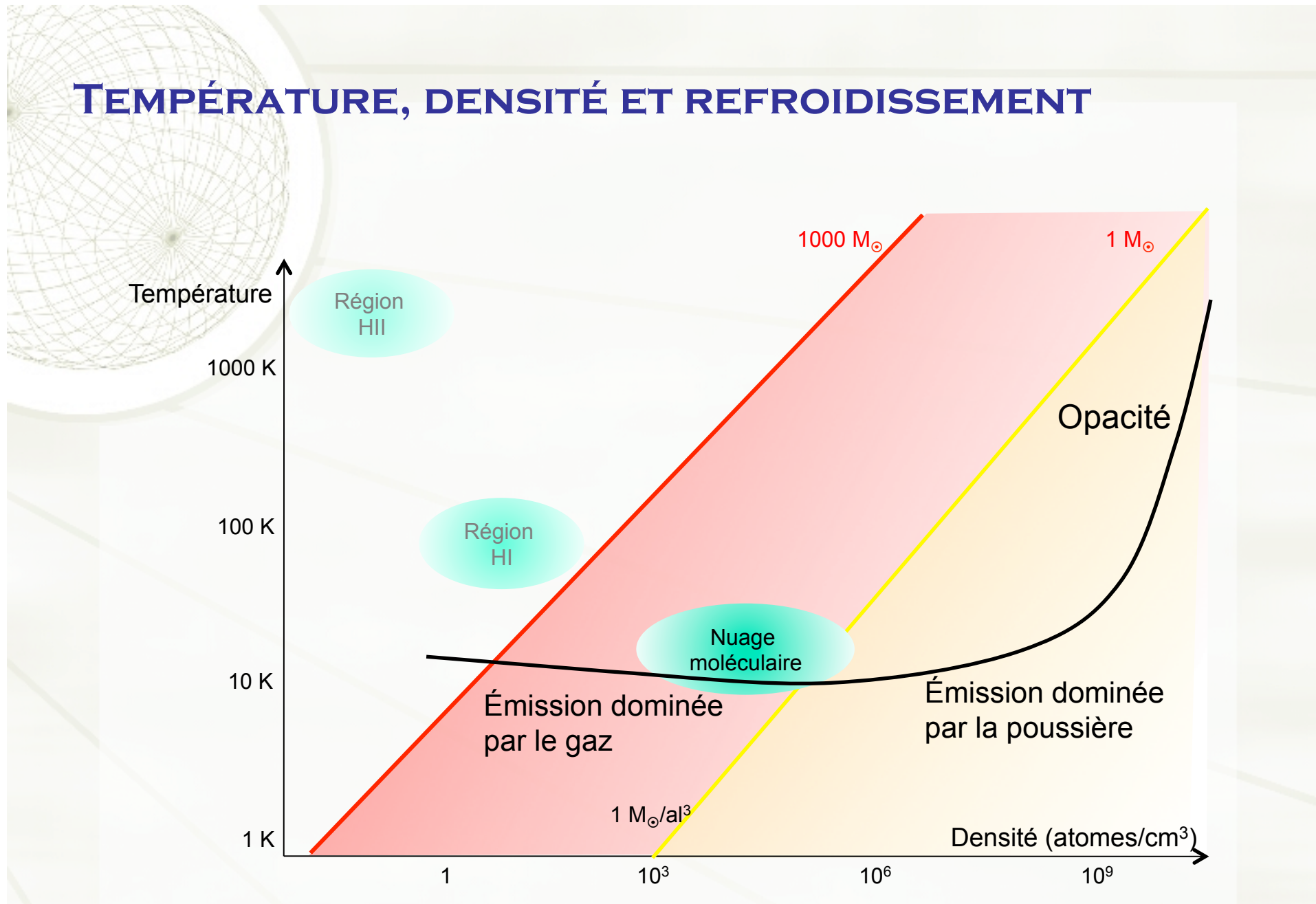


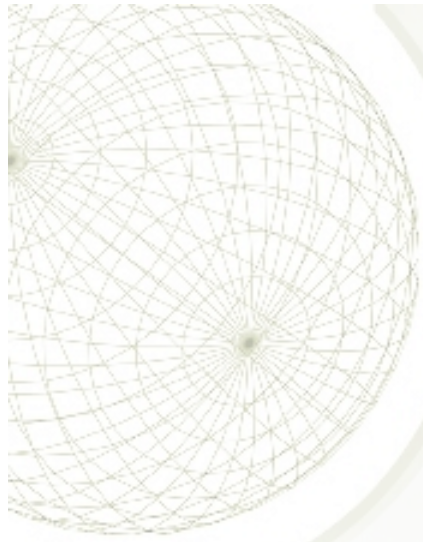
- L'efficacité de refroidissement augmente
  - avec la densité (collisions plus fréquentes)
  - avec la température (excitations plus faciles)

## ■ Trois régimes différents

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

# TEMPÉRATURE, DENSITÉ ET REFROIDISSEMENT



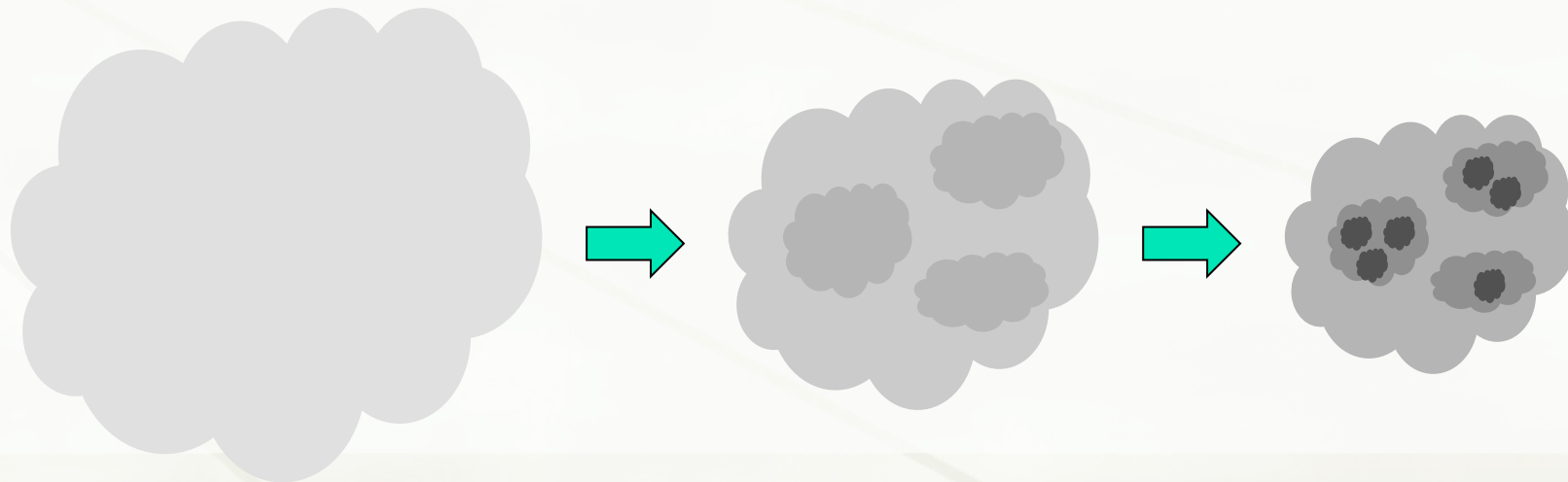


# PROTO-SOLEIL

# 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 K (contraction isotherme)**
- → la masse de Jeans  $M_{\text{Jeans}} = T^{3/2}/\rho^{1/2}$  diminue rapidement
- → des zones de taille plus petite deviennent instables →

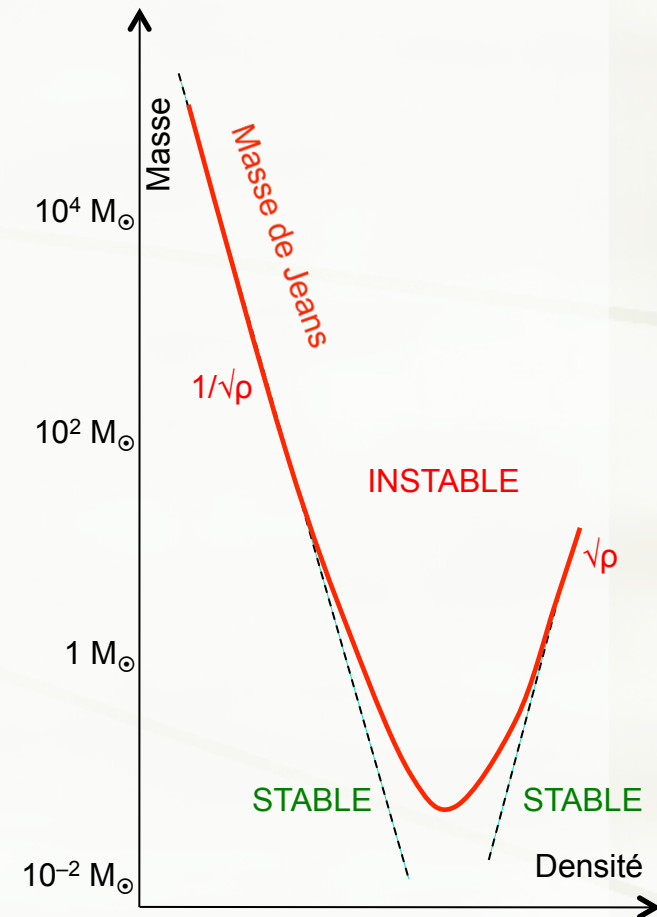
**Fragmentation**





# 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

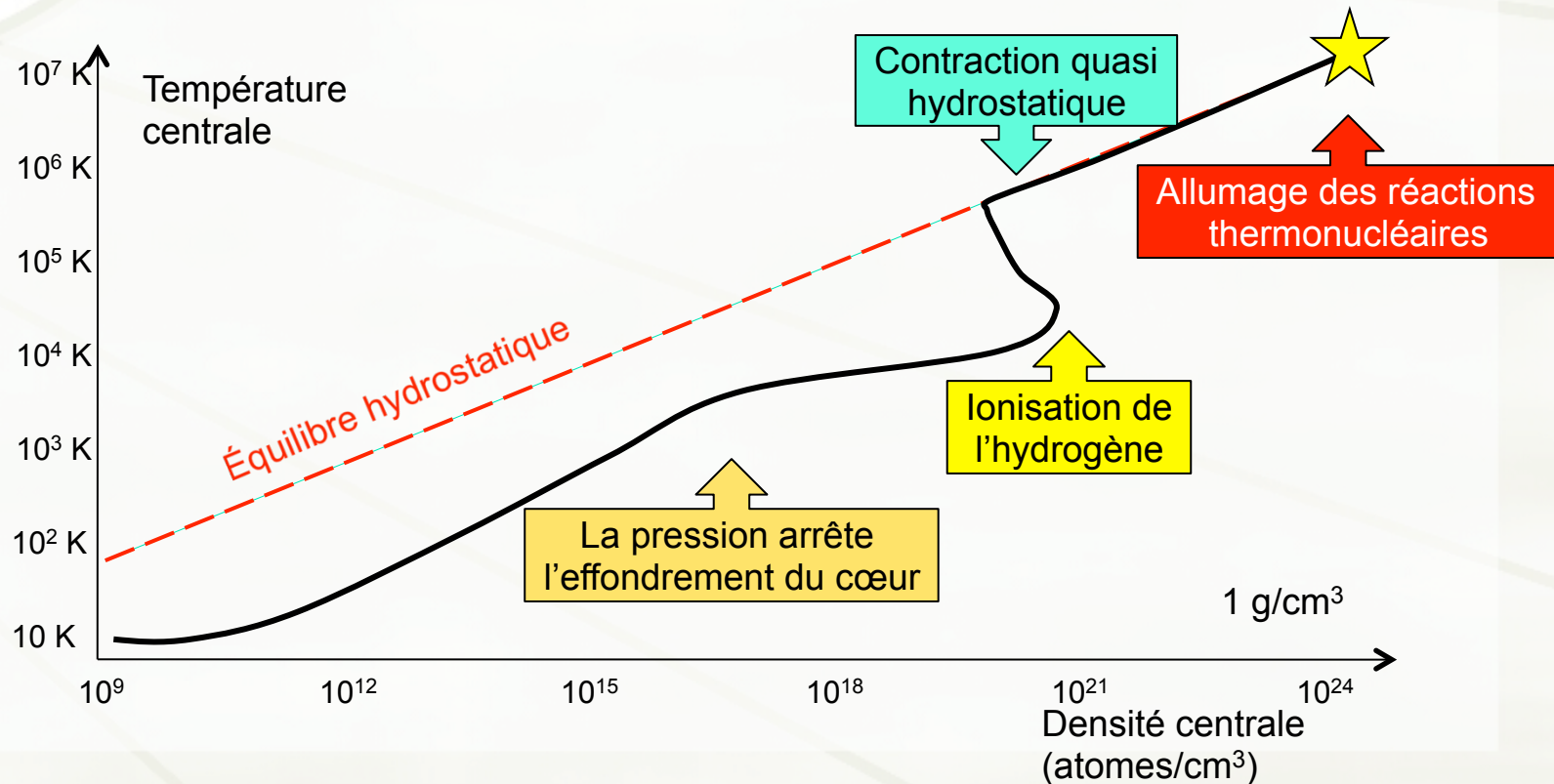
## UNE ÉTOILE EST NÉE

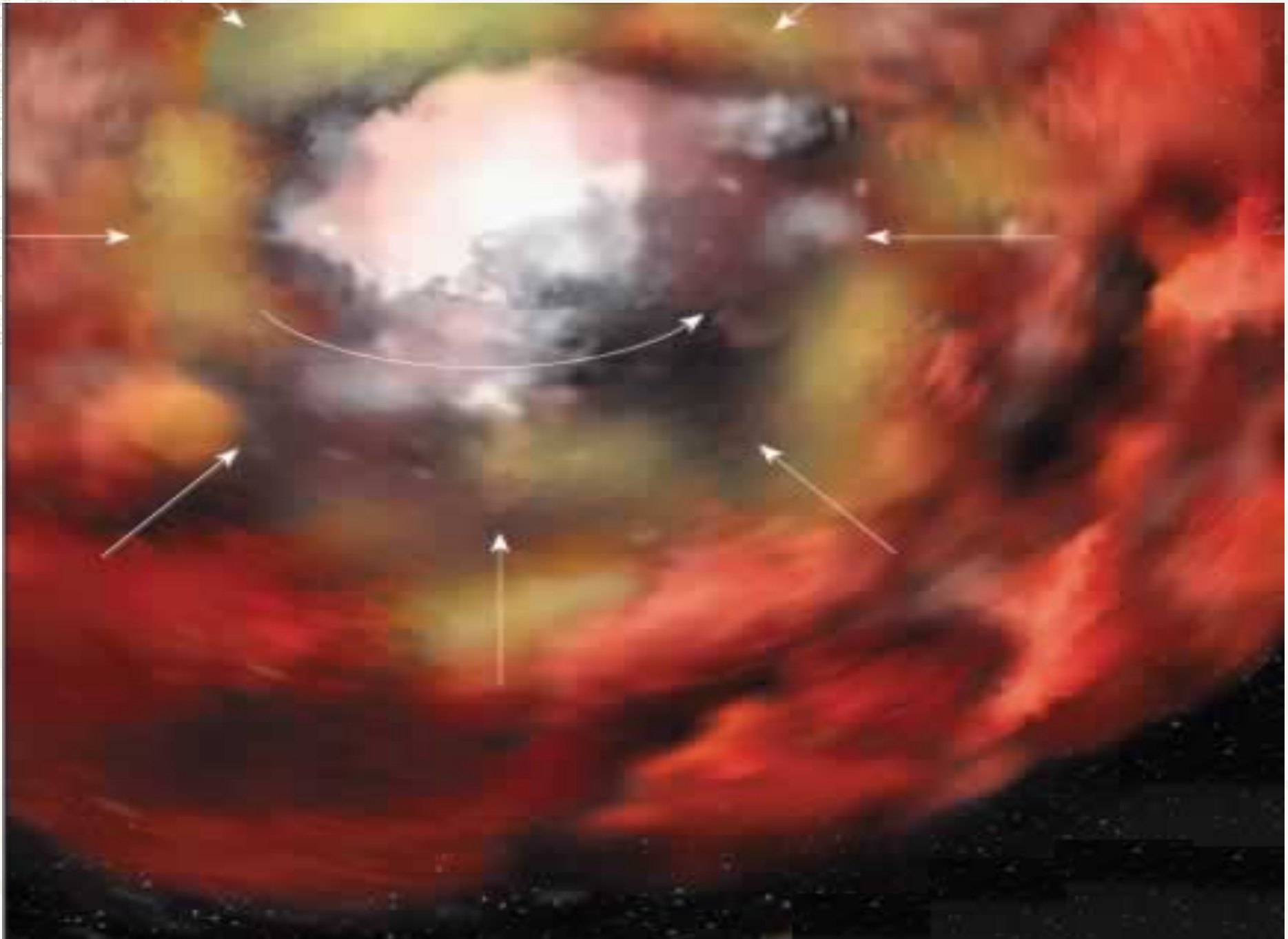
- Un nuage moléculaire se fragmente en nombreux petits nuages de masse allant de  $0,01 M_{\odot}$  à  $100 M_{\odot}$ 
  - → les étoiles naissent en groupes (amas d'étoiles)
  - → forte probabilité de systèmes binaires, triples ou quadruples
- La fragmentation cesse mais pas la contraction
- → les régions 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

- Le cœur (~ 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



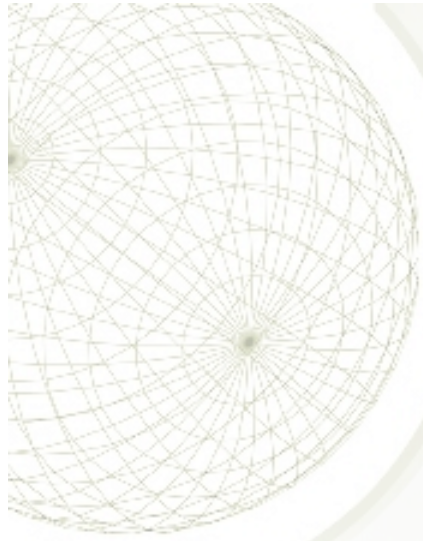


12 janvier 2012

*Alain Bouquet – Astrophysique 10 – Formation du système solaire*

20



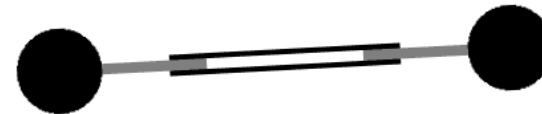


# **LE DISQUE PROTOPLANÉTAIRE**

## 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  
→ si D diminue,  $\omega$  augmente
- Inévitablement, le nuage proto-solaire tourne sur lui-même
- Contraction → accélération de la rotation

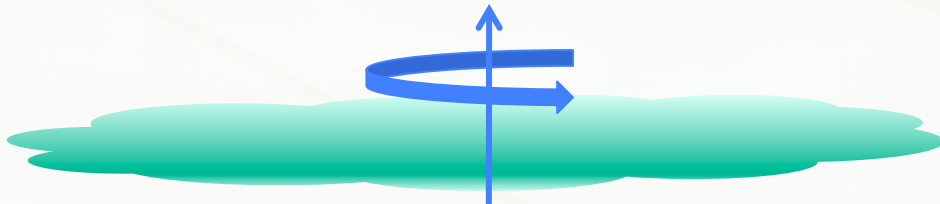
- Un exemple simple de conservation du moment angulaire



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

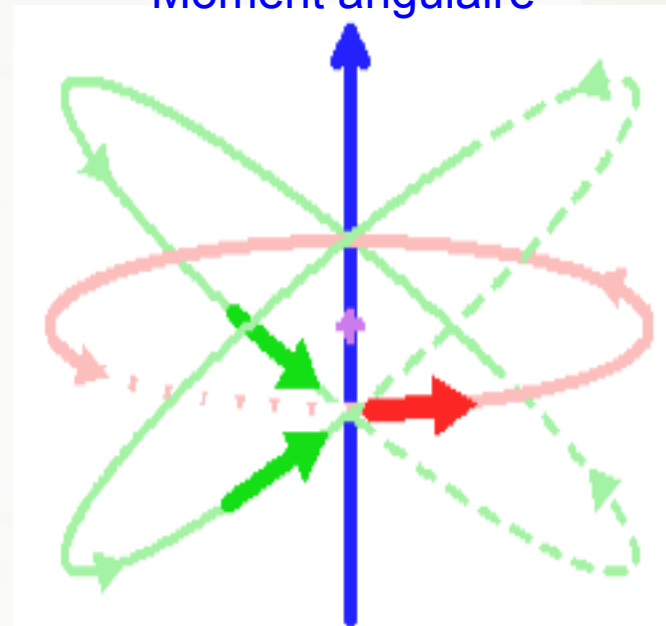
# LE DISQUE : UNE CONSÉQUENCE DES COLLISIONS

- Moment angulaire
  - → direction privilégiée, celle du moment angulaire
  - 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
  - les vitesses « verticales » se compensent
  - les vitesses « horizontales » s'additionnent
- → la rotation d'ensemble est préservée, mais le nuage devient plus plat



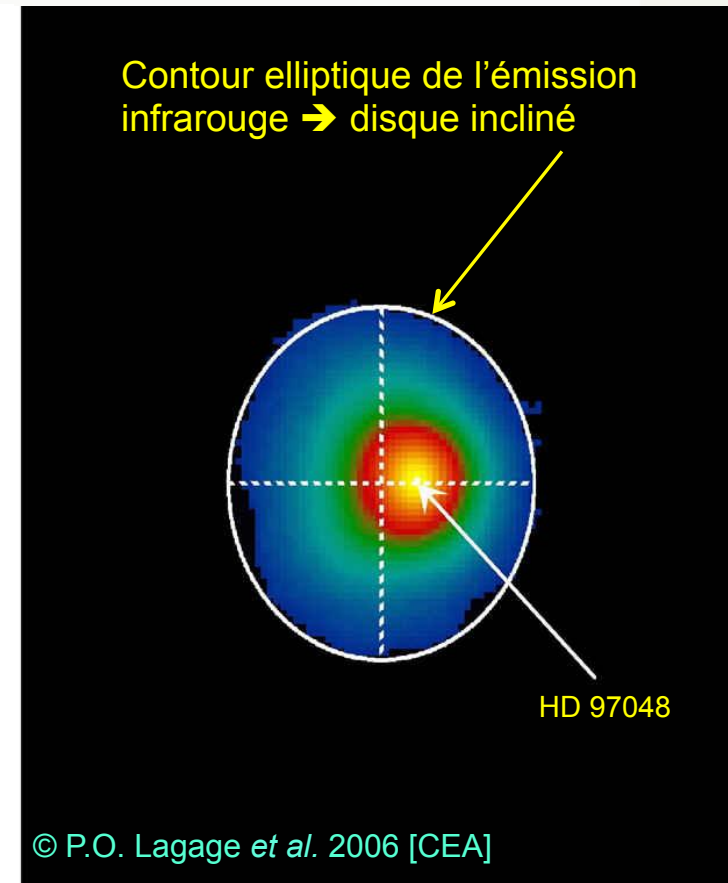
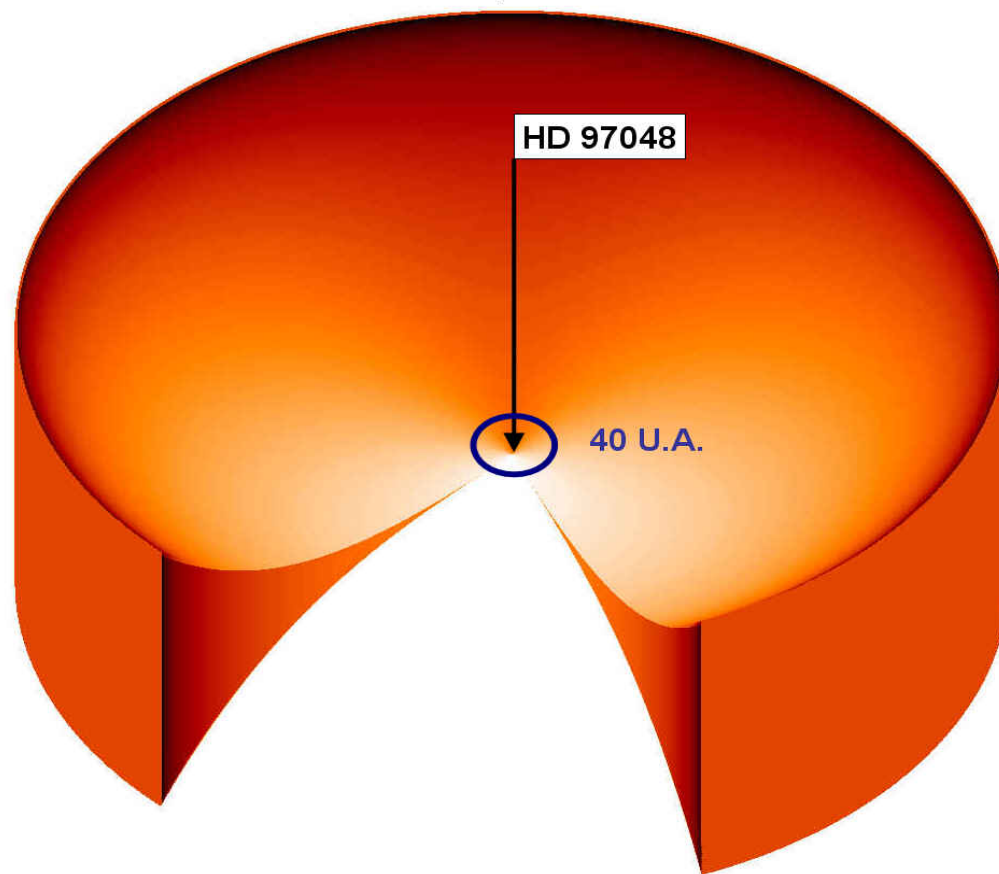
- → disque protoplanétaire **orthogonal** au moment angulaire

## Moment angulaire



# DISQUES PROTOPLANÉTAIRES

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





# MOMENT ANGULAIRE ET MAGNÉTISME

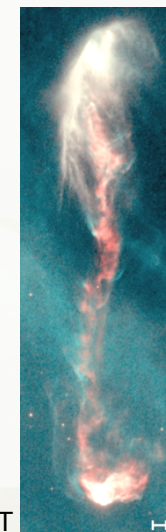
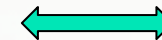
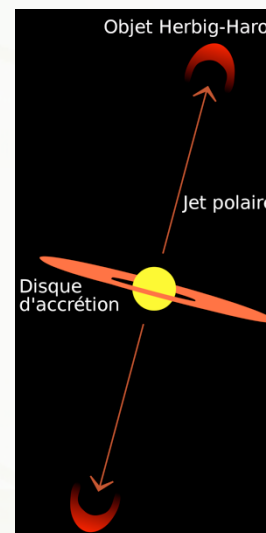
- Contraction → augmentation de la température
- Température > 1000 K → ionisation des atomes
- Particules chargées en mouvement
  - → courants électriques
  - → champs magnétiques
  - → force de Lorentz sur les particules

- Théorème d'Alfven :

Dans un milieu conducteur, les lignes de champ magnétique se déplacent exactement comme la matière

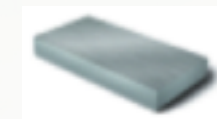
- De façon imagée: les lignes de champ magnétique sont « gelées » dans la matière

- 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

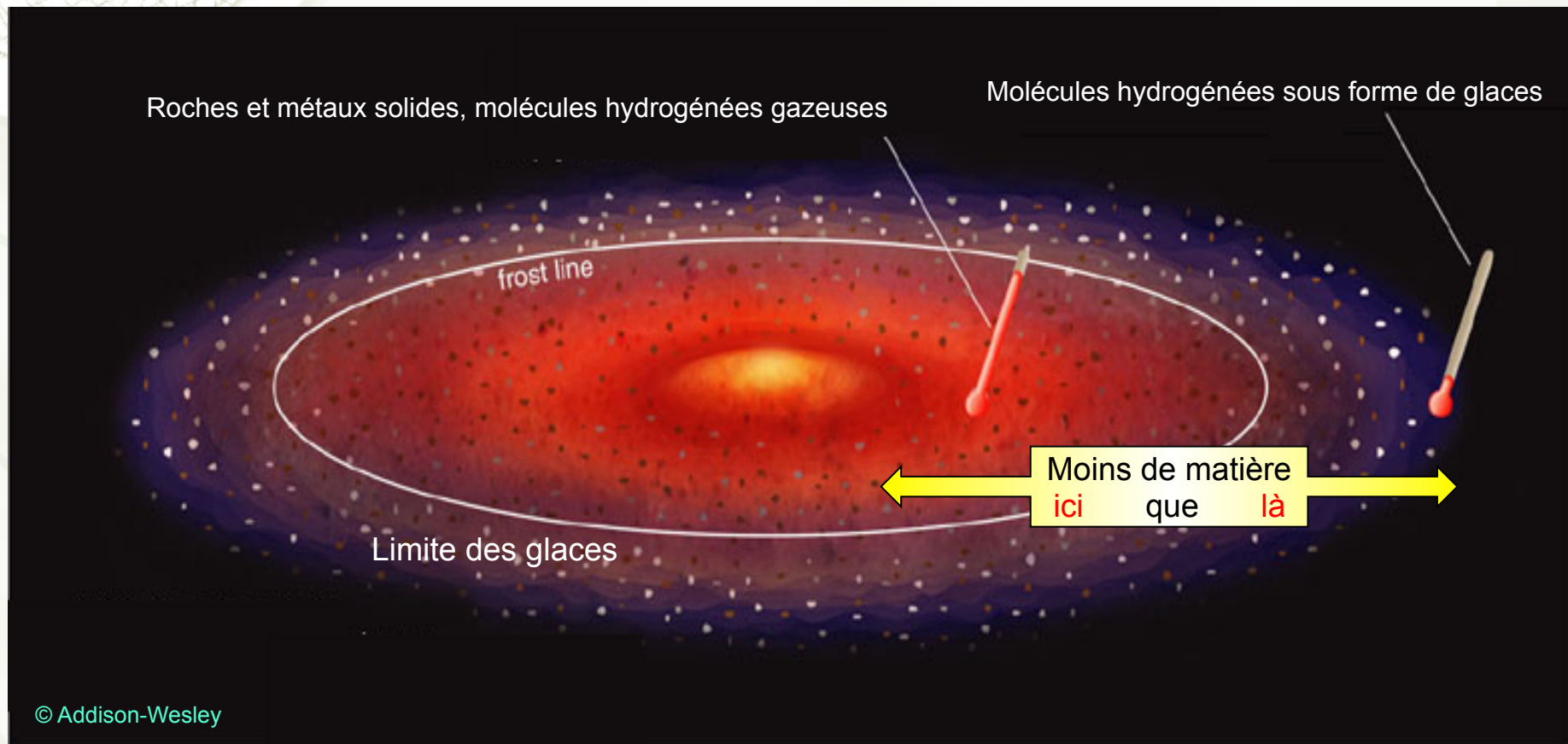
- Hydrogène et hélium gazeux 98%  $T_{\text{fusion}} \sim 1 \text{ K}$
- Glaces 1,4%  $T_{\text{fusion}} \sim 150 \text{ K}$ 
  - eau  $\text{H}_2\text{O}$
  - méthane  $\text{CH}_4$
  - ammoniac  $\text{NH}_3$
  - monoxyde et dioxyde de carbone  $\text{CO}$  et  $\text{CO}_2$
- Pierres, rocs... silicates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

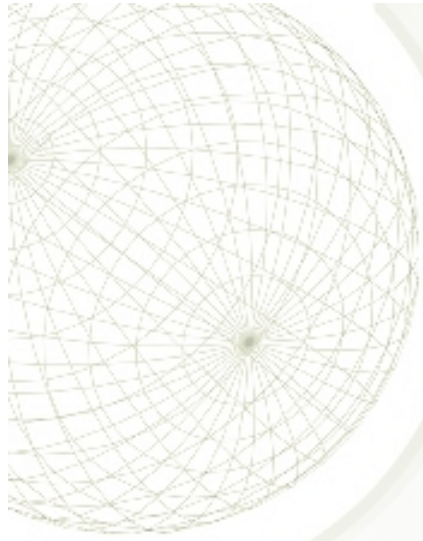


Distance  $D$  du (proto) Soleil  $\Leftrightarrow$  température d'équilibre  $T = T_{\odot} [R_{\odot}/2D]^{1/2}$

## RÉGION DES GLACES, RÉGION DES ROCHES

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



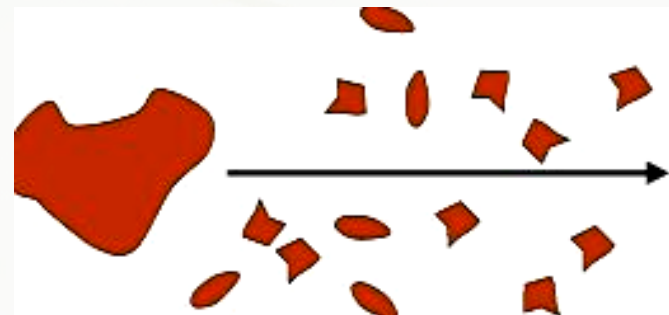
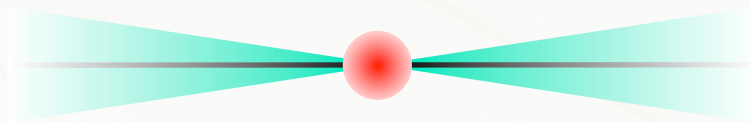


# **DES PLANÉTÉSIMAUX AUX PLANÈTES**



# 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





© Weidenschilling 2006

12 janvier 2012

Alain Bouquet – Astrophysique 10 – Formation du système solaire

30

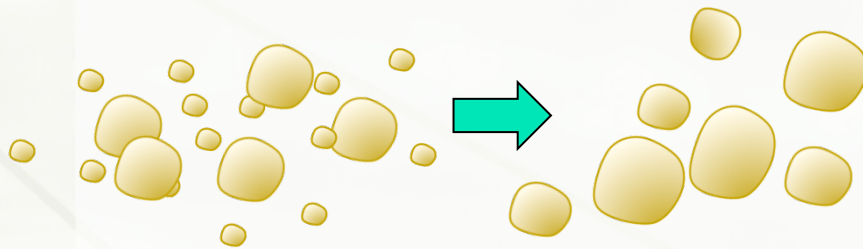
## DEUX MODÈLES DE L'ÉVOLUTION DES PLANÉTÉSIMAUX

- Croissance ordonnée, ou méthode russe (Safronov 1969)

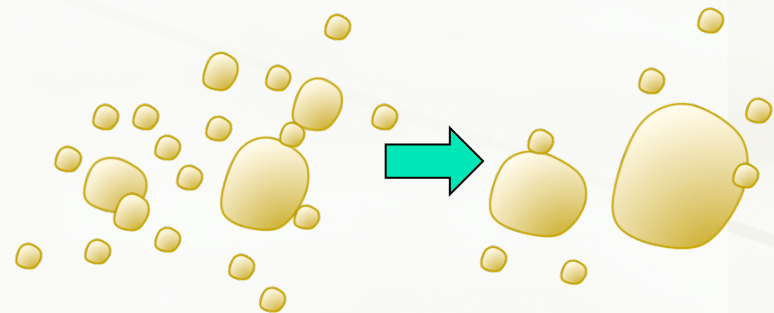
- petits grains
  - grains moyens
  - gros grains
  - planétésimaux *stricto sensu*
  - protoplanètes
  - planètes

- 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)



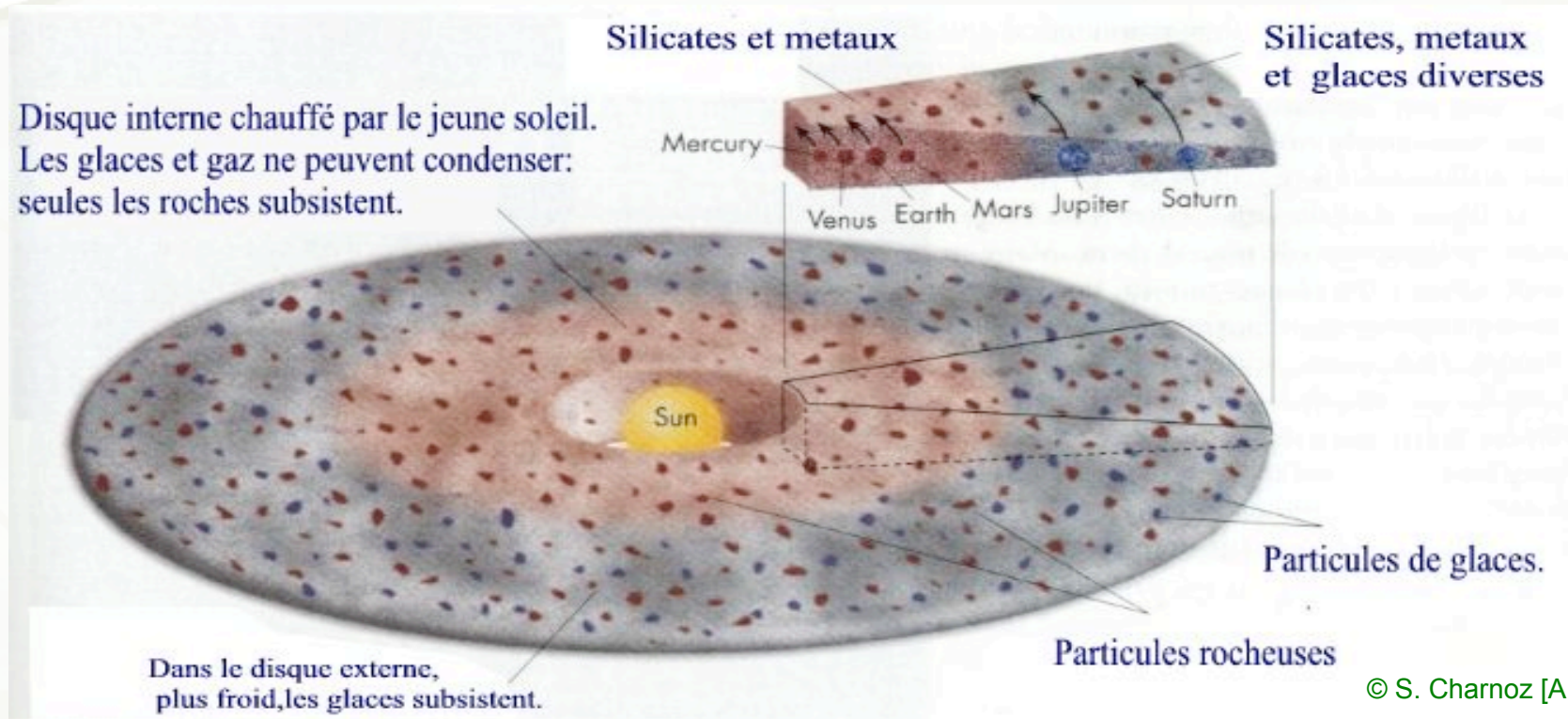
- **Problème : c'est très long !**





# DIFFÉRENTIATION DES PLANÈTES

- Près du Soleil, les éléments qui ont formé les planétésimaux étaient riches en métaux et silicates
  - → planètes telluriques
- Loin du Soleil, les planétésimaux étaient beaucoup plus riches en glaces
  - → noyau plus gros
  - → accrétion ensuite possible d'hydrogène et d'hélium (gazeux)
  - → planètes gazeuses



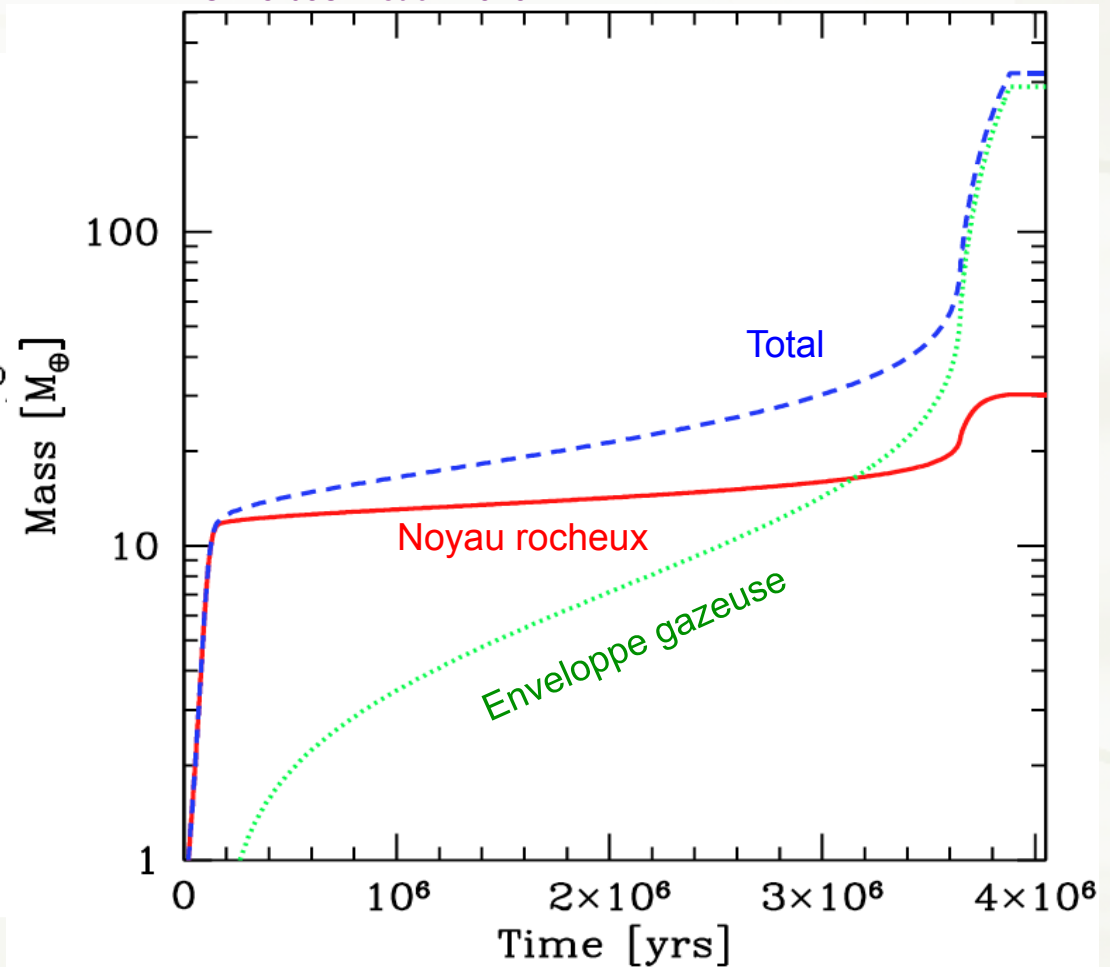
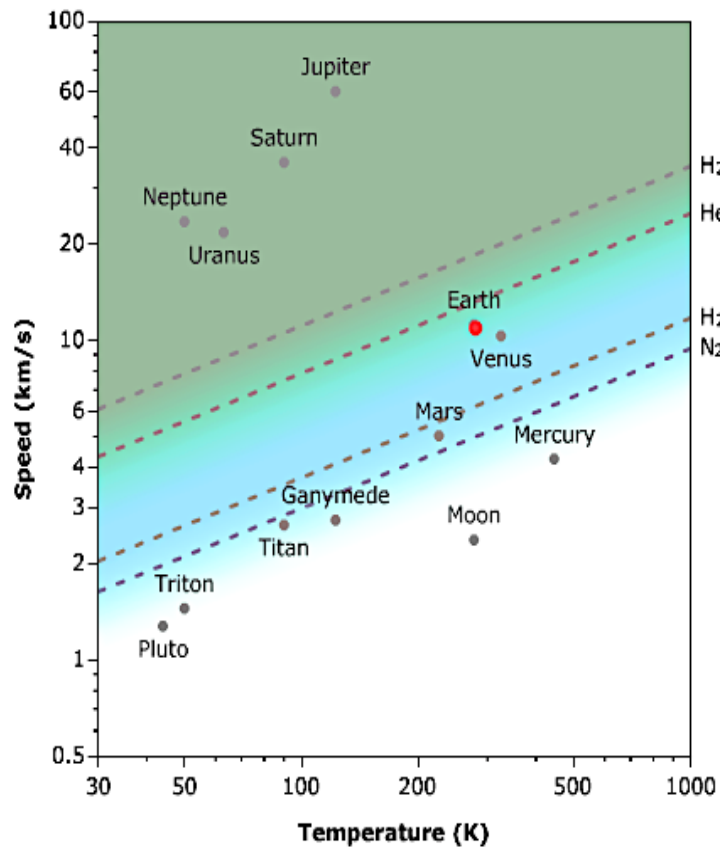
© S. Charnoz [AIM]



# CROISSANCE DES PLANÈTES GÉANTES

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

© Mordasini et al. 2010





# 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

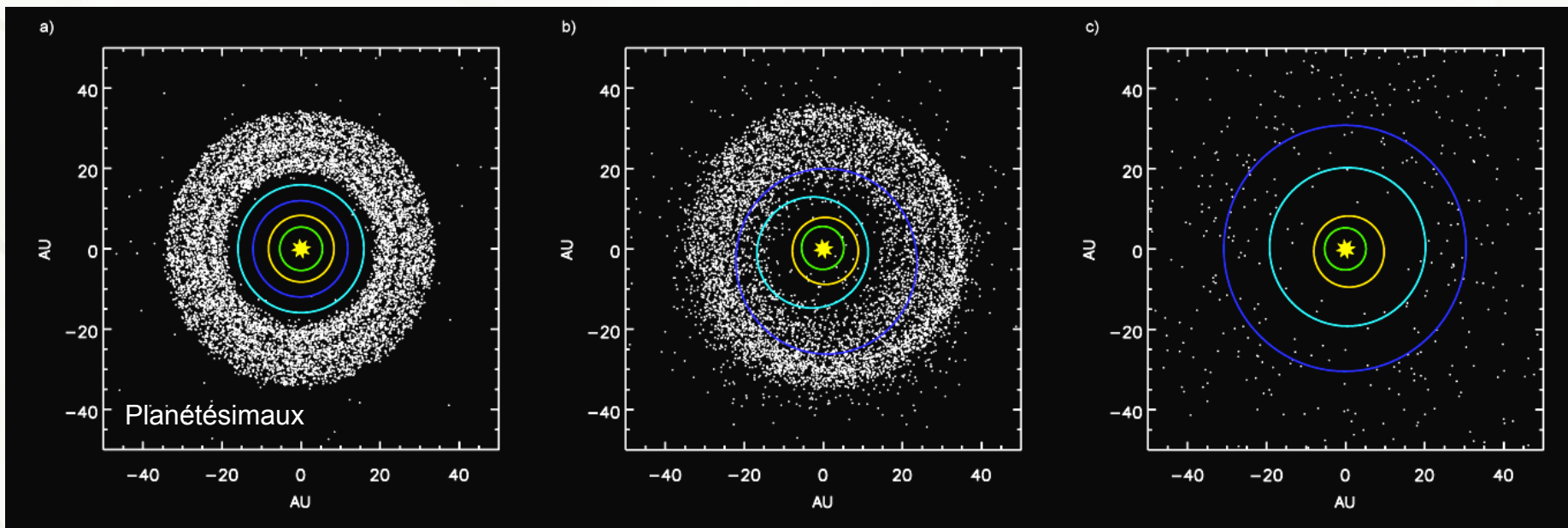
- Modèle de Nice (2005)

Jupiter  
Saturne  
Neptune  
Uranus

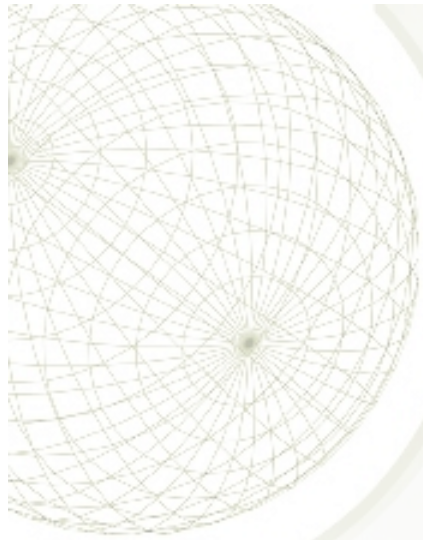
Explique

- 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 !

