

Aussois 2004

Chronologie de la formation du Système Solaire II. Des grains présolaires aux objets de Kuiper

École de formation permanente du CNRS



COMITÉ SCIENTIFIQUE

Matthieu Gounelle, CNSCM, U. Paris 11
Tristan Guillot, OCA
Bernard Marty, CRPG Nancy
Alessandro Morbidelli, OCA
Jean-Marc Petit, Obs. de Besançon

COMITÉ D'ORGANISATION

Claude Froeschlé, OCA
Tristan Guillot, OCA
Rose Hollande, OCA
Patrick Michel, OCA
Alessandro Morbidelli, OCA

Logistique & programme des cours

	8h30-10h	10h30-12h30	libre	16h30-18h00	18h10-19h40	21h00-22h30
Lundi	<i>introduction</i>	André+Hennebelle		Chaussidon	Ferreira	André+Hennebelle
Mardi	Morbidelli	Chaussidon		André+Hennebelle	Morbidelli	<i>soirée pierrade</i>
Mercredi	Ferreira	Masset		Gounelle	Richling	Chaussidon
Jeudi	Gounelle	Masset		Gallino	Gounelle	discussion
Vendredi	Gallino	Masset		<i>formation permanente</i>	<i>conclusions</i>	<i>soirée fondue</i>

- Début des cours: 8h30
- Pause café à 10h
- Déjeuner: 12h30; Commander ses paniers repas la veille
- Reprise à 16h30
- Courte pause à 18h
- Dîner: 19h45-21h
- Lundi & mercredi: on réattaque jusqu'à 22h30!

Logistique & programme des cours

	8h30-10h	10h30-12h30	libre	16h30-18h00	18h10-19h40	21h00-22h30
Lundi	<i>introduction</i>	André+Hennebelle		Chaussidon	Ferreira	André+Hennebelle
Mardi	Morbidelli	Chaussidon		André+Hennebelle	Morbidelli	soirée pierrade
Mercredi	Ferreira	Masset		Gounelle	Richling	Chaussidon
Jeudi	Gounelle	Masset		Gallino	Gounelle	discussion
Vendredi	Gallino	Masset		<i>formation permanente</i>	<i>conclusions</i>	soirée fondue

- Les cours seront mis à disposition sous forme électronique sur: www.obs-nice.fr/guillot/chronologie
- Formation permanente: Un questionnaire sera distribué vendredi.

Rappel: les Houches 2001

- Introduction générale
 - Tristan Guillot: Des nuages moléculaires aux planètes
- La période du disque
 - Thierry Montmerle: Les premières étapes de l'évolution stellaire
 - Anne Dutrey: Observation des disques
 - Jean-Marc Huré: Évolution de la nébuleuse
 - Daniel Gautier: Rapport D/H & évolution de la nébuleuse
- Les données isotopiques & chimiques
 - François Robert: Introduction à la géochimie
 - Marc Chaussidon: Radioactivités éteintes - âges relatifs
 - Gerard Manhès: Radioactivités à longues périodes - âges absolus
 - Francis Albarède: L'âge de la Terre
 - Bernard Marty: L'âge de l'atmosphère

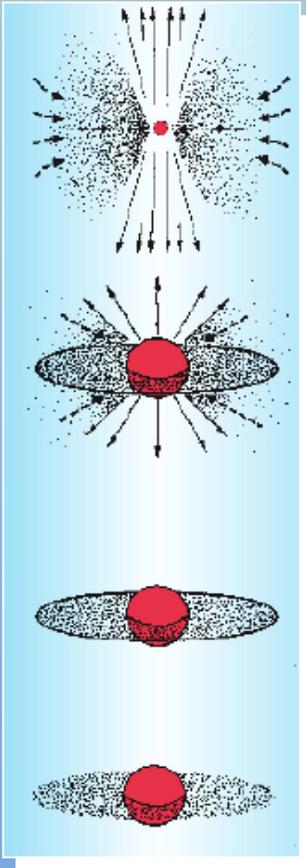
Rappel: les Houches 2001

- Les modèles astronomiques
 - Brett Gladman: Introduction au Système Solaire
 - Paolo Tanga: Interactions poussières-gaz
 - Patrick Michel: Interaction/coagulation des grains dans les disques
 - Jean-Marc Petit: Des planétésimaux aux planètes
 - Willy Benz: La formation de la Lune
 - Alessandro Morbidelli: Évolution précoce des populations de petits corps
- Conclusions
 - François Robert: À la recherche d'un référentiel commun aux astronomes et géochimistes

Aussois 2004

- *Des nuages moléculaires aux coeurs denses et aux étoiles* (Philippe André & Patrick Hennebelle) [4h30]
- *Disques, jets et champs magnétiques* (Jonathan Ferreira) [3h]
- *The photoevaporation of clouds and disks* (Sabine Richling) [1h30]
- *Les grains présolaires* (Roberto Gallino) [3h]
- *Inclusions riches en Aluminium (CAIs) et chondres* (Matthieu Gounelle) [4h30]
- *Une chronologie de la formation du Système Solaire* (Marc Chaussidon) [5h]
- *La migration des planètes* (Frederic Masset) [6h]
- *L'évolution tardive du Système Solaire* (Alessandro Morbidelli) [3h]

Petit lexique



- ***Nuage moléculaire***: Berceau de la naissance des étoiles
- ***Cœur de nuage moléculaire***: Partie donnant naissance à une étoile (simple, double, triple)
- ***Protoétoiles de classes 0, I, II, III***: Phases précoces de la formation stellaire
- ***Étoile T-Tauri***: étoile jeune (qqs Ma) directement visible et dont l'excès infrarouge trahit la présence d'un disque
- ***Disque circumstellaire, protoplanétaire ou protosolaire***: disque de gaz et/ou de poussières en rotation Keplerienne
- ***Disques de première/deuxième génération***: disques faits majoritairement de gaz/poussières

Petit lexique

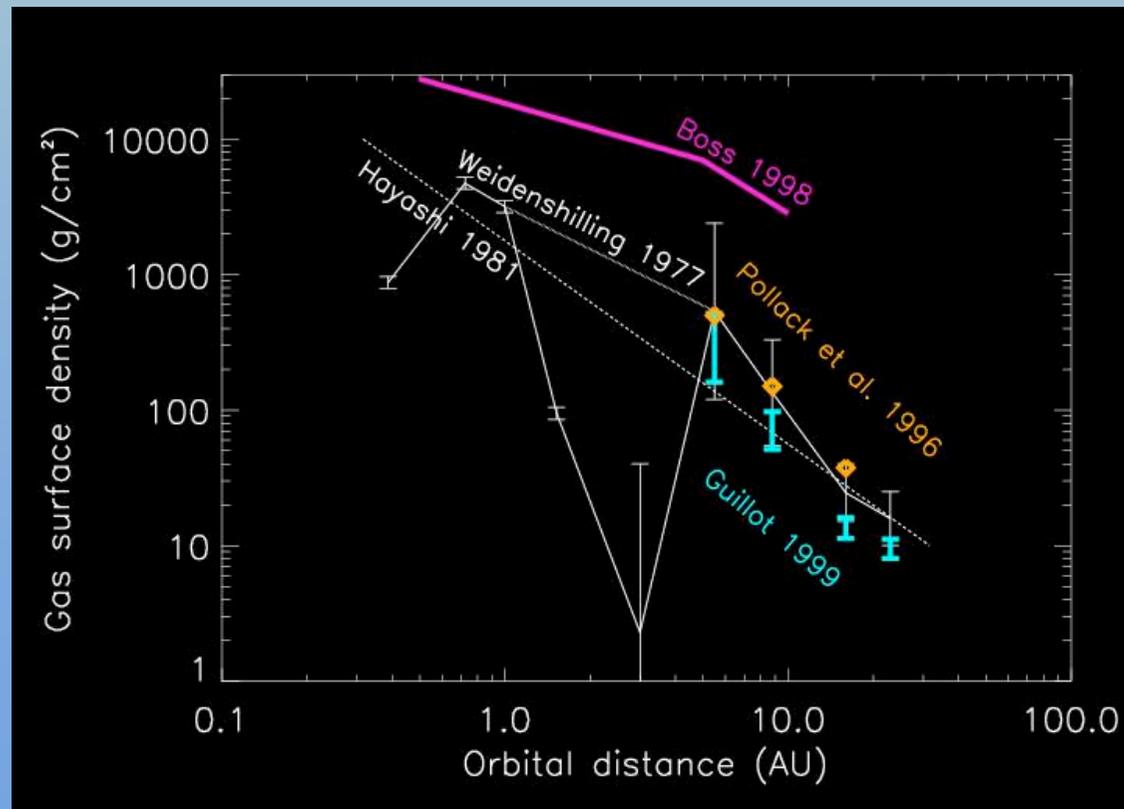
- **Âge d'un solide**: temps passé depuis sa condensation/cristallisation
- **Grains présolaires**: grains dont les signatures isotopiques indiquent une formation antérieure à celle du Système Solaire
- **CAIs**: Inclusions riches en calcium & aluminium
- **Chondres**: Inclusions de formes ~circulaires, trouvées dans les *météorites chondritiques*, dont la composition est extrêmement proche de celle du Soleil
- **Anomalie isotopique**: Rapport de deux isotopes (ex: $^{16}\text{O}/^{17}\text{O}$) différent de celui constaté habituellement; trace d'un processus physique ayant altéré le corps étudié: mélange de sources différentes, échappement thermique/hydrodynamique, radioactivité

Petit lexique

- ***Planètes extrasolaires***: planètes découvertes autour d'étoiles autres que le Soleil (actuellement plus de 100, de masses $> 0.25 M_{\text{jup}}$)
- ***Ceinture d'astéroïdes***: objets de tailles variables (le plus gros étant Cérés $r \sim 500\text{km}$), dont l'orbite se situe entre celle de Mars et Jupiter
- ***Ceinture de Kuiper (ou de Edgeworth-Kuiper)***: ceinture d'objets de tailles kilométriques et plus (incluant Pluton) s'étendant en distance périhélique de ~ 30 à 50 AU
- ***Nuage de Oort***: Ensemble des comètes du Système Solaire; s'étend jusqu'à $\sim 10000\text{AU}$

Petit lexique

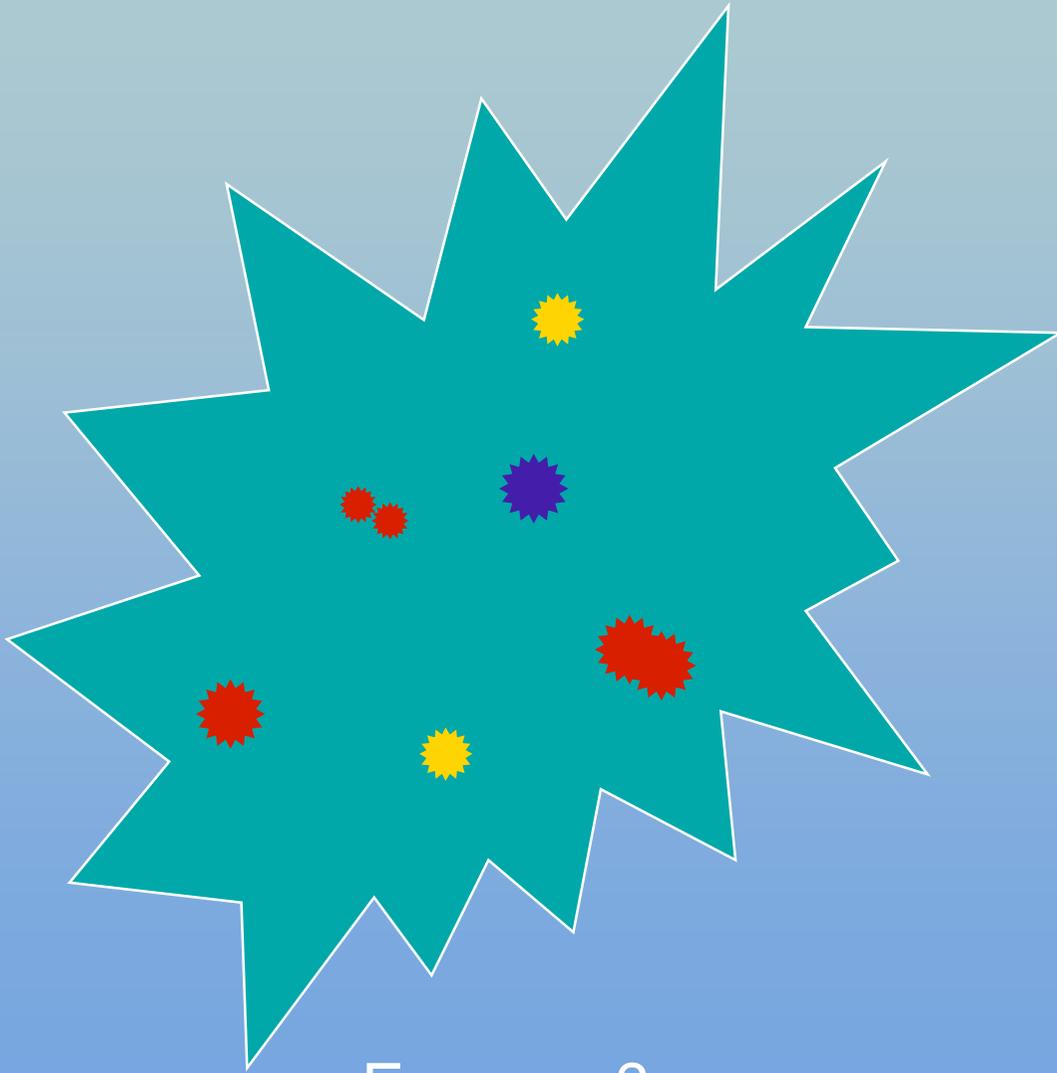
- **Densité de surface:** Σ ou $\sigma = \int \rho dz$
- **Nébuleuse Solaire de Masse Minimale:** Densité de surface obtenue en étalant toutes les planètes du Système Solaire et en leur ajoutant leur complément d'hydrogène et d'hélium



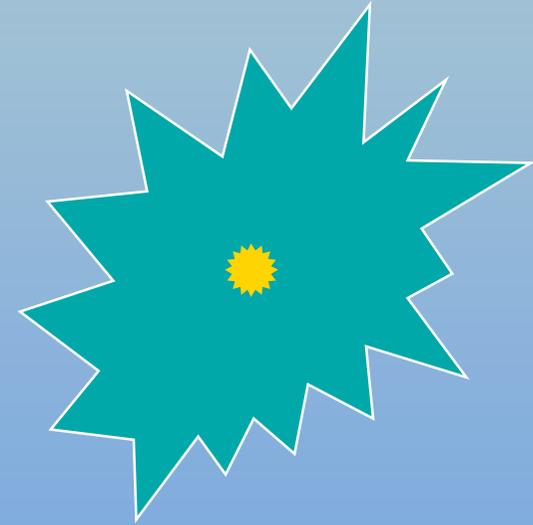
Un scénario « standard » de formation du Système Solaire

- -0.5 Ma: Un cœur de nuage moléculaire s'effondre
- 0 : Le Soleil est créé; Les premiers solides (CAIs; chondres) apparaissent dans le disque protoplanétaire
- 1-10 Ma: Jupiter, puis Saturne, puis Uranus et Neptune se forment
- 3-15 Ma: Le disque de gaz se dissipe
- 10-100 Ma: Les planètes telluriques se forment
- 4.56 Ga: Une école d'hiver à Aussois réunit 60 cerveaux de l'astronomie, géochimie, planétologie

Où s'est formé le Soleil?



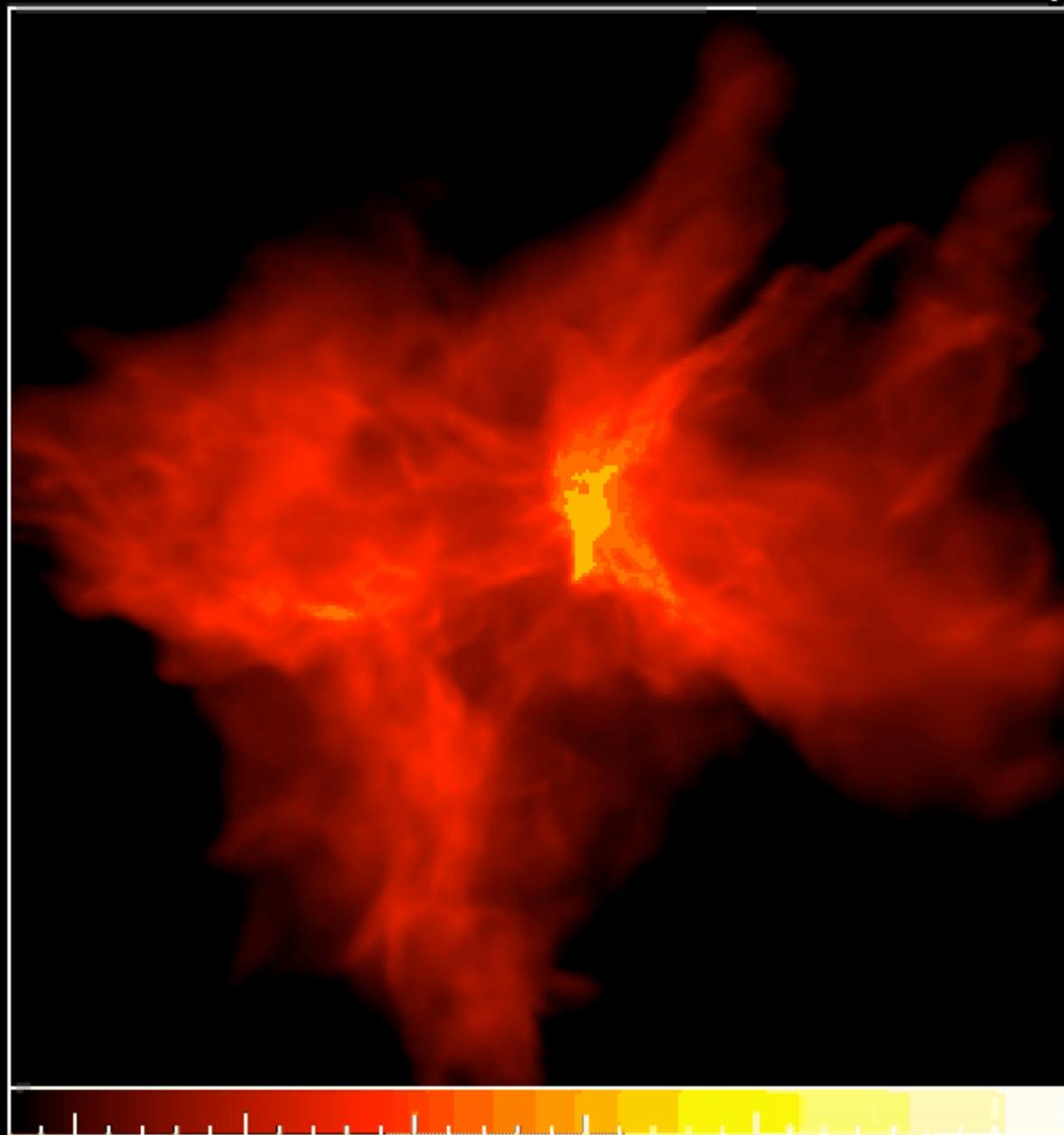
En amas?



Isolément?

Dimensions: 82500. AU

Time: 197220. yr



-1.5

-1.0

-0.5

0.0

0.5

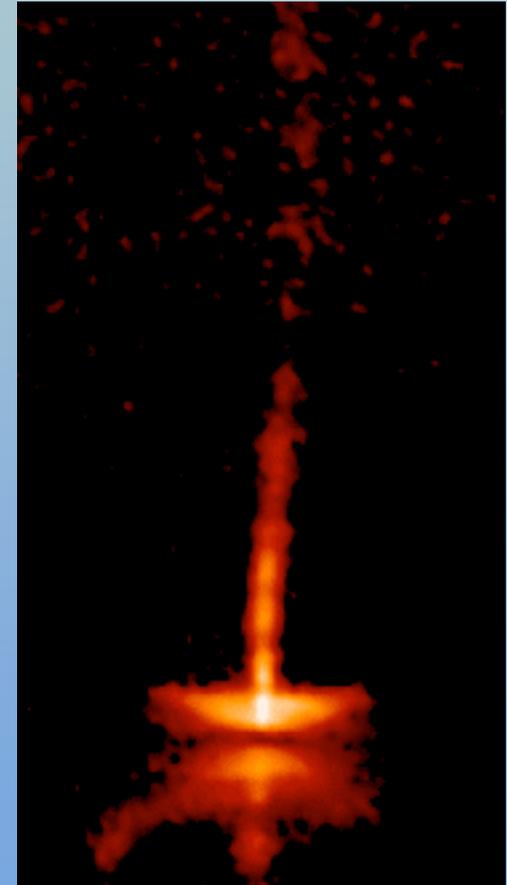
1.0

Log Column Density [g/cm^2]

Matthew Bate

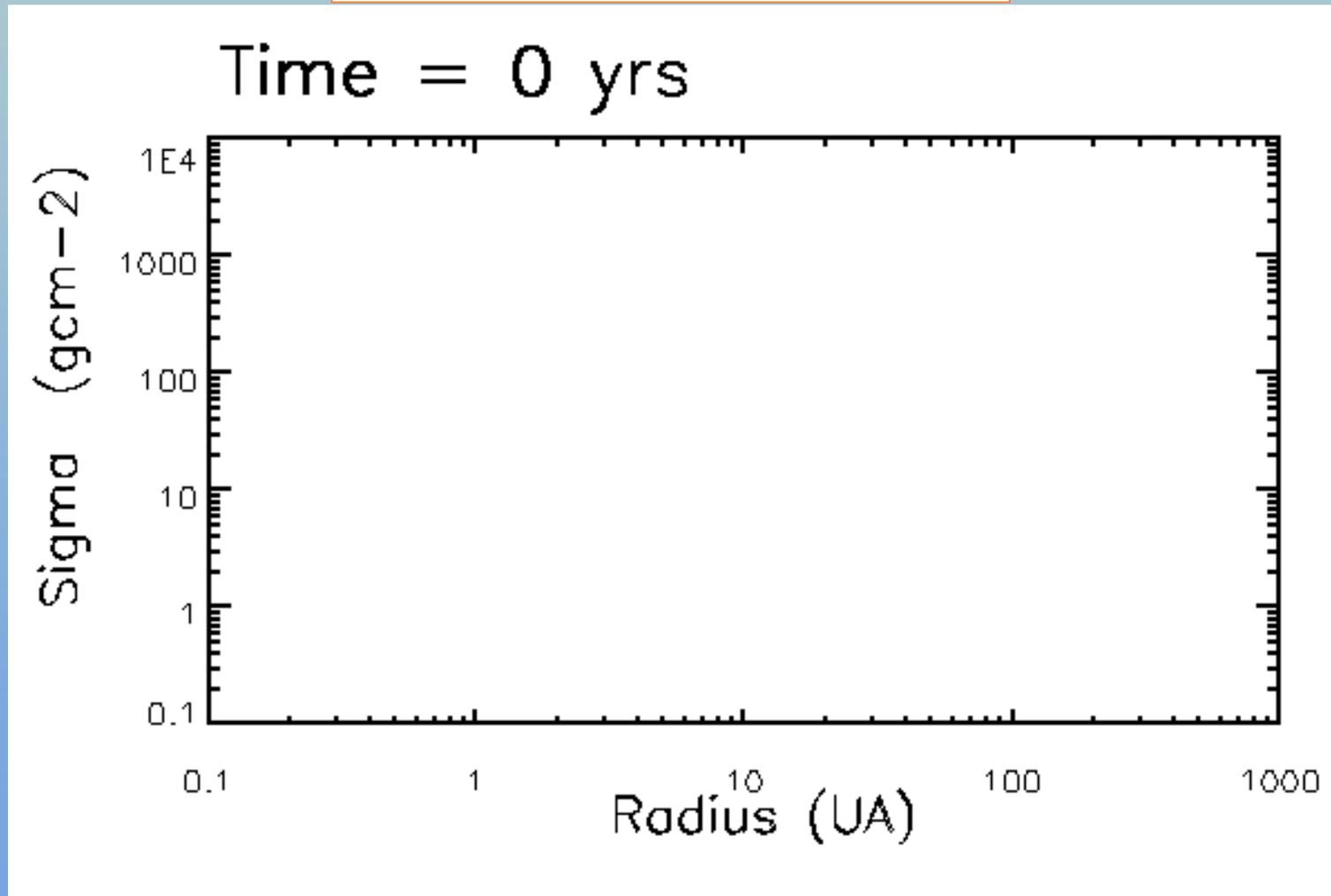
Quelles ont été les premières étapes de la vie du Soleil?

- Moment cinétique initial?
- Temps d'effondrement du nuage moléculaire?
- Densité de surface « initiale », température du disque?
- Importance des jets?
- Importance de l'instabilité gravitationnelle?



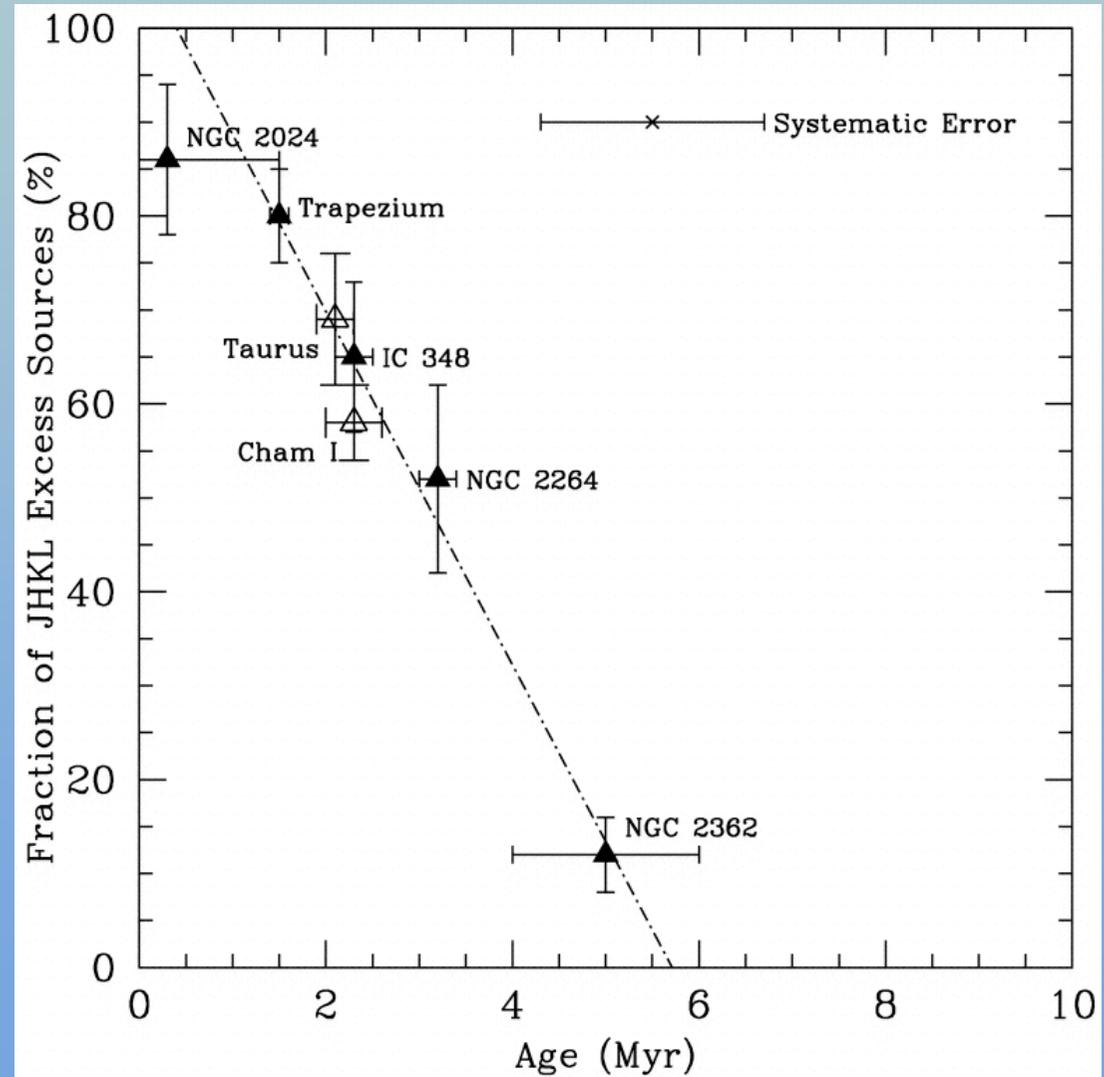
Évolution du disque protosolaire

$$\frac{\partial \Sigma}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sqrt{r} \frac{\partial}{\partial r} [\nu \Sigma \sqrt{r}] \right) + S(r, t)$$

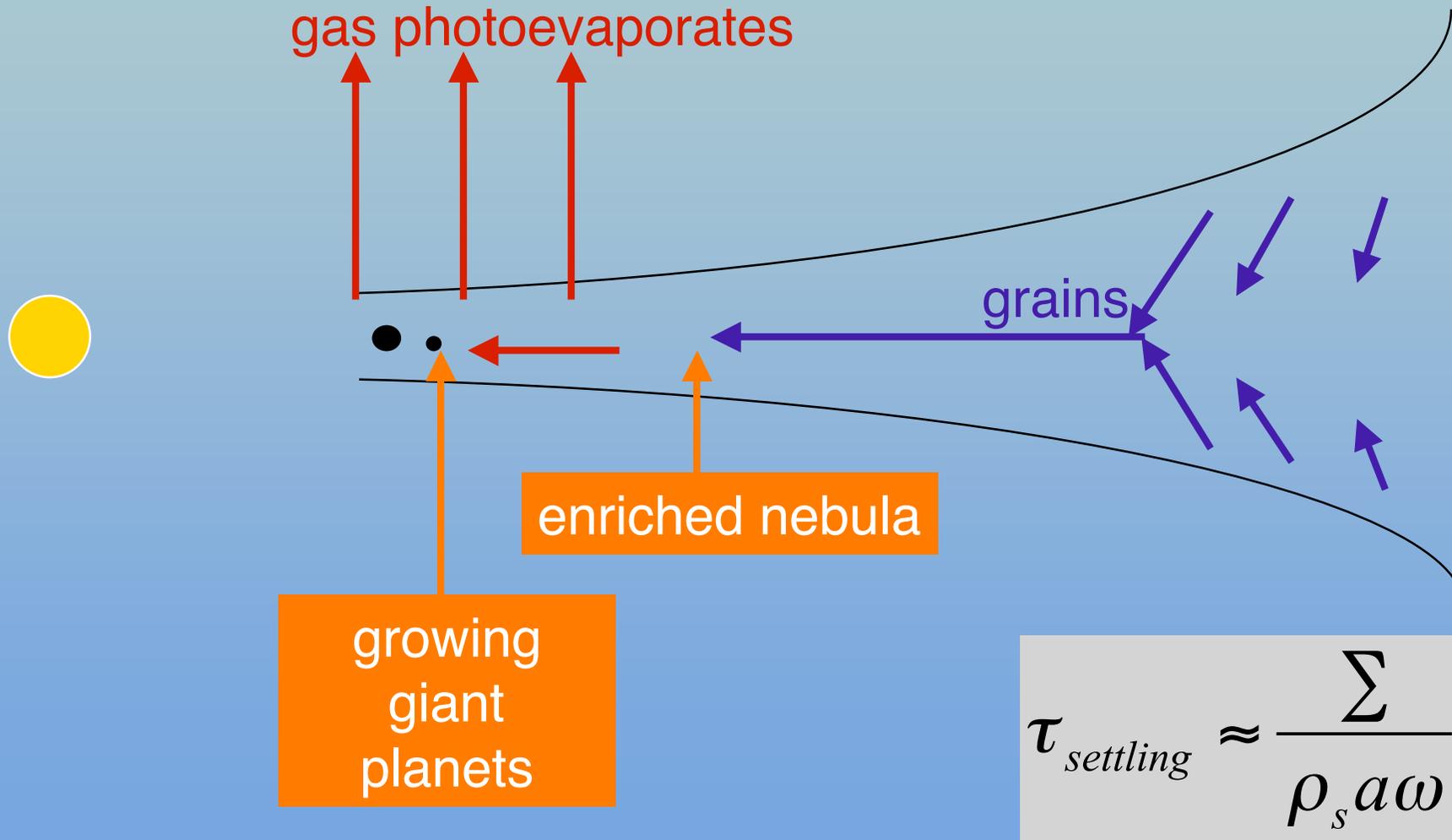


Comment le gaz de la nébuleuse a-t'il été dissipé?

- Importance de la photoévaporation? Interne? Externe?
- Marées stellaires?
- Formation de planètes géantes?



Un scénario possible...



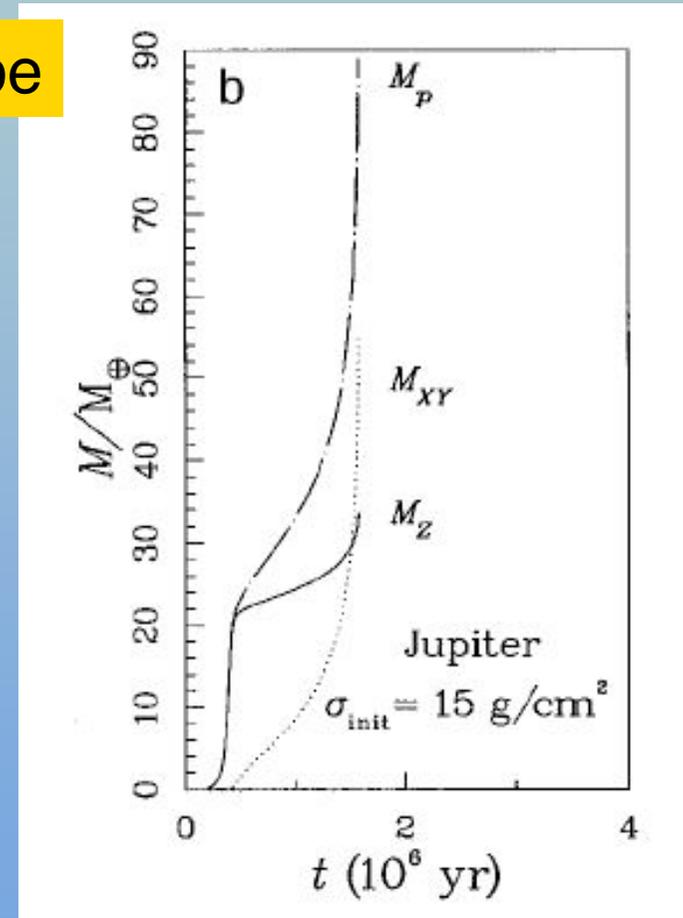
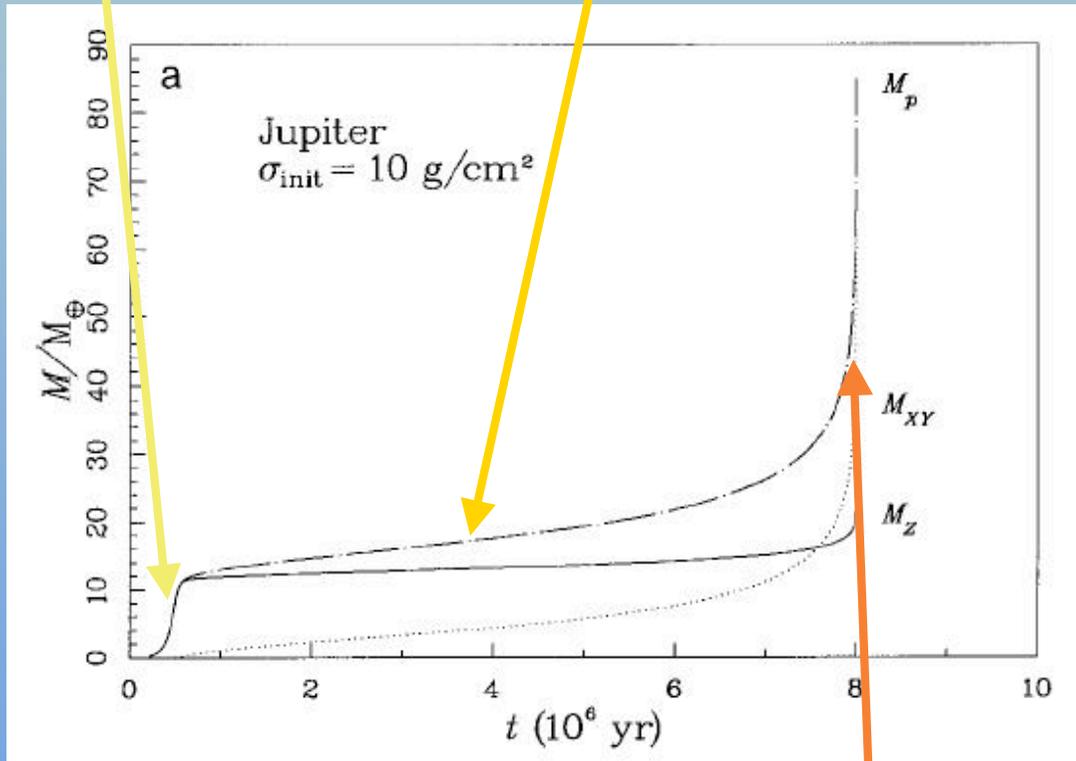
Les planètes géantes se sont-elles formées tôt ou tard?

- Instabilité gravitationnelle (Boss 1998; Mayer et al. 2003)
 - formation directe dans une nébuleuse massive
- Accrétion (Pollack et al. 1996):
 - Formation d'un noyau solide d'environ $10 M_{\oplus}$
 - Capture de l'enveloppe d'hydrogène (qqs Ma)

Le modèle « standard »

1. Accrétion du noyau

2. Refroidissement de l'enveloppe

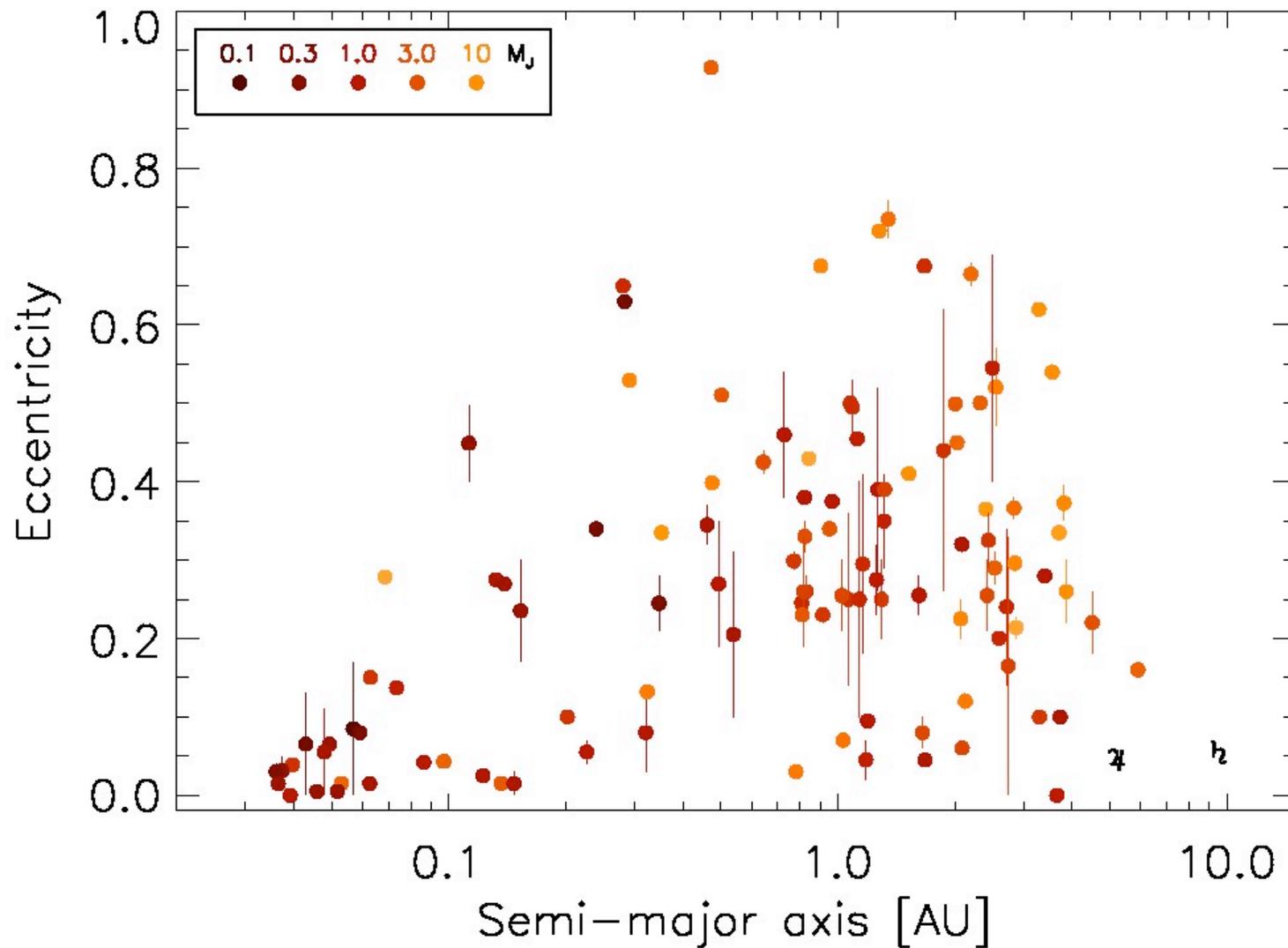


3. Contraction rapide de l'enveloppe

Quelle a été l'importance de la migration?

- Migration par interaction planète / disque de gaz
- Migration par éjection de planétésimaux & modelage de la ceinture de Kuiper

...et les systèmes extrasolaires?...



...la suite cette semaine...