



**La formation des planètes :  
des grains interstellaires aux exoplanètes**

**Sébastien CHARNOZ**

**Laboratoire AIM  
(Université Paris Diderot / CEA)**

# Préambules...

---

→ La théorie de formation planétaire est une **théorie jeune et en plein développement**,  
(bien moins mature que celle du Big-Bang , par exemple)  
(Safronov : 60's, Greenberg, Wetherill, Weidenschilling : 80-90's,  
et... la foule depuis 1995)

→ Une théorie **multi-disciplinaire**  
qui fait appel à tous les domaines de la physique  
(hydrodynamique, Gravité, chimie minérale et organique, physique des surfaces,  
géologie, expériences de laboratoire, datation radio-active, transfert-radiatif, physique de  
la fracturation etc..., photo-chimie)



Multiplicité des outils

→ L'objet de l'étude ne cesse de se transformer, de changer  
de nature



Multiplicité des objets

**1. Diversité des planètes et exoplanètes**

**2. Quelques notions de physique**

**3. Les grandes étapes de la formation planétaires**

La physique du disque protoplanétaire  
des grains aux planètes

**3. Notre Système Solaire**

# 1. Diversité des planètes et exoplanètes

**Quelques repères historiques :** « Si j'ai vu plus loin c'est par ce que j'étais assis sur des épaules de géants » I. Newton

**Antiquité :** Existence de 7 corps célestes ( de Mercure à Saturne, incluant la Terre).  
Théorie des épicycles.

**15<sup>ème</sup> Siècle :** Copernic

**16<sup>ème</sup> / 17<sup>ème</sup> siècle :**

- **Début 16<sup>ème</sup> Siècle :** travaux de Copernic => mouvement des corps célestes
- **Fin 16<sup>ème</sup> :** Giordano Bruno exécuté à Rome => idée de pluralité des mondes, notion de planètes et d'étoiles
- **1610 :** Galilée observe le ciel à la lunette : Lune, Jupiter, Saturne
- **1600-1630** Travaux de Kepler : 1600-1630

**Fin 17<sup>ème</sup> siècle / Début 18<sup>ème</sup> :** Isaac Newton : théorie de la gravité

**17-20 siècle:** Ere de la mécanique celeste.

**19-20 siècle** : Premières photographies et spectr

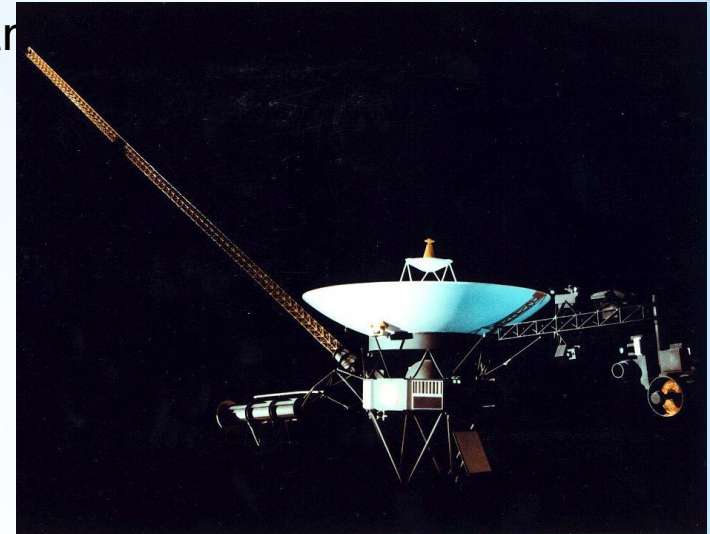
**20<sup>ème</sup> siècle** : Début de l'ère spatiale.  
Exploration des planètes du Système Solaire

**1979** : Missions Voyager 1 et 2 : 1977

**1995** : Première découverte d'exoplanètes (M. Mayer et D. Queloz)

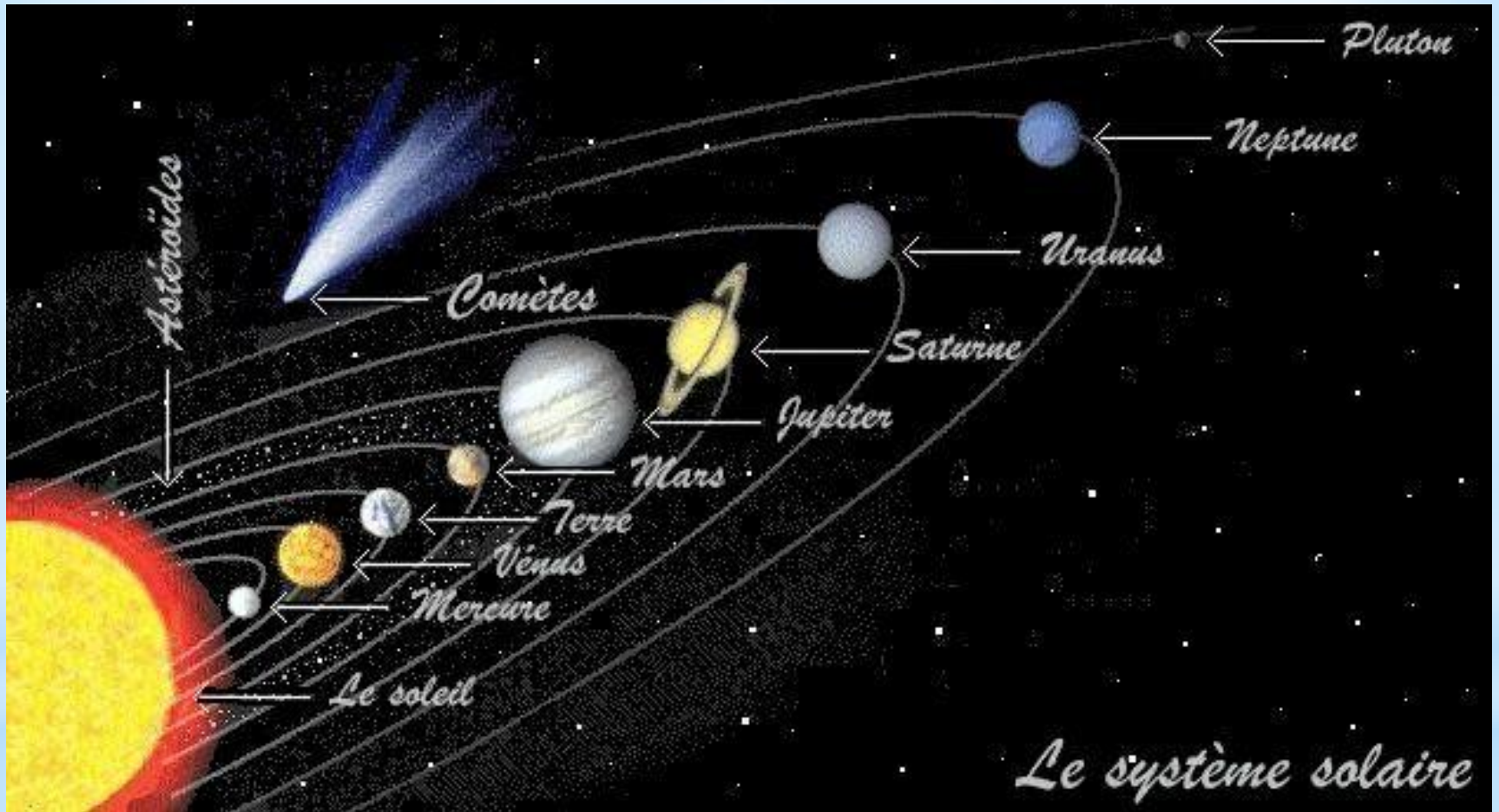
**Depuis 2000** : Environ 900 exoplanètes découvertes par divers moyens (vitesses radiales, transits, lentilles gravitationnelles etc..) dont plusieurs en zones habitables.

Satellite Kepler : des milliers de candidats en attente de confirmation.



# Les planètes de notre Système Solaire

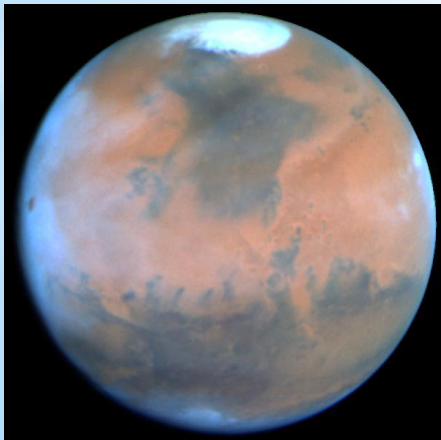
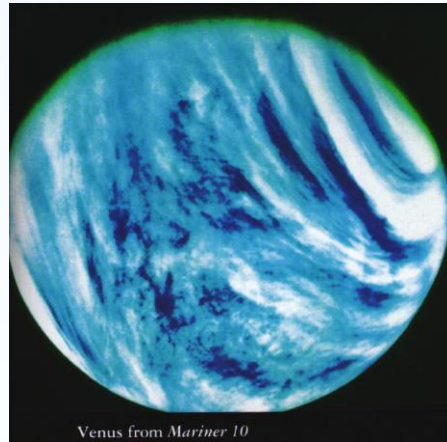
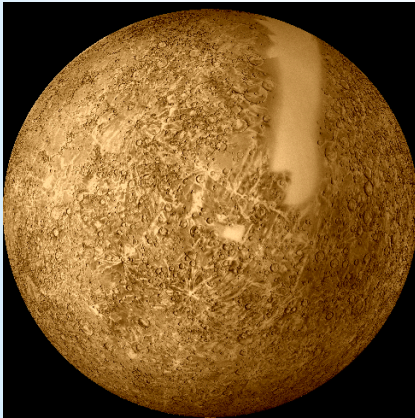
Des planètes et deux ceintures de petits corps



# Grands faits à expliquer

## Différenciation chimique interne/externe

Planètes internes (< 3 UA) **petites** et **faites de roches et de métaux**

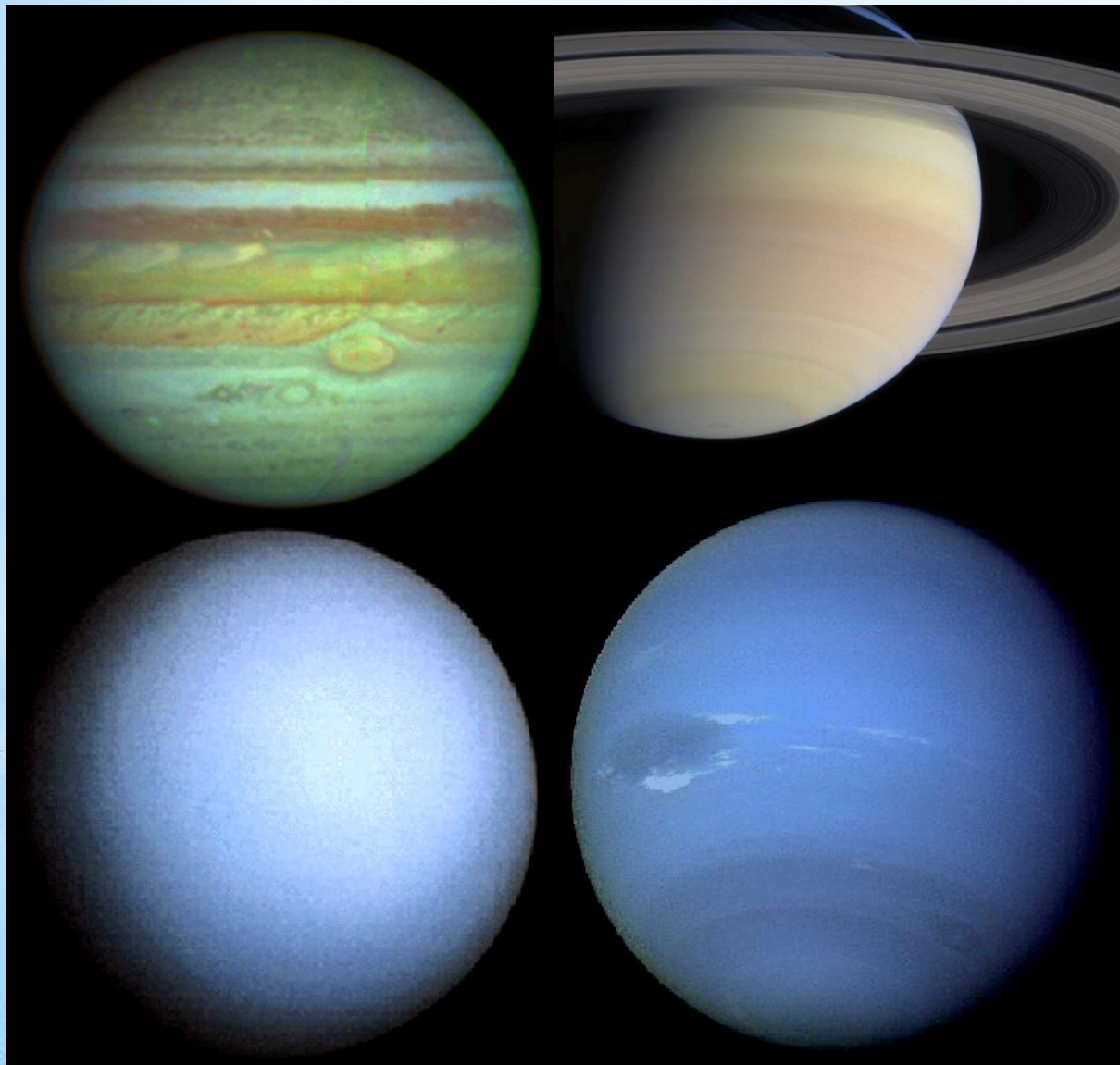


Eléments réfractaires (condensent à haute température)

Peu de volatils

Grands cratères , plus grands sur mercures

# Planètes externes (> 5 UA) géantes et composées de volatils



15 à 300 x la masse  
de la terre

Volatils (gaz+glaces)

Atmosphère :

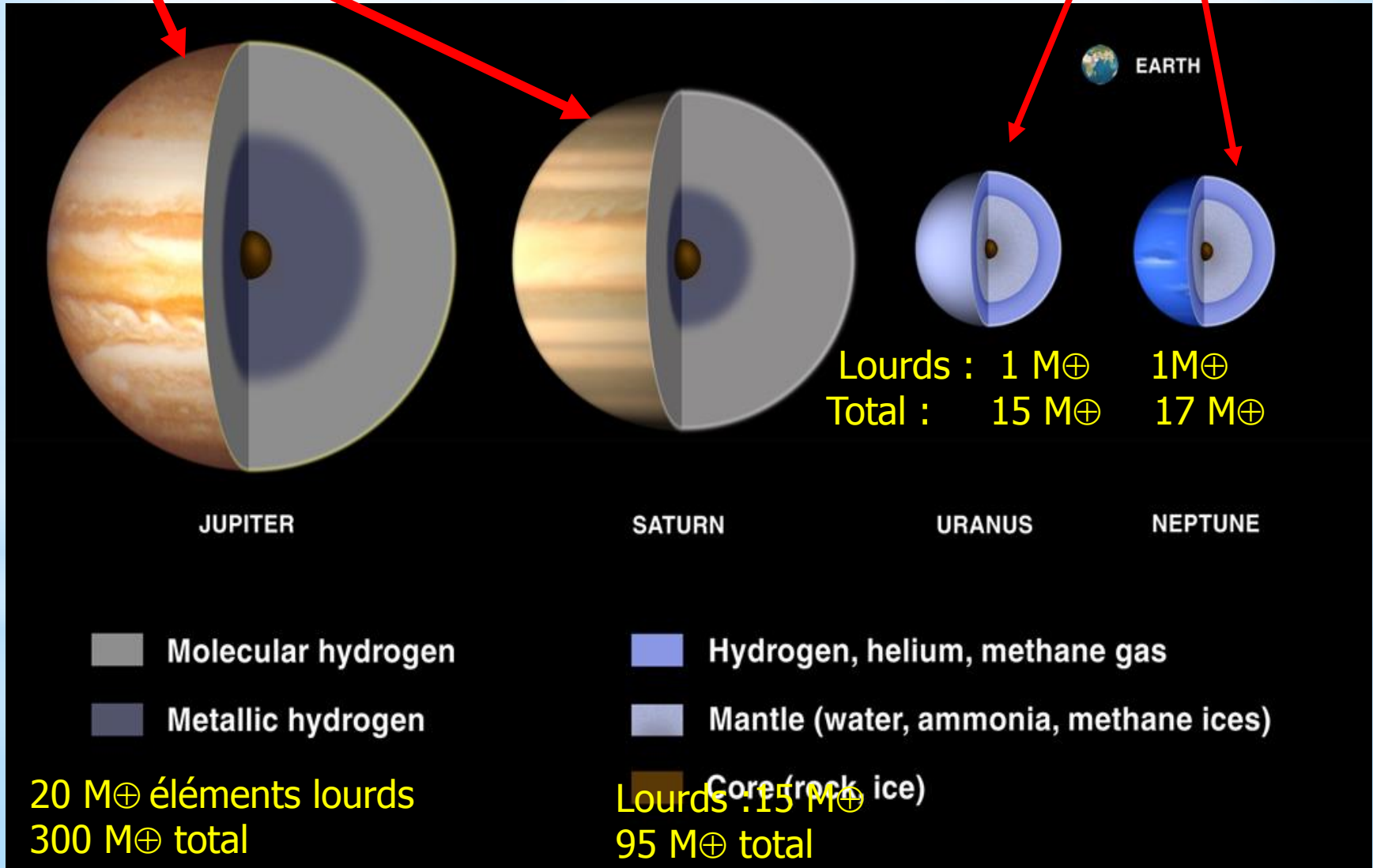
~ 4-5 fois la métallicité  
du Soleil



*Toutes les planètes géantes ne sont pas les mêmes*

Géantes de glaces

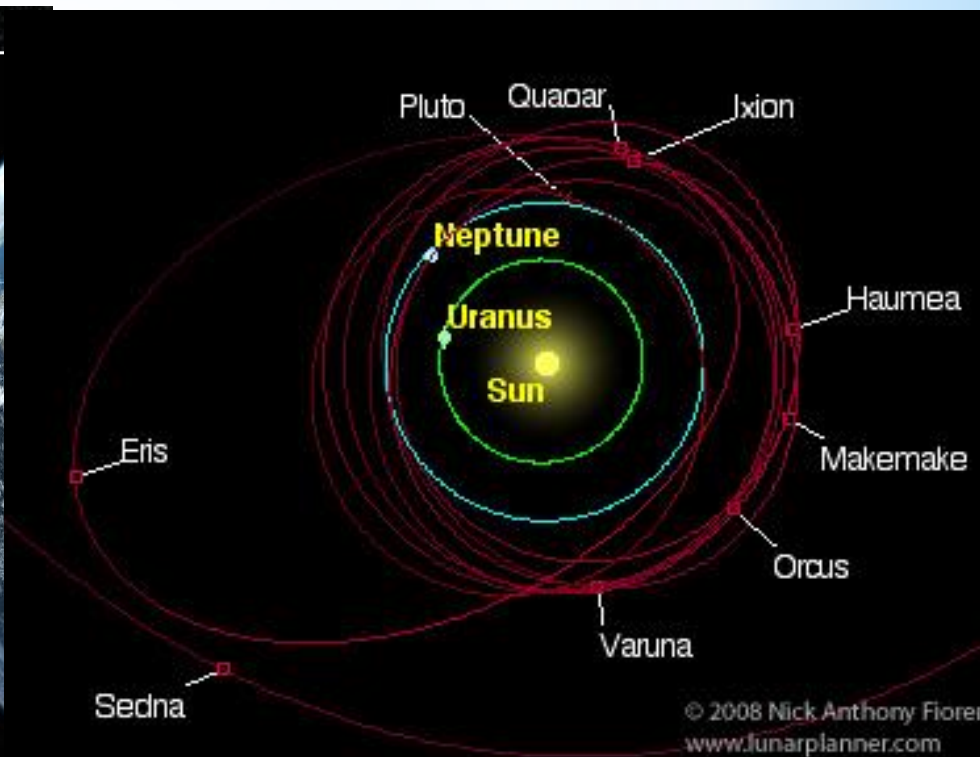
Géantes de gaz



# Ceinture de Kuiper (> 40 UA)

Beaucoup d'embryons planétaires

Planet candidates in the Solar System [artist's impression]

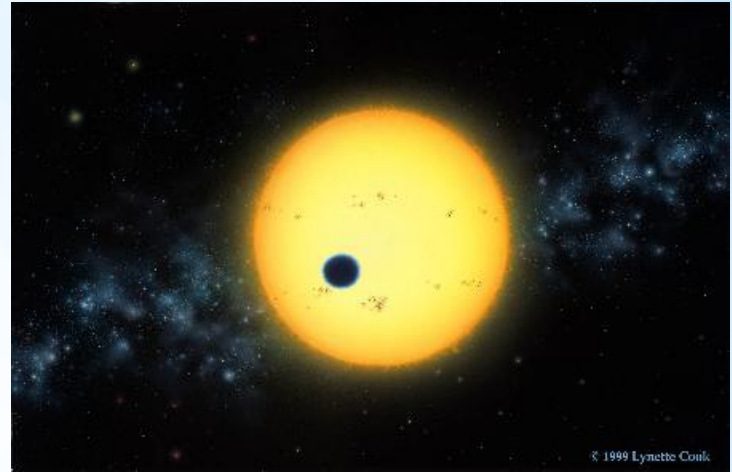


# Exoplanètes : beaucoup ... mais mal connues

Quelques infos uniquement :

Masse , taille, Distance à l'étoile

=> Densité => composition chimique

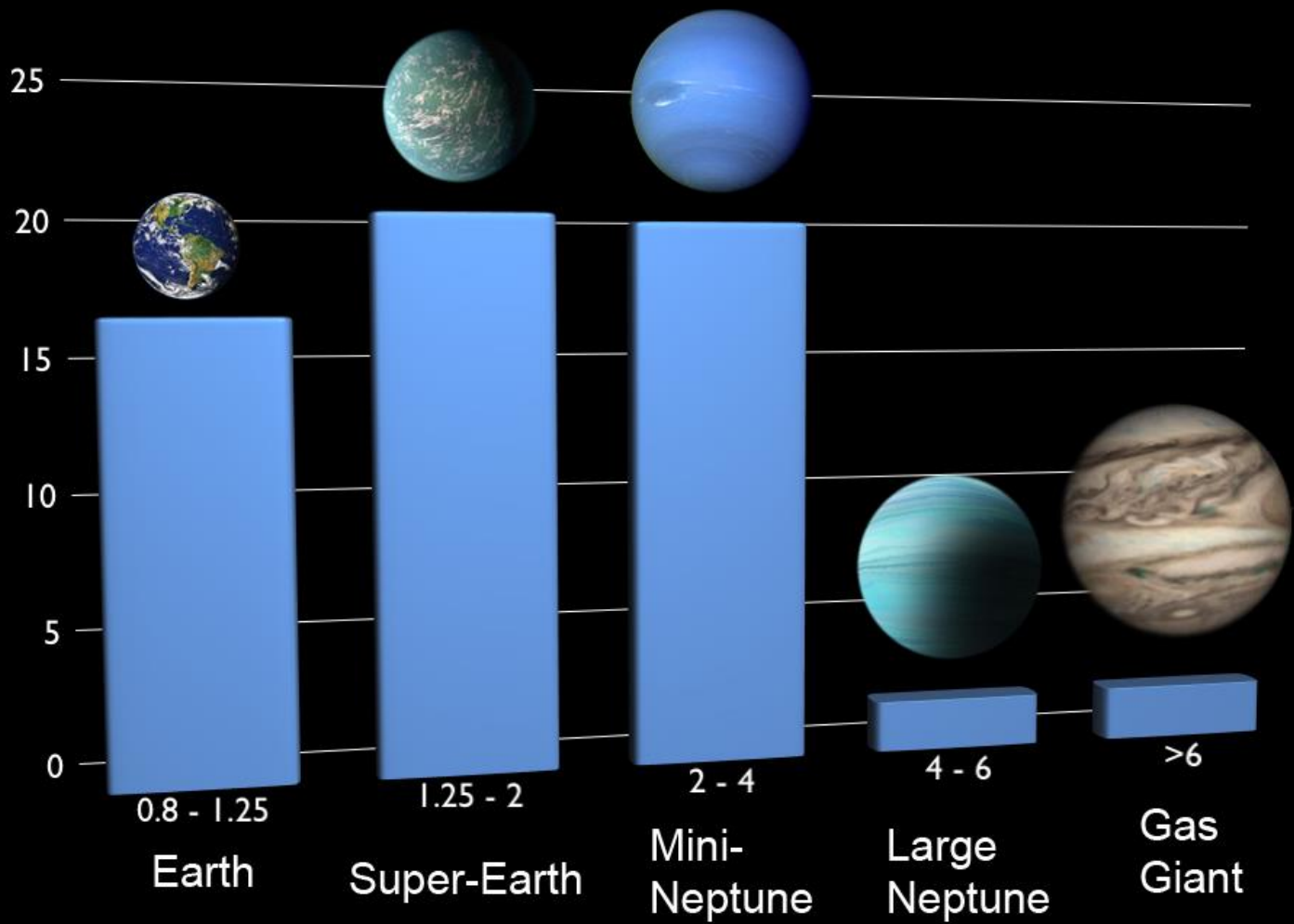


La plus-part des étoiles ont des planètes !

Les planètes terrestres sont plus courantes que les planètes géantes

Grande diversité des caractéristiques planétaires

FRACTION OF STARS WITH AT LEAST ONE PLANET



PLANET SIZE (relative to Earth)

# Des nouvelles catégories de planètes ... sans équivalent dans le Système Solaire

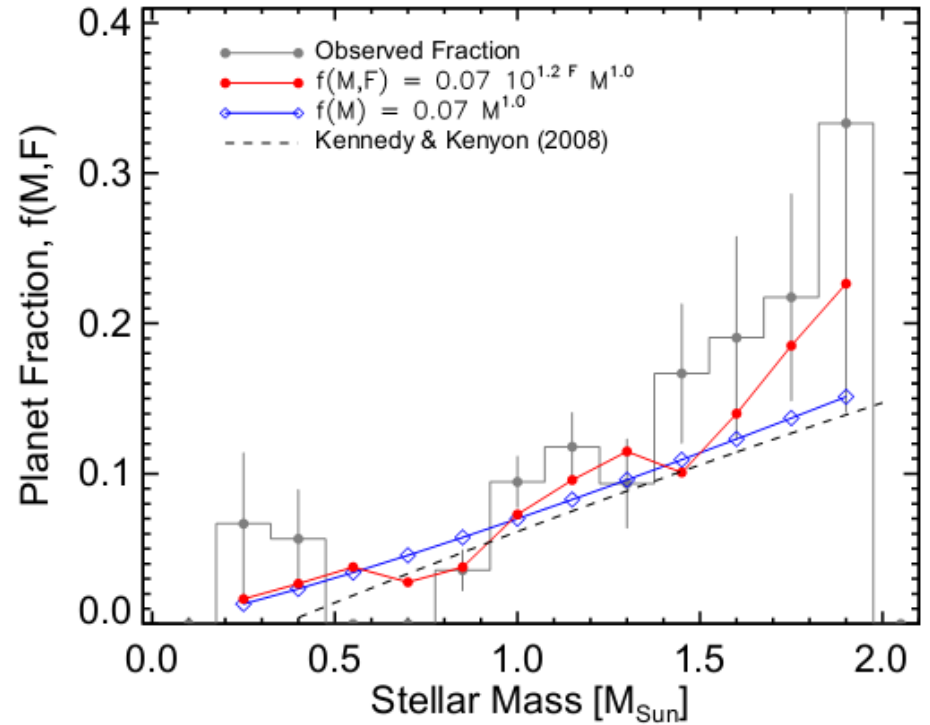
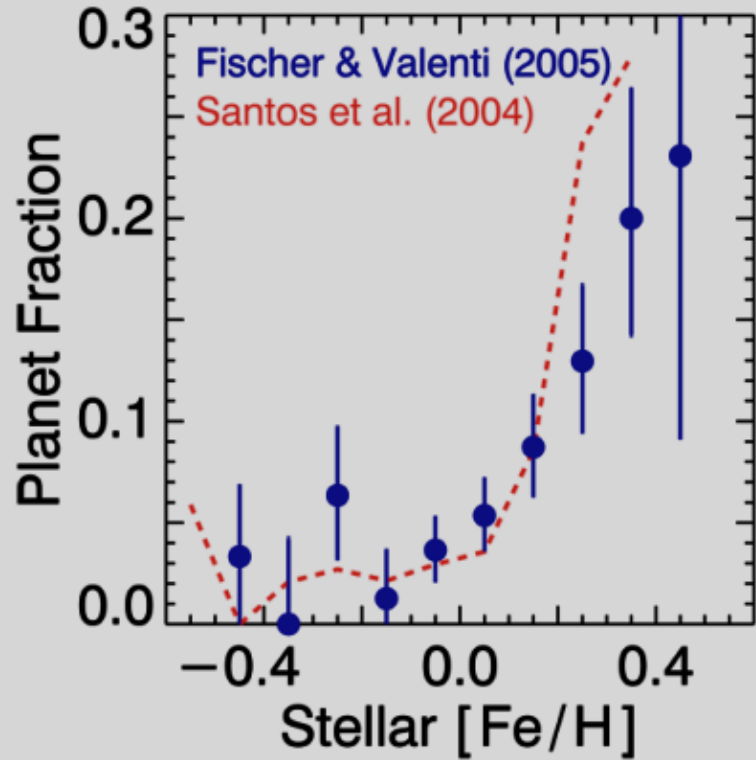
« **Super-terres** » : grandes planètes terrestres

« **Waterworld** » : planètes riches en liquides

« **Hot Neptune** » : planètes de type neptunes proches de leur étoile

« **Hot Jupiter** » : planètes de type Jupiter proches de leur étoiles

# Les étoiles riches en éléments lourds abritent plus de planètes



# Comprendre l'origine des planètes : un défi théorique et observationnel



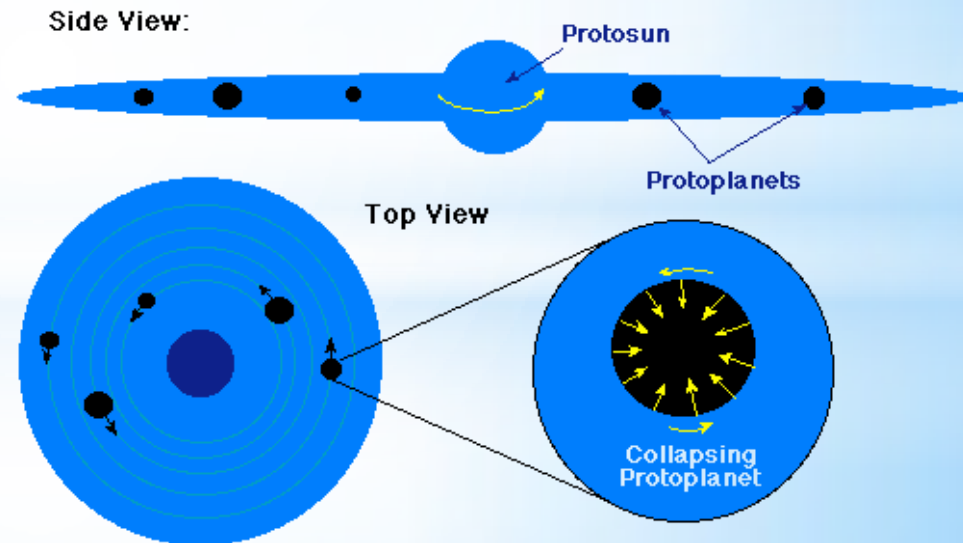
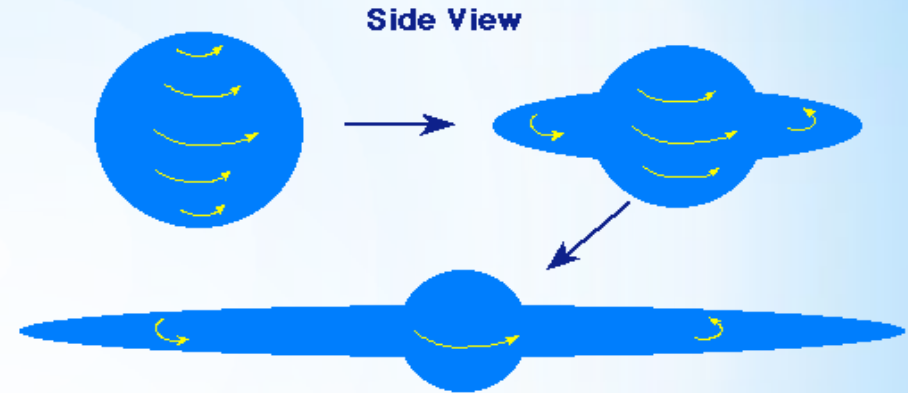
- La formation des planètes est un processus robuste ! => quasiment toutes les étoiles semblent avoir des planètes
- C'est un processus qui crée une grande variété d'objets différents !  
grande diversité des processus physiques mis en jeu (fluide, matériaux, gravité, Etc...)  
=> *Difficulté théorique (quels processus physiques sont dominants ?)*
- C'est un processus complètement achevé dans notre Système Solaire =>  
=> Difficulté pour trouver des traces « exploitables » de ce processus à cause de l'évolution planétaire. (météorites, petites corps, exploration in situ)

# Les grandes étapes de la formation planétaire

## Premières théories modernes :

Observation : toutes la planètes orbitent dans le même plan

Laplace, Newton , Kant :  
⇒ idée d'une nébuleuse en forme de disque qui se condense



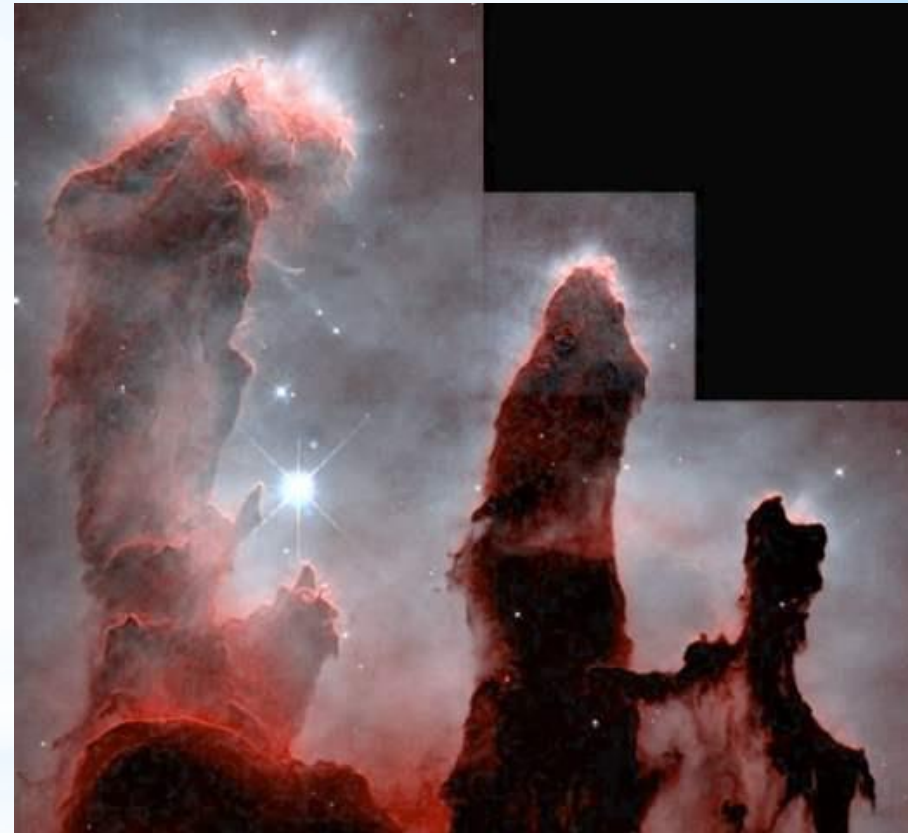
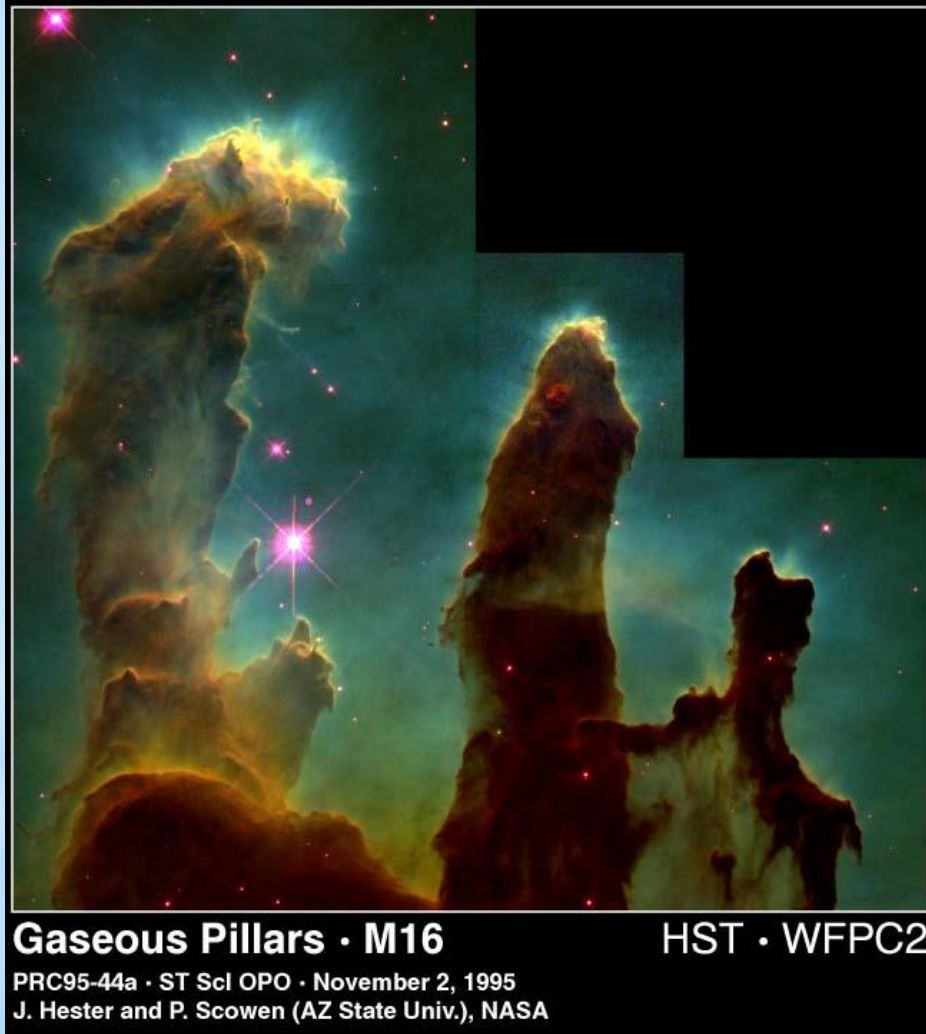


# Le Modèle Actuel

1. Un groupe d'étoiles se forme au sein d'une nébuleuse en effondrement (spontané ou choc)
2. Les proto-étoiles s'entourent d'un cocon de gaz
3. Autour des étoiles se forment des disques
4. Dans les disques se forment les planètes

# Quelques données observationnelles

Nuages moléculaires : gaz ( $\sim$  H,He) + grains ( $\sim$  microns)

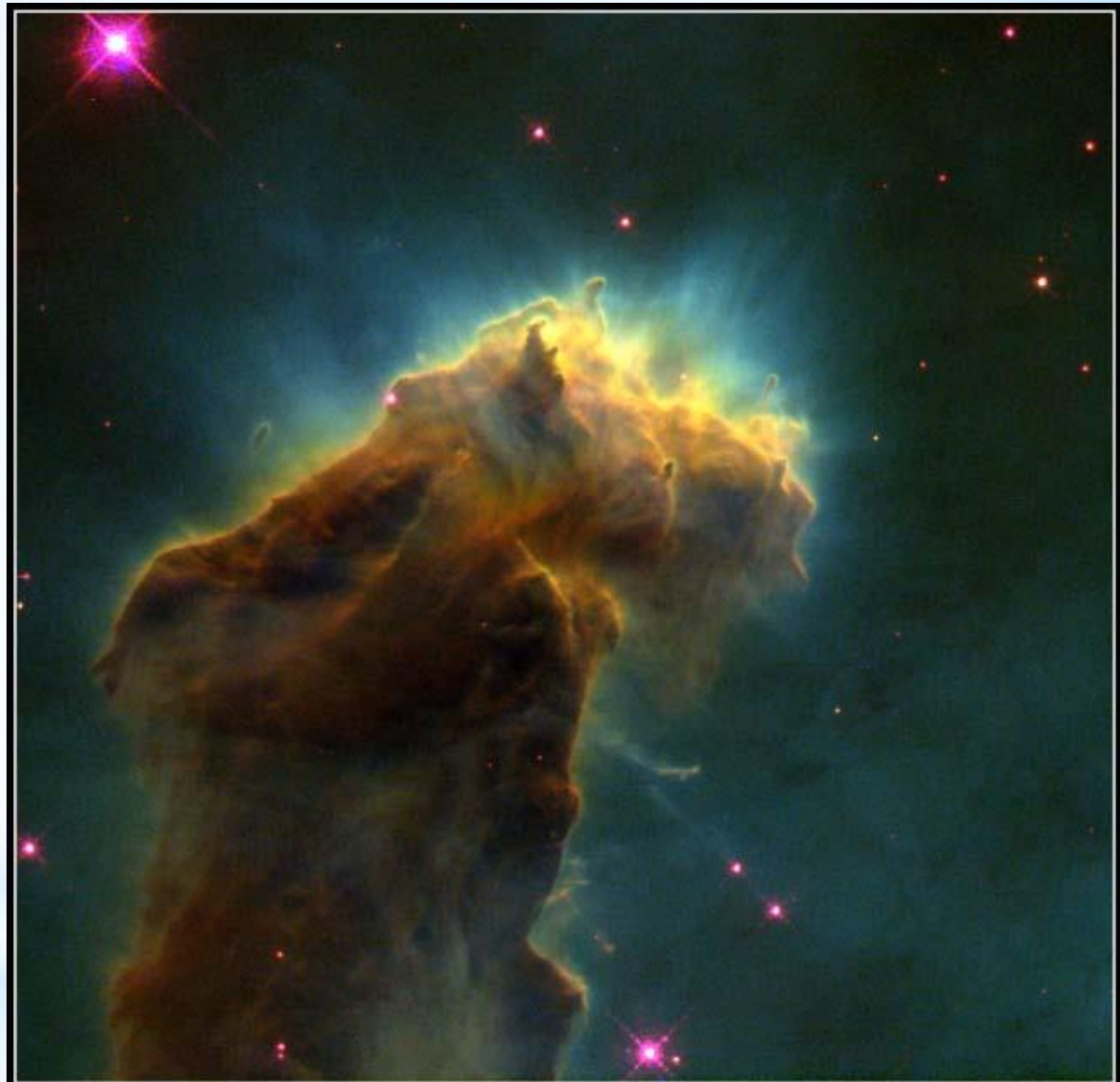


$\sim$  Vraies couleurs

77 x 55 Année lumières  
Distance  $\sim$  7000 années lumière

1 A.L.  $\sim 10^{13}$  km

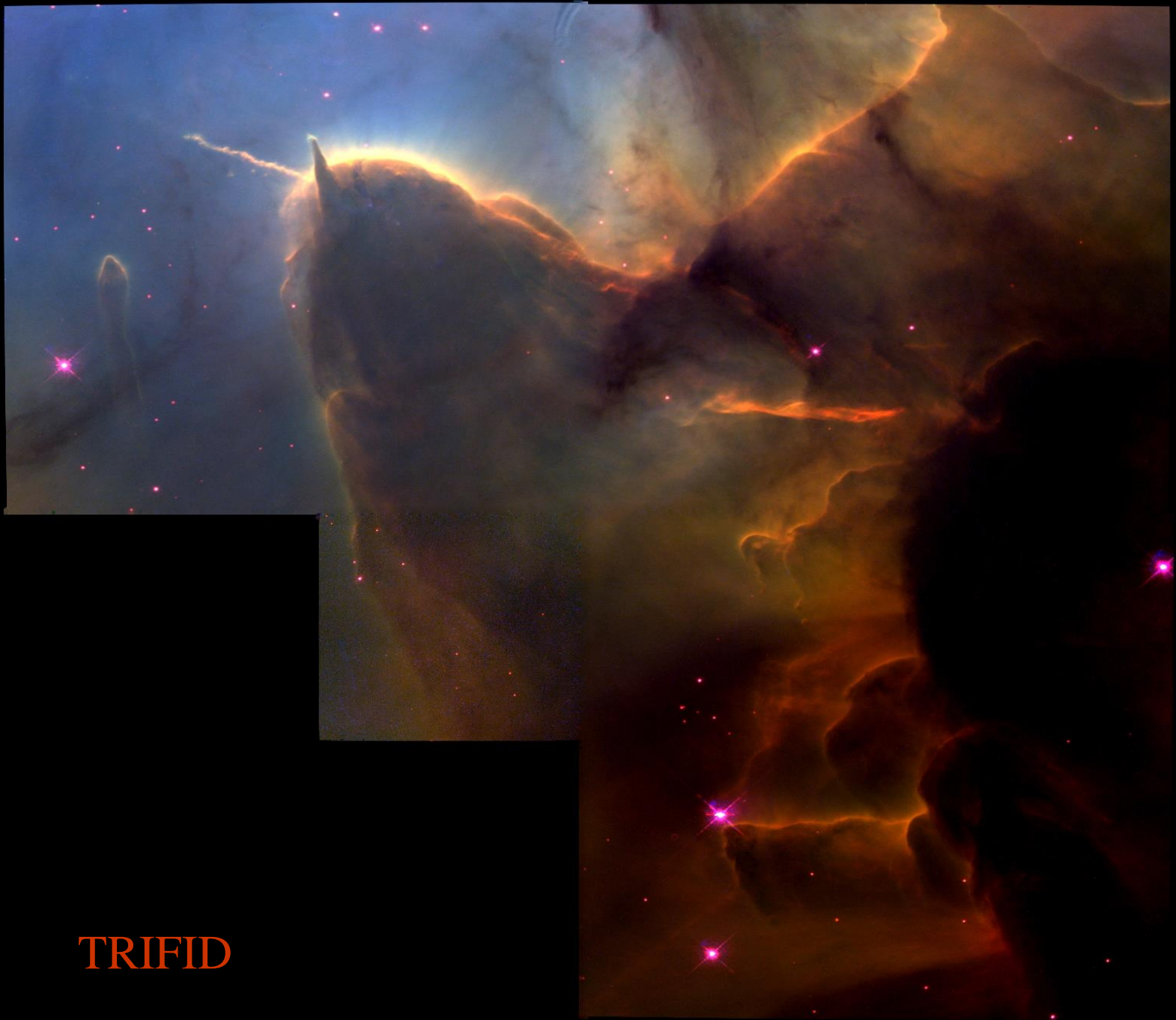
Photodissociation  
des nuages



**Star-Birth Clouds • M16**

**HST • WFPC2**

PRC95-44b • ST ScI OPO • November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



TRIFID



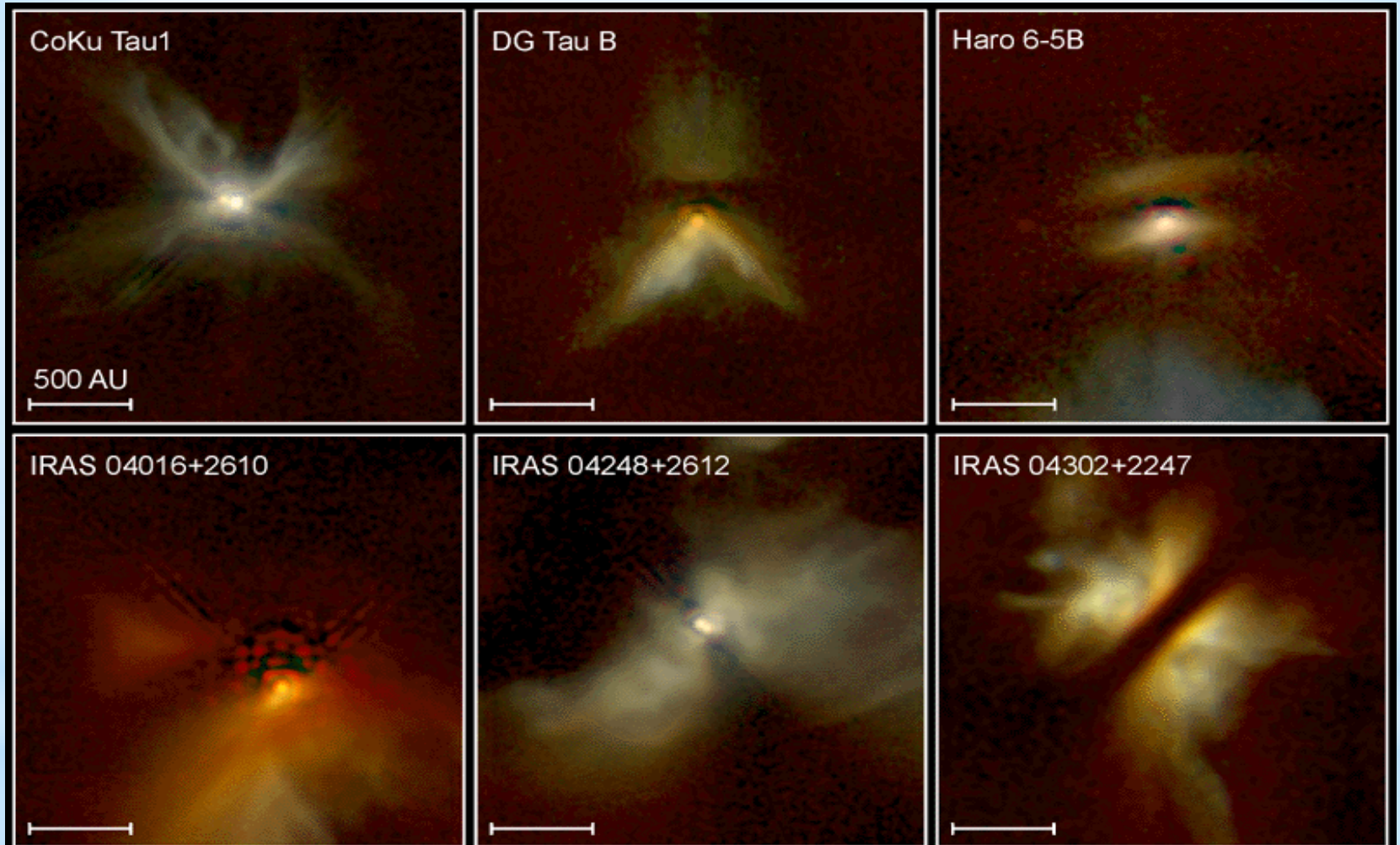
**Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula**

HST • WFPC2

PRC95-45c • ST ScI OPO • November 20, 1995

M. J. McCaughrean (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

# Disques protoplanétaires « silhouettes »



**Young Stellar Disks in Infrared**

**HST • NICMOS**

PRC99-05a • STScI OPO

D. Padgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA

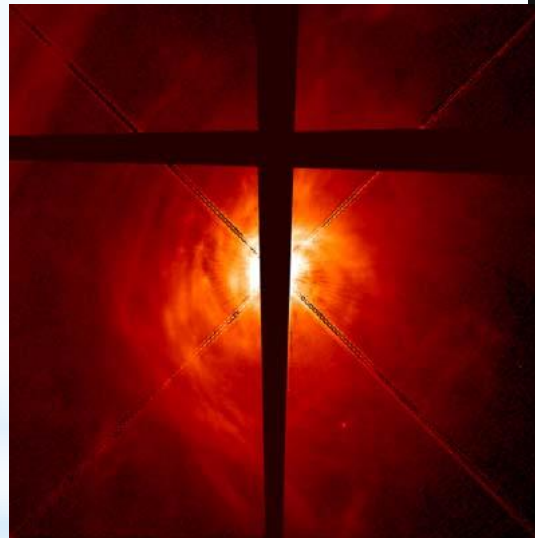


# Les disques protoplanétaires évoluent

**Protoplanétaire** : riches en gaz  
( < million d'années)



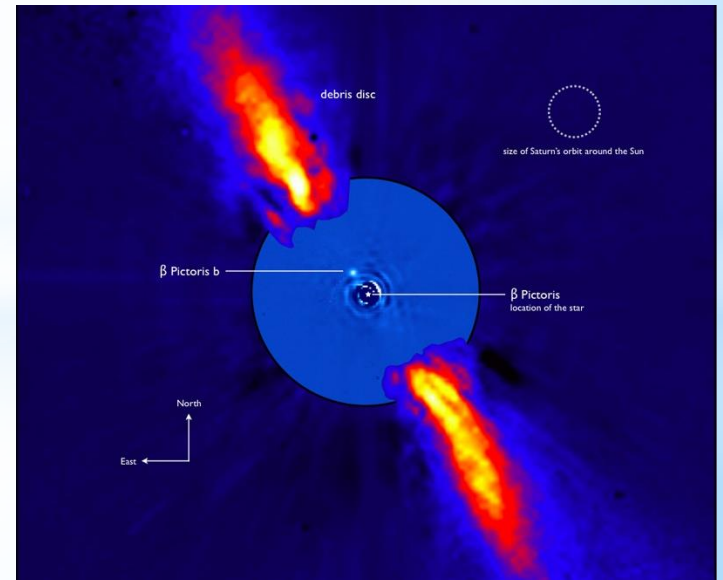
**Disque de transition** :  
Le gaz disparaît  
(qq millions d'années)



GG tau

**Disque de débris** : que de la poussière, traces  
De planètes  
( > 10 millions d'années)

Burger disk



Beta Pic



# Quelques principes physique de base

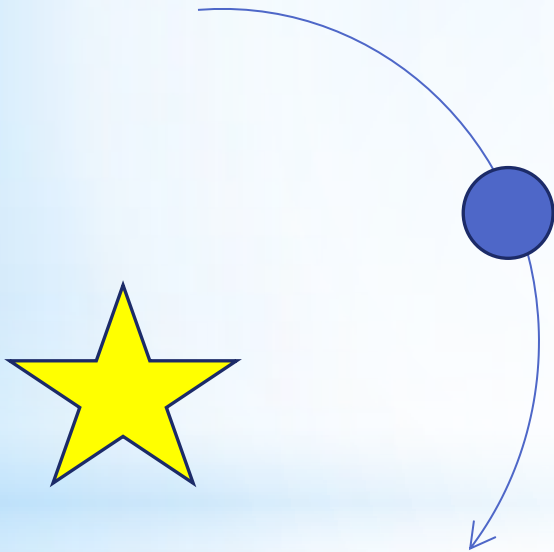
1. Vitesse rotation autour d'une étoile

1. Energie orbitale

2. Moment cinétique orbital

# Vitesse rotation d'un corps autour d'une étoile

Equilibre entre force de gravité ( $G M_* M/r^2$ )  
Et force centrifuge :  $V^2/R$



$$V = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \Omega(r)r$$

$$\Omega(r) = \sqrt{\frac{GM}{r^3}}$$

**La vitesse décroît avec la distance à l'étoile**

# Energie :

Energie de gravité ( $-G M_* M/r$ ) + Energie cinétique ( $1/2 MV^2$ ) =>

$$E = -\frac{GM_*}{2r}$$

⇒ l'énergie croit avec la distance. Un corps qui perd de l'énergie  
« tombe » vers le soleil

A noter : l'énergie peut être évacuée par le rayonnement, et échangée avec le Soleil

# Moment Cinétique :

~ « quantité de rotation » => grandeur  
Fondamentale CONSERVEE en physique

J= distance x vitesse (ex : patineur)

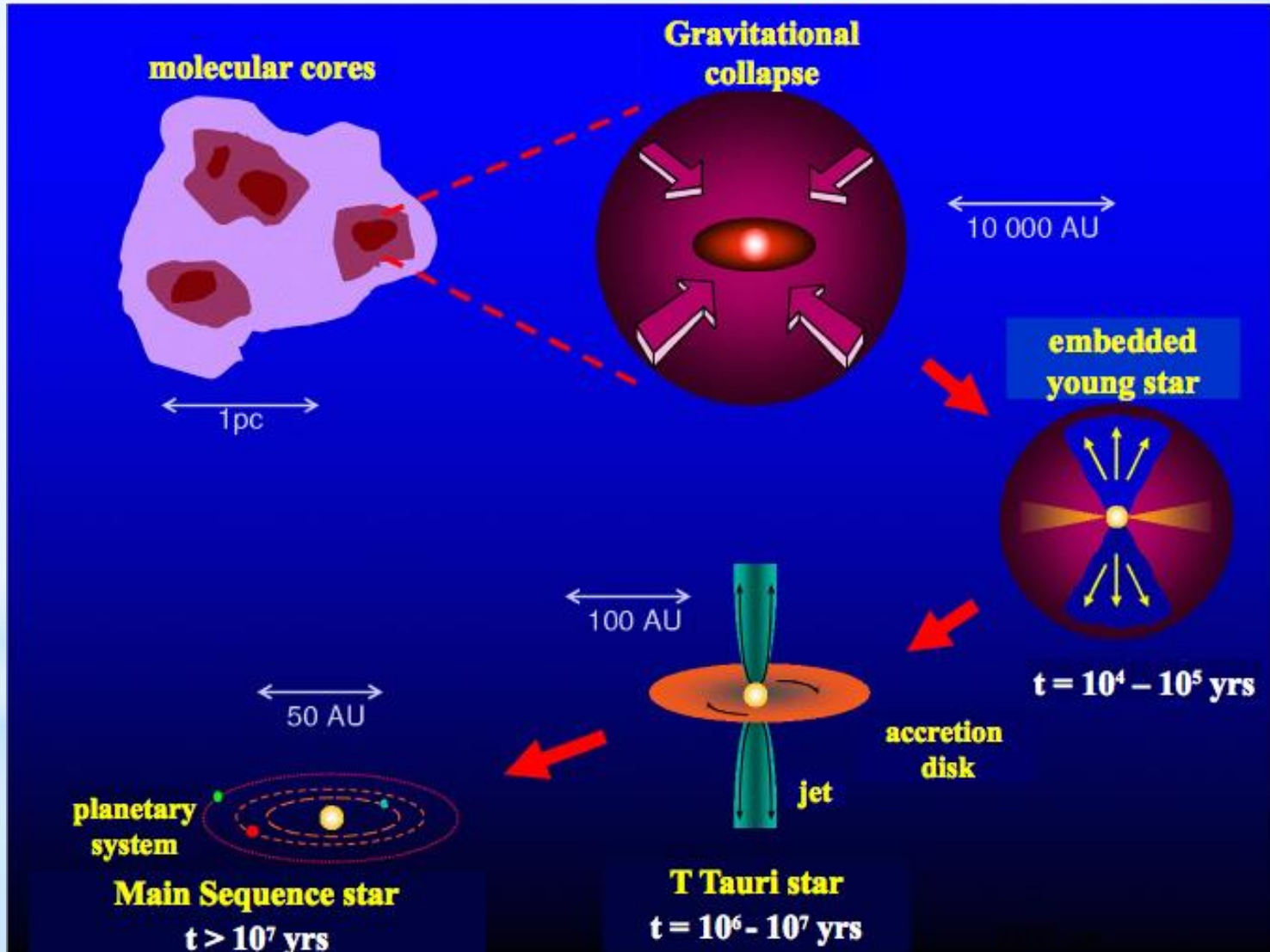
$$J = (G M^* R)^{1/2}$$

J croît avec la distance

⇒ Difficile d'évacuer le moment cinétique  
Echanges possibles avec le Soleil

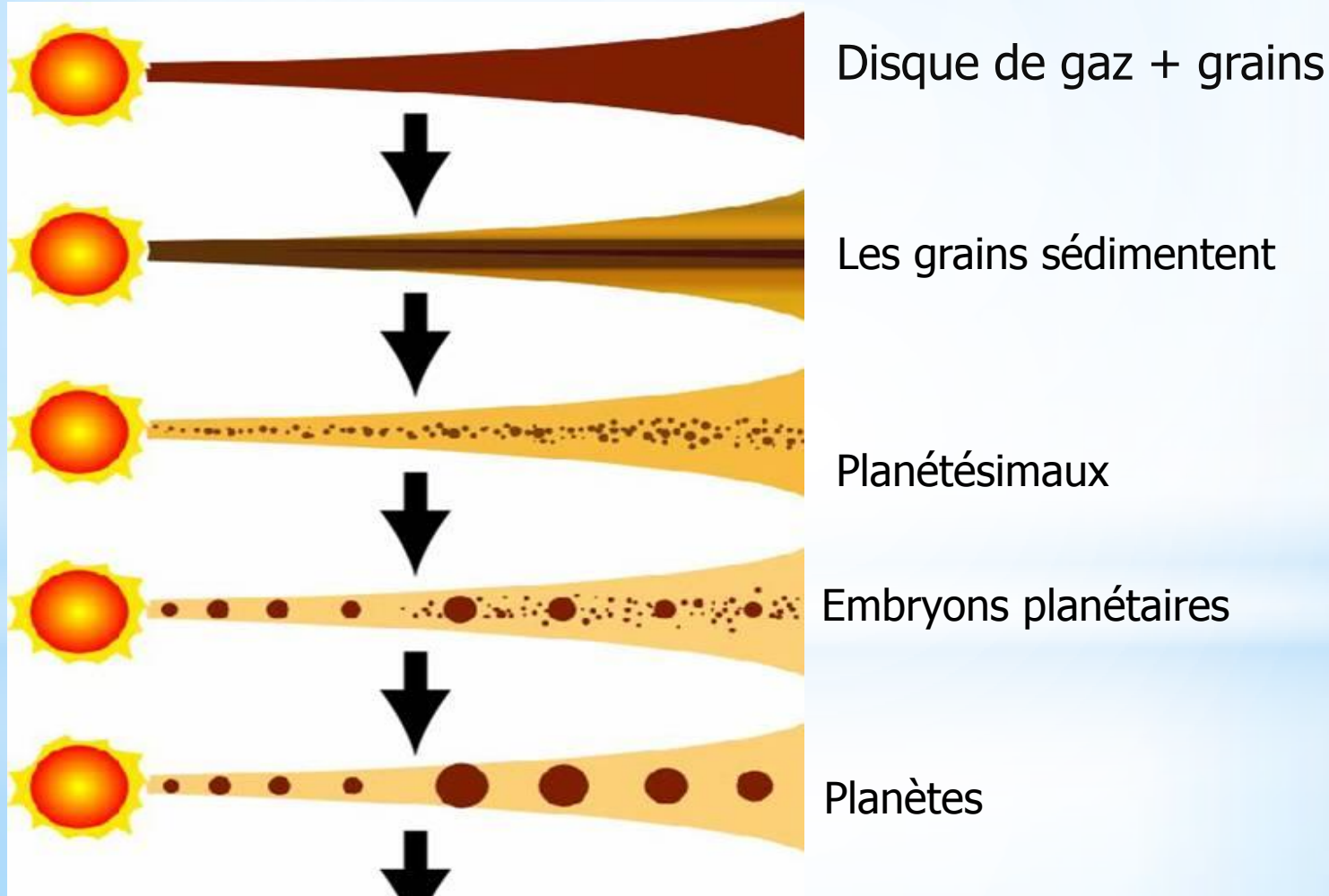
# De la formation des étoiles à la formation des planètes

## Représentation schématique de l'évolution stellaire et circumstellaire



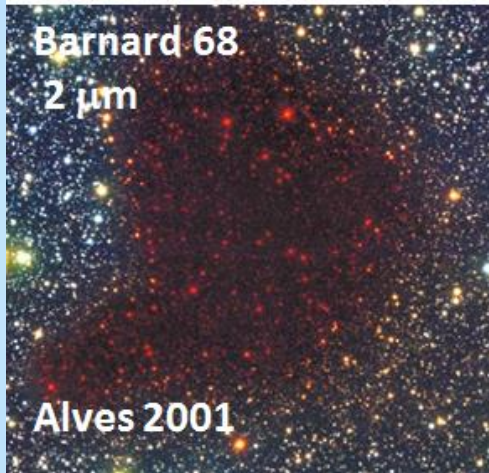
# Les étapes de la formation planétaire dans le disque circumstellaire

Histoire de la formation planétaire : Comment des grains micrométriques vont grandir jusqu'à des tailles planétaires



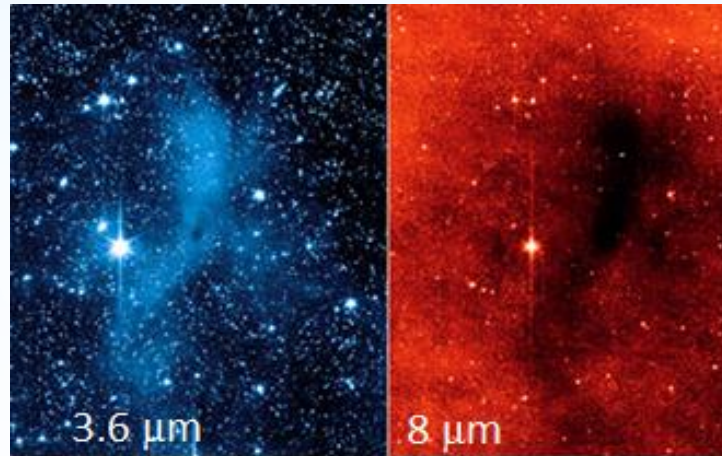
# 1. Effondrement d'un cœur dense

Cœurs denses



OBSERVATIONS : L. PAGANI

« Core Shine » => Pagani et al., 2007



Gaz poussière

Rayonnement => Effondrement

Turbulence ??

Perte Energie MAIS conservation du moment cinétique

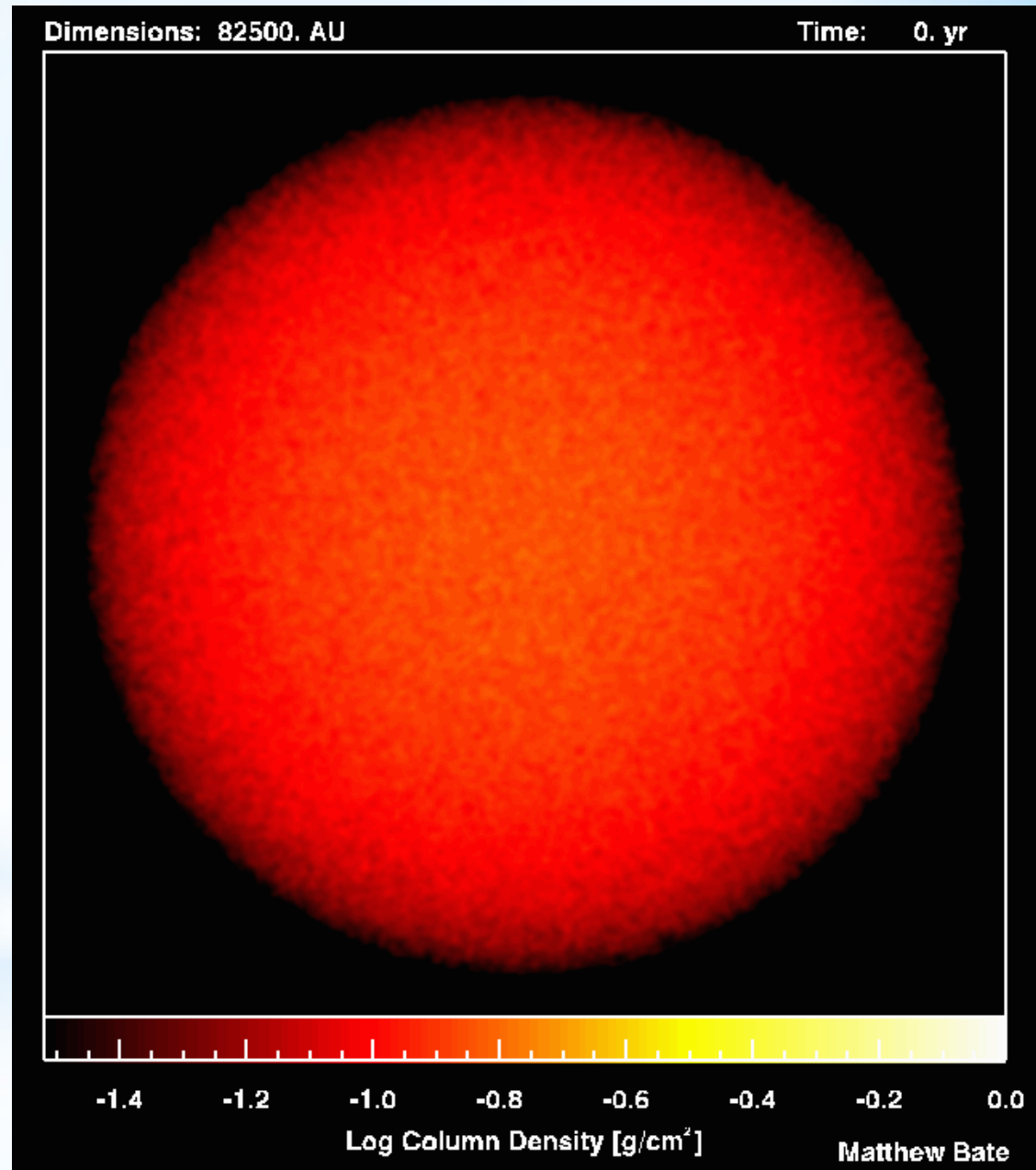
Champ magnétique

L'effondrement du nuage va donner lieu à la naissance de dizaines à centaines d'étoiles

Simulation  
hydrodynamique 3D  
de formation d'étoiles  
en amas.

Point de départ: une  
sphère de gaz

Bate, 2002





# Pourquoi se forme-t-il un disque ?

Energy dissipation (radiation):

E decrease => C decrease => H decrease

+ Inward mass flow ( $E = -G\Sigma/2R$ )  
(Mass Flux =  $-3\pi\nu\Sigma$ ,  $\nu$  = viscosity)

BUT

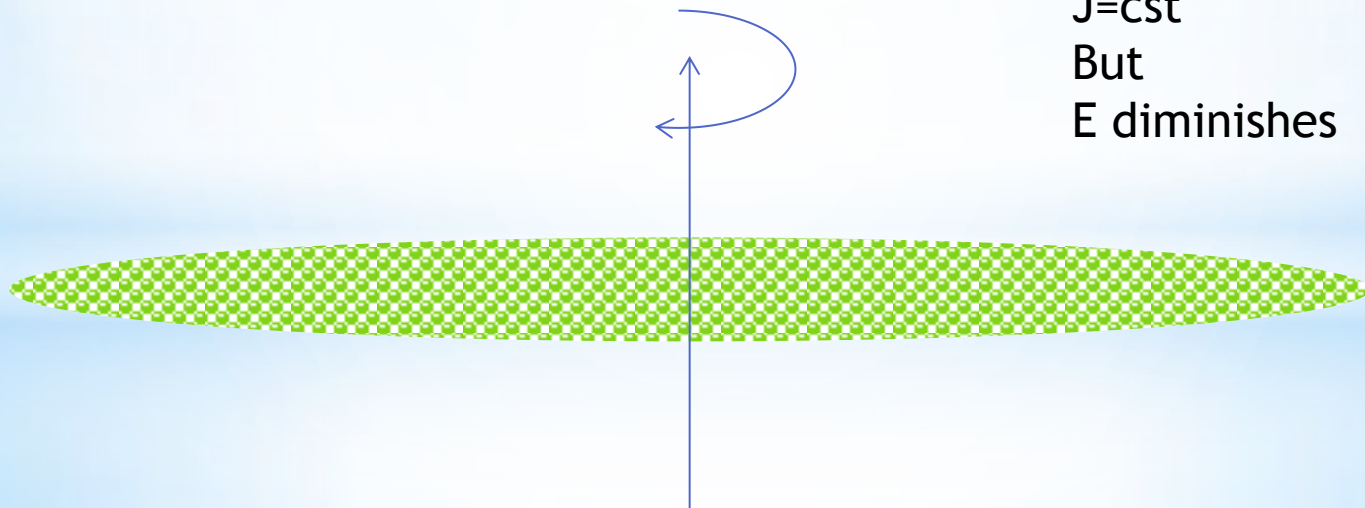
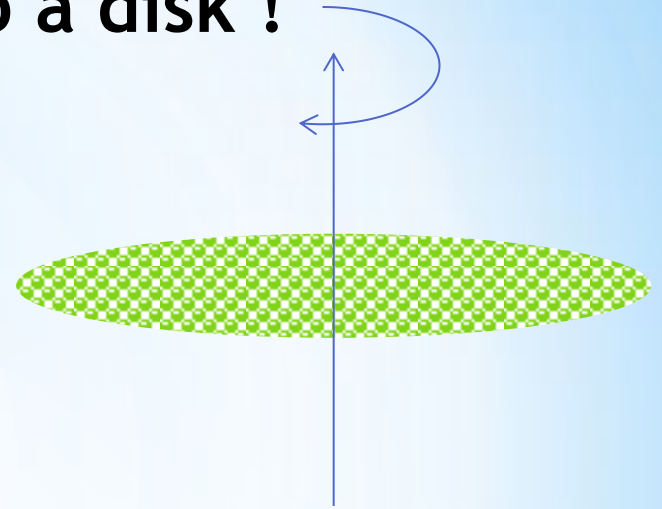
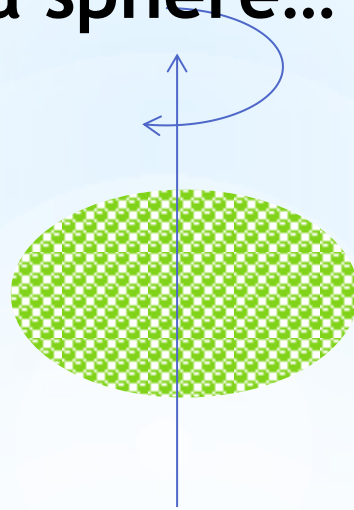
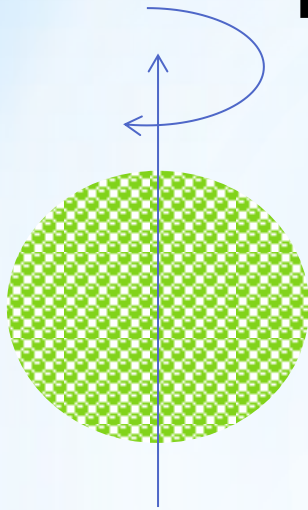
The angular momentum is conserved

$$J = \sqrt{GMR}$$

=> Only solution : the systems spreads !



# From a sphere... to a disk !



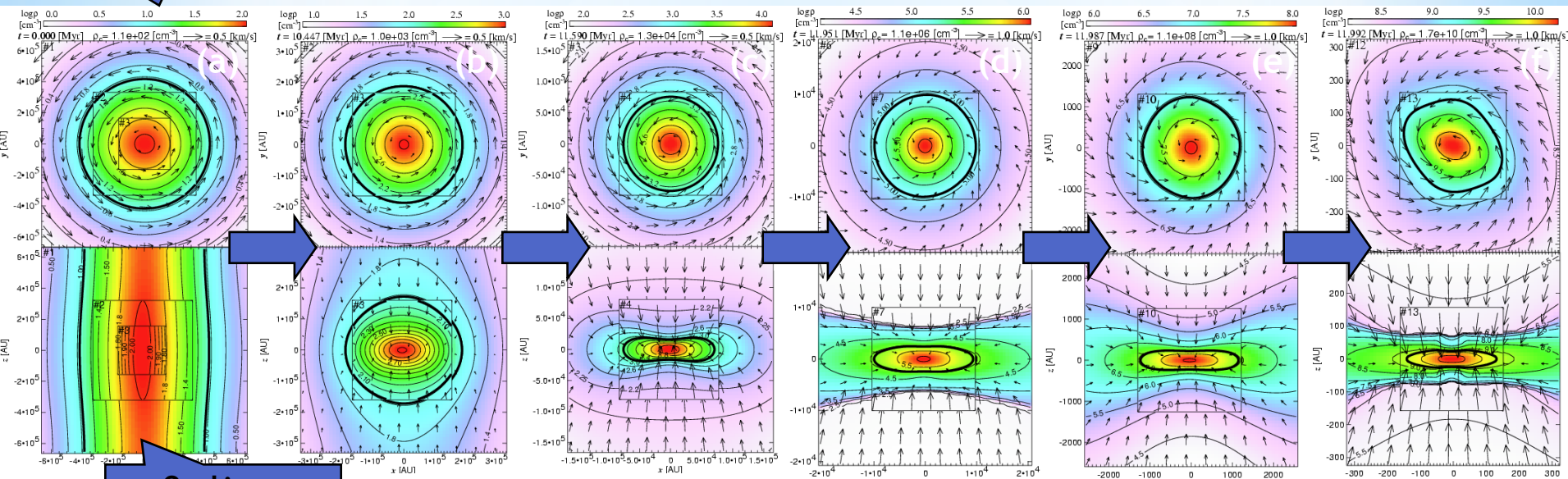
$J = cst$   
But  
E diminishes

Flattenning timescale = cooling timescale due to radiation

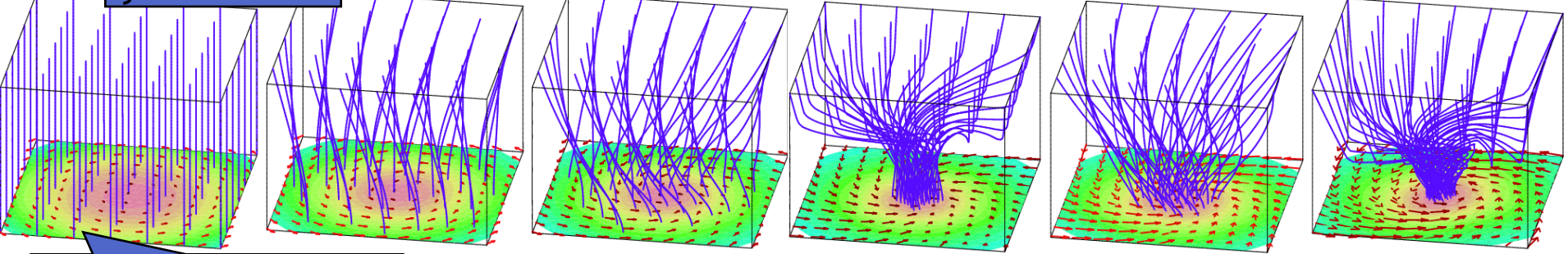
# 4. Results

★ Evolution in the isothermal phase  
 model of  $\alpha=0.01$ ,  $\omega=0.5$ ,  $A_0=0.01$

z=0 slice

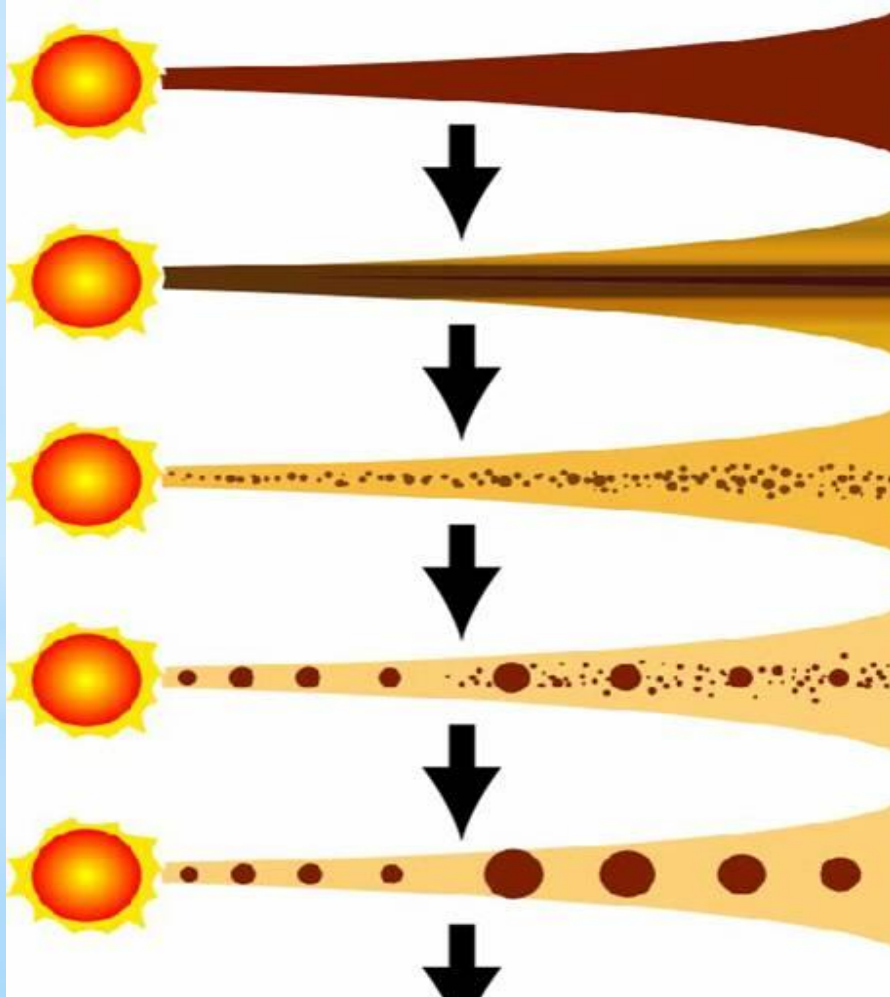


y=0 slice



magnetic field line

- ◆ Density :  $10^2, 10^3, 10^4, 10^6, 10^8, 10^{10} \text{ cm}^{-3}$  The scale is different in each panel
- ◆ Grid : L=1, 2, 3, 6, 9, 12
- ◆ Color : gas density



Disque de gaz + grains



Les grains sédimentent

Planétésimaux

Embryons planétaires

Planètes

## Épaisseur du disque

Accélération de gravité à la distance R

$$A = GM^*/R^2 = R \Omega_k^2 \Rightarrow Az = R \Omega_k^2 \sin(i) = \Omega_k^2 H$$

### Épaisseur du disque

Accélération verticale  $\sim \Omega_k^2 Z \Leftrightarrow$

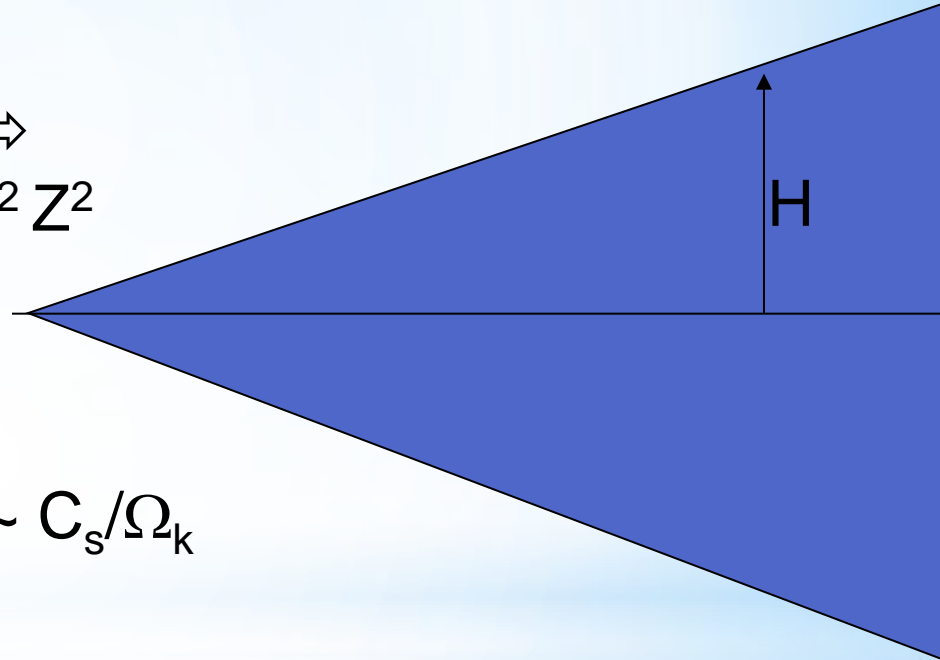
Energie potentielle  $E_p = 1/2 \rho \Omega_k^2 Z^2$

Energie cinétique  $E_c = 1/2 \rho C_s^2$

$E_{cinétique} = E_{potentielle} \Rightarrow H \sim C_s / \Omega_k$

Noter que  $H \propto r^{1.5}$  si  $C_s = \text{cst}$

À 1 AU :  $H \sim 10^{10} \text{ m} \sim 0.1 R \Rightarrow H \ll R$  dans le disque



# Un disque évasé à cause du chauffage de l'étoile:

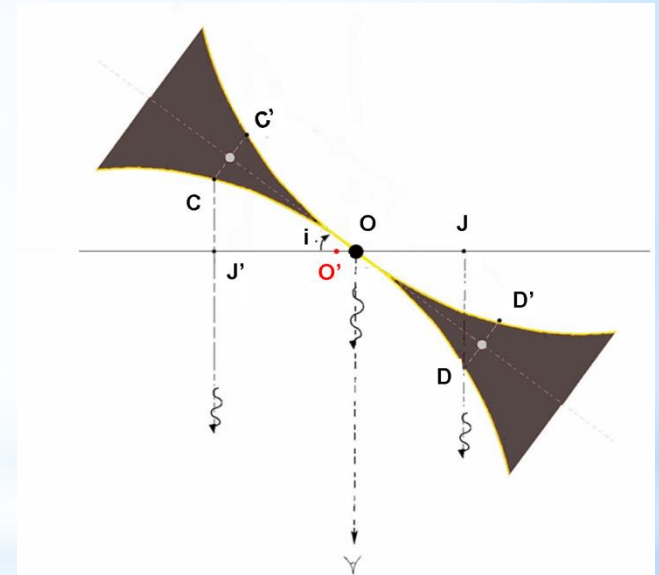
Energie absorbée par le disque  $\sim 1/R^2$

Energie réémise par refroidissement de corps noir  $\sim T^4$

On trouve que la température  $\sim 1/R^{1/2}$

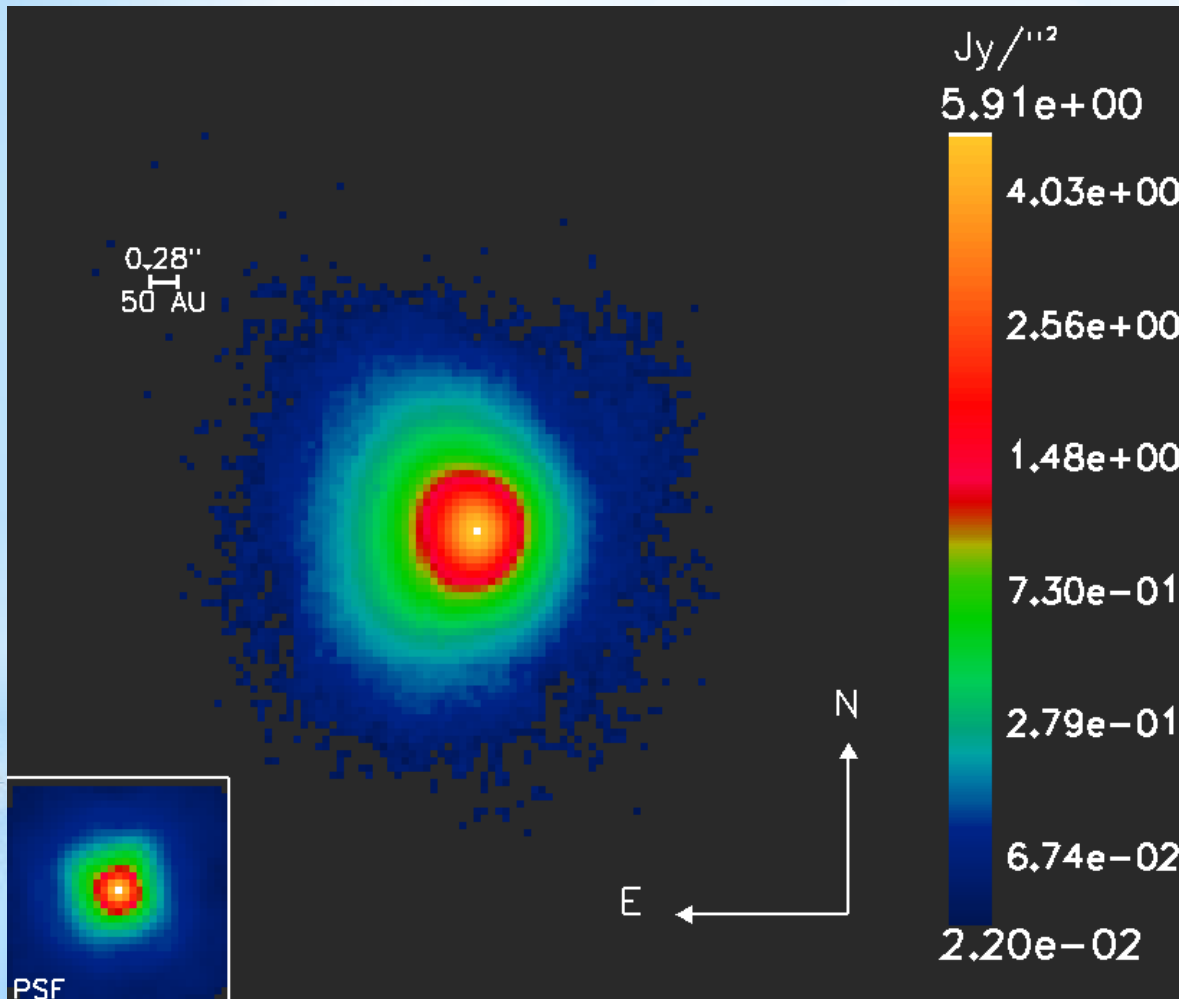
Or  $C \sim T^2$  et  $H = C / \Omega(r)$

On trouve que  $H / R \sim R^{1/4}$

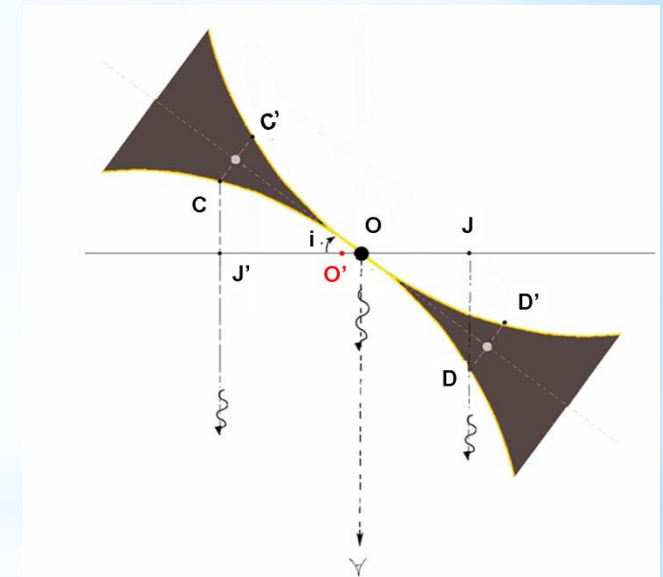


# Une observation : HD97048

Lagage, Doucet, Pantin, Habart, Duchêne, Pinte, Charnoz, Pel  
Science, Dec. 2006



Interprétation géométrique

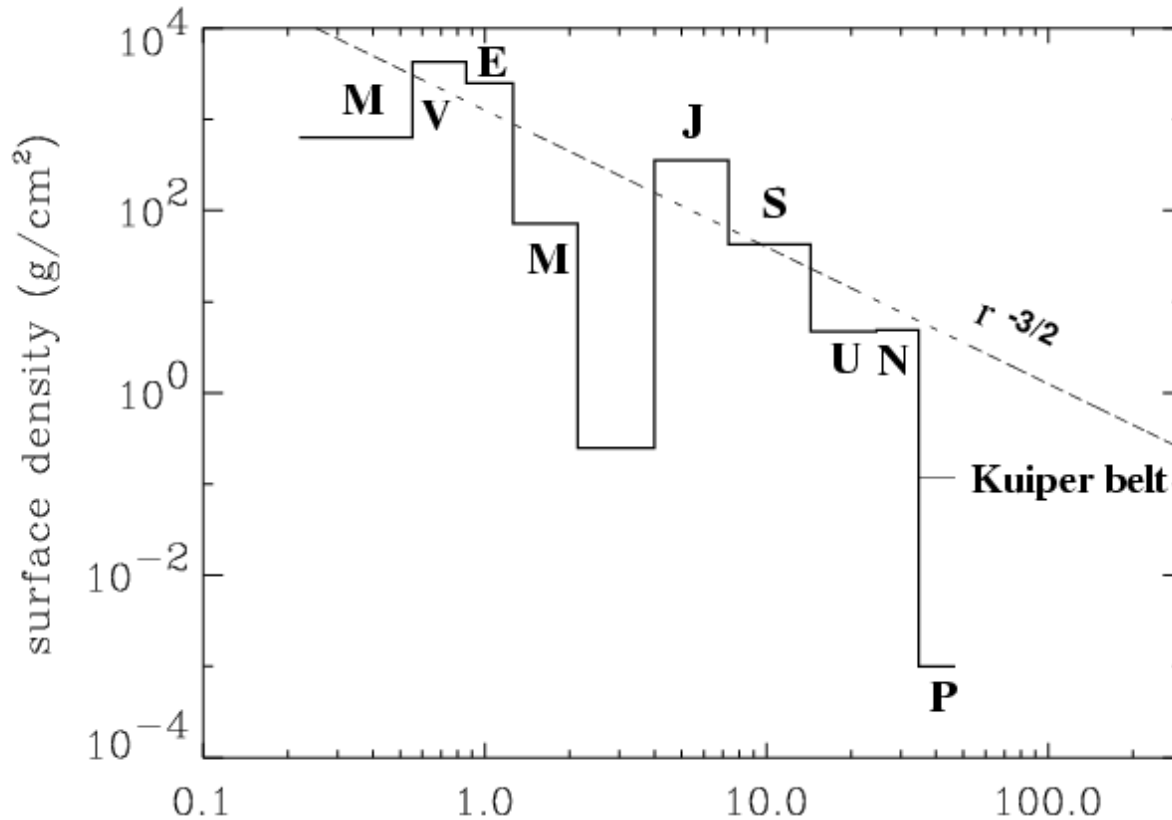


$$H/R \propto R^{0.26} \quad !!!$$

[Animation](#)

# Masse de la nébuleuse primordiale :

« La nébuleuse de masse minimale »



(Hayashi 77)

À 1 UA :

$T \sim 700$  K,  $P \sim 1$  Pa

$\rho \sim 10^{-7}$  kg/m<sup>3</sup>

$C_s \sim 2000$  m/s

Densité de surface:

$$\Sigma \propto r^{-\frac{3}{2}}$$

Environ 20000 kg/m<sup>2</sup> à 1 AU



Silicates et métaux

Silicates, métaux  
et glaces diverses

Disque interne chauffé par le jeune soleil.  
Les glaces et gaz ne peuvent condenser:  
seules les roches subsistent.

Mercury

Venus

Earth

Mars

Jupiter

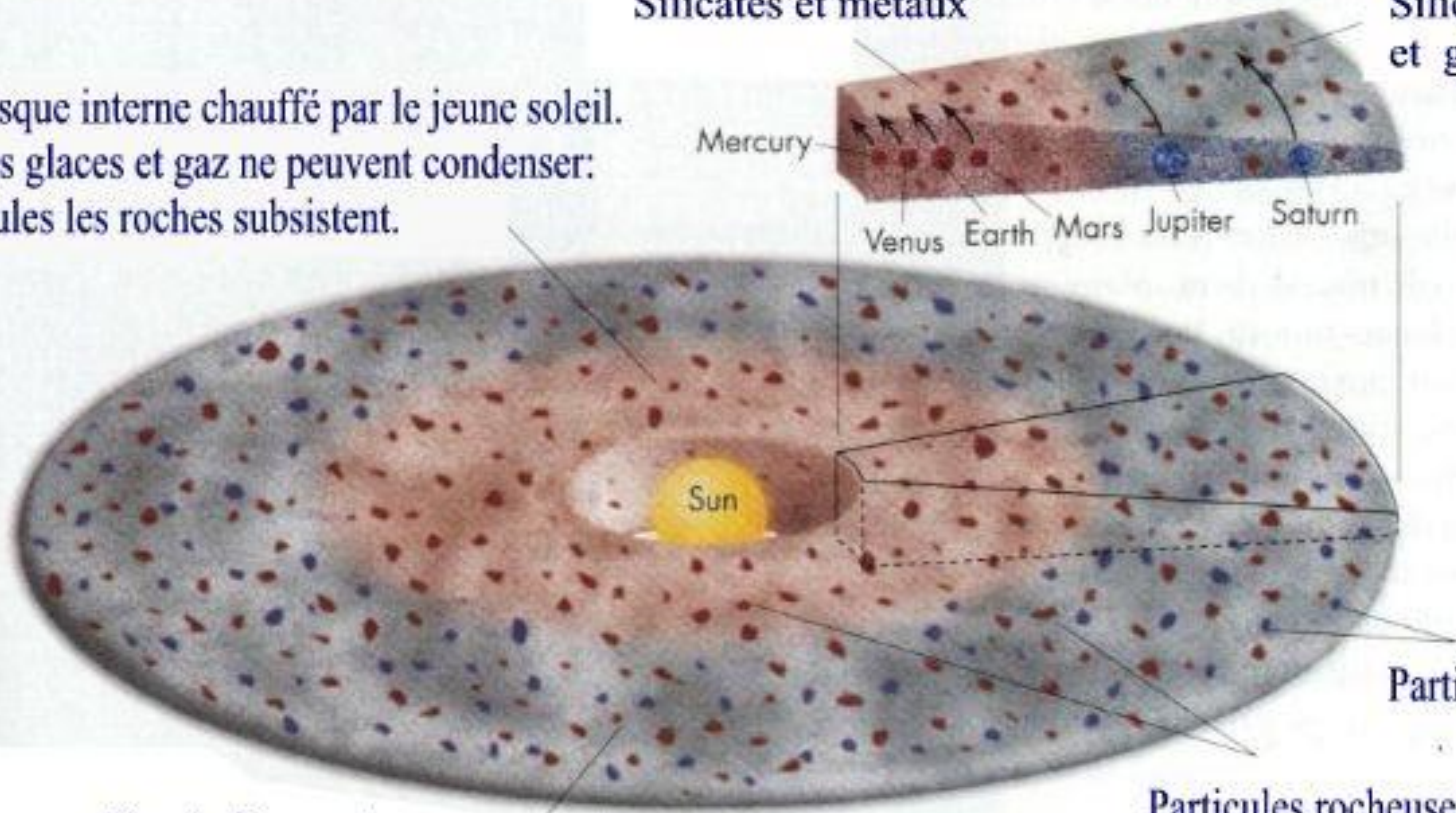
Saturn

Sun

Particules de glaces.

Particules rocheuses

Dans le disque externe,  
plus froid, les glaces subsistent.



# Origine de la différenciation chimique du Système Solaire

C'est l'histoire de sa température

⇒ Condensation des espèces chimiques

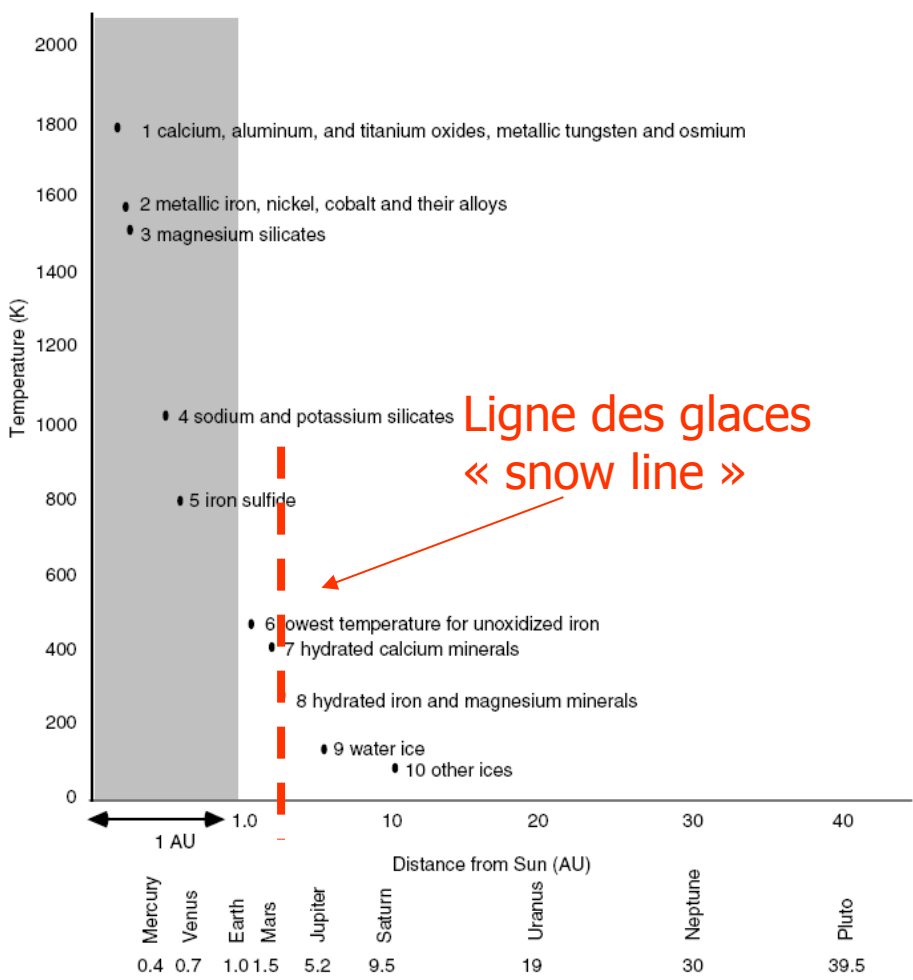
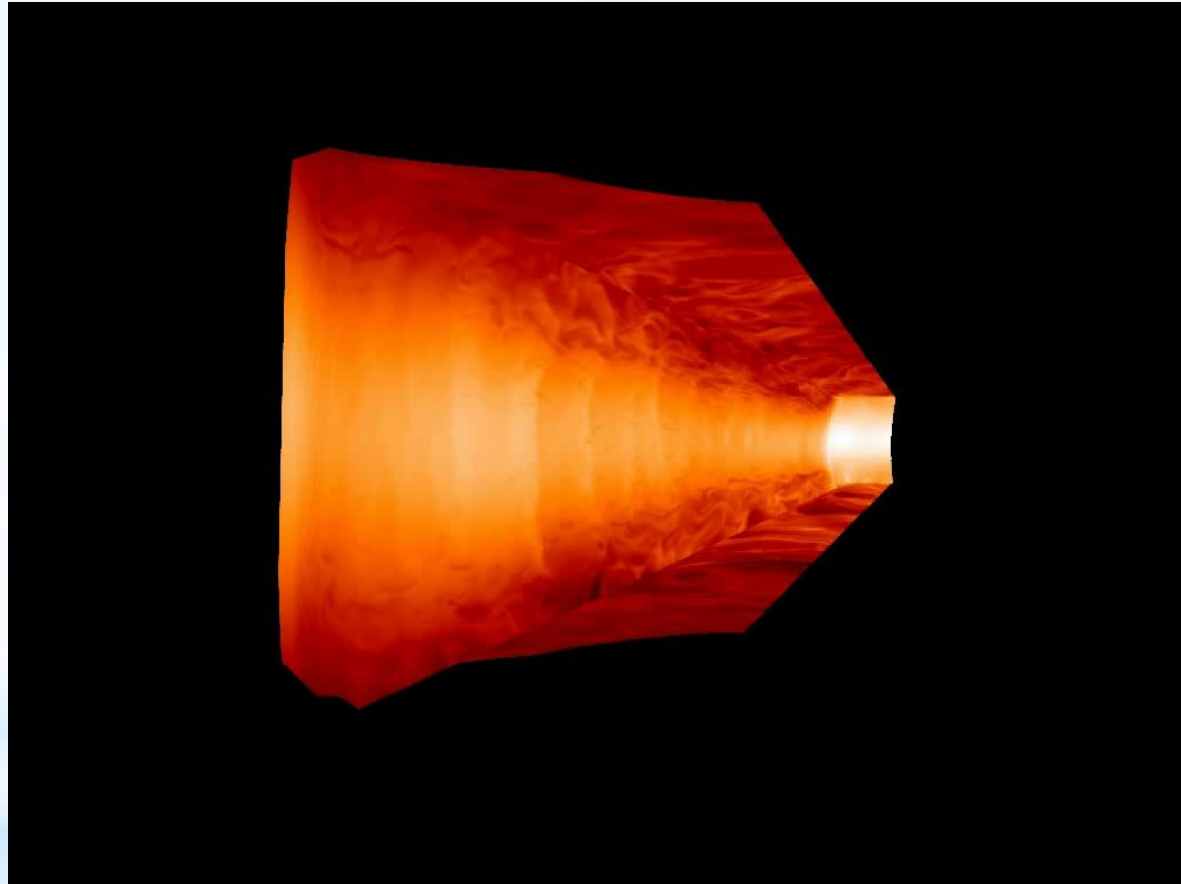


Figure 2. Temperature (K) and distance from sun (AU) at which major planetary constituents would condense from primordial solar nebula. Note. [Note that the shaded region on the horizontal axis represents only 1.0 AU, whereas the other axis units are 10 AUs.] The data in Figure 2 are from *The New Solar System* by J. K. Beatty & A. Chaikin, (Eds.) 1990, Cambridge, MA: Cambridge Publishing Press; *Geochemistry Pathways and Processes* by S. M. Richardson & H. McSween Jr., 1989, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; and *Solar System Evolution: A New Perspective* by S. R. Taylor, 1992, Cambridge, MA: Cambridge University Press.

## Variation spatiale de la température

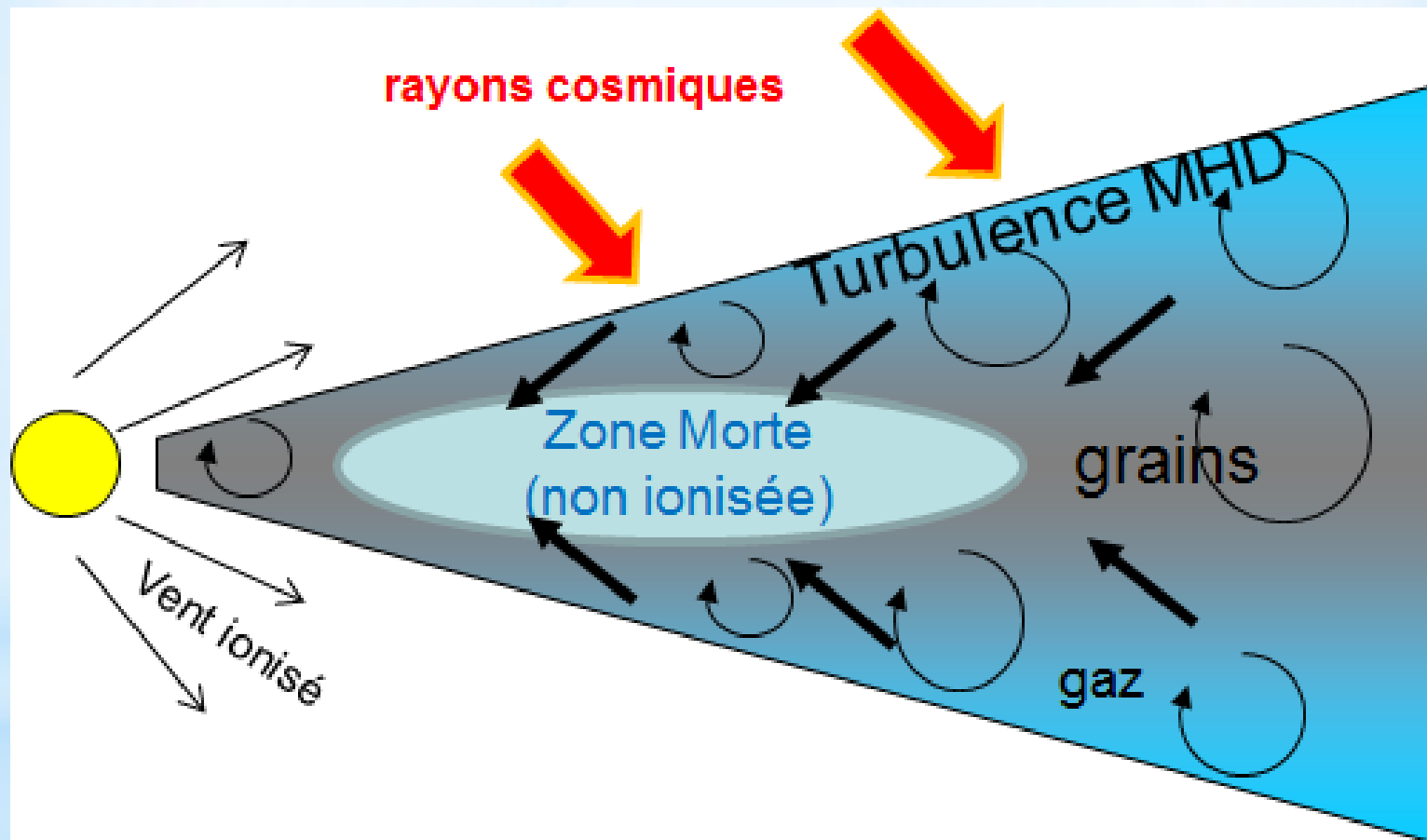
# Un disque turbulent à cause du champ magnétique



Turbulence : Etalement et chauffage du disque...

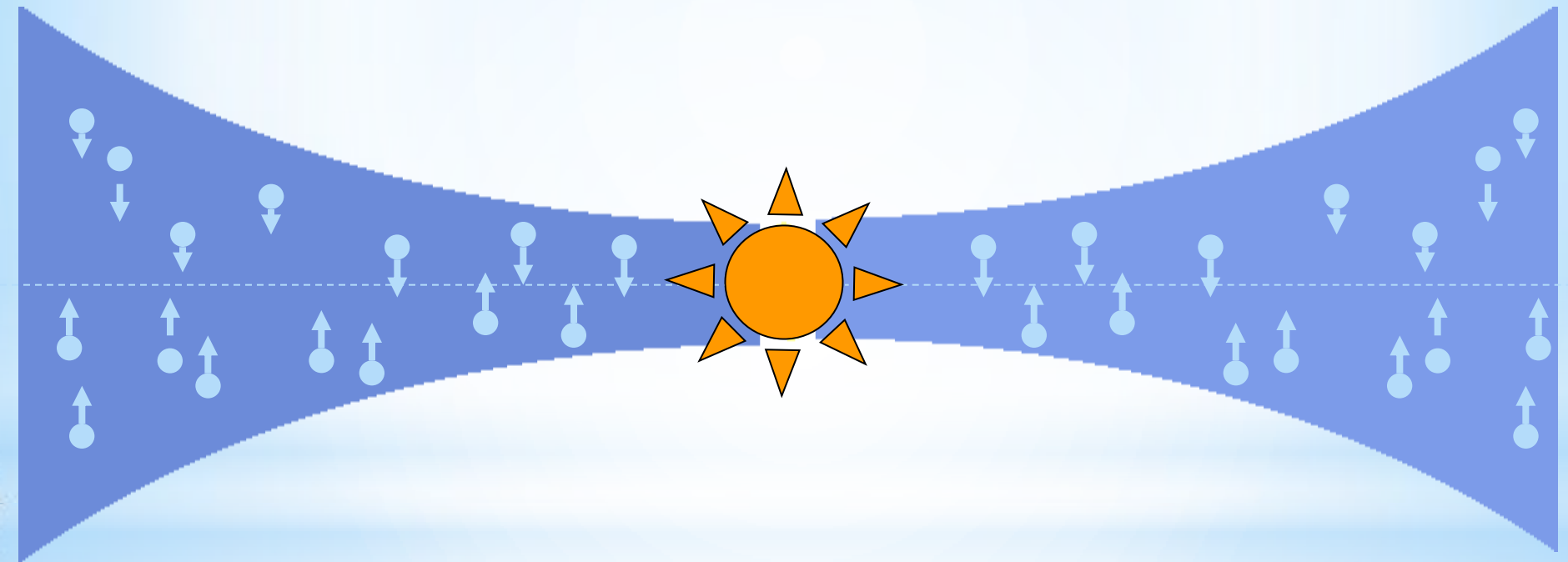
Taux d'accrétion sur l'étoile : entre  $10^{-5}$  et  $10^{-10}$  masses solaires /an

## Présence potentielle de zones mortes



Les grains dans le disque :

Les grains sédimentent dans le plan médian du disque



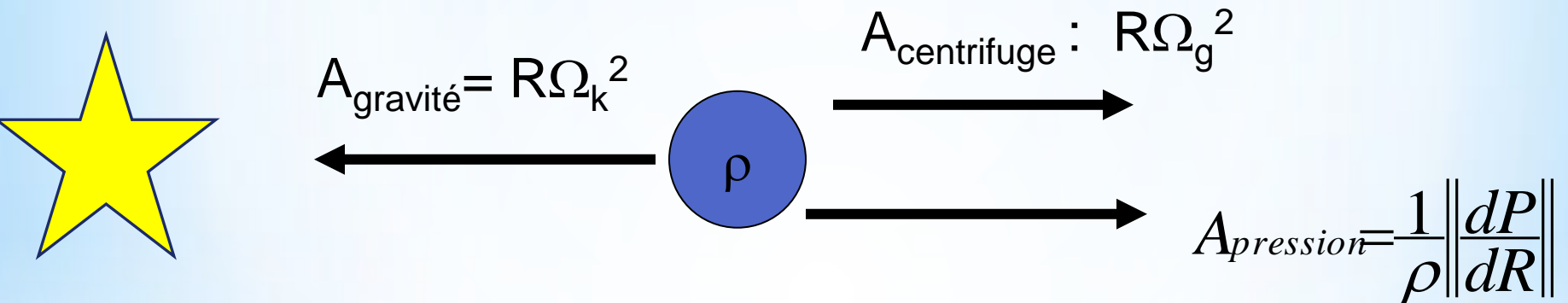
Pourquoi ?

Raison : vitesse de rotation du gaz !

# Le disque de gaz tourne + lentement que les grains !

A quelle vitesse tourne le gaz ( $\Omega_g$ ) ?

*La pression contrebalance la force de l'étoile !!*

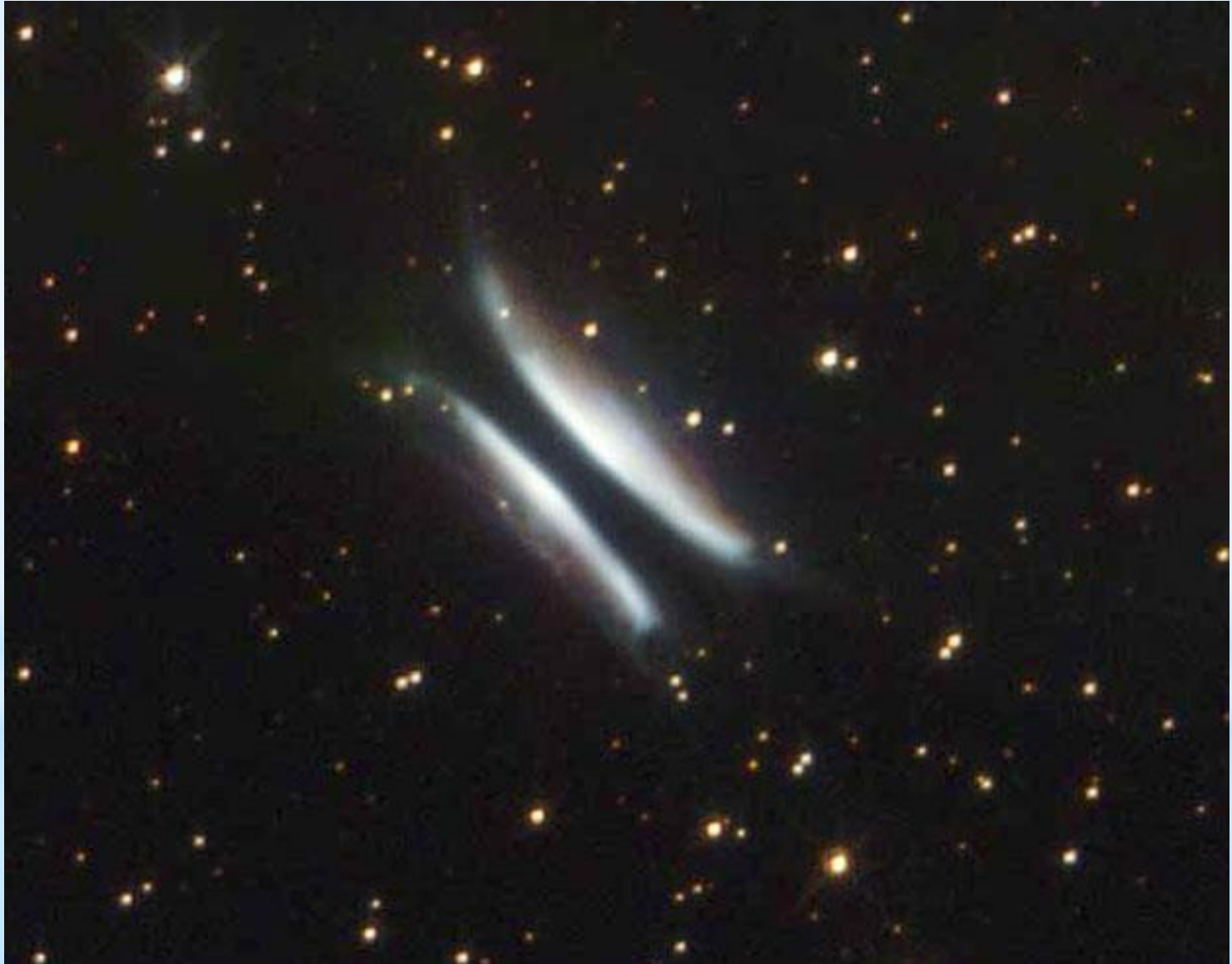


$$\Rightarrow \Omega_g^2 = \Omega_k^2 - \frac{1}{\rho R} \left\| \frac{dP}{dR} \right\|$$

$$\Omega_k = \Omega_g(1-\eta) \text{ avec } \eta \sim 5 \cdot 10^{-3}$$

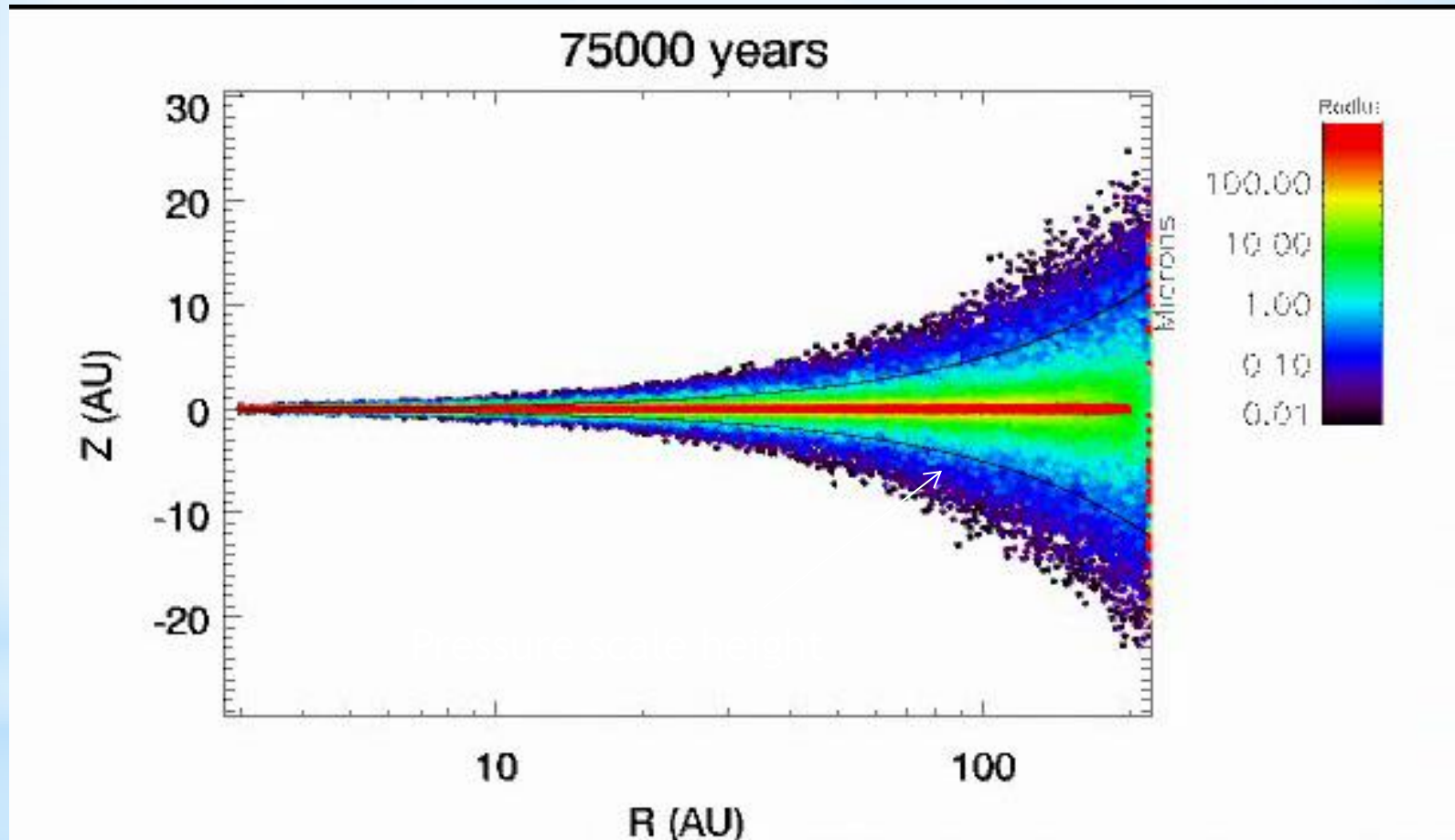
- ⇒ Migration des particules vers l'étoile
- ⇒ Sédimentation dans le plan médian

Sédimentation visible !!



# Evolution des poussières

DUST : Sedimentation + MHD turbulence PAS DE CROISSANCE



Particles' sizes extend  
From 0.01 microns  
To 100 microns

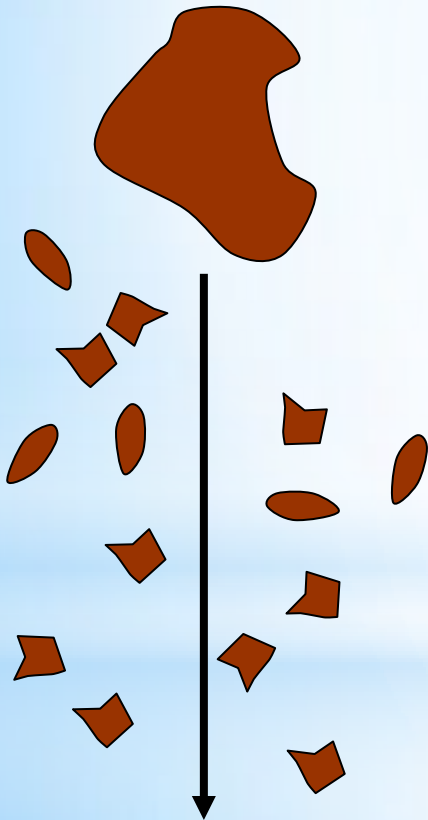
200 K particles

Particles > 80 microns  
Are cleaned rapidly  
From the disk

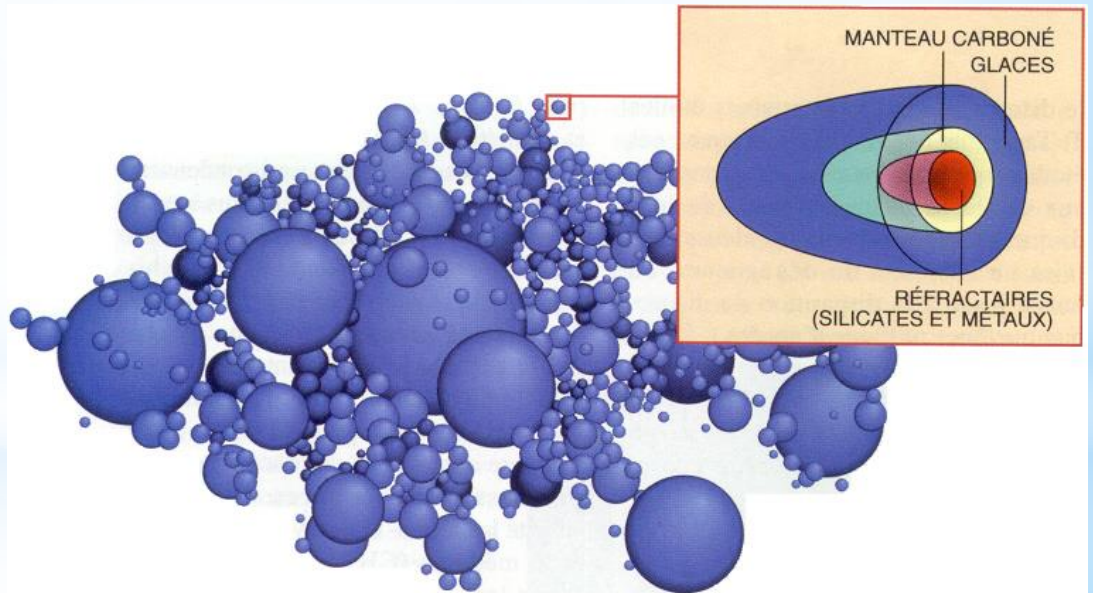


## Pendant la chute:

Les plus gros flocons rattrapent les plus petits et les absorbent



Collages de surfaces : agrégats fractals



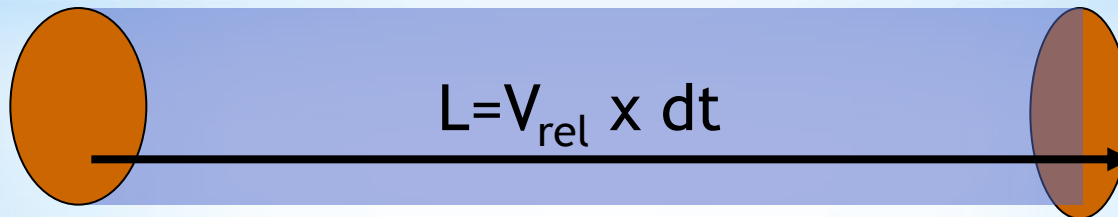
## CROISSANCE DES GRAINS

Mais en fait ce temps est beaucoup plus court car pendant leur chute les grains grandissent (  $r_p$  augmente)

En effet, les collisions entre grains font grandir la taille des grains .... **A quelle vitesse ??**

Masse accumulée en un temps  $dt$

$$dm = \rho \pi r_p^2 V_{rel} dt$$



$$\frac{dm}{dt} = \rho \pi r_p^2 V_{rel}$$

Densité de  
solide =  $\alpha \rho_{\text{gaz}}$

Section efficace

$V_{\text{rel}} \sim$  Vitesse  
d'agitation moléculaire

$$V_{\text{rel}} \sim C_s / (m/m_{\text{h}_2})^{1/2}$$

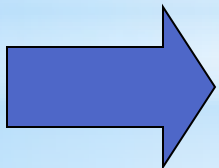
# CROISSANCE DES GRAINS

d'où :

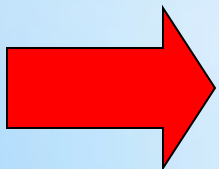
$$\frac{dr}{dt} = \alpha \frac{\rho_g}{\rho_s} \frac{C_s}{\sqrt{A}}$$

Avec  $A \sim$  masse molaire/masse hydrogène

On trouve  $dr/dt \sim 0.1$  à  $1$  cm par an !!

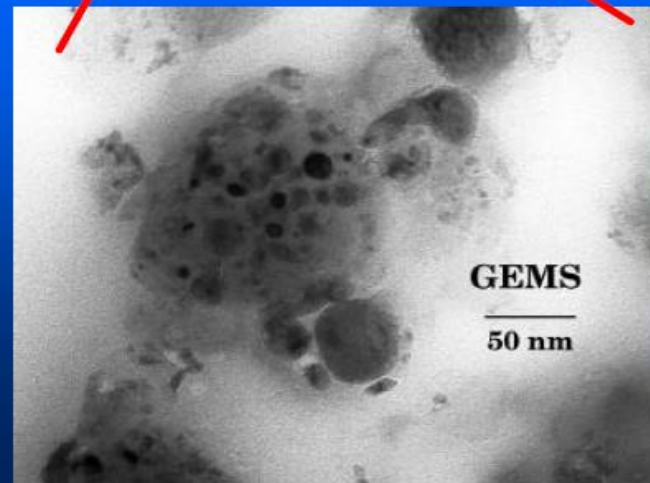
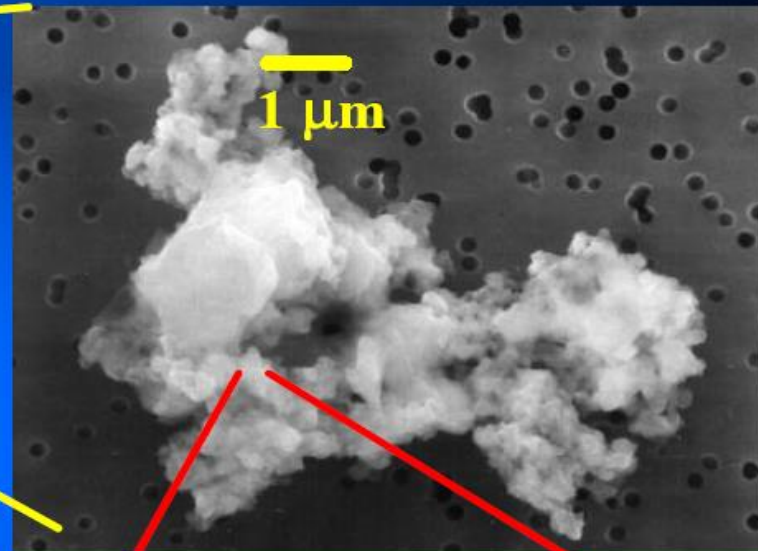
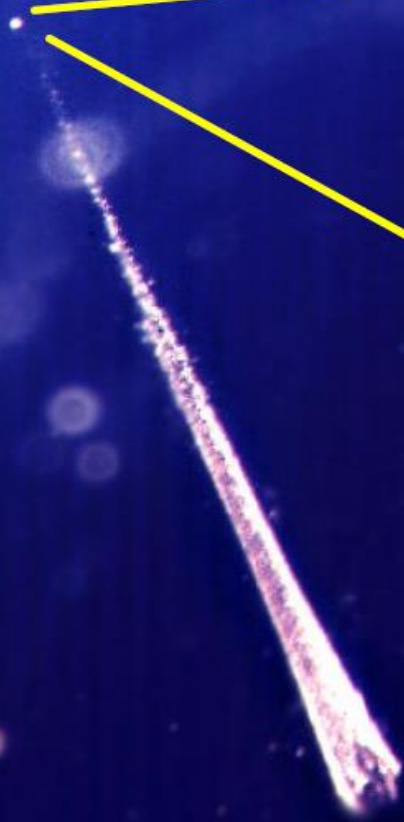


Le temps de sédimentation est réduit

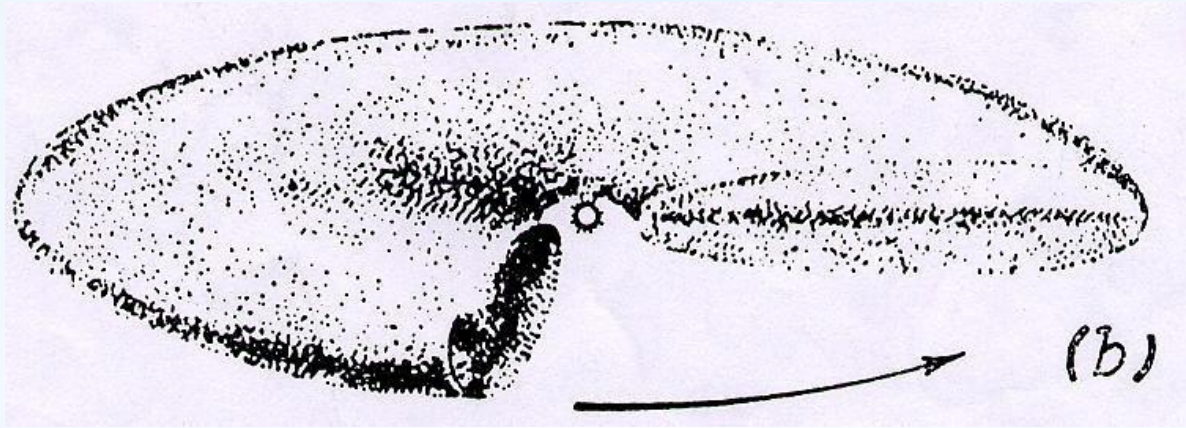


On atteint des tailles de l'ordre du cm au m

**Interplanetary dust particles – collected in the stratosphere**  
→ some of cometary origin



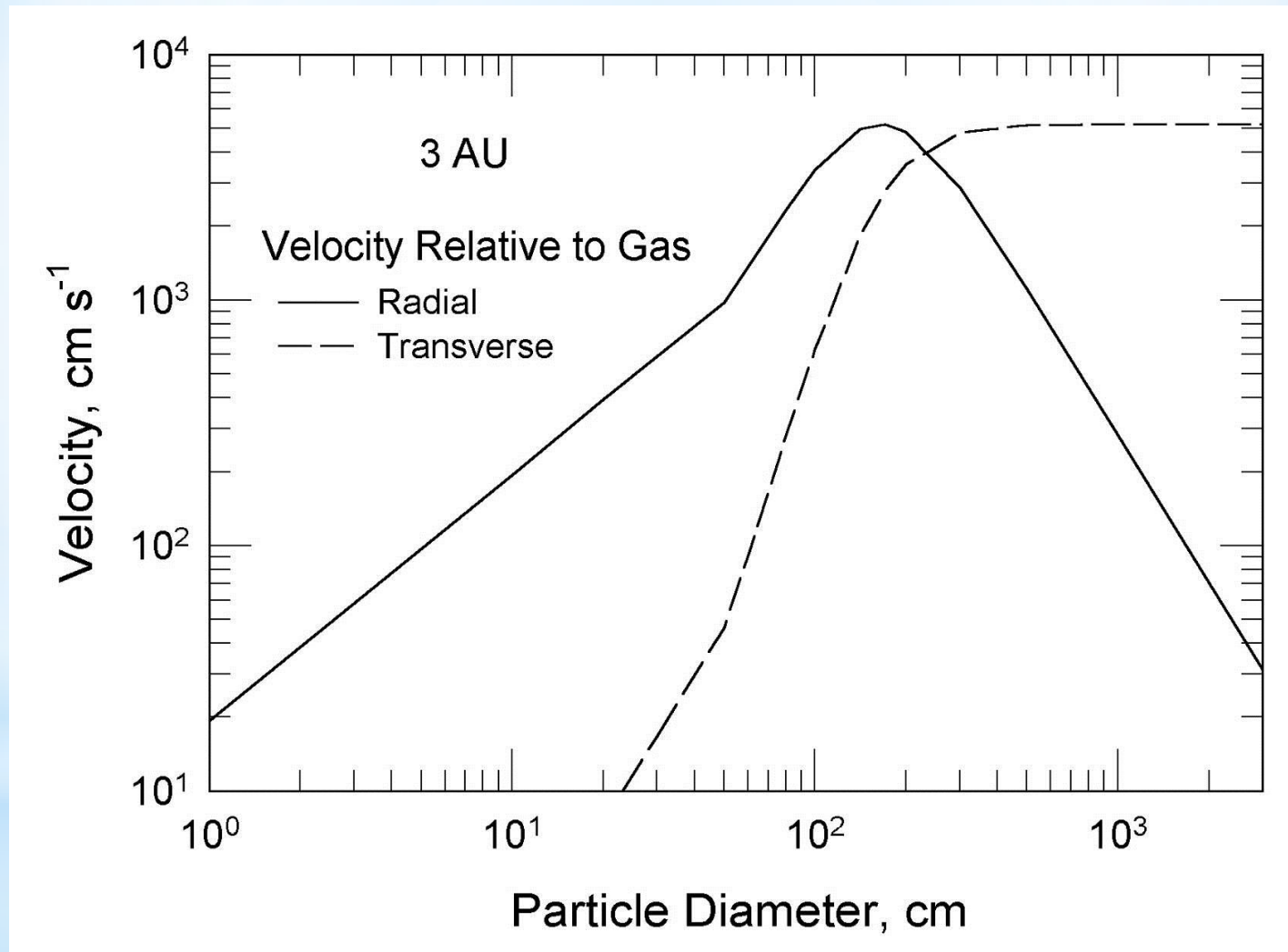
# MIGRATION RADIALE DES GRAINS



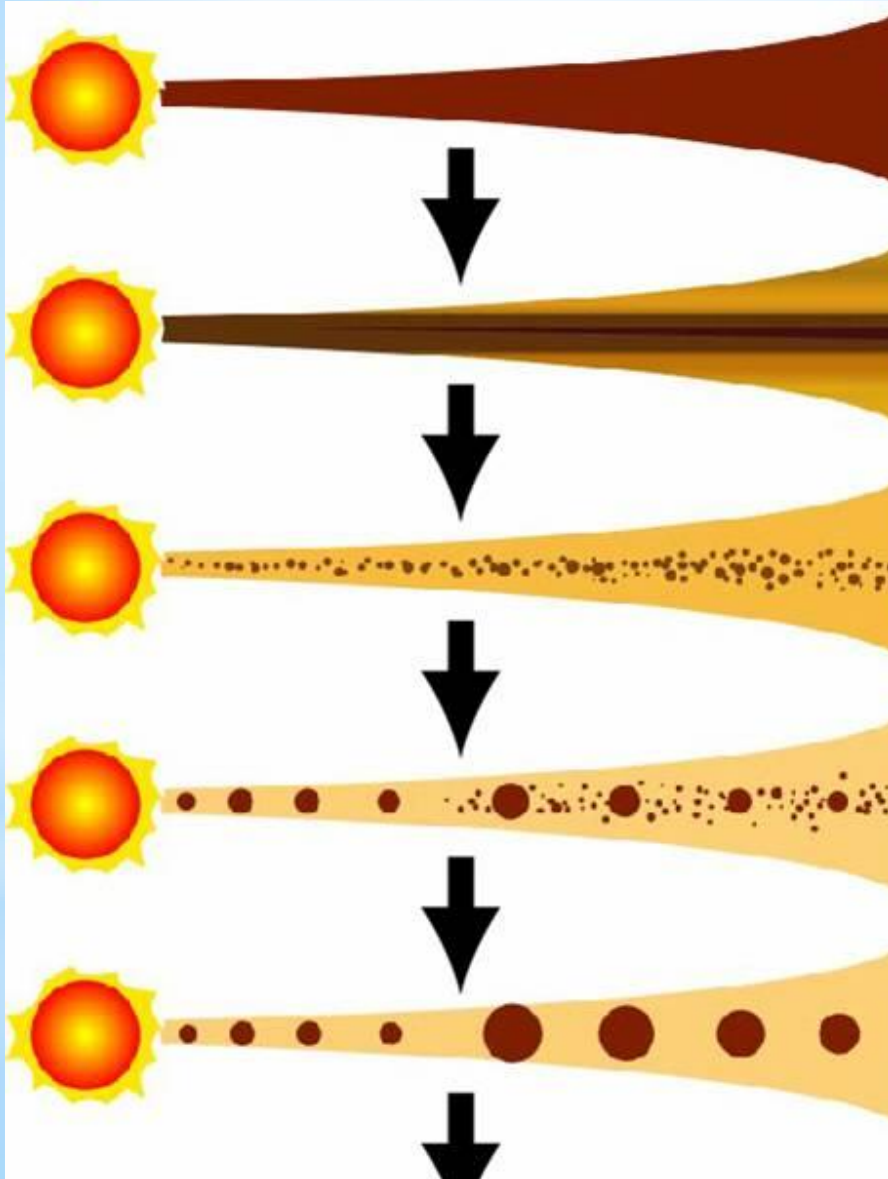
Les grains frottent contre le gaz  
=> ils perdent de l'énergie  
=> Ils migrent

A quelle vitesse ?

# Problème de la barrière du mètre !!!



# Les 5 étapes de la formation planétaire



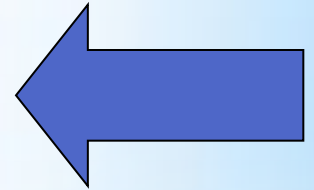
Disque de gaz + grains

Les grains sédimentent

**Planétésimaux**

Embryons planétaires

Planètes





# Formation des planétésimaux

il doit exister un Processus de collage TRES efficace  
« super-grains » de 10 km : PLANETESIMAU

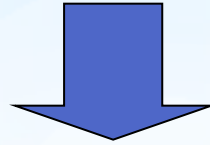


Croissance en turbulence  
(Cuzzi, Weidenschilling)

Croissance par instabilité  
gravitationnelle du disque de grains  
(Ward, Goldreich)

⇒ Aujourd'hui :  
Une sorte de mélange

$$\frac{E_T}{E_{grav}} \cdot \frac{E_K}{E_{grav}} < 1 \Rightarrow \frac{\Omega C_s}{G \pi \Sigma} < 1$$



Critère d'instabilité de Toomre

$$Q \equiv \frac{\Omega C_s}{G \Sigma} < \frac{\pi}{2}$$

$Q < 1$  : instable     $Q > 1$  : Stable

En posant  $Q < 1$  on en déduit une « densité de surface critique » pour déclencher l'instabilité gravitationnelle

« Taille des grumeaux » :  
Longueur d'onde de Jeans

$$\lambda \approx \frac{4\pi a^3 \Sigma}{M_*}$$

Pour les planètes géantes :

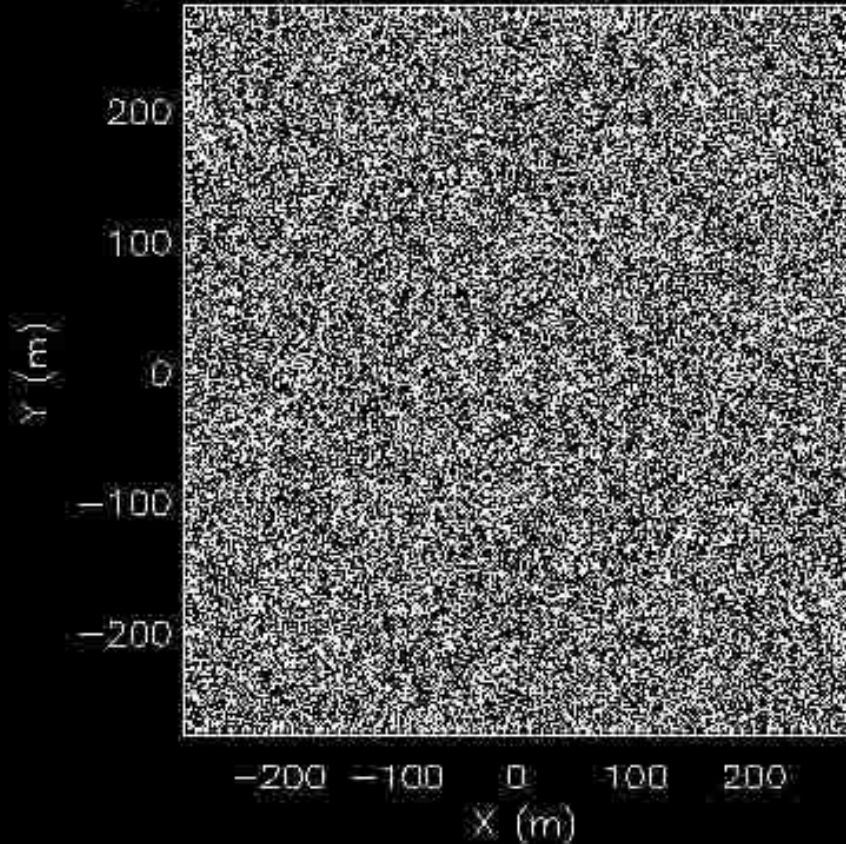
$$\begin{aligned} \rho_{cr} &= 2 \cdot 10^{-9} \text{ g/cm}^3 & H &= 10^{10} \text{ cm} \\ m &= 10^{21} \text{ g} & D &= 100 \text{ km}, & \rho &= 1 \text{ g/cm}^3 \end{aligned}$$

•  
*Dans la région des planètes telluriques*

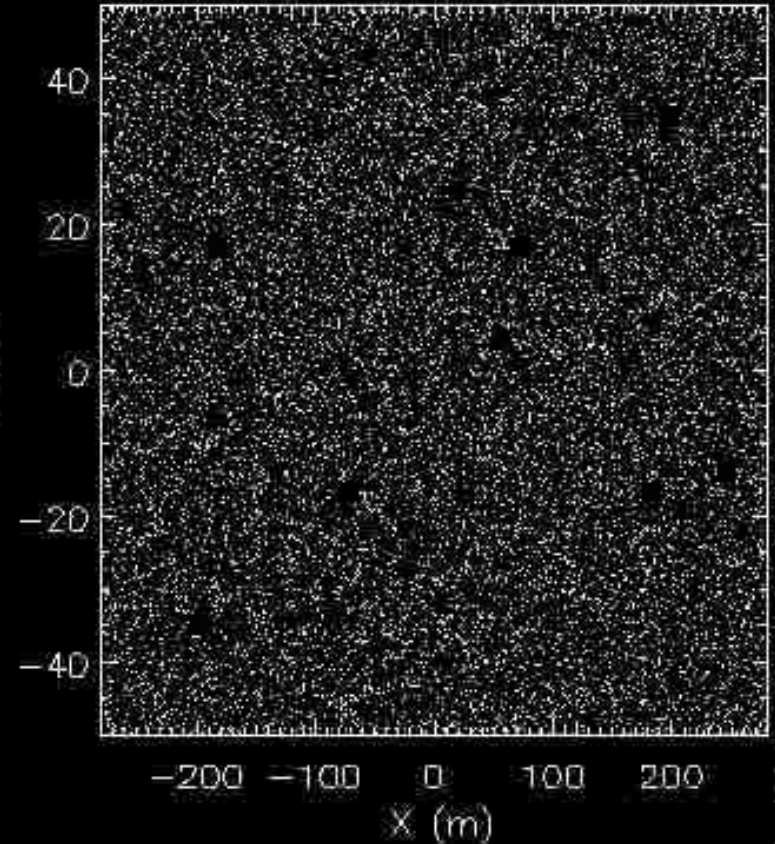
*$H\rho$  : comparable  $\rho$  : 100 fois plus grande  
corps de 5 km*

# Une instabilité gravitationnelle (idem anneaux de Saturne)

F ring,  $\tau=0.5$ ,  $\Sigma=60\text{g/cm}^2$ , 50000 part.

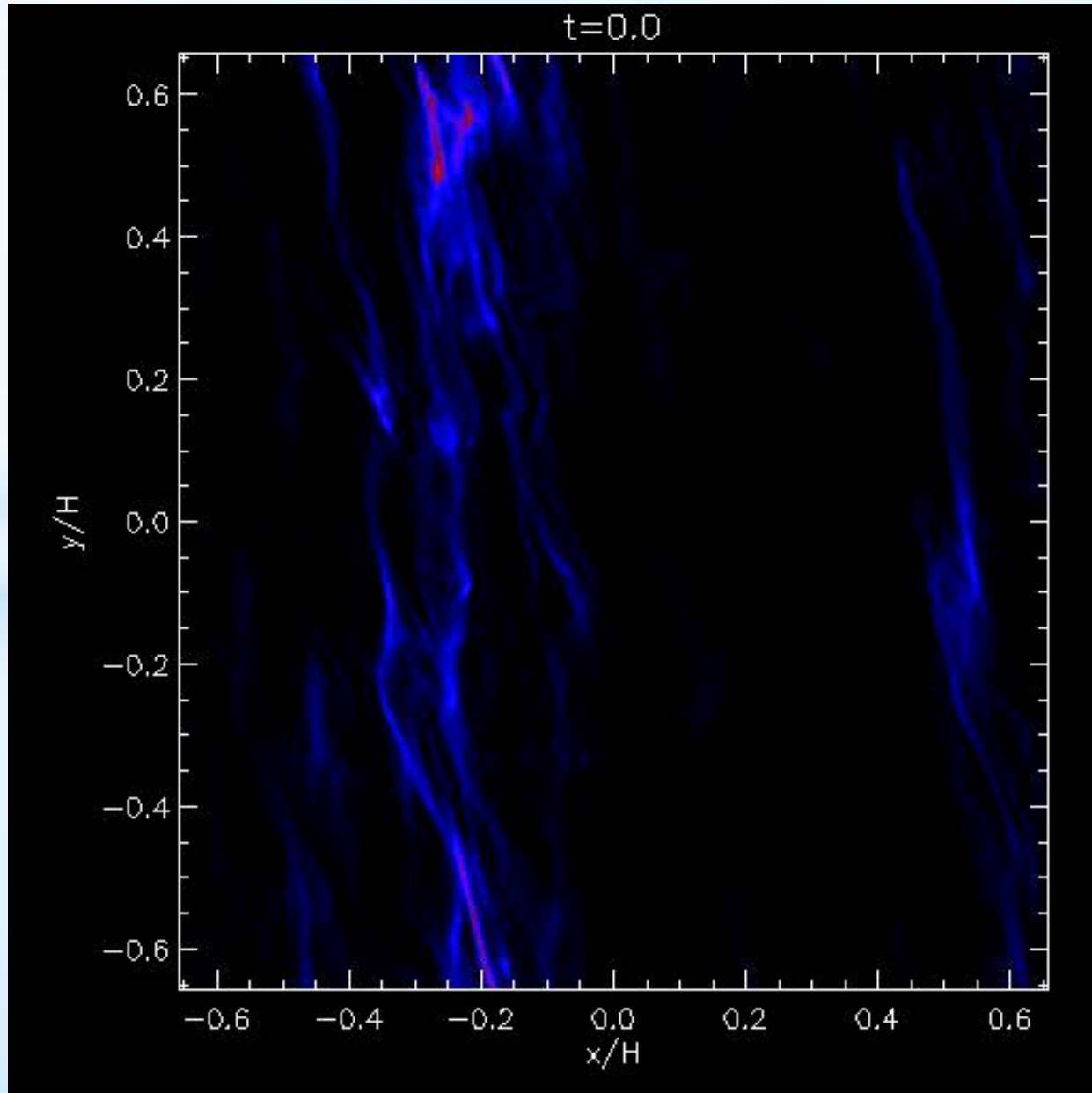


0.0020000000 Orbits

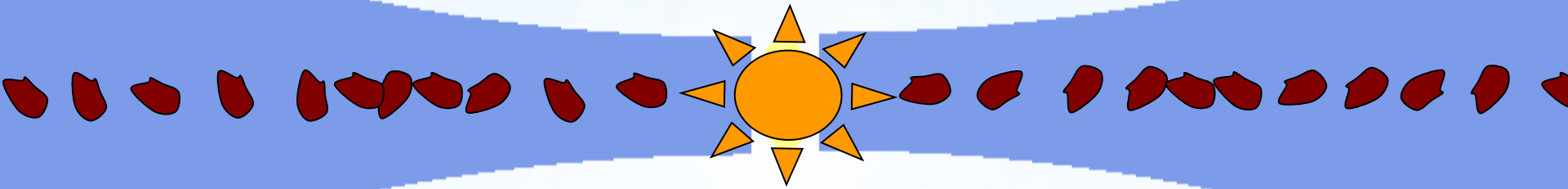


St. Charnoz & D. Ganem, AIM-Univ. Paris 7-CEA

Avec du gaz : Streaming instability + gravitational collapse (2007, Youdin)



# L'époque des planétésimaux

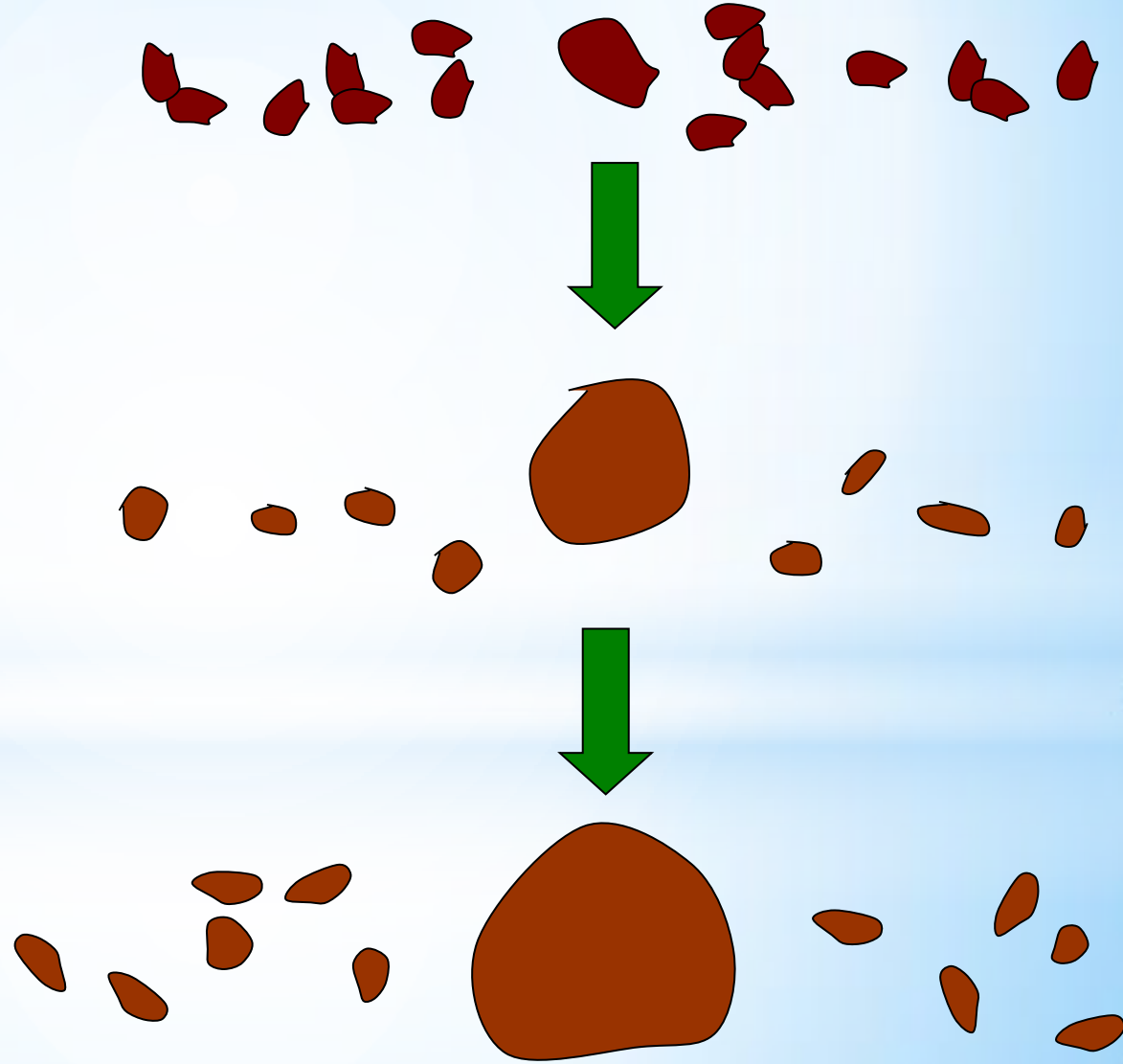


Croissance par collisions mutuelles

# ECOLE AMERICAINE :

Greenberg , Weidenschilling, Wetherill ...

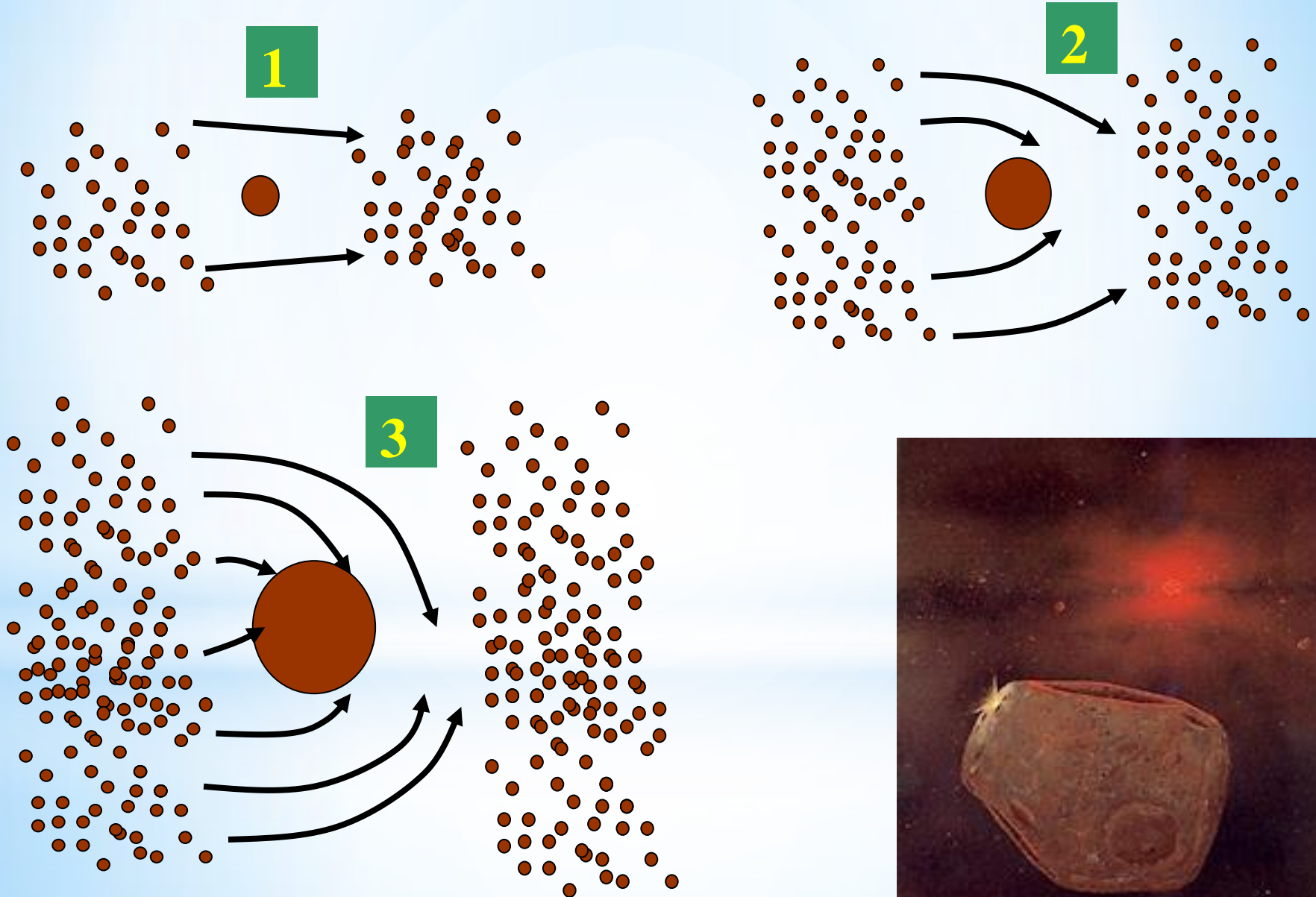
**Croissance par effet "Boule de Neige"**  
**"Les plus gros grandissent les plus vite"**



Mécanisme TRES  
rapide : 100,000 ans

# L'effet « Boule de Neige » »

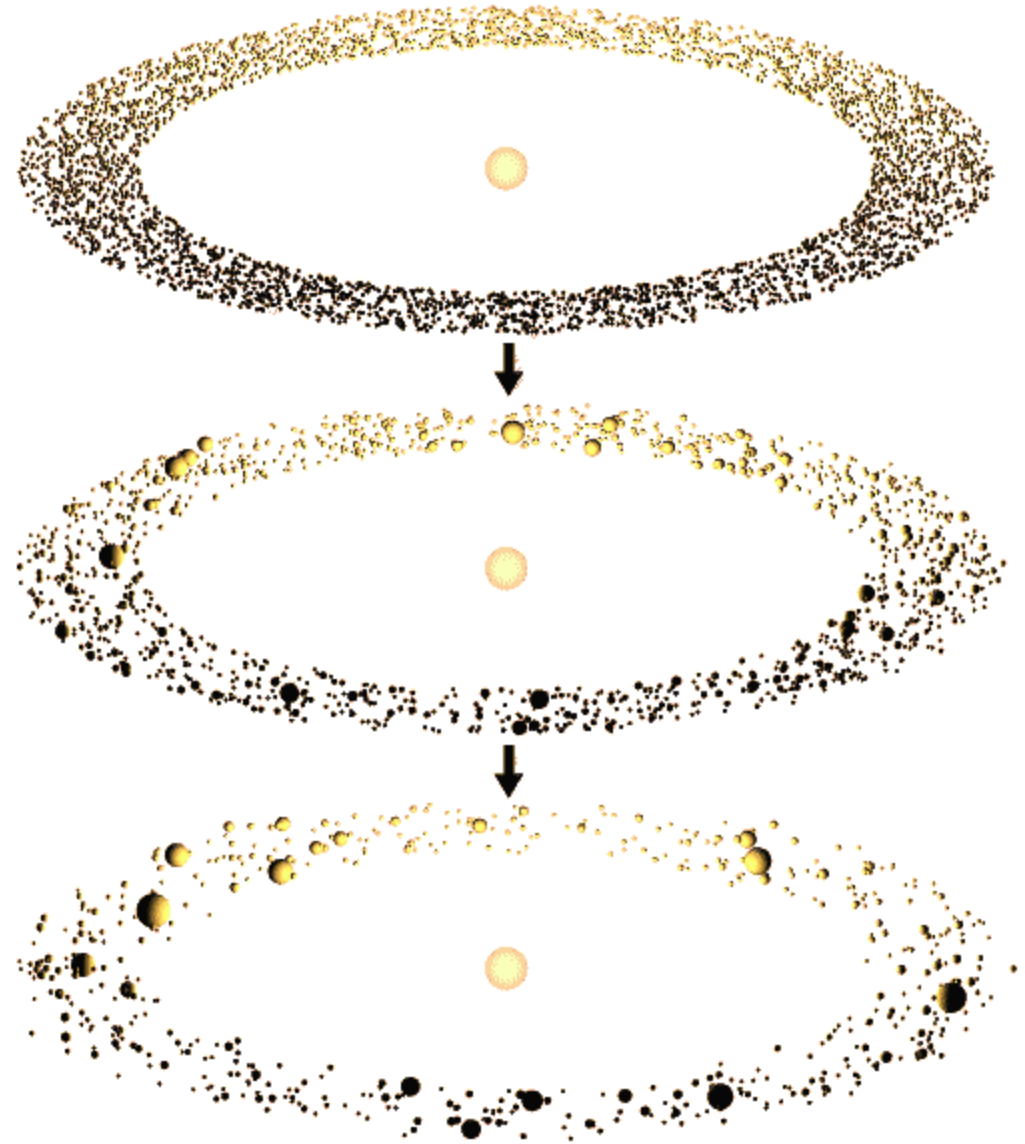
*Runaway Growth*

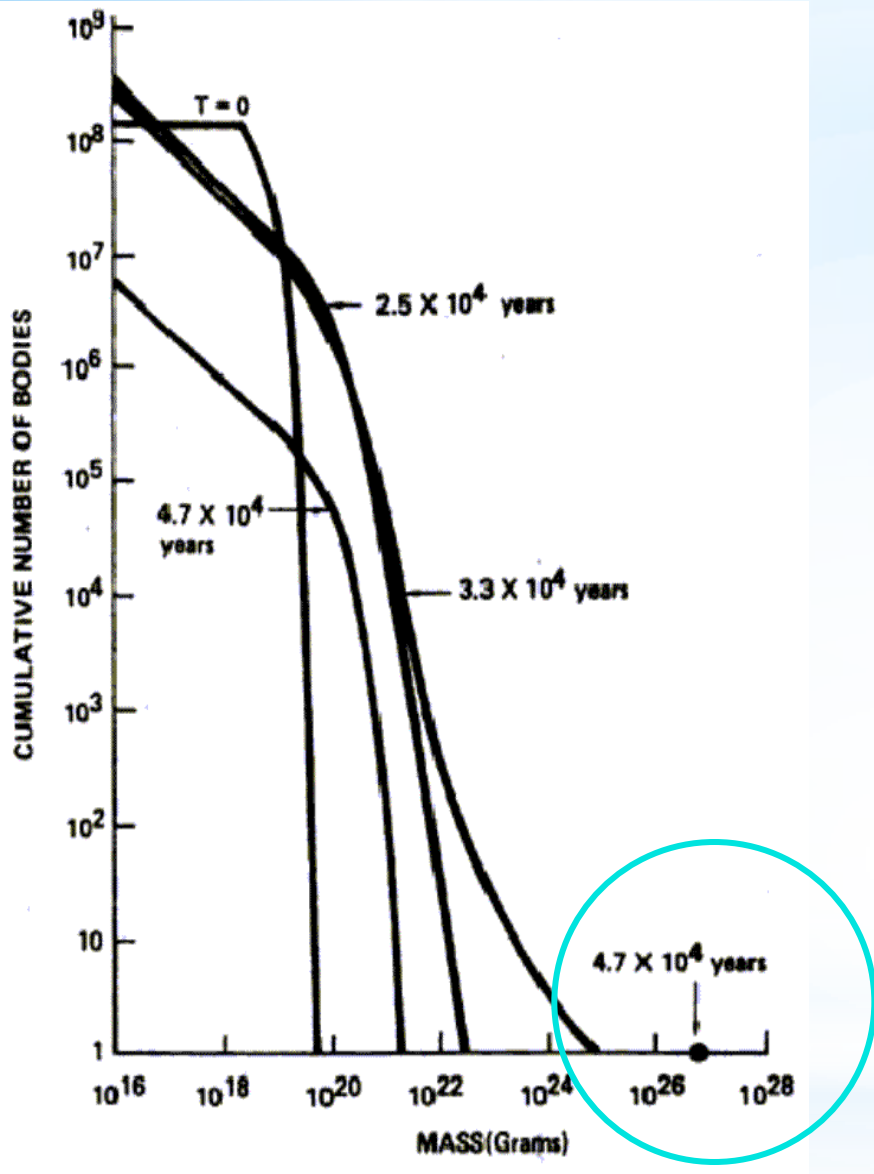




# Une simulation Numérique

**Apparition de  
protoplanètes  
(taille lunaire  
à martienne)**





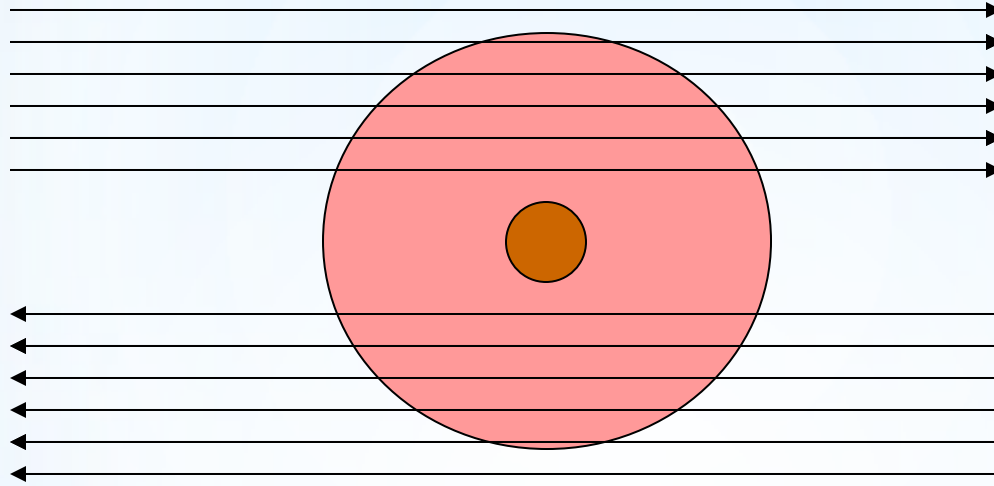
Simulation d'accrétion  
(Greenberg 1978)

Embryon planétaire

Par ce processus on crée un population **d'embryons planétaires**

À 1 AU : le temps est d'environ  $10^5$  ans

# MASSE D'ISOLATION



Un corps de masse  $M$  peut accréter du matériau  
À l'intérieur de  $\sim 4$  rayons de Hill

$$R_h = R \left( \frac{M_{\text{corps}}}{3M_*} \right)^{1/3}$$

Paramétrisation simple :

$$M_i \sim 0.3 M_{\oplus} \left( \frac{r}{1 \text{ ua}} \right)^3 \left( \frac{\sigma}{\sigma_{1 \text{ UA}}} \right)^2$$

Masse d'isolation

$$T \approx \frac{10^5 \text{ ans}}{\sigma / \sigma_{\oplus}} \left( \frac{r}{1 \text{ ua}} \right)^{3/2}$$

Temps d'accrétion

Pour la Terre :

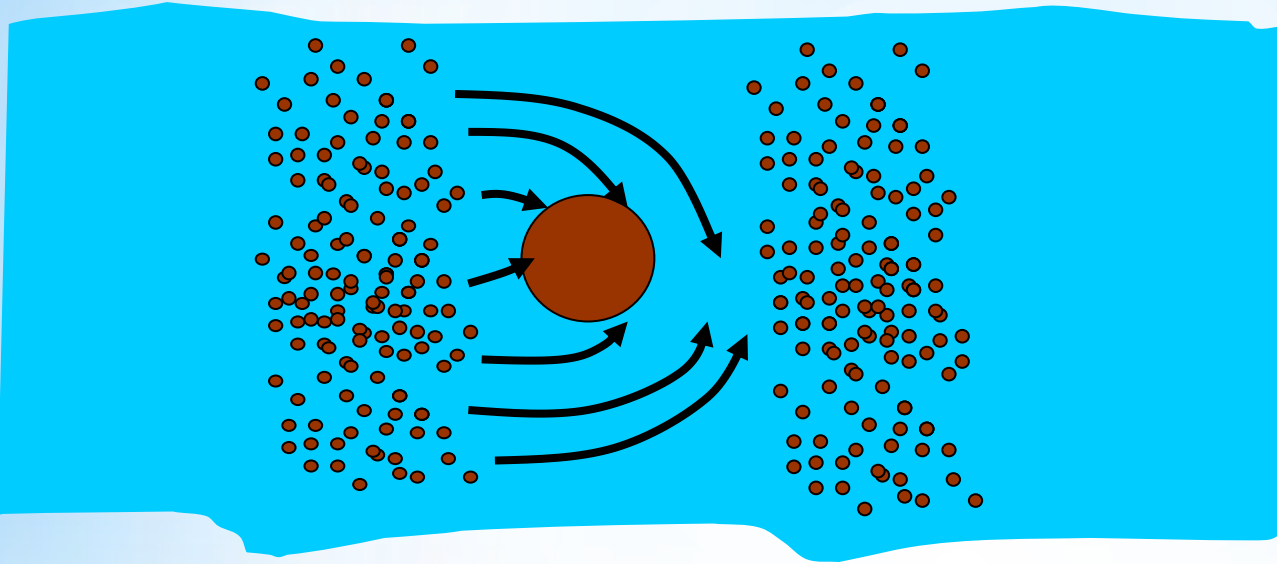
$\sim 0.3 M_{\oplus}$  en  $10^5$  ans

Pour Jupiter :

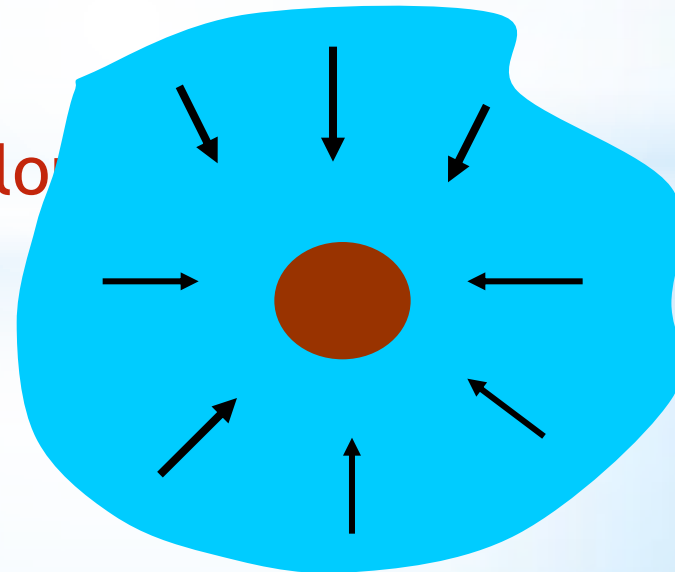
$\sim 30 M_{\oplus}$  en  $10^6$  ans

# Et les planètes géantes ?

## 1- Accrétion « Boule de Neige » au milieu du gaz



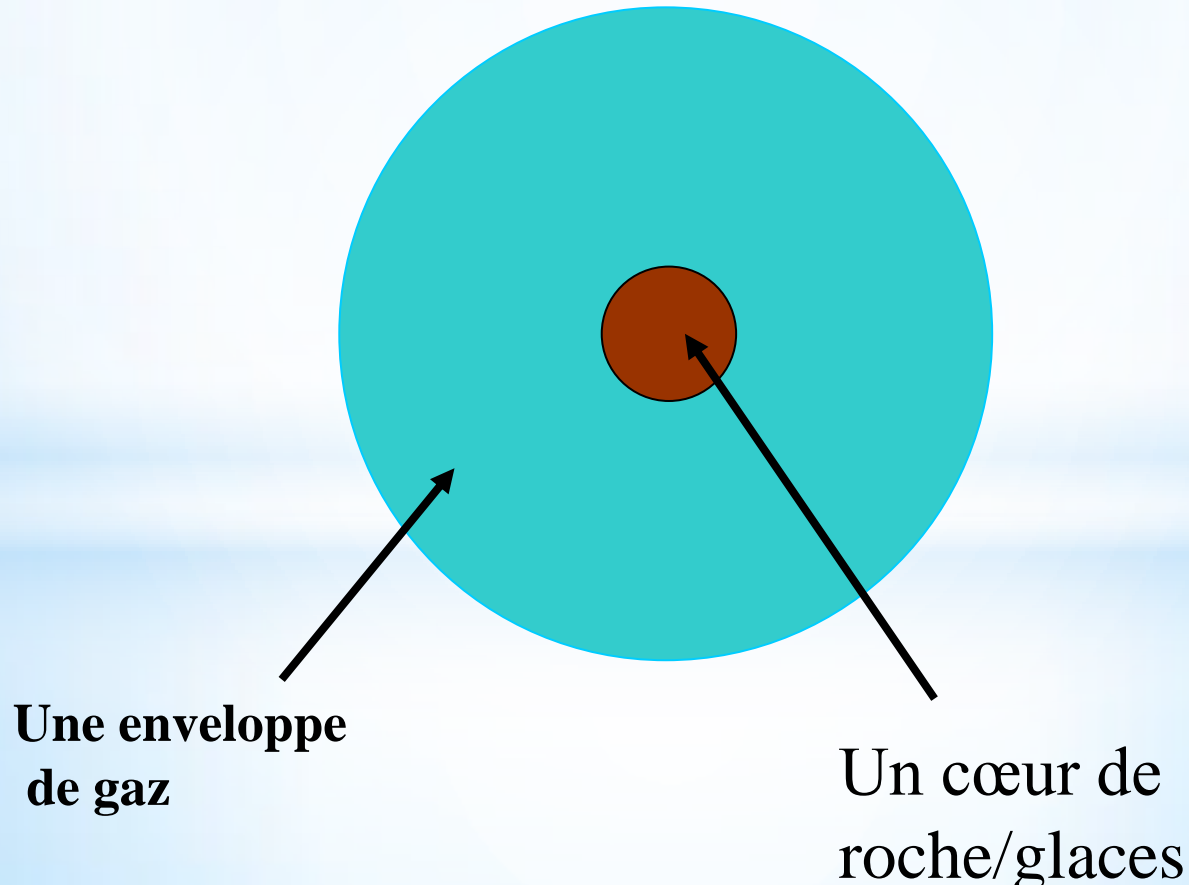
## A2- Accrétion d'une enveloppe



➤ **Emballement de l'accrétion d'une enveloppe de gaz**

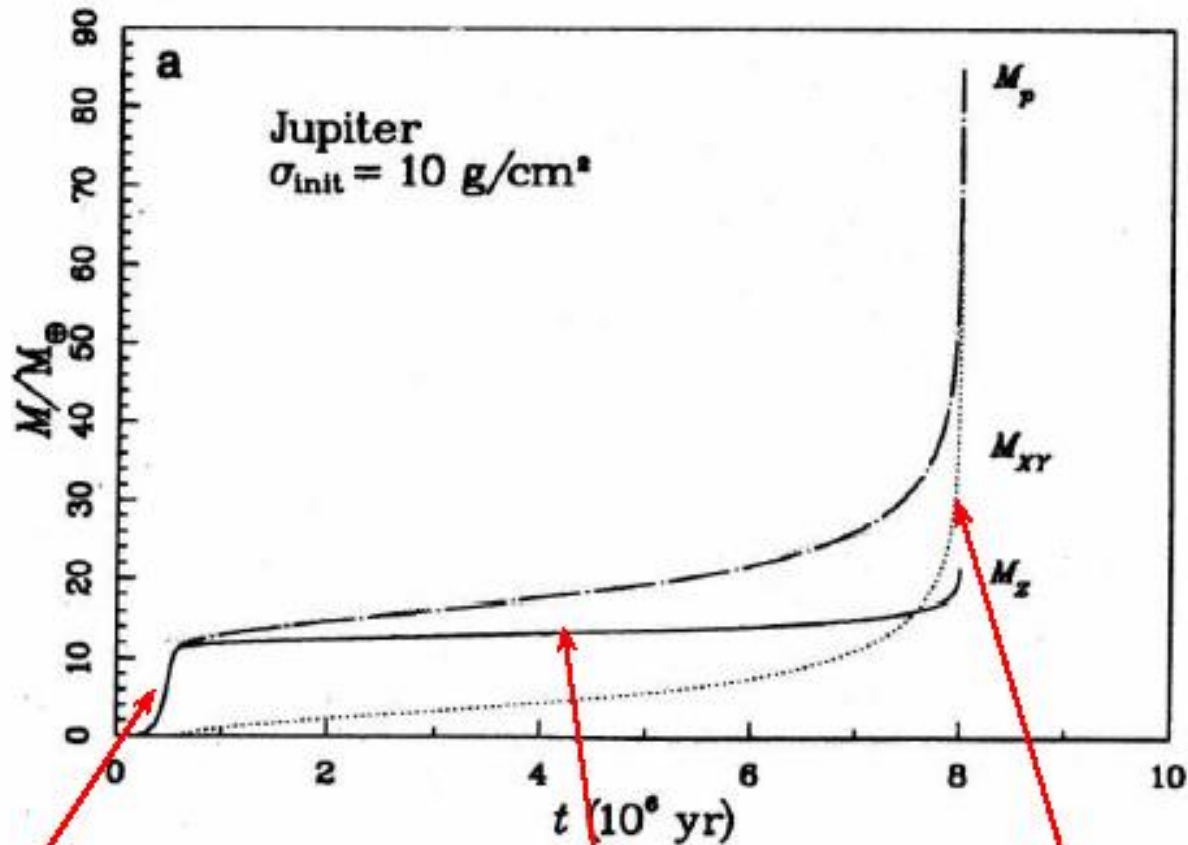
➤ **Effondrement rapide sur la planète**

**RESULTAT :**



# Formation des planètes géantes

Pollack et al. 1996



1. Coagulation

2. Accrétion lente

3. Effondrement

Les planètes vont migrer pendant la phase 2

*Uranus et Neptune n'ont jamais atteint la troisième phase.*

# La migration planétaire

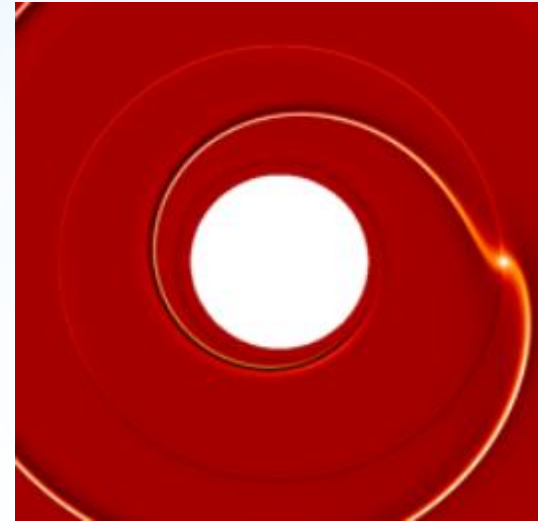
Les protoplanètes sont-elles stable dans le disque de gaz ?

**NON... elles se déplacent !**

2 types :

**Type 1 : sans ouverture de sillon**

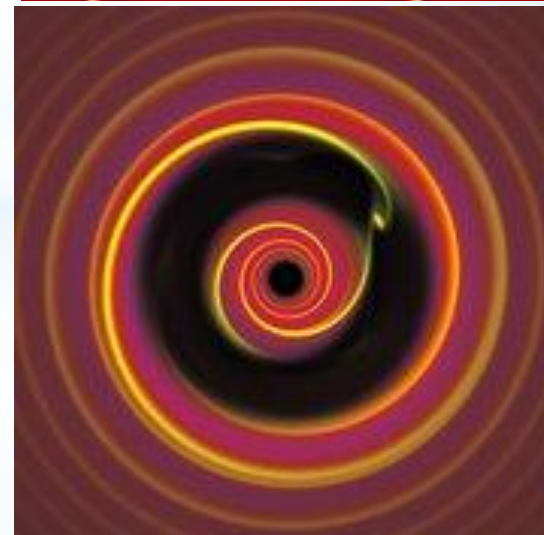
Planètes de faibles masse



**Type 2 : avec ouverture de sillon**

Planètes massives

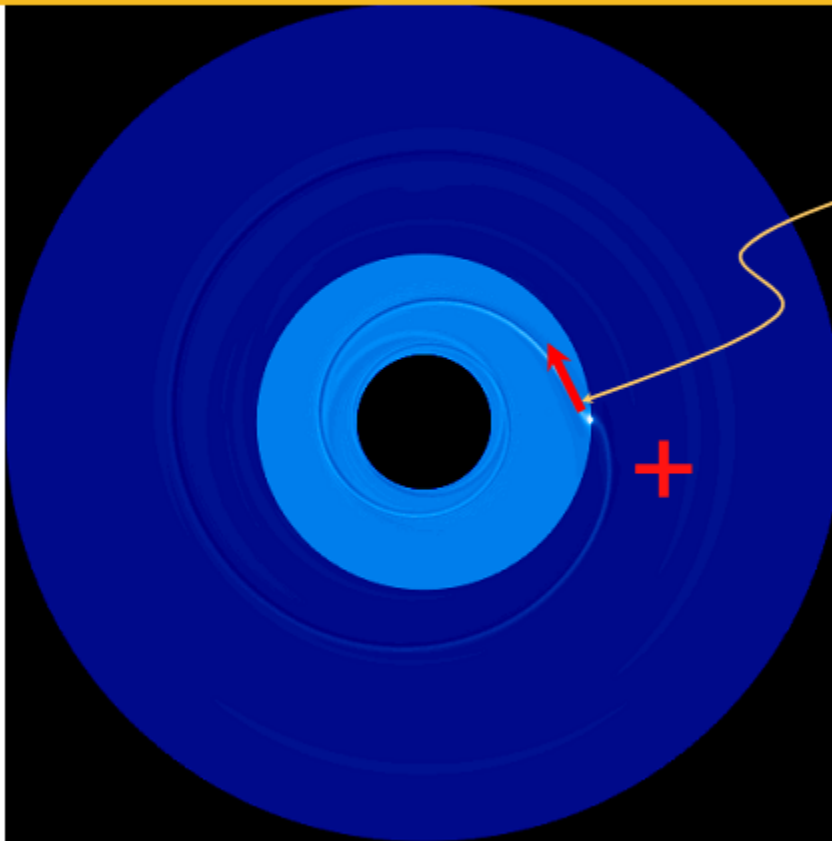
Evolution couplée à celle du disque





Le disque de gaz interne repousse la planète vers l'extérieur

## Inner disk's torque

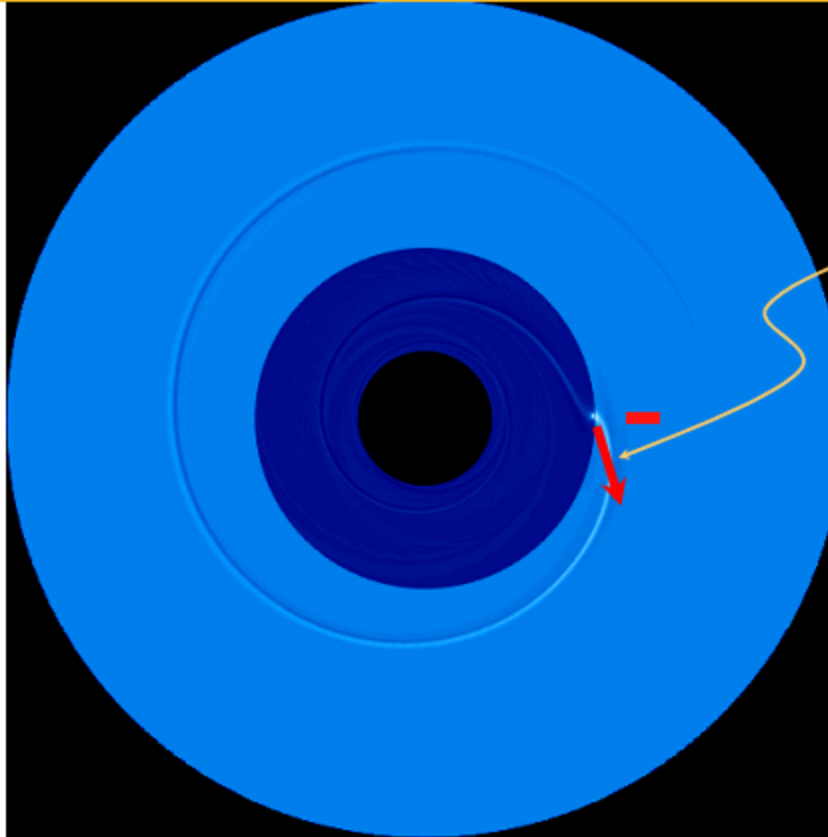


The inner wake  
leads the planet.

It therefore exerts  
a positive torque  
on the latter

Le disque de gaz externe repousse la planète vers l'intérieur

## Outer disk's torque

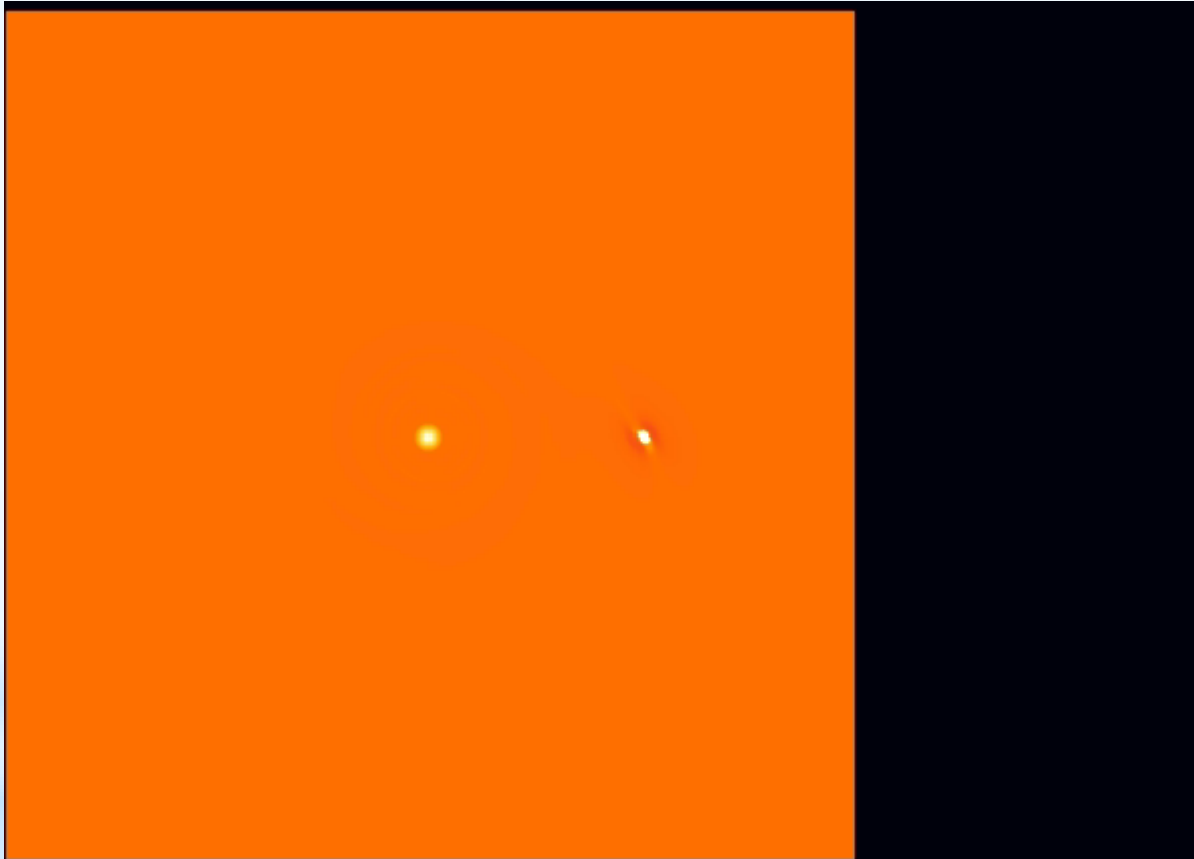


The wake in the outer disk lags the planet.

It therefore exerts a negative torque on the planet.

Souvent (mais pas toujours !) le disque externe gagne => migration vers l'intérieur

# Simulation numérique de migration



Couleur = densité du gaz

# Conséquence de la migration

Apparition de configuration résonante entre planètes géantes

Origine des « hot Jupiter »

Evolution dynamique complexe des jeunes systèmes planétaires

... encore très mal compris...

Au bout de 3-5 millions d'années le disque de gaz disparaît  
=> Planètes géantes déjà formées

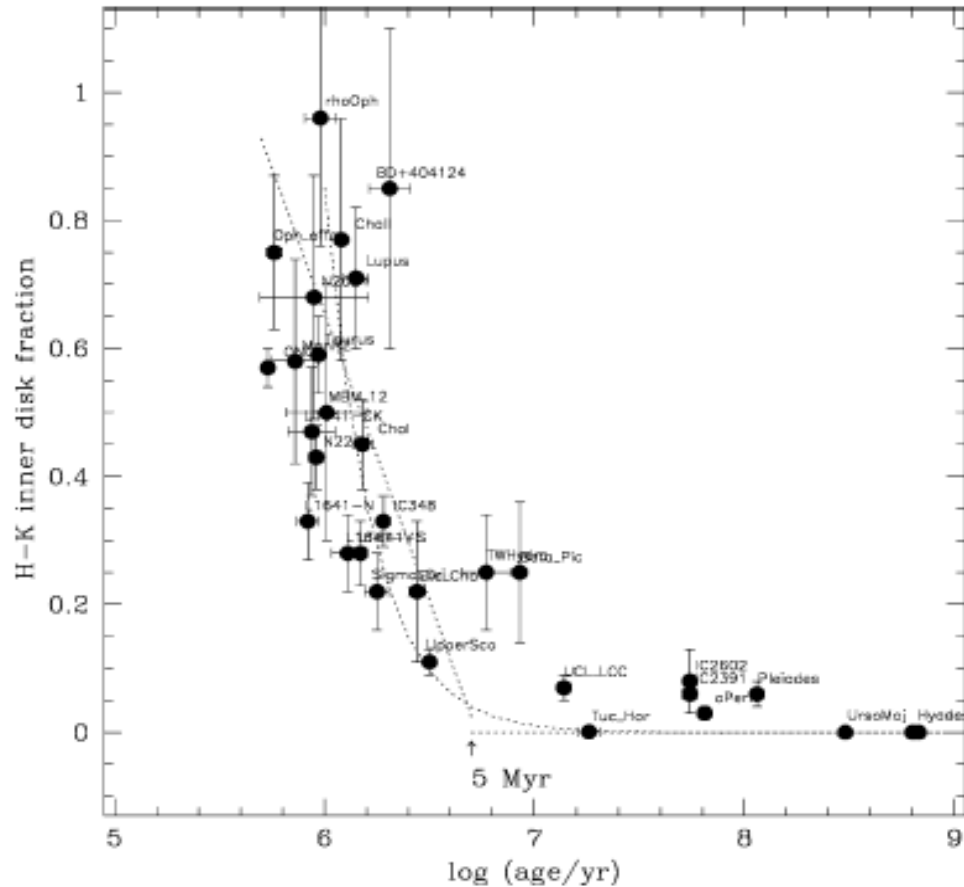
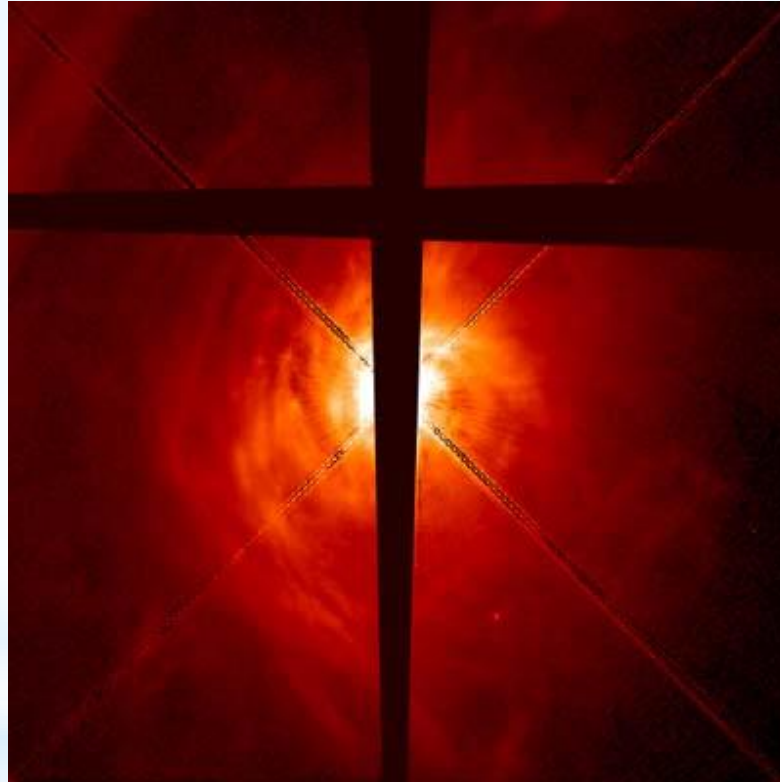


Figure 3.11. Disk fraction in young stellar clusters, as a function of their age. This fraction is consistent with 100% at young ages (less than 1 Myr), then declines over a timescale of a few Myr. After 10 Myr, with a few exceptions, all the disks around young stars have disappeared, presumably because of planet formation (Hillenbrand, 2006). This puts strong constraints on the formation of giant planets (which cannot be seen themselves).

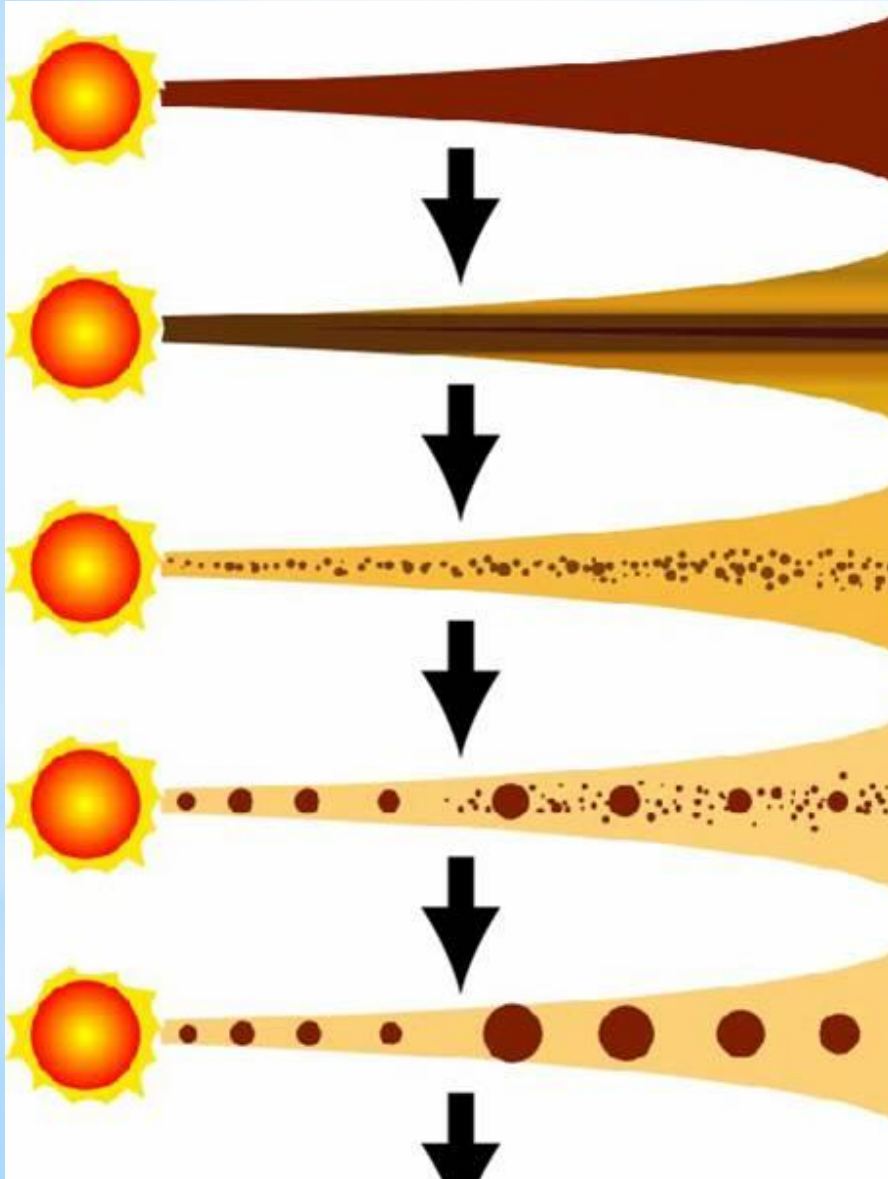
**Mais les planètes terrestres sont encore à l'état d'embryon !**

Pendant la disparition du disque de gaz , les planètes géantes structurent le disque

=> Signature observationnelle « disques de transition »



# Les 5 étapes de la formation planétaire



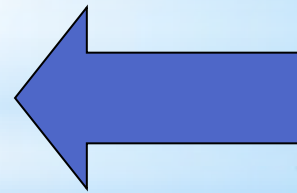
Disque de gaz + grains

Les grains sédimentent

Planétésimaux

**Embryons planétaires**

Planètes



« Late Stage accretion » Que se passe-t-il ?

Une centaine d'embryons  $< 5\text{AU}$

Les embryons sont séparés de  $\sim 10$  rayons de Hill

=> Comment sortir de l'isolement ?



# Les perturbations gravitationnelles !!

Les embryons se perturbent mutuellement

$$dv \sim (2GM_{\text{embryo}}/\Delta r)^{1/2} \Rightarrow e \sim dv/V_{\text{orb}}$$

avec  $V_{\text{orb}} = R(GM_*/R^3)$

E augmente  $\Rightarrow$  croisement des orbites

$\Rightarrow$  Collisions géantes

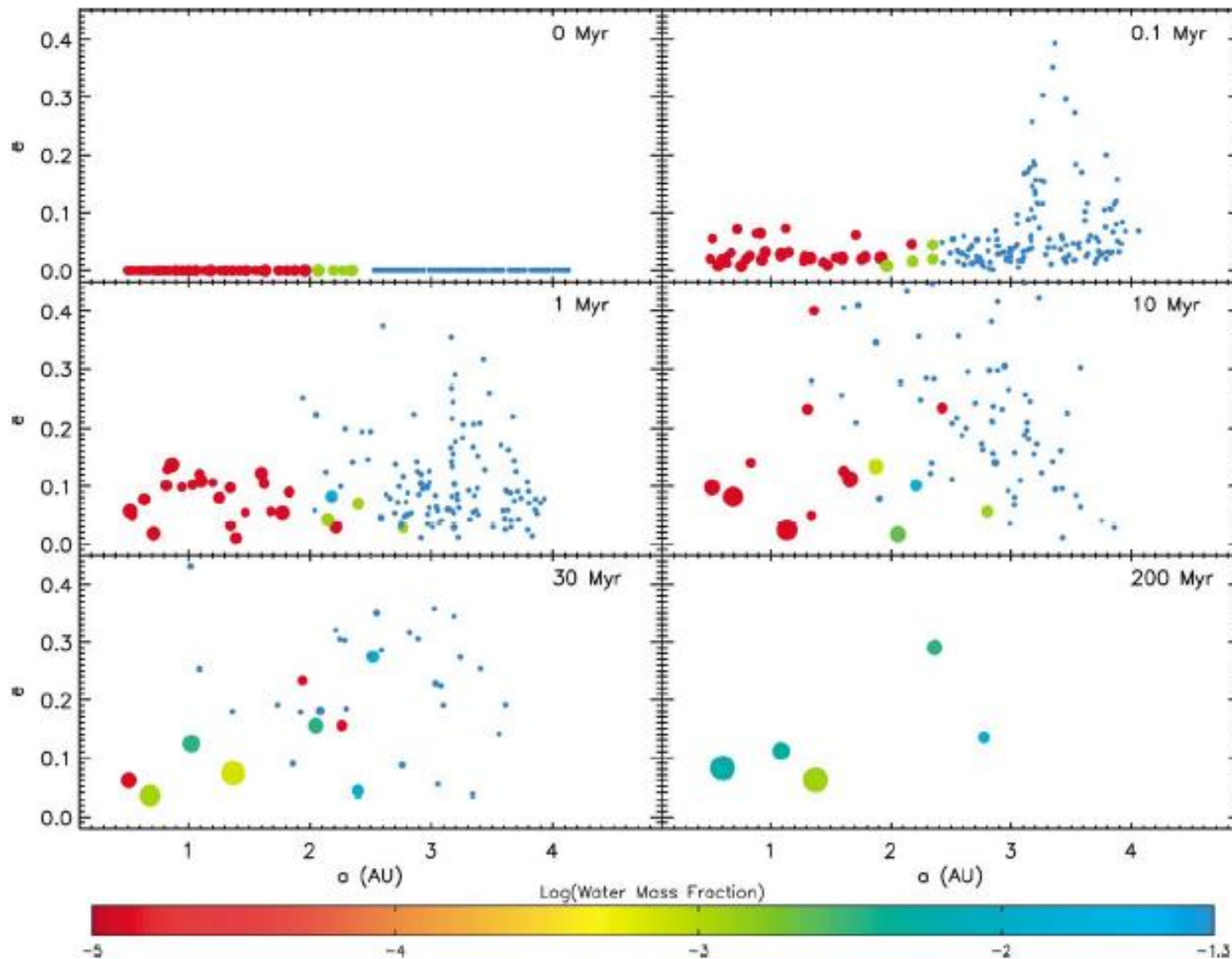
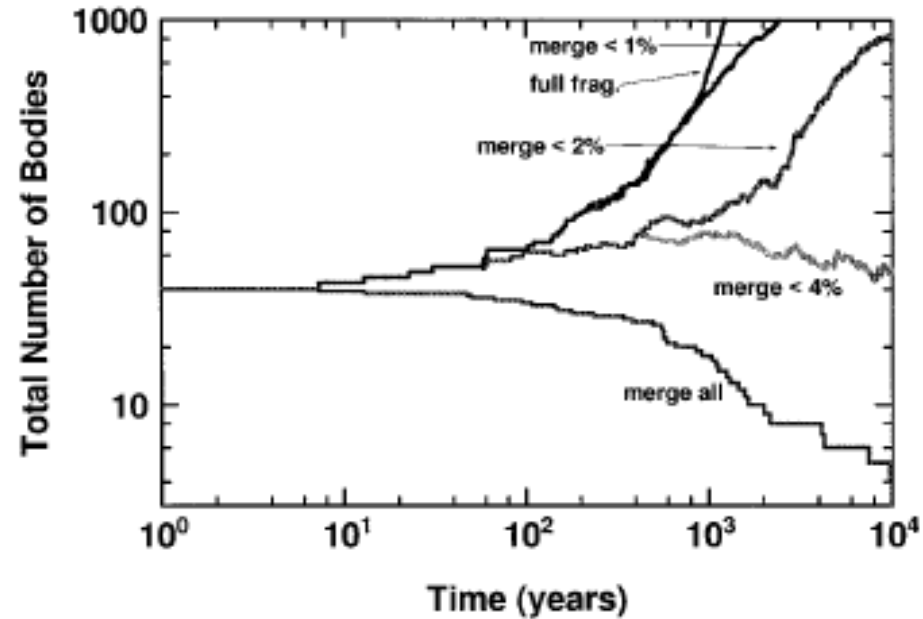
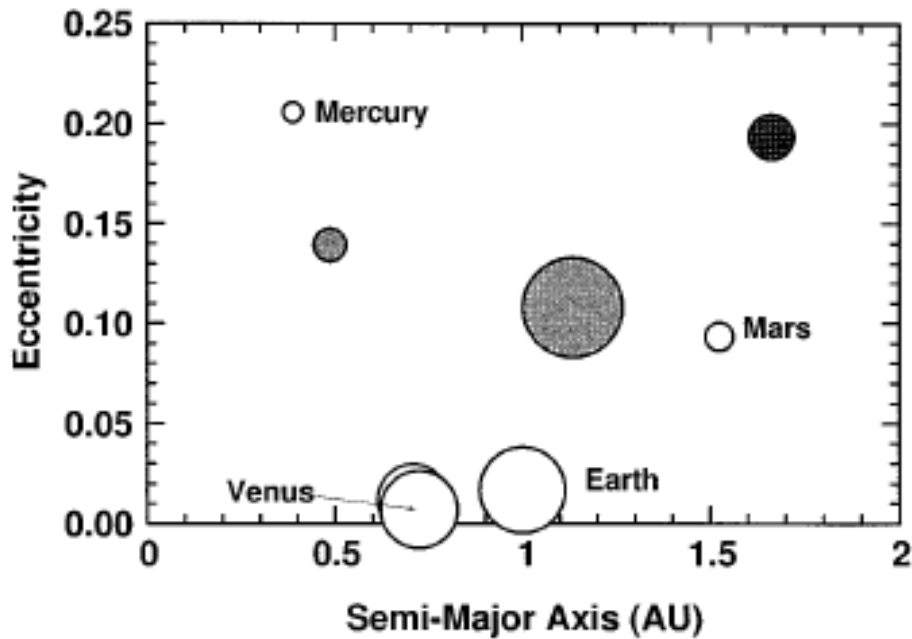
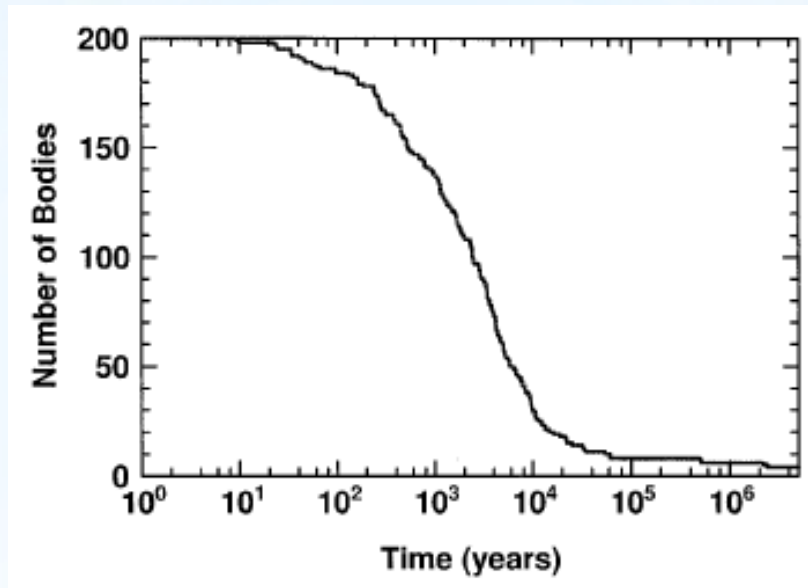
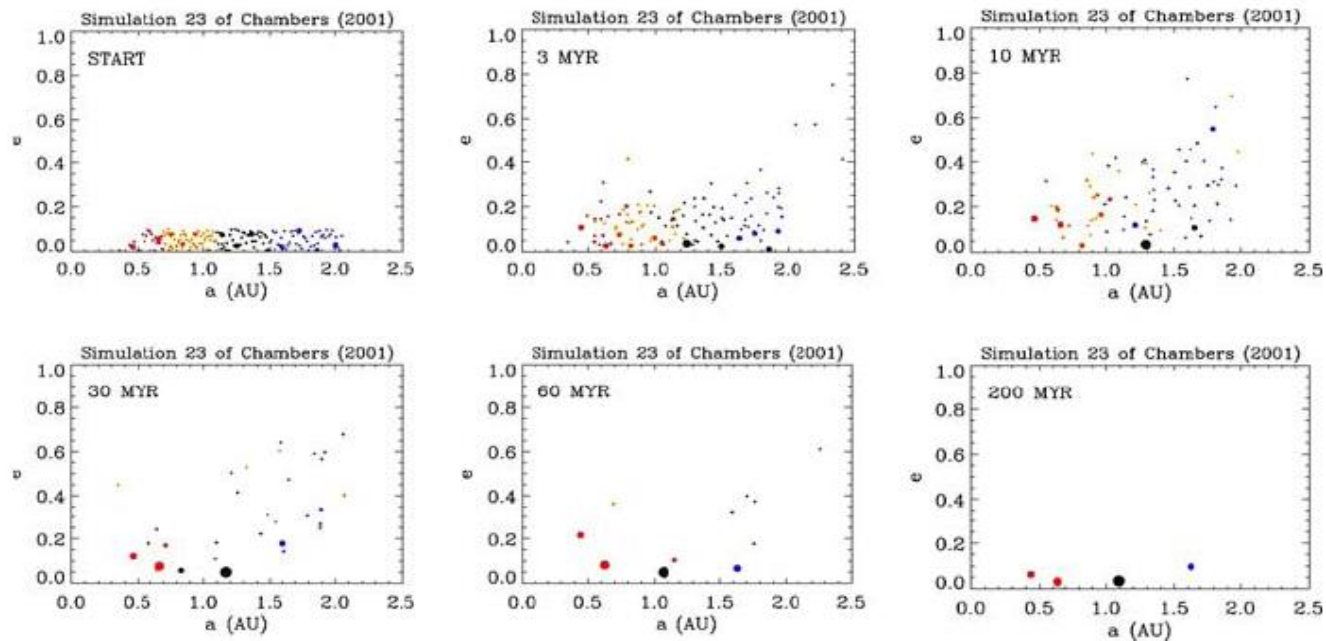


Fig. 3. Snapshots in the evolution of a simulation with Jupiter at 5.2 AU with zero eccentricity, and a planetesimal mass of  $0.01M_{\oplus}$  (simulation 10: see Table 1 for details). The size of each object is proportional to its mass<sup>(1/3)</sup> (but does not represent the actual physical size), and the color of each object corresponds to its water mass fraction. Note that the wettest objects have water mass fractions of  $\log_{10}(5\%) = -1.3$ . See text for discussion.

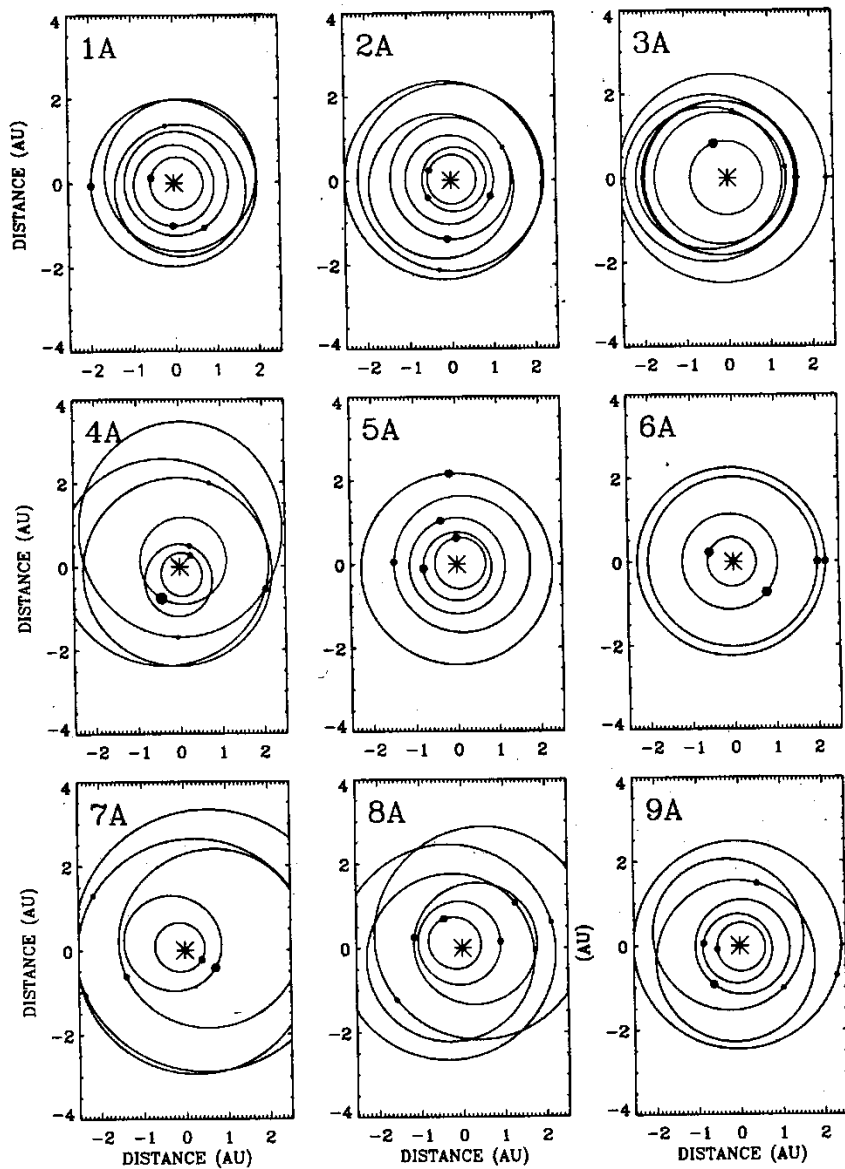
Alexander & Agnor  
1998





*Figure 3.23.* The growth of terrestrial planets from a disk of planetary embryos. Each panel shows the semi-major axis and eccentricity of the bodies in the system, the size of each dot being proportional to the mass. The color initially reflects the starting position of each embryo. When two (or more) embryos collide, the formed object assumes the color corresponding to the embryo population that has mostly contributed to its total mass. A system of four terrestrial planets, closely resembling our solar system, is formed in 200 Myr. From Chambers (2001).

CHAMBERS AND WETHERILL

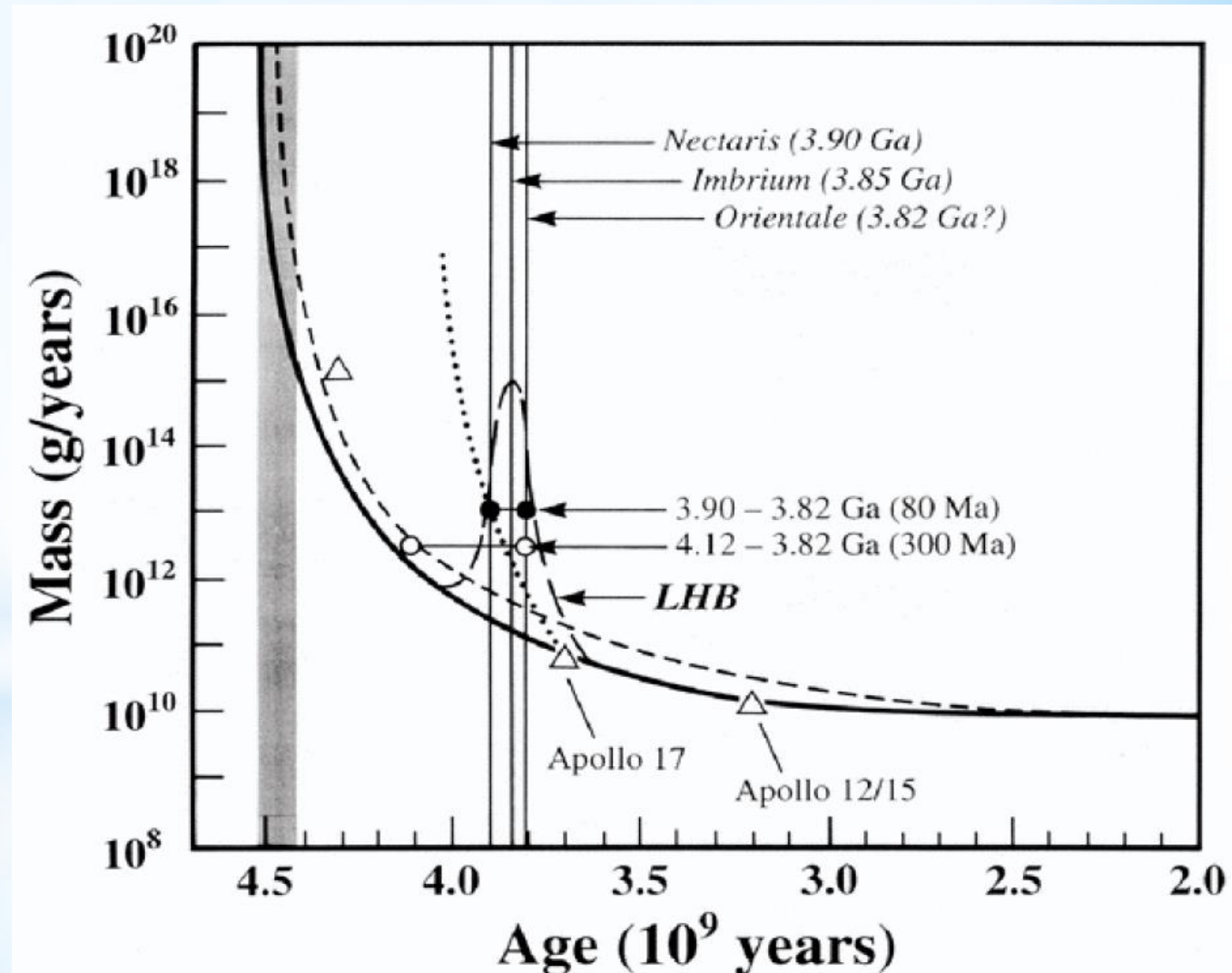


Des planètes trop  
excentriques  
(i.e orbites trop « ovales »)

# Le bombardement massif dans notre système Solaire (LHB)

Un événement catastrophique dans l'histoire du Système Solaire

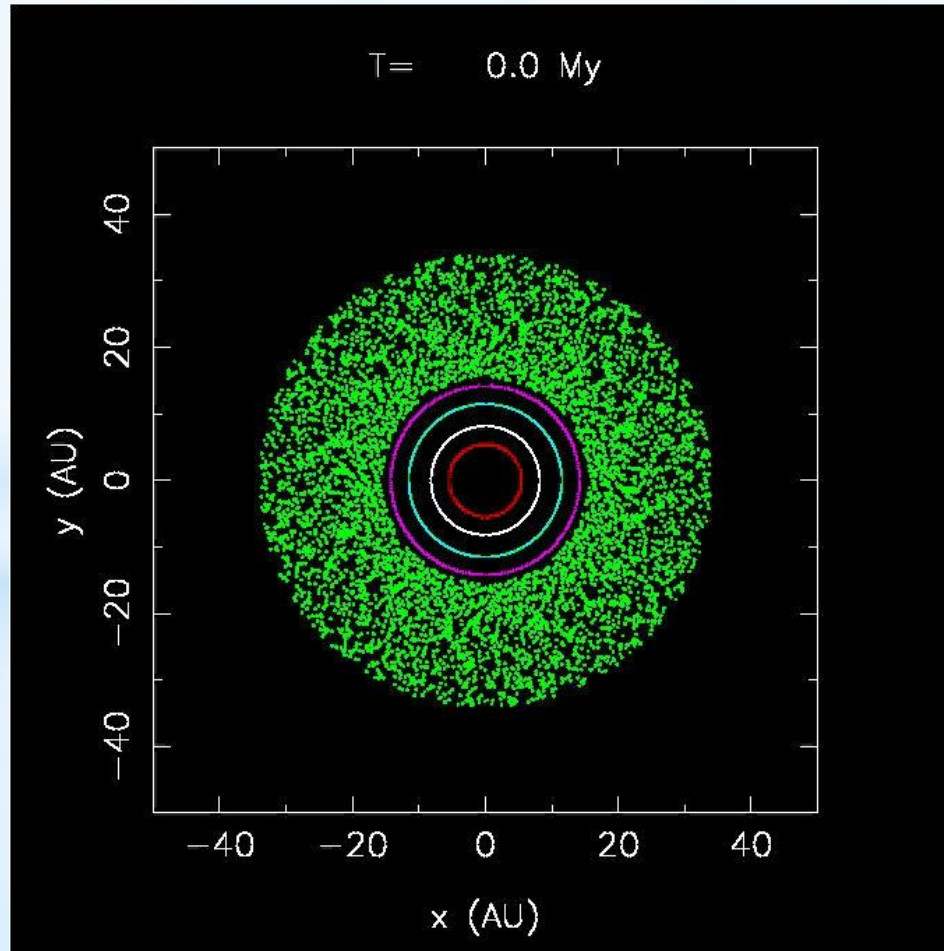
⇒ Mise évidence d'une phase « catastrophique » dans l'histoire lunaire :



Les planètes terrestres et géante sont nées. Le gaz a disparu...

Elles évoluent dynamiquement...

=> Simulation d'une phase instable du système solaire (NCORPS)



Le BOMBARDEMENT TARDIF :

Explique : la cratérisation de la lune, les satellites des planètes géantes, les orbites des planètes

## CONCLUSION

- Il nous semble avoir compris les grandes étapes
- de nombreux mystères demeurent

## MAIS

- discipline en pleine « explosion »
- la découverte d'exoplanètes et l'exploration in-situ  
Du Système Solaire nous aide à comprendre les étapes  
Du scénario



QUELQUES PROCESSUS CLEFS

DIVERSITE DES EXOPLANETES

# Diversité chimique du Système Solaire

C'est l'histoire de sa température

⇒ Condensation des espèces chimiques

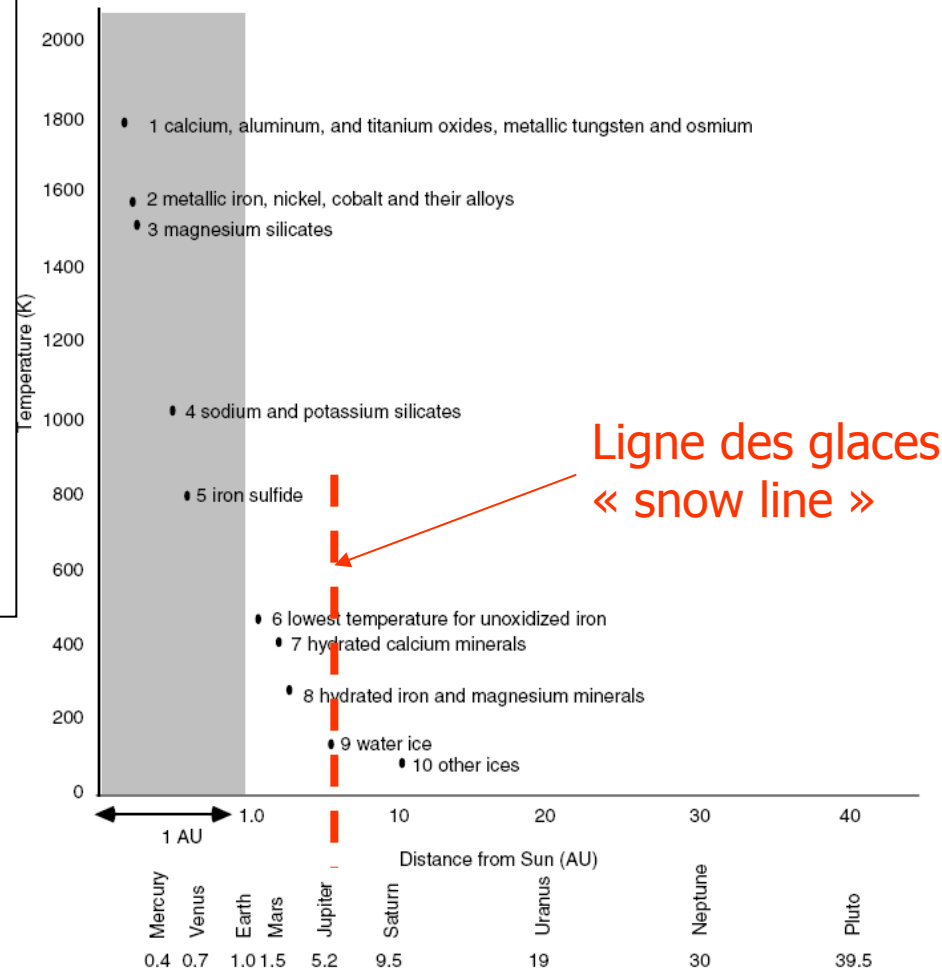


Figure 2. Temperature (K) and distance from sun (AU) at which major planetary constituents would condense from primordial solar nebula. Note. [Note that the shaded region on the horizontal axis represents only 1.0 AU, whereas the other axis units are 10 AUs.] The data in Figure 2 are from *The New Solar System* by J. K. Beatty & A. Chaikin, (Eds.), 1990, Cambridge, MA: Cambridge Publishing Press; *Geochemistry Pathways and Processes* by S. M. Richardson & H. Y McSween Jr., 1989, Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall; and *Solar System Evolution: A New Perspective* by S. R. Taylor, 1992, Cambridge, MA: Cambridge University Press.

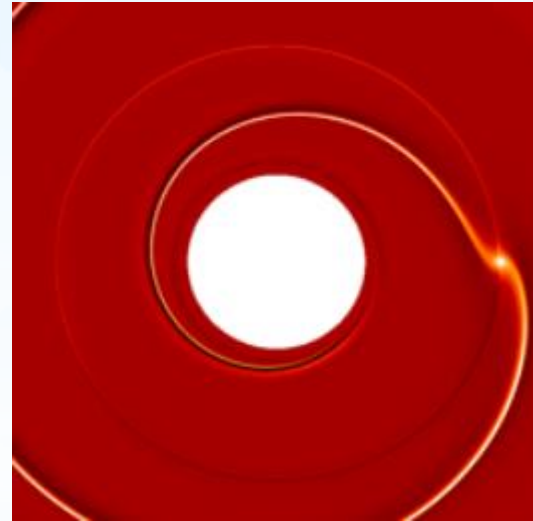
## Variation spatiale de la température

# La migration planétaire dans le disque de gaz

2 types :

**Type 1 : sans ouverture de gap**

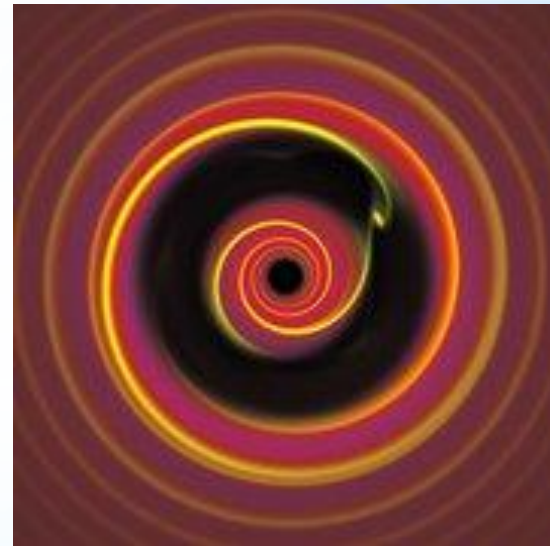
Planètes de faibles masse



**Type 2 : avec ouverture de gap**

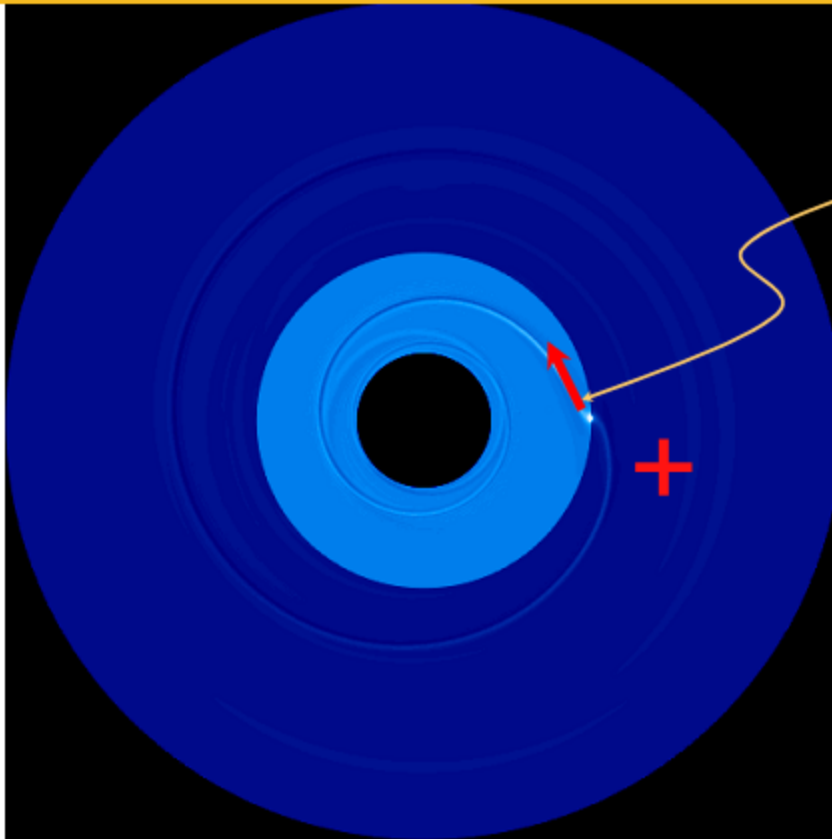
Planètes massives

Evolution couplée à celle du disque



La migration radiale est due couple de marée (la force de gravité) que les disques internes et externes appliquent sur la planète.

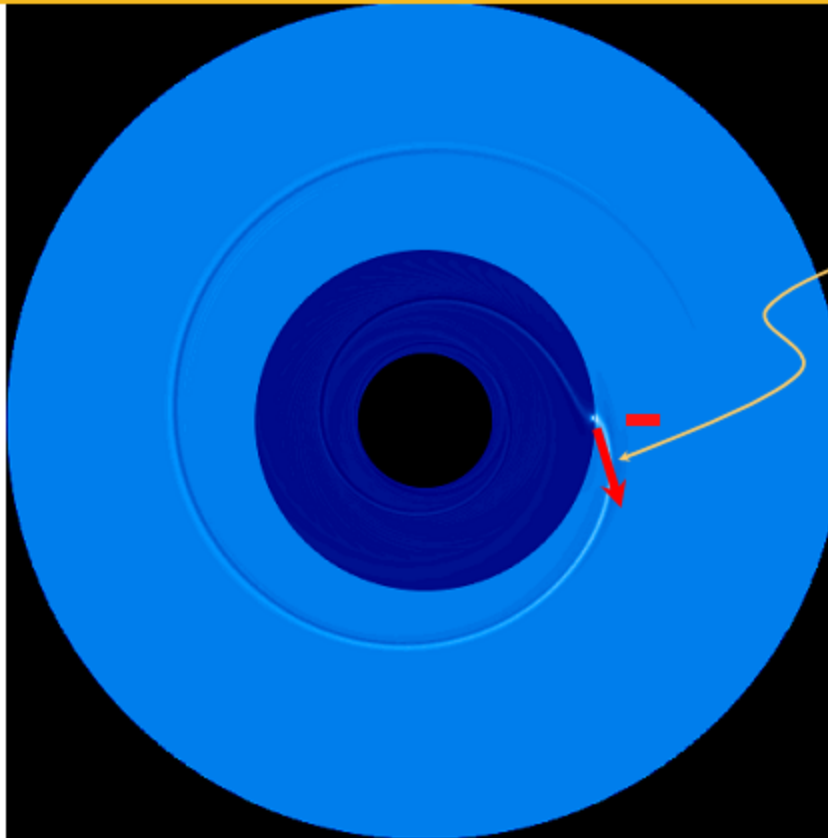
## Inner disk's torque



The inner wake leads the planet.

It therefore exerts a positive torque on the latter

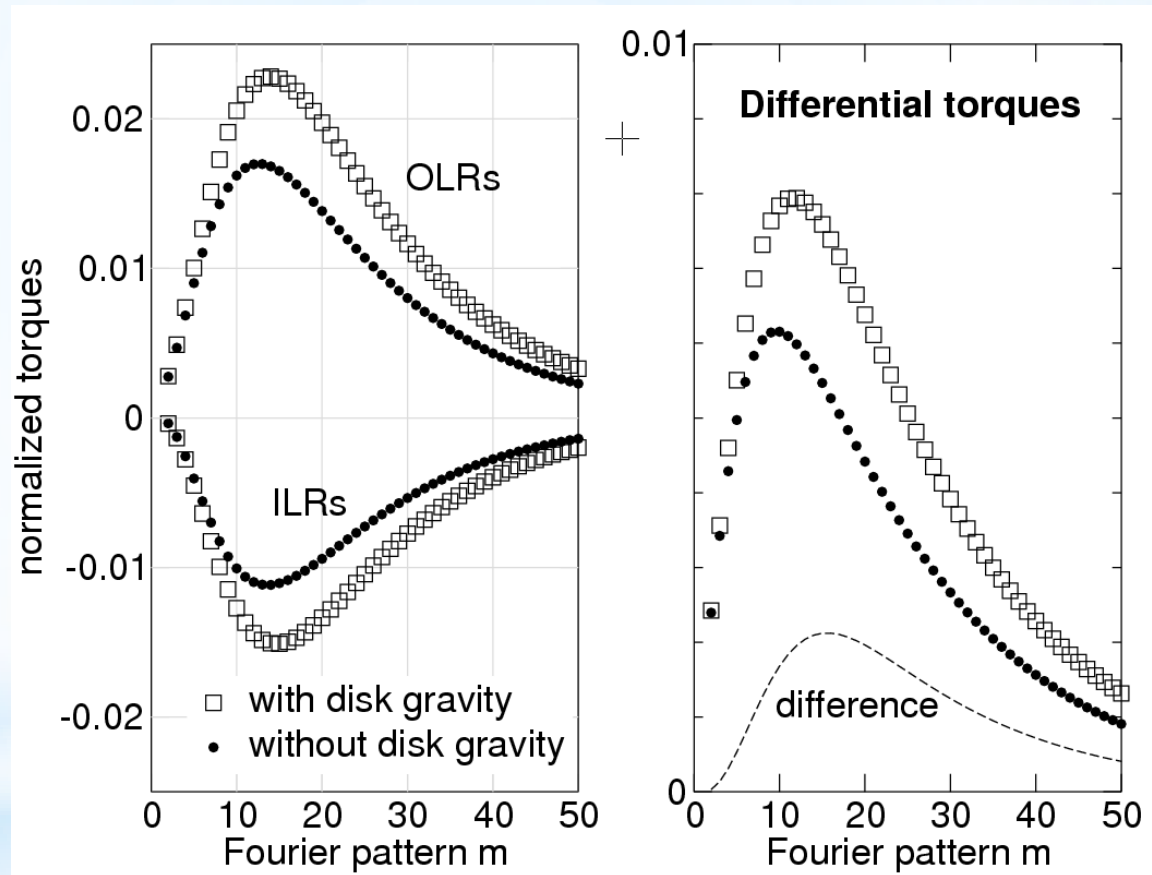
## Outer disk's torque

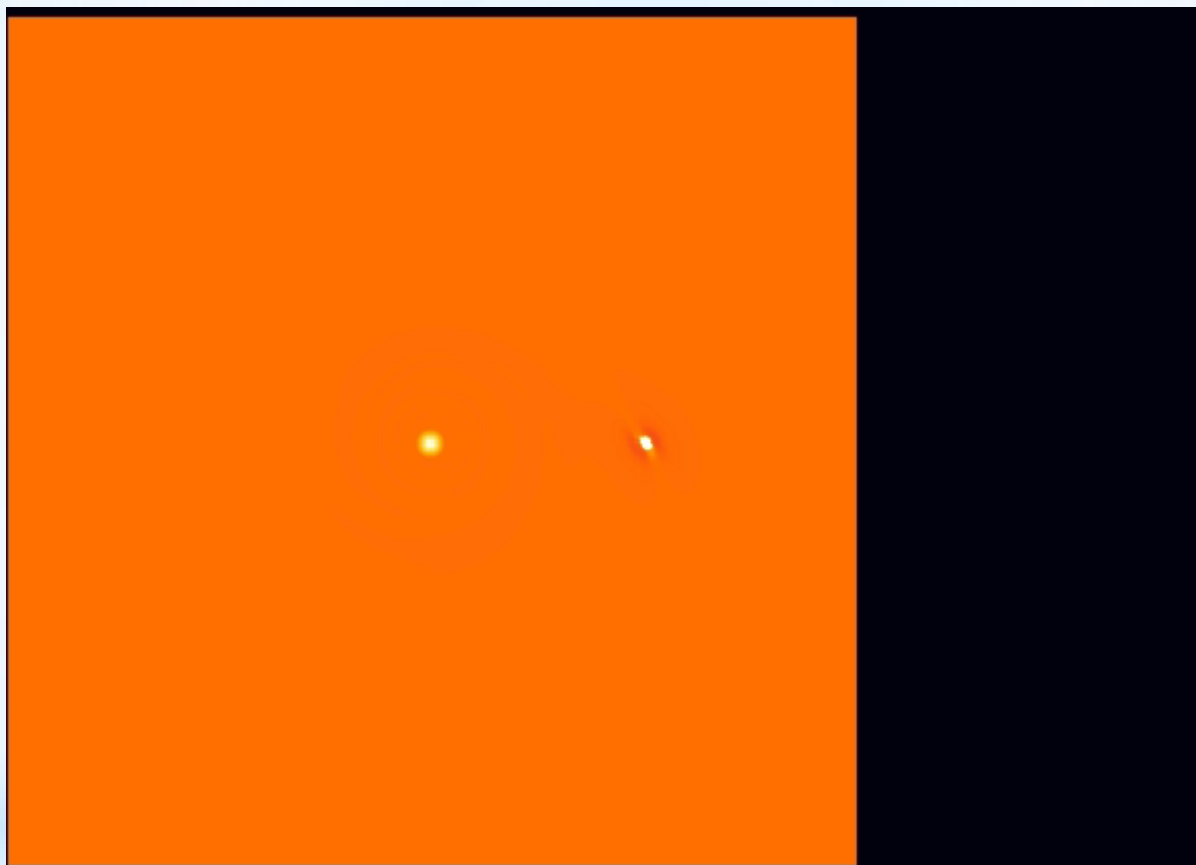


The wake in the outer disk lags the planet.

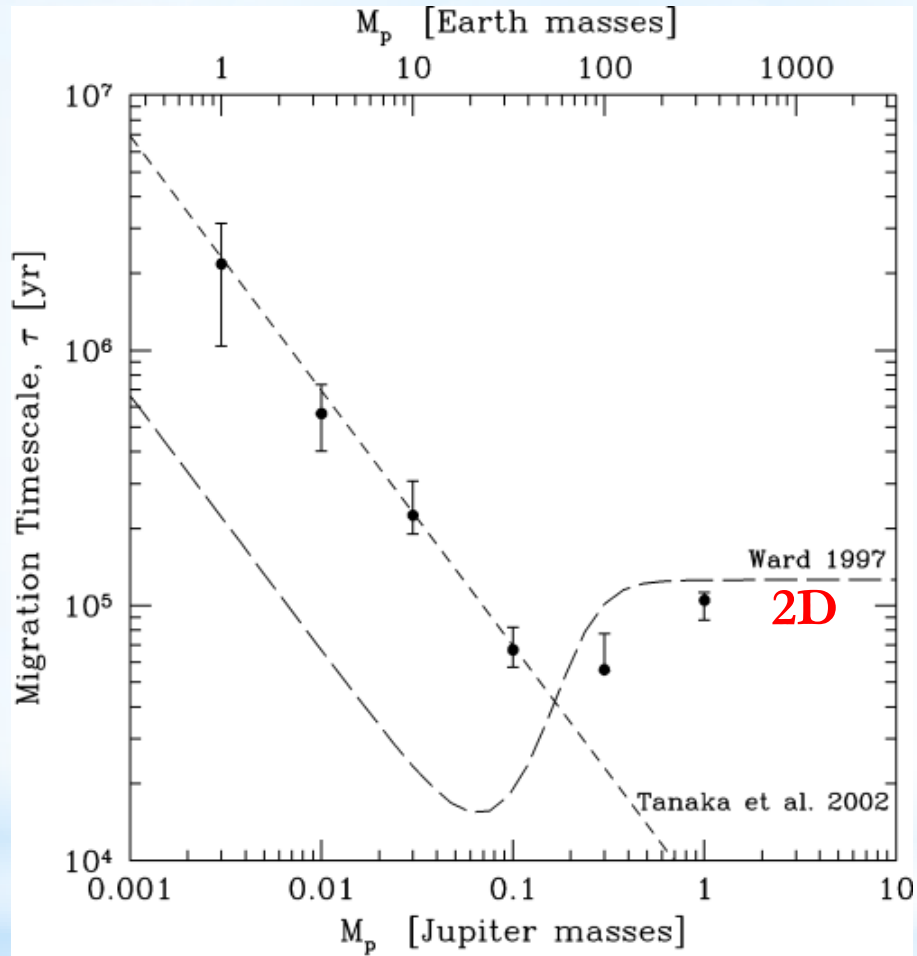
It therefore exerts a negative torque on the planet.

Migration vers l'intérieur => déséquilibre en faveur du couple externe





# Vitesse de migration



(Bate et al. '03)



## Migration :

Un facteur d'évolution majeur

Migration de type 1 sur les planètes terrestre => Super earth proche de l'étoile

Migration à 1 corps => hot jupiter

=> Water planet (cœur des planètes géantes)

Migration à 2 corps => apparition de configurations résonantes entre planètes

La migration peut accélérer le processus de formation planétaire

## QUELQUES MOTS SUR LA SIMULATION

Le système ne cesse de se transformer => outils différents => difficultés

Couplage entre gaz et grains => approches multifluides/multi-composants

Chaque étape de la formation planétaire nécessite des outils différents

GAZ , MHD : Approches fluides euleriennes

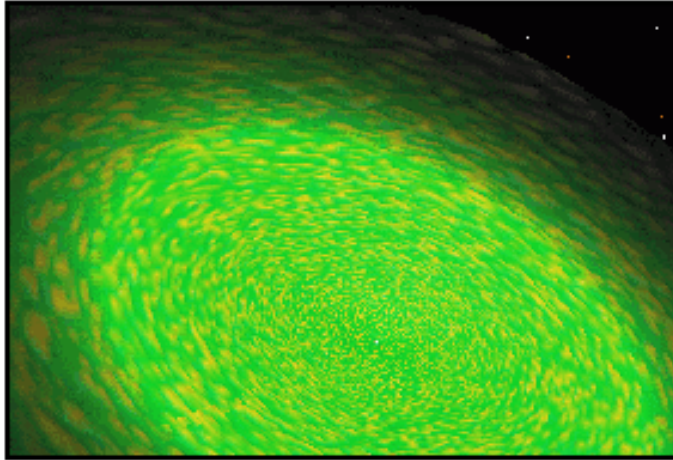
Grains : approches lagrangienne pour la dynamique et statistique pour l'accrétion

Planètes : approches lagrangiennes

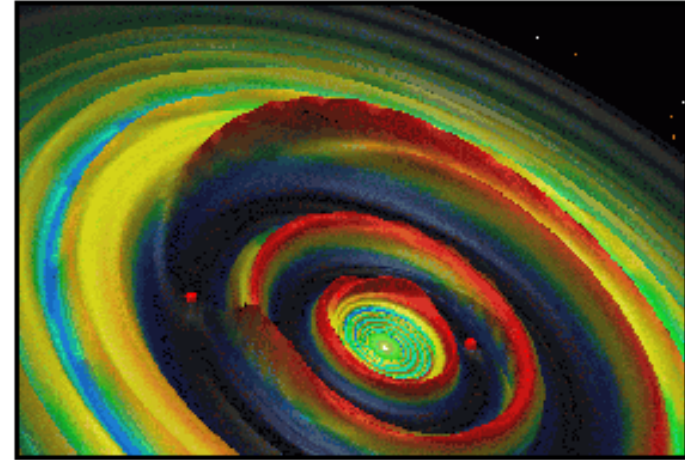
FIN

# How do planets get in resonance?

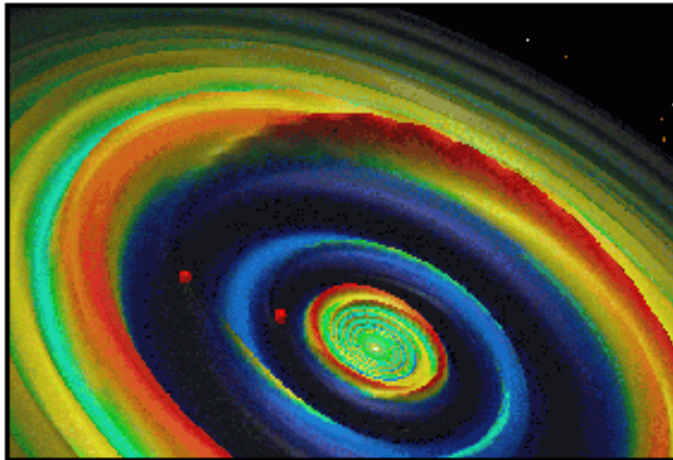
I. Initial Disk



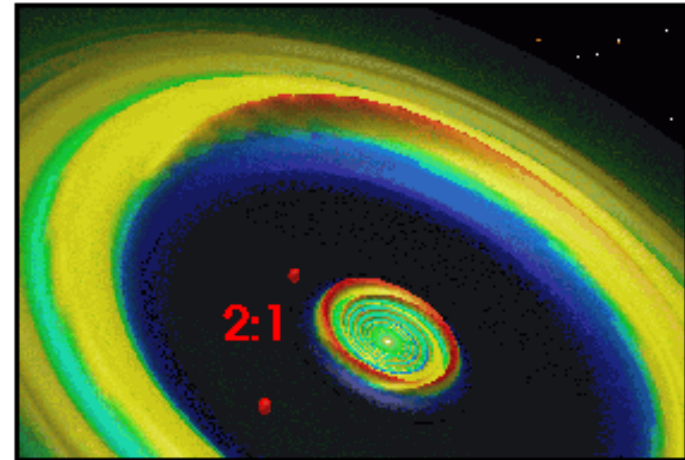
II. Gap Formation



III. Gas Ring Dissipation



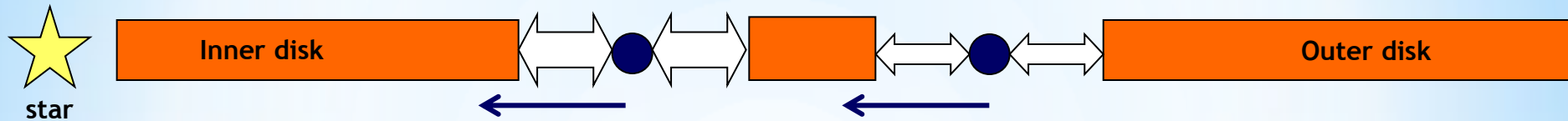
IV. Resonant Configuration



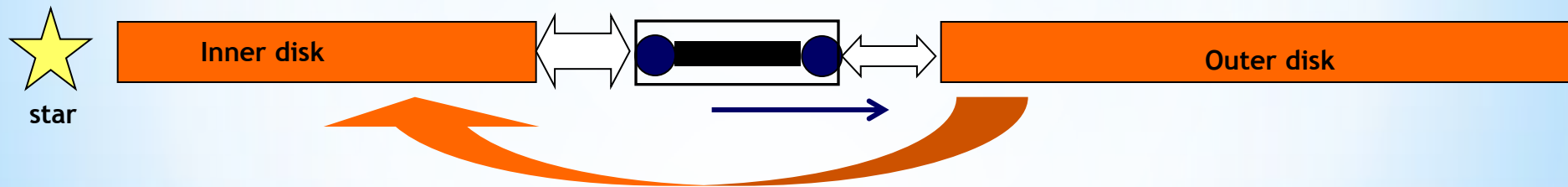
bitale

# 1) Migration of Jupiter & Saturn

Two planets in their own gaps migrate in parallel.



Two planets in a same gap approach each other → MMR.



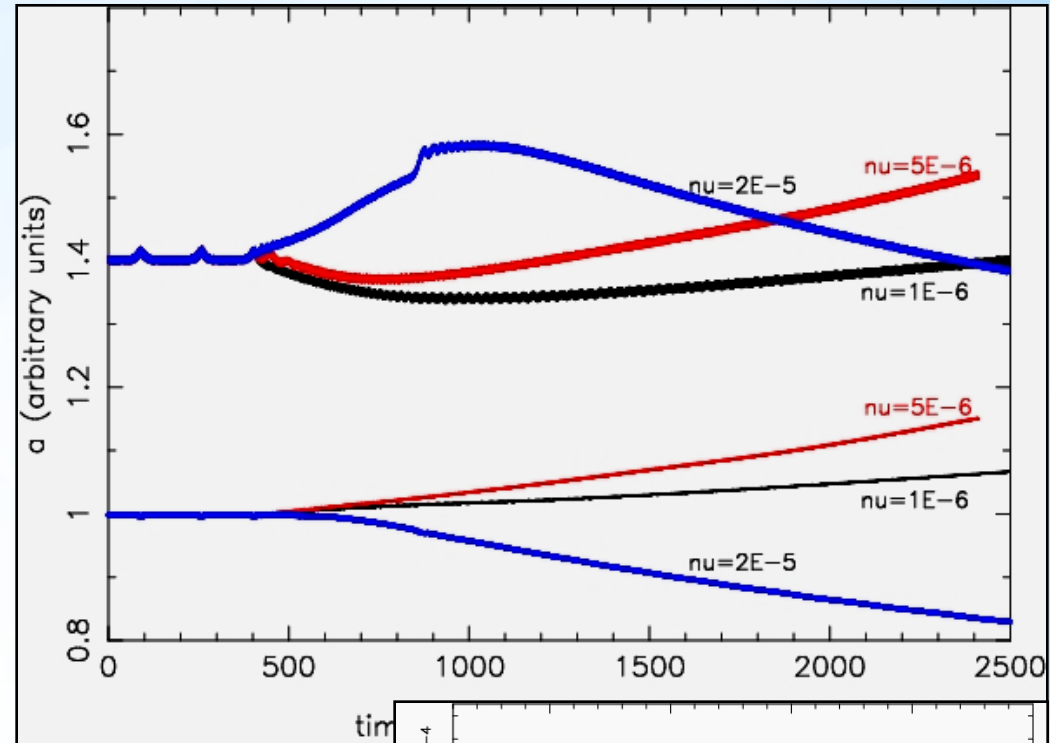
If the planets have different masses, the pair of planets is not in equilibrium. → gas passes the gap ; decoupling from disk evolution.

Migration of a pair of planets  $\neq$  migration of one planet.  
Lighter outer planet → outward migration.  
(Masset & Snellgrove, 2001, MNRAS)

# 1) Migration of Jupiter & Saturn

Dependence on viscosity  $\nu$  :

Start with  $a_{\text{Saturn}} = 1.4 a_{\text{Jupiter}}$ , fixed planets (for gap opening).  
At  $t \approx 500$ , release the planets.  
 $\nu < 10^{-5}$  (black, red) : They approach, lock in MMR at  $t \approx 1000$ , and then migrate together.



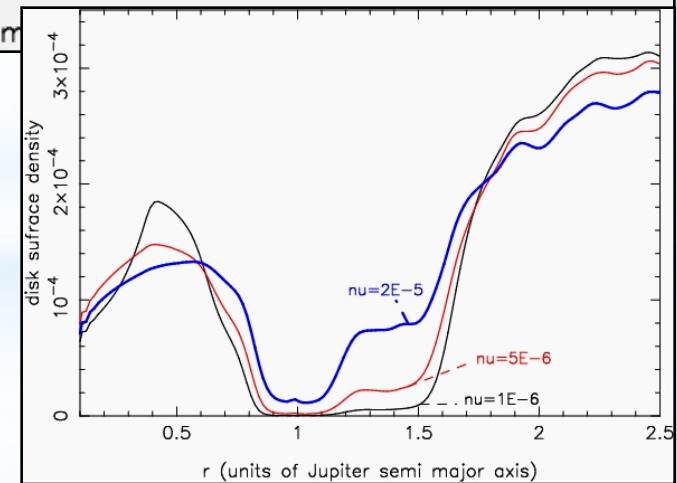
Low  $\nu$  :

outward migration rate increases with  $\nu$  :

- Jupiter feels a stronger positive torque ( $\propto \nu$ ),

- corotation torque increases.

$\nu = 2 \cdot 10^{-5}$  : Saturn migrates outward (strong corotation torque), then parallel migration in separated gaps : Mechanism broken.



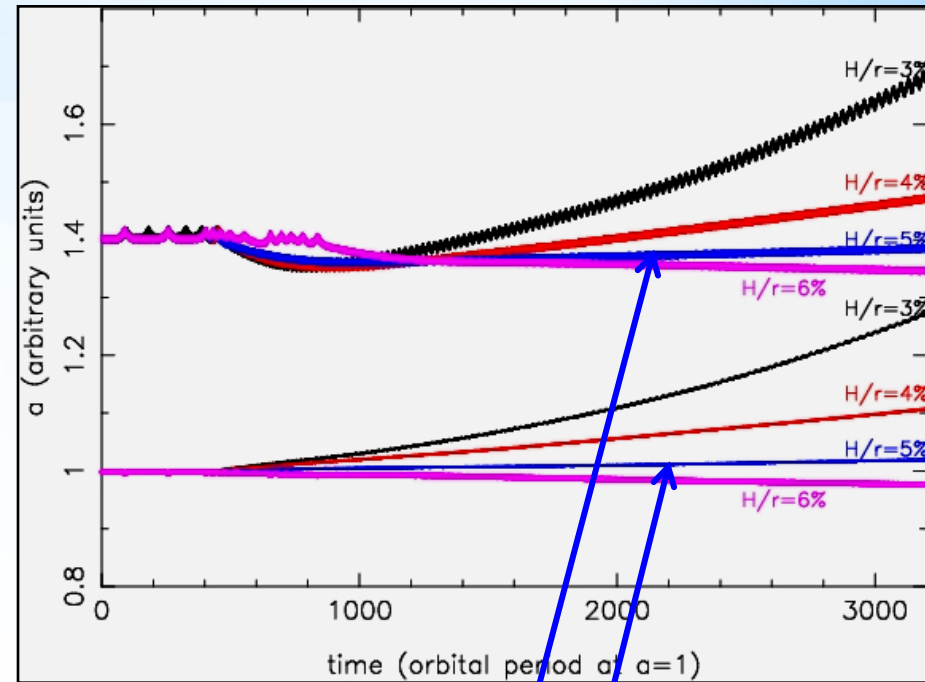
# 1) Migration of Jupiter & Saturn

Dependence on aspect ratio  $H/r$  :

Start with  $a_{\text{Saturn}} = 1.4 a_{\text{Jupiter}}$ ,  
 $v = 10^{-5.5}$ ,

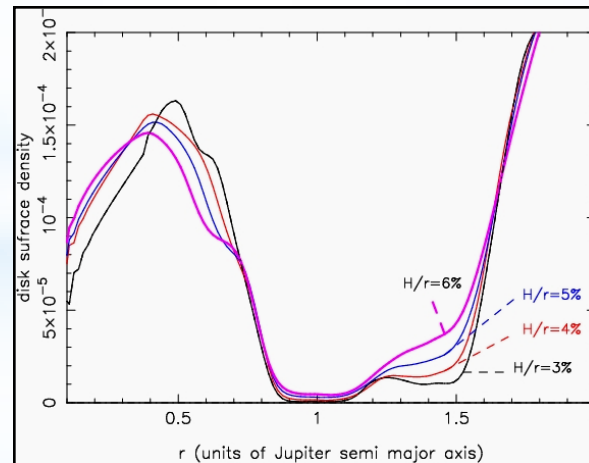
fixed planets (for gap opening).

At  $t \approx 500$ , release the planets.  
They approach,  
lock in MMR at  $t \approx 1000$ ,  
and then migrate together.



The smaller  $H/r$ ,  
the deeper Saturn's gap,  
the more Jupiter pushed  
outward.

(Morbidelli & Crida, 2007)



$H/r = 0.05$  :  
stationary solution.