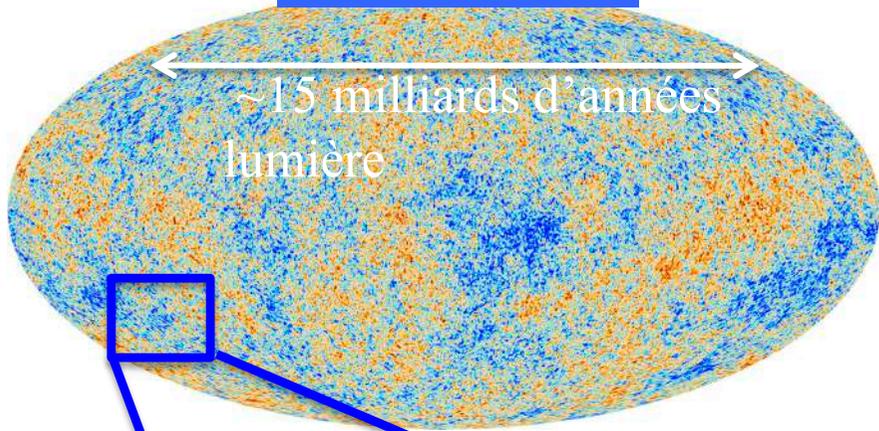


La distribution de masse des étoiles

Un paramètre fondamental de l'Univers

Patrick Hennebelle

Univers visible



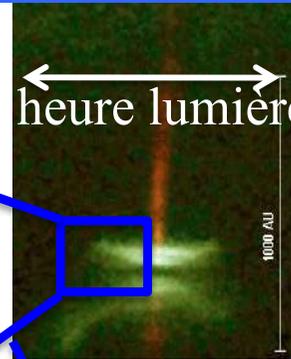
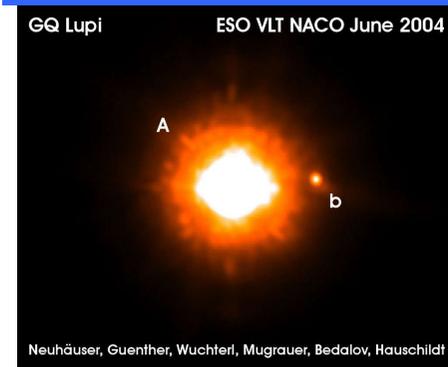
Grandes Structures

Cycle interstellaire et formation des étoiles

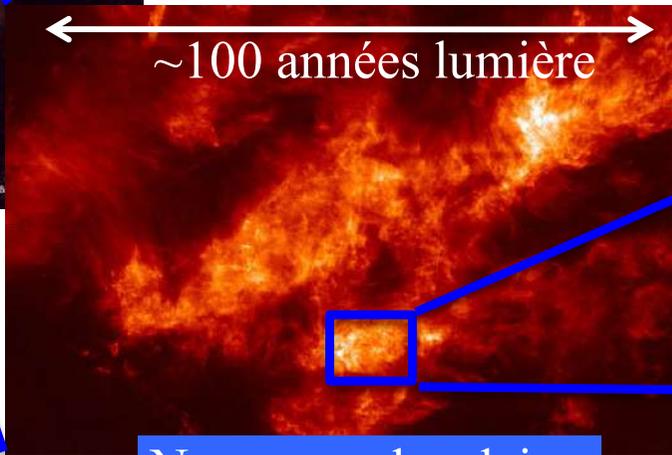
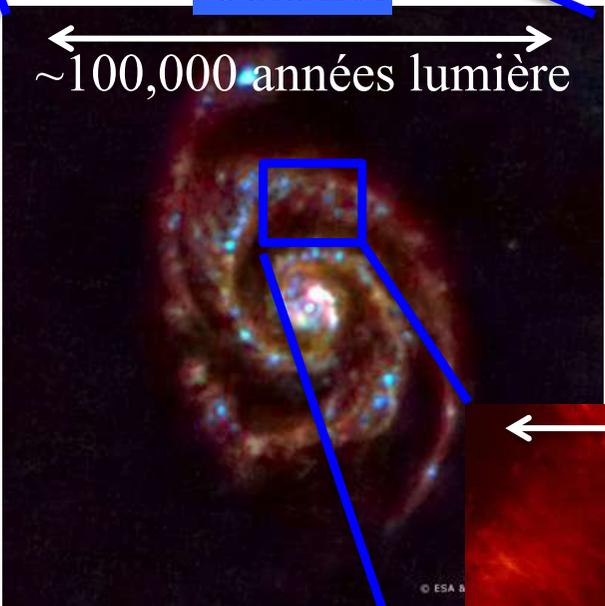
Planètes

Etoiles et disques

Planètes extrasolaires



Galaxies



Nuages moléculaires



Coeurs denses

1) Des étoiles – c'est quoi ?

2) Des étoiles – *pour quoi faire* ?

3) Des étoiles – comment elles se forment ?

1) Des étoiles – c'est quoi ?

2) Des étoiles – pour quoi faire ?

3) Des étoiles – comment elles se forment ?

Des étoiles :

-c'est quoi ?

La recette d'une étoile

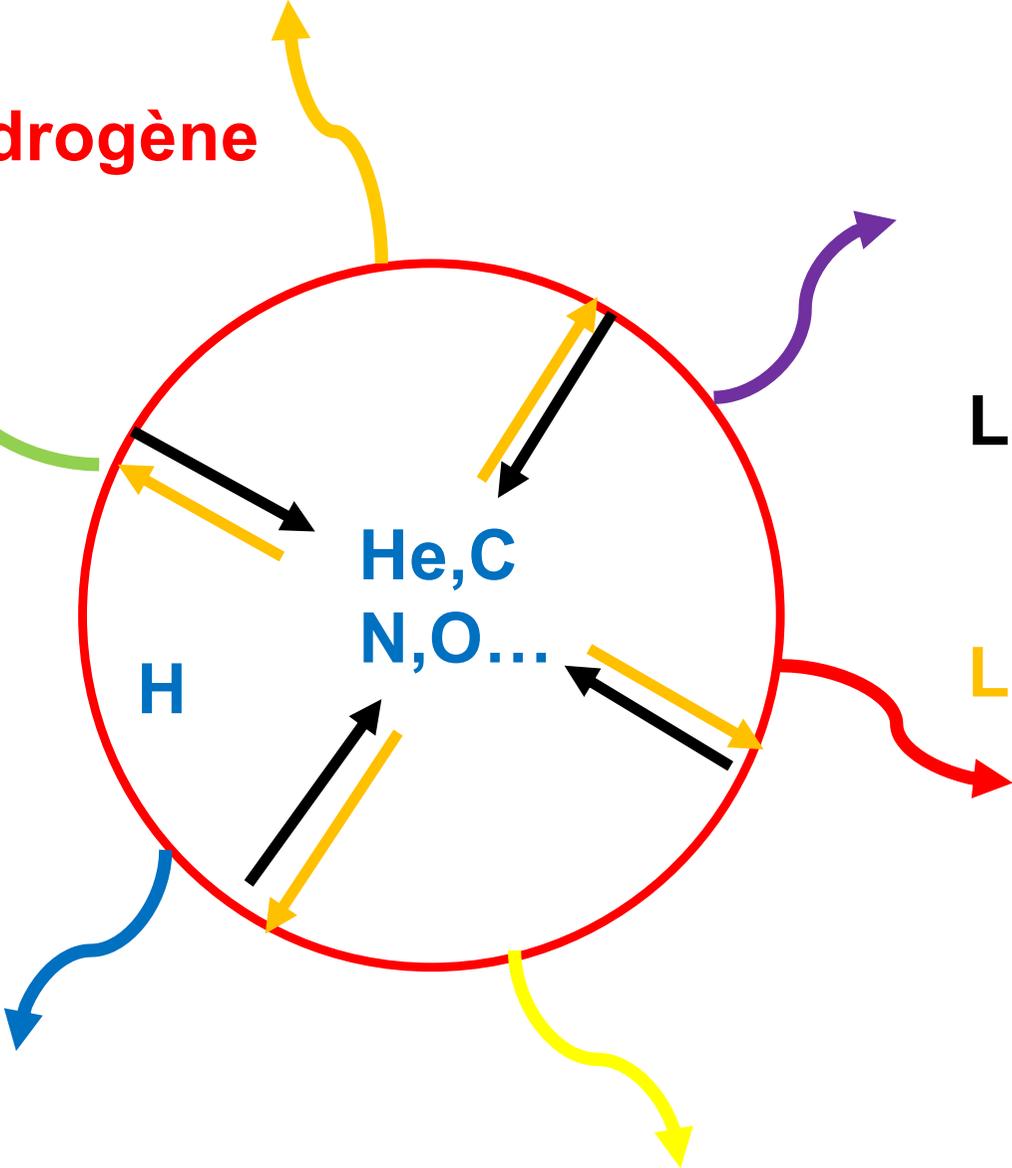
De la lumière

Du gaz d'hydrogène

La gravité

Des réactions nucléaires

La pression



Des étoiles :

-c'est quoi ?

-les plus petites ?

Les plus petites étoiles ?

0.08 M_{\odot} (85 M_{J}) : la limite de brûlage de l'hydrogène

0.013-0.08 M_{\odot} : brûlage du deutérium => naine brune

En dessous de 0.013 M_{\odot} , plus de réactions nucléaires possibles, on parle de alors de « free-floating planets » et de planètes géantes comme Jupiter

Des étoiles :

-c'est quoi ?

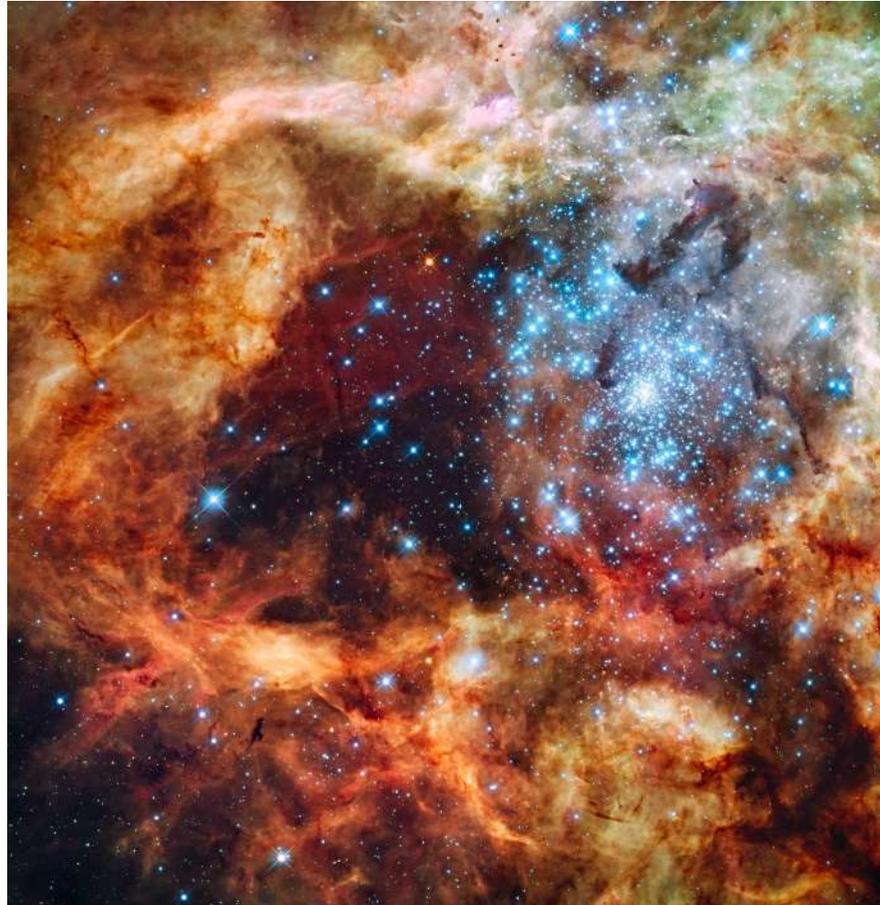
-les plus petites ?

-les plus grosses ?

Les plus grosses étoiles ?

L'amas R136a1 dans la nébuleuse de la Tarentule

**Masse record
~300 Ms**



Pourrait-il y avoir des étoiles plus grosses ? Sans doute oui.
Y a t-il une limite ?

Des étoiles :

-c'est quoi ?

-les plus petites ?

-les plus grosses ?

-pourquoi les étoiles brillent ?

Pourquoi les étoiles brillent ?

Qui brillent le plus ?

La densité d'énergie lumineuse d'un corps noir : $U_{rad} = aT^4$

Le transport de l'énergie lumineuse : $F_{rad} = D \frac{\partial U_{rad}}{\partial R}$, $D \approx cl_{dif} = \frac{c}{\kappa\rho}$

L'équilibre mécanique : $kT = \frac{GM}{R} m_p$

La luminosité : $L_{\odot} = 4\pi R^2 F_{rad} \propto M^3$

Une étoile brille car elle est chaude...

**Les grosses étoiles sont plus chaudes
=> Elles brillent beaucoup plus !**

Des étoiles :

-c'est quoi ?

-les plus petites ?

-les plus grosses ?

-pourquoi les étoiles brillent ?

-combien de temps vivent-elles ?

Quelles étoiles vivent le plus longtemps ?

Une étoile rayonne donc perd de l'énergie...

Quelle source d'énergie ?

⇒ Les réactions nucléaires car $E = Mc^2$...

Les grosses étoiles ont un plus gros « réservoir »

mais elles « consomment » plus car $L_{\odot} \propto M^3$!

$$\tau \propto \frac{E}{L} \propto M^{-2}$$

Les plus grosses étoiles vivent 3-4 Ma

Le soleil 10 Ga

Les plus petites sont... presque... éternelles

1) Des étoiles – c'est quoi ?

2) Des étoiles – *pour quoi faire* ?

3) Des étoiles – comment elles se forment ?

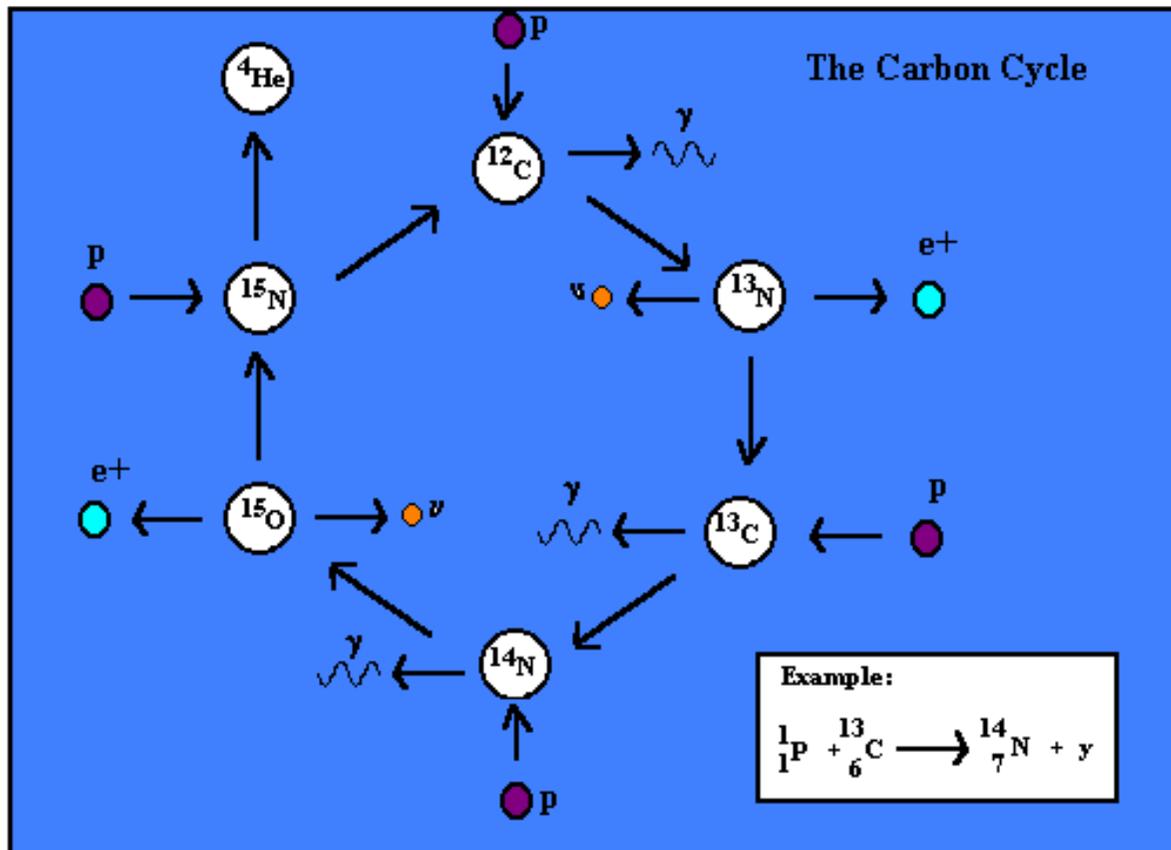
Pourquoi s'intéresser aux étoiles ?

-elles produisent les éléments lourds (carbone, oxygène)

Les étoiles sont le siège de réactions nucléaires qui :

-chauffent leurs intérieurs ($E=Mc^2\dots$)

-synthétisent les éléments lourds tels que le carbone



Abondances des éléments lourds

$$\text{He}/\text{H} \sim 10^{-1}$$

$$\text{D}/\text{H} \sim 3 \cdot 10^{-5}$$

$$\text{C}/\text{H} \sim 3 \cdot 10^{-4}$$

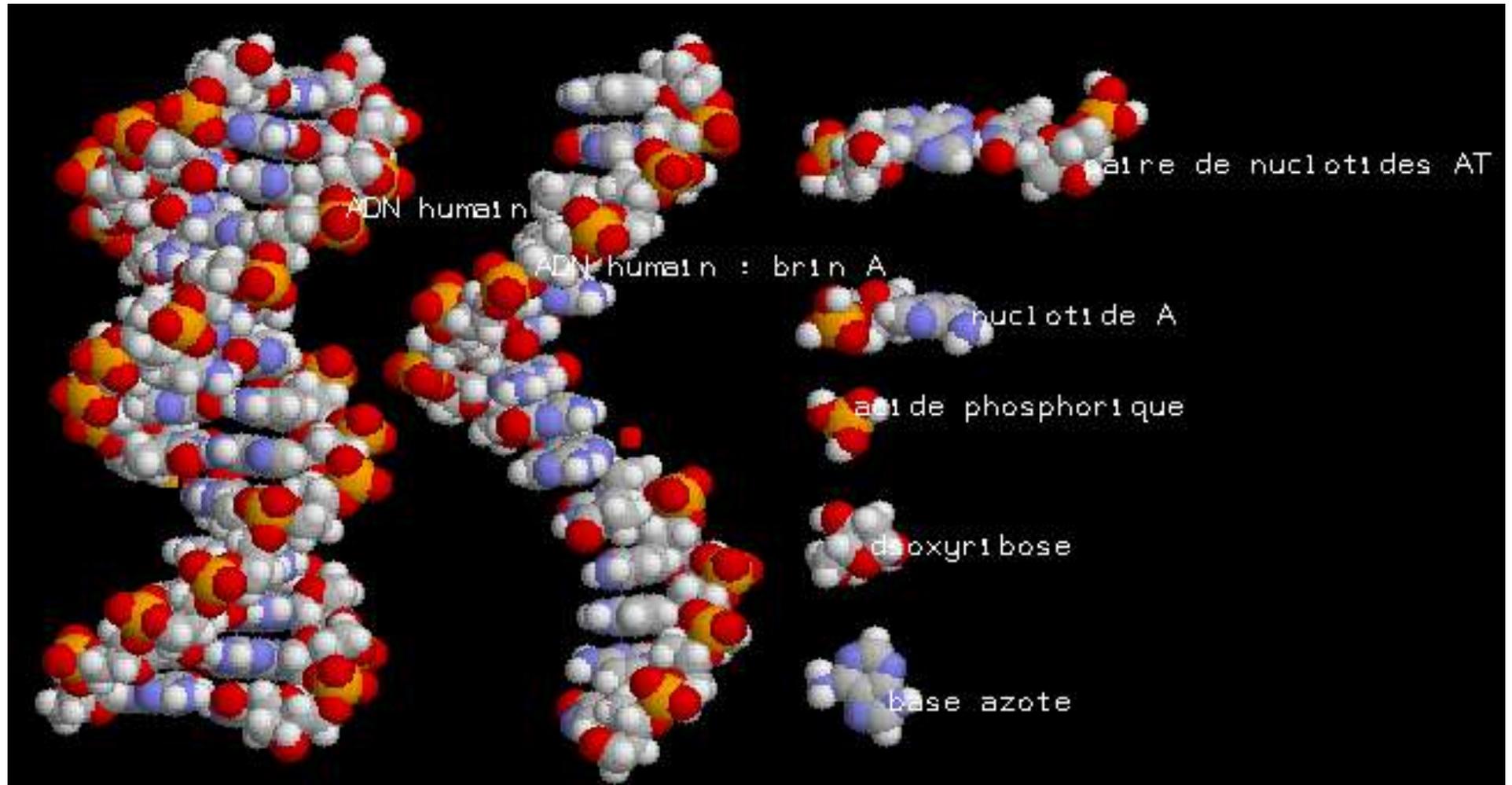
$$\text{N}/\text{H} \sim 1 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{O}/\text{H} \sim 7 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{Métaux: } 10^{-7} - 10^{-5}$$

Bien que leurs abondances soient relativement faibles, les éléments lourds jouent un rôle très important pour la physique du milieu interstellaire, en particulier pour le bilan thermique.

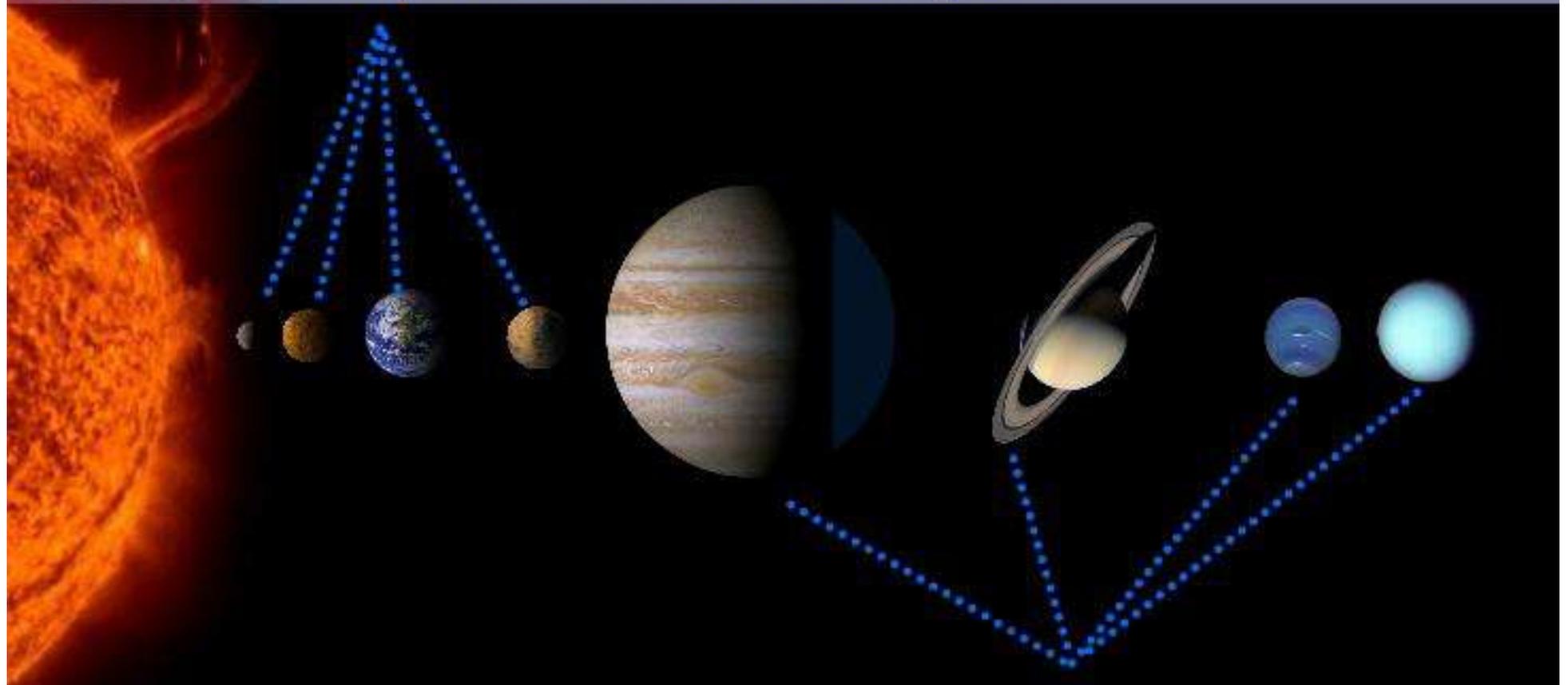
Sans élément lourd, pas de vie



Pourquoi s'intéresser aux étoiles ?

- elles produisent les éléments lourds (carbone, oxygène)
- elles abritent les planètes

Les planètes telluriques



Les planètes gazeuses

Existence des exo-planètes en orbite autour d'autres étoiles...

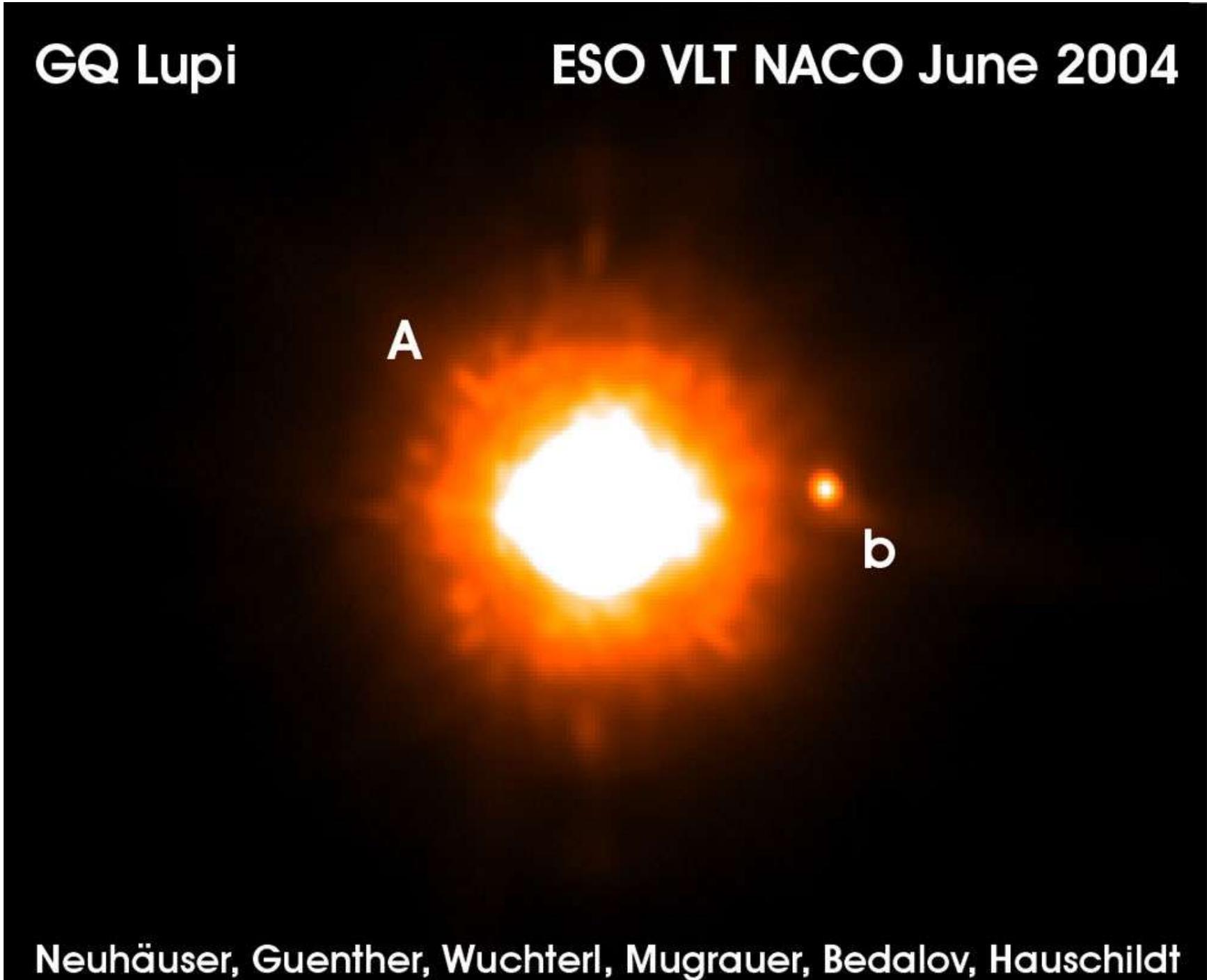
GQ Lupi

ESO VLT NACO June 2004

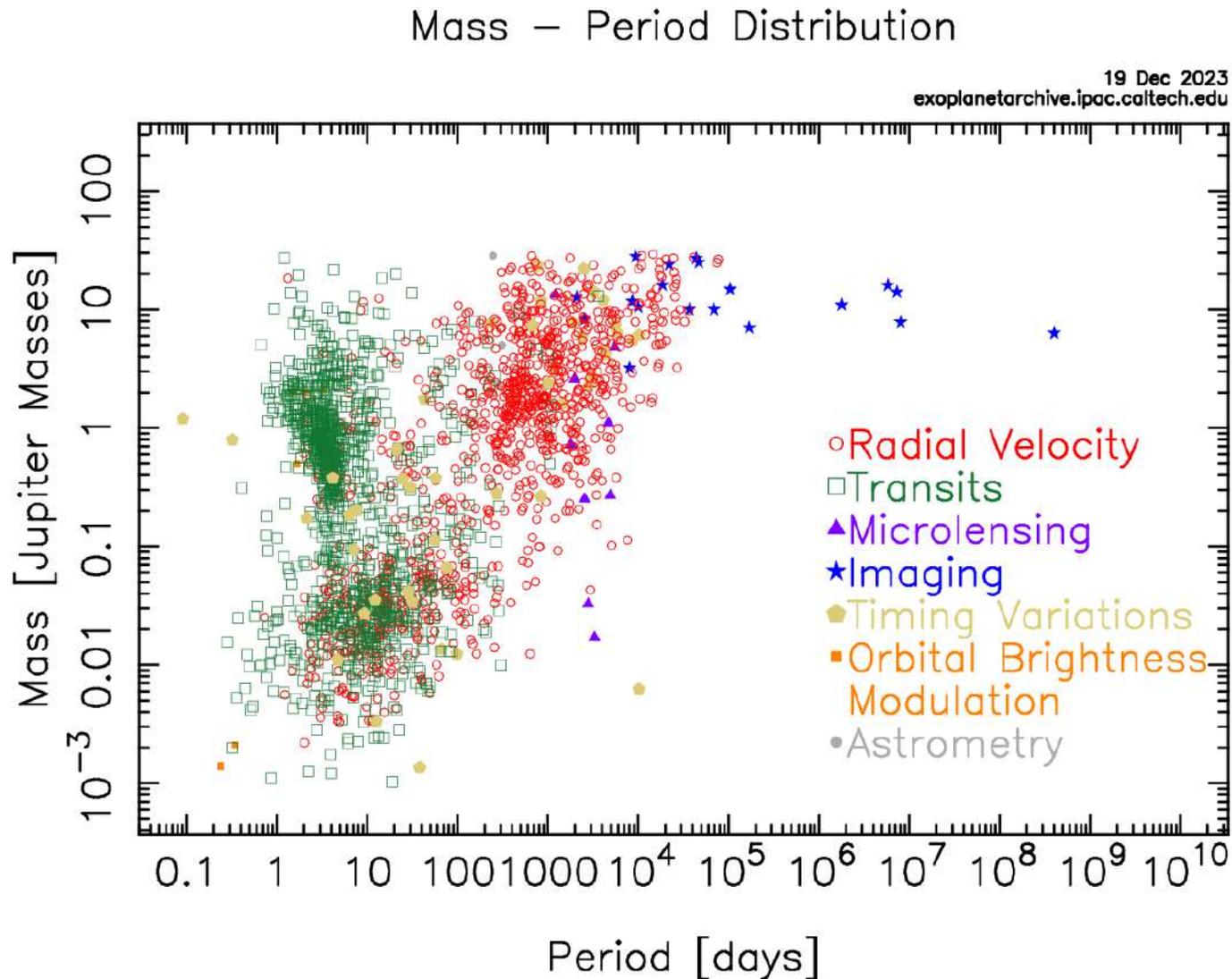
A

b

Neuhäuser, Guenther, Wuchterl, Mugrauer, Bedalov, Hauschildt



De plus en plus de planètes découvertes

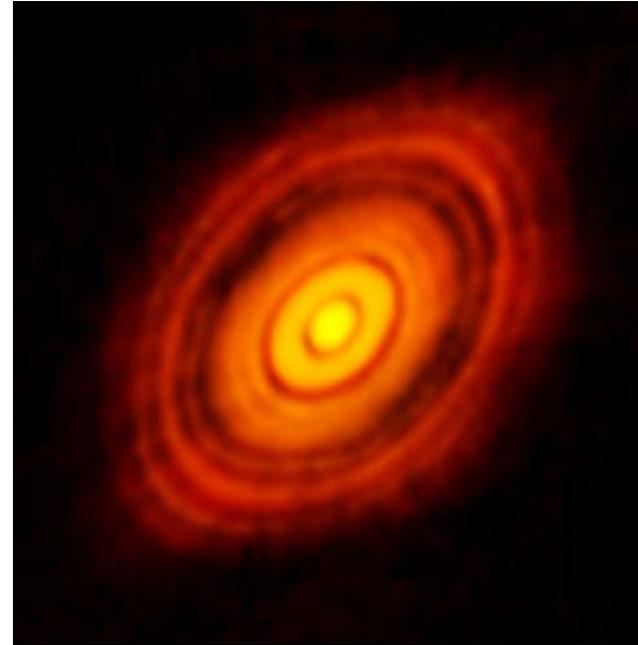


Sans doute plus de planètes que d'étoiles (100 milliards)
dans la Galaxie

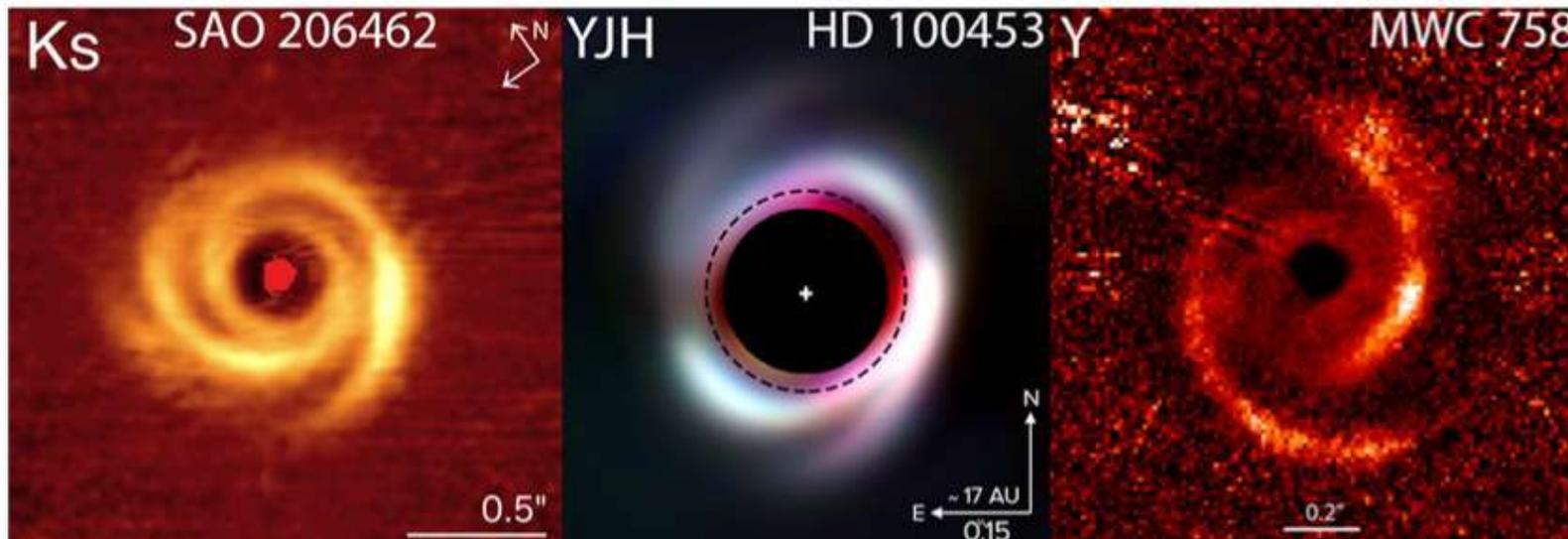
Pourquoi s'intéresser aux étoiles ?

- elles produisent les éléments lourds (carbone, oxygène)
- elles abritent les planètes qui se forment dans les disques protoplanétaires autour des étoiles !

Un disque protoplanétaire récemment observé par ALMA
Des sillons sont visibles...



D'autres exemples de disques récemment observés

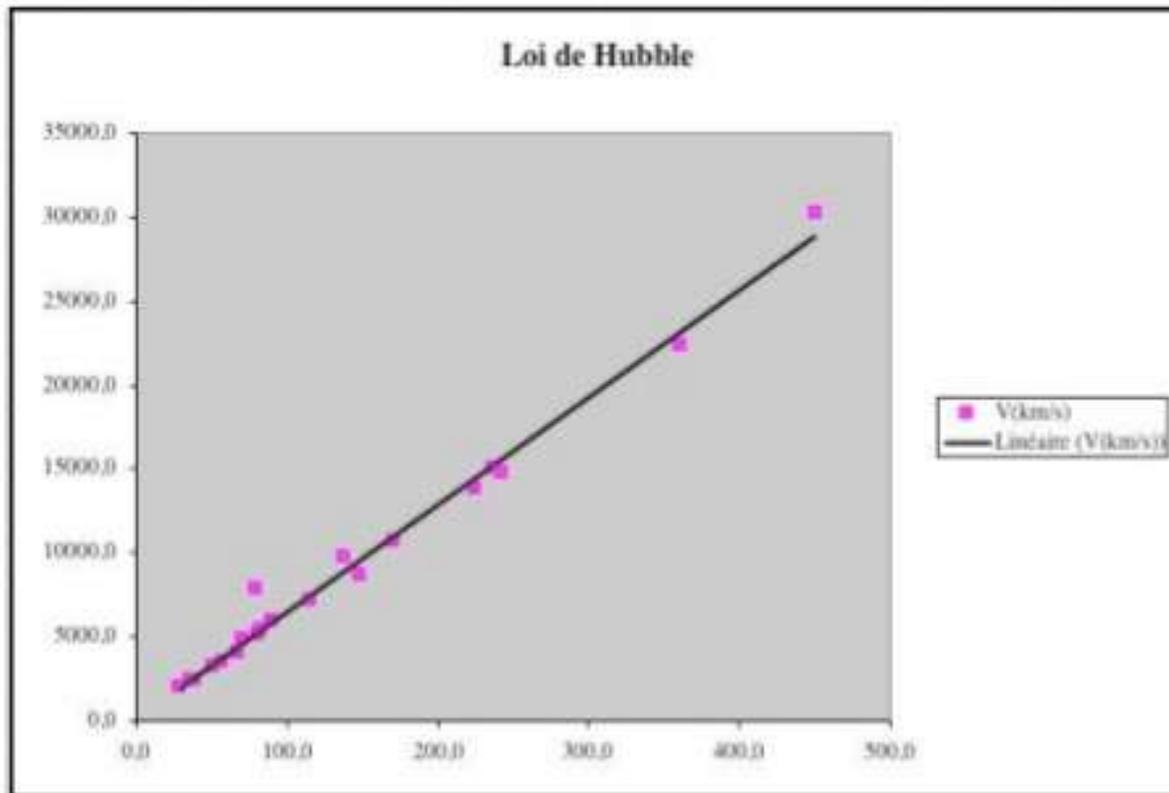


Pourquoi s'intéresser aux étoiles ?

- elles produisent les éléments lourds (carbone, oxygène)
- elles abritent les planètes
- elles sont "visibles"

Expansion de l'univers

Loi de Hubble
Décalage vers le rouge des galaxies

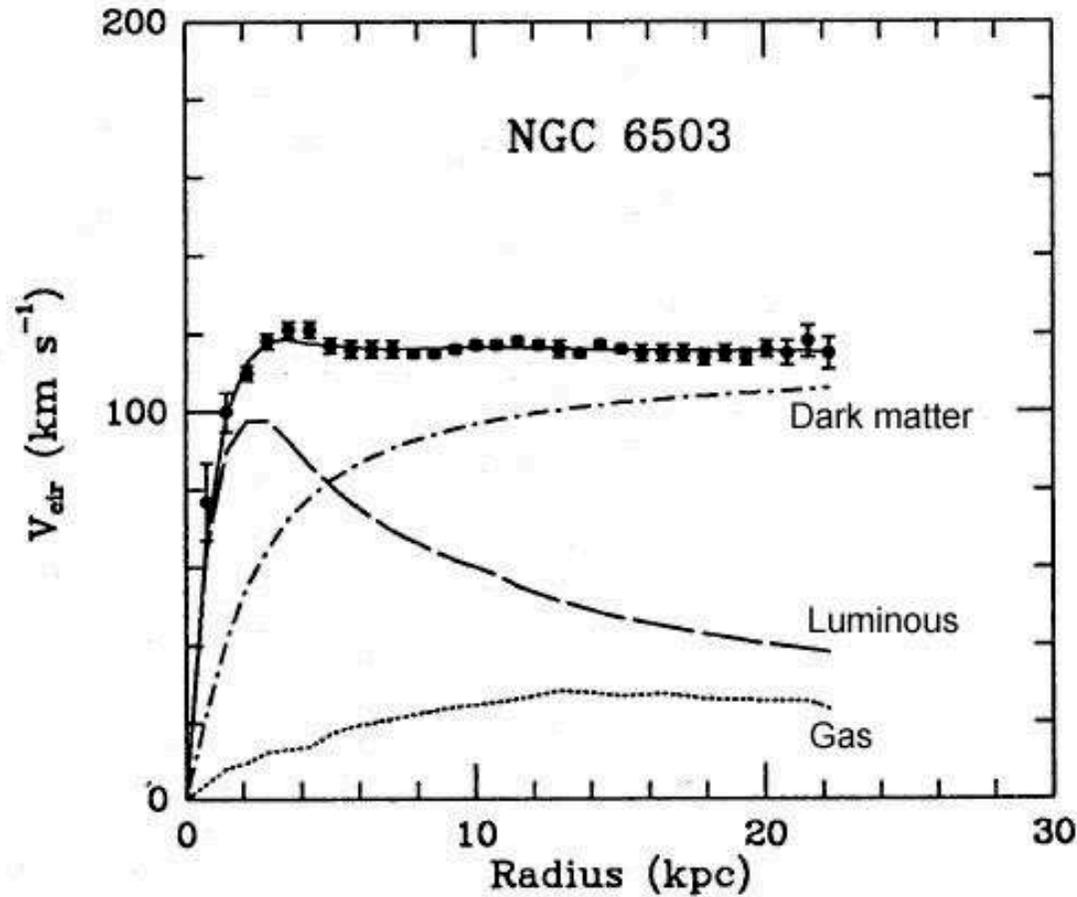


La loi de Hubble mesurée en 1996 (vitesse des galaxies en fonction de leur distance).
Cette fois, la distance des galaxies atteint 500 Mpc.

Crédit : Riess, Press & Kirshner (1996), Astrophysical Journal 473, 88

La matière noire

Courbe de rotation des galaxies



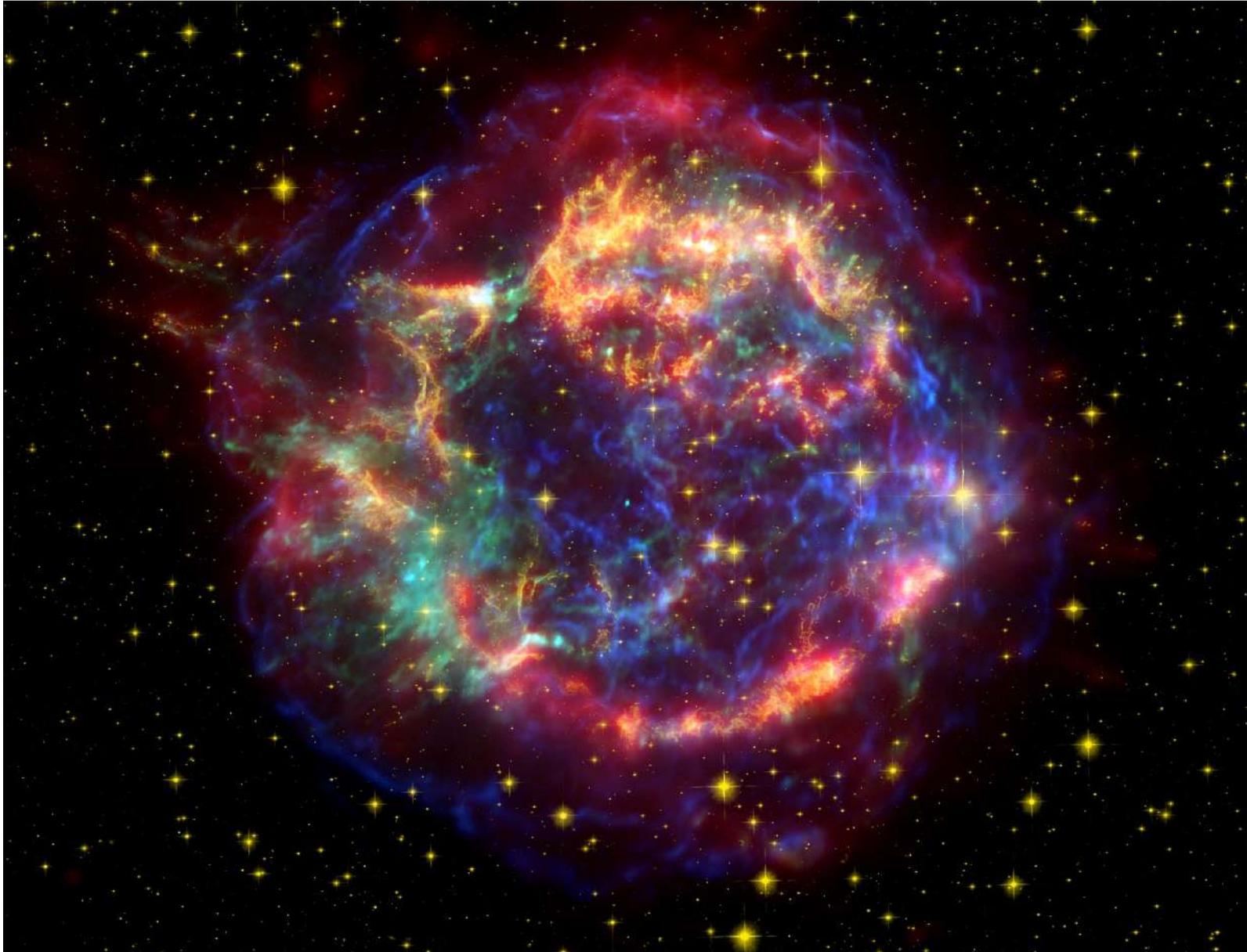
Begeman et al. 1991

Egalement mise en évidence dans les amas de galaxies.

Pourquoi s'intéresser aux étoiles ?

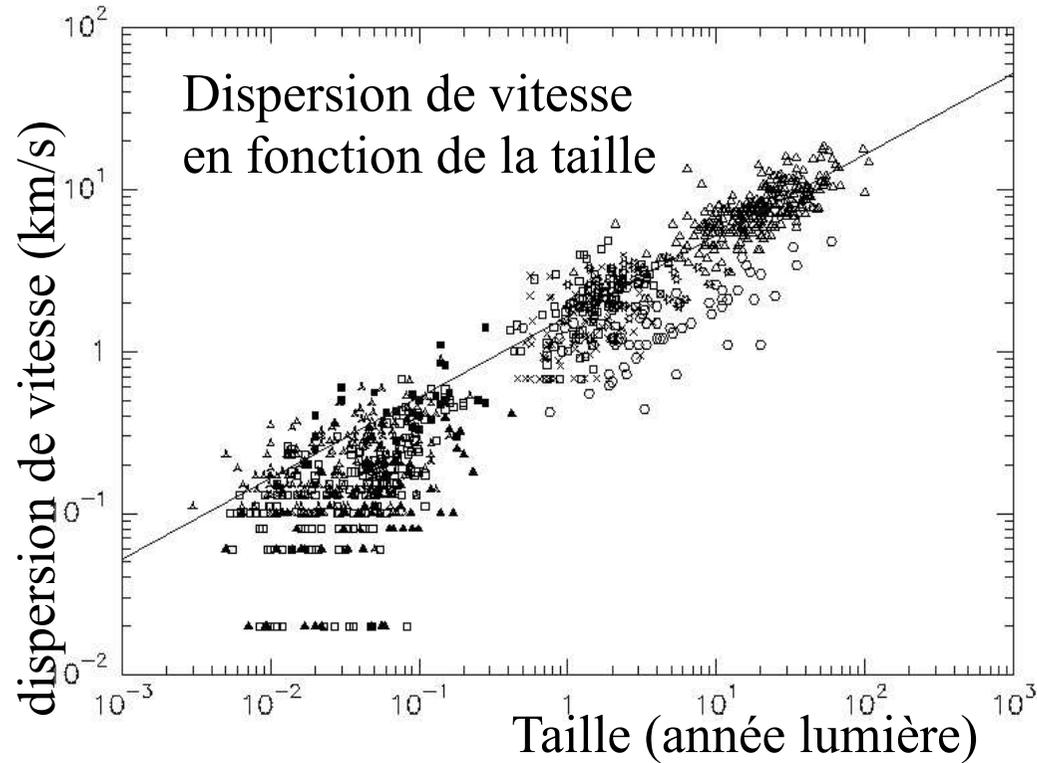
- elles produisent les éléments lourds (carbone, oxygène)
- elles abritent les planètes
- elles sont "visibles"
- elles ont une grande influence sur les galaxies

La nébuleuse de Cassiopée : un reste de supernova



Une « cascade » turbulente dans les galaxies

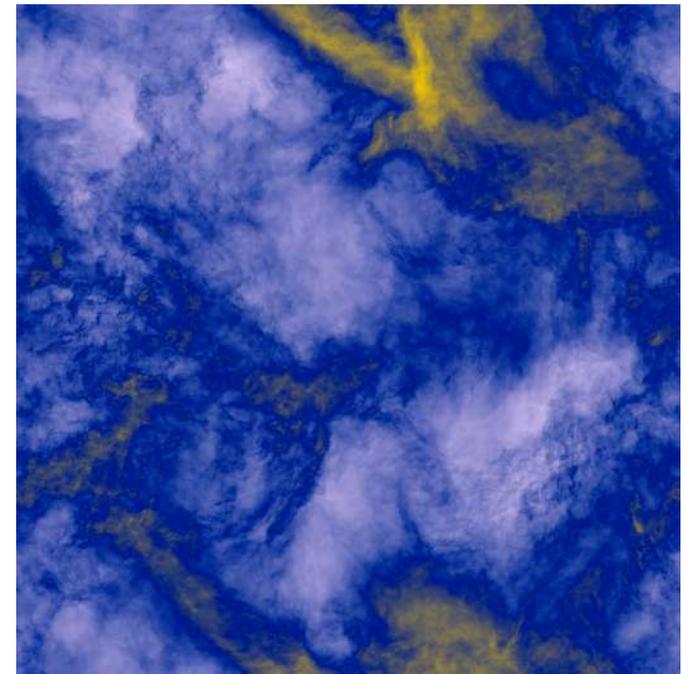
La turbulence hydrodynamique joue un rôle fondamentale dans les galaxies dans le gaz moléculaire des lois de puissance sont observées sur plusieurs décades.



Larson 1981
Falgarone 2000

Une simulation numérique
du gaz interstellaire turbulent

Kritsuk et al. 2007



Qu'est-ce qu'une simulation numérique ?

Un algorithme qui résout *avec une certaine précision* les équations de la physique pertinente pour le problème étudié. Plusieurs étapes :

- définition d'une technique de discrétisation (grilles, particules...). Cet échantillonnage peut évoluer au cours du temps
- définition d'une méthode pour résoudre de manière approchée, les équations de la physique
- une simulation doit être bien *résolue* => un grand nombre d'éléments de calcul (parfois plusieurs milliards voire centaines de milliards)
- pour être réalisé, le calcul nécessite plusieurs milliers (voire centaines de milliers) de processeurs travaillant en parallèle
- on a souvent recours à des modèles « sous-maille » pour décrire ce qui se passe à des échelles trop petites pour être décrites

Une simulation numérique est une longue suite d'approximations...

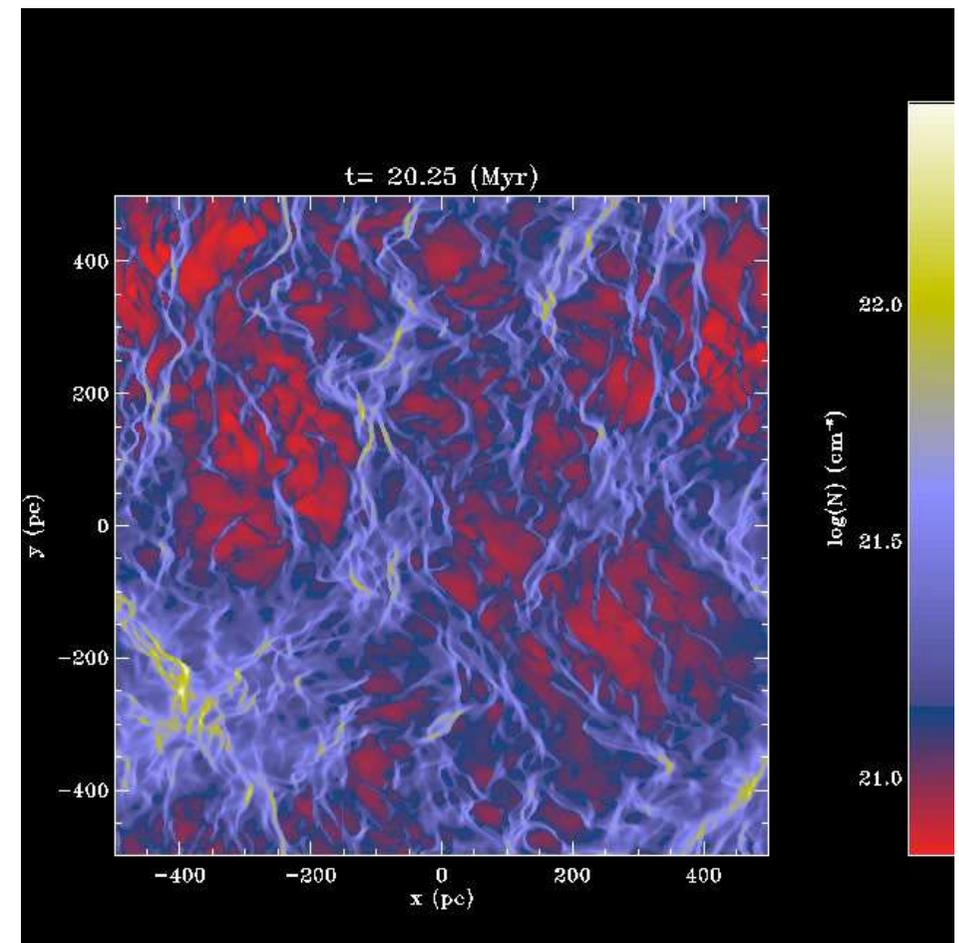
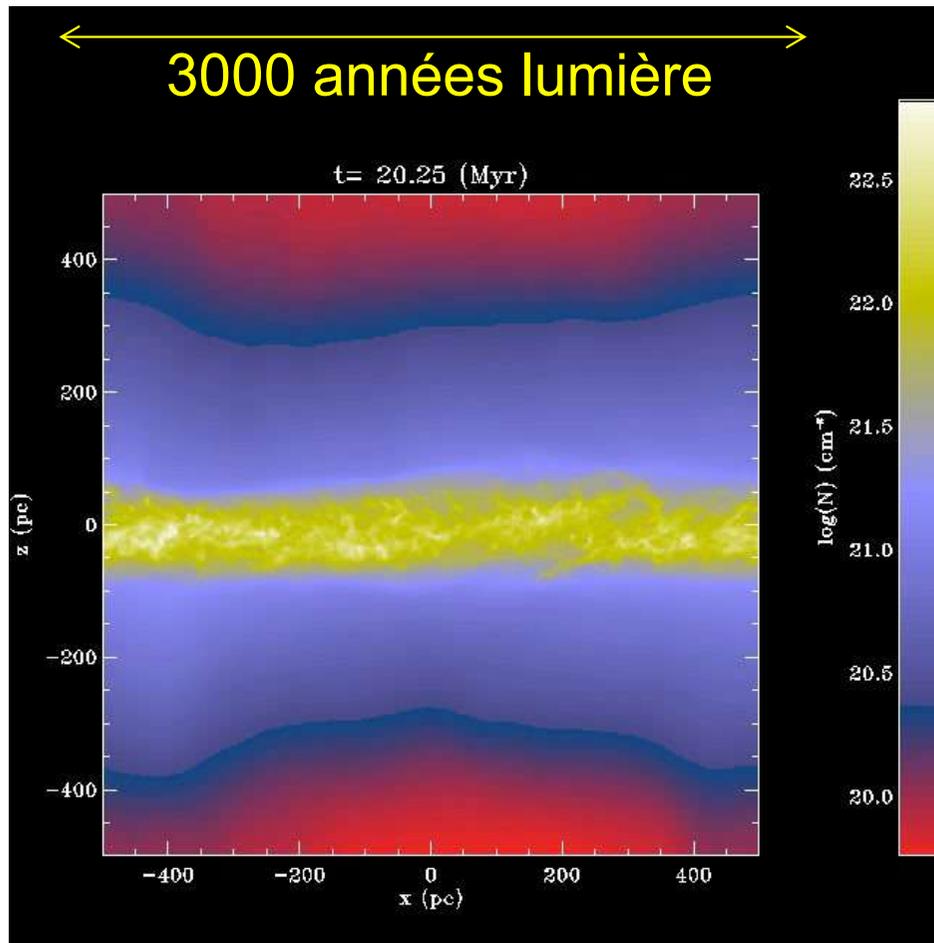
Les explosions des étoiles “agitent” la galaxie

Exemple d'un calcul sur ordinateur montrant l'influence des explosions sur une tranche de galaxie

Densité du gaz intégrée

Vue de profil

Vue de face



1) Des étoiles – c'est quoi ?

2) Des étoiles – pour quoi faire ?

3) Des étoiles – comment elles se forment ?

Comment les étoiles se forment ?

-par effondrement gravitationnel d'un nuage de gaz

La gravité : force d'attraction universelle !

$$\mathbf{G} = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ kg}^{-1} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$$

$G \times \rho : \text{s}^{-2}$ ρ la densité du gaz (la masse par unité de volume)

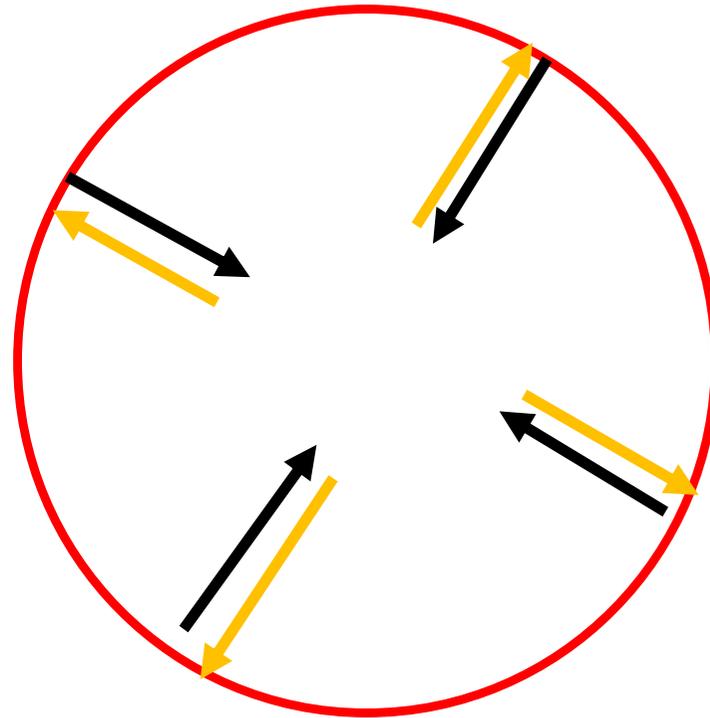
$\frac{1}{\sqrt{G\rho}} : \text{s}$ est un temps caractéristique, dit temps de chute libre

C'est le temps au bout duquel un nuage de densité ρ , d'effondre sur lui-même et forme une singularité/étoile.

Une bataille cosmique : la gravité contre la pression !

Une affaire de temps, le plus rapide gagne...

Un nuage interstellaire de densité, ρ



La gravité

La pression

Si le temps de chute libre < temps de traversée le nuage s'effondre

$$\frac{1}{\sqrt{G\rho}} < \frac{R}{c_{son}} \Rightarrow R > \frac{c_{son}}{\sqrt{G\rho}}$$

Le nuage doit être assez grand

la gravité et la pression ou comment passer d'un Univers presque homogène à un Univers structuré

temps de chute libre < temps de traversée

$$\frac{1}{\sqrt{G\rho}} < \frac{R}{c_{son}} \Rightarrow R_{jeans} > \frac{c_{son}}{\sqrt{G\rho}}$$

masse minimum, dite de Jeans :

$$M_{jeans} \propto \rho R_{jeans}^3 \propto \rho^{-1/2}$$

La masse de Jeans diminue avec la densité !

Quand une masse de gaz se contracte, sa densité augmente, la masse de Jeans diminue et donc de nouveaux fragments apparaissent.

L'Univers se fragmente !

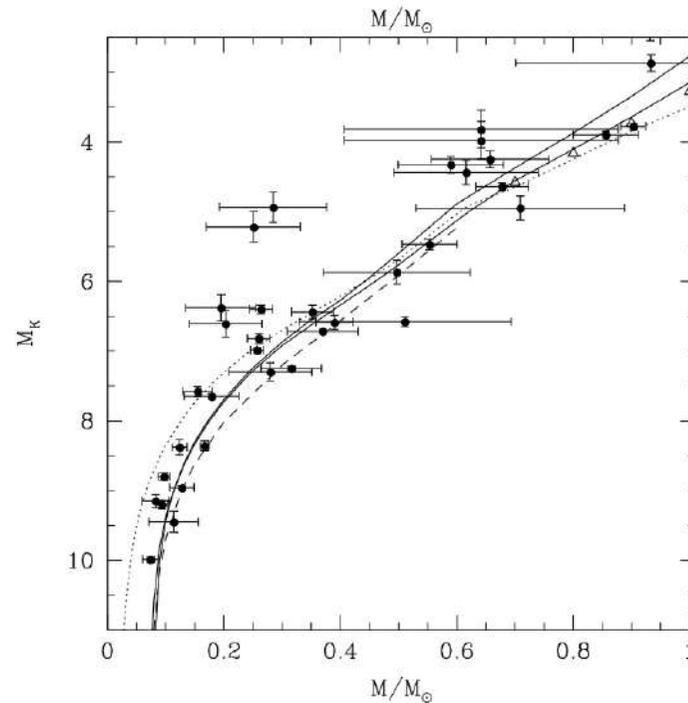
Des objets de plus en plus petits apparaissent.

Comment les étoiles se forment ?

- par effondrement gravitationnel d'une boule de gaz
- la distribution de masse des étoiles

Comment détermine-t-on la fonction de masse ?

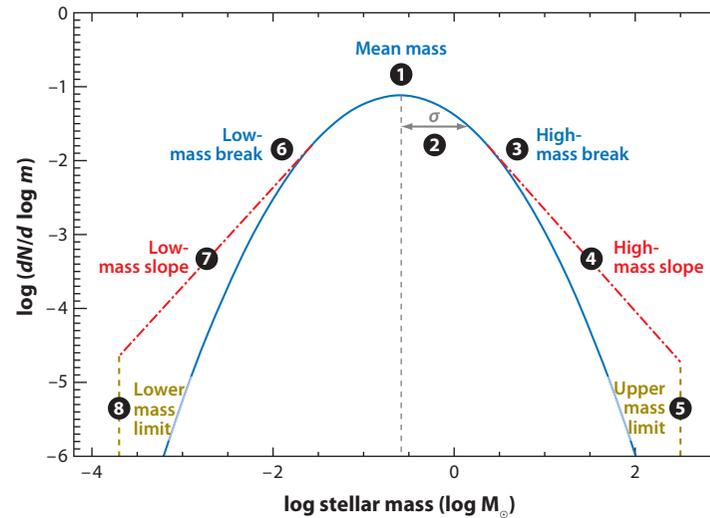
- La masse n'est, en général, pas accessible
- On mesure la luminosité
- Il faut un modèle pour « transcrire » la luminosité en masse
- On mesure alors la « present day mass function » - il faut ensuite corriger de l'âge (les étoiles massives peuvent avoir disparu)
- Il faut également tenir compte de la binarité



Baraffe et al. 1998

La fonction de masse initiale des étoiles

(Salpeter 1955, Kroupa 2002, Chabrier 2003, Hillenbrand 2004, Moraux+2007, Bastien+2010, Offner+2014)



Bastien+2010

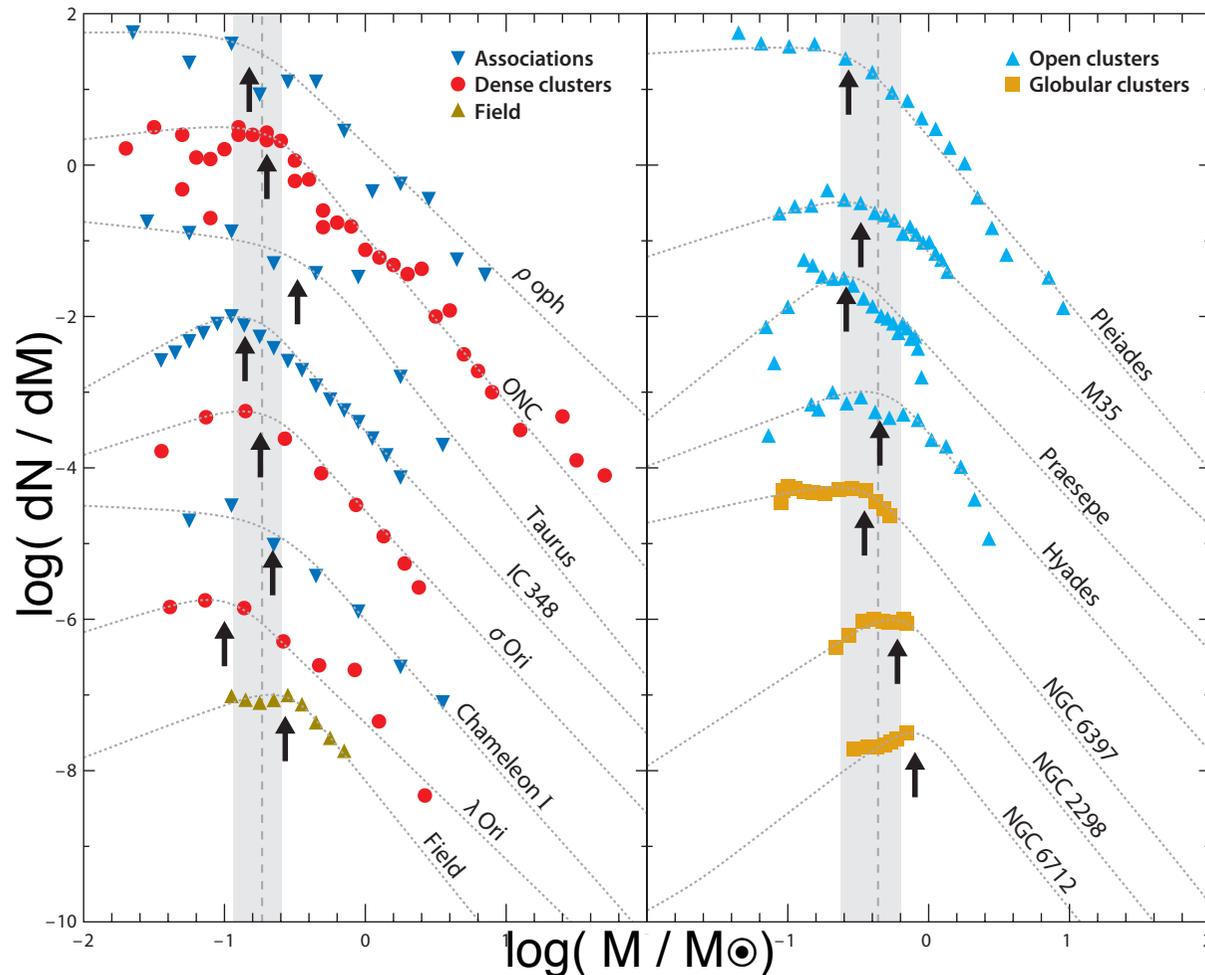
Pour des masses $> 1-2 M_{\odot}$: $dN/d \log M \propto M^{-1.35}$

Deux caractéristiques principales :

- une loi de puissance (processus sans échelle caractéristique)
- un pic \Rightarrow une masse caractéristique

Pourquoi la fonction de masse des étoiles est-elle « si »

universelle ?



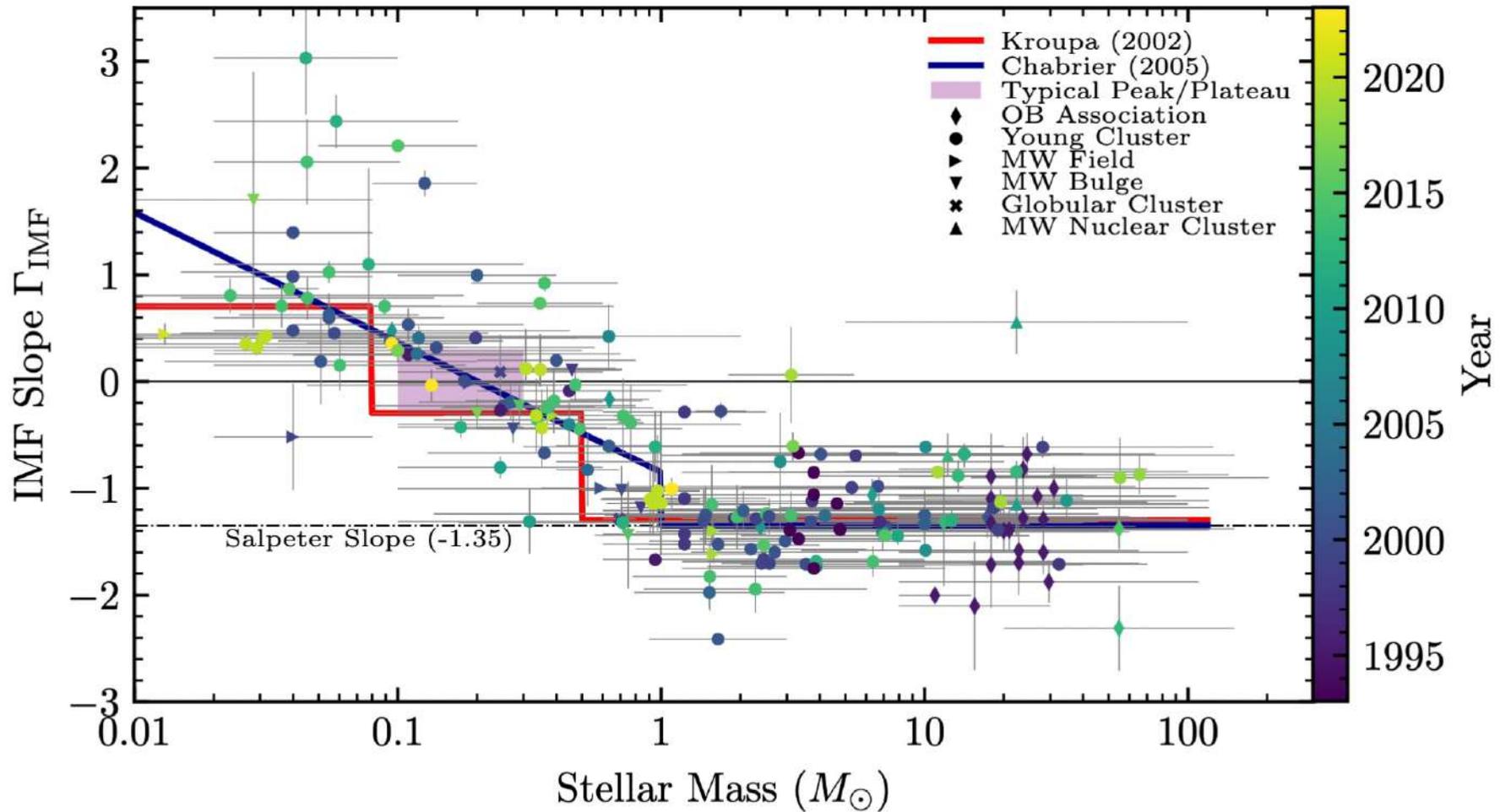
Bastien+2010

Ces données montrent que le spectre de masse des étoiles varie peu d'une région à l'autre quand bien même les conditions physiques sont parfois très différentes.

Même si des différences plus marquées commencent à apparaître, l'universalité (relative) de l'IMF est surprenante.

Pourquoi la fonction de masse des étoiles est-elle « si » universelle ?

$$\frac{dN}{d \log M} \propto M^{\Gamma_{IMF}}$$



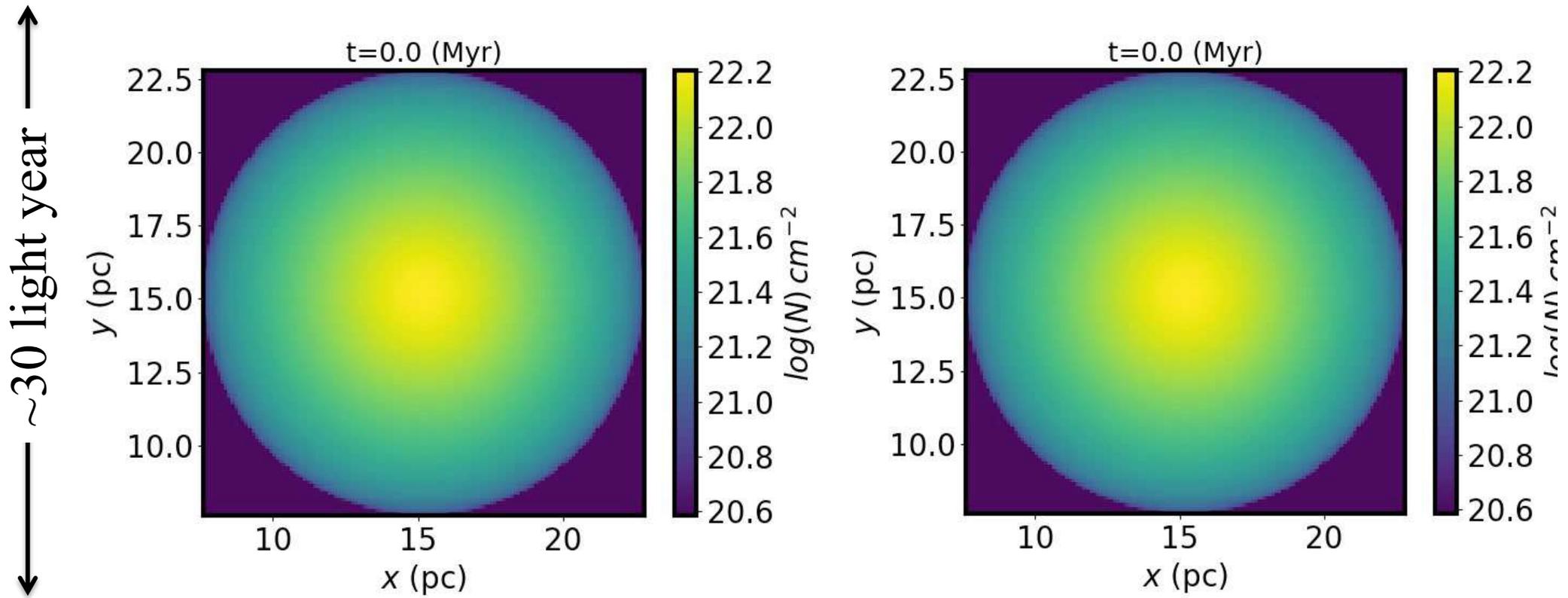
Comment les étoiles se forment ?

-par effondrement gravitationnel d'une boule de gaz

-la distribution de masse des étoiles

-idées physique et études de la distribution de masse par les simulations numériques

Etude de la formation des étoiles grâce aux simulations numériques



Les points rouges représentent des étoiles. Modèle « sous-maille ».

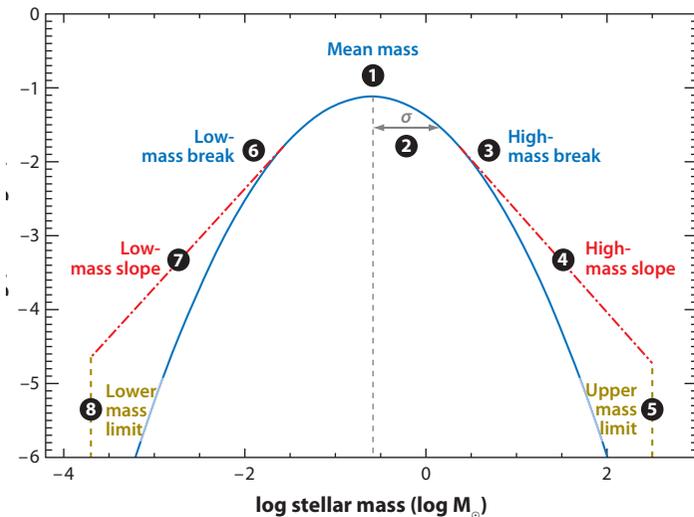
Une origine du pic de la fonction initiale de masse ?

Au cours de l'effondrement gravitationnel, la densité du gaz augmente de pratiquement 20 ordres de grandeur. A « mi-parcours », la poussière devient opaque à son rayonnement.

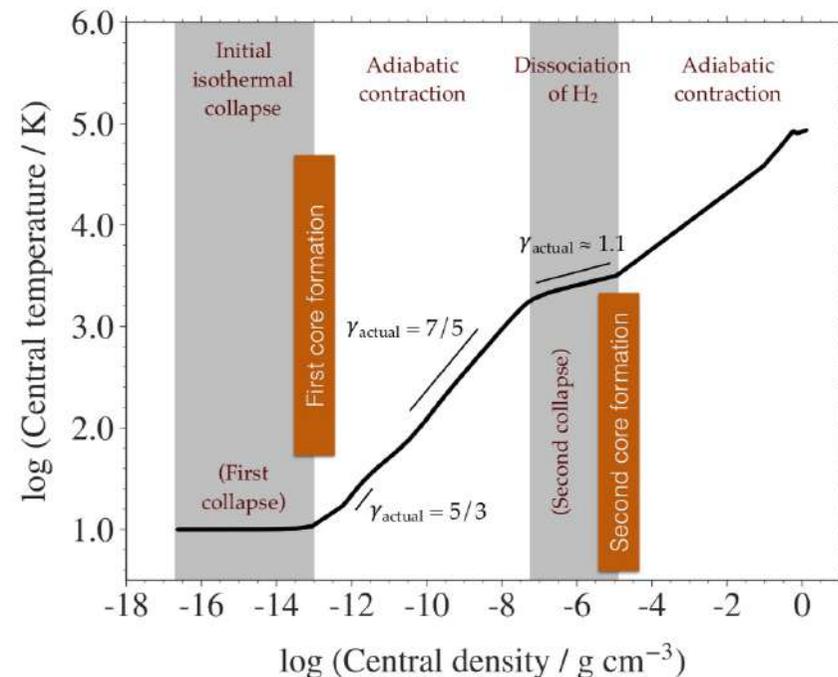
=> l'effondrement s'arrête pour un temps.

=> de la masse s'accumule et un cœur hydrostatique se forme

=> quand la masse est assez élevée, l'effondrement reprend et l'étoile se forme



Température en fonction de la densité



Le rôle critique de la thermodynamique pour la fragmentation

Considérons un nuage de rayon initial R . Modélisons la pression par un polytrophe $P = K \rho^\gamma$

$$\frac{E_{therm}}{E_{grav}} = \frac{PV}{GM^2/R} \propto \rho^\gamma R^4 \propto R^{4-3\gamma}$$

-si $\gamma < 4/3$, lorsque R décroît (le nuage se contracte) E_{therm}/E_{grav} diminue.
L'effondrement s'amplifie.

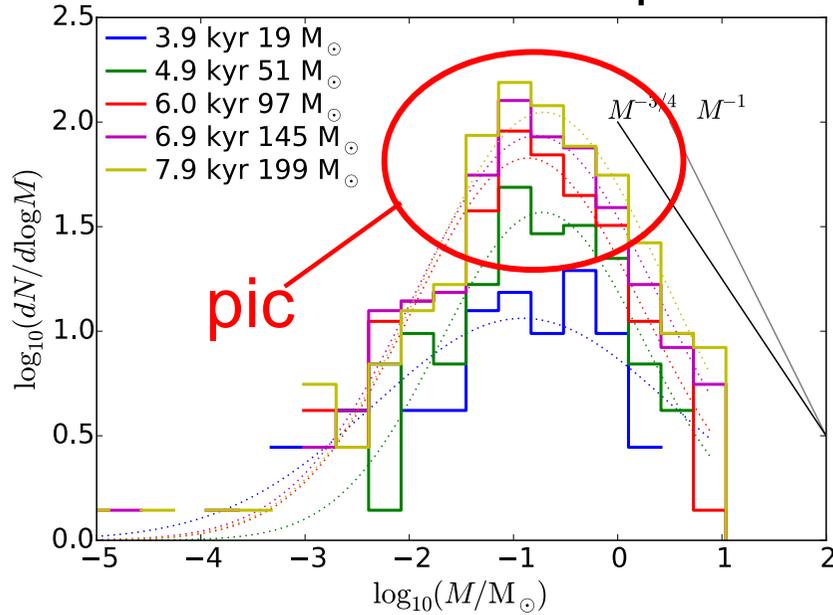
-si $\gamma > 4/3$, lorsque R décroît, E_{therm}/E_{grav} augmente. L'effondrement est stoppé.

$\gamma = 4/3$ est un exposant critique

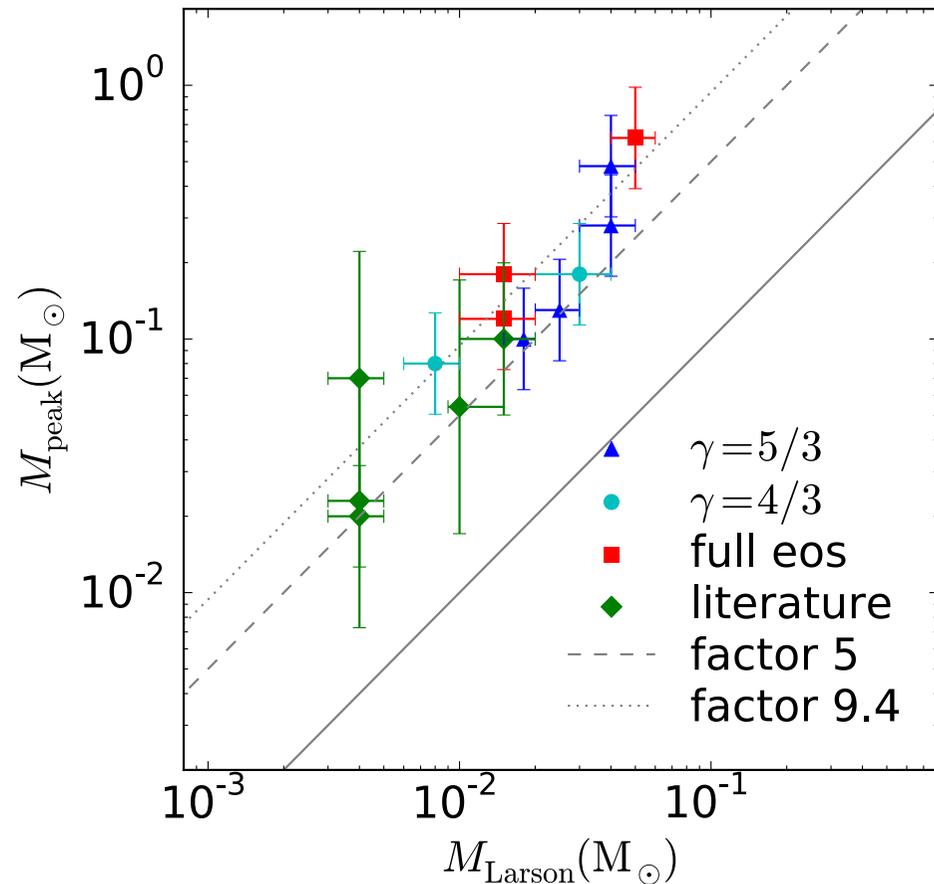
Une origine du pic de la fonction initiale de masse ?

Les simulations numériques mettent en évidence une corrélation étroite entre la masse du cœur hydrostatique et le pic de la fonction de masse des étoiles

Spectre de masse obtenu dans une simulation numérique



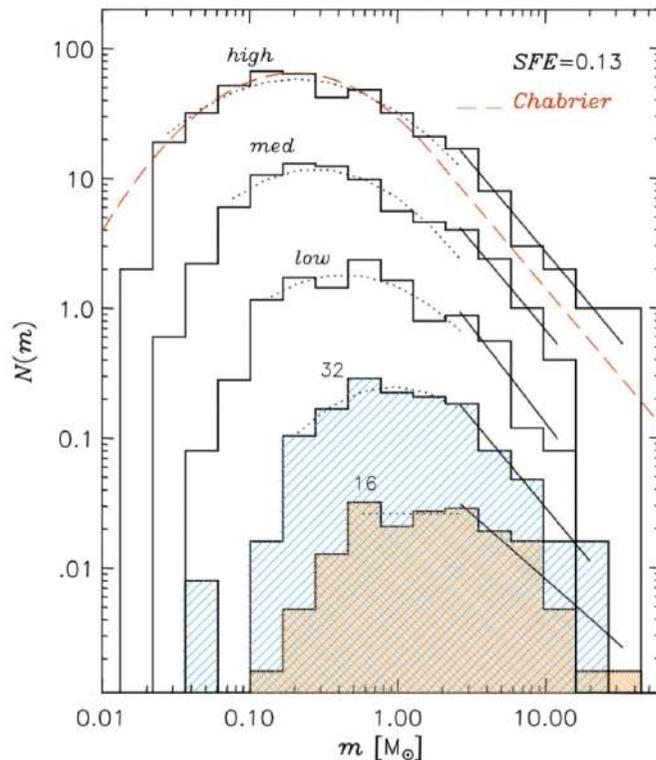
Masse du pic en fonction de la masse du cœur hydrostatique



Au-delà du pic, un régime auto-similaire ?

Les simulations numériques mettent en évidence un régime en loi de puissance qui ne présentent pas d'échelle caractéristique

Spectre de masse obtenu dans une simulation numérique



Haugbolle+2018

Les fluctuations de densité induites par la turbulence et la « pression turbulente » peuvent expliquer cette tendance

$$N(R) R^3 = \text{cst}$$

$$d_R N \propto R^{-4}$$

Equilibre viriel

(gravité = turbulence) :

$$GM / R = V^2 \propto R^{2\eta}$$

$$\Rightarrow M \propto R^{2\eta+1}$$

\Rightarrow

$$d_{\log M} N = M^{-3/(2\eta+1)}$$

Chabrier&H+2011

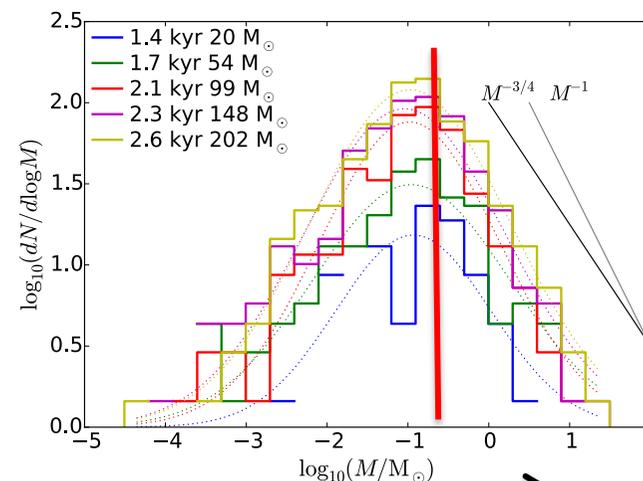
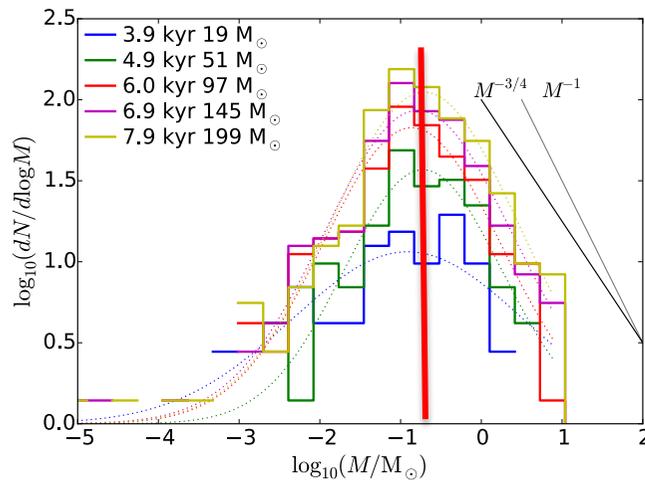
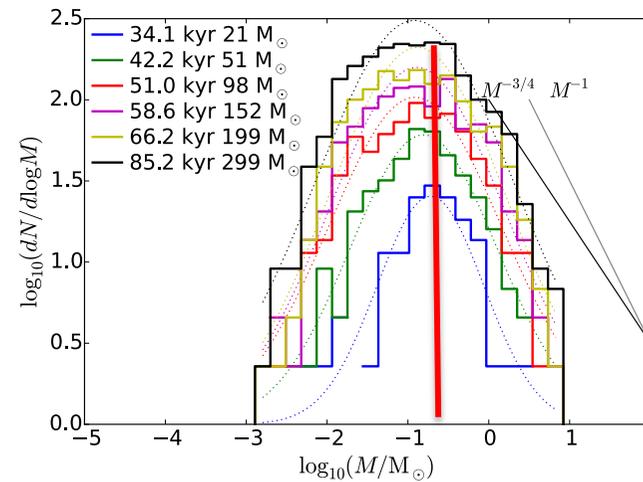
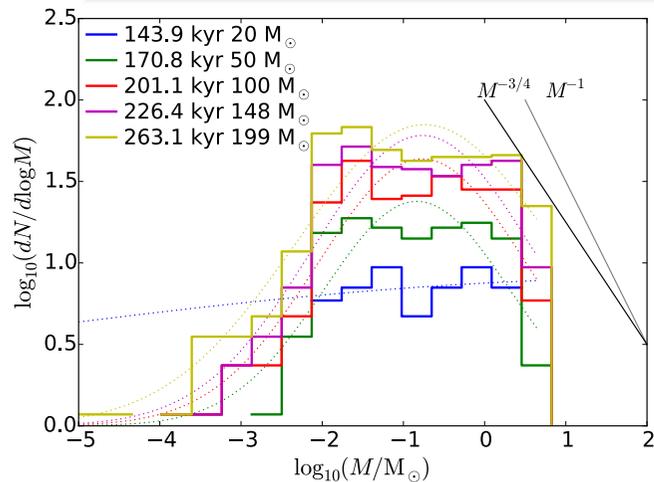
Comment les étoiles se forment ?

- par effondrement gravitationnel d'une boule de gaz
- la distribution de masse des étoiles
- idées physique et études de la distribution de masse par les simulations numériques
- des questions qui perdurent

Des questions qui perdurent...

Les simulations numériques prédisent que pour certaines conditions initiales, le spectre prédit est en assez bon accord mais pour d'autres conditions ce n'est pas le cas.

Initial density $\sim 10^3 \text{ cm}^{-3}$ ($\Leftrightarrow E_{\text{turbulent}} / E_{\text{thermal}}$)



Initial density $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$

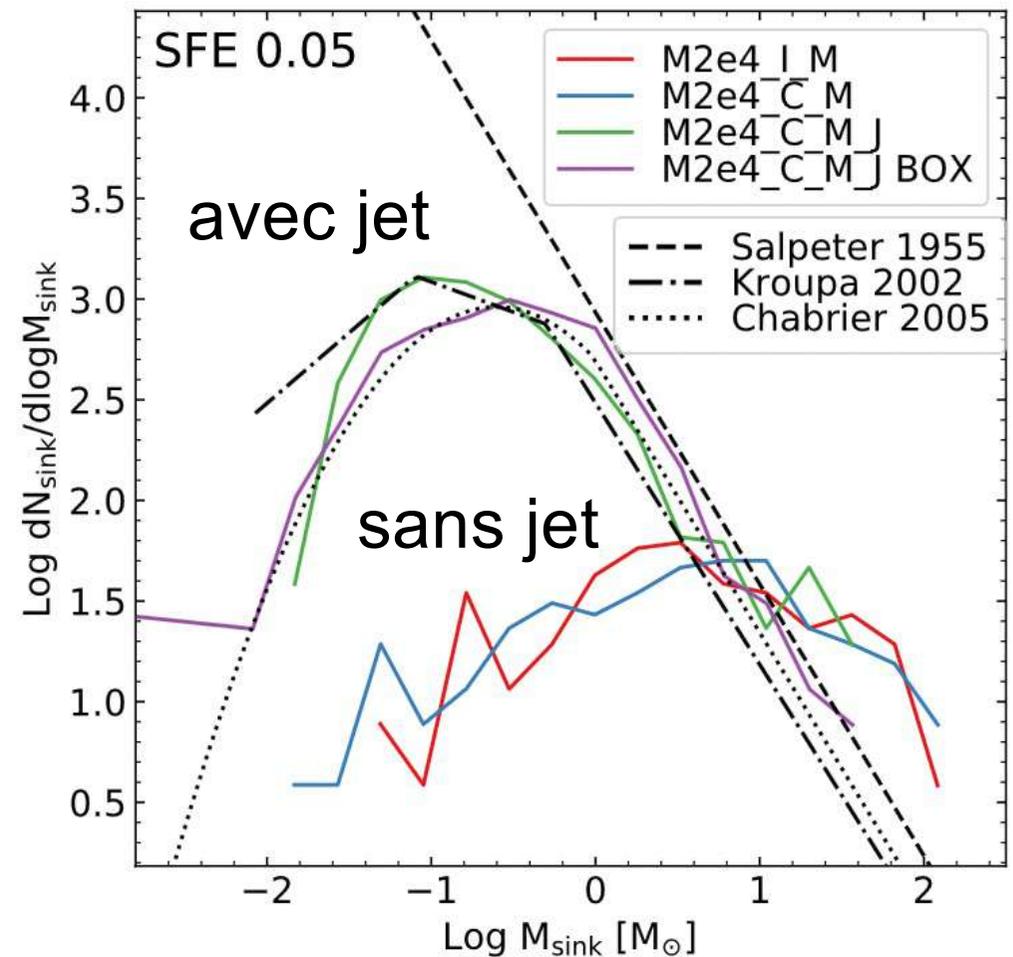
Des questions qui perdurent...

Un ingrédient possiblement important, les jets protostellaires. Les simulations numériques semblent indiquer que lorsque les jets protostellaires sont pris en compte, le spectre de masse trouvé est en meilleur accord avec les observations.

Un jet protostellaire



ESO, McCaugrean



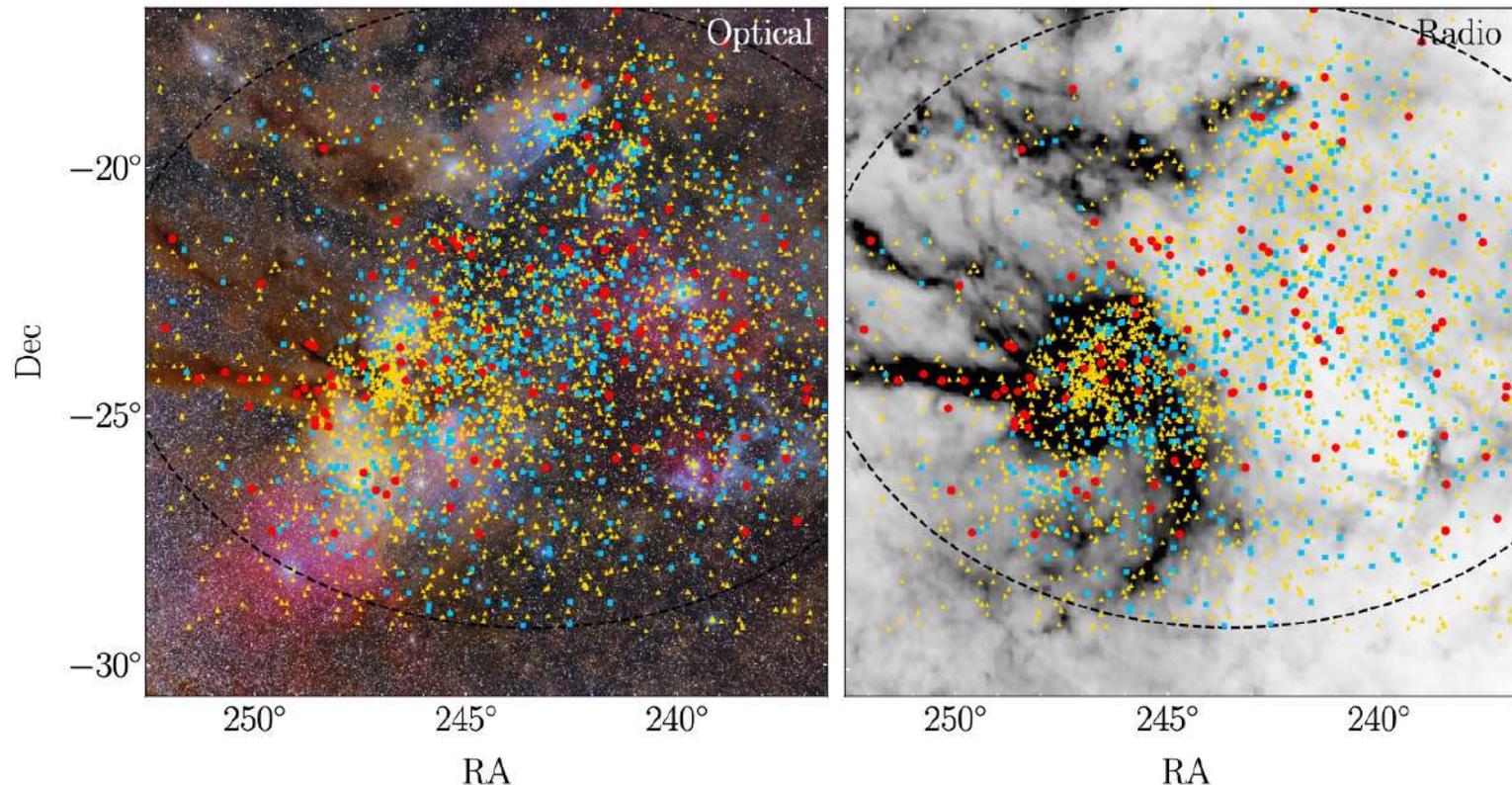
Comment les étoiles se forment ?

- par effondrement gravitationnel d'une boule de gaz
- la distribution de masse des étoiles
- idées physique et études de la distribution de masse par les simulations numériques
- des questions qui perdurent
- les très petites masses : « free-floating planets »

Vers les très petites masses : « free-floating » planets

Les observations récentes révèlent une population d'objets dont la masse est inférieure à celles des naines brunes. Ils sont qualifiés de « *free-floating planet* ».

Upper-Scorpus cluster

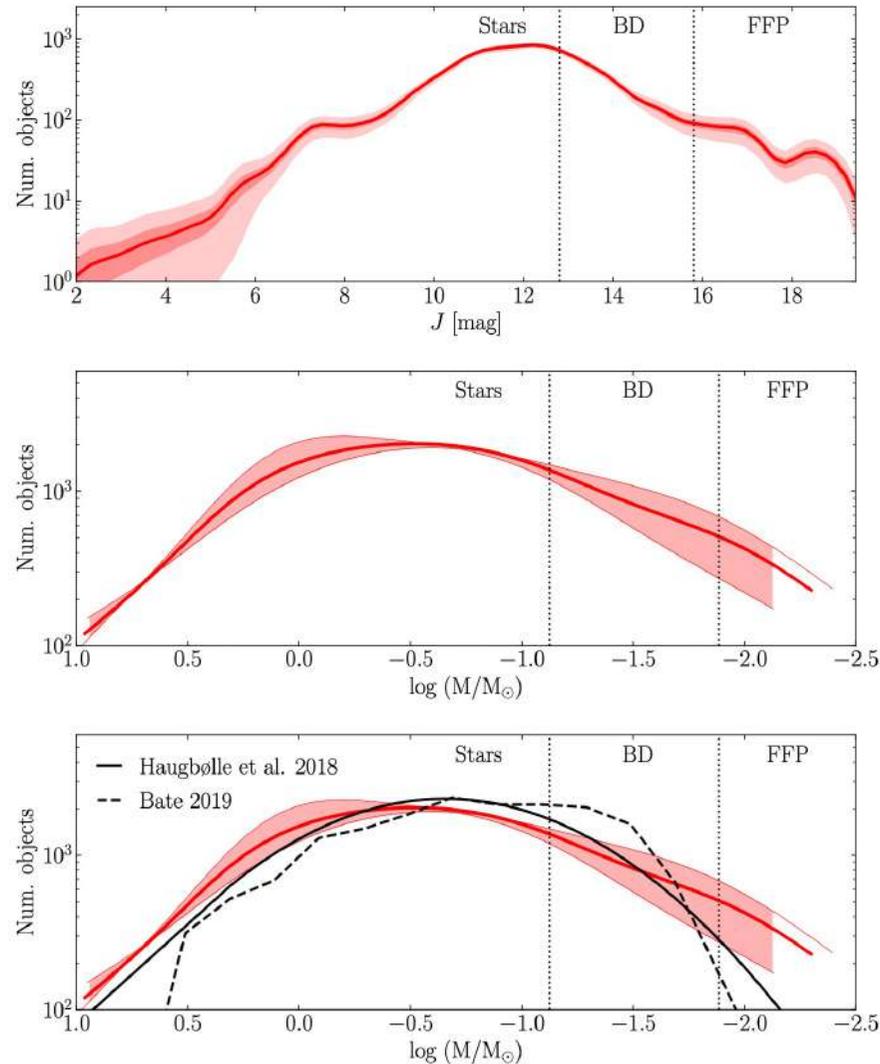


Point rouges : free-floating planets
Points bleus : naines brunes
Points jaunes : étoiles

Vers les très petites masses : « free-floating » planets

La distribution de masse se prolonge vers les petites masses.

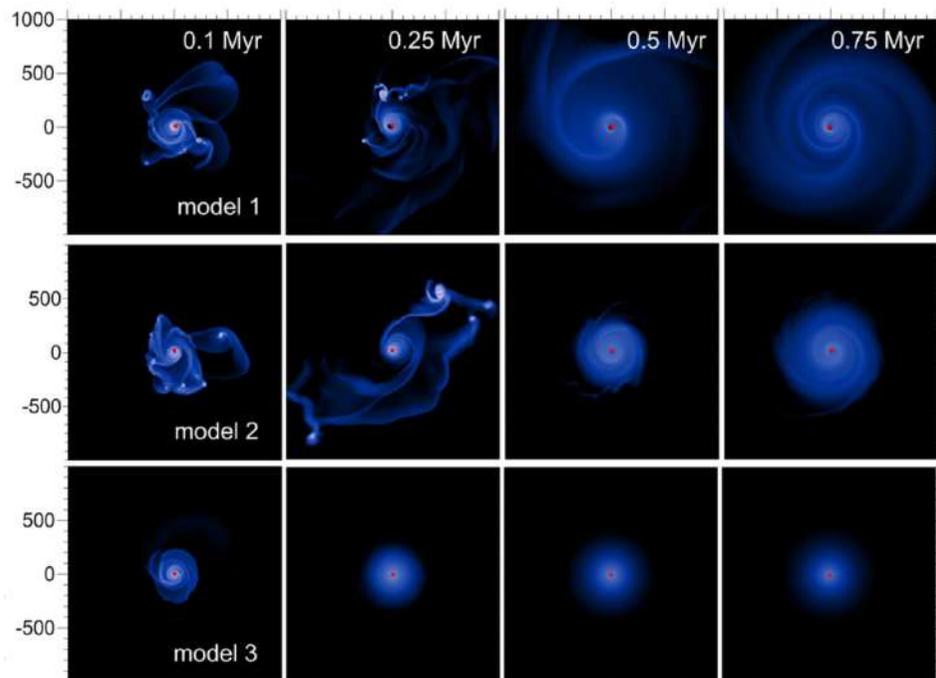
Les simulations prédisent un nombre de ces objets bien inférieur à ce que les observations révèlent.



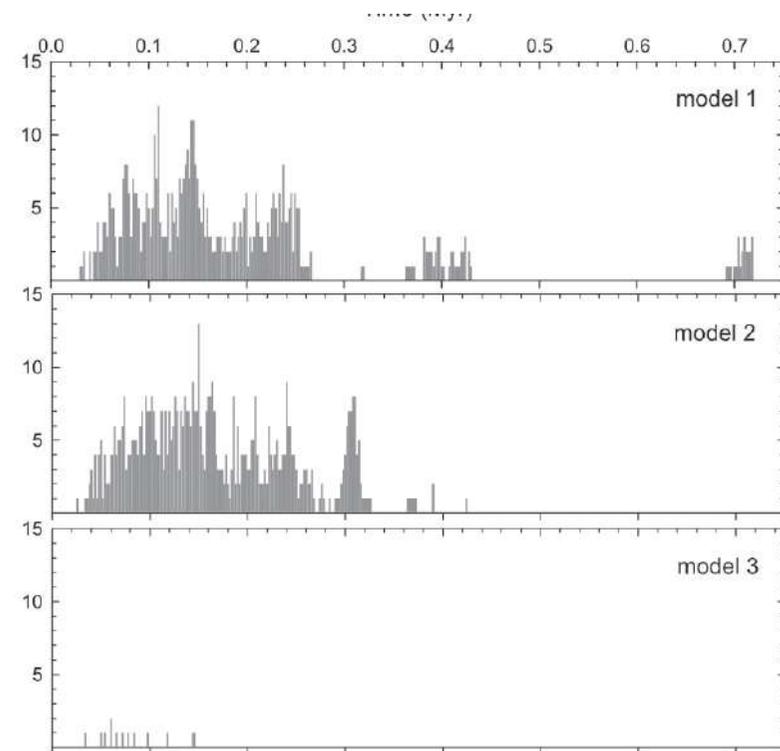
Un scénario possible pour la formation des « free-floating » planets

Un scénario envisageable la fragmentation des disques proto-planétaires.

Disques proto-planétaires
Certains se fragmentent et
forment des free-floating
planets



Nombre d'objets formés



Comment les étoiles se forment ?

- par effondrement gravitationnel d'une boule de gaz
- la distribution de masse des étoiles
- idées physique et études de la distribution de masse par les simulations numériques
- les très petites masses : « free-floating planets »
- des questions qui perdurent
- la distribution de masse des premières étoiles

Quelle est la distribution de masse des premières étoiles ?

Les conditions physiques au moment de la formation des premières étoiles étaient très différentes de ce qu'elles sont aujourd'hui.

Pas d'éléments lourds (seulement H, He et un peu de D et de Li)

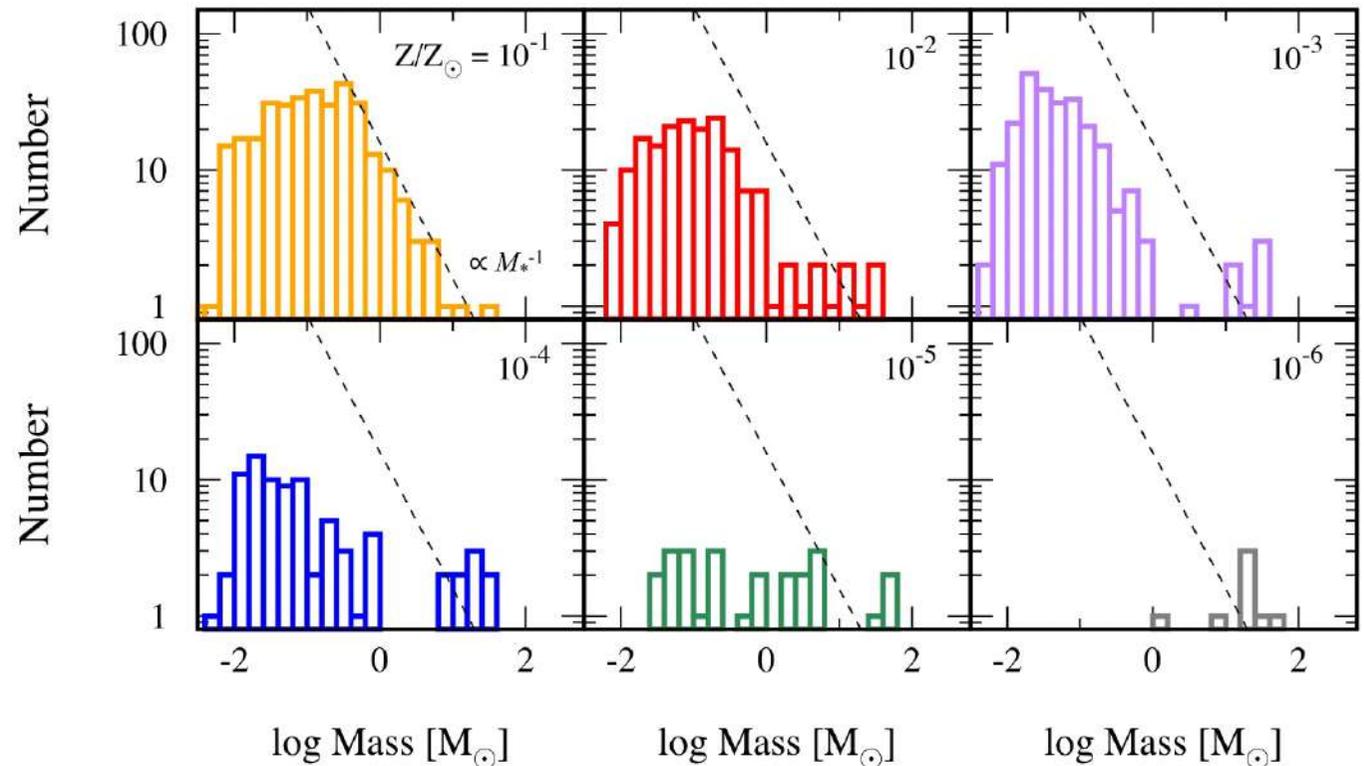
=> refroidissement très difficile

=> température élevée

=> masse de Jeans élevée

=> étoiles massives ?

Distribution de masse pour différentes « métallicités »



Conclusion

Le spectre de masse des étoiles est certainement l'une des quantités les plus structurantes de notre Univers :

- pour les galaxies à grande échelle via les processus de retro-action
- pour la composition du milieu interstellaire
- pour les systèmes planétaires

L'origine de cette distribution de masse est à chercher dans la physique du milieu : gravité, turbulence, refroidissement