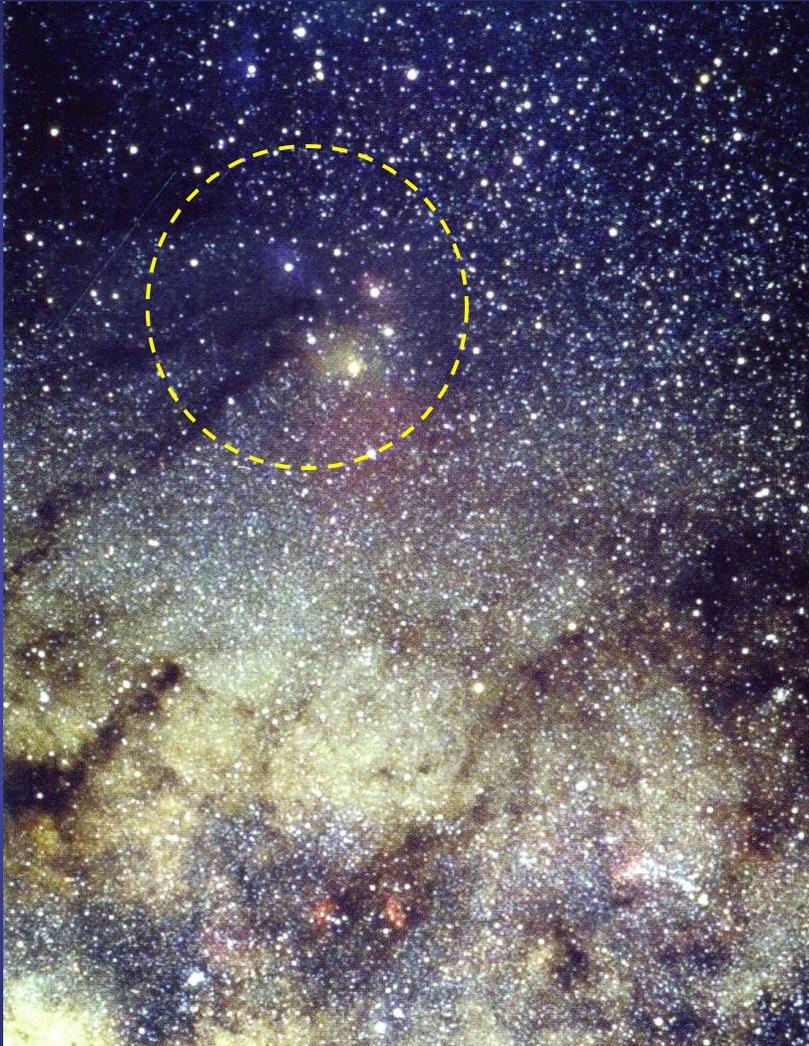


Il était une fois... le système solaire
Ou: l'inné et l'acquis
dans l'origine et l'évolution des systèmes planétaires

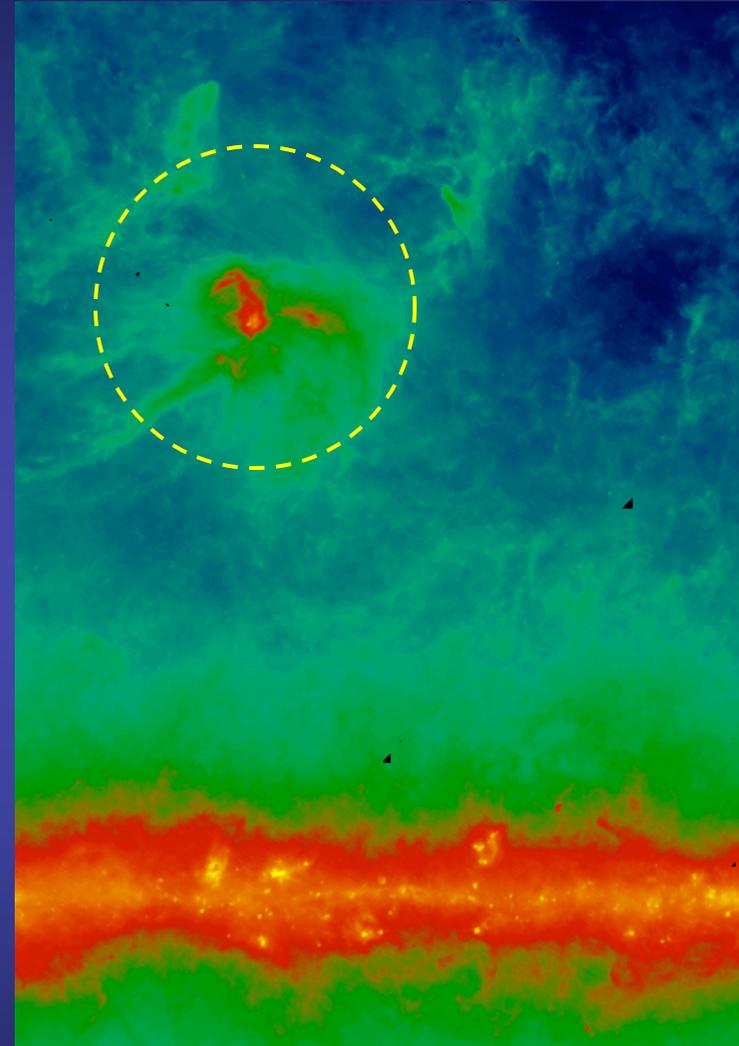
Thierry Montmerle
Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble

1. Introduction

*Formation et jeunesse des étoiles:
Chronologie sommaire et
environnement à grande échelle dans
le voisinage solaire*



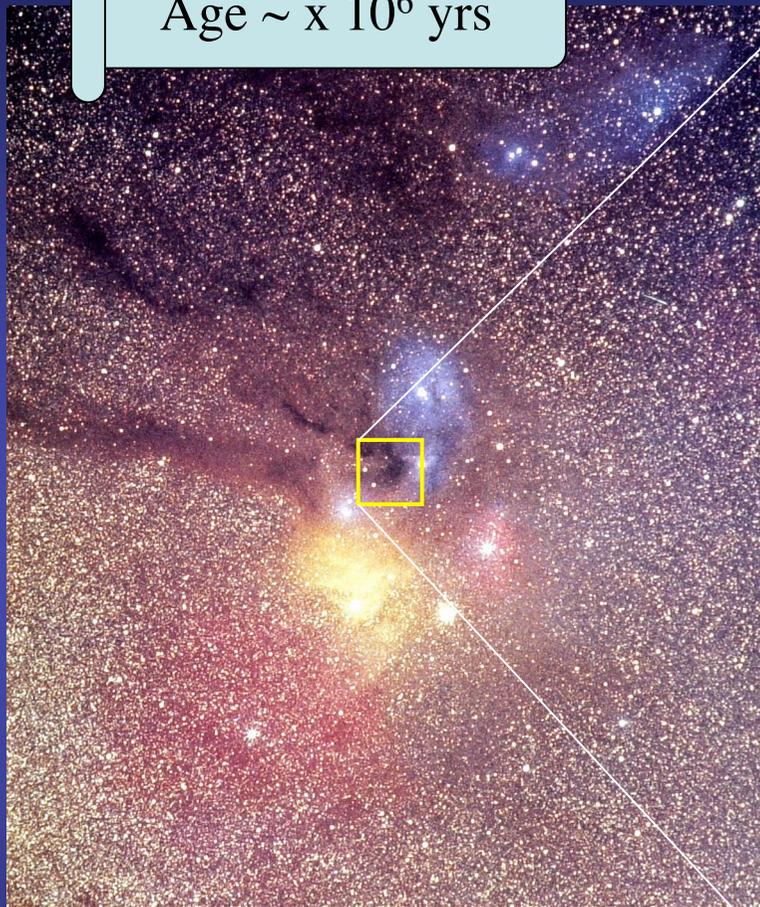
Optical : stars



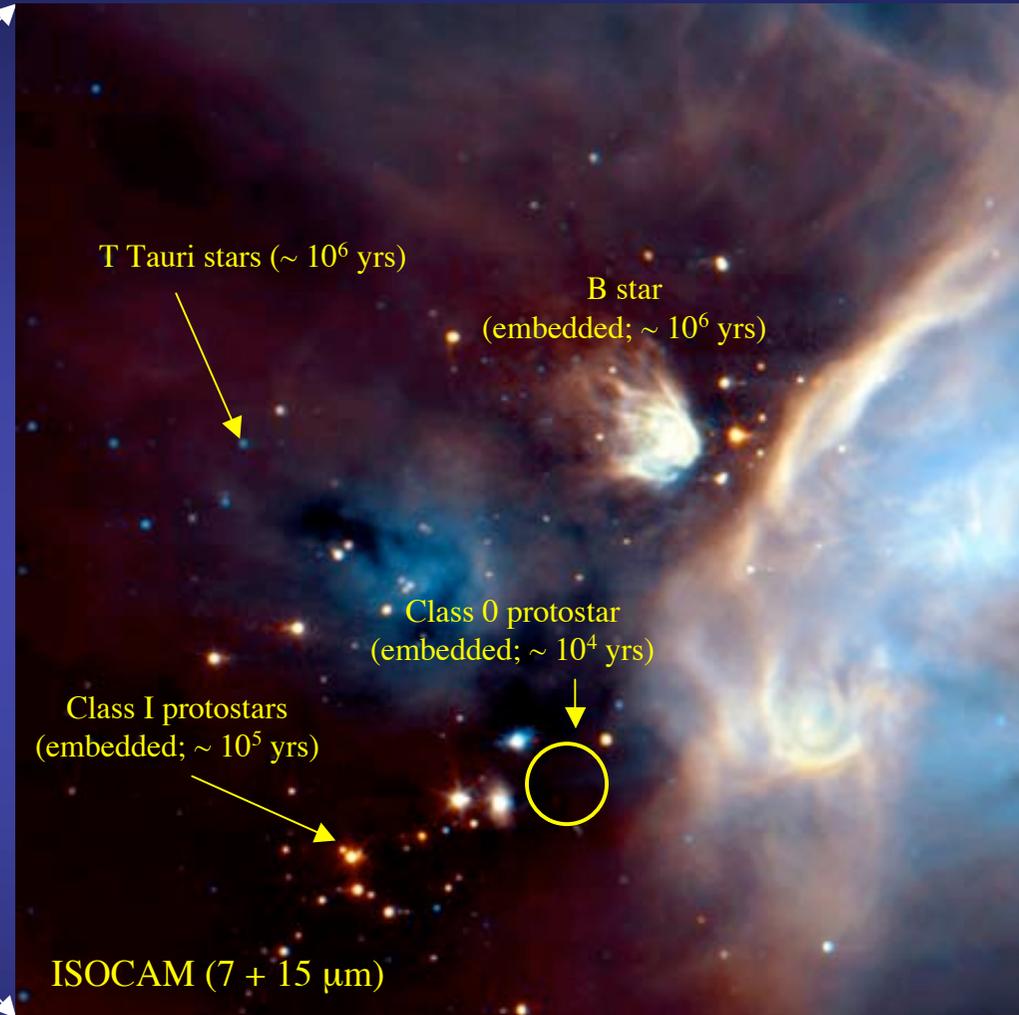
Far-IR (*IRAS*) : cold dust

The ρ Ophiuchi dark cloud ($d = 150$ pc)

Age $\sim x 10^6$ yrs

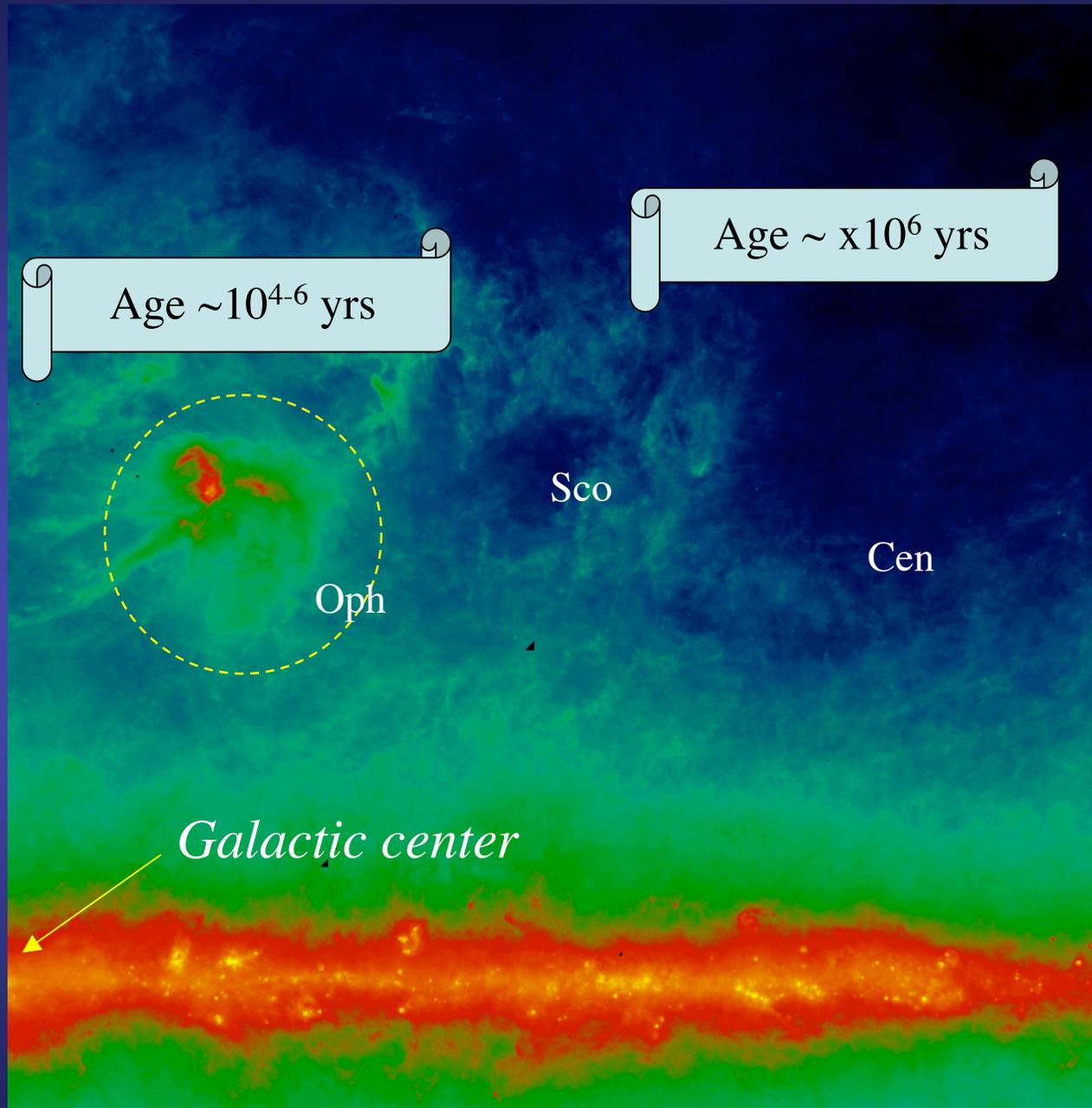


optical

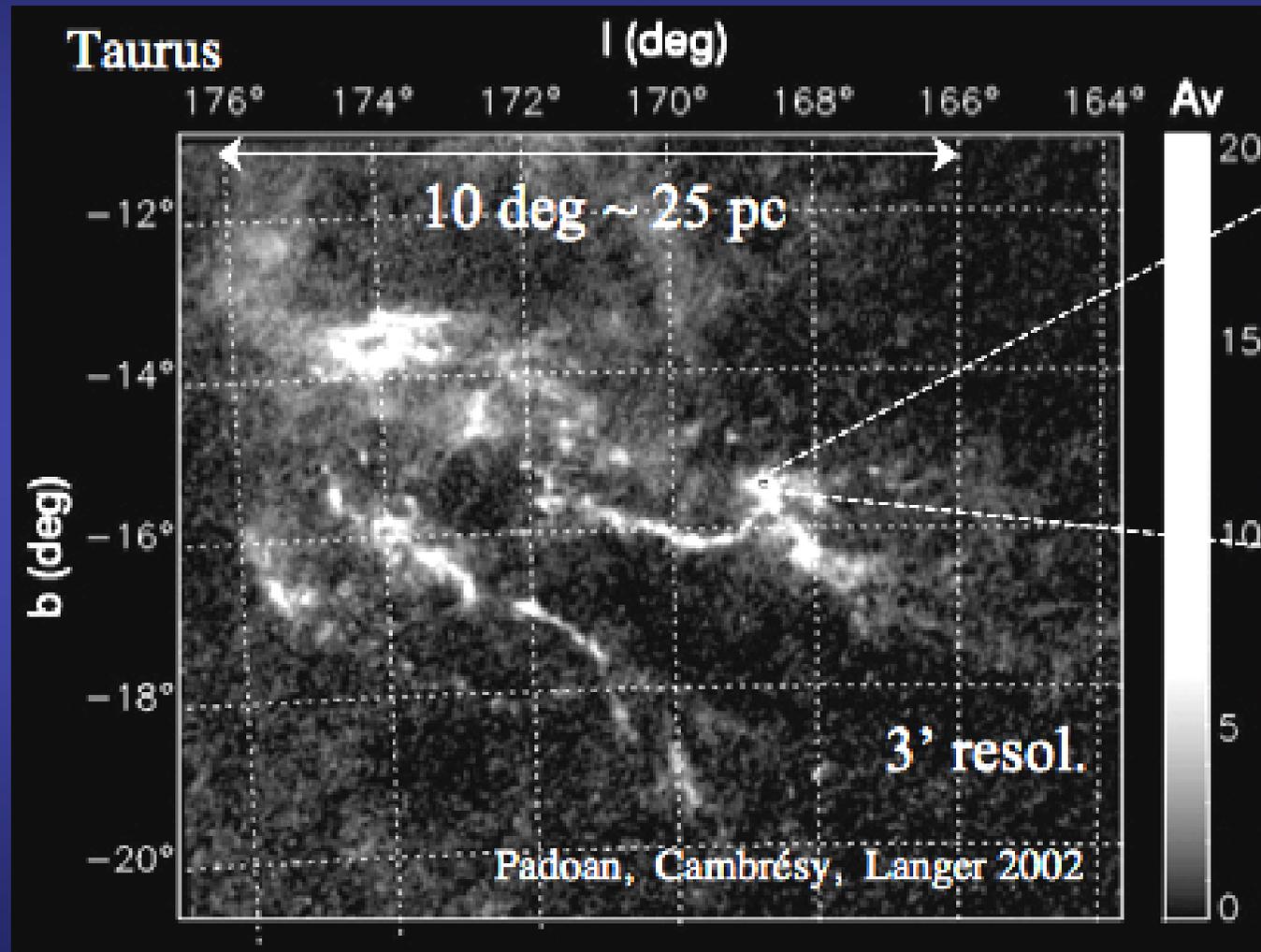


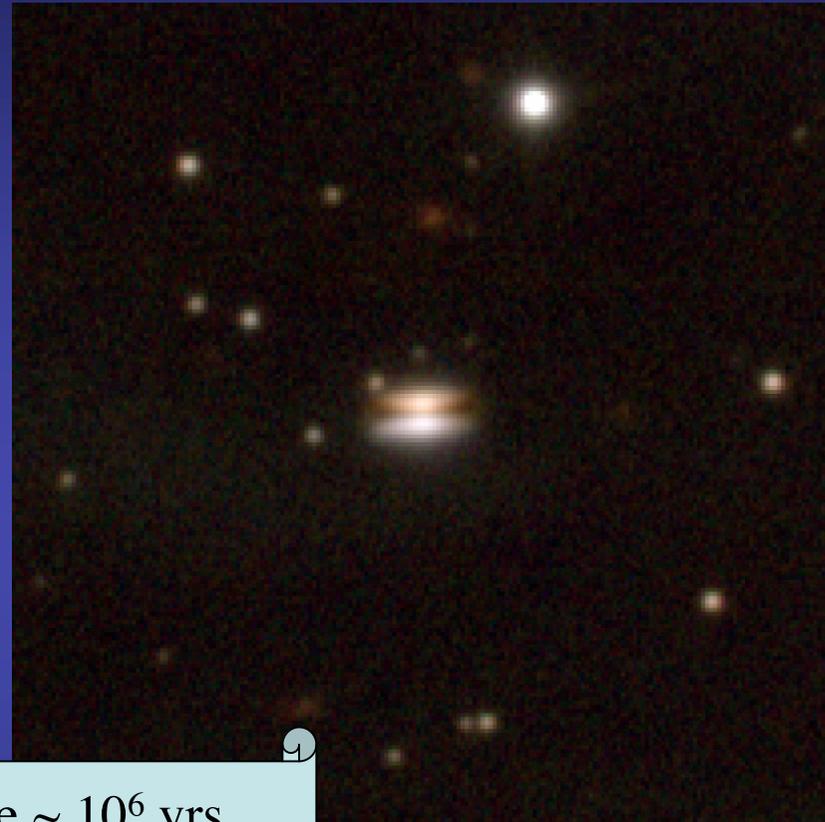
ISOCAM (7 + 15 μm)

The ρ Oph dark cloud ($d = 150$ pc) in the visible and mid-IR



Age $\sim 10^{4-6}$ yrs





Age $\sim 10^6$ yrs

Orion

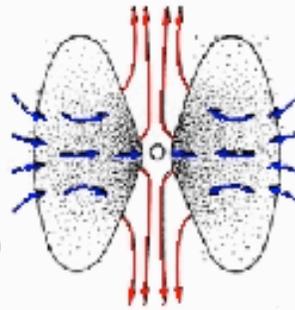
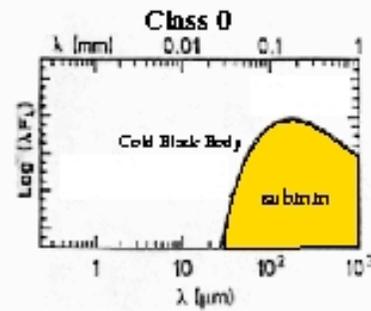
ρ Oph

Diamètre des disques ~ 1000 AU : ~ 20 x système solaire

Quelques questions...

- Importance des effets (hostiles) d'environnement ?
 - UV (évaporation) et/ou X (ionisation ?) des étoiles massives => éviter les associations OB
- Où le Soleil est-il né ?
 - Statistique + dynamique => **amas de 10-100 étoiles**
 - Problème: évolution des disques (mécanismes inconnus)
- Quel est le rapport entre les disques observés ($r = 500$ AU) et le système solaire ($r = 50$ AU) ?
- Chronologie : quelles sont les phases/échelles de temps importantes ?
 - “oubli” des conditions initiales de la formation stellaire, sauf la masse et la composition chimique (invariants)

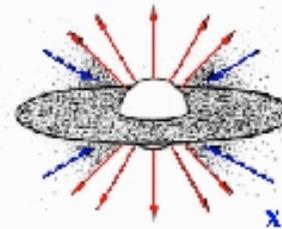
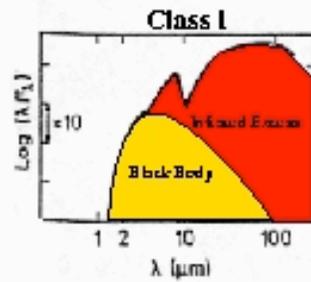
Beginning of gravitational collapse



$t \sim 0$ yr

Submillimeter Protostar

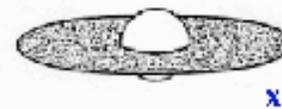
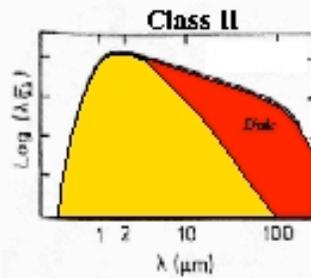
< 10000 yr



Infrared Protostar

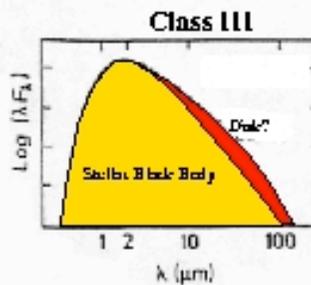
~ 100000 yr

Bifurline



T Tauri (CTTS)

~ 1000000 yr



Evolved T Tauri (WTTS)

~ 10000000 yr

Time

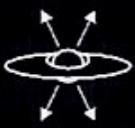
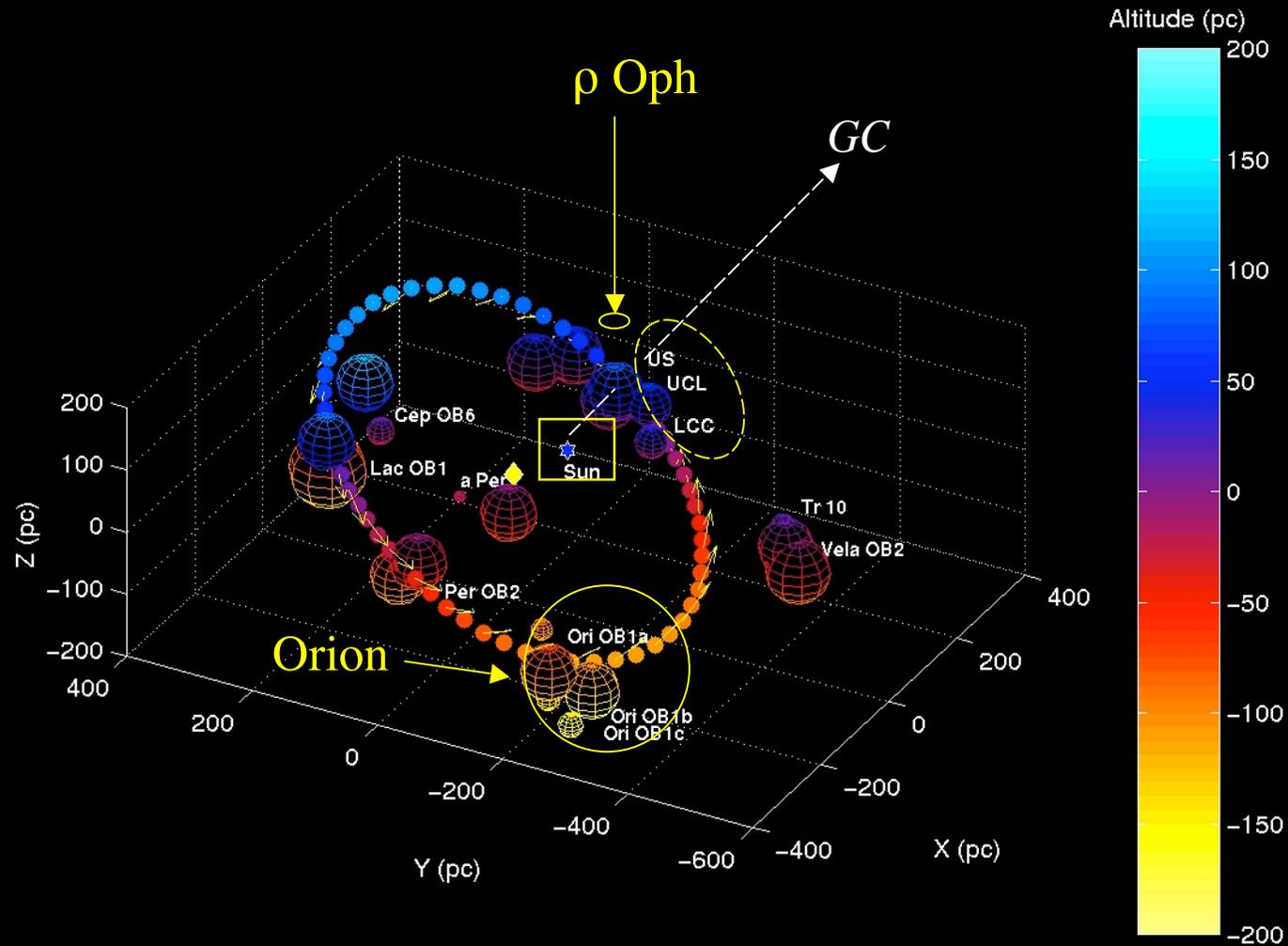
PROPERTIES	<i>Infalling Protostar</i>	<i>Evolved Protostar</i>	<i>Classical T Tauri Star</i>	<i>Weak-lined T Tauri Star</i>	<i>Main Sequence Star</i>
SKETCH					
AGE (YEARS)	10^4	10^5	$10^6 - 10^7$	$10^6 - 10^7$	$> 10^7$
mm/INFRARED CLASS	Class 0	Class I	Class II	Class III	(Class III)
DISK	Yes	Thick	Thick	Thin or Non-existent	Possible Planetary System
X-RAY	?	Yes	Strong	Strong	Weak
THERMAL RADIO	Yes	Yes	Yes	No	No
NON-THERMAL RADIO	No	Yes	No ?	Yes	Yes

Figure 1 The stages of low-mass young stellar evolution. This review chiefly addresses the bottom three rows of the chart. (Adapted from Carkner 1998.)

Les “ères planétologiques”

- Deux grandes ères:
 - 1. L’ère « stellaire et préplanétaire »:
 - Formation des étoiles (cœurs prestellaires, enveloppes, disques, jets)
 - *Dominée par les interactions étoile-disque*
 - $\Delta t \sim 0 \text{ à } 10^6 \text{ ans}$
 - 2. L’ère « planétaire »:
 - Formation des planètes
 - *Dominée par les interactions planètes-disque*
 - Gaz, poussières, planétésimaux
 - $\Delta t \sim 10^6 \text{ à } 10^9 \text{ ans}$
- Transition entre les deux ères, $\sim 10^6$ ans : stade critique
 - Effets d’environnement (photoévaporation, irradiation, etc.)
 - Dispersion des amas
 - Signatures: radioactivités éteintes

Within 500 pc of the Sun : The Gould Belt

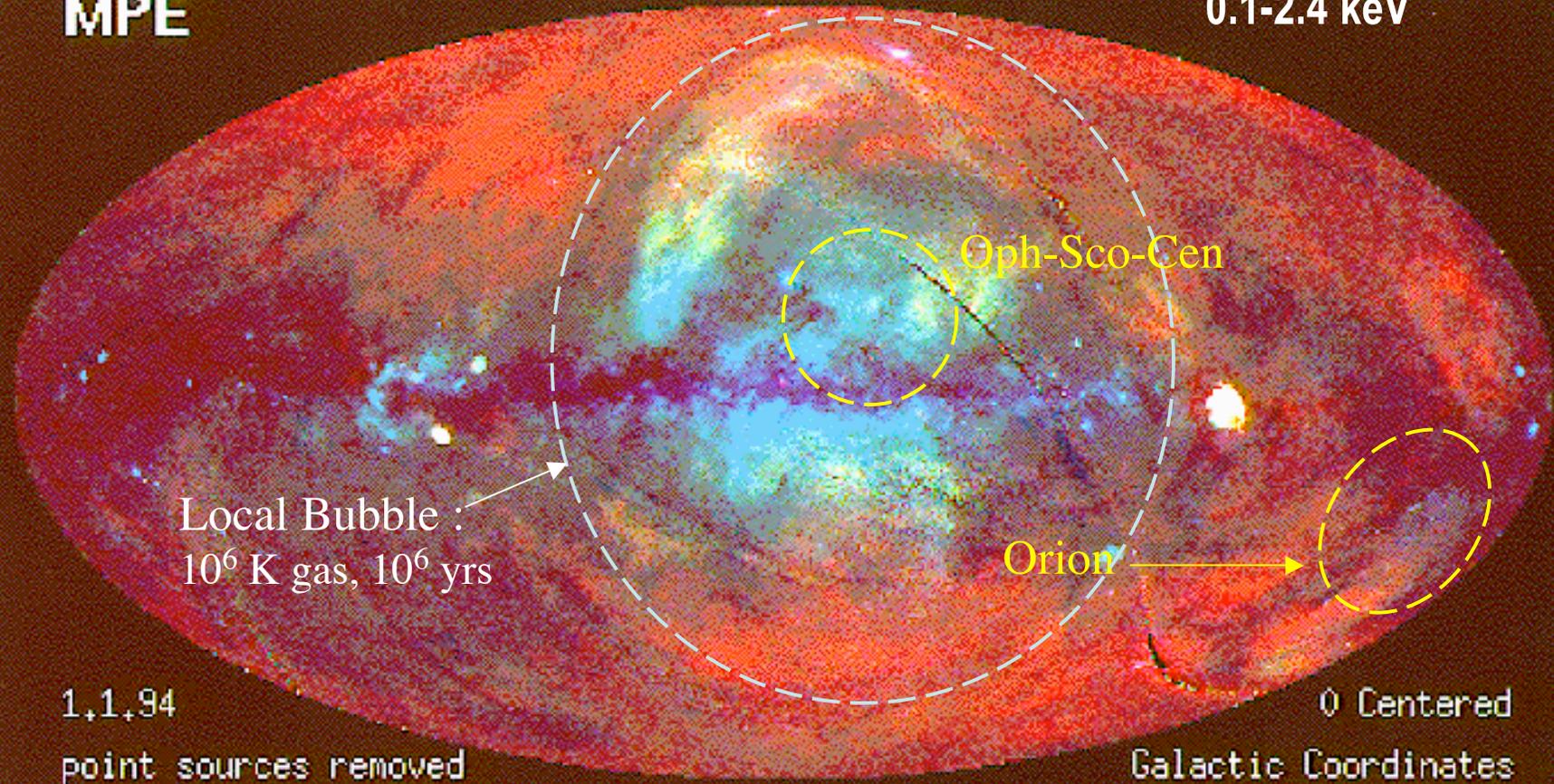


(Perrot & Grenier 2002)

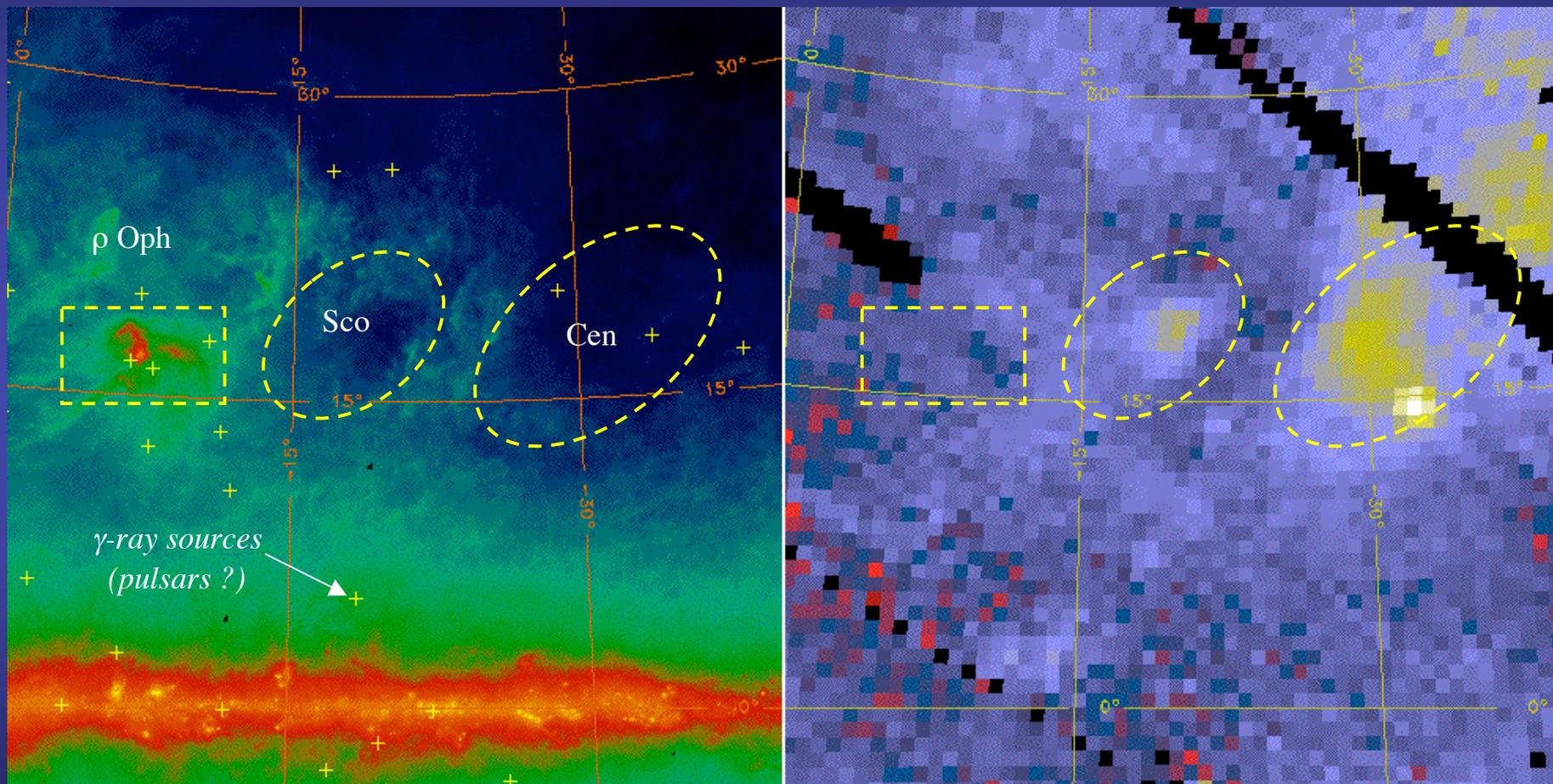
ROSAT PSPC
MPE

All-Sky Survey

Multispectral
0.1-2.4 keV



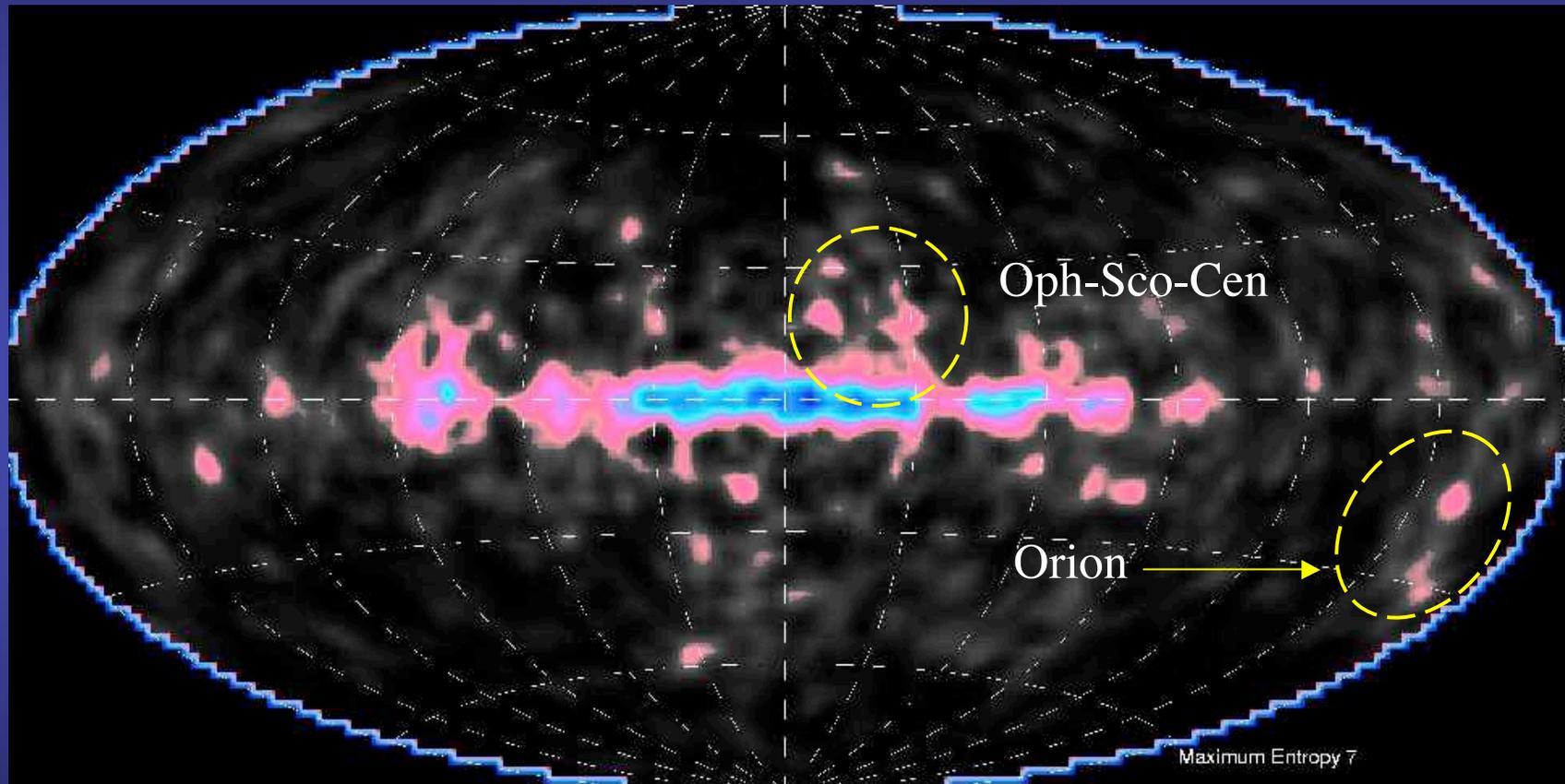
Shadowing the Oph-Sco-Cen superbubble



100 μm

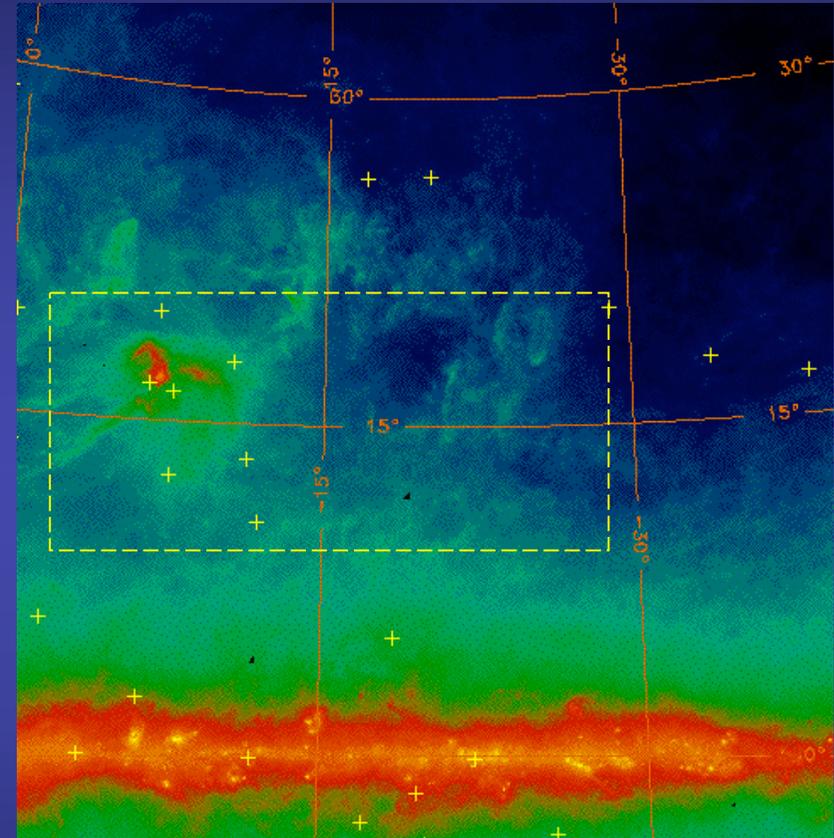
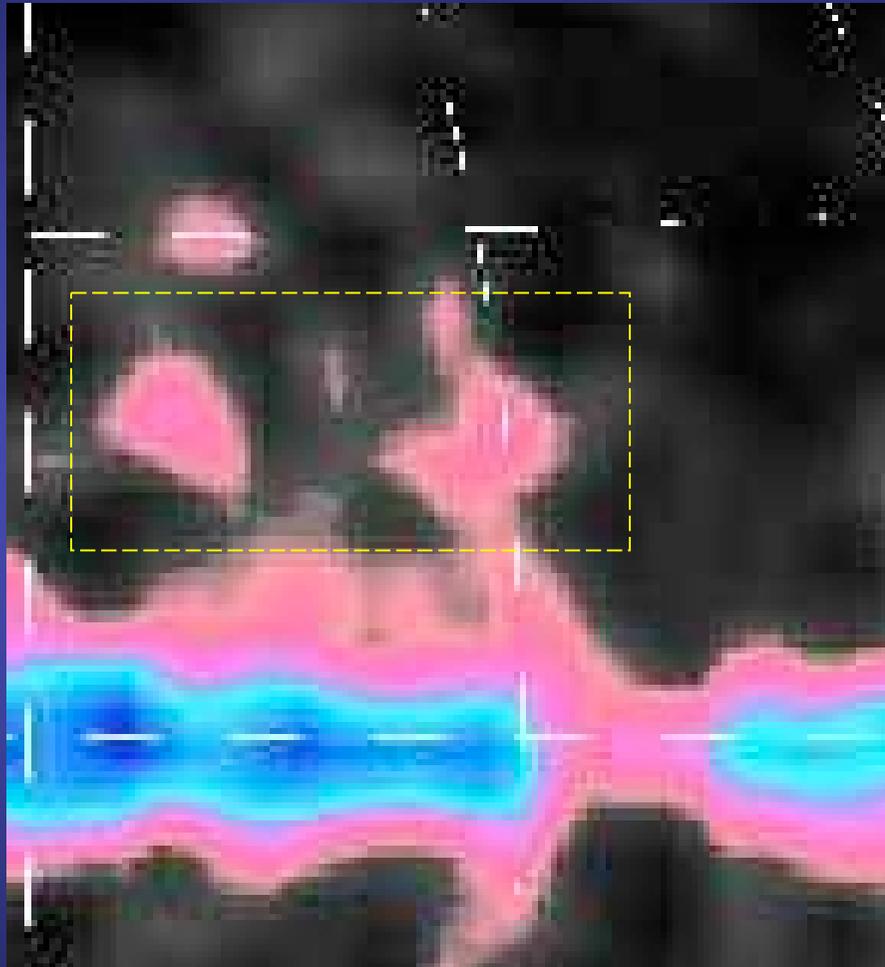
ROSAT 1/4 keV

The Milky Way @ 1.809 MeV : live ^{26}Al



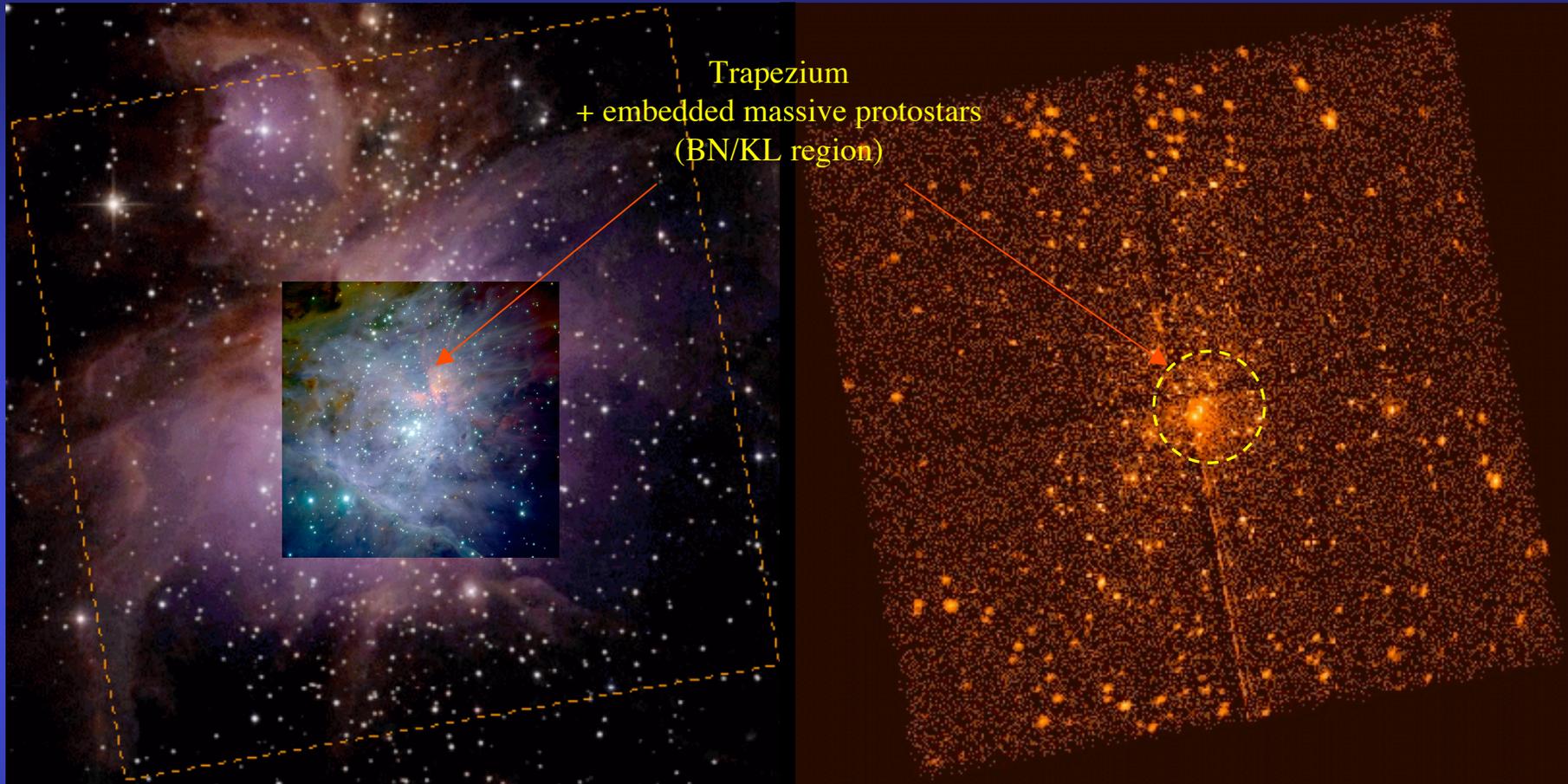
GRO Comptel (2001)

The Oph-Sco-Cen ^{26}Al emission



100 μm

1.809 MeV $\Phi_{\gamma} \sim \text{few } 10^{-5} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



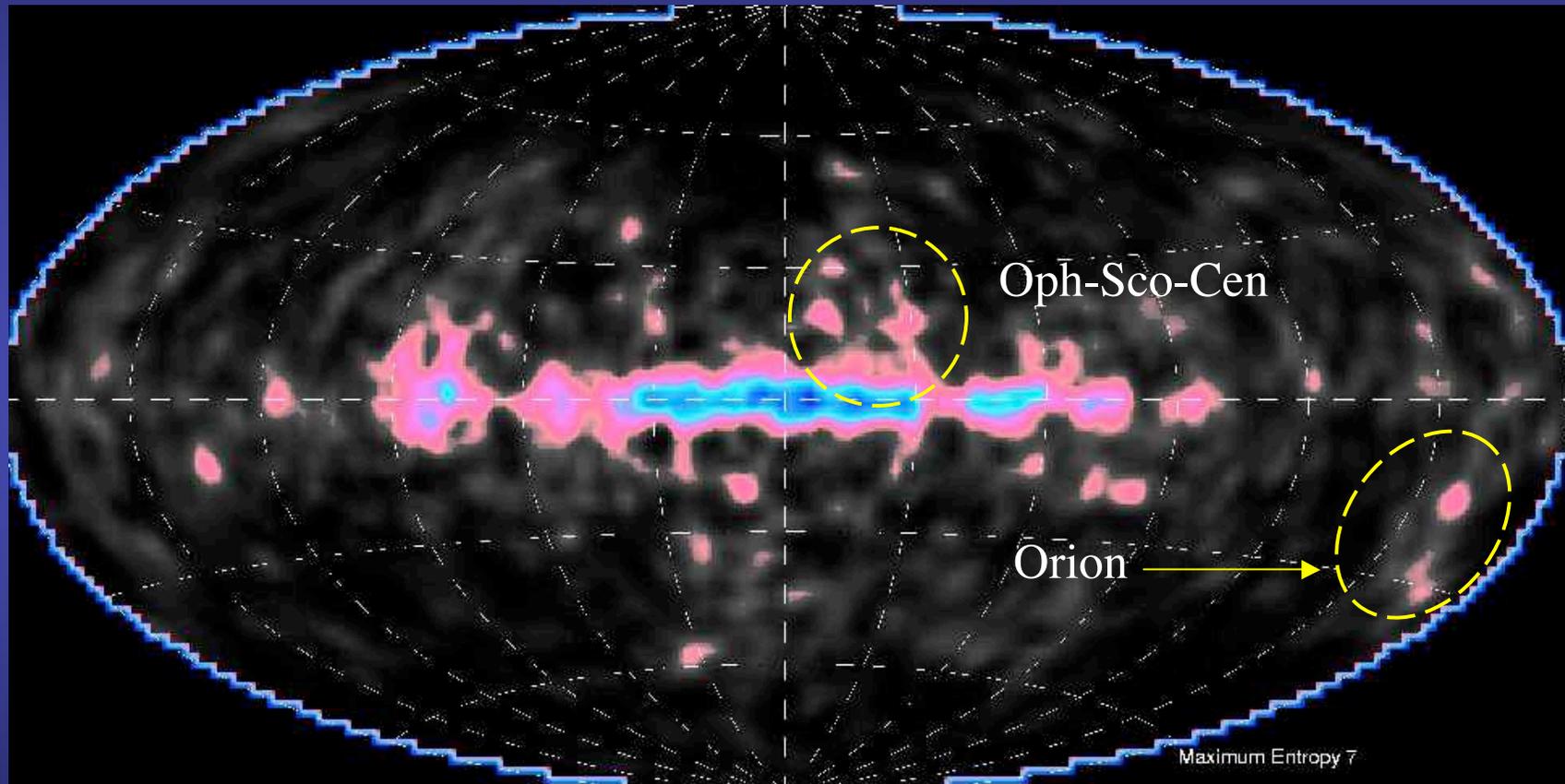
Near-IR image (2MASS + VLT)

X-ray image (*Chandra* ACIS-I): Garmire et al. 2000

Orion Nebula (M42) and Trapezium region ($\sim 17' \times 17'$)

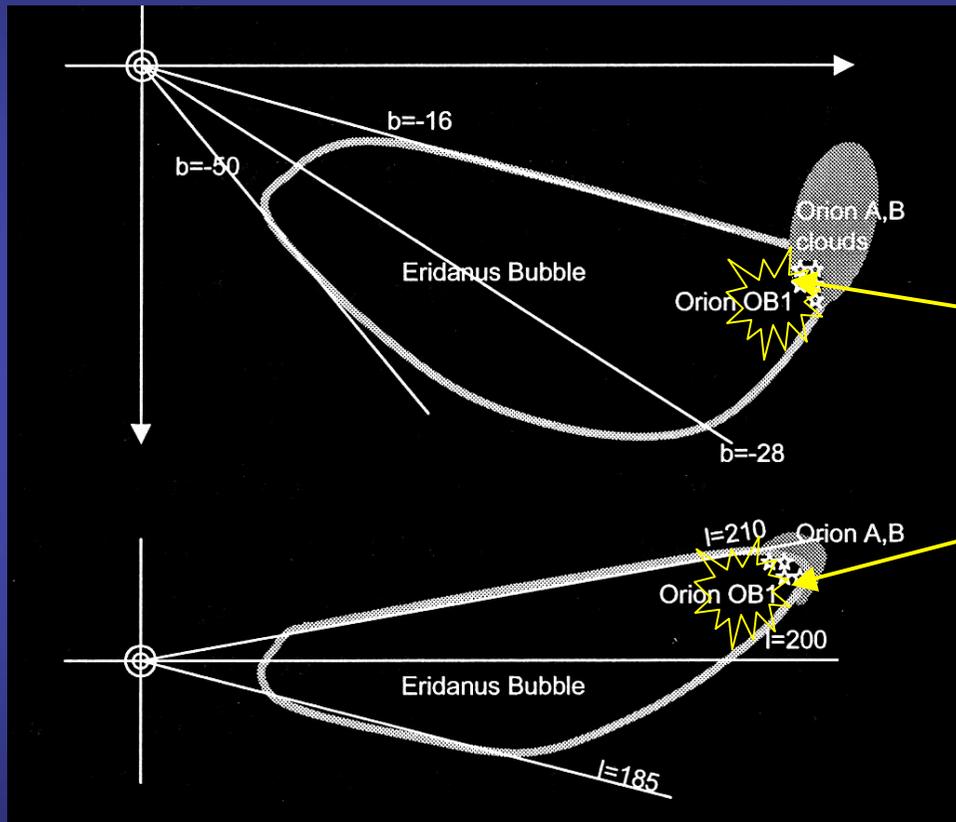
~ 1000 sources, $L_X \sim 10^{28} - 10^{32} \text{ erg s}^{-1}$ ($\sim 10 - 10^5 L_{X,\odot}$)

The Milky Way @ 1.809 MeV : live ^{26}Al

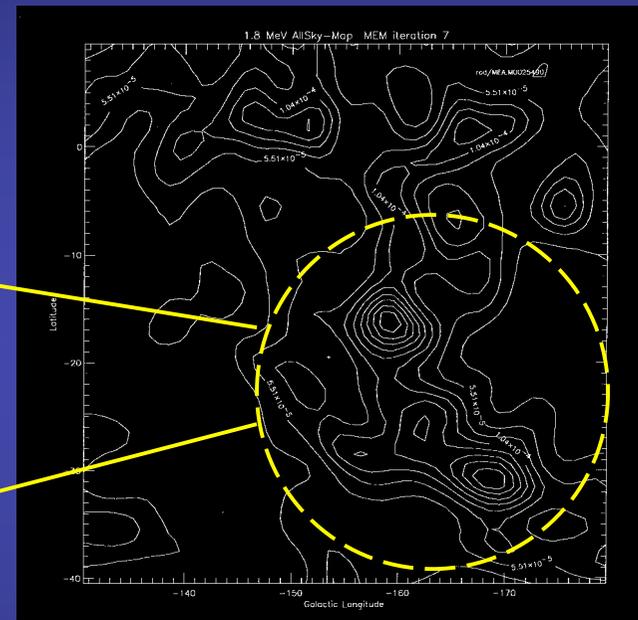


GRO Comptel (2001)

The Orion ^{26}Al emission



The Eridanus Superbubble



1.809 MeV (Diehl et al. 2001)

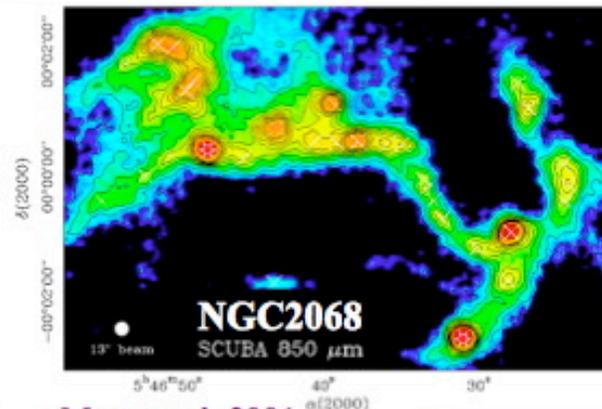
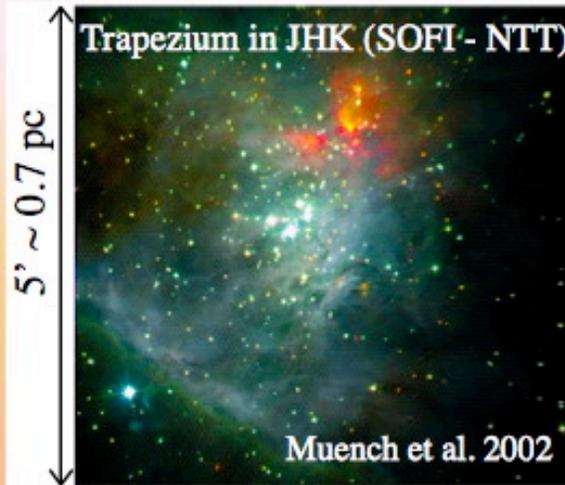
$$\Phi_{\gamma} \sim 10^{-4} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2. Des étoiles aux planètes :

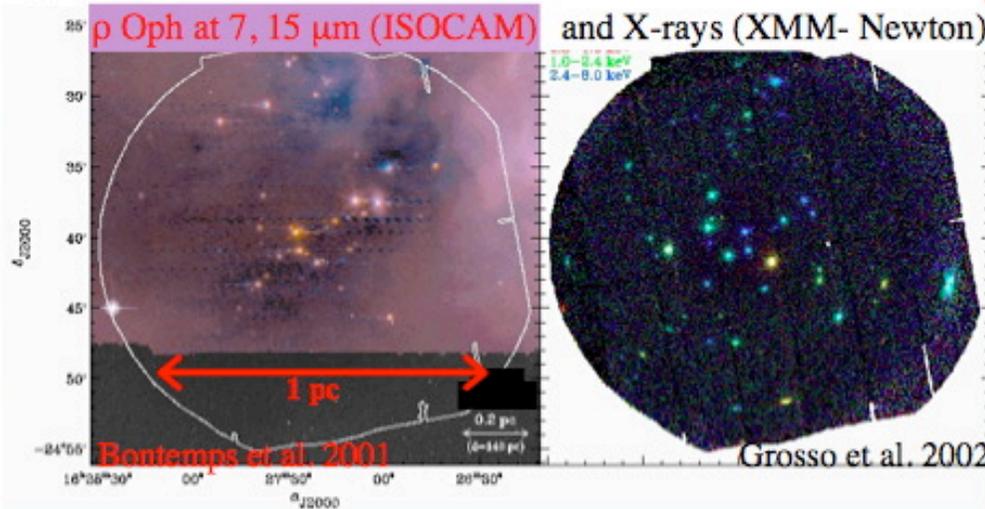
L'ère stellaire et préplanétaire

La majorité des étoiles se forment dans des amas

(e.g. Adams & Myers 2001; Lada & Lada 2003 ARA&A)



Orion
($d = 450$ pc)



ρ Oph
($d = 150$ pc)

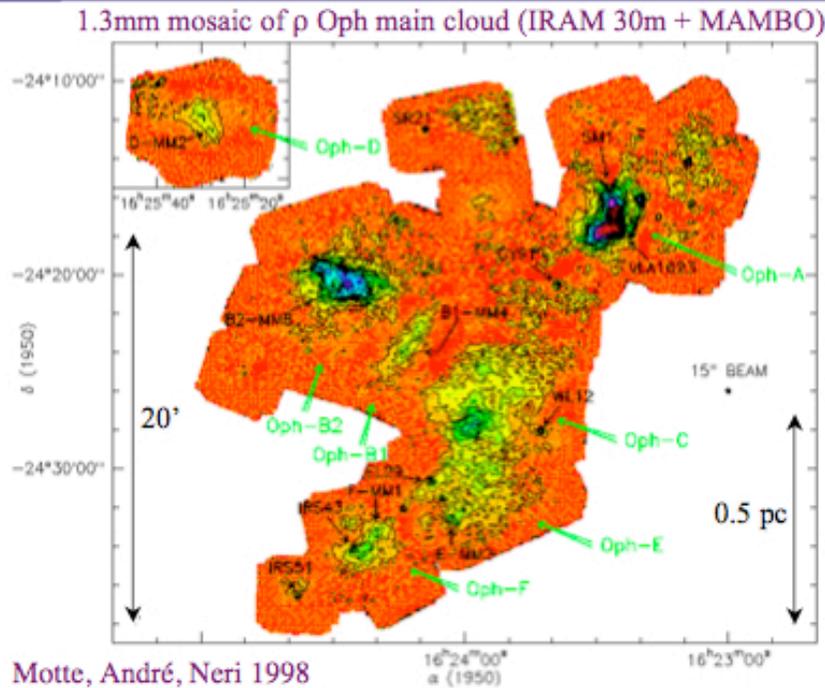
X : activité magnétique
de type solaire

IR proche : étoile jeune

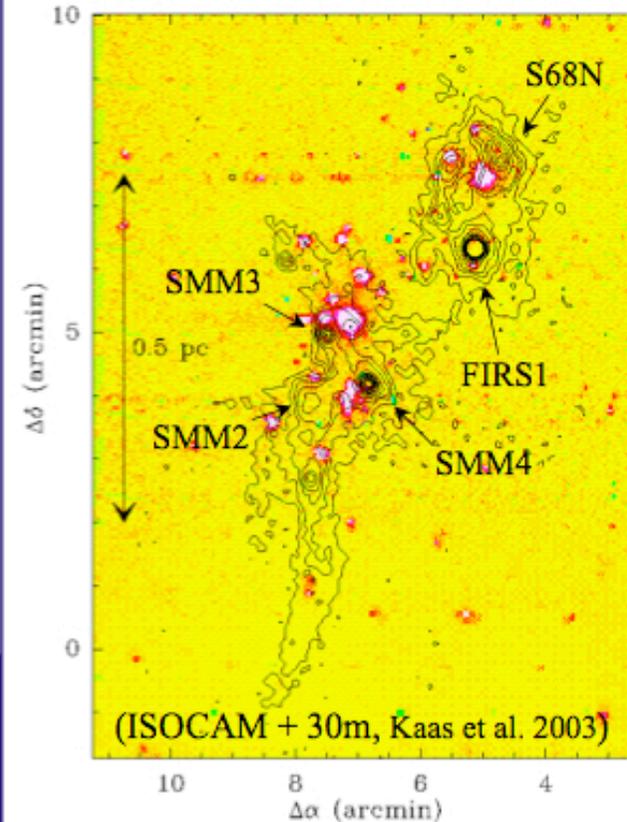
IR moyen : disque

Submm : condensation/
enveloppe

Recensements de proto-étoiles de «Classe 0» et condensations «pré-stellaires» en continuum (sub)-millimétrique



The Serpens Core ($d = 310$ pc) at $7 \mu\text{m}$ and 1.3 mm



Statistique :

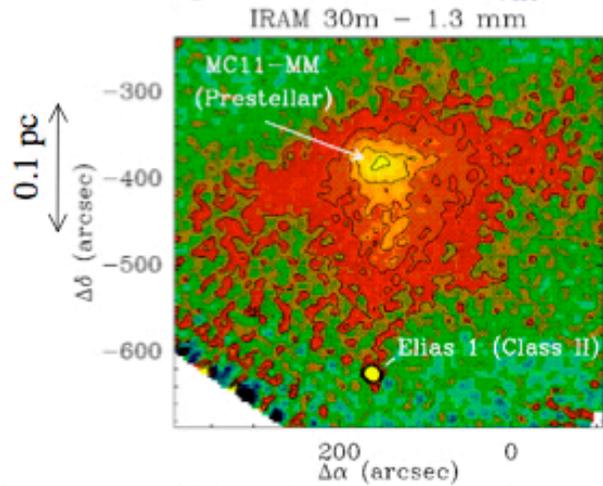
Préstellaire / Classe 0 / Classe I / Classe II

ρ Oph : 0.52 / 0.02 / 0.13 / 1

Serpent : 0.46 / 0.09 / 0.36 / 1

Durée de vie de la Classe II $\sim 10^6$ ans

Cœurs pré-stellaires :
 Auto-gravitants ($M \sim M_{\text{VIR}}, M_* = 0$)

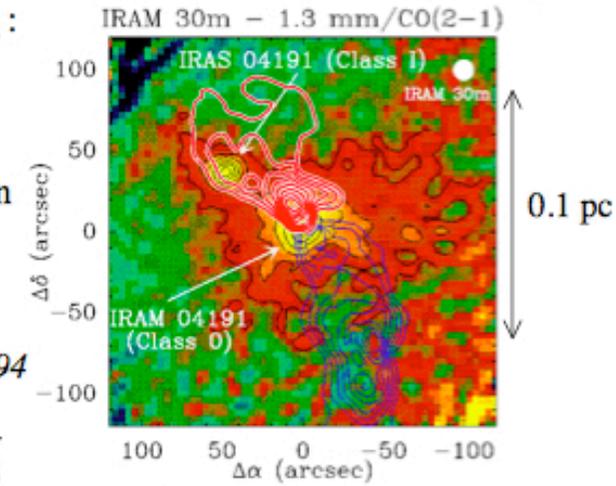


Traceurs d'évolution :

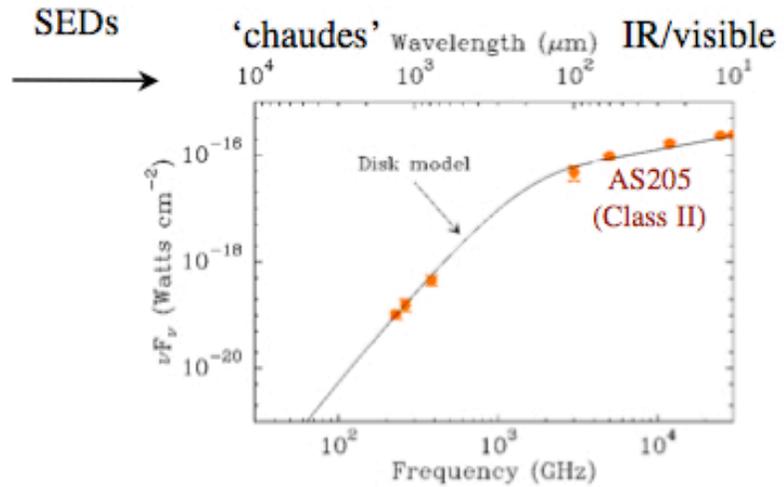
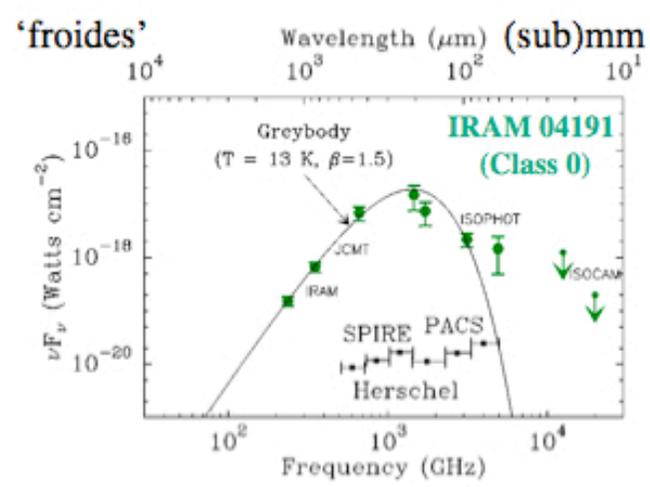
- Spectre d'énergie
Lada & Wilking '84;
Lada 1987
- Masse et distribution de la matière en continuum (sub)mm
André et al. '93;
André & Montmerle '94

$$M = \frac{S_{1.3} d^2}{B_{1.3}(T) \kappa_{1.3}}$$

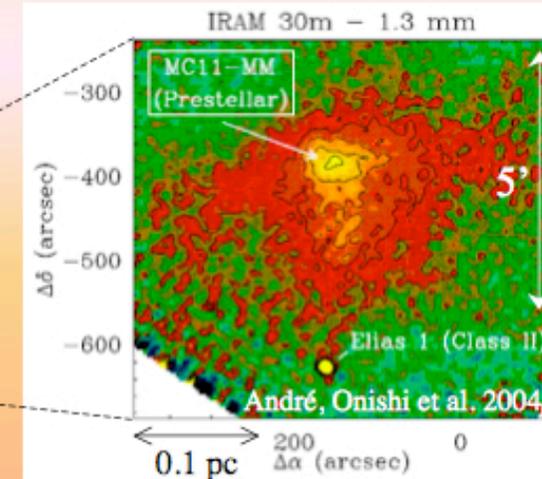
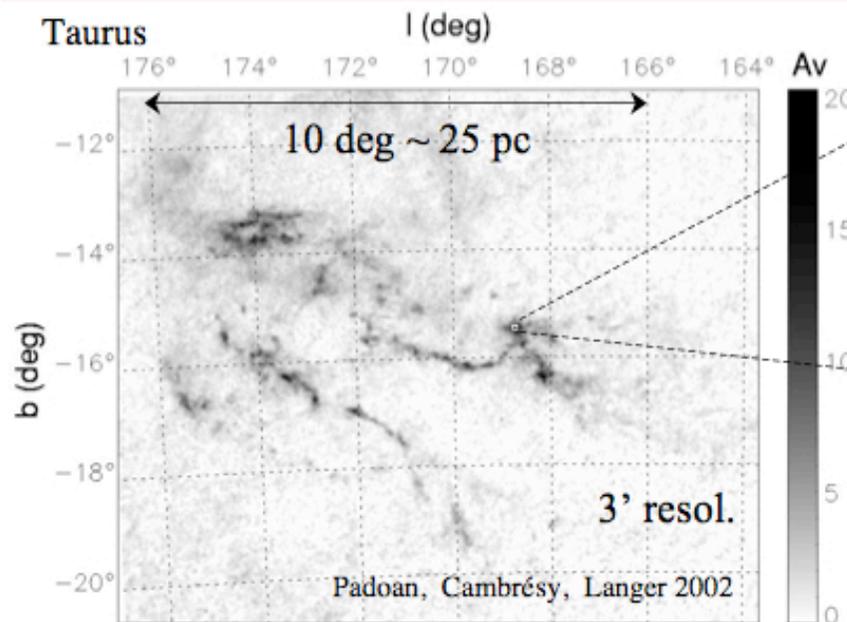
Protoétoiles de Classe 0 :
 Enveloppe massive ($M_{\text{env}} > M_*$)



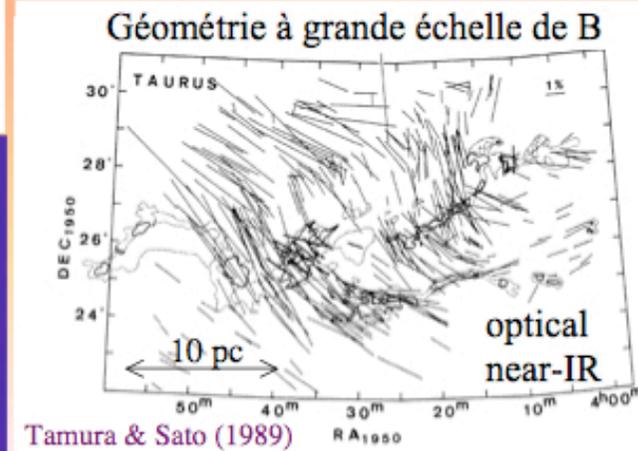
Classe I : Combinaison enveloppe + disque → **Classe II : $M_{\text{env}} \sim 0$, disque dominant**



Distribution des cœurs pré-stellaires le long de filaments: L'exemple du nuage du Taureau

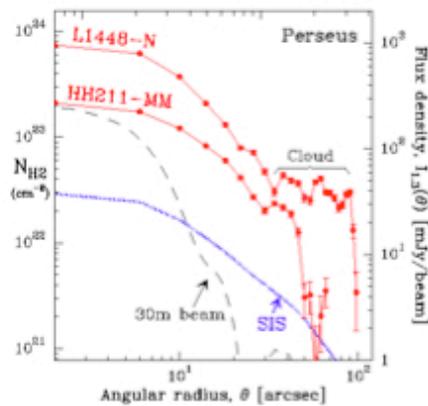


- Le mécanisme de formation des cœurs pré-stellaires est intimement lié au processus de formation des filaments dans les nuages
- Importance d'une compréhension globale des nuages incluant une grande gamme d'échelles spatiales



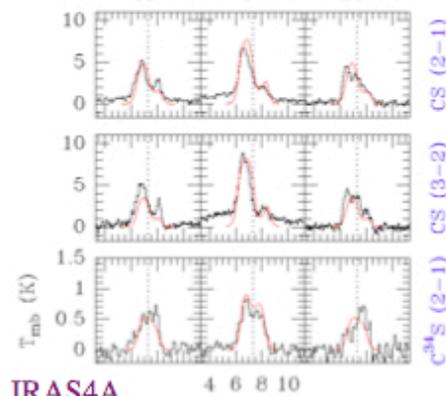
Effondrement plus violent dans les proto-amas (e.g. ρ Oph, Persée)

Enveloppes plus denses : au stade Classe 0, ~ 3 -12 fois plus denses qu'une SIS à $T = 10$ K



(Motte & André 2001)

Vitesses d'effondrement supersoniques



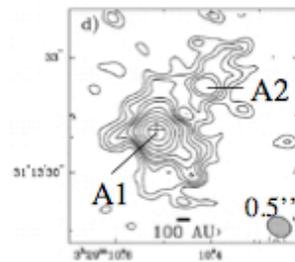
IRAS4A

$V_{\text{inf}} \sim 0.7$ -1.3 km/s, $\dot{M}_{\text{inf}} \sim 1$ -5 $\times 10^{-4}$ M_{\odot} /yr à 2000 AU (Di Francesco et al. 2001; Belloche et al., in prep.)

→ **Taux d'accrétion très élevés ($\gg a^3/G$) qui peuvent s'expliquer dans le cas d'une augmentation forte et rapide de la pression extérieure**

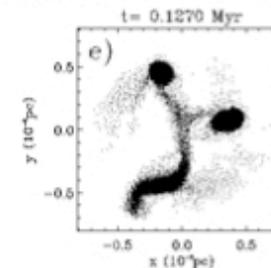
↓
Favorise la formation des systèmes multiples

IRAS4A est une protobinaire ~ 600 AU

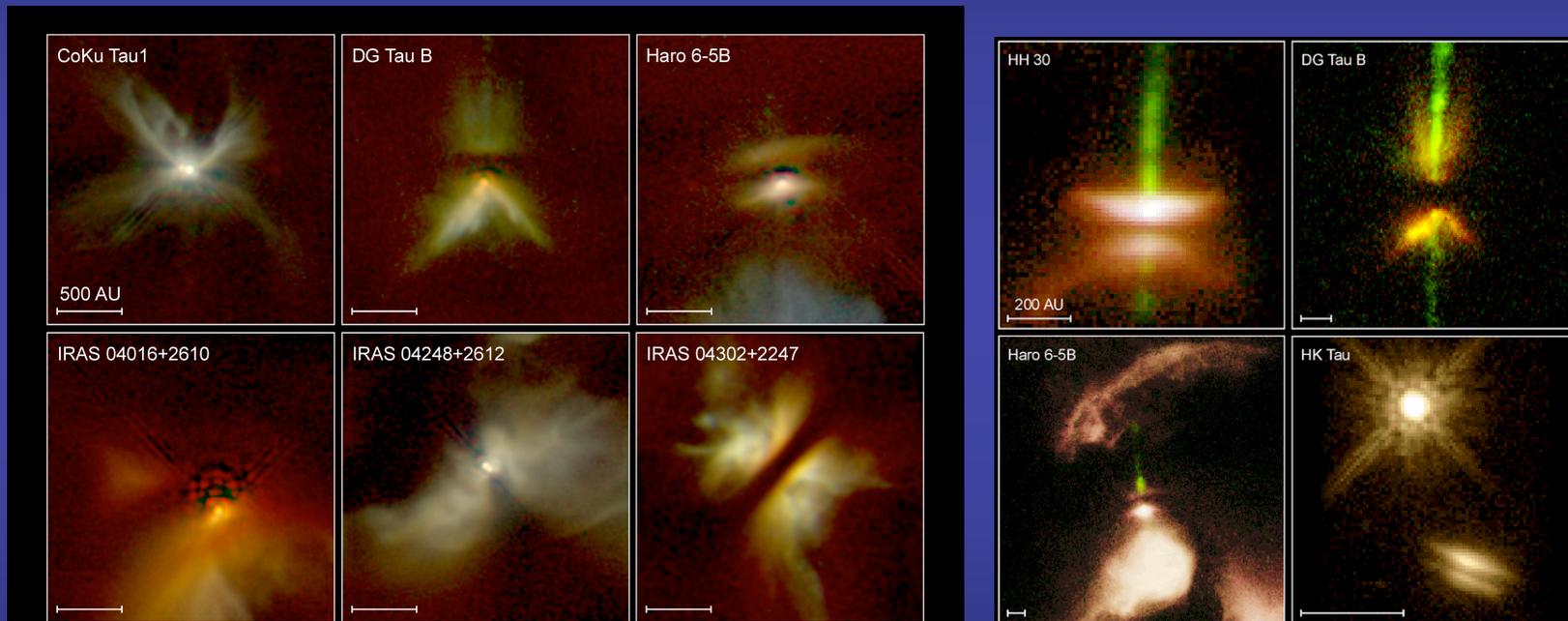


Obs. BIMA - 2.7 mm (Looney et al. 2000)

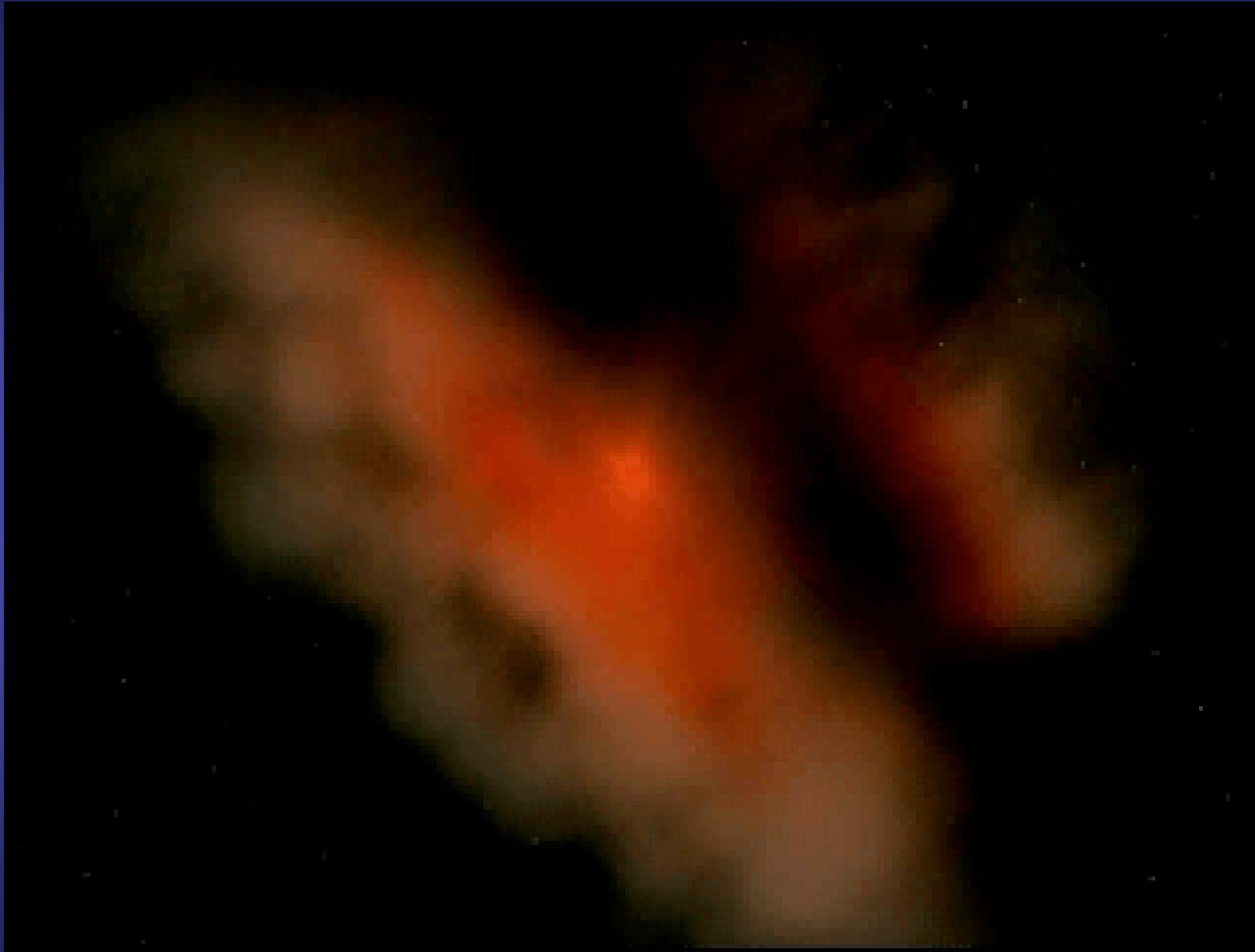
Simulations SPH d'effondrement avec compression et rotation: Hennebelle et al. 2004



*Ubiquity -and diversity- of jets and circumstellar disks :
the role of the (molecular) environment*

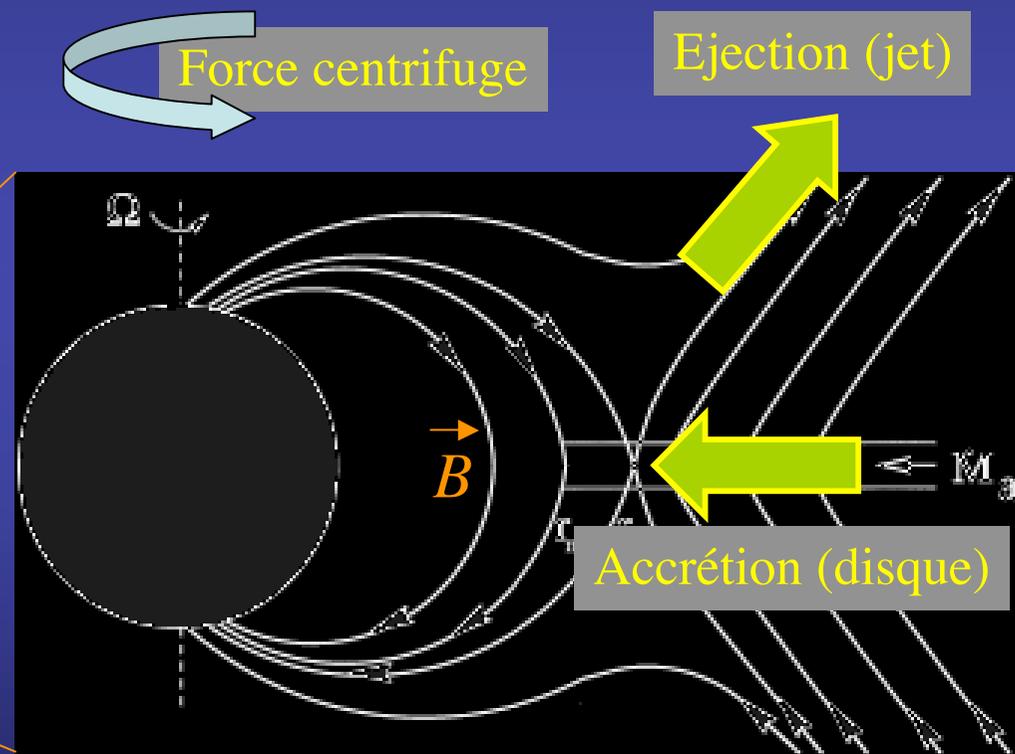
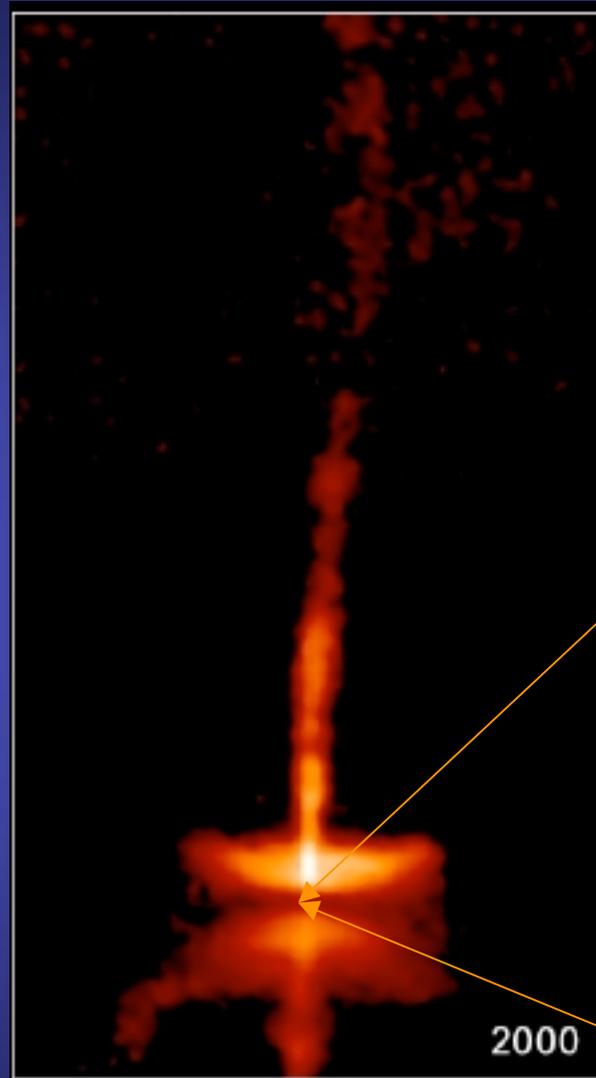


Age $\sim x 10^{5-6}$ yrs



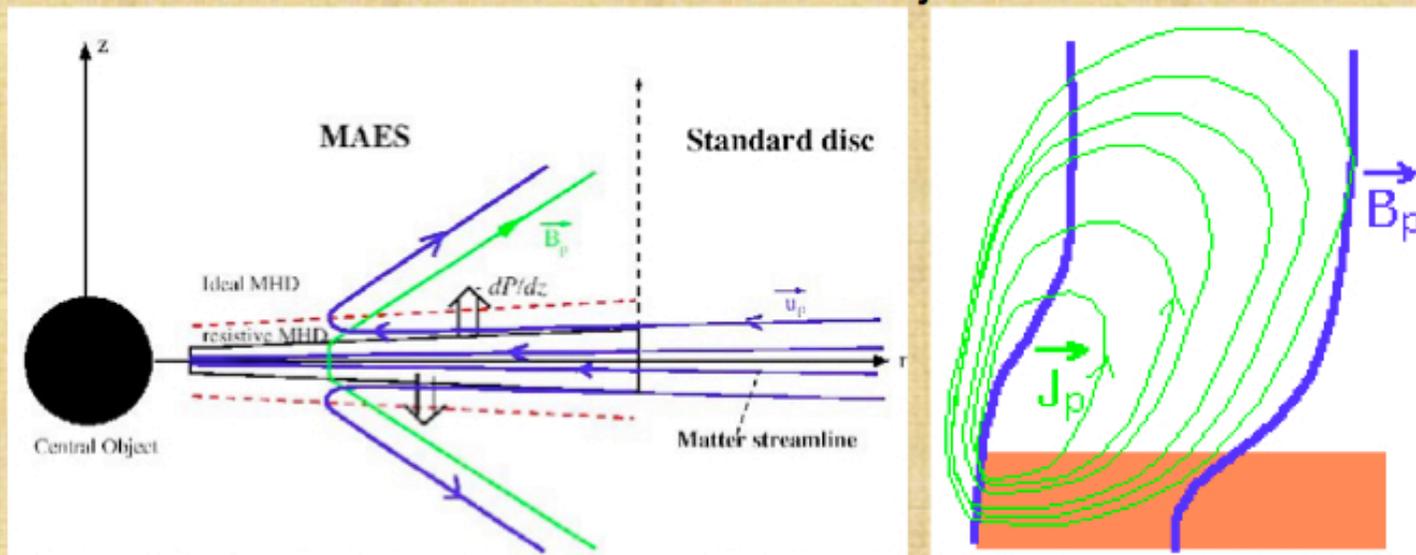
Mécanisme MHD par couplage magnétique

(J. Ferreira et al., 2001)



Principes de l'éjection magnéto-centrifuge

- Couple magnétique permet accrétion
- Disque résistif => nécessité d'un transport turbulent de B
- Modèle doit fournir flux de masse éjecté: $\dot{M}_{\text{acc}} \propto r^{\frac{5}{2}}$
- Force de Lorentz accélère et confine le jet



Jets de disques

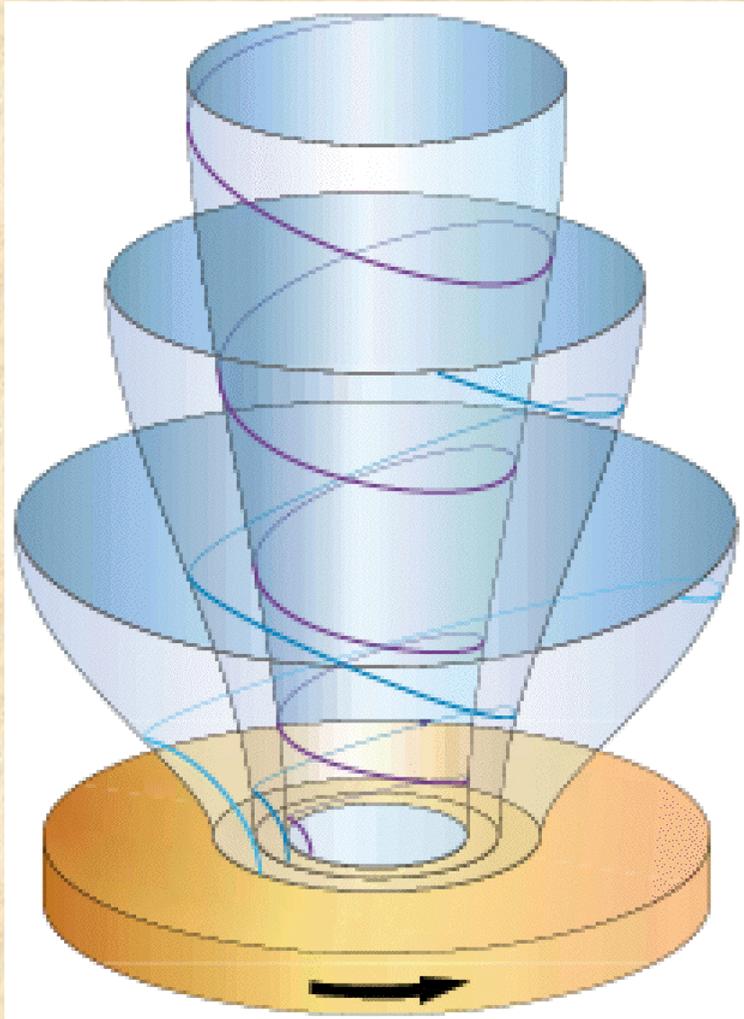
Blandford & Payne 82

Wardle & Königl 93, Li 95, 97

Ferreira & Pelletier 93,95

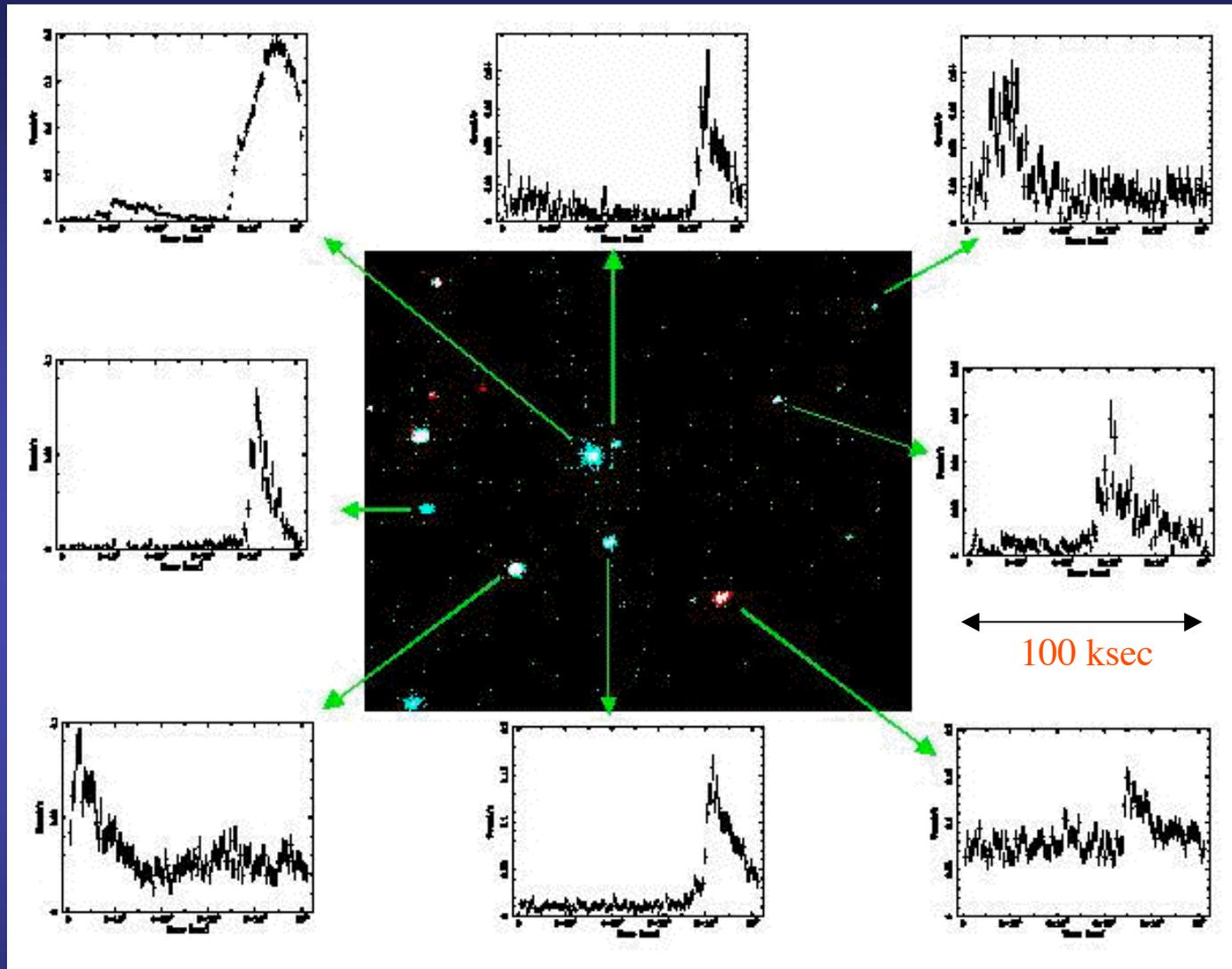
Casse & Ferreira 00a,b

Vlahakis et al. 00, Ferreira & Casse 04

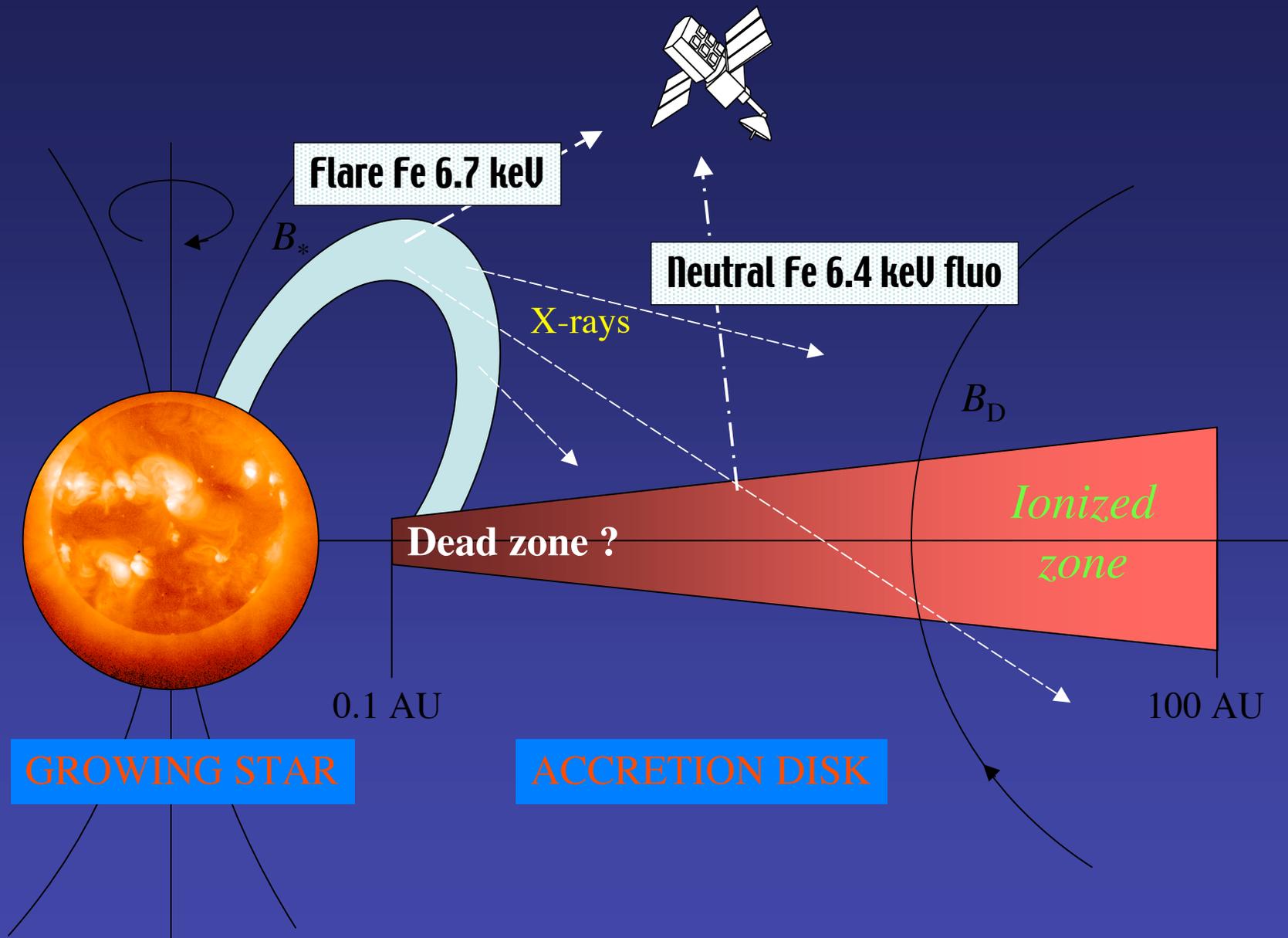


- $B \approx$ equipartition
- Solutions complètes auto-similaires existent
- Modèle « Universel » (YSO, AGN, microquasars, GRB?)

=> A quel point peut-on se fier aux résultats issus de solutions auto-similaires ?



Variability of T Tauri stars and protostars* in the ρ Oph cloud
(Imanishi et al. 2001)

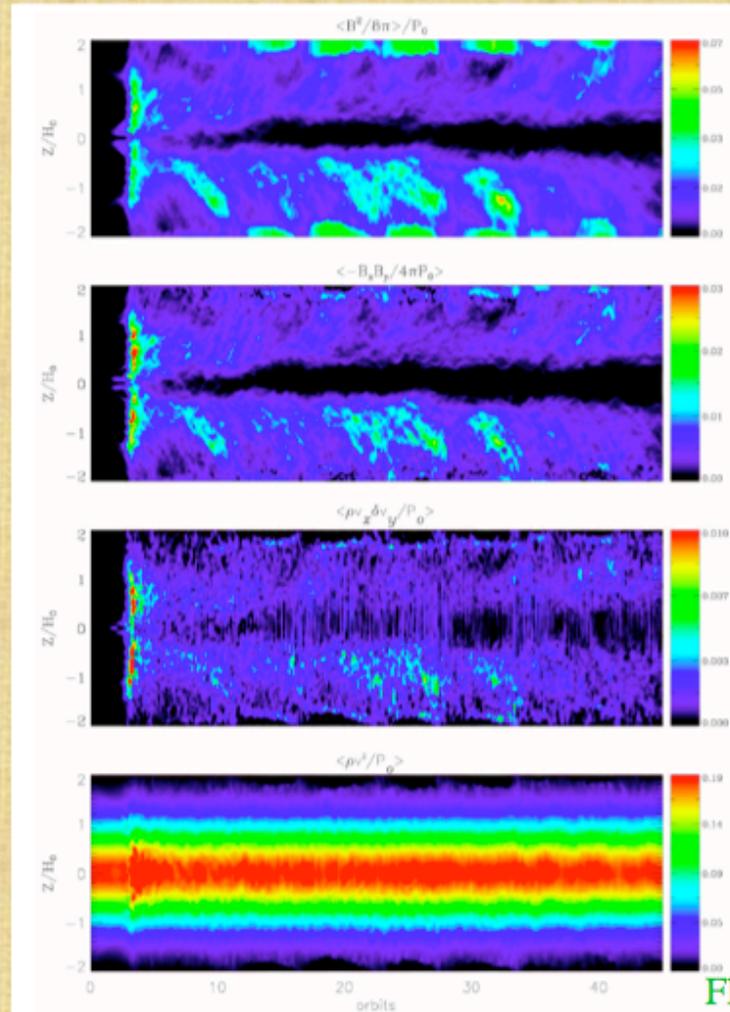


Energie magnétique

Couple Maxwell

Couple Reynolds

Energie cinétique



Resistivité
Ohmique

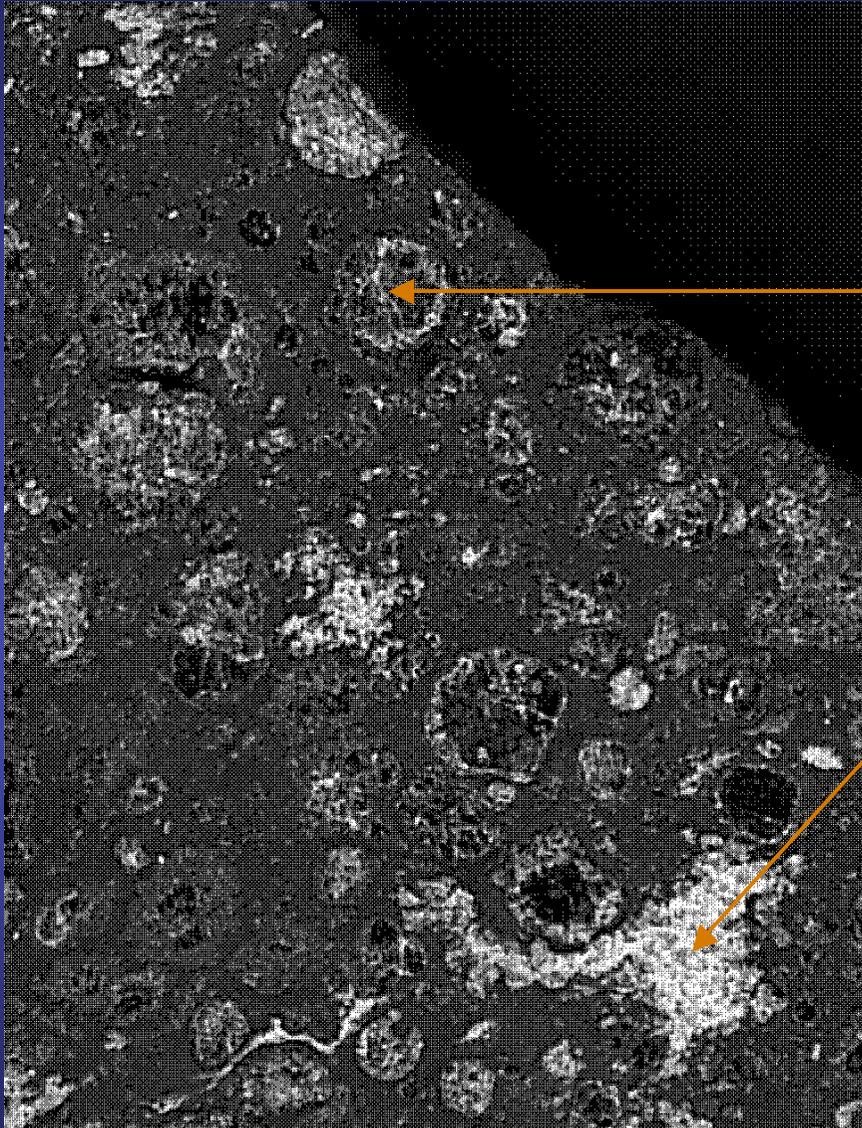
$\eta(z)$



La zone morte
n'est pas tout à fait
morte...

Echange turbulent
de masse entre les
2 régions.

Fleming & Stone 03



Chondrules

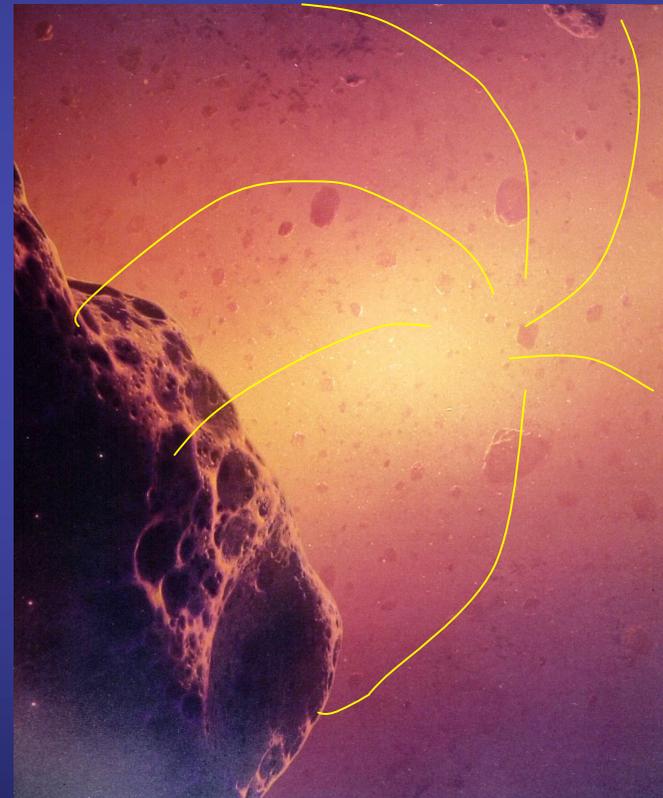
« Calcium-Aluminium
Inclusions » (CAIs):
Decay products of
 ^{41}Ca ^{26}Al ^{10}Be ^{53}Mn

OK for young Sun activity
enhancement $\sim 10^4 - 10^5$

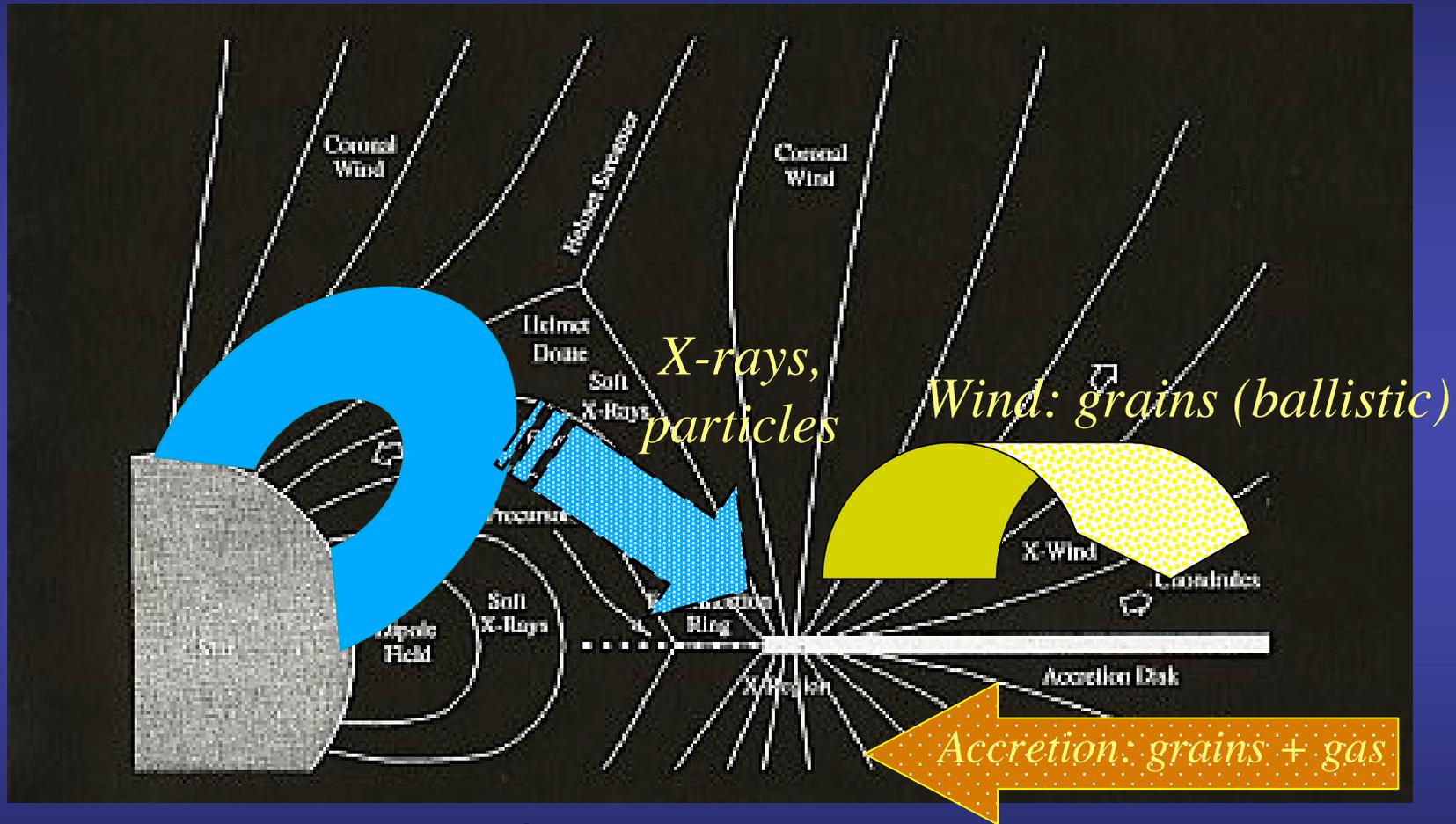
The Allende meteorite

Disk Irradiation (cont'd)

- Low-energy particles (p , ${}^3\text{He}$)
- X-ray flares : analogy with the Sun
- *spallation reactions* in meteorites :
« extinct radioactivities » problem
(Shu et al. 2001, Gounelle et al. 2001,
Feigelson et al. 2002)



The Accretion-Irradiation-Ejection-Transport model



Age $\sim x 10^{5-6}$ yrs; steady state

After Shu, Gounelle et al. 1998



Age $\sim 1-3 \times 10^6$ yrs

Orion OB association and HII region

Exciting stars :

Trapezium (O7-O8)



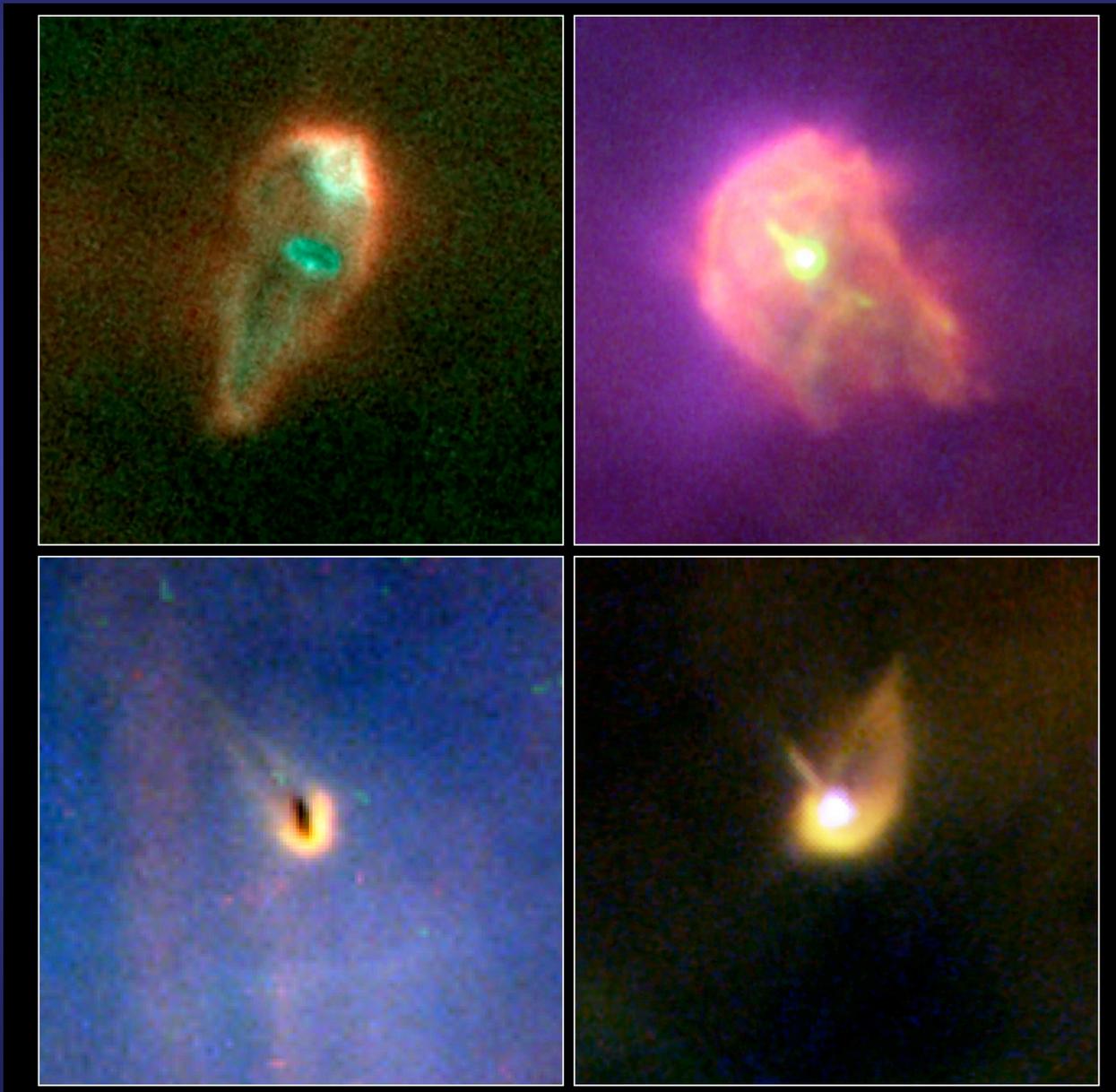
HST image (visible)



Subaru image (near-IR: 2 μm + H₂ line)

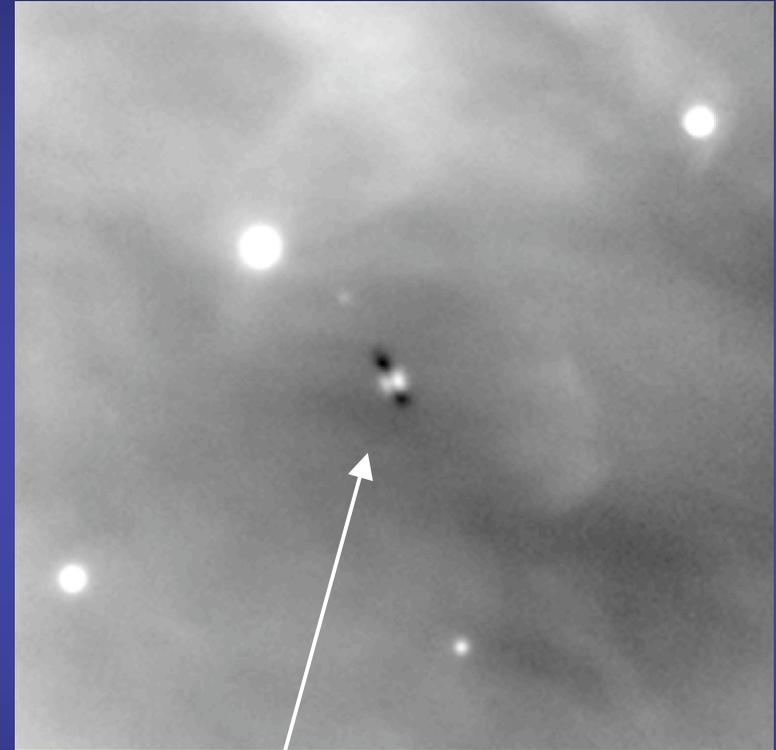
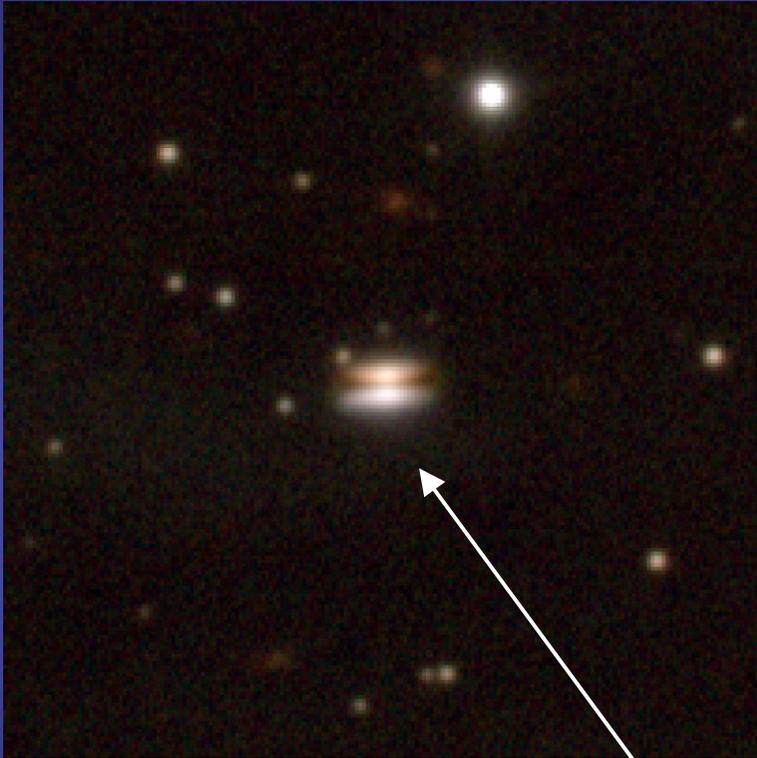
Orion Nebula (M42) and Trapezium region

Photoevaporation by massive stars (Orion) : disk lifetimes $\sim 10^6$ yrs



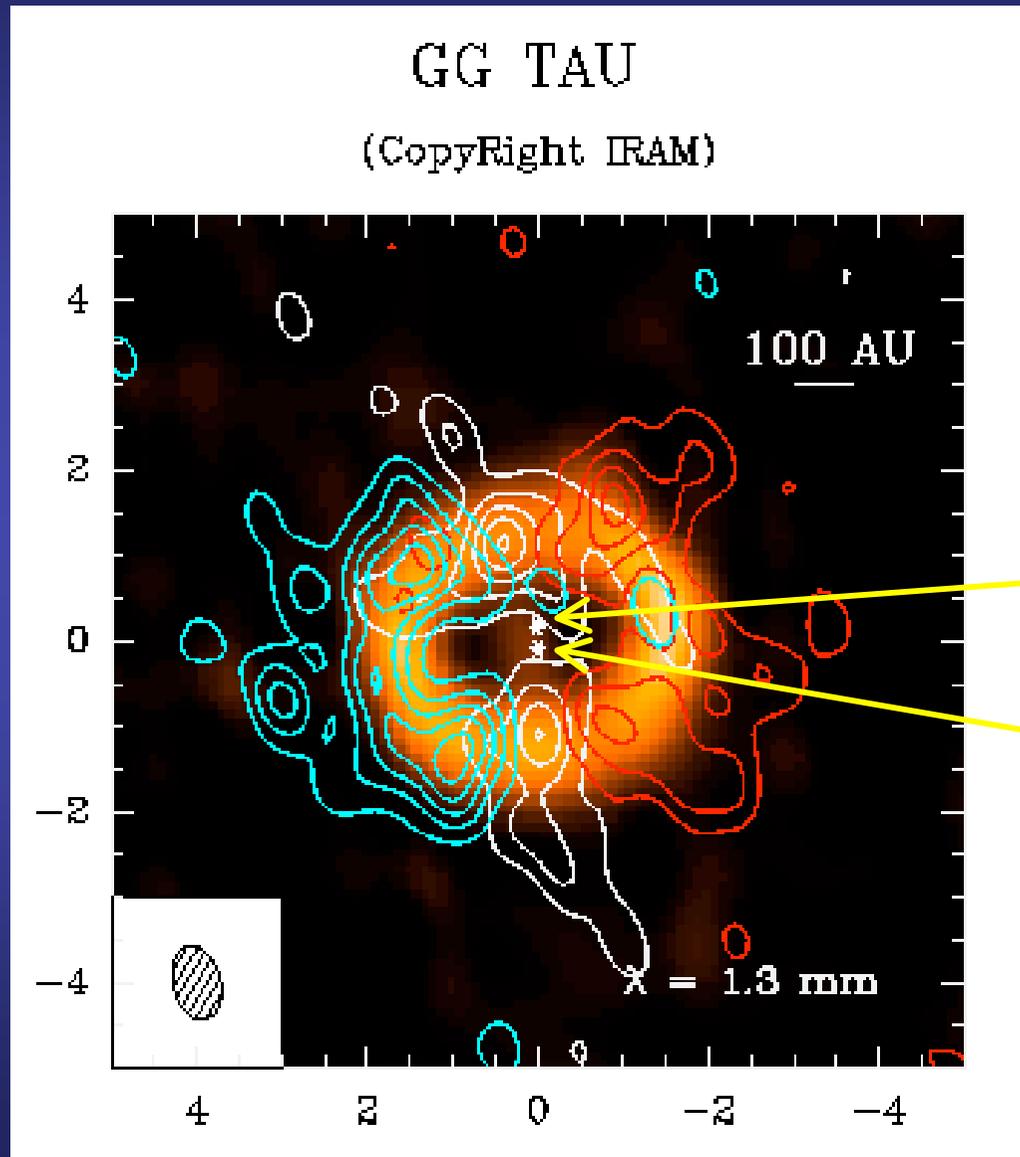
3. Des étoiles aux planètes :

L'ère planétaire

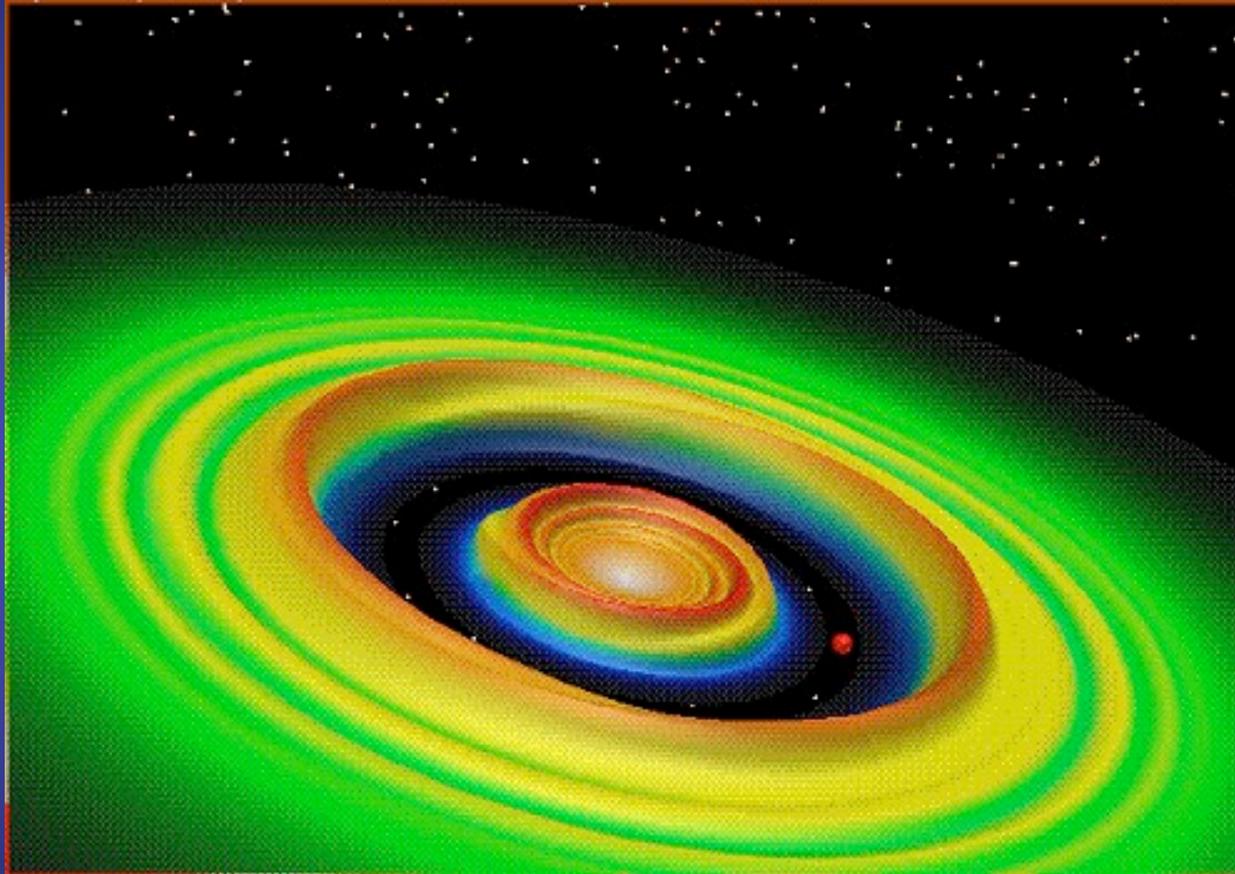


Le Soleil est-il né ici (ρ Oph) ou là (Orion) ?

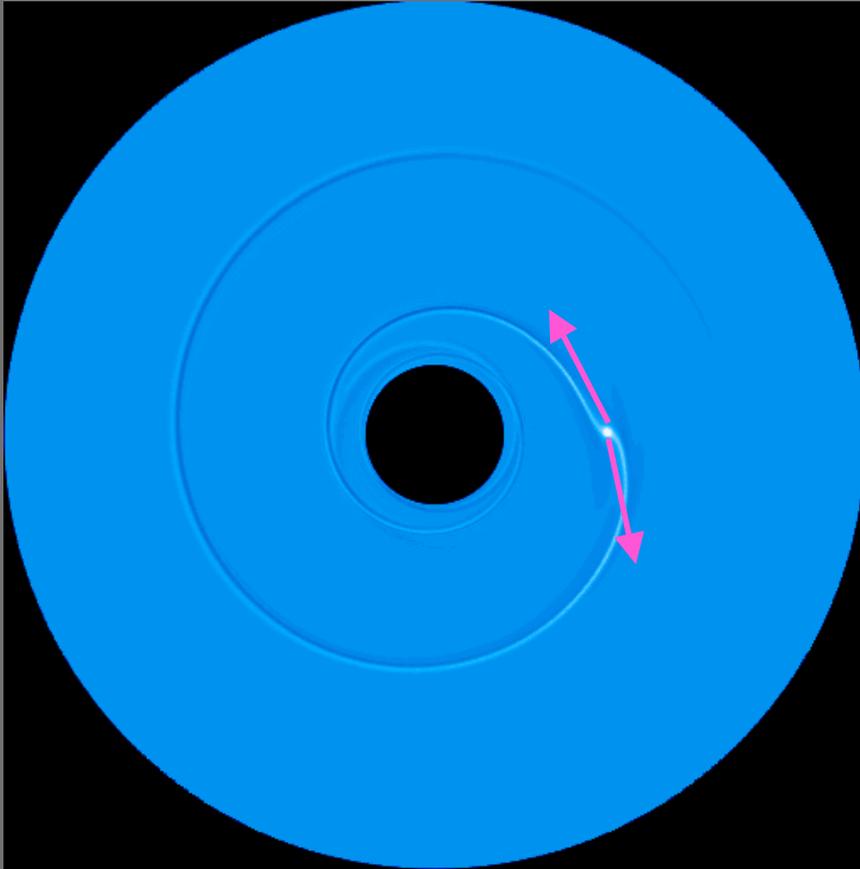
Le Soleil a-t-il été une étoile binaire ?? Cf. ceinture de Kuiper



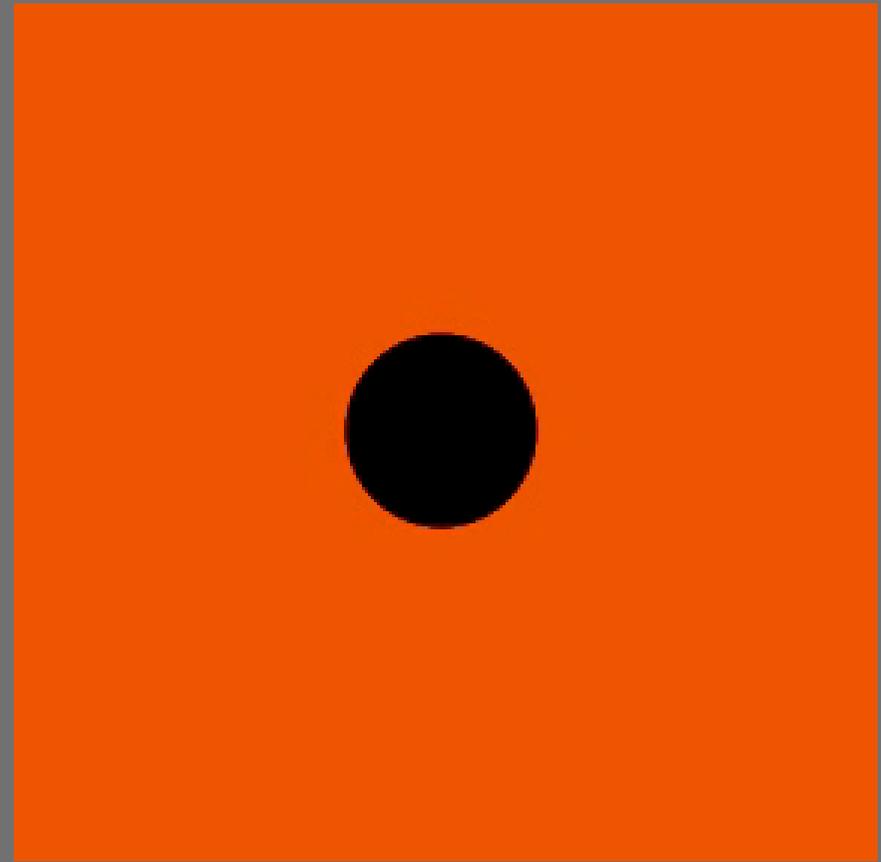
Forte interaction planètes-disque: sillages, sillons...



Migration planétaire : résumé première session



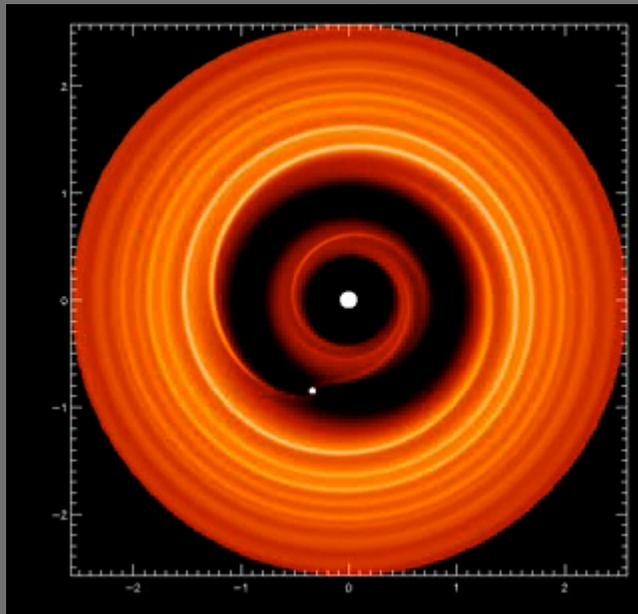
Couple du sillage : migration de type I. Rapide. Planètes de petite masse.



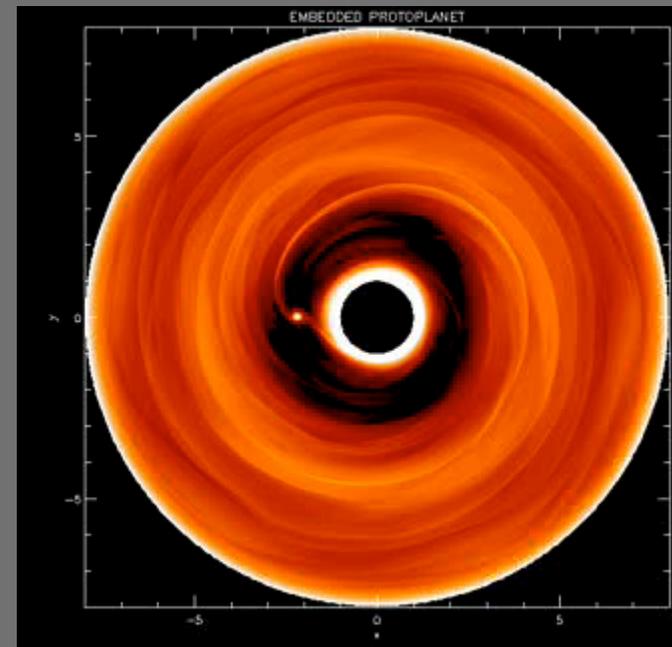
Migration de type II : avec sillon. Lente. Planètes géantes.

Ouverture des gaps en disques turbulents

Les mêmes auteurs se sont penchés sur le problème de l'ouverture des gaps par des planètes géantes dans des disques « *MR* » turbulents.

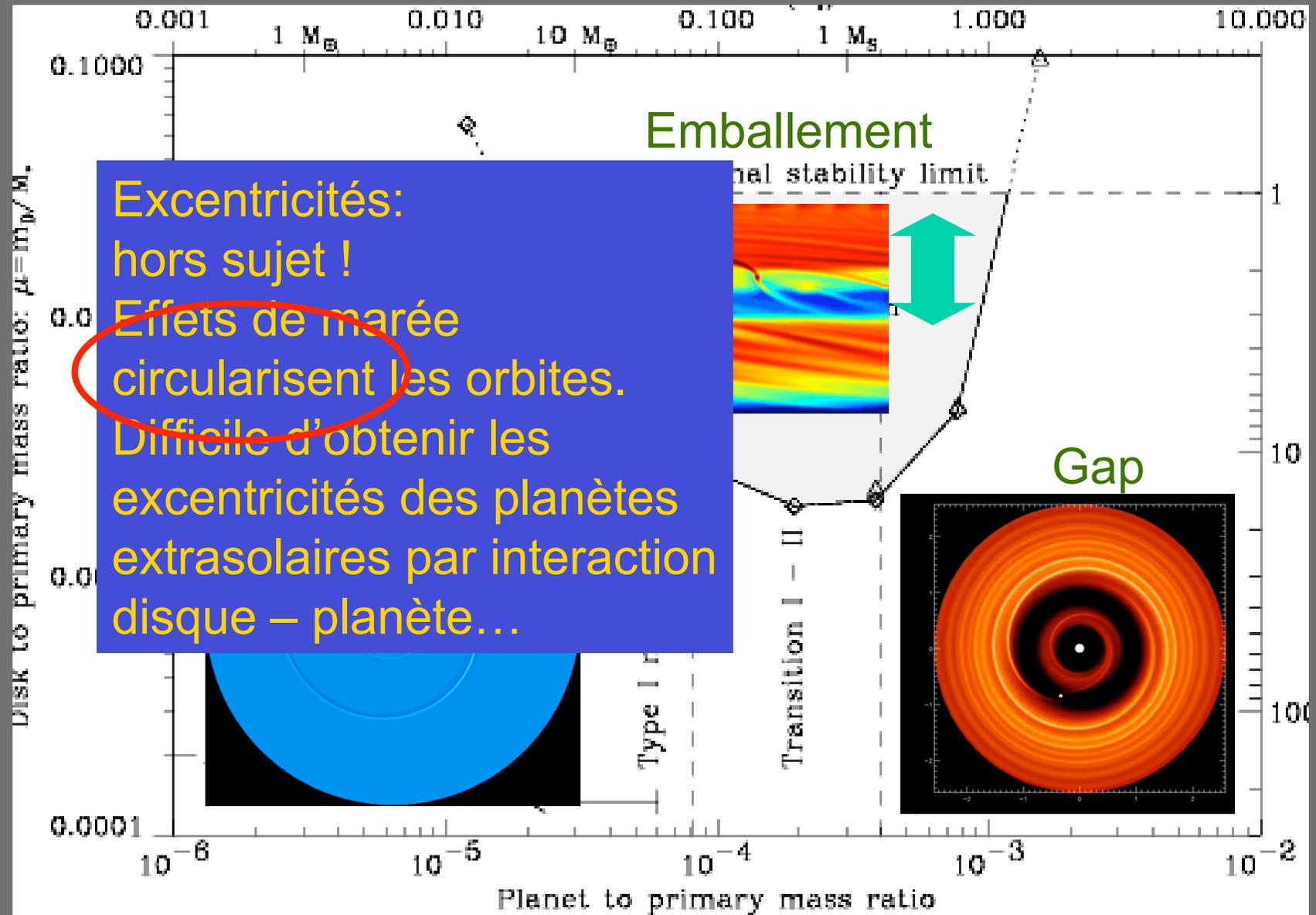


Planète géante en disque laminaire



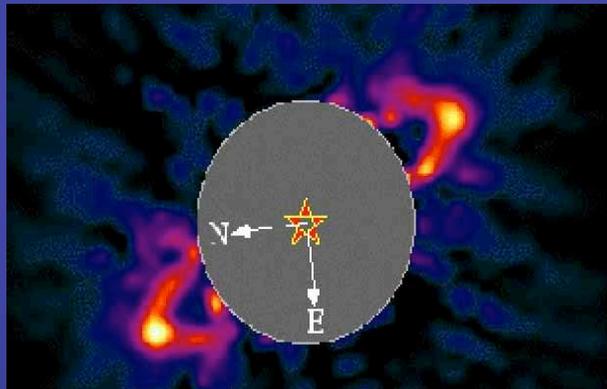
Planète géante en disque turbulent

Résumé

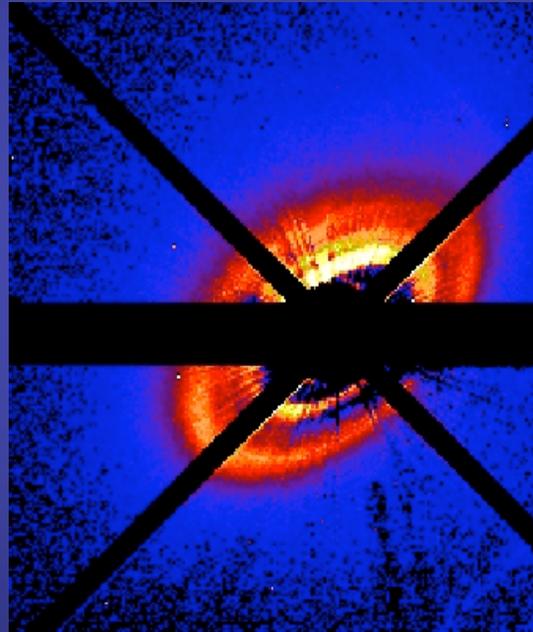


Excentricités:
hors sujet !
Effets de marée
circularisent les orbites.
Difficile d'obtenir les
excentricités des planètes
extrasolaires par interaction
disque – planète...

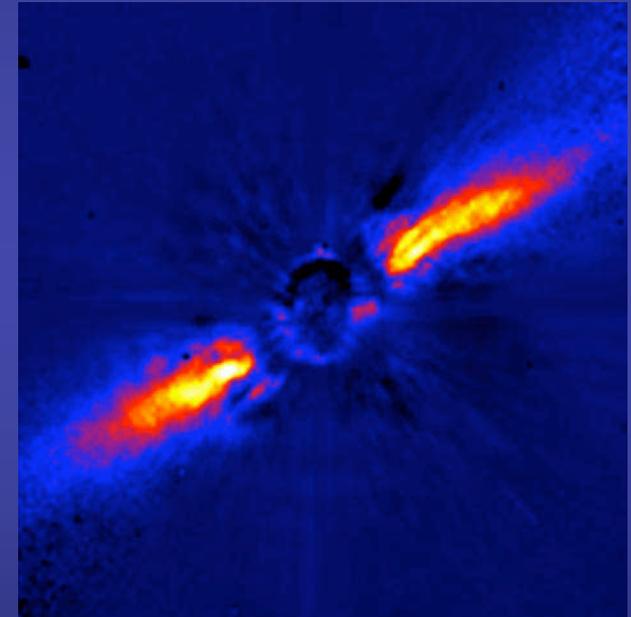
Disques « planétaires » (coronographie)



Hubble Space Telescope
(HST)



Mouillet et al. (1999)
HST



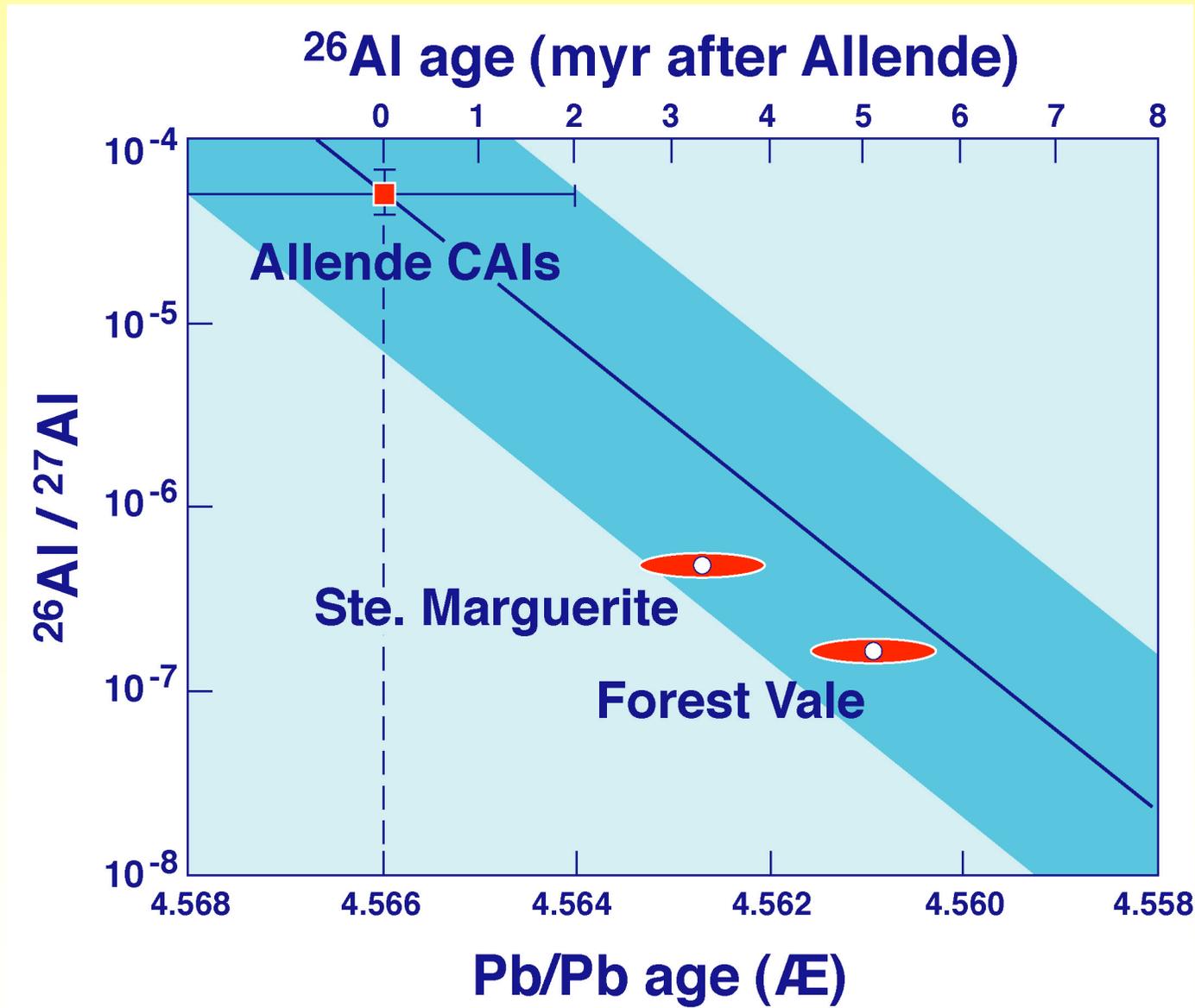
Lagrange et al. (1997)
ESO 3,60m + ADONIS

4. Le système solaire

*La seule histoire que nous
connaissions...*

Les météorites: une “pierre de Rosette” ?

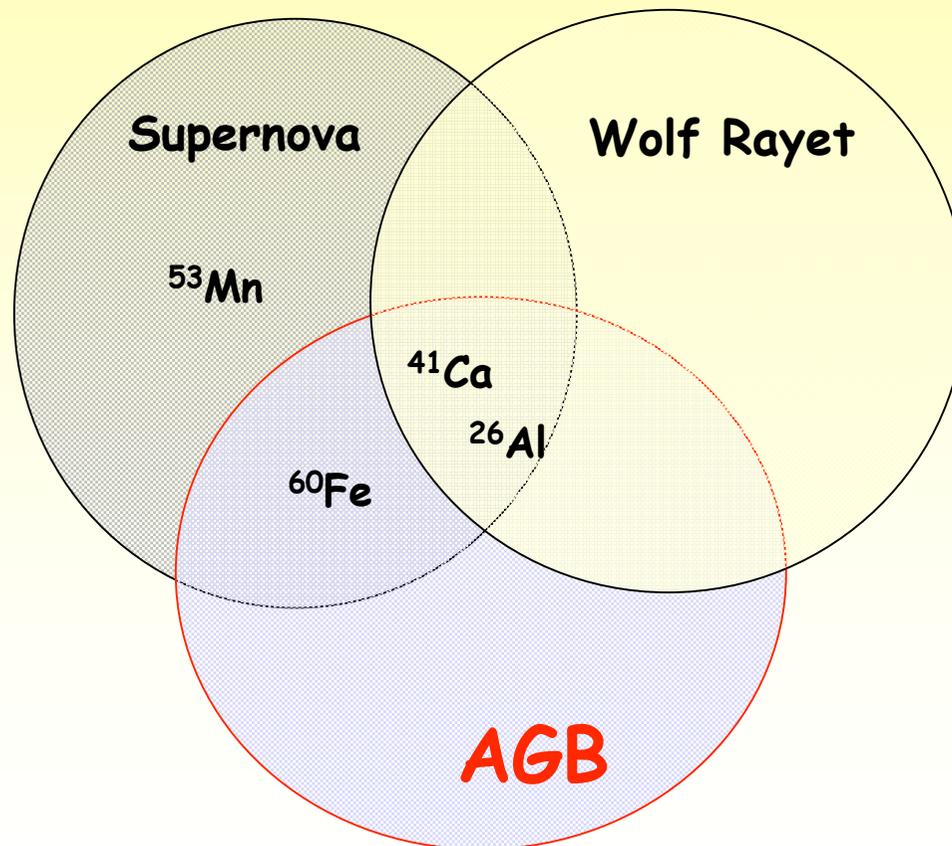
- Une « histoire de l’astronomie »: grains “pré-solaires” (nucléosynthèse stellaire: SN, AGB, novae, etc.)
- Une histoire du système solaire (phases de condensation, de différenciation, etc.): utilisation des “cosmochronomètres” radioactifs
- Mais... *le Soleil n’est pas daté !!!*
- => **pb du SEUL raccordement entre les échelles de temps “stellaires” et “planétaires”**



Zinner & Göpel, 2002

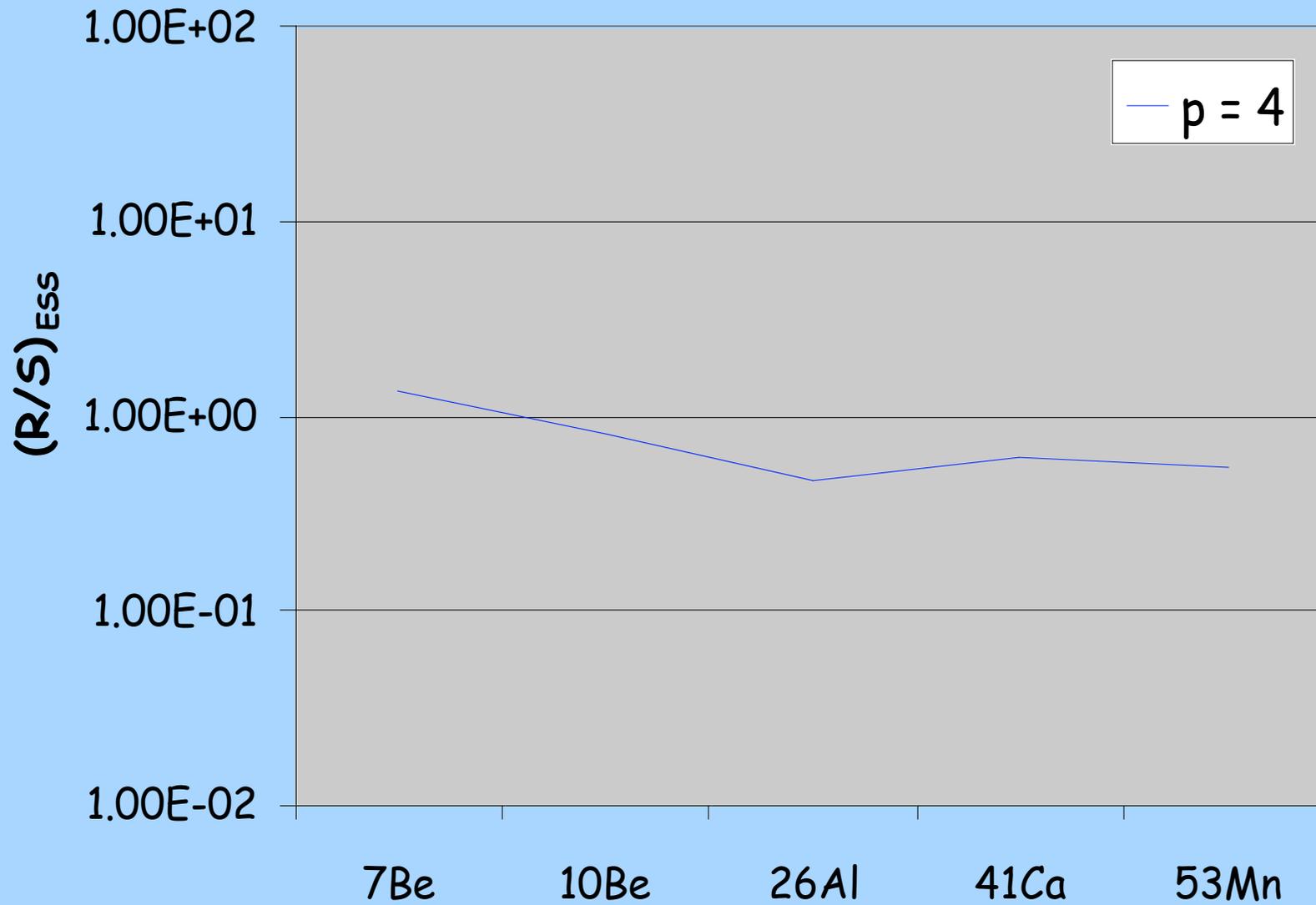
ESRs in stellar models - Summary again

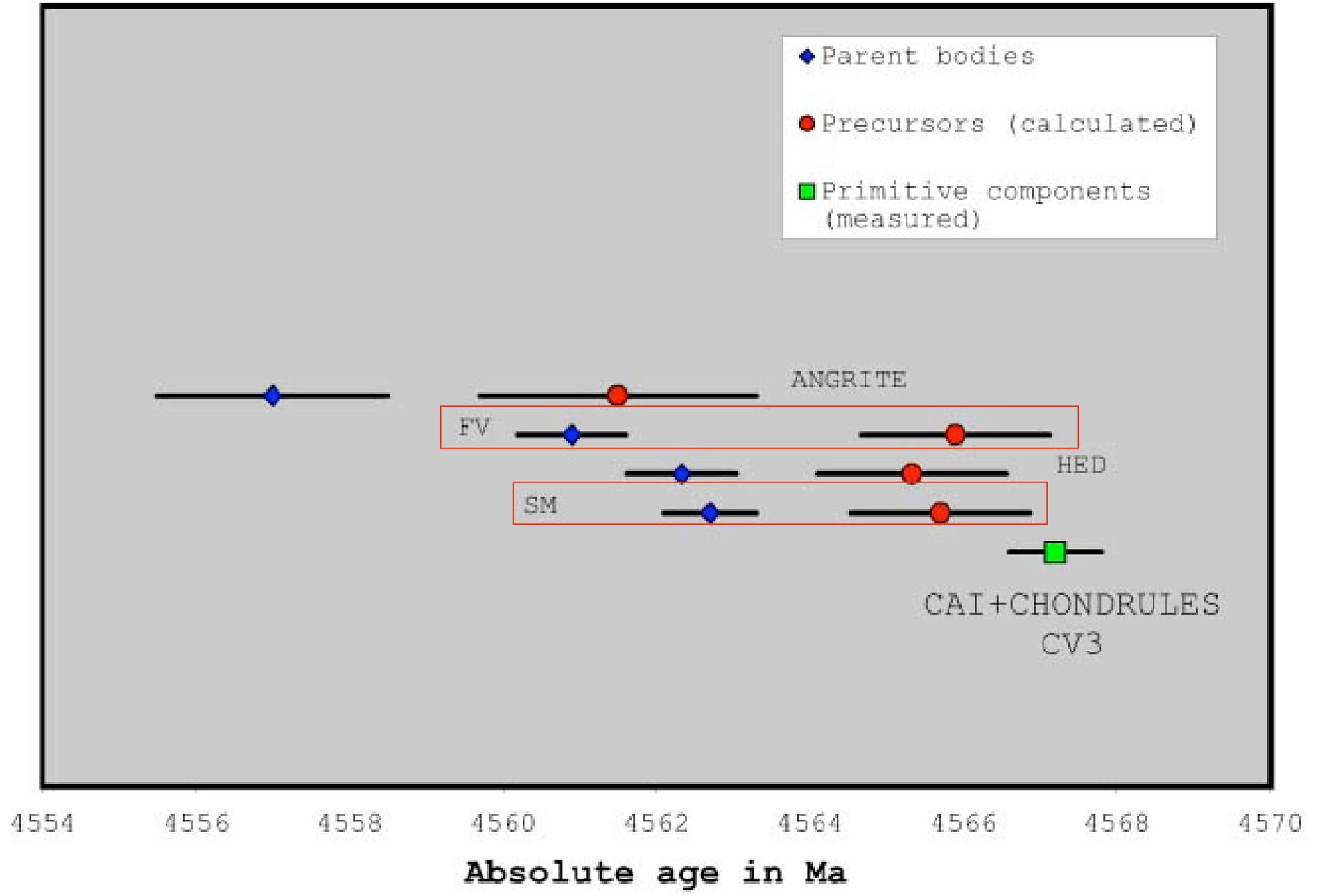
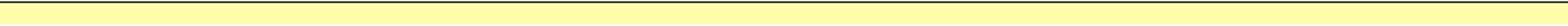
^{10}Be trapped from the GCR ? - No solution for ^7Be



Core-mantle protoCAIs

Impulsive flares ($3\text{He}/p = 0.3$, $p \sim 4$)





Conclusions (?)

- Les échelles de temps sont *logarithmiques*
 - de 10^4 à 10^9 ans (pb de représentation)
- **Importance particulière de la phase disque (1-10 Myr):**
 - “inné” vs. “acquis”: même échelle de temps pour beaucoup de phénomènes (évaporation, irradiation, contamination, formation/migration des planètes géantes, etc.) => nombreuses configurations “non-solaires” possibles
- Mais: disques présents dès 10^5 ans, peut-être même dès 10^4 ans
- La chronologie des météorites n'est pas encore claire (ex.: datation Al/Mg vs Cr/Mn: 2 Ma d'écart => disque non homogène ??)
- **Rôle du champ magnétique probablement essentiel au moins pendant l'ère pré-planétaire**
 - Rôle dans la formation stellaire
 - Rôle dans l'accrétion-éjection et l'irradiation interne
 - Rôle pour maintenir la turbulence (IMR) pendant la phase de migration ?