



UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

Patrick Boissé, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie



Lundi 9 janvier 2012

**8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles**

Les nuages interstellaires et la formation des étoiles

Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Les nuages interstellaires et la formation des étoiles



La nébuleuse d'Orion
(ESO-2.2 m)

La nébuleuse d'Orion
à 1350 années lumière



Amas du trapèze
(HST)



Plan du cours 8

- L'espace entre les étoiles n'est pas vide !
- Détection de la matière interstellaire, étude de ses propriétés
- Comment se forme une étoile : modèles, observations
- Questions ouvertes
- Le cycle de la matière interstellaire



Comment se révèle la matière interstellaire ?

Nébuleuses sombres (poussières)

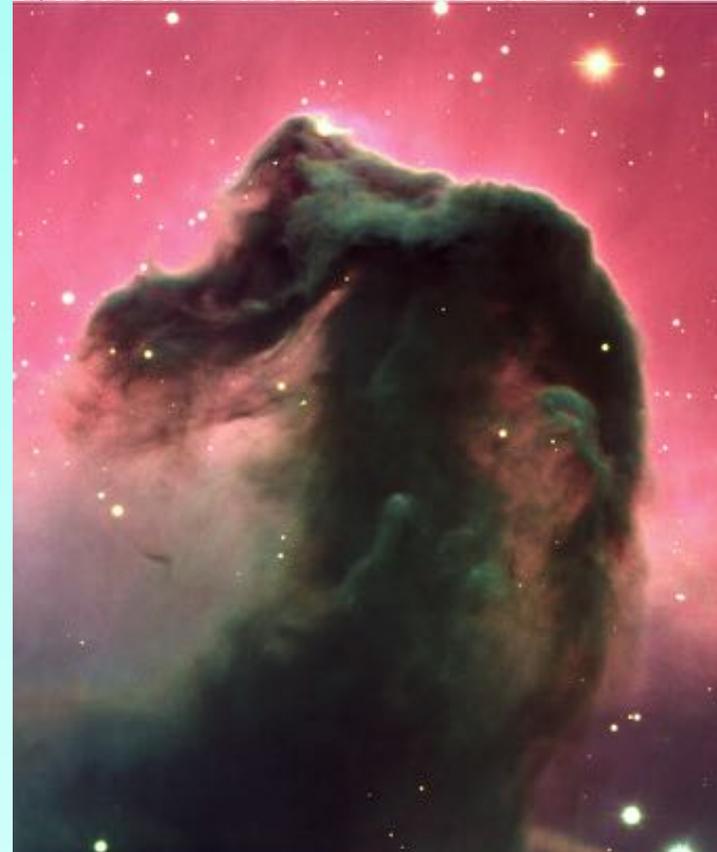
Absence d'étoiles repérée par
W. Herschel (1738 - 1822) :

- zones « vides » ?
- étoiles cachées ?

Nuage sombre B68



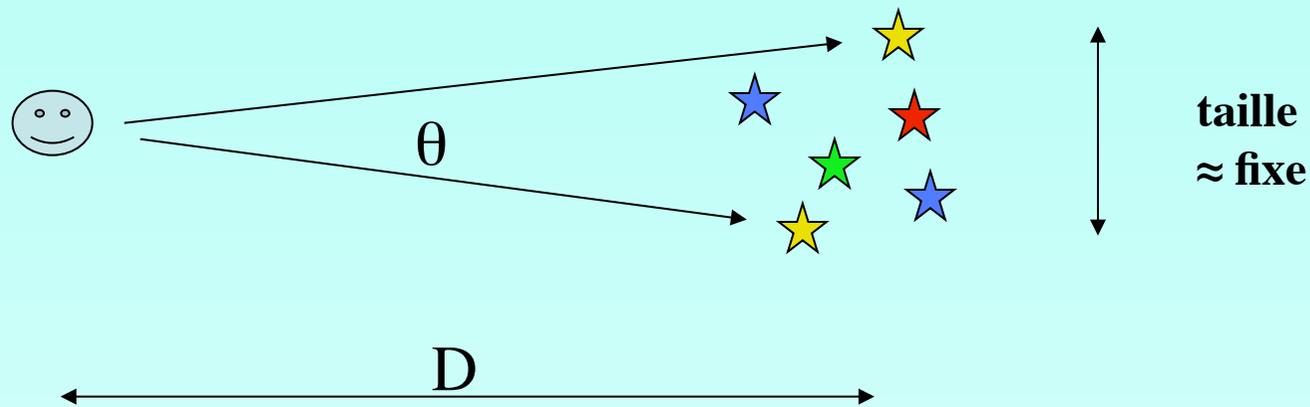
Nébuleuse de la tête de cheval



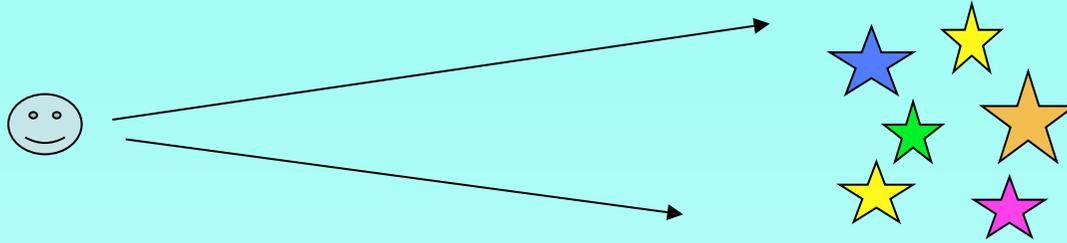
Principe de la mesure historique de l'atténuation interstellaire « diffuse » par R. Trumpler en 1930

Etude d'amas ouverts (groupe de jeunes étoiles):

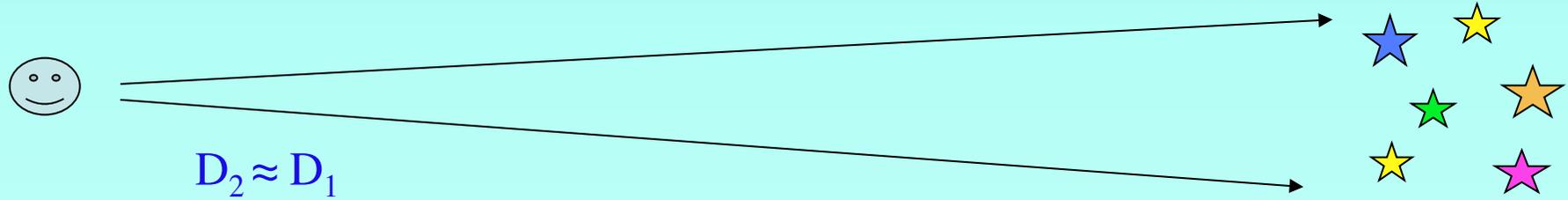
- taille sur le ciel: θ varie en $1/D$ --> D_1
- éclat : brillance en $1/D^2$ --> D_2



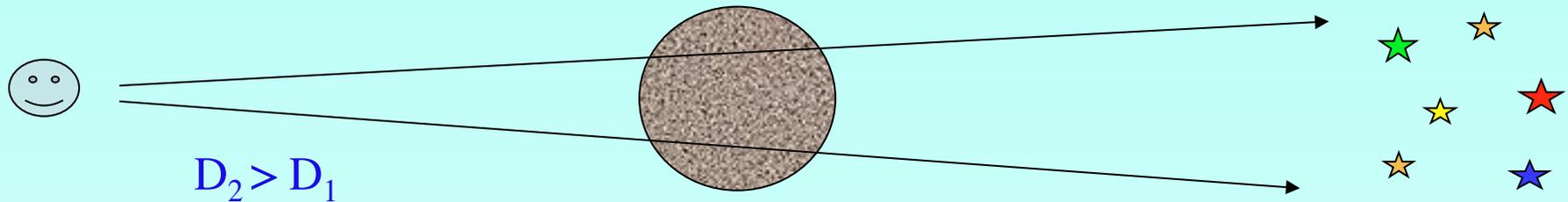
Amas proche



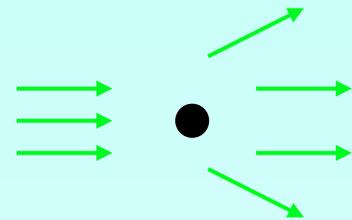
Amas lointain



Amas lointain obscurci



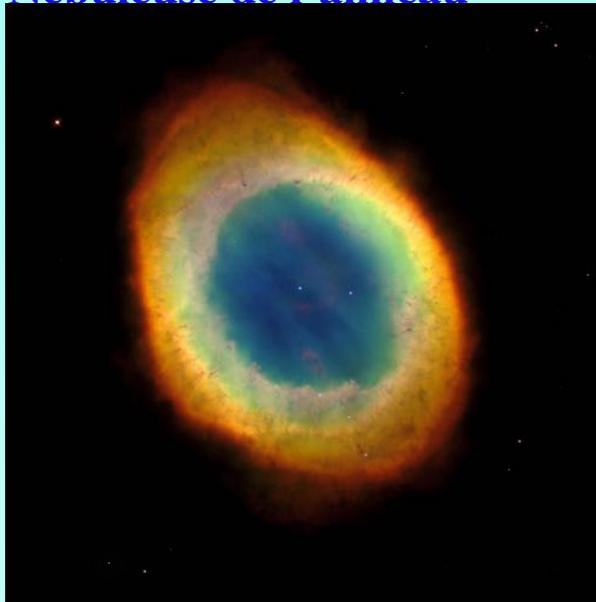
--> Atténuation $\approx 1\text{mag}/1000 \text{ a. l.}$ par de petits grains



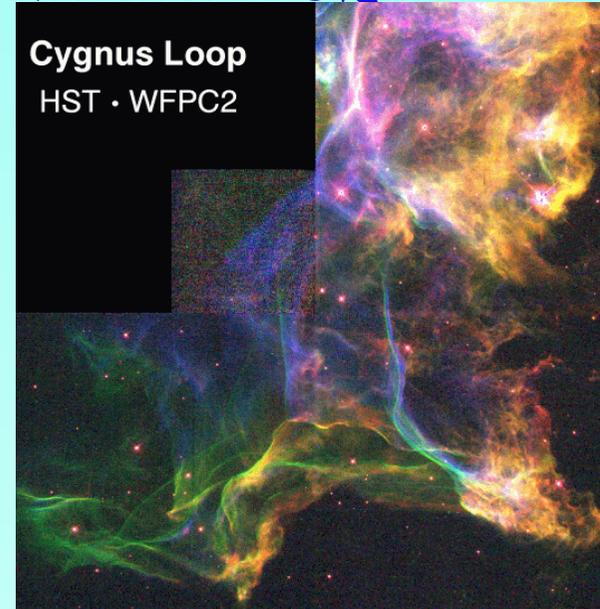
Comment se révèle la matière interstellaire ?

Nébuleuses brillantes (gaz illuminé)

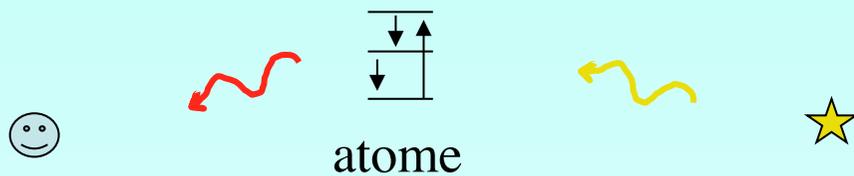
Nébuleuse de l'anneau



Nébuleuse du Cygne



Raies d'émission d'atomes ou ions « excités »



Comment se révèle la matière interstellaire ?

Spectroscopie: raies interstellaires

Découverte de molécules :

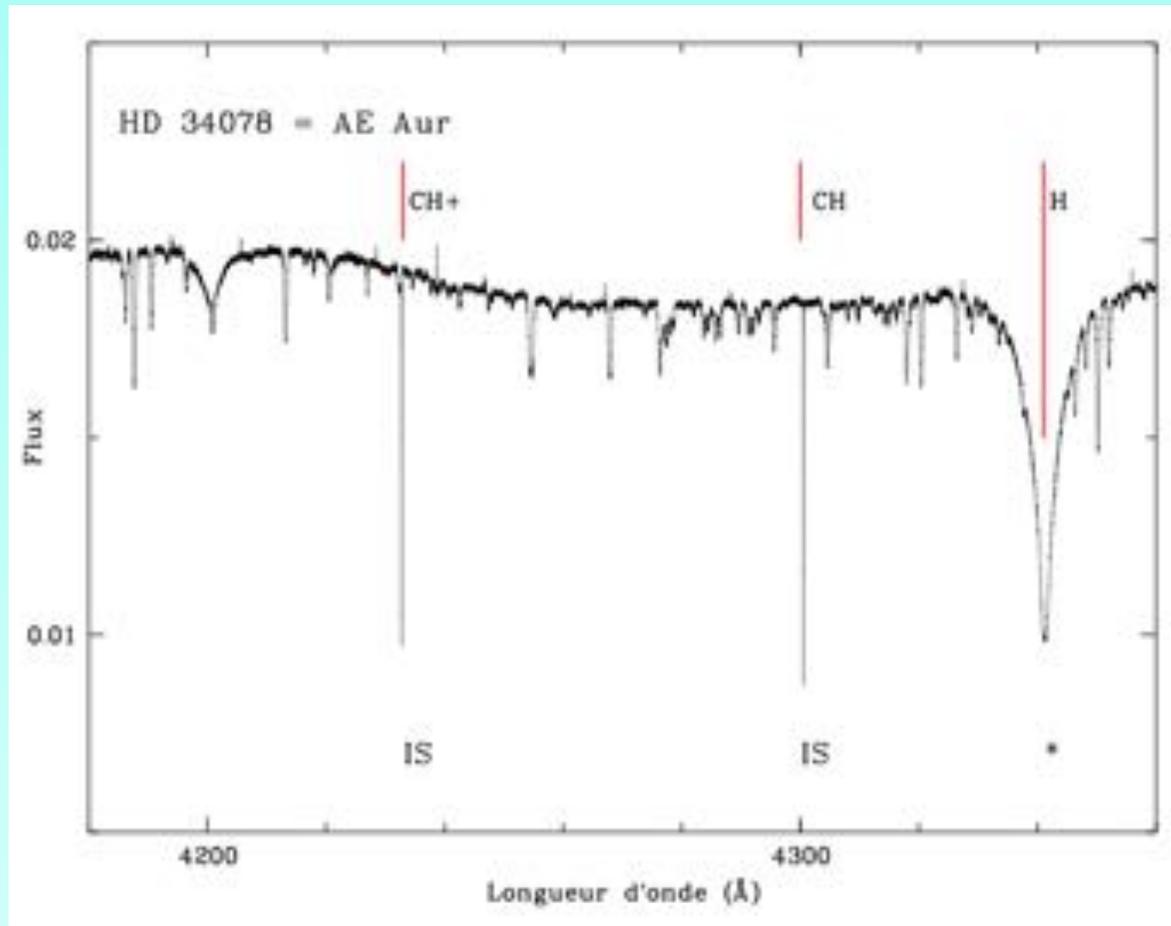
- CH (Swings et Rosenfeld, 1937)
- CH⁺ (Douglas et Herzberg, 1941)

Aussi, dans le domaine visible :

Na, Ca⁺, K, Li, CN, C₂, C₃,
bandes « diffuses »

Domaine UV: très riche !

H, H₂, CO, C, C⁺, O



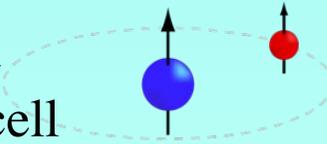
Comment se révèle la matière interstellaire ?

Observations radio de H (21 cm) ou de molécules (CO à 2,6 mm)

Emission dans la raie à 21cm de H :

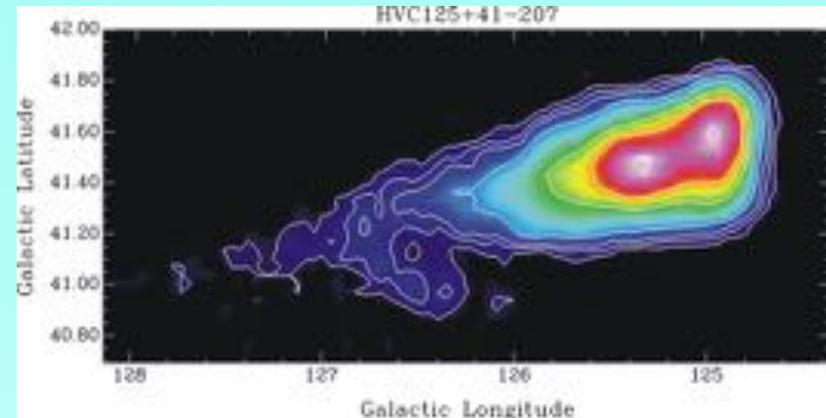
Prédiction: 1944, van de Hulst

Détection 1951 : Ewen & Purcell



Nuage à grande vitesse (Effelsberg 100m)

structure cométaire -> interaction avec le milieu



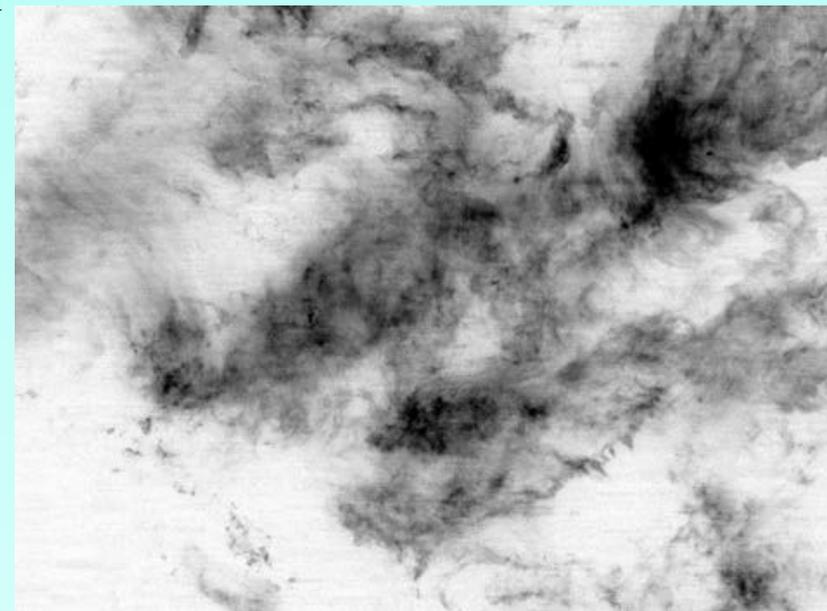
Emission de la raie de rotation de CO

$\lambda = 2,6 \text{ mm}$

Nuage moléculaire, constellation du Taureau

(tél. 14m FCRAO, Amherst, USA)

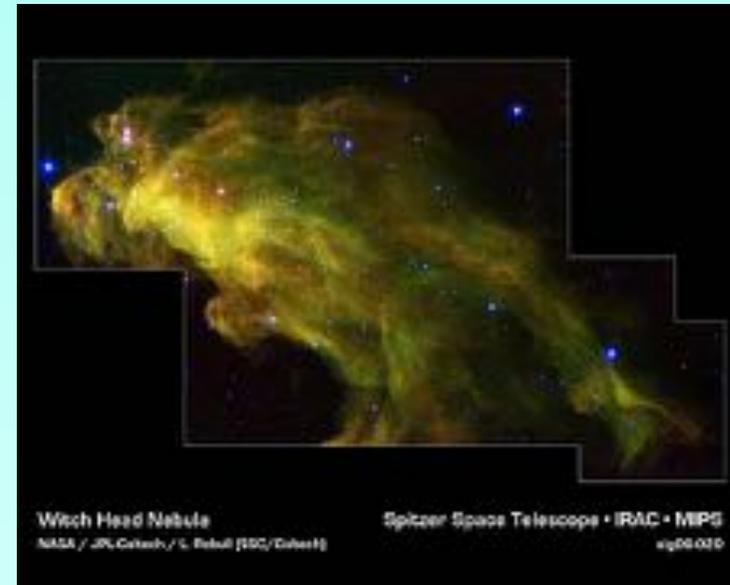
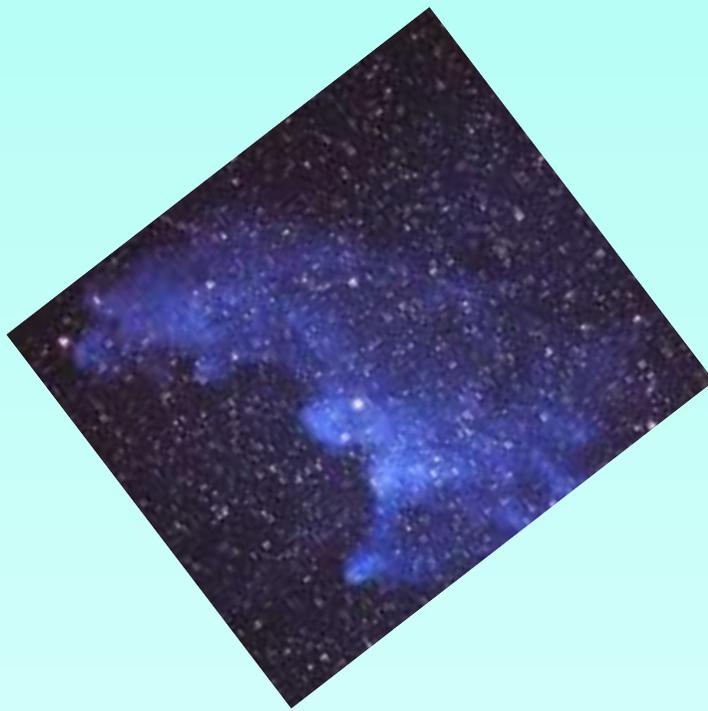
Structure très complexe.



Comment se révèle la matière interstellaire ?

Emission thermique (IR lointain) des grains de poussière

absorption \longrightarrow grains chauffés \longrightarrow rayonnement IR



Comment se révèle la matière interstellaire ?

Emission de rayons gamma (-> masse)

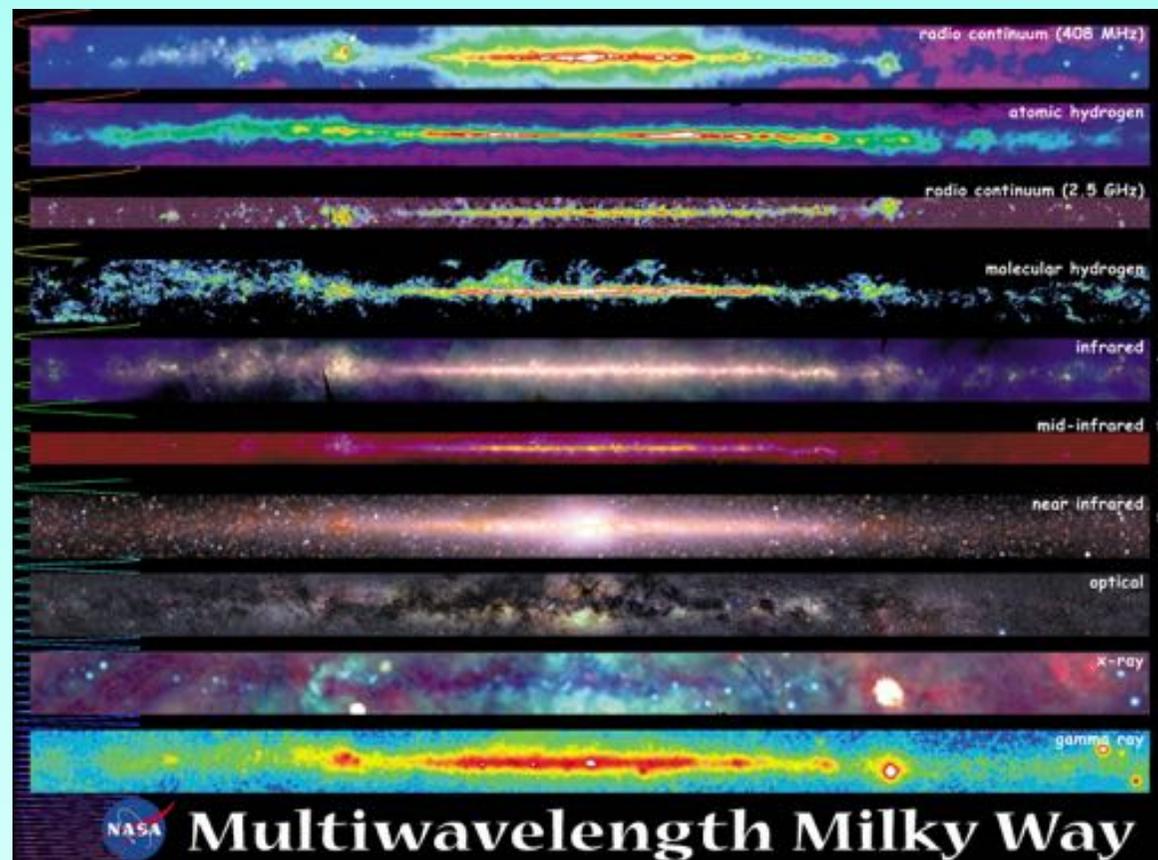
Impact de rayons cosmiques sur matière IS \longrightarrow rayonnement γ

Collisions : $p + p$ et $p + e$

vers 10 - 100 MeV

$\xrightarrow{\text{H}}$
 $\xrightarrow{\text{H}_2, \text{CO}}$
 $\xrightarrow{\text{poussières}}$

$\xrightarrow{\gamma}$



9 janvier 2012

Milieu interstellaire, formation
d'étoiles

13

Propriétés de la matière interstellaire / 1

Plusieurs « phases » très différentes :

- **gaz très chaud** ($\approx 10^6$ K), ionisé (plasma), très peu dense (0,01 par cm^3)

sur terre $n \approx 30$ milliards de milliards de molécules par cm^3

- **gaz neutre** (H), plus dense ($T \approx 100$ à 1000 K; $n \approx 1$ cm^3)

- **gaz moléculaire diffus et dense** ($T \approx 10$ K; $n \approx 100$ à 10000 par cm^3)

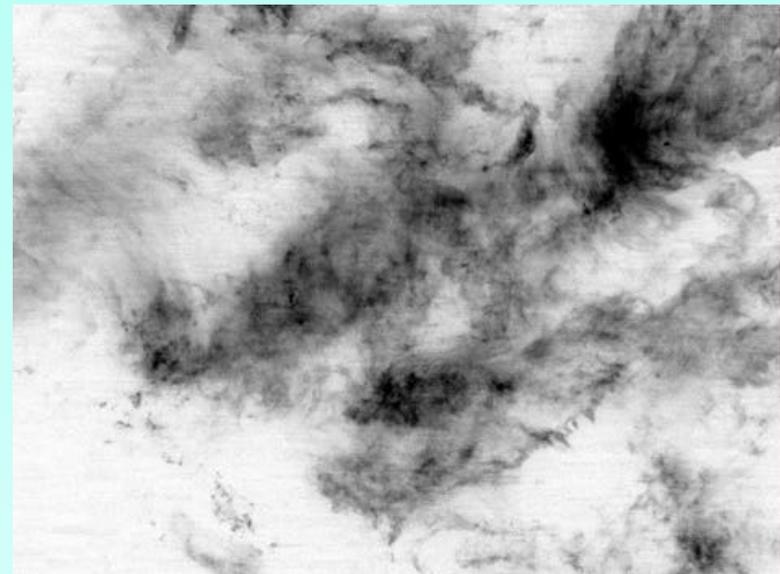
Distribution spatiale

Pas du tout homogène. nuages. filaments

Géométrie

complexe

(fractale ?)



Propriétés de la matière interstellaire

Mouvements internes

Participe à la rotation galactique,
Agitation turbulente ($V \approx 1$ à quelques 10 km/s)

Conditions physiques et chimiques

Température : qq K à $> 10^6 \text{ K}$

Densité: $0,01$ à $> 10^8$ par cm^3

Composition chimique : plus de 100 molécules identifiées

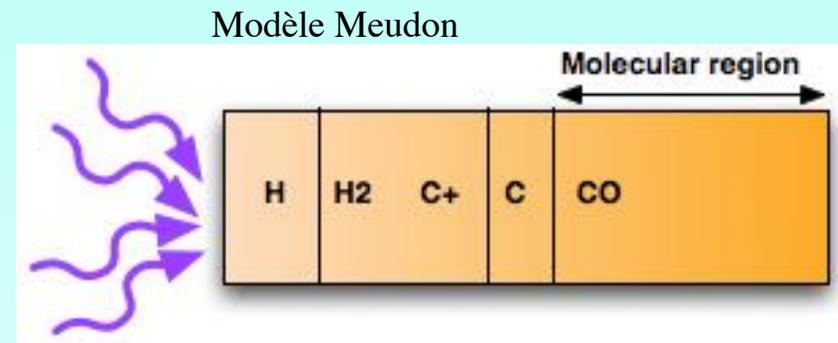
Grains de toutes tailles: qq atomes à $1\text{-}10 \mu\text{m}$



Modélisation

Rôle important

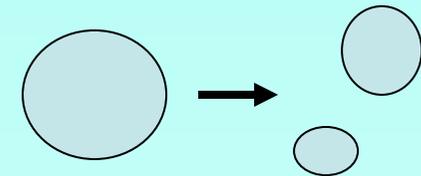
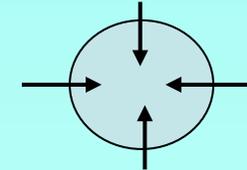
- des photons UV
- des rayons cosmiques.



Formation des étoiles

Les grandes étapes

- Instabilité d'un (fragment de) nuage
- Contraction gravitationnelle --> « cœur dense »
- Fragmentation --> plusieurs étoiles voisines
- Disque d'accrétion, jet
- Allumage des réactions nucléaires
- Etoile et disque circumstellaire



Formation des étoiles

Stabilité/instabilité d'un nuage

J. Jeans étudie en 1902 la stabilité d'un milieu uniforme infini

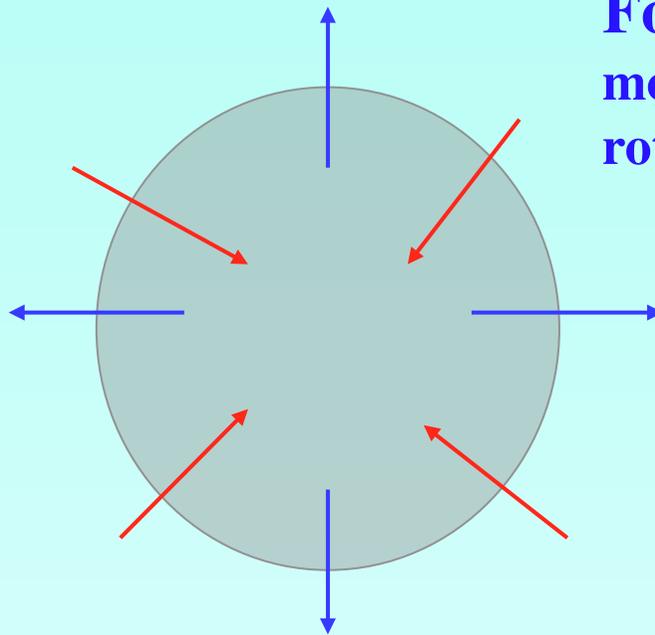
Forces mises en jeu :

Gravitation
pression externe

E_g

Forces de pression (T)
mouvement turbulents
rotation, champ magnétique

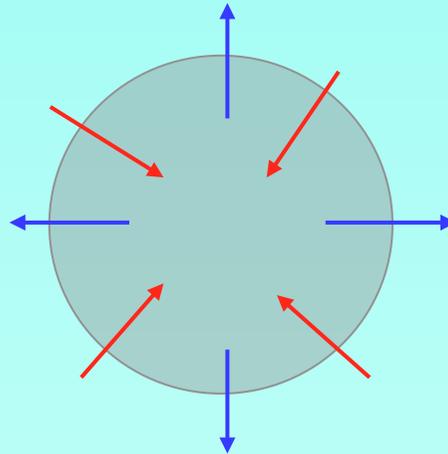
E_c



Critère d'instabilité d'un nuage

Equilibre (Viriel)

$$E_g = 2E_c$$



Expansion si

$$E_g < 2 E_c$$

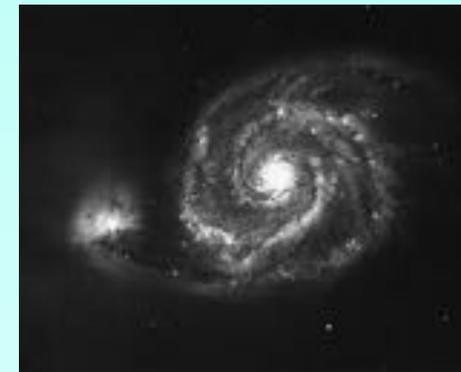
Effondrement si $E_g > 2 E_c$ ou $M > M_{\text{Jeans}}$

$$\text{avec } M_{\text{Jeans}} = k T^{3/2} / \rho^{1/2}$$

Observation : nombreux nuages « juste à l'équilibre »

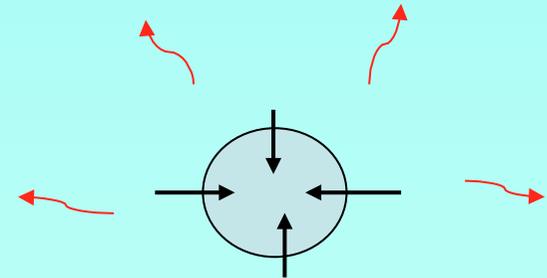
Perturbations : passage dans bras spiral, supernova, jet, effets de marée ...

M51



Evolution durant l'effondrement

$$M_{\text{Jeans}} = k T^{3/2} / \rho^{1/2}$$

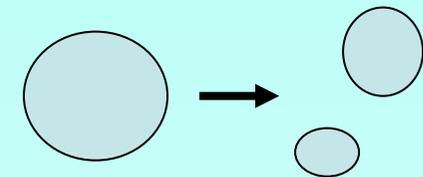


- **D'abord $T \approx \text{constant}$ (isotherme)**

excès d'énergie rayonné : couplage micro - macroscopique

- **La densité (ρ) croît**

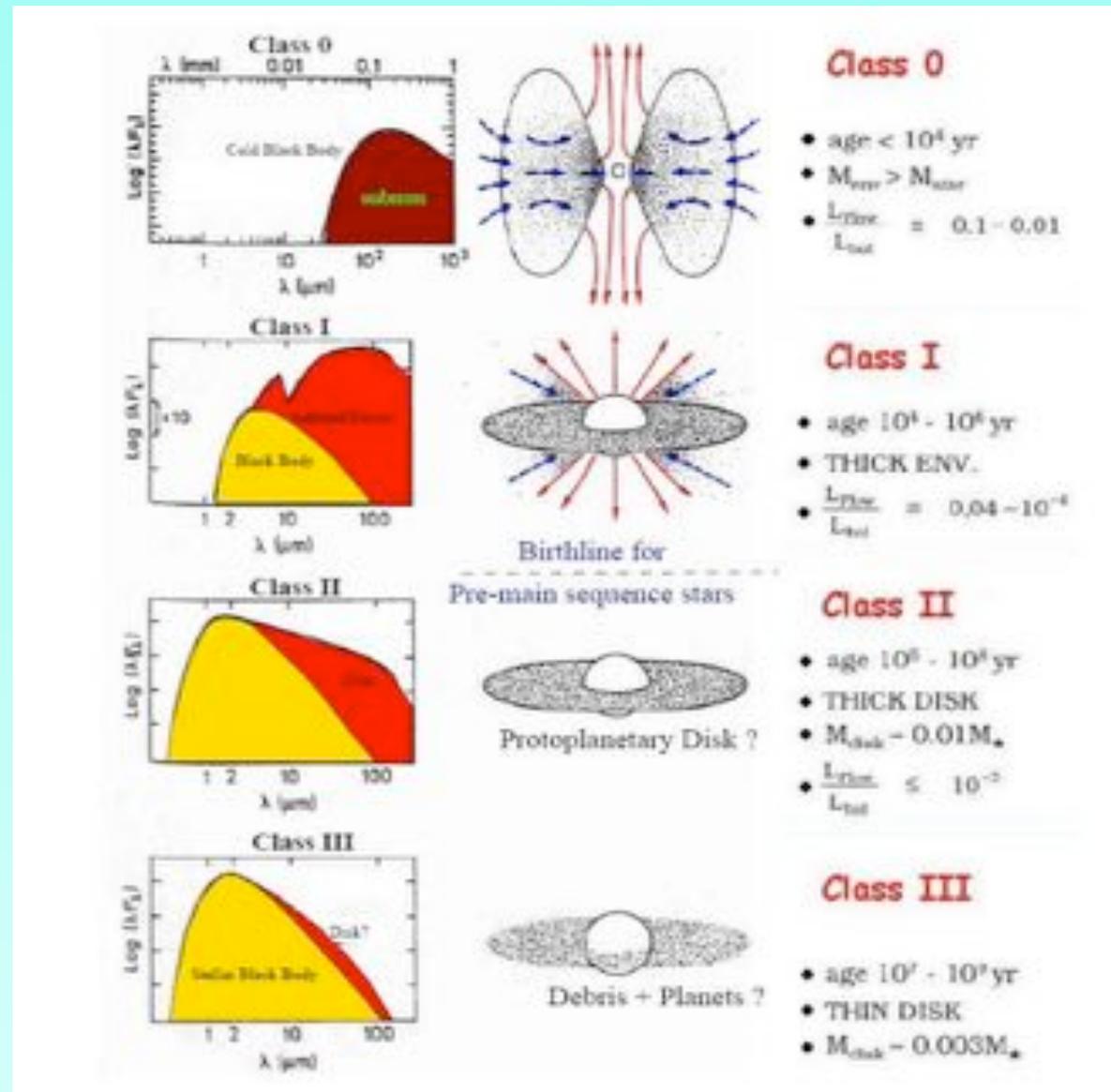
$\implies M_{\text{Jeans}}$ décroît \implies **fragmentation**



- **Le fragment devient opaque : T croît (adiabatique)**

\implies **masse minimale $M_{\text{Jeans}} \approx 0,01 M_{\odot}$**

Du cœur dense à l'étoile ...



Origine de la rotation des étoiles (et planètes)

Conservation du moment cinétique

$J \omega = \text{constante}$ (sans frott.) J : moment d'inertie $J = k M r^2$

Cf $p = mv$ (Galilée et principe d'inertie)

Expérience du tabouret tournant

r décroît $\Rightarrow \omega$ croît ($r \rightarrow r/2 \Rightarrow \omega \rightarrow 4 \omega$)

Mvt initial ? rotation différentielle galactique
(\rightarrow rotation du nuage qui a formé la galaxie)

« **Barrière centrifuge** » pour former une étoile
 \rightarrow évacuer du moment cinétique (jets de gaz).



Recherche des cœurs denses

ESA, Herschel, P. André

Constellation de l'Aigle

Instruments Herschel :

PACS (60 - 200 μm)

SPIRE (200 - 650 μm)

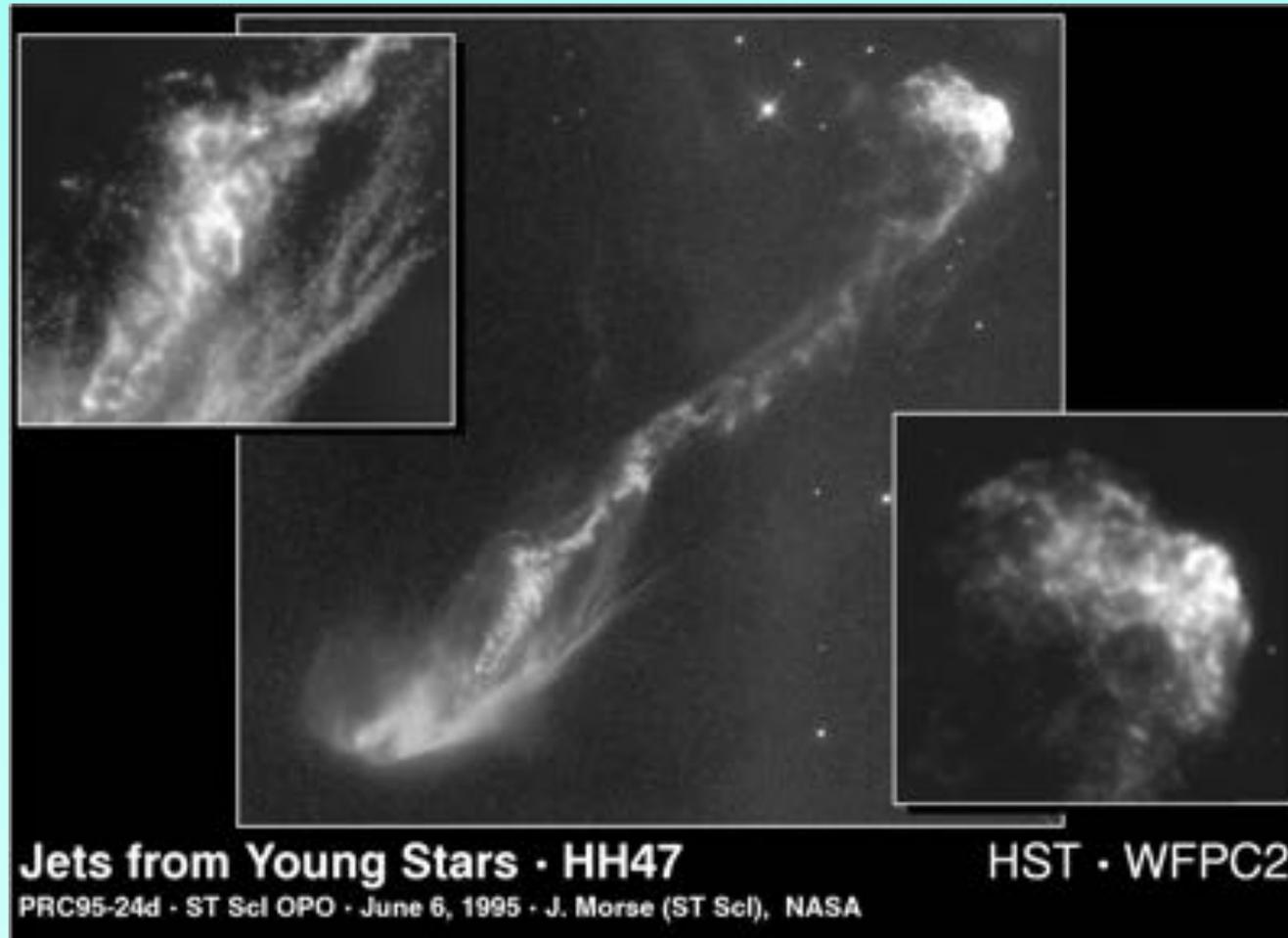
distance ≈ 1000 a.l.

taille ≈ 65 a.l.

≈ 700 condensations



Jets protostellaires



$D \approx 1500 \text{ a.l.}$, $L = 10000 D_{\text{TS}}$, $V \approx 150 \text{ km/s}$, Δt (1994 - 2008)

Questions ouvertes

Fonction initiale de masse (IMF)

- origine de la **fonction initiale de masse** (qq 0,01 Mo à ≈ 50 Mo) ?
 - proportion **N(massives) / N (total)**
 - fonction de masse des fragments ?
- Comment l'IMF dépend-elle de l'environnement ?
 - > identique dans d'autres galaxies ?

Rotation (trop) lente des étoiles

rôle du jet, de la fragmentation ...

Formation du jet, propriétés

rôle du champ magnétique

Multiplicité (binaires, étoiles triples, ...)

Pourquoi certains nuages forment des étoiles, d'autres non ?

Cycle de la matière

Milieu interstellaire <--> étoiles (vents, explosions/formation)

---> Evolution des étoiles et des nuages

IAS, Orsay



9 janvier 2012

Milieu interstellaire, formation
d'étoiles

25

Résumé du cours 8



- **Nombreux moyens de détection de la MIS**
- **Milieu complexe, grande diversité de conditions phys./chim.**
- **Formation stellaire : instabilité puis évolution complexe**
- **Nombreuses questions ouvertes (origine de l'IMF ...)**
- **Cycle de la matière interstellaire: étoiles et MIS évoluent !**

Prochains cours

Fin du cours n°7 & Cours n°9 – La Voie Lactée et les galaxies proches :
Frédéric Daigne, lundi 16 janvier.

Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Fin du cours n°7 & Cours n°9 – La Voie Lactée et les galaxies proches :
Frédéric Daigne, lundi 16 janvier.

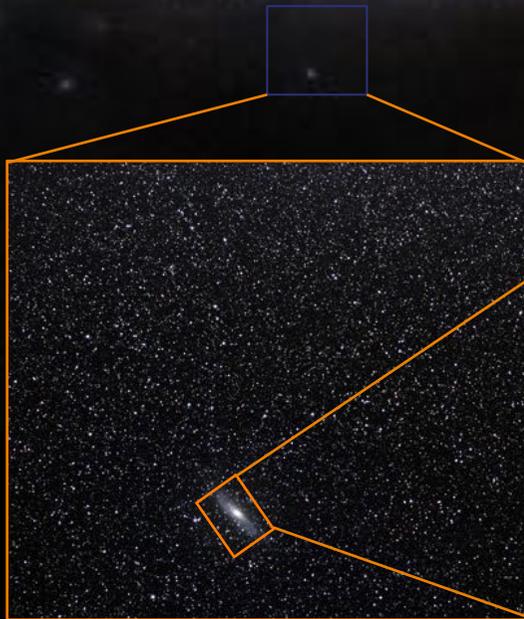
Le centre galactique
à 27 000 a.l.



Les nuages de Magellan
à 160 000 (LMC)
et 190 000 (SMC) a.l.



La galaxie d'Andromède
à 2,5 millions d'a.l.



(T-30 cm) (ESO-1m)



Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr