

Le monde des étoiles

Classer les étoiles

- luminosité et température
- diagramme de Hertzsprung-Russell

Le Soleil

- une étoile banale
- nucléosynthèse, sources d'énergie stellaire

Les étoiles

- évolution des étoiles
- formation des étoiles

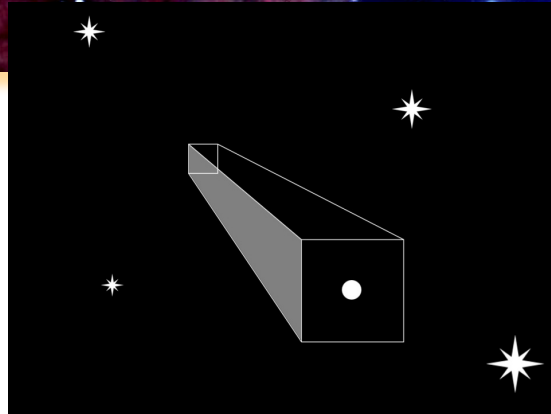
Milieu interstellaire



100 à 400 milliards d'étoiles dans notre Galaxie, la Voie Lactée. La séparation moyenne entre deux étoiles dans le voisinage solaire est de 650 mille milliards de km

➤ et entre les étoiles ? L'espace interstellaire est-il vide?

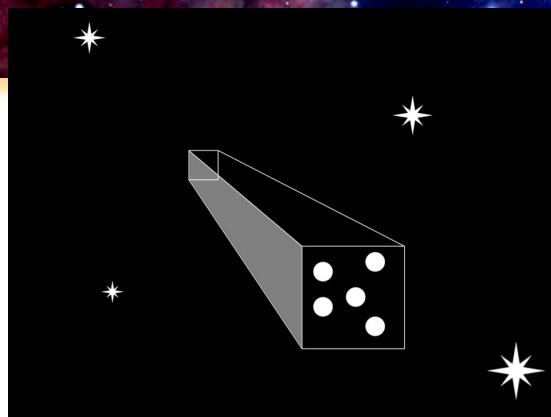
L'espace interstellaire est-il vide?



Dans 1 cube de 1 cm de côté, on trouve en moyenne 1 seul atome dans l'espace interstellaire. L'air que nous respirons sur Terre contient 10 milliards de milliards de molécules par cm^3 !

- l'espace interstellaire est **quasiment vide**, mais localement...

Nuage interstellaire



Localement, il peut y avoir une concentration plus importante de matière interstellaire

- cette accumulation de matière forme un **nuage interstellaire**

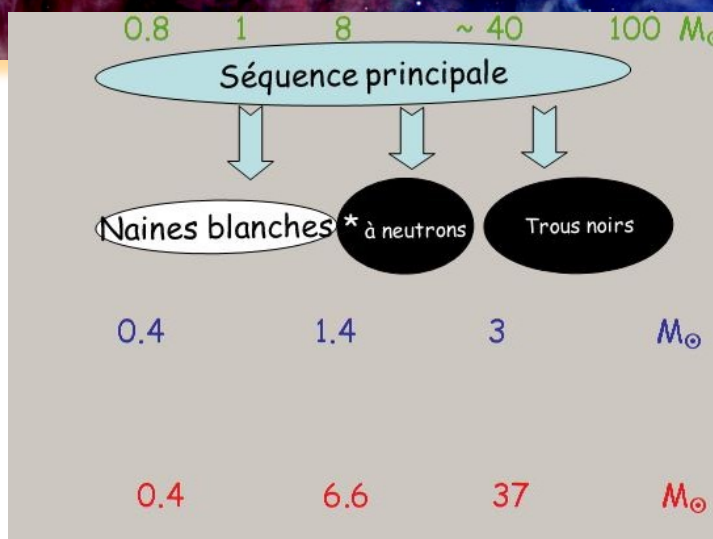
Nuage interstellaire

Origine et composition

Enrichissement du milieu interstellaire

Les **phases finales** de l'évolution des étoiles (vent stellaire, nébuleuse planétaire, supernova) contribuent à alimenter le milieu interstellaire (MIS) en matière

Origine de la matière du MIS



masse initiale – masse finale = éjection dans le milieu interstellaire



Les **phases finales** de l'évolution des étoiles (vent stellaire, nébuleuse planétaire, supernova) contribuent à alimenter le milieu interstellaire (MIS) en matière

La matière éjectée dans le milieu interstellaire est enrichie en cendres des **combustions nucléaires** successives

➤ **évolution chimique de la Galaxie** (MIS = 10-15 % de la masse de la Galaxie)

Courbe d'abondance universelle

La composition du MIS correspond aux produits de la **nucléosynthèse stellaire** éjectés dans le milieu interstellaire à la fin de la vie de l'étoile

Tous les éléments sont a priori présents avec leur abondance +/- usuelle (H, He, C, N, O, Ne, ...) mais à des **conditions de T et P (densité)** très variables selon les régions

➤ différents types de **nuages interstellaires**



L'**hydrogène** est l'élément le plus abondant dans l'Univers

A de faibles densités (5-20 atomes/cm³), sa forme normale est l'**atome** d'hydrogène neutre: HI en notation spectroscopique

➤ **région HI**

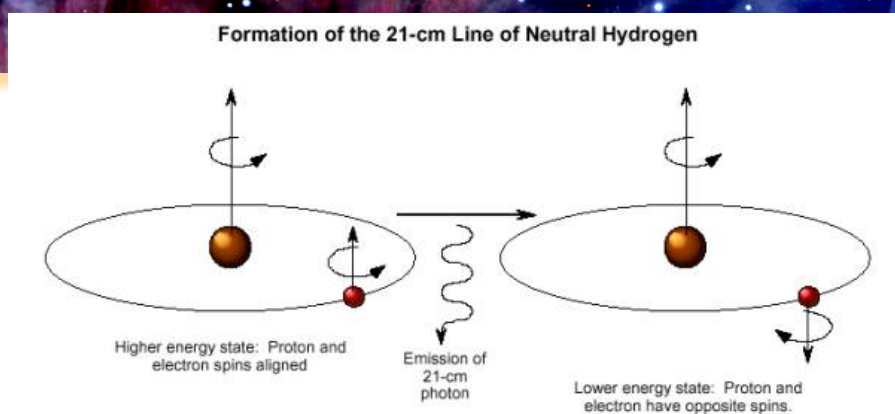
Région HI



Nuages diffus, froids, d'hydrogène neutre: il s'agit des plus nombreux, mais la température froide (10-100 K) les rend difficile à détecter (pas d'émission thermique)

➤ heureusement: détectable en **onde radio** à 1420.4 MHz

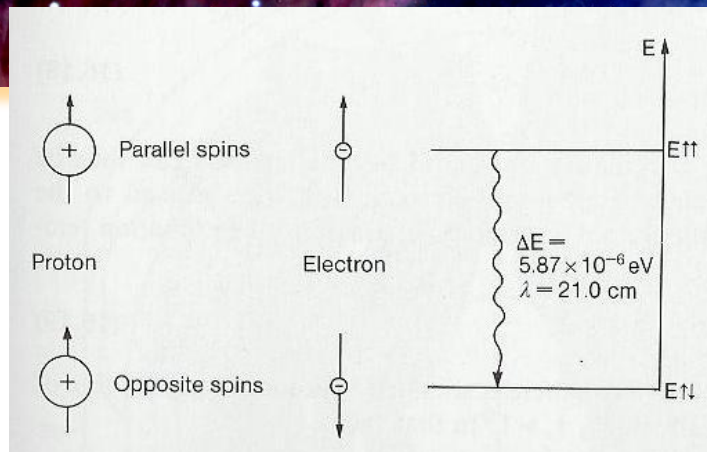
Spin



Isotropie des lois physiques implique la conservation du moment angulaire, sous forme de moment cinétique orbital et de moment cinétique « intrinsèque », le **spin**

➤ **états up et down** des spins du proton et de l'électron : deux configurations possibles

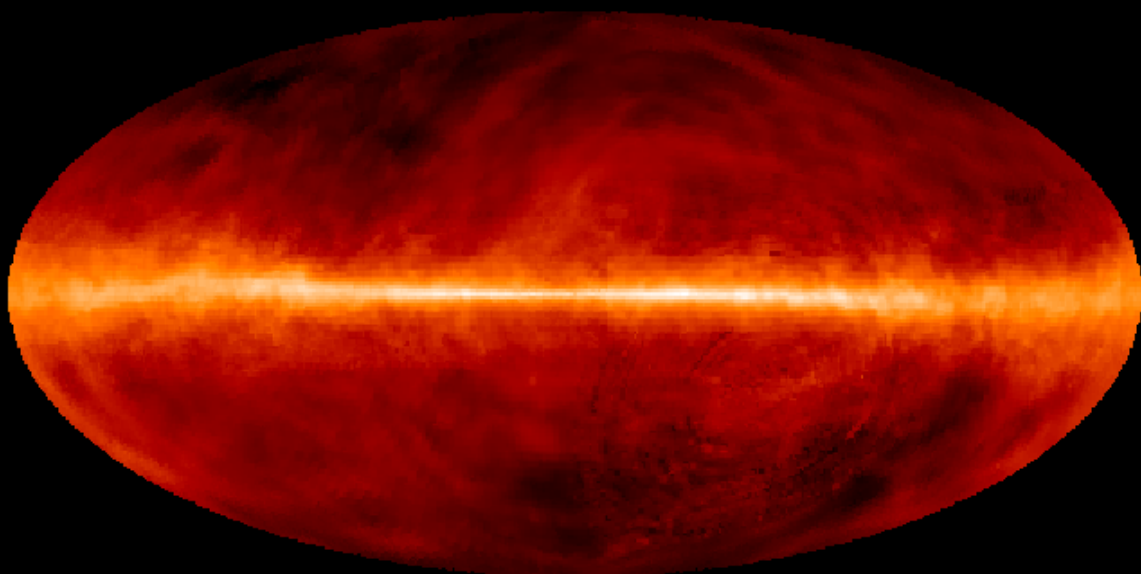
Transition hyperfine



Transition entre les deux niveaux énergétiques très rapprochés du niveau (dédoublé) fondamental de l'atome d'hydrogène

➤ raie d'émission à 21 cm

La Voie Lactée Raie d'émission à 21 cm





L'**hydrogène** est l'élément le plus abondant dans l'Univers

A de faibles densités (5-20 atomes/cm³), sa forme normale est l'**atome** d'hydrogène neutre: HI en notation spectroscopique

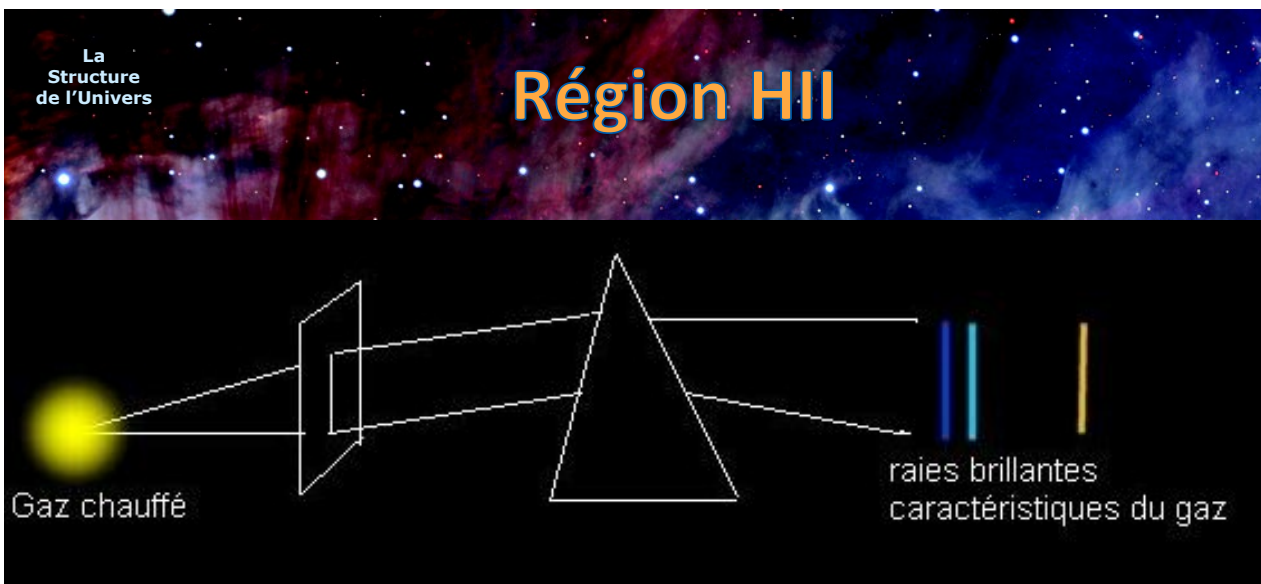
➤ **région HI**

Nuage d'hydrogène atomique ionisé

L'illumination d'un nuage diffus par une ou plusieurs étoiles O ou B (rayonnement UV) permet l'**ionisation** des atomes neutres d'hydrogène

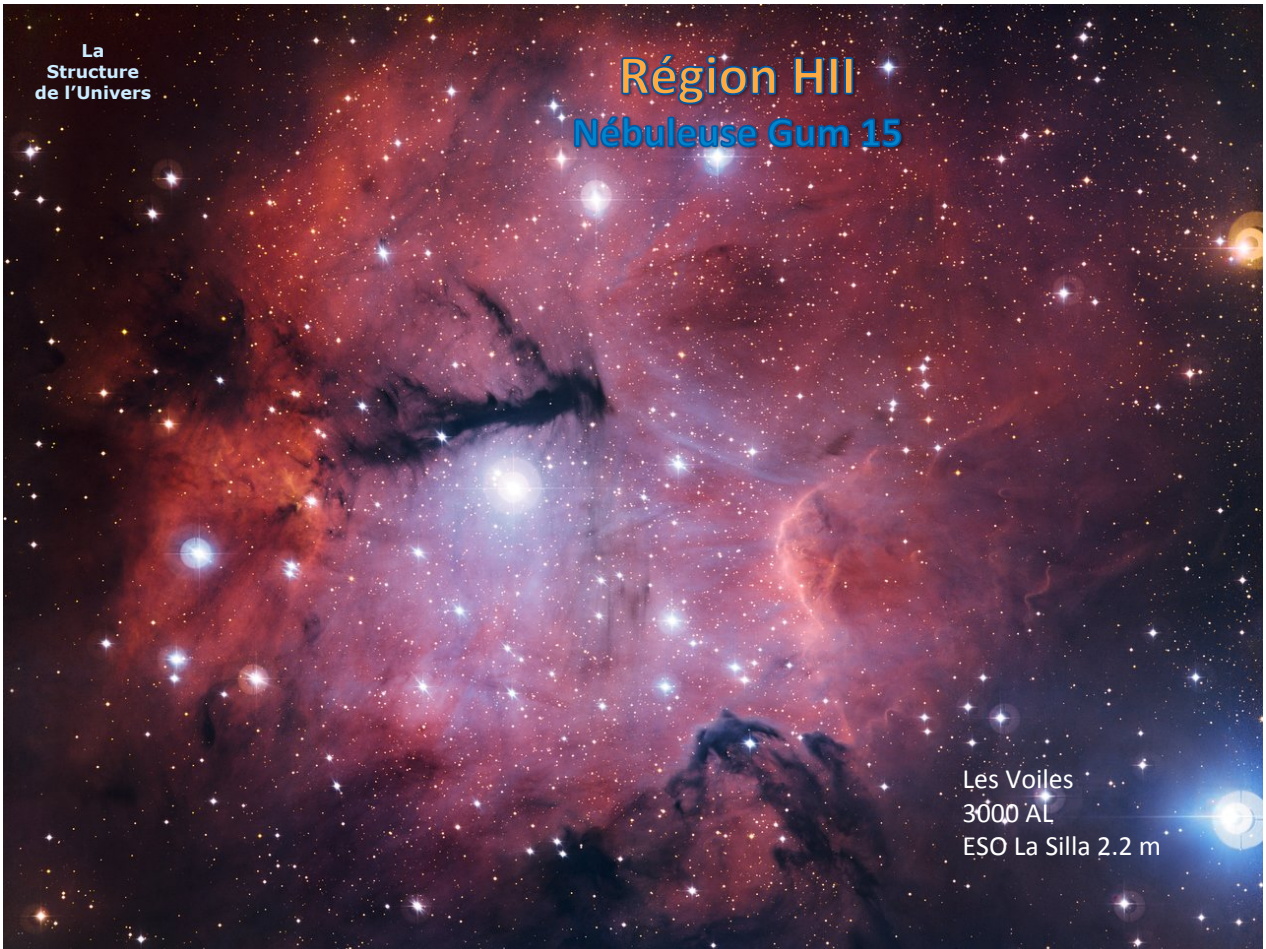
Les ions d'hydrogène (HII en notation spectroscopique) émettent abondamment dans la **partie visible** du spectre (cas du nuage chauffé)

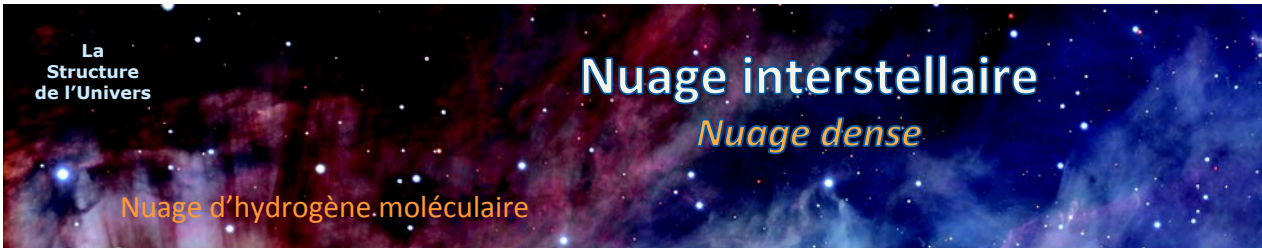
➤ **région HII**



Gaz peu dense chauffé par lumière UV ionisante des étoiles chaudes: ionisation ($\text{HI} + g \Rightarrow \text{HII} + e^-$), recombinaison ($\text{HII} + e^- \Rightarrow \text{HI}^* + g$), fluorescence ($\text{HI}^* \Rightarrow \text{HI} + g$), cf. Cours 3a « Etoiles »

➤ **raies d'émission** (par exemple Balmer H_α: domaine visible !)





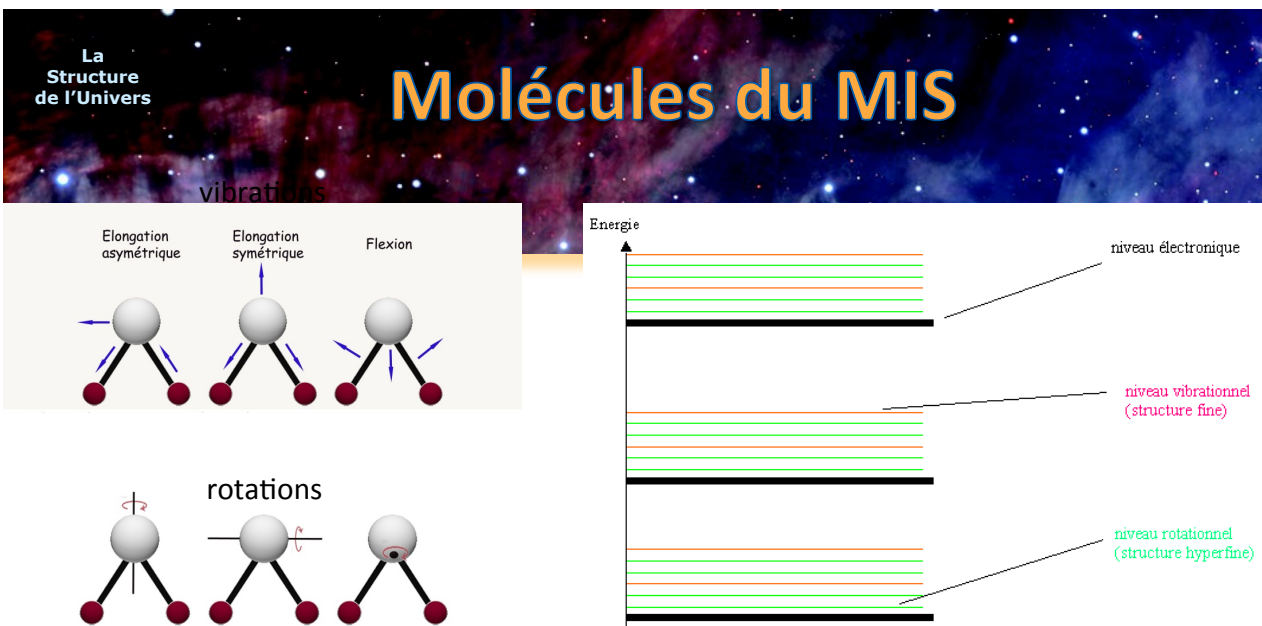
La densité peut atteindre **100.000 particules par cm^3** (1/10ème du vide extrême obtenu en laboratoire)

La densité plus élevée fait que l'hydrogène atomique peut se combiner en **molécules H_2**

➤ **nuage moléculaire**

Composition et modes de détection

Ces nuages sont composés de **gaz** (99% de la masse de la MIS) et de **poussières** (le reste: 1%), à une température de **-240°**



Spectroscopie moléculaire: transitions électroniques + vibrationnelles + rotationnelles

➤ spectre complexe détectable en **onde radio**

Nuage interstellaire

Nuage dense

Nuage d'hydrogène moléculaire

La densité peut atteindre **100.000 particules par cm³** (1/10ème du vide extrême obtenu en laboratoire)

La densité plus élevée fait que l'hydrogène atomique peut se combiner en **molécules H₂**

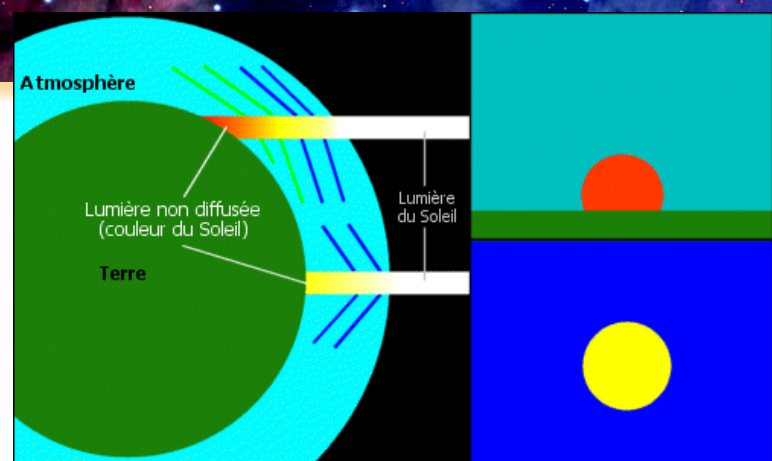
➤ nuage moléculaire

Composition et modes de détection

Ces nuages sont composés de **gaz** (99% de la masse de la MIS) et de **poussières** (le reste: 1%), à une température de -240°

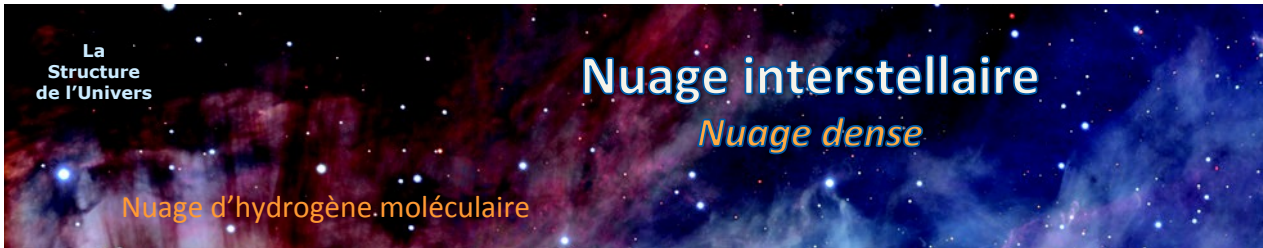
Molécules: dihydrogène, monoxyde de carbone, eau, méthane, ammoniac, alcool méthylique, acide formique, cyanure d'hydrogène, etc = **123 molécules** recensées dans les nuages moléculaires

Poussières du MIS



Diffusion Rayleigh: les petites longueurs d'onde (**bleu**) sont davantage diffusées que les grandes (**rouge**), cf. **bleu du ciel** et **rougeoiement du Soleil** à l'aube et au crépuscule

➤ MIS : effet de **rougissement interstellaire** (*reddening*)



La densité peut atteindre **100.000 particules par cm^3** (1/10ème du vide extrême obtenu en laboratoire)

La densité plus élevée fait que l'hydrogène atomique peut se combiner en **molécules H_2**

➤ nuage moléculaire

Composition et modes de détection

Ces nuages sont composés de **gaz** (99% de la masse de la MIS) et de **poussières** (le reste: 1%), à une température de -240°

Molécules: dihydrogène, monoxyde de carbone, eau, méthane, ammoniac, alcool méthylique, acide formique, cyanure d'hydrogène, etc = **123 molécules** recensées dans les nuages moléculaires

Poussières: silicates, graphites, SiC = effet d'**atténuation** de la lumière visible



L'effet de rougisement (dû à la diffusion) et d'absorption de la lumière visible par les grains de poussière et les molécules peut être tel que l'atténuation interstellaire devient une véritable **extinction interstellaire**

Les étoiles ou les nébuleuses en émission derrière le nuage moléculaire très dense **ne sont plus visibles** dans le domaine optique

➤ nébuleuse obscure

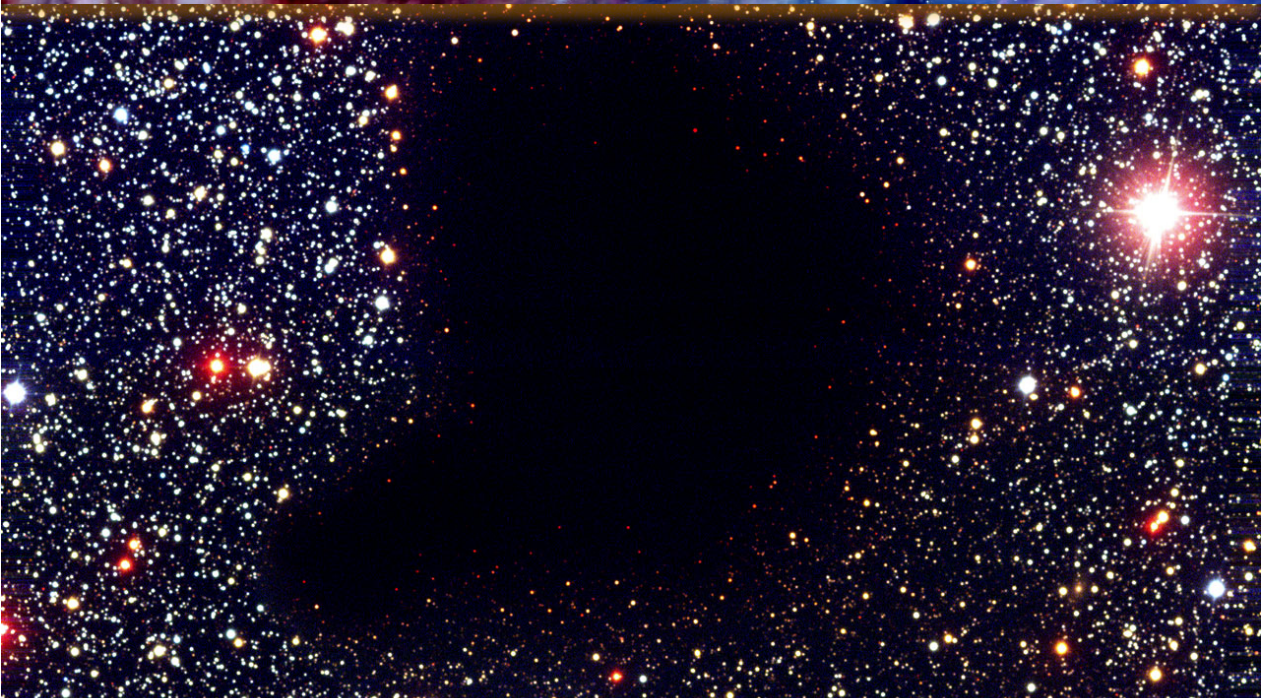
Nébuleuse obscure

Dans la constellation de la Couronne Australe



Nébuleuse obscure

Barnard 68 (constellation d'Ophiucus)





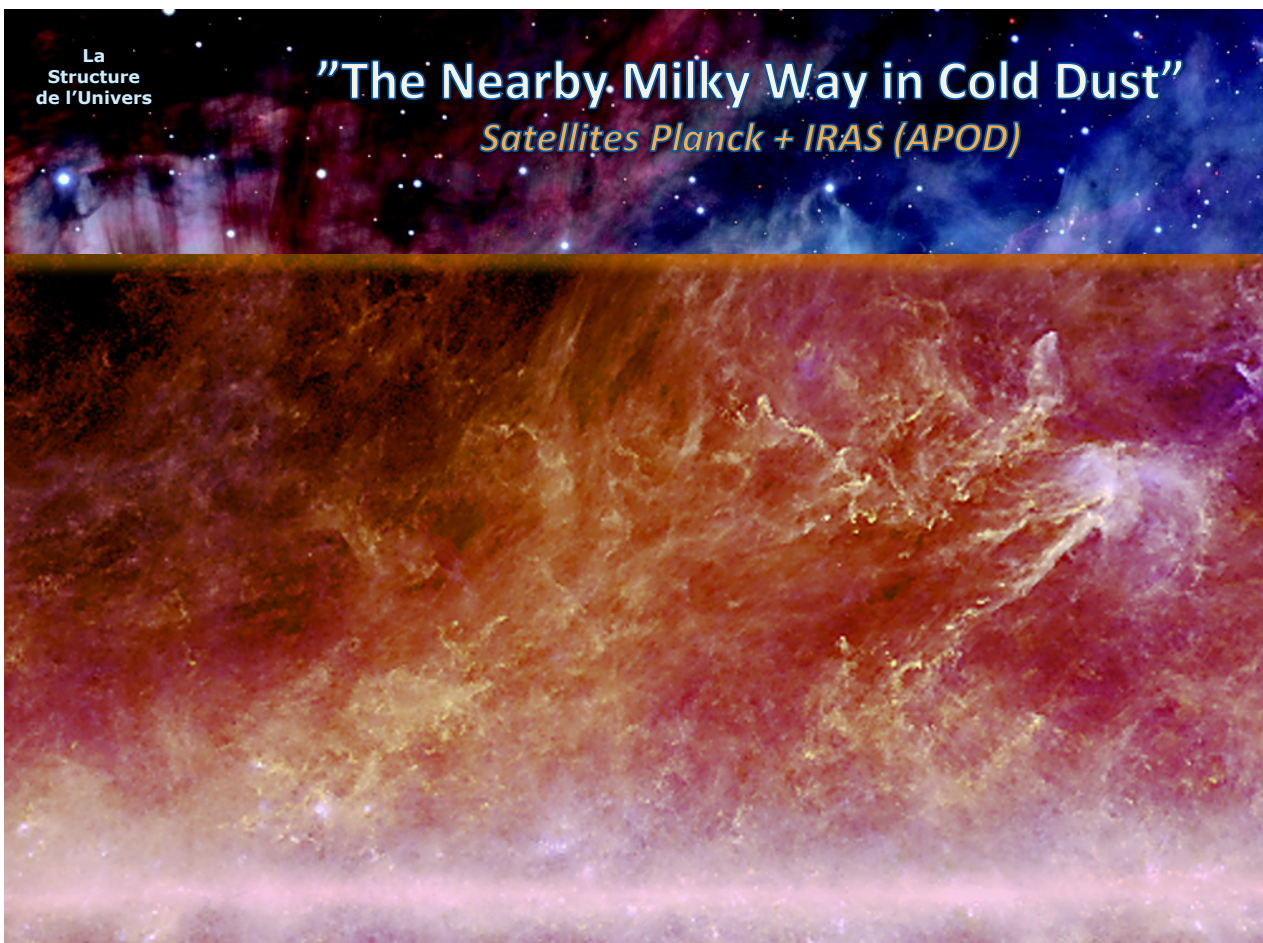
L'effet de rougissement (dû à la diffusion) et d'absorption de la lumière visible par les grains de poussière et les molécules peut être tel que l'atténuation interstellaire devient une véritable **extinction interstellaire**

Les étoiles ou les nébuleuses en émission derrière le nuage moléculaire très dense **ne sont plus visibles** dans le domaine optique

➤ **nébuleuse obscure**

Astronomie infrarouge

L'**infrarouge lointain** permet de mettre en évidence le gaz très froid et les cirrus de grains de poussières





L'effet de rougissement (dû à la diffusion) et d'absorption de la lumière visible par les grains de poussière et les molécules peut être tel que l'atténuation interstellaire devient une véritable **extinction interstellaire**

Les étoiles ou les nébuleuses en émission derrière le nuage moléculaire très dense **ne sont plus visibles** dans le domaine optique

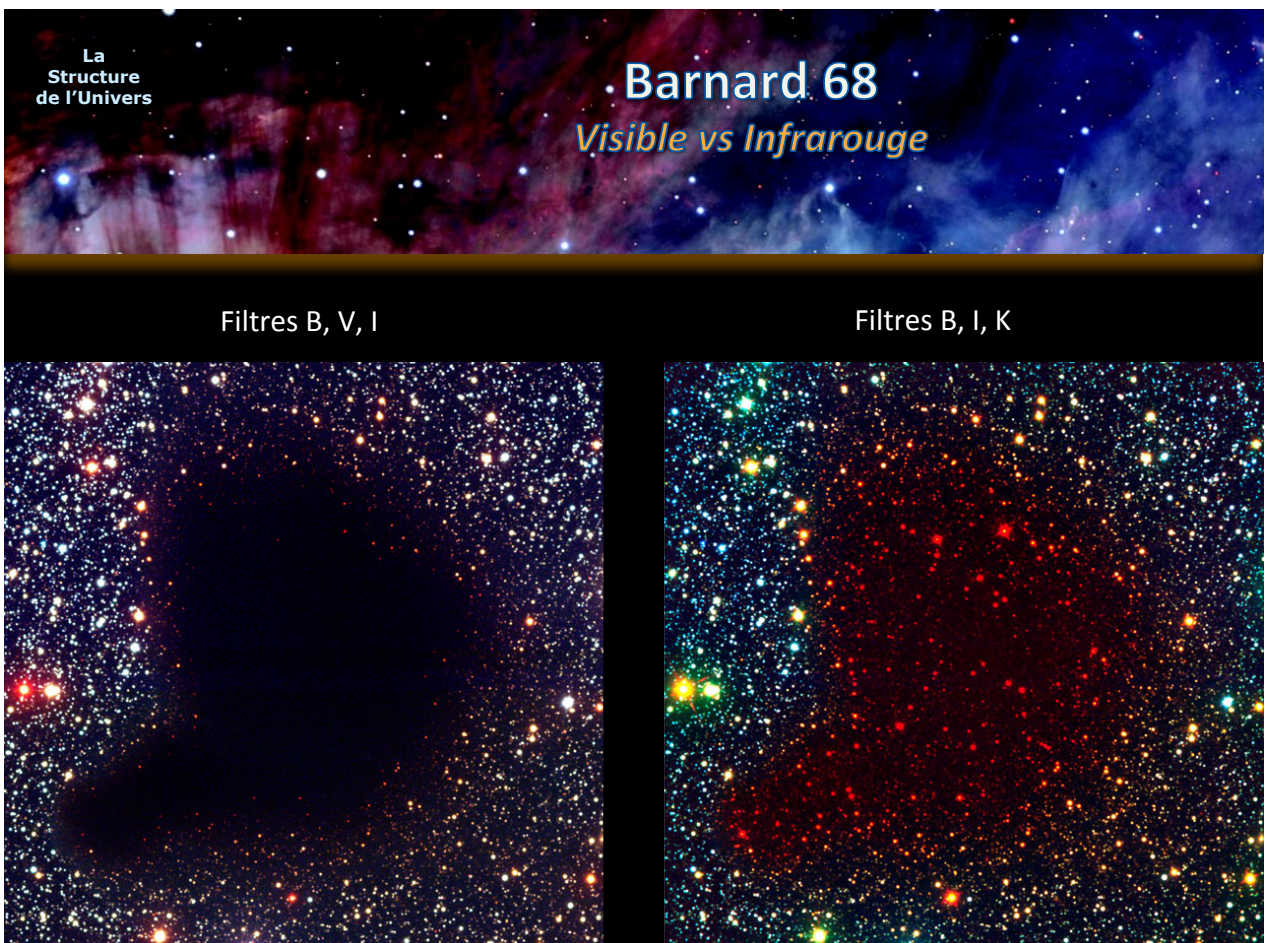
➤ **nébuleuse obscure**

Astronomie infrarouge

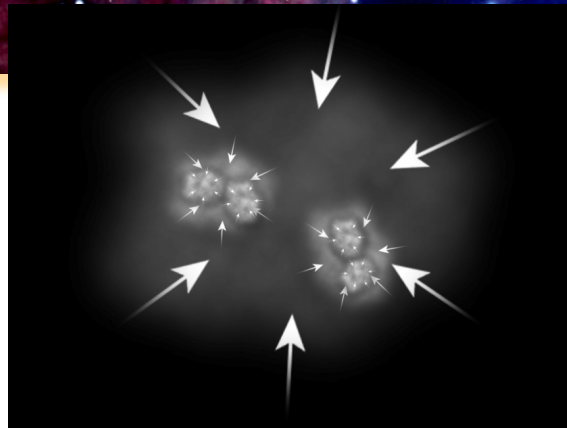
L'**infrarouge lointain** permet de mettre en évidence le gaz très froid et les cirrus de grains de poussières

Il permet également de révéler les **étoiles cachées** par les nébuleuses obscures

➤ cas de **Barnard 68**



Globule de Bok

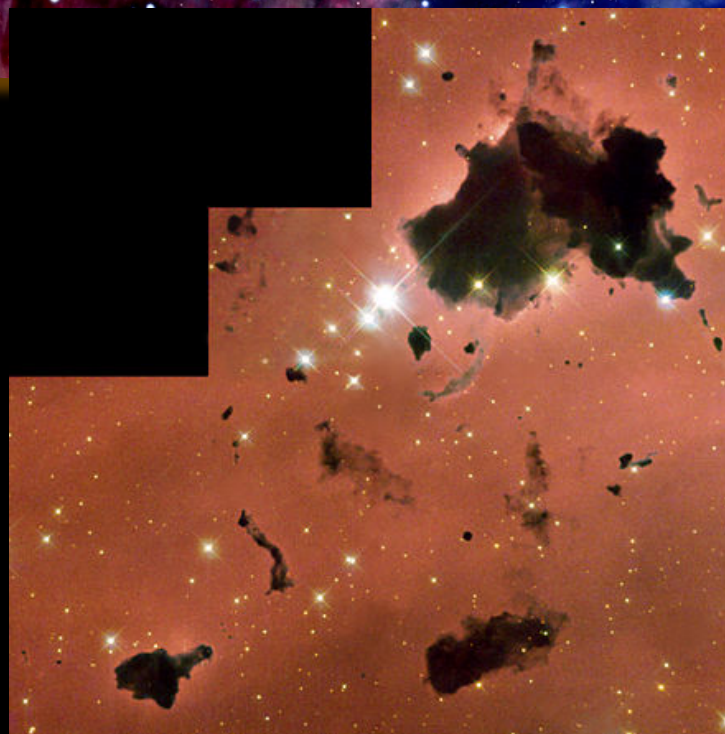


Nuages moléculaires très denses et massifs: localement, il peut se produire des surdensités entraînant une contraction gravitationnelle; l'effondrement du nuage va provoquer de nouvelles surdensités locales

- **effondrement et fragmentation** du nuage initial

Globule de Bok

Amas ouvert IC 2944 (Hubble Space Telescope)





Origine des surdensités locales

Sous l'effet d'**ondes de choc** associées aux supernovae; une onde de choc résulte du déplacement de matière dans un milieu (ici MIS) plus rapidement que la vitesse du son dans ce milieu

Sous l'effet d'une **collision** entre deux galaxies (cf. Cours Galaxies)

Sous l'effet du passage d'un nuage dans l'**onde de densité** associée aux bras spiraux (cf. Cours Galaxies)

- la compression et fragmentation du milieu interstellaire aboutit à la formation de **cœurs proto-stellaires**



Globule sombre

Les fragments du nuage de gaz et de poussière se **contractent** en quelques milliers ou dizaines de milliers d'années ($100\,000$ ans pour $1 M_{\text{sol}}$)

L'énergie gravitationnelle est convertie en **énergie cinétique thermique**: les collisions entre molécules aboutissent à des états d'excitation produisant in fine un rayonnement (micro-ondes, infrarouge) : montée en température modérée

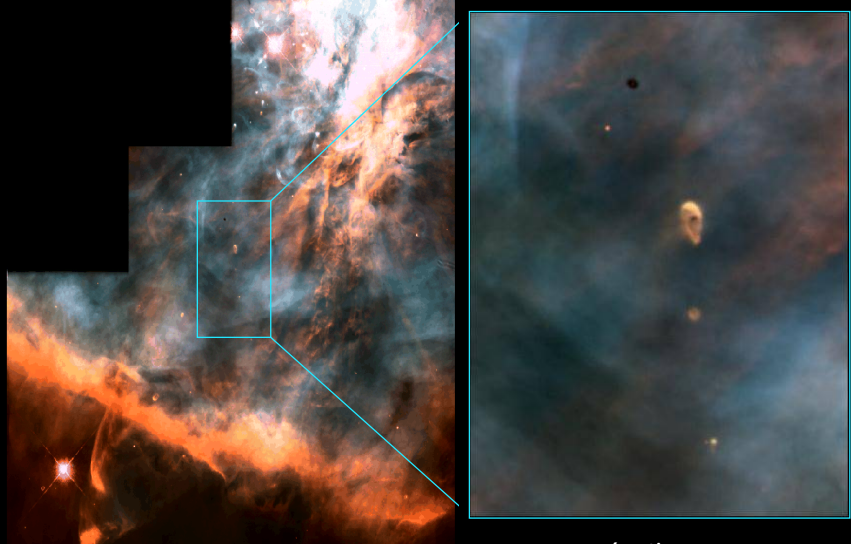
Mais la densité croissante de poussière au centre empêche la lumière (et donc la chaleur) de s'échapper : **montée en température** importante

Si la masse est suffisante, la température pourra atteindre le seuil critique pour amorcer les **réactions thermonucléaires**

- **proto-étoile** entouré d'un cocon de poussière opaque

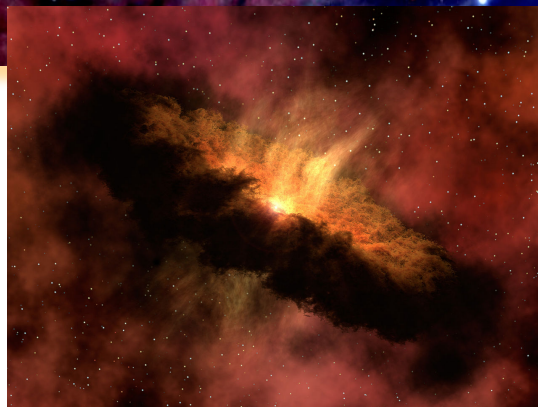
Proto-étoile

Nébuleuse d'Orion (Hubble Space Telescope)



Proto-étoiles, encore
entourées d'un cocon de
poussières et gaz froid

Disque protoplanétaire



Vue d'artiste

Conservation du moment angulaire: le cocon de matière entourant la proto-étoile s'aplatit pour donner un disque

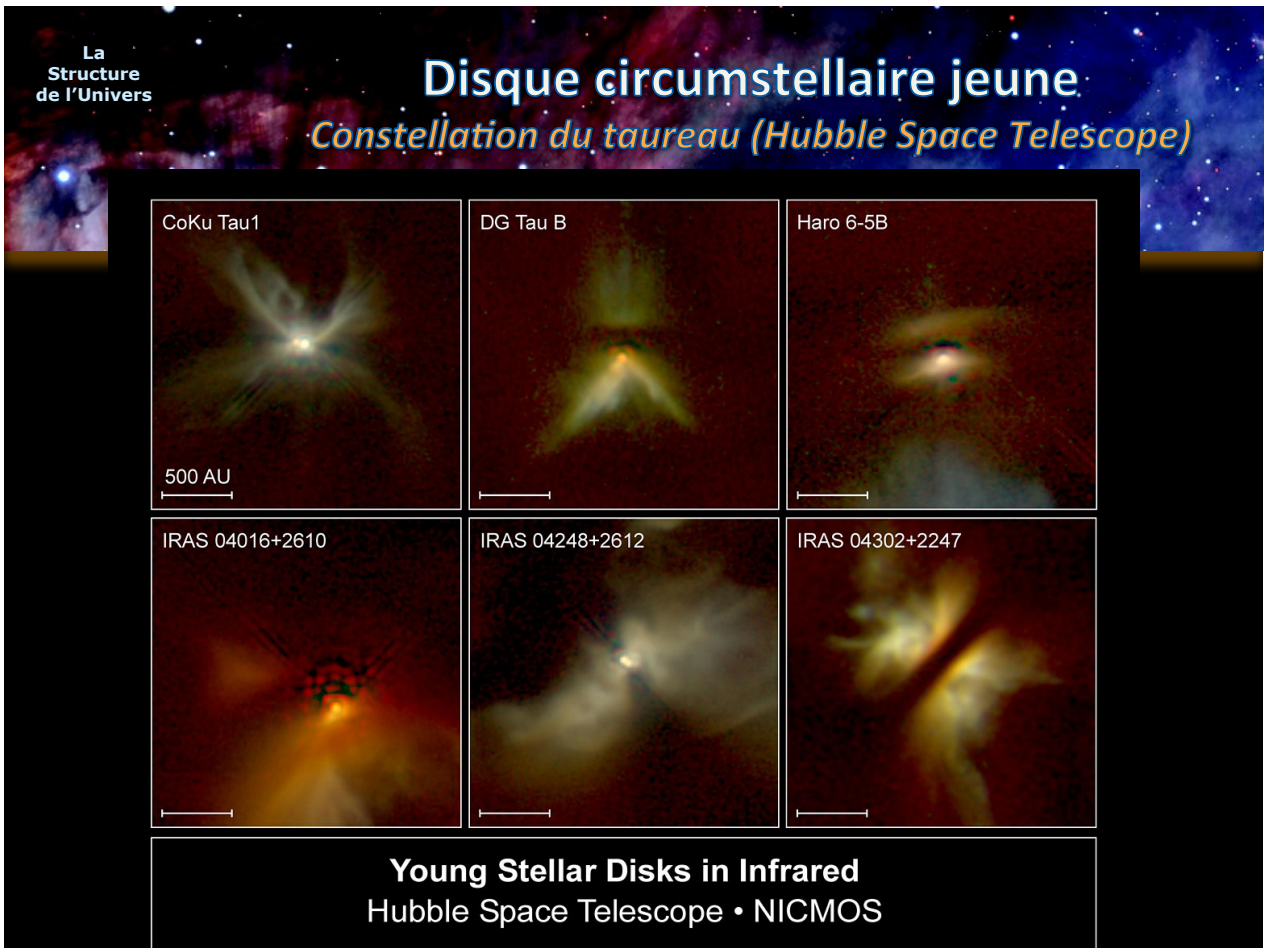
- réservoir de matière pour possible futur **cortège planétaire**



La matière du disque protoplanétaire tombe sur la proto-étoile, qui continue de se contracter et de chauffer : **forte luminosité** (le proto-Soleil a brillé avec $L = 500 L_{\text{sol}}$ durant quelques milliers d'années)

L'**enveloppe de poussière** réfléchit la lumière de l'étoile en infrarouge

- images de la **matière circumstellaire**: disque opaque + enveloppe brillante



La matière du disque protoplanétaire tombe sur la proto-étoile, qui continue de se contracter et de chauffer : **forte luminosité** (le proto-Soleil a brillé avec $L = 500 L_{\text{sol}}$ durant quelques milliers d'années)

L'**enveloppe de poussière** réfléchit la lumière de l'étoile en infrarouge

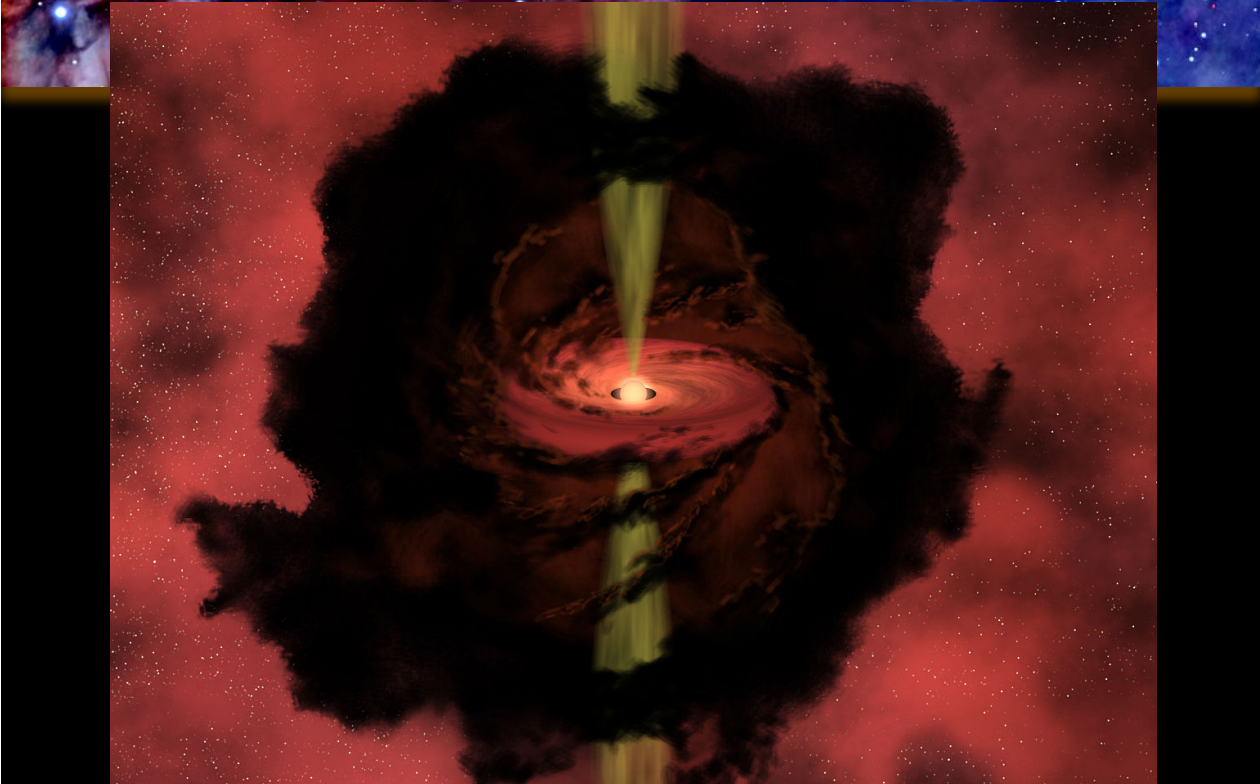
➤ images de la **matière circumstellaire**: disque opaque + enveloppe brillante

Objet de Herbig-Haro

Un **jet** est souvent présent, perpendiculaire au disque de gaz et poussières qui entoure l'étoile

Proto-étoile dans un globule de Bok

Vue d'artiste



Formation stellaire

De la proto-étoile à l'étoile

Environnement circumstellaire

La matière du disque protoplanétaire tombe sur la proto-étoile, qui continue de se contracter et de chauffer : **forte luminosité** (le proto-Soleil a brillé avec $L = 500 L_{\text{sol}}$ durant quelques milliers d'années)

L'**enveloppe de poussière** réfléchit la lumière de l'étoile en infrarouge

- images de la **matière circumstellaire**: disque opaque + enveloppe brillante

Objet de Herbig-Haro

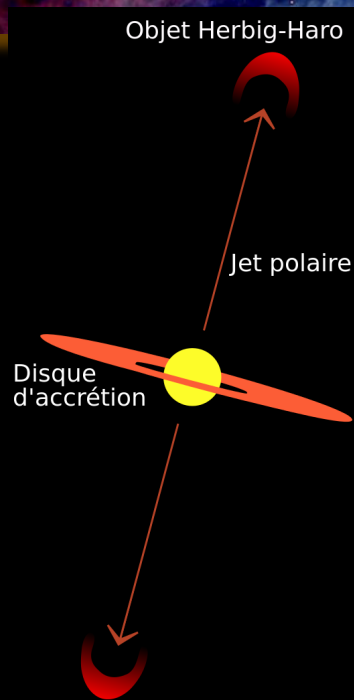
Un **jet** est souvent présent, perpendiculaire au disque de gaz et poussières qui entoure l'étoile

Ce jet crée une **onde de choc** lorsqu'il rencontre le nuage de gaz environnant

- création d'un objet de **Herbig-Haro**

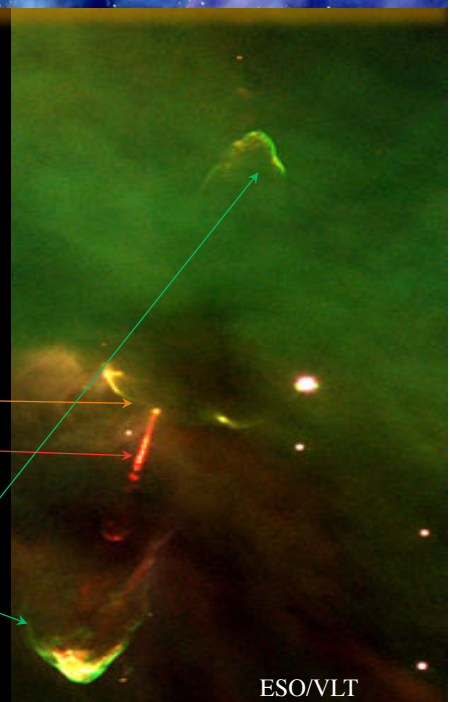
Objet de Herbig-Haro

Schéma



Objet de Herbig-Haro

HH-34 (HST et VLT)



A la **proto-étoile**
est associé un **jet**
qui crée une **onde de choc**
lorsqu' il rencontre le nuage
(formation d' un objet de Herbig-Haro)

Formation stellaire

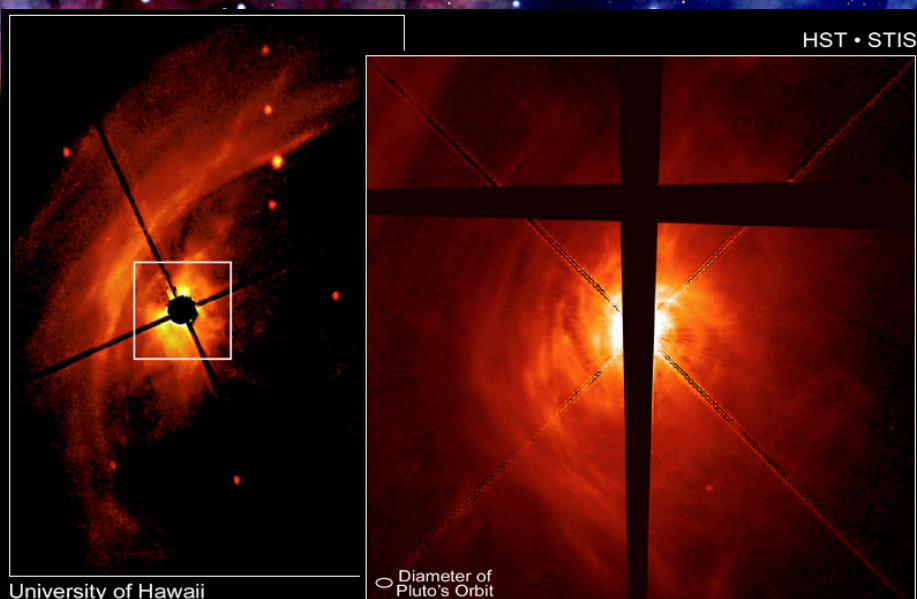
Etoiles au berceau

Système planétaire

Lorsque les processus d'accrétion s'arrêtent (pression de radiation), l'objet est considéré comme étant une **étoile de la pré-séquence principale**

Etoiles jeunes

AB Aurigae (Hubble Space Telescope)



AB Aurigae Disk

PRC99-21 • STScI OPO • C. Grady (NOAO at NASA Goddard Space Flight Center) and NASA

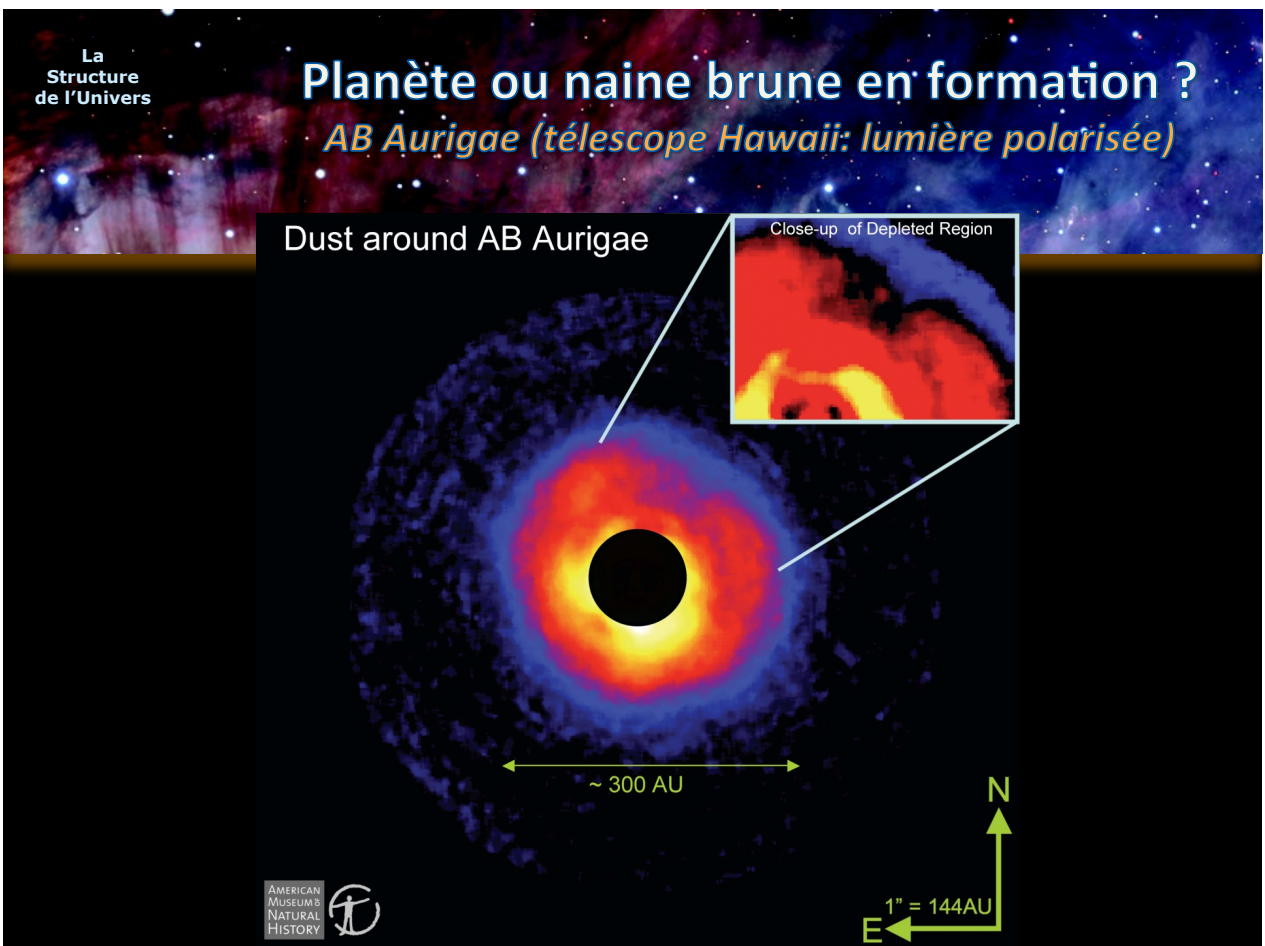
Etoile jeune ($\sim 3 \cdot 10^6$ années): la pression de radiation est en voie de chasser le gaz



Lorsque les processus d'accrétion s'arrêtent (pression de radiation), l'objet est considéré comme étant une **étoile de la pré-séquence principale**

La pression de la radiation de l'étoile en formation, qui devient de plus en plus chaude, finit par dissiper le disque dans lequel des **planètes** sont susceptibles de se former

➤ possible **formation d'un système planétaire**



Formation stellaire

Etoiles au berceau

Système planétaire

Lorsque les processus d'accrétion s'arrêtent (pression de radiation), l'objet est considéré comme étant une **étoile de la pré-séquence principale**

La pression de la radiation de l'étoile en formation, qui devient de plus en plus chaude, finit par dissiper le disque dans lequel des **planètes** sont susceptibles de se former

➤ possible **formation d'un système planétaire**

Amas stellaire

Au bout de **quelques dizaines de millions d'années**, le gaz a presque totalement disparu

Processus de fragmentation : les étoiles naissent en **groupe serré**, avant de se disperser

➤ **amas ouvert**

Amas des Pléïades

3000 étoiles âgées de moins de 100 M d'années



Formation stellaire

Imbrication de processus astronomiques

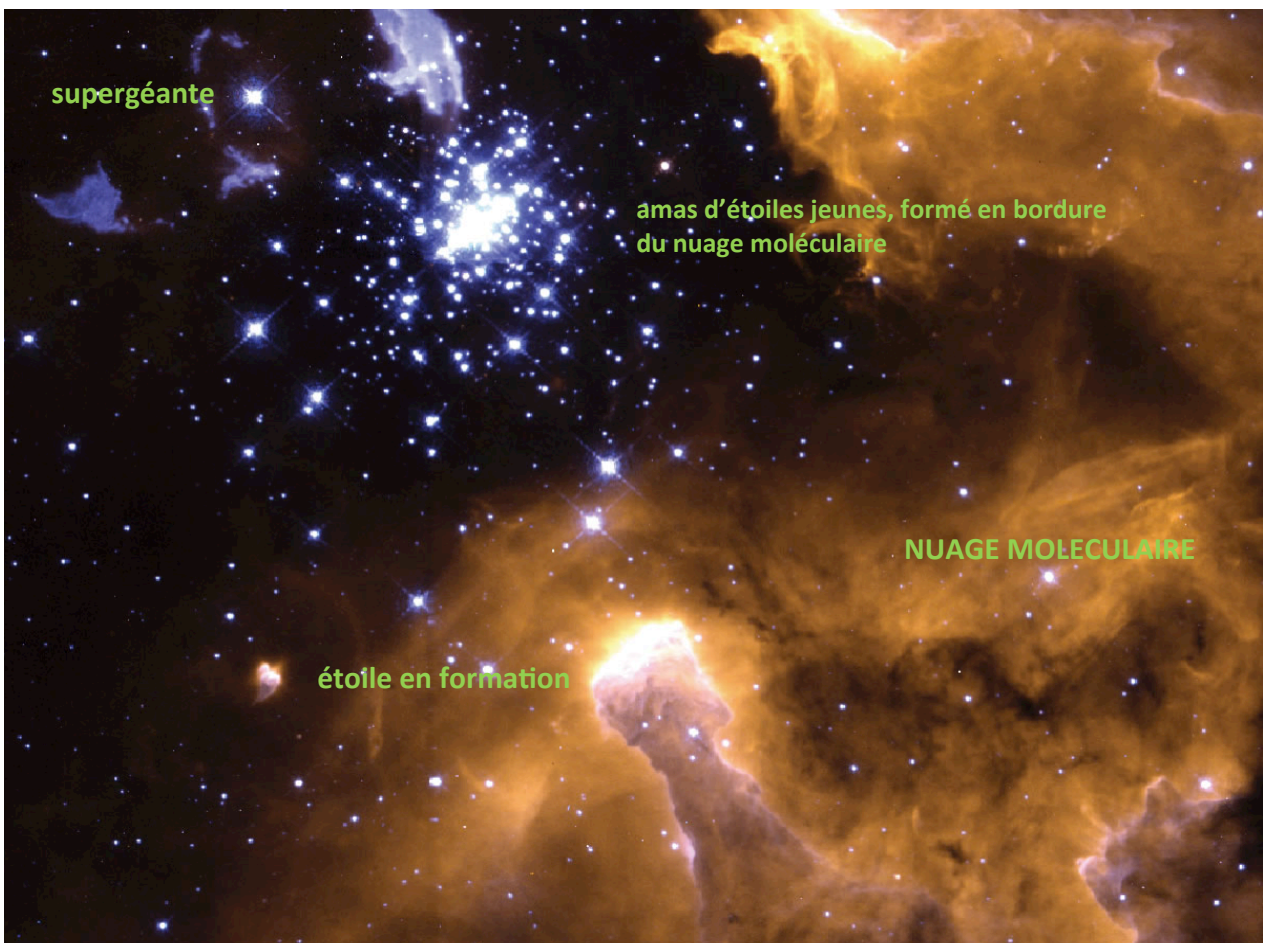
Région de formation stellaire

L'historique complexe de l'effondrement d'un nuage moléculaire se traduit par des zones ayant des « stades évolutifs » différents

- des **proto-étoiles** côtoient des **amas ouverts** et des **étoiles supergéantes** déjà en fin de vie

Les rayonnements stellaires illuminent et sculptent le nuage moléculaire : la **pression de radiation** crée des cavités ou des colonnes

- des **nébuleuses sombres** côtoient des **régions HII** brillantes et des **cavités** et des **colonnes** créées par la pression de radiation



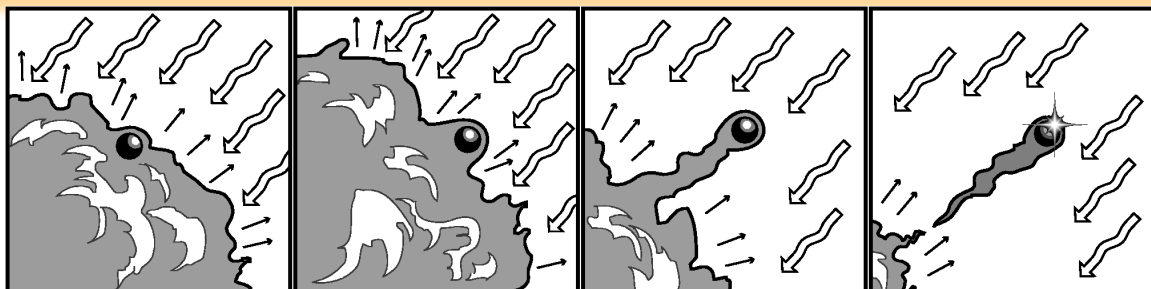
Pression de radiation



Photon de fréquence ν transporte énergie $E = h \nu$ et impulsion $p = E / c$; lorsqu'un photon est absorbé par la matière, il lui communique cette impulsion p , ce qui se traduit par une pression « de radiation »

➤ **cavité créée par les étoiles chaudes**

Erosion lumineuse

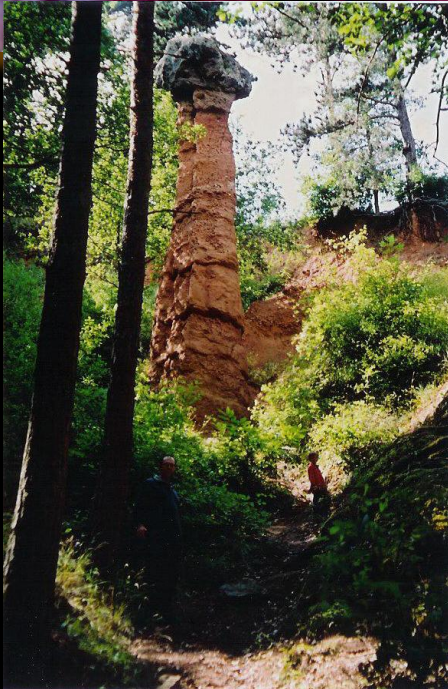


Pression de radiation repousse la matière interstellaire qui n'est pas « protégée » par une zone de densité élevée

➤ **phénomène d'érosion lumineuse**

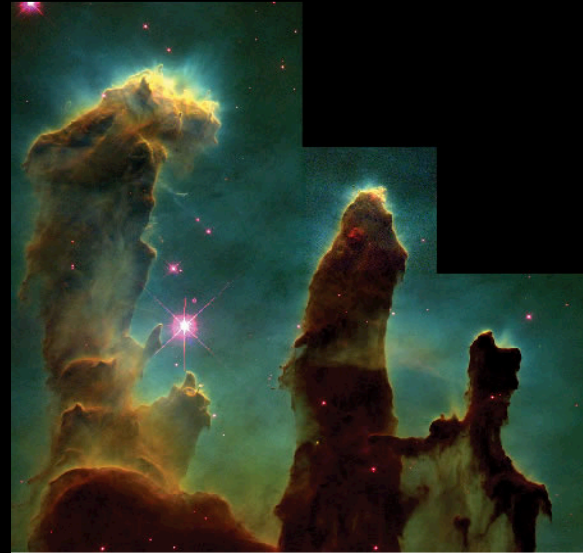
Processus d'érosion

Auvergne vs Nébuleuse de l'Aigle



Les cheminées de fée ou demoiselles coiffées

Les piliers de la création



région HII
alimentée par l'étoile supergéante

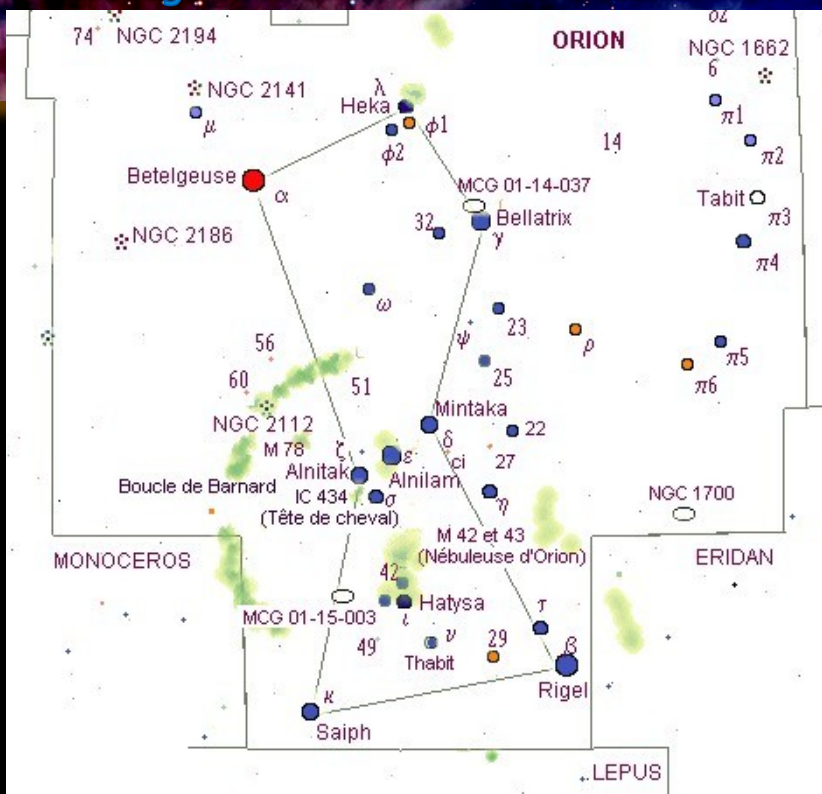
amas d'étoiles jeunes créant une cavité dans le nuage moléculaire
avec étoiles supergéantes pré-supernovae

globule formé par la contraction locale du nuage interstellaire, déclenchée par l'onde de choc d'une supernova

érosion lumineuse du nuage moléculaire par la lumière UV des étoiles chaudes de l'amas
écranté par une étoile en formation déclenchée par les supernovae récentes de l'amas ouvert

Région de formation stellaire

Le nuage d'Orion: bonheur des astronomes amateurs



Nuage d'Orion

Boucle de Barnard (nébuleuse en émission)



Nuage d'Orion

Nébuleuse d'Orion (nébuleuse en émission/réflexion)



Nuage d'Orion

Nébuleuse de la Tête de Cheval (nébuleuse obscure)

