

Le cycle de la matière galactique ou une histoire de la complexité de la matière dans l'Univers

Julien Montillaud

UTINAM

-

Université de Franche-Comté

-

Observatoire de Besançon

1^{er} *Avril* 2016

Séminaire LPC

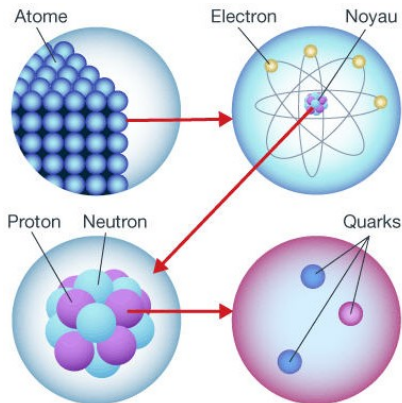
Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
 - Vue d'ensemble
 - Du milieu diffus aux nuages denses
 - Formation stellaire
 - Les étapes suivantes en bref
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
 - Enrichissement en éléments lourds
 - Formation de molécules simples
 - Formation de molécules prébiotiques
- 4 Conclusion

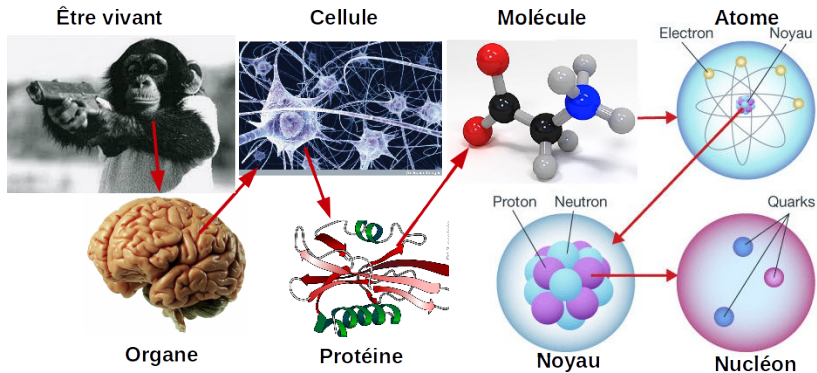
Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion

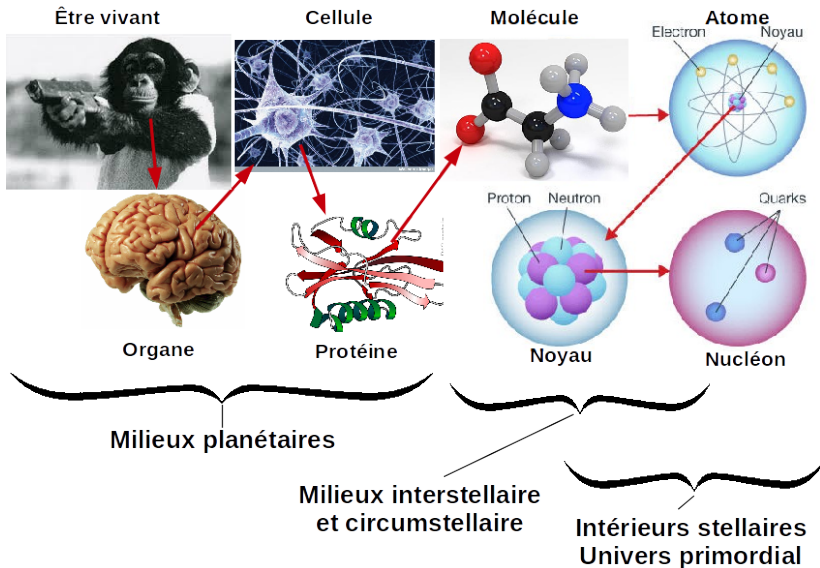
La complexité dans l'organisation de la matière



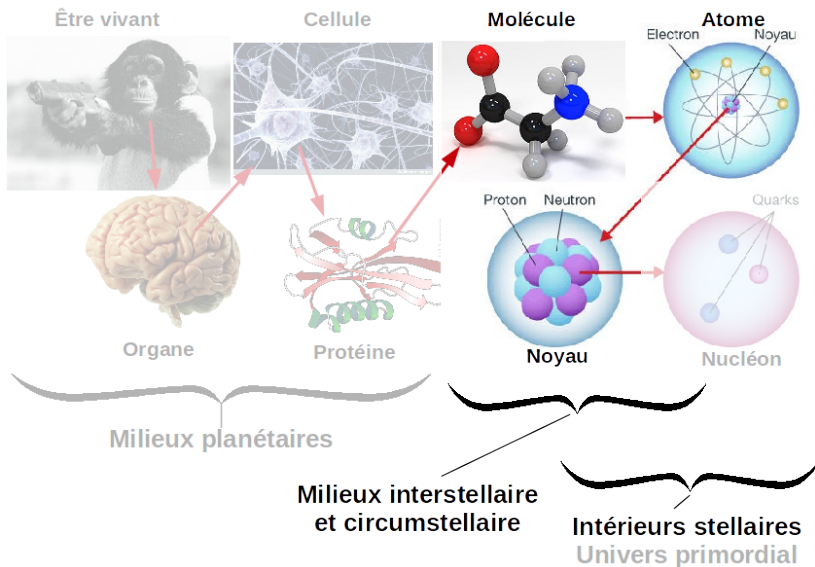
La complexité dans l'organisation de la matière



La complexité dans l'organisation de la matière



La complexité dans l'organisation de la matière



Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
 - Vue d'ensemble
 - Du milieu diffus aux nuages denses
 - Formation stellaire
 - Les étapes suivantes en bref
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion

Le cycle de la matière galactique : paysage



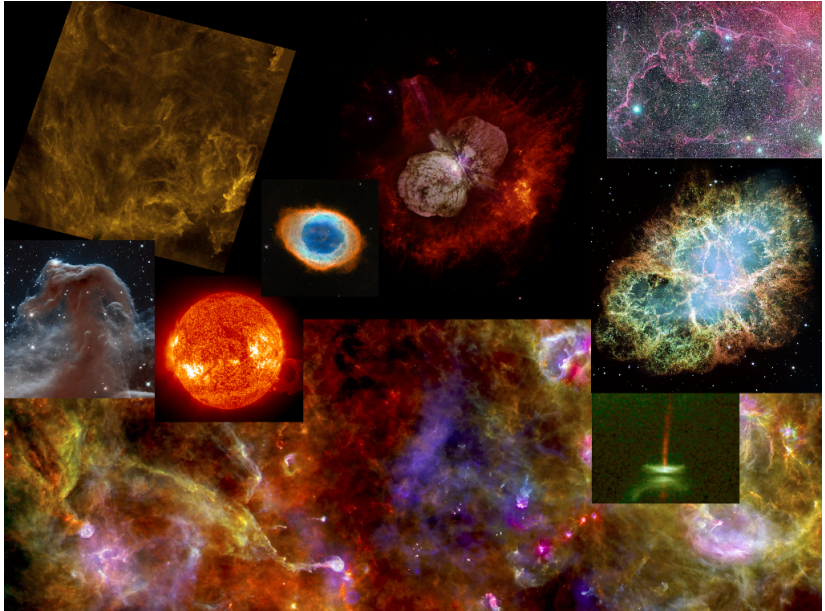
Le cycle de la matière galactique : paysage



Le cycle de la matière galactique : paysage



Le cycle de la matière galactique : diversité



Position de l'exposé

○

Cycle de la matière

○○○○○●○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○

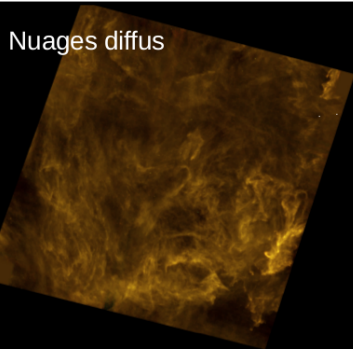
Complexité de la matière

○○○○○○○○○○○○○○○

Conclusion

Le cycle de la matière galactique

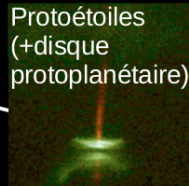
Nuages diffus



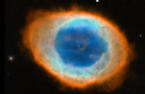
Nuages denses



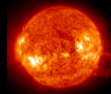
Protoétoiles
(+disque
protoplanétaire)



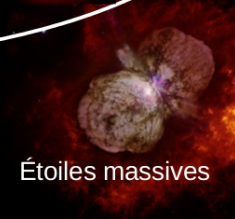
Nébuleuses planétaires



Étoiles



Étoiles massives



Vestiges



Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 **Le cycle de la matière galactique**
 - Vue d'ensemble
 - **Du milieu diffus aux nuages denses**
 - Formation stellaire
 - Les étapes suivantes en bref
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion

Le milieu interstellaire : caractéristiques

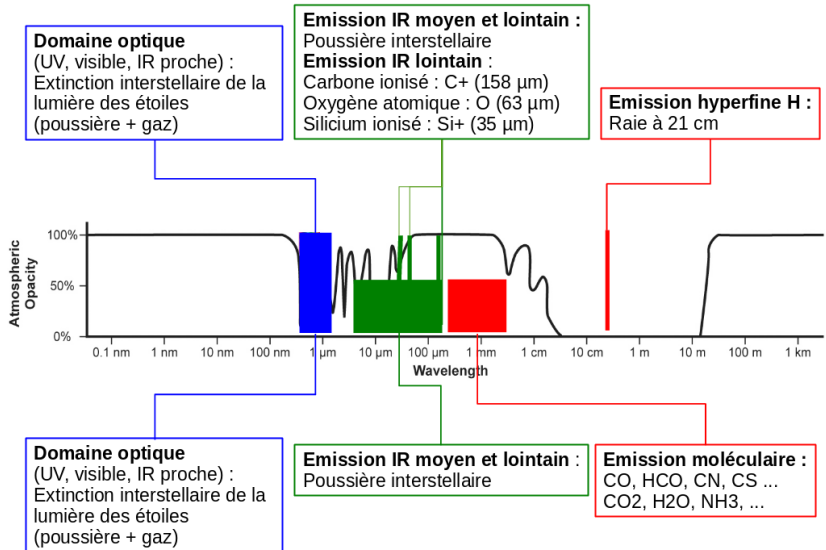
● milieu diffus :

- $\sim 5 \times 10^9 M_{\odot} \Leftrightarrow \sim 5\%$ matière visible
- Composition : **H** ($\sim 75\%$), He ($\sim 25\%$), H^+ ($\sim 2\%$), **poussière** ($\sim 1\%$), autres ($\lesssim 0.1\%$)
- $n_H \sim 10^{-2} - 10^2 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} \sim \text{qq} \times 100 - 1000 \text{ K}$,
 $T_{\text{poussière}} \sim \text{qq} \times 10 - 100 \text{ K}$

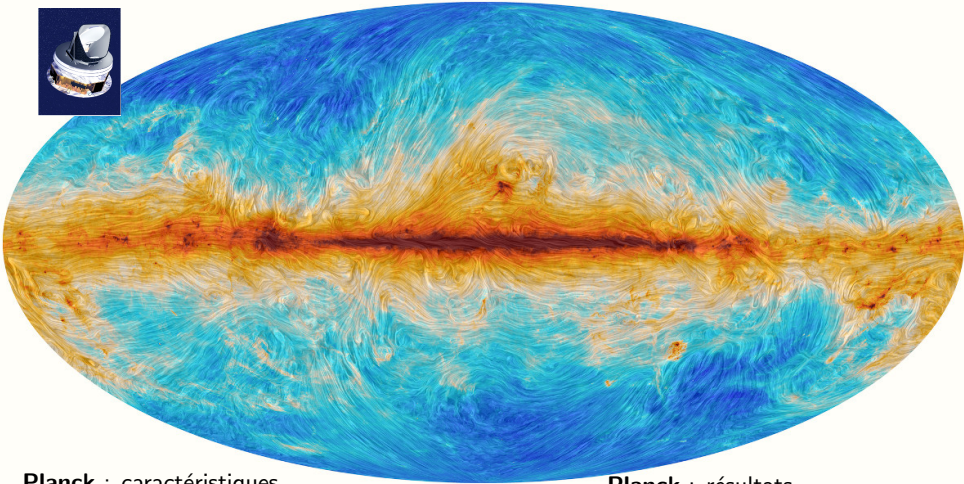
● milieu dense :

- $\sim 10^9 M_{\odot} \Leftrightarrow \sim 1\%$ matière visible
- Composition : **H₂** ($\sim 75\%$), He ($\sim 25\%$), **poussière** ($\sim 1\%$), autres ($\lesssim 0.1\%$)
- $n_H \gtrsim 10^3 \text{ cm}^{-3}$, $T_{\text{gaz}} \sim 6 - 100 \text{ K}$, $T_{\text{poussière}} \sim 6 - 20 \text{ K}$

Le milieu interstellaire : observations



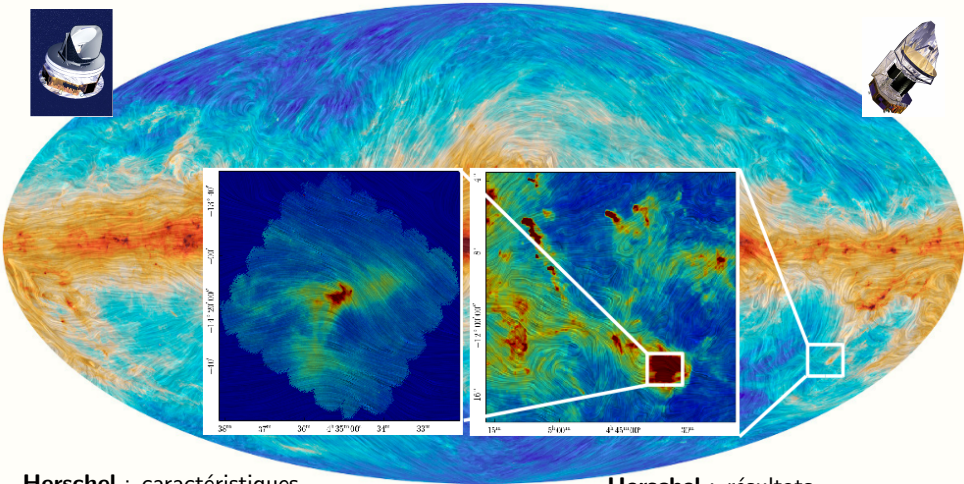
Le milieu interstellaire : observations Planck et Herschel



Planck : caractéristiques
 tout le ciel
 $350\mu\text{m} \rightarrow 1\text{ cm}$
 resolution $5'$

Planck : résultats
 Cartes évolution poussière
 Carte polarisation $\Rightarrow \vec{B}$
 Catalogue sources froides

Le milieu interstellaire : observations Planck et Herschel



Herschel : caractéristiques

Couverture $\sim 10\%$ du ciel, dont le plan galactique

$60\mu\text{m} \rightarrow 670\mu\text{m}$

resolution $5'' \rightarrow 40''$

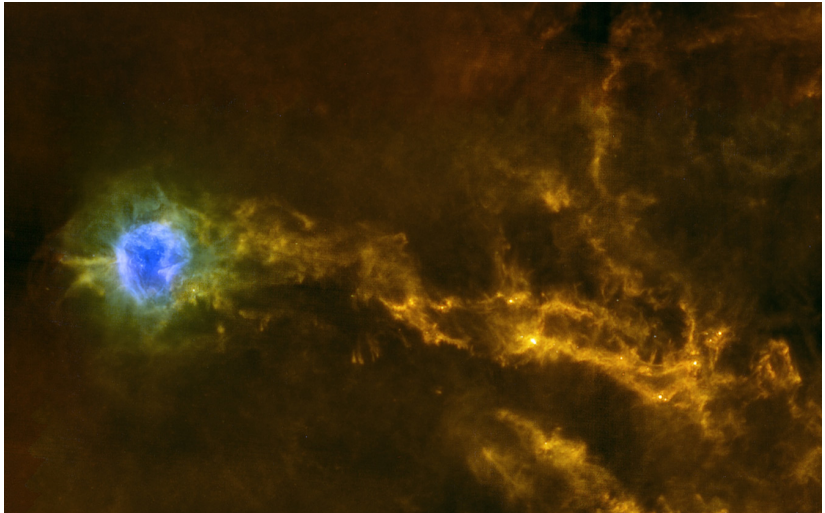
Herschel : résultats

Catalogue sources froides

Ubiquité des filaments

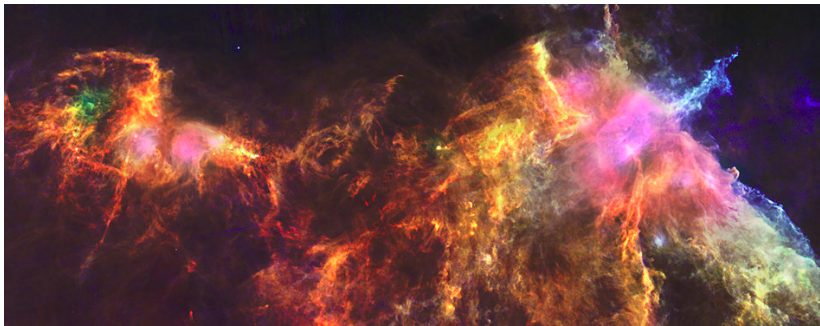
Structure fractale du MIS

Le milieu interstellaire : filaments



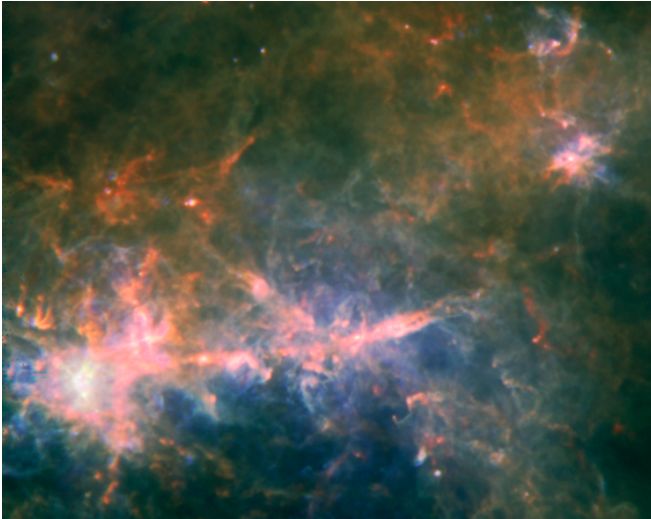
IC5146 Credits: ESA/Herschel/SPIRE/D. Arzoumanian (CEA Saclay)

Le milieu interstellaire : filaments



Horsehead Credits: ESA/Herschel/PACS, SPIRE/N. Schneider, Ph. André, V. Könyves

Le milieu interstellaire : filaments



G49

Credit: ESA/Herschel/PACS/SPIRE/Ke Wang et al. 2015

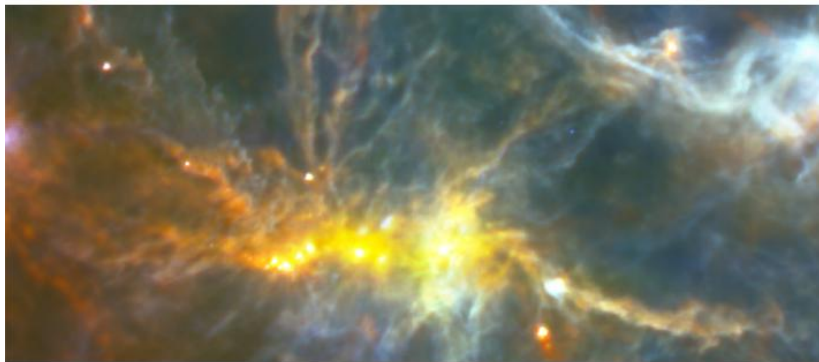
Le milieu interstellaire : filaments



Taurus B211/B213 region

Palmeirim+13

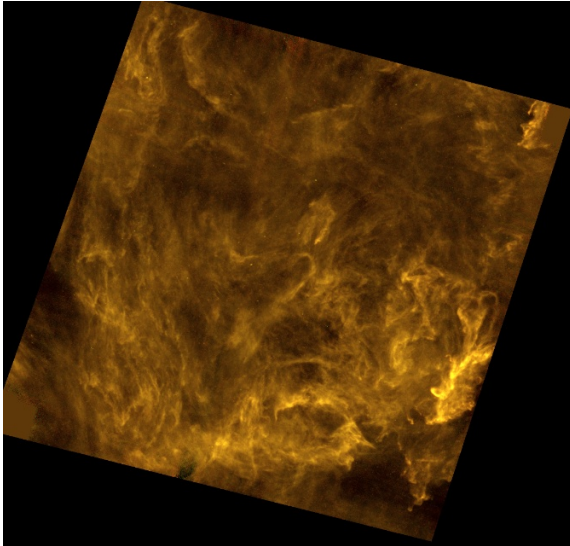
Le milieu interstellaire : filaments



The DR21 ridge

Credits: ESA/Herschel/SPIRE/PACS/HOBYS

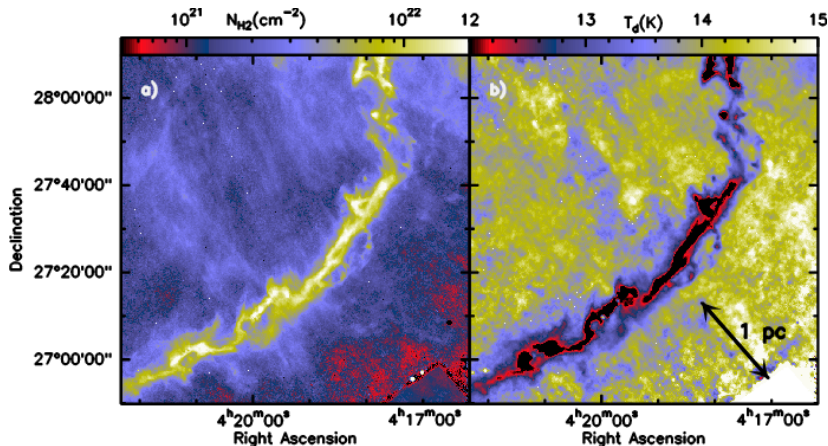
Le milieu interstellaire : filaments



Polaris region

Credits: ESA/Herschel/SPIRE/Ph. André (CEA Saclay)

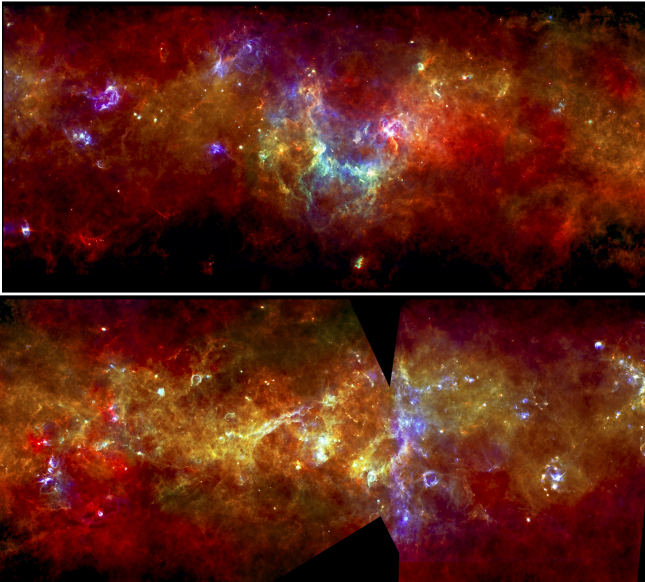
Le milieu interstellaire : filaments



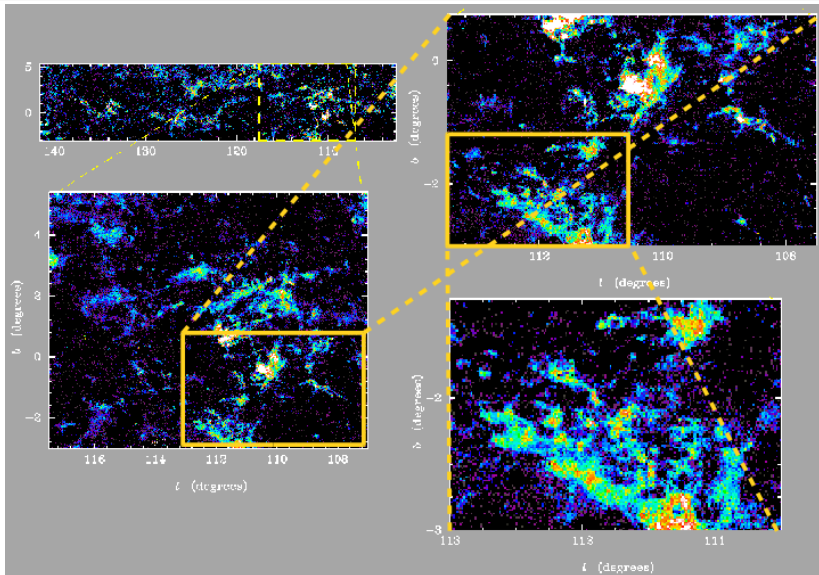
Taurus B211/B213 region

Palmeirim+13

Le milieu interstellaire : filaments



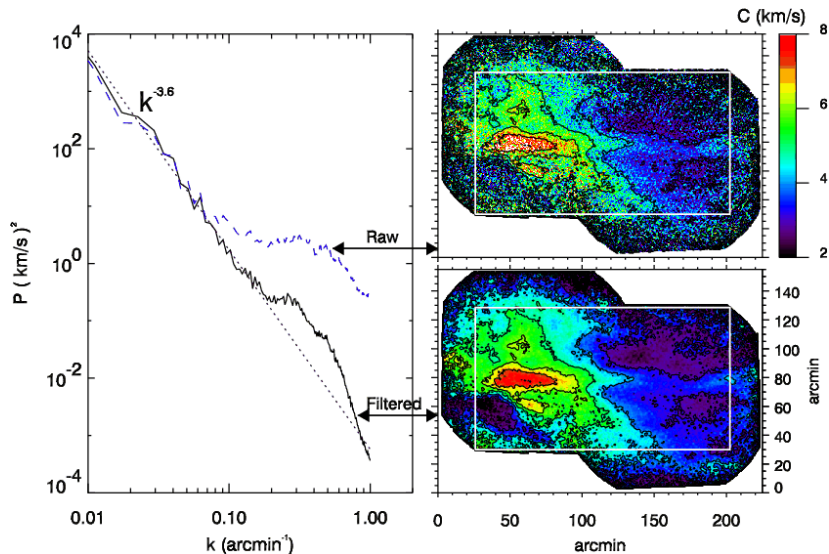
Le milieu interstellaire : structure fractale



data : Heyer et al, ApJS 115, 241 (1998)

idea : <http://aramis.obspm.fr/~combes/fcombes/rech02/>

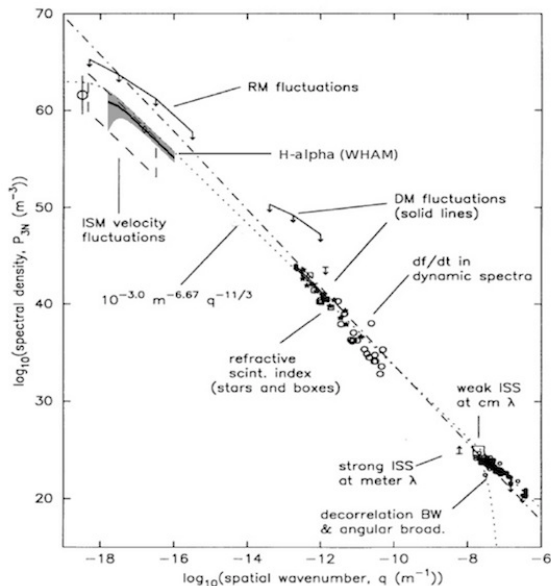
Le milieu interstellaire : structure fractale



Miville-Deschênes+2003

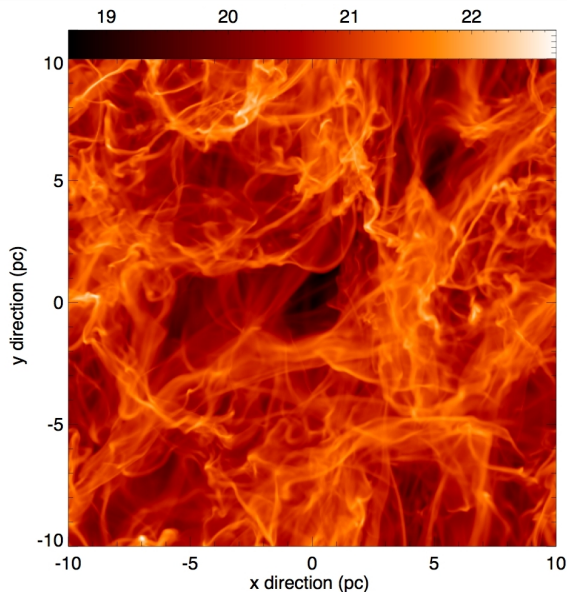
HI(21cm) in Ursa Major Galactic cirrus

Le milieu interstellaire : fluide magnétique turbulent supersonique autogravitant



The "Big Power Law in the Sky" by Armstrong, Rickett, & Spangler
+ Chepurnov and Lazarian

Le milieu interstellaire : fluide magnétique turbulent supersonique autogravitant



Glover & Mac Low 2007

hydrodynamique
(turbulence supersonique)

auto-gravité

champ $\vec{B}$

chimie $\text{H}^+ - \text{H} - \text{H}_2$

Résultats importants

Formation rapide (1-2 Myr)
des nuages moléculaires

log-normal PDF (turbulence)

filaments abondants

Position de l'exposé

○

Cycle de la matière

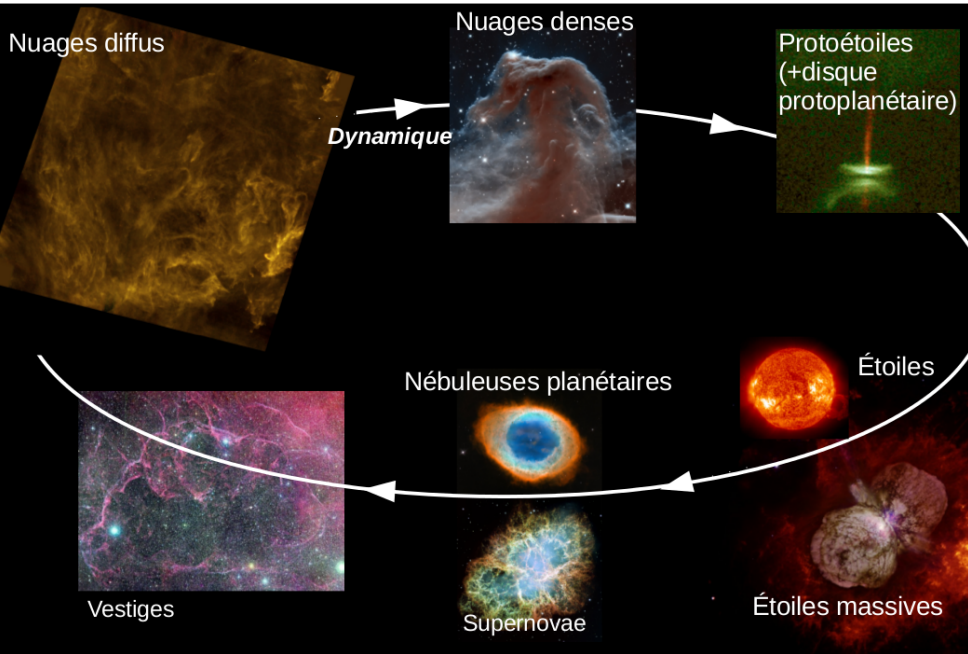
○○○○○○○○○○○○○○●○○○○○○○○○

Complexité de la matière

○○○○○○○○○○○○○○○

Conclusion

Le cycle de la matière galactique



Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 **Le cycle de la matière galactique**
 - Vue d'ensemble
 - Du milieu diffus aux nuages denses
 - **Formation stellaire**
 - Les étapes suivantes en bref
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion

Formation stellaire : observations “brutes”



Position de l'exposé

o

Cycle de la matière

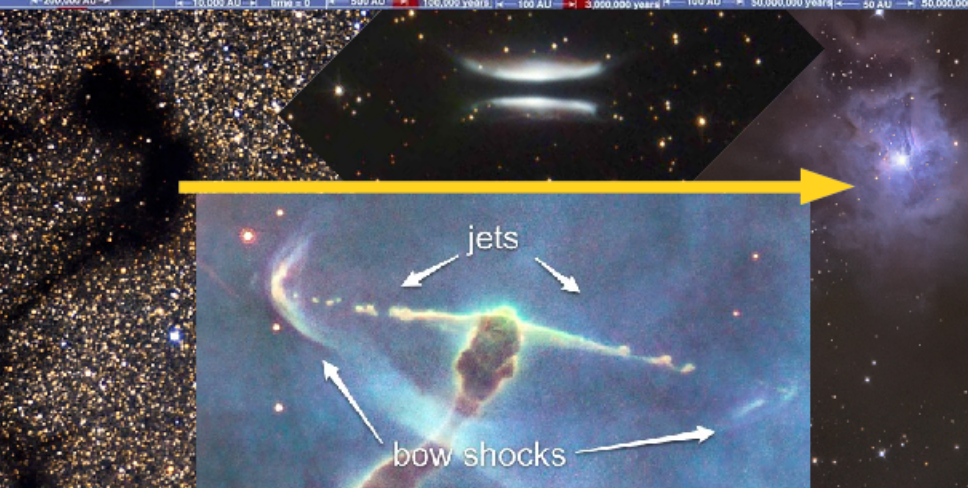
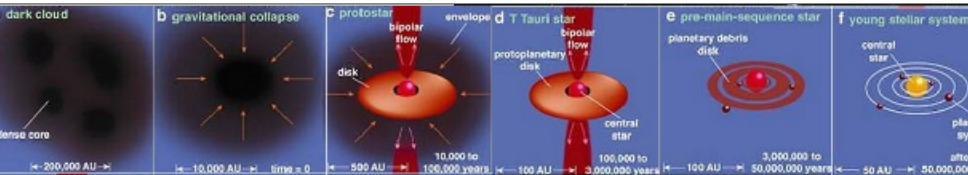
oooooooooooooooooooo●oooooooo

Complexité de la matière

oooooooooooooooo

Conclusion

Formation stellaire : scénario standard



Formation stellaire : balbutiements théoriques

Jeans 1902

● Ingrédients

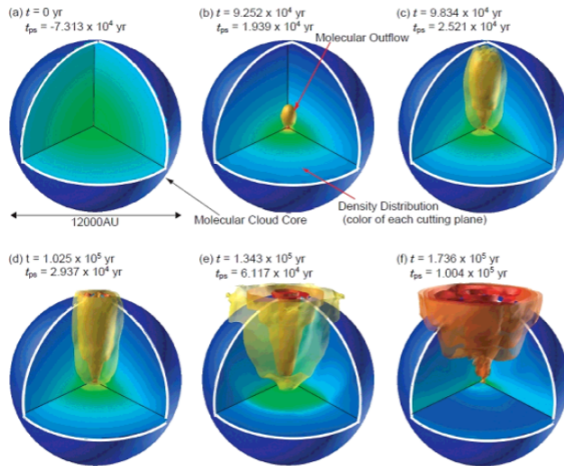
- Équation de continuité : $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{v}) = 0$
- Dynamique des fluides : $\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} P - \rho \vec{\nabla} \Phi$
- Équation de Poisson : $\Delta \Phi = 4\pi \mathcal{G} \rho$

● Résultats

- Comportement d'une perturbation : $\frac{\partial^2 \rho_1}{\partial t^2} = c_s^2 \Delta \rho_1 + 4\pi \mathcal{G} \rho_0 \rho_1$
- Apparition d'instabilités pour : $L > L_J = \frac{c_s \sqrt{\pi}}{\sqrt{\mathcal{G} \rho_0}}$
- Valeurs typiques de $L_J \sim 0.1 - 1 \text{ pc}$, selon c_s et ρ_0
- $L_J \propto \rho_0^{-1} \Rightarrow$ fragmentation

Formation stellaire : simulations numériques

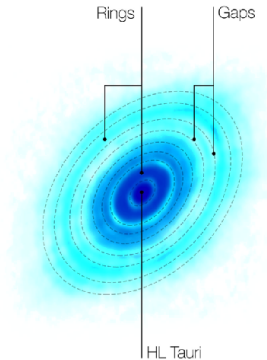
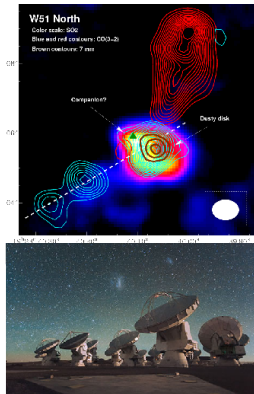
Exemple aux "petites" échelles : formation des jets bipolaires



Exemple aux "grandes" échelles: dynamique globale du nuage et des (proto-)étoiles (voir vidéo "cluster1mre.avi")

Formation stellaire : difficultés et voies de résolution

- Difficultés majeures : rotation, champ magnétique, rétroaction
- Voies de résolution potentielles : interférométrie submillimétrique



Position de l'exposé

○

Cycle de la matière

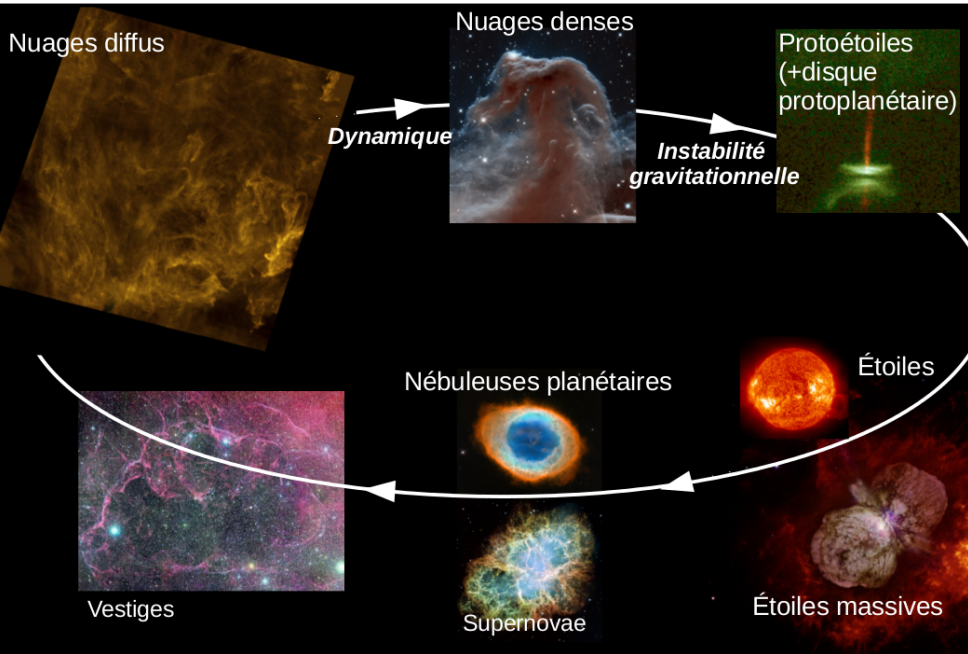
○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○●○○

Complexité de la matière

○○○○○○○○○○○○○○

Conclusion

Le cycle de la matière galactique



Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 **Le cycle de la matière galactique**
 - Vue d'ensemble
 - Du milieu diffus aux nuages denses
 - Formation stellaire
 - **Les étapes suivantes en bref**
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion

Position de l'exposé

Cycle de la matière

Complexité de la matière

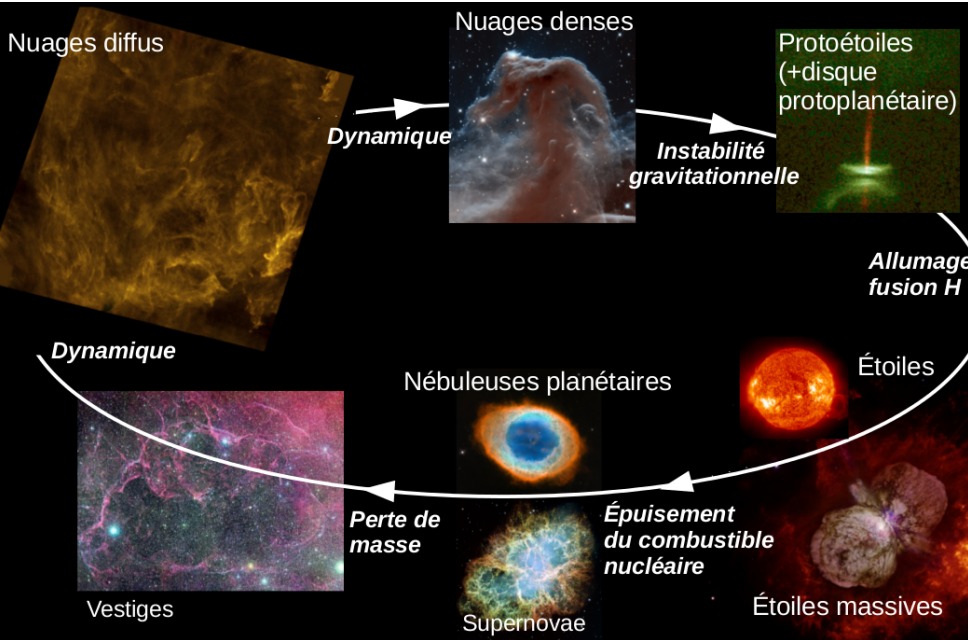
Conclusion

○

○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○●

○○○○○○○○○○○○○○○○○○○○

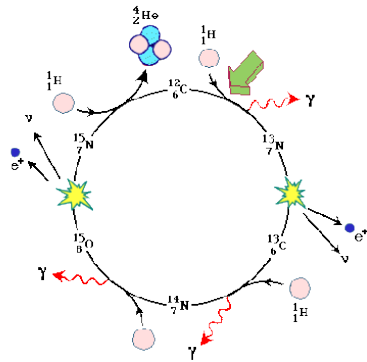
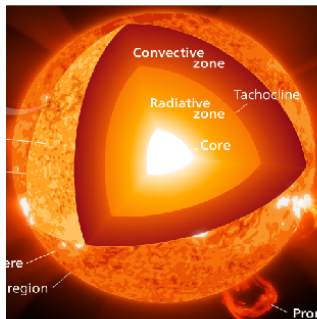
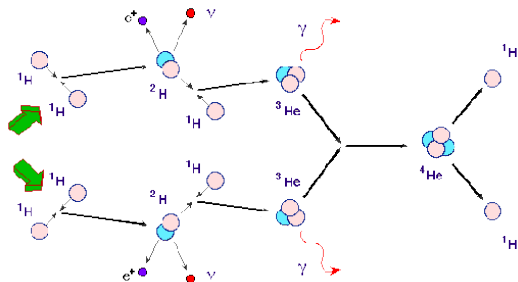
Le cycle de la matière galactique



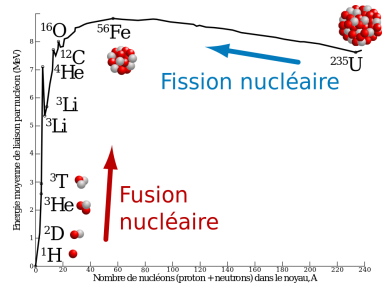
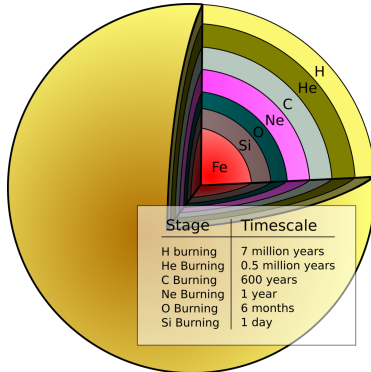
Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière**
 - Enrichissement en éléments lourds
 - Formation de molécules simples
 - Formation de molécules prébiotiques
- 4 Conclusion

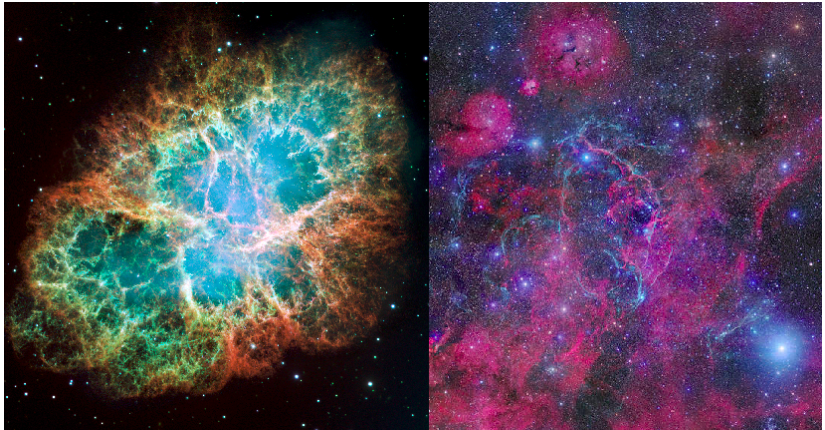
Nucléosynthèse stellaire : première étape



Nucléosynthèse stellaire : jusqu'au Fer



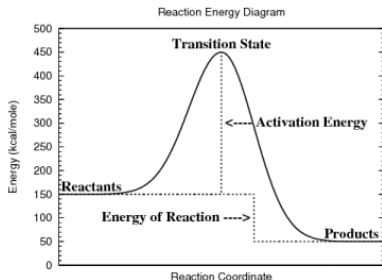
Nucléosynthèse stellaire : jusqu'à l'Uranium + restitution au MIS



Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
 - Enrichissement en éléments lourds
 - **Formation de molécules simples**
 - Formation de molécules prébiotiques
- 4 Conclusion

Formation de molécules simples : ménage à trois...

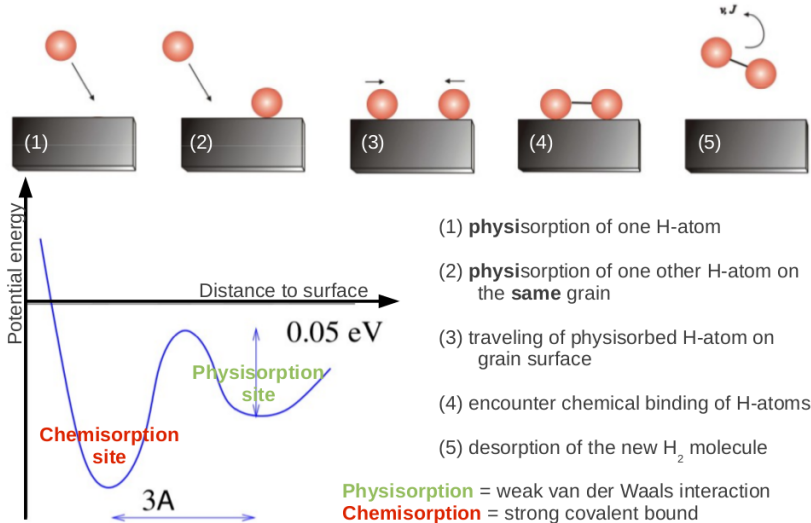


3e corps :

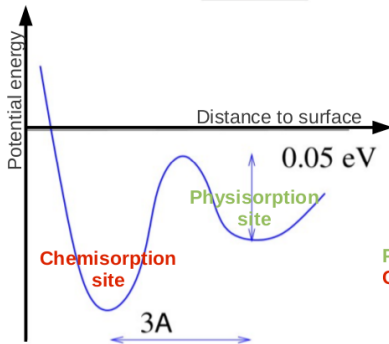
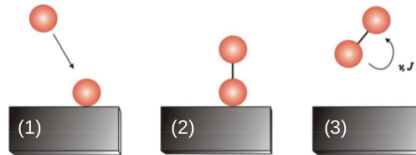
- perte d'une particule
 - émission de photon(s)
 - émission de phonons
 - collision à trois corps
- fenêtre $\Delta t \sim 10^{-13} \text{ s}$

Cas de $\text{H} + \text{H} \rightarrow \text{H}_2$: Coef. Einstein $A \sim 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Formation de molécules simples : mécanisme Langmuir-Hinshelwood



Formation de molécules simples : mécanisme Eley-Rideal



(1) **chemisorption** of one H-atom

(2) collision between a gas-phase H-atom and the chemisorbed H-atom

(3) desorption of the new H₂ molecule

Physisorption = weak van der Waals interaction

Chemisorption = strong covalent bound

Outline

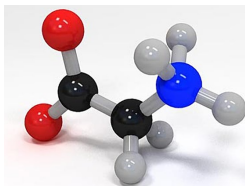
- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
 - Enrichissement en éléments lourds
 - Formation de molécules simples
 - Formation de molécules prébiotiques
- 4 Conclusion

Formation de molécules prébiotiques : contexte

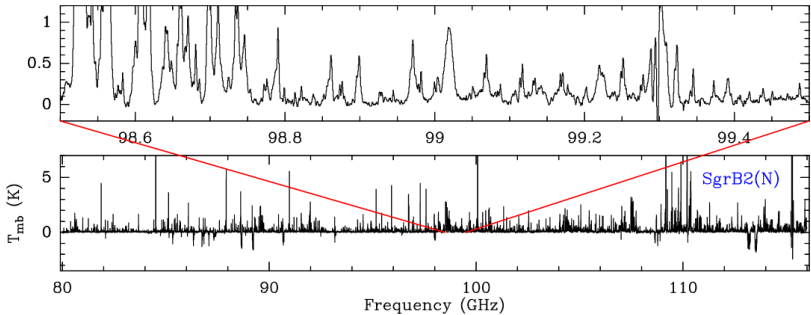
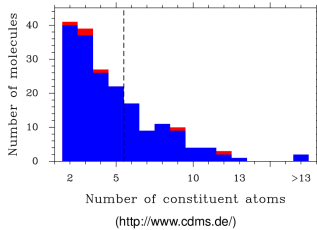
(Inspiré de la présentation d'Arnaud Belloche (MPIfR Bonn) du 22 Juin 2015 à Bordeaux)

- 20 acides aminés utilisés par le vivant pour construire des protéines
- ≥ 80 acides aminés détectés dans les météorites terrestres
- glycine ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$) détectée dans les échantillons *Stardust* de la comète 81P/Wild 2

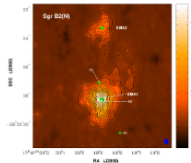
⇒ Origine interstellaire ?



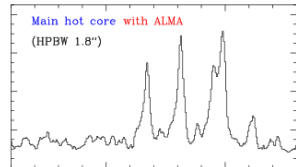
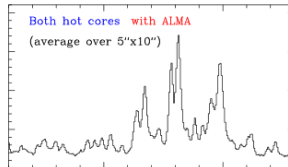
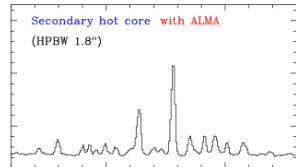
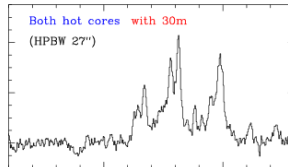
Formation de molécules prébiotiques : observations



Formation de molécules prébiotiques : observations

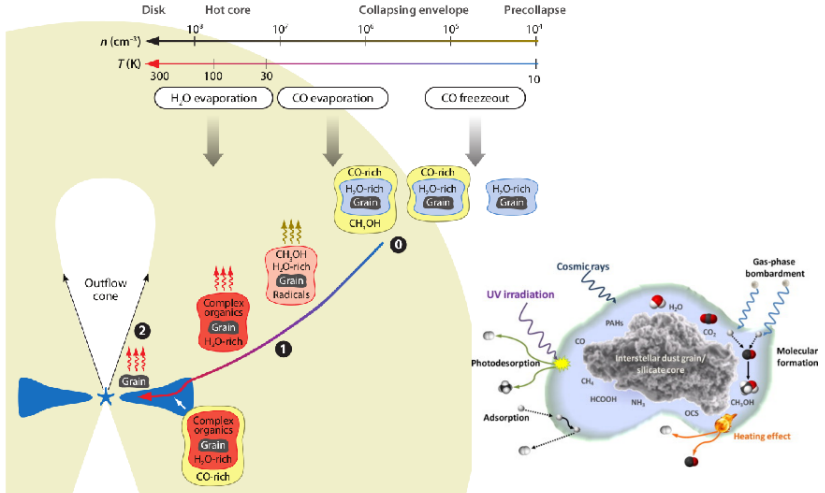


Sgr B2(N) at 850 μm
(SMA, Qin+ 2011)



Sgr B2(N2): narrower linewidths $\Rightarrow$ **confusion limit lowered**

Formation de molécules prébiotiques : mécanisme

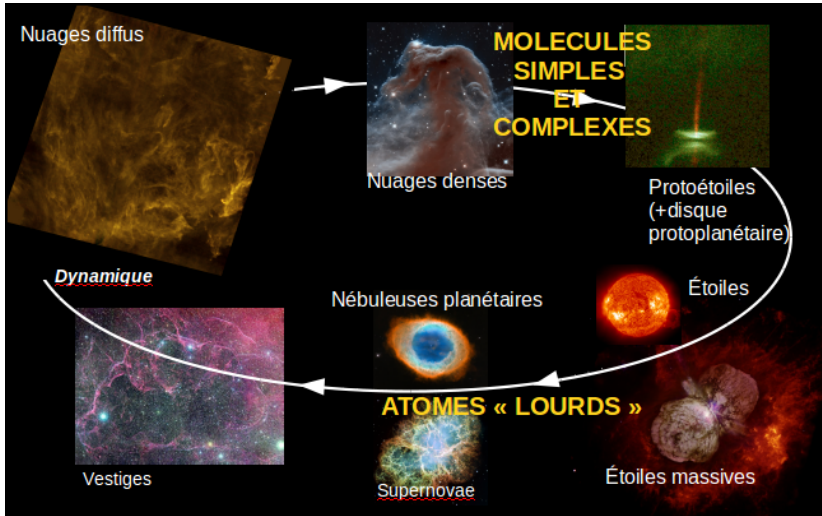


Herbst & van Dishoeck 2009

Outline

- 1 Position de l'exposé
- 2 Le cycle de la matière galactique
- 3 Contribution du cycle à la complexité de la matière
- 4 Conclusion**

Conclusions



Conclusions

- Le cycle de la matière galactique : plusieurs étapes importantes de l'évolution de la complexité de la matière
- Rôle important joué par la poussière interstellaire
- Mise en perspective aux temps cosmologiques : voir vidéo