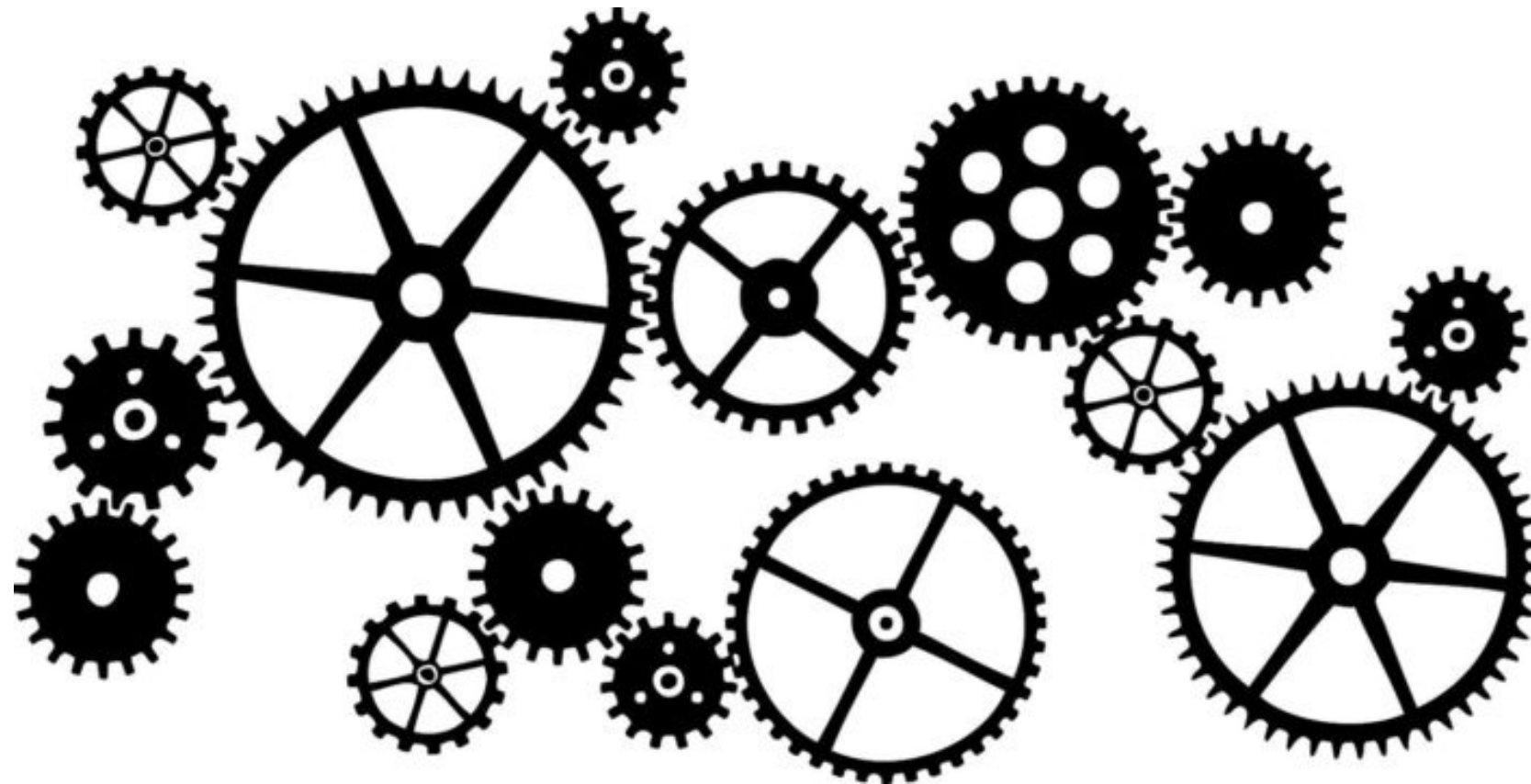


Les rouages de la formation des étoiles : dynamique multi-échelle et multi-phase



Marc-Antoine Miville-Deschênes
Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay

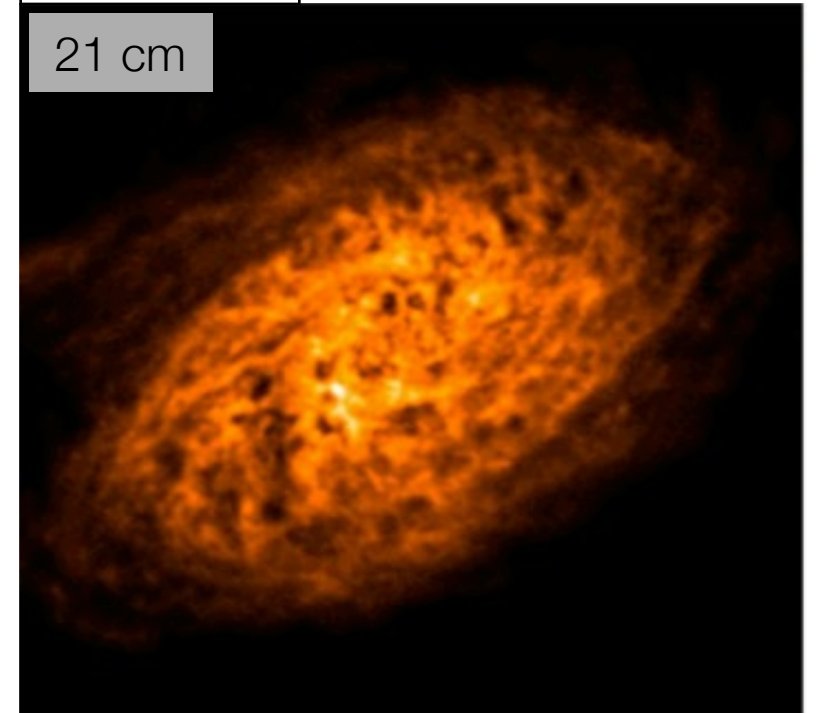


Du gaz aux étoiles

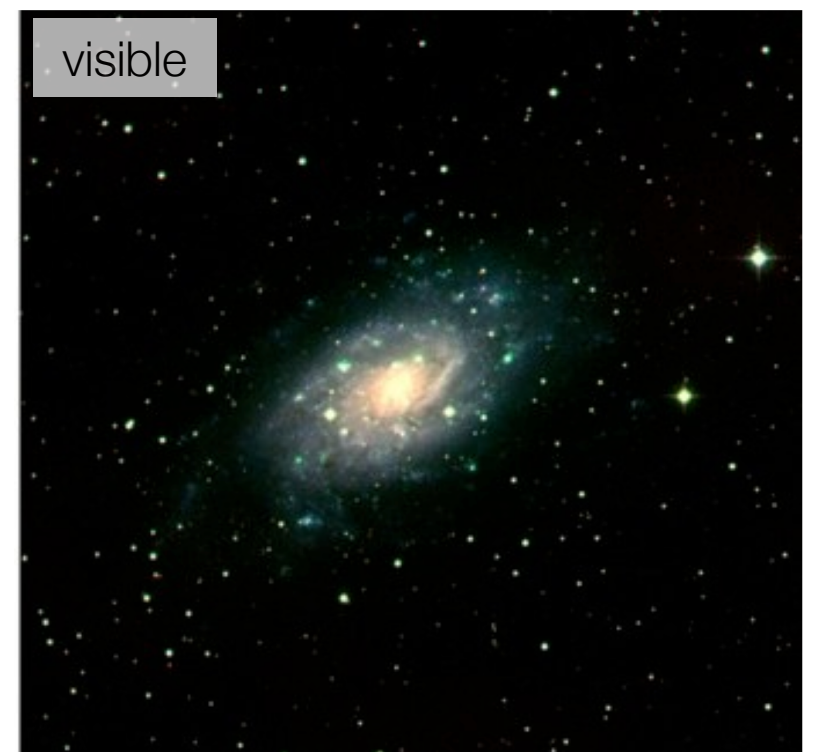
- La formation d'étoiles dépend de plusieurs processus physique complexes (gravité, turbulence magnéto-hydrodynamique, instabilité thermique (processus de chauffage et de refroidissement), rétro-action stellaire).
- Du fait de la cascade turbulence et de l'effet à longue portée de la gravité et du rayonnement, il est essentiel d'étudier cette physique sur une grande gamme d'échelles, idéalement de la taille du disque d'une galaxie jusqu'au libre parcours moyen des particules (unité astronomique).
- Les galaxies proches nous permettent d'étudier les relations entre les processus à grande échelle.
- La Voie Lactée est notre laboratoire pour étudier la physique multi-échelle

NGC 2403

21 cm



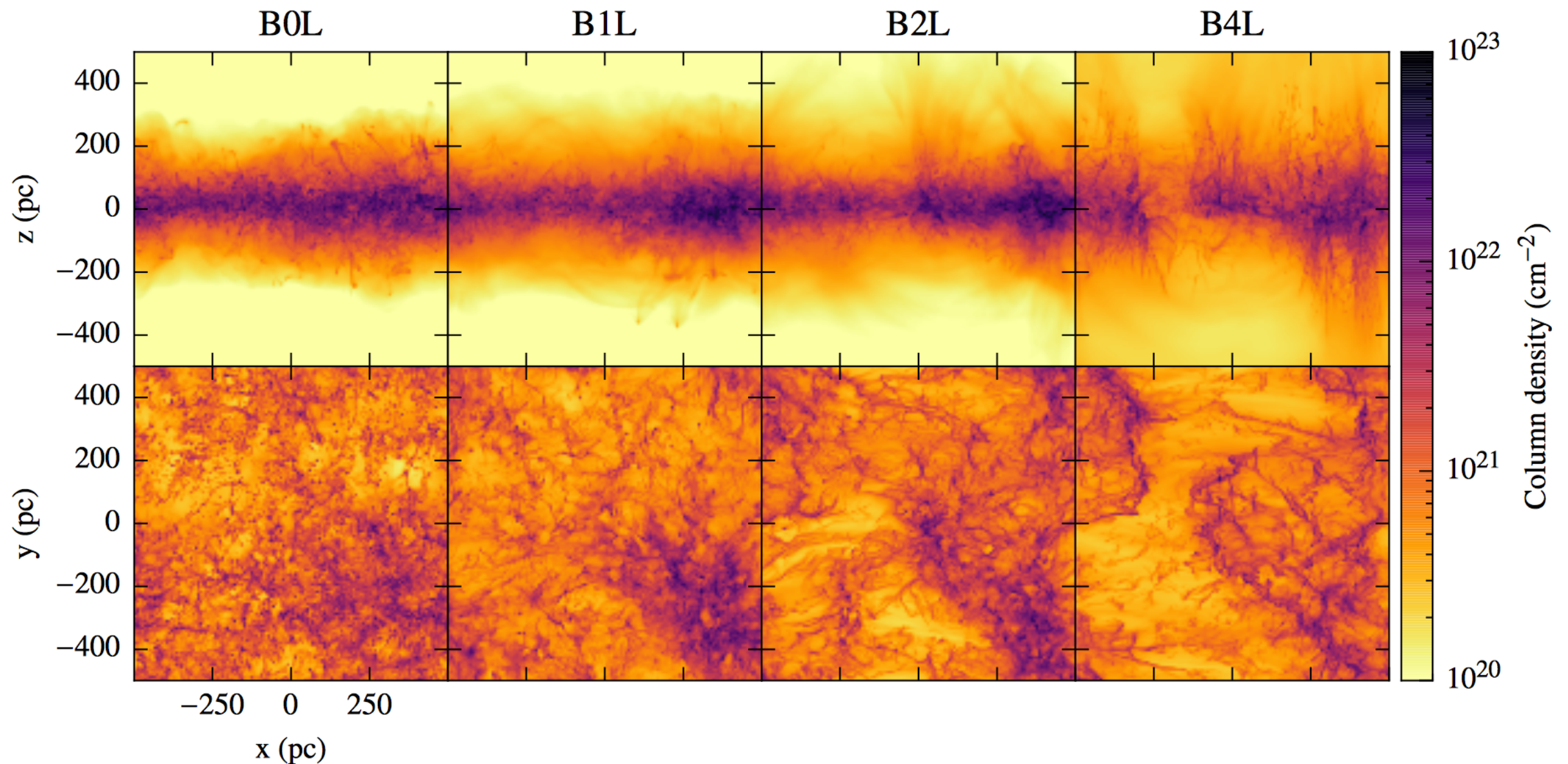
visible



Les défis actuels pour comprendre la physique multi-échelle et multi-phase du MIS

- Étendre les diagnostics observationnels : nous avons atteint un point où les simulations numériques manquent de contraintes.
- Accéder aux différentes quantités physiques (densité, température, vitesse, champ magnétique, abondance) de manière continue, sur une gamme étendue d'échelles spatiales.
- Comprendre les effets de projection et tenter de reconstruire ces quantités en 3 dimensions.
- Ca demande :
 - Rapprochement entre les simulations numériques et les observations (comparaison directe).
 - Utilisation d'observations de spectro-imagerie sur de grandes régions
 - Observations de toutes les phases de la matière, du milieu diffus aux régions de formation d'étoiles, pour comprendre la cascade d'énergie et de masse.
- Dans ce qui suit : quelques pistes récentes pour l'étude de la physique multi-échelle du milieu interstellaire

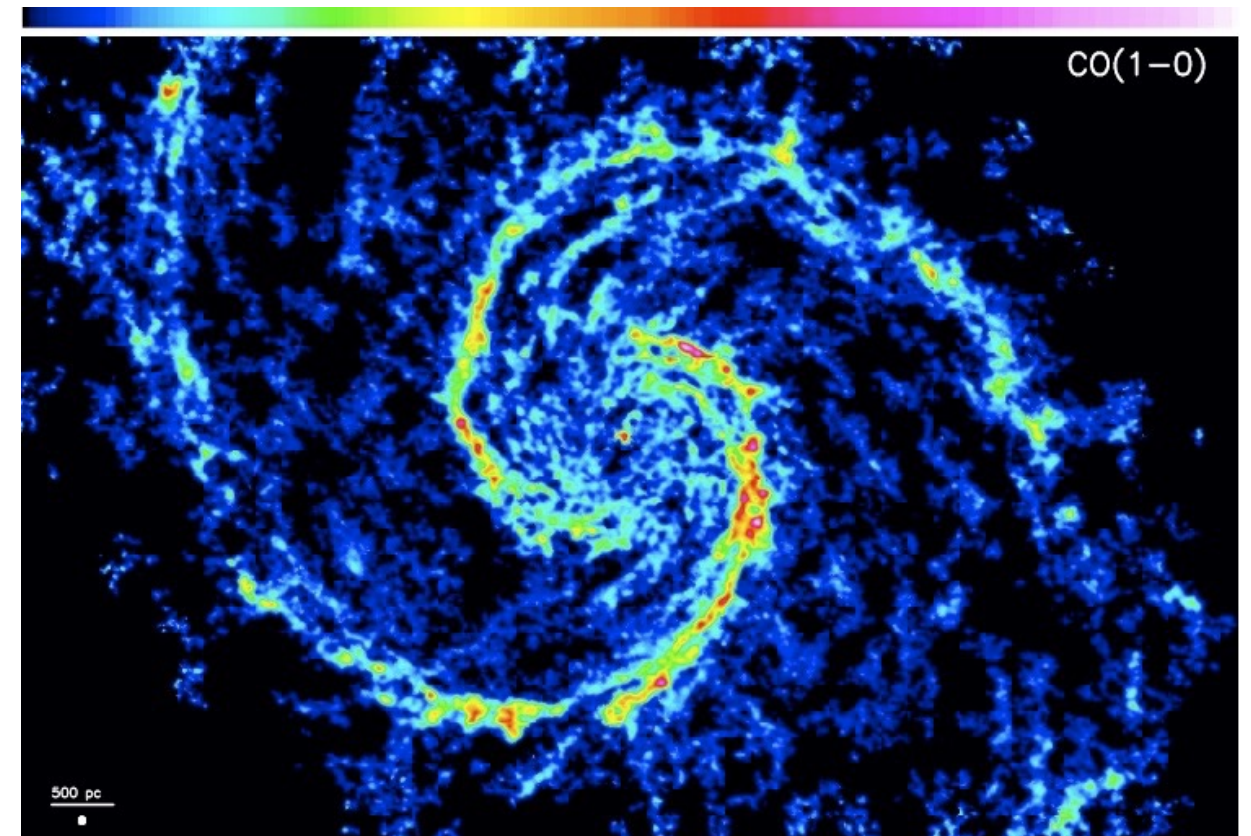
Structure distribution and turbulence in self-consistently supernova-driven ISM of multiphase magnetized galactic discs



- Iffrig & Hennebelle (2017)
- La corrélation des supernovas avec le gaz dense permet de mieux reproduire le taux de formation d'étoiles observé, surtout si le champ magnétique est de l'ordre de quelques microG.

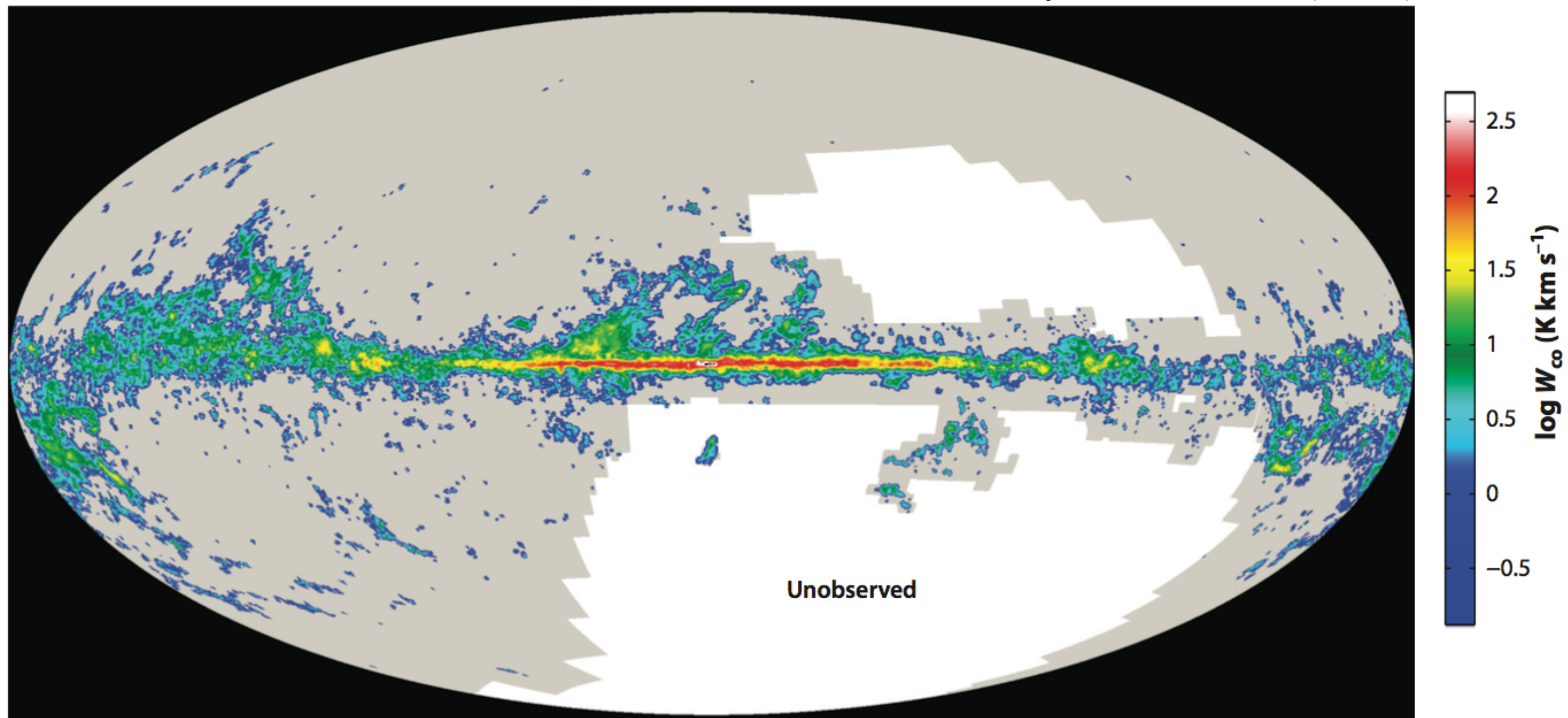
Les nuages moléculaires

- Ce que l'on apprend à l'école
 - Loi de Larson
 - Densité de colonne $\sim$ constante
 - Equilibre viriel
 - L'efficacité de la formation d'étoiles est proportionnelle à la densité de colonne du gaz moléculaire.
- Le débat actuel : importance relative de la gravité et de la rétro-action stellaire comme source d'énergie turbulente.
- Notre connaissance des nuages moléculaires reposent sur
 - Petit échantillon de nuages (surtout des études statistiques des années 1980s)
 - Une petite fraction de l'émission CO est dans ces catalogues (typiquement 20%), ce qui biaise les résultats vers les nuages brillants et massifs.
 - L'extraction est difficile en partie à cause d'un manque de méthode adaptée pour résoudre le problème de la confusion en vitesse



Schinnerer et al. (2013) - M51; IRAM PdB+30m

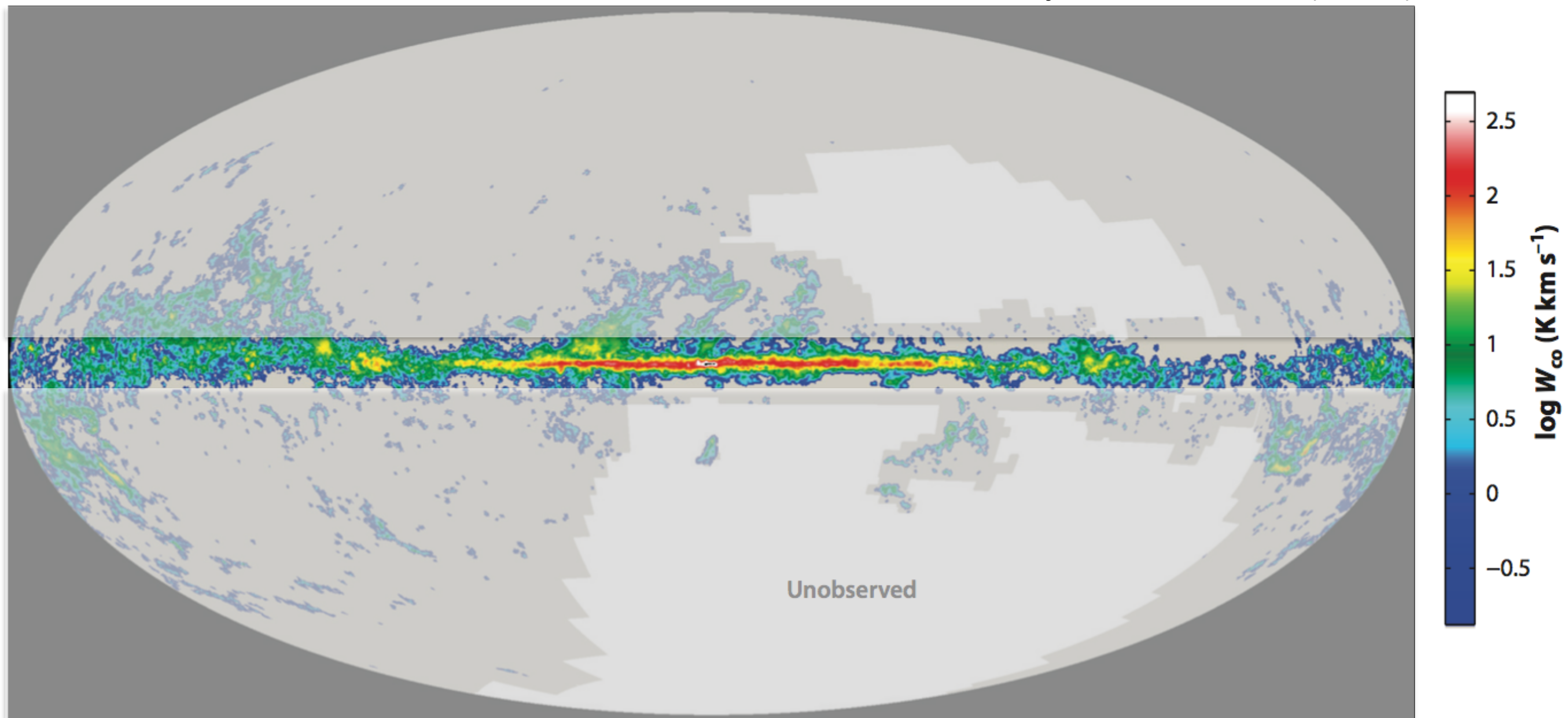
12CO survey - Dame et al. (2001)



- Data acquisition over 20 years (New-York, Cambridge, Cerro-Tololo)
- Angular resolution = $8.5'$
- Channel width = 1.3 km/s
- Noise $\sim 0.1 \text{ K}$

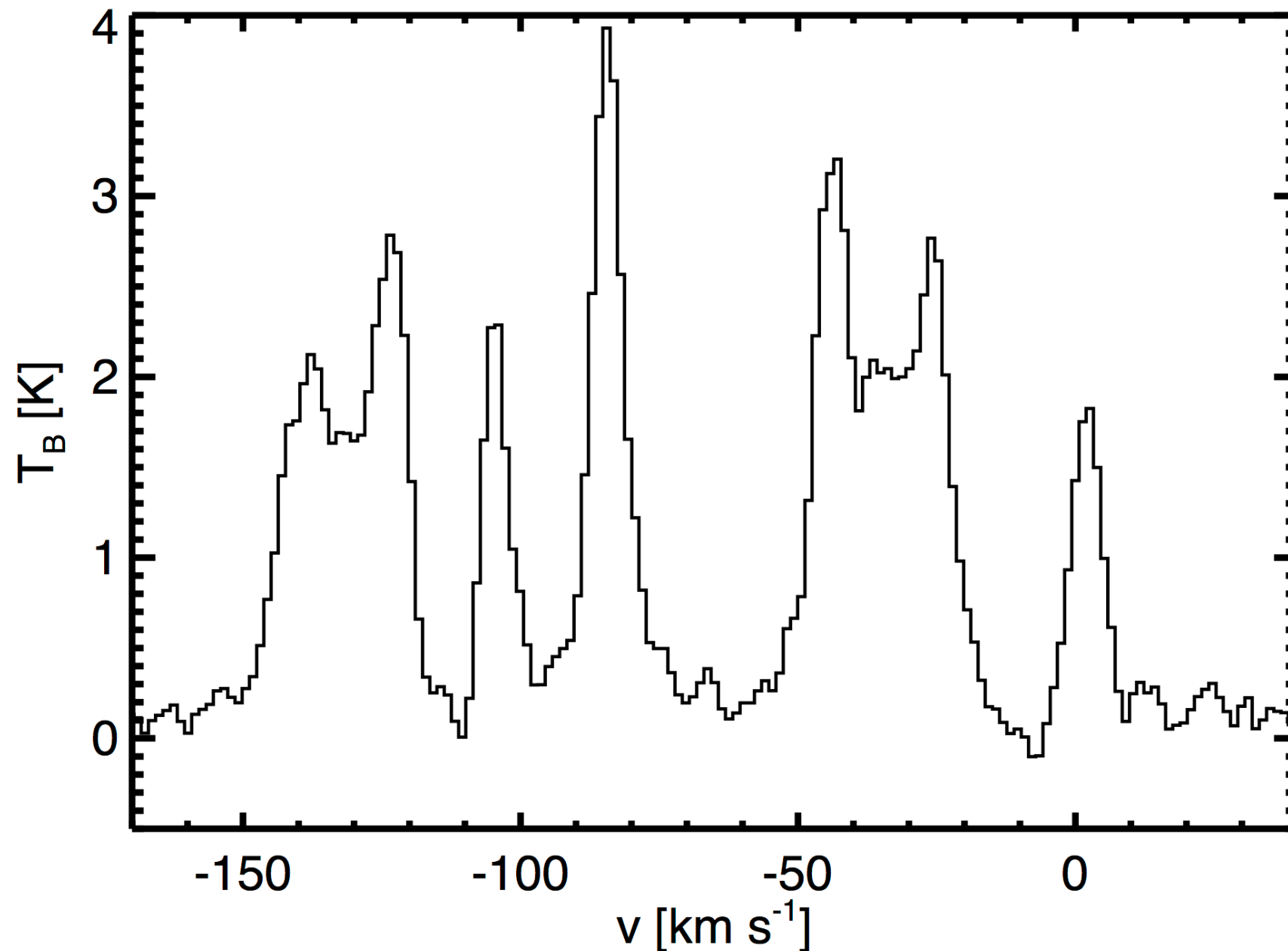
from Heyer & Dame 2015

12CO survey - Dame et al. (2001)

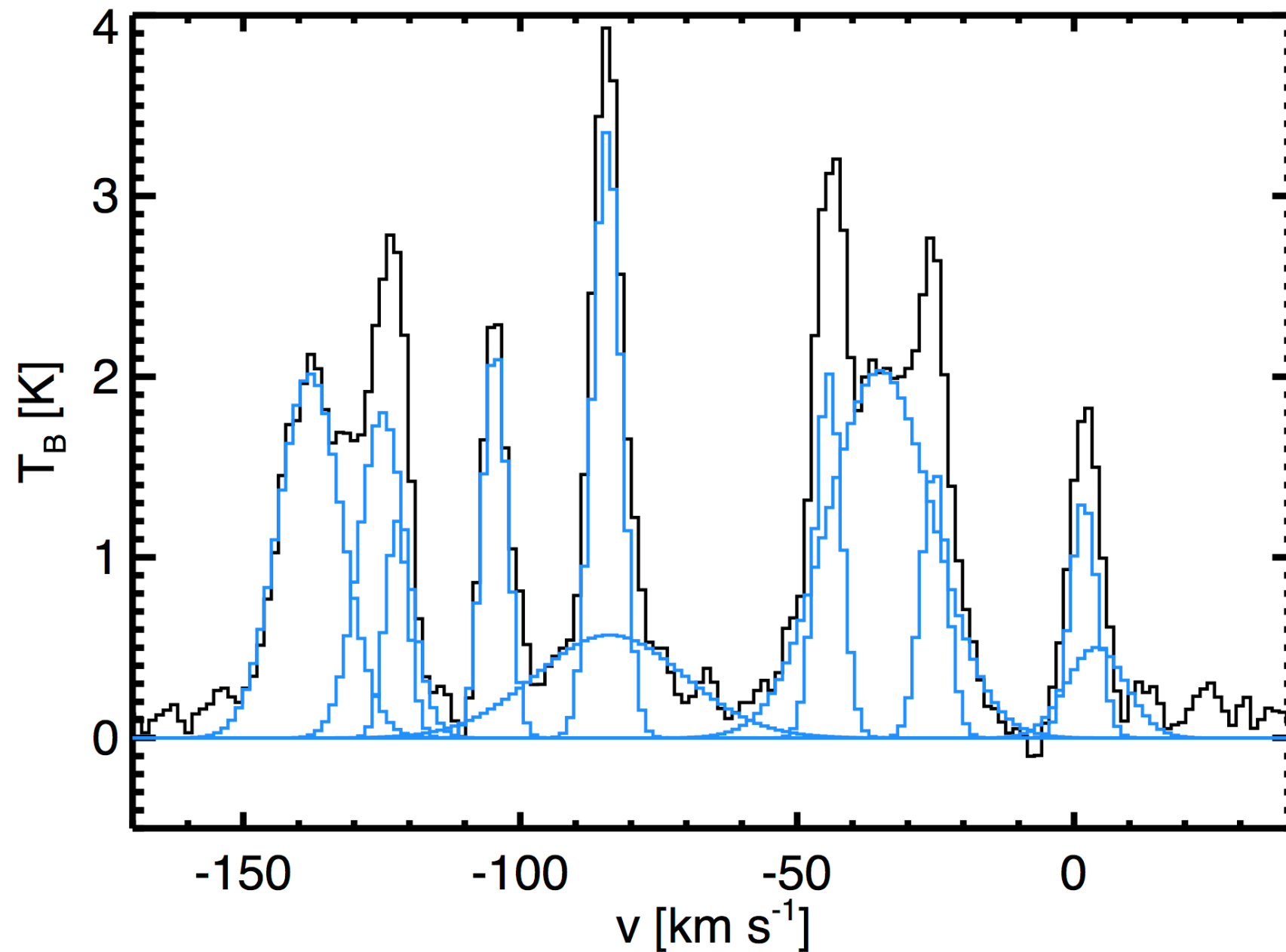


- Data acquisition over 20 years (New-York, Cambridge, Cerro-Tololo)
- Angular resolution = $8.5'$
- Channel width = 1.3 km/s
- Noise $\sim 0.1 \text{ K}$

from Heyer & Dame 2015

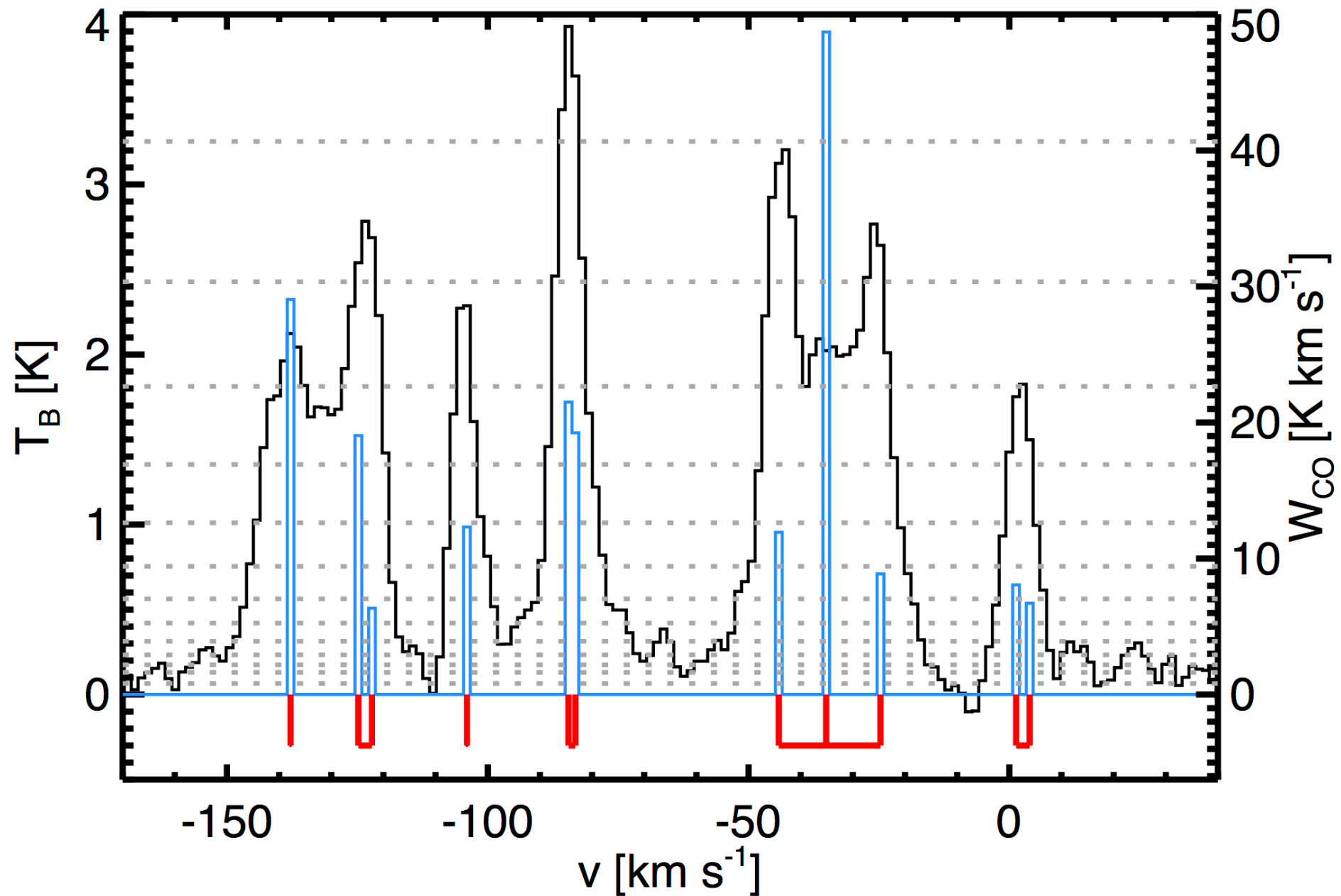


- Gaussian decomposition with spatial coherence
- Hierarchical cluster identification with a threshold decent
- The parametrisation is set in order to reproduce the radial variation of surface density and the total mass of molecular clouds in the Milky Way.



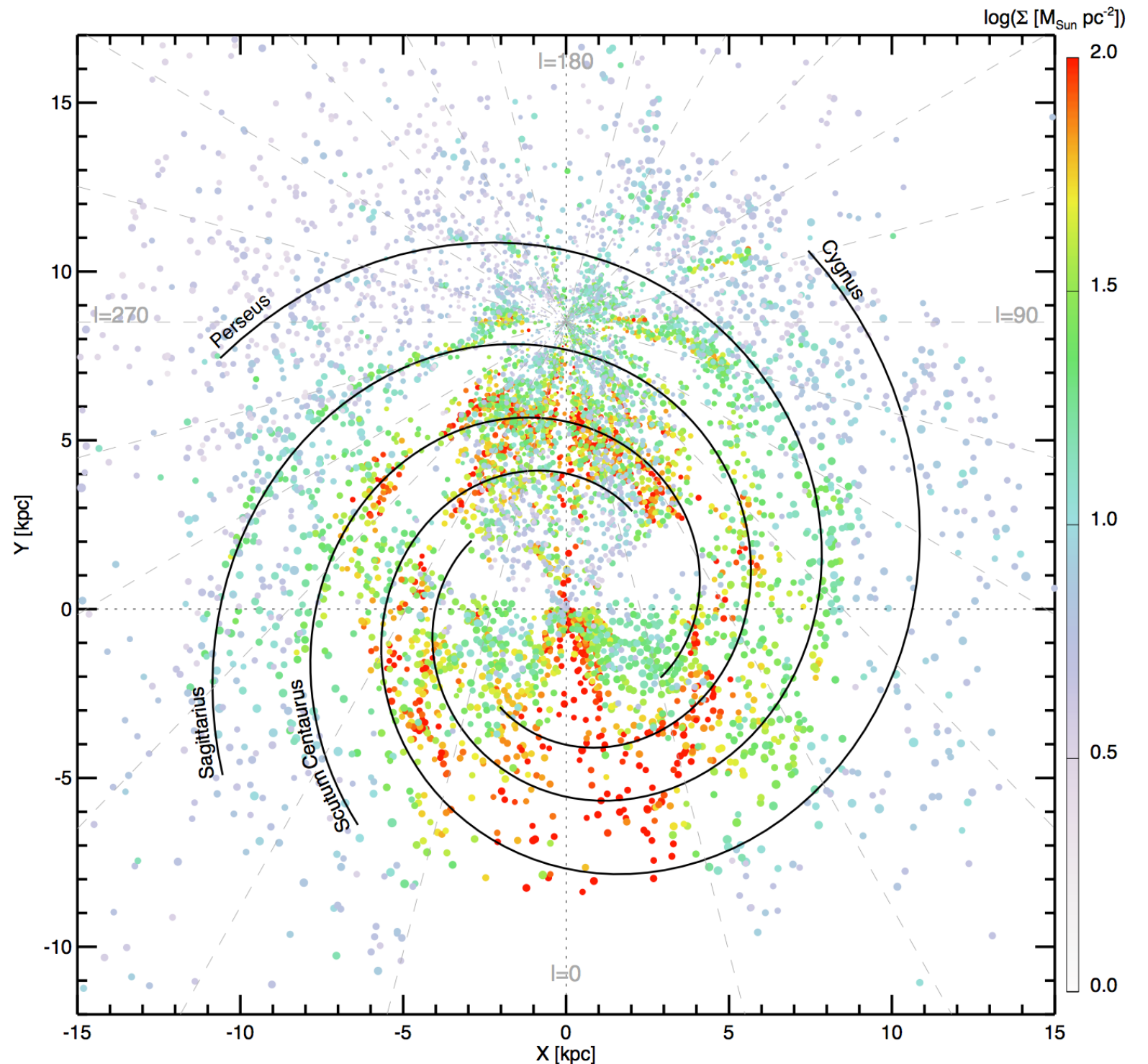
- Gaussian decomposition with spatial coherence
- Hierarchical cluster identification with a threshold decent
- The parametrisation is set in order to reproduce the radial variation of surface density and the total mass of molecular clouds in the Milky Way.

11 Gaussians grouped in 6 clouds

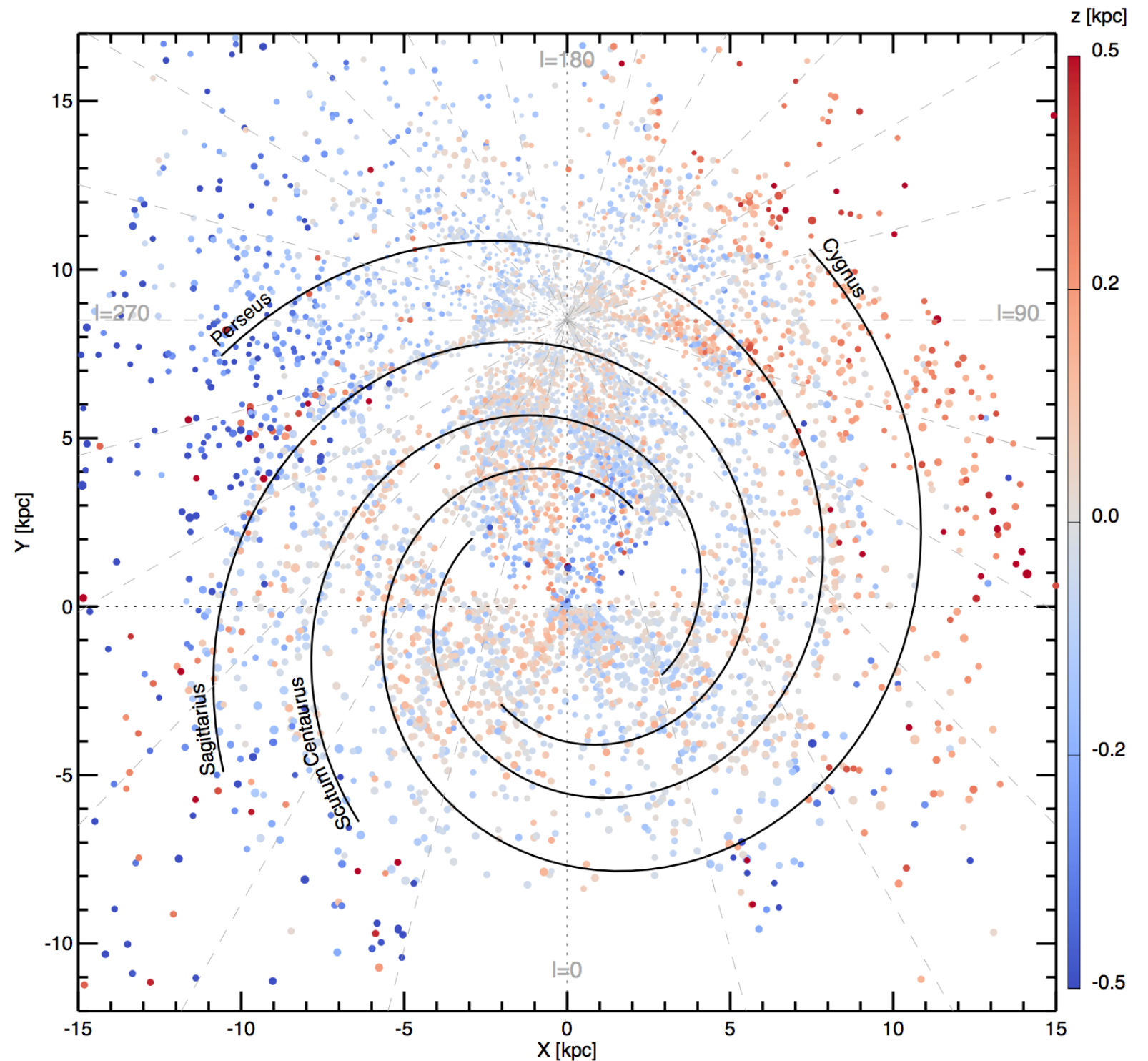


- Gaussian decomposition with spatial coherence
- Hierarchical cluster identification with a threshold decent
- The parametrisation is set in order to reproduce the radial variation of surface density and the total mass of molecular clouds in the Milky Way.

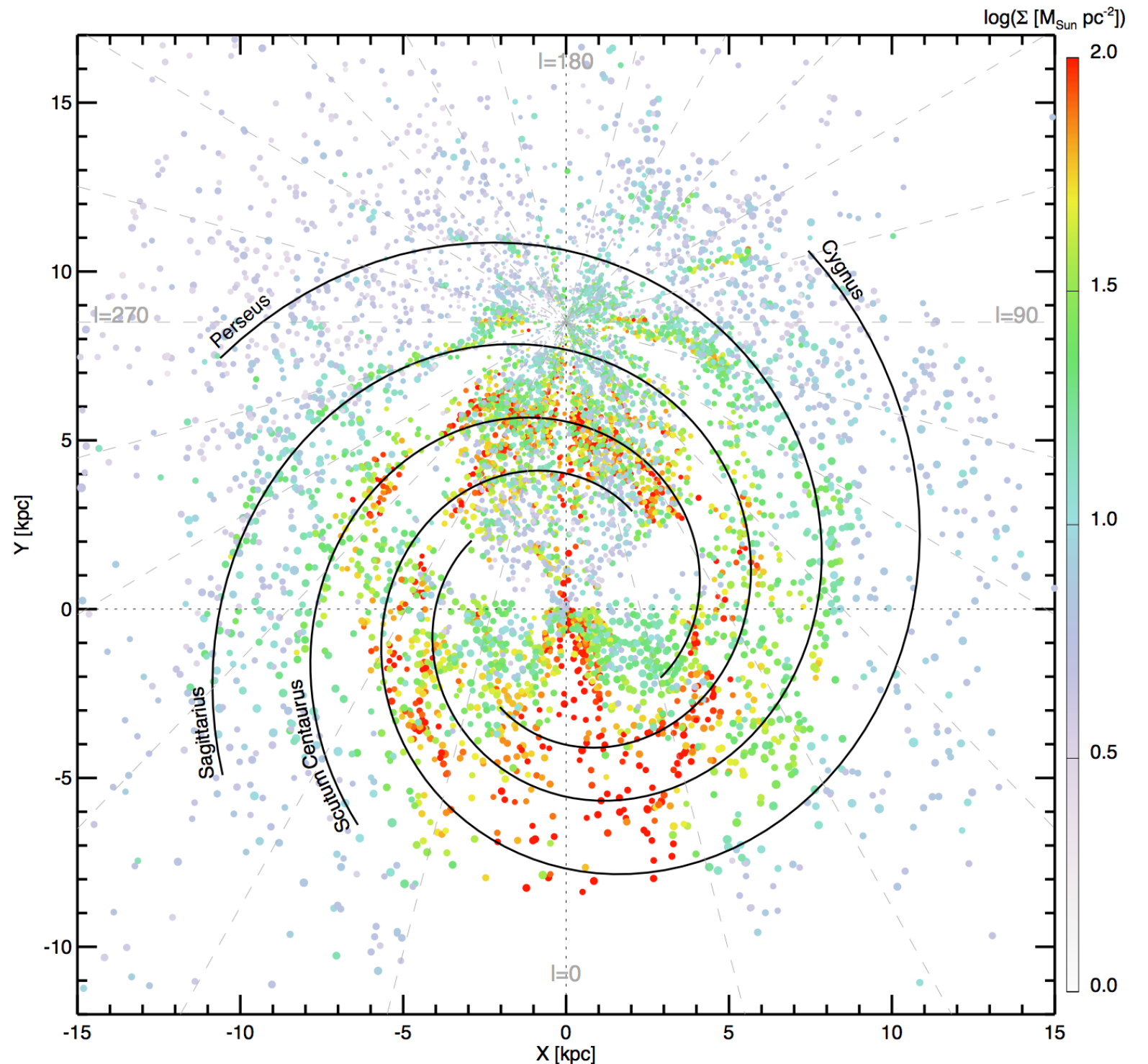
- Identification of 8107 molecular clouds
- Corresponds to 98% of the total 12CO emission
- 2/3 of lines of sight have 0, 1 or 2 clouds
- Outer Galaxy : large number of small clouds explained by the accretion of matter in large scale converging flows (Klessen & Hennebelle 2010)

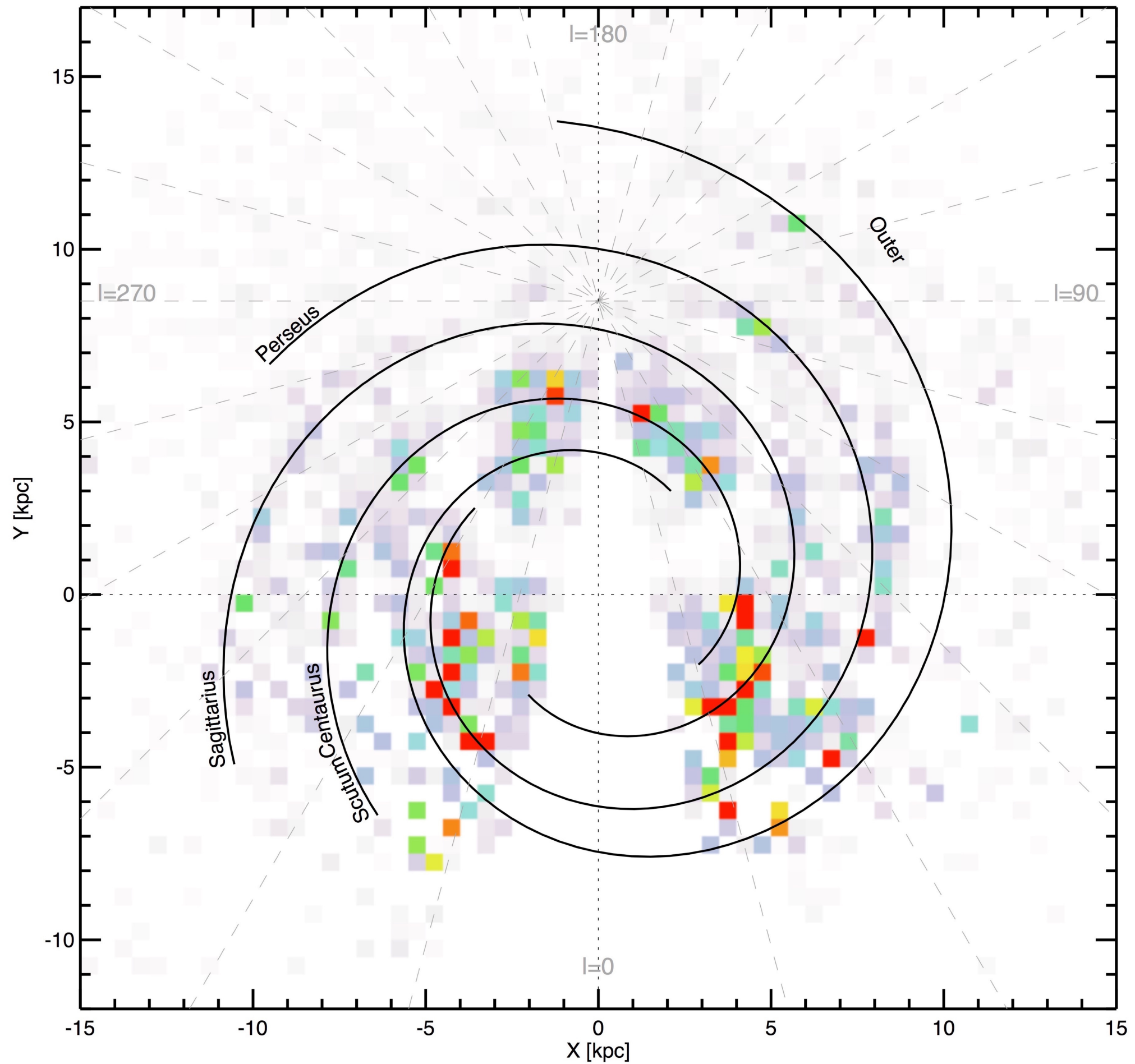


- Identification of 8107 molecular clouds
- Corresponds to 98% of the total ^{12}CO emission
- 2/3 of lines of sight have 0, 1 or 2 clouds
- Outer Galaxy : large number of small clouds explained by the accretion of matter in large scale converging flows (Klessen & Hennebelle 2010)

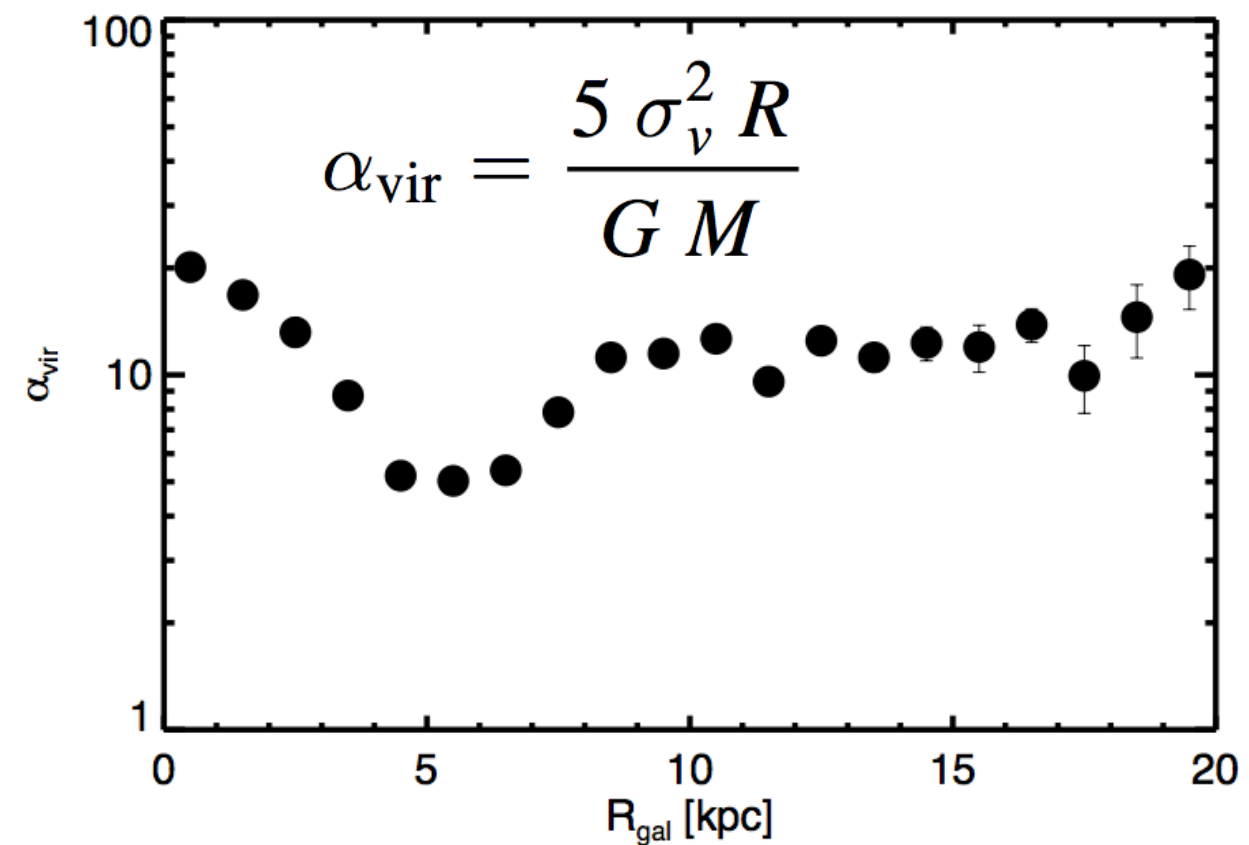
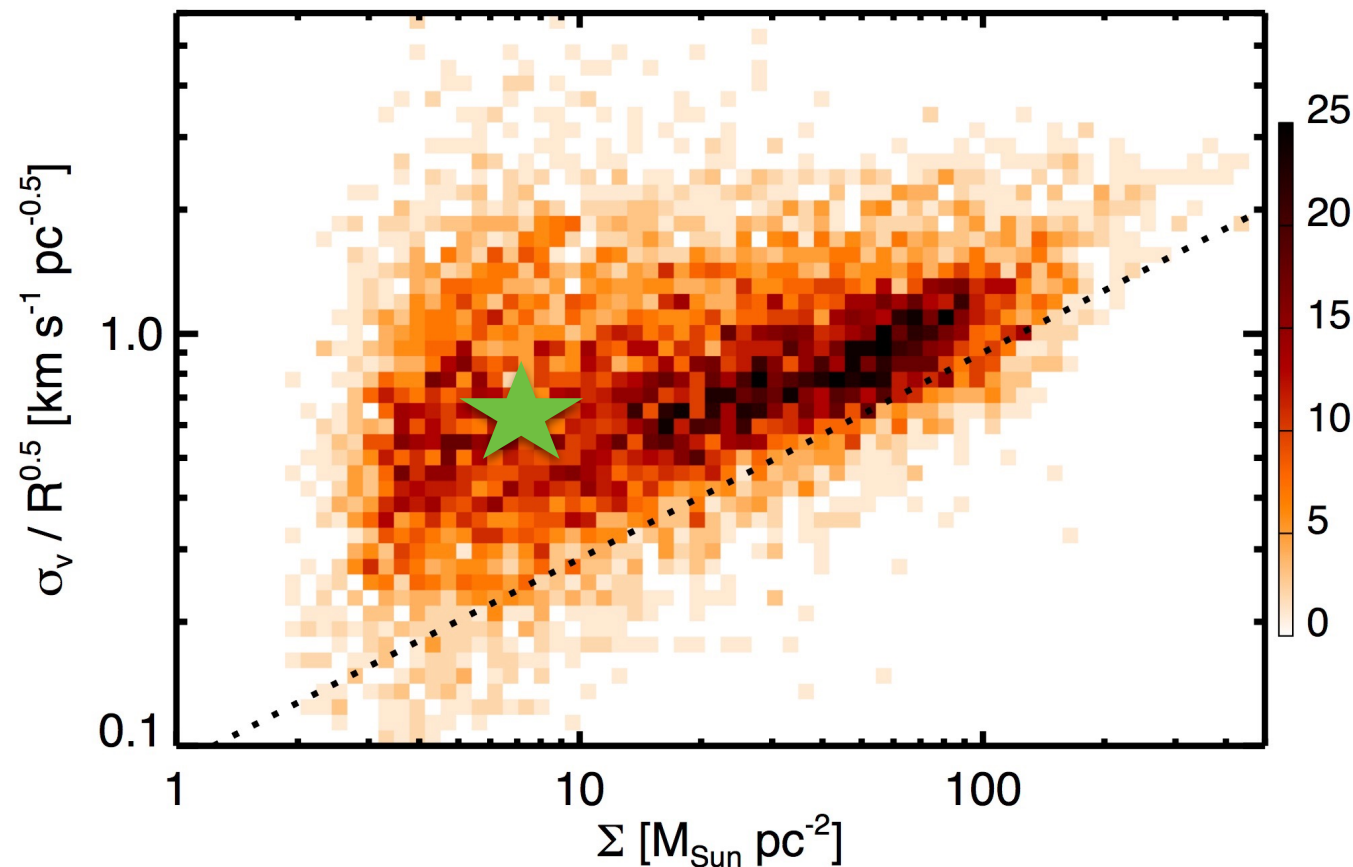


- Identification of 8107 molecular clouds
- Corresponds to 98% of the total 12CO emission
- 2/3 of lines of sight have 0, 1 or 2 clouds
- Outer Galaxy : large number of small clouds explained by the accretion of matter in large scale converging flows (Klessen & Hennebelle 2010)



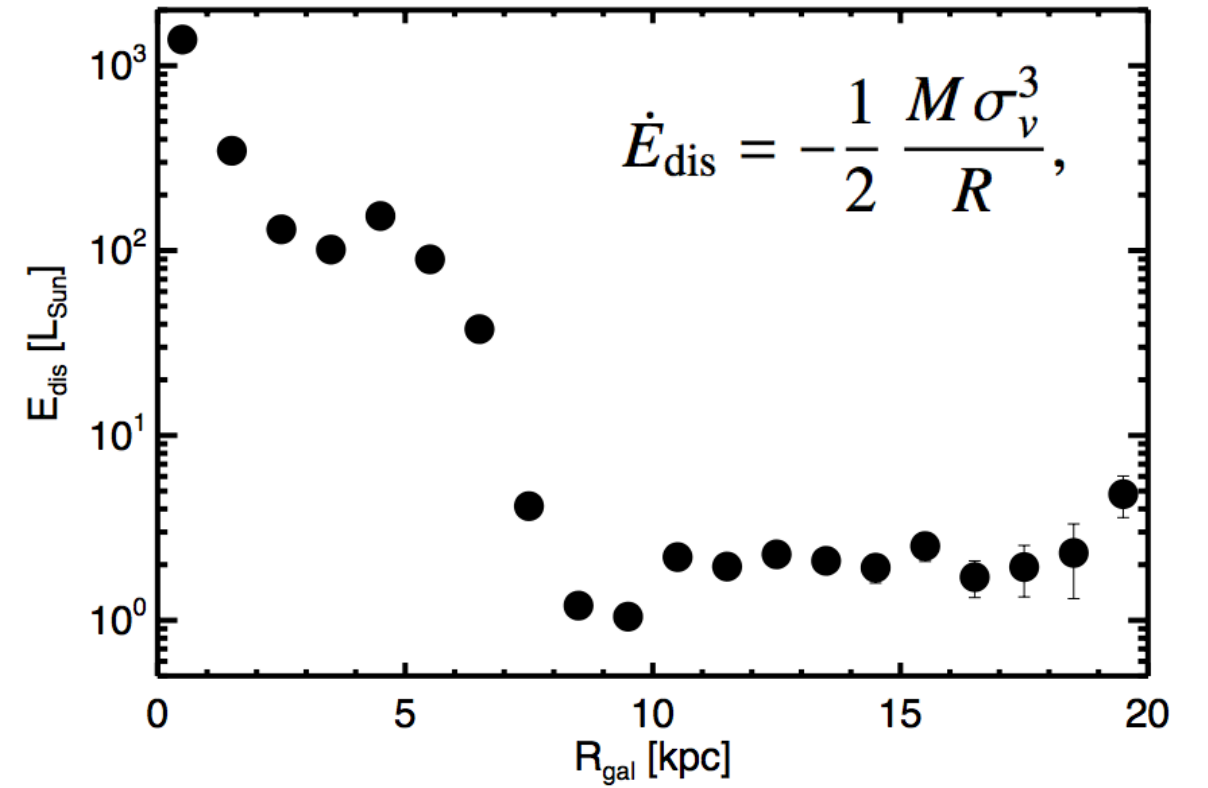
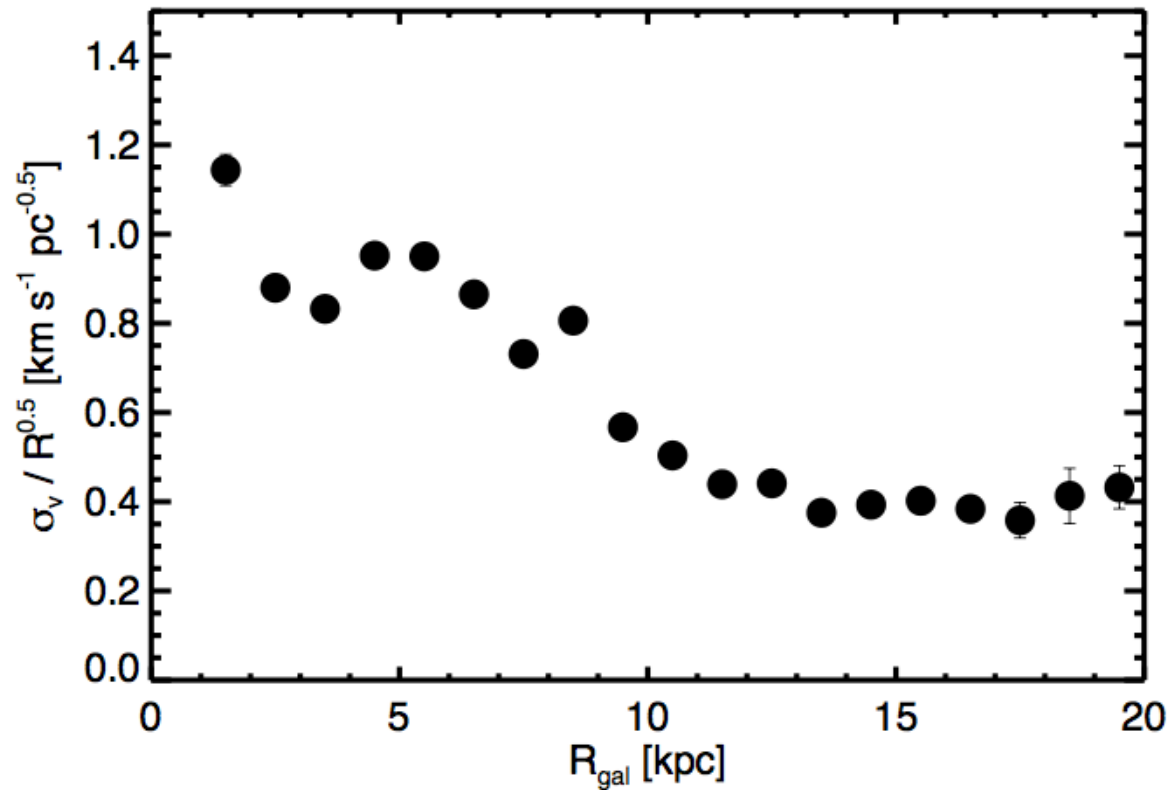
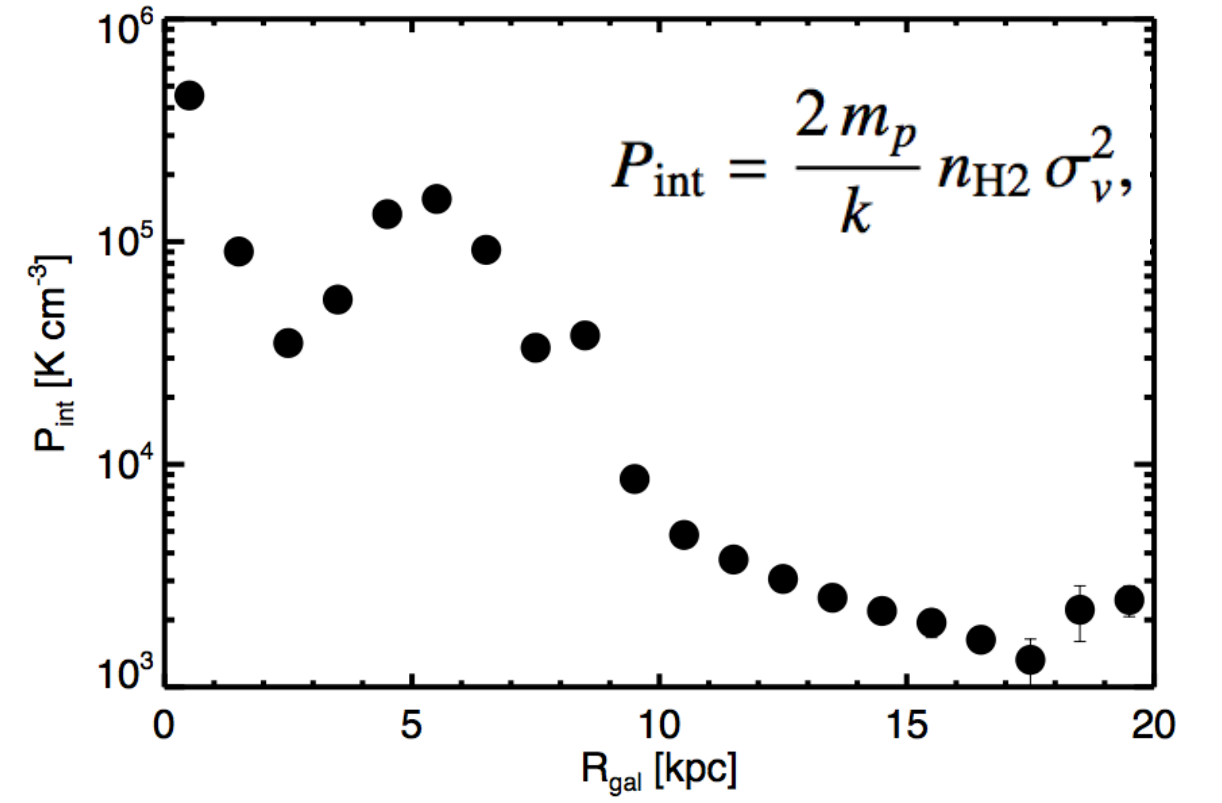
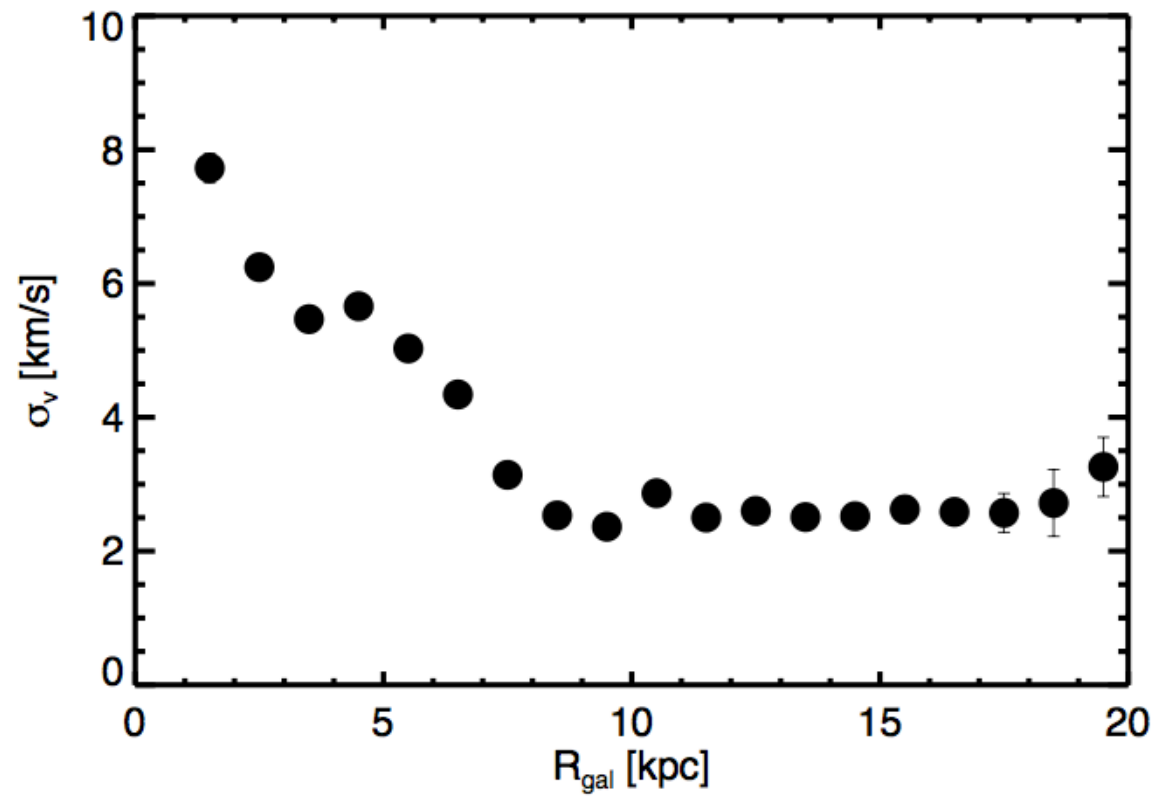


La majorité des nuages ne sont pas liés par la gravité



- Seulement 15% des nuages sont liés par la gravité (ils contiennent 40% de la masse)
- Il est fort probable que des structures à l'intérieur des nuages soient liées par la gravité.
- Compatible avec l'idée que les nuages moléculaires sont des structures jeunes et transitoires
- Le paramètre viriel ne varie pas systématiquement avec le rayon galacto-centrique.
 - Il y a un lien clair entre l'énergie turbulente et l'énergie gravitationnelle



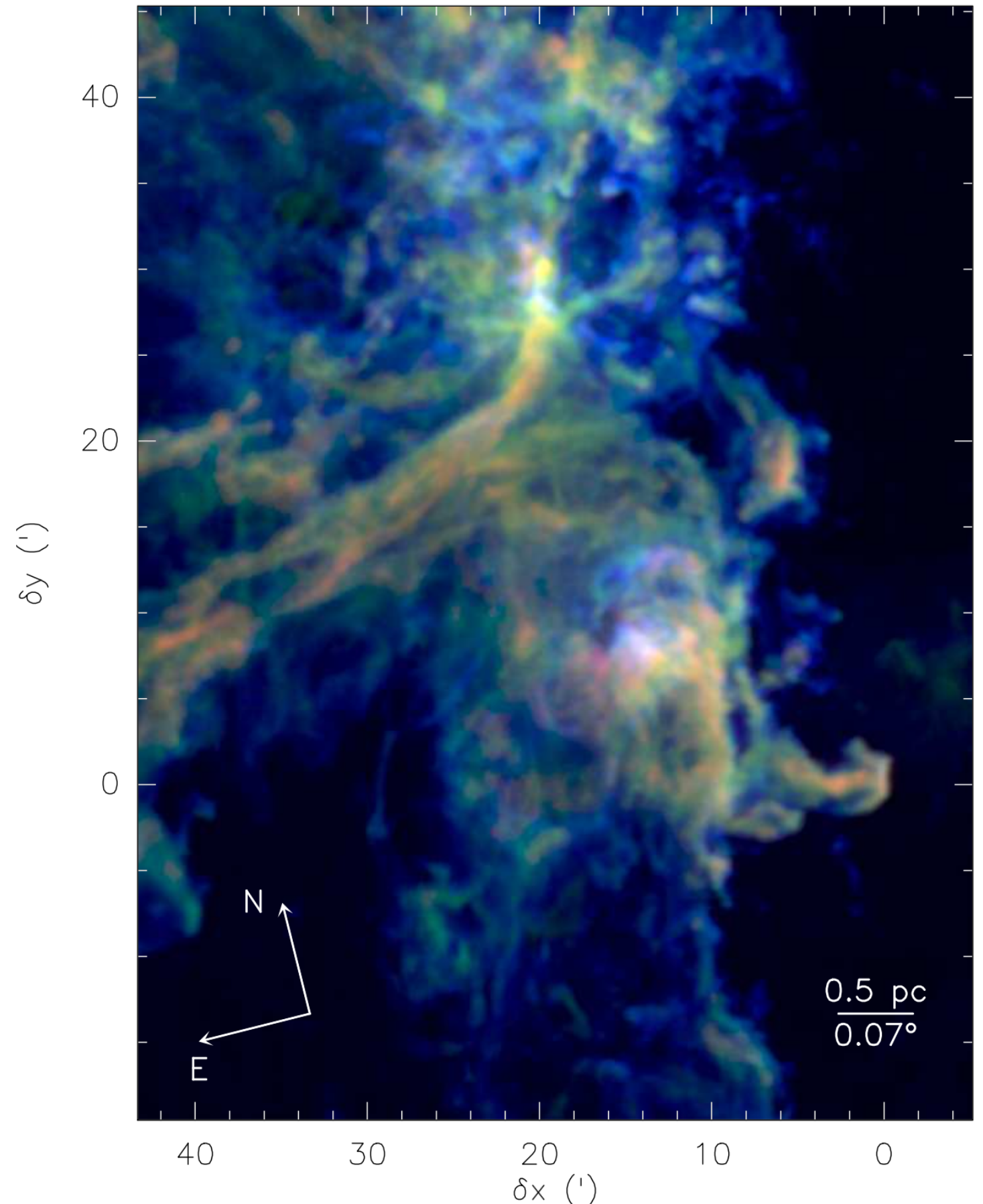


interprétation

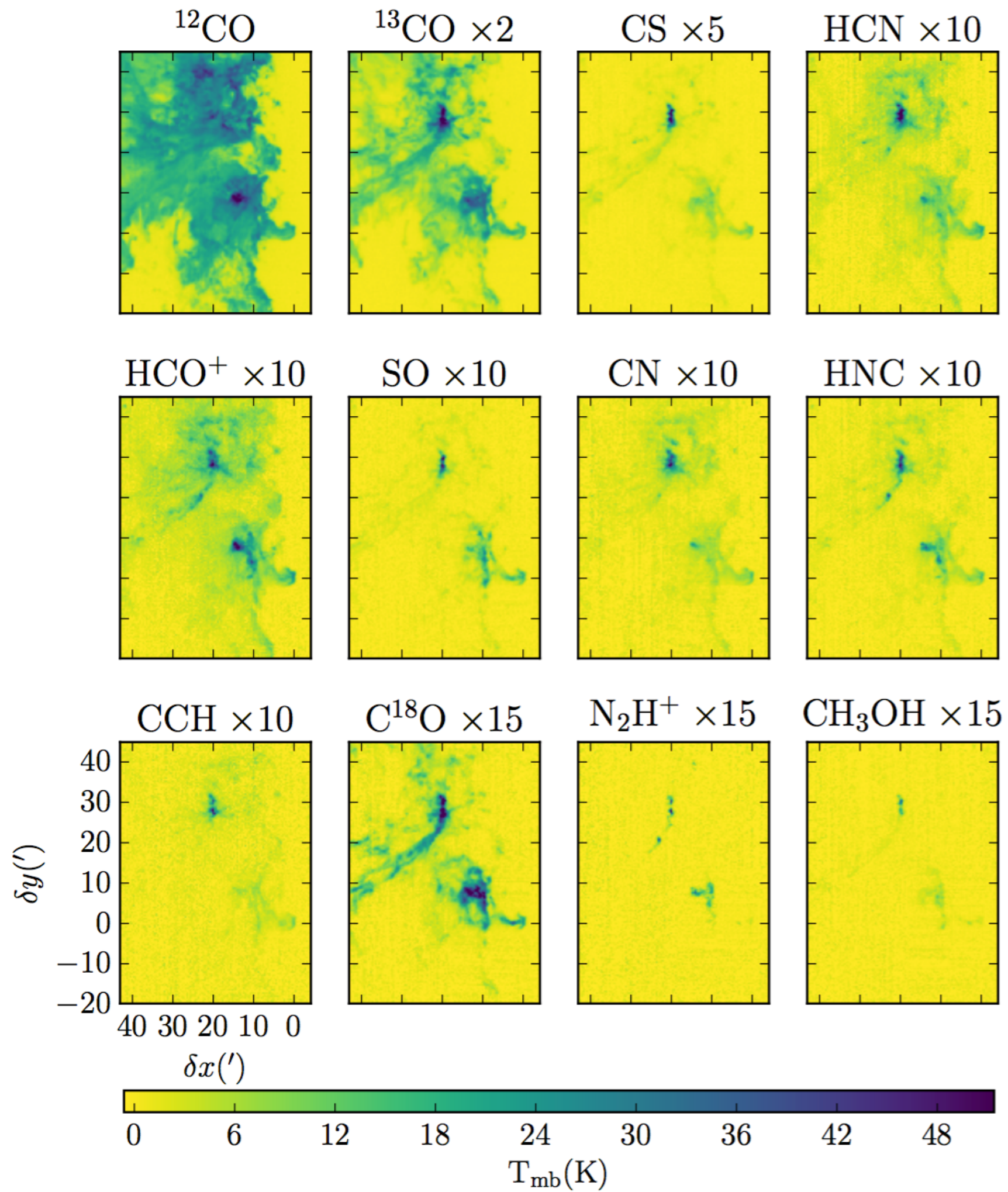
- Dans la partie interne de la galaxie, la pression et le taux d'injection d'énergie turbulente sont 100 fois plus grands que dans la partie externe, où il se forme peu d'étoiles.
- La dispersion de vitesse n'augmente que d'un facteur 2-3 indiquant que l'énergie cinétique est dans des modes compressifs.
 - La gravité et la rétro-action stellaire sont des agents compressifs
 - La gravité semble être dominante car on n'observe pas une différence significative dans l'énergie cinétique des nuages avec ou sans formation d'étoiles jeunes.
- L'auto-gravité n'est pas suffisante pour expliquer la dispersion de vitesse : rétro-action stellaire ou gravité des étoiles ?

Orion-B

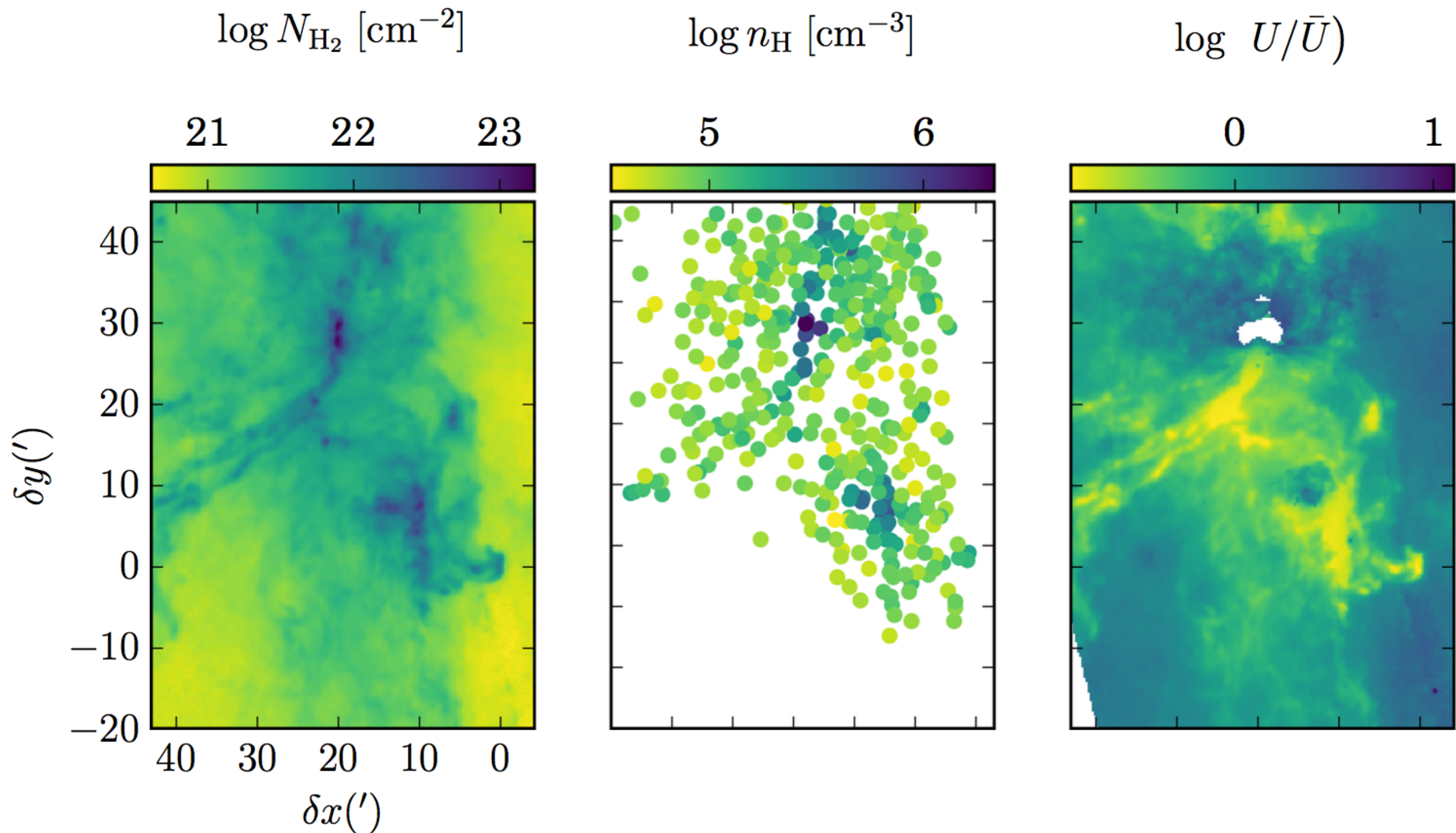
- Pety et al. (2017), Gratier et al. (2017), Orkisz et al. (2017)
- Observation
IRAM-30m - 84 à 116 GHz, 26 arcsec de résolution sur un degré carré.
- Plusieurs transitions, dont ^{12}CO , ^{13}CO , C^{18}O , C^{17}O , HCN, HNC, ^{12}CN , C_2H , HCO^+ , N_2H^+ (1–0), ^{12}CS , ^{32}SO , SiO, c- C_3H_2 , CH_3OH .



Composite image of the ^{12}CO (blue), ^{13}CO (green), C^{18}O (red) (1–0) peak-intensity main-beam temperature.



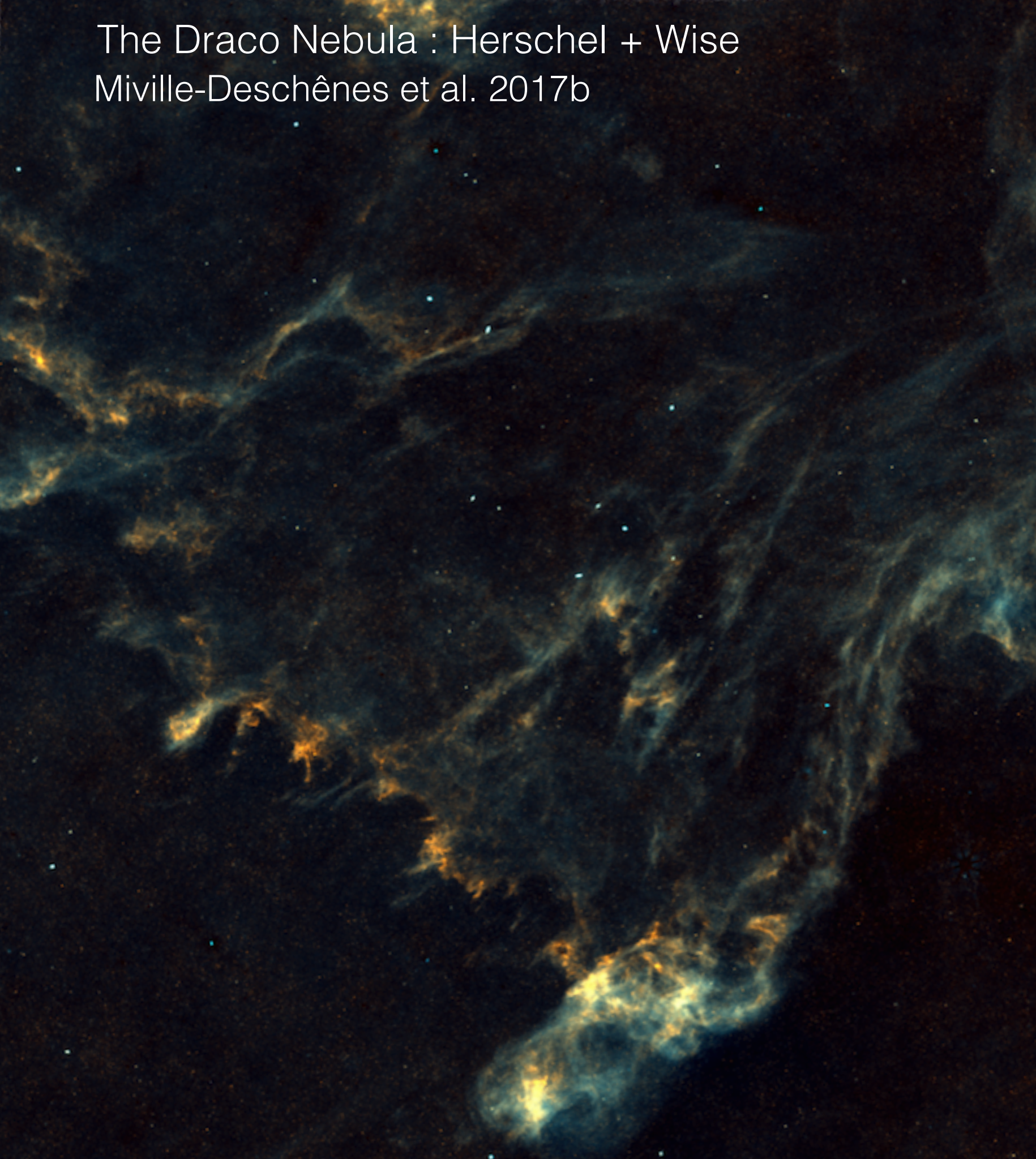
Orion-B : analyse PCA



Gratier et al. (2017)

The Draco Nebula : Herschel + Wise

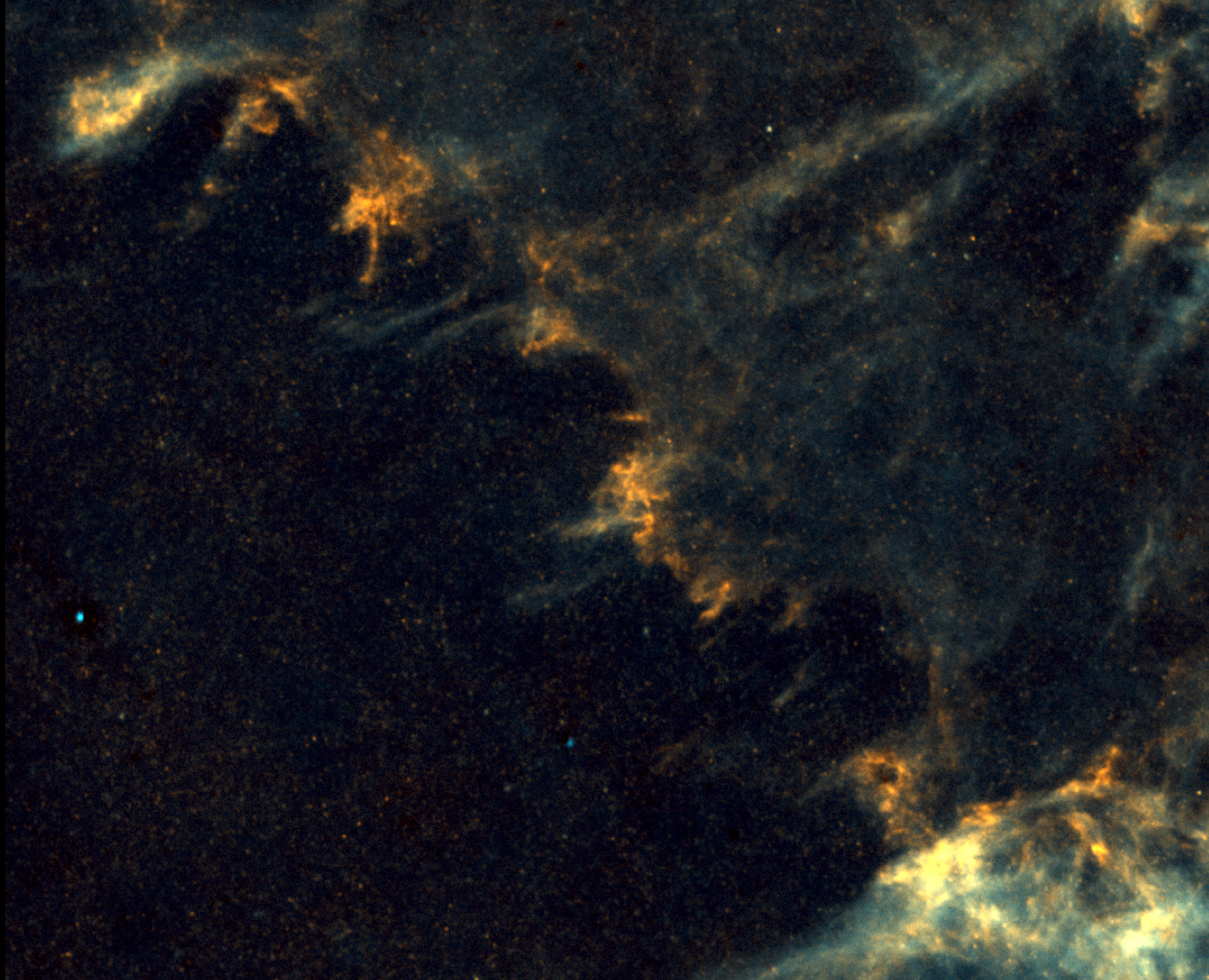
Miville-Deschênes et al. 2017b

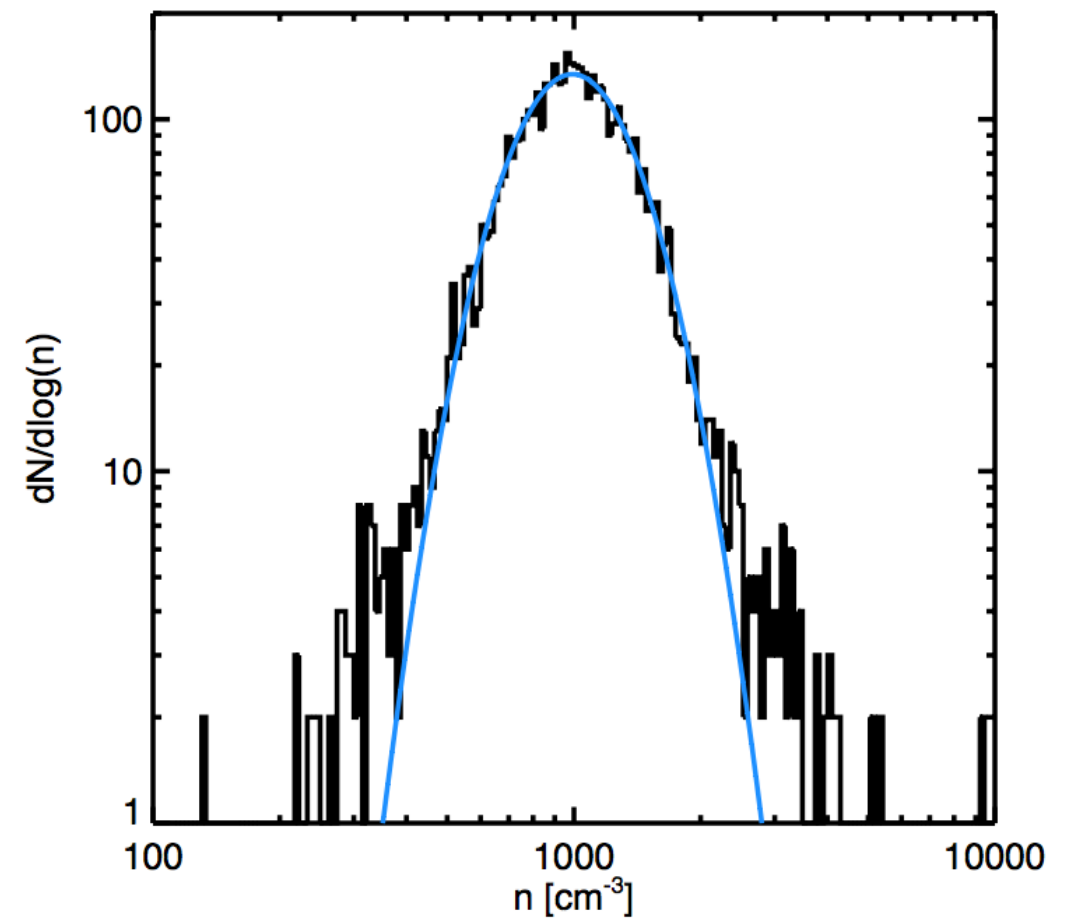
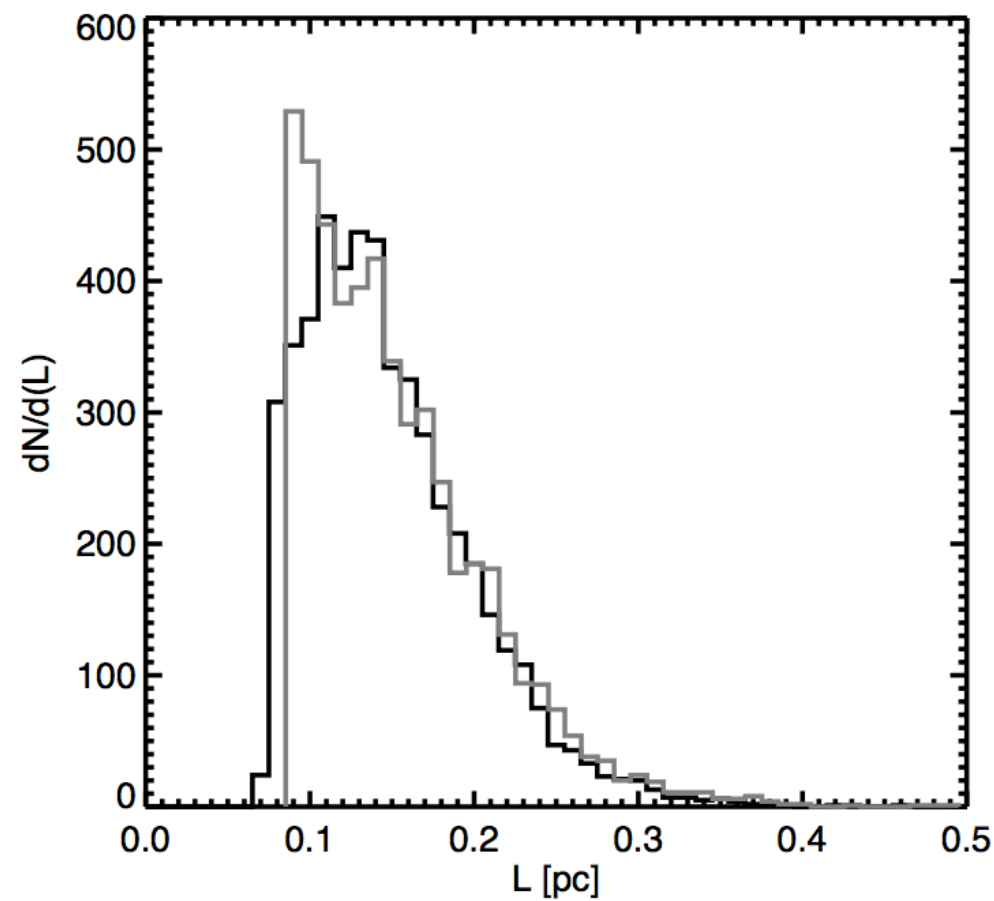


La fontaine galactique : un laboratoire pour étudier la formation des structures dans des écoulements convergeants.

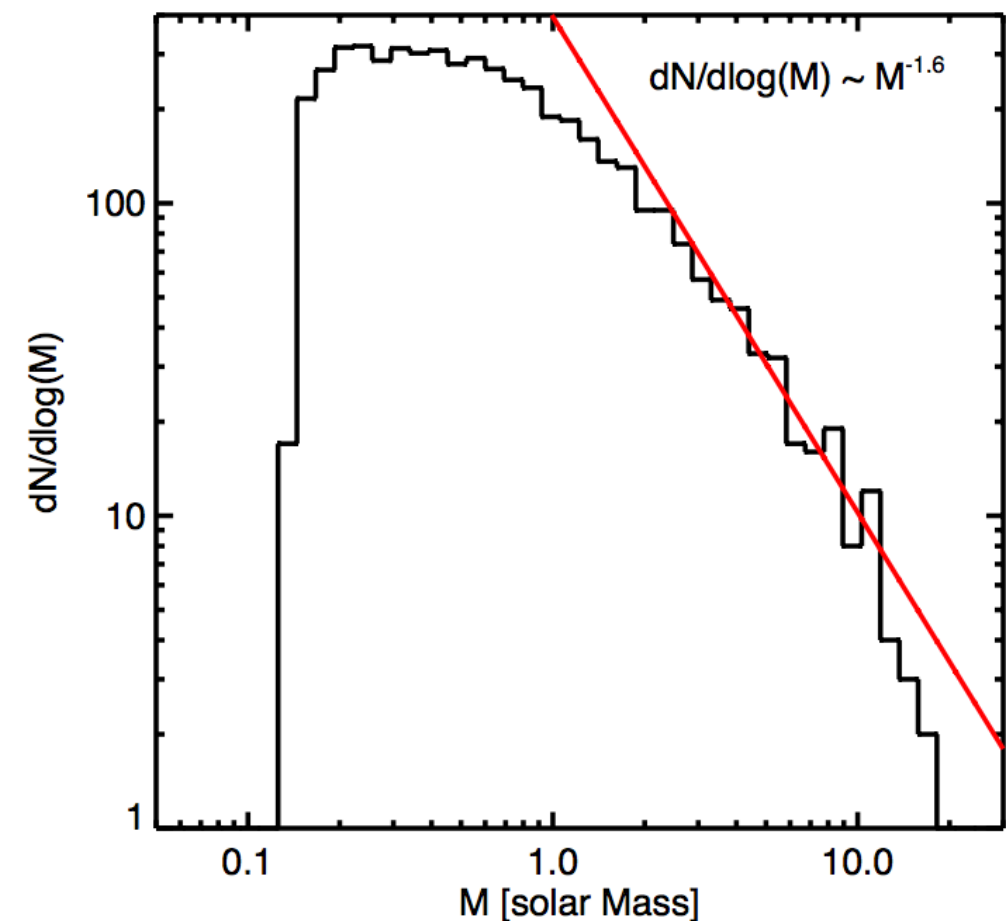
Les questions

- Comment la matière se condense et se refroidit, avant de former des étoiles ?
- Gravité vs turbulence MHD vs instabilité thermique
- Comment et à quelle échelle l'énergie turbulente est-elle dissipée ?





- Non-gravitationnaly bound
- Density PDF is log-normal
- Mass spectrum slope similar to dense cores
- MHD turbulence + thermal instability at the origin of fundamental properties of the ISM structure



La lumière diffusée et la structure à petite échelle de la matière interstellaire

- Le $P(k)$ de la densité de colonne de la matière nous renseigne directement sur les propriétés de la turbulence (sub/super sonique, magnétique, multi-phasique)
- On sait depuis longtemps que $P(k) \sim k^{-2.9}$, ce qui est loin de la prédiction de Kolmogorov ($k^{-3.66}$).
- Cet aplatissement du spectre peut-être causé par un nombre de Mach élevé ou par la formation de structures denses via l'instabilité thermique
- La mesure à très petite échelle pourrait nous renseigner directement sur le processus de dissipation d'énergie turbulence.

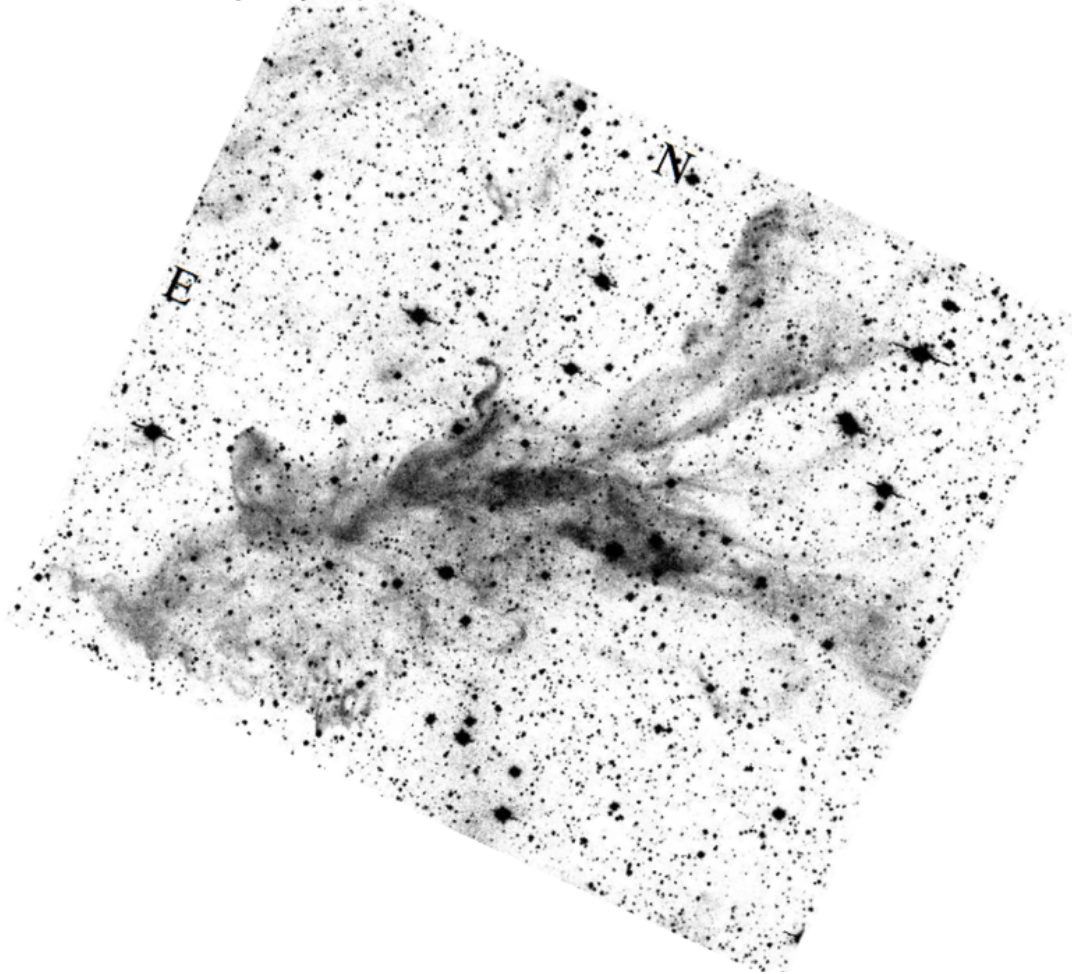
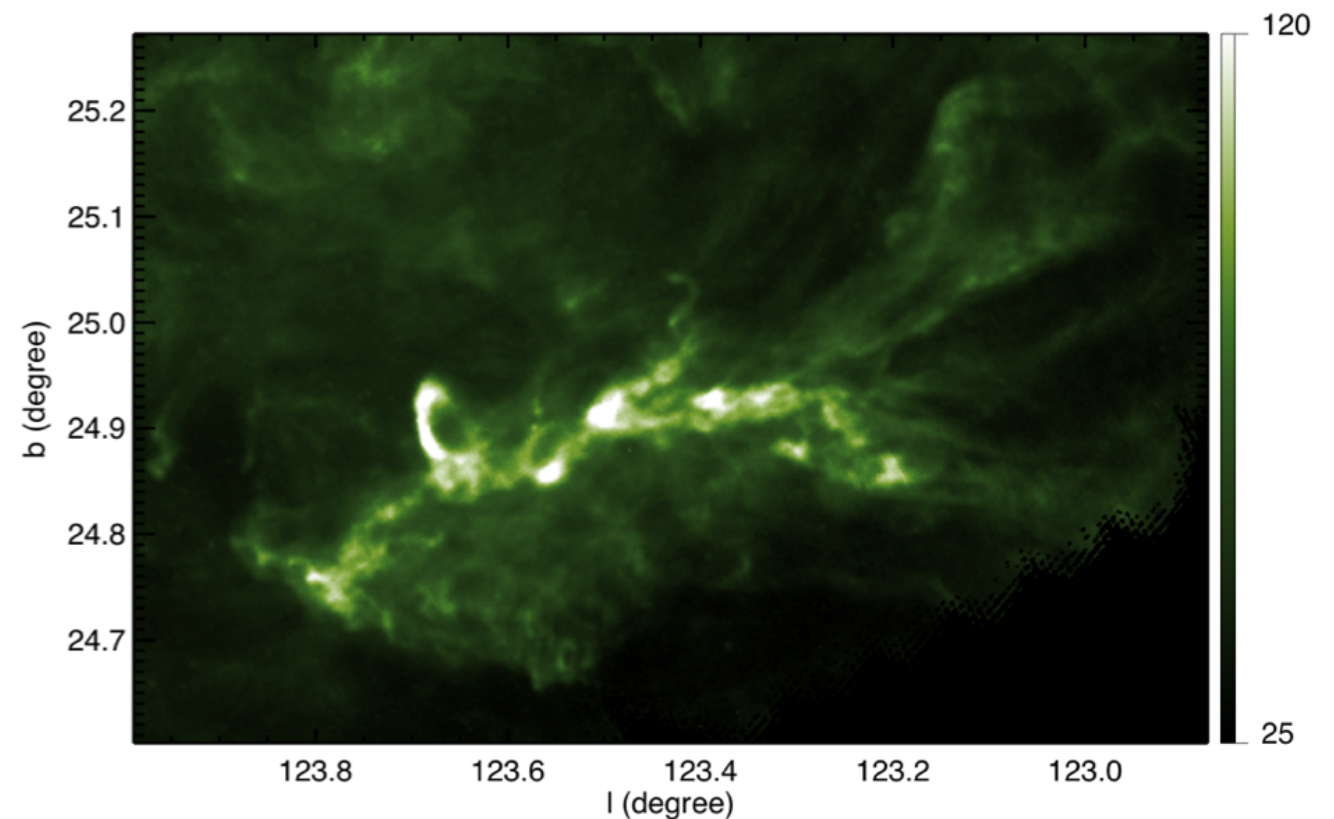
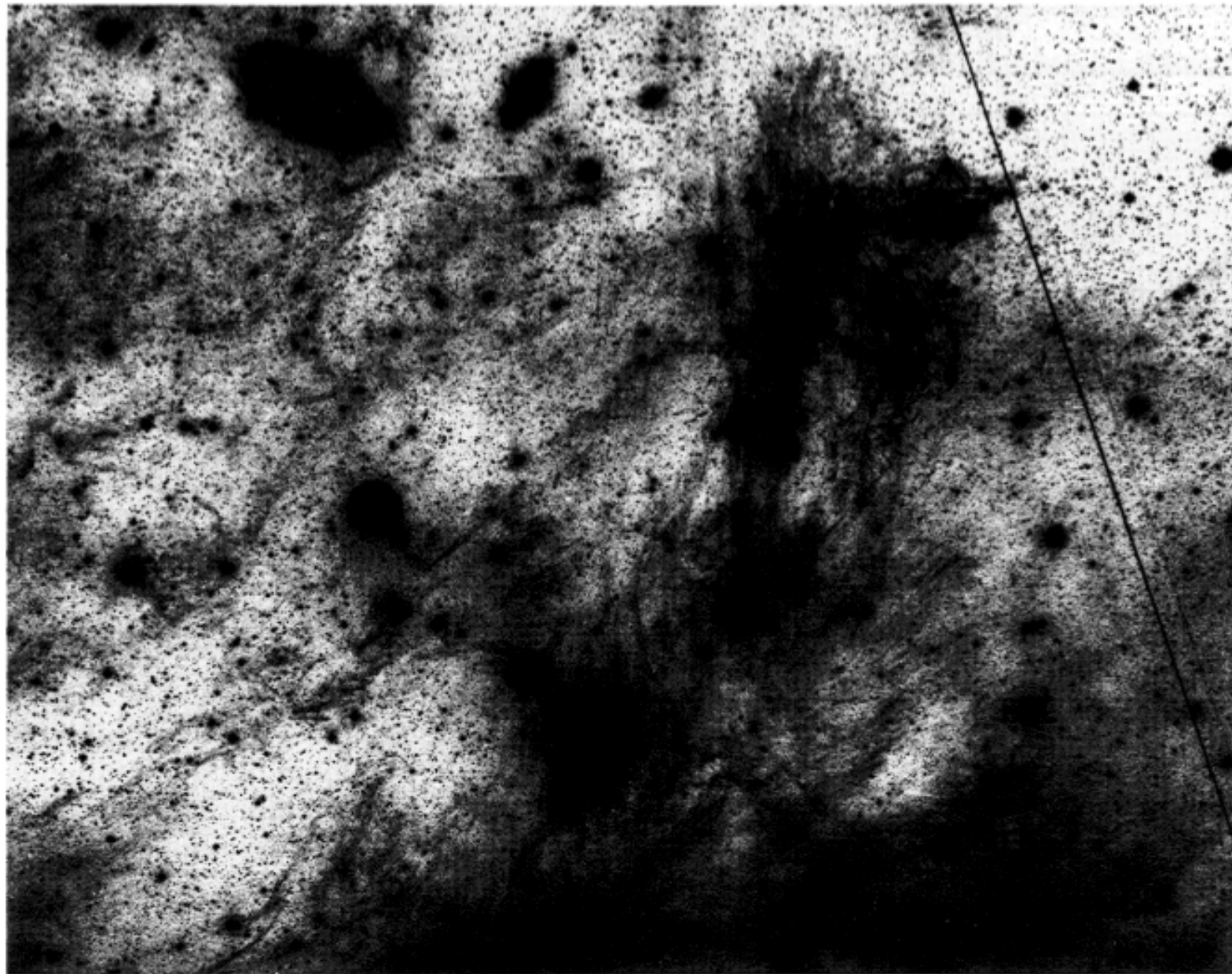


Image en bande I - Kitt Peak.
Zagury et al. (1999)



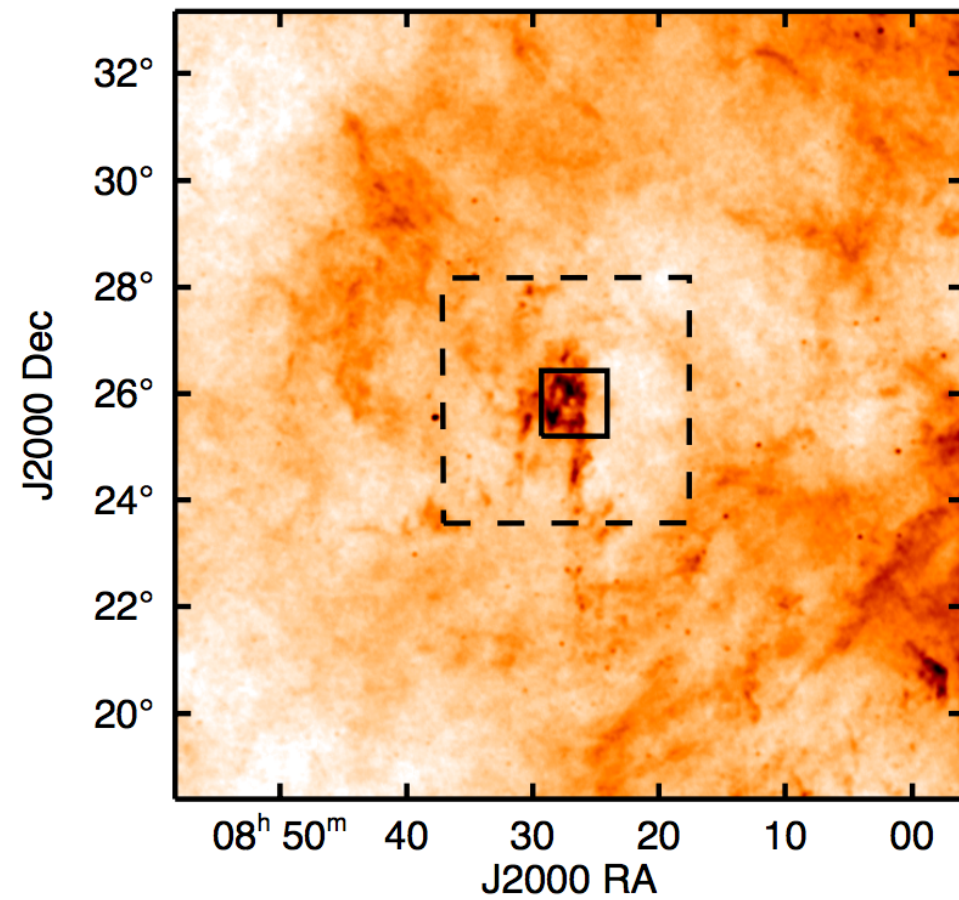
Herschel SPIRE - 250 micron
Miville-Deschênes et al. (2010)

Dépoussiérons !

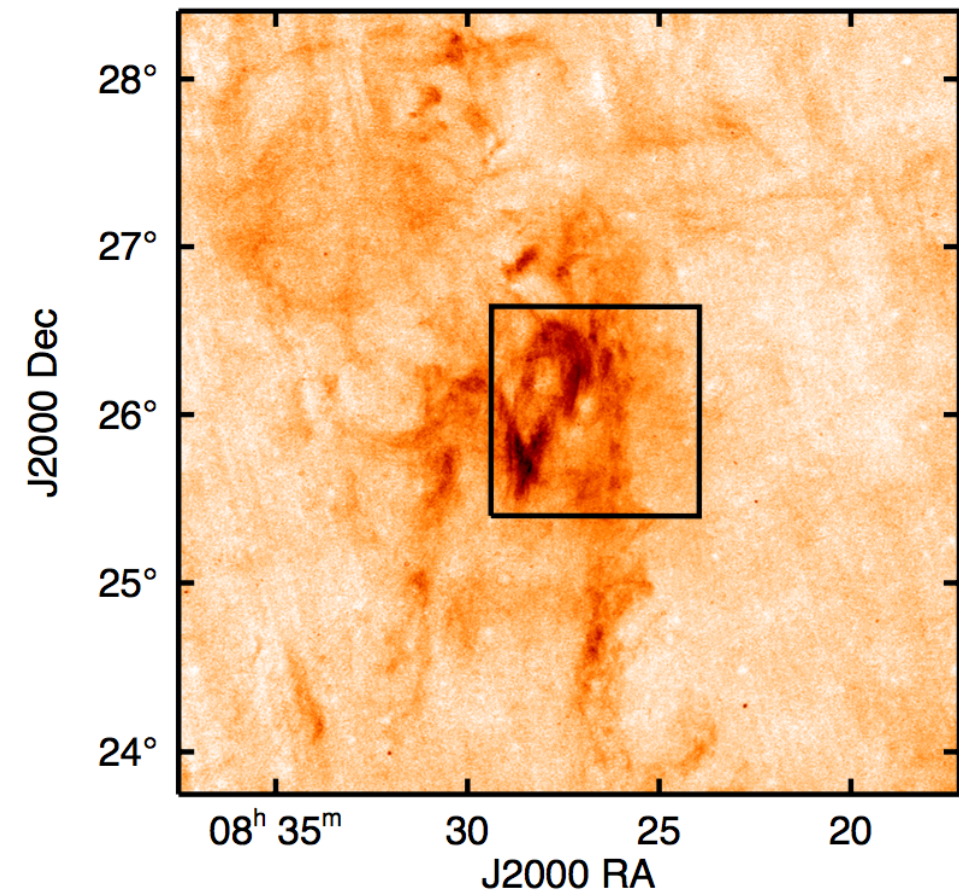


Nébulosité à haute latitude galactique
Palomar plates II - Sandage (1976)

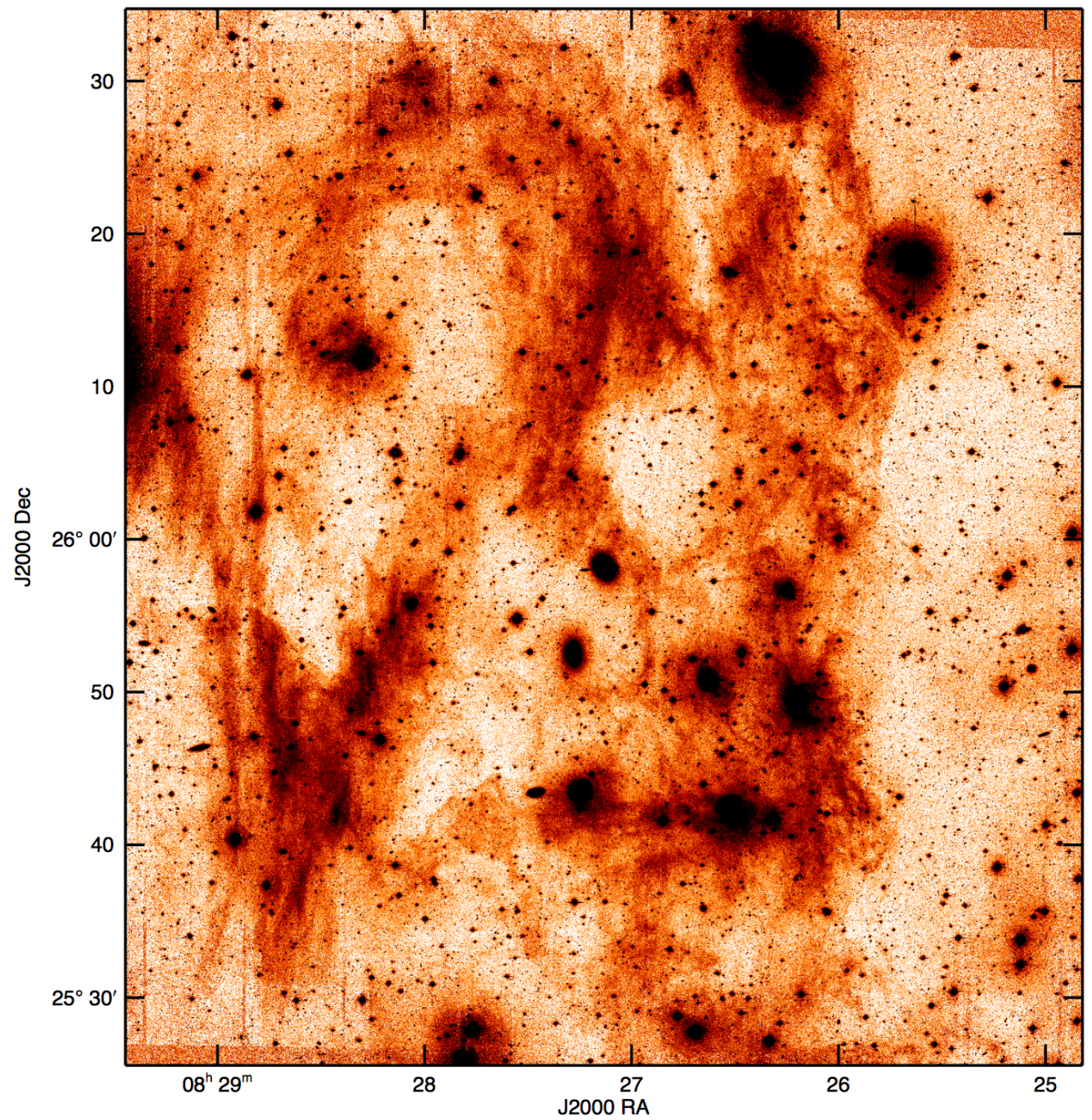
Planck radiance - 5'



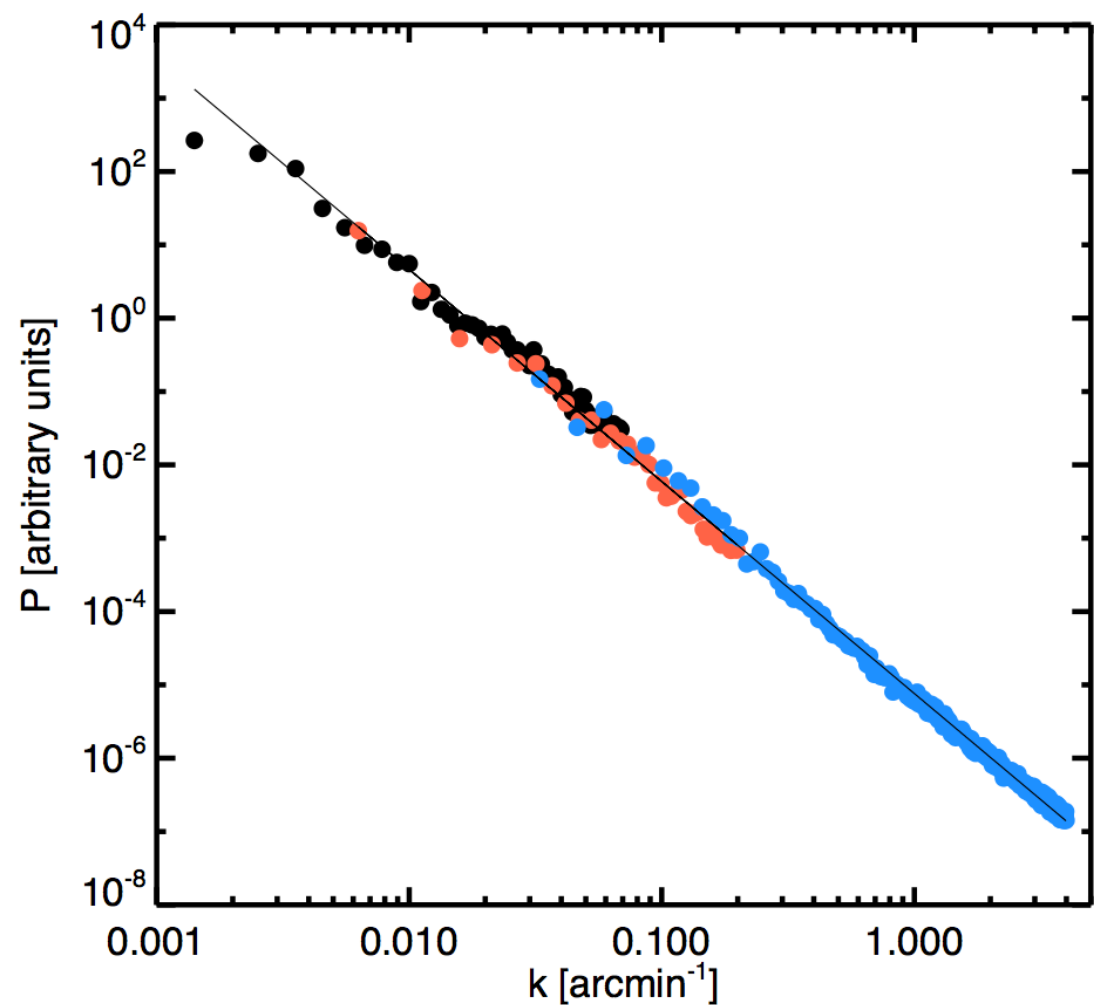
WISE 12 micron - 15''



CFHT Megacam g band - 1.5''

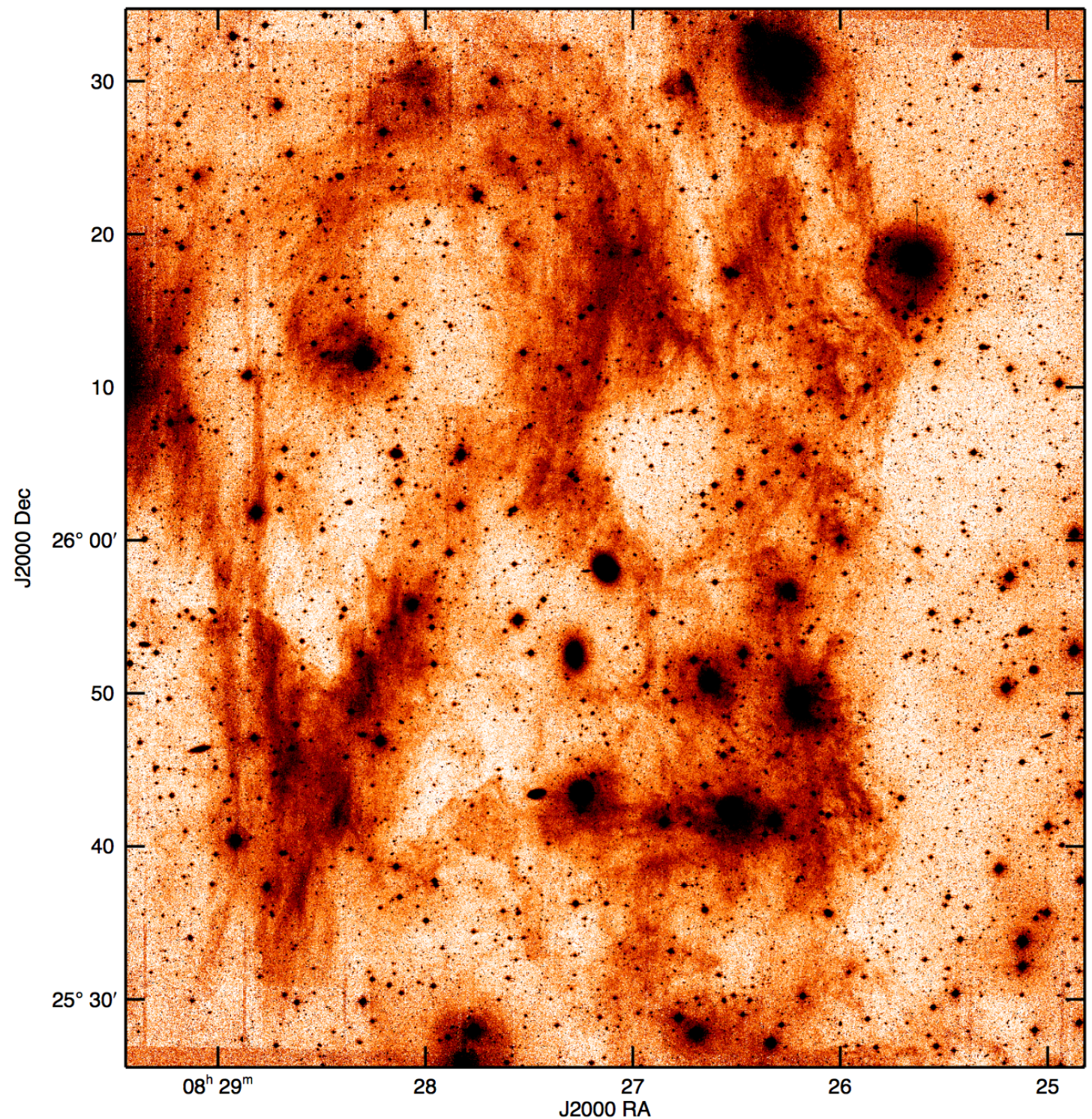


Miville-Deschênes, Duc et al. 2016



- $P(k) \sim k^{-2.9 \pm 0.1}$
- This is not Kolmogorov turbulence
 - Supersonic turbulence ?
 - Thermal instability ?
- No damping at small scales...
 - smallest scale probed : 0.01 pc comparable to the ambipolar diffusion scale of the CNM
 - Uncertainty on the distance...

CFHT Megacam g band - 1.5''

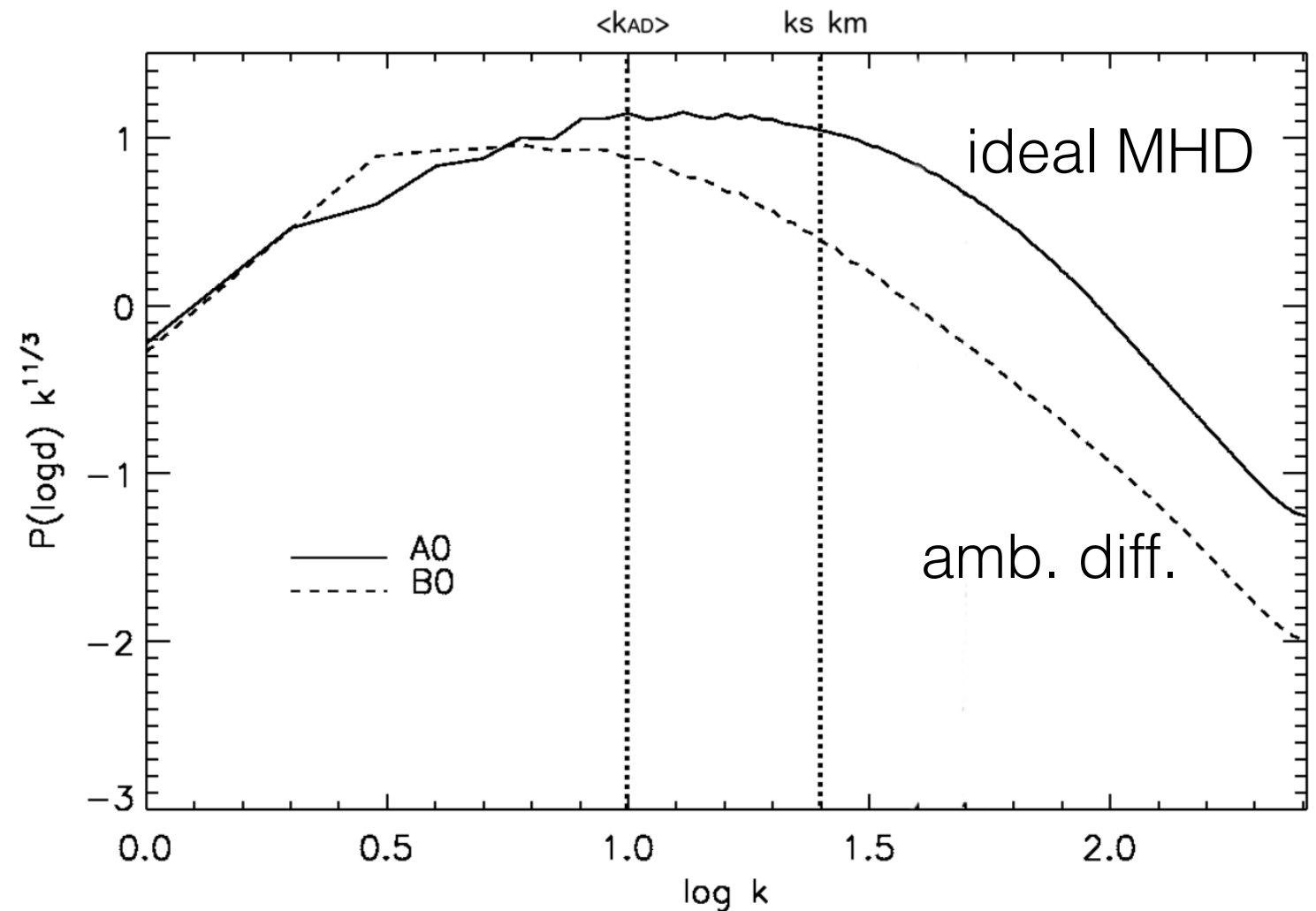


Miville-Deschênes et al. 2016

Tracing ambipolar diffusion with observations ?

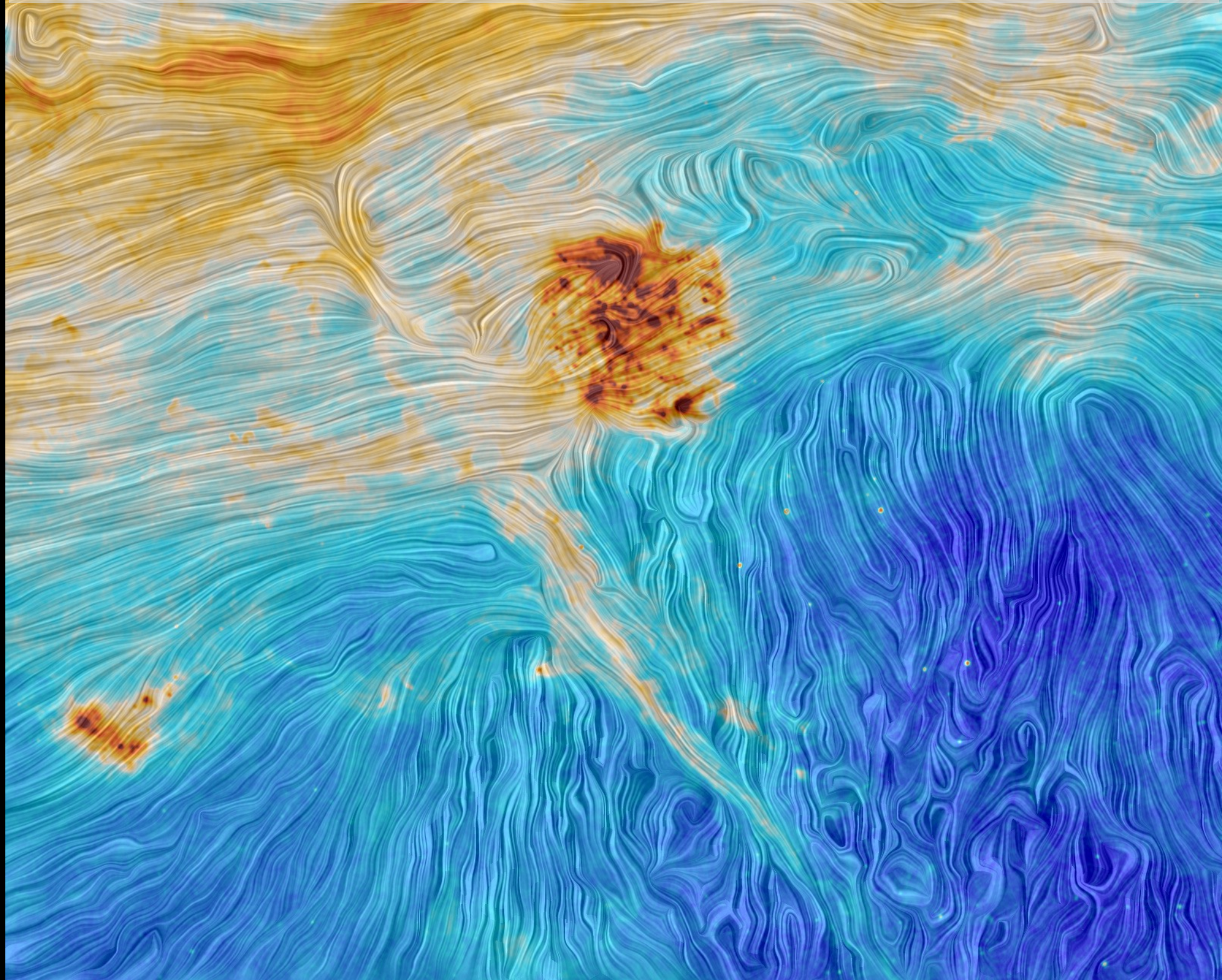
- Numerical simulations :
supersonic, decaying,
isothermal, without
gravity
 - $P(k)$ of n is flatter than
Kolmogorov (typical
for supersonic flows)
 - Ambipolar diffusion
produces a damping
of density fluctuations
at larger scale than
normal turbulent
energy dissipation
- Can we see that in
observations ?

Power spectrum of density



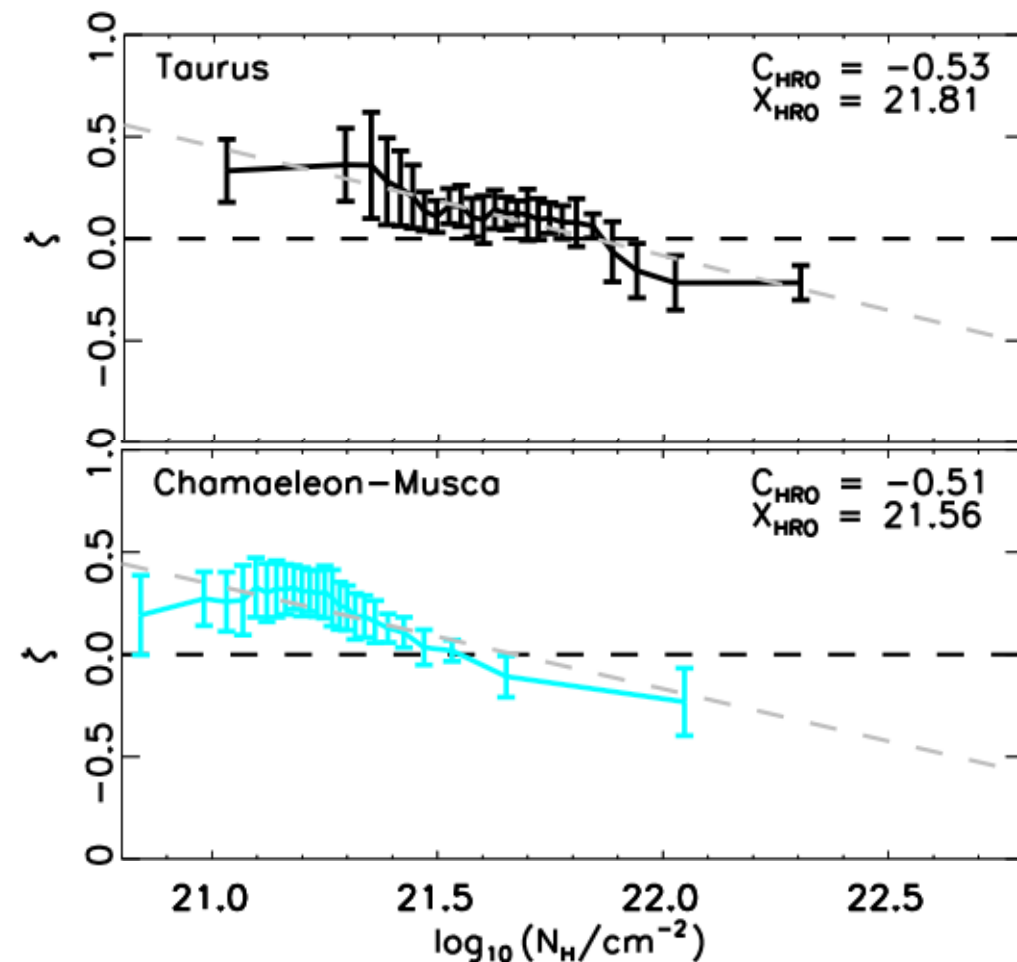
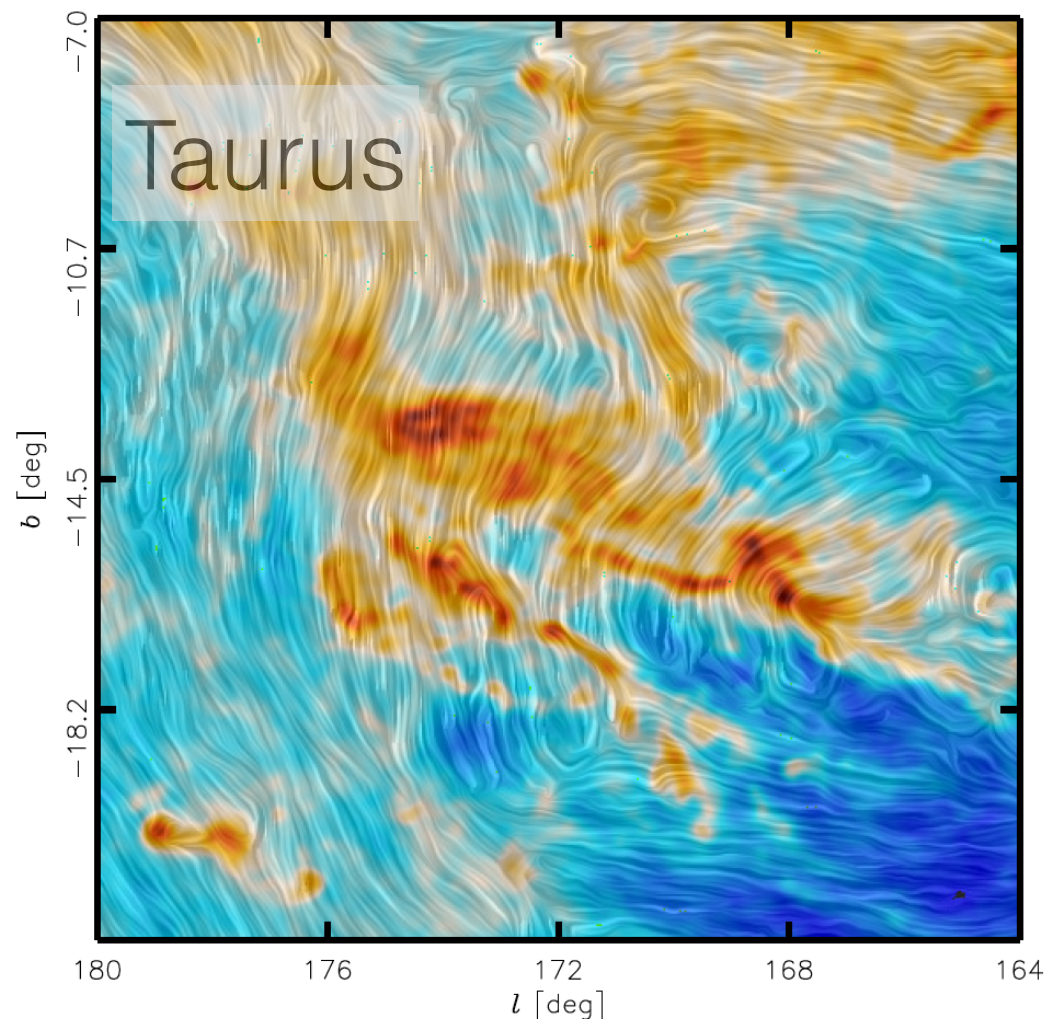
Ntormousi, E. et al. (2016)

Le rôle du champ magnétique
révélé par l'émission polarisée de la poussière
Planck 353 GHz



Planck intermediate results. XXXV. Probing the role of the magnetic field in the formation of structure in molecular clouds

2016, A&A, 586, A138



- Etude de la corrélation spatiale entre B-n pour 10 nuages moléculaires proches.
- **Resultat** : n et B sont parallèles dans le milieu diffus et perpendiculaire dans le milieu dense.
- Cet effet avait été vu (prédit ?) à l'aide de simulations numériques par Soler et al. (2013)

Conclusion

- L'évolution de la matière interstellaire dans les galaxies est guidée par une turbulence MHD multi-phasique, combinée à l'action de la gravité et de la rétro-action stellaire.
- Il est nécessaire de comprendre cette physique complexe de manière globale
- Période excitante suite aux résultats marquants d'Herschel sur le milieu interstellaire et la formation des étoiles
- Potentiel pour l'imagerie visible (lumière diffusée)
- Ere de la spectro-imagerie grand champ (mm et radio - IRAM, ALMA, SKA)
- Poursuivre l'exploration en polarisation (visible, infrarouge, submm)
- Comparaison directe avec les simulations numériques
- Méthode d'analyse issues des "data science"

21 cm - GALFA, Arecibo. credit Joshua Peek

Conclusion

- L'évolution de la matière interstellaire dans les galaxies est guidée par une turbulence MHD multi-phasique, combinée à l'action de la gravité et de la rétro-action stellaire.
- Il est nécessaire de comprendre cette physique complexe de manière globale
- Période excitante suite aux résultats marquants d'Herschel sur le milieu interstellaire et la formation des étoiles
- Potentiel pour l'imagerie visible (lumière diffusée)
- Ere de la spectro-imagerie grand champ (mm et radio - IRAM, ALMA, SKA)
- Poursuivre l'exploration en polarisation (visible, infrarouge, submm)
- Comparaison directe avec les simulations numériques
- Méthode d'analyse issues des "data science"

21 cm - GALFA, Arecibo. credit Joshua Peek