

Cygnus X et le plan Galactique vu par Herschel



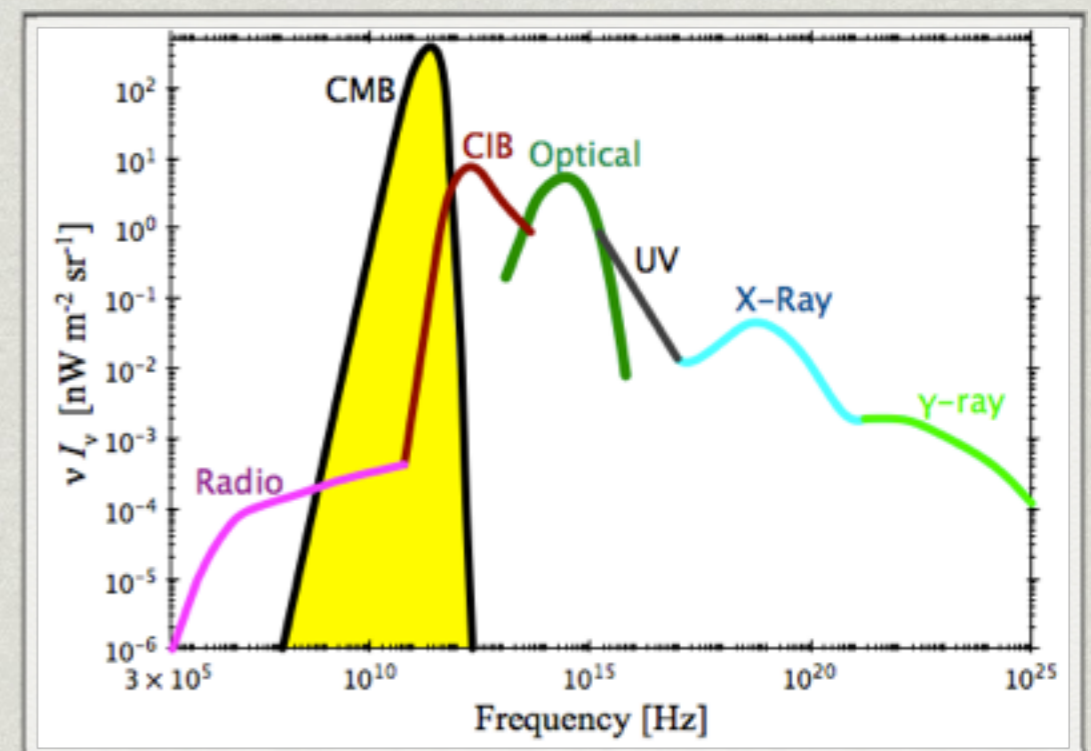
Observer l'Univers Froid avec le satellite Herschel

Marc Sauvage (CEA/CNRS/Univ. Paris Diderot)

Remerciements: David Elbaz, Frédéric Galliano, Matt Griffin, Suzanne Madden, Göran Pilbratt, Laurent Vigroux

Pourquoi IR lointain = Univers Froid?

- * Quels types d'émission collecte-t-on dans l'infrarouge lointain?
 - * Emission thermique: on parle de corps ayant des températures de qqs. K à une centaine de K.
 - * Photons IR = photons de faible énergie = processus de faible énergie:
 - * raies de vibration/rotation moléculaires: phase moléculaire du milieu interstellaire.
 - * raies de structure fine d'atomes neutres ou ionisés: état énergétique du milieu interstellaire.
- * Quels phénomènes?
 - * Les phases précoces des principaux "objets" astrophysiques (étoiles, galaxies...) présentent les caractéristiques communes d'être soit associées à des phénomènes faiblement énergétiques, ou de se produire dans des régions denses de l'Univers.
- * L'astronomie étant "réduite" à l'observation, il est en général impossible de former des scénarios plausibles en ignorant un pan entier du spectre électromagnétique.
 - * Environ la moitié de l'énergie émise par les objets astrophysiques nous parvient dans le domaine infrarouge et sub-millimétrique (et ce, en excluant le fond cosmologique)

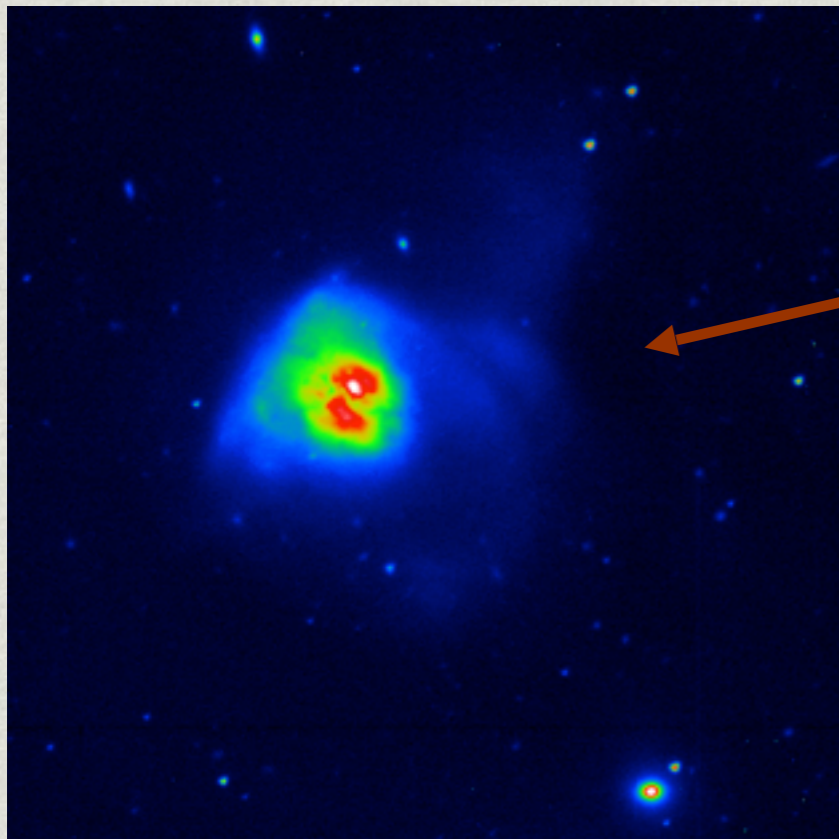


Pourquoi observer en infrarouge?

Question de bilan énergétique: notre galaxie émet **30%** de sa luminosité en infrarouge, d'autres, plus "actives", **90%**

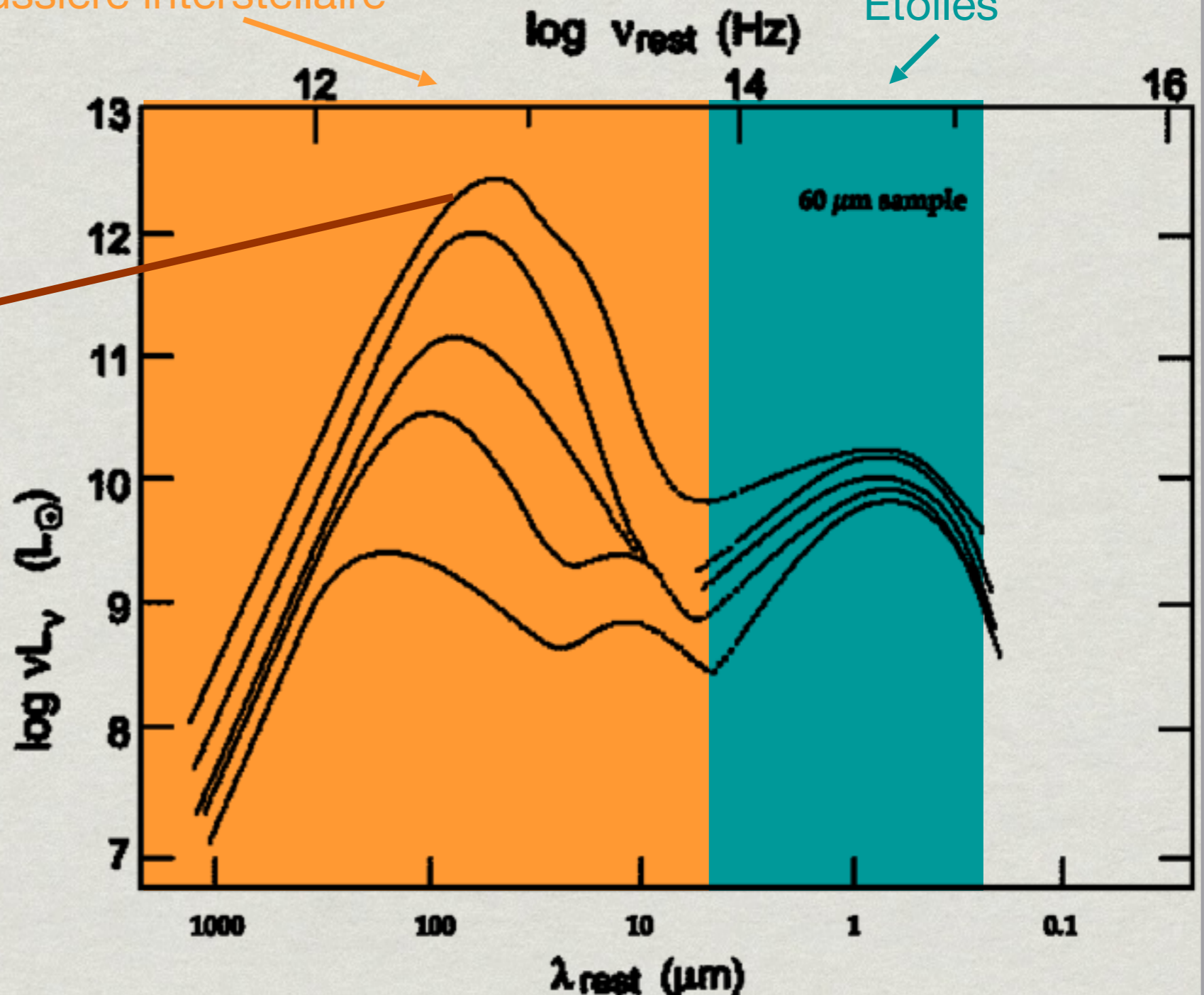
Poussière interstellaire

Etoiles



Arp 220, image visible en fausses couleurs, une galaxie ultra-lumineuse en infrarouge

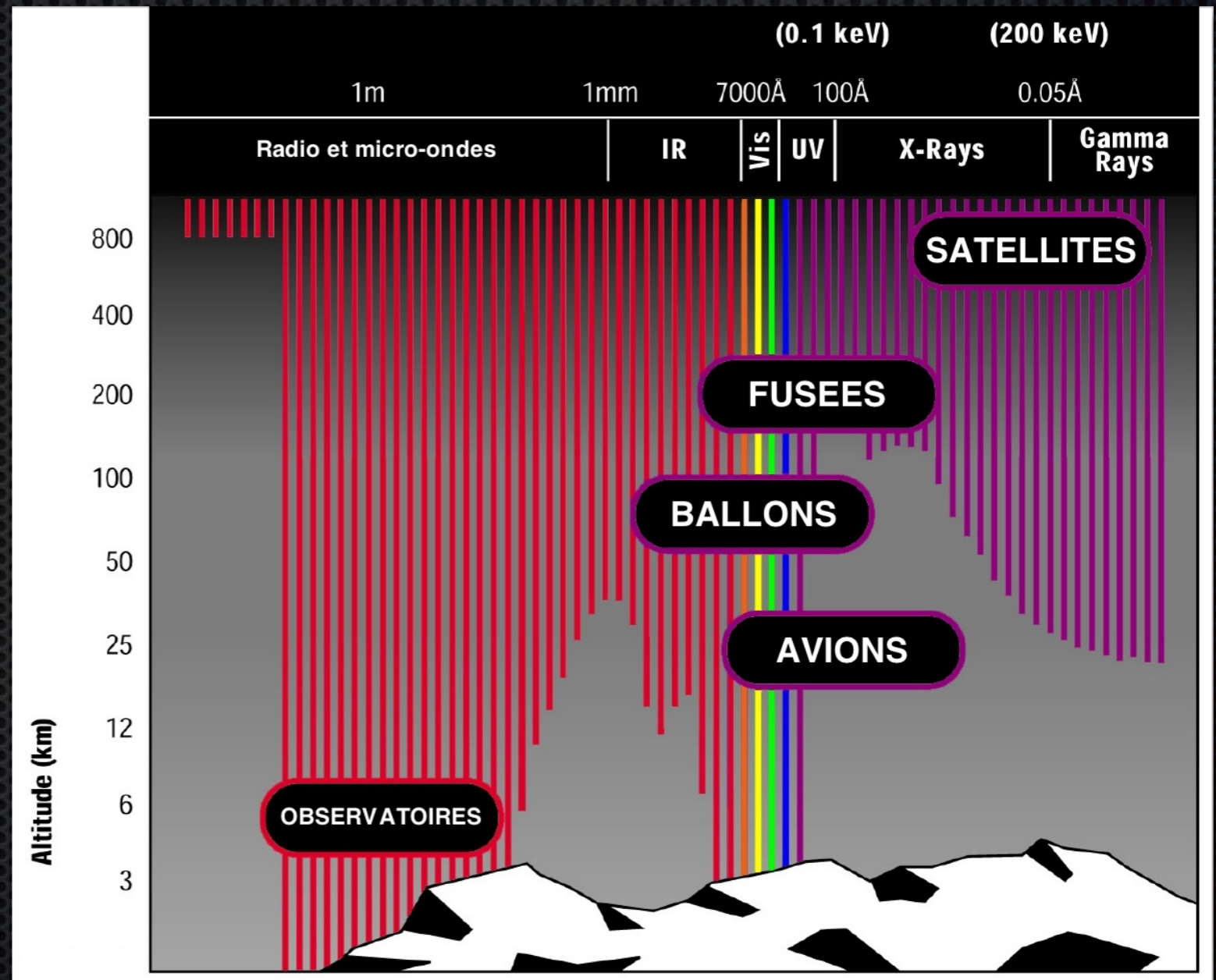
$$L_{\text{IR}} > 10^{12} L_{\odot}$$



Herschel et l'observation en infrarouge

Le rayonnement infrarouge

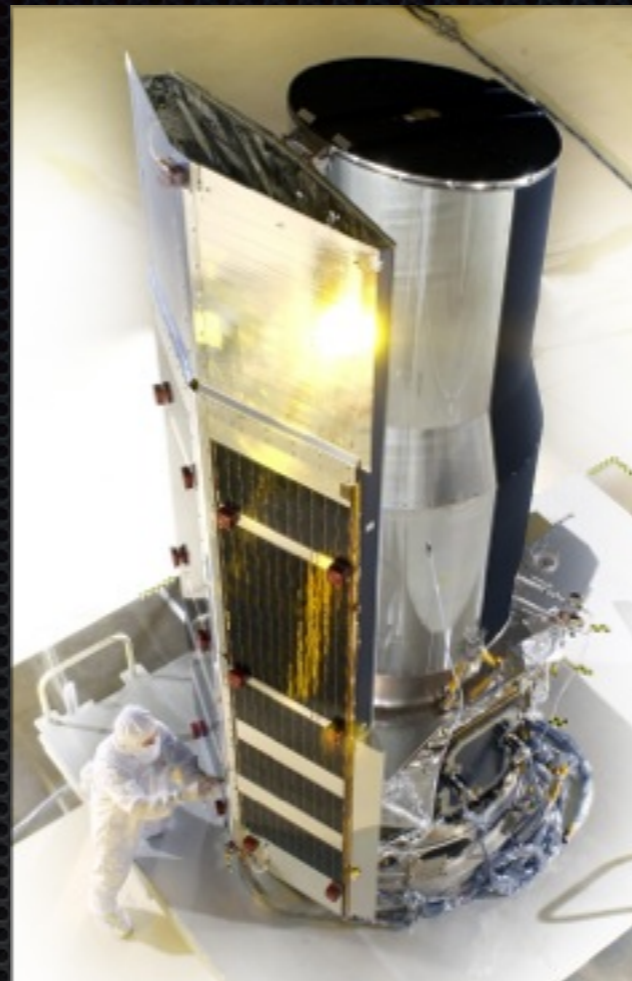
- ✦ Un domaine de longueur d'onde difficile/impossible à exploiter du sol
- ✦ Domaine privilégié d'émission des corps froids de l'univers:
 - ✦ Fond cosmologique
 - ✦ Régions de formation d'étoile
 - ✦ Milieu interstellaire



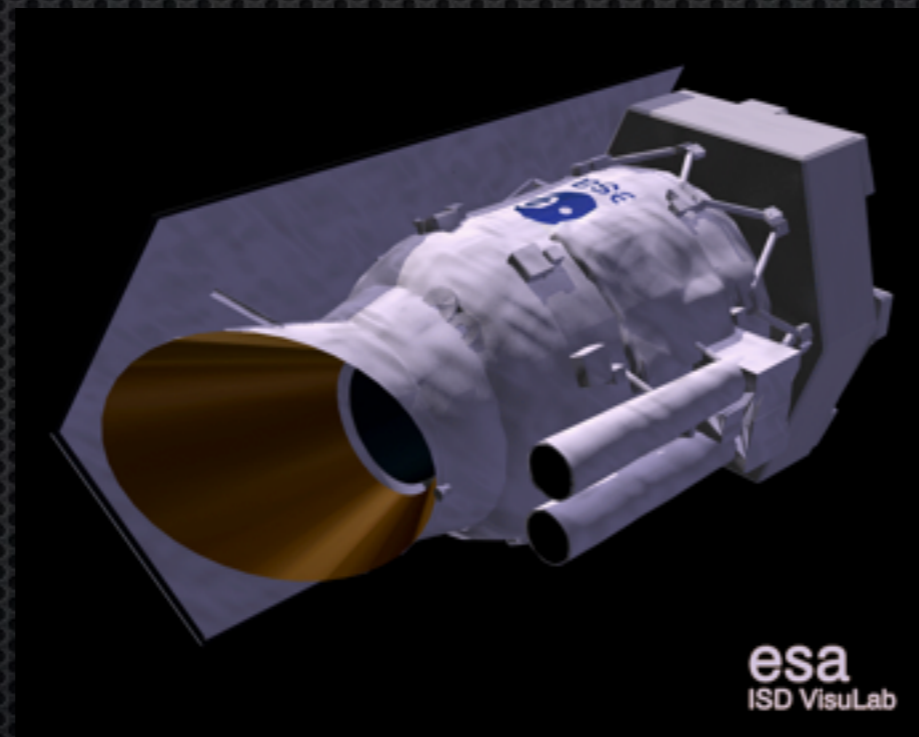
La lignée des satellites infrarouges

IRAS
1983
USA, UK, NL
Télescope 60 cm
Mode défilant
10 - 100 μm

SPITZER
2003
USA
Télescope 80 cm
2 - 200 μm



AKARI
2006
Japon
Télescope 67 cm
Mode pointé
2 - 600 μm



ISO
1995
Europe
Télescope 63 cm
Mode pointé
3 - 200 μm

Un peu d'histoire

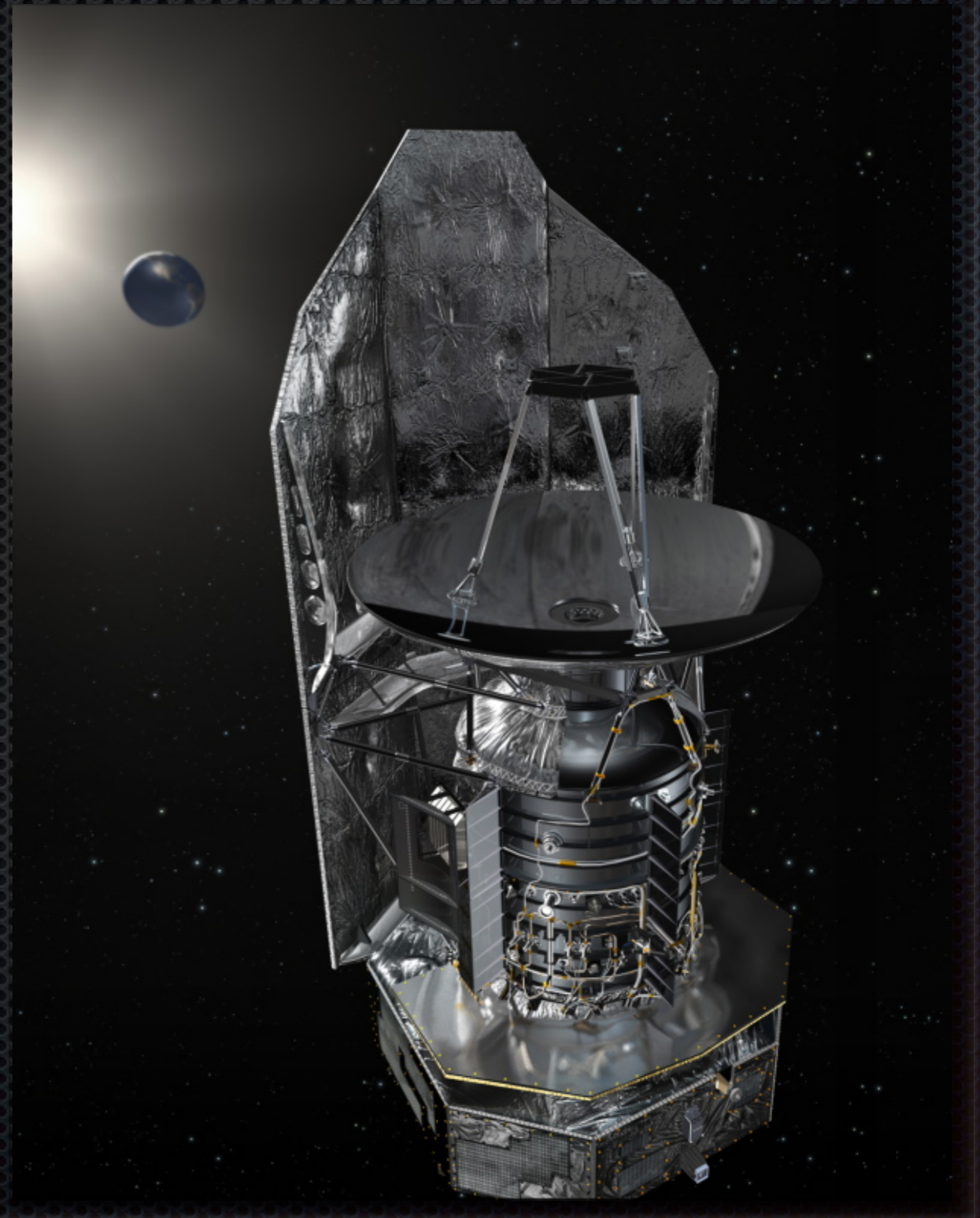
- William Herschel 1738-1822:
 - Découvreur de la planète Uranus.
 - Constructeur d'un des plus grands télescopes de l'époque.
 - Découvreur du rayonnement infrarouge.



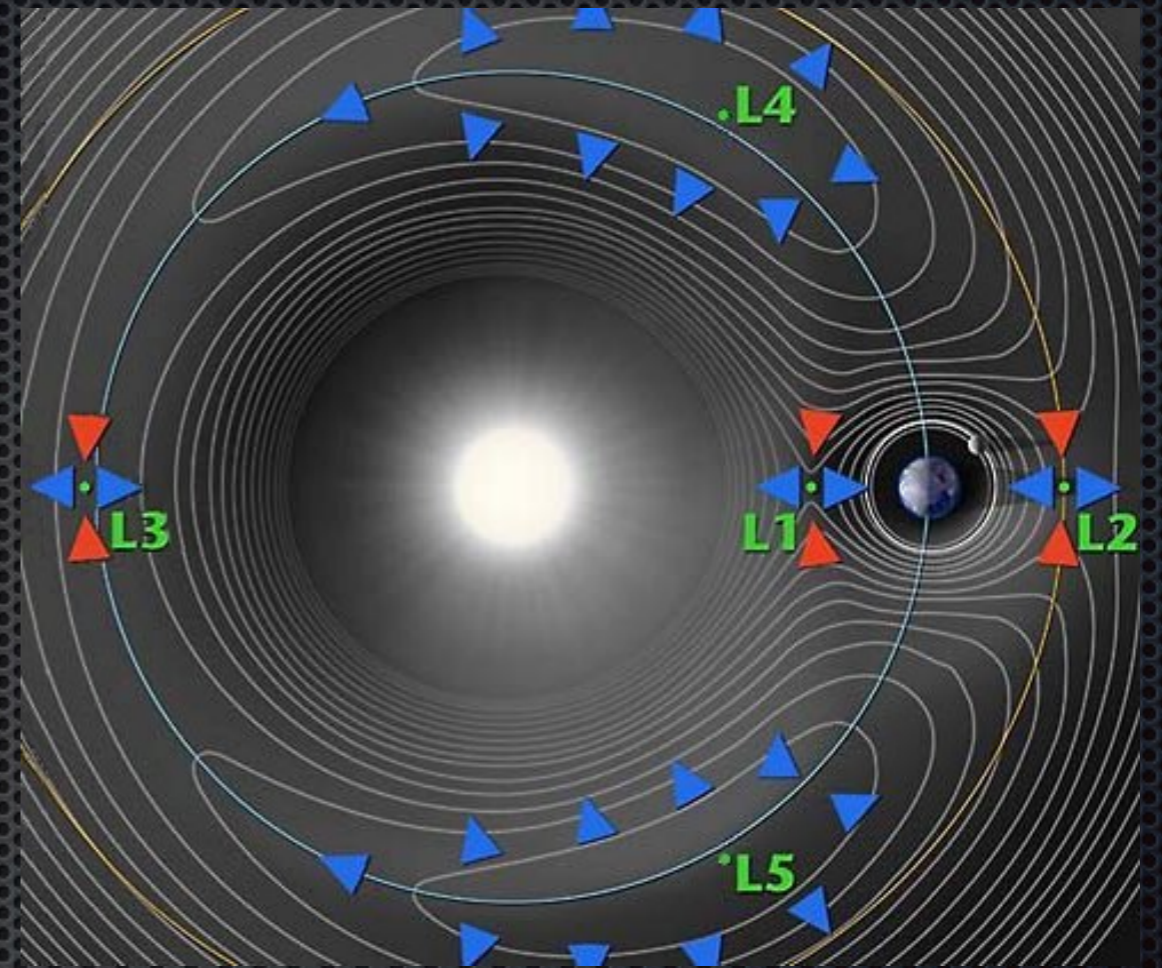
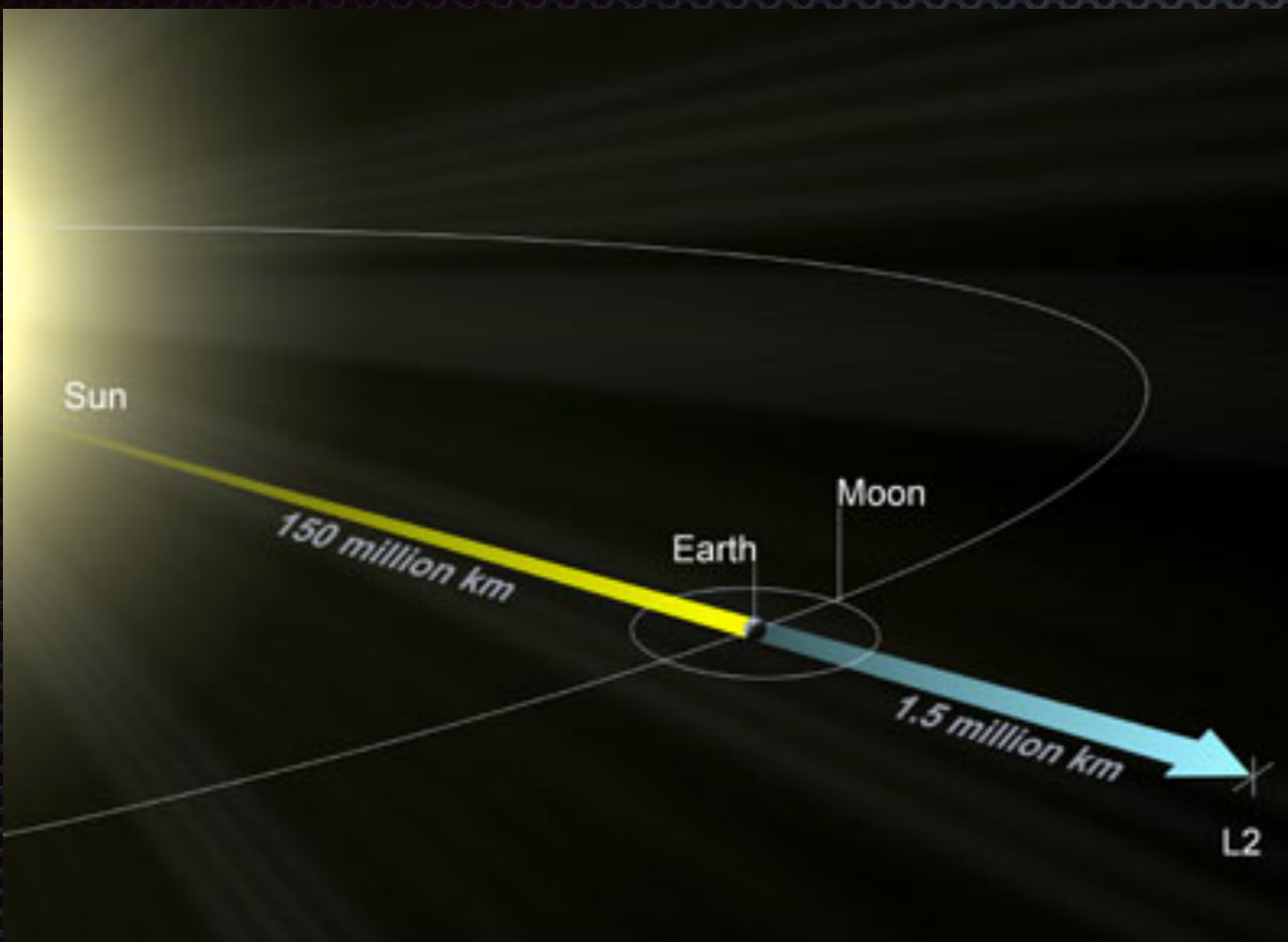
Les découvertes astronomiques de William doivent beaucoup à sa soeur Carolyn

L'observatoire Spatial Herschel

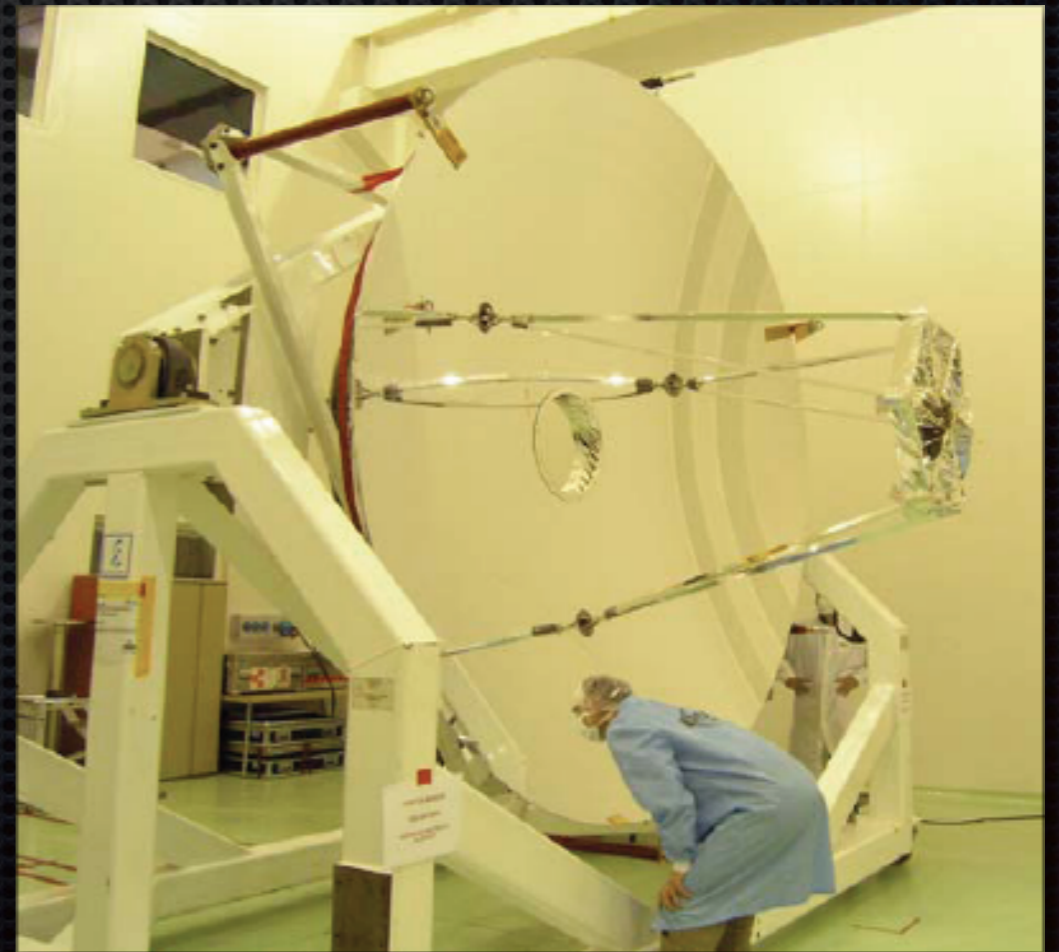
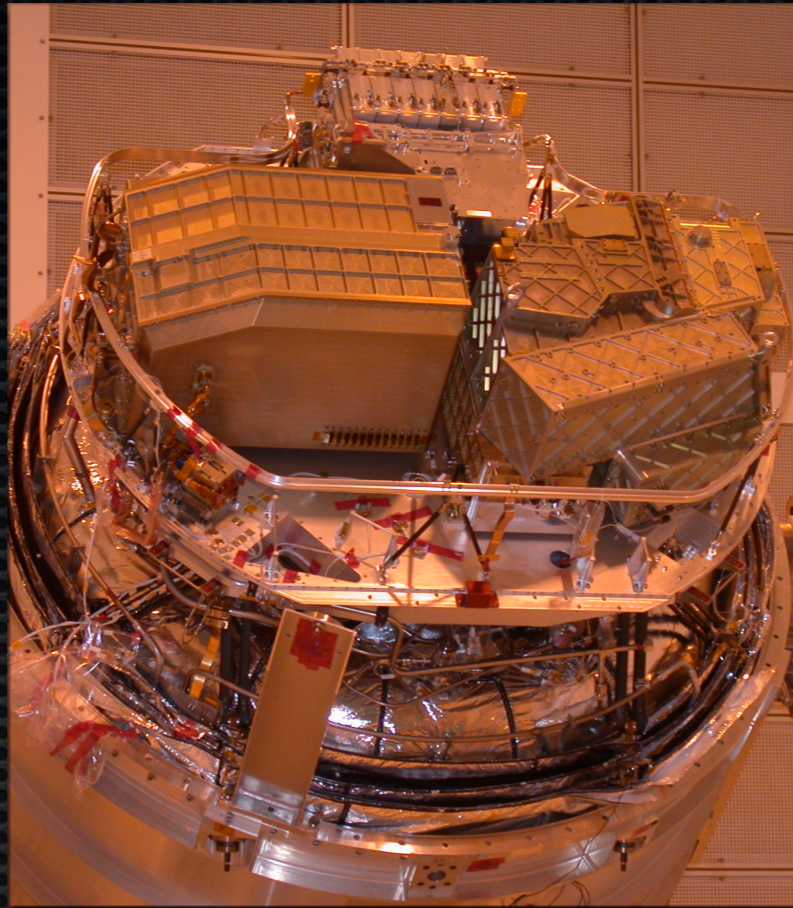
- ✦ Télescope de 3.5m de diamètre, limité par la diffraction à $90\ \mu\text{m}$.
- ✦ En orbite au point L2 du système Terre-Soleil.
- ✦ 3 instruments pour le submillimétrique:
 - ✦ HIFI: spectroscopie hétérodyne haute résolution $100\text{-}600\ \mu\text{m}$.
 - ✦ PACS: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de photoconducteurs et de bolomètres dans la bande $60\text{-}200\ \mu\text{m}$.
 - ✦ SPIRE: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de bolomètres dans la bande $200\text{-}600\ \mu\text{m}$.
- ✦ Durée de vie de presque 4 ans (dont le voyage vers L2), pour 3.5 ans spécifié par la cahier des charges.
 - ✦ il y a deux mois, Herschel était à 70 millions de km de la Terre.



Pourquoi L2 et où est-ce?

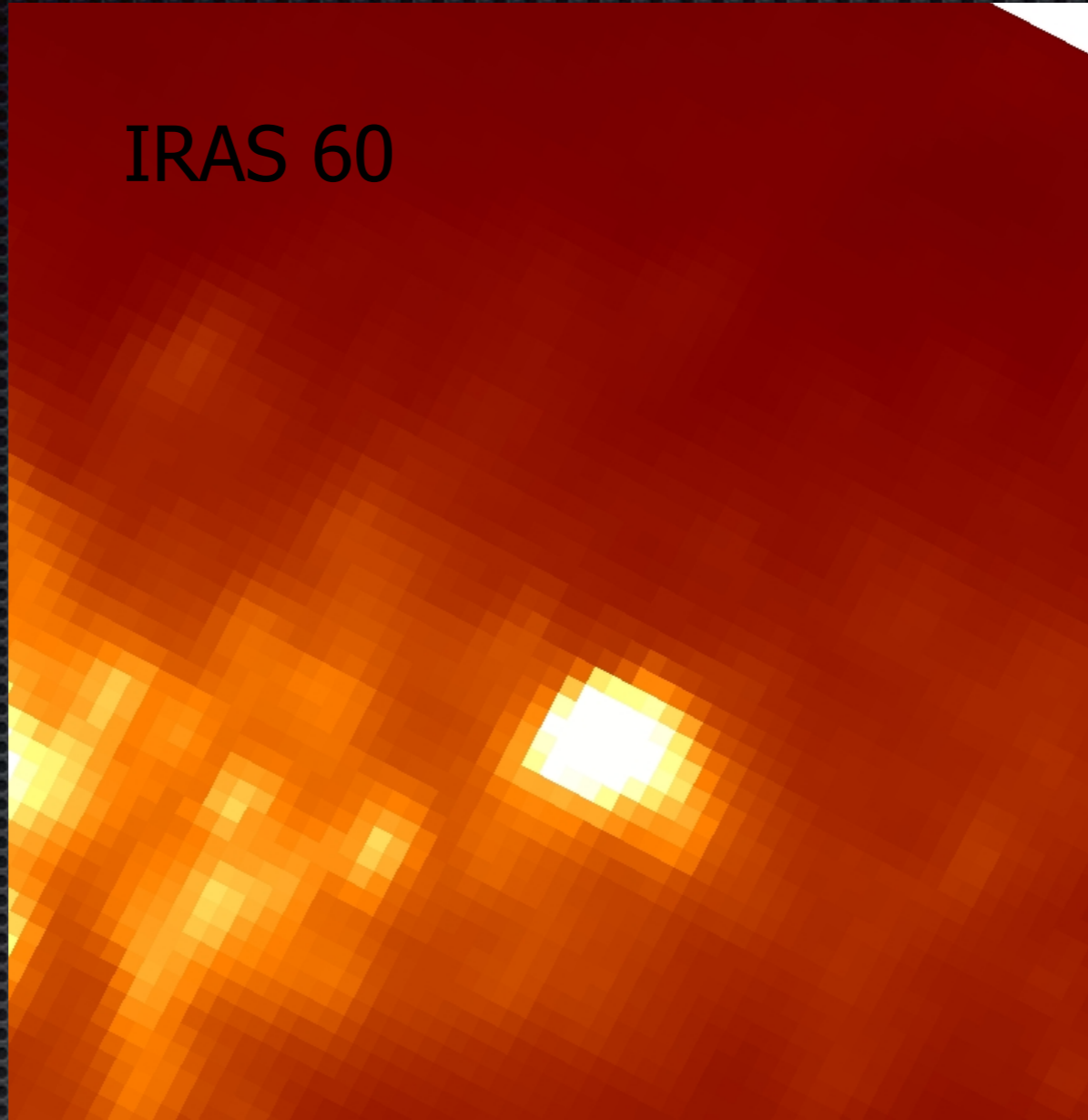


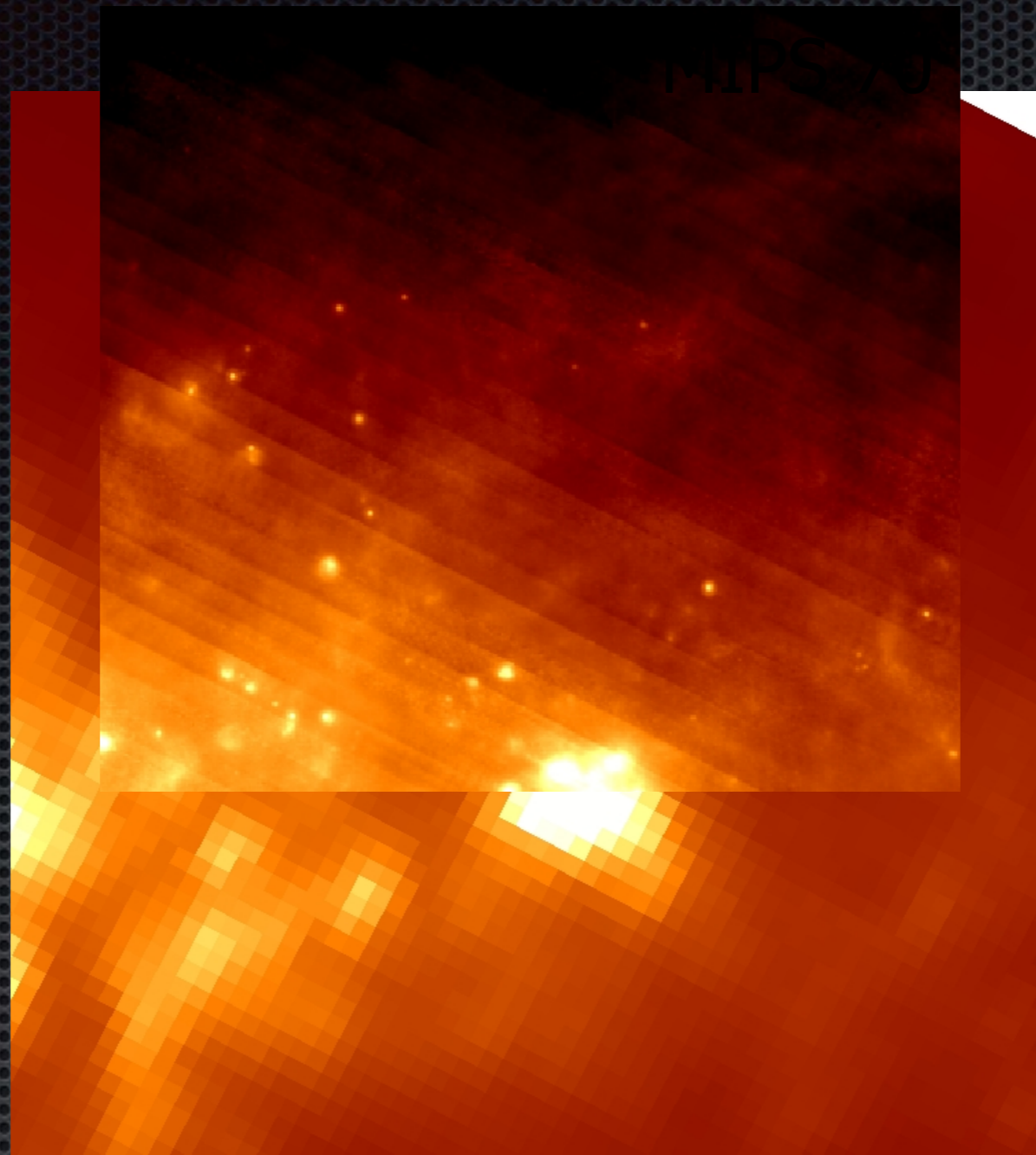
- ✦ Pour s'affranchir des perturbations terrestres:
 - ✦ Ceintures de radiation
 - ✦ Chauffage
- ✦ Pour maximiser le refroidissement passif tout en gardant les panneaux solaires idéalement orientés.

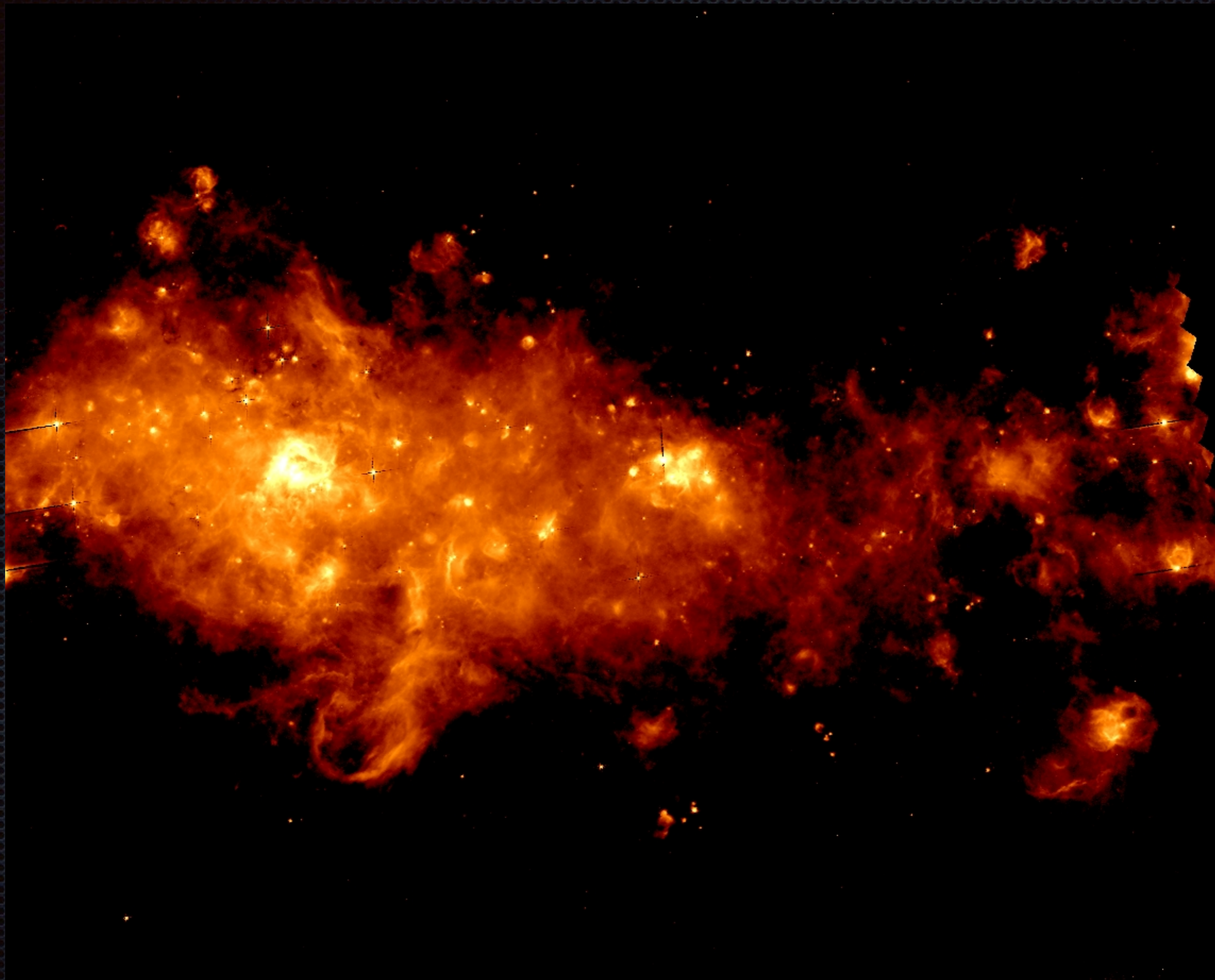


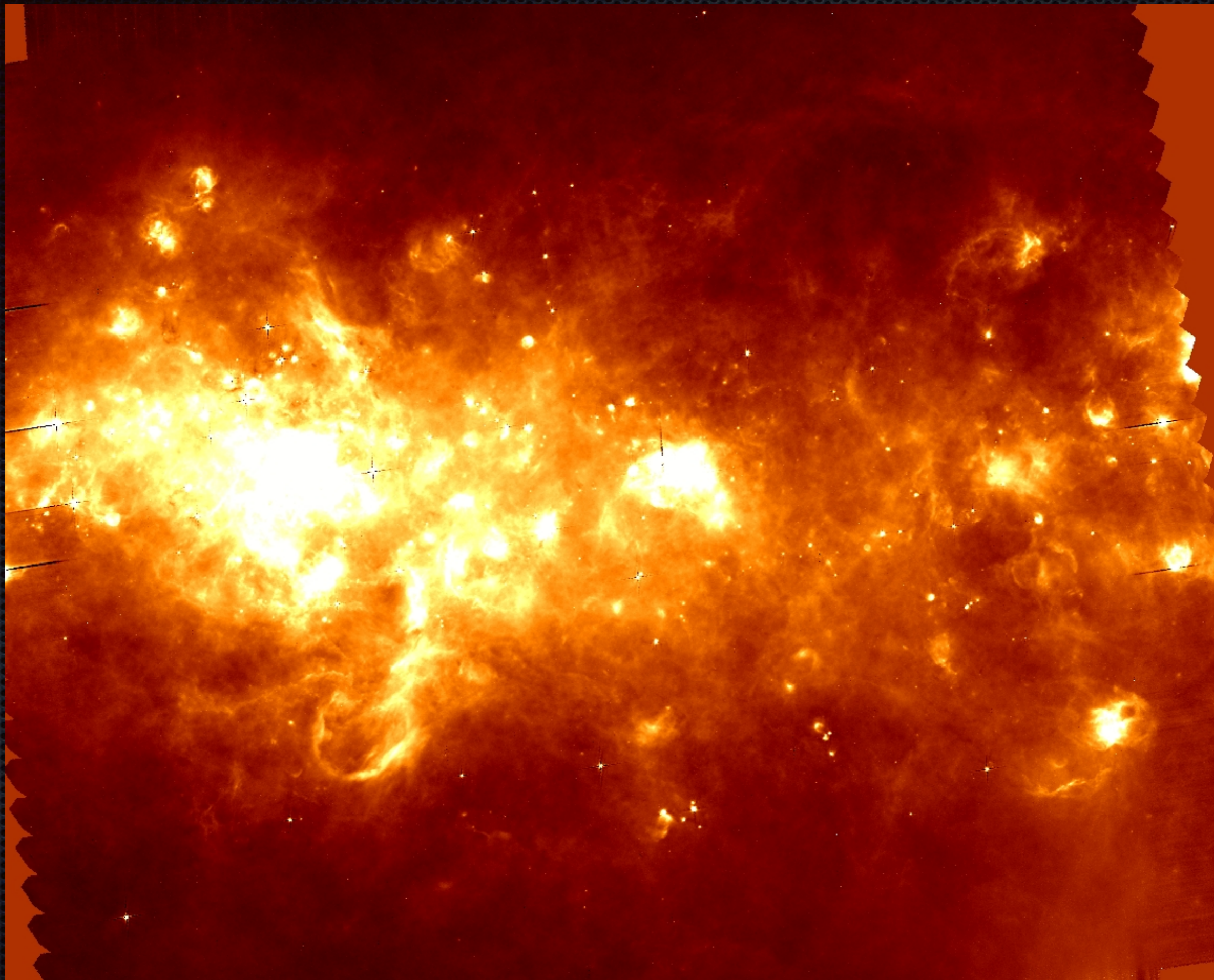
Quelques images de
l'objet Herschel

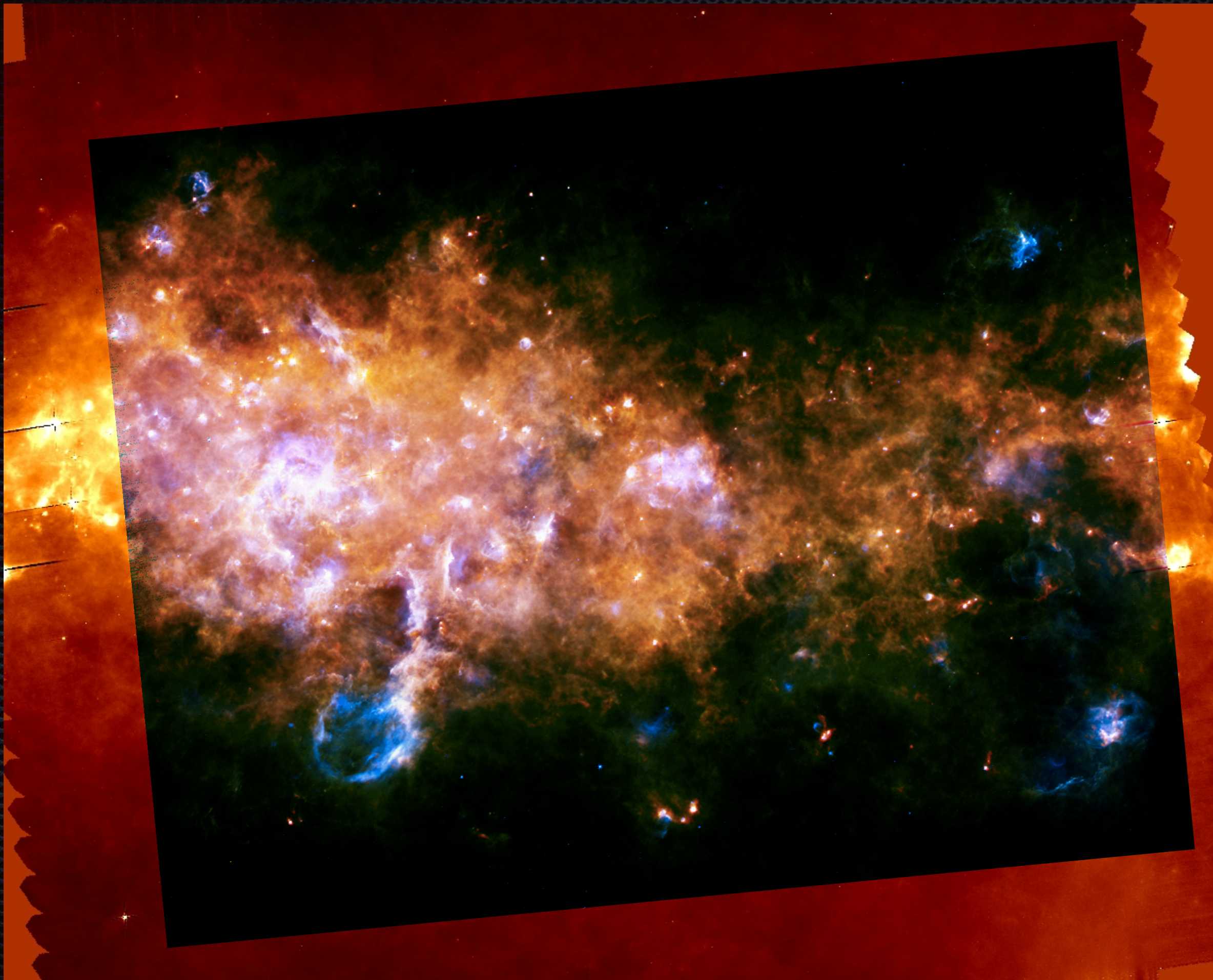
IRAS 60











La technologie au coeur d'Herschel

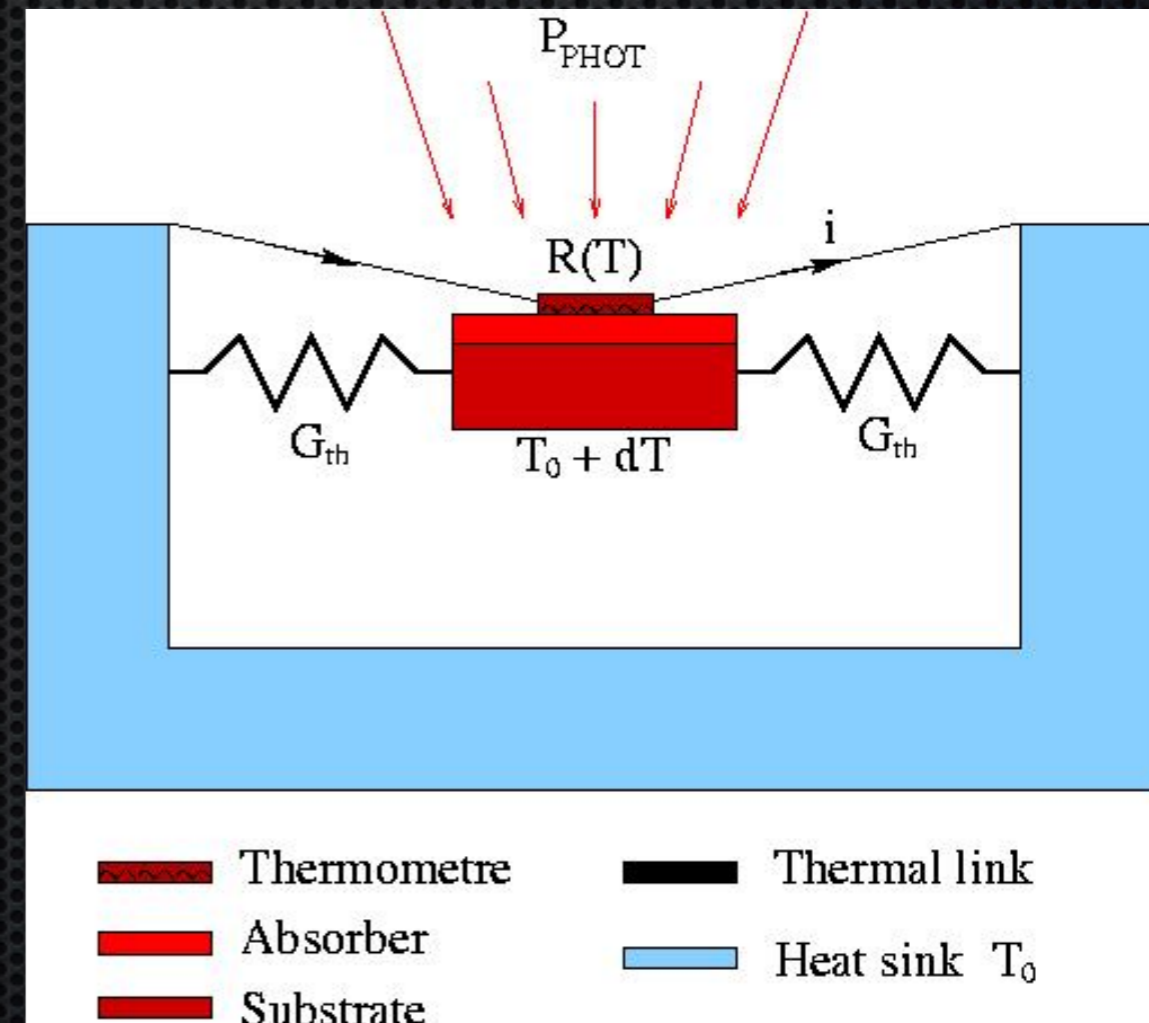
Les bolomètres

- Le bolomètre exploite le principe de détection le plus simple qui soit:

Tout corps exposé à un rayonnement électromagnétique (à la lumière) en absorbe une partie et converti cette énergie en chaleur.

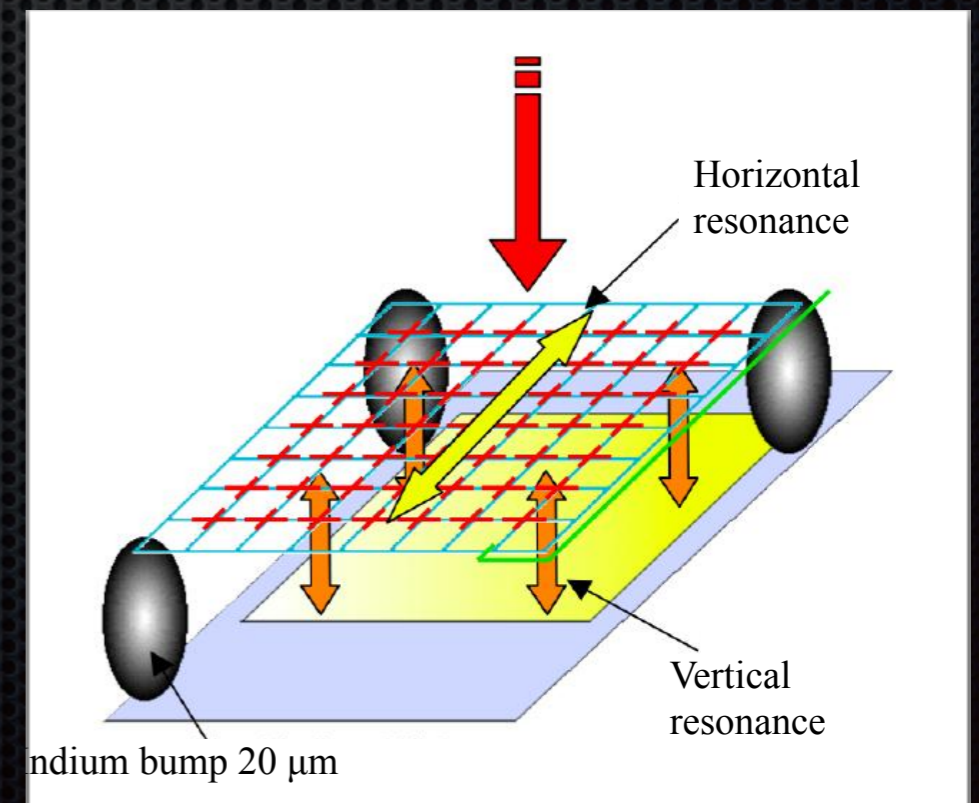
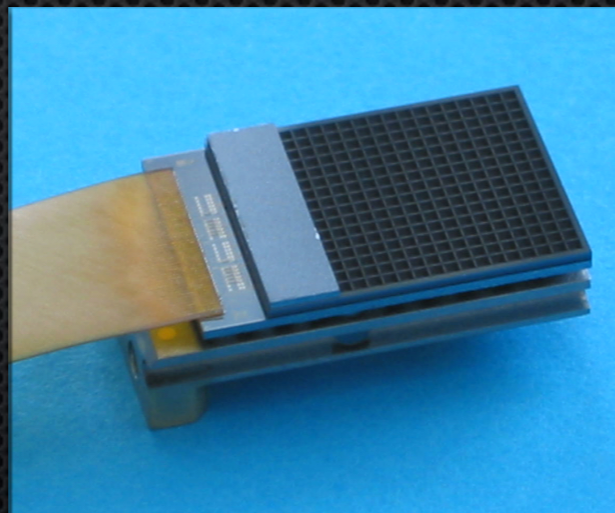
Le principe est utilisé en l'astronomie depuis 1881.

- Première photographie utilisée dans un contexte astronomique: 1840
- Premier CCD utilisé dans un contexte astronomique: 1975



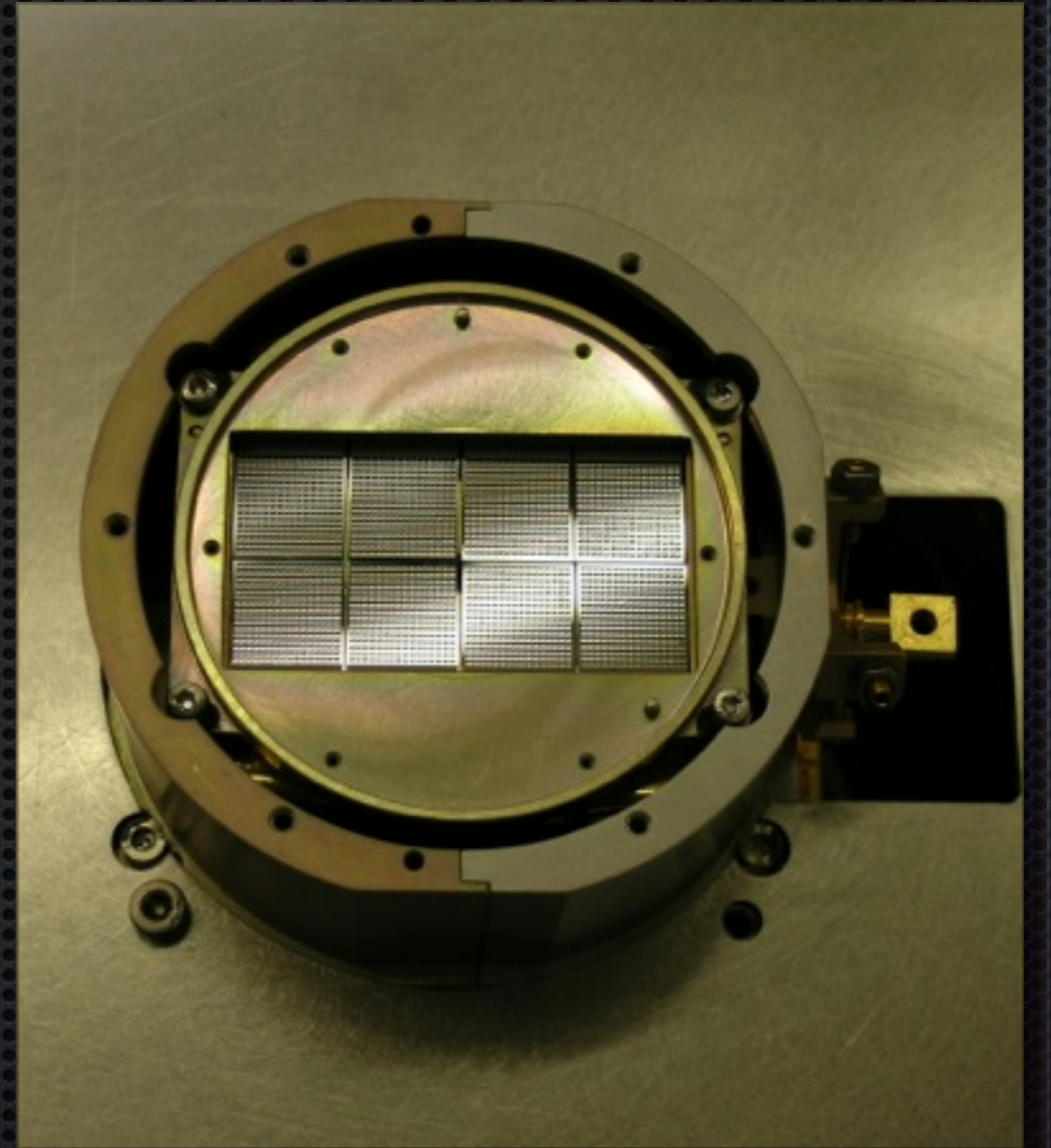
PACS, première caméra de bolomètres

- Une caméra c'est un imageur réalisant un échantillonnage spatial complet instantané à l'aide d'un réseau de pixels construits collectivement.
- PACS: Fabrication collective 16x16, échantillonnage complet.
- Très faible encombrement physique: très faible sensibilité aux particules cosmiques.



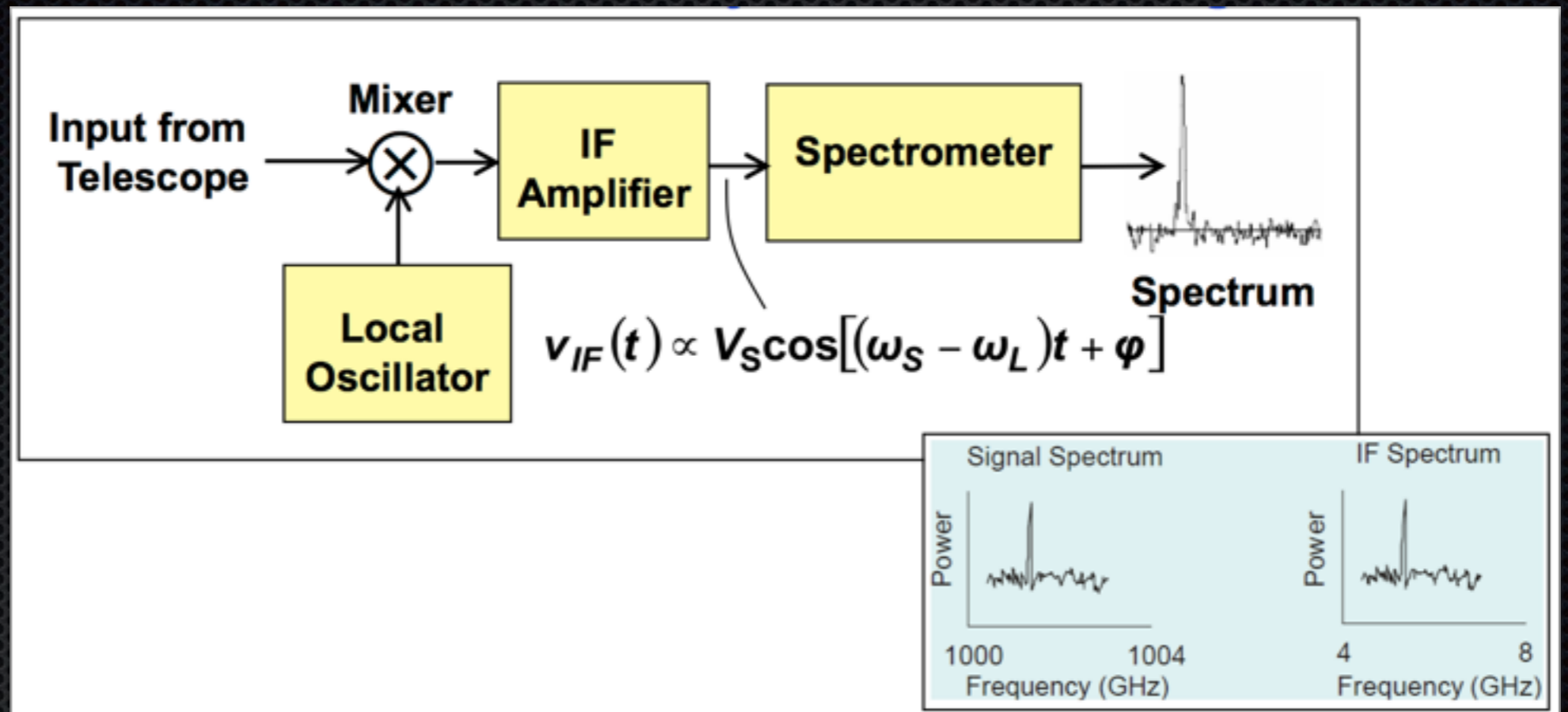
La caméra de PACS

- Le plus grand plan focal fait de bolomètres.
- Le premier instrument à multiplexer des bolomètres.
- le premier instrument submillimétrique à réaliser un échantillonnage complet et instantané du champ de vue.



La caméra de PACS a été l'instrument le plus utilisé d'Herschel: elle a été en opération plus de la moitié du temps.

HIFI, le spectromètre hétérodyne



▪ Avantages:

- Très haute résolution spectrale (100-1000 m.s⁻¹).
- Pas de refroidissement nécessaire.

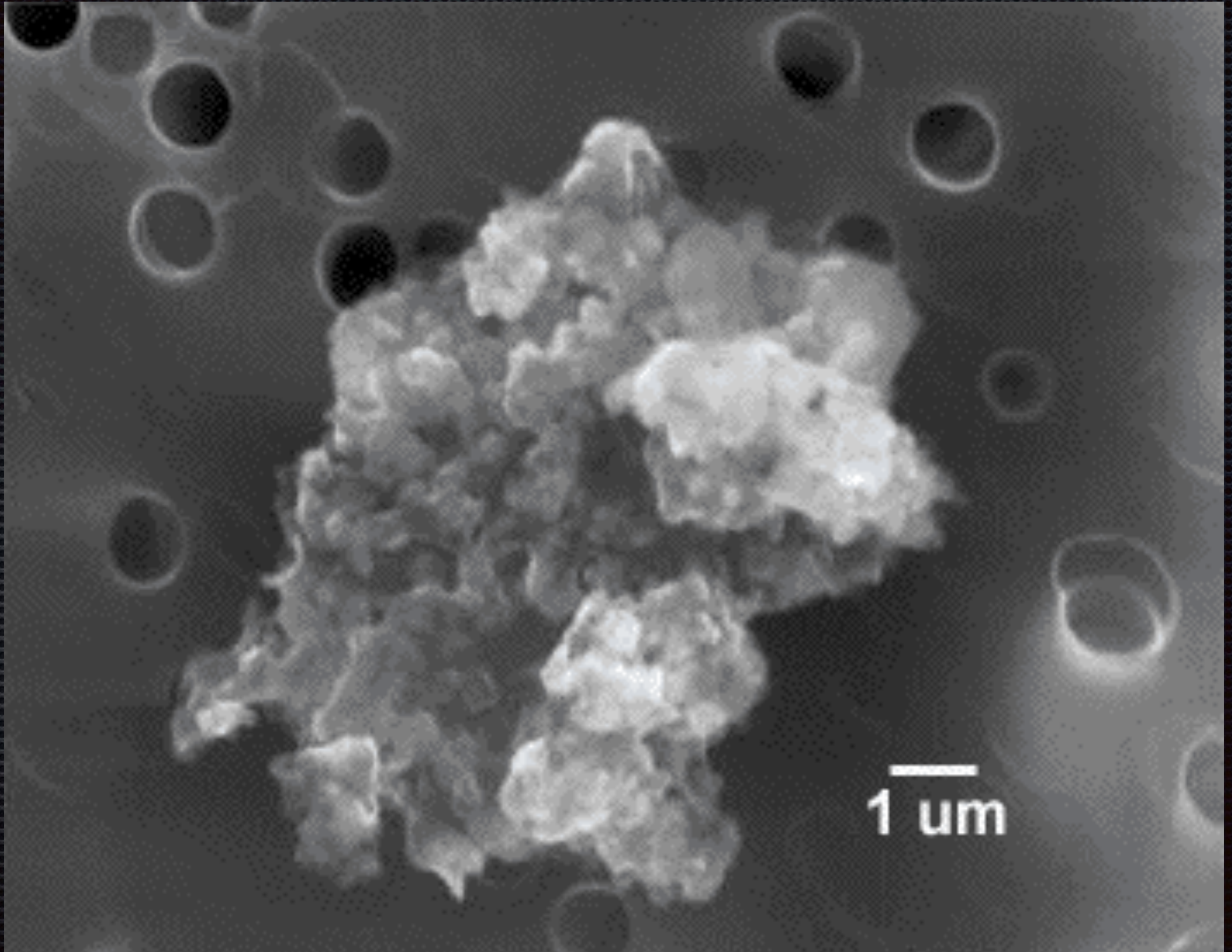
▪ Inconvénients:

- Faible largeur de bande spectrale (multiplication des canaux de détection).
- Mono-pixel (pas d'imagerie).

Astronomie infrarouge

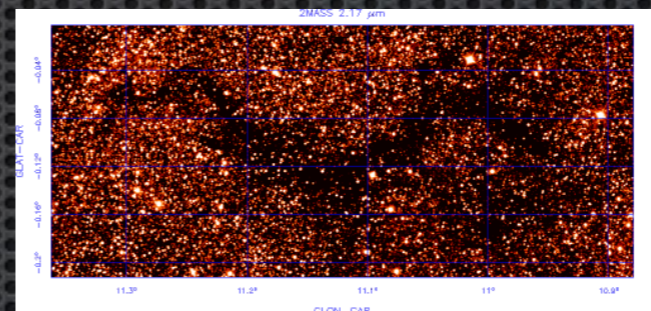
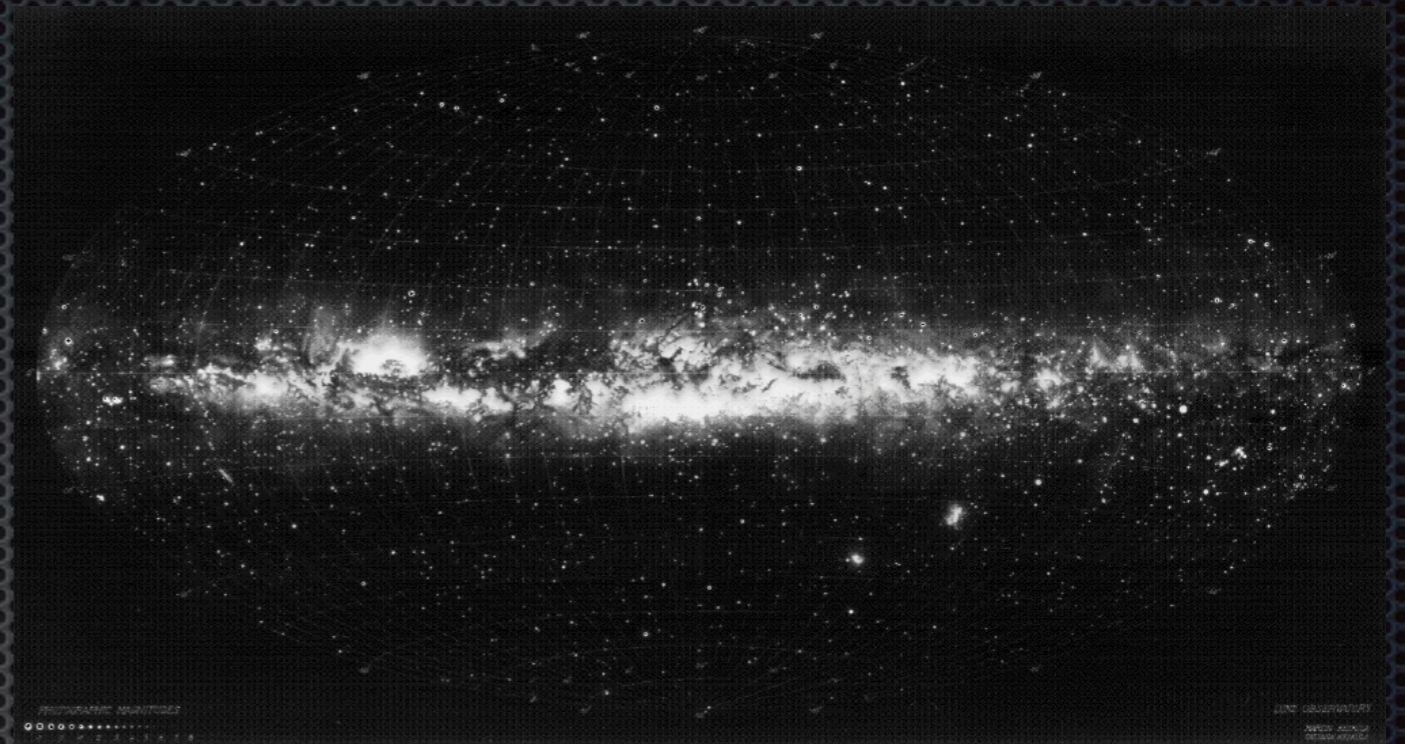
Les fondamentaux

Les deux faces de la poussière

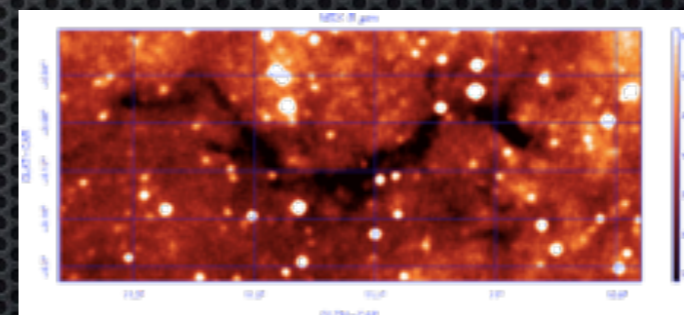


Les deux faces de la poussière

- Elle fait écran au rayonnement, des étoiles par exemple, et interdit qu'il pénètre ou qu'il sorte des milieux denses



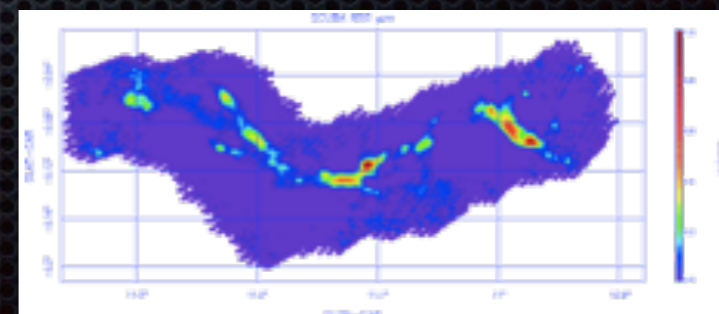
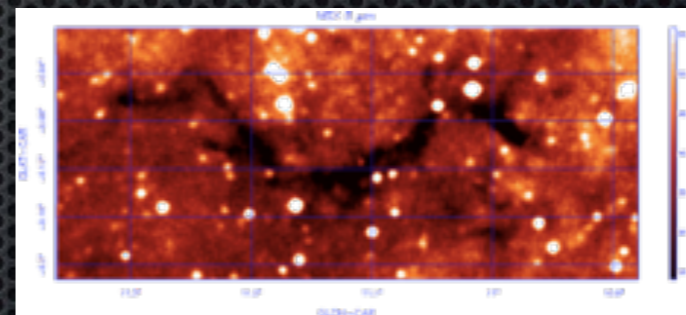
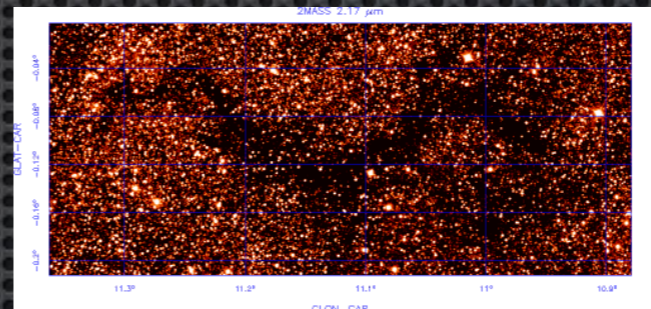
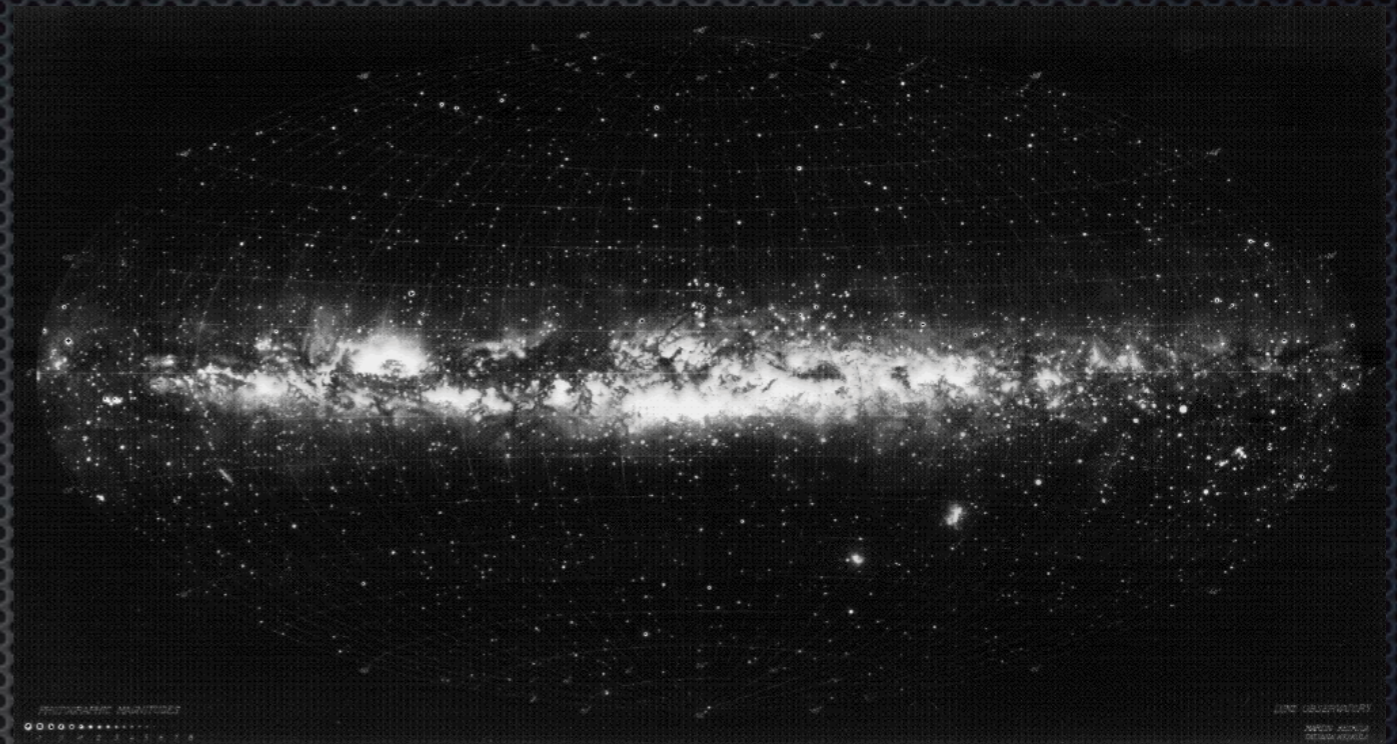
Visible



Proche IR

Les deux faces de la poussière

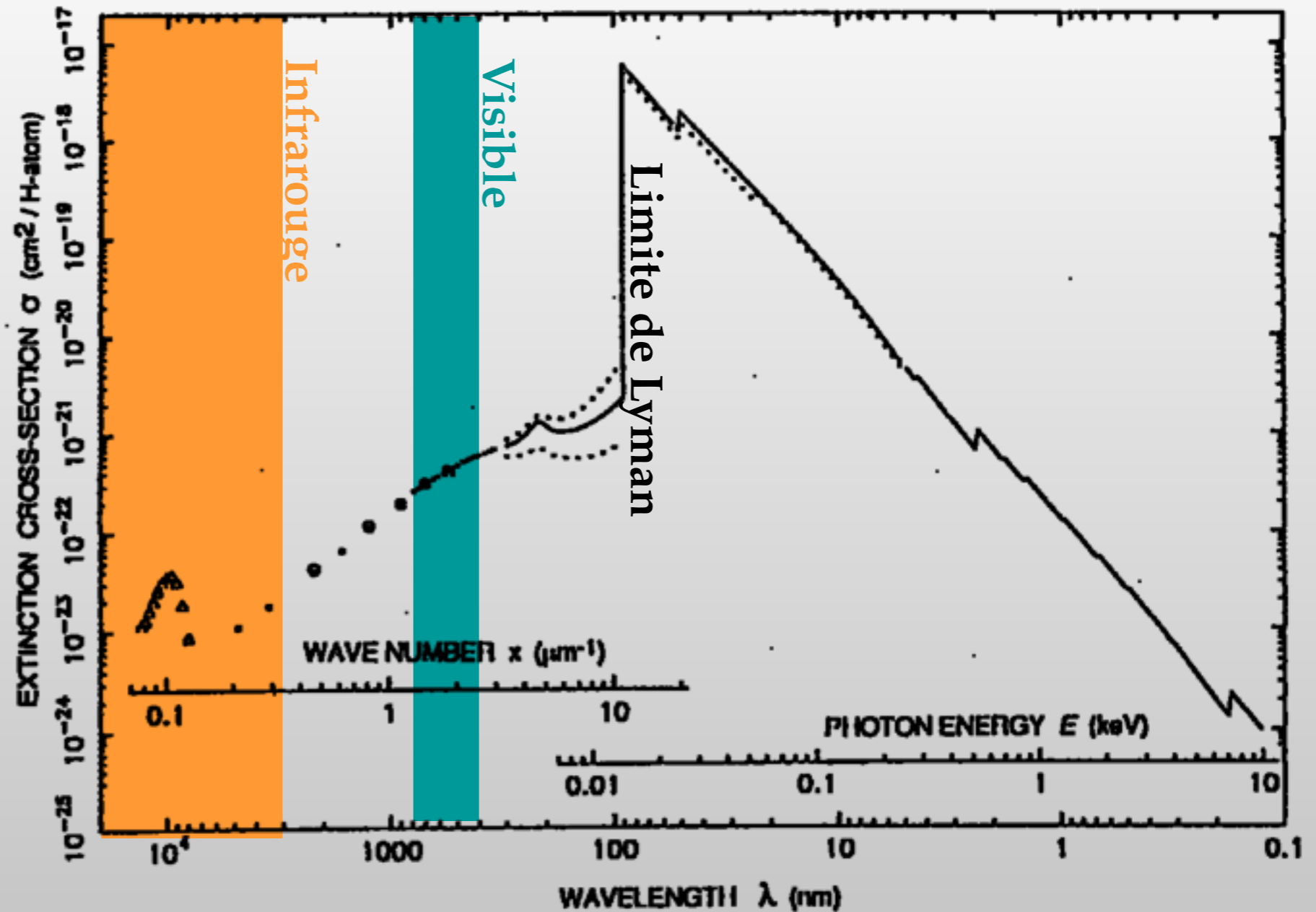
- ✦ Elle fait écran au rayonnement, des étoiles par exemple, et interdit qu'il pénètre ou qu'il sorte des milieux denses
- ✦ L'émission de la poussière elle-même permet de voir indirectement les sources d'énergies dans ces milieux denses
- ✦ Elle est présente (presque) partout et son émission agit comme un thermomètre du milieu interstellaire
- ✦ Dans les régions les plus froides, sans étoiles par exemple, elle est souvent le seul traceur disponible



Pourquoi observer en infrarouge?

Absorption et dispersion
par la poussière

Ionisation du gaz

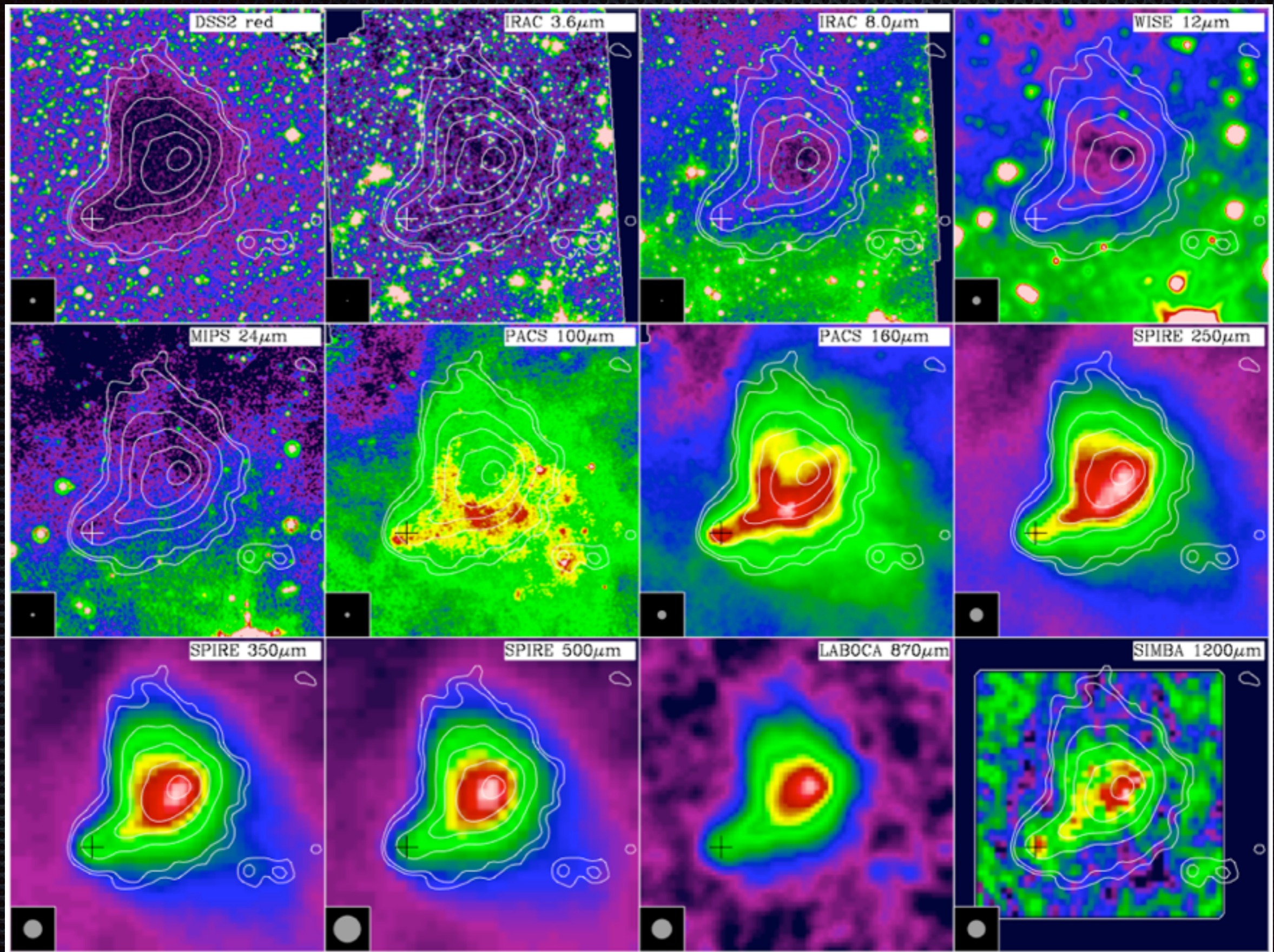


Section efficace d'absorption du milieu interstellaire

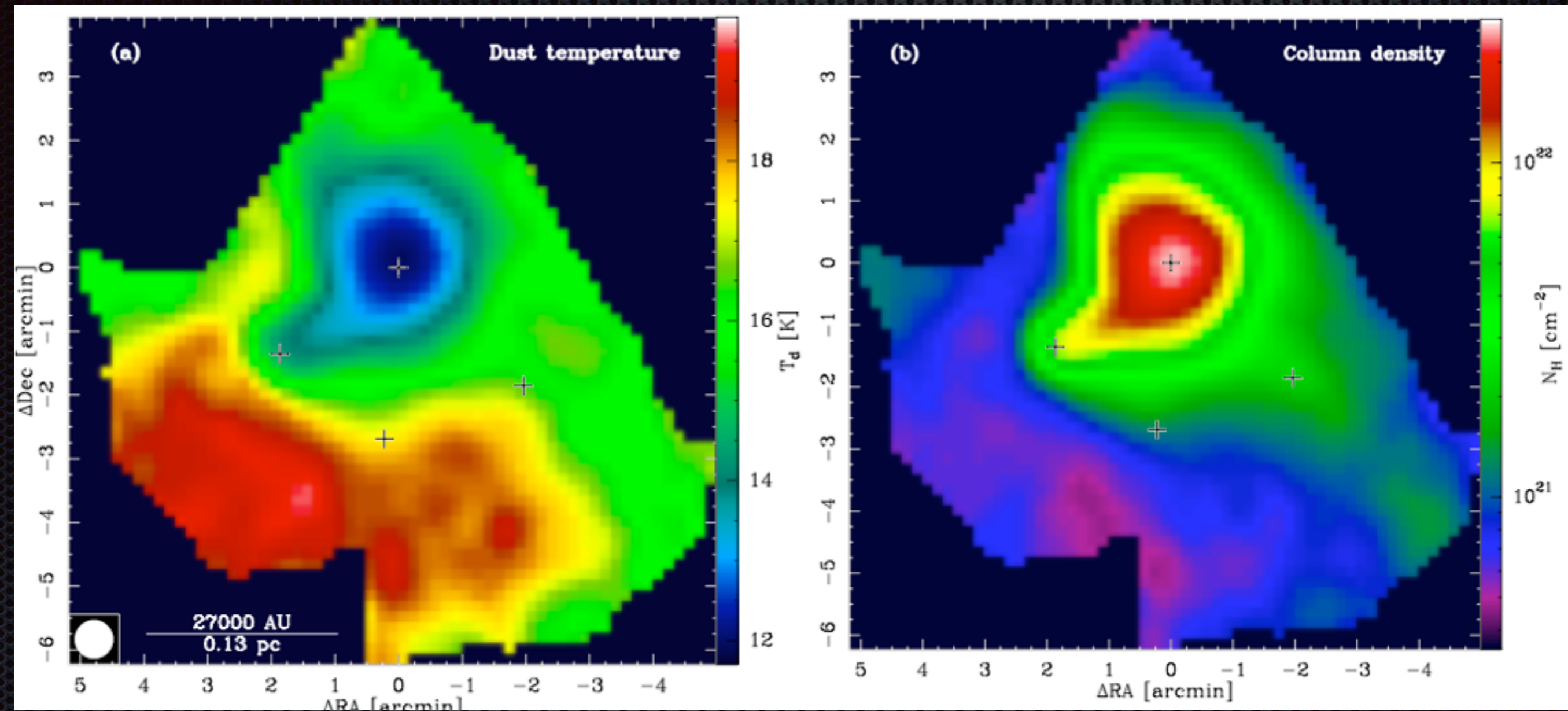
En infrarouge,
le milieu
interstellaire
est **10 à 1000** fois
plus transparent
qu'en visible



Barnard 68, un exemple de l'utilité de l'infrarouge



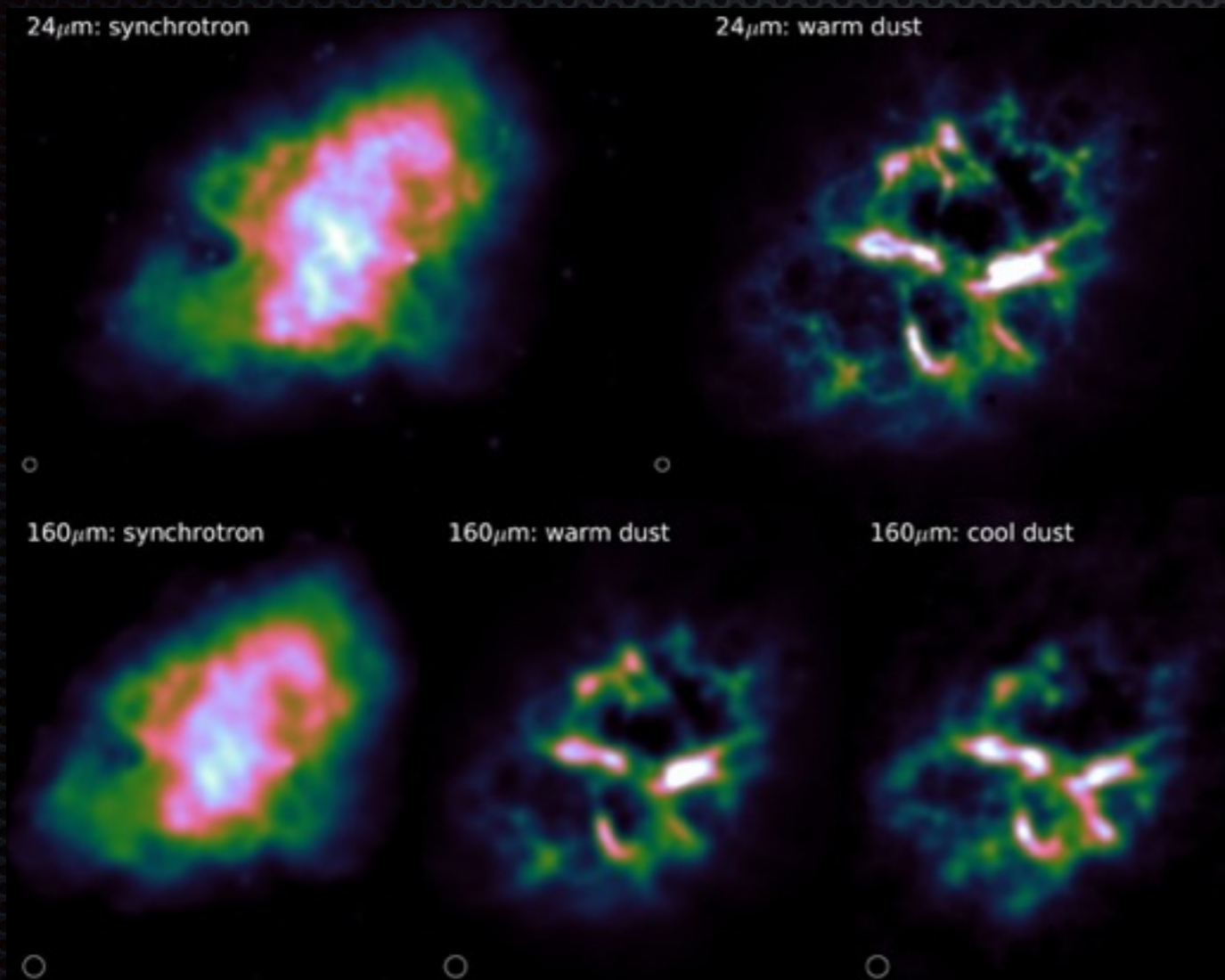
Barnard 68, un exemple de l'utilité de l'infrarouge



Grâce aux modèles d'émission de la poussière interstellaire, l'émission donne accès aux quantités physiques: température et densité.

Sources de poussière interstellaire

- Supernovae et phases tardives de l'évolution des étoiles de masse intermédiaire ($M_* \in [1-15] M_\odot$)



Nébuleuse du Crabe, reste de supernova
(données Herschel et Spitzer)



Enveloppes de poussière de l'étoile
géante rouge R Sculptoris
(données ALMA)

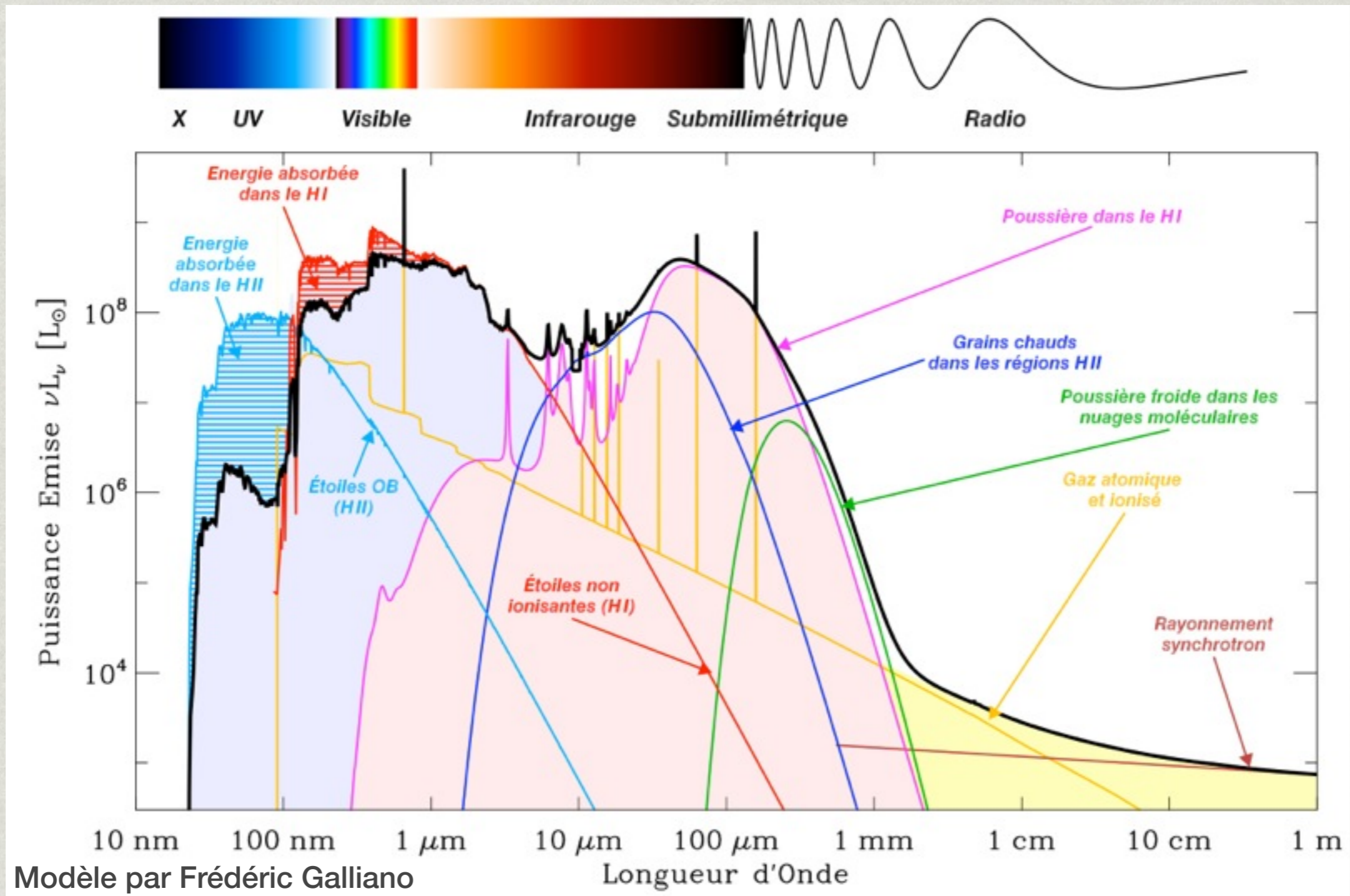
Résultats marquants d'Herschel

- * **Mesure de la masse et de la température des poussières dans les galaxies.**
- * **Energétique du milieu interstellaire et mise en évidence du gaz moléculaire sombre.**
- * **Mesure du taux de formation stellaire à bas et haut décalage spectral, et renversement du paradigme d'évolution des galaxies.**
- * **L'énigme des trous noirs super-massifs.**

Poussière et gaz dans le milieu interstellaire

- * Masse de poussière et source de chauffage
- * Structure thermique du gaz
- * Projecteurs sur une phase sombre du gaz

Le spectre global d'une galaxie "classique"

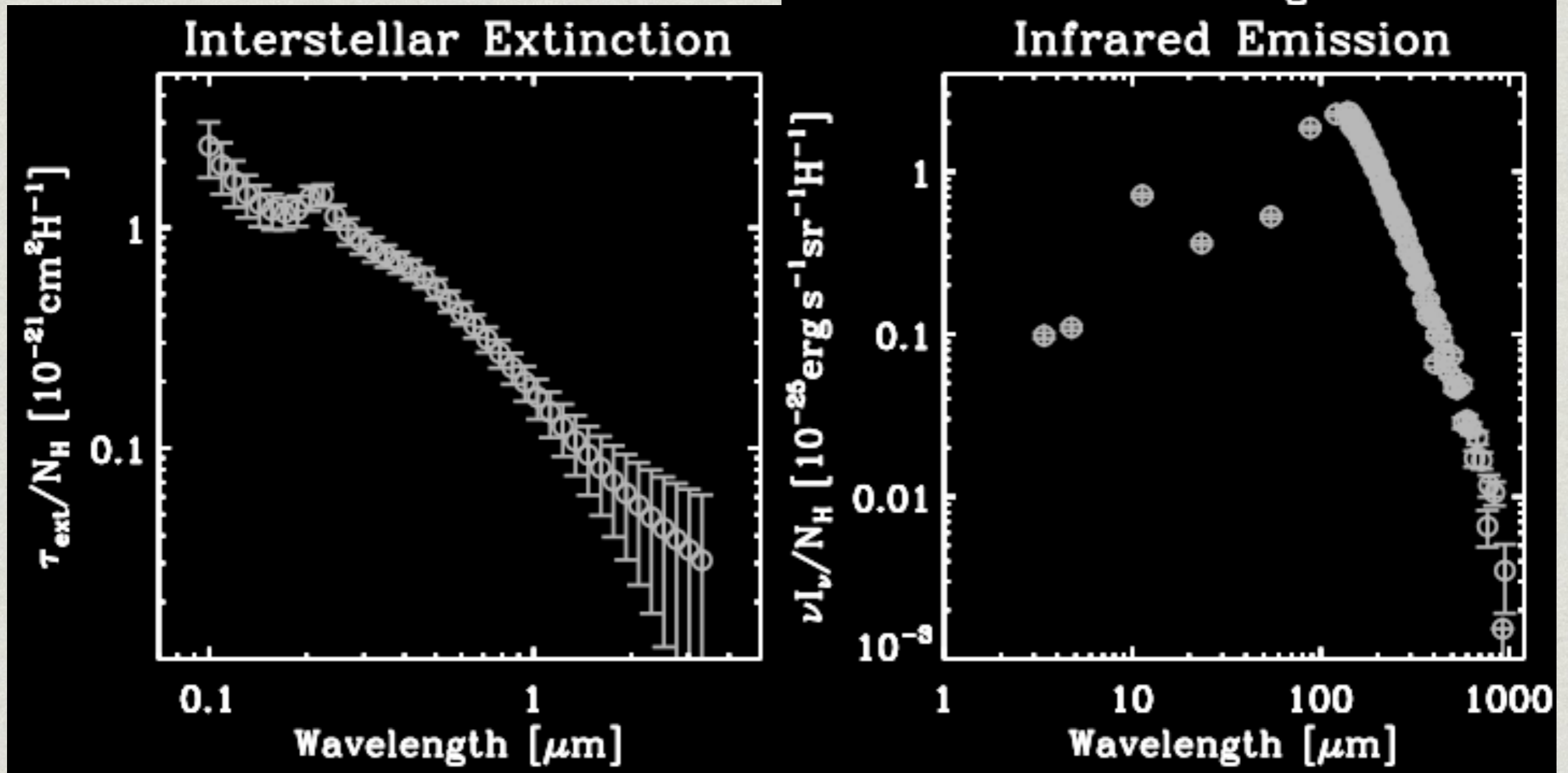


- * L'émission thermique de la poussière est liée à plusieurs phases du milieu interstellaire, et à différents types de populations stellaires.
- * Seule une vue globale de la distribution spectrale d'énergie permet de démêler ces liens.

Modélisation de la poussière dans la Voie Lactée

Ajustement simultané des différentes données (extinction, émission, abondances) sur l'émission de la poussière à haute latitude Galactique.

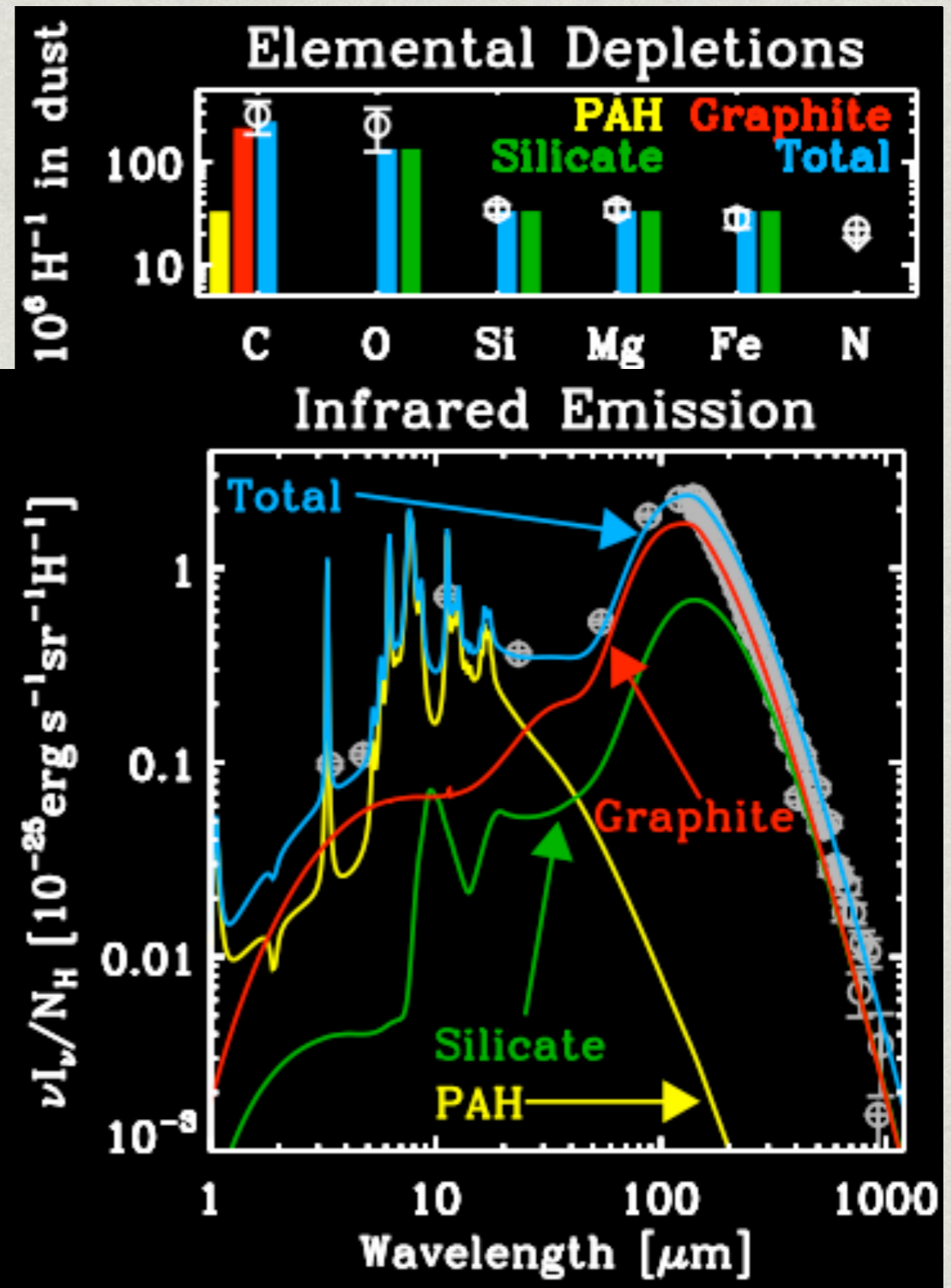
(Zubko, Dwek & Arendt, 2004)



Modélisation de la poussière dans la Voie Lactée

Ajustement simultané des différentes données (extinction, émission, abondances) sur l'émission de la poussière à haute latitude Galactique.

(Zubko, Dwek & Arendt, 2004)



Le programme HERITAGE d'observation des Nuages de Magellan

Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine irrégulière satellite de la nôtre:

- $d \approx 50$ kpc
- $8^\circ \times 8^\circ$
- $Z \approx 1/2 Z_\odot$

Image composite
Herschel du programme
HERITAGE:

- vert: $100 \mu\text{m}$
- bleu: $160 \mu\text{m}$
- rouge: $250 \mu\text{m}$



Le programme HERITAGE d'observation des Nuages de Magellan

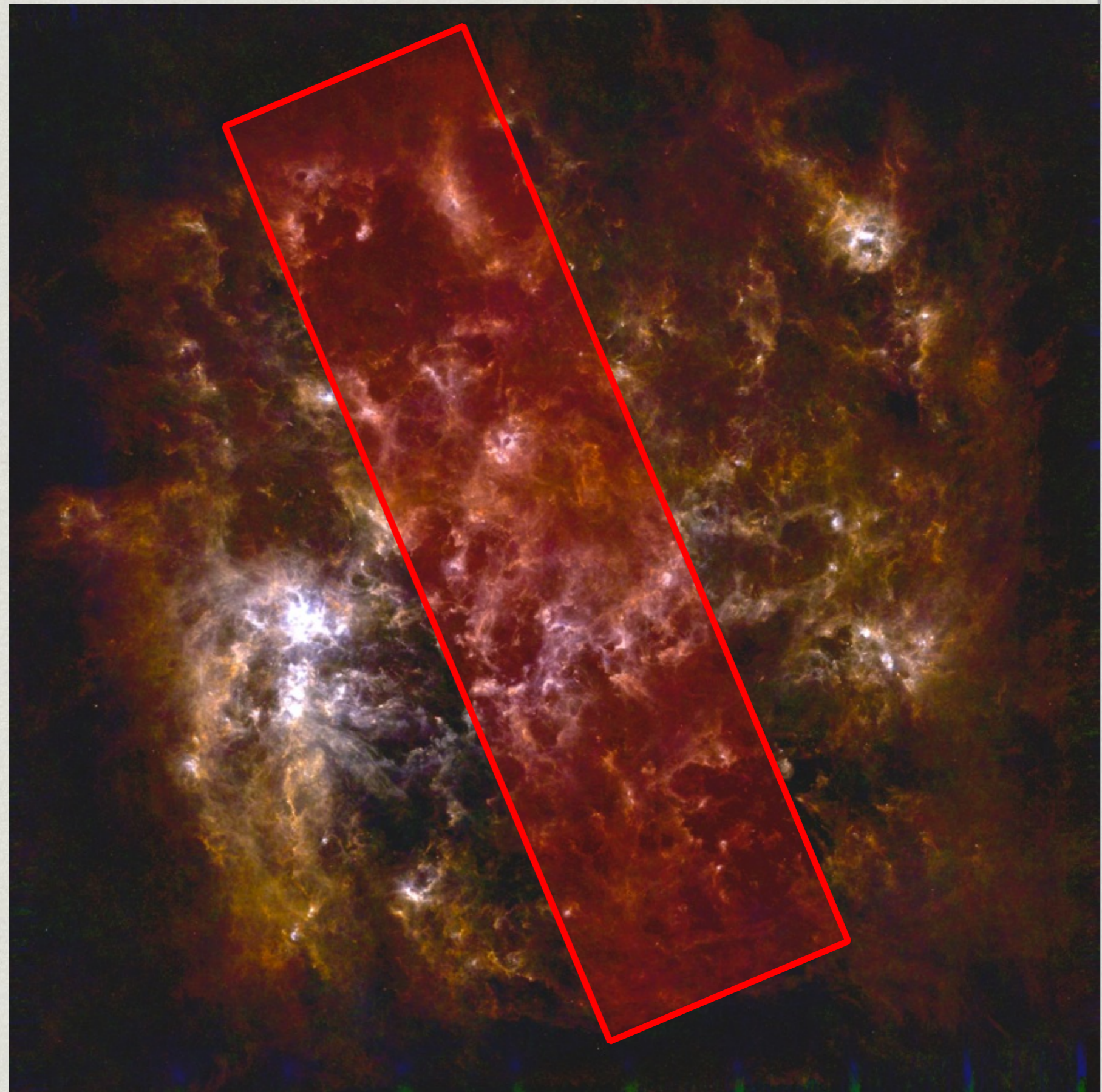
Le Grand Nuage de Magellan est une galaxie naine irrégulière satellite de la nôtre:

- $d \approx 50$ kpc
- $8^\circ \times 8^\circ$
- $Z \approx 1/2 Z_\odot$

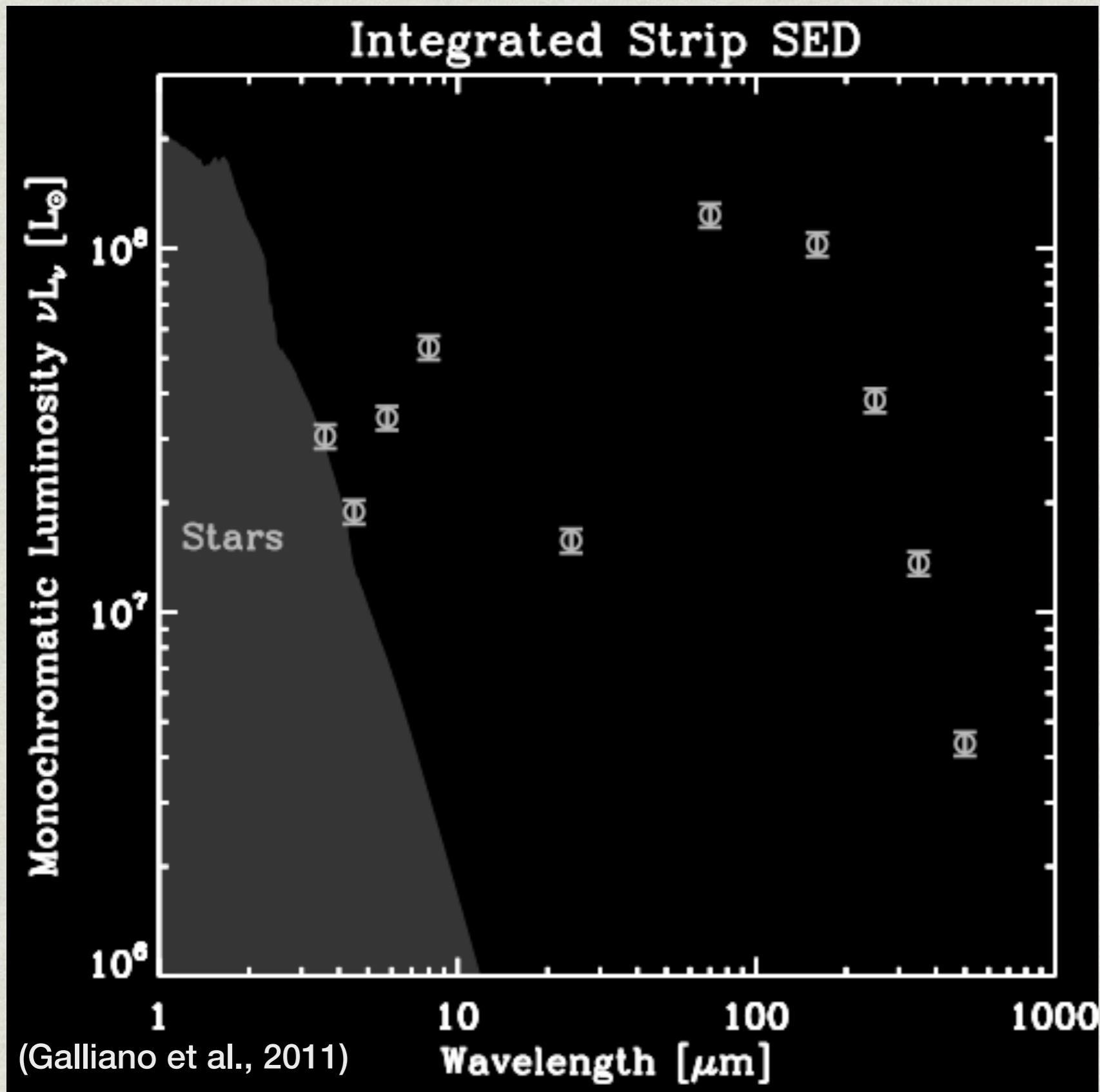
Image composite
Herschel du programme
HERITAGE:

- vert: $100 \mu\text{m}$
- bleu: $160 \mu\text{m}$
- rouge: $250 \mu\text{m}$

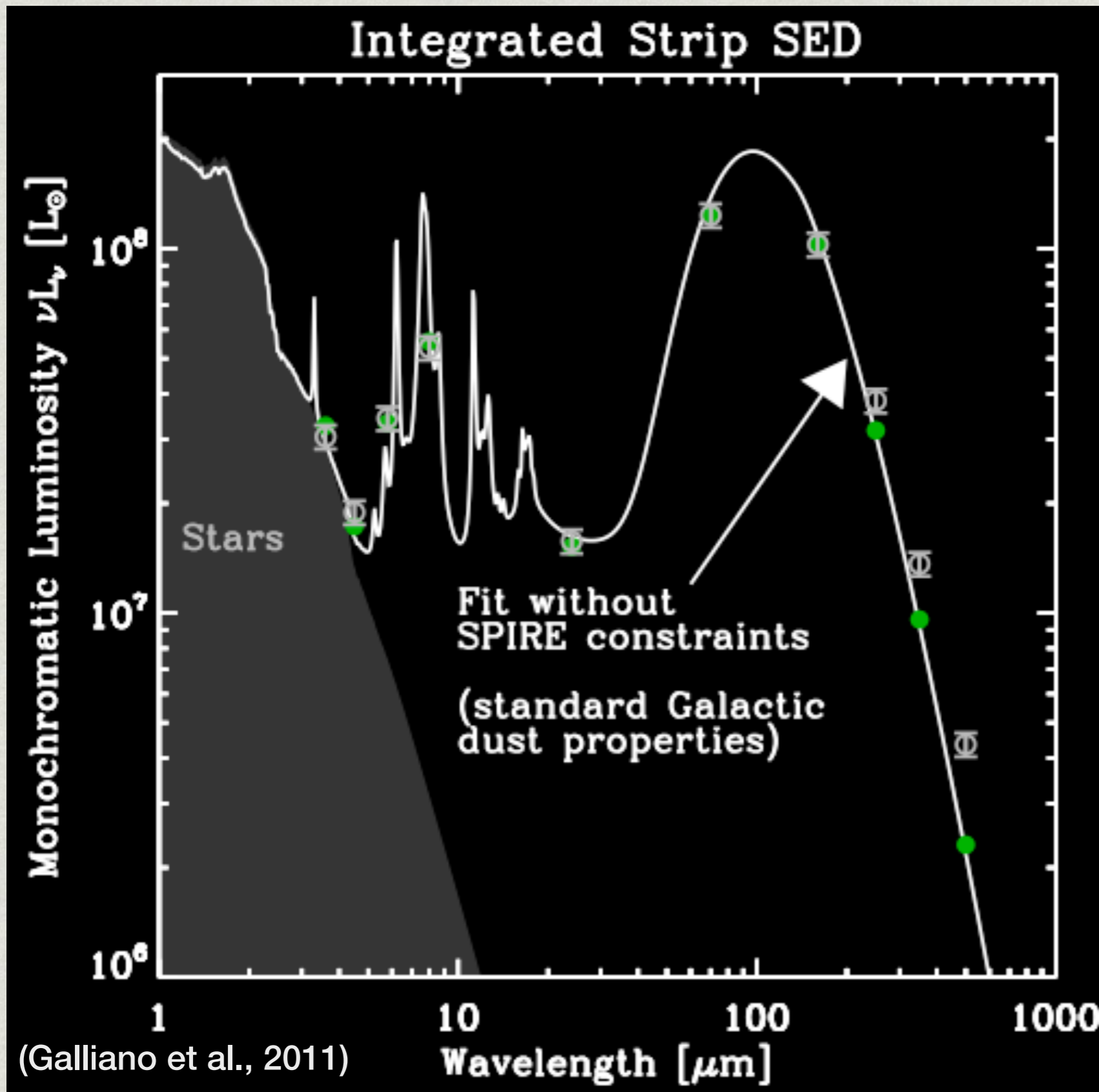
$2^\circ \times 8^\circ$ Science
Demonstration Strip
(Meixner, Galliano et al.
2010)



Les dilemmes de la modélisation

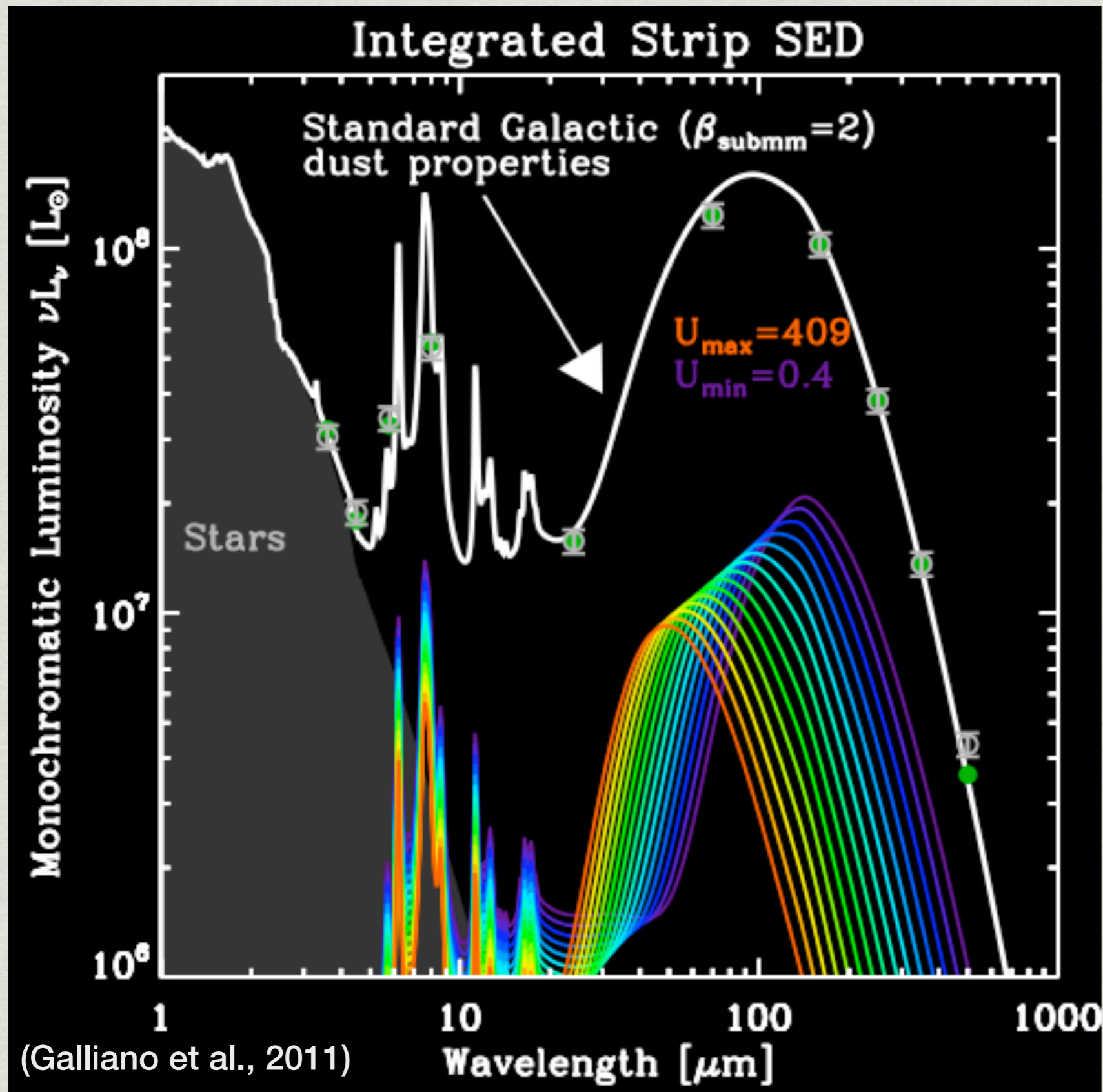


Les dilemmes de la modélisation



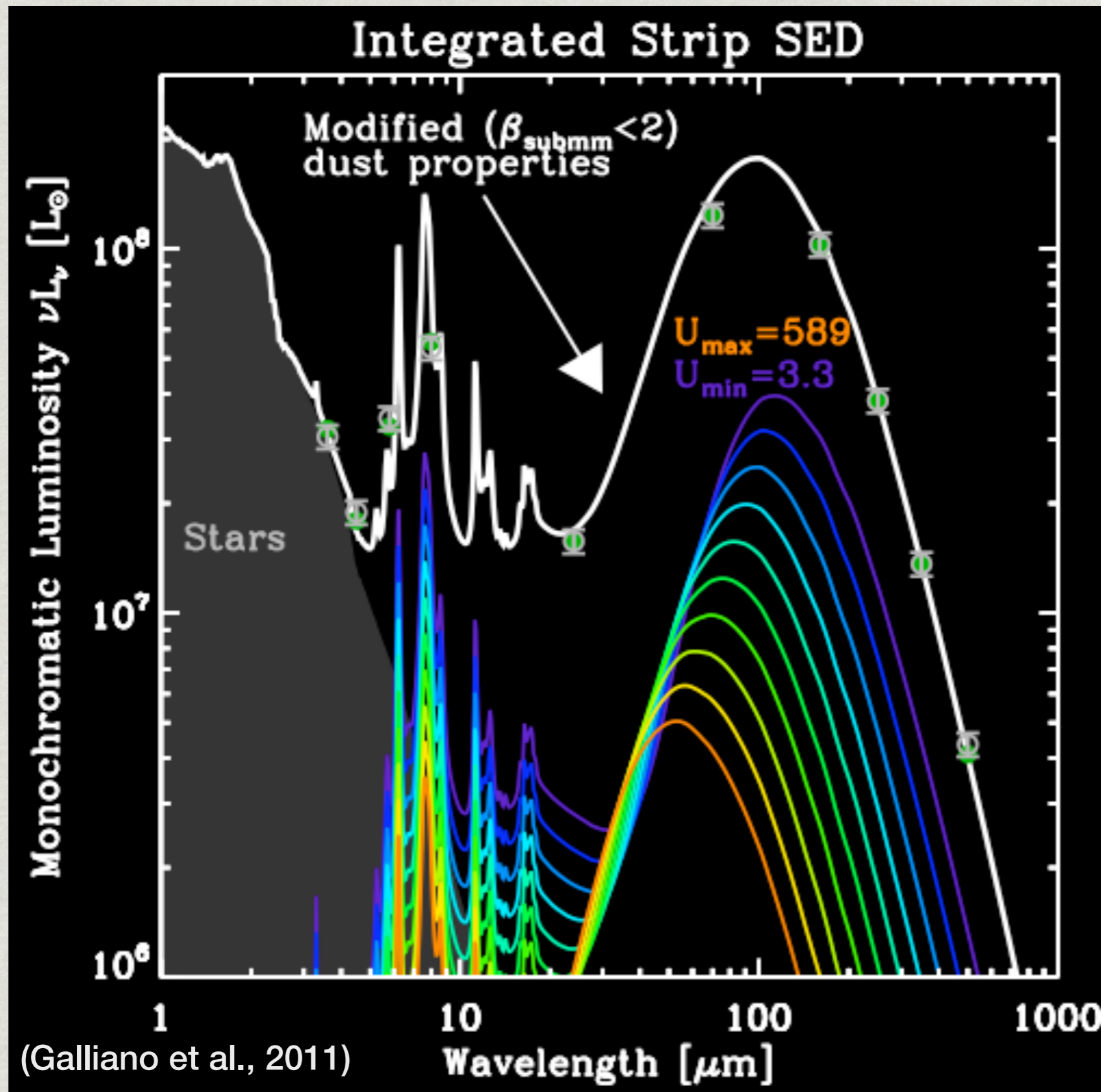
- * Sans ajuster les données SPIRE: un excès d'émission apparaît à grande longueur d'onde.

Les dilemmes de la modélisation



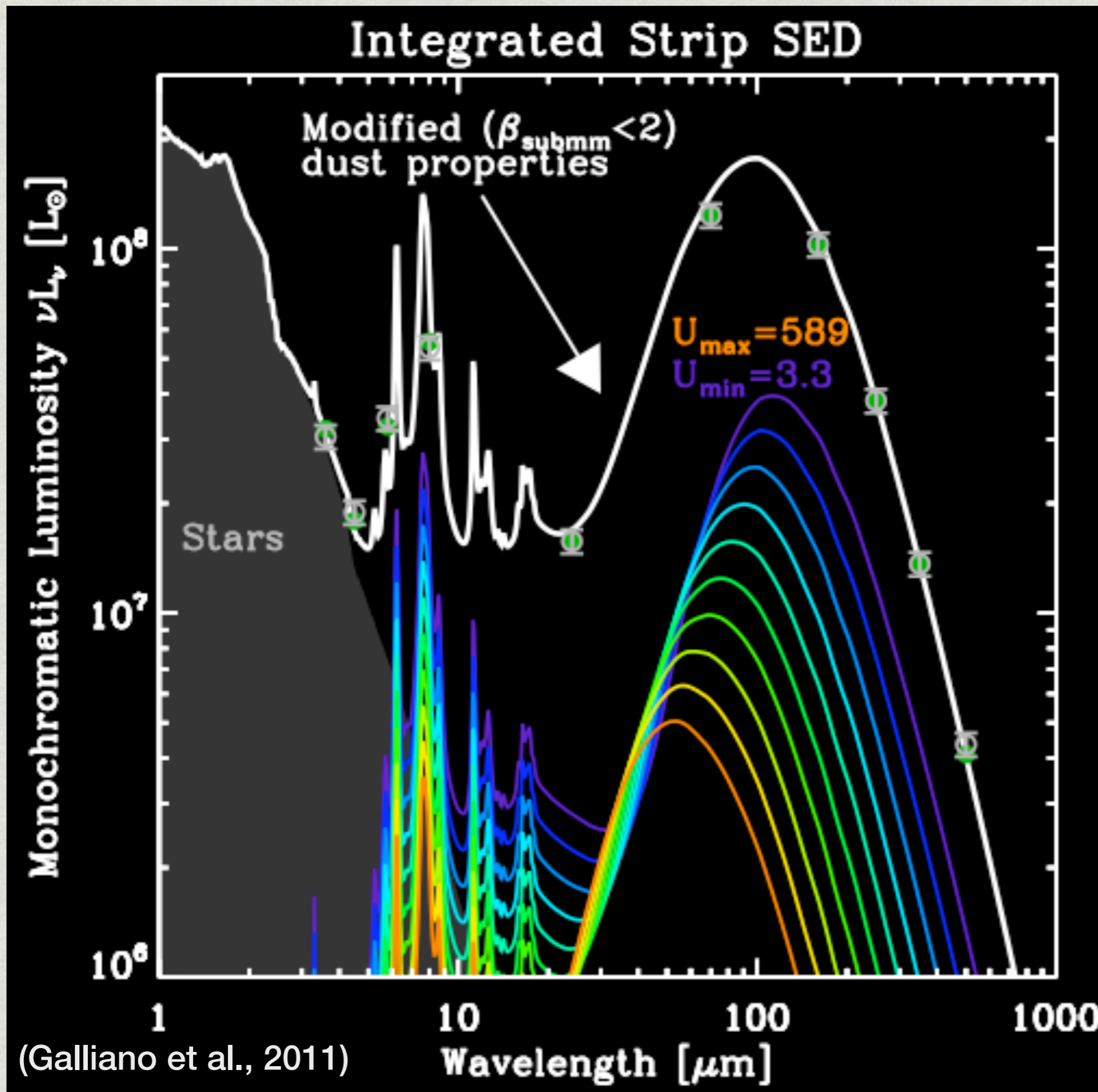
- * Sans ajuster les données SPIRE: un excès d'émission apparaît à grande longueur d'onde.
- * Avec des propriétés de poussière classiques, cet excès demande une grande masse de poussière froide ($<15\text{K}$).

Les dilemmes de la modélisation



- * Sans ajuster les données SPIRE: un excès d'émission apparaît à grande longueur d'onde.
- * Avec des propriétés de poussière classiques, cet excès demande une grande masse de poussière froide ($< 15\text{K}$).
- * Avec une variété différente de poussière, l'excès se résout sans ajout de poussière.

Les dilemmes de la modélisation

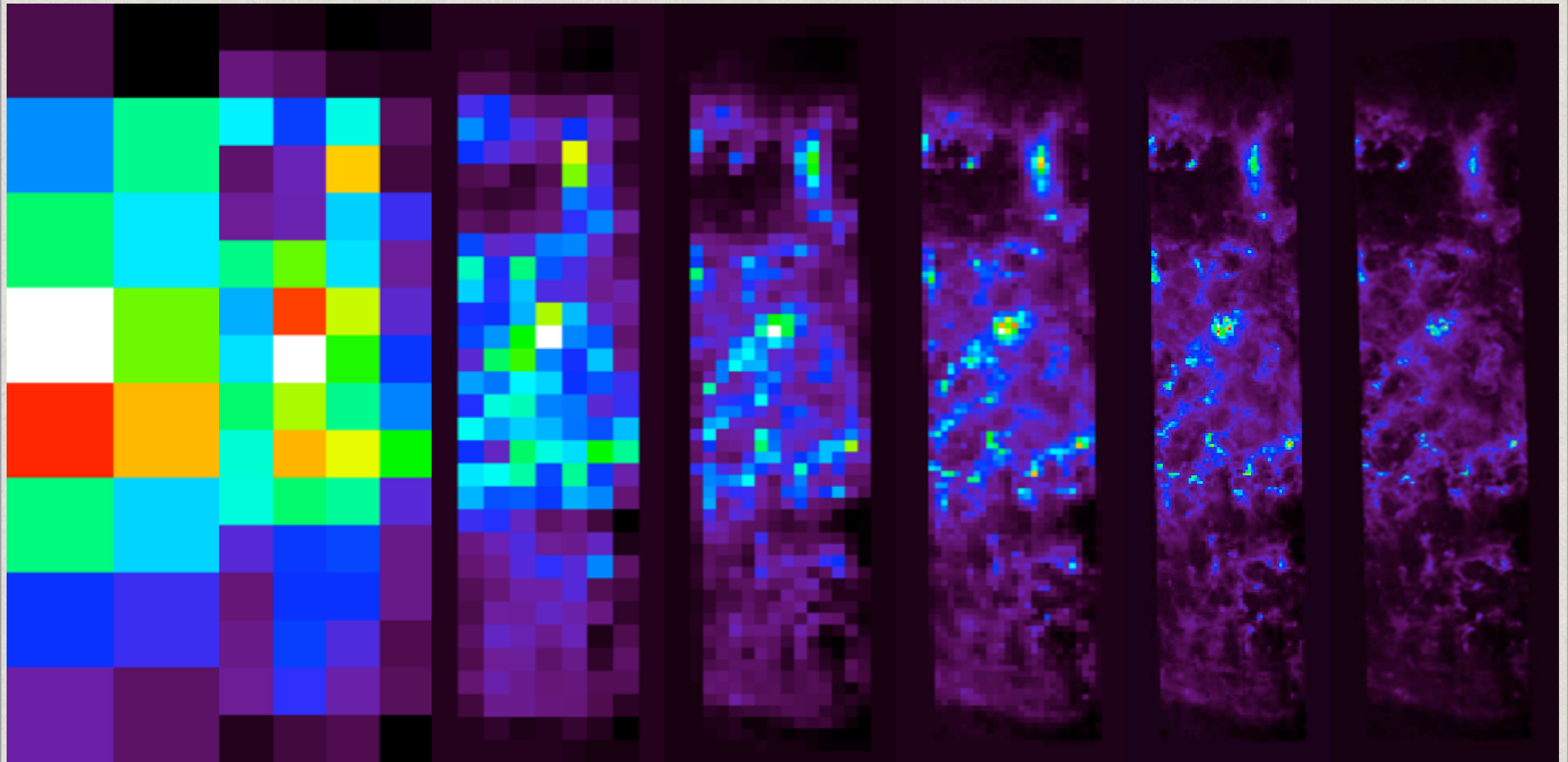


- * Sans ajuster les données SPIRE: un excès d'émission apparaît à grande longueur d'onde.
- * Avec des propriétés de poussière classiques, cet excès demande une grande masse de poussière froide ($<15\text{K}$).
- * Avec une variété différente de poussière, l'excès se résout sans ajout de poussière.
- * Dégénérescence entre température et émissivité de la poussière)

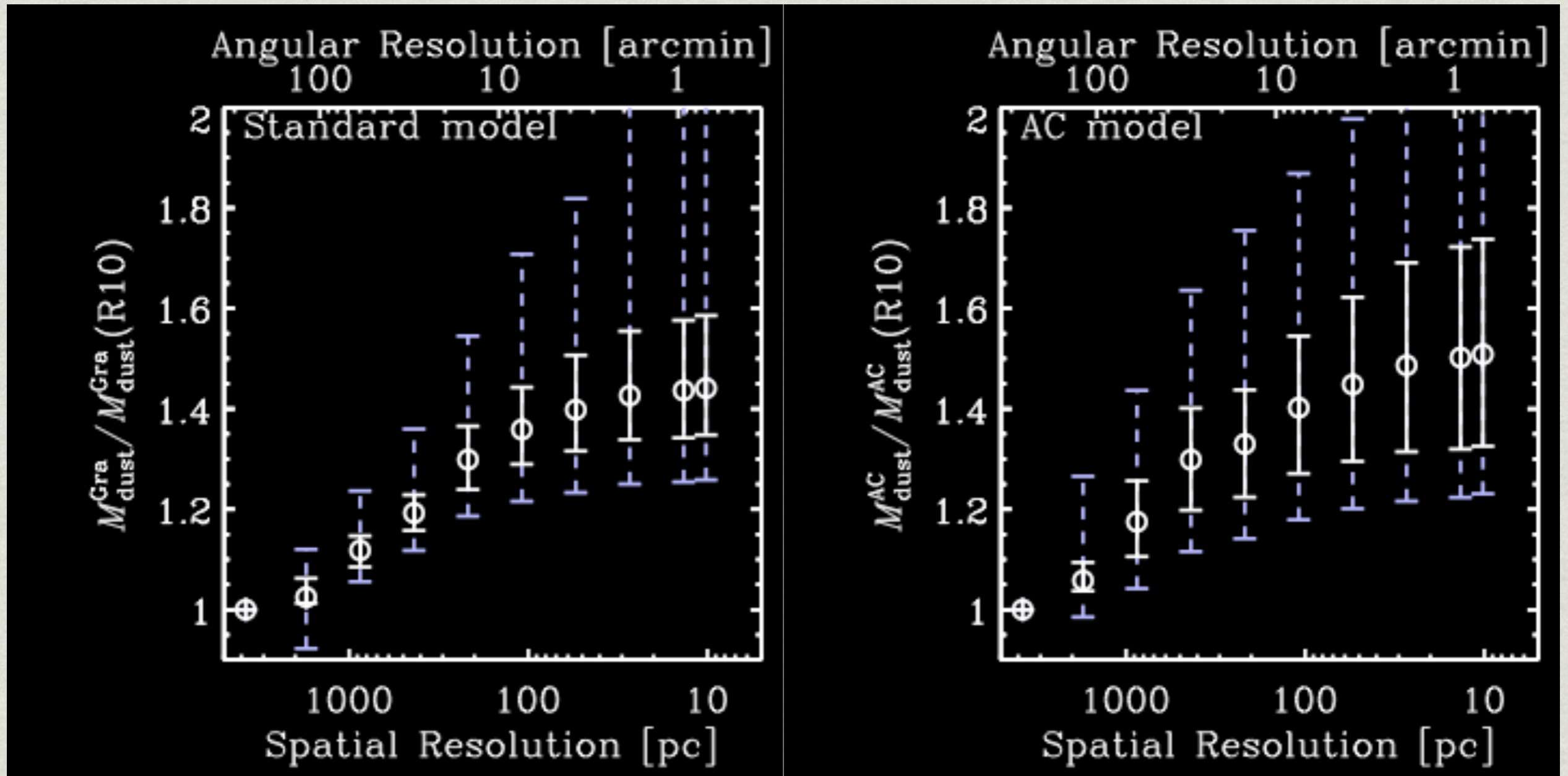
Effet de la résolution spatiale sur la mesure de la masse de poussière

Exercice en forme de poupées russes:

- * La résolution spatiale est dégradée progressivement en conservant le flux.
- * La masse de poussière est mesurée à chaque étape par la même méthode d'ajustement.



Variation de la mesure de masse avec l'échelle



Effet de la résolution spatiale:

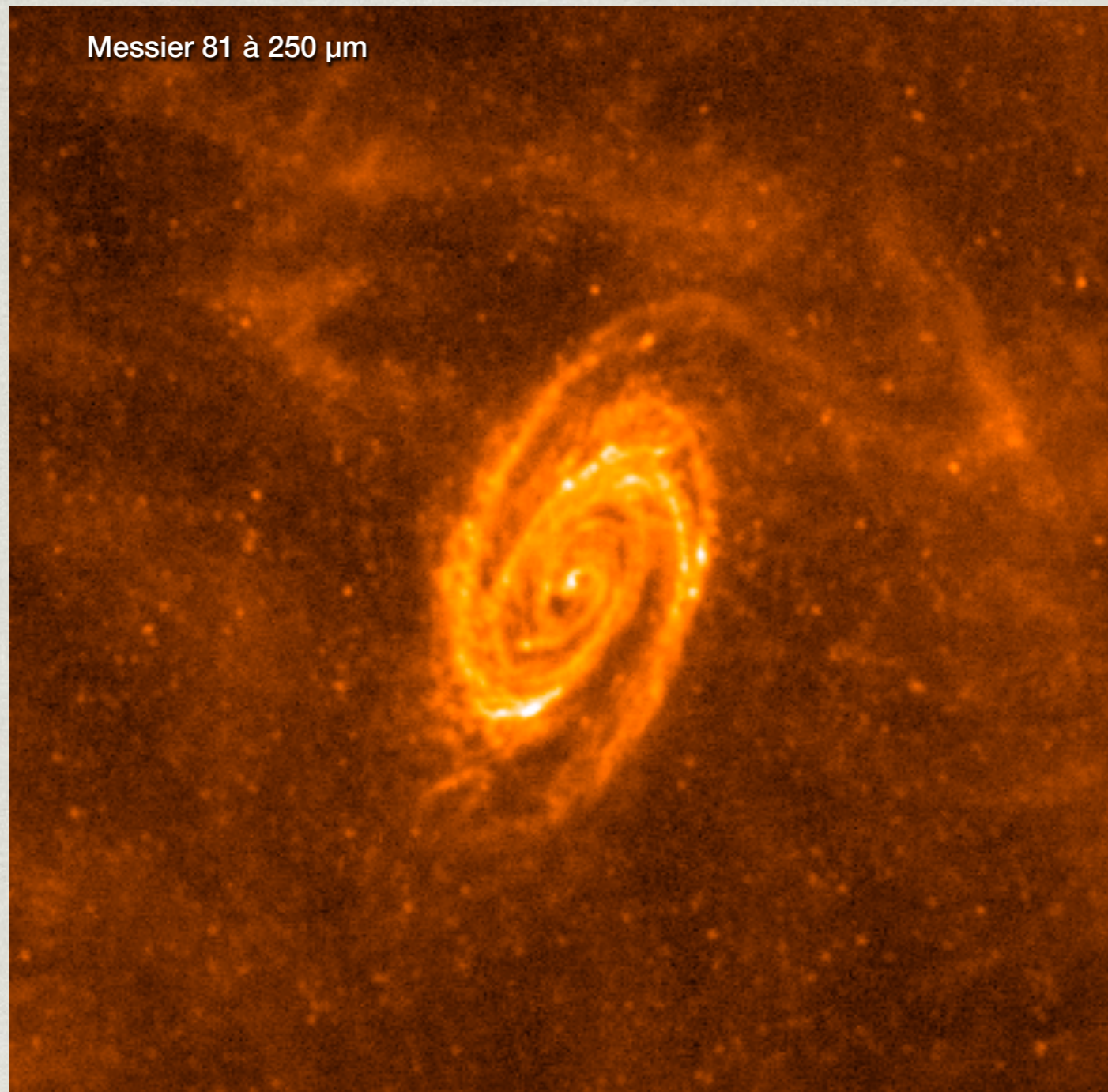
(Galliano et al., 2011)

- * la masse est sous-estimée d'un facteur 1.5 quand elle est mesurée à l'échelle globale.
- * La mesure se stabilise vers 30-50 pc, soit l'échelle de résolution des grandes régions froides du milieu interstellaire (Nuages Moléculaires Géants).

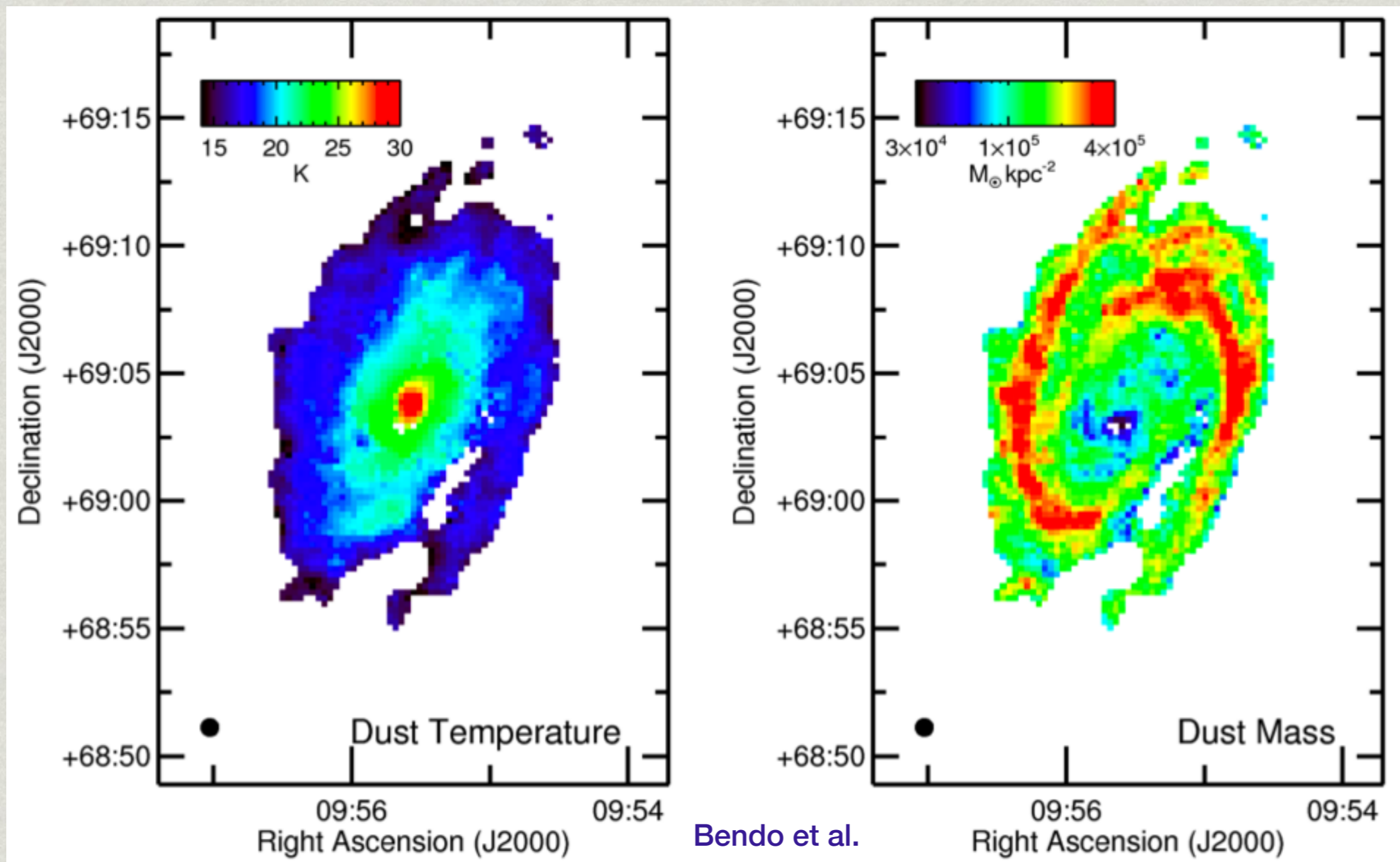
Conclusions sur la masse de poussière

- * Il n'est pas possible de se référer à un modèle universel pour la composition de la poussière.
- * Il est possible de trouver un modèle de poussière qui reproduise l'émission IR des galaxies tout en restant compatible avec les abondances chimiques, et sans invoquer des masses surprenantes de poussière froide.
- * La résolution spatiale d'Herschel est déterminante: si les complexes moléculaires (30 pc) ne sont pas résolus, la masse de poussière peut être fortement sous-estimée.

Température et masse de poussière dans la galaxie spirale M81



Température et masse de poussière dans la galaxie spirale M81

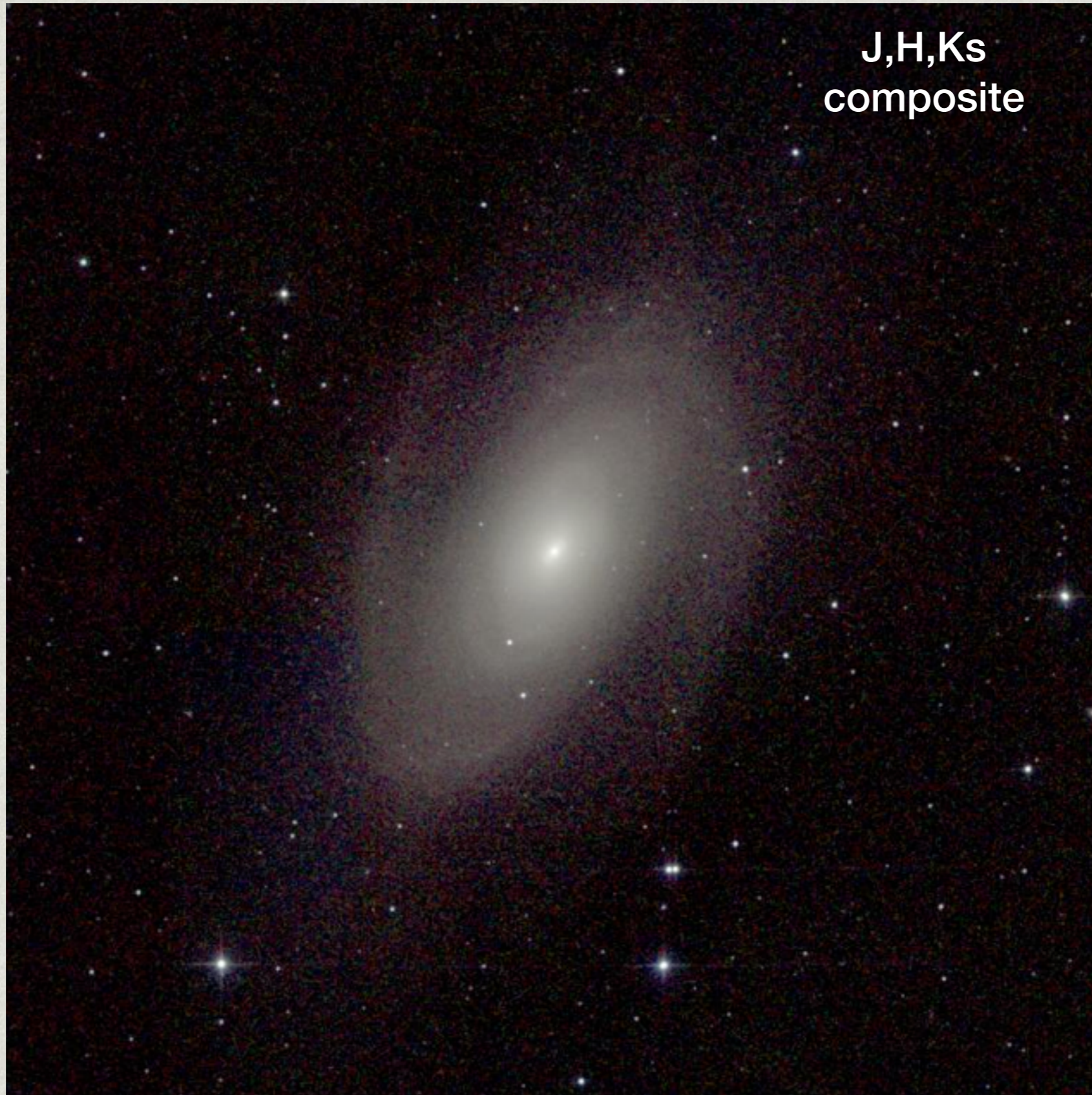


La structure spirale (brillante) de la galaxie n'est pas due à une augmentation du chauffage par des populations stellaires jeunes localisées dans les bras. La distribution de température est surtout radiale. Les régions brillantes en IR correspondent en fait à l'accumulation de masse créée par le passage de l'onde spirale dans le disque.

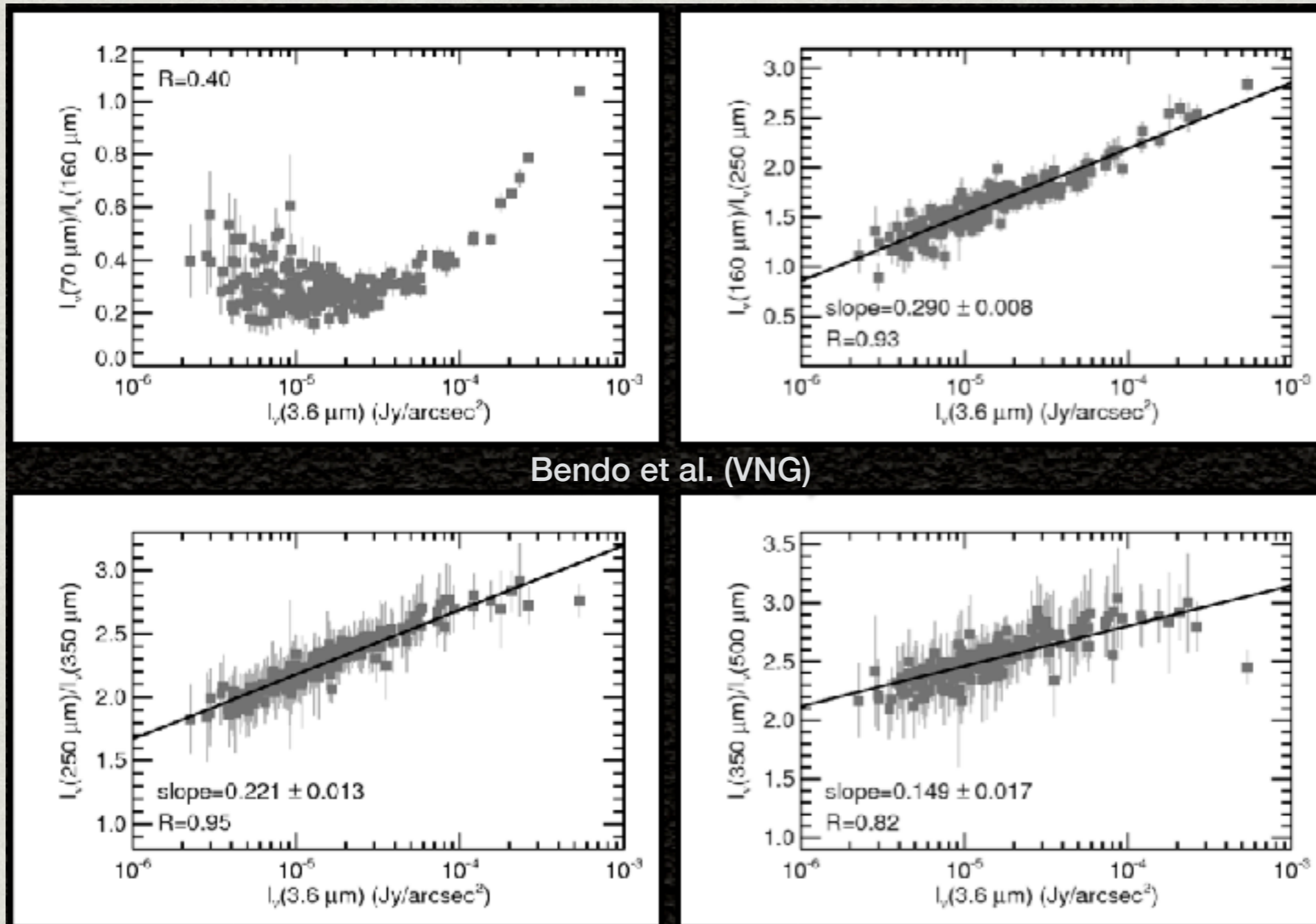
Quelle source d'énergie pour l'émission FIR de M81?

Quelle est la composante des galaxies qui ne montre pratiquement pas de structure spirale?

Quelle source d'énergie pour l'émission FIR de M81?



Quelle source d'énergie pour l'émission FIR de M81?



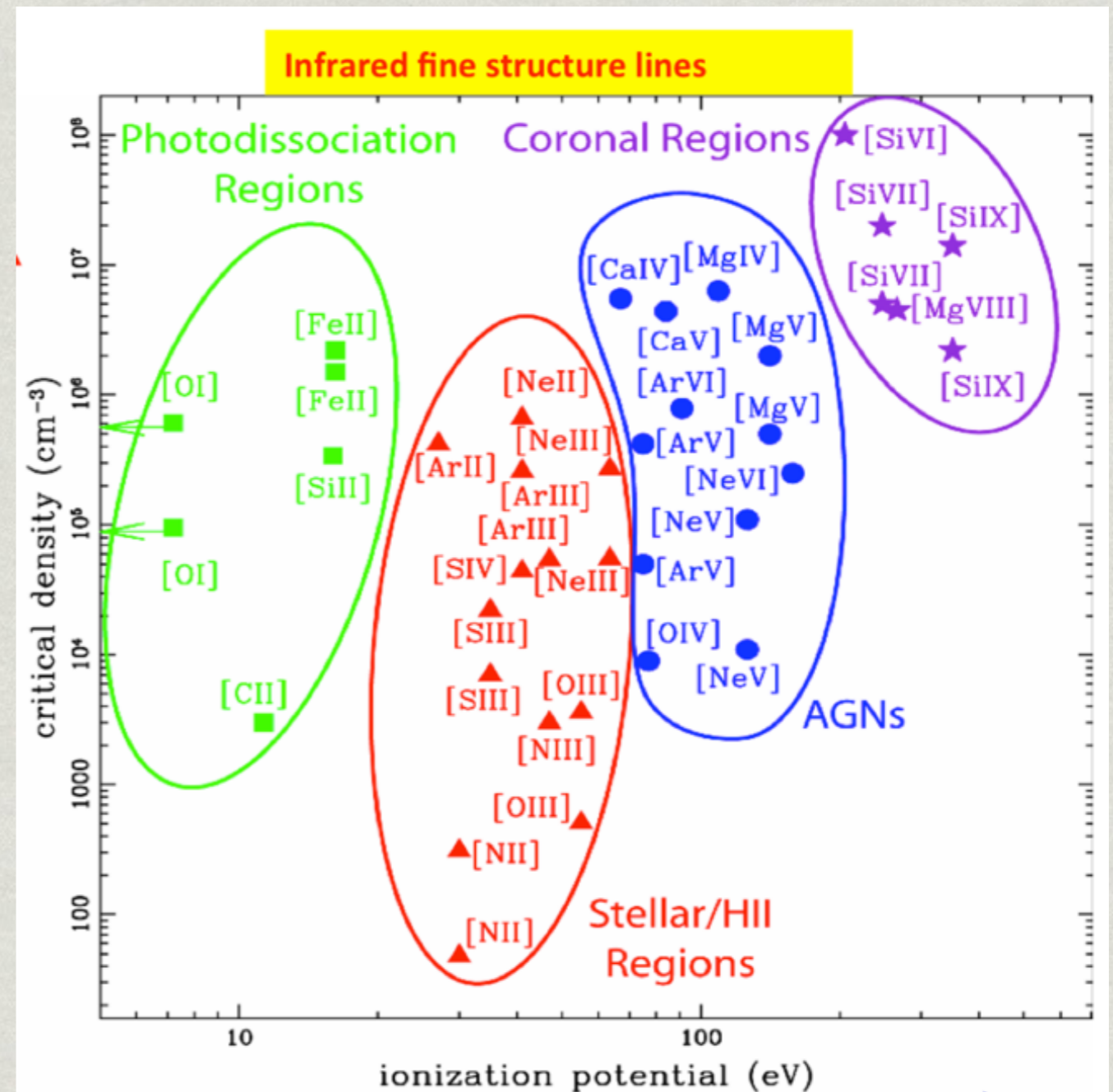
- * Au delà de 160 μm , les couleurs FIR (\approx Température des poussières) sont très corrélées avec la brillance NIR (population stellaires âgées, 10^9 yr).
- * Il y a un changement de régime entre 70 et 160 μm , signe de l'influence d'une autre source de chauffage..

Conclusions sur le chauffage de la poussière

- * Bien que le rayonnement UV soit très efficace à chauffer la poussière (bien plus que le visible), les populations stellaires âgées (10^8 ans et plus) peuvent contribuer très significativement au chauffage.
- * Herschel permet la résolution d'une longue controverse sur l'origine de l'émission IR dans les galaxies (étoiles jeunes et massives ou populations générales):
 - * Cela dépend du type de la galaxie et donc de son histoire évolutive.

Raies de structure fines: sondes du milieu interstellaire

- * Ces raies correspondent à des transitions d'état d'excitation électroniques d'atomes ionisés principalement.
- * L'excitation se fait par collision electron-ion.
- * Au delà d'une certaine densité, la désexcitation collisionnelle l'emporte sur la désexcitation radiative.



Les raies permettent de sonder la structure en densité-énergie du milieu interstellaire

Exemple: modélisation multiphase du milieu interstellaire de Haro 11

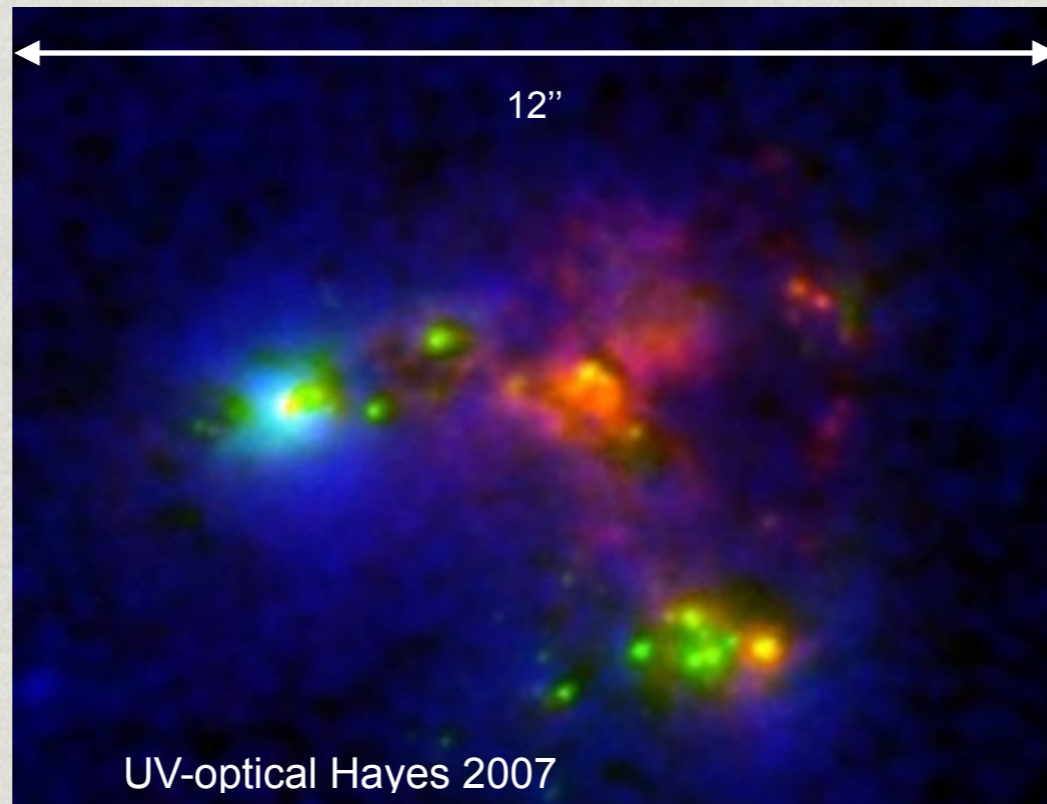
$$L_{\text{FIR}} \sim 1 \times 10^{11} L_{\odot}$$

$$Z = 1/7 Z_{\odot}$$

Pas de détection classique
du gaz interstellaire

$$M(\text{CO}) < 10^8 M_{\odot}$$

$$M(\text{HI}) < 10^8 M_{\odot}$$



Exemple: modélisation multiphase du milieu interstellaire de Haro 11

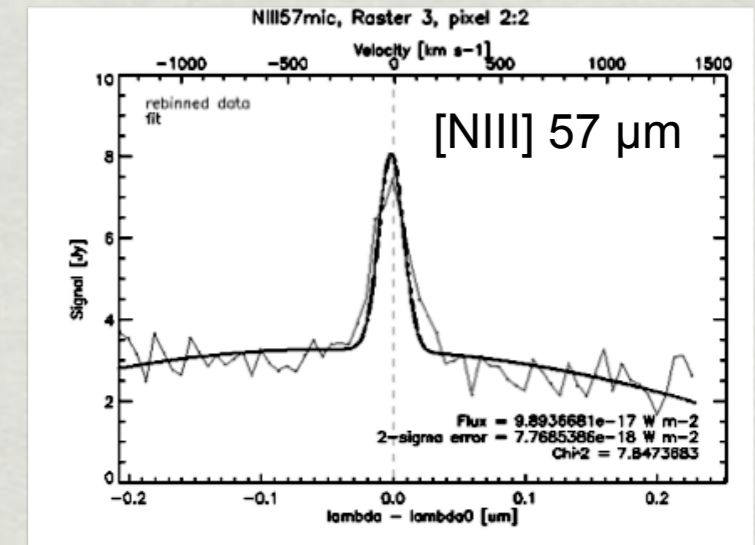
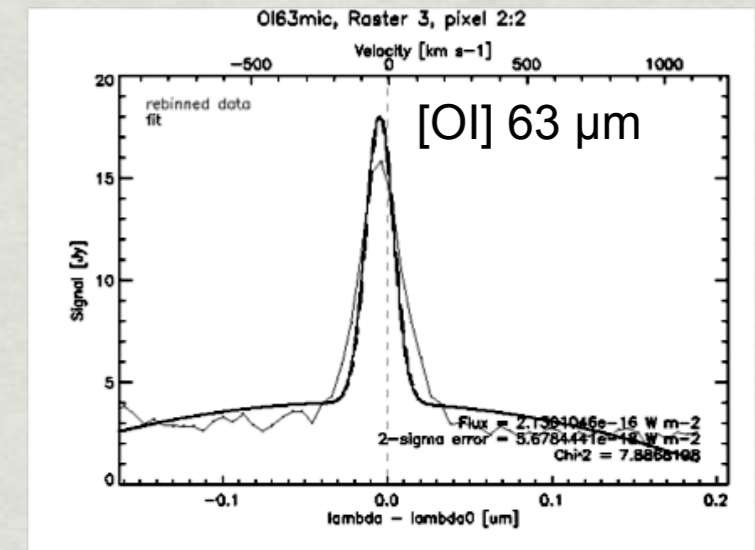
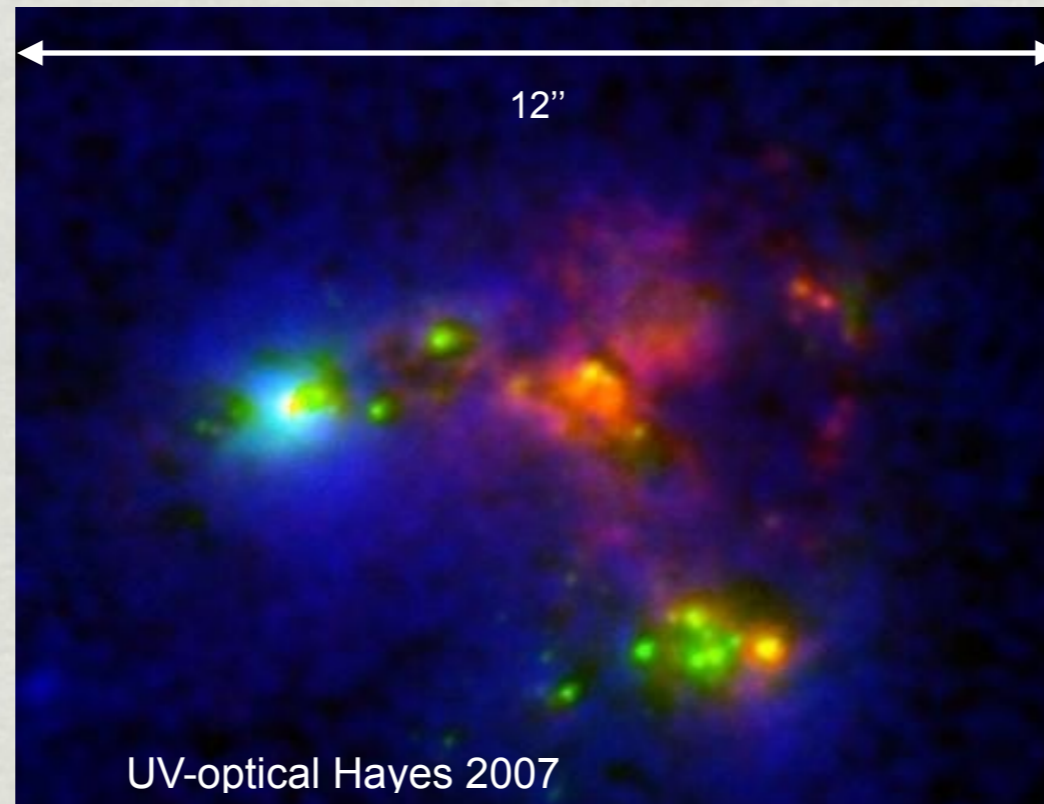
$$L_{\text{FIR}} \sim 1 \times 10^{11} L_{\odot}$$

$$Z = 1/7 Z_{\odot}$$

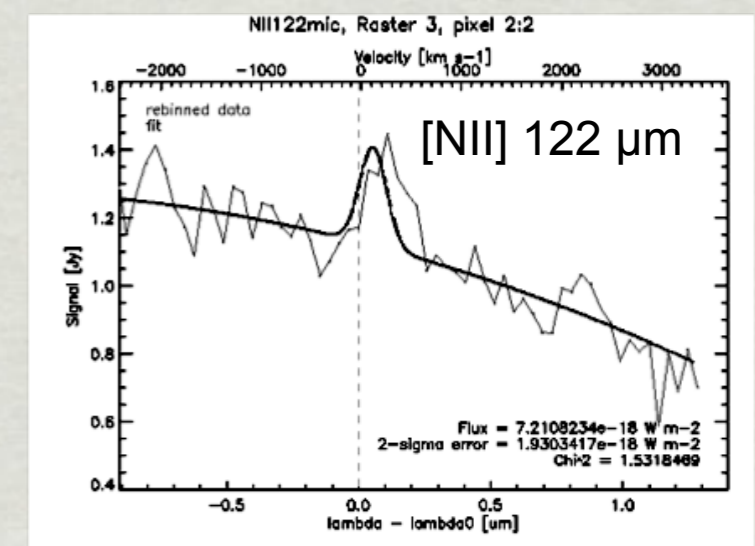
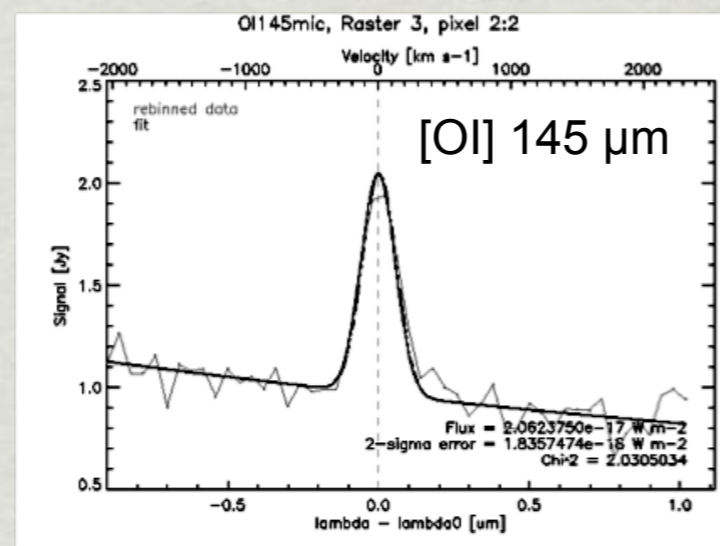
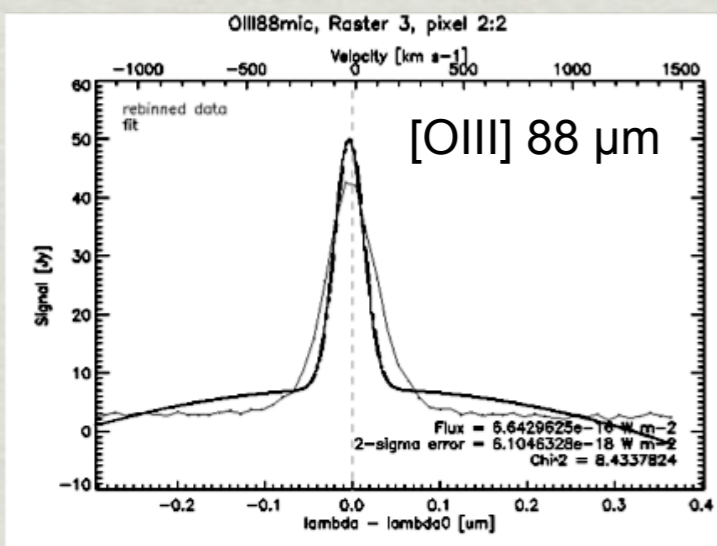
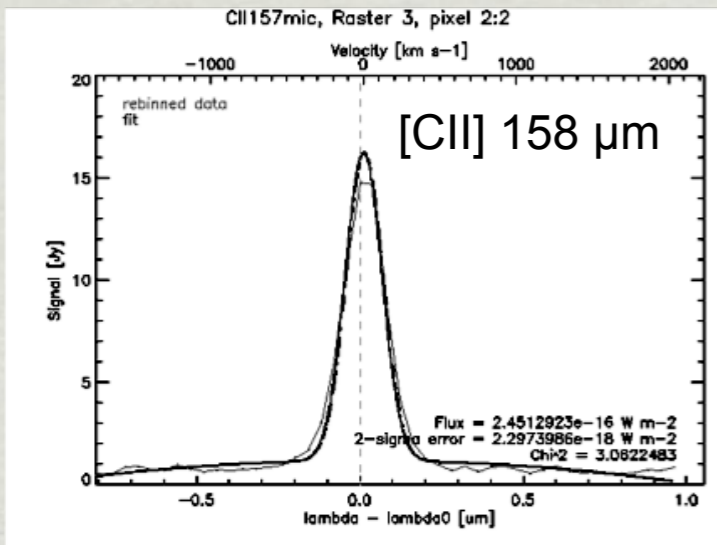
Pas de détection classique du gaz interstellaire

$$M(\text{CO}) < 10^8 M_{\odot}$$

$$M(\text{HI}) < 10^8 M_{\odot}$$

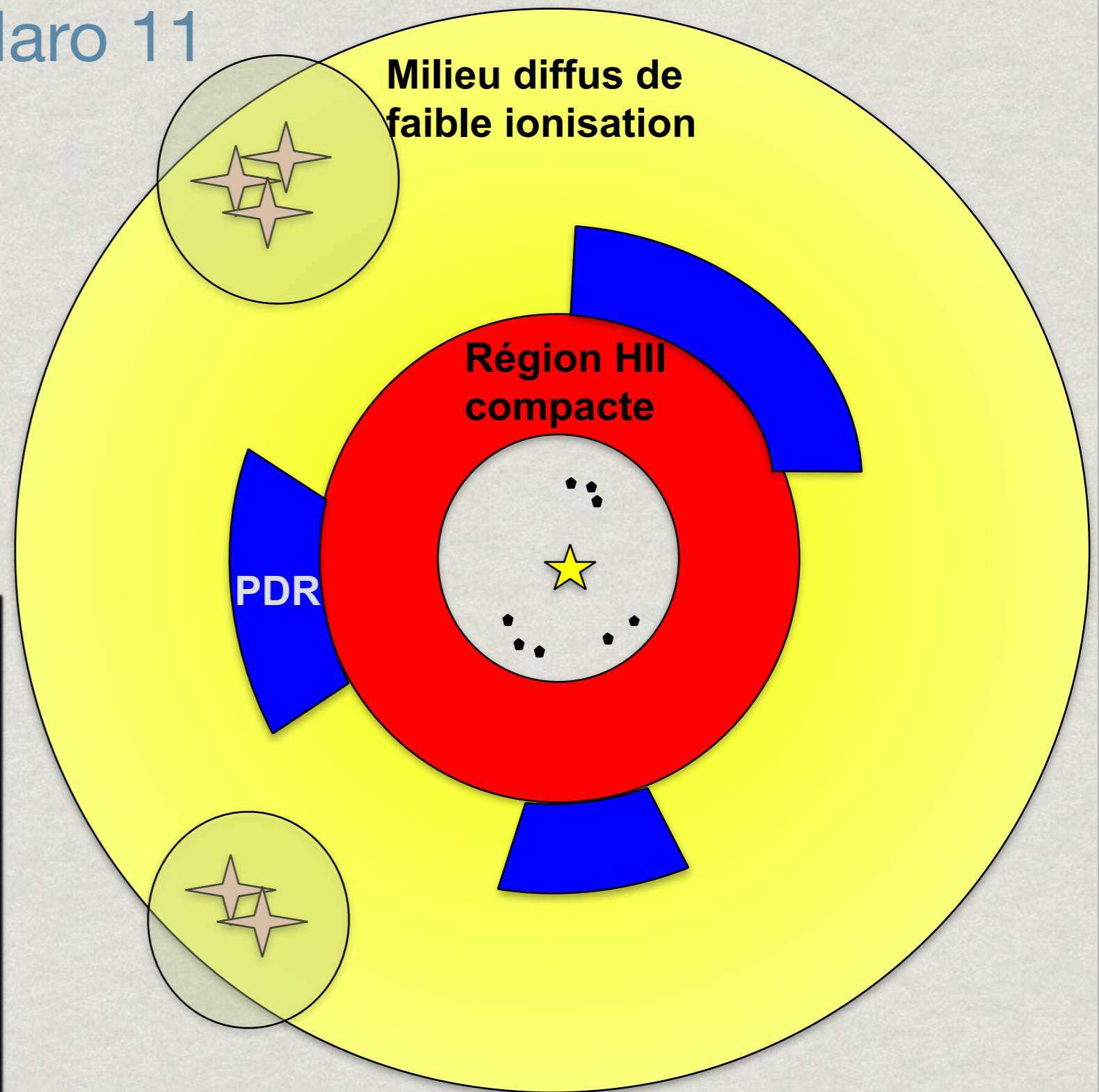
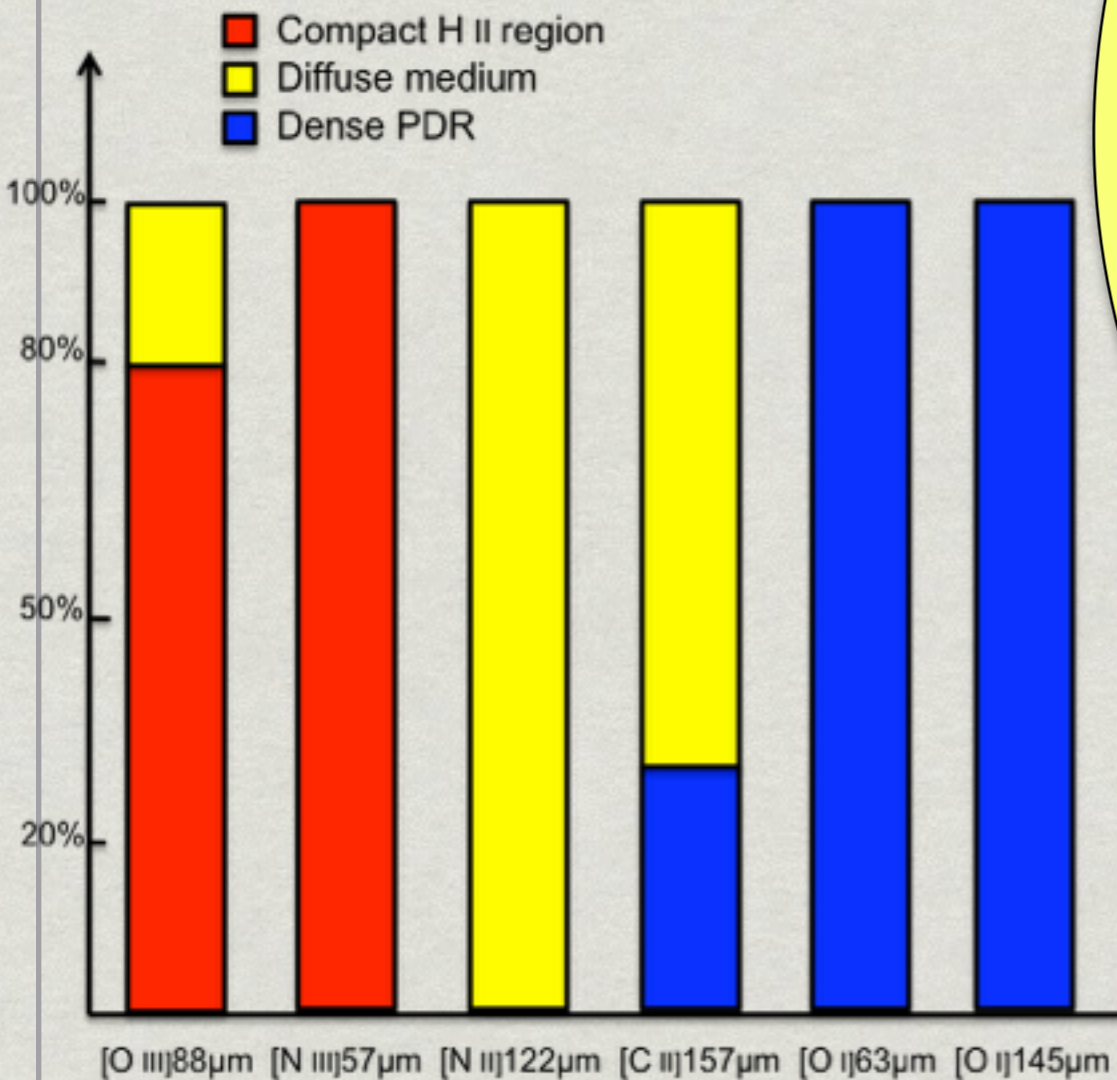


(Cormier et al 2012)



Exemple: modélisation multiphase du milieu interstellaire de Haro 11

Reconstruction d'une image globale

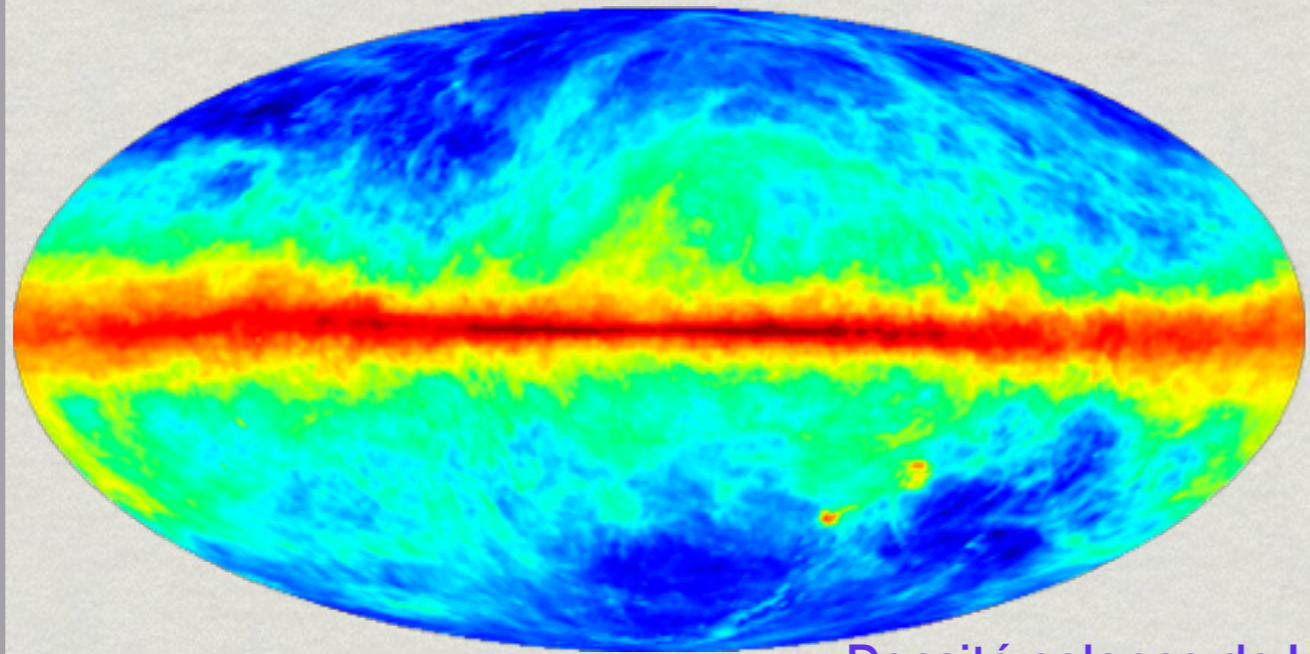


PDR: région de photo-dissociation

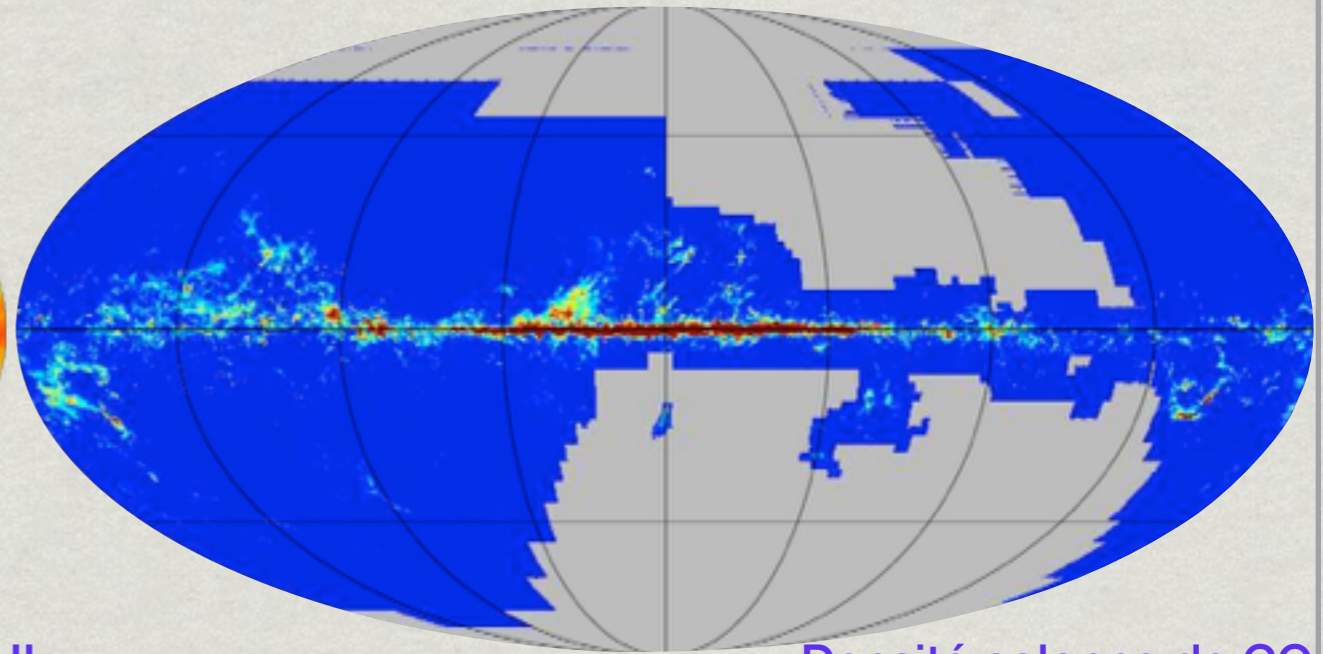
Conclusions sur l'utilisation des raies de structure fine

- * Il est possible avec Herschel de construire une représentation complète du milieu interstellaire d'une galaxie en accédant aux détails de l'état thermodynamique (densité, énergie) des différentes phases.
- * En comprenant mieux la structure physique et énergétique du milieu interstellaire des galaxies, cela nous permet de construire de nouvelles sondes de l'activité de formation stellaire dans les galaxies qui exploitent des observables accessibles à grand décalage spectral.

Du gaz sombre dans la Voie Lactée? l'apport de Planck



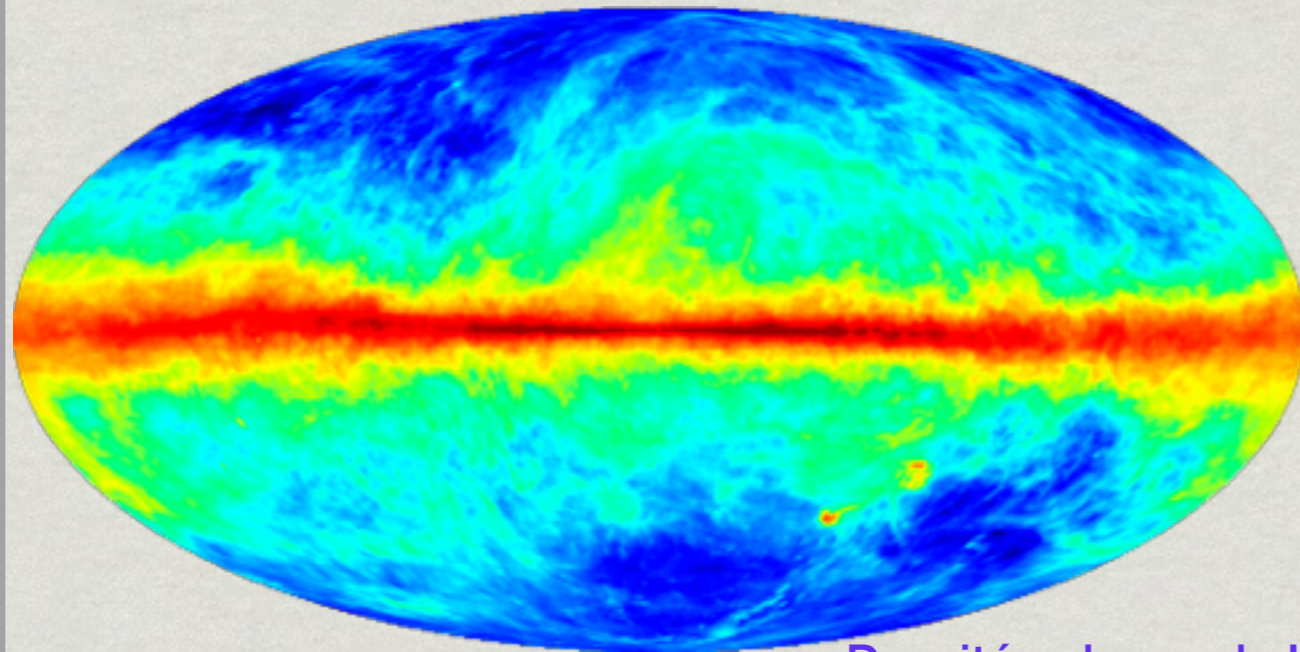
Densité colonne de HI



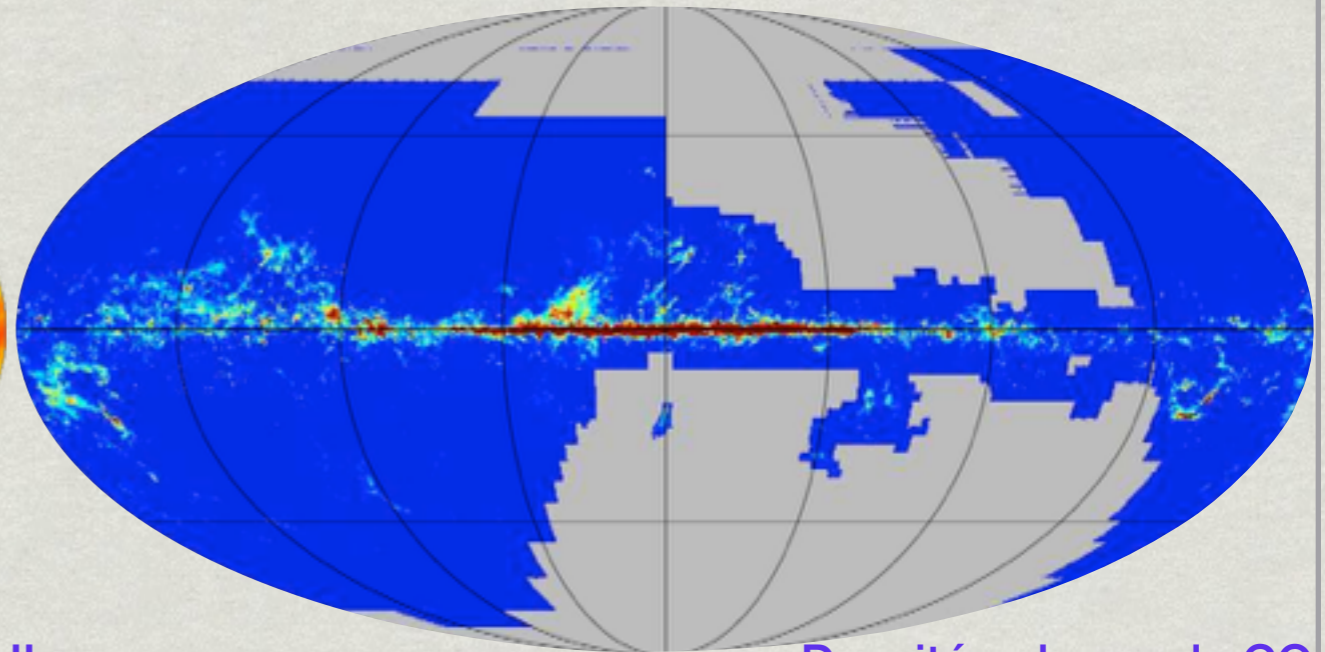
Densité colonne de CO

- * Le gaz, atomique ou moléculaire, est la composante la plus importante du milieu interstellaire.
- * L'abondance du gaz est une contrainte importante pour les scénarios d'évolution des galaxies.
- * Le gaz moléculaire est le carburant de la formation stellaire, mais il est difficile à observer.

Du gaz sombre dans la Voie Lactée? l'apport de Planck



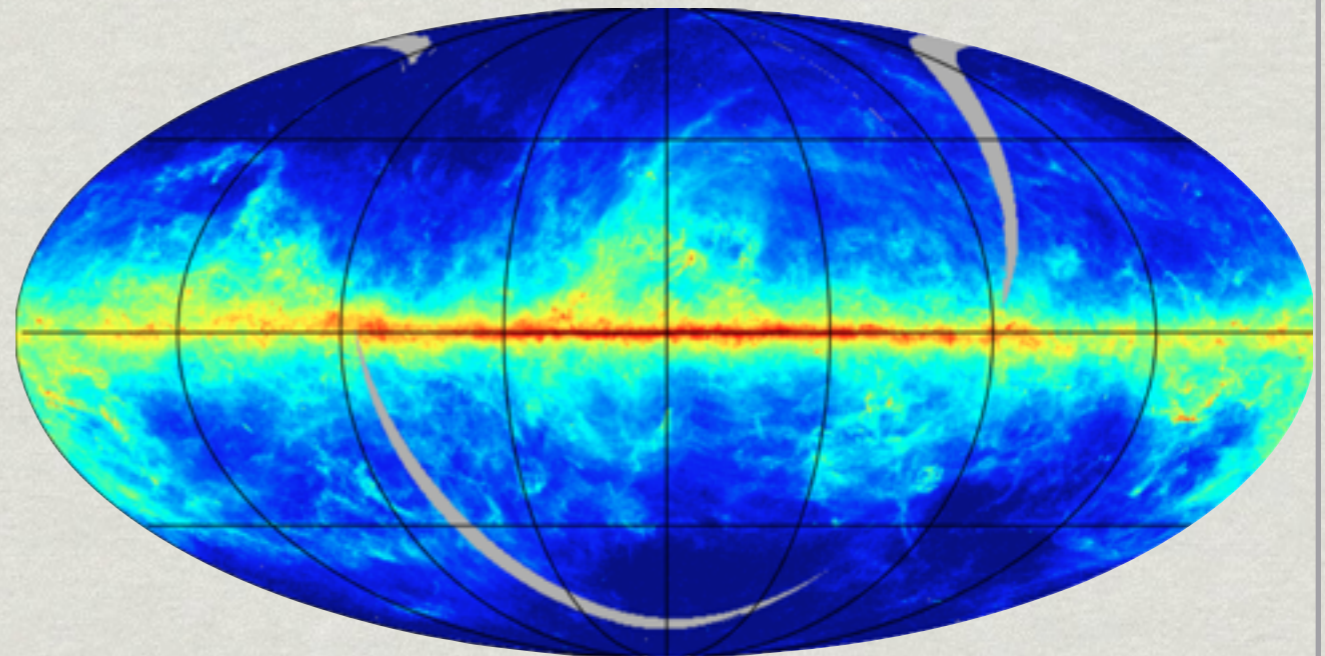
Densité colonne de HI



Densité colonne de CO

- * Le gaz, atomique ou moléculaire, est la composante la plus importante du milieu interstellaire.
- * L'abondance du gaz est une contrainte importante pour les scénarios d'évolution des galaxies.
- * Le gaz moléculaire est le carburant de la formation stellaire, mais il est difficile à observer.
- * La poussière, qui est mélangée avec toutes les phases de gaz, est un traceur potentiellement intéressant du milieu interstellaire

Données Planck



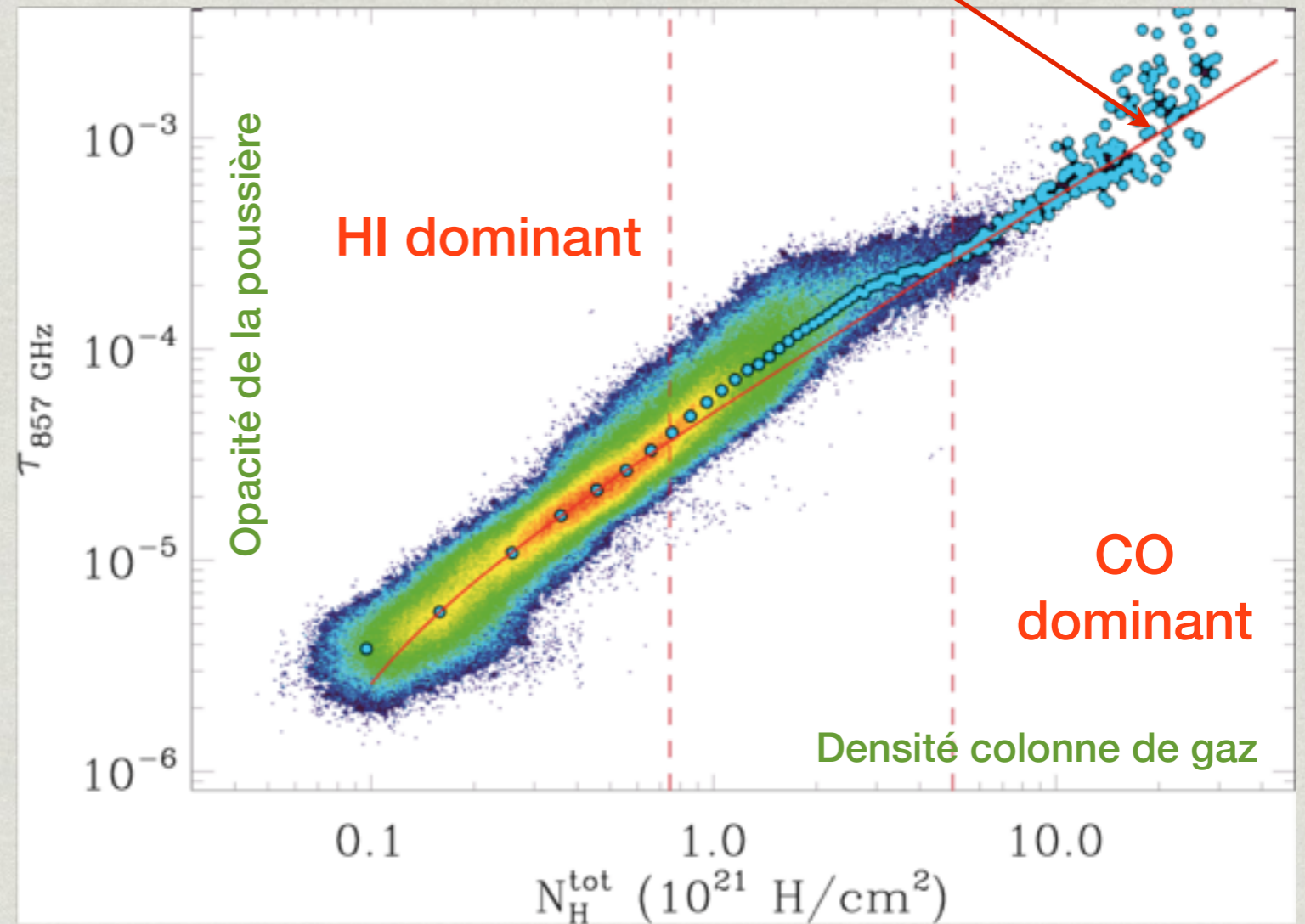
Profondeur optique de la poussière

Ade et al. 2011 (J. P. Bernard)

Du gaz sombre dans la Voie Lactée? l'apport de Planck

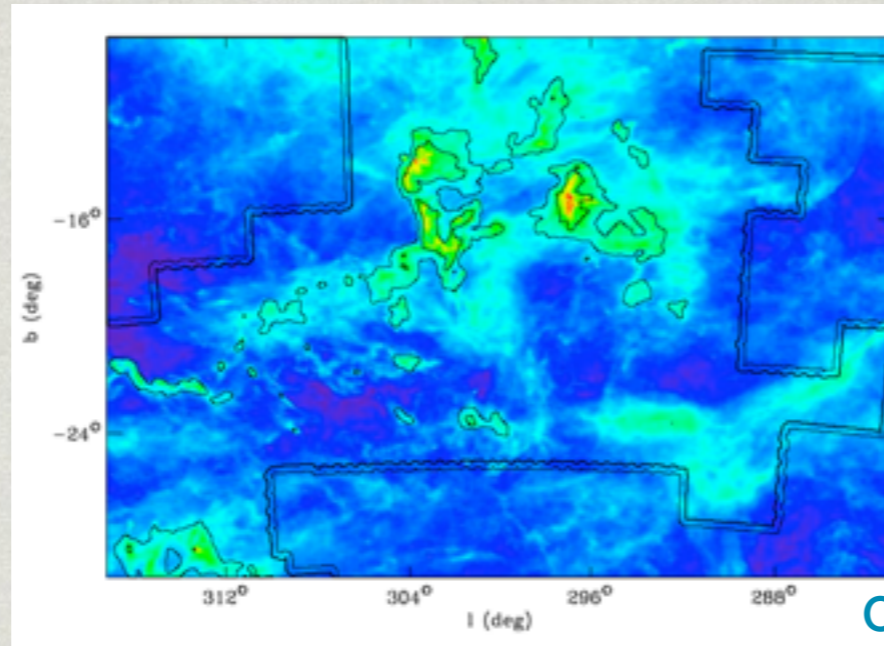
- * Hypothèse principale: l'émissivité de la poussière par unité de colonne de gaz est constante.
- * En se concentrant sur les hautes latitudes galactiques (nuages proches), l'hypothèse est plausible.
- * On trouve effectivement une bonne proportionnalité entre l'opacité de la poussière et la densité colonne de gaz pour les faibles (HI) et les hautes (CO) densités.
- * Il existe un excès significatif d'opacité pour les densités intermédiaires.

La relation linéaire attendue en supposant le rapport gaz/poussière constant, telle qu'ajustée sur les régions de faibles densités

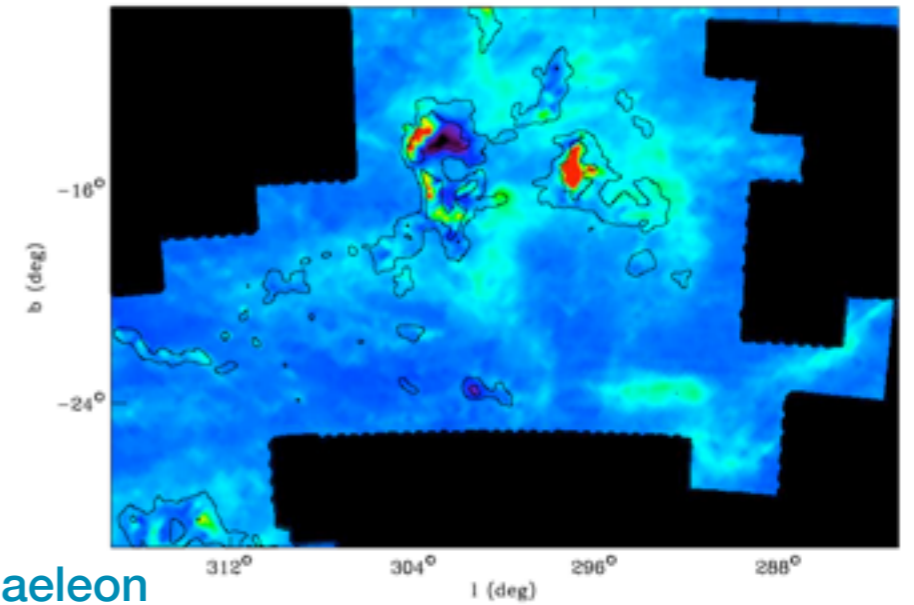


Du gaz sombre dans la Voie Lactée? l'apport de Planck

* A gauche: profondeur optique de la poussière.



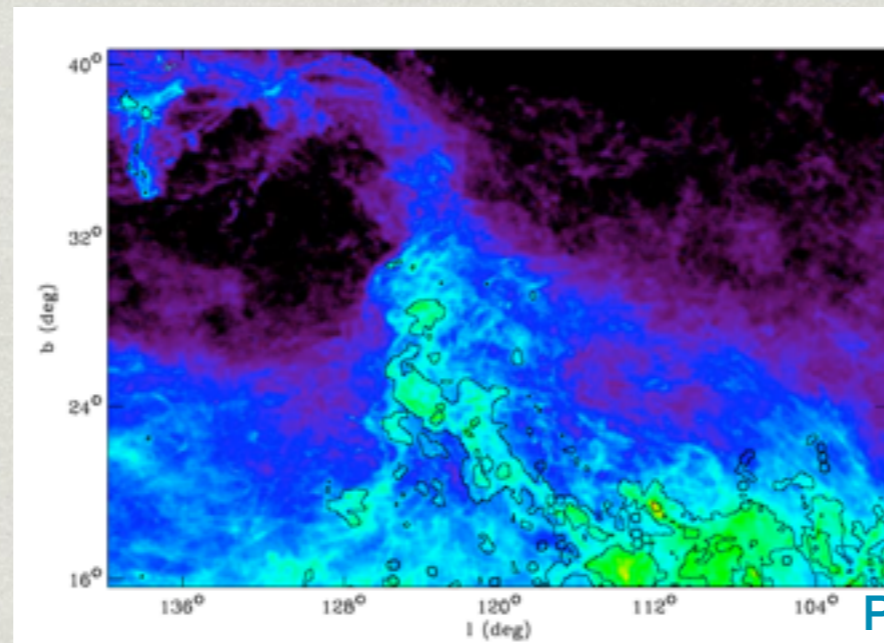
Chamaeleon



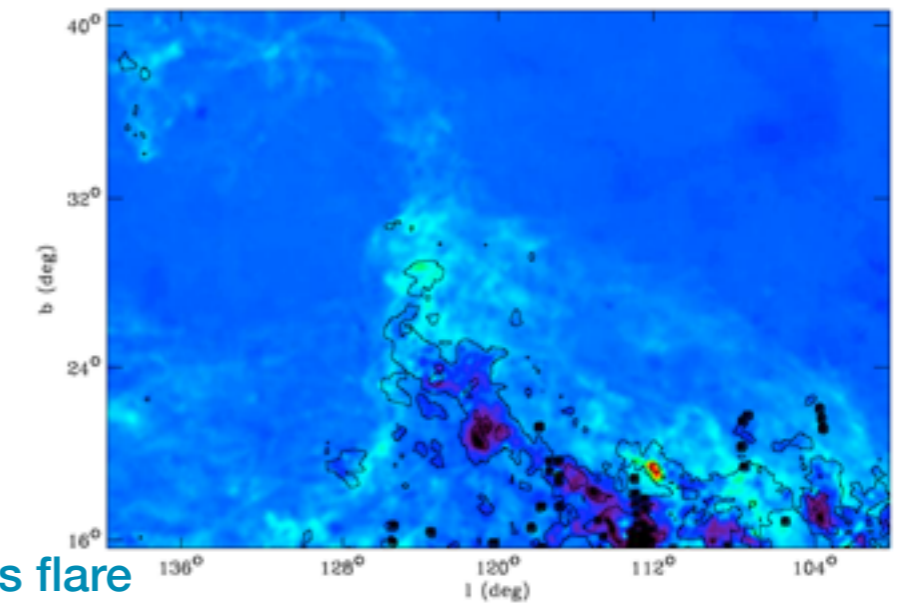
Ade et al. 2011 (J. P. Bernard)

* A droite: densité colonne de gaz sombre.

* Contours: densité colonne de CO.



Polaris flare

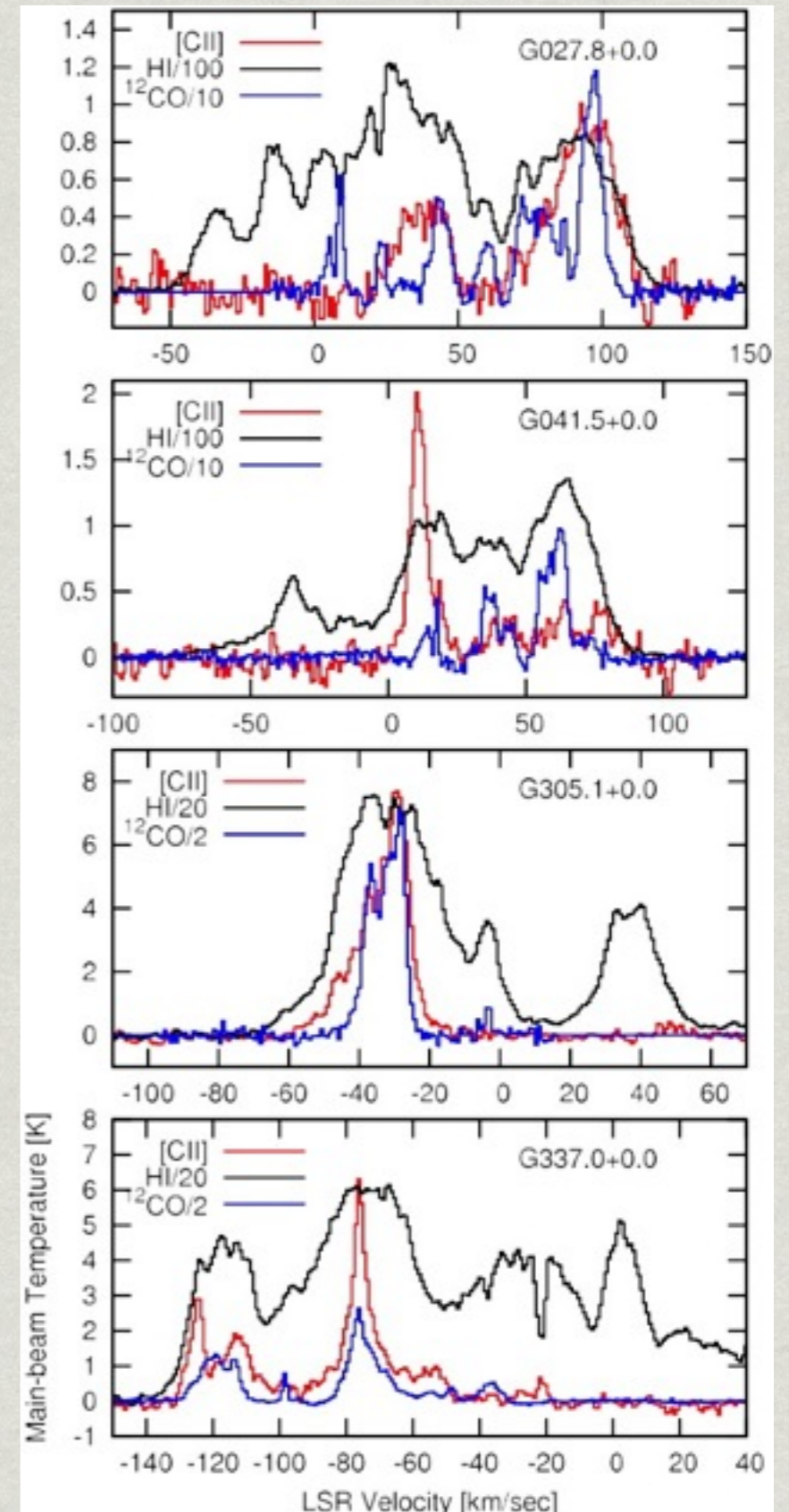
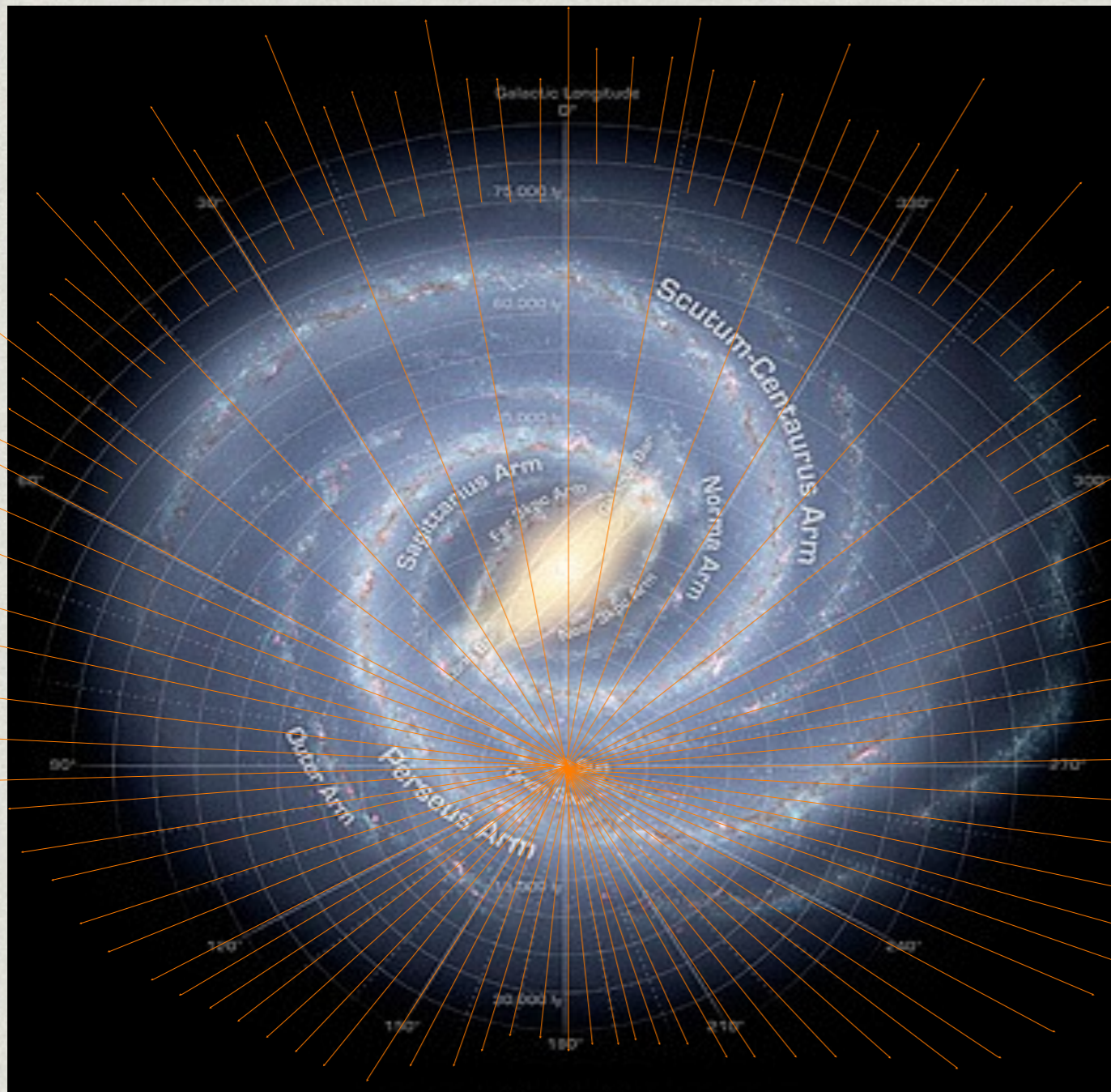


Intégré sur l'ensemble du voisinage solaire, le gaz sombre représente 28% du gaz atomique, et 118% du gaz moléculaire tracé par CO.

Cette composante de gaz sombre laisse aussi sa trace dans les observations en rayon gamma de la Galaxie (Grenier et al. 2005).

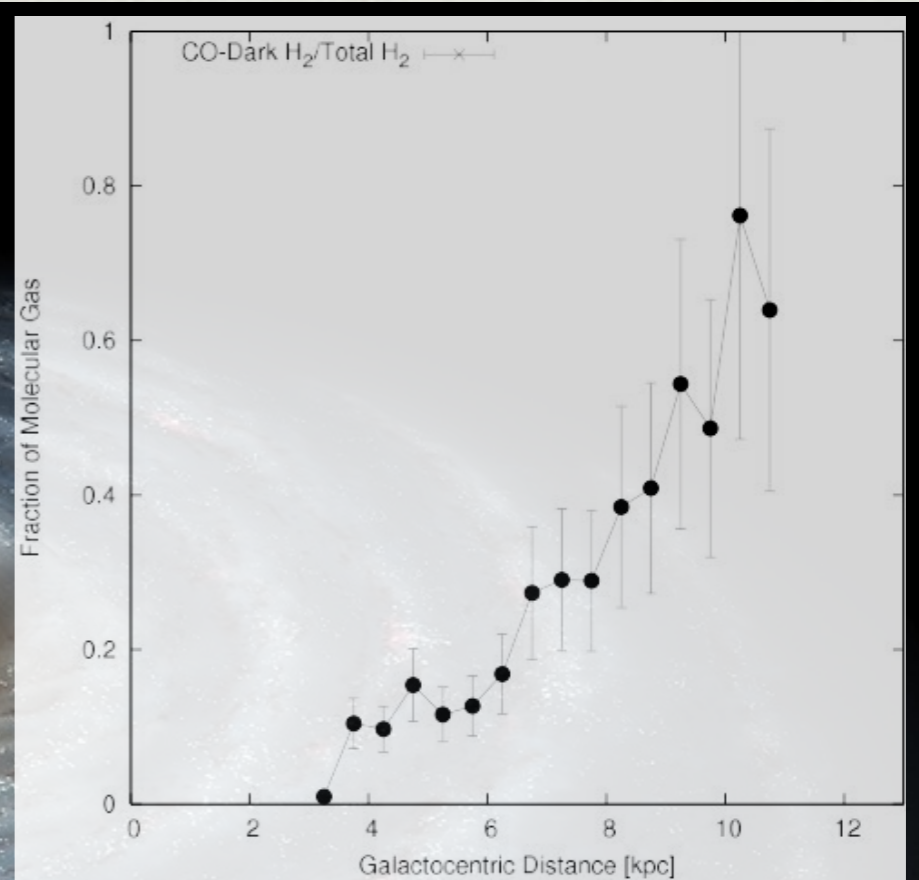
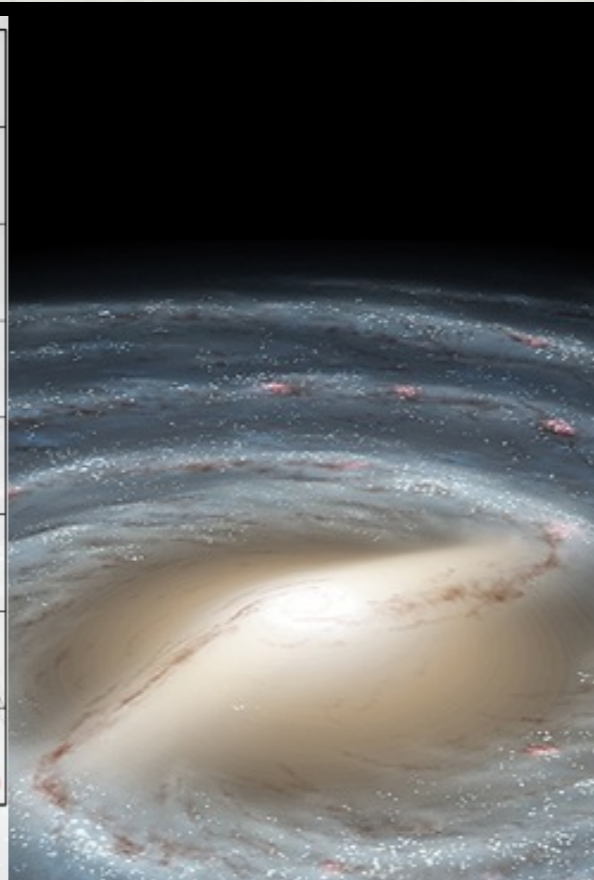
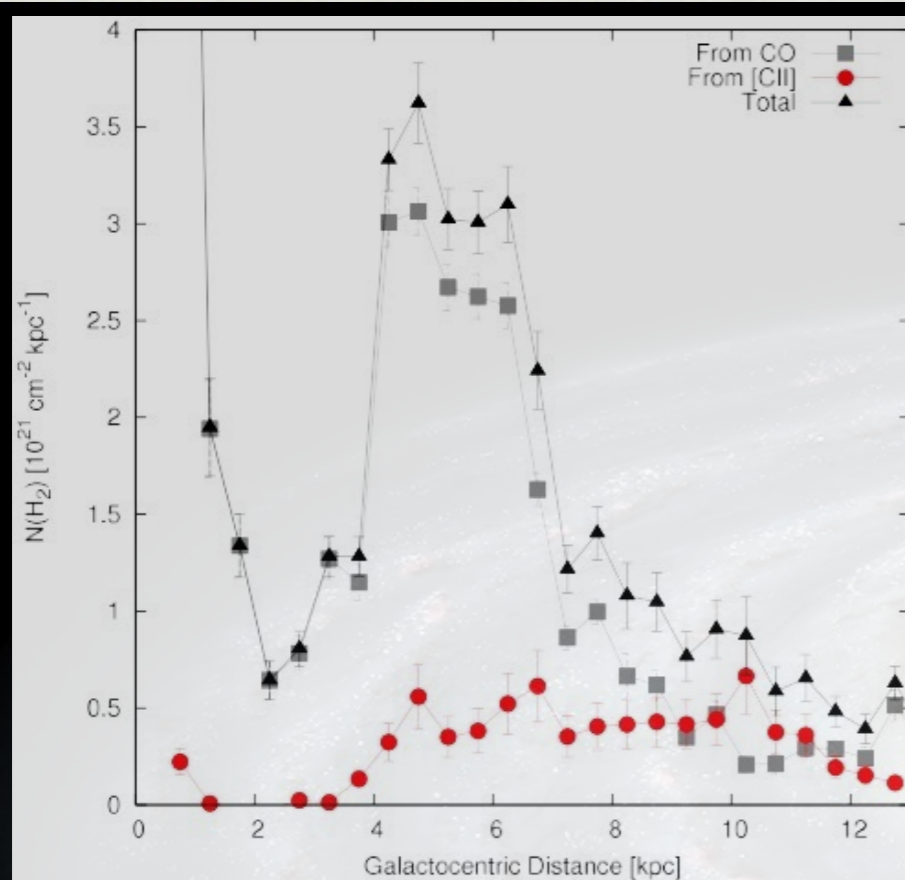
Un autre indice, avec le relevé C⁺ (158 μm) de la Voie Lactée par HIFI

500 Lignes de visée à travers le Plan Galactique



Pineda et al. 2013

Relevé C⁺ de la Voie Lactée



- Le gaz H₂ sombre domine la phase moléculaire pour $r > R_0$
- Cela représente une augmentation de ~30% par rapport au H₂ déduit de CO

Pineda et al. 2013

Conclusions sur le gaz sombre dans les galaxies

- * Plusieurs pistes indépendantes pointent vers l'existence d'une phase encore non détectée du gaz dans les galaxies.
- * L'hypothèse la plus probable est qu'il s'agit de gaz moléculaire (H_2) suffisamment perméable au rayonnement pour que la molécule CO soit complètement photo-dissociée.
- * Le réservoir moléculaire des galaxies pourrait être au moins deux fois plus important qu'observé jusqu'à présent (et ce d'autant plus que la galaxie est pauvre en éléments lourds).

Evolution des galaxies à l'échelle cosmique

- * Mode de formation stellaire au cours du temps.
- * Croissance en masse des galaxies.
- * Incertitudes sur la place (le rôle?) des trous noirs super-massifs.

Quelques mots rapides sur le “redshift”

- * Pour étudier l'évolution des galaxies, on ne peut plus utiliser des notions de distances, ou d'âge, qui dépendent trop d'un modèle de cosmologie, et on préfère se rapporter au décalage spectral (“redshift”) observable.
- * Dans le modèle cosmologique de référence (LCDM=modèle comprenant de l'énergie noire et de la matière noire “froide”) tel qu'établit par les données du satellite Planck:
 - * L'âge de l'Univers est de 13.8 Gyr.
 - * L'émission du fond cosmologique (2.7K) se produit à $z=1090$.
 - * La galaxie la plus lointaine découverte à ce jour est à $z=7.5$, et existe donc alors que l'Univers n'est âgé que de 700 Myr.
 - * L'intervalle $z=[1,2]$ correspond à une durée de 2.6 Gyr.
 - * A $z=1$ l'univers n'est âgé “que” de 5.8 Gyr soit moins de la moitié de son âge actuel.

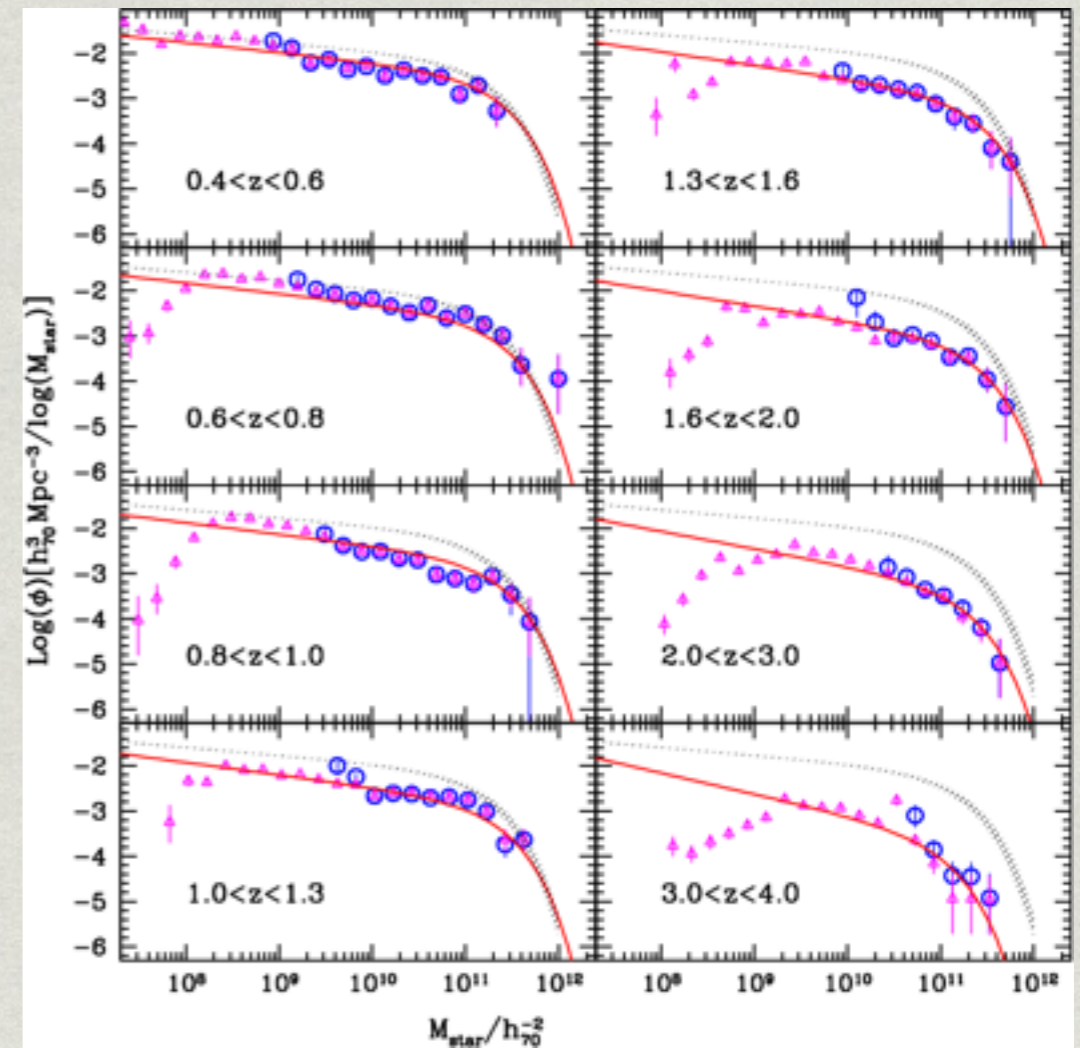
Evolution des galaxies, la vision de l'infrarouge

Les paramètres principaux que l'on peut utiliser pour mesurer l'évolution des galaxies au cours du temps sont:

Evolution des galaxies, la vision de l'infrarouge

Les paramètres principaux que l'on peut utiliser pour mesurer l'évolution des galaxies au cours du temps sont:

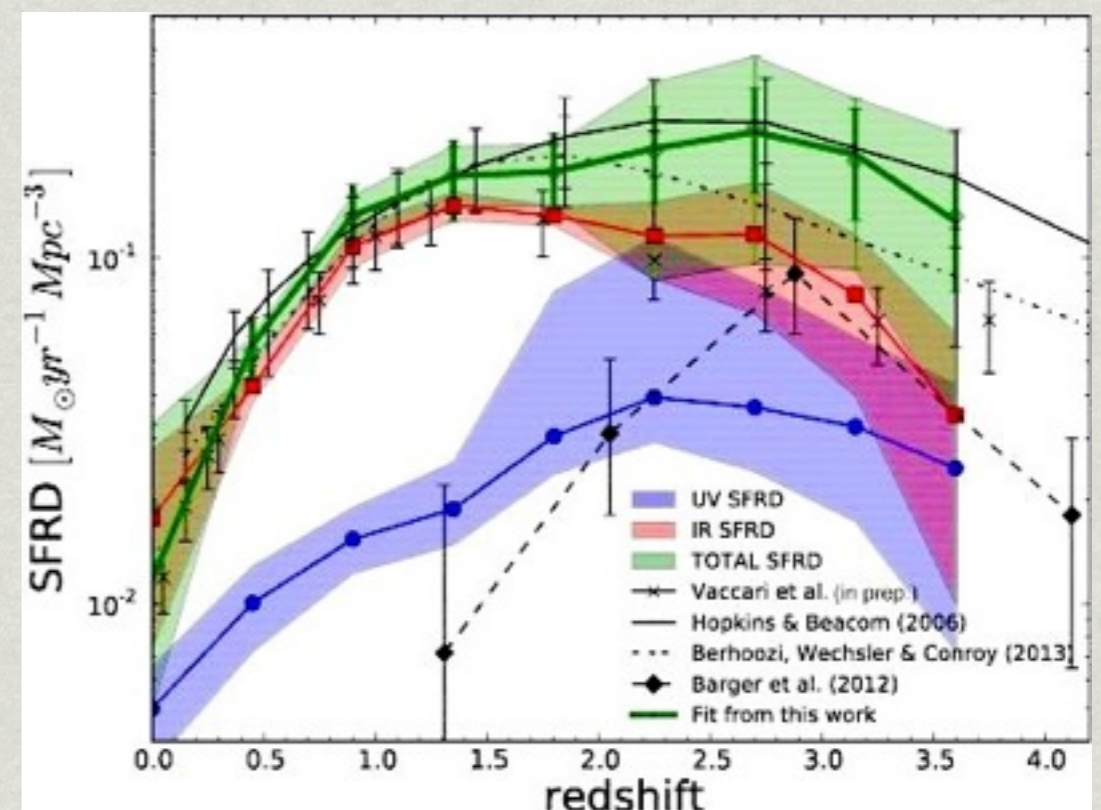
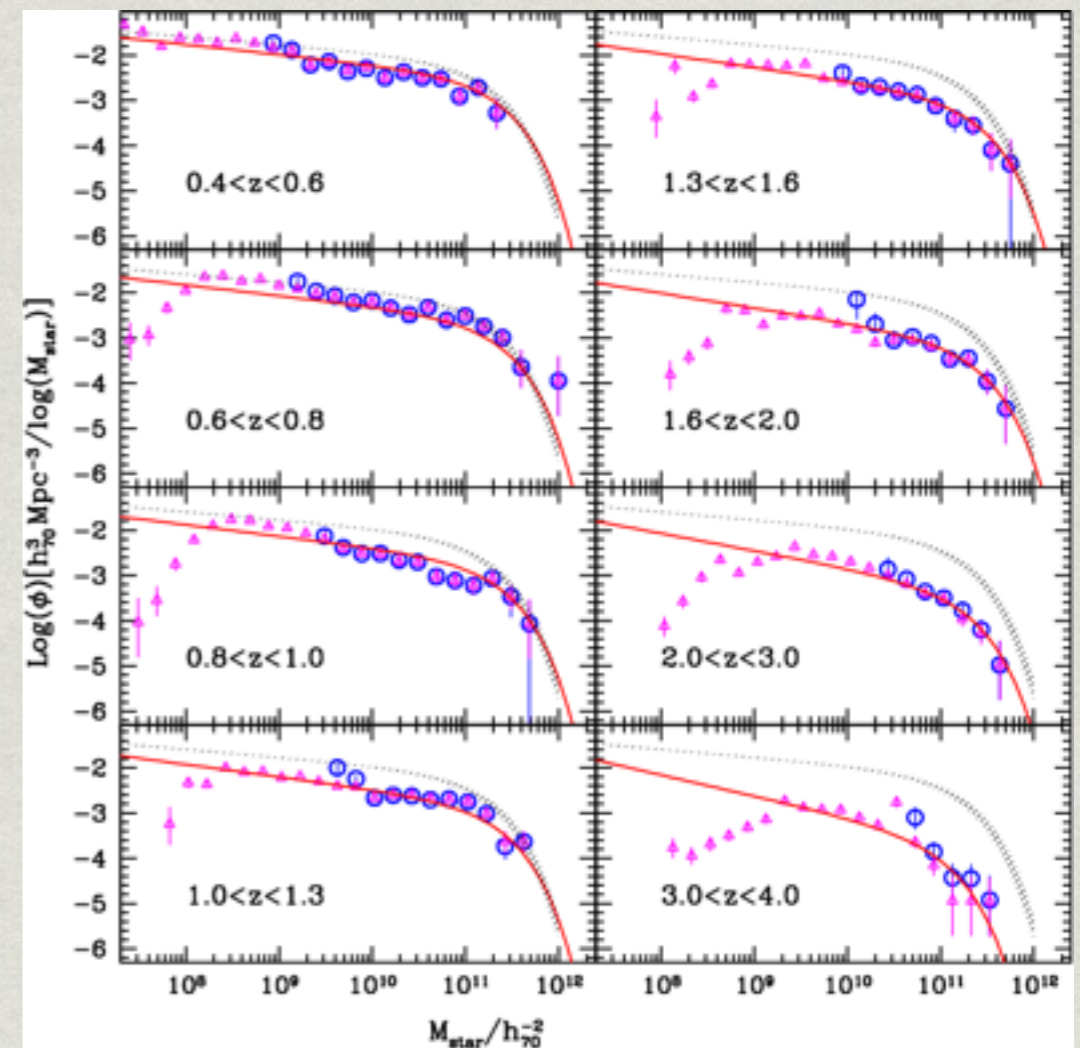
- * La masse d'étoiles présentes dans une galaxie (M_*).
- * Photométrie multi-bandes optique-NIR et ajustement de la distribution spectrale par une synthèse des populations stellaires.



Evolution des galaxies, la vision de l'infrarouge

Les paramètres principaux que l'on peut utiliser pour mesurer l'évolution des galaxies au cours du temps sont:

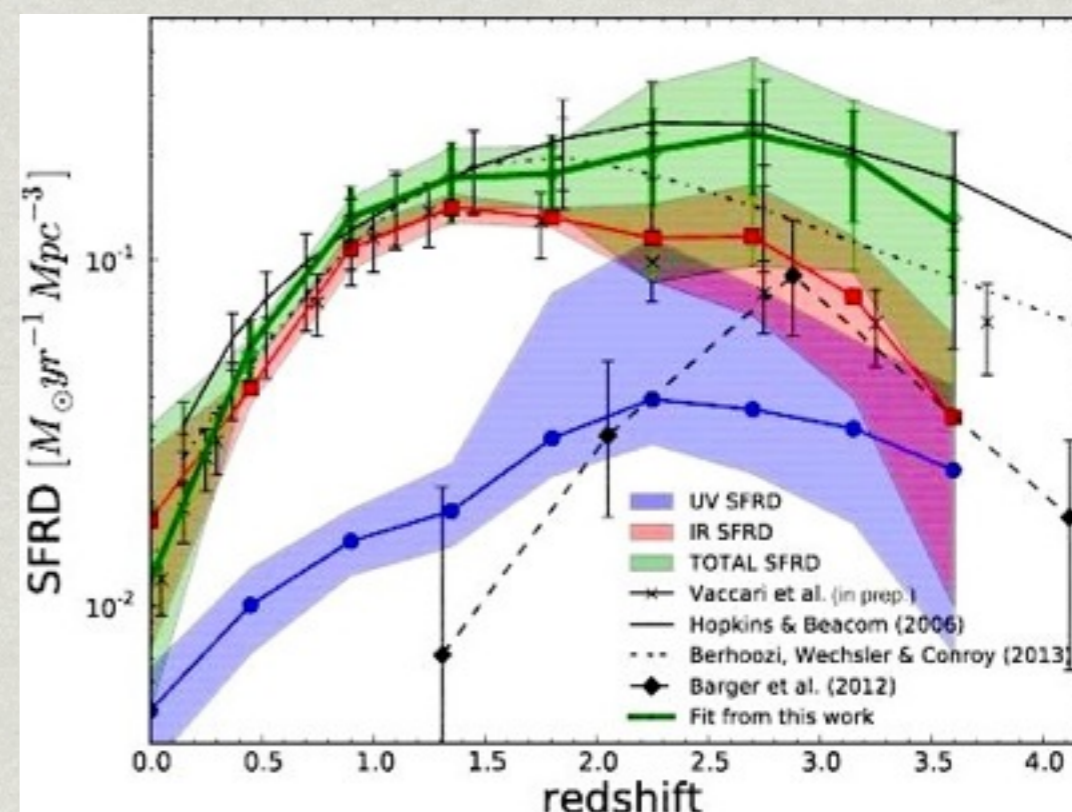
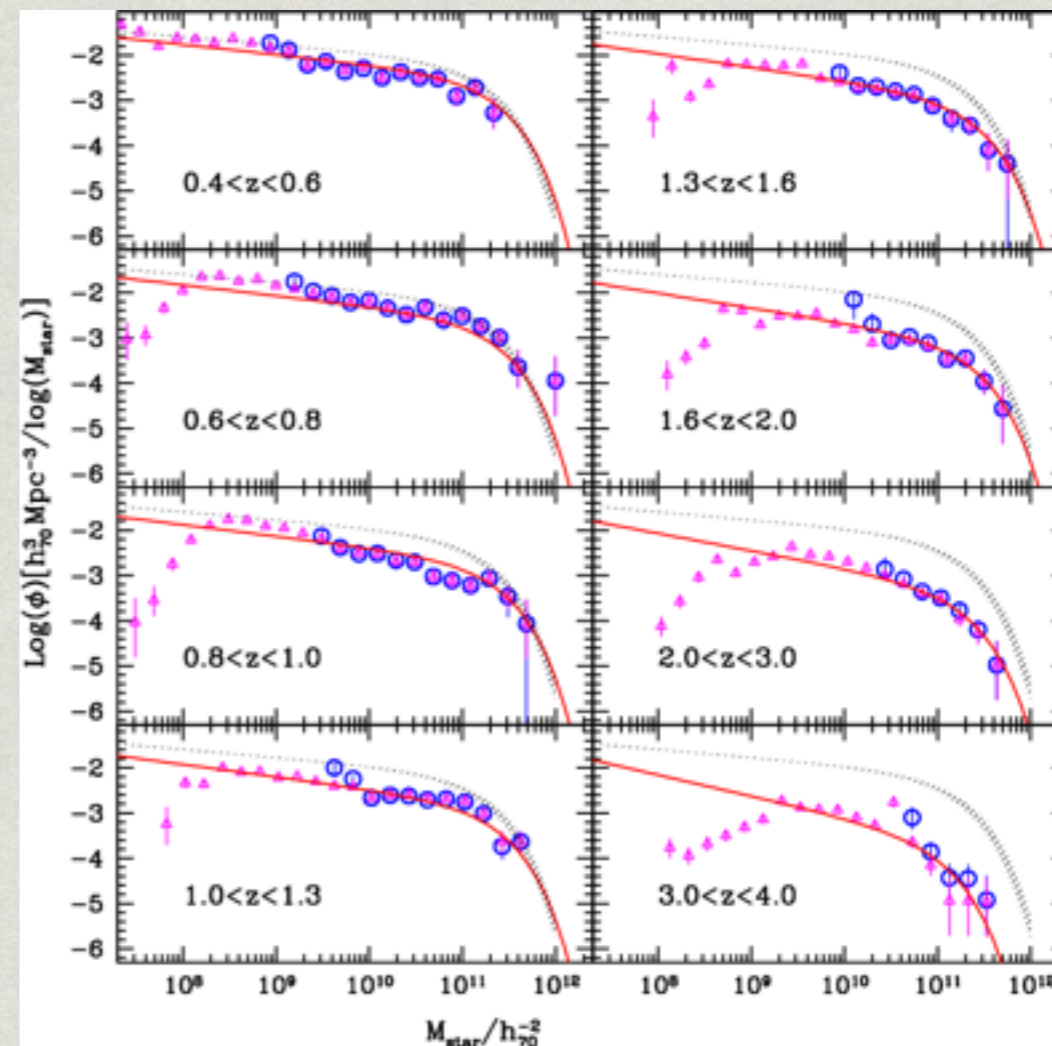
- * La masse d'étoiles présentes dans une galaxie (M_*).
- * Photométrie multi-bandes optique-NIR et ajustement de la distribution spectrale par une synthèse des populations stellaires.
- * Le taux de conversion de gaz interstellaire en étoiles, ou taux de formation stellaire (SFR en anglais).
- * Apport majeur d'Herschel par la mesure complète de la distribution spectrale d'énergie des galaxies dans la gamme du spectre alimentée essentiellement par la formation stellaire (60-200 μm).



Evolution des galaxies, la vision de l'infrarouge

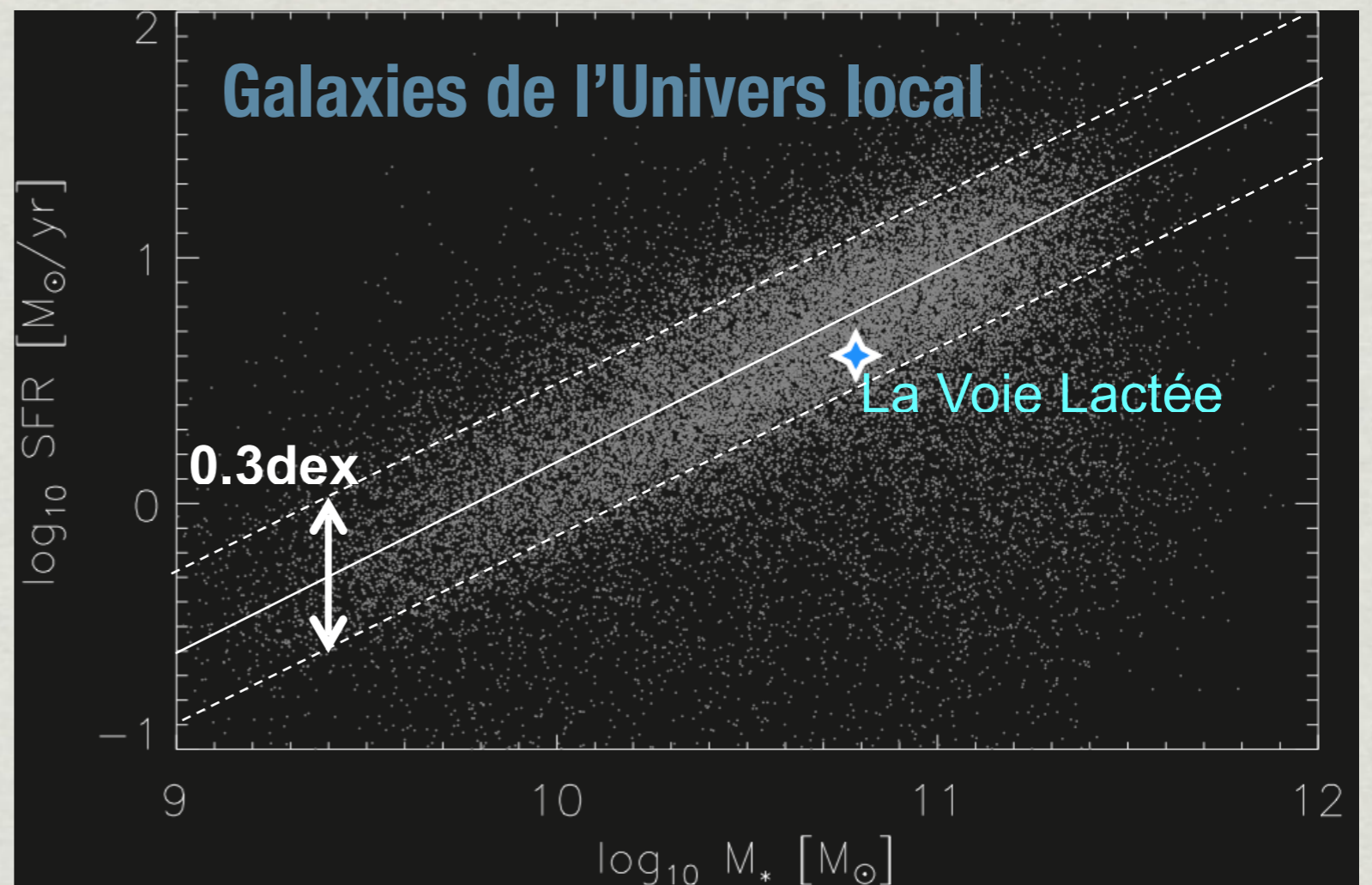
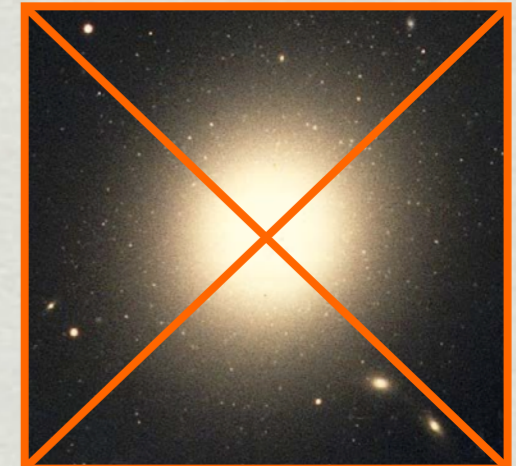
Les paramètres principaux que l'on peut utiliser pour mesurer l'évolution des galaxies au cours du temps sont:

- * La masse d'étoiles présentes dans une galaxie (M_*).
- * Photométrie multi-bandes optique-NIR et ajustement de la distribution spectrale par une synthèse des populations stellaires.
- * Le taux de conversion de gaz interstellaire en étoiles, ou taux de formation stellaire (SFR en anglais).
- * Apport majeur d'Herschel par la mesure complète de la distribution spectrale d'énergie des galaxies dans la gamme du spectre alimentée essentiellement par la formation stellaire (60-200 μm).
- * La quantité totale de milieu interstellaire serait elle aussi très intéressante à mesurer mais elle est beaucoup plus complexe à déterminer...



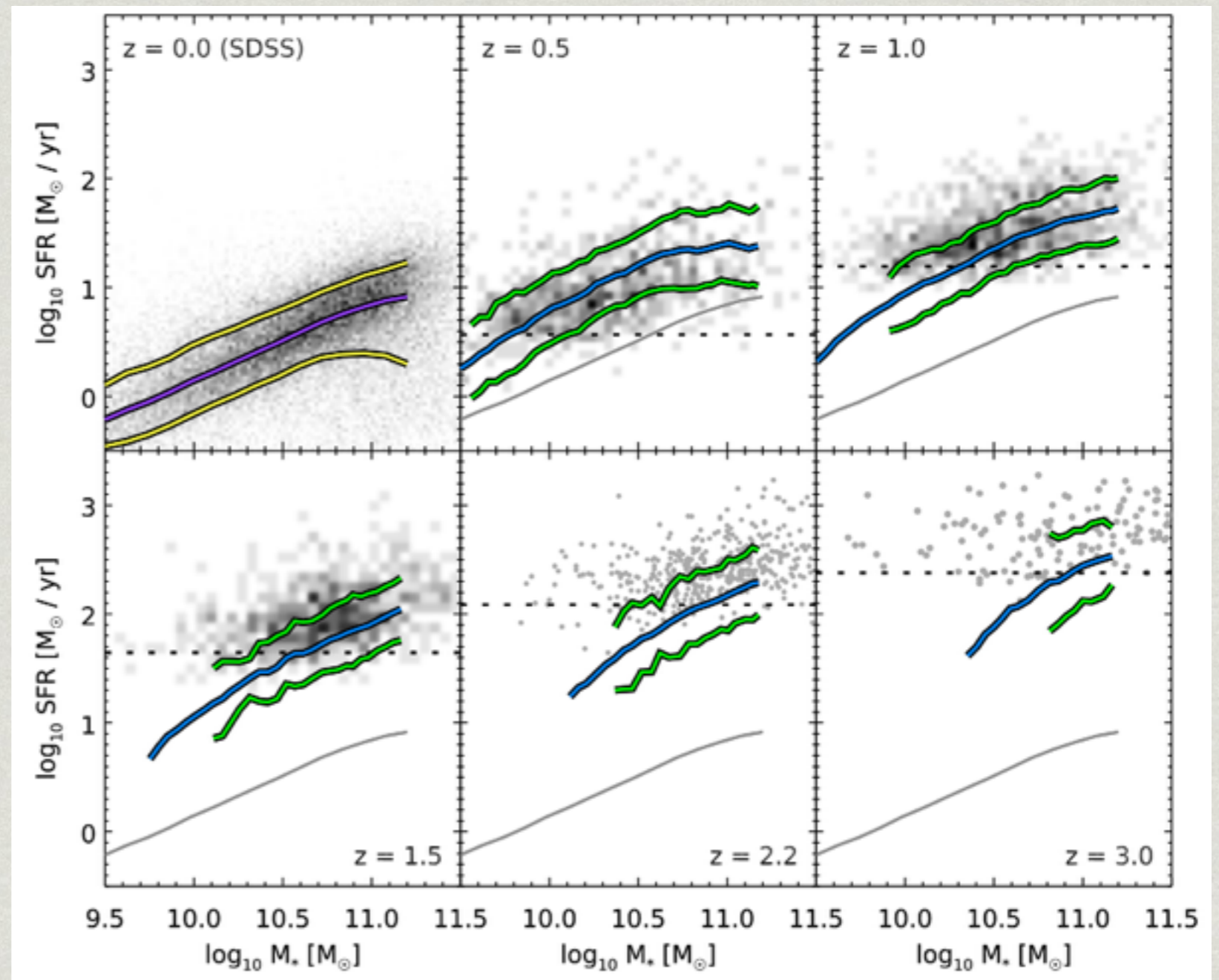
La “séquence principale” des galaxies de l’Univers local

- * 68% des galaxies de même M_{\star} ont le même SFR à un facteur 2 près.
- * La pente de la relation est proche de 1 (et quasiment égale à 1 si on considère seulement la masse du disque).
 - * Le processus de formation stellaire est universellement “local”.
- * Si cette relation existe sur de grandes durées, alors:
 - * le rôle des grandes fusions de galaxies est mineur dans leur évolution.
 - * L’accumulation de la masse est un processus lent, par exemple lié à l’accrétion de matière le long des filaments du réseau cosmique



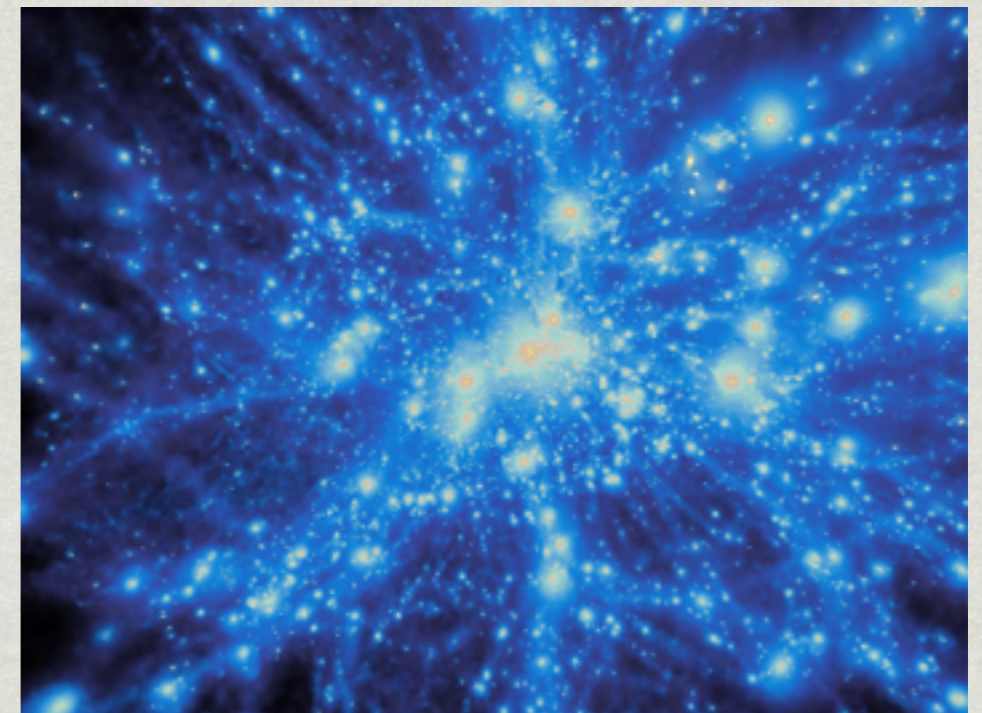
SFR – M_{\star} : la séquence principale à travers les âges

- * La séquence principale se retrouve bien au moins jusqu'au pic de formation stellaire ($z=1.5-2$).



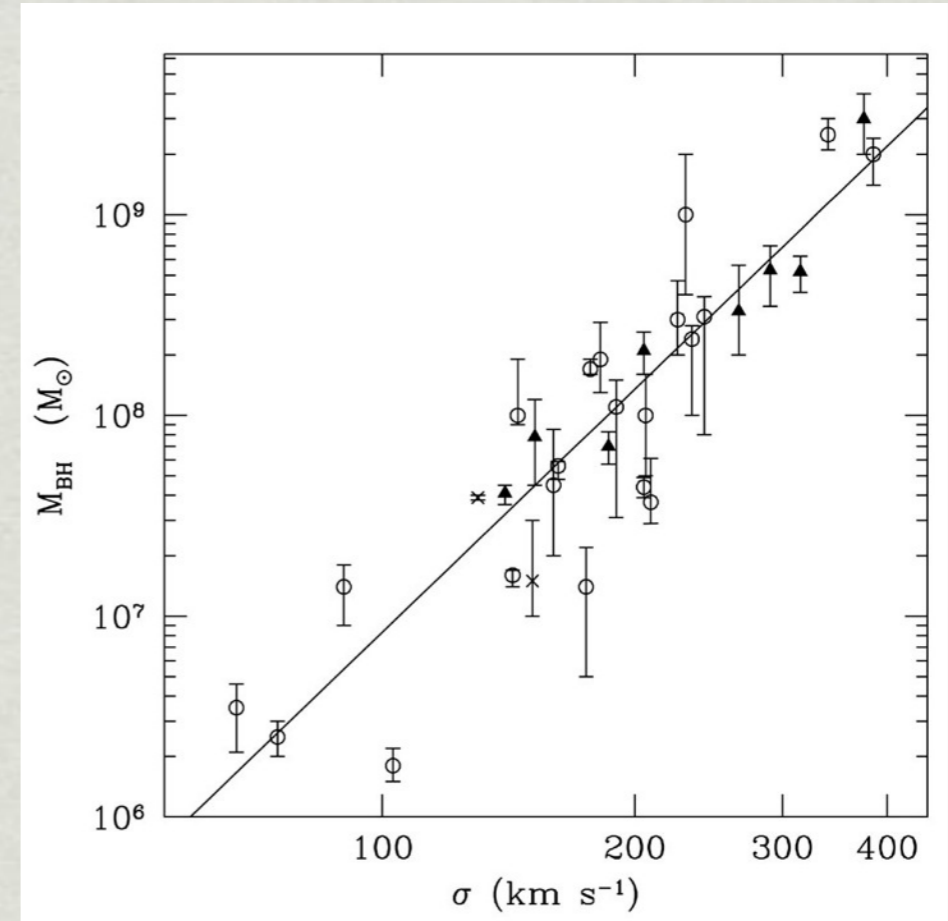
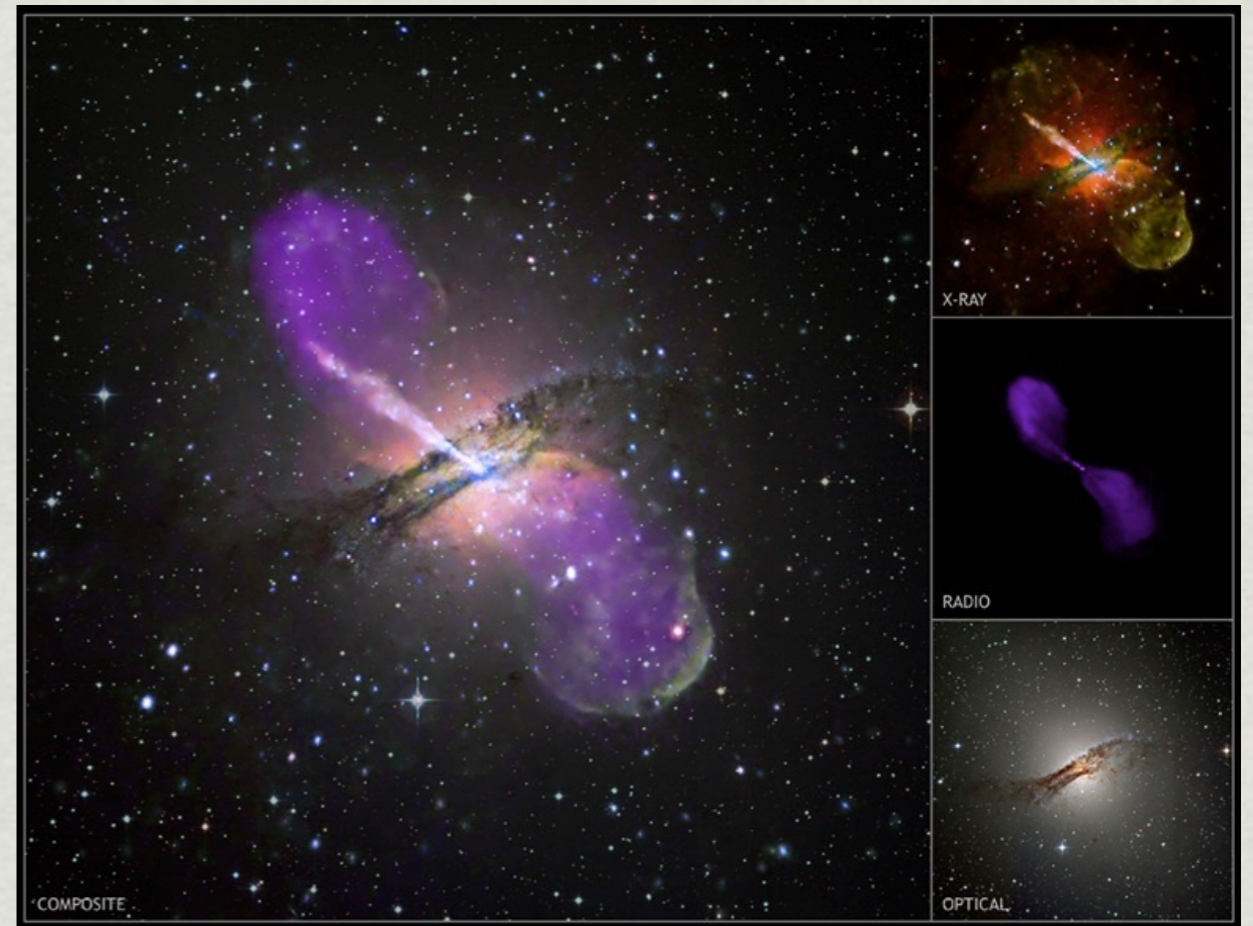
Conclusions sur l'évolution des galaxies

- * Herschel a permis de mettre au point des mesures du taux de formation stellaire fiables.
- * La formation stellaire dans les galaxies est un processus essentiellement "local", et l'influence de grands bouleversements liés à l'environnement des galaxies (fusion) est limitée.
- * L'intégration de l'histoire de formation stellaire dans la séquence principale des galaxies montre que 65% des étoiles présentes aujourd'hui se sont formées via ce mode "local".
- * L'histoire évolutive des galaxies est principalement une lente transformation du gaz intergalactique en étoiles, via l'accrétion régulière de ce gaz sur les galaxies.



Trous noirs super-massifs

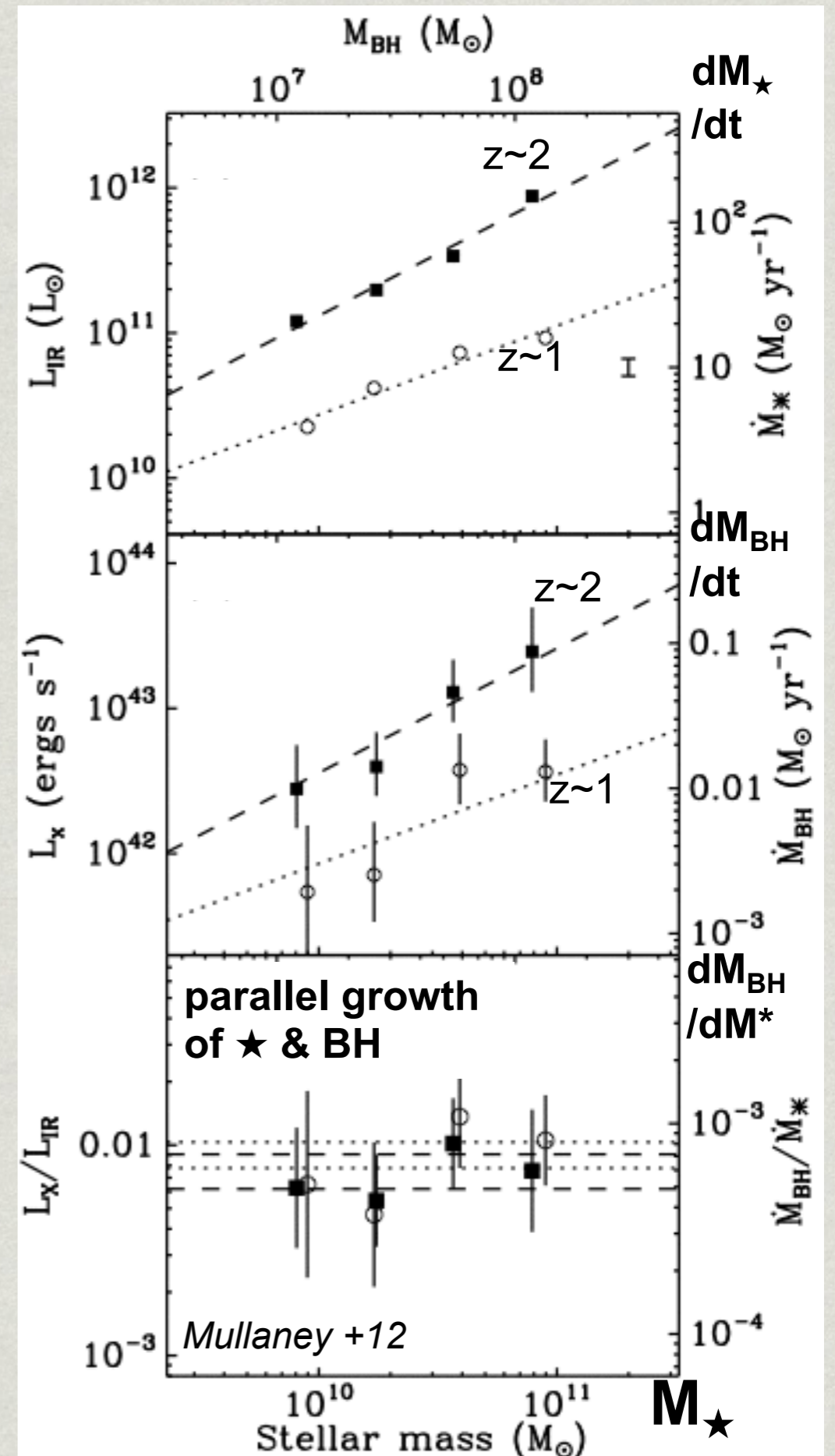
- * Il y a quelques années encore, les trous noirs super-massifs ($M_{\text{BH}} > 10^6 M_{\odot}$) détectés au centre de certaines galaxies étaient considérés comme des objets exceptionnels (les noyaux actifs de galaxies, ou AGN).
- * La situation a évolué avec la découverte d'une relation entre la masse du trou noir et celle de son hôte (ou plutôt de la composante 3D de son hôte).
- * Les trous noirs au centre des galaxies sont d'une façon ou d'une autre reliés au processus d'évolution des galaxies.



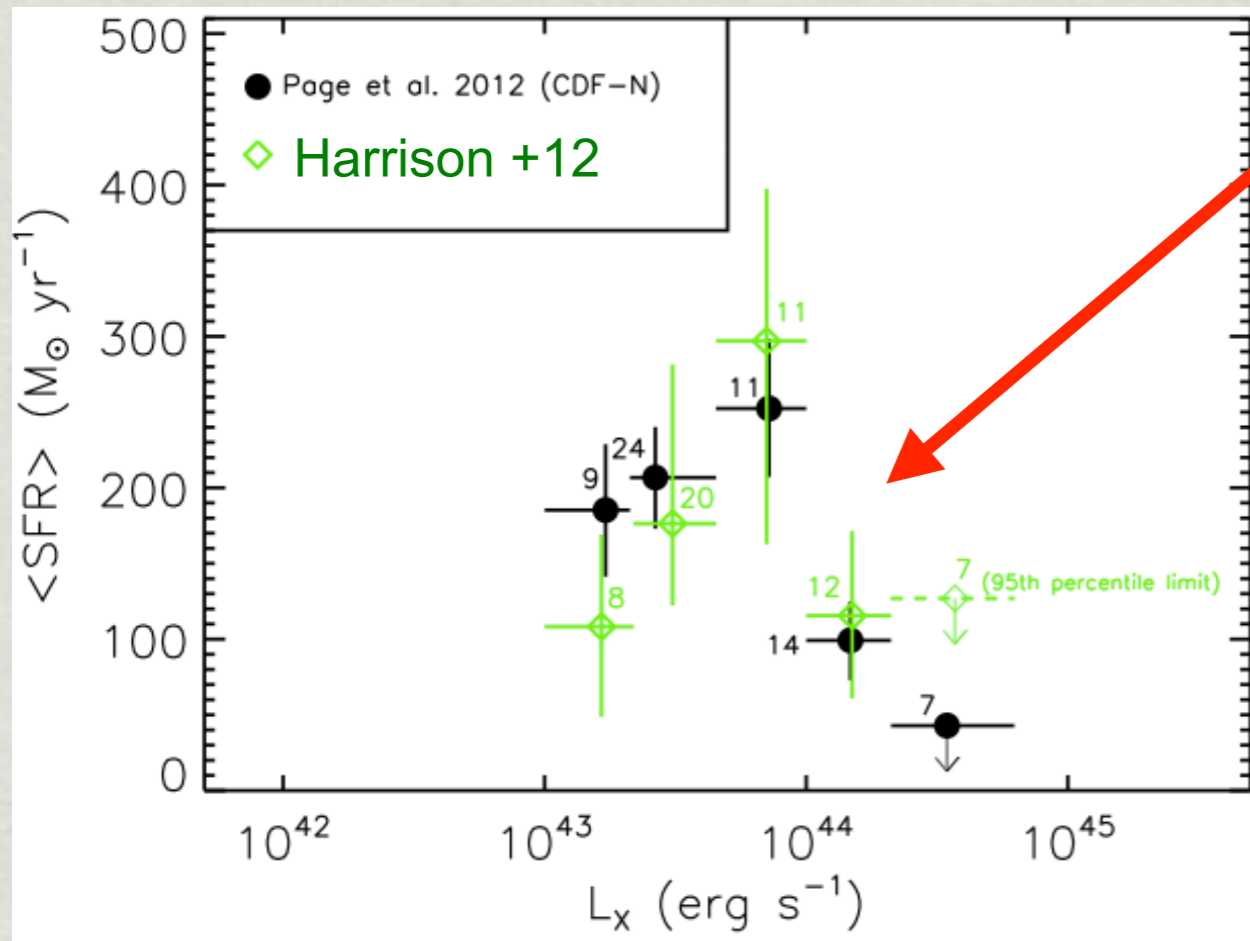
Croissance parallèle des populations stellaires et du trou noir dans les galaxies avec AGN

- * Les galaxies avec un AGN puissant se signalent par une forte émission X.
- * Pourtant leur distribution spectrale FIR est indistinguable, et donc déterminée par la formation stellaire de l'hôte.
 - * Les AGN se trouvent dans des galaxies "normales".
- * Les données semblent indiquer que croissance du trou noir et formation stellaire évoluent de pair...

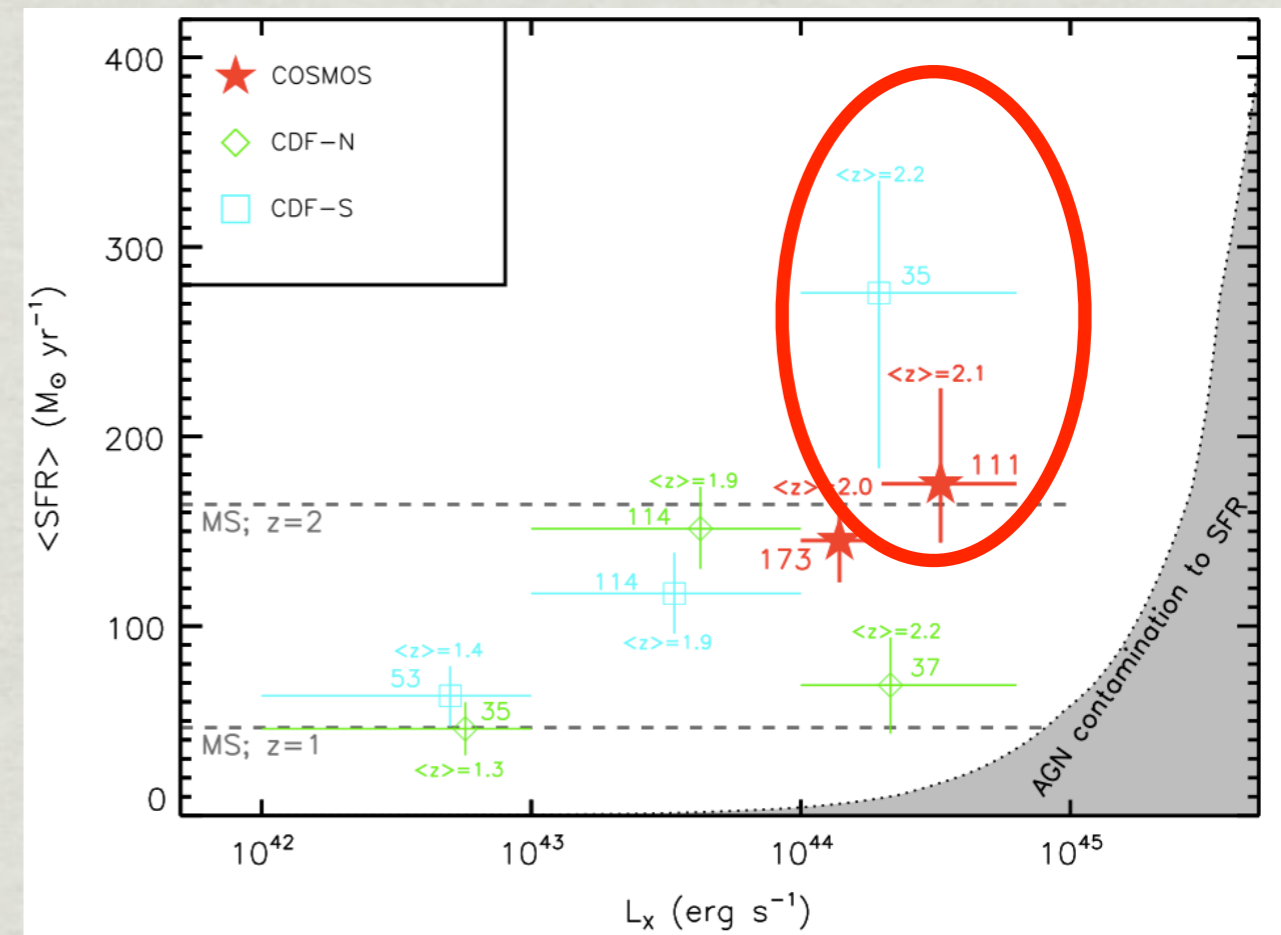
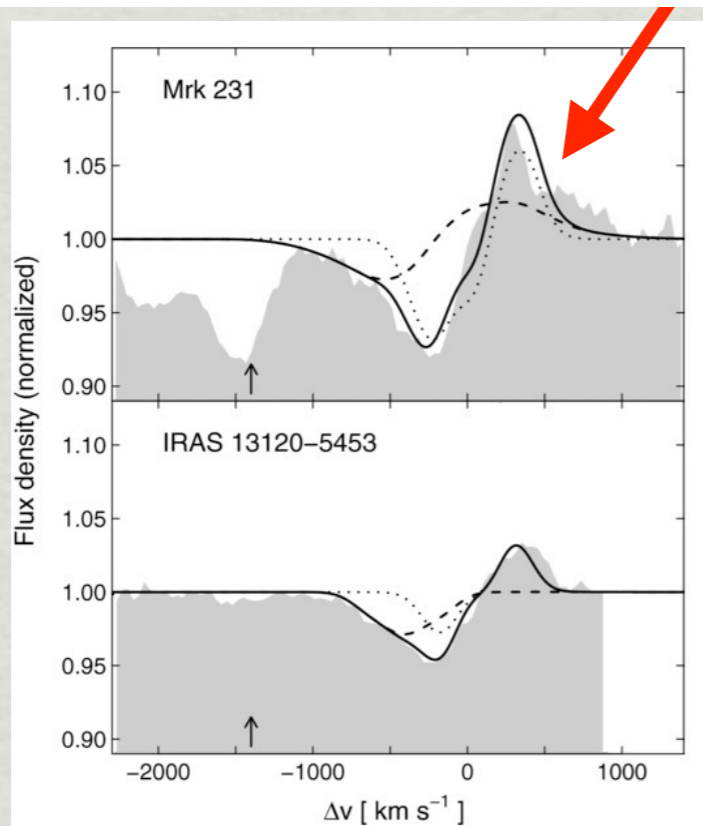
Les mécanismes restent à élucider..



Influence du tour noir sur la formation stellaire?



Suppression de la formation stellaire à forte luminosité X du fait des vents de matière créés par l'AGN ($v > 100 \text{ km.s}^{-1}$)?



D'autres relevés ne confirment pas la tendance...

Le “futur”

Photo: S. Guisard (ESO)



Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

la “science-fiction”

