

Herschel



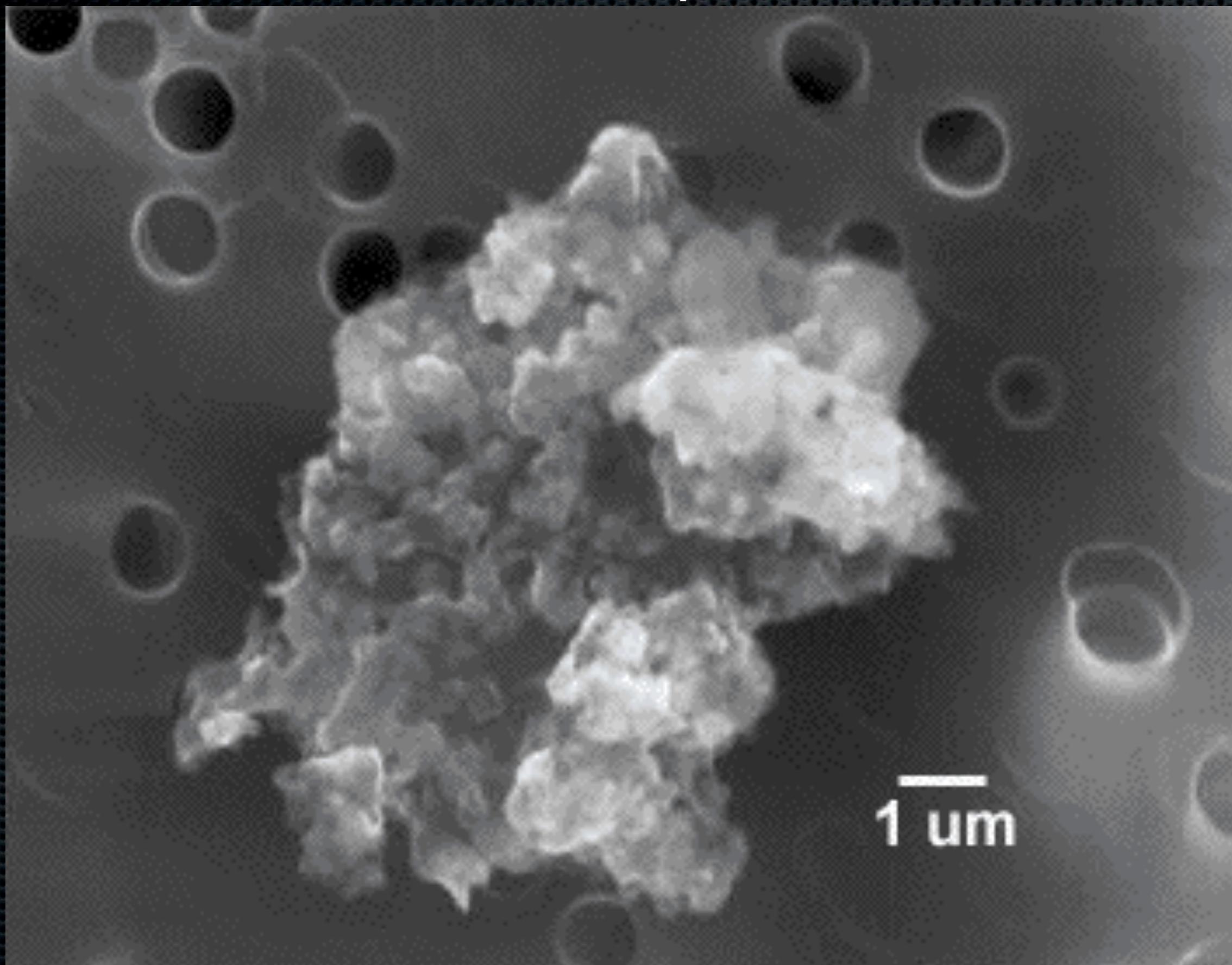
# Herschel

# Un peu d'histoire

- William Herschel 1738-1822
  - Découvreur de la planète Uranus.
  - Constructeur en 1789 d'un des plus grands télescopes de l'époque (12m de focale, 1.2m d'ouverture).
  - Découvreur du rayonnement infrarouge (1800).



# Les deux faces de la poussière



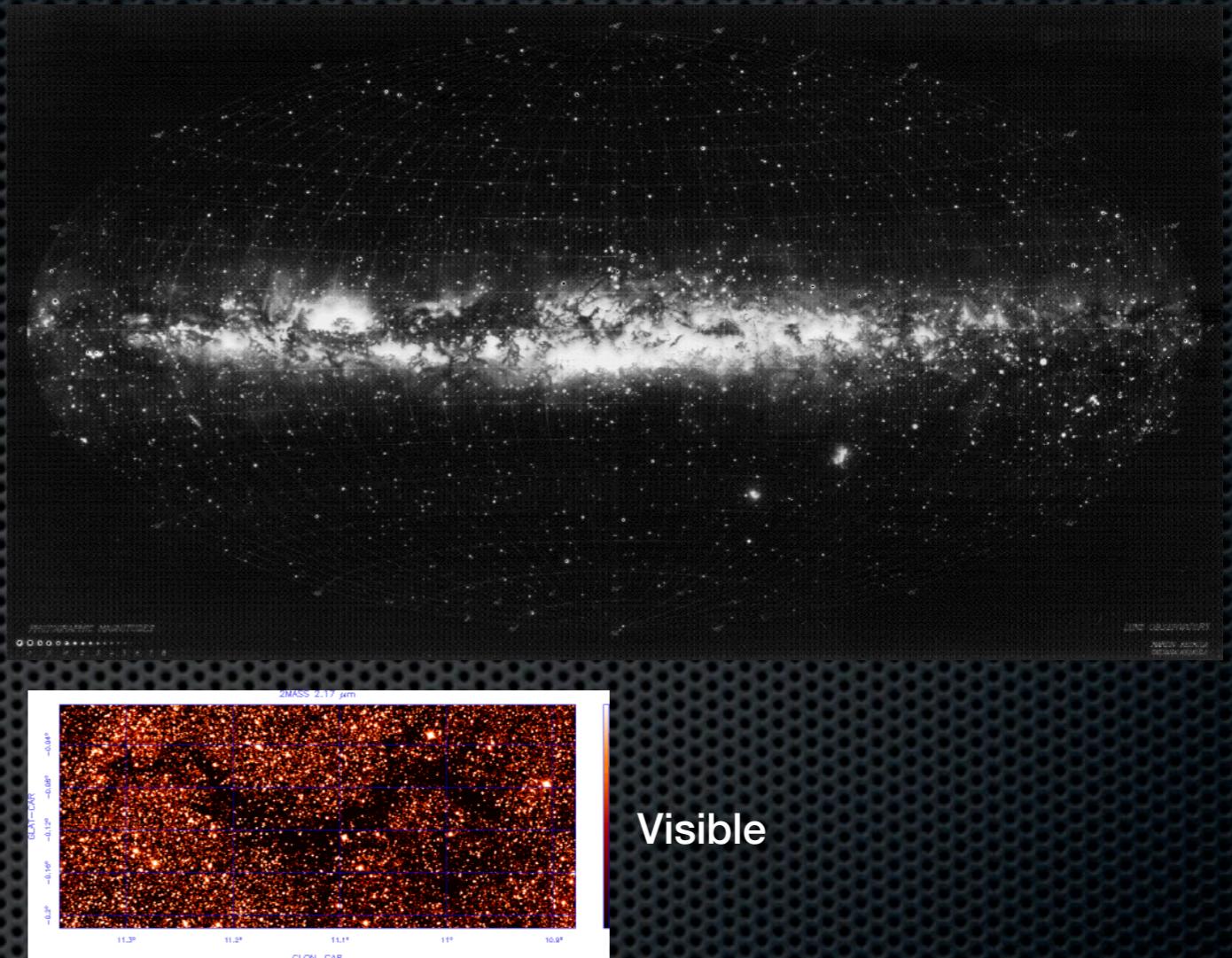
# Les deux faces de la poussière

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

Poussière: H, C, Si, O, <1% de la masse du milieu interstellaire

# 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



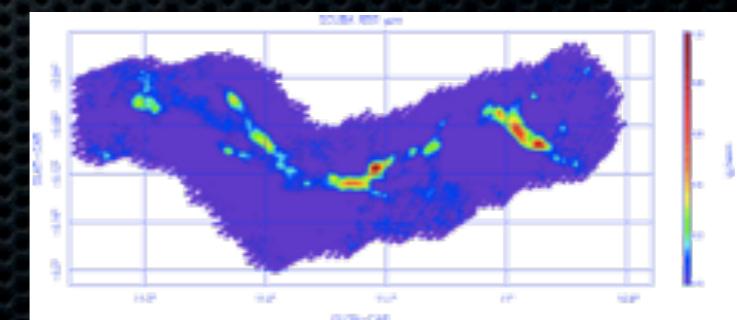
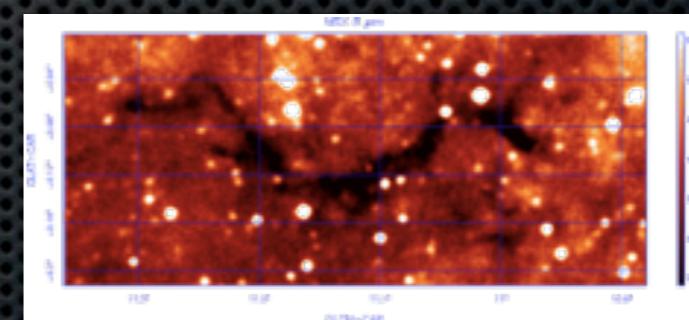
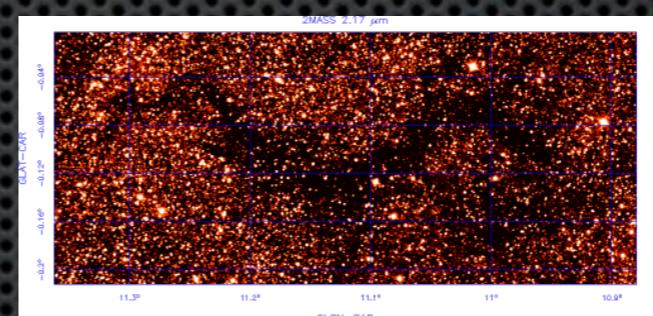
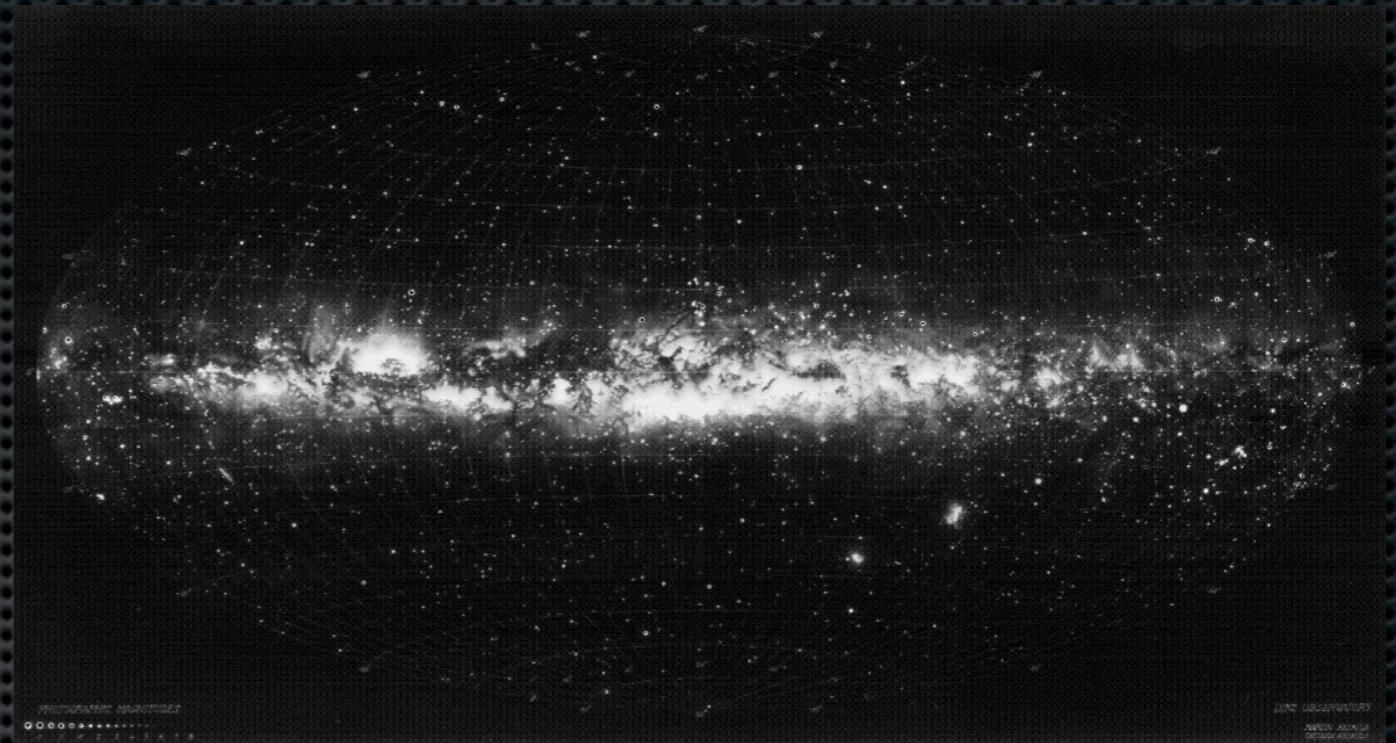
Visible

Poussière: H, C, Si, O, <1% de la masse du milieu interstellaire

# 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

Poussière: H, C, Si, O, <1% de la masse du milieu interstellaire



# L'Observatoire Spatial Herschel



# L'Observatoire Spatial Herschel

- Télescope de 3.5m de diamètre, limité par la diffraction à 90  $\mu\text{m}$ .



# L'Observatoire Spatial Herschel

- Télescope de 3.5m de diamètre, limité par la diffraction à 90 µm.
- En orbite au point L2 du système Terre-Soleil.



# L'Observatoire Spatial Herschel

- **Télescope de 3.5m de diamètre, limité par la diffraction à 90 µm.**
- **En orbite au point L2 du système Terre-Soleil.**
- **3 instruments pour le submillimétrique:**
  - **HIFI: spectroscopie hétérodyne haute résolution 100-600 µm**
  - **PACS: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de photoconducteurs et de bolomètres dans la bande 60-200 µm**
  - **SPIRE: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de bolomètres dans la bande 200-600 µm.**



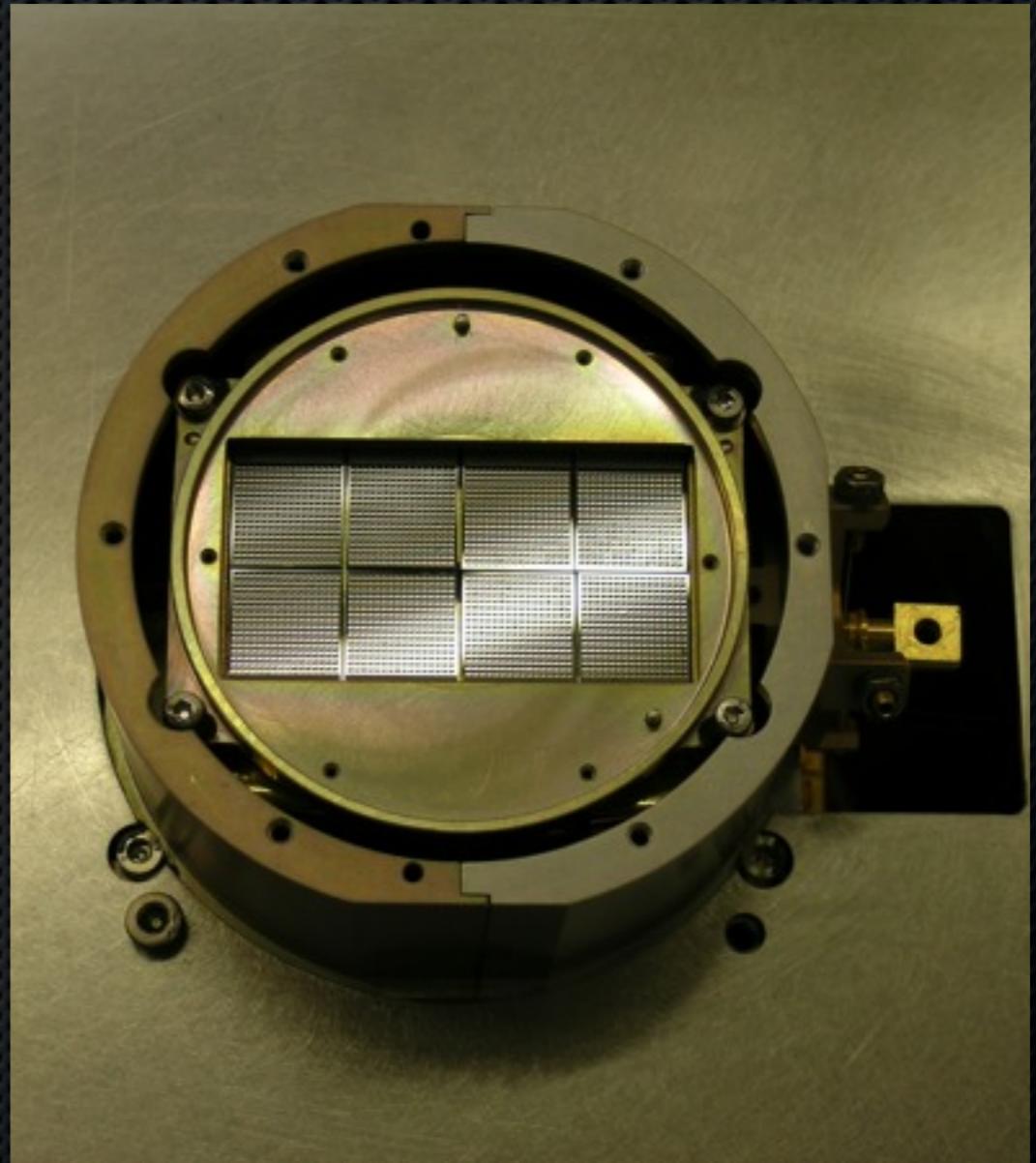
# L'Observatoire Spatial Herschel

- **Télescope de 3.5m de diamètre, limité par la diffraction à 90 µm.**
- **En orbite au point L2 du système Terre-Soleil.**
- **3 instruments pour le submillimétrique:**
  - **HIFI: spectroscopie hétérodyne haute résolution 100-600 µm**
  - **PACS: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de photoconducteurs et de bolomètres dans la bande 60-200 µm**
  - **SPIRE: Imagerie et spectro-imagerie à l'aide de bolomètres dans la bande 200-600 µm.**
- **Durée de vie de 3,5 ans (dont le voyage vers L2).**



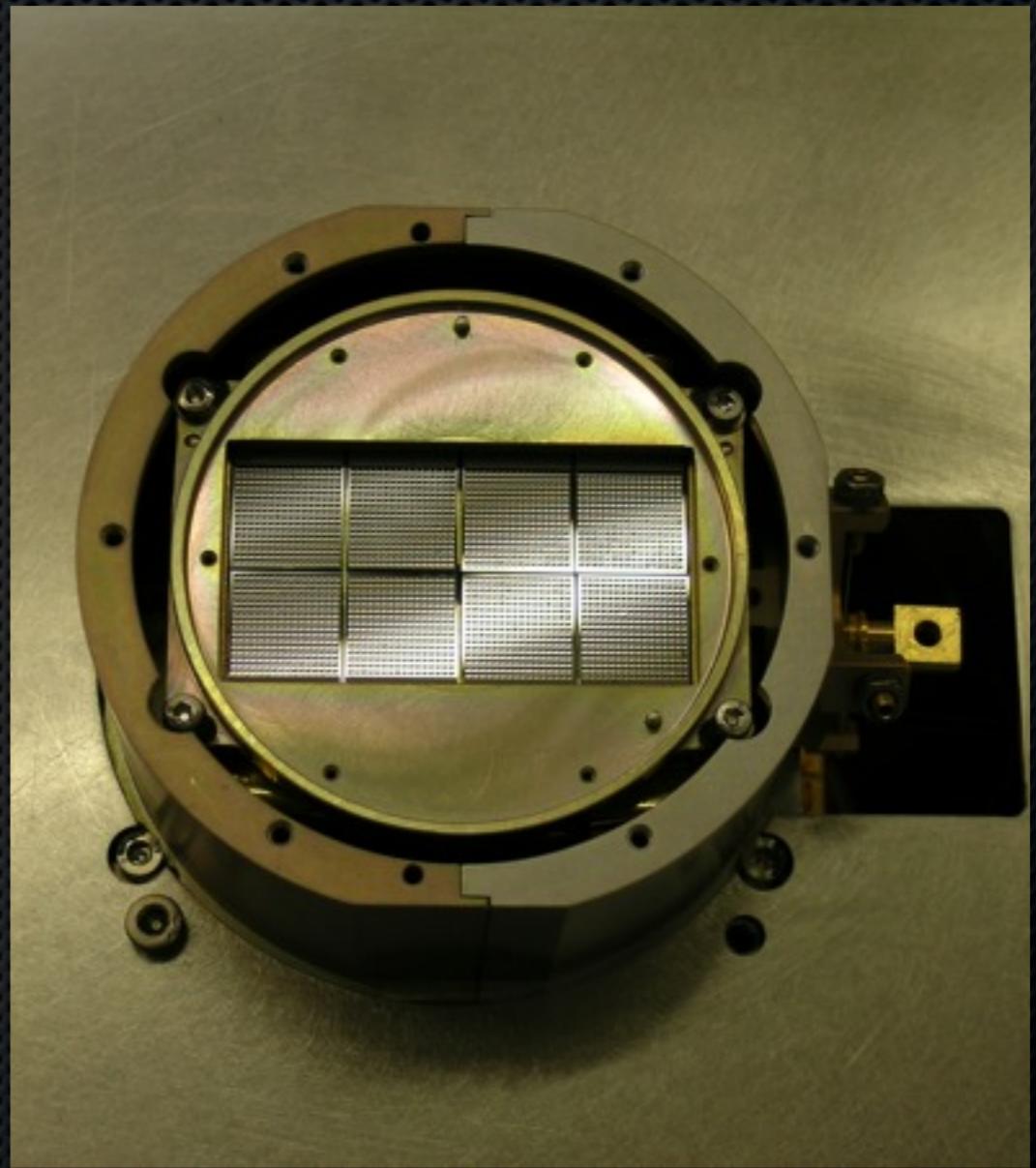
# La caméra de PACS

- 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.
- Entièrement réalisée au CEA (Irfu, Leti, SBT)



# La caméra de PACS

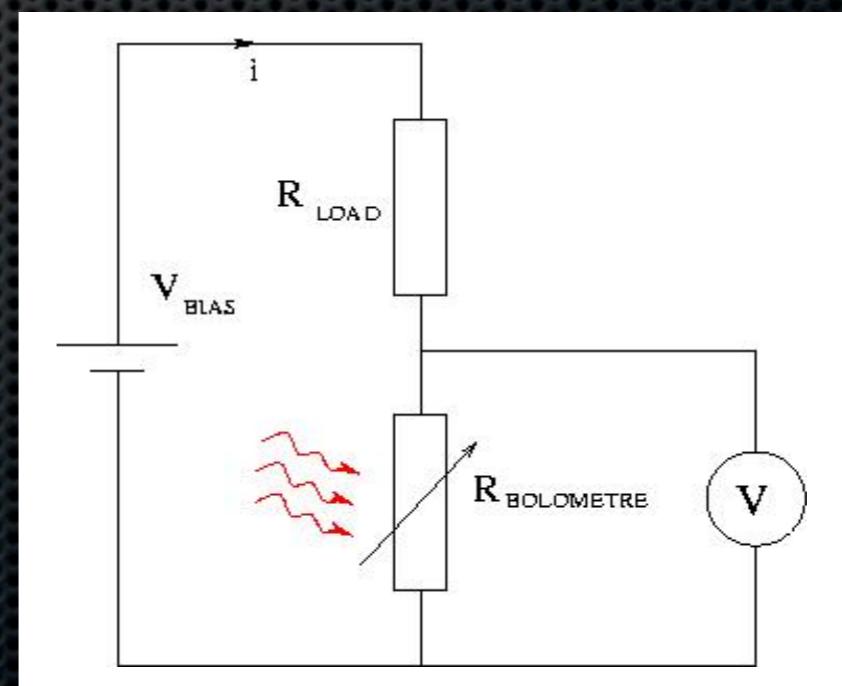
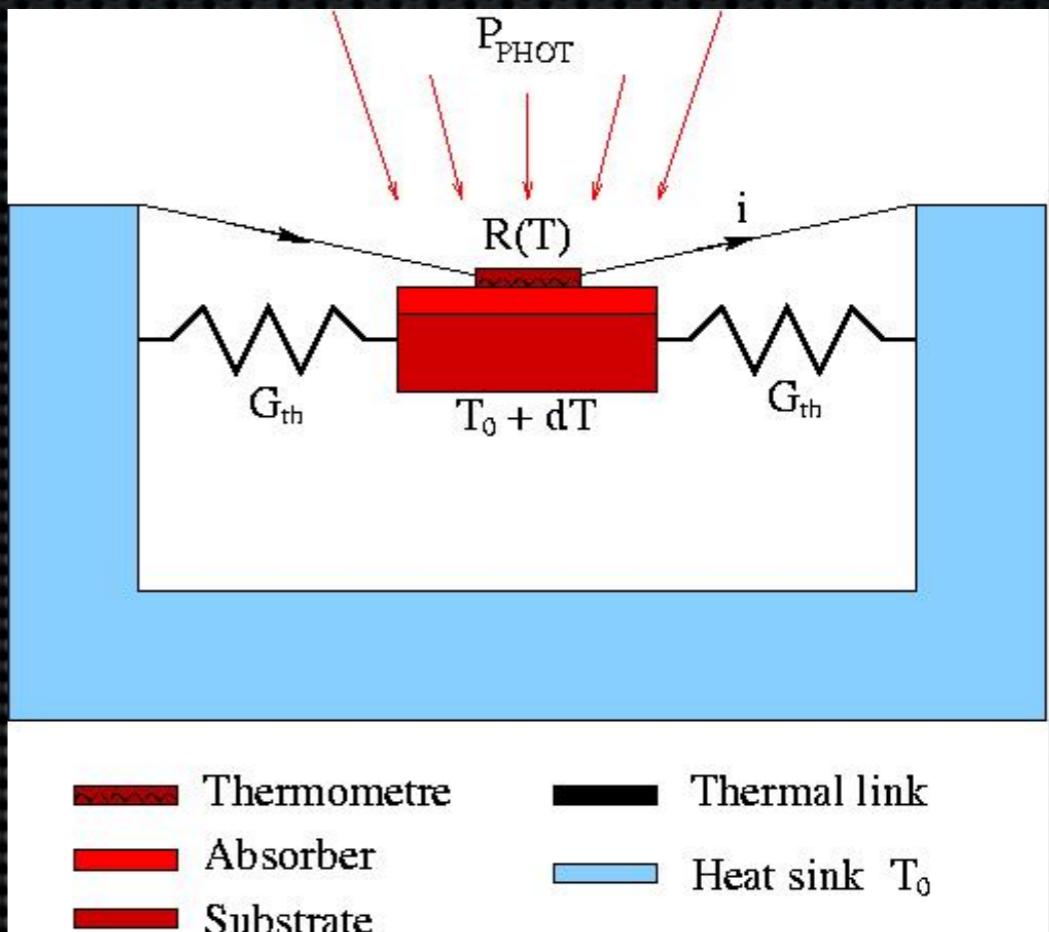
- Le plus grand plan focal fait de bolomètres.
- Le premier instrument à multiplexer des bolomètres.
- le premier instrument submillimétrique à réaliser un échantillonnage complet et instantané du champ de vue.
- Entièrement réalisée au CEA (Irfu, Leti, SBT)



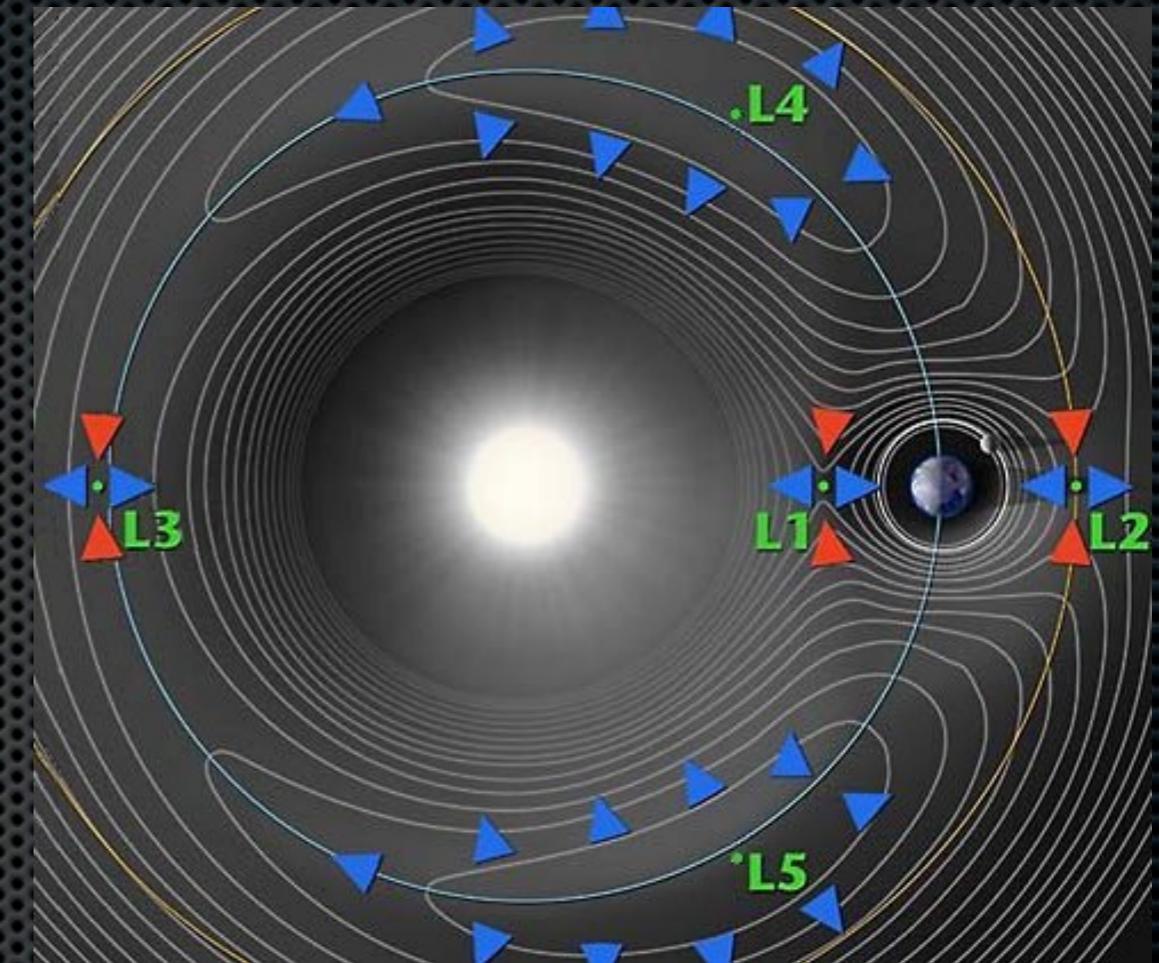
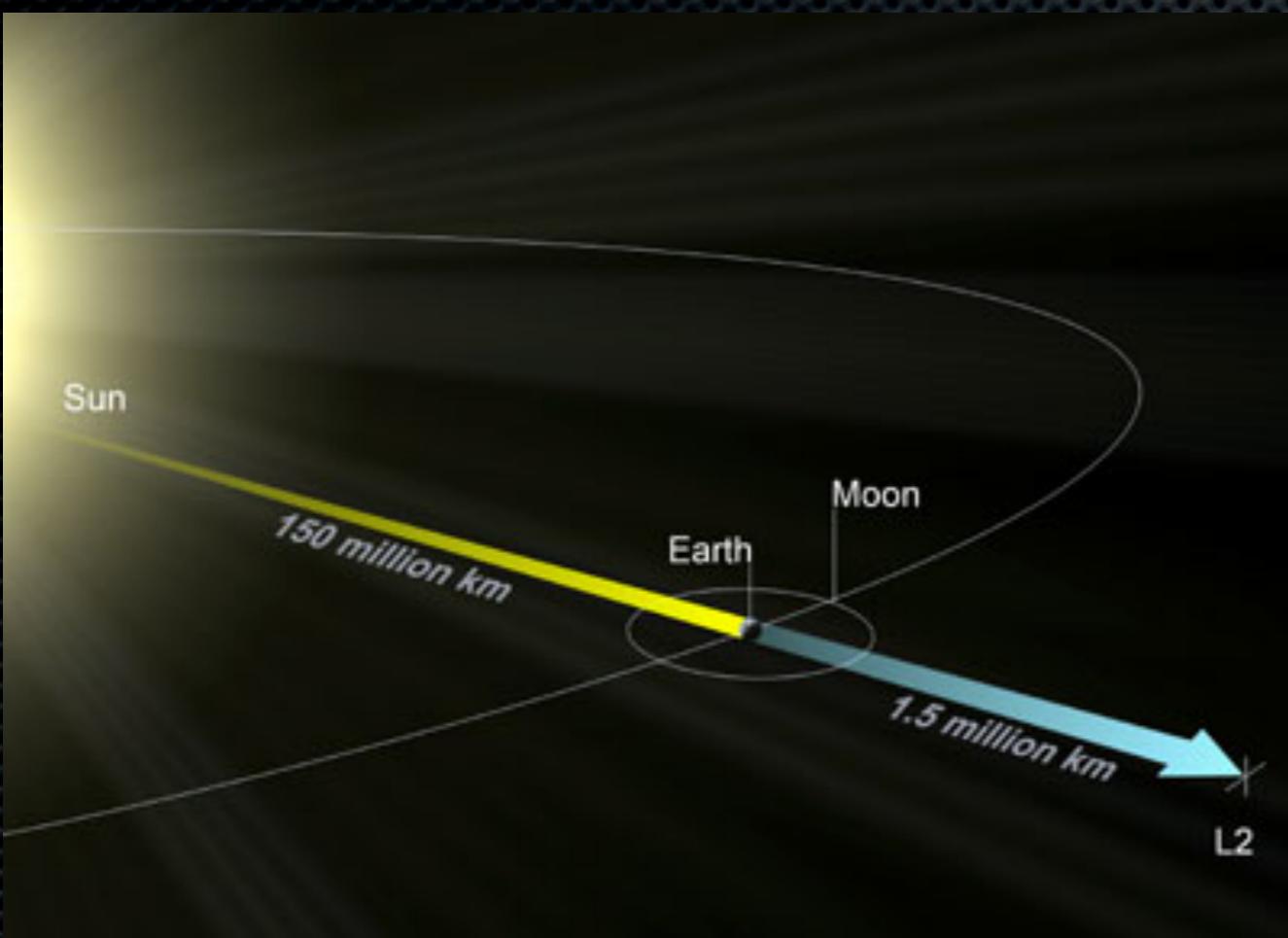
**La caméra de PACS est l'instrument le plus demandé d'Herschel: elle est en opération plus de la moitié du temps.**

# Principe du bolomètre

- Mesurer l'élévation de la température produite par l'absorption du rayonnement.
- Les bolomètres sont des détecteur thermiques combinant:
  - une très faible capacité calorifique du matériau absorbeur
  - Une résistance variable suivant la température la plus sensible possible
  - Un système de connexion à un bain thermalisé.
- Il s'agit d'un très vieux principe de détection du rayonnement:
  - Première utilisation d'un bolomètre dans un contexte astronomique: 1881
  - Première plaque photographique utilisée pour l'astronomie: 1840
  - Premier CCD: 1975



# 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.

# Herschel en chiffres

# Herschel en chiffres

- 485 jours dans l'espace
  - Fin des opérations prévues en Mars 2013...

# Herschel en chiffres

- 485 jours dans l'espace
  - Fin des opérations prévues en Mars 2013...
- Plus de 400 participants à la conférence du mois de Mai

# Herschel en chiffres

- 485 jours dans l'espace
  - Fin des opérations prévues en Mars 2013...
- Plus de 400 participants à la conférence du mois de Mai
- 150 articles dans le numéro spécial d'Astronomy & Astrophysics

# Herschel en chiffres

- 485 jours dans l'espace
  - Fin des opérations prévues en Mars 2013...
- Plus de 400 participants à la conférence du mois de Mai
- 150 articles dans le numéro spécial d'Astronomy & Astrophysics
- Des heures de données publiques dans l'archive Herschel
  - accessible via <http://herschel.esac.esa.int/>
  - Toute observation devient publique 1 an après sa réalisation. Tous les logiciels de traitement de données sont en open source.

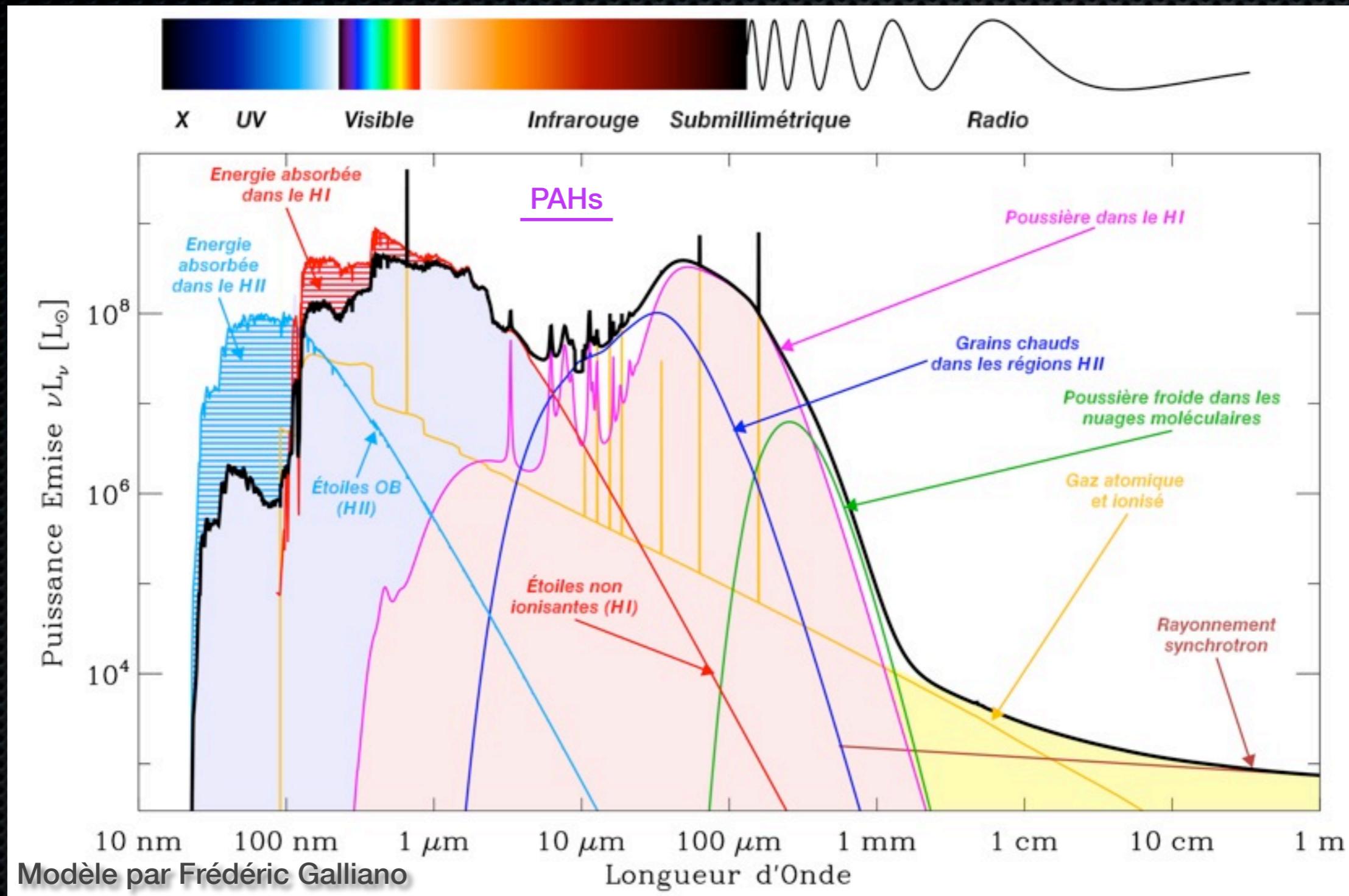
# Programmes scientifiques

- Grands relevés cosmologiques
- *Physique des galaxies proches*
- Relevés de formation stellaire Galactique

# Grands relevés cosmologiques

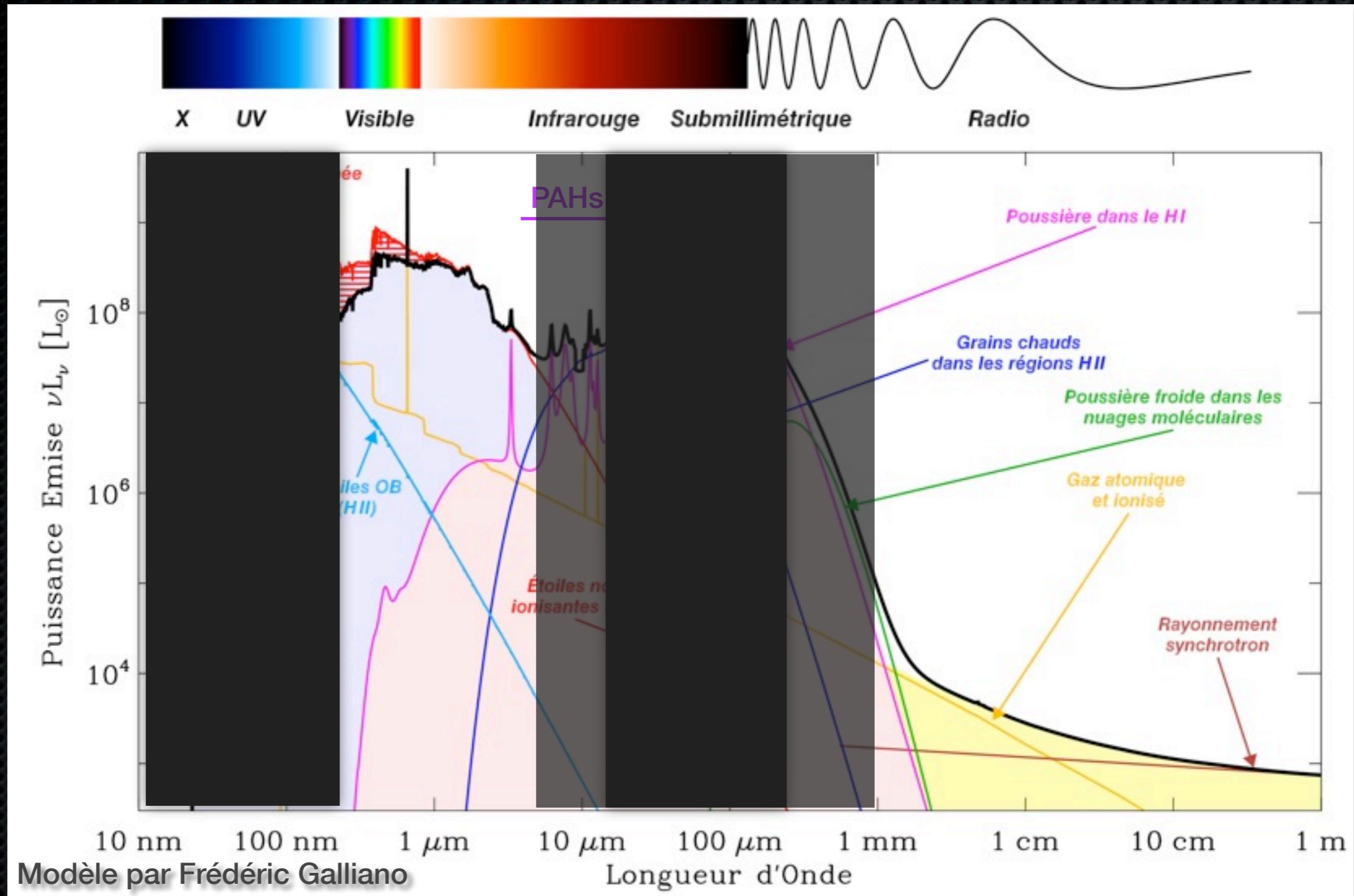
- Reconstituer l'histoire de la formation des galaxies en mesurant et en comprenant l'évolution du taux de formation stellaire au cours des ages de l'Univers.
  - Méthode: résoudre le fond diffus extragalactique.
  - Outils: «modèles» de galaxies, traceurs de formation stellaire, diagnostics physiques, modèles d'Univers.
- L'histoire de la formation des galaxies est le pendant visible de l'histoire de la formation des structures dans l'Univers, dominée par la matière noire et l'énergie noire.
  - Synergie Planck-Herschel

# Distribution spectrale d'énergie d'une galaxie



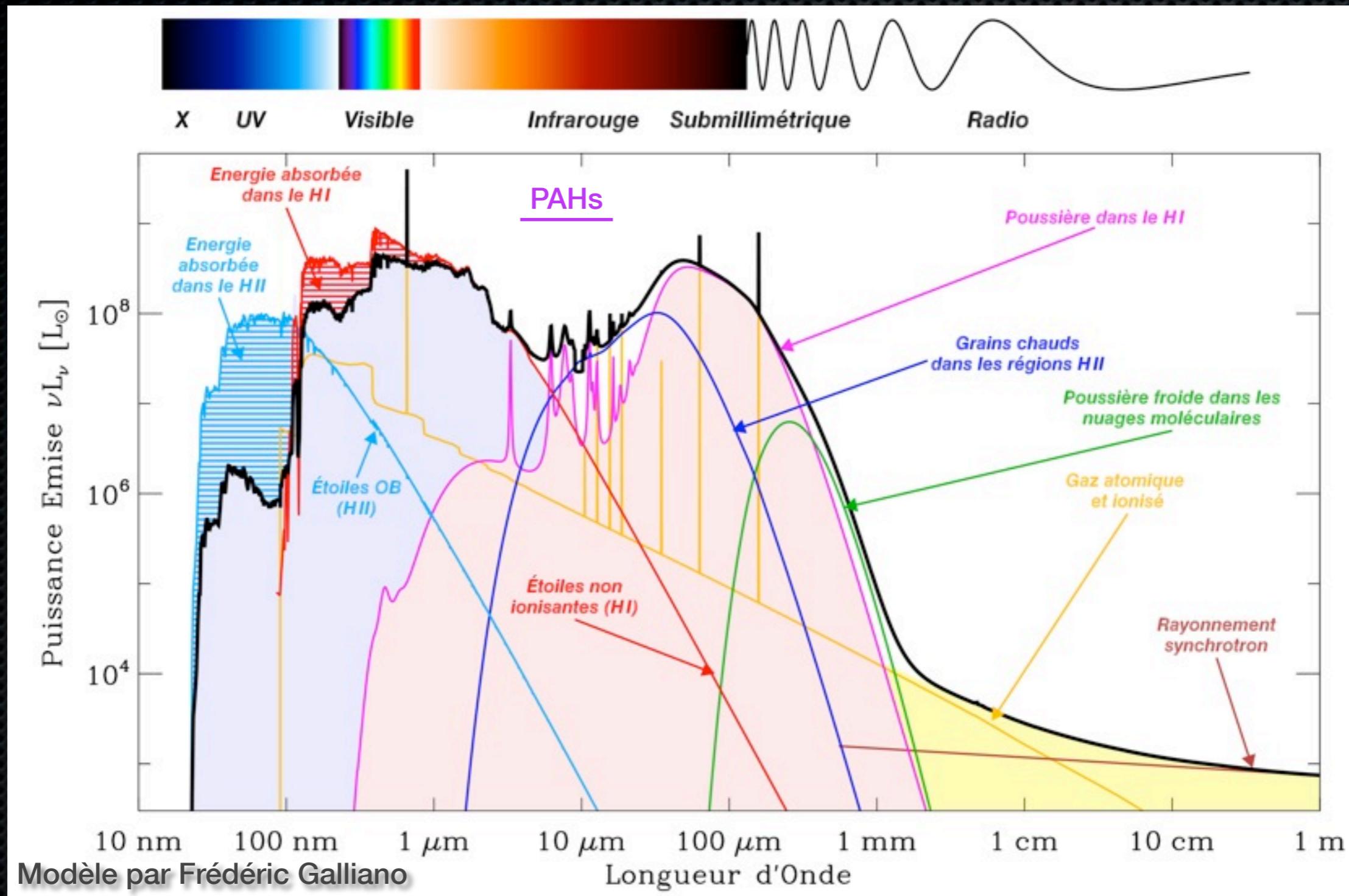
L'émission thermique de la poussière est liée à de nombreuses phases du milieu interstellaire, ainsi qu'à de nombreux types de populations stellaires.

# Distribution spectrale d'énergie d'une galaxie



L'émission thermique de la poussière est liée à de nombreuses phases du milieu interstellaire, ainsi qu'à de nombreux types de populations stellaires.

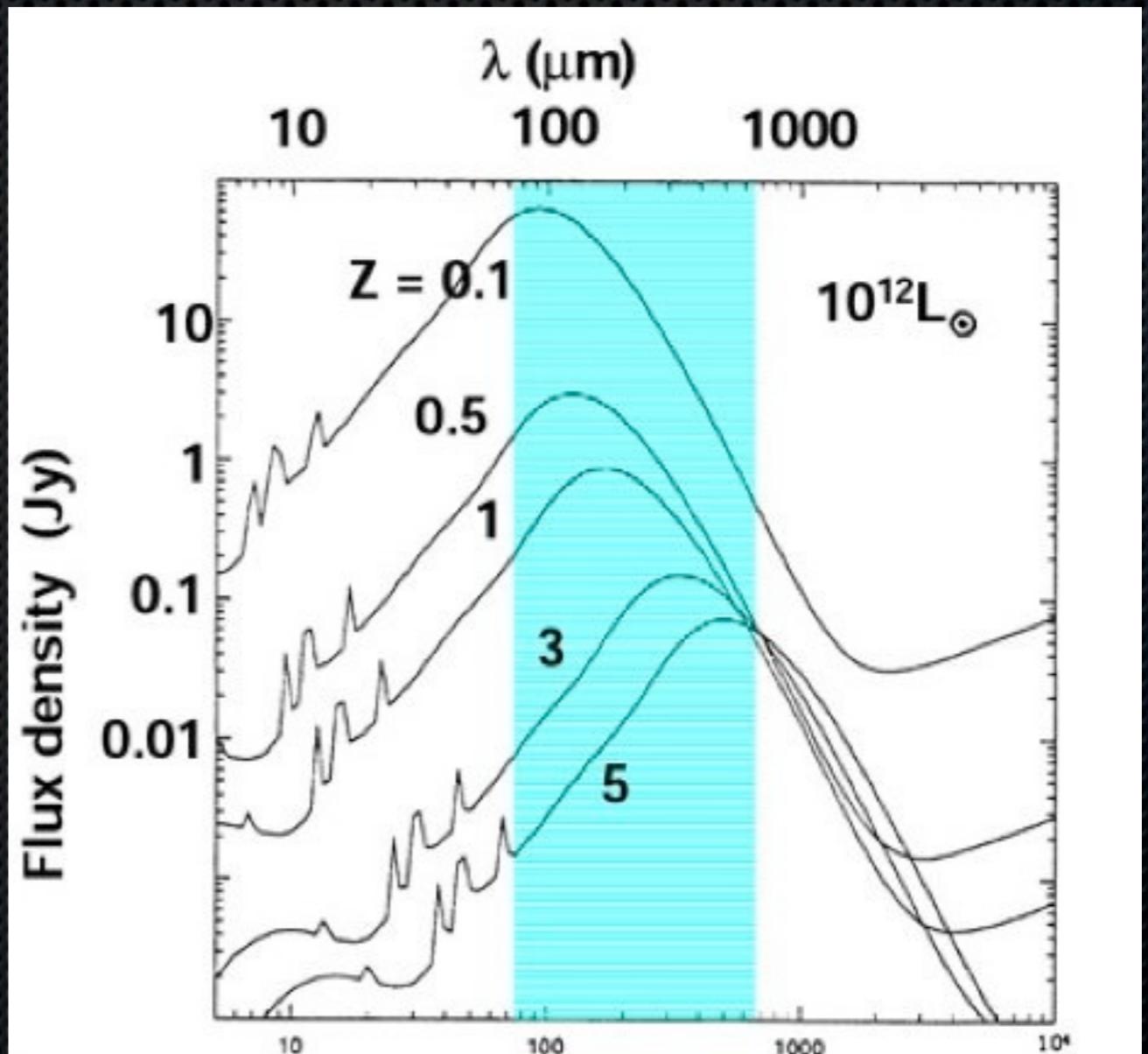
# Distribution spectrale d'énergie d'une galaxie



L'émission thermique de la poussière est liée à de nombreuses phases du milieu interstellaire, ainsi qu'à de nombreux types de populations stellaires.

# Décalage spectral et correction-k

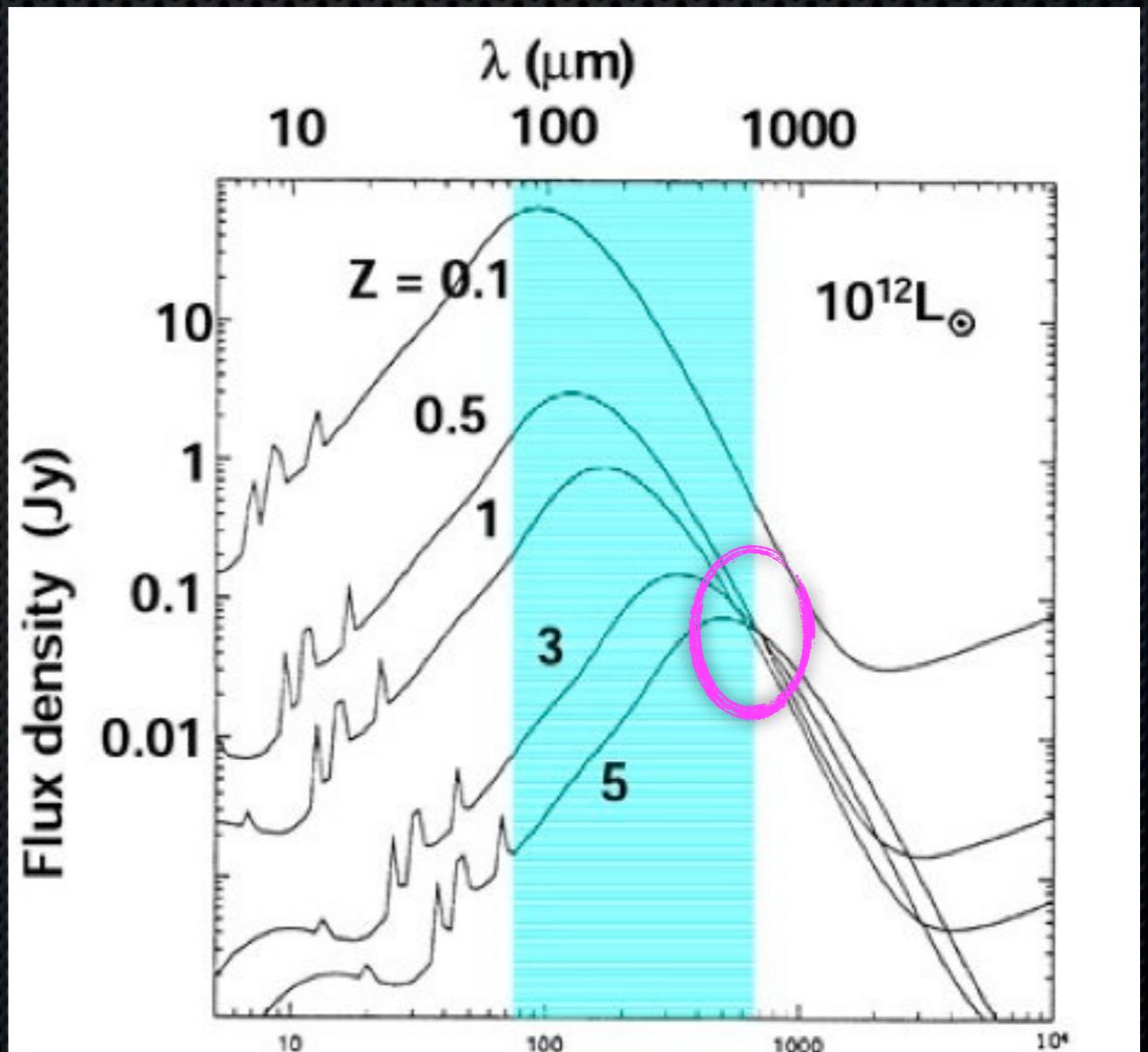
- Plus une galaxie est éloignée, plus sa brillance (puissance reçue) est faible.
- Plus une galaxie est éloignée, plus son spectre est décalé vers le rouge (expansion de l'Univers).
- Dans le domaine Herschel, les deux effets peuvent se compenser.



$z=1$   $\text{âge}=6 \text{ Gyr}$ ,  $z=3$   $\text{âge}=2 \text{ Gyr}$ ,  $z=5$   $\text{âge}=1 \text{ Gyr}$

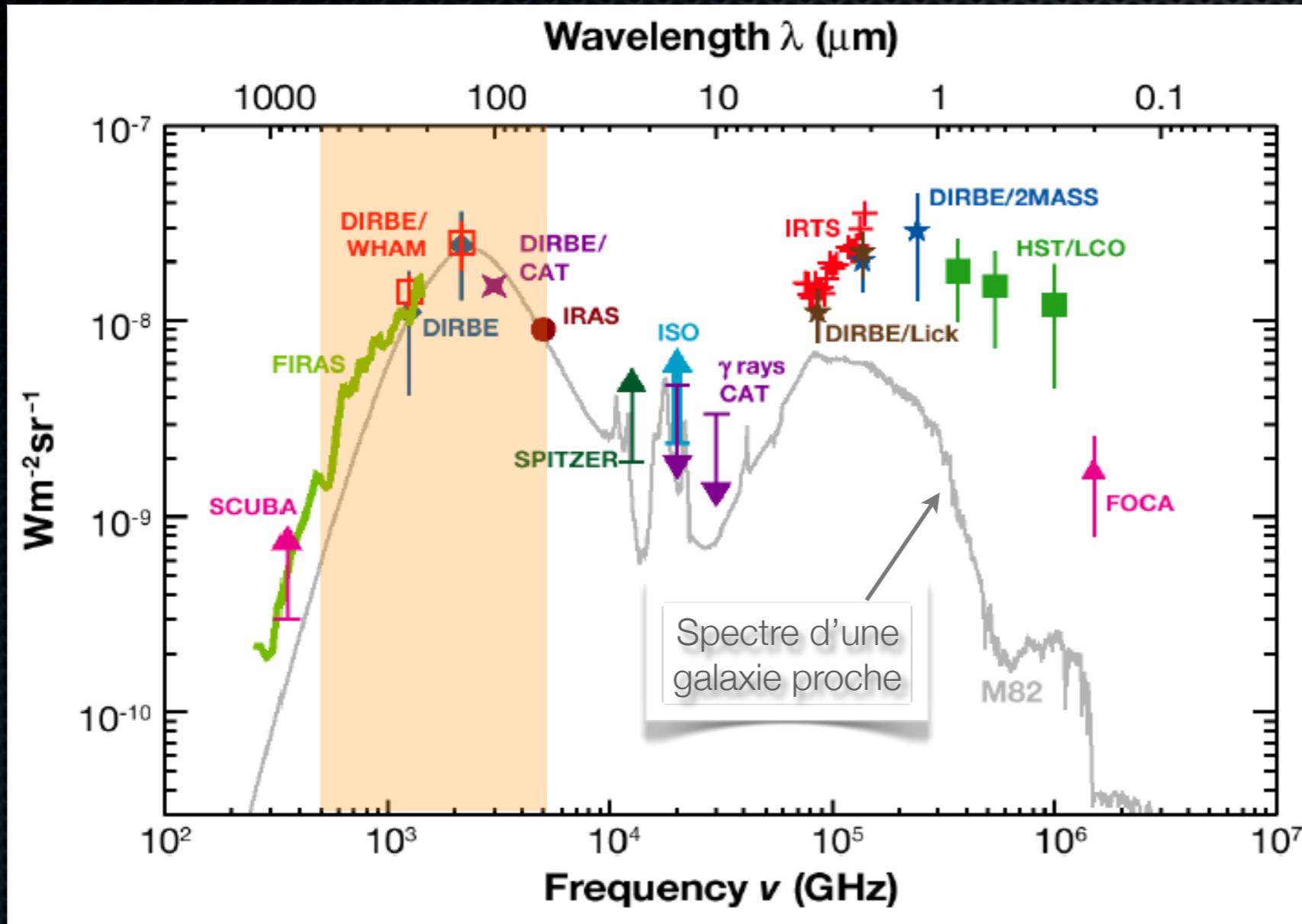
# Décalage spectral et correction-k

- Plus une galaxie est éloignée, plus sa brillance (puissance reçue) est faible.
- Plus une galaxie est éloignée, plus son spectre est décalé vers le rouge (expansion de l'Univers).
- Dans le domaine Herschel, les deux effets peuvent se compenser.



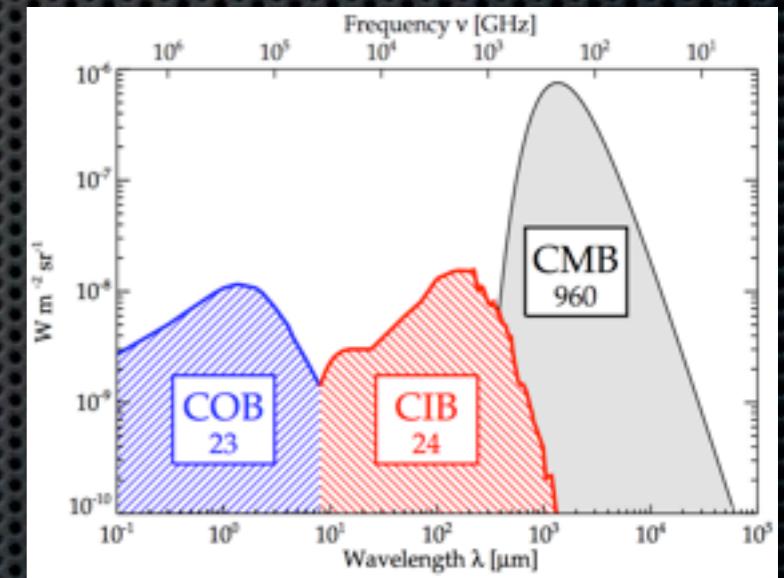
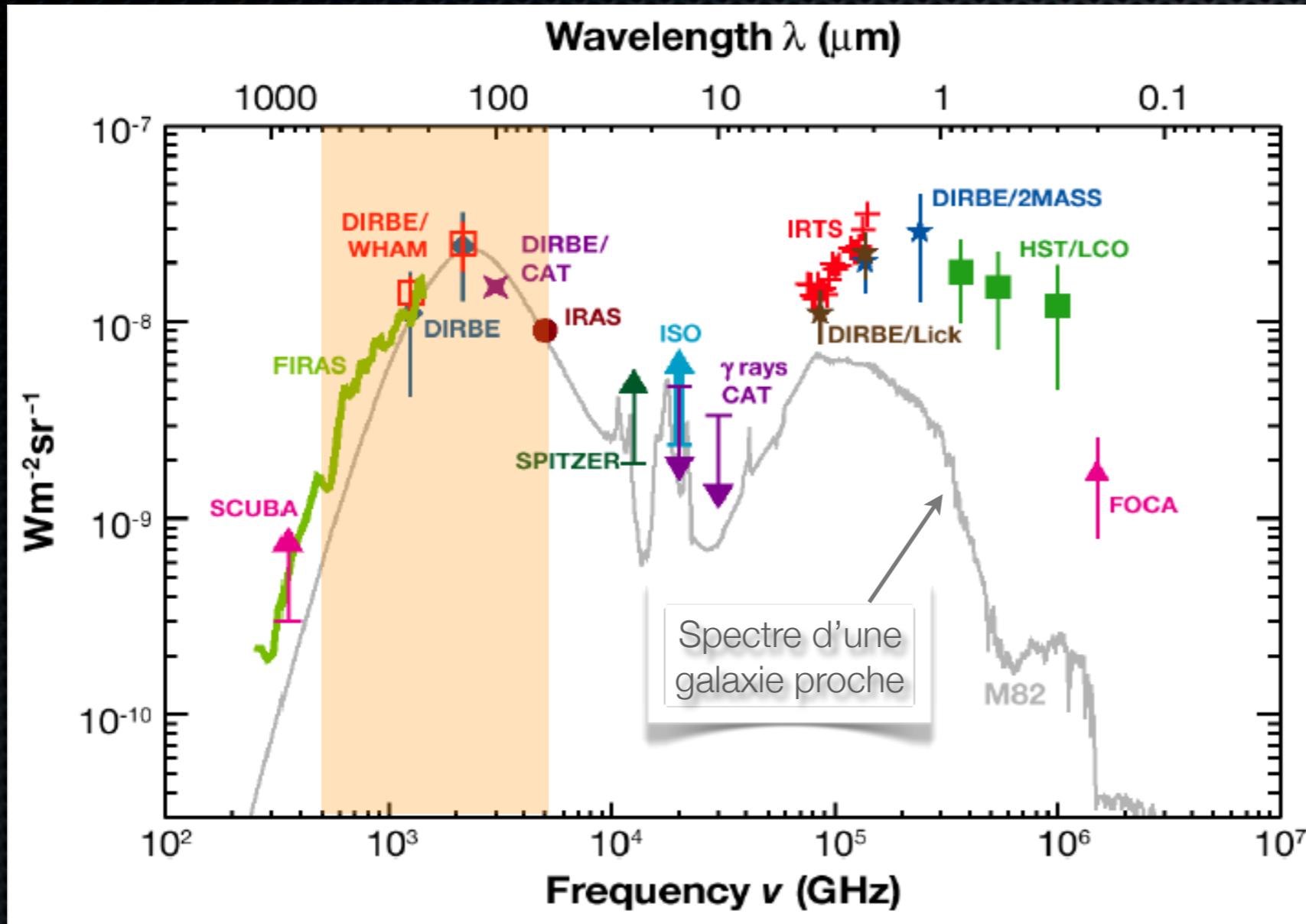
$z=1$   $\text{âge}=6 \text{ Gyr}$ ,  $z=3$   $\text{âge}=2 \text{ Gyr}$ ,  $z=5$   $\text{âge}=1 \text{ Gyr}$

# Résoudre le fond diffus extra-Galactique



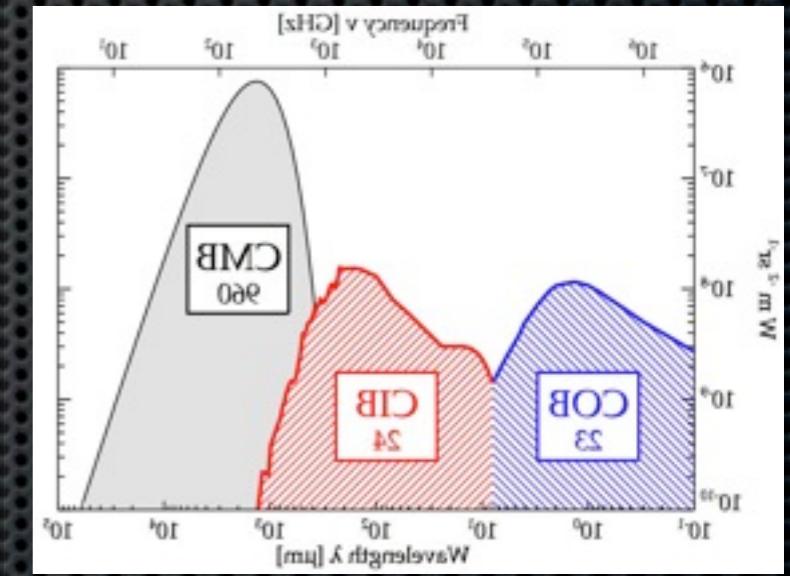
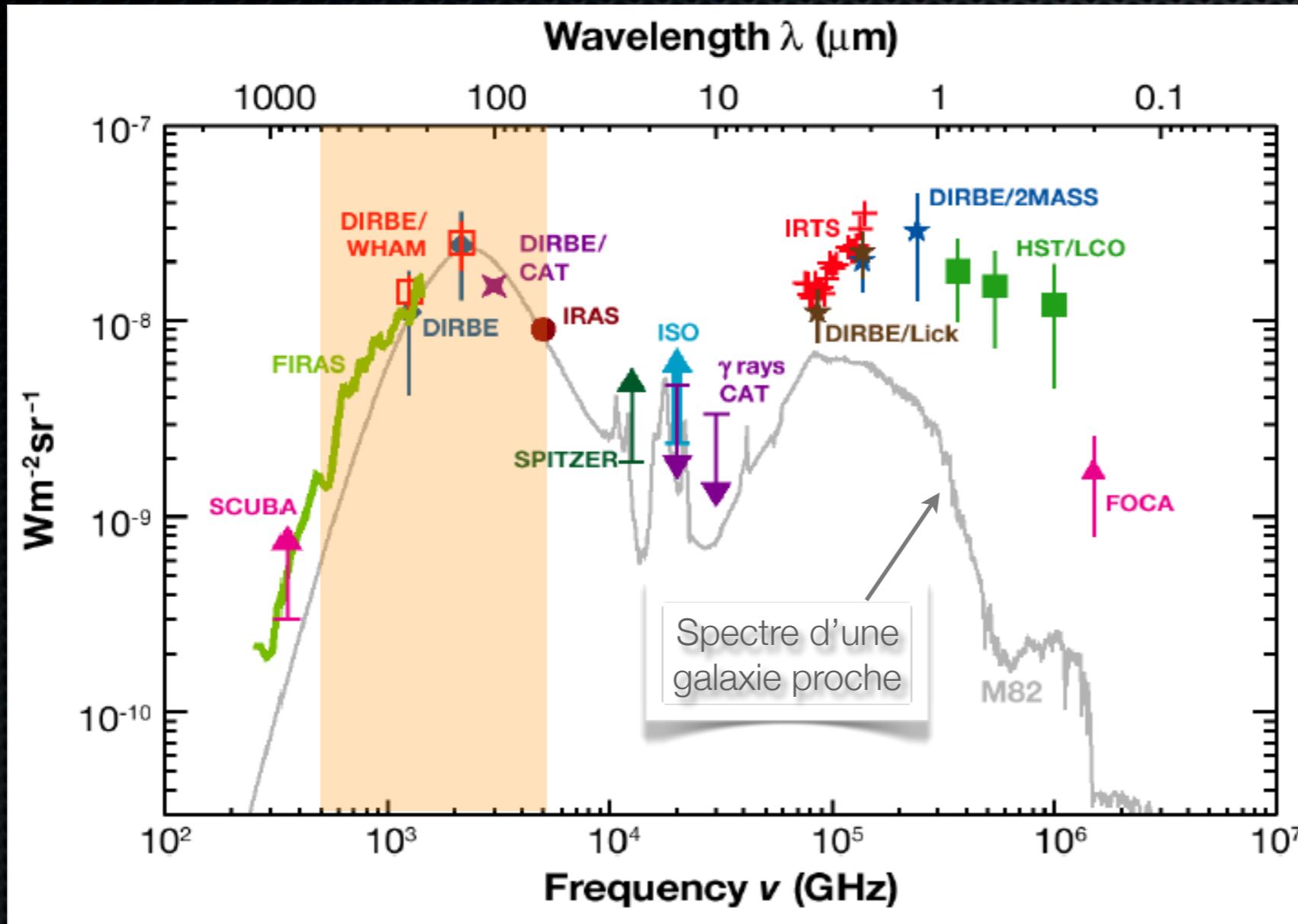
- Il s'agit de l'émission de toutes les galaxies qui peuplent l'Univers, de ses débuts à aujourd'hui.
  - cf. Paradoxe d'Olbers (comment peut-il faire nuit dans un univers infini?)
- Il ne s'agit pas du fond cosmologique à 2.7 K

# Résoudre le fond diffus extra-Galactique



- Il s'agit de l'émission de toutes les galaxies qui peuplent l'Univers, de ses débuts à aujourd'hui.
  - cf. Paradoxe d'Olbers (comment peut-il faire nuit dans un univers infini?)
- Il ne s'agit pas du fond cosmologique à 2.7 K

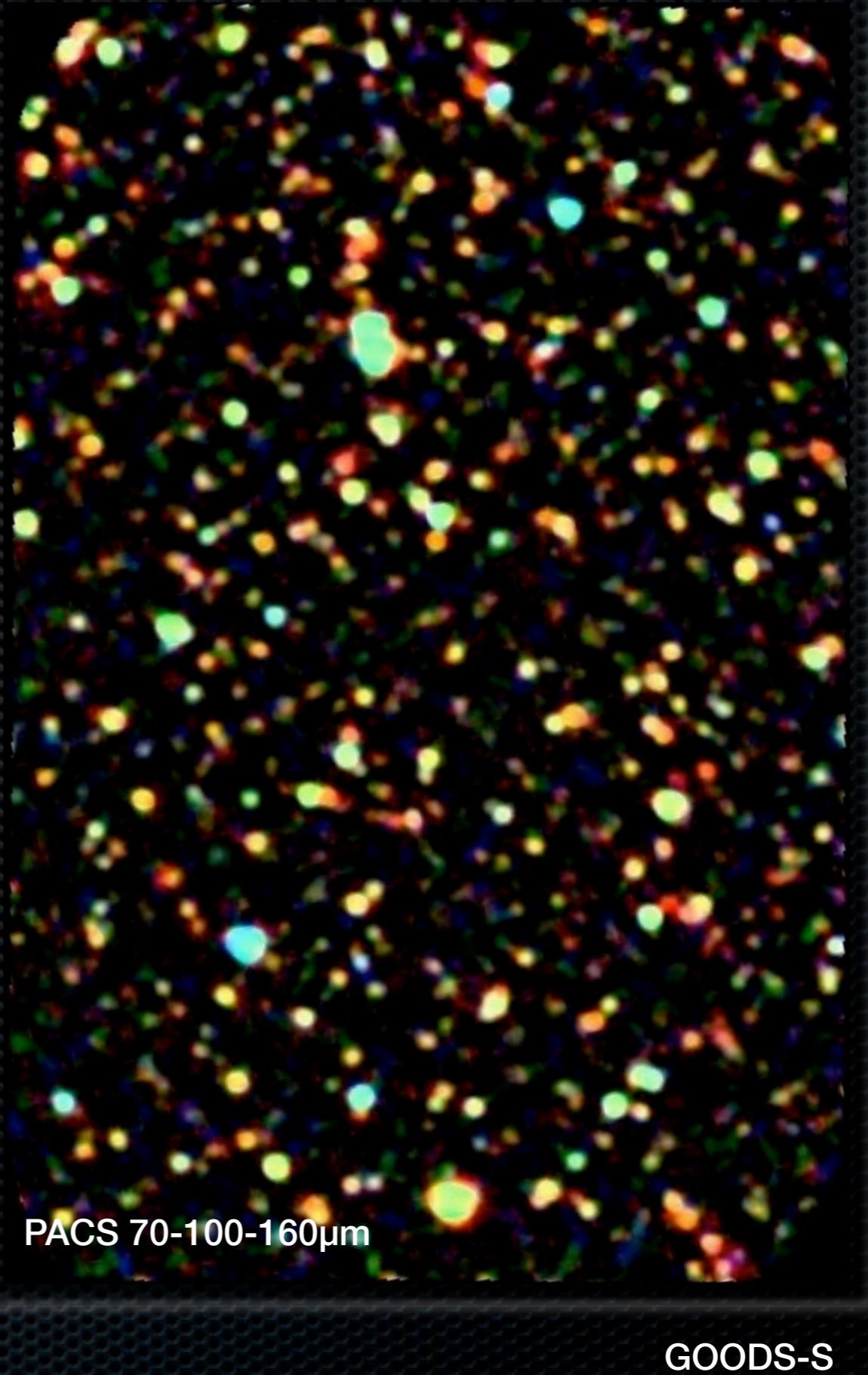
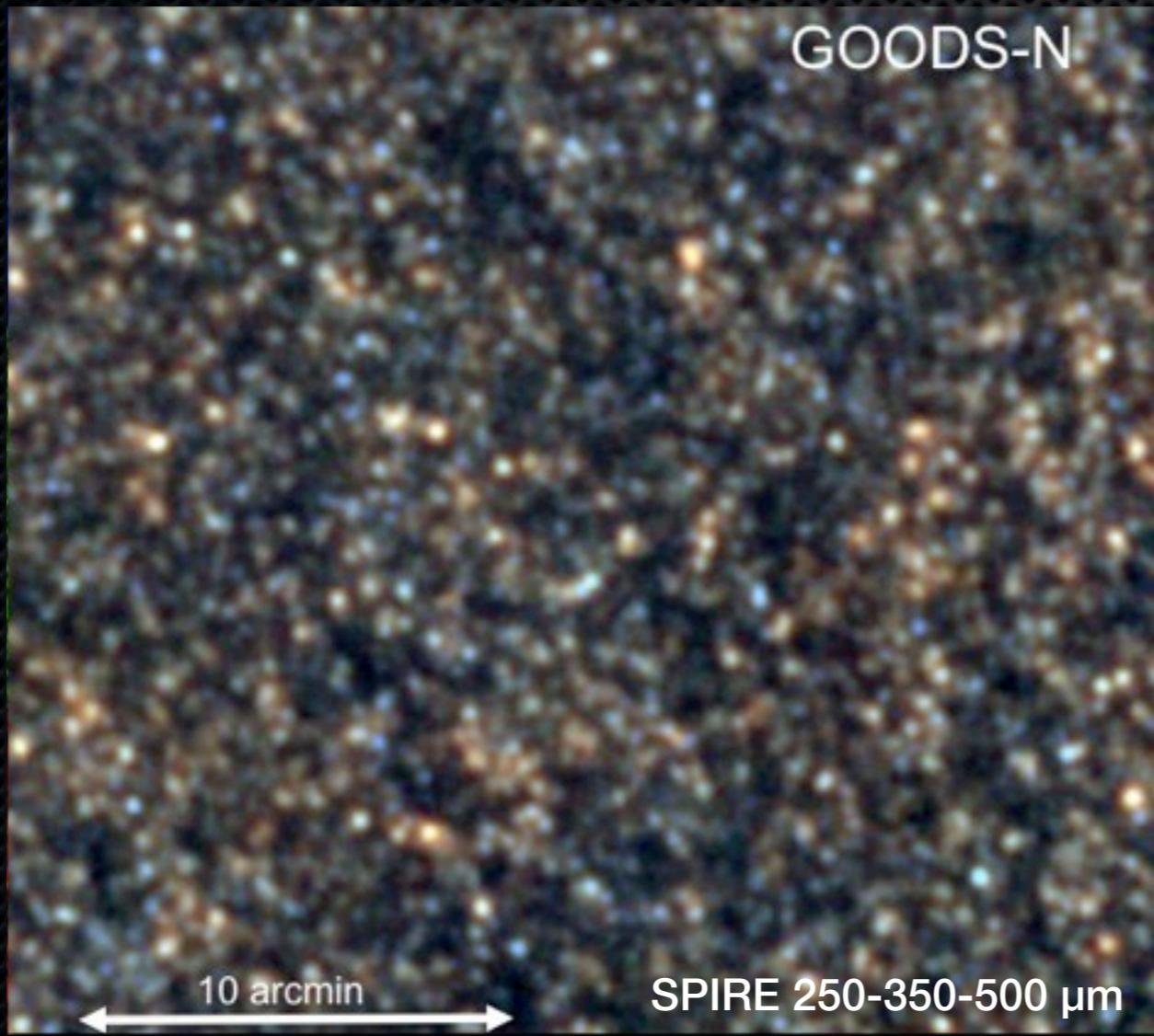
# Résoudre le fond diffus extra-Galactique



- Il s'agit de l'émission de toutes les galaxies qui peuplent l'Univers, de ses débuts à aujourd'hui.
  - cf. Paradoxe d'Olbers (comment peut-il faire nuit dans un univers infini?)
- Il ne s'agit pas du fond cosmologique à 2.7 K

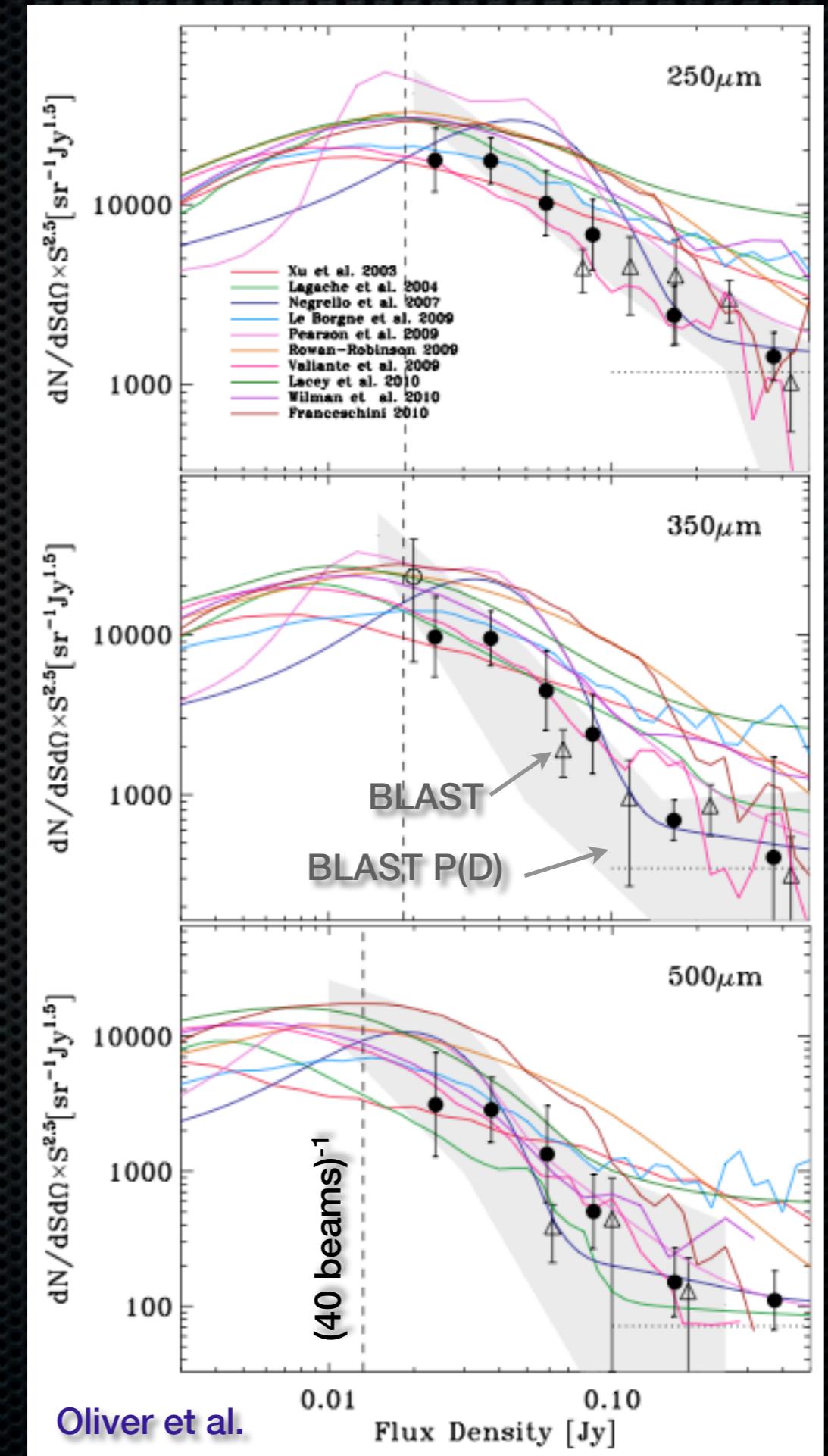
# La confusion est atteinte

- Les cartes SPIRE sont entièrement dominées par la confusion.
- A plus courte longueur d'onde, seuls les relevés à 160  $\mu\text{m}$  ont atteint la confusion.



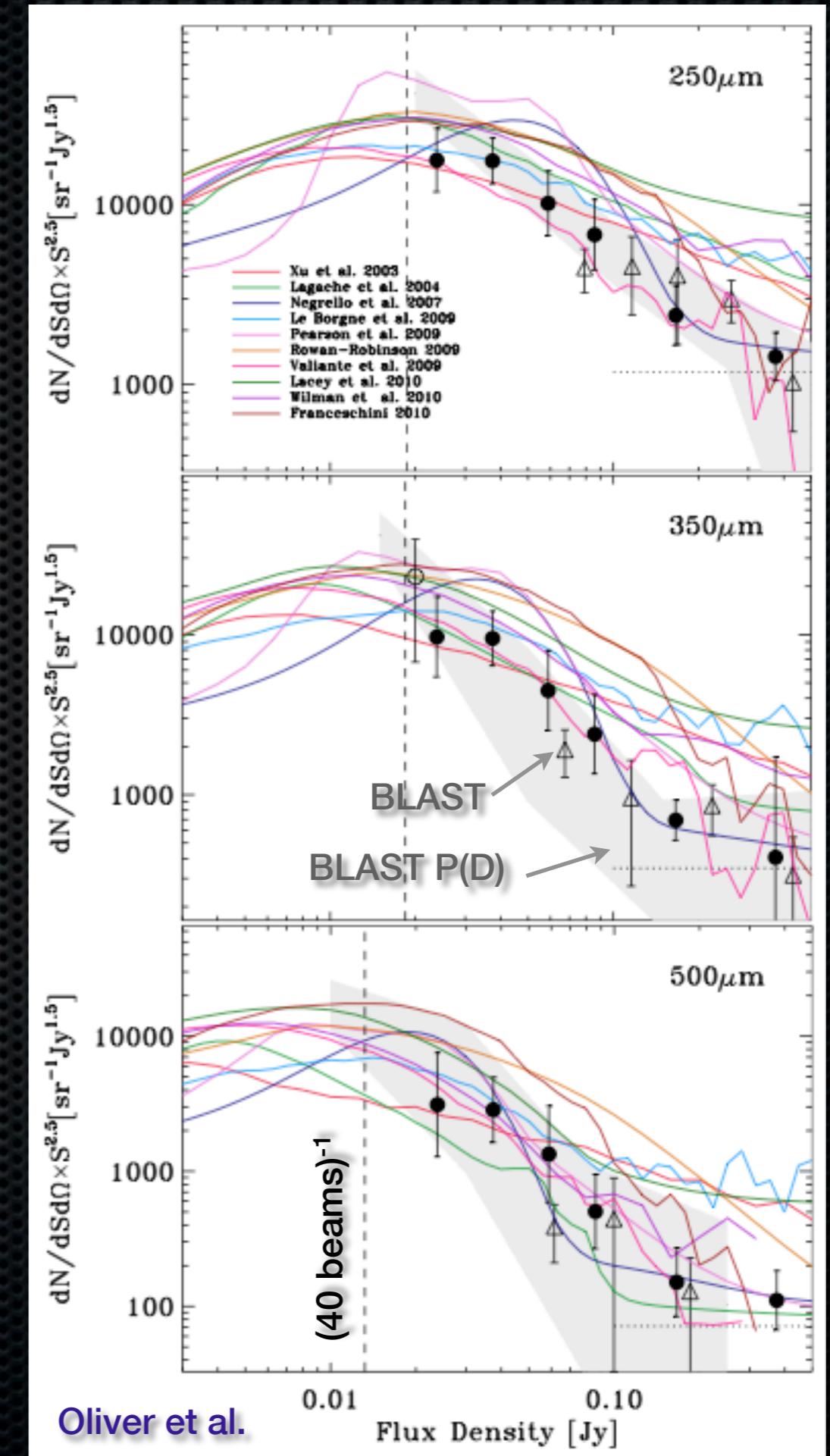
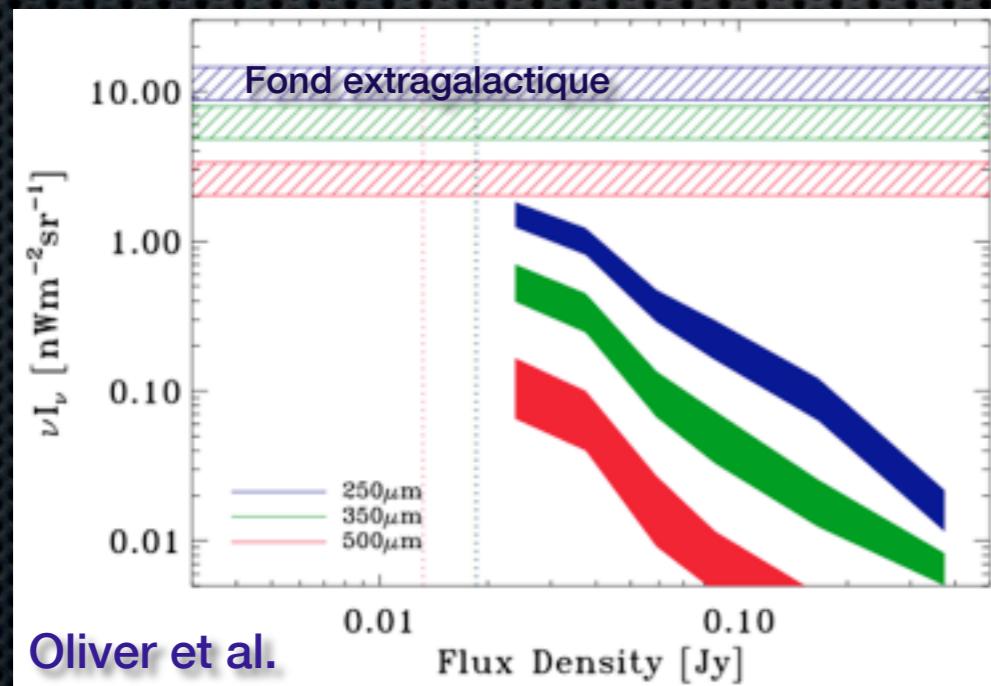
# Comptages SPIRE

- Comptage: histogramme du nombre d'objets en fonction de leur brillance.
    - Ne nécessite pas de connaissance des distances.
  - Beaucoup de modèles de comptages ont du mal à reproduire la partie fort flux des observations. Modifications possibles:
    - Galaxies plus froides à haut redshift...
    - Plus de galaxies à haut redshift...

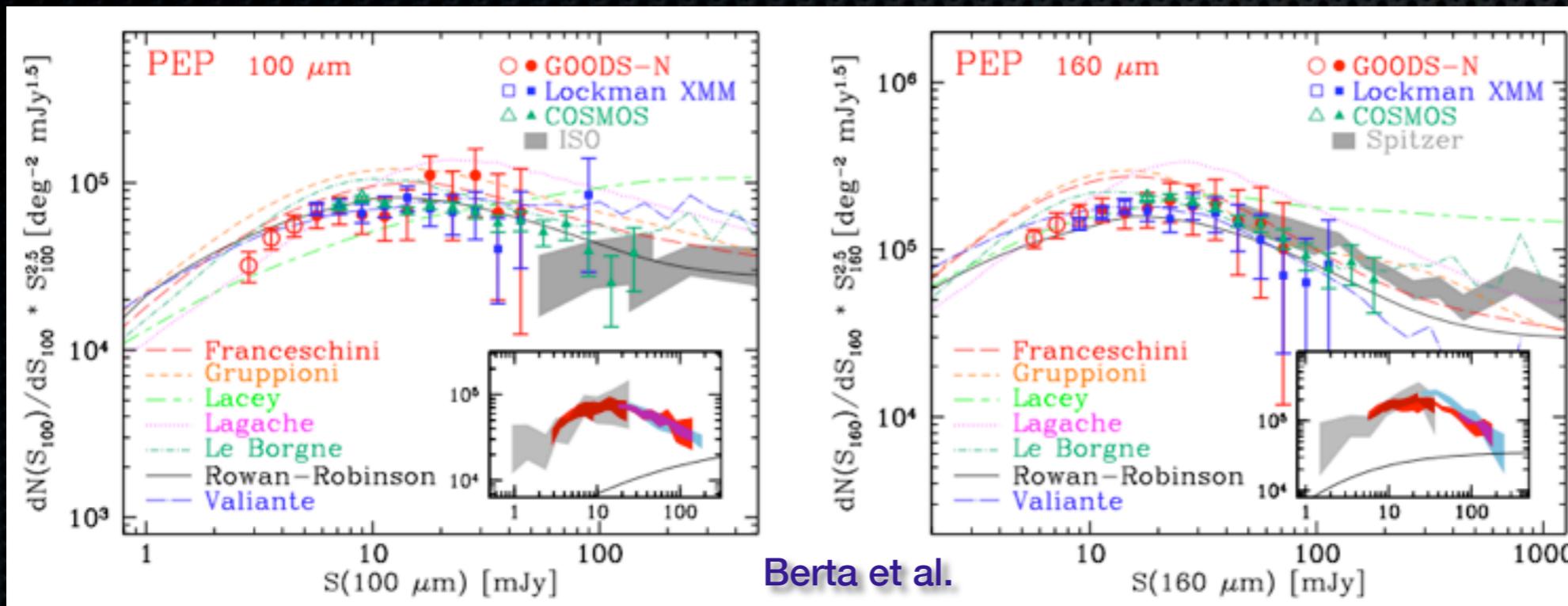


# Comptages SPIRE

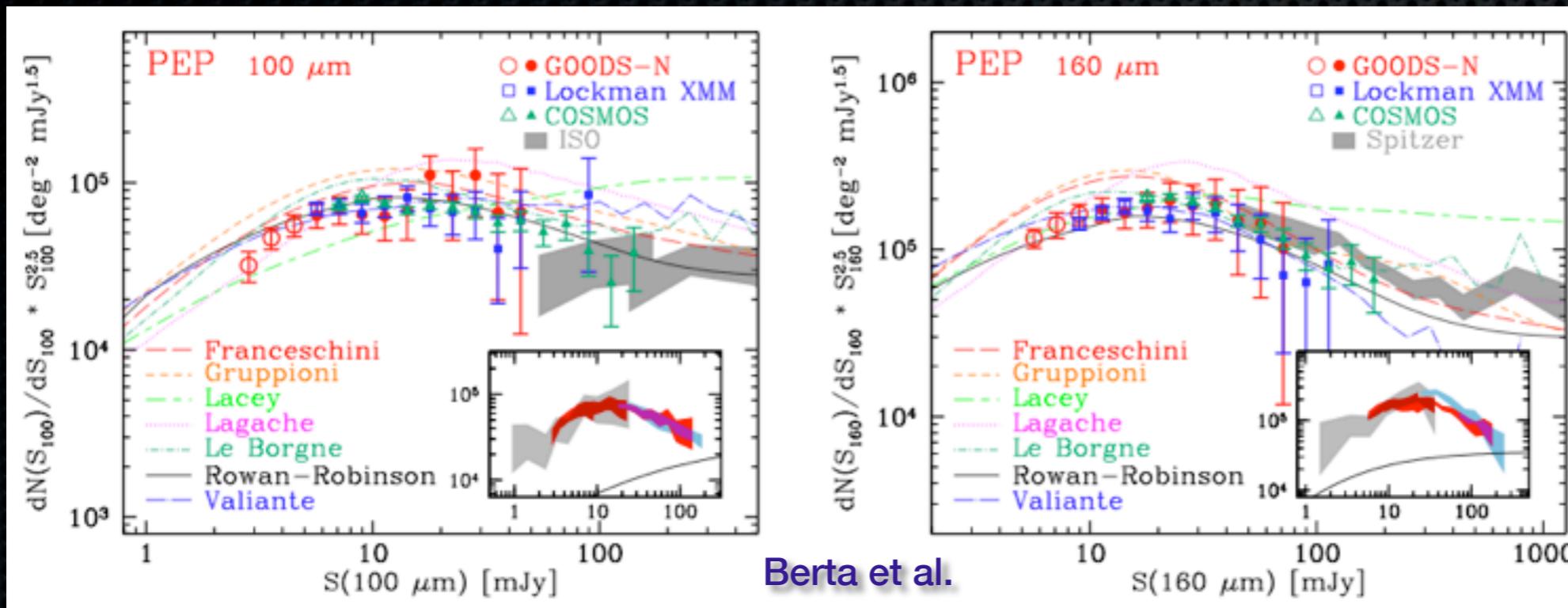
- Comptage: histogramme du nombre d'objets en fonction de leur brillance.
  - Ne nécessite pas de connaissance des distances.
- Beaucoup de modèles de comptages ont du mal à reproduire la partie fort flux des observations. Modifications possibles:
  - Galaxies plus froides à haut redshift...
  - Plus de galaxies à haut redshift...
- A la limite de confusion, seulement 15, 10, et 6% du fond extragalactique est résolu.



# Comptages PACS

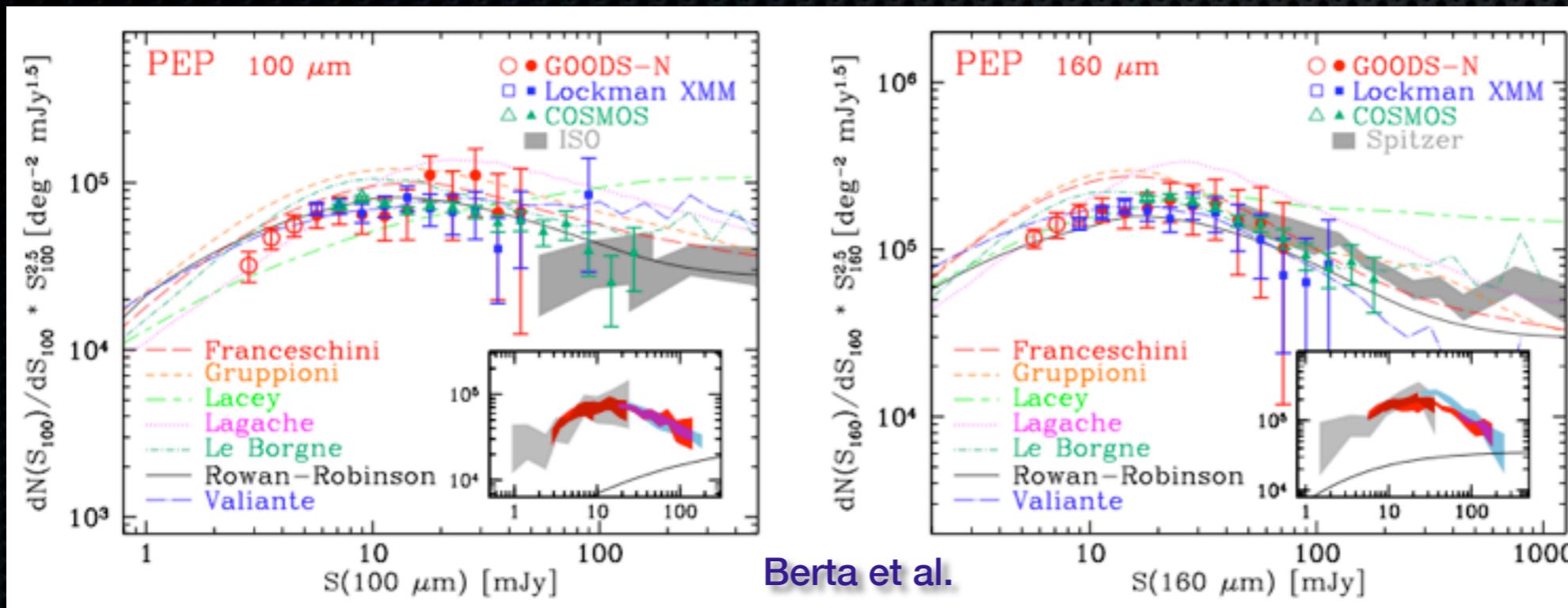


# Comptages PACS



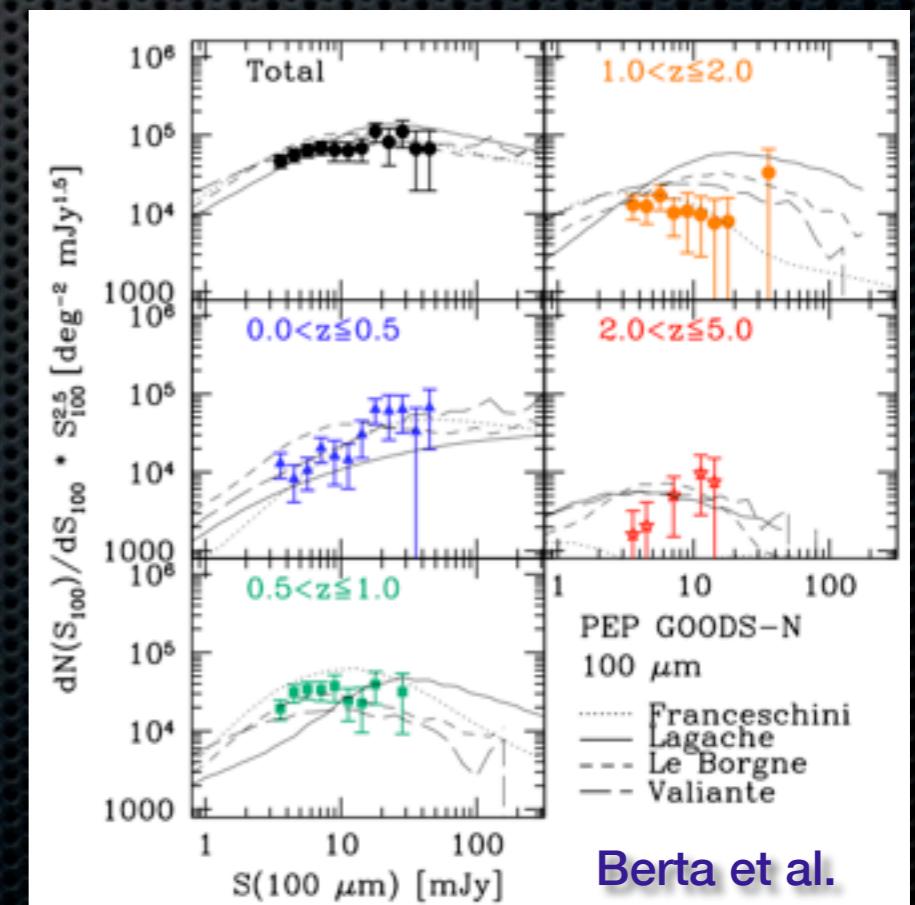
- «Découpage» par tranche de redshift:
  - z<0.5: peu d'évolution, mais les SED indiquent un spectre plus froid que les galaxies LIGs locales.
  - 1<z<2: le domaine le moins bien reproduit par les modèles.

# Comptages PACS



Berta et al.

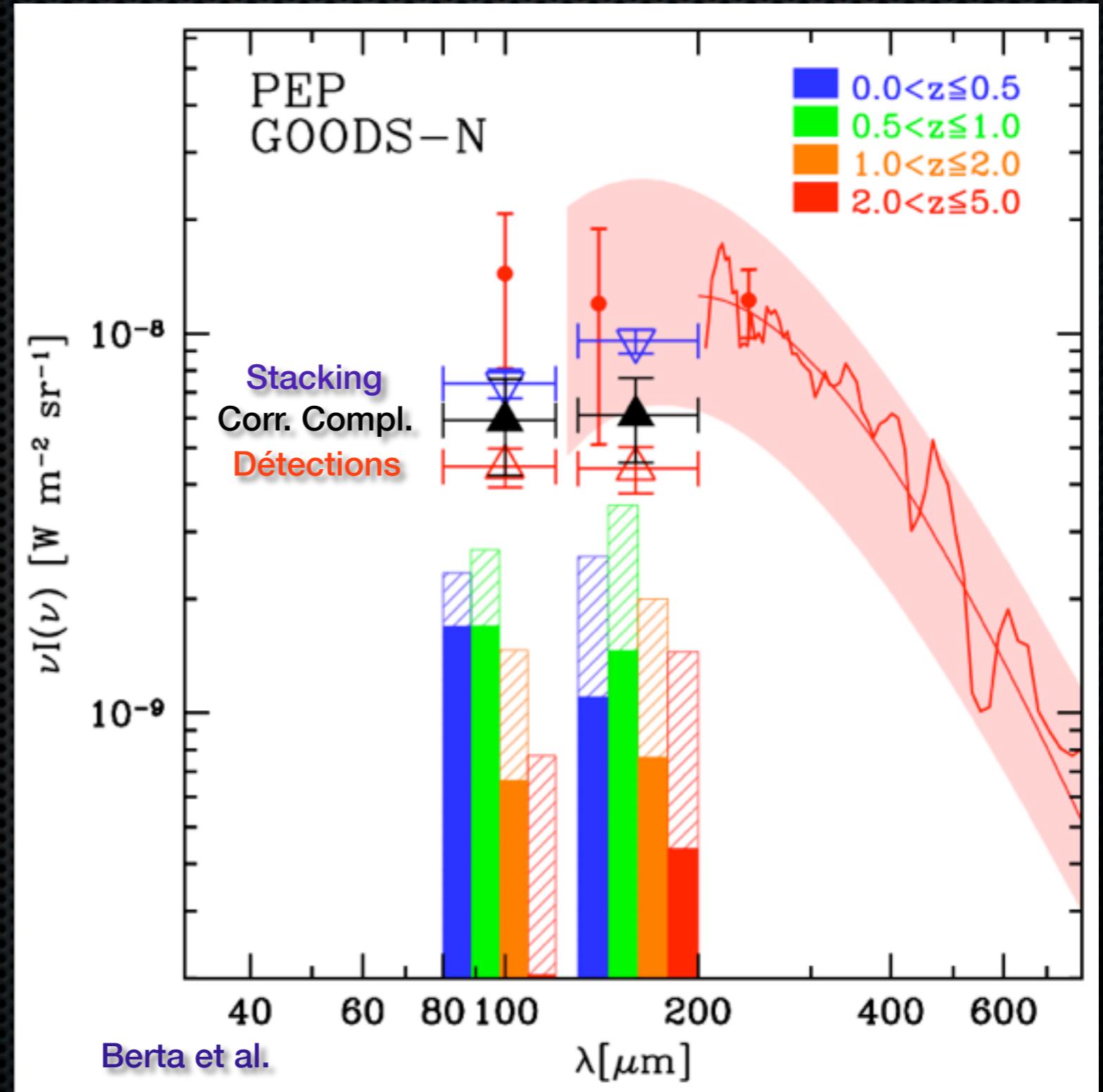
- «Découpage» par tranche de redshift:
  - $z < 0.5$ : peu d'évolution, mais les SED indiquent un spectre plus froid que les galaxies LIGs locales.
  - $1 < z < 2$ : le domaine le moins bien reproduit par les modèles.



Berta et al.

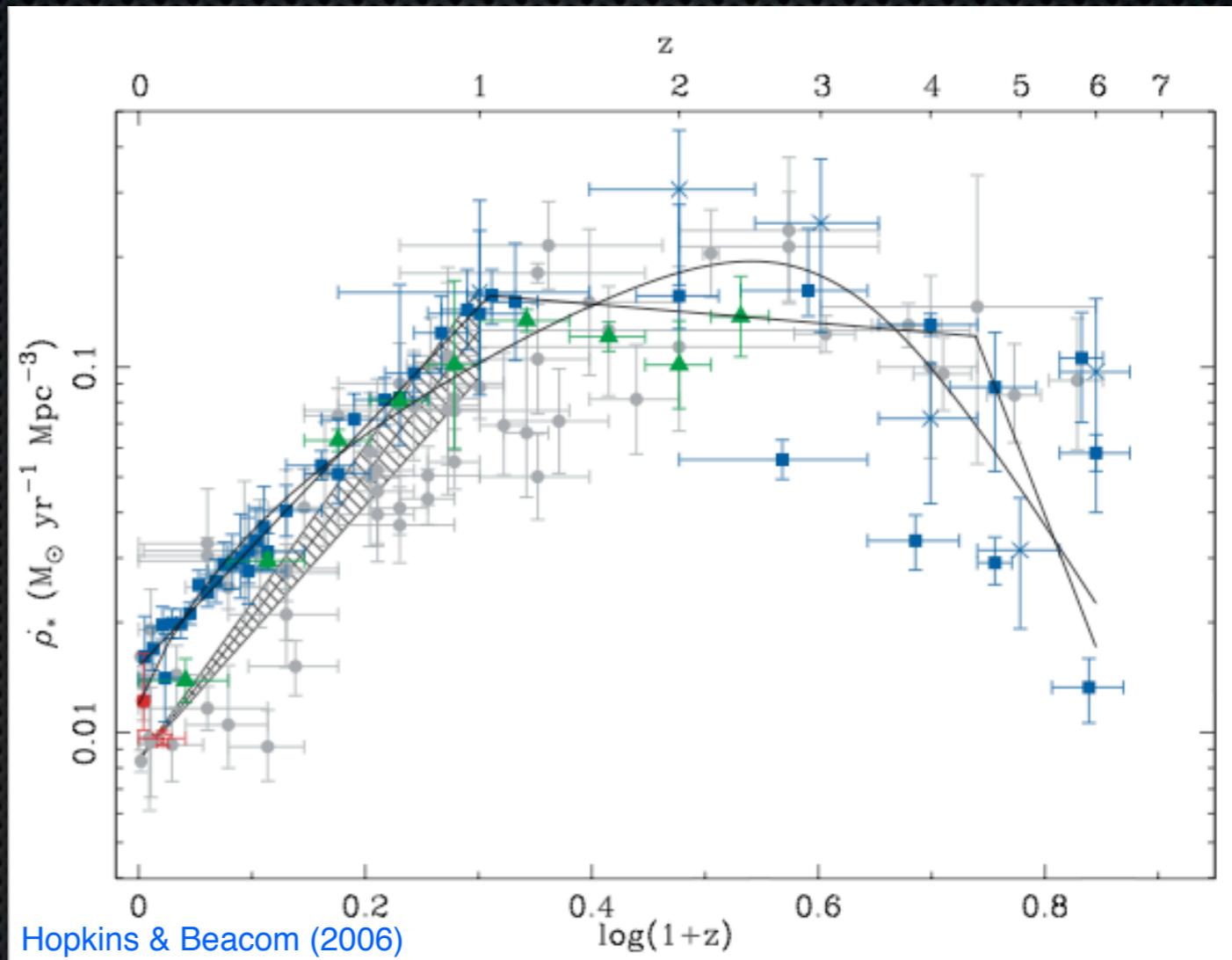
# Comptages PACS

- 45 et 52% du fond cosmologique est résolu (stacking à 24 microns, 51 et 75% du fond est détecté).
- Pour la partie du fond qui est directement résolue:
  - à 100  $\mu\text{m}$  elle est émise principalement à  $z < 1$
  - à 160  $\mu\text{m}$  les galaxies à  $z > 1$  font une contribution significative
- En tenant compte du stacking à 24  $\mu\text{m}$ :
  - à 100  $\mu\text{m}$  la contribution des sources «stackées» à  $z > 2$  est très importante.



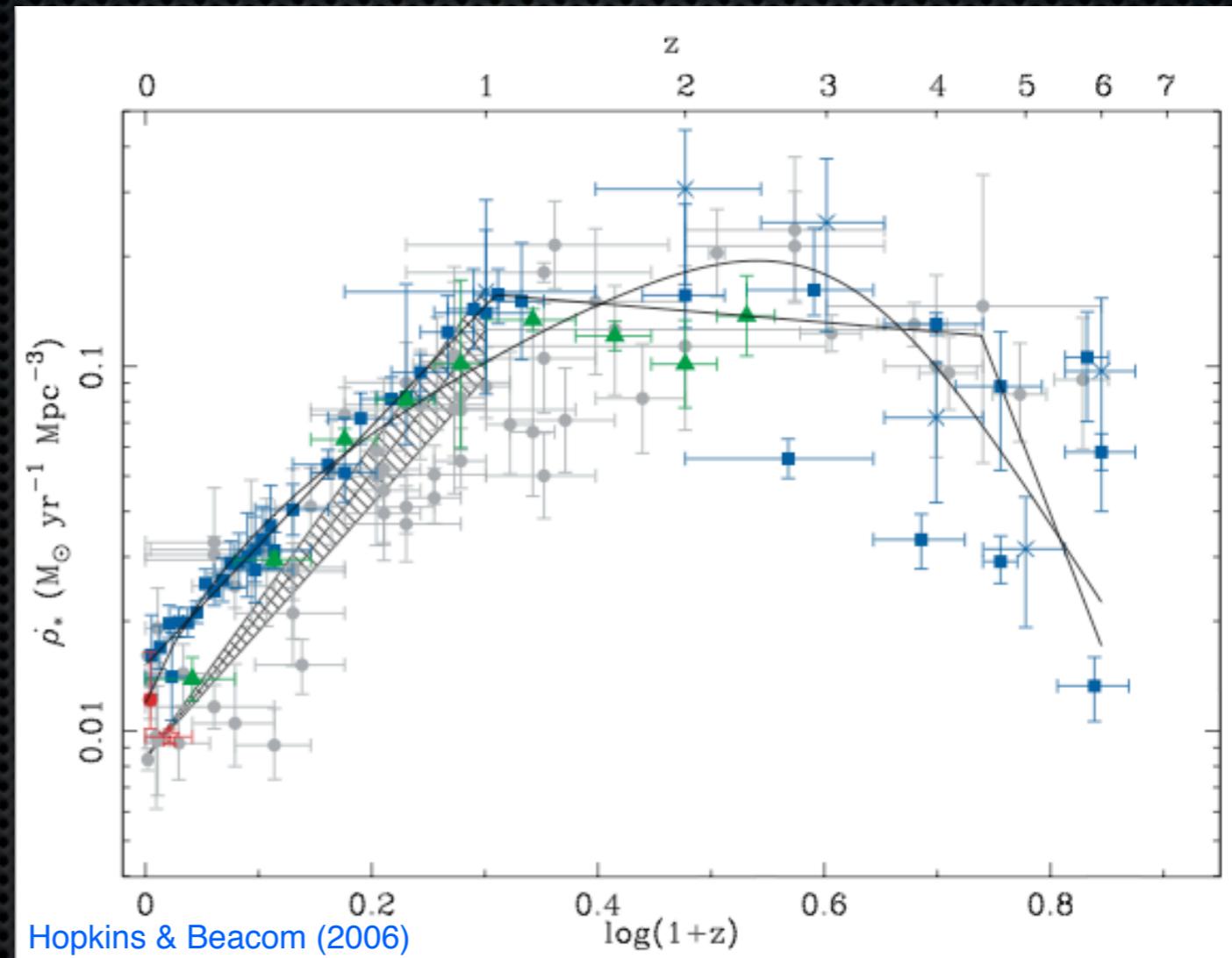
# Conversion $L_{\text{IR}} \rightarrow \text{SFR}$

- L'objectif des relevés cosmologiques, c'est de mesurer  $\text{SFR}(z)$ .
- Hyp:  $\text{SFR} \propto L_{\text{IRtot}}(8-1000\mu\text{m})$ .
- Herschel couvre à priori la totalité de l'émission IR, donc permet de mesurer  $L_{\text{IR}}$  sans extrapolation.



# Conversion $L_{\text{IR}} \rightarrow \text{SFR}$

- L'objectif des relevés cosmologiques, c'est de mesurer  $\text{SFR}(z)$ .
- Hyp:  $\text{SFR} \propto L_{\text{IRtot}}(8-1000\mu\text{m})$ .
- Herschel couvre à priori la totalité de l'émission IR, donc permet de mesurer  $L_{\text{IR}}$  sans extrapolation.

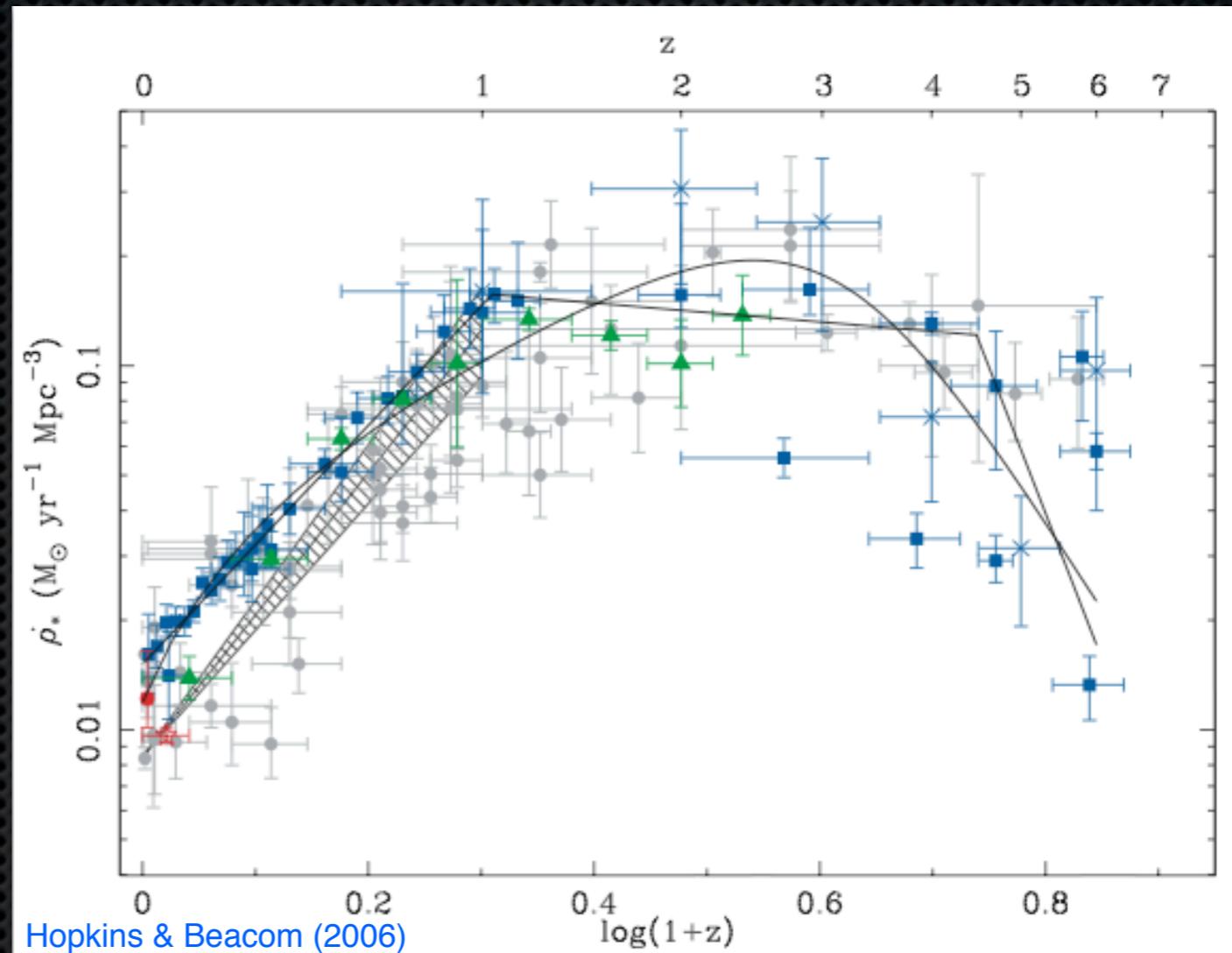
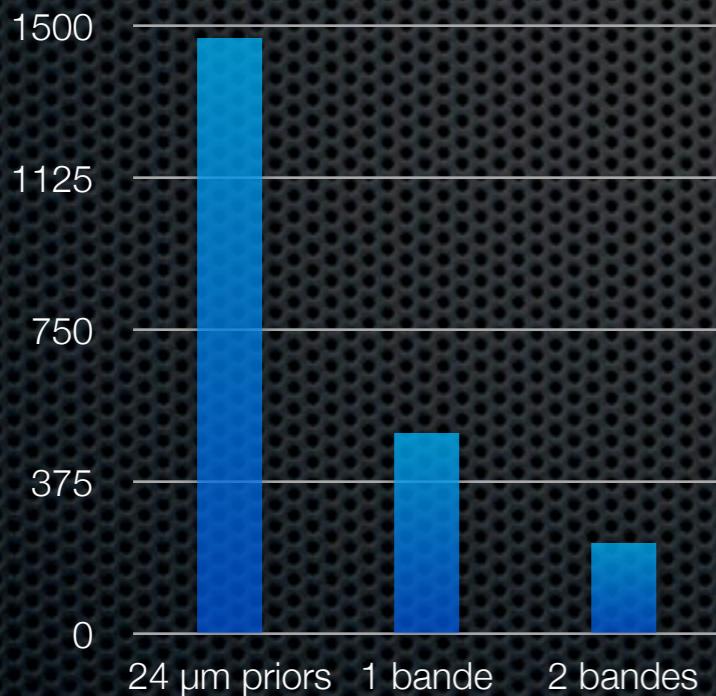


Problème: du fait de la confusion, peu de sources distantes ont une couverture spectrale «dense»

# Conversion $L_{\text{IR}} \rightarrow \text{SFR}$

- L'objectif des relevés cosmologiques, c'est de mesurer  $\text{SFR}(z)$ .
- Hyp:  $\text{SFR} \propto L_{\text{IRtot}}(8-1000\mu\text{m})$ .
- Herschel couvre à priori la totalité de l'émission IR, donc permet de mesurer  $L_{\text{IR}}$  sans extrapolation.

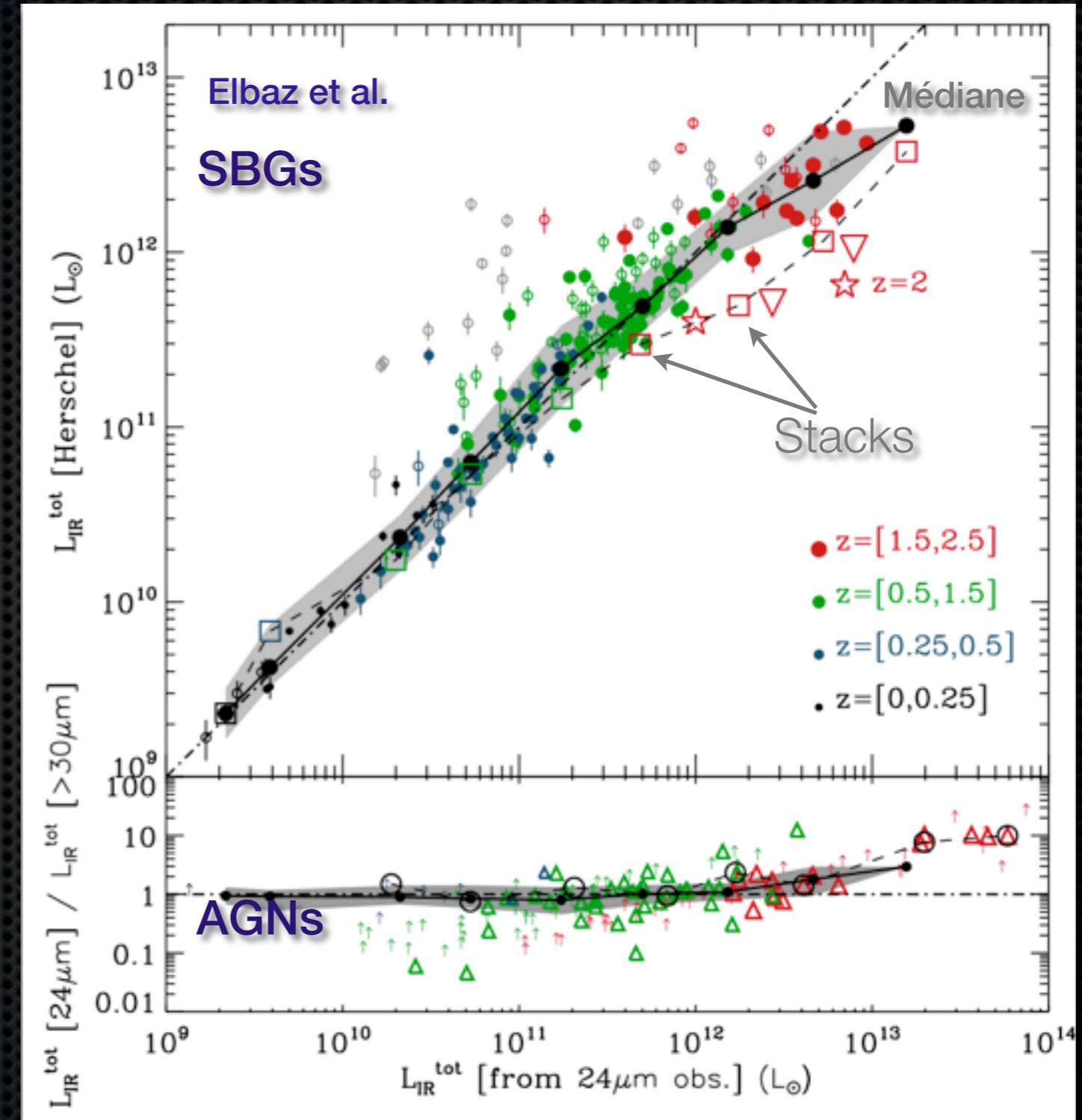
Elbaz et al.



Problème: du fait de la confusion, peu de sources distantes ont une couverture spectrale «dense»

# Comparaison d'estimateurs $L_{\text{IR}}$ ( $z < 1.5$ )

- $L_{\text{IR}}$  est estimé à partir d'ajustement des luminosités observées par des bibliothèques  $L_{\text{IR}} \leftrightarrow \text{SED}$ .
  - Permet aussi de relier  $L_{\lambda}$  à  $L_{\text{IR}}$ .
- Sur trois décades de luminosité ( $10^9$ - $10^{12}$ ), pour  $z < 1.5$ , Herschel démontre que les extrapolations basées sur  $L_{24\mu\text{m}}$  sont correctes.
- Les galaxies contenant un AGN détecté suivent la même relation.
  - l'AGN ne domine pas la luminosité  $L_{\text{IR}}$
- Au delà de  $z = 1.5$ , les bibliothèques sur-estiment  $L_{\text{IR}}$ .

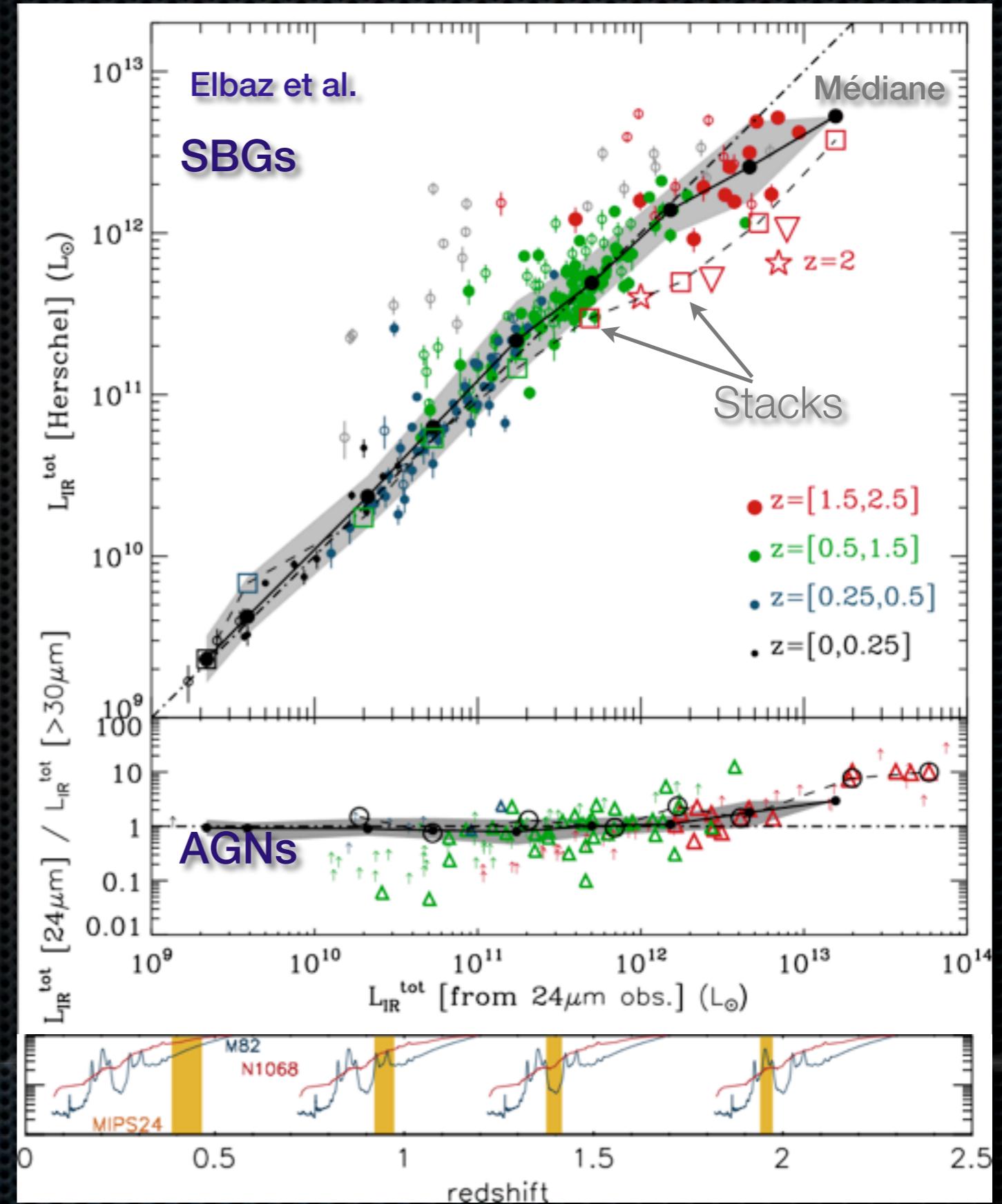


AGN: Noyau Actif de Galaxie =  
Trou noir central super-massif

# Comparaison d'estimateurs $L_{\text{IR}}$ ( $z < 1.5$ )

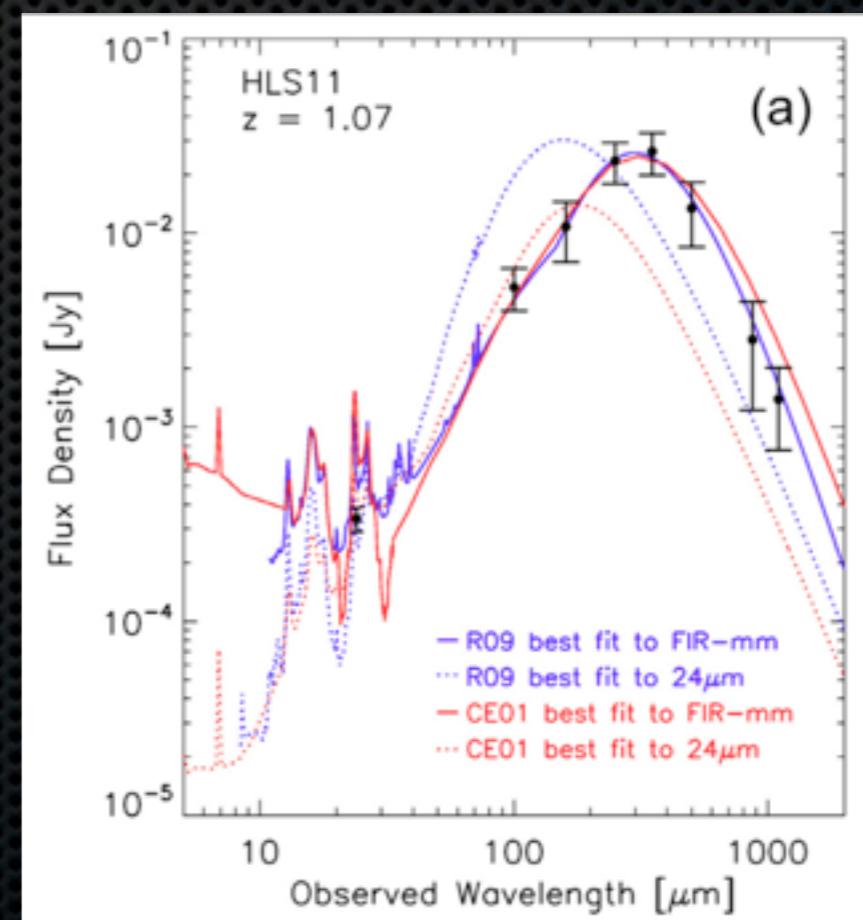
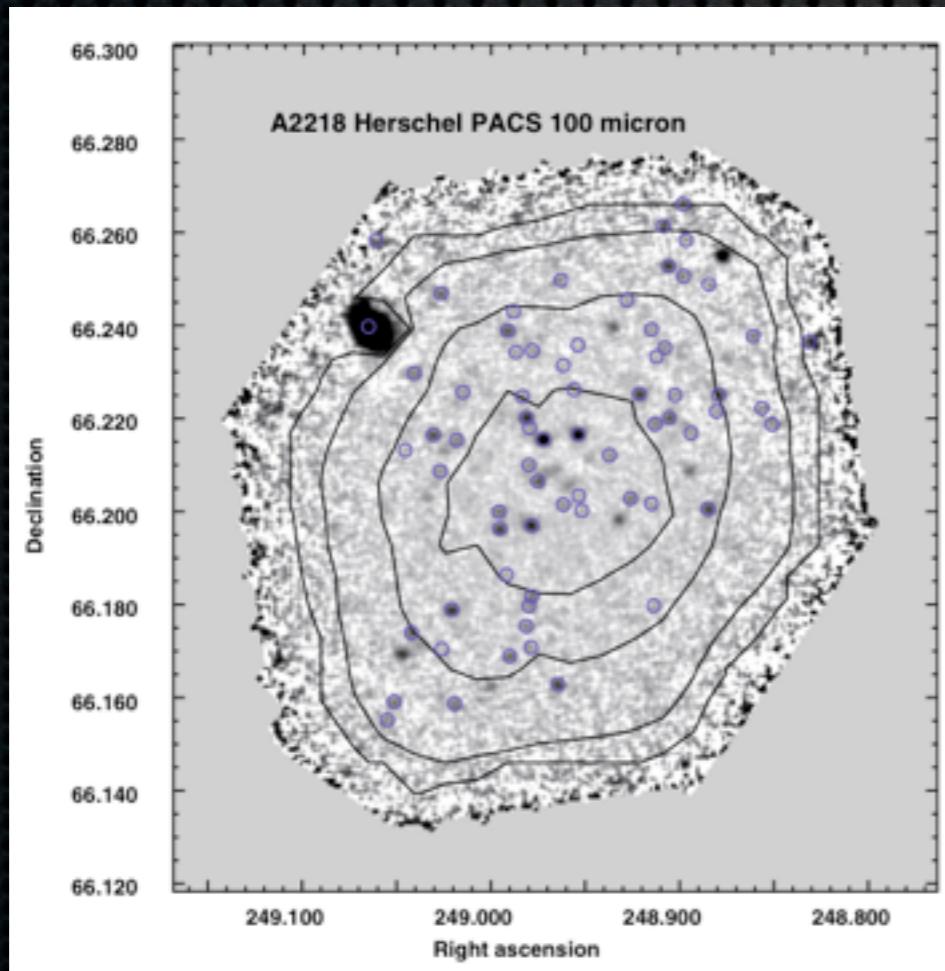
- $L_{\text{IR}}$  est estimé à partir d'ajustement des luminosités observées par des bibliothèques  $L_{\text{IR}} \leftrightarrow \text{SED}$ .
  - Permet aussi de relier  $L_{\lambda}$  à  $L_{\text{IR}}$ .
- Sur trois décades de luminosité ( $10^9$ - $10^{12}$ ), pour  $z < 1.5$ , Herschel démontre que les extrapolations basées sur  $L_{24\mu\text{m}}$  sont correctes.
- Les galaxies contenant un AGN détecté suivent la même relation.
  - l'AGN ne domine pas la luminosité  $L_{\text{IR}}$
- Au delà de  $z = 1.5$ , les bibliothèques sur-estiment  $L_{\text{IR}}$ .

AGN: Noyau Actif de Galaxie =  
Trou noir central super-massif



# Télescopes gravitationnels

- On exploite l'effet de lentille gravitationnelle pour s'affranchir de la confusion et atteindre des sources plus faibles.
- Gain d'un facteur 4 sur la limite basse des comptages.



Exemple d'une galaxie de  $10^{11} \text{ L}_\odot$ , dont la SED est nettement plus froide qu'attendue



# Observations de galaxies proches

# Observations de galaxies proches

- Le moteur principal de l'évolution des galaxies c'est la formation des étoiles:
  - Converti du gaz en étoiles qui évoluent sur des échelles de temps allant du million au milliard d'années.
  - Enrichi la matière en éléments lourds.

# Observations de galaxies proches

- Le moteur principal de l'évolution des galaxies c'est la formation des étoiles:
  - Converti du gaz en étoiles qui évoluent sur des échelles de temps allant du million au milliard d'années.
  - Enrichi la matière en éléments lourds.
- Le processus de formation stellaire est lié:
  - Aux phénomènes gravitationnels internes (par exemple l'onde spirale) et externes (interactions) mis en jeu par les galaxies.
  - À la thermodynamique et à la chimie du milieu interstellaire qui transporte et réagit aux flux d'énergie émis par les étoiles.

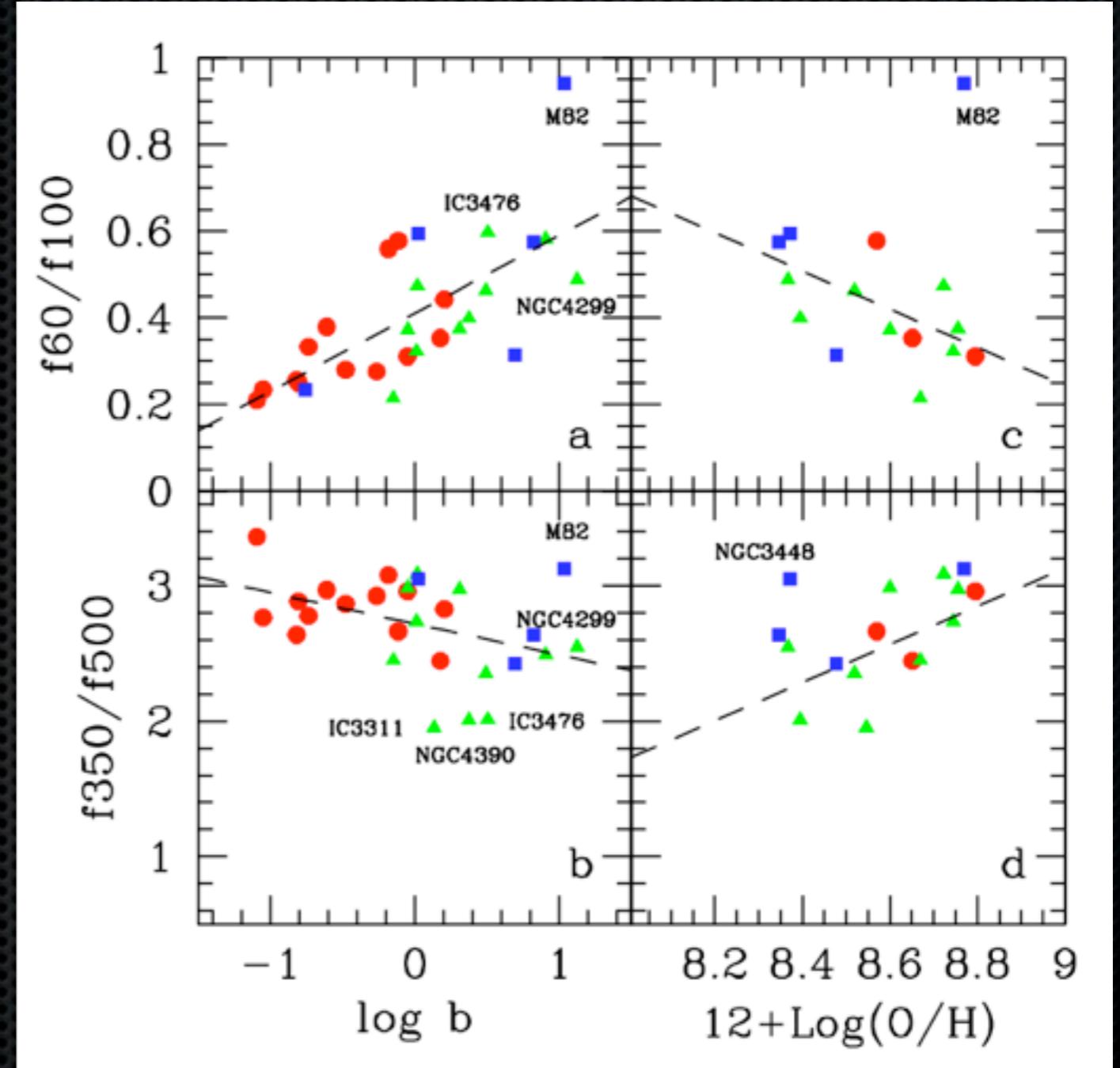
# Observations de galaxies proches

- Le moteur principal de l'évolution des galaxies c'est la formation des étoiles:
  - Converti du gaz en étoiles qui évoluent sur des échelles de temps allant du million au milliard d'années.
  - Enrichi la matière en éléments lourds.
- Le processus de formation stellaire est lié:
  - Aux phénomènes gravitationnels internes (par exemple l'onde spirale) et externes (interactions) mis en jeu par les galaxies.
  - À la thermodynamique et à la chimie du milieu interstellaire qui transporte et réagit aux flux d'énergie émis par les étoiles.
- La résolution spatiale offerte par Herschel va permettre d'étudier ces processus en détail et en accédant à la gamme de longueur d'onde où ils sont le plus visibles.
  - La luminosité infrarouge fournit-elle un traceur fiable de la formation stellaire?
  - Quelles sont vraiment les sources de chauffage?
  - Quelles sont les relations entre la poussière et les phases du milieu interstellaire?

# Caractère composite du spectre FIR

- Grand débat: une ou plusieurs phases de poussière dans les galaxies?
- Clairement deux: les rapports 60/100 et 350/500 indiquent des températures différentes.
- Ils varient de façon opposée avec le taux de formation stellaire par unité de masse (SSFR) ou les abondances chimiques ( $[O/H]$ ).

A fort SSFR ou faible métallicité, la phase chaude est plus chaude, et la phase froide plus froide..

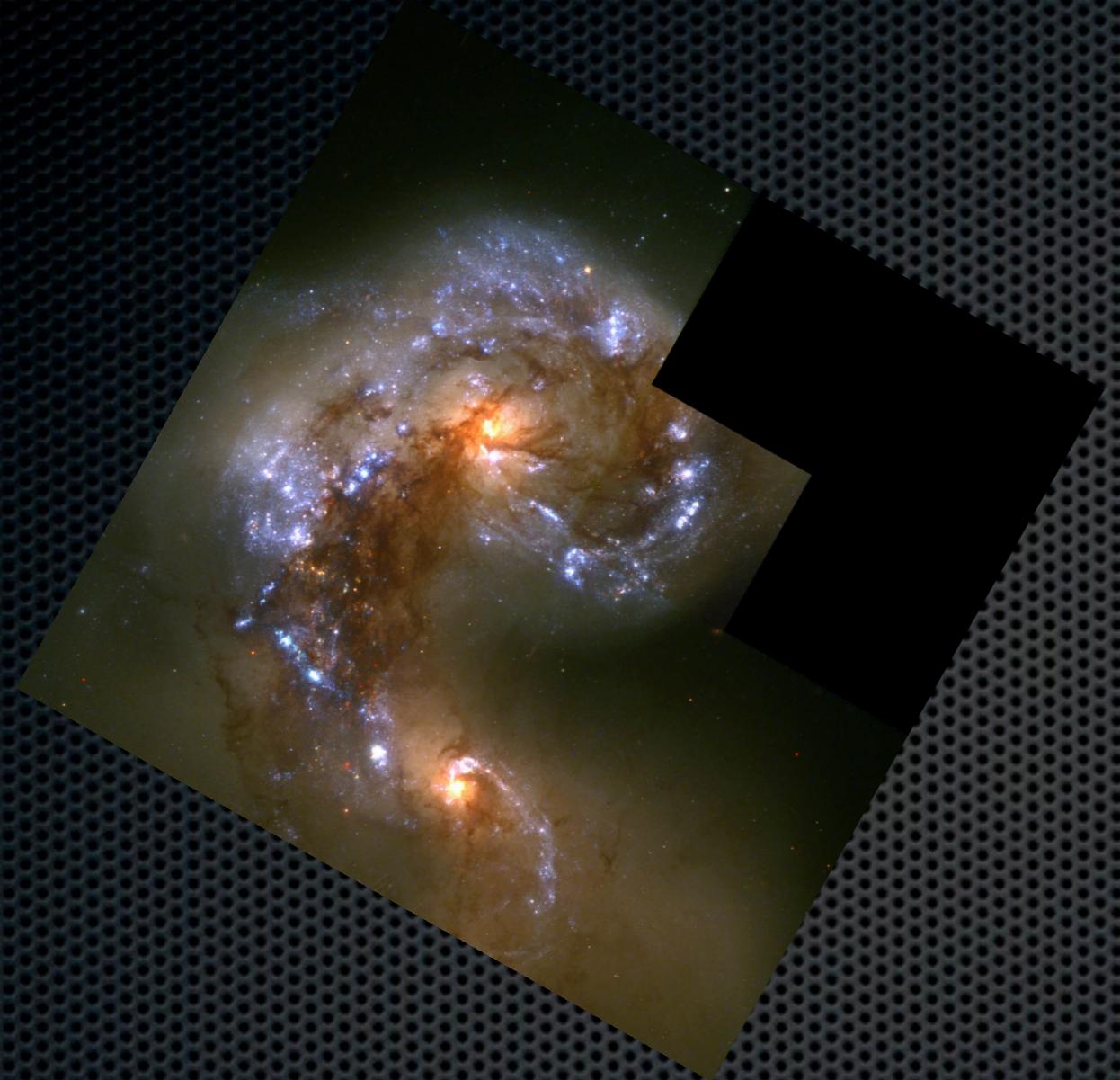


Boselli et al. 2010

Une galaxie n'est pas un «point»

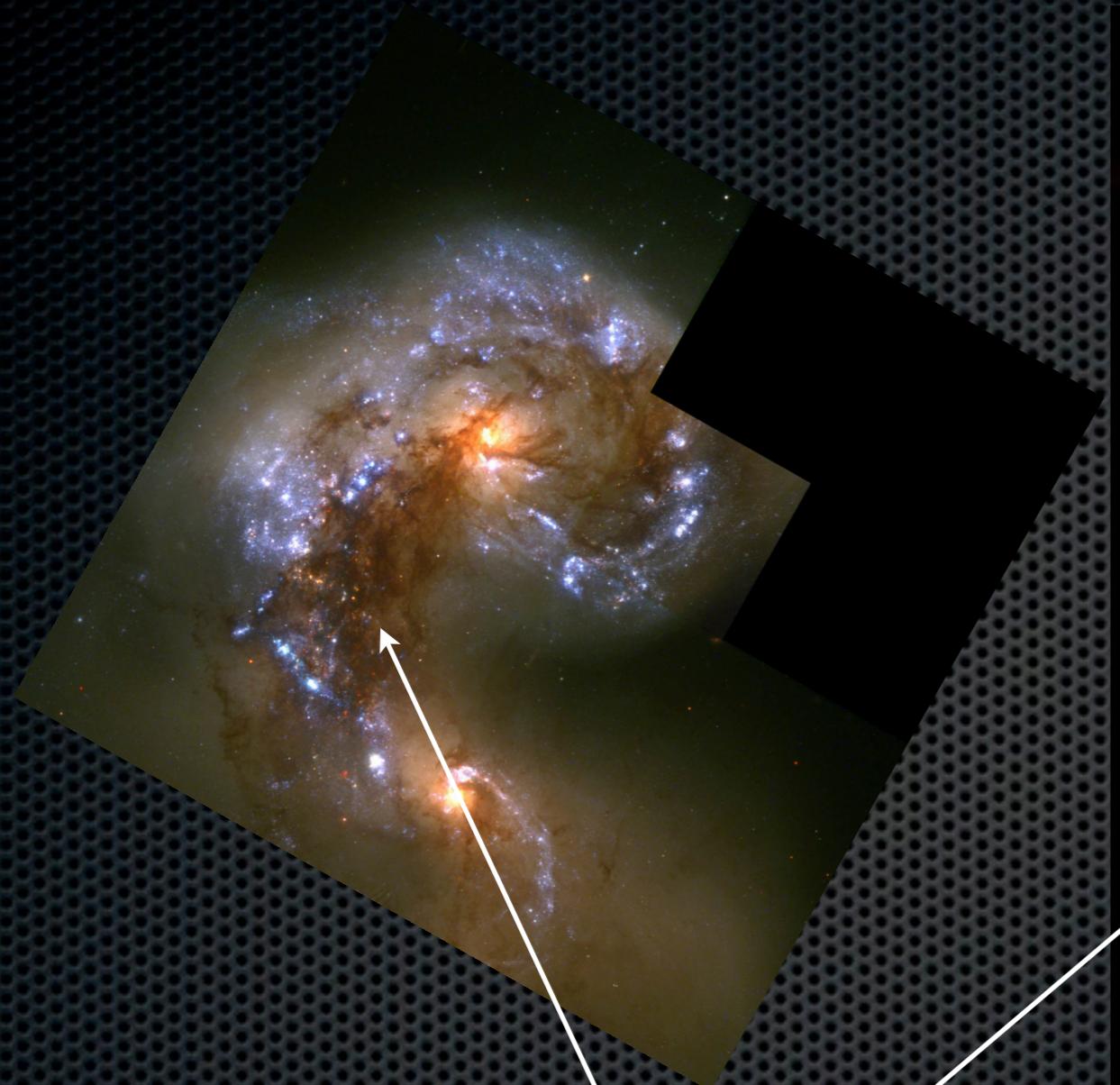


# Une galaxie n'est pas un «point»

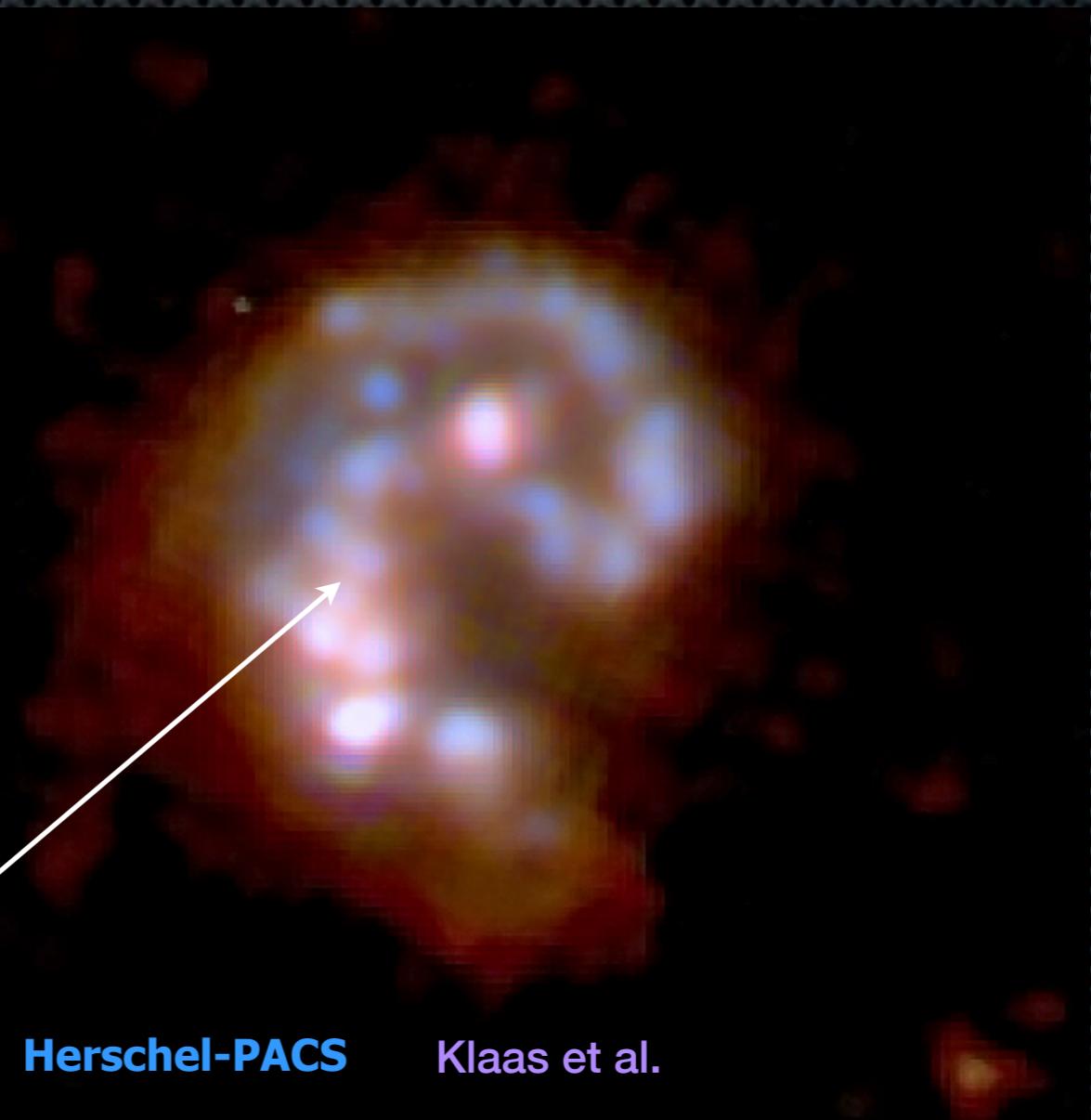


**Hubble Space Telescope**

# Une galaxie n'est pas un «point»



**Hubble Space Telescope**

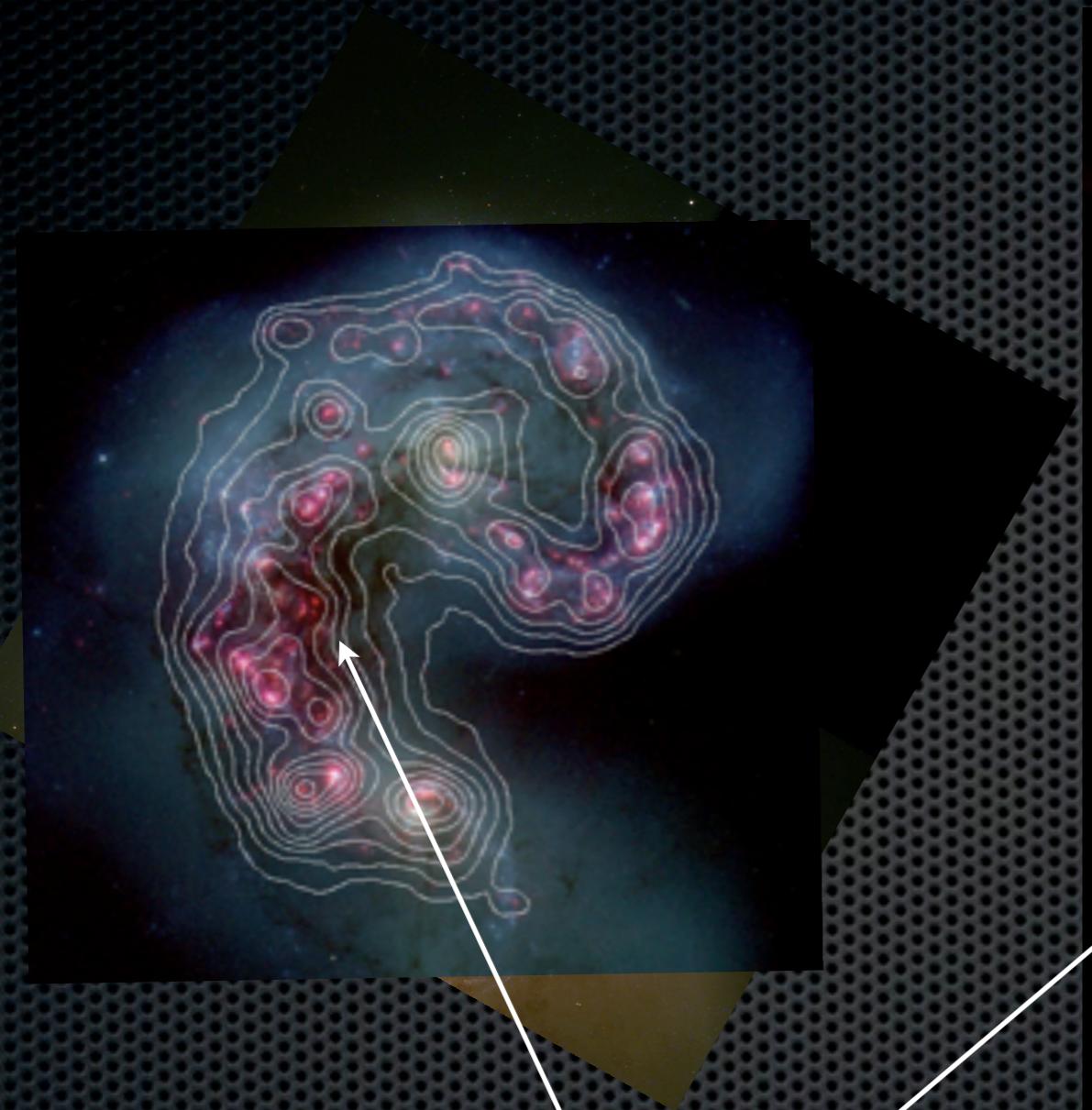


**Herschel-PACS**

Klaas et al.

La zone de recouvrement entre les galaxies, sombre dans le domaine visible à cause des grandes quantités de poussière qui l'obscurcissent, est très brillante en infrarouge: formation d'étoile enfouie. Les amas qui s'y trouvent représentent 20% de l'émission totale à  $100\ \mu\text{m}$

# Une galaxie n'est pas un «point»



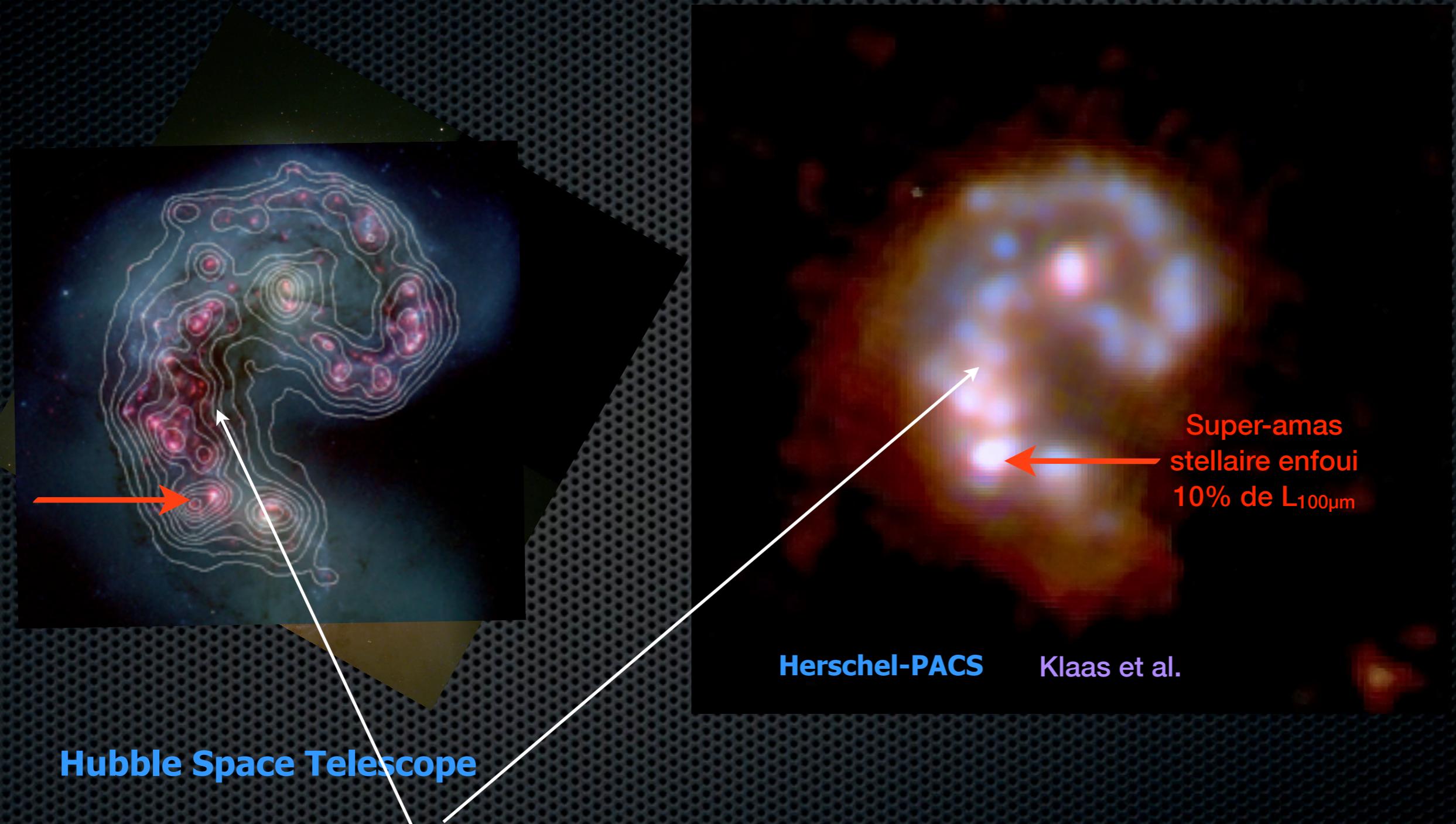
**Hubble Space Telescope**

**Herschel-PACS**

Klaas et al.

La zone de recouvrement entre les galaxies, sombre dans le domaine visible à cause des grandes quantités de poussière qui l'obscurcissent, est très brillante en infrarouge: formation d'étoile enfouie. Les amas qui s'y trouvent représentent 20% de l'émission totale à  $100\ \mu\text{m}$

# Une galaxie n'est pas un «point»



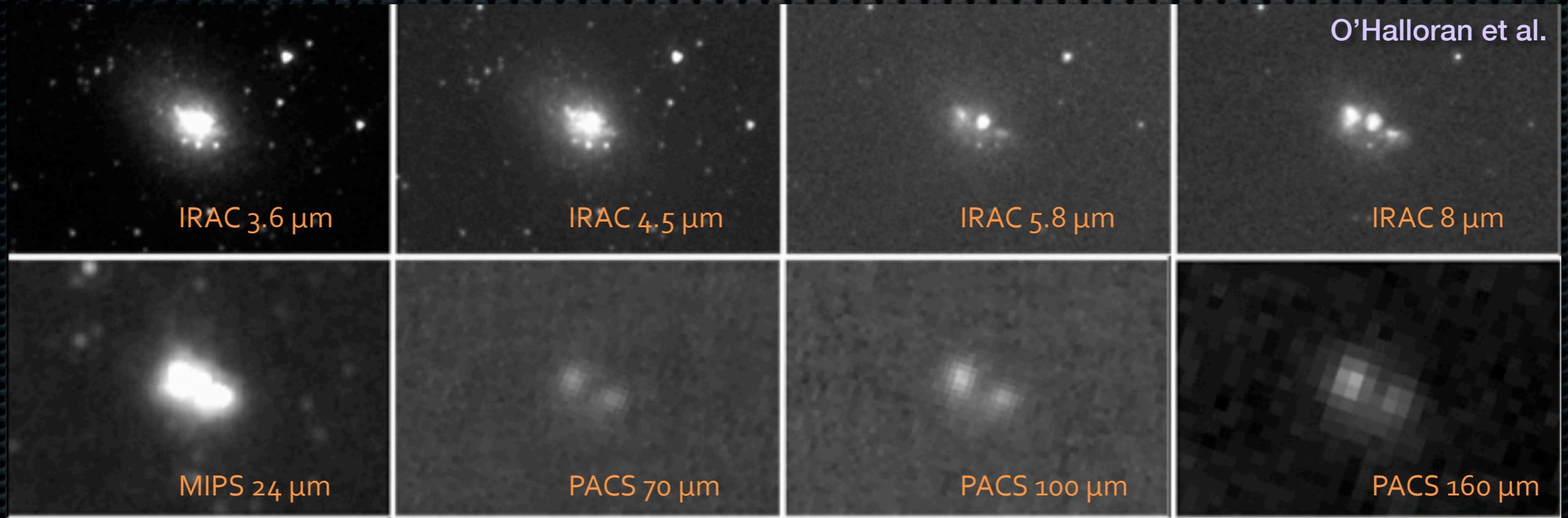
La zone de recouvrement entre les galaxies, sombre dans le domaine visible à cause des grandes quantités de poussière qui l'obscurcissent, est très brillante en infrarouge: formation d'étoile enfouie.  
Les amas qui s'y trouvent représentent 20% de l'émission totale à  $100\mu\text{m}$

# Une autre galaxie «polymorphe»



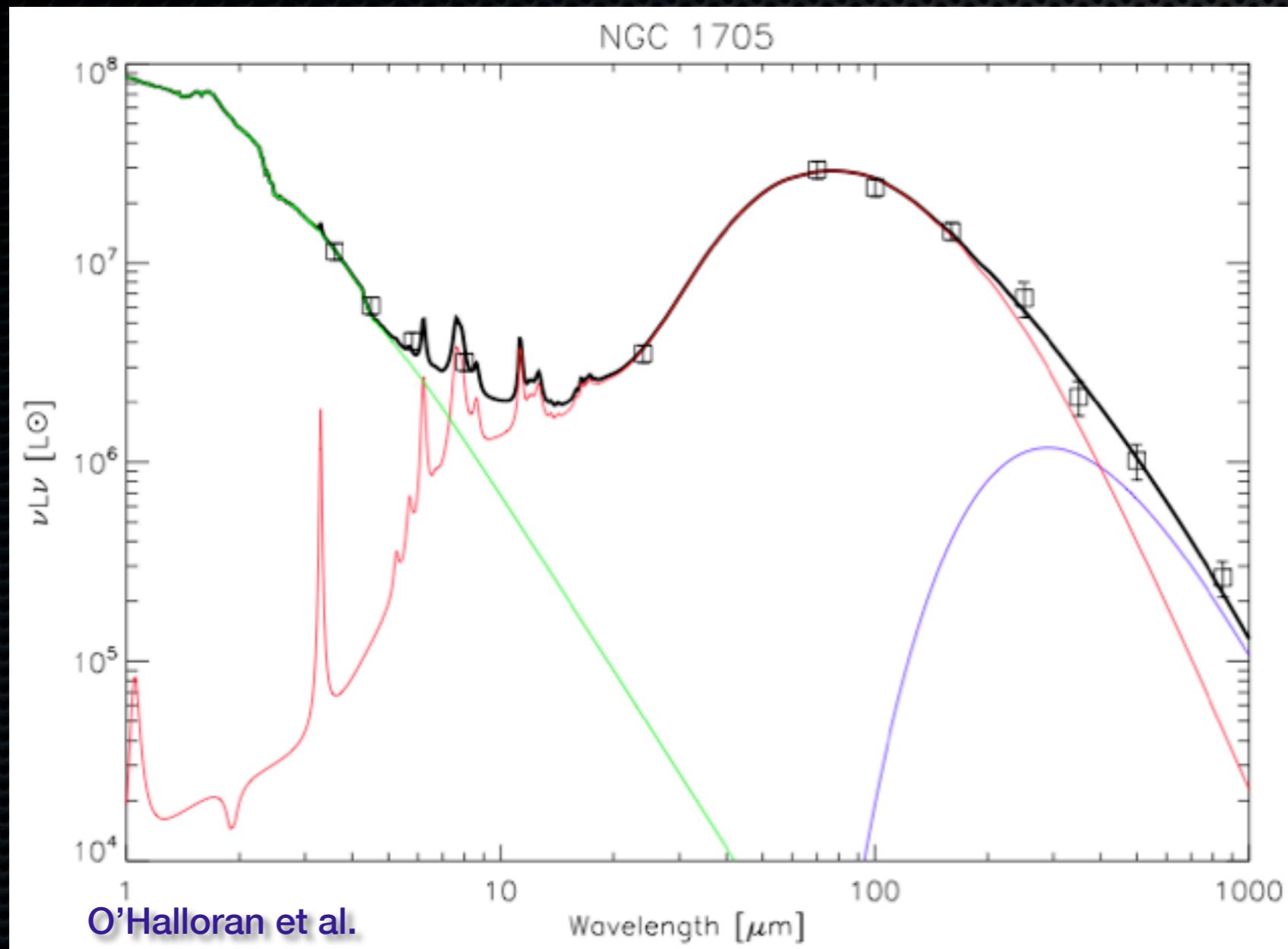
NGC 1705

# Une autre galaxie «polymorphe»



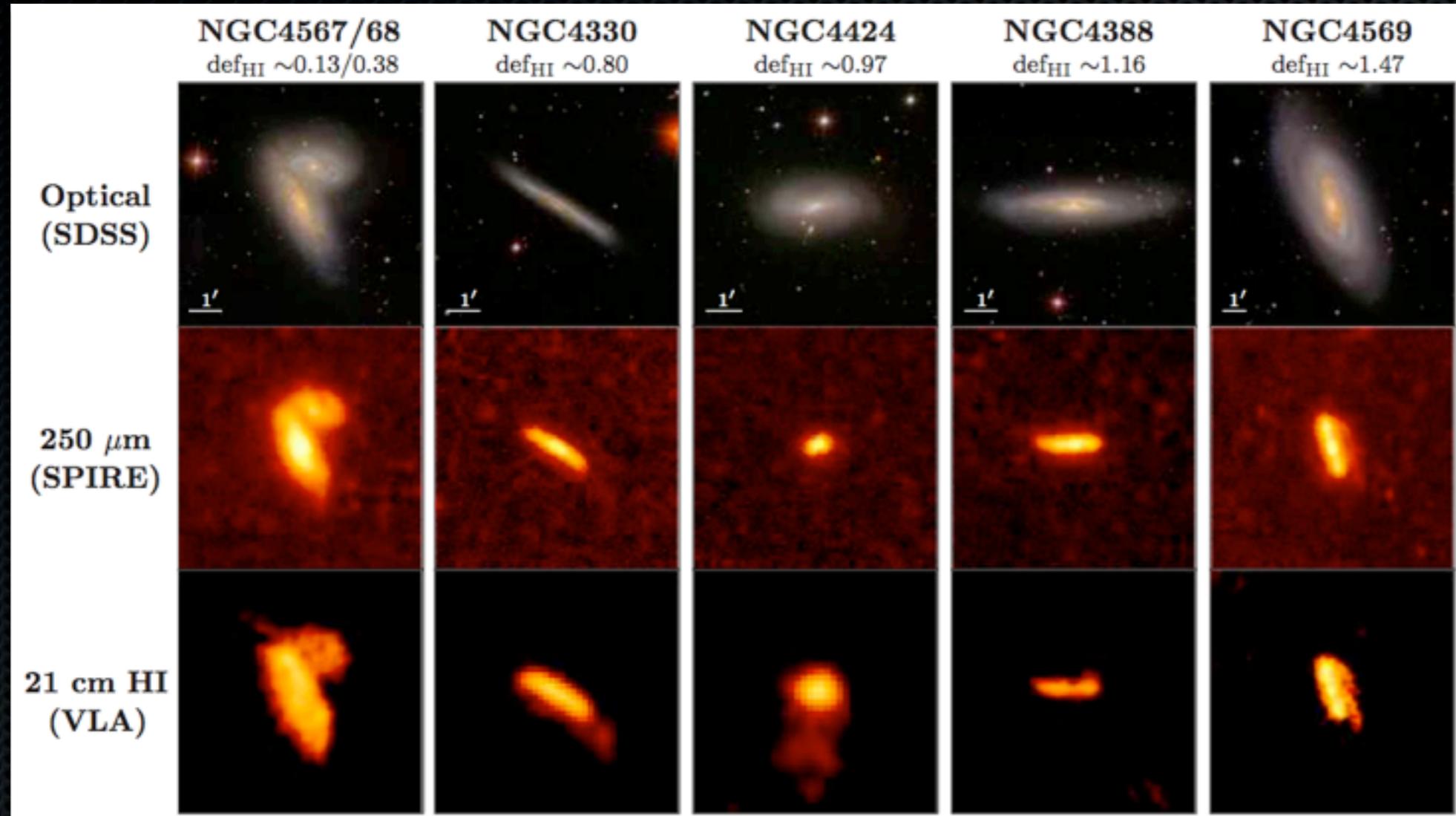
La région la plus brillante en infrarouge proche disparaît dans l'infrarouge lointain.

# NGC 1705 - Excès à grand $\lambda$



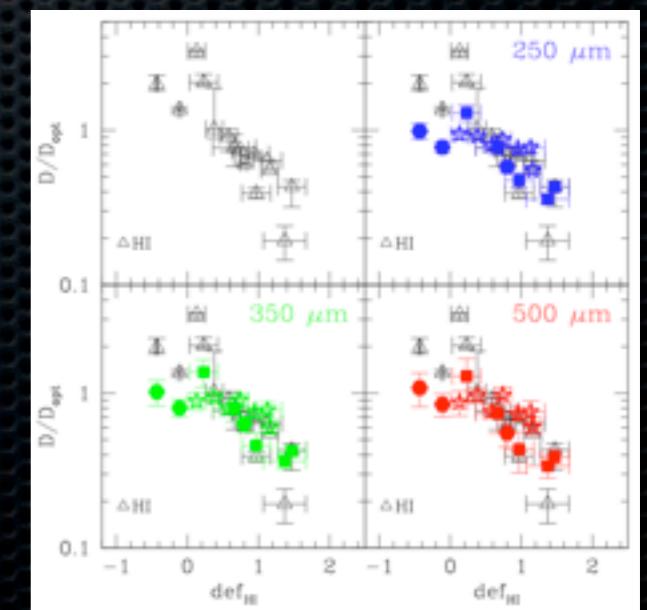
- Poussière froide rajoutée ad-hoc.
  - $4 \times 10^5 M_\odot$  pour  $2 \times 10^4 M_\odot$  dans le modèle
- Autre possibilités:
  - modification des propriétés de la poussière.
  - Effets complexes de transfert de rayonnement (cf. géométrie de l'émission)

# Troncature des disques de poussière

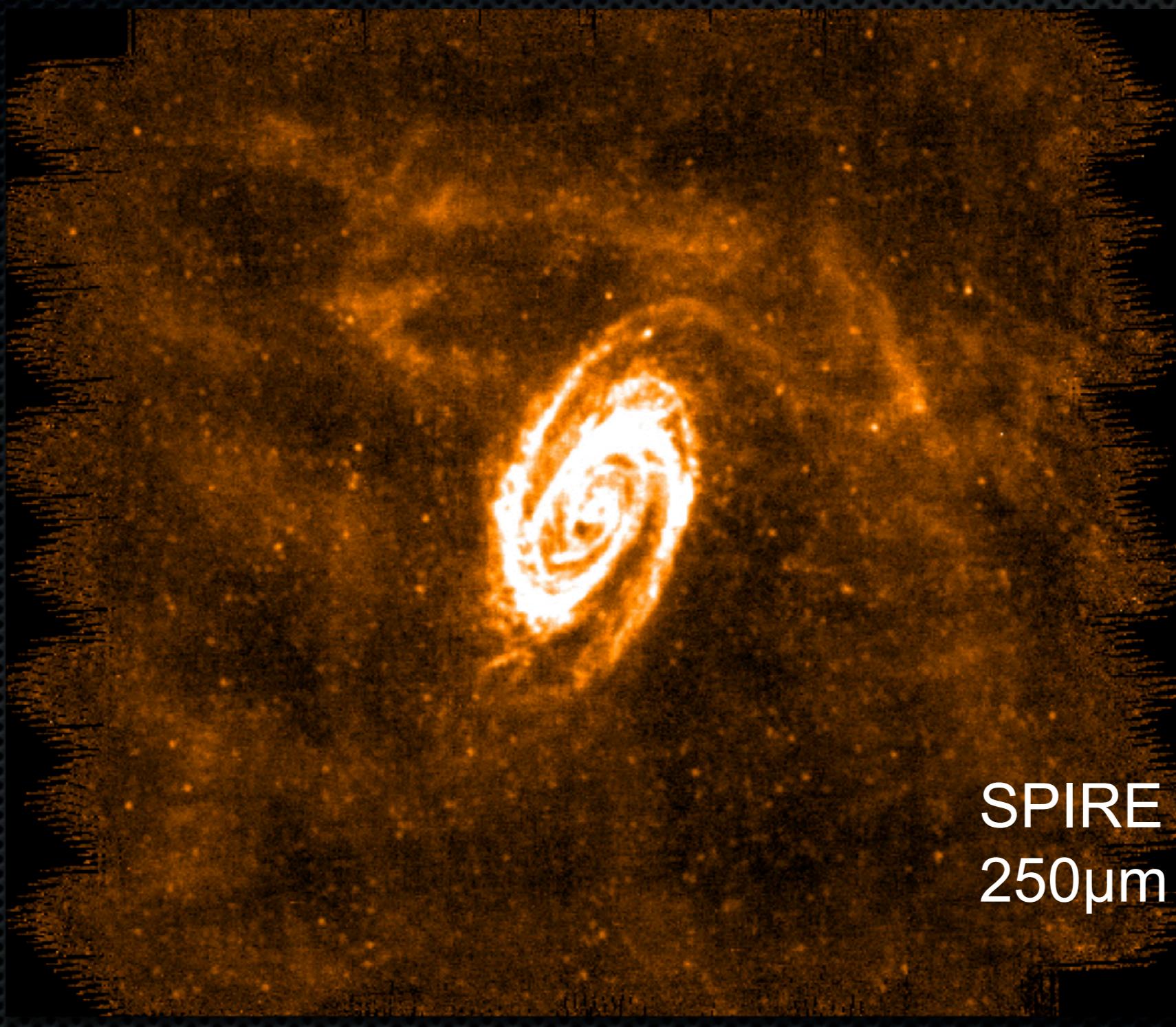


Cortese et al. 2010

- La déficience HI des galaxies spirales dans les amas de galaxies est bien connue.
- Herschel met clairement en évidence que ce phénomène affecte aussi la phase de poussière des galaxies.



# M81, une galaxie spirale froide?



# M81 - Couleurs infrarouges

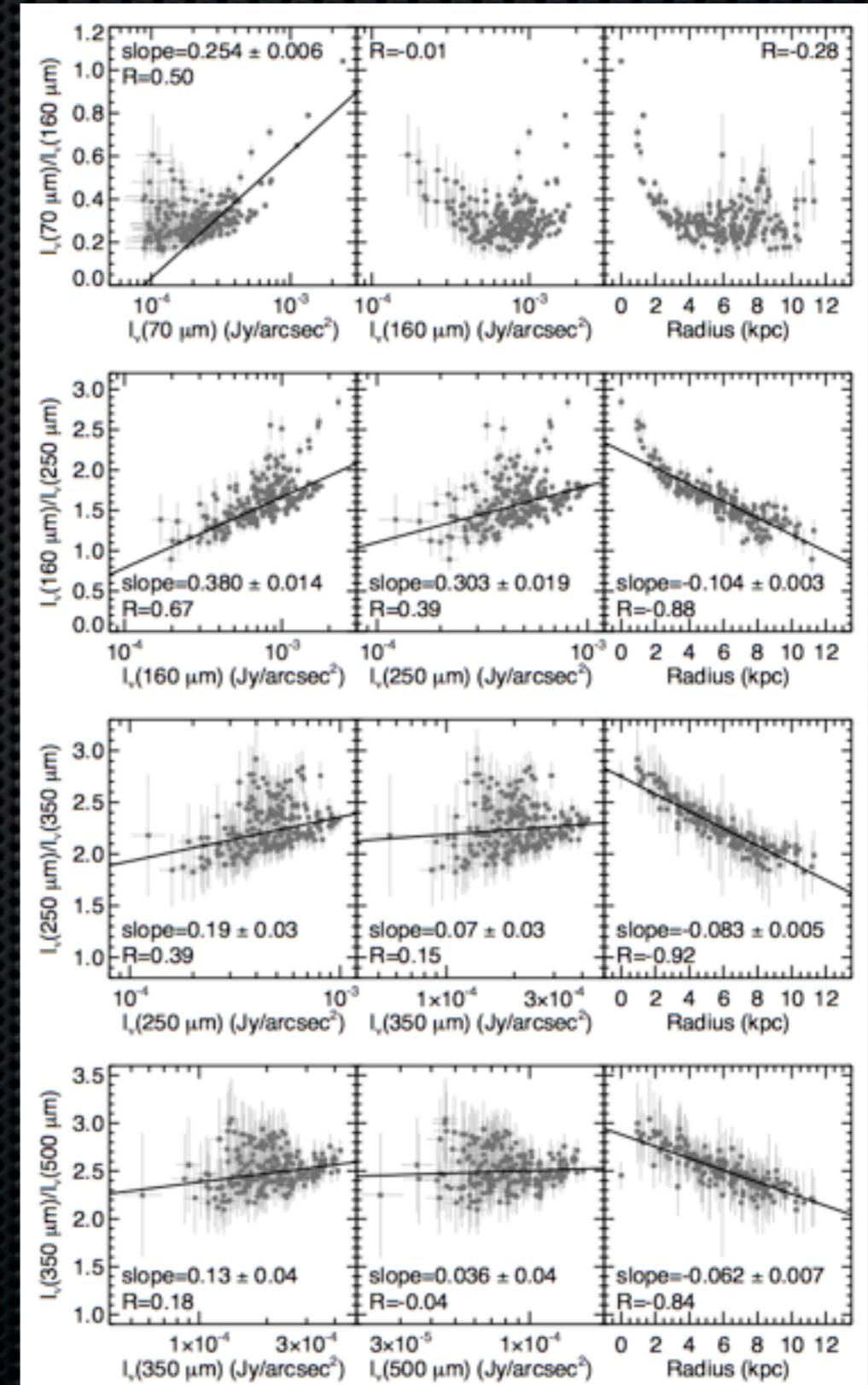
- *Interprétation standard:*

- La brillance infrarouge d'une région est liée à son activité de formation stellaire.
- L'augmentation de l'activité de formation stellaire augmente la température de la poussière.
- Donc les régions brillantes en infrarouge doivent aussi être plus chaudes.

# M81 - Couleurs infrarouges

- *Interprétation standard:*

- La brillance infrarouge d'une région est liée à son activité de formation stellaire.
- L'augmentation de l'activité de formation stellaire augmente la température de la poussière.
- Donc les régions brillantes en infrarouge doivent aussi être plus chaudes.



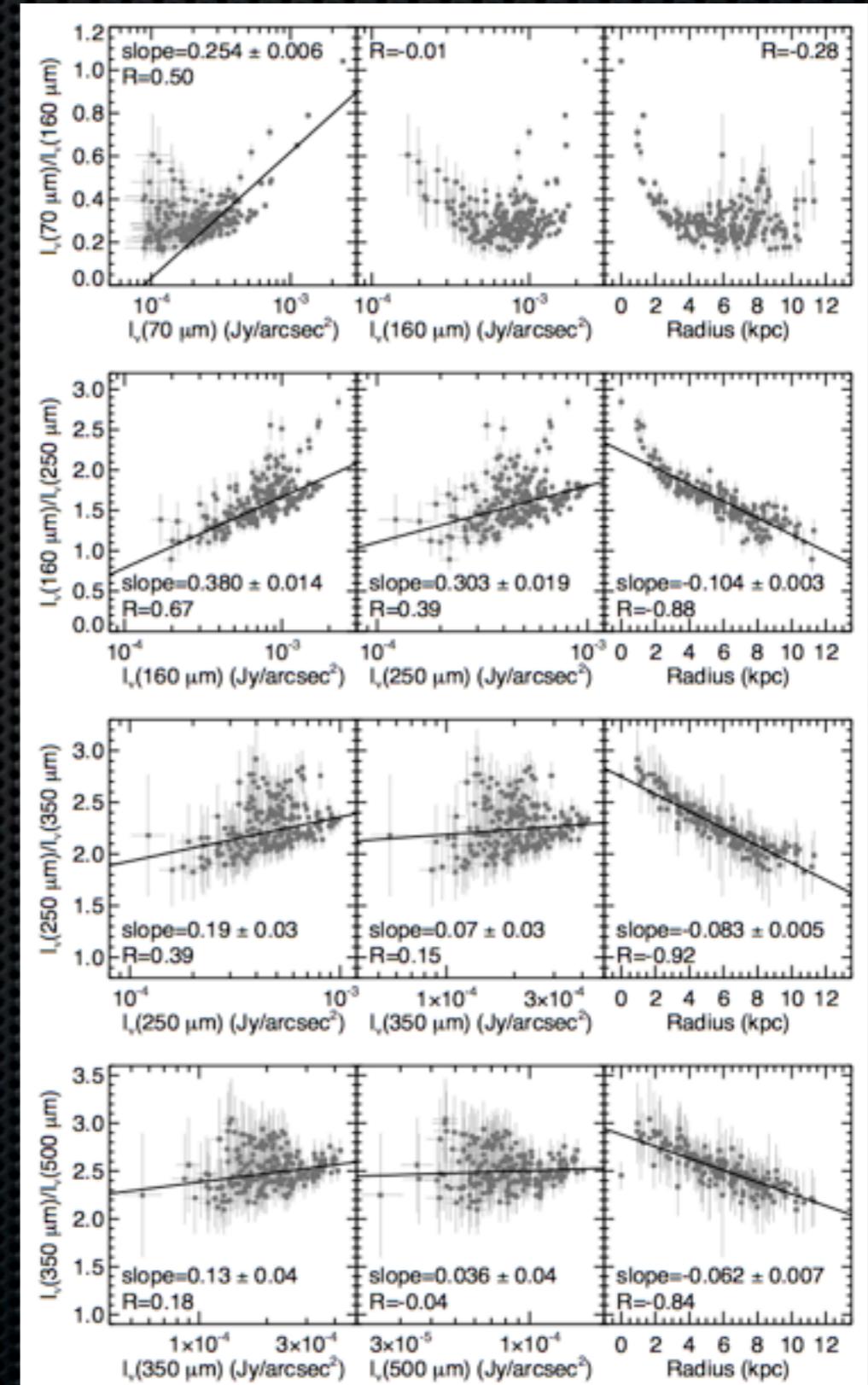
# M81 - Couleurs infrarouges

- *Interprétation standard:*

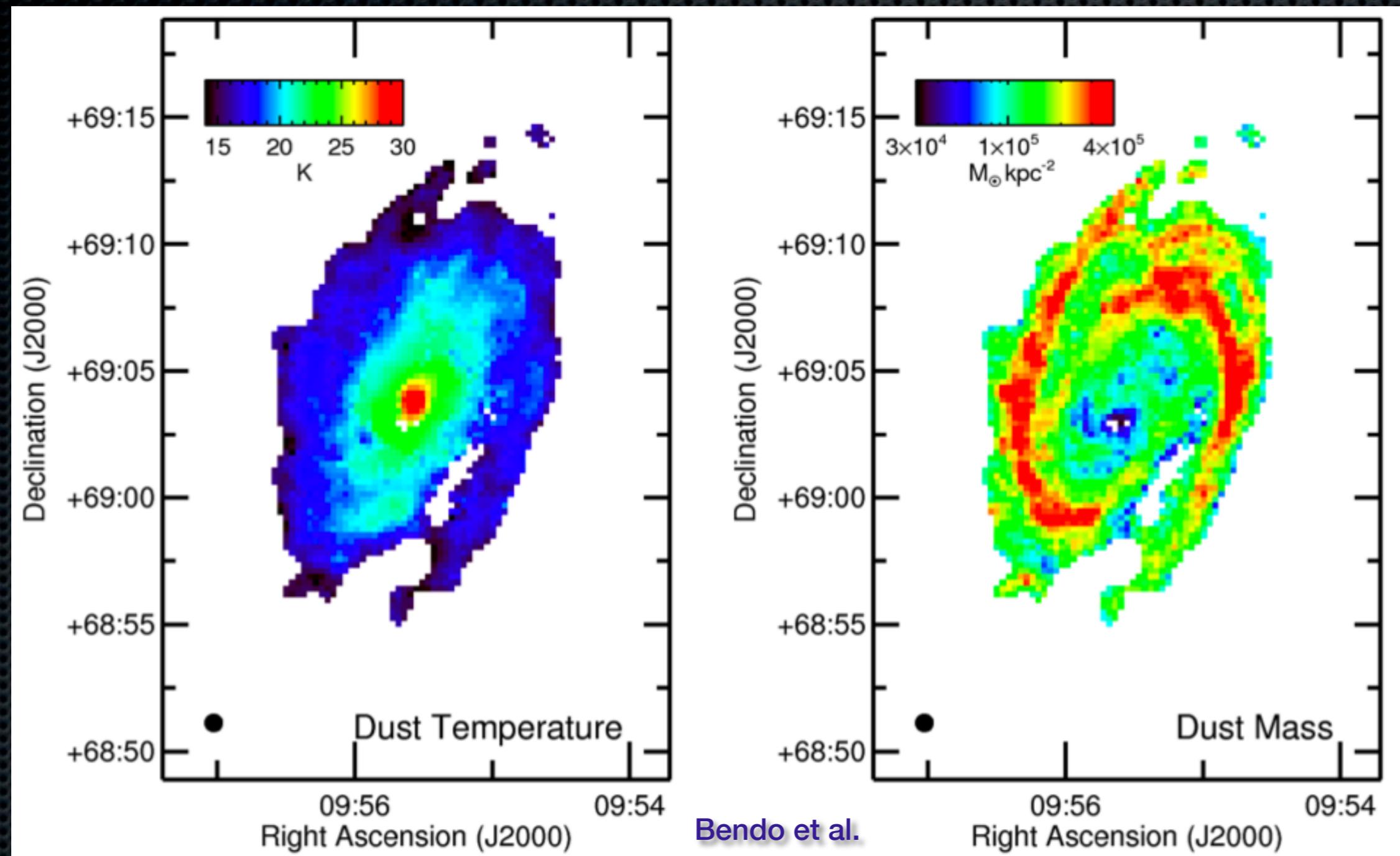
- La brillance infrarouge d'une région est liée à son activité de formation stellaire.
- L'augmentation de l'activité de formation stellaire augmente la température de la poussière.
- Donc les régions brillantes en infrarouge doivent aussi être plus chaudes.

- *Problème avec M81:*

- Les correlations des couleurs avec la brillance sont présentes à courte longueur d'onde mais sont en général faibles ou absentes à grande longueur d'onde.
- Les corrélations sont toujours plus forte avec le rayon.



# M81: Température et masse de poussières



La structure spirale infrarouge (brillante) n'est pas due à une augmentation du chauffage par les populations stellaires jeunes qui s'y trouve. La température de la poussière est surtout distribuée radialement. Les bras spiraux visibles en IR tracent en fait des empilements de poussières «poussés» par l'onde spirale.

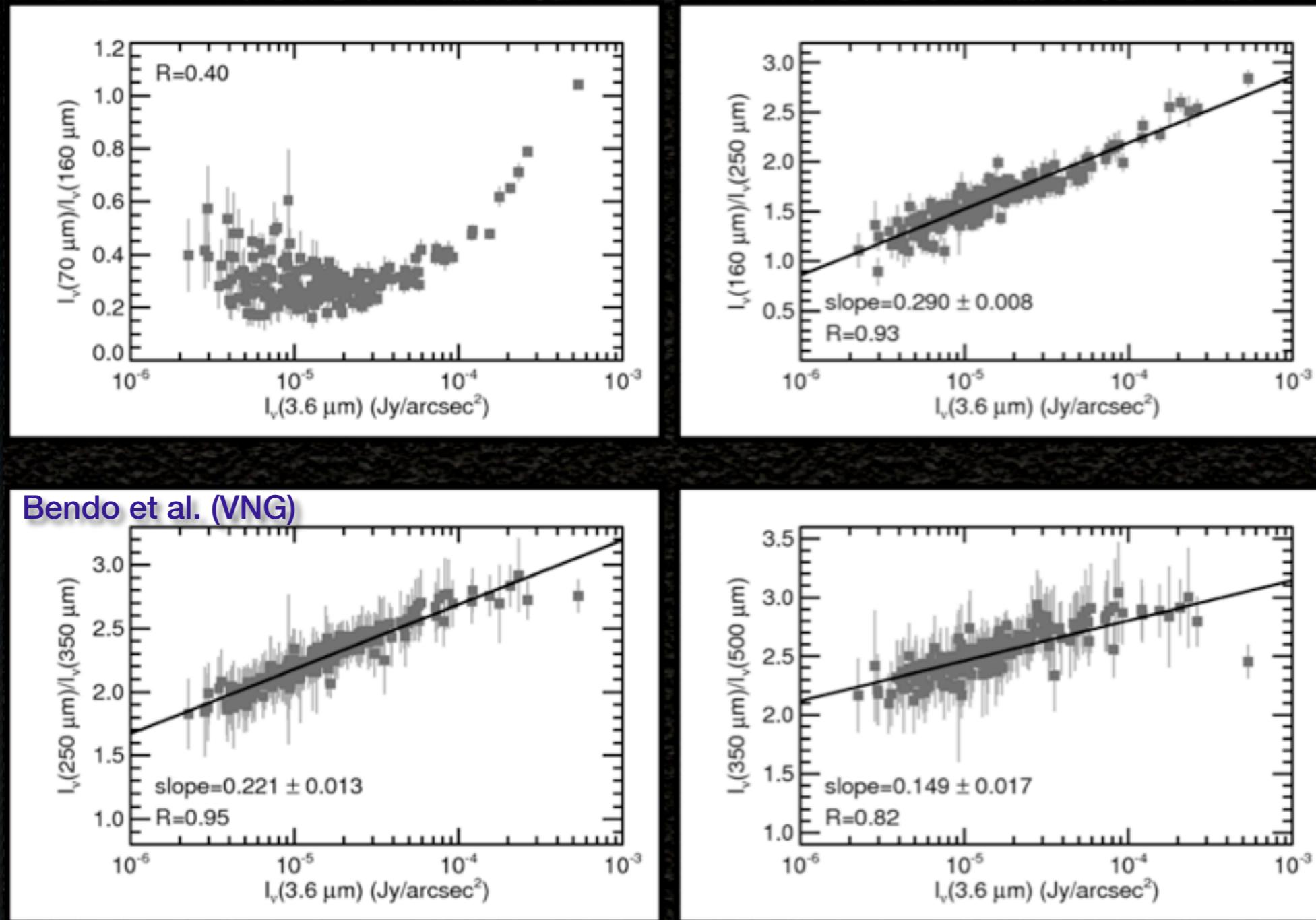
# Source d'énergie pour l'émission FIR

Quelle est la composante des galaxies qui ne présente quasiment pas de structure spirale?

# Source d'énergie pour l'émission FIR

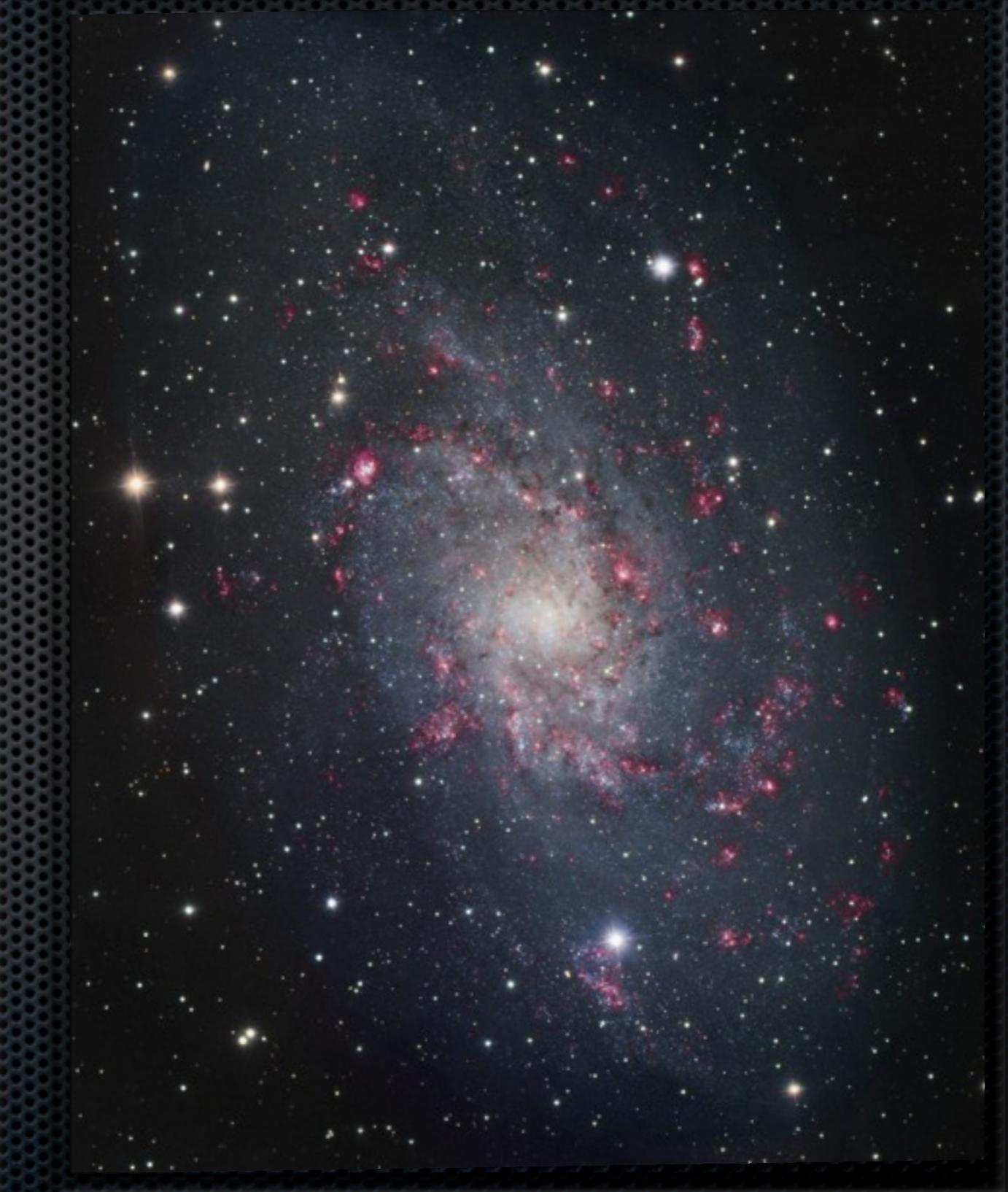
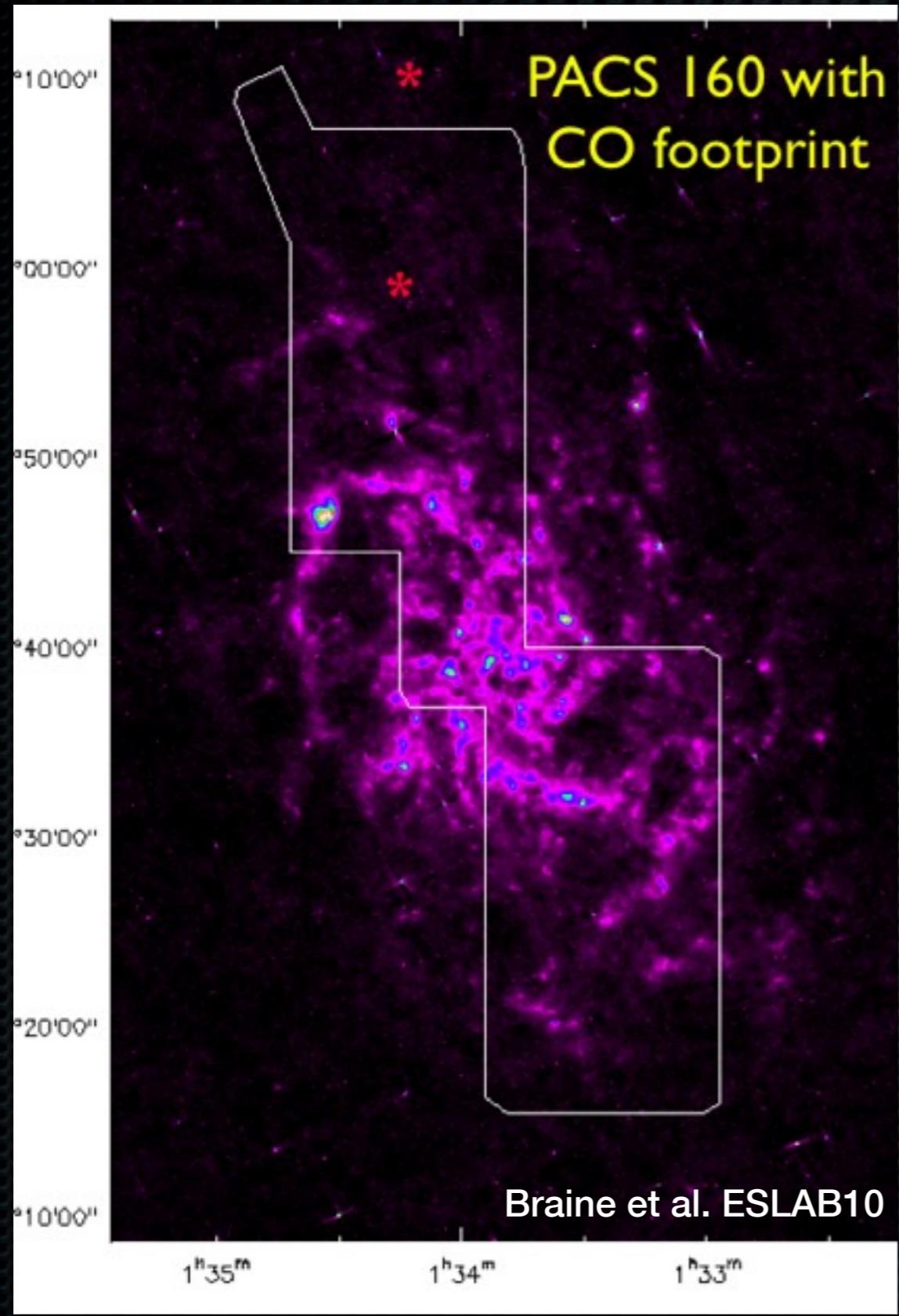


# Source d'énergie pour l'émission FIR



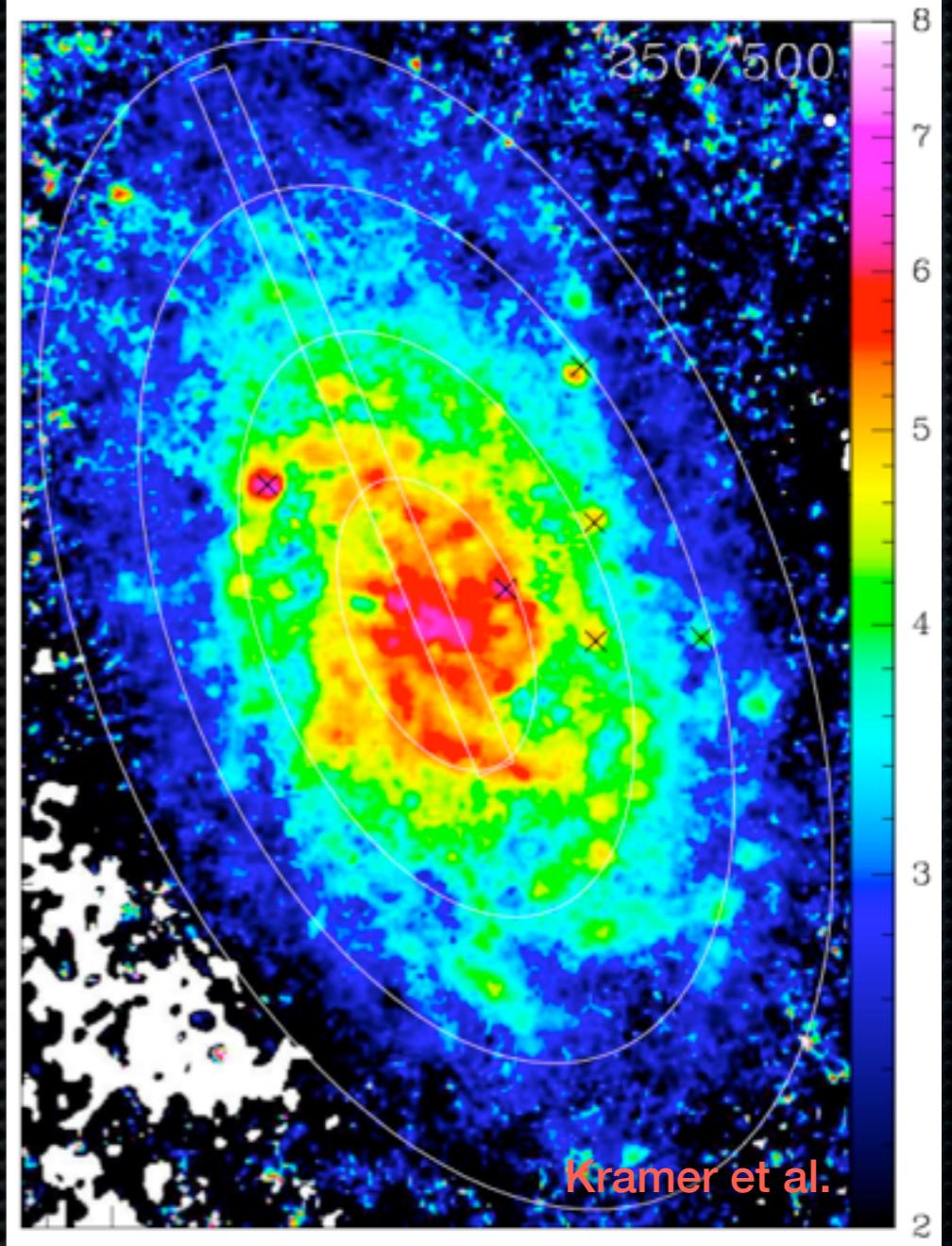
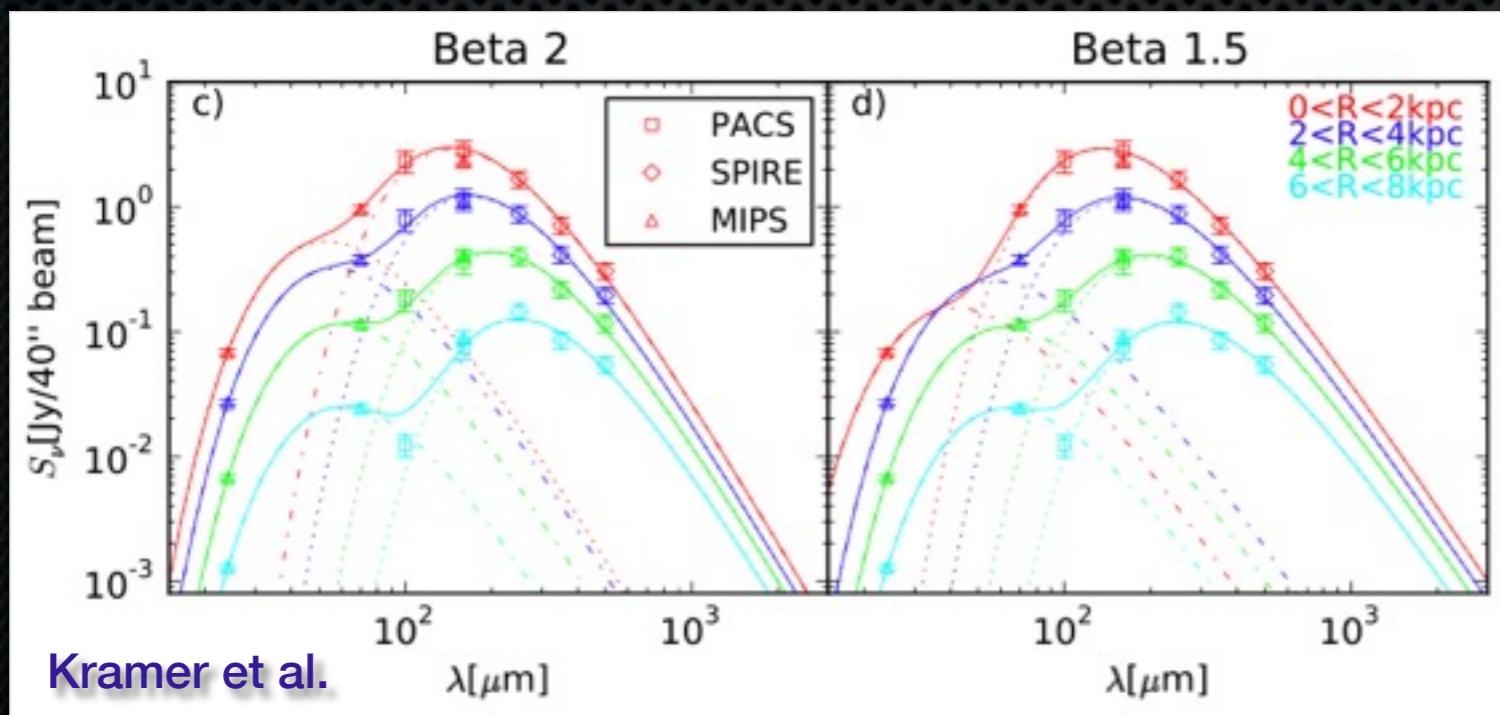
- A partir de 160 μm, les couleurs infrarouges (température de la poussière) sont fortement corrélées avec l'émission infrarouge proche: les vieilles populations stellaires,  $\geq 1$  Gyr, responsables du champ de radiation moyen dans la galaxie.
- Il y a un changement de régime thermique entre 70 et 160 μm.

# M33 une spirale «chaude»?



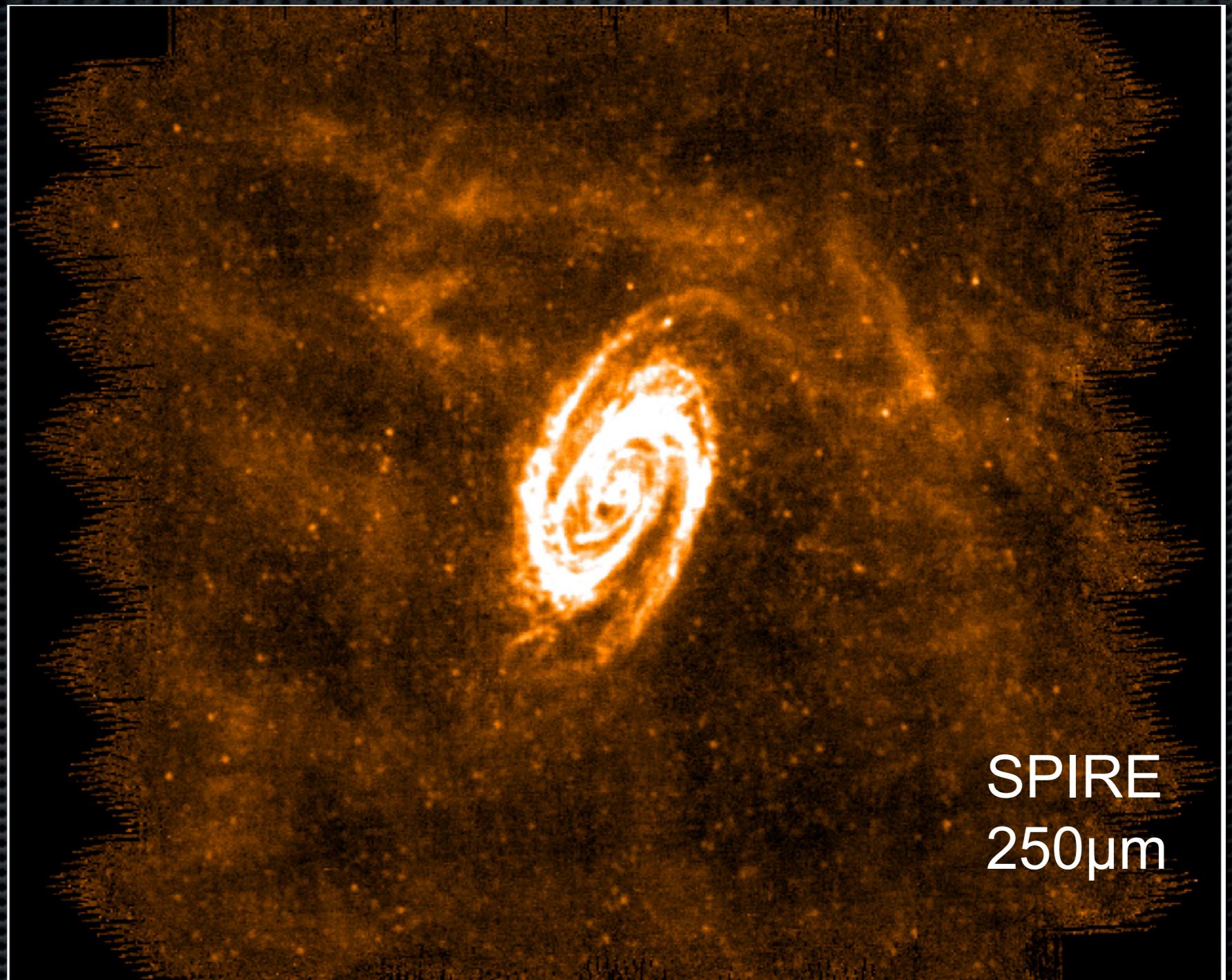
# M33 - Toutes les galaxies ne sont pas comme M81

- La structure spirale est visible dans la carte de température, mais un fort gradient radial aussi.
- Les SEDs calculées dans des ellipses concentriques montrent clairement que la poussière se refroidit à grand rayon.
- M33 est une galaxie relativement active, mais la plupart de la poussière (en masse) y est froide.



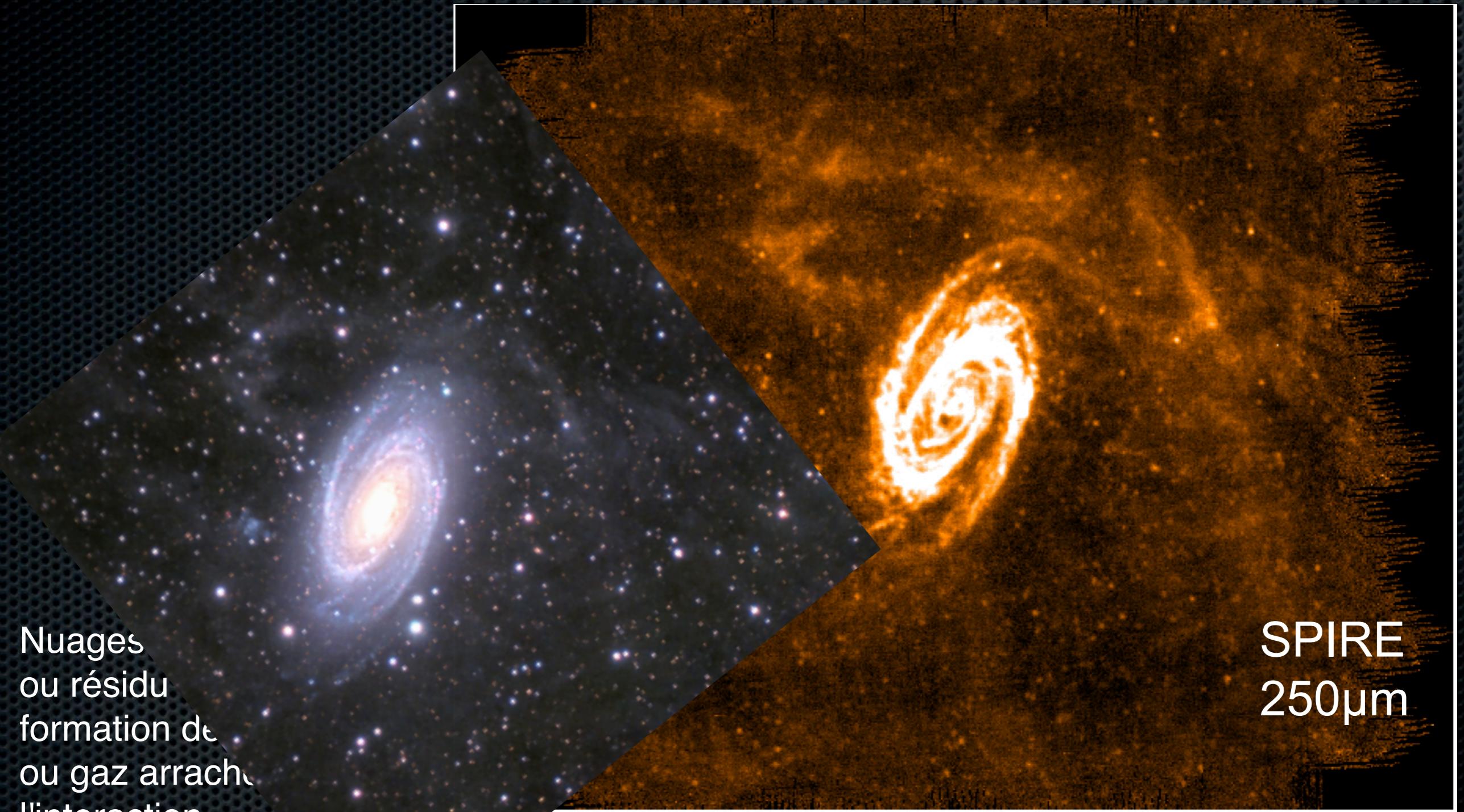
# L'environnement complexe des galaxies

Nuages Galactiques,  
ou résidu de la  
formation des galaxies,  
ou gaz arraché lors de  
l'interaction  
M81-M82-N3077?



SPIRE  
250 $\mu$ m

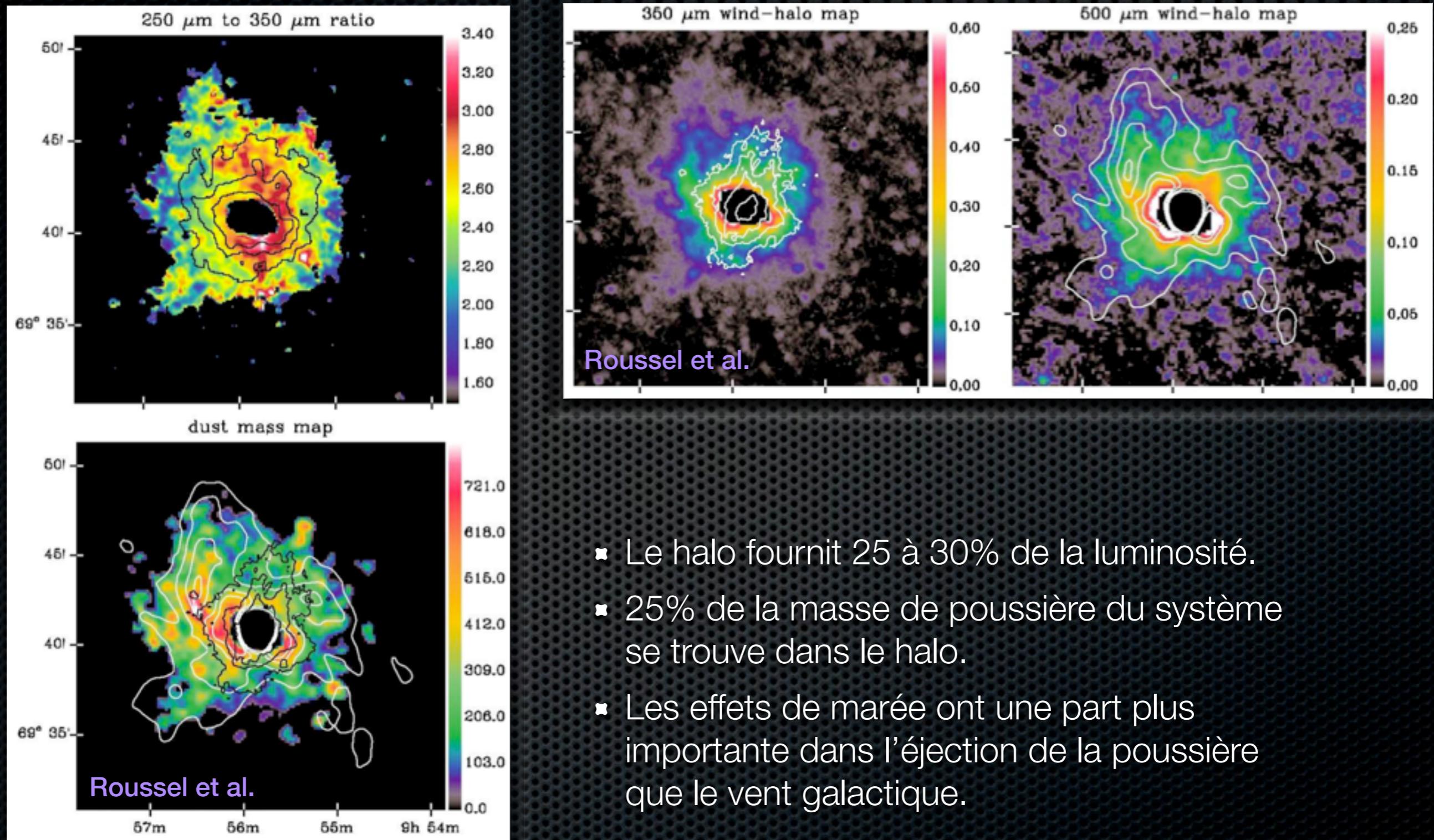
# L'environnement complexe des galaxies



M82

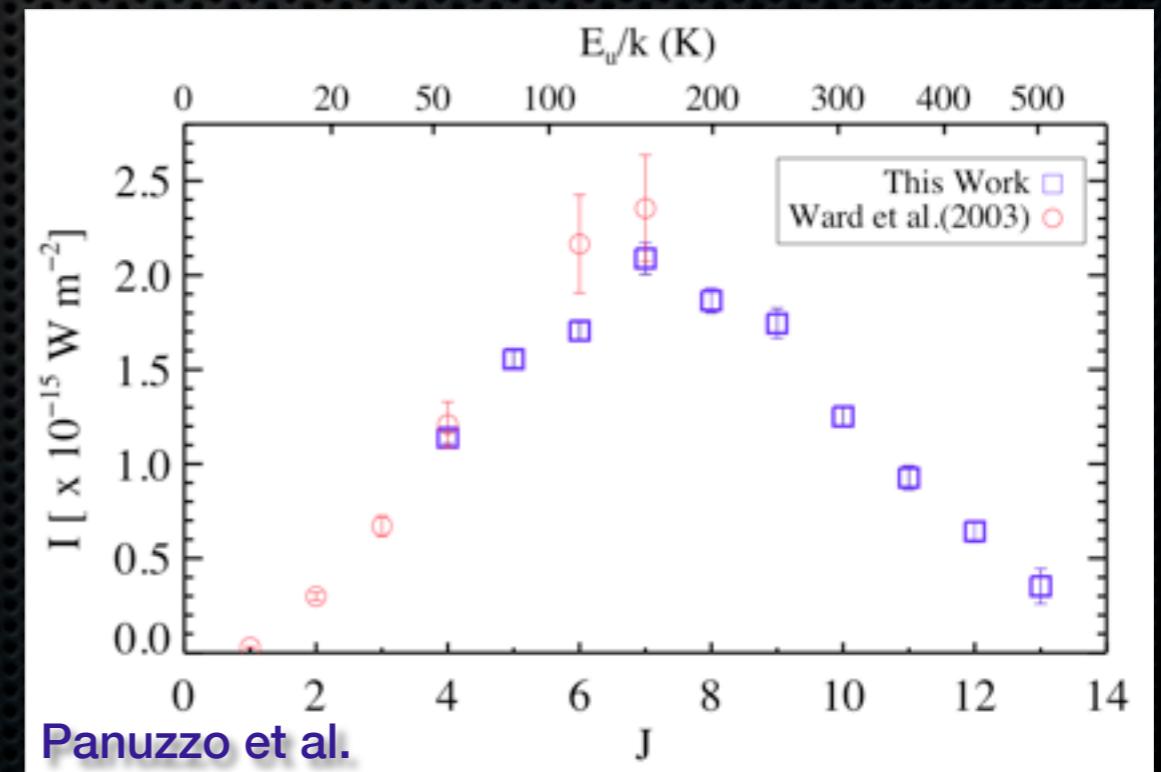
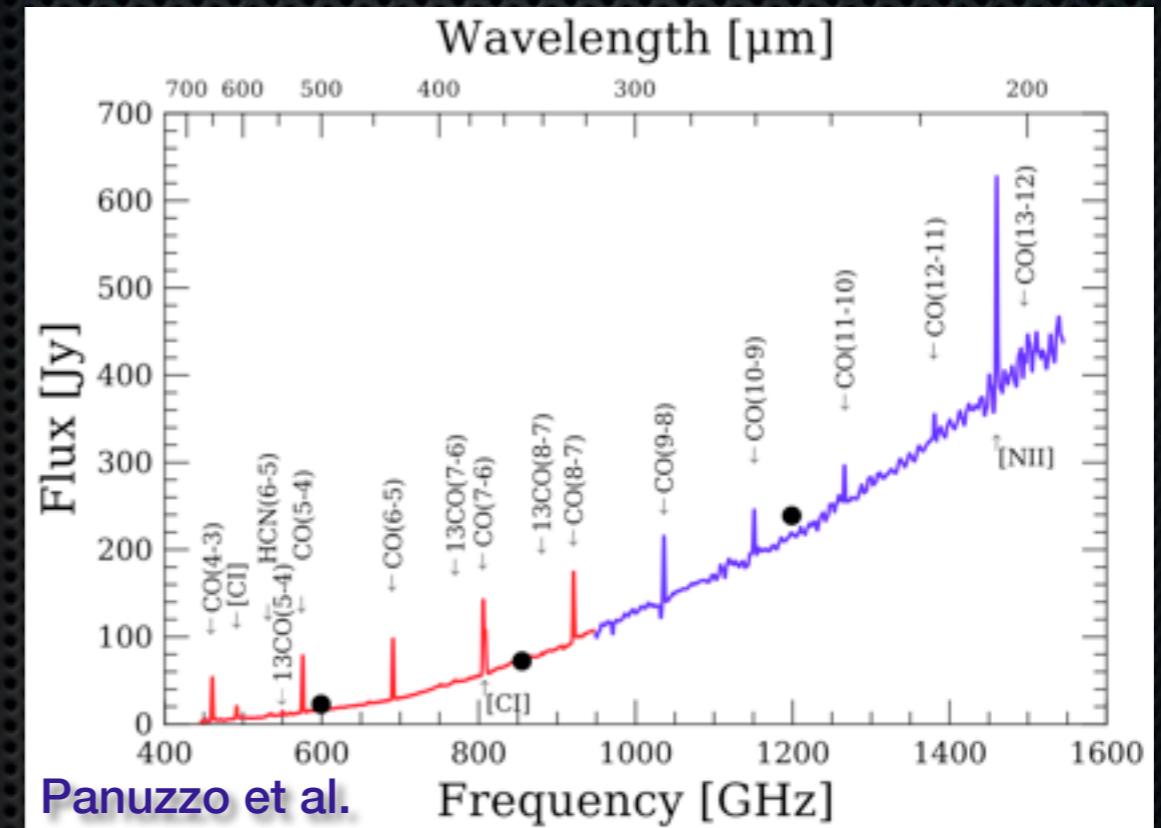


# M82 - Ejection de poussière



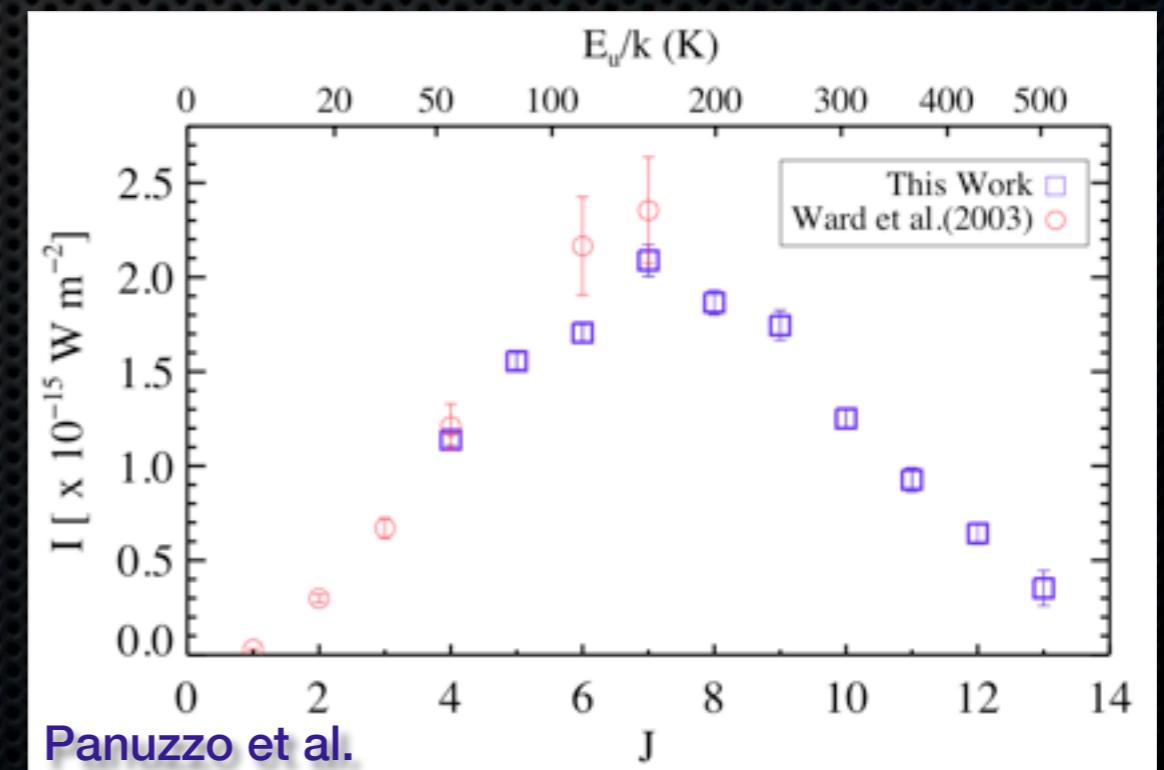
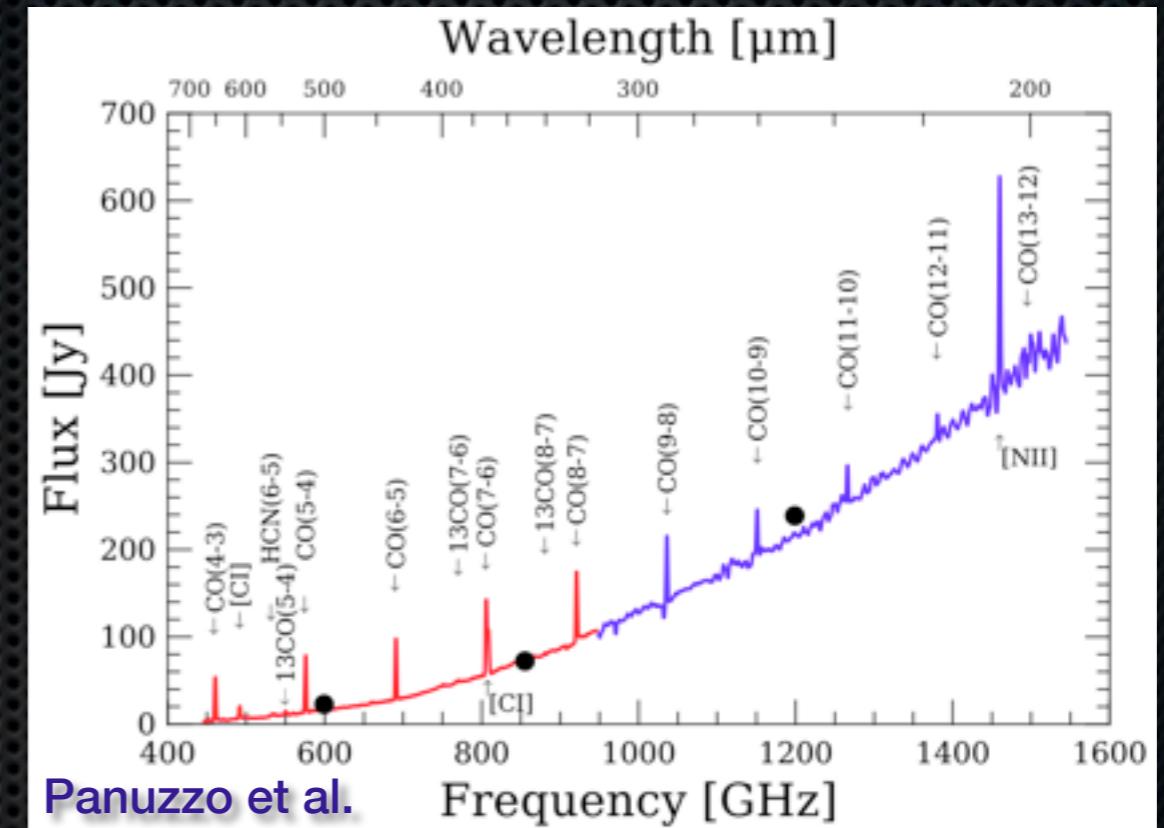
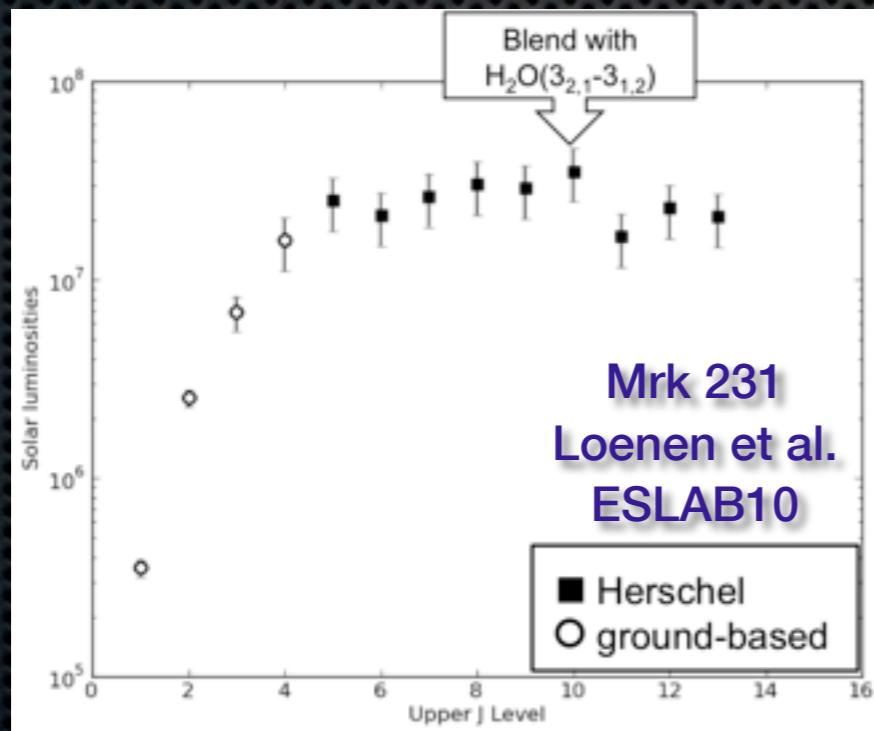
# M82 - Diagnostic du gaz moléculaire

- Les transitions de CO sont détectées jusqu'à CO(13-12), 6 de plus que précédemment.
- Le gaz détecté a une température de 540K et représente 1/4 du gaz moléculaire.
  - Pour une telle T, H<sub>2</sub> est le principal canal de refroidissement.
- La distribution d'énergie dans les raies permet d'éliminer un AGN comme source du chauffage.



# M82 - Diagnostic du gaz moléculaire

- Les transitions de CO sont détectées jusqu'à CO(13-12), 6 de plus que précédemment.
- Le gaz détecté a une température de 540K et représente 1/4 du gaz moléculaire.
  - Pour une telle T, H<sub>2</sub> est le principal canal de refroidissement.
- La distribution d'énergie dans les raies permet d'éliminer un AGN comme source du chauffage.



# Formation d'étoiles dans la Galaxie

# Formation d'étoiles dans la Galaxie

- Toutes les étoiles n'ont pas la même masse, mais les mécanismes qui déterminent la masse des étoiles sont mal connus.
- Ces mécanismes sont à l'œuvre dès les premières phases de contraction des nuages interstellaires.

# Formation d'étoiles dans la Galaxie

- Toutes les étoiles n'ont pas la même masse, mais les mécanismes qui déterminent la masse des étoiles sont mal connus.
  - Ces mécanismes sont à l'œuvre dès les premières phases de contraction des nuages interstellaires.
- Le processus de formation stellaire est loin d'être aussi efficace qu'on aurait pu le penser.
  - Quels sont les mécanismes de feedback? Trop de formation stellaire peut-il tuer la formation stellaire?

# Formation d'étoiles dans la Galaxie

- Toutes les étoiles n'ont pas la même masse, mais les mécanismes qui déterminent la masse des étoiles sont mal connus.
  - Ces mécanismes sont à l'œuvre dès les premières phases de contraction des nuages interstellaires.
- Le processus de formation stellaire est loin d'être aussi efficace qu'on aurait pu le penser.
  - Quels sont les mécanismes de feedback? Trop de formation stellaire peut-il tuer la formation stellaire?
- Interactions entre la formation stellaire et le milieu interstellaire.

# Nuage de formation stellaire dans l'Aigle



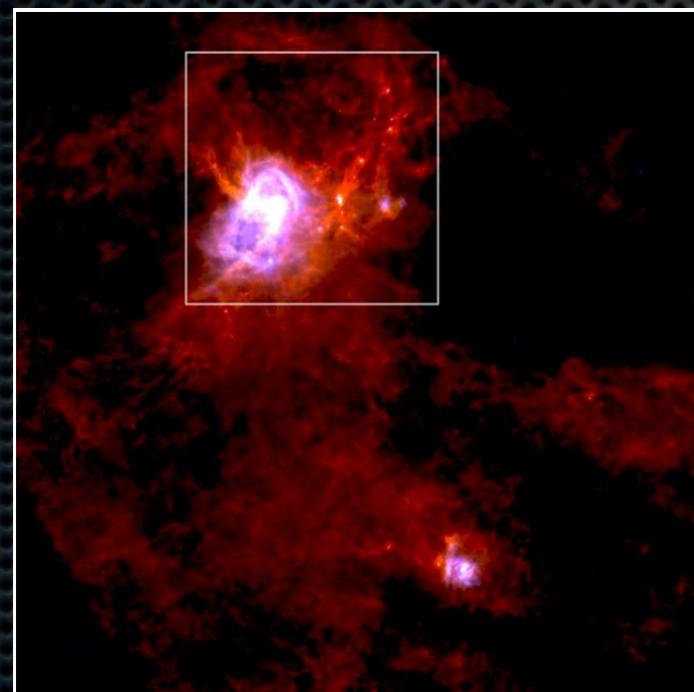
- ✿  $\sim 3^\circ \times 3^\circ$

Rouge : SPIRE 500  $\mu\text{m}$   
Vert : PACS 160  $\mu\text{m}$   
Bleu : PACS 70  $\mu\text{m}$

- ✿ +700 condensations pré-stellaires
- ✿ +300 objets stellaires jeunes

# La formation stellaire dans les filaments

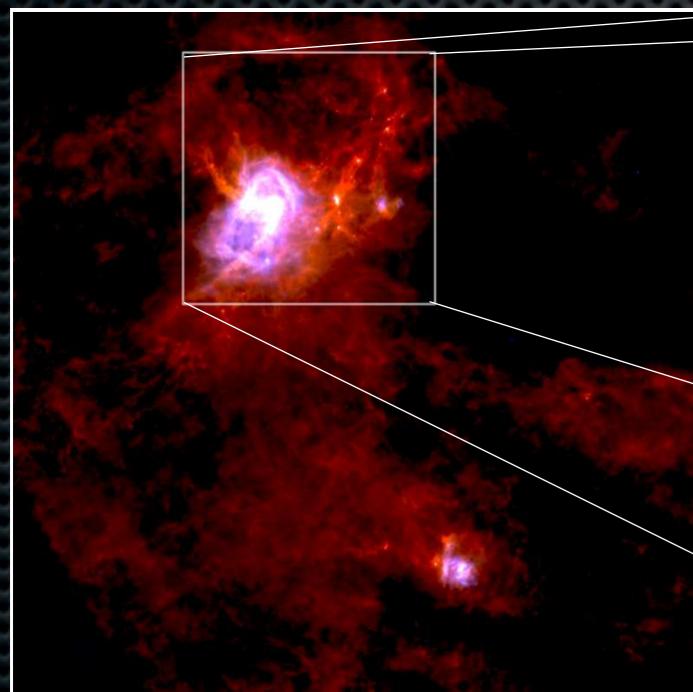
- Le milieu interstellaire est extrêmement structuré (sous l'effet de la turbulence) .
- Herschel met en évidence pour la première fois à très grande échelle le fait que les sites de formation stellaire sont intimement liés à la structure du milieu interstellaire.
- La physique du milieu interstellaire et de sa structuration sont les clefs pour comprendre l'origine de la masse des étoiles.



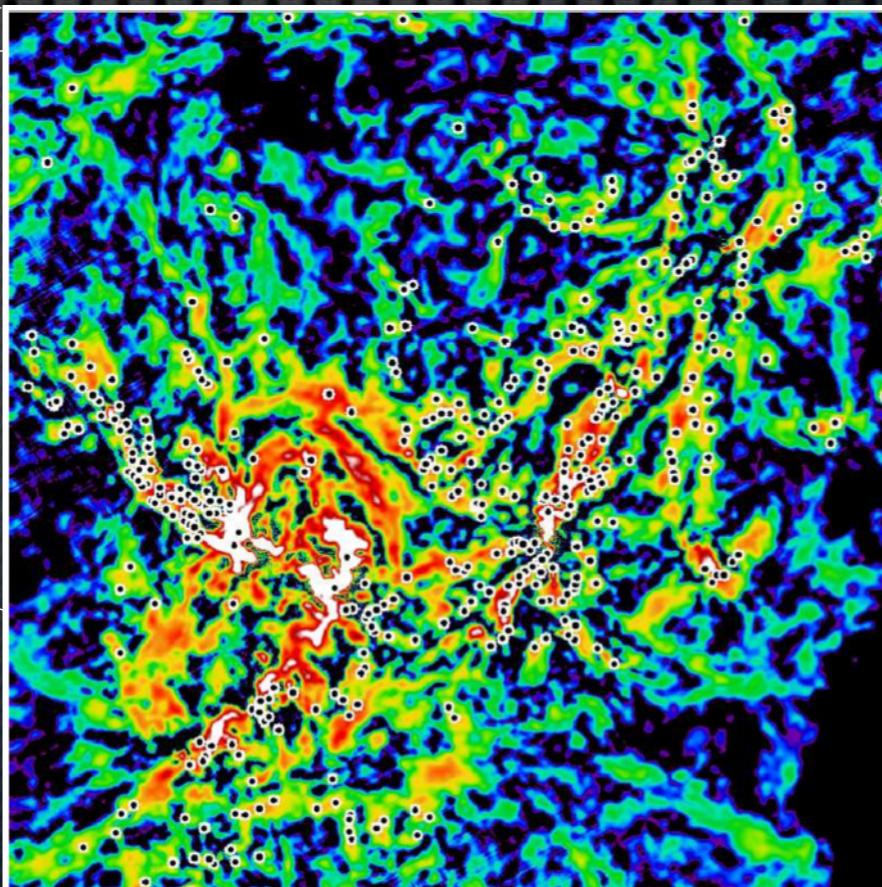
Aquila en trois couleurs  
(70, 160, 250+350+500)

# La formation stellaire dans les filaments

- Le milieu interstellaire est extrêmement structuré (sous l'effet de la turbulence) .
- Herschel met en évidence pour la première fois à très grande échelle le fait que les sites de formation stellaire sont intimement liés à la structure du milieu interstellaire.
- La physique du milieu interstellaire et de sa structuration sont les clefs pour comprendre l'origine de la masse des étoiles.



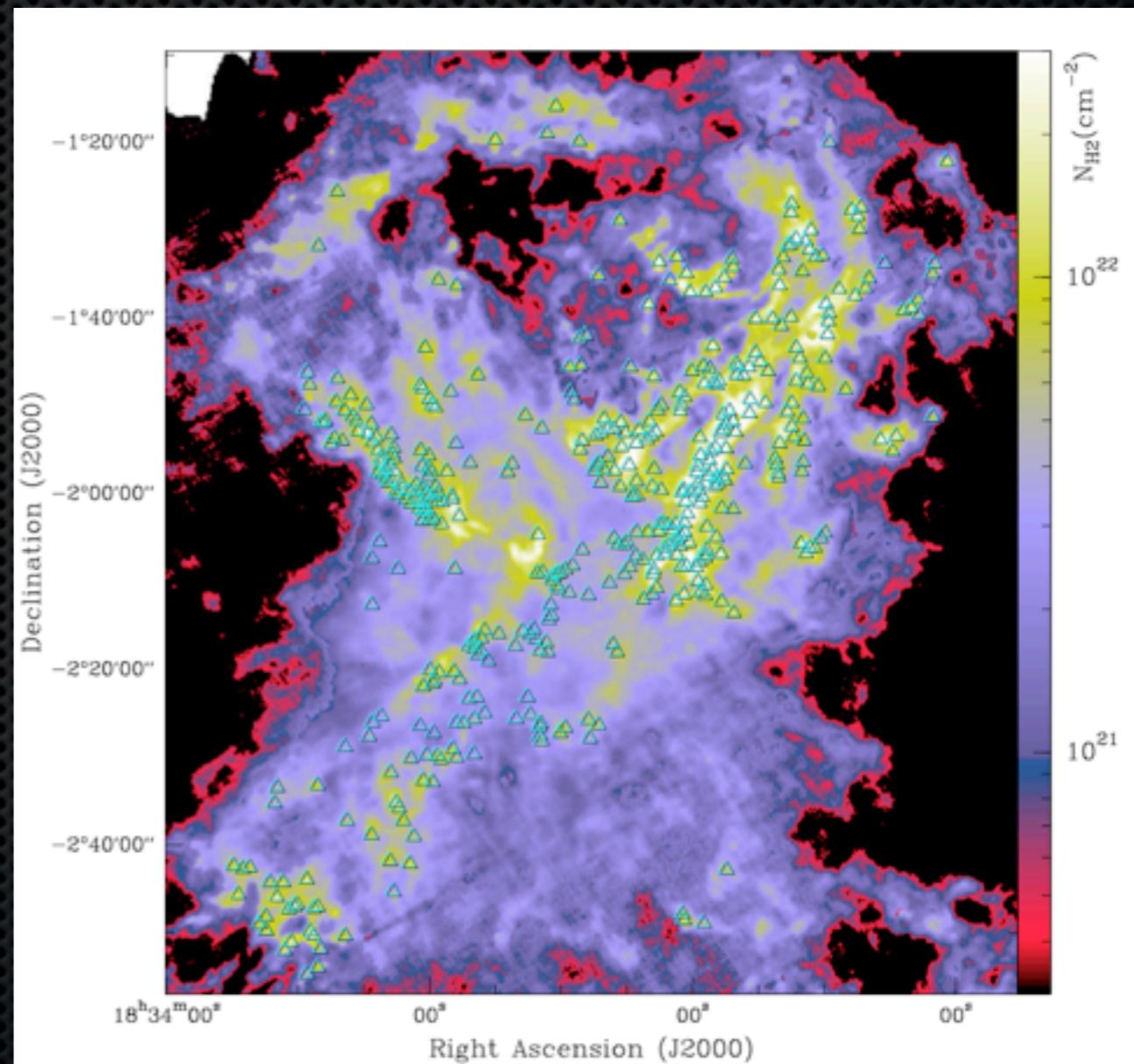
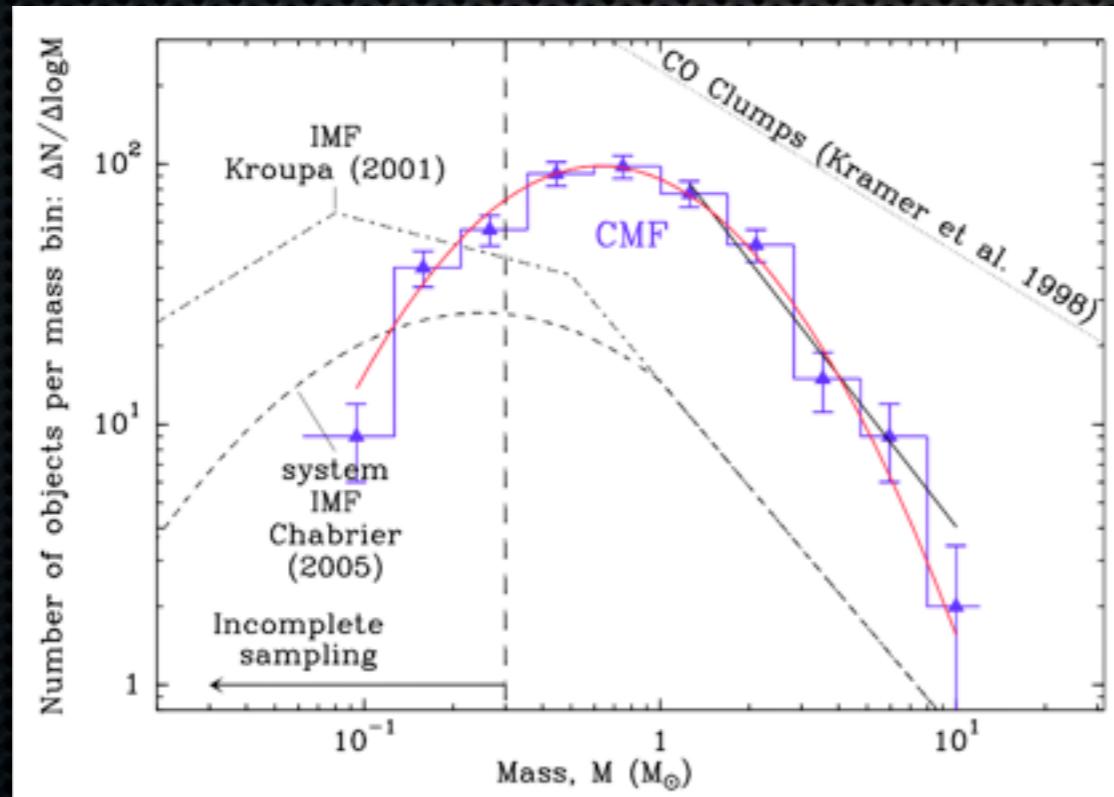
Aquila en trois couleurs  
(70, 160, 250+350+500)



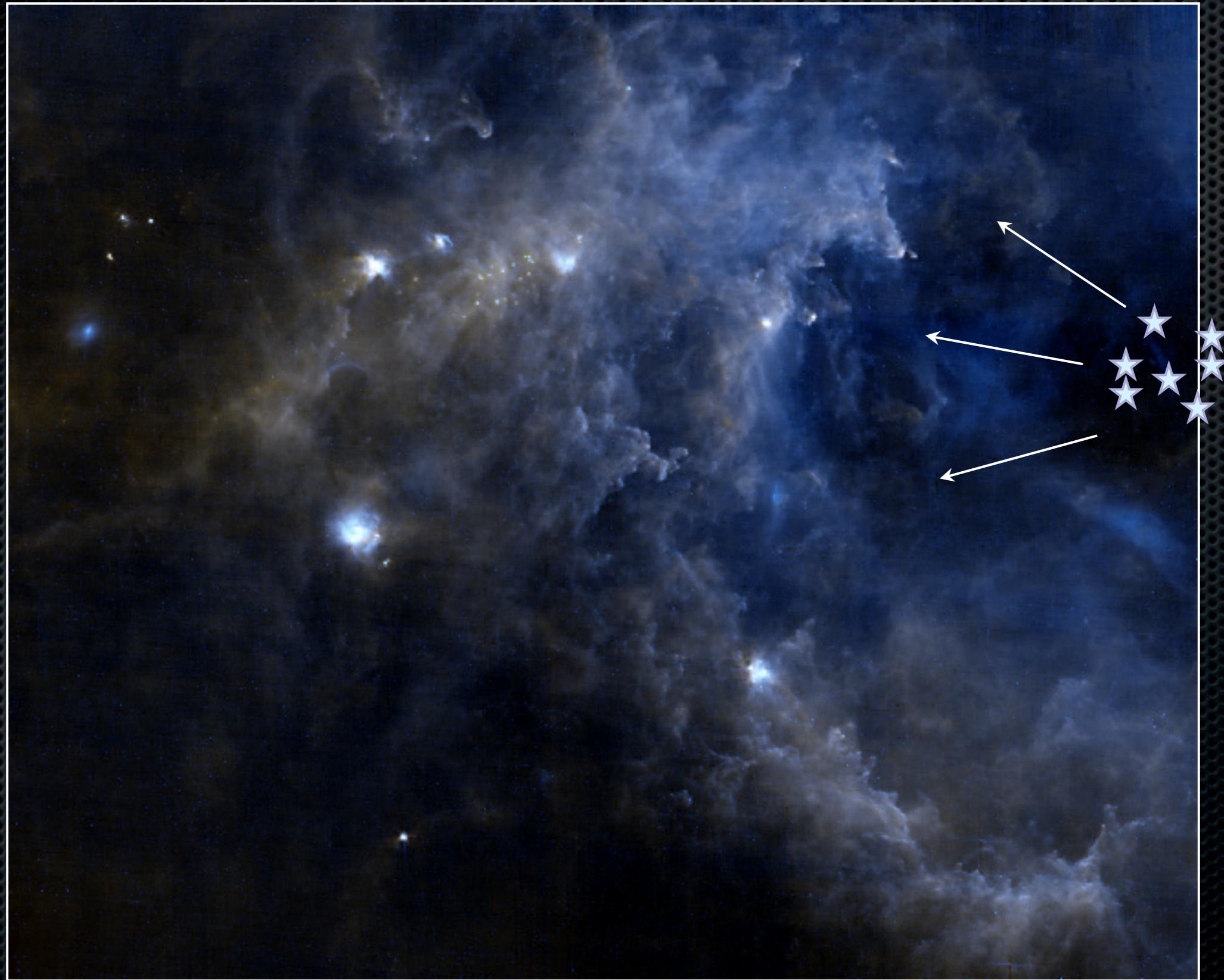
Traitement d'image pour détecter les filaments,  
avec cœurs pré-stellaires superposés

# Fonction de masse des coeurs pré-stellaires

- La couverture spectrale d'Herschel permet de déterminer la masse des coeurs des nuages.
- La fonction de distribution de cette masse est nettement différente de celle des nuages moléculaires.
- Elle commence à ressembler de très près à la fonction de masse initiale des étoiles.



# Nuage moléculaire de la Rosette

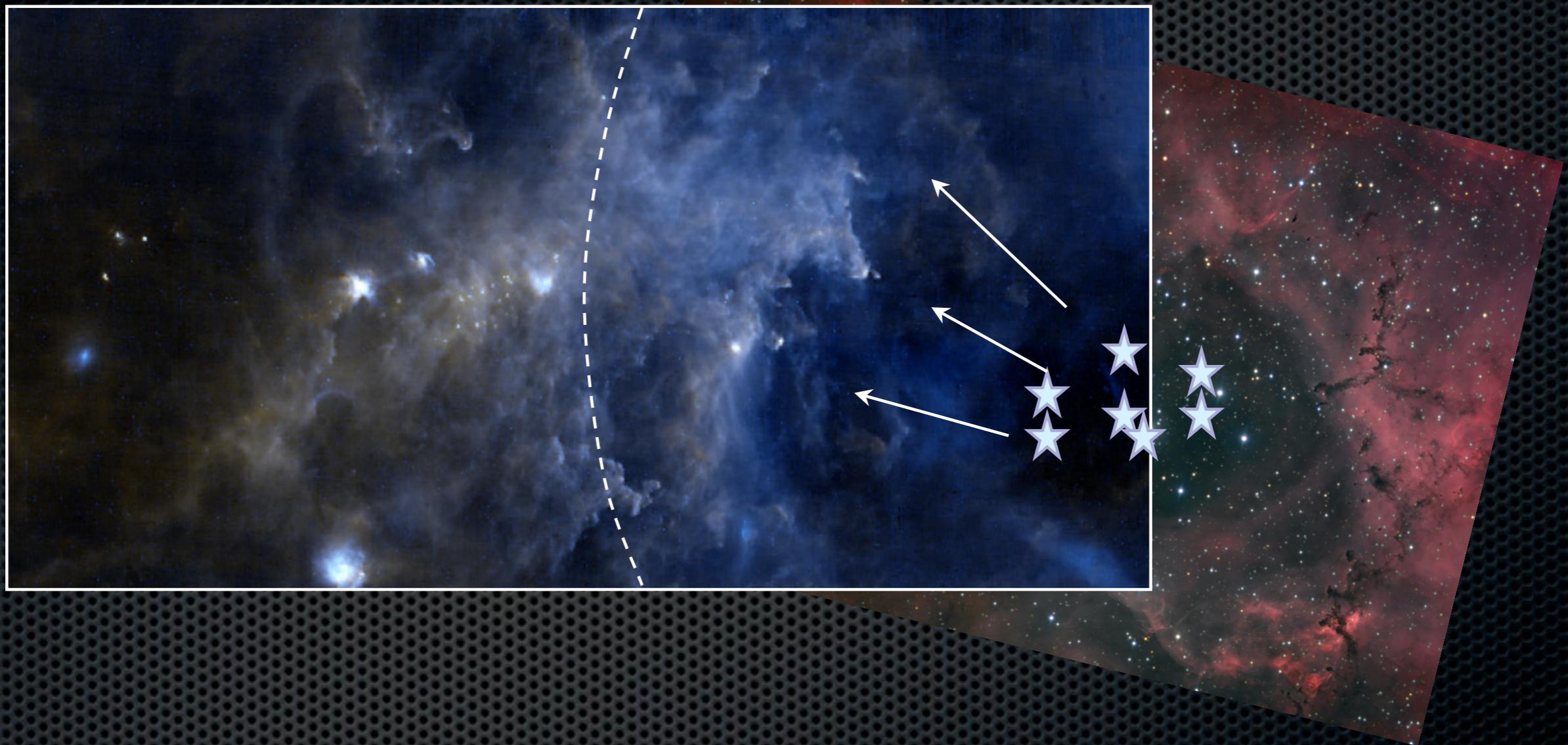


PACS 70, 160  $\mu\text{m}$

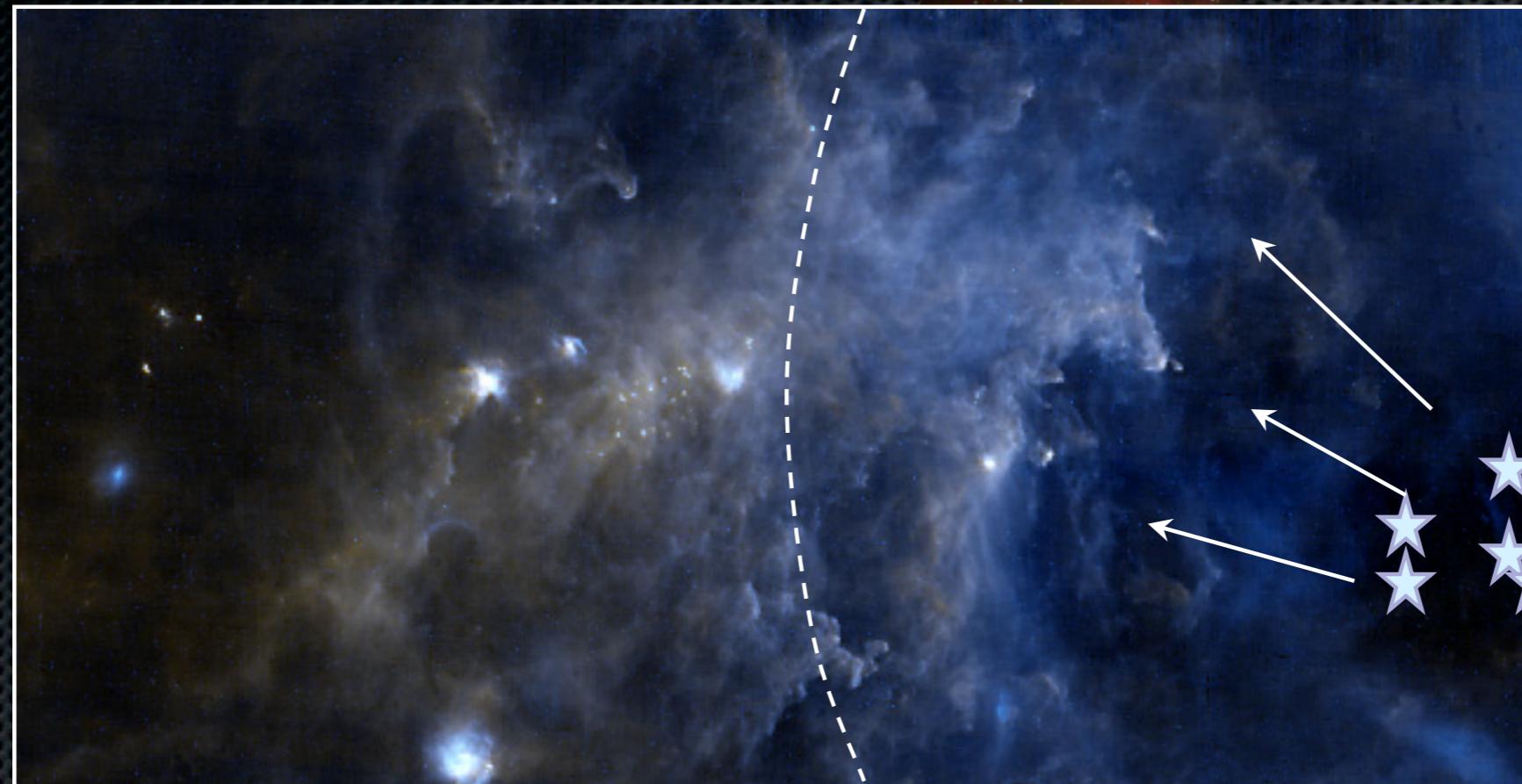
# Transition gaz ionisé <> gaz moléculaire



# Transition gaz ionisé <> gaz moléculaire

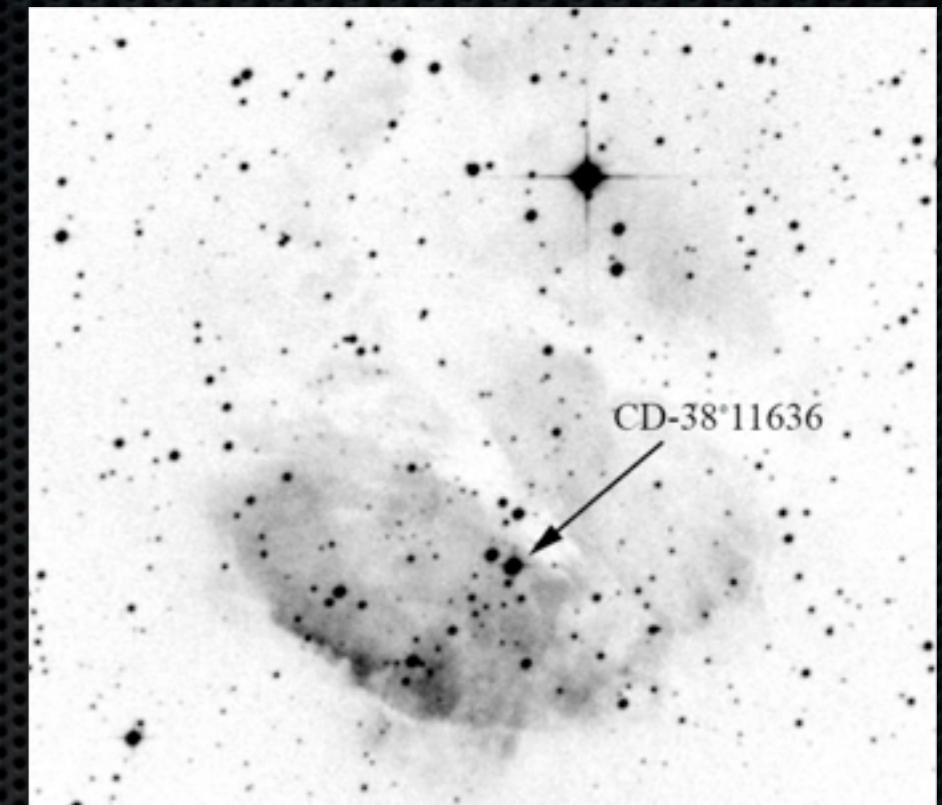
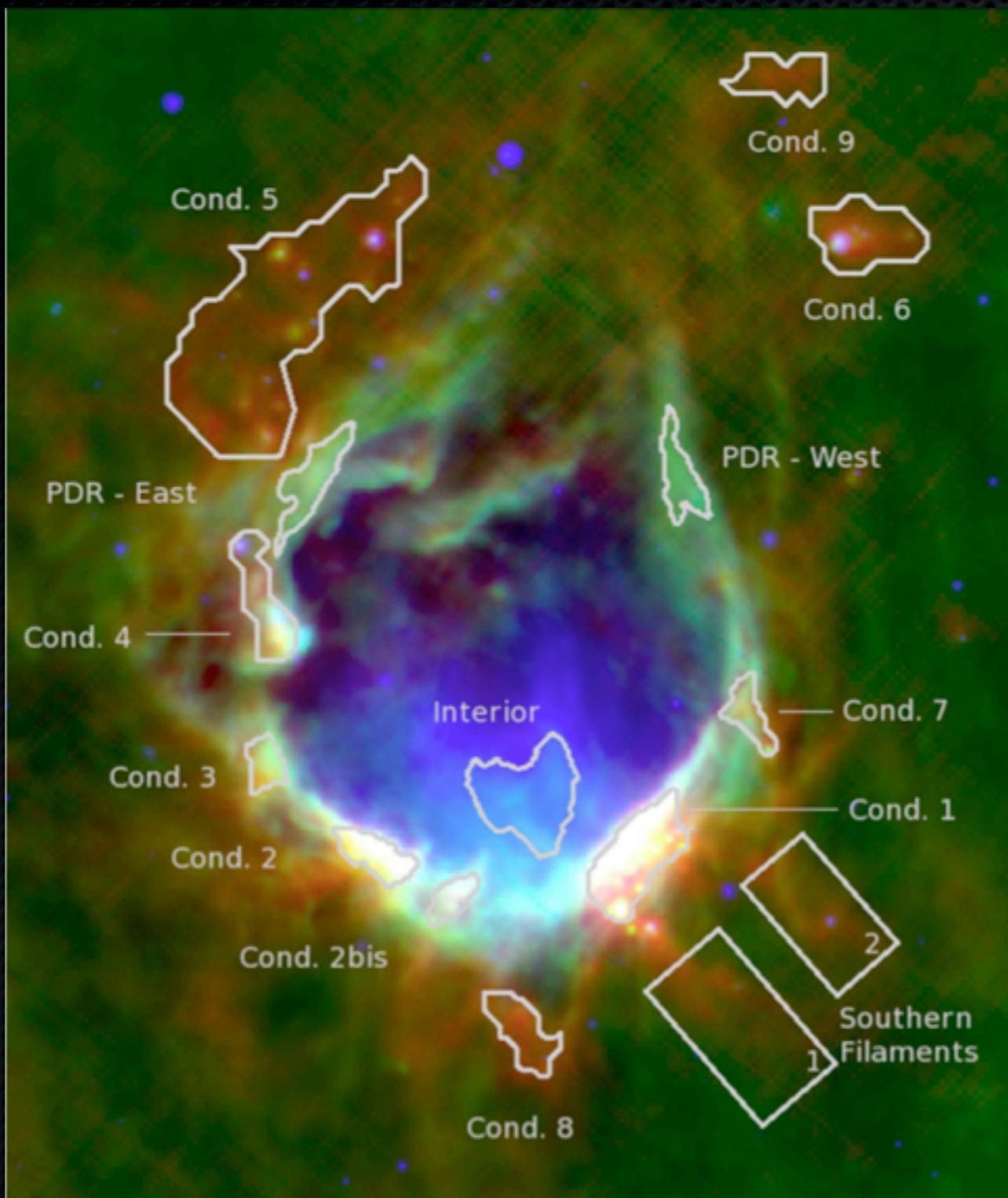


# Transition gaz ionisé <> gaz moléculaire



- Le champ ultraviolet de l'amas sculpte toute la région.
- La position de l'interface permet de donner un âge à la région.
  - 10 pc à 10 - 20 km/s donne 1 - 2 Myr.
- La formation stellaire induite se développe dans les poches de gaz froid et dense, près de l'interface avec la bulle ionisée.

# RCW 120 - la bulle parfaite

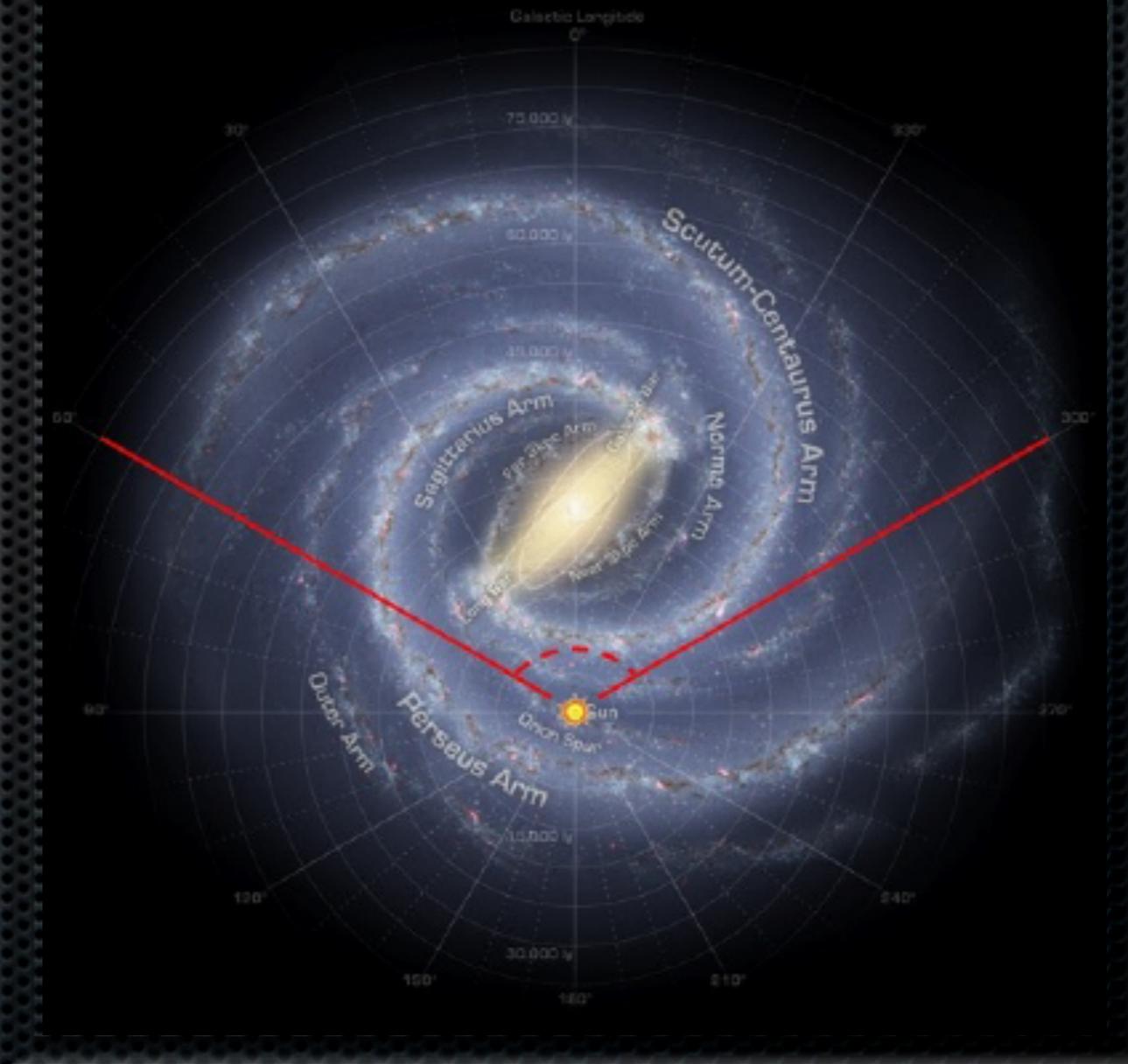


H $\alpha$  - gaz ionisé par les étoiles massives

Exemple type du mécanisme «collect and collapse»: la formation d'un amas génère une bulle de gaz chaud et ionisé sur le bord de laquelle une nouvelle génération d'étoiles se prépare.

# Notre Galaxie

Relevé systématique du quadrant interne de notre galaxie pour déterminer la luminosité, la masse et le spectre des structures de la poussière à toutes les échelles, depuis les objets stellaires jeunes massifs jusqu'aux bras spiraux.



IRAS 60

