



# L'astronomie spatiale infrarouge : la mission Herschel

Club Astro-Trégor 17 janvier 2014

André Gilloire

Association Observation radio – Pleumeur-Bodou  
SAF Commission radioastronomie  
Club d'Astronomie du Trégor



Herschel est un radiotélescope sub-millimétrique adapté à l'étude du rayonnement thermique émis par les objets « froids » de l'Univers

Cette mission complète et approfondit la riche moisson de résultats fournie par plusieurs missions prestigieuses depuis les années 1980

But de la mission Herschel: observation fine d'objets célestes dans le domaine de l'infrarouge lointain: régions de formation et de naissance des étoiles, nuages moléculaires, galaxies lointaines en formation, planètes ...

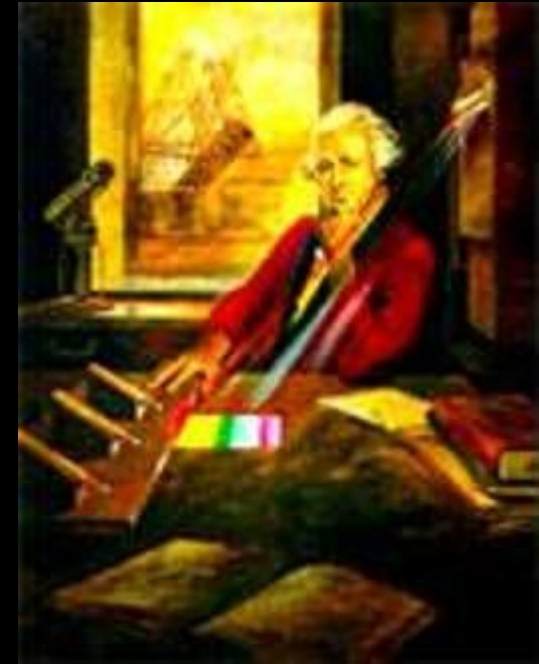
# Le rayonnement infrarouge

Le rayonnement infrarouge est la famille d'ondes électromagnétiques se situant entre la lumière visible et les micro-ondes

Longueurs d'onde  $\lambda$  : 0,8  $\mu$  à ~ 0,3 mm

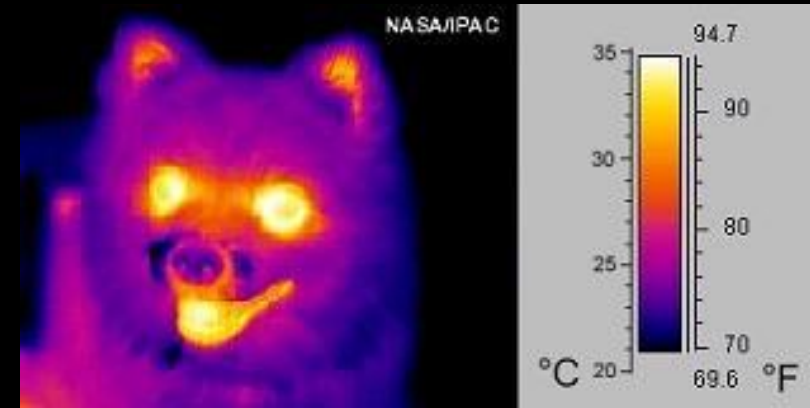
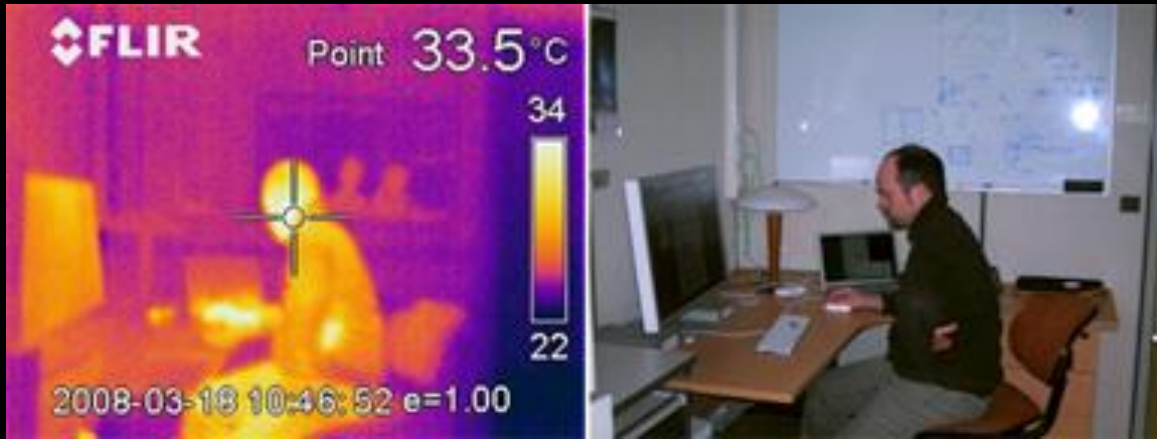
Fréquences  $\nu$  : ~ 1000 GHz à 400 THz

**William Herschel** découvre en 1800 les « rayons calorifiques » dans le spectre de la lumière solaire



Découverte par  
William Herschel

Tout corps à une température supérieure à  $0^{\circ}\text{K}$  ( $-273,15^{\circ}\text{C}$ ) émet un rayonnement électromagnétique à large spectre



Images obtenues avec une caméra thermique infrarouge



# Le « corps noir »

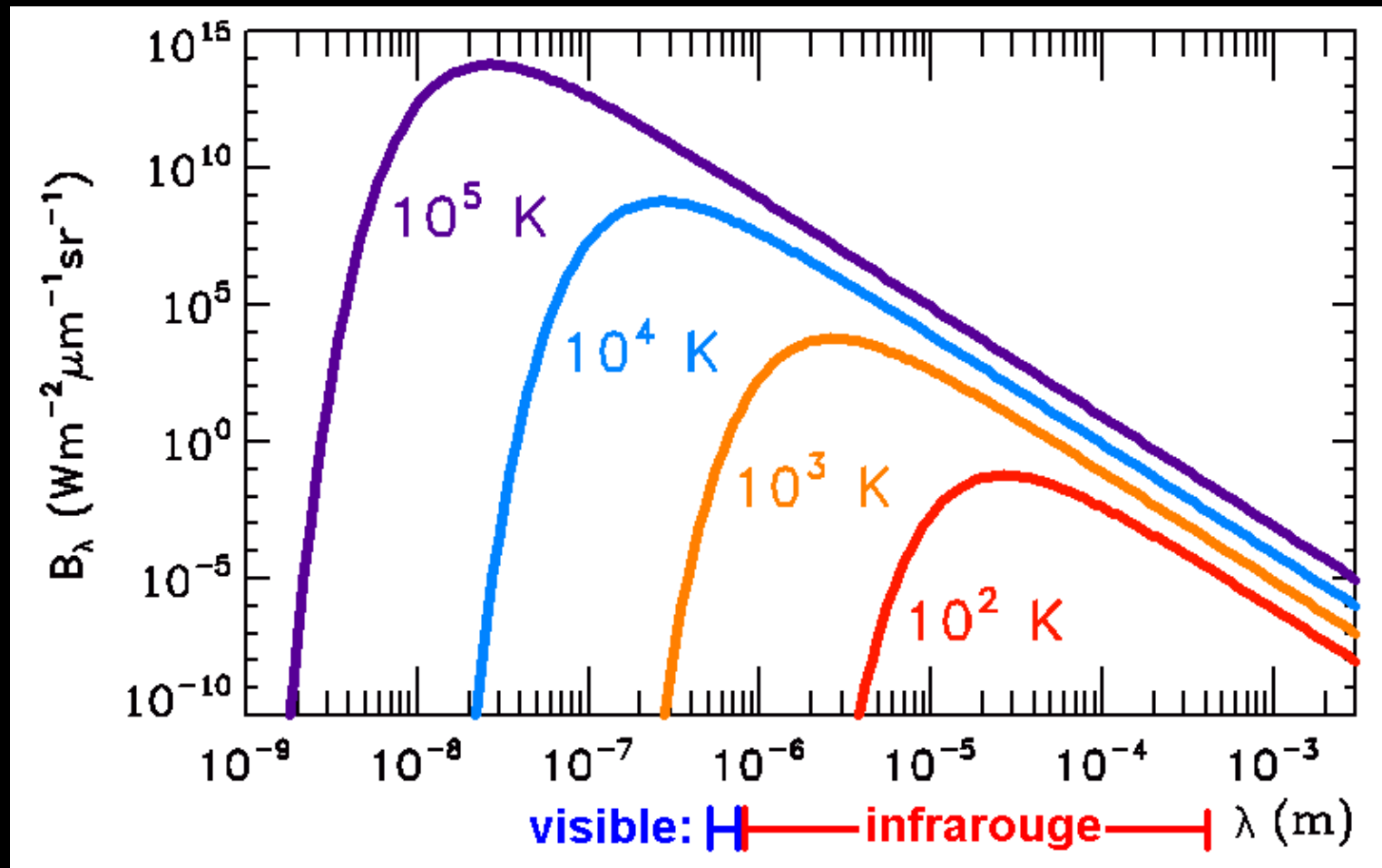
Milieu matériel en équilibre thermique avec le rayonnement

Exemples : intérieur d'un four ; intérieur du Soleil

Le corps noir est un modèle physique pour comprendre la nature et les propriétés du rayonnement thermique

L'étude du rayonnement du corps noir à la fin du XIXème siècle a conduit Max Planck à proposer en 1900 l'hypothèse des quanta d'énergie, reprise par Albert Einstein en 1905 pour formuler la théorie quantique de la lumière et du rayonnement électromagnétique

# spectre du rayonnement émis par un corps noir à différentes températures



$$B_\lambda \sim \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Loi de Planck

$$\lambda_{max} = \frac{hc}{4,965 \cdot kT} = \frac{2,898 \cdot 10^{-3}}{T}$$

Loi de Wien

# Observation de l'Univers en infrarouge

L'astronomie infrarouge (IR) s'intéresse à l'observation des « objets froids » de l'Univers:

- nuages de gaz et de poussières au voisinage des étoiles ou se réchauffant par effet dynamique
- « pouponnières » d'étoiles
- planètes du système solaire, comètes et exoplanètes
- rayonnement d'objets lointains fortement décalé vers le rouge (*red-shift*)

# L'astronomie infrarouge

Très limitée jusqu'aux années 1950

- peu de moyens pour s'affranchir de l'absorption par l'atmosphère au-delà de  $\lambda \sim$  quelques microns
- pas de détecteurs performants
- bruit de fond thermique non maîtrisé

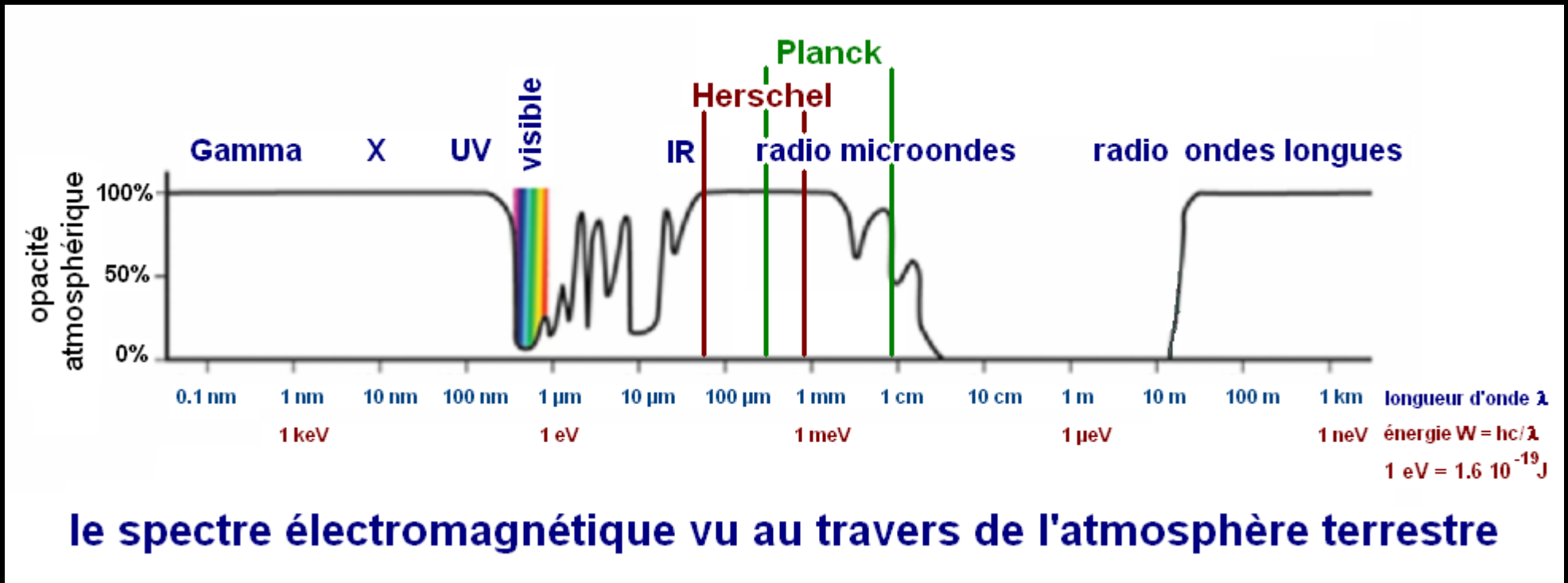
Nouvelles technologies à partir des années 1960 :  
spatial, micro-ondes, capteurs, techniques cryogéniques...  
l'astronomie IR se développe rapidement

- Missions embarquées en ballon, avion, fusées-sondes
- Observatoires au sol: IRAM, ALMA ...
- Observatoires spatiaux IR : IRAS, Spitzer (NASA), Akari (Jp), ISO (ESA), Hubble (infrarouge proche), Herschel

→ grand nombre de sources IR répertoriées dans l'Univers



# Pourquoi des observatoires dans l'espace ?



- s'affranchir de l'absorption des ondes IR par l'atmosphère terrestre
- pas d'occultation du « champ visuel » pour les sondes placées en orbite loin de la Terre: on « voit » tout le ciel
- « propreté » électromagnétique de l'environnement dans l'espace

# La mission IRAS - InfraRed Astronomical Satellite

Projet conjoint de la NASA, du NIVR (Pays-Bas) et du SERC (UK)

Mission de Janvier à Novembre 1983, en orbite autour de la Terre

Premier «survey » complet (96%) du ciel en infrarouge

350000 sources IR observées à 12, 25, 60 et 100  $\mu$

Télescope Ritchey-Chrétien

miroir (Be) 57cm, résolution angulaire :

30" à 12  $\mu$ , 2' à 100  $\mu$

Instruments:

Réseau de 62 détecteurs IR

Spectromètre à basse résolution (LRS)

Photomètre (CPC)

Le système de refroidissement à 4°K

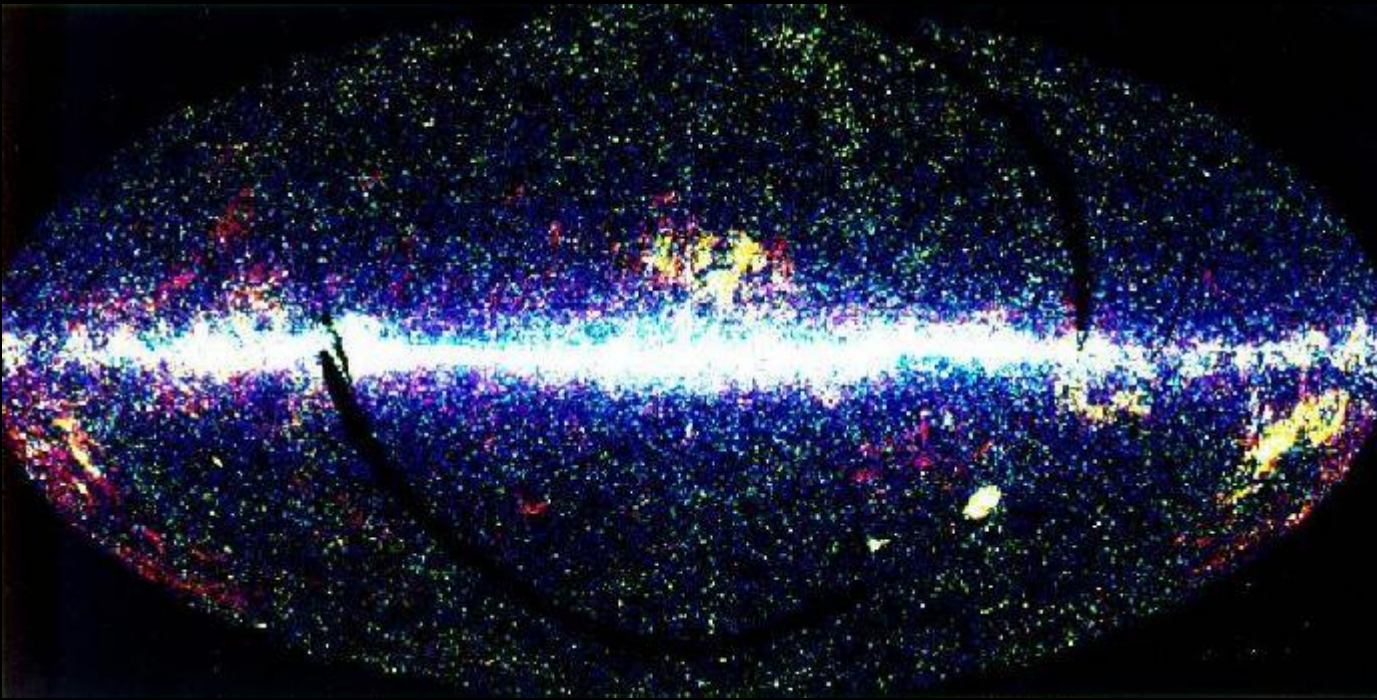
par évaporation d'Hélium superfluide

(73 kg) a limité la durée de la mission

à 10 mois

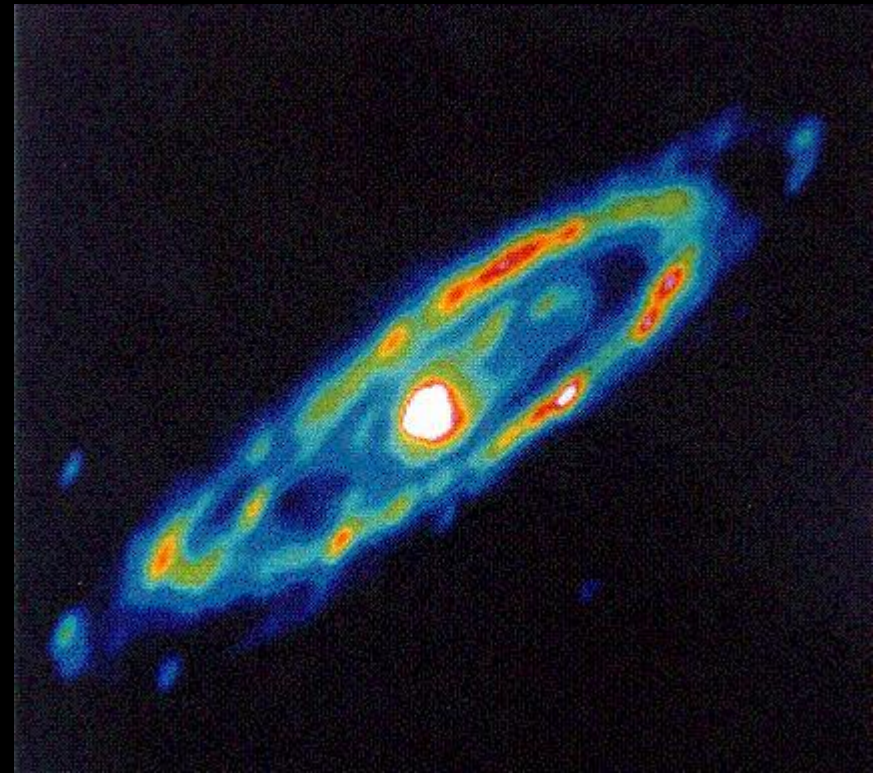


# IRAS résultats



Sources ponctuelles IR détectées ▲  
sur l'ensemble du ciel  
couleurs suivant bandes spectrales IR

Galaxie d'Andromède (M31) ►  
Les régions de formation d'étoiles  
apparaissent en jaune, orange et rouge  
couleurs suivant intensité IR



# Mission ISO - Infrared Space Observatory (ESA)

Mission de Février 1996 à Mai 1998, en orbite géosynchrone

Résultats sur atmosphère des planètes, disques protoplanétaires, galaxies IR à noyaux actifs, noyaux cométaires, présence eau ...

Télescope R-C 60cm f/15 (SiO<sub>2</sub>)

Bande IR couverte 2,5  $\mu$  à 240  $\mu$

Résolution: de 1,5'' à 1,5'

4 instruments:

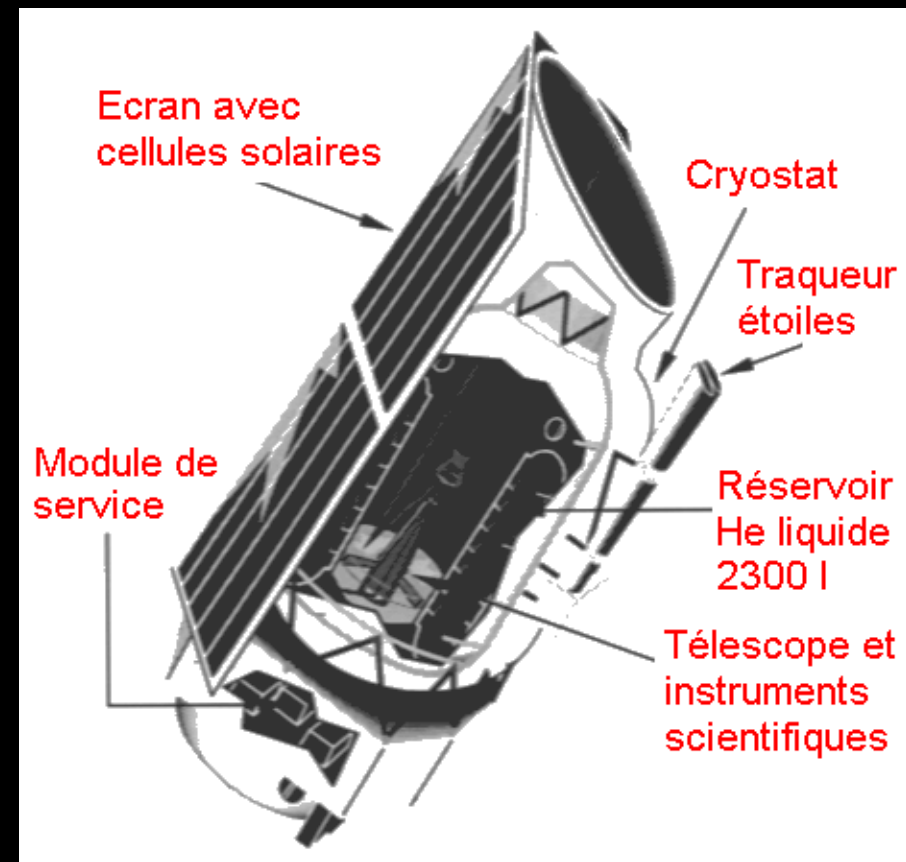
Deux spectromètres: SWS et LWS

Caméra ISOCAM 32x32 pixels

Photopolarimètre imageur ISOPHOT

Sensibilité et résolution >> IRAS

Système de refroidissement à 3°K par évaporation d'Hélium superfluide (2300 l) → durée de la mission limitée à 28 mois (+10 mois que prévu)



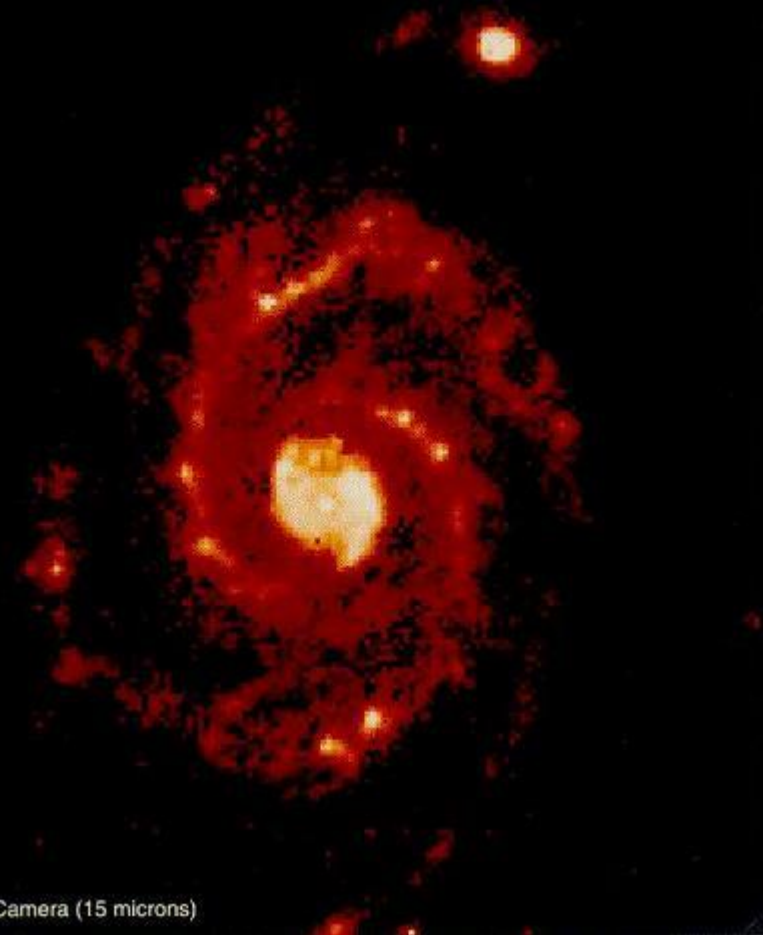
# ISO Résultats



Nébuleuse de l'Aigle:  
zone active de  
formation d'étoiles  
à 7,7  $\mu$  (bleu) et 14,5  $\mu$   
(rouge)



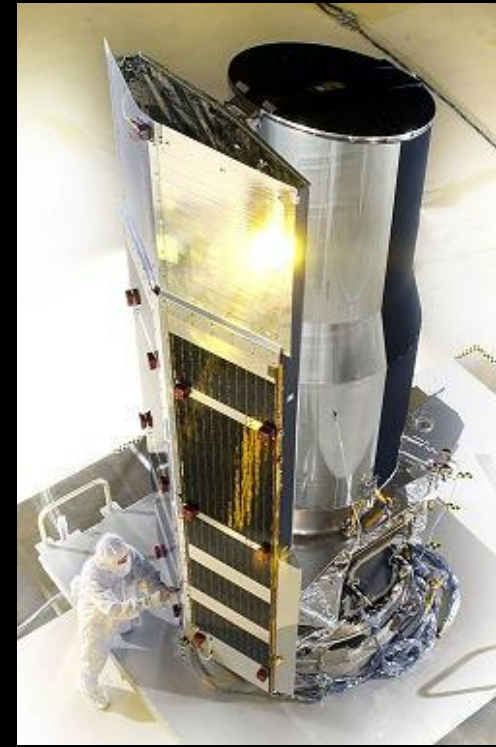
Galaxie du Tourbillon (M51) à 15  $\mu$ .  
Les zones plus chaudes de formation  
d'étoiles sont en clair.  
La galaxie-compagnon M51b paraît  
plus petite qu'en visible: la zone  
chaude de formation d'étoiles y est  
concentrée près du noyau



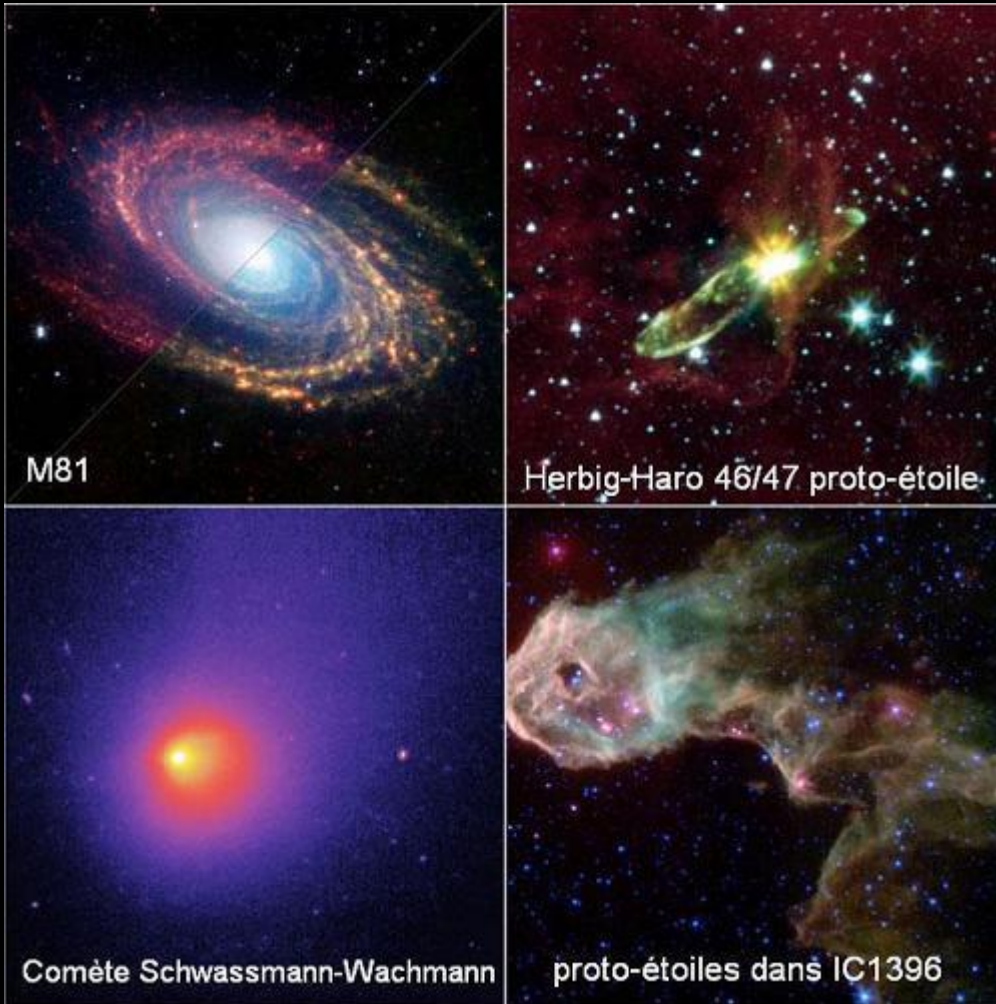
ISO Camera (15 microns)

# Mission Spitzer (NASA) 2003 → 2009 → ...

Télescope R-C 85 cm (Be), 3 instruments refroidis He (spectroscopie et imagerie), bande  $3\mu - 180\mu$



Télescope spatial  
IR Spitzer



Galaxies primordiales à 13 milliards AL

# La mission Herschel



Lancement des deux observatoires Herschel et Planck par lanceur Ariane 5 ECA depuis Kourou le 14 Mai 2009 (VA188)

Acheminement et positionnement très précis au voisinage du point de Lagrange L2

Mission opérationnelle Herschel:

début le 14 Juin 2009

fin de mission le 30 Avril 2013 par épuisement de la réserve d'hélium réfrigérant

# Mise en place sur Ariane 5 avant le lancement



Planck (dans container)  
surmonté de Herschel

## Herschel en chiffres

Hauteur : 7 m

Largeur : 4,30 m

Masse : 3,25 t

## Planck en chiffres

Hauteur : 4,20 m

Largeur : 4,20 m

Masse : 1,8 t



Coiffe montée 10 Mai 2009



# Le (radio)télescope spatial Herschel

Plus grand télescope spatial à ce jour: miroir primaire de 3,50m (Hubble: 2,40m)

Pour voir plus net et plus loin: résolution et sensibilité très supérieures aux missions précédentes

Spectre IR-microondes: de  $60\mu$  à  $670\mu$

## Enjeux scientifiques

- étudier le mécanisme de formation des étoiles
- observer la formation des galaxies, les noyaux galactiques...
- observer à haute résolution des objets proches (planètes...)



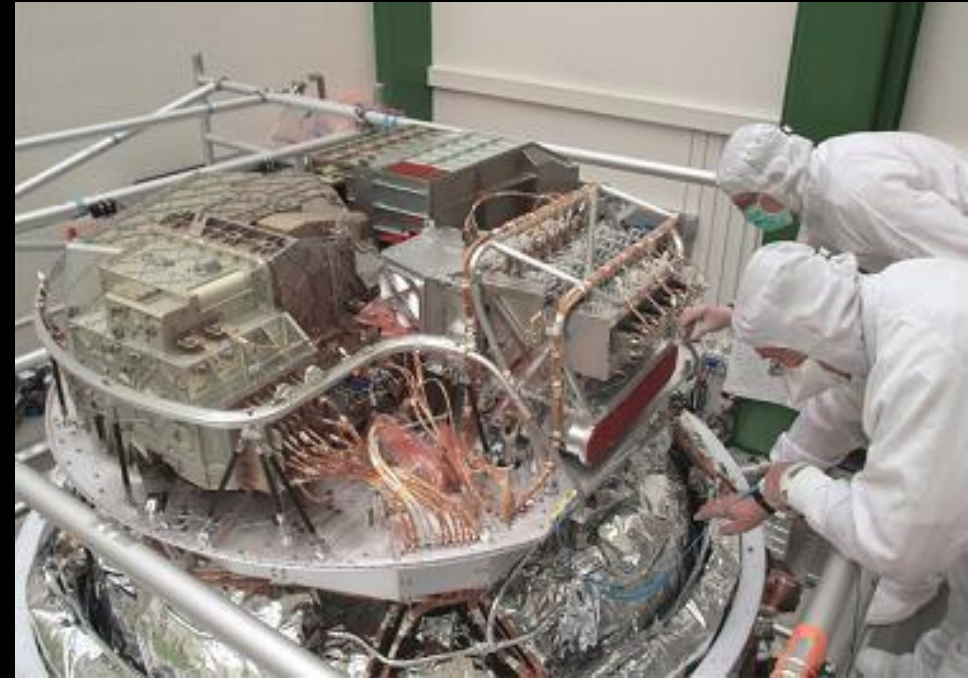
Vue générale – optique Cassegrain avec le miroir primaire en SiC et le baffle thermique au premier plan

# Les instruments d'Herschel

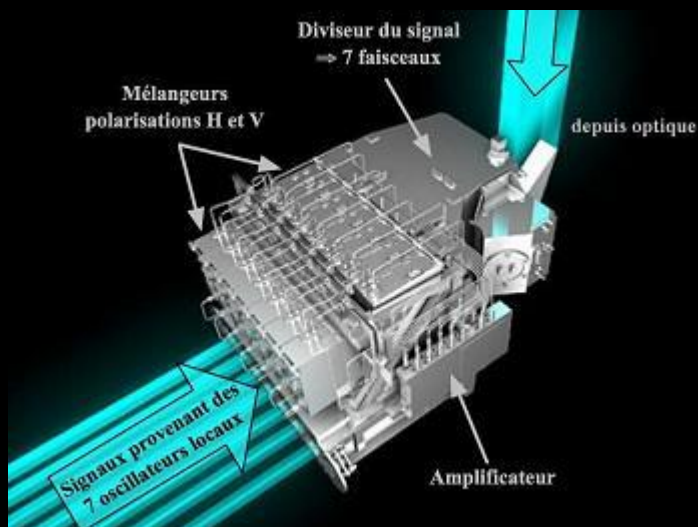
**PACS:** imageur et spectromètre dans la bande  $60\mu$  à  $210\mu$

**SPIRE:** imageur et spectromètre dans la bande  $250\mu$  à  $500\mu$

**HIFI:** spectromètre hétérodyne haute résolution ( $13''$  à  $40''$ ) dans la bande  $160\mu$  à  $625\mu$



Intégration des trois instruments



HIFI: chemins des signaux

Capteurs: matrices de bolomètres refroidis à  $0,3K$



# Systeme de refroidissement passif

Au lancement: le cryostat contient  
2300 l de He3 superfluide à 1,65°K

Basse température maintenue par  
évaporation → limitation durée de vie  
† 29 Avril 2013... comme prévu!

Détecteurs placés à l'intérieur du  
cryostat

Température bolomètres PACS et  
SPIRE maintenue à 0,3°K

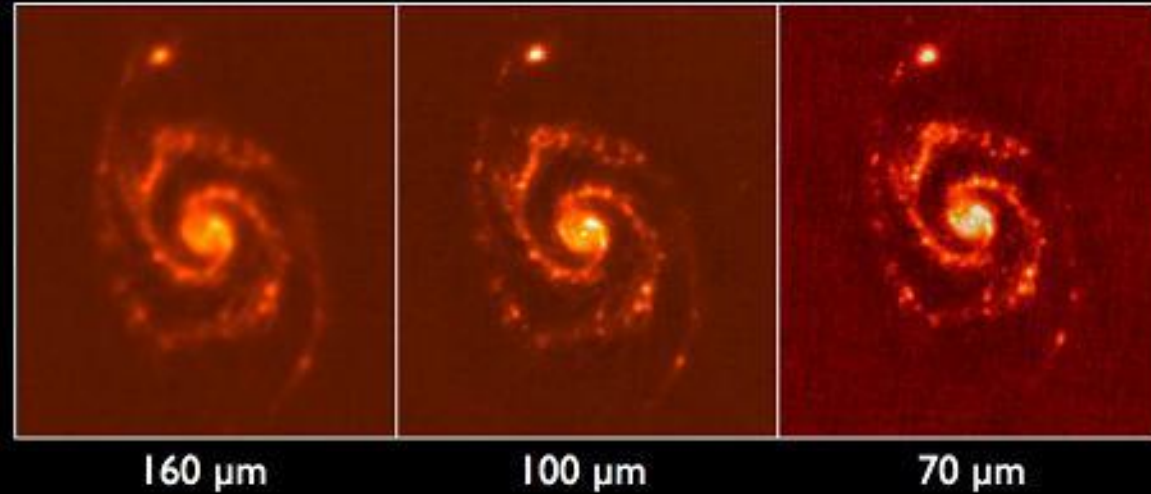




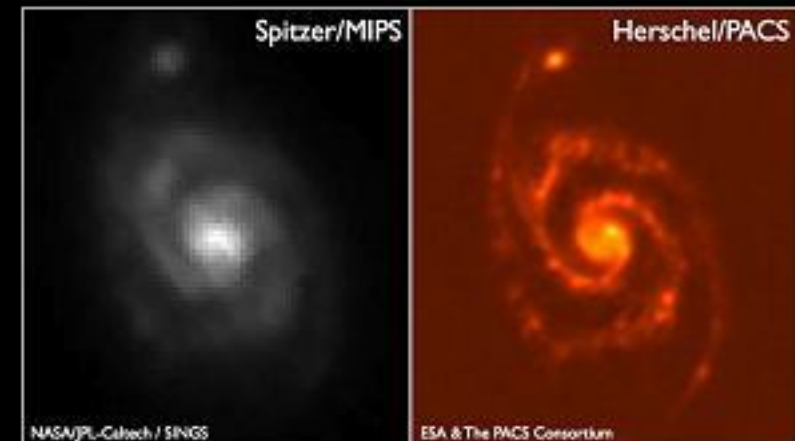
Quelques observations obtenues  
au cours de la vie de Herschel



Herschel/PACS Images of M51 ("Whirlpool Galaxy")



© ESA & The PACS Consortium



Spiral Galaxy M51 ("Whirlpool Galaxy") in the Far Infrared (160 $\mu$ m)

Images M51 superposées à 160 $\mu$ , 100 $\mu$ , 70 $\mu$   
Les taches bleues sont des zones chaudes  
de formation active d'étoiles.

Progrès des  
performances



3 Septembre 2009

Images PACS et  
SPIRE combinées

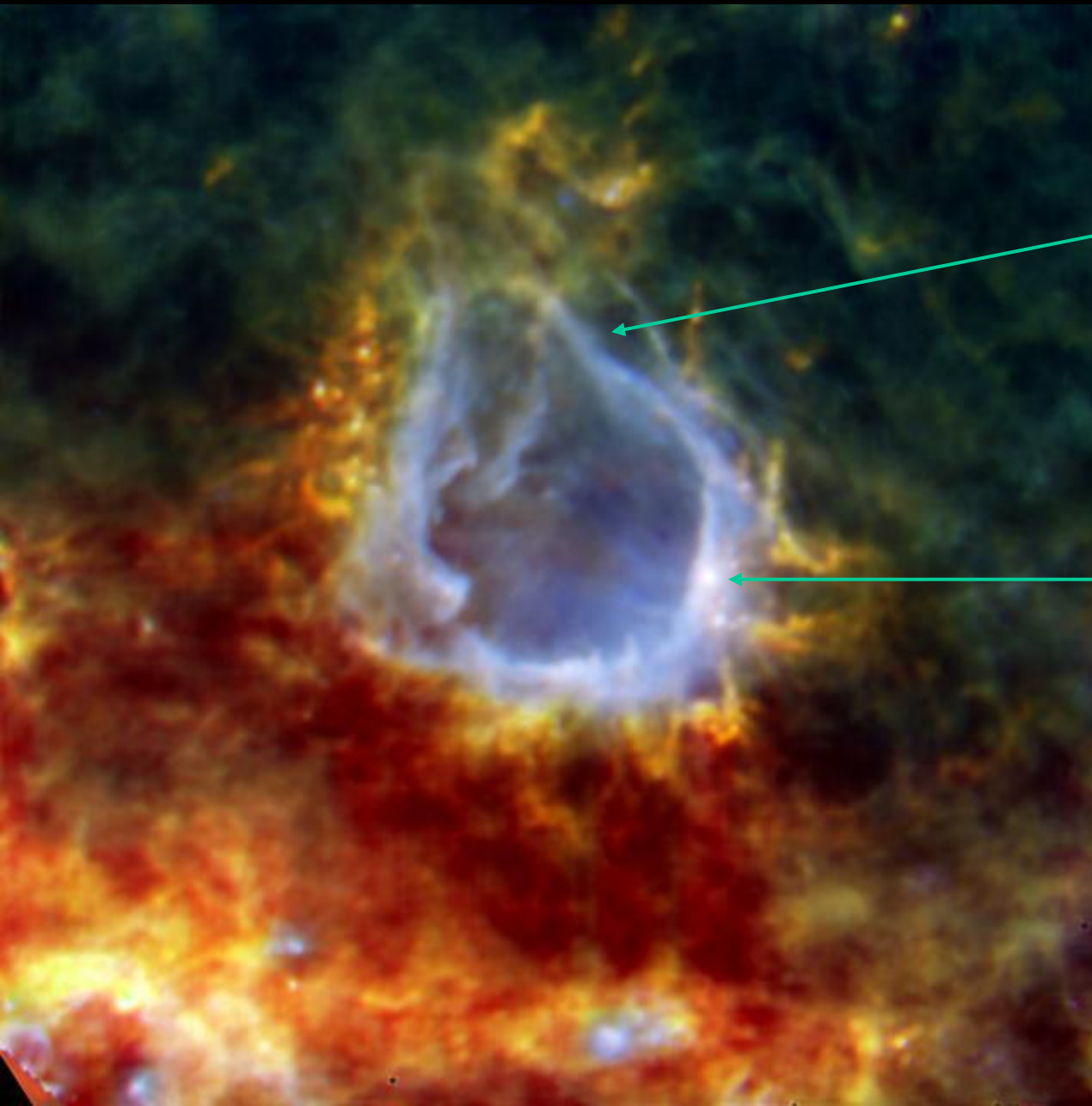
Réservoir de gaz froid  
dans la Croix du Sud

Structures  
filamenteuses chaudes  
où se forment  
simultanément de  
nombreuses étoiles

6 Mai 2010

« Bulle galactique » RCW120  
distance au Soleil ~ 4300 AL

Images PACS et  
SPIRE combinées



Matière de la bulle  
soufflée par  
rayonnement étoile au  
centre (invisible)

Etoile géante en gestation  
8  $M_{\odot}$  pourrait grossir  
jusqu'à 150  $M_{\odot}$  sauf si  
accrétion stoppée par  
pression de radiation

« Massacre de comètes » autour de Fomalhaut

11 Avril 2012

« Jeune » étoile,  $2M_{\odot}$

Image PACS  $70\mu$



La ceinture de poussières et de glace serait produite par de nombreuses et fréquentes collisions de comètes

L'étroitesse de la ceinture et son excentricité pourraient être dues à une planète orbitant autour de l'étoile



# Pouponnière d'étoiles dans la « nébuleuse bleue » W40

7 Janvier 2013  
Image PACS & SPIRE

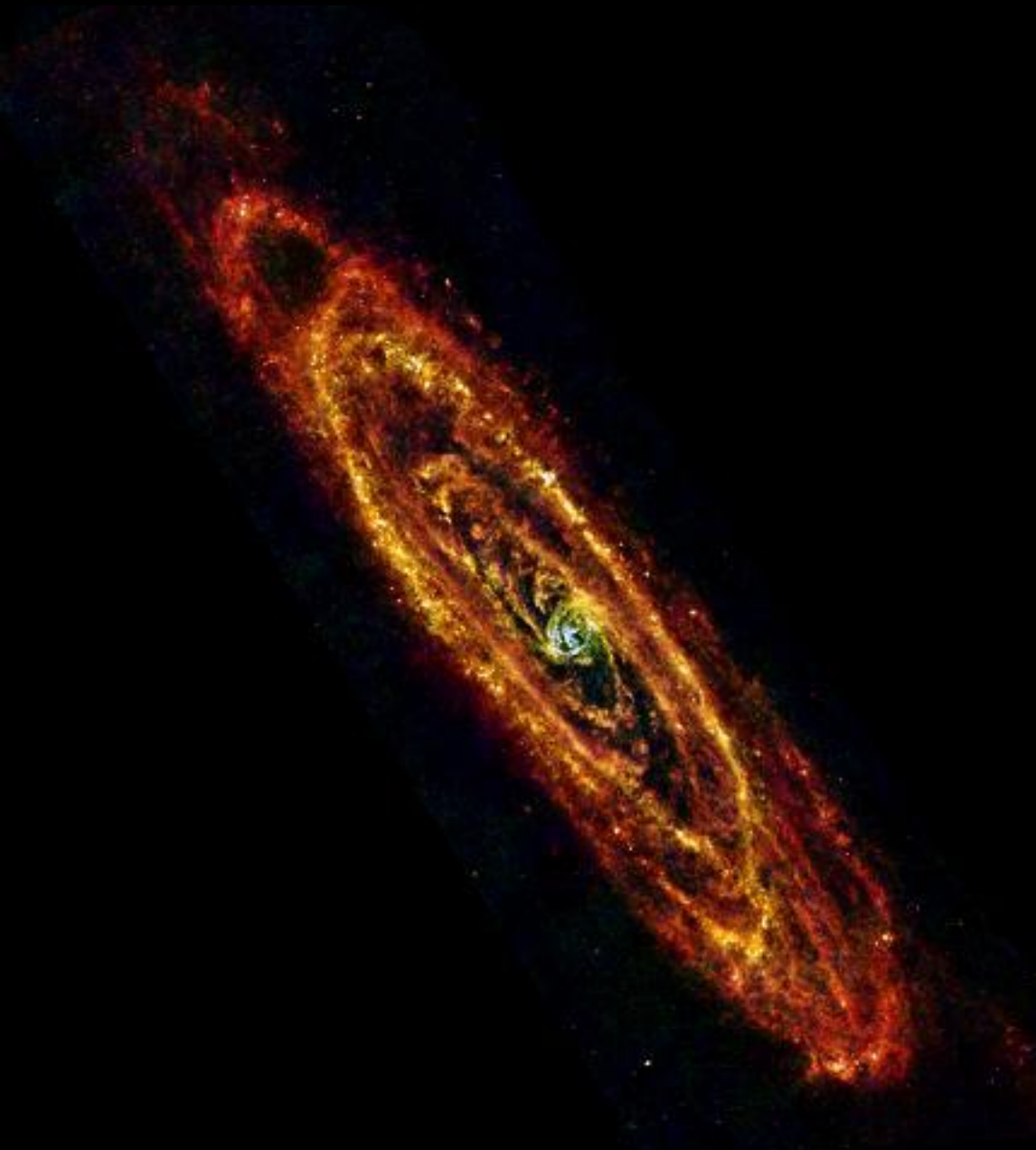


600 étoiles naissantes sont  
visibles dans les filaments de  
poussière

La zone de la nébuleuse  
bleue W40 se trouve dans la  
Constellation de l'Aigle, à  
environ 1000 AL du Soleil

# Les zones « froides » de la galaxie d'Andromède (M31) en infrarouge lointain

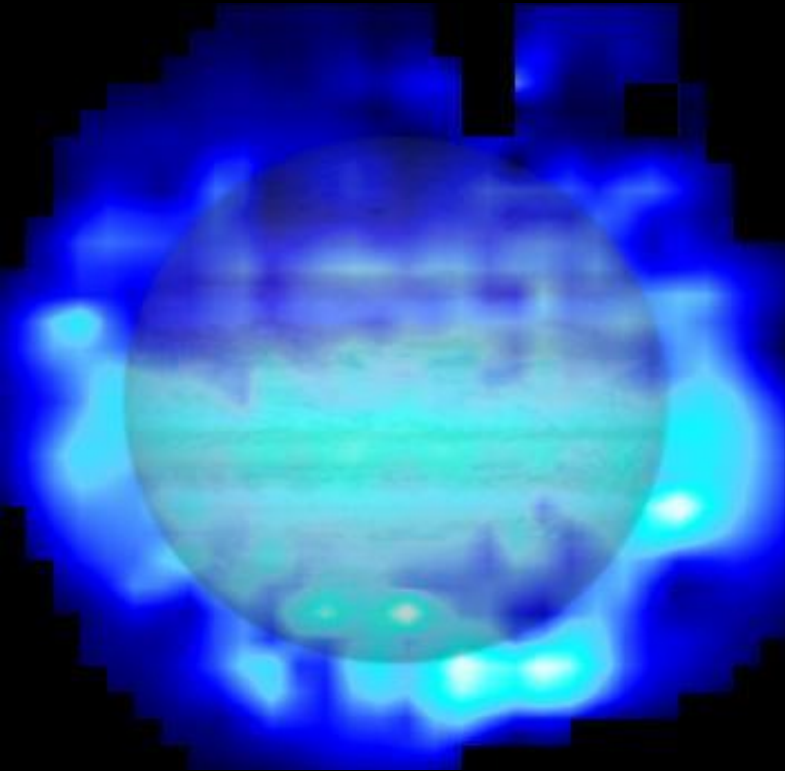
28 Janvier 2013  
Image PACS & SPIRE  
70  $\mu$  (bleu), 100  $\mu$   
(vert), 160  $\mu$  et 250  $\mu$   
combinés (rouge)



Détails les plus fins jamais  
observés des filaments en  
anneau contenant des  
étoiles en formation

Des nuages de poussière  
très froide – quelques  
dizaines de °K –  
apparaissent en rouge

Les régions plus chaudes  
comme le bulbe central très  
peuplé apparaissent en  
bleu



Vapeur d'eau dans la haute atmosphère de Jupiter (Herschel confirme observation ISO):

conséquence de l'impact de la comète Shoemaker-Lévy, 9 Juillet 1994

provenance planétaire exclue; dissymétrie: trois fois plus d'eau dans l'hémisphère Sud

PACS & SPIRE 160, 250 & 350  $\mu$

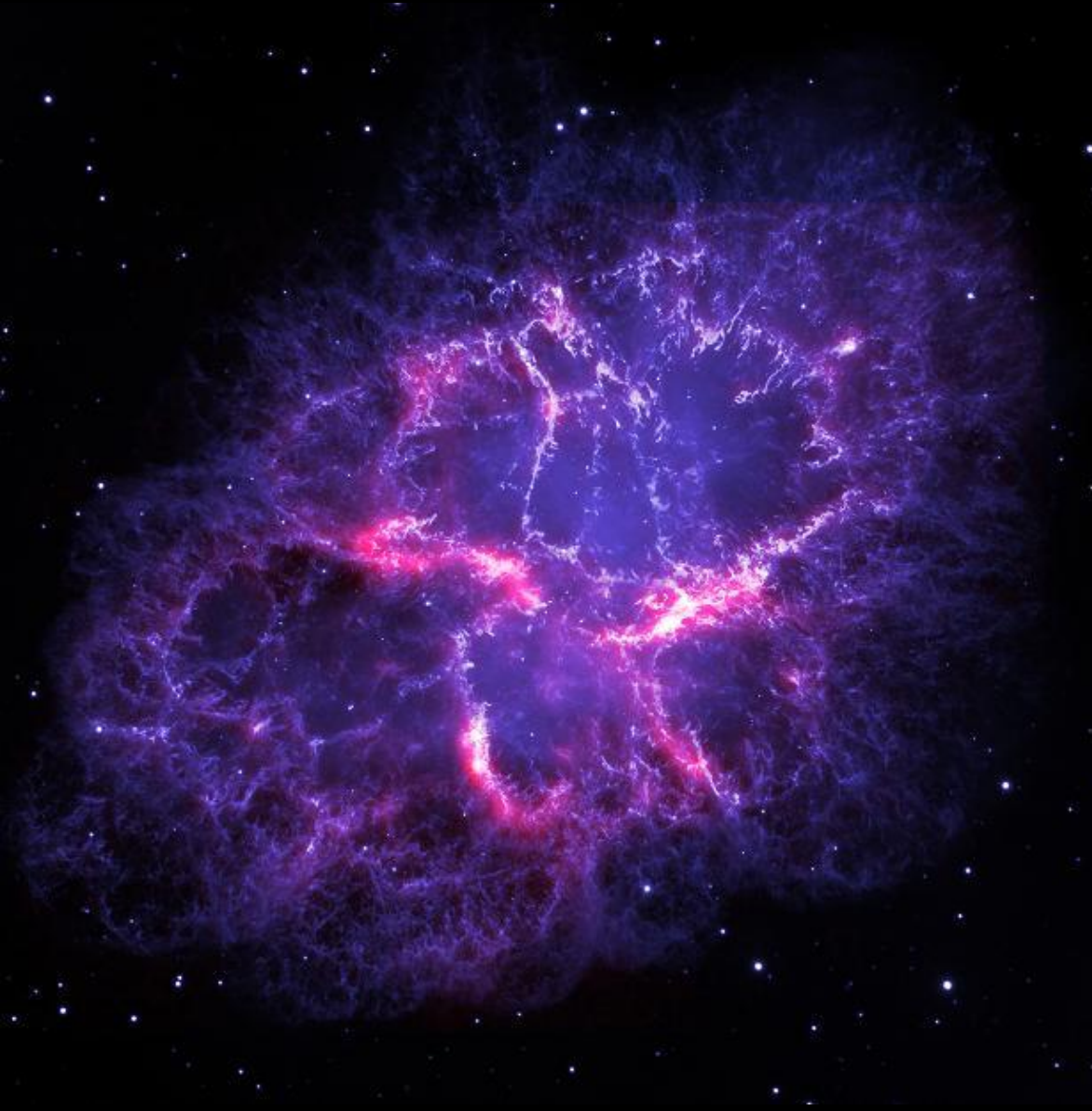
PACS 66,4  $\mu$  + visible (planète)

Nuage de vapeur d'eau très chaude autour de l'étoile géante en fin de vie IRC+10216

H<sub>2</sub>O due à effet des ultraviolets produits par les étoiles environnantes: molécules CO et SiO cassées, O libre puis O+H<sub>2</sub> → H<sub>2</sub>O



# Observation des poussières et d'argon lié dans la nébuleuse du Crabe (M1)



IR: poussière cosmique dans la nébuleuse

Visible: mise en évidence oxygène et soufre sous forme de gaz

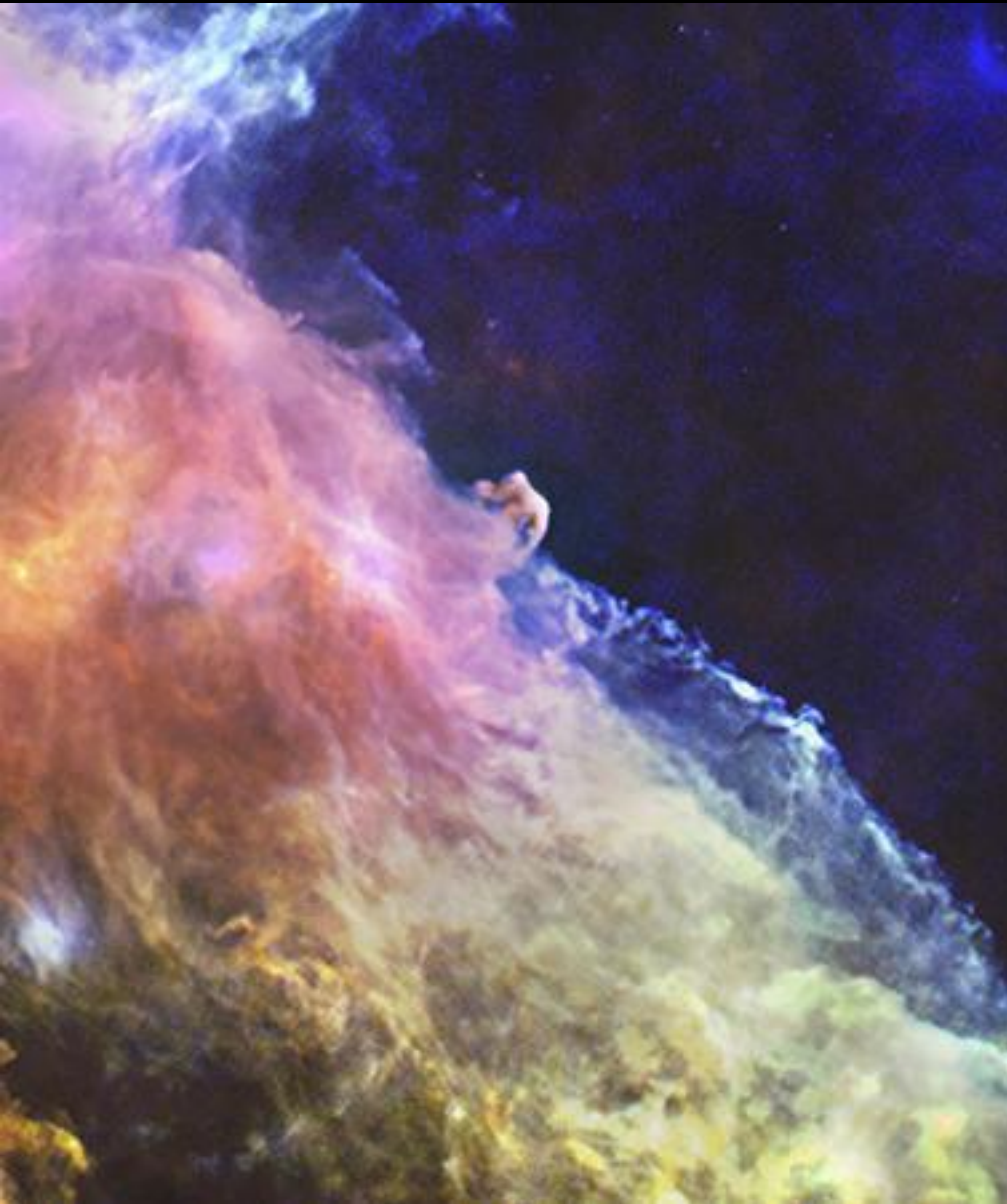
La nébuleuse contient une masse de poussières équivalente à 1/4 du Soleil

Détection pour la première fois de la présence d'un gaz noble (Ar) lié à d'autres atomes dans l'espace, malgré les gaz chauds en expansion après l'explosion de la supernova

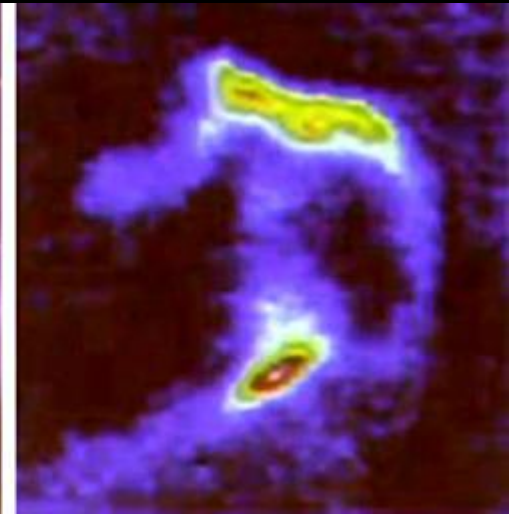
Image composite IR (Herschel) en rouge et visible (Hubble) en bleu

# Nébuleuse « Tête de cheval » dans le nuage d'Orion

19 Avril 2013



visible



IR (Herschel)

Vue dans  
différentes  
bandes spectrales



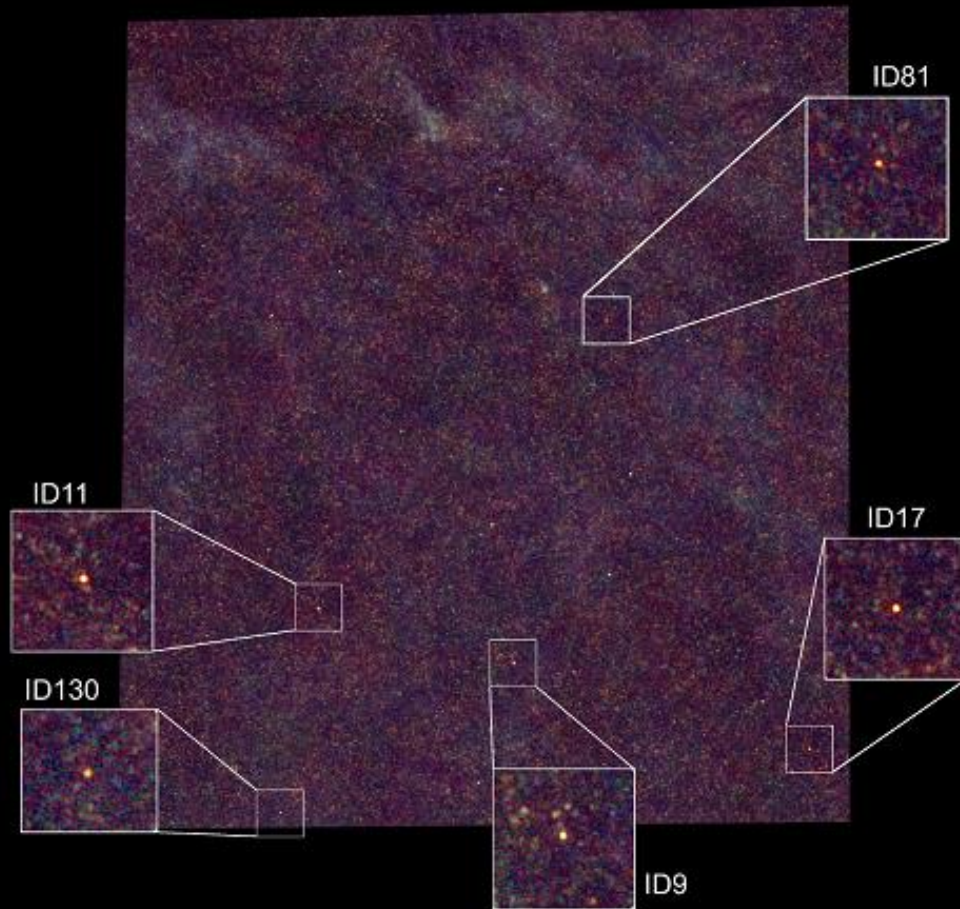
IR proche (Hubble)

Image PACS & SPIRE Composite 70 $\mu$   
(bleu), 160 $\mu$  (vert) et 250 $\mu$  (rouge)

# Herschel détecte 5 nouvelles galaxies lointaines grâce aux « loupes cosmiques »

4 Nov. 2010

SPIRE & PACS, 100-500  $\mu$



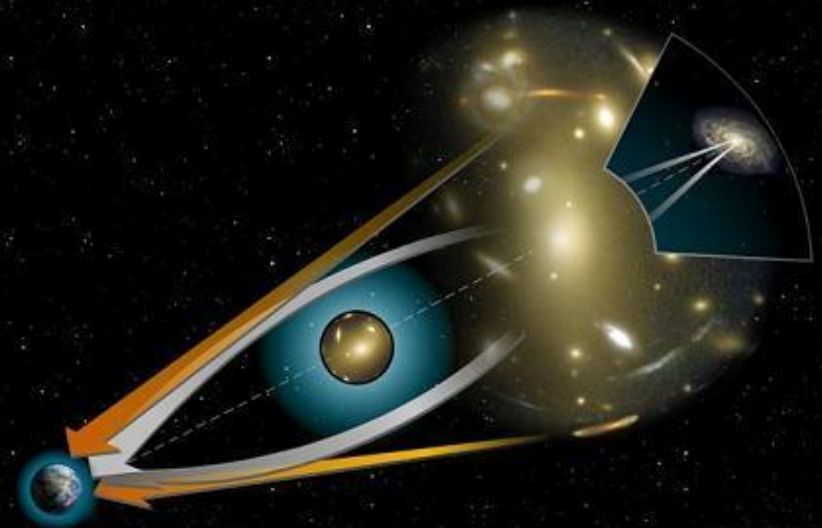
Galaxies éloignées de  $\sim 10$  GAL  
très peu lumineuses mais  
observables grâce à l'effet de  
lentille gravitationnelle

Projet ATLAS\*: inventaire par  
Herschel des galaxies lointaines

→ sera repris par ALMA

\* *Astrophysical TeraHertz Large Area Survey*

Effet de lentille gravitationnelle



# Perspectives en astronomie infrarouge

## Améliorer encore la qualité des observations

Résolution angulaire, sensibilité et définition des images

Télescopes spatiaux plus grands: JWST (?)

Détecteurs plus sensibles et matrices plus denses

Observatoires au sol: ALMA (Chili)

## Nouvelles observations

Objets très lointains avec  $z$  importants -> histoire de l'Univers

Planètes en formation et exoplanètes

Détails fins sur planètes du Système Solaire

Molécules pré-biotiques dans l'espace

# Bibliographie

Beaucoup d'informations sur Internet très bien documentées et illustrées:

- ▶ ESA (site spécialisé Herschel), CNRS/INSU (observatoires), CEA, CNES ...
- ▶ NASA (site spécialisé Spitzer), JPL, CalTech ...
- ▶ bons articles assez complets sur Wikipédia
- ▶ sites pédagogiques et sites d'amateurs passionnés

Articles scientifiques en ligne: Arxiv, A&A... assez ouvert

Revue de vulgarisation: l'Astronomie, Ciel et Espace, Astronomie magazine, La Recherche, Pour la Science ...