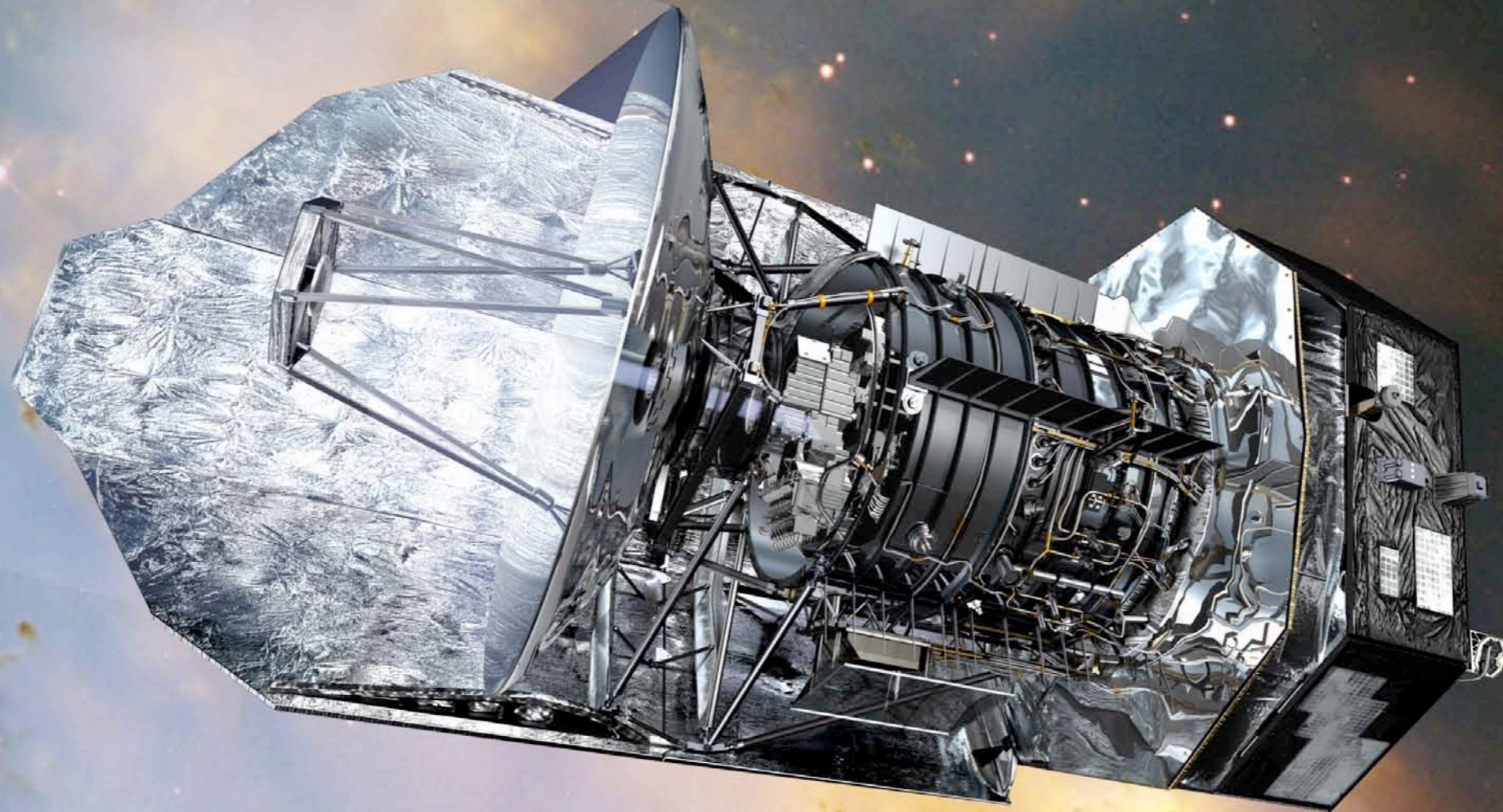


# L'Observatoire Spatial Herschel : à la recherche de l'eau dans l'Univers

**Fabrice Herpin**



[herpin@obs.u-bordeaux1.fr](mailto:herpin@obs.u-bordeaux1.fr)

**Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux**





# Qu'est-ce qu'un rayonnement ?

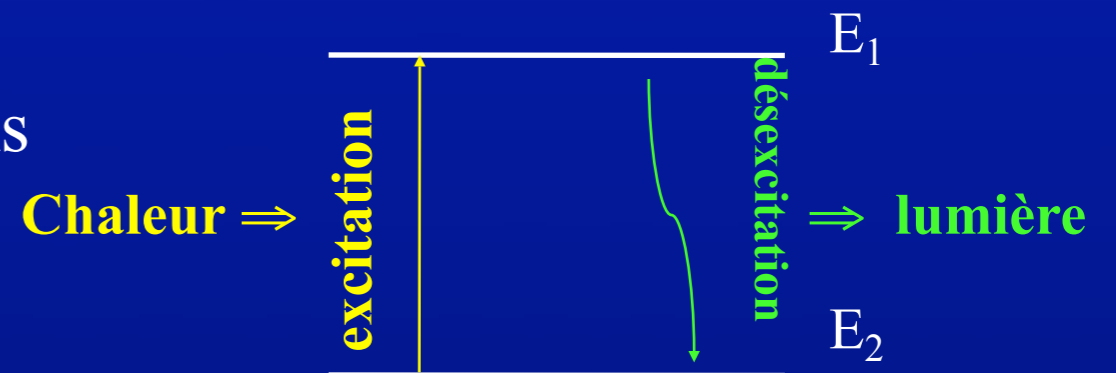
## Les ondes e.m. d'origine spatiale

Provenance: **molécules dans l'espace émettent des ondes électromagnétiques**  
(exemple : lumière visible)

Plus précisément : **Pourquoi un atome émet-il des ondes radio ?**

→ *fer qu'on chauffe au rouge* ⇒ *lumière émise*

La mécanique quantique nous apprend qu'un *atome ou une molécule* ne peut exister que dans des **états d'énergie** bien définis.



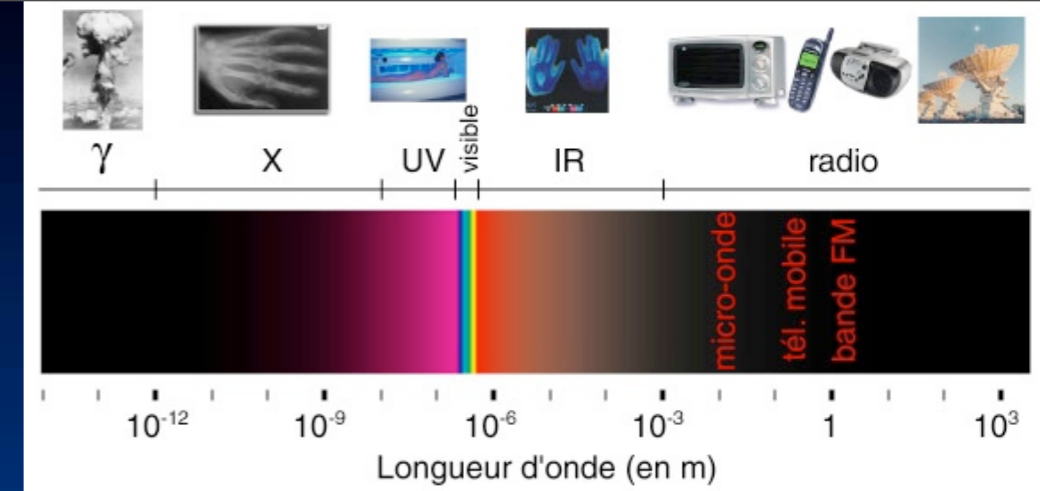
Quand un atome passe d'un niveau d'énergie  $E_1$  à un autre d'énergie inférieure  $E_2$  il y a **émission d'un photon**, c'est-à-dire d'une certaine quantité d'onde e.m. dont la fréquence est très simplement liée à la différence entre  $E_1$  et  $E_2$ .

L'émission de chaque atome est très faible, mais vu l'immensité des espaces interstellaires, l'émission totale sera parfaitement détectable.

De la même manière qu'en tournant le bouton d'un récepteur radio l'on s'accorde sur la fréquence d'une station, les spectromètres d'une antenne s'accordent sur les fréquences émises par les molécules, ce qui facilite leur identification.

**En effet l'émission ne se fait qu'à des fréquences bien déterminées  
= carte d'identité de la molécule**

# Les longueurs d'onde

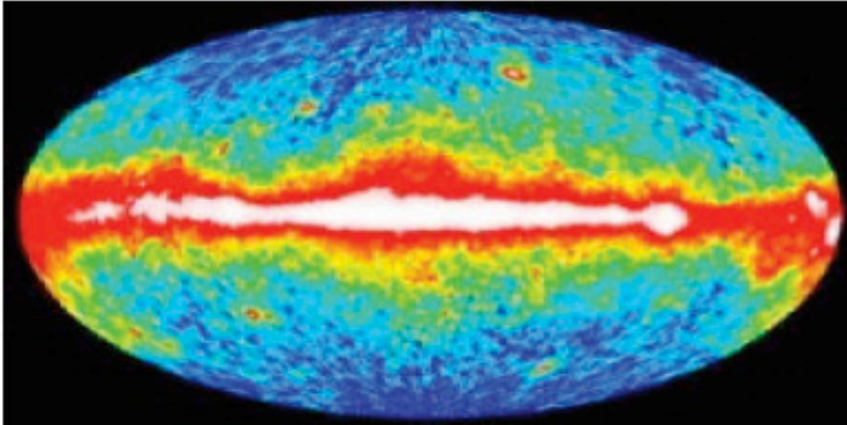


Type Of Radiation	Characteristic Temperature	Objects Emitting This Type of Radiation
<u>Gamma rays</u>	more than $10^8$ Kelvin (K)	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Interstellar clouds where cosmic rays collide with hydrogen nuclei</li> <li>* Accretion disks around black holes</li> <li>* Pulsars or Neutron Stars</li> </ul>
<u>X-rays</u>	$10^6$ - $10^8$ K	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Regions of hot, shocked gas</li> <li>* Gas in dusters of galaxies</li> <li>* Neutron stars</li> <li>* Supernova remnants</li> <li>* Stellar corona</li> </ul>
<u>Ultraviolet</u>	$10^4$ - $10^6$ K	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Supernova remnants</li> <li>* Very hot stars</li> <li>* Quasars</li> </ul>
<u>Visible</u>	$10^3$ - $10^4$ K	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Planets</li> <li>* Stars</li> <li>* Galaxies</li> <li>* Reflection nebulae</li> <li>* Emission nebulae</li> </ul>
<u>Infrared</u>	$10$ - $10^3$ K	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Cool stars</li> <li>* Star Forming Regions</li> <li>* Interstellar dust warmed by starlight</li> <li>* Planets</li> <li>* Comets</li> <li>* Asteroids</li> </ul>
<u>Radio</u>	less than 10 K	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Cosmic Background Radiation</li> <li>* Scattering of free electrons in interstellar plasmas</li> <li>* Cold interstellar medium</li> <li>* Regions near neutron stars</li> <li>* Regions near white dwarfs</li> <li>* Supernova remnants</li> <li>* Dense regions of interstellar space (e.g. near the galactic center)</li> <li>* Cold, dense parts of the interstellar medium - concentrated in the spiral arms of galaxies in molecular clouds (often the site of star formation).</li> <li>* Cold molecular clouds</li> </ul>

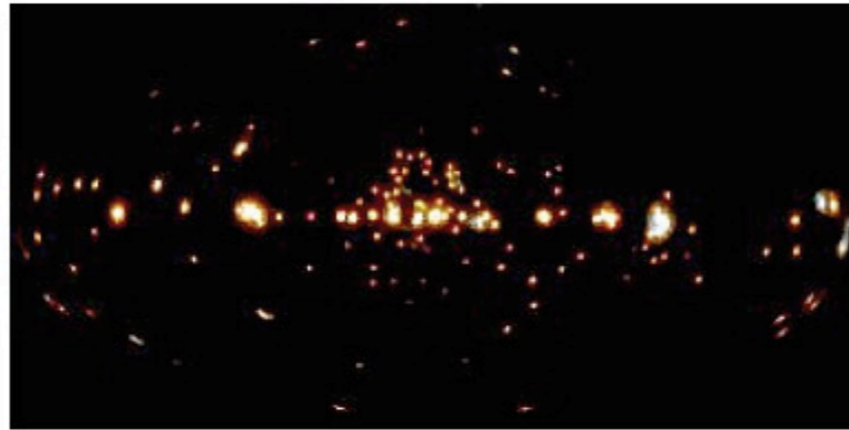
- $5 \cdot 10^{16}$  Hz ( $< 0.01$  nm)
- $5 \cdot 10^{16}$  -  $5 \cdot 10^{19}$  Hz (0.01-10 nm)
- $10^{15}$  -  $5 \cdot 10^{16}$  Hz (10 nm - 0.4  $\mu$ m)
- $6 \cdot 10^{14}$  -  $10^{15}$  Hz (0.4 - 0.8  $\mu$ m)
- $5 \cdot 10^{11}$  -  $6 \cdot 10^{14}$  Hz (0.8  $\mu$ m - 1 mm)
- 300 Hz -  $5 \cdot 10^{11}$  Hz (1 mm - 2000 km)



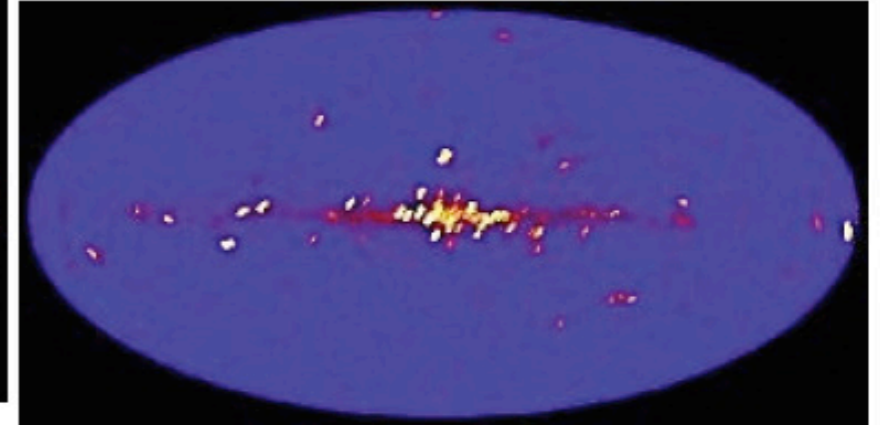
# Notre Galaxie



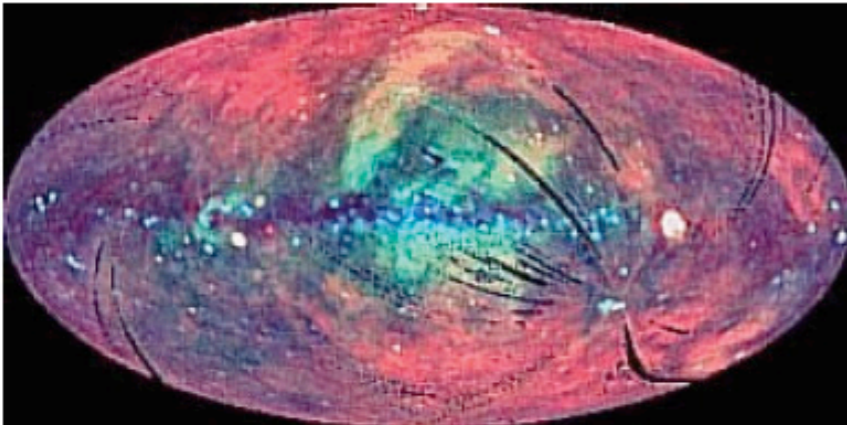
Gamma-Ray >100MeV (CGRO, NASA)



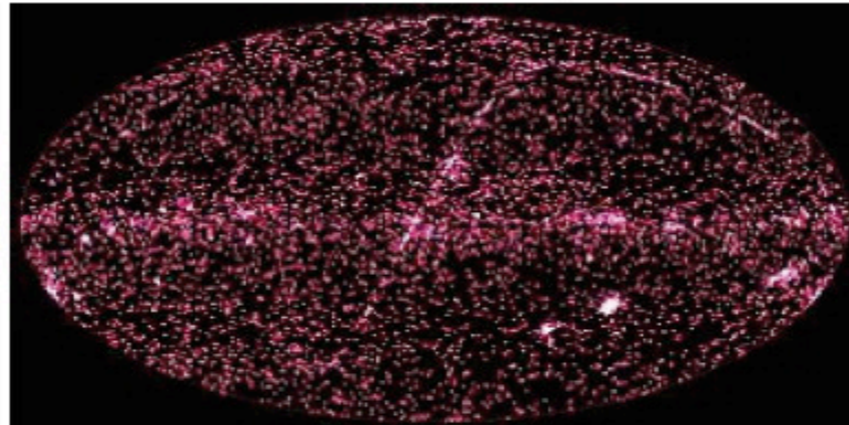
Gamma-Ray (N. Gehrels et.al. GSFC, EGRET, NASA)



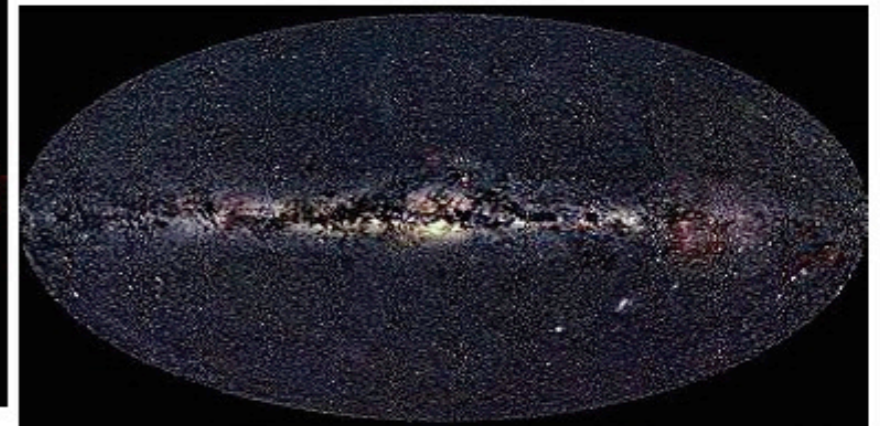
X-Ray 2-10keV (HEAO-1, NASA)



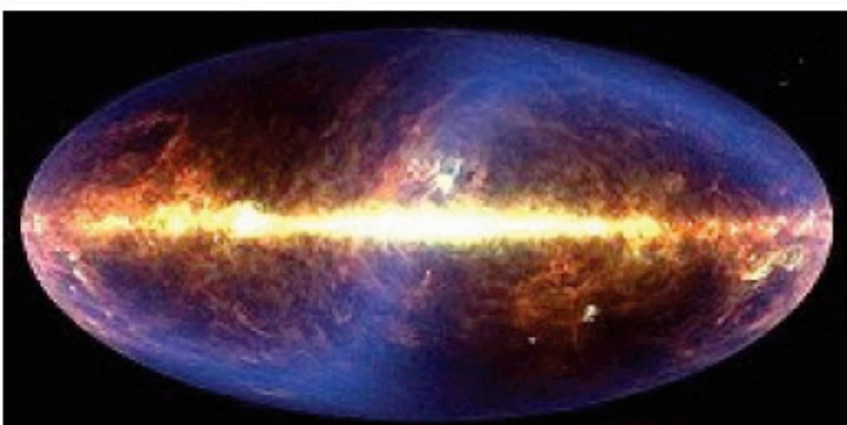
X-Ray 0.25, 0.75, 1.5 keV (S. Digel et. al. GSFC, ROSAT, NASA)



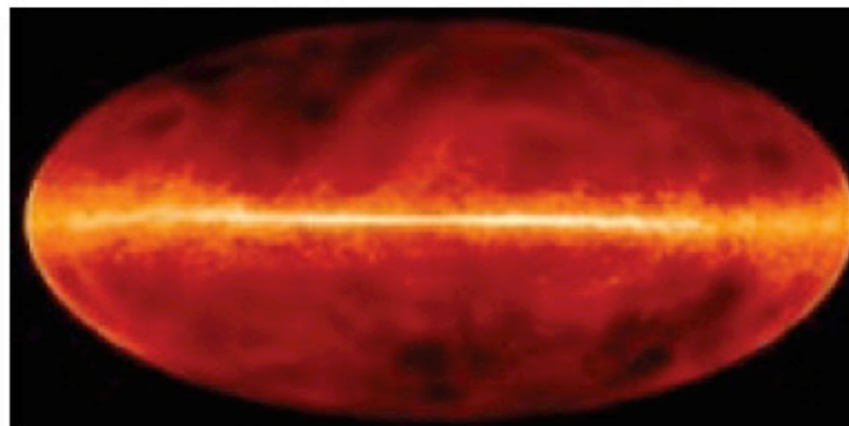
Ultraviolet (J. Bonnell et.al.(GSFC), NASA)



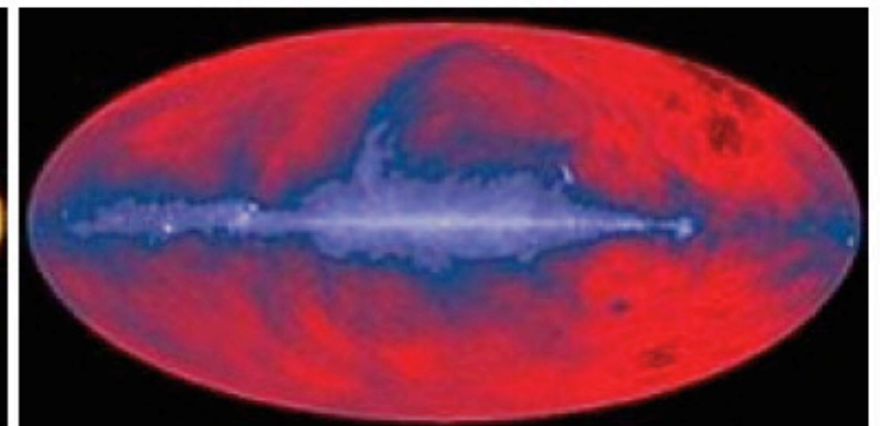
Visible (Axel Mellinger)



Infrared (DIRBE Team, COBE, NASA)

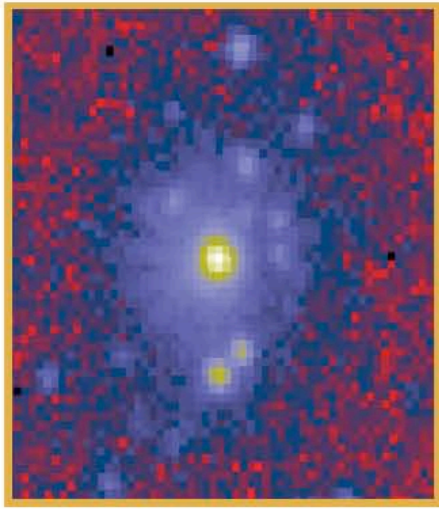


Radio 1420MHz (J. Dickey et.al. UMn, NRAO SkyView)

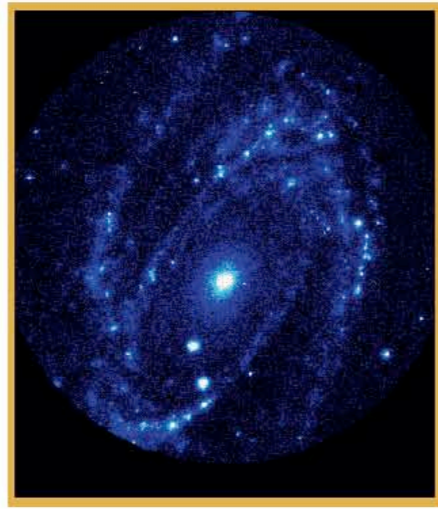


Radio 408MHz (C. Haslam et al., MPIfR, SkyView)





X-Ray (ROSAT)



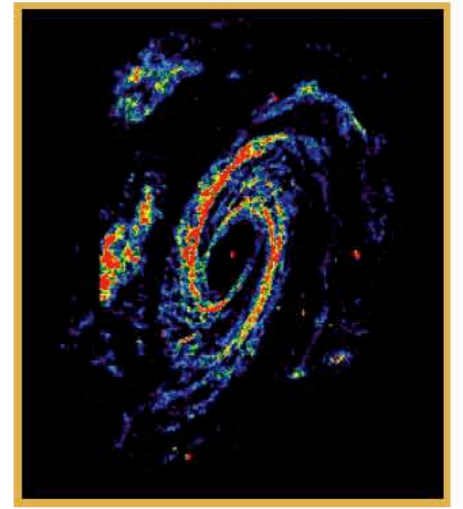
Ultraviolet (ASTRO-1)



Visible (R. Gendler)

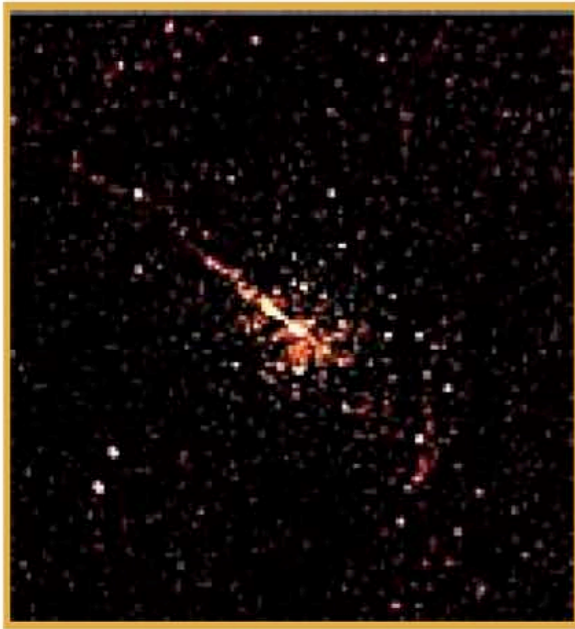


Infrared (Spitzer)



Radio (VLA)

## M81



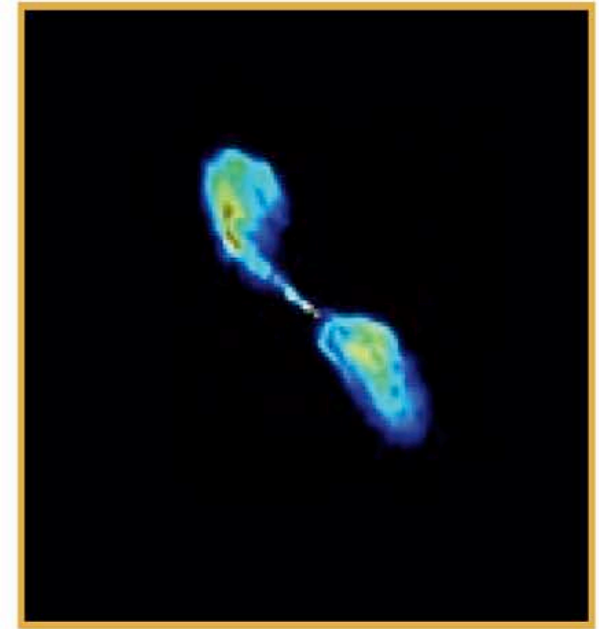
X-Ray (CXO)



Visible (Malin/AAO)



Infrared (ISO)



Radio (VLA)

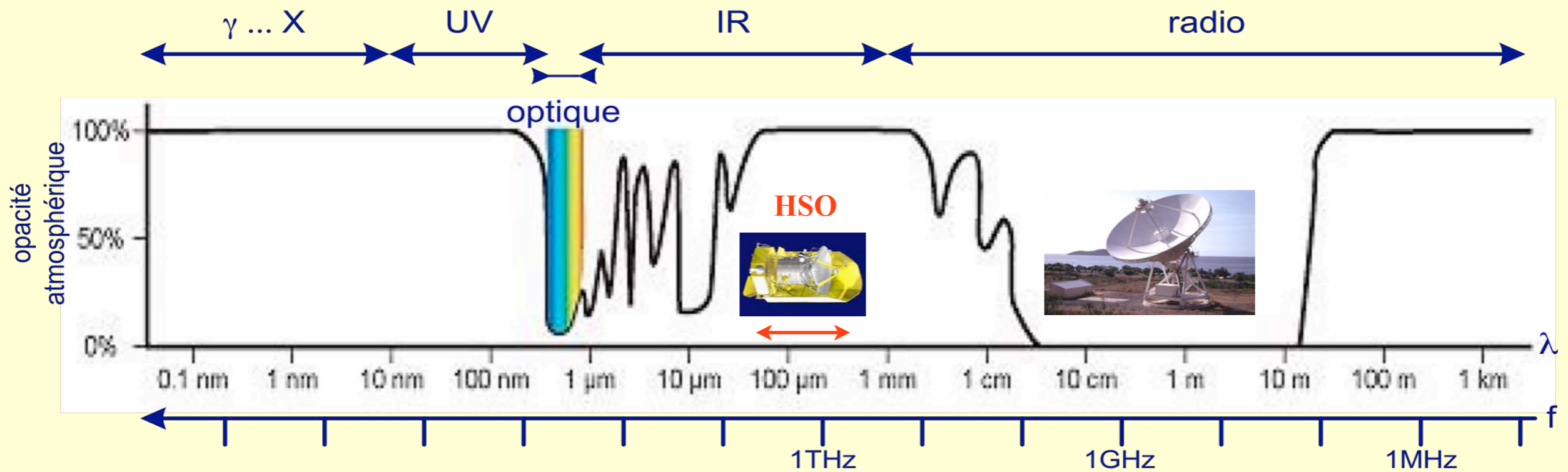
## Centaurus A



# RadioAstronomie

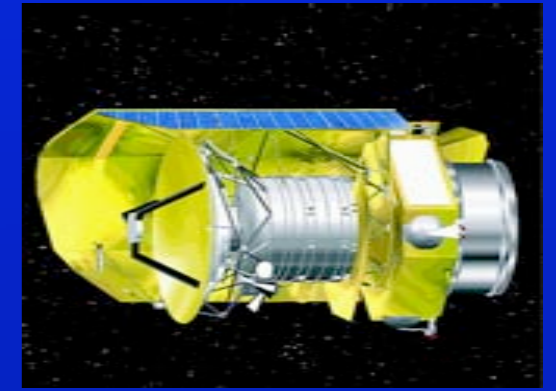
= quelques MHz (+ km de longueur d'ondes) à plusieurs THz (sub-millimétrique).  
Cependant, au delà de plusieurs dizaines de GHz, le spectre complet n'est observable que de l'espace, seules quelques 'fenêtres' radio sont accessibles du sol (110, 220, 320 GHz...)

## Observations sol/espace





# Le satellite Herschel Space Observatory



ESA

**Mise en orbite le 16 avril 2009**

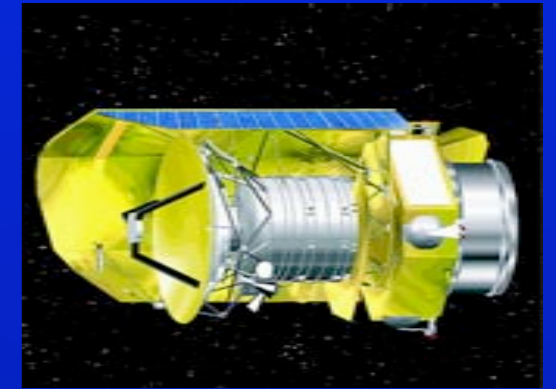
- **Durée de vie > 3 ans**
- **imagerie, photométrie, spectroscopie**
- **1<sup>er</sup> observatoire spatial couvrant complètement l'IR lointain ~ 60-670  $\mu\text{m}$**
- **3 instruments à bord : PACS, SPIRE, HIFI**
- **diamètre du télescope 3.5 m**
- **température du télescope 70-90 K**
- **hauteur 9 m**
- **masse au lancement 3300 kg**
- **lancement avec le satellite Planck puis séparation après insertion dans la trajectoire de transfert**
- **orbite L2**

*crédits ESA*





# Le satellite Herschel Space Observatory



ESA

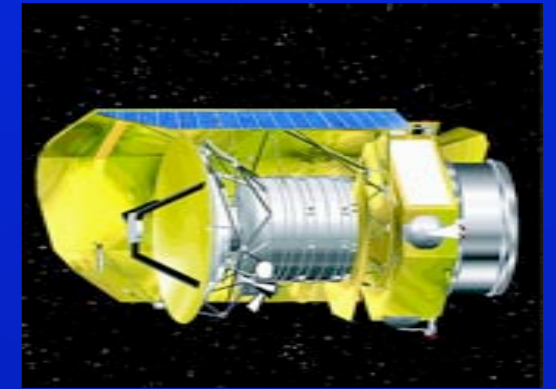
**Mise en orbite le 16 avril 2009**

- **Durée de vie > 3 ans**
- **imagerie, photométrie, spectroscopie**
- **1<sup>er</sup> observatoire spatial couvrant complètement l'IR lointain ~ 60-670  $\mu\text{m}$**
- **3 instruments à bord : PACS, SPIRE, HIFI**
- **diamètre du télescope 3.5 m**
- **température du télescope 70-90 K**
- **hauteur 9 m**
- **masse au lancement 3300 kg**
- **lancement avec le satellite Planck puis séparation après insertion dans la trajectoire de transfert**
- **orbite L2**

*crédits ESA*



# Le satellite Herschel Space Observatory



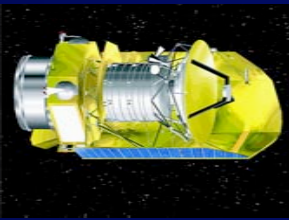
ESA

**Mise en orbite le 16 avril 2009**

- **Durée de vie > 3 ans**
- **imagerie, photométrie, spectroscopie**
- **1<sup>er</sup> observatoire spatial couvrant complètement l'IR lointain ~ 60-670  $\mu\text{m}$**
- **3 instruments à bord : PACS, SPIRE, HIFI**
- **diamètre du télescope 3.5 m**
- **température du télescope 70-90 K**
- **hauteur 9 m**
- **masse au lancement 3300 kg**
- **lancement avec le satellite Planck puis séparation après insertion dans la trajectoire de transfert**
- **orbite L2**

*crédits ESA*





# Herschel Space Observatory = 3 instruments

## PACS



*Photodetector Array Camera  
& Spectrometer*

**Photomètre  
imageur**

**Spectromètre de  
champ intégral**

60-90 ou 90-130  $\mu\text{m}$   
et 130-210  $\mu\text{m}$

57 - 210  $\mu\text{m}$ , 5x5  
pixels

## SPIRE



*Spectral and Photometric Imaging  
Receiver*

**Photo-imageur**

**Spectromètre imageur**

Simultanément  
250, 350  
et 500  $\mu\text{m}$

200-300  $\mu\text{m}$   
300-670  $\mu\text{m}$

## HIFI = Spectromètre hétérodyne à très haute résolution

*= construit au LAB (Bordeaux) / CESR (Toulouse)*

### HIFI = WBS + HRS

### modes d'observation :

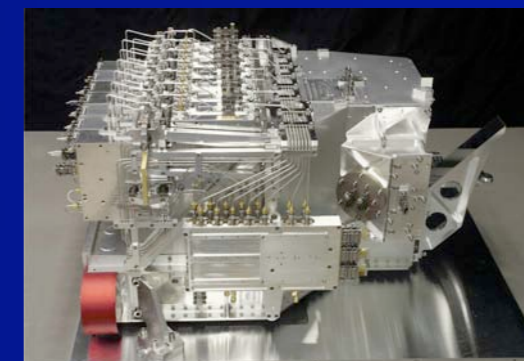
Heterodyne Instrument for the Far-IR  
**Spectromètre hétérodyne à très haute  
résolution**

**bandes 1-5 : 240-625  $\mu\text{m}$**

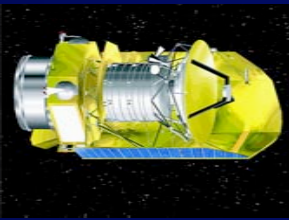
**bandes 6-7 : 157-213  $\mu\text{m}$**

• **WBS** = Wide Band  
Spectrometer

• **HRS** = High Resolution  
Spectrometer



*crédits ESA*



# Herschel Space Observatory = 3 instruments

## PACS



*Photodetector Array Camera  
& Spectrometer*

**Photomètre  
imageur**

**Spectromètre de  
champ intégral**

60-90 ou 90-130  $\mu\text{m}$   
et 130-210  $\mu\text{m}$

57 - 210  $\mu\text{m}$ , 5x5  
pixels

## SPIRE



*Spectral and Photometric Imaging  
Receiver*

**Photo-imageur**

**Spectromètre imageur**

Simultanément  
250, 350  
et 500  $\mu\text{m}$

200-300  $\mu\text{m}$   
300-670  $\mu\text{m}$

## HIFI = Spectromètre hétérodyne à très haute résolution

*= construit au LAB (Bordeaux) / CESR (Toulouse)*

### HIFI = WBS + HRS

modes d'observation :

Heterodyne Instrument for the Far-IR  
**Spectromètre hétérodyne à très haute  
résolution**

• **WBS** = Wide Band  
Spectrometer

• **HRS** = High Resolution  
Spectrometer

bandes 1-5 : 240-625  $\mu\text{m}$

bandes 6-7 : 157-213  $\mu\text{m}$



crédits ESA



# Quelle science avec le HSO ?

- **formation et évolution des galaxies**
  - Comment et quand se sont formées les galaxies ?
  - Existe-t-il une population inconnue de galaxies IR à grand redshift ?
  - **taux de formation stellaire ?**  
**Noyaux actifs de galaxies**
- **Formation stellaire et physique du milieu interstellaire**
  - Comment les étoiles se forment-elles ?
  - Circulation et enrichissement du milieu interstellaire - astrochimie
  - **eau**
- **Études cométaires, des atmosphères de planètes et satellites**
  - **histoire du système solaire, atmosphères des planètes géantes: composition, profils...**
  - **comètes**
  - **eau (spécialement sur Mars et les comètes)**

*crédits ESA*

# Quelle science avec le HSO ?

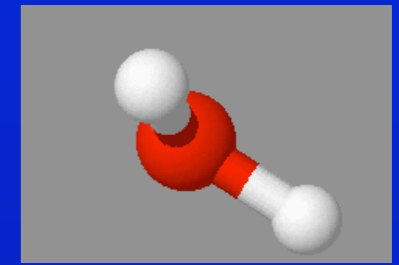


*crédits ESA*

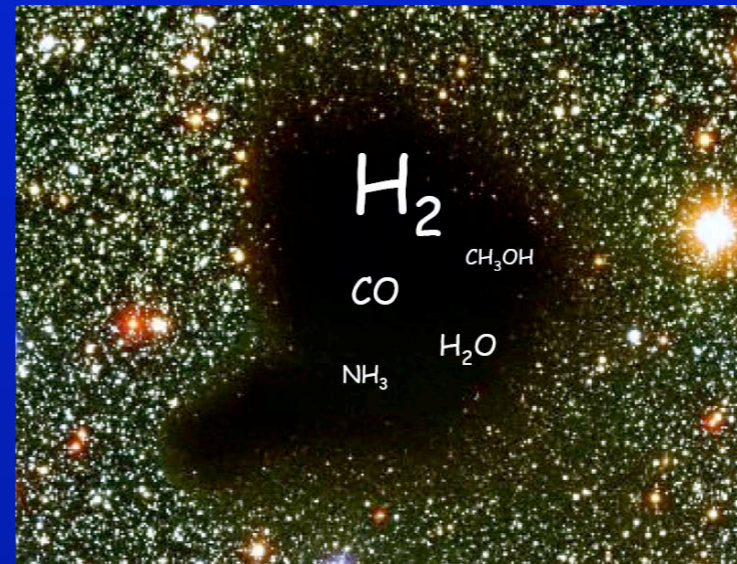
- **formation et évolution des galaxies**
  - Comment et quand se sont formées les galaxies ?
  - Existe-t-il une population inconnue de galaxies IR à grand redshift ?
  - **taux de formation stellaire ?**
    - Noyaux actifs de galaxies**
- **Formation stellaire et physique du milieu interstellaire**
  - Comment les étoiles se forment-elles ?
  - Circulation et enrichissement du milieu interstellaire - astrochimie
  - **eau**
- **Études cométaires, des atmosphères de planètes et satellites**
  - **histoire du système solaire, atmosphères des planètes géantes: composition, profils...**
  - **comètes**
  - **eau** (spécialement sur Mars et les comètes)



# Intérêt de l'eau ?

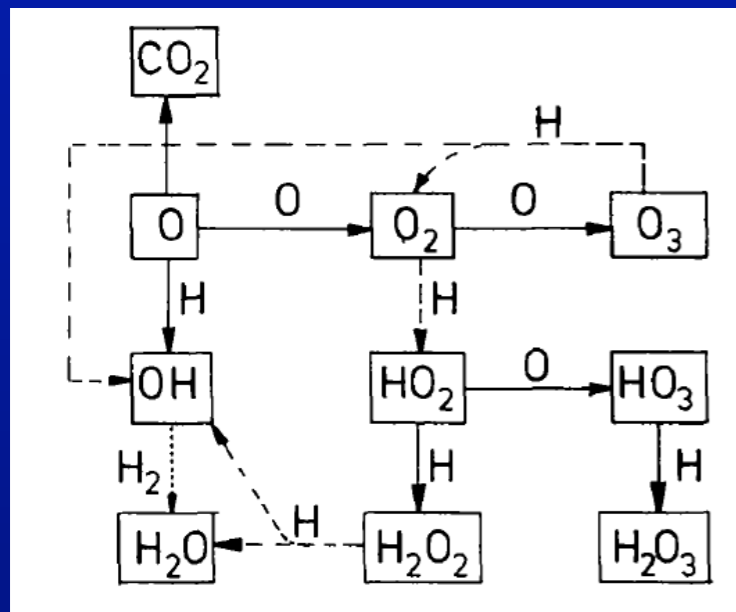


- espèce abondante
- chimie de l'oxygène
- agent de refroidissement
- origine de l'eau sur Terre ?
- origine de l'eau sur les autres planètes ?
- chimie de la vie fortement liée à l'eau

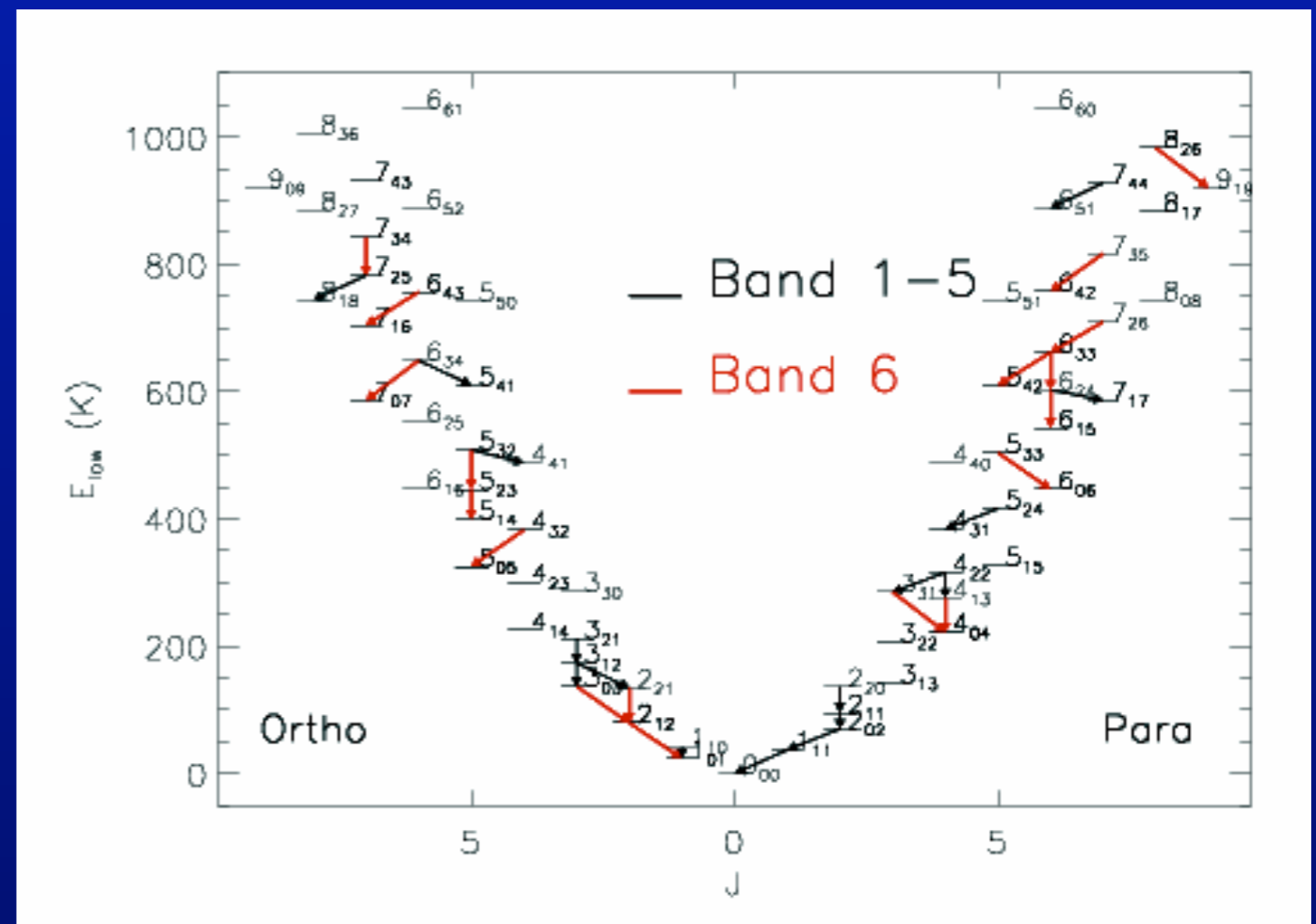


crédits ESO/Alvès

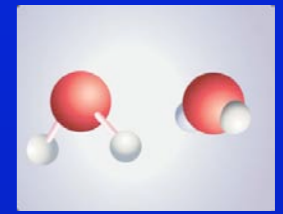
## Herschel : première observation complète de l'eau



Tielens & Hagen 1982



# Origine de l'eau



Pour fabriquer de l'eau, il faut de l'**hydrogène** et de l'**oxygène**.

Le **Big Bang** n'a créé que 2 éléments : l'**hydrogène** (80%) et l'**hélium** (20%).

Le **reste des éléments chimiques** (oxygène, carbone, fer...) a été formé ensuite à partir de H et He par transmutation nucléaire à l'**intérieur des premières générations d'étoiles**, qui ont existé avant que notre système solaire se forme

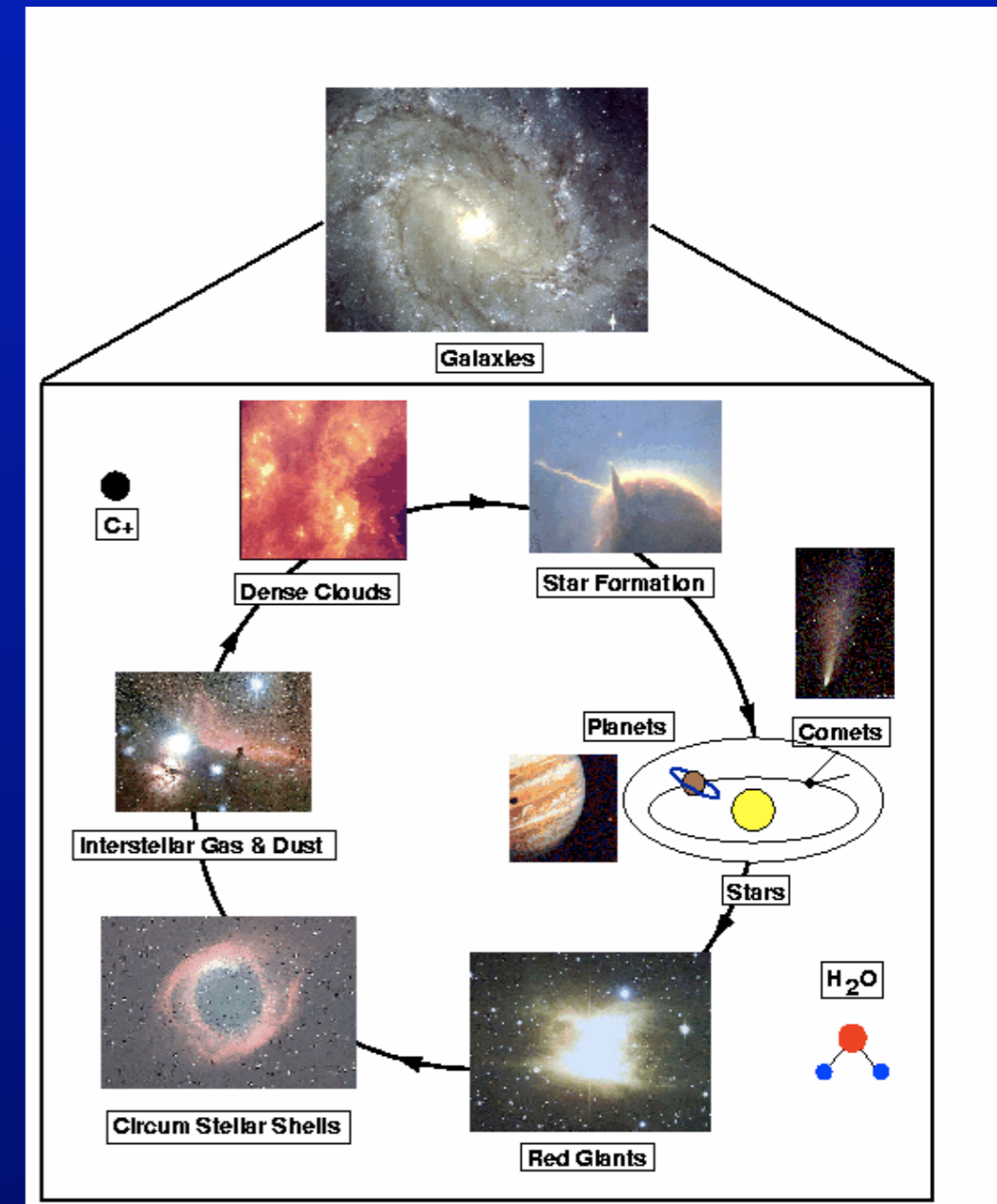
⇒ Soleil = objet de n<sup>ième</sup> génération + nous sommes nés des cendres des étoiles mortes !

**La synthèse de l'O et des autres éléments plus lourds continue actuellement dans en gros deux types d'étoiles :**

- celles plus massives que le soleil ⇒ Si, Ne, C, O, Fe
- étoiles de type solaire ⇒ O, Si, C

L'origine de l'eau sur la Terre est encore discutée :

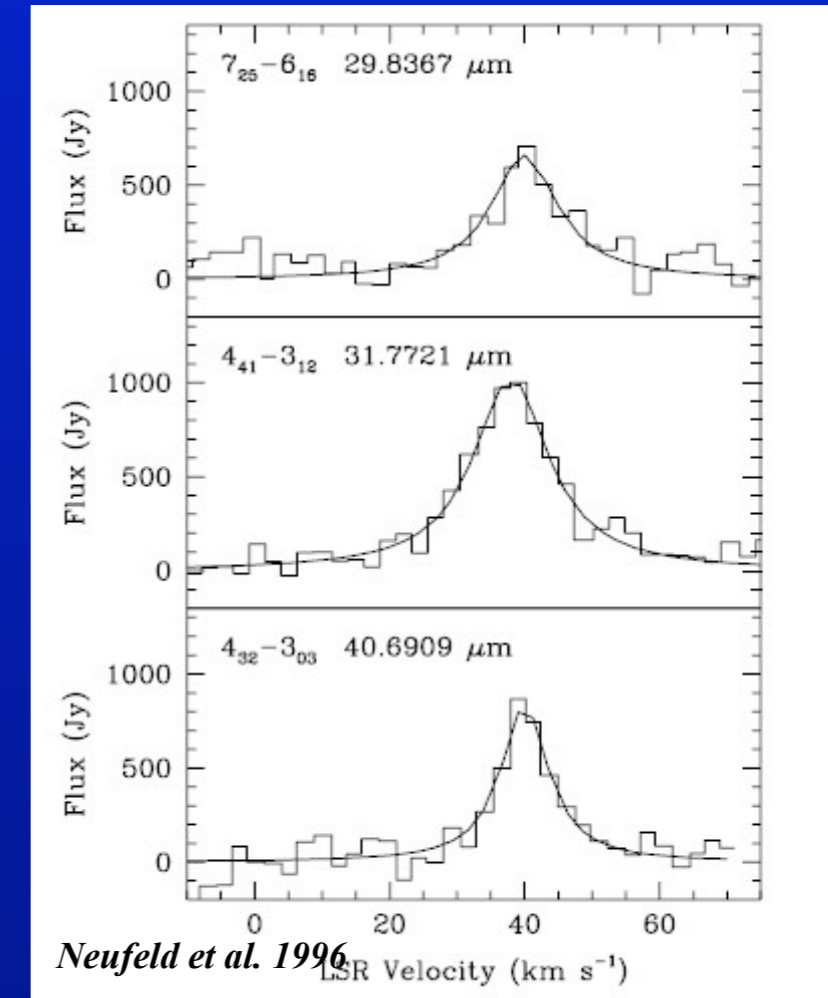
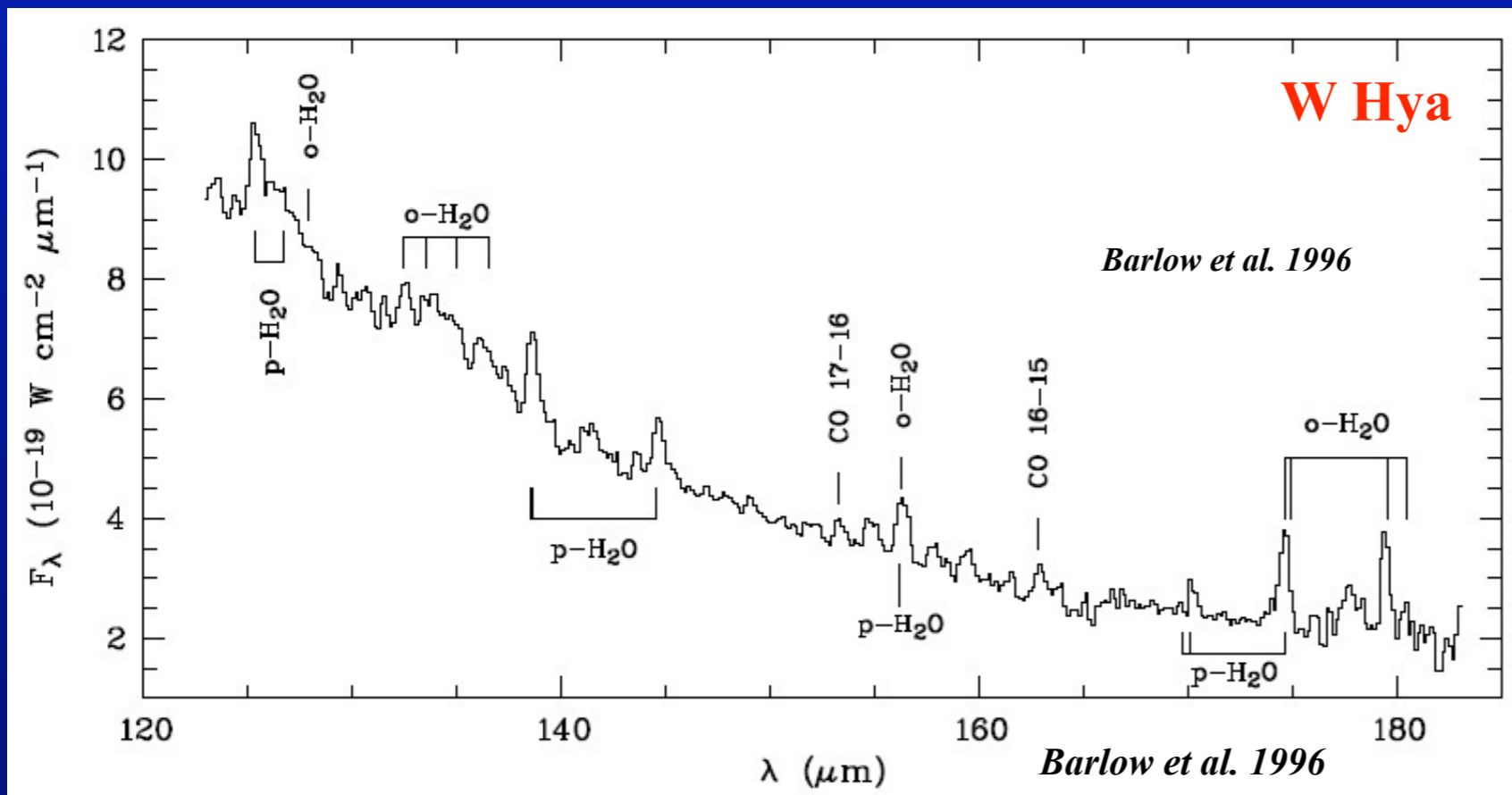
- ~~condensation de l'atmosphère primitive~~
- dégazage des parties internes de notre planète
- apport extraterrestre



# Objectifs des observations avec le HSO

## Etoiles évoluées : mieux comprendre la fin de vie des étoiles

- principal agent de refroidissement du gaz
- nombreuses détections par ISO
- perte de masse
- structure physique

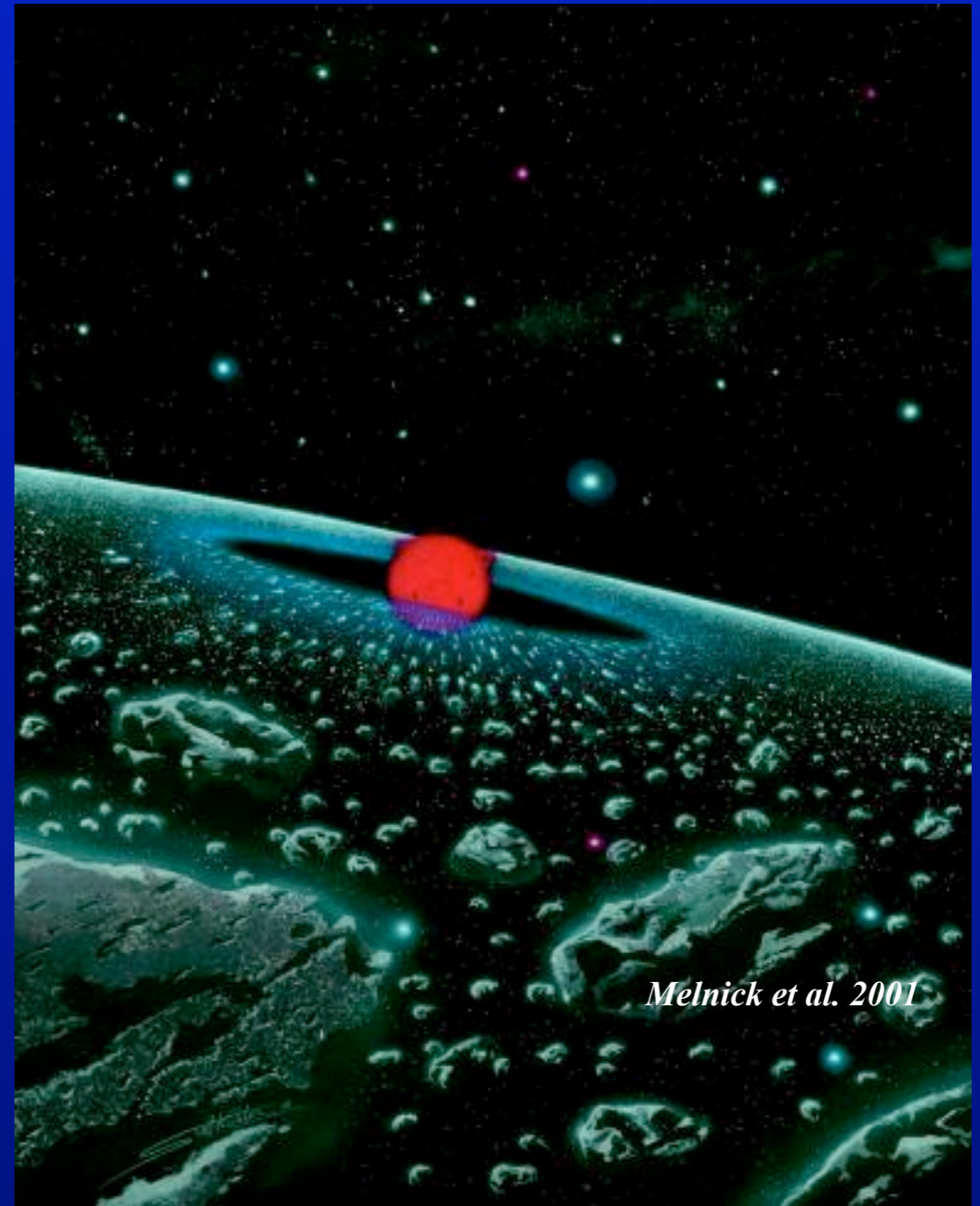




# L'eau dans les étoiles carbonées

## *Origine de l'eau (et autres espèces O) ?*

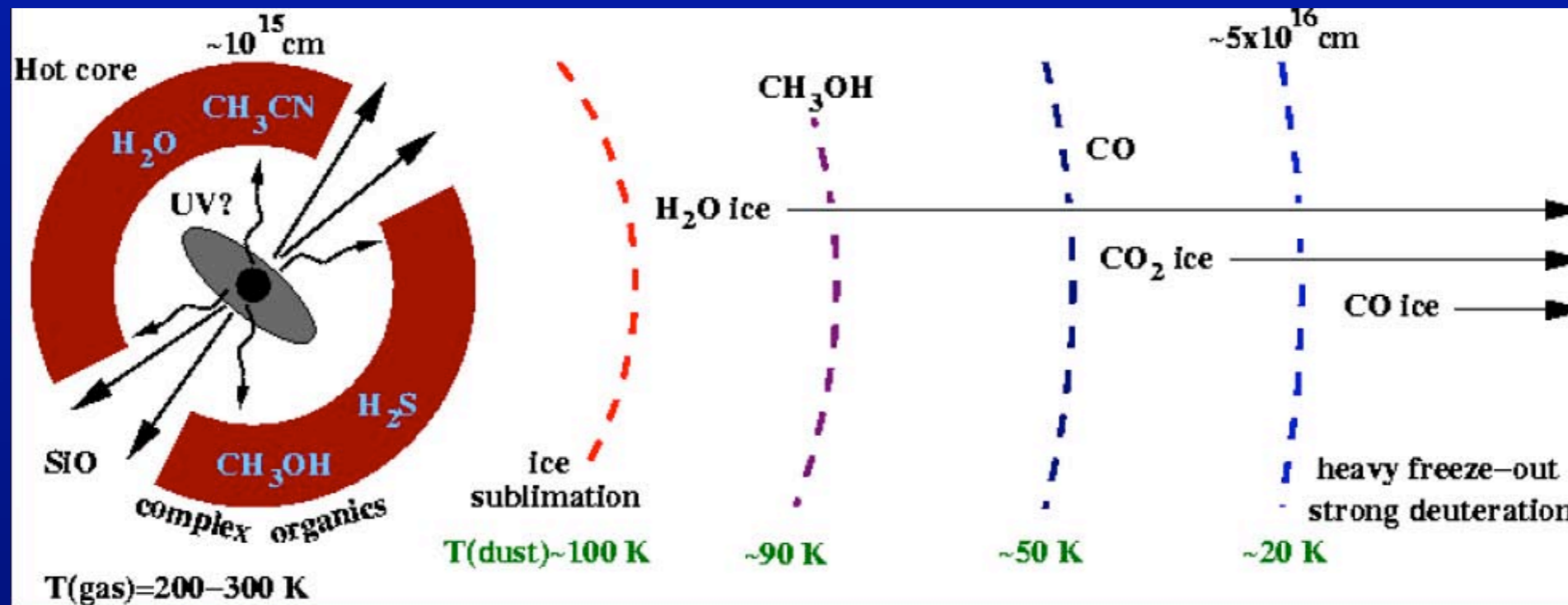
- Exemple: détection de l'eau dans IRC+10216
- évaporation de planétésimaux de glace ?





# Comprendre comment les étoiles se forment

- grandes variations d'abondance de  $H_2O$ 
    - ⇒ unique pour tester différentes régions/conditions physiques
  - principal réservoir d'oxygène
    - ⇒ conditionne la chimie "O"
  - caractérise différents stades d'évolution
- 
- $H_2O$  = sonde des mouvements de gaz (effondrement, éjection...)
  - $H_2O$  = rôle important dans l'équilibre thermique



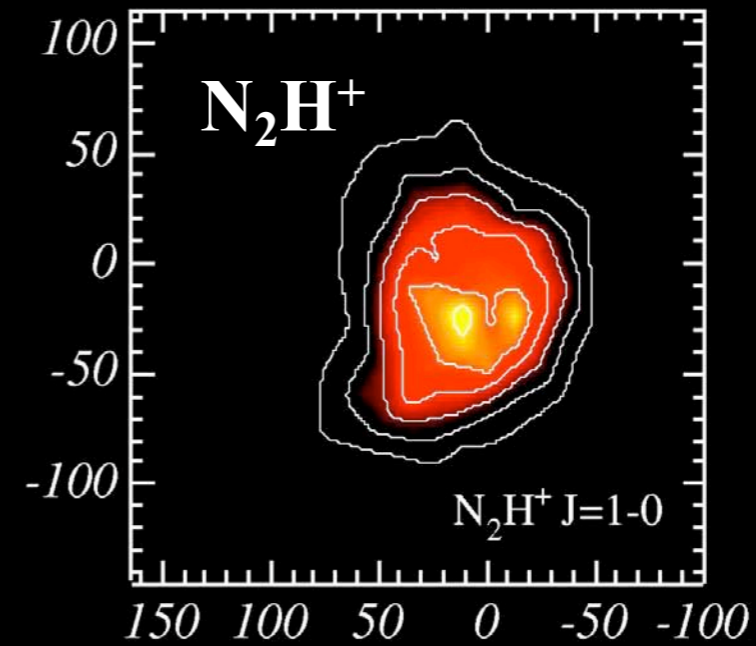
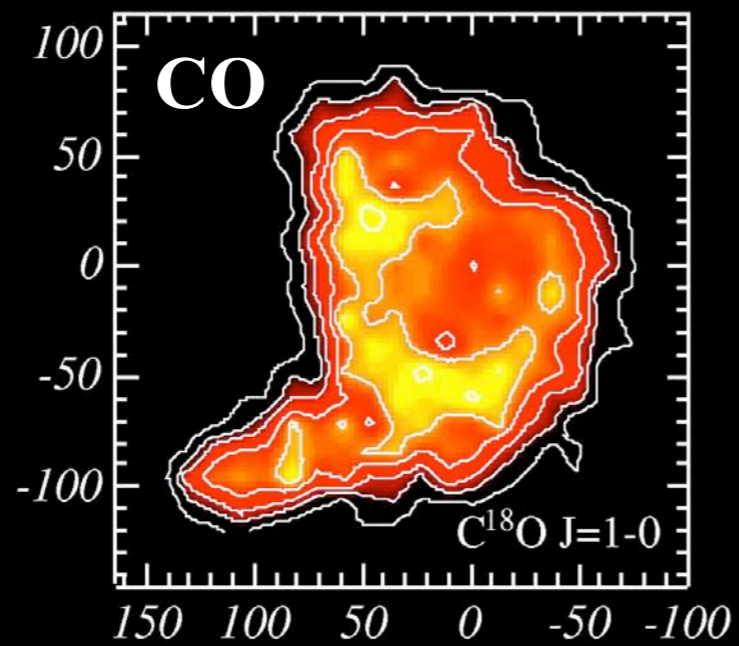
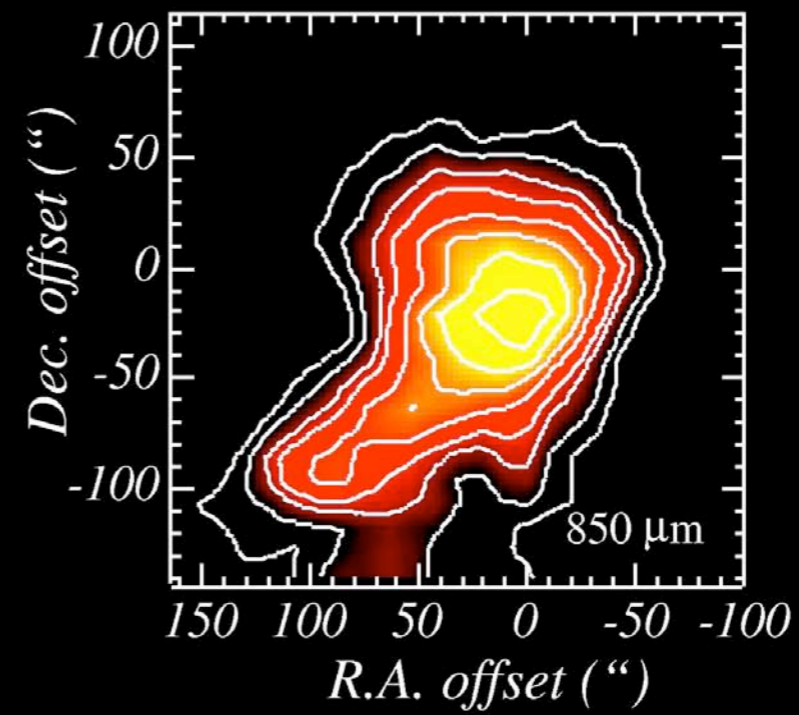
crédits E. van Dishoeck

# Etoiles de faible masse (= soleil)

B68



**Submm continuum**



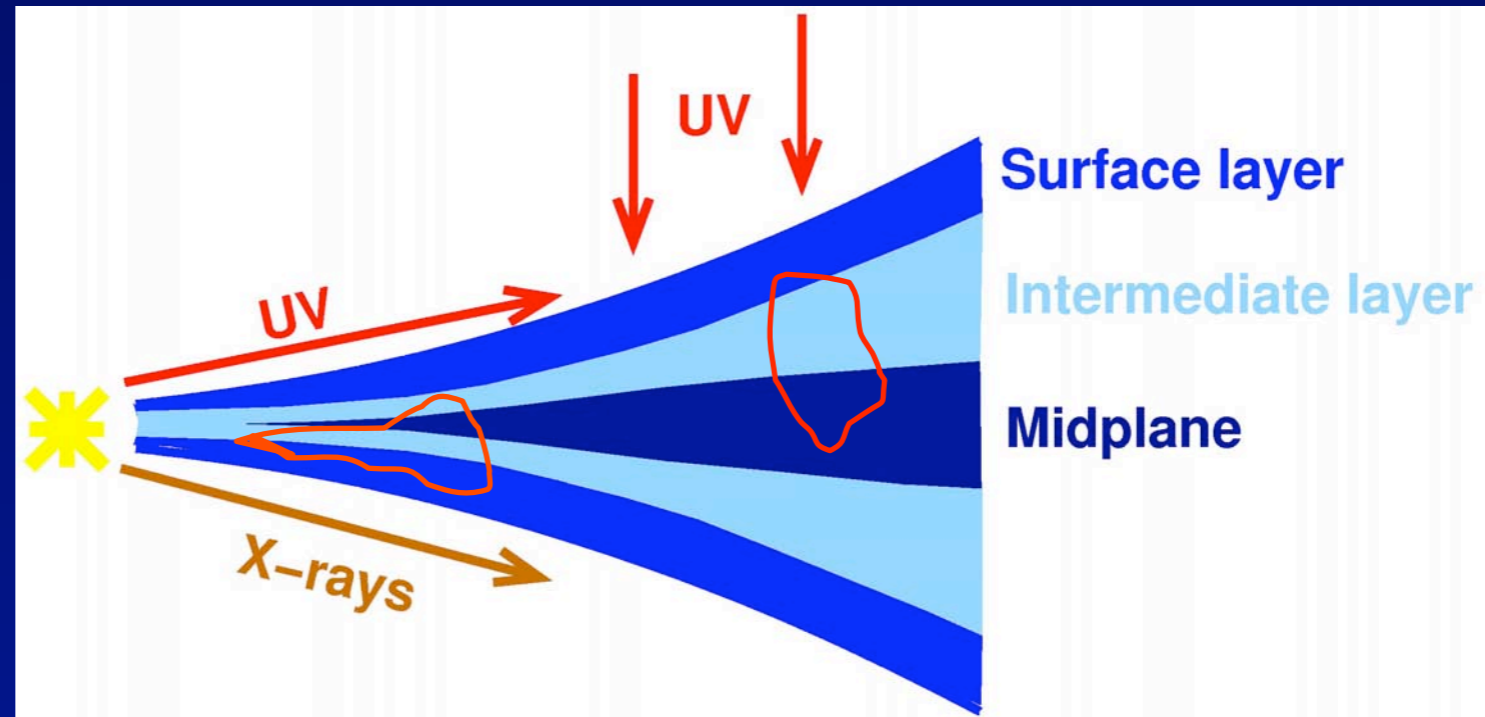
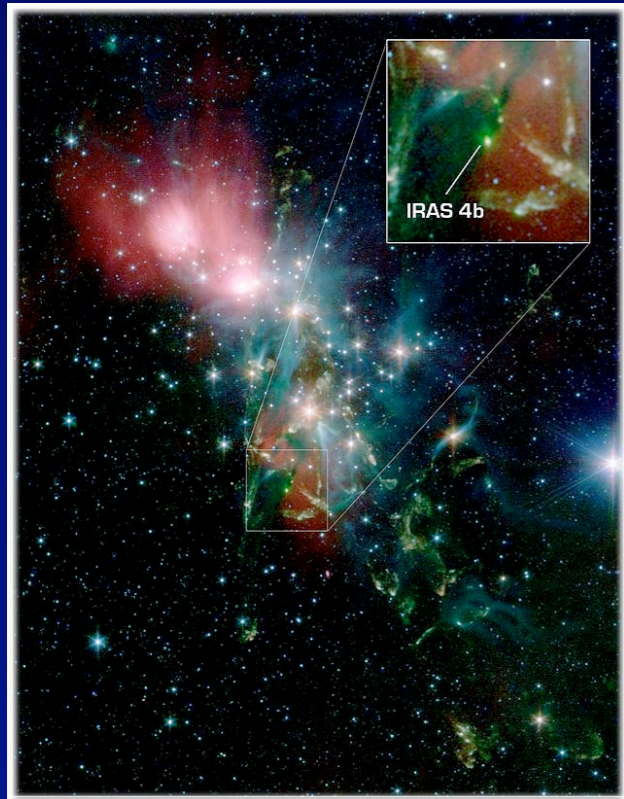
*Bergin & Snell 2002*



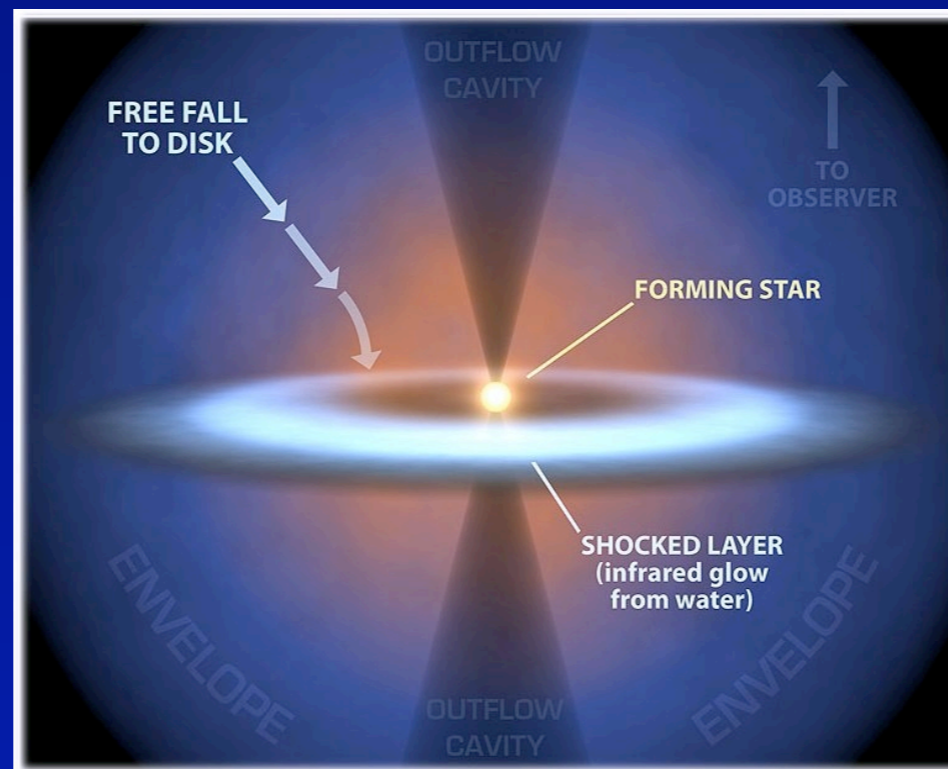
# Où est l'eau dans les disques proto-planétaires ?



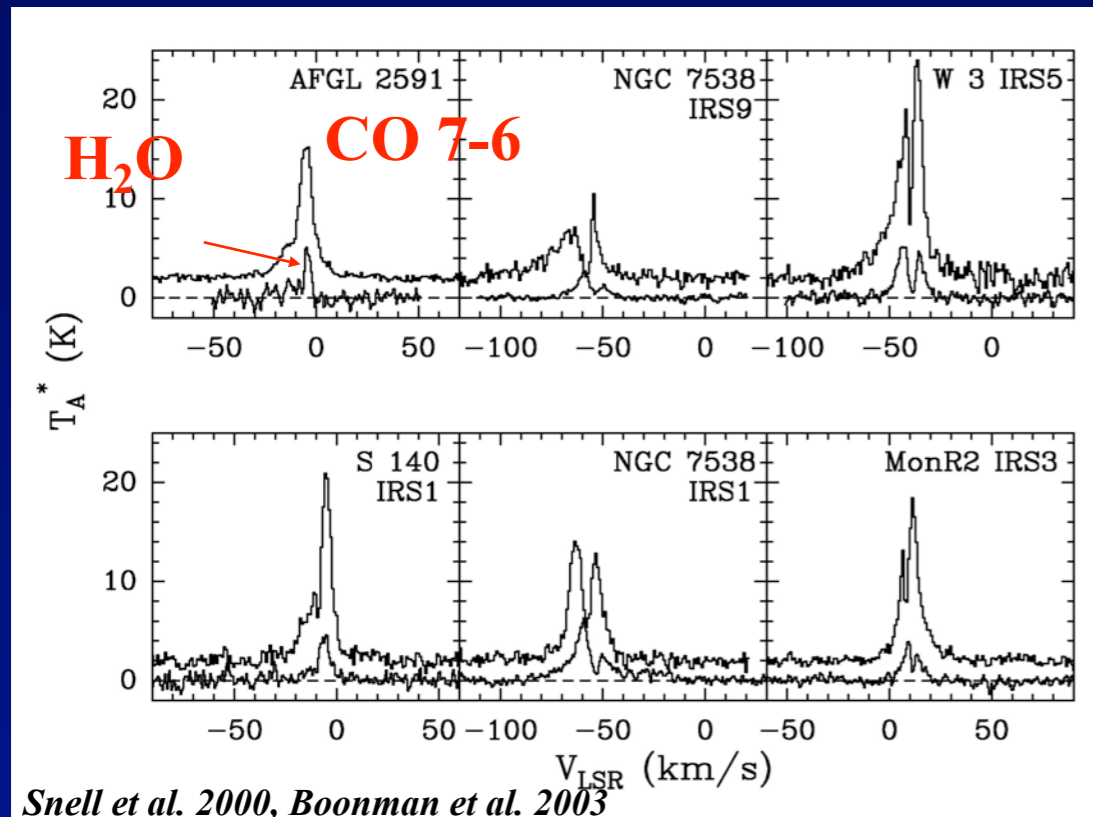
## Formation des systèmes planétaires



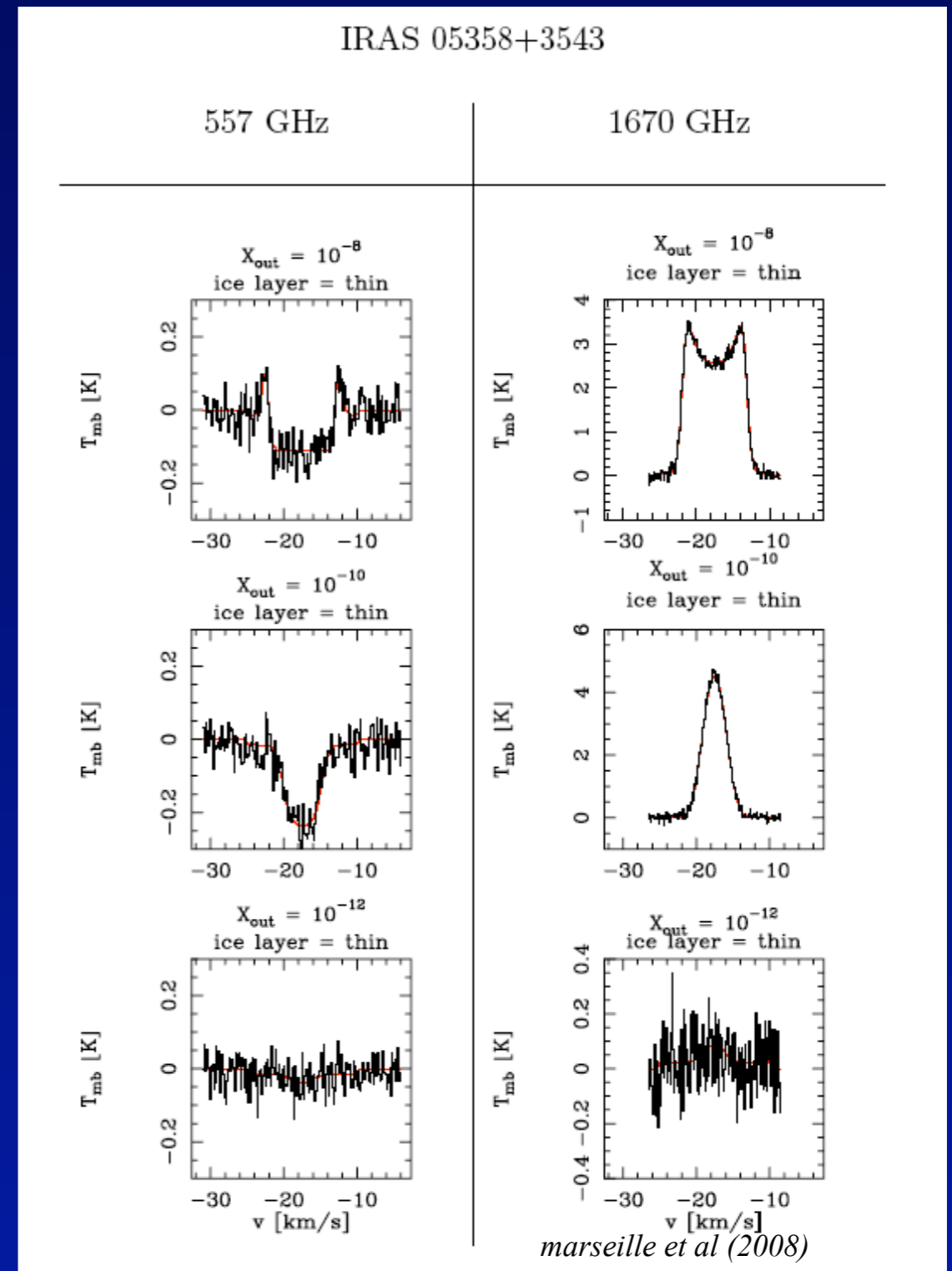
*crédits E. van Dishoeck*



# étoiles massives ( $> 6$ masses solaires)



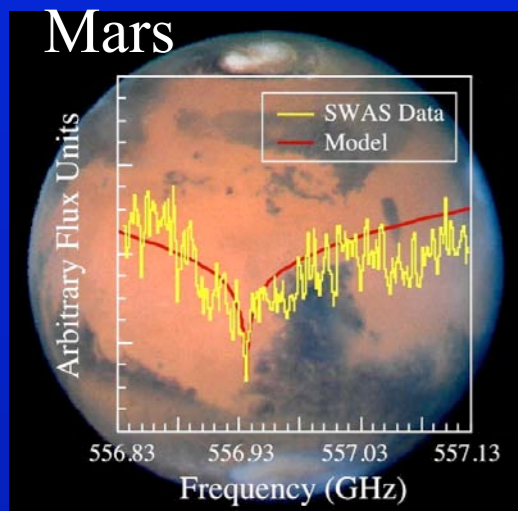
eau = régulateur thermique ?



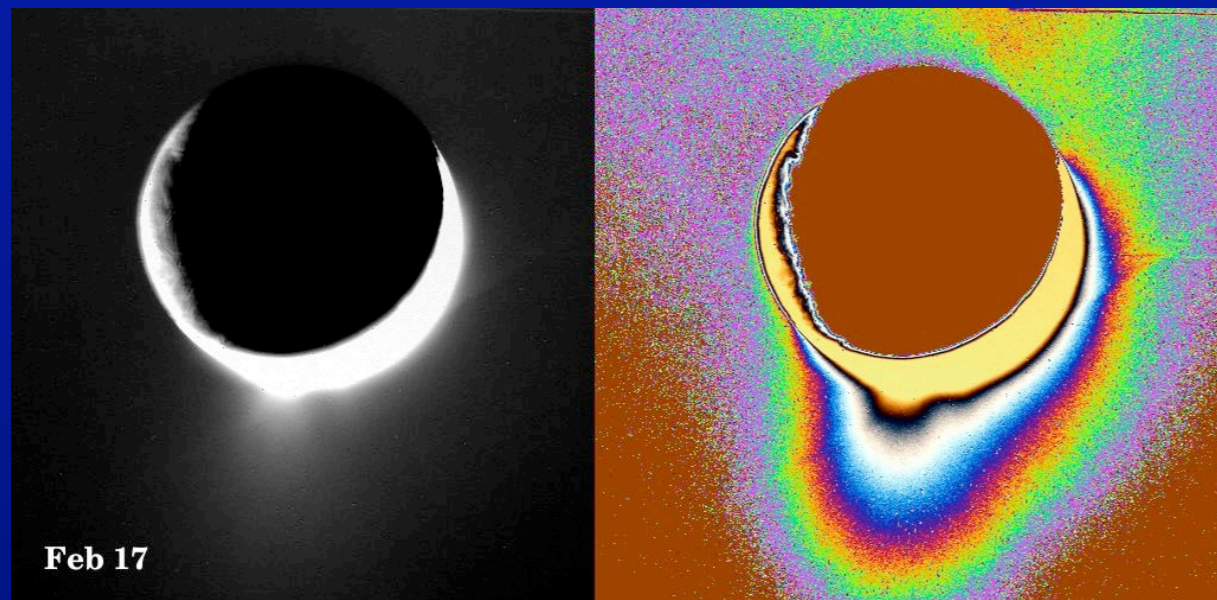
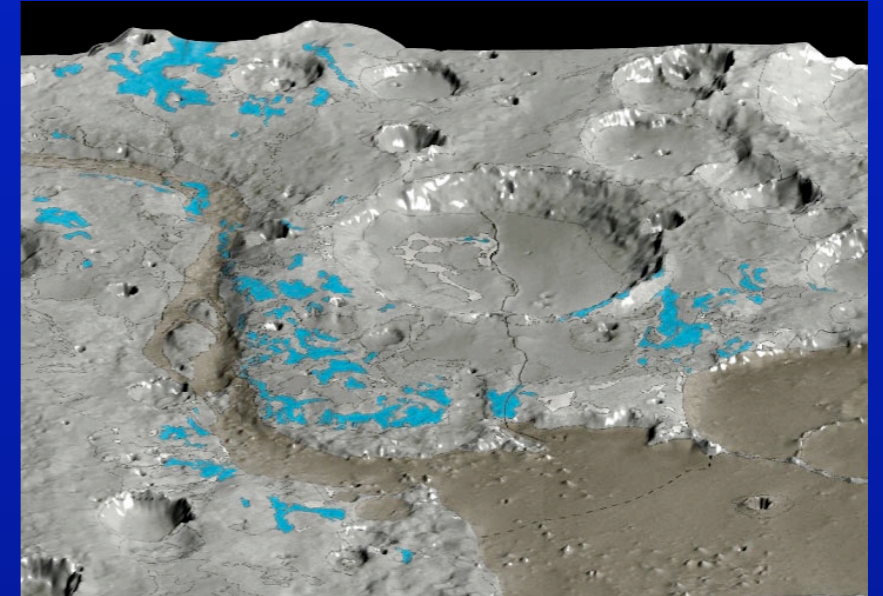


# L'eau dans système solaire

- un peu partout dans le système solaire : planètes, astéroïdes, comètes et météorites,
- surtout sous forme de glace ou emprisonnée dans les roches, ou dans les atmosphères.

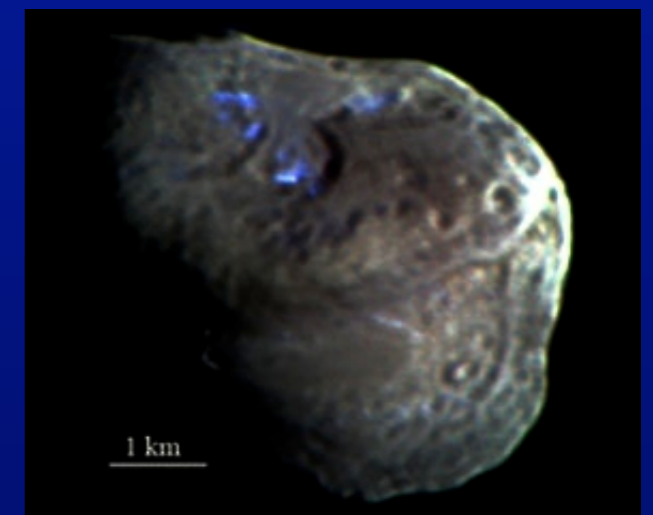


**Mars** : région Mawrth Vallis (gris), Mars Express a cartographié des minéraux riches en eau (bleu). Credits: ESA/OMEGA/HRSC

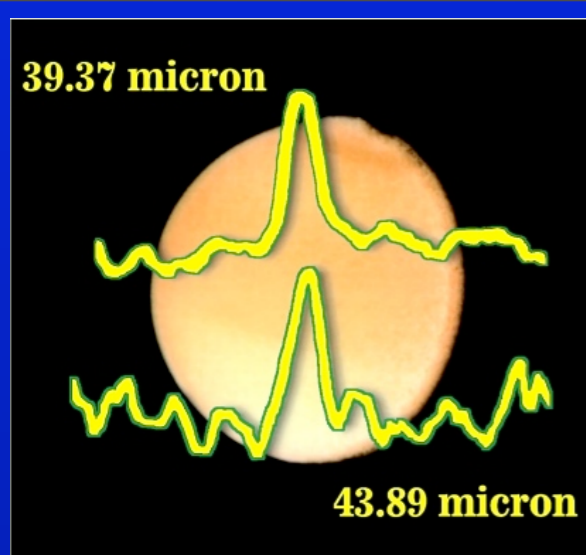


**Encelade** : “plumes” de glace au dessus du pôle sud (Cassini)  
Credits: NASA/JPL/Space Science Institute.

**Tempel 1** : glace d'eau en bleu , NASA's Deep Impact spacecraft. Photo credit: NASA.

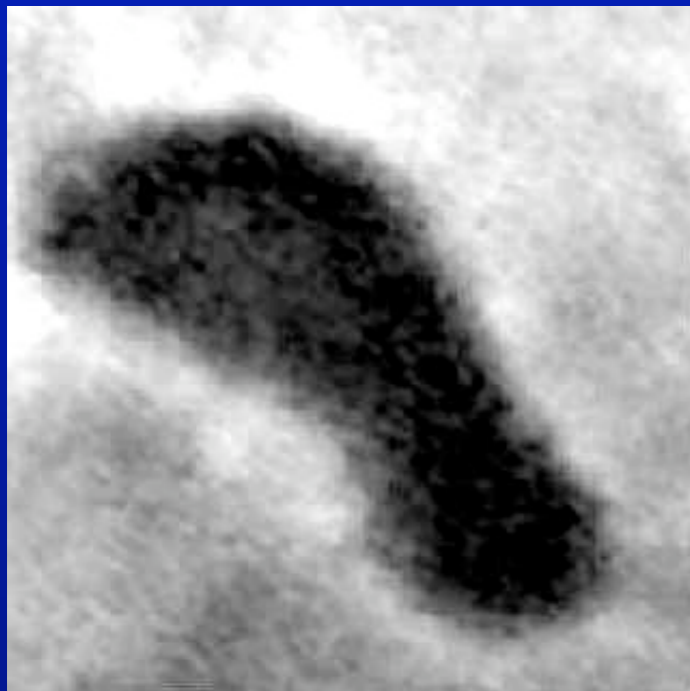
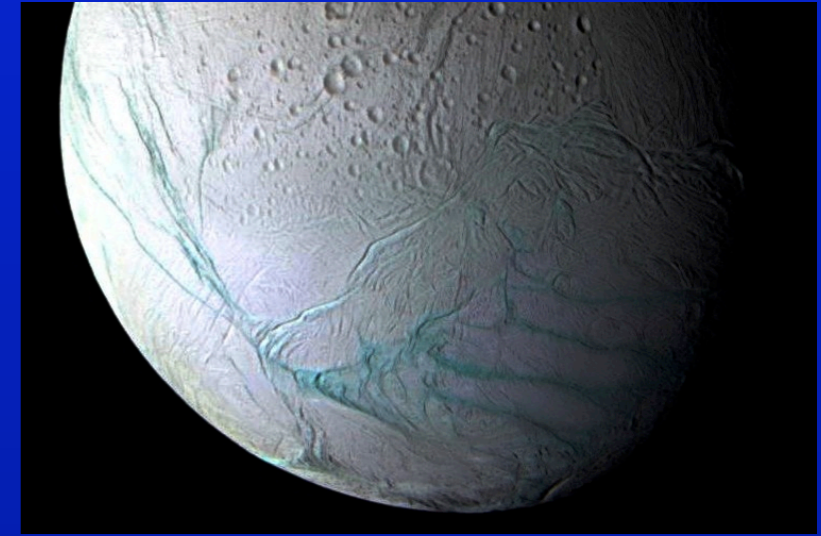






**Titan** : eau (European Space Agency's Infrared Space Observatory, ISO) Credits: Spectra: ESA/ISO/SWS et Coustenis/Salama et al. Photo: NASA / JPL

**Encelade** : pôle sud, vapeur d'eau et glace.  
Credits: ASA / JPL / Space Science Institute



**Titan** : lac d'hydrocarbure (Ontario lacus) vu par l'orbiteur de Cassini (NASA) = seul objet du syst. solaire à avoir du liquide à sa surface. Credits: NASA/JPL/University of Arizona.

En 2006 (Cassini, Hansen et al. , 2006) a été découvert sur Titan et peut-être Encelade un cycle volcanique reposant sur l'eau. A étudier !

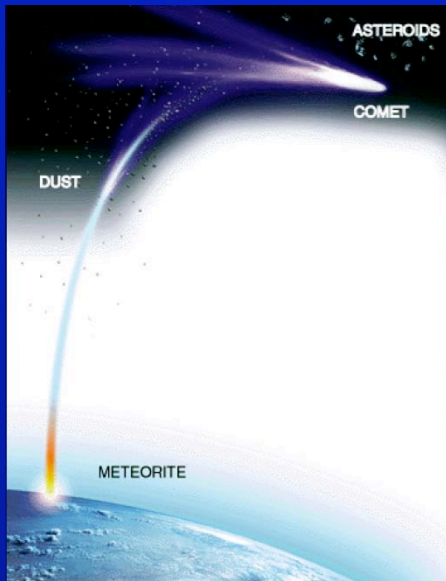
**Comètes** = elles ont conservé la pristine de la nébuleuse solaire primordiale au moment de l'accrétion de ce matériel

⇒ contiennent des indices uniques sur l'histoire et l'évolution de notre syst. solaire.

# D'où vient l'eau du système solaire ?



- HIFI observera l'eau dans l'atmosphère des planètes.
- chimie dans l'atmosphère des planètes géantes
- origine de l'eau dans la haute atmosphère des planètes géantes et Titan ? Particules de poussières interplanétaires ? Impacts cométaires ? Sources locales ?
- deutération : clef pour contraindre l'origine et l'évolution des espèces dans le syst. solaire va être mesuré  
⇒ contraindre la composition des grains cométaires pré-nébuleuse solaire, la composition des glaces proto-planétaires et l'évolution de cette nébuleuse



- Mars: eau par dégazage, volcanisme-glace, impact de comète. Cycle de l'eau sur Mars ?
- Astéroïdes: principalement entre Mars et Jupiter. Eau, quantité ?
- Jupiter: quelle quantité d'eau ?
- Saturne: eau dans les anneaux et dans l'atmosphère (nuages d'eau détectés)
- Uranus et Neptune: eau dans l'atmosphère.
- comètes = inventaire complet des molécules dans les comètes

