

# La Lumière pour Goûter les Planètes

Vincent BOUDON & Cyril Richard

*Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne (ICB)  
UMR 6303 CNRS – Université de Bourgogne*

&

*Société Astronomique de Bourgogne (SAB)*



- **Qu'est-ce que la lumière ?**
- **La couleur des étoiles**
- **L'Univers de toutes les couleurs**
- **Goûter les astres**
- **La première lumière**



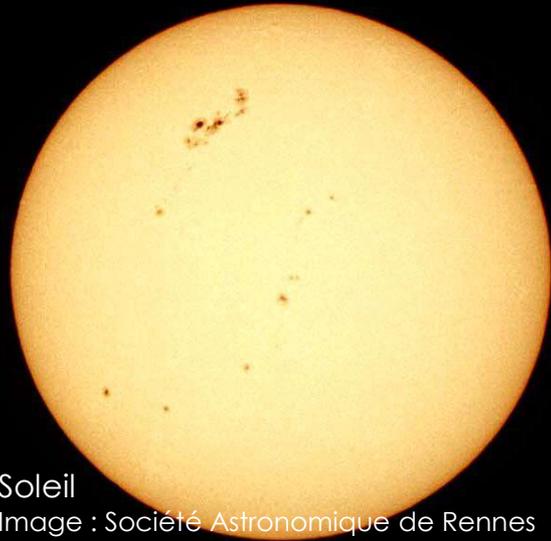
A landscape photograph showing a vibrant rainbow arching across a clear blue sky. The rainbow's colors are clearly visible, transitioning from red on the left to violet on the right. Below the rainbow, a lush green forest covers a hillside, with a rocky outcrop visible on the left side. The overall scene is bright and clear, suggesting a sunny day after a rain shower.

Qu'est-ce que la lumière ?

Première partie



# Toutes sortes de lumières



Soleil  
Image : Société Astronomique de Rennes



Étoiles (les Pléïades)  
Image : NASA



LASER



Ampoule à incandescence

Flamme



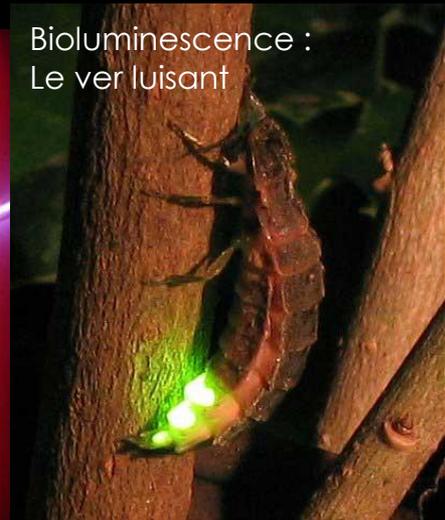
LED



Tubes fluorescents

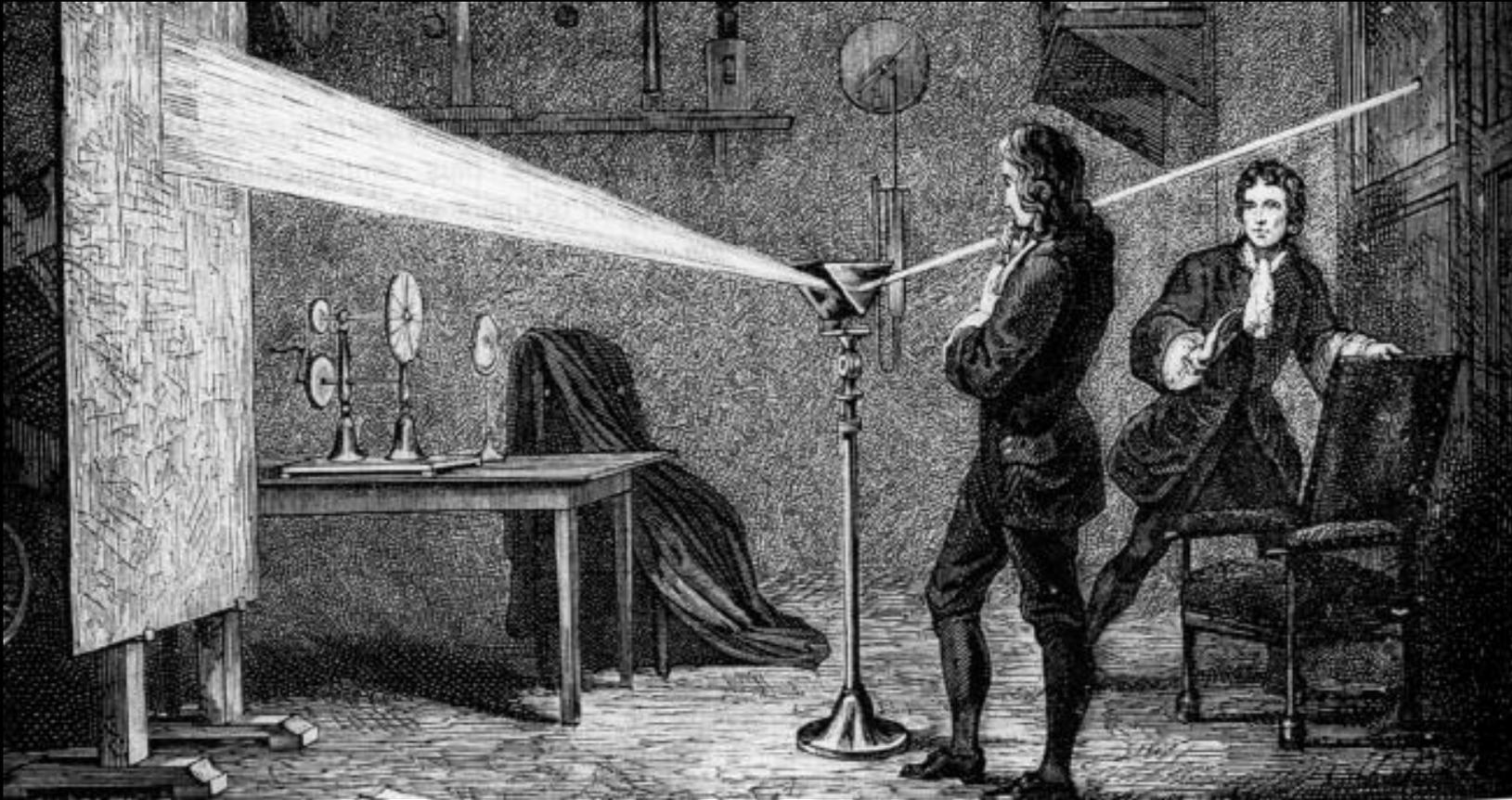


Bioluminescence :  
Le ver luisant



Qu'est-ce que la lumière ?

# Décomposer la lumière



En 1666, Isaac Newton décompose la lumière à l'aide d'un prisme. S'il n'est pas le premier à le faire, il est le premier à comprendre que la lumière blanche est composée de l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel.

Avant lui, certains pensaient que les couleurs étaient dues au milieu traversé, voire à un effet de la lumière sur notre système sensoriel (Descartes) ...

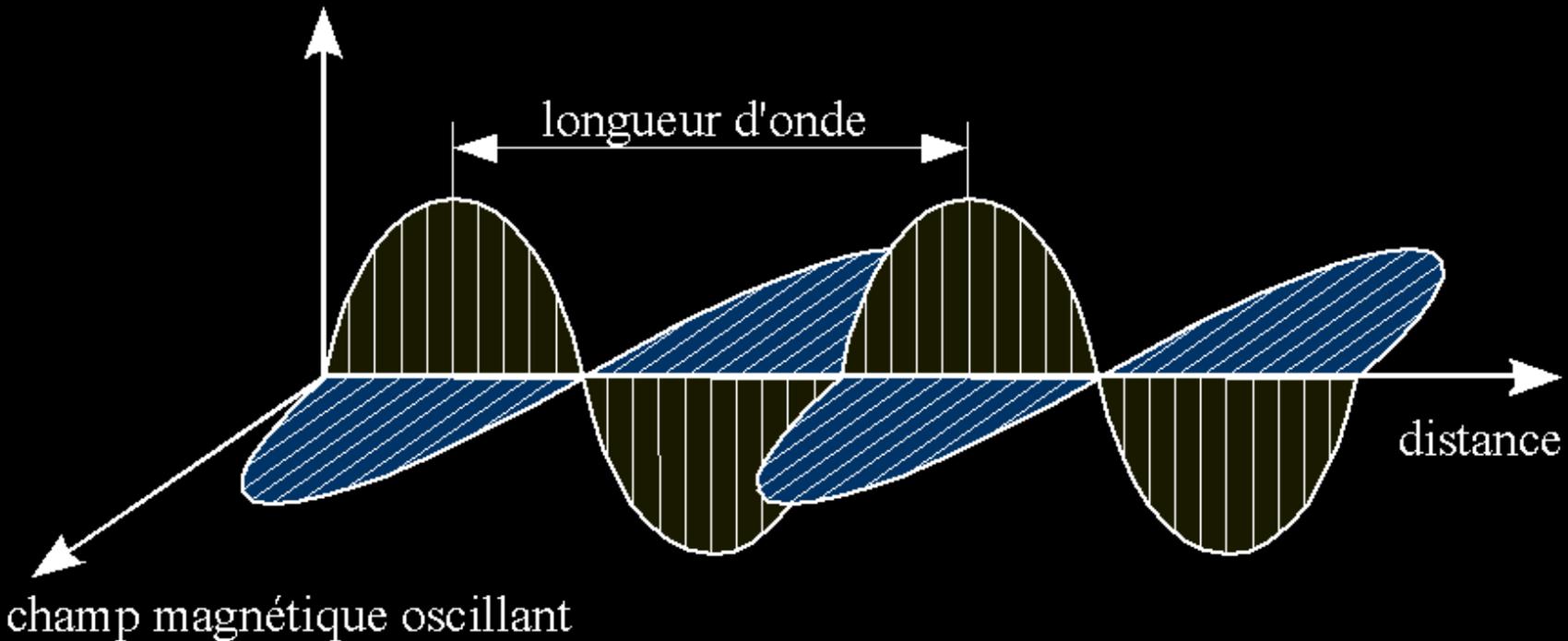
Qu'est-ce que la lumière ?

# Lumière et ondes

Qu'est-ce que la lumière ?

La lumière est une onde électromagnétique

champ électrique oscillant



Longueur d'onde mesurée en nm

$$1 \text{ nm} = 0.000000001 \text{ m} = 10^{-9} \text{ m}$$

# Ondes et particules

- Le **photon** est un *quantum* (« grain ») de lumière
- Le photon n'est ni une particule, ni une onde, mais il peut se comporter comme l'une ou l'autre
- L'**énergie** ( $E$ ) du photon est reliée à la **longueur d'onde** ( $\lambda$ ) :

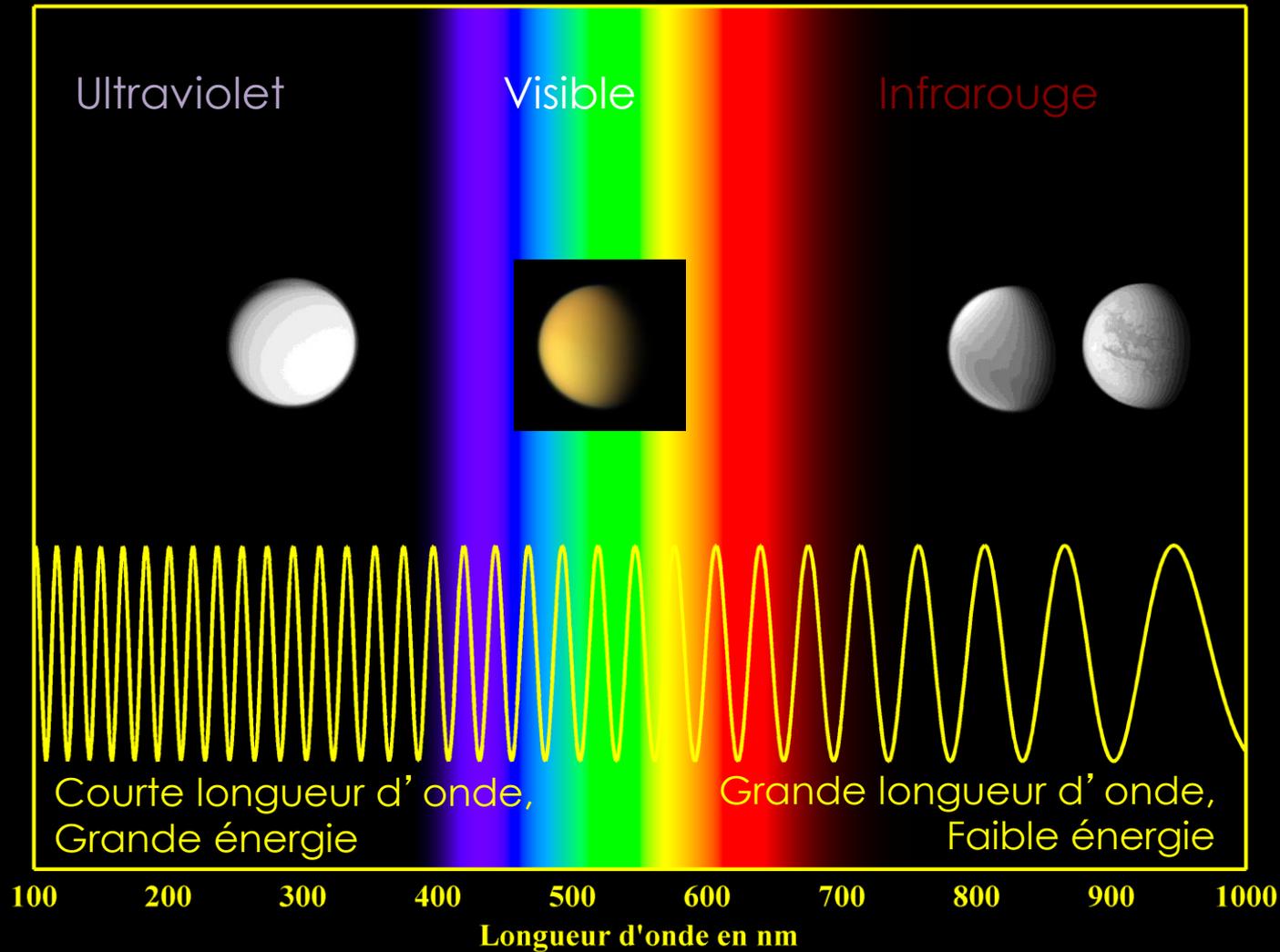
$$E = hc / \lambda$$

Décomposition en longueur d'onde : **Le spectre**



Qu'est-ce que la lumière ?

# Longueur d'onde et couleur



Qu'est-ce que la lumière ?



# La couleur des étoiles



# Lumière et température

Soleil  
5800 K



FLIR

Chien par caméra IR  
300 K



Acier en fusion  
1800 K



Fond cosmologique  
de l'univers 3K



La couleur des étoiles

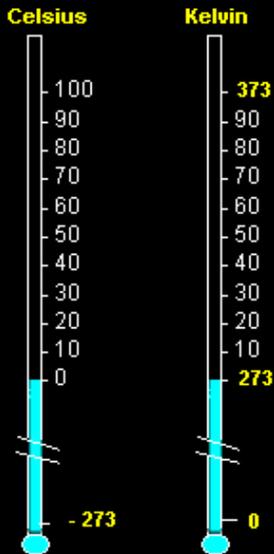
# Corps noir !

Un **corps noir** est un objet idéal absorbant tous les rayonnements et dont **l'émission ne dépend que de sa température**.

Cette notion a été introduite par Gustav Kirchhoff en 1880. Elle a permis à Max Planck de poser en 1900 les bases de la mécanique quantique.

L'intérieur d'un four est un très bon analogue de corps noir.

La surface d'une étoile ou le rayonnement de fond cosmologique sont également de très bons corps noirs.



La **loi du corps noir** permet, grâce à l'analyse du spectre lumineux, de **mesurer la température** d'un objet.

Les physiciens mesurent les températures en **Kelvins**, échelle ayant pour origine le zéro absolu ( $-273.15^{\circ}\text{C}$ ).

# Chaud et froid sur les étoiles

Soleil 5800 K

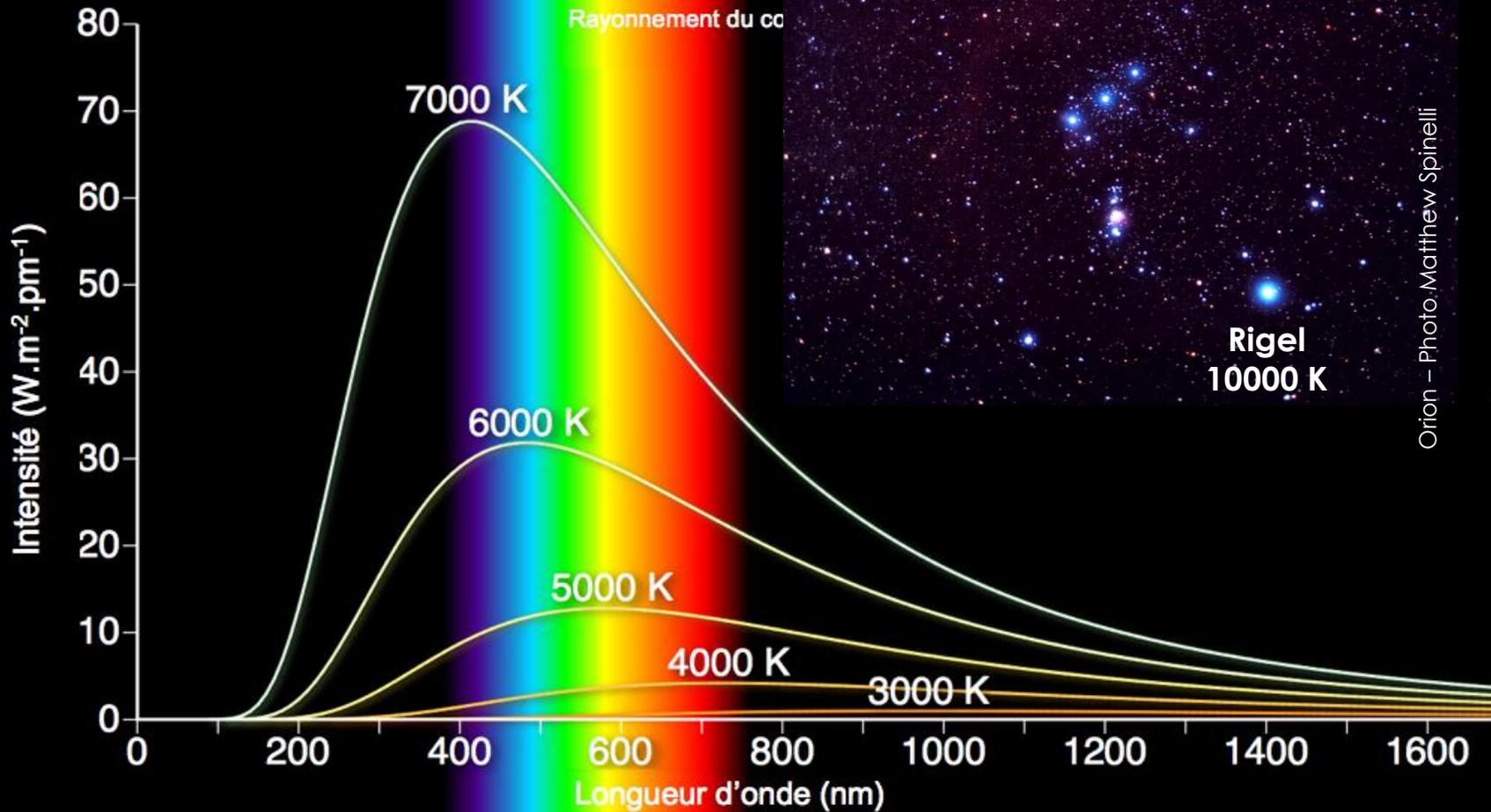


Image : NASA

Bételgeuse  
3600 K

Rigel  
10000 K

Orion – Photo Matthew Spinelli

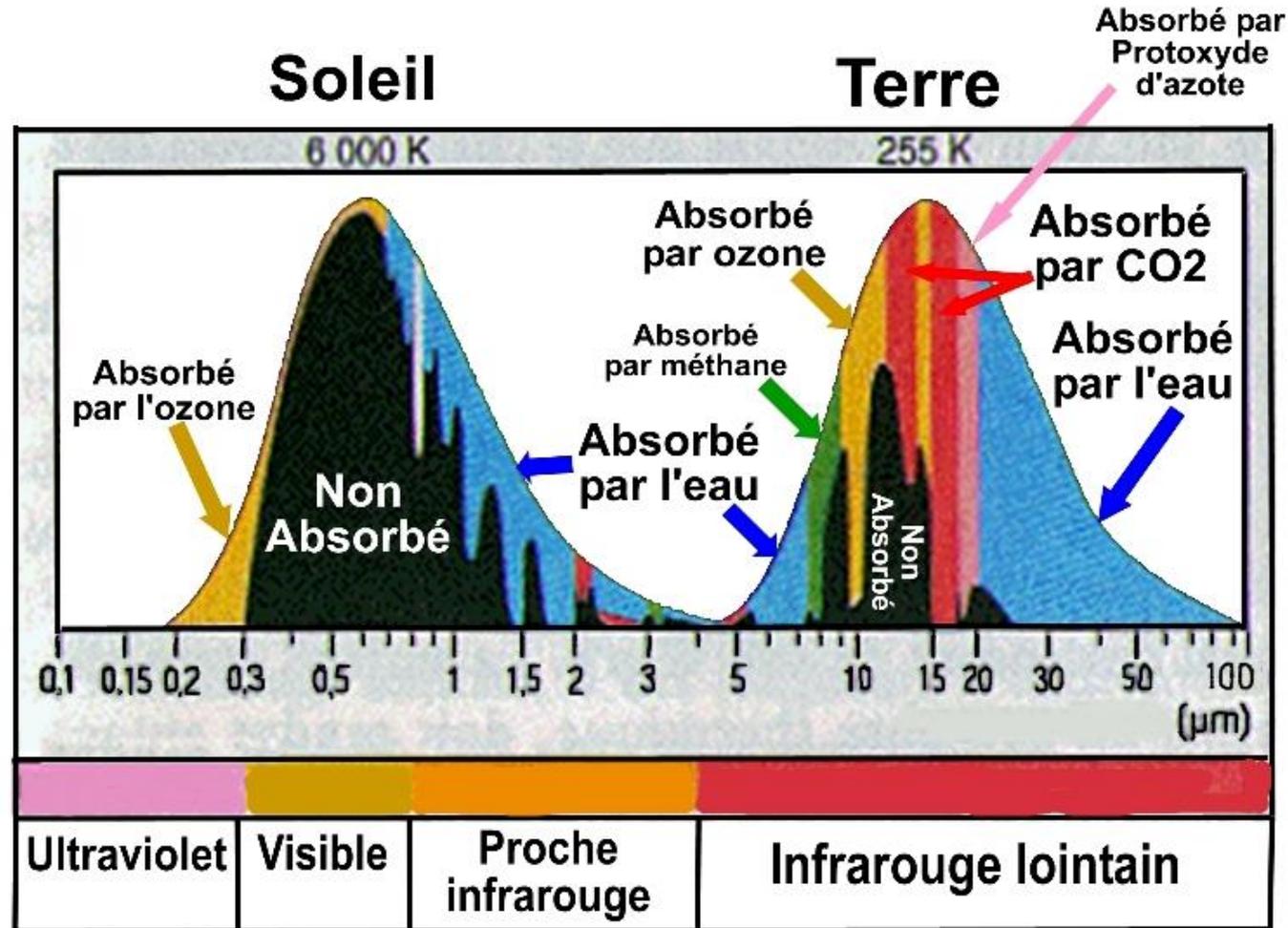


La couleur des étoiles



# Soleil et Terre

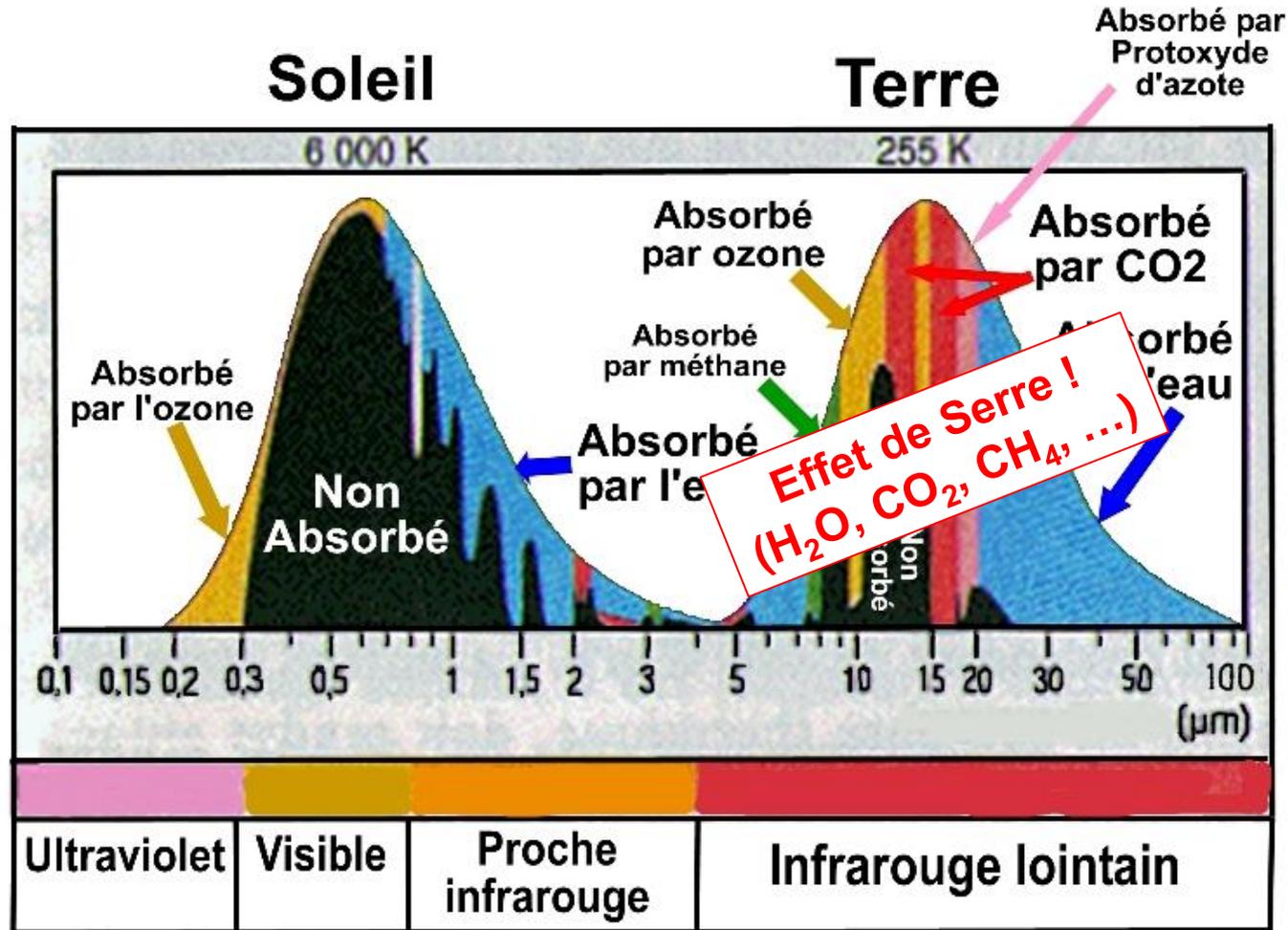
## Spectre d'absorption du rayonnement thermique



Sources : Sadourny, Jancovici

# Soleil et Terre

## Spectre d'absorption du rayonnement thermique

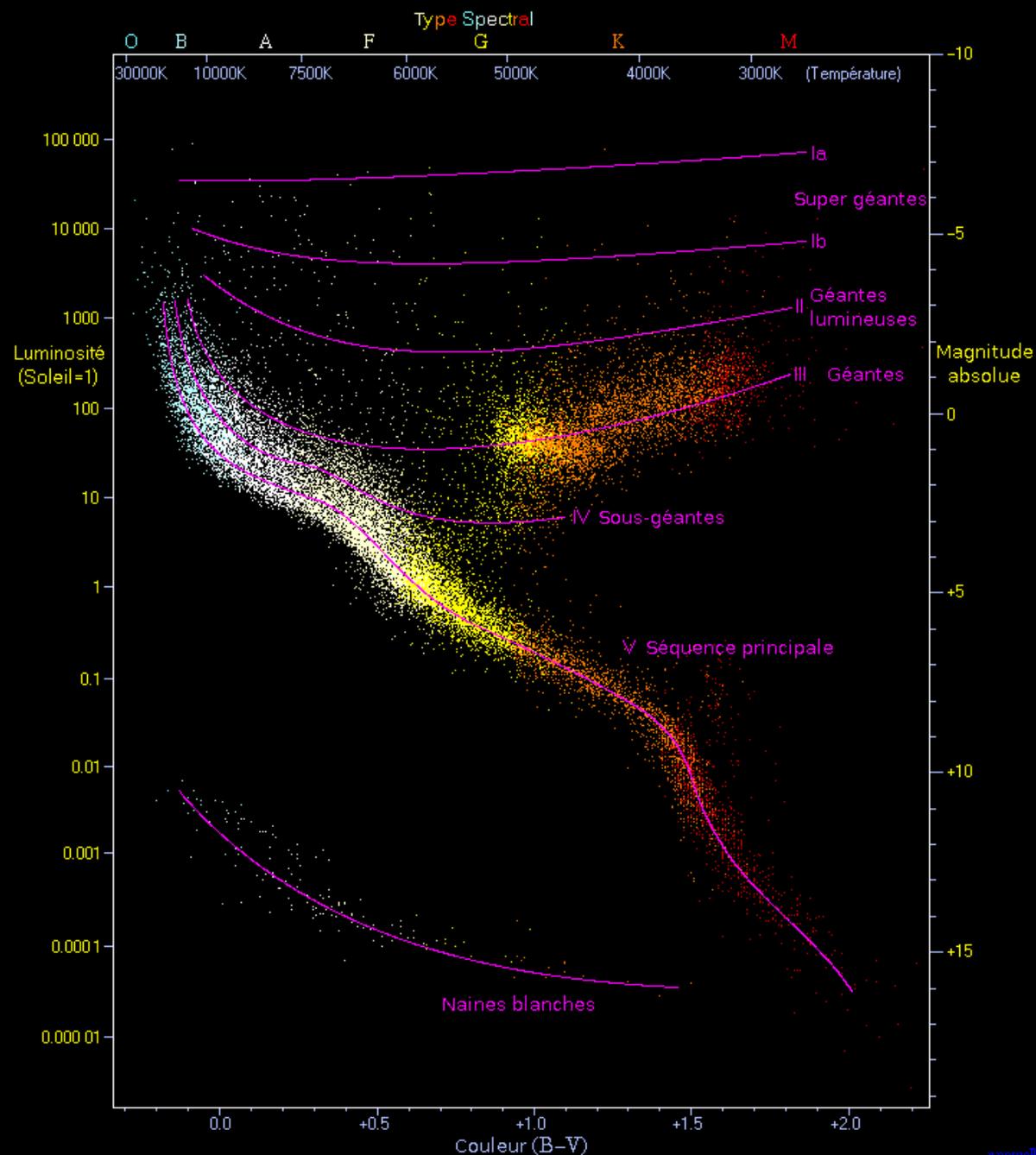


Sources : Sadourny, Jancovici

# Classer les étoiles

On peut classer les étoiles en fonction de leur couleur et de leur luminosité.

Elles s'arrangent sur les différentes branches du diagramme de Hertzsprung-Russell, selon leur degré d'évolution.



La couleur des étoiles

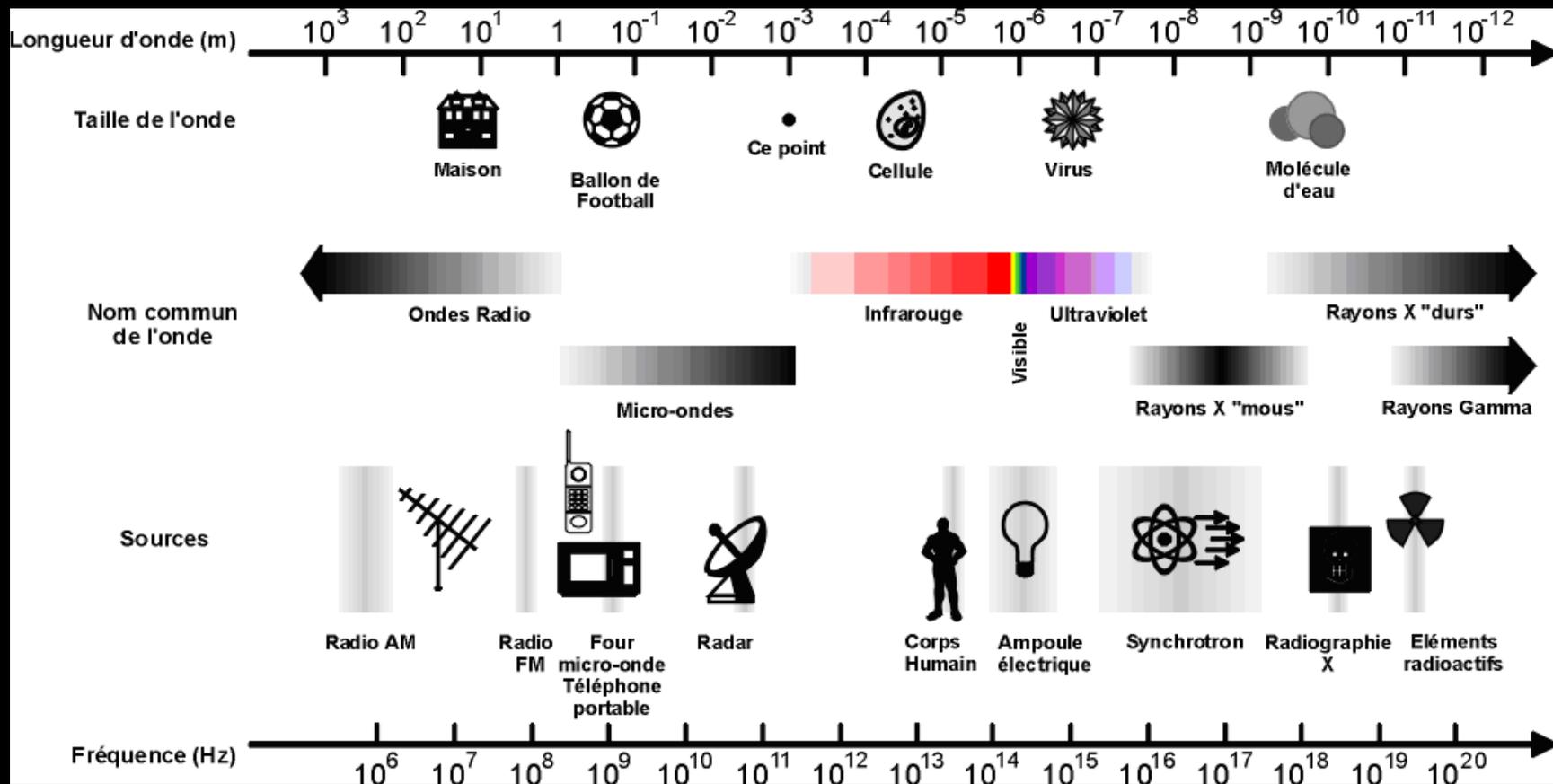
# L'Univers de toutes les couleurs



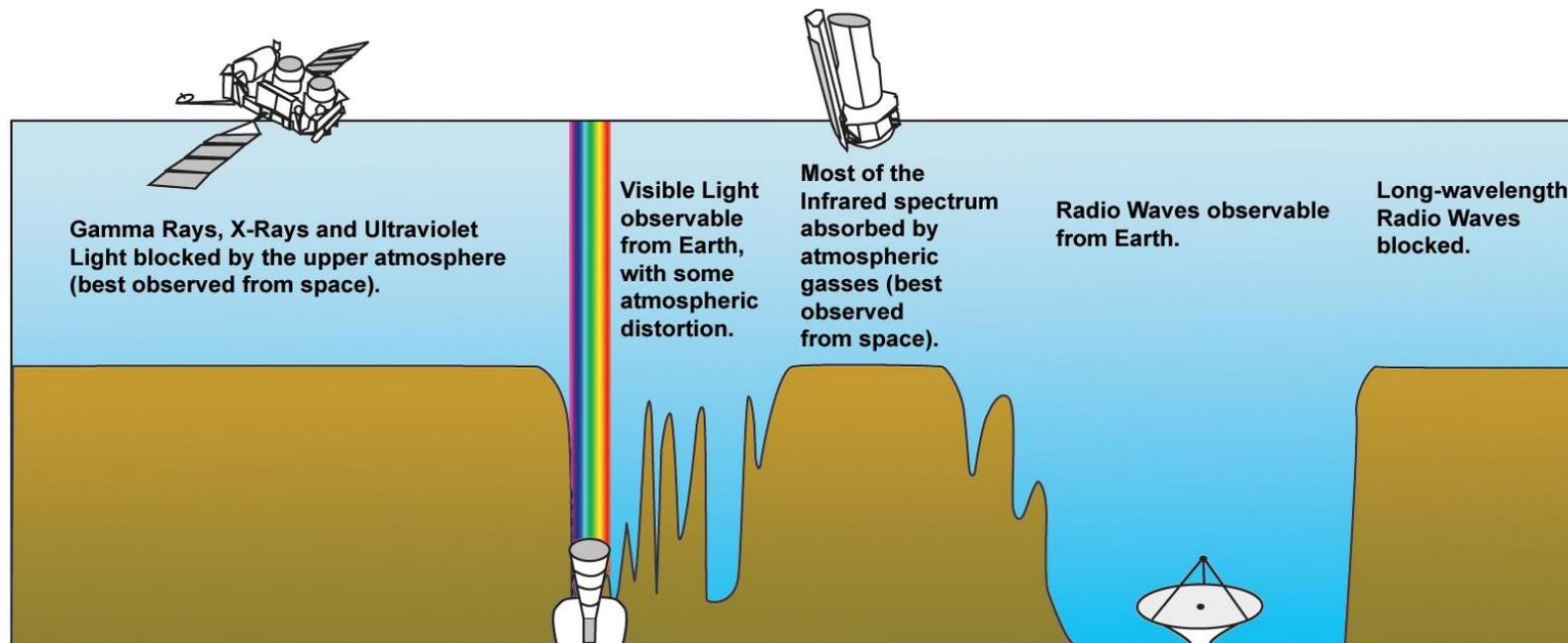
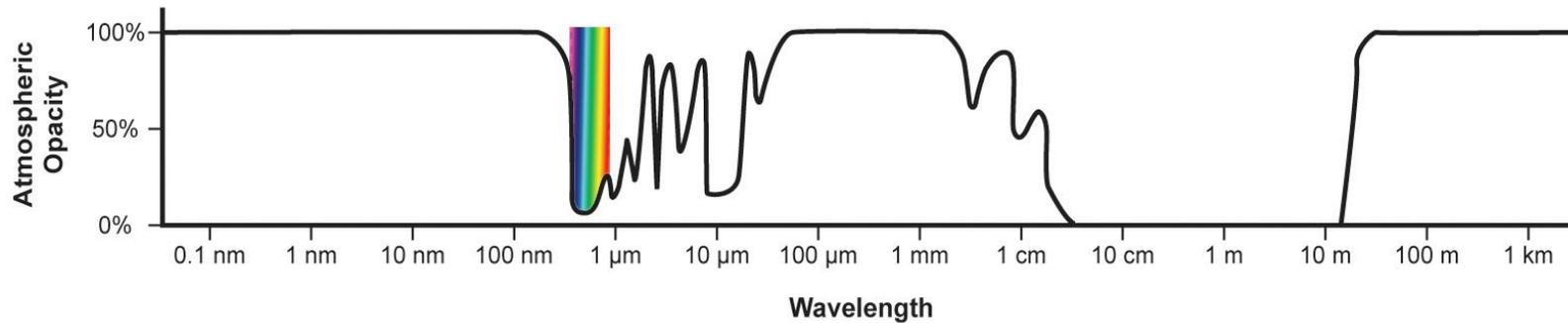
# Le spectre électromagnétique

La lumière visible ne représente qu'une toute petite partie du spectre.

Les astronomes utilisent toutes les longueurs d'onde pour sonder l'Univers.



# Observer dans toutes les longueurs d'onde



L'Univers de toutes les couleurs



# La radioastronomie

De nombreux objets émettent en ondes radio (galaxies, pulsars, ...).

En particulier, la raie à  $\lambda = 21$  cm de l'atome d'hydrogène permet de cartographier la répartition de cet élément dans l'Univers.



La nébuleuse du Crabe en radio par le VLA



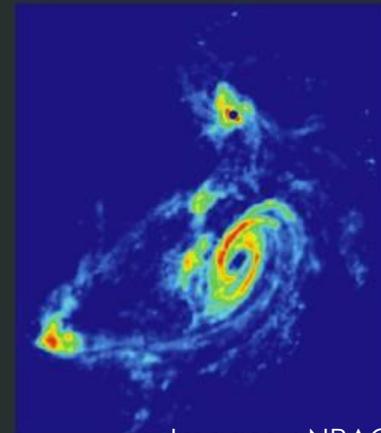
Radiotélescopes du Very Large Array (USA)

## TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution



21 cm HI Distribution

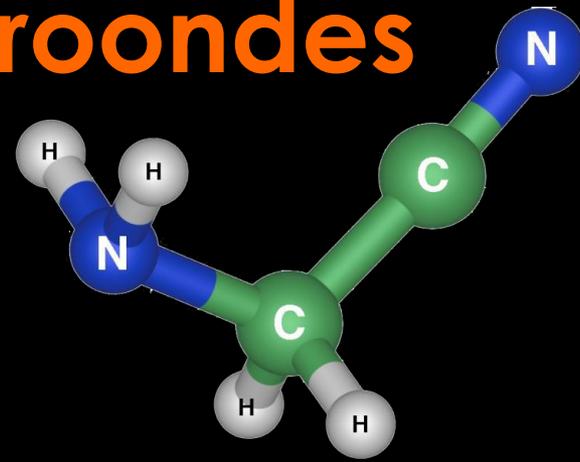


Images : NRAO

# L'Univers en microondes

Un très grand nombre de molécules complexes du milieu interstellaire ont un spectre d'absorption très caractéristique dans les micro-ondes.

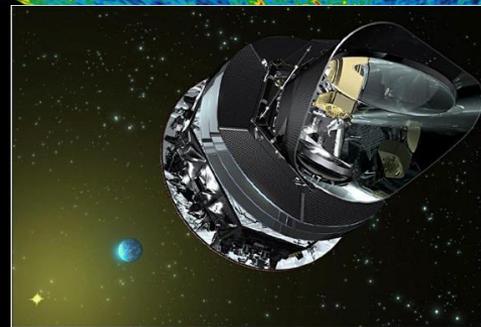
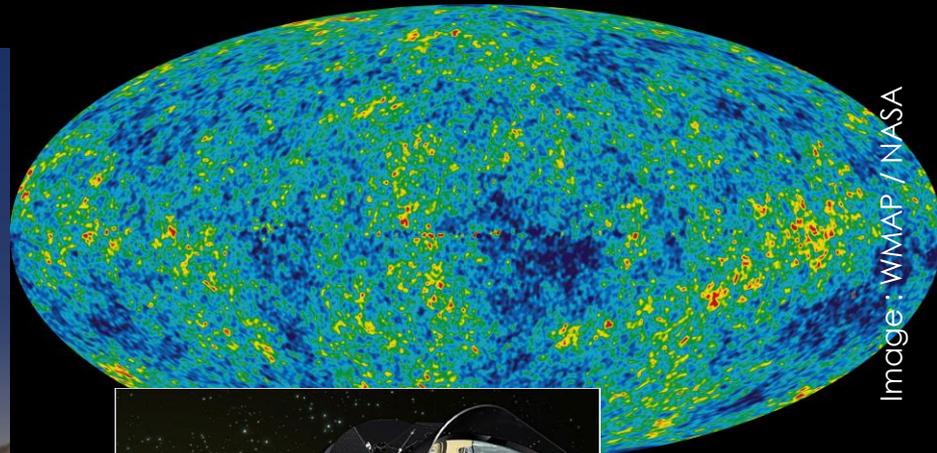
Le fonds diffus cosmologique est également cartographié en micro-ondes par des satellites.



L'aminocétonitrile, précurseur de la glycine (acide aminé le plus simple), découvert en 2008 dans le « *Large Molecular Heimat* », près du centre galactique.



Le projet ALMA dans le désert d'Atacama au Chili / ESO

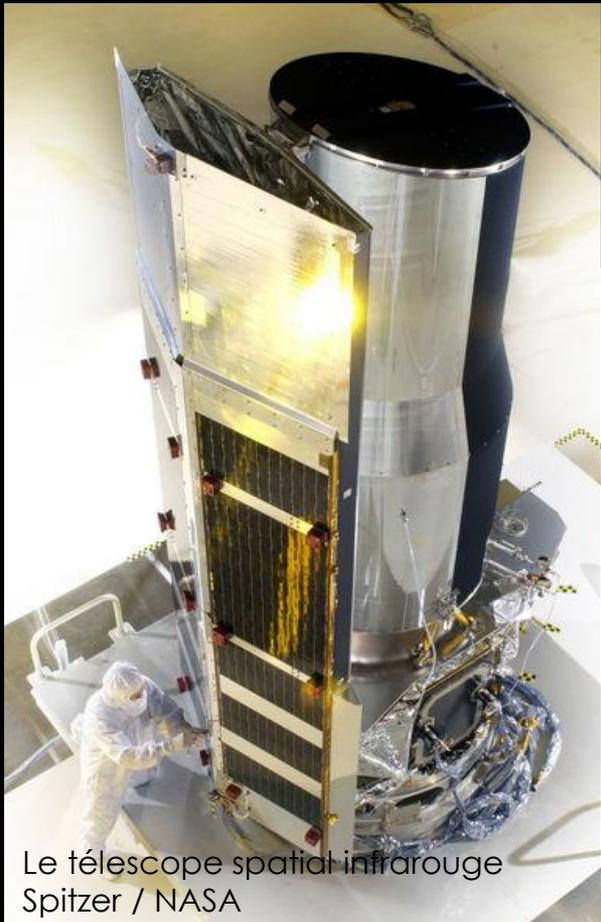


Le satellite Planck (ESA), lancé en 2009 pour cartographier le fond diffus cosmologique.

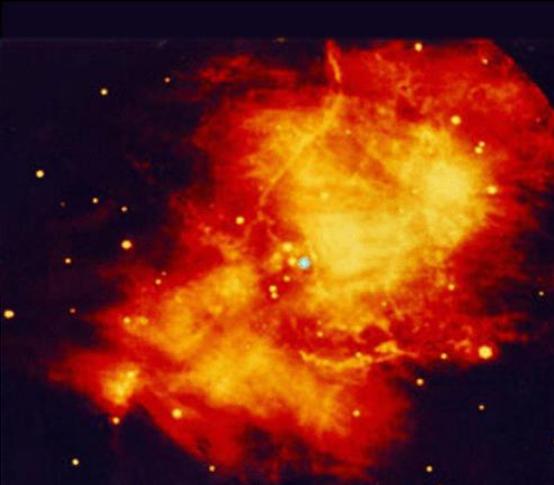
# L'Univers en infrarouge

L'Univers de toutes les couleurs

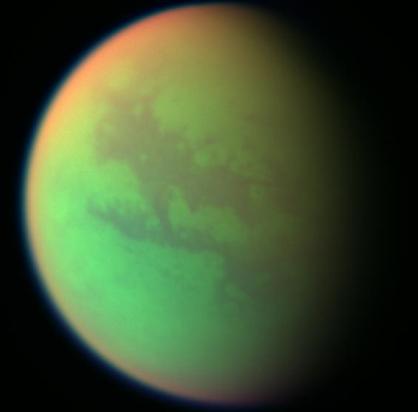
Le rayonnement infrarouge permet de cartographier l'Univers « froid », en particulier les nuages de poussières.



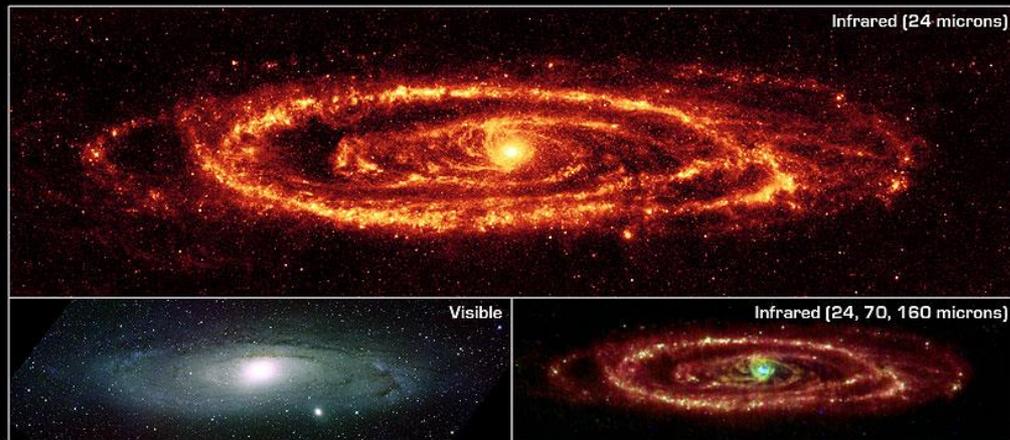
Le télescope spatial infrarouge Spitzer / NASA



La nébuleuse du Crabe en infrarouge, NASA



Voir à travers la brume : Titan en infrarouge par Cassini / NASA



**Dust in Andromeda Galaxy (M31)**  
NASA / JPL-Caltech / K. Gordon (University of Arizona)

**Spitzer Space Telescope • MIPS**  
Visible: NOAO/AURA/NSF      ssc2005-20a



# L'Univers visible

La plupart des étoiles émettent essentiellement dans le visible.

Un certain nombre d'atomes ou d'ions ont également des raies d'absorption dans le visible.



Le Gran Telescopio Canarias  
Diamètre : 10,40 m



La nébuleuse du Crabe en lumière visible  
Image : Hubble / NASA

La nébuleuse d'Orion (M42) en lumière visible.

En rouge, l'hydrogène.

En vert, l'oxygène.



Image : Robert Gendler

# L'Univers en ultraviolet

Les étoiles (dont le Soleil) émettent aussi généralement beaucoup de rayonnement UV (responsable du bronzage !).

Ce rayonnement est produit par des électrons changeant de niveau. Il est la signature des objets chauds.



Le télescope spatial ultraviolet GALEX / NASA



La galaxie M81 en ultraviolet, par GALEX / NASA



Le Soleil en ultraviolet par l'instrument EIT du satellite SOHO / ESA

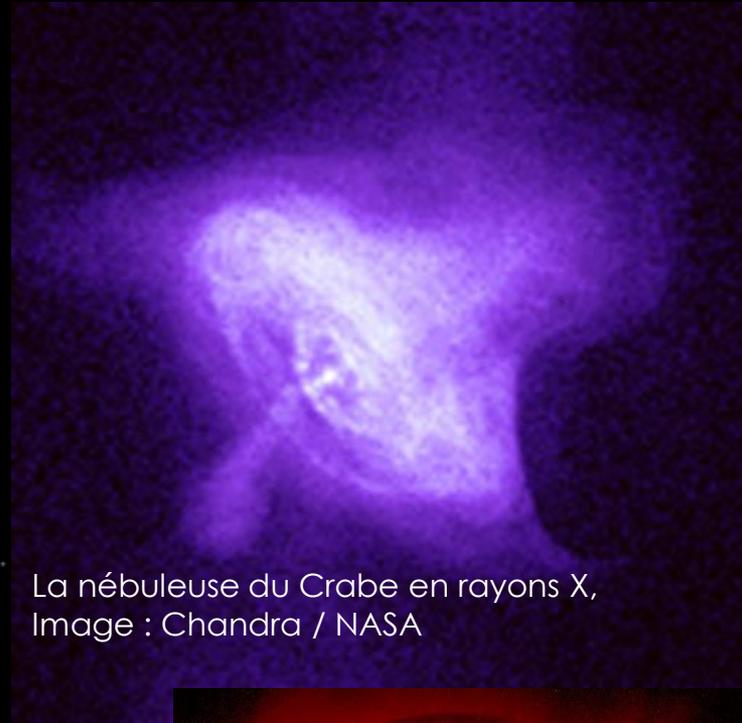
# L'Univers en rayons X

Les rayons X peuvent facilement pénétrer la matière (radiographie).

Dans l'Univers, les gaz extrêmement chauds peuvent émettre de grandes quantités de rayons X. Le gaz chauffé spiralant dans un trou noir en est un exemple.

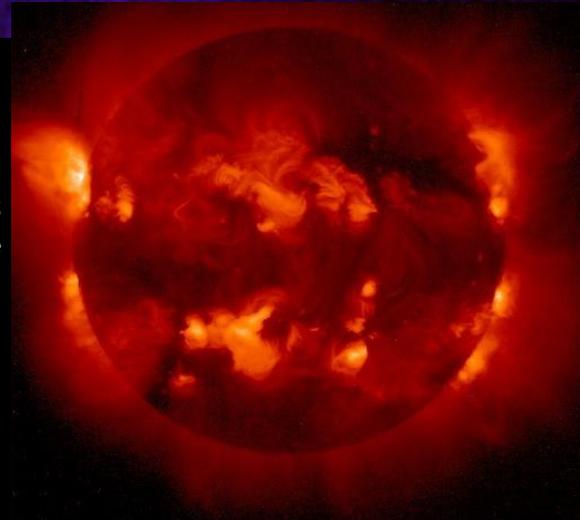


Le télescope spatial X  
Chandra / NASA



La nébuleuse du Crabe en rayons X,  
Image : Chandra / NASA

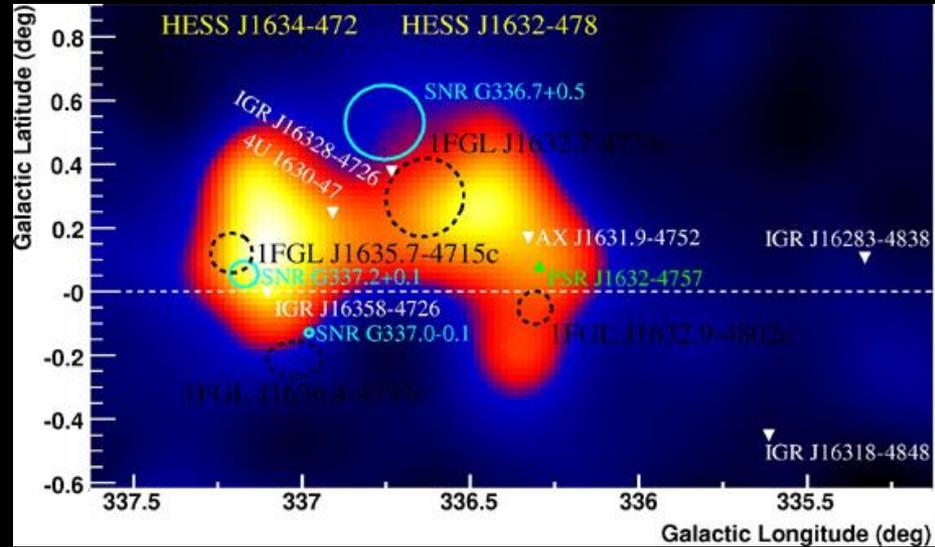
Le Soleil  
en rayons  
X par le  
satellite  
japonais  
Yohkoh



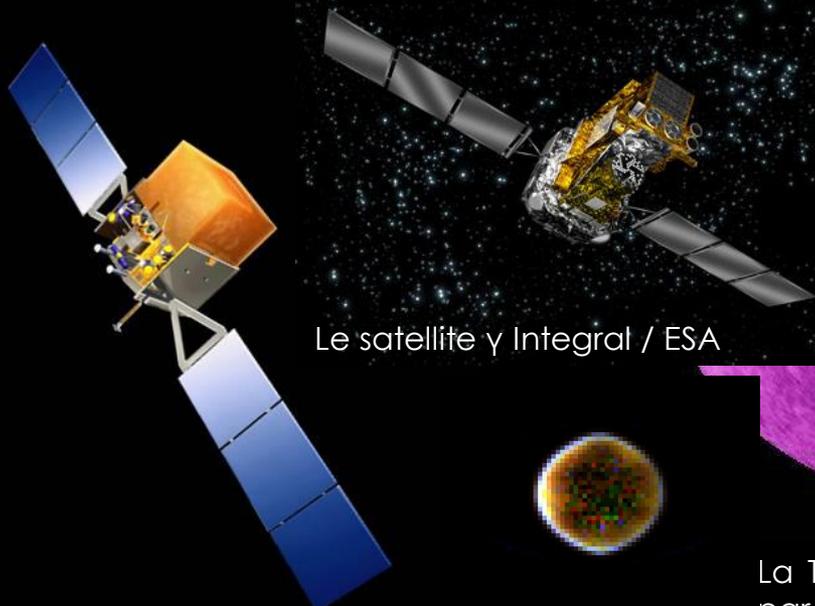
# L'Univers en rayons $\gamma$

Les rayons  $\gamma$  sont émis par les noyaux atomiques (radioactivité, réactions nucléaires).

Ils sont le signe des événements les plus violents de l'Univers : supernovæ (sursauts  $\gamma$  longs) ou fusions d'astres compacts (étoiles à neutrons, trous noirs / sursauts  $\gamma$  courts) .

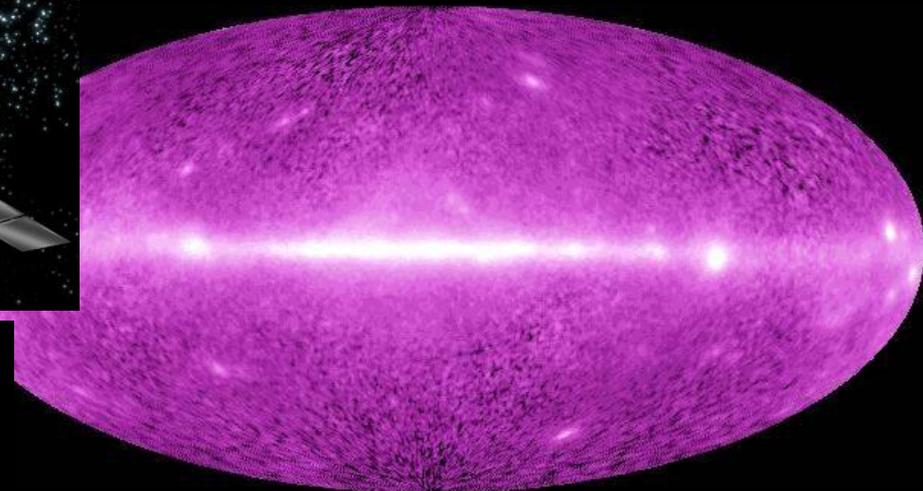


Sources  $\gamma$  galactiques par le télescope HESS (Namibie)



Le satellite  $\gamma$  Integral / ESA

Le satellite  $\gamma$  Fermi / NASA

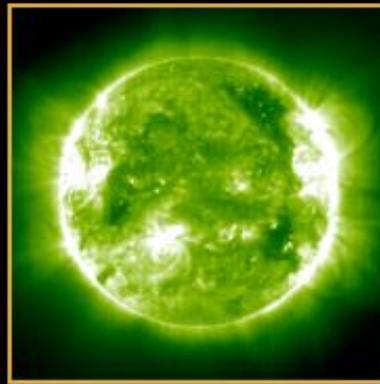


La Terre (à gauche) et le ciel (ci-dessus) en rayons  $\gamma$  par le satellite Compton Gamma Ray Observatory / NASA

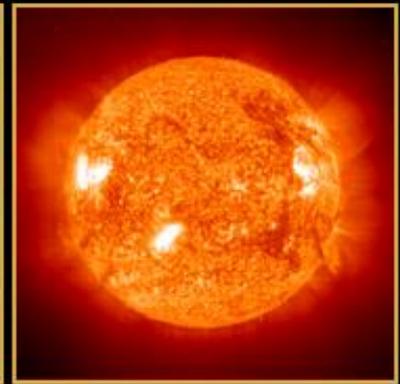
# Le Soleil vu dans différentes longueurs d'onde



X-Ray: Yohkoh



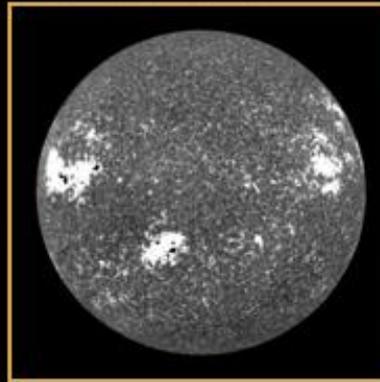
Ultraviolet: SOHO-EIT



Extreme UV: SOHO-EIT



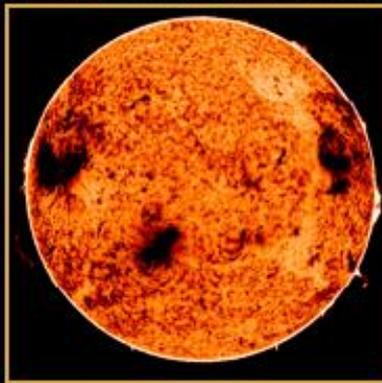
Visible: White Light BBSO



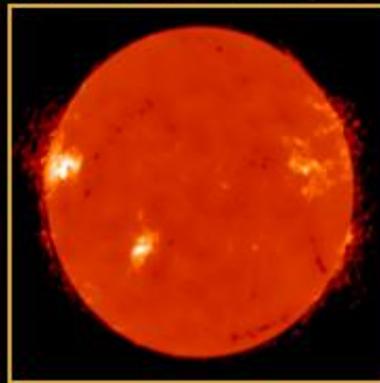
Visible: Calcium-K BBSO



Visible: H-alpha Learmonth



Infrared: NSO



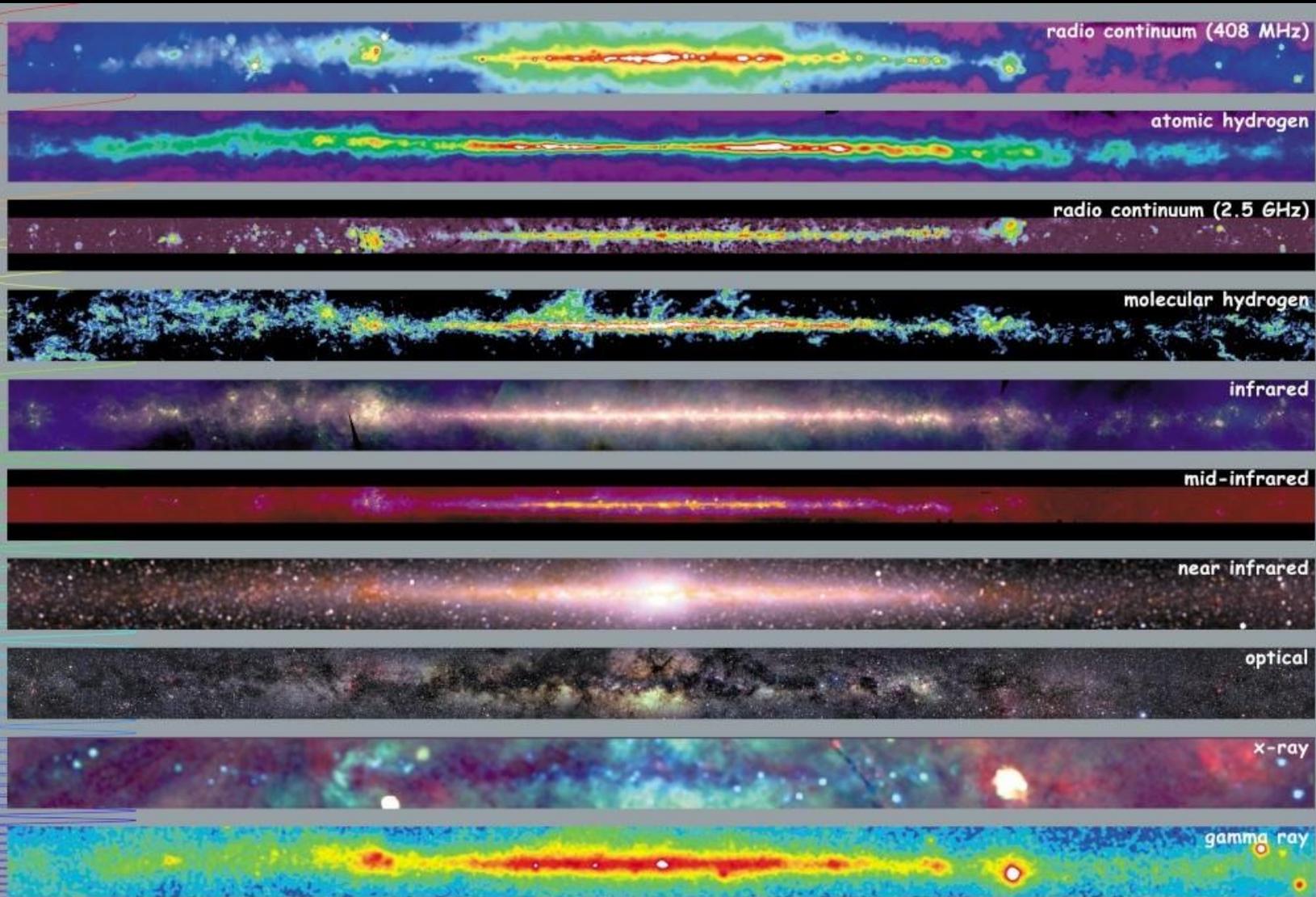
Radio: NobeyamaObs

L'Univers de toutes les couleurs

Source : Caltech



# Les couleurs de la Voie Lactée



<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw/>

L'Univers de toutes les couleurs

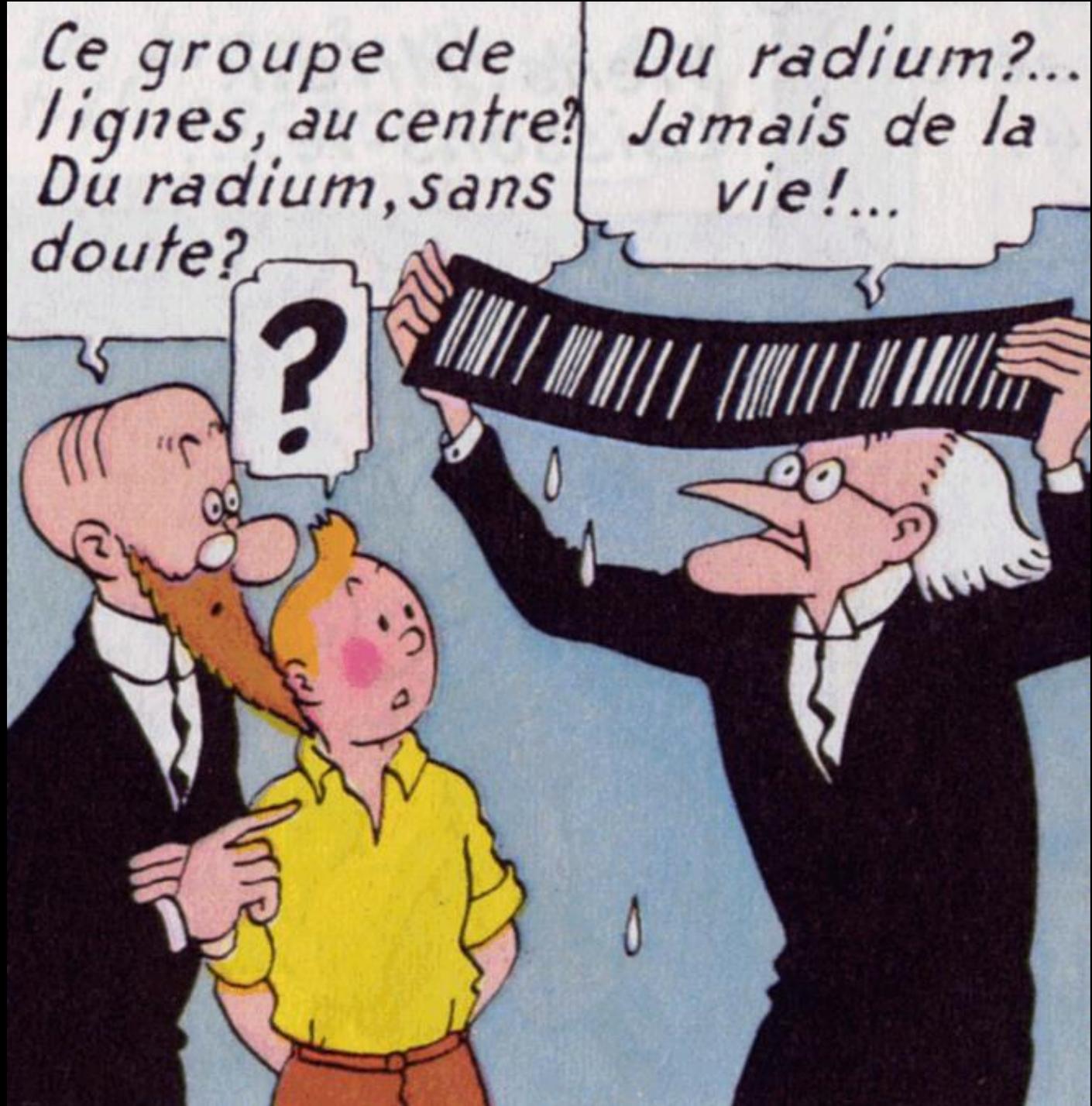


Multiwavelength Milky Way



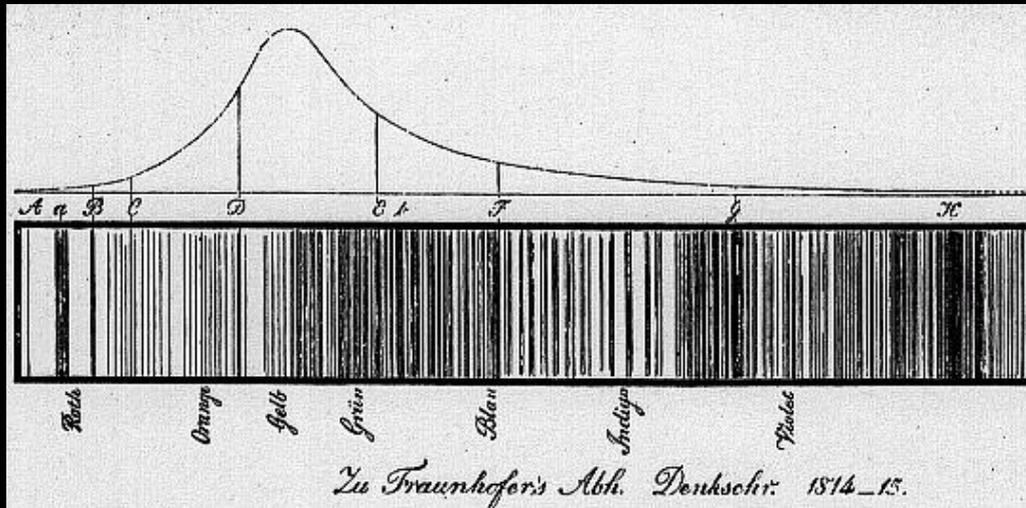
# Goûter les astres





# Les raies spectrales

- 1802, **William Wollaston** : raies sombres dans le spectre solaire.
- 1811, **Joseph von Fraunhofer** : près de 500 raies.
- 1865, **Robert Bunsen** et **Gustav Kirchhoff** : raie caractéristique du sodium dans le spectre du Soleil.
- 1896, **Henry Rowland** : 36 éléments
- Hélium : découvert sur le Soleil par identification de raies inconnues, avant qu'il ne soit découvert sur la Terre en 1895.



Aujourd'hui, on dénombre plusieurs milliers de raies, pour l'ensemble des éléments chimiques connus.

# Spectre solaire

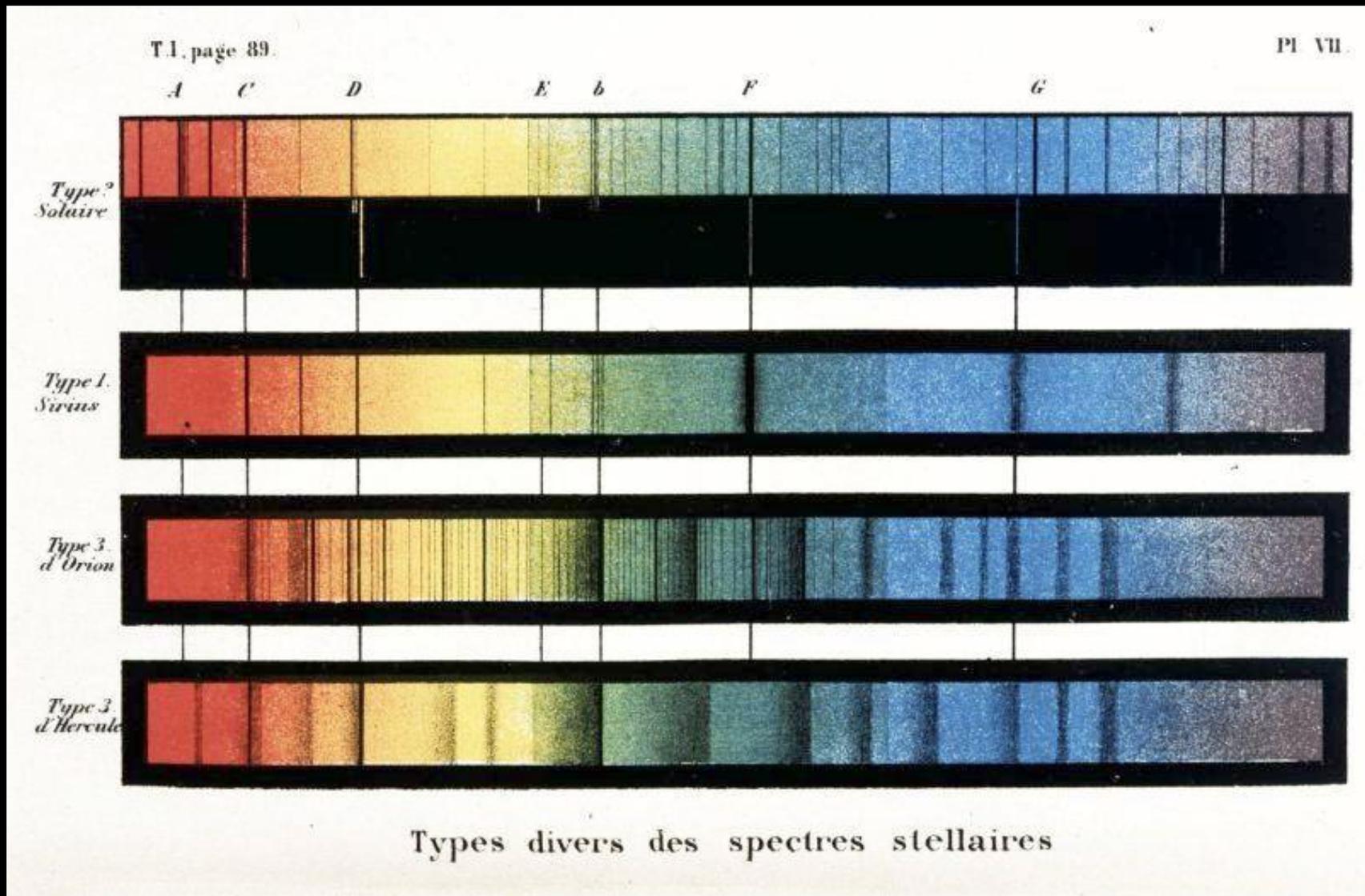
Goûter les astres

Source : McMath-Pierce Solar Observatory



# Spectres d'étoiles

Dès la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, ont été observés les premiers spectres stellaires.



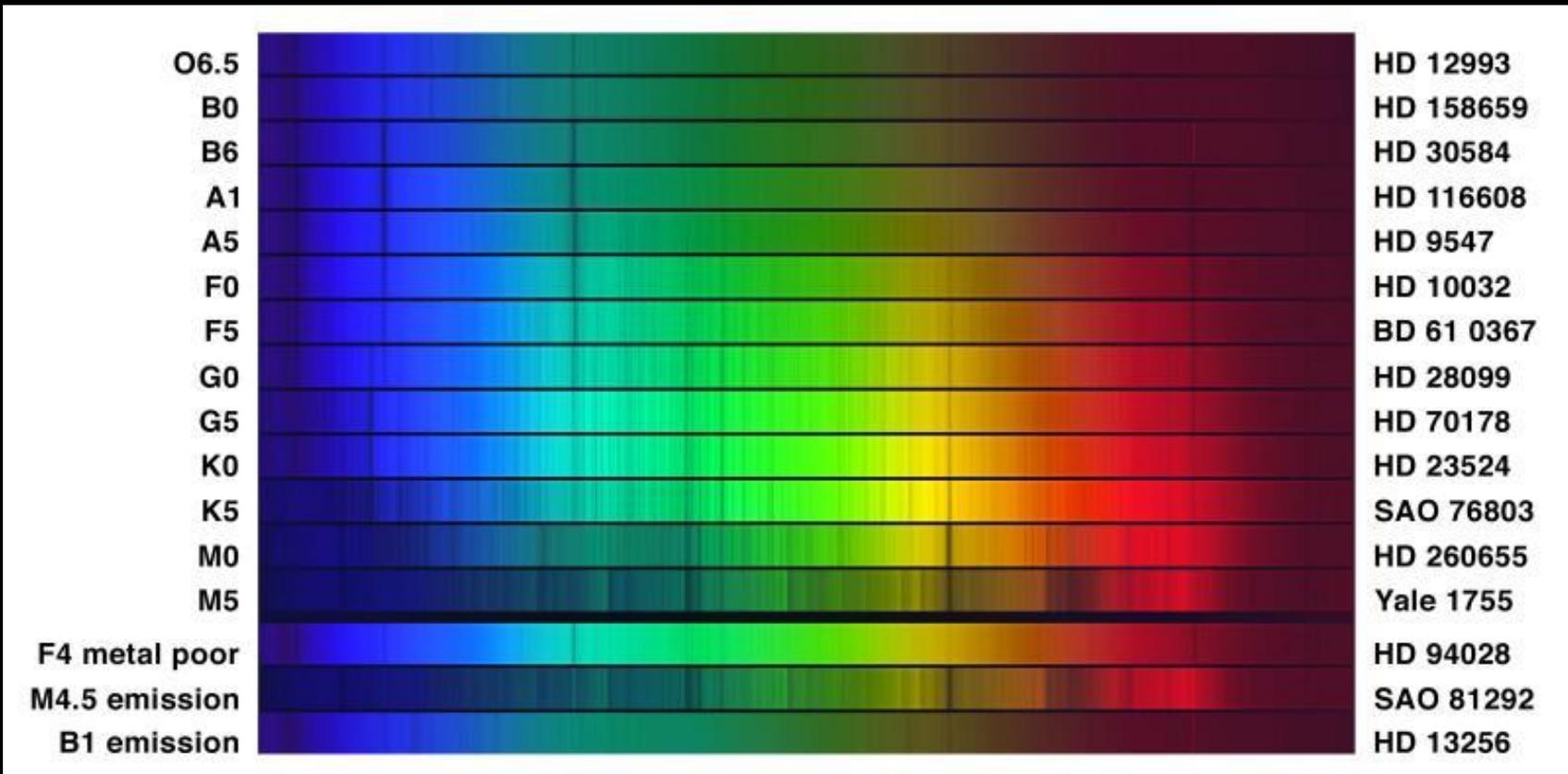
Goûter les astres



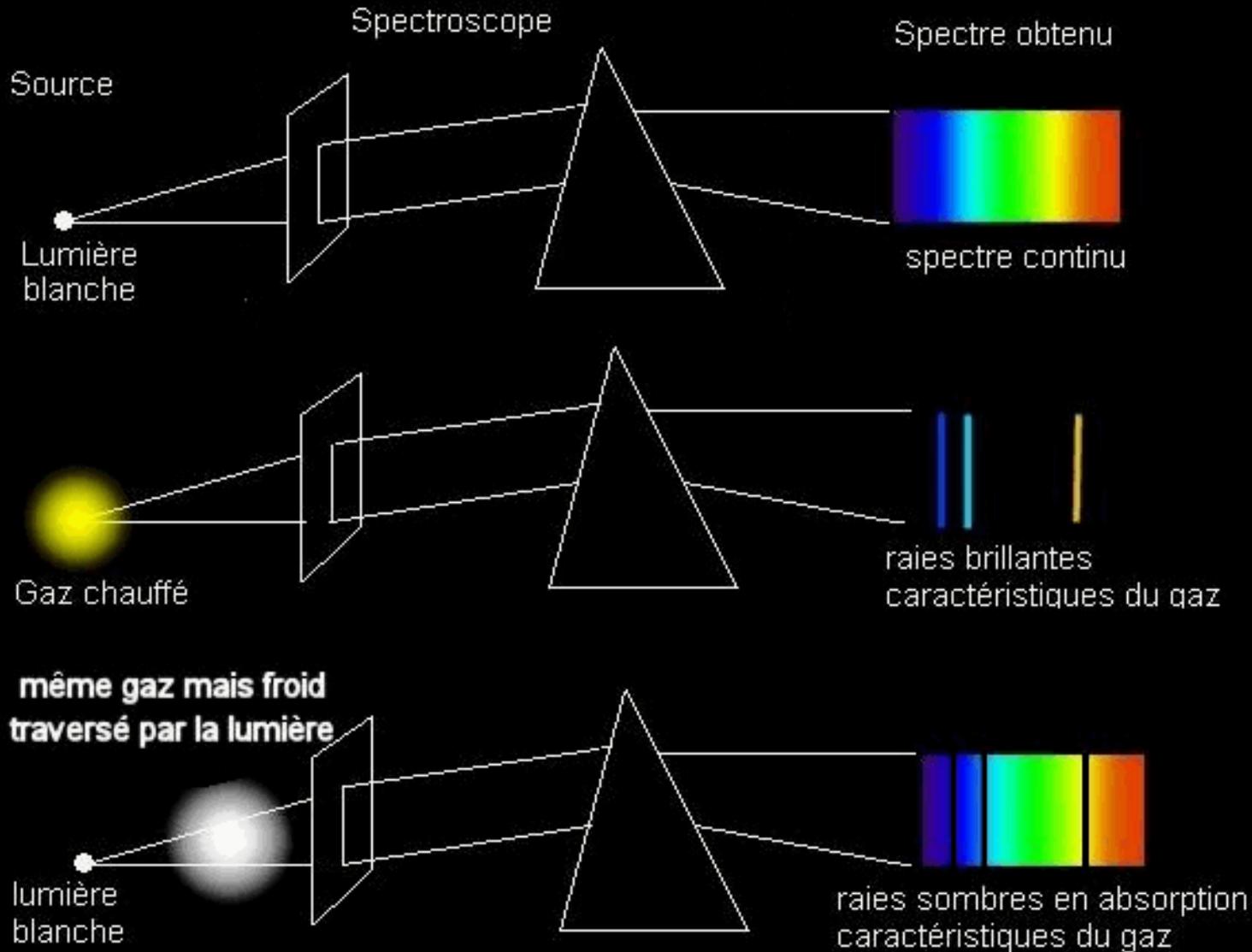
# Types spectraux

Différents types de spectres stellaires ont pu être observés et classifiés (aujourd'hui, types O-B-A-F-G-K-M : « *Oh Be A Fine Girl, Kiss Me* », et aussi L, T, Y).

Goûter les astres



# Principes physiques



# Raies d'absorption

Image : Hubble / NASA

Intensité / Unité arbitraire

Sirius ( $\alpha$  Canis Majoris)

23/12/2008

Type A0

Magnitude -1.46

Température 9900 K

1500

1000

500

0

400

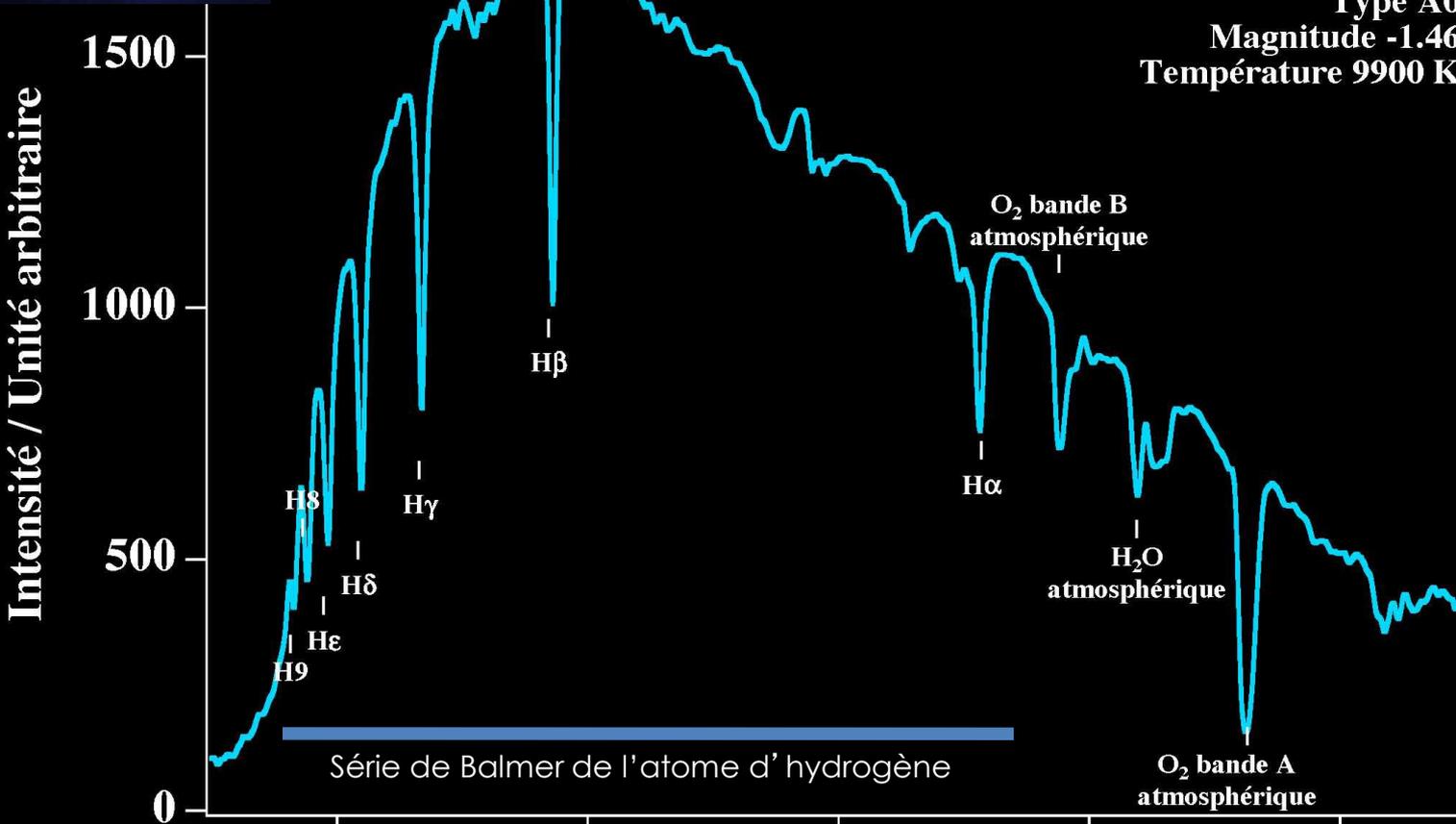
500

600

700

800

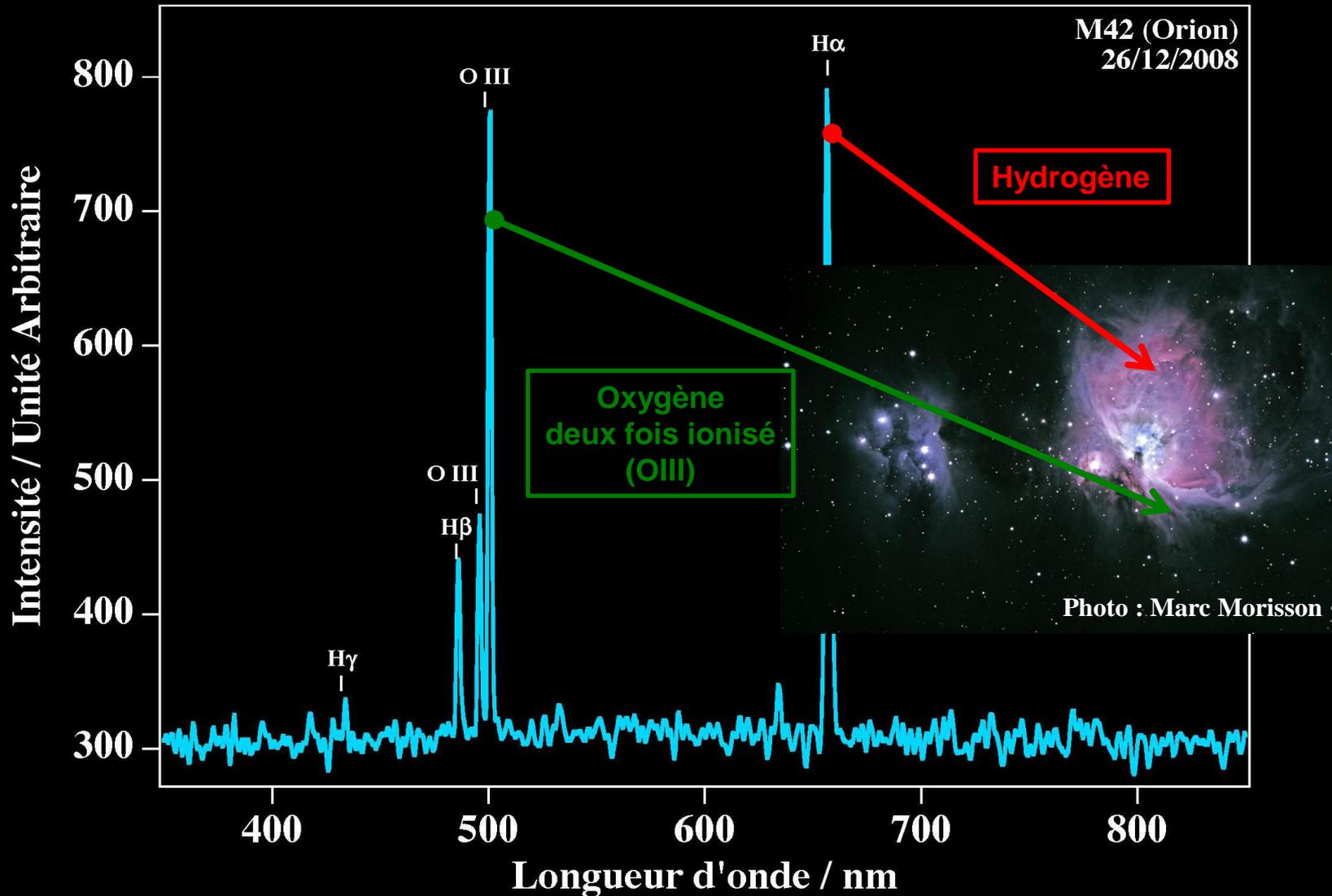
Longueur d'onde / nm



Goûter les astres



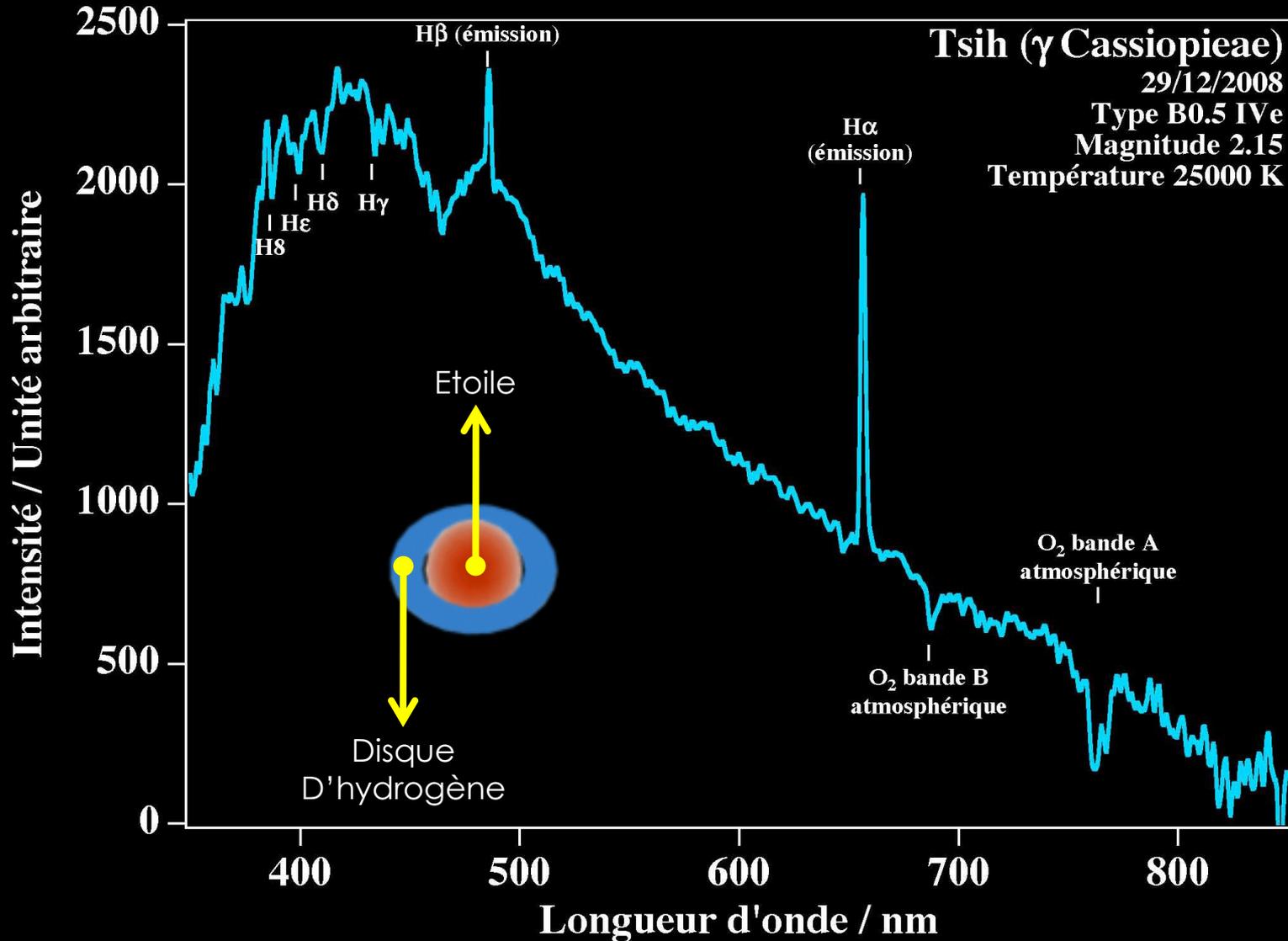
# Raies d'émission



Goûter les astres



# Absorption et émission



Goûter les astres



# Lumière et molécules

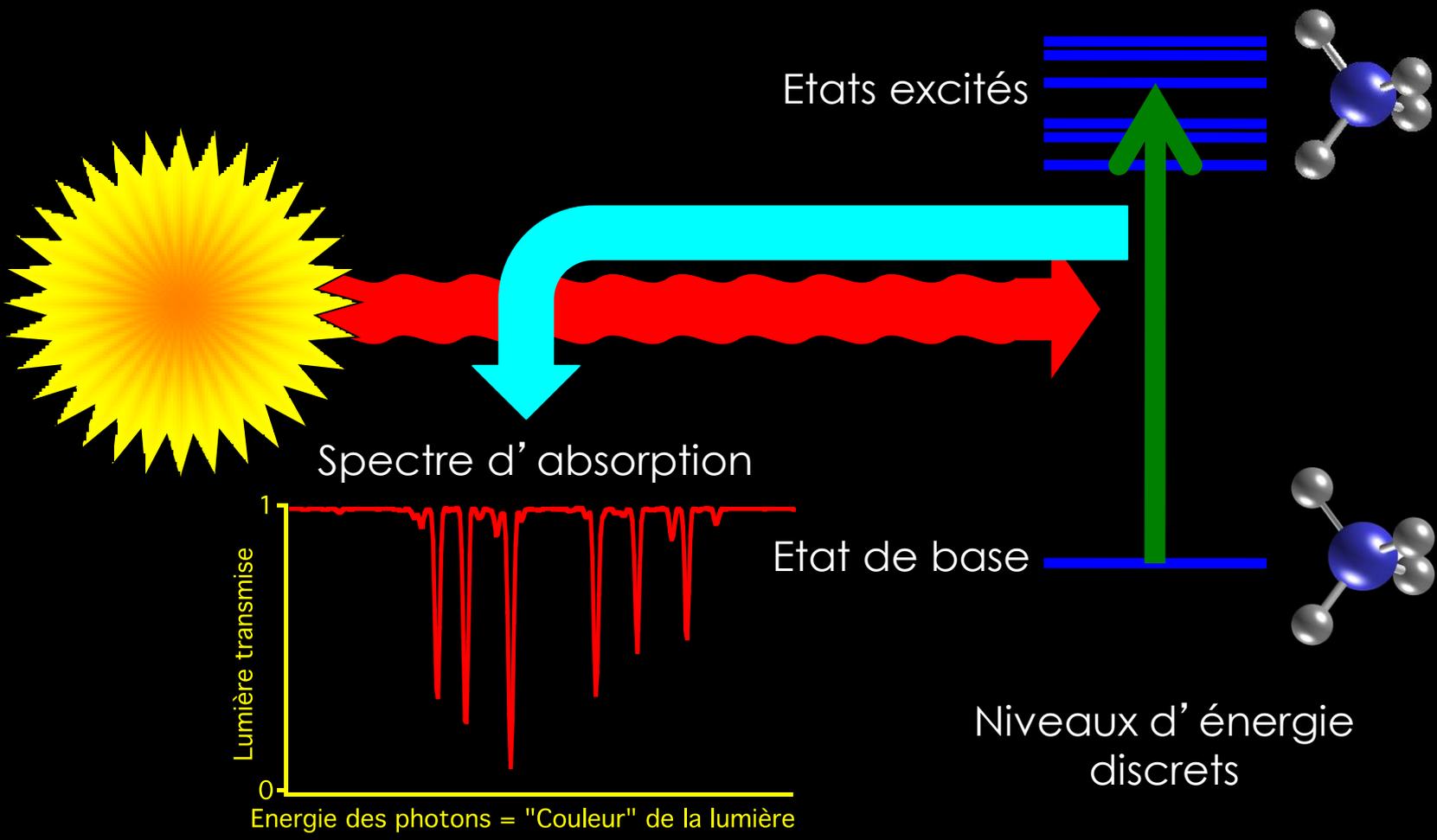


Source de  
lumière

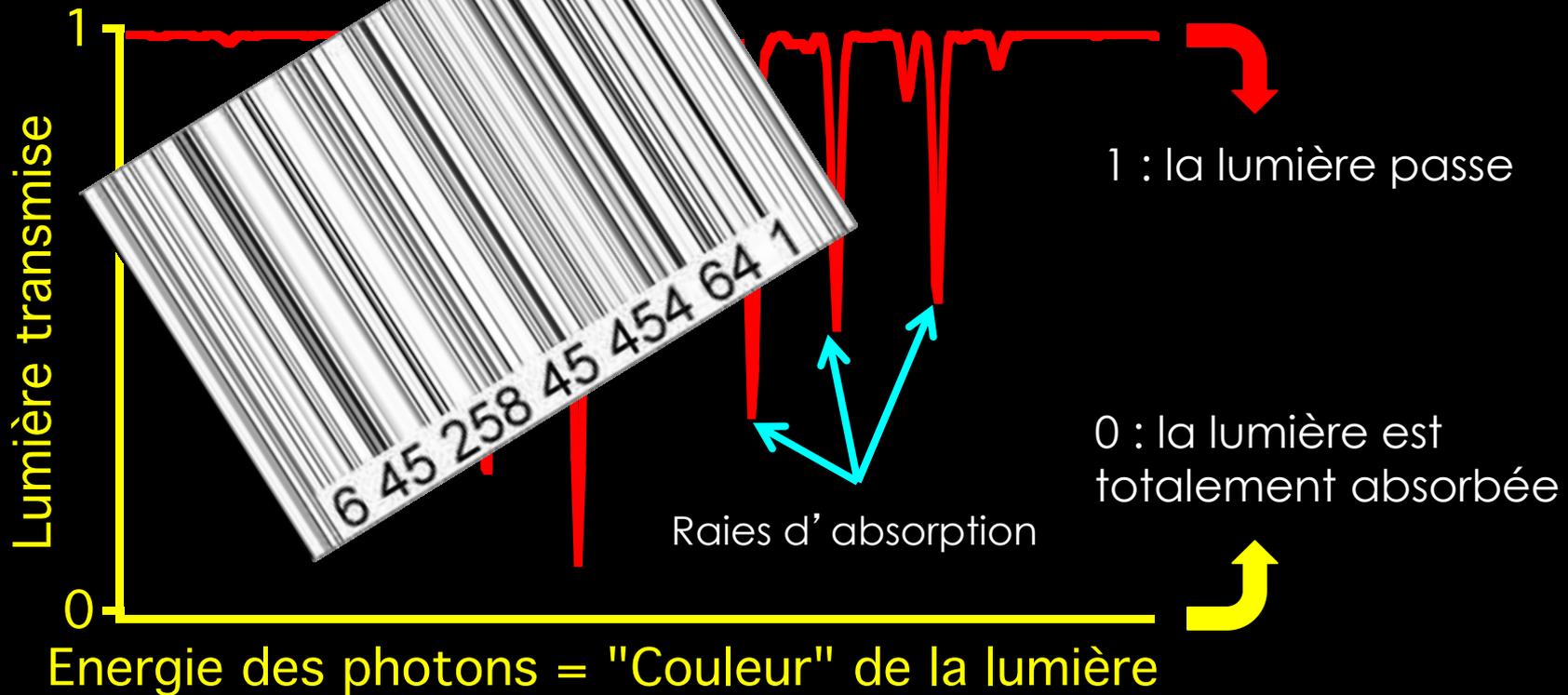
Photons émis et  
absorbés

Rotation et  
vibration

# Un spectre c'est discret !



# Le code-barre des étoiles

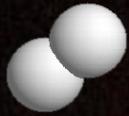


Goûter les astres

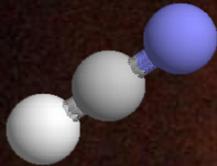


# Molécules interstellaires

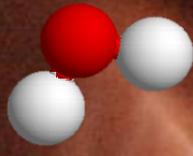
On connaît plus de 150 molécules différentes dans le milieu interstellaire. D'autre part, les enveloppes circumstellaires sont également riches de molécules encore plus complexes.



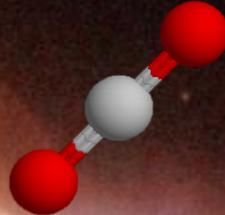
Hydrogène



Cyanure  
d'hydrogène



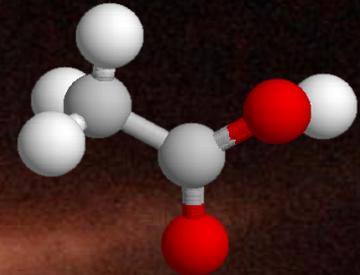
Eau



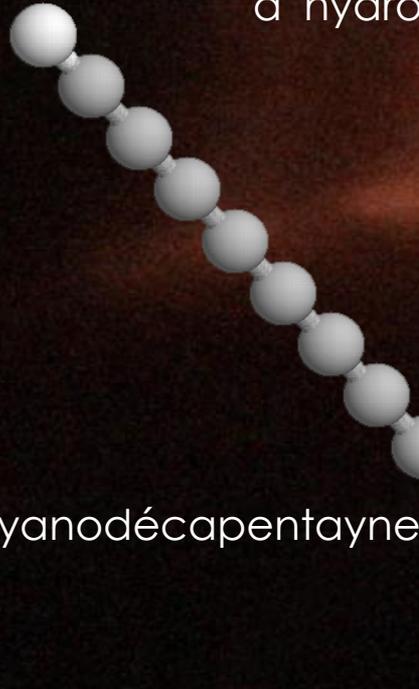
Dioxyde  
de carbone



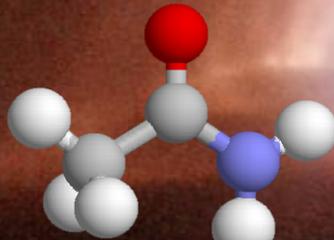
Méthane



Acide acétique

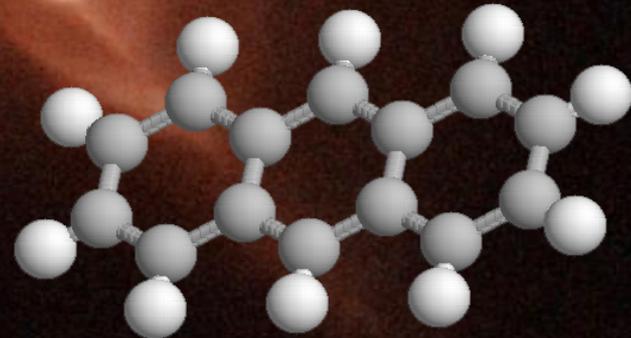


Cyanodécapentayne



Acétamide

Les nuages protoplanétaires contiennent des molécules très complexes.

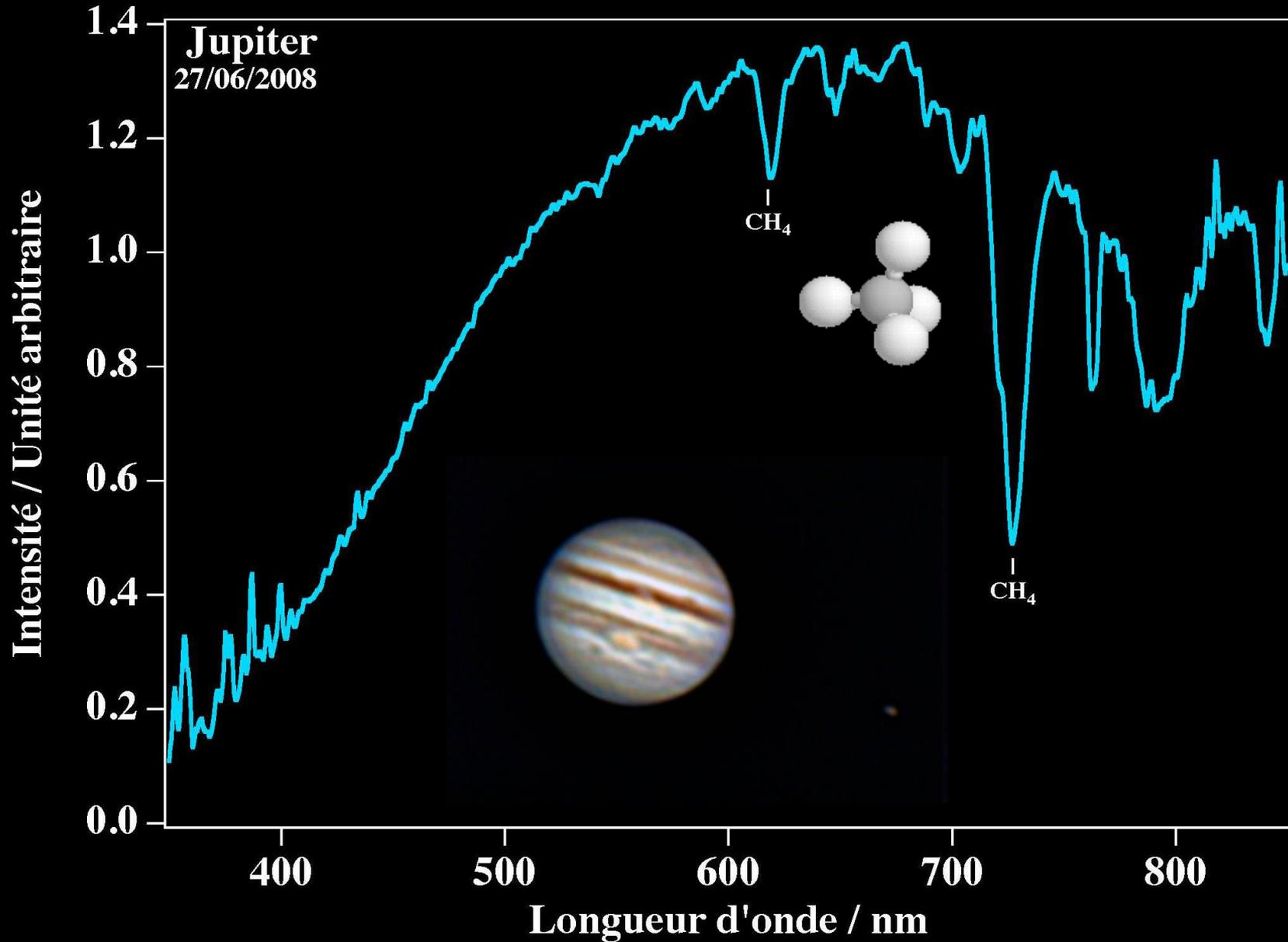


Anthracène

Goûter les astres



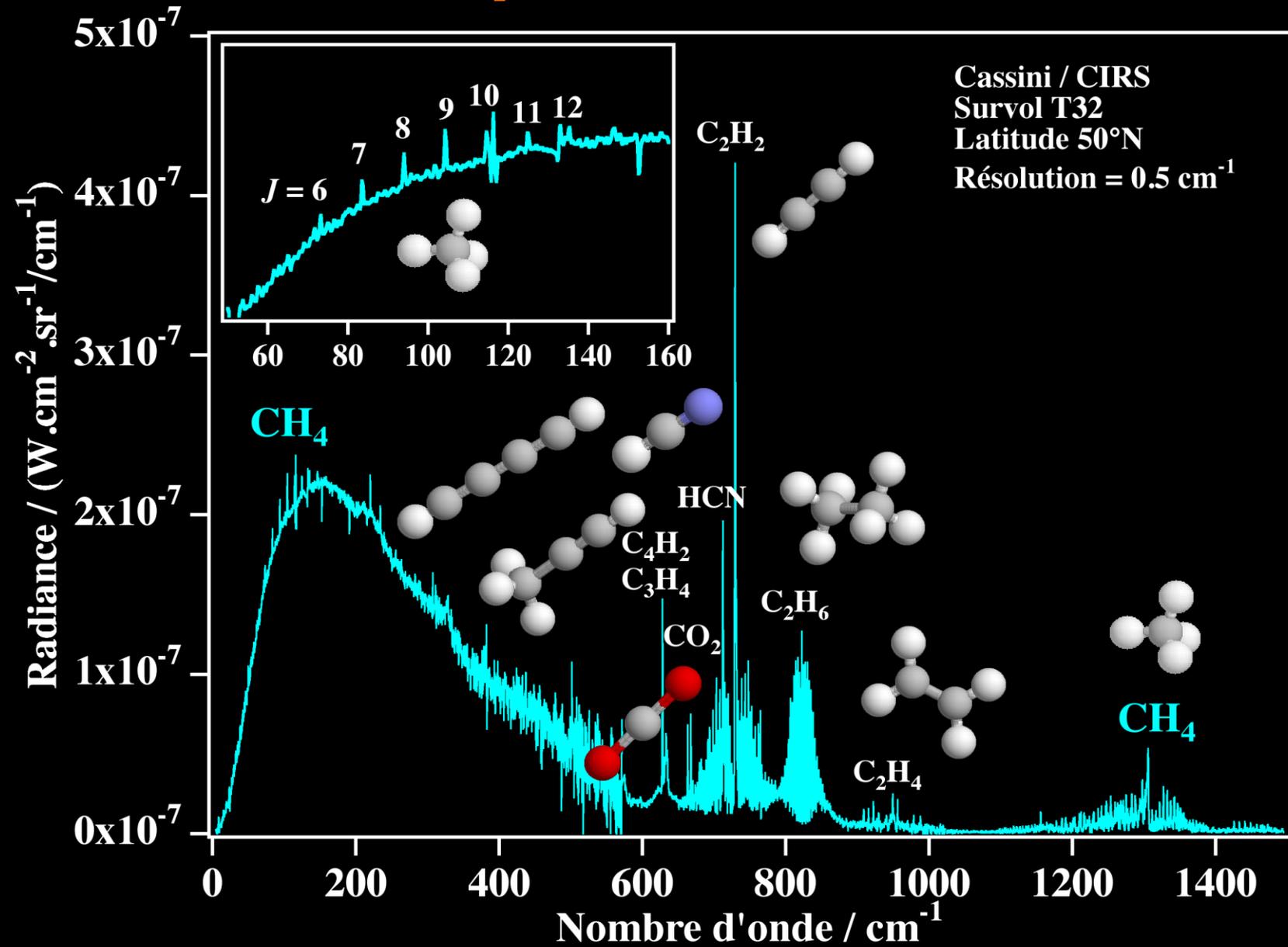
# Spectre planétaire : Jupiter



Goûter les astres



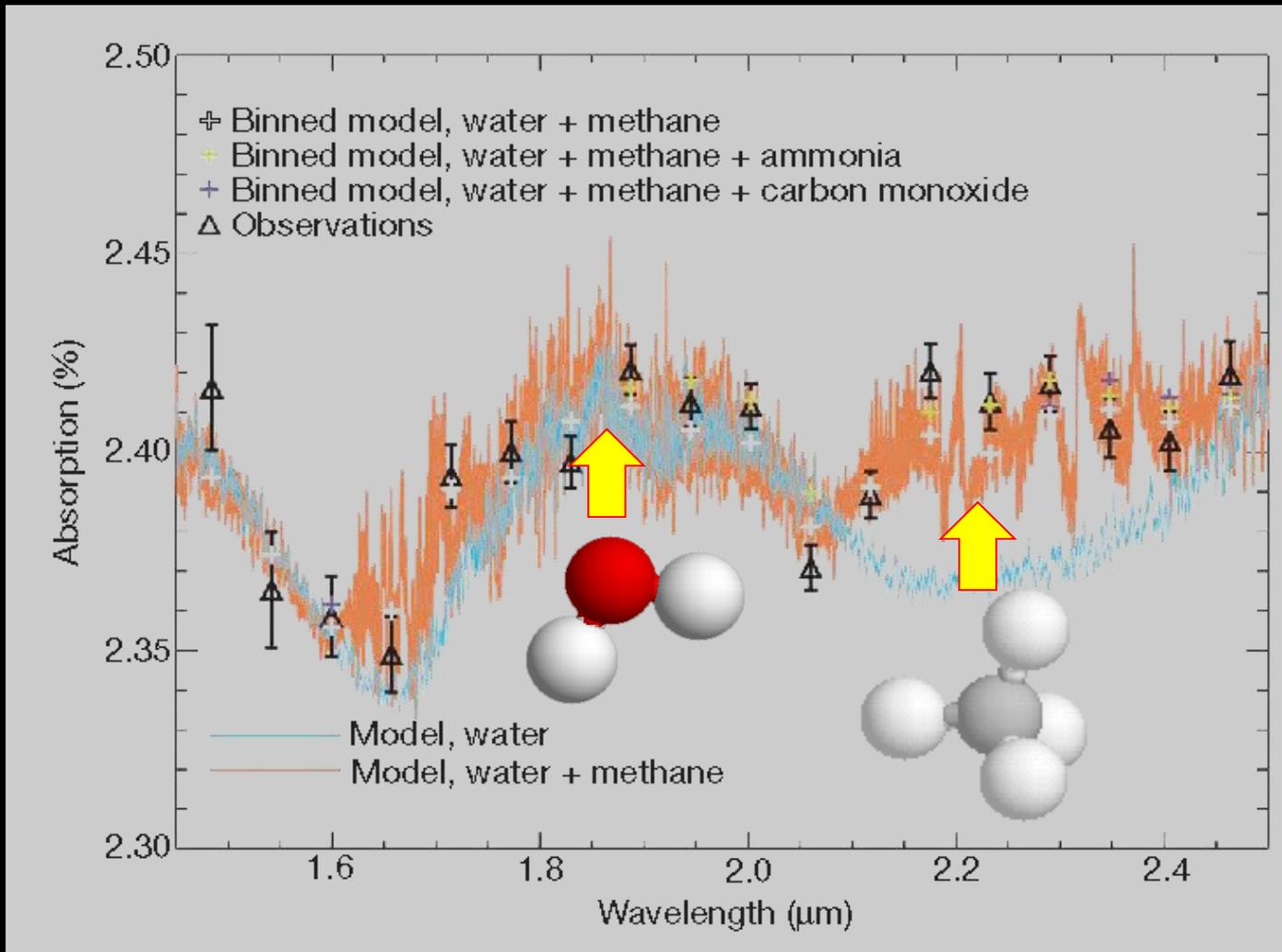
# L'atmosphère de Titan



Goûter les astres



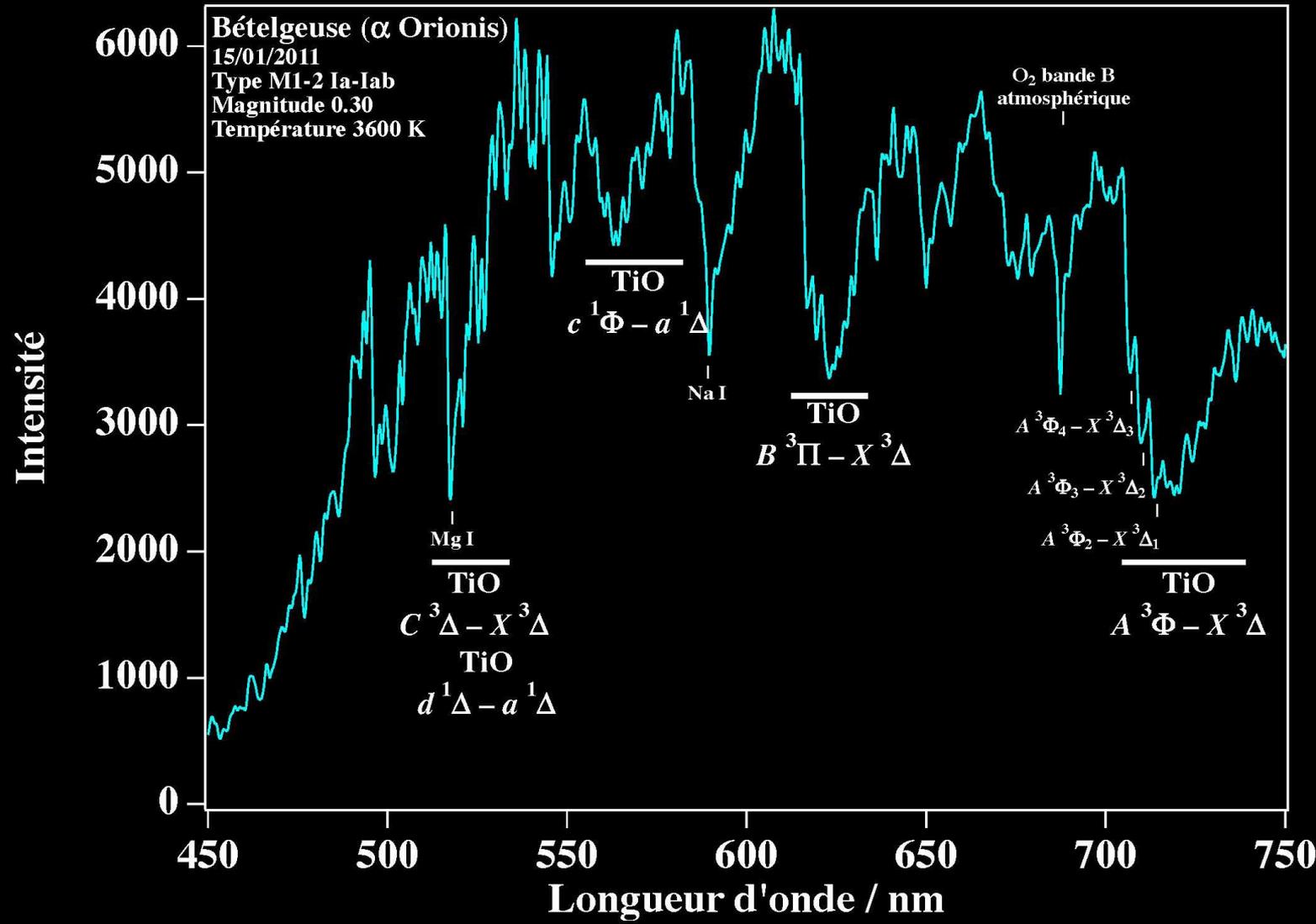
# Spectres d'exoplanètes



Goûter les astres

M. R. Swain, G. Vasisht and G. Tinetti, *Science* 452, 329–331 (2008) :  
Détection de  $\text{CH}_4$  et  $\text{H}_2\text{O}$  dans l'atmosphère de l'exoplanète HD189733b

# Molécules dans les étoiles « froides »



Goûter les astres

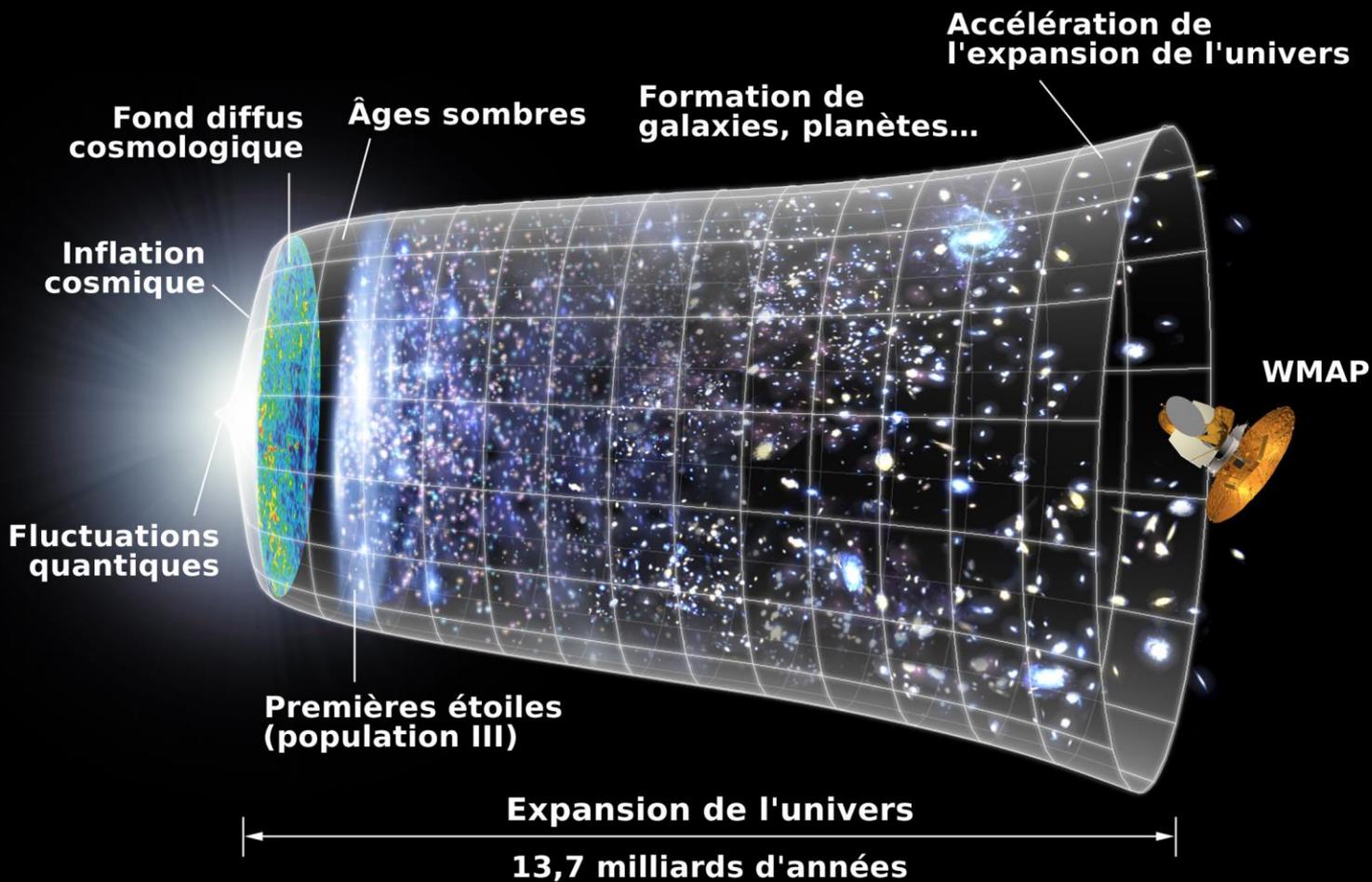


# La première lumière



# Big Bang !

## La première lumière



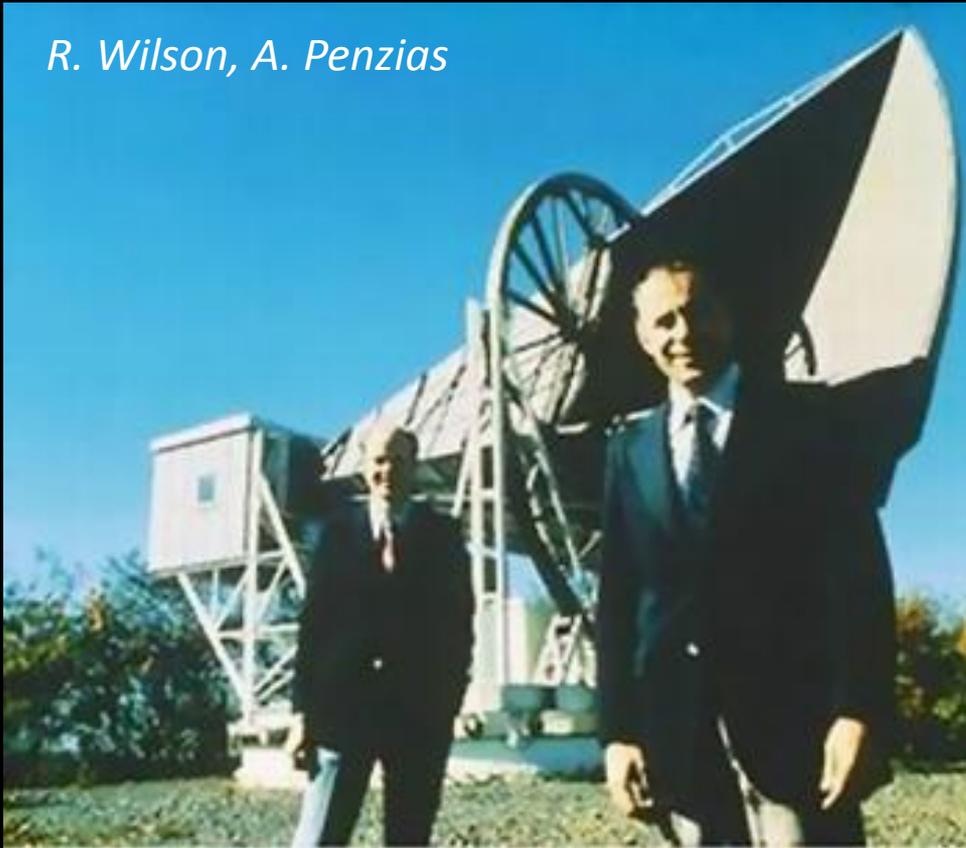
NASA/WMAP Science Team

# Libérez les photons !

Après le Big Bang, le jeune Univers est très chaud. C'est un plasma opaque.

Après 380 000 ans, il se refroidit suffisamment pour que les électrons se lient aux noyaux et que la lumière circule librement.

*R. Wilson, A. Penzias*



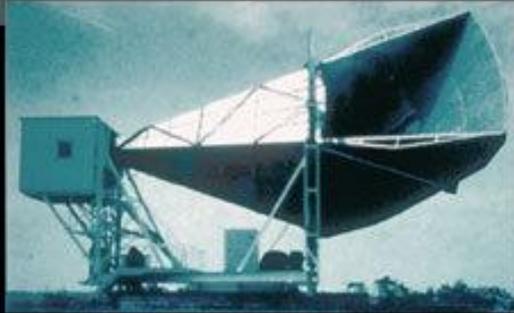
Cette première lumière est encore observée aujourd'hui en **micro-ondes** : c'est le **fond diffus cosmologique**.

Il est prédit par la théorie du Big-Bang.

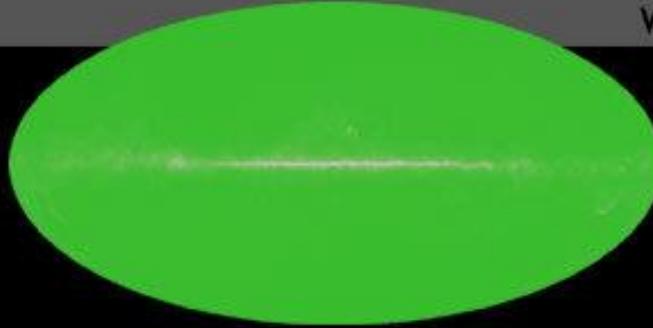
Il fut détecté (par hasard) par **A. Penzias** et **R. Wilson** en 1965 (prix Nobel de Physique 1978).

# Une révélation progressive

1965



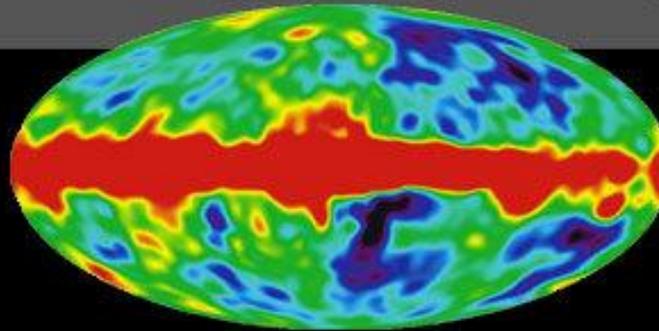
Penzias and  
Wilson



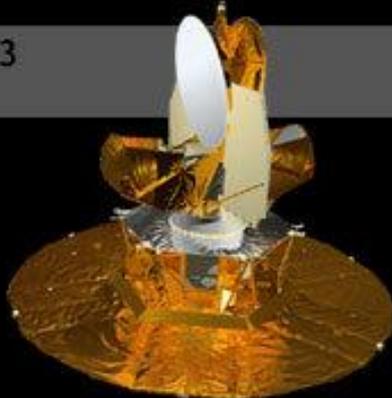
1992



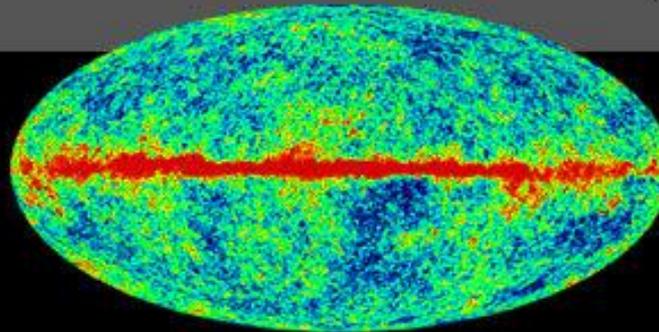
COBE



2003



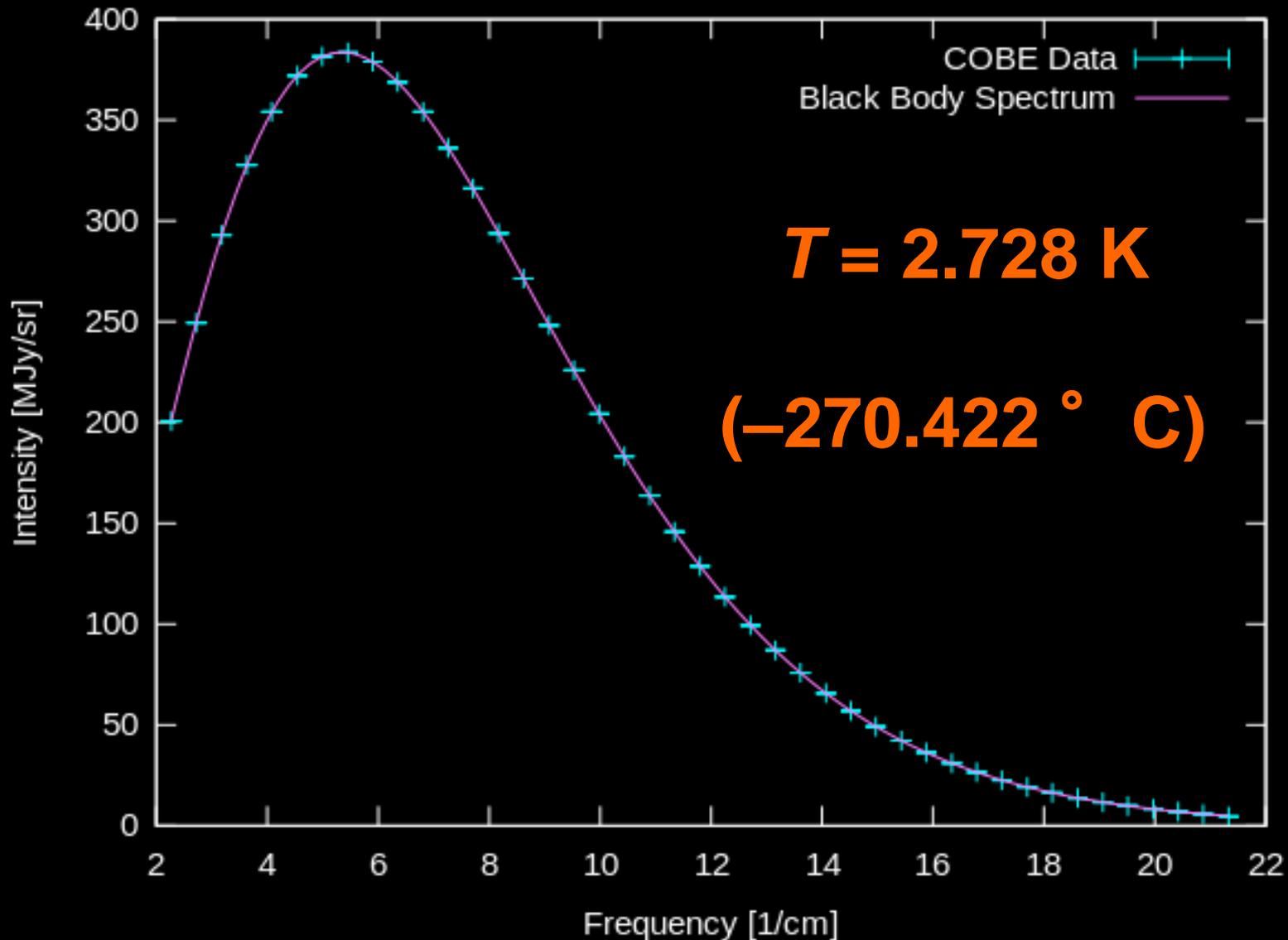
WMAP



La première lumière

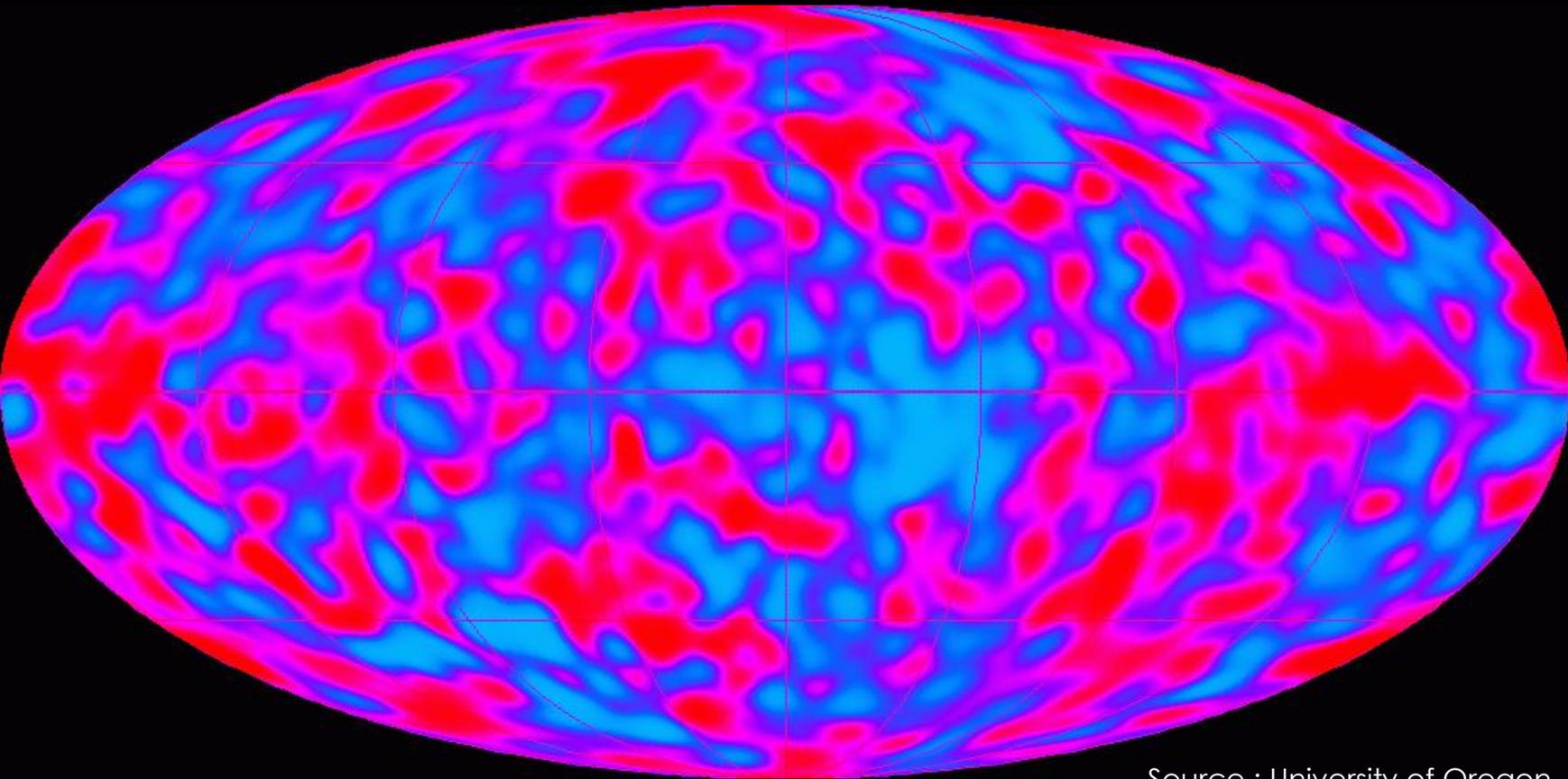
# Une courbe parfaite !

Cosmic Microwave Background Spectrum from COBE



La première lumière

# La carte de COBE (1992)

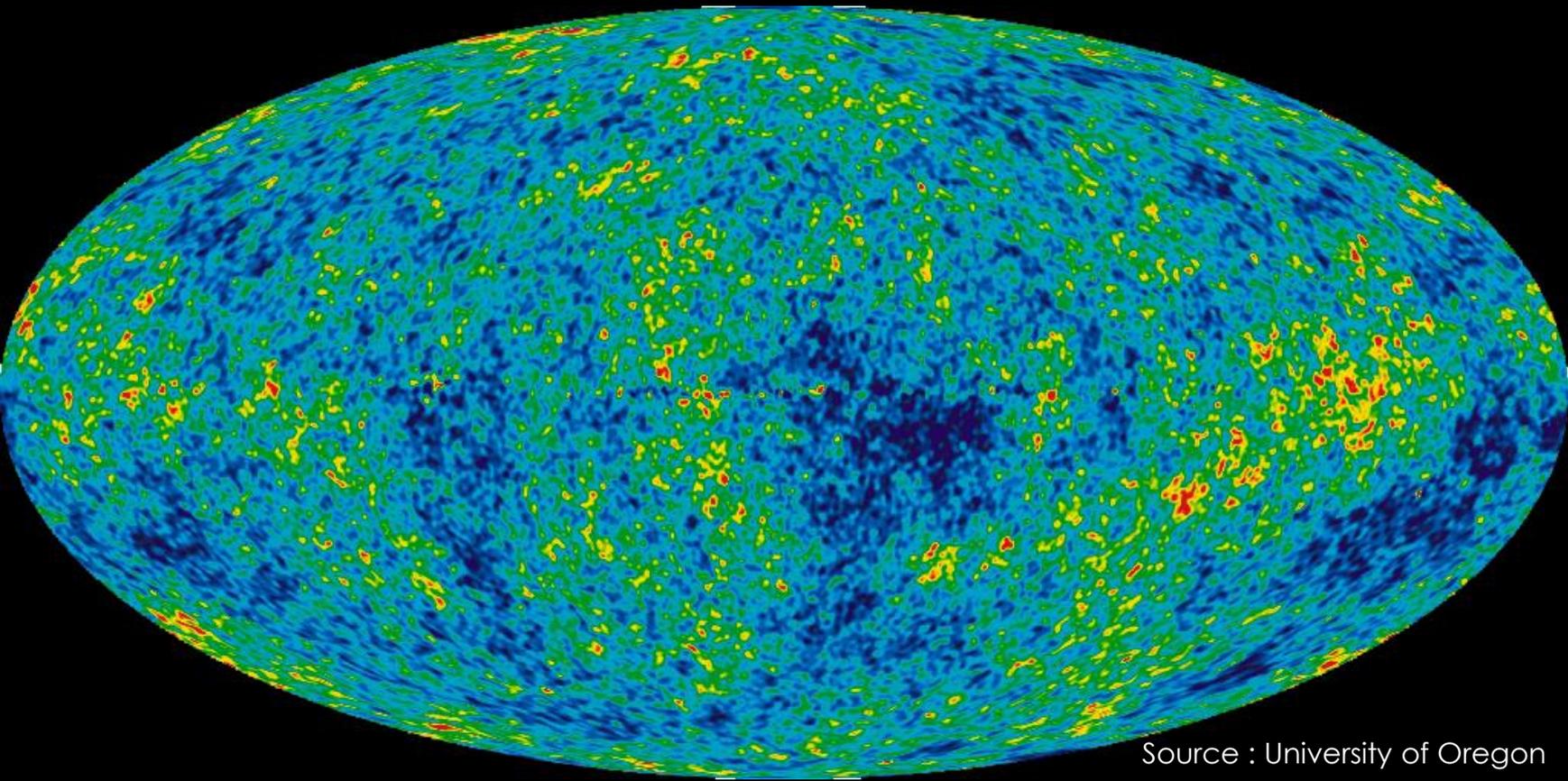


Source : University of Oregon

Le fond diffus est extrêmement homogène et isotrope.

Mais on détecte d'**infimes variations**, de l'ordre de 0.00001 degré. Celles-ci révèlent la structure du jeune Univers.

# La carte de WMAP (2003)



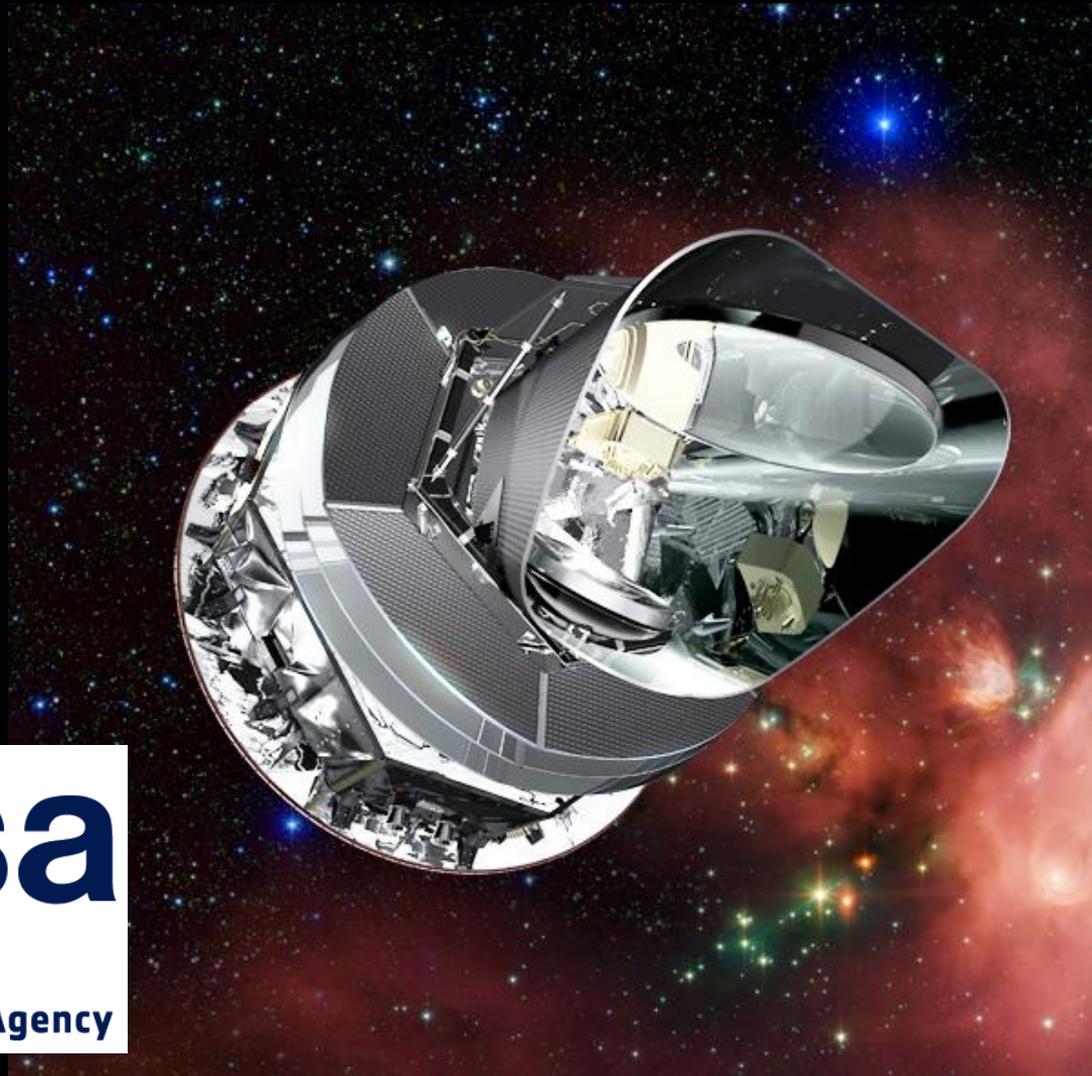
Source : University of Oregon

Ces structures sont à l'origine des amas de galaxies de l'Univers actuel.

Les scientifiques cherchent donc à mesurer ces fluctuations le plus finement possible.

# PLANCK : encore plus précis

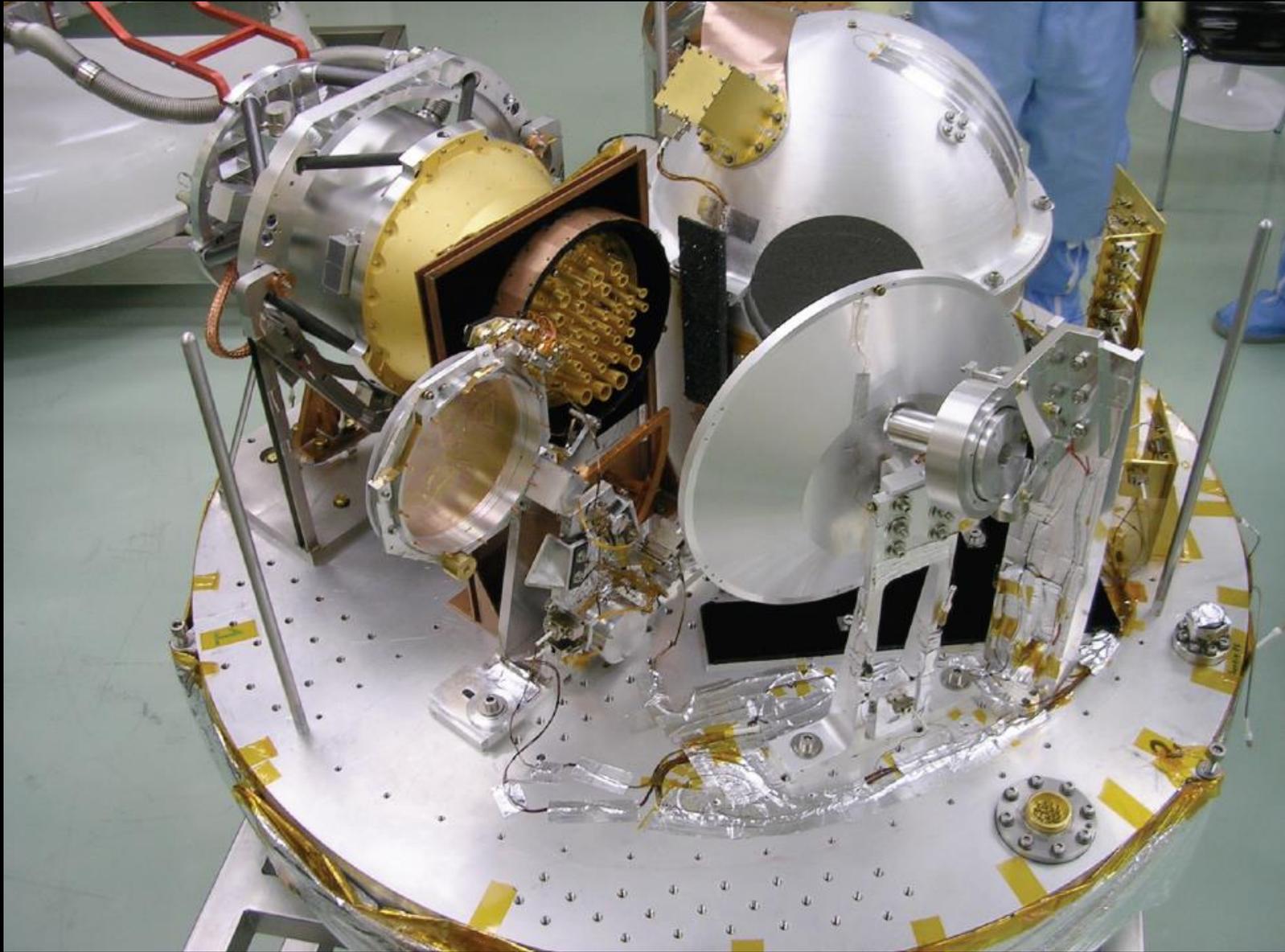
Le détecteur HFI, refroidi à 0.1 K était le point le plus froid de l'Univers (hormis quelques laboratoires terrestres). Planck (ESA) a pu cartographier le rayonnement de fond cosmologique avec une précision inégalée.



La première lumière



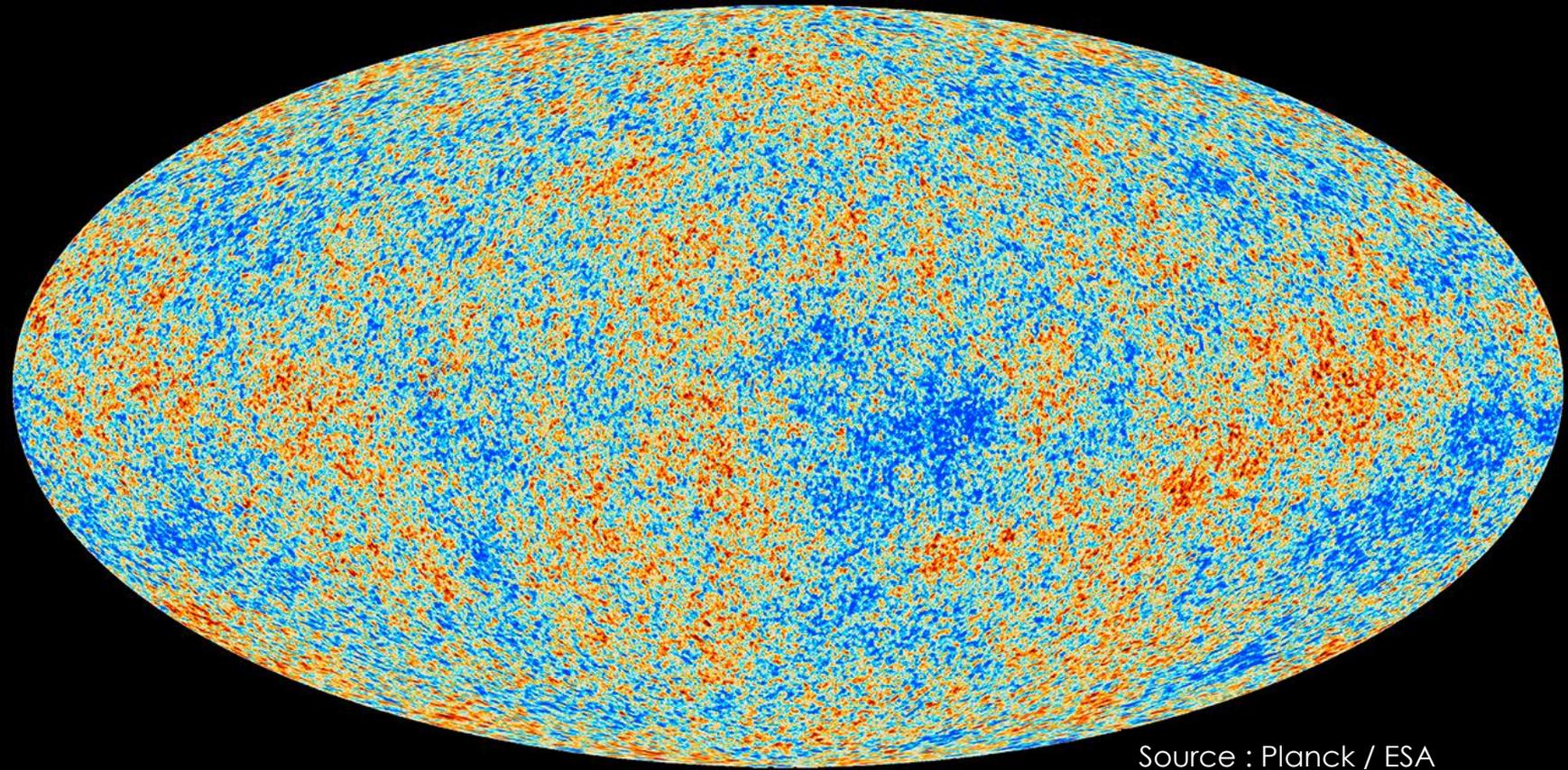
# Un instrument complexe



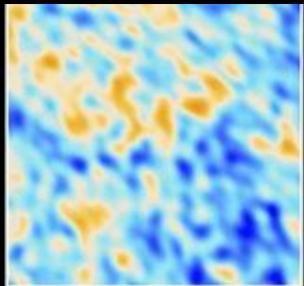
La première lumière

# La carte de Planck (21 mars 2013)

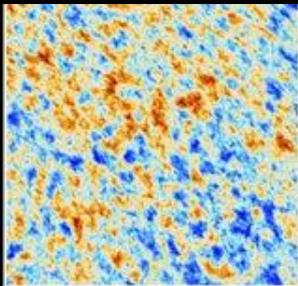
La première lumière



Source : Planck / ESA



WMAP

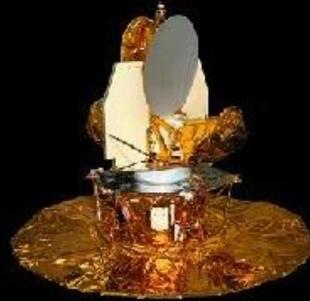


Planck

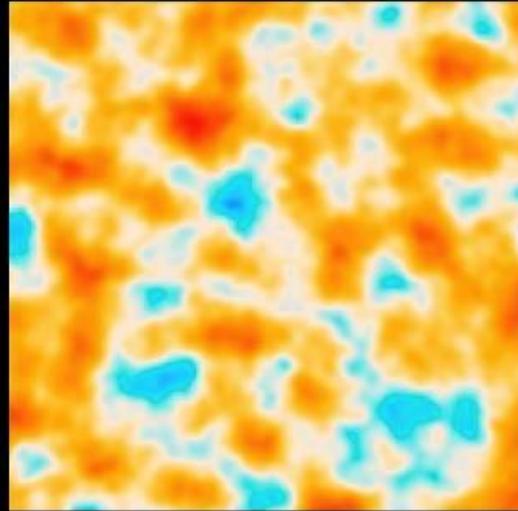
Cohérent avec COBE et WMAP, Planck révèle des détails sans précédent.



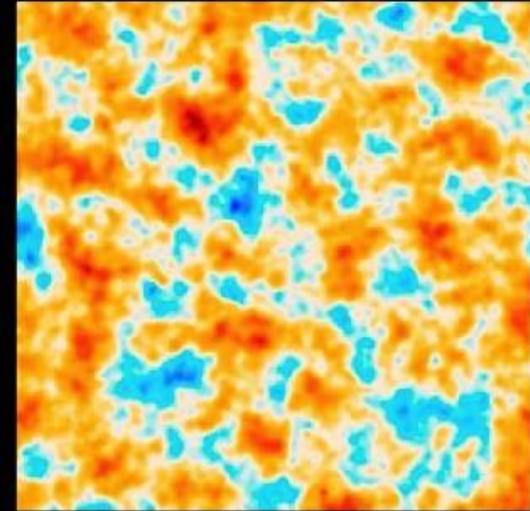
# Des détails de plus en plus fins



COBE



WMAP



Planck

La première lumière

# Une mesure complexe

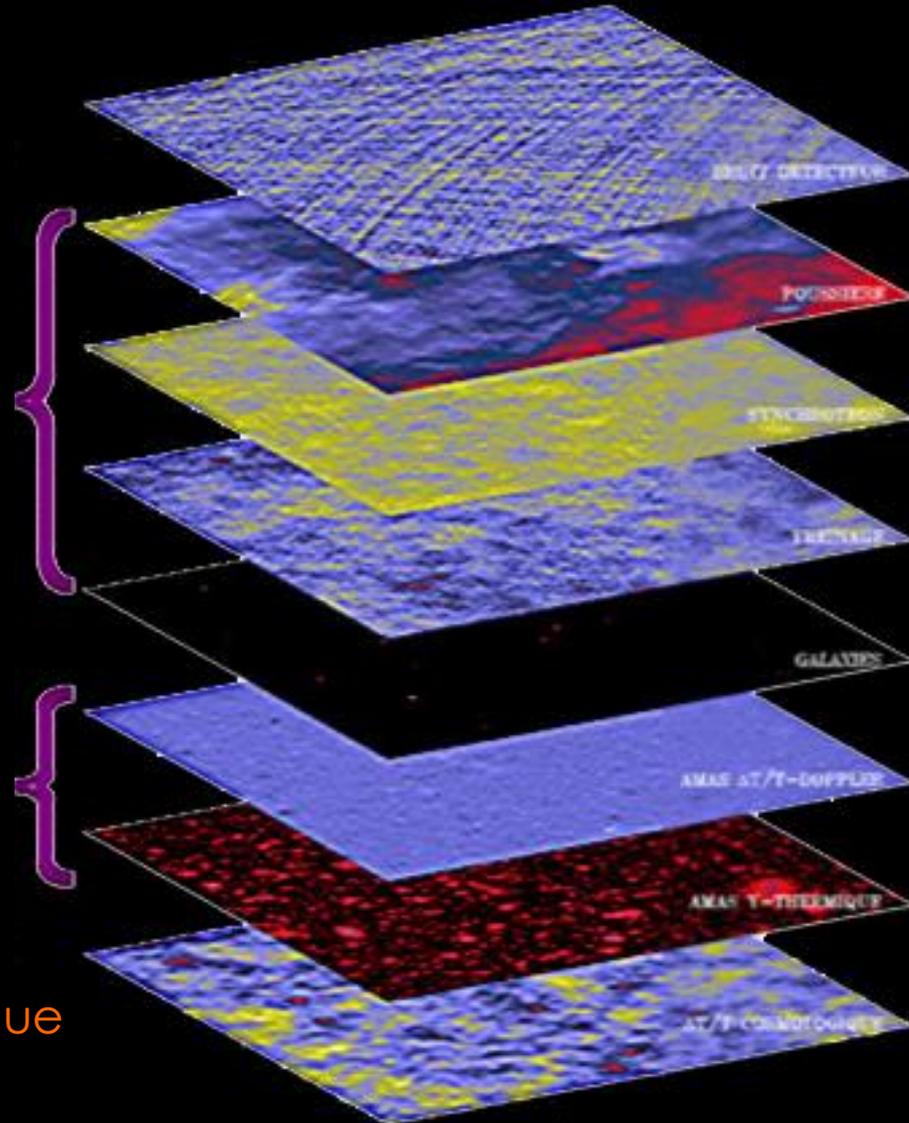
La mesure du fond diffus implique de soustraire les autres contributions.

Instrument

Voie Lactée  
(poussières, etc)

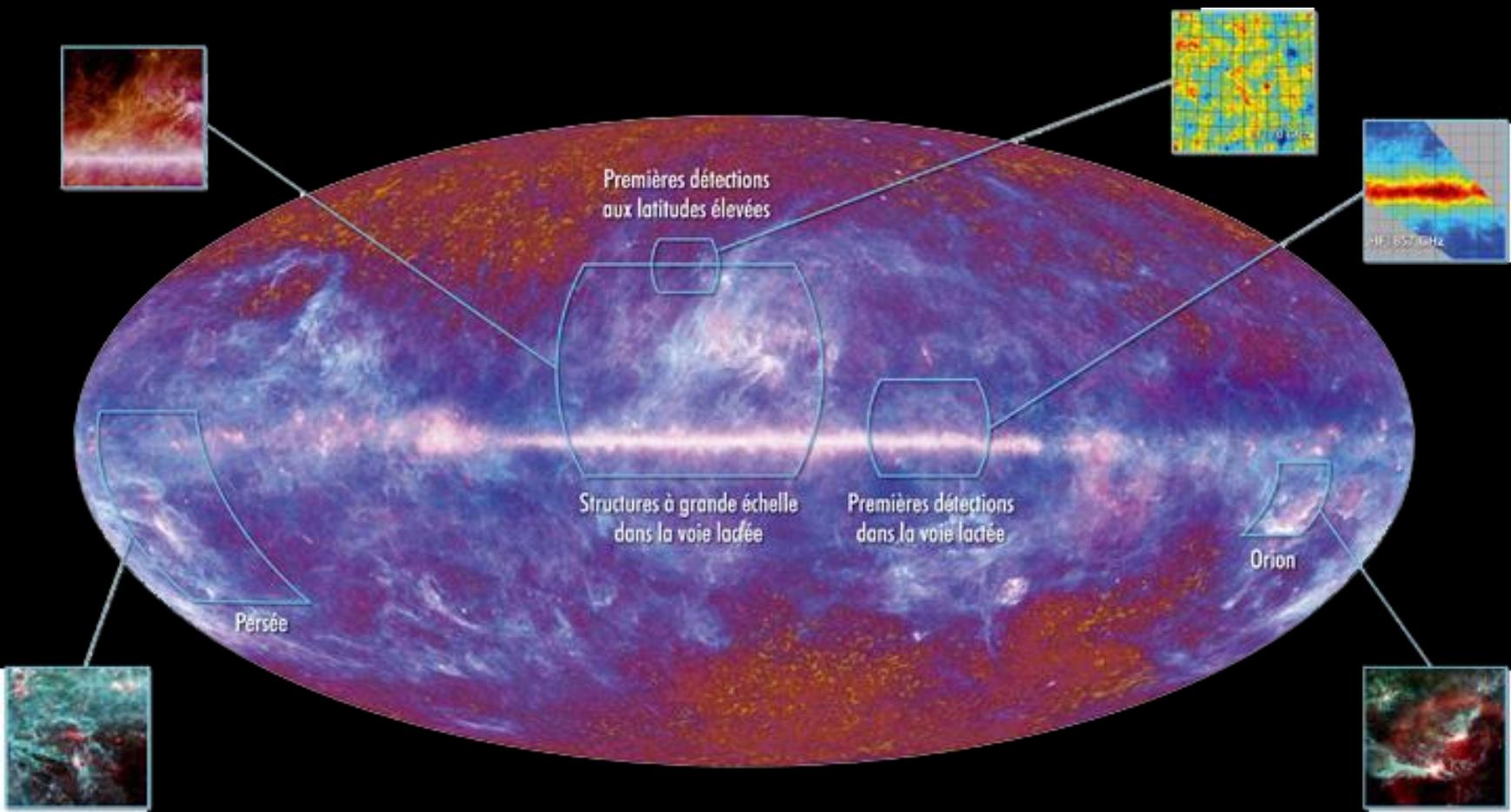
Amas de galaxies

Le fond diffus cosmologique



La première lumière

# Poussières en avant-plan



es  
La première lumière

Les « avant-plans » sont également très intéressants !

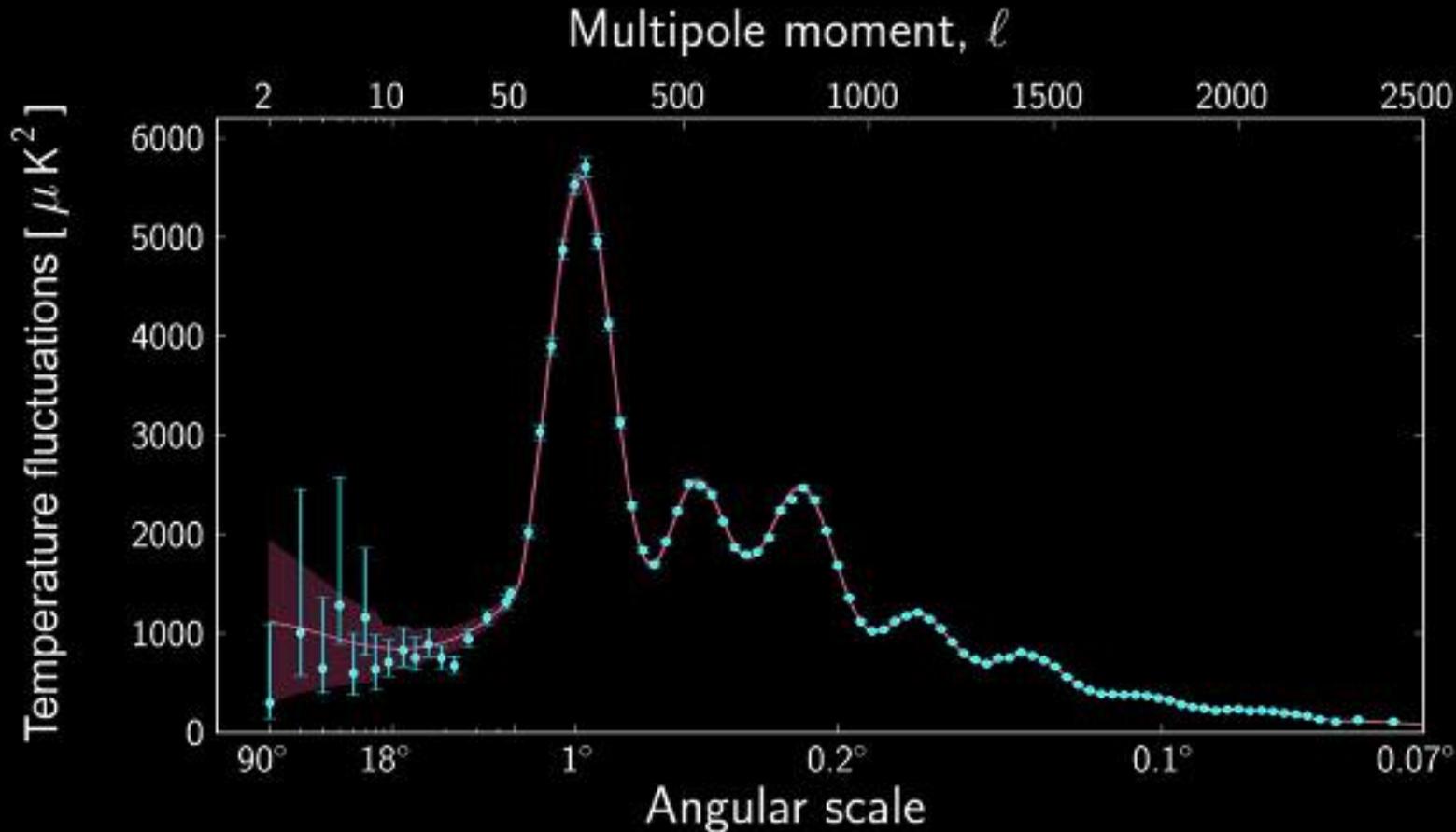
Planck a ainsi pu cartographier en détail la poussière présente dans la Voie Lactée.

Source : <http://www.apc.univ-paris7.fr>



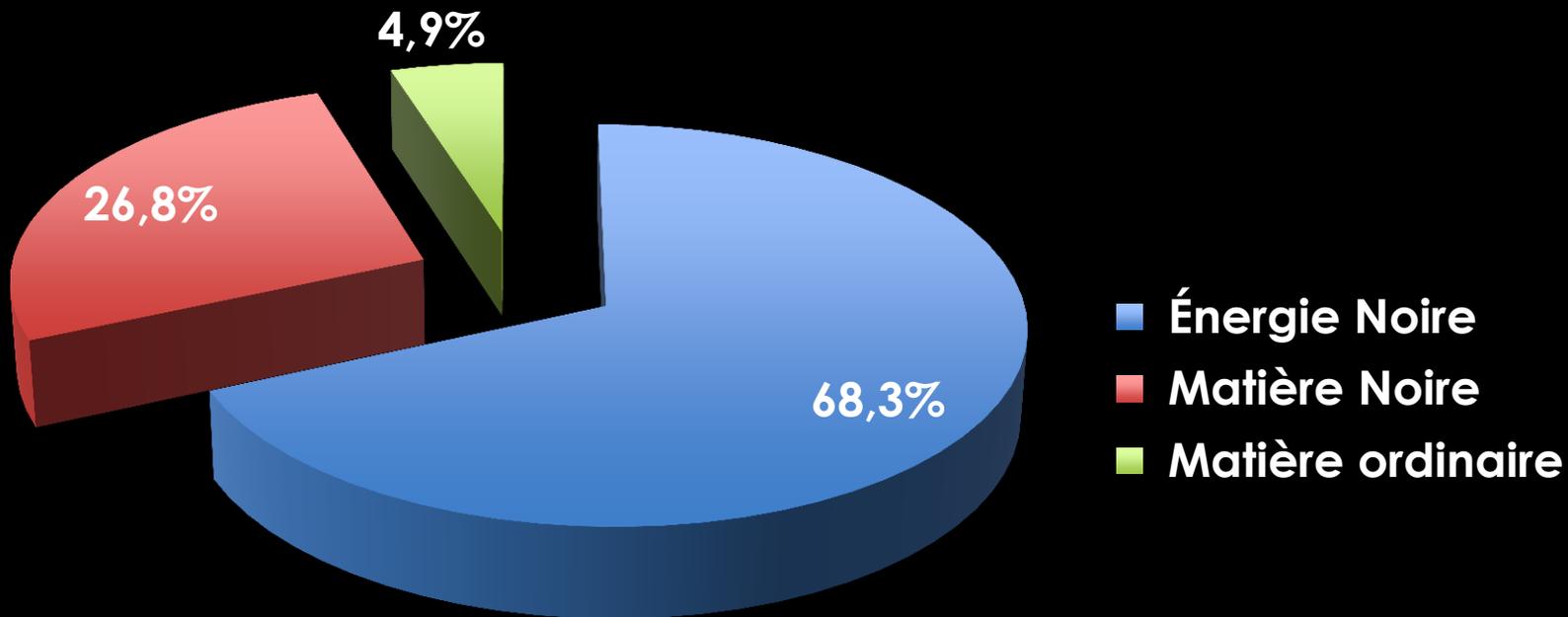
# Les fluctuations selon Planck

Les modèles reproduisent parfaitement les données de Planck (en particulier aux petites échelles) et permettent de préciser les paramètres décrivant l'Univers.



# L'Univers selon Planck

Les données de Planck permettent de préciser le contenu et l'âge de l'Univers.



Age de l'Univers :  $13.81 \pm 0.05$  milliards d'années



**Merci de votre attention !**