La Lumière pour Goûter les Planètes

Vincent BOUDON & Cyril Richard

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

- Ek

Société Astronomique de Bourgogne (SAB)



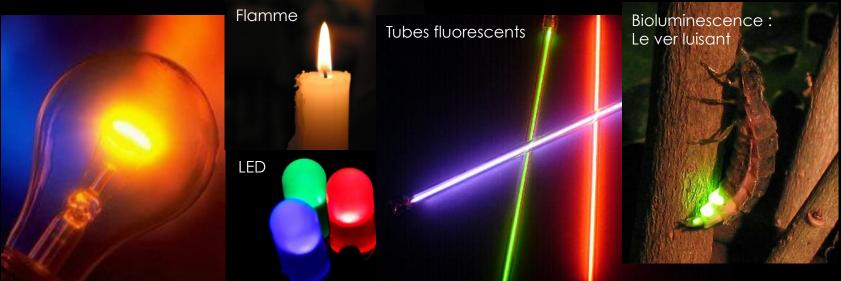


- Qu'est-ce que la lumière ?
- · La couleur des étoiles
- L'Univers de toutes les couleurs
 - Goûter les astres
 - · La première lumière

Qu'es-ce que la lumière ?

Toutes sortes de lumières





Ampoule à incandescence

Décomposer la lumière



En 1666, Isaac Newton décompose la lumière à l'aide d'un prisme. Si 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.

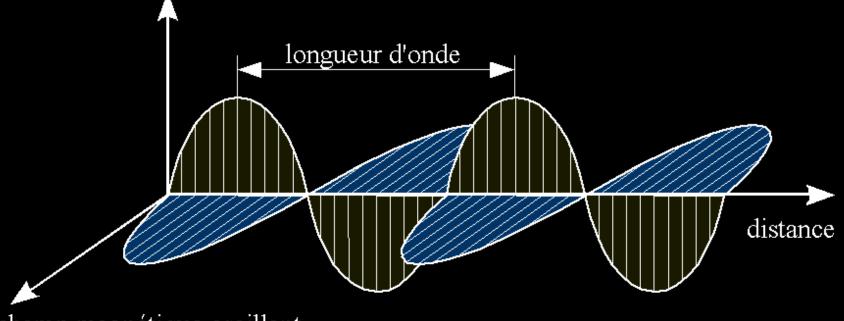
Avant lui, certains pensaient que les couleurs étaient dues au milieu traversé, voire à un effet de la lumière sur notre système sensoriel (Descartes) ...



Lumière et ondes

La lumière est une onde électromagnétique

champ électrique oscillant



champ magnétique 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 (λ):

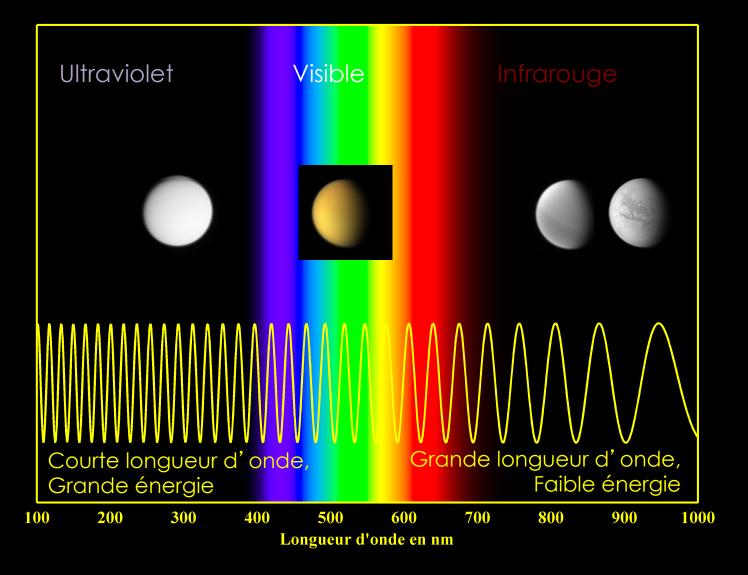
$$E = hc / \lambda$$

Décomposition en longueur d'onde : Le spectre



Qu'es-ce que la lumière?

Longueur d'onde et couleur





Photos: Titan / Cassini-Huygens - NASA

La couleur des étoiles

Lumière et température





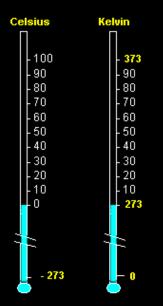
Corps noir!

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.

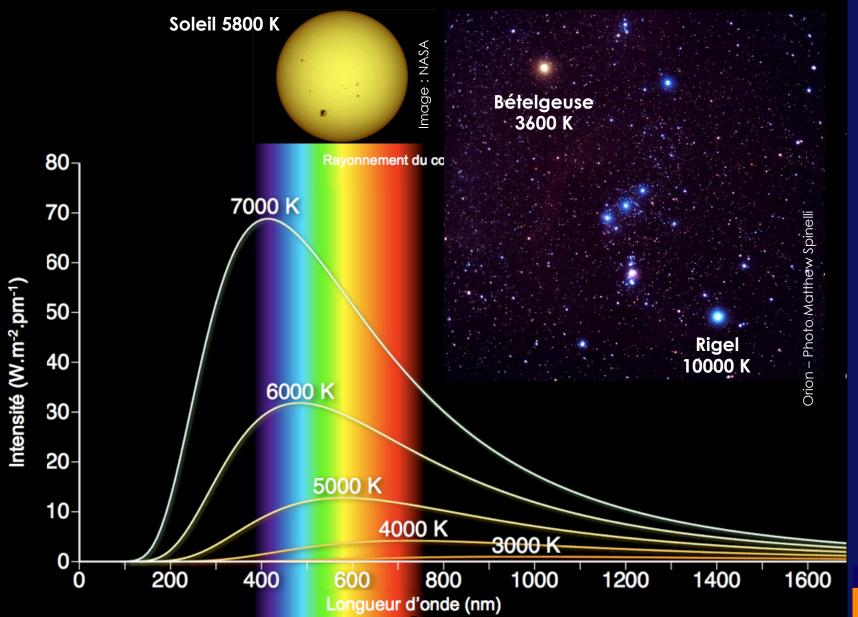


La loi du corps noir permet, grâce à l'analyse du spectre lumineux, de mesurer la température d'un objet.

Les physiciens mesurent les températures en Kelvins, échelle ayant pour origine le zéro absolu (–273.15°C).



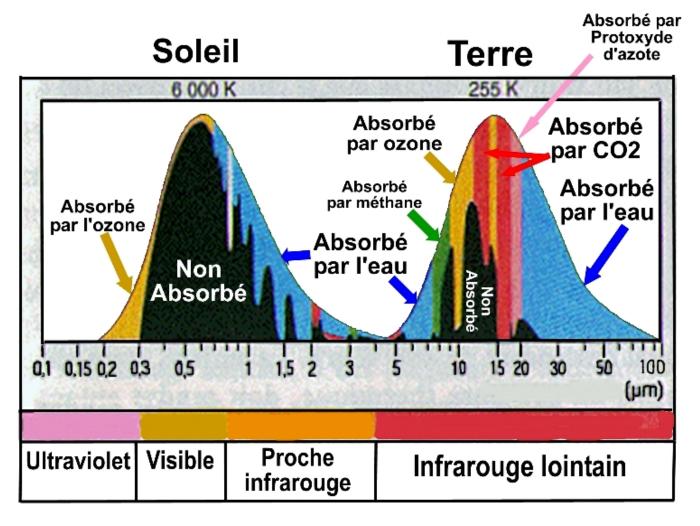
Chaud et froid sur les étoiles



a couleur des étoiles

Soleil et Terre

Spectre d'absorption du rayonnement thermique

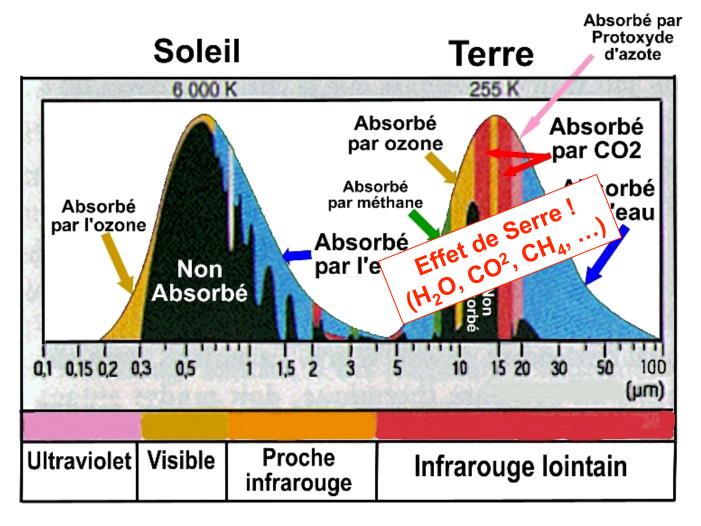


Sources : Sadourny, Jancovici



Soleil et Terre

Spectre d'absorption du rayonnement thermique



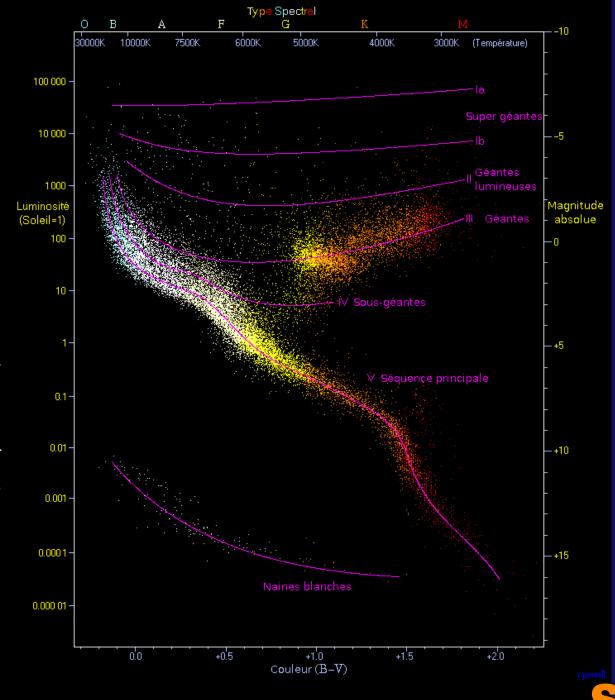
Sources : Sadourny, Jancovici



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-Russel, selon leur degré d'évolution.

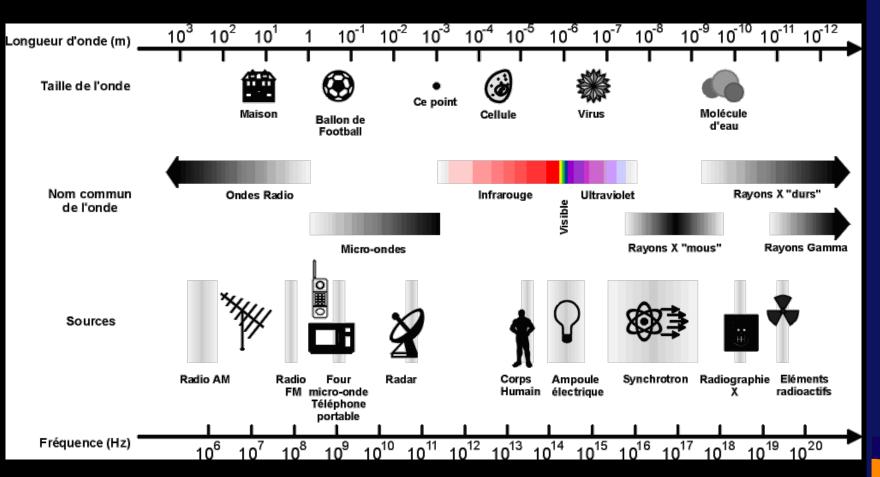


L'Univers de toutes les couleurs

Le spectre électromagnétique

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

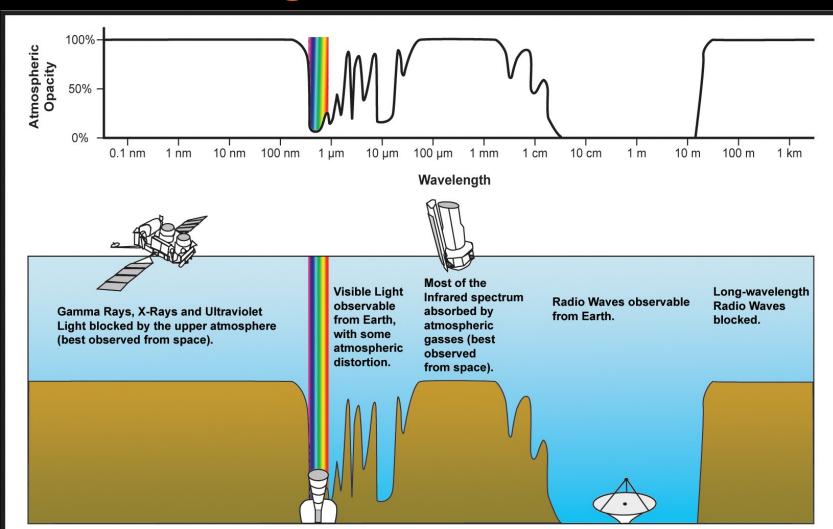
Les astronomes utilisent toutes les longueurs d'onde pour sonder l'Univers.



Source: http://patrick.kohl.pagesperso-orange.fr



Observer dans toutes les longueurs d'onde



Source: Wikipedia

La radioastronomie

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

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



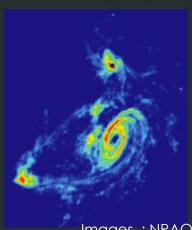


La nébuleuse du Crabe en radio par le VLA

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

Stellar Light Distribution





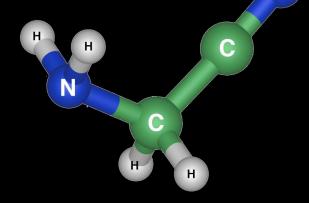
21 cm HI Distribution

Images: NRAO

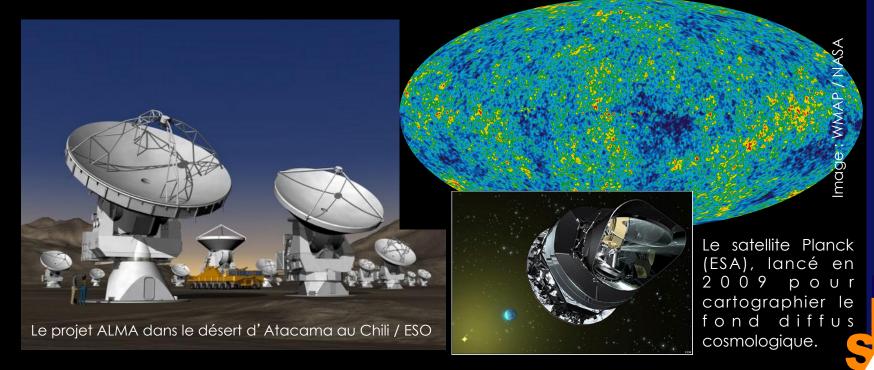
L'Univers en microondes

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.

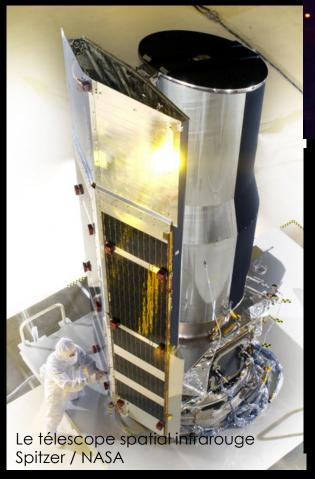


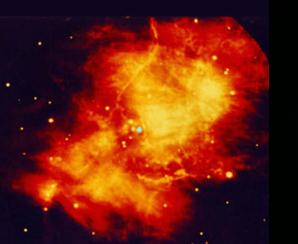
L'aminoacétonitrile, précurseur de la glycine (acide aminé le plus simple), découvert en 2008 dans le « Large Molecular Heimat », près du centre galactique.



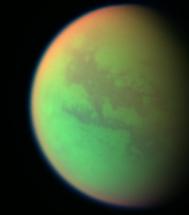
L'Univers en infrarouge

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

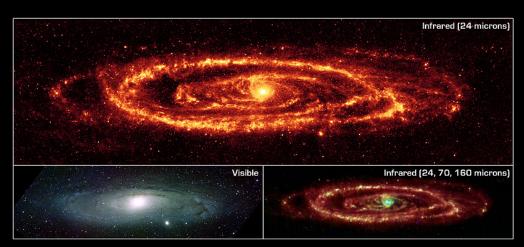




La nébuleuse du Crabe en infrarouge, NASA



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 raiess d'absorption dans le visible.



Le Gran Telescopio Canarias <u>Diamètre</u>: 10,40 m



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

En rouge l'hydrogène.

En vert l'oxygène.



L'Univers en ultraviolet

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.

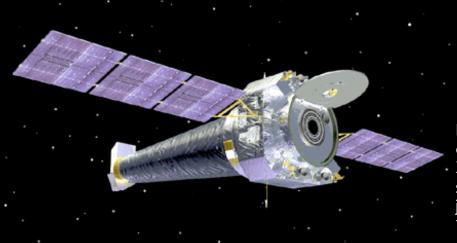




L'Univers en rayons X

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.



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

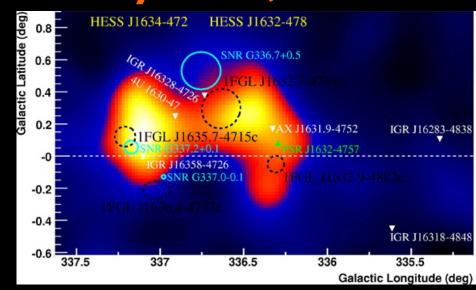
Le Soleil en rayons X par le satellite japonais Yohkoh



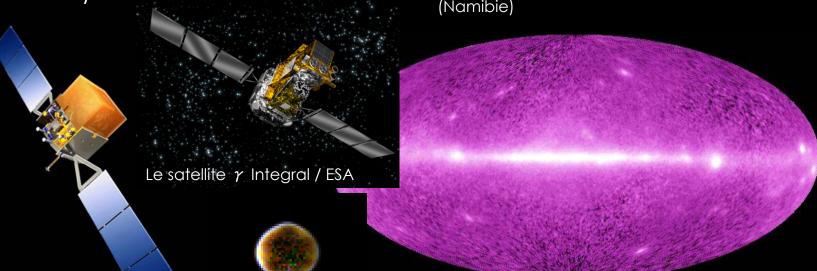
L'Univers en rayons γ

Les rayons γ sont émis par les noyaux atomiques (radioactivité, réactions nucléaires).

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

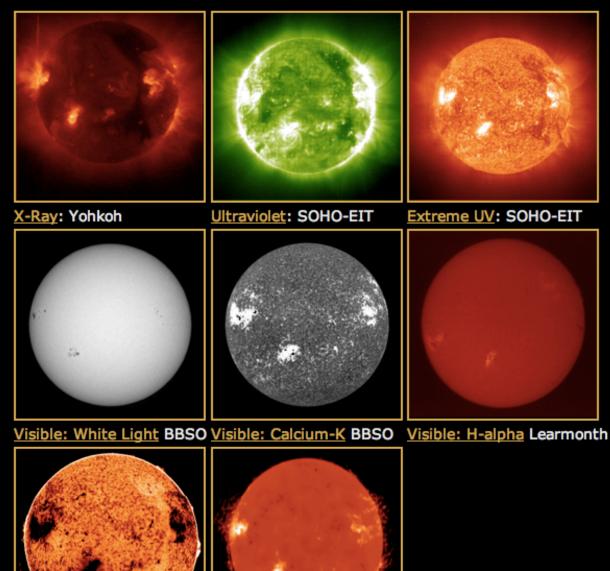


Sources γ galactiques par le télescope HESS (Namibie)

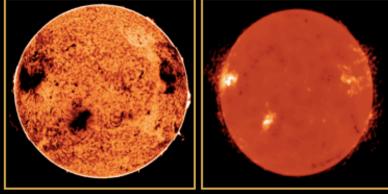


La Terre (à gauche) et le ciel (ci-dessus) en rayons γ par le satellite Compton Gamma Ray Observatory / NASA

Le Soleil vu dans différentes longueurs d'onde



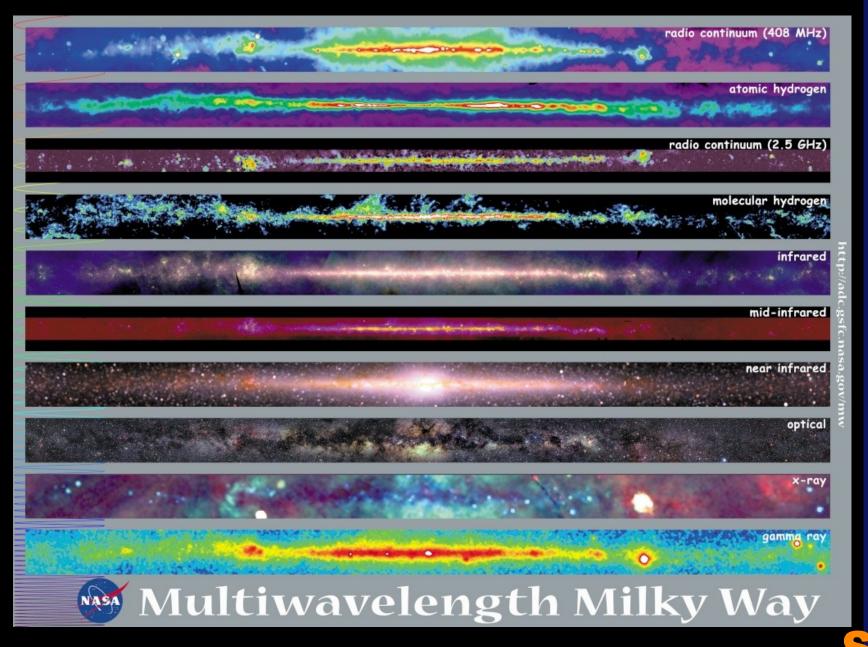
Source: Caltech



Infrared: NSO

Radio: NobeyamaObs

Les couleurs de la Voie Lactée

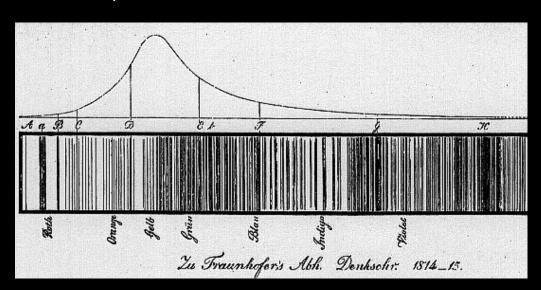






Les raies spectrales

- 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.

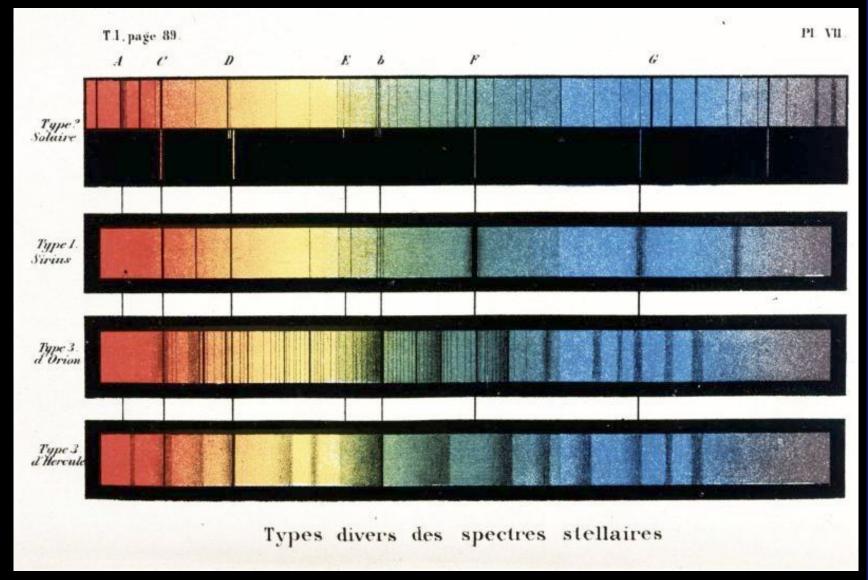
Source: http://www.hao.ucar.edu



Spectre solaire

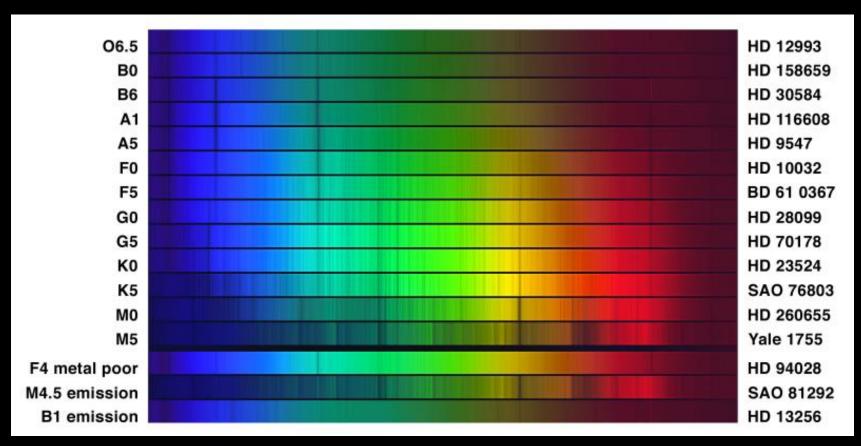
Spectres d'étoiles

Dès la fin du 19^{ème} siècle, ont été observés les premiers spectres stellaires.



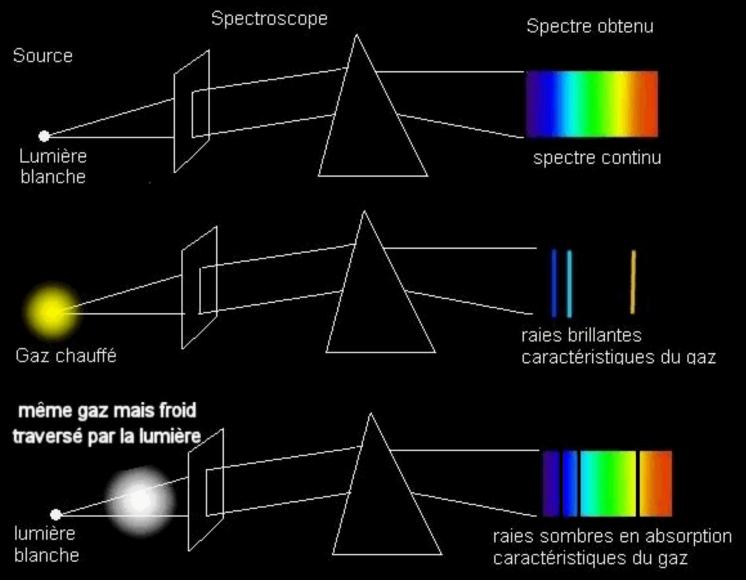
Types spectraux

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).



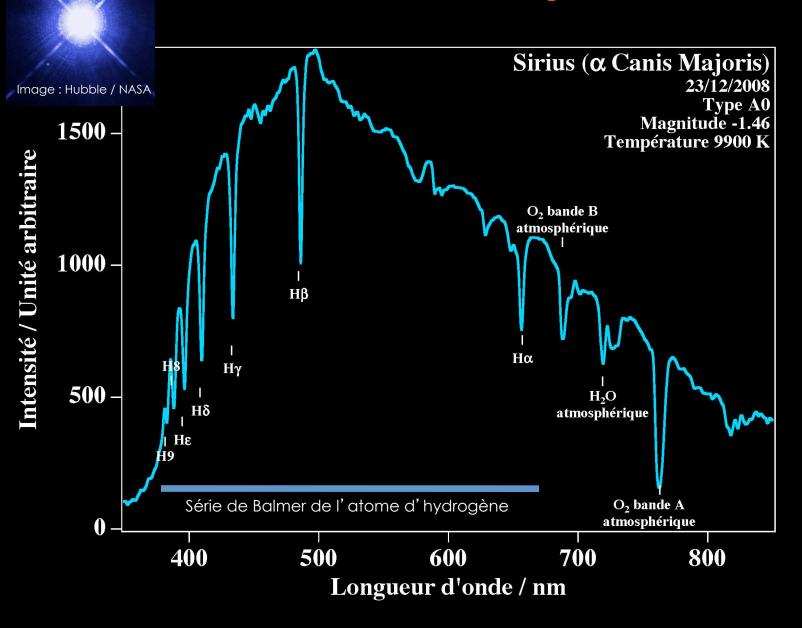


Principes physiques



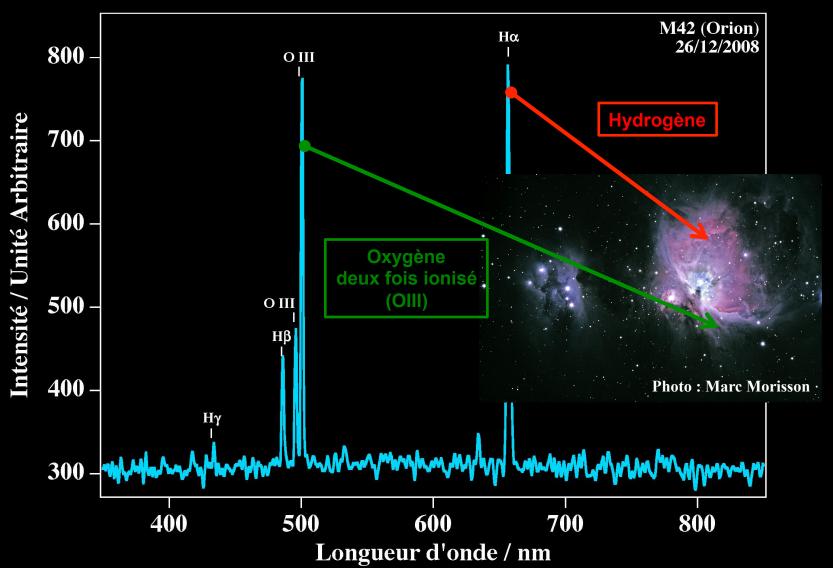


Raies d'absorption





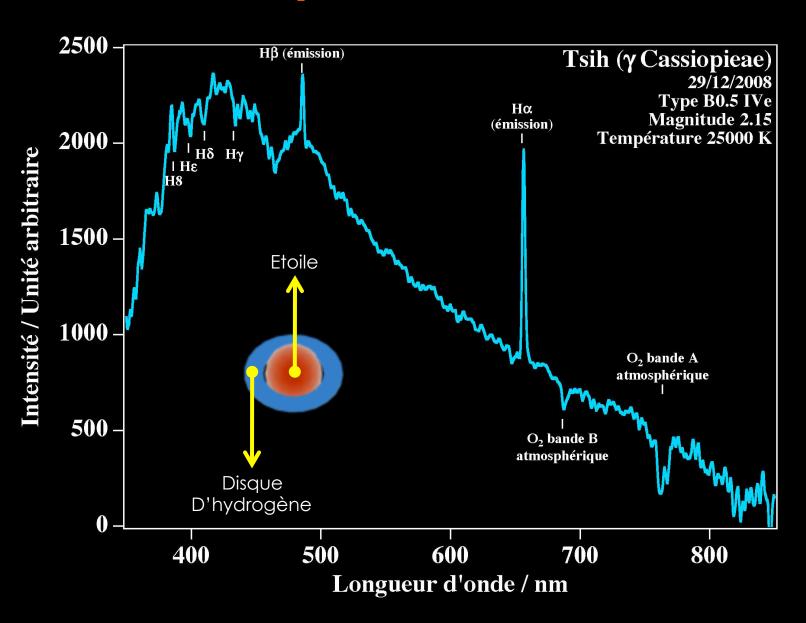
Raies d'émission





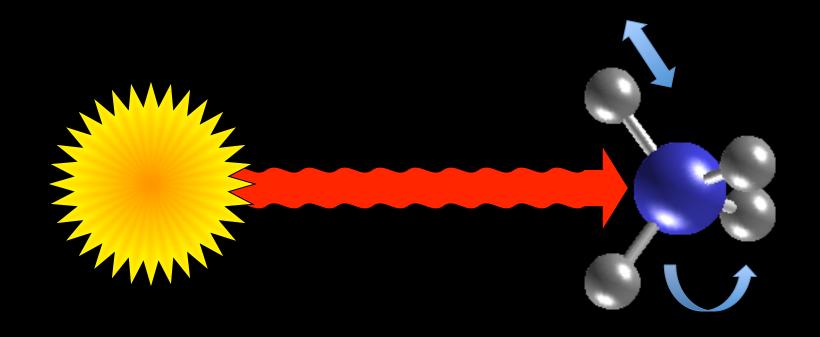
Goûter les astres

Absorption et émission





Lumière et molécules

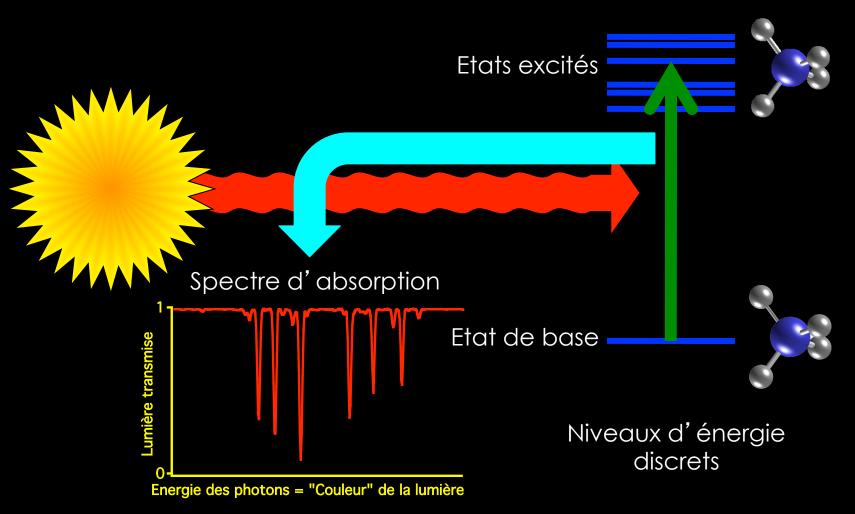


Source de lumière Photons émis et absorbés

Rotation et vibration

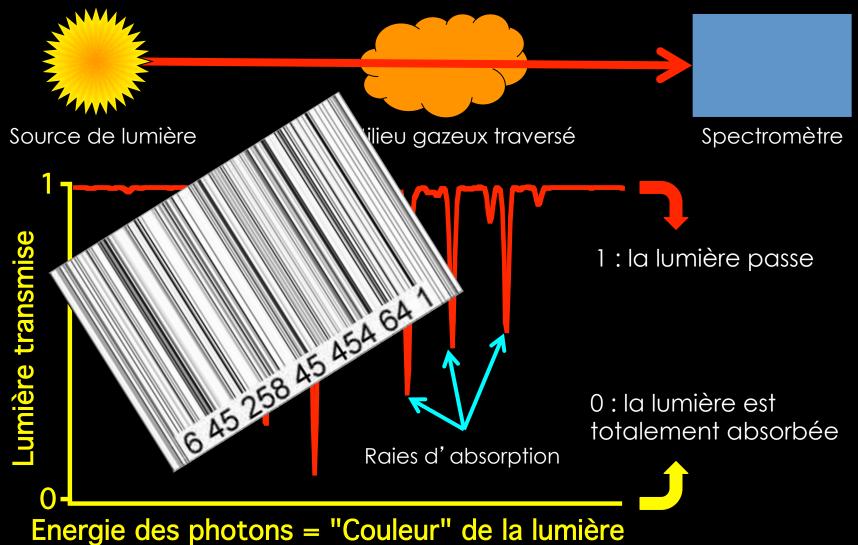


Un spectre c'est discret!





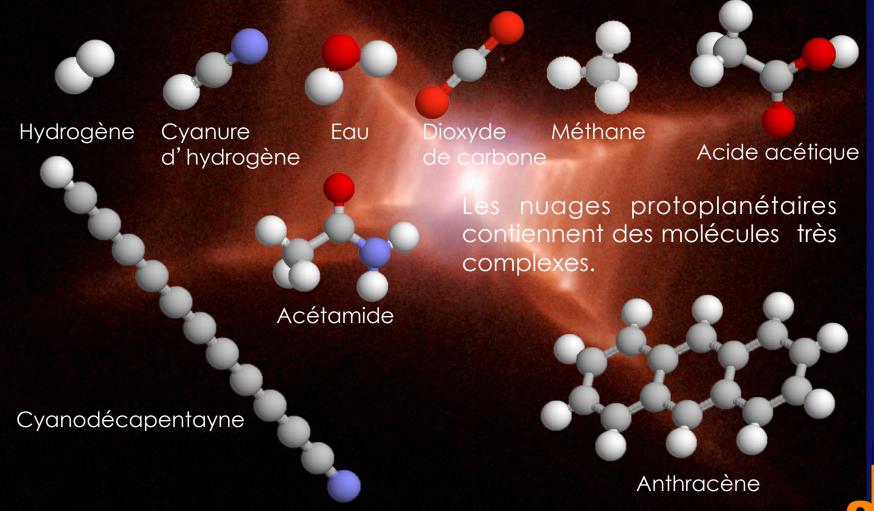
Le code-barre des étoiles



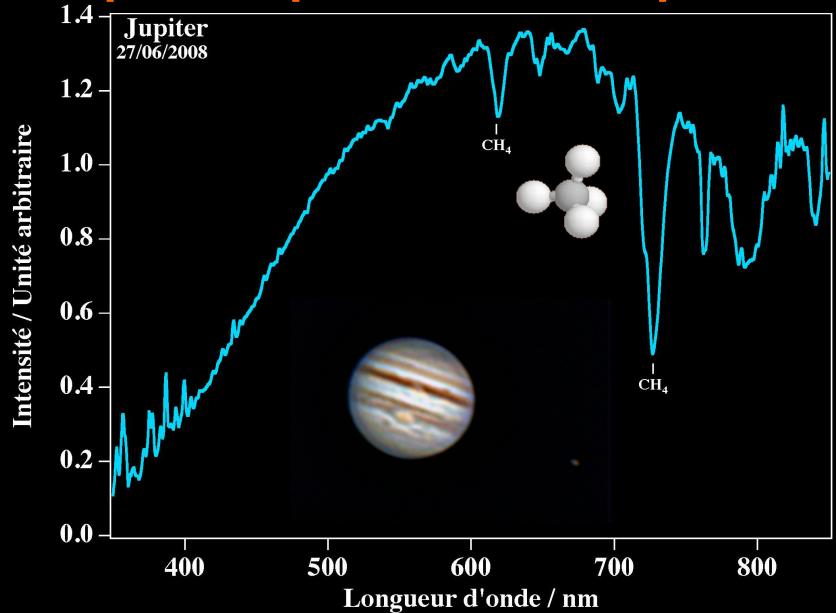


Molécules interstellaires

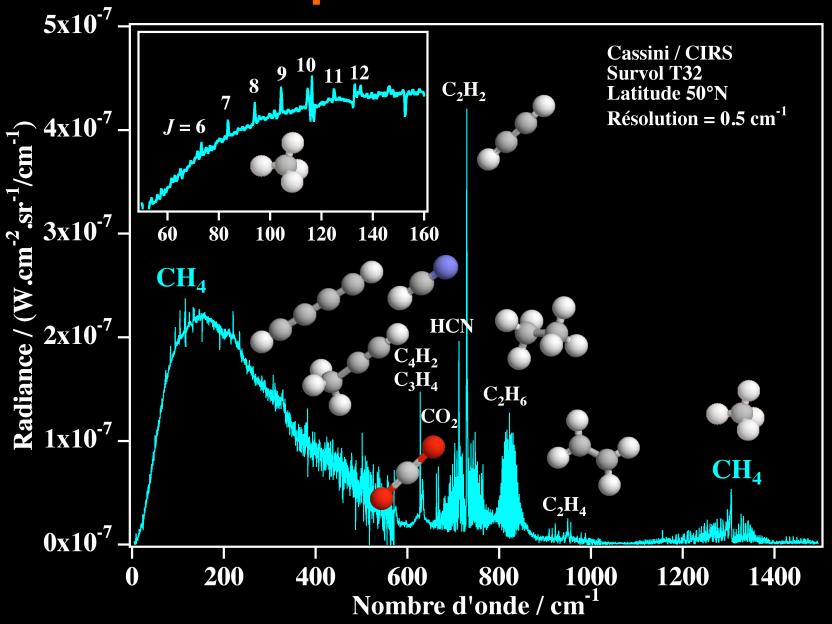
On connaît plus de 150 molécules différentes dans le milieu interstellaire. D'autre part, les enveloppes circumstellaires sont également riches de molécules encore plus complexes.



Spectre planétaire : Jupiter

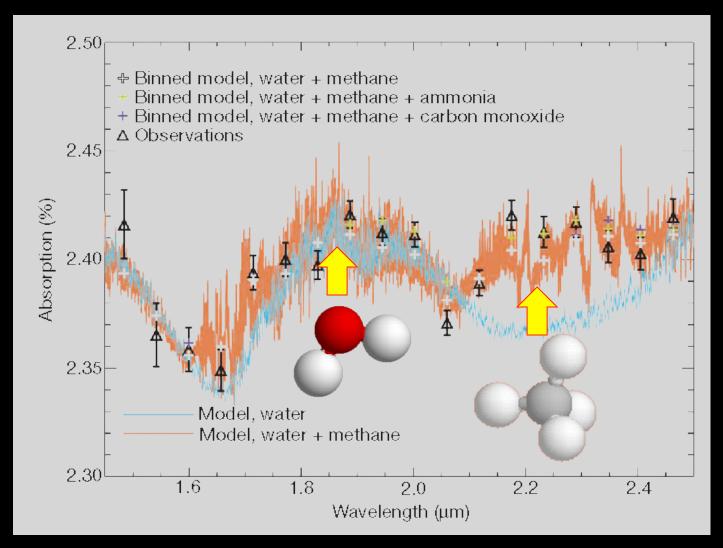


L'atmosphère de Titan





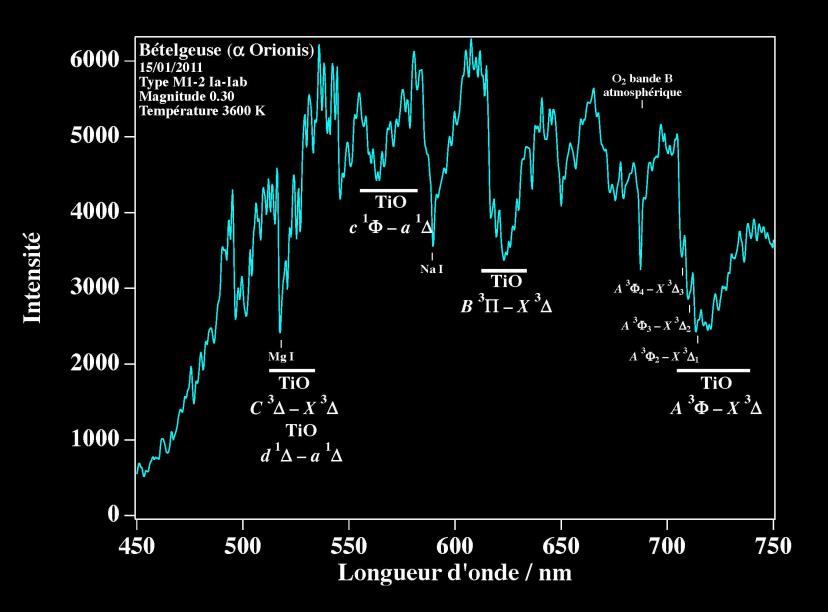
Spectres d'exoplanètes



M. R. Swain, G. Vasisht and G. Tinetti, *Science* 452, 329–331 (2008) : Detection de CH_4 et H_2O dans l'atmosphère de l'exoplanète HD189733b

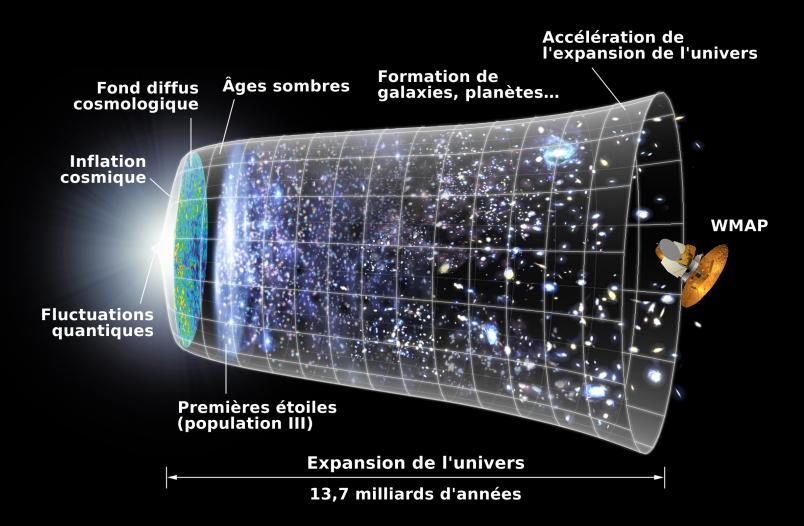


Molécules dans les étoiles « froides »





Big Bang!





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.



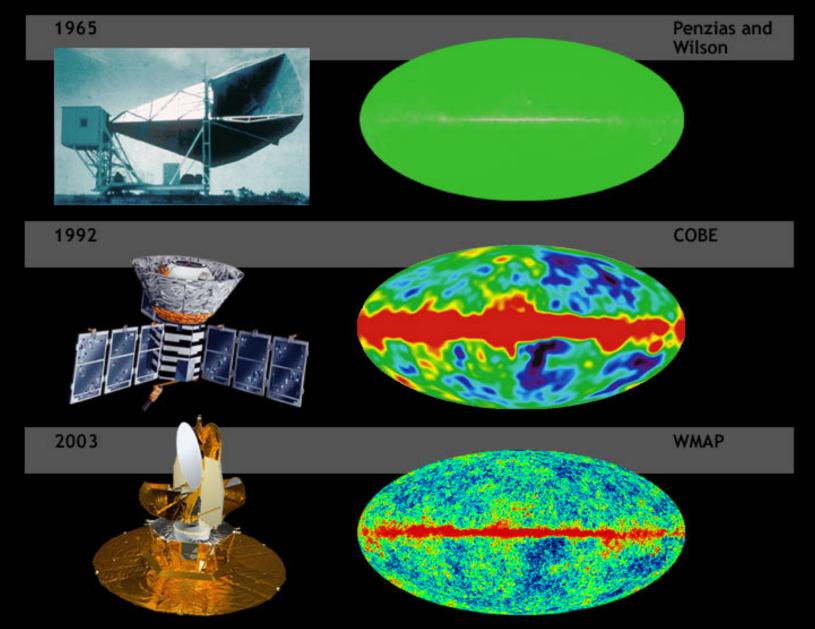
Cette première lumière est encore observée aujourd'hui en microondes : c'est le fond diffus cosmologique.

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).



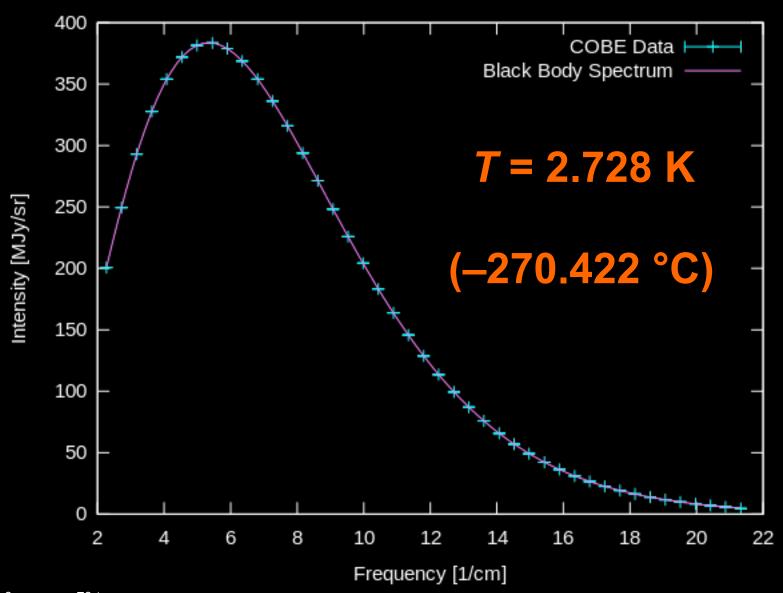
Une révélation progressive





Une courbe parfaite!

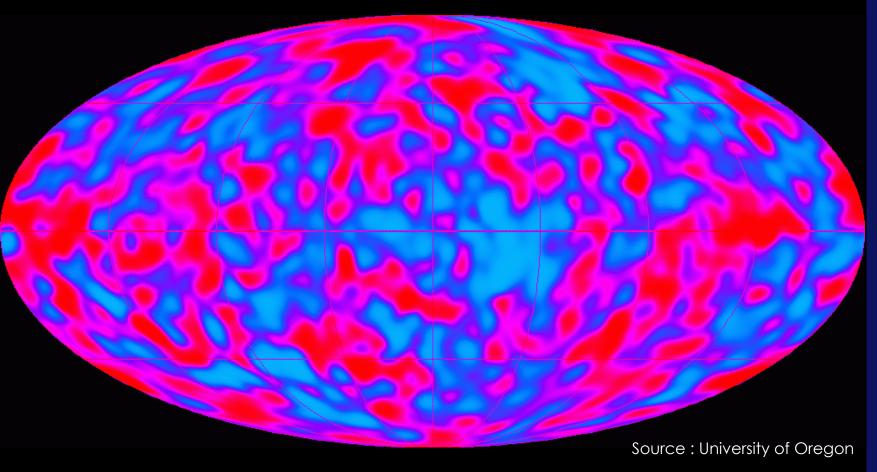
Cosmic Microwave Background Spectrum from COBE



Source: ESA



La carte de COBE (1992)

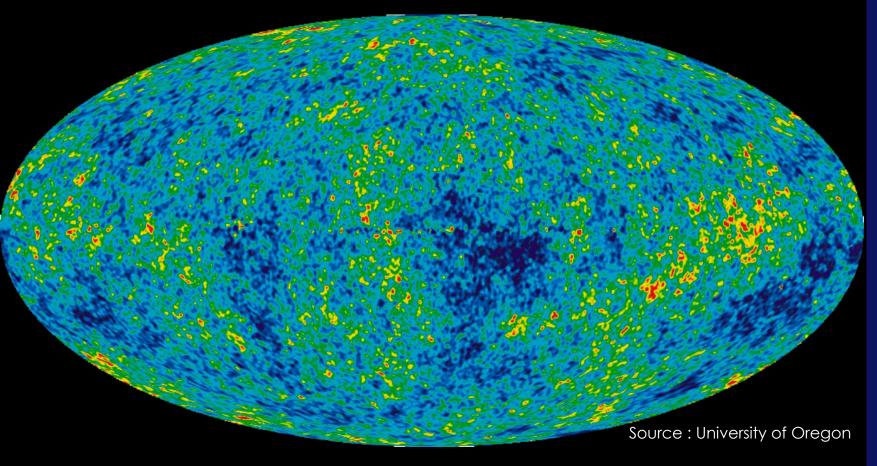


Le fond diffus est extrêmement homogène et isotrope.

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)



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.



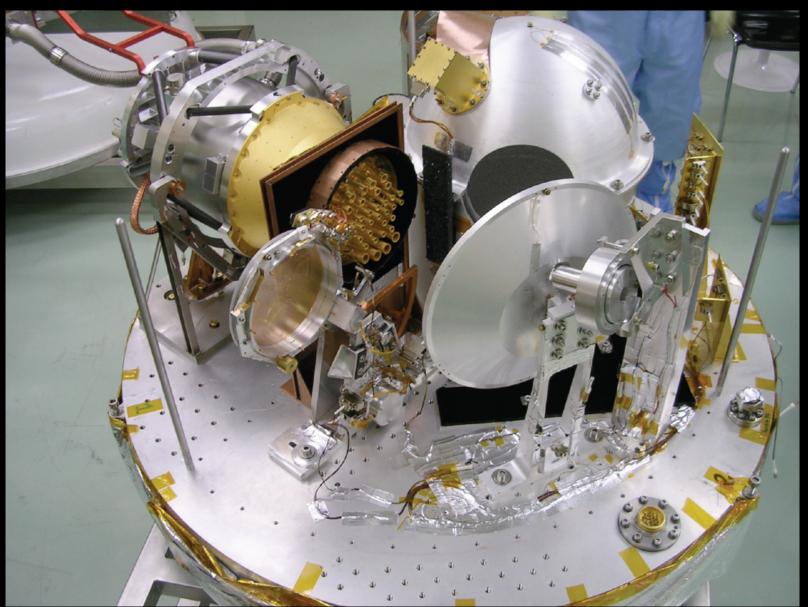
PLANCK : encore plus précis

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.





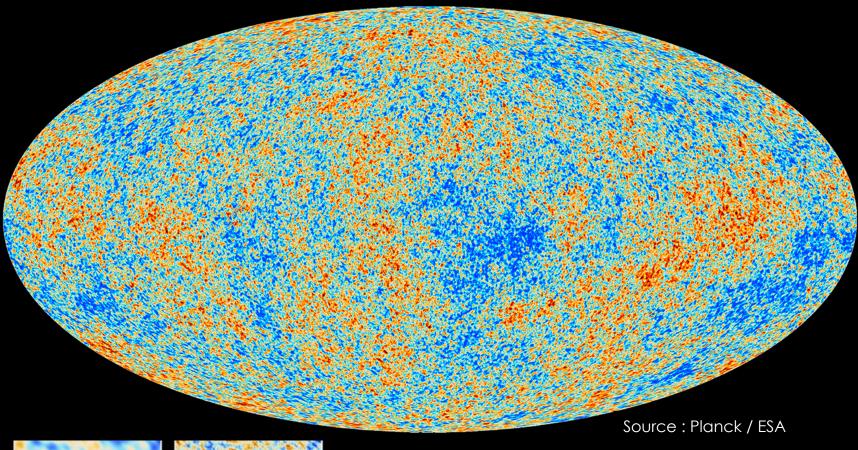
Un instrument complexe

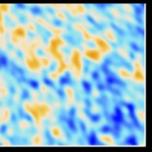


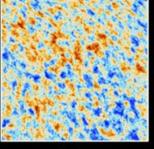
Source: ESA

La première lumière

La carte de Planck (21 mars 2013)







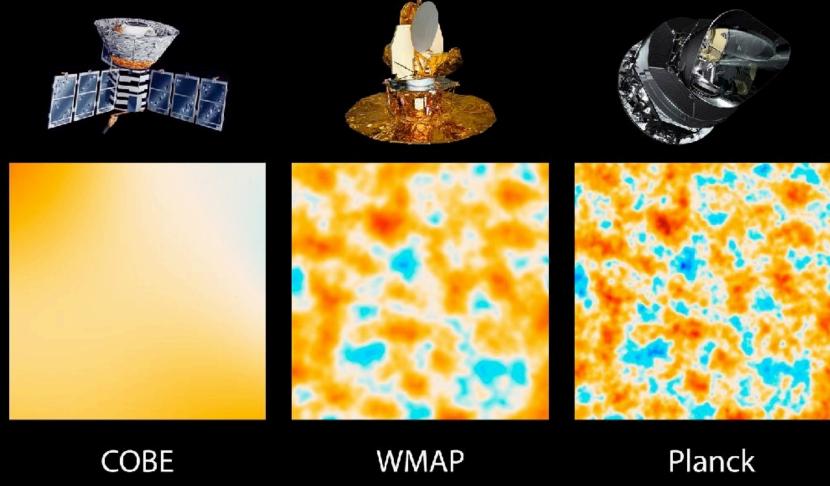
Cohérent avec COBE et WMAP, Planck révèle des détails sans précédent.

WMAP Planck



La première lumière

Des détails de plus en plus fins





Une mesure complexe

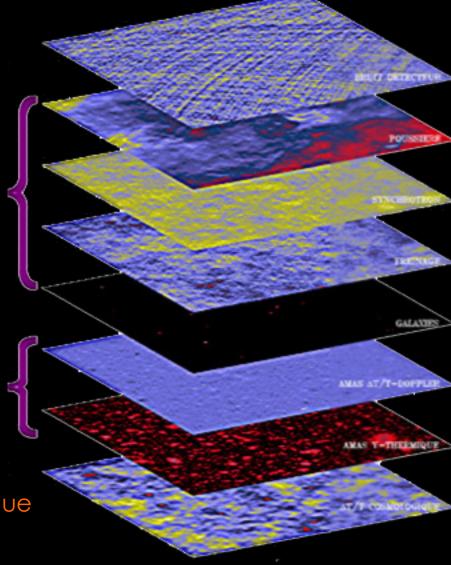
La mesure du fond diffus implique de soustraire les autres contributions.

Instrument

Voie Lactée (poussières, etc)

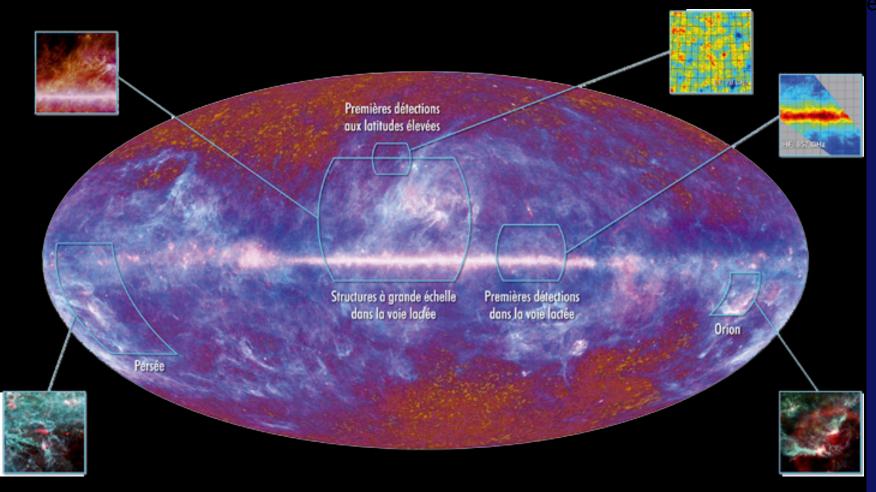
Amas de galaxies

Le fond diffus cosmologique



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

Poussières en avant-plan



Les « avant-plans » sont également très intéressants!

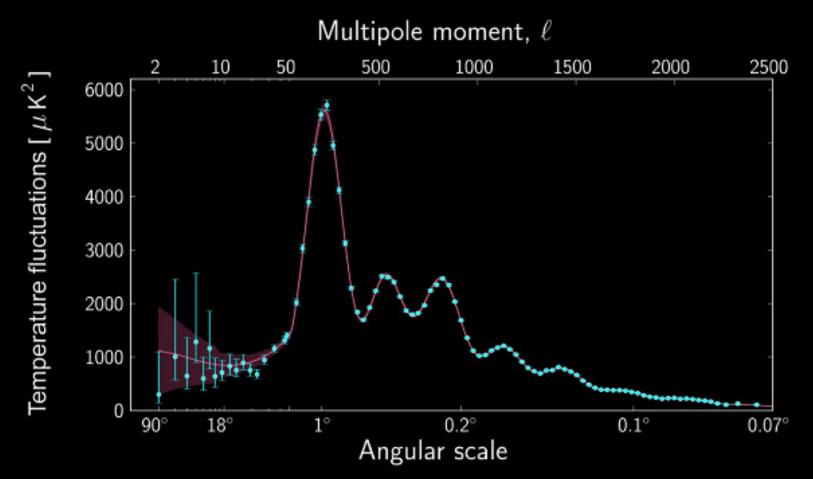
Planck a ainsi pu cartographie en détail la poussière présente dans la Voie Lactée.

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.

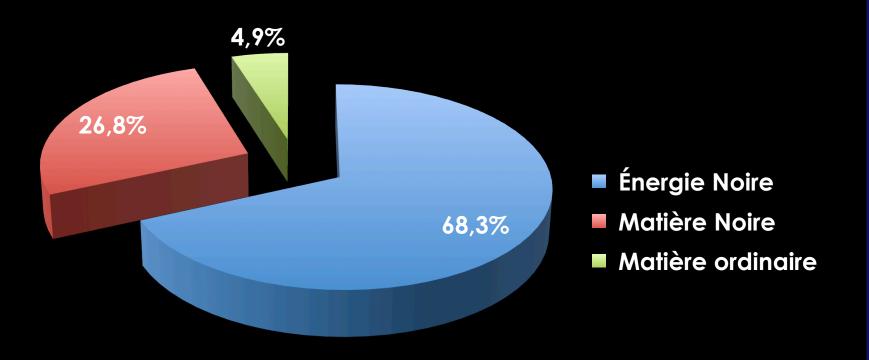


SAB

Source: Planck / ESA

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 ± 0.05 milliards d'années





