

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – SOMMES-NOUS SEULS ?

Vincent Minier

CEA/Irfu, Laboratoire AIM Paris Saclay

Université de Nantes, Centre François Viète

Email: vincent.minier@cea.fr

Site Web: <http://explornova.fr/cours>



UNIVERSITÉ DE NANTES



8 novembre 2013

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES

5 séances

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
2. Le cycle de la naissance des étoiles.
3. Les planètes naissent dans un disque.
4. Les conditions de l'habitabilité ici et ailleurs.
5. Sommes-nous seuls ? Imaginaire (représentations) et science (connaissances). Ex: Nébuleuses, Exoplanètes.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.

Séance #1

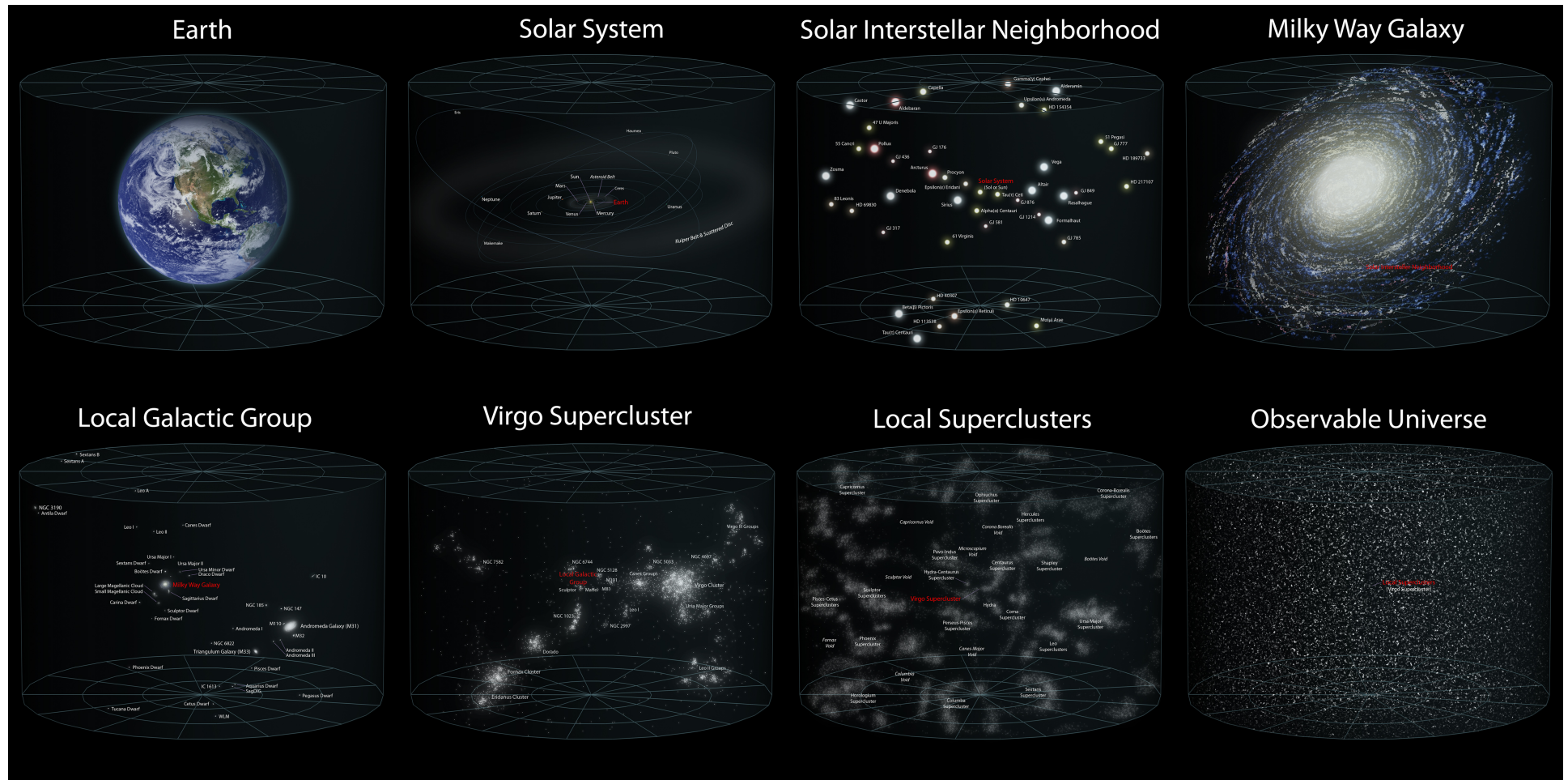
1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.A.

Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. **Echelles et structures dans l'univers.**
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.A.



Crédit image: Andrew Z. Colvin

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.A.

Vidéo GOODS

Lien: http://www.dailymotion.com/video/xtdwyg_histoire-de-la-naissance-des-etoiles-dans-l-univers_tech

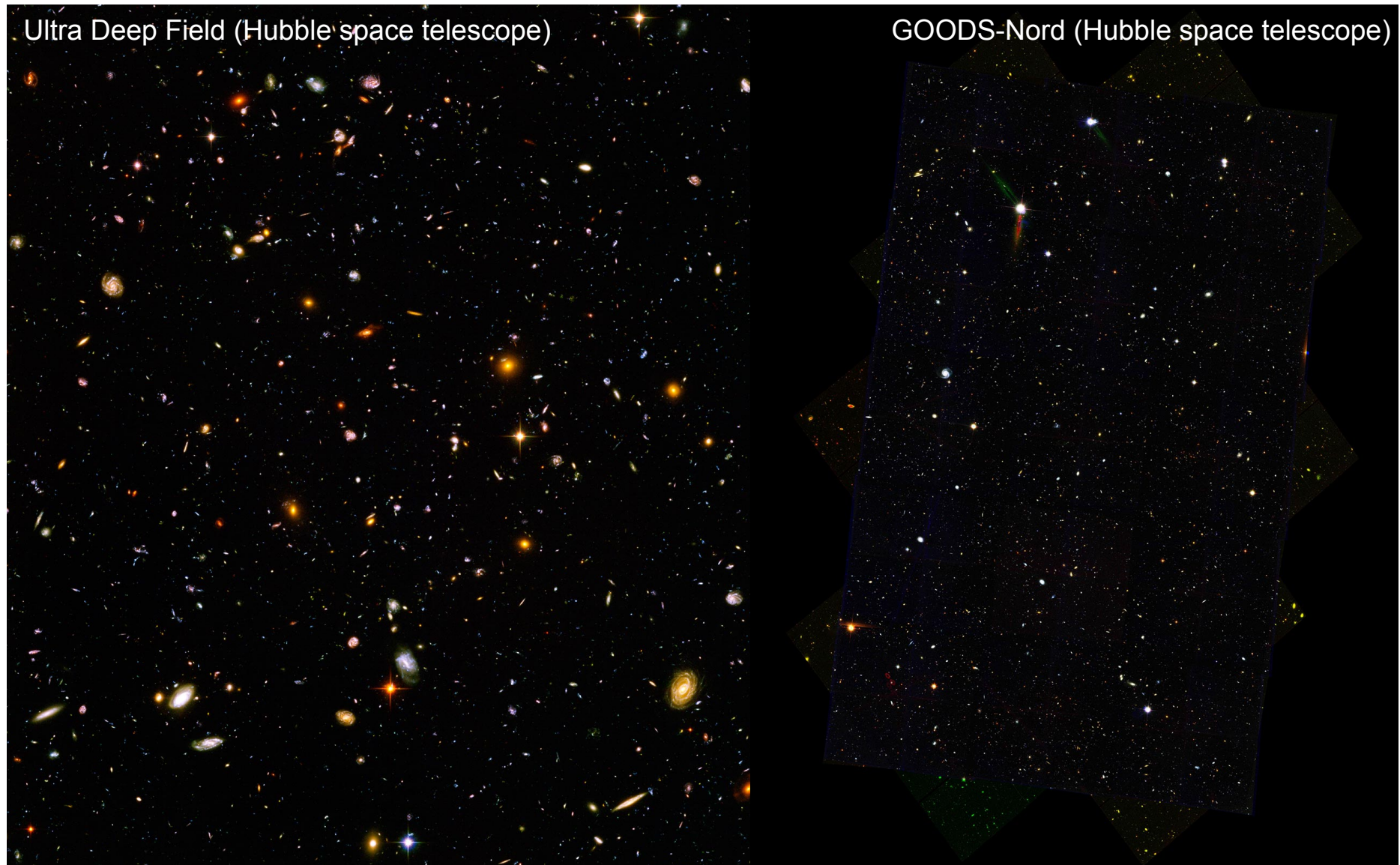


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.A.



Crédit image: Hubble space telescope

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.A.

Vidéo M51

Lien: http://www.dailymotion.com/video/xrazj8_la-galaxie-messier-51-vue-par-herschel-et-hubble_tech



Auteur: Vincent Minier



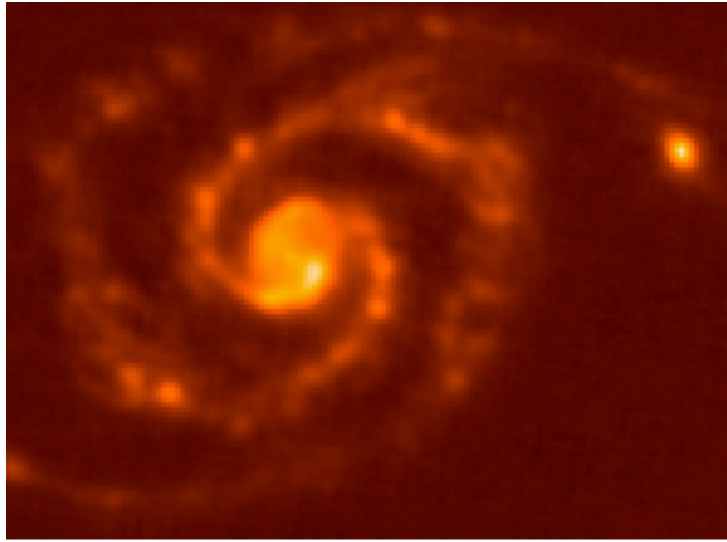
UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).**
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

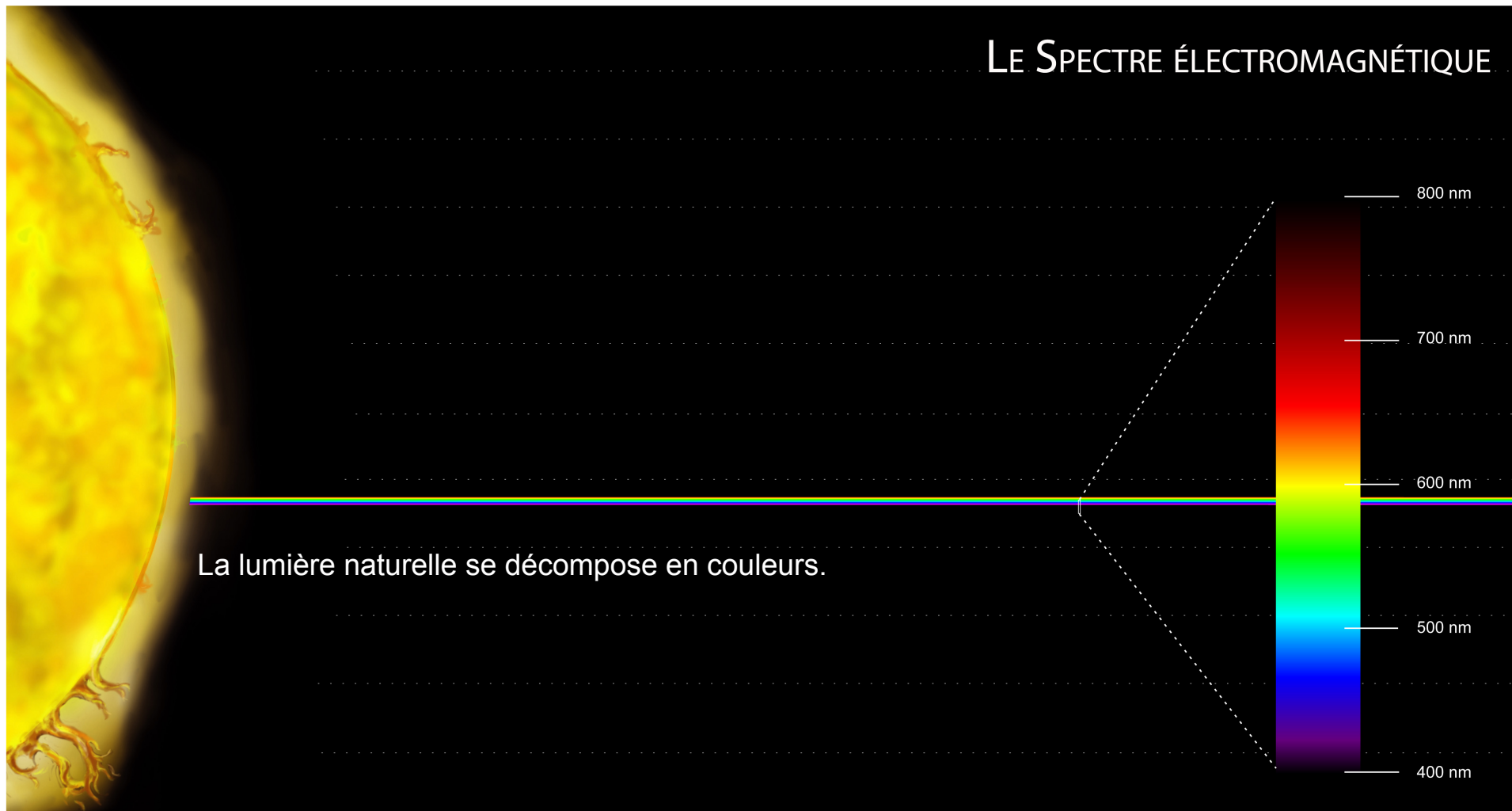
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



Crédit image: CEA & Novae Factory

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE



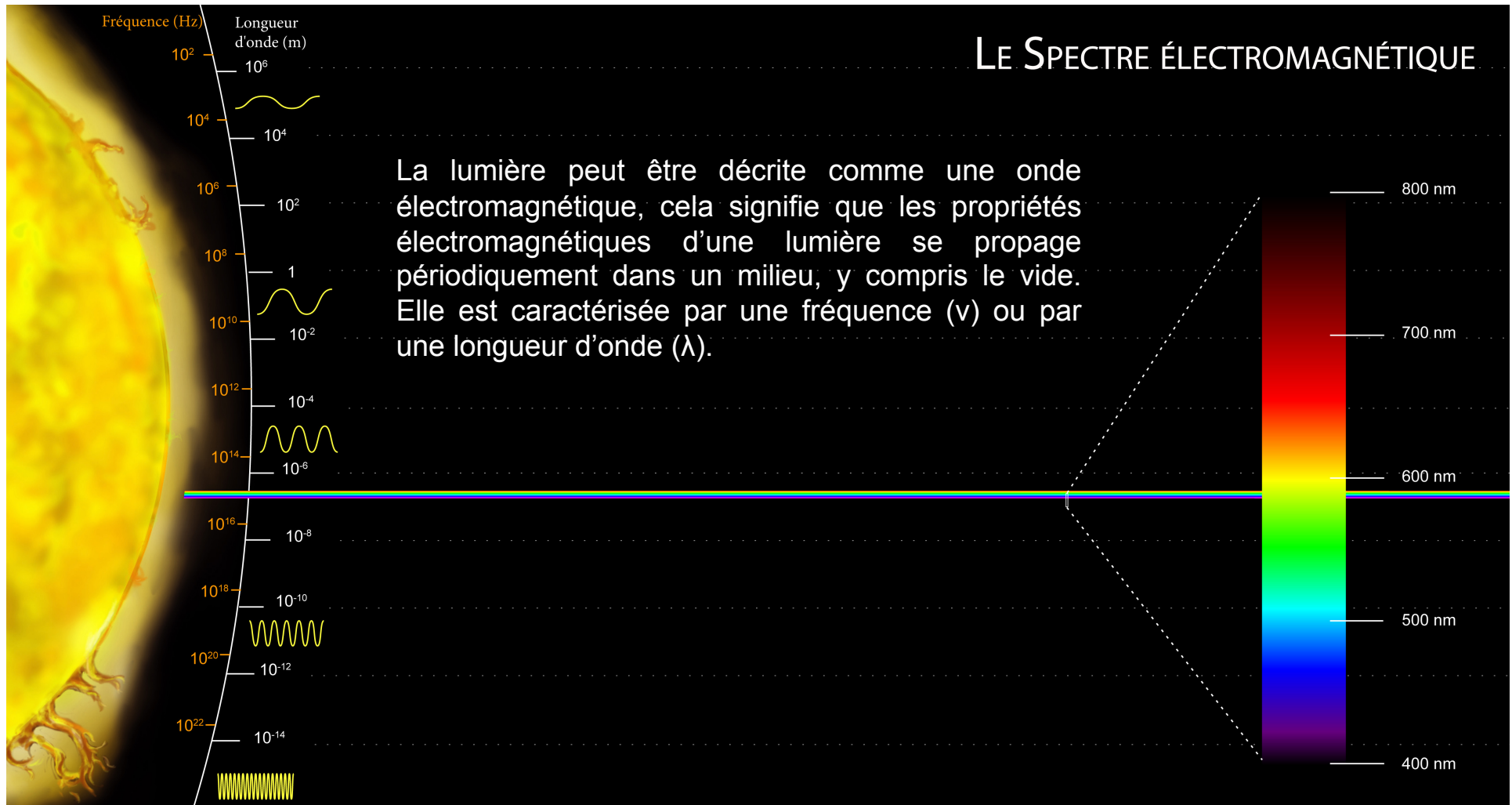
La lumière naturelle se décompose en couleurs.

Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

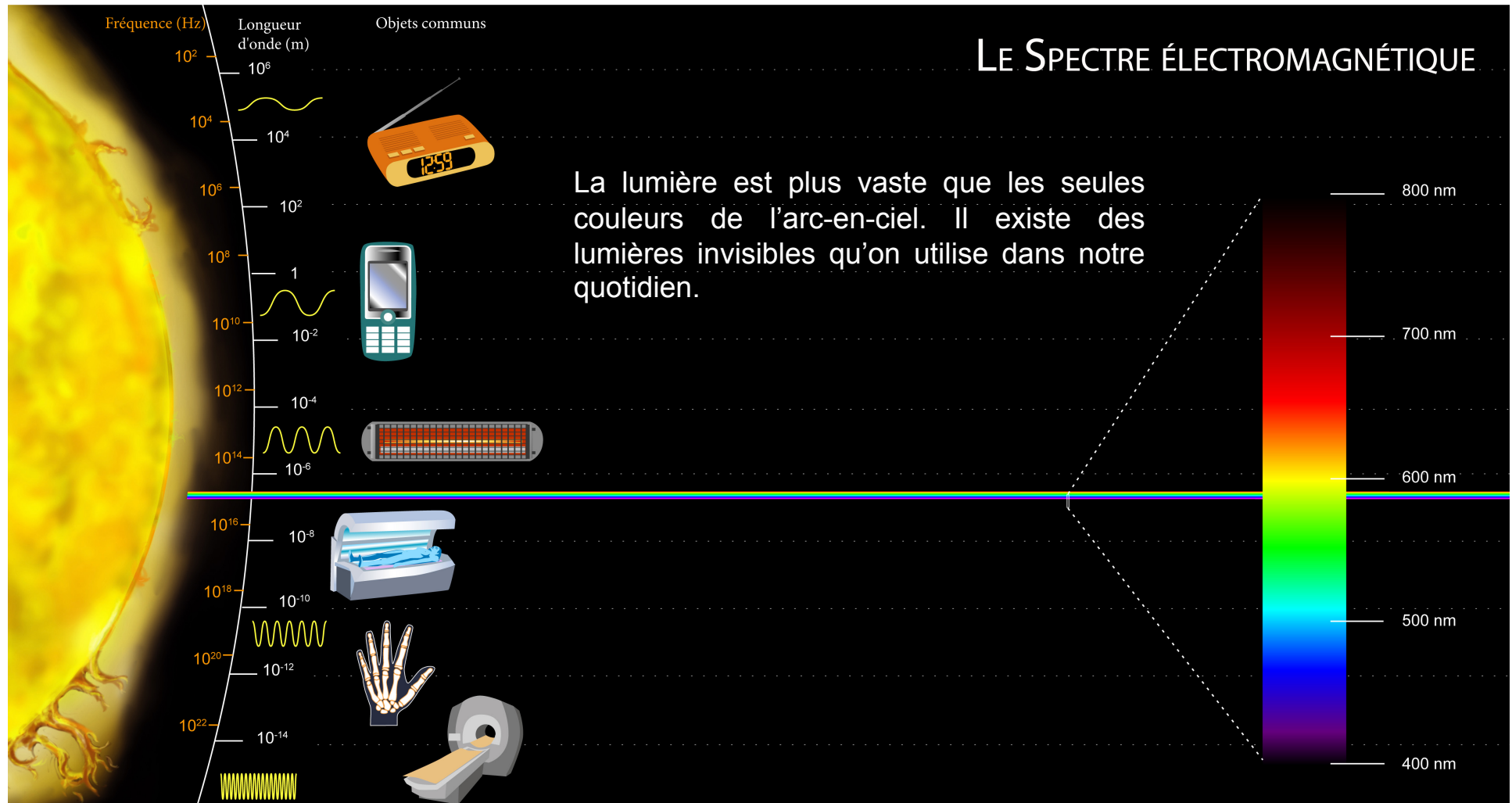
LE SPECTRE ÉLECTROMAGNÉTIQUE

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique, cela signifie que les propriétés électromagnétiques d'une lumière se propage périodiquement dans un milieu, y compris le vide. Elle est caractérisée par une fréquence (ν) ou par une longueur d'onde (λ).



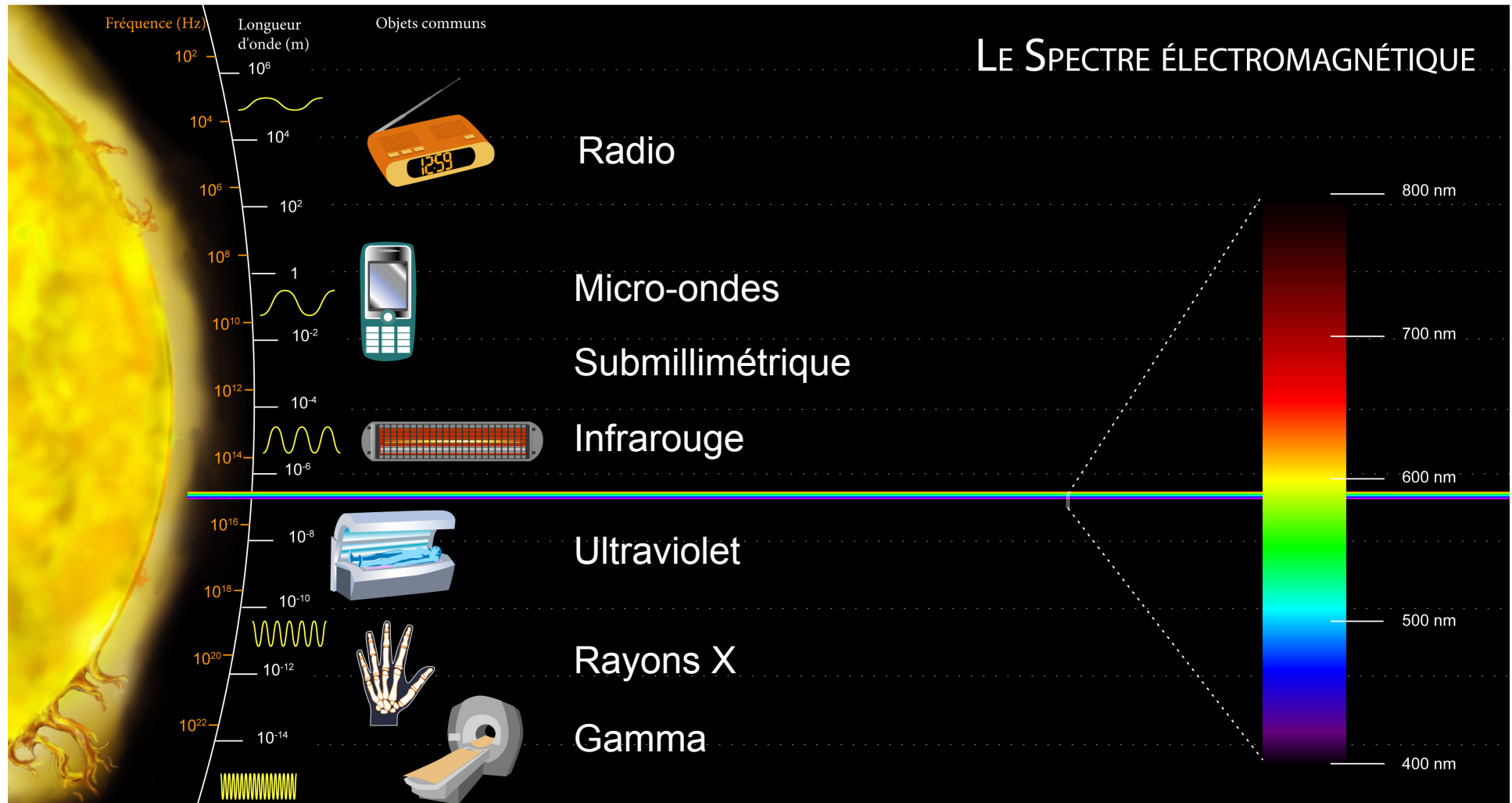
Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

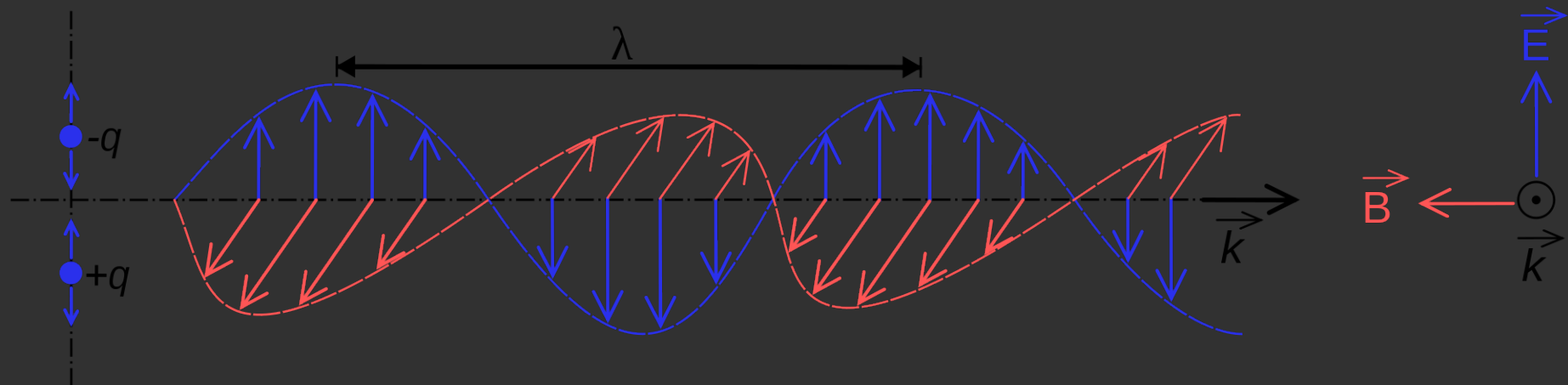


Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Energie, longueur d'onde, fréquence...

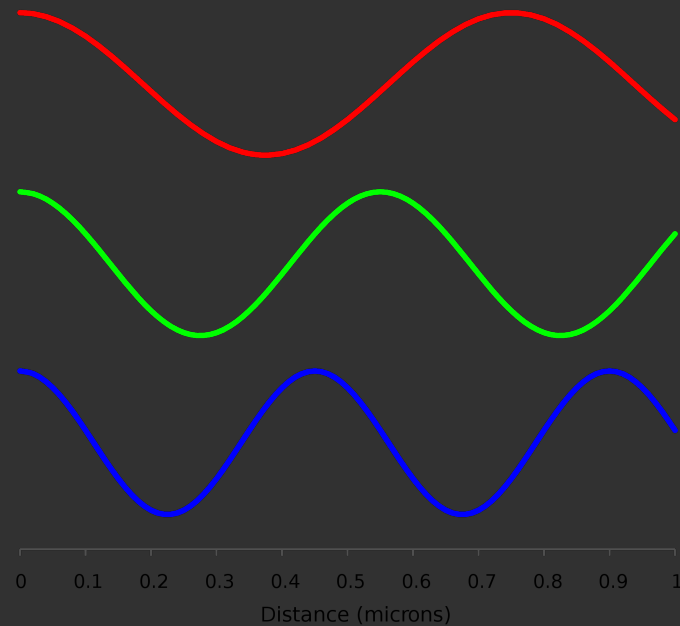
D'autres lumières, invisibles à l'œil... Elles voyagent à la vitesse de la lumière soit $c \approx 300\,000$ km/s dans le vide. Ce sont également des ondes électromagnétiques dont la fréquence et la longueur d'onde sont reliées ainsi $v = c/\lambda$.



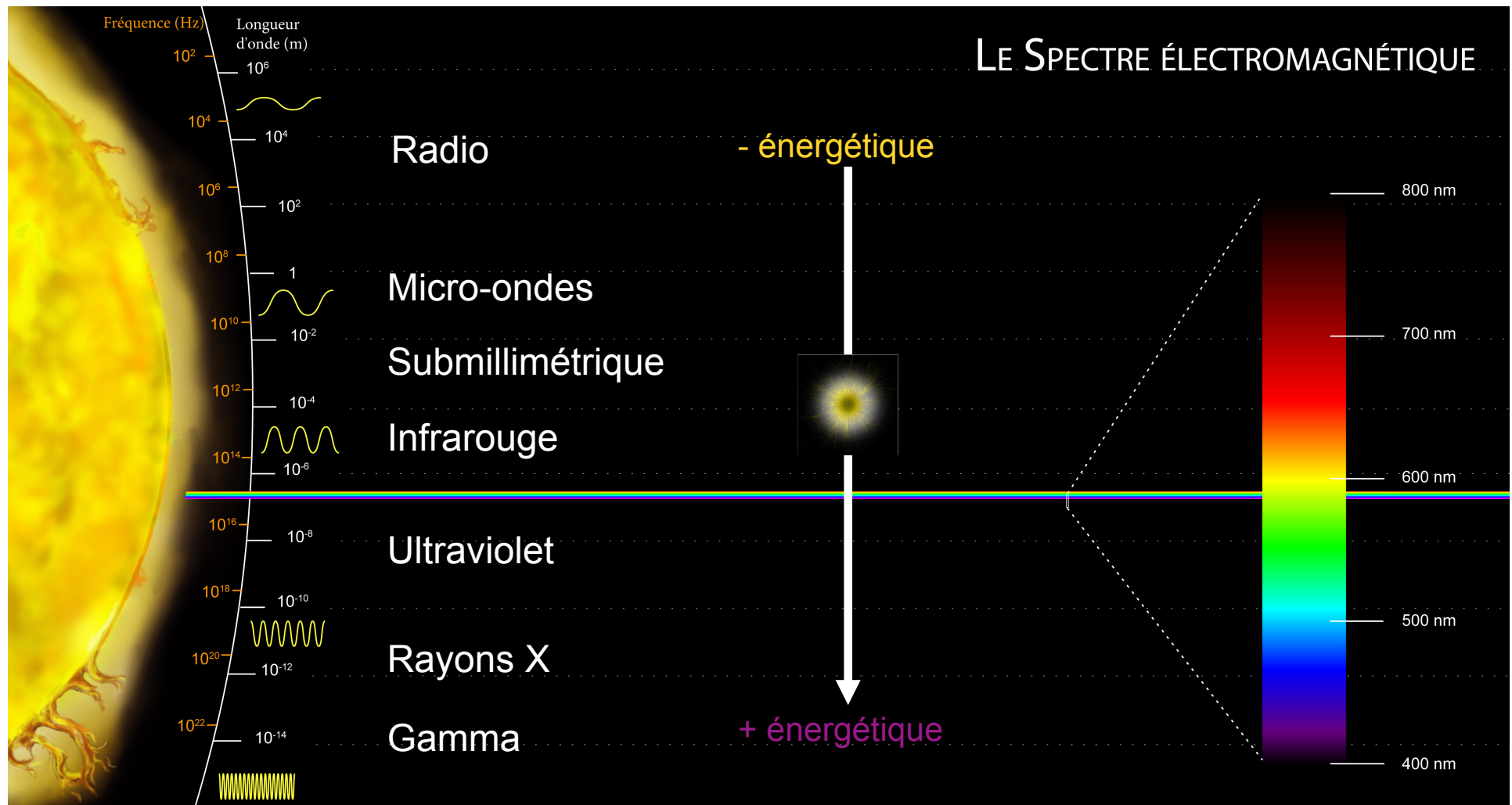
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Energie, longueur d'onde, fréquence...

D'autres lumières, invisibles à l'œil... Elles voyagent à la vitesse de la lumière soit $c \approx 300\,000$ km/s dans le vide. Ce sont également des ondes électromagnétiques dont la fréquence et la longueur d'onde sont reliées ainsi $v = c/\lambda$.

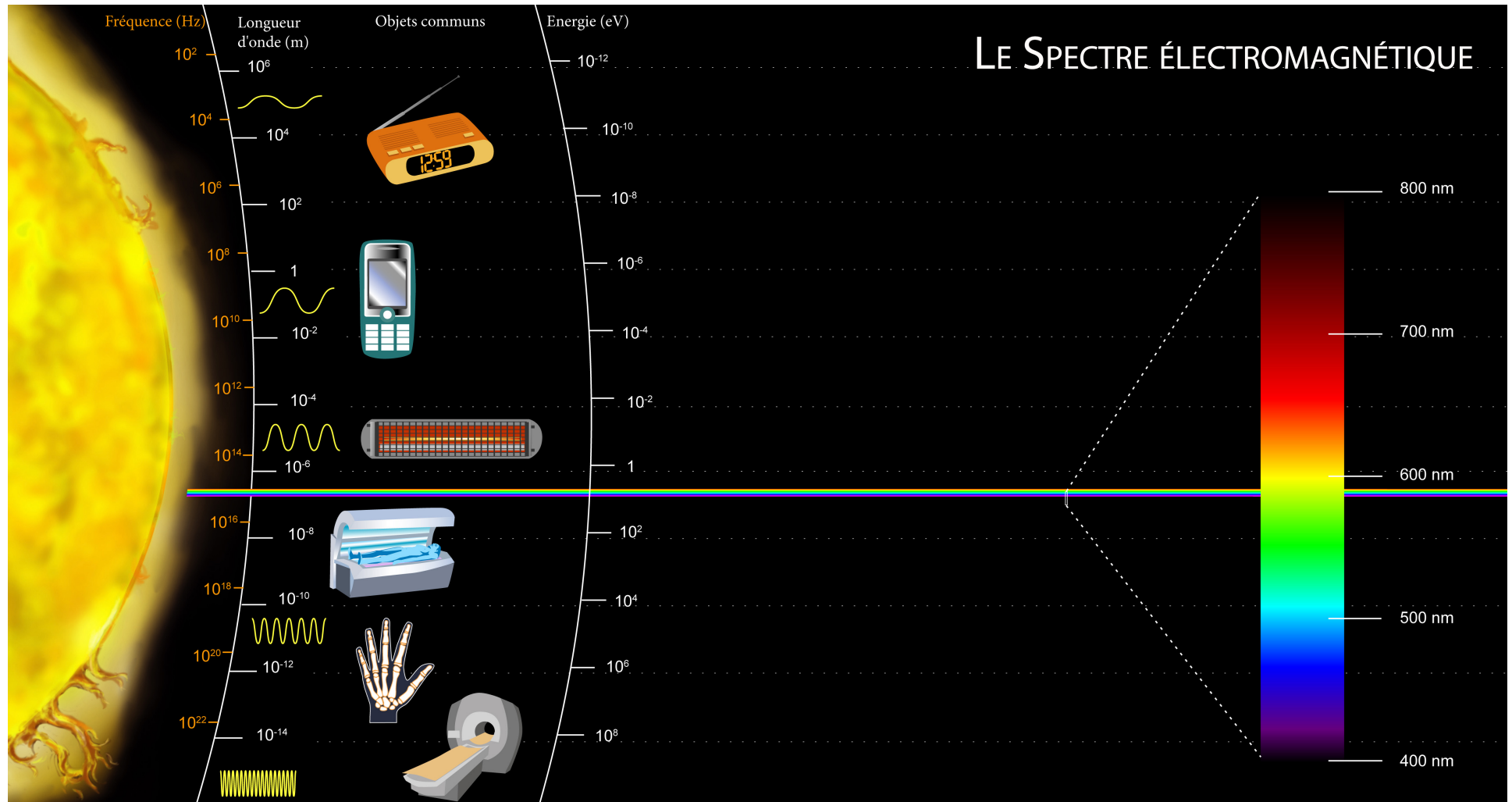


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



Crédit image: CEA

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Résumé

La lumière peut être décrite comme une onde électromagnétique, cela signifie que les propriétés électromagnétiques d'une lumière se propage périodiquement dans un milieu, y compris le vide. Elle est caractérisée par une fréquence (ν) ou par une longueur d'onde (λ).

La lumière peut être également décrite par les propriétés physiques (vitesse, énergie) d'une particule, le photon ou quantum de lumière ayant une quantité de mouvement égale à h/λ , où h est la constante de Planck.

Il existe une correspondance entre l'énergie du photon et la fréquence (ou la longueur d'onde) de la lumière. Plus la fréquence est grande, plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie transportée par le photon est grande.

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

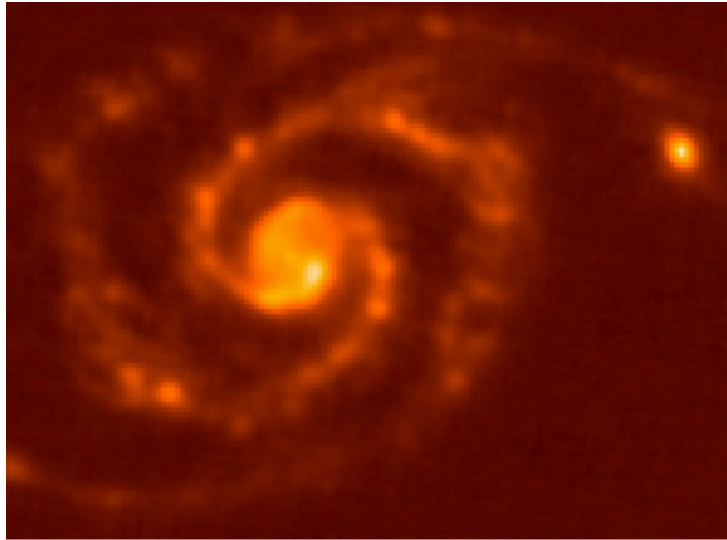
Equation: énergie, fréquence ou longueur d'onde

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

A quoi sert la lumière en astronomie ?

- Tout phénomène cosmique ou tout objet émet potentiellement de la lumière directement ou indirectement.
- Utiliser la lumière de l'univers comme un messenger des phénomènes physiques qui le structurent et un moyen de les cartographier, de les quantifier et de les qualifier.
- L'observable est un flux d'énergie, émis ou absorbé par de la matière.
- Le flux d'énergie peut dépendre de la taille, de la masse, de la température, de la vitesse et de la distance de la matière qui rayonne.

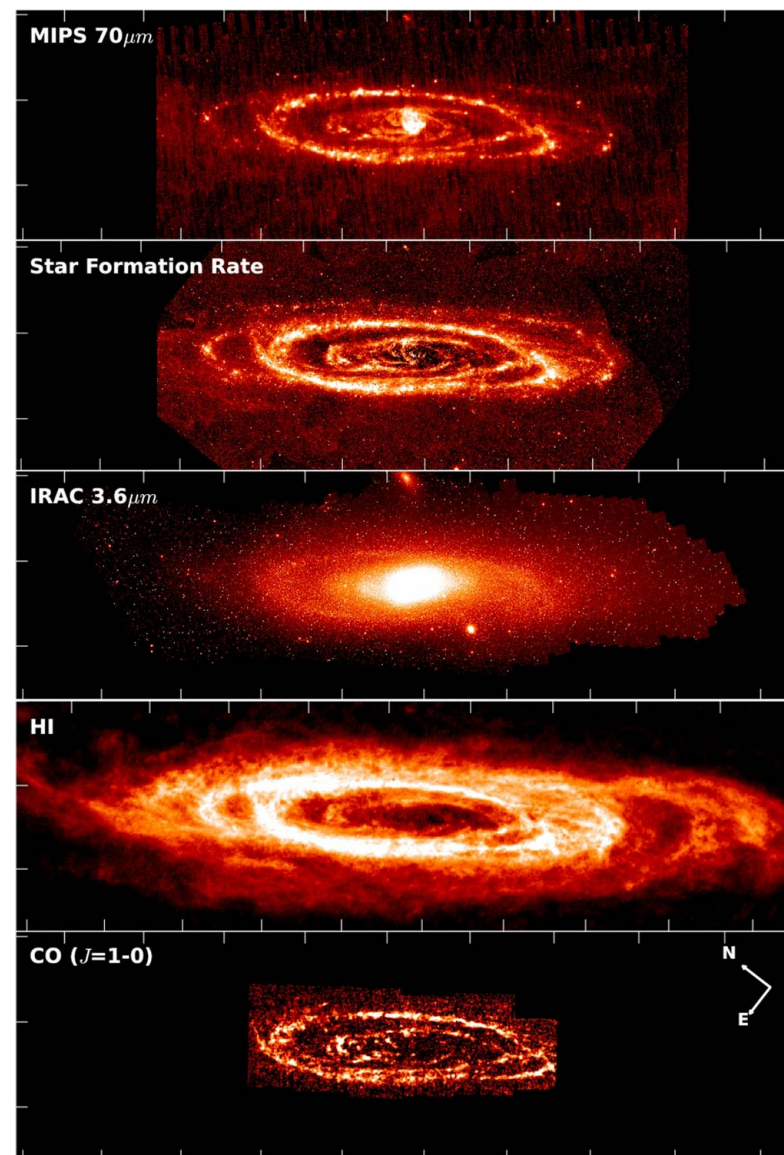
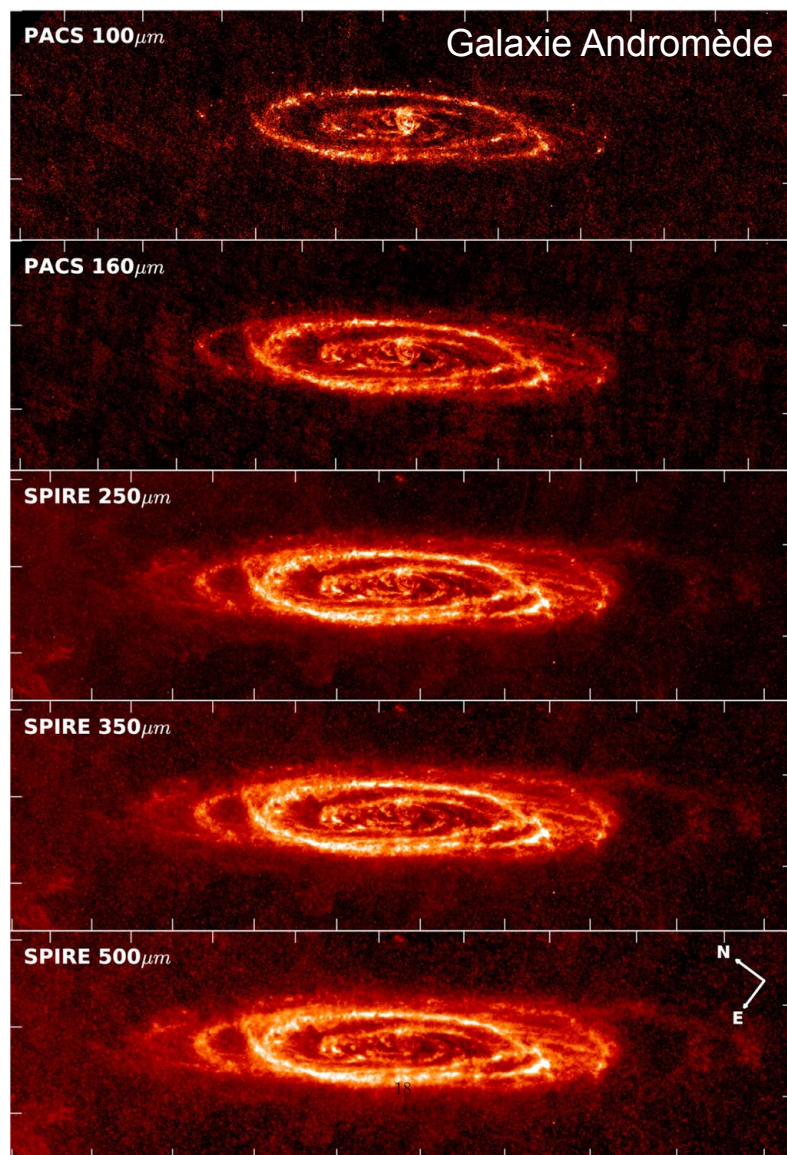
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



Le milieu interstellaire est composé de gaz atomique et moléculaire, et grains de poussières. C'est le milieu qui remplit l'espace entre les étoiles. C'est le matériau de base pour la fabrication des étoiles.

Crédit image: CEA & Novae Factory

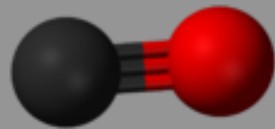
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



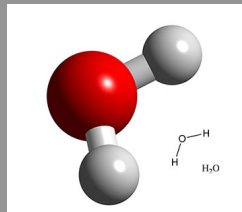
Crédit images: Smith et al. 2012

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

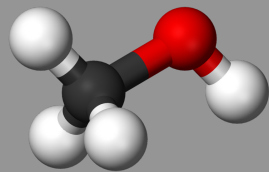
Gaz: H, H₂



CO [10⁻⁴]
Monoxyde de carbone



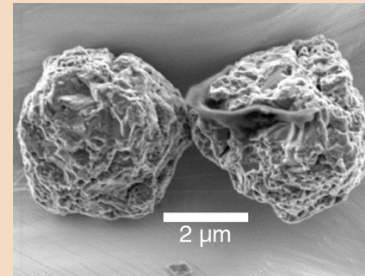
H₂O [10⁻⁵]
Eau



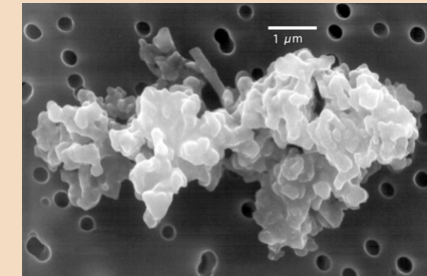
CH₃OH [10⁻⁶]
Méthanol

H₂O⁺, HCO⁺, C₄H⁻, H₃⁺...

- Poussière: petits solides

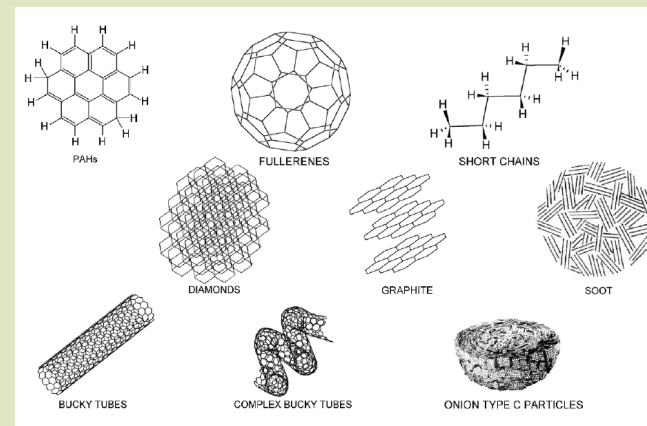


Sur la météorite de Murchison



Grains de poussière interplanétaires

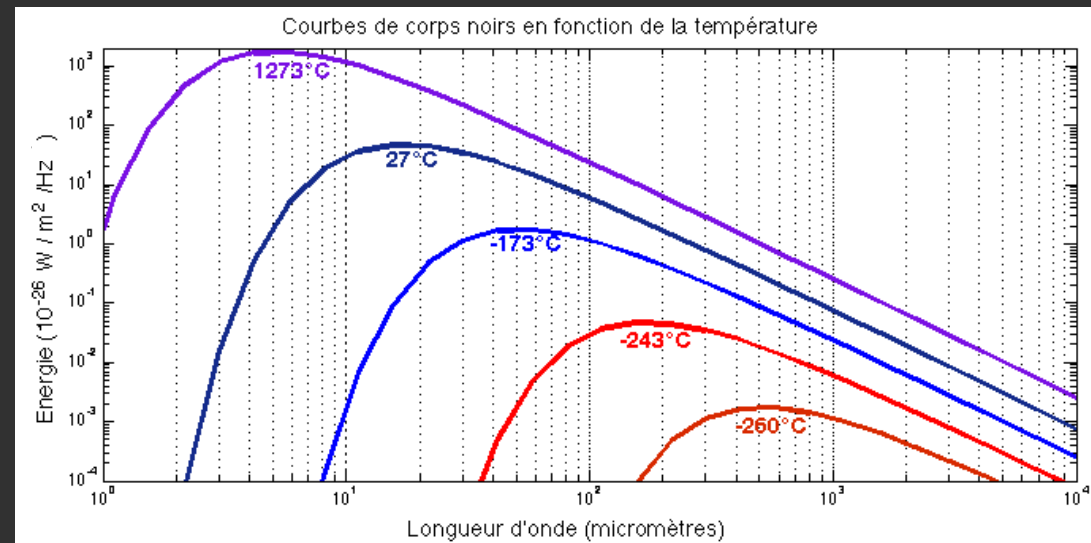
- Molécules carbonacées



Ehrenfreund & Charnley 2000

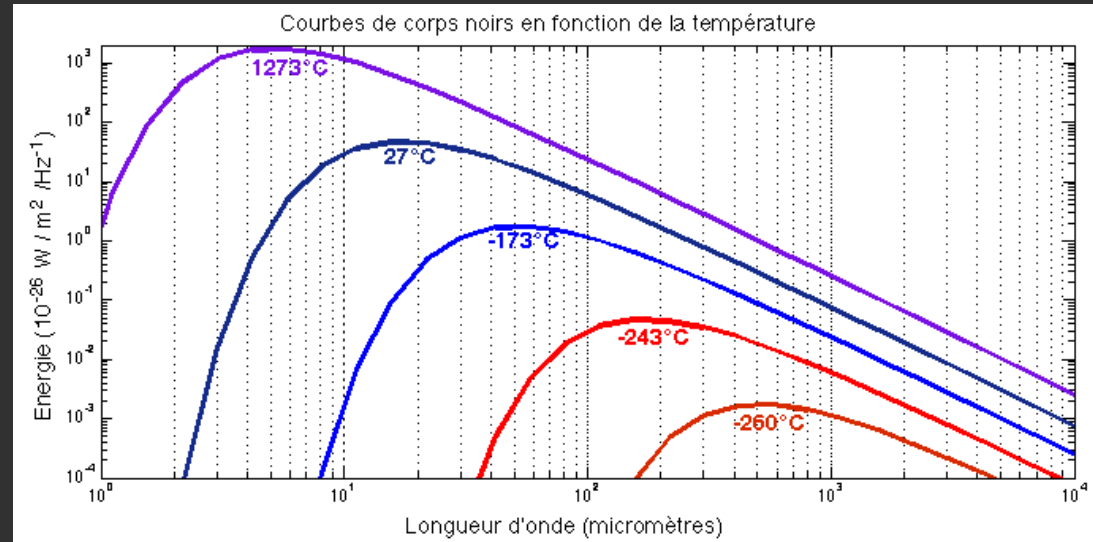
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Corps noir: objet idéal, absorbant tout rayonnement incident, et dont le rayonnement est caractérisé par sa température uniquement.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Loi du déplacement de Wien



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Transfert radiatif et masse du nuage de poussière interstellaire



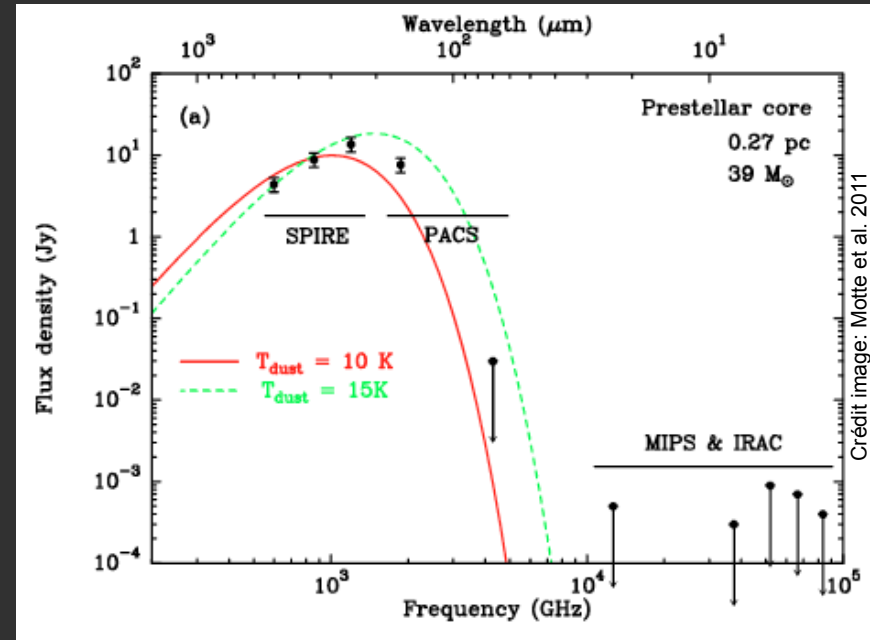
Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

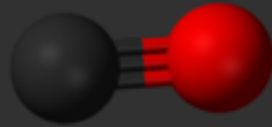
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Densité spectrale d'énergie d'un cœur préstellaire → masse



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Molécule, niveaux d'énergie...



Pour une molécule diatomique, on peut utiliser l'approximation du rotateur rigide:

$$E = \frac{1}{2} I_x \omega_x^2 + \frac{1}{2} I_y \omega_y^2 + \frac{1}{2} I_z \omega_z^2$$

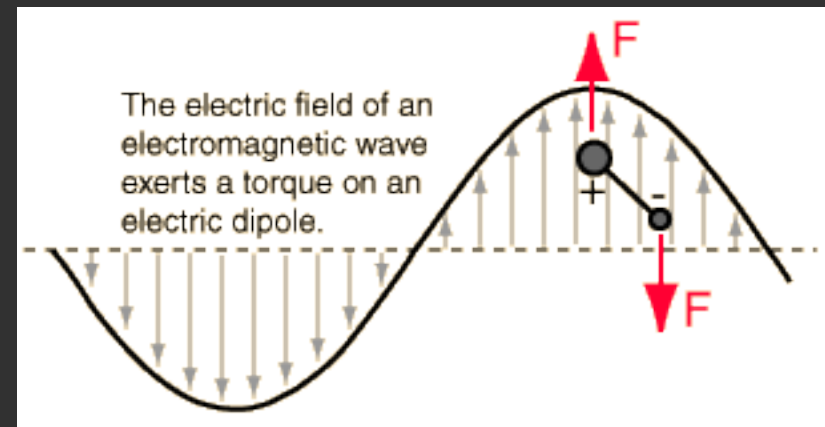
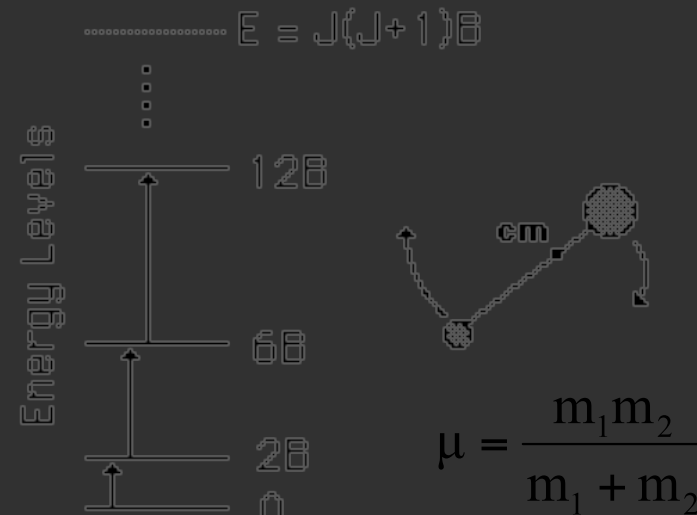
où $I = \mu r^2 =$ moment d'inertie

$E = L^2/2I$ où $L = I \omega =$ moment angulaire

Equation de Schrödinger :

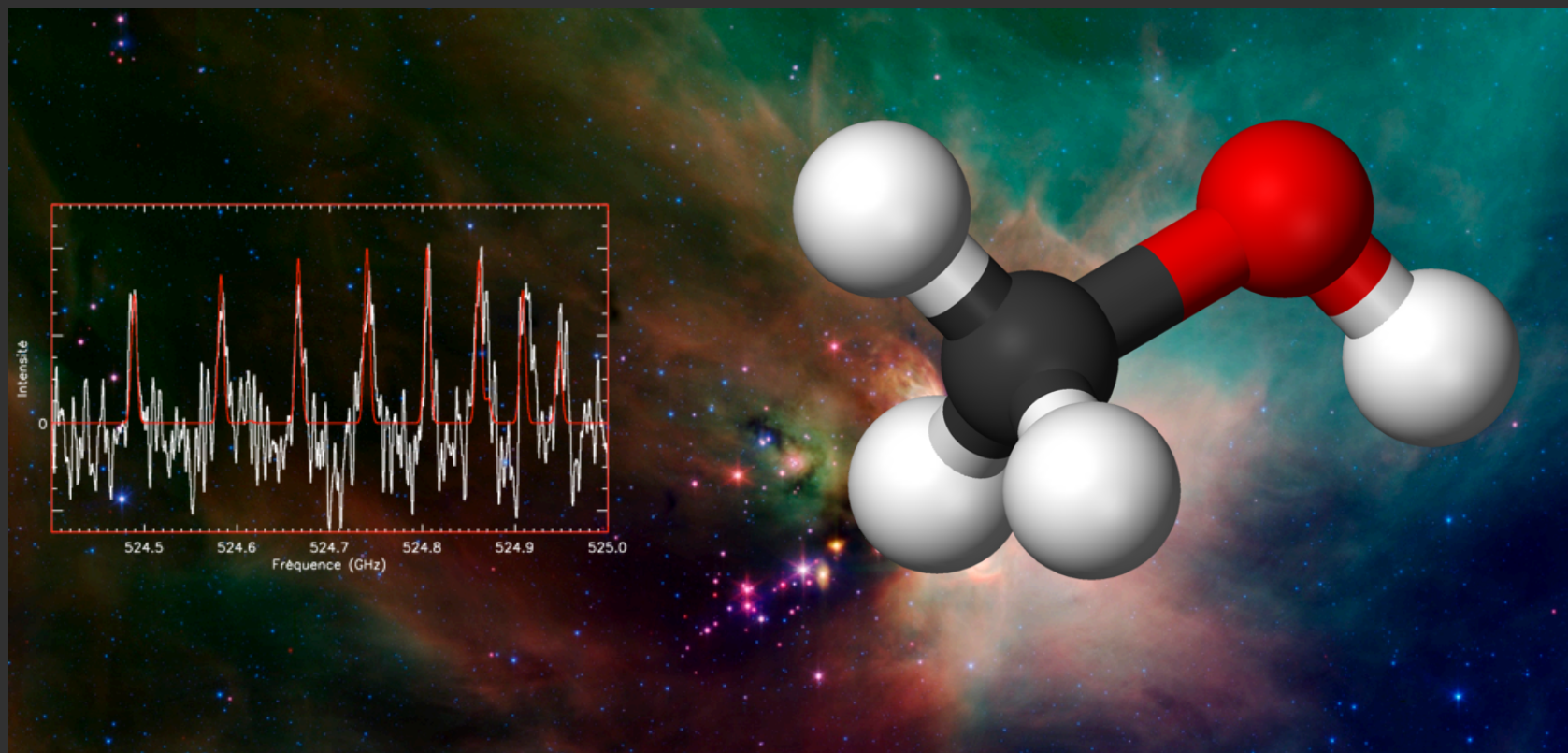
$$H \Psi = E \Psi = L^2/2I \Psi = J(J+1) h^2/8\pi^2 I \Psi$$

$$\rightarrow E_J / h = B J(J+1) \text{ où } B = h^2/8\pi^2 I$$



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

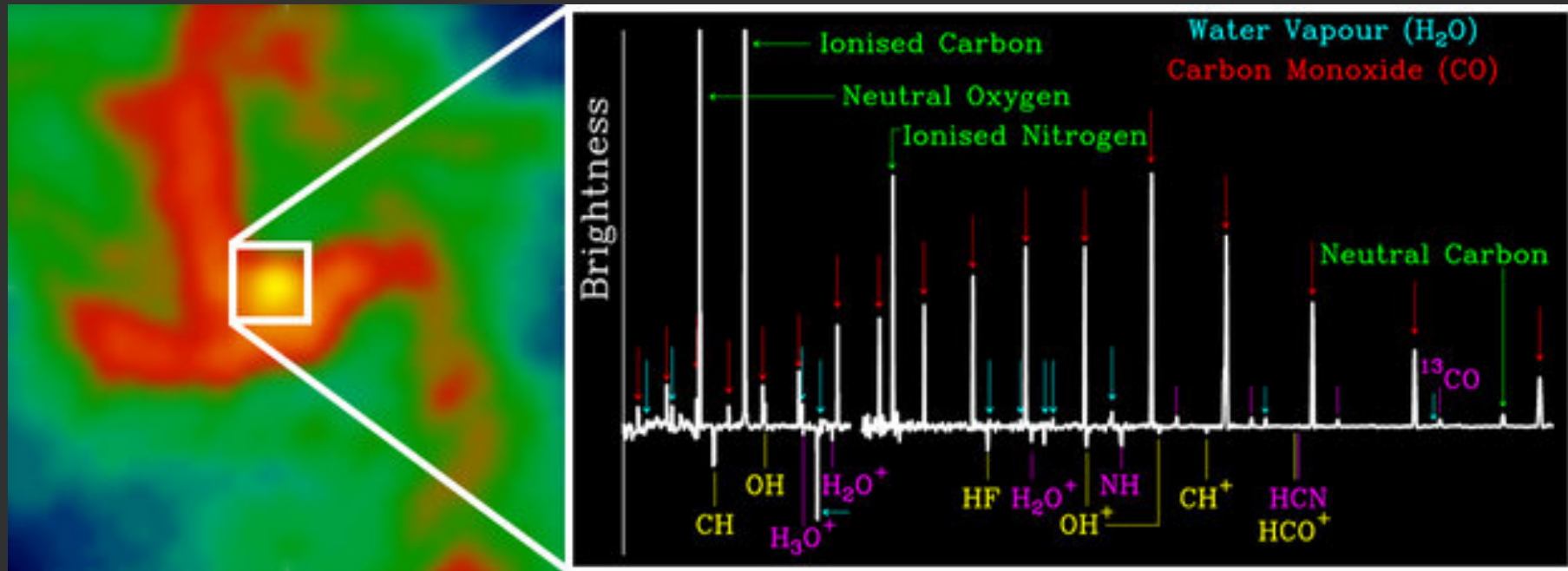
Molécules, niveaux d'énergie et raies spectrales



Crédit image: C.H.E.S.S. - ESA/Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Spectre de raies atomiques et moléculaire



Crédit image: ESA/Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Table 1 Complex organic interstellar molecules (≥ 6 atoms)

Species	Name	Source	Species	Name	Source
Hydrocarbons			N-Containing		
C ₂ H ₄	Ethene	circ	CH ₃ CN	Acetonitrile	cc, hc, of
HC ₄ H	Butadiyne	circ	CH ₃ NC	Methylisocyanide	hc
H ₂ C ₄	Butatrienylidene	circ, cc, lc	CH ₂ CNH	Keteneimine	hc
C ₅ H	Pentadiynyl	circ, cc	HC ₃ NH ⁺	Prot. cyanoacetylene	cc
CH ₃ C ₂ H	Propyne	cc, lc	C ₅ N	Cyanobutadiynyl	circ, cc
C ₆ H	Hexatriynyl	circ, cc, lc	HC ₄ N	Cyanopropynylidene	circ
C ₆ H ⁻	Hexatriynyl ion	circ, cc, lc	CH ₃ NH ₂	Methylamine	hc, ge
H ₂ C ₆	Hexapentaenylidene	circ, cc, lc	C ₂ H ₃ CN	Vinylcyanide	cc, hc
HC ₆ H	Triacetylene	circ	HC ₅ N	Cyanodiacetylene	circ, cc
C ₇ H	Heptatriynyl	circ, cc	CH ₃ C ₃ N	Methylcyanoacetylene	cc
CH ₃ C ₄ H	Methyldiacetylene	cc	CH ₂ CCHCN	Cyanoallene	cc
CH ₃ CHCH ₂	Propylene	cc	NH ₂ CH ₂ CN	Aminoacetonitrile	hc
C ₈ H	Octatetraynyl	circ, cc	HC ₇ N	Cyanotriacetylene	circ, cc
C ₈ H ⁻	Octatetraynyl ion	circ, cc	C ₂ H ₅ CN	Propionitrile	hc
CH ₃ C ₆ H	Methyltriacetylene	cc	CH ₃ C ₅ N	Methylcyanodiacetylene	cc
C ₆ H ₆	Benzene	circ	HC ₉ N	Cyanotetraacetylene	circ, cc
O-Containing			C ₃ H ₇ CN	N-propyl cyanide	hc
CH ₃ OH	Methanol	cc, hc, gc, of	HC ₁₁ N	Cyanopentaacetylene	circ, cc
HC ₂ CHO	Propynal	hc, ge	S-Containing		
c-C ₃ H ₂ O	Cyclopropenone	gc	CH ₃ SH	Methyl mercaptan	hc
CH ₃ CHO	Acetaldehyde	cc, hc, gc	N,O-Containing		
C ₂ H ₃ OH	Vinyl alcohol	hc	NH ₂ CHO	Formamide	hc
c-CH ₂ OCH ₂	Ethylene oxide	hc, ge	CH ₃ CONH ₂	Acetamide	hc, ge
HCOOCH ₃	Methyl formate	hc, ge, of			
CH ₃ COOH	Acetic acid	hc, ge			
HOCH ₂ CHO	Glycolaldehyde	hc, ge			
C ₂ H ₃ CHO	Propenal	hc, ge			
C ₂ H ₅ OH	Ethanol	hc, of			
CH ₃ OCH ₃	Methyl ether	hc, ge			
CH ₃ COCH ₃	Acetone	hc			
HOCH ₂ CH ₂ OH	Ethylene glycol	hc, ge			
C ₂ H ₅ CHO	Propanal	hc, ge			
HCOOC ₂ H ₅	Ethyl formate	hc			

Abbreviations: circ, circumstellar envelope around evolved star/protoplanetary nebula; cc, cold cloud core; hc, hot core/corino; lc, lukewarm corino; gc, galactic center cloud; of, outflow. Not all of these molecules fulfill the strict criteria for identification listed in Section 3.3.

Crédit: Herbst & van Dishoeck 2010

50 molécules interstellaires
constituées de 6 à 13 atomes



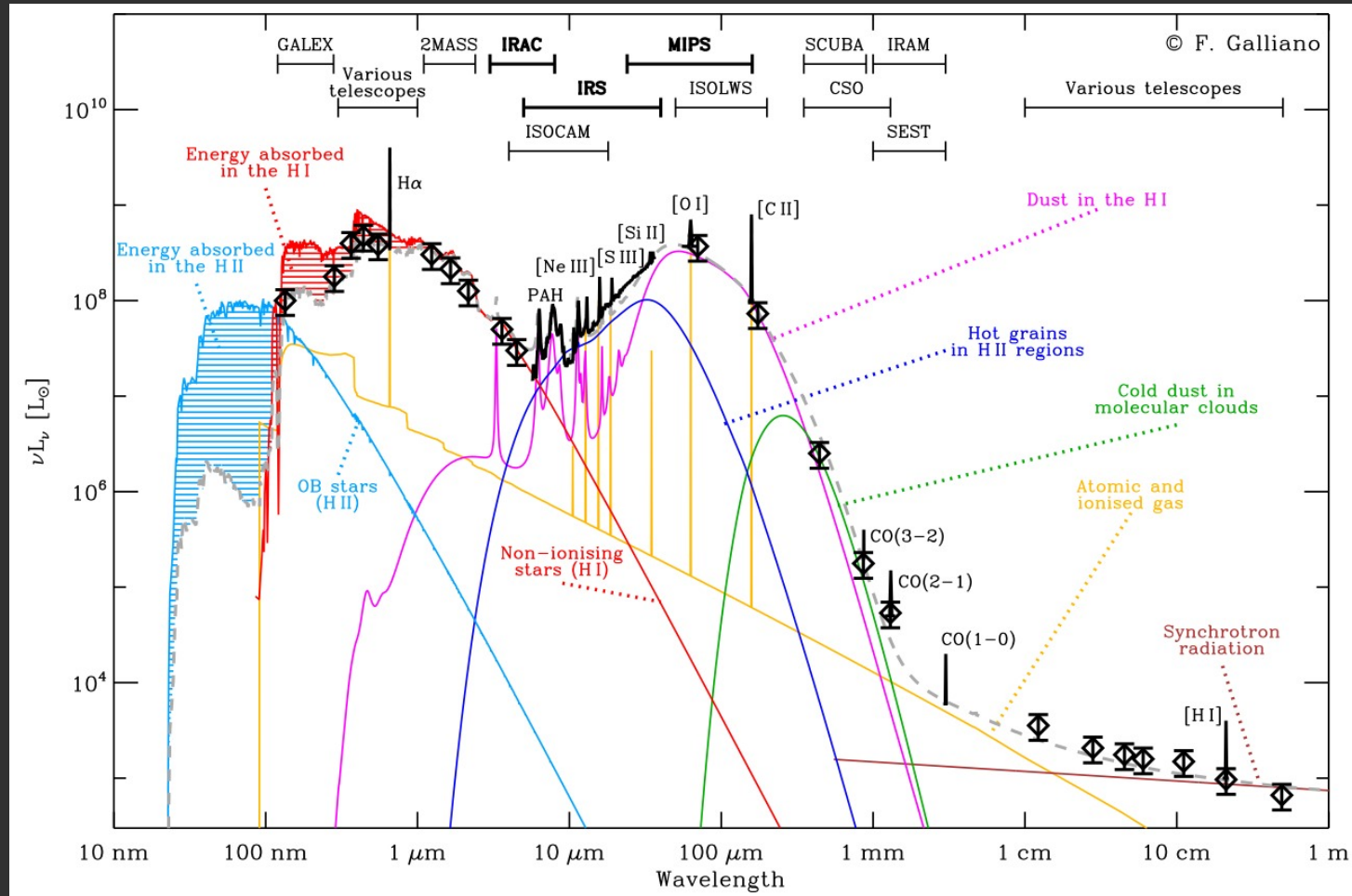
Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

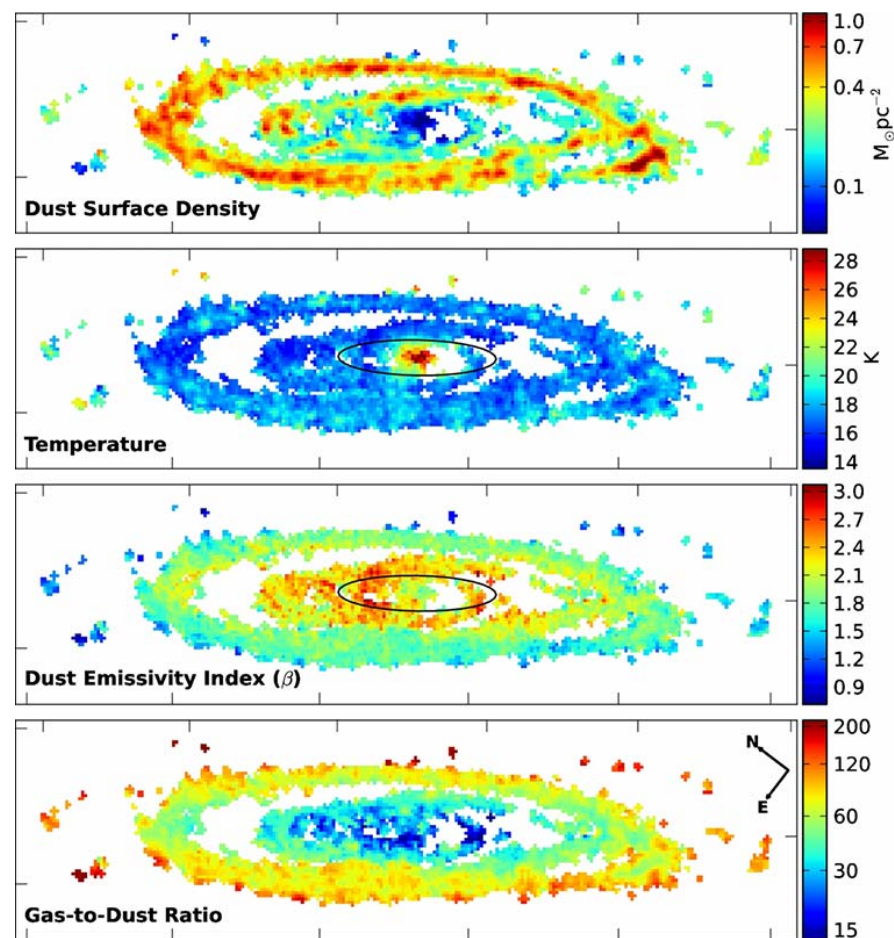
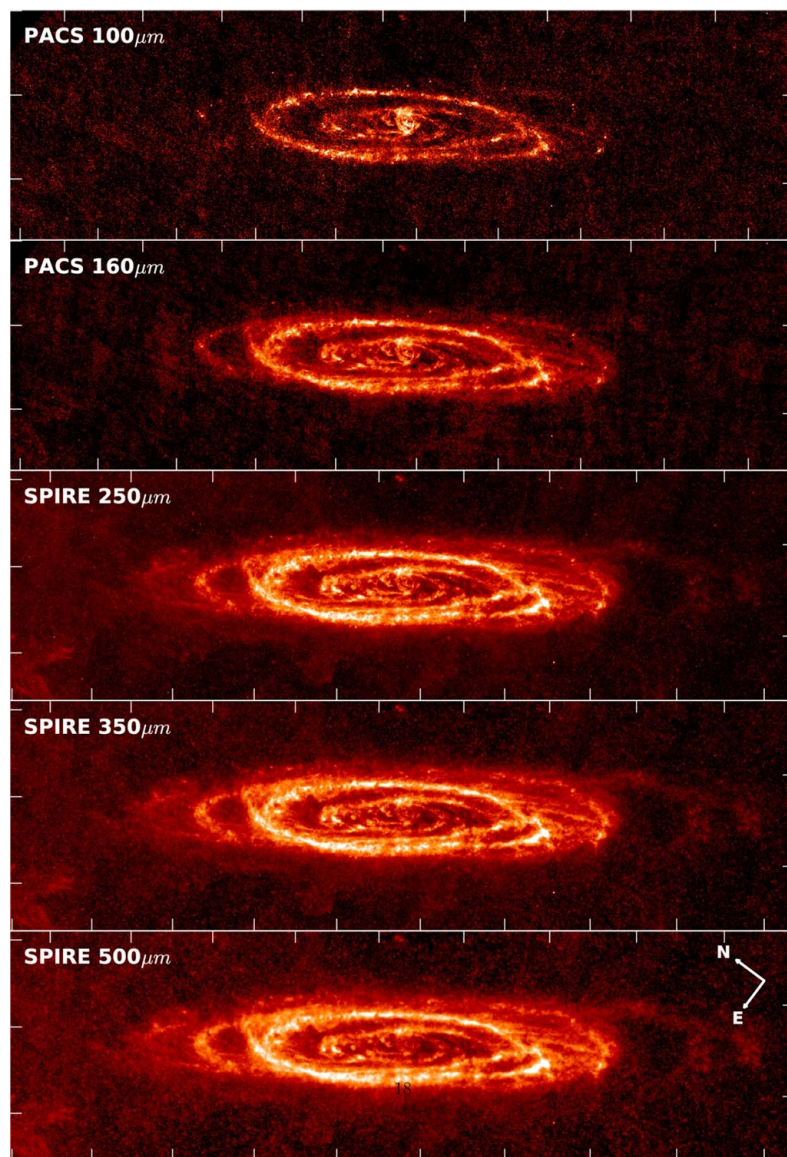
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.

Densité spectrale d'énergie d'une galaxie



Crédit image: Hubble space telescope

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.B.



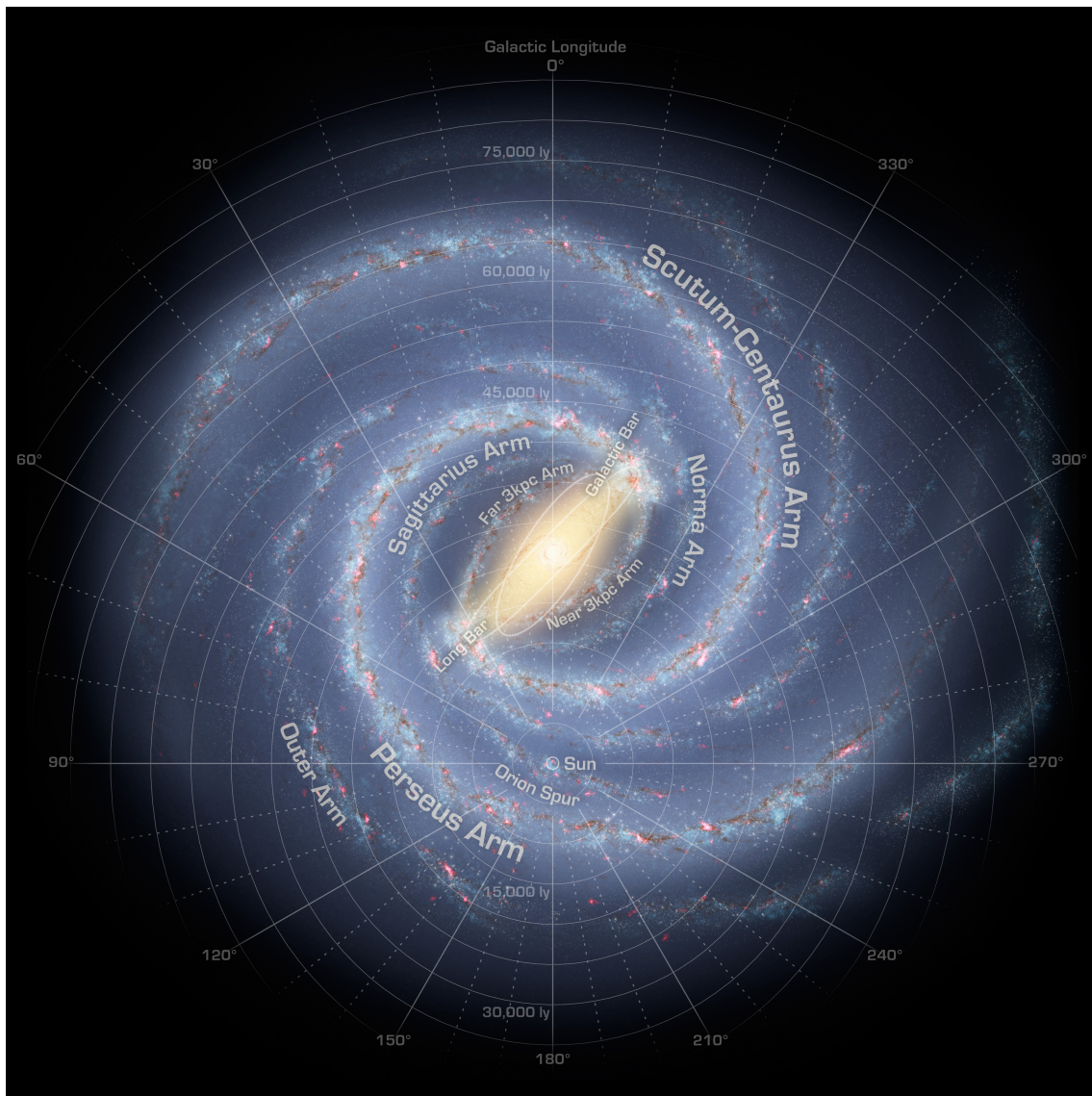
Crédit images: Smith et al. 2012, <http://arxiv.org/pdf/1204.0785v2.pdf>

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.

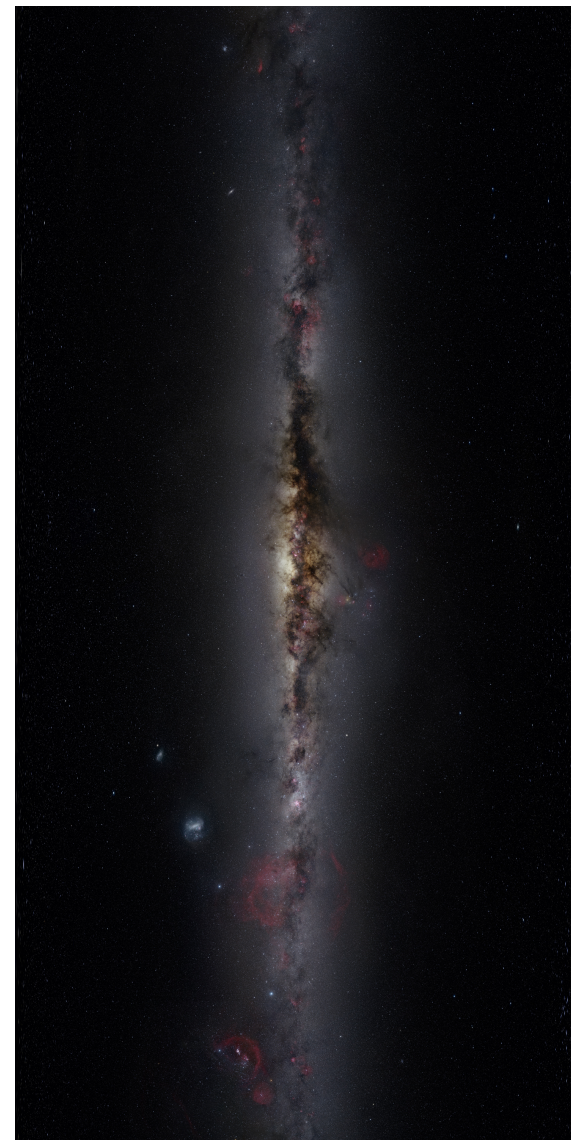
Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).**
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.

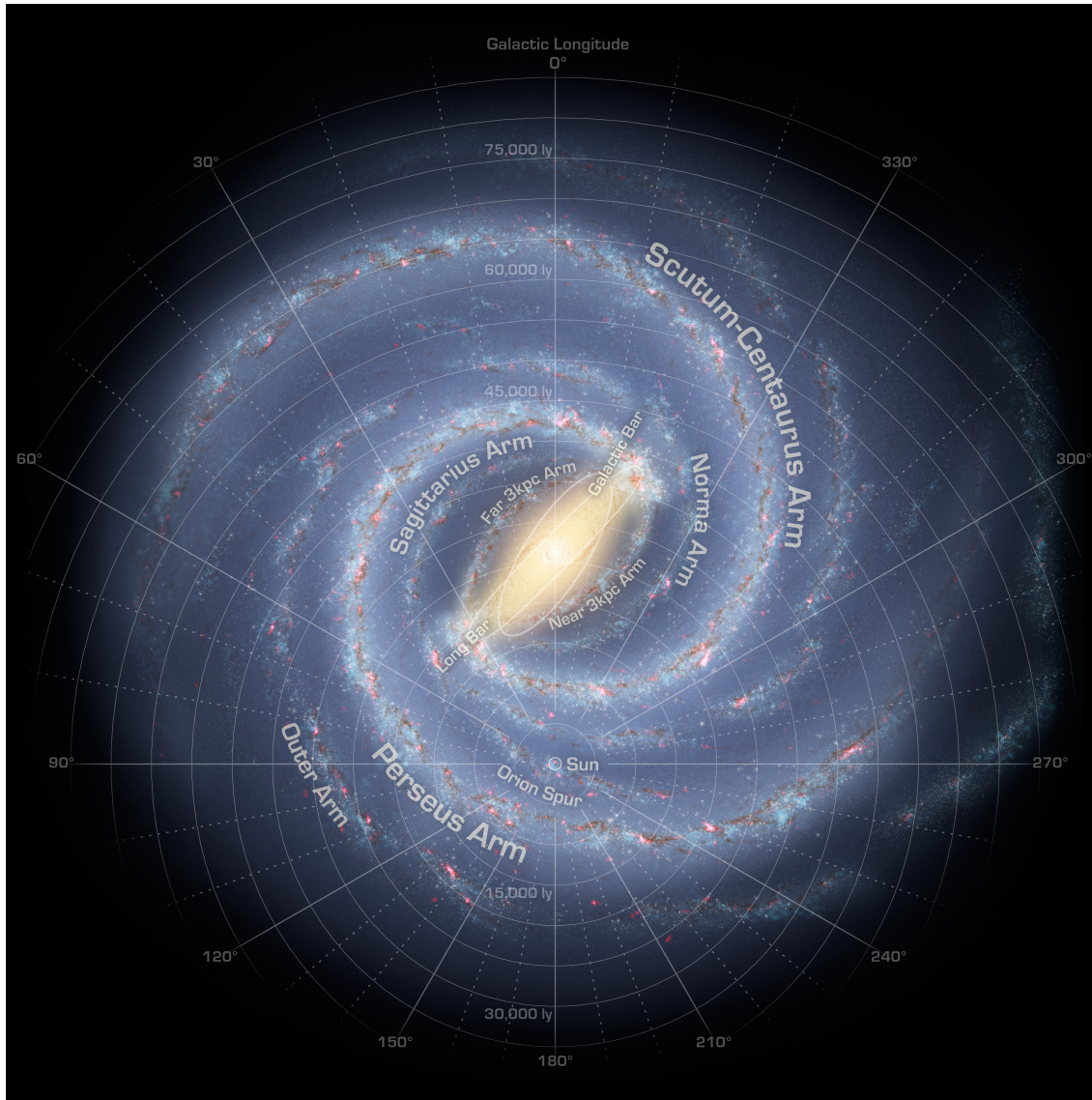


Crédit image: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt

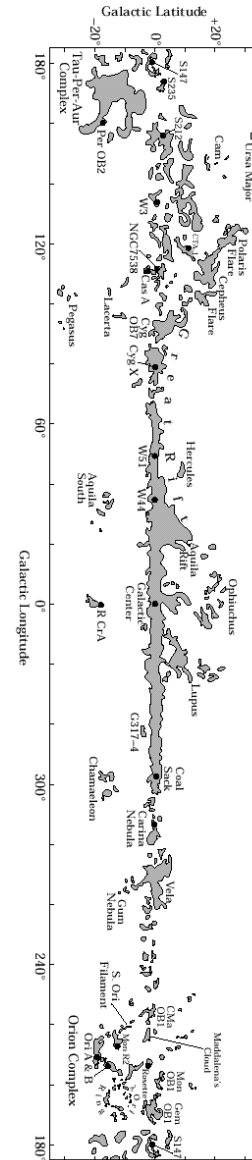


Crédit image: Nick Risinger

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.

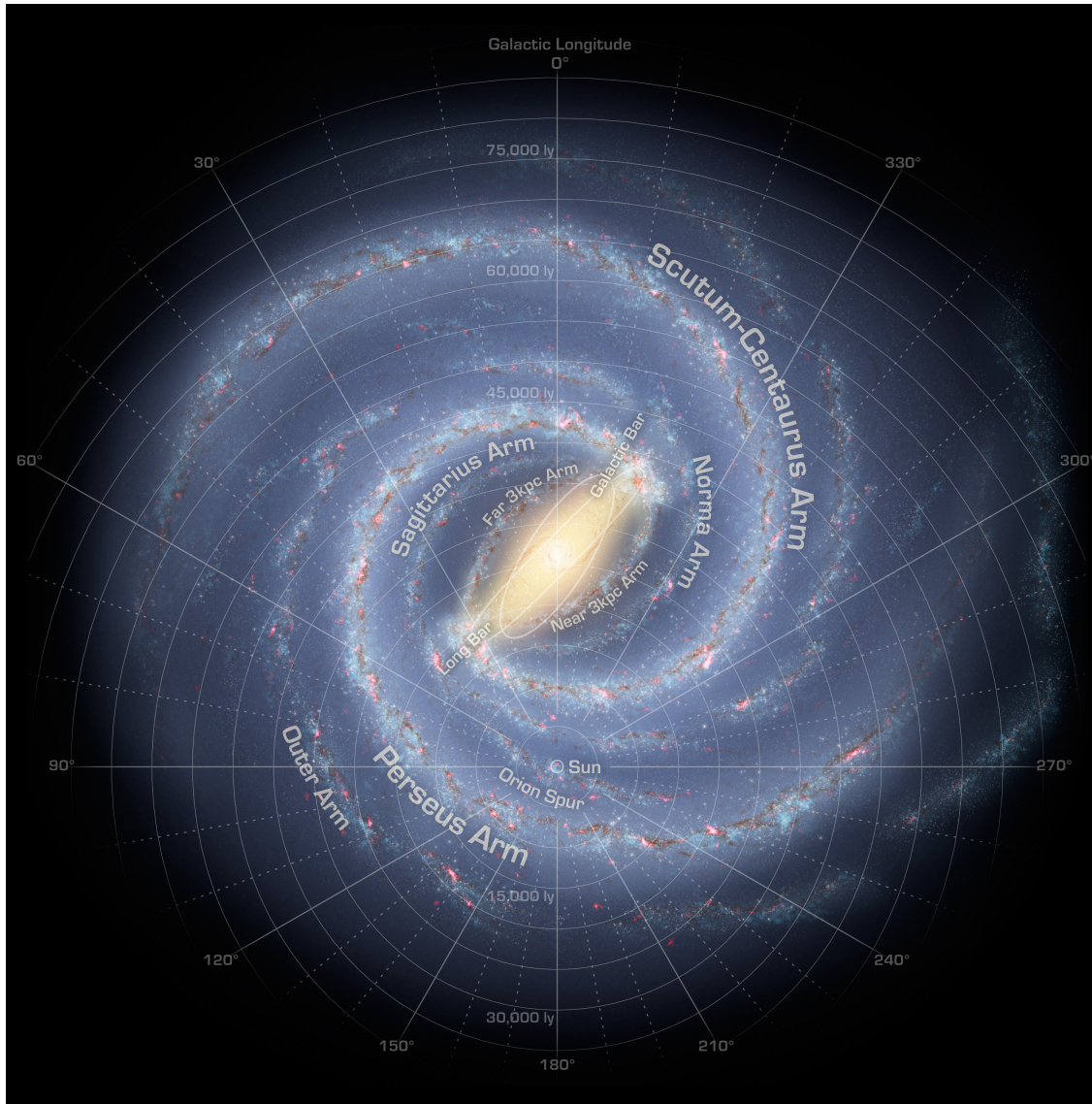


Crédit image: NASA/JPL-Caltech/R. Hurt



Crédit image: Dame et al. 2001 - <http://www.cfa.harvard.edu/mmw/MilkyWayinMolClouds.html>

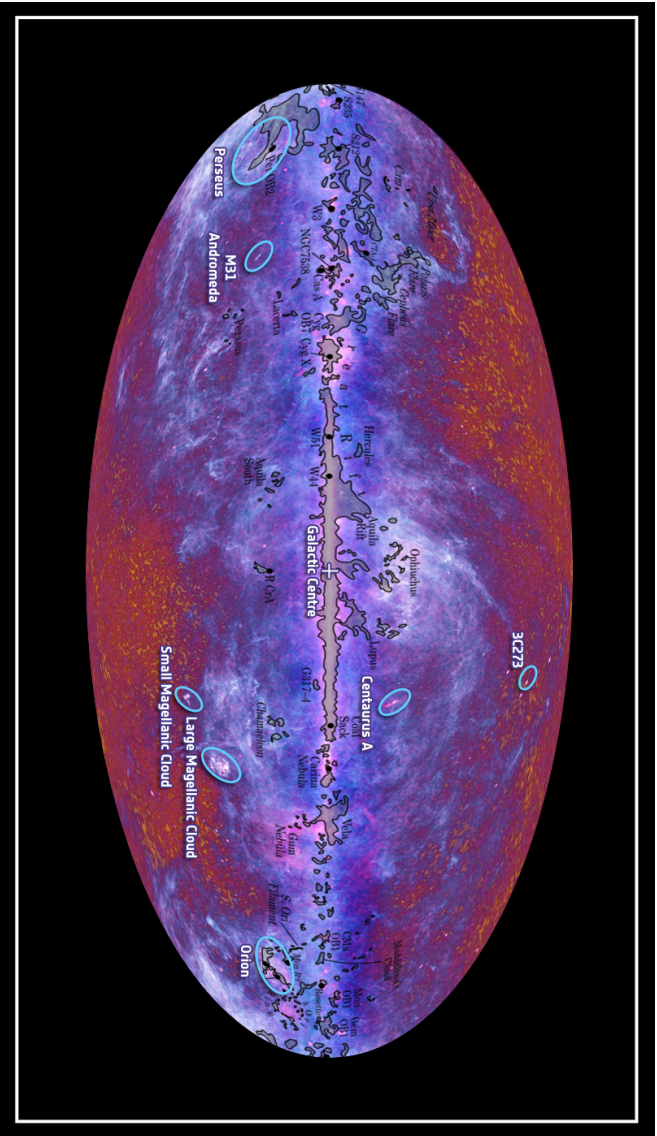
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.



The Planck one-year all-sky survey



(c) ESA, HFI and LFI consortia, July 2010

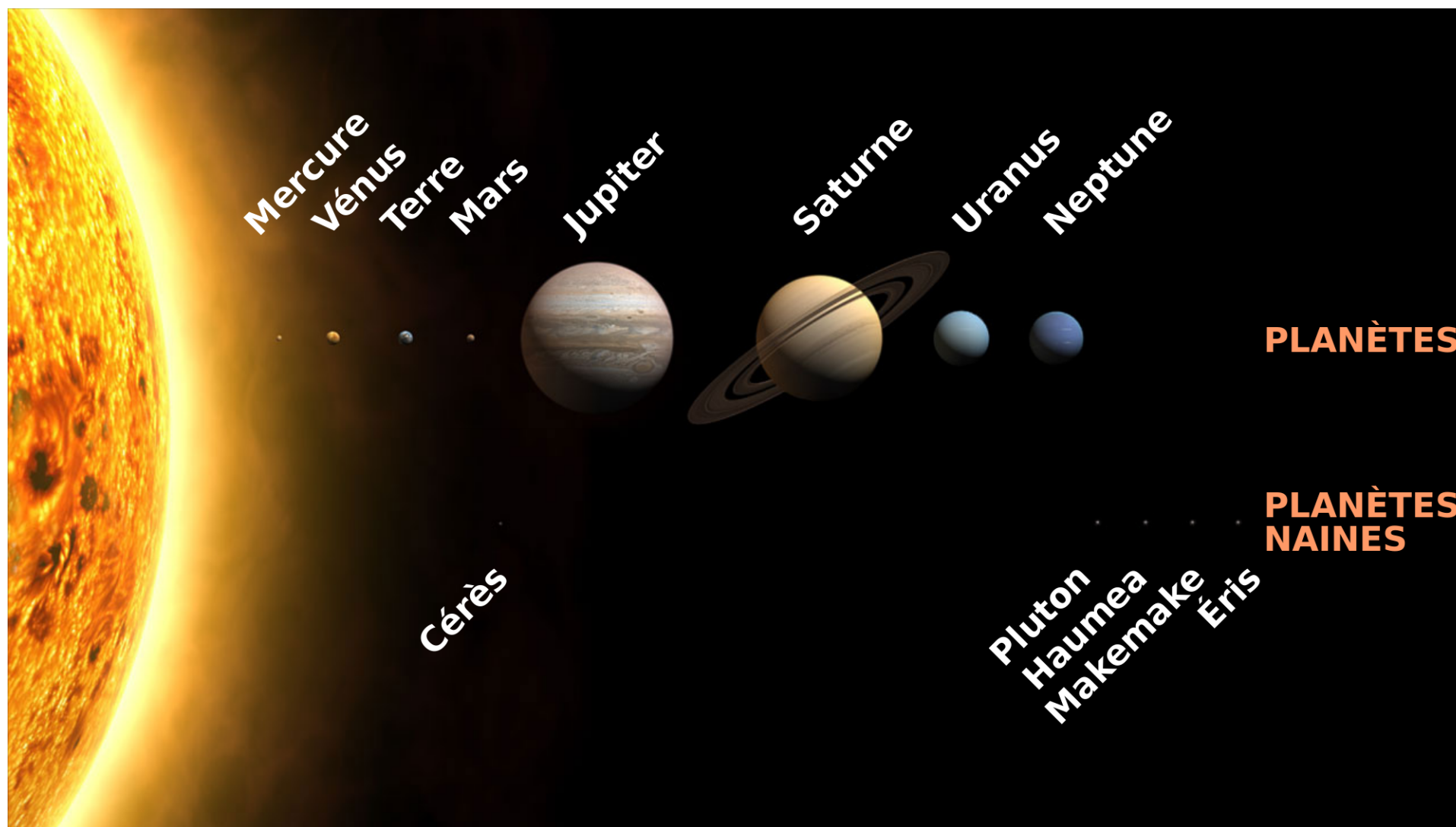


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.

Quelques unités et conversions en astronomie:

- Une année-lumière [al] = distance parcourue par la lumière en une année, soit:

$$299\,792\,458 \text{ m/s} \times 365 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$$

- Une unité astronomique [ua] = distance Terre-Soleil, soit:

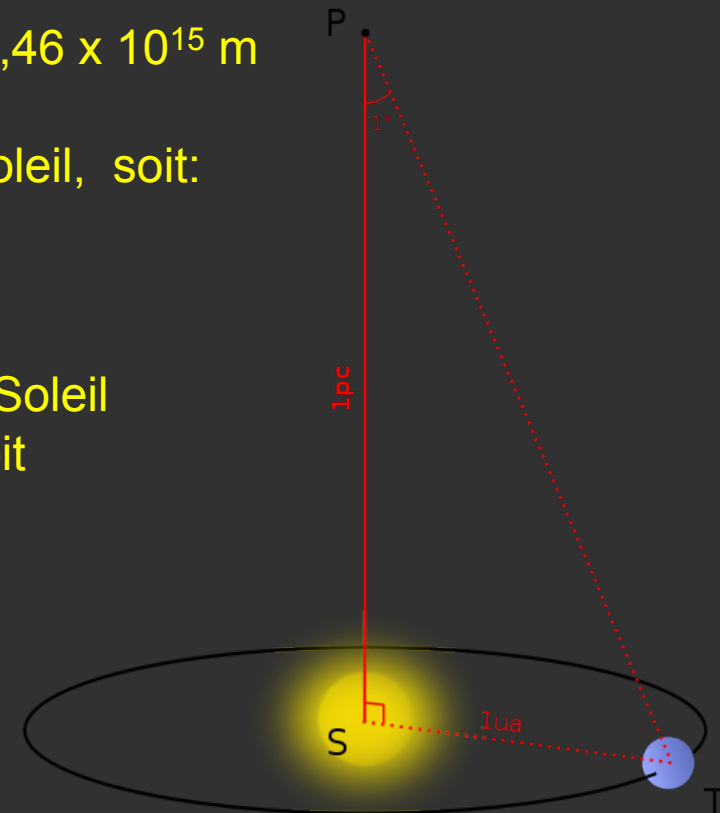
$$149\,597\,870\,700 \text{ m} = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$$

- Un parsec [pc], soit à laquelle la distance Terre-Soleil est vue sous un angle de 1 seconde d'arc ($1''$), soit

$$3,08 \times 10^{16} \text{ m}$$

Exprimer 1 pc en al et ua ?

Exprimer 1 al en ua ?



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.C.

Quelques unités et conversions en astronomie:

- Une année-lumière [al] = distance parcourue par la lumière en une année, soit:

$$299\,792\,458 \text{ m / s} \times 365 \text{ j} \times 24 \text{ h} \times 3600 \text{ s} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$$

- Une unité astronomique [ua] = distance Terre-Soleil, soit:

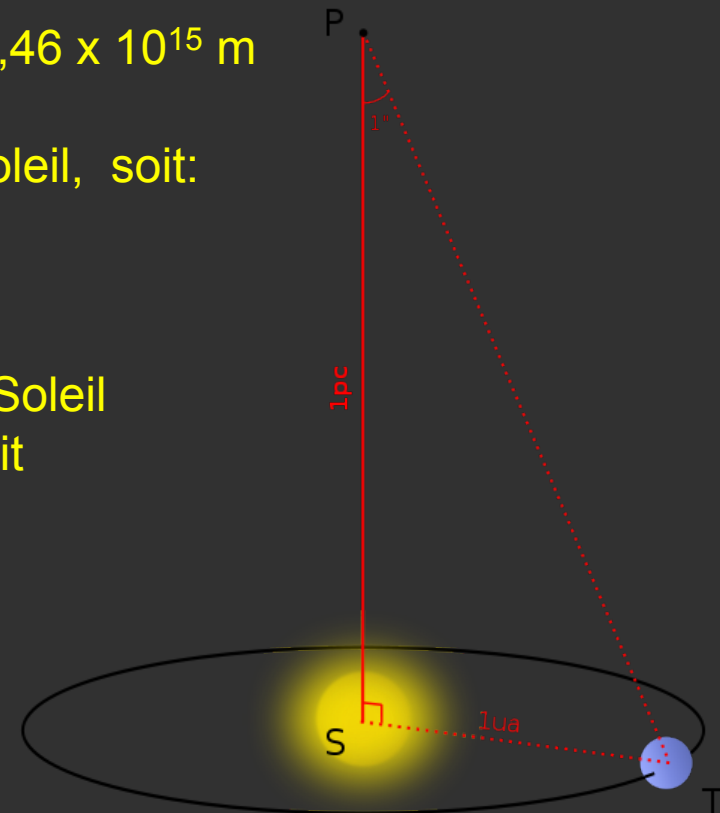
$$149\,597\,870\,700 \text{ m} = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$$

- Un parsec [pc], soit à laquelle la distance Terre-Soleil est vue sous un angle de 1 seconde d'arc ($1''$), soit

$$3,08 \times 10^{16} \text{ m}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ al} = 206\,265 \text{ ua}$$

$$1 \text{ al} = 63\,286 \text{ ua}$$

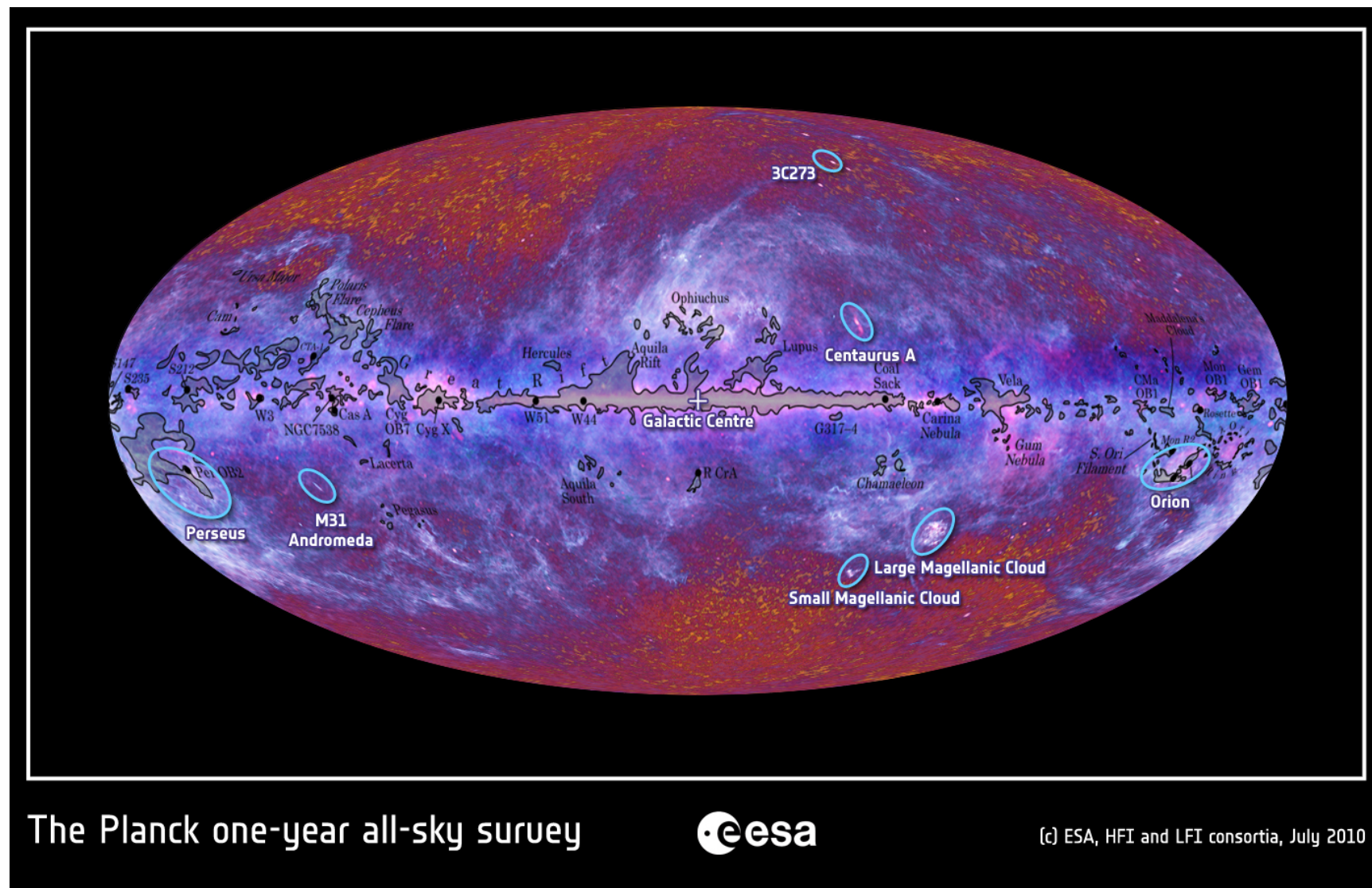


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).**
 - E. Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



Crédit image: CEA & Novae Factory

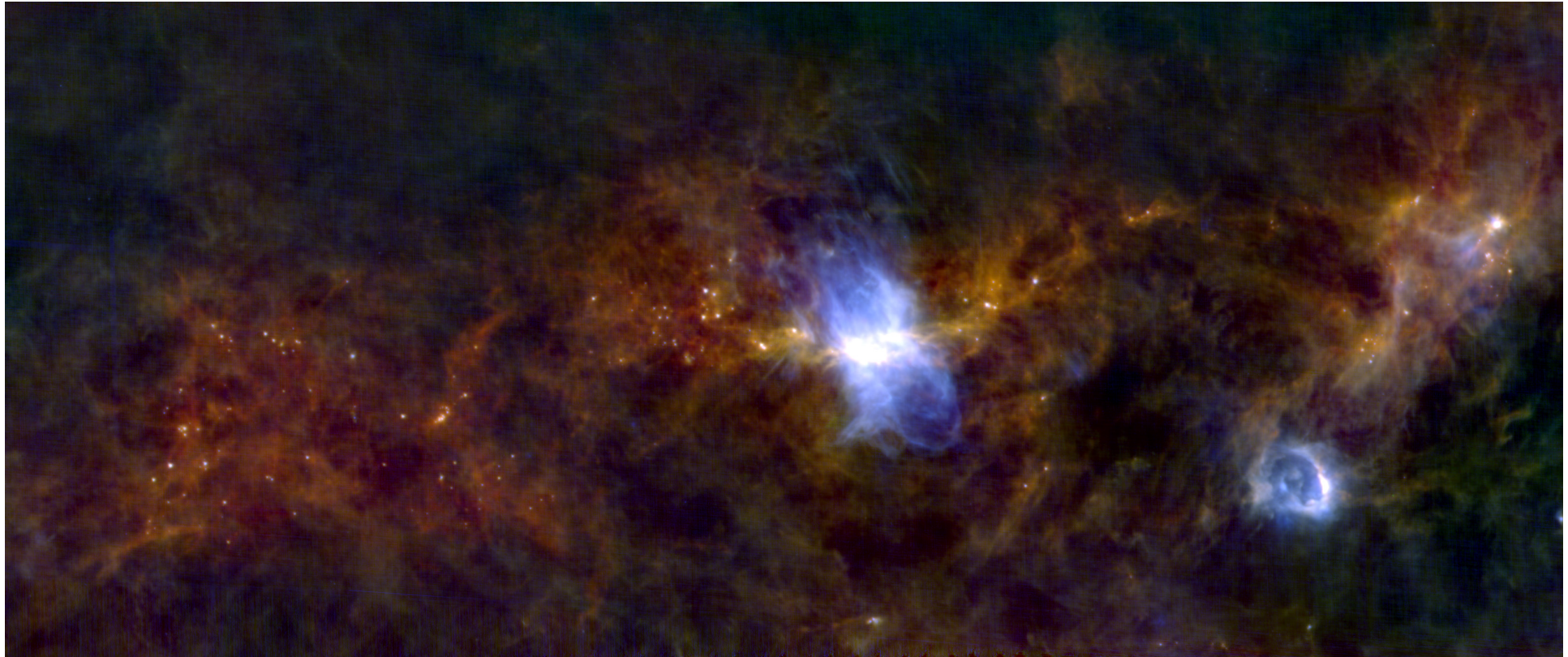


Auteur: Vincent Minier



UNIVERSITÉ DE NANTES

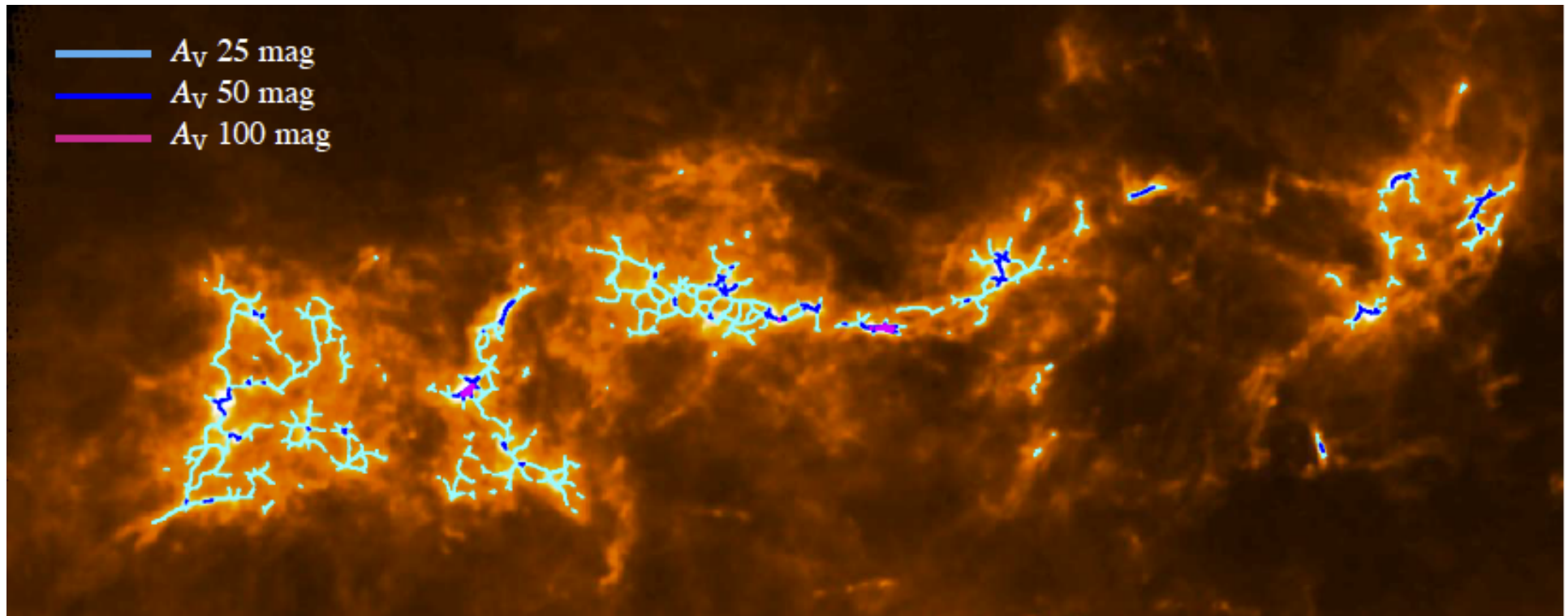
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

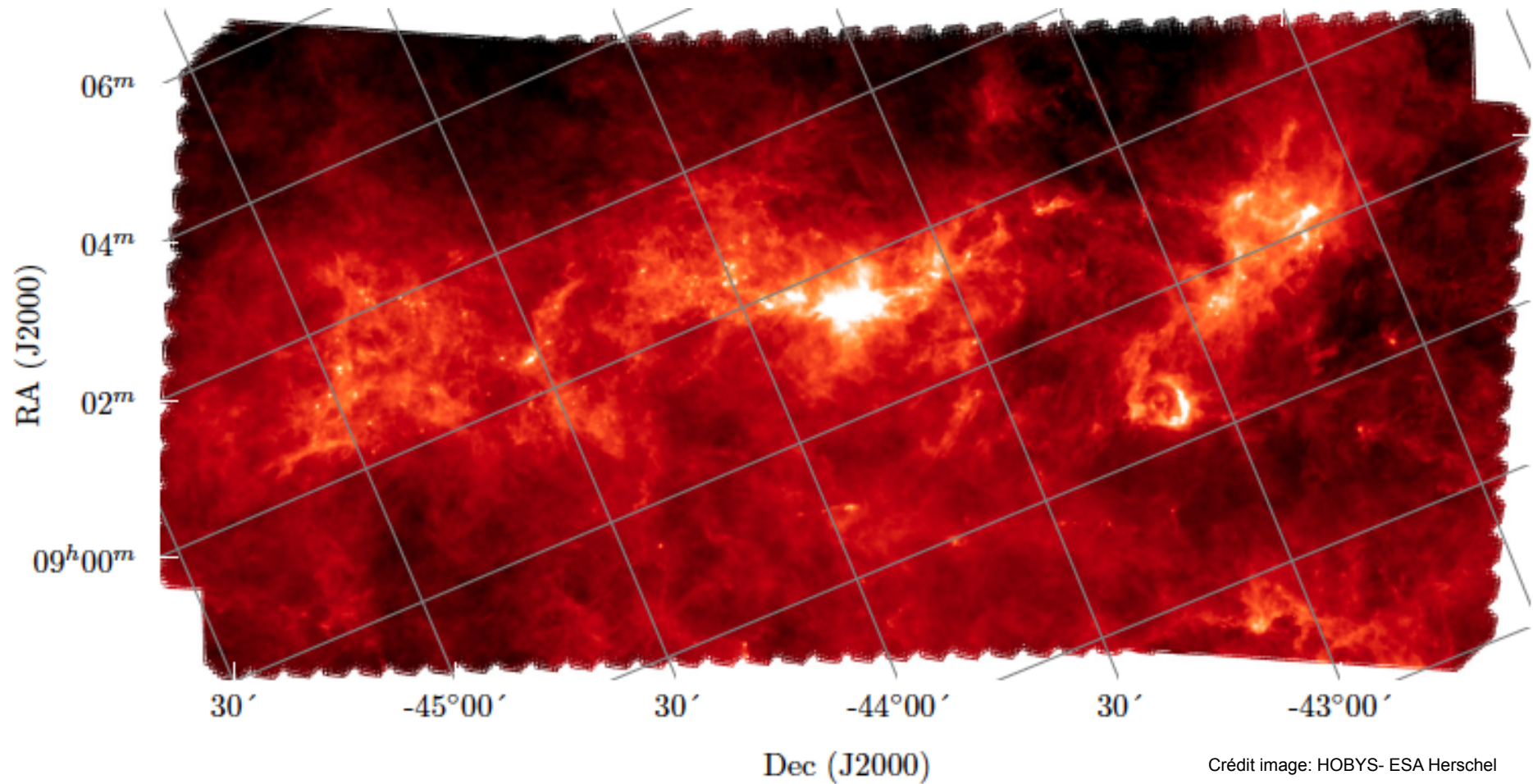
Emission de la poussière interstellaire dans 3 bandes Herschel (Hill et al. 2011) dans la région Vela C: 70 (bleu), 160 (vert), 250 (rouge) μm .

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



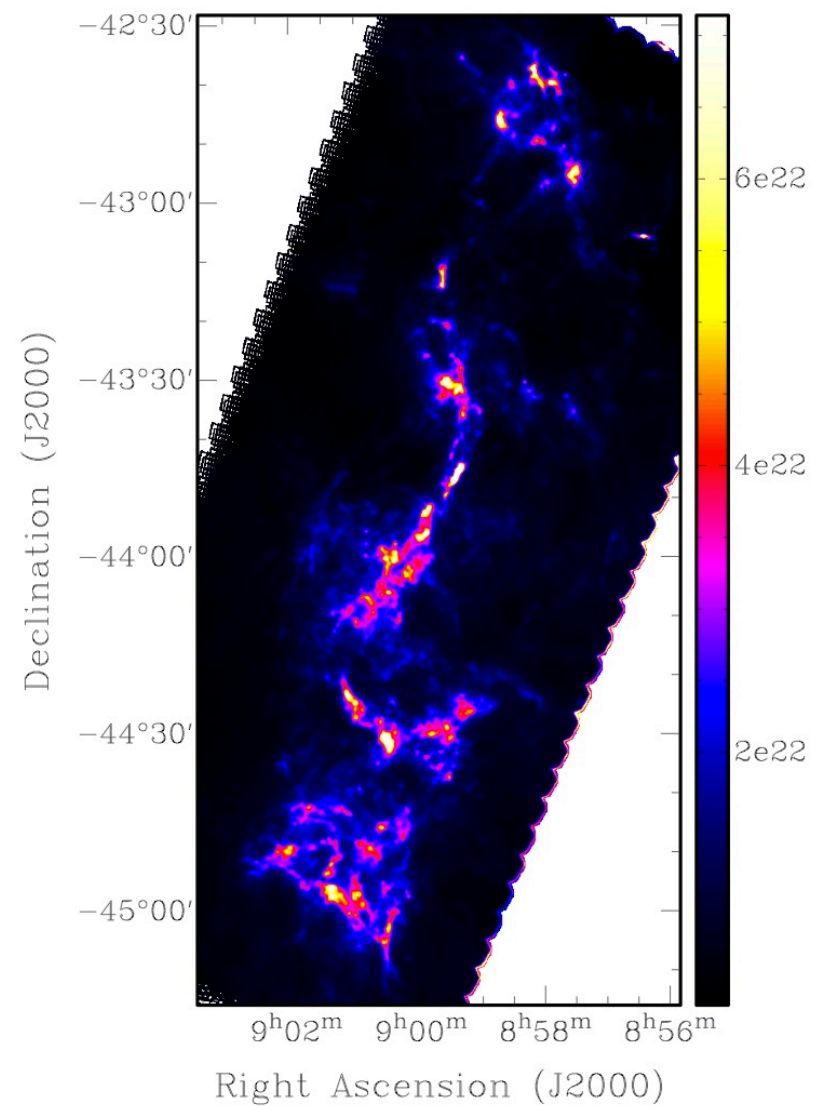
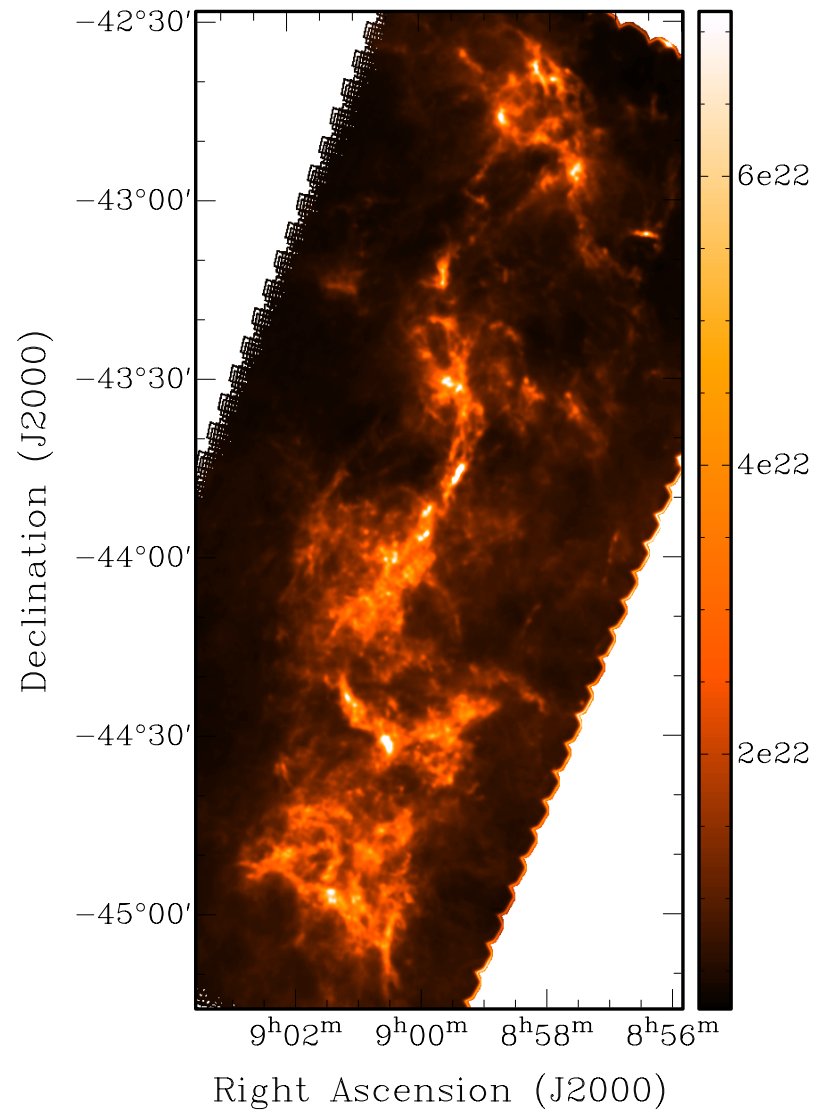
Crédit image: HOBYS- ESA Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



Emission de la poussière interstellaire (Hill et al. 2011) dans la région Vela C à 250 μm .

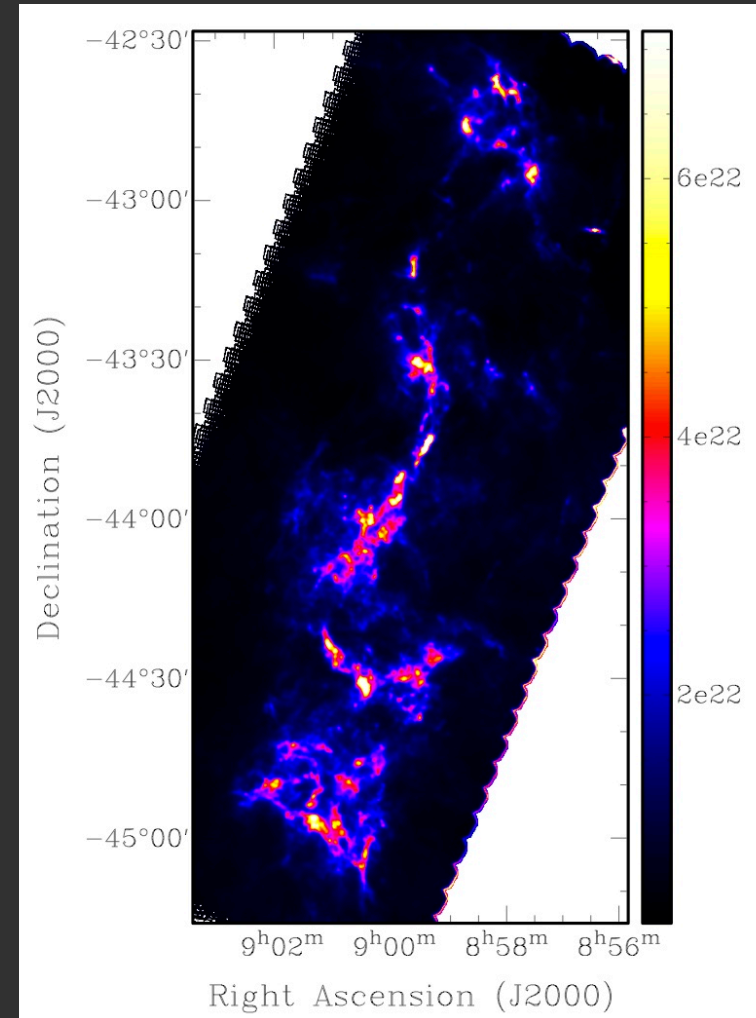
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



Crédit image: Minier - HOBYS- ESA Herschel

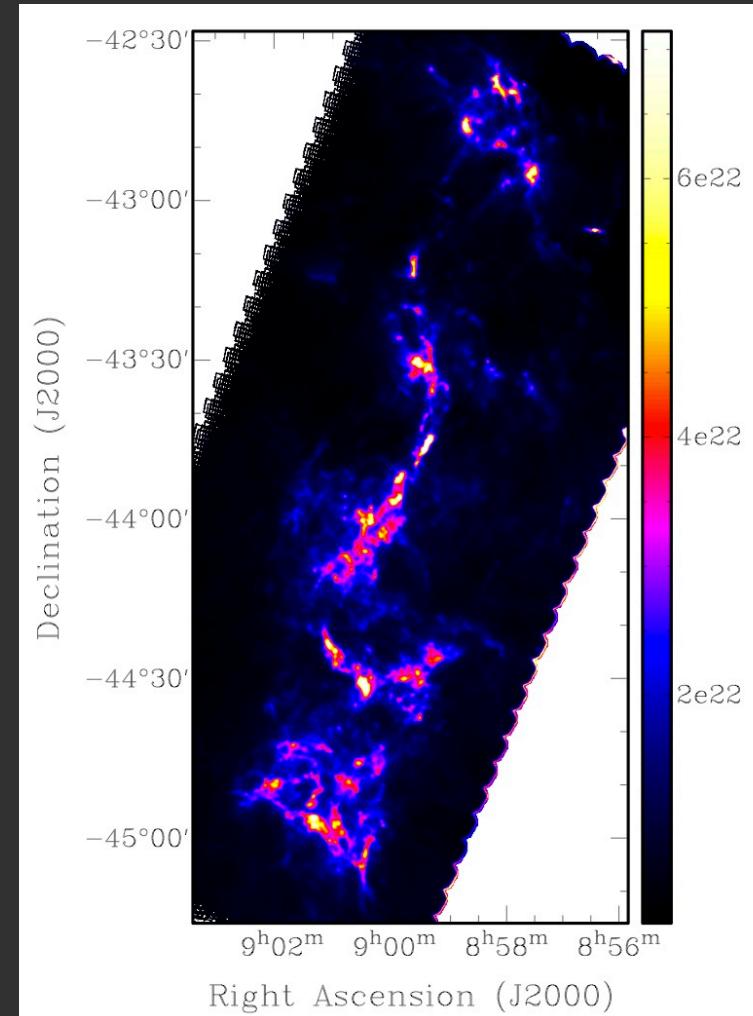
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

Comment calcule-t-on la masse totale de Vela C ?



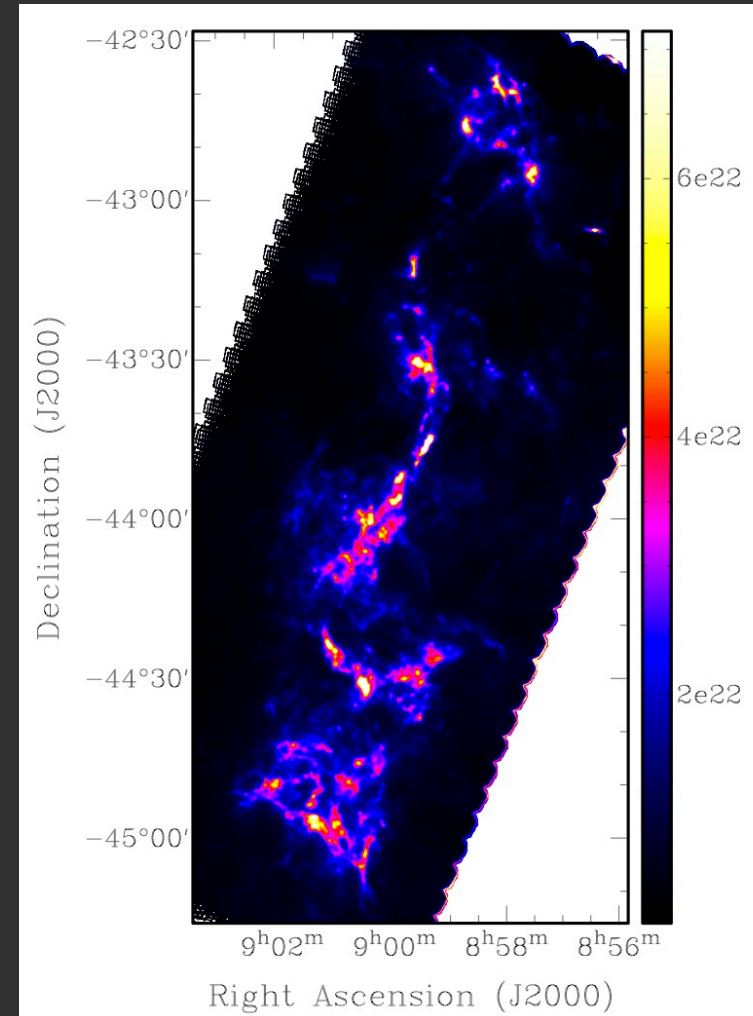
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

Comment calcule-t-on la masse volumique de Vela C ?



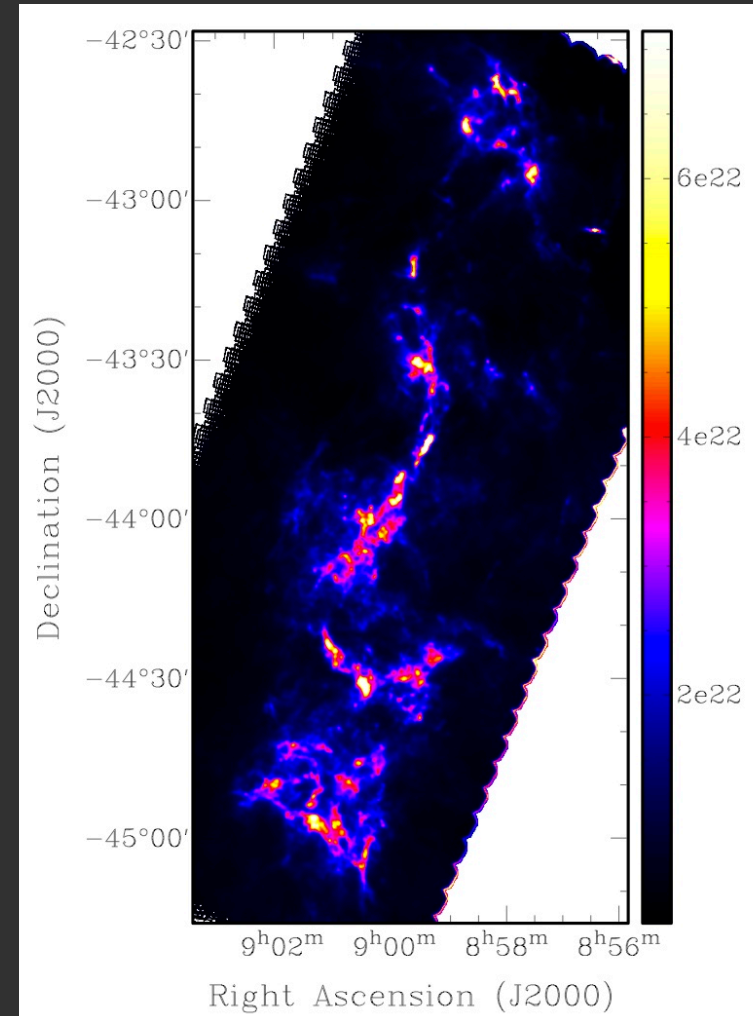
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

Comment calcule-t-on la masse volumique de Vela C ?



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

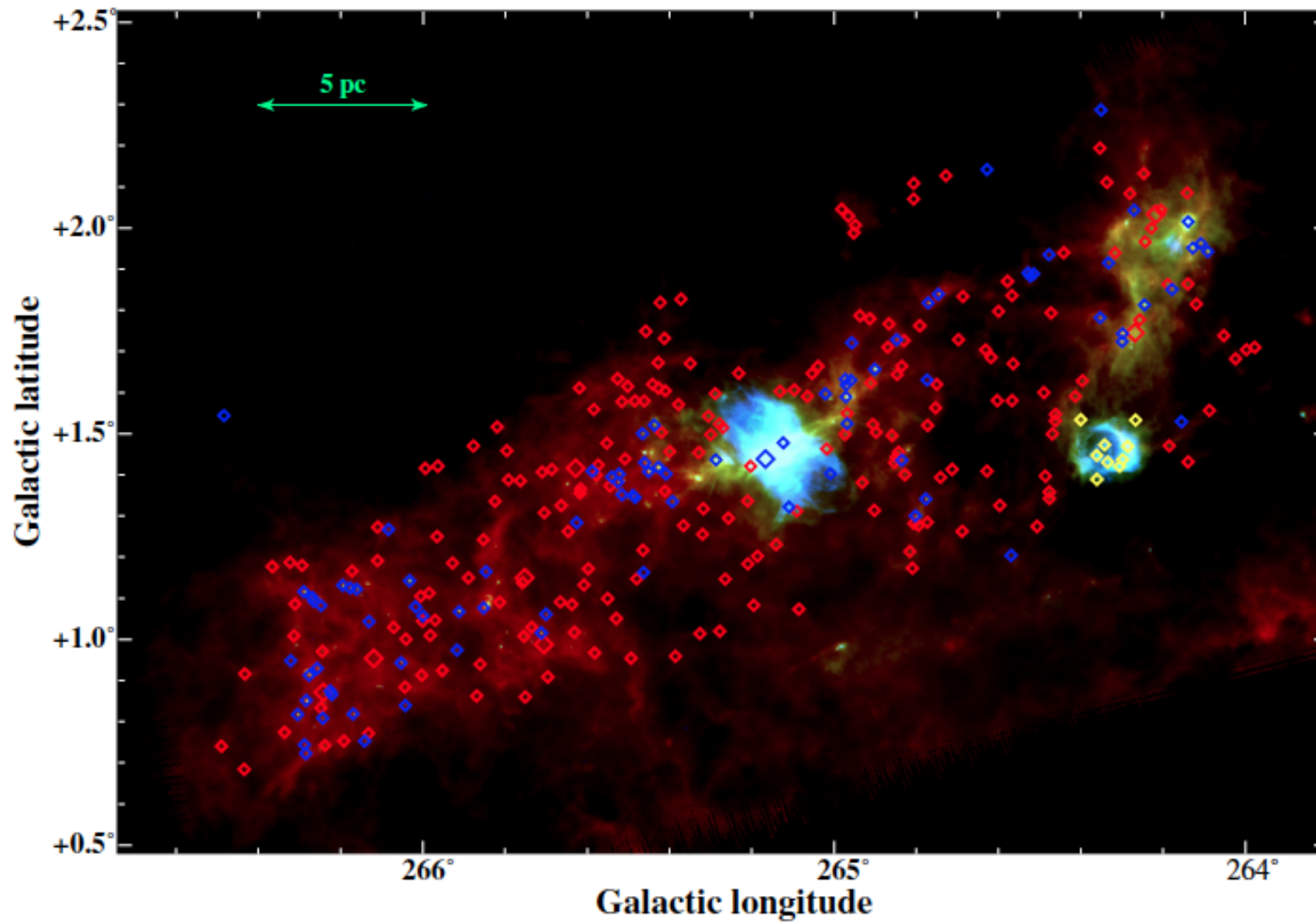
Comment calcule-t-on la masse volumique de Vela C ?



GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.

Et dans l'air et l'eau ?

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.D.



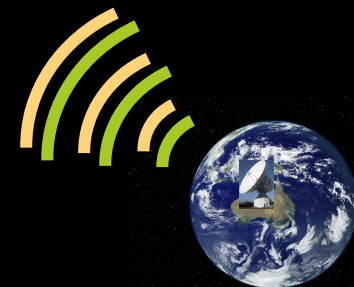
Crédit image: Giannini - HOBYS - ESA Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.

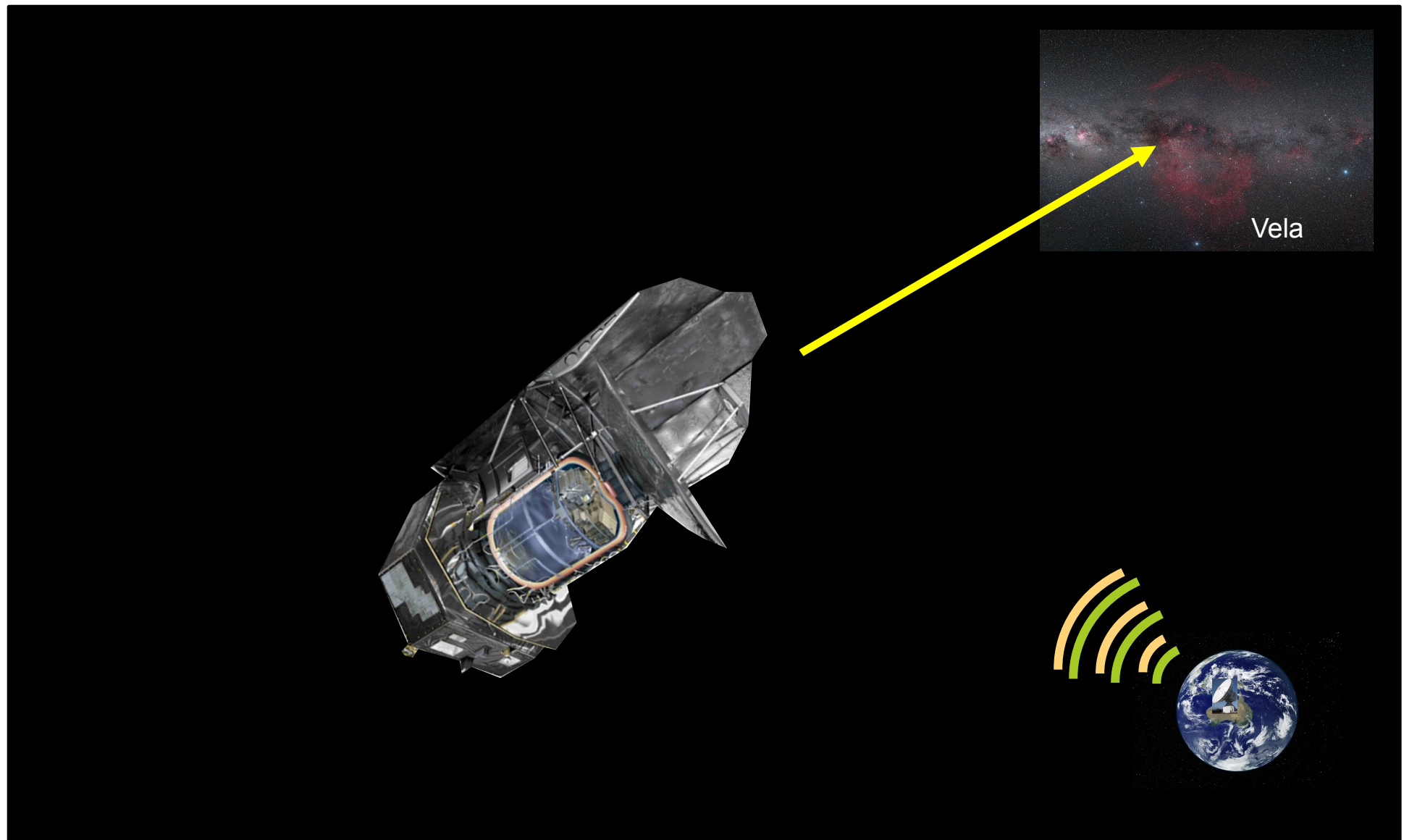
Séance #1

1. Tout commence dans le quasi-vide interstellaire.
 - A. Echelles et structures dans l'univers.
 - B. Milieu interstellaire des galaxies (lumière + contenu).
 - C. Notre galaxie, la Voie Lactée (notre position + dimensions + unités).
 - D. Nuages moléculaires (dimensions + contenu + masse).
 - E. **Observatoires dans le domaine submillimétrique (Herschel + ALMA).**

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.

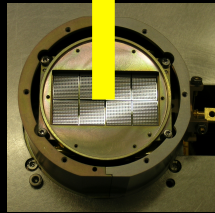
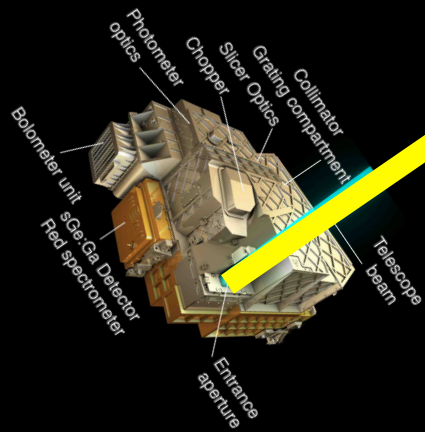


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.

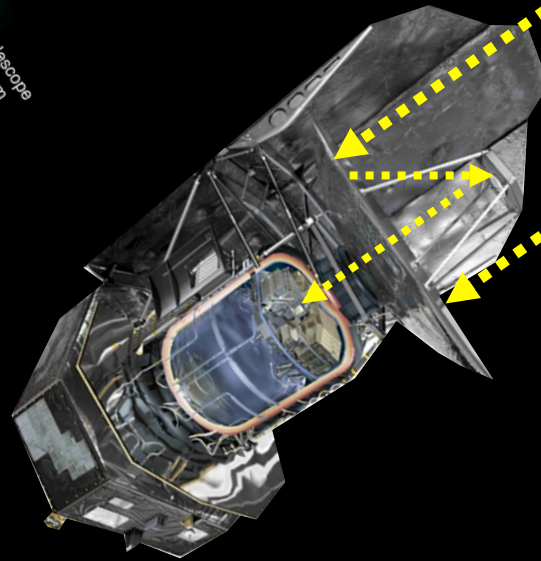


GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.

L'instrument PACS

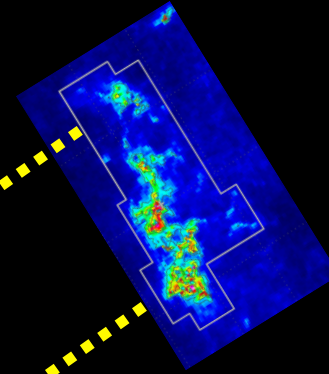
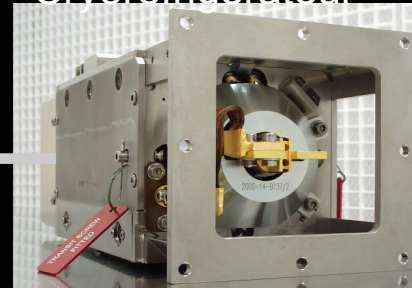


Caméra: 2048 pixels



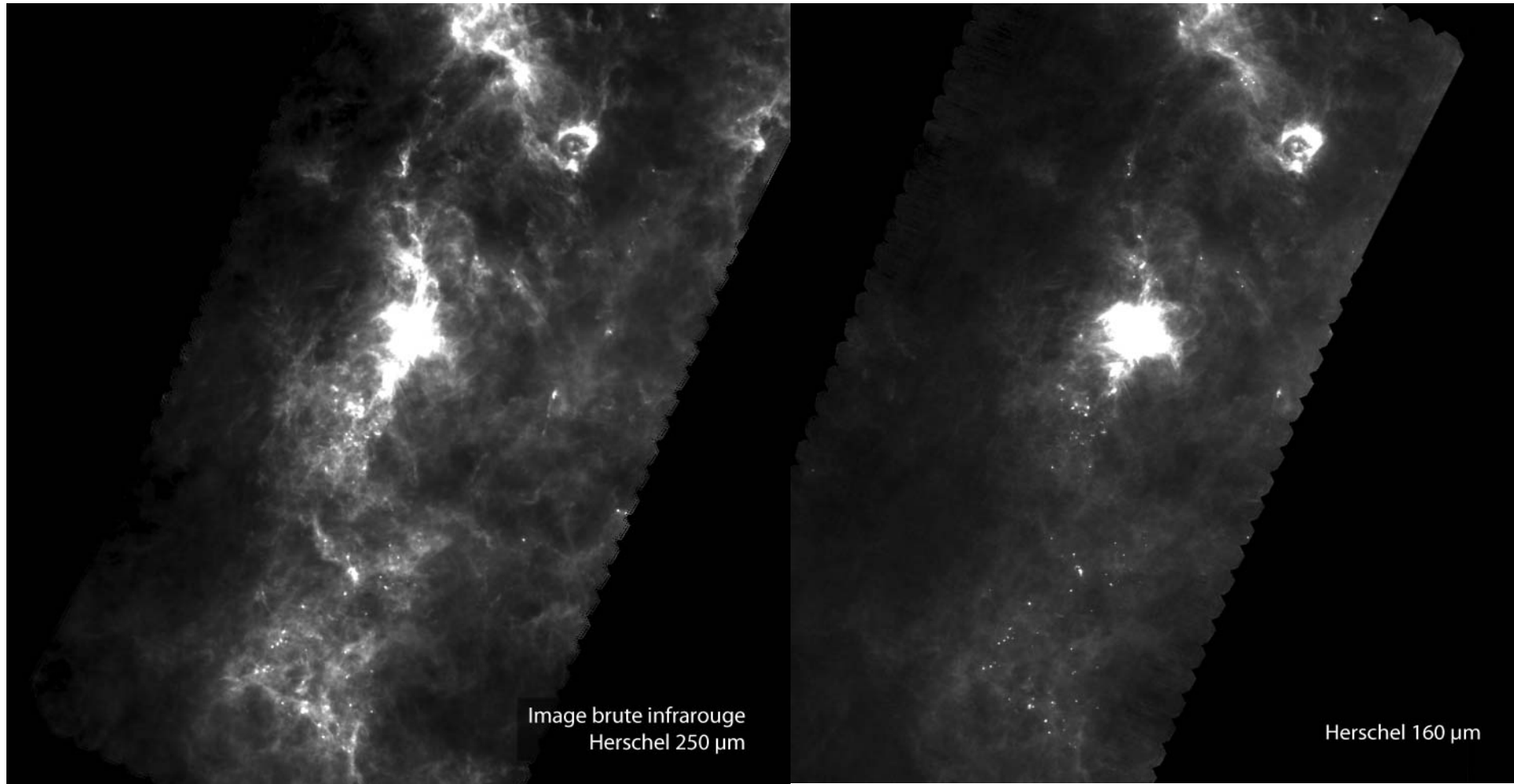
0,3 K = -272,85°C

Cryoréfrigérateur



Crédit images: ESA - CEA

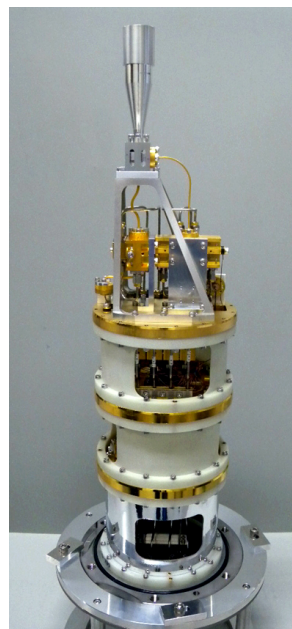
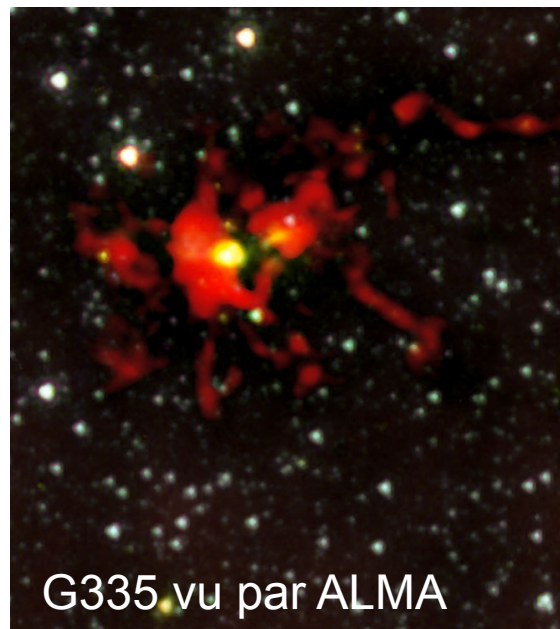
GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.



Crédit image: Minier – HOBYS - ESA Herschel

GENÈSE DES SYSTÈMES SOLAIRES – 1.E.

ALMA



Crédit images: ESO