

Astrophysique



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

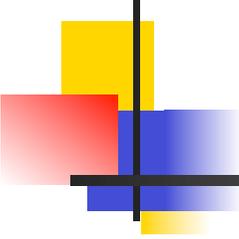
Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA

De quoi parlerons-nous aujourd'hui ?

- Un astronome, c'est quoi?
- Brève histoire de l'astronomie
- Le cadre
- Le contenu (les objets)
- Les moyens



© Observatoire de Paris



Astronomie, astrophysique, astrologie ?

- Le système solaire et le mouvement des planètes
- La distribution des étoiles et leur type
- La distribution des galaxies et leur types

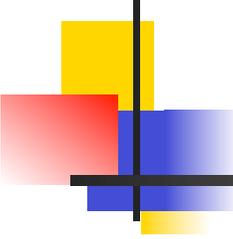
Observation pure
ASTRONOMIE

- La nature du Soleil et des étoiles
- La *formation* du Soleil et des étoiles
- La dynamique des amas d'étoiles et des galaxies
- L'origine du système solaire
- L'origine des galaxies
- L'origine de l'univers

Physique des objets
ASTROPHYSIQUE

- L'influence des astr  sur la destinée humaine

ASTROLOGIE

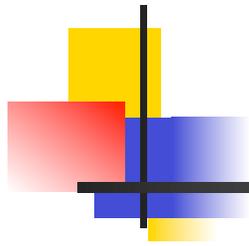


Difficulté : L'univers est *très* grand

- On ne peut pas aller explorer *in situ*
- On ne peut pas manipuler les objets, ni monter des expériences
- L'observation (la lumière reçue) est la **seule** source d'information
- Tout apparaît à plat sur le « fond du ciel », sans profondeur



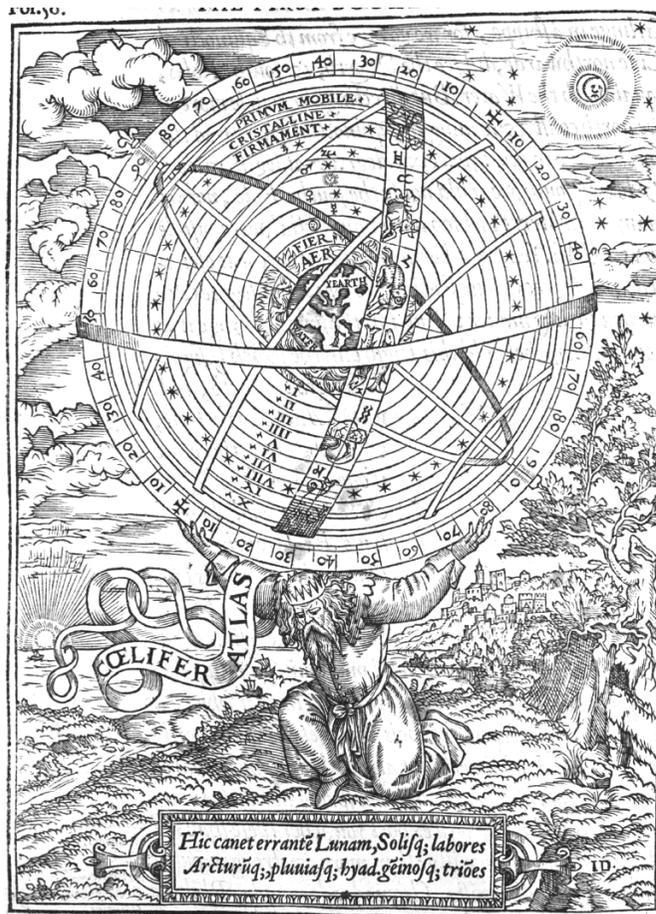
Tout porte à croire que notre Univers est un des plus grands au monde © Sidney Harris



UNE BRÈVE HISTOIRE



De l'œil au satellite: très brève histoire de l'astronomie

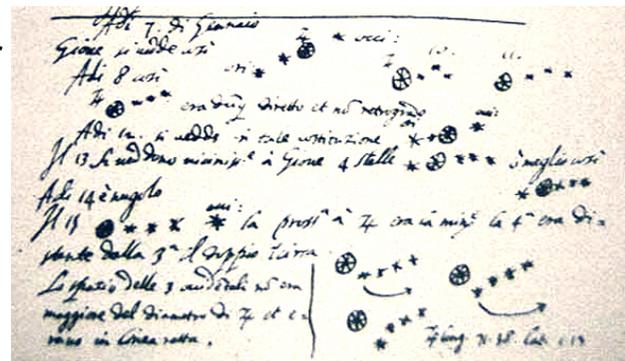


De l'œil au satellite: lunettes et télescopes

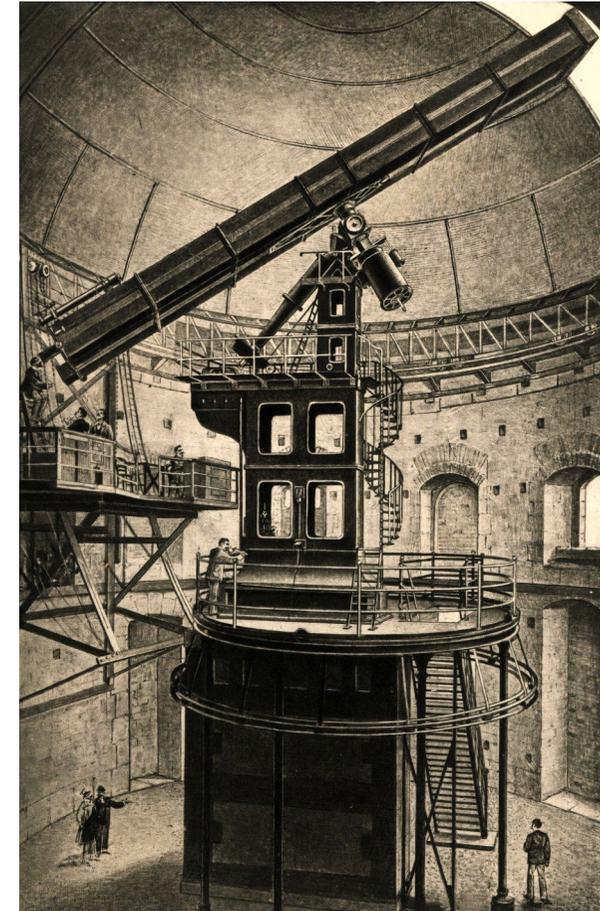
- Lunette de Galilée

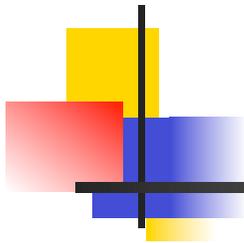


- Satellites de Jupiter
(notes de Galilée)



- Grande lunette équatoriale (Observatoire de Meudon)





LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



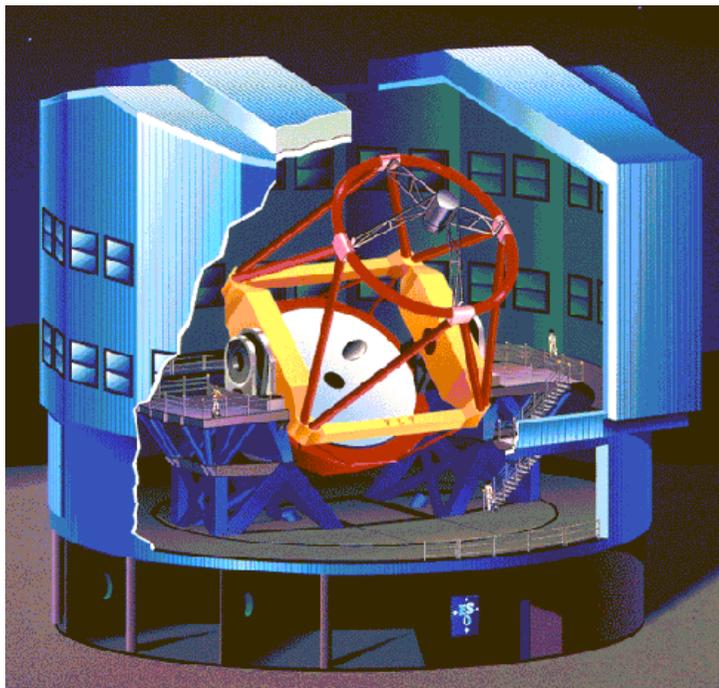
De l'œil au satellite

- Les VLT (*Very Large Telescope*) de l'ESO au Cerro Paranal (Chili)

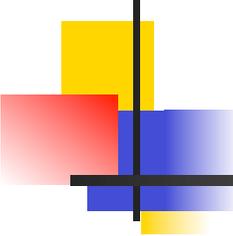


De l'œil au satellite

- Un télescope: optique, mécanique, électronique et informatique !



La salle des ordinateurs de pilotage du VLT © ESO



De l'œil au satellite

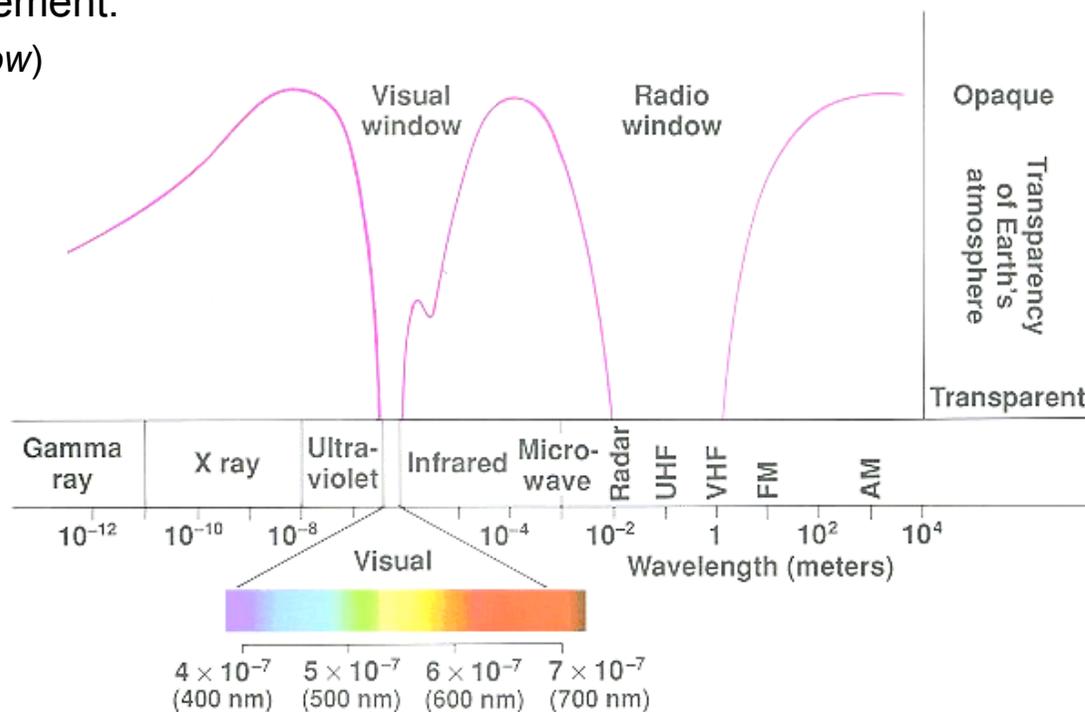
- La radioastronomie: à la découverte de l'univers « froid »



Le radiotélescope de Green Bank (Etats-Unis)

Transparence de l'atmosphère

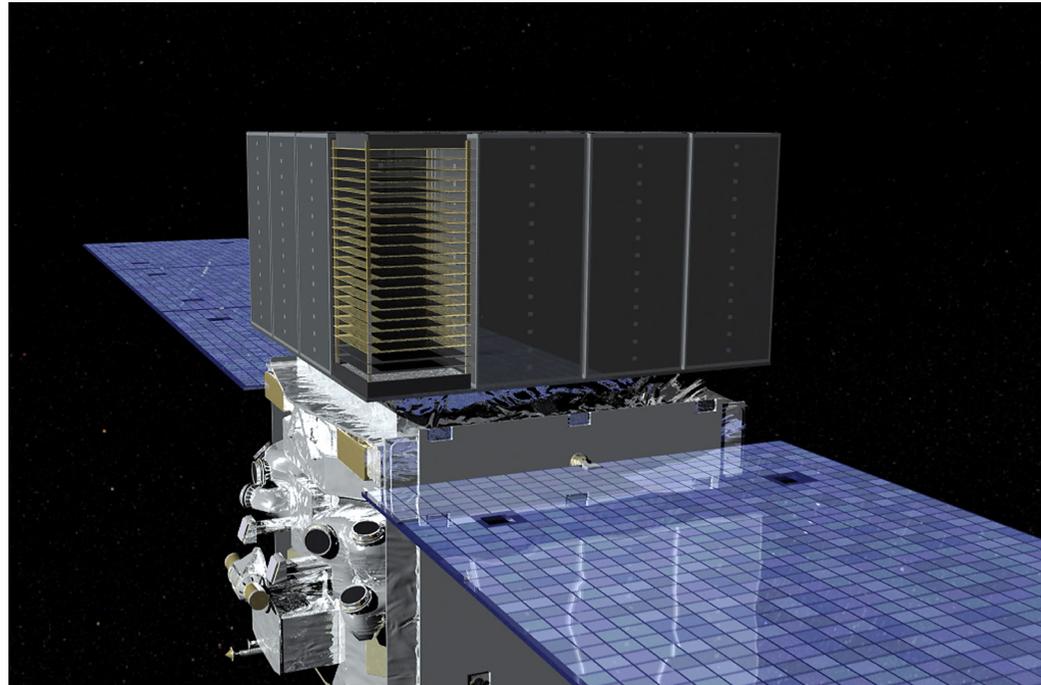
- L'atmosphère terrestre absorbe presque tous les rayonnements électromagnétiques
- Deux « fenêtres » seulement:
 - Optique (*visual window*)
 - Radio
- → satellites !



De l'œil au satellite

■ Satellites

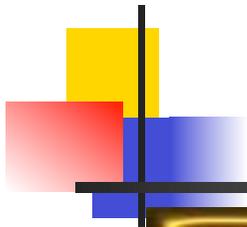
- Radio (millimétrique)
CoBE, WMAP, Planck
- Infrarouge
Spitzer, IRAS, ISO, Herschel...
- Visible
Hubble, Hipparcos, Corot, Kepler...
- Ultraviolet
FUSE, Swift...
- Rayons X
XMM-Newton, Chandra, RoSat...
- Rayons gamma
Fermi (Glast), Compton (GRO), Swift...



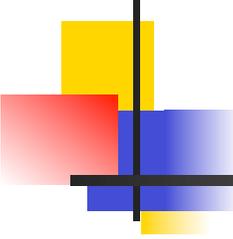
Le satellite Fermi d'observation en rayons gamma © NASA

■ Sondes

- Soleil et planètes *Pioneer, Soho, Venus Express, Mars Express, Voyager, Cassini-Huyghens...*
- Comètes et astéroïdes *Giotto, Rosetta, Galileo, Hayabusa...*



LE CADRE

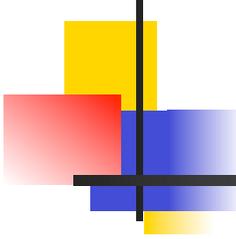


Le cadre spatio-temporel

- Échelles de temps : des durées « astronomiques »
 - Âge de l'univers 14 milliards d'années
 - Évolution d'une étoile légère (Soleil) 10 milliards d'années
 - Évolution d'une étoile lourde (15 Mo) 15 millions d'années
 - Rotation galactique 200 millions d'années
 - Effondrement d'une supernova ~ quelques secondes

 - Nucléosynthèse primordiale 3 minutes
 - Émission du fond micro-onde (CMB) 400 000 ans

 - Et avant?
- Le « calendrier cosmique » de Carl Sagan : 1 seconde pour 5 siècles



Le cadre spatio-temporel

- Échelles d'espace : des distances « astronomiques »

■ Terre	Ø 13 000 km		
■ Lune	380 000 km		1 s
■ Soleil	149 millions km	1 UA	8 mn
■ Système solaire proche	15 milliards de km	100 UA	12 h
■ Système solaire lointain	10 000 milliards de km	70 000 UA	1 an
■ Étoile la plus proche	40 000 milliards de km	270 000 UA	4.2 ans
■ Voie lactée	Ø 30 000 années-lumière		
■ Andromède	2 millions d'années-lumière		
■ Amas de galaxies	Ø 1 à 10 millions d'années-lumière		
■ Univers visible	Ø 100 milliards d'années-lumière		
■ Et au-delà?			

1 année-lumière = 9 461 milliards de km

1 parsec = 3,6 années-lumière

- Un modèle à l'échelle ?

Des modèles à l'échelle ?

- Si la Terre était une petite bille...



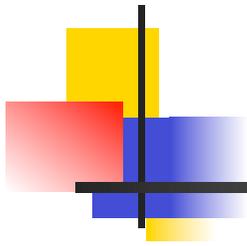
- Le Soleil mesurerait 1,4 m de diamètre et serait à 150 m
- Le système solaire aurait 6 000 km de rayon environ (la taille de la vraie Terre)
- L'étoile la plus proche serait à 40 000 km
- Le centre de la Voie lactée serait à 240 millions de km
- La galaxie la plus proche, Andromède, serait à 20 milliards de km

- Si le système solaire tenait dans un grain de sable...



- La Voie lactée aurait 10 m de diamètre (et 10 cm d'épaisseur)
- La galaxie d'Andromède serait à 400 m
- L'amas de galaxies de Coma, lui, serait à 60 km
- La limite de l'univers observable serait à 10 000 km à peu près...

...mais les notions de distances deviennent ambiguës



LE CONTENU

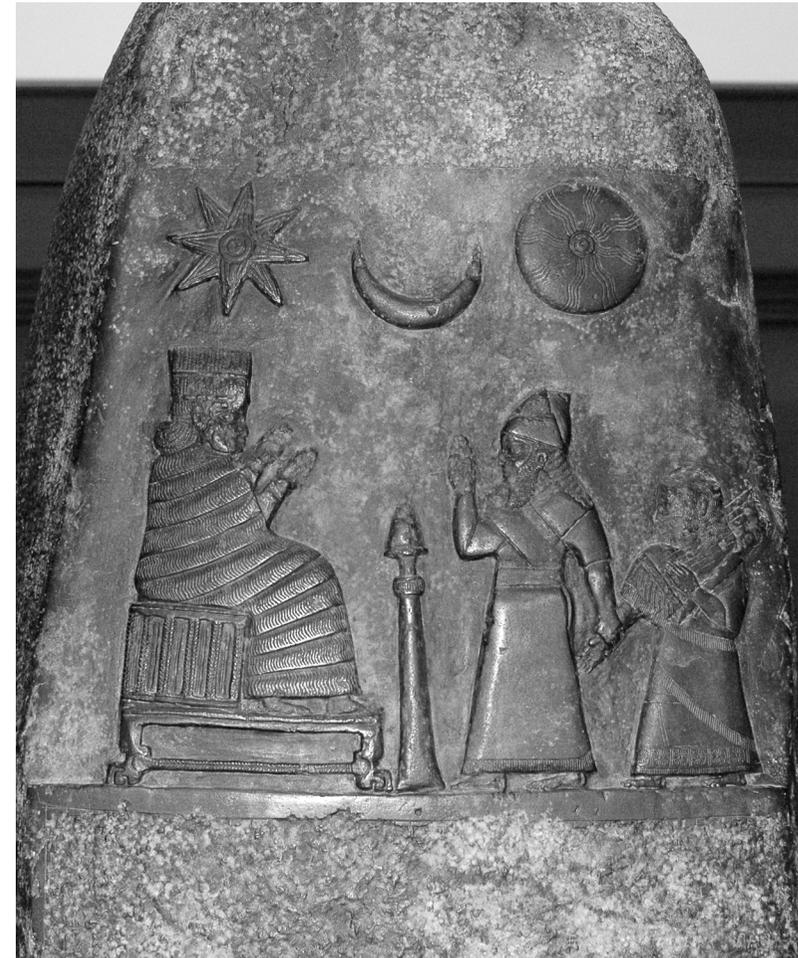


Le contenu de l'univers

- Ce que l'on voit à l'œil nu
 - Le Soleil !
 - La Lune
 - 5000 étoiles (environ)
 - 5 planètes
 - 1 nébuleuse (M31 d'Andromède)

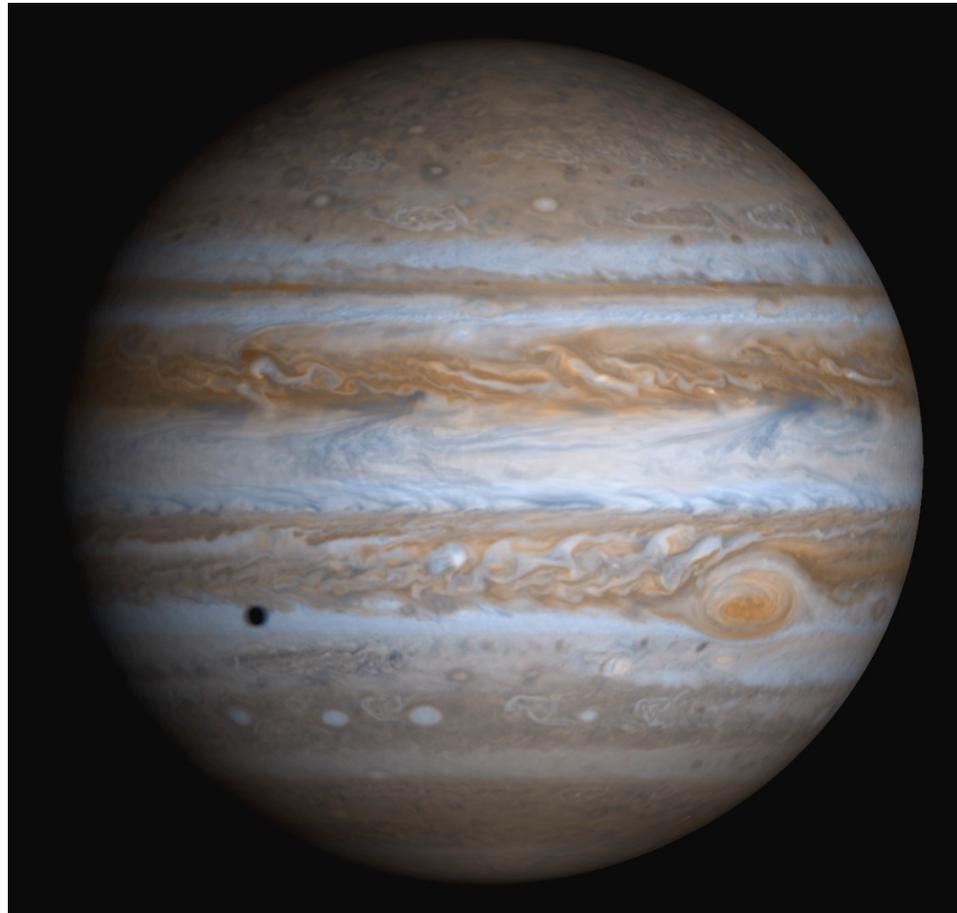
- Avec de bons instruments
 - 100 milliards d'étoiles
 - 10 milliards de galaxies
 - du gaz interstellaire, neutre et ionisé
 - des poussières

- Indirectement
 - Exoplanètes
 - Trous noirs
 - Matière noire et énergie noire



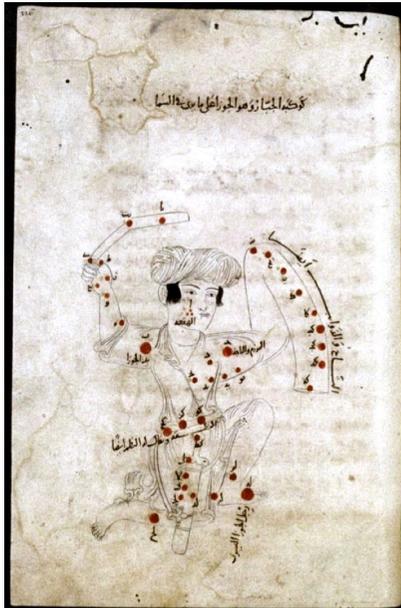
Planètes

- Jupiter, par la sonde Cassini de la NASA



Étoiles, astérismes, constellations

- L'association des étoiles en constellations est *très* variable d'un peuple à l'autre



Manuscrit astronomique arabe



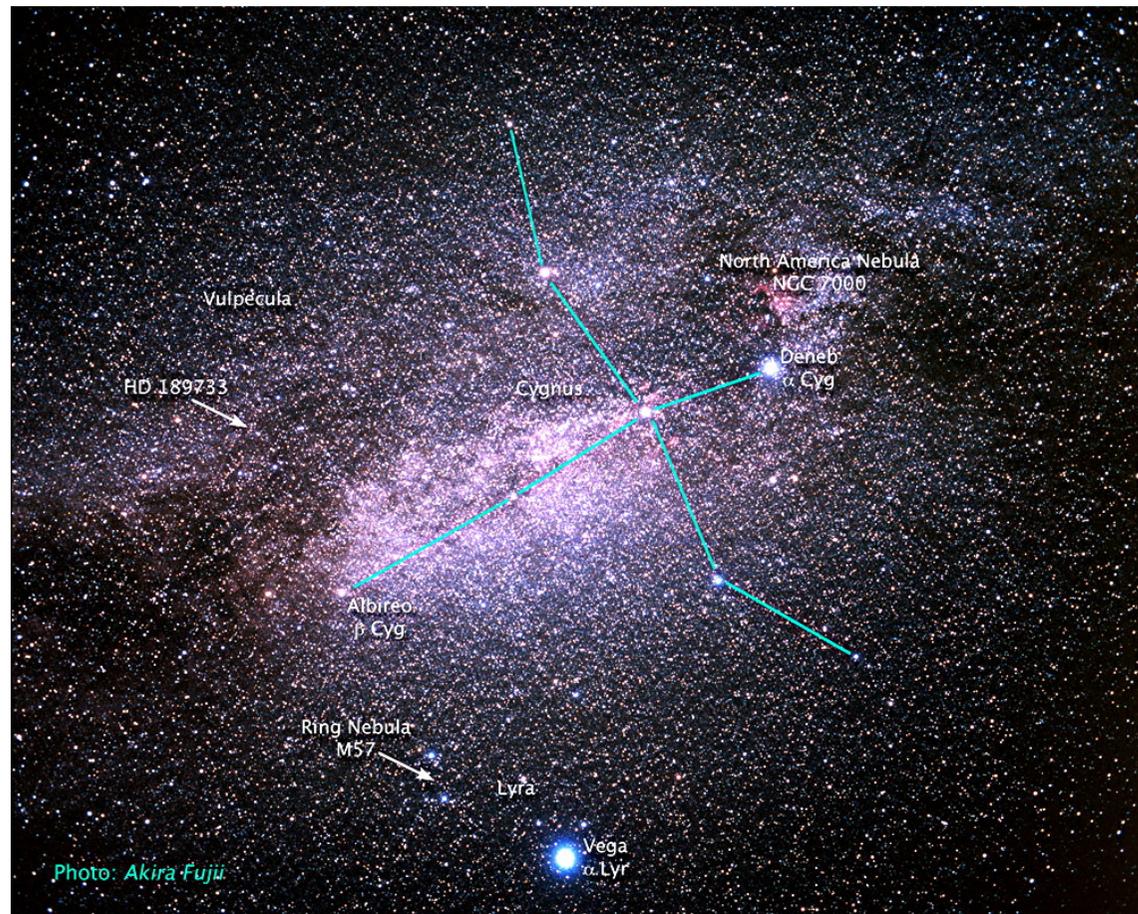
Constellation d'Orion



Atlas stellaire de Dun Huang

Constellations du Cygne, de la Lyre et du Petit Renard

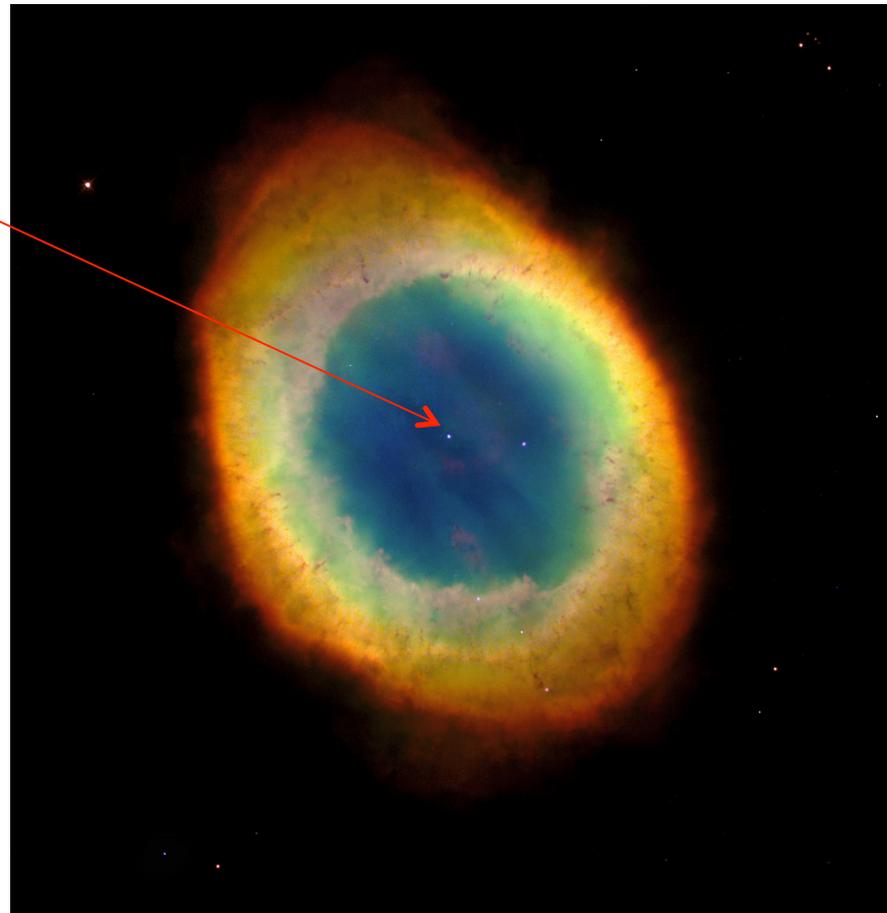
- Véga est à 25 al
- Albireo à 400 al
- Deneb à 2000 al
- La nébuleuse de la Lyre M57 à 2300 al
- La nébuleuse North America à 6300 al



- L'étoile HD189733 (à 63 al) possède au moins une planète avec une atmosphère de méthane

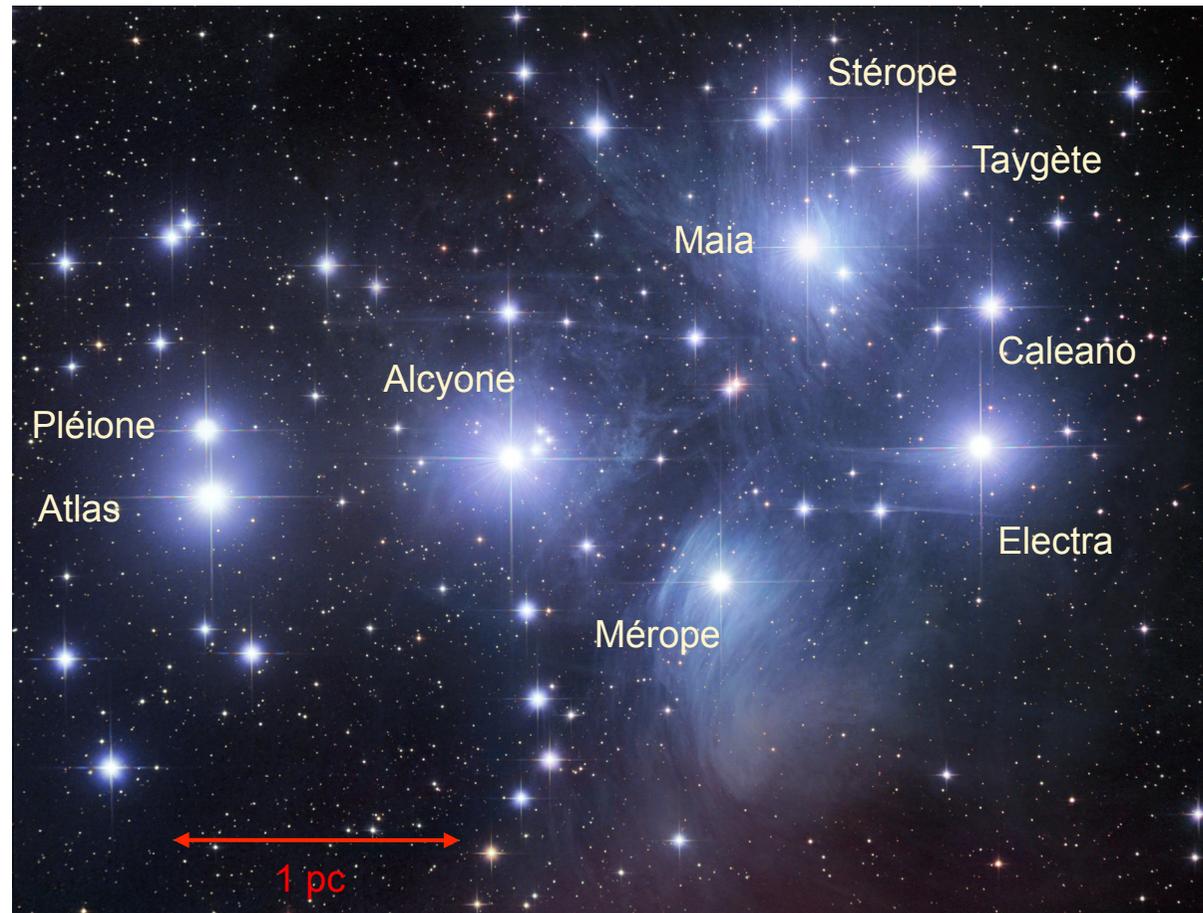
Nébuleuse planétaire

- La nébuleuse M57 dans la constellation de la Lyre est un reste d'étoile qui a éjecté il y a ~ 1600 ans son enveloppe de géante rouge
- Reste une petite étoile naine blanche de $1,2 M_{\odot}$ au centre



Amas d'étoiles

- Les Pléiades



Nébuleuses

- La nébuleuse M42 dans la constellation d'Orion: une pépinière d'étoiles



Galaxies

- Le centre de la galaxie spirale M51 vue par le télescope spatial Hubble



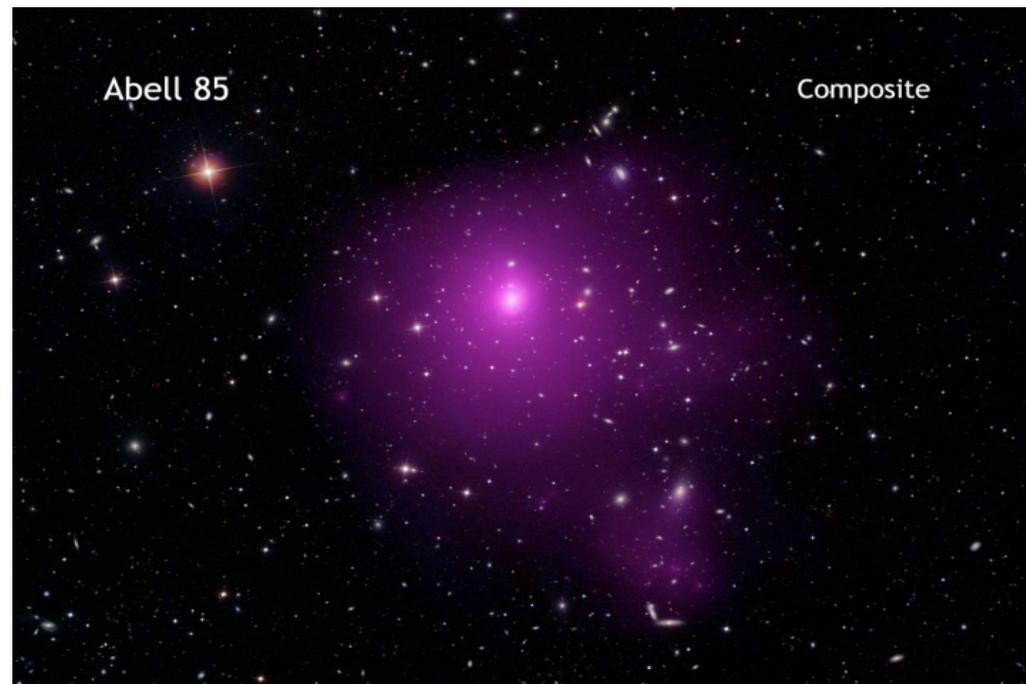
Amas de galaxies de Coma

- À 320 millions al de la Terre, l'amas Abell 1656 contient plus de 1000 galaxies, en majorité elliptiques

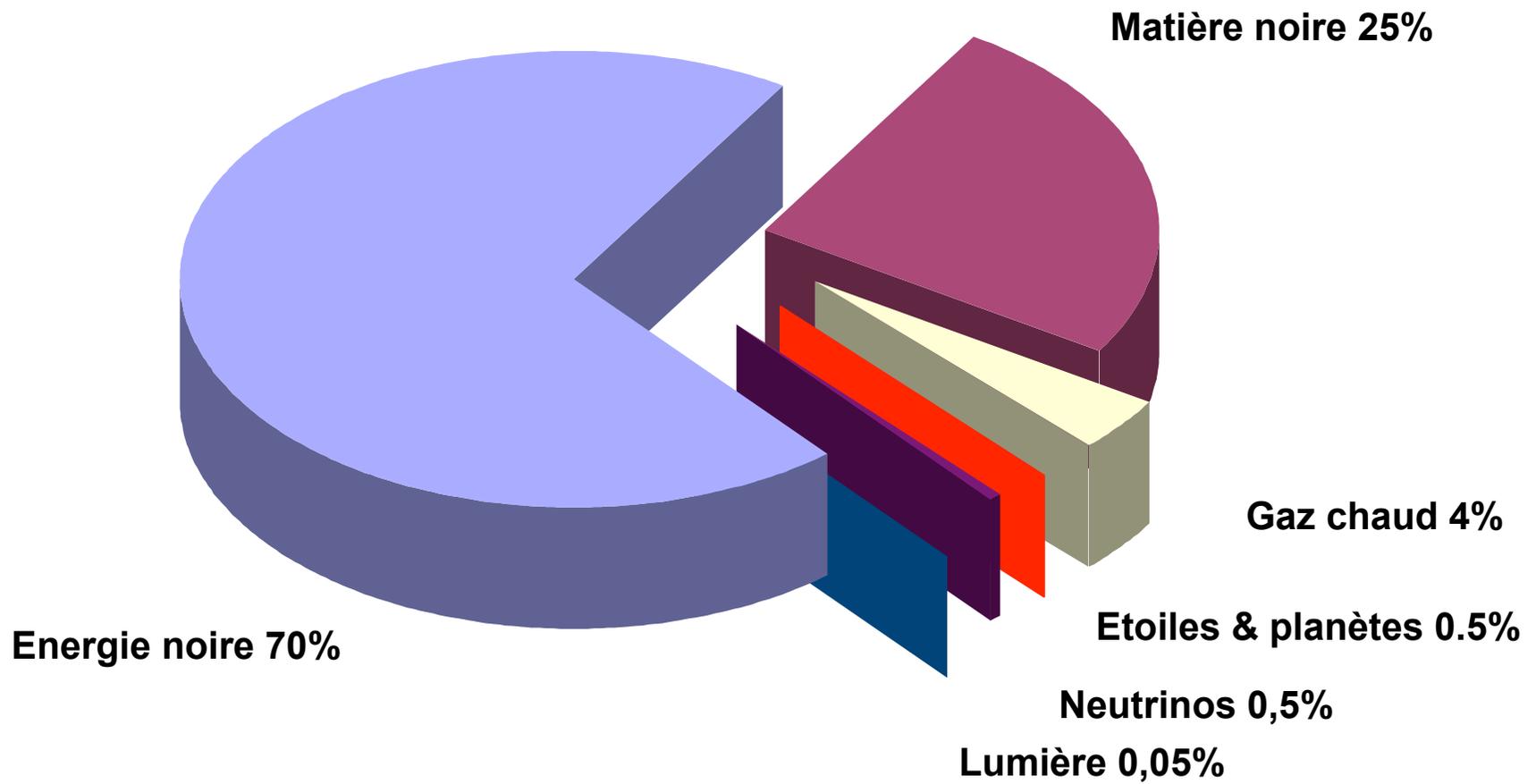


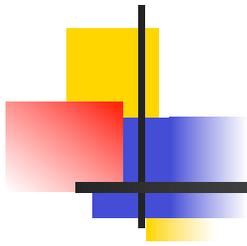
Mais tout ceci n'est que la fraction émergée de l'iceberg

- Étoiles (et planètes) représentent **moins de 1%** du bilan de masse-énergie de l'univers visible
- Poussières, gaz interstellaire froid guère plus
- Les satellites d'observation en rayons X ont décelé de grandes quantités de gaz intergalactique chaud
- Amas Abell 85 à 740 millions al
Image composite
 - Galaxies par le SDSS
 - Gaz chaud par Chandra
- Mais c'est loin d'être tout
 - Matière noire
 - Énergie noire



Étonnant inventaire



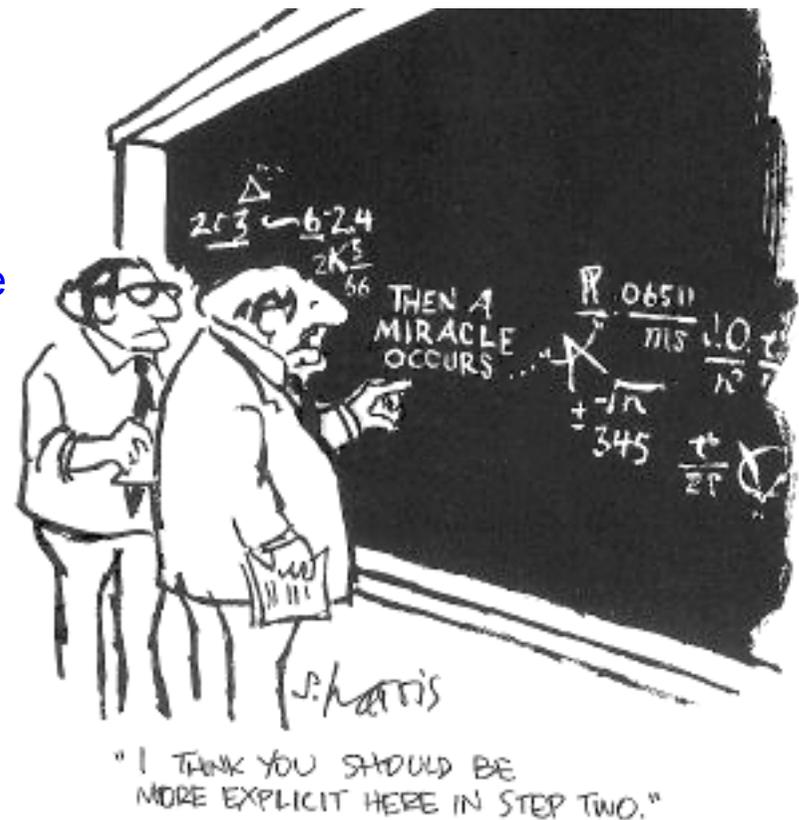


COMMENT LE SAIT-ON ?



Observations + lois de la physique

- La lumière est quasiment la seule source d'information sur l'univers
 - À part les rayons cosmiques et les météorites
 - Et, un jour, ondes gravitationnelles ?
- Vitesse finie → histoire de l'univers directement visible en fonction de la distance
 - Intérêt des galaxies lointaines ($z=5$ à 10)
 - Et surtout du fond de rayonnement micro-ondes ($z=1100$)
- Axiome fondamental : les lois de la physique sont identiques en tout temps et en tout lieu

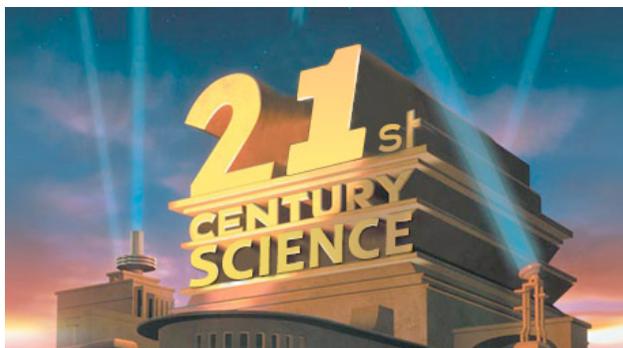


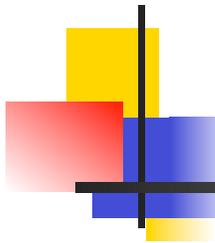
Comment ça marche ?

■ Toutes les branches de la physique sont mises en jeu

- Gravitation
- Électromagnétisme
- Interactions nucléaires
- Physique quantique
- Thermodynamique
- Hydrodynamique
- Transferts d'énergie
- Simulations numériques

<p>UNIVERSAL GRAVITATION</p> $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM} r^3$ $U_g = -\frac{Gm_1m_2}{r}$ <p>MAGNETISM</p> $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$ $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$ $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$ <p>MECHANICS OF FLUIDS</p> $p = p_0 + \rho gh$ $\rho v A = \text{constant}$ $p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$	<p>THERMODYNAMICS</p> $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ $Q = mc\Delta T$ $Q = Lm$ $pV = nRT = NKT$ $dE = dQ - dW$ $e = \frac{W_{\text{ext}}}{Q_{\text{in}}}$ $\frac{Q_c}{W} = \text{COP}$ <p>ELECTROSTATICS</p> $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2}$ $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$ $U = qV$ $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ <p>PHYSICAL (WAVE) OPTICS</p> $d \sin \theta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ $2d \sin \theta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ $\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$ <p>AMPERE'S LAW, FARADAY'S LAW, AND MAXWELL'S EQUATIONS</p> $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{enc}}}{\epsilon_0}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{enc}}$ $\epsilon_r = -\frac{di}{dt}$ $U = \frac{1}{2} Li^2$ $L = \mu_0 n^2 A l$ $i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$	<p>WAVES</p> $v = f\lambda$ $y = A \sin(kx - \omega t)$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ $f = \frac{v \pm v_D}{v \mp v_S}$ $I = \frac{P}{A}$ $\beta = (10 \text{ dB}) \log_{10} \frac{I}{I_0}$ <p>CURRENTS</p> $i = \frac{dq}{dt}$ $J = n q v_d$ $E = \rho J$ $R = \frac{\rho l}{A}$ $V = IR$ $P = VI$ $i = I_0 e^{-t/\tau}$	<p>MODERN PHYSICS</p> $\beta = \frac{v}{c}$ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\Delta t = \gamma \Delta t_0$ $L = \frac{L_0}{\gamma}$ $u_x' = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$ $\lambda = \frac{h}{p}$ $E = hf$ $eV_0 = hf - \Phi$ $\frac{dQ}{dt} = \sigma A \epsilon T^4$ $\lambda_{\text{max}} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ $E_n = (-13.6 \text{ eV}) \frac{Z^2}{n^2}$ $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ $N = N_0 e^{-t/\tau}$
---	--	---	--





La gravitation

- Aristote
- Une propriété du **lieu**



La *Physique* d'Aristote
(traduction de Guillaume de Moerbeke)

→ Newton
Une force **universelle**

Isaac Newton
(vu par Marcel Gotlib)

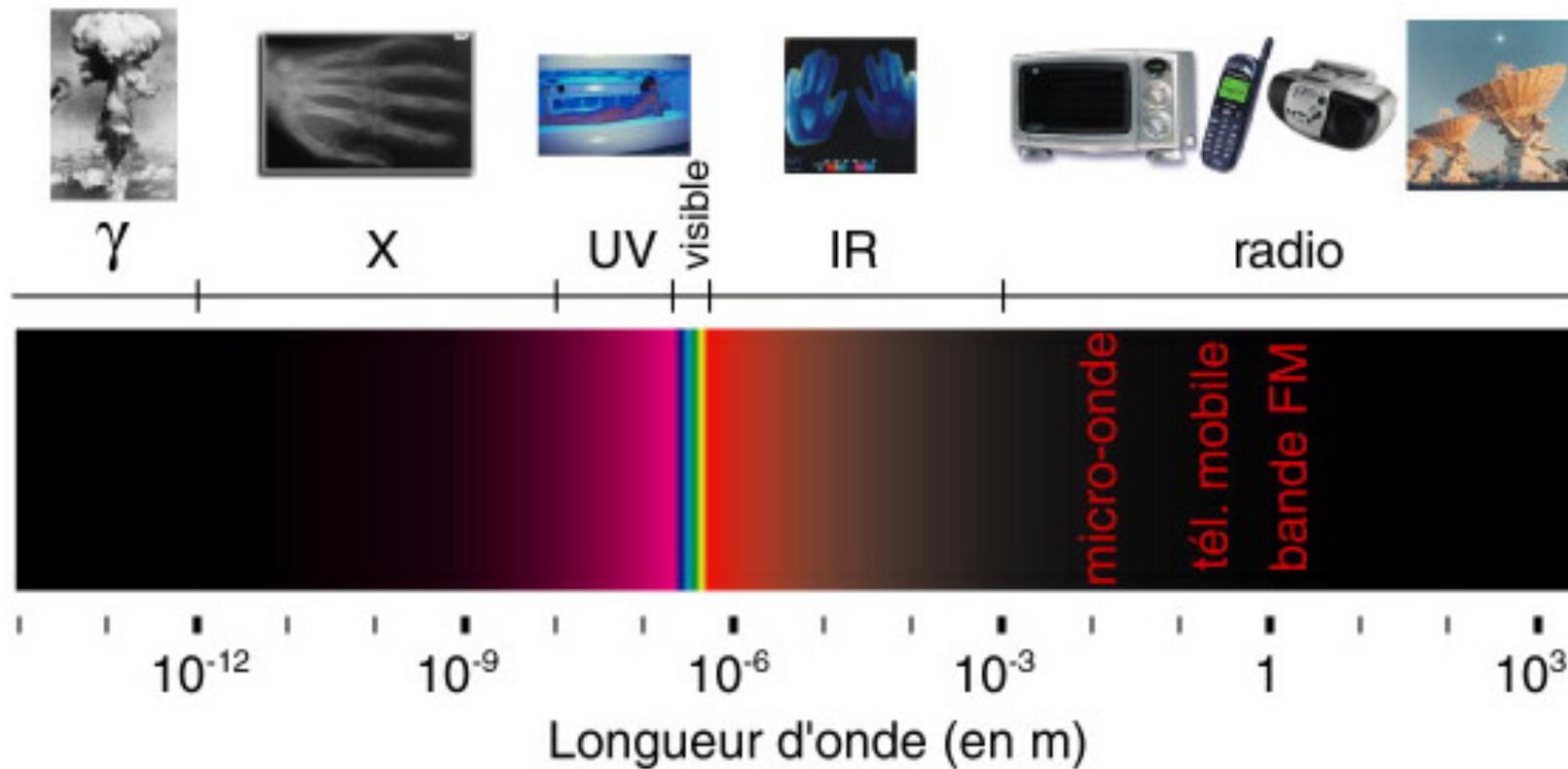


Einstein

Albert Einstein
(vu par David Levine)

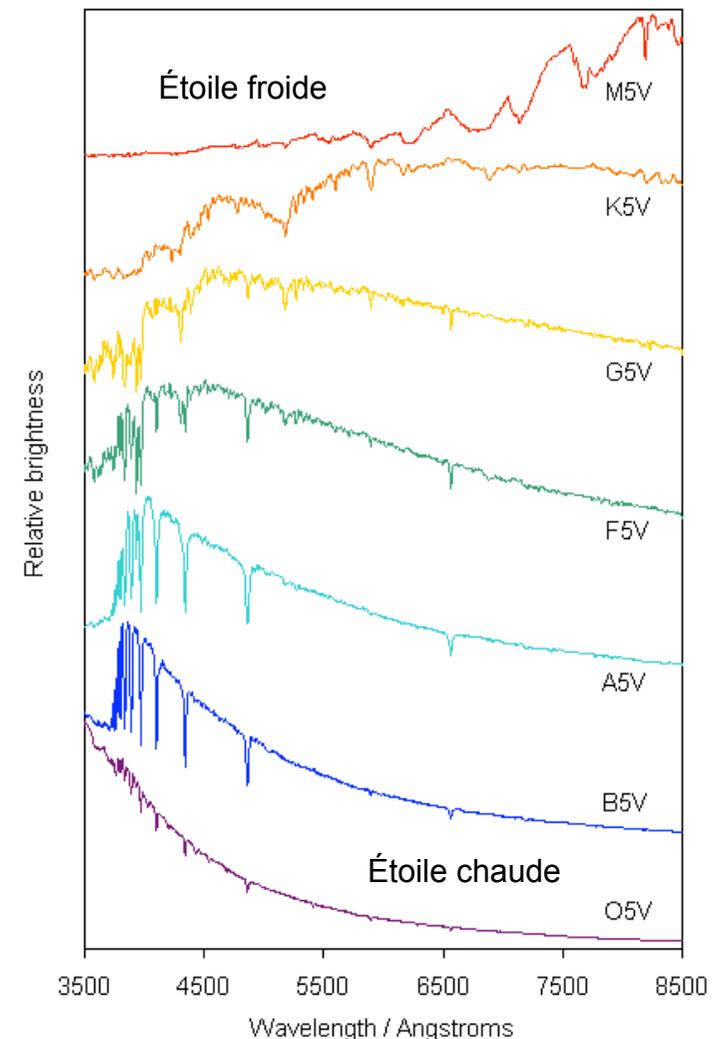
La lumière

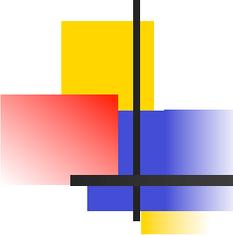
- Le « spectre » électromagnétique



Spectroscopie

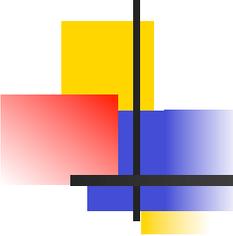
- Le « spectre » est la distribution de l'énergie d'un rayonnement en fonction de la longueur d'onde
- La **forme** globale du spectre indique –par exemple- si la source est un corps chaud et en donne la température
- Les **raies** d'émission et d'absorption indiquent
 - La **composition chimique** (par leurs positions)
 - L'**abondance** des différents éléments (par leur intensité)
 - La **température** du lieu d'émission ou d'absorption (par leur largeur, et par la présence de raies d'éléments ionisés)
 - La **vitesse** du lieu d'émission ou d'absorption (par un décalage *identique* de la position de toutes les raies)



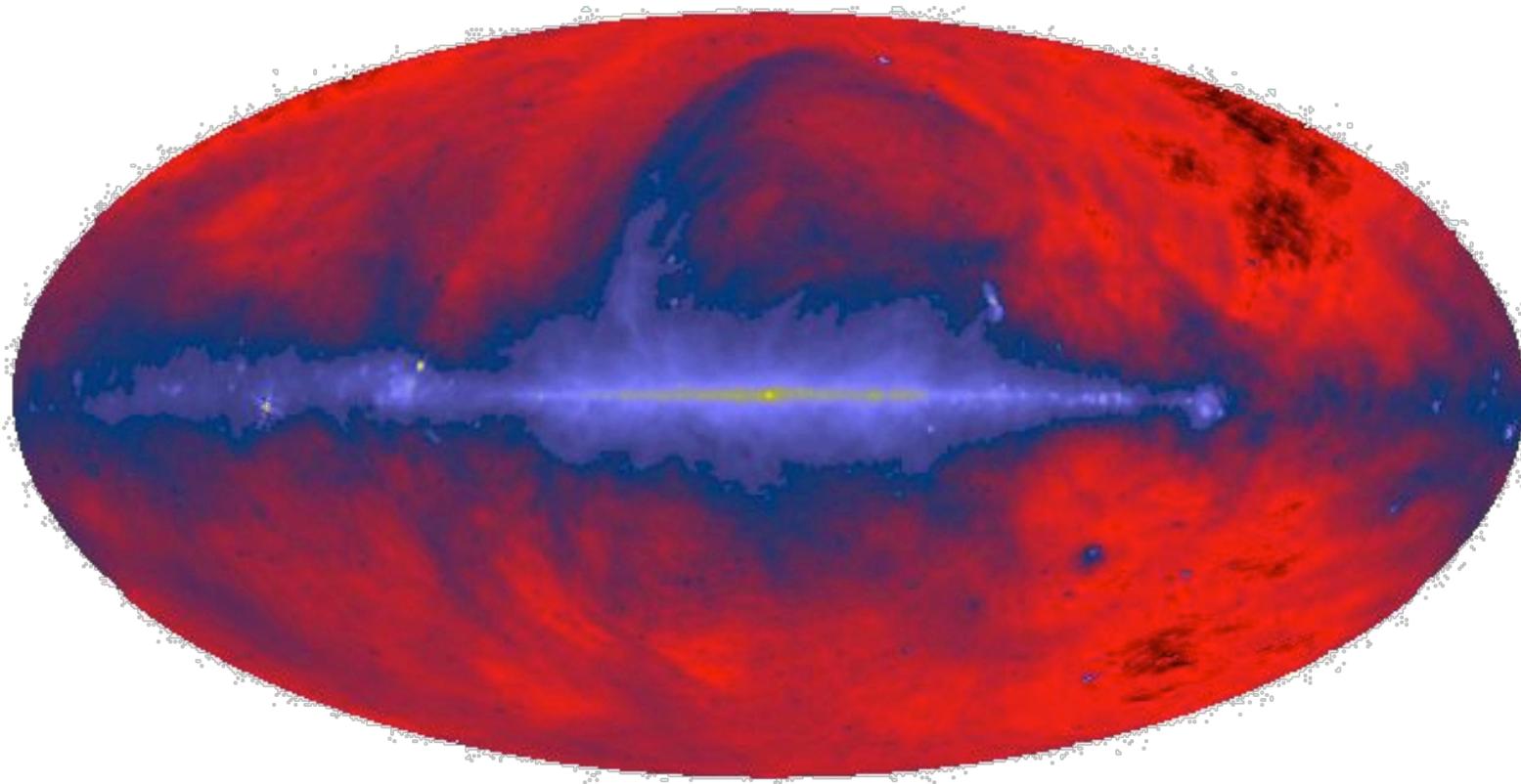


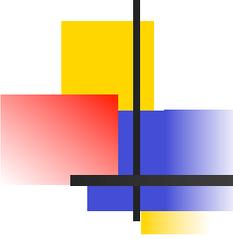
Le ciel en optique





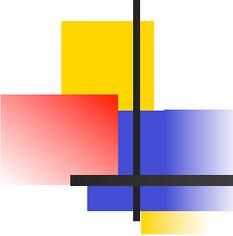
Le ciel en radio (métrique)





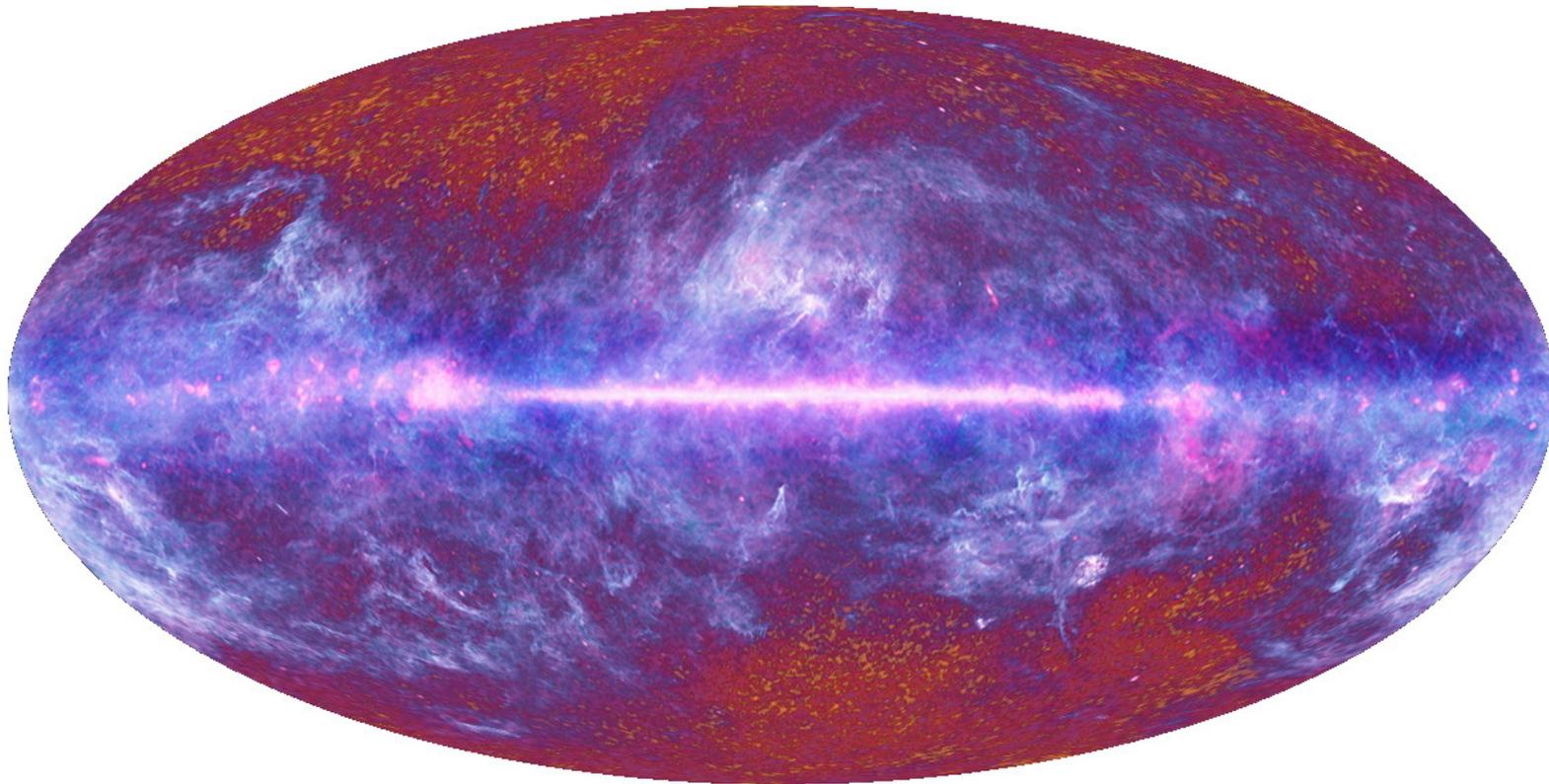
Le ciel en radio (millimétrique)



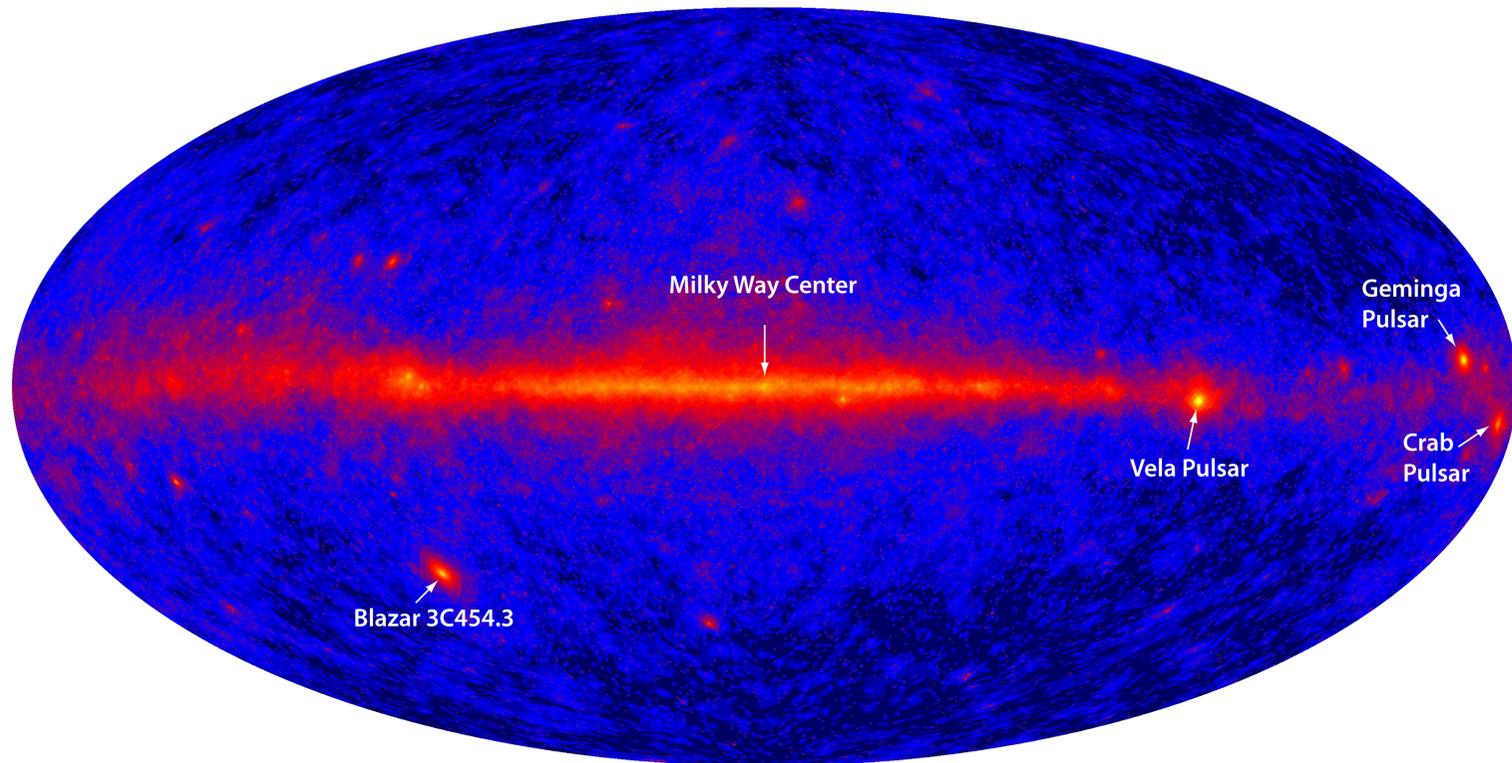


Le ciel en radio (millimétrique)

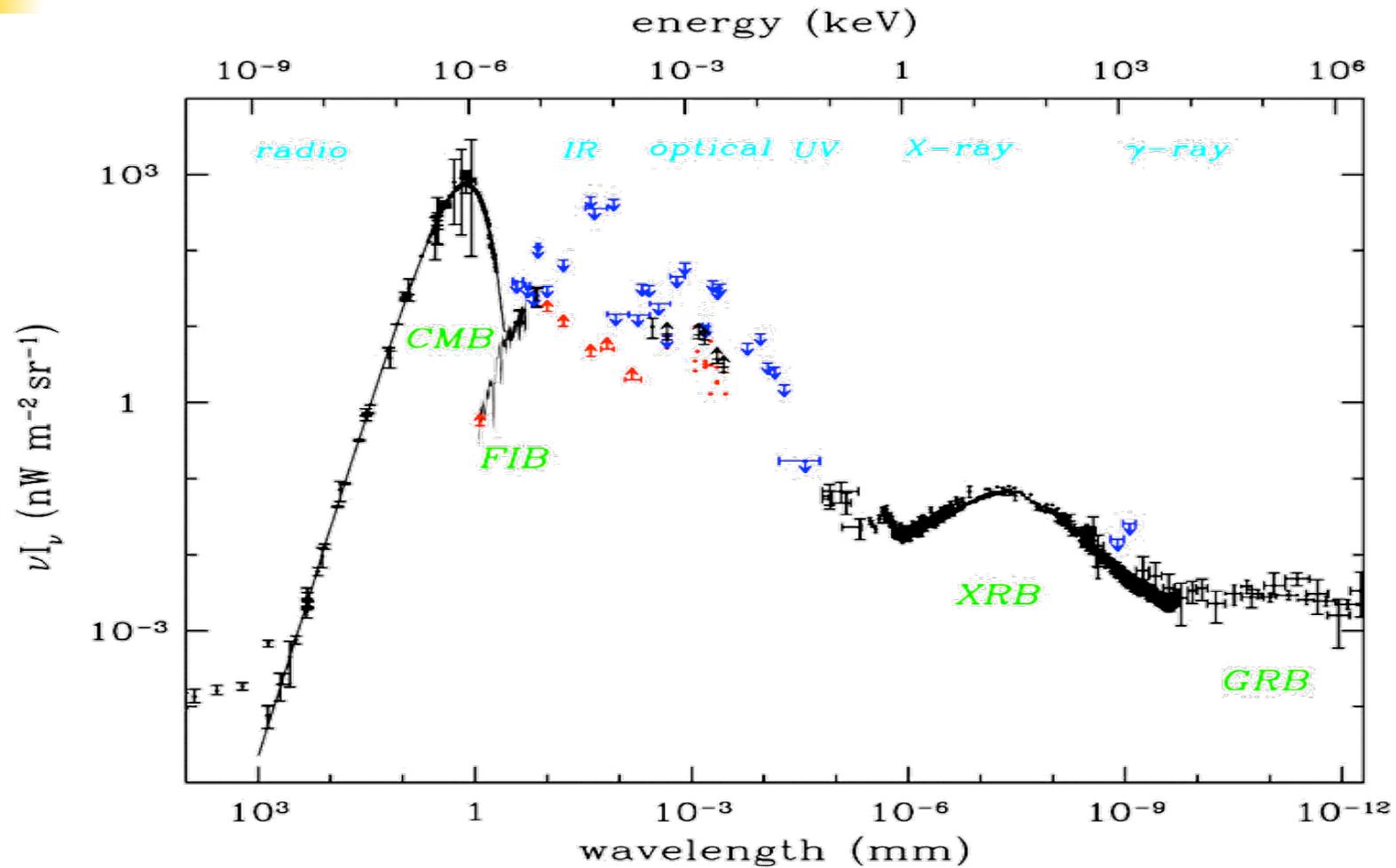
- En augmentant *considérablement* le contraste (satellite *Planck* de l'ESA, 2010)

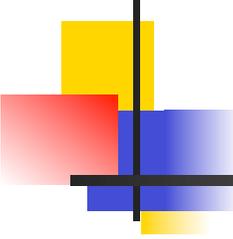


Le ciel en rayons gamma



Les sources de lumière dans l'univers





N'oublions pas...

there are more things in heaven and earth, Horatio,
than are dreamt of in your philosophy.

(Shakespeare, Hamlet 1-V)

