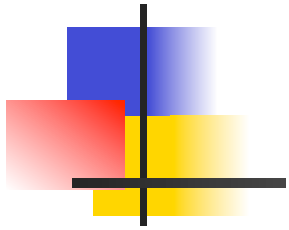


# INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE L'UNIVERS



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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



## 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
  - limitation colossale
  - **biais** énorme dans notre connaissance
- ➡ 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





# **LE CADRE :** **L'ESPACE ET LE TEMPS**





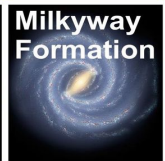
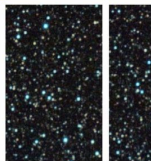
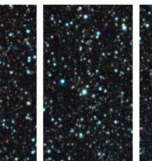

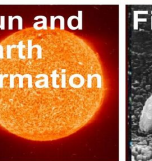
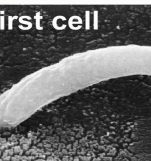
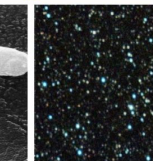


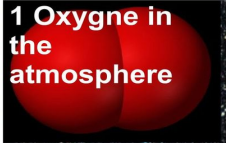







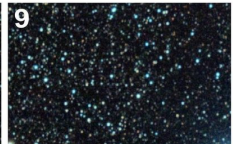


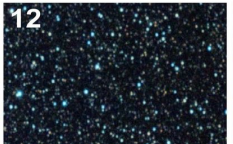


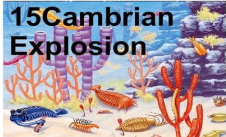










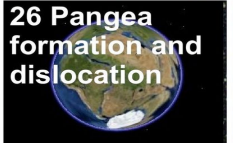


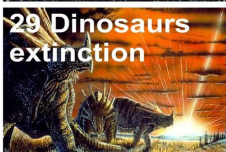

# Le temps

---

- 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 calendrier cosmique de Carl Sagan

January	February	March	April	May	June	July	August	September	October	November			
Big Bang 		Milkyway Formation 					Sun and Earth formation 	First cell 		First multicellular organism 			
December													
1 Oxygne in the atmosphere 	2 	3 	4 	5 	6 	7 	8 	9 	10 	11 	12 	13 	14 
15 Cambrian Explosion 	16 Snowball Earth 	17 First Vertebrate 	18 	19 	20 First four-limbed animals 	21 Variety of insects begins to flourish 	22 	23 	24 First dinosaurs 	25 First Mammals ancestor 	26 Pangea formation and dislocation 	27 First bird 	28 
29 Dinosaurs extinction 	30 	31 10H15 : Apes appear 21H24 : First Human to walk upright 22H48 : Homo Erectus 23H59 et 50s : Great Pyramids construction											



# L'espace

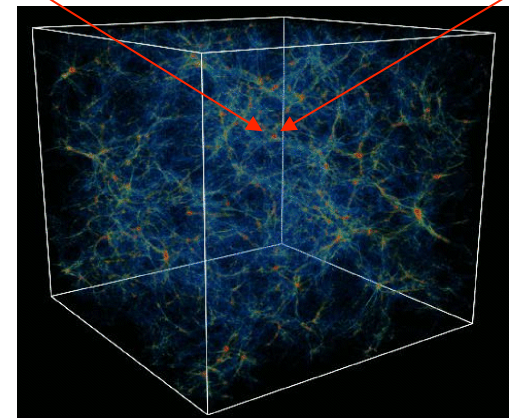
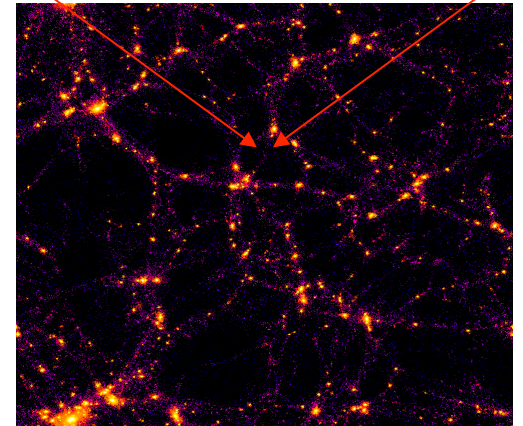
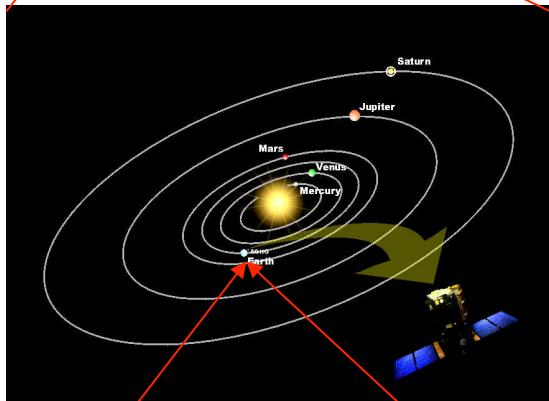
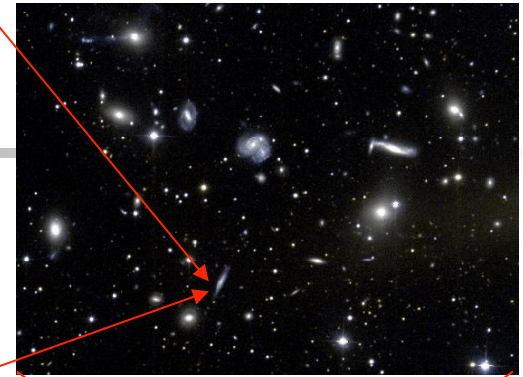
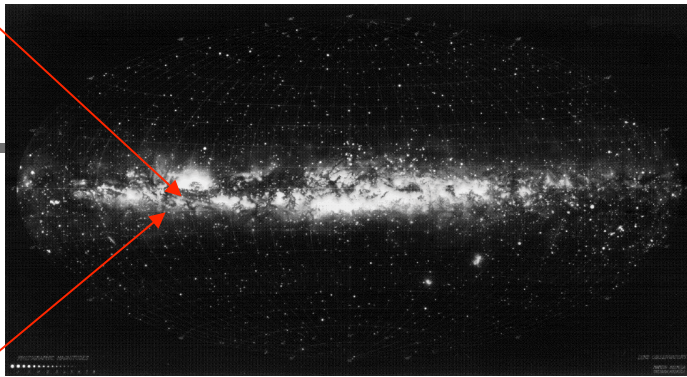
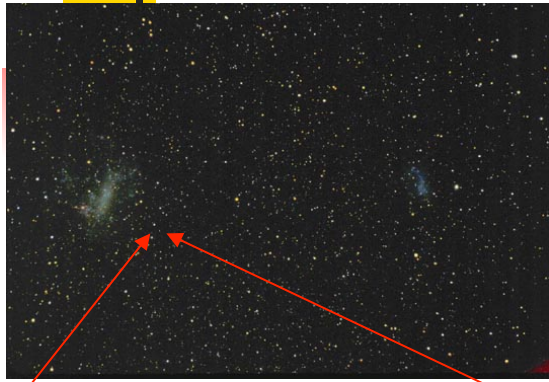
- Échelles d'espace : des distances « astronomiques »

■ 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		
■ Galaxie d'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





## Les échelles de distance dans l'univers

© Jacques Colin (OCA)

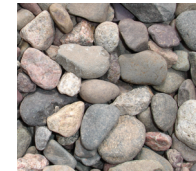
## Des modèles à l'échelle ?

- Si la Terre était une petite bille...



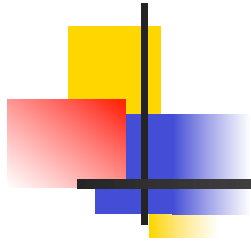
- Le Soleil mesurerait 1,4 m de diamètre et serait à 150 m
- Le système solaire aurait 6 000 km de rayon environ (la taille de la vraie Terre)
- L'étoile la plus proche serait à 40 000 km
- Le centre de la Voie lactée serait à 240 millions de km
- La galaxie la plus proche, Andromède, serait à 20 milliards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

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

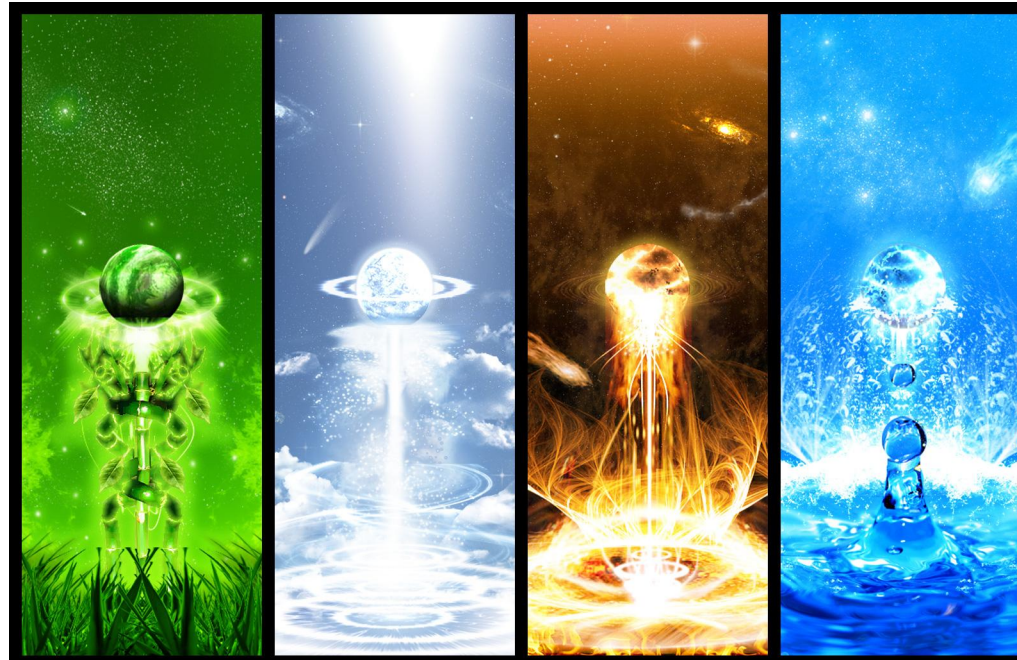


- La Voie lactée aurait 10 m de diamètre (et 10 cm d'épaisseur)
- La galaxie d'Andromède serait à 400 m
- L'amas de galaxies de Coma, lui, serait à 60 km
- La limite de l'univers observable serait à 10 000 km à peu près...

...mais les notions de distances deviennent ambiguës



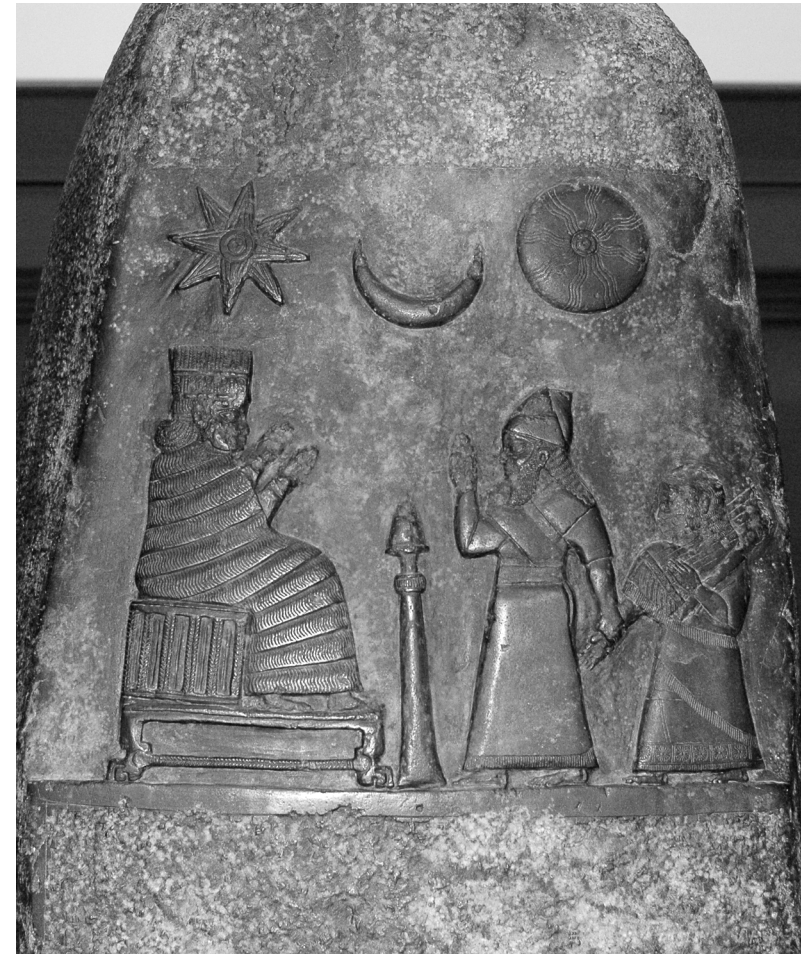
# LE CONTENU





# Le contenu de l'univers

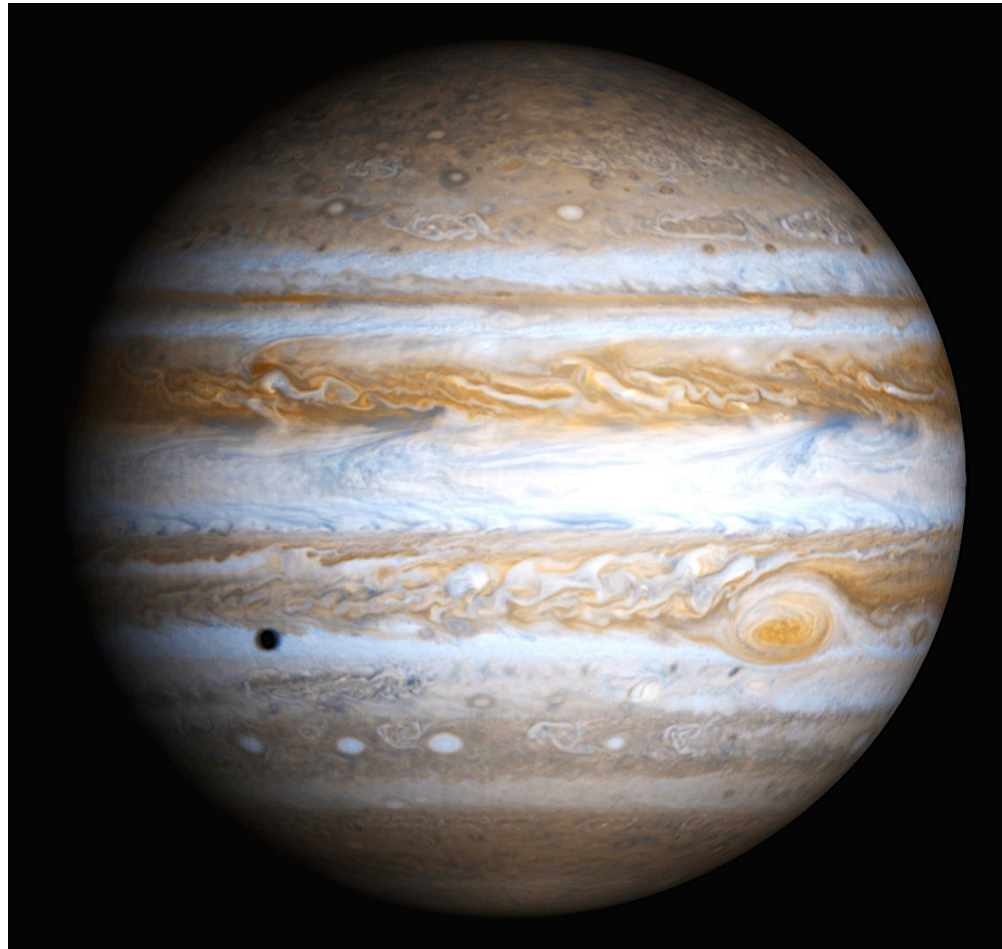
- Ce que l'on voit à l'œil nu
  - Le Soleil !
  - La Lune
  - 5000 étoiles (environ)
  - 5 planètes
  - 1 nébuleuse (M31 d'Andromède)
  
- Avec de bons instruments
  - 100 milliards d'étoiles
  - 10 milliards de galaxies
  - du gaz interstellaire, neutre et ionisé
  - des poussières
  
- Indirectement
  - Exoplanètes
  - Trous noirs
  - Matière noire et énergie noire





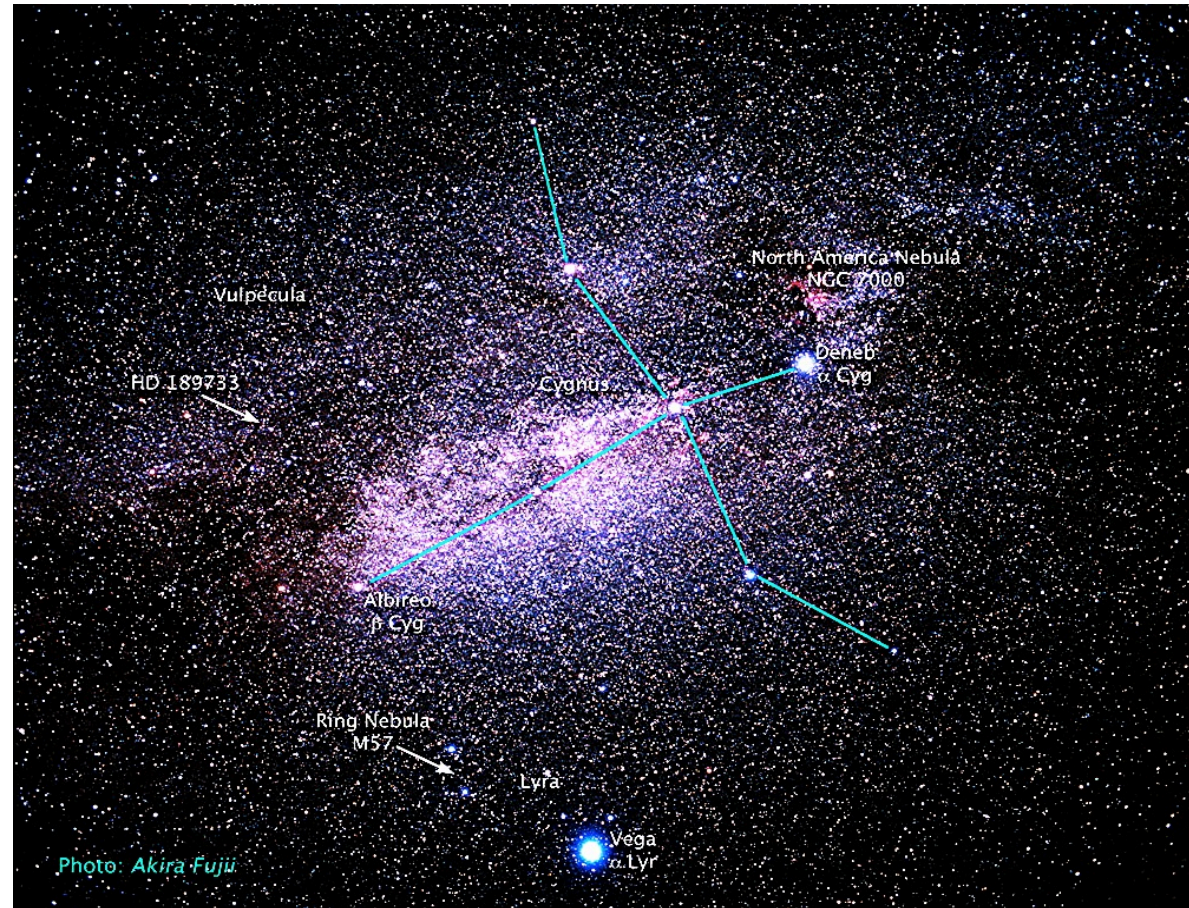
# Planètes

- Jupiter, par la sonde Cassini de la NASA



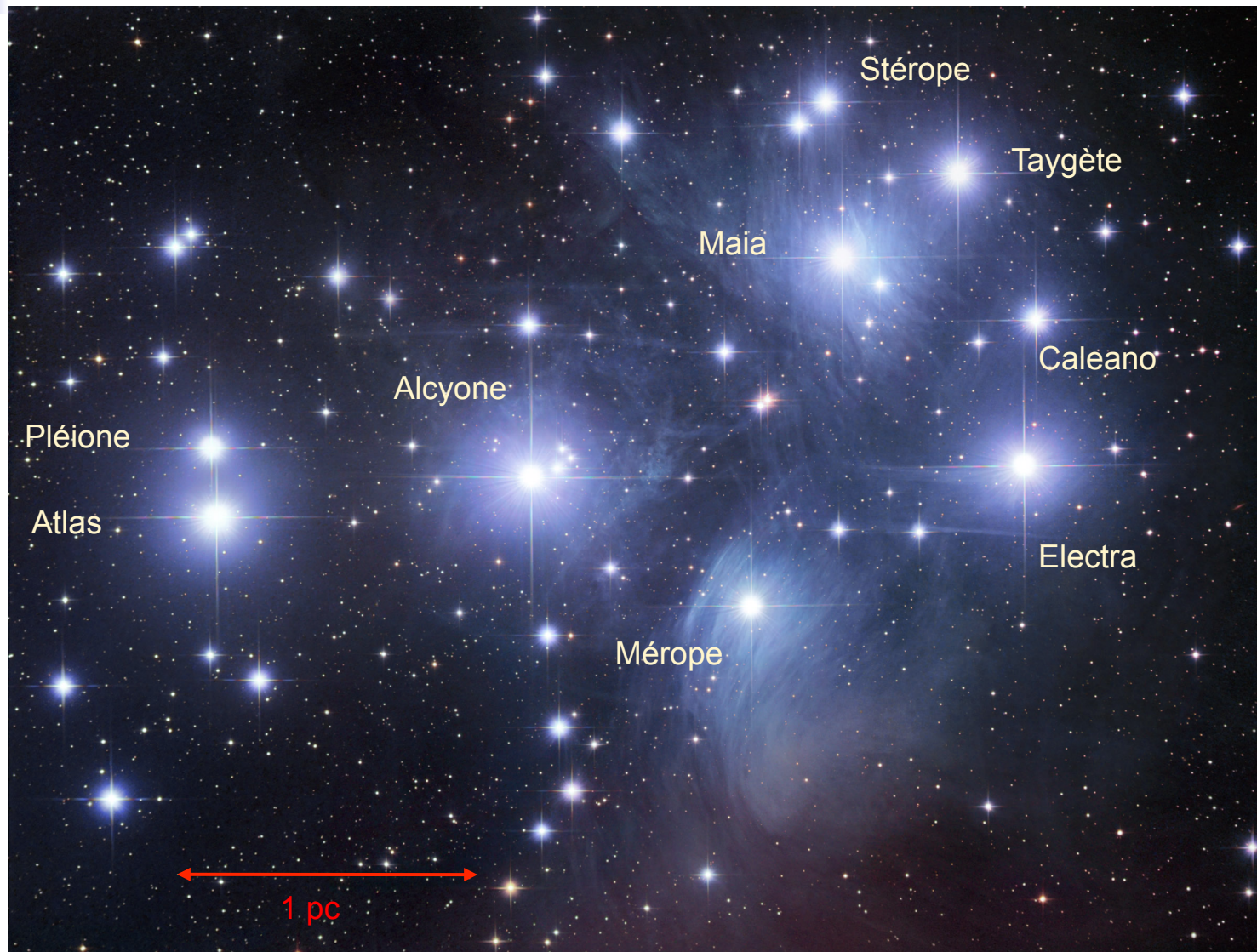
# Constellations

- 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





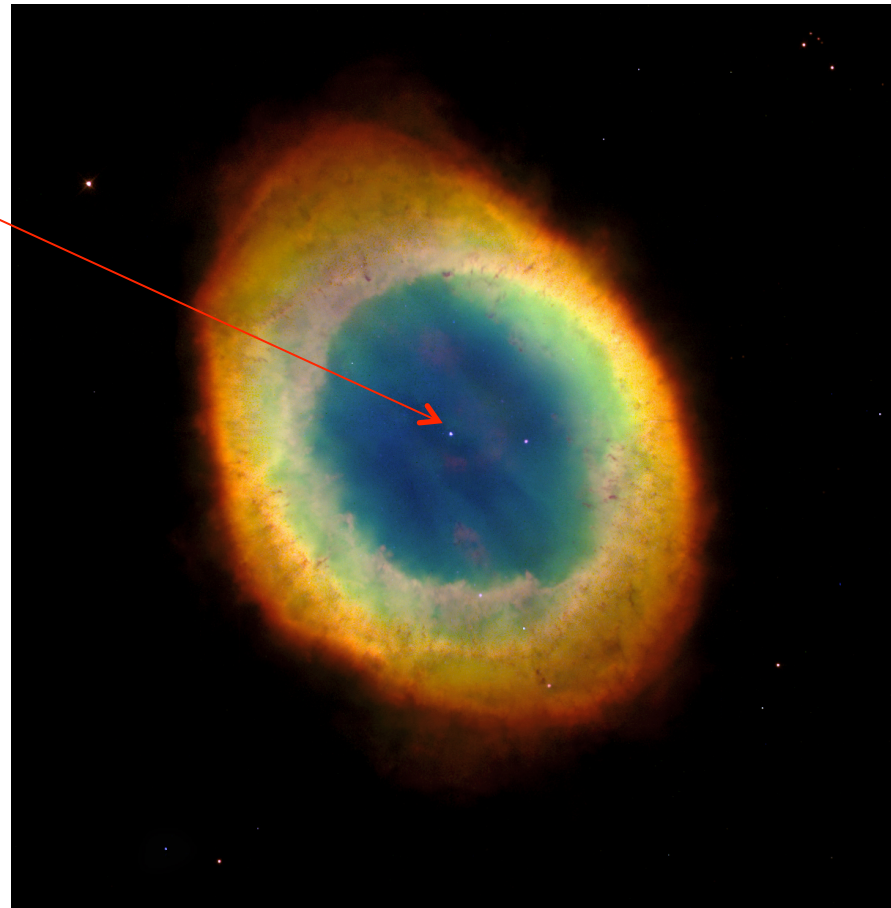
# Amas d'étoiles : les Pléiades



# 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 Mo au centre

*Ni une nébuleuse ni une planète...*





# Nébuleuses

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





# La Voie lactée, notre Galaxie

---



La Voie lactée au-dessus de l'Observatoire Européen Austral (ESO) au Cerro Tololo (Chili) © S. Guisard



# 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







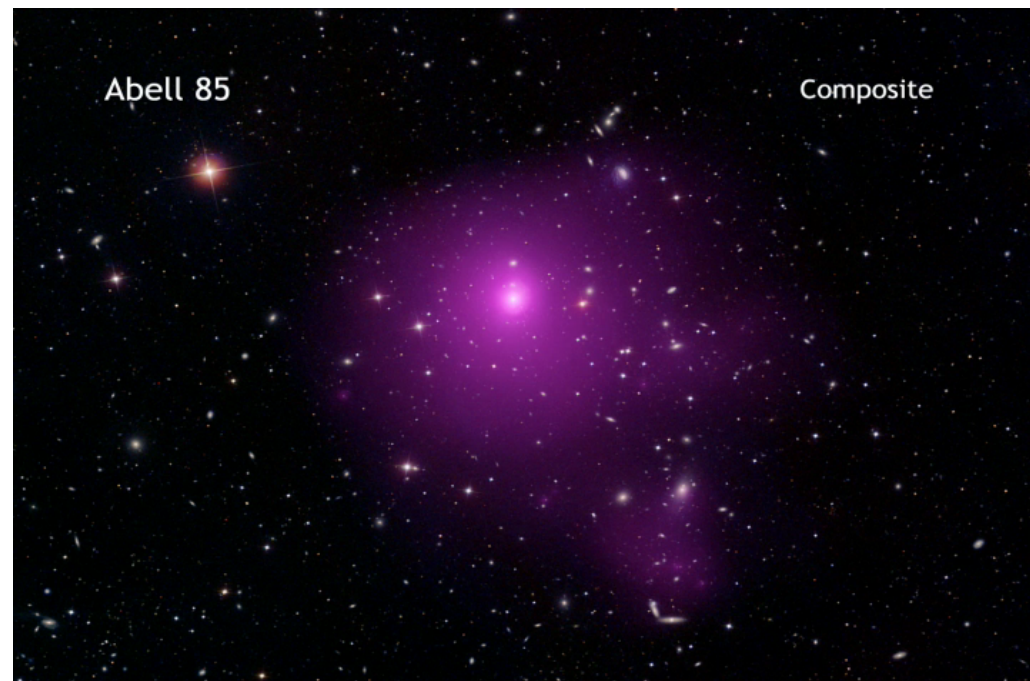
## Amas de galaxies : Abell 1689 (à 670 Mpc)

---



## Mais ce n'est que la fraction émergée de l'iceberg

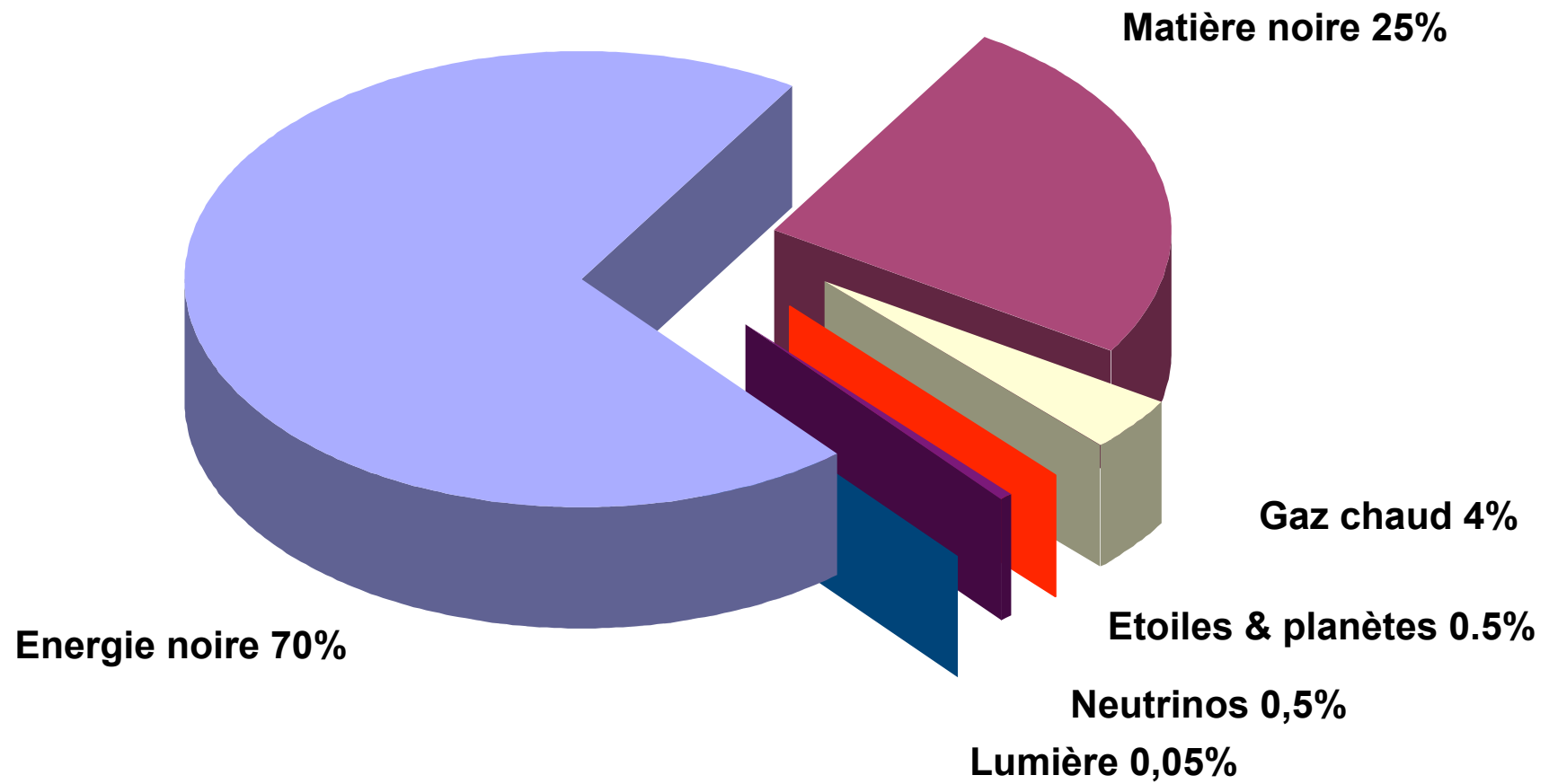
- Étoiles (et planètes) représentent moins de 1% du bilan de masse-énergie de l'univers visible
- Poussières, gaz interstellaire froid guère plus
- Les satellites d'observation en rayons X ont décelé de grandes quantités de gaz intergalactique chaud
- Amas Abell 85 à 740 millions al
- Image composite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





Énergie noire + matière noire = 95%

---







95% d'inconnu, est-ce raisonnable?

---

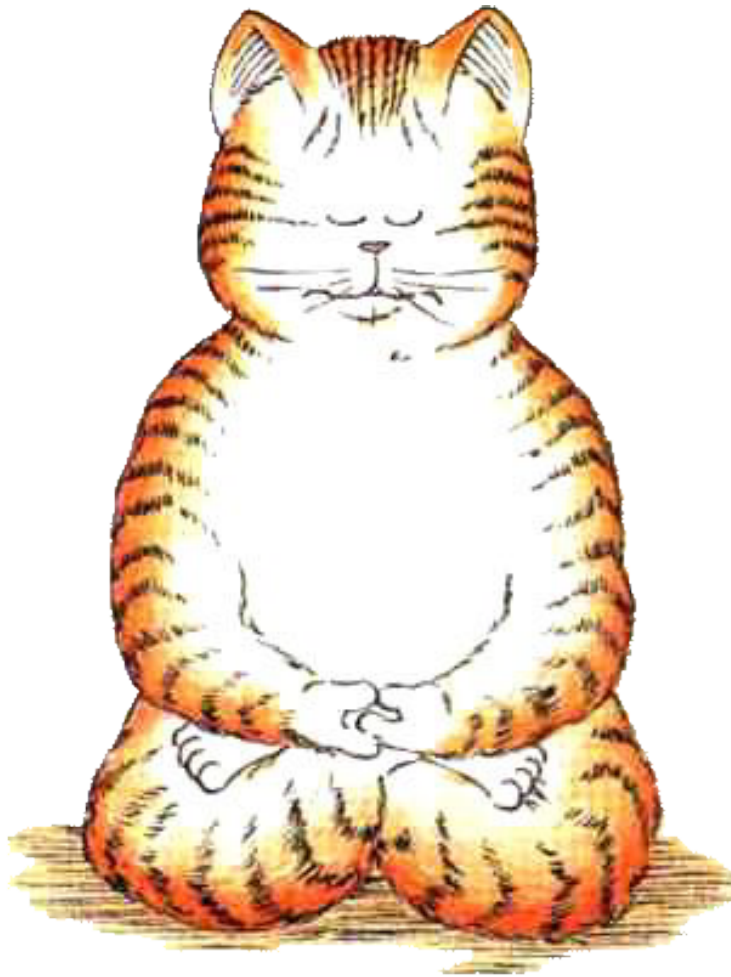


**Les cosmologistes sont  
parfois dans l'erreur,  
mais jamais dans le  
doute**



## Méditons sur les mystères de l'univers

---



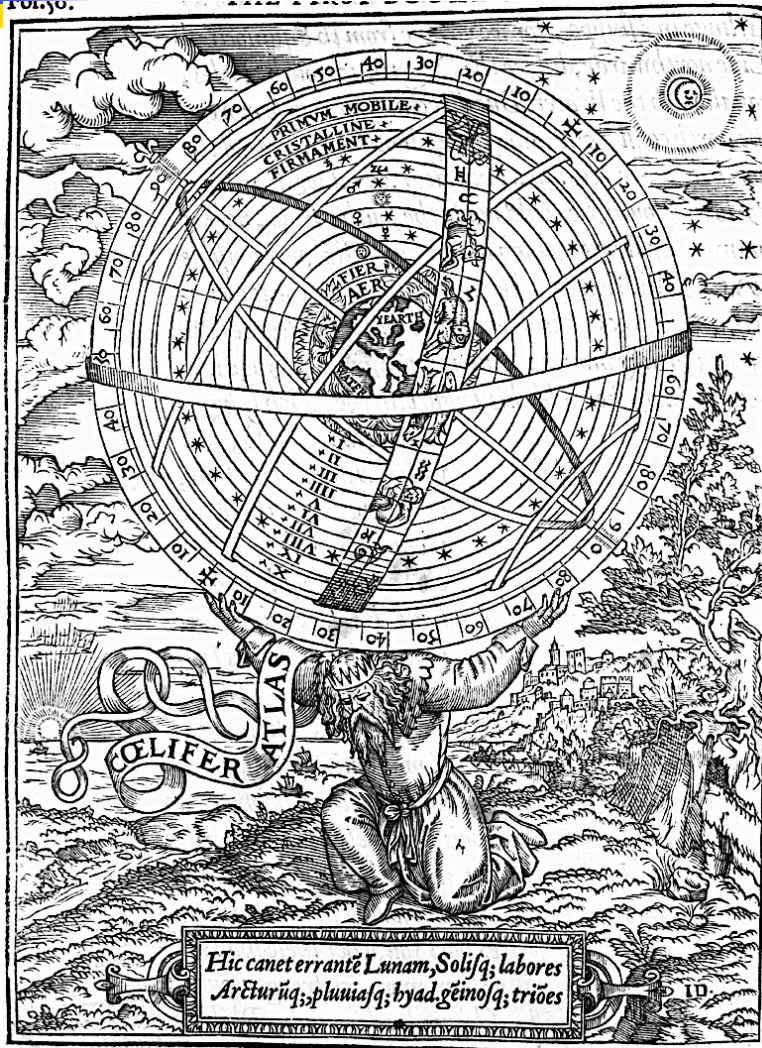


# UNE BRÈVE HISTOIRE





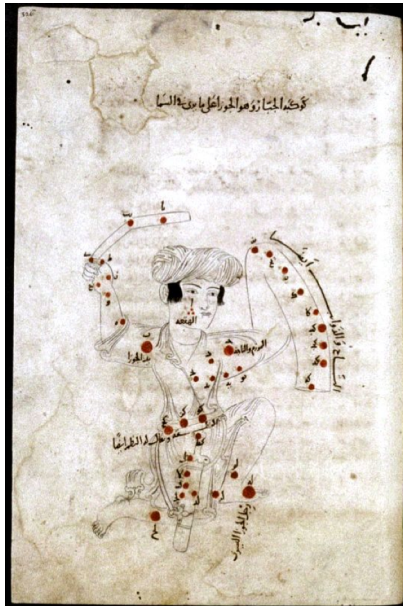
# À l'œil nu





# 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



## LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER

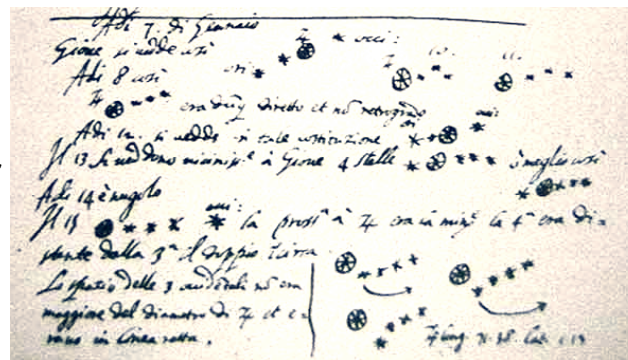


# De l'œil au satellite: lunettes et télescopes

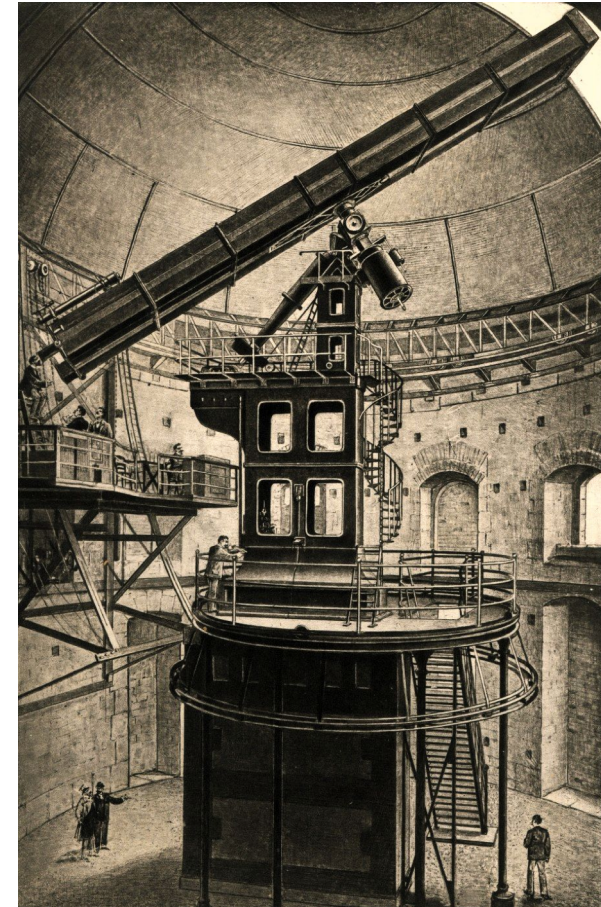
- Lunette de Galilée



- Satellites de Jupiter  
(notes de Galilée)



- Grande lunette équatoriale (Observatoire de Meudon)





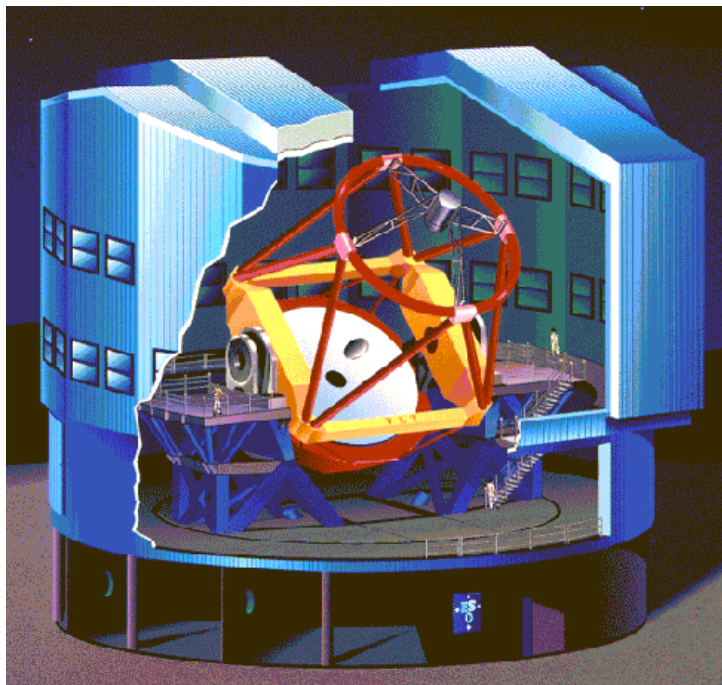
# Télescopes

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



# Télescopes

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



La salle des ordinateurs de pilotage du VLT © ESO

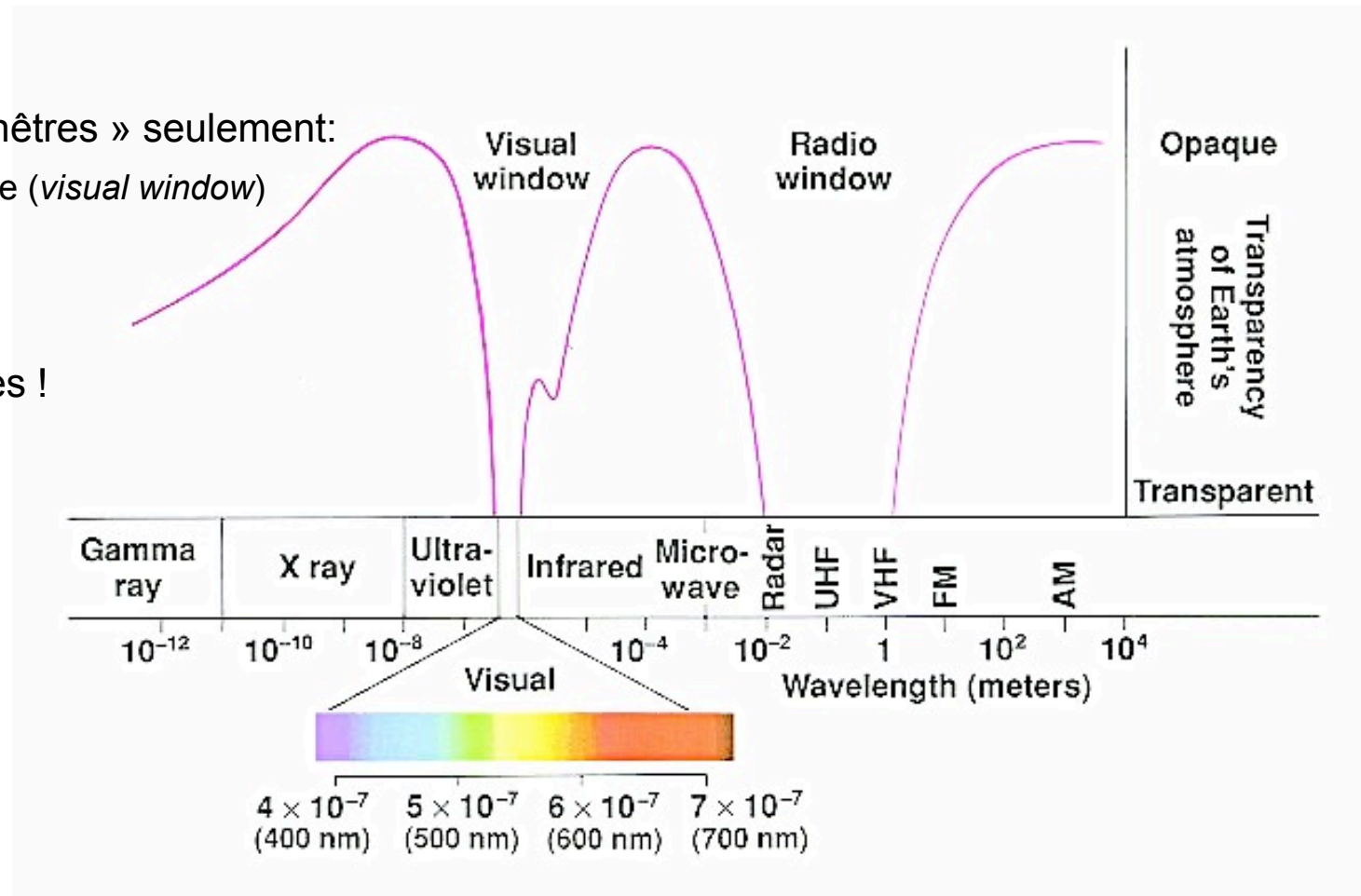
# Transparence de l'atmosphère

- L'atmosphère terrestre absorbe presque tous les rayonnements électromagnétiques

- Deux « fenêtres » seulement:

- Optique (*visual window*)
- Radio

- → satellites !





# Radiotélescopes

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



Le radiotélescope de Green Bank (Etats-Unis)

# Radiotélescopes

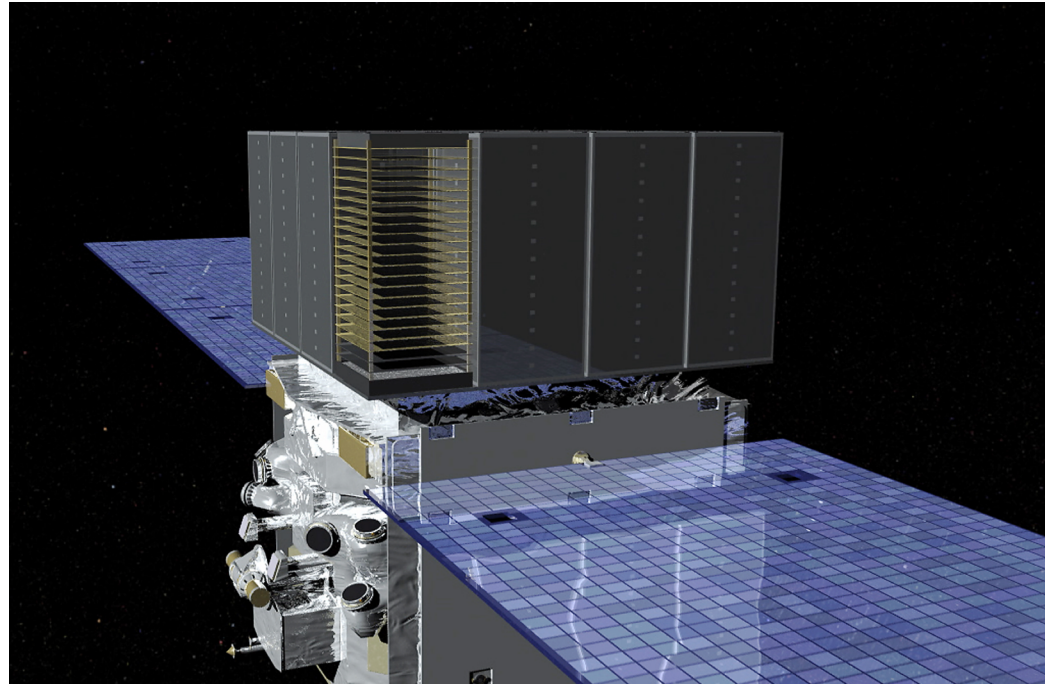
- ALMA (Atacama Large Millimeter Array) au Chili, sur le Llano de Chajnantor



# 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 ciel en optique

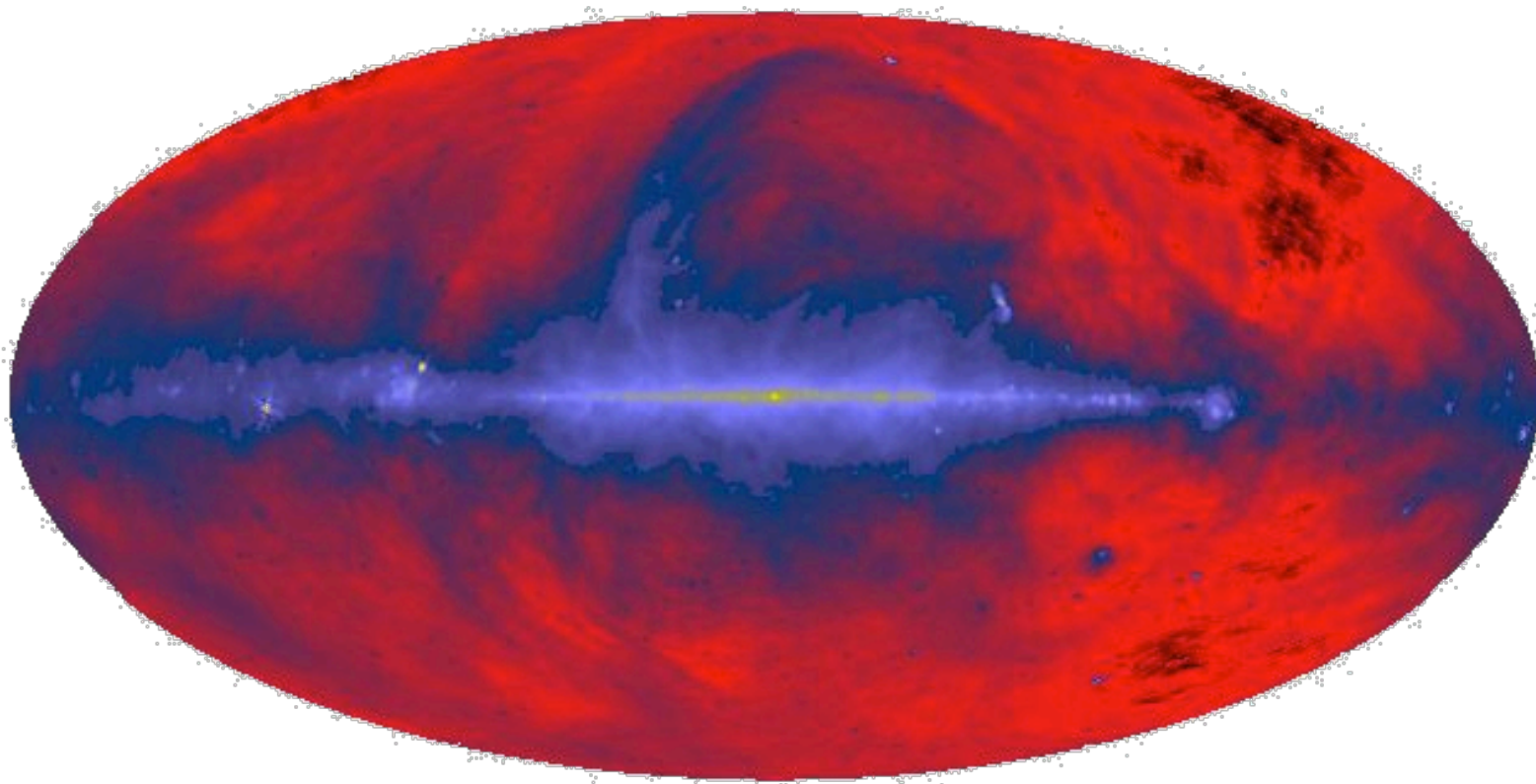
---





## Le ciel en radio (métrique)

---





## Le ciel en radio (millimétrique)

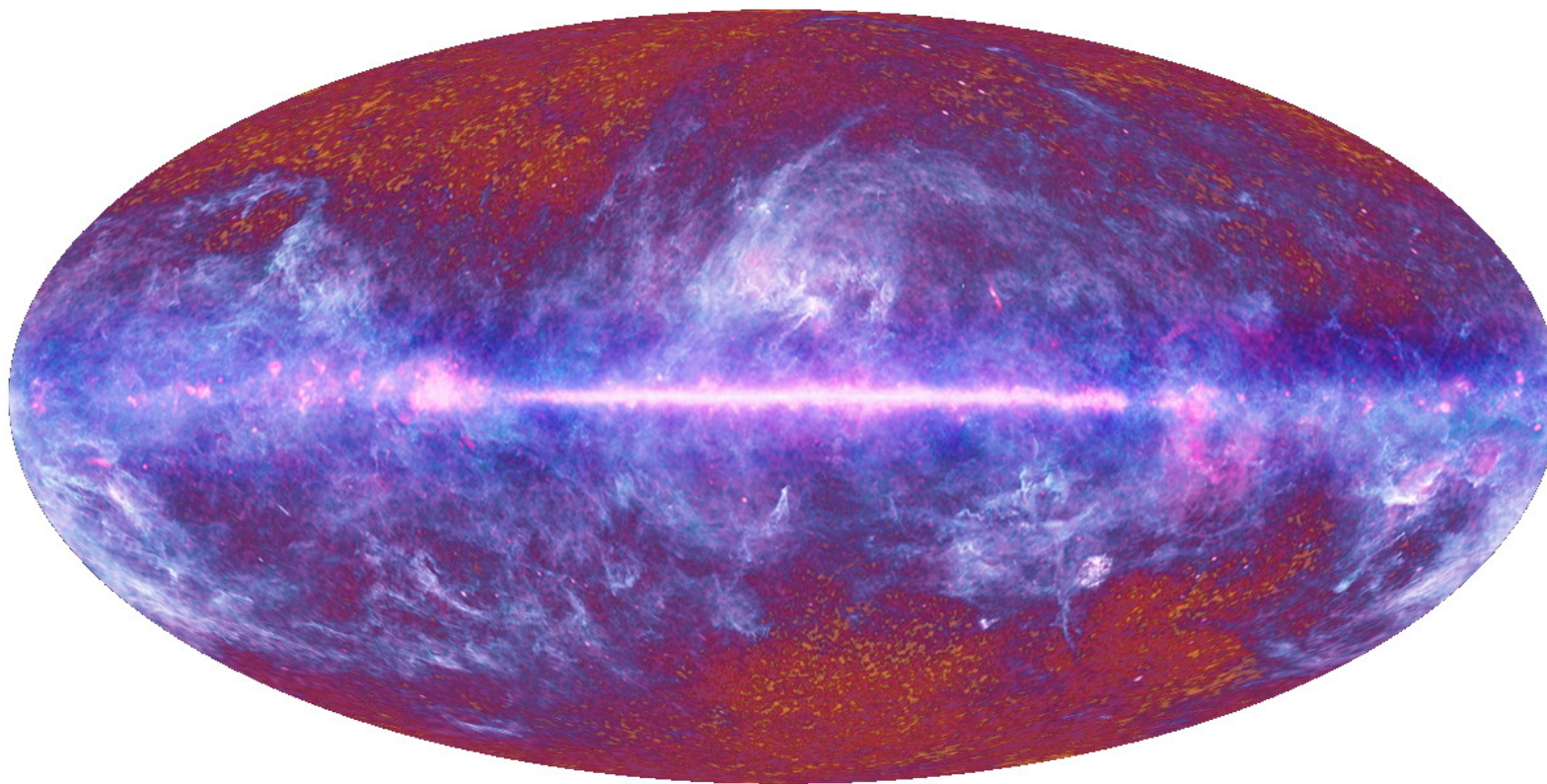
---



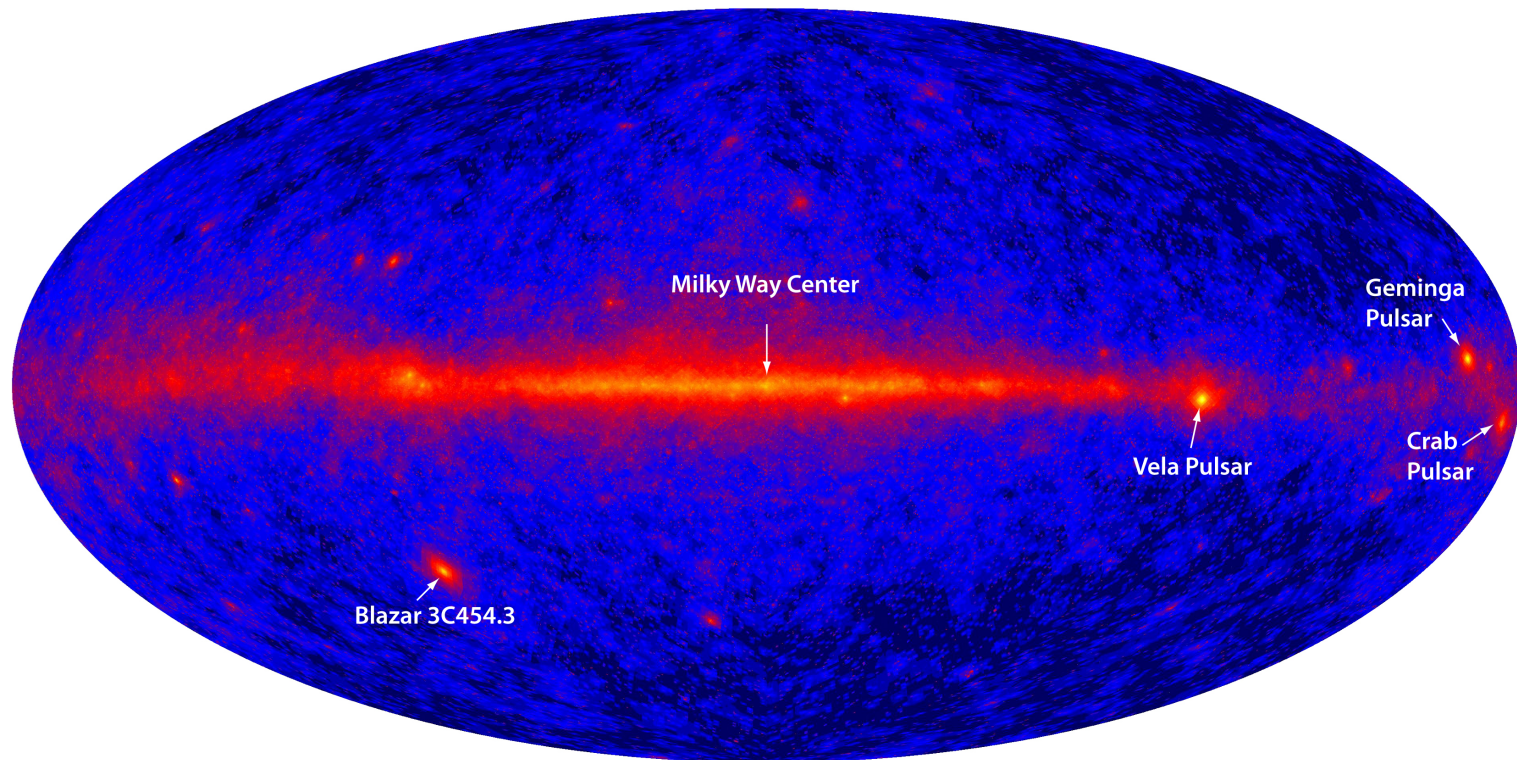


## Le ciel en radio (millimétrique)

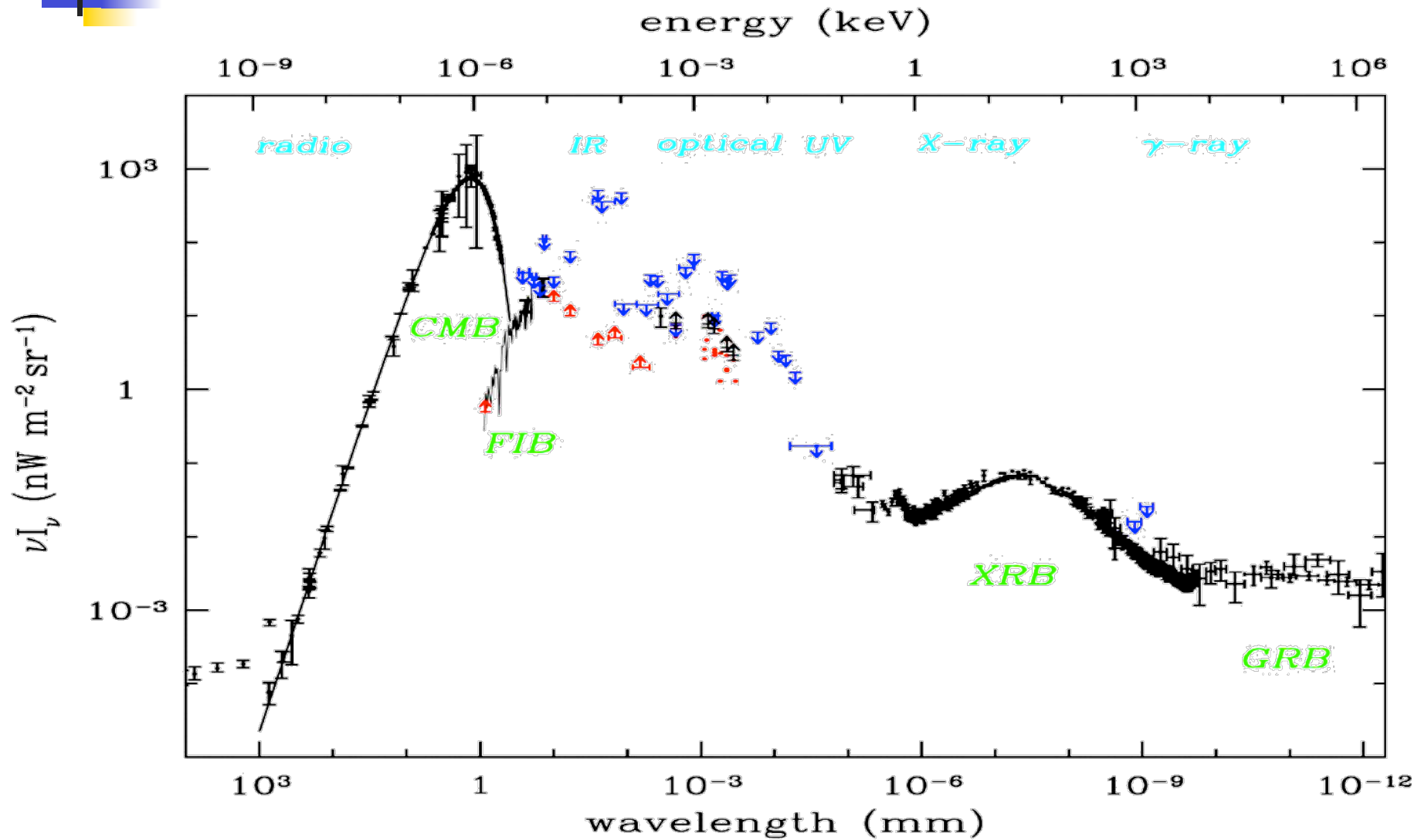
- En augmentant *considérablement* le contraste (satellite *Planck* de l'ESA, 2010)



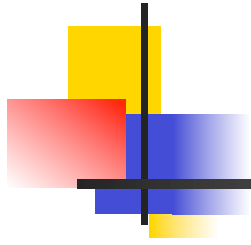
# Le ciel en rayons gamma



# Les sources de lumière dans l'univers





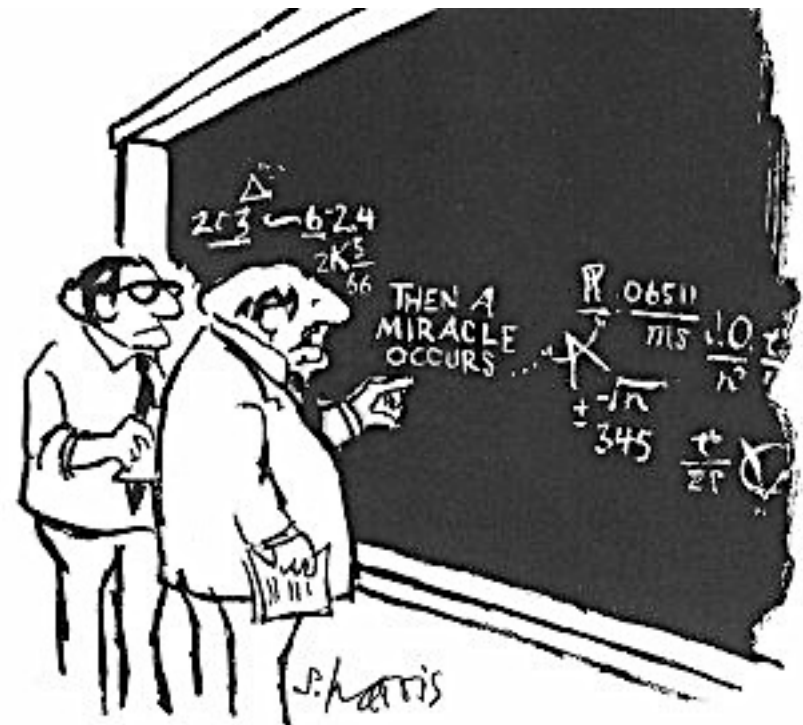


# COMMENT LE SAIT-ON ?



# 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, les ondes gravitationnelles ?
- Vitesse finie  $\Rightarrow$  histoire de l'univers directement visible en fonction de la distance
  - $\Rightarrow$  intérêt des galaxies lointaines ( $z=5$  à  $10$ )
  - $\Rightarrow$  intérêt du fond de rayonnement micro-ondes (CMB,  $z=1100$ )
- Axiome fondamental : les lois de la physique sont identiques en tout temps et en tout lieu



"I THINK YOU SHOULD BE MORE EXPLICIT HERE IN STEP TWO."

# 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

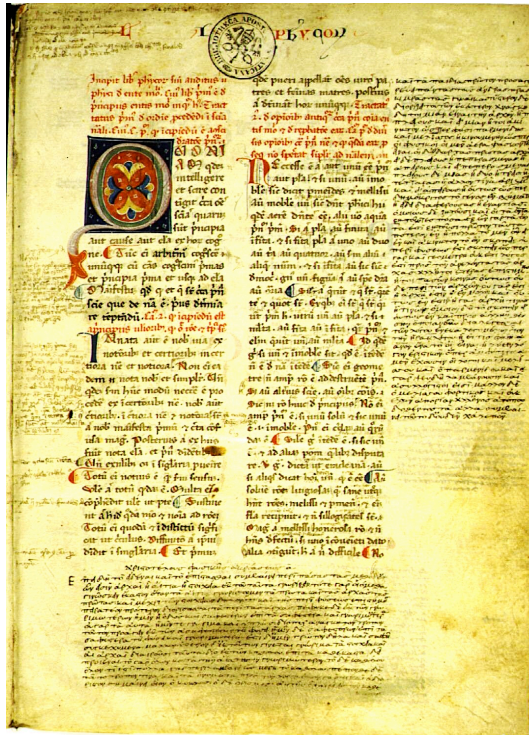


<b>UNIVERSAL GRAVITATION</b> $F = \frac{Gm_1m_2}{r^2}$ $T^2 = \frac{4\pi^2}{GM}r^3$ $U_g = -\frac{GMm_2}{r}$	<b>THERMODYNAMICS</b> $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ $Q = mc\Delta T$ $Q = Lm$ $pV = nRT = NkT$ $dE = dQ - dW$ $e = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$ $\frac{Q_c}{W} = COP$	<b>WAVES</b> $v = f\lambda$ $y = A \sin(kx - \omega t)$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ $f = \frac{v \pm v_{obs}}{v \mp v_{src}}$ $I = \frac{P}{A}$ $\beta = (10 \text{ dB}) \log_{10} \frac{I}{I_0}$	<p><i>Handwritten notes on the right side of the table, including sections like 'PHASE TRANSITIONS', 'CURRENTS', and 'AMPERE'S LAW, FARADAY'S LAW, AND MAXWELL'S EQUATIONS'.</i></p>
<b>MAGNETISM</b> $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$ $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$ $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$	<b>ELECTROSTATICS</b> $F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1q_2}{r^2}$ $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2}$ $U = qV$ $V = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$ $\Delta V = -\rho/\epsilon_0$ $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ $C = \frac{Q}{V}$ $C = \frac{k\epsilon_0 A}{d}$ $U = \frac{1}{2} CV^2$	<b>CURRENTS</b> $i = \frac{dq}{dt}$ $J = n q v_d$ $E = \rho J$ $R = \frac{\rho \ell}{A}$ $V = IR$ $P = VI$ $i = I_0 e^{-t/\tau}$	
<b>MECHANICS OF FLUIDS</b> $p = p_0 + \rho gh$ $\rho vA = \text{constant}$ $p + \frac{1}{2} \rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$	<b>MODERN PHYSICS</b> $\beta = \frac{v}{c}$ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\Delta t = \gamma \Delta t_0$ $L = \frac{L_0}{\gamma}$ $u_x' = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$ $\lambda = \frac{h}{p}$ $E = hf$ $eV_0 = hf - \Phi$ $\frac{dQ}{dt} = \sigma A \epsilon T^4$ $\lambda_{max} T = 2.898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ $E_n = (-13.6 \text{ eV}) \frac{Z^2}{n^2}$ $\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$ $N = N_0 e^{-t/\tau}$	<b>PHYSICAL (WAVE) OPTICS</b> $d \sin \theta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ $2d \sin \theta = m\lambda, m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ $\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{d}$	
<b>AMPERE'S LAW, FARADAY'S LAW, AND MAXWELL'S EQUATIONS</b> $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{enc}$ $\epsilon_r = -\frac{di}{dt}$ $U = \frac{1}{2} Li^2$ $L = \mu_0 n^2 A \ell$ $i = I_0 \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$			



# 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

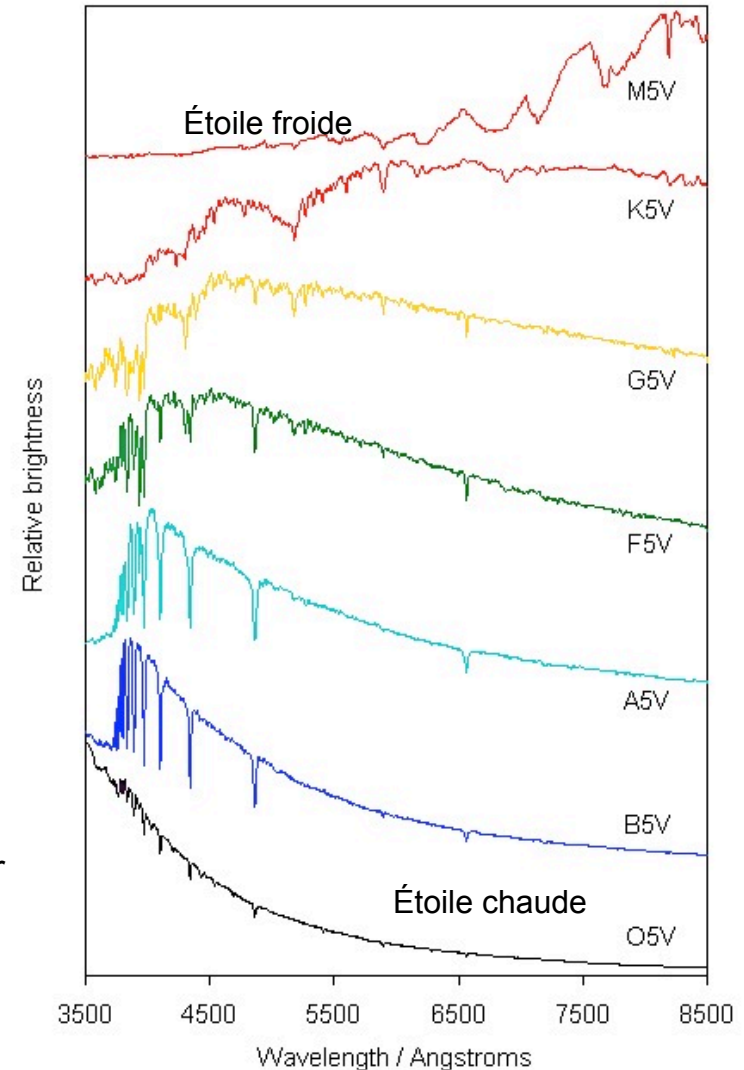
Une propriété de  
l'espace-temps

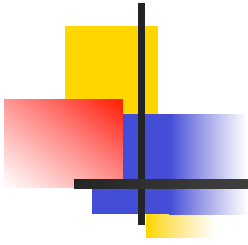


Einstein  
Albert Einstein  
(vu par David Levine)

# Lumière et 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 si la source est (ou non) un corps chaud et en donne alors la température
- Les **raies** d'émission et d'absorption indiquent
  - La **composition chimique** (par leur position)
  - 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)





Merci de votre attention !

