

ASTROPHYSIQUE



Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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



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 astres 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
 - 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**




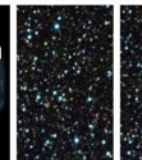
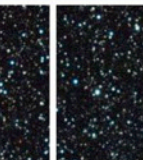


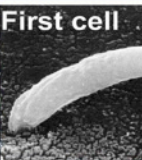
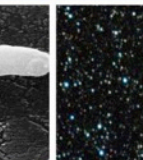



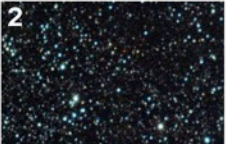
















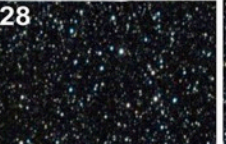


LE TEMPS

- 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											

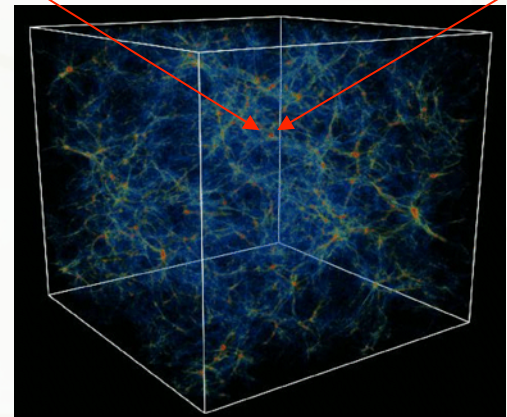
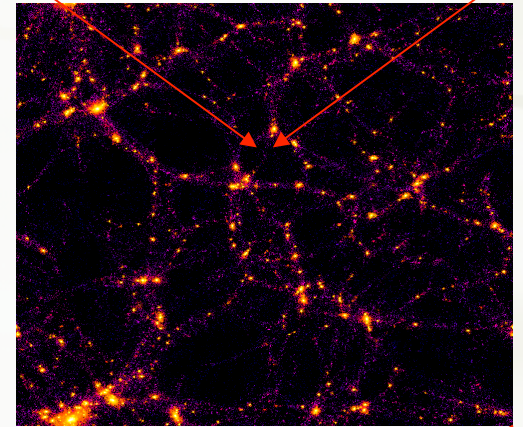
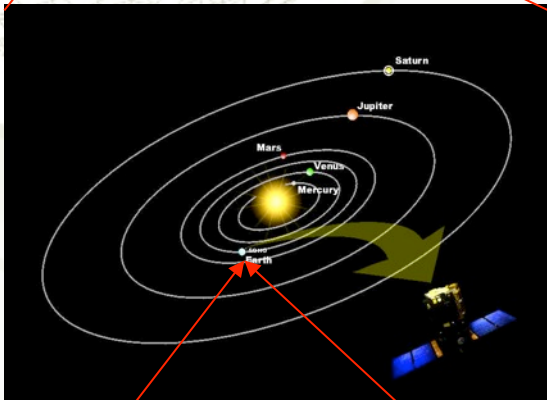
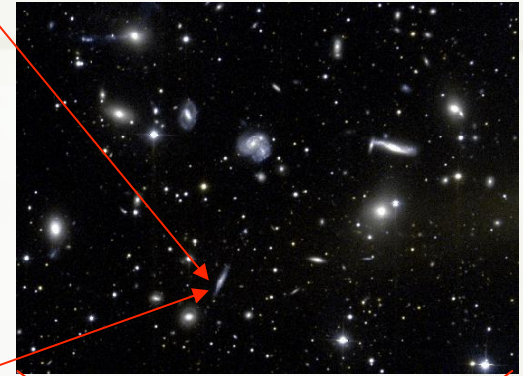
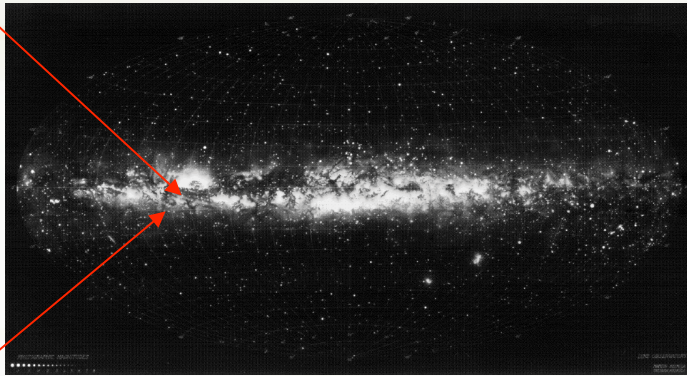
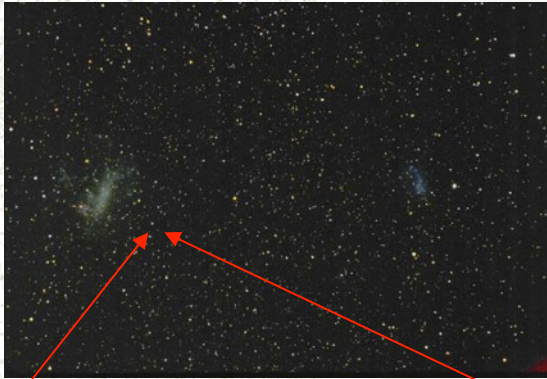
L'ESPACE

■ 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...



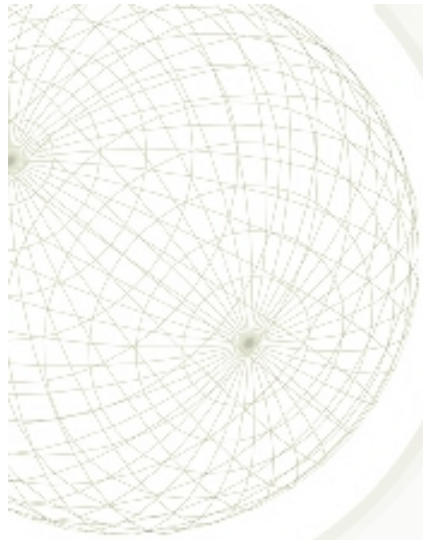
- Le Soleil mesurerait 1,4 m de diamètre et serait à 150 m
- Le système solaire aurait 6 000 km de rayon environ (la taille de la vraie Terre)
- L'étoile la plus proche serait à 40 000 km
- Le centre de la Voie lactée serait à 240 millions de km
- La galaxie la plus proche, Andromède, serait à 20 milliards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

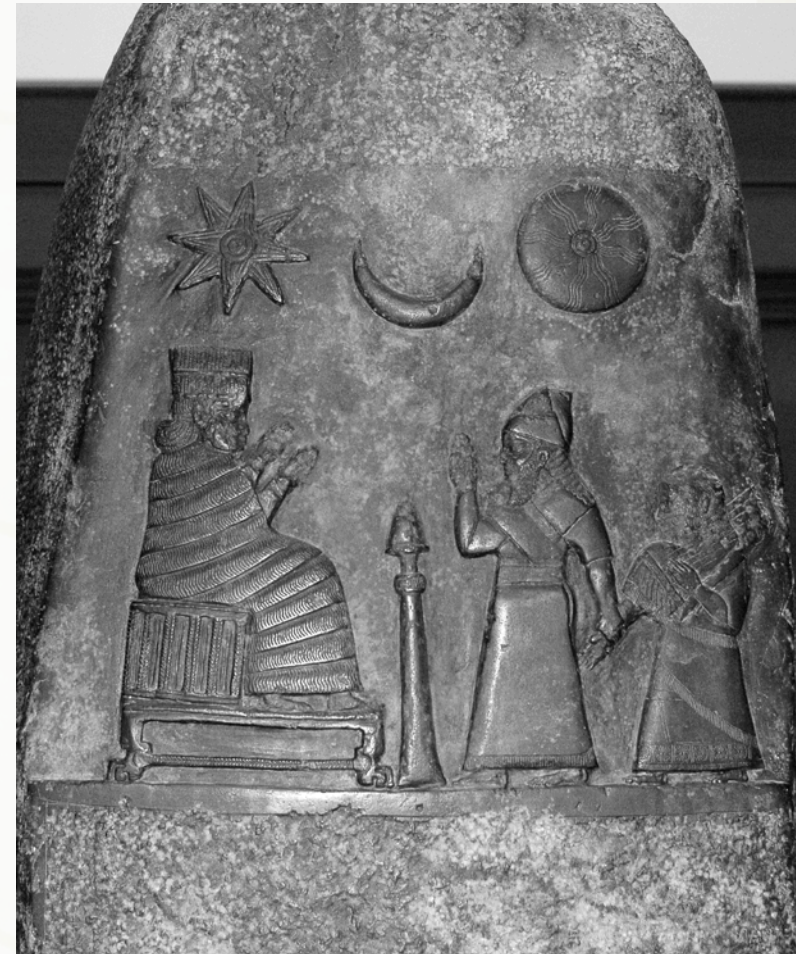


LE CONTENU



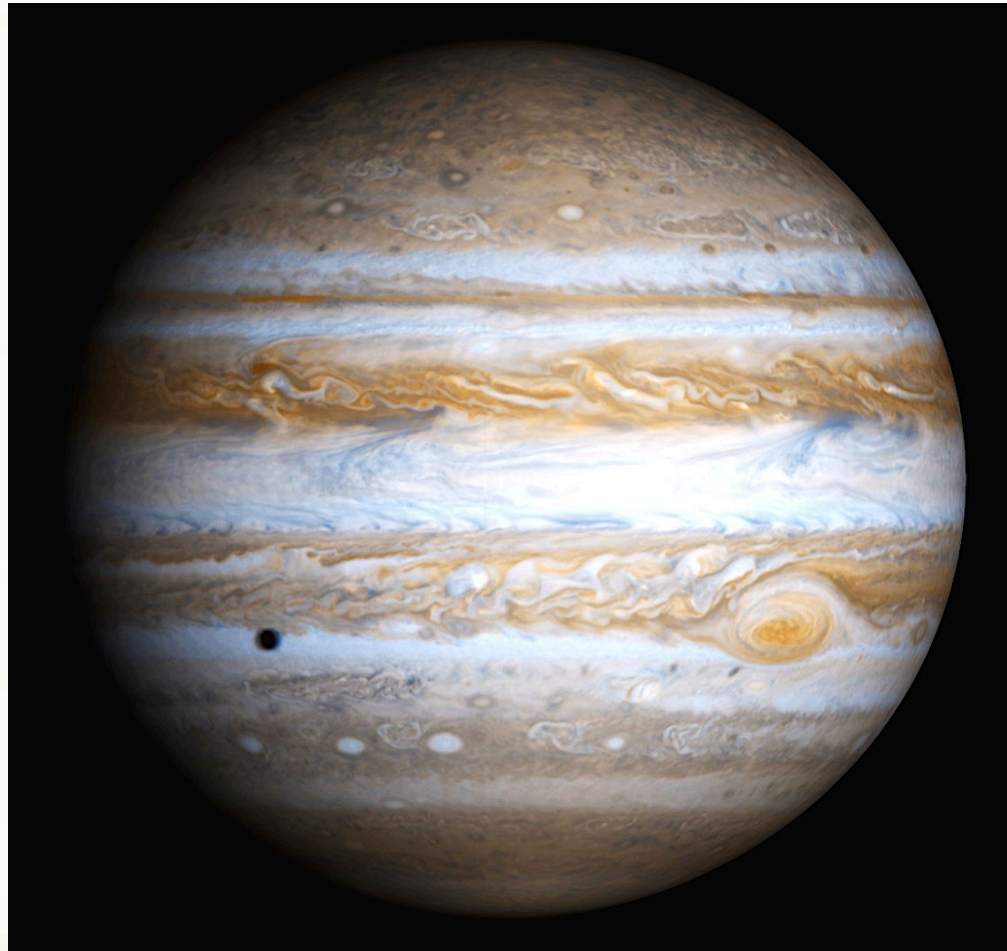
LE CONTENU DE L'UNIVERS

- 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



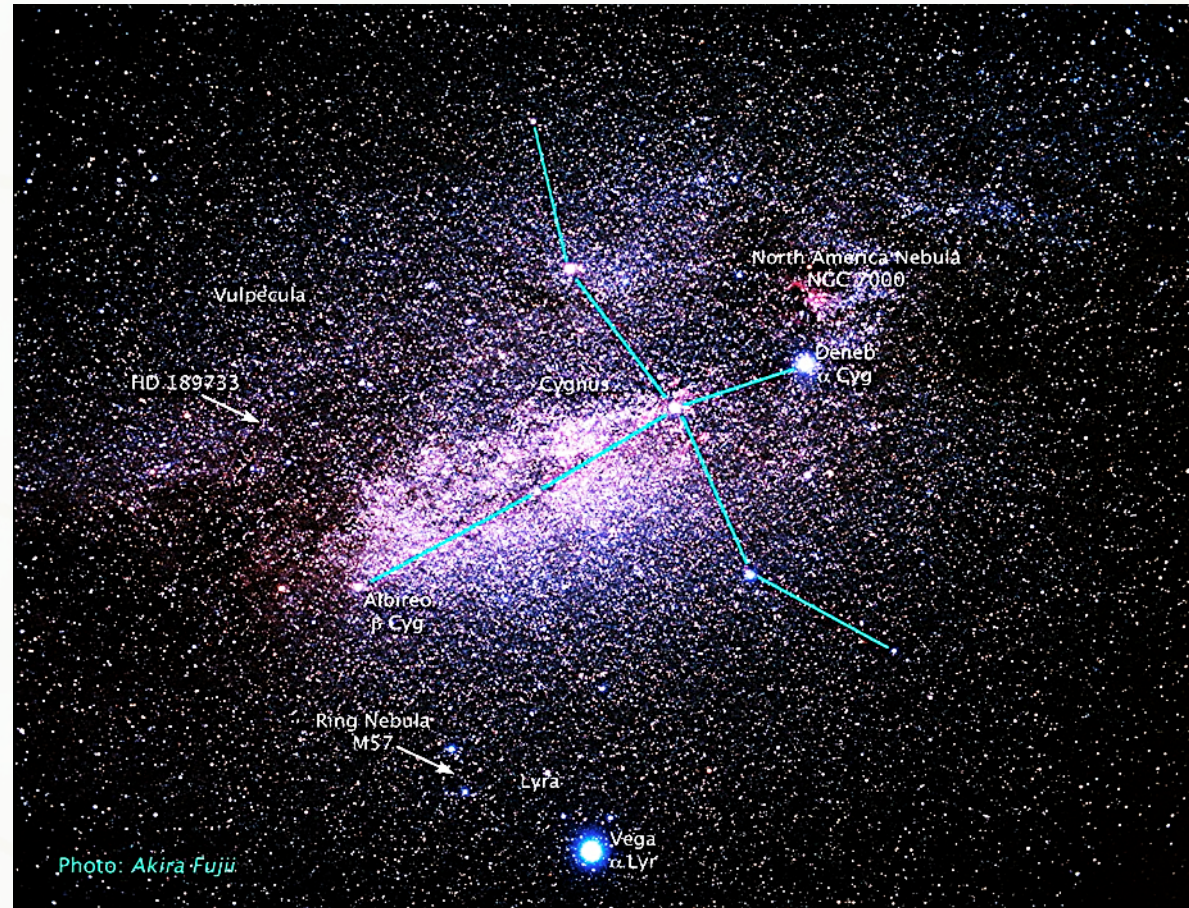
PLANÈTES

- Jupiter, par la sonde Cassini de la NASA



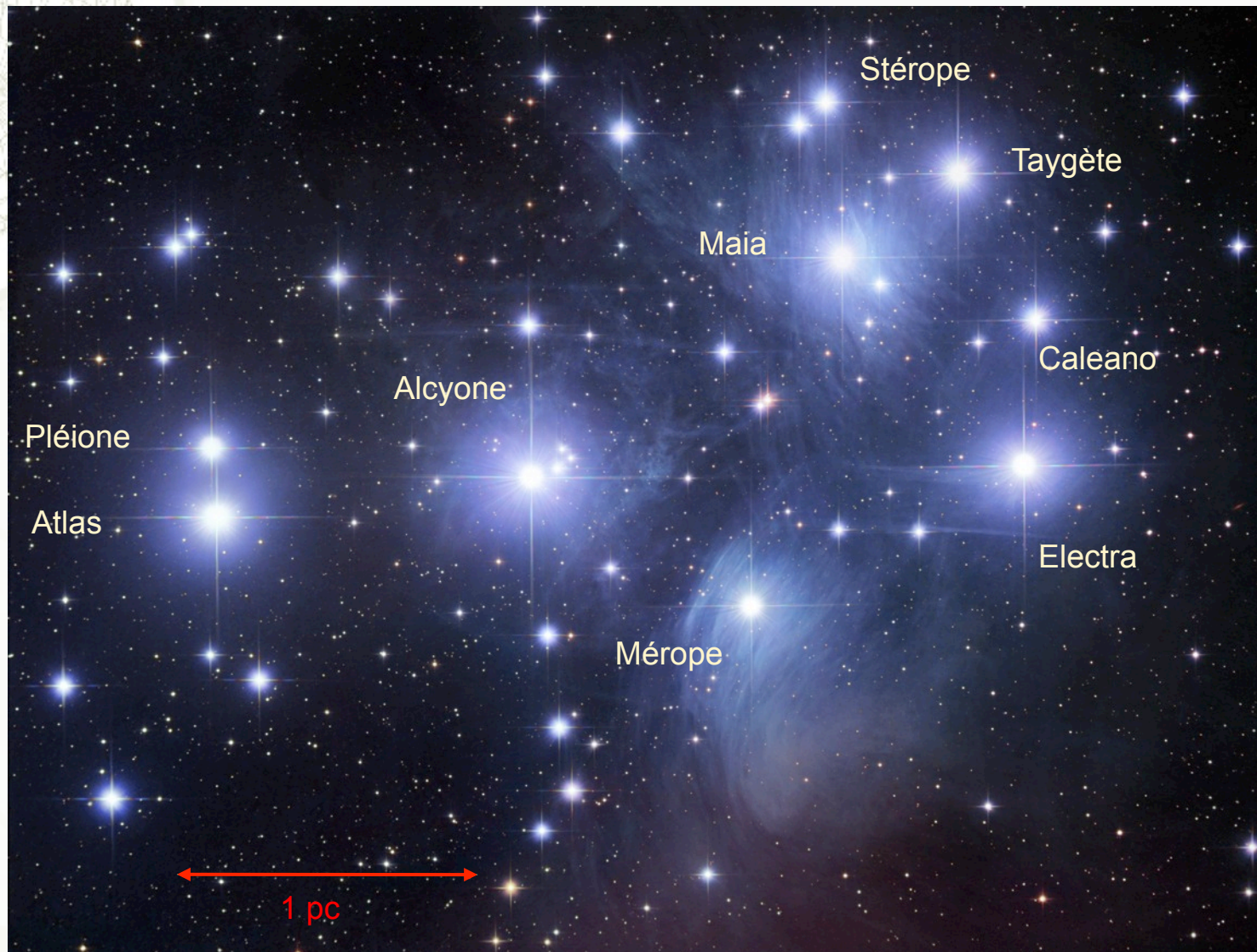
CONSTELLATIONS

- 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



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

AMAS D'ÉTOILES : LES PLÉIADES



GALAXIES

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

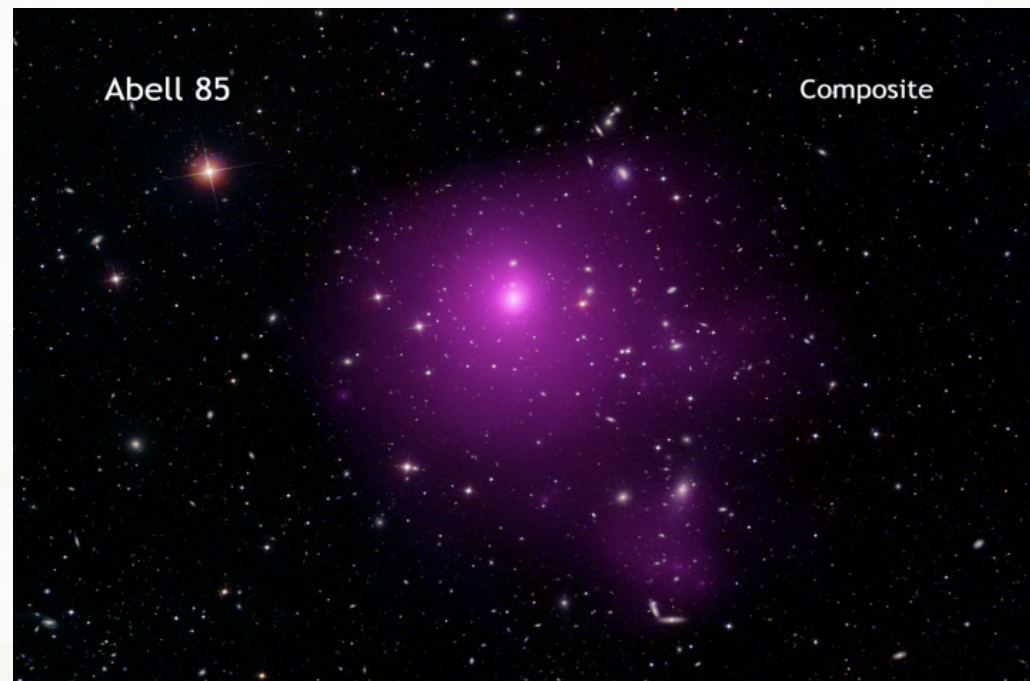


AMAS DE GALAXIES : ABELL 1689 (À 670 Mpc)



MAIS CE N'EST QUE LA FRACTION ÉMERGÉE DE L'ICEBERG

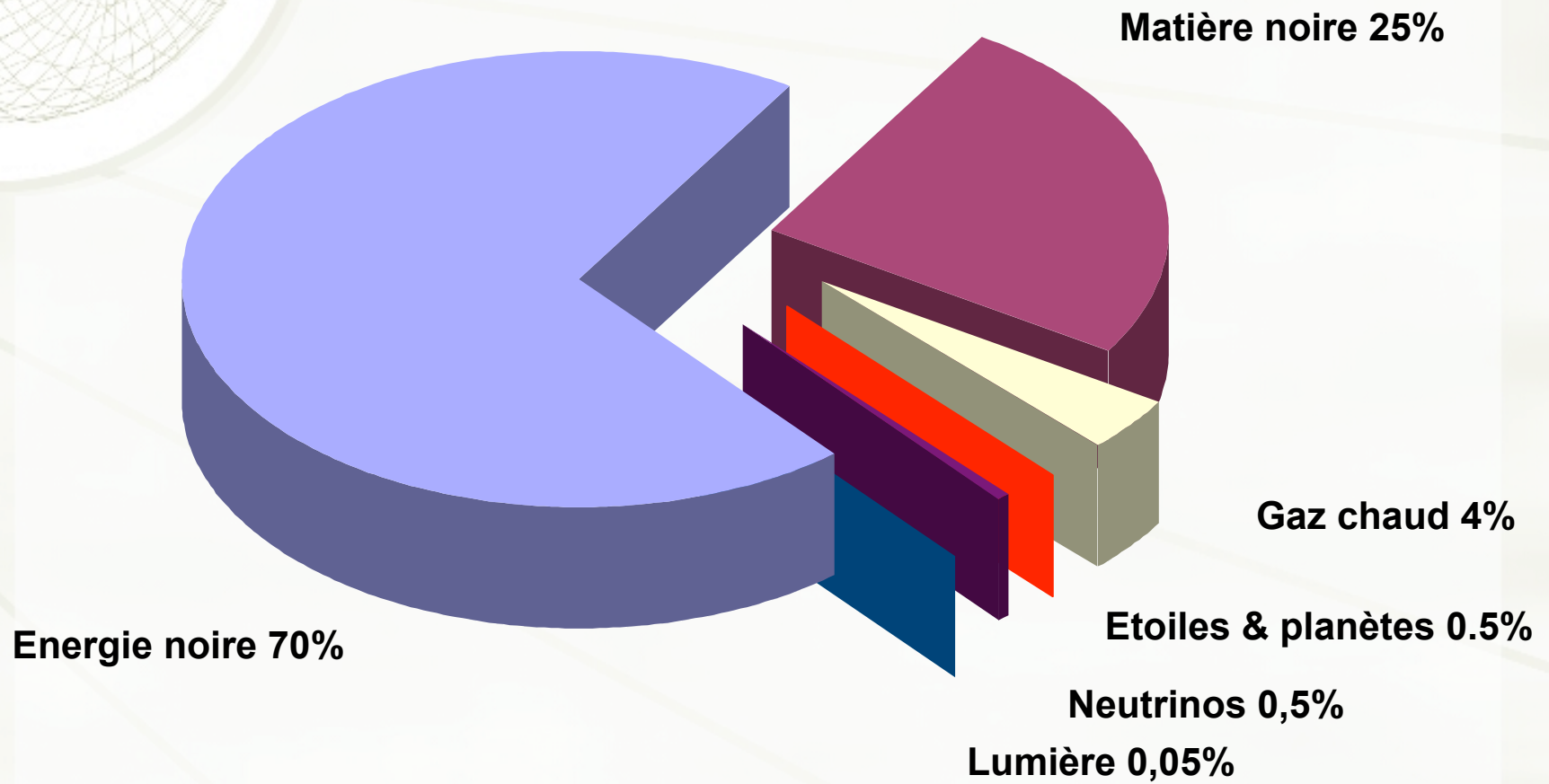
- Étoiles (et planètes) représentent **moins de 1%** du bilan de masse-énergie de l'univers visible
- Poussières, gaz interstellaire froid guère plus
- Les satellites d'observation en rayons X ont décelé de grandes quantités de gaz intergalactique chaud
- Amas Abell 85 à 740 millions al
Image composite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



MÉDITONS SUR LES MYSTÈRES DE L'UNIVERS



ÉNERGIE NOIRE + MATIÈRE NOIRE = 95%



95% D' INCONNU, EST-CE RAISONNABLE?



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



COMMENT LE SAIT-ON ?



UNE BRÈVE HISTOIRE



20 octobre 2011

Astrophysique 1 - Alain Bouquet

23

LE DIFFICILE COMBAT DE JOHANNES KEPLER



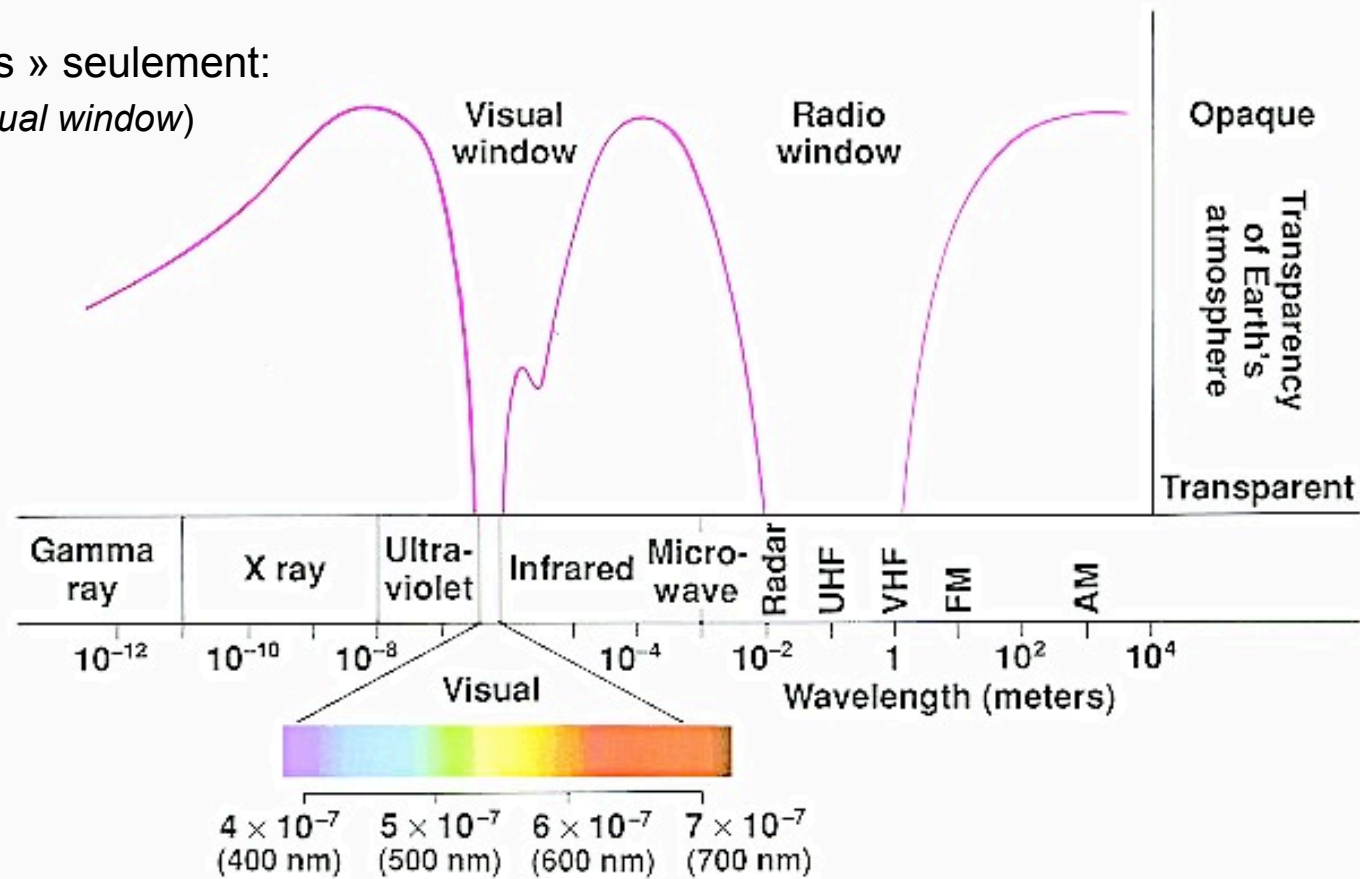
TÉLESCOPES

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



TRANSPARENCE DE L'ATMOSPHÈRE

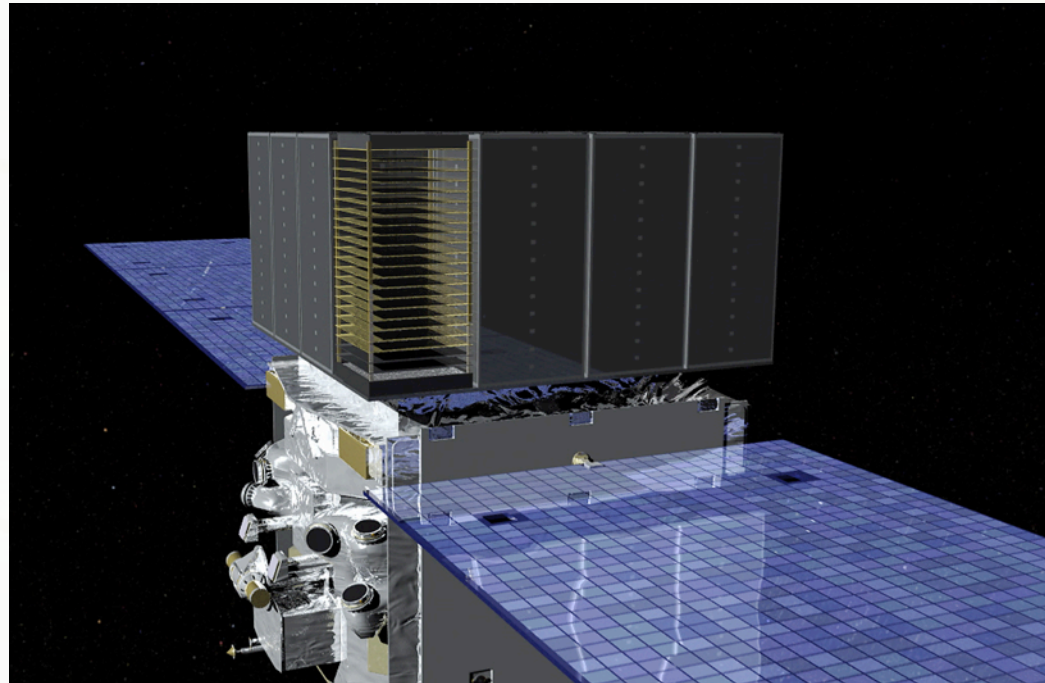
- L'atmosphère terrestre absorbe presque tous les rayonnements électromagnétiques
- Deux « fenêtres » seulement:
 - Optique (*visual window*)
 - Radio
- → satellites !



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...*

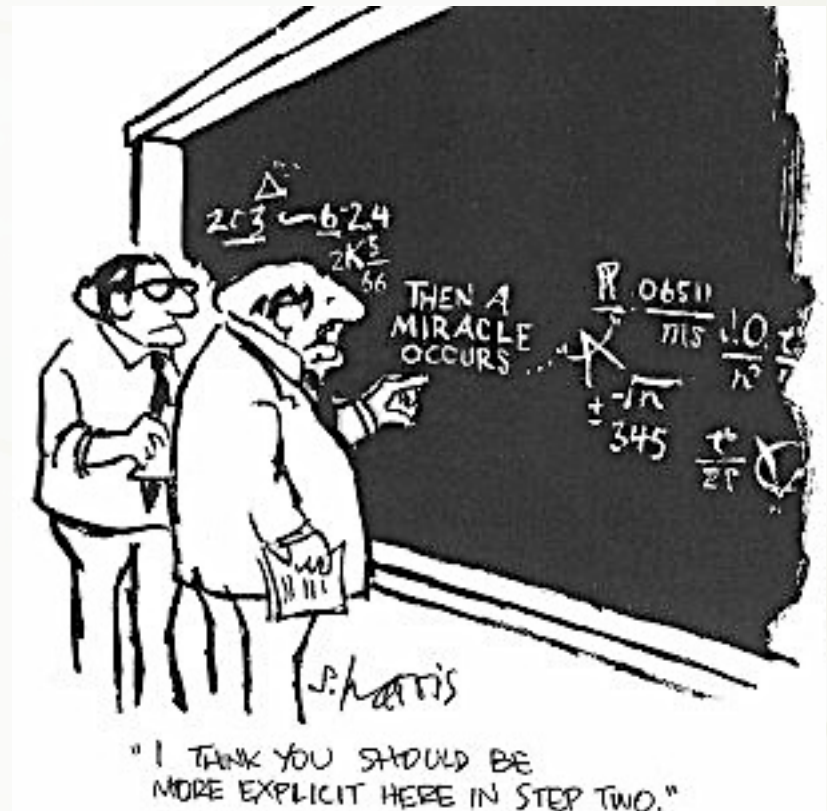


COMMENT LE SAIT-ON ?



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 → histoire de l'univers directement visible en fonction de la distance
 - → intérêt des galaxies lointaines ($z=5$ à 10)
 - → 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**



COMMENT ÇA MARCHE ?

- Toutes les branches de la physique sont mises en jeu

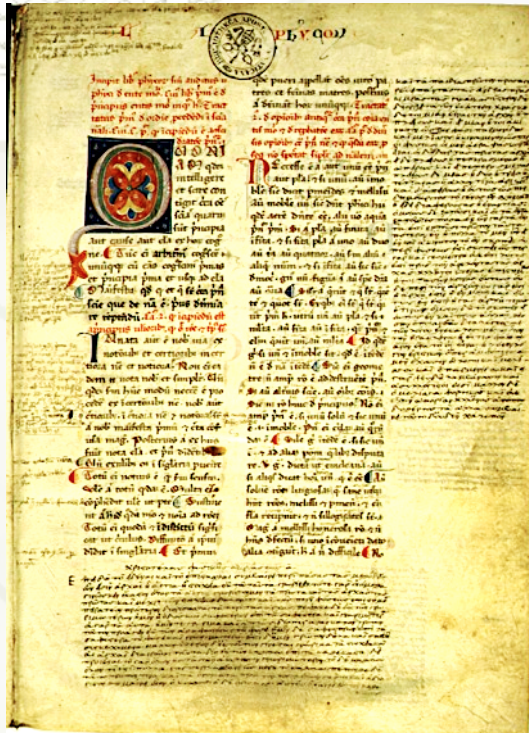
- Gravitation
- Électromagnétisme
- Interactions nucléaires
- Physique quantique
- Thermodynamique
- Hydrodynamique
- Transferts d'énergie
- Simulations numériques



<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>THERMODYNAMICS</p> $\Delta L = \alpha L_0 \Delta T$ $Q = mc\Delta T$ $Q = Lm$ $pV = nRT = NkT$ $dE = dQ - dW$ $e = \frac{W_{out}}{Q_{in}}$	<p>WAVES</p> $v = f\lambda$ $y = A \sin(kx - \omega t)$ $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ $v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$ $f' = v \frac{v \pm v_o}{v \mp v_s}$ $I = \frac{P}{A}$ $\beta = (10 \text{ dB}) \log_{10} \frac{I}{I_0}$	<p>MAGNETISM</p> $\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A}$ $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$ $\vec{F} = i\vec{l} \times \vec{B}$ $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\vec{s} \times \hat{r}}{r^2}$ $\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B}$	<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>MECHANICS OF FLUIDS</p> $p = p_0 + \rho gh$ $\rho vA = \text{constant}$ $p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constant}$	<p>MODERN PHYSICS</p> $\beta = \frac{v}{c}$ $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ $\Delta t = \gamma \Delta t_0$ $L = \frac{L_0}{\gamma}$ $u_x' = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}$ $\lambda = \frac{h}{p}$	<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> $\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{enc}$ $\epsilon_r = -\frac{di}{dt}$ $U = \frac{1}{2} Li^2$ $L = \mu_0 n^2 \ell A$ $i = I \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$	<p><i>(Handwritten notes and diagrams covering various physics topics like gravitation, thermodynamics, waves, magnetism, electrostatics, mechanics of fluids, modern physics, physical optics, and Maxwell's equations.)</i></p>
---	--	---	---	---	---	---	--	--	---

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)

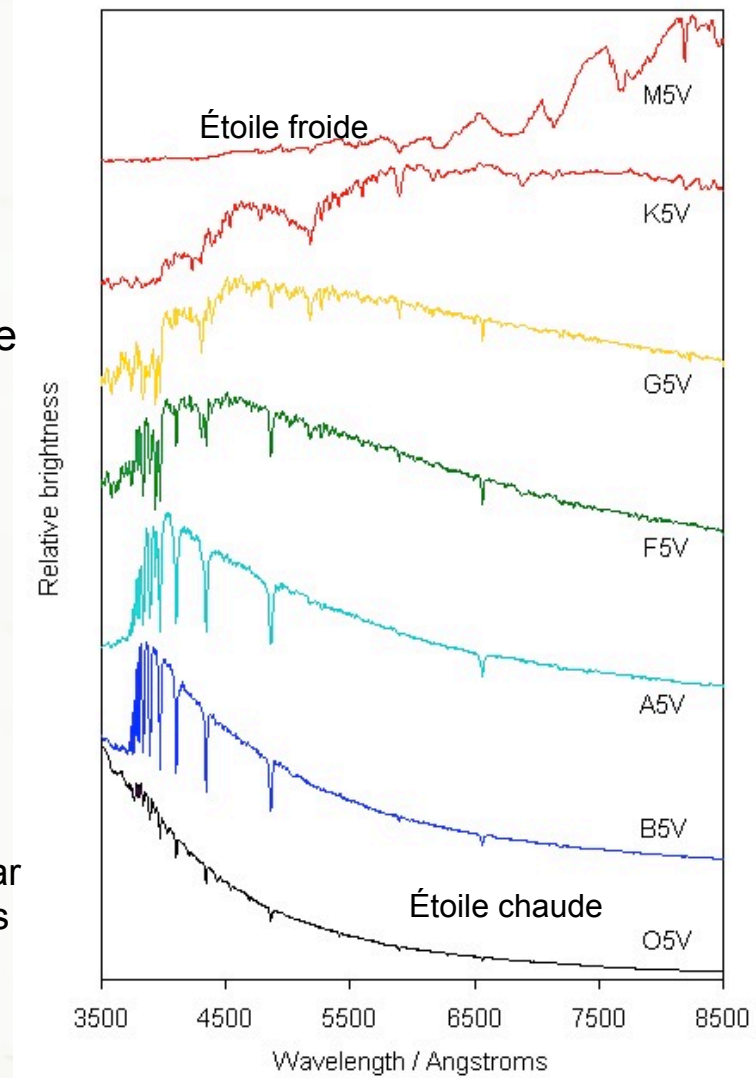
- ➔ Einstein
- Une **propriété de l'espace-temps**



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)





PROGRAMME POSSIBLE

1. Introduction
2. Espace, temps et gravitation
3. Lumière et spectroscopie
4. Thermodynamique et physique nucléaire
5. Système solaire: planètes
6. Système solaire: petits corps, exoplanètes
7. Système solaire: formation
8. Étoiles: structure
9. Étoiles: formation et évolution
10. Étoiles: supernovae et trous noirs
11. Galaxies: spirales et matière noire
12. Galaxies: elliptiques et quasars
13. Galaxies: amas et matière noire
14. Cosmologie: big bang et expansion
15. Cosmologie: nucléosynthèse et CMB
16. Cosmologie: énergie noire

N'OUBLIONS PAS...

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

(Shakespeare, Hamlet 1-V)



Merci de votre attention !

