



*La face cachée
de l'Univers*

Vincent Bertin

Centre de Physique des Particules de Marseille
Conférence du CPPM pour l'Année de la Physique – 24/09/2005

Télescope spatial Hubble



Télescope XMM-Newton



Very Large Telescope



Very Large Array radiotelescope

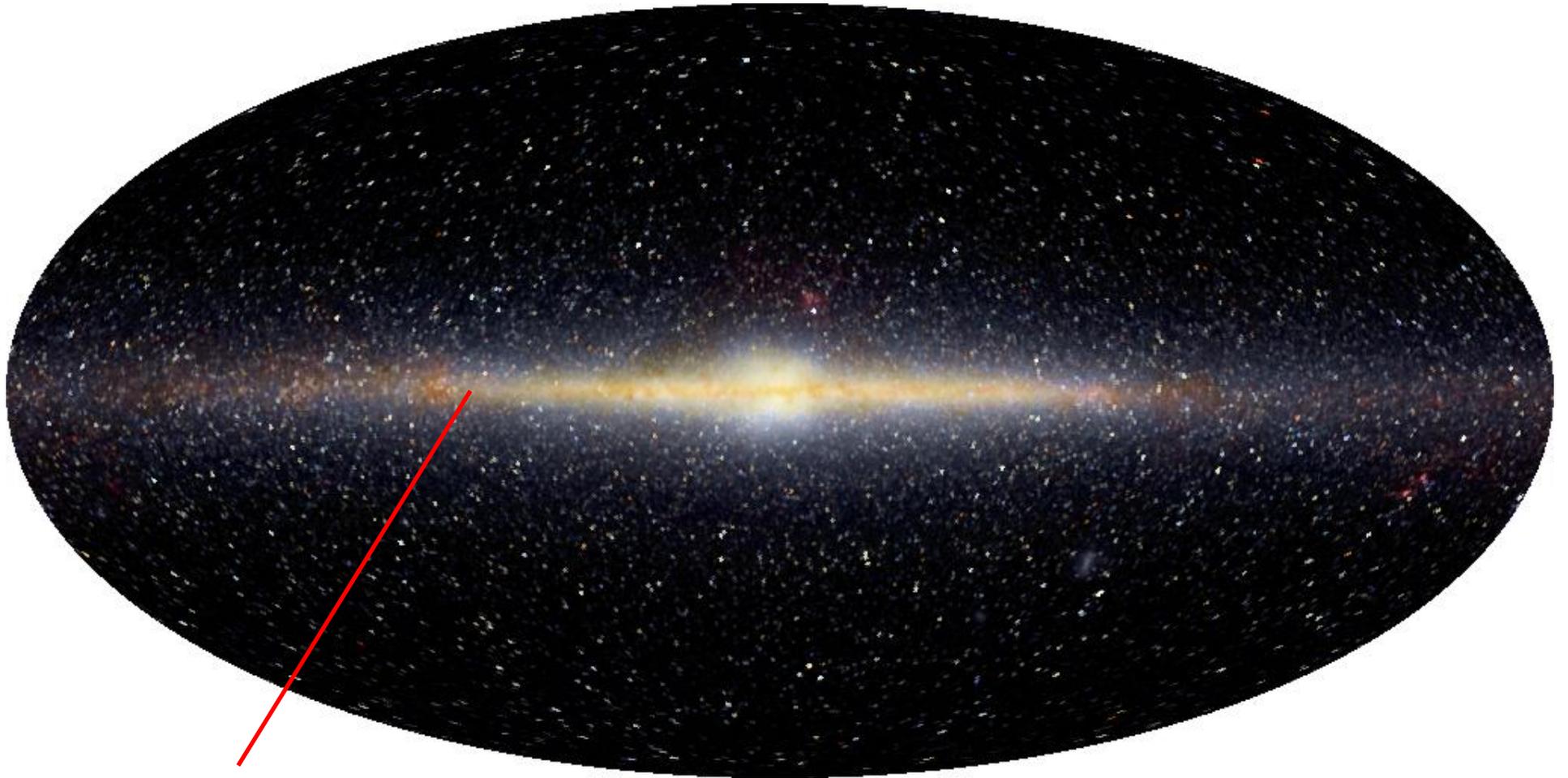


Une galaxie rassemble plus de 100 milliards d'étoiles





Notre galaxie : la Voie Lactée



Vous êtes ici !

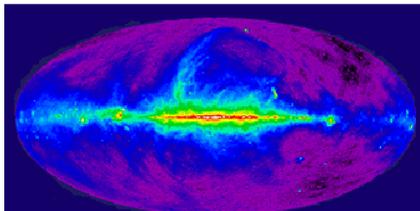
Longueur d'onde
(mètres)

Observations multi longueur d'onde



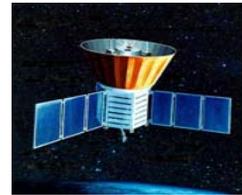
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻³
10⁻⁴
10⁻⁵
10⁻⁶
10⁻⁷
10⁻⁸
10⁻⁹
10⁻¹⁰
10⁻¹¹
10⁻¹²
10⁻¹³

Ondes radio



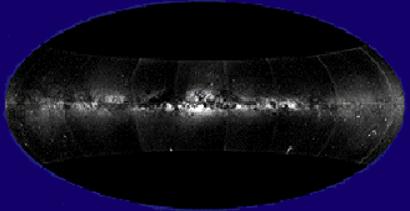
Radio télescope de Bonn

Infra-rouge



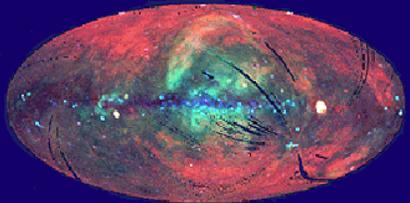
Satellite COBE

Lumière visible



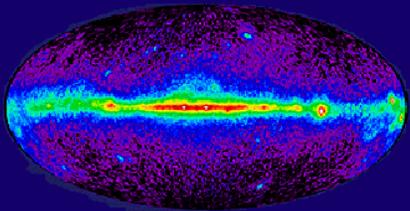
Télescope du Mont Palomar

Rayons X



Satellite INTEGRAL

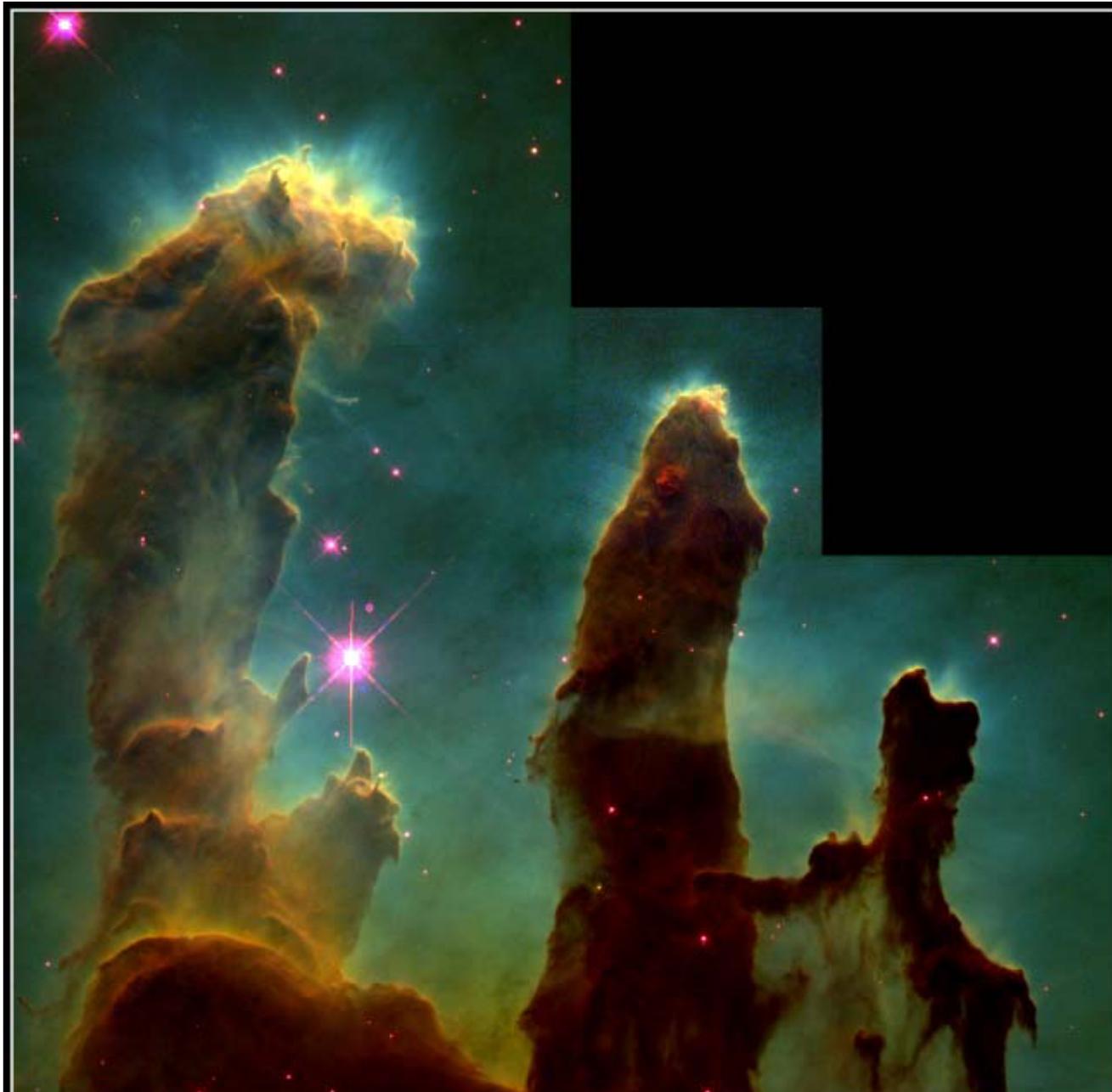
Rayons gamma



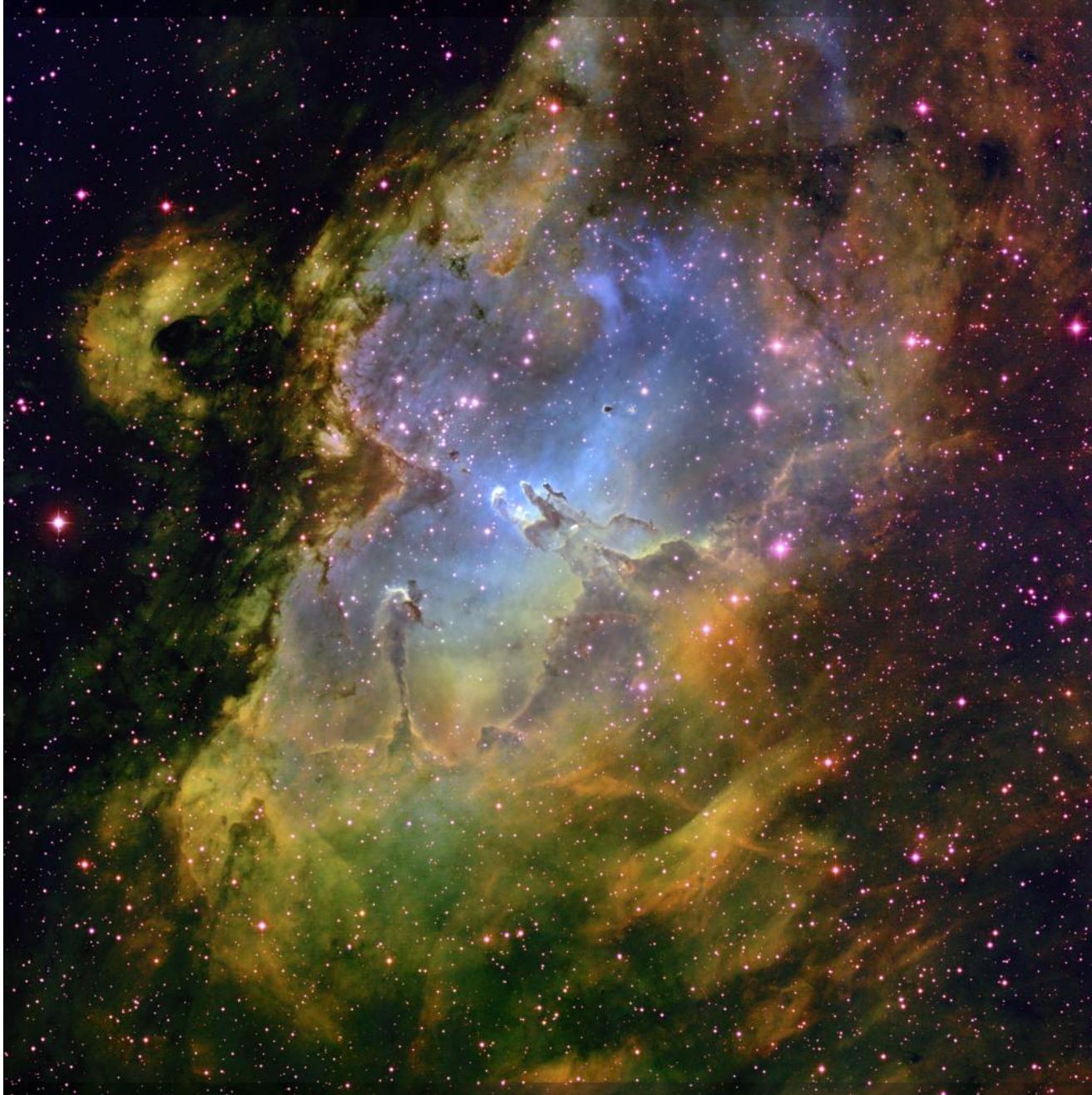
Satellite CGRO

énergie
(électron volt)

Des nuages d'hydrogène : les nurseries des étoiles



La nébuleuse de l'Aigle



La nébuleuse du Pélican



La nébuleuse de la Tête de Cheval



Mort d'une étoile : une supernova



Planetary Nebula NGC 3132



Hubble
Heritage

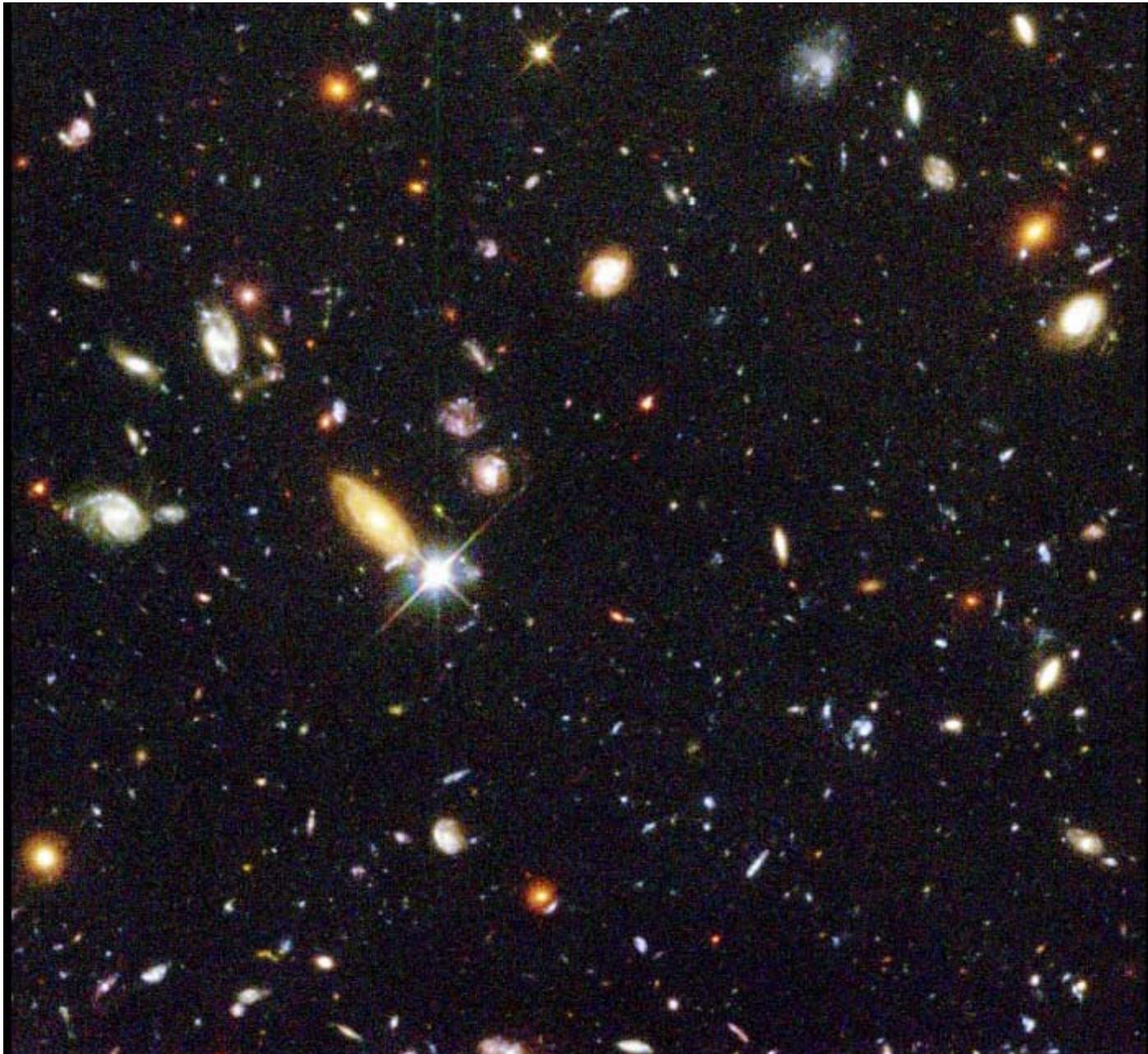
Un reste de supernova : la nébuleuse du Crabe

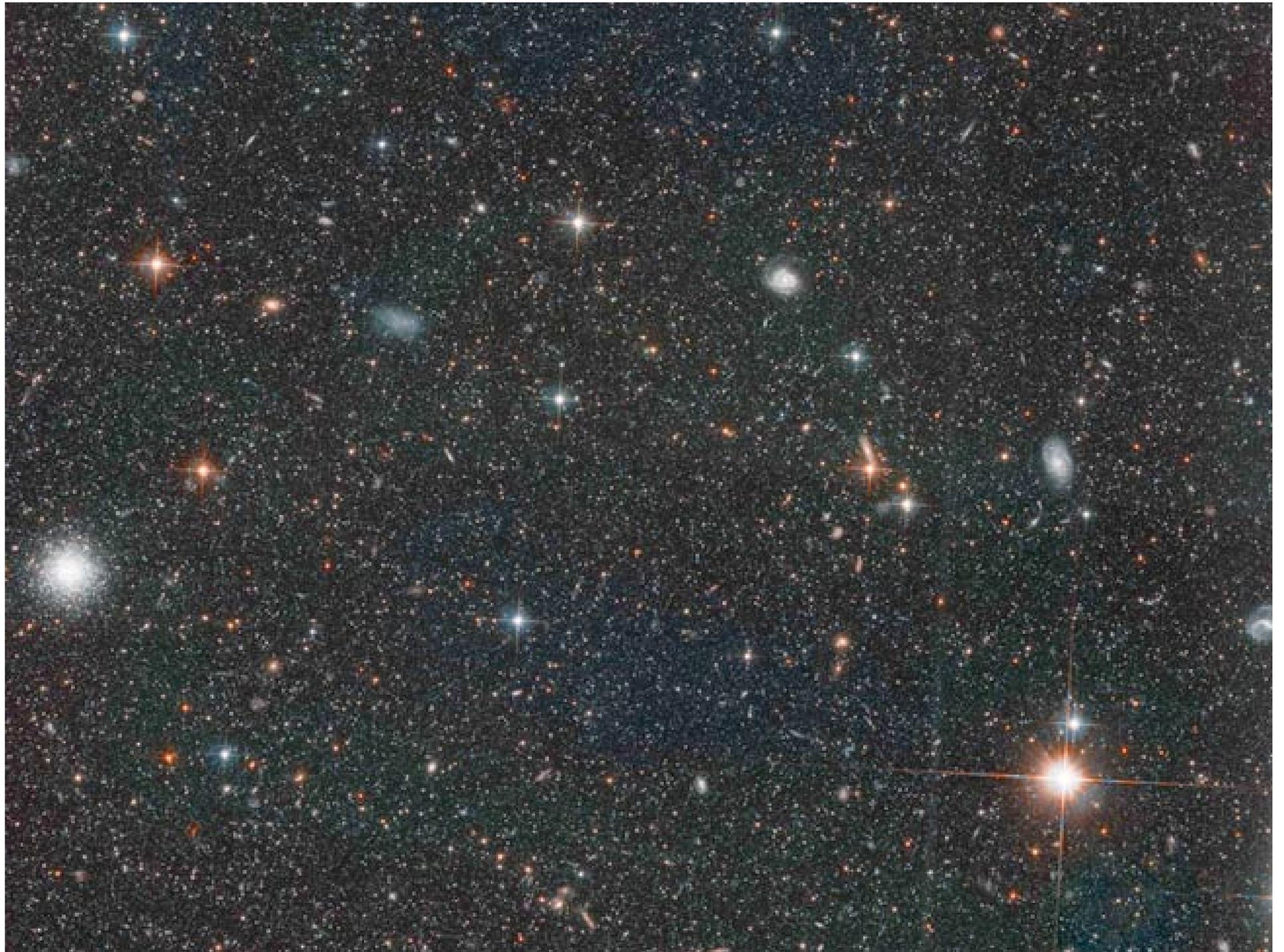


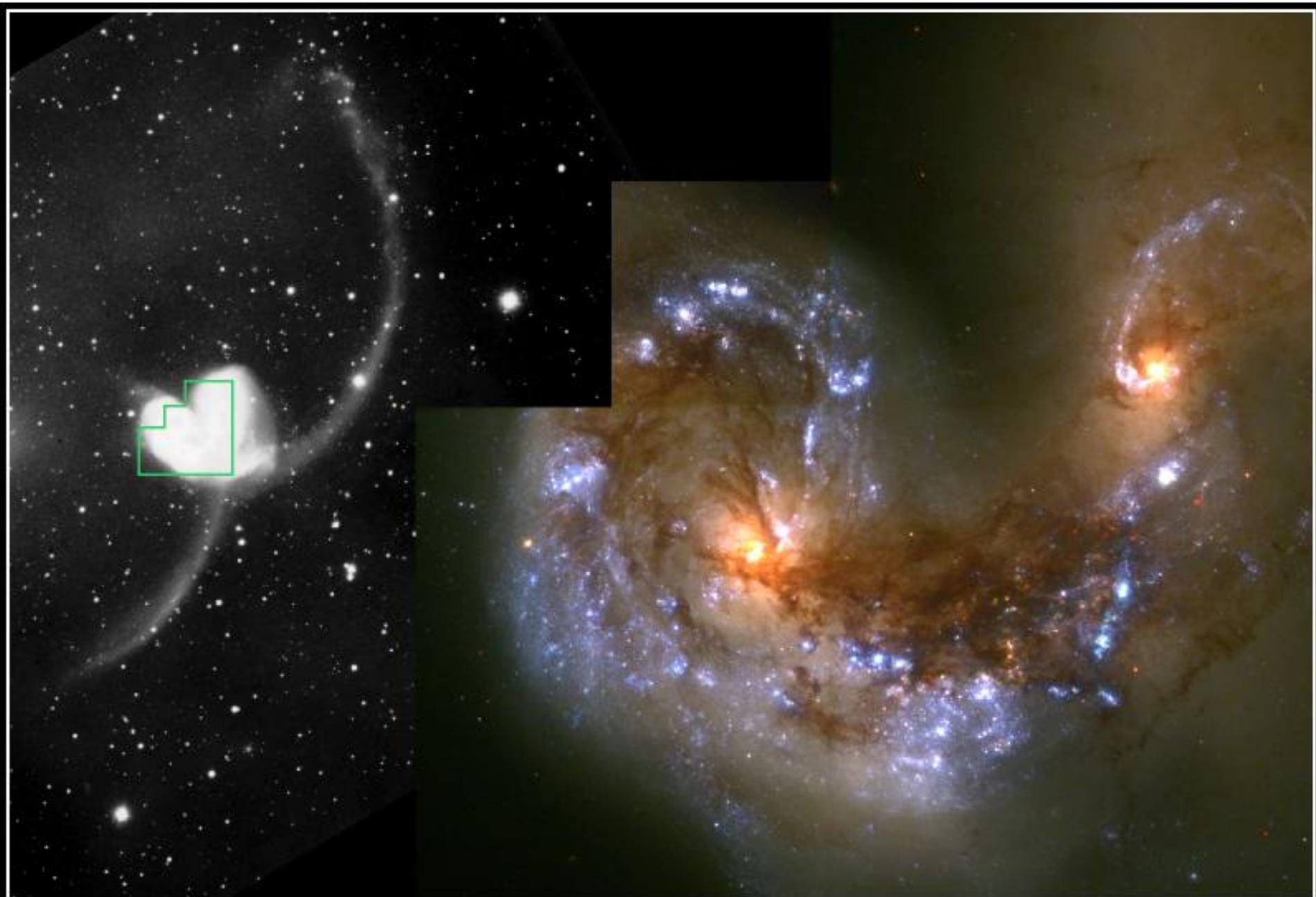
Un phare du ciel : le pulsar du Crabe



L'Univers observable compte plus de 100 milliards de galaxies !



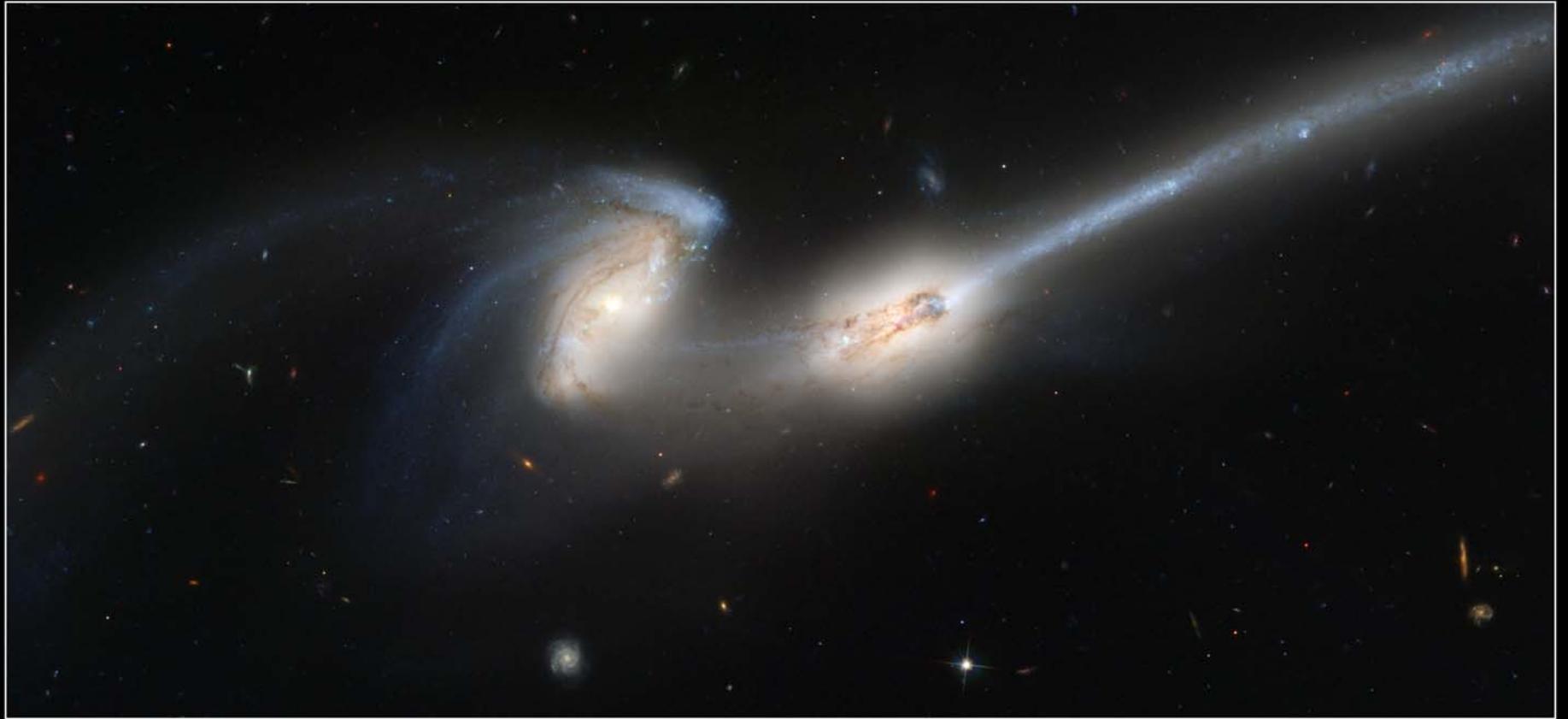




Colliding Galaxies NGC 4038 and NGC 4039

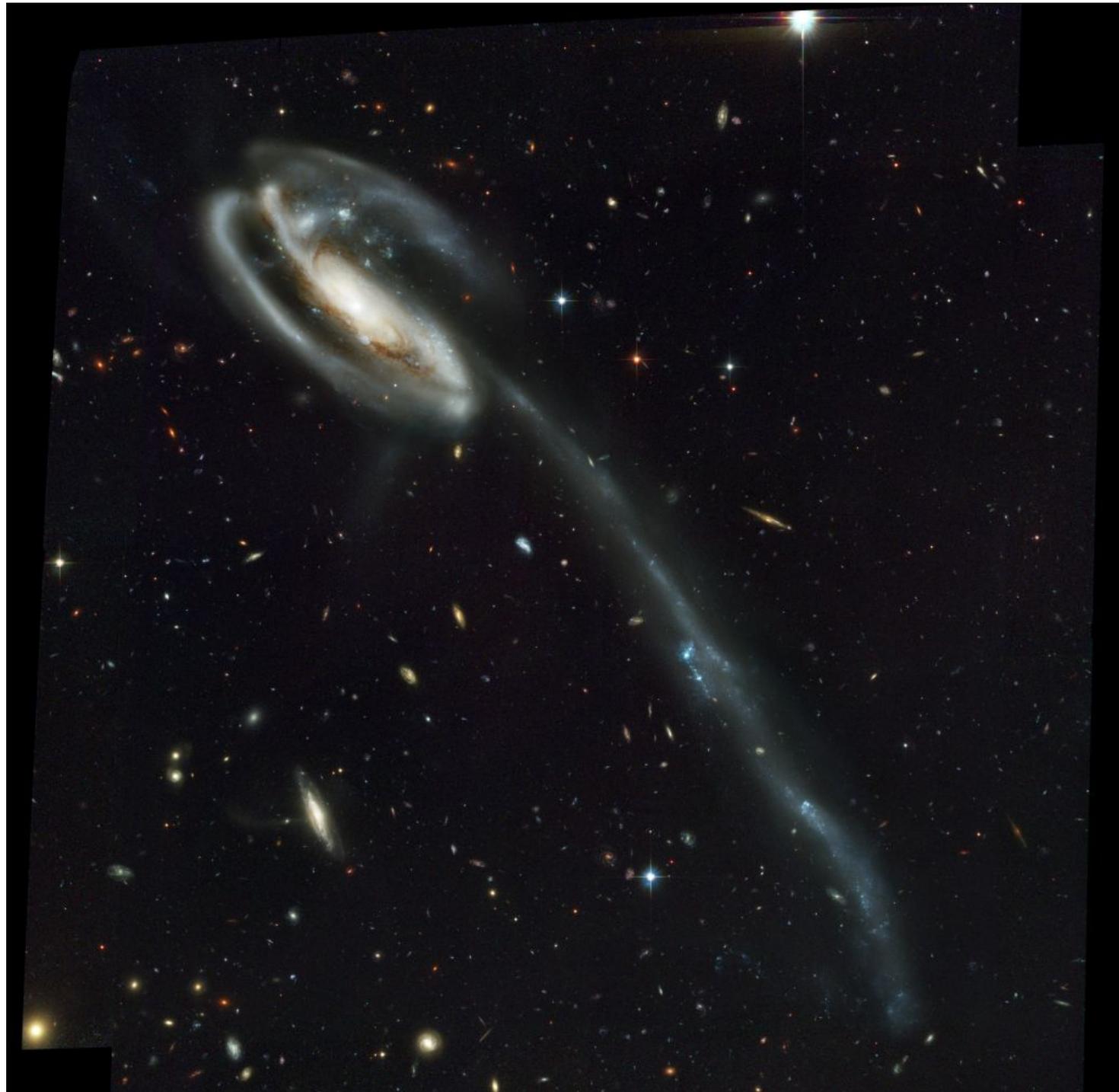
HST • WFPC2

PRC97-34a • ST ScI OPO • October 21, 1997 • B, Whitmore (ST ScI) and NASA



The Mice • Interacting Galaxies NGC 4676
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, H. Ford (JHU), G. Illingworth (UCSC/LO), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI) and the ACS Science Team • STScI-PRC02-11d



De quoi est fait l'Univers ?

Plus on l'observe,

plus on comprend

n'y

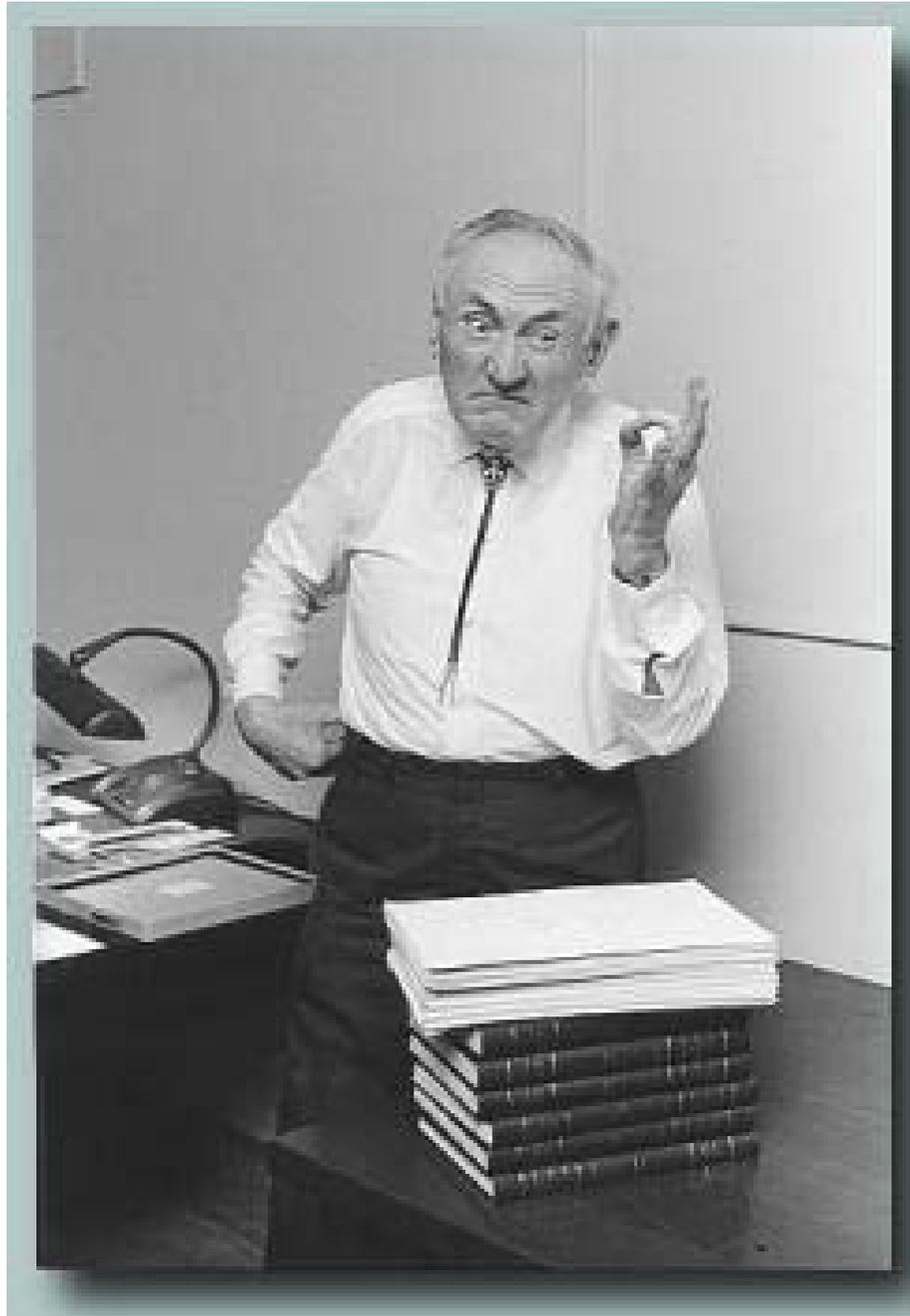
RIEN !!!???

Méfiez-vous du côté obscur de l'Univers :



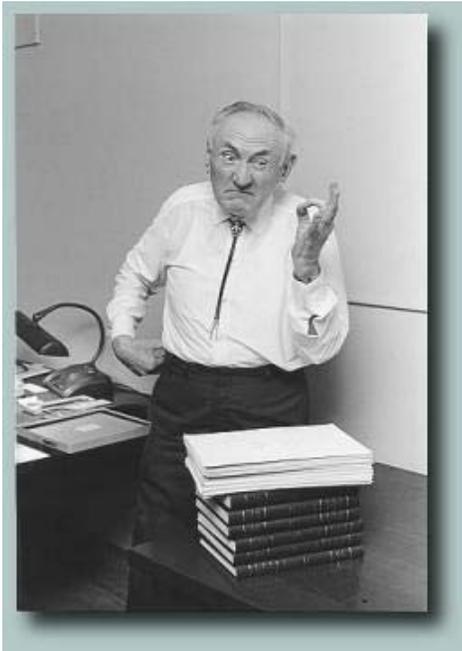
la Matière Noire : c'est elle qui le tient lié !

l'Energie Noire : c'est elle qui dicte son destin !



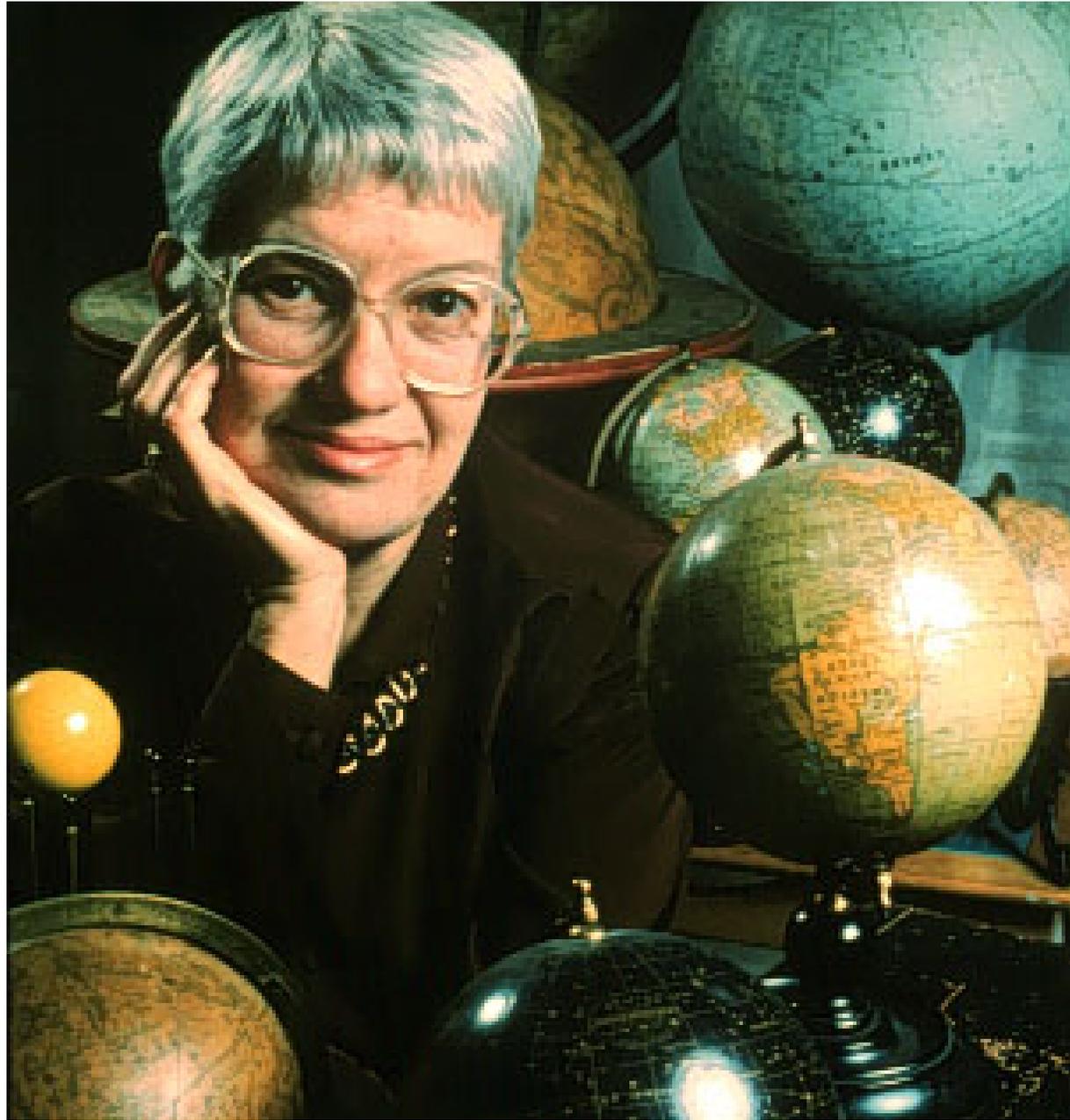
Fritz Zwicky – 1930

Mesure de la vitesse des galaxies dans les amas de la Vierge et de Coma



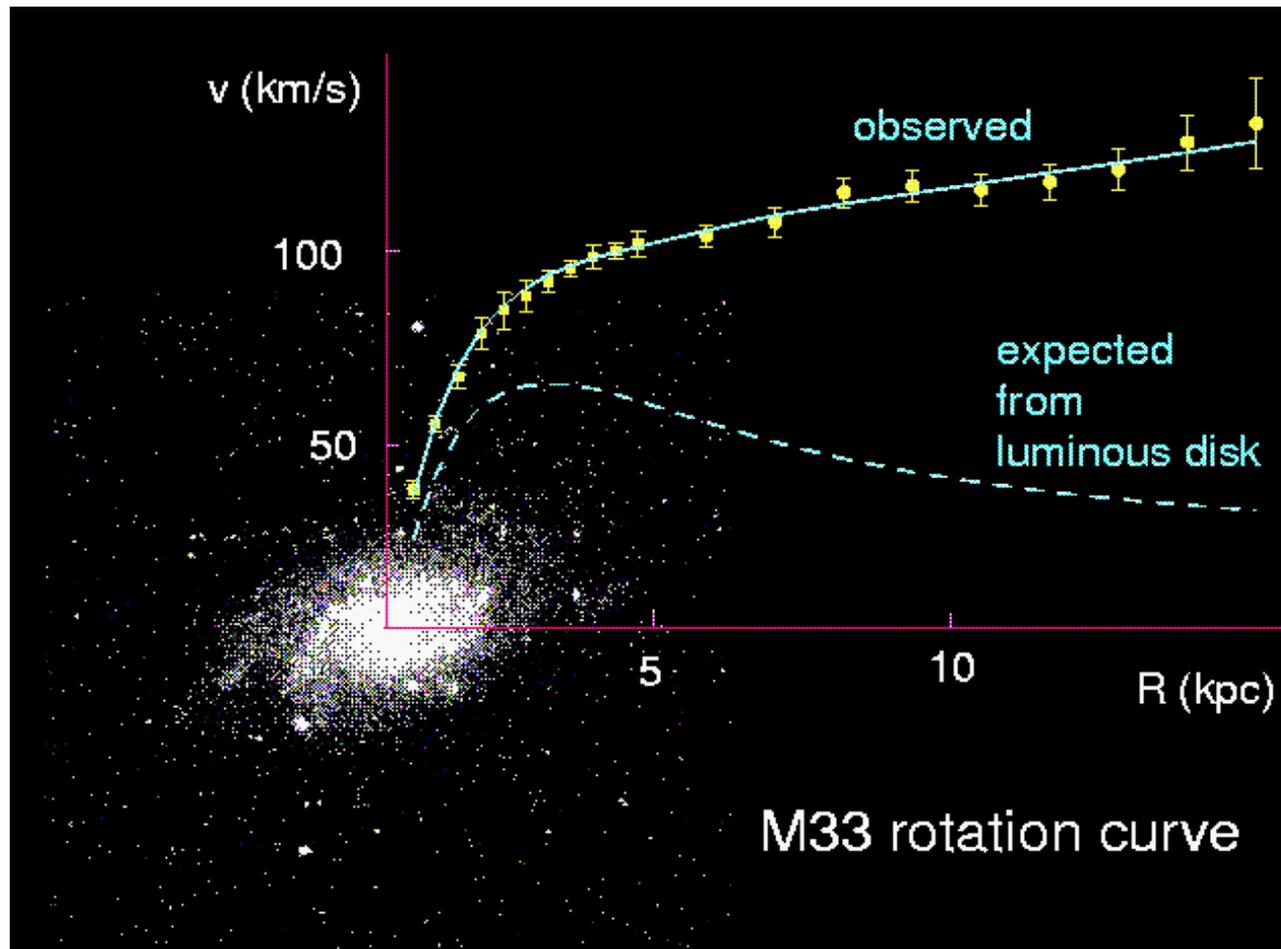
Les vitesses des galaxies sont **10 à 100 fois plus grandes**
que ce qu'on attendait...

Zwicky : **il y a de la masse cachée qui accélère les galaxies !**



Vera Rubin - 1948

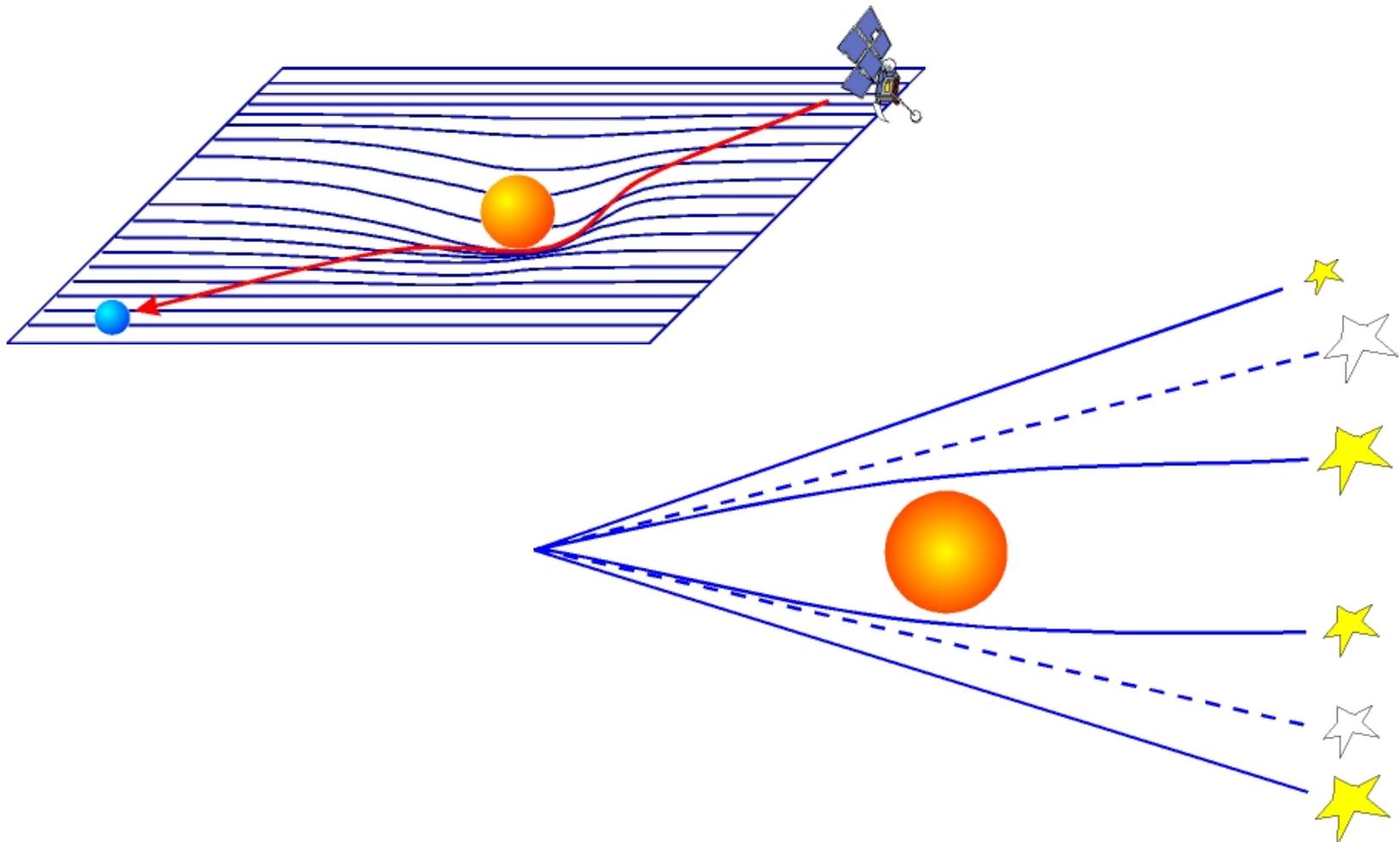
Mesure de la vitesse de rotation des étoiles autour de la Galaxie



Les étoiles ne représentent **que moins de 10%** de la masse totale des Galaxies !!??

La gravitation en Relativité Générale

Une grande masse courbe l'espace :
déflexion des rayons lumineux



Mesure de la masse des amas de galaxies dans les effets de lentilles gravitationnelles



Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI) • STScI-PRC00-08







WHAT YOU HAVE:



WHAT YOU SEE:

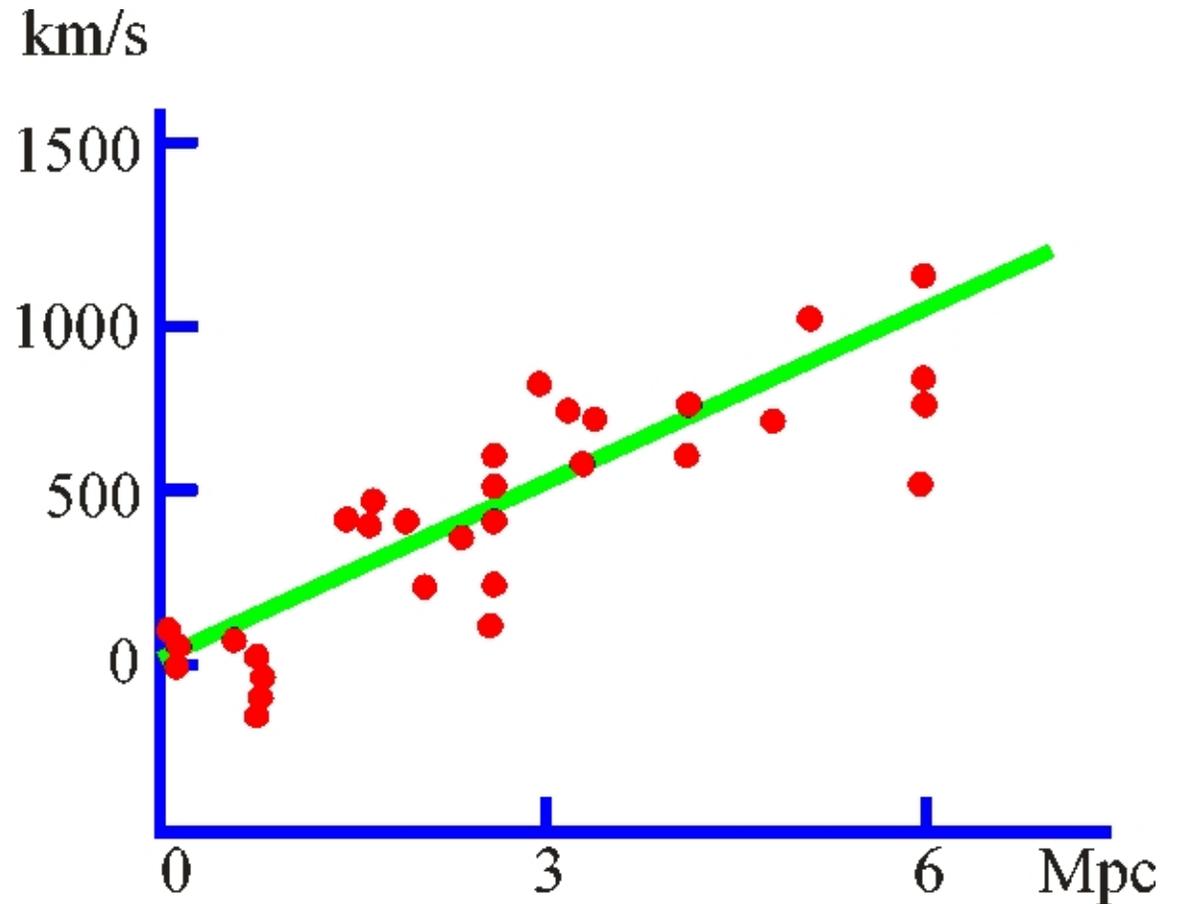




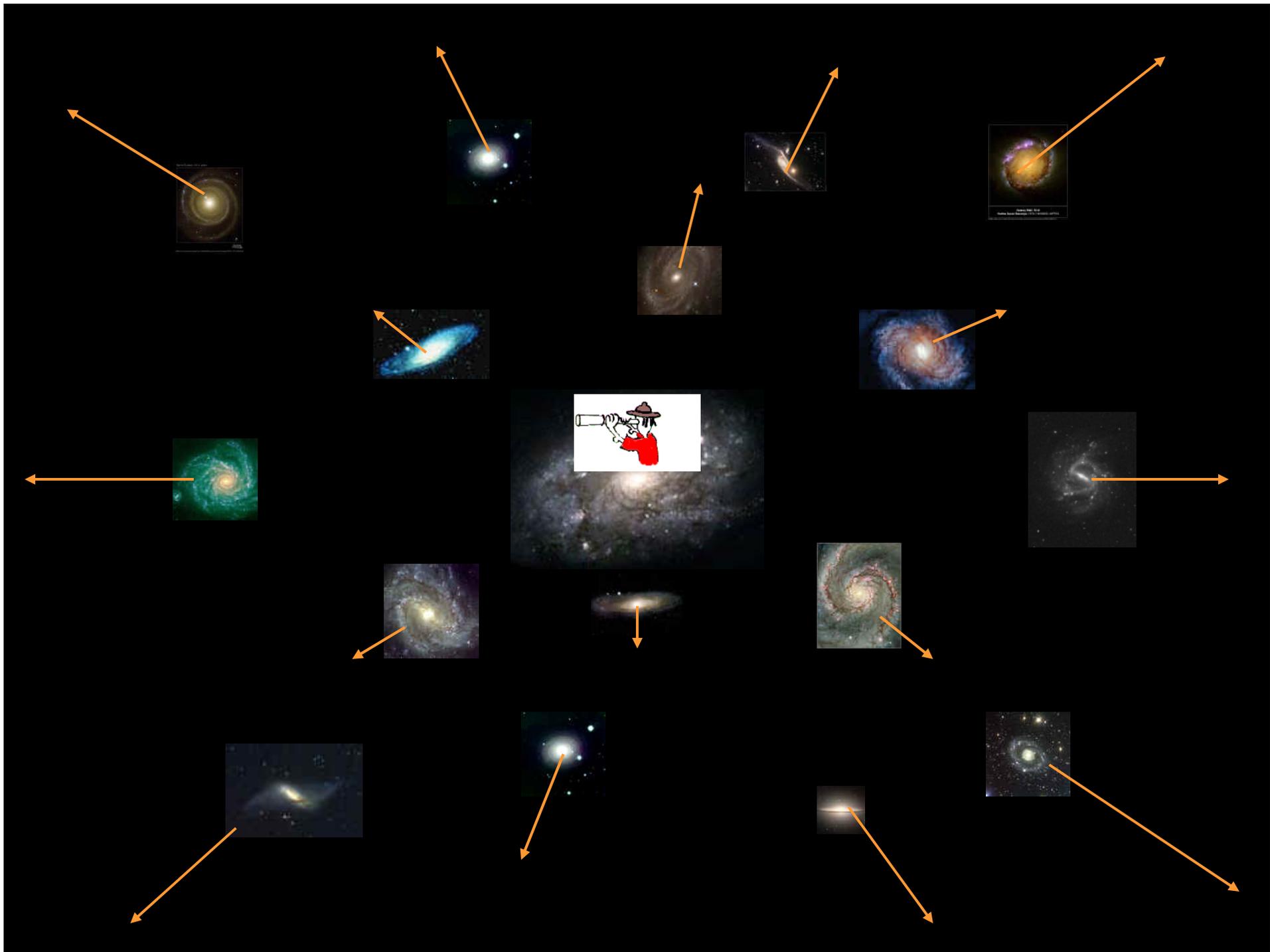
Les amas de galaxies sont **largement dominés** par la Matière Noire !!

Mesure de la “fuite” des galaxies

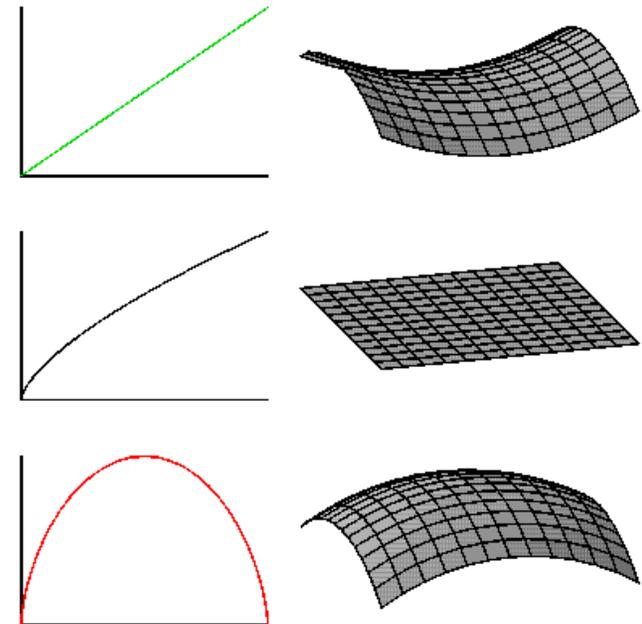
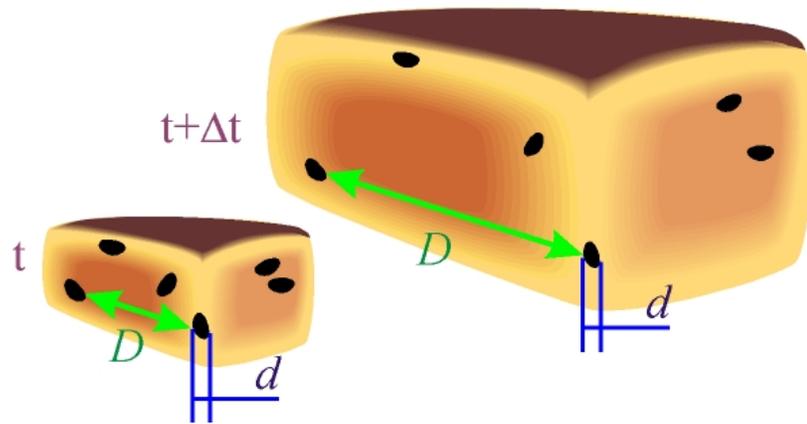
Edwin Hubble
1929



La vitesse de fuite des galaxies est proportionnelle à leur distance : $v = H d$



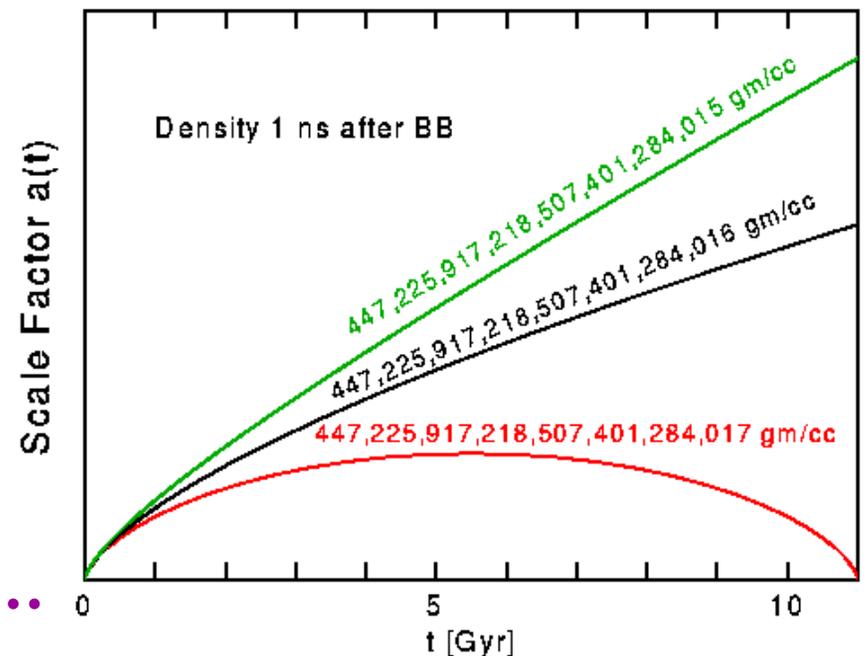
L'espace enfle : L'Univers est en expansion !



- L'Univers est issu d'une phase extrêmement dense et chaude :
le BIG-BANG !!

- La géométrie et l'évolution future de l'Univers dépend de sa densité :
la gravitation va-t-elle l'emporter sur l'expansion ?

la lutte entre l'Espace & la Matière...

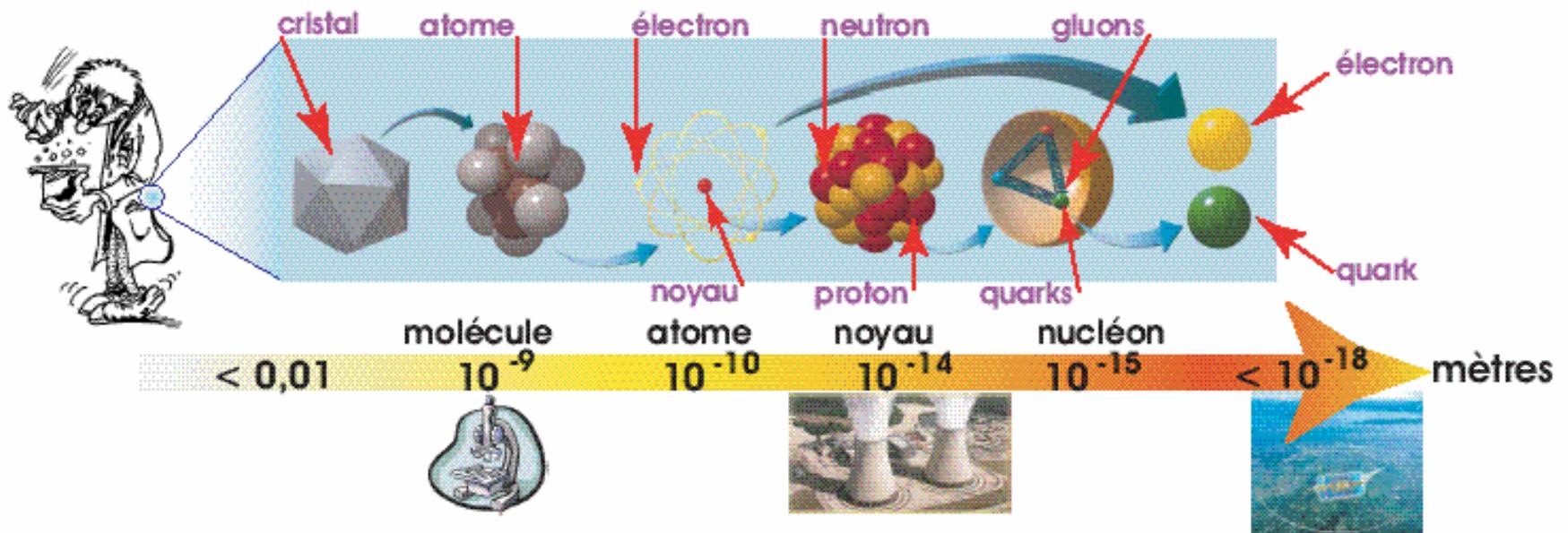


Qu'est ce que la matière ?

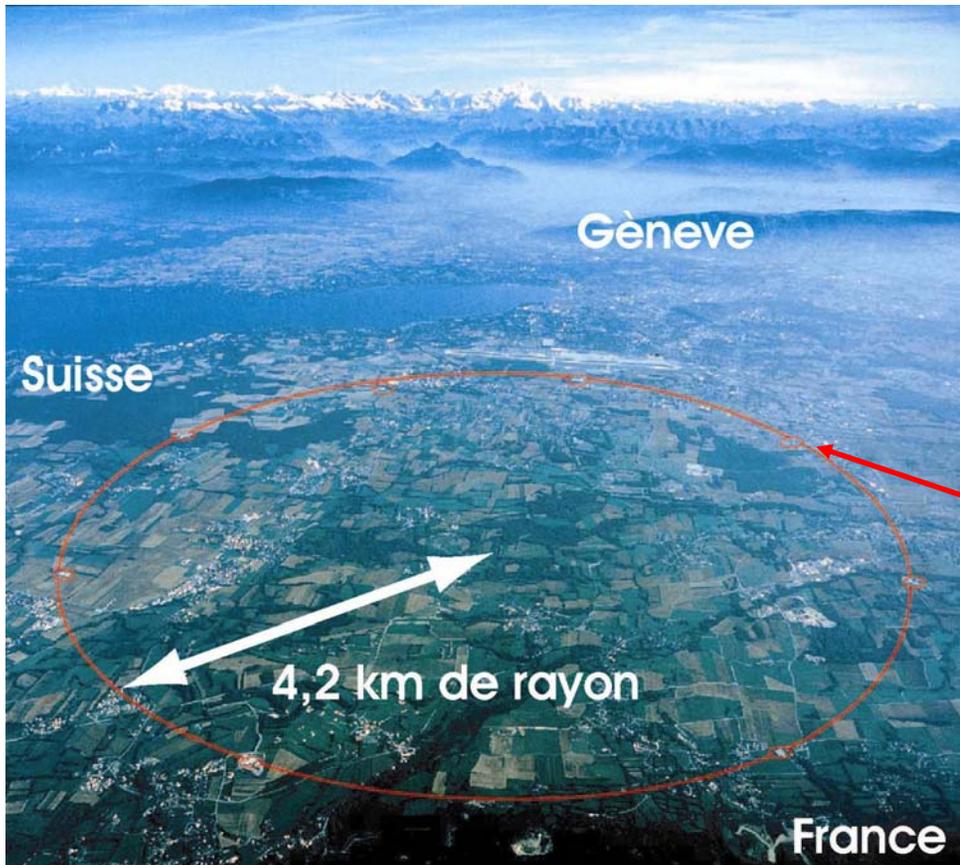
Voyage vers l'infiniment petit...

Les sous-structures de la matière ...

... Un gigantesque jeu de construction constitué de "briques" élémentaires

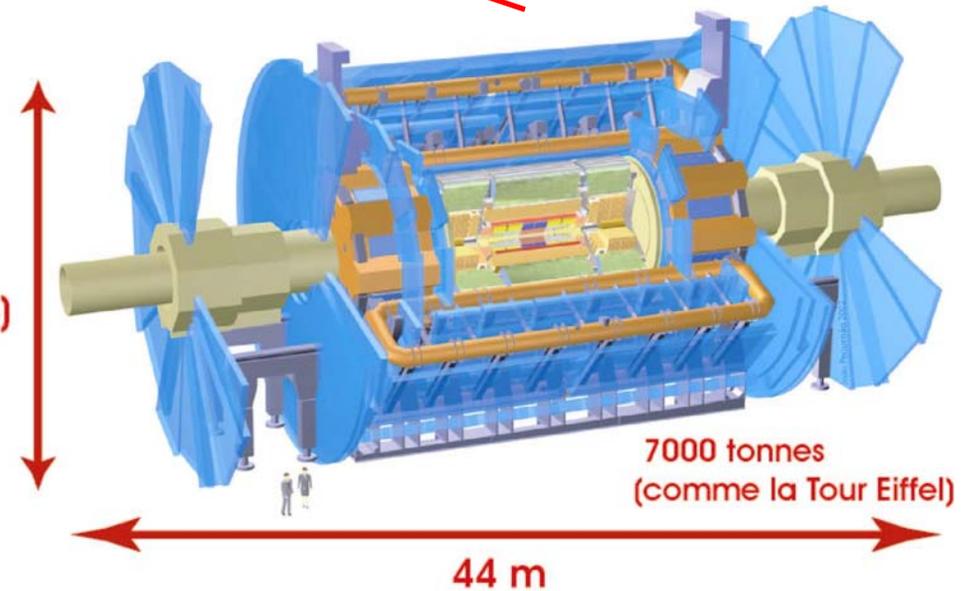


Les accélérateurs LEP/LHC au CERN

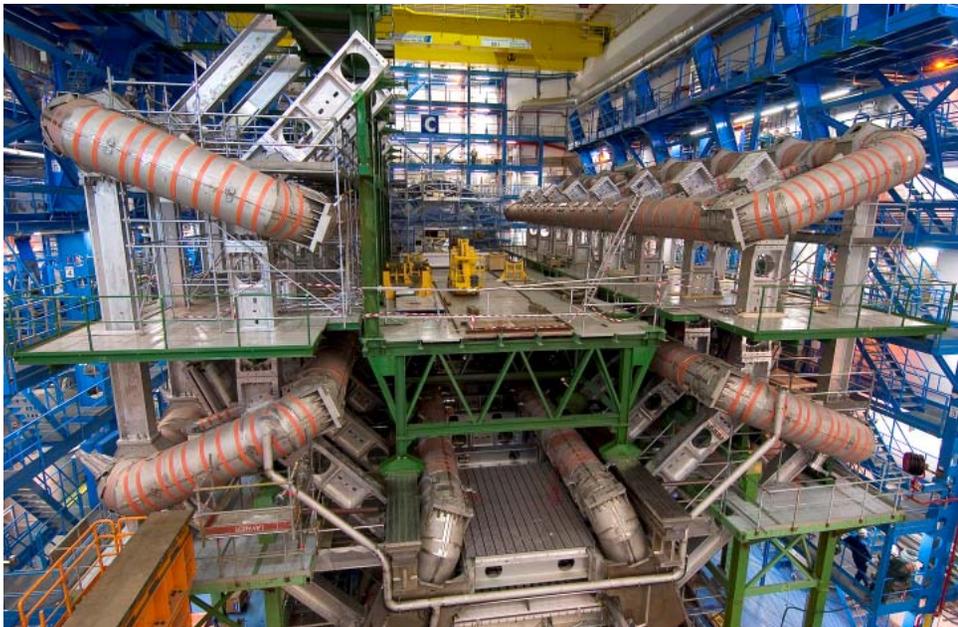
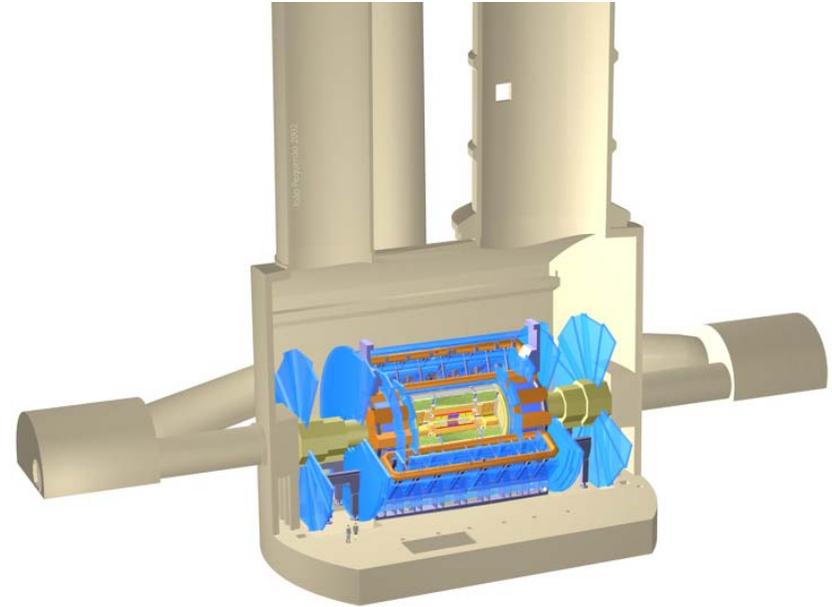


Le détecteur **ATLAS** au LHC

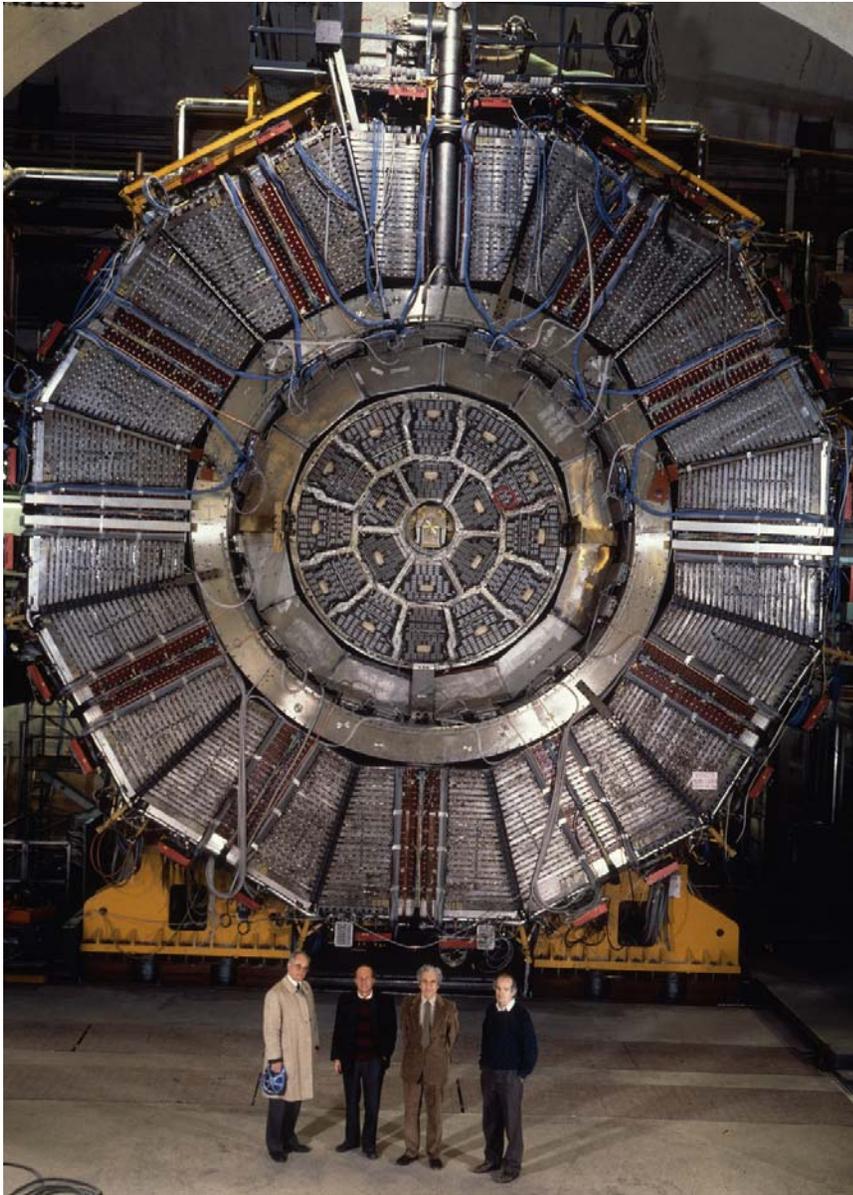
22 m
(8 étages)



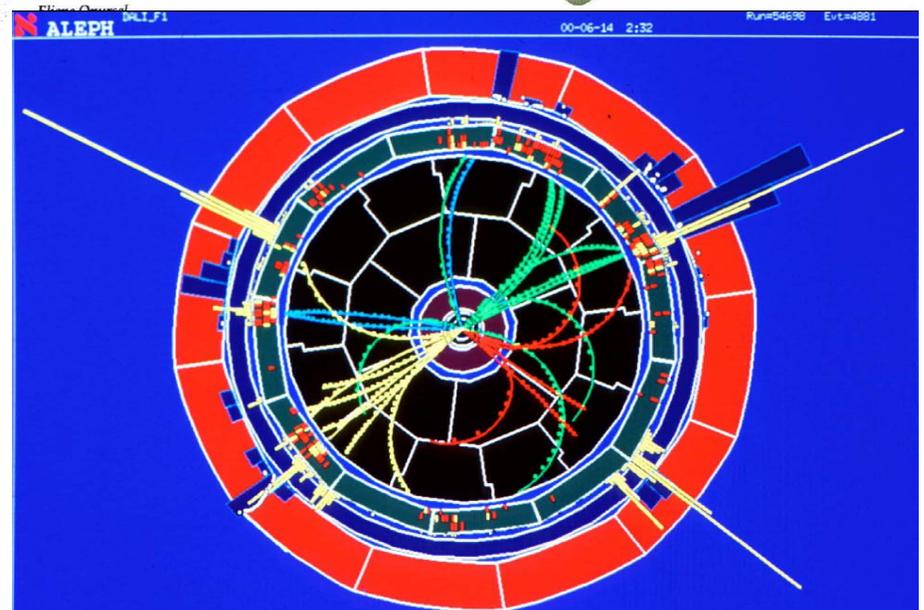
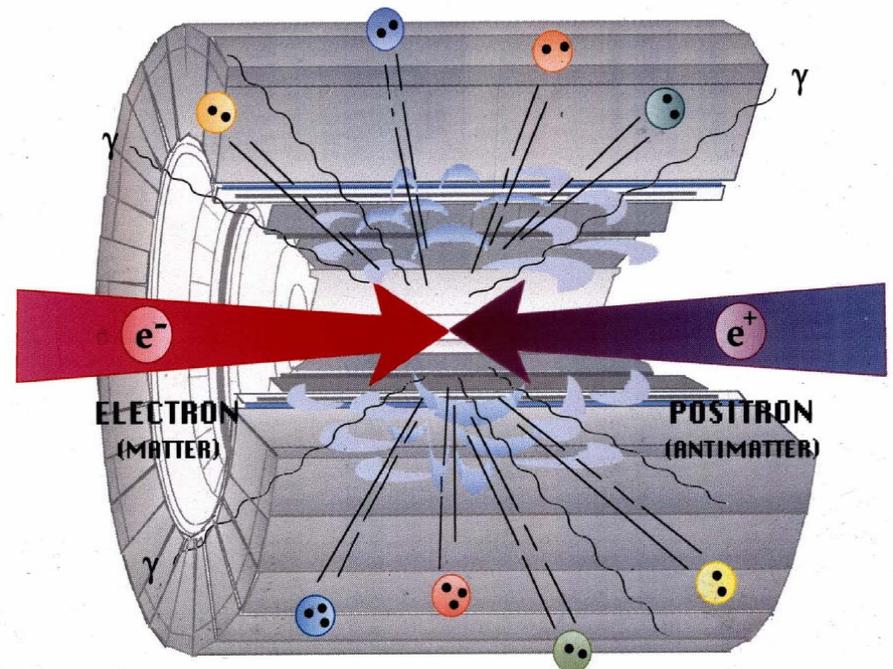
Le détecteur ATLAS au LHC (mise en service en 2007)



Enregistrement d'une annihilation e^+e^- au LEP

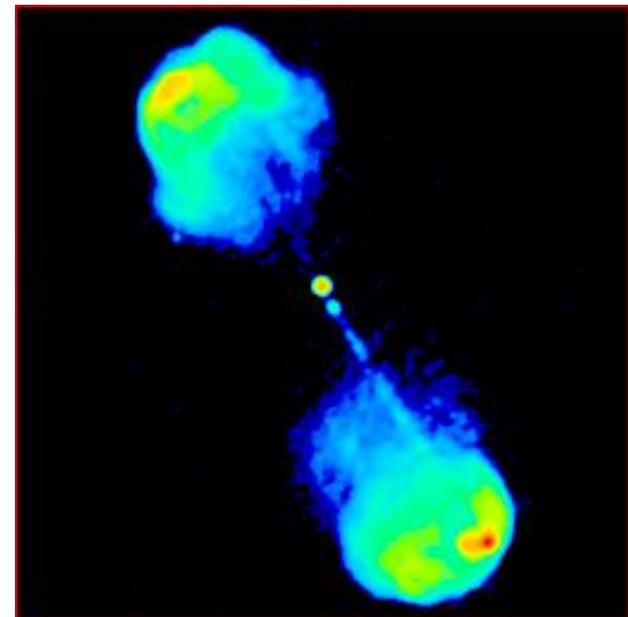
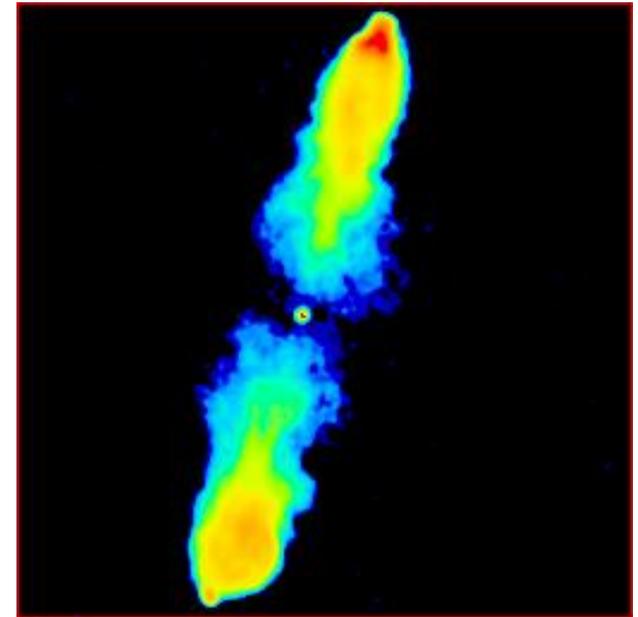
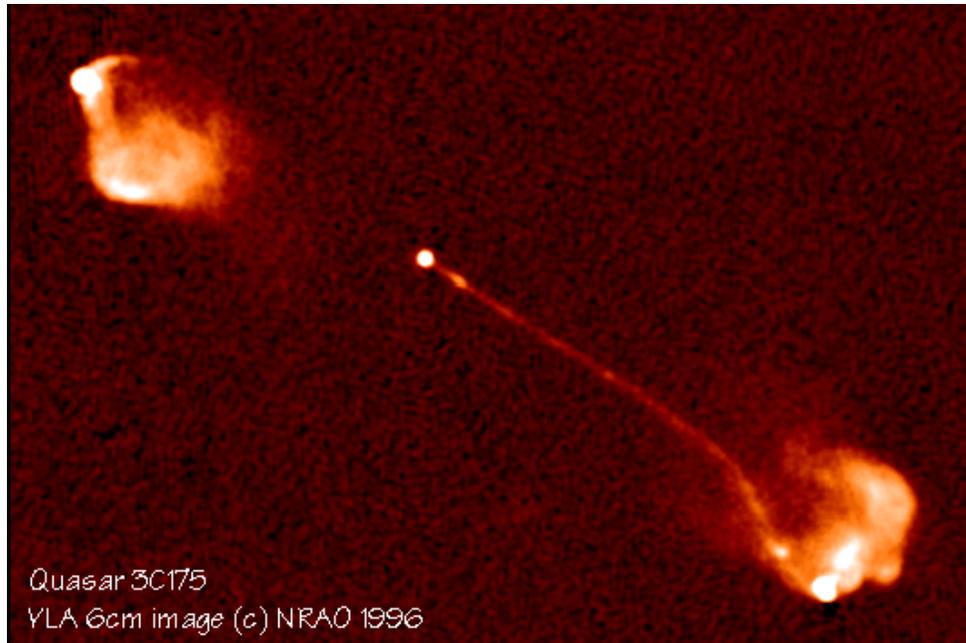


Le détecteur **ALEPH** au LEP



Les Quasars :

des incroyables accélérateurs cosmiques !!



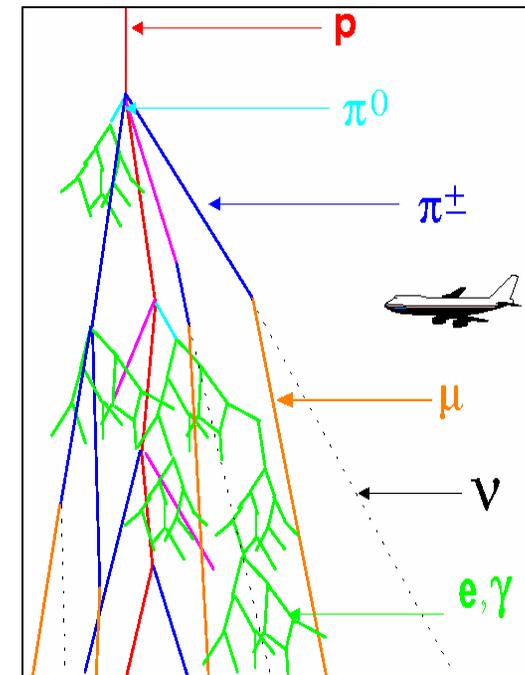
Rayons Cosmiques



**100 ans après la découverte
des rayons cosmiques
on ne connaît
toujours pas leurs origines.**

Primaires:

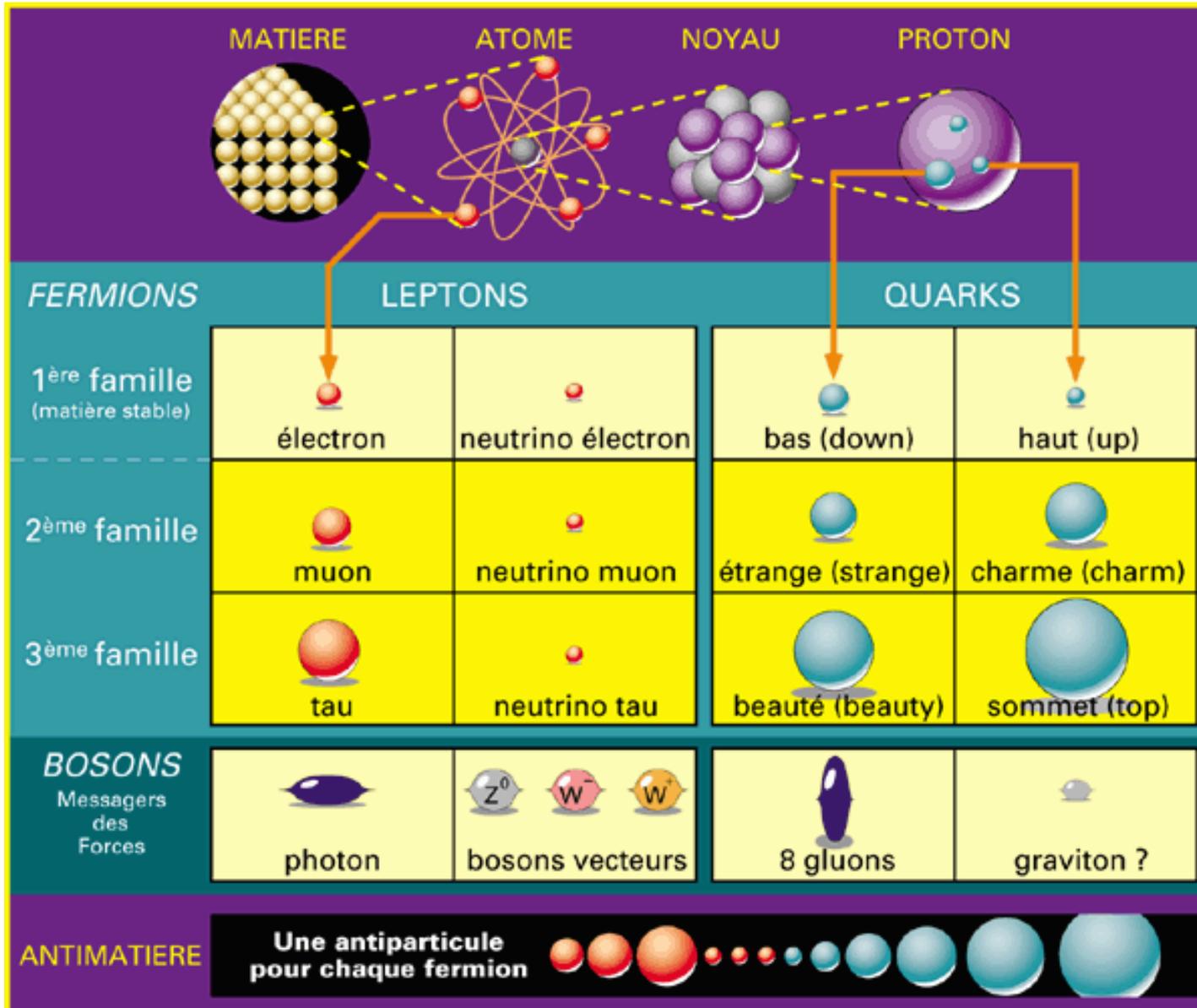
p 80 %, α 9 %, n 8 %
e 2 %, nucléon 1 %
 γ 0.1 %, ν 0.1 % ?



Secondaires niveau terre:

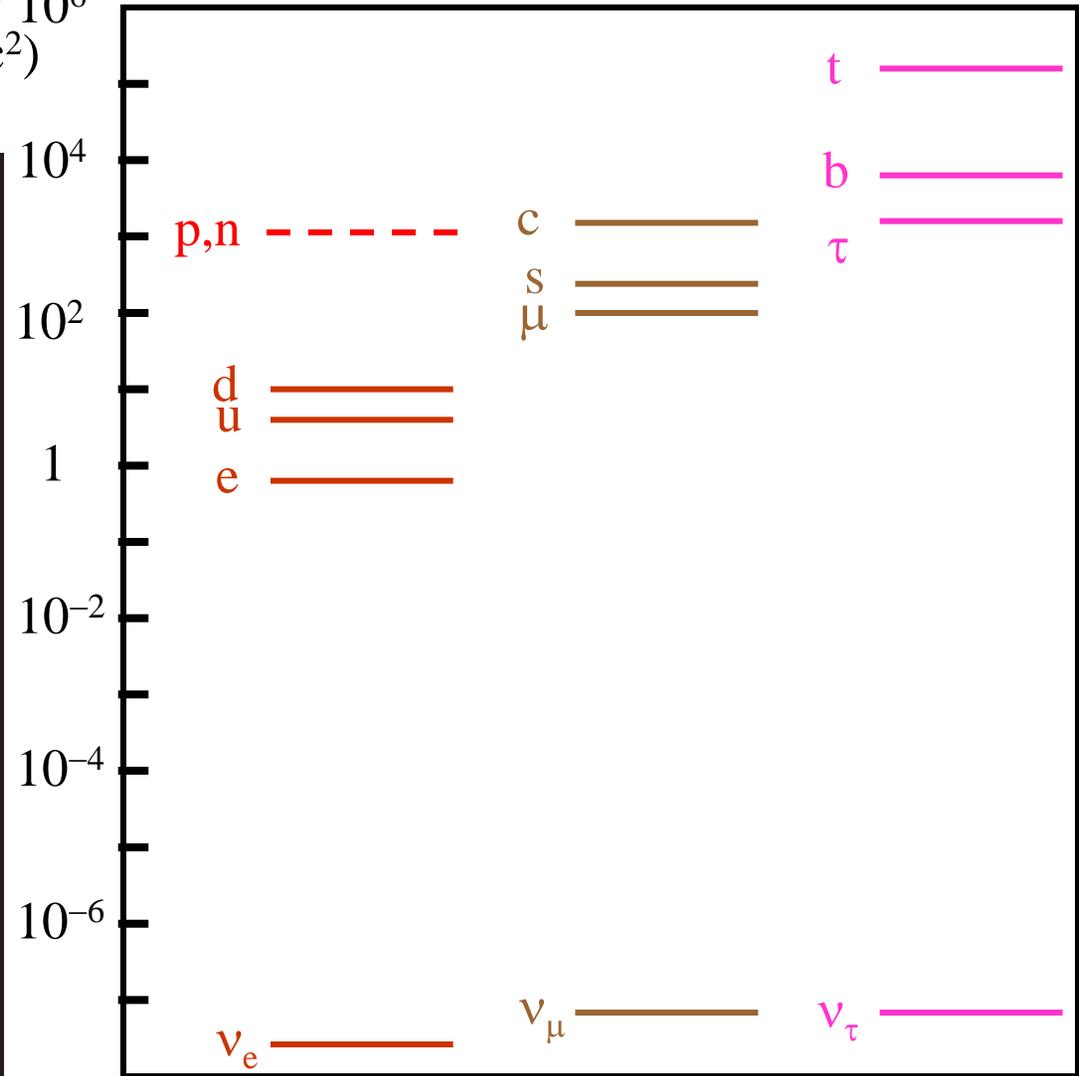
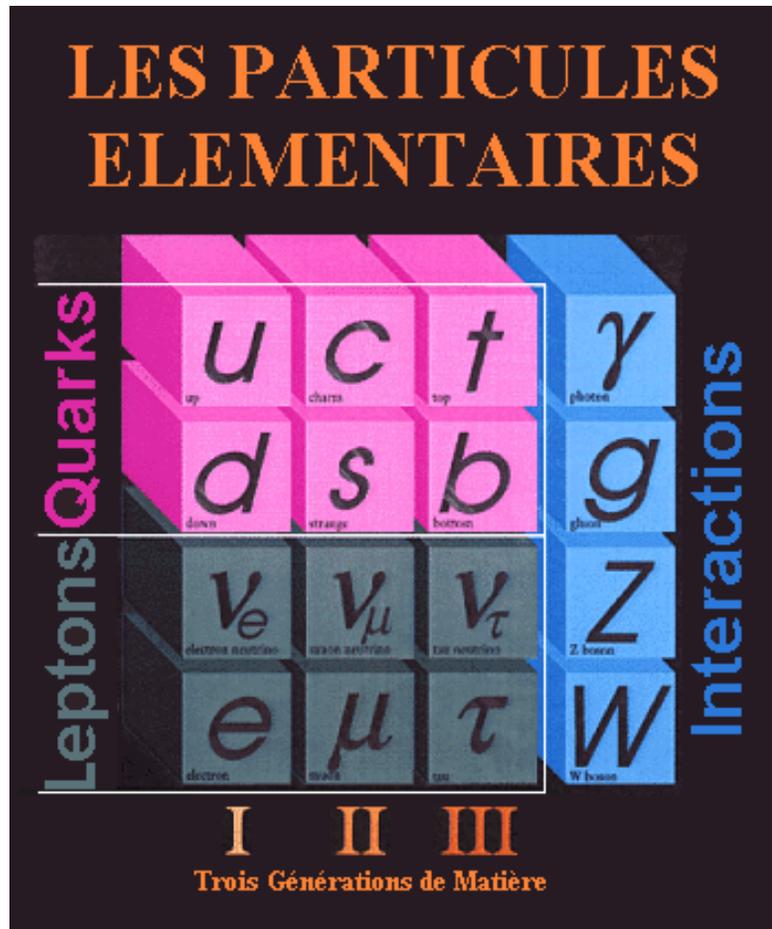
ν 68 %
 μ 30 %
p, n, ... 2 %

Les particules élémentaires

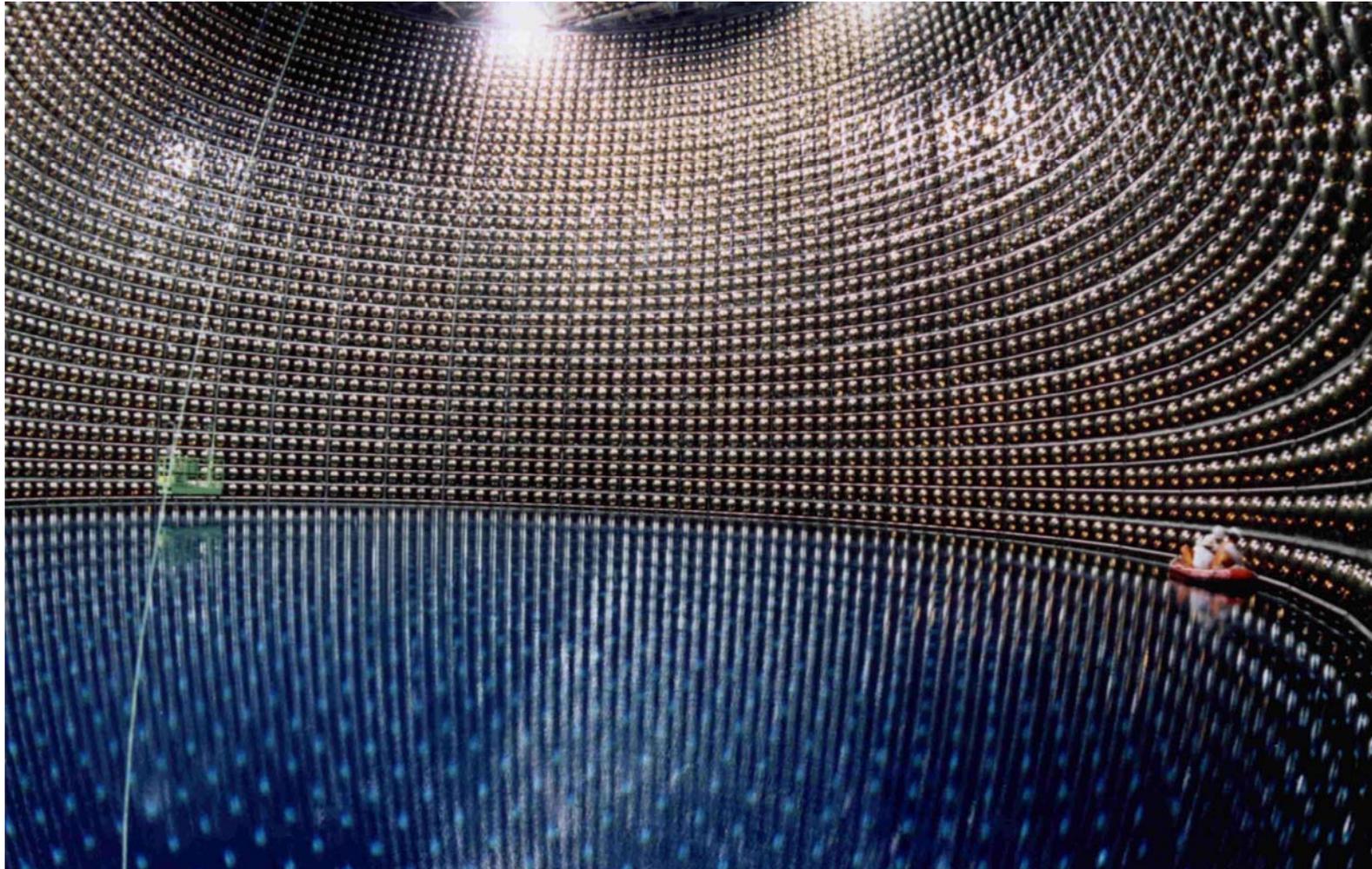


Les masses des particules de matière

Masse 10^6
(MeV/c²)



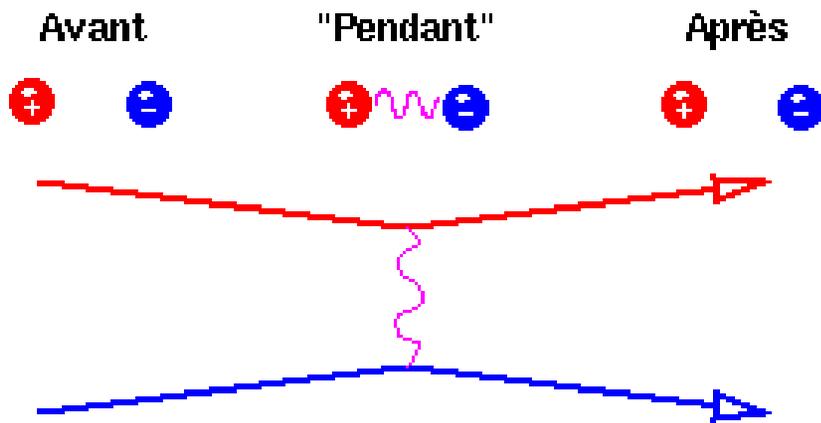
Le détecteur à neutrinos Super-Kamiokande



Mise en évidence de la très faible masse des neutrinos :

$$M_{\nu} \sim 0.1 \text{ eV} = 0.0000000001 M_p$$

Qu'est ce qu'une interaction ?



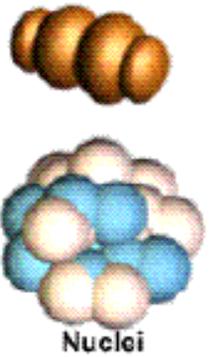
**Les particules de matière
(fermions)**

interagissent en échangeant
des **particules d'interaction**
(bosons)

Les interactions fondamentales

Strong

Gluons (8)



Quarks

Mesons

Baryons

Nuclei



Matter

fermions

Force carriers

bosons

ELEMENTARY PARTICLES

Quarks	u	c	t	γ
	d	s	b	g
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ	Z
	e	μ	τ	W

Force Carriers

I II III
Three Generations of Matter

Weak

Bosons (W,Z)



Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun

1

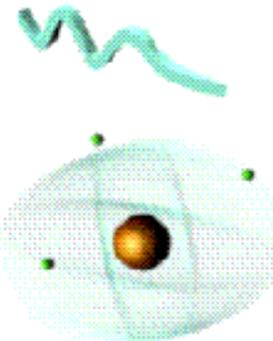
10^{-13}

10^{-2}

10^{-38}

Electromagnetic

Photon



Atoms
Light
Chemistry
Electronics

Gravitational

Graviton ?



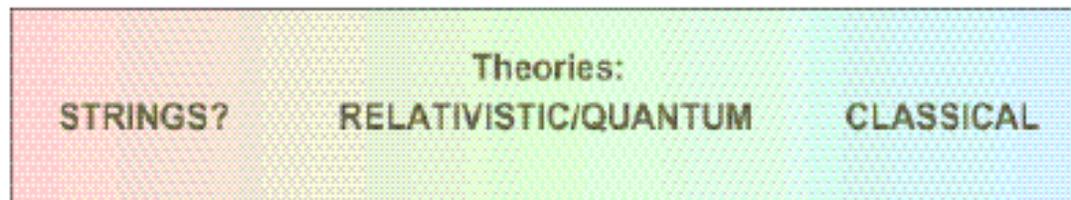
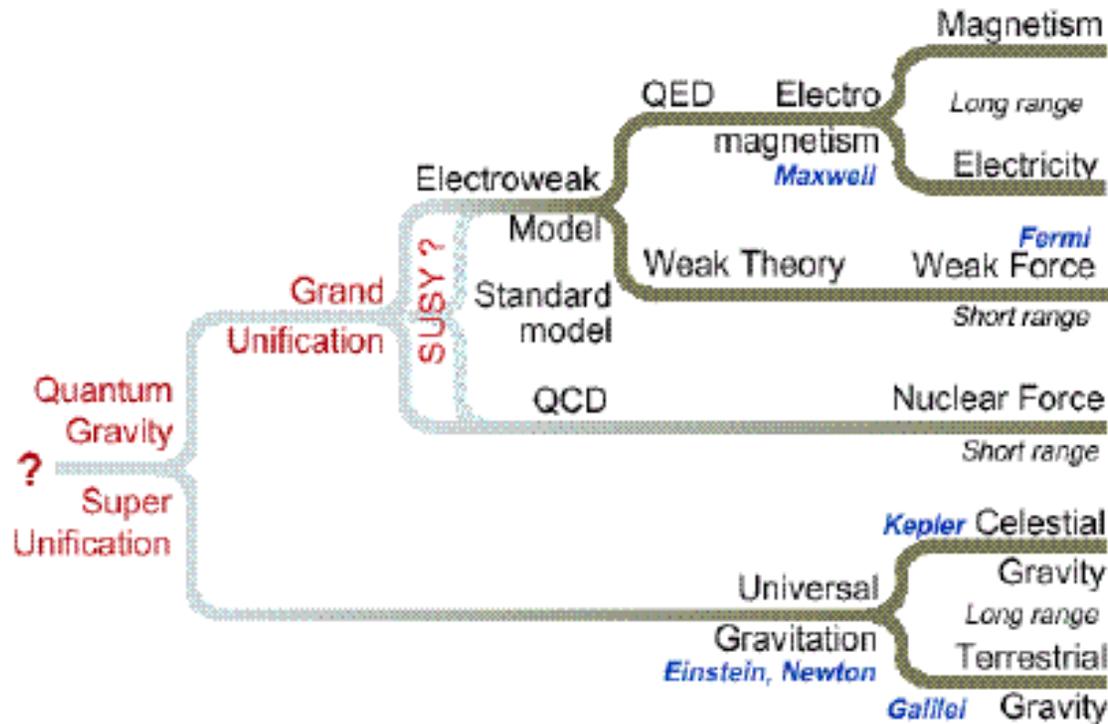
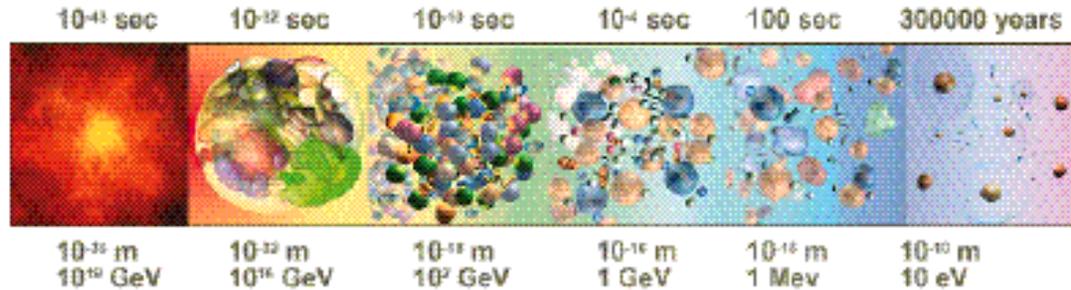
Solar system
Galaxies
Black holes

+ antiparticles

e.g : $p=uud$; $\Lambda^0=uds$; $\Lambda_b^0=udb$

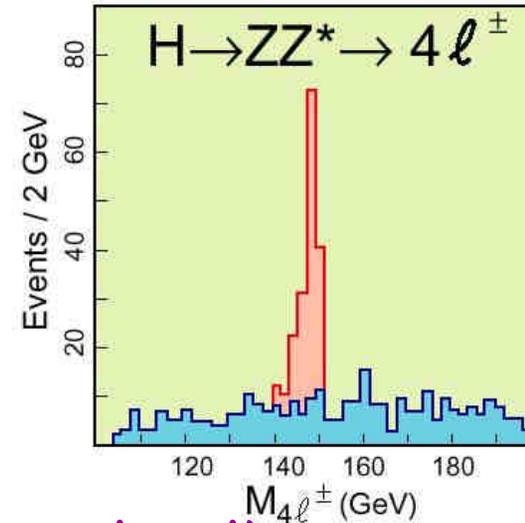
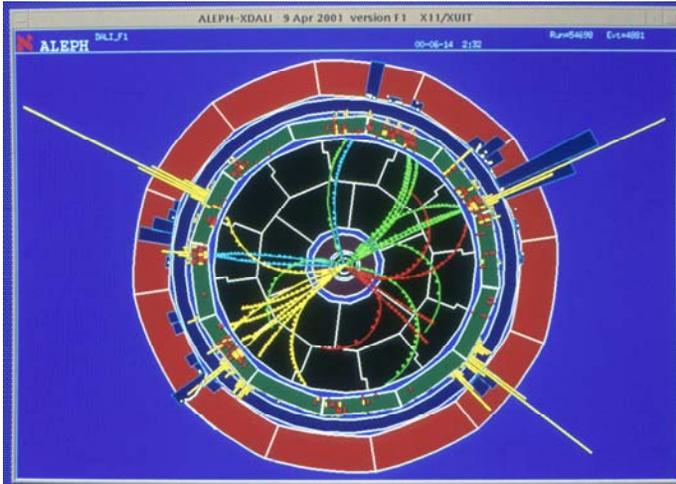
$\pi^+=u\bar{d}$; $\psi=c\bar{c}$; $Y=b\bar{b}$

Unification des interactions

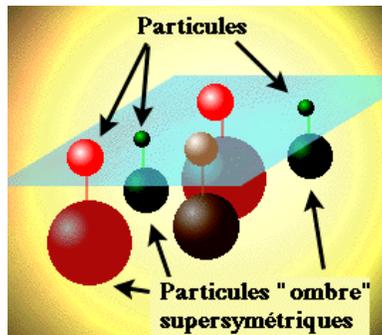


Les grandes questions ouvertes...

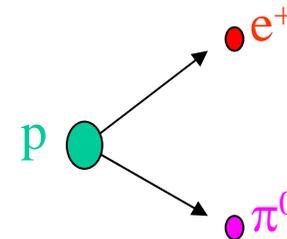
- Origine des masses : **Boson de Higgs** $M_H \sim 200 M_p$



- Hiérarchie des masses, asymétrie matière-antimatière :
Grande unification, Supersymétrie, nouvelles particules supersymétriques, désintégration du proton

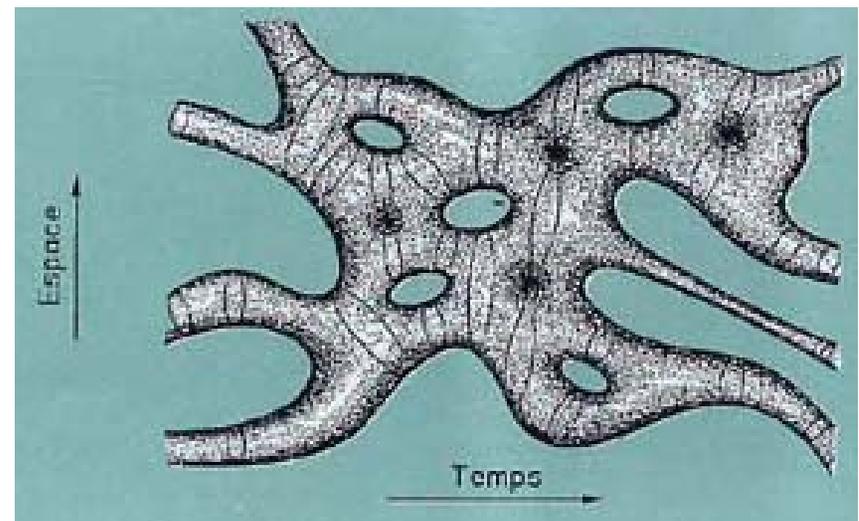
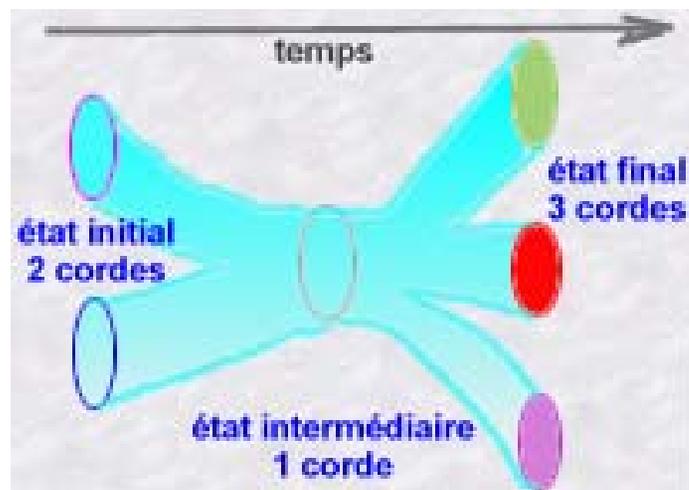
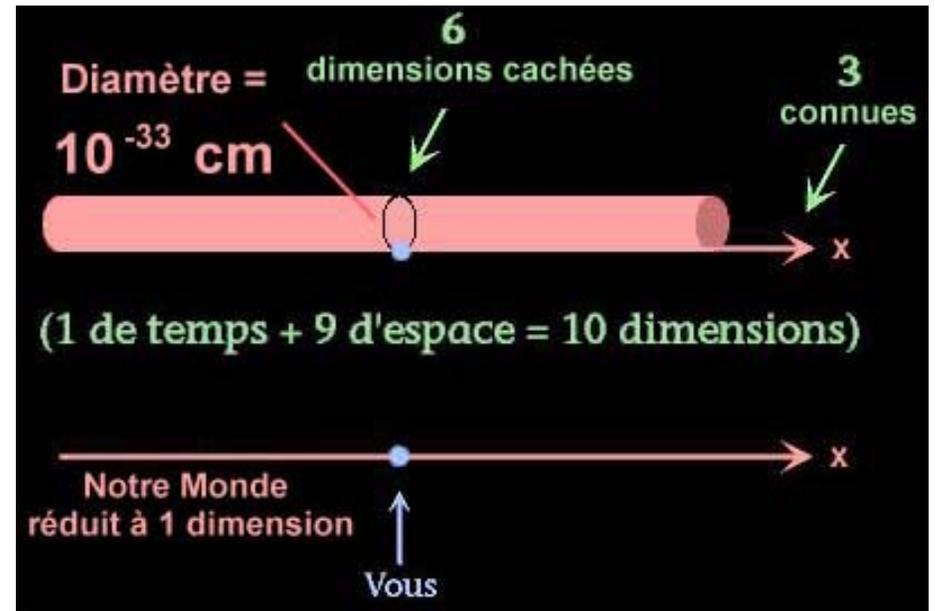
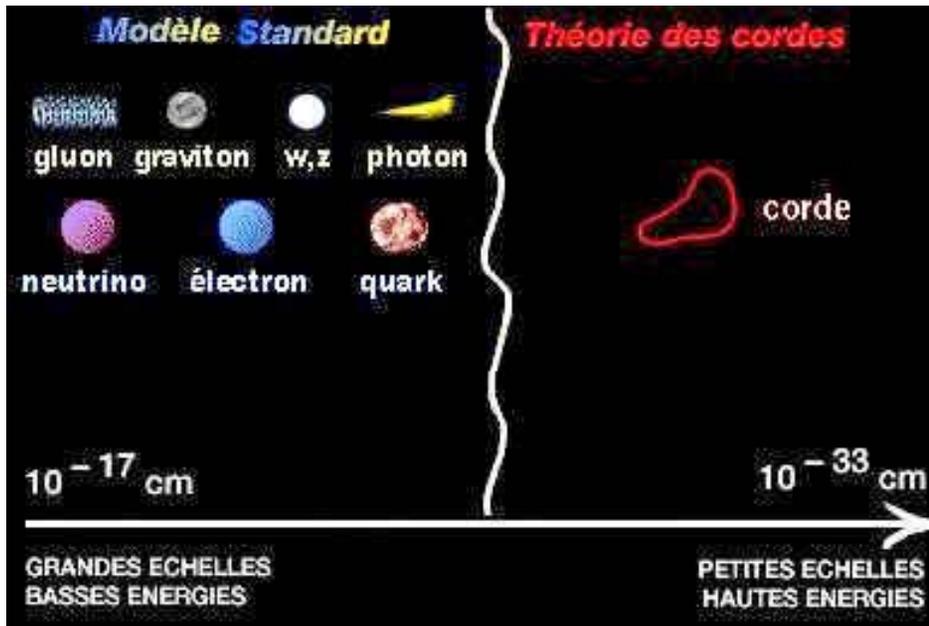


$$M_{\text{SUSY}} \sim 100\text{-}1000 M_p$$

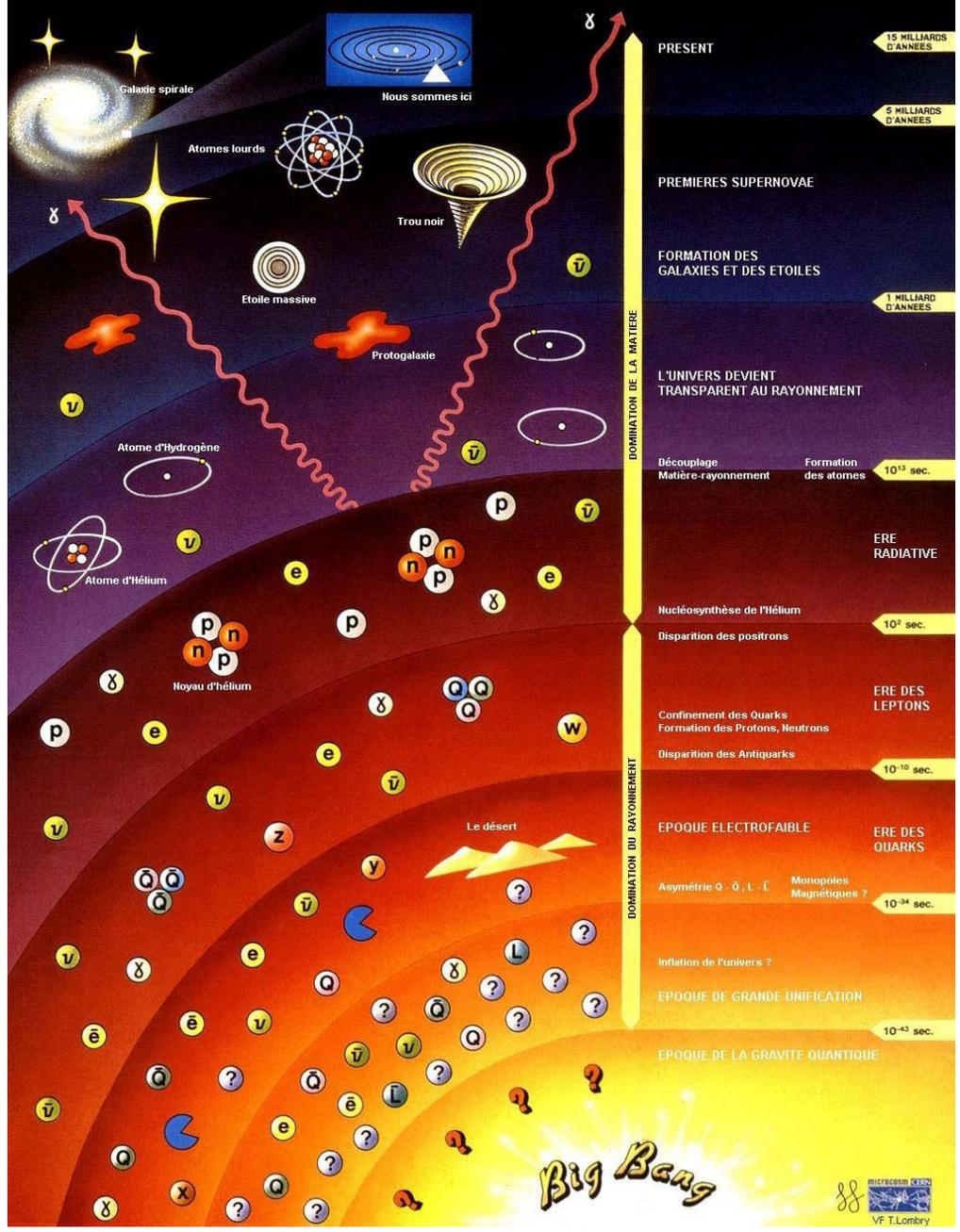


Durée de vie du proton
 $> 10^{33}$ ans !

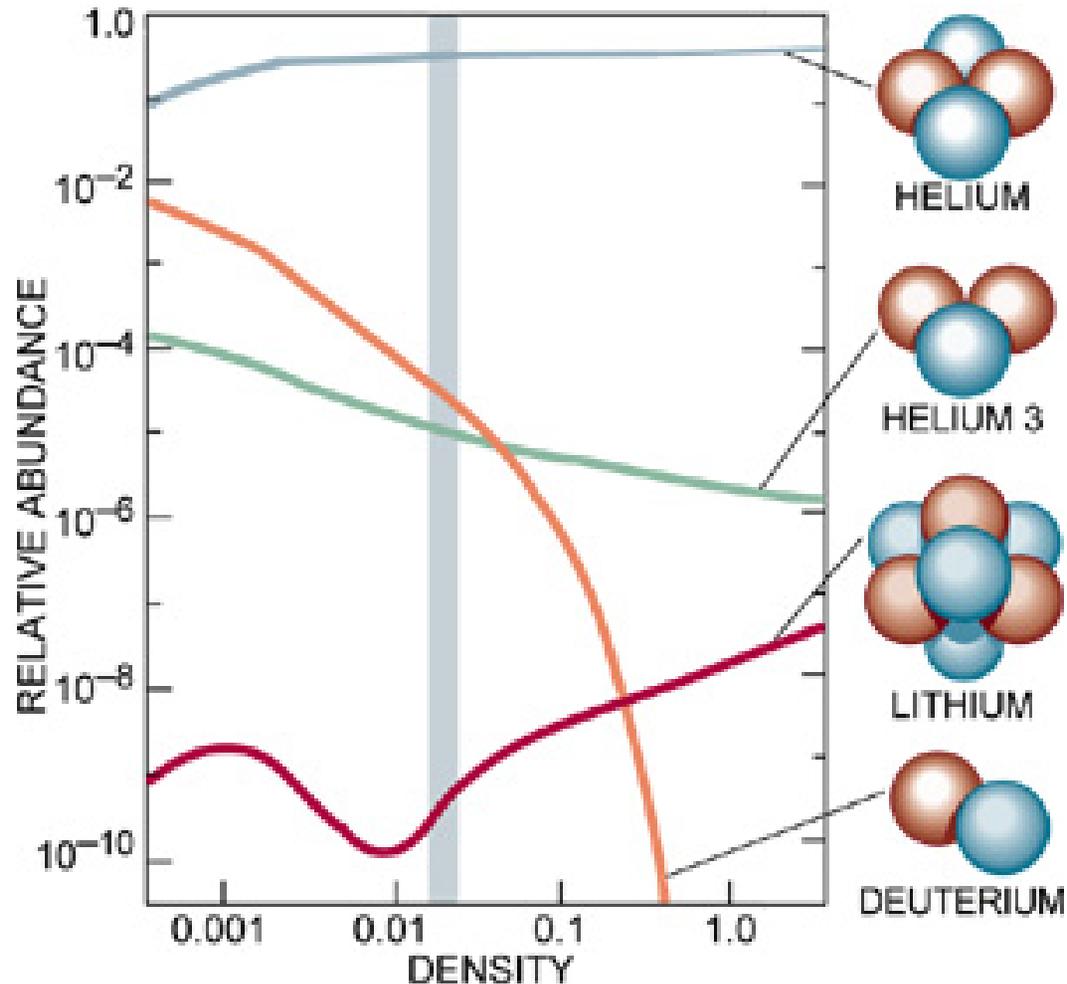
- Unification de la gravitation dans le monde quantique :
Supercordes, Univers à 10 dimensions...



L'Histoire de L'Univers



La formation des éléments légers (nucléosynthèse primordiale)



Masse totale protons+neutrons =

15 % de la matière de l'Univers !

Quelle est la nature de la Matière Noire de l'Univers ?

- **Des nuages de gaz froids, des planètes, des trous noirs ?**

Non, car composés de matière ordinaire (atomes = protons, neutrons)...

- **Des neutrinos ?**

Bonne idée !

Il y a **~300 neutrinos reliques du Big-Bang par cm^3** dans tout l'Univers, donc **BEAUCOUP !**

...mais trop légers : **1-2%** de la matière...

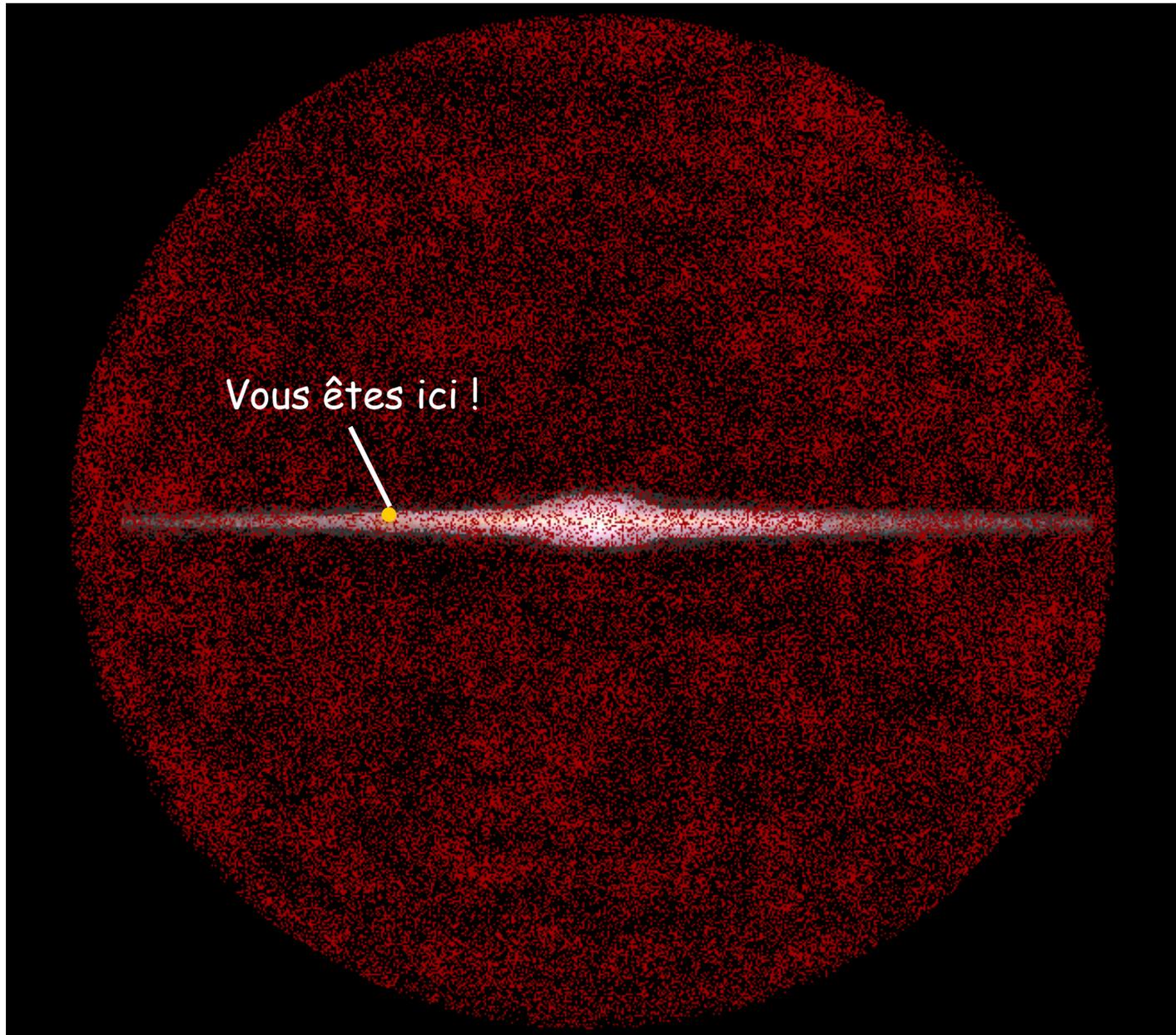
- **Une nouvelle particule ??**

La particule supersymétrique la plus légère, **le neutralino χ** , doit être **stable et relique** du Big-Bang

on attend $M_\chi \sim 100 M_p$: **85% de la matière !!**

Le neutralino est le candidat idéal !
cherchons-le !

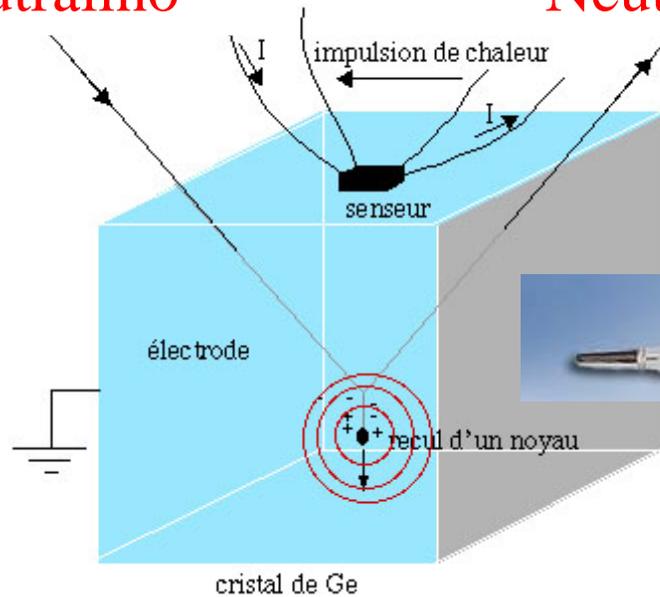
La Voie Lactée et son halo de Matière Noire



Détection directe de la Matière Noire

Neutralino

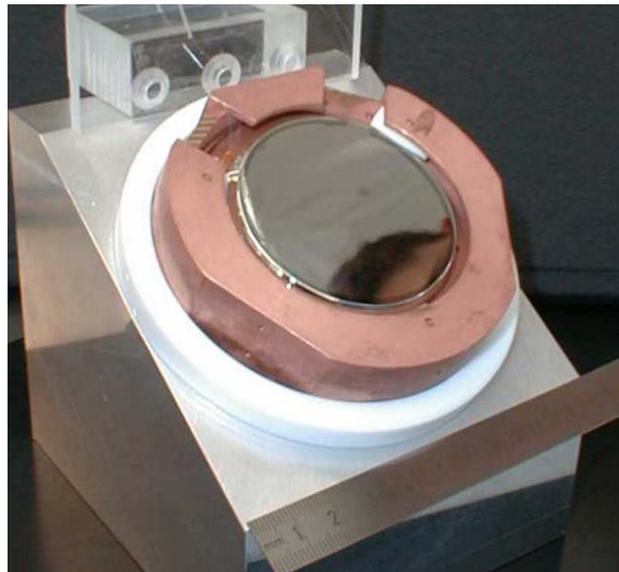
Neutralino diffusé



Cristal refroidi à 0.01°K
soit environ -273°C

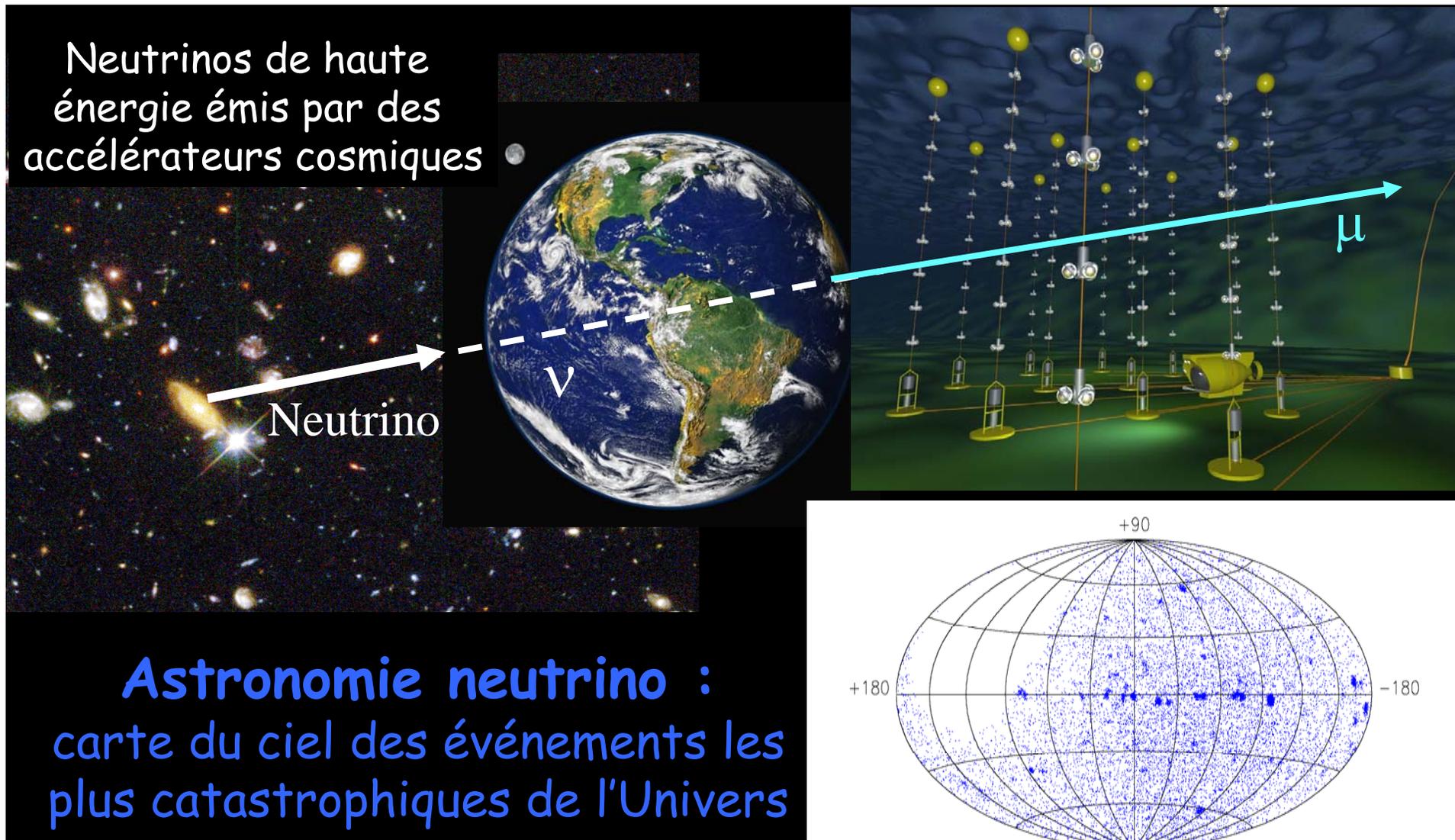


Mesure de la **chaleur** due
à la collision du neutralino !!



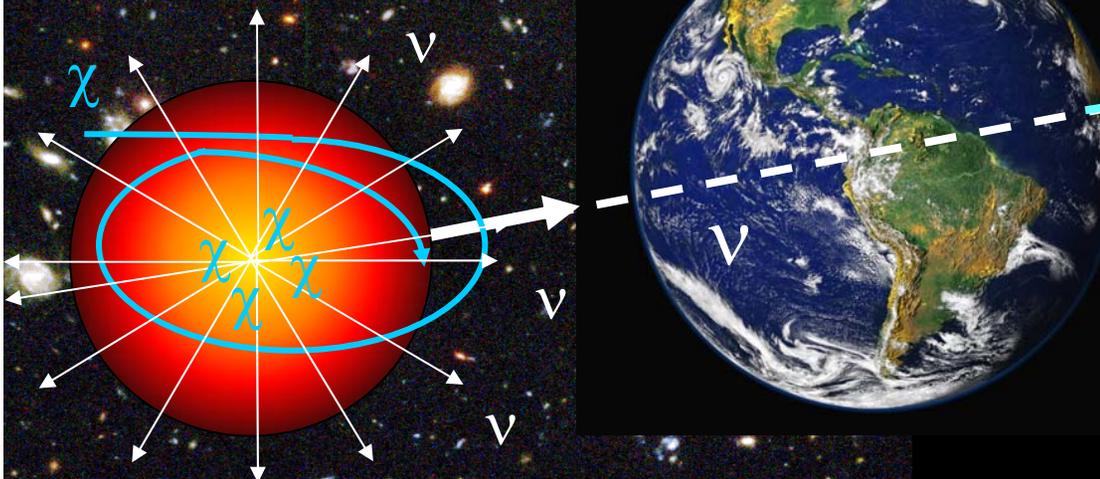
Cristal en Germanium de
l'expérience française
EDELWEISS
dans le Laboratoire
Souterrain de Modane

Les télescopes à neutrinos : une nouvelle fenêtre sur l'Univers...

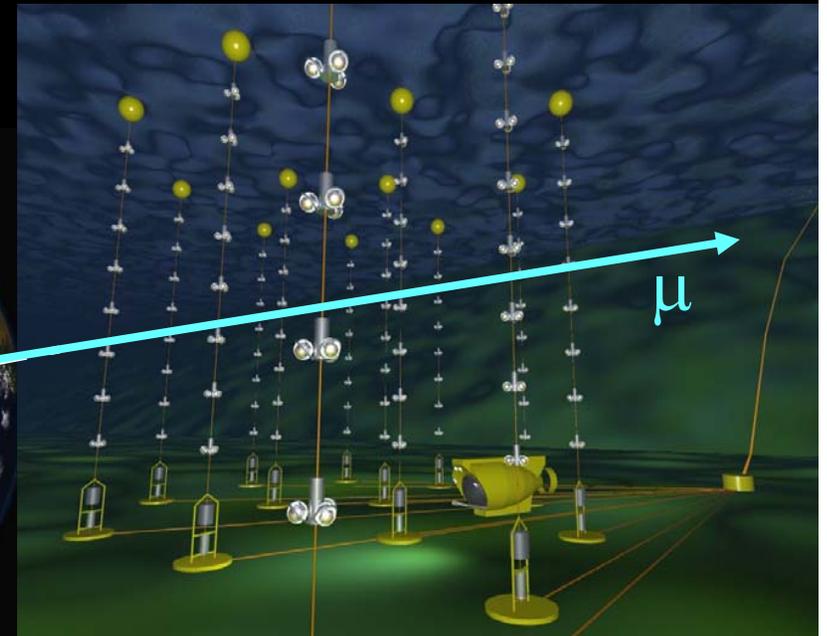


Détection indirecte de **Matière Noire** avec un télescope à neutrino

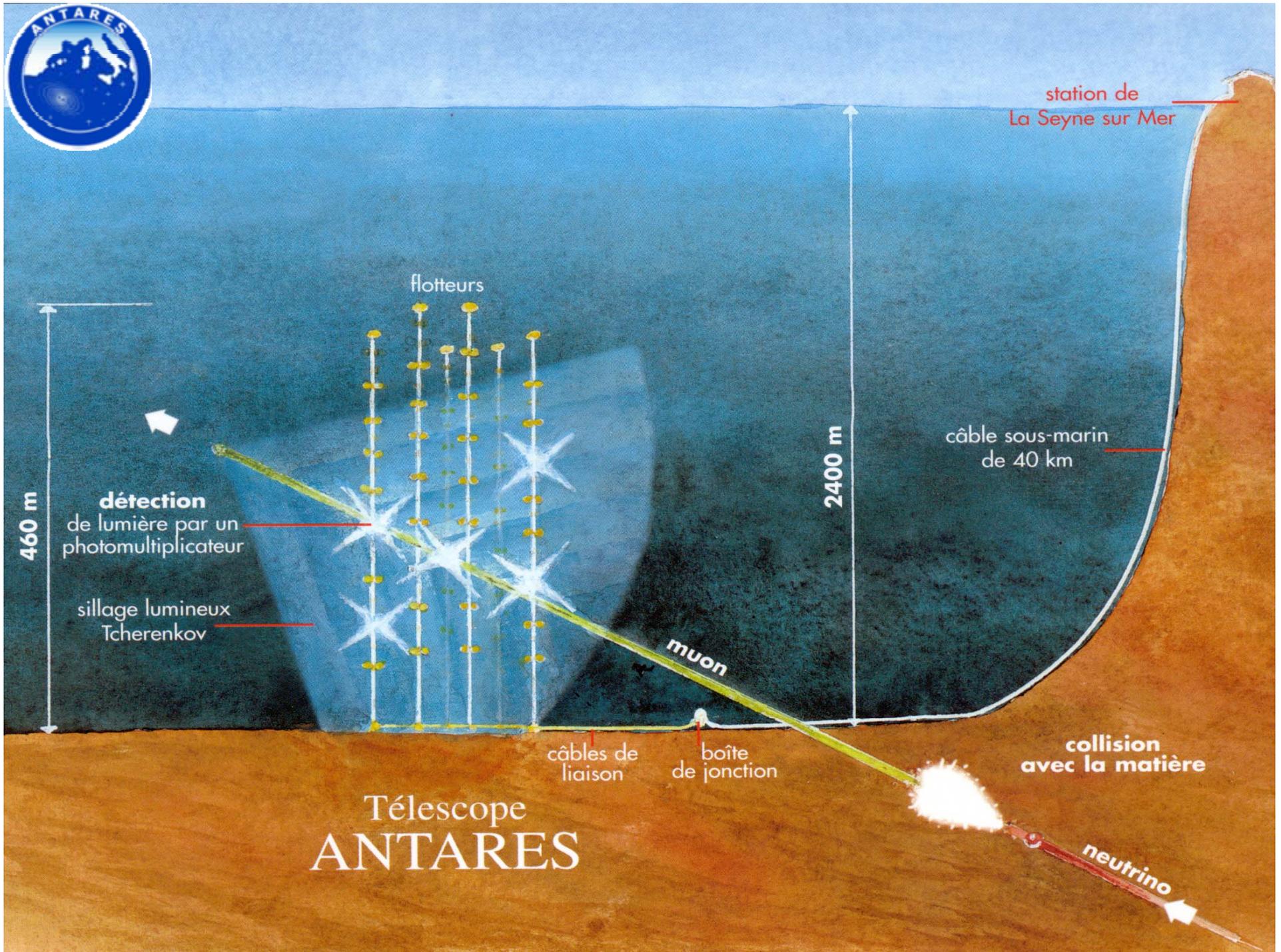
Neutralinos
capturés dans les
corps célestes



ν Annihilations de neutralinos
produit un flux de
neutrinos de haute énergie



Sources potentielles $\chi\chi \rightarrow \nu$:
Soleil, noyau de la Terre,
Centre de la Galaxie





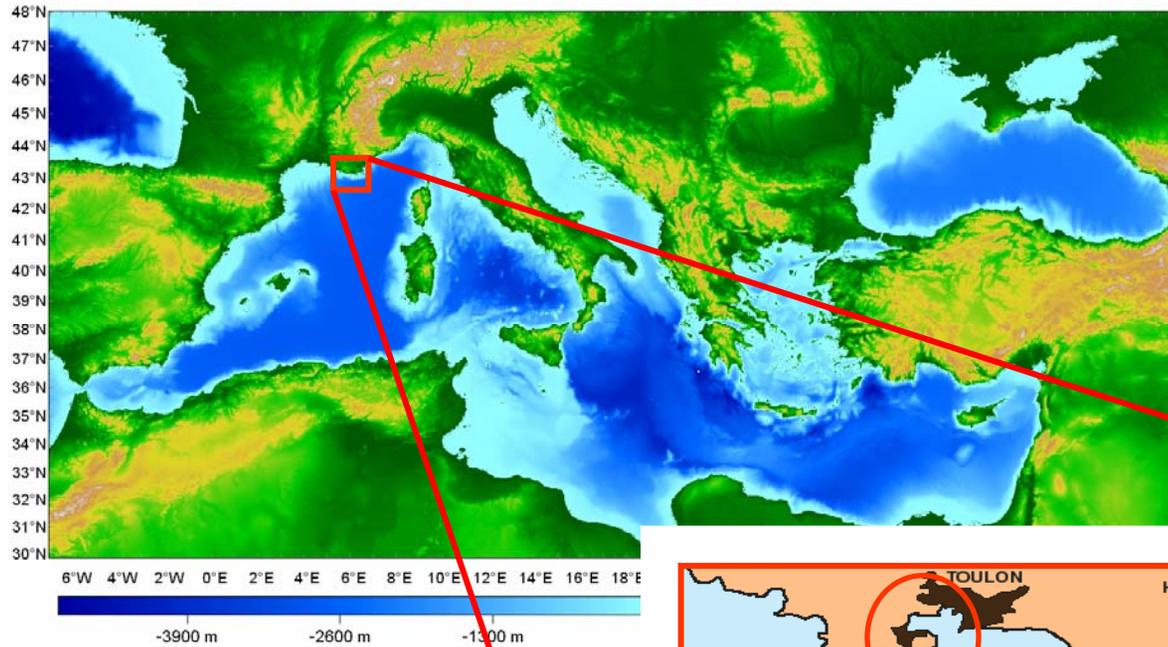
Le détecteur ANTARES

Construction au CPPM
Installation 2005-2007



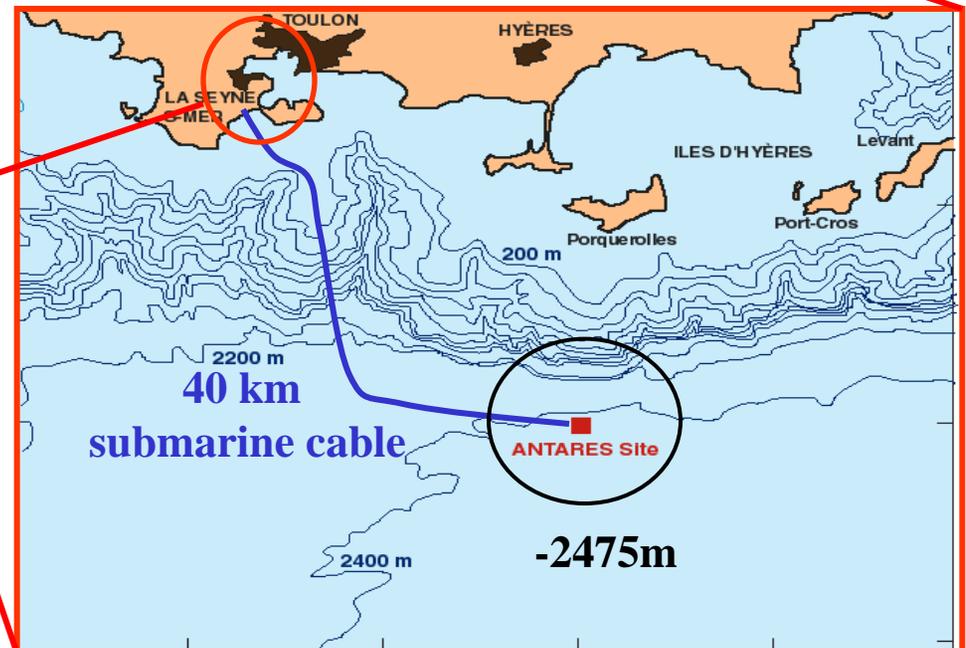


Le site ANTARES



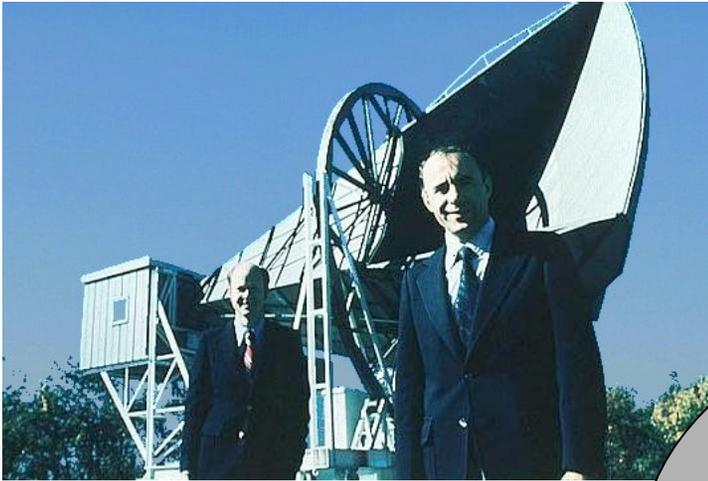
Institut Michel Pacha

**Station de contrôle du
détecteur ANTARES
à La Seyne/Mer**



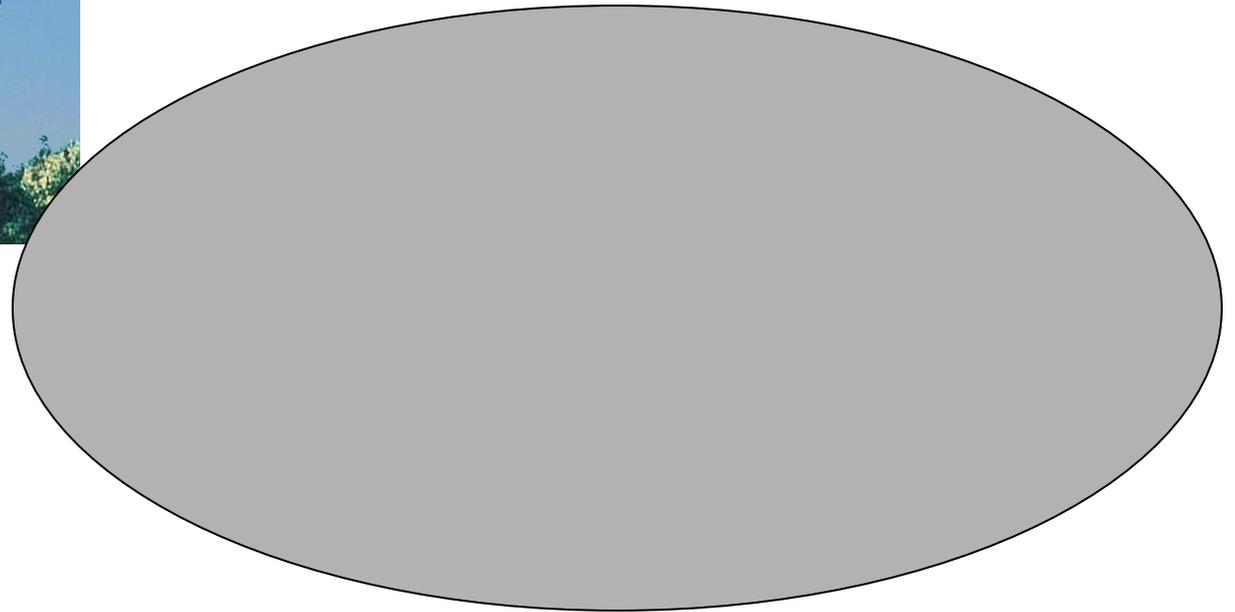
La première lueur de l'Univers

Penzias et Wilson – 1965



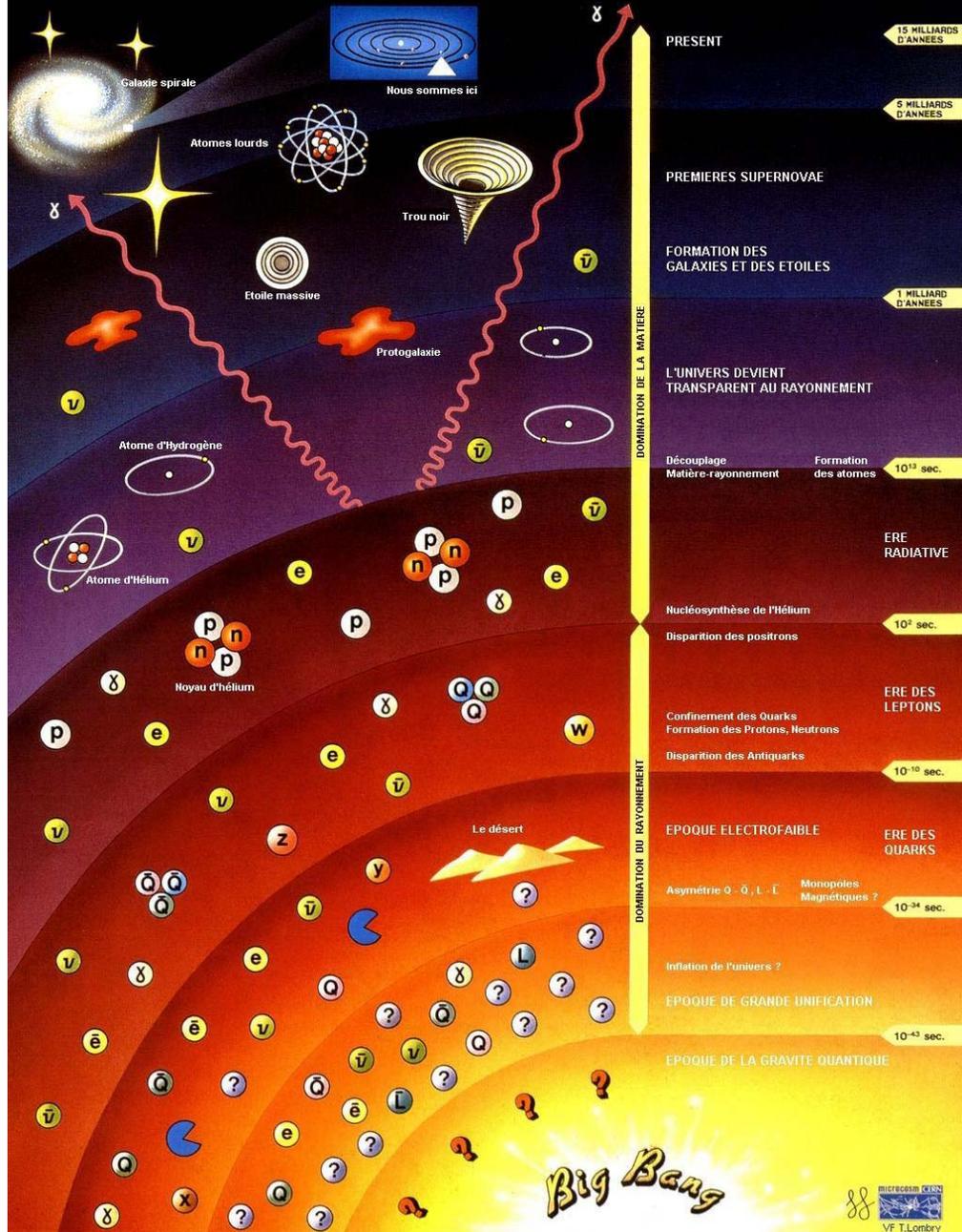
**Découverte du
rayonnement cosmologique :**

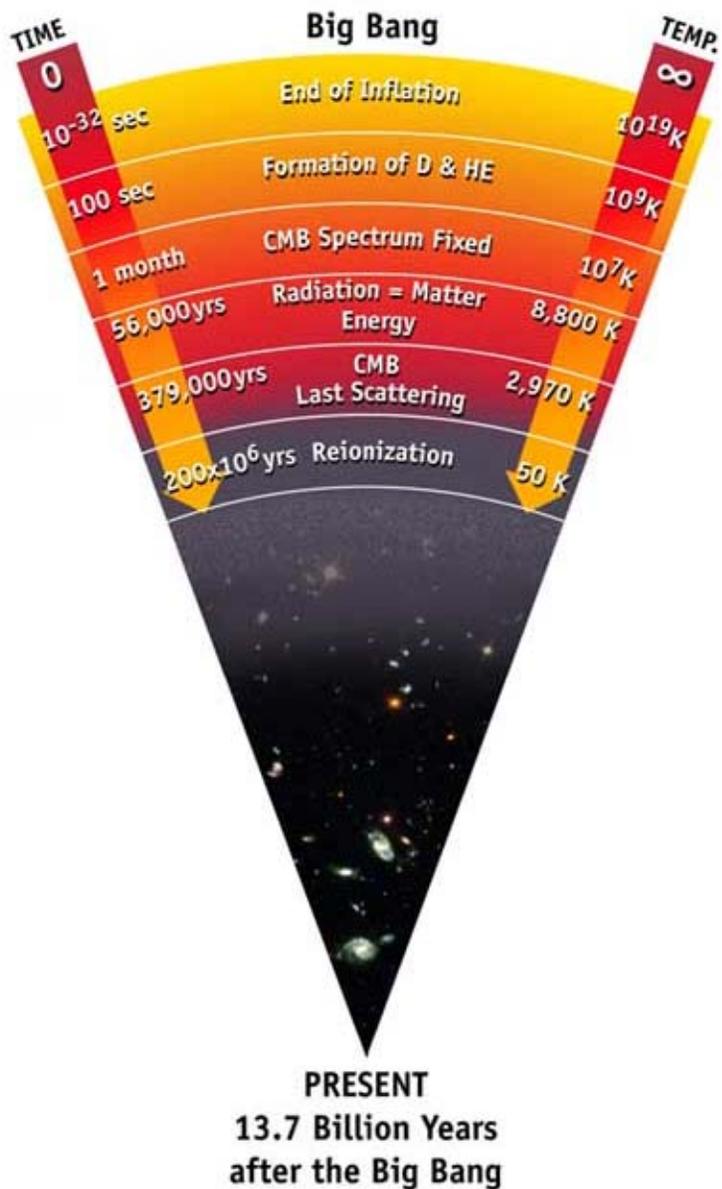
carte du ciel en ondes micro-métriques



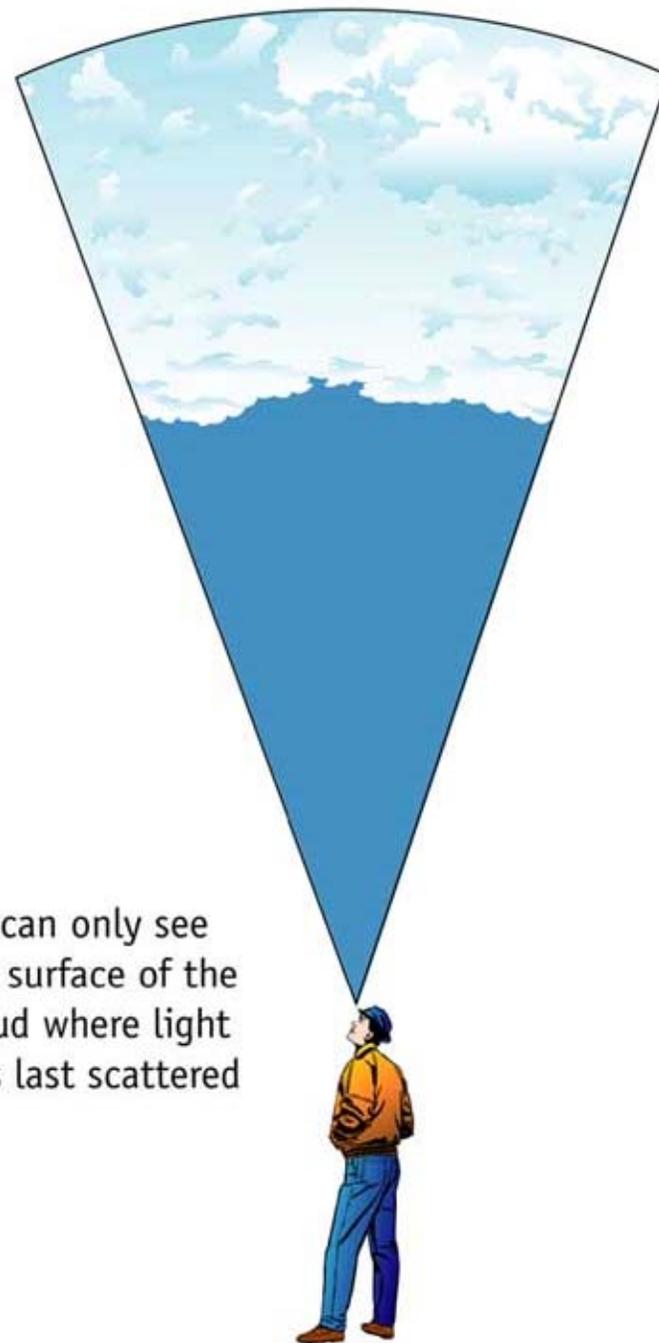
**L'Univers à une température uniforme
de $2.7^{\circ}\text{K} \sim -270^{\circ}\text{C}$: signature du Big-Bang !**

L'Histoire de L'Univers



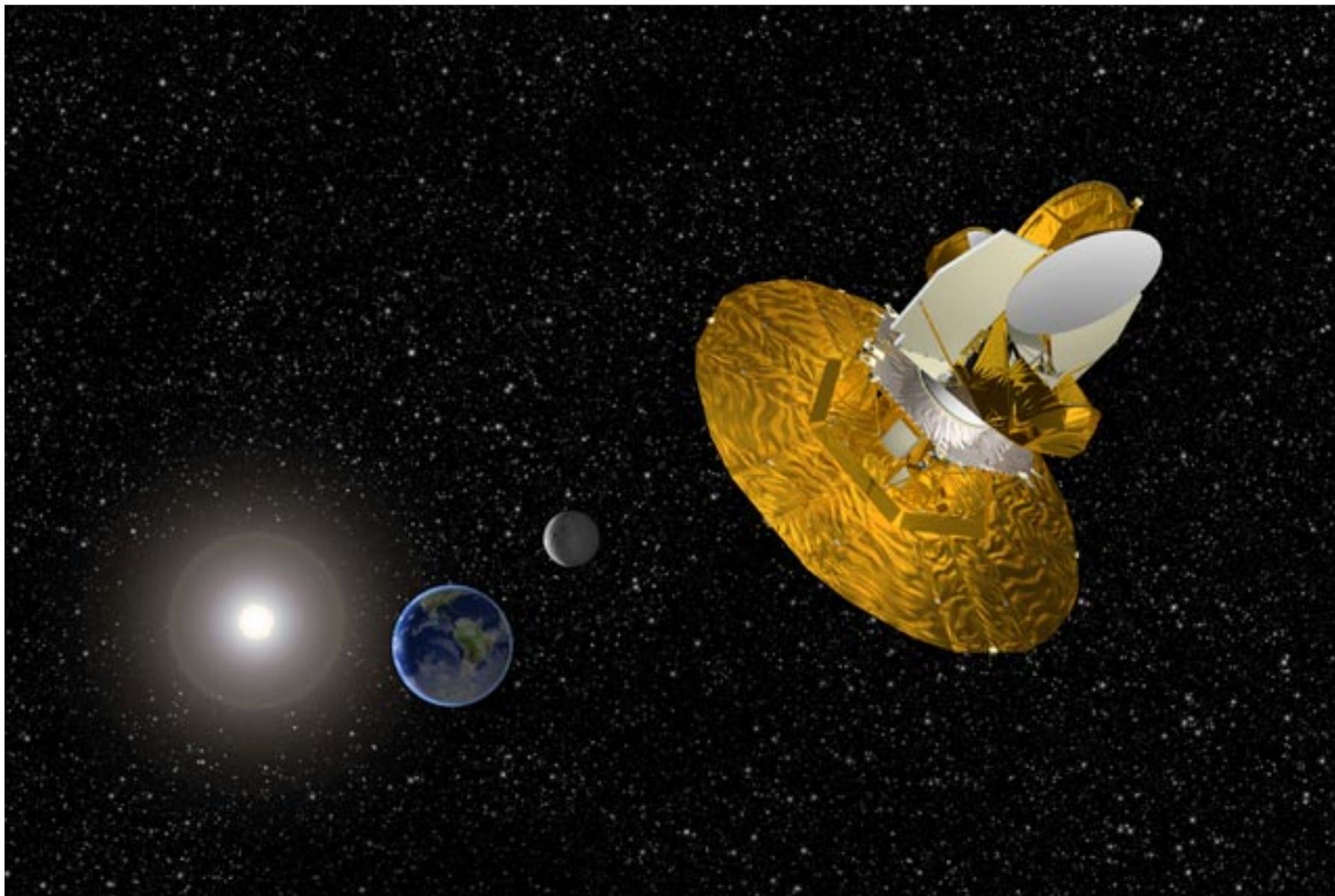


The cosmic microwave background Radiation's "surface of last scatter" is analogous to the light coming through the clouds to our eye on a cloudy day.

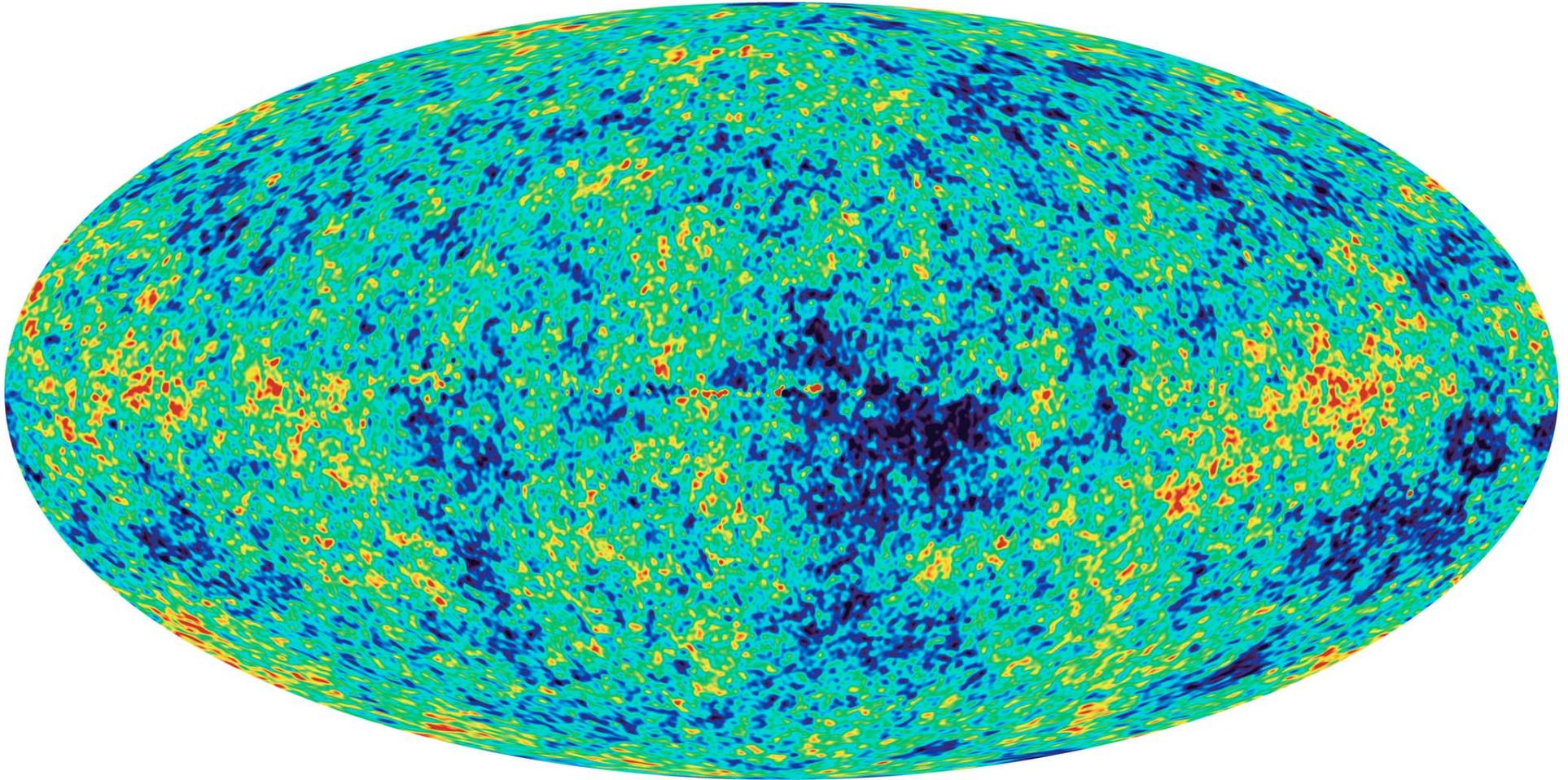


We can only see the surface of the cloud where light was last scattered

Le télescope WMAP



Le rayonnement cosmologique de l'Univers



Fluctuations de température : $\Delta T \sim 0.00001 \text{ } ^\circ\text{C}$

→ Grumeaux de matière à l'origine de la formation des galaxies

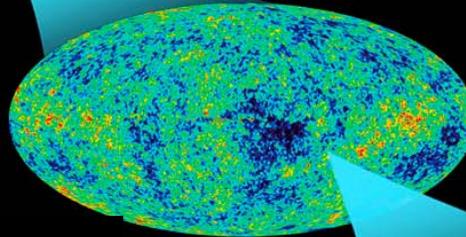


Naissance de l'Univers



Minuscule fraction de seconde

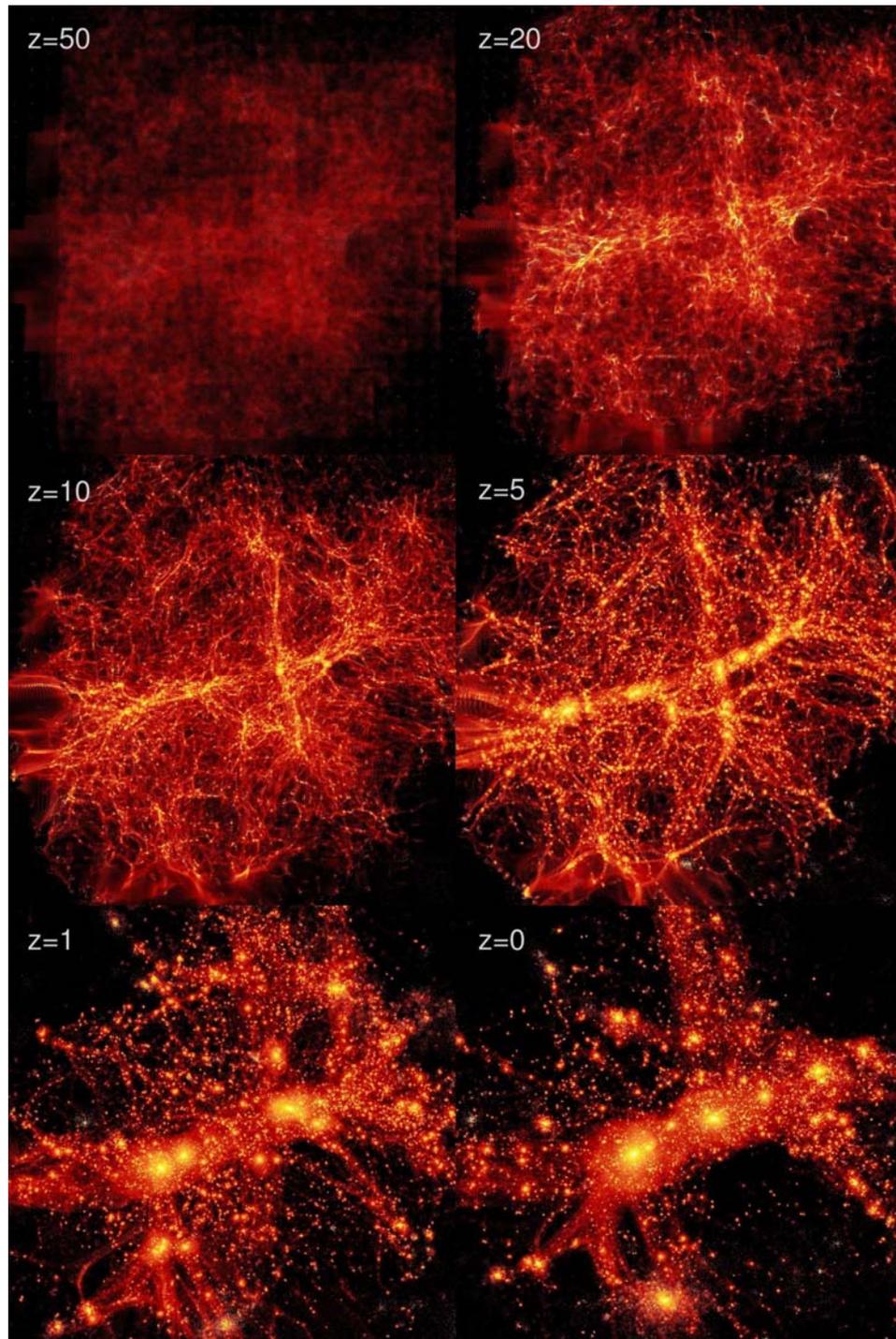
inflation

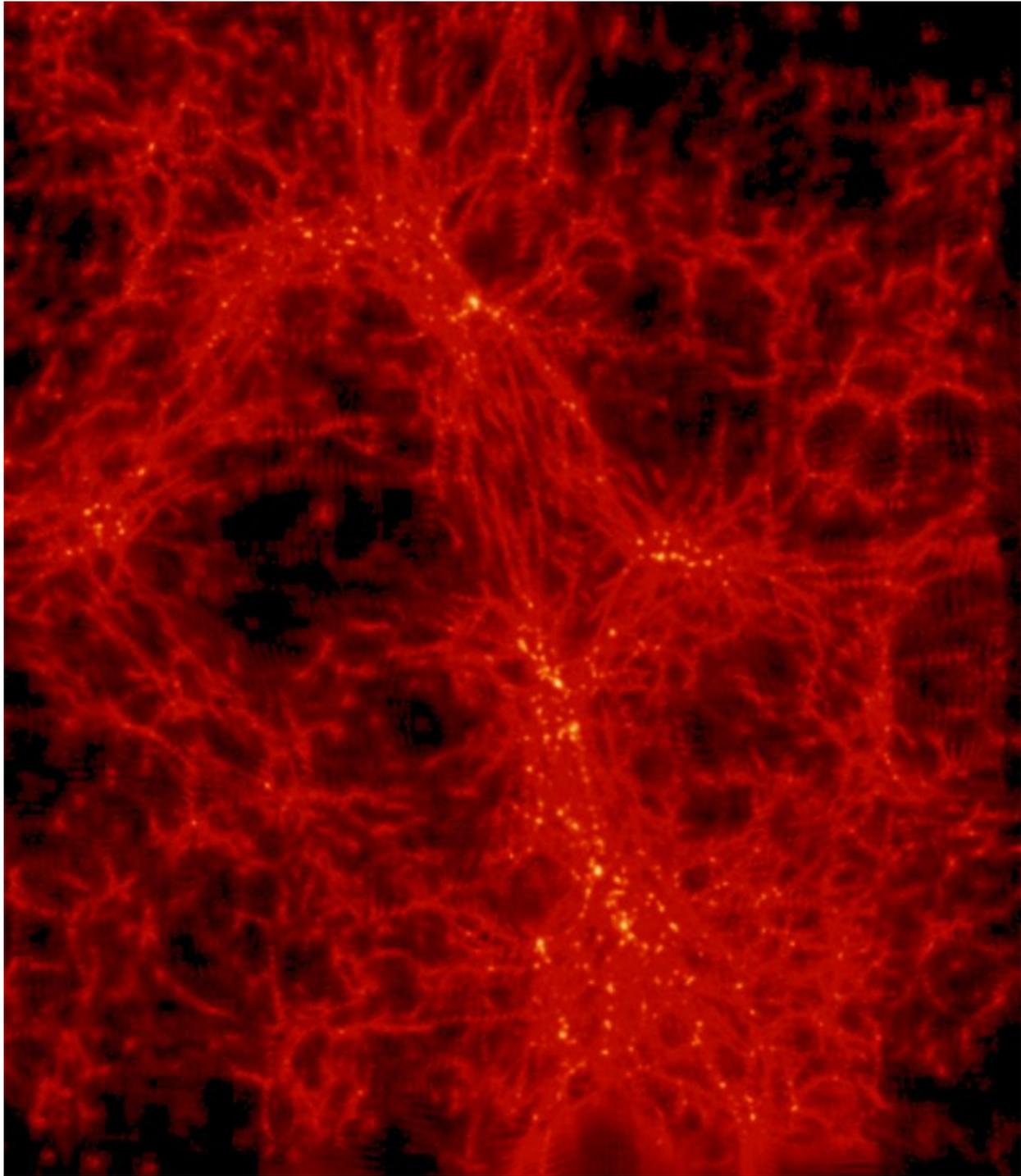


380 000 ans

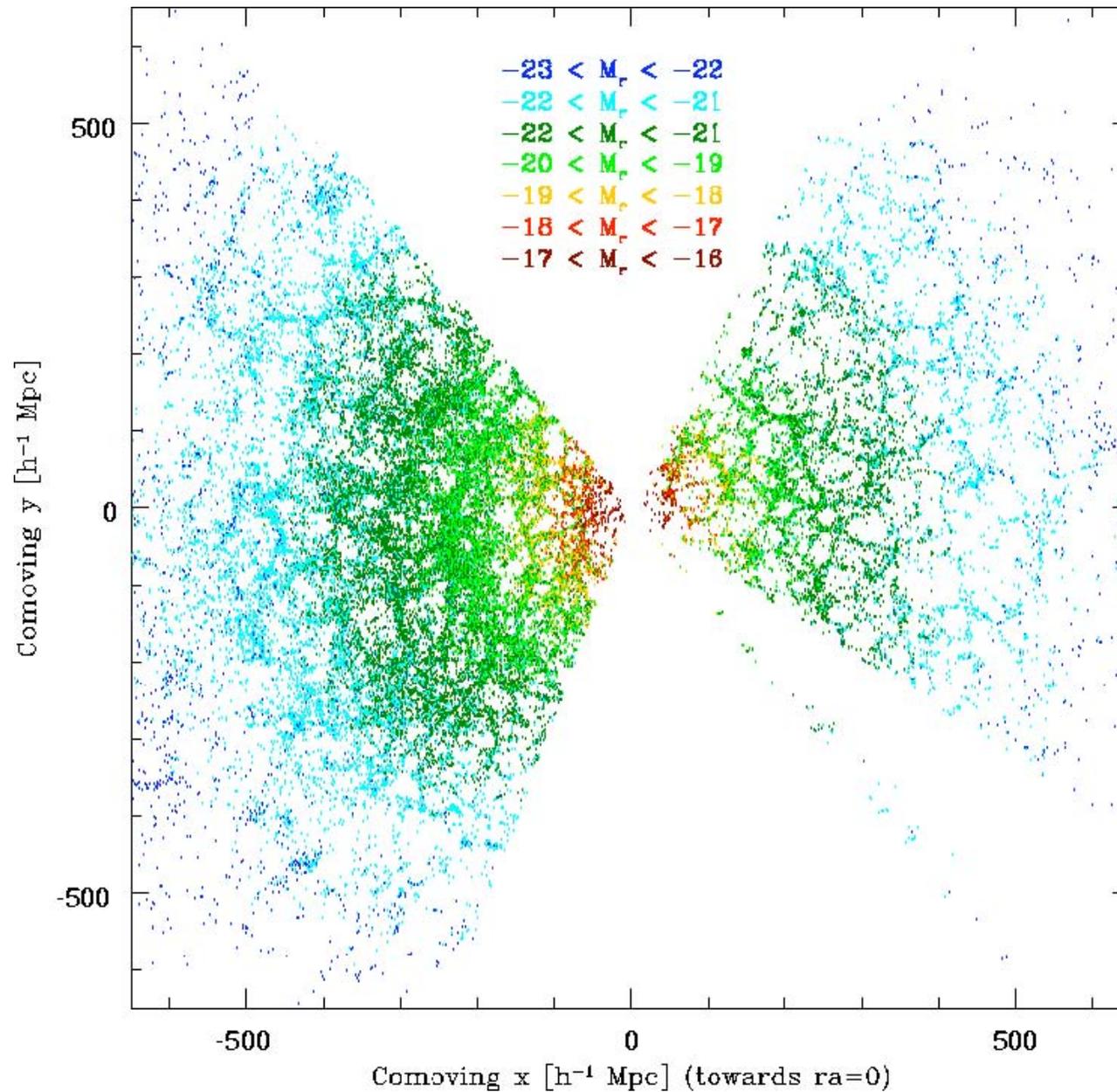


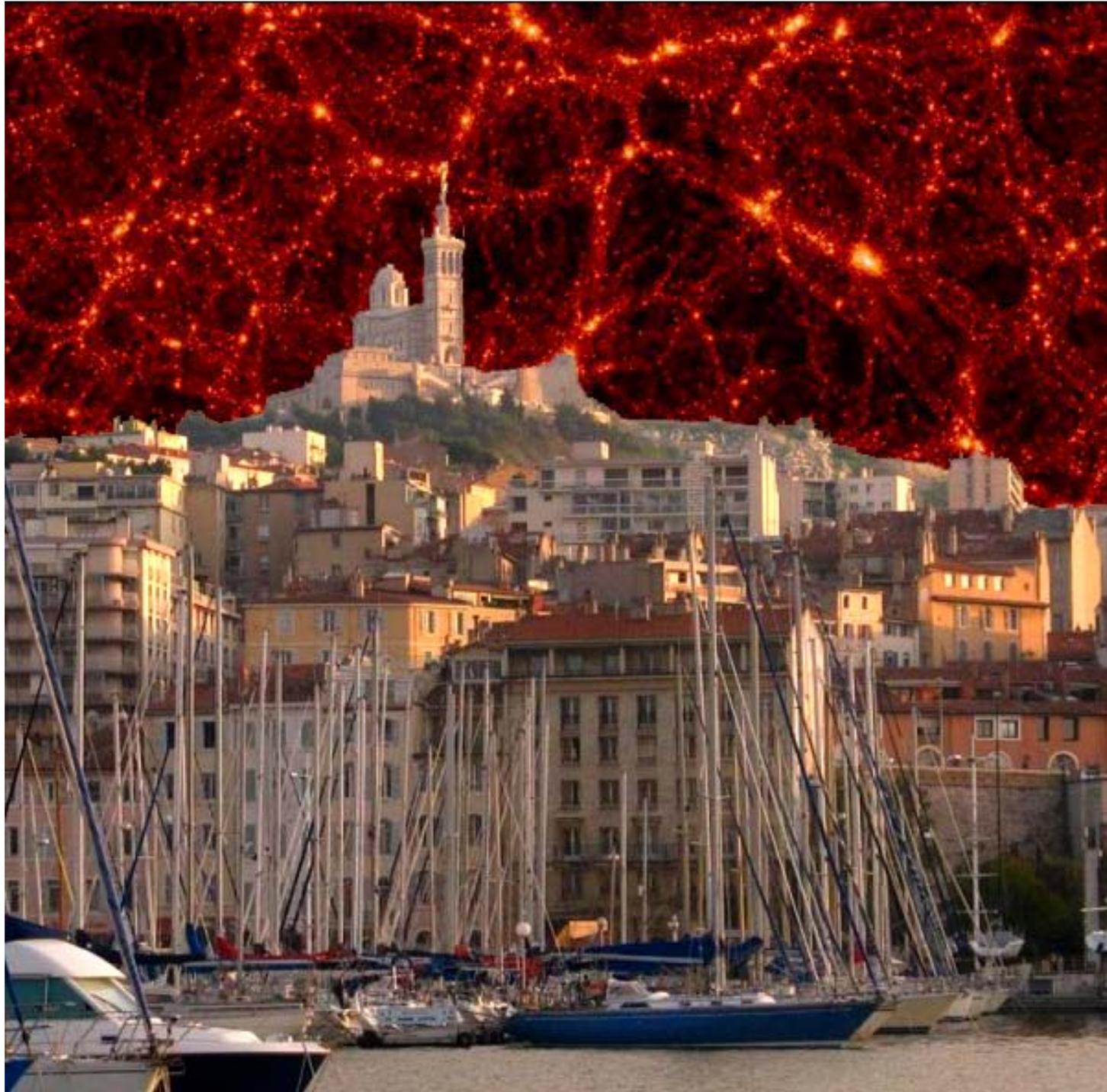
13.7 milliards d'années





Cartographie d'une tranche de l'Univers





L'Univers est plat !

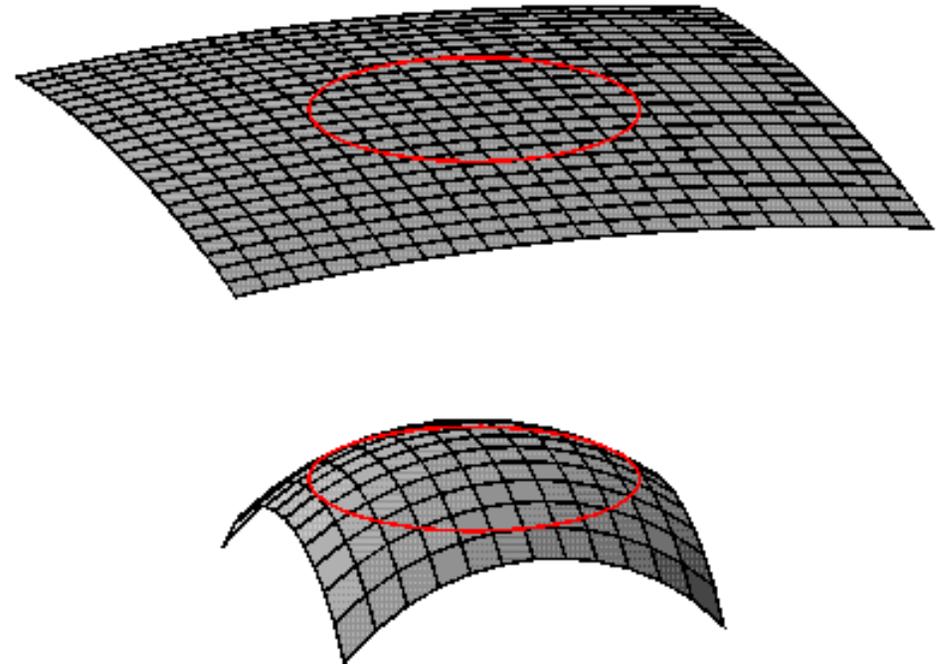
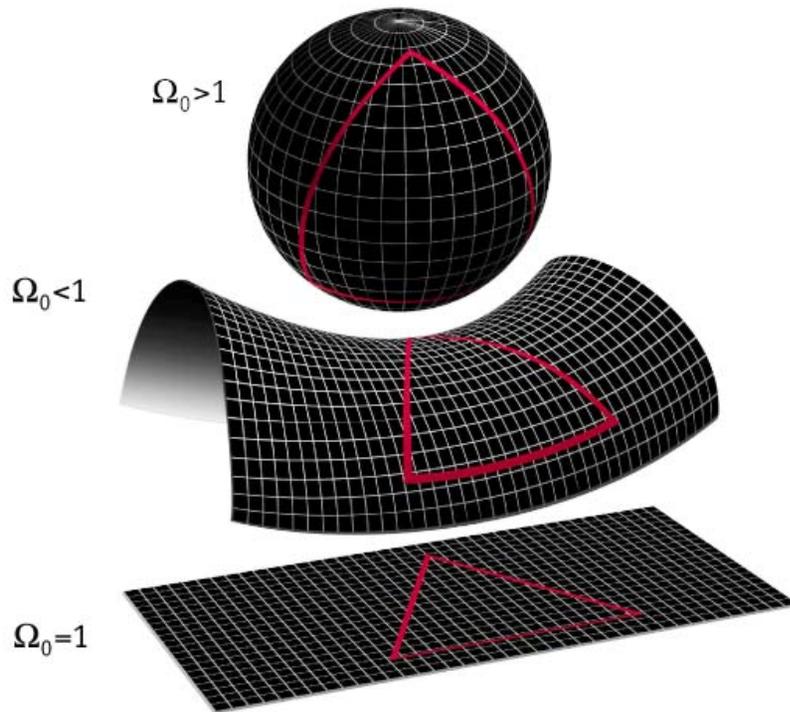
Mesure de la taille des grumeaux du fond cosmologique :

la densité de l'Univers est celle de la densité critique :

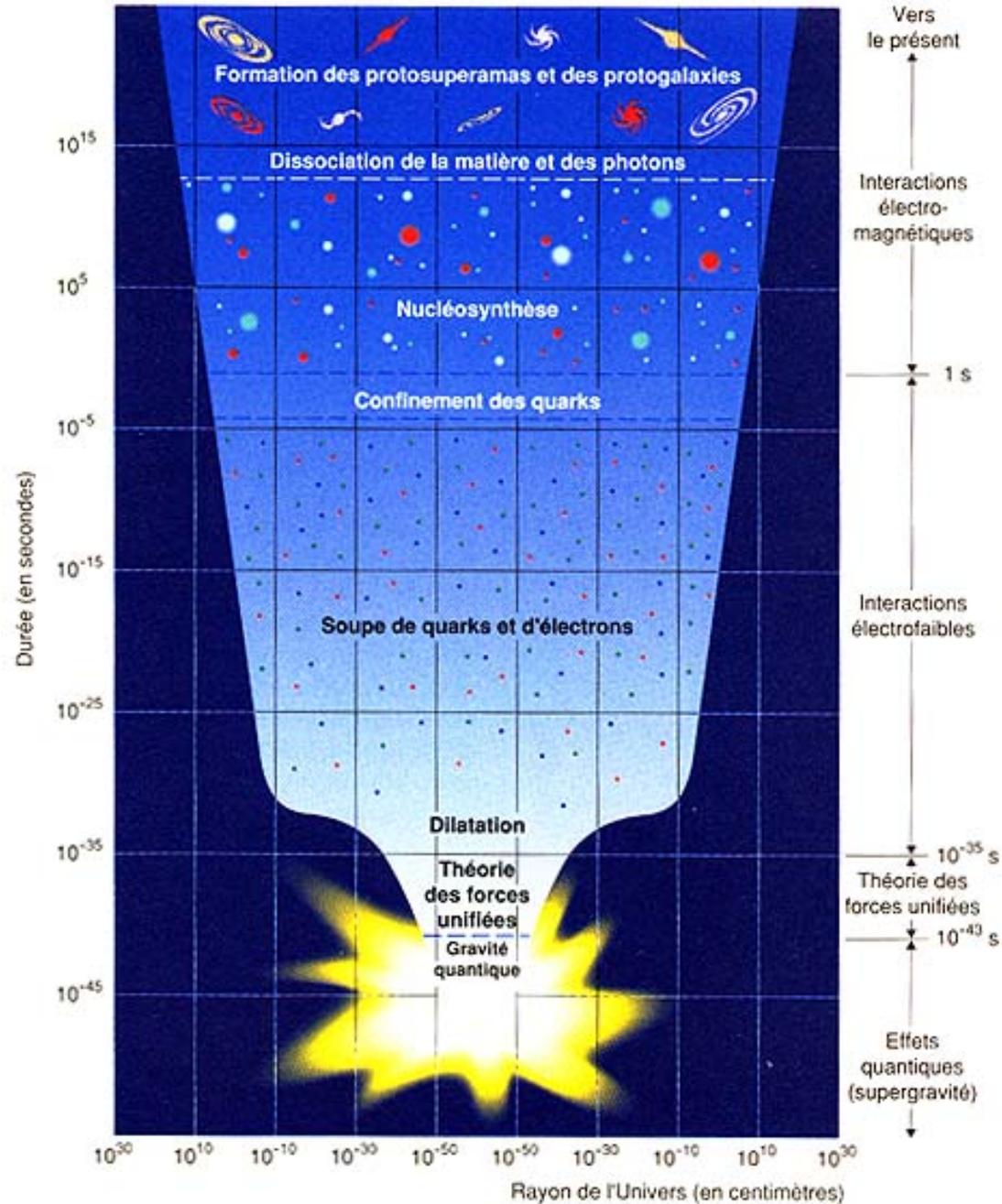


Conséquence de l'inflation de l'Univers à $t = 10^{-35}$ s après le Big-Bang

$$\Omega = \rho / \rho_c = 1$$



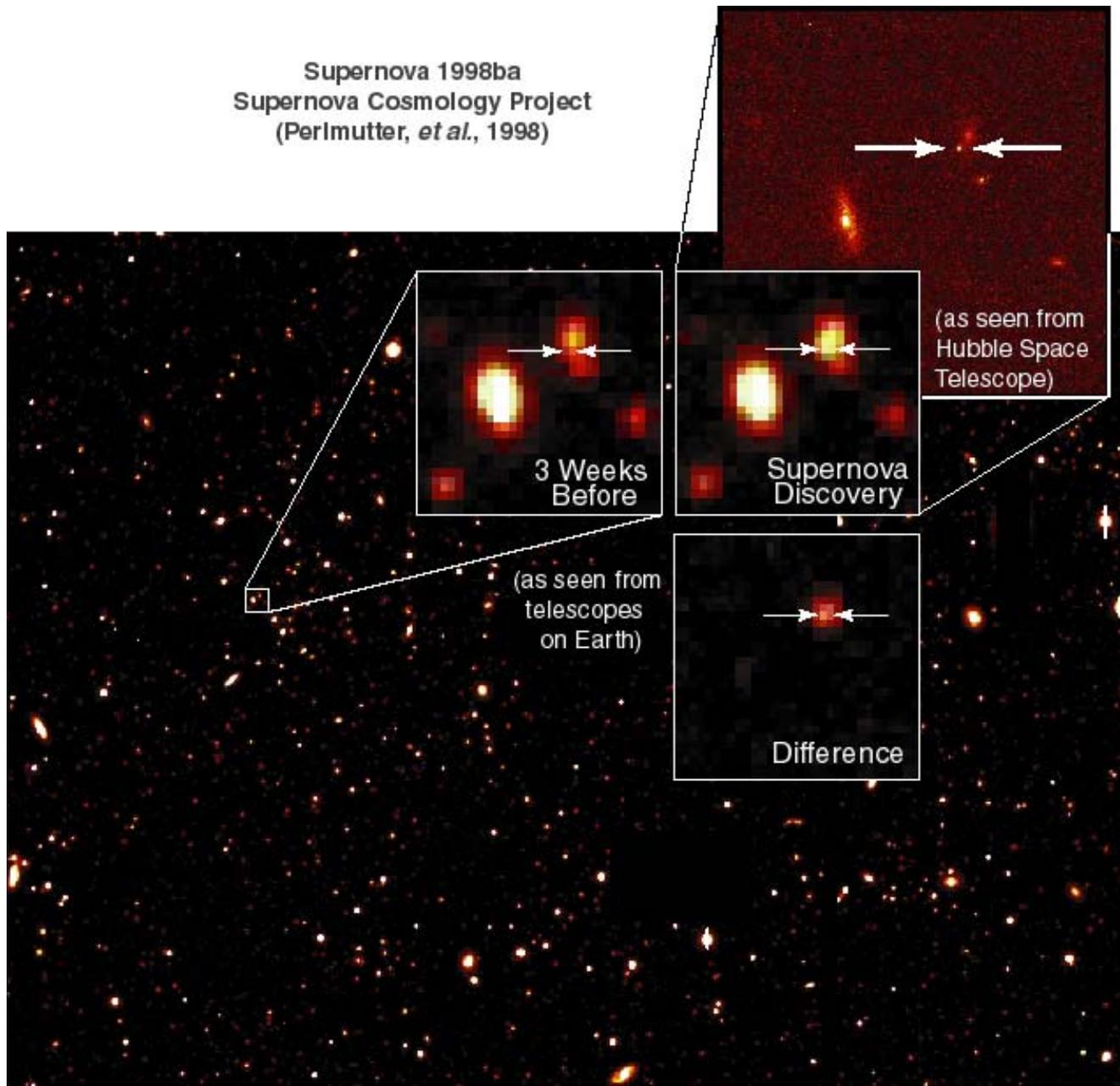
L'histoire de l'Univers



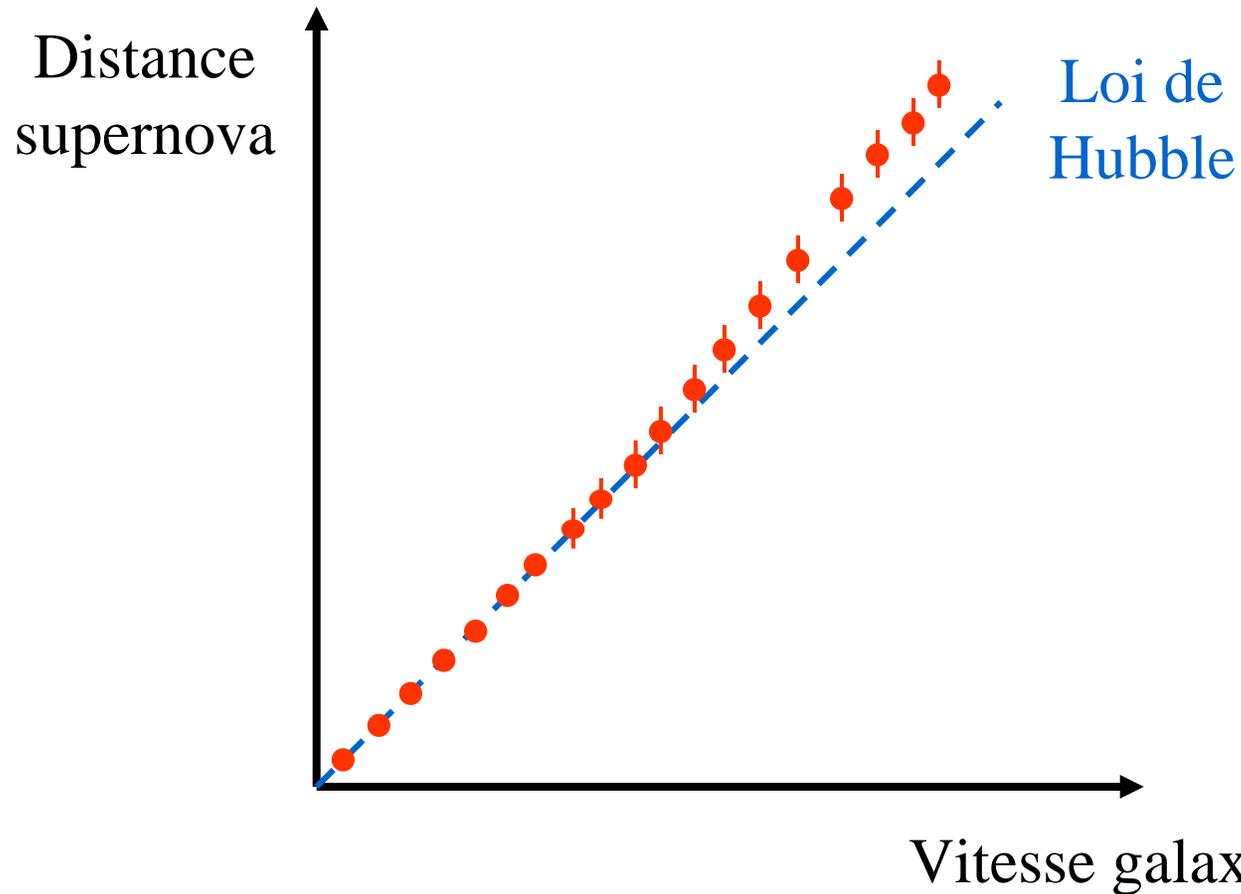
Mort d'une étoile : une supernova



Etude des supernovae dans les galaxies lointaines



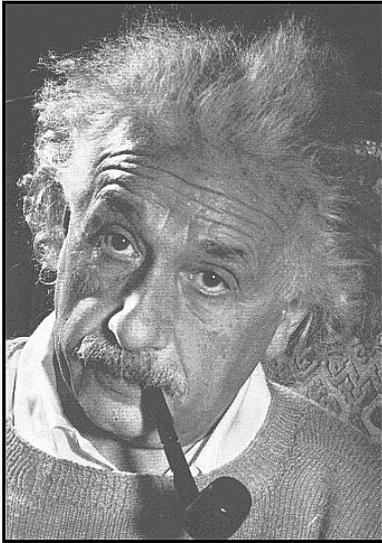
La révolution de 1998



A grande distance, les supernovae sont trop loin :

l'expansion de l'Univers accélère !!!

La constante cosmologique ou l'Énergie Noire



Equation d'Einstein de la Relativité Générale – 1917 :

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu}$: géométrie de l'Univers

$T_{\mu\nu}$: matière, énergie de l'Univers

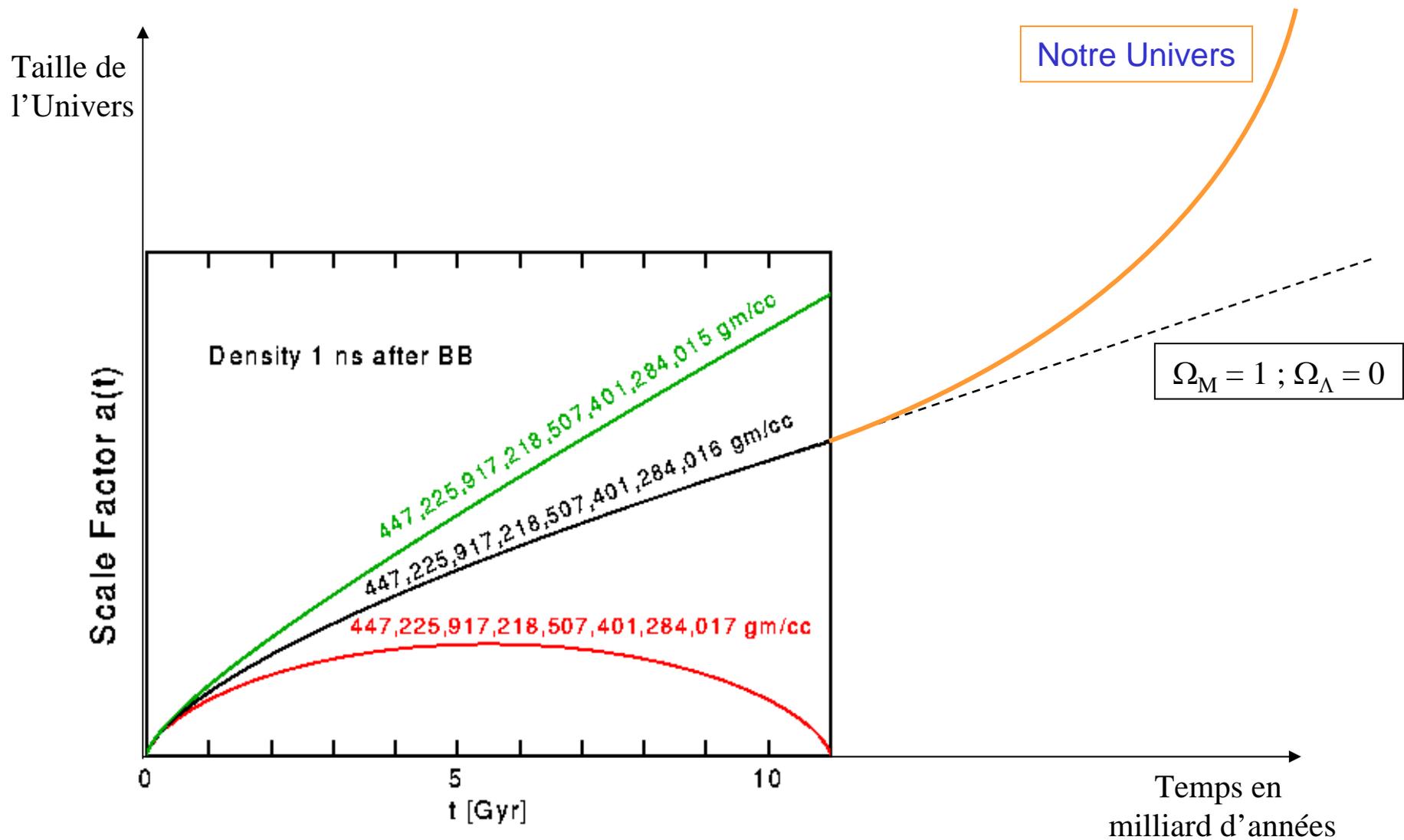
Λ : constante cosmologique = “gravitation répulsive”

Mesures des supernovae et du rayonnement cosmologique :

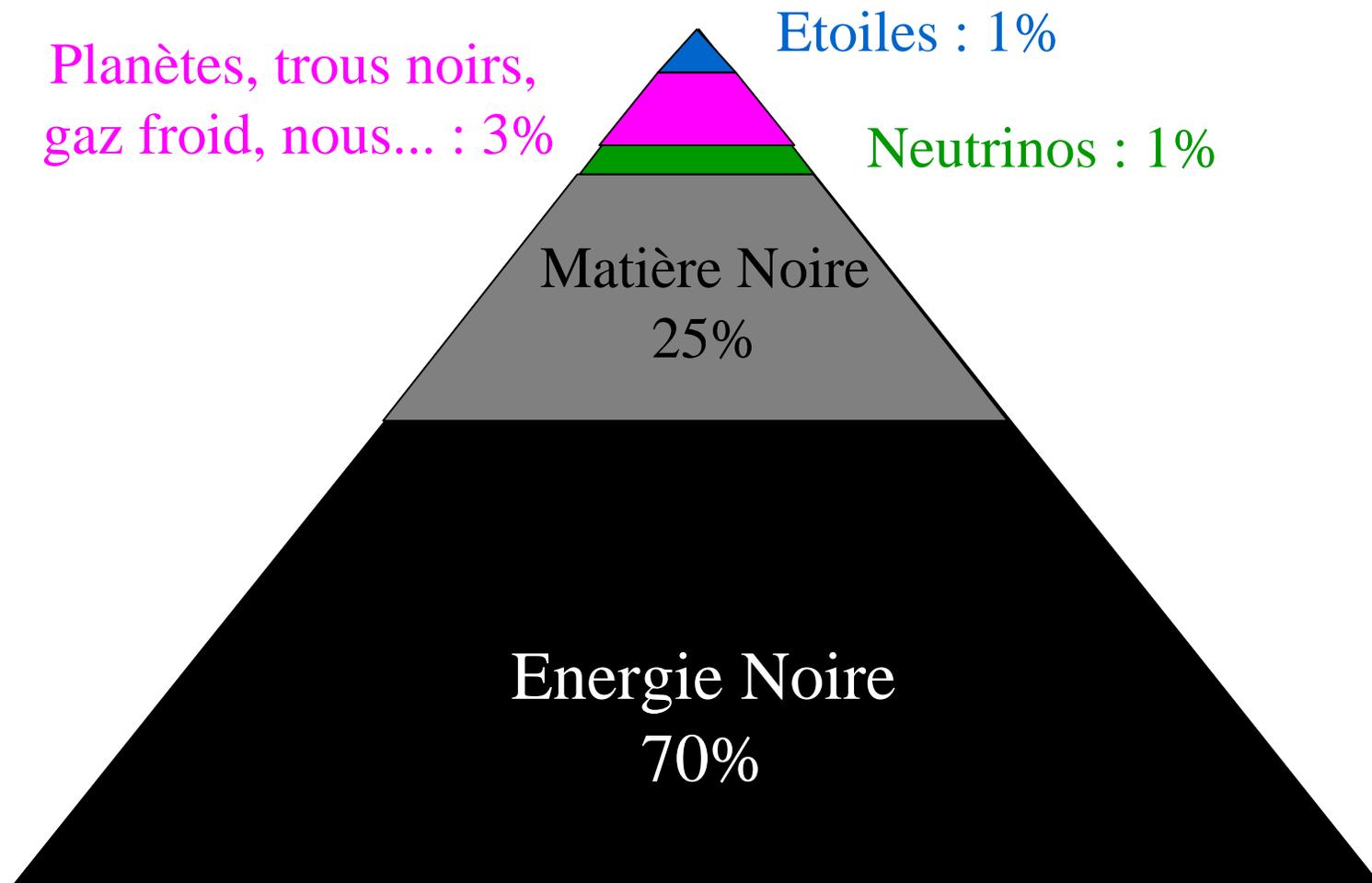
$$\Omega_{\text{matière}} = 0.3 \quad ; \quad \Omega_{\Lambda} = 0.7$$

**L'Univers actuel est dominé à 70%
par l'énergie noire du vide !!**

Le destin de l'Univers : le grand désert...



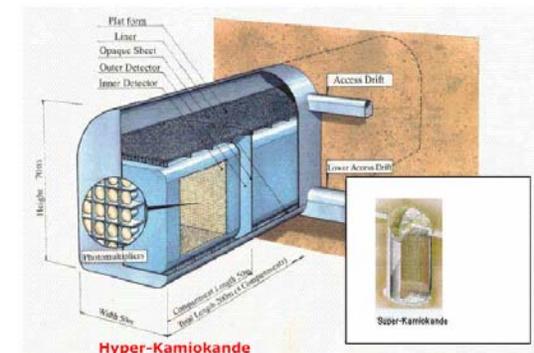
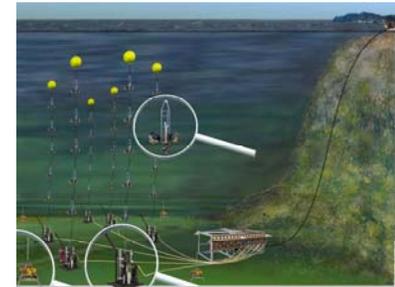
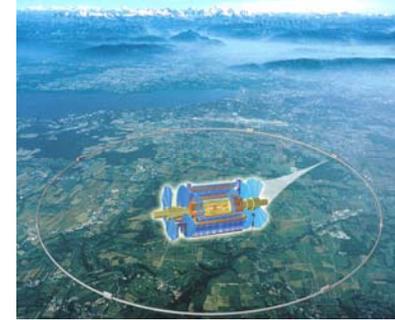
Résumé sur la composition de l'Univers



**95% de l'Univers reste à découvrir
et à comprendre !!**

Et demain ?

- **LHC + ATLAS/CMS (2007) :**
Découverte du boson de Higgs et des particules supersymétriques ?
- **ANTARES (2007) :**
Détection indirecte de la matière noire ?
- **EDELWEISS (2007) :**
Détection directe de la matière noire ?
- **MEGATONNE (2015 ?) :**
Découverte de la désintégration du proton ?



Et demain ?

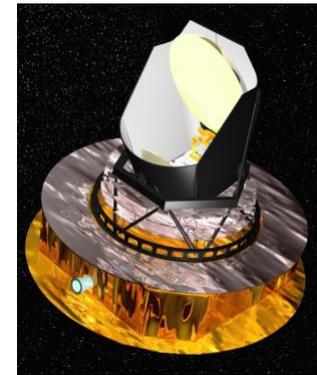
- **VIRGO (2006) :**

Détection des ondes gravitationnelles (graviton) ?



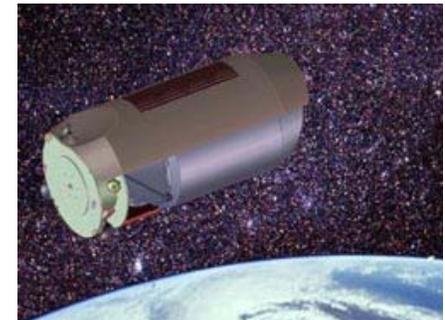
- **PLANCK (2007) :**

Mesures précises du rayonnement cosmologique



- **SNAP/JDEM (2014) :**

Mesure précise de la constante cosmologique
(supernovae lointaines)



Rendez-vous dans quelques années !!