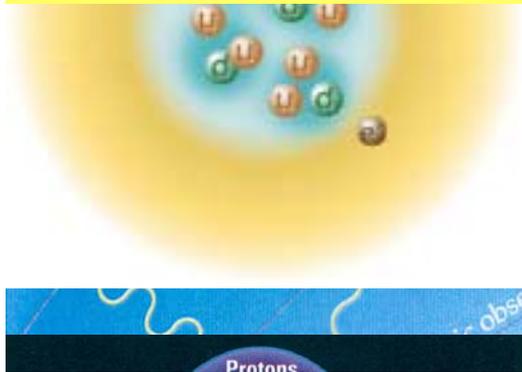


# La Cosmologie aujourd'hui: entre philosophie et science exacte



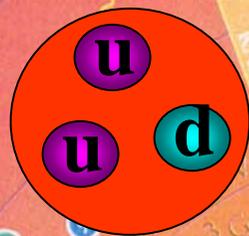
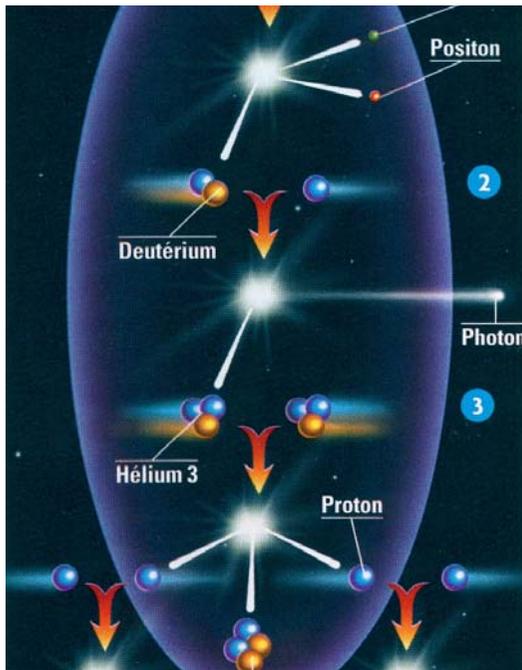
**L'univers est en route**

- Les atomes sont créés
- L'univers devient transparent

**Nucléosynthèse**

- Les noyaux sont créés

Cycle de conférences grand public du CPPM 2008



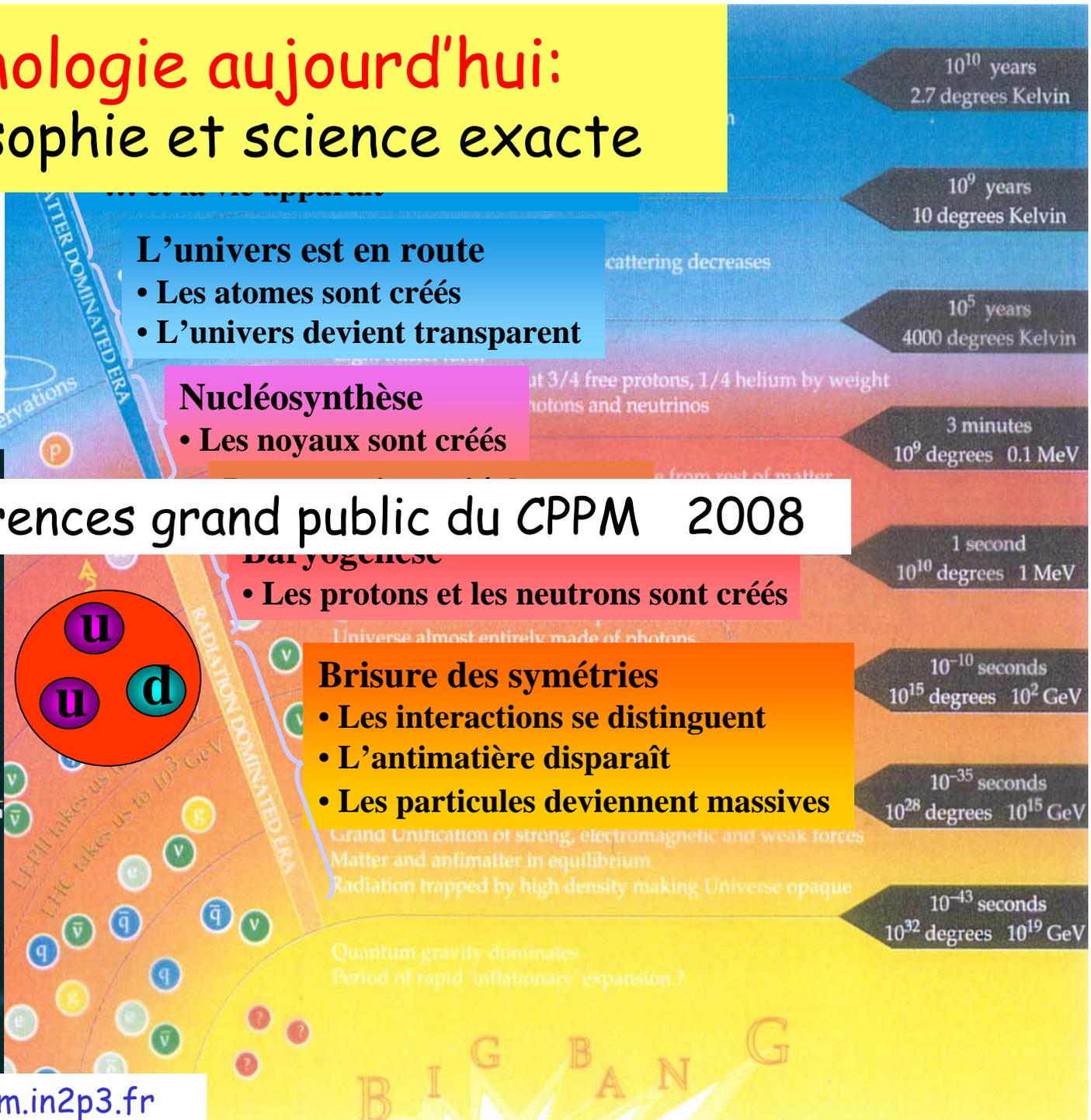
**Baryogenèse**

- Les protons et les neutrons sont créés

**Brisure des symétries**

- Les interactions se distinguent
- L'antimatière disparaît
- Les particules deviennent massives

Charling Tao tao@cppm.in2p3.fr



# Plan de l'exposé

- Qu'est-ce que la cosmologie?
- Petite Histoire de la cosmologie: de la naissance de la Science à  $\Lambda$ CDM au %.
- La cosmologie aujourd'hui: un « Modèle Standard »,  $\Lambda$ CDM
- Qu'est-ce que la Matière Noire? La piste des particules supersymétriques
- Qu'est-ce que l'Energie Noire? Une constante cosmologique ou une modification de la gravité ou un nouveau champ scalaire?
- Energie Noire, Matière Noire: des épicycles modernes?
- Quelles perspectives pour les prochaines années?  
ANTARES, SNAP/JDEM et ... LHC (Projets CPPM)

# Qu'est-ce que la cosmologie?

L'Etude de l'Univers

origine? évolution? avenir? structures? composition?

Élément de base:  
les galaxies



Une vision Universelle "scientifique"

"Notre" modèle cosmologique "standard" aujourd'hui

# Cosmologie = vision du monde



## Histoires de Génèse:

1. - Au début Dieu créa le Ciel et la Terre. Et la Terre était vide et ...
2. Au début, il y avait seulement le « chaos ». Du vide, ont surgi Erebus et la Nuit, ...
3. Au début, il n'y avait ni Terre, ni ciel. Il y avait un grand vide. Au nord, les rivières se mirent à couler,...
4. Au début, le monde était un espace un monde sans temps, sans forme, s créateur créa le fini Sotuknang, qu' établir 9 universs...
5. Au début, il y avait un œuf et rien ni Terre, juste l'obscurité. De l'obscurité dans l'obscurité pendant des milliers d'années jusqu'à devenir un géant. Il devint si léger que les parties légères s'envolèrent pour former le ciel et les parties lourdes devinrent la Terre:..

1) Bible

2) Mythologie grecque

3) Mythologie nordique

4) Hopi

5) Chine

- Anthropomorphisme, action d'un artisan supérieur
- “chaos ou nuit” ou “oeuf” originel

## Génèse en 2008 ?

Au début, il n'y avait ni espace ni temps, mais une mousse de cordes et boucles.

La mousse chaude, l'espace, le temps et l'énergie étaient mélangés dans une grande Unification.

La mousse s'est refroidie et étendue.

Et la gravité et l'espace temps et l'Univers sont apparus....

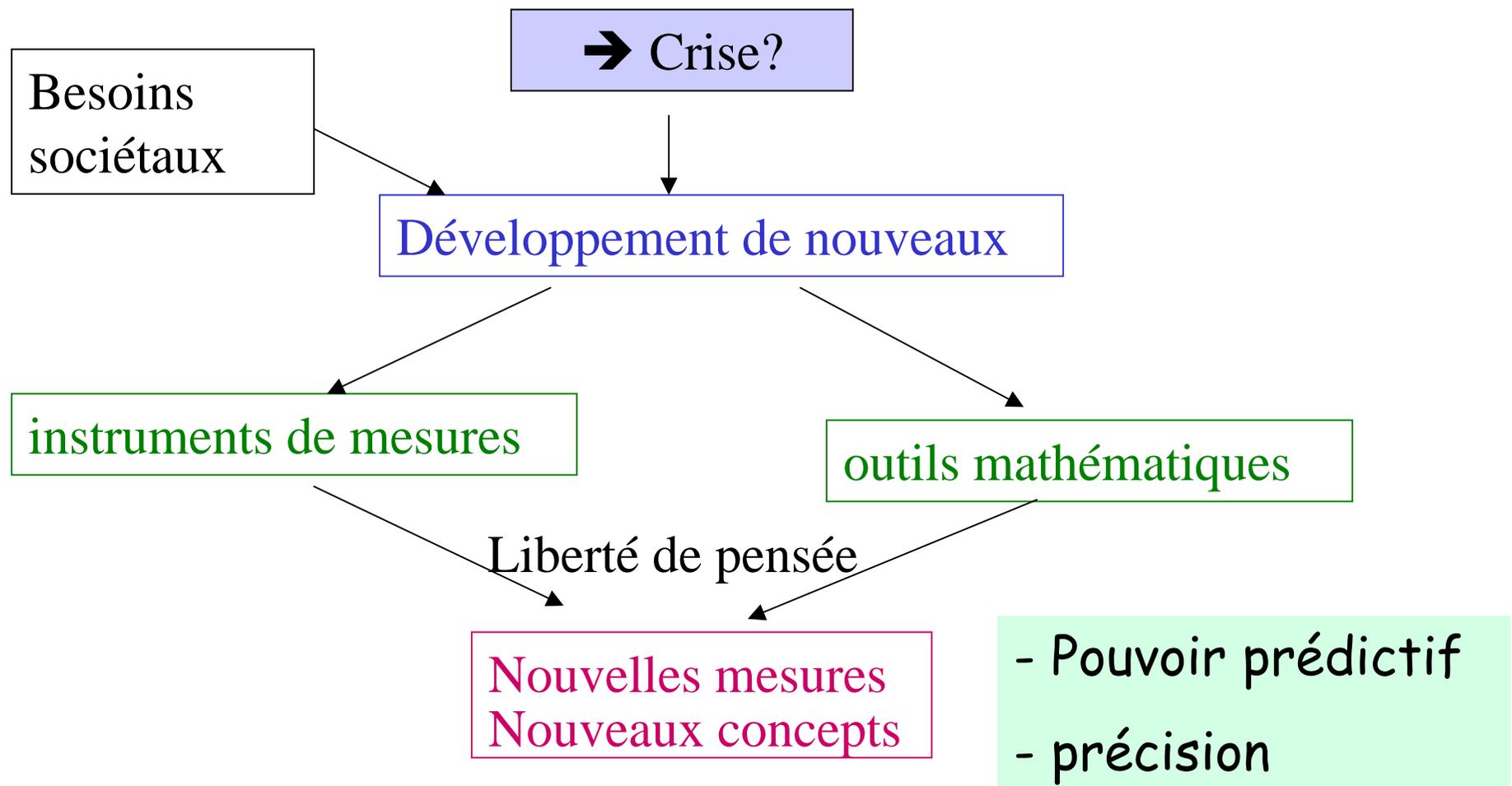
Quelle différence entre cette histoire et les autres?

Qu'est-ce qu'une science exacte?

# Remarques sur la démarche scientifique

Démarche scientifique (sciences exactes et non-exactes)

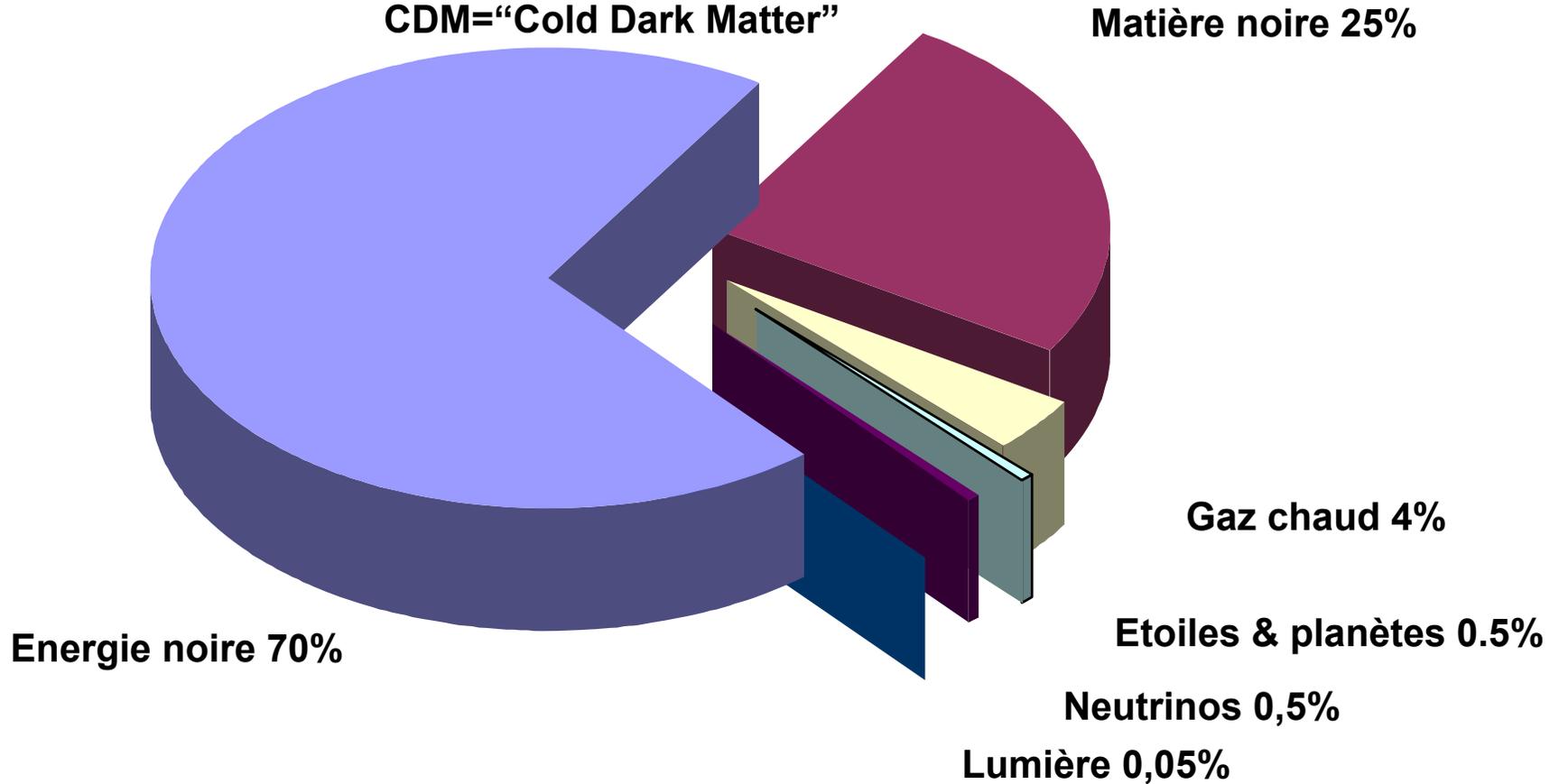
Confrontation des modèles théoriques avec les observations



# Composition étonnante et précisément connue...

Modèle  $\Lambda$ CDM

$\Lambda$  = Constante cosmologique  
CDM = "Cold Dark Matter"



Mesures Précises au pourcent depuis quelques années !

# Petite Histoire de la cosmologie

## Grande aventure de la science:

Du calcul aux mathématiques,  
de l'astrologie à l'astronomie

de la mécanique à la physique: optique, thermodynamique,  
électromagnétique, physique atomique, physique nucléaire,  
physique des particules et astrophysique

- Antiquité
- Les Hélienistes Lucio Rosso:  
La révolution oubliée
- Renaissance
- Physique Classique
- 20<sup>ème</sup> siècle
- Aujourd'hui

## Développement

- Vision du monde
- Qualité des mesures et des  
calculs possibles

et demain?

# Quelques références

## Quelques Sites en français

- <http://fsoso.free.fr/conferences/index.htm> Fabio Soso
- [Histoire Cosmologie et Relativité](http://phyun5.ucr.edu/~wudka/phys7/Notes_www/notes_www.html)  
[phyun5.ucr.edu/~wudka/phys7/Notes\\_www/notes\\_www.html](http://phyun5.ucr.edu/~wudka/phys7/Notes_www/notes_www.html)
- [Alain Bouquet](http://cdfinfo.in2p3.fr/Culture/Cosmologie) [cdfinfo.in2p3.fr/Culture/Cosmologie](http://cdfinfo.in2p3.fr/Culture/Cosmologie)  
**MATIERE SOMBRE ENERGIE NOIRE** Bouquet-Monnier

- [Carlo Rovelli](#) Naissance de la Science, cours licence Luminy
- [Jean Pierre Luminet](#) Cours de cosmologie master Meudon

## Quelques livres spécialisés

- [Jim Rich](#) Fundamentals of cosmology ed. Springer
- [Jayant Narlikar](#) Introduction to Cosmology
- [Jim Peebles](#) Principles of Modern Cosmology
- [Stephen Weinberg](#) Gravitation and Cosmology
- [Barbara Ryder](#) Introduction to Cosmology

Autres références au fur et à mesure

# Naissance de la logique et de la géométrie

les philosophes grecs

Raphaël:  
*Ecole d'Athènes*  
1511  
*Siècles mélangés*

Démocrite,  
Leucippe

Platon Aristote

Parménide

Pythagore

Héraclite

Euclide

Jean Pierre Luminet



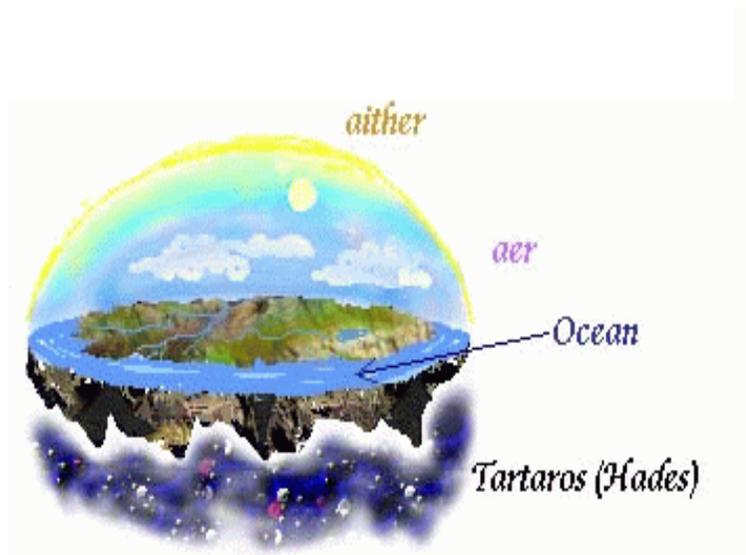
# D'une Terre Plate à un Univers géocentrique

Cosmos of the Ancients: The Greek Philosophers on Myth and Cosmology    Stefan Stenudd

- Anaximandre, Anaximène, Thalès, -600

Recherche d'explication  
rationnelle de la Nature (sans  
Dieux ni mythes)

Terre plate, astres fixés/sphères en révolution.

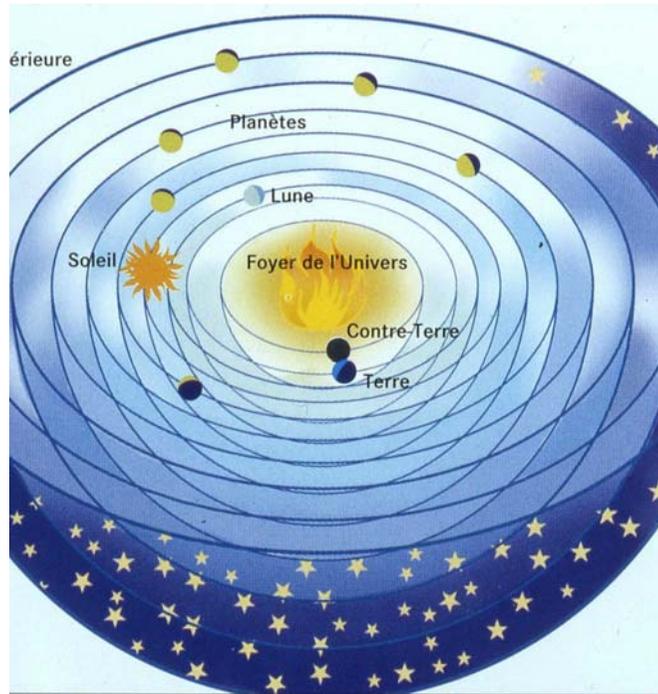


Les substances peuvent être décrites  
un nombre réduit d'éléments:  
4 éléments: la Terre, l'eau, l'air, le  
feu

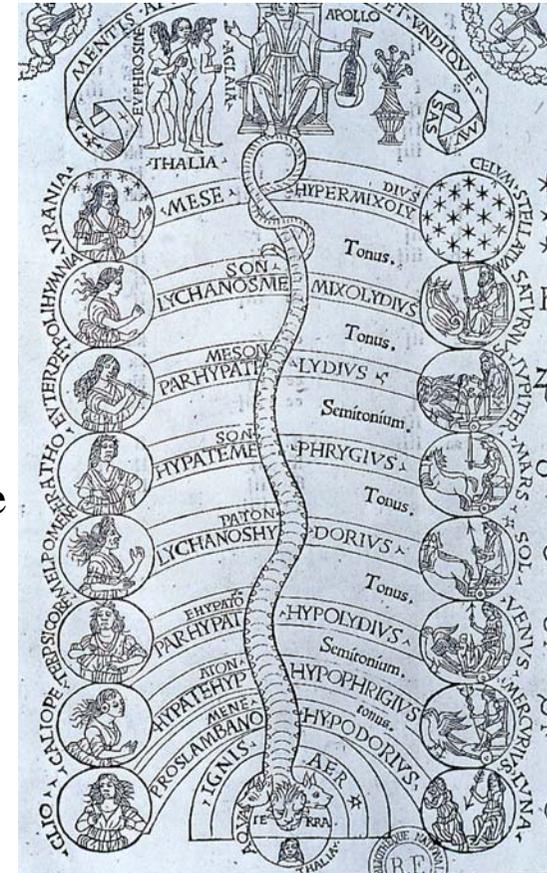


# Pythagore, 560-500 av.J.C.

Postule qu'il existe une relation entre les nombres et les phénomènes naturels



Terre sphérique et dix sphères concentriques. La dixième sphère porte les étoiles.

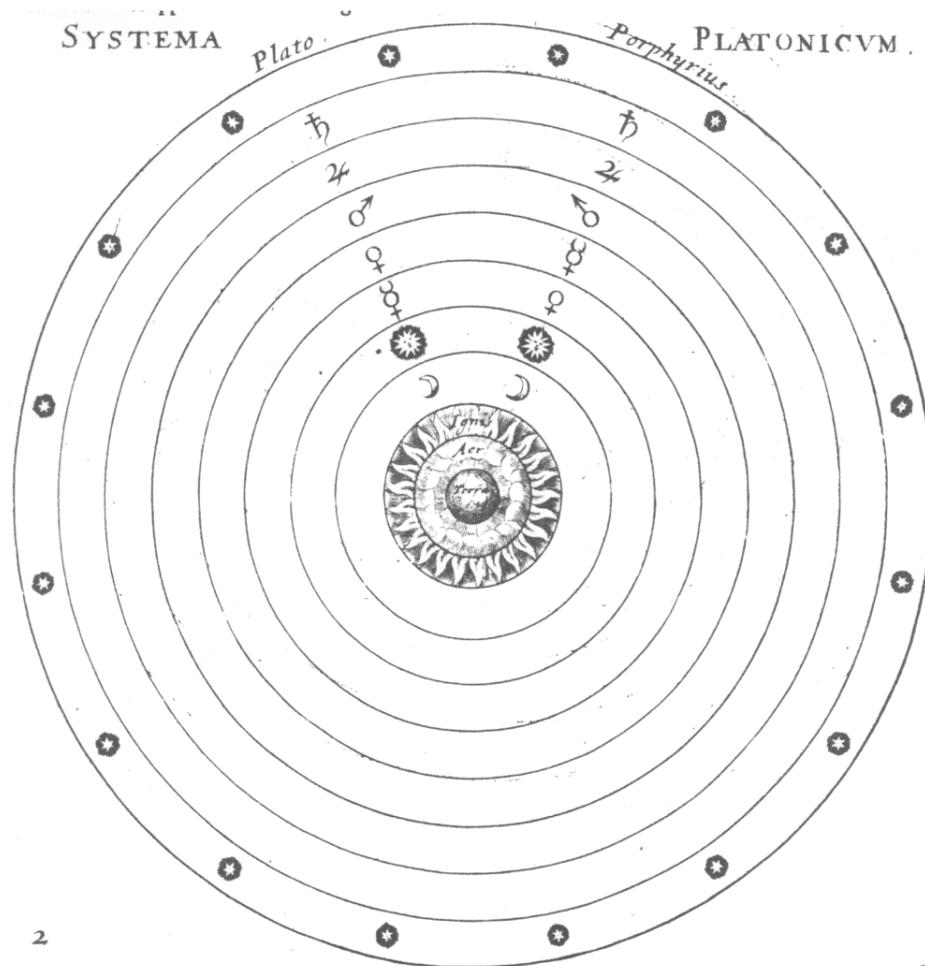


Harmonie des sphères:

Recherche analogie entre intervalles musicaux et distances entre les sphères.



# Systeme platonicien (géocentrique)



Perfection des corps célestes et du cercle

→ Les orbites ne peuvent être que des cercles parfaits!

Terre-Lune-Soleil - Mercure-Vénus-Mars-  
Jupiter-Saturne-Etoiles Fixes

# Les apports des Hellénistes

(III -I s av JC)

Aristarque, Euclide, Hipparque, Archimède, Seleucos, Eratosthène, Appollonius, Chrisippe...

La géométrie Euclidienne

L'optique géométrique et la perspective

La théorie des machines simples

L'hydrostatique

La théorie des nombres

Propriétés des sections coniques

...

## Astronomie

(Héliocentrisme)

Dimensions de la Terre et de la Lune

La distance Terre-Lune

La précession des équinoxes

L'idée de la gravité

La théorie des marées

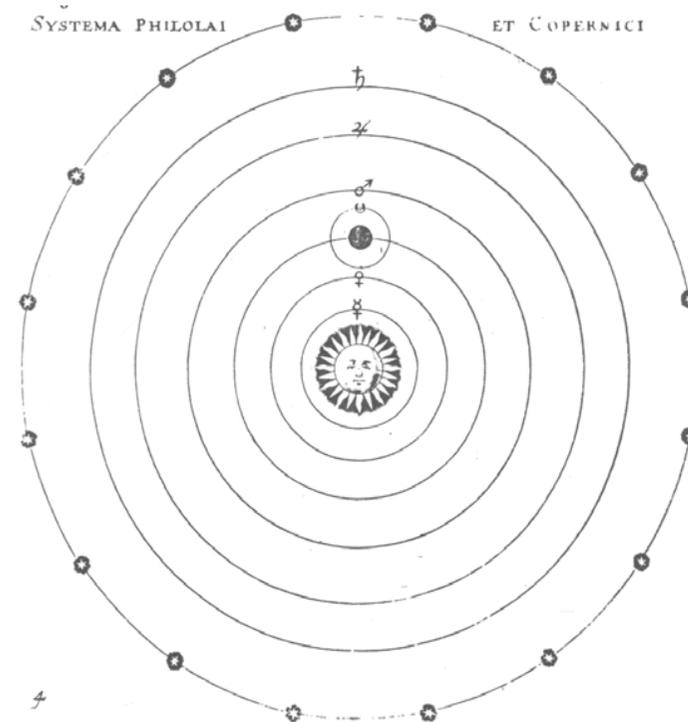
...

# Système héliocentrique

déjà envisagée conceptuellement dans l'Antiquité grecque

*Philolaos de Crotona* (Vème siècle av. J.-C.)

- l'âme : une harmonie des parties du corps
- les nombres : la clef de la connaissance
- la Terre n'est pas au centre de l'Univers,
- elle tourne en un jour autour d'un « *Feu central* » Estia, demeure de Zeus, invisible de la Terre
- Toutes les planètes, y compris le soleil tournent autour de Estia.
- Pour obtenir le nombre parfait de 10, il faut une « anti-Terre »



Selon Copernic, Philolaos connaissait déjà le mouvement de la Terre autour du Soleil.

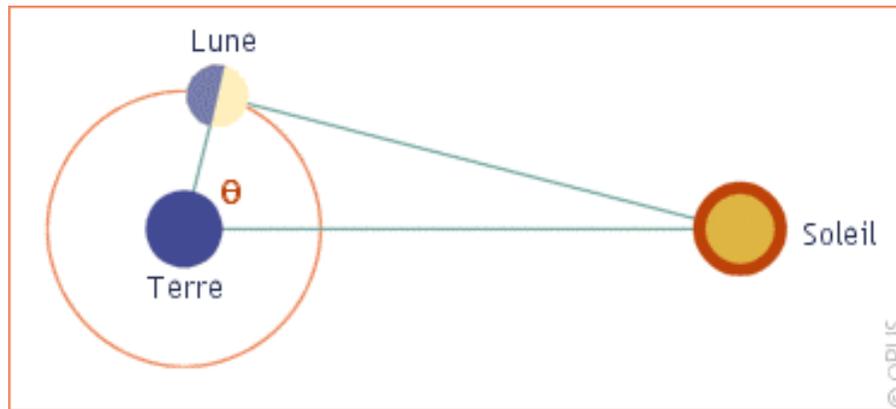
Il évalua le mois lunaire à 29 jours et demi, l'année lunaire à 354 jours et l'année solaire à 365 jours et demi.

# Systeme héliocentrique

Période Helléniste

*Aristarque de Samos* (v. 301-v. 250 av. J.-C.)

- distances relatives de la Lune et du Soleil



séparation angulaire (l'angle LTS)  
quand la Lune est à demi pleine  
(l'angle SLT est alors de  $90^\circ$ )  
→  $LT = ST \cos \theta$

## Raisonnement par observation et déductions

- Il obtient  $\theta = 87^\circ$  ( en fait  $89,95^\circ$  ) → déduit  $ST = 19 \times LT$  (en fait 390)
- la Lune cache parfaitement le Soleil lors d'une éclipse solaire totale  
→ le Soleil 19 fois plus gros que la Lune.
  
- Eclipses lunaires → la Terre : 2 à 4 fois plus grosse que la Lune.  
→ le Soleil plusieurs fois plus gros que la Terre.  
→ la petite Terre doit tourner autour du gros soleil

Mais cette conclusion n'est pas prise au sérieux!  
modèle géocentrique aristotélicien dominant

# Mouvement Rétrograde des planètes

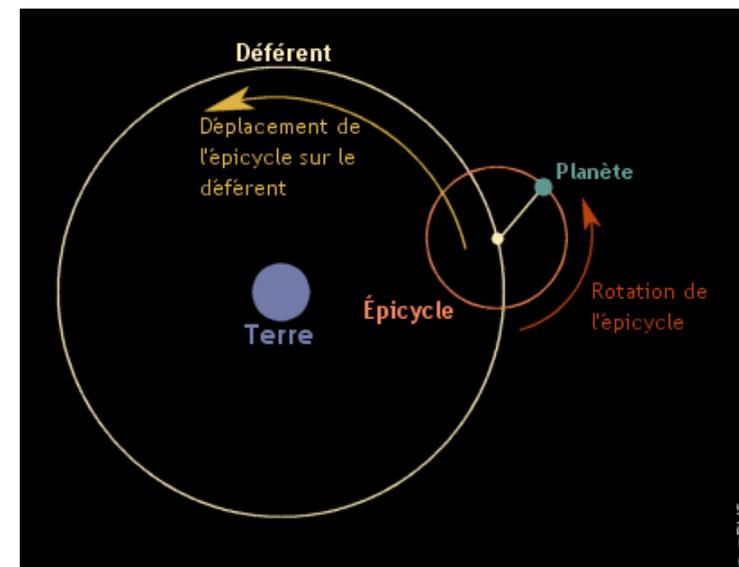
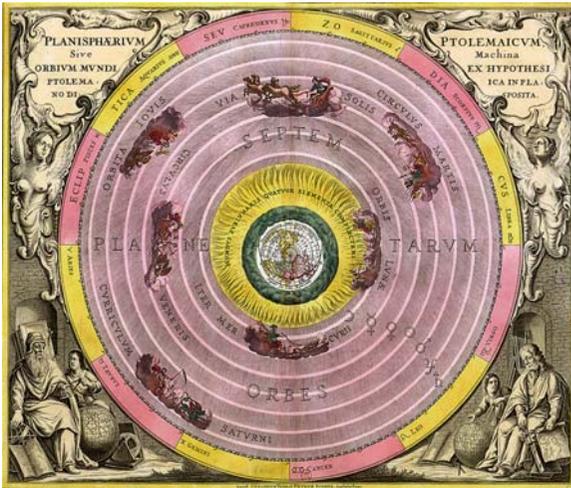
Les Mésopotamiens: observations astronomiques très précises.

Pas de systèmes connus. Mais prédictions d'astrologie

Hipparque (-190, -120) (père de la trigonométrie) utilise ces données pour développer des modèles quantitatifs et précis du mouvement de la Lune et du Soleil

- Toutes les planètes parcourent une bande du ciel qu'on nomme zodiaque d'est en ouest par rapport aux étoiles lointaines.
- Cependant, quelques fois, certaines d'entre elles reviennent en arrière.

II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. :  
Ptolémée, dans l'Almageste  
introduit les épicycles

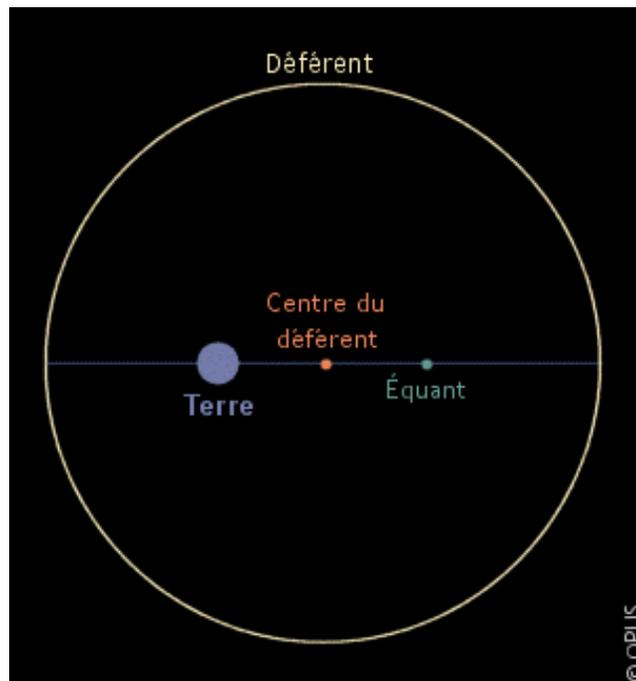


## Mais les épicycles ne suffisent pas!

-les planètes ne parcourent pas le zodiaque à une vitesse constante. Elles ralentissent lorsqu'elles passent devant un groupe de constellations « préféré ».

C'est la **préférence zodiacale**.

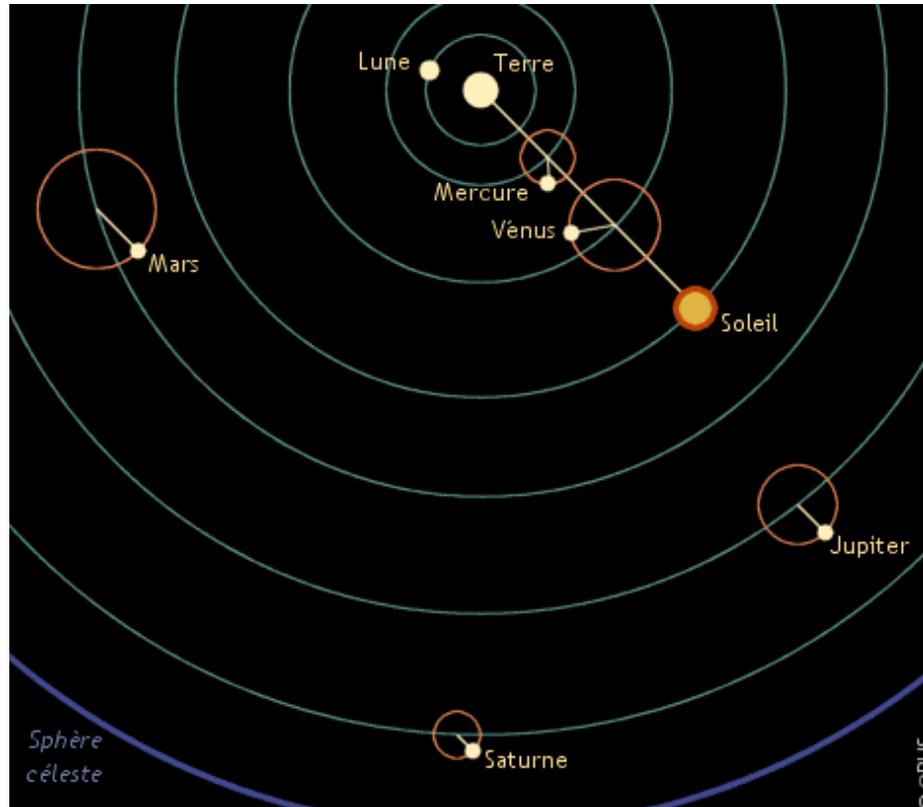
II<sup>e</sup> siècle ap. J.-C. :  
Ptolémée, *Almageste*



Sacrifie la pureté des orbites des planètes:

Décale la Terre du centre: **point imaginaire équant** auquel duquel la vitesse est constante

# Problèmes du système Ptoléméen



- Le centre des épicycles de Mercure et de Vénus doit toujours se trouver sur la ligne allant de la Terre au Soleil.
- La ligne reliant le centre de l'épicycle à une planète doit toujours avoir la même orientation que celle joignant la Terre au Soleil

Le système de Ptolémée est incapable d'expliquer ces liens ni même les positions des astres errants, à l'exception de celle de la Lune.

## Haut Moyen-Âge : Aristote oublié!

Pas de flèche de l'histoire ?

Domination des dogmes religieux



### **Cosmas Indicopleustes (VI<sup>e</sup> s)**

Réfute les observations « païennes » de Ptolémée sur la sphéricité du monde  
Terre: surface plane reposant sur les eaux et enchassée dans les cieux comme un tabernacle



### **Hildegarde de Bingen (1180)**

L'Univers oeuf cosmique vivant,  
renouvelable et créateur

# Bas Moyen-Âge : textes anciens redécouverts

Empyrée



Etoiles fixes

Saturne

Jupiter

Soleil

Venus

Mercure

Lune

Terre

Gossouin de Metz (1245) Le Soleil est le principal et le roy des Planètes assiz au milieu d'elles...

# Contributions des civilisations arabes

Les chiffres arabes

Le système décimal, avec virgule et zéro

Les 4 opérations

La racine carrée

La preuve par 9

Les propriétés des nombres

L'algèbre

Les équations et leurs résolutions

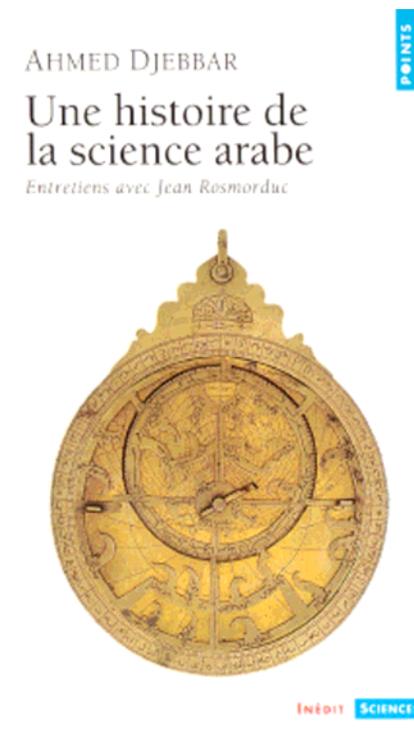
La trigonométrie

Le calcul combinatoire

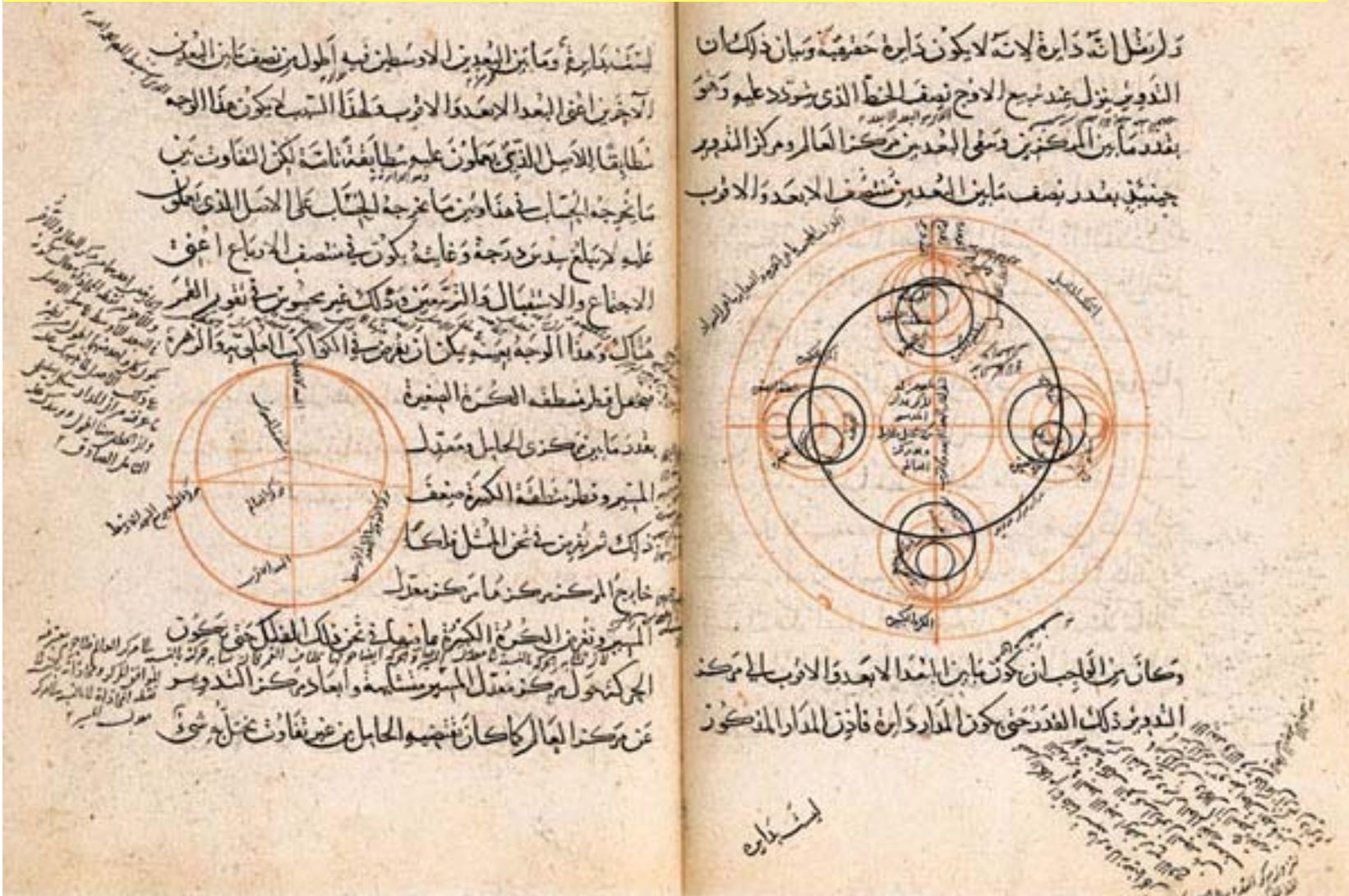
L'optique géométrique

Une « base de données » astronomiques

Mémoire des textes hellénistes,  
Assimilation des sciences  
d'autres régions asiatiques  
(Mésopotamie, Inde, Chine)



# Nasir ud-Dine al-Tusi (XIII<sup>e</sup> siècle): Critique de Ptolémée



Configuration astronomique plus simple que celle de Ptolémée

# Héliocentrisme

**Argument contre l'héliocentrisme:** Il est difficile de concevoir que la Terre soit en mouvement alors qu'on ne le sent pas!

**Nicolas de Cuse (1401-1464)**

**Réfutation:** le passager d'un bateau, se trouvant dans une cale sans hublot, n'est pas en mesure de dire si le bateau est en mouvement ou non.

**Proposition:** l'Univers plutôt infini, ne possède pas de centre ou de circonférence.

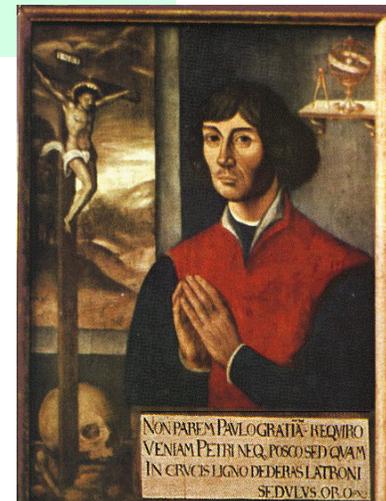
Thèse reformulée par **Giordano Bruno (v. 1548-1600)**, condamné pour hérésie puis brûlé vif à Rome...

un univers infini, peuplé d'une quantité innombrable de mondes identiques au nôtre (*De l'infini, l'univers et les mondes, 1584*)

**Nicolas Copernic (1473-1543)**

1543 *Révolutions de sphères célestes*

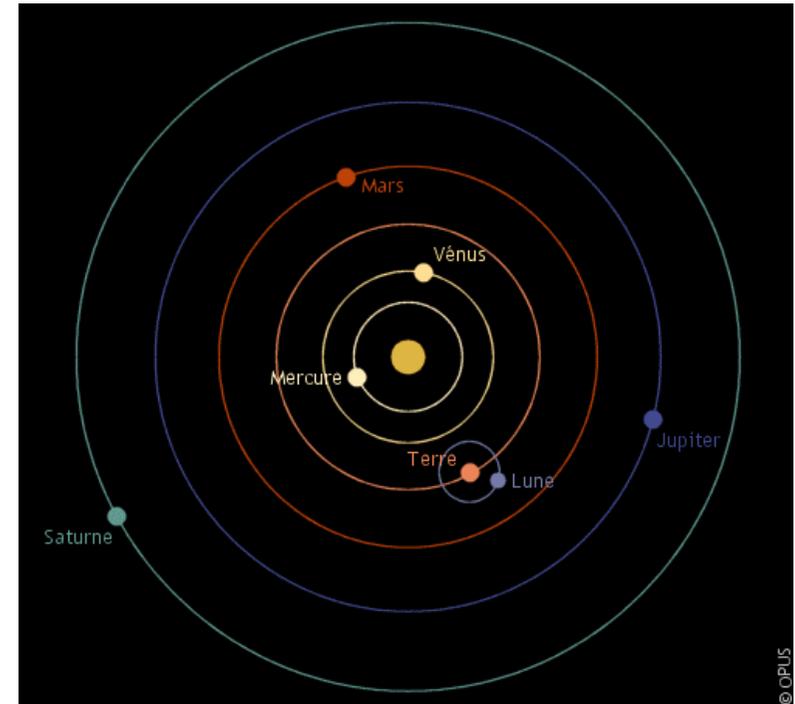
Publié quelque temps à peine avant sa mort



# 1543: La révolution Copernicienne

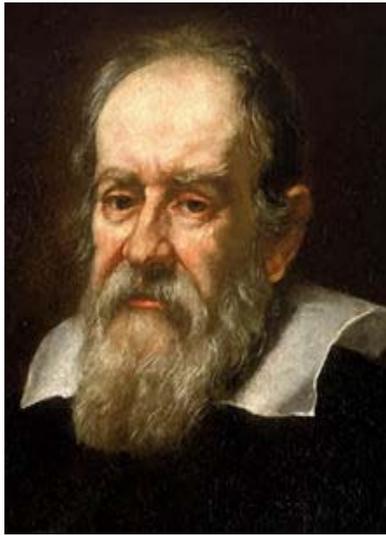
## Hypothèses de Copernic

- la Terre fait le tour du Soleil (révolution), et non l'inverse, en un an.
- les autres planètes, comme la Terre, tournent toutes autour du Soleil.
- l'axe de la terre oscille comme celui d'une toupie, ce qui explique la précession
- l'idée des sphères solides, ou la sphère des fixes physique, est conservée.



## Cette nouvelle théorie explique:

- le mouvement journalier du soleil et des étoiles par la rotation terrestre
- le mouvement du soleil au cours de l'année
- le mouvement rétrograde des planètes externes, (Mars, Jupiter, Saturne)
- prend également en compte les planètes internes Vénus et Mercure
- théorie sur l'ordre des planètes, leurs distances ==> période de leur révolution.



## Galilée ( 1564-1642)



L'une des lunettes fabriquée par Galilée en 1610.  
Cette lunette grossit 14x et présente un champ de 15'.

Hans Lippershey (?-1616)

Opticien- Brevet Oct 1594

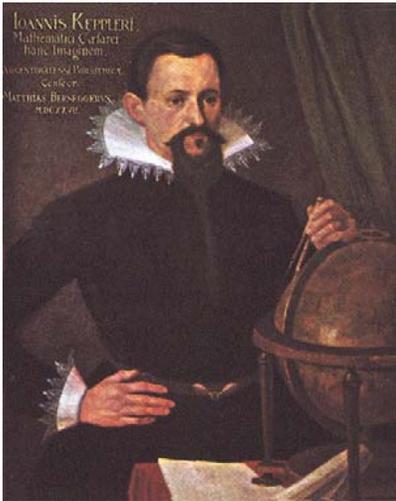
### Permet la découverte

- des satellites de Jupiter: la Terre n'est pas le seul centre de révolution
- le cycle complet des phases de Vénus → Vénus tourne autour du Soleil
- Montagnes lunaires: même nature que la Terre
- Tâches solaires: les astres ne sont pas parfaits et immuables?!?

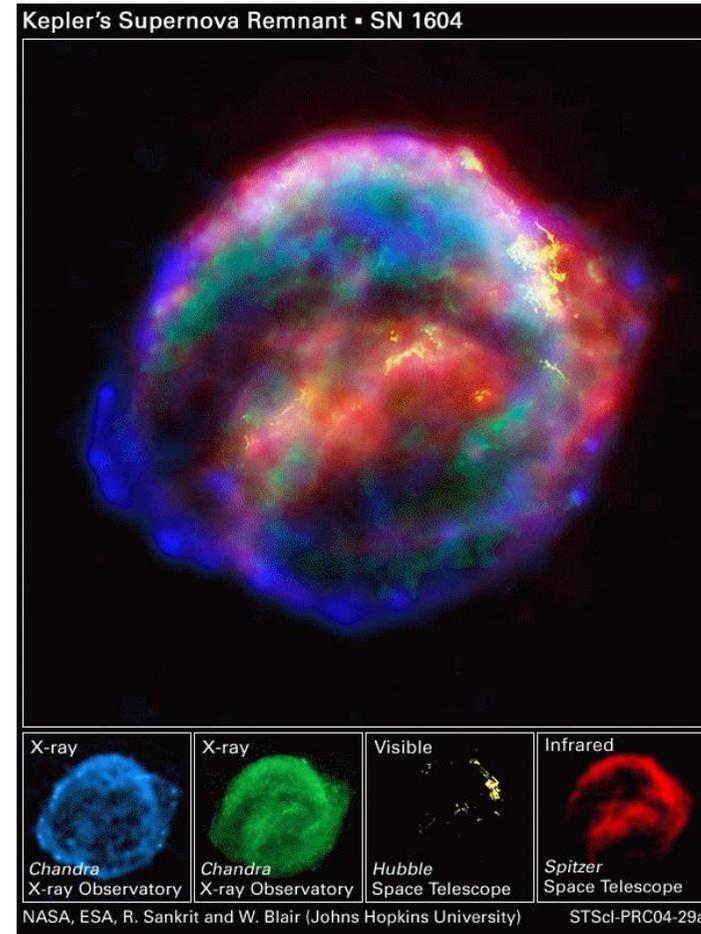
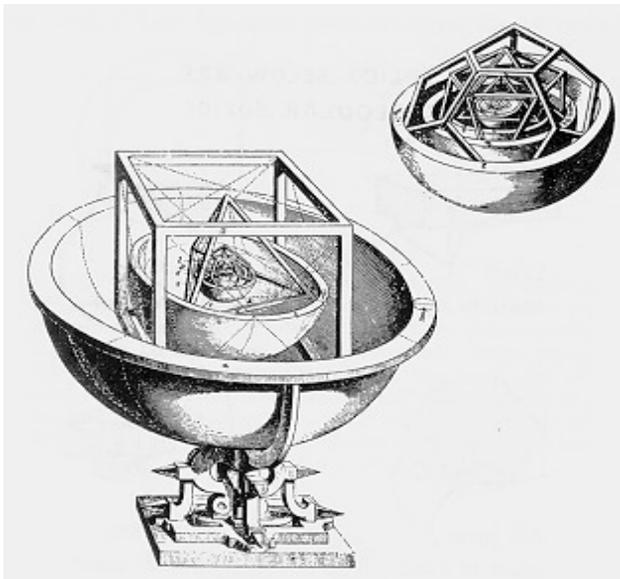
→ Longues vues pour l'armée de terre et la marine

→ Amélioré: **Télescopes pour l'astronomie**

# J. Kepler (1571-1630)

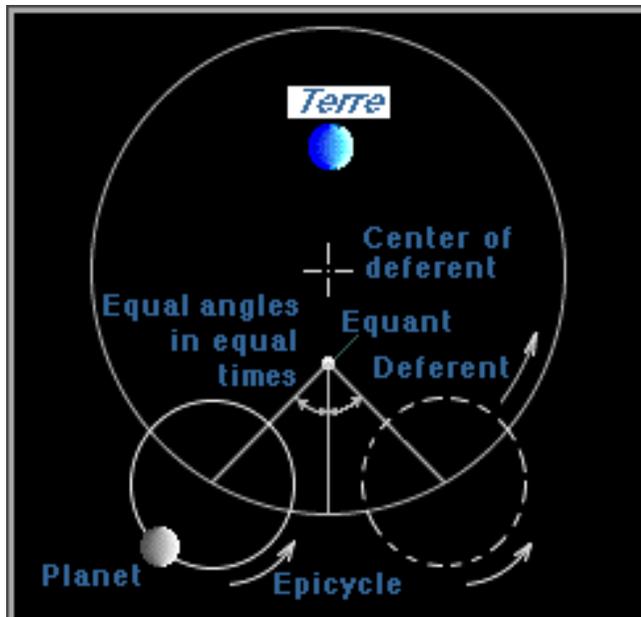


- Observation de Supernova 1604
- Lois de Kepler

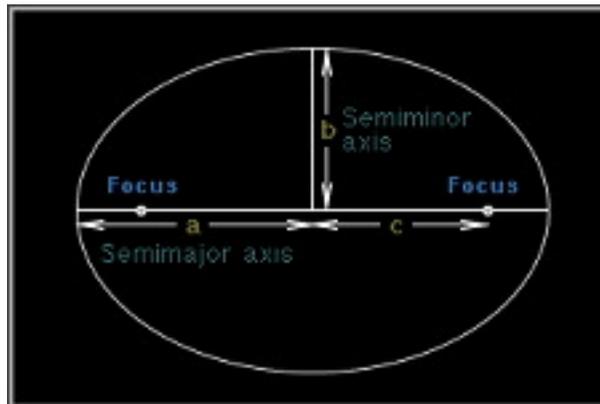


Le secret du monde (1596)

# Orbites planétaires



Ptolémée, Copernic :  
plusieurs cercles



Kepler : une ellipse

*Astronomia nova* (1609)

# 16<sup>ème</sup> siècle: la cosmologie- philosophie rejoint l'astronomie-mathématique

Jusqu'au 20<sup>ème</sup> siècle:

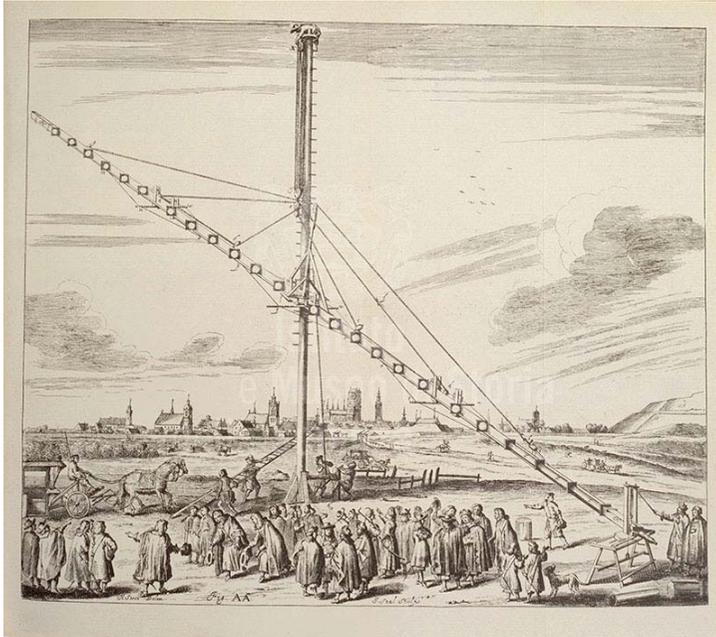
1) Accumulation de données

2) Développements de

- **la Physique classique**: optique, hydrodynamique, thermodynamique, électricité, électromagnétisme

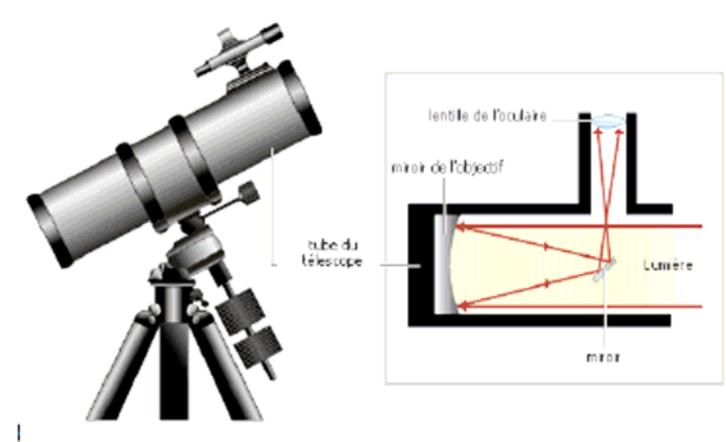
- **les techniques mathématiques**: analyse fonctionnelle, calcul différentiel, fonction dérivée, calcul intégral, fonctions exponentielles et logarithmiques, calcul des probabilités, théorie des graphes, probabilités, etc....

# Développement des télescopes et de l'optique géométrique



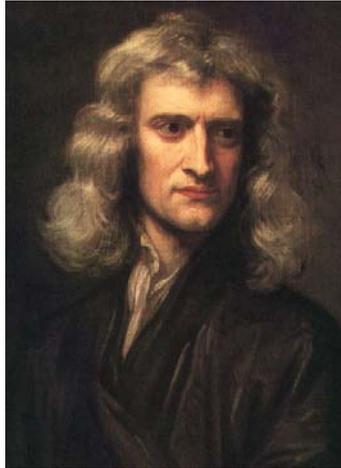
Télescope de J. Hoewel's 150-pied  
(Machina coelestis, 1673)

<http://www.imss.fi.it/index.html>

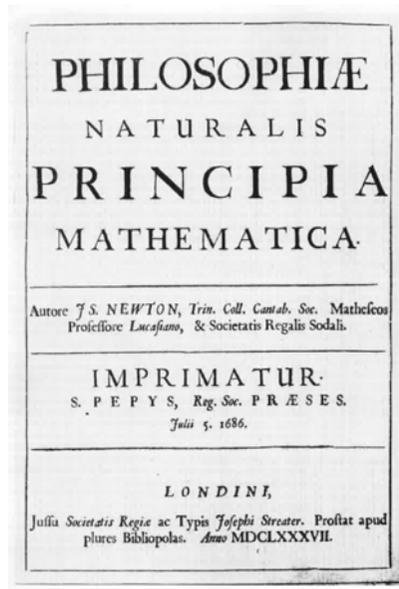
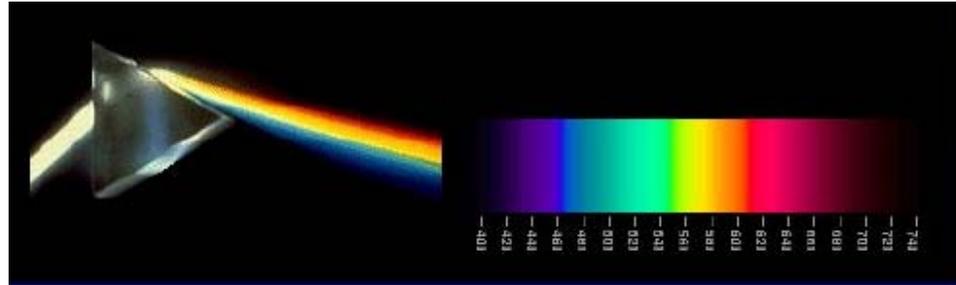


ISAAC NEWTON,  
*Reflecting telescope*, 1671-1766  
Petit telescope réfléchissant x35  
miroir concave parabolique et miroir plan,  
dévie les rayons lumineux sur le côté vers  
l'oculaire.

# I. Newton (1642-1727)



Théorie de la lumière et des couleurs  
(1665-1666)



Principia Mathematica (1687)

- masses et forces
- le principe d'inertie
- $F = m \gamma$
- la loi de l'action et de la réaction
- La loi de l'attraction universelle

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

# Développements mathématiques



**Bernoulli (Jacques)** Suisse, 1654-1705

analyse fonctionnelle, calcul différentiel, calcul intégral

**Jakob Bernoulli** : les fonctions exponentielles  
méthodes de résolutions d' équations différentielles  
calcul des probabilités (Ars conjectandi, 1713)



**EULER Léonard** (Suisse), 1707-1783

de l'arithmétique à la géométrie différentielle en passant par l'analyse numérique et fonctionnelle, le calcul des variations, les courbes et les surfaces algébriques, le calcul des probabilités et les premiers aspects de la théorie des graphes et de la topologie.

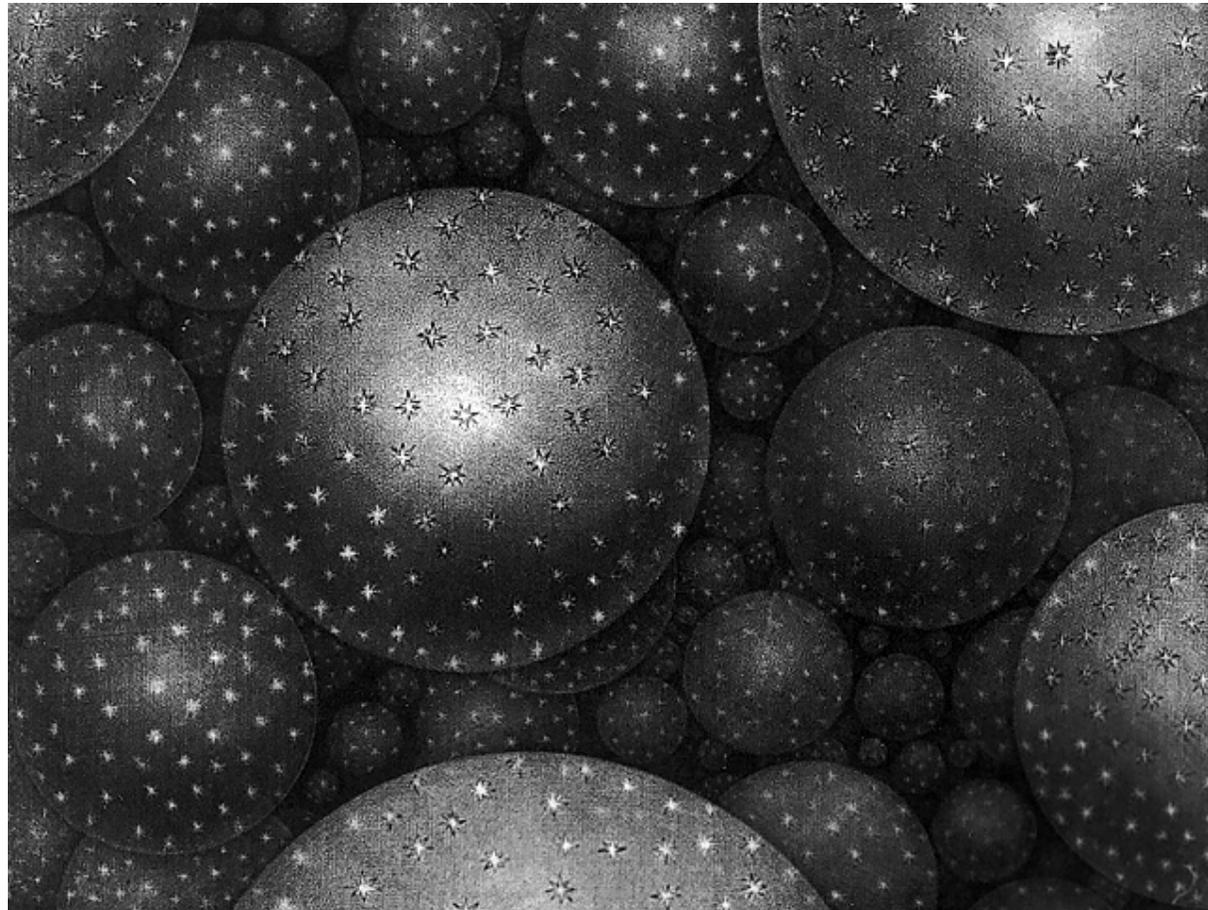
- **astronomie** (orbites planétaires, trajectoires des comètes),
- **sciences physiques** (champs magnétiques, hydrodynamique, optique, nature ondulatoire de la lumière,...),

# Le concept d' Univers-îles



**T. Wright**, An Original Hypothesis (1750)

Le système solaire  
et notre galaxie  
ne seraient pas  
uniques!

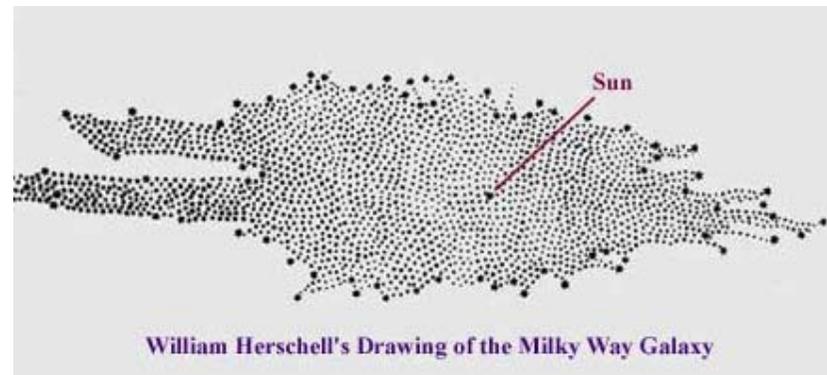
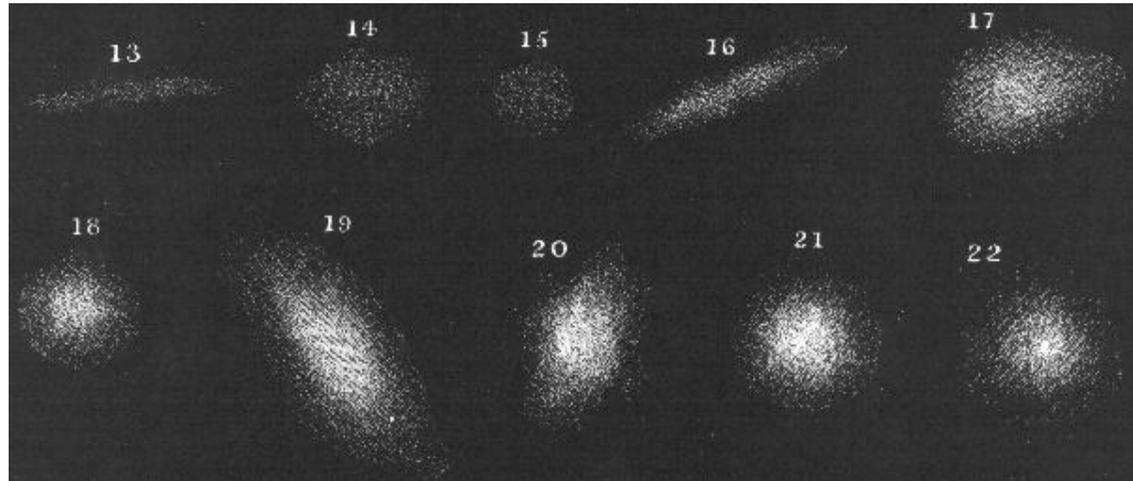


Emanuel Swedenborg (1734)  
I. Kant, *Théorie du Ciel* (1755)  
J. H. Lambert, *Lettres cosmologiques* (1761)

# Nébuleuses de gaz et Galaxies



Herschell,  
Construction of the  
Heavens (1811)



William Herschel's Drawing of the Milky Way Galaxy

# Le grand débat de 1920 Shapley-Curtis



Curtis:

- l'Univers composé de nombreuses "nébuleuses spirales" comme notre Voie Lactée
- le Soleil est au Centre de Notre Galaxie

"More data are needed"

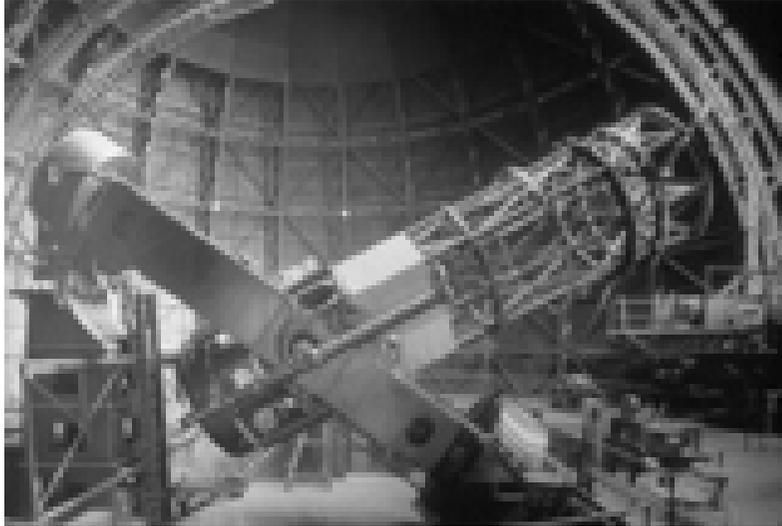


Shapley

- Ces "nébuleuses spirales" sont des nuages de gaz
- l'Univers est une unique grande Galaxie, où notre Soleil n'est pas au centre.

Shu, F., 1982, The Physical Universe, An Introduction to Astronomy, (University Science Books, Mill Valley, California)

# La solution au débat



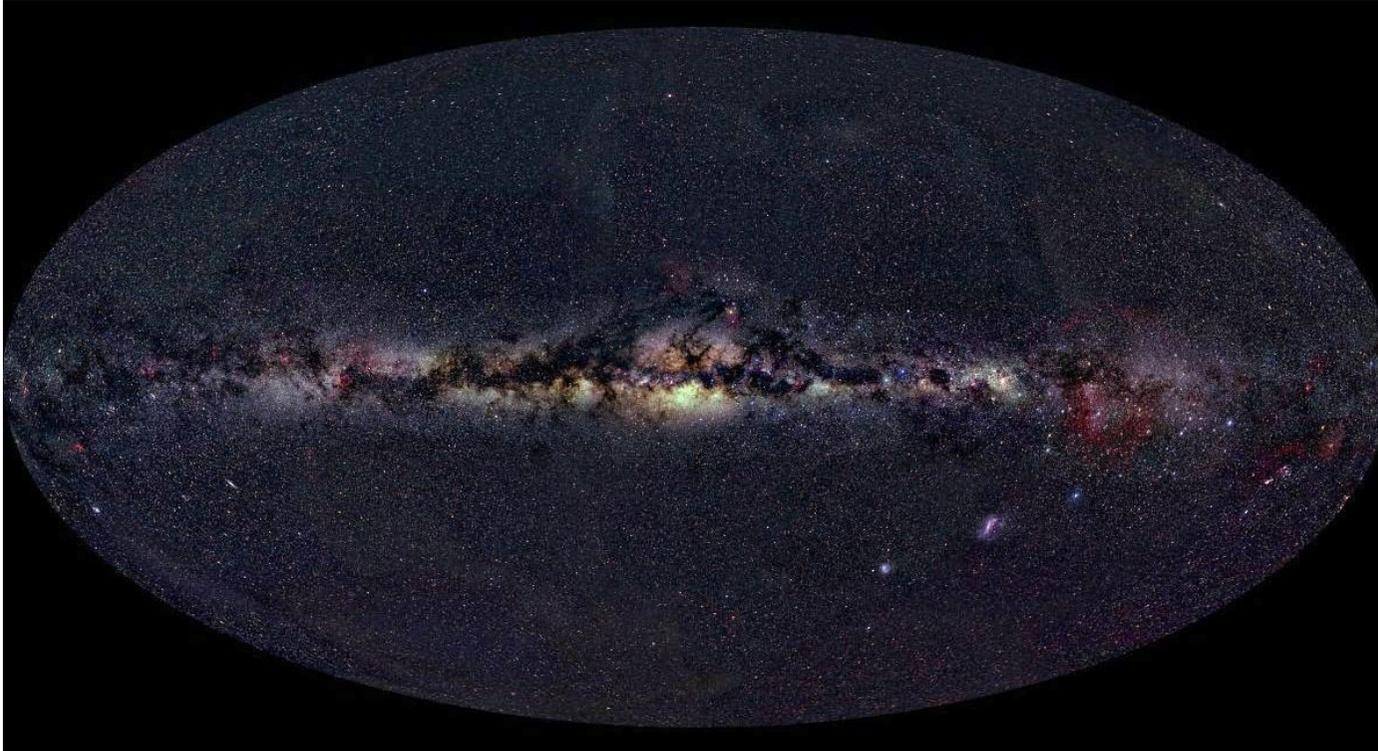
Plus de meilleures données

Telescope Hooker 100 inch au Mount Wilson

Edwin Hubble identifie les Céphéides dans Andromède (M31).  
distance à M31 plus grande encore que le supposait Shapley  
→ M31= galaxie comme la nôtre.

Découverte de l'absorption interstellaire  
+ meilleure compréhension ds distances  
→ le soleil n'est pas proche du centre de Notre Galaxie.

# Notre Galaxie: La Voie Lactée



Bande légèrement lumineuse qui traverse le ciel

Entre les constellations de Cassiopée, du Cygne et de l'Aigle

Entourée de 2 galaxies satellites: le Grand et Petit Nuage de Magellan

# Notre relation à l'Univers



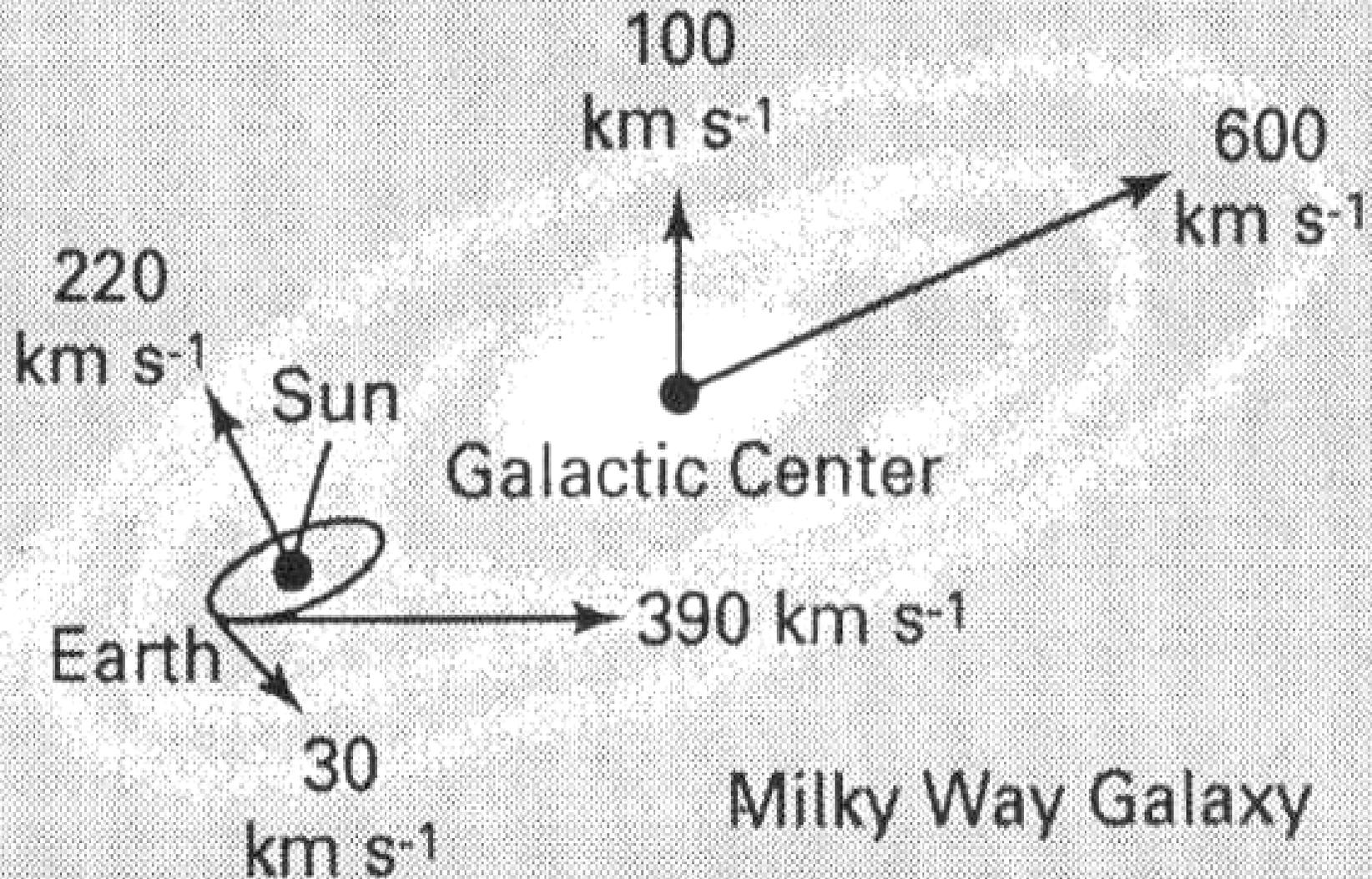
Le diamètre de notre Galaxie: 100000 années-lumière.

Le Soleil se trouve à environ 25000 années-lumière du centre dans une région dont l'épaisseur est d'environ 700 années-lumière.

La Voie Lactée tourne légèrement sur elle-même

le Soleil et les planètes mettent environ 250 millions d'années pour faire le tour

## Notre relation à l'Univers



## Facteurs de Conversions

1 parsec = distance pour une parallaxe de 1" =  $3.1 \times 10^{18}$  cm =  
 $3.1 \times 10^{13}$  km = 3.3 ly

1 Kilo parsec (Kpc) = 1,000 pc

1 Mega parsec (Mpc) = 1,000,000 pc

distance parcourue par la lumière en 1 année=

1 année-lumière (1 al= 1 ly= lightyear) =  $9.6 \times 10^{12}$  km

# Quelques tailles dans l'Univers

Echelle de Planck ==>  $< 10^{-35}$  m

Noyaux ==>  $10^{-15}$  m

Atomes et Molécules ==>  $10^{-10}$  m

Poussière ==>  $10^{-8}$  -  $10^{-7}$  m

Etres humains ==> 1-2 m



Terre ==> 13,000 km de diamètre

Système Solaire ==> 12 milliards de km de diamètre

Voie lactée ==> 40,000 pc (~120,000 ly)

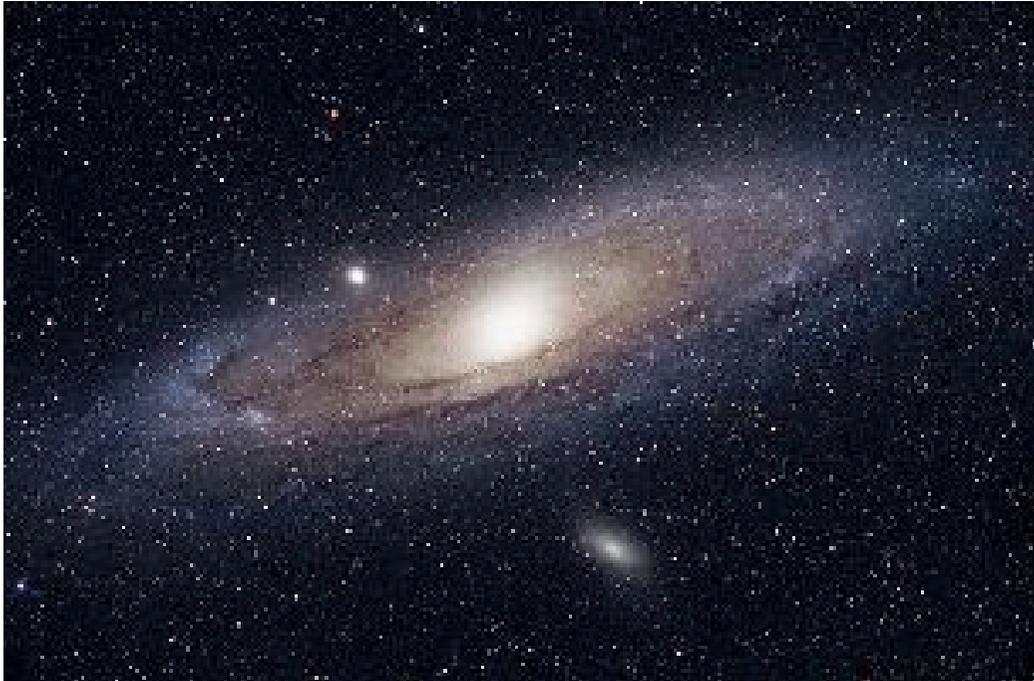
Amas Local ==> qqes Mpc

SuperAmas ==> Plusieurs Mpc

Grand Mur ==> 100 Mpc

Univers Observable ==> 3,000-6,000 Mpc (10-20 milliards ly)

## Andromède (M31), notre voisine



Elle ressemble à la Voie Lactée  
et est aussi entourée par  
deux petites galaxies satellites.

M31 se trouve à 2.2 millions d'années-  
lumière de notre Galaxie

(~22 fois le diamètre de notre Galaxie)

# Amas de galaxies



eg, Amas de Coma

Ils comprennent chacun plus de 30000 galaxies et s'étendent en moyenne sur 30 millions d'années-lumières.

Leur masse représente environ 20000 fois la Voie Lactée !



# La Grande Muraille

Muraille Nord

Les « surveys » à grand redshift révèlent des grandes structures dans l'Univers

Muraille Sud



# Distance des Galaxies



Hubble, 1925



Galaxie d'Andromède, 2 000 000 années-lumière

# Mesures de distance

- **Parallaxe:** pour les étoiles proches (F. Bessel 1784-1846 61cygni)
- **Amas stables: Pléiades** mesure de  $d\theta/dt$  (mouvements propres et de  $v_R$  (Doppler)  $\implies v_T = v_R \tan(\theta)$  et  $D = v_T / (d\theta/dt)$ )

## Chandelles « standard »

- **Céphéides:** étoiles pulsantes - distances aux Galaxies (zones d'ionisation de H2 et He, proches de la surface)  $\implies$  températures semblables  $\implies$  **Relation période- luminosité**
- **SN1a:** explosion d'étoiles **Luminosités relatives connues à 20%**

## Propriétés des galaxies

**Relation Tully-Fisher:** vitesses radiales  $L = \text{constante} * v_R^4$

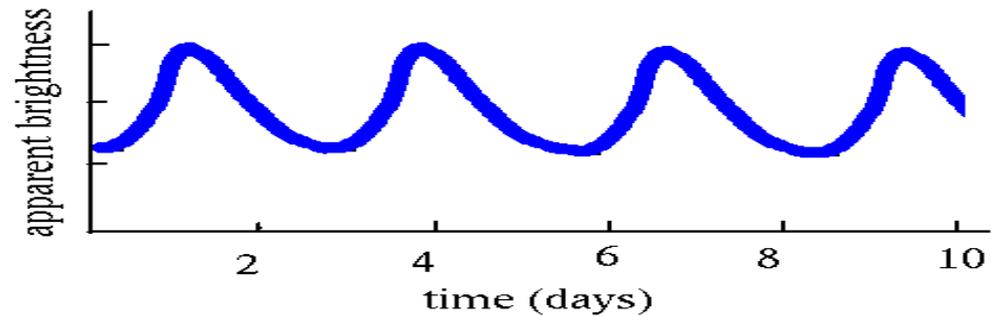
- **Relation Faber-Jackson:** Dispersion des vitesses

$$L = \text{constante} * \sigma(v)^4$$

## Lentilles gravitationnelles

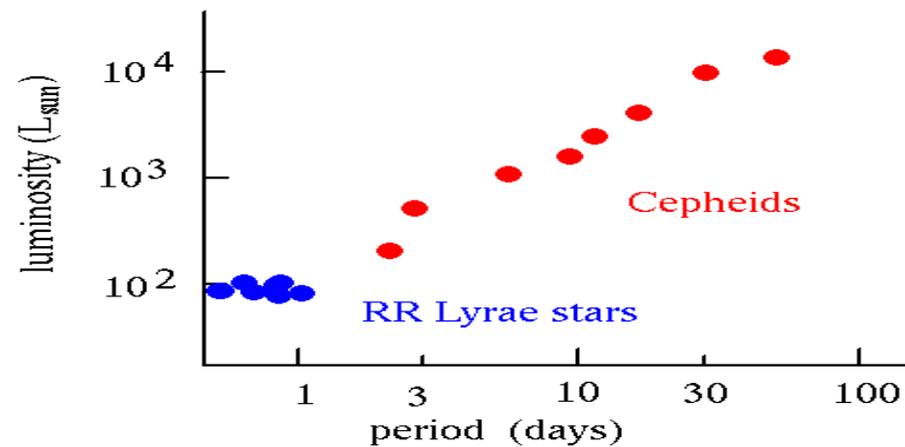
# Céphéides

## Etoiles variables

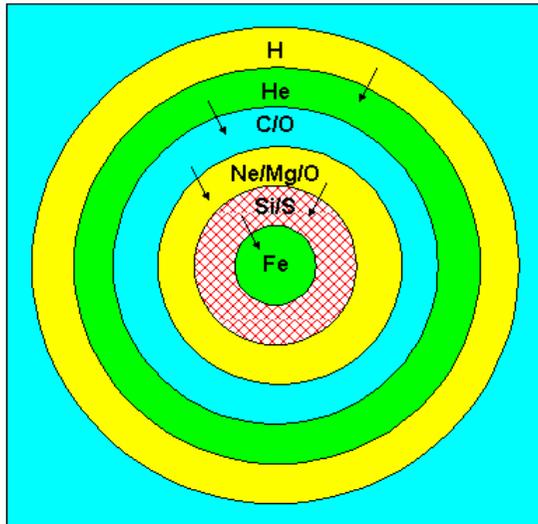


## Relations Luminosité- Période

découverte par Henrietta Levitt (SMC)



# Supernovae: explosions



« Core Collapse »  
Effondrement du  
coeur

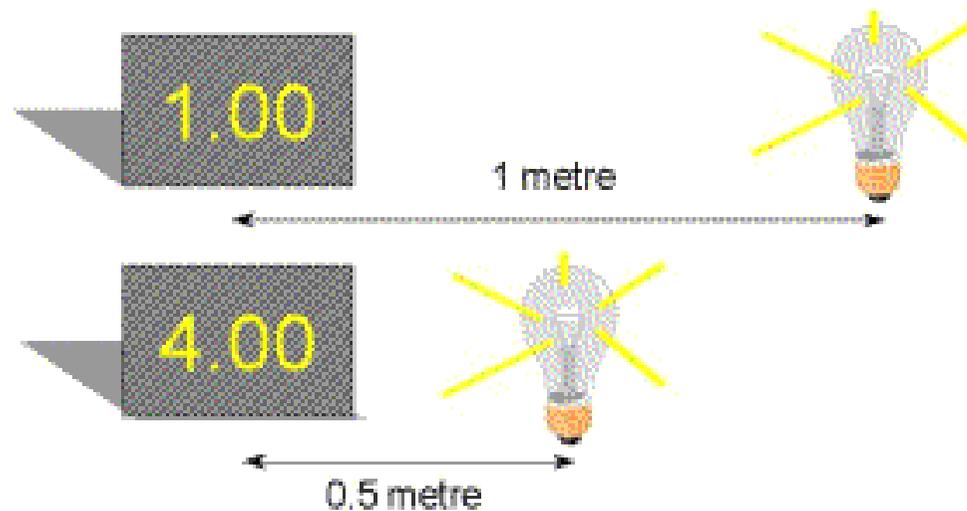


**SNIa** : 2 étoiles (naine blanche +...)

## Intérêt de l'étude des SN

- Physique des galaxies: éléments lourds et formation d'étoiles dans le milieu interstellaire (ISM)
- Physique des étoiles: explosion d'une étoile en fin de vie
- Physique des particules: propriétés des neutrinos
- Philosophie: Nous sommes tous de la poussière d'étoiles
- Cosmologie: indicateurs de distance (SNIa)

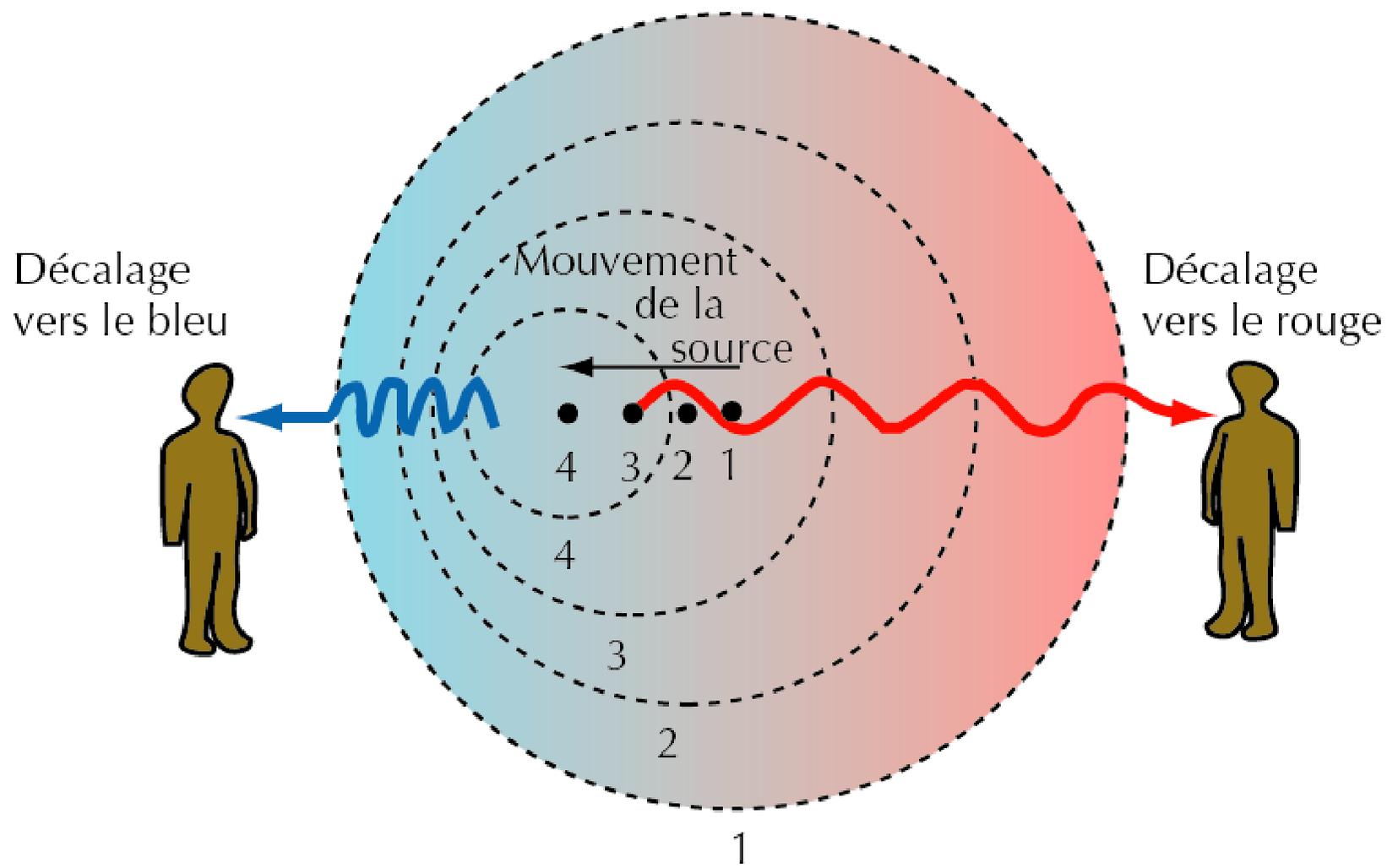
## Mesure de distances avec des chandelles standard



La luminosité est inversement proportionnelle au carré de la distance

Cosmologie: un peu plus compliqué à cause de la RG

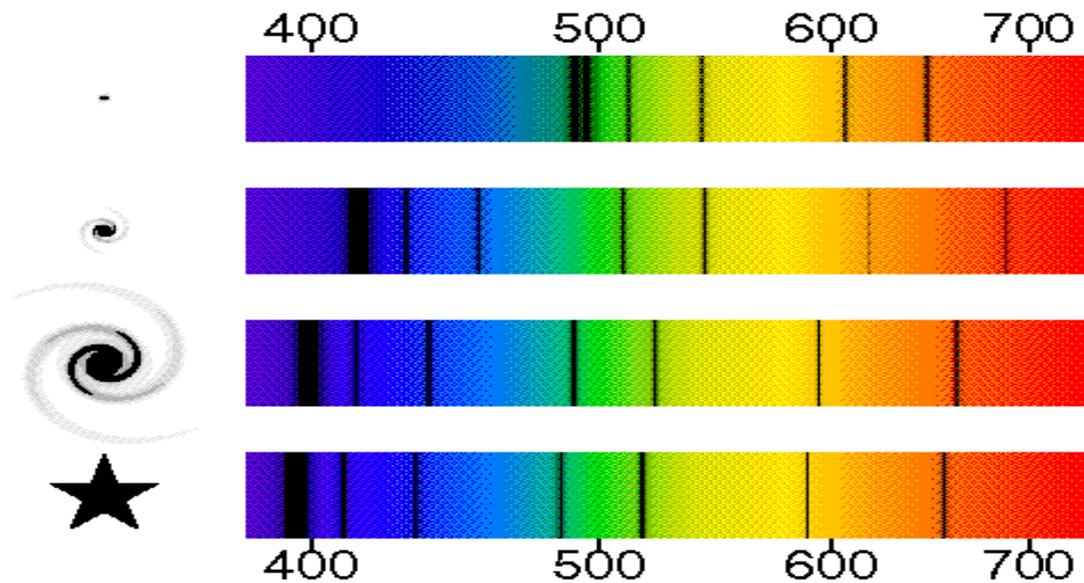
# Vitesses radiales



Effet Doppler-Fizeau

# Mesures de vitesses

## Mesures par Spectrométrie

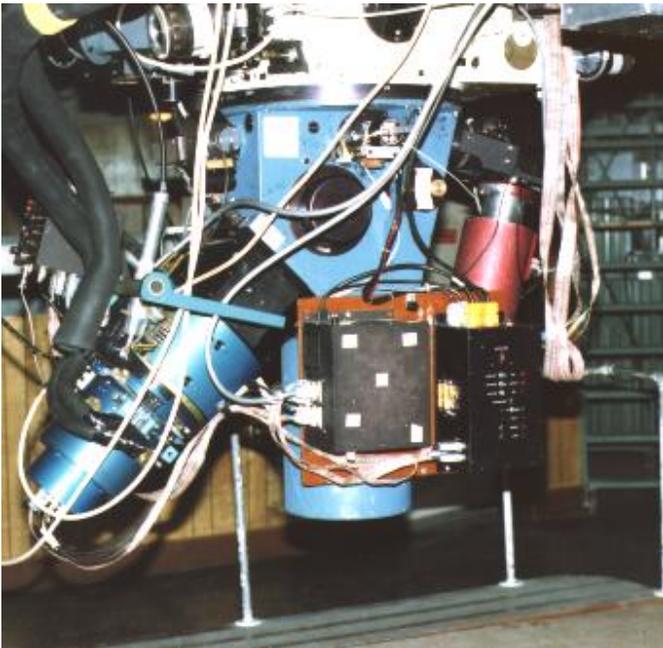
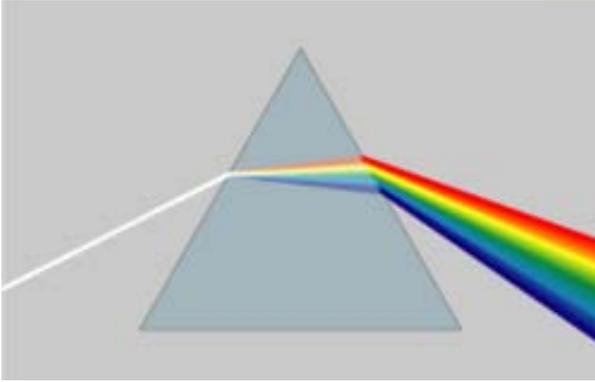


Redshift  $z$  (Effet Doppler)

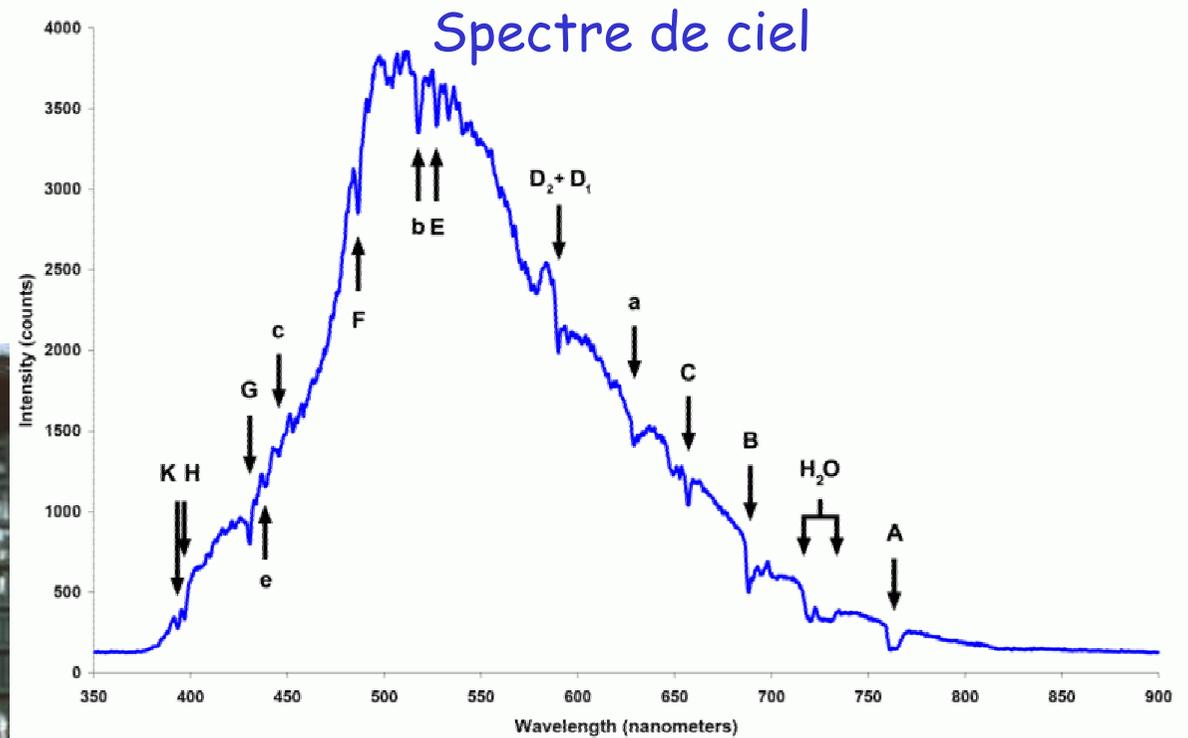
$$1 + z = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{émis}} = \left( \frac{1 + v/c}{1 - v/c} \right)^{1/2}$$

$$v = cz + \dots$$

# Spectroscopie

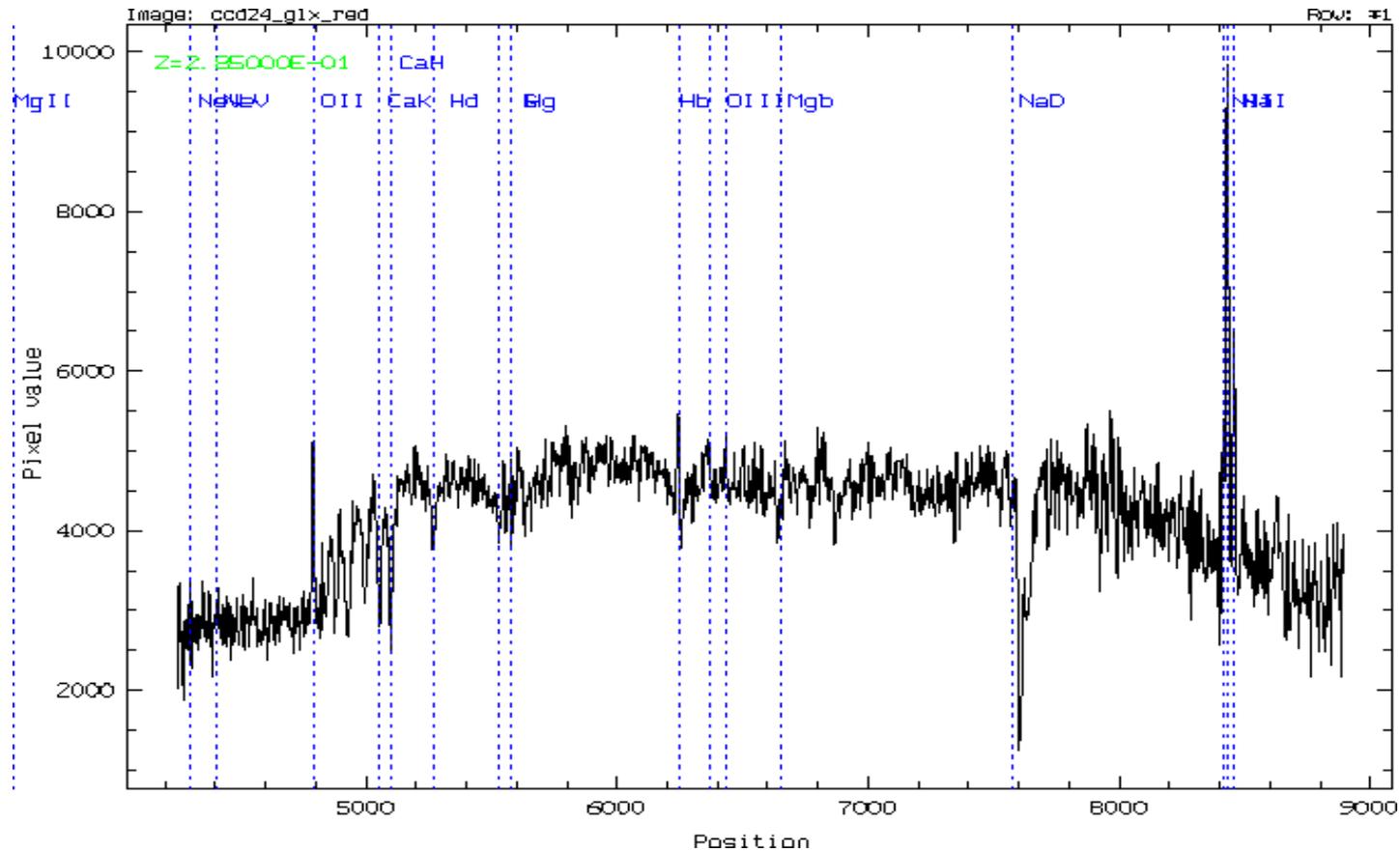


Université Arizona Steward Observatory  
spectrographe  
photo J. B. Kaler

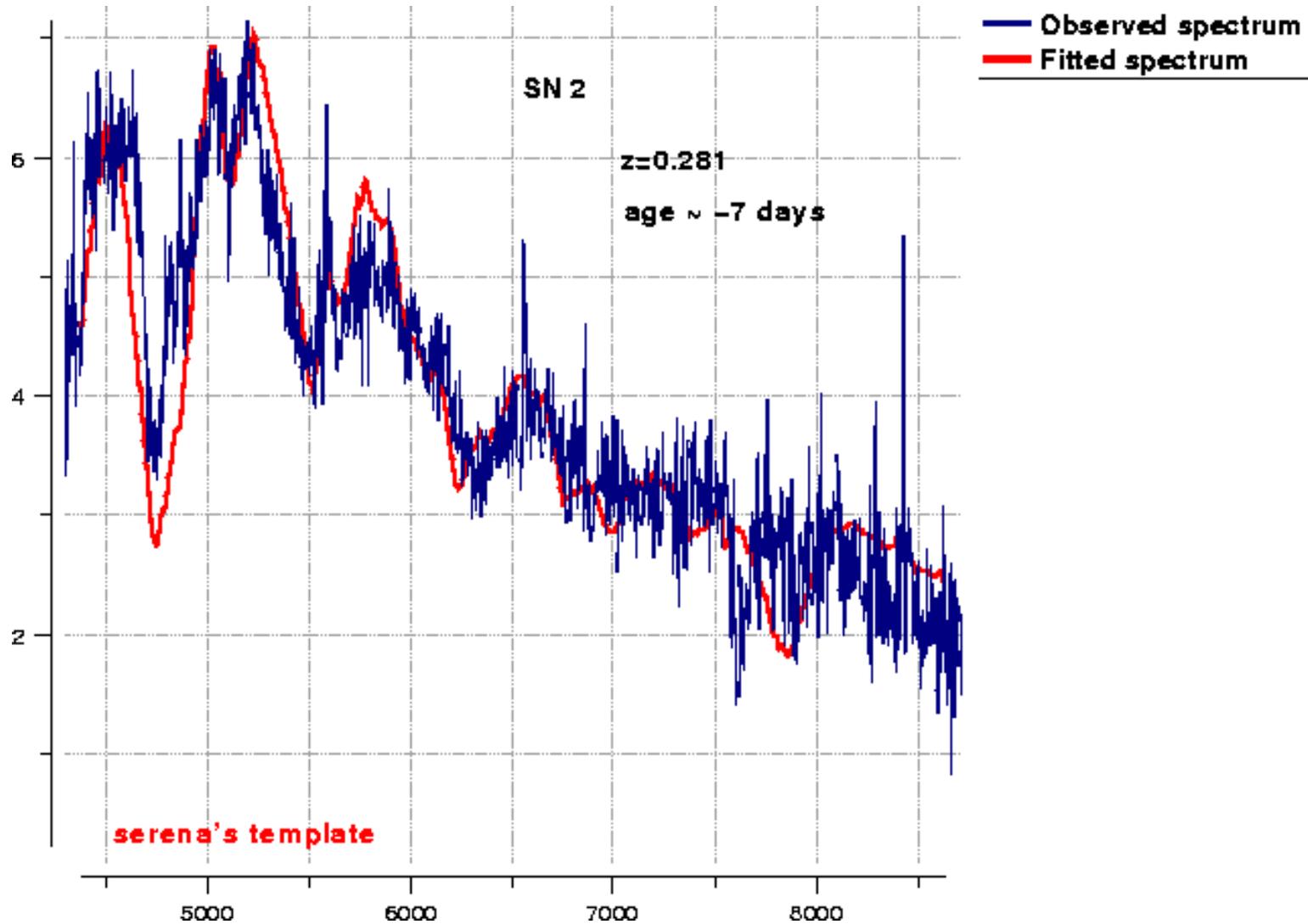


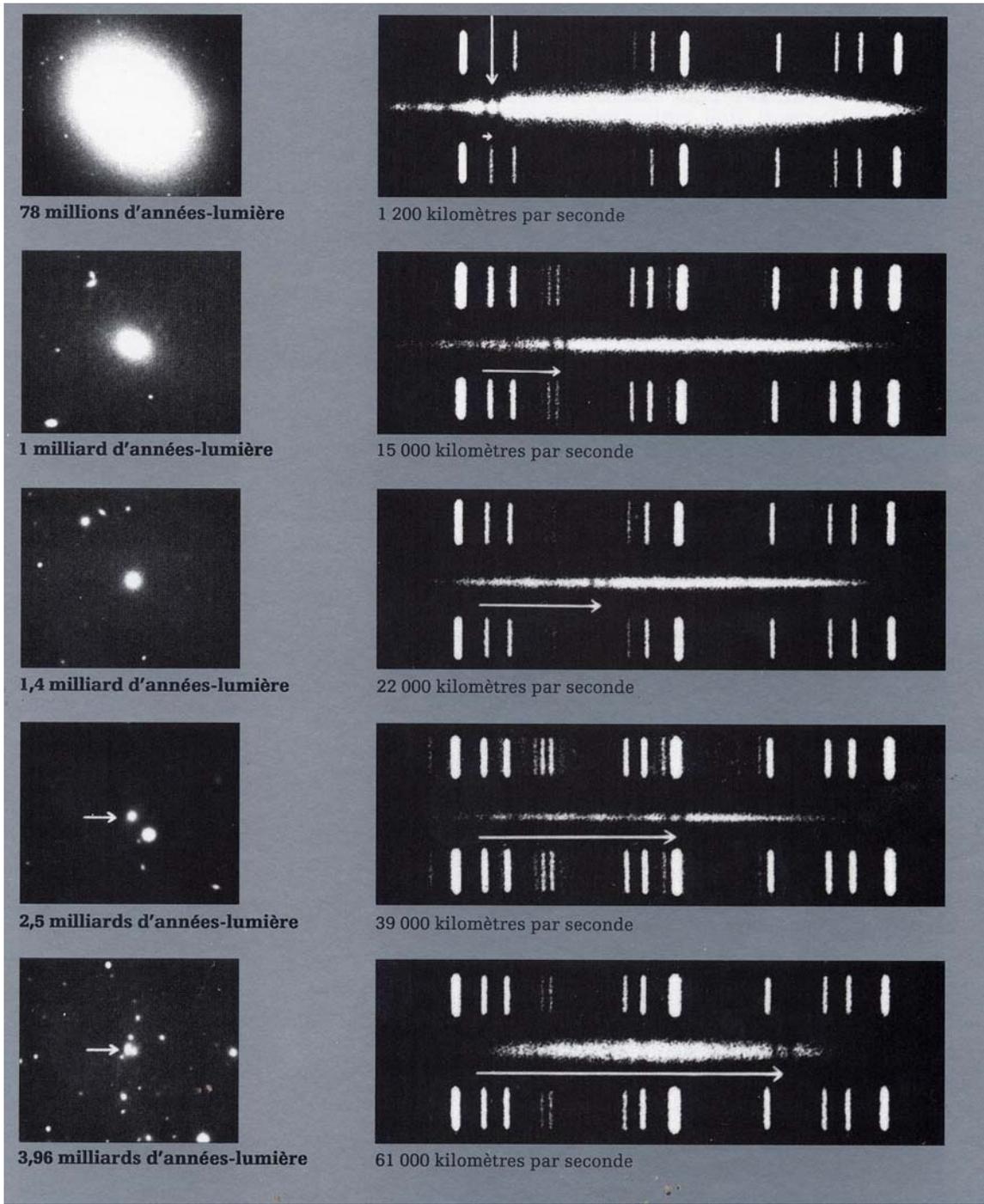
Les étoiles et galaxies observées  
présentent des raies d'émission ou  
d'absorption correspondant à leur  
composition chimique !

# La spectroscopie : une galaxie



# La spectroscopie : une Supernovae



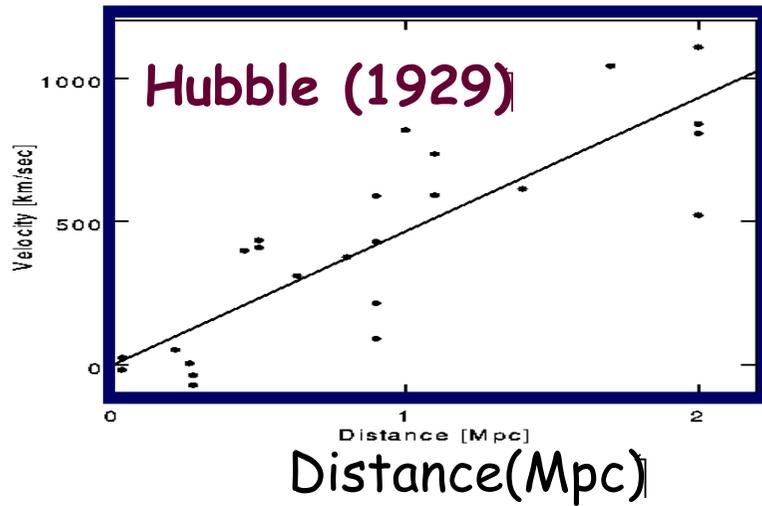


Slipher,  
Hubble,  
Humason  
(1929)

Observation de  
décalage vers le  
rouge

# Un Univers en expansion

Vitesse (km/s)



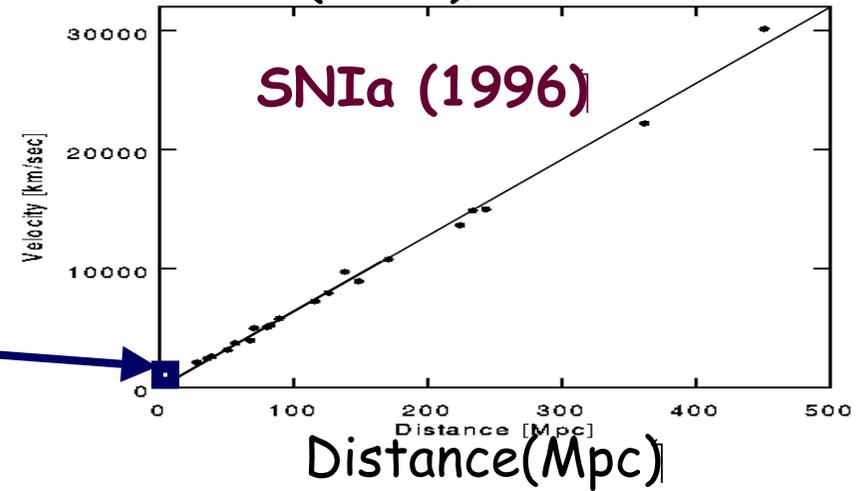
$$v = H_0 D$$

~~Constante de Hubble~~  
~~Paramètre~~



Auteur ?

vitesse (km/s)



Aujourd'hui

$$H_0 \sim 72 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$$

$$(1 \text{ Mpc} = 3.086 \cdot 10^{22} \text{ m})$$

# Lumière fatiguée ou Expansion de l'Univers?

**Lemaître et Hubble:** décalage rouge cosmique provoqué par l'étirement des ondes lumineuses lors de leur voyage dans l'espace en expansion.

**Albert Einstein:** pour réconcilier les mesures avec son hypothèse d'univers statique

Il faut un décalage vers le rouge proportionnel à la distance pour les galaxies,

**Fritz Zwicky (1929) :** le décalage rouge cosmique causé par des photons perdant graduellement l'énergie avec la distance, probablement en raison de la résistance aux champs de gravitation entre la source et le détecteur .

**Pour un photon individuel:** la lumière fatiguée est indistinguishable de l'hypothèse de l'expansion de l'univers

**Pour une distribution de photons** présentant un spectre de corps noir garde, même si elle n'est pas à l'équilibre thermique un **spectre de corps noir**, du fait de l'expansion de l'univers, avec une température qui décroît au cours du temps.

Dans le cas de la lumière fatiguée, un spectre de corps noir est déformé au cours du temps.

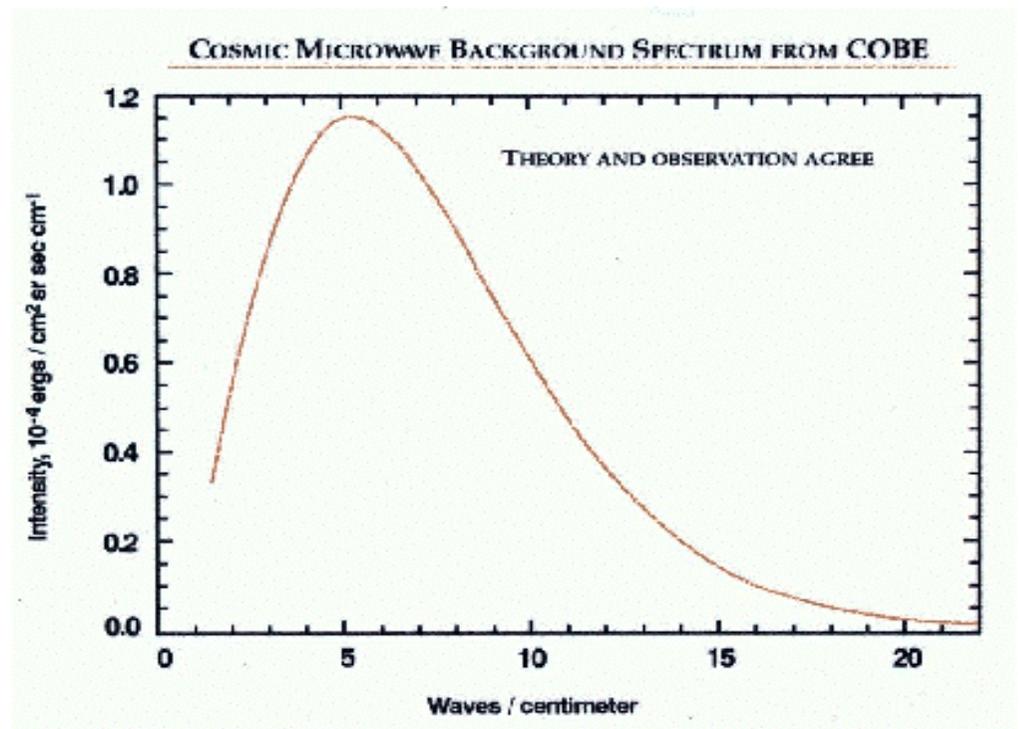
# Le rayonnement du corps noir

$$dF_{\text{eml}}^{\text{CN}} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp \frac{hc}{k_B \lambda T} - 1} d\lambda$$

$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  : constante de Planck  
 $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/s}$  constante de Boltzman  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  vitesse de la lumière  
 $\lambda$  : longueur d'onde.  
 $T$  : Température du corps opaque.

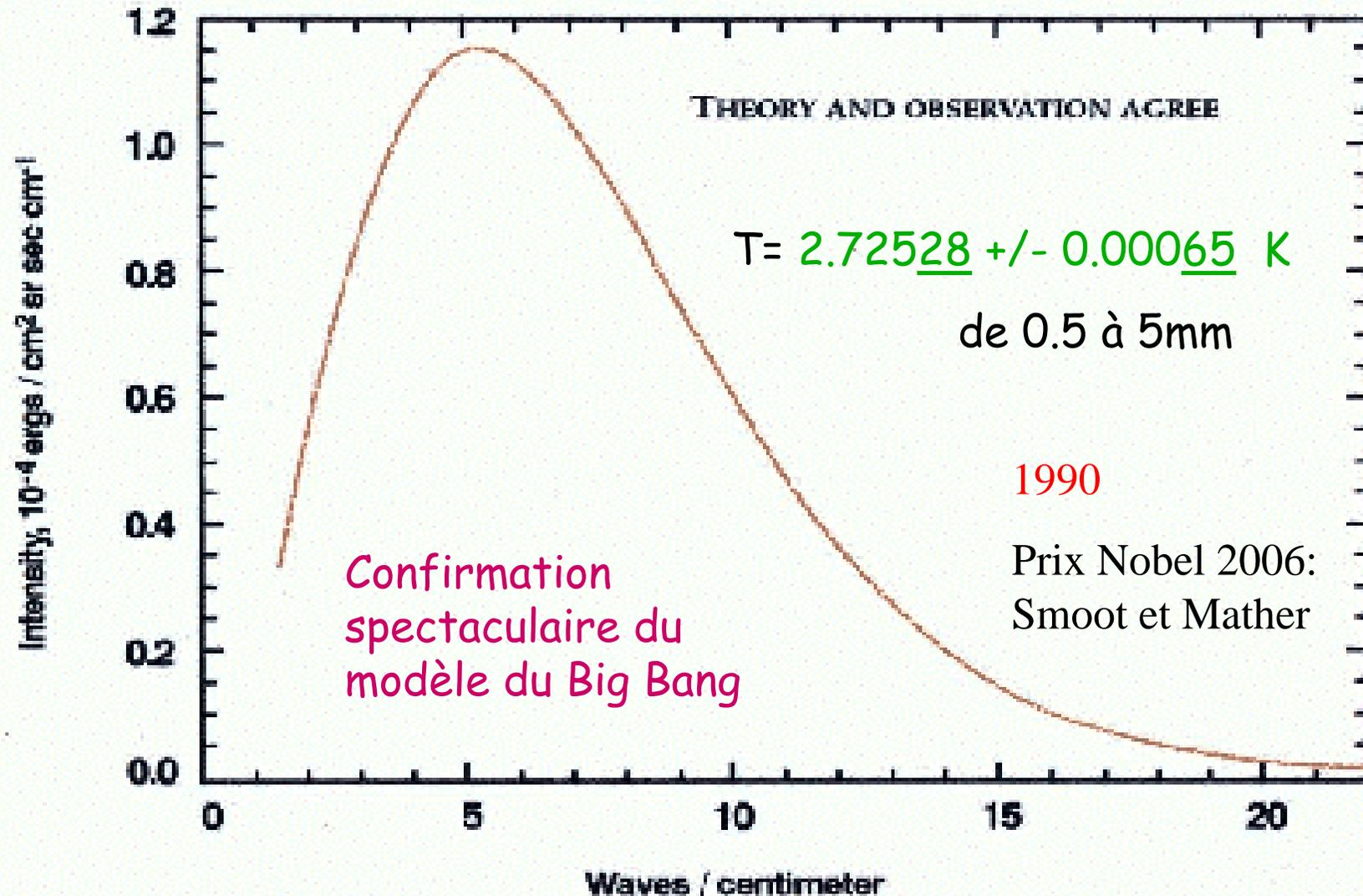
Max Planck, 1900

Albert Einstein, 1905



# Rayonnement fossile à 3K a un spectre de corps noir

## COSMIC MICROWAVE BACKGROUND SPECTRUM FROM COBE



# Théorie du Big Bang

**Relativité Générale**

**Principe Cosmologique:**  
Univers homogène et isotrope

**Observations cosmologiques**

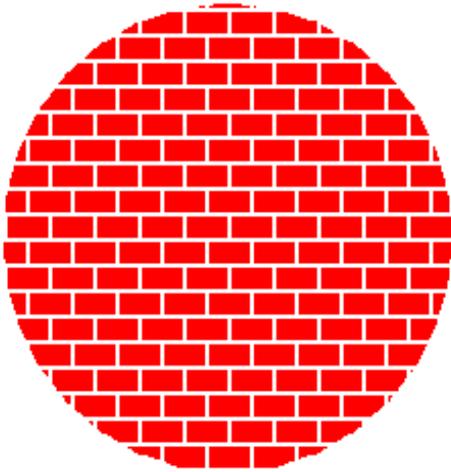
# Bases de la cosmologie

- Univers homogène et isotrope (grande échelle)
- Principe de Copernic
  - Pas de lieu privilégié
  - Pas de direction privilégiée
- L'Univers semblable vu d'un point ou d'un autre
- Les lois de la physique sont les mêmes partout

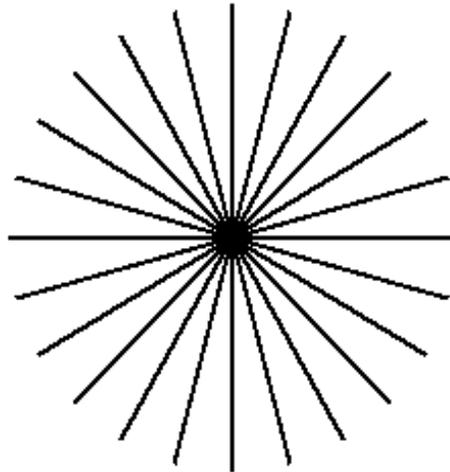
- L'Univers a une histoire au cours du temps - Il n'est pas statique!
- L'Univers est en expansion,
- L'espace temps est courbe,
- l'espace-temps est gouverné par les lois de la Relativité Générale

# Univers isotrope et homogène

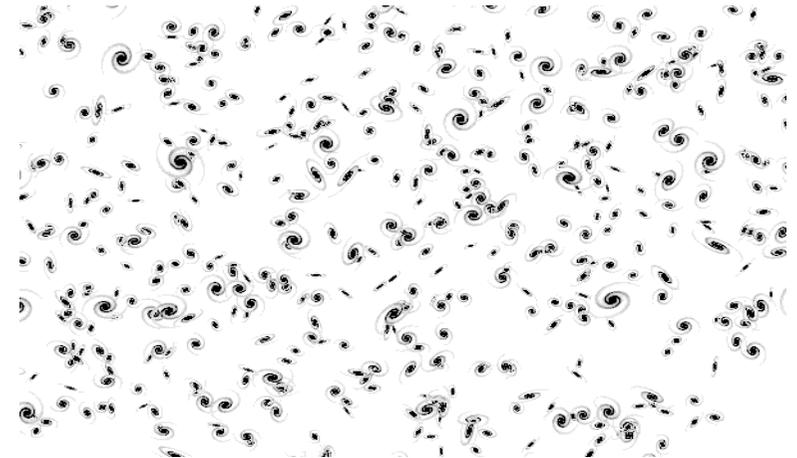
Homogène non isotrope



Isotrope non homogène



Simulation de galaxies



Ned Wright Cosmology tutorial

Meilleure preuve de l'Univers isotrope et homogène:

Le CMB (Cosmic Microwave Background): fond diffus cosmologique

# 1915: Relativité générale

Notes de cours de Sean Carroll <http://pancake.uchicago.edu/~caroll/notes/>

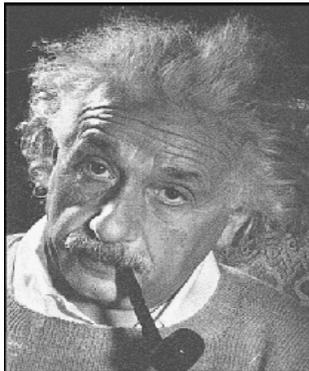
Extension de la relativité restreinte aux déplacements accélérés

Principe d'équivalence champ gravitationnel uniforme  $\Leftrightarrow$  accélération

« La gravitation n'a qu'une existence relative: pour un observateur en chute libre, il n'existe pas de champ gravitationnel »

Equations d'Einstein

$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

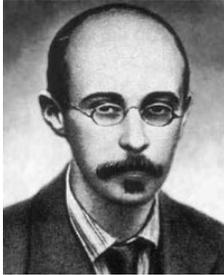


Géométrie

Energie-  
Impulsion

L'univers est courbé par la matière

# Equations de Friedmann



Alexandr  
Friedmann

Abbe  
George  
LeMaitre



Réduction des équations d'Einstein aux 2 équations de Friedmann

$$* H^2 = (\dot{a}/a)^2 = 8/3 \pi G \rho - k/a^2 + \Lambda/3 \text{ (constante cosmologique)}$$

$$* \rho + 3H (\rho + 3P) = 0$$

Paramètre de Hubble  $H_0 = (a/a)_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$ ,  $h = 0.72 \pm 0.08$

Solution la plus générale des équations d'Einstein

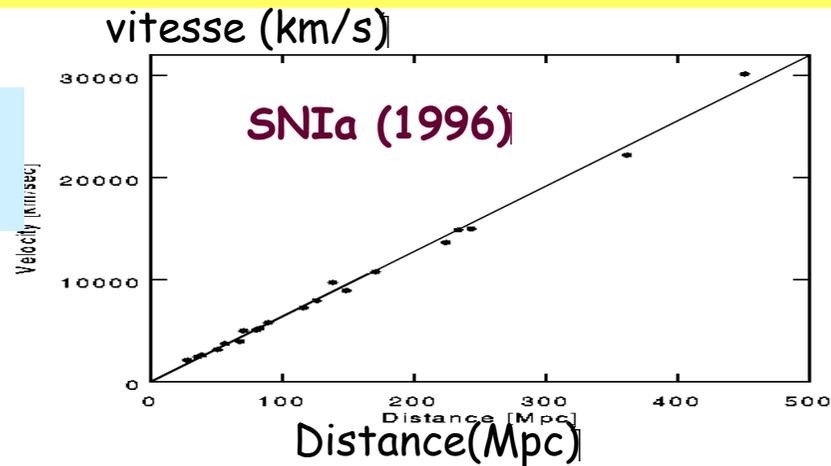
$k = -1, 0, 1$  : courbure

$a(t)$  facteur d'échelle  $= R(t)/R_0 = 1/(1+z)$

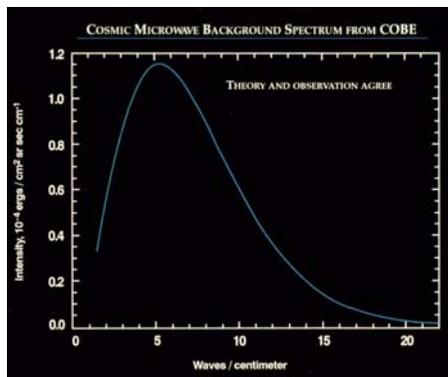
$z$  = décalage vers le rouge = « redshift »

# Tests observationnels de la théorie du Big Bang

Expansion de l'Univers:  
« Constante » de Hubble



3K: Spectre thermique du fond diffus cosmologique



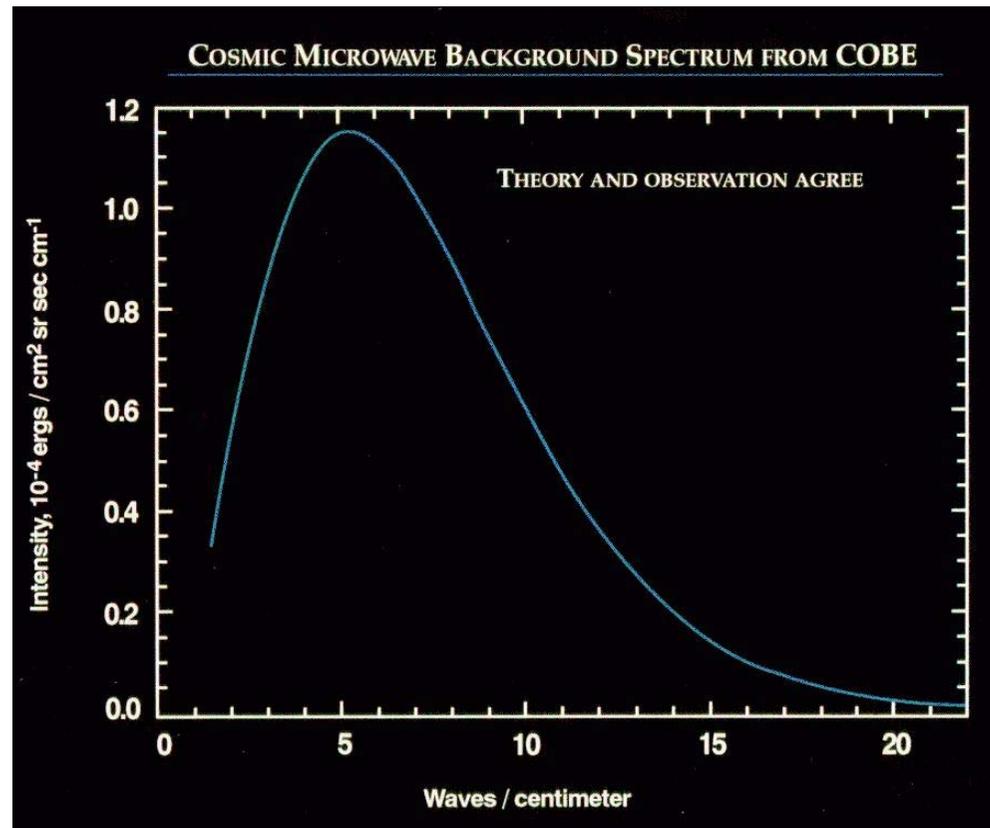
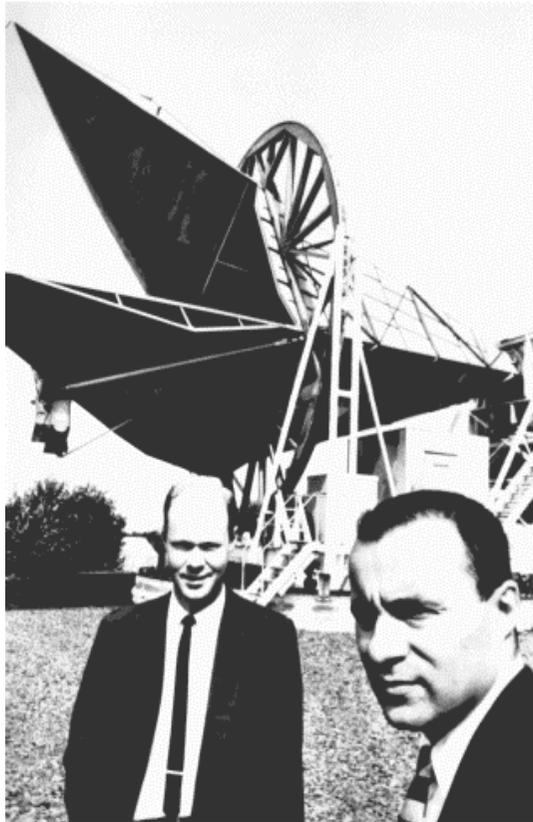
Nucléosynthèse primordiale: Abondance He, D, Li calculables

# Observation du rayonnement

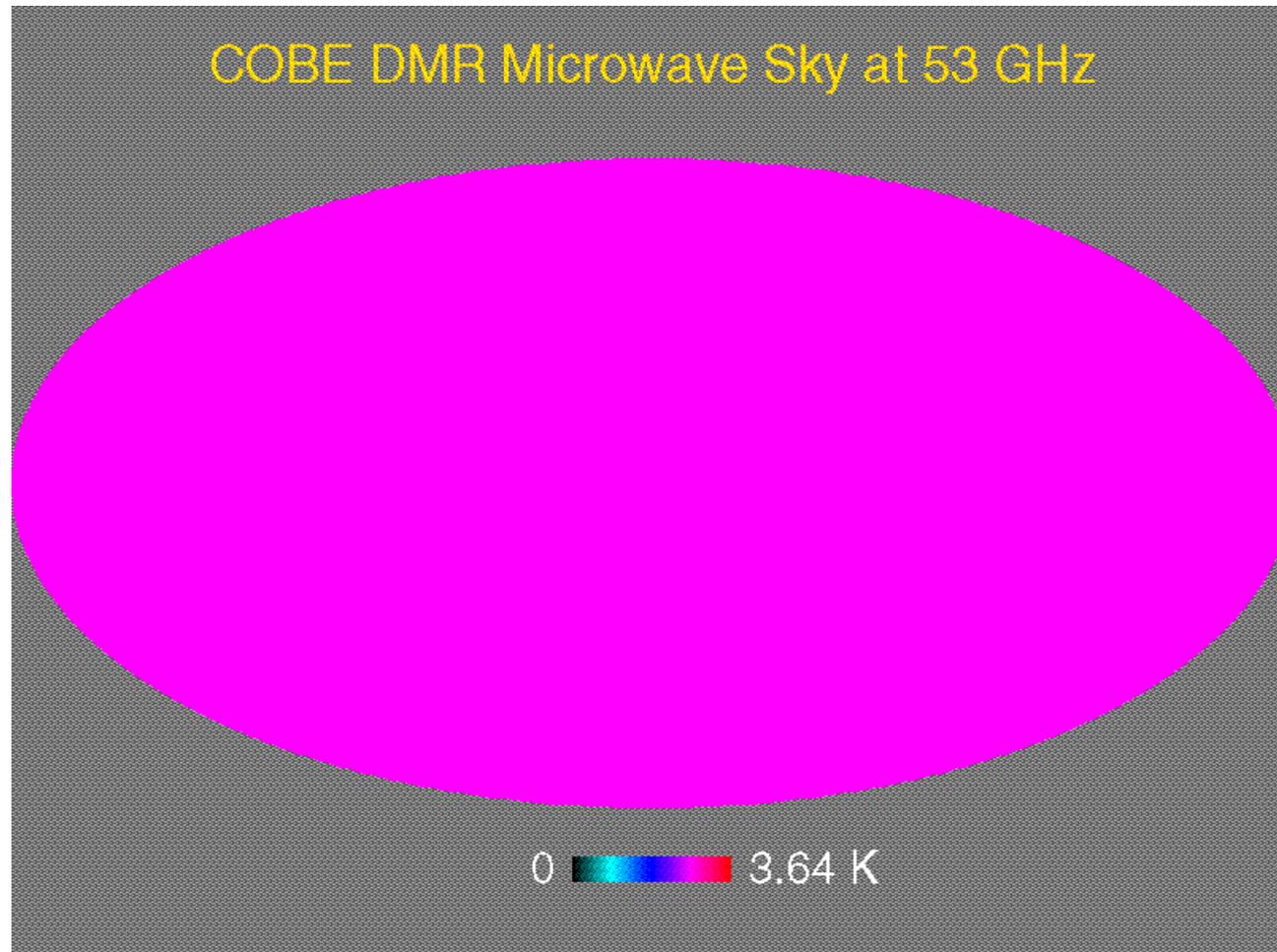
- Découverte par hasard par Penzias et Wilson (1965)

Antenne Radio: excès de bruit dans toutes les directions ( $7,5 \text{ cm } \lambda$ )

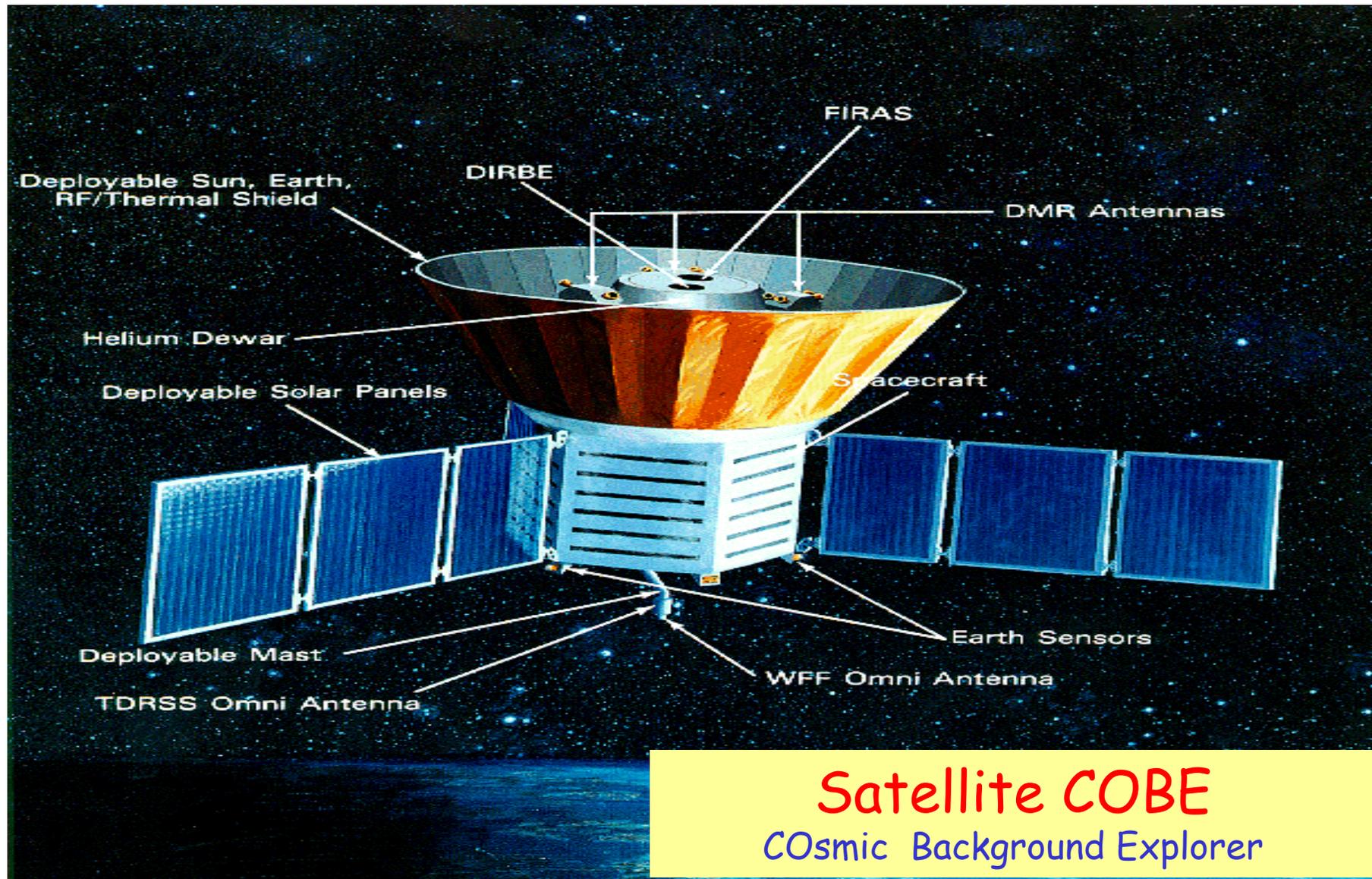
Rayonnement de corps noir à  $3.7 \pm 1 \text{ }^\circ \text{K}$  Loi de Planck



# Un Univers très Homogène



$T = 2.728 \text{ K}$



DMR : Détecteur Radio

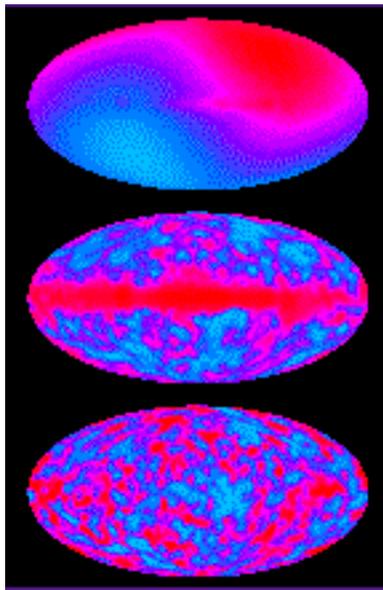
DIRBE + FIRAS: Détecteurs IR (bolomètres)

Cryogénie

# Anisotropies de Température

Expériences spatiales!

COBE/DMR (1992)

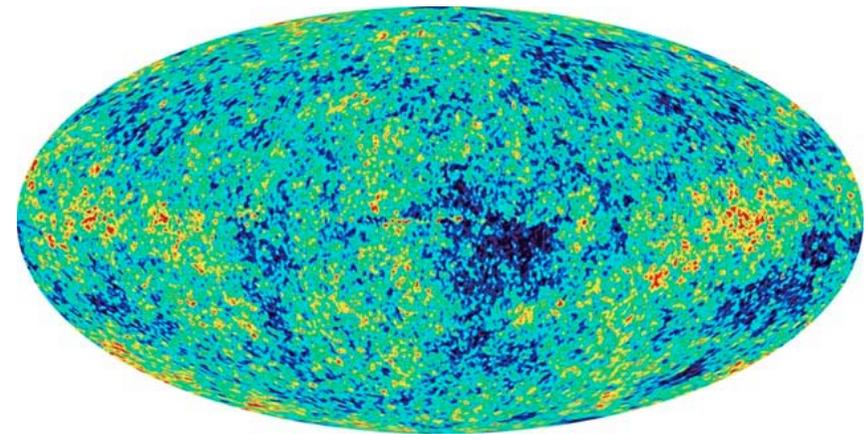


Dipole

$\Delta T \pm 3.353 \text{ mK}$

Resolution  $7^\circ$

WMAP (2003)

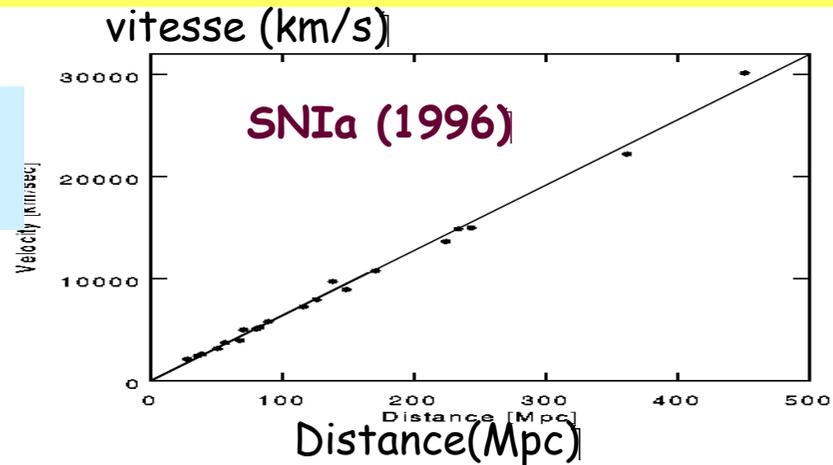


Resolution  $10'$

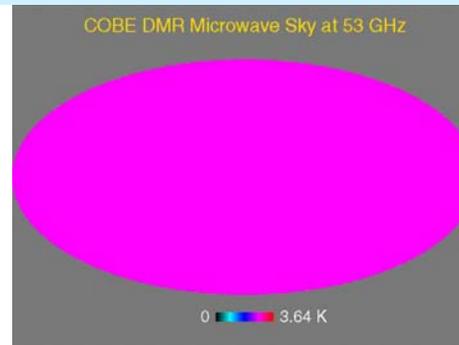
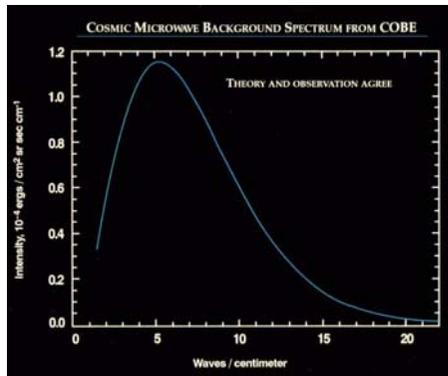
$T = 2.728 \text{ K}$ , fluctuations  $10 \mu\text{K}$

# Tests observationnels de la théorie du Big Bang

Expansion de l'Univers:  
« Constante » de Hubble



3K: Spectre thermique du fond diffus cosmologique



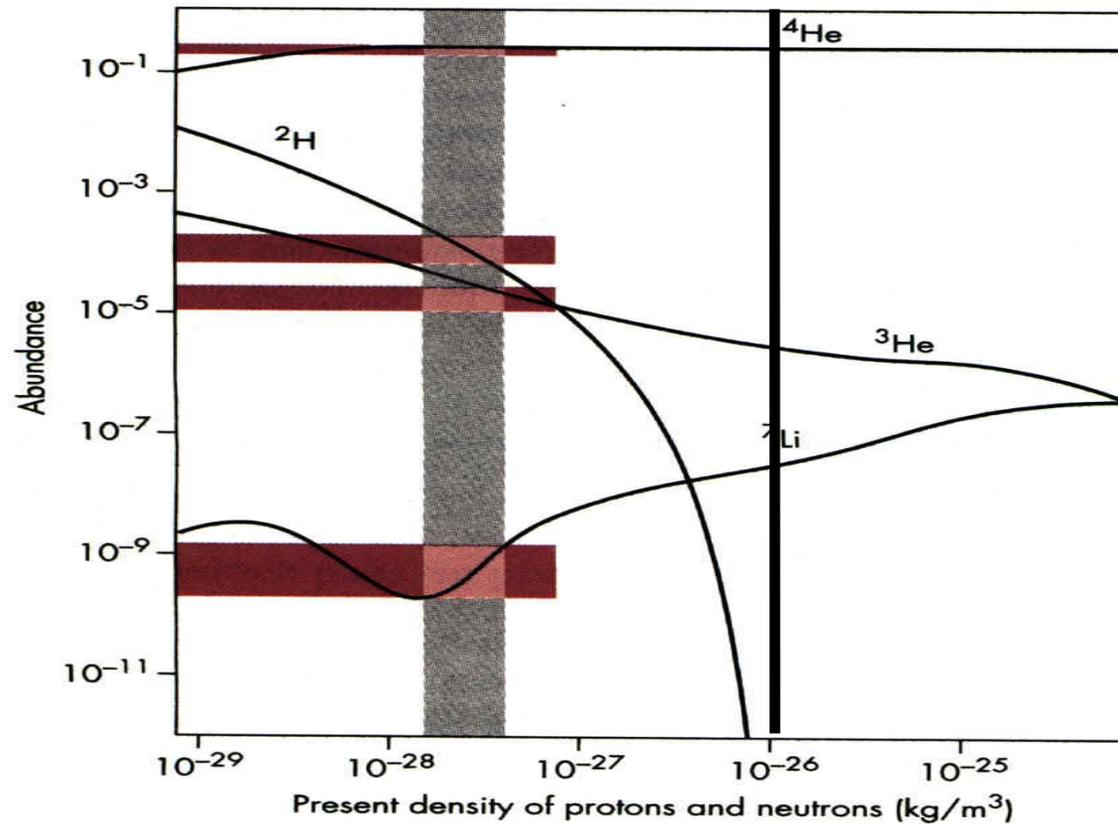
Nucléosynthèse primordiale: Abondance He, D, Li calculables

# Nucléosynthèse du Big Bang

D,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^7\text{Li}$  produits dans les premières minutes

Abondances mesurées

Densité critique



$$\Omega_B = 0.04 \pm 0.004!!$$

# Nucléosynthèse et Origines de la Vie

Carbone, Oxygène, Silicium, etc...

Synthèse des éléments plus lourds : dans les étoiles!

Disséminés par les Supernovae

## Les 2 révolutions scientifiques du début du XX<sup>ème</sup> siècle

- Mécanique Quantique
- Théorie de la Relativité

→ Physique atomique, électronique,  
informatique, physique nucléaire, physique  
des particules

→ Astrophysique, cosmologie

→ Electronique, Informatique

# L'expansion de l'Univers et la physique des particules expliquent l'évolution de l'Univers



Temps proche de 0

Gravité quantique?



Temps =  $10^{-35}$  Seconds

Fin de GUT

- 3 forces existent:  
gravité, inter. forte & électrofaible
- Création de particules élémentaires -  
quarks (proton, neutron)  
leptons (electrons, neutrinos)
- Comment la matière est-elle créée?

$$E=mc^2$$

Leger déséquilibre entre matière et antimatière

Temps =  $10^{-35}$  to  $10^{-33}$  seconde

## INFLATION?

La taille de l'univers augmente très rapidement

facteur  $10^{30}$  à  $10^{40}$

Pour expliquer l'uniformité de l'univers

Et autres problèmes

Temps =  $10^{-12}$  seconde jusqu'à 3 minutes

## Ere de la nucléosynthèse

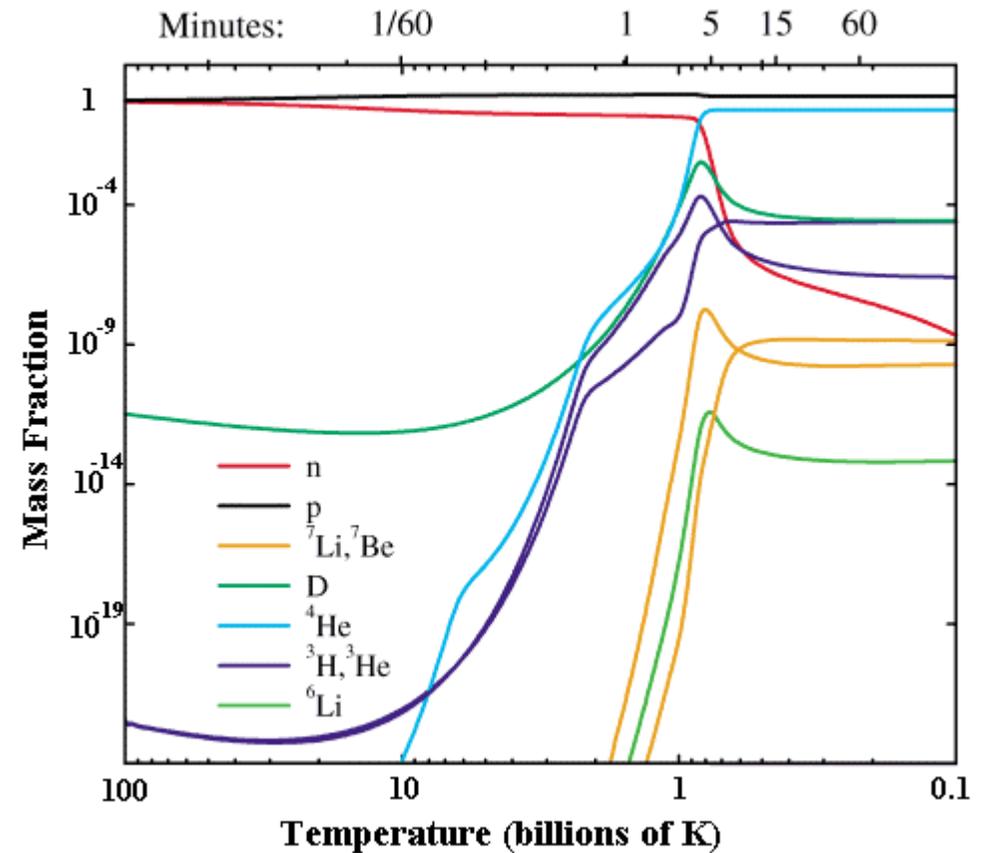
Température  $> 10^9$  K

Fusion Hydrogène (protons)

→ noyaux d'Hélium

Résultat final = composition

de 75% H 25% He



**Temps = 300,000 ans ( $z=1100$ )**

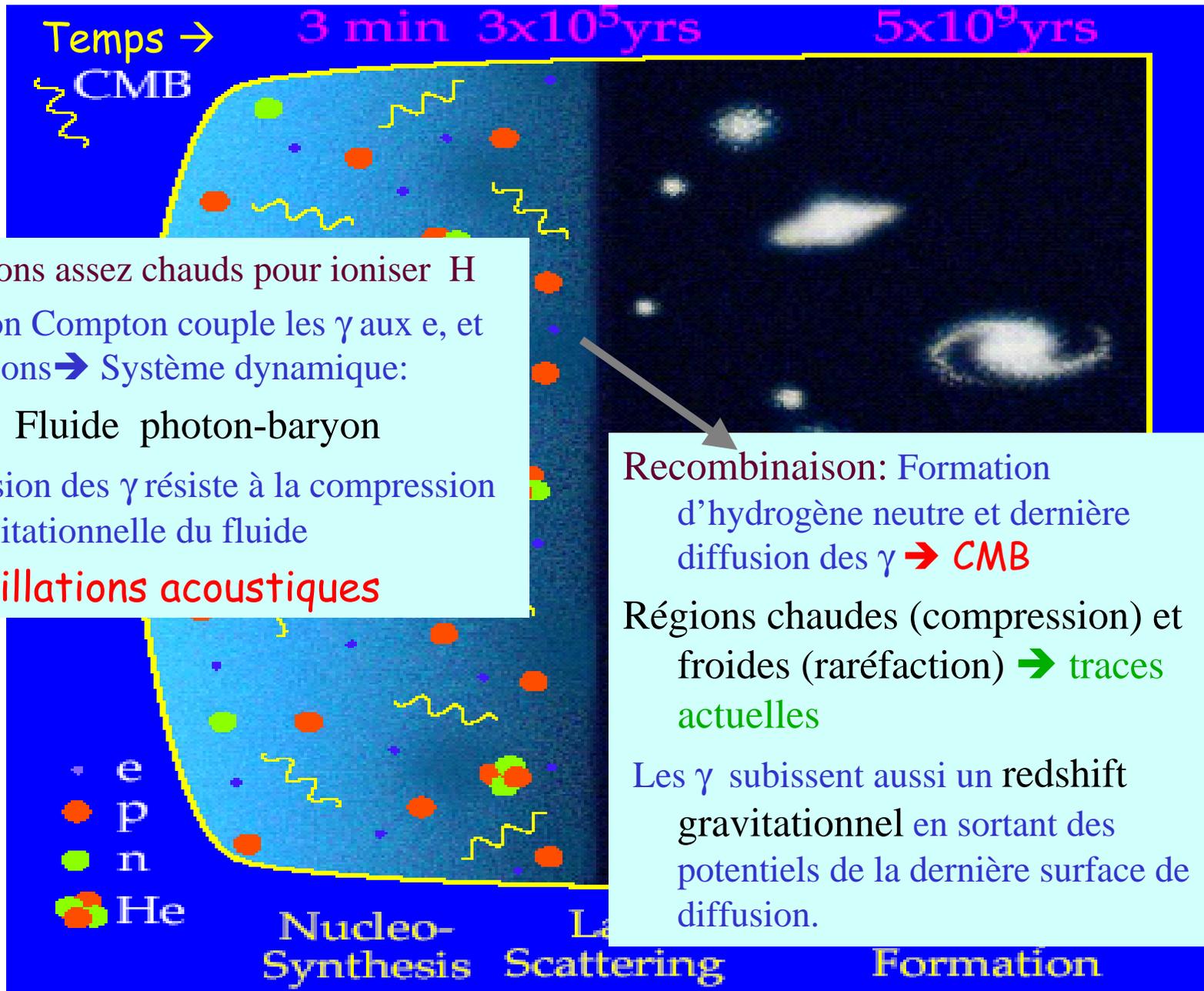
### **Recombinaison (Découplage)**

Température = 3000 K

La domination de l'univers par la radiation s'achève  
et celle de la matière commence

C'est le début des "Ages sombres"

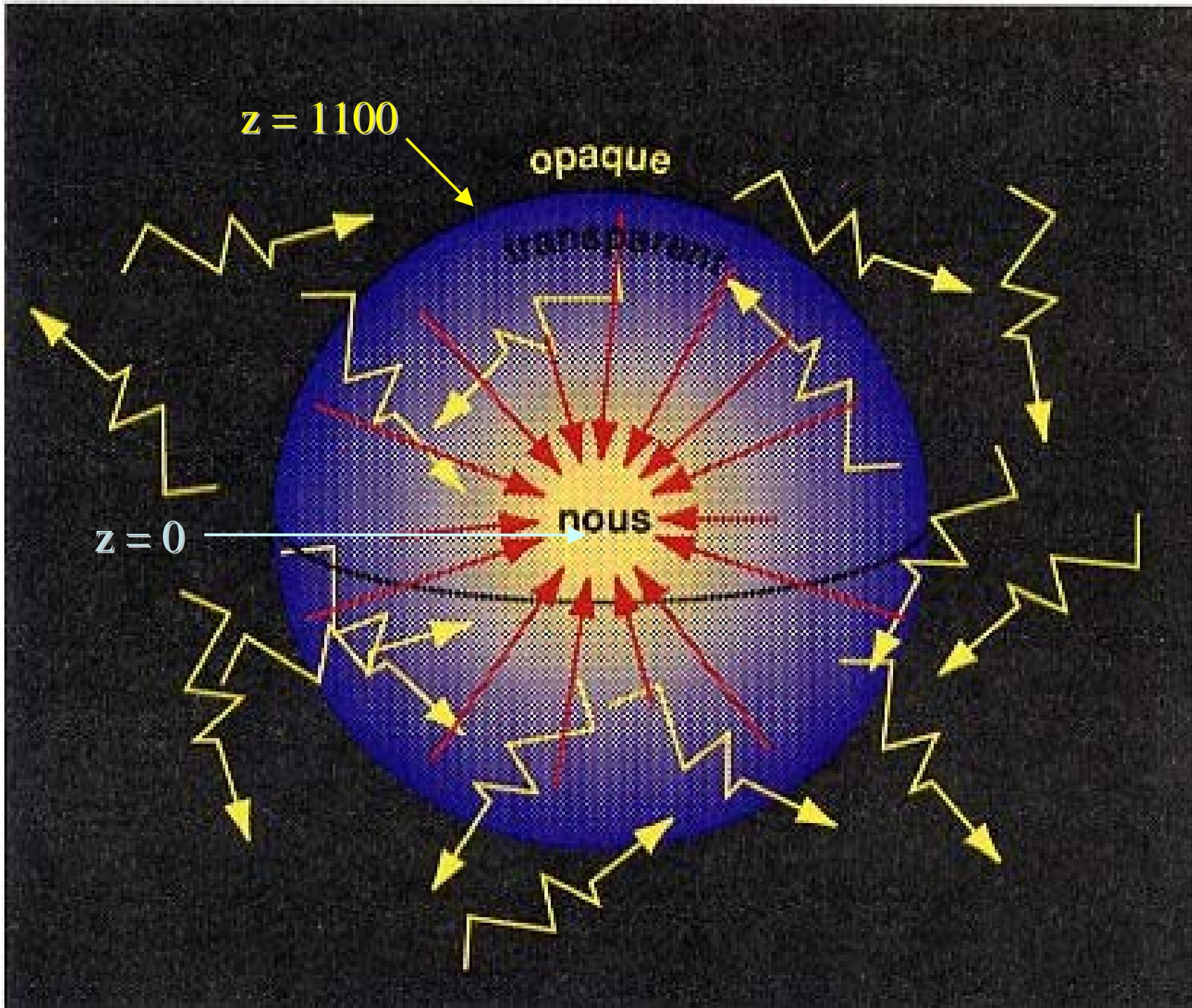
# Recombinaison



Photons assez chauds pour ioniser H  
Diffusion Compton couple les  $\gamma$  aux e, et baryons  $\rightarrow$  Système dynamique:  
Fluide photon-baryon  
La pression des  $\gamma$  résiste à la compression gravitationnelle du fluide  
 $\rightarrow$  oscillations acoustiques

Recombinaison: Formation d'hydrogène neutre et dernière diffusion des  $\gamma \rightarrow$  CMB  
Régions chaudes (compression) et froides (raréfaction)  $\rightarrow$  traces actuelles  
Les  $\gamma$  subissent aussi un redshift gravitationnel en sortant des potentiels de la dernière surface de diffusion.

W.Hu



Temps = 150 - 1 milliard d'années?  
( $z = 6-20$ )

Fin des "Ages Sombres"

Formation des premières étoiles:

Emission de rayonnement → Réionisation de l'hydrogène

**Temps = 500 millions d'années**

Formation des Galaxies - galaxies ou amas en premier?

Théorie du haut en bas: grandes structures puis galaxies

Théorie du bas en haut :galaxies, puis amas

Dépend de la forme de la matière sombre.

matière sombre "chaude"

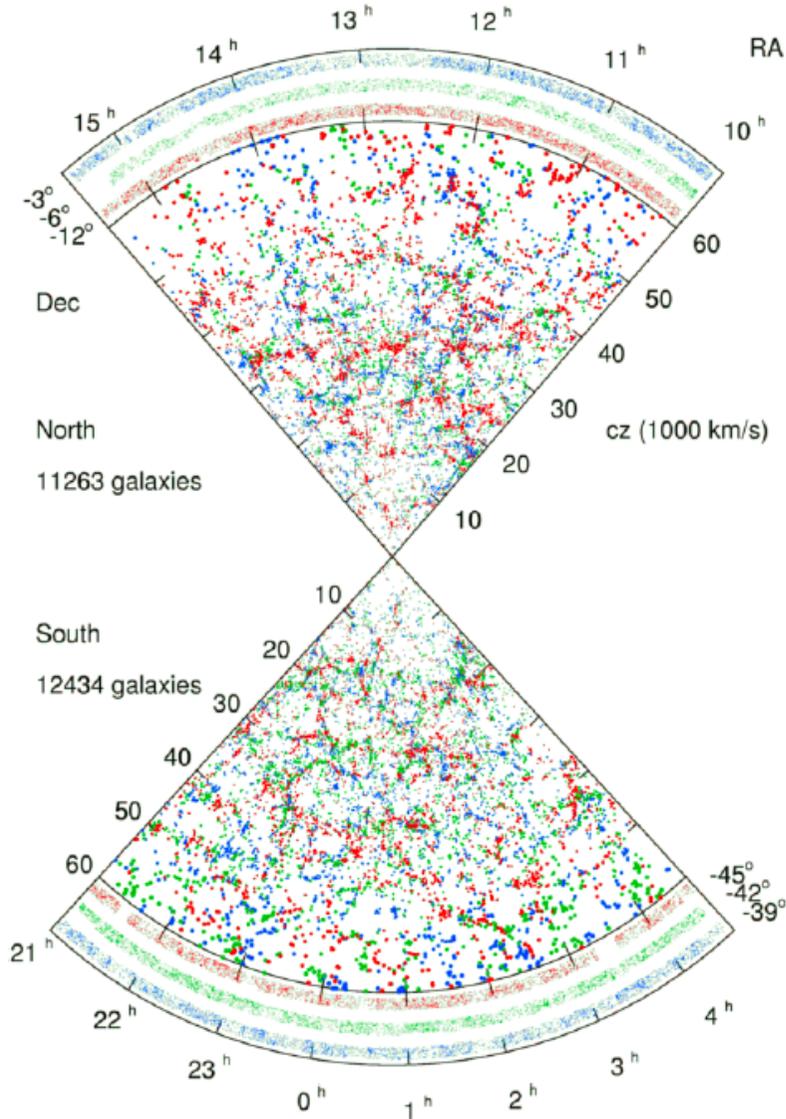
mouvement rapide - facilite les grandes structures

matière sombre "froide" (Cold Dark Matter)

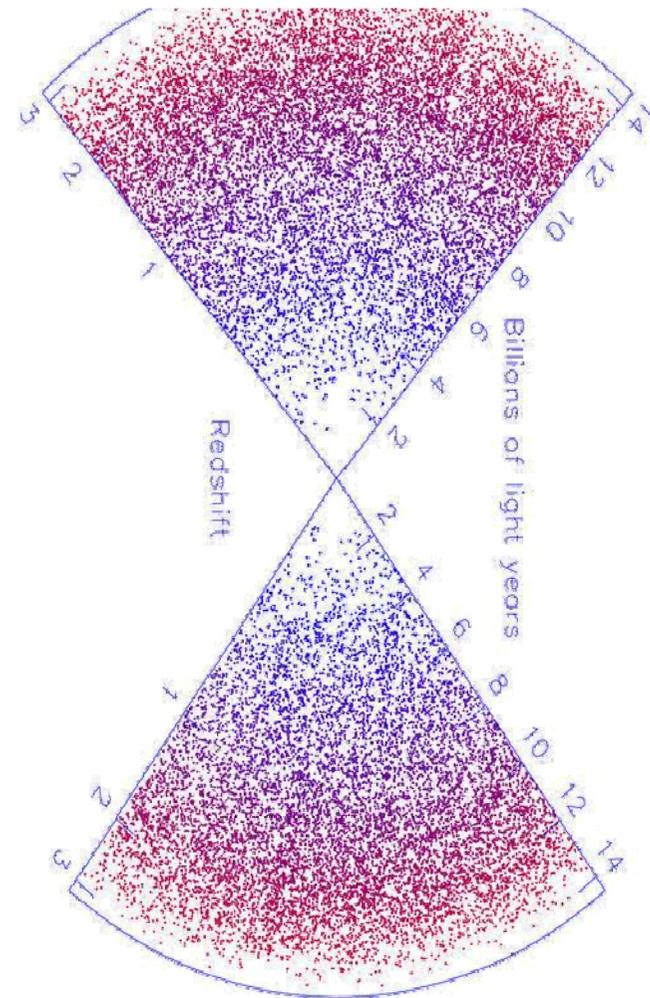
lente - petites structures

# Homogénéité : répartition uniforme à très grandes échelles

*galaxies (Las Campanas survey)*



*quasars*



The 2dF Quasar Redshift Survey

# Formation des structures

De haut en bas ?

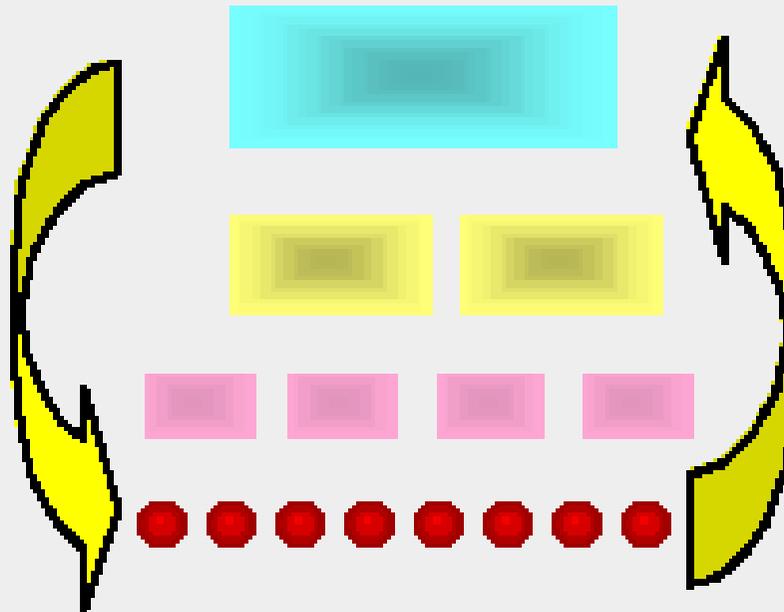


*Yakov Borisovitch Zeldovitch*

Ou de bas en haut ?



*James Peebles*



De toute façon, sans matière noire, on n'y arrive pas !

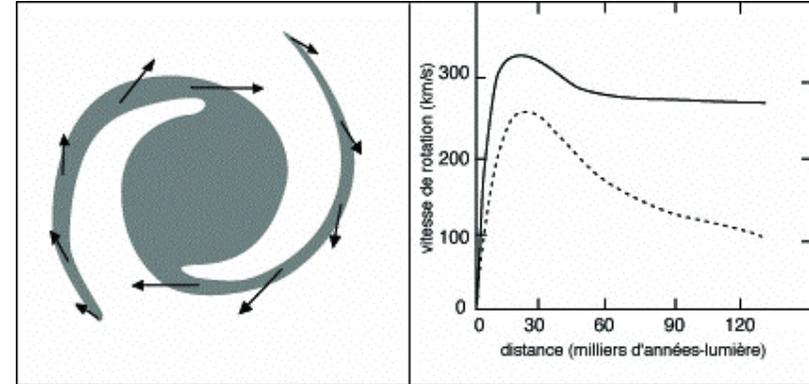
# Brève Histoire thermique de l'Univers

- **Big Bang Chaud:**  $t < 1$  sec. très spéculatif  $t_{\text{Planck}} = (h_{\text{pl}} G/c^5)^{1/2} = 5.4 \times 10^{-44}$  s  
Inflation  $\rightarrow$  Univers plat actuel
- $T = 10^{30} \text{K} = 10^{16} \text{ GeV}$ ,  $t \sim 10^{-38}$  s ???  
Interactions fortes et faibles  $\rightarrow$  toutes les particules en équilibre thermique?  
GUT brisée, transition de phase  $\rightarrow$  monopôles, murs ou cordes cosmiques?  
Violation nombres baryoniques et leptoniques  $\rightarrow$  asymétrie matière-antimatière?
- $T = 10^{15} \text{K} = 100 \text{ GeV}$ ,  $t \sim 10^{-10}$  s transition électrofaible
- $T = 300 \text{ MeV}$  plasma de quarks gluons  $\rightarrow$  plasma de hadrons
- $T = 10^{10} \text{K} = 1 \text{ MeV}$ ,  $t \sim 1$  sec : soupe de p, n, e en équilibre thermique.  
La nucléosynthèse primordiale dure quelques minutes  $\rightarrow y_{\text{He}} = 0.25$   
(trop chaud, dissociation, trop froid, barrière coulombienne)
- $T = 10^{10} \text{K} = 1 \text{ MeV}$
- $T = 0.5 \text{ MeV}$  annihilation  $e^+$ ,  $e^-$  (plus en équilibre thermique avec  $\gamma$ )
- $T = 3300 \text{ K} = 13.6 \text{ eV}$ ,  $t_{\text{rec}} \sim 10^{13}$  s ( $\sim 300000$  ans);  $z = T/T_0 - 1$   
Recombinaison : formation atomes et molécules  
Découplage Rayonnement - Matière  
Photons à  $2.73 \text{K}$   $\rightarrow$  informations sur fluctuations/inhomogénéités à  $t_{\text{rec}}$
- $\sim 10^9$  ans: Formation des structures Réionisation de l'hydrogène  
Dynamique gouvernée par la Matière Noire Froide (CDM)

# Observation de Matière Noire

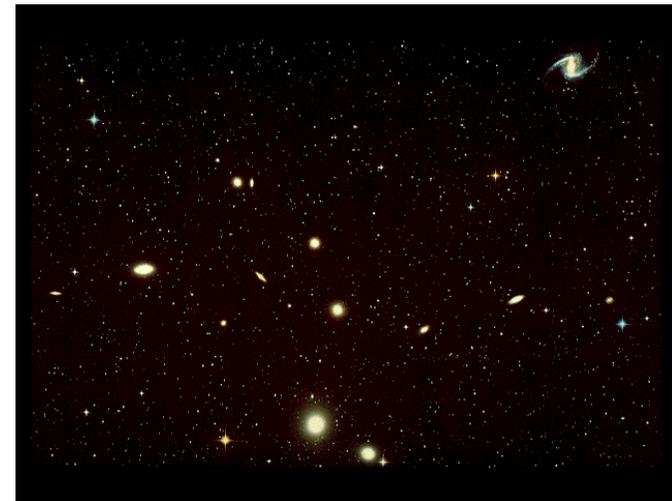
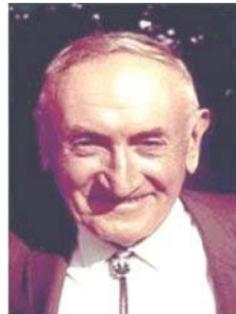
- courbes de rotation des galaxies

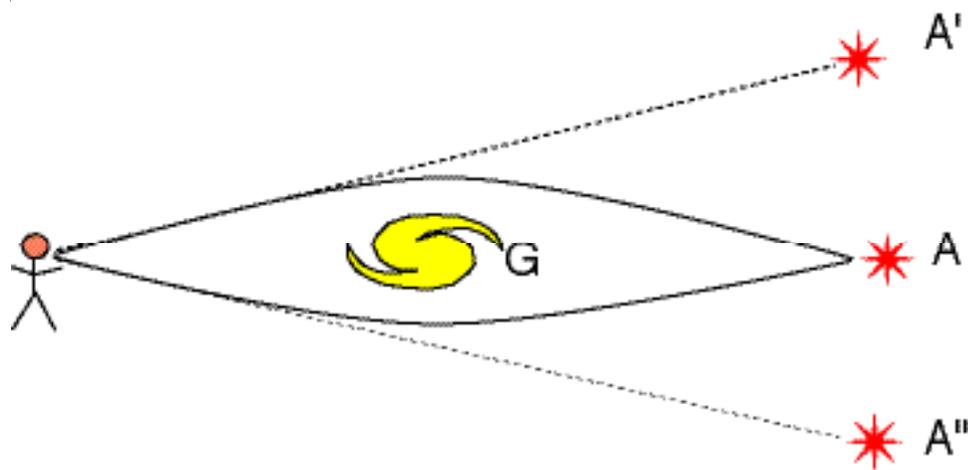
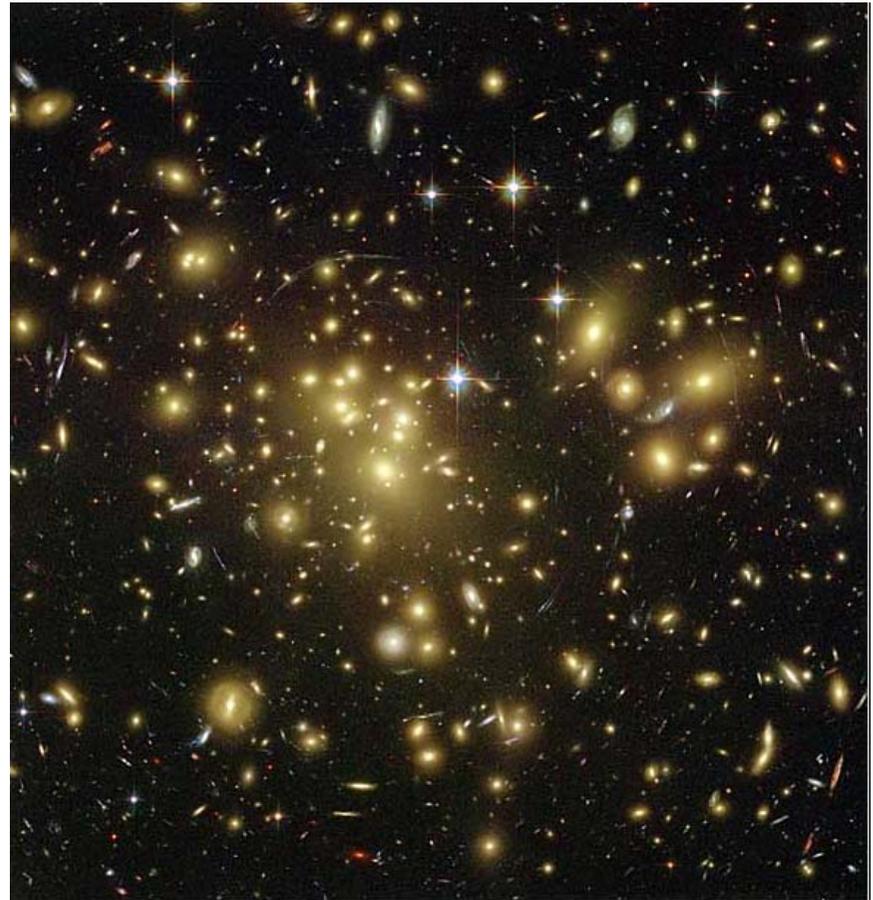
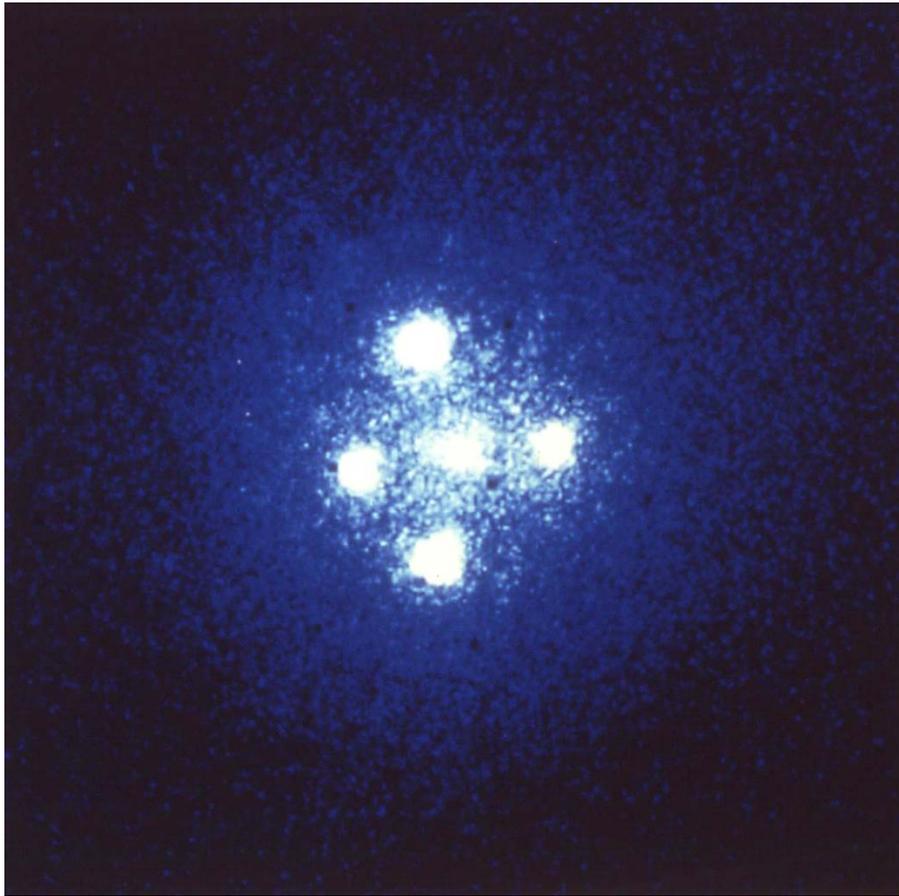
Vera Rubin (1970....)



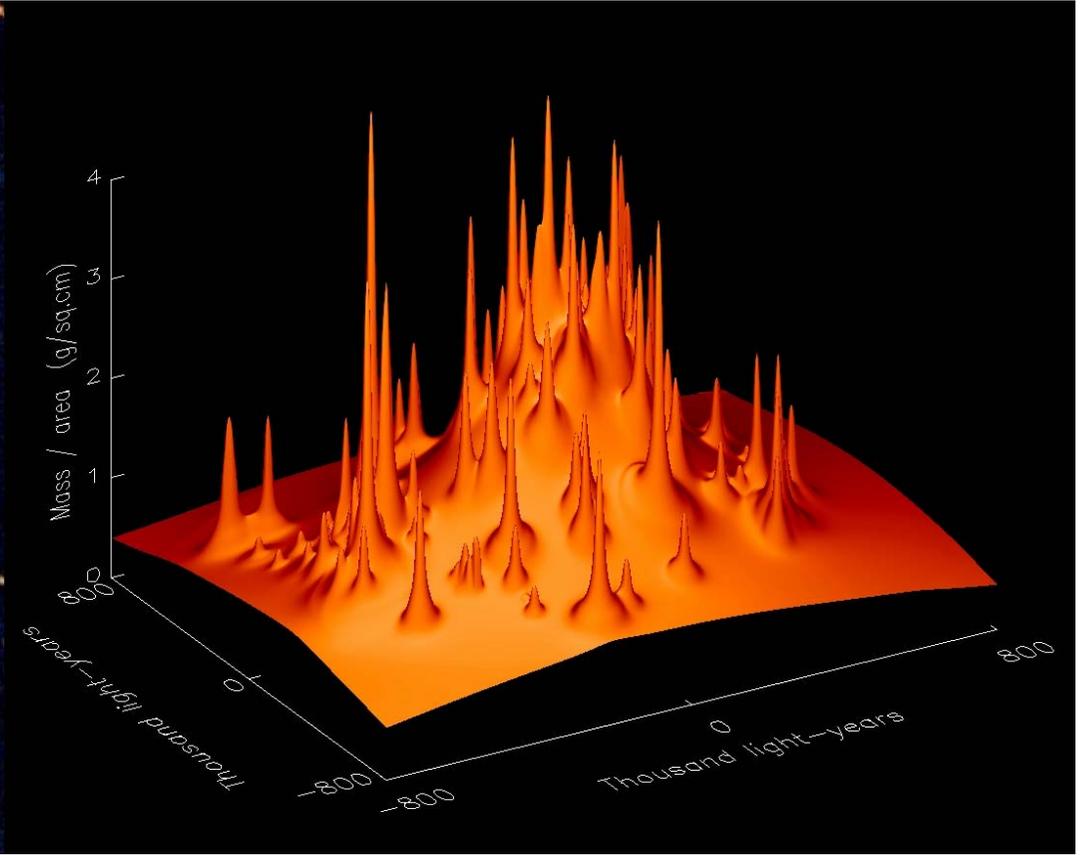
- dynamique des amas de galaxies  
(viriel)

Fritz Zwicky : Années 20





**Mirages  
gravitationnels**



# Des candidats MN très variés

Gravité  
Modifiée



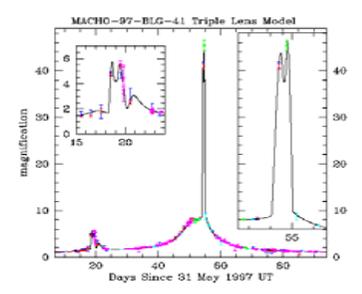
pous  
sière

Hydrigène  
Moléculaire  
Froide

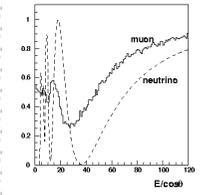
Trous noirs



MACHOs



SIMPs



Neutrino

WIMPs  
Weakly interacting  
massive particles  
10-1000GeV

Axions légers

Exotiques

# Supersymétrie

## Fermions

6 quarks

3 leptons

3 neutrinos



## Bosons

photon

gluon

graviton

3 bosons faibles

→ Nombreuses nouvelles particules  
partenaires

# MN: des Neutralinos supersymétriques ?

- Une solution naturelle MN et physique des particules
- Combinaison linéaire stable de plus faible masse de gauginos et higgsinos (LSP) de SUSY

$$\chi = \alpha \tilde{\gamma} + \beta \tilde{Z} + \gamma \tilde{H}_1^0 + \delta \tilde{H}_2^0$$

- SUSY > 7 paramètres MSSM → Pas de pouvoir prédictif
- Contraintes Expérimentales LEP, pp, b → sγ, + ...

Regarder partout où c'est possible !

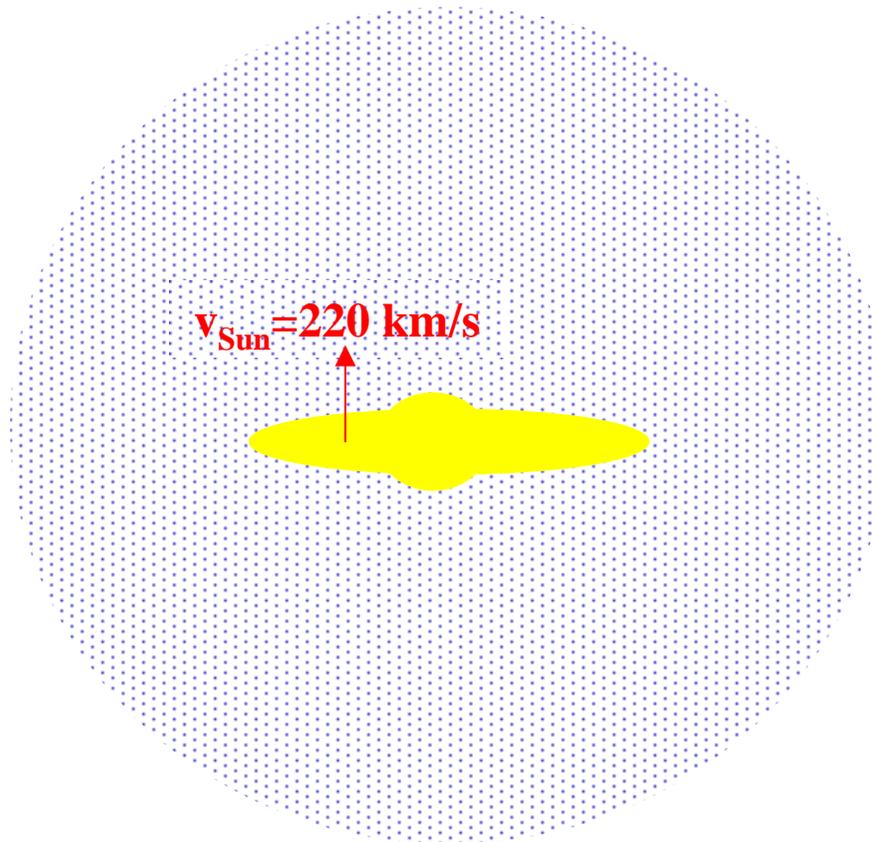
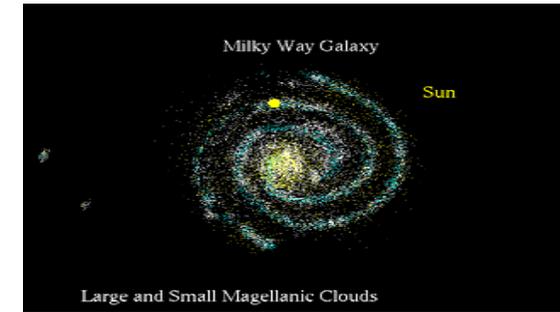
Détections expérimentales

Directes et Indirectes



# « Modèle Standard » de MN dans notre Galaxie

- Arguments de stabilité:
- Disque plat
  - Halo Sphéroïdal



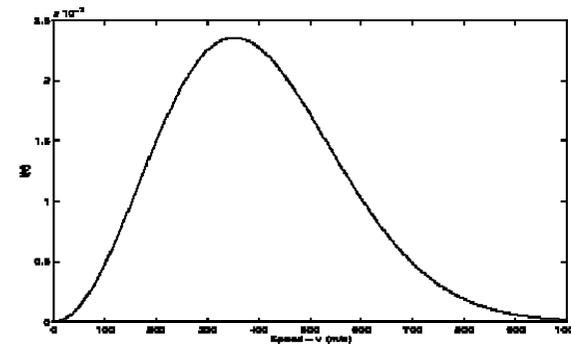
## Hypothèses habituelles

$$\rho_{\text{DM}} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$$

Distribution Maxwellienne de vitesses, tronquée

$$v_{\text{rms}} = 270 \text{ km/s}, \quad \beta = 10^{-3}$$

$$f(v) = (m/(2 \pi k T))^{3/2} \exp(-m v^2/2kT)$$

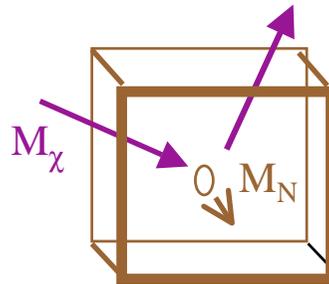


Quelle est cette MN?

# Recherche de WIMPs: Détection Directe

- Principe : (Goodman and Witten, 1985, Drukier and Stodolsky 1984)

Diffusion élastique de la **MN galactique**  
sur les noyaux des détecteurs



Reculs de  
noyaux de  
quelques keV

Ge, Si, NaI, LXe, ...

# Détections Indirectes

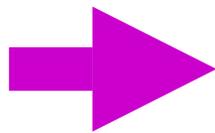
Distribution  
de  
Matière  
dans la  
galaxie



Accumulation  
+  
Annihilation

États finals possibles:  $\tau^+\tau^-$ , paires  
lepton, qq, WH, ZH, WW, ZZ  
Hadronisation et désintégration

MN (WIMPS)  
**SUSY**

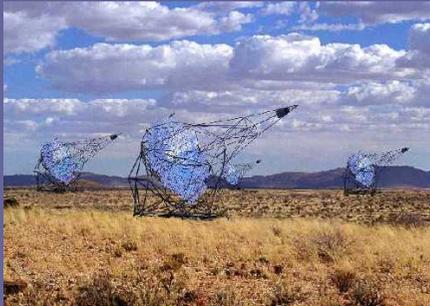
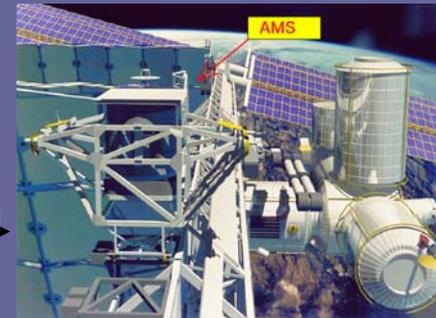
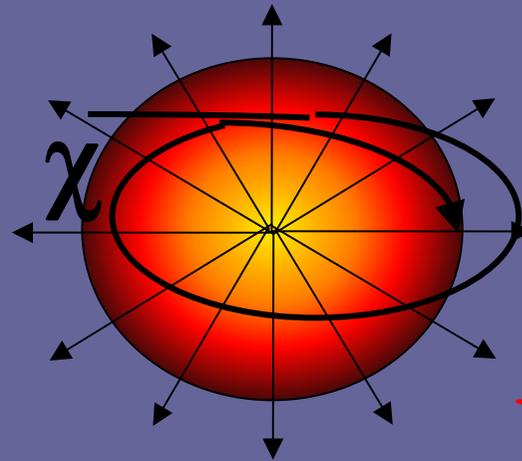
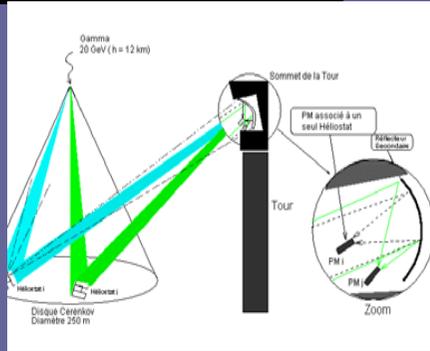
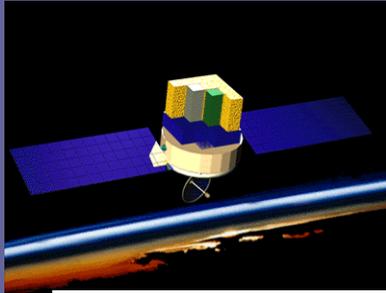


Détecteurs Astroparticules:  
positrons, antiprotons, antideutons  
gammas, neutrinos

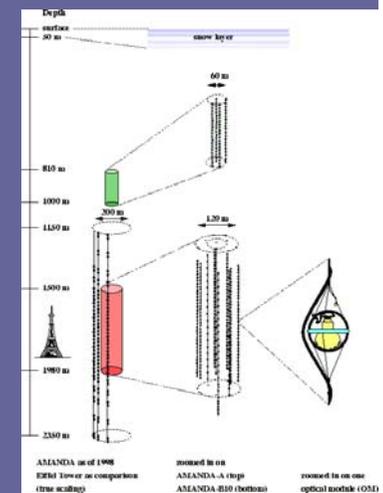
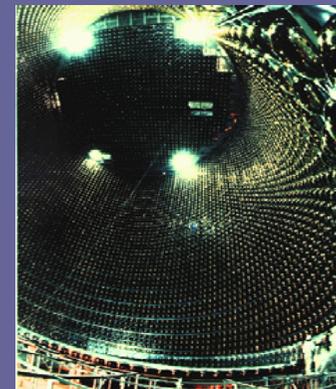
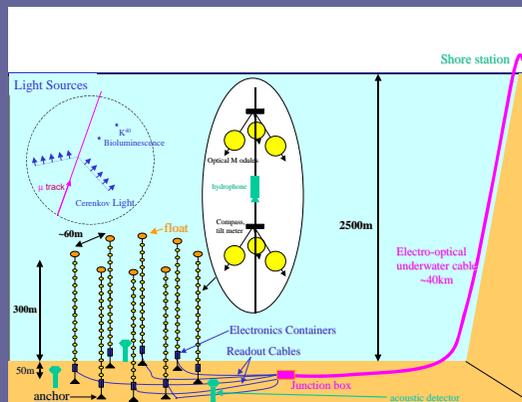
Expériences non dédiées



# WIMPs: Détections Indirectes

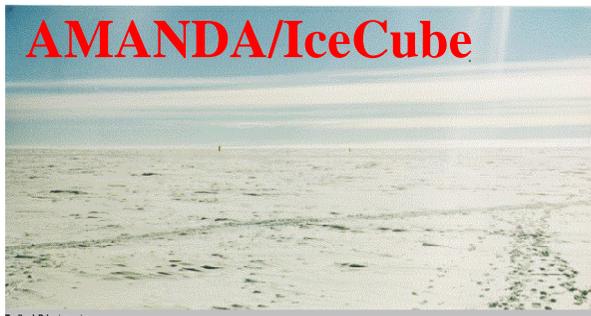


$\nu, \gamma, \bar{p}, e^+$



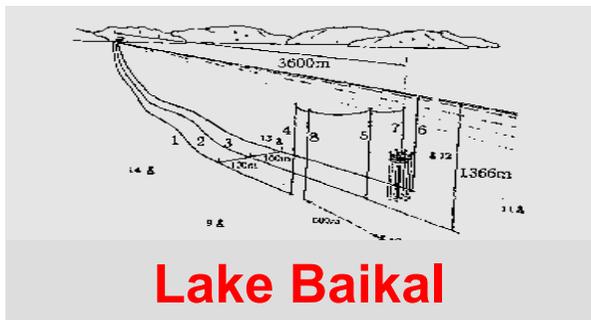
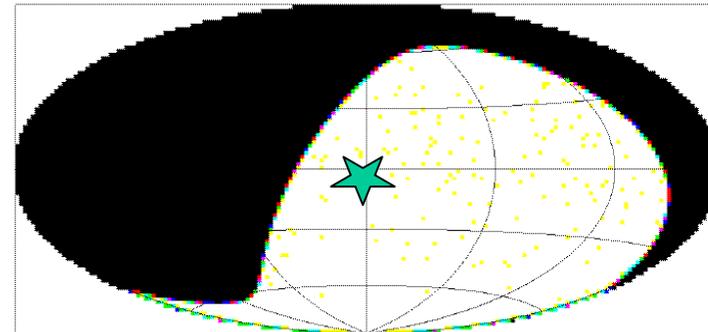
# Télescopes Neutrino

★ GC

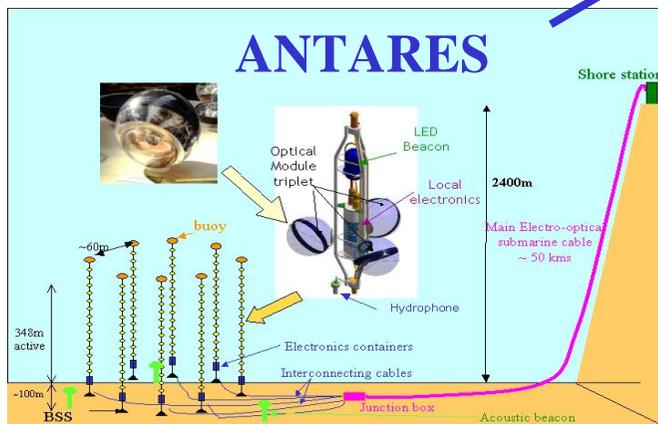
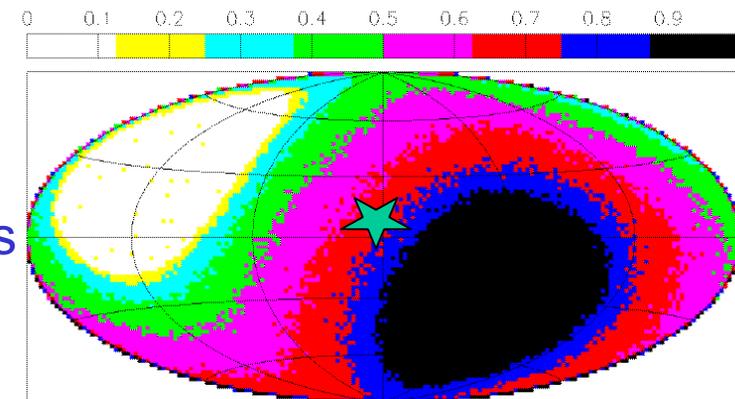


Pôle Sud

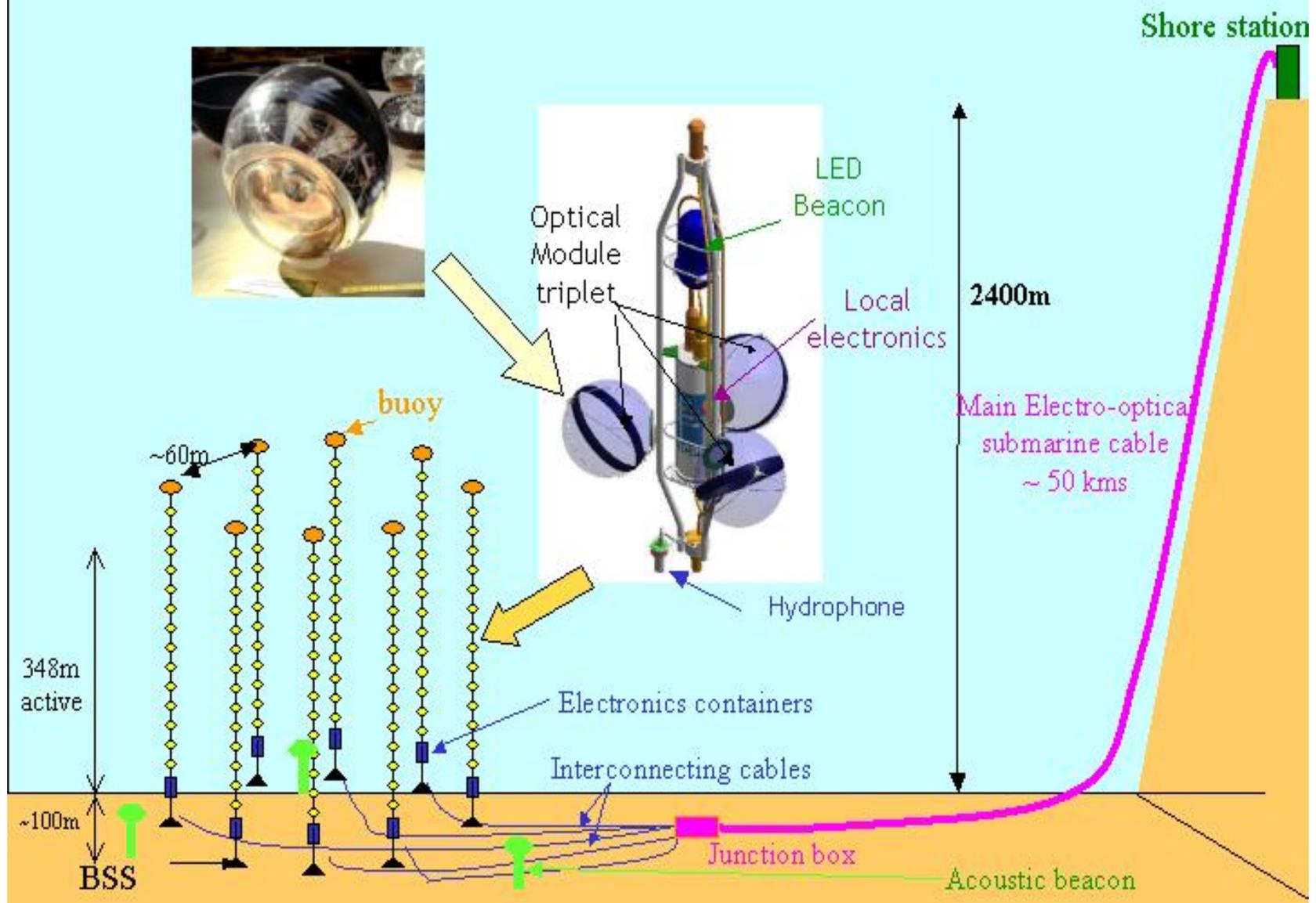
CG non vu

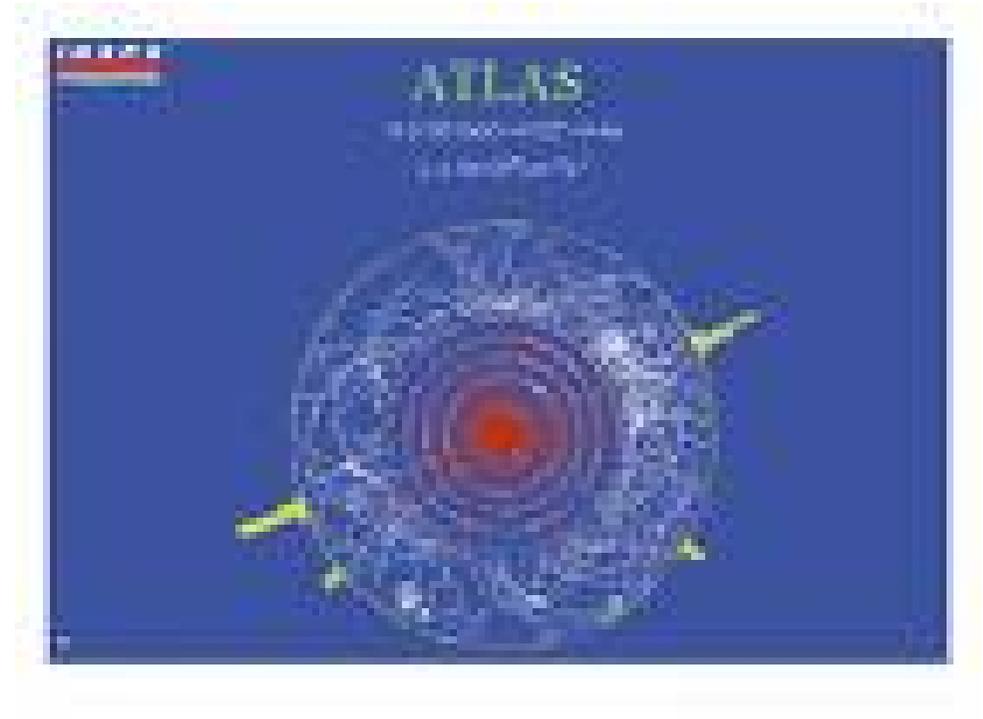


Hémisphère Nord; CG vu  
~ 80% temps



# ANTARES au CPPM





**CERN : LH Collisionner**



# Surprise 1998: Un Univers en accélération!

2 collaborations SN  
SCP + HST

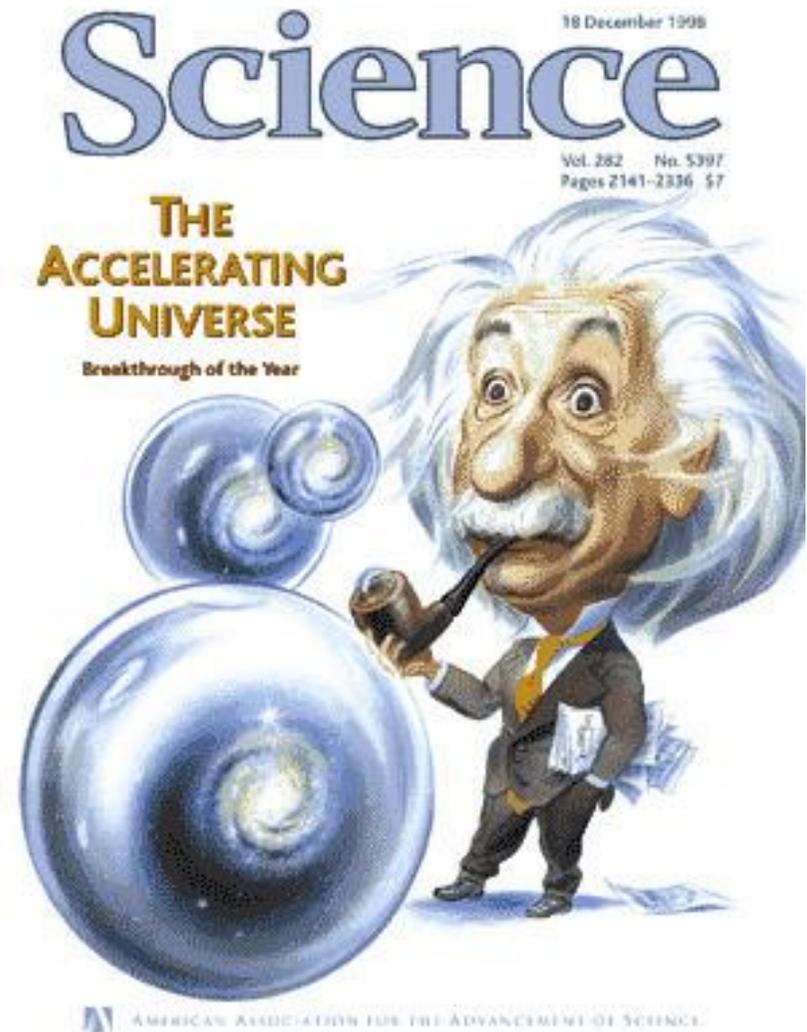
. Facteur d'échelle cosmologique  
 $a(t) = a_0(1 + H_0 t - 1/2 q_0 (H_0 t)^2 + \dots)$   
paramétrise l'expansion de l'Univers

- $H_0$  = paramètre de Hubble mesure le taux d'expansion

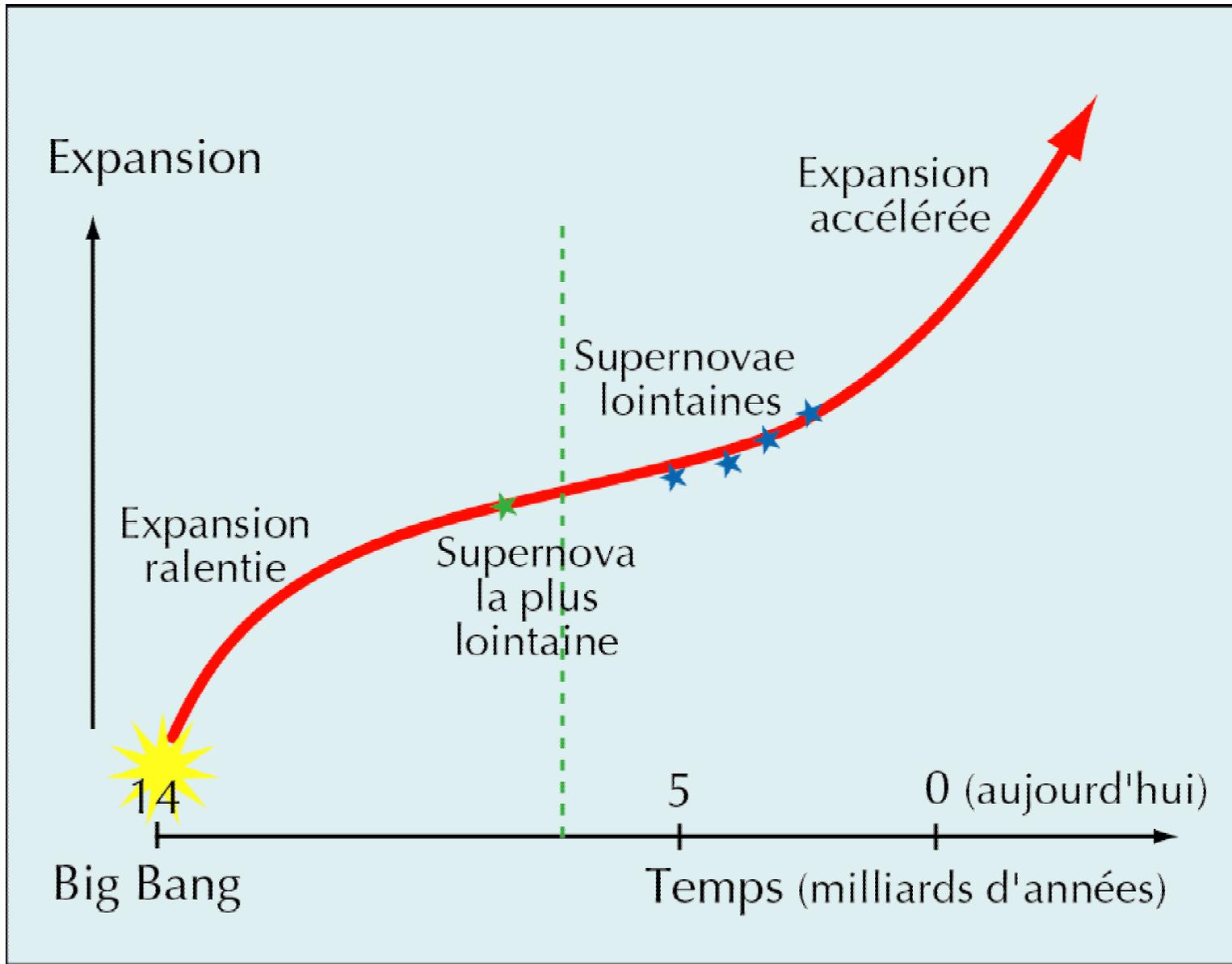
$H_0 = (\dot{a}/a)_0 = 100 h \text{ km/s/Mpc}$ ,  
 $h = 0.72 \pm 0.05$  (?)

- $q_0$  = paramètre décélération

Un Univers avec seulement de la matière devrait être en décélération

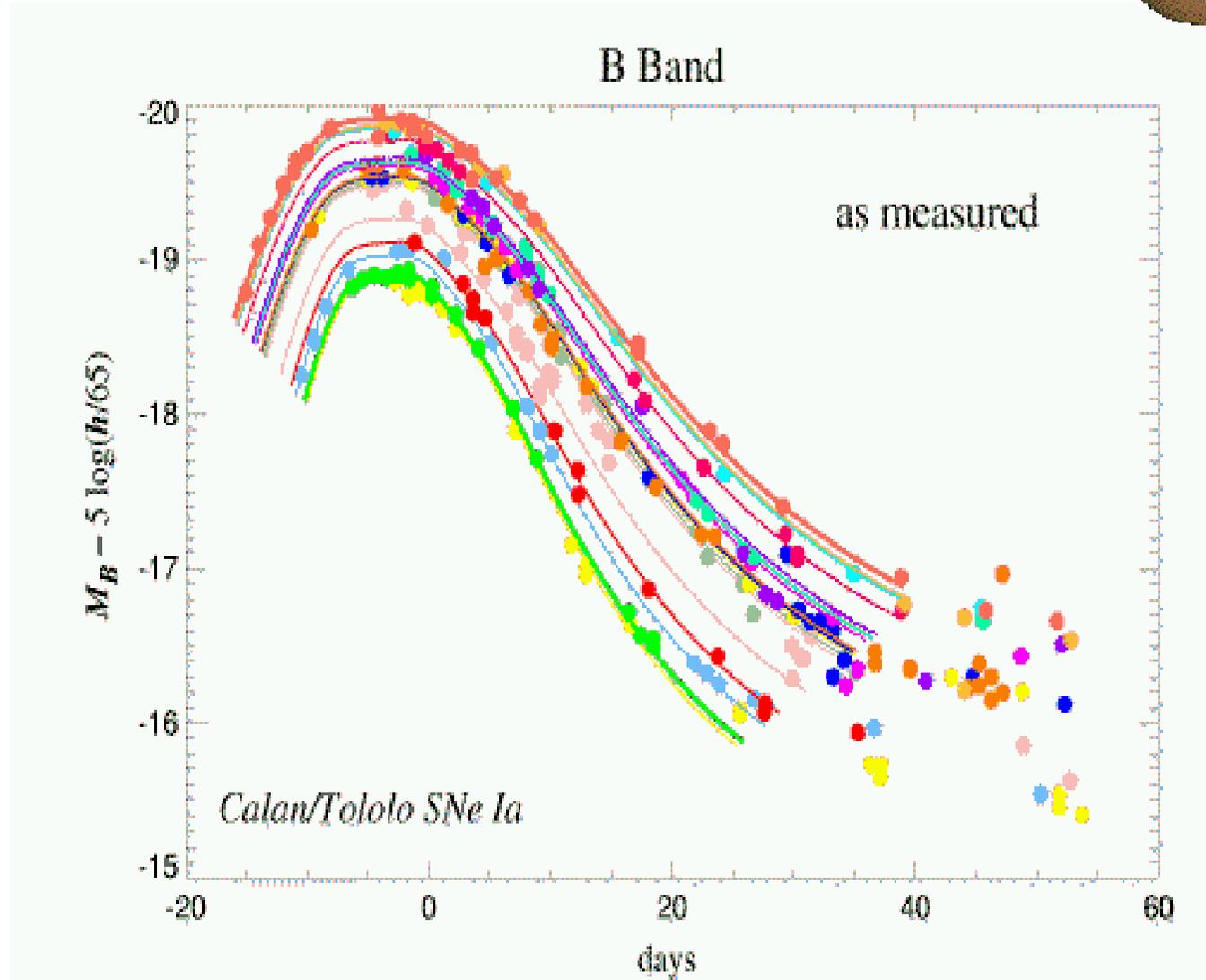


$q_0$  négative

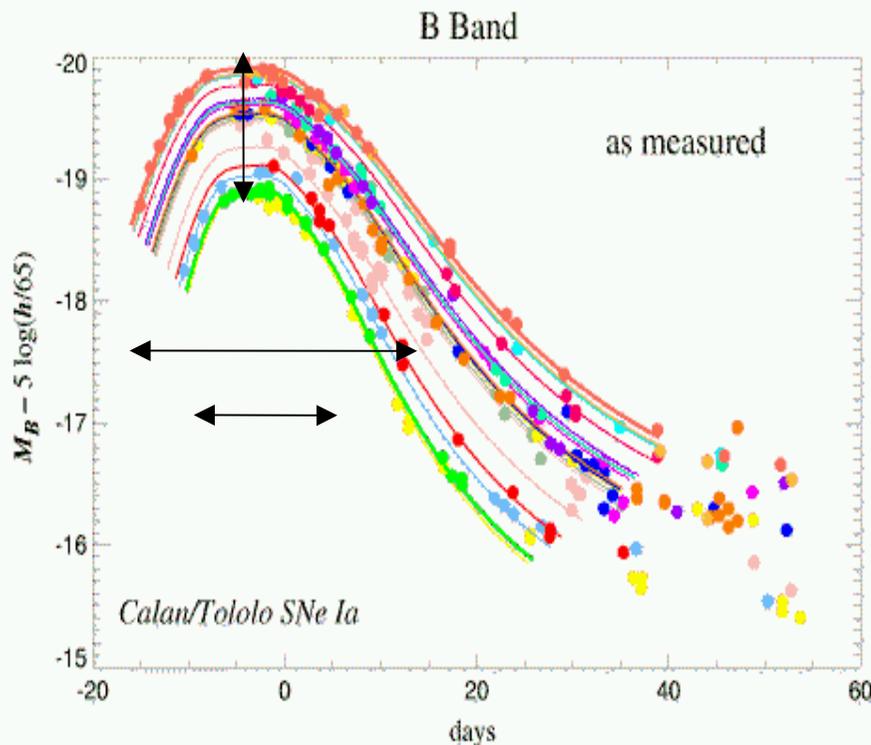
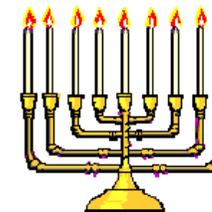


La lumière des explosions de SNIa peut être suivies pendant plusieurs semaines avec des télescopes

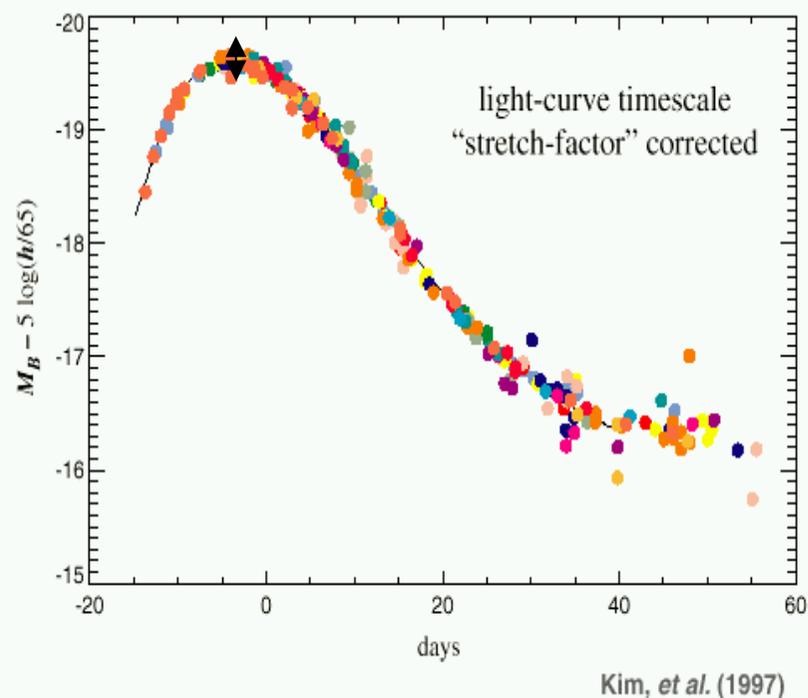
**Les SNIa ne sont pas des « chandelles standard »**



Mais elles sont standardisables à un certain niveau



avant:  $m_B$



après, eg, correction stretch :

$$m_{Bcor} = m_B - \alpha (s-1)$$

Différentes méthodes standardisation : stretch (SCP), MLC2k2 (HiZ),  $\Delta m_1$

# Projets SN

## Une activité du CPPM

- Idéal: projet SNAP/JDEM avec spectrographe dans l'espace

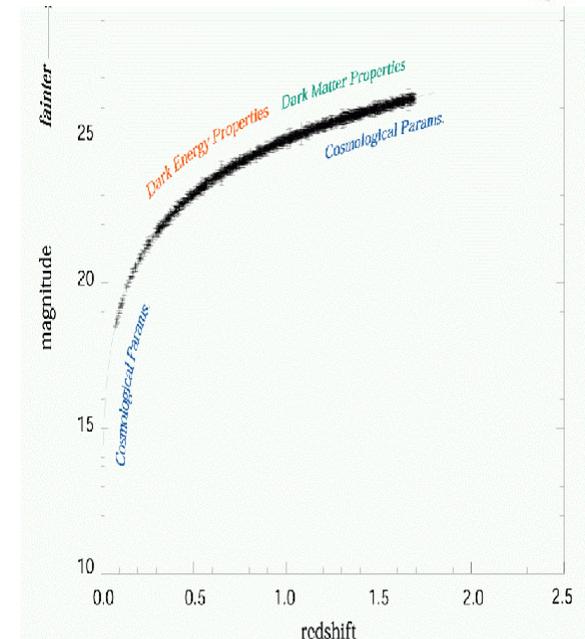
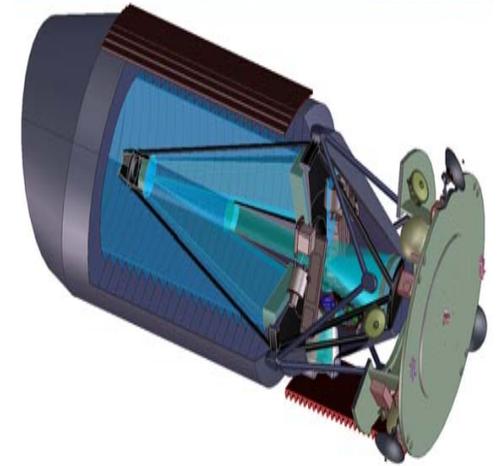
→ > 2014

### • Entretemps:

- HST dans l'espace pour quelques dizaines de SN par an
- Statistiques au sol avec échantillons les plus homogènes possibles

CFHTLS et ESSENCE

+ SNFactory pour SN proches

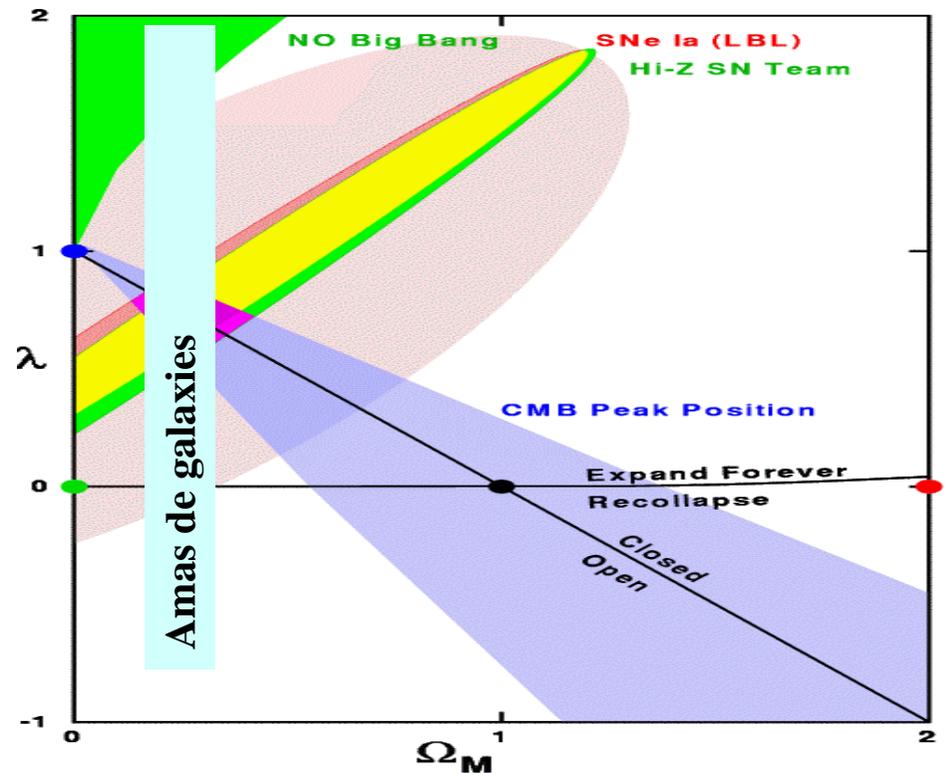
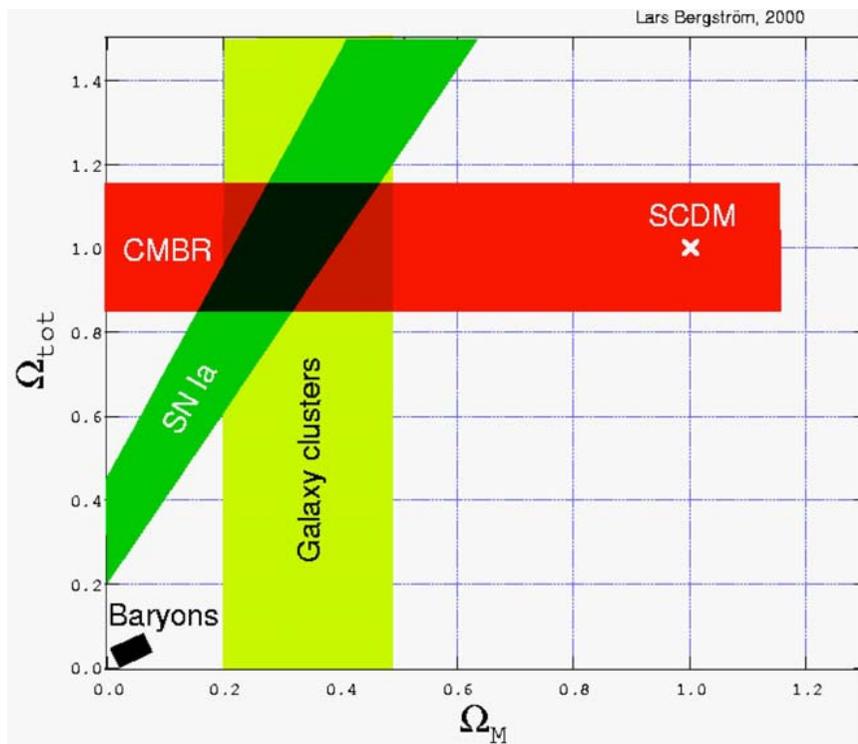


# Constante cosmologique?

$$R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu}(R - \Lambda) = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Einstein l'introduit pour garder l'Univers statique:  
MAIS « Ma plus grande erreur! » (?)

MAIS Indications observationnelles pour  $\Lambda$  :  $\Omega_T = \Omega_M + \Omega_\Lambda$



# Qu'est ce que l'Energie Noire?

Nouvelle forme de  
« champ/matière »?

Quintessence?

Unified Dark Matter?

$w=p/\rho \neq \text{cte} = w(z)$

Constante cosmologique???

$\Lambda\text{CDM } w=p/\rho = \text{cte} = -1$

Modification  
Gravité/RG ?

$w=p/\rho \neq \text{cte} = w(z)$  effectif

minimaux?

- Dimensions  
supplémentaires?

- Effets anisotropie  
et inhomogénéités?

- Energie négative?

## Comment les distinguer?

-modèles fantômes  $w < -1$

# Problème de la Constante Cosmologique $\Lambda$

• Relativité Générale  $\rightarrow$  échelle de  $\Lambda$

$$1 \text{ GeV} = 1.6 \cdot 10^{-10} \text{ Joules}$$

• Mesures cosmologiques

$$\rho_{\Lambda}^{\text{obs}} \sim (10^{-12} \text{ GeV})^4 = 2 \times 10^{-17} \text{ J/cm}^3$$

• Physique des particules  $\rightarrow \Lambda \sim$  énergie du vide

vide = fluide parfait avec  $p = -\rho_{\Lambda} = -\Lambda/(8\pi G)$

$$\rho_{\Lambda}^{\text{EW}} \sim (200 \text{ GeV})^4 = 3 \times 10^{40} \text{ J/cm}^3$$

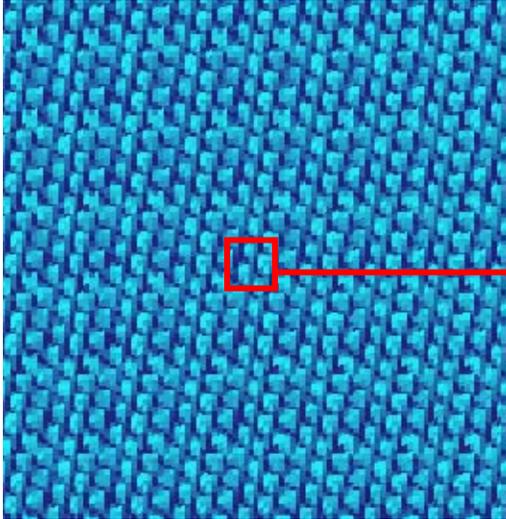
$$\rho_{\Lambda}^{\text{QCD}} \sim (0.3 \text{ GeV})^4 = 1.6 \times 10^{29} \text{ J/cm}^3$$

$$\rho_{\Lambda}^{\text{Pl}} \sim (10^{18} \text{ GeV})^4 = 2 \times 10^{103} \text{ J/cm}^3$$

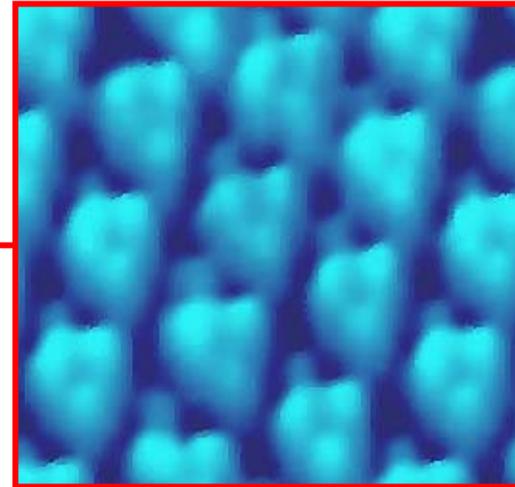
Différence jusqu'à 120 ordres de grandeur

# Du vide et des particules

Un **champ** presque uniforme



de **particules**



Quand il n'y a pas de **particules**, il reste le **champ** sous-jacent, dont l'énergie n'a *aucune* raison d'être nulle !

En général, celle-ci n'a pas d'importance car on ne mesure que des *différences* d'énergies entre deux états, avec ou sans particules...

... *sauf* en gravitation où toute énergie compte !

# Quintessence

Introduite pour problème de la constante cosmologique Wetterich (1988), Peebles & Ratra

Champ scalaire exponentiel

$$L = \sqrt{g} \left( \frac{1}{2} \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi + V(\phi) \right), V(\phi) = M^4 \exp(-\alpha\phi / M)$$

(Berk!!! Disent les théoriciens, eg 'tHooft: « pas naturel »)

MAIS Higgs est aussi un scalaire!

Pas prédictif!

Nombreuses variantes de la théorie

$\Phi$  ne couple qu'avec la gravité modèles les plus simples

# L'énergie du vide est-elle la solution?

Quelle que soit l'expansion de l'univers, il est toujours possible de trouver un champ et l'énergie du vide ad hoc : **aucune prédictivité**

Aucune forme proposée n'a de justification indépendante, et aucune n'est une théorie des champs viable

La (vraie) constante cosmologique doit être préalablement mise à zéro

Les observations sont compatibles avec (matière + constante), alors que toute l'idée d'exploiter l'énergie du vide est précisément de changer la « constante »

## Mesurer $dw/dz = \text{un défi !}$

- Une motivation= séparer les diverses interprétations théoriques

- Une estimation difficile ( $\sigma_{w'} < 10 \%$ )

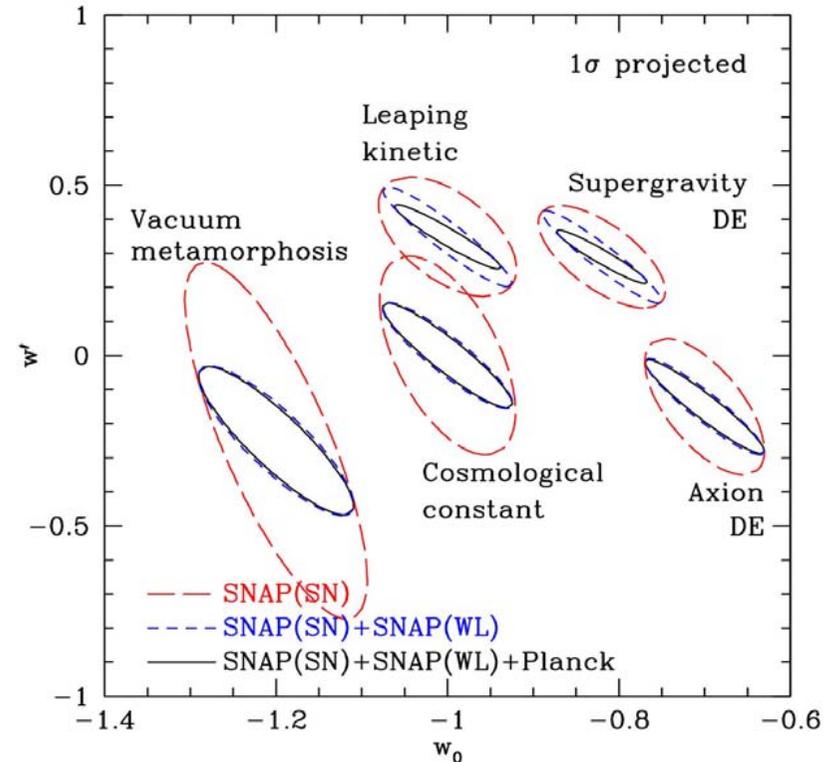
- Des hypothèses à contrôler

- La paramétrisation de  $w$
- Contraintes externes comme  $\Omega_m$ ...
- Sensibilité aux systématiques au %

- Une nécessité ..

Comparer et combiner les sondes

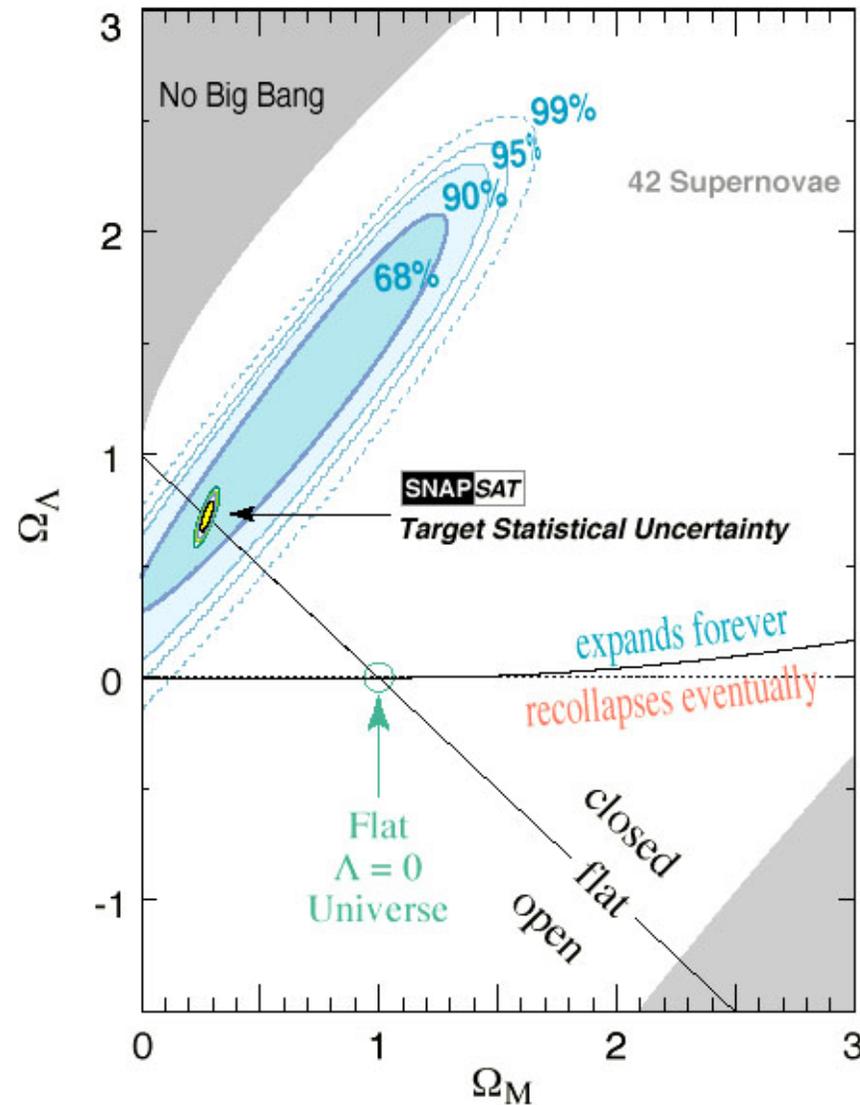
Travailler sur les systématiques



Le contrôle futur des interprétations en dépend

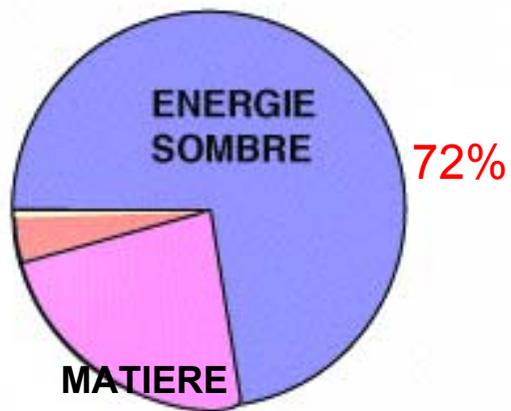
# Résultats espérés avec SNAP/JDEM

Supernova Cosmology Project  
Perlmutter *et al.* (1998)

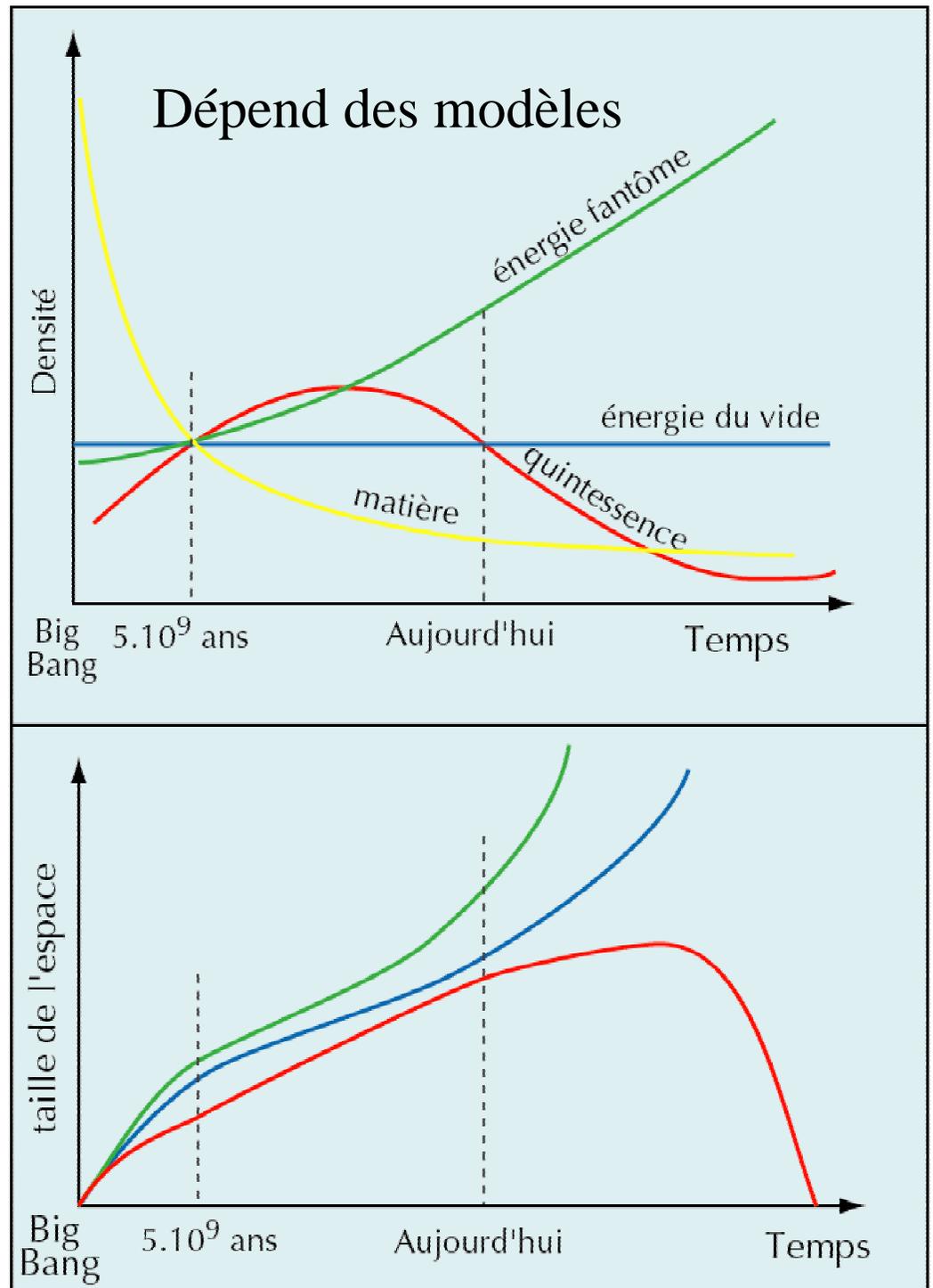


# Quel avenir pour l'Univers?

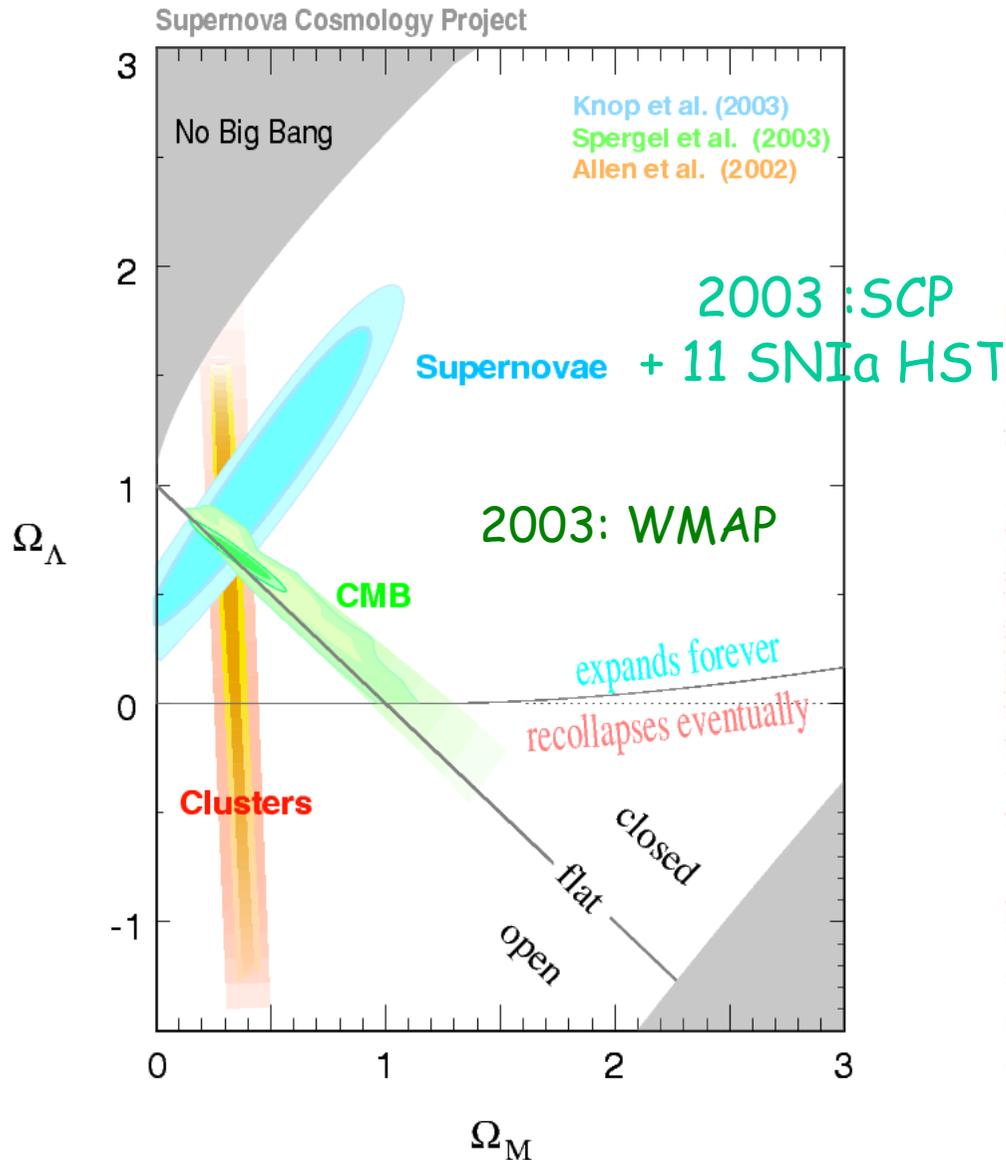
Contenu énergie-matière aujourd'hui:



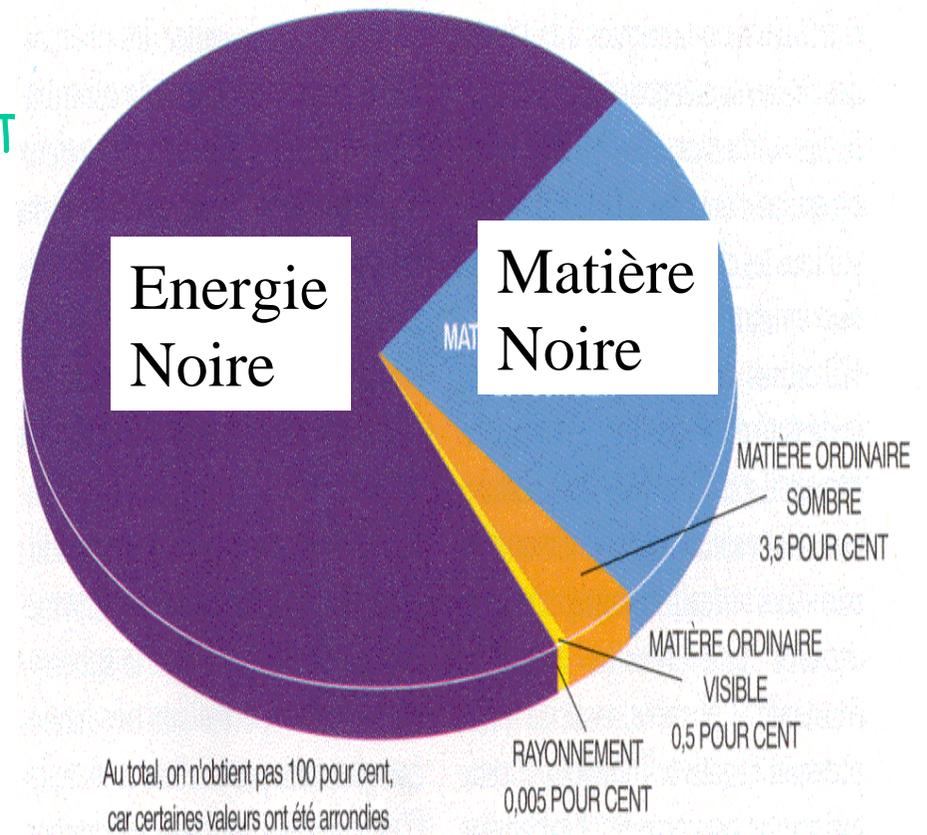
28%



# Nouveau paradigme: le modèle concordant



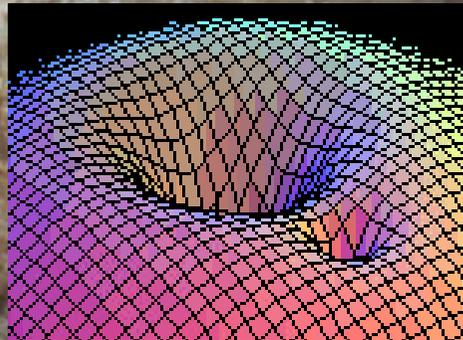
## Un Univers plat majoritairement sombre



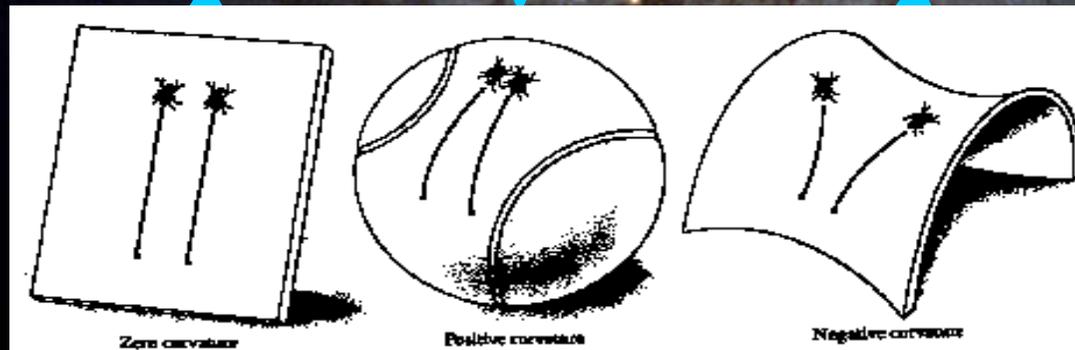
# Courbure de l'espace (Quelle Topologie)?

Nous vivons dans un espace à 4 dimensions:

- 3 dimensions spatiales (x,y,z)  $\Leftrightarrow$  Surface d'une sphère
- 1 dimension temporelle (t)  $\Leftrightarrow$  rayon de la sphère

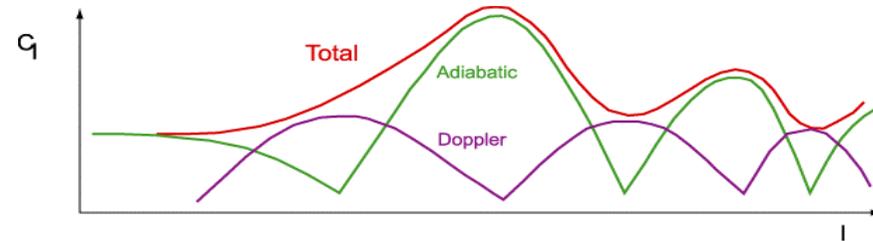
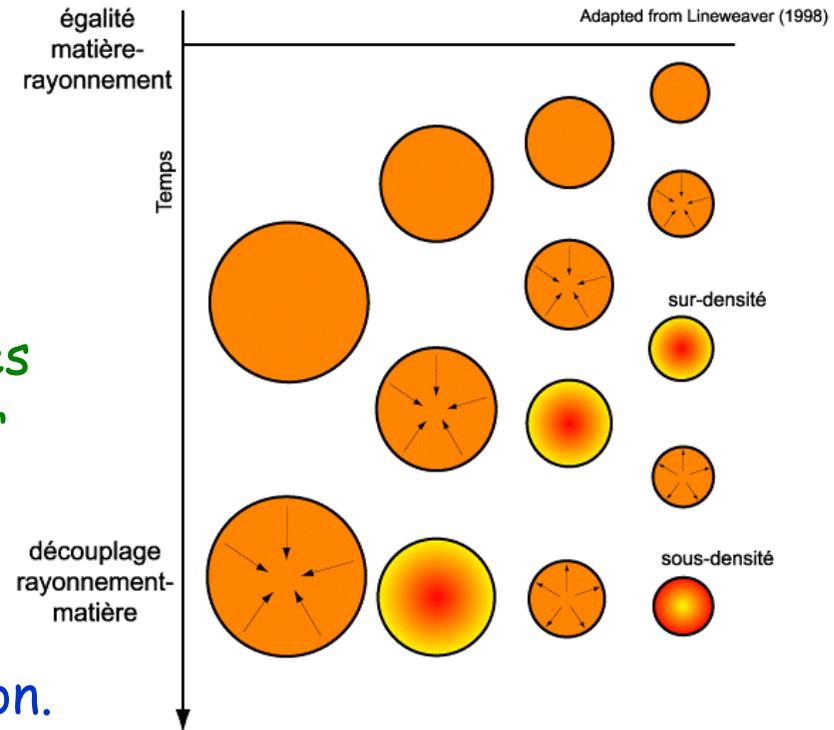


Trois courbures spatiales possibles



# Forme du spectre

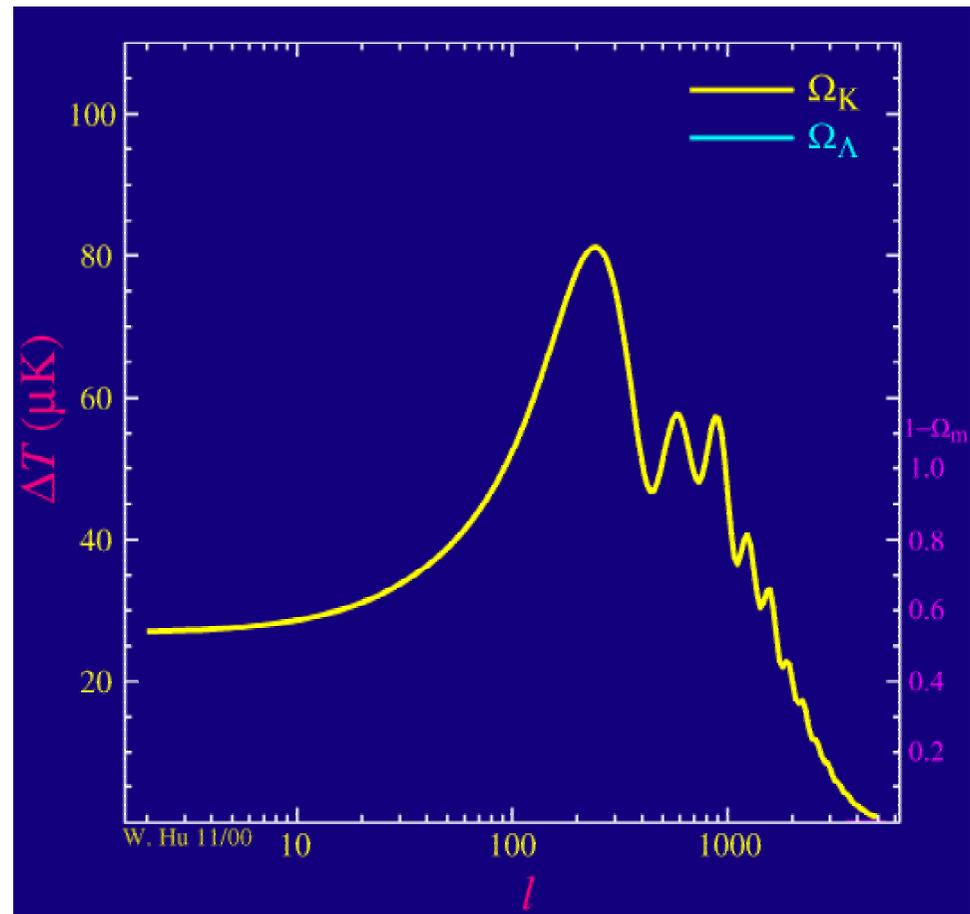
- L'Univers primordial est dominé par le rayonnement  
→ Pas d'effondrement de matière
- à l'égalité matière/rayonnement les baryons commencent à s'effondrer
- Des ondes acoustiques sur des échelles sub-horizon sont induites par la pression de radiation.
- Les oscillations sont gelées au moment du découplage



Adapted from Lineweaver (1998)

# Courbure de l'espace et position du premier pic

- La position des pics est sensible à la courbure
- Les formes sont sensibles à la densité de matière et de baryons
- L' « Energie noire » joue faiblement sur la position des pics

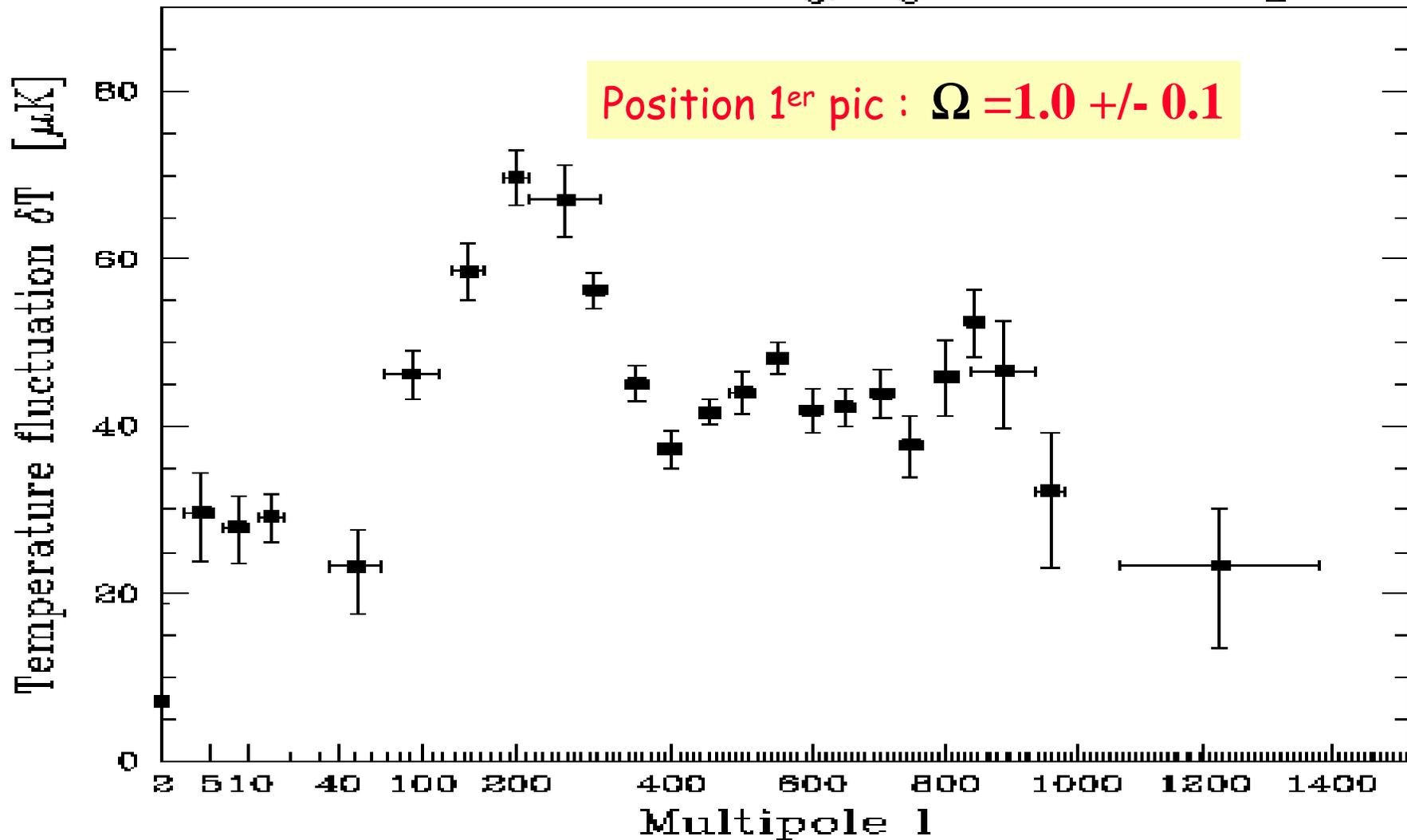


Site de Wayne Hu pour le CMB: <http://background.uchicago.edu/~whu/>

# Boomerang : les premiers résultats

ballon + bolomètres

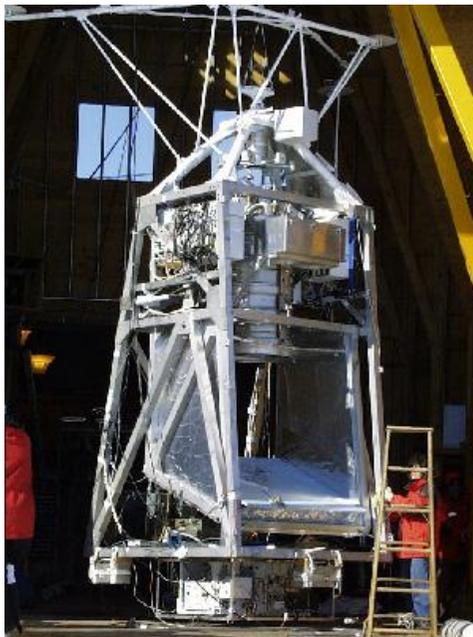
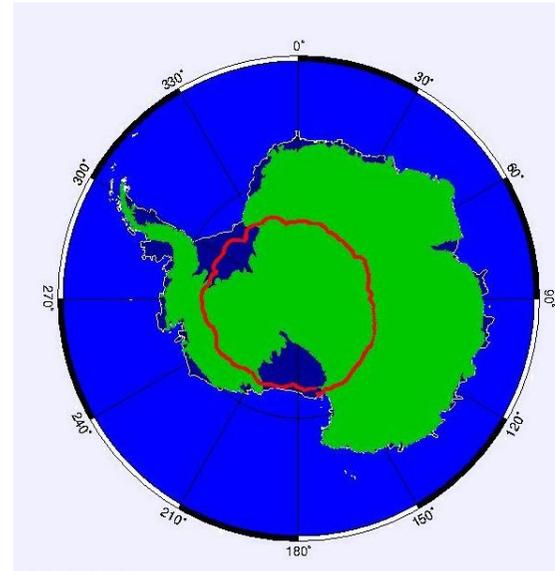
Wang, Tegmark & Zaldarriaga 2001



# Boomerang



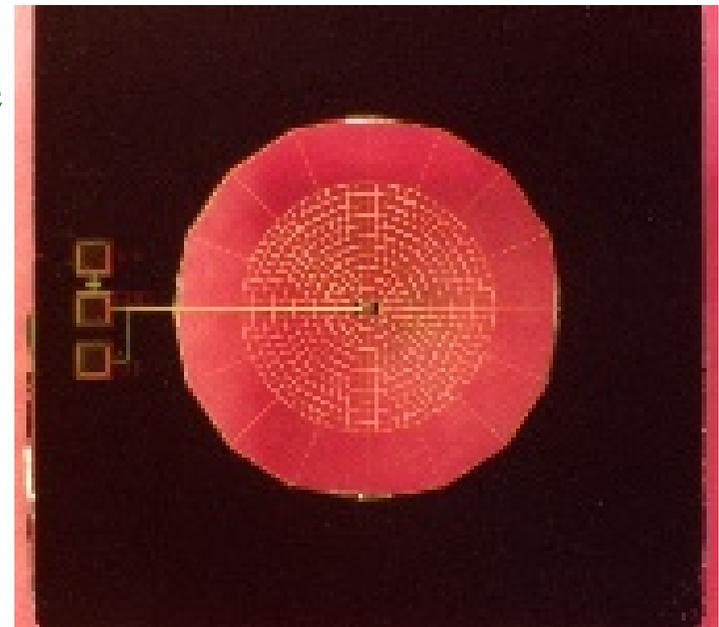
Expérience  
Ballon



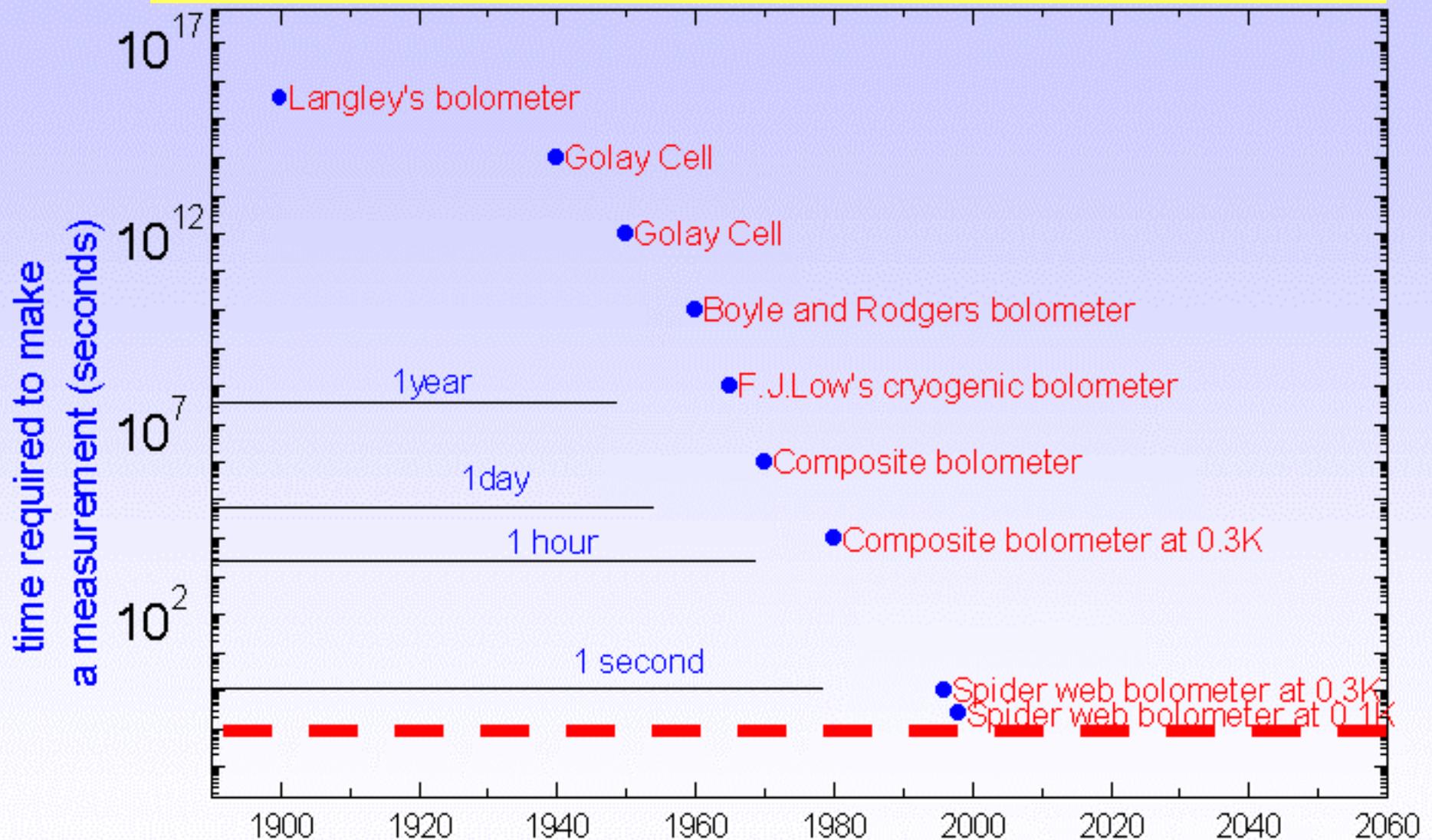
## Avancée technologique

### Le bolomètre micromesh

- nitride silicium pour absorber ondes mm.
- Minimum matériaux.
- Thermistor Germanium refroidi à  $0.3^{\circ}\text{K}$



# Développement de détecteurs thermiques



Encore un exemple où la physique se fait grâce aux développements technologiques

# Résultats les plus récents

WMAP5: mars 2008

L'Univers est plat au %

## FIVE-YEAR WILKINSON MICROWAVE ANISOTROPY PROBE (WMAP<sup>1</sup>) OBSERVATIONS: COSMOLOGICAL INTERPRETATION

E. KOMATSU <sup>1</sup>, J. DUNKLEY <sup>2,3,4</sup>, M. R. NOLTA <sup>5</sup>, C. L. BENNETT <sup>6</sup>, B. GOLD <sup>6</sup>, G. HINSHAW <sup>7</sup>, N. JAROSIK <sup>2</sup>, D. LARSON <sup>6</sup>, M. LIMON <sup>8</sup>, L. PAGE <sup>2</sup>, D. N. SPERGEL <sup>3,9</sup>, M. HALPERN <sup>10</sup>, R. S. HILL <sup>11</sup>, A. KOGUT <sup>7</sup>, S. S. MEYER <sup>12</sup>, G. S. TUCKER <sup>13</sup>, J. L. WEILAND <sup>10</sup>, E. WOLLACK <sup>7</sup>, AND E. L. WRIGHT <sup>14</sup>

*Submitted to the Astrophysical Journal Supplement Series*

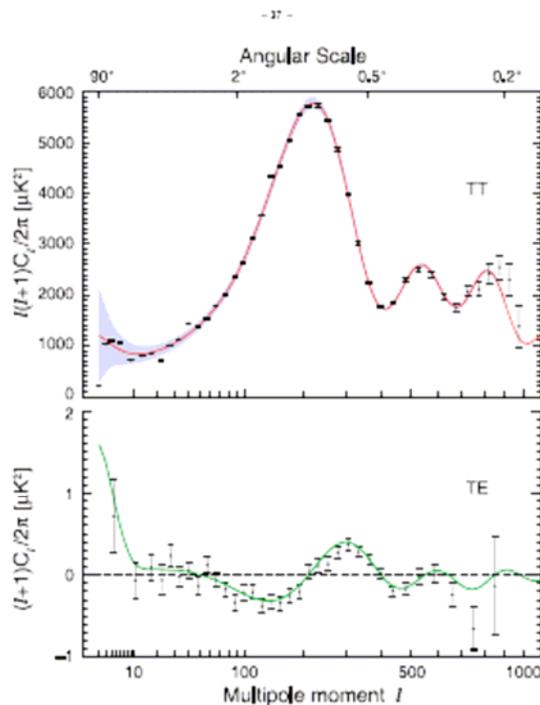
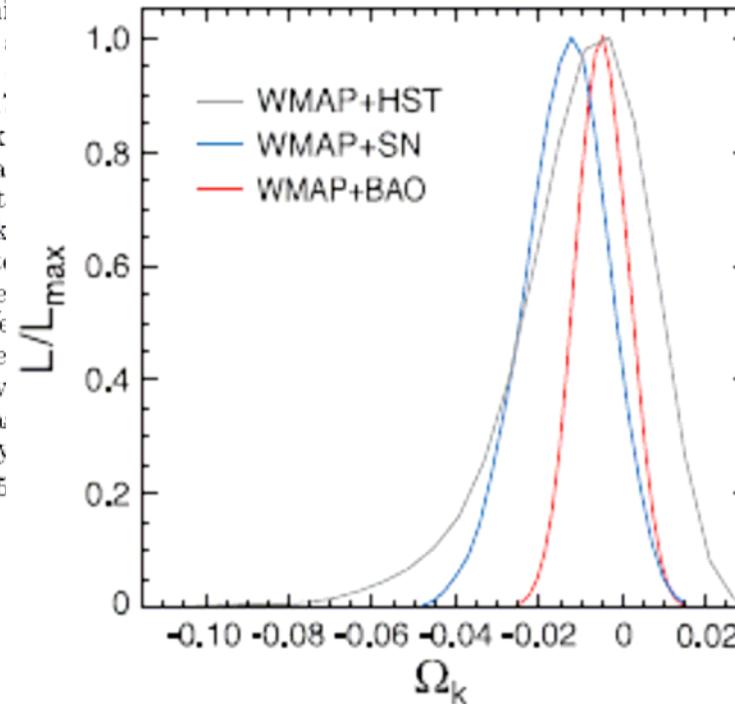


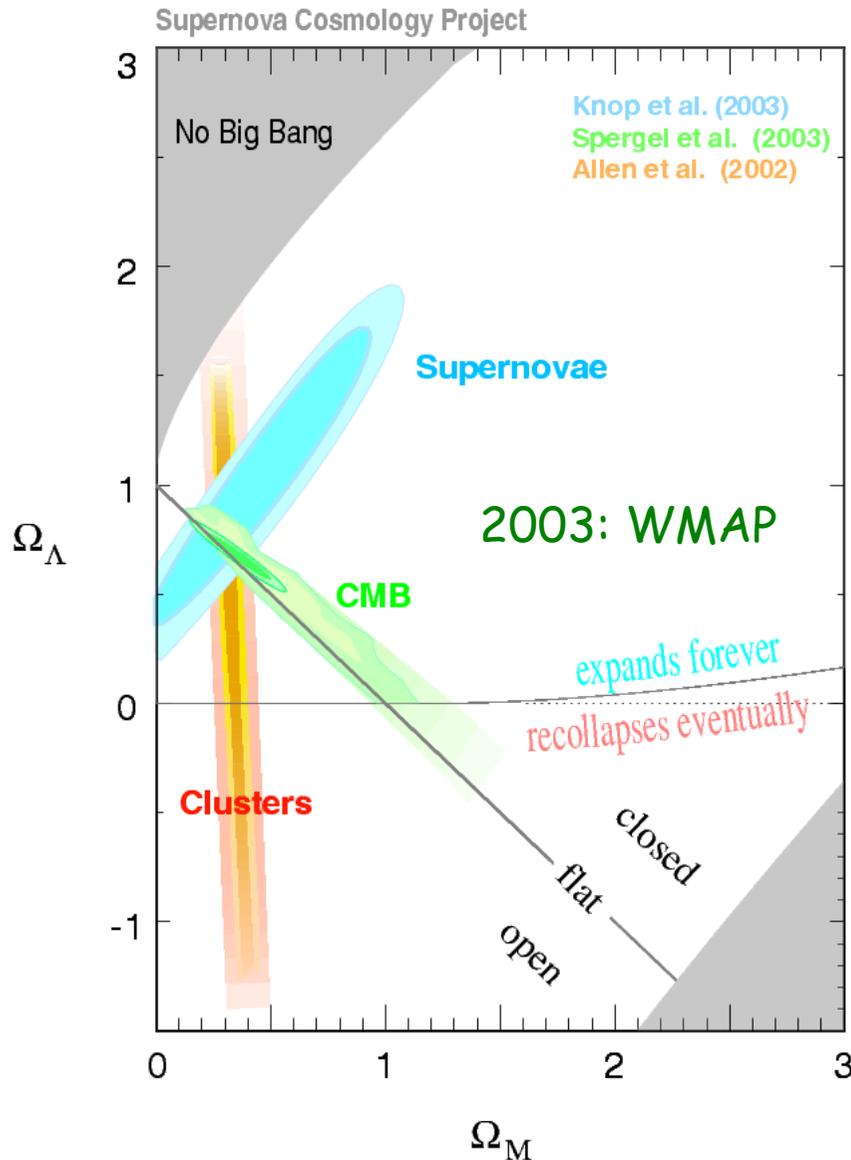
Fig. 13.— The temperature (TT) and temperature-polarization correlation (TE) power spectra based on the 5 year WMAP data. The addition of 2 years of data provide more sensitive measurements of the third peak in TT and the high- $l$  TE spectrum, especially the second trough.

... and even when gravitational waves are included, which constrain the spectrum, such as the ionization state of the universe and the equation of state of dark matter. A wide variety of dark matter models are found to be consistent with the non-type dark matter. Violating interactions could not be ruled out in the past epoch. We find that the universe is free of relativistic particles. Constrained limits on physical parameters ( $\Omega_b$ ) and  $-15$

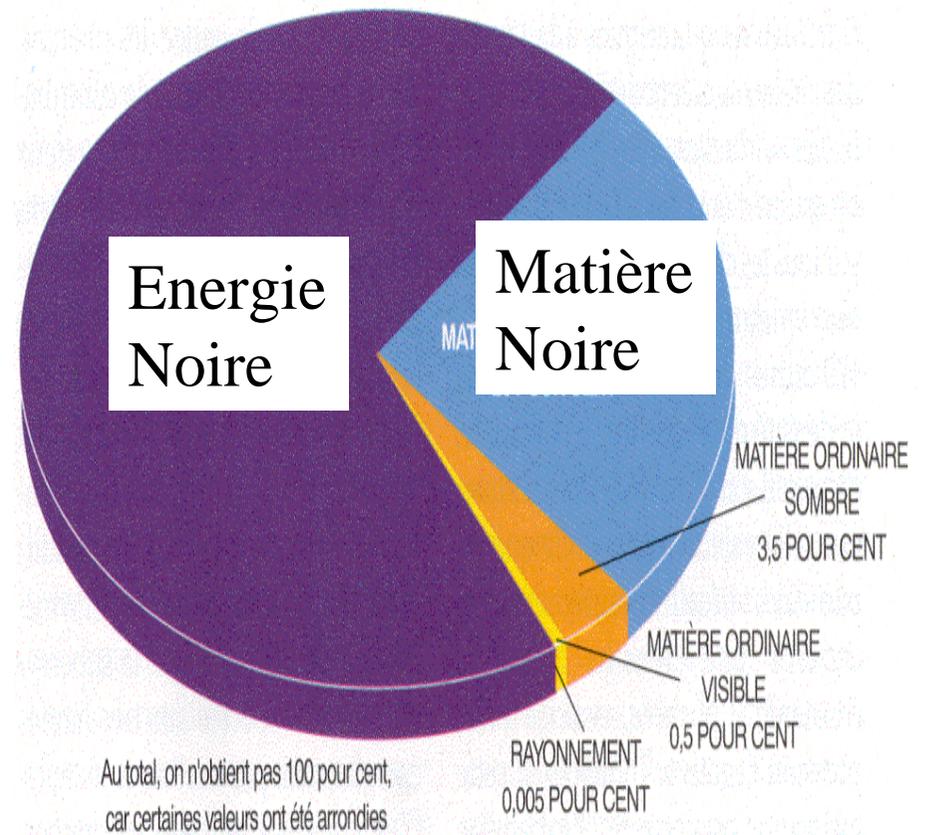


Expérience spatiale!

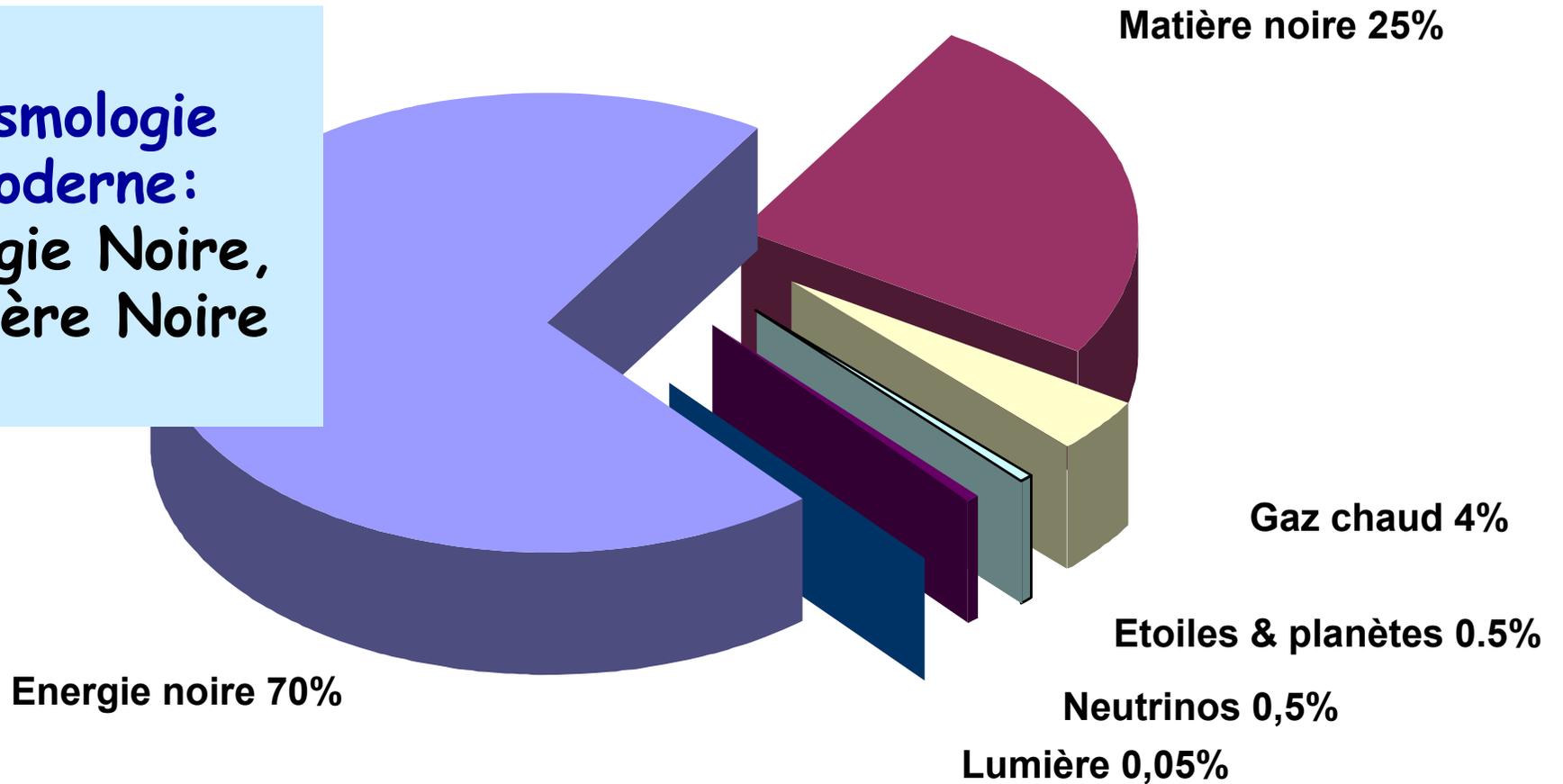
# Nouveau paradigme: le modèle concordant



## Un Univers plat majoritairement sombre



**Cosmologie  
Moderne:  
Energie Noire,  
Matière Noire**



**Mesures Précises au pourcent!**

**Epicycles modernes?**

**Besoin d'une nouvelle révolution conceptuelle?**

# Cosmologie quantique

## Gravité quantique

- Supercordes, Théorie des Branes, M theory

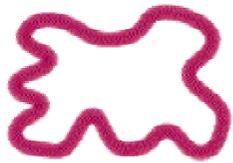
- Théorie des boucles

- Géomérodynamique quantique

# Théorie des cordes

Veneziano, Green,  
Schwarz, Witten, etc.

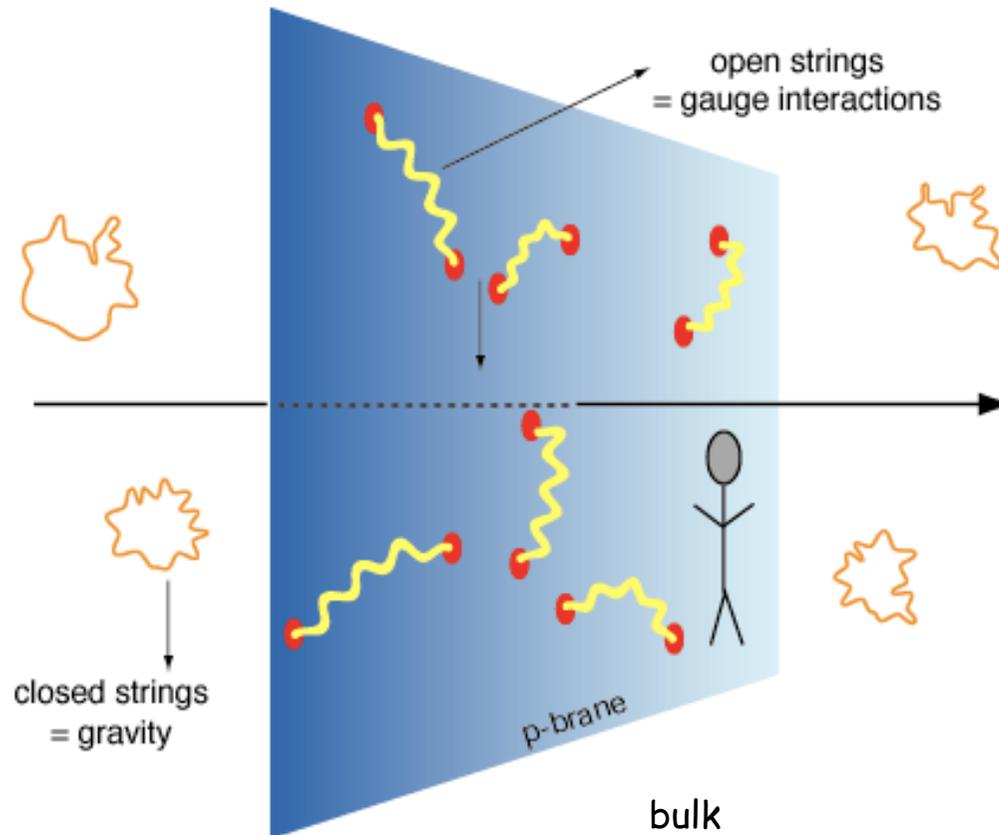
Prix à payer :  
extra-dimensions



Corde fermée



Corde ouverte



# Loop quantum gravity

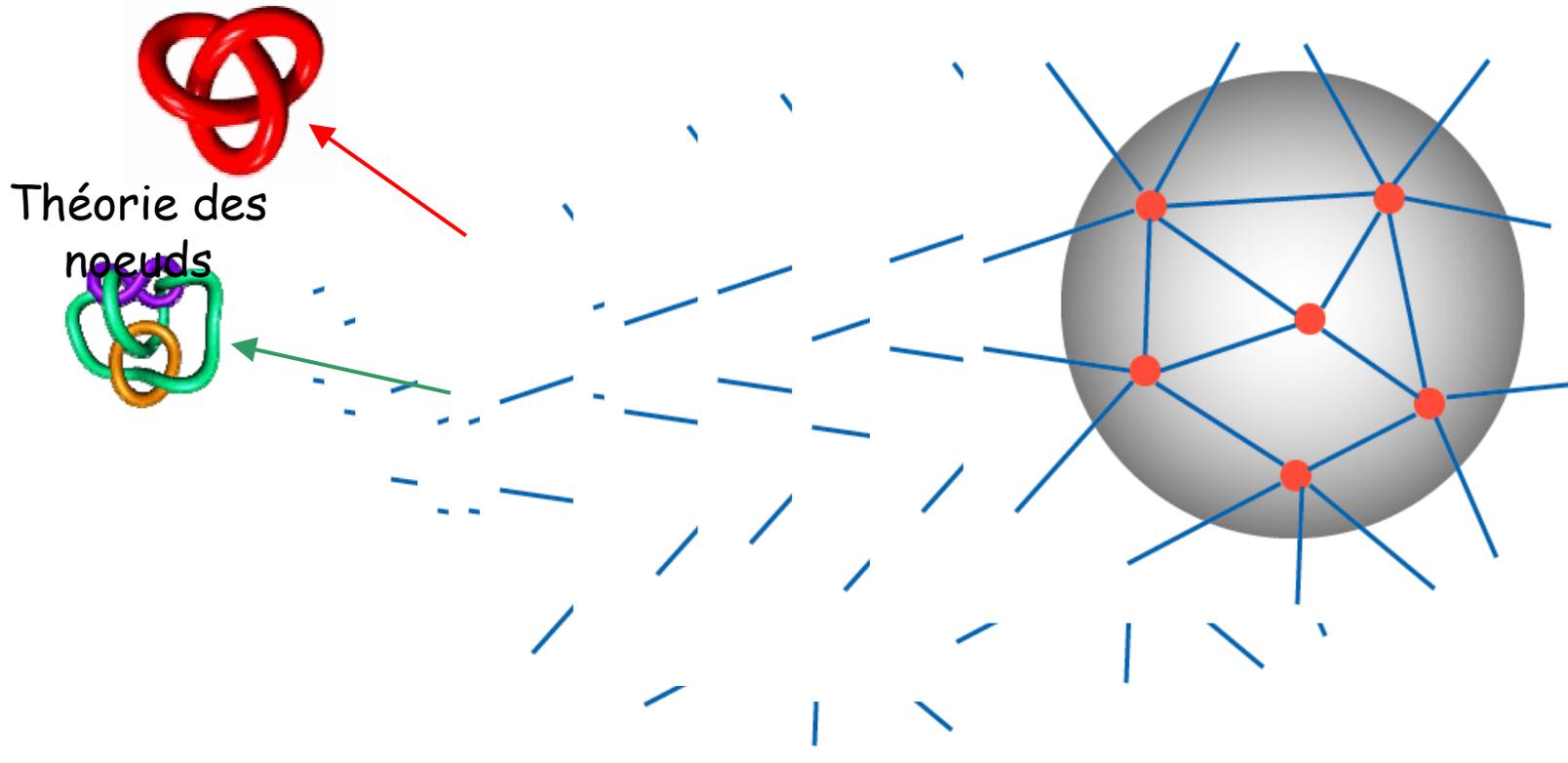
Ashtekhar, Smolin, Rovelli, Bojowald

Atomes d'espace:  $10^{-99} \text{ cm}^3$

Réseau de Spin

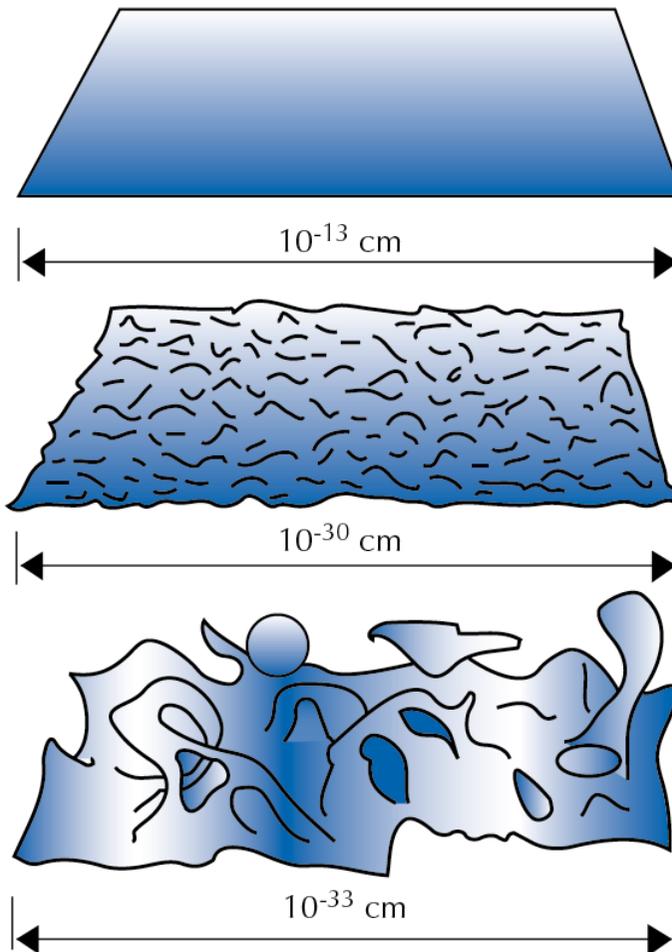
Atomes de temps :  $10^{-43} \text{ sec}$

Mousse de Spin



# Quantum Gravity

Quantum foam  
(J. Wheeler)



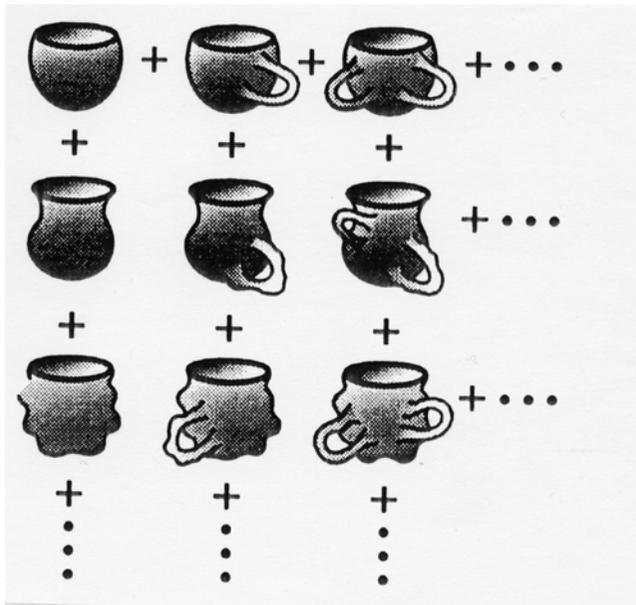
# Cosmologie quantique

Fonction d'onde de l'Univers

équation Wheeler-De Witt

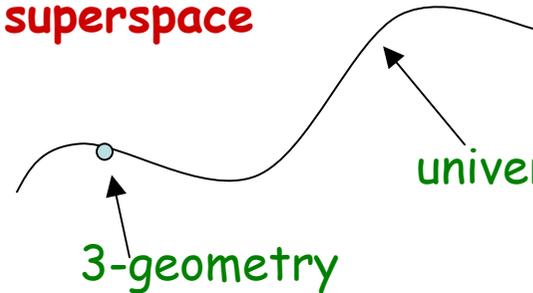
$$H\Psi(^3g, \Phi) + R\Psi = 0$$

$\Psi(^3g) =$



espace-temps -->

**superspace**



universe worldline

3-geometry

Solutions approchées dans le « mini-superspace »:

- No-boundary solution (Hawking-Hartle)
- Inflation chaotique (Linde, Vilenkin)

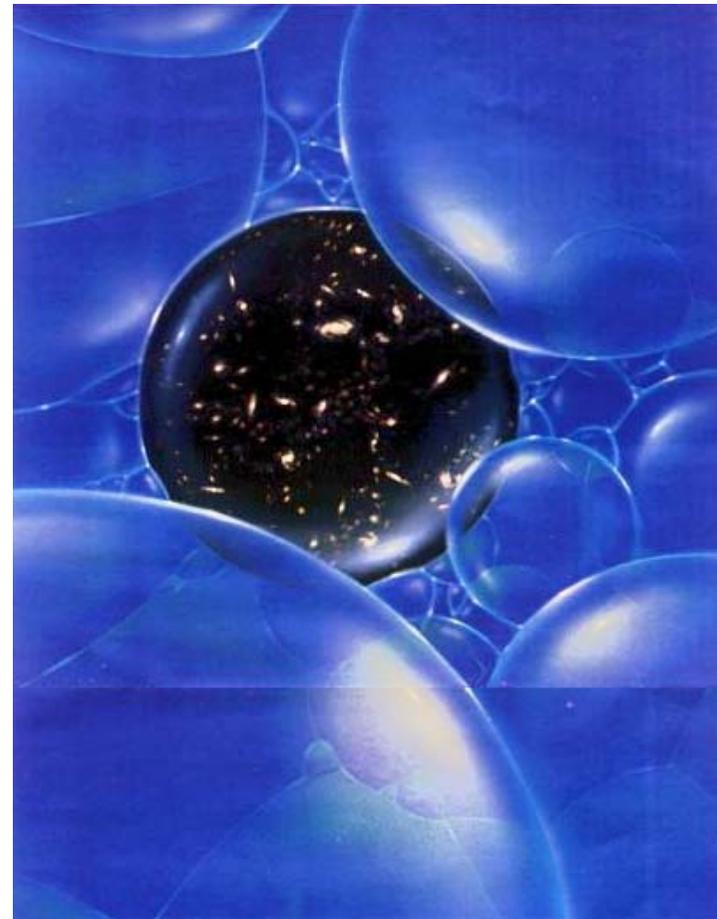
# Naissance de l'espace-temps par fluctuation spontanée du vide

(Linde, Vilenkin)



Inflation chaotique

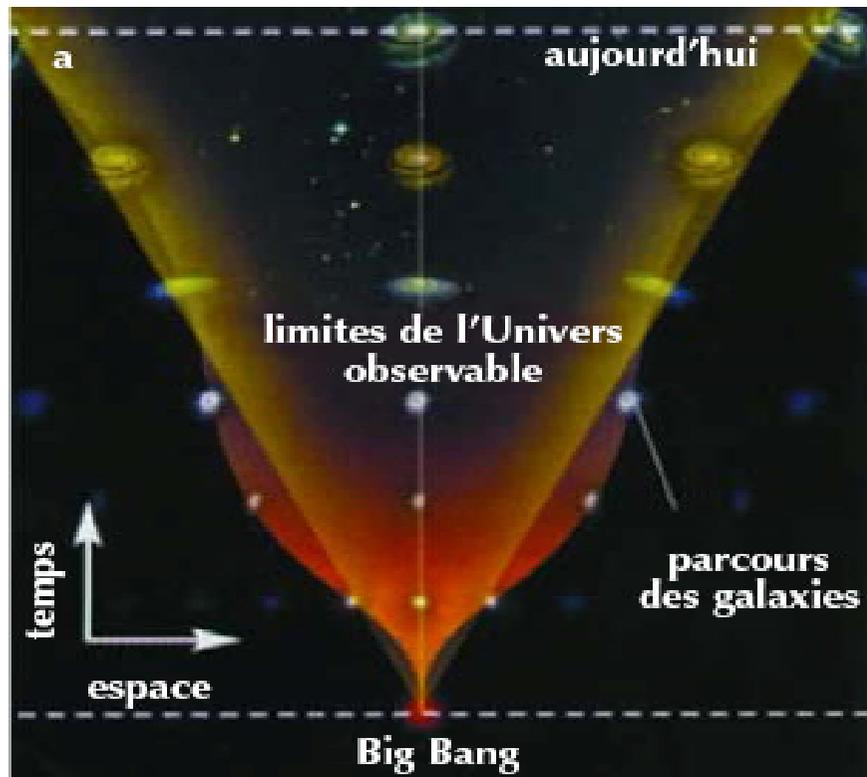
Mousse d'univers (multivers)



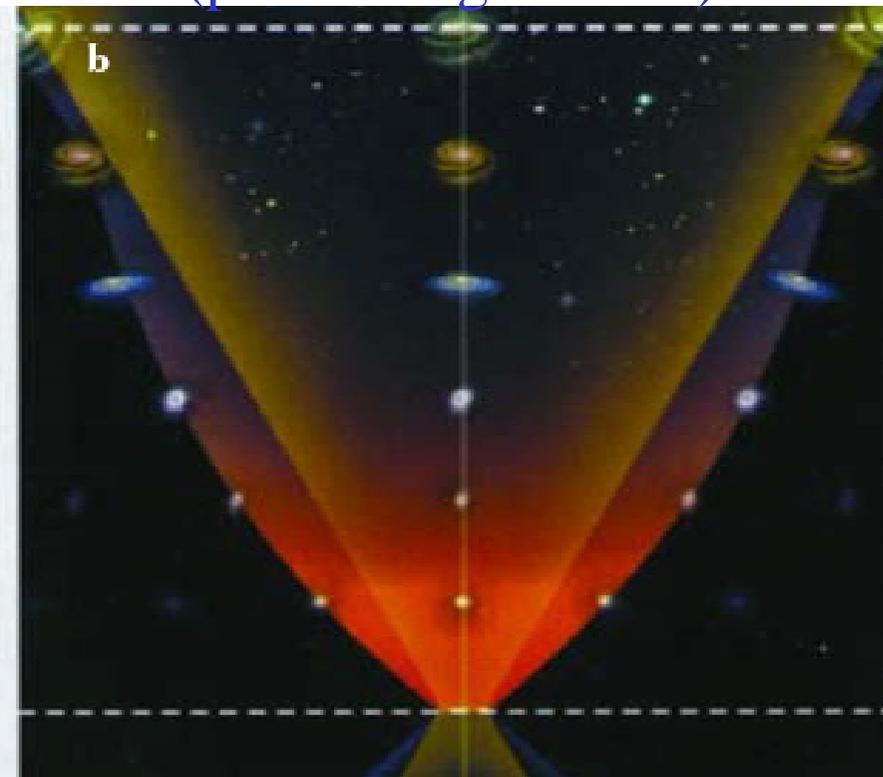
# Modèles de Pré-Big Bang ?

## Philosophie ou Science?

Gravité classique  
(singularité)



Gravité quantique ?  
(pas de singularité ?)



En tous cas, pas (encore?) une science exacte!

**Conclusion?**

La cosmologie navigue entre  
philosophie et science exacte