

# Histoire de l'Univers

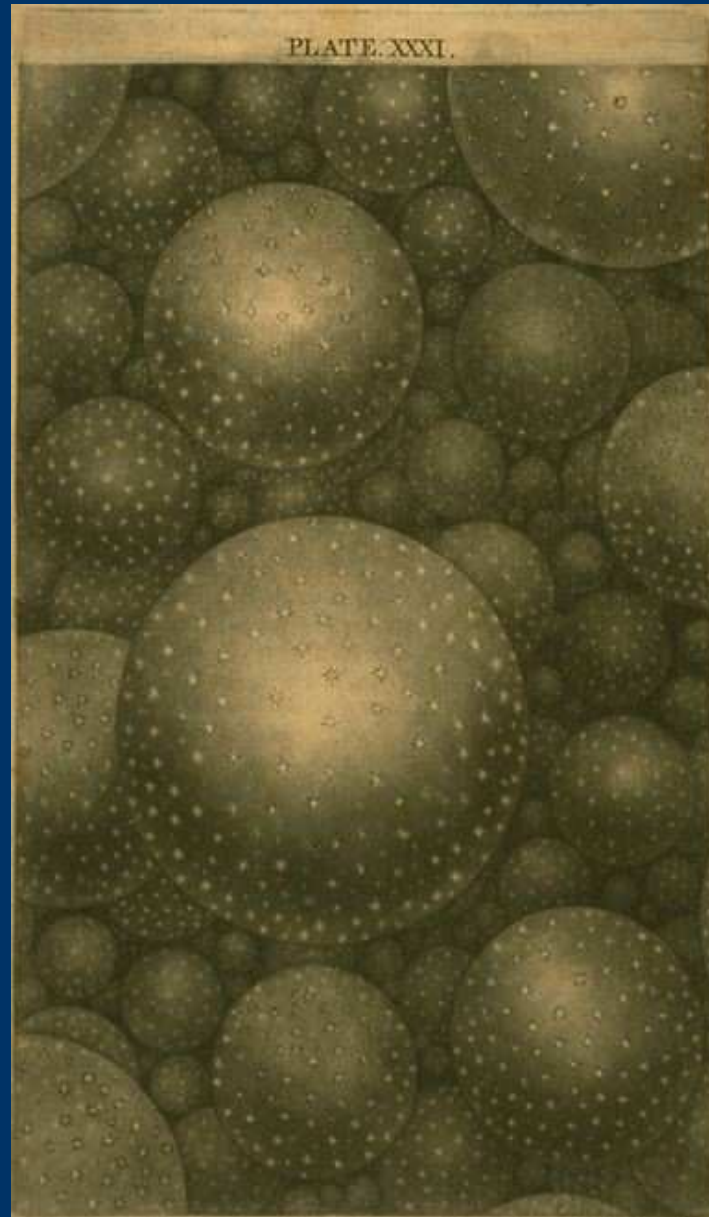
Alberto Cappi

*INAF - Osservatorio Astronomico di Bologna*  
*Observatoire de la Côte d'Azur*

École Astronomique de Porquerolles  
19-24 Septembre 2004

# Première partie l'univers en expansion

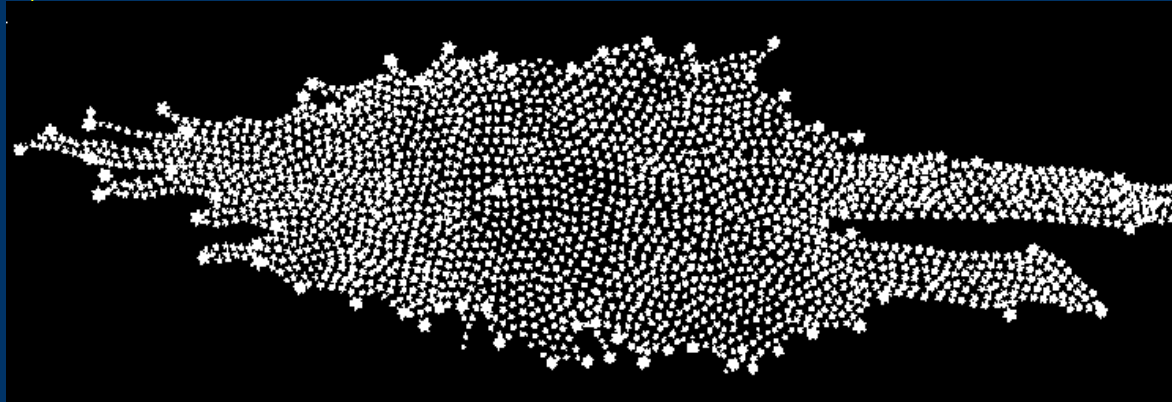




Early conception of galaxies shown in *Starstruck Tonight*. Thomas Wright, *A New Theory of the Universe* (1750), Plate 31. Photograph courtesy of the *History of Science Collections* of the University of Oklahoma.

# La Voie Lactée

Les comptages de William Herschel



*1785: il publie la première synthèse des ses observations des nébuleuses. Il pense qu'il s'agit de systèmes stellaires à de millions d'année-lumière de la Terre.*

# Pierre Simon de Laplace (1749-1827)



1796

septième note dans *l'Exposition du système du monde*

Hypothèse de la nébuleuse primordiale:  
le “Big Bang” du XIX<sup>e</sup> siècle



Lorsqu'on lit LAPLACE, KANT ou BUFFON, on se rend compte que ces auteurs ont éprouvé, en composant leurs systèmes, un plaisir spécial, une sorte d'exaltation apparentée à l'enthousiasme des poètes: plaisir de découvrir une énigme, d'apercevoir une simplicité cachée sous l'apparente complexité du monde, plaisir esthétique sans doute aussi devant une beauté grandiose, peut-être aussi plaisir du risque que comporte leur entreprise, puisque le progrès des connaissances positives doit finalement contrôler leurs intuitions en les confirmant, à moins qu'elles ne les anéantissent et ne les fassent même apparaître après coup presque ridicules.

Georges Lemaître, 1945, *Hypothèses cosmologiques* (dans L'hypothèse de l'atome primitif, 1946)

# Observations de nébuleuses au XIX siècle



Télescope de Lord Rosse  
en Irlande (182 cm)



**1880:** Henry Draper obtient la première photographie d'une nébuleuse (nébuleuse d'Orion)

**1888:** Isaac Roberts obtient la première photographie d'une nébuleuse à spirale (M31: 3 heures)

Au début du XX<sup>e</sup> siècle, spectroscopie des nébuleuses à spirale: 20-40 heures d'exposition (record: 80 heures).



William Huggins, **1864**: premier spectre de M42 (nébuleuse d'Orion). Il découvre les raies d'émissions typiques des gaz.



No competent thinker, with the whole of the available evidence before him, can now, it is safe to say, maintain any single nebula to be a star system of co-ordinate rank with the Milky Way.

*Agnes Mary Clerk, System of Stars (1890)*

***PROBLÈME DES DISTANCES***

# Cosmologie du XX<sup>e</sup> siècle

## Technologie:

Photographie  
Spectroscopie  
Télescopes  
de grand diamètre

## Théorie:

Relativité  
Mécanique Quantique

# Naissance de la cosmologie scientifique

Histoires parallèles...

THEORIE



EUROPE

OBSERVATIONS



USA

# George Ellery Hale (1868-1938)

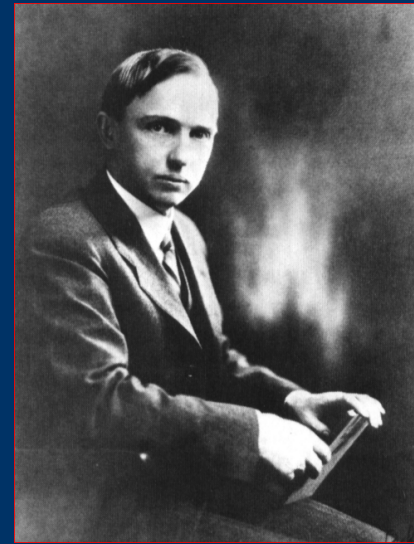
Le plus important constructeur de télescopes du XX<sup>e</sup> siècle. Fils d'un industriel de Chicago. Professeur d'astronomie en 1892.

Hale se fait financer par **Charles Yerkes**, un magnate des tram: il achète une lentille de 40 pouces (à Paris) pour l'Observatoire de Yerkes. Le Carnegie Institute finance la construction d'un télescope de 60 pouces pour l'Observatoire de Mount Wilson, dont Hale devient le directeur.

Il arrive à convaincre un homme d'affaires de Los Angeles, **John D. Hooker**, a financer un télescope de 100 pouces, terminé en 1918. 1929: il obtient 6 millions de dollars de la Fondation Rockefeller pour un télescope de 200 pouces.

Retard de 20 ans a cause de la guerre: inauguré en 1948 (Mount Palomar).

# Harlow Shapley (1885-1972)



Né en 1885 (dans le Missouri);

Responsable d'une rubrique criminelle pour un quotidien du Kansas;

Il fréquente un cours de journalisme, qui termine en 1907.

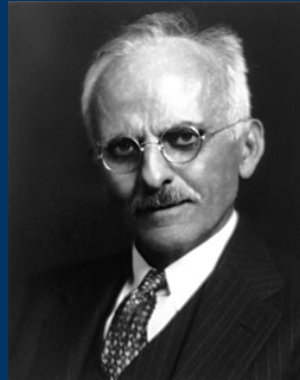
Il décide d'étudier une autre matière, et

choisit la première dans la liste (Astronomie).

À Princeton, il montre que les Céphéides ne sont pas des étoiles binaires, mais pulsantes

À Mount Wilson, il découvre que le Soleil n'est pas au centre de la Galaxie.

# Heber Doust Curtis (1872-1942)



Né en 1872 à Muskegon (Michigan).

Il fait des études classiques et devient professeur de latin à 22 ans au Collège de Napa en Californie.

En 1897 il devient professeur d'astronomie et de mathématiques.

En 1902 il devient astronome à l'Observatoire de Lick en Californie.

**1885**: une *nova* est observée dans la nébuleuse d'Andromède

**1901**: une *nova* très proche est observée dans la constellation de Persée; sa parallaxe correspond à une distance de 100 années-lumière

Si les deux avaient la même luminosité, la *nova* Andromède devait être *seize fois* plus lointaine, mais *dans* la Voie Lactée.

Curtis trouva d'autres novae dans Andromède, beaucoup plus faibles que la *nova* de 1885, ce qui impliquait que la distance d'Andromède était de centaines de milliers d'années-lumière, au-delà de la Voie Lactée.

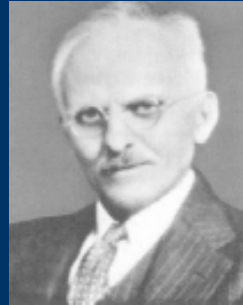
La “*nova*” de 1885 était en réalité une *Supernova*...



# The Great Debate



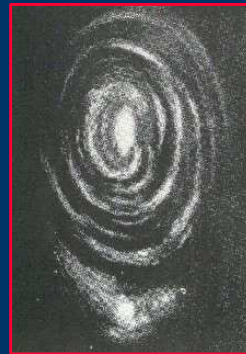
Harlow Shapley



Heber D. Curtis

Washington, 26 avril 1920

Quelle est la nature des nébuleuses à spirale?



*Curtis, meilleur orateur,  
gagne...*



# Distance de luminosité et magnitudes

$$f = \frac{L}{4\pi D^2}$$

$$D = \sqrt{\frac{L}{4\pi f}}$$

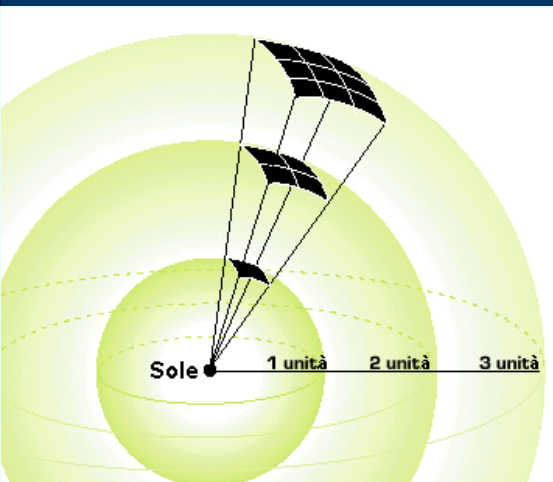
$$m = -2.5 \log f$$

$M$ : magnitude apparente à 10 pc

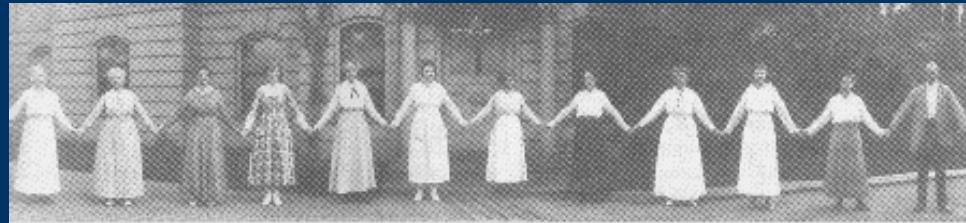
$$m - M = -2.5 \log L + 2.5 \log(4\pi) + 5 \log D + 2.5 \log L - 2.5 \log(4\pi) - 5$$

$$M = m + 5 - 5 \log D(\text{pc})$$

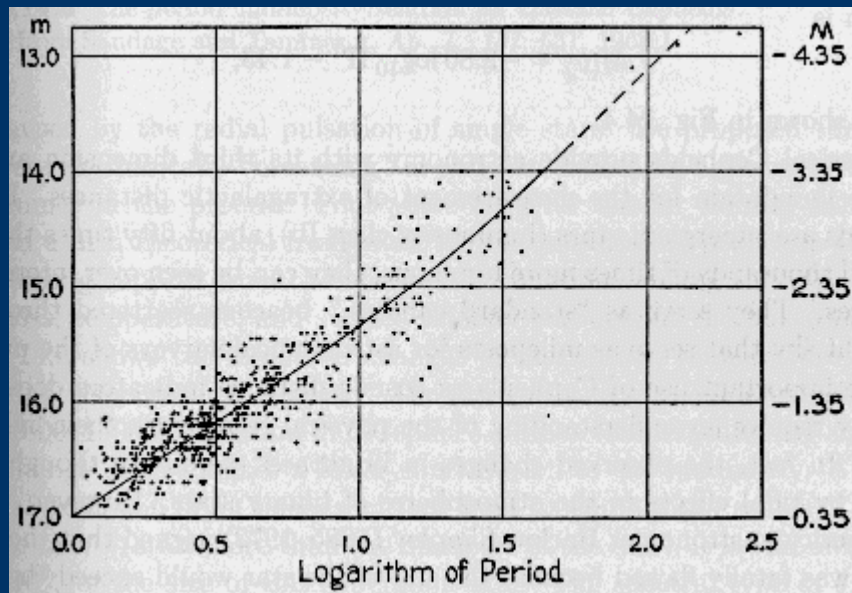
$$m - M = 25 + 5 \log D(\text{Mpc})$$



# Henrietta Swan Leavitt (1868-1921)



Harvard women computers

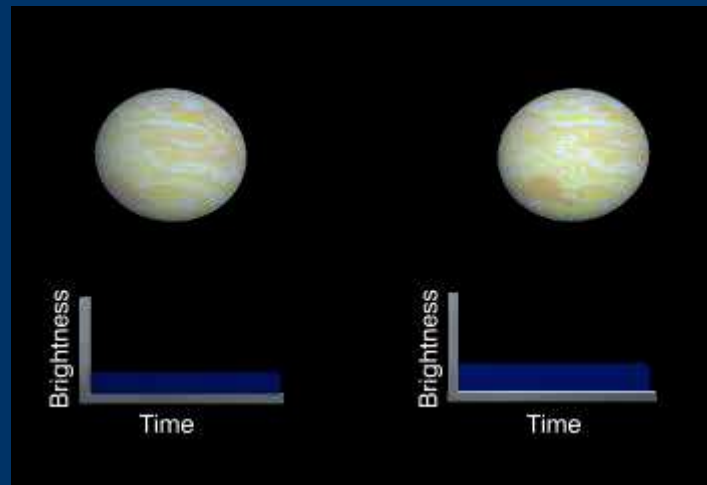


# La distance des nébuleuses

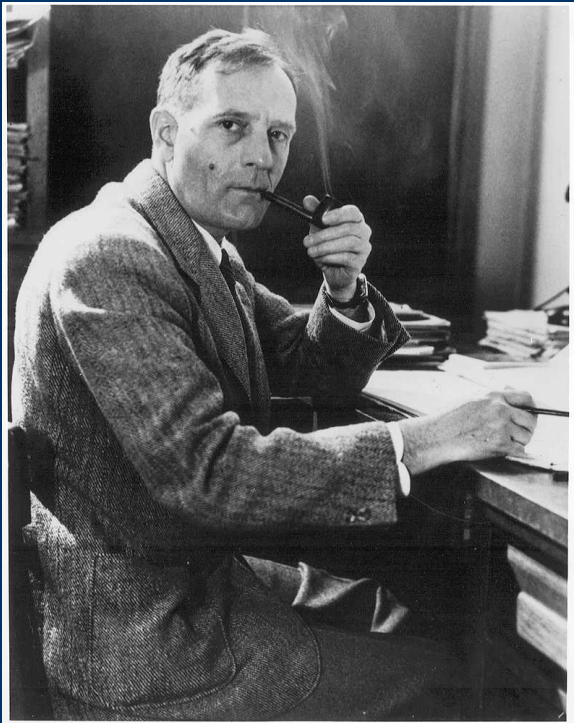
**Cepheïdes**: étoiles variables avec une relation bien définie entre période et luminosité (magnitude absolue):

$$M = a + b \log(P) \quad (\text{Leavitt 1908})$$

A partir du flux (magnitude apparente) observé on peut donc connaître leur distance.



# Edwin Powell Hubble (1889-1953)



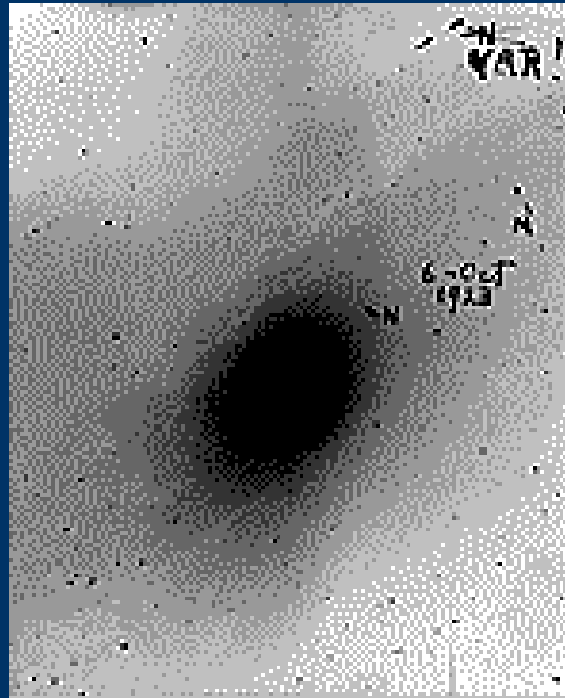
“Découvreur” de l’expansion de l’Univers.

Fils d’un avocat. boxeur amateur, il va étudier le droit à Oxford. Aux Etats-Unis il étudie astronomie à l’Université de Chicago.

Blessé en France pendant la Première Guerre Mondiale.

Hale lui offre un poste au Mount Wilson, où le nouveau télescope de 100 pouces(2,5 metri) entre en fonction en 1919.





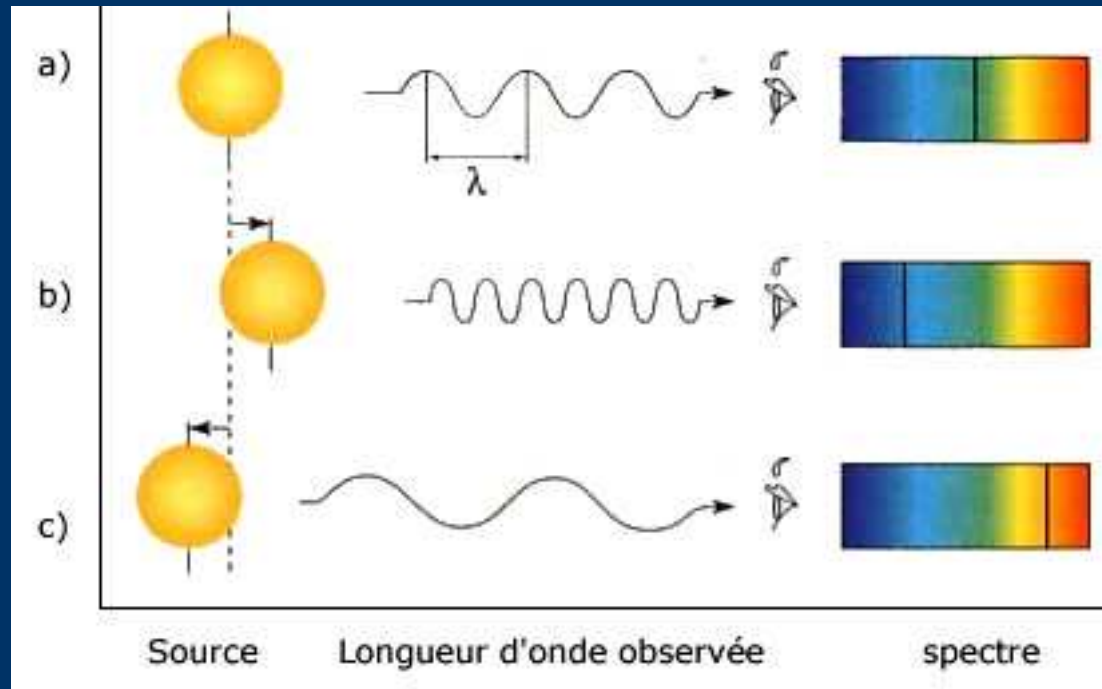
*En 1924, Hubble identifie des Céphéides dans trois galaxies.  
Communication le 1<sup>e</sup> janvier 1925.  
NGC 6822 (1925), M33 (1926), M31 (1929)*

**Hubble: nébuleuse d'Andromède à 900 kpc,  
une distance supérieure au diamètre de la Voie Lactée.**

# La découverte de l'expansion



# Spectres et effet Doppler



Blue-shift et red-shift

*Doppler 1842; Fizeau 1848*



$$t_0 = \frac{1}{v_0}$$

période de la lumière (temps qui s'écoule entre deux pics) à la source

$$\Delta s = V t_0 = \frac{V}{v_0}$$

déplacement de la source pendant une période

$$t_1 = t_0 + \frac{\Delta s}{c} = \frac{1}{v_0} + \frac{V}{v_0 c}$$

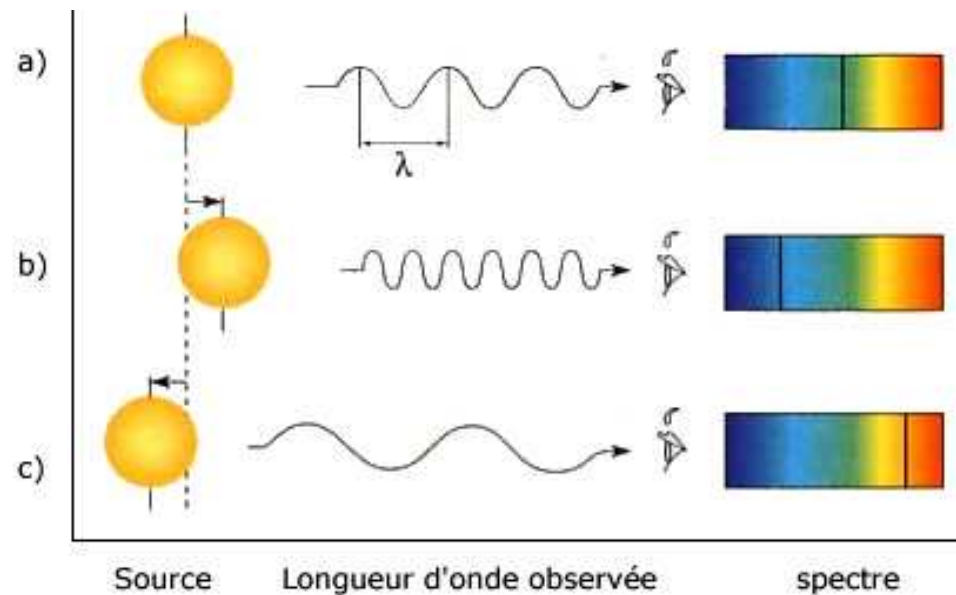
période observée

$$\frac{v_1}{v_0} = \frac{t_0}{t_1} = \frac{\frac{1}{v_0}}{\frac{1}{v_0} \left(1 + \frac{V}{c}\right)} = \frac{1}{1 + \frac{V}{c}}$$

$$\lambda = \frac{c}{v}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_0} = 1 + \frac{V}{c}$$

$V$ : vitesse de la source



# Vesto Melvin Slipher (1865-1969)



Directeur du Lowell Observatory, Flagstaff, Arizona.  
En 1912 il mesure le décalage spectral de la nébuleuse d'Andromède:  $-300$  km/s. Dans les années suivantes, il découvre que la plupart des décalages des nébuleuses sont vers le rouge.

Il fallait des dizaines d'heures pour avoir un spectre utilisable pour la mesure du redshift.

# Carl Wilhelm Wirtz (1876-1939)

En 1923 l'astronome allemand Carl Wirtz utilise les redshift de Slipher et des mesures de distance des nébuleuses obtenues avec le diamètres apparents, et il trouve une relation vitesse-distance (Allan Sandage l'a appelé "Hubble sans télescope").

En 1927 le belge Georges Lemaître prédit la relation "de Hubble" et en trouve la valeur.

# Milton La Salle Humason (1891-1972)



Il quitte l'école à 14 ans.

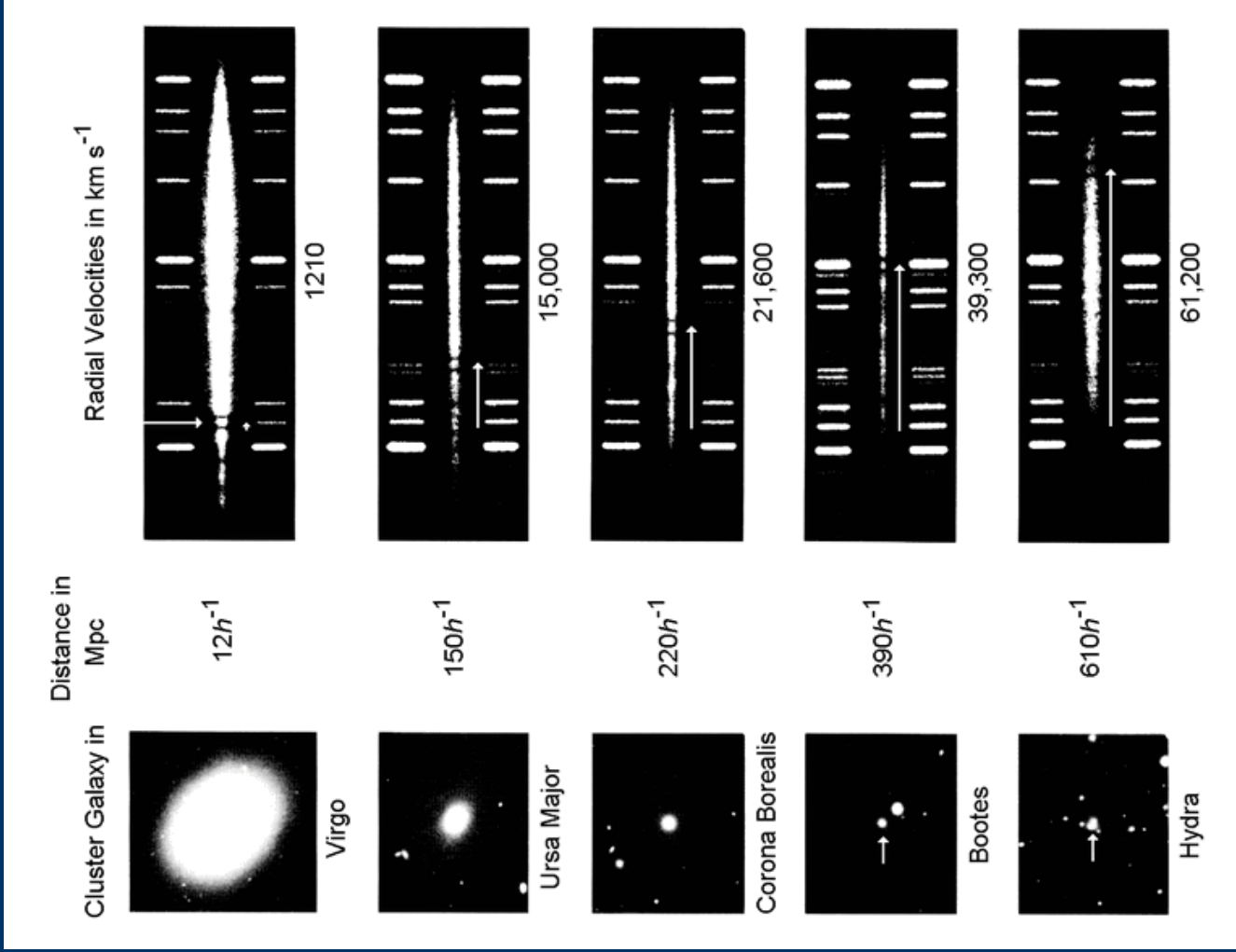
Conducteur de mules à Mount Wilson.

Il se marie en 1911 avec la fille d'un ingénieur de l'Observatoire.

En 1917 il devient portier de l'Observatoire, puis il est promu assistant.

En 1919, appuyé par Hale, il devient Astronome-Assistant et collaborateur de Hubble.

Son programme: mesurer les redshifts des nébuleuses.



## 24 galaxies + une moyenne de 22 galaxies sans distance

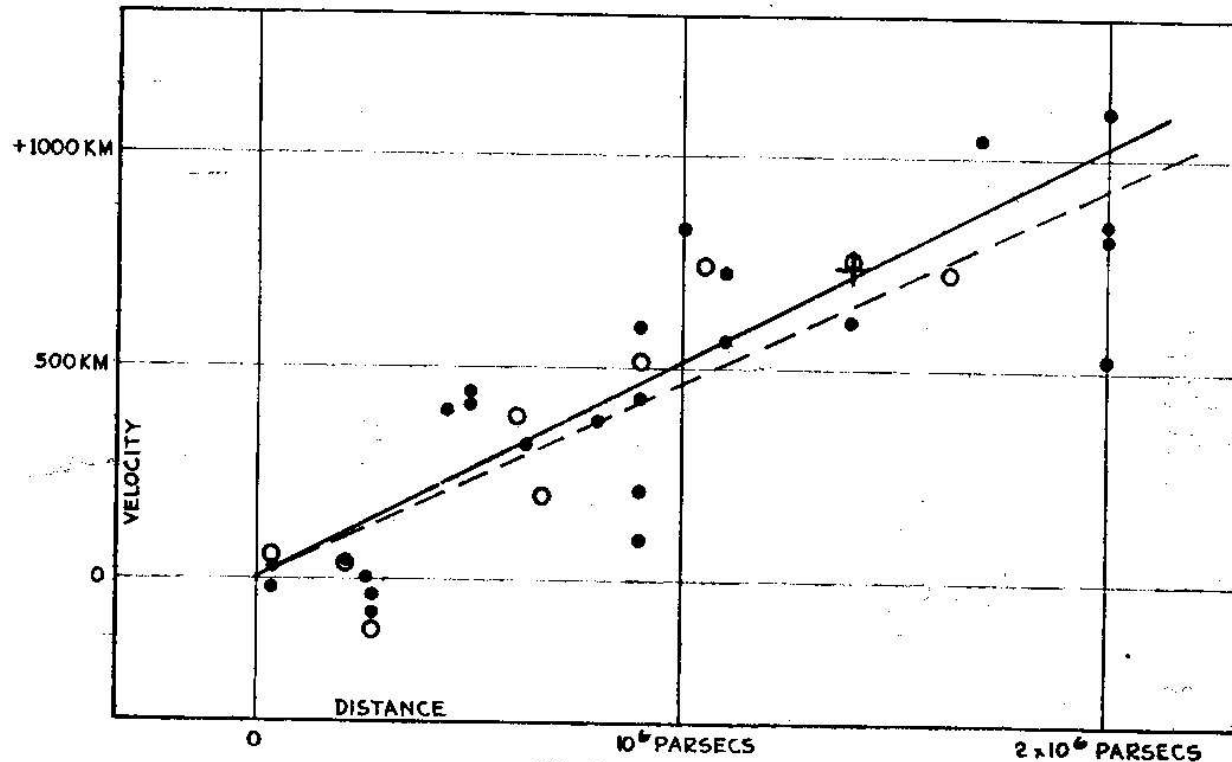


FIGURE 1

### Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

Radial velocities, corrected for solar motion, are plotted against distances estimated from involved stars and mean luminosities of nebulae in a cluster. The black discs and full line represent the solution for solar motion using the nebulae individually; the circles and broken line represent the solution combining the nebulae into groups; the cross represents the mean velocity corresponding to the mean distance of 22 nebulae whose distances could not be estimated individually.

# Les modèles cosmologiques



# La loi de gravitation universelle



Isaac Newton (1643-1727)

1687

*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

$$F = -G m M / r^2$$

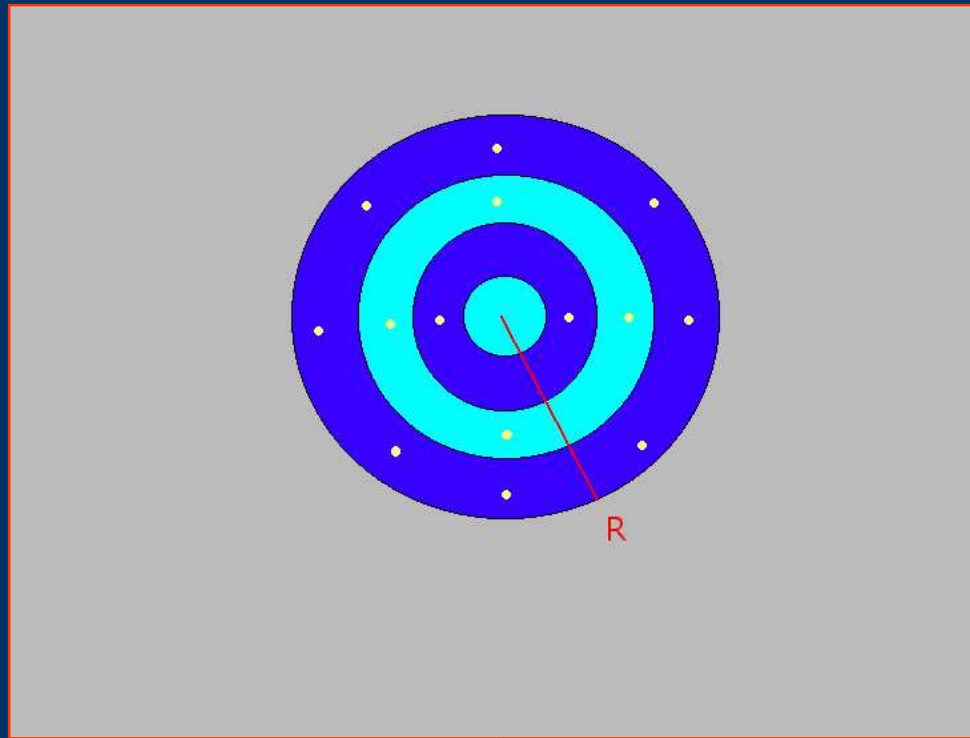


# Problèmes de la cosmologie newtonienne

- a) Pourquoi le ciel est-il noir la nuit (paradoxe d'Olbers)?
- b) Comment définir la force de gravité dans un univers homogène et infini?

# Le paradoxe d'Olbers

La lumière d'une étoile diminue proportionnellement à l'inverse du carré de la distance, mais le nombre d'étoiles augmente proportionnellement au carré de la distance.



# Solutions possibles du paradoxe d'Olbers

- a) La matière n'est pas distribuée uniformément dans l'espace.
- b) Les étoiles sont en nombre fini.
- c) L'univers a eu une origine dans le passé + vitesse finie de la lumière.

The only mode, therefore, in which, under such a state of affairs, we could comprehend the *voids* which our telescopes find in innumerable directions, would be by supposing the distance of the invisible background so immense that no ray from it has yet been able to reach us at all.

Poe, Eureka, 1848

# Giacomo Leopardi: l'illusione de l'infinito



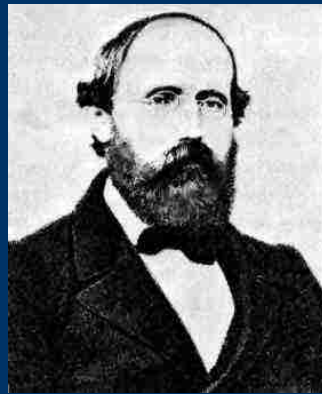
Il credere l'universo infinito, è un'illusione ottica: almeno tale è il mio parere. [...] Quando io guardo il cielo, mi diceva uno, e penso che al di là di que' corpi ch'io veggo, ve ne sono altri ed altri, il mio pensiero non trova limiti, e la probabilità mi conduce a credere che sempre vi sieno altri corpi più al di là, ed altri più al di là. Lo stesso, dico io, accade al fanciullo, o all'ignorante, che guarda intorno da un'alta torre o montagna, o che si trova in alto mare. Vede un orizzonte, ma sa che al di là v'è ancor terra o acqua, ed altra più al di là, e poi altra; e conchiude, o conchiuderebbe volentieri, che la terra o il mare fosse infinito.

*Giacomo Leopardi, Zibaldone, 1827*

We will select, I say, no axiom of an unquestionability so questionable as is to be found in Euclid. We will not talk, for example, about such propositions as that two straight lines cannot enclose a space, or that the whole is greater than any one of its parts.

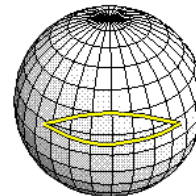
*Poe, Eureka, 1848*

# La courbure de l'espace

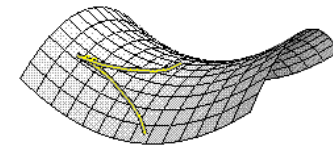


Bernhard Riemann (1826-1866)

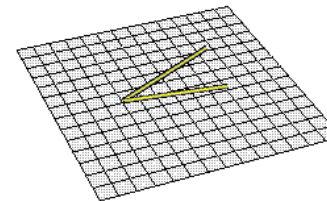
Analogie bidimensionnelle pour un espace fermé: la surface de la sphère est finie mais sans limites.



A *closed* universe curves "back on itself". Lines that were diverging apart come back together. Density  $>$  critical density.



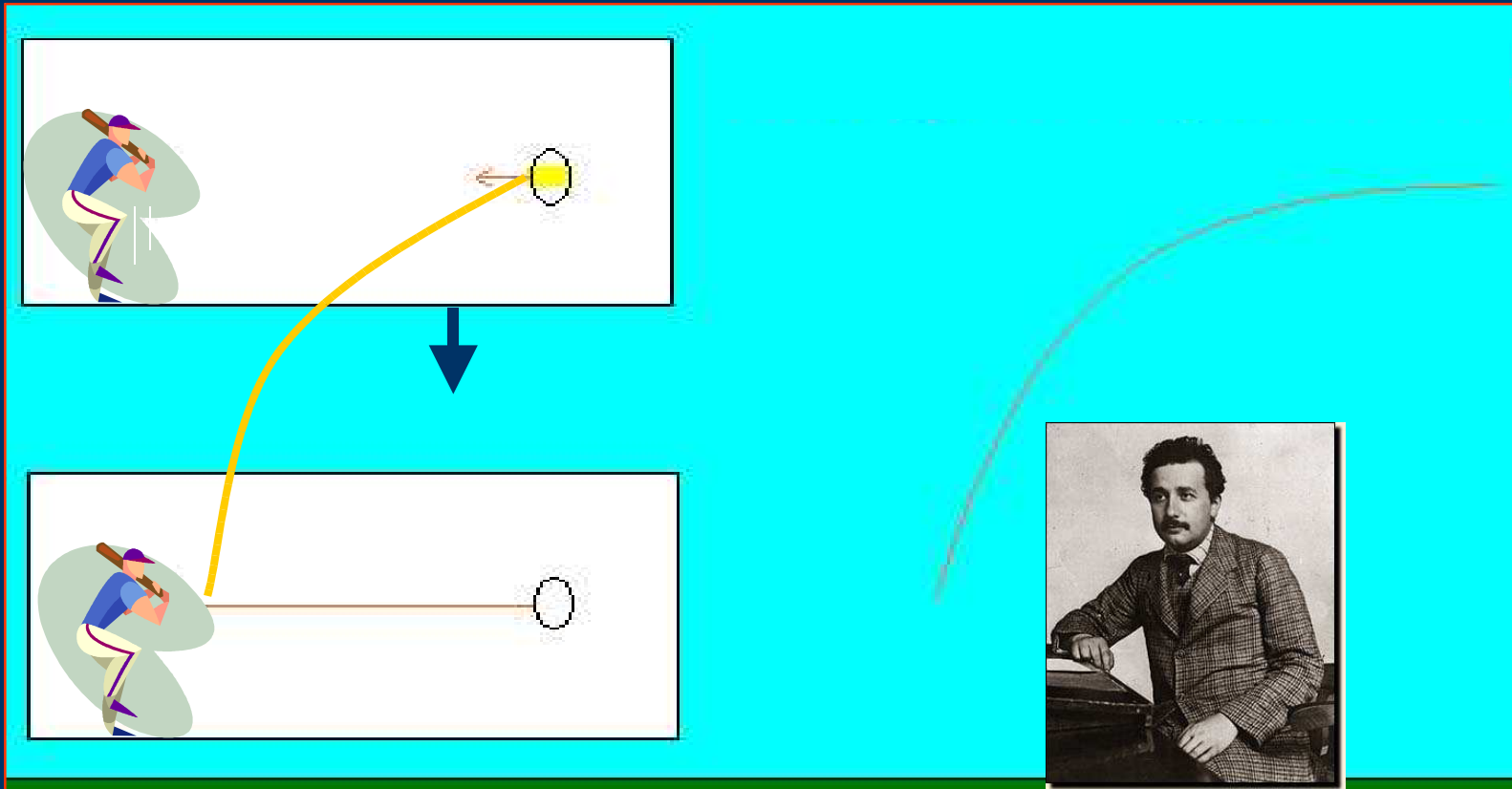
An *open* universe curves "away from itself". Diverging lines curve at increasing angles away from each other. Density  $<$  critical density.



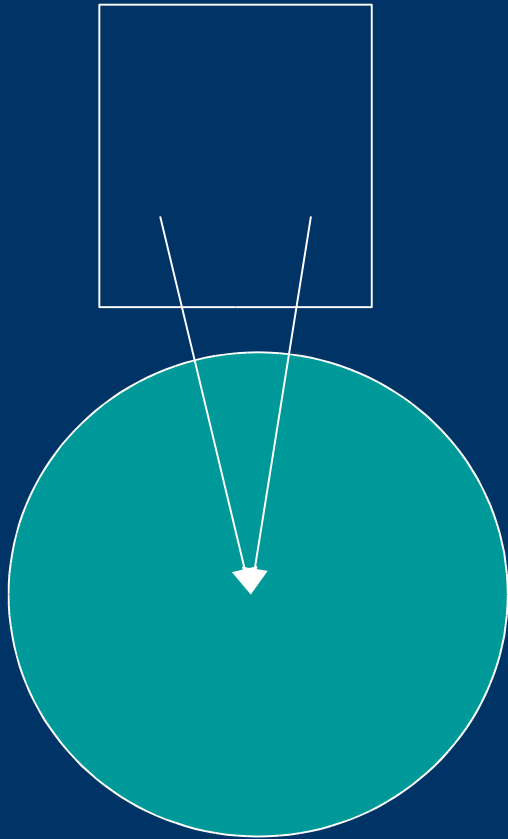
A *flat* universe has no curvature. Diverging lines remain at a constant angle with respect to each other. Density = critical density.

# Le Principe d'équivalence forte

Einstein 1907



# L'équivalence est locale

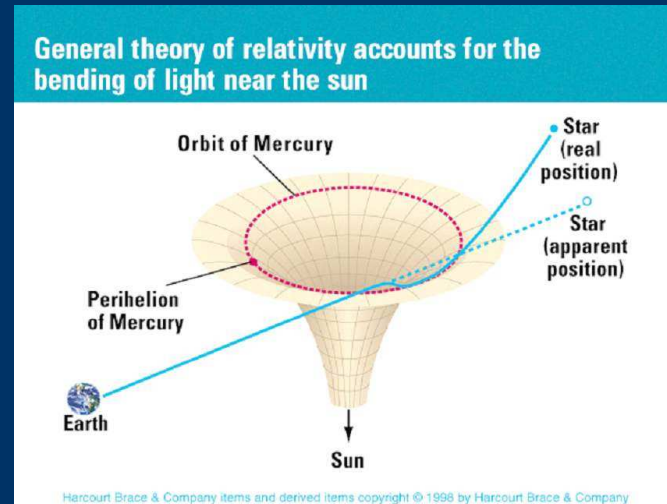
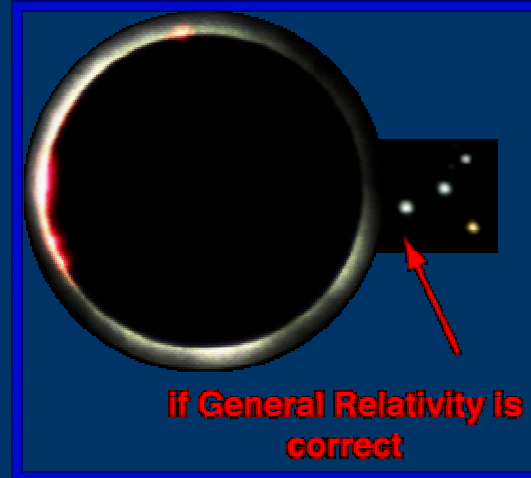
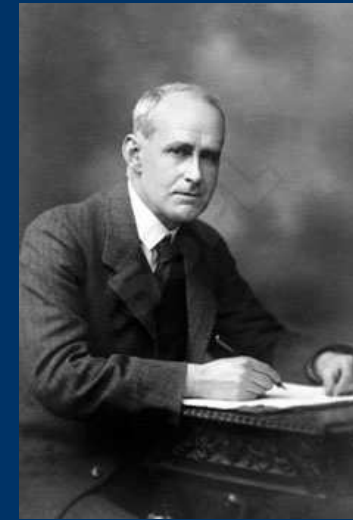


Effet de marée = courbure ineliminable  
Il faut utiliser les geometries non euclidiennes!

# Arthur Eddington (1882-1944)

29 mai 1919: eclipse de Soleil

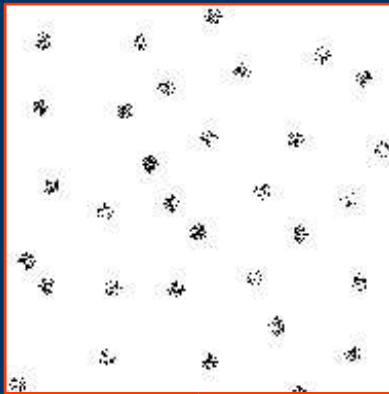
Première mesure du déplacement des images stellaires du au champ gravitationnel du Soleil.



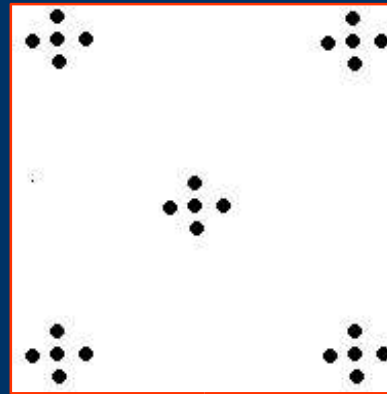


# Le principe cosmologique

Milne (1935): «**principe cosmologique**» d'Einstein.  
L'univers est homogène et isotrope.



Distribution homogène



Distribution hiérarchique

# L'univers d'Einstein

**1917: premier modèle cosmologique relativiste.**

Homogène et statique, fini et illimité. Mais pour empêcher l'effondrement gravitationnel, Einstein doit introduire la constante cosmologique et lui donner une valeur "critique".

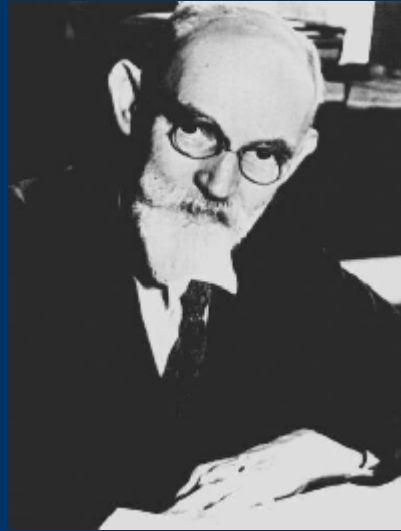


Ce dernier [la constante cosmologique] n'est nécessaire que pour rendre possible une répartition quasi statique de la matière, laquelle correspond au fait que les vitesses des étoiles sont petites.”

Einstein 1917

Mais en 1930 Arthur Eddington montre que l'univers d'Einstein est instable.

# Willem de Sitter (1872-1934)



Il informe Eddington de la nouvelle théorie de la relativité d'Einstein (il y a la guerre, mais les Pays Bas sont neutrales).

**1917:** modèle d'univers vide □ **prévoit un décalage vers le rouge des raies spectrales.**

# Alexander Alexandrovich Friedmann (1888-1925)

1922: *Sur la courbure de l'espace*

1924: *Sur la possibilité d'un univers  
à courbure négative constante*

Solutions des équations de la  
relativité pour des univers  
homogènes et isotropes.



Il découvre les modèles d'univers non statiques  
mais en évolution.



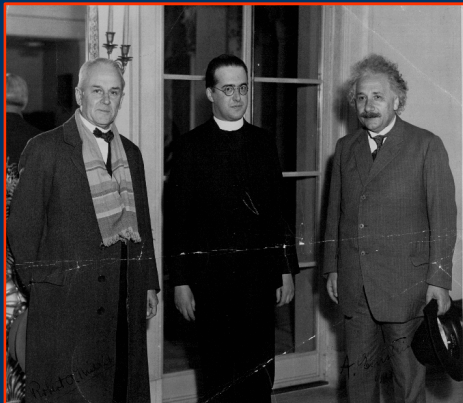
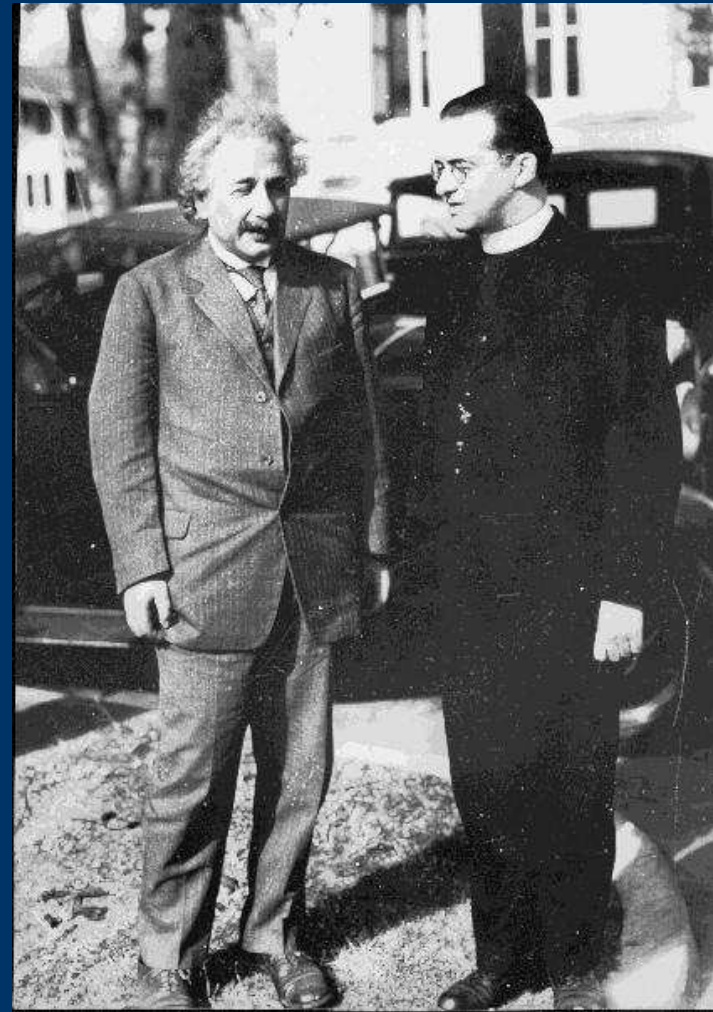
# Georges Lemaître (1894-1966)

1927:

"Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques".

Einstein à Lemaître:

Vos calculs sont corrects,  
mais votre physique est **abominable** !



“Utilisant les 42 nébuleuses extragalactiques figurant dans les listes de Hubble et de Strömberg, et tenant compte de la vitesse propre du Soleil, on trouve une distance moyenne de 0,95 millions de parsecs et une vitesse radiale de 600 km/s, soit **625 km/s** à  $10^6$  parsecs.”

Lemaître 1927

*Cette partie n'a pas été traduite en anglais par Eddington en 1931.*

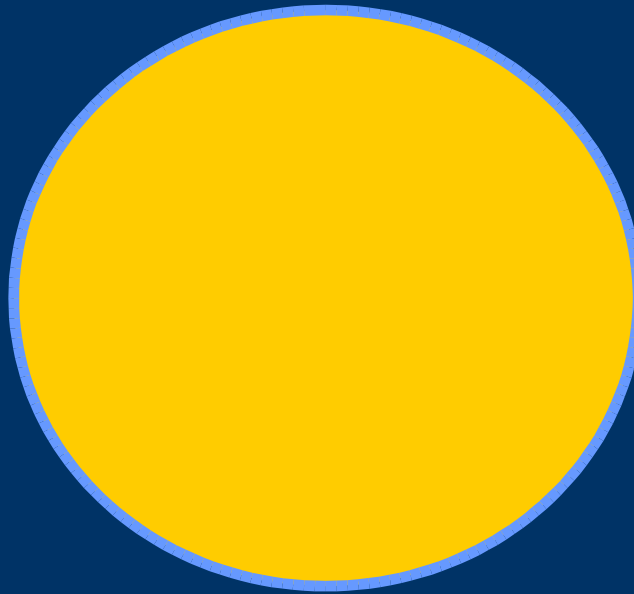
# Cosmologie newtonienne

*La cosmologie newtonienne a été développée après la relativité générale (Milne & McCrea 1934).*

Sphère uniforme de densité  $\rho$  et de rayon  $R$

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

$$M = \rho \times V = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$





# Première équation

Conservation de l'énergie:

$$\frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{R} = C \quad M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho$$

$$H^2 = \frac{v^2}{R^2} = 2 \times \frac{G}{R^3} \times \frac{4}{3}\pi R^3 \rho + 2 \times \frac{C}{R^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho + \frac{2C}{R^2}$$

Si  $C = 0$ :

$$\frac{1}{2}v_f^2 = \frac{GM}{R}$$

$$v_f = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

*Formule relativiste:*

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{kc^2}{R^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

# Deuxième équation

$$a = -\frac{GM}{R^2} = -\frac{4}{3}\pi GR\rho \quad (M = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho_M)$$

Formule relativiste:

$$a = -\frac{4}{3}\pi GR(\rho + 3P/c^2) + \frac{\Lambda c^2}{3}R$$

Matière non relativiste (“univers de poussière”):  $P=0$ .

Rayonnement et matière relativistique:  $P=\rho c^2/3$ .

# Densité critique

$k=0$

$$\rho_{crit} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} : 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

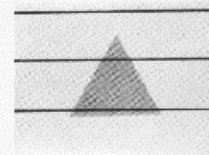
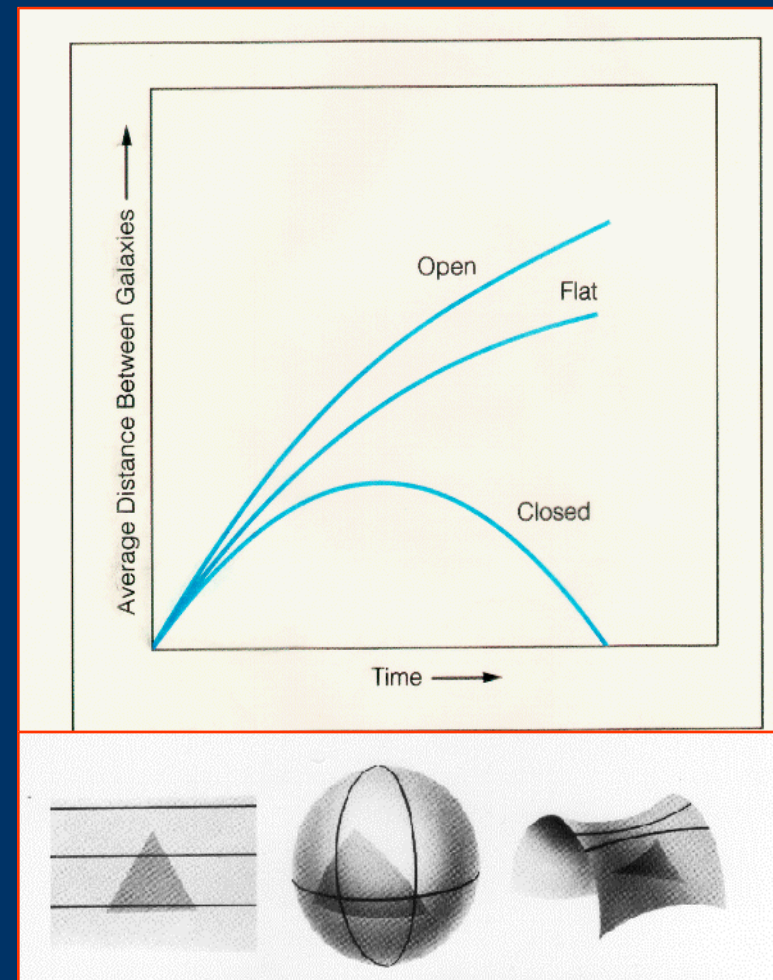
# Modèles d'univers de matière (sans constante cosmologique)

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

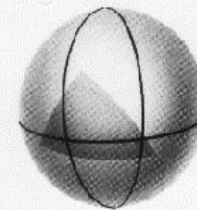
si  $\Omega > 1$ ,  
l'espace est  
fermé, fini e  
destiné à l'effondrement

si  $\Omega = 1$ ,  
l'espace est plat,  
infini\*, et l'expansion  
ne s'arrête pas

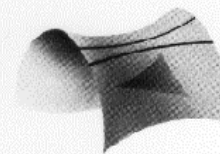
si  $\Omega < 1$ ,  
l'espace est  
hyperbolique, infini\*, et  
l'expansion ne s'arrête pas.



$$\Omega = 1$$



$$\Omega > 1$$



$$\Omega < 1$$



*Si l'univers est infini, il y a un nombre infini de copies de nous-mêmes...*

Voici néanmoins un grand défaut : il n'y a pas progrès. Hélas ! non, ce sont des rééditions vulgaires, des redites. Tels les exemplaires des mondes passés, tels ceux des mondes futurs. Seul, le chapitre des bifurcations reste ouvert à l'espérance. N'oublions pas que *tout ce qu'on aurait pu être ici-bas, on l'est quelque part ailleurs.*

*Auguste Blanqui, L'éternité par les astres, 1872*

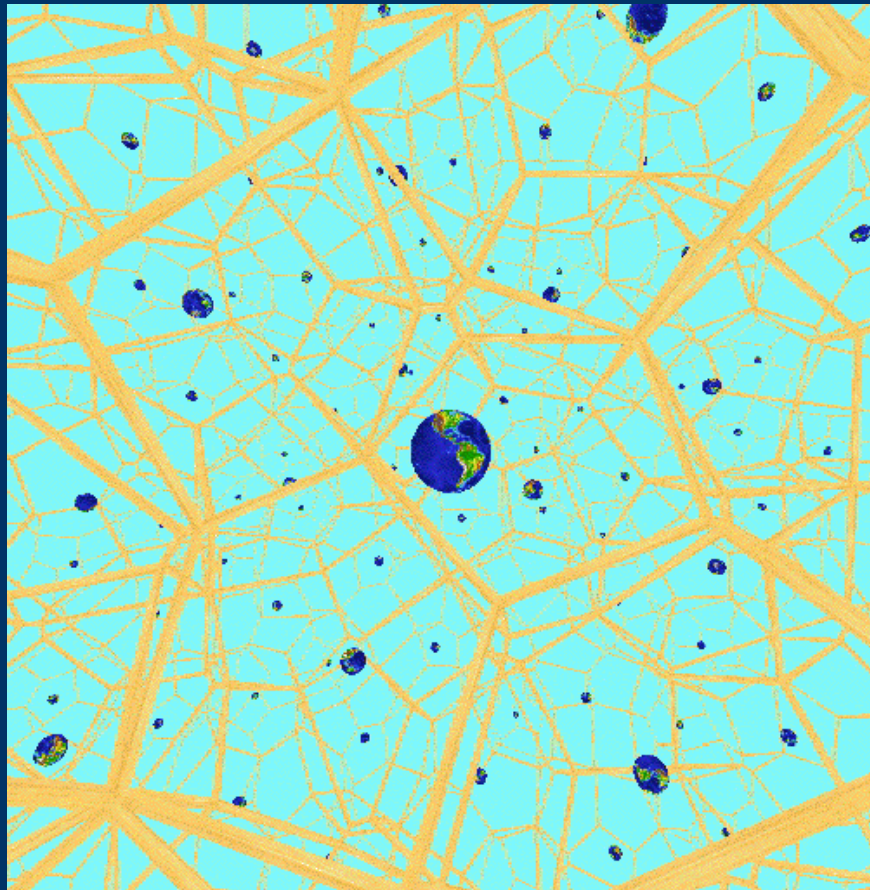
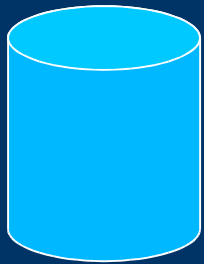
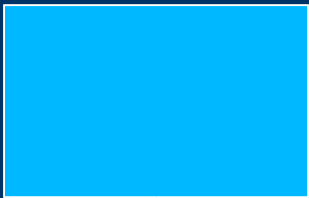
# Géométrie et futur de l'Univers

Avec une constante cosmologique positive, l'espace peut être fini mais l'expansion continuer pour l'éternité (comme dans le cas du modèle de Lemaître).

*Et aussi...*

# La topologie

La relativité générale ne permet pas de déterminer la topologie de l'espace.  
(Lachièze-Rey & Luminet 1995, Physics Reports)



# Le redshift et l'expansion





# La fusion entre la Voie Lactée e Andromeda



**Collision dans 6 milliards d'années.**

# H0 et l'âge de l'univers

H constante dans l'espace, pas dans le temps!

H0: constante de Hubble au temps actuel.

Temps de Hubble:  $T_H = 1/H_0 = D/V$

Avec  $H_0 = 500 \text{ km/s/Mpc}$

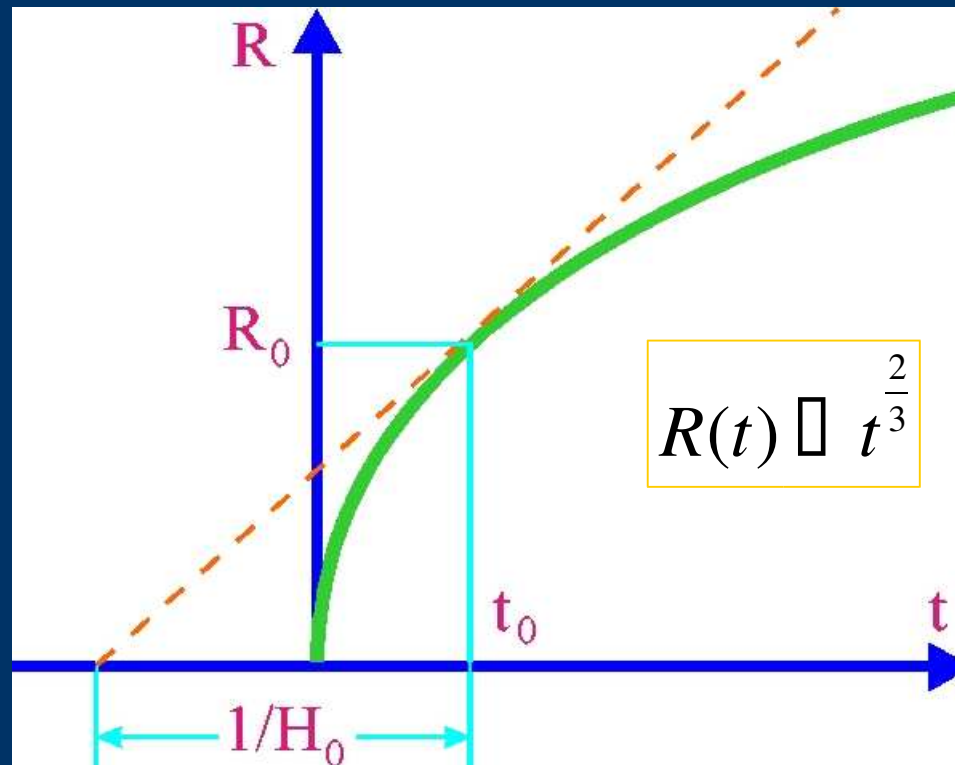
le temps de Hubble est inférieur à l'âge de la Terre.

# Einstein-de Sitter (1932)

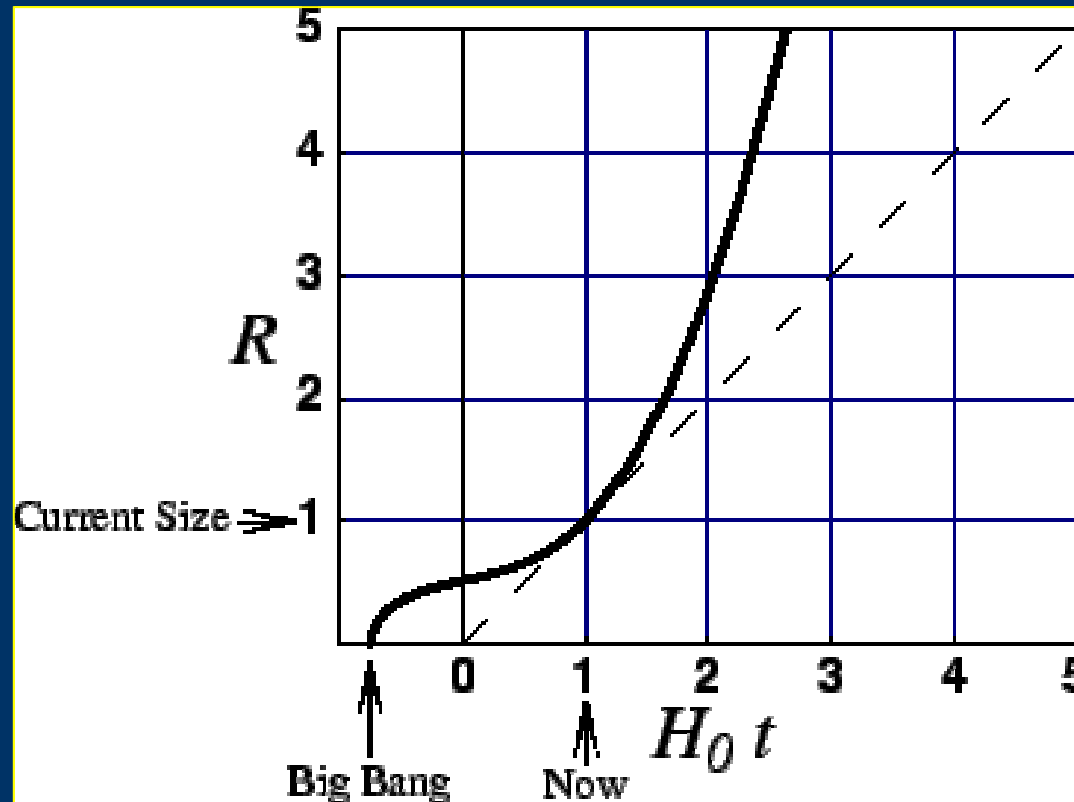
Le modèle le plus simple.

$$K=0, \Omega=0$$

$$T=2/(3H_0)$$



# Modèle de Lemaître

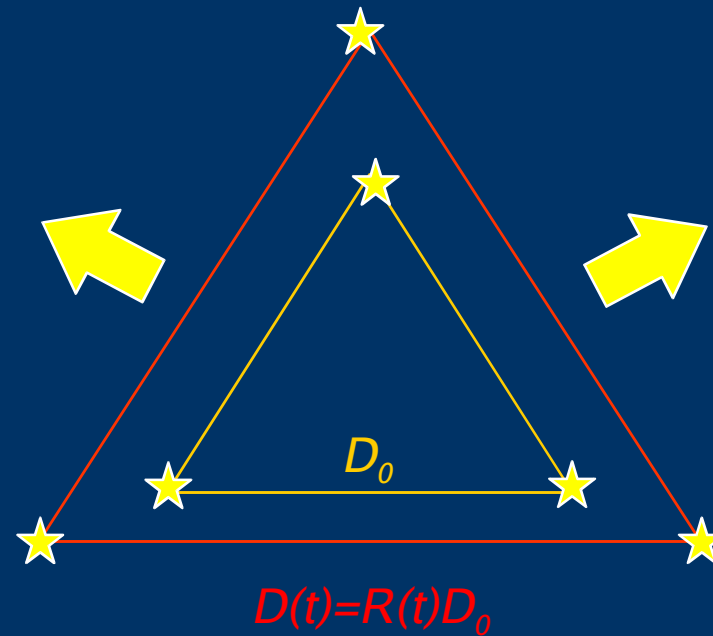


Presence d'une constante cosmologique positive.  
Avantages: âge de l'univers et formation des structures.

# Pourquoi la loi d'Hubble?

Hypothèse d'homogénéité et isotropie  
à tous les temps

→ loi de Hubble



$$D(t) = R(t)D_0$$



$$V = HD$$



# Expansion de l'univers



Espace newtonien: en l'absence de forces, deux particules restent dans leur état de repos ou mouvement à vitesse constante.



Notre univers relativiste en expansion: En l'absence de forces, deux particules s'éloignent.



Si les deux particules sont liées par une force, elles ne suivent pas l'expansion.

# Interprétation du redshift

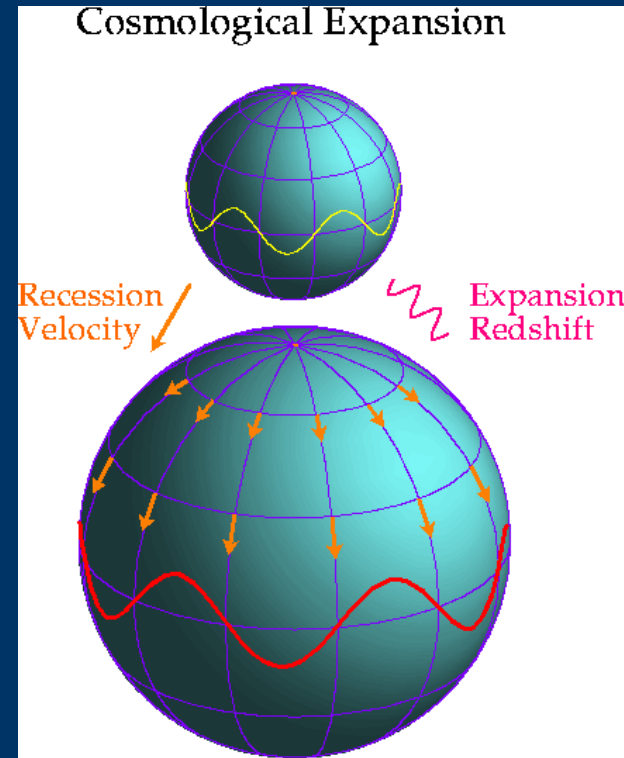
Quand  $z > 1$ , la formule classique de l'effet Doppler donne des vitesses superluminales. L'introduction de la formule relativiste de l'effet Doppler ne donnerait pas des redshifts supérieurs à l'unité...

**MAIS C'EST FAUX!!!**

Le redshift **n'est pas un effet Doppler donné par le mouvement des galaxies dans l'espace!**

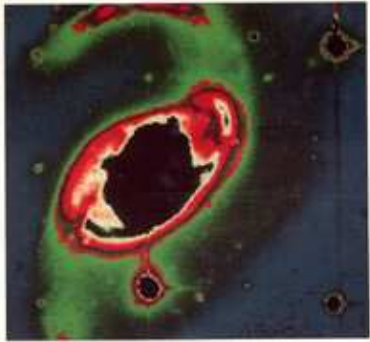
# Redshift cosmologique

$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda} = \frac{R_0}{R} = 1 + z$$



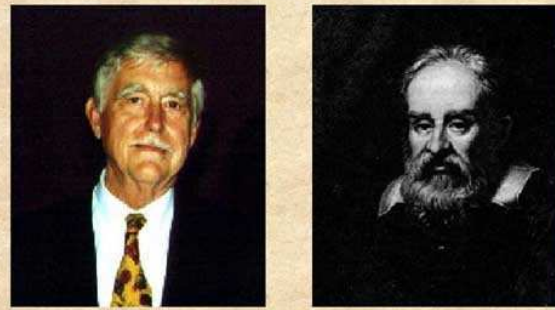


# Anomalous redshifts



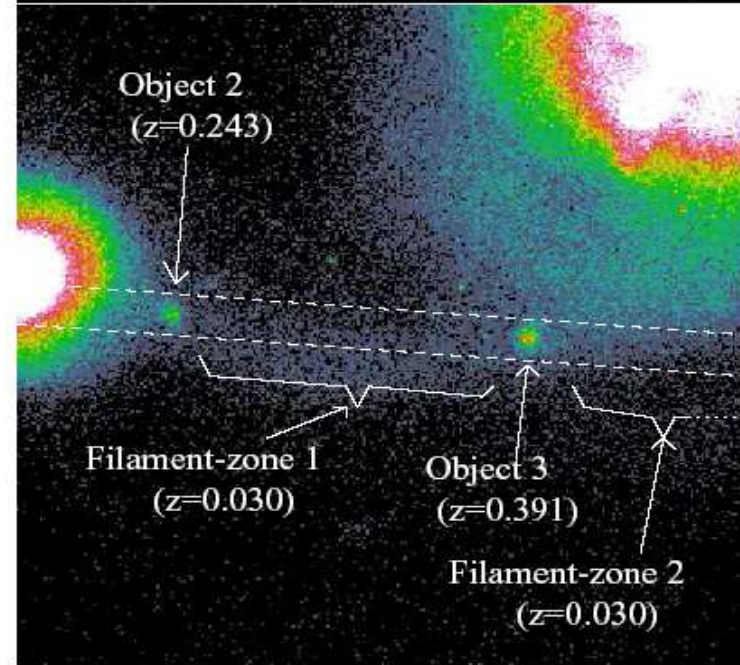
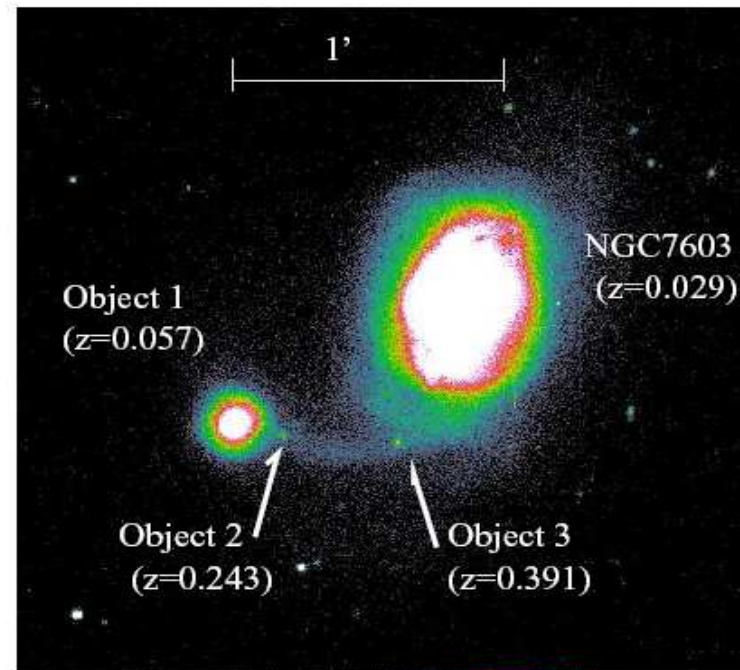
QUASARS, REDSHIFTS  
AND CONTROVERSIES

by Halton Arp



HALTON ARP  
A MODERN DAY GALILEO

*Le mythe de Arp ...*



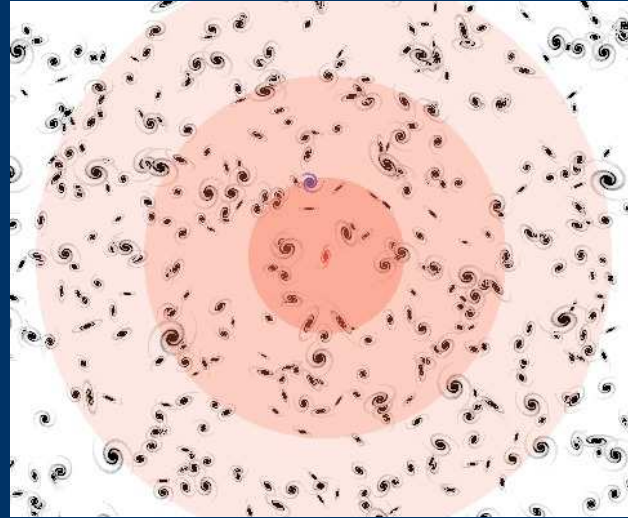
Interpretations alternatives:  
redshift gravitationnel, lumière fatiguée...  
Pas d'hypotèse physique raisonnable!  
Pas de statistique sérieuse!  
(Quand on observe des milliers de galaxies,  
on trouve des effets de projection, du  
lensing gravitationnel)...

M. López-Corredoira<sup>1,2</sup> and Carlos M. Gutiérrez<sup>1</sup>

# Deuxième Partie: Le Big Bang



# Le Big Bang



**Selon le modèles de Big Bang, dans le passé l'Univers devait être dans un état de très haute densité (formellement infinie, selon la relativité générale: une singularité).**

1931: A.S. Eddington,  
*The End of the World from the standpoint of mathematical physics*,  
Nature, 21 mars

*“Philosophiquement, la notion de commencement de l’ordre présent  
de la Nature me répugne.”*

1931: G. Lemaître,  
*L’origine du monde du point de vue de la théorie quantique*,  
Nature, 9 mai

*Hypothèse de l’atome primitif*

Le monde a procédé du condensé au diffus. [...]

L’atome-univers s’est brisé en fragments [...]

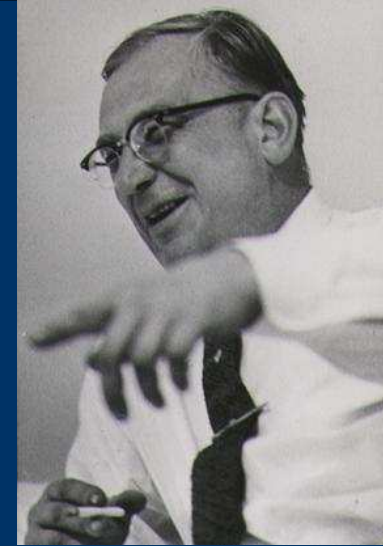
Nous pouvons concevoir que l’espace a commencé avec l’atome primitif  
et que le commencement de l’espace a marqué le commencement du temps.

*Lemaître, L’expansion de l’espace, novembre 1931*

# La nucléosynthèse primordiale



# George Gamow (1904-1968)



Expansion de l'univers  dans le passé:  
haute densité

À haute température: réactions nucléaires.

Univers primordial chaud: équilibre entre  
matière et rayonnement.

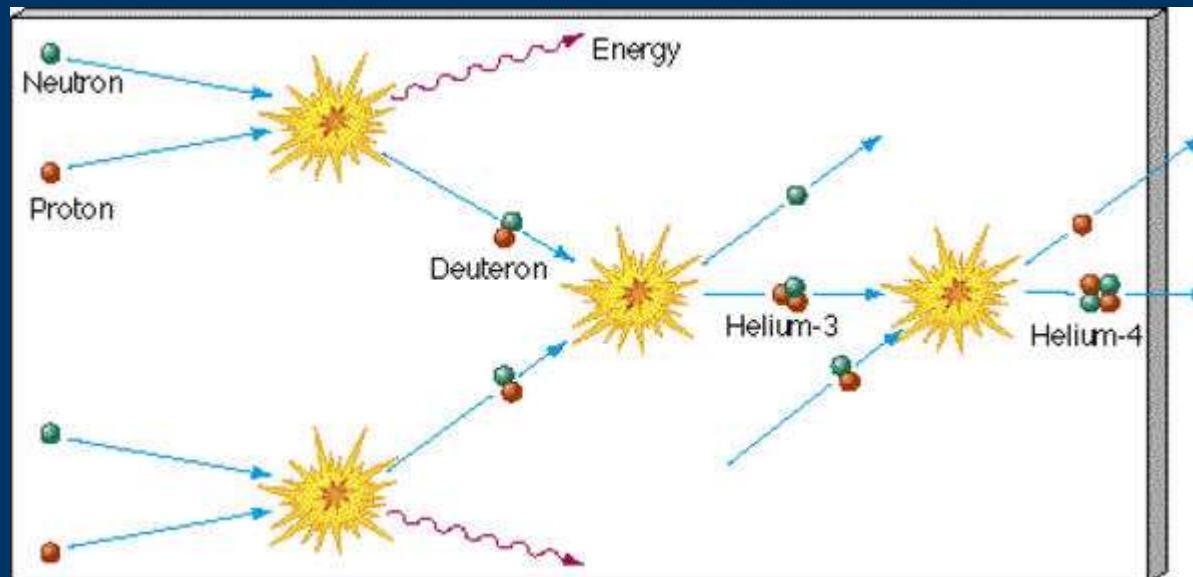
À  $T=10^{12}$  °K ( $10^{-5}$  sec) toutes les espèces de particules  
sont en équilibre thermique: on peut calculer leur  
abondances.

Avec l'expansion, densité et température diminuent, et les  
particules (à des temps différents selon l'espèce) quittent  
l'état d'équilibre.

1948: papier

(Alpher, Bethe & Gamow, 1er Avril 1948 (!); Alpher & Herman 1948)

Dans l'Univers, les éléments les plus abondants sont l'hydrogène et l'hélium. Problème: on n'arrive pas à former les éléments plus lourds (Fermi & Turkevich)



“There was a rumour that later, when the  $\Lambda$ CDM theory went temporarily on the rocks, Dr. Bethe seriously considered changing his name to Zacharias.”

# Matière et rayonnement

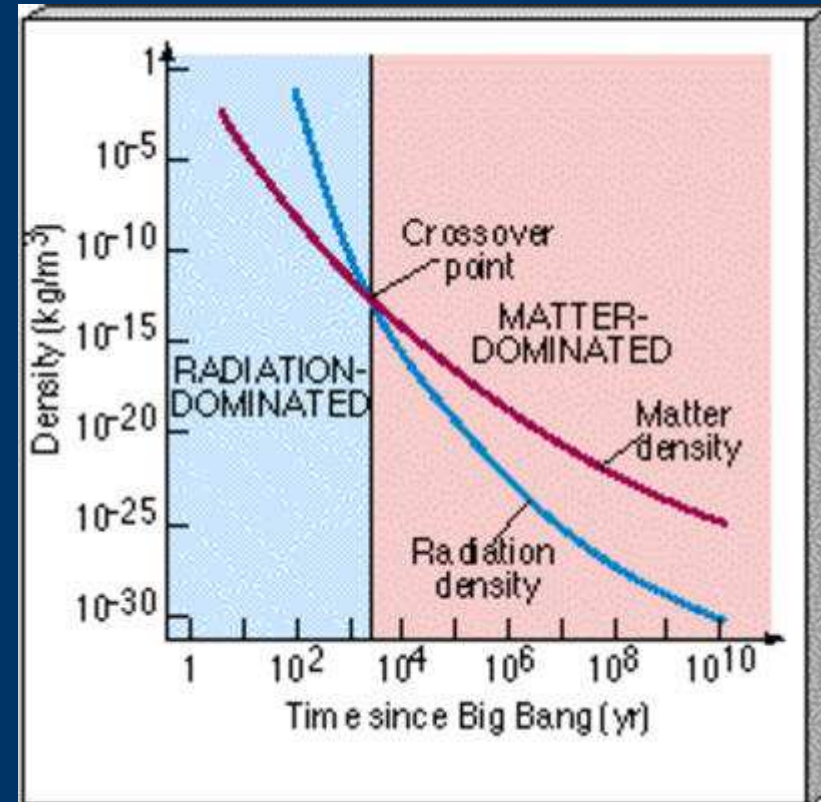
$$T = T_0 / R = T_0 \times (1+z)$$

$$\rho_m = \rho_m(0) / R^3 = \rho_m(0) \times (1+z)^3$$

$$\rho_r = \rho_r(0) / R^4 = \rho_r(0) \times (1+z)^4$$

$$T \sim 10^{10} \text{ K} / t^{1/2} \text{ (sec)}$$

A 1 seconde, la température était de 10 milliards de degrés.





# La prédiction du rayonnement fossile

a) Le deutérium se forme à  $10^9$  °K, quand l'âge de l'univers est 200 sec.

b) La physique nucléaire nous dit que pour former le deutérium il fallait une certaine densité de neutron et protons.

c) A partir de cette densité, et de la densité actuelle de protons et neutrons, on trouve le redshift de la nucléosynthèse selon la relation

$$\rho_{NS} = \rho_0 (1 + z_{NS})^3$$

d) Si la température était donc de 1 milliard de degrés au redshift de la nucléosynthèse, aujourd'hui elle sera:

$$T_0 = \frac{T_{NS}}{1 + z_{NS}} = \frac{10^9}{2 \times 10^8} : 5 \text{ °K}$$

Prédiction (Alpher & Hermann 1948):

**il existe aujourd'hui un rayonnement cosmique à une température de  $\sim 5$  °K.**

# La théorie de l'État Stationnaire

**1948:** selon Hoyle, Bondi e Gold l'univers doit conserver les mêmes propriétés dans l'espace et dans le temps: c'est le **Principe Cosmologique Parfait**.  
L'expansion implique alors la création continue de matière.



Mais l'univers était différent dans le passé.

(1949: Hoyle invente le nom de *Big Bang*; publié en 1950)

# La singularité initiale

Dans le Big Bang la singularité initiale est inévitable. (Penrose et Hawking). Mais la relativité générale n'est plus valable dans ces conditions.

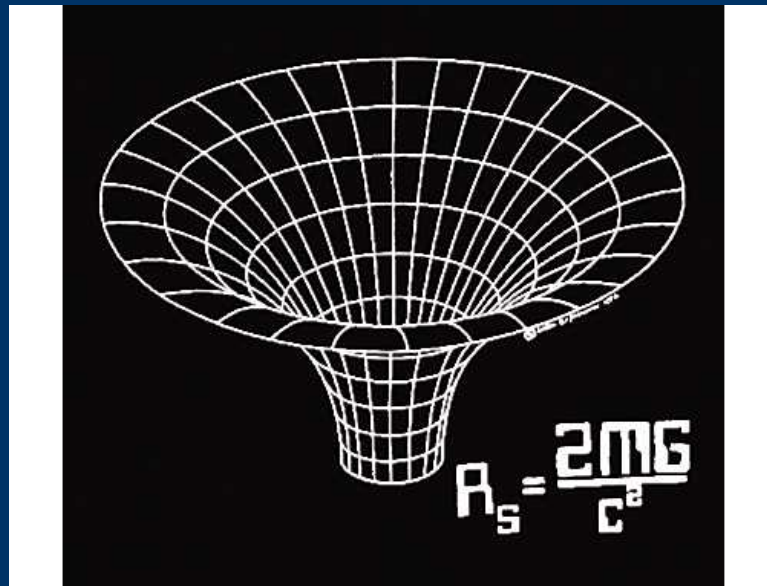
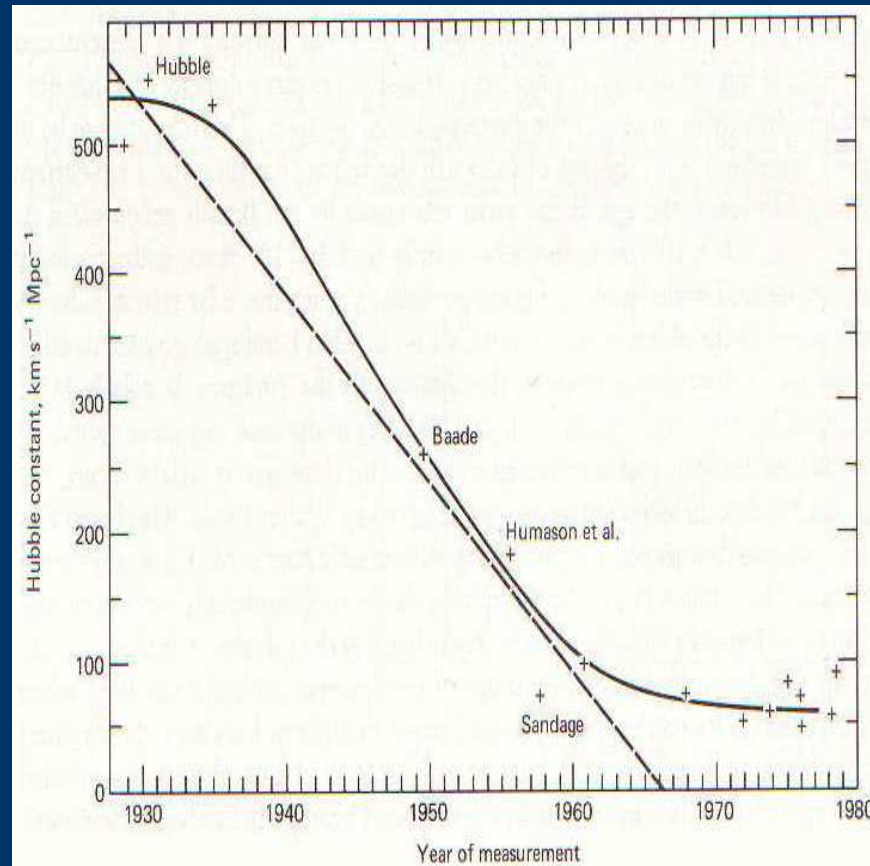


Diagram of a black hole warping spacetime, from a T-shirt. The radius of the black hole,  $R_s$ , is  $R_s = 2MG/c^2$ , where  $G$  is Newton's constant,  $M$  is

# Le problème de l'âge de l'univers

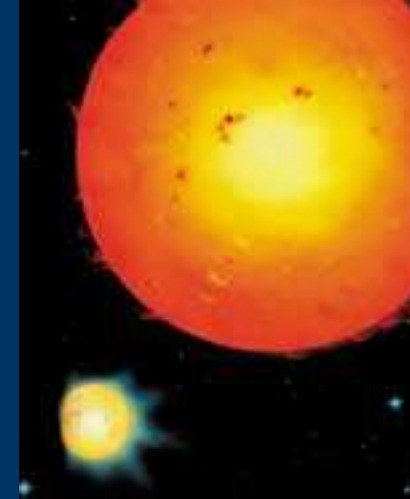
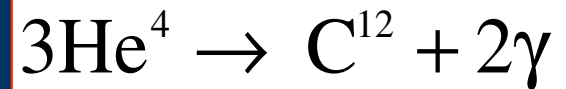


# Problèmes complémentaires des deux théories

D'un côté, Gamow voulait produire tous les éléments dans le Big Bang.

De l'autre, Hoyle voulait les produire dans les étoiles. Problème du  $C^{12}$ .

# La prédiction de Hoyle

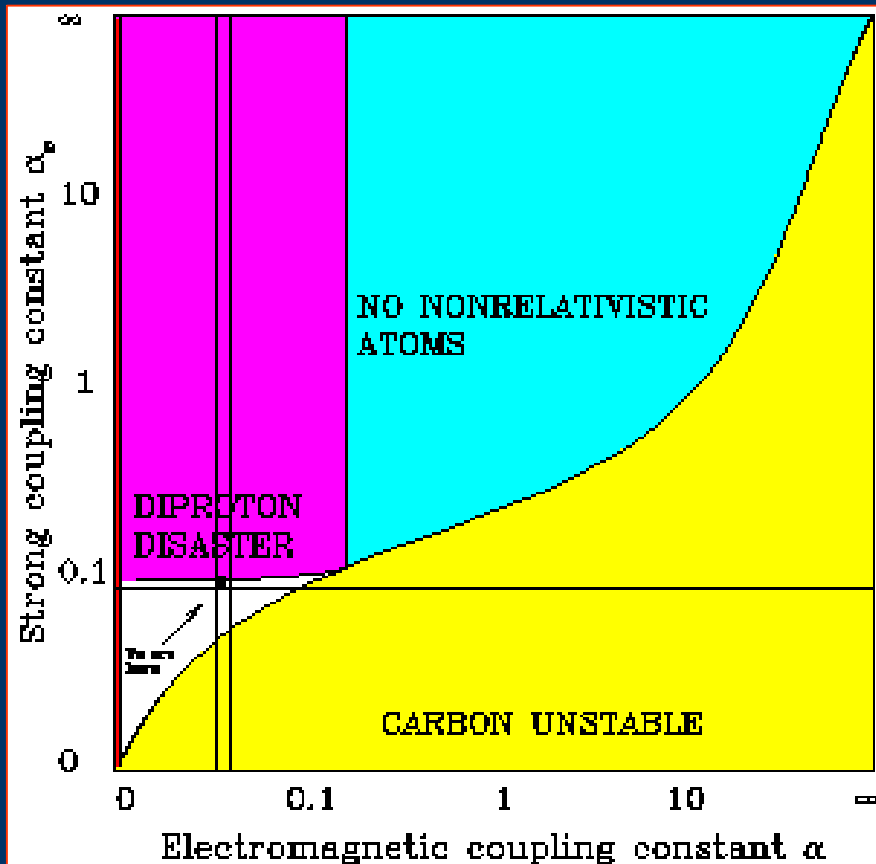


Le béryllium-8 est instable et la réaction est trop lente pour produire les abondances observées.

En 1952 Hoyle prédit qu'il devait y avoir une résonance grâce à un niveau d'énergie du carbone-12 à 7.65 MeV.

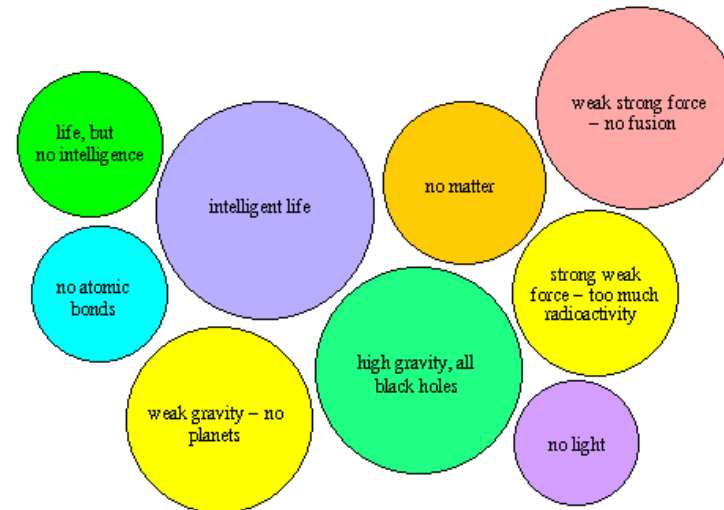
En 1953 il convainca le groupe du CalTech (Fowler) à chercher ce niveau en laboratoire, qui fut effectivement découvert.

# Le principe anthropique



## Anthropic Bubbles

one possible solution to the anthropic dilemma is the numerous bubble universes produced by inflation. Each bubble universe may have its own physical constants, which determine the evolution within the bubble



the evolution of intelligent life is extremely sensitive to the initial conditions, but since number of bubble universes is also large, the possibility is finite and our existence is not a big mystery

# Les réactions à l'intérieur des étoiles

**1957:** B<sup>2</sup>FH (Burbidge, Burbidge, Fowler, Hoyle).

Les étoiles produisent les éléments plus lourds que l'hélium.

OK pour le Big Bang, qui ne peut produire essentiellement que de l'hélium

**1967:** Wagoner, Fowler, Hoyle

Ils calculent les éléments produits dans la nucléosynthèse primordiale.

“Ce fut cet article qui fit accepter par un grand nombre de physiciens la cosmologie du Big Bang chaud comme une science quantitative sérieuse”, William McCrea

*Fred Hoyle est parmi les grands scientifiques qui ont contribué le plus à la construction de la théorie du Big Bang.*

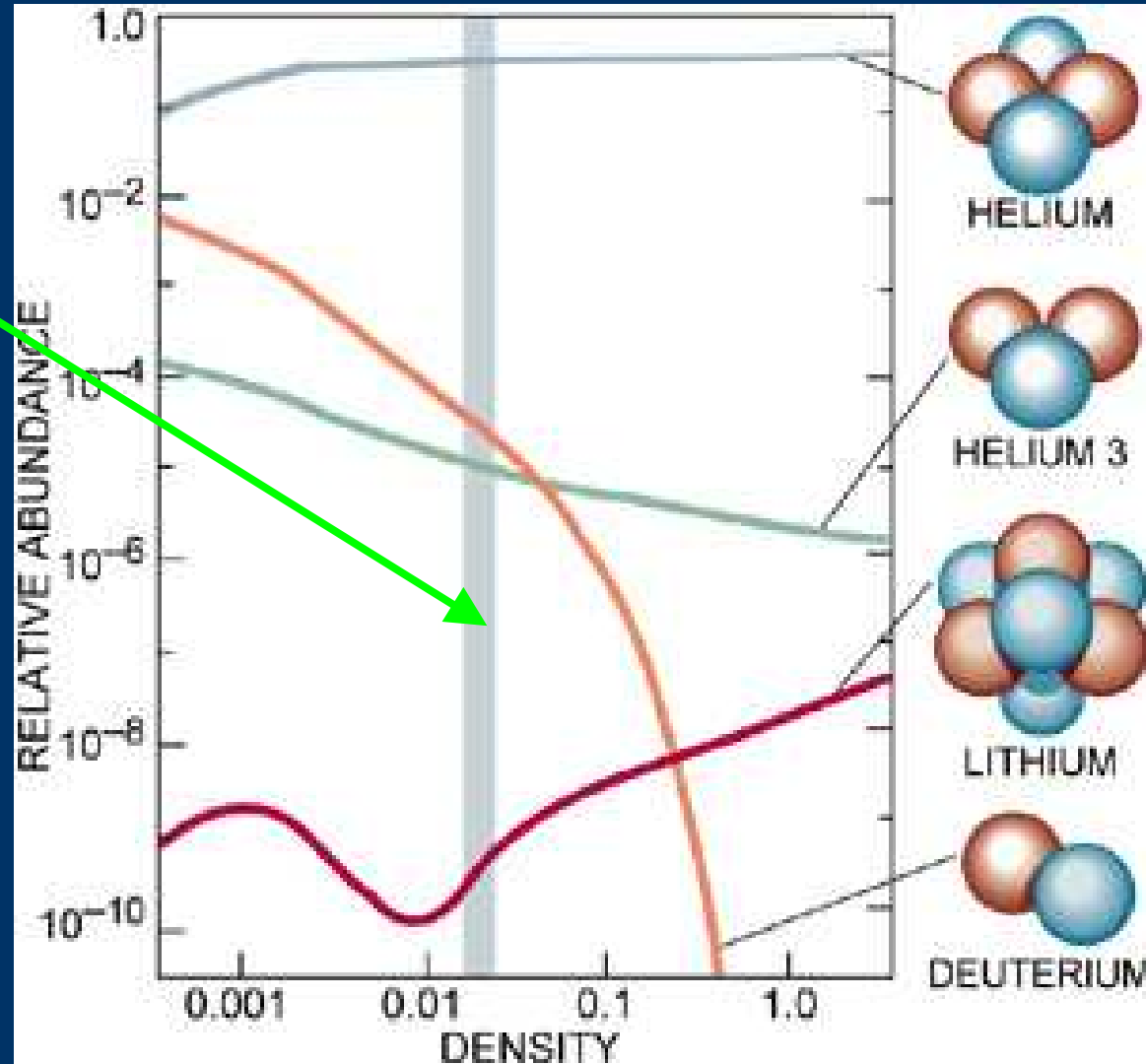


# Nucléosynthèse primordiale

Abondances observées

$$\Omega_b \sim 0.04$$

*Limite sur les familles de neutrinos*



# Ère de la matière

L'énergie de la matière est aujourd'hui  $\sim 10000$  fois celle du rayonnement.

Dans le passé,  $T > 10000\text{K}$   
le rayonnement domine.

# Annihilation électrons-positrons

A une température supérieure à  $\sim 10^{10}\text{K}$ , on a la création de paires électron-positron

$T > 10^{10}\text{K}$ : équilibre entre électrons et positrons.

$T < 10^{10}\text{K}$ : *freeze-out*. Annihilation des paires (il reste un excès d'électrons).

*Aujourd'hui il y a un électron par milliard de photon.*

*A l'époque de l'annihilation il devait y avoir un milliard +1 d'électron et un milliard de positrons.*

*Asymétrie matière-antimatière*

# Rayonnement fossile de neutrinos

$T=10^{10} \text{ }^\circ\text{K}$  (t=1 sec)

Les neutrinos n'ont plus assez d'énergie pour interagir avec les nucléons.

Aujourd'hui: rayonnement fossile de neutrinos à  $1,9 \text{ }^\circ\text{K}$  (contre  $2,7 \text{ }^\circ\text{K}$  du rayonnement fossile).

$450 / \text{cm}^3$

$T > 10^{12}\text{K}$  création des paires proton-antiproton

$10^{13}\text{K} < T < 10^{15}\text{K}$  Les quarks forment les hadrons (baryons, mesons)

$T > 10^{15}\text{K}$  électromagnétisme et interactions faible sont unifiés dans l'interaction électrofaible

$T > 10^{29}\text{K}$  unification des interactions électrofaible et forte (GUT, Grand Unified Theories)

$T > 10^{32}\text{K}$  unification finale avec la gravité: *hic sunt leones*

# Le fond diffus cosmologique



Andrew McKellar (1941):  
raies d'absorptions du CN dans les nuages interstellaires.  
Deux niveaux d'énergie.

Emission d'énergie à 2.6 mm.

$$\frac{n_1}{n_0} = e^{\frac{-\Delta E}{kT}}$$

$$E = h\nu$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = 2.6 \text{ mm}$$

$$T = 2.3 \text{ °K}$$

Résultat cité dans un texte classique de physique stellaire.

Prédiction de Alpher & Hermann en 1948: 5 °K  
Mais ils ignorent le résultat de Kellar.

1955 Émile Le Roux, Thèse de doctorat

$$T = 3 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{K}$$

à 33cm, origine extragalactique

1957 T.A.Shmaonov (journal technique sovietique)

1961 E.Ohm (même antenne de Penzias & Wilson!)

Doroshkevich et Novikov lisent Ohm et font la liaison avec les prédictions de Gamow et al., mais ils interprètent mal la mesure.

1962 William Rose ( $T=3 \text{ } ^\circ\text{K}$ , non publié)



# Penzias et Wilson (1964)



Chercheurs des laboratoires Bell, utilisent une antenne pour mesurer l'émission radio de la Voie Lactée.

Ils découvrent un bruit de fond qui n'arrivent pas à éliminer. Le groupe de Princeton leur explique qu'ils viennent de découvrir le **fond diffus cosmologique...**

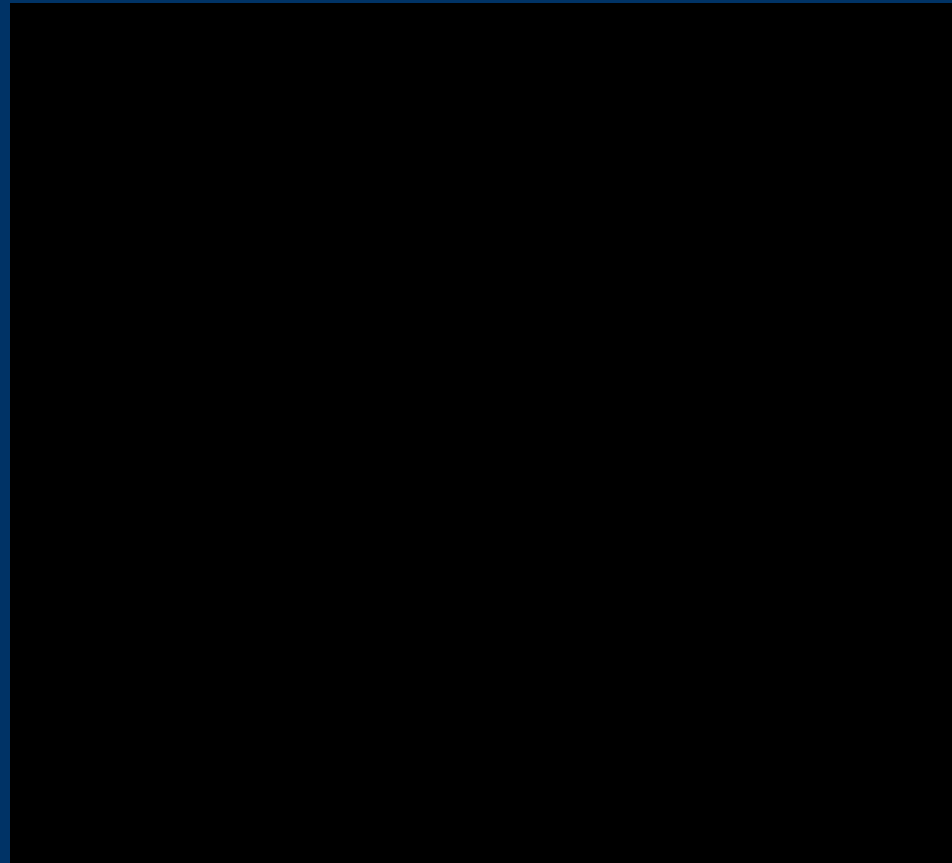
Prix Nobel pour la physique en 1978.

# Origine cosmologique du CMB

Isotrope

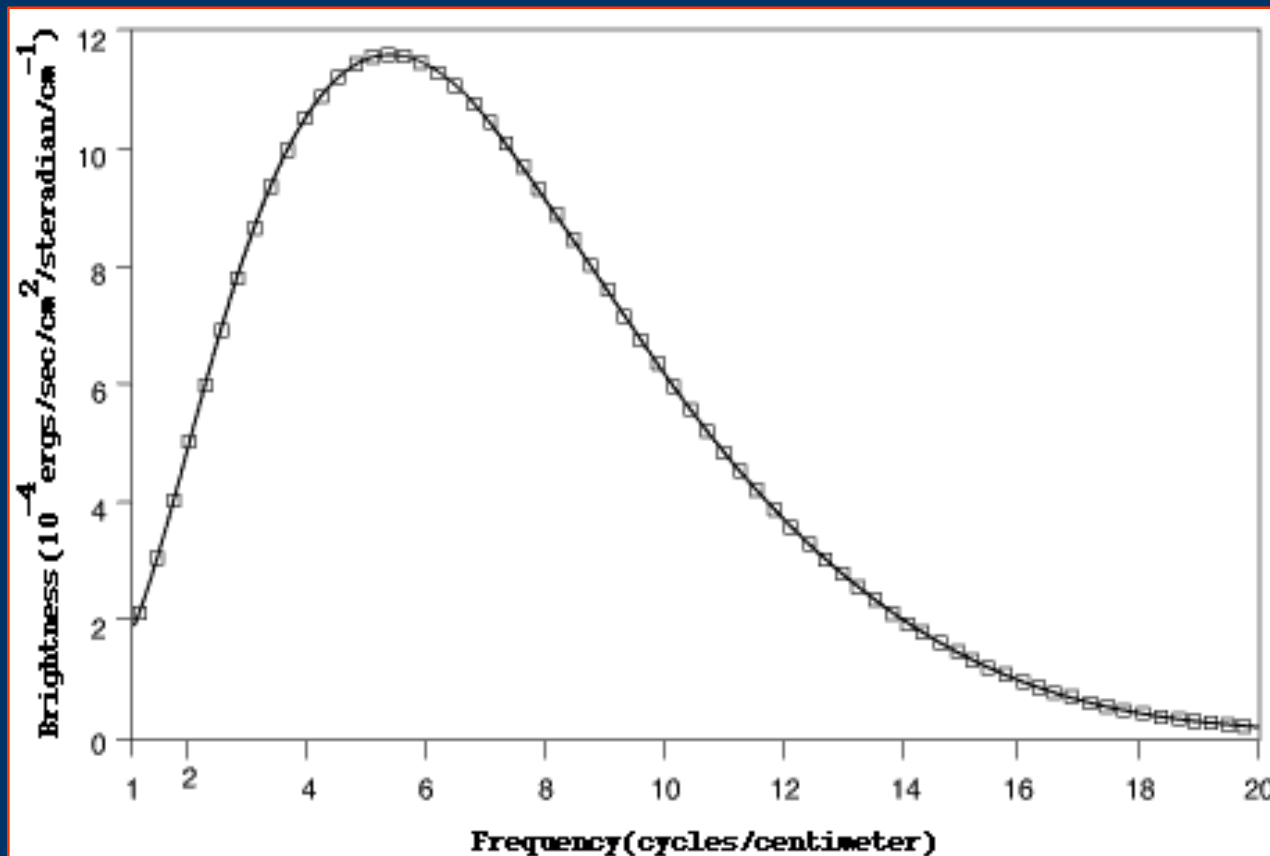
↳ Spectre thermique

*400 photons/cm<sup>3</sup>*

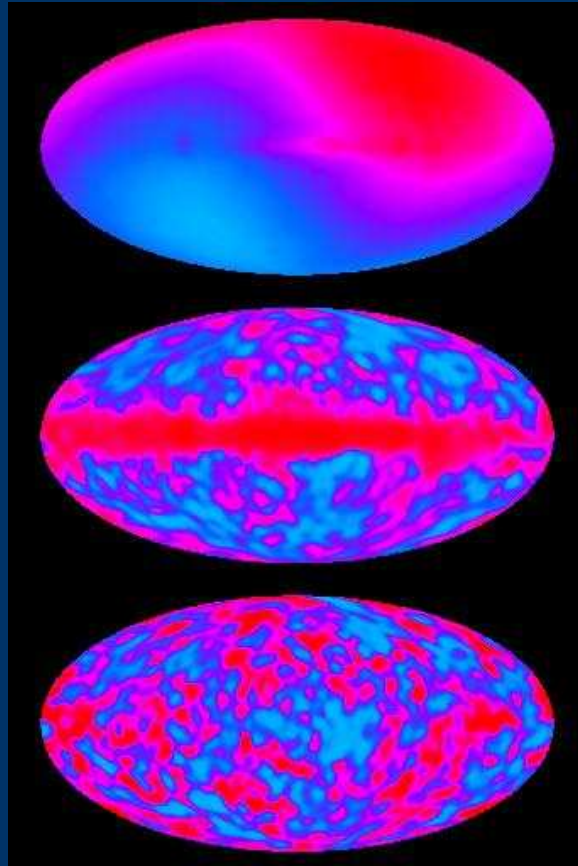


# Spectre du fond diffus cosmologique

400000 ans après le Big Bang, électrons et protons se sont liés, et l'univers est devenu «transparent»: les photons ont pu se propager librement. La température du rayonnement, alors supérieure à 3000 K, est aujourd'hui de 2,73 K.



# Détection des fluctuations COBE (1992)



An aerial photograph of a vast agricultural landscape. The foreground shows a road and a tree, leading into a patchwork of colorful fields in shades of red, yellow, green, and blue. The fields stretch towards a horizon under a dramatic, cloudy sky. The text is overlaid on the upper part of the image.

**Troisième partie:  
Le succès du “concordance model”**

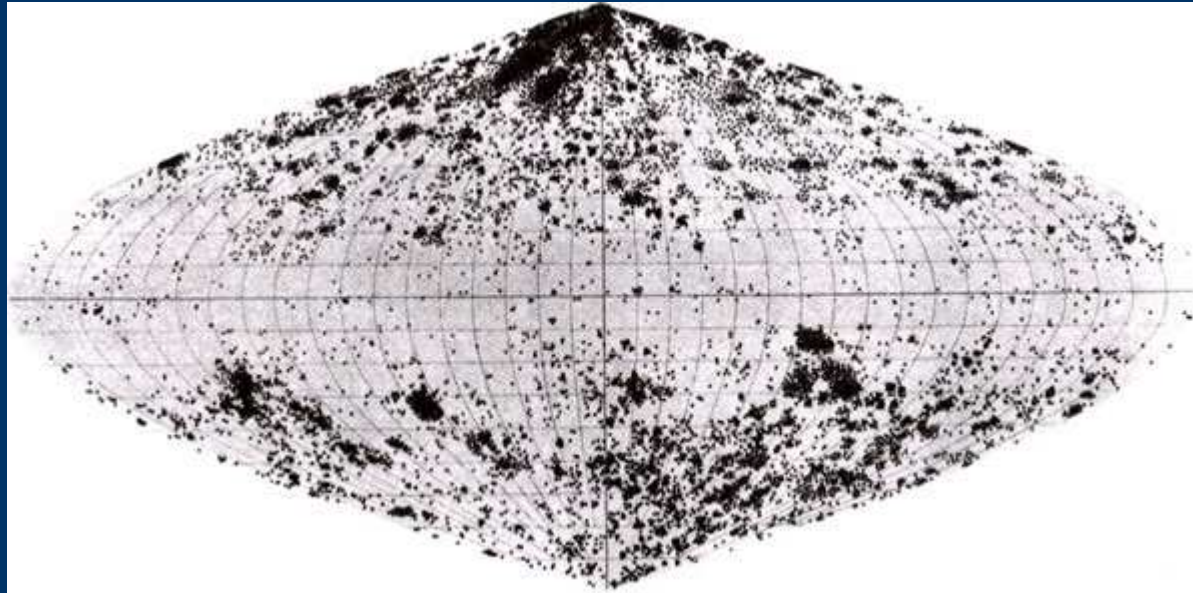
# Old Standard Model

Allan Sandage: “**Cosmology: A Search for two Numbers**”, 1970, *Physics Today* 23, 34

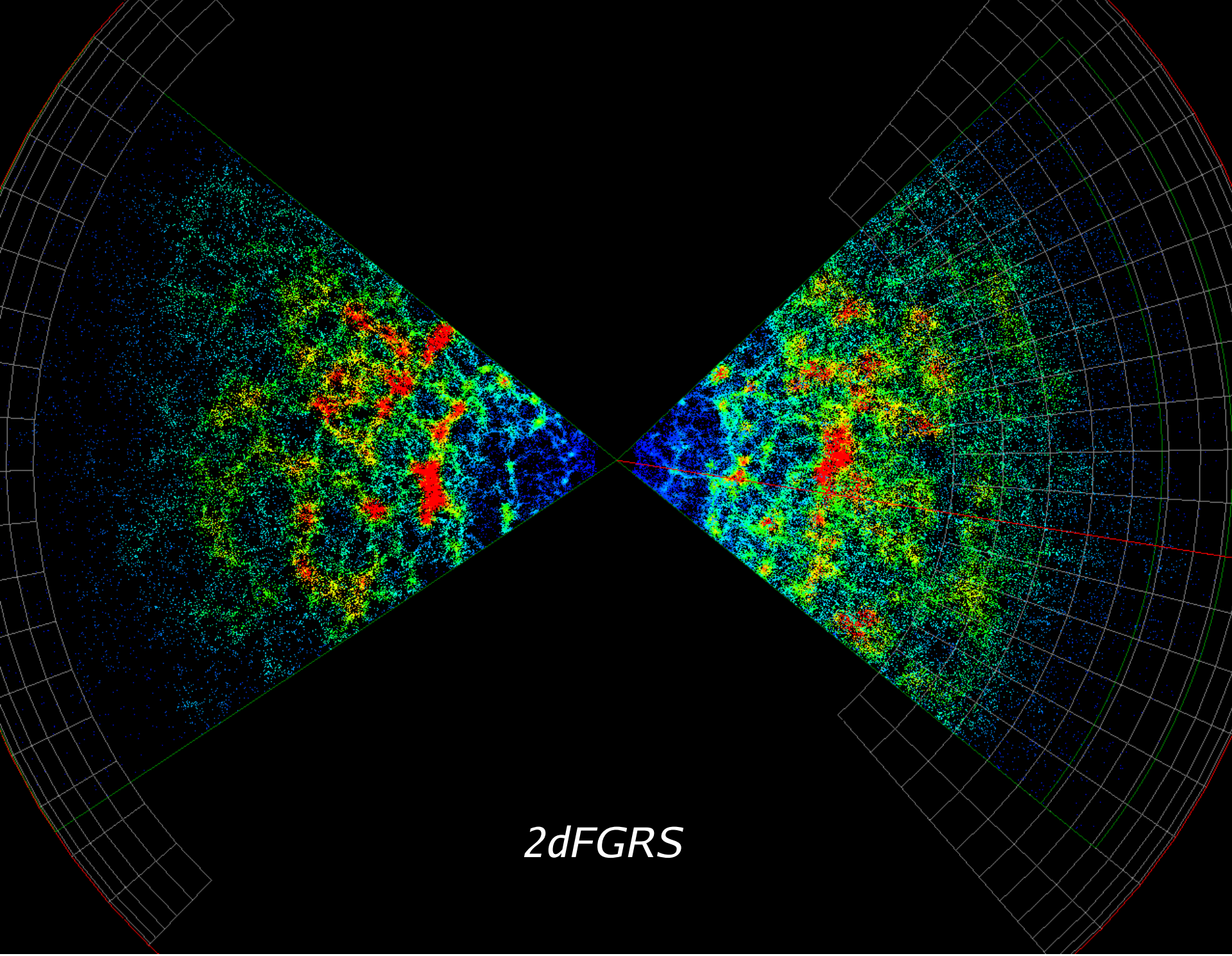
“**at the present time the Einstein-de Sitter model is not the straightforward interpretation of the bulk of the evidence.**”

*P.J.E. Peebles, 1993, Physical Cosmology*

# L'univers est-il homogène?

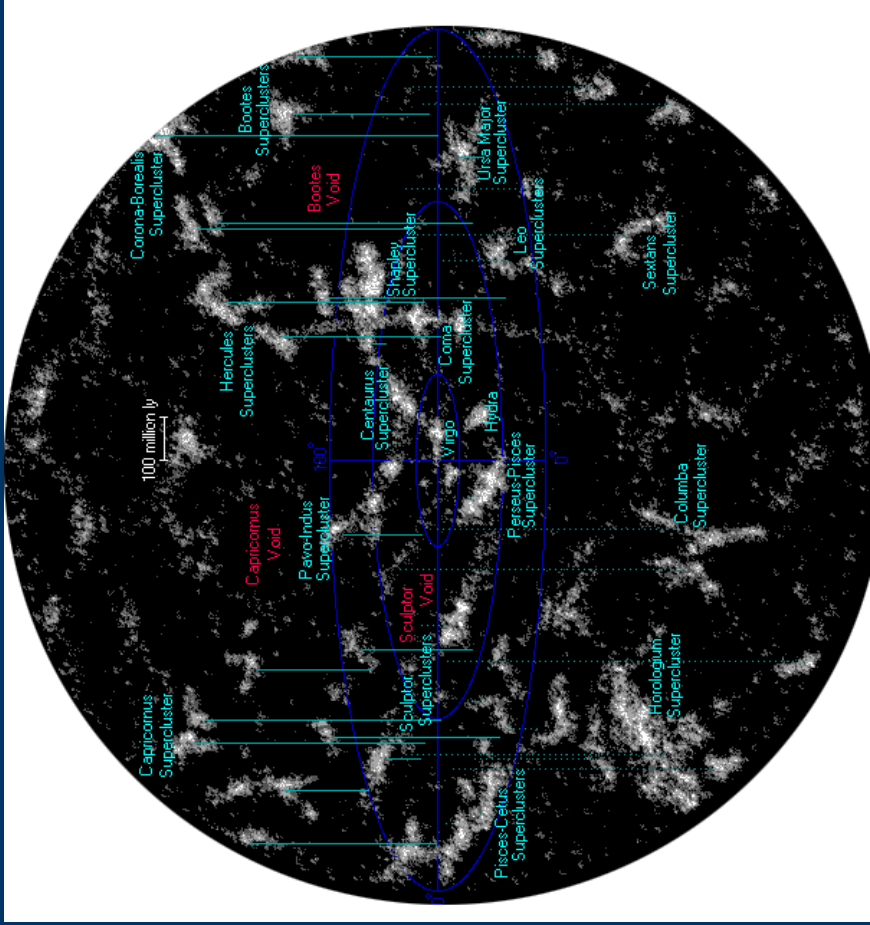


Charlier 1922



*2dFGRS*





# Formation des galaxies

Les baryons n'ont pas le temps de former les structures qu'on observe aujourd'hui à partir des petites fluctuations observées dans le rayonnement diffus cosmologique.

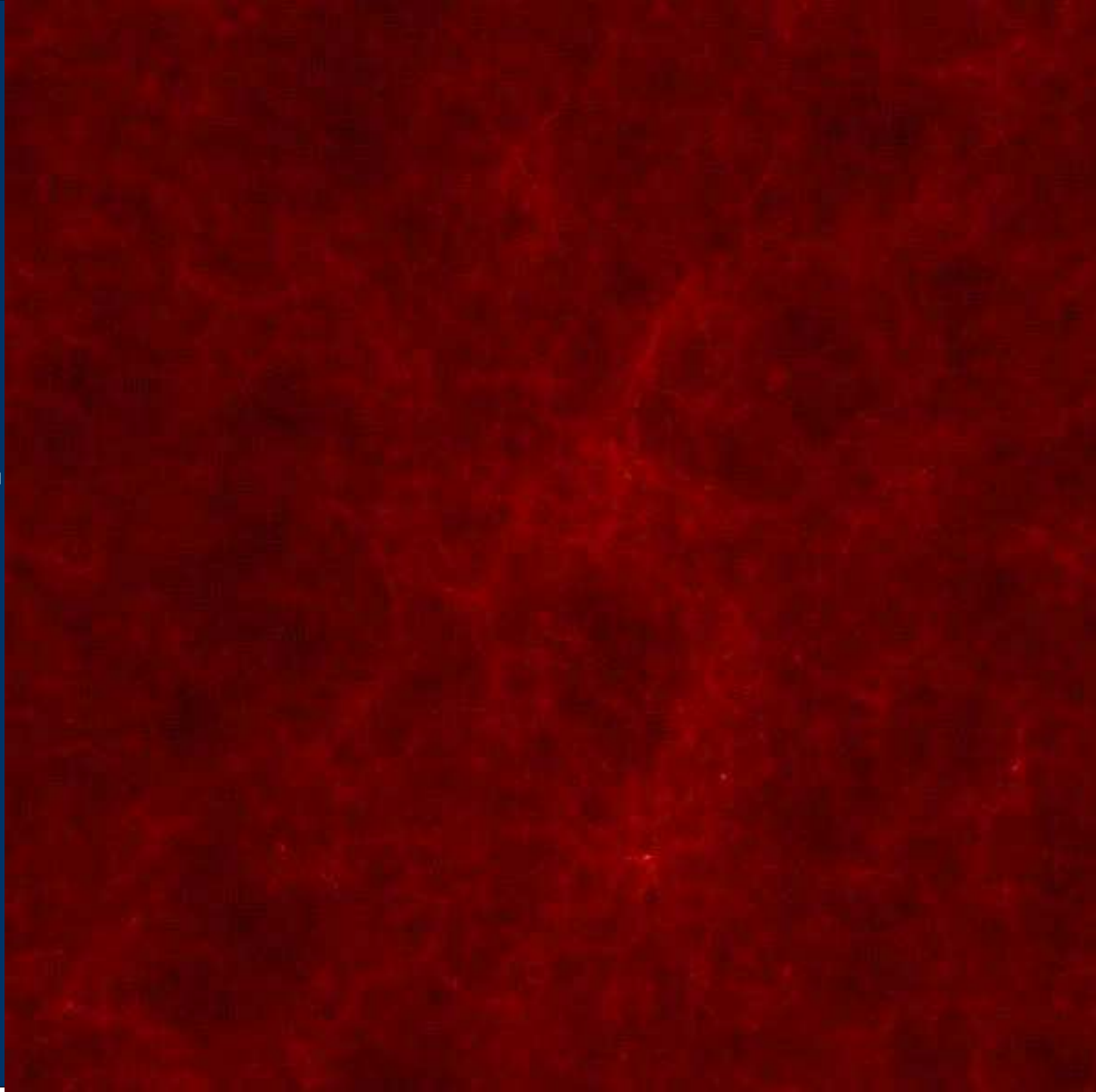
Nécessité de la matière noire.



$z=9.00$

65 Mpc

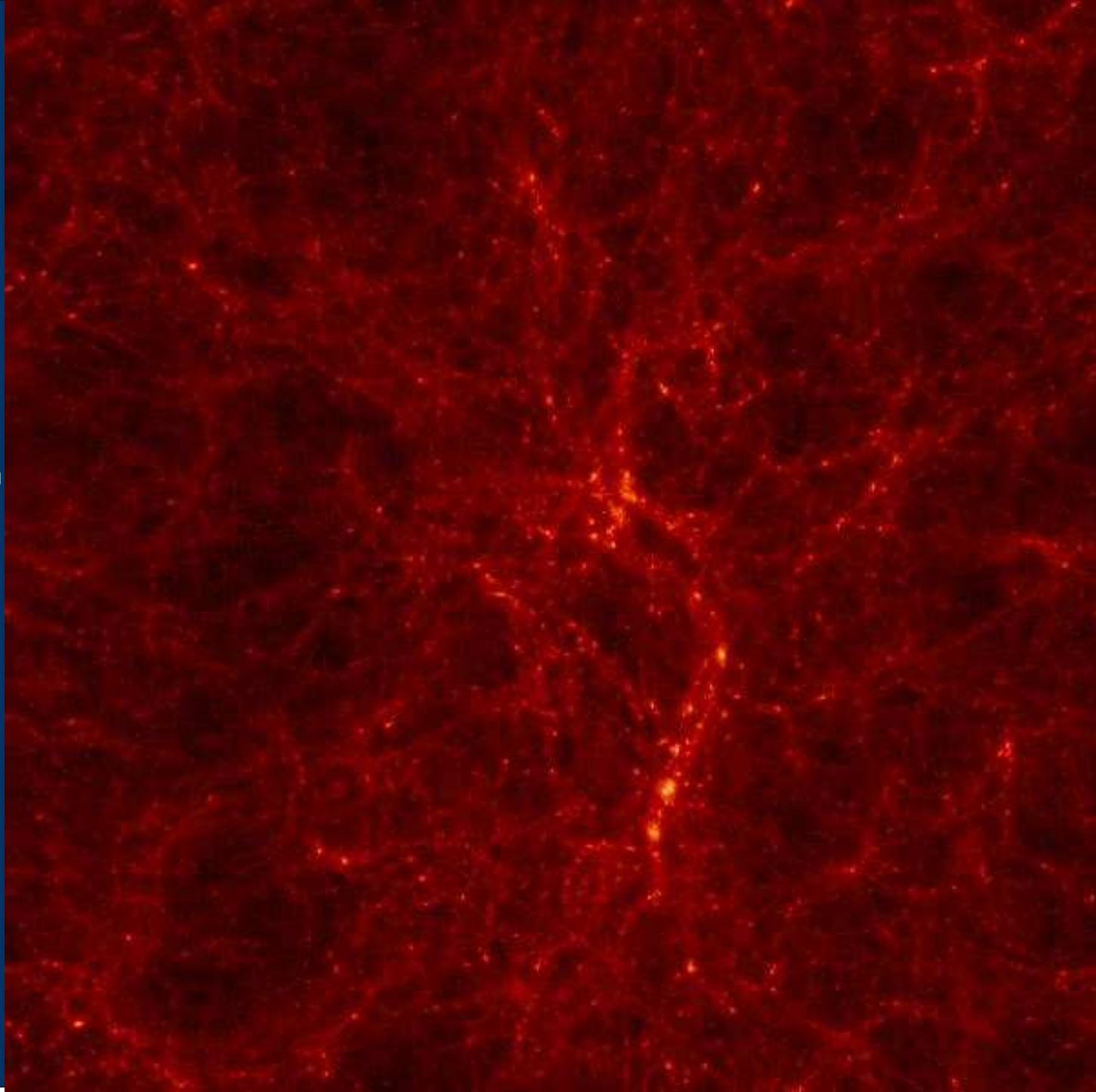
50 million  
particle  
N-body  
simulation



$z=4.00$

65 Mpc

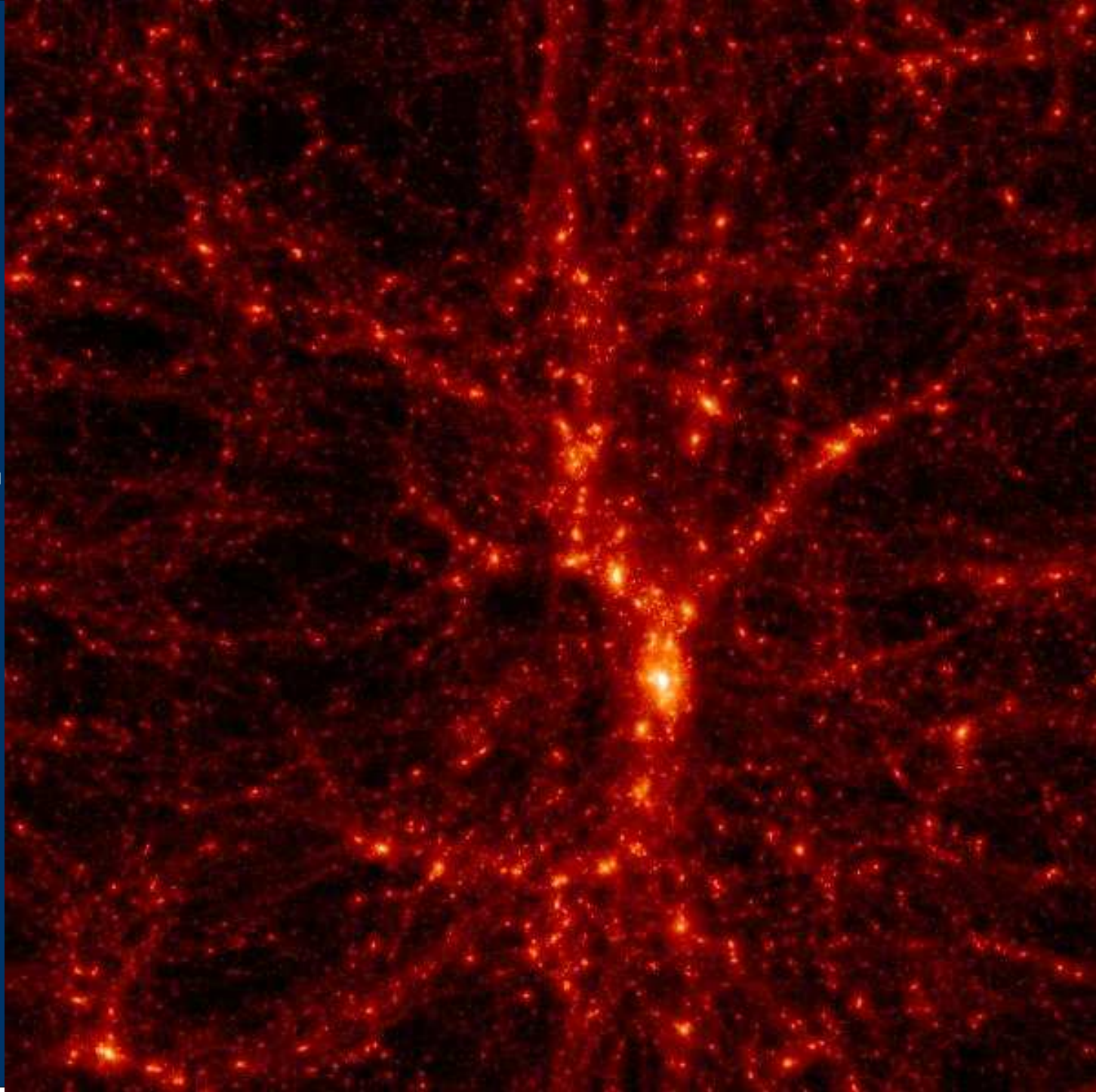
50 million  
particle  
N-body  
simulation



$z=1.00$

65 Mpc

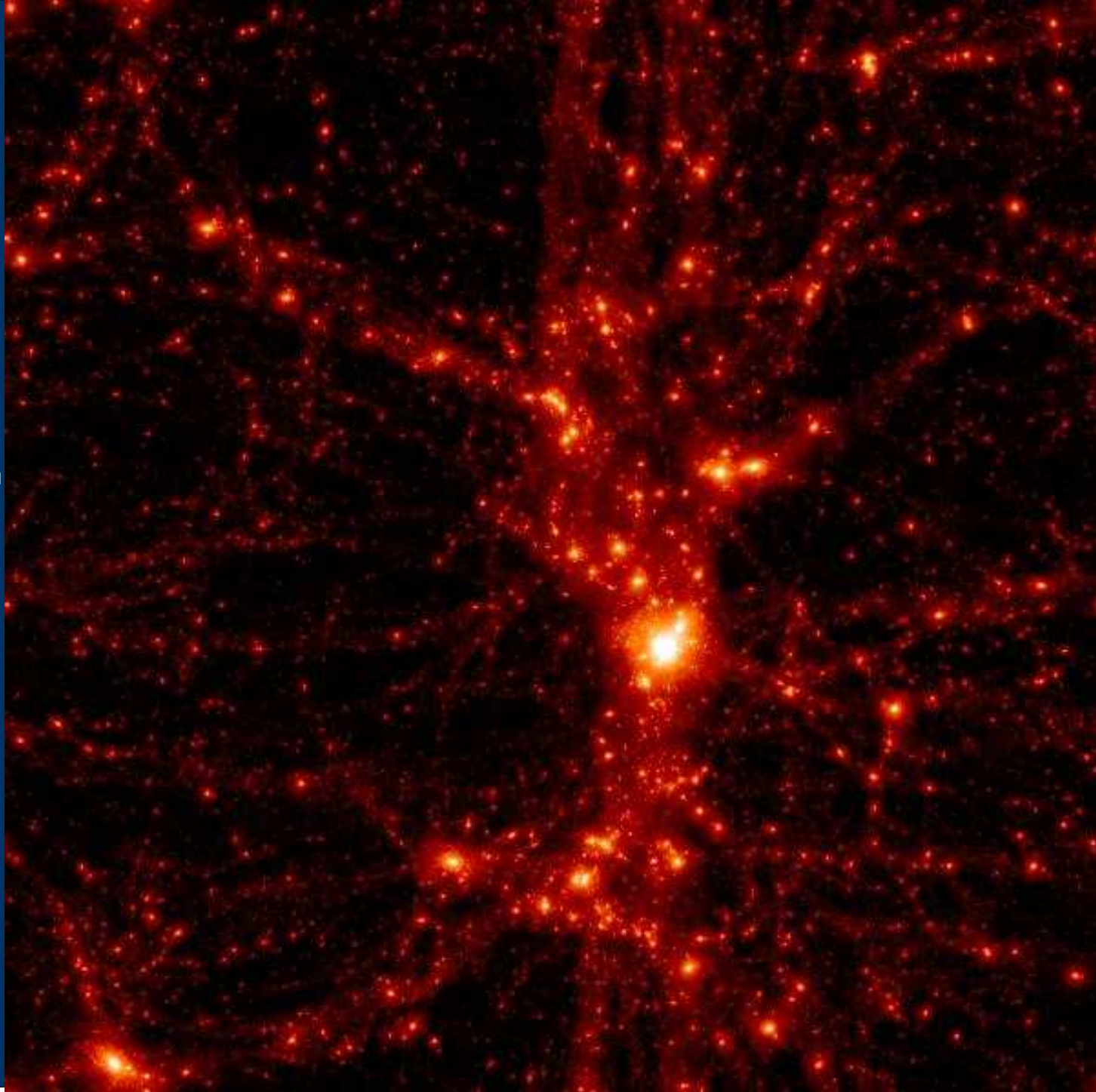
50 million  
particle  
N-body  
simulation



$z=0.00$

65 Mpc

50 million  
particle  
N-body  
simulation



# Les amas de galaxies

NGC 4881  
Coma Cluster  
HST · WFPC2



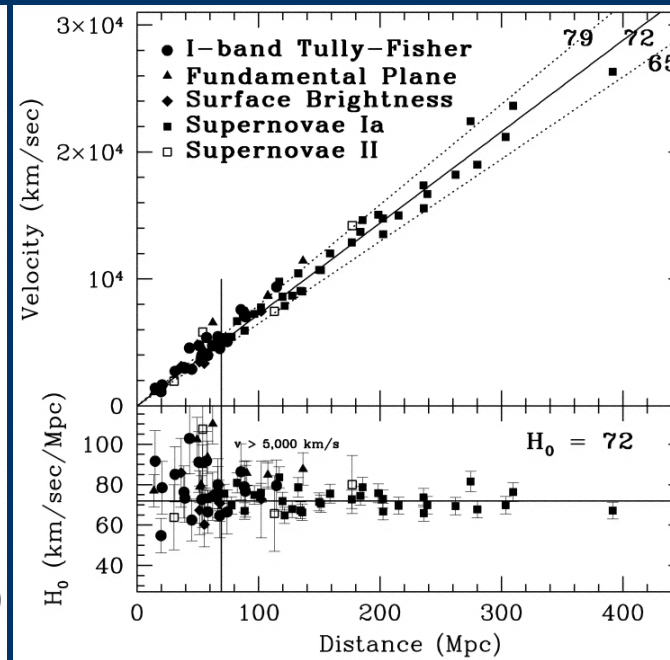
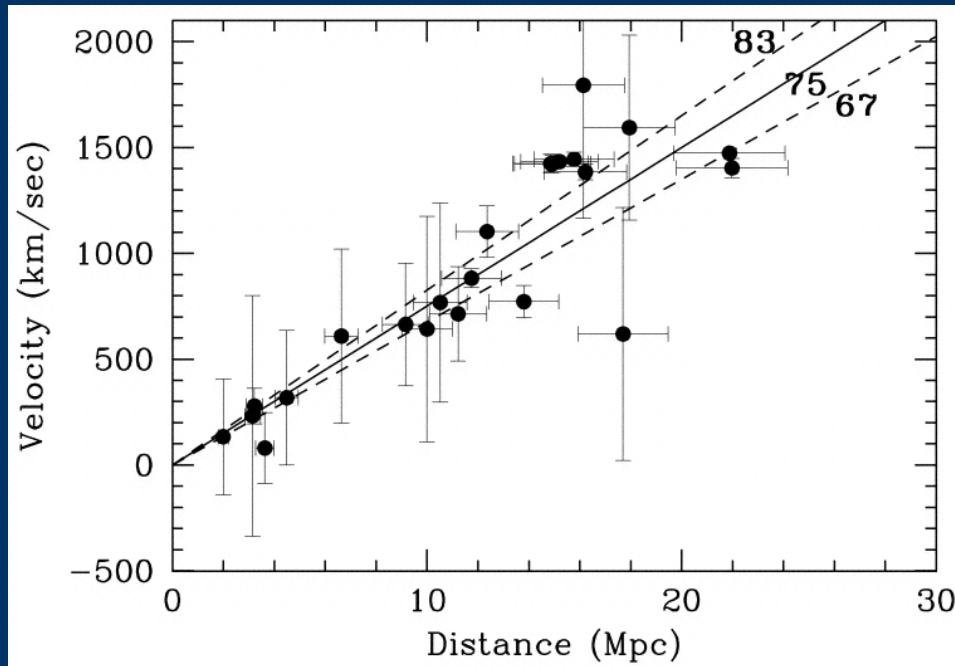
Galaxies

Gaz chaud à  
100 millions de  
degrés, detectable  
dans l'X

Matière invisible!

# Hubble Constant

Freeman et al. 2001 (HST Key Project):  $H_0 = 72 \pm 2 \pm 7$  km/s/Mpc



$H_0 = 70$  km/s/Mpc

$D_H = 14$  Gyr

$T_H = 14$  Gyr



GROS PROBLEMES POUR L'EINSTEIN-DE SITTER!



# Age des amas globulaires

$T = 13.5 \pm 2$  Gyr

- **Globular clusters**

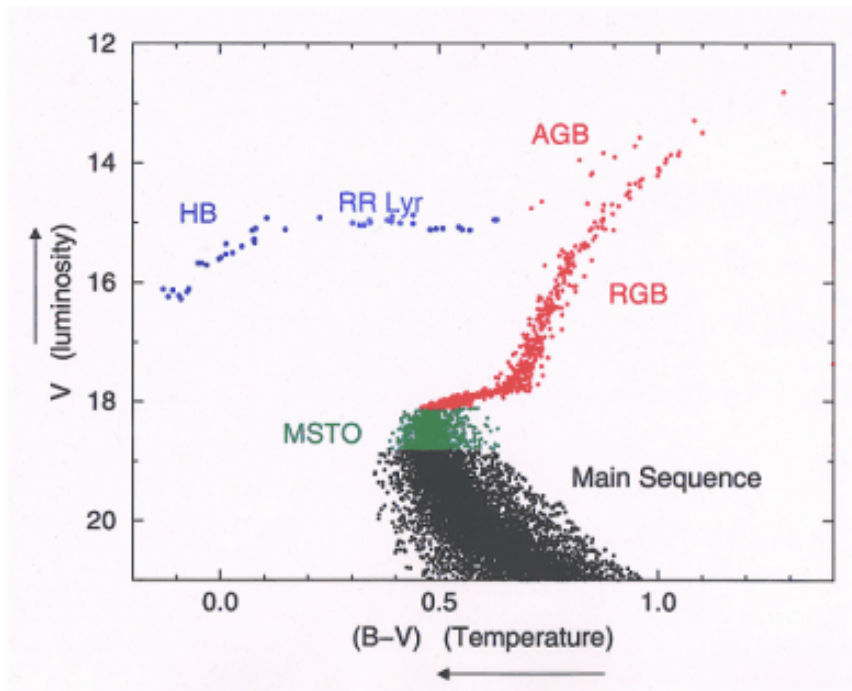
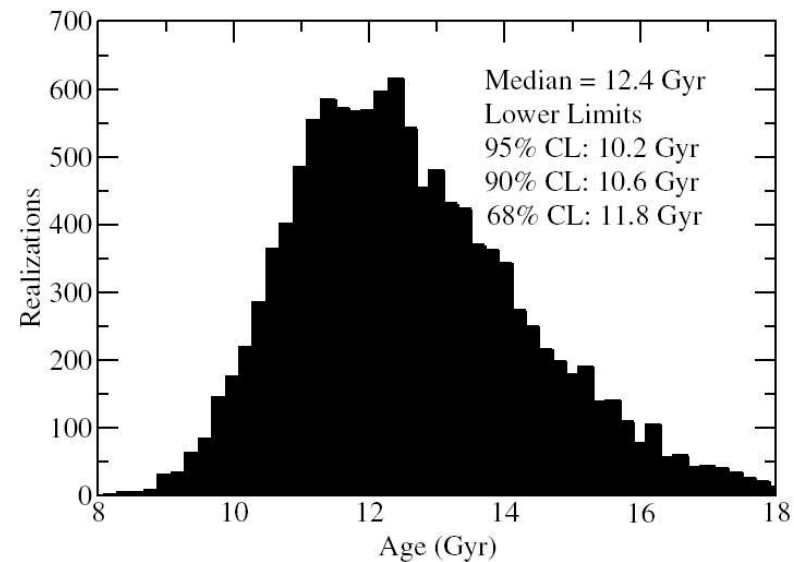
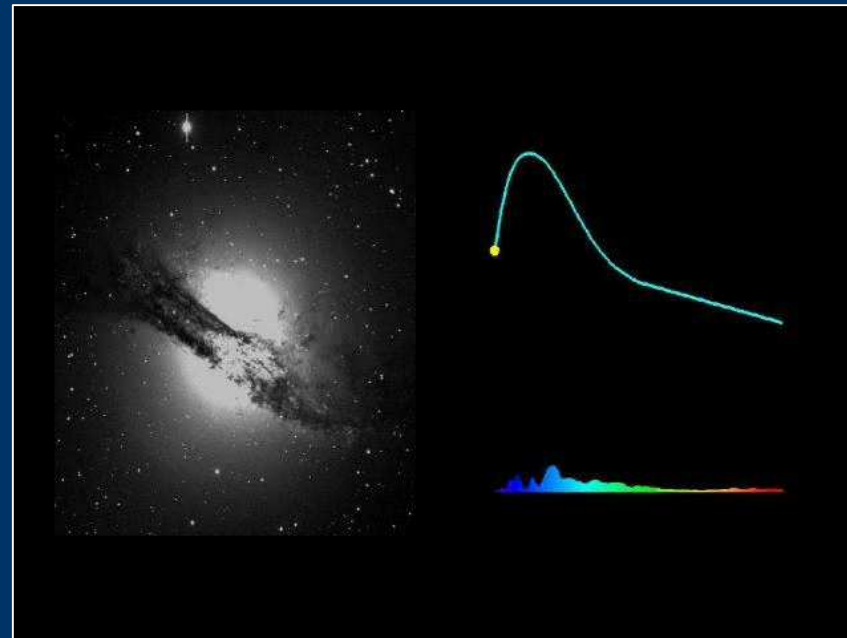
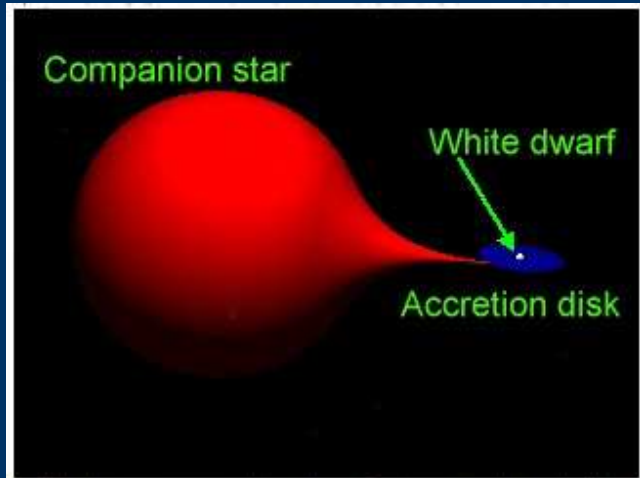


Figure 1: Histogram representing results of Monte Carlo presenting 10,000 fits of predicted isochrones for differing input parameters to observed isochrones to determine the age of the oldest globular clusters.



<b><math>H_0 = 70</math></b>	$\Omega_m$	$\Omega_\Lambda$	$t_0$ (Gyr)
<b>Open</b>	<b>0.2</b>	<b>0</b>	<b><math>12 \pm 1</math></b>
<b>Open</b>	<b>0.3</b>	<b>0</b>	<b><math>11 \pm 1</math></b>
<b>Flat</b>	<b>0.2</b>	<b>0.8</b>	<b><math>15 \pm 1.5</math></b>
<b>Flat</b>	<b>0.3</b>	<b>0.7</b>	<b><math>13.5 \pm 1.5</math></b>
<b>Flat</b>	<b>1.0</b>	<b>0</b>	<b><math>9 \pm 1</math></b>

# Les Supernovae comme indicateurs de distance



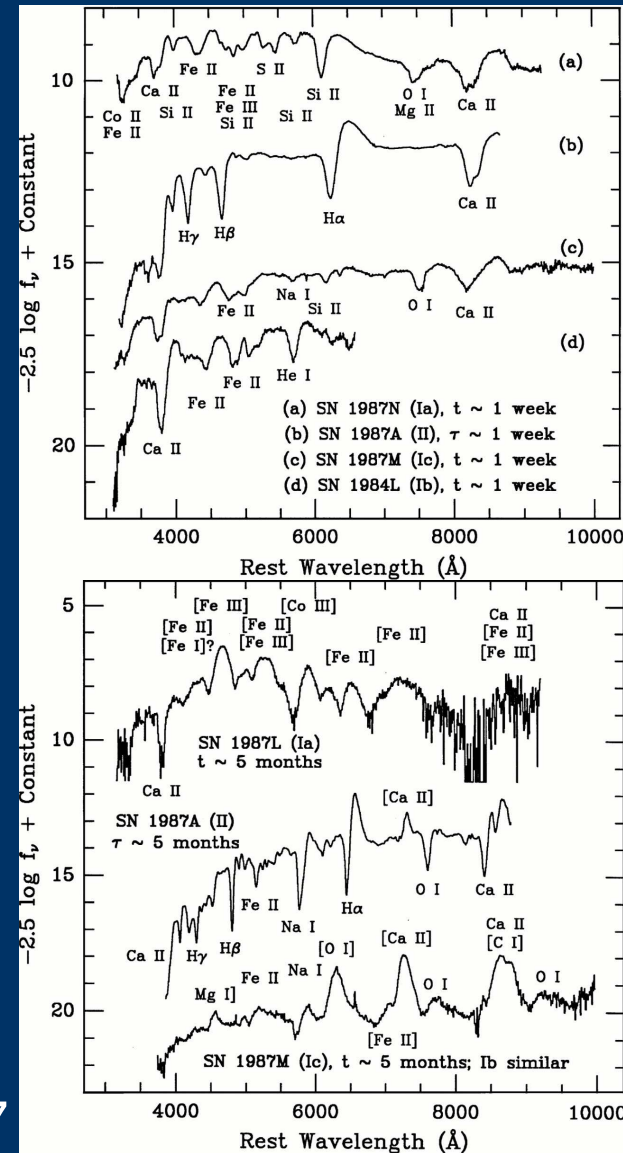
# La classification des Supernovae

## Classification en 1985:

- Type I sans raies de l'hydrogène
- Type II avec raies de l'hydrogène

## Découverte en 1985:

- Type Ia: présence de la raie du Sill à  $\sim 6150 \text{ \AA}$ .
- naines blanches en systèmes binaires



Filippenko 1997

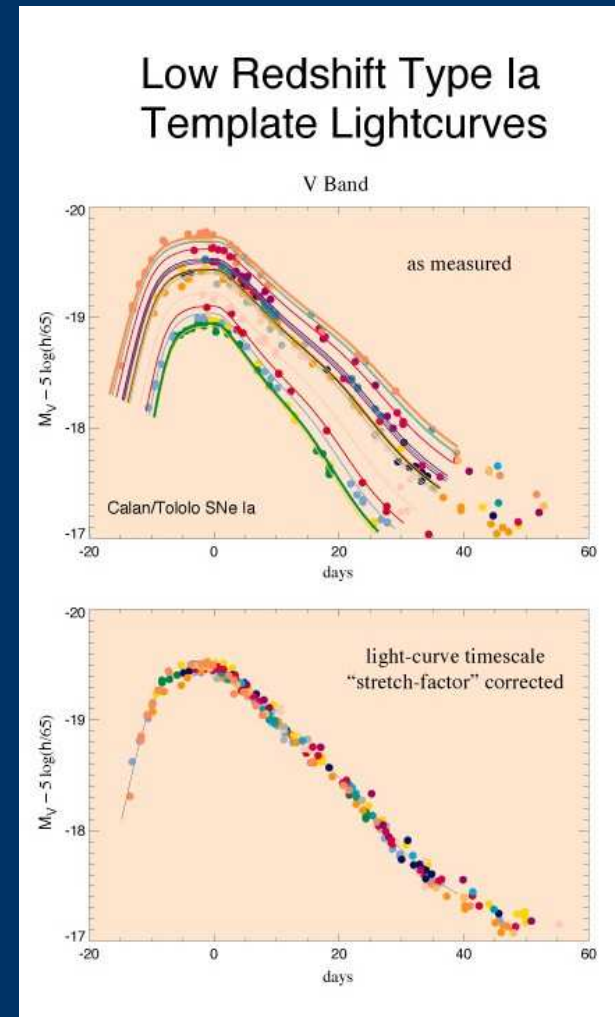
# Le Supernovae la comme indicateurs de distance

$$m-M=25+5\log(D_L/\text{Mpc})$$

$M \sim -19.5$

Explosion d'une naine blanche qui recoit de la matière de la compagne et arrive à la limite de Chandrasekhar.

40% de dispersion de luminosités au maximum:  
correlation avec la courbe de lumière.



# Loi de Hubble et distance des galaxies

$$D = \frac{c}{H_0} z$$

Loi de Hubble approximée

$$D = \frac{c}{H_0} f(z; \Omega_m, \Omega_r, \Omega_x, w) \quad \text{Relation exacte}$$

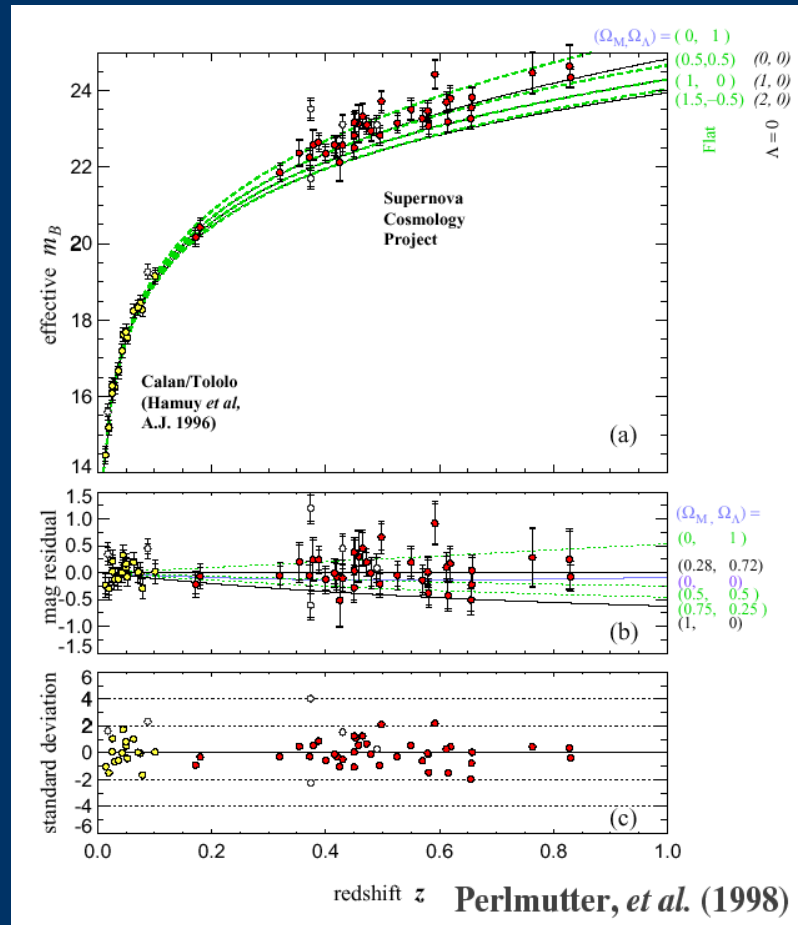
# Méthode

*Pour chaque modèle cosmologique, et on calcule quelle est la magnitude apparente prévue pour une Supernova en fonction du redshift, et on va mesurer la différence avec les Supernovae observées.*

$q_0 < 0$ : accélération;  $q_0 > 0$  décélération.

Pour un modèle avec matière et constante cosmologique:

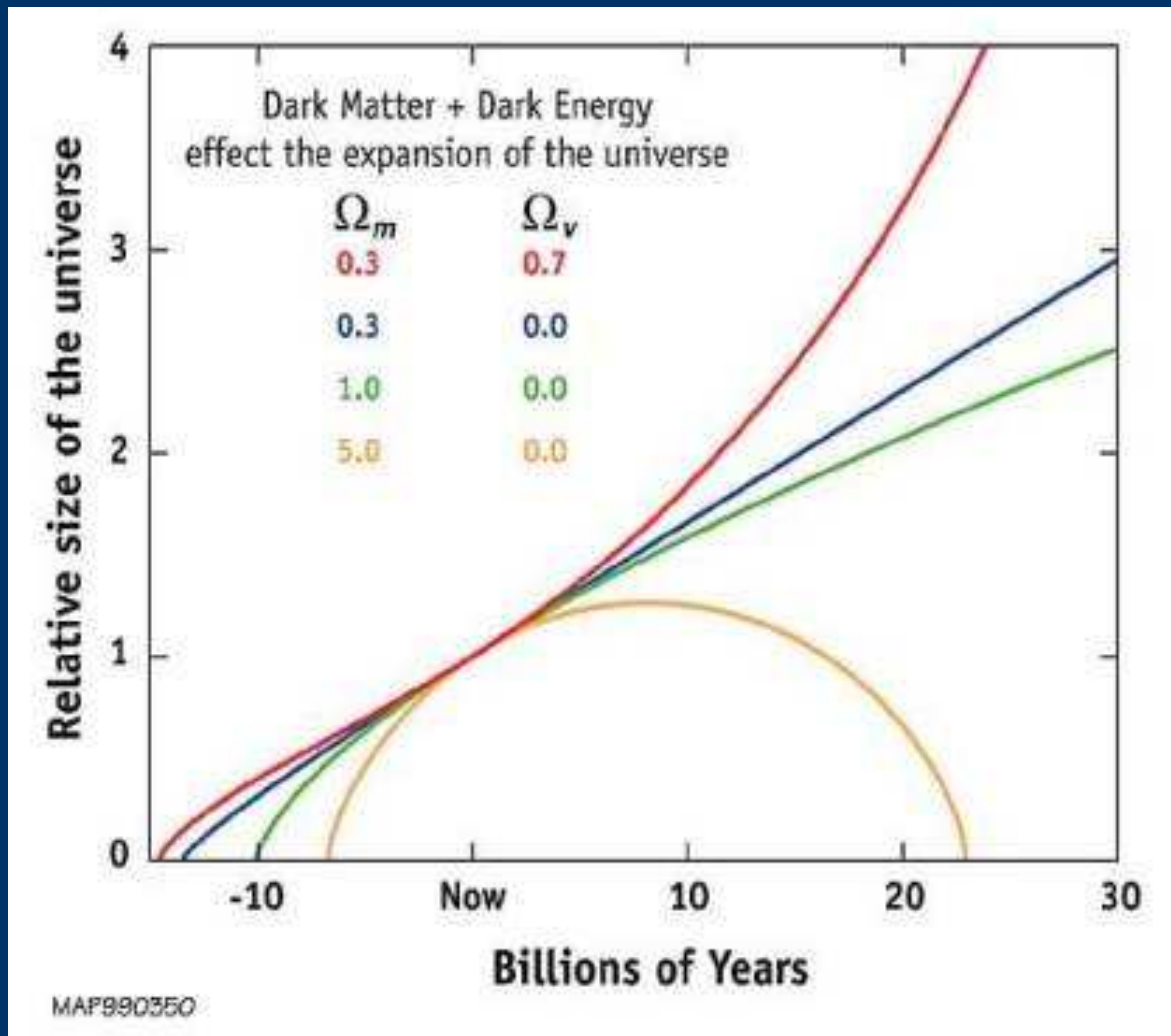
$$q_0 = \Omega_T/2 - 3/2 \Omega_\lambda$$



Riess et al. 1998; Perlmutter et al. 1999; Riess et al. 2001:  
 les magnitudes des supernovae sont plus faibles (donc les supernovae  
 sont plus lointaines) par rapport au modèle d'Einstein-de Sitter:  
 les observations s'expliquent par la présence d'une constante cosmologique.

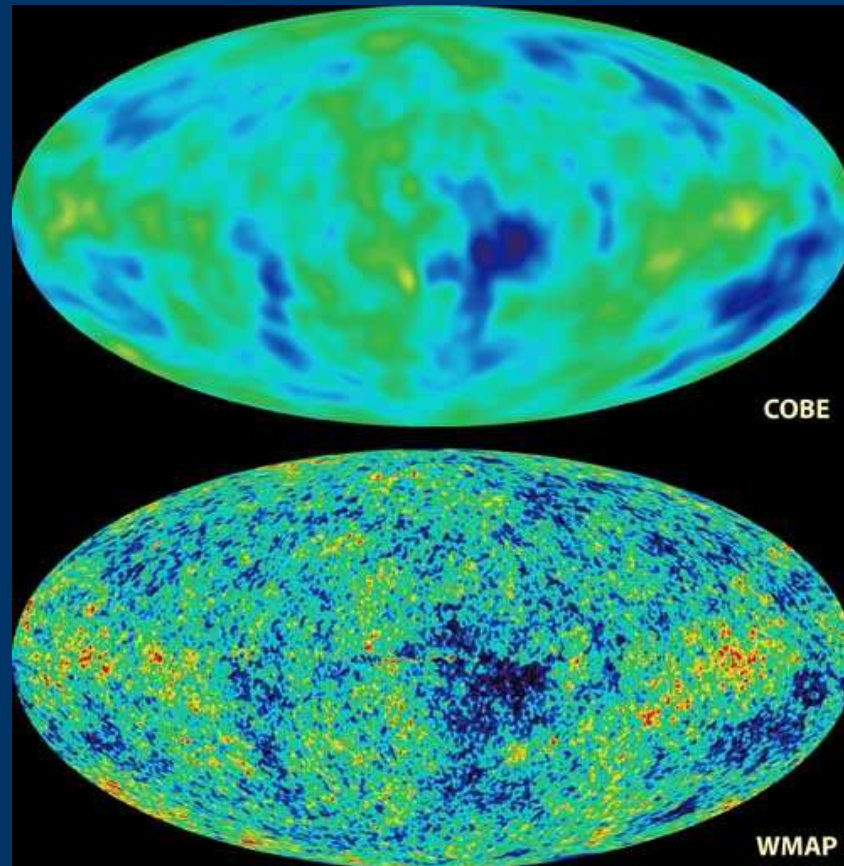
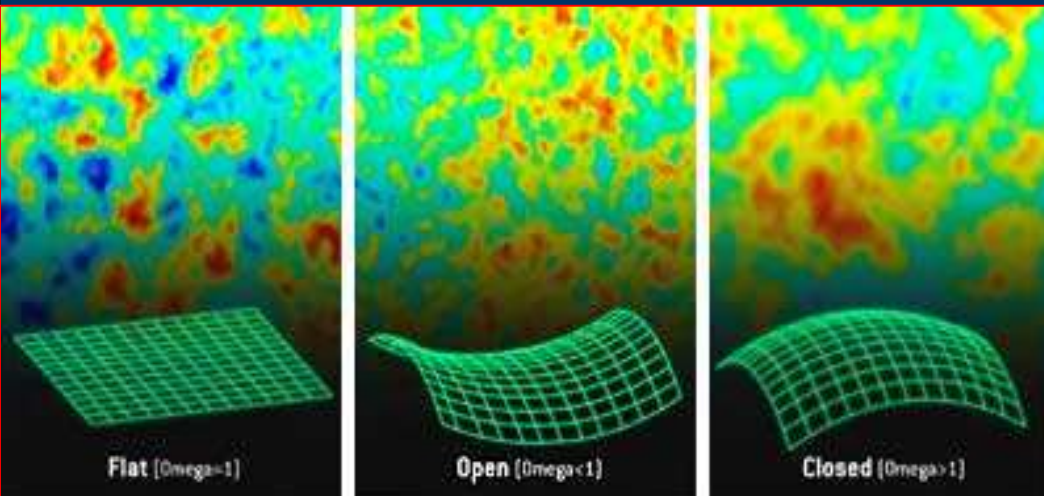
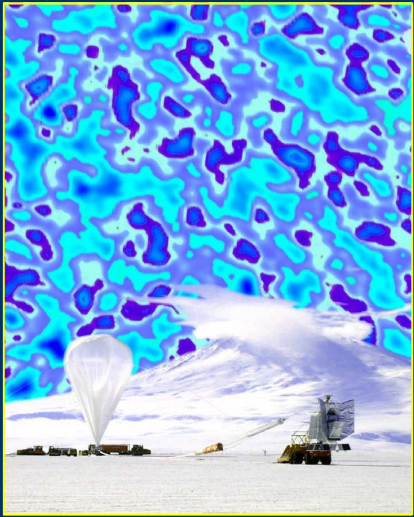


# L'expansion accélère!

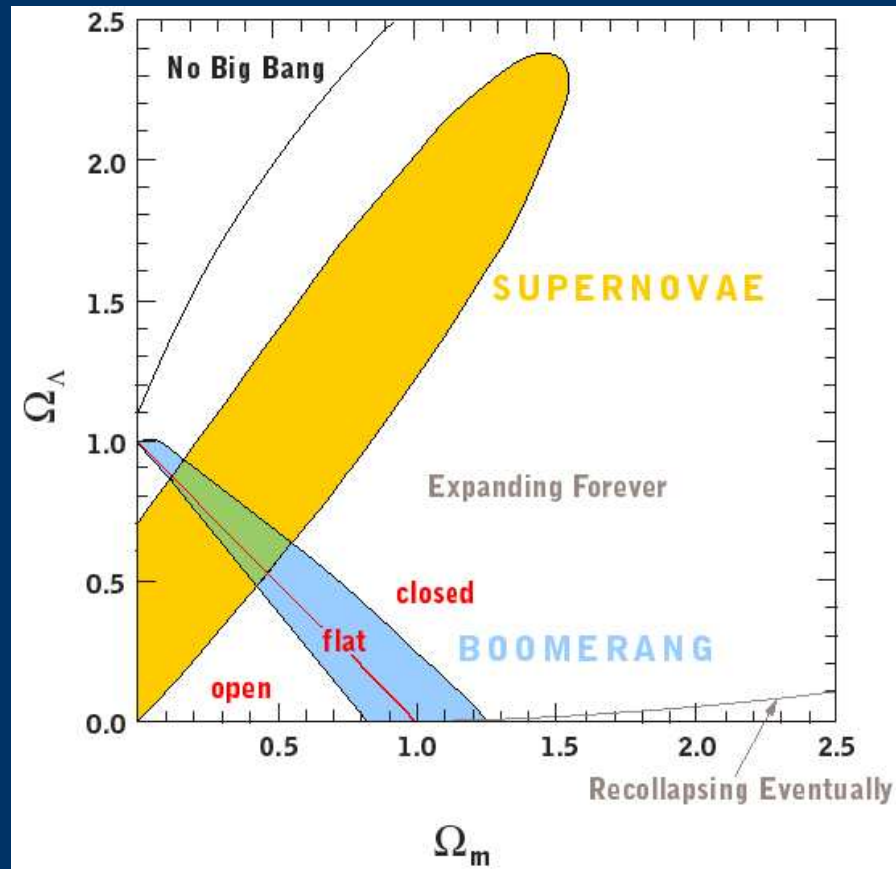


# La géométrie de l'univers

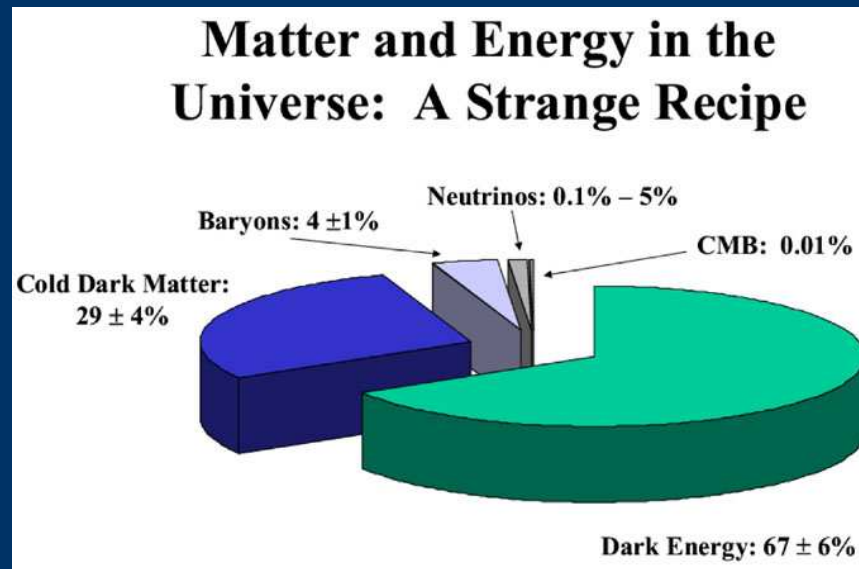
MESURES EN ACCORD AVEC UN UNIVERS  
PLAT:  $\Omega_{\tau}=1$  (Boomerang et WMAP)



# Diagramme $\Omega_M - \Omega_\Lambda$



# Moment historique: “concordance model”!



Paramètres cosmologiques connus avec précision  
Mystère de la constante cosmologique  
et/ou de l'énergie du vide

# Deux problèmes

## Problème 1

Impossible expliquer la valeur petite mais non nulle de l'énergie du vide.

## Problème 2

Coincidence: pourquoi l'énergie du vide est comparable à celle de la matière aujourd'hui?

# Chronologie

