

Le modèle du Big-bang

Le modèle cosmologique standard de l'évolution de l'univers

G. Wilquet
pour les Master Classes
Mars 2009

Les limites du modèle du Big-bang

1. Le modèle cosmologique standard de l'évolution de l'univers **mais pas de la création de l'Univers**.
2. L'âge de l'Univers que nous observons est de 13.7 milliards d'années.
Notre horizon serait donc limité à 13.7 milliards d'années-lumière (Gly)

L'Univers est en expansion et notre horizon est de 45 Gly

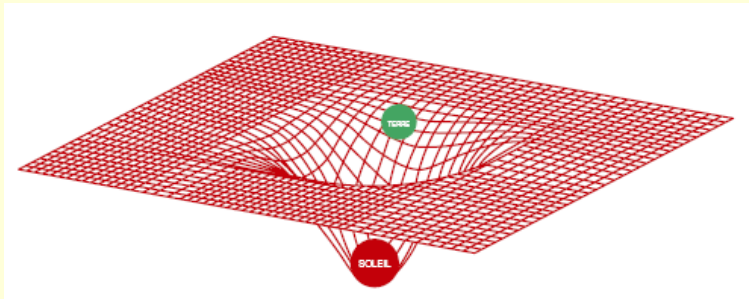
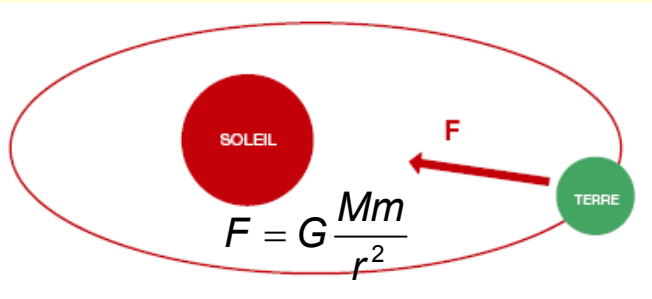
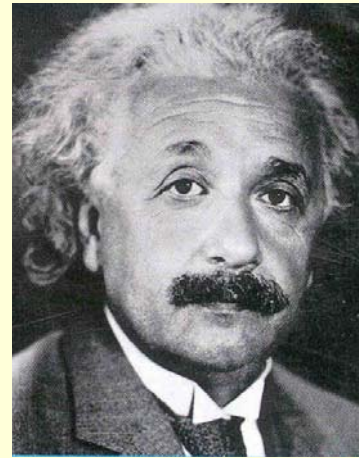
$$1 \text{ ly} \approx 10^{13} \text{ km} \quad \rightarrow \quad \text{Notre horizon} \approx 5 \cdot 10^{23} \text{ km}$$

La plupart des étapes de cette évolution sont reproduites et vérifiées ou en tout cas non falsifiées:

- par l'expérimentation dans le laboratoire : physique des particules, physique nucléaire, physique atomique,
- ou par l'observation : astronomie, astrophysique, cosmologie.

Les prémisses : La relativité générale

Albert Einstein (1919) : la relativité générale remplace la théorie de la gravitation de Newton.



La distribution de la matière courbe l'espace et le temps.
La courbure de l'espace et du temps dirige le mouvement de la matière.

L'Univers observé à l'époque est statique et immuable.
Or, la force gravitationnelle est attractive.

Le remède d'Einstein: il introduit un terme ad hoc dans sa théorie, caractérisé par une constante arbitraire, la constante cosmologique Λ , prenant exactement la valeur qui empêche l'Univers de s'effondrer en₃ contrebalançant exactement la gravitation.

Les univers de Friedmann-Lemaitre-Robertson-Walker FLRW (1922-1927)

Proposent des solutions **dynamiques** de la relativité générale d'Einstein:
L'Univers fini est en expansion ou en contraction.

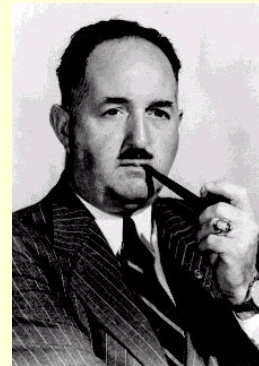
Elles sont basées sur le Principe Cosmologique:
aux très grandes dimensions, l'Univers est homogène et isotrope



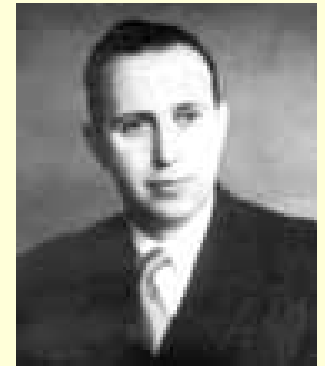
Aleksandr Friedmann



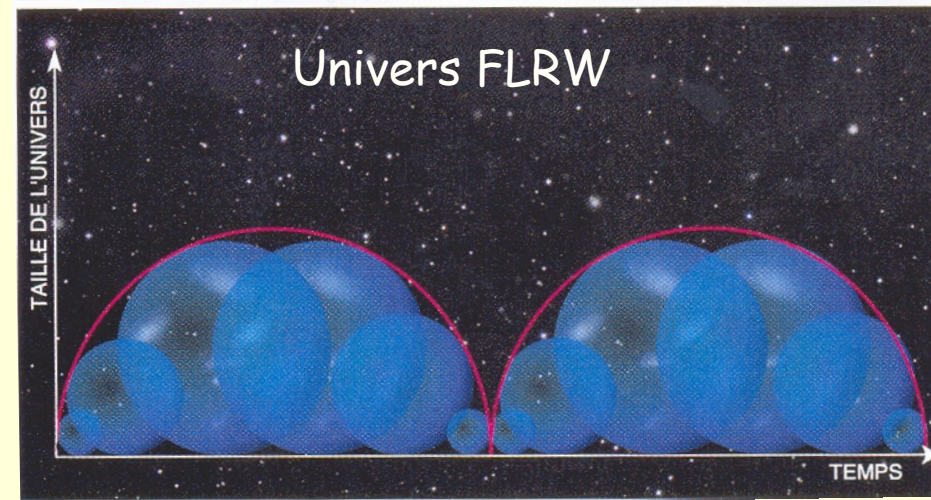
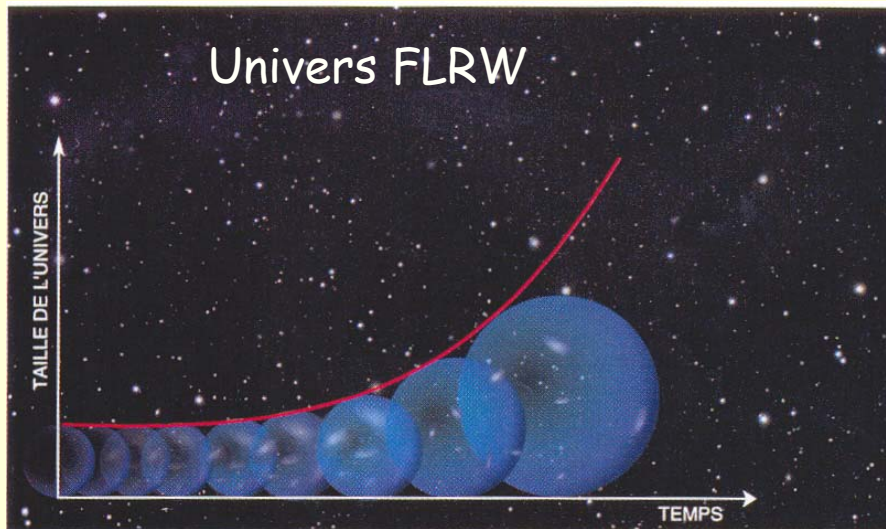
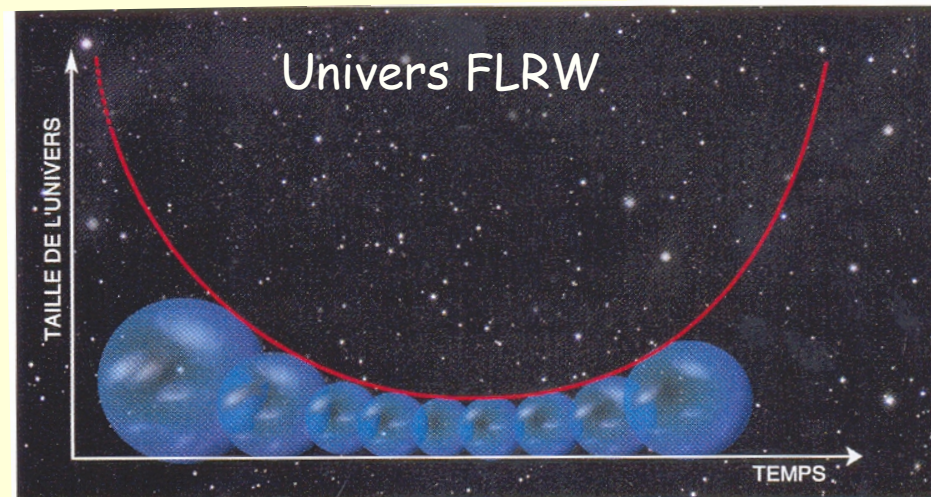
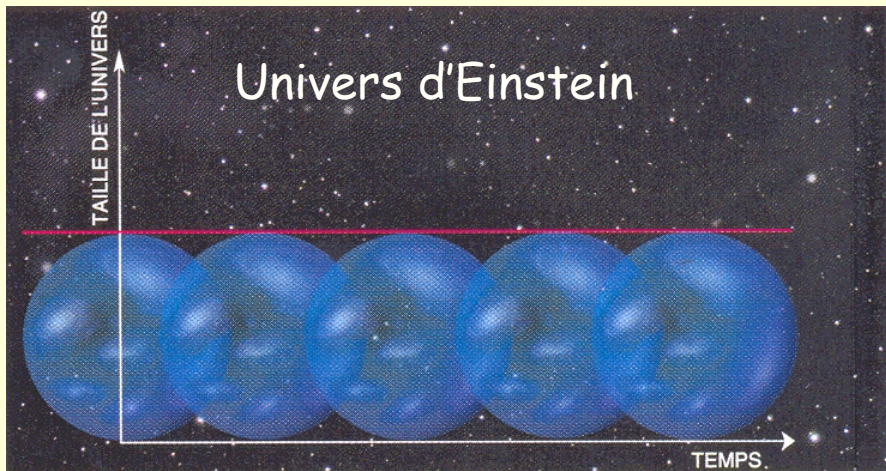
Georges Lemaitre



Howard Robertson



Arthur Walker



Le premier indice : L'expansion de l'Univers

Edwin Hubble :

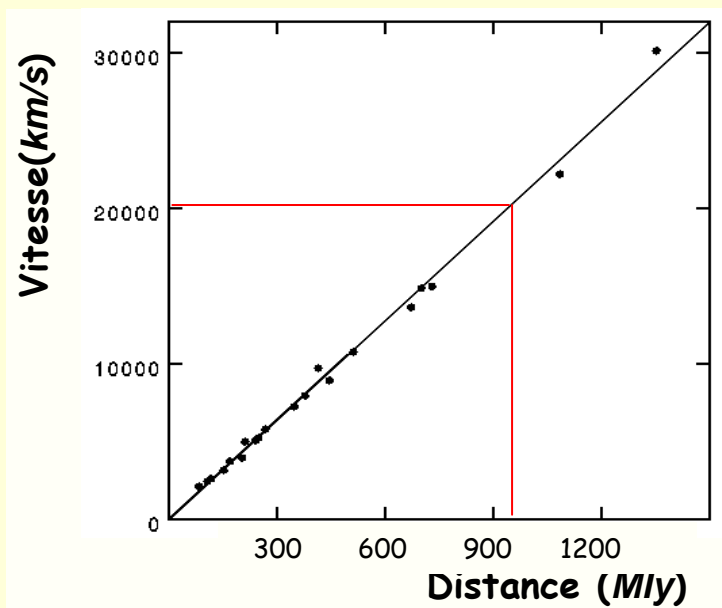
- 1920 : découvre que les « nébuleuses » des galaxies.
- 1929 observe que l'univers est en expansion : les galaxies lointaines s'éloignent de nous. Plus elles sont lointaines, plus elles s'éloignent rapidement de l'observateur.

Loi de Hubble

$$v = H \times d$$

Constante de Hubble

$$H \approx 20 \text{ (km/s) / Mly}$$



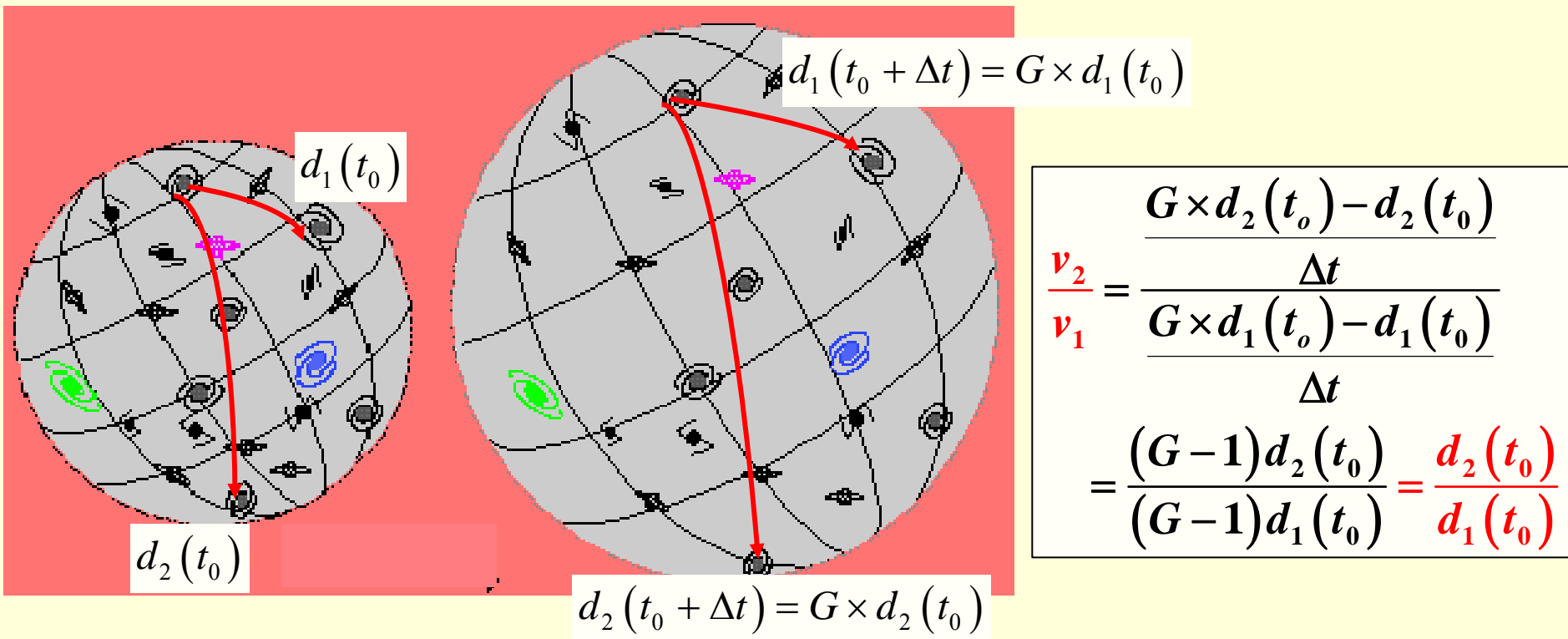
Hubble au télescope
Hooker de 250cm
du Mont Wilson



Au cours du temps, toutes les distances sont multipliées par un même facteur d'échelle. 6
Si l'expansion de l'univers est constante : le facteur d'échelle est constant dans le temps.

Exemple d'Univers isotrope homogène en expansion

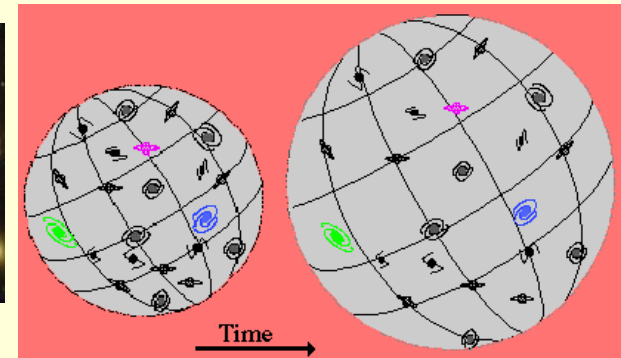
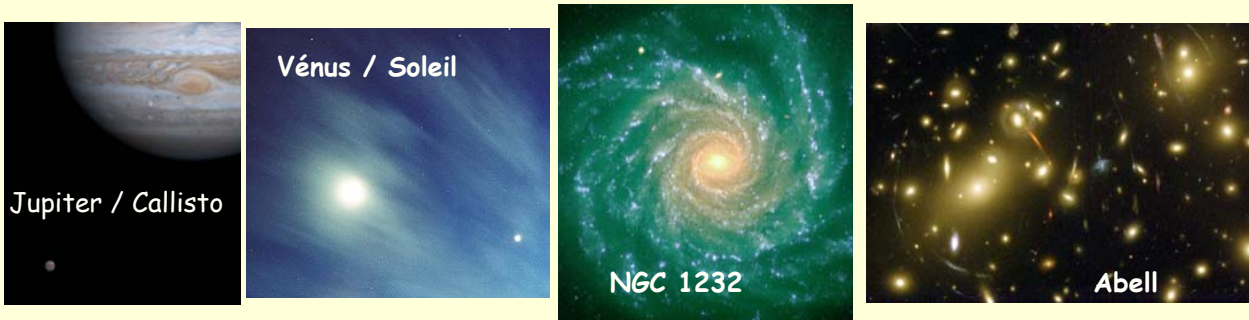
- Univers à deux dimensions sur la surface d'une sphère
- Le ballon gonfle : aucun point n'est particulier sur la sphère
l'expansion n'a pas de centre



Attention : dans le modèle il s'agit d'un Univers en expansion à 2 dimensions dans un Univers préexistant à 3 dimensions et statique.

Mouvement

Co-Mouvement



Les lunes autour de leur planète, les planètes autour de leur étoile, les étoiles dans leurs galaxies, les galaxies dans les amas de galaxies sont en mouvement les uns par rapports aux autres.

A l'échelle de l'Univers, un amas de galaxies est un seul grand objet. Ses composants sont

- **liés** par la force de la gravitation.
- **en mouvement** les uns par rapport aux autres.

Des objets très éloignés les uns des autres:

- Dans un Univers statique, les distances sont constantes.
- L'Univers est en expansion: les distances sont multipliées par un facteur d'échelle.
- Les objets gardent la même position relative. Dans l'exemple de la sphère en expansion, ils garderaient mêmes latitude et longitude.
- Ils sont **libres** et en **co-mouvement**.

Einstein :

La constante cosmologique est la plus grande erreur de ma vie.

Hubble (et d'autres) :

La matière se répand dans un espace préexistant

Georges Lemaitre (1931) :

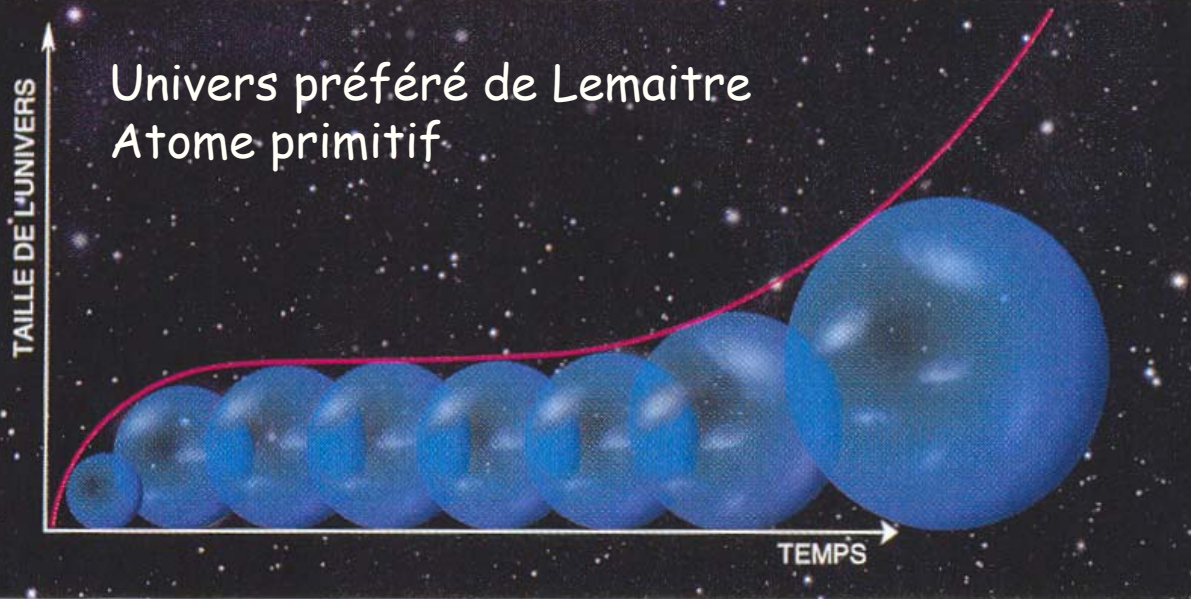
« Atome primitif » : Naissance du concept de Big-bang



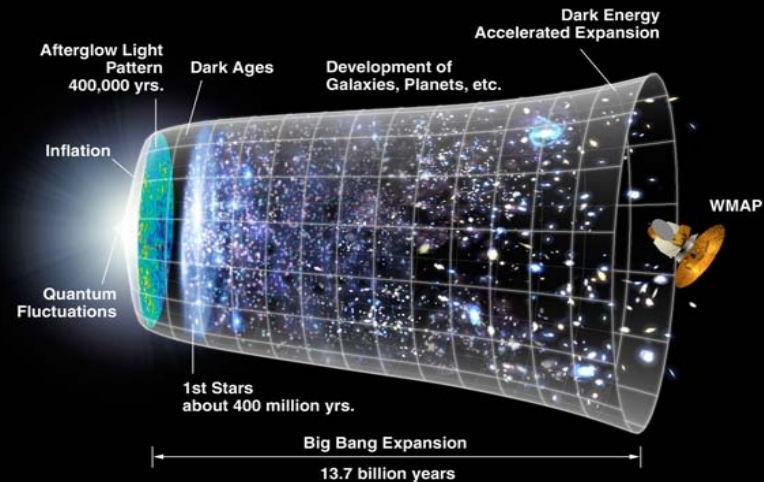
L'Univers est en expansion donc ...

La taille de l'Univers régresse en remontant le temps et la densité en masse/énergie augmente...

Univers préféré de Lemaitre
Atome primitif



Modèle du Big-bang aujourd'hui



Ce qu'est et n'est pas le modèle du Big-bang

Le modèle du Big-bang, ce n'est pas du rayonnement et de la matière en expansion dans un Univers vide et préexistant de tout temps.

Le modèle du Big-bang, c'est l'espace et le temps qui apparaissent simultanément partout dans l'Univers et dans lequel la matière et le rayonnement créés se diluent et se refroidissent au fur et à mesure de leur expansion.

Si l'Univers dans son entièreté est infini maintenant, il était nécessairement infini au moment du Big-bang si sa vitesse d'expansion est finie.

Un Univers fini n'a pas nécessairement de bord

Le modèle du Big-bang décrit l'évolution de l'univers mais pas la création de l'Univers.

Ce qui ressemble très fort à une preuve : Le bruit de fond cosmique micro-onde

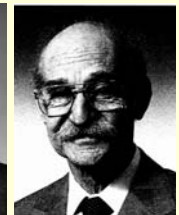
Richard Tolman (1934)

Le Big-Bang a produit un rayonnement intense extrêmement énergétique



Georges Gamov (1948),

Ralph Alpher et Robert Herman (1950)



Les traces fossiles de ce rayonnement existent sous la forme du bruit de fond cosmique micro-onde dont la température est de l'ordre de $T \approx 3 \text{ K}$.

L'Univers est en expansion :

Relativité restreinte de Einstein \Rightarrow l'énergie de la radiation diminue.

La longueur d'onde de la radiation augmente : radiation micro-onde

Arno Penzias et Robert Wilson (1965)

Bruit de fond uniforme capté par une antenne micro-onde.

Découverte fortuite(!) du bruit de fond cosmique micro-onde.



Relation entre énergie, température et longueur d'onde d'un rayonnement

La température reflète l'énergie cinétique

$$E = kT = 1.4 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \times T$$

$$T \approx 3\text{K} \rightarrow E \approx 1.4 \cdot 10^{-23} \text{ J} \approx 3 \cdot 10^{-4} \text{ eV} \approx 6 \cdot 10^{-10} m_e$$

L'énergie est proportionnelle à la fréquence ν et
donc inversement proportionnelle à la longueur d'onde λ

$$E = h\nu$$

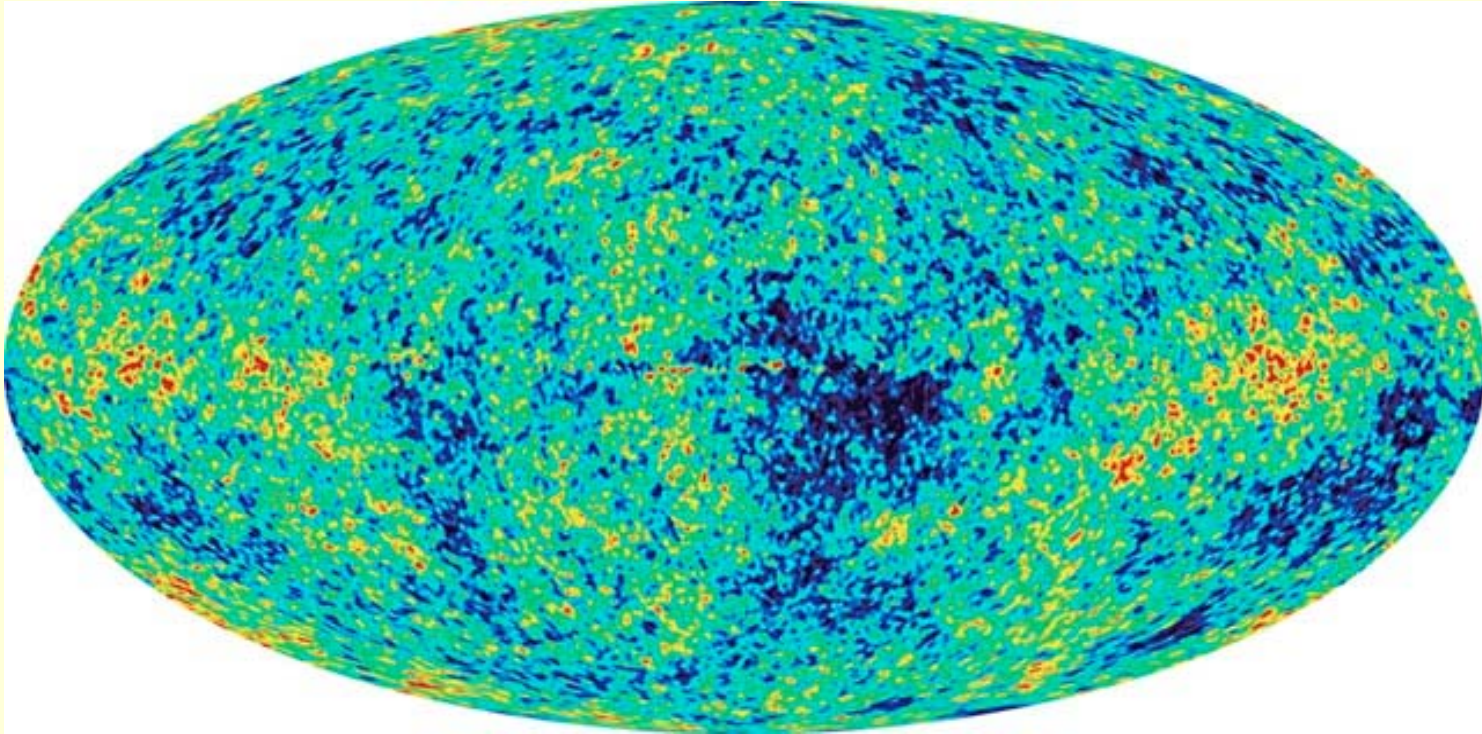
$$\nu = c/\lambda \rightarrow E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$E = kT$$

$$\lambda = \frac{hc}{kT} = \frac{6.6 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \times 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}}{1.4 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1} \times T}$$

$$T \approx 3\text{K} \rightarrow \lambda \approx 5\text{mm}$$

Carte de l'univers dans le bruit de fond cosmique micro-onde WMAP 2005

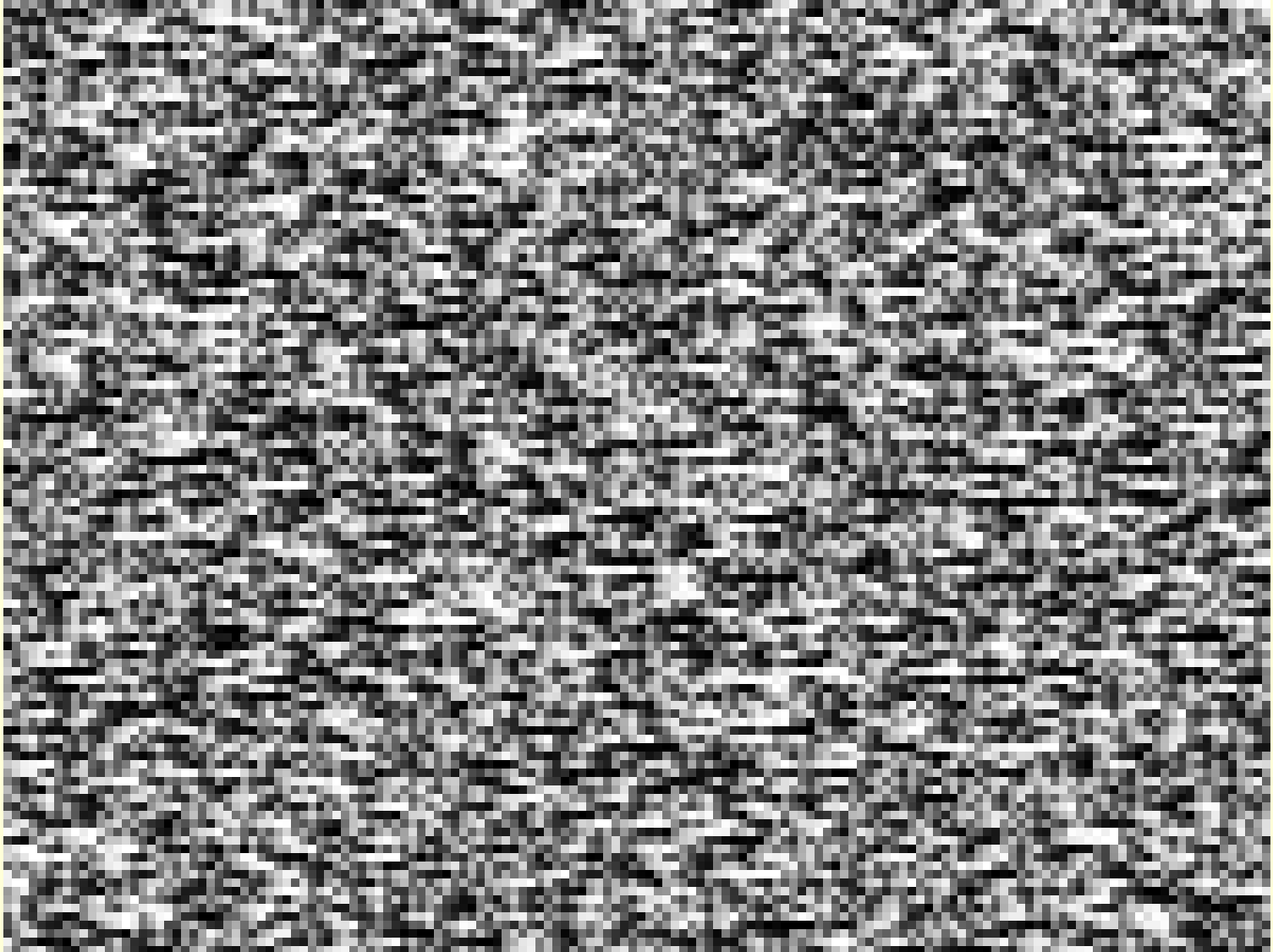


Code de couleur : variations de température de l'ordre de $10^{-5} K$ autour de la valeur moyenne $T = 2.725 K$

Principe cosmologique est vrai pour le rayonnement fossile
A très grande échelle: Univers homogène et isotrope

Densité du bruit de fond cosmique micro-onde: 400 cm^{-3}

Vous voulez voir le rayonnement fossile? Allumer la TV et débrancher l'antenne.



↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10 ¹⁴	100	1	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
T (K)	10 ²⁷	10 ¹⁵	10 ¹³	10 ¹⁰	4000	70	2.7
t	10 ⁻⁴⁴ s	10 ⁻³⁵ s	10 ⁻¹⁰ s	10 ⁻⁴ s	200 s	3×10 ⁵ ans	10 ⁹ ans
							13.7×10 ⁹ ans

Cosmologie

Étape 1 - Inflation

R. Brout, F. Englert,
E. Gunzig- 1978

La taille de l'univers augmente de 30 ordres de grandeur en 10^{-35} s

1. Le rayonnement micro-onde est extrêmement homogène et isotrope.
Tout l'Univers a du être en contact thermique c.à.d. échanger de l'information à un moment de son évolution
2. L'échange d'information dans l'espace est limité par la vitesse de la lumière.
3. A tout moment de son histoire, l'Univers est trop grand que pour que de l'information ait pu être échangée entre les points les plus distants.
4. La vitesse d'expansion de l'espace n'est pas de limitée par c.

L'Univers : soupe de quarks, leptons, radiation, particules inconnues

↓ Emax accélérateurs



E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

Physique des particules

Étape 2 - Baryogenèse

Les quarks s'assemblent en protons et neutrons

Equilibre à température élevée $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ $\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$ $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$

Univers en expansion, T diminue $q\bar{q} \rightarrow \gamma\gamma$ ~~$\gamma\gamma \rightarrow q\bar{q}$~~ $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$ ~~$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$~~

Annihilation complète matière - antimatière en rayonnement?

Légère asymétrie - matière antimatière : $N_{\bar{q}} \approx 0.999999999 N_q$ $\frac{N_\gamma}{N_q} \approx 2 \cdot 10^9$
 $N_{e^+} \approx 0.999999999 N_{e^-}$

Univers : protons, neutrons et électrons + radiation
 pratiquement pas d'antimatière

↓ Emax accélérateurs

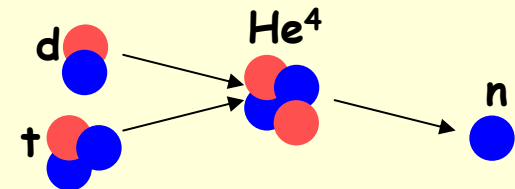
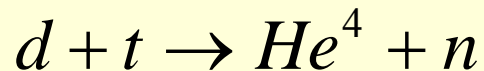
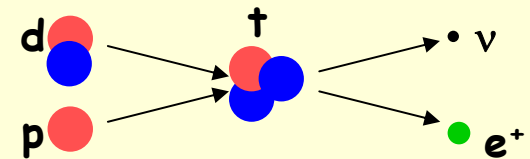
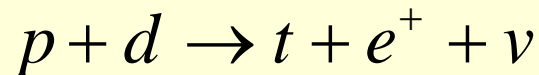
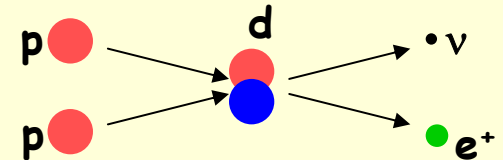
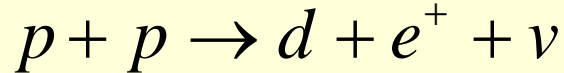


E(GeV)	10 ¹⁴	100	1	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
T (K)	10 ²⁷	10 ¹⁵	10 ¹³	10 ¹⁰	4000	70	2.7
t	10 ⁻⁴⁴ s	10 ⁻³⁵ s	10 ⁻¹⁰ s	10 ⁻⁴ s	200 s	3×10 ⁵ ans	10 ⁹ ans
							13.7×10 ⁹ ans

Étape 3 - Nucléosynthèse

Physique nucléaire

Les premiers noyaux d'He⁴ avec des traces de H², He³ et de Li⁷ se forment



Univers : noyaux légers + électrons + rayonnement
Univers opaque à la lumière

↓ Emax accélérateurs



E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	10^9 ans
							13.7×10^9 ans

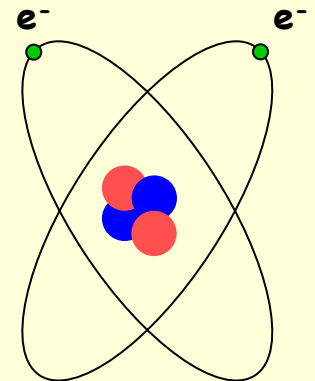
Physique atomique
Chimie

Étape 4a - Formation des atomes


La force électromagnétique entre en jeu.

Les premiers atomes d' H^1 et d' He^4 avec des traces de H^2 , He^3 et de Li^7 se forment à partir des noyaux et des électrons

Univers : Atomes légers, H^1 , He^4 + rayonnement
L'Univers est électriquement neutre
L'Univers est transparent au rayonnement
L'Univers baigne dans le rayonnement
L'origine du bruit de fond cosmique micro-onde



↓ Emax accélérateurs



E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	10^9 ans
							13.7×10^9 ans

Étape 4b - Différence d'évolution entre le rayonnement et la matière

Avant $t = 300\,000$ ans :

Les petites fluctuations de la matière et du rayonnement sont couplées.

Après $t = 300\,000$ ans :

Les petites fluctuations du rayonnement sont gelées

Les petites fluctuations de la matière sont **amplifiées par la gravitation**

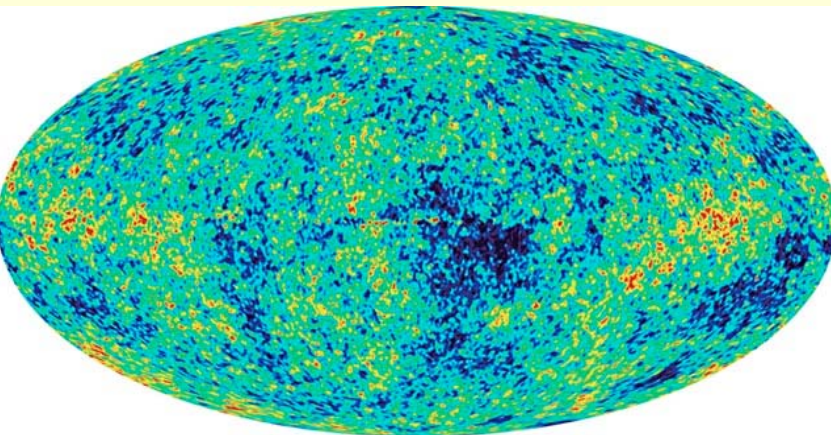
↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	10^9 ans
							13.7×10^9 ans

Étape 4c - Différence d'évolution entre le rayonnement et la matière

Fluctuations à $t=t_0=13.7$ milliards années

Rayonnement : Fluctuations similaires à $t = 300\,000$ ans



$$\left[\begin{array}{l} T(3 \cdot 10^5 \text{ ans}) \approx 4000 \text{ K} \\ T(t_0) = 2.7 \text{ K} \end{array} \right] \text{ mais } \frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-5}$$

Matière : Fluctuations amplifiées par la gravitation à échelle « réduite ».



$$\frac{\rho_{\text{trou noir}}}{\rho_{\text{vide intergalactique}}} \approx \frac{5 \cdot 10^{96} \text{ kg m}^{-3}}{5 \cdot 10^{-27} \text{ kg m}^{-3}} = 10^{123}$$

↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

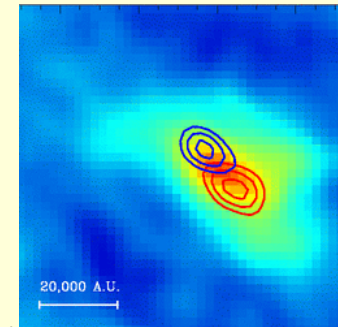
Étape 5a - Premières étoiles

La gravité entre en jeu:

- Proto-étoile : Coalescence de petites zones de gaz autour de fluctuations de densité plus élevée.
- Constitution d'un disque d'accrétion, accumulation progressive de gaz tombant sur la future étoile.
- Quand la densité au cœur de l'étoile est suffisante : la fusion de l'hydrogène en hélium commence et l'étoile devient lumineuse

Astrophysique

Proto-étoile
En infrarouge



Étoile jeune + disque d'accrétion.
Nébuluse Orion



Pouponnière d'étoiles
Nébuluse de la Lagune



↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

Astrophysique

Étape 5b - Premières galaxies et premiers amas

Galaxies : étoiles liées par la gravitation

Andromède



Amas : galaxies liées par la gravitation

Amas de galaxies Abell-2218
Vu par le télescope Hubble



↓ Emax accélérateurs

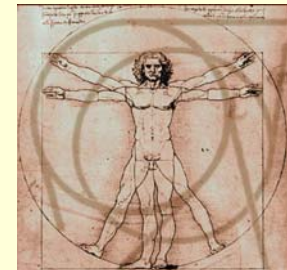
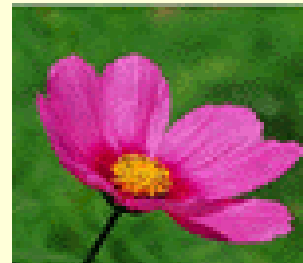
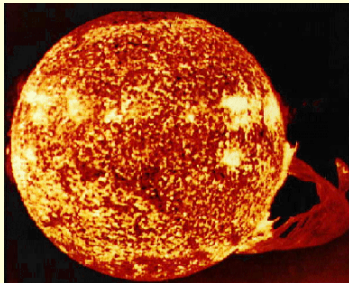


E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^{10}	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

Aujourd'hui

Étape 6 - Aujourd'hui

Entre autre



E(GeV)	10 ¹⁴	100	1	10 ⁻³	10 ⁻⁹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²
T (K)	10 ²⁷	10 ¹⁵	10 ¹³	10 ¹⁰	4000	70	2.7
t	10 ⁻⁴⁴ s	10 ⁻³⁵ s	10 ⁻¹⁰ s	10 ⁻⁴ s	200 s	3×10 ⁵ ans	10 ⁹ ans
							13.7×10 ⁹ ans

A l'origine

Étape 0 - Avant 10⁻⁴⁴s : le temps de Planck

Les petites distances sont le domaine de la mécanique quantique où les distances sont quantifiées: la force de gravitation est tout à fait négligeable aux petites distances. La théorie de la gravitation de Einstein, la relativité générale suppose l'espace lisse: les effets quantiques sont tout à fait négligeables aux grandes distances.

La distance de Planck

La distance où la relativité générale classique devient caduque.

Il n'existe pas de théorie quantique de la gravitation !!!

La dimension de l'Univers en dessous de laquelle les théories existantes sont caduques.

$$l_p = \sqrt{\frac{h G}{3\pi c^3}} \approx 1.6 \cdot 10^{-35} \text{ m}$$

Le temps de Planck

Le temps mis par la lumière pour parcourir l_p

L'âge de l'Univers en dessous duquel les théories existantes sont caduques

$$t_p = l_p / c \approx 5.4 \cdot 10^{-44} \text{ s}$$

↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^8	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

A l'origine

Étape 0 - que signifient les unités de Planck?

L'Univers observable

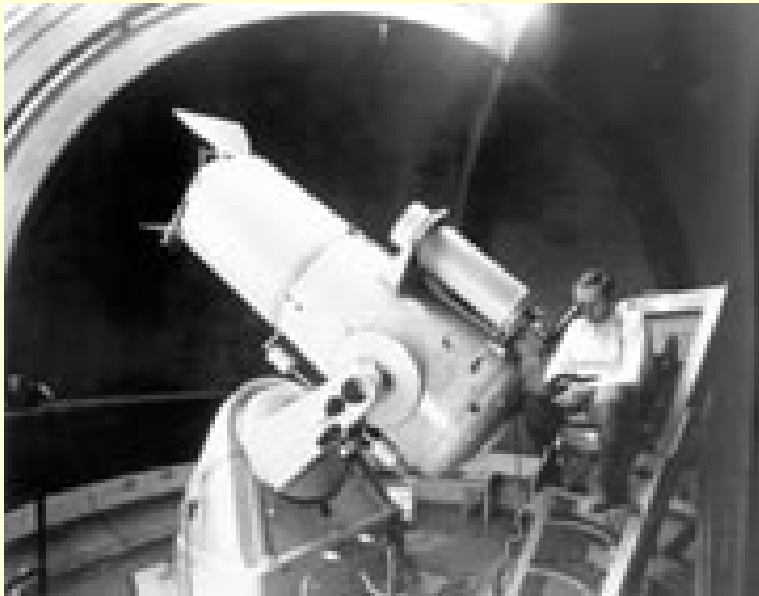
	aujourd'hui	au temps de Planck
temps	$t_0 \approx 13.7 \times 10^9$ ans	$t_p \approx 5.4 \times 10^{-45}$ s
dimension	$l_0 \approx 5 \times 10^{26}$ m	$l_p \approx 1.6 \times 10^{-35}$ m
densité	$\rho_p = 5 \times 10^{-27}$ kg/m ³	$\rho_p \approx 5 \times 10^{96}$ kg/m ³ ,
température	$T_0 = 2.7$ K	$T_p \approx 1.4 \times 10^{32}$ K.

L'Univers avant le temps de Planck est équivalent à un trou noir

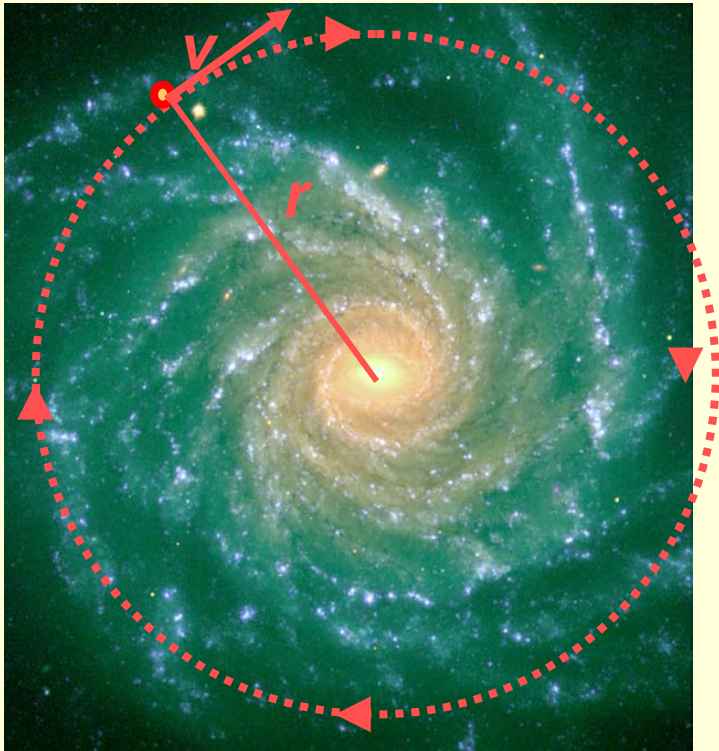
Fritz Zwicky (1931-1935) : La matière noire de l'Univers



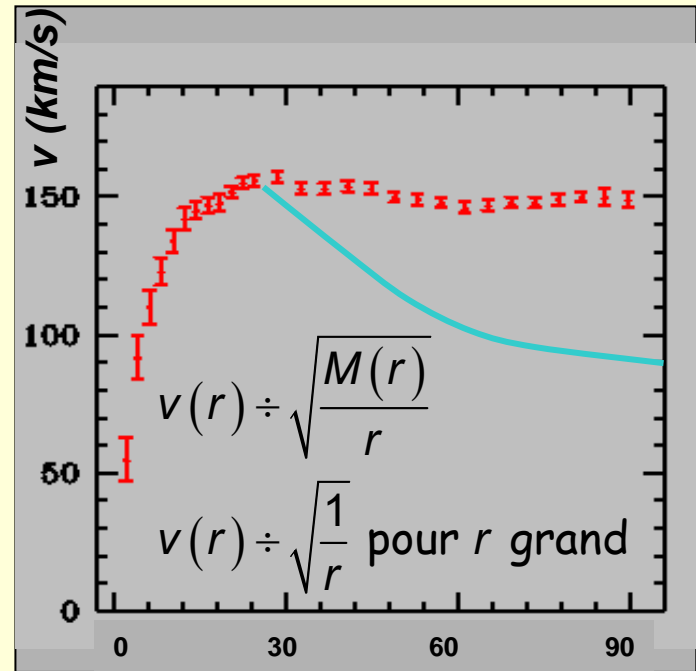
Amas de galaxies Abell-2218
Vu par le télescope Hubble



Galaxie spirale NGC 1232



La matière noire



mesures

Orbite de
Kepler suivant la
loi de Newton

Vitesse de rotation des étoiles en fonction
de la distance au cœur de la galaxie

Les étoiles les plus éloignées tournent trop vite et la galaxie devrait se déstructurer.

Sauf si la quantité de matière est supérieure à la quantité de matière visible.

Matière visible : émission de lumière ou absorption de lumière émise à l'arrière plan
Matière noire : observable uniquement par ses effets gravitationnels identiques à la matière visible.

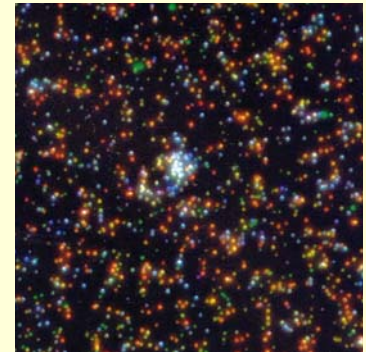
Ou sauf si la loi de Newton est incorrecte aux grandes distances.

La matière noire

Andromède

100 000 ly

Nombreuses galaxies naines satellites très peu lumineuses dans des halos locaux denses de matière noire



Canes Venaciti II :
Micro-galaxie peu
lumineuse de la Voie
Lactée

La matière noire

1E 0657-56 - collision entre deux amas de galaxie (2006)

Galaxies en lumière visible : Hubble

Effets de lentille gravitationnelle dus à la matière : Hubble

Emission de rayons X par gaz de matière ordinaire : Chandra



De quoi est faite la matière noire ?

De particules neutres massives interagissant faiblement

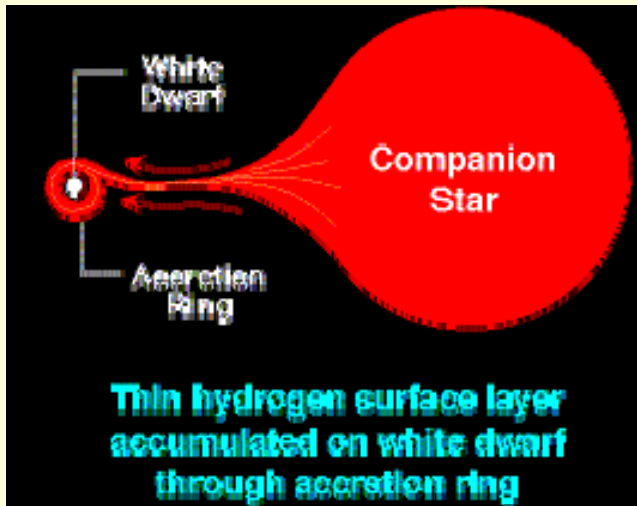
Les neutrinos reliques du Big Bang? Trop légers $N_\nu \approx N_\gamma \approx 10^9 N_{p,n} \Rightarrow 300 \nu \text{ cm}^{-3}$

La plus légère des particules super-symétriques neutres stables? Vue au LHC?

L'énergie noire

Premier indice: Supernova de Type Ia

Etoiles binaires : naine blanche et géante rouge.
Explosion de la naine blanche due à l'excès d'accrétion de matière de la géante rouge



La luminosité absolue M de ces objets est constante : ce sont des chandelles standard.

La luminosité apparente m est mesurée par l'observation → Distance
→ Temps écoulé depuis la SN-Ia

Décalage en longueur d'onde z vers le rouge du spectre de lumière émise (effet Doppler). → Vitesse d'éloignement

Relation entre $(m-M)$ et z

Entre distance d et vitesse v

Note: les luminosités sont mesurées en unités logarithmiques appelées magnitudes

L'Univers est en expansion accélérée

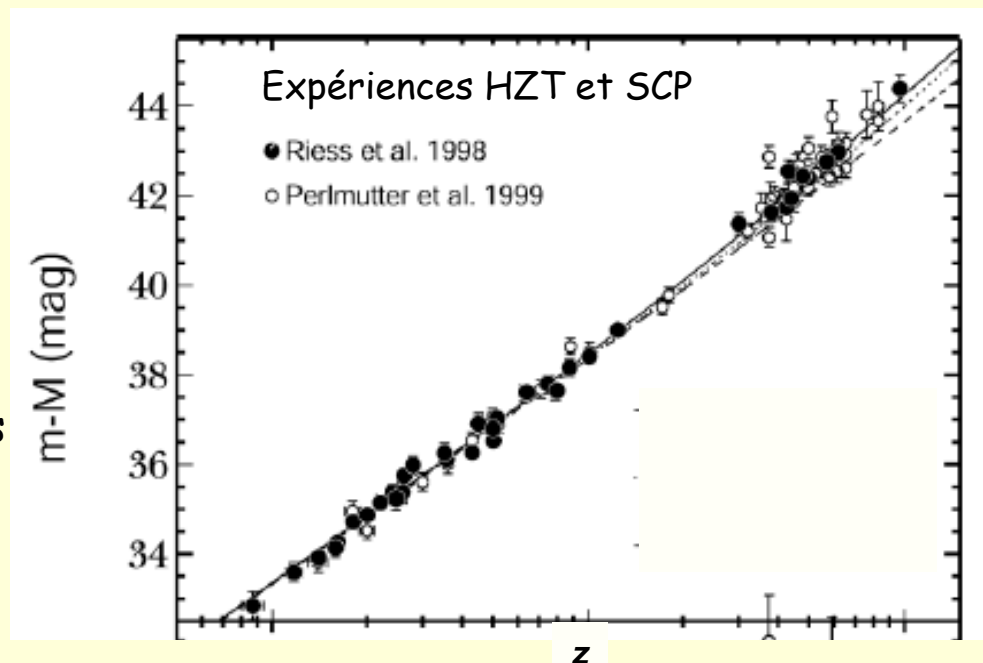
La « constante » H dans la loi de Hubble $v = H \times d$ n'est pas constante dans le temps.

La matière décélère l'expansion originale venant du Big-bang (attraction gravitationnelle). Il existerait une composante répulsive et accélératrice baptisée «énergie noire».

D'autres observations récentes que SN-Ia vont dans ce sens.

Divers modèles très spéculatifs et non testables existent. Certains expliquent aussi l'inflation.

La nature de l'«énergie noire» est aujourd'hui totalement inconnue.



Ce que l'on croit être le contenu en énergie de l'Univers

Radiation
0.005%

Matière
lumineuse
0.1 %

Matière ordinaire
non lumineuse
mais visible parce
qu'elle absorbe la
lumière
4 %

Neutrinos.
Reliques du
Big-bang.
Non observés
2 %

Se comporte
comme la matière
pour ce qui est
de la gravitation.

Matière noire
Particules nouvelles à
découvrir ??
22 %

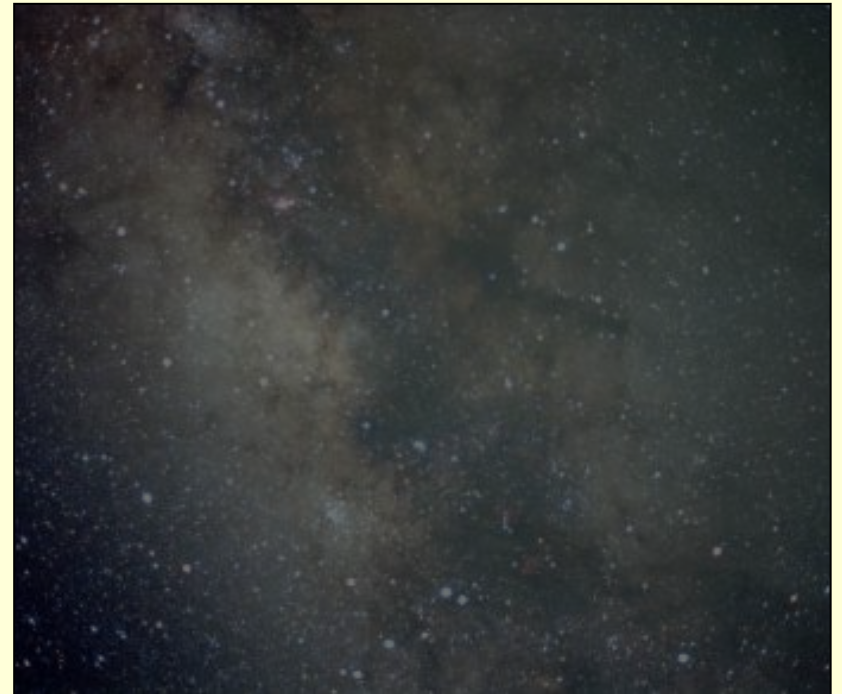
Force répulsive
opposée
à l'attraction
gravitationnelle.

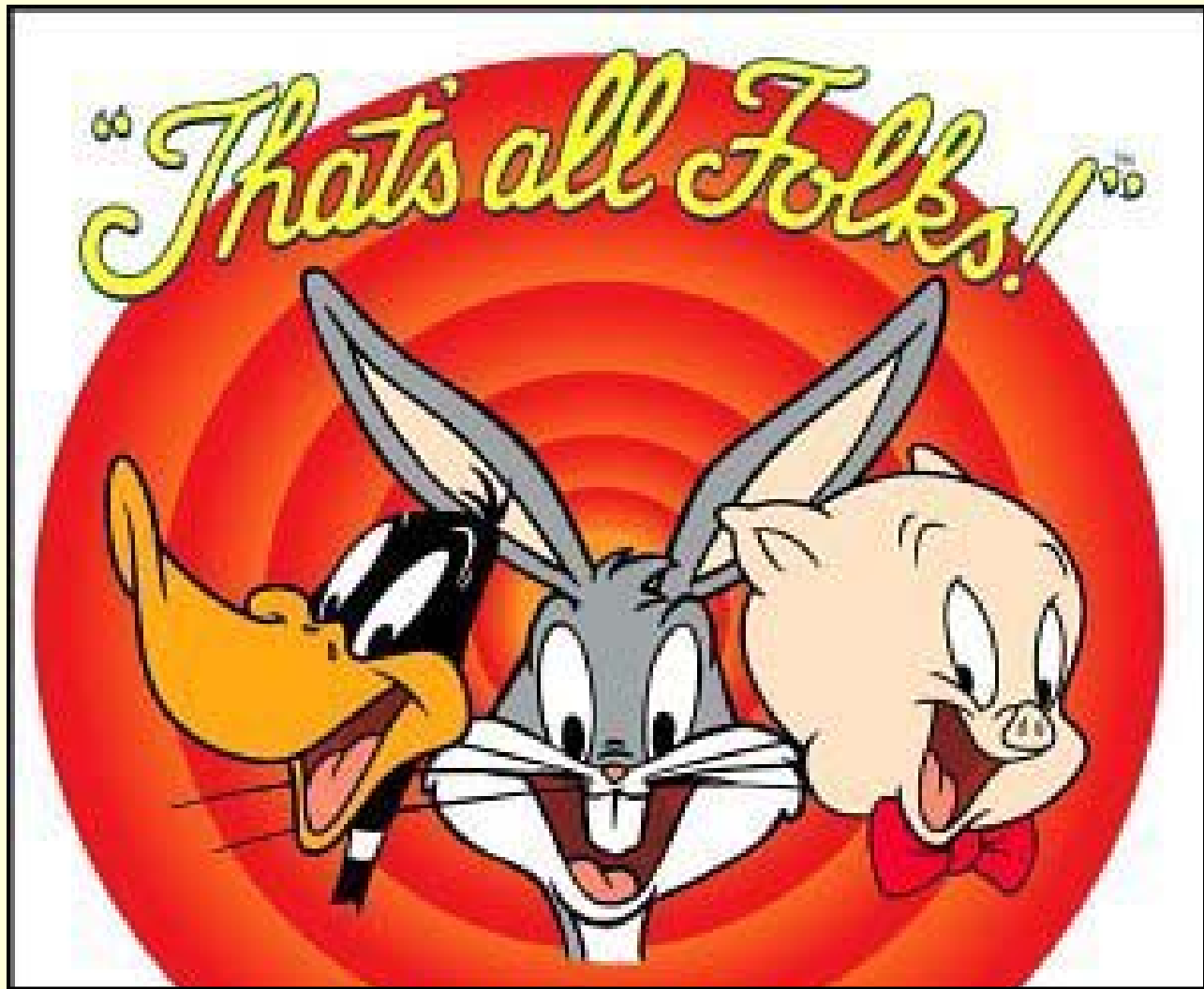
Énergie noire
Force répulsive s'opposant à l'attraction gravitationnelle
???????
72 %

Et après

Le modèle à la mode: une conséquence de l'existence de l'énergie noire

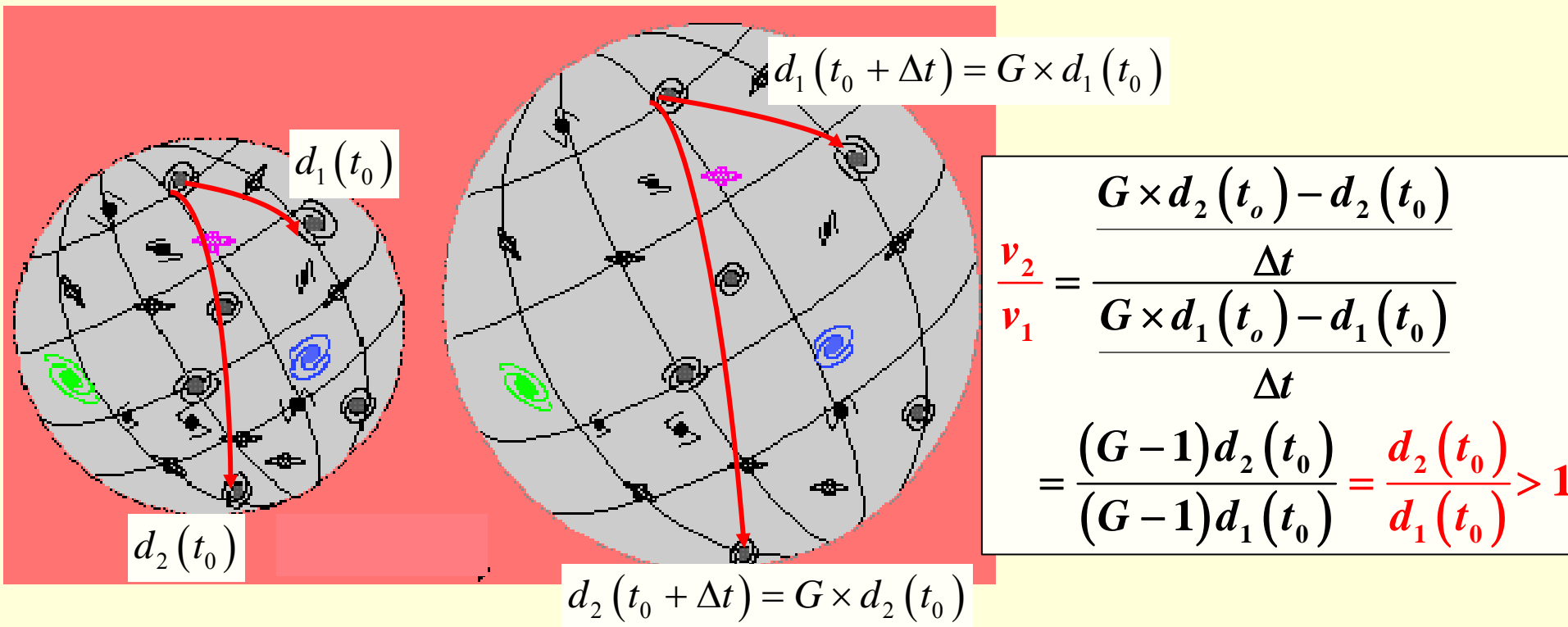
Une expansion accélérée éternelle vers un Univers froid, vide et noir





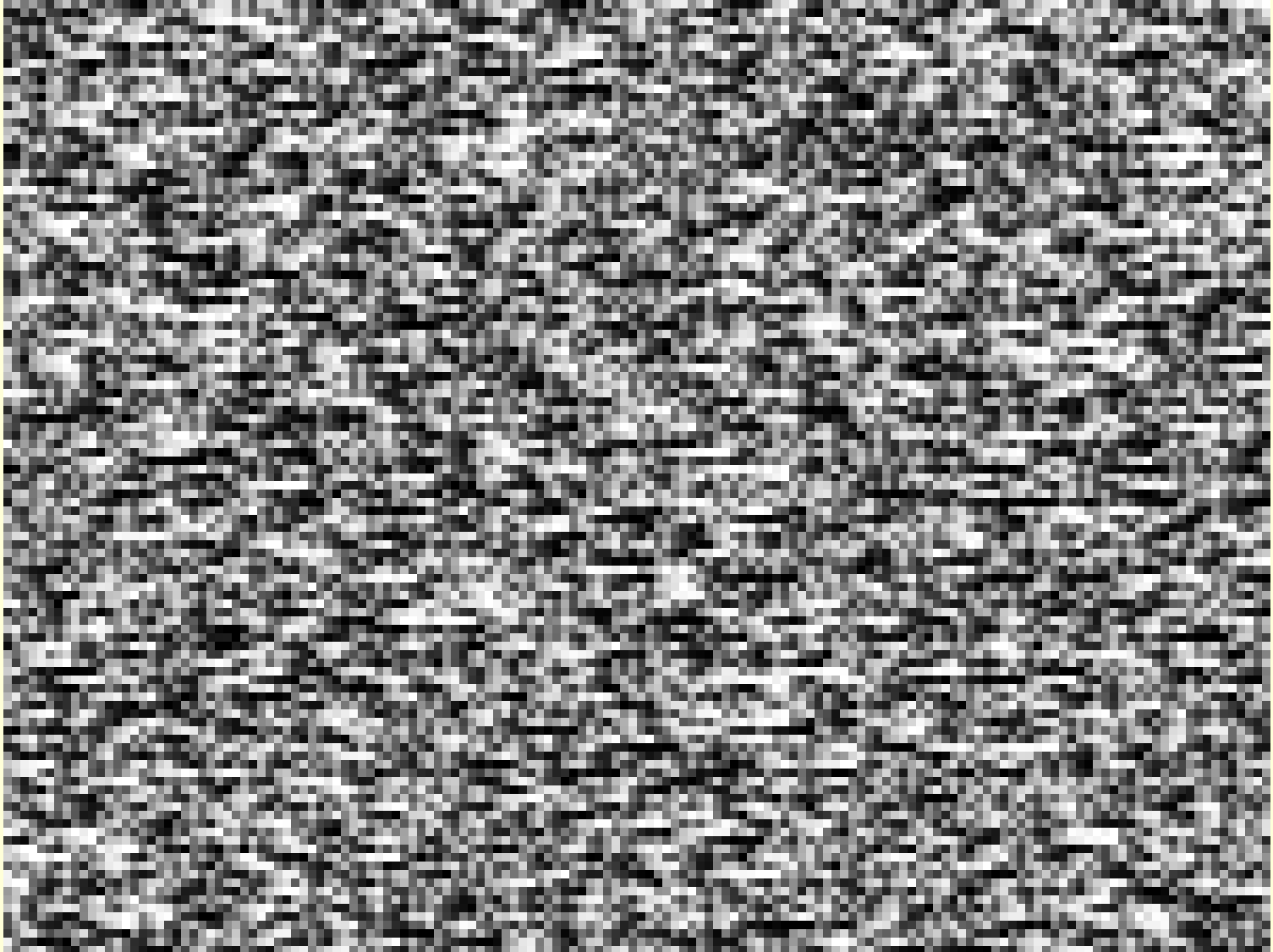
Exemple d'Univers isotrope homogène en expansion

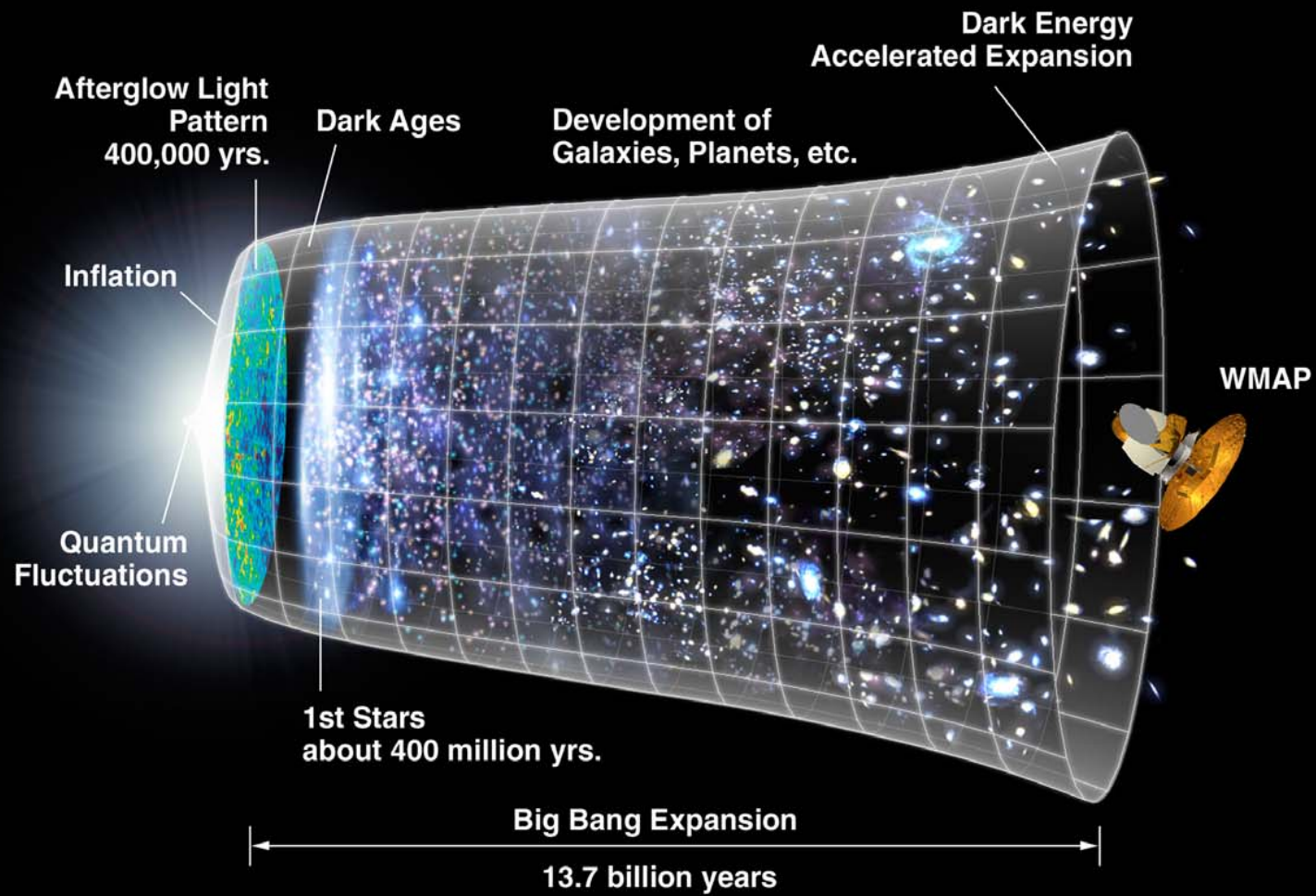
- Univers à deux dimensions sur la surface d'une sphère
- Le ballon se gonfle : aucun point n'est particulier sur la sphère
l'expansion n'a pas de centre

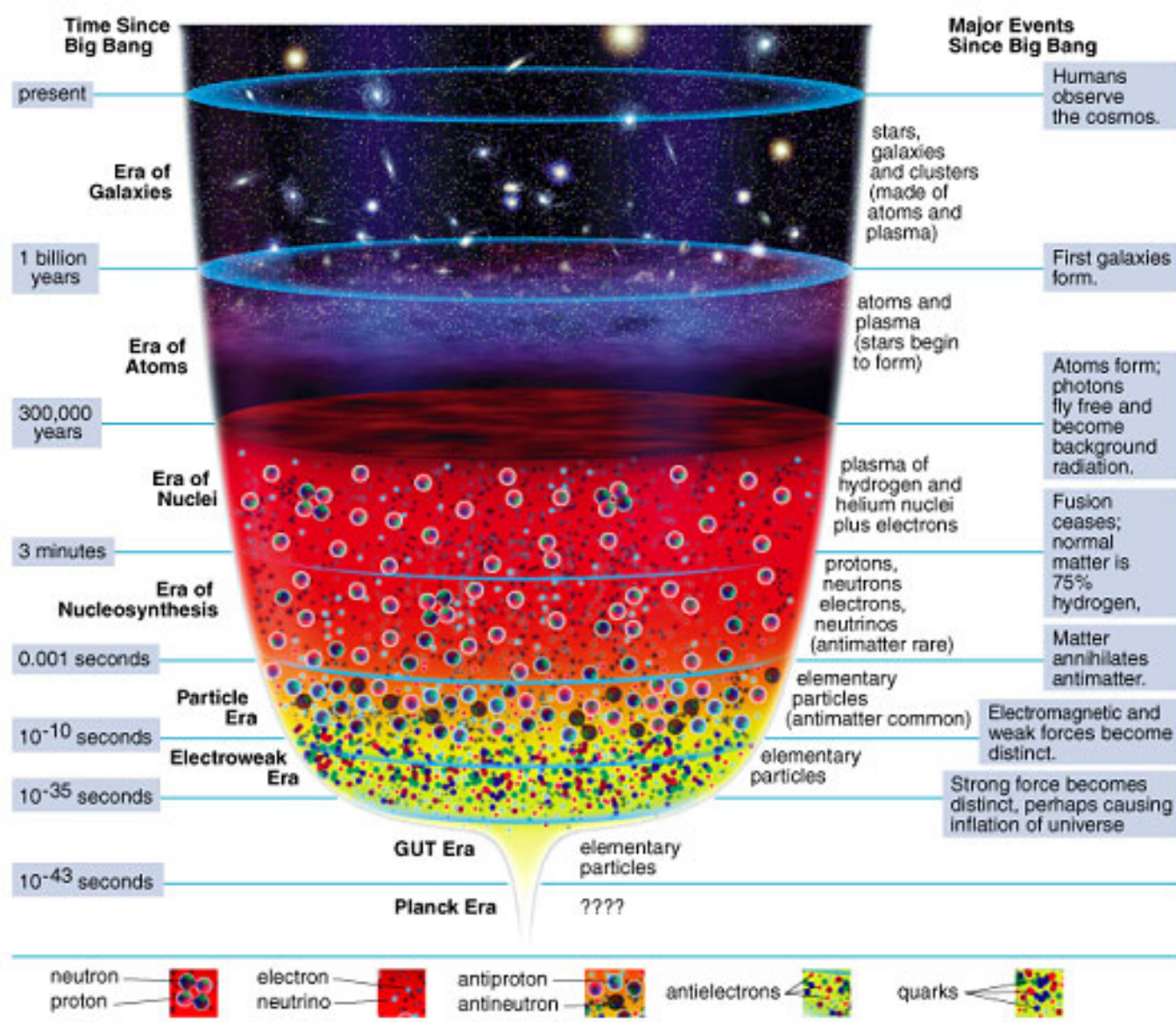


Attention : ici il s'agit d'un Univers en expansion à 2 dimensions dans un Univers préexistant à 3 dimensions et statique.

Vous voulez voir le rayonnement fossile? Allumer la TV et débrancher l'antenne.







↓ Emax accélérateurs

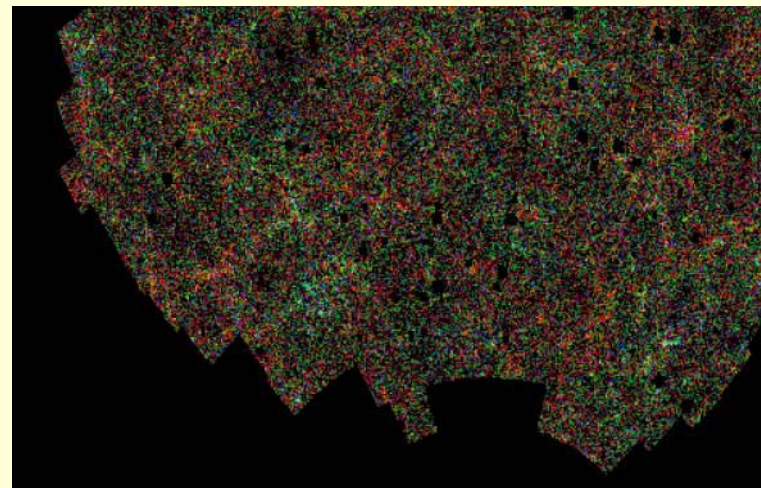
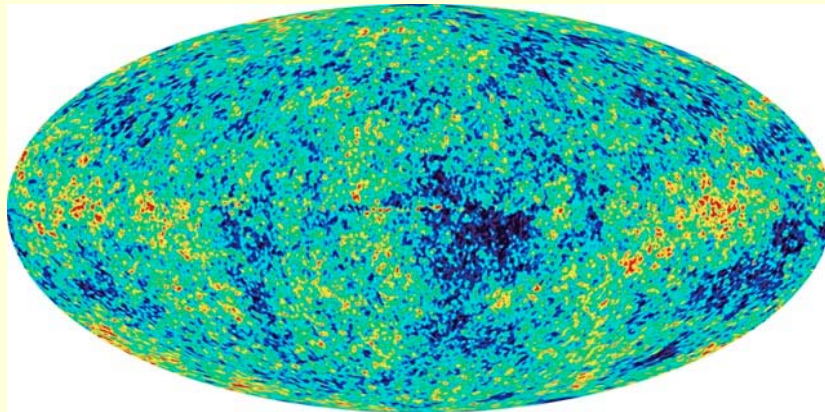
E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^8	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	10^9 ans
							13.7×10^9 ans

Étape 4d - Différence d'évolution apparente entre le rayonnement et la matière

Fluctuations à $t=t_0=13.7$ milliards années

Rayonnement : Fluctuations similaires à $t = 300\,000$ ans

Matière : Fluctuations évanescentes dans la population en galaxies vue à très grande échelle



$2 \cdot 10^9$
années-
lumière

Principe cosmologique : Univers homogène et isotrope

↓ Emax accélérateurs

E(GeV)	10^{14}	100	1	10^{-3}	10^{-9}	10^{-11}	10^{-12}
T (K)	10^{27}	10^{15}	10^{13}	10^8	4000	70	2.7
t	10^{-44} s	10^{-35} s	10^{-10} s	10^{-4} s	200s	3×10^5 ans	13.7×10^9 ans

Et Après ? L'avenir de l'Univers dépend de deux paramètres

Future and geometry of Universe defined by Ω_M and Ω_Λ

~~Ω_r : densité d'énergie venant des radiations (rayonnement et particules relativistes):
Totalement négligeable en t_0~~

Ω_M : densité d'énergie venant de la matière
Plus Ω_M est élevé, plus la gravitation s'oppose à l'expansion de l'Univers.

Ω_Λ : densité d'énergie dont l'effet est similaire à la constante cosmologique d'Einstein, s'opposer à la force de gravitation

