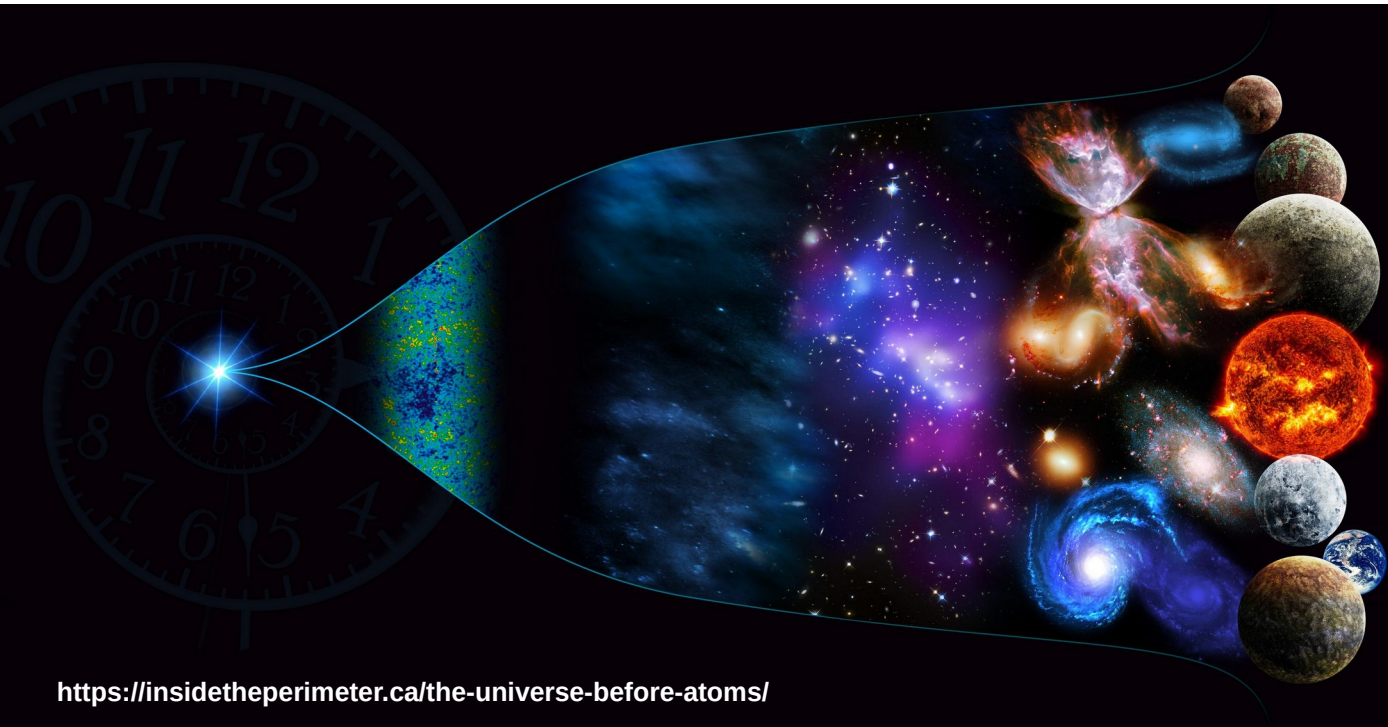


L'histoire de l'Univers

- Rappels
 - La métrique de l'espace-temps
 - Le Big Bang et l'évolution de l'Univers
 - Théorie alternatives au Big Bang
- Et après ?
 - Le multivers
 - Et avant ?
 - Et pourquoi ??



Notions utilisées :
À peu près tout...

Pour une meilleure compréhension,
certaines explications pourront être
légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipédia sauf mention contraire

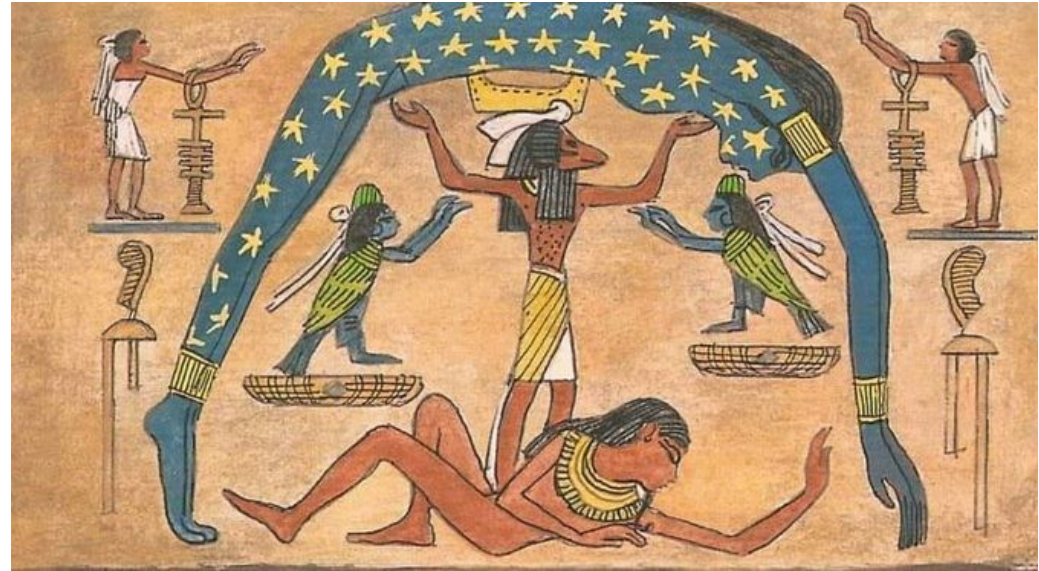
Définitions

Cosmologie

- Du grec
 - κόσμος (cosmos, utilisé pour la première fois par Pythagore) : ordre, organisation de l'Univers
 - λόγος (logos) : étude
- Branche de la physique qui regroupe les études scientifiques portant sur les propriétés de l'Univers dans son ensemble, sa structure

Cosmogonie

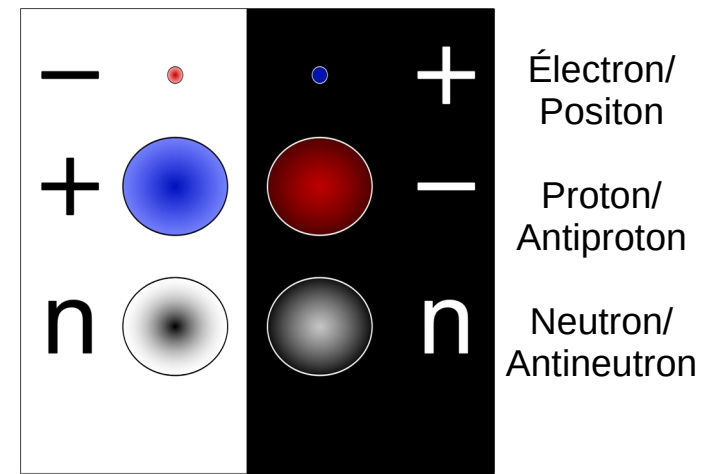
- Du grec γένεσις (genesis) : formation
- Récit mythologique qui décrit / explique la formation du Monde



Cosmogonie égyptienne d'Héliopolis 2

Le « modèle standard »

Particules élémentaires et bosons vecteurs qui composent toute la matière connue



	masse →	charge →	spin →																									
QUARKS	≈2.3 MeV/c ²	2/3	1/2	u	up	≈1.275 GeV/c ²	2/3	1/2	c	charm	≈173.07 GeV/c ²	2/3	1/2	t	top	0	0	1	g	gluon	≈126 GeV/c ²	0	0	0	H	boson de Higgs		
	≈4.8 MeV/c ²	-1/3	1/2	d	down	≈95 MeV/c ²	-1/3	1/2	s	strange	≈4.18 GeV/c ²	-1/3	1/2	b	bottom	0	0	0	γ	photon								
	0.511 MeV/c ²	-1	1/2	e	électron	105.7 MeV/c ²	-1	1/2	μ	muon	1.777 GeV/c ²	-1	1/2	τ	tau	91.2 GeV/c ²	0	0	1	Z ⁰	boson Z ⁰							
	<2.2 eV/c ²	0	1/2	ν _e	neutrino électronique	<0.17 MeV/c ²	0	1/2	ν _μ	neutrino muonique	<15.5 MeV/c ²	0	1/2	ν _τ	neutrino tauique	80.4 GeV/c ²	±1	1	1	W [±]	boson W [±]							

BOSONS DE JAUGE

Ne sont pas représentés :

- Les **antiparticules** des quarks et des leptons (charge opposée)
- Le **graviton** (hypothétique)

Théorie :

- Théorie **électrofaible** (inclut électrodynamique quantique)
- **Chromodynamique** quantique = description des 3 forces par la **physique quantique**

Les forces fondamentales

Elles gouvernent les **interactions** entre les particules

Elles sont transmises par des « **bosons vecteurs** »

Interaction	Théorie courante	Médiateurs	Masse (GeV/c ²)	Puissance relative approximative	Rayon d'action (m)	Dépendance de distance
Forte	Chromodynamique quantique (QCD)	huit gluons	0	1	$2,5 \times 10^{-15}$	$\frac{1}{r^7}$
Électromagnétique	Électrodynamique quantique (QED)	photon	0	10^{-2}	∞	$\frac{1}{r^2}$
Faible	Théorie électrofaible	W^+ , W^- , Z^0	80, 80, 91	10^{-5}	10^{-18}	$\frac{1}{r^5}$ à $\frac{1}{r^7}$
Gravitation	Relativité générale	graviton (postulé)	0	10^{-40}	∞	$\frac{1}{r^2}$

Unités de Planck

- Longueur (ou échelle) de Planck = **limite d'indiscernabilité entre 2 points** :

$$l_P = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-35} \text{ m}$$

- Temps de Planck = temps mis par un photon pour parcourir la longueur de Planck dans le vide (**plus petit temps ayant une signification**)

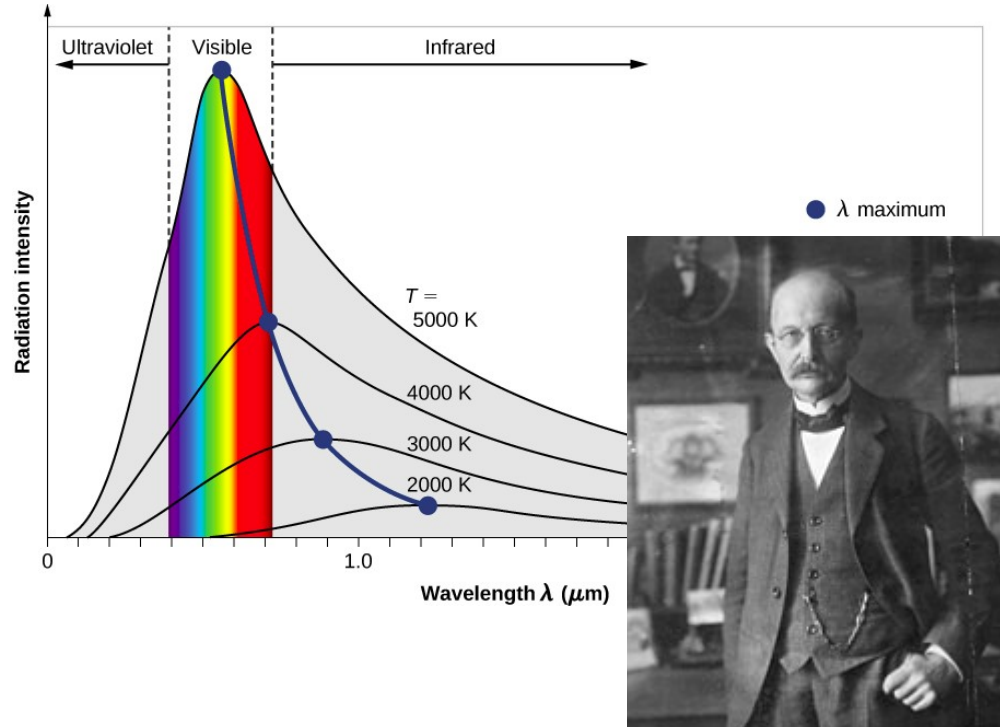
$$t_P = \frac{l_P}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5,4 \times 10^{-44} \text{ s} \approx 10^{-43} \text{ s}$$

- Énergie de Planck : **énergie d'un photon** dont $\lambda = l_P$

$$E_P = \sqrt{\frac{c^5 \hbar}{G}} \approx 2 \times 10^9 \text{ J} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

- Température de Planck = T_P du **corps noir** dont le maximum d'émission a pour longueur d'onde $\lambda = l_P$

$$T_P = \sqrt{\frac{\hbar c^5}{G k_B^2}} = 1,4 \times 10^{32} \text{ K}$$



Limites fondamentales des théories physiques actuelles :
plus petites/grandes valeurs
ayant une signification physique

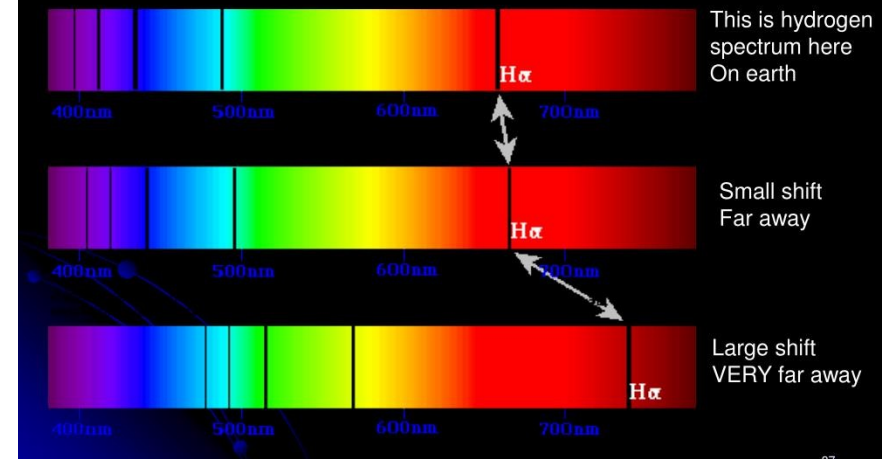
Noter la présence de \hbar (constante de Planck, MQ) et G (gravitation, RG)

Le Big Bang

- **Modèle cosmologique** (le mieux accepté aujourd'hui) décrivant **l'origine** et **l'évolution** de l'Univers
- 1915 : la relativité générale fournit un modèle global de description de l'Univers
 - → « Univers d'Einstein » fermé, **homogène** et **isotrope** mais ... **statique** (**constante cosmologique** pour contrebalancer l'attraction gravitationnelle)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Proposé en 1927 par George Lemaître (astrophysicien et chanoine belge)
 - (Équations de Friedmann en 1922)



- 1929 : Hubble mesure un décalage vers le rouge dans toutes les directions proportionnel à la distance des galaxies

Travaux de V. Slipher en 1917

- → **loi de Hubble-Lemaître** : « les galaxies s'éloignent les unes des autres à une vitesse ~ proportionnelle à leur distance » :

$$v = H_0 \cdot d$$

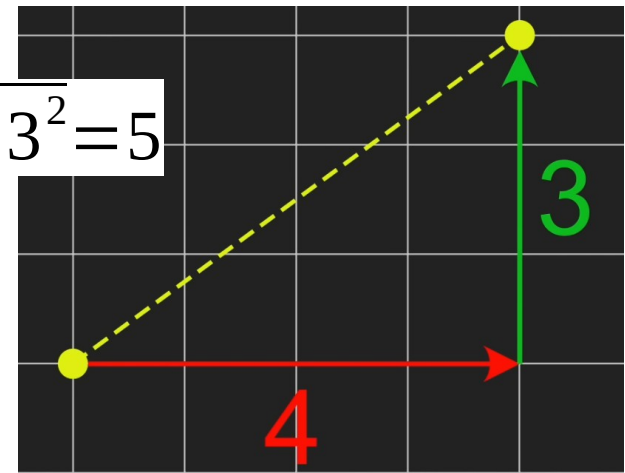
$$H_0 = 67,4 \pm 0,5 \text{ km/s/Mpc}$$

= « **constante de Hubble** »

Si on remonte le temps, convergence vers un « point » initial

La métrique

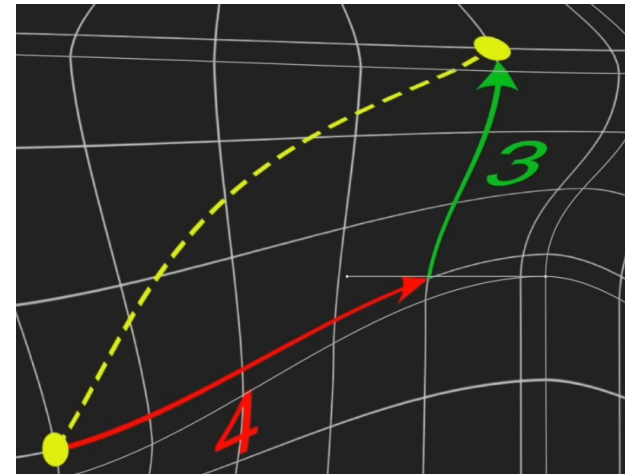
$$D = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$$



- La métrique indique **comment mesurer la distance entre 2 points**
 - Ici, le théorème de Pythagore donne D

- Relativité générale : la **matière et l'énergie** « **courbent** » l'espace-temps
- = courbure « **intrinsèque** », ≠ courbure « extrinsèque » dans un espace plus grand
- La **métrique** permet de calculer la nouvelle distance : les points sont toujours aux **mêmes coordonnées (4, 3)** mais la **distance a changé !**
 - Il faut adapter le théorème de Pythagore

$$D = \sqrt{\alpha \cdot 4^2 + \beta \cdot 3^2} \neq 5$$



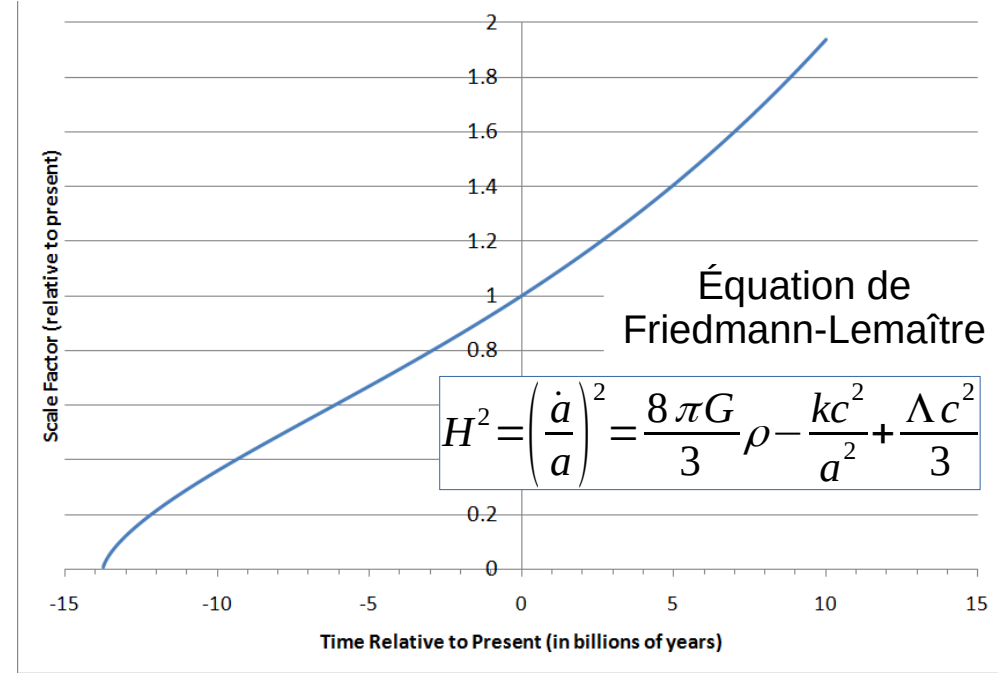
Le facteur d'échelle

- La **métrique de l'Univers**

- Georges Lemaître, 1927
- Univers **homogène, isotrope** (à grande échelle) → **métrique constante** « de Friedmann–Lemaître–Robertson–Walker »
- = « **facteur d'échelle** », qui mesure **l'évolution de la distance** entre deux objets (très distants) due à l'expansion de l'Univers :

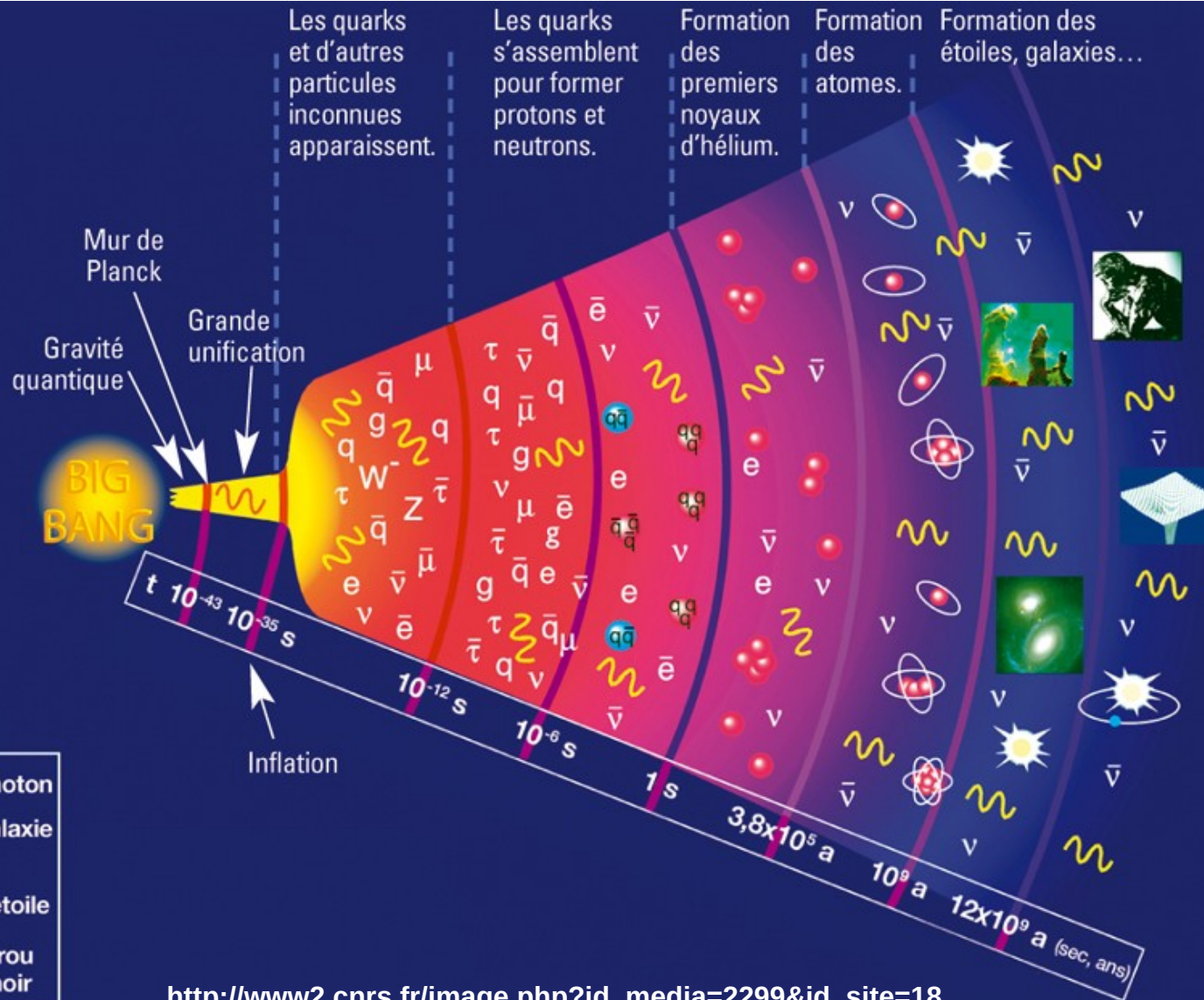
$$D = \sqrt{\alpha \cdot \Delta x^2 + \beta \cdot \Delta y^2}$$

$$\longrightarrow D = a(t) \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$



- Le Big Bang n'est pas une explosion dans l'espace mais une explosion de l'espace
- Il a eu lieu **partout à la fois** (émission du rayonnement fossile, par exemple)
→ l'Univers n'a **pas de centre**
- Âge de l'Univers : $13,77 \pm 0,040$ milliards d'années
- La vitesse d'éloignement des objets peut **dépasser c**

Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.



Légendes		W, Z bosons	photon
q quark	meson	galaxie	
g gluon	baryons	étoile	
e électron	ions	trou noir	
μ muon	atome		
τ tau			
ν neutrino			

http://www2.cnrs.fr/image.php?id_media=2299&id_site=18

Chronologie (1)

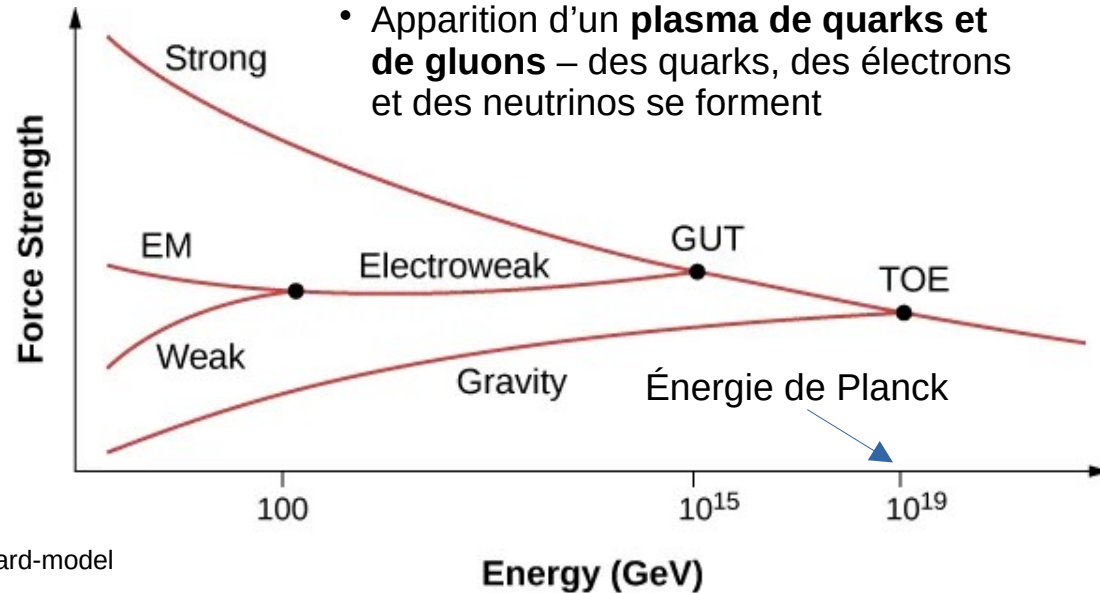
Notes :

plus on remonte dans le temps,
plus les éléments sont spéculatifs

Certains éléments ont été simplifiés

- $t < 10^{-43}$ s : Ère de Planck ($T = 10^{32}$ K)
 - 4 forces unifiées → **Théorie du tout** (T.O.E)
- 10^{-43} s – 10^{-35} s : ère de la **grande unification**
 - Découplage de la force gravitationnelle
 - **Forces électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte unifiées**
 $T = 10^{27}$ K
 - → **Grand Unification Theory** (GUT)

- 10^{-35} s – 10^{-12} s : ère **électrofaible**
 - Forces électromagnétique et faible unifiées : interaction « **électrofaible** »
 - Phases :
 1. Ère de **l'inflation** 10^{-36} s – 10^{-32} s
→ l'Univers grandit d'un **facteur 10^{26}** !
 2. Ère du **réchauffement**
 - « Énergie de l'inflat(i)on → Énergie thermique »
 - Apparition d'un **plasma de quarks et de gluons** – des quarks, des électrons et des neutrinos se forment



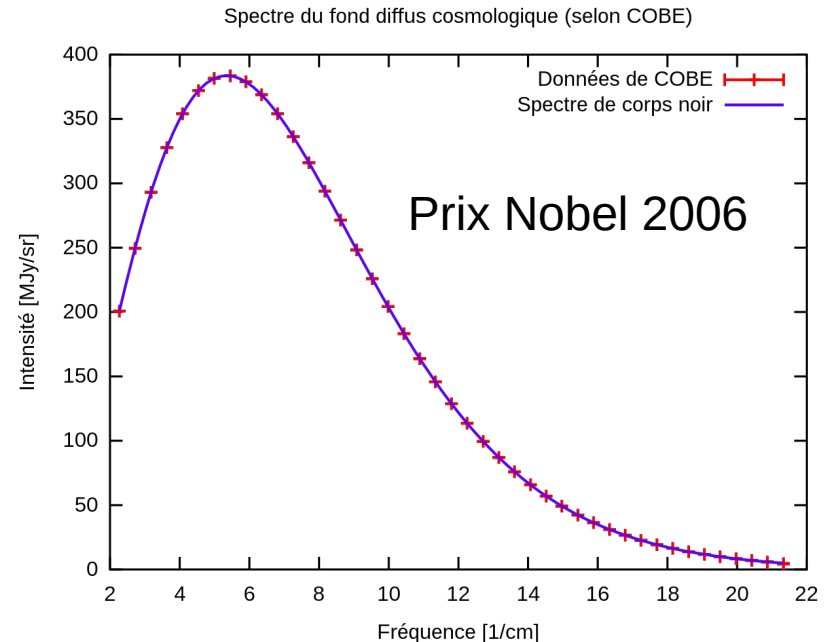
Chronologie (2)

- 10^{-12} s – 10^{-6} s : ère des **quarks**
 - **Séparation des forces électromagnétique et faible** : les 4 forces ont leur forme actuelle
 - **Acquisition de masse** par les particules élémentaires (« mécanisme de Higgs »)
 - température de l'Univers encore **trop élevée** pour permettre la **liaison des quarks en hadrons** (3 quarks : p, n, ...)
- 10^{-6} s – 1 s : ère **hadronique**
 - Refroidissement du QGP → **formation de hadrons** = fin des annihilations hadrons / anti-hadrons
 - Rappel : Énergie ↔ particule + antiparticule
 - 1 s : **découplage des neutrinos**
- 1 s – 10 s : ère des **leptons**
 - Fin des annihilations leptons-antileptons
- 10 s – 380 000 ans : ère des **photons**
 - **Nucléosynthèse primordiale (entre 3 et 20 min)**
 - Formation de **noyaux atomiques** par fusion nucléaire → 75% d'H, 25% d'He⁴ : vérifié !
 - **Déséquilibre matière / antimatière** inexplicable : ~ 1 sur 1 milliard (10^{-9}) = « **asymétrie baryonique** »
 - 3000 K : Recombinaison des noyaux et des électrons → atomes neutres
 - → Univers **transparent**
 - → « découplage du rayonnement EM » – photons émis tjs visibles aujourd'hui = « **fond diffus cosmologique** »

Le fond diffus cosmologique

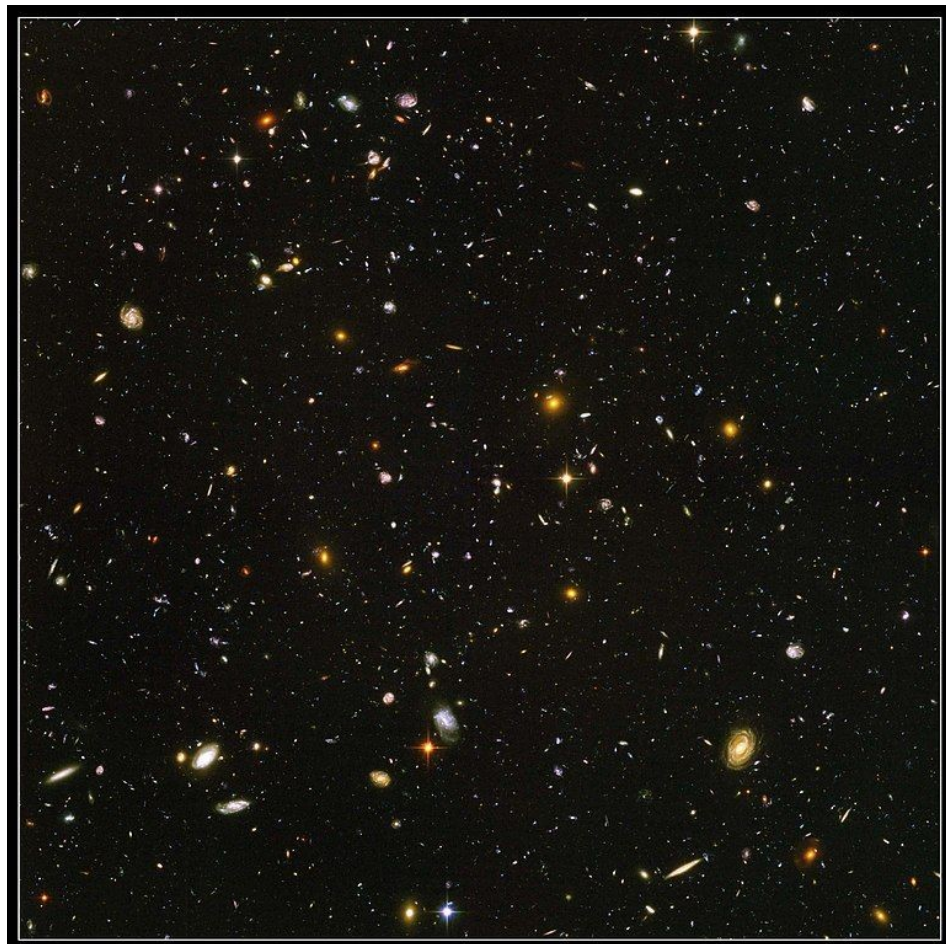
Stephen Hawking : « [C'est] la découverte la plus importante du siècle, si ce n'est depuis toujours »

- Ou CMB pour « **Cosmic Microwave Background** »
- **Rayonnement électromagnétique très homogène**
 - observé dans **toutes les directions** du ciel
 - pic d'émission dans les **micro-ondes**
 - « **diffus** » car il ne provient pas de sources localisées
 - « **cosmologique** » car il est présent dans tout l'Univers
- Émis il y a **380 000 ans = plus vieille image électromagnétique** de l'Univers
- Présente d'infimes « **anisotropies** » (de T_p et d'intensité), qui donnent des **informations sur la structure, l'âge et l'évolution de l'Univers** (distances 1000 fois plus faibles qu'aujourd'hui)
- Ces **fluctuations** correspondent aux graines qui ont permis **la formation des galaxies**
- Prévu dès 1948 et découvert « par hasard » (bruit perturbant impossible à éliminer) en 1964 par Penzias et Wilson (prix Nobel 1978)
- **Température = 2,728 K**



Chronologie (3)

- 380 000 ans – ? : **âges sombres**
 - entre l'émission du fond diffus cosmologique et l'allumage de la **première génération d'étoiles**
 - aucun processus astrophysique ne produit de rayonnement électromagnétique → **aucun moyen de sonder l'état de l'Univers à cette époque**
 - Mais le ciel n'était **pas noir** : $T = \sim 3000$ K au départ → **forte luminosité** dans toutes les directions
 - Puis refroidissement : rayonnement → infra-rouge → le ciel devient froid et noir
- ? – ~ 100 Ma : **formation des structures**
 - Étoiles (~ 150 Ma), galaxies (~ 180 -700 Ma)
 - Puis gravitation → groupes, amas, superamas
 - Fin réelle des âges sombres vers 1 Ga
- 8 Ga : formation de notre Système solaire
 - Étoile de **génération tardive** (incorpore des **débris** des **générations antérieures d'étoiles**)

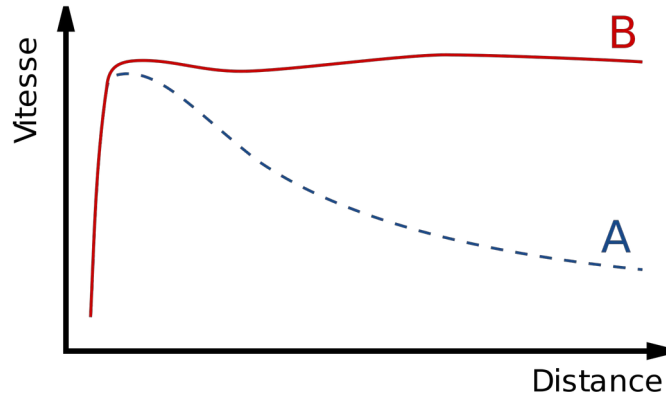


Les ~ 100 galaxies les plus petites et les plus rouges sont les plus lointaines observées par un télescope optique. Elles existaient quand l'Univers avait juste 800 millions d'années.
(Hubble, NASA)

La matière noire

Candidats

- Matière **hypothétique** invoquée pour expliquer certaines observations :
 - **Rotation des galaxies spirales** (B) en désaccord avec les lois de Newton (A) (Fritz Zwicky, années 30, Vera Rubin, années 70)
 - Masse « **lumineuse** » \ll masse « **dynamique** »
 - Interagit peu/pas avec la matière ordinaire
→ matière ~ invisible = « **matière noire** »
 - Représente la **majorité de la masse des galaxies**
 - Propriétés des **fluctuations du FDC**



- Matière **ordinaire** (baryonique, 3 quarks) :
 - Nuages de **gaz** (pas assez massifs)
 - **MACHO** (Massive Compact Halo Objects) : naines blanches et brunes, étoiles à neutrons, trous noirs
- Matière **non ordinaire**
 - **Neutrinos** (masse insuffisante)
 - **WIMP** (Weakly Interacting Massive Particles) : neutralino (SuSy)
- Autres hypothèses (sans matière)
 - Il existe des **masses négatives**
 - **Théorie MOND** (MOdified Newtonian Dynamics, « dynamique newtonienne modifiée » pour les très faibles valeurs → $1/r$)
- Pas de réponse définitive à ce jour...

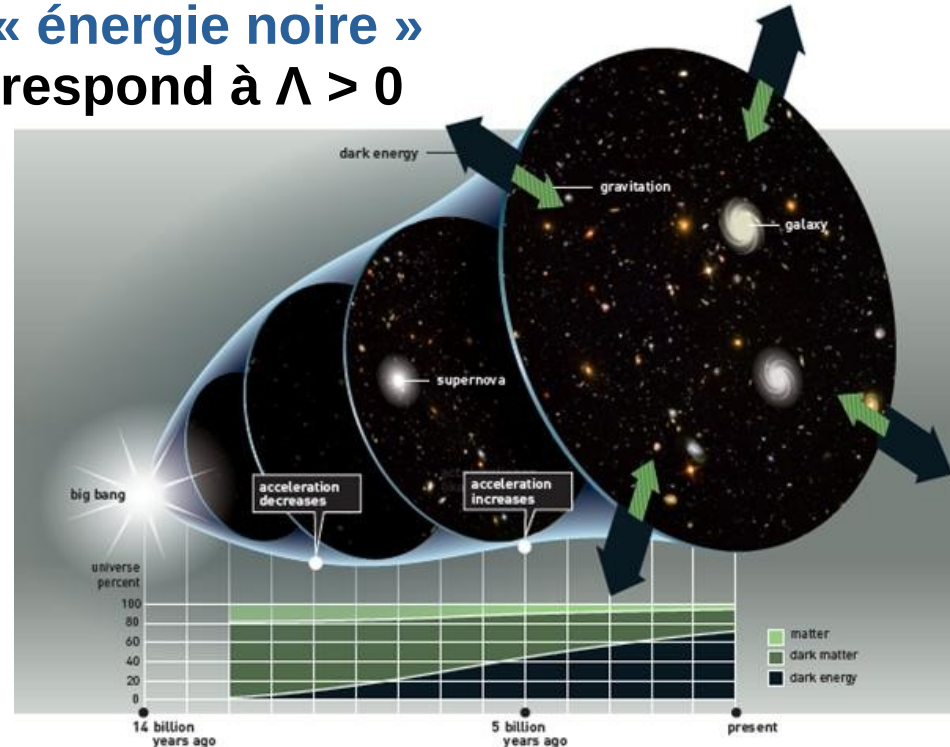
La constante cosmologique

Équation d'Einstein (1915-1917) :

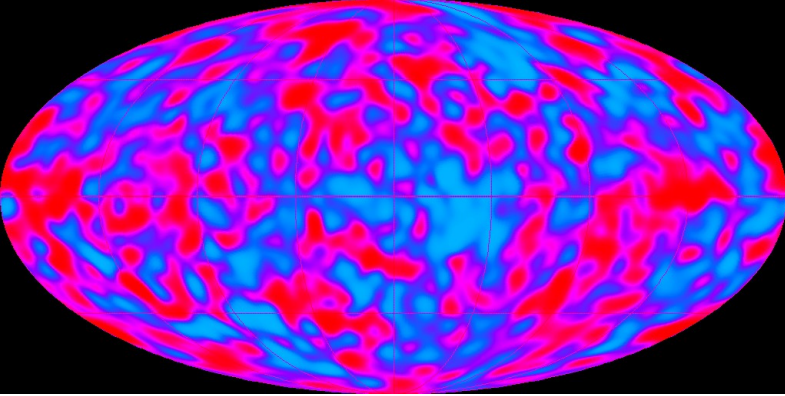
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

- Introduite (avec une valeur très particulière) par Einstein en 1917 pour garder un Univers **statique** car, sans, la RG implique un **Univers dynamique**
 - « La plus grande bêtise de ma vie »
- 1931 : Einstein accepte l'expansion de l'Univers → **propose $\Lambda = 0$**
- Mais, en 1998, découverte de **l'accélération de l'expansion l'Univers !**
 - Prix Nobel de physique 2011 (Perlmutter, Schmidt, et Riess)

- Les galaxies distantes **s'éloignent de plus en plus vite** de nous
 - interprétation : « **anti-gravité** » associée à une **pression négative**
 - « **énergie noire** »
- Correspond à $\Lambda > 0$**

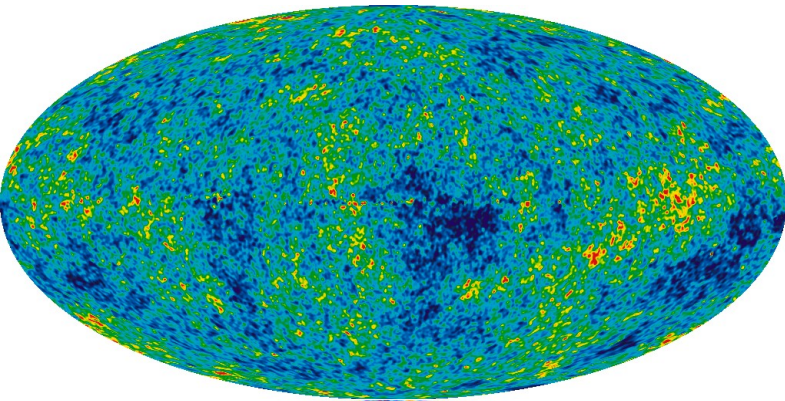


Analyse du FDC



1. 1992 : 2 ans de données du satellite **COBE** (COsmic Background Explorer, 1989) :

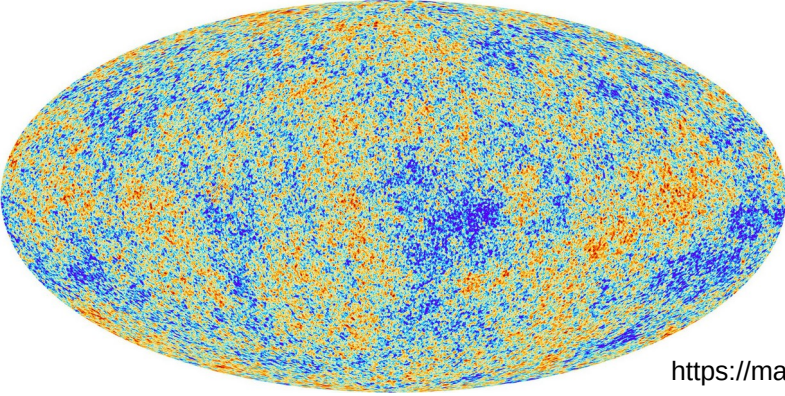
- **Forme exacte** du fond diffus cosmologique et existence des **fluctuations** de température inconnues → Prix Nobel 2006



2. 2012 : 9 ans de données de **WMAP** (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001, NASA)

3. 2013 : observations du satellite **Planck** (ESA, 2009)

- Buts : (1) améliorer la précision des mesures de WMAP, (2) mesurer avec précision certains paramètres cosmologiques et (3) vérifier certaines hypothèses des modèles d'inflation
- **Composition de l'Univers** : 4,9 % de matière ordinaire, 26,6 % de matière noire, 68,5 % d'énergie noire
- **Constante de Hubble** revue à la baisse : $67,4 \pm 0,5$ km/s/Mpc
- **Anisotropie très faible** : $\sim 10^{-5}$: liée à la **densité de matière primordiale** et la formation des étoiles & galaxies : confirme la phase **d'inflation** (sinon anisotropie bcp plus importante)



Théories alternatives

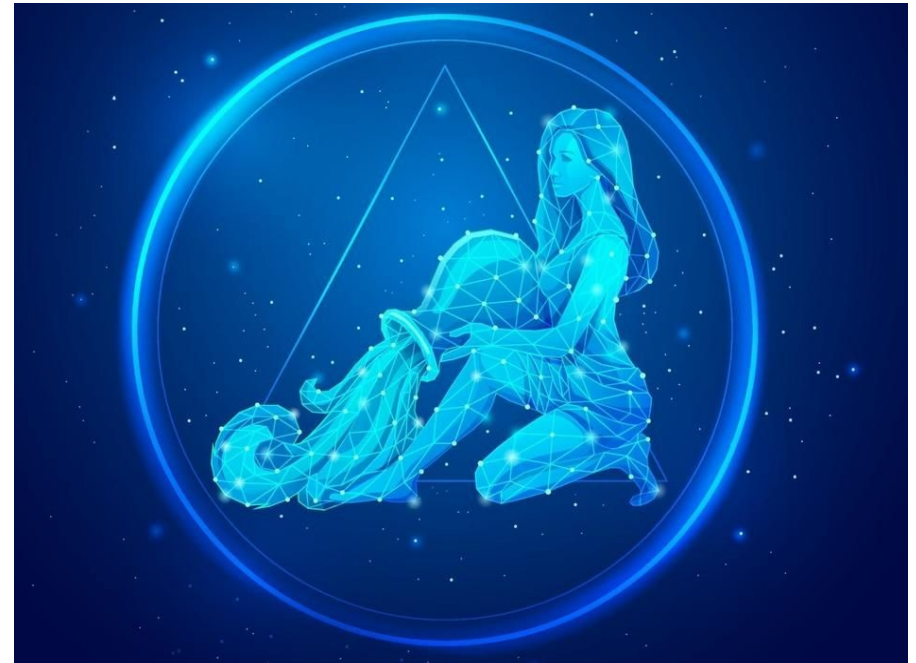
- **L'Univers n'est pas en expansion**

- Théorie de la « **lumière fatiguée** » : décalage vers le rouge causé par une **perte d'énergie des photons** (F. Zwicky)
- Mais en **contradiction avec les observations du FDC**

- **L'Univers est bien en expansion mais**

- **création continue de matière** qui contrebalance la dilution due à l'expansion : Univers « **stationnaire** »
- Intérêt de ce modèle : Univers éternel et immuable (dans les années 1940, l'Univers semble plus jeune que la Terre car taux d'expansion surestimé)

- Mais contradiction avec les observations
 - Fond diffus cosmologique (période chaude)
 - Abondances relatives des éléments légers (H, He, Li)



Et après ?

- Évolution décrite par a (facteur d'échelle)
- Elle dépend de :
 - ρ : densité d'énergie (et masse)
 - k : courbure de l'espace-temps
 - Λ : constante cosmologique (~pression négative)

Équation de Friedmann-Lemaître

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{\Lambda c^2}{3}$$

« Problème de la platitude »

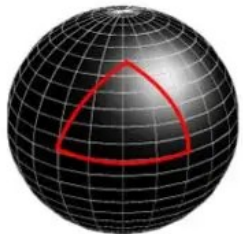
- On définit la « densité critique » ρ_c
 - (~ différence expansion, contraction, arrêt)
 - $\rho_c \approx 6$ atomes (H) par mètre cube
 - $\Omega = \rho/\rho_c$: **paramètre de densité** (rayonnement + matière (baryonique et noire) + énergie noire + courbure spatiale)

Planck : Aujourd'hui, $\Omega \approx 1$:

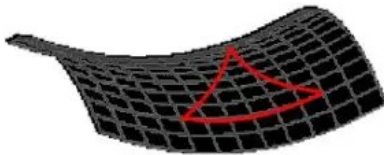
$$\Omega_m \approx 0,3, \Omega_\Lambda \approx 0,7, \Omega_k \approx 0$$

Valeur et composition de Ω
→ **évolution de l'Univers**

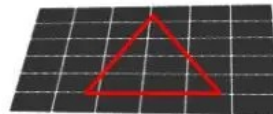
Elliptical (spherical) geometry, $\kappa > 0$



Hyperbolic geometry, $\kappa < 0$



Euclidean (flat) geometry, $\kappa = 0$



Et après ?

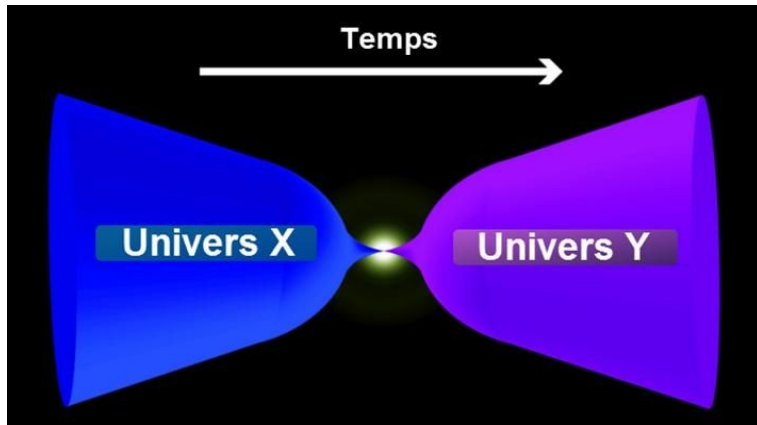
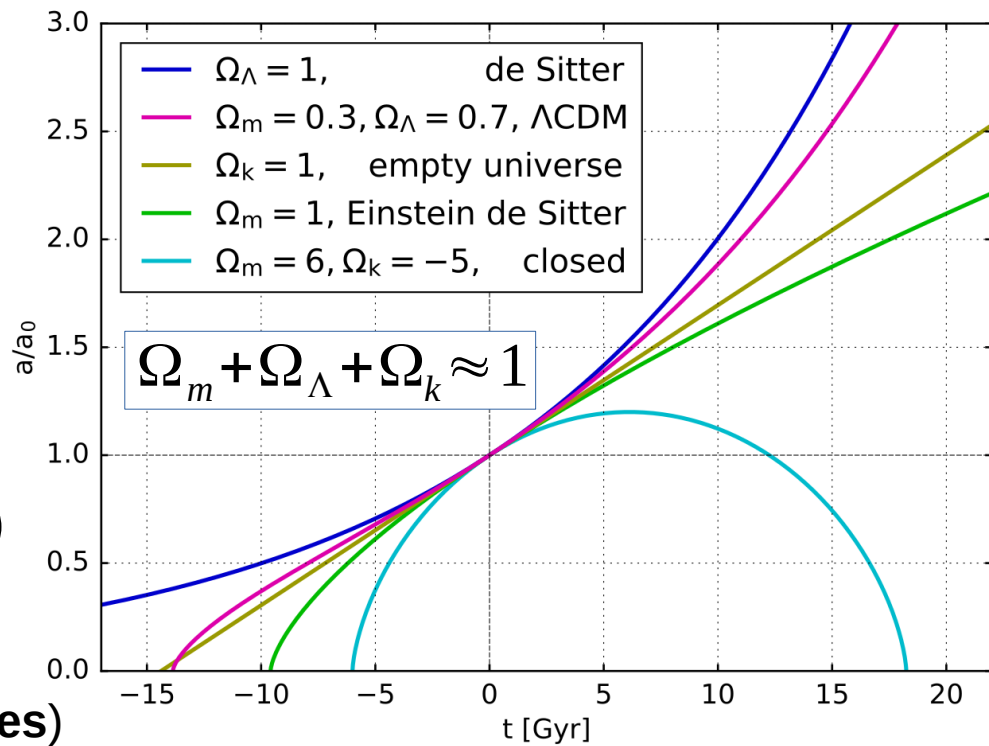
3 scénarios principaux ($\Omega \approx 1$),
selon la répartition entre Ω_m , Ω_Λ , Ω_k

1. Mort thermique (« Big Freeze »)

- Éloignement des étoiles, consommation de l'hydrogène, l'Univers devient froid et sombre

2. Effondrement terminal (« Big Crunch »)

- Contraction vers une « singularité »
- **Grand rebond** (« Big Bounce »), pulsation ?
(Prévu par la cosmologie quantique à boucles)



3. Grand déchirement (« Big Rip »)

- Si l'énergie noire est une énergie « fantôme » (dont la densité **augmente avec l'expansion de l'Univers**) → expansion infinie qui **dépasse toutes les forces de cohésion** : tout est *in fine* « déchiré », des amas de galaxie aux particules élémentaires...

Le(s) multivers

= Ensemble de tous les univers



- Plusieurs théories (non « falsifiables »)

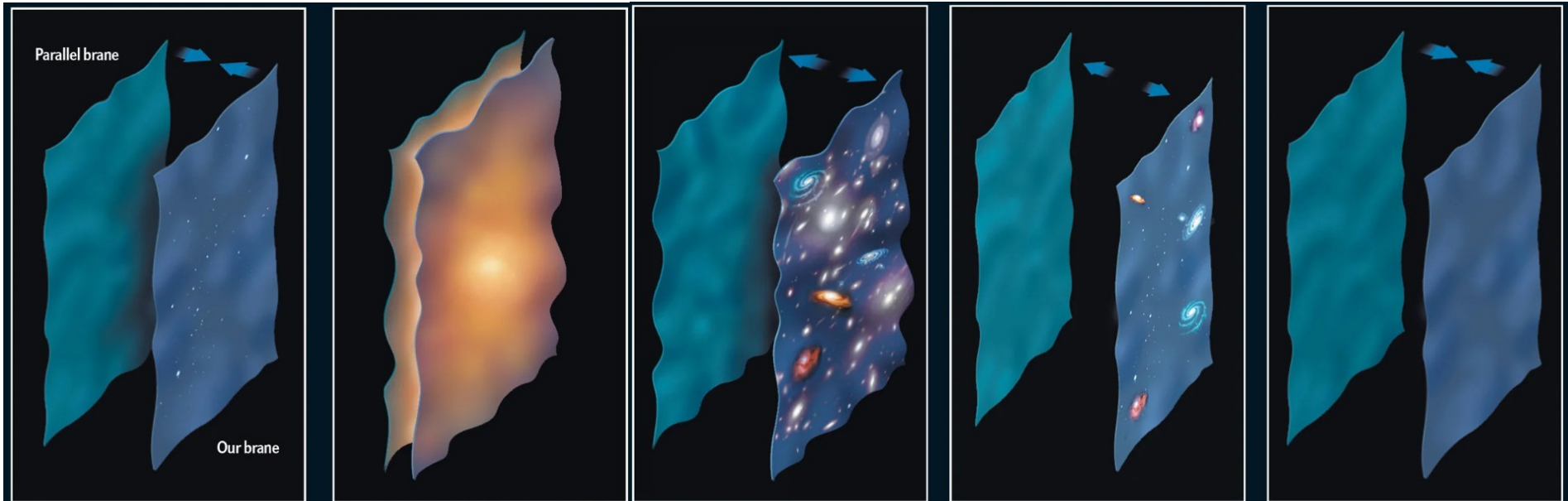
1. Univers observable \ll Univers entier : possibilité de nombreux (∞ ?) univers **au-delà de l'« horizon cosmologique »** (mêmes lois φ)
2. Théorie de l'**inflation éternelle** : l'inflation ne s'arrête que **localement**, elle se poursuit à d'autres endroits : **univers-bulles** (lois φ différentes)
3. Théorie des **mondes multiples** (physique quantique, Everett) : **division du monde à chaque observation** \rightarrow univers « **parallèles** » (ramifiés) **dans notre espace-temps**
 - S'applique aux deux premiers modèles...
4. **Tout ce qu'il est possible d'imaginer / de modéliser par les mathématiques**
 - **Platonisme (ou réalisme) mathématique** : les objets sont des **entités autonomes** et pas des artefacts de l'esprit humain, des abstractions
 - Inclut les possibilités précédentes...

- Explications de certains phénomènes :

- Fentes de Young : lorsqu'un photon unique traverse une fente, il interfère avec un **photon d'un monde parallèle** qui passe par l'autre fente
- Accélération de l'expansion de l'univers due à l'**attraction gravit. d'univers extérieurs au nôtre**
- **Principe totalitaire** de Gell-Mann :
« Tout ce qui n'est pas interdit est obligatoire »
 - Selon ce principe, même l'événement le plus improbable finira par se produire
- \rightarrow paradoxe de Fermi sur les extraterrestres

Et avant ?

- Certaines théories de la gravité quantique (comme l'équation de Wheeler-DeWitt) impliquent que le temps est une **propriété « émergente »** (comme la T_p), c'est-à-dire que **le temps n'existait pas avant le Big Bang**
- Modèle de Hartle-Hawking : le temps **diverge de l'espace** à la fin de l'ère de Planck, il était auparavant « **imaginaire** » (nombre « complexe »)
- Scénario **ekpyrotique** (du grec ἐκπύρωσις, « embrasement ») : notre Univers serait situé sur une « **D3-brane** » dans un **super-univers de dim. supérieure**. Le Big Bang serait un **échange d'énergie lors du contact de deux branes**. Notre Univers pourrait en avoir subi plusieurs...



Two nearly empty branes pull each other together. Each is contracting in a direction perpendicular to its motion.

The branes collide, converting their kinetic energy into matter and radiation. This collision is the big bang.

The branes rebound. They start expanding at a decelerating rate. Matter clumps into structures such as galaxy clusters.

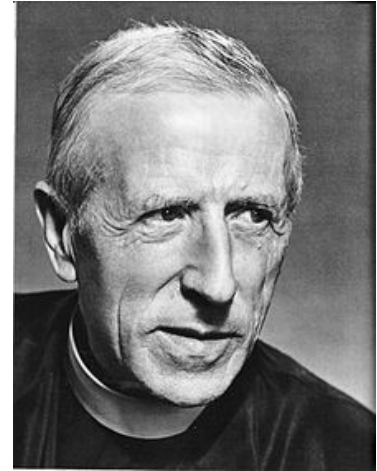
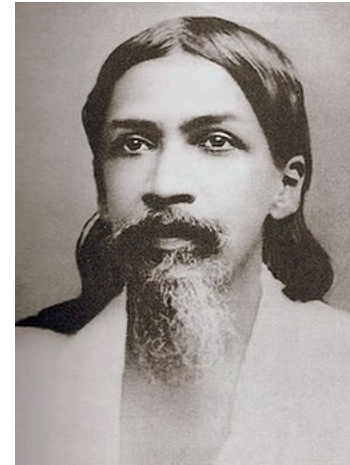
In the cyclic model, as the branes move apart, the attractive force between them slows them down. Matter thins out.

The branes stop moving apart and start approaching each other. During the reversal, each brane expands at an accelerated rate.

Et pourquoi ??

« Ce qui m'intéresse vraiment, c'est de savoir si Dieu aurait pu faire le monde différemment ; autrement dit, si l'exigence d'une simplicité logique admet une marge de liberté. »

- **Principe anthropique (fort)** (Brandon Carter 1973) :
 - Les **paramètres fondamentaux de la matière**, qui donnent ses **propriétés à l'Univers**, sont réglés pour qu'il permette **l'apparition d'observateurs** à un certain stade de son développement.
 - Exemple : **densité de l'Univers primordial** très proche de la densité critique ($\sim 10^{-62}$ car augmentation d'un facteur 10^{60} entre notre époque actuelle (10^{17} s) et l'ère de Planck (10^{-43} s))
- **Question de l'intention**
 - du latin *intendere*, tendre vers : disposition d'esprit par laquelle on se propose délibérément un but ; ce but lui-même
 - **Téléonomie** : conception selon laquelle s'exerce, tout au long de l'évolution, une finalité de nature purement mécanique, tenant à la mise en œuvre par les êtres vivants du projet dont ils sont dotés
 - Brahman en Inde, Tao en Chine
 - On reconnaît l'intention dans une montre, pourquoi pas dans une fleur ?



- **Point Oméga** de Teilhard de Chardin : **point ultime du développement** de la complexité et la conscience, mais **également sa cause**
 - Éternel, personnel, transcendant, indépendant, irréversible
- Supramental de Sri Aurobindo

Pour aller plus loin

- Big bang et évolution de l'Univers (science étonnante)
 - <https://scienceetonnante.com/2015/04/13/cosmologie-1-le-big-bang/>
 - <https://scienceetonnante.com/2015/05/11/cosmologie-2-forme-et-destin-de-lunivers/>
 - <https://scienceetonnante.com/2015/07/06/cosmologie-3-la-constante-cosmologique/>
 - <https://www.youtube.com/watch?v=lms2jQeHnVs>
 - https://www.youtube.com/watch?v=_kO2kp9je5o
- Matière noire :
 - https://www.youtube.com/watch?v=M5X_ljxm2bw
 - En anglais : <https://www.youtube.com/watch?v=5EBgo6rVsCk>
- Multivers :
 - <https://www.youtube.com/watch?v=37M2Cv5RZsM>
 - En anglais : <https://www.youtube.com/watch?v=2bZi3Xm9tJE>
- Wikipédia :
 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Futur_d%27un_univers_en_expansion
 - https://fr.wikipedia.org/wiki/Chronologie_du_futur_lointain
- Fin du film « Men in Black », (Barry Sonnenfeld, 1997) : <https://www.youtube.com/watch?v=OKnpPCQyUec>