

Cours de cosmologie: Troisième partie

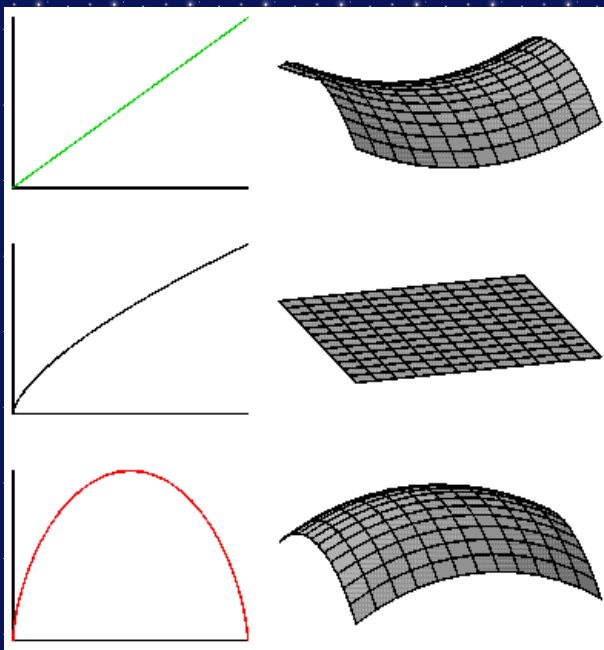
Adapté librement par Jacques Fric du cours de Cosmologie du Pr Edward Wright (avec son aimable autorisation) janvier 2014

Courbure spatiale, « platitude », âge, horizon,  
inflation, anisotropie inhomogénéités

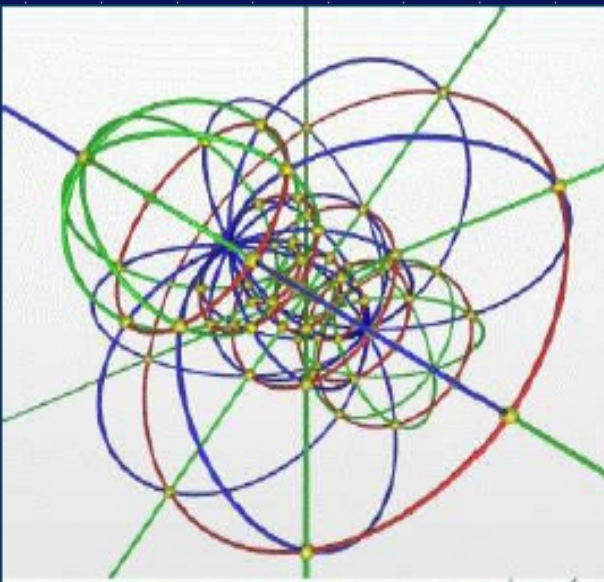
---

---

# Courbure Spatiale



Géométrie représentée en 2D



Hypersphère

Une conséquence de la Relativité est que la courbure de l'espace dépend du rapport  $\rho/\rho_{crit} = \Omega$ . Rappelons que  $\rho$  peut être constitué de différentes composantes ayant des comportements différents vis à vis de l'expansion. La dilution peut être en  $a^{-3}$  (poussière),  $a^{-4}$  (lumière) ou  $a^0$  (pas de dilution: constante cosmologique). Dans le modèle  $\Lambda$ CDM au début l'univers a été dominé par la lumière puis la poussière a pris le relais au de 150 000 ans environ et enfin l'énergie noire est dominante (et le sera de plus en plus) depuis 4 milliards d'années environ.

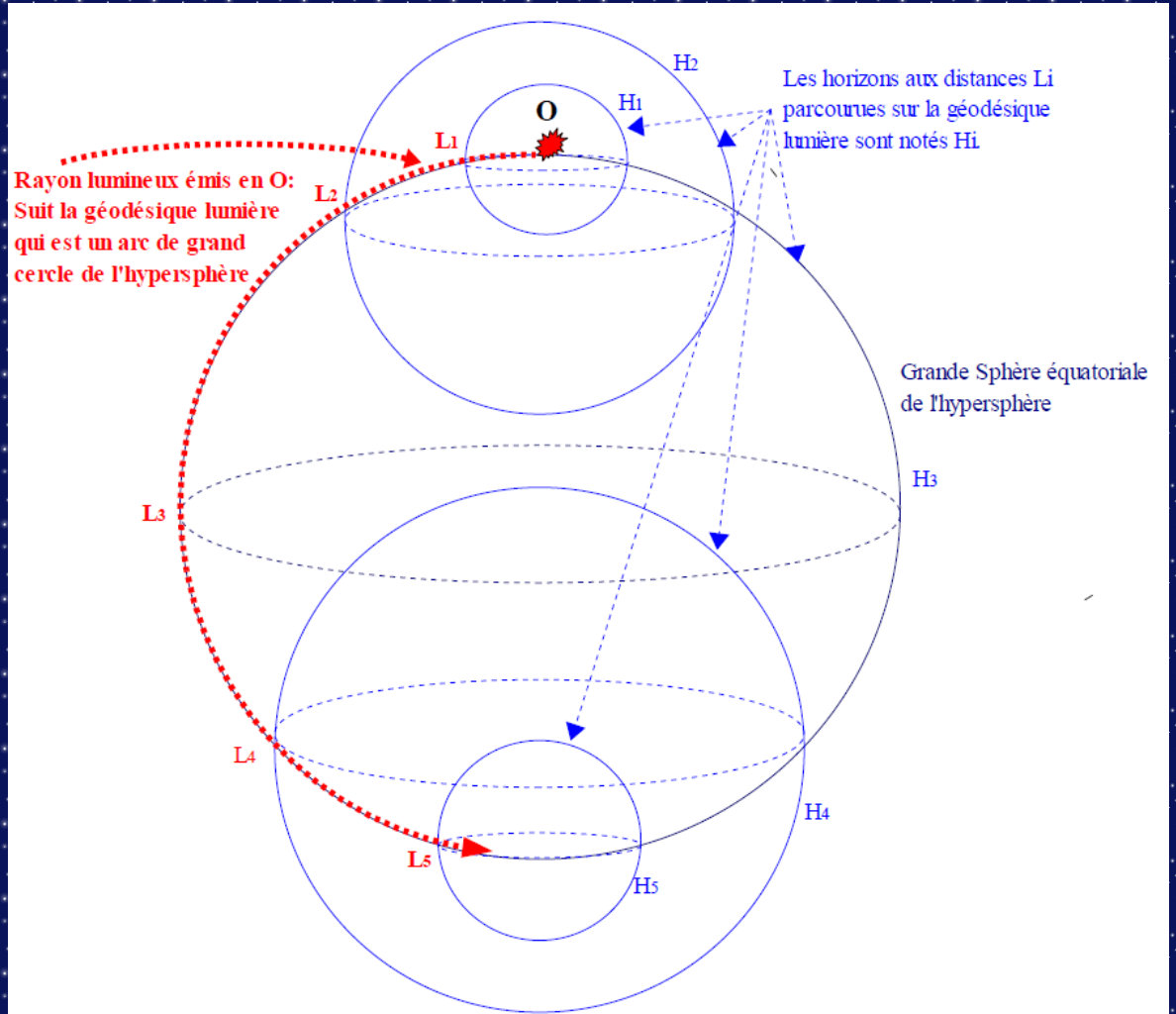
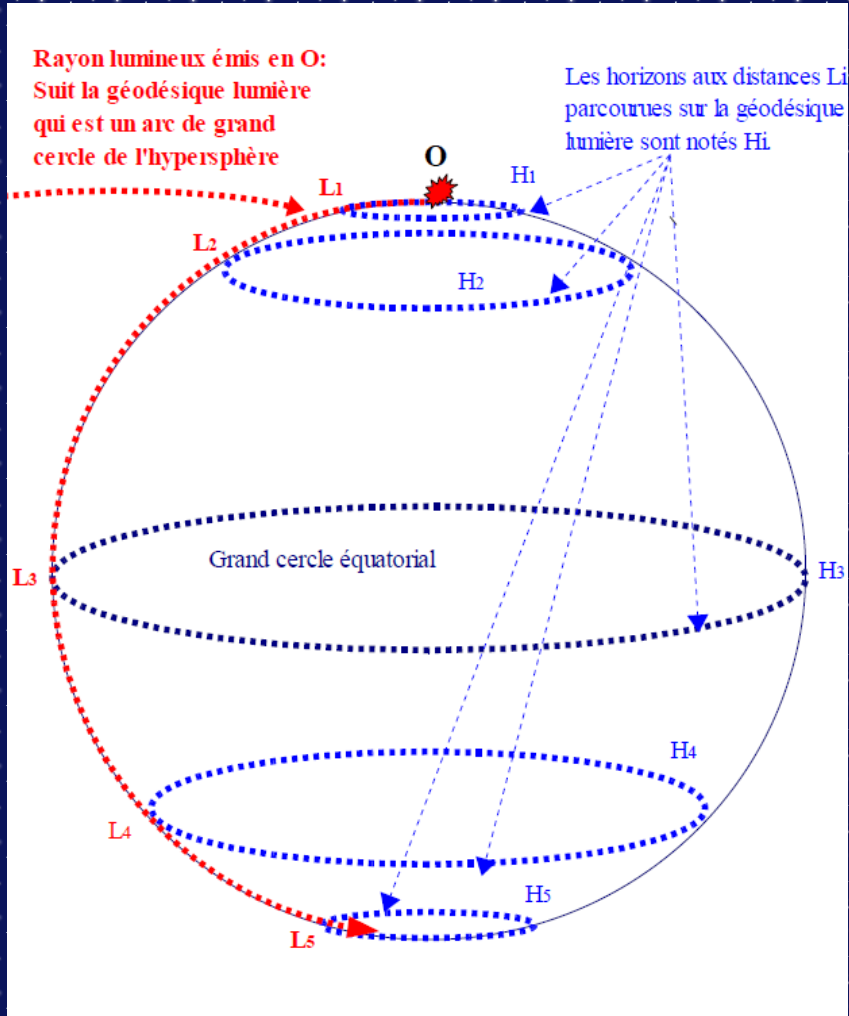
Pour  $\Omega < 1$ , l'univers a une géométrie courbée négativement, une géométrie **3D (hyper)hyperbolique**. Nous avons vu que le cas particulier de densité zéro correspond bien à une géométrie hyperbolique (de volume fini!) du fait que les strates temporelles [à temps constant] en coordonnées de la Relativité Restreinte sont des hyperboloïdes.

Pour  $\Omega = 1$ , l'univers a une géométrie 3D à courbure nulle, **euclidienne**.

Pour  $\Omega > 1$ , l'univers a une géométrie 3D à courbure positive, une géométrie **(hyper)sphérique: Volume de l'hypersphère  $V = 2\pi^2 R^3$** .

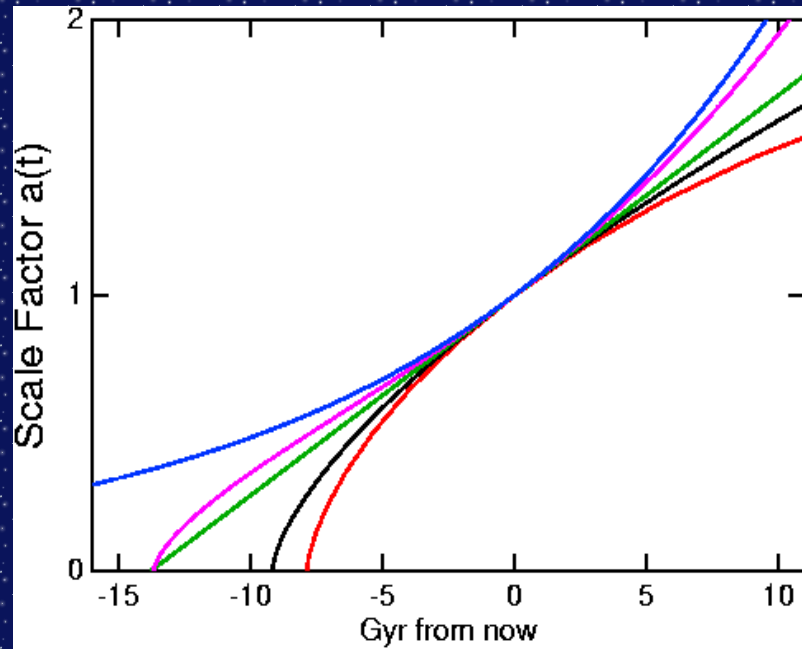
La figure en haut représente les trois cas de courbure (représentées en 2D) et leur courbes  $a(t)$  associées en supposant la constante cosmologique  $\lambda = 0$ , ce qui n'est pas le cas dans le modèle adopté aujourd'hui. Si  $\lambda \neq 0$ ,  $\Omega > 1$  correspond toujours à une hypersphère mais elle peut s'étendre indéfiniment du fait du caractère répulsif de  $\lambda$ .

# Sphère - Hypersphère



$$S_3 = 2\pi^2 R^3, V_n = S_n R/n$$

## Age de L'univers



L'âge de l'Univers dépend de  $\Omega_o$  (**matière**) et de  $H_o$ , (valeurs de  $\Omega$  et  $H$  mesurées « maintenant »), i.e:

$\Omega_o = 1$ , densité critique, le facteur d'échelle vaut:  $a(t) = (t/t_o)^{2/3}$ . l'âge de l'Univers est  $t_o = (2/3)/H_o$

$\Omega_o = 0$ , univers vide,  $a(t) = t/t_o$  et  $t_o = 1/H_o$

$\Omega_o > 1$ , l'âge de l'Univers  $t_o < (2/3)/H_o$ .

La figure ci dessus montre le facteur d'échelle fonction du temps mesuré à partir de maintenant pour  $H_o = 71 \text{ km/sec/Mpc}$  et  $\Omega_o = 0$  (vert),  $\Omega_o = 1$  (noir), et  $\Omega_o = 2$  (rouge) avec  $\lambda = 0$ , le modèle WMAP avec  $\Omega_m = 0.27$  et  $\Omega_v = 0.73$  (magenta) et le modèle stationnaire avec  $\Omega_v = 1$  (bleu). L'âge de l'Univers (origine pour  $a(t) = 0$ ), est respectivement 13.8, 9.2, 7.9, 13.7 et  $\infty \text{ Ga}$  dans ces 5 modèles. Quel âge aura t'il dans 24 H? Il faudra remesurer  $\Omega_o, H_o$  et recalculer l'âge. Sera t'il supérieur de  $24H$ ?

Cela dépend du rapport entre le temps cosmologique et notre temps propre (comme nous ne sommes pas co-mobiles ils ne sont pas égaux)!

Notons que la re-contraction du modèle avec  $\Omega_o = 2$  se produit quand l'Univers est 11 fois plus vieux qu'il n'est aujourd'hui, ce qui nous laisserait un peu de temps!

## L'âge de l'univers

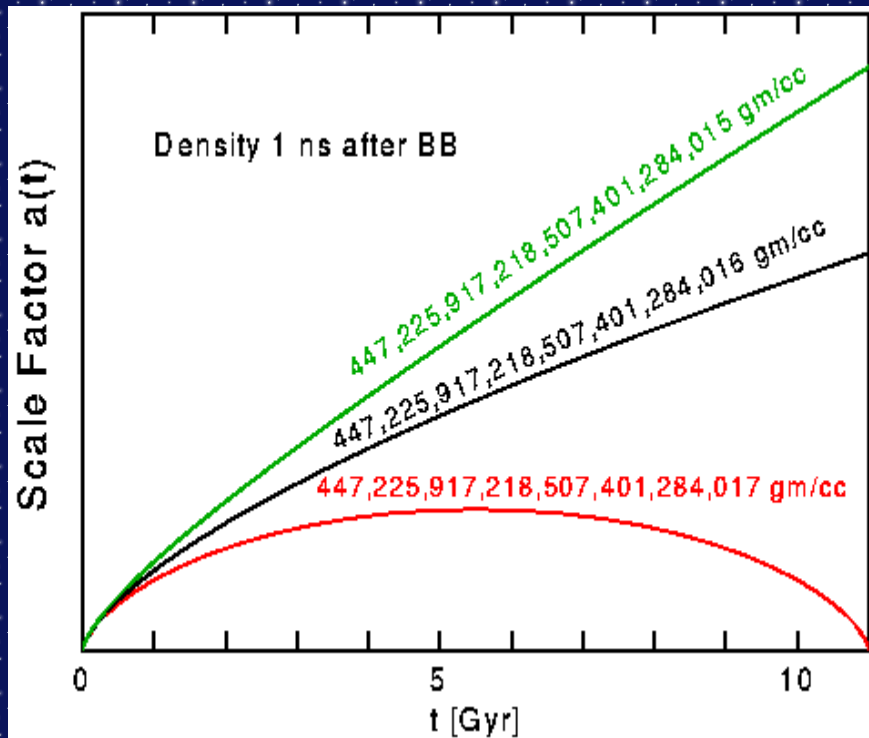
$H_0 * t_0$  est un nombre sans dimension qui vaut 1 si l'Univers est vide ( ou presque) ou  $2/3$  si l'Univers a une densité critique. En 1994 Freedman *et al* trouvèrent  $H_0 = 80 \pm 17$  avec  $t_0 = 14.6 \pm 1.7 \text{ Ga}$ , nous trouvons que  $H_0 * t_0 = 1.19 \pm 0.29$ .

Ceci semble privilégier un Univers vide mais une erreur égale à 2 fois l'écart standard vers le bas nous amène au cas critique.

Comme l'âge des amas globulaires utilisés avant et que la valeur de  $H_0$  dépendent de l'échelle de distance de la même manière, une erreur résidant dans l'échelle de distance pourrait influencer largement sur la valeur de  $H_0 * t_0$ .

En fait des données récentes du satellite HIPPARCOS suggèrent que la distance des Céphéides devrait être augmentée de 10% et par conséquent l'âge des amas globulaires réduit de 20%. Si nous prenons la dernière valeur du HST pour  $H_0 = 72 \pm 8$  (Freedman *et al* 2001) et la dernière estimation de l'âge des amas globulaires  $t_0 = 13.5 \pm 0.7 \text{ Ga}$ , nous trouvons  $H_0 * t_0 = 0.99 \pm 0.12$ , ce qui est compatible avec l'univers vide mais aussi avec un univers en accélération ce qui est le modèle retenu aujourd'hui.

## Le Problème de la platitude et de la longévité de l'Univers



Si  $\Omega_0 > 1$ , l'expansion de l'Univers va s'arrêter et s'inverser, et alors  $\Omega$  va tendre vers l'infini.

Si  $\Omega_0 < 1$ , l'univers va s'étendre sans fin et la densité va décroître plus vite que la densité critique donc  $\Omega$  va devenir de plus en plus petit.

Donc  $\Omega = 1$  est une valeur limite instable dont le moindre écart a tendance à s'amplifier et il est étonnant qu'il soit si proche de 1 maintenant

La figure ci dessus montre  $a(t)$  pour trois modèles de densité différentes à  $t = 1$  nanoseconde, ( $\approx 30$  GeV), après le Big Bang. La courbe noire représente la densité critique =  $447\,225\,917\,218\,507\,401\,284\,016\text{ g/cm}^3$ . **Ajouter seulement  $1\text{ g/cm}^3$  à ces 447 sextillions  $\text{g/cm}^3$  ferait que le Big Crunch se produirait maintenant. Retirer  $1\text{ g/cm}^3$  donne un modèle avec un  $\Omega$  bien plus faible que ce que nous observons.**

## Problème de la platitude

Donc la densité, 1 ns après le Big Bang était incroyablement proche de 1 (écart =  $1 / 447$  sextillion). Plus on remonte dans le temps pire c'est (jusqu'à  $10^{-59}$ !).

Si la densité est un poil trop élevée, l'univers se re-contracte illico et si elle est un poil plus élevée il se dilue très rapidement. L'écart par rapport à la valeur  $\Omega = 1$ , en plus ou en moins, est amplifié par l'expansion. Si on appelle  $\delta(t)$  cet écart,  $\delta(t) = \Omega(t) - 1$ :

On montre que:  $\delta(t) = (k/a^2)/(8\pi G\rho/3)$  est proportionnel à:

$a^2(t)$  pendant la phase dominée par le rayonnement jusqu'à  $t < 150\,000$  ans environ.

$a(t)$  pendant la phase dominée par la matière pour  $t > 150\,000$  ans environ.

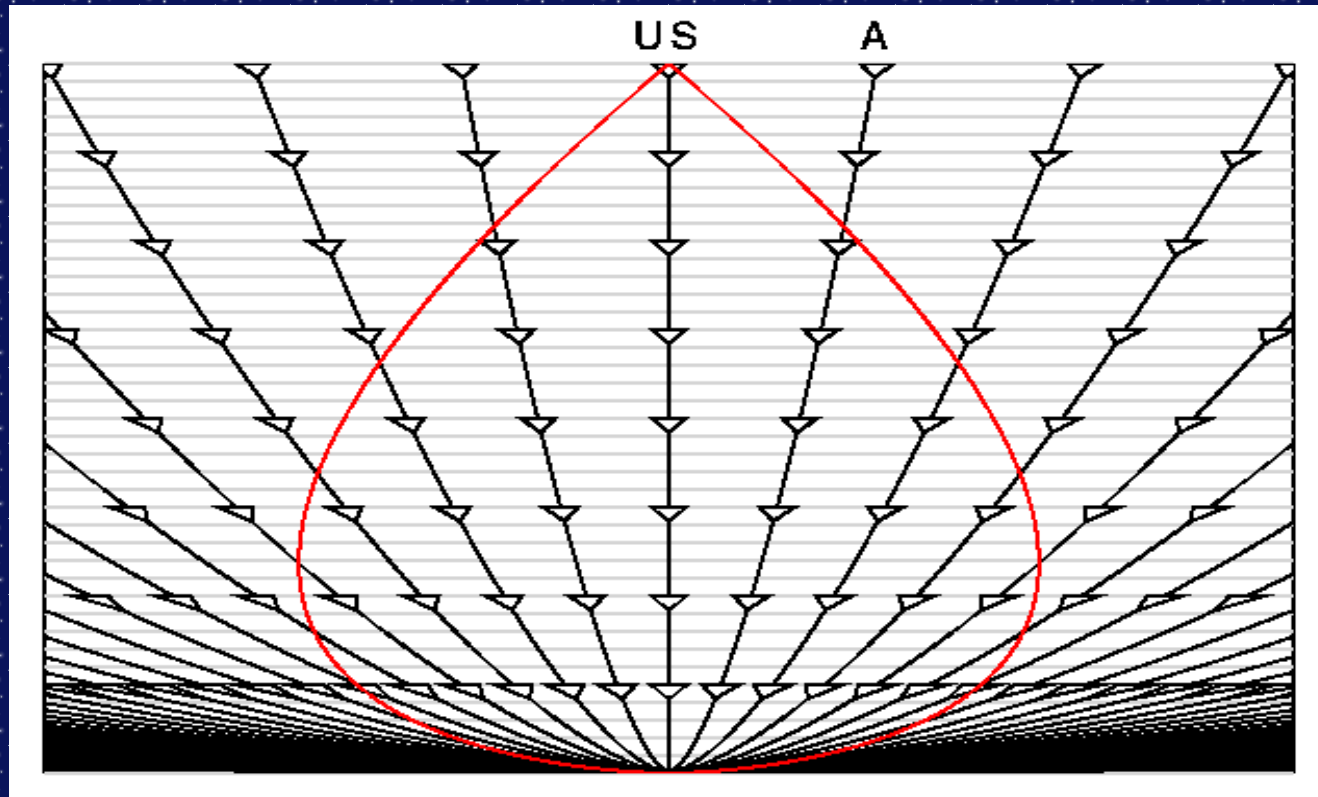
Ceci est appelé le **problème de la longévité de l'Univers**.

Comme la densité critique correspond à une géométrie plate, cela est aussi appelé le **problème de la platitude** ou problème de platitude et de longévité.

Quel que soit le mécanisme qui a produit cette densité critique, il a bien fonctionné et ce serait une coïncidence remarquable si  $\Omega_0$  valait près de 1 mais pas exactement 1.

[Comme une valeur exacte est incompatible avec la physique cela nous conduira à rechercher une autre solution: l'inflation].

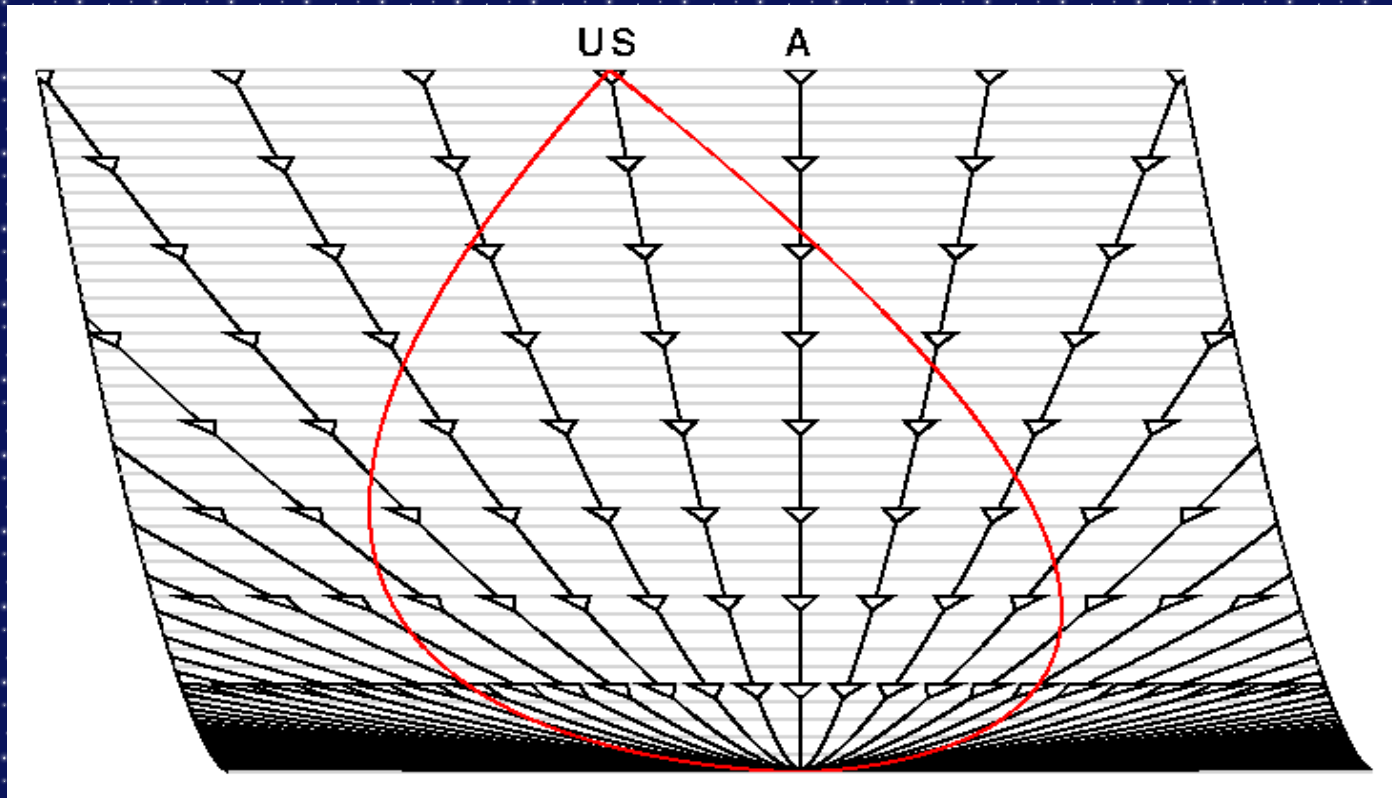
## Diagrammes d'espace temps



Le modèle correspondant à **une densité critique (matière)** est représenté ci dessus. Remarquons que les lignes d'univers sont maintenant courbées du fait de la gravitation qui provoque un ralentissement de l'expansion. En fait chaque ligne d'univers est proportionnelle à  $a(t)$ , qui vaut  $A*(t/t_0)^{2/3}$  pour  $\Omega_0 = 1$ , où  $A$  est une constante. La courbe rouge en forme de poire correspond à notre cône du passé (modélisé en poire par l'expansion).



## Diagrammes d'espace temps



Le diagramme précédent était tracé de **notre point de vue** (notre galaxie est au "centre" du diagramme), mais comme l'Univers est homogène, ce diagramme est identique du point de vue de n'importe quelle galaxie. Comme le montre le diagramme ci-dessus, représenté du point de vue de la galaxie de ligne d'univers A. (Si on assimile ceci à un "château de cartes" vu par la tranche, alors dans ce cas, le "château de cartes" est incliné!).

## Commentaires sur ces diagrammes

Remarquons que ce n'est pas une transformation de Lorentz, et que ces coordonnées ne sont pas celles de la Relativité Restreinte où la transformation de Lorentz est applicable.

La transformation galiléenne qui peut être faite en inclinant les cartes de cette manière exige que le dessus du "château" reste droit, et en aucun cas la transformation de Lorentz ne peut être ainsi faite car il n'y a pas de temps absolu.

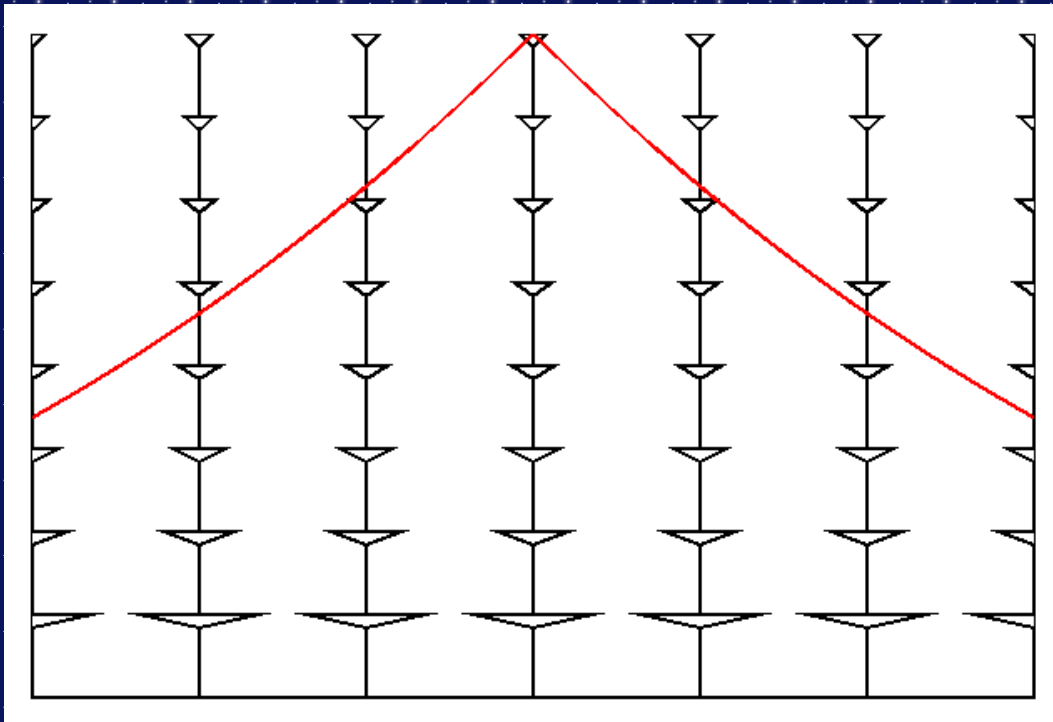
Mais dans les modèles cosmologique, nous avons le temps cosmologique, qui est le temps propre écoulé depuis le Big Bang, mesuré par les observateurs co-mobiles et il peut être utilisé pour construire un tel château de cartes.

La gravitation présente dans le modèle implique un espace temps courbe impossible à représenter sans distorsion dans un espace temps plat. Si chaque système de coordonnées représente de façon distordue l'Univers, nous pouvons aussi bien utiliser un système de coordonnées qui nous convient et matérialiser la distorsion par l'enveloppe des cônes de lumière.

---

---

## Diagrammes dans d'autres coordonnées

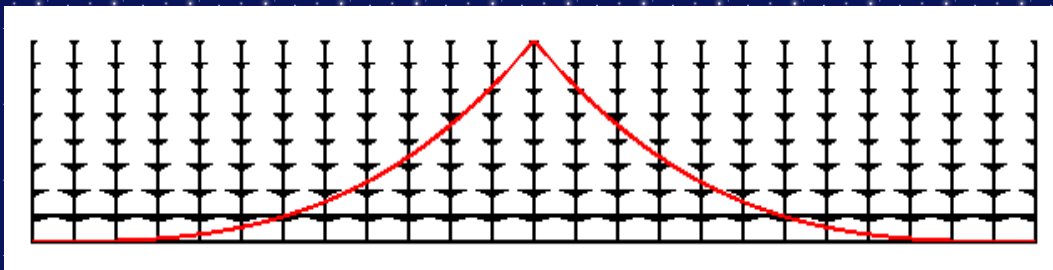


Il peut être intéressant de ne pas visualiser l'expansion, ce que montre le diagramme d'espace temps ci contre où la coordonnée spatiale a été divisée par  $a(t)$ . Alors les lignes d'univers des galaxies sont verticales (la distance entre galaxies est la distance fixe comobile).

L'écrasement des cônes de lumière est lié à la division par  $a^2(t)$  de la métrique. Pour l'univers critique ( $k = 0$ ), pour la métrique RW radiale cela s'écrit:

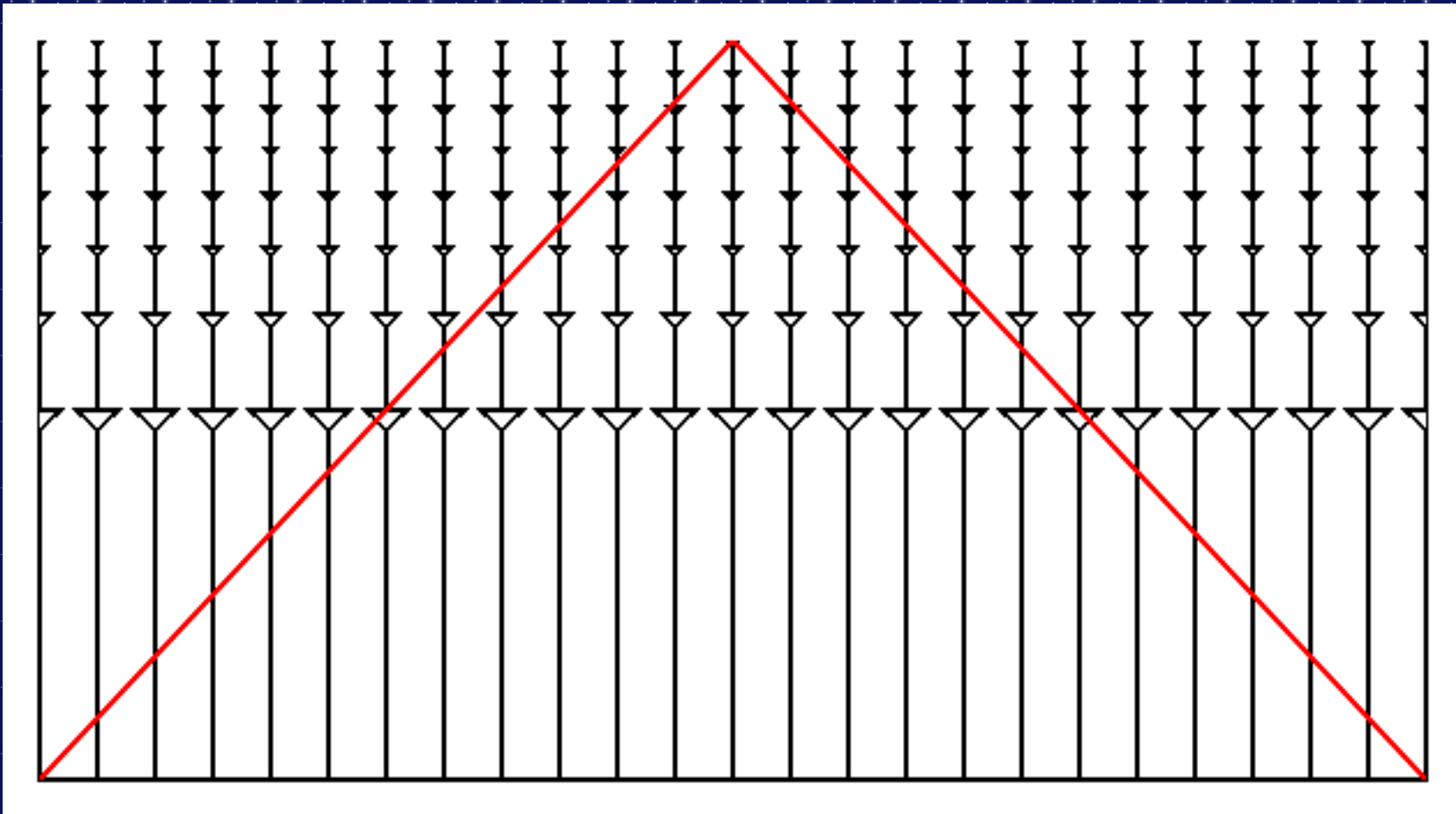
$$ds^2/a(t)^2 = -dt^2/a(t)^2 + dr^2.$$

Pour  $ds = 0$  (photons)  $\rightarrow dr/dt = a(t)^{-1}$ .



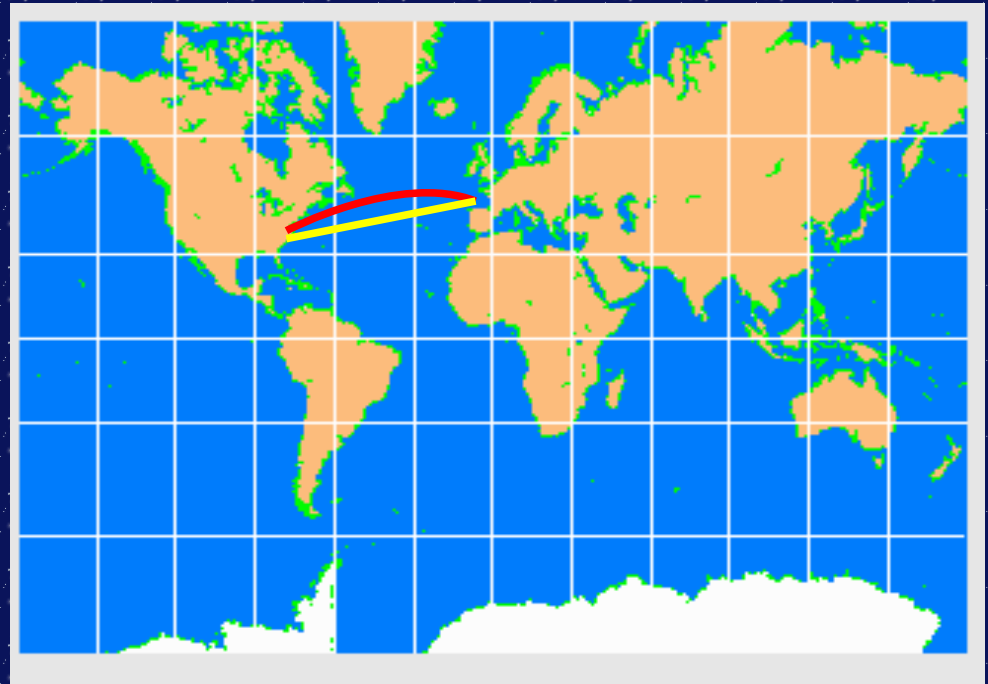
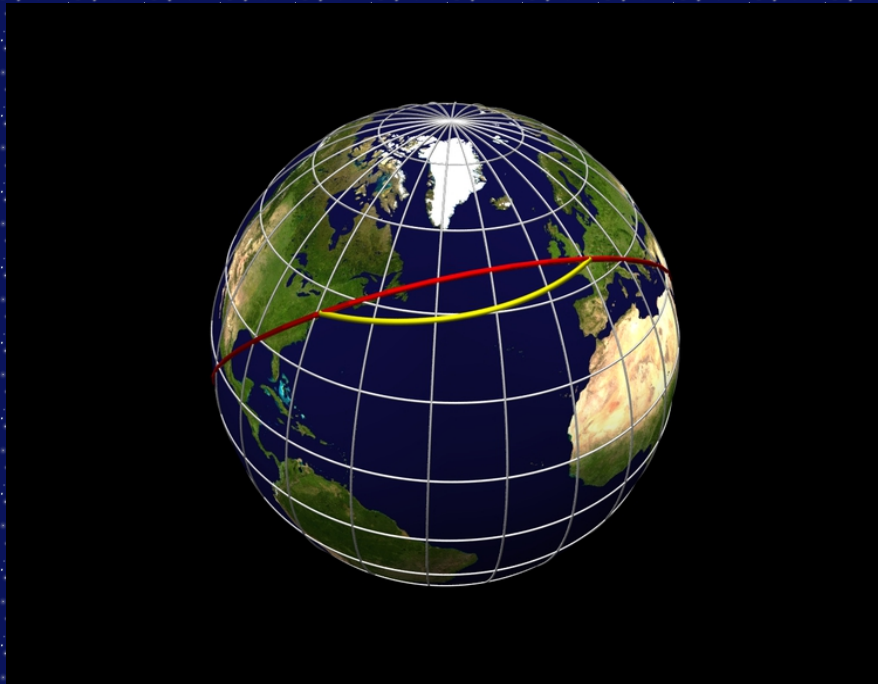
Cette division a eu pour effet de dilater notre cône de lumière du passé, retraçons le diagramme pour montrer ce **cône de lumière dans sa totalité**.

## Diagrammes dans d'autres coordonnées



Si nous dilaton l'axe des temps lorsqu'on remonte vers le big bang, nous obtenons le diagramme d'espace temps suivant qui a un cône de lumière du passé non déformé. En posant  $d\eta = dt/a(t)$  la métrique RW radiale critique s'écrit:  $ds^2 = a(\eta)^2(-d\eta^2 + dr^2)$ . Ce type de diagramme d'espace temps est appelé diagramme d'espace temps "conforme" et est très utile lorsqu'on étudie l'univers primordial où  $a(t) \ll 1$ .

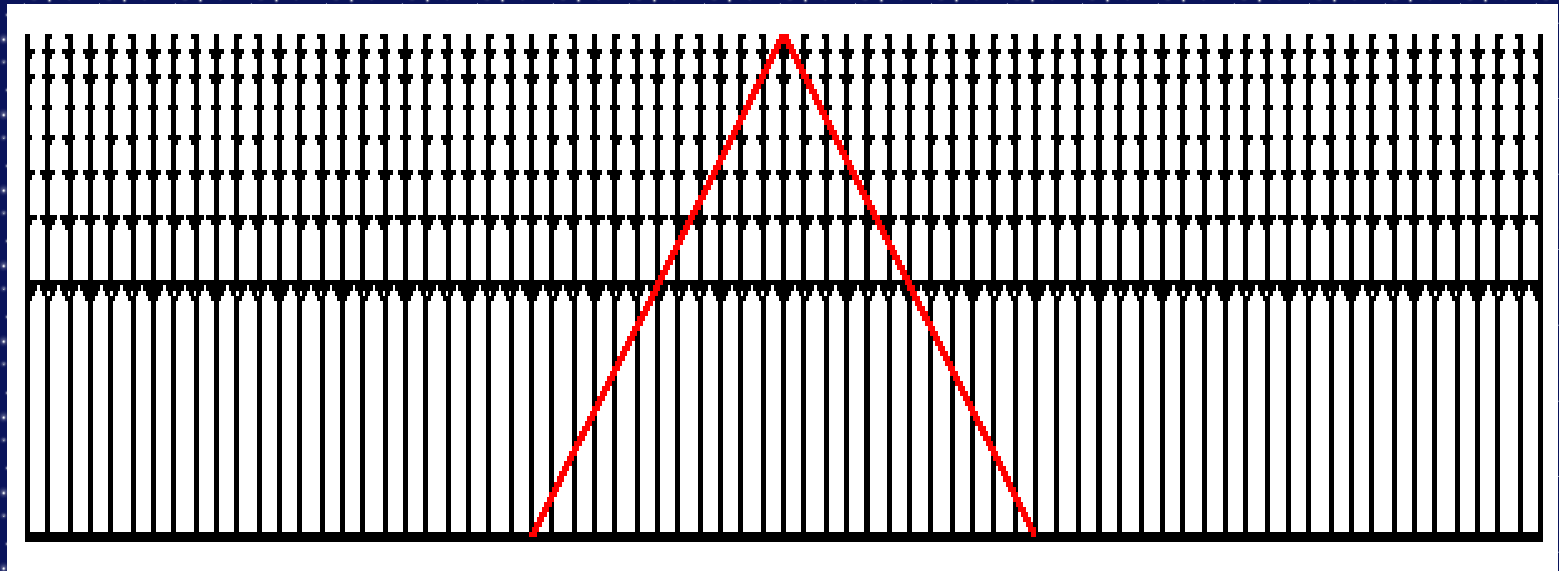
## Diagrammes dans d'autres coordonnées



Cette **transformation est analogue** à celle opérée en géographie pour obtenir la **projection de Mercator** de la Terre représentée à gauche ci dessus. Remarquons qu'un cap "Sud- Ouest" constant est une ligne droite sur la projection de Mercator, de façon analogue aux cônes de lumière du passé "euclidiens" sur le diagramme d'espace temps conforme.

Avec  $l$  = latitude,  $L$  = longitude qui sont des angles et  $r$  = rayon de la Terre:  $ds^2 = r^2[dl^2 + \cos^2 l.dL^2]$

## Diagrammes dans d'autres coordonnées



Rappelons aussi que pour  $\Omega_0 = 1$ , l'espace temps **s'étend à l'infini**, donc le diagramme d'espace temps conforme s'étend au delà de notre cône de lumière du passé, comme montré ci dessus.

## Problème de l'Horizon

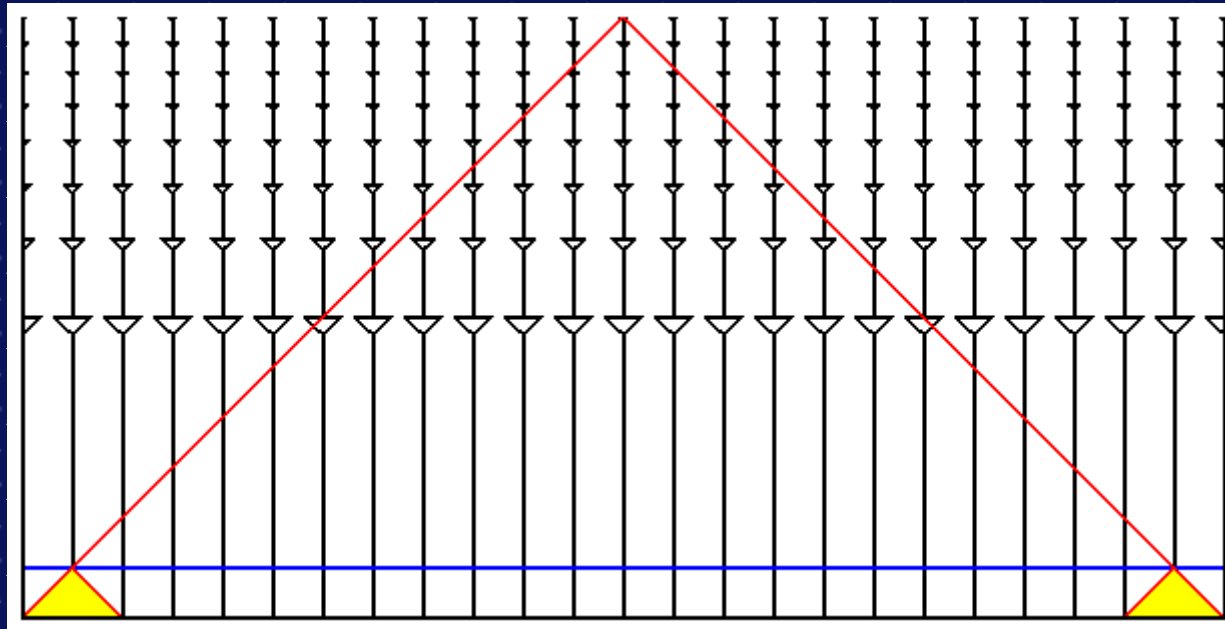
Le diagramme d'espace temps "conforme" est un bon outil pour décrire la signification de l'anisotropie observée du RFC.

L'univers était opaque avant que les électrons et les protons se combinent pour former des atomes d'hydrogène quand la température tomba sous les  $3\ 000\ K$  à un décalage vers le rouge  $1+z = 1090$ . Après cela les photons du RFC ont pu voyager librement dans l'Univers devenu transparent que nous observons aujourd'hui. Donc la température du RFC d'un point donné du ciel devait être déterminée au moment où les atomes d'hydrogène ont été formés, habituellement appelé re-combinaison, encore que combinaison serait plus approprié du fait que c'était la première fois [ on dit aussi découplage ].

Comme les longueurs d'onde du RFC suivent la même loi d'échelle que les distances intergalactiques vis à vis de l'expansion de l'Univers nous savons que  $a(t)$  devait être de  $0.0009$  au découplage. Pour le modèle avec  $\Omega_o = 1$ , ceci implique que  $t/t_o = 0.00003$ , donc pour  $t_o$  d'environ  $14\ Ga$ , ce temps est environ de  $380\ 000$  ans après le Big Bang.

L'étirement de l'axe des temps, qui se traduit par un agrandissement de cette petite période de l'histoire de l'Univers, dans le diagramme "conforme" est très appréciable pour mieux l'examiner en détail.

## Problème de l'Horizon



Le diagramme conforme ci dessus a exagéré l'agrandissement encore plus, en prenant le décalage vers le rouge à la recombinaison égal à  $1+z = 144$ , ce qui est matérialisé par la ligne bleue. Les régions en jaune sont les cônes du passé des événements qui sont dans notre cône du passé au moment du découplage. Tout événement ayant un lien causal avec la température du RFC de la partie gauche du ciel se trouve dans le cône en jaune à gauche. Itou pour la partie droite, en remplaçant gauche par droit. Ces régions n'ont aucun événement commun, mais leurs températures diffèrent de moins de  $0,01\%$ . Comment est ce possible? C'est ce qu'on appelle le problème de l'horizon en Cosmologie



# L'inflation

Le scénario inflationniste (assez complexe) développé par Starobinsky et par Guth (1980), et amélioré par A. Linde (1982) et quelques autres, car les premiers modèles posaient des problèmes de sortie de l'inflation, offre une solution aux problèmes de longévité, de platitude et d'horizon de l'Univers [la Totale].

Le scénario inflationniste fait appel à la densité d'énergie du vide

Habituellement nous pensons que le vide est "vide" et sans masse, et nous avons déterminé que sa densité est en tout état de cause inférieure  $10^{-29}$  g/cc aujourd'hui.

Mais en théorie quantique des champs, le vide n'est pas vraiment vide, mais plutôt rempli de particules virtuelles.

## Inflation cosmologique

**L'inflation cosmique** est un modèle cosmologique s'insérant dans le paradigme du Big Bang lors duquel une région de l'univers comprenant l'univers observable a connu une phase d'expansion très violente qui lui aurait permis de grossir d'un facteur considérable : au moins  $10^{26}$  et probablement immensément plus (de l'ordre de  $10^{10000000}$ , voire plus encore dans certains modèles). Ce modèle cosmologique offre, à la fois, une solution au problème de l'horizon ainsi qu'au problème de la platitude.

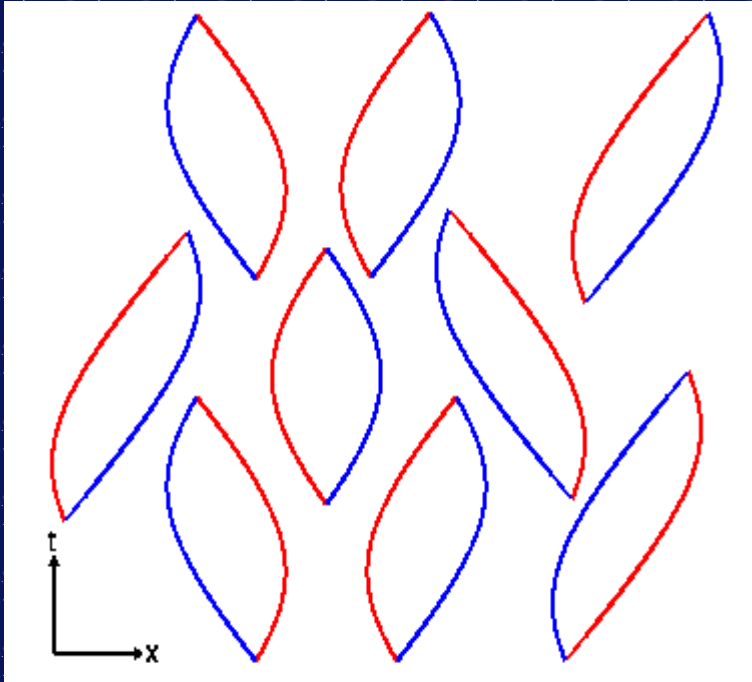
Cette phase d'expansion se serait produite très tôt dans l'histoire de l'univers, à l'issue de l'ère de Planck, ou relativement peu après (de l'ordre de  $10^{-35}$  seconde) l'ère de Planck. À l'issue de l'inflation, l'univers était encore extrêmement dense et chaud. On pense que sa masse volumique devait être de l'ordre de  $10^{86}$ , voire  $10^{94}$  kilogrammes par mètre cube, et sa température de  $10^{26}$ , voire  $10^{28}$  degrés

## Inflation cosmologique

Le paradigme de l'inflation peut être testé grâce à de nombreuses observations astronomiques, notamment la mesure des anisotropies du fond diffus cosmologique, les catalogues de galaxies, et les effets de cisaillement gravitationnel. À l'heure actuelle (2013), l'inflation s'avère compatible avec l'ensemble des données observationnelles récentes, notamment celle du satellite WMAP, confirmée par le satellite Planck, et fait partie intégrante du modèle standard de la cosmologie.

Une subtile prévision des modèles inflationnistes est que les fluctuations du rayonnement de fond à grande échelle soient un peu plus intenses que celles à petite échelle. C'est ce que constatent en 2010 les mesures<sup>1</sup> sur 7 ans de WMAP, renforçant la validité de ces modèles. Il n'est cependant pas exclu que d'autres mécanismes produisant des effets semblables puissent également être envisagés, mais ceux-ci apparaissant aujourd'hui moins convaincants et moins réalistes.

## L'inflation



Le diagramme d'espace temps ci contre montre la création Ex nihilo de paires particules-antiparticules virtuelles s'annihilant tout aussi soudainement qu'elles se sont créées. Pour des particules de masse  $m$ , on estime qu'il y a une particule virtuelle par volume égal au cube de la longueur d'onde de Compton associée à cette particule,  $h/mc$ , où  $h$  est la constante de Planck [vu la petitesse de ce volume, cela en fait beaucoup]. Donc la densité supposée du vide est  $\rho = m^4 * c^3 / h^3$ , ce qui est énorme.

Pour la masse correspondant à la particule la plus lourde que permet la théorie, la masse de Planck  $M$  définie par  $2 * \pi * G * M^2 = h * c$ , cette densité est  $2.10^{91} \text{ g/cm}^3$ . Donc comme la densité d'énergie du vide est au moins de 120 ordres de grandeur inférieure à l'estimation brute de la mécanique quantique, il doit y avoir un mécanisme de "compensation" manifestement très [mais pas totalement ?] efficace.

## Mécanisme de l'inflation

Si un petit résidu de l'énergie du vide subsiste, cela se traduit par une constante Cosmologique qui est un mécanisme proposé (à l'époque) pour être compatible avec les contraintes alors imposées par le modèle avec  $\Omega_o=1$  conduisant à un âge de l'Univers de  $t_o = (2/3)/H_o = 9 \text{ Ga}$ , et l'âge apparent des plus vieux amas globulaires,  $13 \pm 1 \text{ Ga}$ .

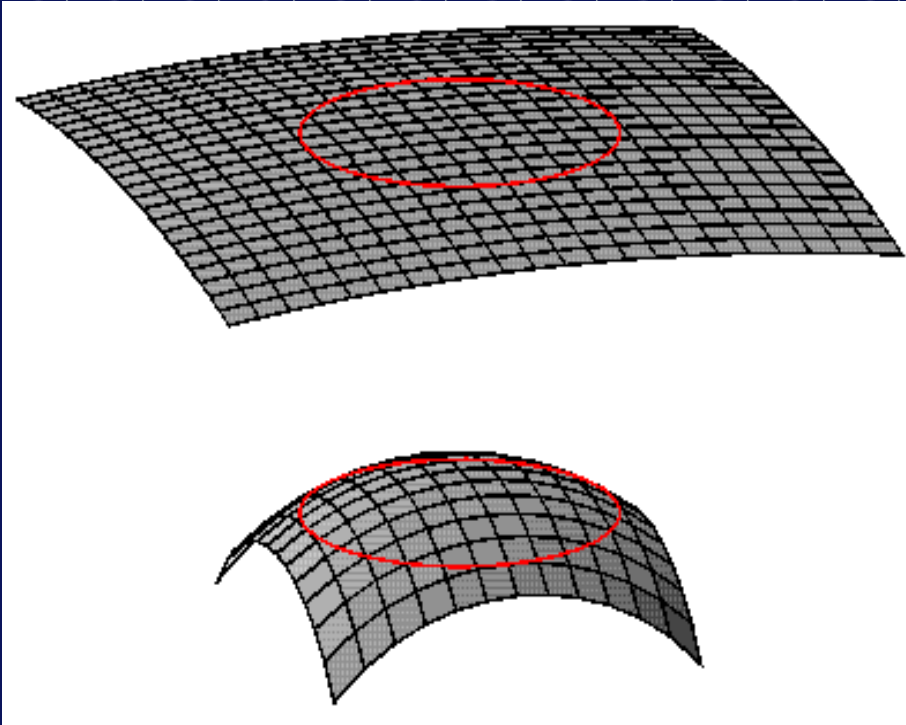
L'énergie du vide génère une répulsion de la matière (antigravitation) qui provoque l'accélération de l'expansion de l'Univers au lieu de son ralentissement, et de ce fait accroît  $t_o$  pour un  $H_o$  donné.

Le scénario inflationniste stipule que l'énergie du vide a été colossale pendant une brève période dans la prime jeunesse de l'Univers (vers  $10^{-34}$  sec, ce qui correspond à  $10^{15}$  GeV, température de grande unification).

Quand l'Univers est dominé par l'énergie du vide le facteur d'échelle croît exponentiellement,  $a(t) = \exp(H(t-t_o))$ .

La constante de Hubble reste alors constante pendant cette période, pas besoin de l'indice 0 de référence d'époque. Si cette époque inflationniste dure suffisamment longtemps (on suppose qu'elle se déroule entre  $10^{-34}$  et  $10^{-32}$  sec, ce qui fait que sa durée est égale à 100 fois l'âge de l'univers) la fonction exponentielle atteint une valeur considérable. Ceci rend  $a(t)$  très grand, et par conséquent le rayon de l'Univers très grand.

## Inflation et platitude

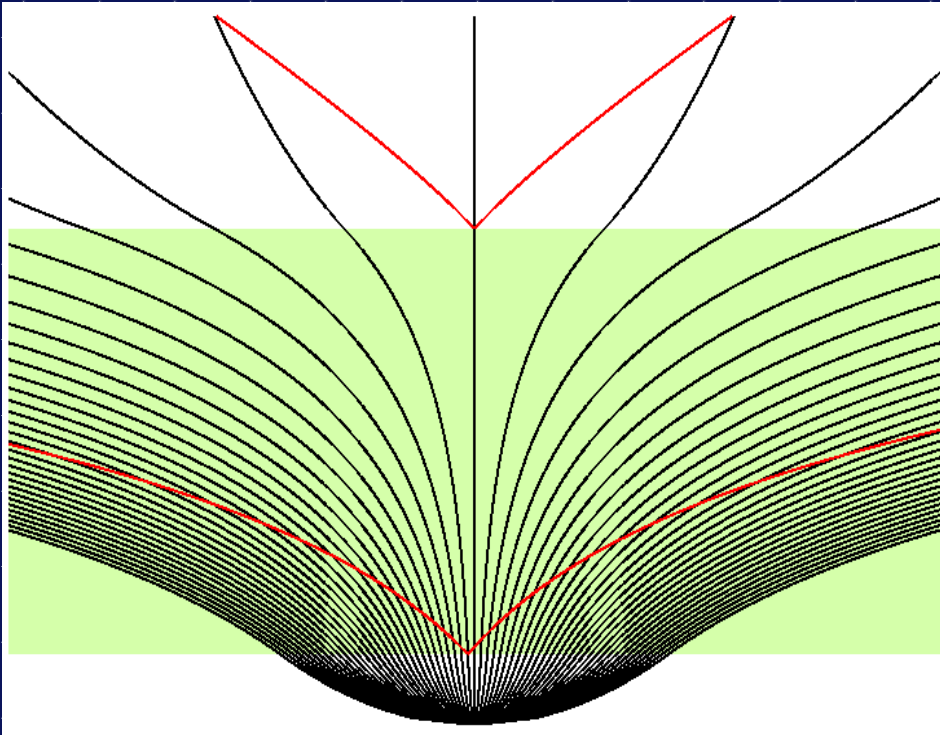


Le diagramme ci contre montre notre horizon représenté sur une sphère de grand rayon en haut et sur une plus petite sphère en bas.

Comme nous ne pouvons pas voir au delà de notre horizon, dans le cas inflationniste, sur cette sphère de grand rayon, l'univers nous paraît presque " plat".

Ceci résout le problème de platitude et de longévité sous condition que cette période d'expansion exponentielle dure au moins 100 fois plus longtemps que l'âge de l'Univers quand elle a commencé. Si avant l'inflation l'univers avait la taille d'un proton ( $10^{-15}$ m) comme  $\exp(100) \approx 10^{43}$ , à la fin de l'inflation la taille était de  $10^{30}$  cm  $\approx$  1000 Gigaparsecs  $>$  100 fois la taille estimée aujourd'hui !!!

## Inflation et Horizon

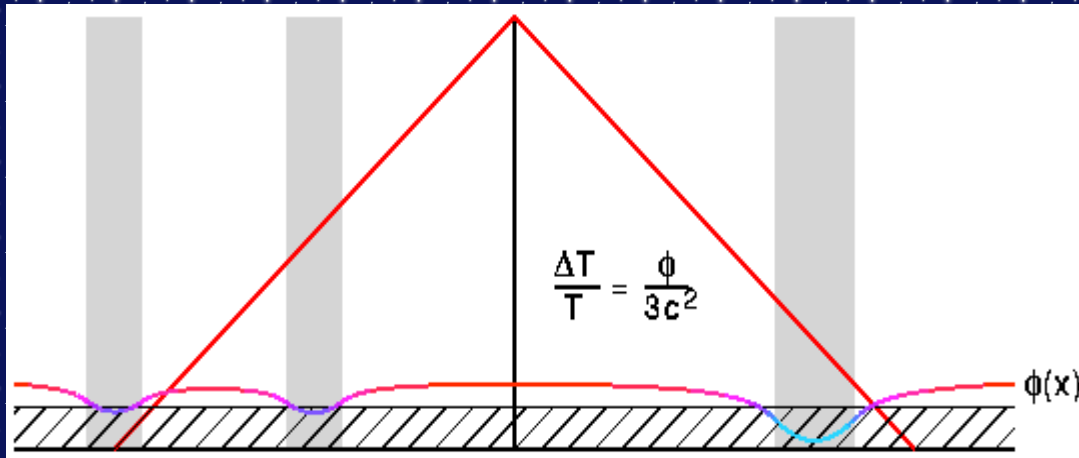


L'inflation résout aussi le problème de l'horizon, car le cône de lumière du futur d'un événement qui s'est produit avant l'inflation est énormément dilaté par le processus d'inflation couvrant ainsi après l'inflation, une région très étendue de l'Univers.

Ce diagramme d'espace temps montre l'époque inflationniste teintée en vert, et les cônes de lumière du futur issus de deux événements en rouge.

L'événement avant l'inflation couvre une région très importante qui peut recouvrir tout notre horizon, alors que l'autre plus tardif est plus "normal". Ceci peut expliquer pourquoi la température du RFC est si uniforme dans tout le ciel.

## Structure à grande échelle et Anisotropie



Bien sûr l'Univers n'est pas parfaitement homogène et isotrope car il contient des régions denses comme les galaxies et les humains. Ces régions denses devraient modifier la température du RFC.

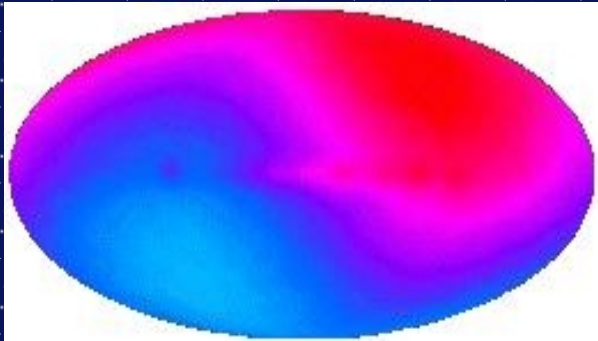
Sachs et Wolfe (1967, ApJ, 147, 73) ont évalué l'effet des perturbations du potentiel gravitationnel sur le RFC. Le potentiel gravitationnel  $\Phi = -GM/r$ , va être négatif dans des grumeaux denses et positif dans les régions moins denses.

Les photons perdent de l'énergie pour émerger des puits de potentiel associés aux grumeaux. Le diagramme d'espace temps "conforme" ci dessus représente les grumeaux par des barres verticales grises, l'époque avant le découplage hachurée et le potentiel gravitationnel par une courbe codée par couleurs  $\Phi(x)$ .

Quand notre cône de lumière du passé coupe la surface de découplage nous voyons une température modulée telle que  $dT/T = \Phi/3c^2$ .



## Anisotropie dipolaire

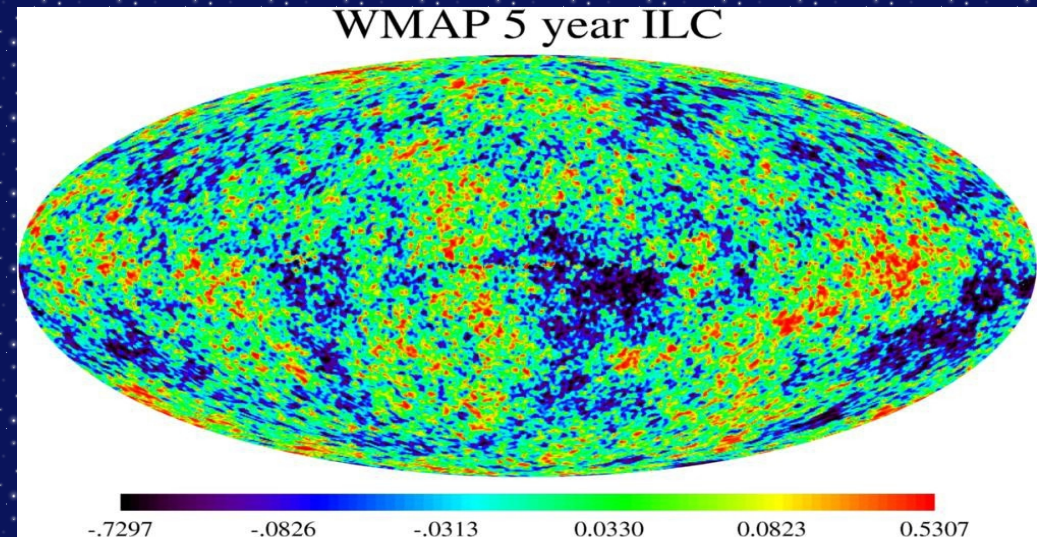
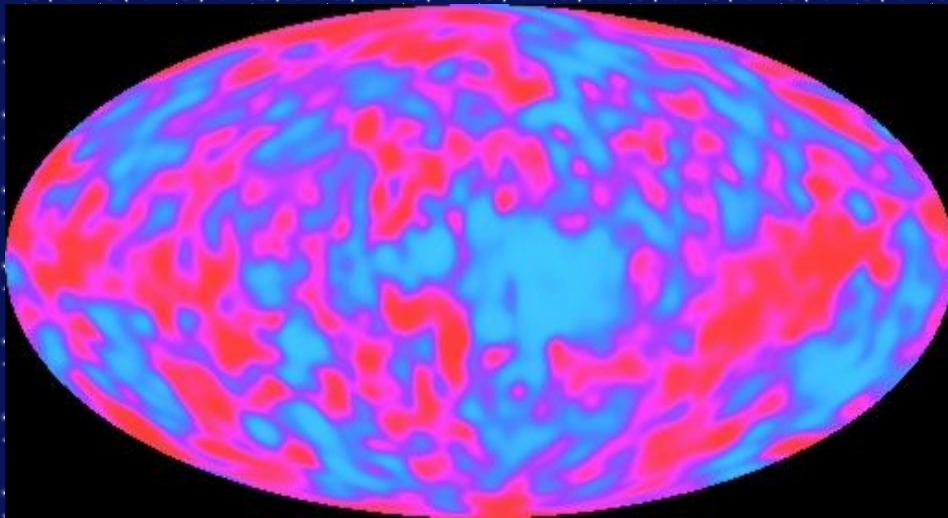


Sachs et Wolfe ont prédit des fluctuations  $dT/T$  allant jusqu'à  $1\%$ , mais nous savons maintenant que l'Univers est bien plus homogène que Sachs et Wolfe le pensaient

Donc les observateurs travaillent depuis des années à améliorer la sensibilité pour détecter ces petites fluctuations. La première anisotropie détectée fut l'anisotropie dipolaire par Conklin en 1969: La représentation du RFC ci dessus est celle du satellite COBE et est bien meilleure que celle qu'avait détecté Conklin.

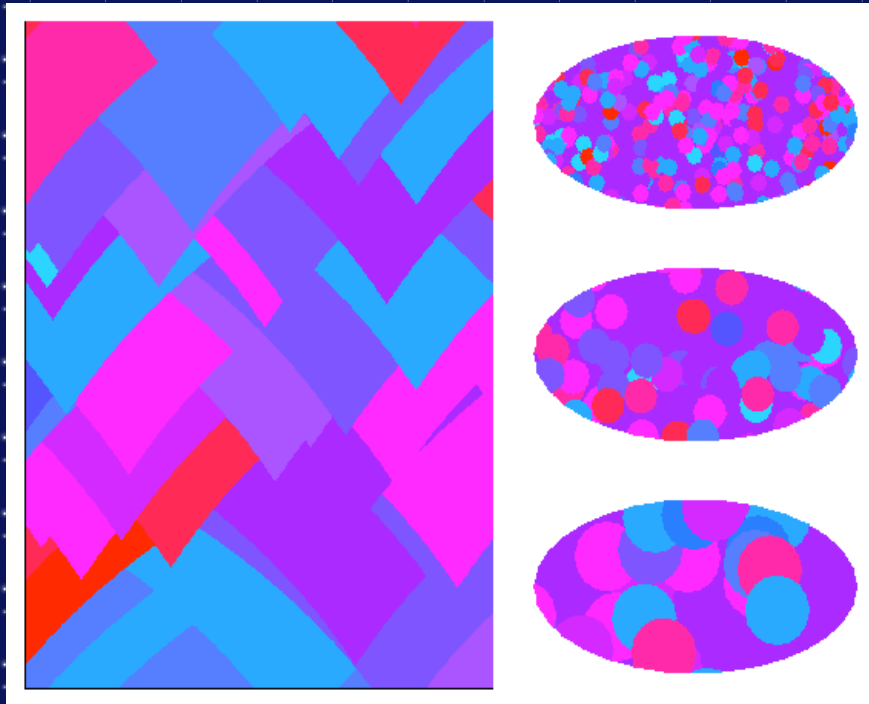
La partie rouge est plus chaude d'un facteur  $(v/c)*T_o$ , tandis que la partie bleue du ciel est plus froide du même facteur  $(v/c)*T_o$ , où la vitesse évoquée est  $v = 368 \text{ km/sec}$ . C'est ainsi que nous mesurons la vitesse du système solaire par rapport à l'Univers observable. Il s'est écoulé 23 ans avant que l'anisotropie prédite par Sachs et Wolfe soit détectée par Smoot *et al* en 1992. L'amplitude était de  $1 \text{ pour } 100,000$  au lieu de  $1\%$  mais est cohérente avec le  $\Lambda$ CDM model, [Wright *et al* 1992 *ApJL*, 396,13].

## Cartes du RFC



La carte à gauche (COBE) ci dessus montre l'anisotropie cosmique (et le bruit du détecteur) après soustraction du motif dipolaire et du rayonnement équatorial de la voie lactée. L'anisotropie de cette carte a un écart type  $30 \mu K$ , et si cela est converti en potentiel gravitationnel en utilisant les travaux de Sachs et Wolfe's et si on exprime ce potentiel par une hauteur dans un champ gravitationnel uniforme d'intensité égal au champ terrestre ( au sol), nous obtenons une hauteur qui est égale à **deux fois la distance Terre - Soleil**. Les montagnes et les vallées de l'Univers sont plutôt grandes. A droite dernière carte de WMAP (2008)

## Fluctuations quantiques et Inflation

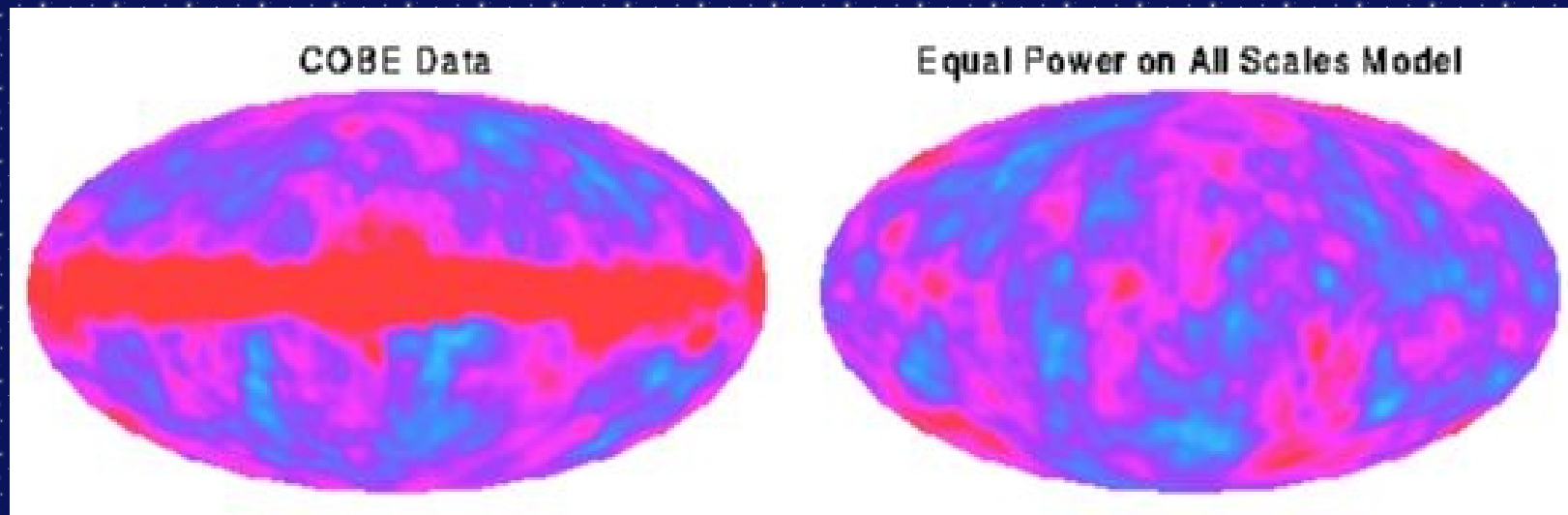


L'inflation prédit une certaine distribution statistique de l'anisotropie. Les fluctuations quantiques n'affectent que des zones minuscules, mais l'expansion fantastique liée à l'inflation les a transformé en régions observables. Le diagramme d'espace temps à gauche en haut montre les cônes de lumière du futur des événements liés aux fluctuations quantiques. Le haut de ce diagramme est en fait un volume qui coupe notre cône de lumière du passé : le ciel visible.

Les cônes de lumière du futur des événements deviennent des cercles dans le ciel. Les événements les plus anciens de l'époque inflationniste tracent de larges cercles, comme montré sur la figure en bas à droite. Les événements ultérieurs tracent des cercles plus petits comme montré au milieu à droite, mais il y en a plus donc la couverture du ciel est la même. Les événements encore ultérieurs tracent une multitude de cercles encore plus petits offrant la même couverture du ciel, comme montré en haut à droite.

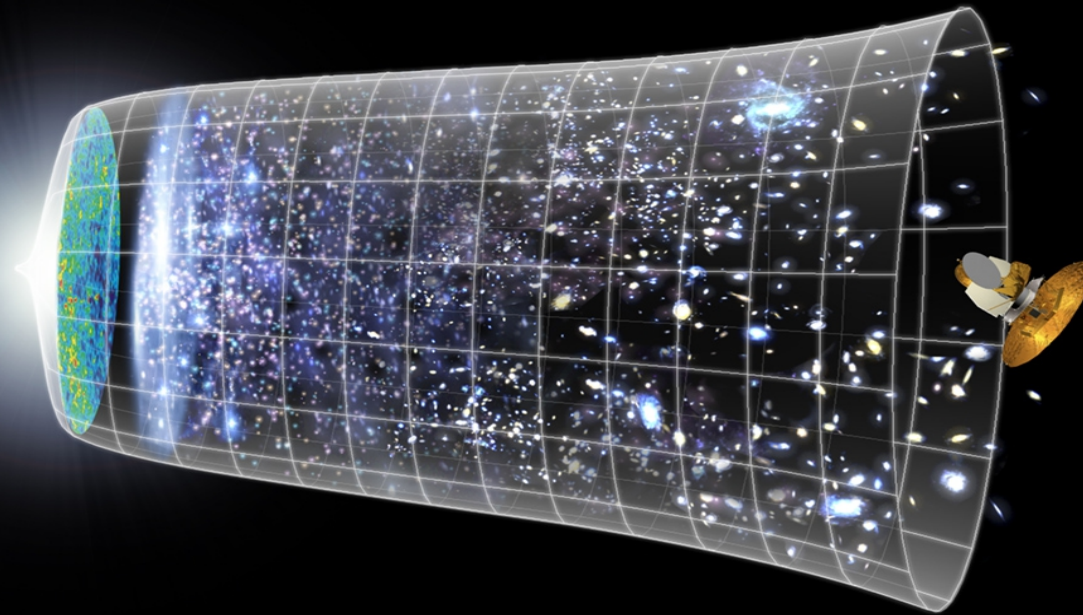
Animation disponible: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/CMB-MN-03/epas.html>

## Modèle à puissance invariante d'échelle



Le motif formé en additionnant tous les effets des événements de tous les âges est appelé "modèle à puissance indépendante d'échelle" et est conforme aux observations de COBE (et de WMAP). Ayant constaté que le motif d'anisotropie est cohérent avec l'inflation, on peut se demander si son amplitude implique des forces gravitationnelles suffisantes pour produire la formation des amas de Galaxies observées.

# L'évolution de L'univers

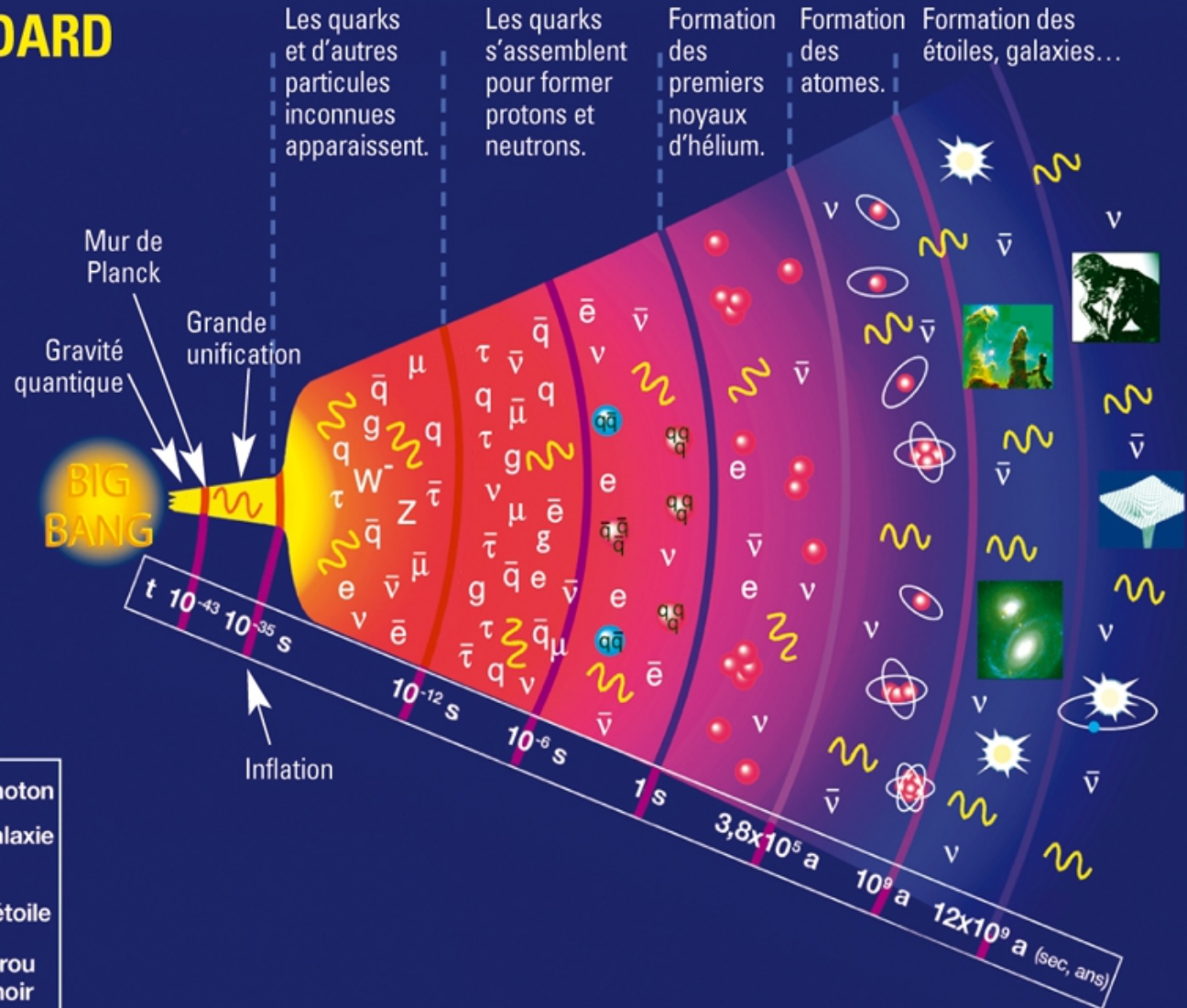


# L'évolution de L'univers

## L'UNIVERS SELON LE MODÈLE STANDARD

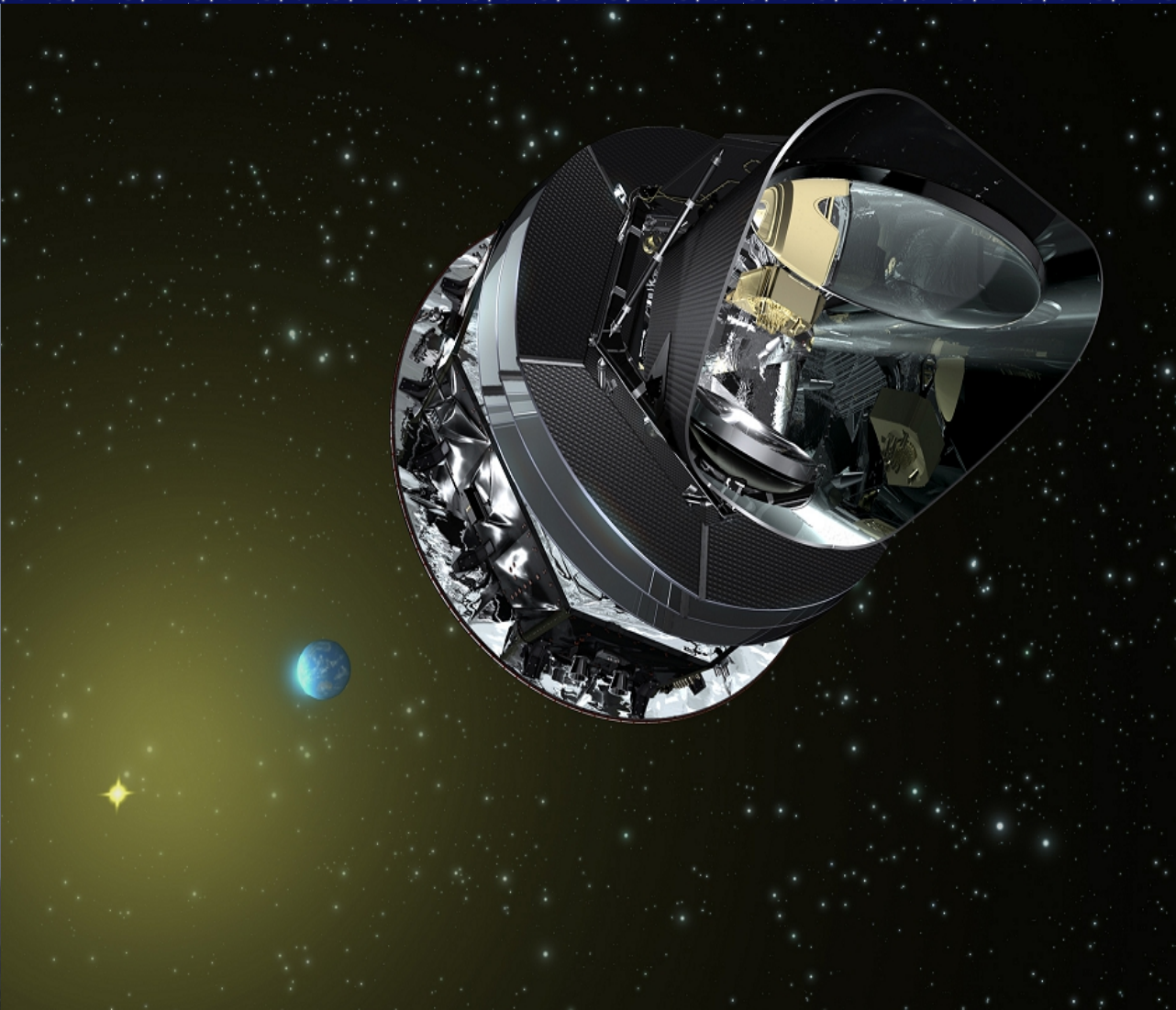
Depuis le Big Bang, l'Univers primordial a franchi de nombreuses étapes durant lesquelles les particules puis les atomes et la lumière ont peu à peu émergé avant qu'étoiles et galaxies ne prennent corps. C'est cette histoire que raconte la théorie du « modèle standard » en vigueur aujourd'hui.

L'Univers devient transparent.

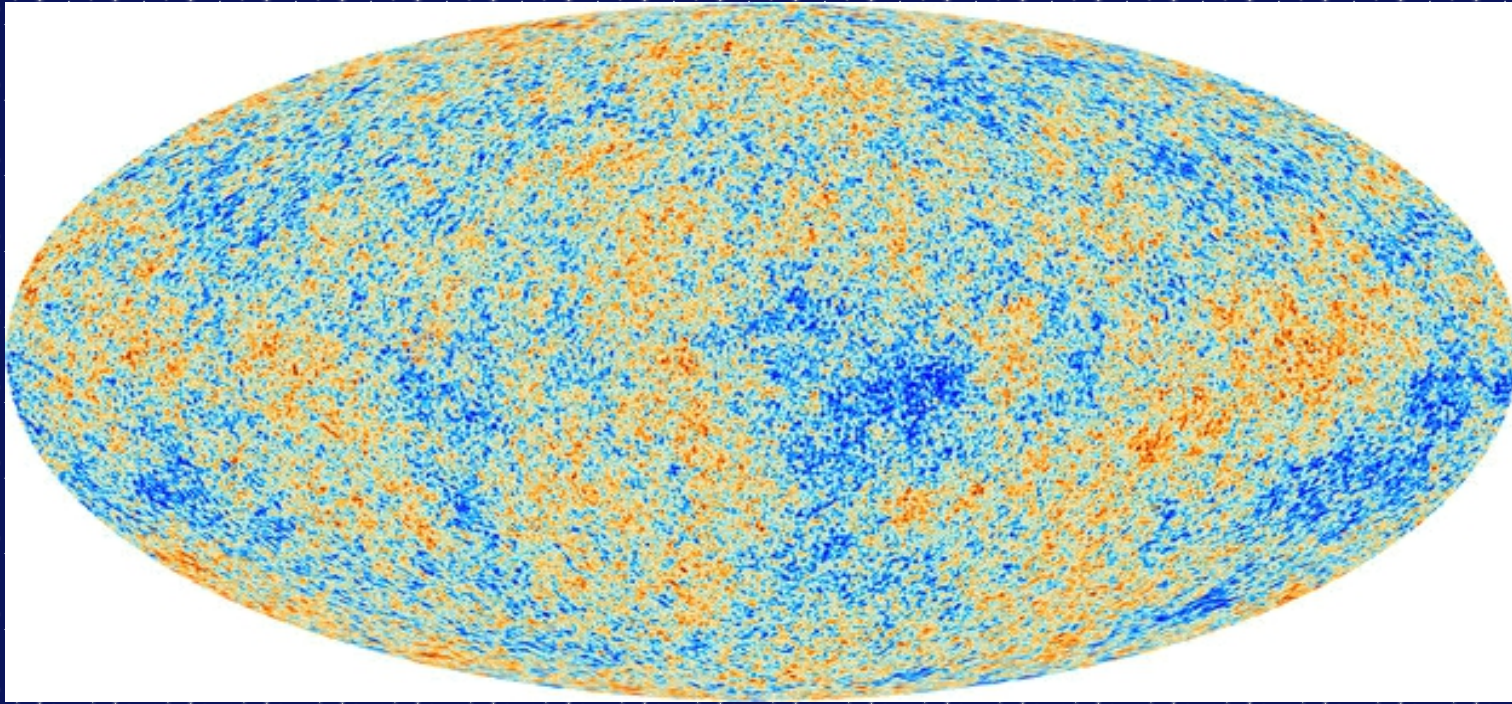


Légendes	
W, Z bosons	photon
quark	meson
gluon	baryons
électron	ions
muon	atome
tau	trou noir
neutrino	galaxie
	étoile

# Le Satellite Planck (ESA)

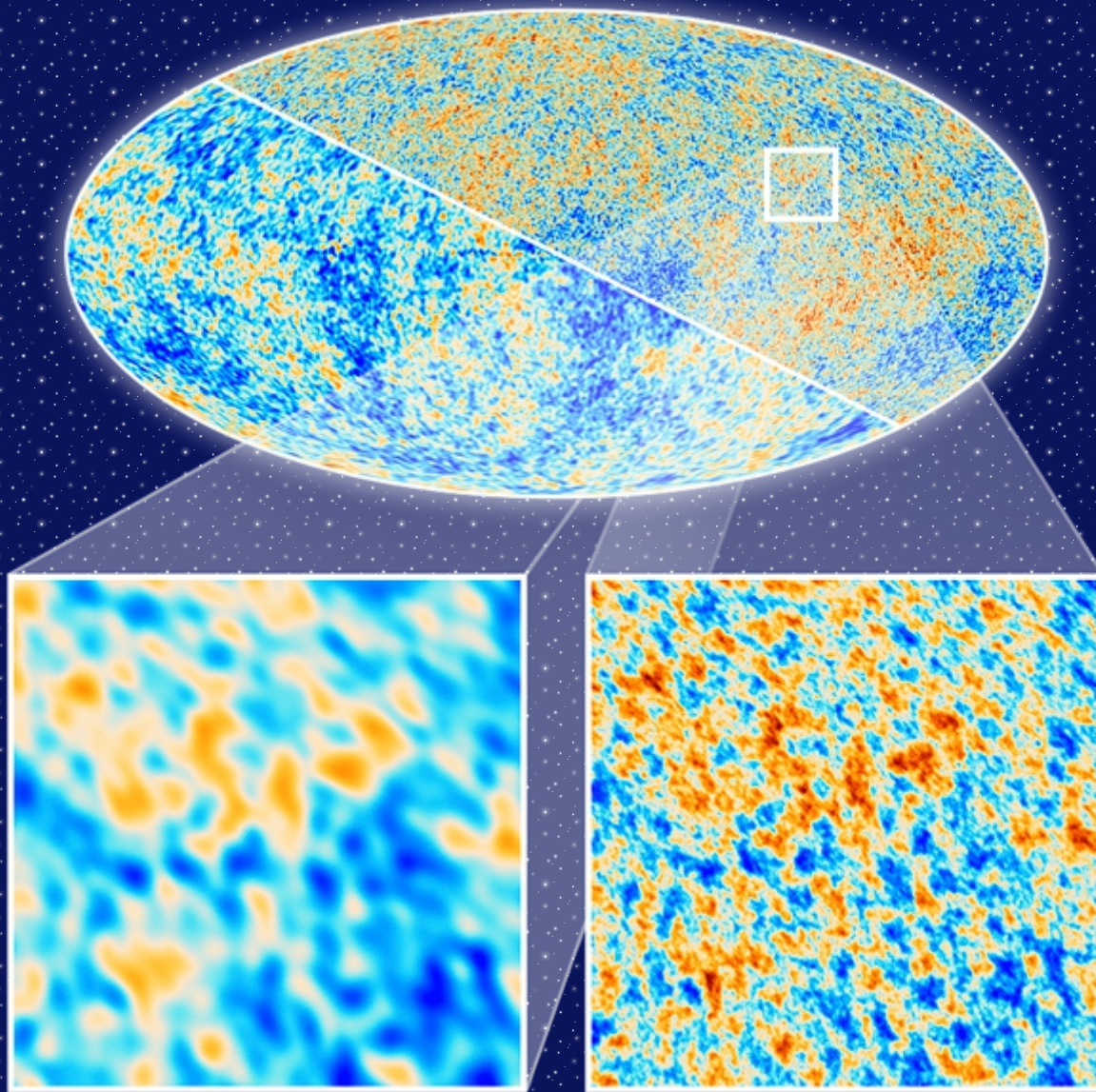


## Les résultats de Planck



- Grâce à sa résolution bien supérieure Planck a permis de préciser le modèle en particulier pour le diagramme de puissance spectrale. Il y a quelques différences sensibles sur les valeurs de l'âge de l'univers, de la constante de Hubble et des quotas des fluides de l'univers.

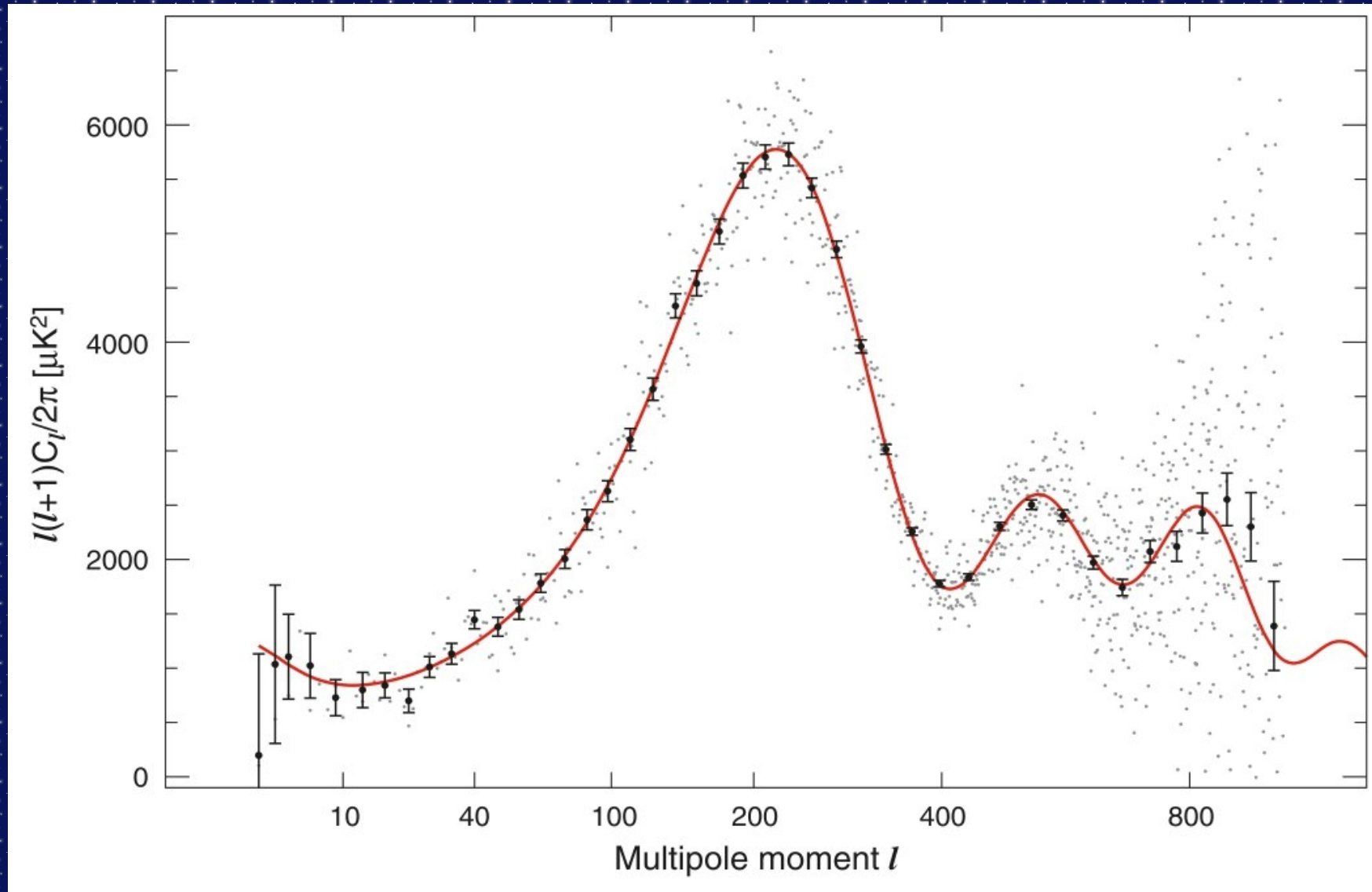




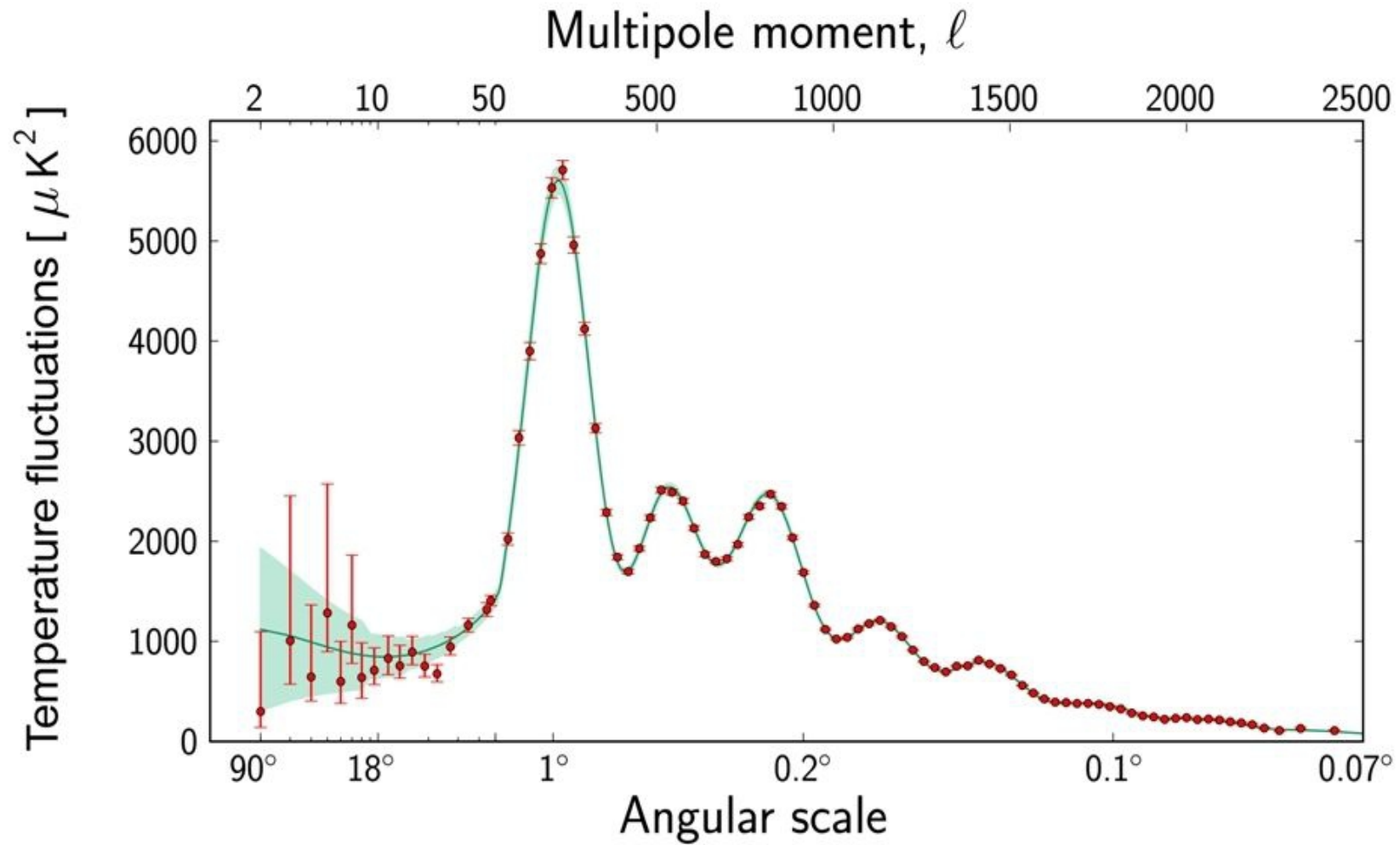
**WMAP**

**PLANCK**

# Diagramme de puissance WMAP



# Diagramme de puissance (Planck)



## Principaux résultats de Planck

- ▶ Les données de la mission nominale de Planck font l'objet d'une trentaine de publications simultanées disponibles le 21 mars 2013 sur <http://sci.esa.int>, puis le 22 mars 2013 sur [www.arxiv.org](http://www.arxiv.org).

Parmi ces autres résultats :

- La confirmation de la « platitude » de l'Univers
  - La révision à la baisse de la constante de Hubble, et donc du rythme d'expansion de l'Univers
  
  - Une nouvelle évaluation, à partir du seul rayonnement fossile, de la composition de l'Univers : 69.4 % d'énergie noire (contre 72.8 % auparavant), 25.8 % de matière noire (contre 23 %) et 4.8 % de matière ordinaire (contre 4.3 %).
- 
-

🔍 Des cartes inédites précieuses pour affiner le scénario de l'histoire de l'Univers et comprendre la physique qui régit son évolution : elles permettent de montrer comment se répartissent la matière noire et la matière ordinaire sur la voûte céleste ; le « fond diffus infrarouge » correspond quant à lui à la lumière émise par les poussières de toutes les galaxies au cours des dix derniers milliards d'années et permet donc d'identifier les zones où se sont concentrés les objets constitués de matière ordinaire.

- Une première analyse de la polarisation du signal cosmologique, qui montre que les données de Planck sont remarquablement cohérentes avec celles sur l'intensité du rayonnement fossile aux échelles correspondantes aux futurs amas de galaxies ; une analyse plus complète sera fournie en 2014, ainsi que d'autres résultats de la mission Planck.

---

---

## Bientôt une vérification expérimentale de la théorie de l'inflation ?

Il existe un test très convaincant, pour autant qu'on le sache, de la théorie de l'inflation. Il s'agirait de la détection des modes B. Il s'agit des traces d'infimes fluctuations quantiques primordiales des ondes gravitationnelles, au tout début de l'histoire du cosmos observable, qui pourraient avoir été considérablement agrandies pendant la phase d'inflation.

Or, comme le signale Jean-Loup Puget, l'un des principaux responsables de la collaboration Planck, les informations concernant ces modes B n'ont pas encore pu être proprement exploitées. Des analyses sont en cours, et si ces modes sont présents avec un signal suffisamment clair dans les données de Planck, on devrait le savoir probablement d'ici la fin de l'année.

Toutes les données collectées par Planck n'ont pas encore été examinées. Qui plus est, comme pour WMap, leur exploitation pourrait bien durer une décennie, et probablement plus. Nous ne sommes donc qu'au début des révélations qu'apportera Planck sur l'histoire et la structure de notre univers.

---

---

## Conclusion

COBE du fait de sa faible résolution, ne fut pas capable de discerner des domaines suffisamment petits correspondant aux "germes" des amas ou même super amas de galaxies, mais si nous utilisons la propriété "que le spectre de puissance est indépendant d'échelle" pour extrapoler les données de COBE à des échelles plus petites, nous trouvons que les forces gravitationnelles sont suffisamment fortes pour produire les amas tels que nous les voyons, mais sous réserve que ces forces ne soient pas opposées à d'autres.

Si la matière de l'univers n'est composée que de éléments chimiques ordinaires, alors il y avait des forces importantes qui s'opposaient avant le découplage, car les électrons libres qui sont maintenant liés à des atomes se couplèrent très facilement avec les photons et étaient très efficaces pour diffuser les photons du fond Cosmologique.

Nous pouvons donc conclure que l'essentiel de la matière dans l'univers est de la "matière sombre" qui n'émet pas, n'absorbe pas, et ne diffuse pas la lumière (photons). De plus les observations des supernova distantes ont montré que la composante principale de l'univers était de l'énergie du vide ce qui produit une expansion accélérée de l'univers. Cette conclusion étrange a été confortée par une analyse plus fine de l'anisotropie du RFC (WMAP puis Planck).

---

---