

# Cours de cosmologie: Quatrième partie

Adapté librement par Jacques Fric du cours de Cosmologie du Pr  
Edward Wright (avec son aimable autorisation) Printemps 2009

## Inflation, anisotropie et inhomogénéités



# L'inflation

Le scénario inflationniste développé par Starobinsky et par Guth, offre une solution aux problèmes de longévité, de platitude et d'horizon de l'Univers [la Totale].

Pour ceux que les mathématiques ne rebutent pas, on peut consulter: [http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique\\_Relativiste.pdf](http://www-cosmosaf.iap.fr/Dynamique_Relativiste.pdf) chapitre 9, pour une description plus technique de l'inflation.

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

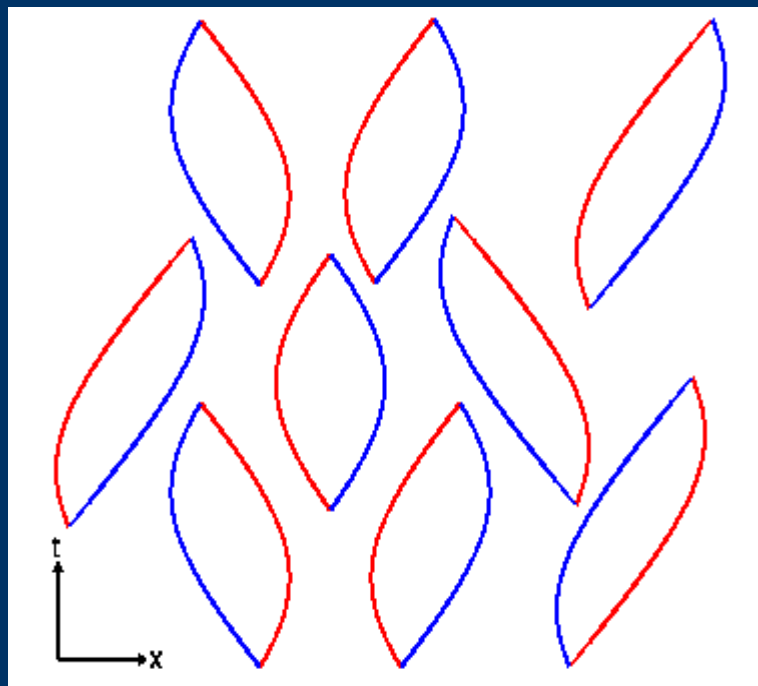
Habituellement nous pensons que le vide est "vide" et sans masse, et nous avons déterminé que sa densité est en tout état de cause inférieure  $10^{-29}$  g/cc aujourd'hui.

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

---

---

# 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).

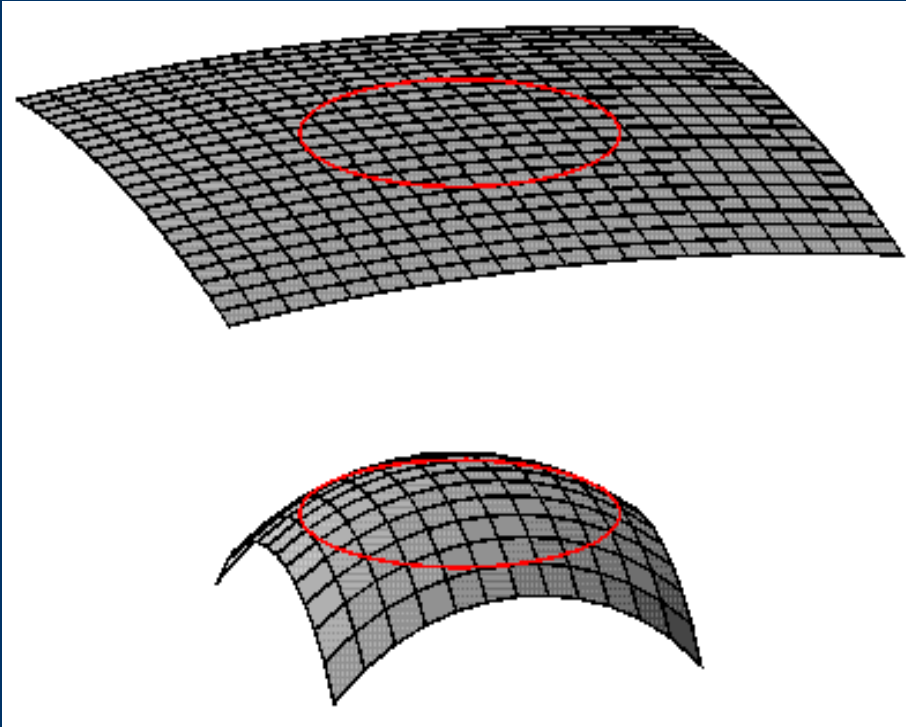
Quand l'Univers est dominé par l'énergie du vide le facteur d'échelle croît exponentiellement,  $a(t) = \exp(H(t - t_o))$ .

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

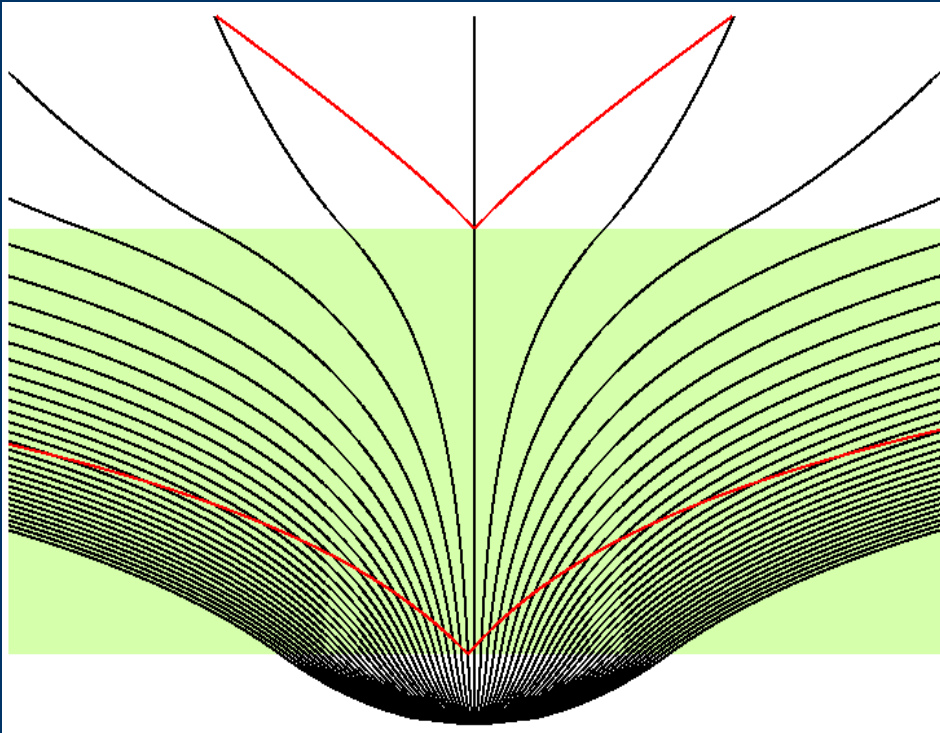


Le diagramme ci contre montre notre horizon représenté sur une sphère de grand rayon en haut et sur une plus petite sphère en bas.

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

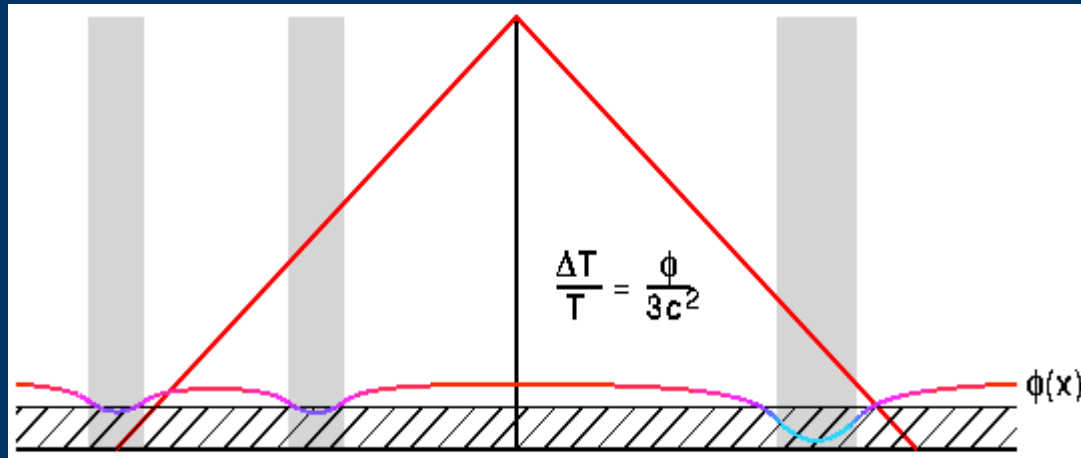


L'inflation résout aussi le problème de l'horizon, car le cône de lumière du futur d'un événement qui s'est produit avant l'inflation est énormément dilaté par le processus d'inflation couvrant ainsi après l'inflation, une région très étendue de l'Univers.

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.

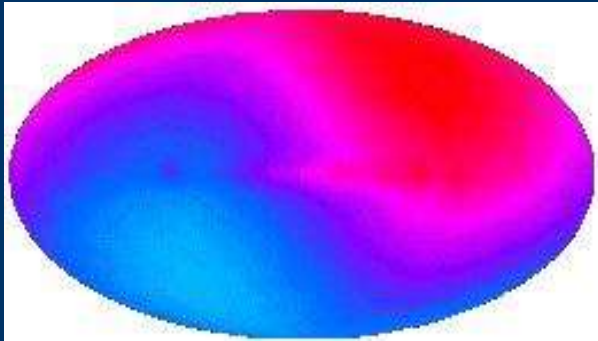
Sachs et Wolfe (1967, ApJ, 147, 73) ont évalué l'effet des perturbations du potentiel gravitationnel sur le RFC. Le potentiel gravitationnel  $\Phi = -GM/r$ , va être négatif dans des grumeaux denses et positif dans les régions moins denses.

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



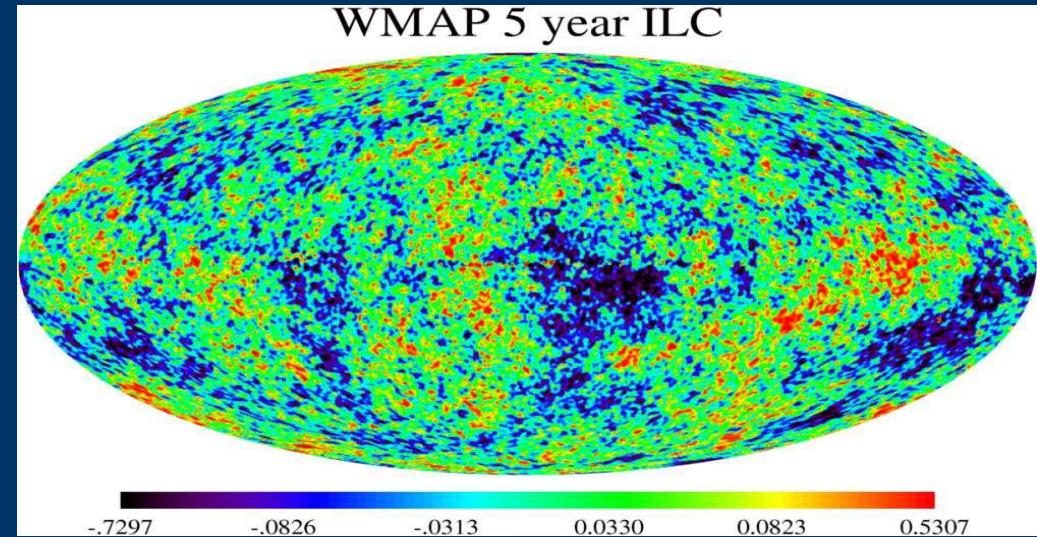
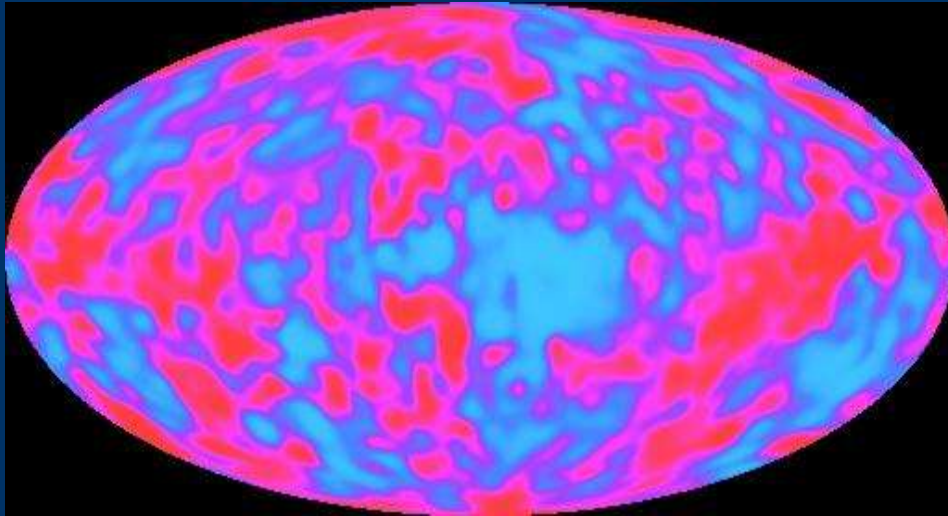
Sachs et Wolfe ont prédit des fluctuations  $dT/T$  allant jusqu'à  $1\%$ , mais nous savons maintenant que l'Univers est bien plus homogène que Sachs et Wolfe le pensaient

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].

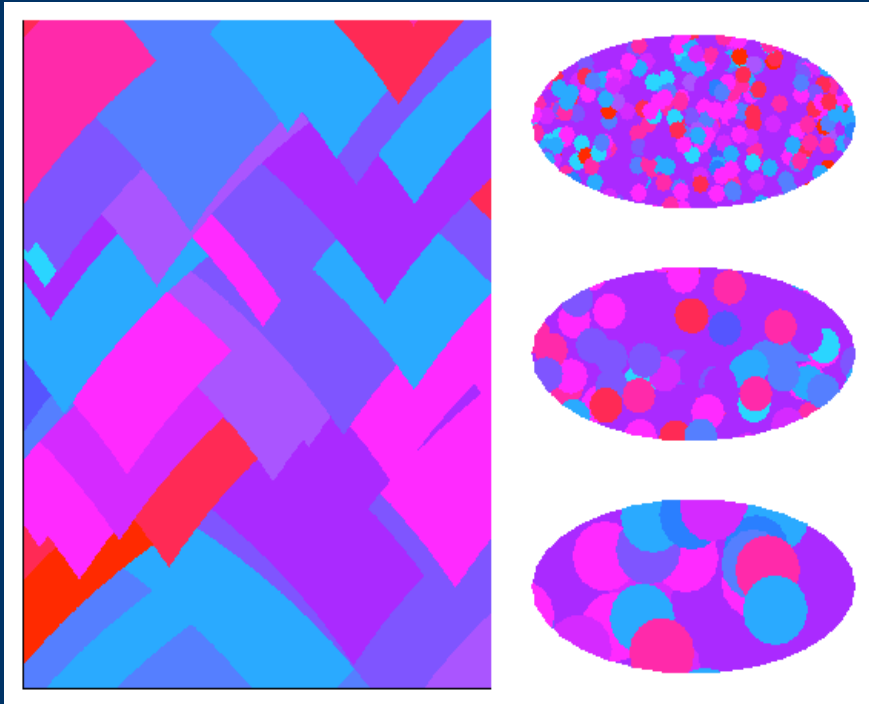


# Cartes du RFC



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

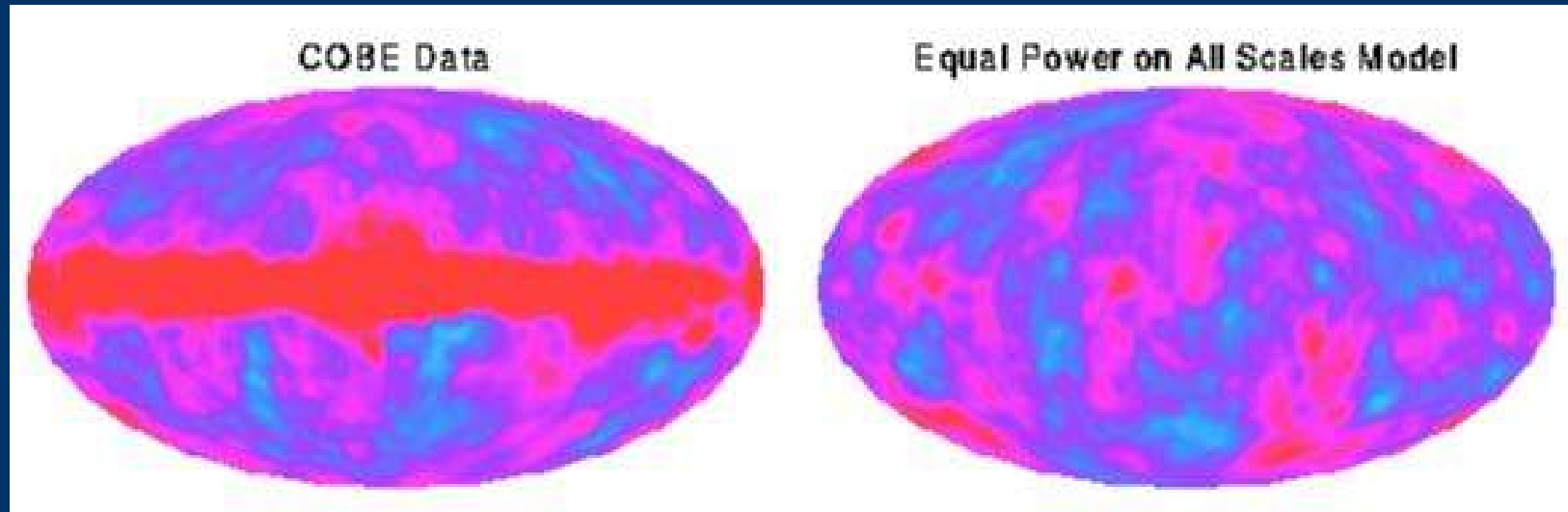


L'Inflation prédit une certaine distribution statistique de l'anisotropie. Les fluctuations quantiques n'affectent que des zones minuscules, mais l'expansion fantastique liée à l'inflation les a transformé en régions observables. Le diagramme d'espace temps à gauche en haut montre les cônes de lumière du futur des évènements 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 évènements deviennent des cercles dans le ciel. Les évènements les plus anciens de l'époque inflationniste tracent de larges cercles, comme montré sur la figure en bas à droite. Les évènements 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

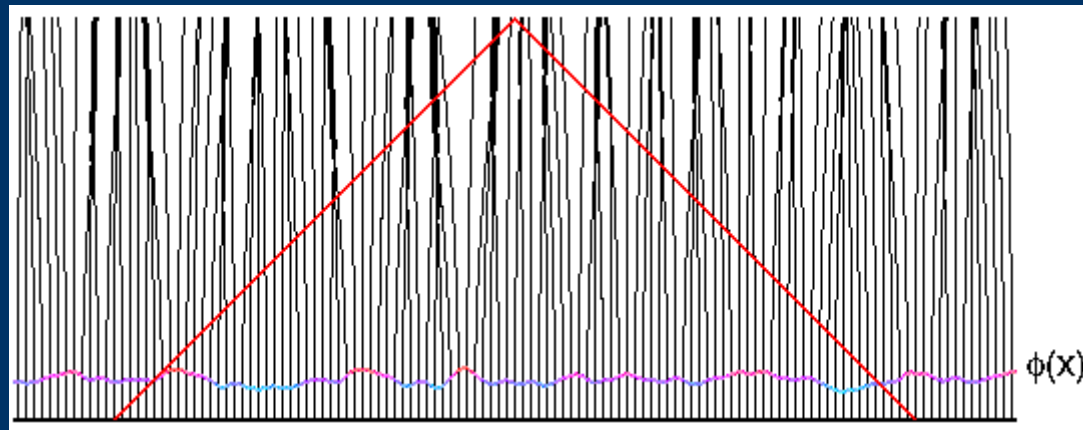


Le motif formé en additionnant tous les effets des événements de tous les âges est appelé " modèle à puissance indépendante d'échelle" et est conforme aux observations de COBE (et de WMAP). Ayant constaté que le motif d'anisotropie est cohérent avec l'inflation, on peut se demander si son amplitude implique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

---

---

# Formation des structures astrophysiques



Le diagramme d'espace temps "conforme" ci-dessus montre la fonction  $\Phi(x)$  au découplage telle que mesurée par COBE, et les lignes d'univers des Galaxies qui sont perturbées par les forces gravitationnelles issues du gradient du potentiel.

La Matière s'écoule vers la vallée s'écartant des pics de potentiel ( points rouges sur la carte COBE) provoquant un vide dans la distribution actuelle des galaxies, alors que les vallées de potentiel ( points bleus) sont les endroits d'accumulation où les amas de galaxies se forment.

# 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 coupleraient très facilement avec les photons et étaient très efficaces pour diffuser les photons du fond Cosmologique.

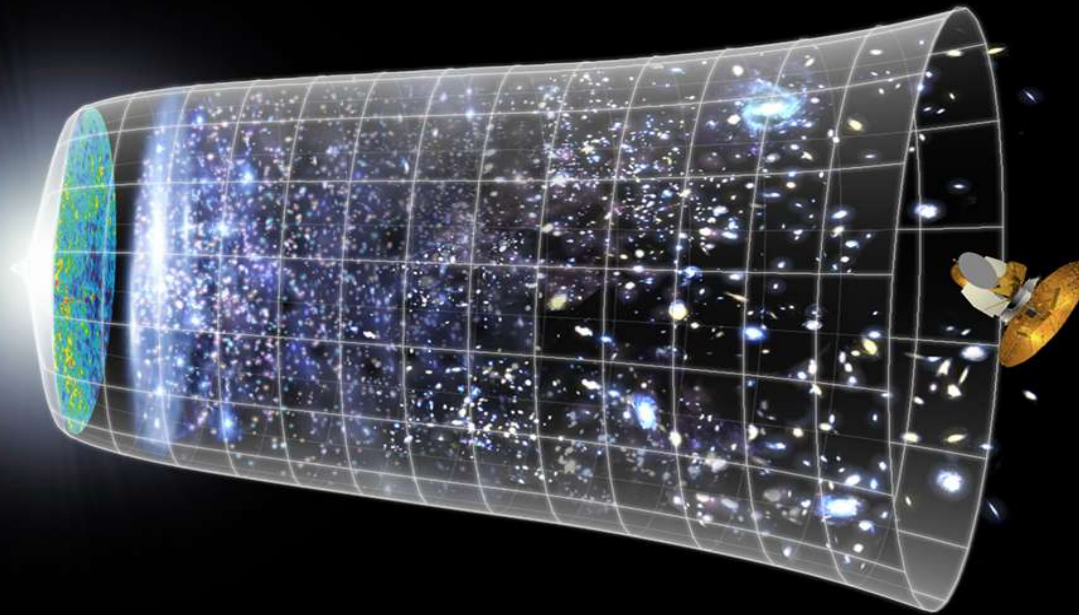
Nous pouvons donc conclure que l'essentiel de la matière dans l'univers est de la "matière sombre" qui n'émet pas, n'absorbe pas, et ne diffuse pas la lumière ( photons). De plus les observations des supernovae distantes ont montré que la composante principale de l'univers était de l'énergie du vide 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 qui a été une des missions de WMAP.

---

---



# WMAP et l'évolution de L'univers

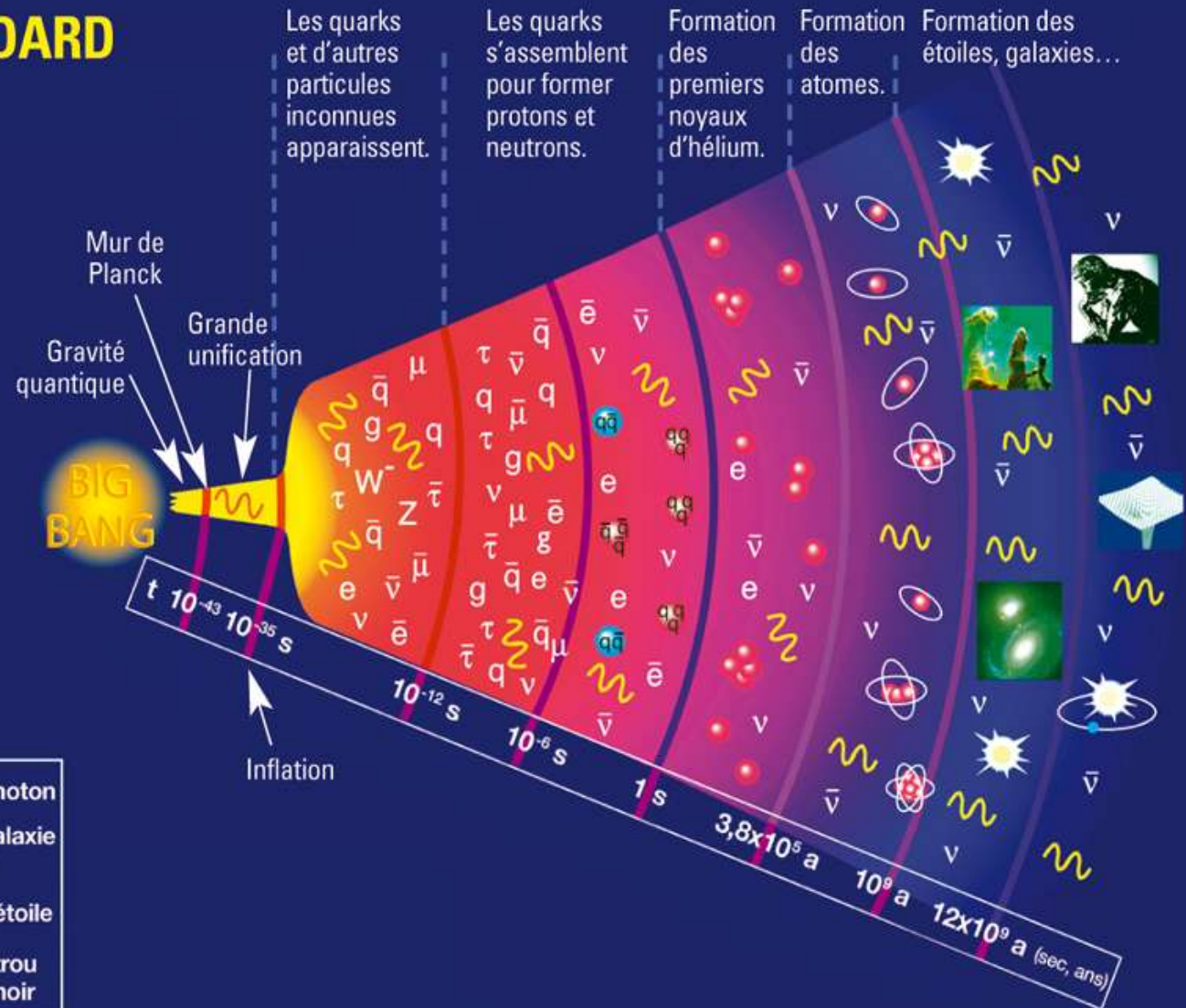


# WMAP et l'évolution de L'univers

## 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.

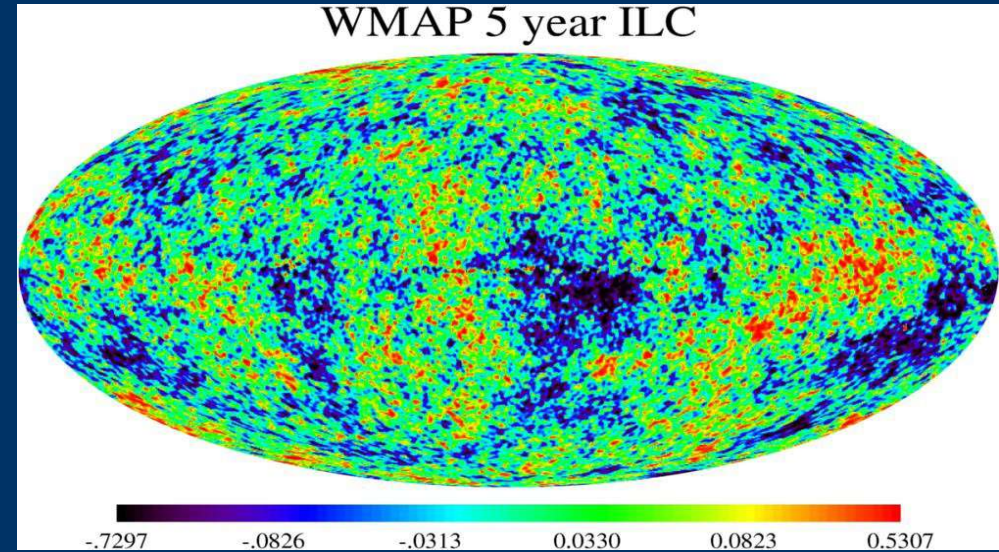


Légendes		
W, Z bosons	meson	photon
quark	baryons	galaxie
gluon	ions	étoile
électron	atome	trou noir
muon		
tau		
neutrino		



# Compléments WMAP + SNE\* + BAO\*\*

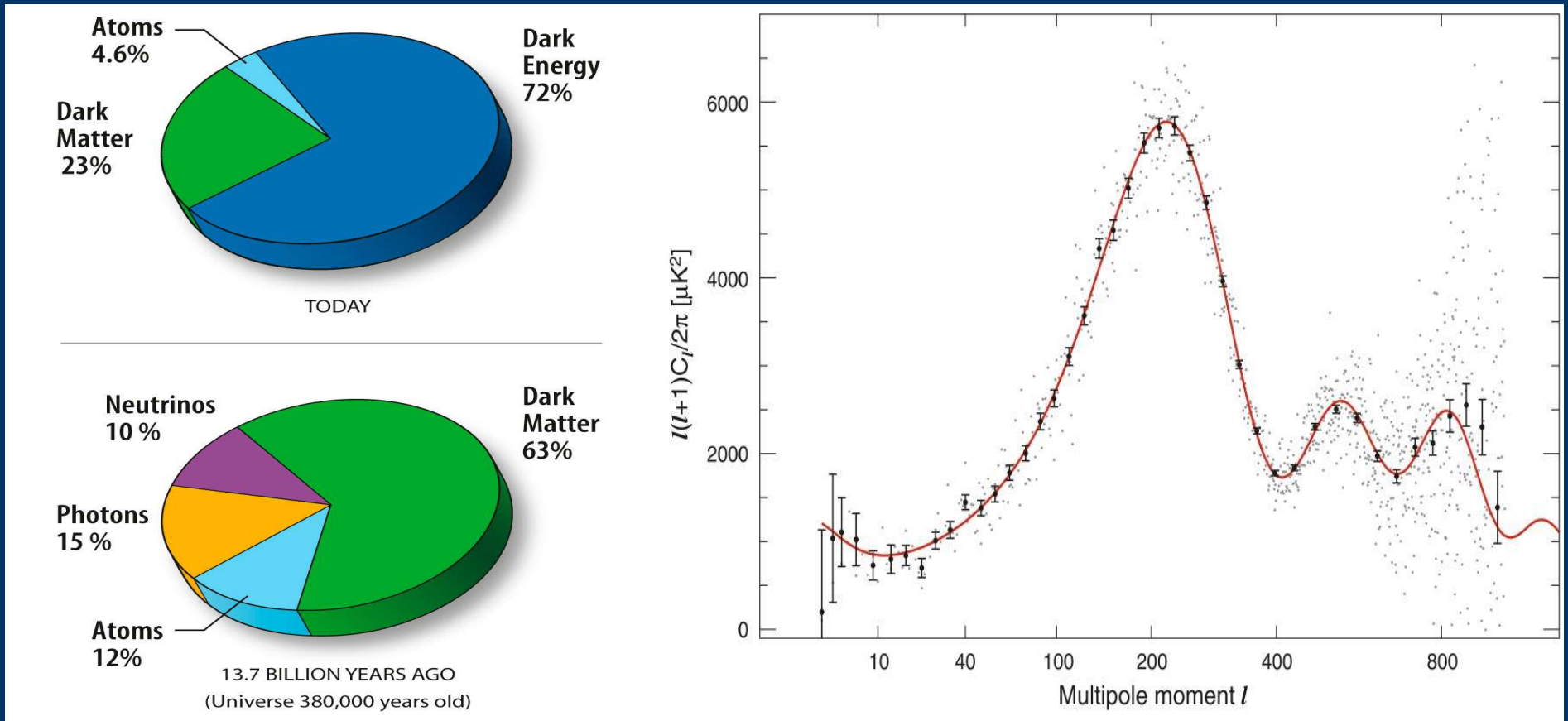
- Amélioration de la précision des résultats antérieurs (Best fit WMAP, SNE, BAO)
- $H = 70,1 \text{ km/s par Mpc} \pm 1,3.$
- Densité totale:  $\Omega_{\text{tot}} = 1,0052 \pm 0,0064$
- Energie noire  $72,1\% \pm 1,5.$
- Matière sombre  $23,3\% \pm 1,3.$
- Matière baryonique  $4,6\% \pm 0,2.$
- Age de l'Univers  $13,73 \cdot 10^9$  d'années  $\pm 0,12.$
- Température moyenne du cosmos  $2,725\text{K}.$
- Recombinaison à  $375900$  ans  $\pm 3100.$
- Fond diffus de neutrinos (troisième pic d'oscillation mis en évidence par l'amélioration des résultats dans la variance cosmique: Univers multiconnexe ? )
- \* SNE (Supernovae de type I)
- \*\*BAO (Baryon Acoustic Oscillation) : Spectre de puissance (position et amplitude relative des pics)



# Compléments résultats

Best-fit cosmological parameters from WMAP five-year results[5] Parameter	Symbol	Best fit (WMAP only)	Best fit (WMAP + SNe + BAO)
Hubble's constant ( $\text{km}/\text{Mpc}\cdot\text{s}$ )	$H_0$		$0.701 \pm 0.013$
Baryonic content	$\Omega_b h^2$	$0.02273 \pm 0.00062$	$0.02265 \pm 0.00059$
Cold dark matter content	$\Omega_c h^2$	$0.1099 \pm 0.0062$	$0.1143 \pm 0.0034$
Dark energy content	$\Omega_\Lambda$	$0.742 \pm 0.030$	$0.721 \pm 0.015$
Optical depth to reionization	$\tau$	$0.087 \pm 0.017$	$0.084 \pm 0.016$
Scalar spectral index	$n_s$		
Running of spectral index	$dn_s / dk$	$-0.037 \pm 0.028$	
Fluctuation amplitude at $8h^{-1}$ Mpc	$\sigma_8$	$0.796 \pm 0.036$	$0.817 \pm 0.026$
Age of the universe (Ga)	$t_0$	$13.69 \pm 0.13$	$13.73 \pm 0.12$
Total density of the universe	$\Omega_{tot}$		$1.0052 \pm 0.0064$
Tensor-to-scalar ration	$r$	$<0.20$	—

# Compléments WMAP



- A gauche décomposition du  $\Omega$  total en ses différentes composantes à deux époques de l'univers.
- A droite spectre de puissance en fonction de modes.

# Compléments: Diagrammes des $\Omega$

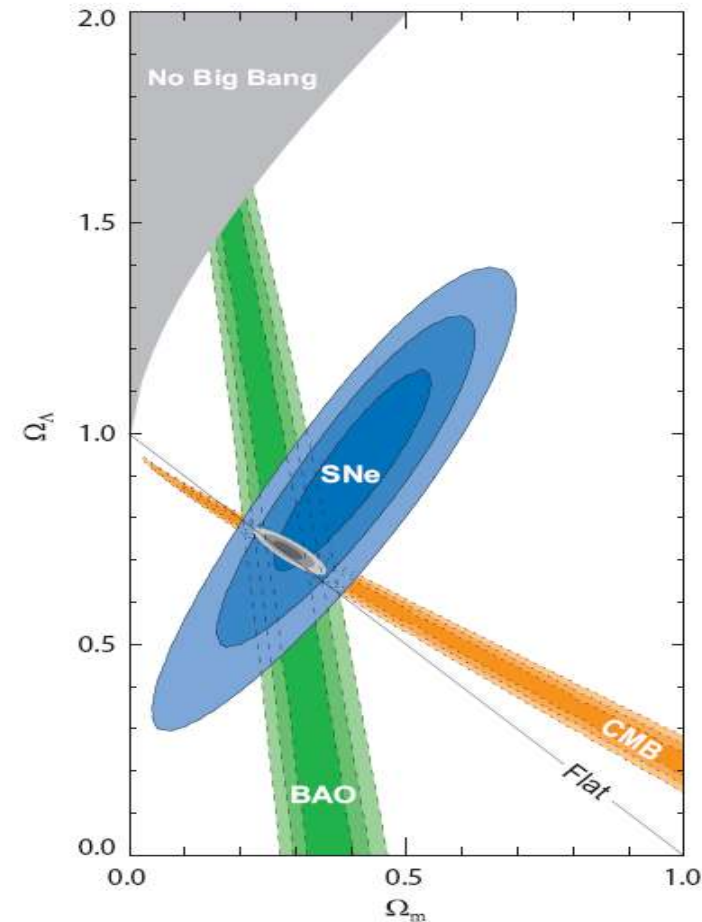
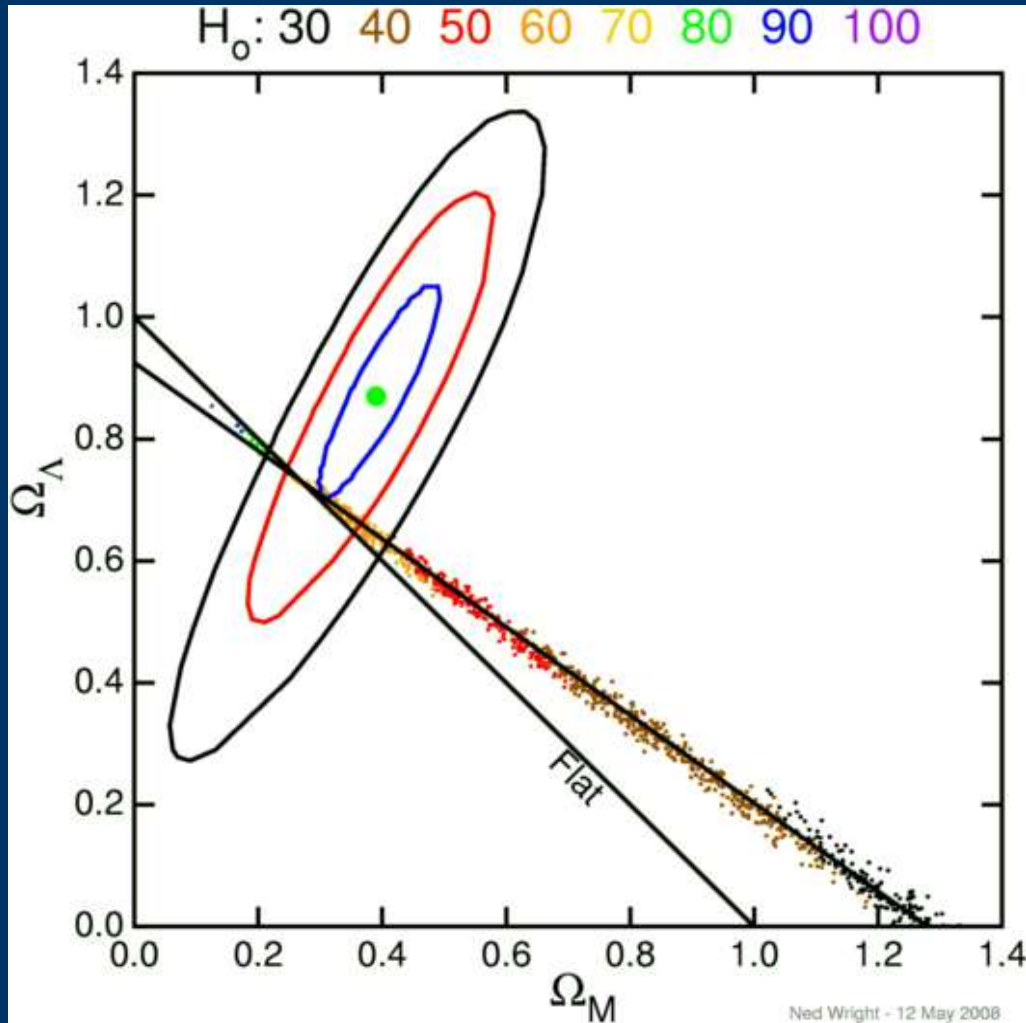

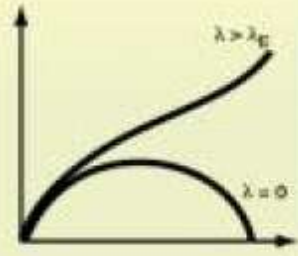

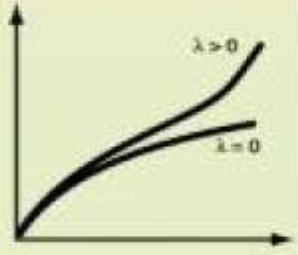

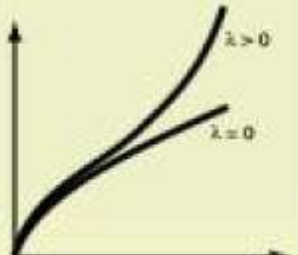


FIG. 15.— 68.3 %, 95.4 % and 99.7% confidence level contours on  $\Omega_\Lambda$  and  $\Omega_M$  obtained from CMB, BAO and the Union SN set, as well as their combination (assuming  $w = -1$ ).

A gauche diagramme schématique des  $\Omega$  où on a ajouté la représentation de  $H_0$  par un code de couleur, à droite c'est le diagramme général classique (2008).

# Types d'univers avec constante cosmologique $\Lambda$

courbure	topologie	dynamique	destin
$K > 0$  sphérique	fini		ouvert si $\lambda$ grand  fermé
$K = 0$  Euclidien	fini ou infini		ouvert
$K < 0$  hyperbolique	fini ou infini		ouvert

- Géométrie spatiale hypersphérique (courbure positive) avec expansion du rayon jusqu'à un maximum puis re-contraction pour  $\lambda < \lambda_{\text{crit}}$ , sinon expansion tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.
- Géométrie spatiale euclidienne marginalement ouverte pour  $\lambda = 0$  tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.
- Géométrie spatiale hyperbolique (courbure négative) ouverte pour  $\lambda = 0$  tendant vers une expansion exponentielle lorsque  $\lambda$  augmente.

- Figure empruntée à JP Luminet