



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Accélération de l'expansion et Energie noire



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes lignes

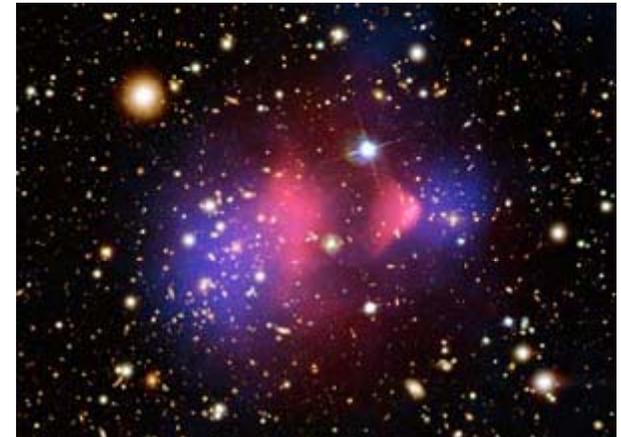
- Le contenu de l'univers et son évolution probable
- Histoire de la constante cosmologique: supposée nulle pendant 80ans
- Comment la physique fondamentale de l'infiniment petit contrôle le destin de l'Univers à grande échelle
- Découverte en 1998 de l'accélération de l'expansion, le mystère se corse! Analogie avec l'inflation?
- Pistes pour des solutions...

Composition de l'Univers

- Matière ordinaire 5%



- Matière noire exotique 25%



- Energie noire 70%

$$\Omega = \rho / \rho_{\text{crit}}$$

$$\rho_{\text{crit}} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

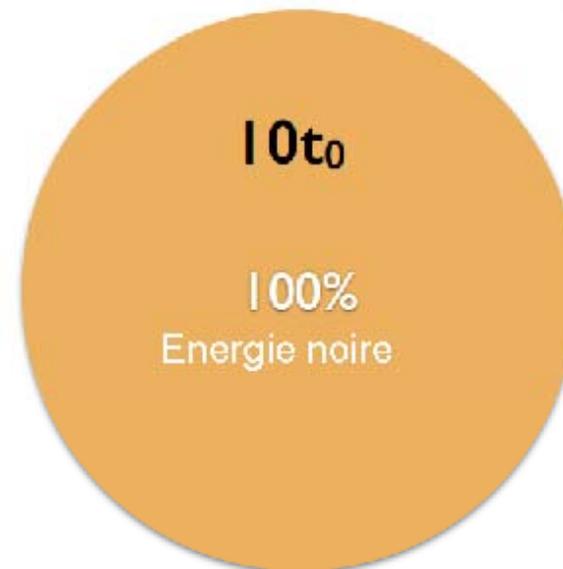
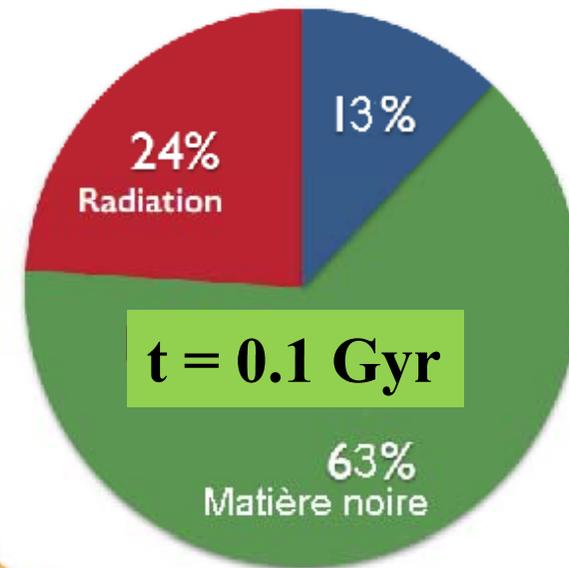
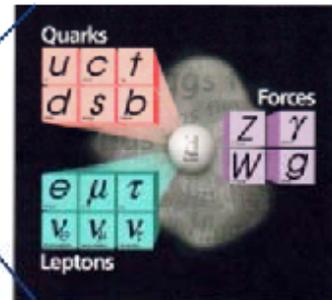
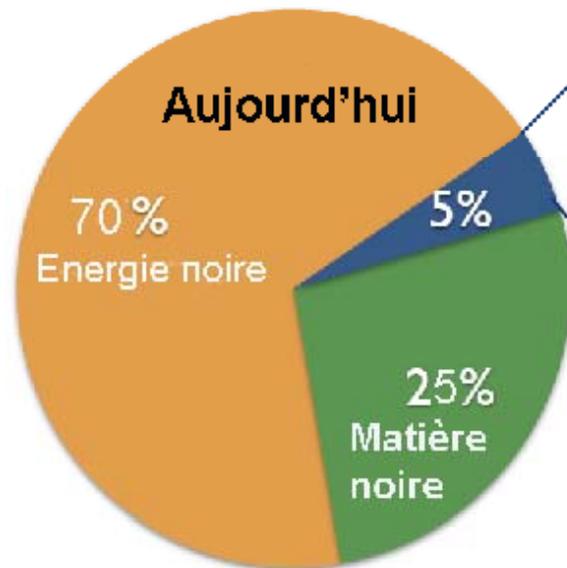
$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$



ou constante cosmologique

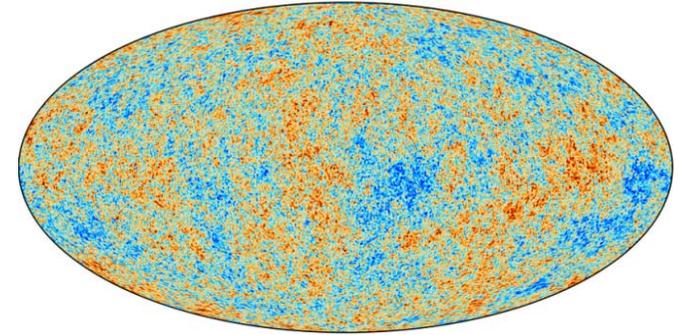
Evolution du contenu

- L'énergie noire ne domine que depuis récemment (<5 Gyr, $z=0.5$)
- Elle va dominer dans le futur

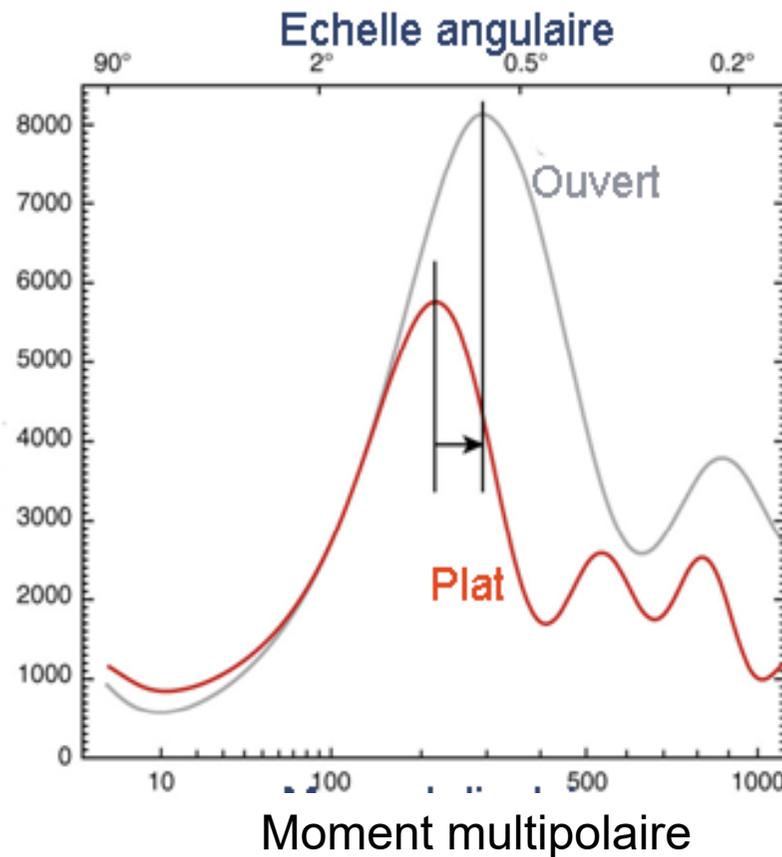


Courbure de l'Univers nulle

- L'observation du fond cosmologique micro-onde (COBE, WMAP, Planck)
- → taille de l'horizon sonore vue sous un angle de $\sim 1^\circ$



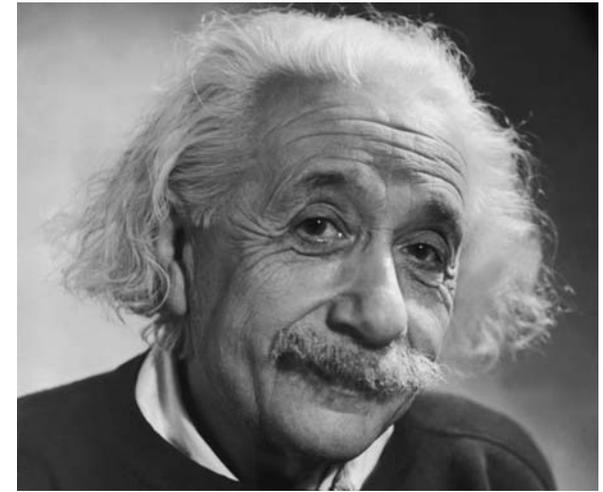
Règle standard 1°
Horizon sonore



La courbure = $\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$

→ $\Omega_{\text{tot}} = 1$

Pourquoi une constante cosmologique?



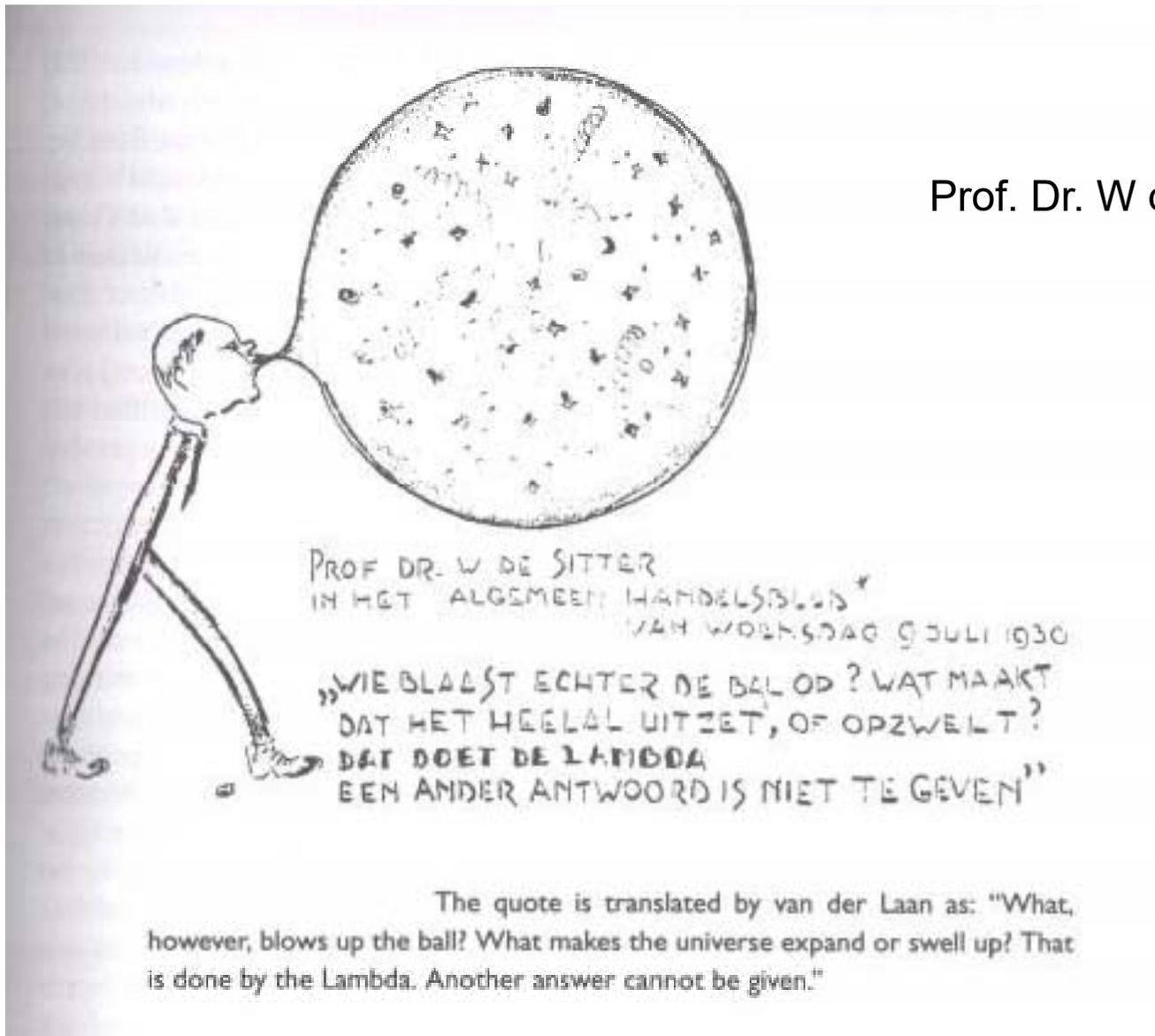
- Cette constante λ est introduite en 1917 par Einstein, qui voulait représenter un Univers statique, avec $\rho = \lambda/8\pi G$
- $R_{\mu\nu} - 1/2 g_{\mu\nu} R - \lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu}$
- Son modèle d'univers était une sphère de masse finie

Peu après, l'**expansion de l'Univers** fut découverte par le mouvement de récession des galaxies (Slipher, 1924) loi de Hubble $\mathbf{V} = \mathbf{Hd}$

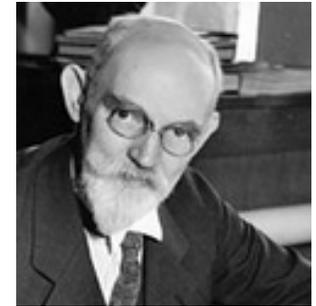
Mais aussi: de Sitter montrait qu'il pouvait exister un référentiel inertiel dans un univers sans matière $\rho = 0$, $R(t) = R_0 \exp(Ht)$, avec $H = \sqrt{\lambda/3}$

$R(t)$ est l'échelle caractéristique de l'univers, avec la métrique

$$d\tau^2 = dt^2 - R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) \right]$$



Prof. Dr. W de Sitter



Qu'est-ce qui fait enfler le ballon? Quel est le processus physique à l'origine de l'expansion ou l'effondrement de l'Univers? **C'est le Λ !**
Il n'y a aucune autre explication

Comment obtenir un univers statique

Courbure de l'Univers

- Equations de Friedmann

$$\frac{2 \ddot{R}}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R} \right)^2 = -\frac{kc^2}{R^2} + \Lambda - \frac{8 \pi G}{c^2} P$$

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

Cste de Hubble

$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

$$\Omega = \frac{8 \pi G \rho}{3 H^2}$$

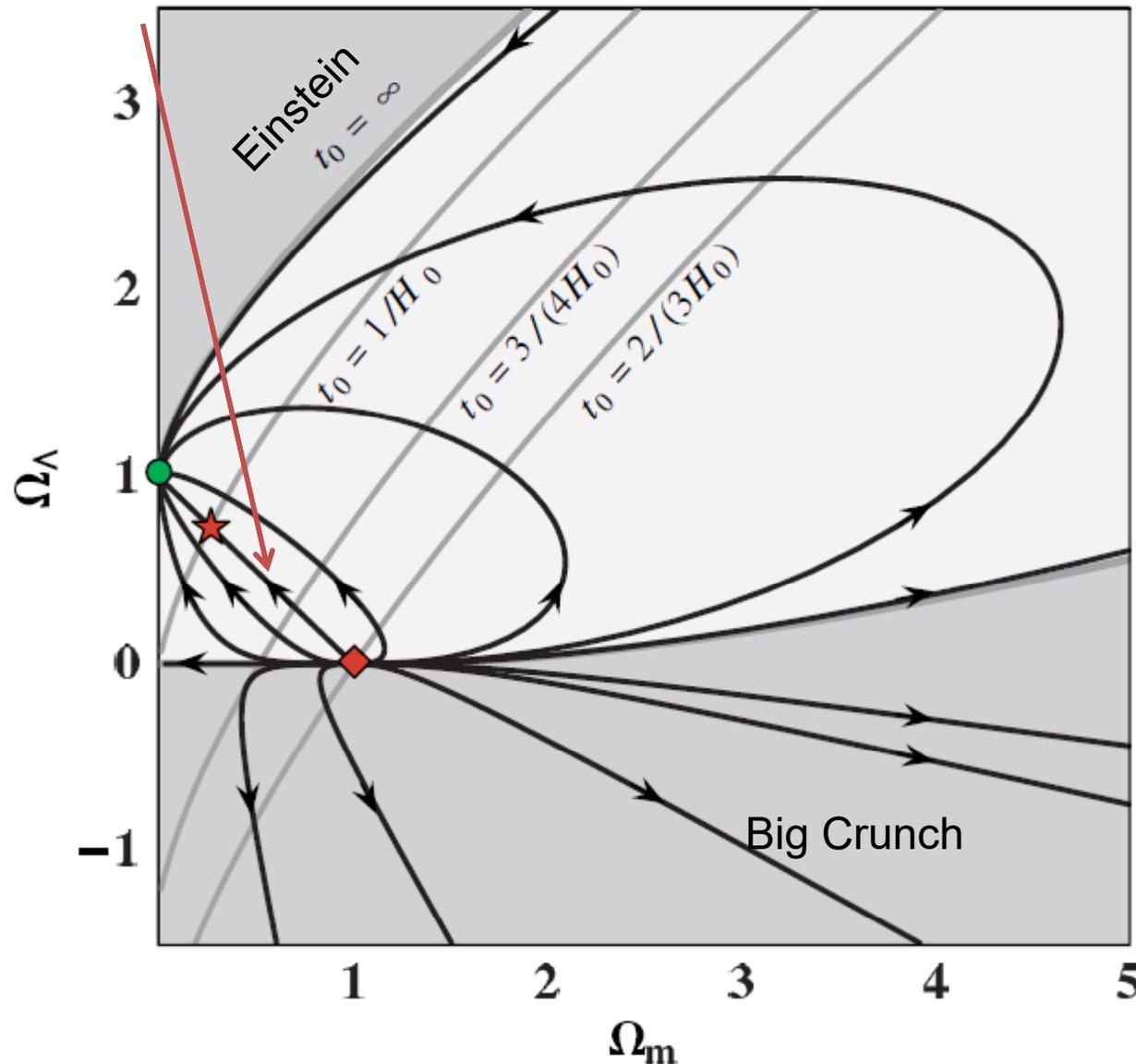
$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3 H^2}$$

La constante Λ est homogène à c^2/a^2 et pour Einstein a^2 était la taille caractéristique de son univers sphérique

L'estimation de l'âge de l'univers, typiquement l'inverse de la constante de Hubble, a beaucoup varié dans le temps, $H_0=500\text{km/s/Mpc}$ au début, aujourd'hui 70 km/s/Mpc . Pour Einstein $t_0 = -\infty$!

Différents modèles d'univers

Droite $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$



● Univers de Sitter
 $R(t) \sim e^{Ht}$

◆ EdS $R(t) \sim t^{2/3}$

★ Standard Λ CDM

Le modèle statique d'Einstein était hautement instable

Lemaître (1933): Λ équivalent à un fluide de pression $P = -\rho c^2$

Energie du vide



- Le premier à supposer qu'il pourrait y avoir une énergie du vide en mécanique quantique, équivalente à Λ , qui pourrait avoir une action gravitationnelle est **Wolfgang Pauli en 1920**

- Ses calculs montrèrent que le rayon de l'univers d'Einstein n'arrivait pas à la Lune!

- Si on essaie en effet d'avoir l'ordre de grandeur

$$\langle \hat{H} \rangle = \frac{1}{2m} \langle \hat{p}_x^2 \rangle + \frac{m\omega^2}{2} \langle \hat{x}^2 \rangle \quad \langle \hat{H} \rangle \geq \frac{\hbar\omega}{2}$$

état fondamental

- $\rho_V = \int \hbar\omega \, 4\pi \omega^2 \, d\omega / (2\pi)^3 \sim \omega_{\max}^4$

- Sommation qui donne une valeur finie, si on intègre jusqu'à une valeur maximale de fréquence $\nu_{\max} = \omega_{\max}/2\pi$ correspondant au rayon de l'électron, alors la densité d'énergie est si grande que le **rayon de l'univers d'Einstein est de 31km!** $\Lambda = c^2/a^2$

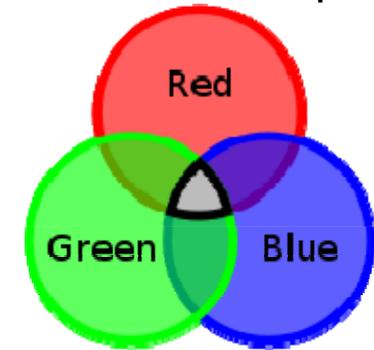
Le vide quantique

- Vers les années 1960-70, approche plus fondamentale de ce problème: théorie des champs, chromodynamique quantique (QCD), décrivant les interactions nucléaires fortes et faibles
- La densité de l'univers ($\Omega=1$) $\sim 10^{-29}$ g/cm³
- ou en énergie 10^{-47} GeV⁴ ($\hbar=c=1$)
- Le calcul de l'énergie du vide revient à sommer tous les degrés de liberté de tous les champs quantiques possibles

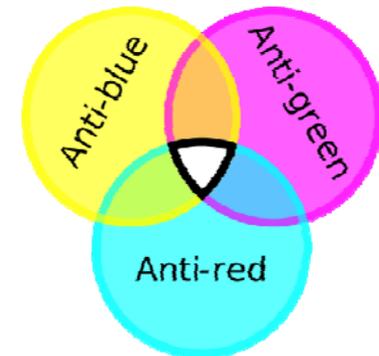
Selon l'échelle de coupure, on trouve

- $2 \cdot 10^9$ GeV⁴ si la coupure est l'échelle de l'interaction électrofaible
- 10^{72} GeV⁴, si la coupure est l'échelle de Planck
- Autre possibilité $\Lambda_{\text{QCD}}=10^{-6}$ GeV⁴ encore 41 ordres de grandeur!

3 couleurs des quarks



+ 3 anti-couleurs



Problème de coïncidence?

- Cette valeur de l'énergie du vide quantique doit apparaître comme une énergie dans l'équation d'Einstein $\Lambda_q = 8\pi G \rho_q$
- Pour représenter la réalité, il faut que Λ mesurée = $\Lambda_E + \Lambda_q$

Une valeur quasi-nulle. Il faut un **réglage extrêmement fin** entre ces deux quantités à 60 ou 120 ordres de grandeur près!

Comment annuler cette constante? Les fermions contribuent une énergie positive, et les bosons une énergie négative, mais ils sont en minorité!

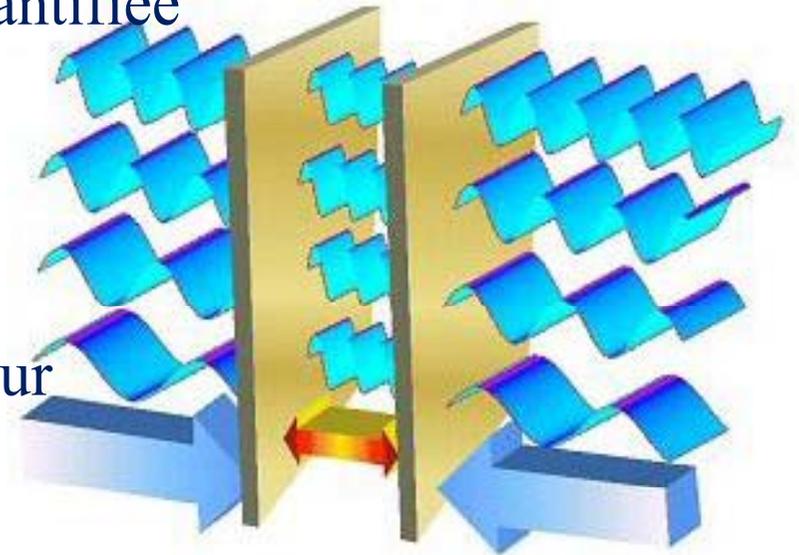
D'où l'hypothèse de **supersymétrie**, avec échange de fermions \leftrightarrow bosons. Mais il faudrait garder une parfaite symétrie, ce qui n'a lieu qu'au début de l'Univers. Aujourd'hui la symétrie est brisée

(Zumino 1975)

Réalité de cette énergie du vide?

- **Effet Casimir (1948)** entre deux plaques non chargées
- L'énergie du vide est partout, mais quantifiée
photons virtuels: E électromagnétique

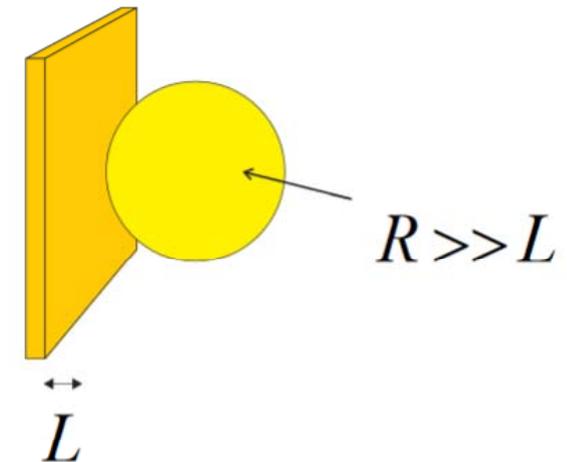
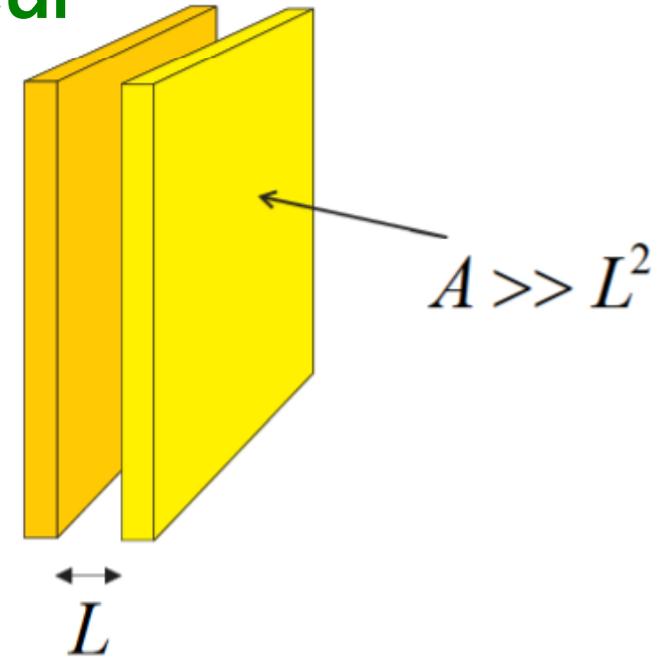
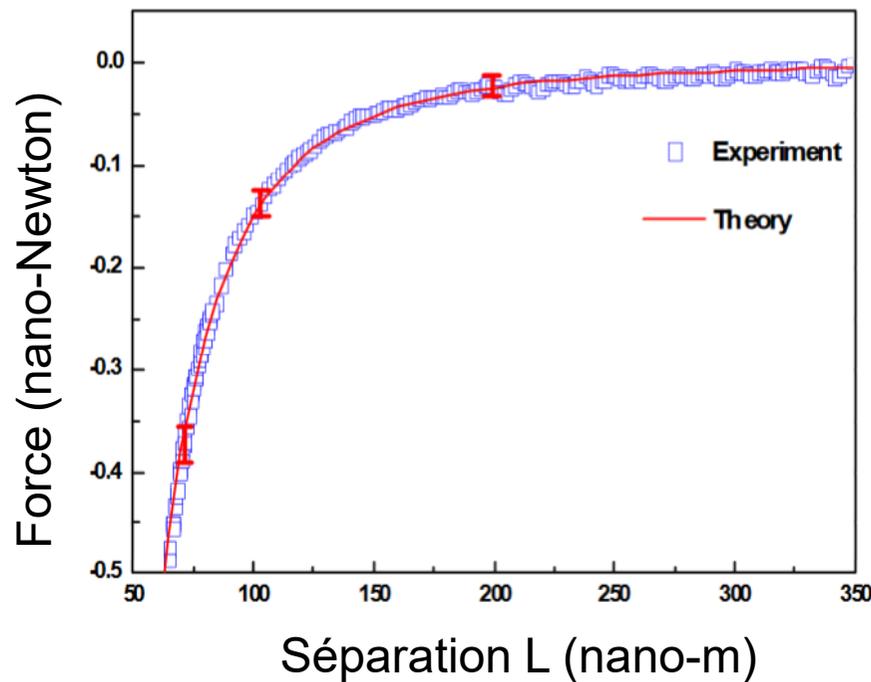
Entre les plaques, il faut que la longueur d'onde soit un sous-multiple de l'épaisseur
 $k\lambda = L$. Le nombre de photons est limité
Si L est petit → moins d'énergie



Force attractive entre les plaques, mesurée dans plusieurs expériences, depuis ~30 ans

Ordres de grandeur

- $F(\text{Casimir}) \sim A / L^4$
 - Pression = $F/A = 10^{-3}$ Pa pour $L=1 \mu\text{m}$
 - Conditions parfaites (réflexion, température= 0, plaques parallèles..)
- ➔ Meilleure géométrie plan/sphère

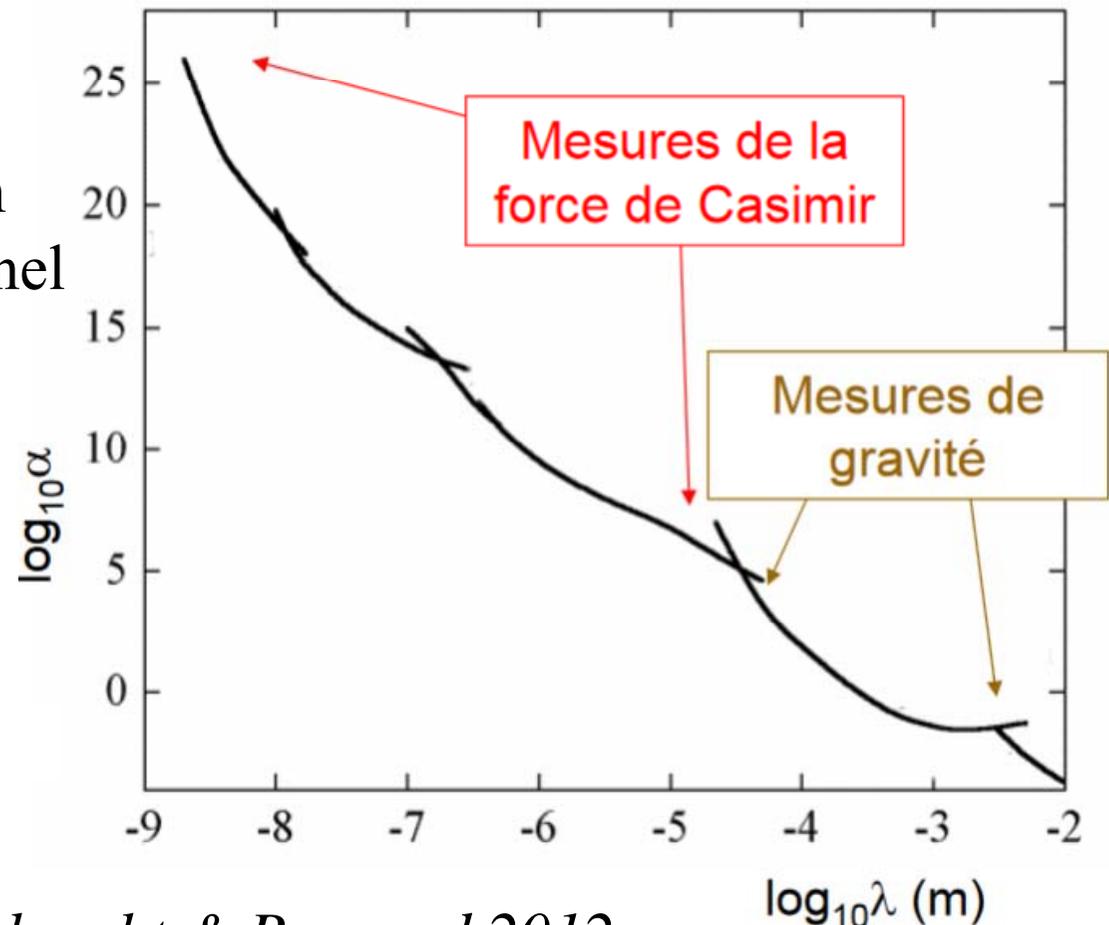


Force de Casimir

- Les recherches se poursuivent pour tester la force de gravité à petite échelle
- Celle-ci est vérifiée jusqu'à $\lambda=10\mu\text{m}$

Recherche sous la forme d'un potentiel de Yukawa additionnel

$$V = Gmm'/r (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$



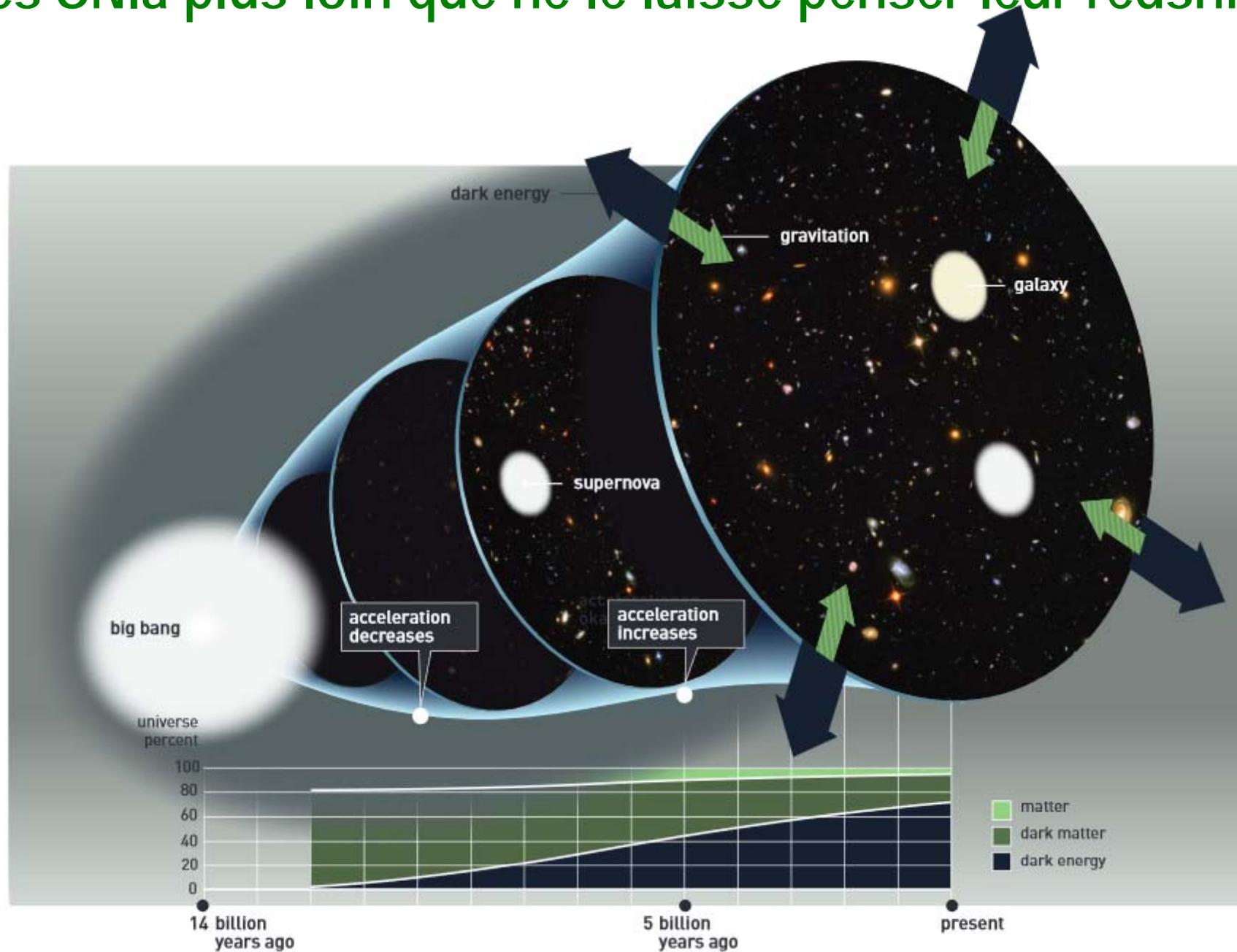
Adelberger et al 2003, Lambrecht & Reynaud 2012

Découverte stupéfiante en 1998

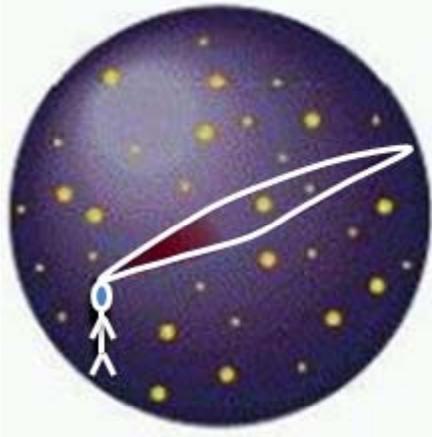
- **Riess et al (1998) 10 supernovae Ia $0.16 < z < 0.62$**
+ 16 à grand z, 34 locales
- Distance- luminosité calculée à partir de la relation entre luminosité et forme de leur courbe de lumière
- Obtention de H_0 , Ω_m , Ω_Λ : les SN Ia sont 10-15% plus lointaines que prévu si $\Lambda=0$
- Age de l'Univers 14.2 ± 1.7 Gyr

→ Une 2^{ème} équipe
Plus de statistiques 7 sigma

Les SNIa plus loin que ne le laisse penser leur redshift!



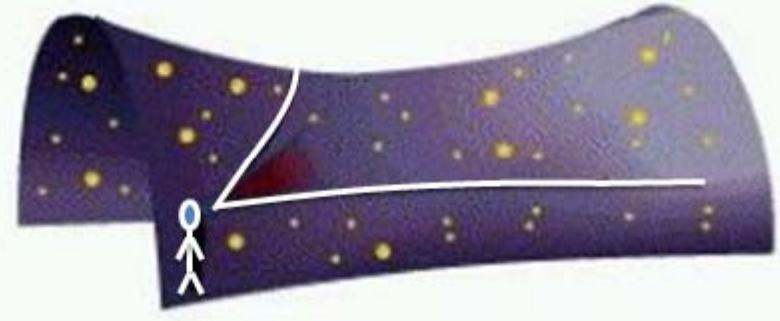
Le calcul des distances



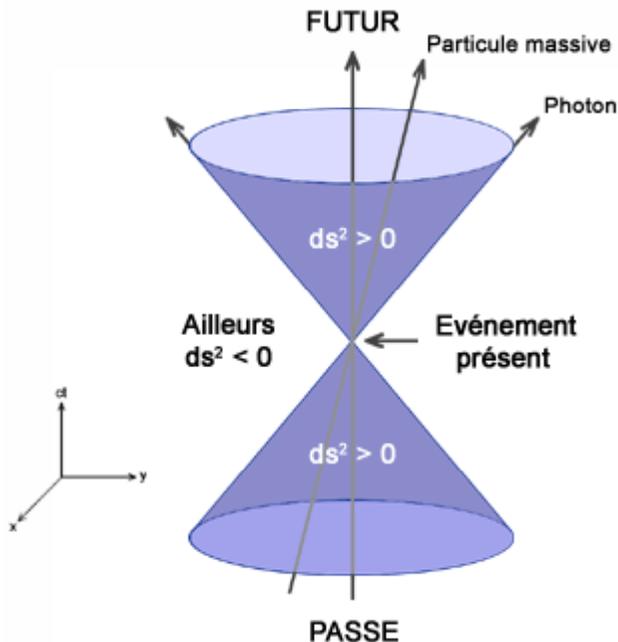
Courbure positive



Univers plat



Courbure négative

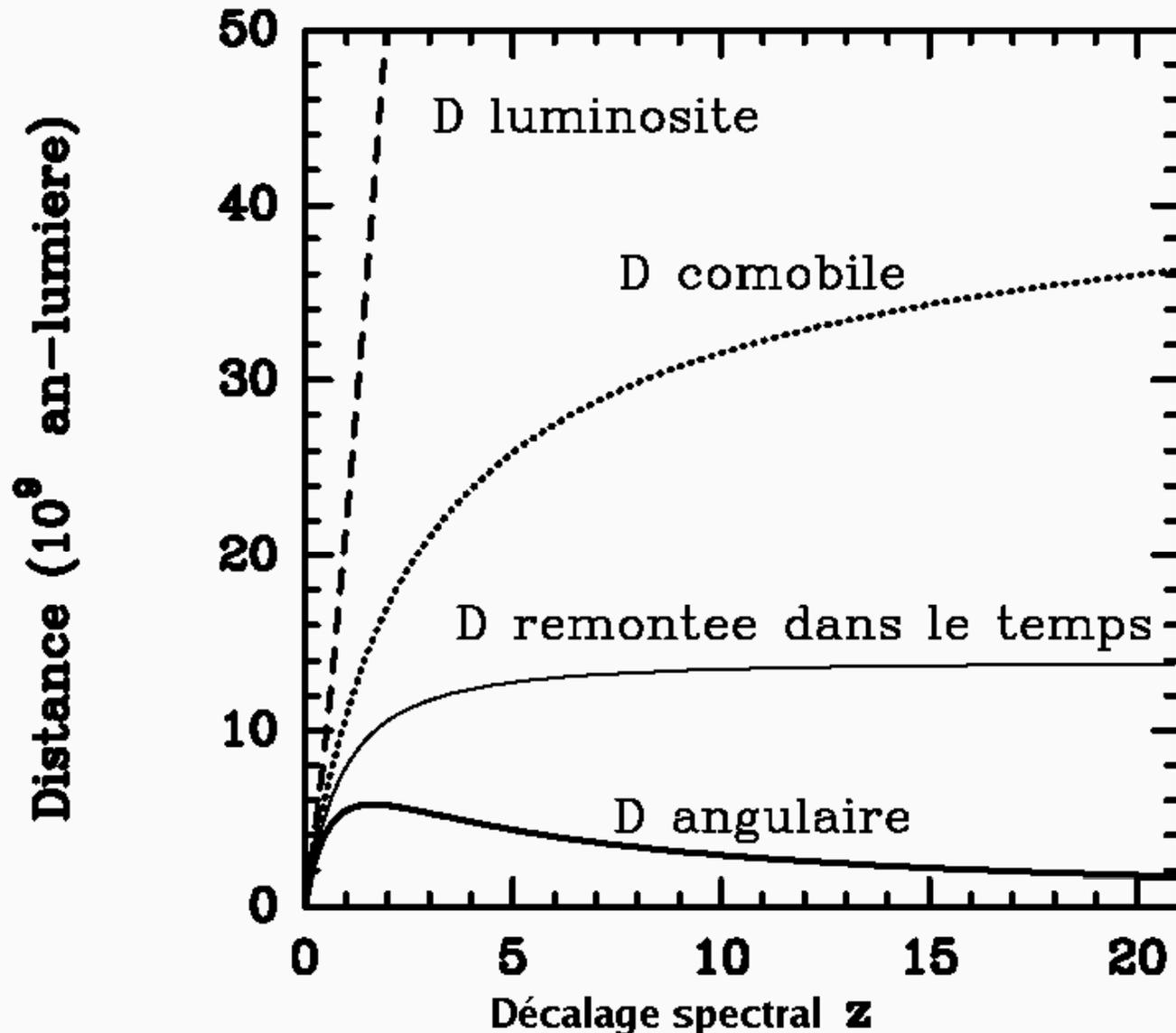


Distance-luminosité DL , telle que
 $L_{\text{apparente}} = L_{\text{intrinsèque}} / 4\pi DL^2$

Distance angulaire DA , telle que
 $\theta_{\text{apparent}} = \text{Dim}_{\text{intrinsèque}} / DA$

Les distances

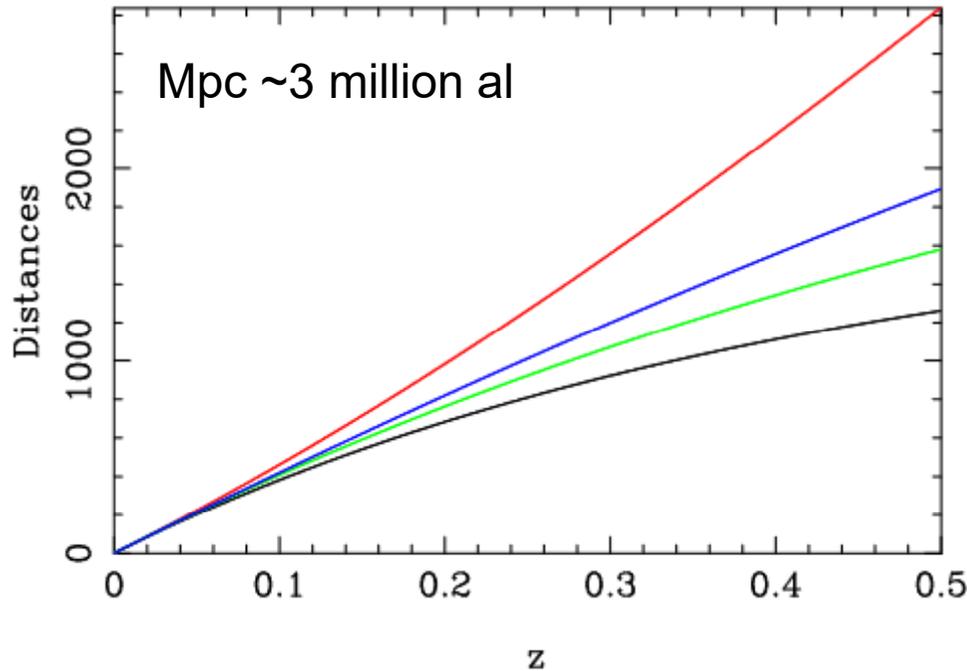
- Notion de distance difficile dans un univers en expansion
- Mesure avec des règles distendues?



Distance angulaire
Corr. de l'expansion,
→ au temps présent

Temps de voyage
de la lumière, à partir de
cet objet

Distances relatives

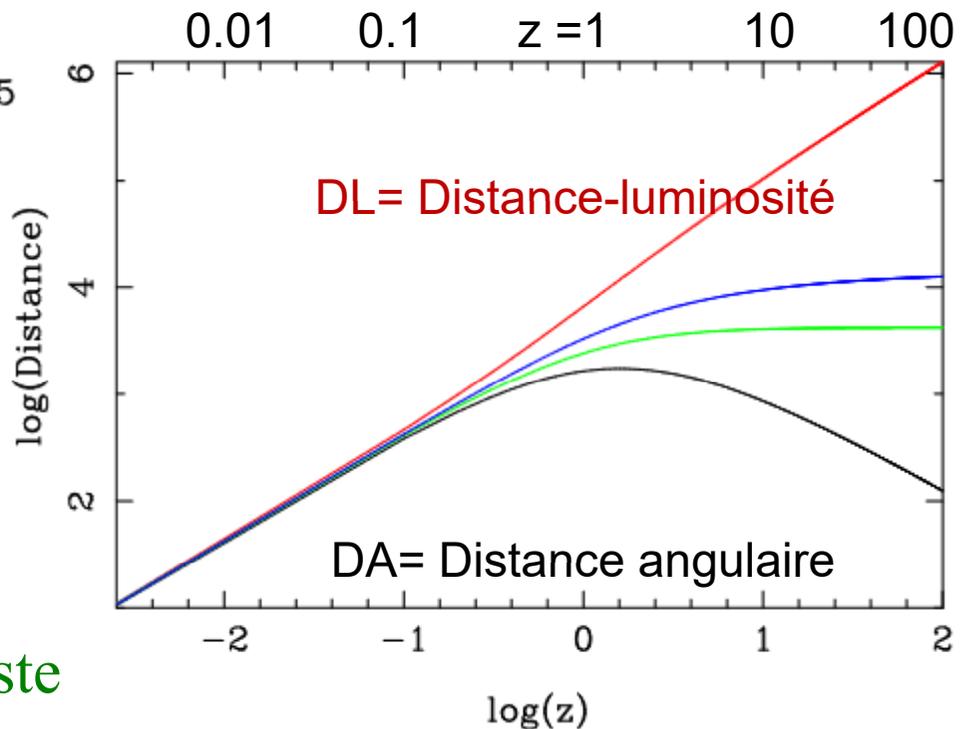


DL= Distance-luminosité
 Distance comobile
 Remontée dans le temps
 DA= Distance angulaire

$DL = (1+z)^2 DA$,
 astres moins lumineux,
 taille à peu près constante

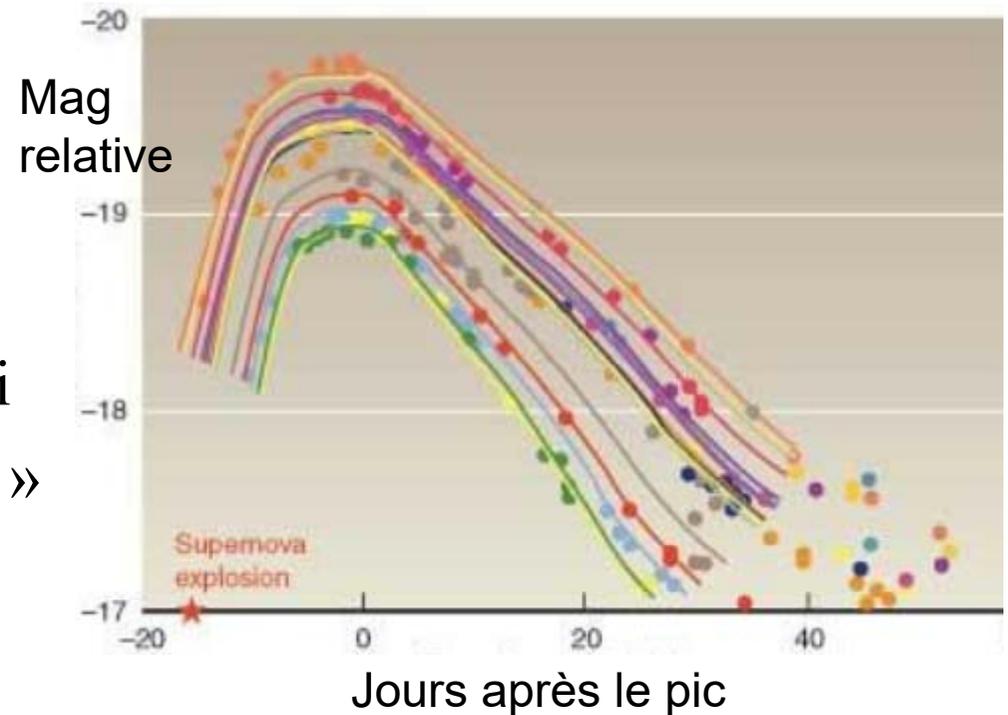
→ Effet de lentille gravitationnelle

2 objets en eq: distance comobile=cste

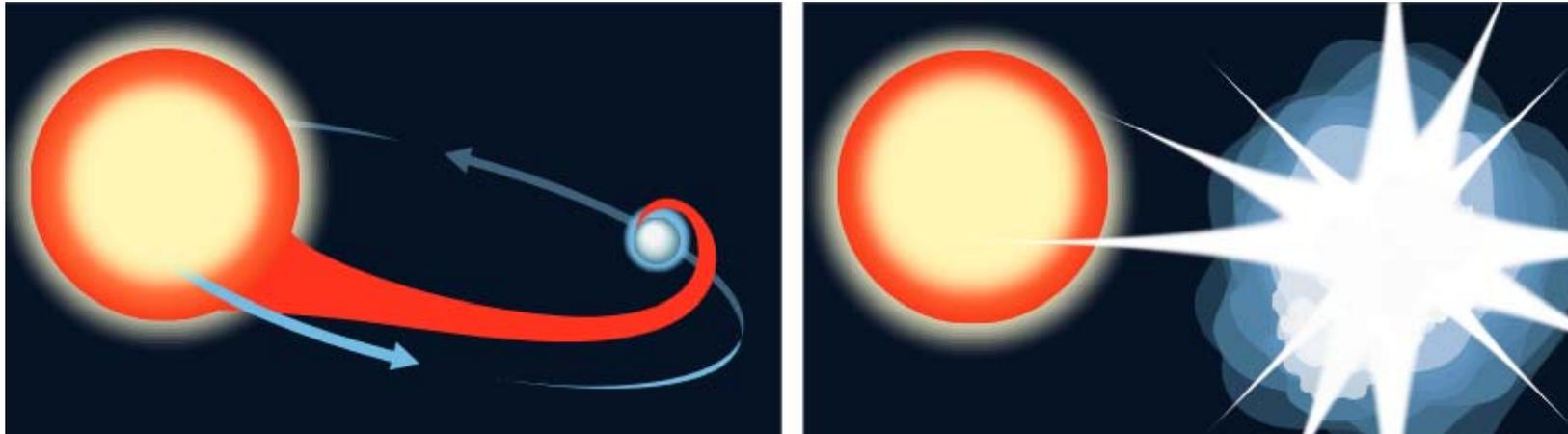


Des chandelles standardisables

- Les SN Ia sont des explosions, dont la courbe de lumière, même si non standard est « **standardisable** »
- La largeur à mi-hauteur dépend de la luminosité intrinsèque
Aussi correction de couleur



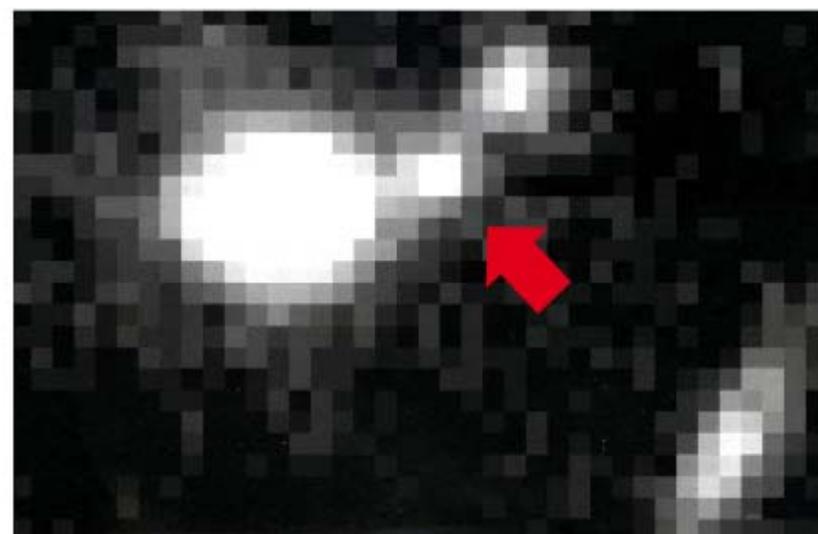
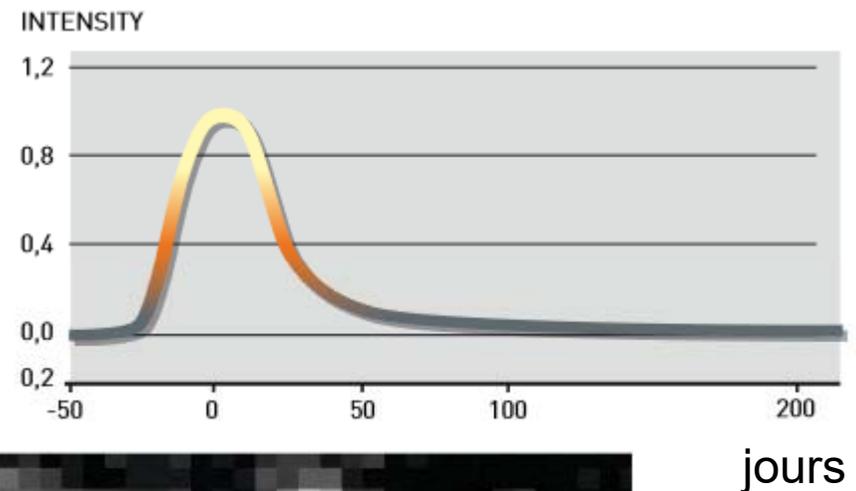
Naine blanche



Les explosions de supernovae Ia



- Une étoile binaire, dont une naine blanche
- Une SN Ia peut durant quelques jours rayonner autant que sa propre galaxie
- Toujours la même forme de courbe de lumière, due à la radio-activité du nickel



Prix Nobel en 2011 à 2 équipes

- **Saul Perlmutter**, *The Supernova Cosmology Project*, Berkeley
- **Adam Riess** (Baltimore) et **Brian Schmidt** (Australie)
The High-z Supernova Search Team

Au total environ 50 SN Ia avec une courbe de lumière bien calibrée, ont permis de démontrer l'accélération de l'Univers

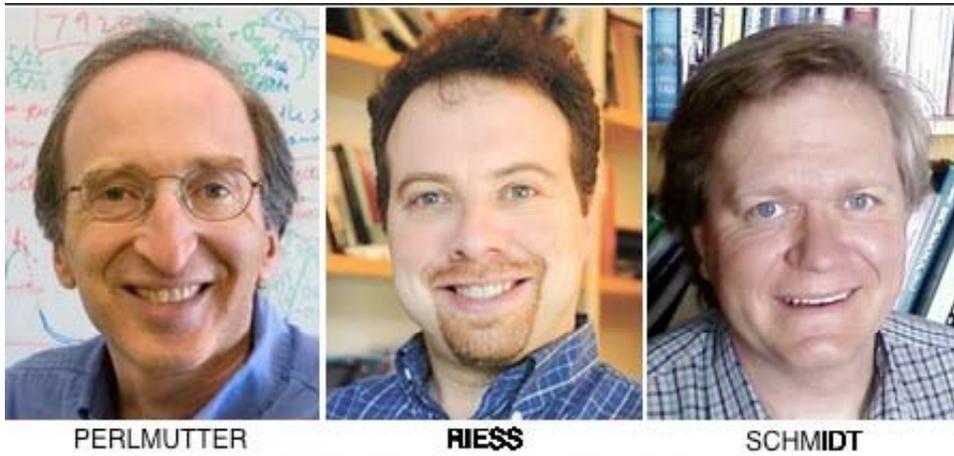
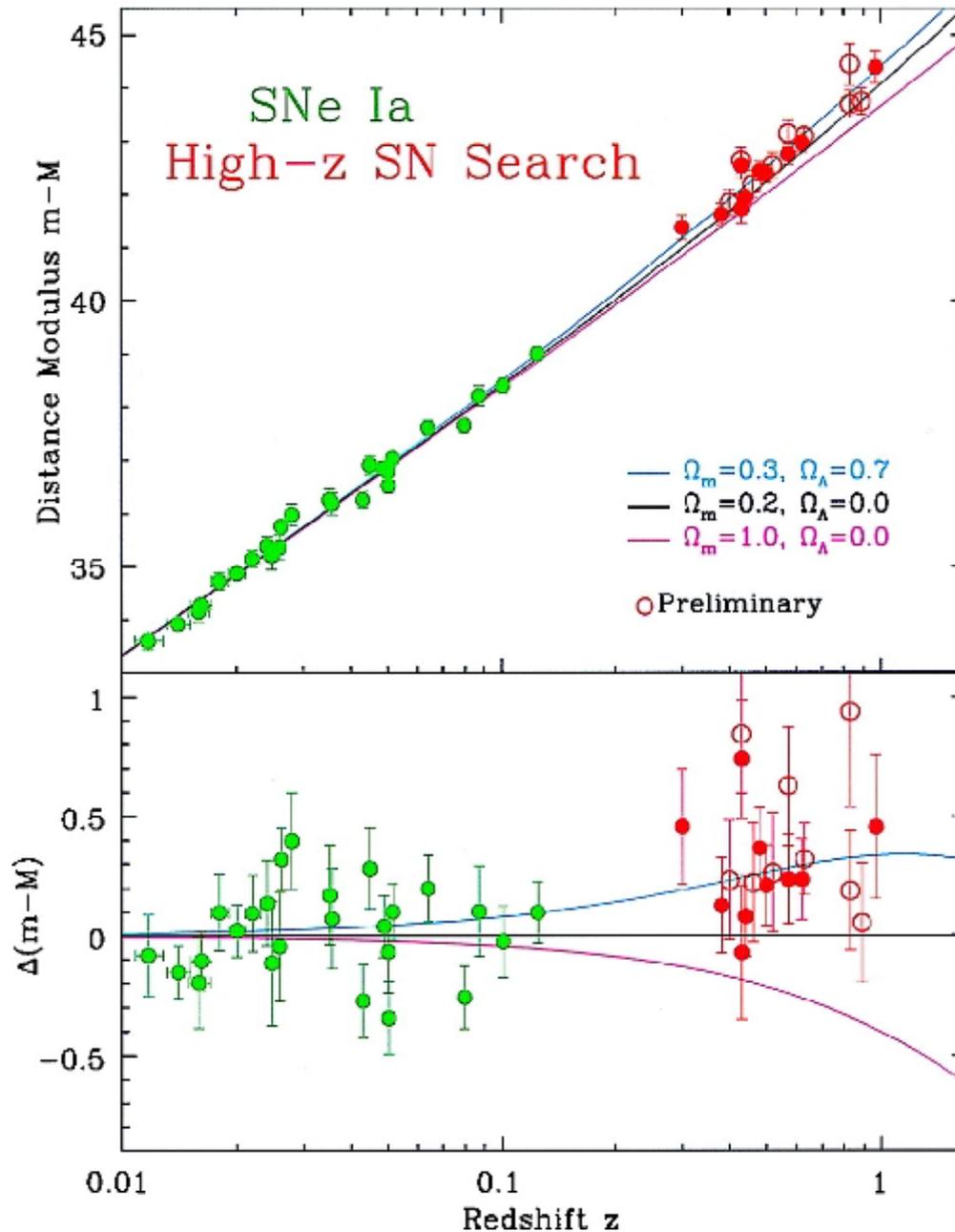


Diagramme de Hubble



Distance vs z

La courbe bleue

$$\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$$

est clairement privilégiée par les données par rapport aux autres courbes $\Omega_\Lambda = 0$

Les supernovae apparaissent plus faibles dans un univers en accélération

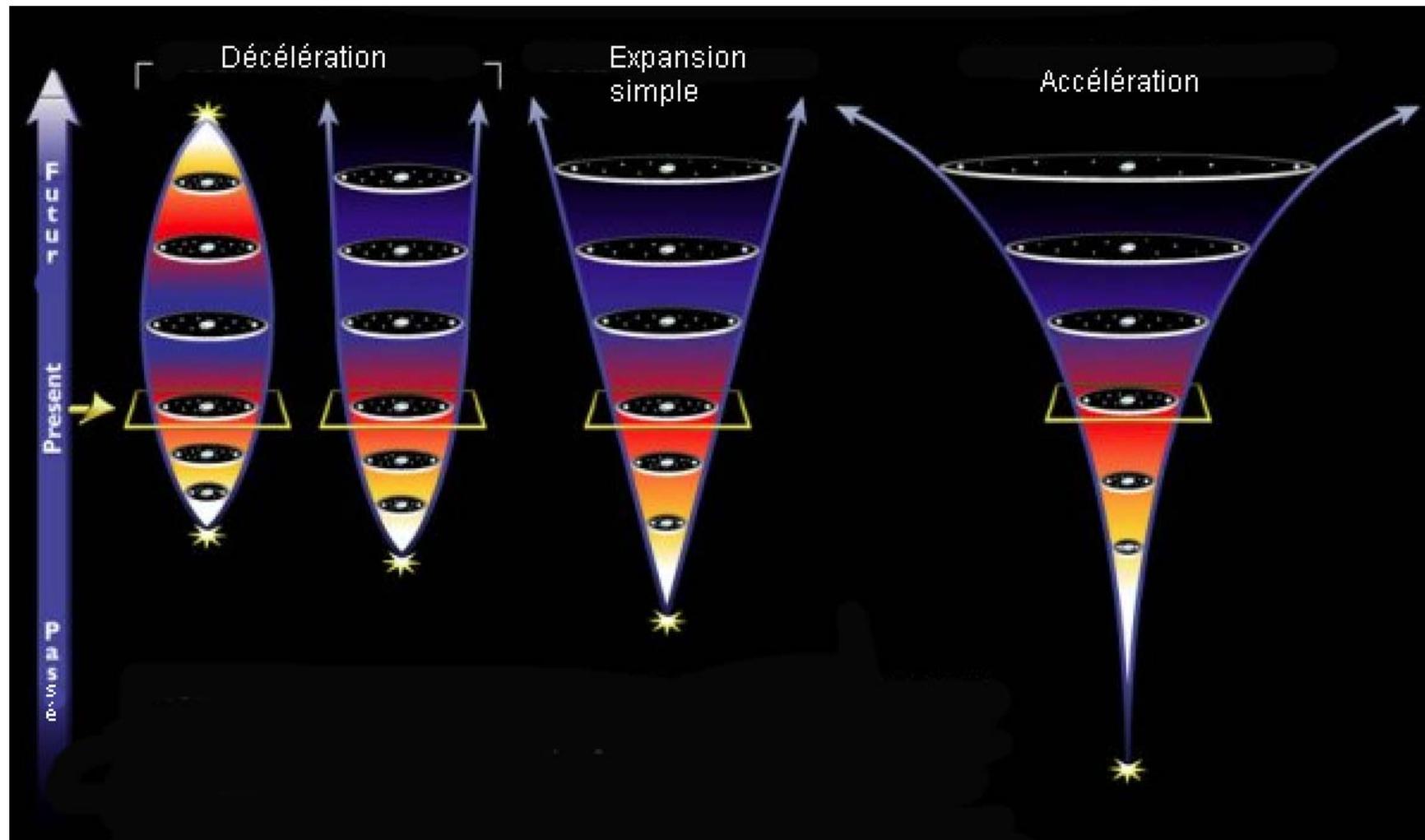
- Si l'univers s'accélère, il devait être **en expansion plus lente** dans le passé
- Dans un univers en accélération, cela prend donc plus de temps entre un redshift z donné et aujourd'hui
- La lumière met plus de temps à nous parvenir
- **La distance-luminosité est plus grande**
- Les SN, dont le redshift est z , apparaissent donc plus faibles

$R(t)$ taille caractéristique = $R_0 / (1+z)$

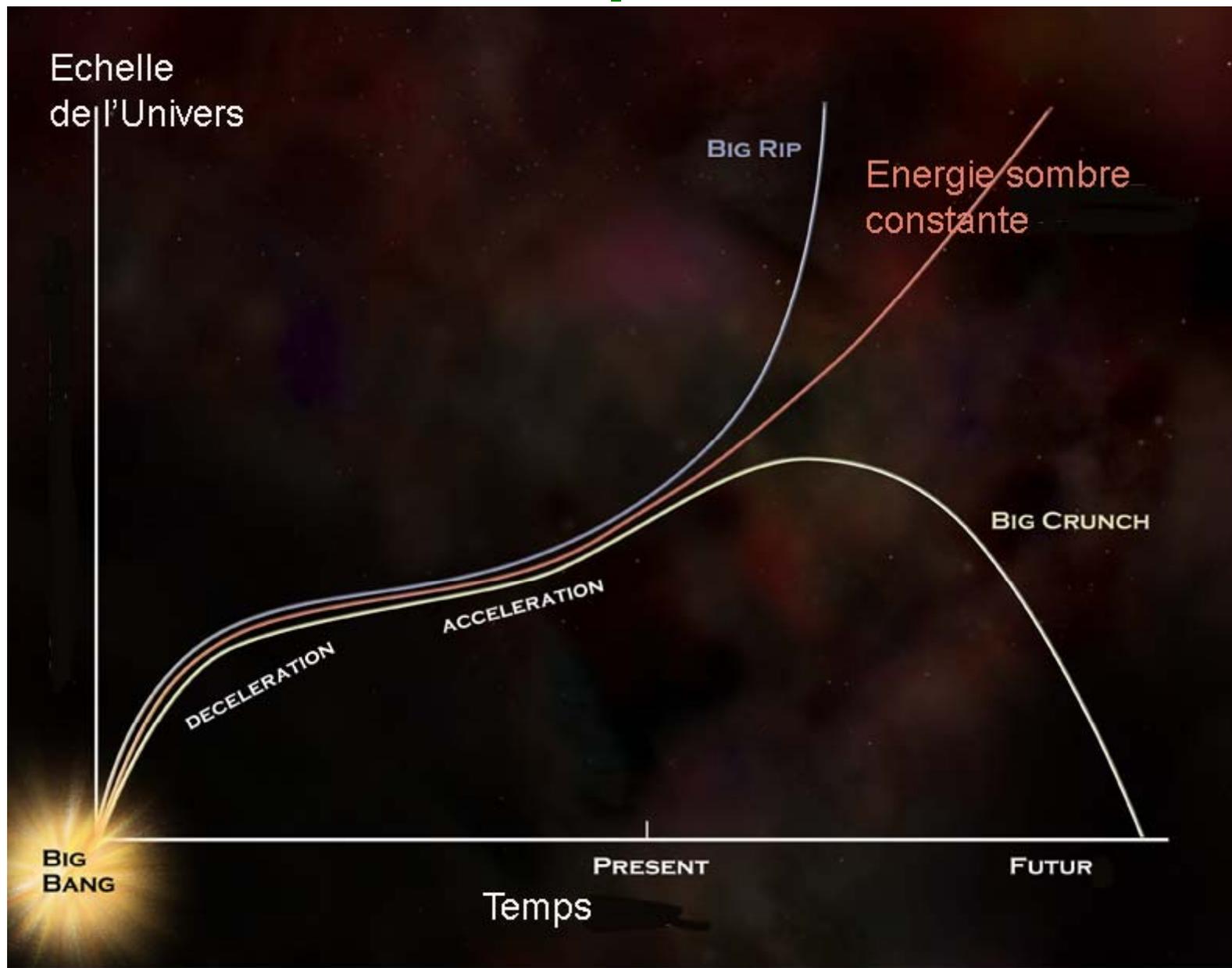
De même que la longueur d'onde des photons $\lambda = \lambda_{\text{repos}} (1+z)$

Les divers modèles possibles

Une taille donnée, $R(t)$, correspond à un redshift donné z

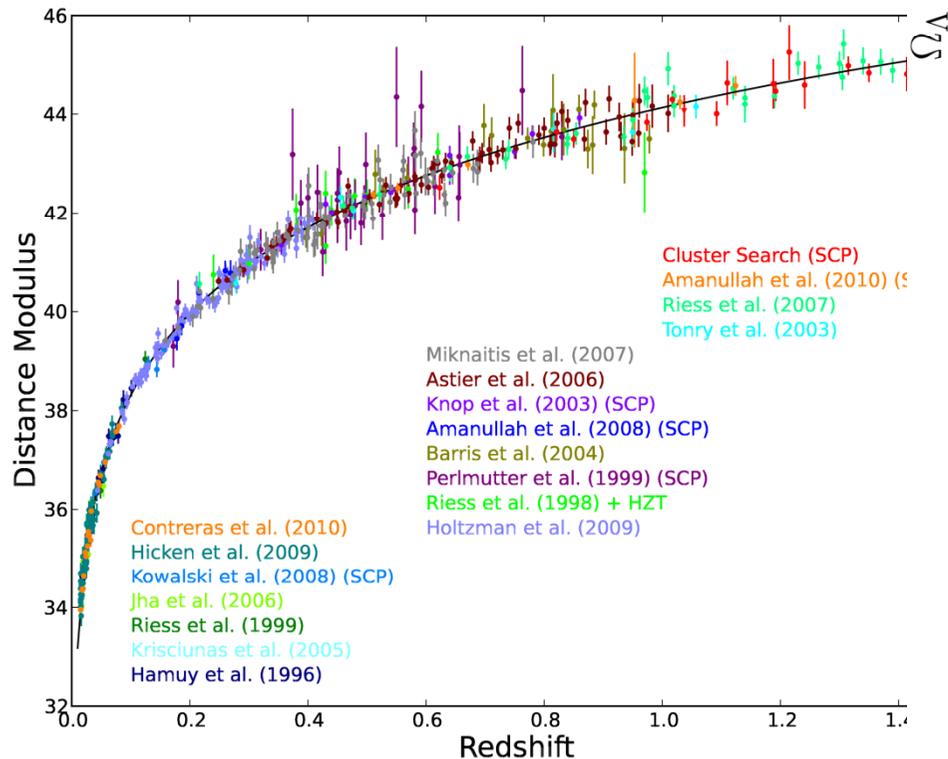


Les diverses possibilités

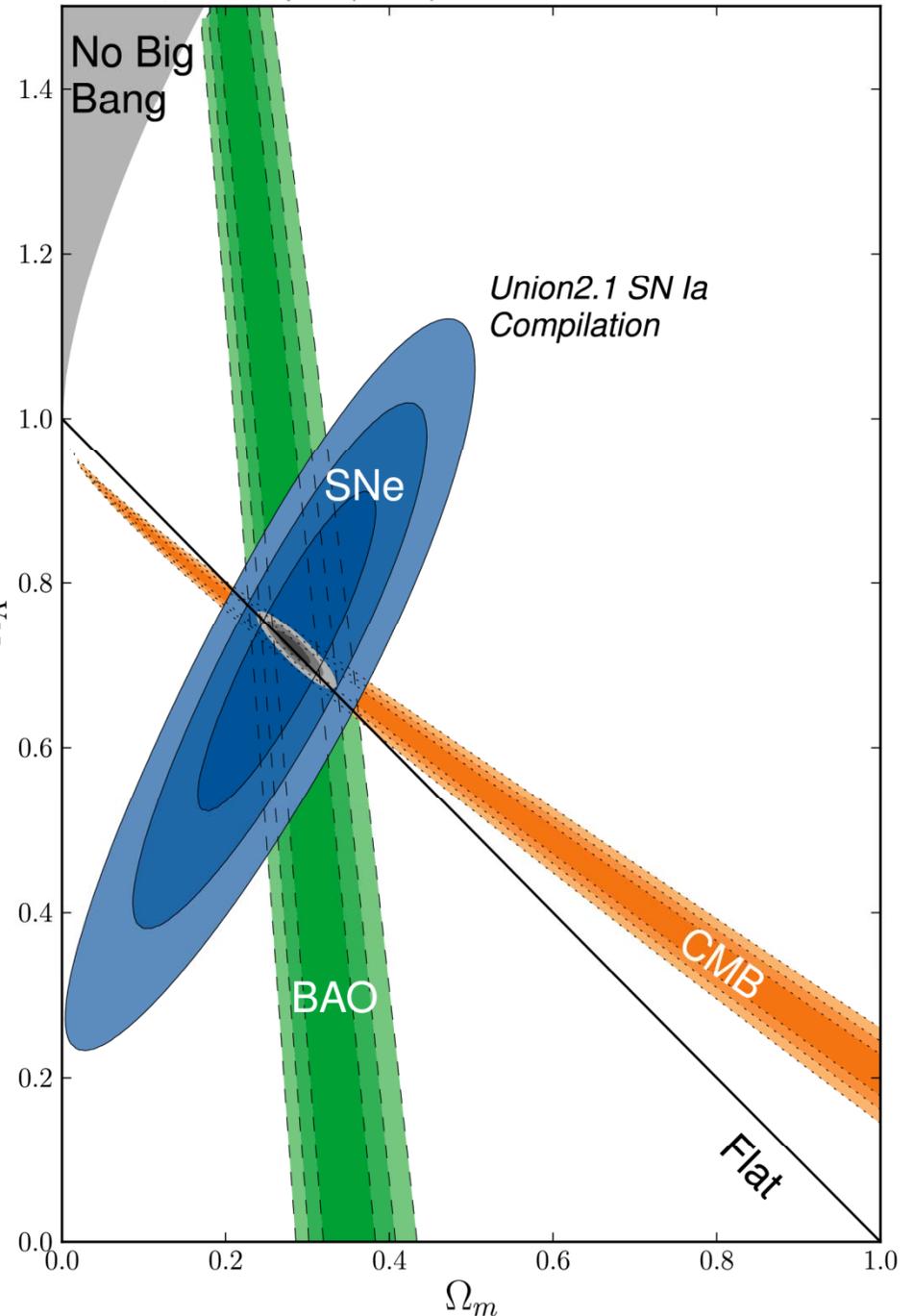


Avancées récentes

- Confirmation, et compatibilité du terme Ω_Λ avec une constante Suzuki et al (2011)



Supernova Cosmology Project
Suzuki, et al., *Ap.J.* (2011)



Avec les autres contraintes

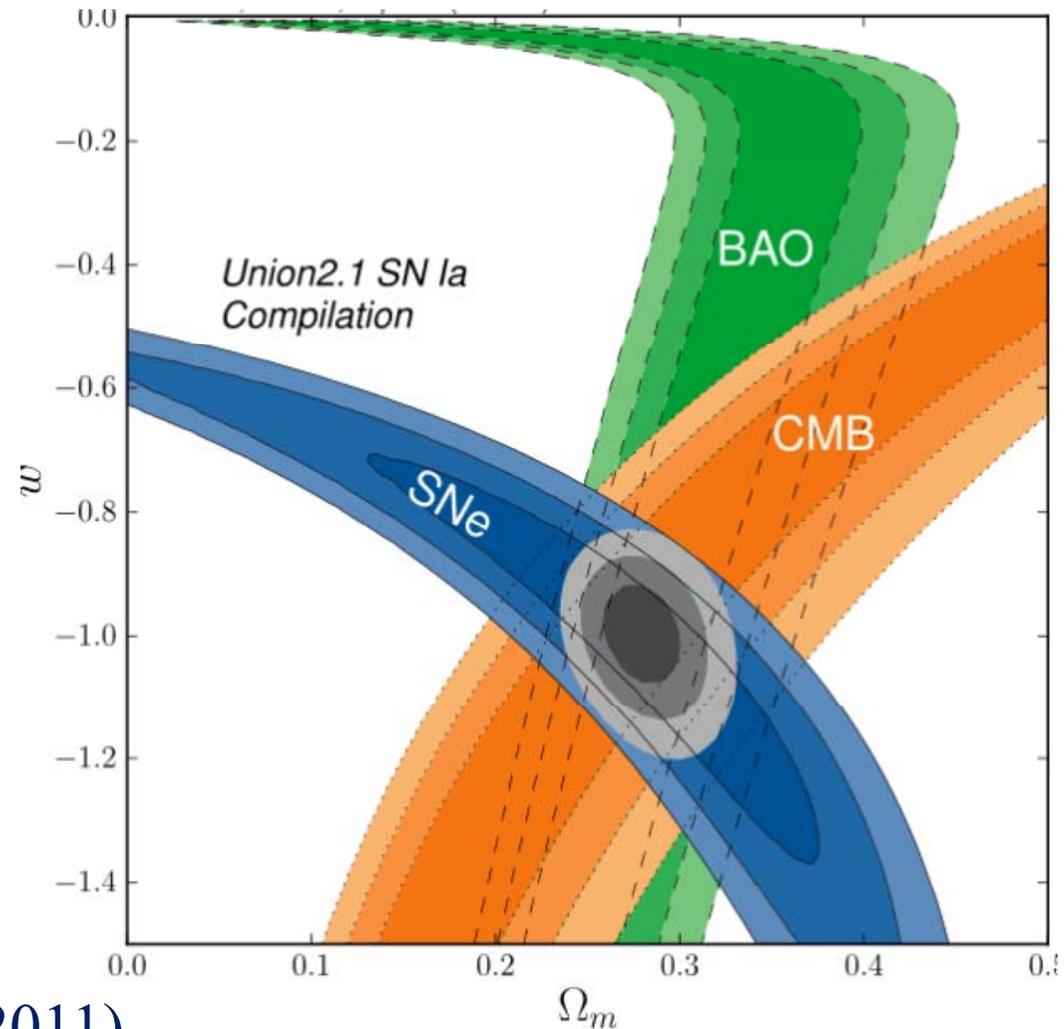
Equation d'état $\mathbf{P = - w \rho}$ $\mathbf{w=-1}$ attendu pour une constante

Quintessence: dynamique
 $w > -1$ en général

Sauf énergie « phantom »
 $w < -1$

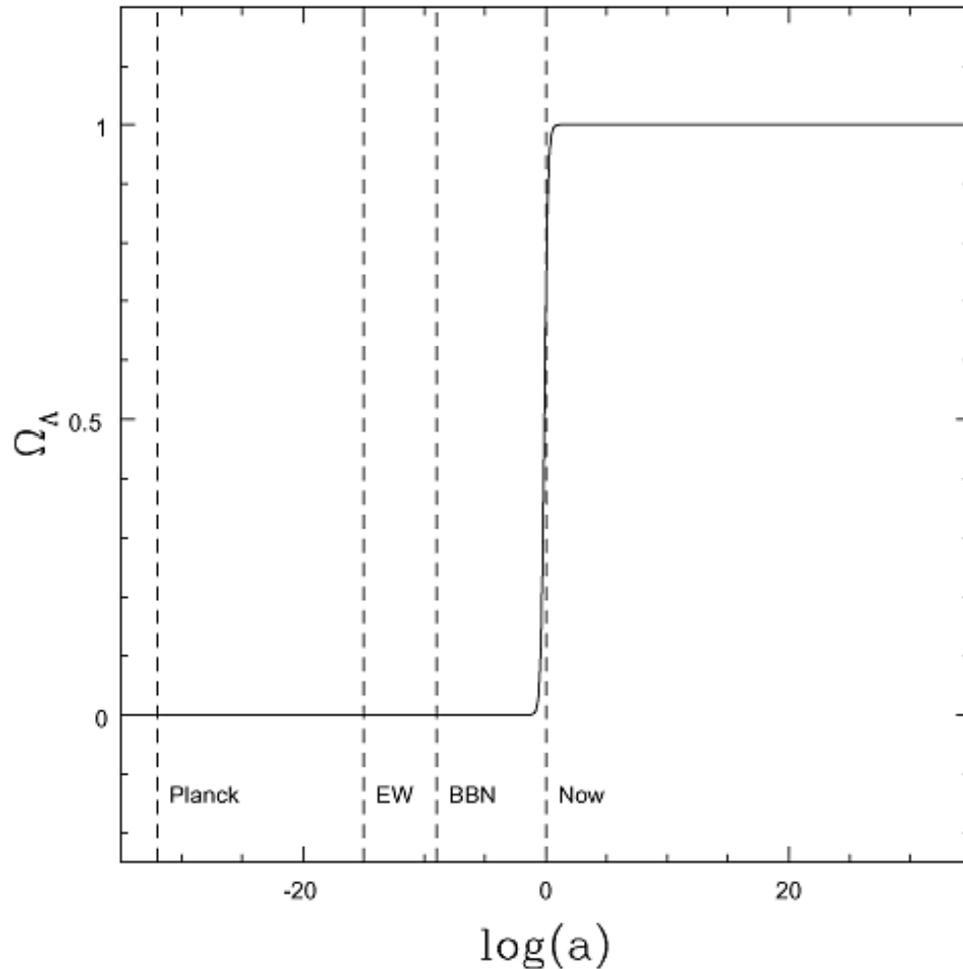
$$w_q = \frac{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 - V(Q)}{\frac{1}{2}\dot{Q}^2 + V(Q)}$$

Accélération $\sim -(3P+\rho)$
 $w < -1/3$



- Suzuki et al (2011)

Problème de fine tuning



Le rapport entre matière baryonique et matière noire exotique reste constant= 5

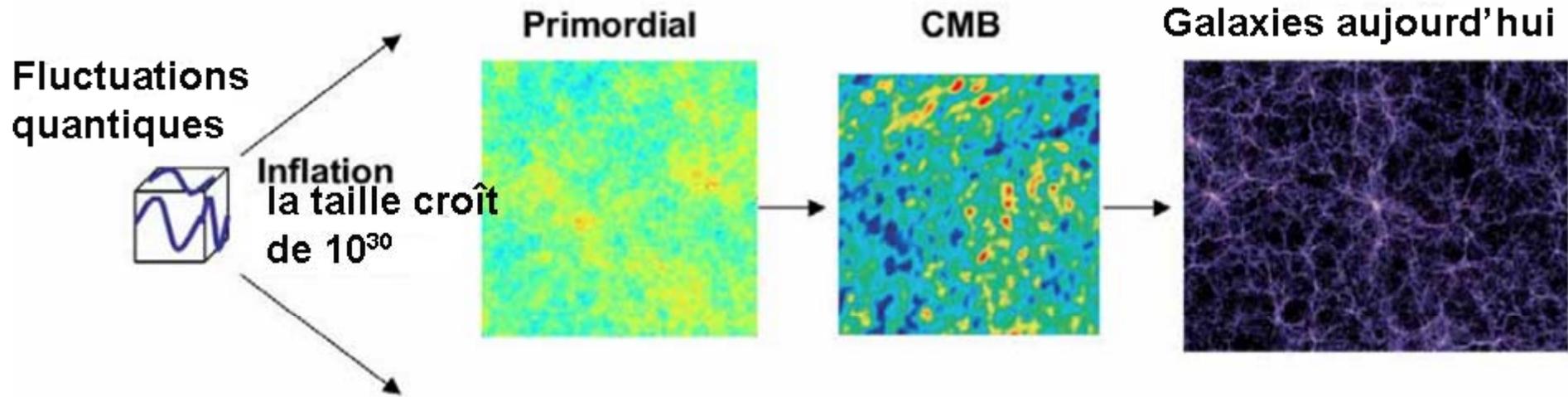
Mais le terme d'énergie noire qui était négligeable, devient dominant à notre époque

Bien que ce modèle fasse la course en tête, il ne semble pas très naturel..

Accélération de l'expansion: inflation

- Une autre période de l'Univers en forte accélération
- L'inflation est supposée avoir eu lieu juste après le Big-Bang
- Supposée due à un champ scalaire (énergie noire aussi?)
- Pourquoi a-t-on besoin d'une période inflationnaire au début de l'Univers?
- Inventée par Alan Guth (1981) pour résoudre
- ➔ le problème de l'horizon
- ➔ le problème de la platitude de l'univers
- ➔ source des fluctuations primordiales, qui forment ensuite les galaxies

Inflation primordiale à $t < 10^{-32}s$



Le champ scalaire qui est la source de l'inflation est baptisé **inflaton**

L'univers est vide au départ (juste habité par les fluctuations)

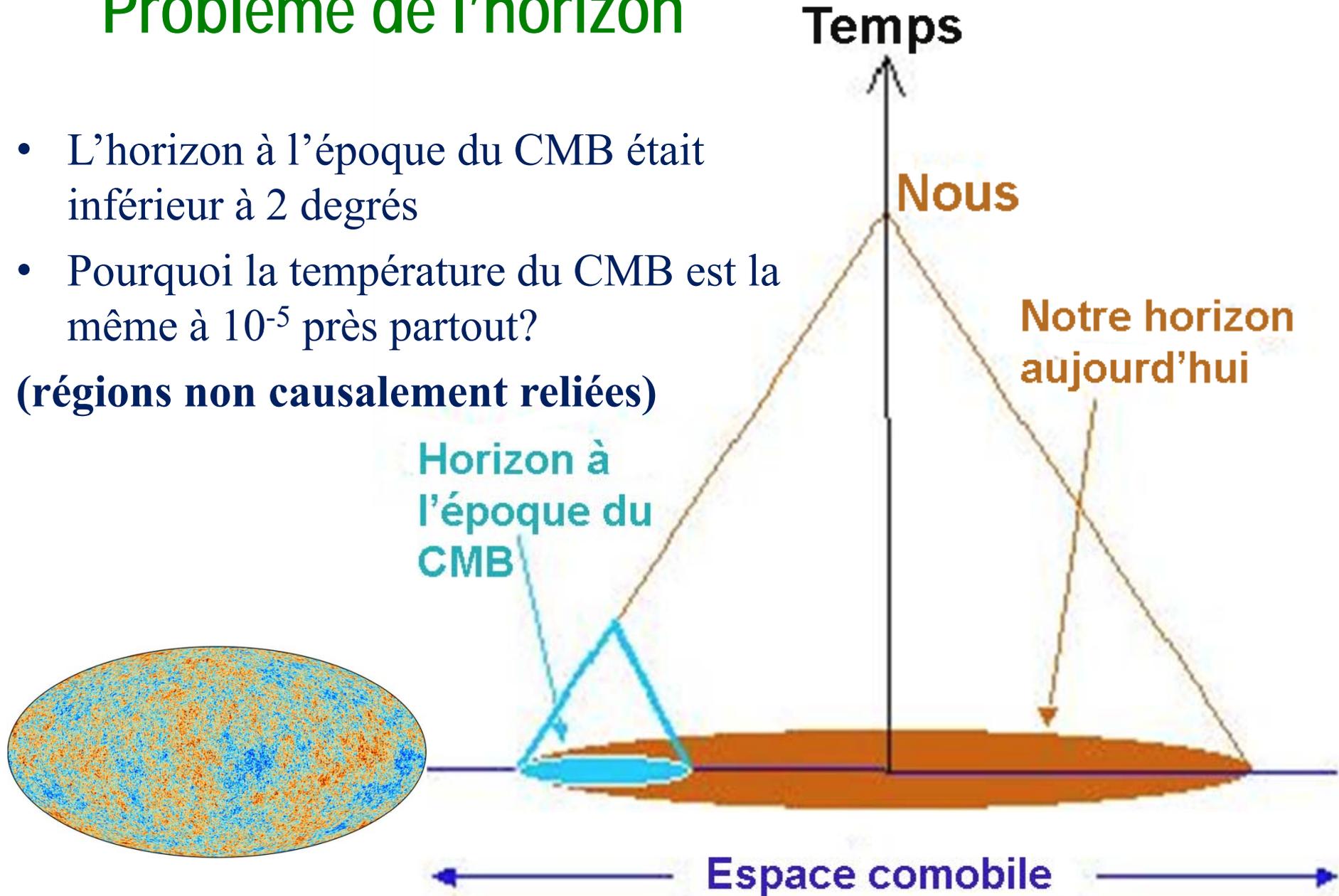
→ Correspond à la solution de de Sitter

→ Après la phase dominée par le rayonnement, puis par la matière, l'Univers redevient vide (à 70%?) et démarre une autre phase d'inflation

Problème de l'horizon

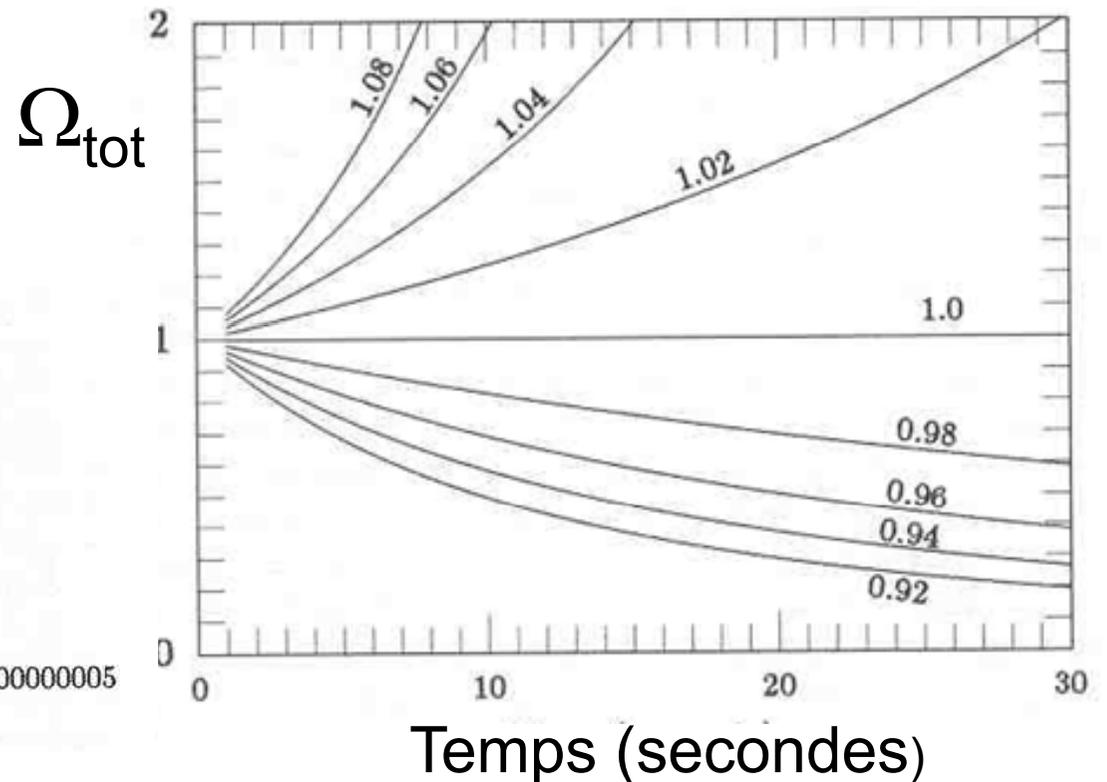
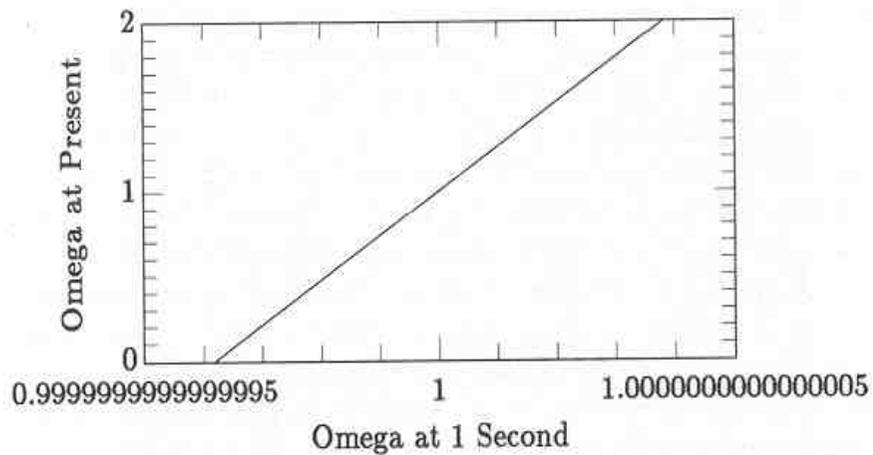
- L'horizon à l'époque du CMB était inférieur à 2 degrés
- Pourquoi la température du CMB est la même à 10^{-5} près partout?

(régions non causalement reliées)

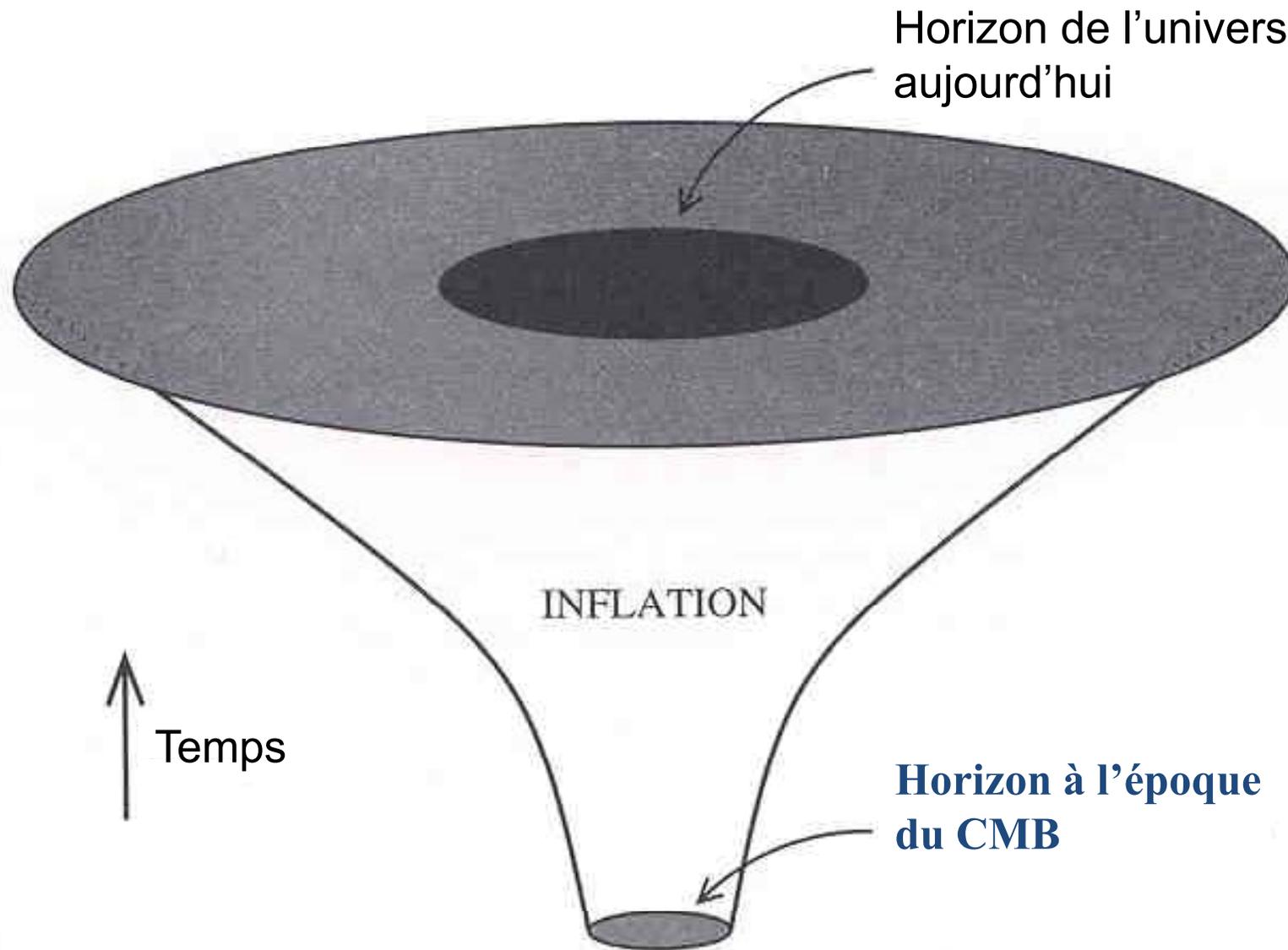


Problème de la platitude

- Si Ω_{tot} est différent de 1 à epsilon près, il va s'en éloigner exponentiellement. Or aujourd'hui $\Omega_{\text{tot}}=1$ à 0.5% près



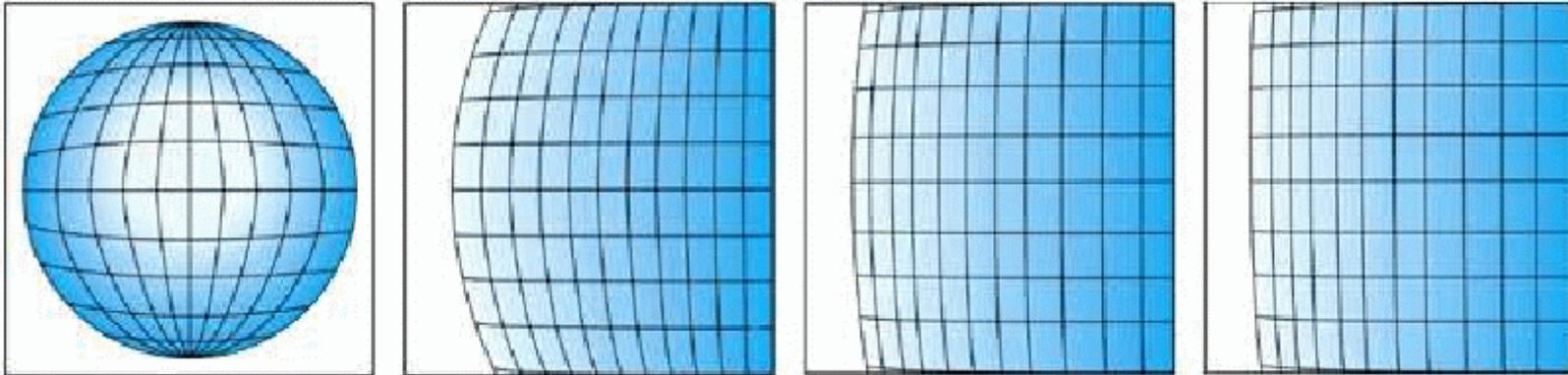
L'inflation résoud le problème de l'horizon



L'inflation dilue aussi les monopoles magnétiques

Guth (1997)

L'inflation résoud le problème de la platitude



- Pour un Univers subissant une rapide période d'inflation.
 - Après expansion, l'Univers devient localement plat
 - Par analogie, localement nous ne percevons pas la courbure de la Terre
 - Résoud le **problème d'ajustement fin**, car quel que soit l'état initial et sa courbure, l'inflation va le diluer et donner $\Omega=1$

Quelle est la nature de cette énergie noire?

- **Equation d'état** $P = w \rho$ **Densité positive**, homogène dans tout l'univers
- Contribue à la courbure de l'espace, et donc à l'expansion

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3}$$

- $$2\frac{R''}{R} + \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} - \frac{8\pi GP}{c^2}$$

Accélération $\sim -(3P+\rho)$
 $w < -1/3$

- Mais dans la 2ème équation, il est clair que la pression équivalente **est de signe opposé** à celui d'un fluide normal. Au lieu d'une décélération, il y a accélération

Cela pourrait être un champ scalaire

- **Comme pour l'inflaton**

Le champ scalaire n'a pas de particules, ni de masse, mais a un tenseur énergie-impulsion $T_{\mu\nu}$

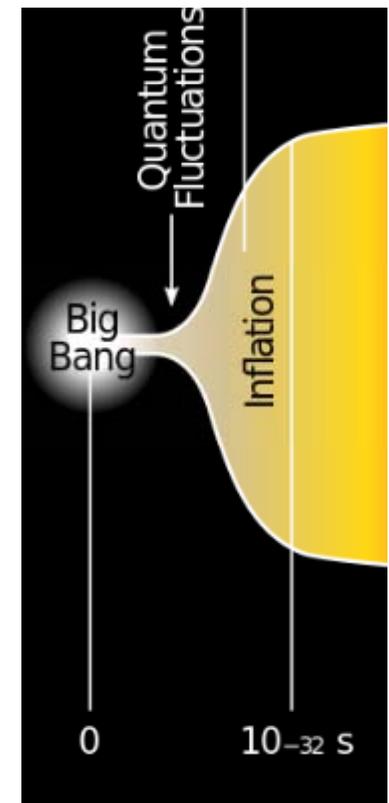
En chaque point de l'espace on peut définir $\phi = \phi(\mathbf{x}, t)$, comme un champ électromagnétique, mais ce dernier est vectoriel

- L'équation d'Einstein est $G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$

Courbure de l'espace = Densité de matière

- $T_{\mu\nu}$ a la même forme pour la matière et les champs scalaires

- Les champs scalaires ont le même effet que la matière en ce qui concerne la gravité



Champ scalaire de l'Inflation

Gaz normal: $T_{\mu\nu} = (\rho+p)u_\mu u_\nu + pg_{\mu\nu}$

Champ scalaire: $T_{\mu\nu} = \underbrace{\partial_\mu\phi \partial_\nu\phi}_{\text{Energie}} - \underbrace{[\partial_\mu\phi \partial^\mu\phi/2 + V(\phi)]}_{\text{Pression}} g_{\mu\nu}$

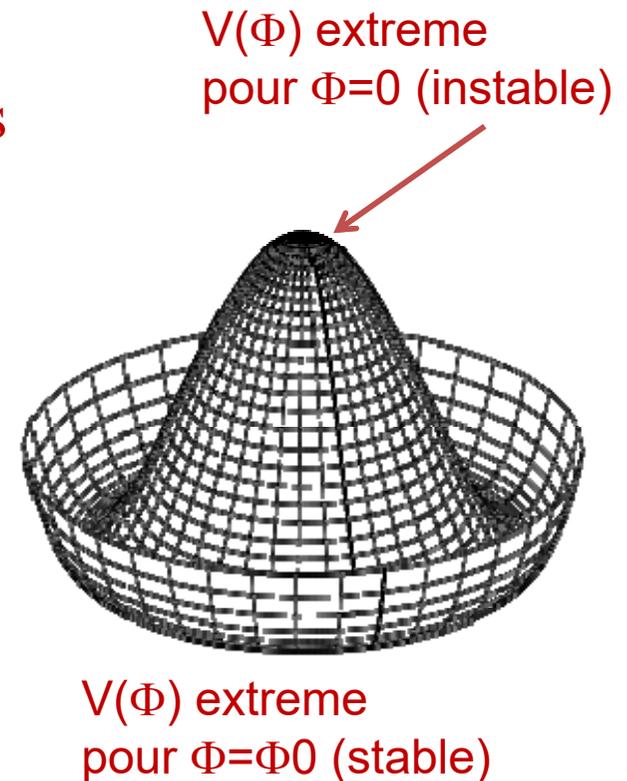
- La partie importante est $V(\phi)$, le **potentiel scalaire**.
- Il a le même rôle que la pression p pour les gaz
- Pour un gaz p doit être positive, mais: $V(\phi)$ peut avoir n'importe quelle valeur
- Il est donc possible d'avoir une pression négative avec $V(\phi)$

La physique de l'inflation

Dans le cas de l'inflation primordiale, il faut un champ $V(\phi)$ énorme

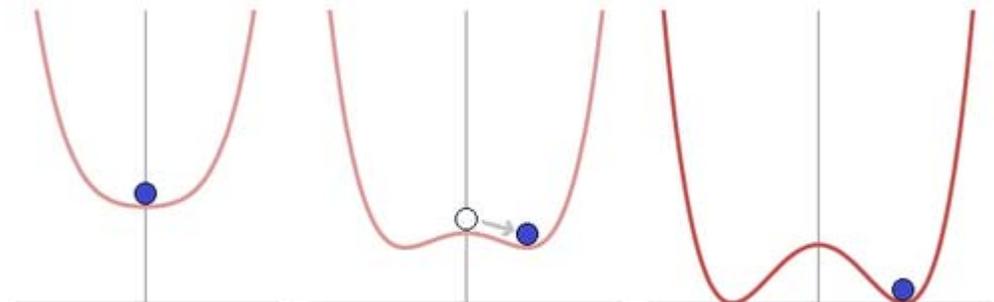
Quelle est son origine?

- Brisure spontanée de symétrie (dans l'univers jeune)
- Les champs scalaires (dilatons) prédits par la théorie des cordes peuvent produire de tels potentiels



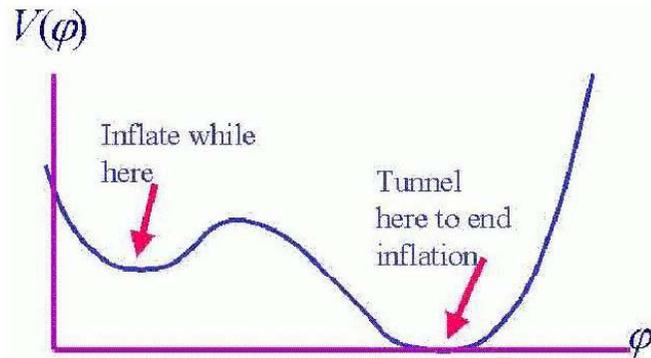
Brisure spontanée de symétrie

- Les lois de la physique sont supposées beaucoup plus symétriques à très **hautes énergies** (dans l'univers primordial)
- Ces symétries sont brisées à **basse énergie**. L'état préféré du système est moins symétrique
- Des champs scalaires qui autrefois étaient au minimum de leur potentiel $V(\phi)$ ne le sont plus
- Le champ scalaire a donc une **énergie du vide**, $V(\phi) > 0$
- ϕ alors se déplace vers le nouveau minimum et la symétrie est brisée
- C'est une **transition de phase**
- **Inflation primordiale**

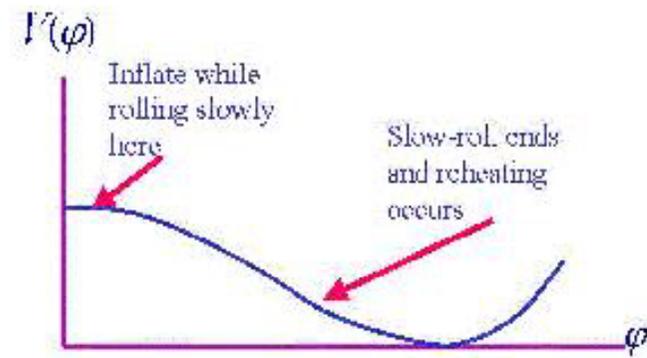


Brisure spontanée de symétrie

- $V(\phi)$ a un minimum à $\phi = 0$ avant la transition
- $V(\phi)$ a un minimum à $\phi > 0$ après la brisure de symétrie
- ϕ se déplace par tunnel quantique de 0 vers le nouveau minimum



Inflation originelle



Slow-roll inflation

Lien avec une constante cosmologique

- Une des explications initiales pour l'inflation était aussi une **constante cosmologique Λ**
- Une constante équivaut à un champ scalaire $\phi = \Lambda$ qui garde la même valeur en tout point de l'espace et du temps
- Donne une pression $p = -\Lambda$
- Y-aurait-il un **lien entre les deux constantes**, une même origine?
- La valeur initiale serait ensuite grandement diminuée par les processus de transitions de phase, ce qui permettrait à la matière de dominer, puis Λ reprendrait le dessus

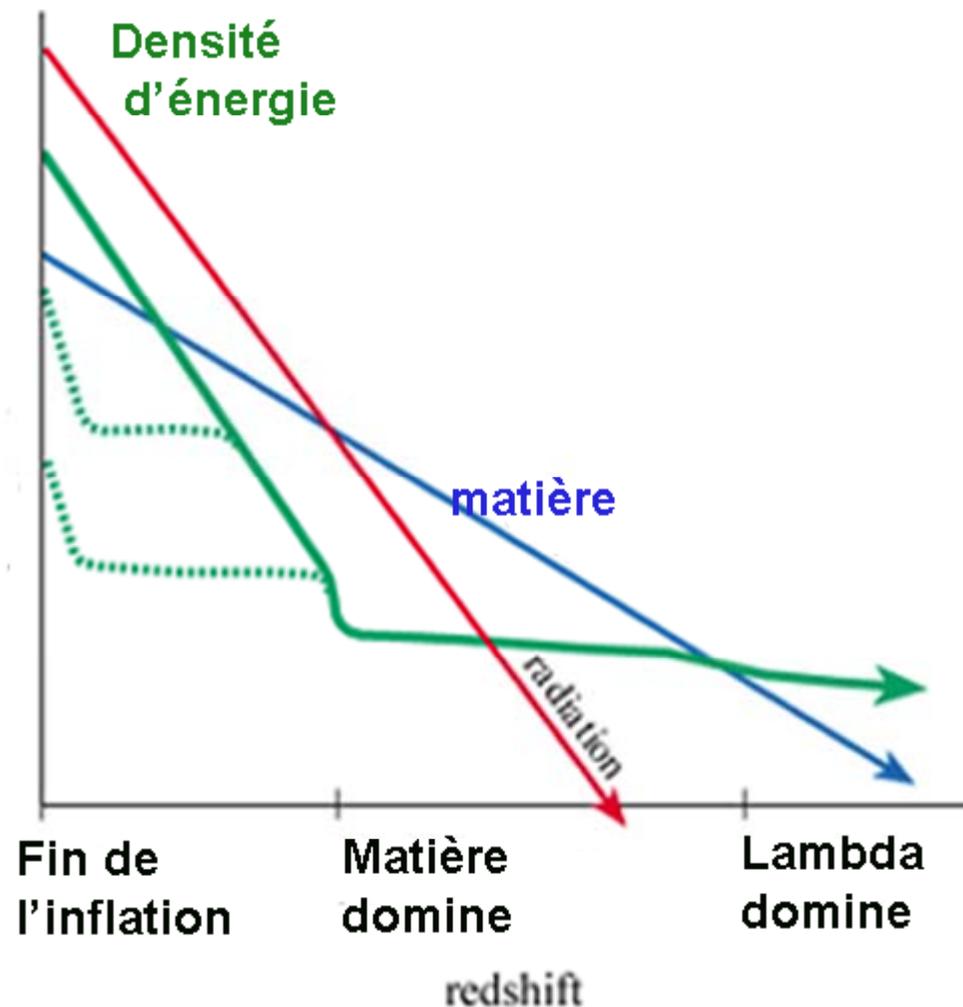
Modèles de quintessence

Les modèles qui essaient de relier les deux constantes cosmologiques sont appelés quintessence, ce sont des modèles avec champ scalaire, **dynamiques**

Différences en durée
 10^{-32} s et Gyrs

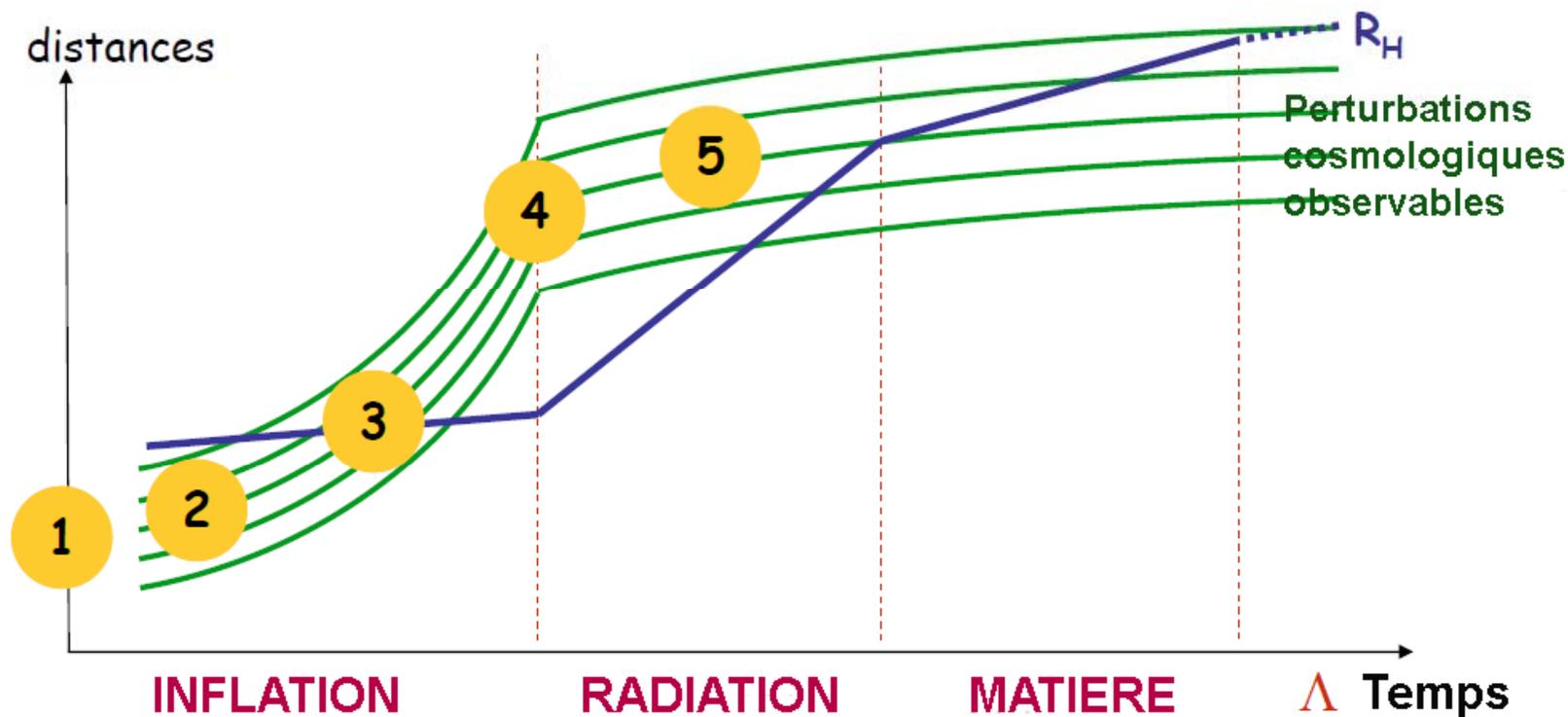
Echelles d'énergies
 10^{15} GeV 1 milli-eV

Taux d'expansion
 10^{50} x



Evolution relative des perturbations

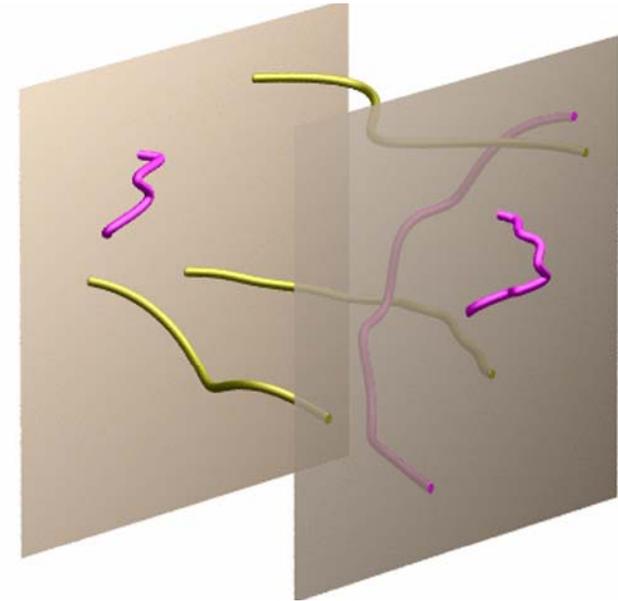
- La plus grande perturbation observable à l'échelle du rayon de Hubble aujourd'hui



Sources possibles pour l'énergie noire

- Brisure spontanée de symétrie et transition de phase (comme pour l'inflation primordiale)?
- **Théorie des cordes:** beaucoup prédisent l'existence d'un champ scalaire (**le dilaton**) dans la limite des basses énergies, semblable à un inflaton
- **Branes:** la théorie des cordes suggère aussi que notre univers est une brane incluse dans un espace à plus haute dimension, et dans ce cadre un champ scalaire serait source d'inflation

Branes et inflation

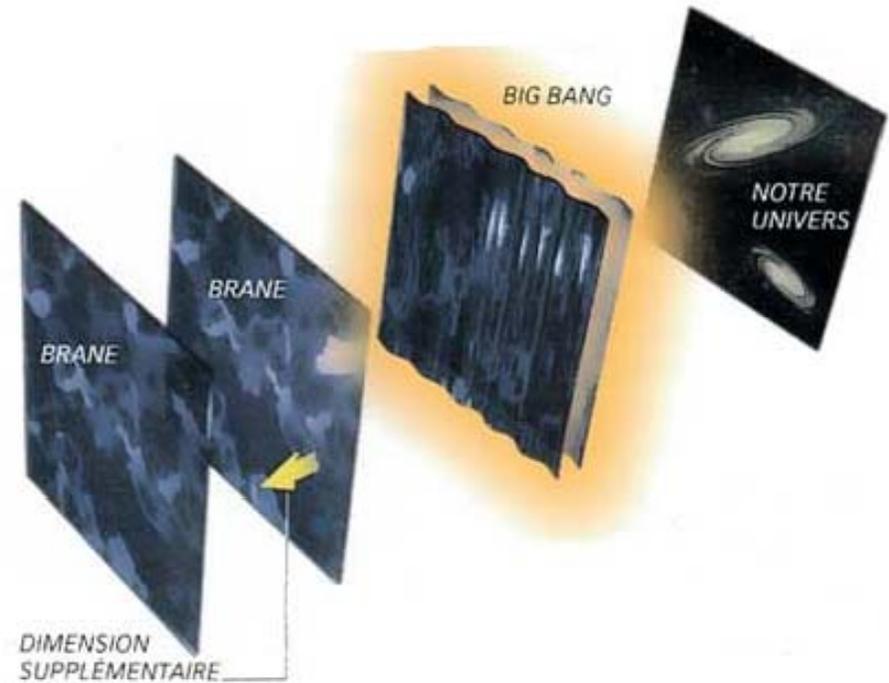


- Dans le cadre de la théorie des cordes, l'univers a en réalité **4 dimensions d'espace**
- Notre univers est une **brane 3D** se déplaçant dans un ensemble à 4D, appelé “bulk”
- La gravité se propage dans le bulk (4D), les autres forces seulement sur la brane (3D)
- Le champ scalaire “inflaton” viendrait de la partie de la gravité qui se propage dans le bulk



Un modèle cyclique

Dans le cadre où notre univers est une brane 3D dans un ensemble plus vaste ou “bulk” 4D:
Imaginons une brane 3D à chaque extrémité



- Une brane serait l'univers réel, et l'autre un univers 'miroir'
 - Les deux branes peuvent se rapprocher (et même se croiser) ce qui donne lieu au modèle cyclique de Steinhardt et Turok
- ➔ scénario **ekpyrotique**: le Big-Bang correspond à la collisions de deux branes

Principe holographique et gravité quantique

- La théorie holographique introduite à l'échelle microscopique
→ La constante cosmologique devrait tendre vers zéro

- Dans le cadre habituel, l'énorme valeur de l'énergie du vide vient du grand nombre de degrés de liberté
- Mais dans la théorie holographique, selon le principe de Bekenstein-Hawking, le nombre de degrés de liberté est réduit
- Horava (1999) a proposé une théorie, avec l'action S

$$S \approx NM^2 \int d^4x \sqrt{g} \left(M^2 + R + \frac{1}{M^2} R^2 + \dots \right)$$

- M = échelle infrarouge, l'inverse de la taille du système
- N degrés de libertés, R^2 termes quadratiques du tenseur de Riemann

Degrés de liberté à la surface

$$G_N^{-1} \approx NM^2.$$

- G constante de gravité (Newton)
- N est la surface entourant le système en unités de Planck
- Action d'Einstein-Hilbert
$$S = \frac{1}{2\kappa} \int R \sqrt{-g} d^4x$$
- $\Lambda \sim M^2$, ou bien $\Lambda r^2 \sim 1$ r taille de l'écran holographique
- L'entropie S est limitée $S < r^2 M_p^2$ $\Lambda S < M_p^2$
- La constante cosmologique prévue **tend vers zéro** (Horava & Minic 2000)
- Le défi est de trouver une théorie holographique qui marche au niveau microscopique

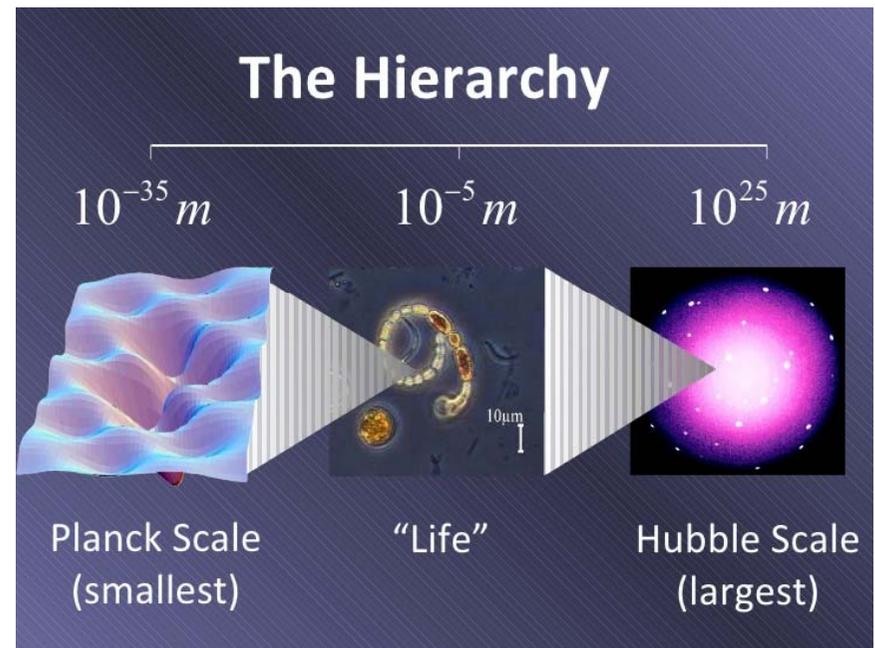
Principe holographique

- La quantité d'informations contenues dans un volume donné ne peut excéder celle emmagasinée à la surface de ce volume, à raison de 4 bits d'information pour une surface de Planck.
Conjecture de G. T'Hooft (1993)
- Limite de **Bekenstein-Hawking** basée sur l'entropie S des trous noirs $S < \text{Aire}/4$

- Quantification à l'échelle de Planck?
- L'espace n'est plus continu
- Limite le nombre de degrés de liberté

Problème d'invariance de Lorentz

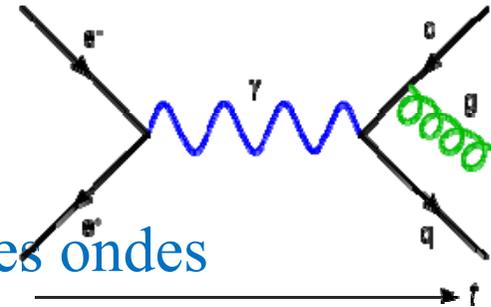
→ Résolu par les trous noirs?



Physique fondamentale et astrophysique

- Le problème de Λ relie la physique microscopique (**quantique**) à l'astrophysique des grandes échelles, celles du **cosmos**
- L'énergie du vide, sommant les énergies de point-zéro de tous les oscillateurs, est prédite 120 ordres de grandeur supérieure à ce qui est observé

- Au 19^e siècle, les physiciens inventaient l'éther, remplissant le vide, et permettant la propagation des ondes électro-magnétiques



- Mais l'invariance de Lorentz, la relativité a balayé tout cela
- Aujourd'hui, référentiel de l'univers: le fonds micro-onde à 3K à grande échelle. Théories de l'éther d'Einstein, avec un champ vectoriel (référentiel privilégié), covariant

Résumé

Historique de la constante cosmologique

Depuis Einstein 1915, à sa découverte en 1998, confirmation des constantes de l'Univers, CMB, lentilles, etc..

Problème astrophysique

Meilleures sondes, les supernovae Ia

Inflation: Champ de l'inflaton qui resurgit?

Problème de physique fondamentale

Energie du vide Effet Casimir

Physique quantique

De nombreuses tentatives: gravité unimodulaire

Supersymétrie (SUSY), Théorie des cordes, Gravité quantique

Holographie, Gravité quantique à boucles