

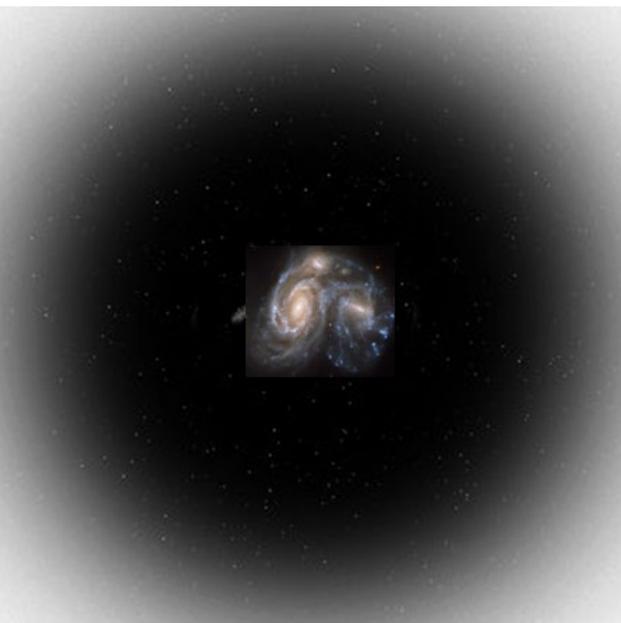


COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

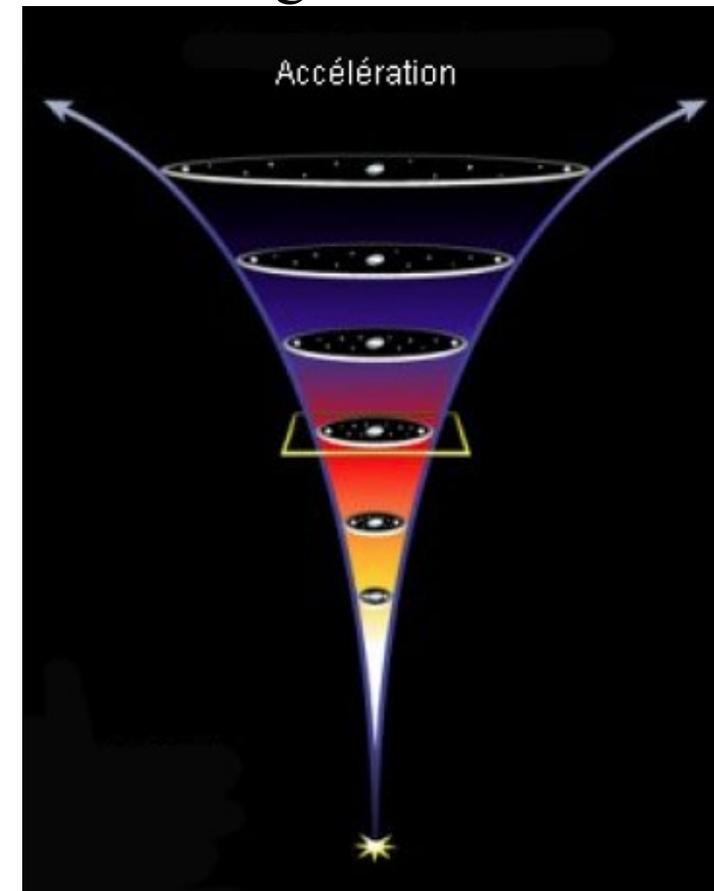
Chaire Galaxies et Cosmologie

# Les observations du secteur noir

Matière noire



Energie noire



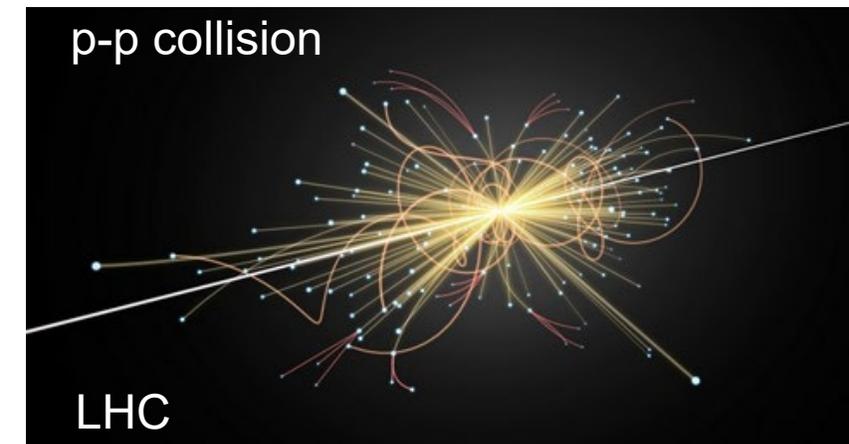
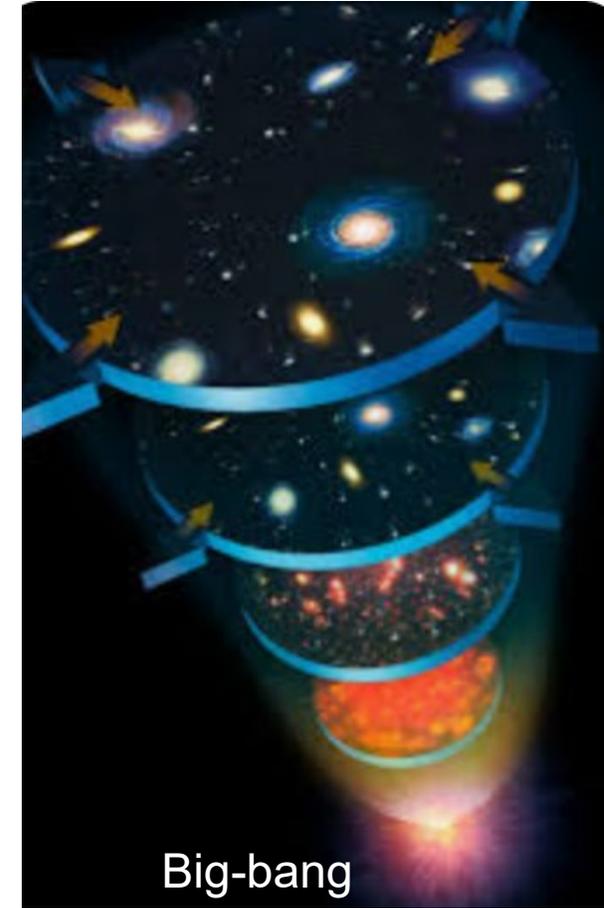
Françoise Combes



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

# Energie sombre et matière noire

- L' énergie sombre ( $\Lambda$ ) a été découverte en premier!
- Histoire de la constante cosmologique: supposée nulle pendant 80ans
- La matière noire et les particules exotiques
- Découverte en 1998 de l'accélération de l'expansion, encore plus de secteur noir! Analogie avec l'inflation?
- Pistes pour des solutions...



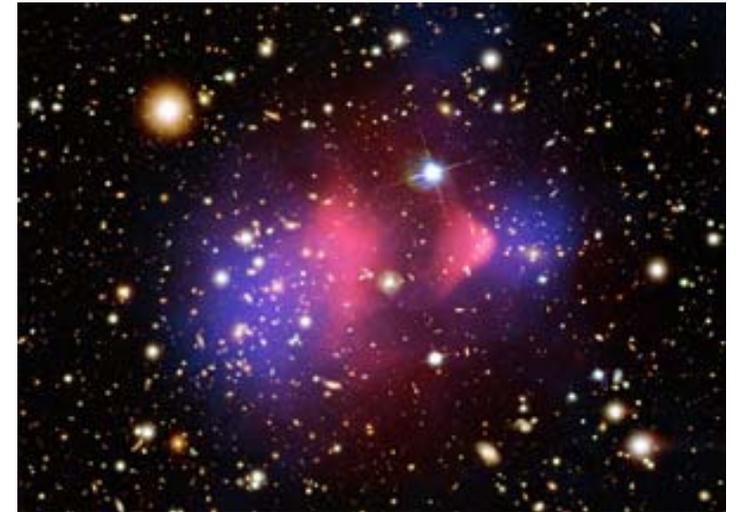
# Composition de l'Univers

95% inconnu

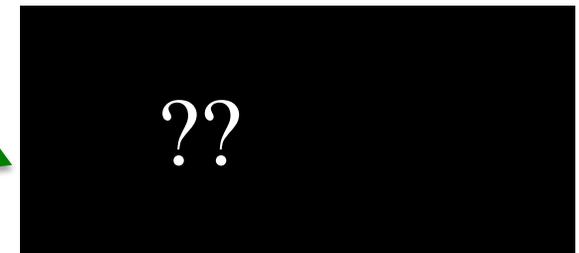
- Matière ordinaire 5%
- Matière noire exotique 25%
- Energie sombre 70%



$\Omega_b$



$\Omega_{DM}$



$\Omega_\Lambda$

ou constante cosmologique

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

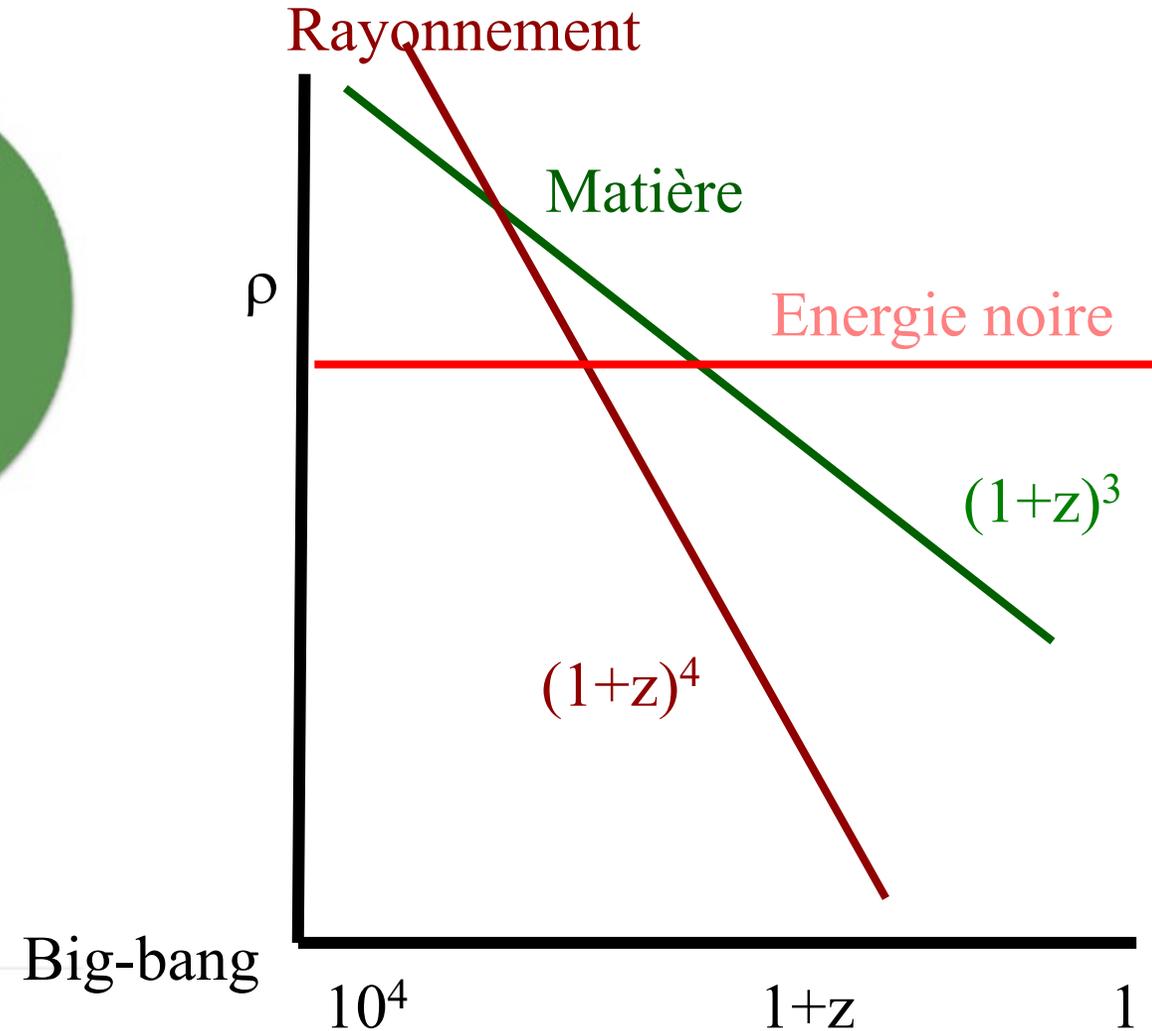
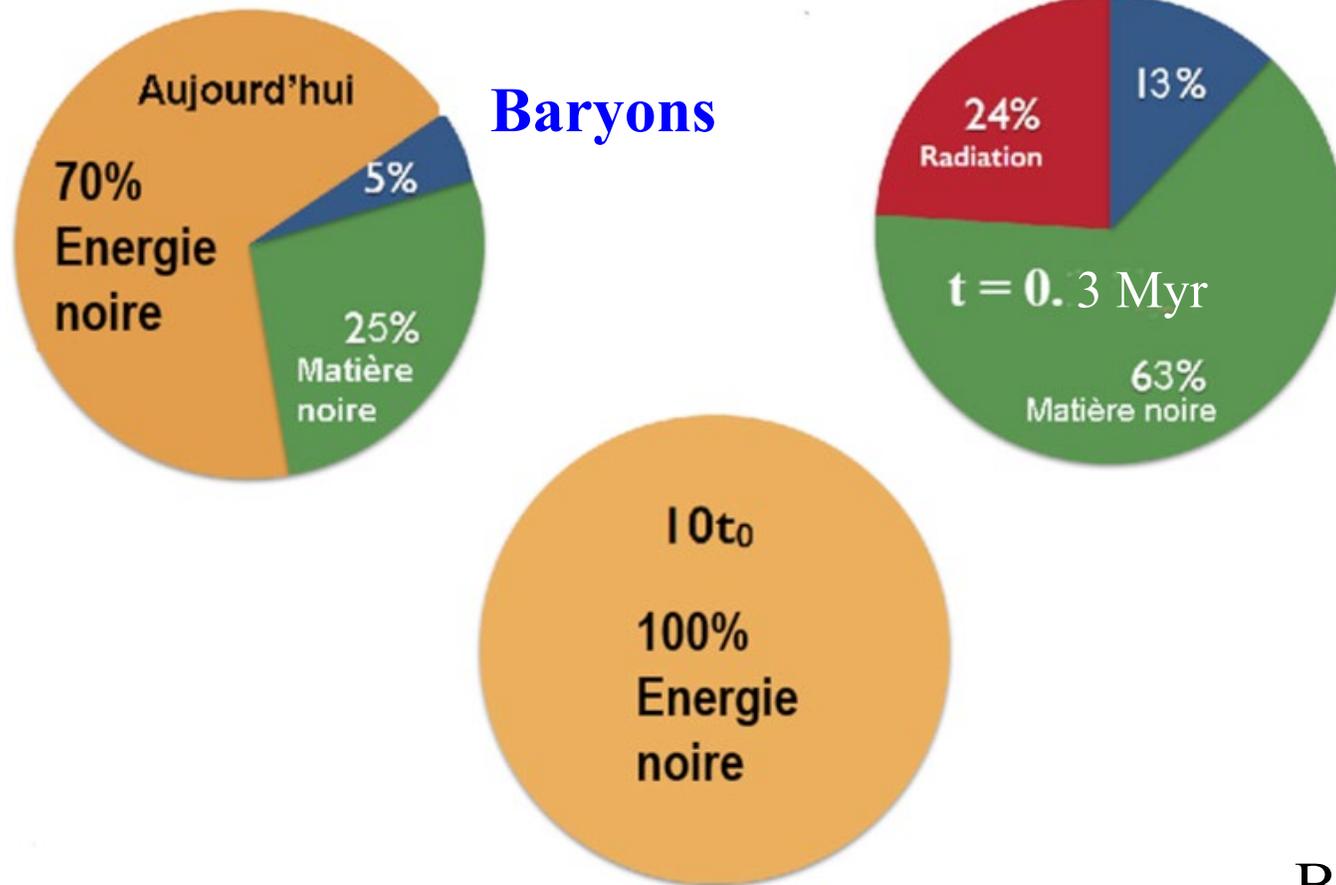
$$\rho_{crit} = 10^{-29} \text{g/cm}^3$$

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

# Evolution du contenu de l'Univers

$$R(t) \propto 1/(1+z)$$

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

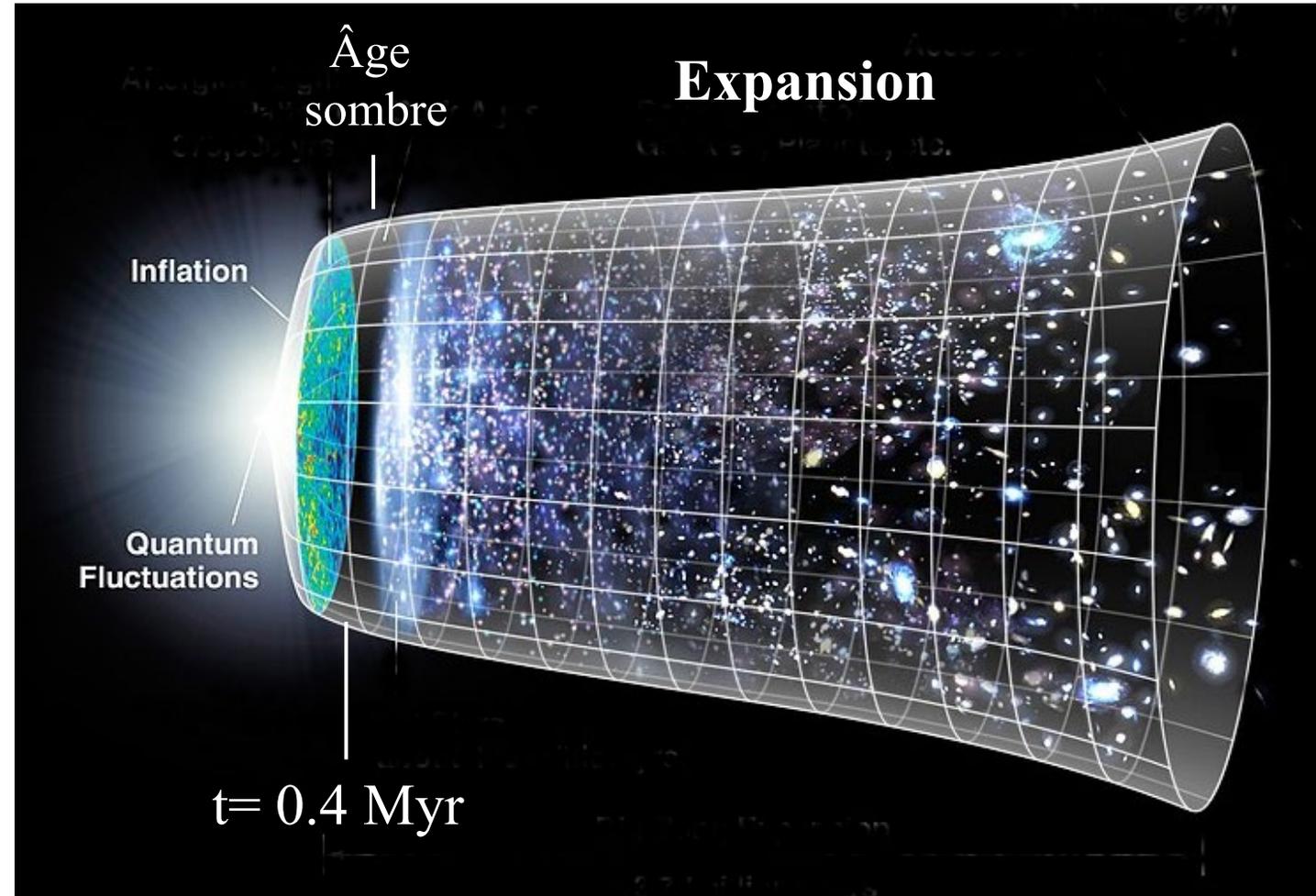
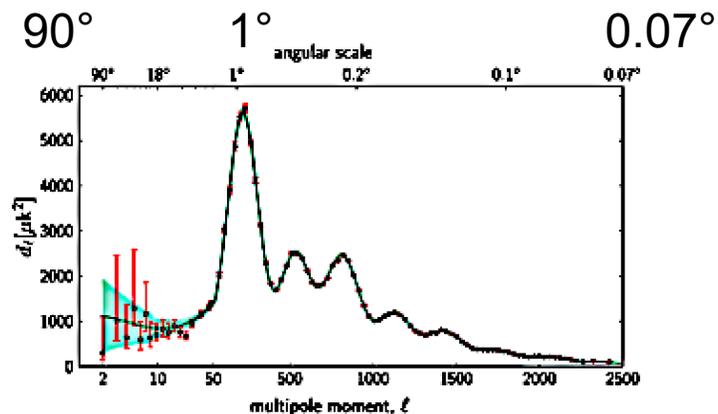
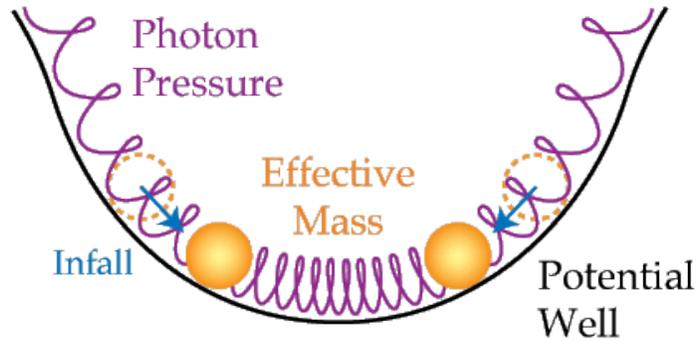
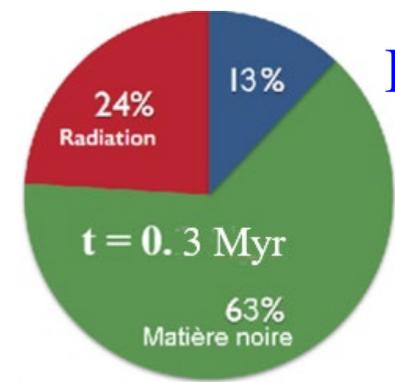


# Epoque des oscillations acoustiques

Les photons et les baryons sont en équilibre: ondes de pression

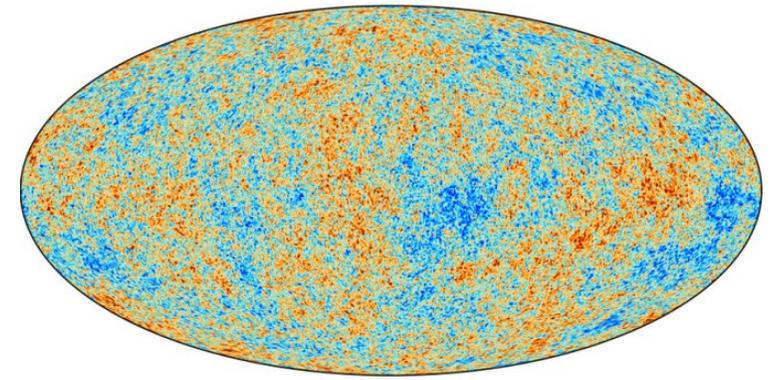
Jusqu'à  $t = 380\,000$  ans

Gaz ionisé,  $T > 3000\text{K}$



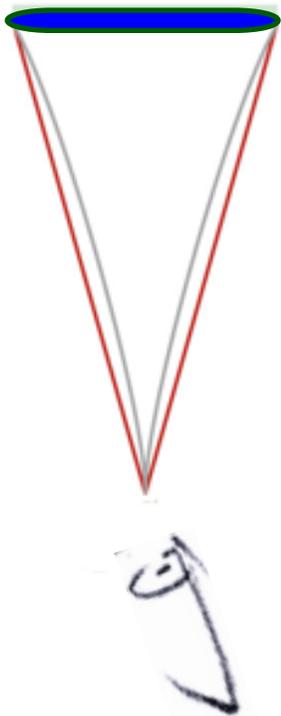
# Courbure de l'Univers nulle

- L'observation du fond cosmologique micro-onde (COBE, WMAP, Planck)
- ➔ taille de l'horizon sonore (150kpc) vue sous un angle de  $\sim 1^\circ$

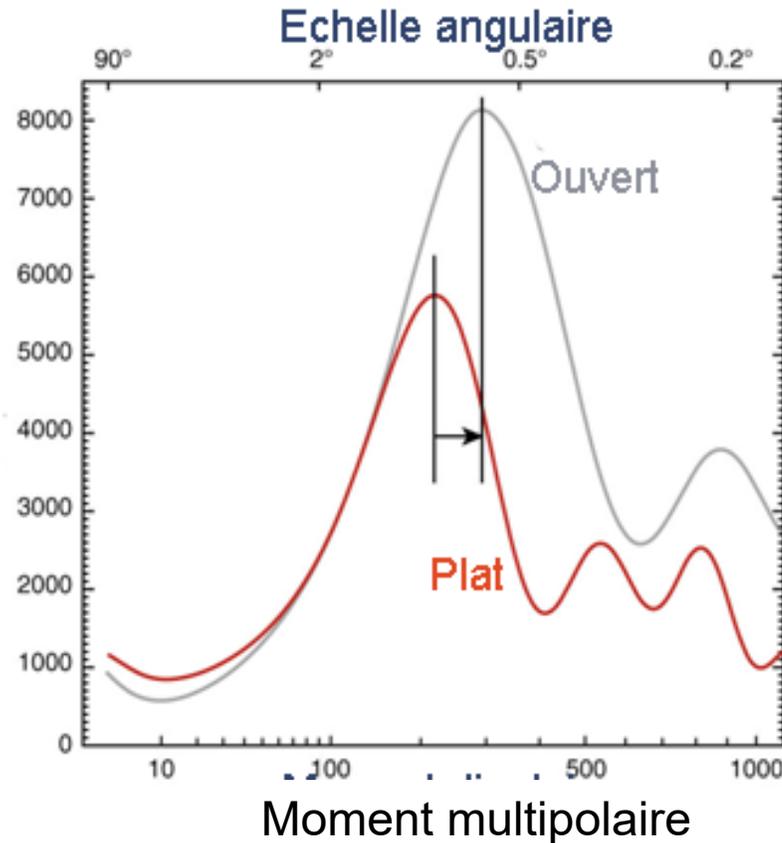


CMB satellite Planck  
Cosmic Microwave Background

Règle standard  $1^\circ$   
Horizon sonore



Règle de  
150Mpc  
comobile



$$\text{La courbure} = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1 = 0$$

$$\rightarrow \Omega_{\text{tot}} = 1$$

# Nébuleuses ou galaxies ?

Au début du XXe : **un grand débat en 1920**

Pour connaître la taille de notre Univers

Nébuleuses, Amas d'étoiles ou Galaxies?

**V.M.Slipher** (USA) a mesuré les vitesses de récession des « nébuleuses »

**W. Herschel** (DE-UK): la Voie lactée est petite, centrée sur le Soleil!

**Relation P-L des Céphéides** pour connaître la distance (Leavitt, 1909)

Henrietta Leavitt  
(1868-1921)



**Harlow Shapley**  
(1885-1972)



**Heber Curtis**  
(1872-1942)



**H. Shapley:** *Les nébuleuses font partie de Notre Galaxie + amas globulaires*

**H. Curtis** *Les nébuleuses, comme Andromède sont des galaxies externes à la Voie lactée*

# Fin du débat

Curtis avait raison - les vitesses de Slipher étaient incompatibles avec le modèle de Curtis



*E. Hubble*

Hubble (1924, 1926) identifie des Céphéides dans NGC 6822, M31, M33

→ M31 galaxie à part, distante de  $\sim 2$  millions d'al

Il interprète les vitesses positives comme une **expansion de l'Univers, en 1929**



# L'expansion de l'Univers

**1929:** Il est établi qu'il existe des galaxies extérieures.  
Les galaxies s'éloignent !

**vitesse proportionnelle à leur distance**

Vitesse

+1000 KM

500 KM

VELOCITY

0

DISTANCE

$10^6$  PARSECS

$2 \times 10^6$  PARSECS

$H = 500 \text{ km/s/Mpc}$

Distance

**L'espace est en expansion**

Georges Lemaître, inspiré par Einstein, propose une origine de l'Univers **très dense et très chaud (1927)**

**L'atome primitif**

Qualifié de **Big-Bang** par Fred Hoyle (BBC, 1949!)

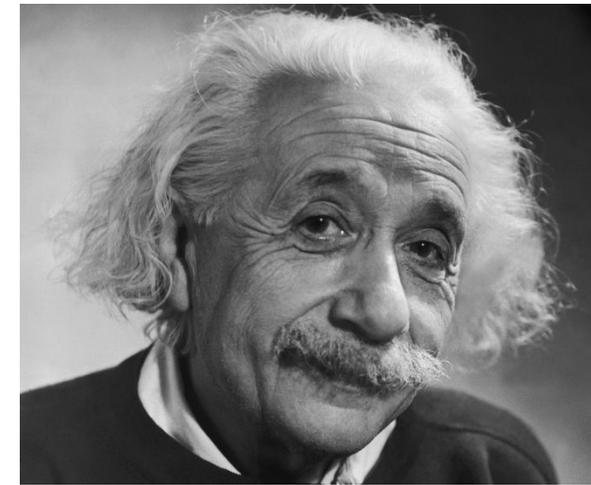
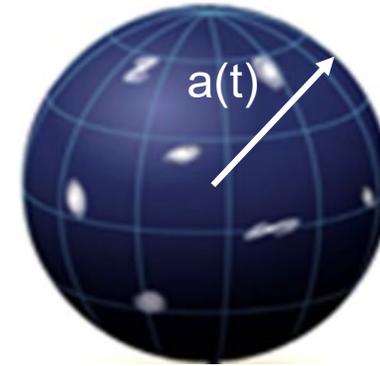
Loi de **Hubble-Lemaître** en 2018

G. Lemaître



# Introduction d'une constante cosmologique $\lambda$ (ou $\Lambda$ )

- Cette constante  $\lambda$  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 → Très instable

1917: de Sitter montre qu'il peut 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

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

W de Sitter



# Les modèles de Friedmann

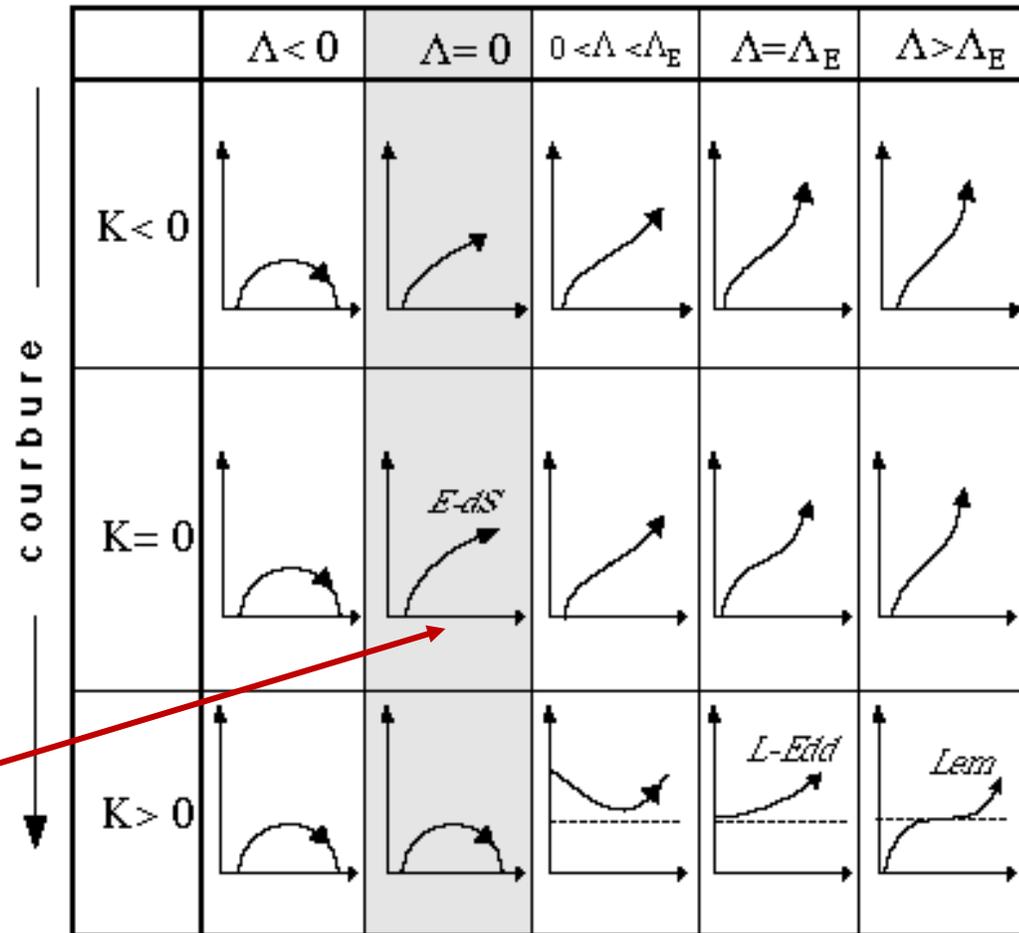
1922: Le premier à résoudre les équations d'Einstein, dans toutes ces possibilités, toutes les courbures, densités

Einstein lit son article dans « Zeitschrift für Physik » lui dit que c'est erroné!

Einstein reconnaitra que Friedmann a raison dans ce même journal

En 1932: modèle Einstein-de Sitter  
E-dS  $\lambda=0, k=0, R(t) \propto t^{2/3}$

— constante cosmologique —>



Alexander Friedmann  
(1888-1925)

# Einstein reconnaît son erreur → $\lambda=0$

1933: séminaire de G. Lemaître en Californie

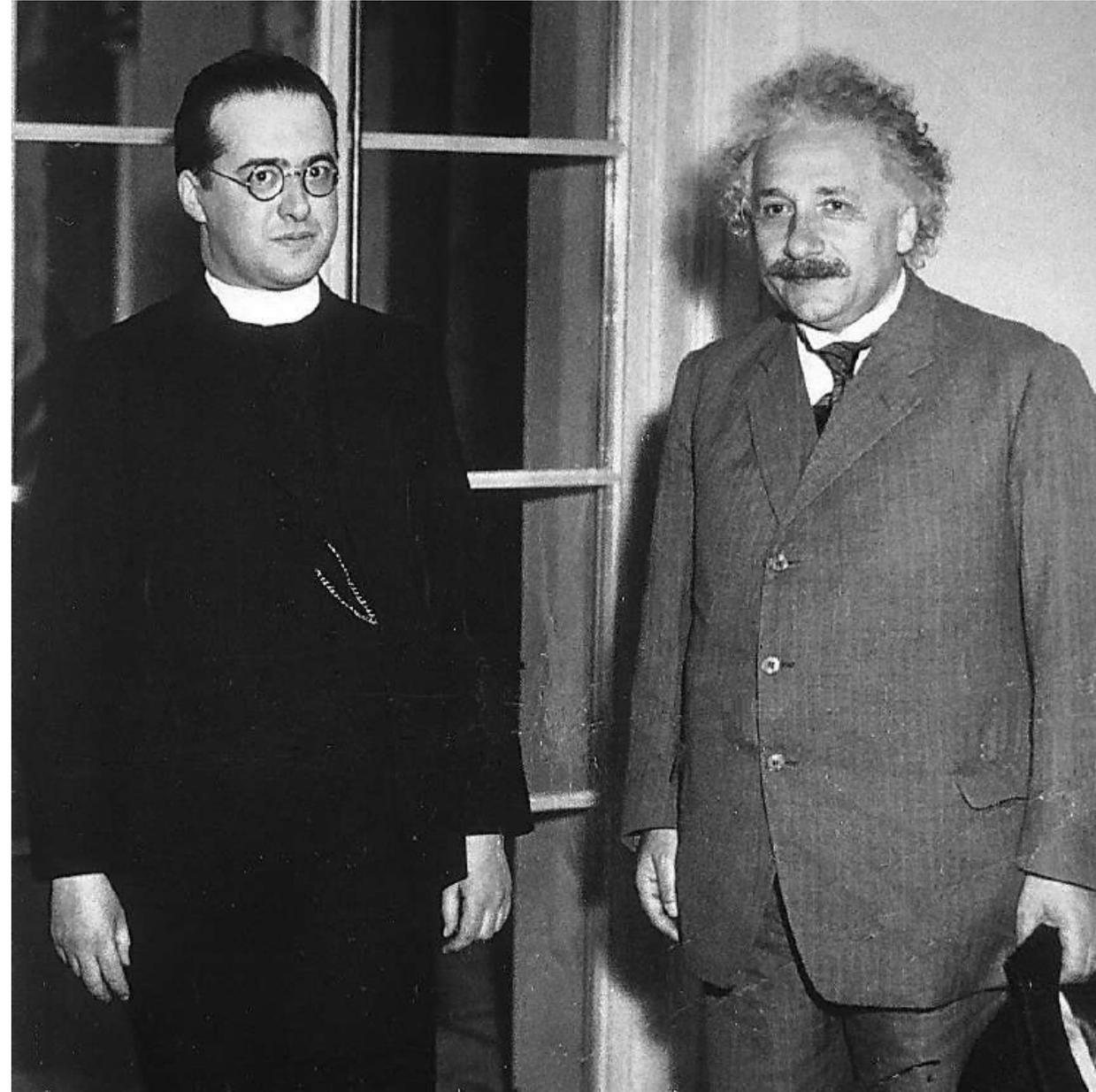
1927: Georges Lemaître est le premier à découvrir l'expansion de l'Univers

Article en Français, traduit plus tard en anglais, où lui-même oublie un point essentiel

Contrairement à Hubble en 1929, il interprète les vitesses des galaxies comme une dilatation de l'espace

**Mathématicien, au courant des observations**

**Pense que l'on aura besoin du  $\lambda$**



# 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-Lemaître

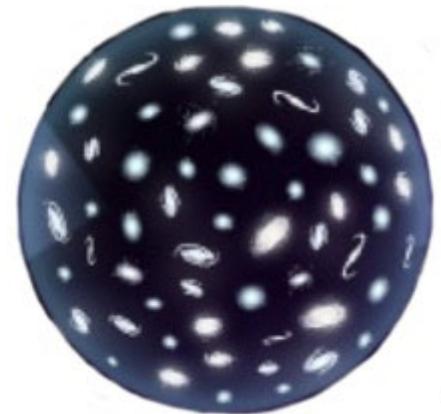
$$H = \frac{\dot{R}}{R}$$

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

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

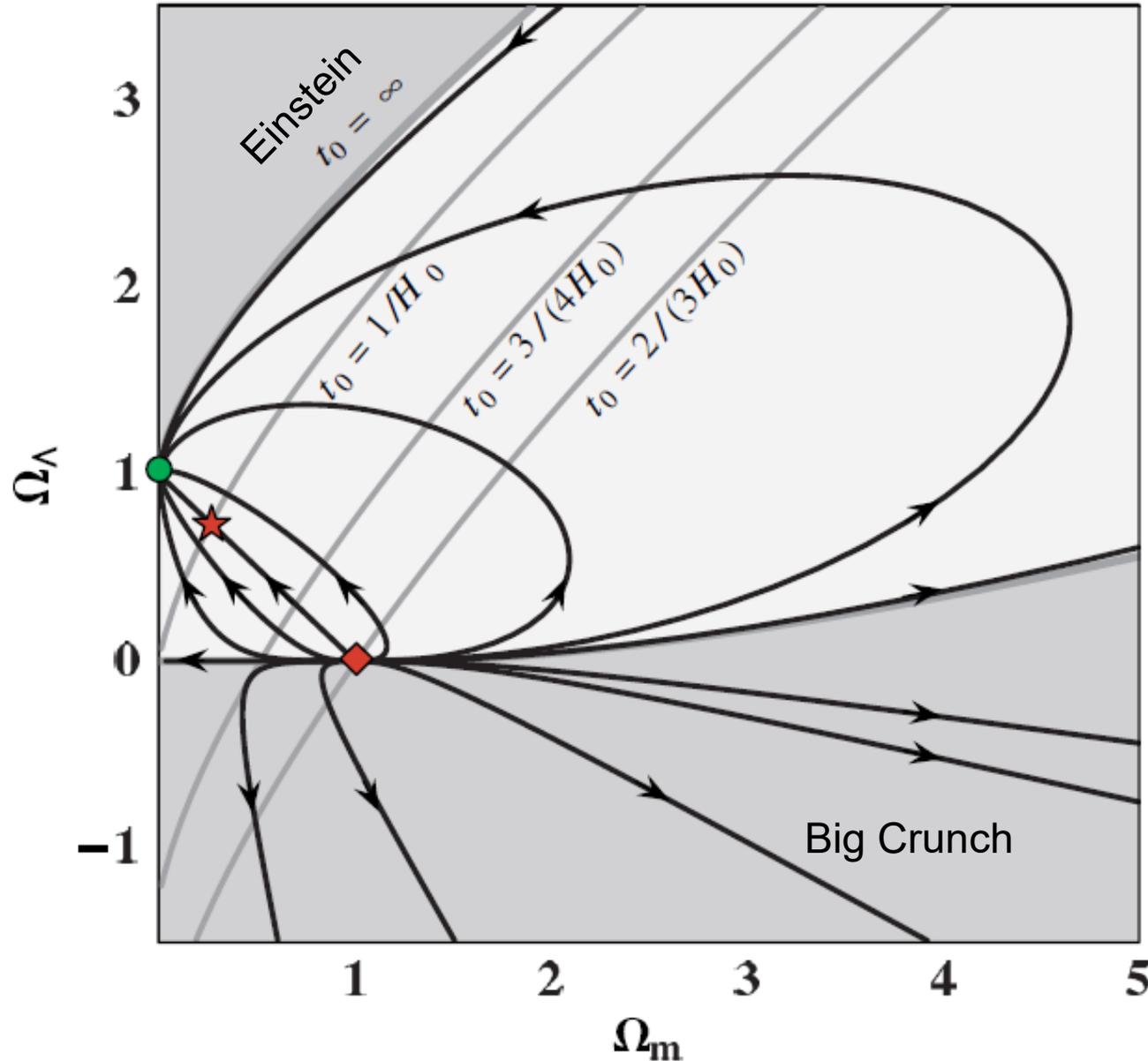
La constante  $\Lambda$  est homogène à  $c^2/a^2$  et pour Einstein  $a^2$  était la taille caractéristique de son univers sphérique  $R(t) = a$

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  $70 \text{ km/s/Mpc}$ . Pour Einstein  $t_0 = 1/H_0 = \text{l'infini}$  !



Courbure =  $\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$

# Différents modèles d'univers



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

◆ EdS  $R(t) \sim t^{2/3}$

★ Standard  $\Lambda$ CDM

Le modèle statique d'Einstein était hautement instable

Lemaître (1933):  $\Lambda$  équivalent à un fluide de pression  $P = -\rho c^2 \rightarrow$  **Energie noire**

# Energie noire= Energie du vide?



Wolfgang Pauli

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

- Ses calculs montrèrent  $\Lambda$  **très grand**, le rayon de l'univers d'Einstein n'arrivait pas à la Lune!

$$\Lambda = c^2/a^2$$

- 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!**

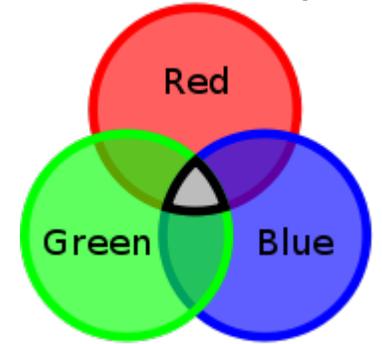
# Le vide en chromodynamique quantique

- 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  $\rho_c (\Omega=1) \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$
- Le calcul de l'énergie du vide revient à sommer tous les degrés de liberté de tous les champs quantiques possibles

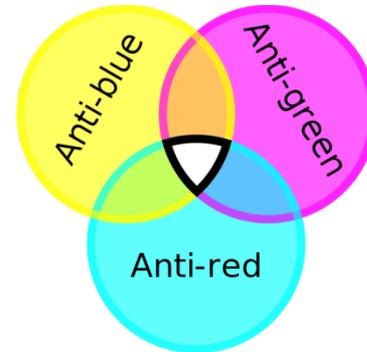
**Selon l'échelle de coupure, on trouve**

- $10^{56} \rho_c$  si la coupure est l'échelle de l'interaction électrofaible
- $10^{120} \rho_c$ , si la coupure est l'échelle de Planck
- Autre possibilité  $\Lambda_{\text{QCD}}$  encore **41** ordres de grandeur!

3 couleurs des quarks



+ 3 anti-couleurs



# Ou bien énergie noire + constante $\Lambda_E$

## Ajustement ultra-fin

Cette valeur de l'énergie du vide quantique doit apparaître comme une énergie dans l'équation d'Einstein  $\Lambda_q = 8\pi G \rho_q$

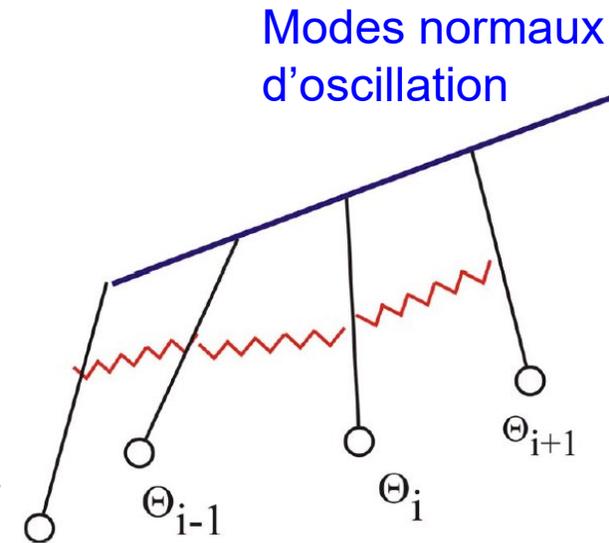
- Pour représenter la réalité, il faut que  $\Lambda_{\text{mesurée}} = \Lambda_E + \Lambda_q$

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 modes normaux de fermions contribuent une énergie négative, et ceux des bosons une énergie positive, 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

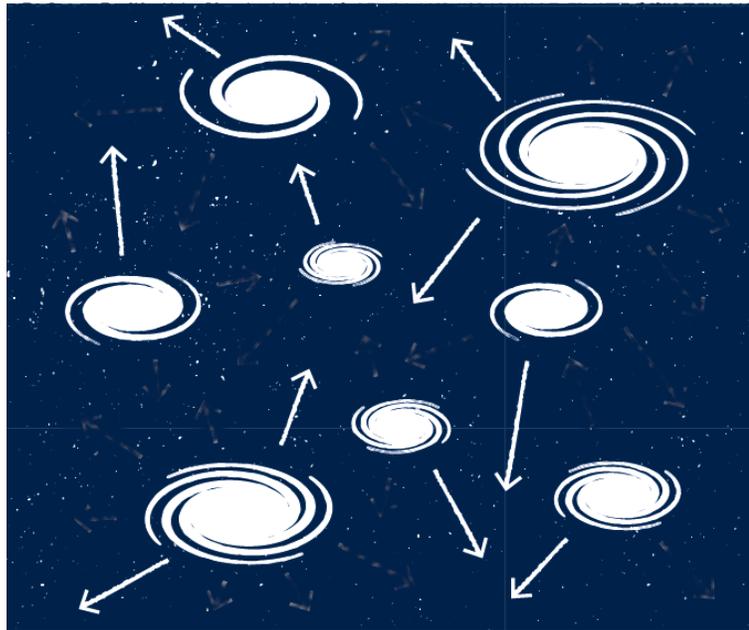
Il faudrait aussi équilibre des masses



$$\sum_k \omega_k(\text{boson}) - \sum_k \omega_k(\text{fermion}) \sim 0$$

# Histoire de la matière noire

1937 – Fritz Zwicky calcule la masse des amas de Galaxies en utilisant leurs vitesses



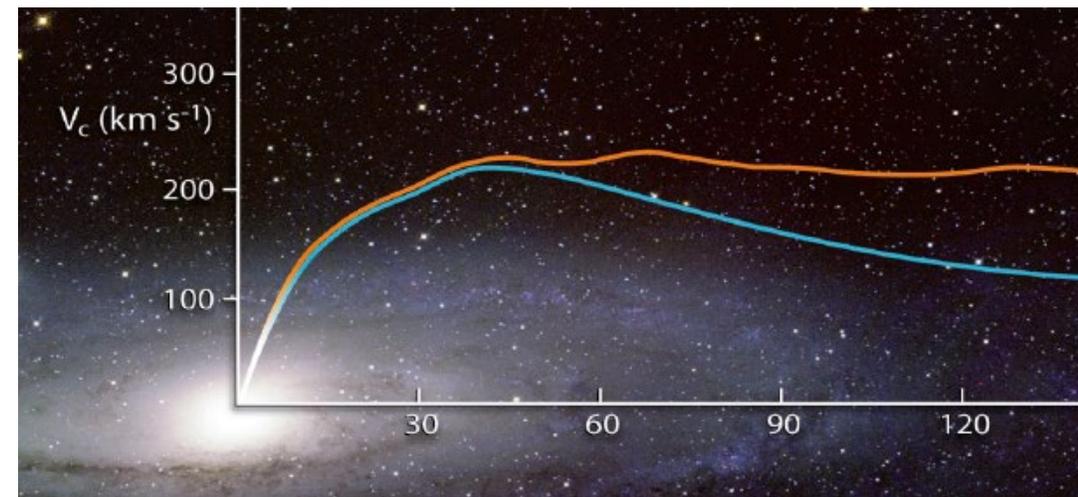
Amas de Coma,  $V \sim 1000 \text{ km/s}$

$$M/L = 500 M_{\odot}/L_{\odot}$$

- matière noire dans les galaxies
- matière entre les galaxies + obscuration
- test de la loi de Newton à grande échelle

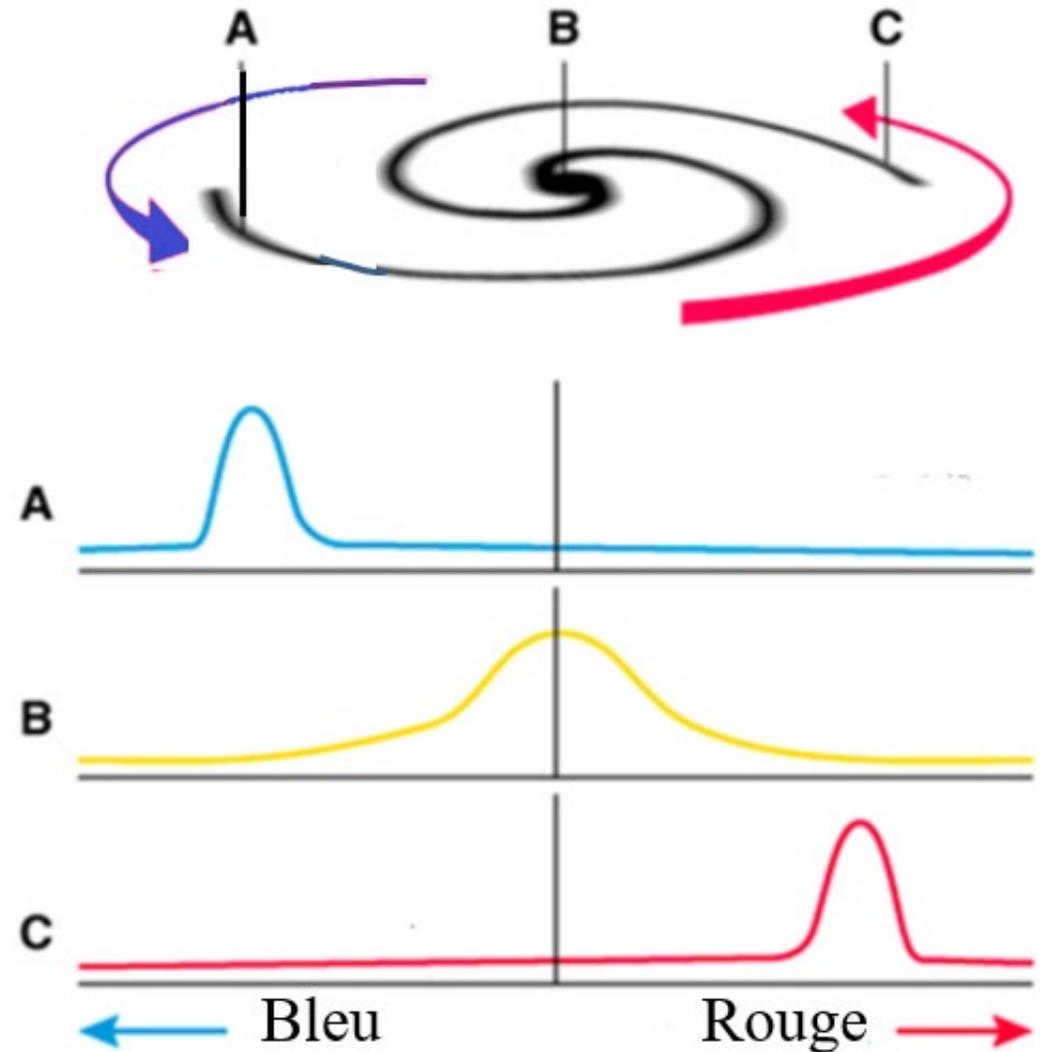
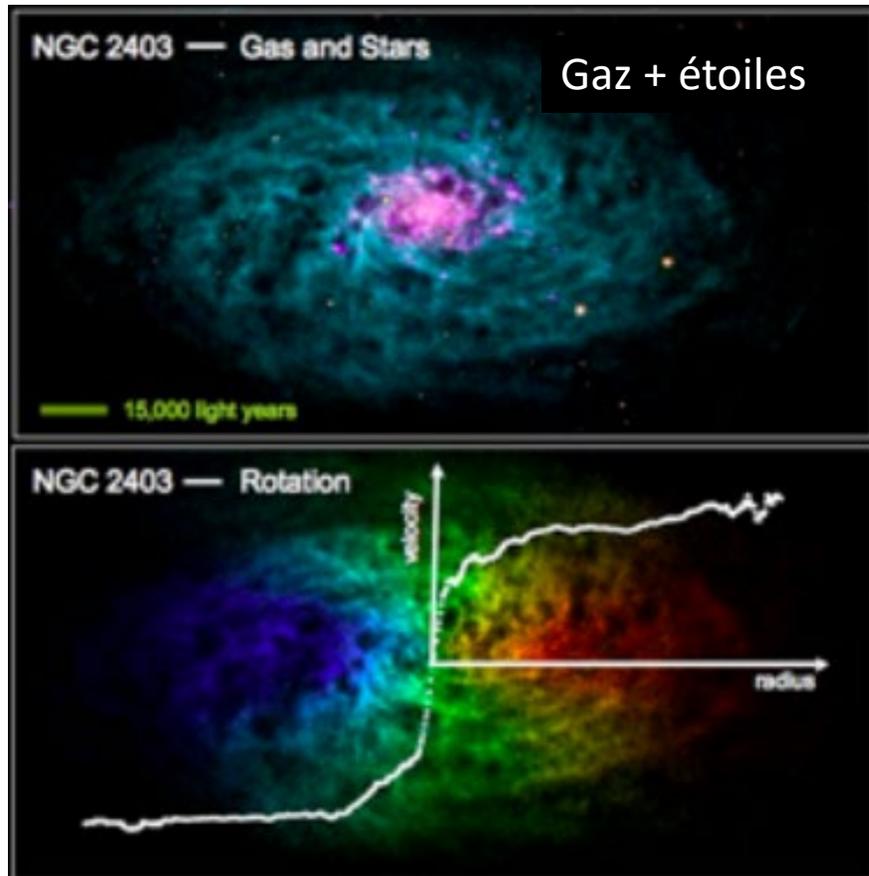


**Optique: Rubin, Ford et al 1978**  
Courbes de rotation des étoiles  
et du gaz ionisé ( $\text{H}\alpha$ ,  $[\text{NII}] 0.6\mu\text{m}$ )  
→ **Courbes plates**



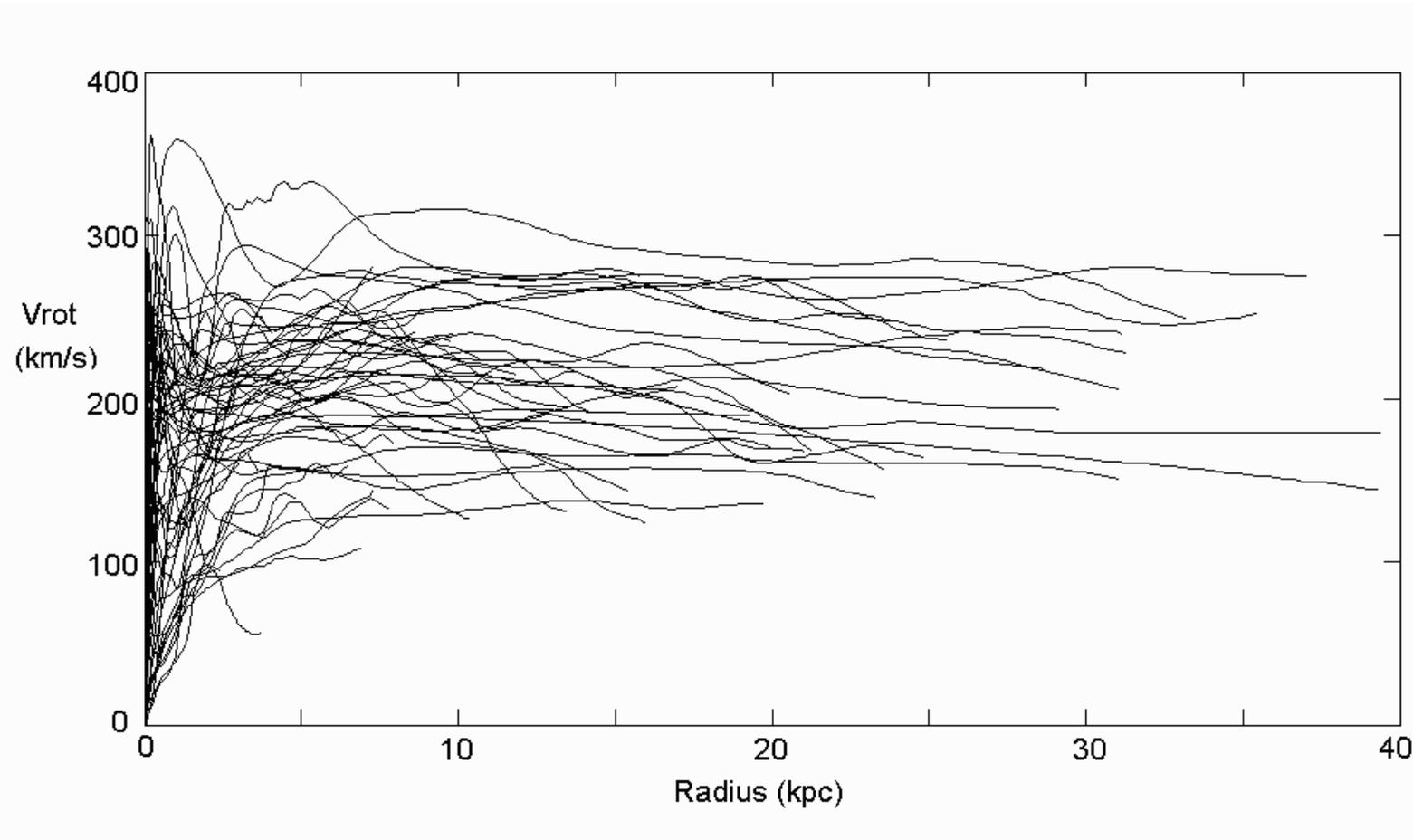
# Les courbes de rotation des galaxies spirales

- Effet Doppler
- Repliement des deux côtés,



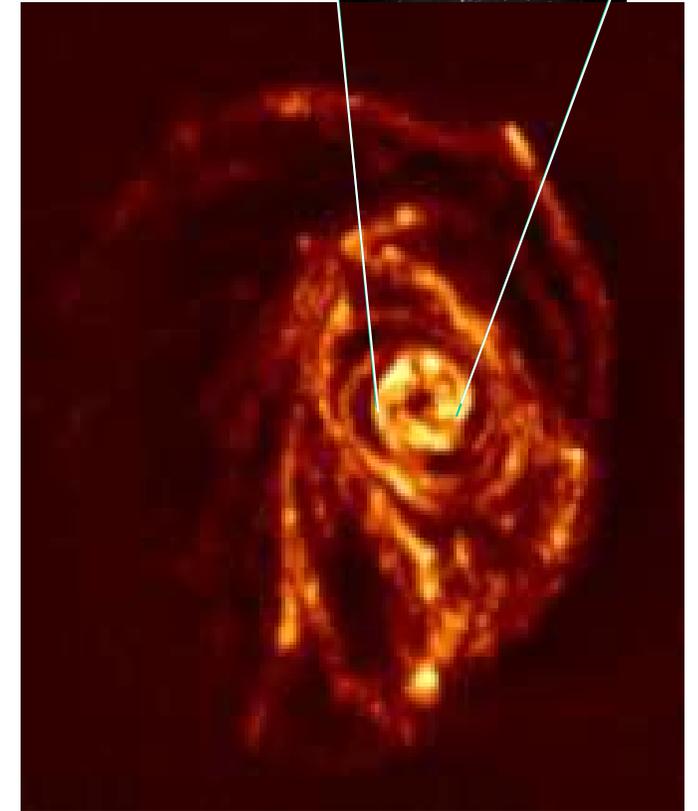
# Les régions externes: gaz atomique HI

HI: carte de l'hydrogène atomique  
21cm de longueur d'onde (découverte en 1951)



*Sofue & Rubin 2001*

M83: optique



HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie latcée

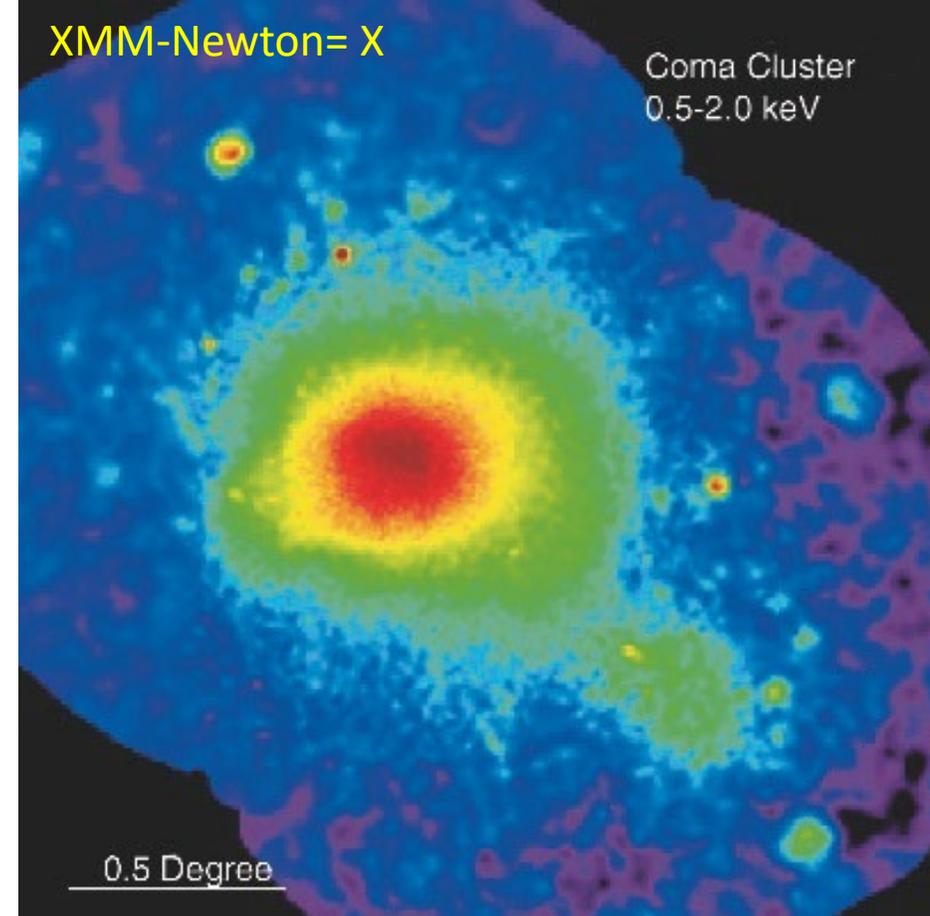
# Emission en rayons X de gaz très chaud

Les satellites en rayons-X en 1966  
→ forte émission diffuse dans Coma

Emission thermique du gaz très chaud  
à  $T \sim 10^8$  K, soit 100 millions de degrés!  
**dont la masse est comparable à la matière manquante**

Aujourd'hui  $M(\text{gaz chaud}) \sim 10 M(\text{galaxies})$   
Il reste encore de la **matière noire**  $\sim 5$  fois la masse visible

**La fraction de matière noire se réduit! la plupart de la matière ne rayonne pas dans les longueurs d'onde optiques, que l'œil reçoit!**



# Cartographies de la matière noire

## Lentilles gravitationnelles: régime fort

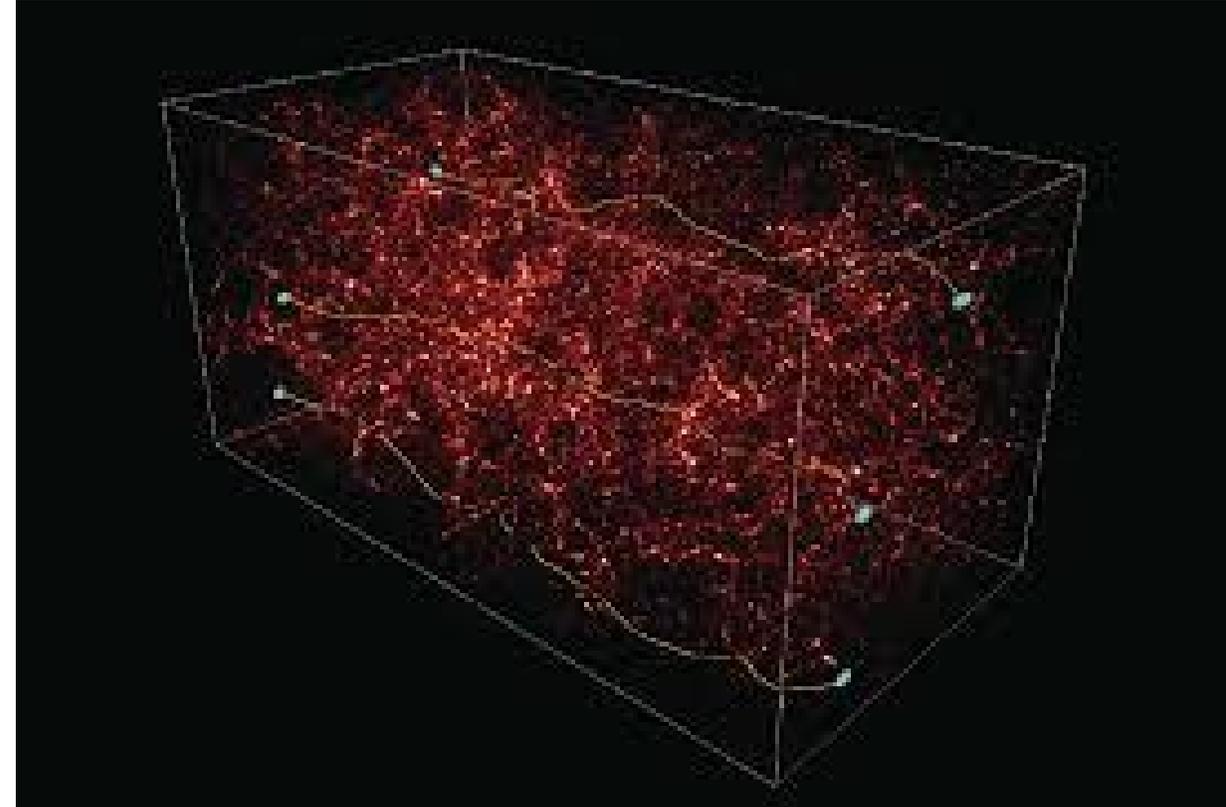
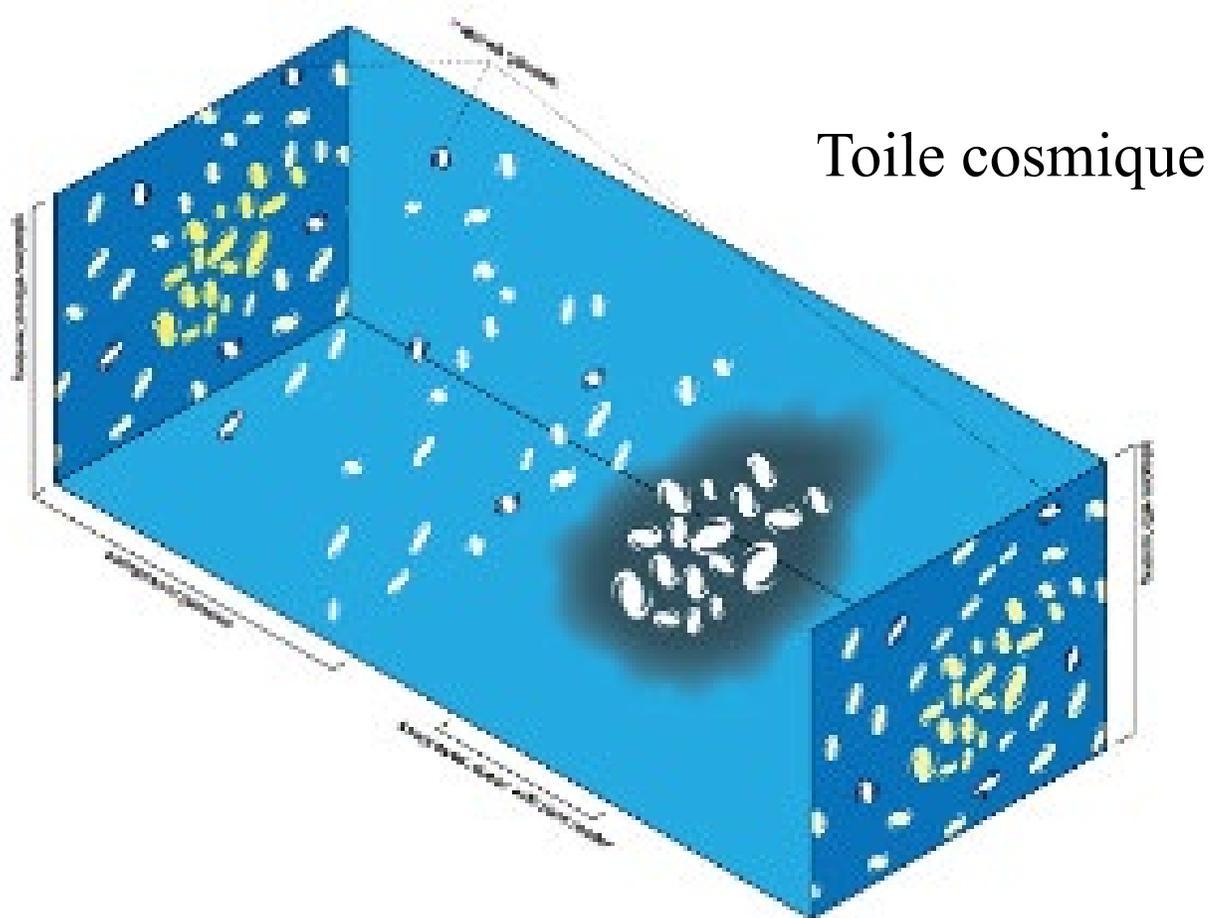


SDSSCGB 8842.3  
HST

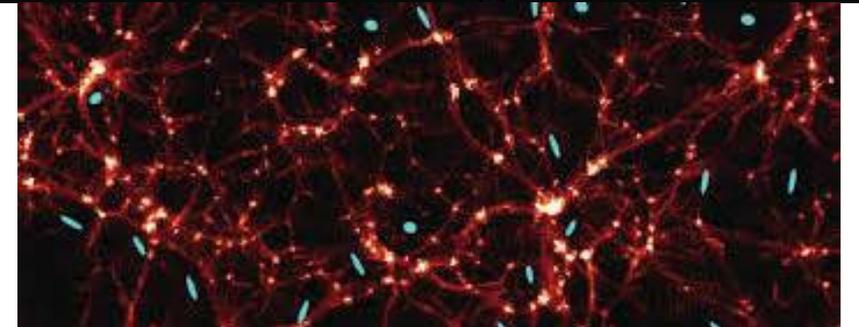


Abell 2218, HST

# Lentilles faibles: cisaillement gravitationnel



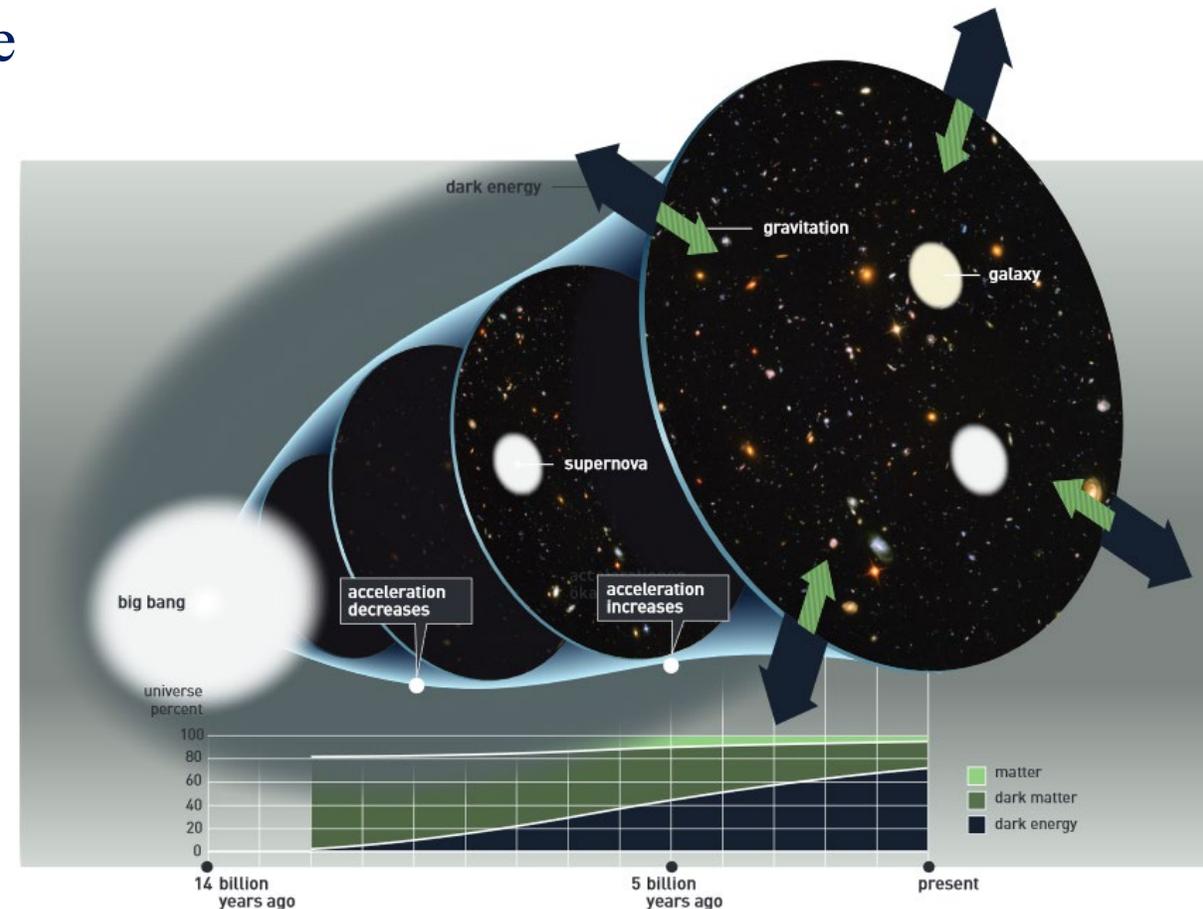
Calcul de la masse totale



# Découverte de l'énergie sombre en 1998

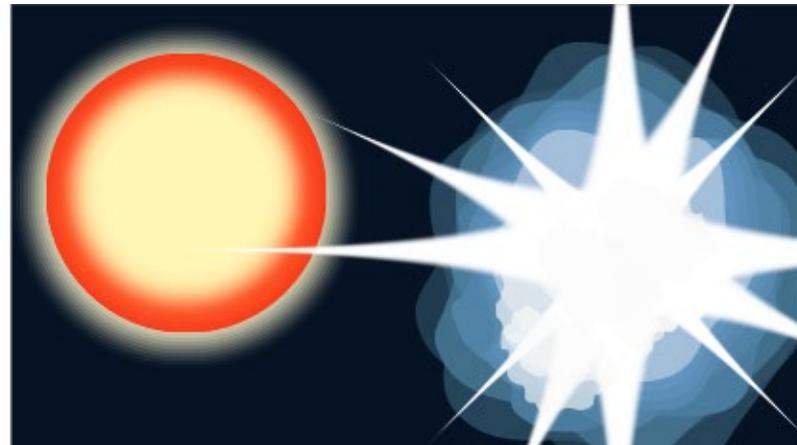
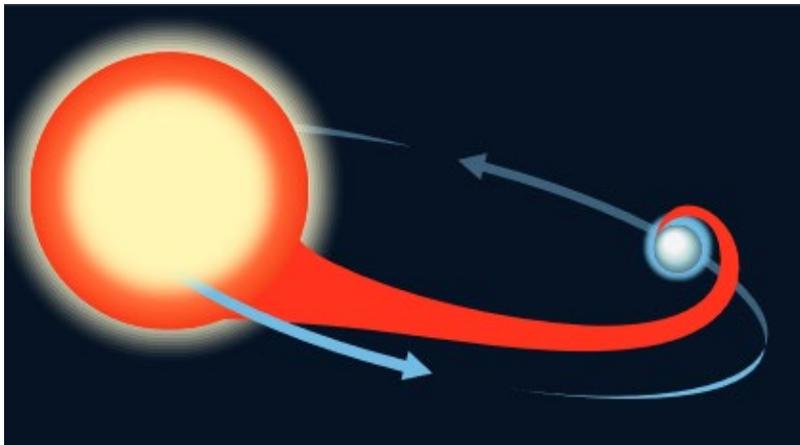
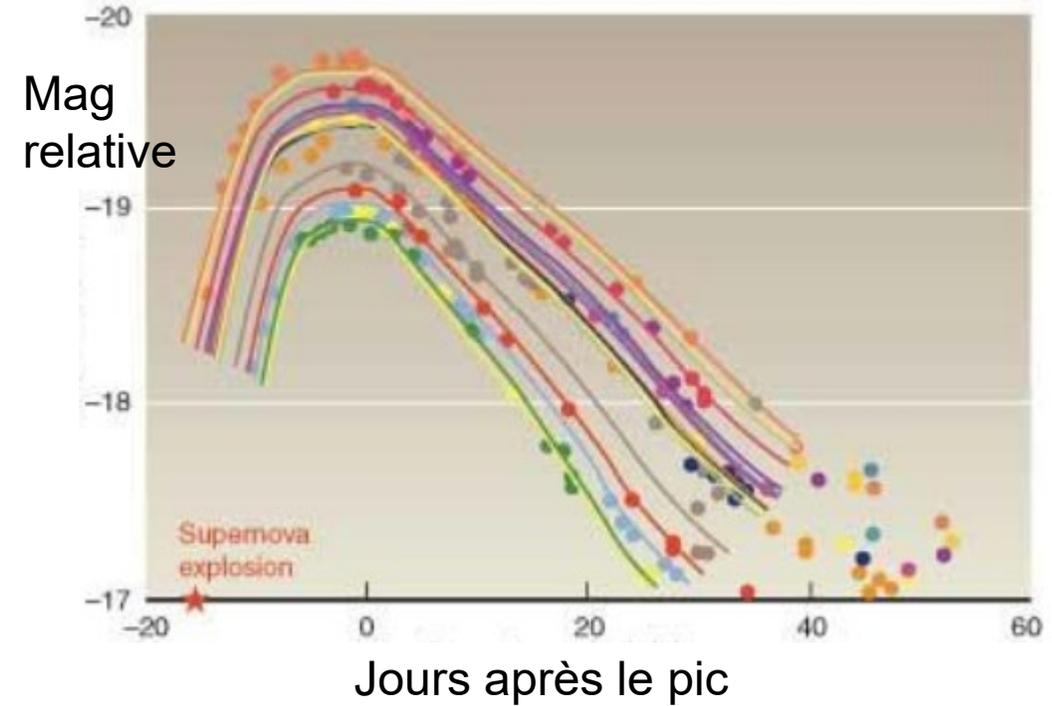
- **Riess et al (1998) 10 supernovae Ia  $0.16 < z < 0.62$**   
+ 16 à grand  $z$ , 34 locales
- Distance- luminosité calculée à partir de la relation entre luminosité et forme de leur courbe de lumière
- Obtention de  $H_0, \Omega_m, \Omega_\Lambda$ : les SN Ia sont 10-15% plus lointaines que prévu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

→ prix Nobel en 2011



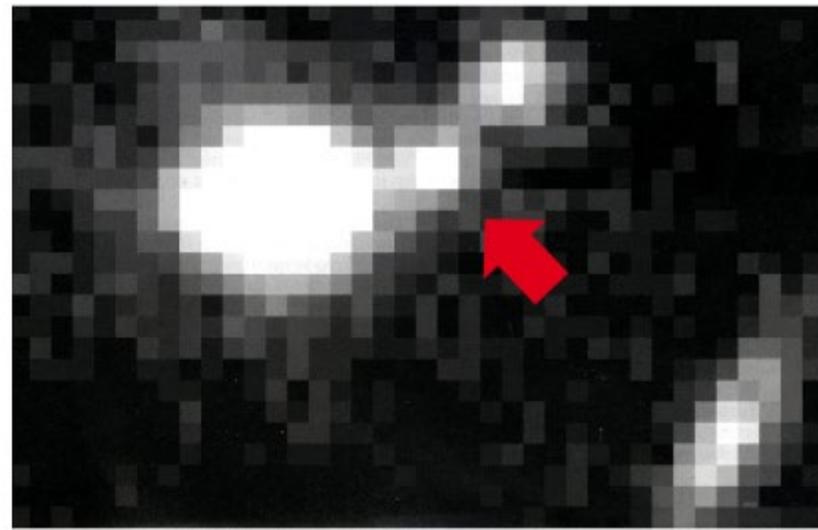
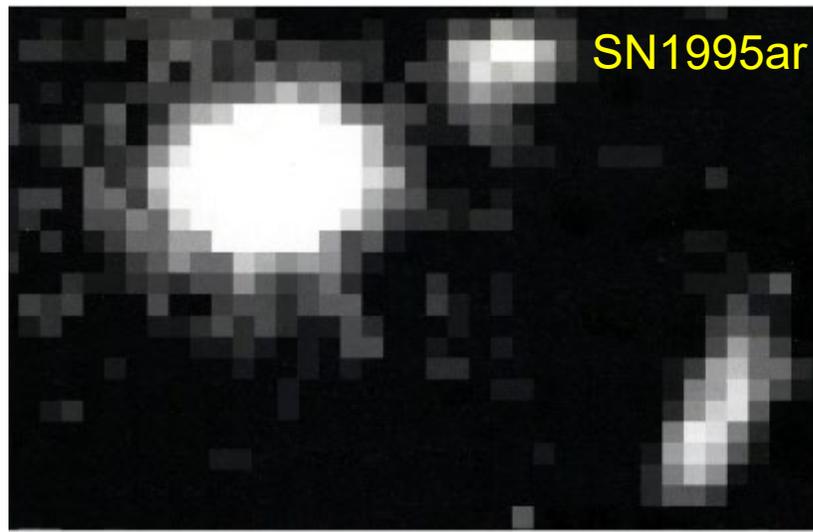
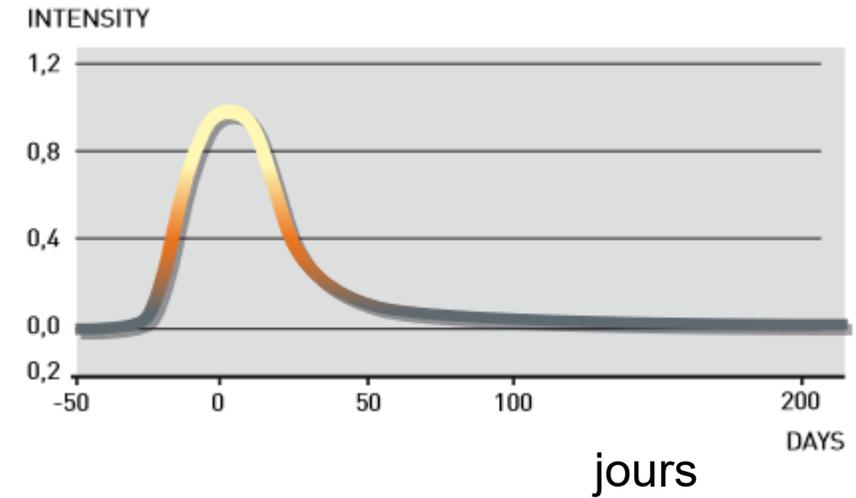
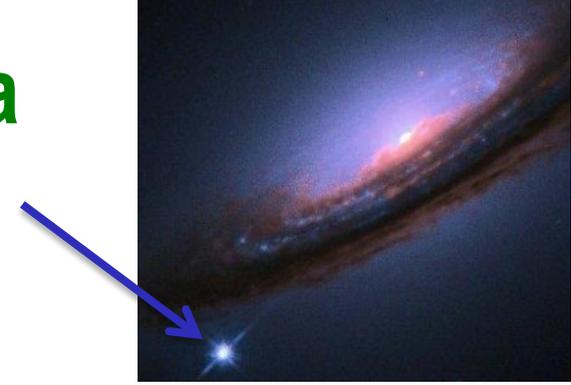
# Des chandelles standard

- 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  
+ correction de couleur



# Les explosions de supernovae Ia

- Une étoile binaire, dont une naine blanche  
Energie bien supérieure à SNII
- 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



# Calibration des échelles de distance

+TRGB, JAGB, Tully-Fisher

Tension avec  $H_0$   
Depuis 10 ans

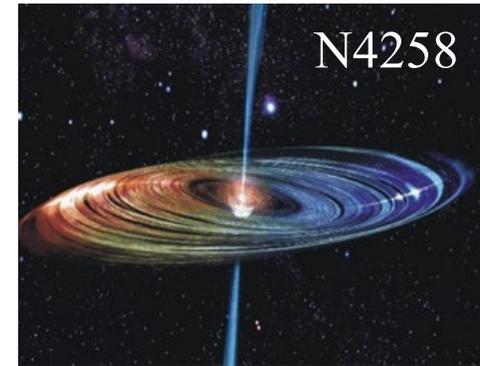
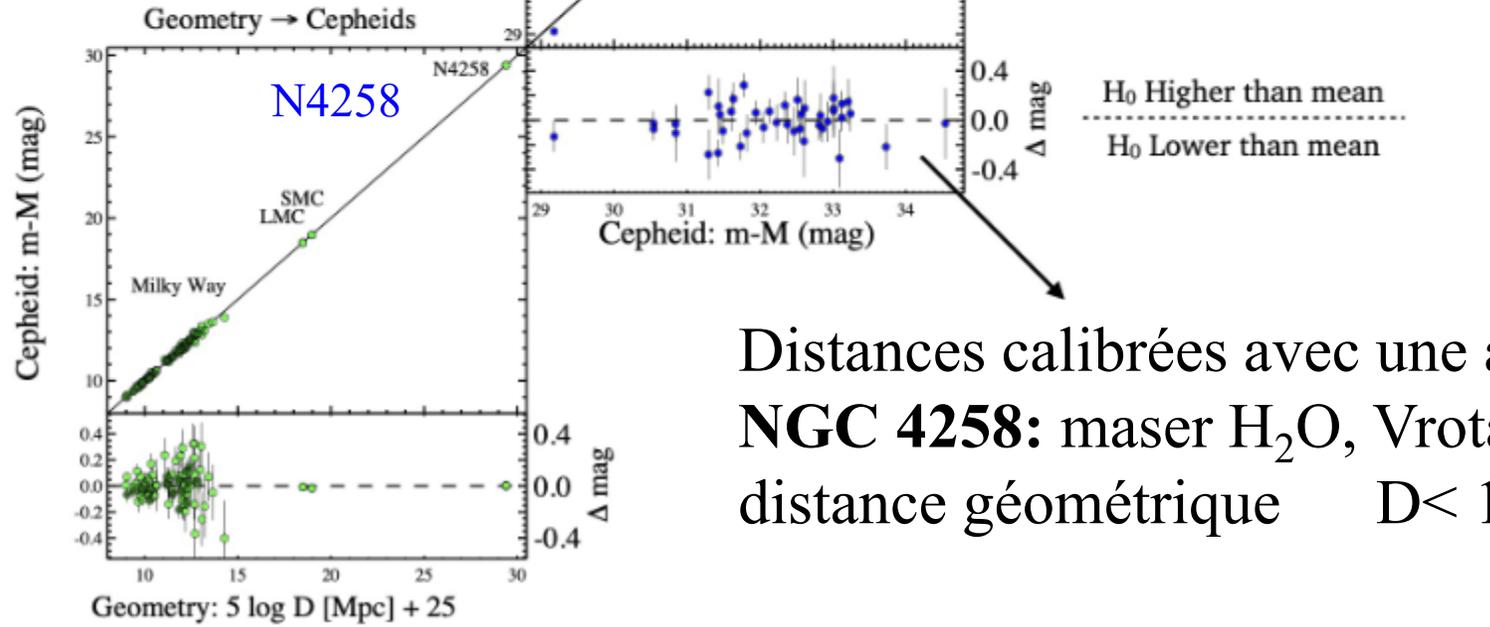
SN Ia - Expansion  $H_0$

Céphéides – SN Ia

JWST



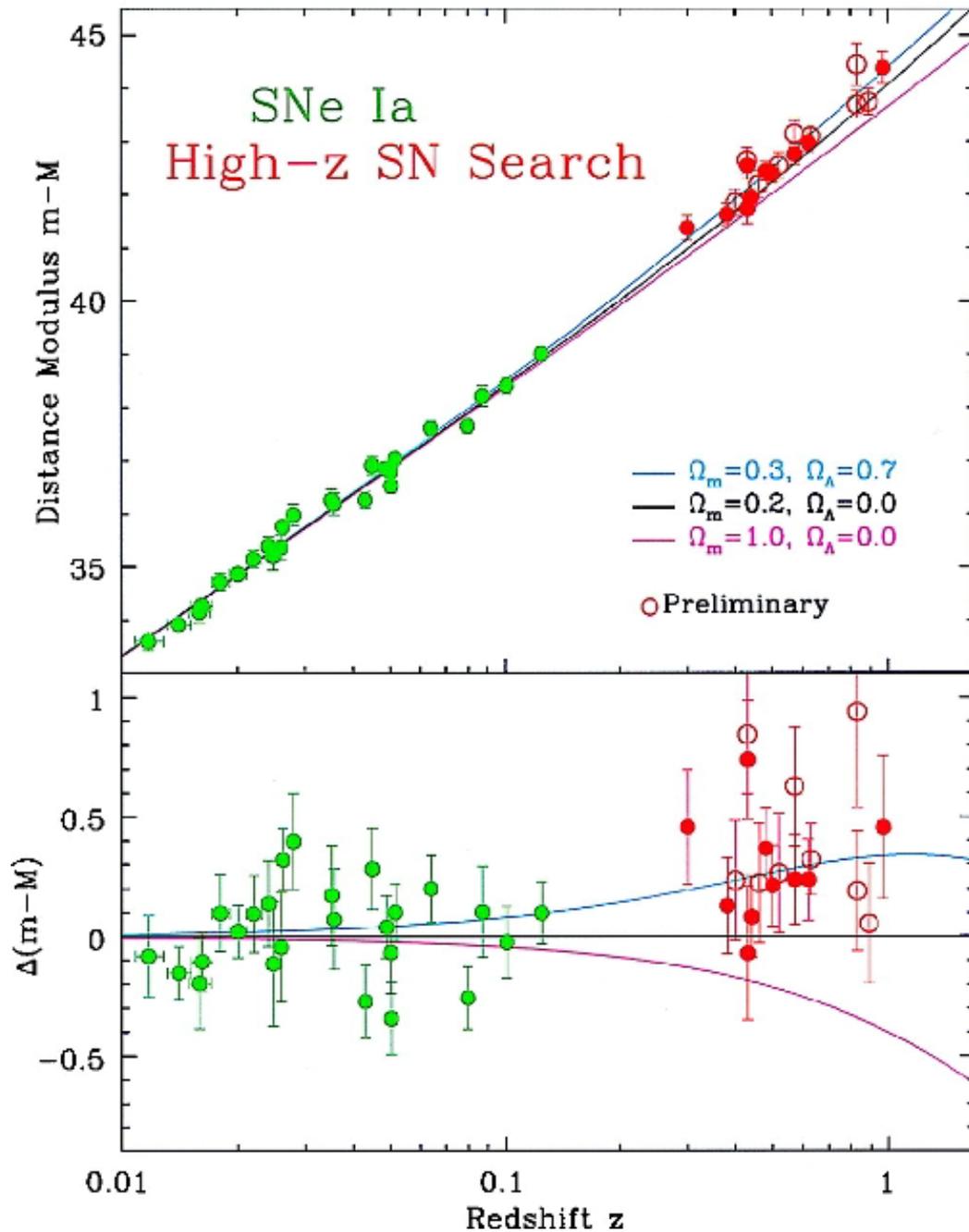
HST



Distances calibrées avec une ancre  
**NGC 4258**: maser  $H_2O$ , Vrotation  
distance géométrique  $D < 100 \text{ Mpc}$

Parallaxes - Céphéides

# Distance versus redshift



## La courbe bleue

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

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

Pour  $k=0$

$$D_c = c \int dz/H(z) \quad D_a = D_c/(1+z) \quad D_L = D_c (1+z)$$

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

$$\Omega_m=0.2, \Omega_\Lambda=0.0$$

$$\Omega_m=1.0, \Omega_\Lambda=0.0$$

$$\frac{H(z)}{H_0} = \sqrt{\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_k(1+z)^2 + \Omega_\Lambda}$$

# 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

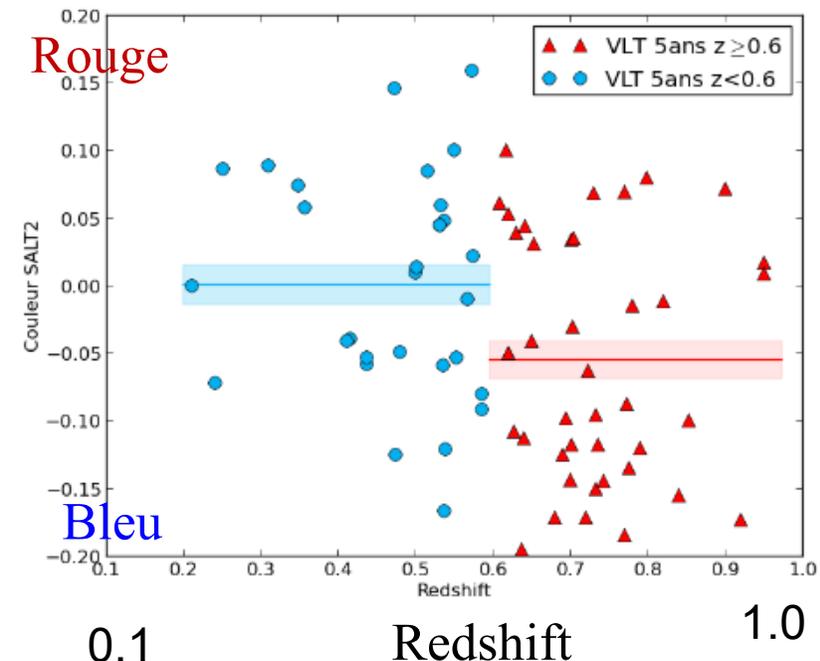
- Les SN, dont le redshift est  $z$ , apparaissent donc plus faibles

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

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

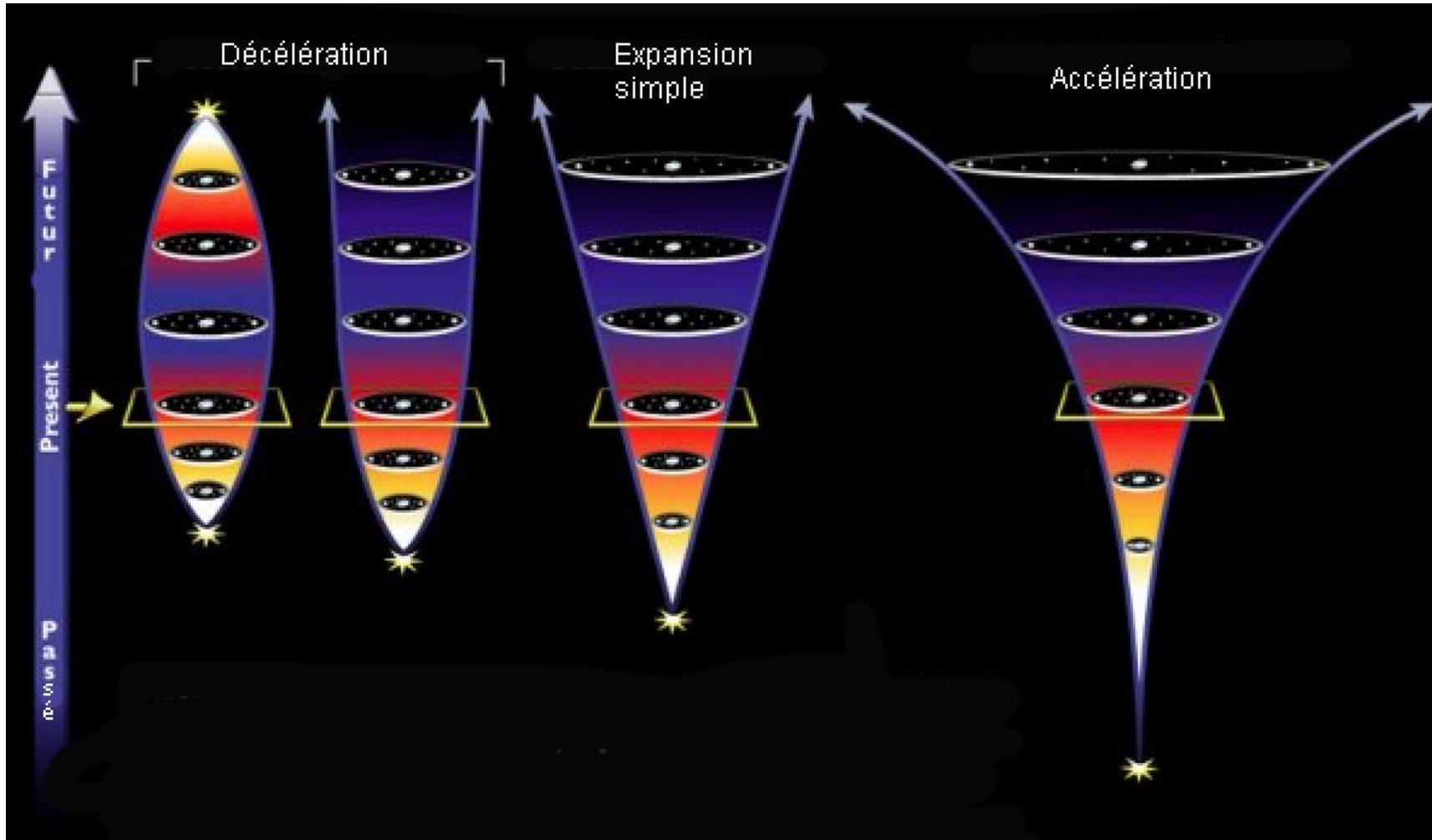
SN obscurcies par la poussière?  
Non, elles sont plus bleues et plus brillantes à grand  $z$

*Cellier-Holzem 2013*



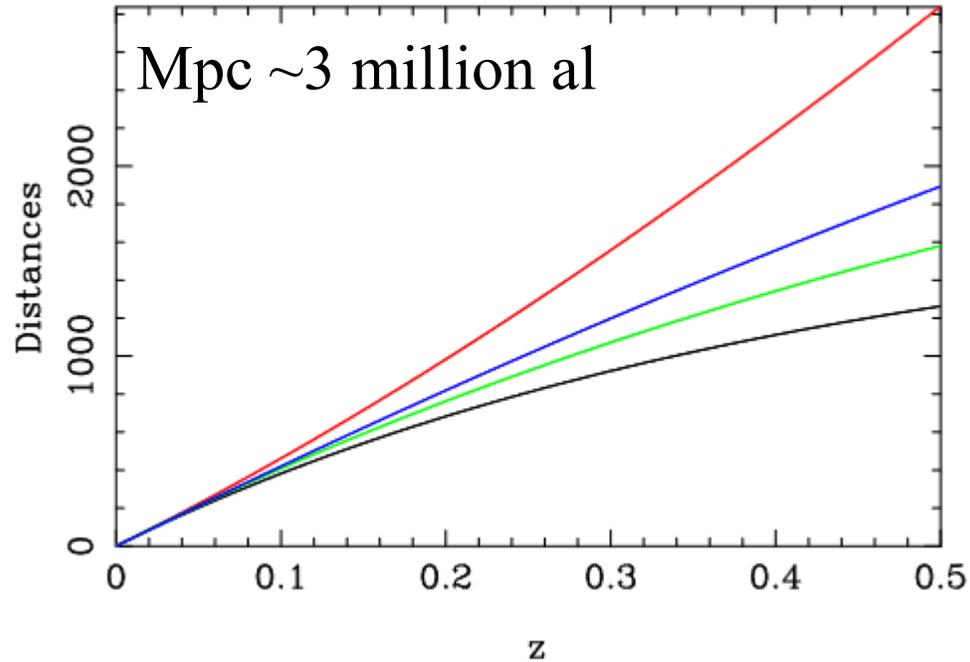
# Les diverses possibilités

Une taille donnée,  $R(t)$ , correspond à un redshift donné  $z$ ,  $R(t) = R_0/(1+z)$



**Age de l'Univers plus long**  
Compatible avec âge des étoiles

# Distances relatives



$D_L$  = Distance-luminosité

Distance comobile  $D_C$

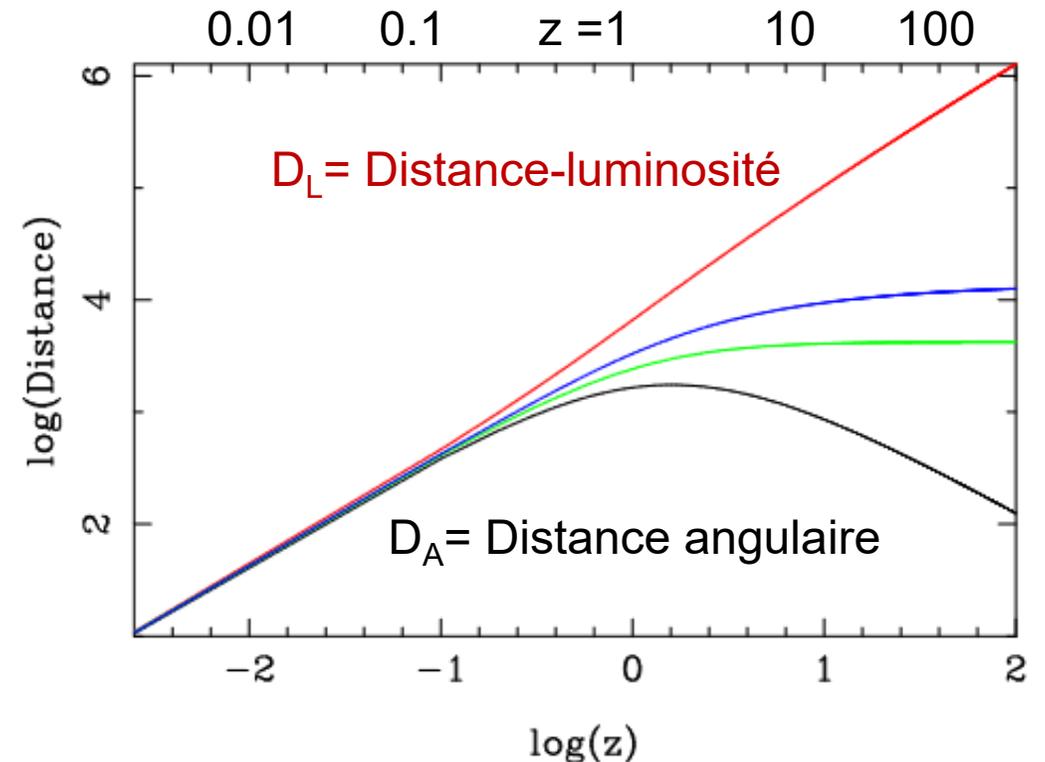
Remontée dans le temps

$D_A$  = Distance angulaire

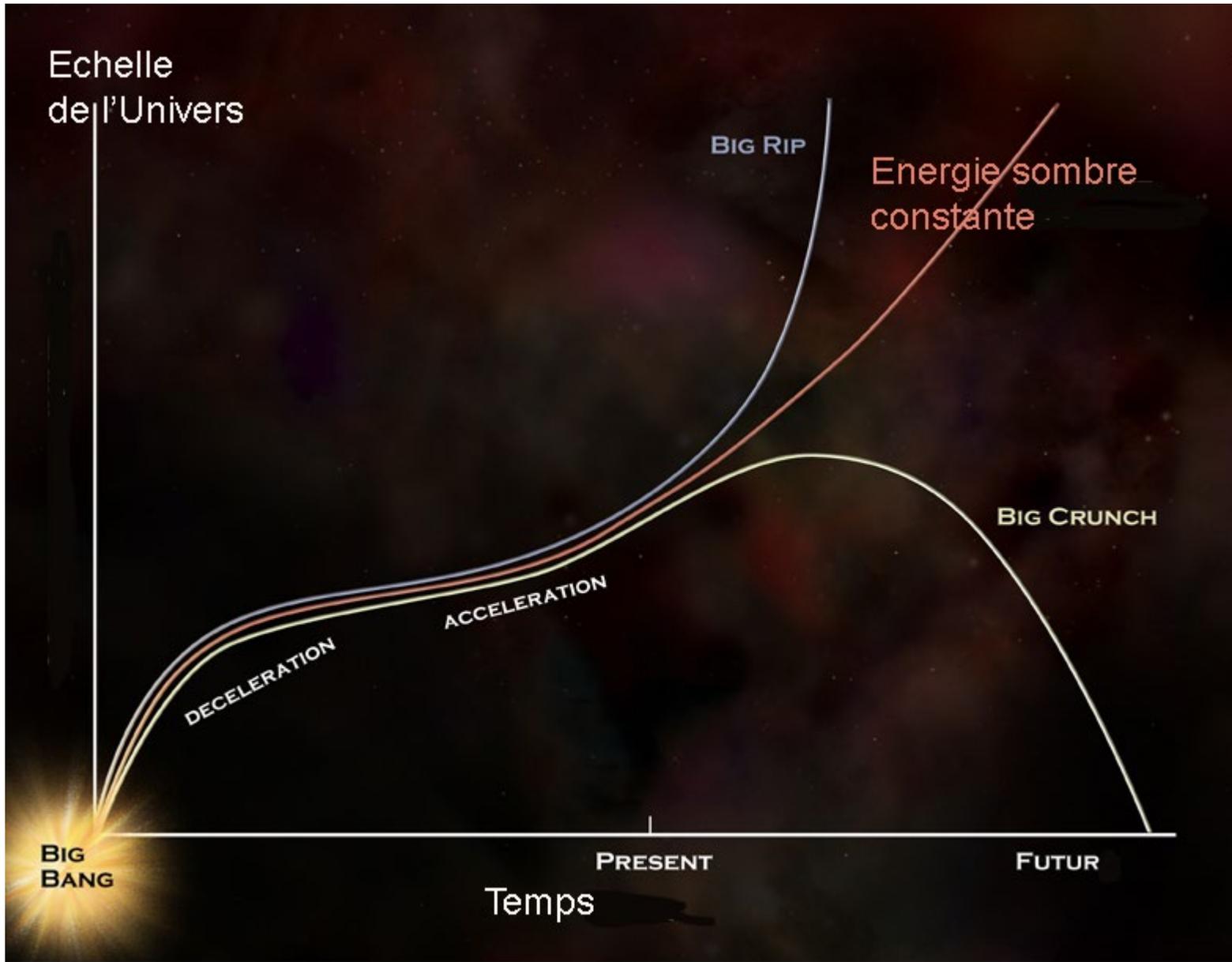
$$D_A(z, H_0, \Omega_\Lambda, \Omega_m)$$

$D_L = (1+z)^2 D_A$ , les astres sont de moins en moins lumineux, alors que leur taille reste à peu près constante, ou même croît  
→ Effet de lentille gravitationnelle

Si 2 objets ne s'effondrent pas l'un vers l'autre, leur distance comobile est constante



# Plusieurs modèles possibles



$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + \frac{3P}{c^2} \right)$$

Equation d'état de l'énergie noire

$$P = w \rho$$

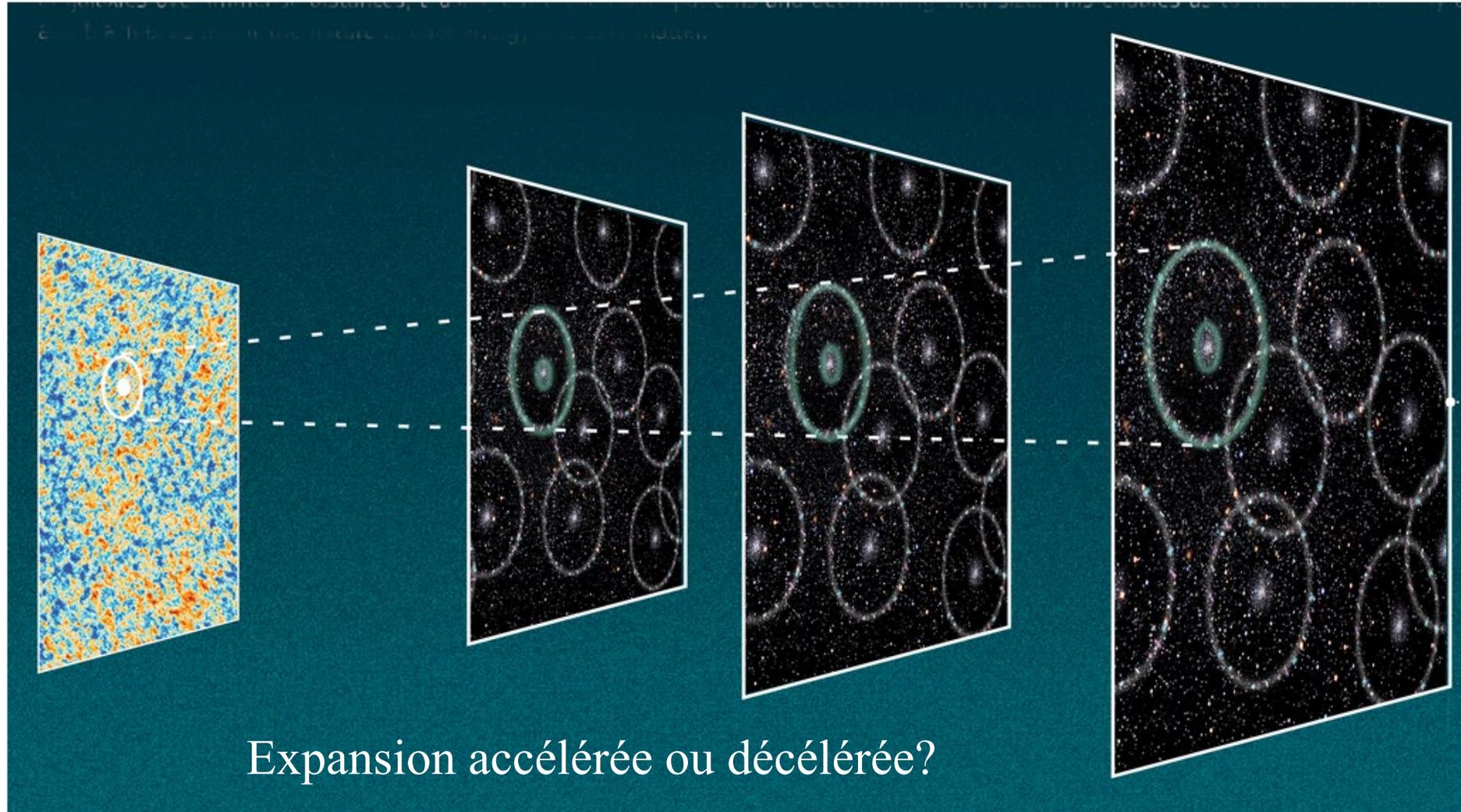
$w < -1/3 \rightarrow$  accélération

Big rip, seulement si  $w < -1$  énergie fantôme  
Très peu physique  
 $\rho$  augmente avec le temps

Constante cosmologique  
 $w = -1$

# Oscillations acoustiques baryoniques: BAO

Diagnostic pour la nature de l'énergie noire



Expansion accélérée ou décélérée?

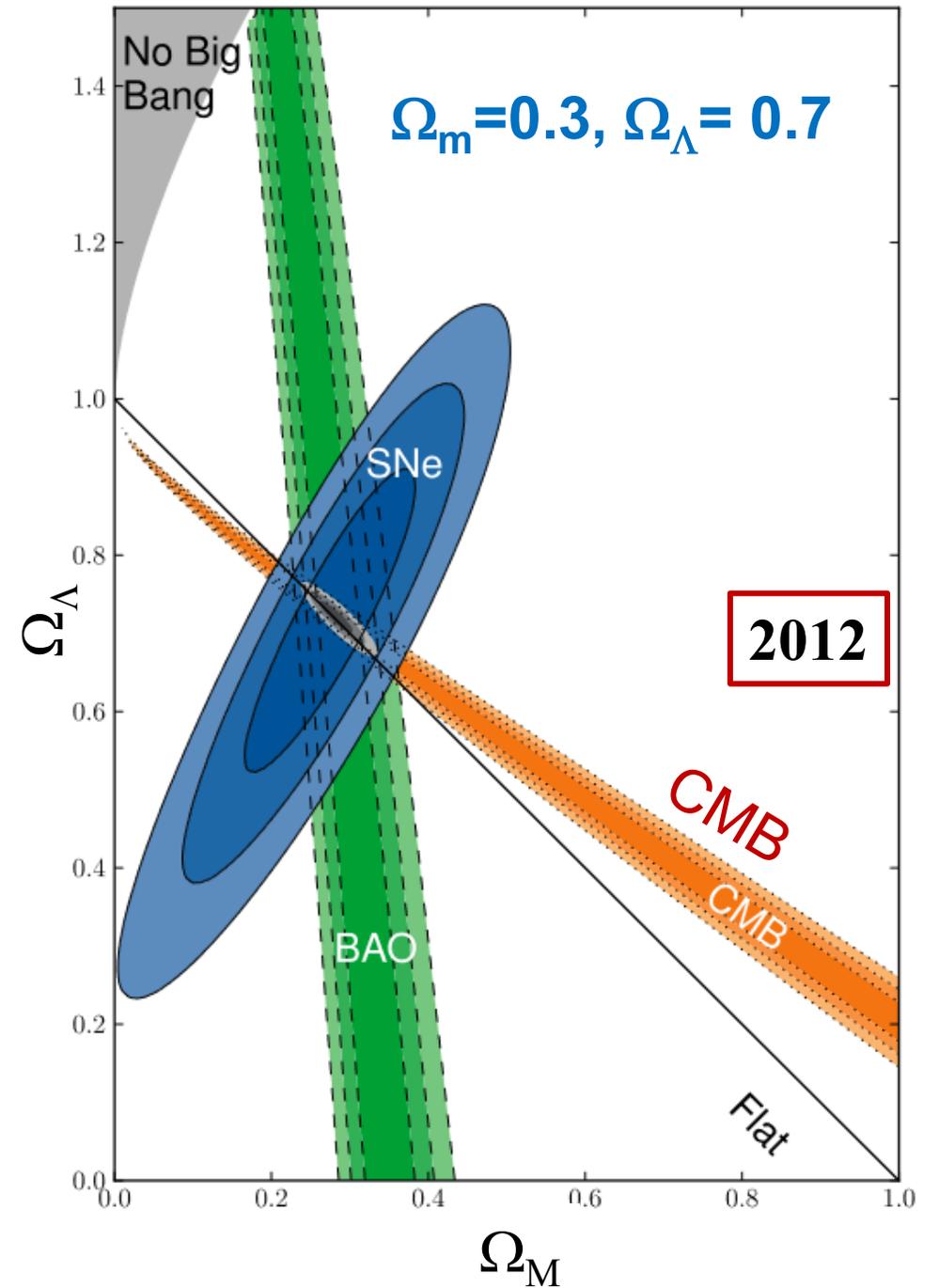
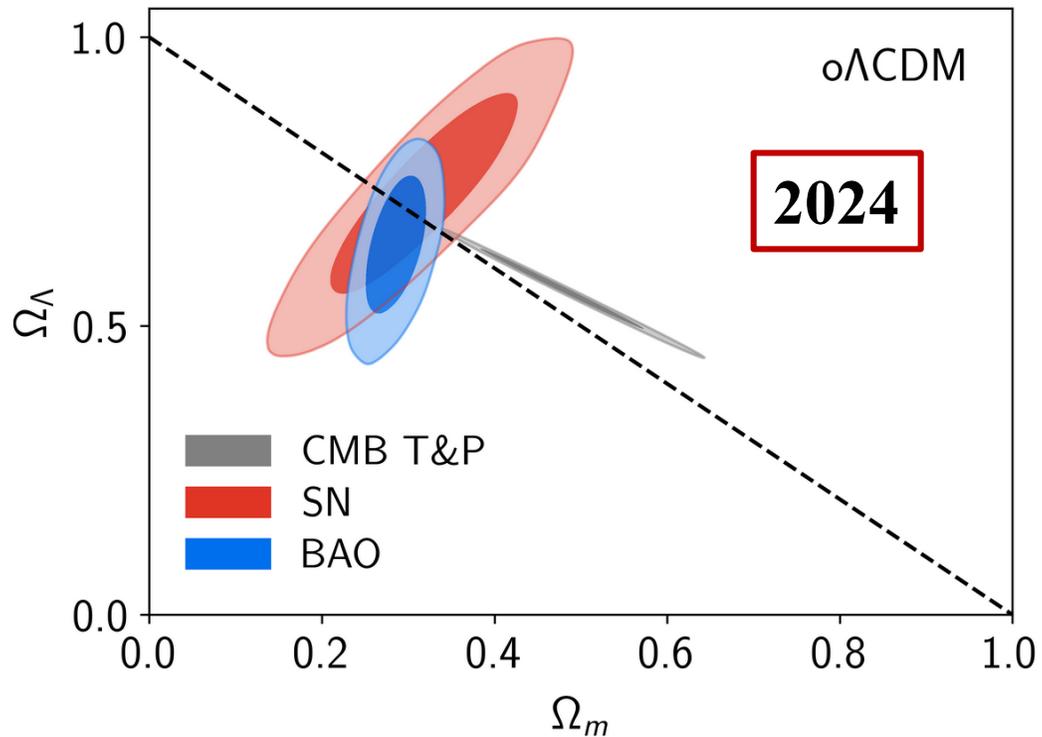
Temps →

# BAO, CMB, SNe

Confirmation, et compatibilité du terme  $\Omega_\Lambda$  avec une constante

*Suzuki et al (2012) Union 2.1, 580 SNe*

Now eBOSS *Alam et al 2024*



# Toutes contraintes combinées

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

$$w = w_0 + w_a a(t)$$

Quintessence: dynamique

$w > -1$  en général

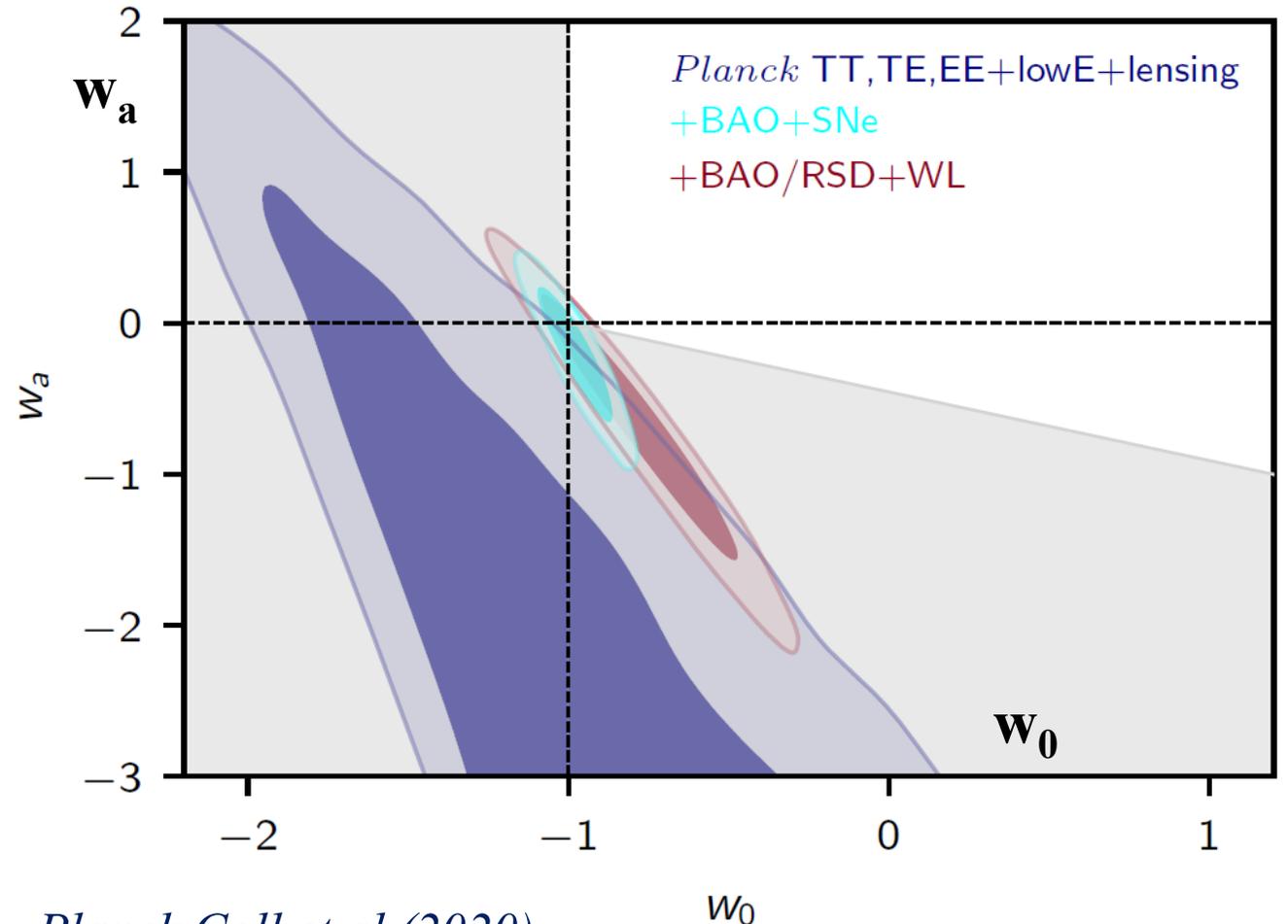
Sauf énergie fantôme

$w < -1$

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

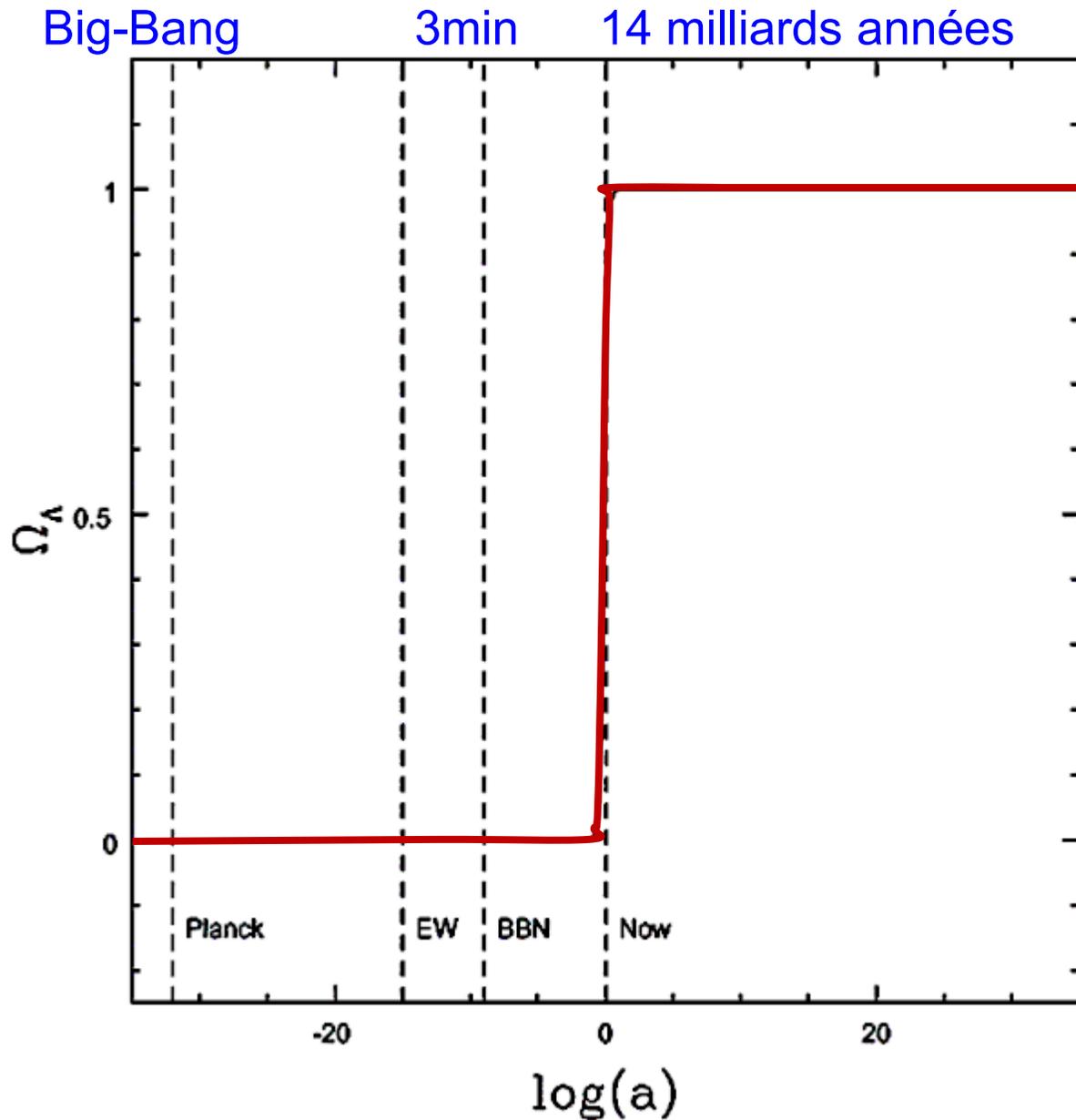
Accélération  $\sim -(3P + \rho)$

→  $w < -1/3$



Planck Coll et al (2020)

# Problème d'ajustement fin



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..*

*Sean Carroll 2001*

# Accélération uniquement locale?

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

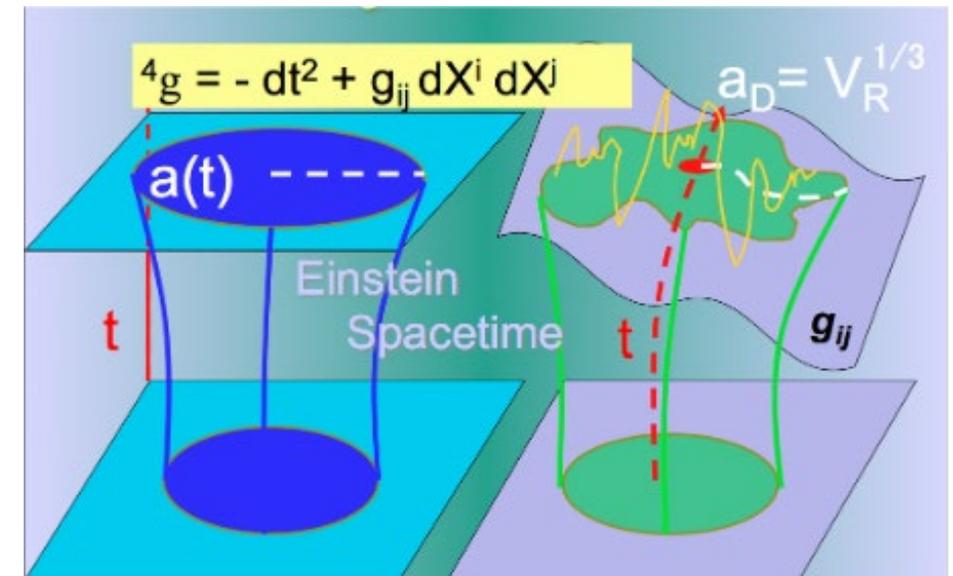
$$G_{\mu\nu} = 8\pi G/c^4 T_{\mu\nu}$$

- Une possibilité a très tôt été proposée:  $\Lambda=0$  dans l'univers dans son ensemble, mais nous vivons dans une bulle sous-dense
- De même que les sur-densités s'effondrent sur elles-mêmes et se découplent de l'expansion, les vides sont en expansion accélérée
- L'expansion de l'Univers est traitée avec l'approximation de l'homogénéité: les inhomogénéités pourraient-elles produire un effet appelé « back-reaction »?
- Qualitativement, l'effet à  $z=0$  va dans le bon sens, mais quantitativement **cela reste à prouver**

Bose & Majumdar 2012: décélération

Adamek et al 2015: négligeable

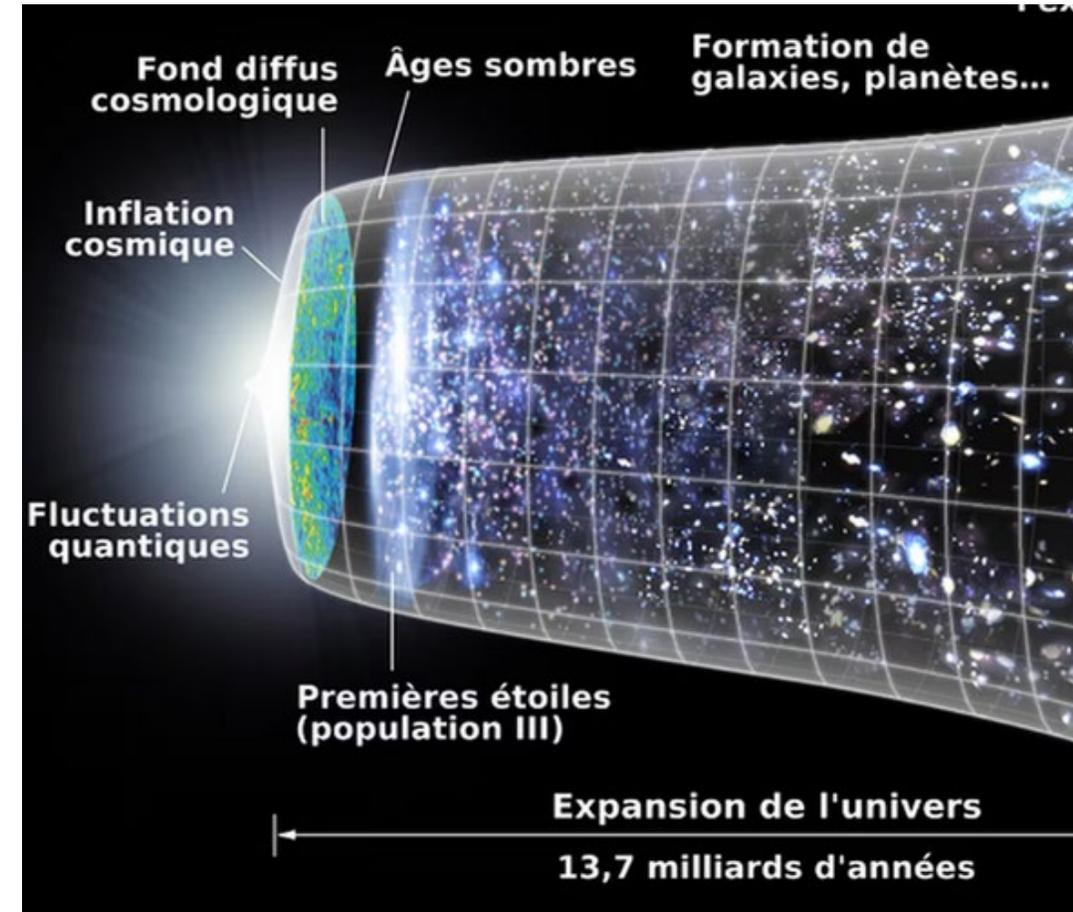
Green & Wald 2014, 2016



Buchert 2014, 2023

# Accélération de l'expansion: Analogie avec inflation

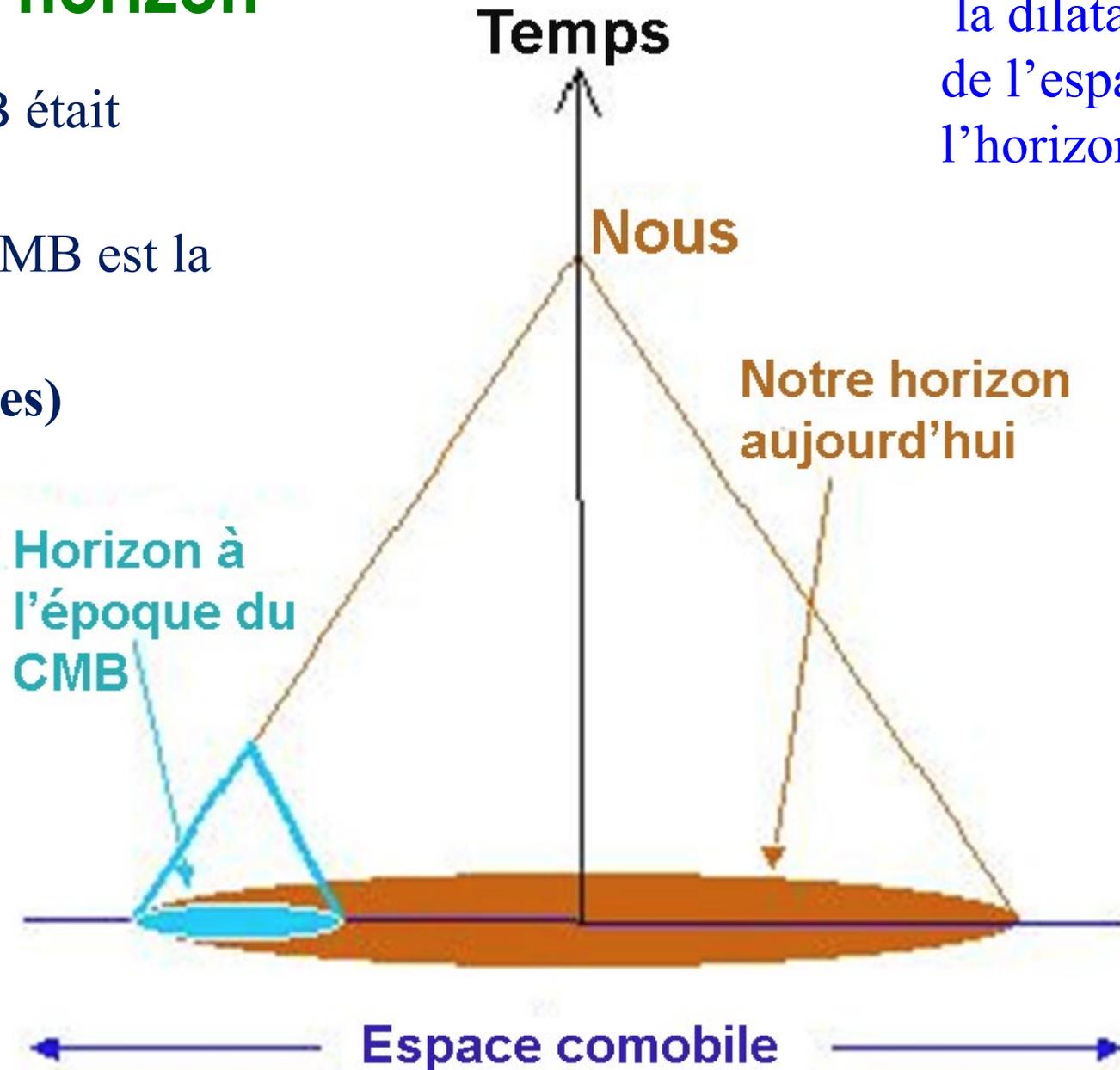
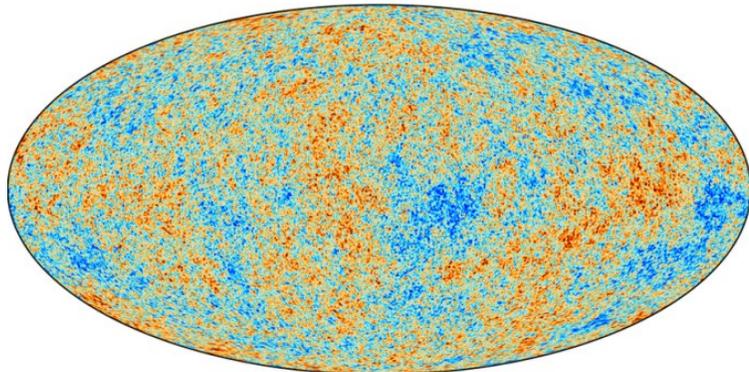
- Une autre période de l'Univers en forte accélération
- L'inflation est supposée avoir eu lieu au moment du Big-Bang
- Dûe à un champ scalaire (énergie noire aussi?)
- Pourquoi une période inflationnaire au début de l'Univers?
- Inventée par Alan Guth (1981) pour résoudre
  - le problème de l'horizon
  - le problème de la platitude de l'univers
  - source des fluctuations primordiales, qui forment ensuite les galaxies



# 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)



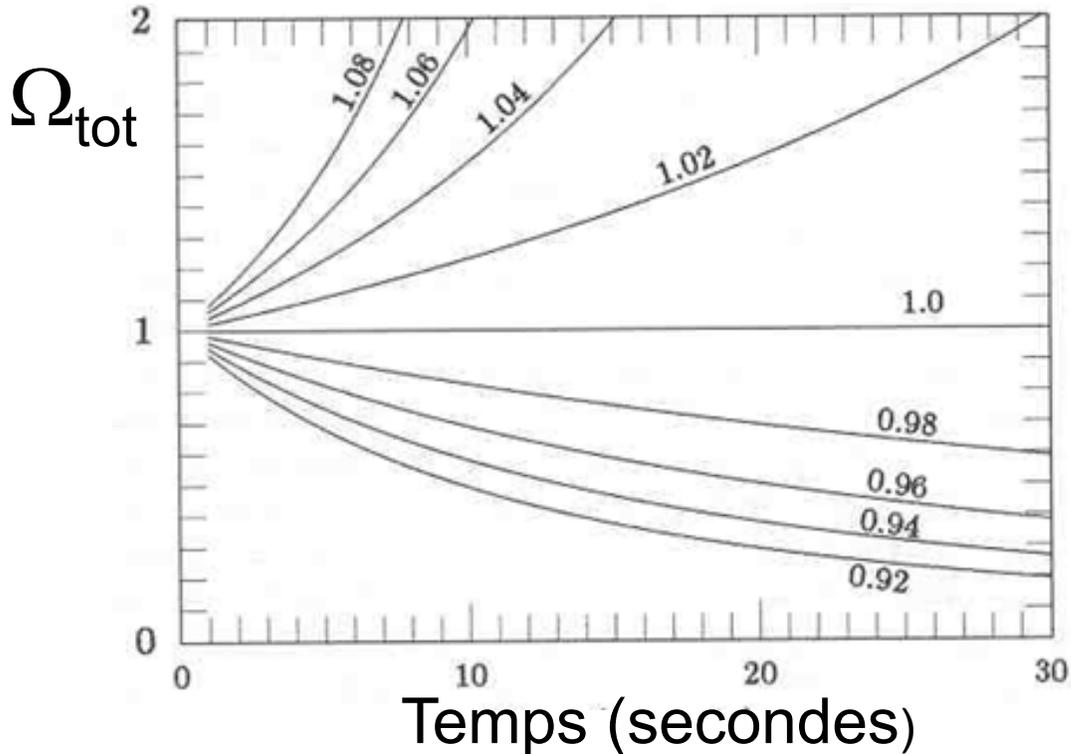
Pendant l'inflation, la dilatation de l'espace va  $\gg c$  l'horizon est fixe

# Pourquoi l'Univers est-il si plat?

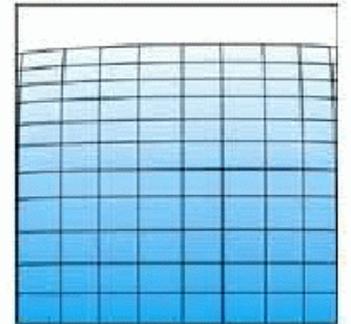
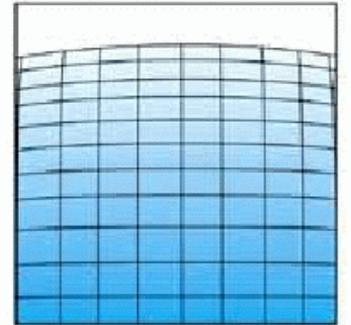
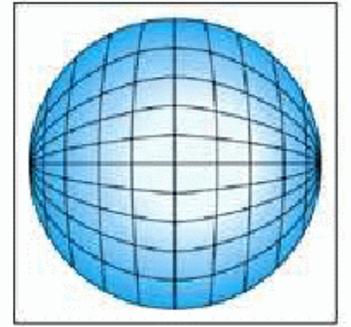
- Si  $\Omega_{\text{tot}}$  est différent de 1 à epsilon près, il va s'en éloigner exponentiellement. Or aujourd'hui  $\Omega_{\text{tot}}=1$  à 0.5% près

$$\text{Courbure} = \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1 = 0$$

$$\rightarrow \Omega_{\text{tot}} = 1$$

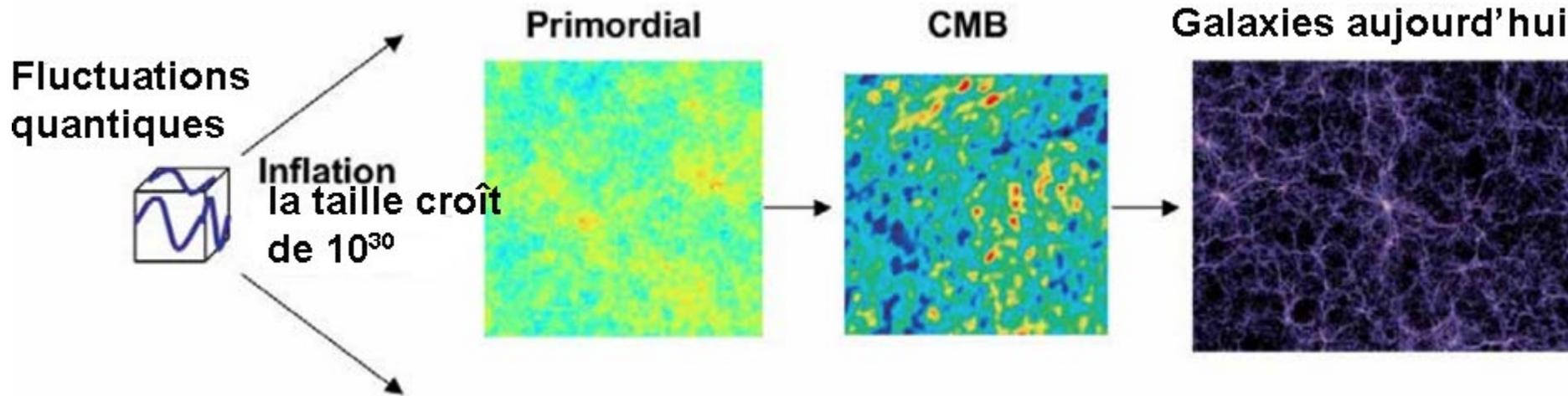


Après une rapide expansion,  
l'Univers devient localement plat  
Problème résolu  
car quelle que soit la courbure,  
l'inflation va la diluer  
et donner  $\Omega=1$



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

Les fluctuations thermiques sont beaucoup trop faibles



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

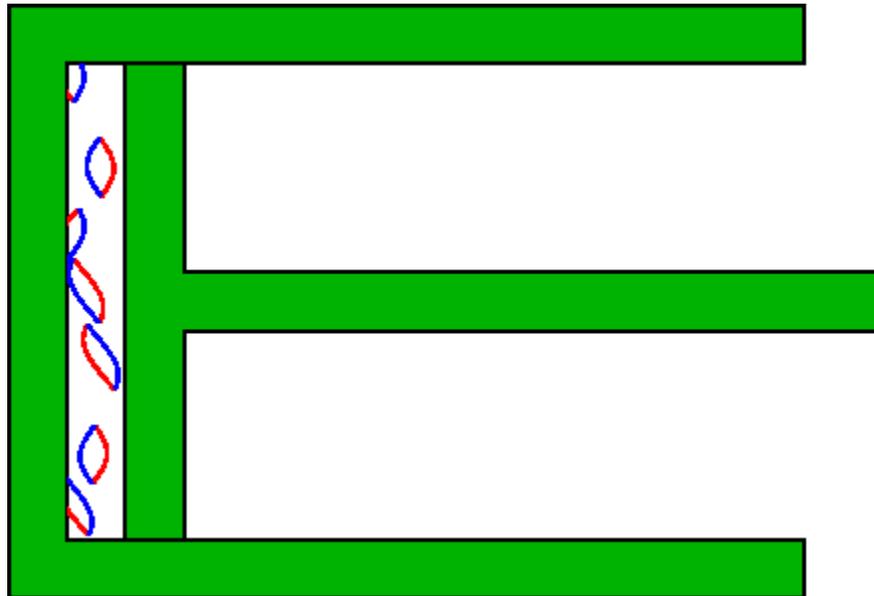
# Energie du vide et constante cosmologique



- L'énergie du vide doit être constante, ne dépend de rien
- Il faut fournir de l'énergie pour tirer le piston, car plus d'énergie après
- Si le piston fournit de l'énergie, → pression négative

$$P = -\rho c^2$$

La « gravité » du vide est répulsive



D'habitude l'énergie gravitationnelle est négative

**Ici elle est de signe opposé  
On peut prendre cette énergie pour créer la matière, dans l'inflation**

Pour un gaz,  $N \sim 1/V$ ,  $\rho$  diminue  
La pression pousse le piston

# L'énergie noire serait un champ scalaire

- **Comme pour l'inflaton**

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

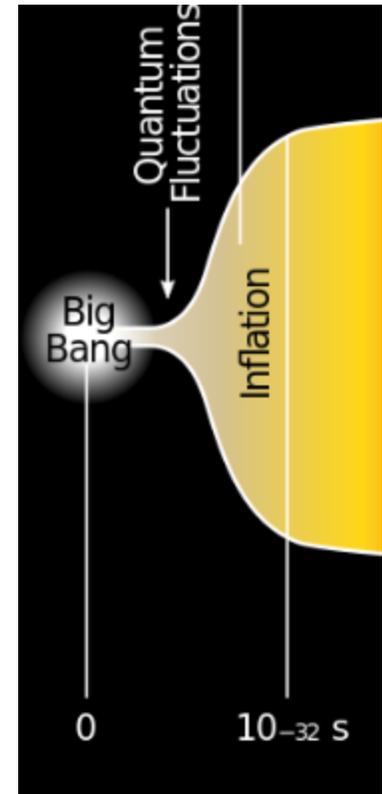
En chaque point de l'espace on peut définir  $\phi = \phi(\mathbf{x}, t)$ , comme un champ électromagnétique, mais ce dernier est vectoriel

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

**Courbure de l'espace = Densité de matière**

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

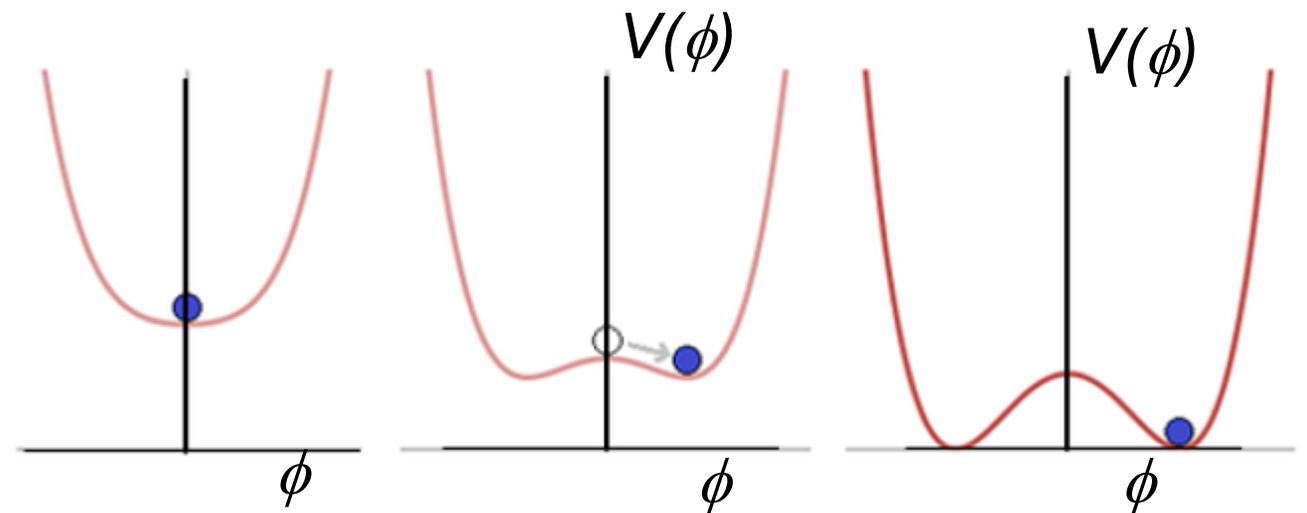
- Les champs scalaires ont le même effet que la matière en ce qui concerne la gravité



# 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**,  $V(\phi) > 0$
- $\phi$  alors se déplace vers le nouveau minimum et la symétrie est brisée
- C'est une **transition de phase**
- **Inflation primordiale**

O: Faux vide=  
Etat métastable  
temporaire

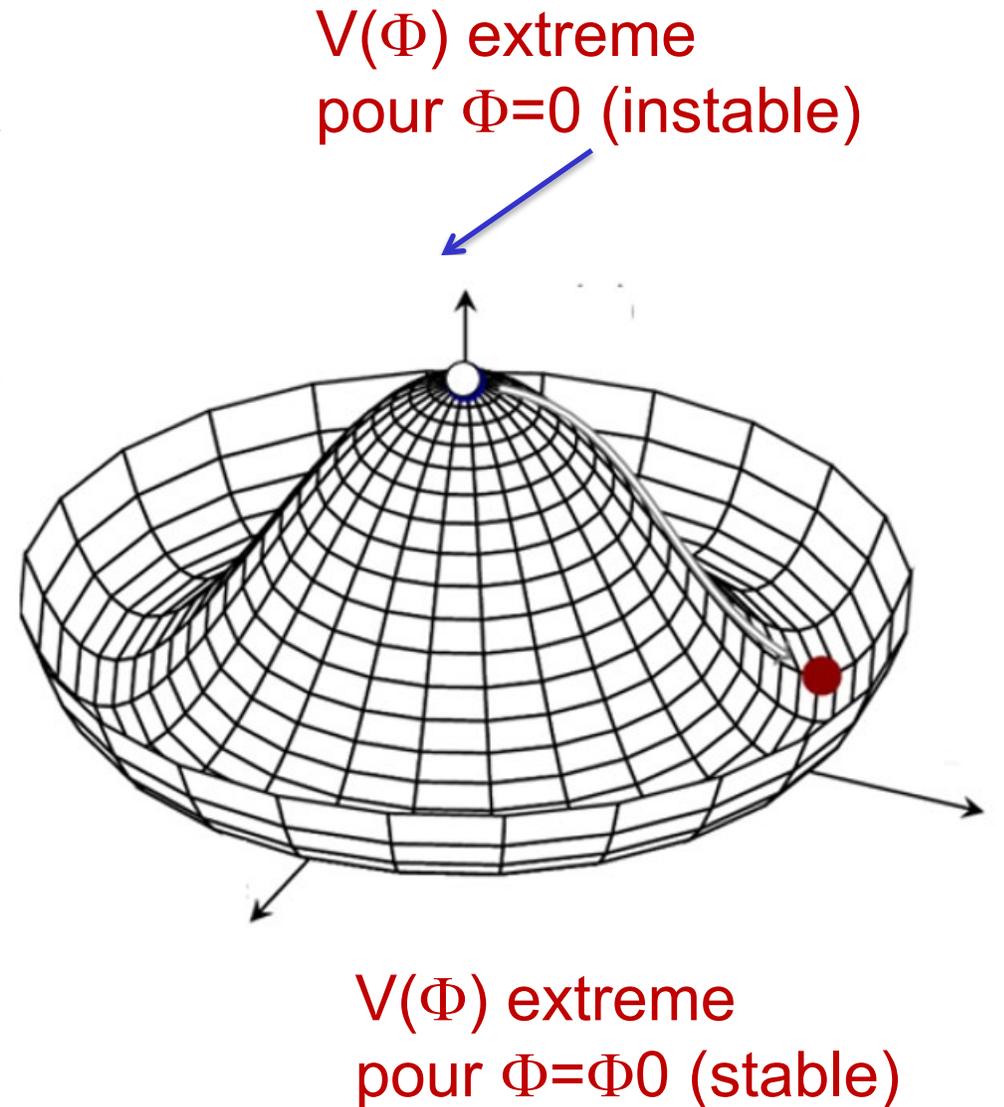


# La physique de l'inflation

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)
  - Ere de Planck,  $t < 10^{-43}$  sec ( $T > 10^{32}$  K), gravité quantique domine
  - temps  $t = 10^{-35}$  sec ( $T = 10^{27}$  K), les forces nucléaires forte et électro-faible sont unifiées, c'est la théorie GUT (Grand Unified Theory)
- Début de l'inflation?



# Champ scalaire de l'Inflation

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

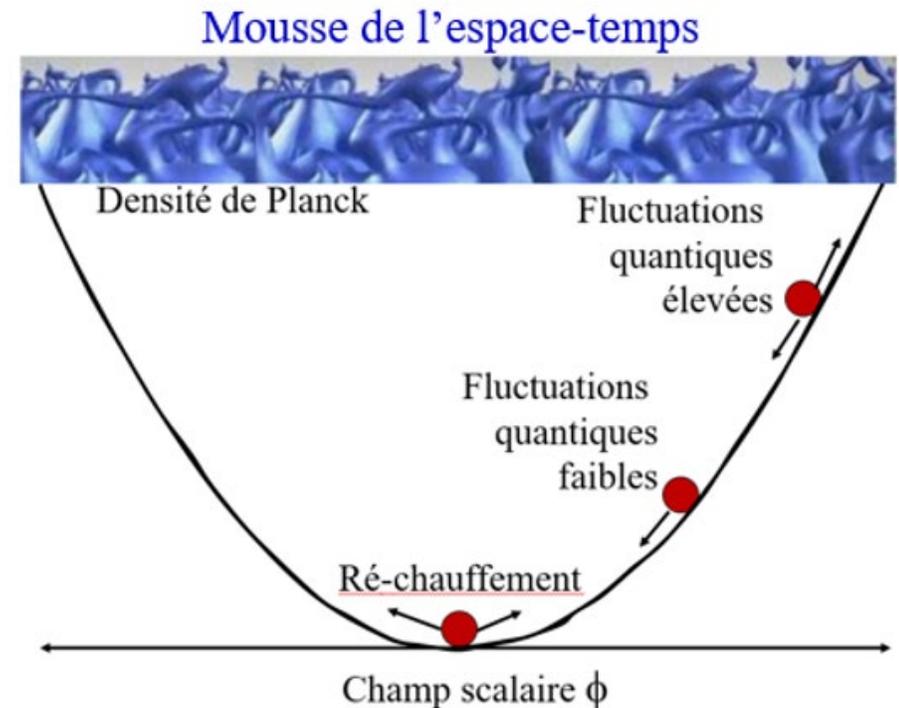
Champ scalaire:  $T_{\mu\nu} = \underbrace{\partial_\mu\phi \partial_\nu\phi}_{\text{Energie}} - \underbrace{[\partial_\mu\phi \partial^\mu\phi/2 + V(\phi)] g_{\mu\nu}}_{\text{Pression}}$

Energie

Pression

- 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  $V(\phi)$

Exemple de **champ scalaire**: **Higgs**  
Parfaite symétrie EW: pas de masse  
 $t=10^{-12}$ s Roule en bas du potentiel:  
donne leur masse aux particules



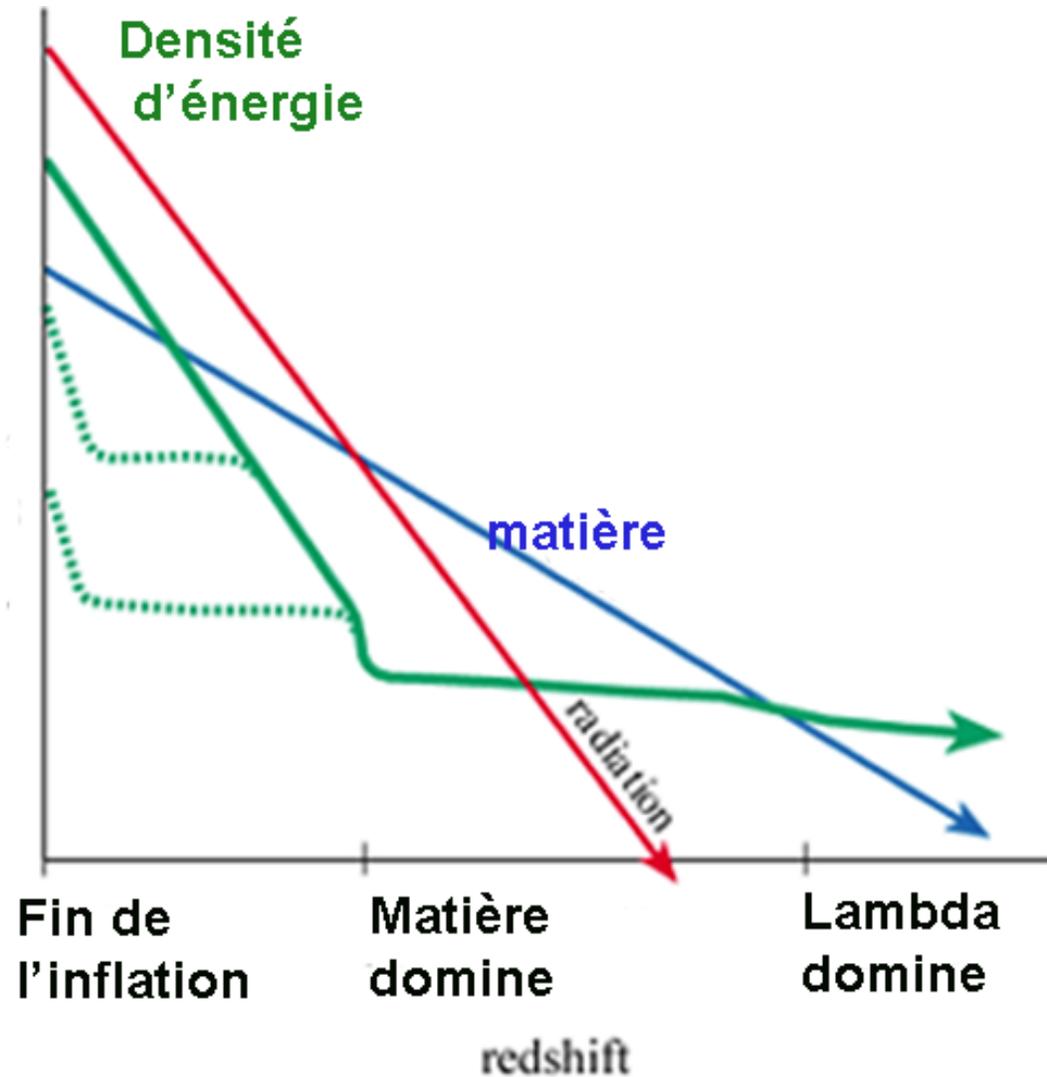
# Modèles de quintessence

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

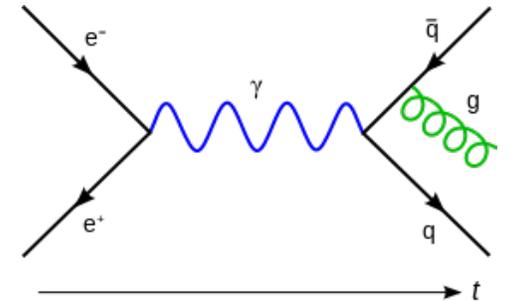
Echelles d'énergies  
 $10^{15}$  GeV 1 milli-eV

Taux d'expansion  
 $10^{50} \times$



# Physique fondamentale et astrophysique

- Le problème de la constante cosmologique relie la physique fondamentale à l'échelle 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<sup>e</sup> siècle, les physiciens inventaient l'éther, remplissant le vide, et permettant la propagation des ondes electro-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



# Particules « noires » en dehors du modèle standard

	fermions (3 générations de la matière)			bosons (forces)	
	I	II	III		
masse →	2,4 MeV/c <sup>2</sup>	1,27 GeV/c <sup>2</sup>	171,2 GeV/c <sup>2</sup>	0	électromagnétisme
charge →	2/3	2/3	2/3	0	
spin →	1/2	1/2	1/2	1	
nom →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>γ</b> photon	
Quarks	4,8 MeV/c <sup>2</sup>	104 MeV/c <sup>2</sup>	4,2 GeV/c <sup>2</sup>	0	interaction forte
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon	
Leptons	<2,2 eV/c <sup>2</sup>	<0,17 MeV/c <sup>2</sup>	<15,5 MeV/c <sup>2</sup>	91,2 GeV/c <sup>2</sup>	interaction faible
	0	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino électronique	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonique	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauique	<b>Z<sup>0</sup></b> boson Z <sup>0</sup>	
	0,511 MeV/c <sup>2</sup>	105,7 MeV/c <sup>2</sup>	1,777 GeV/c <sup>2</sup>	80,4 GeV/c <sup>2</sup>	interaction faible
	-1	-1	-1	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> électron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> boson W	

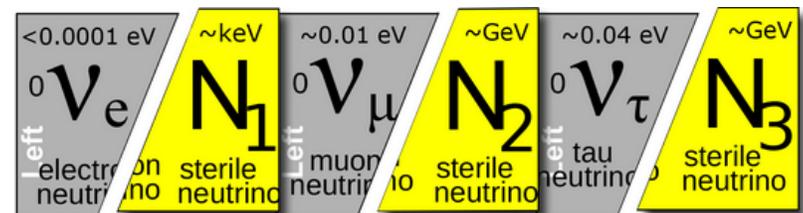
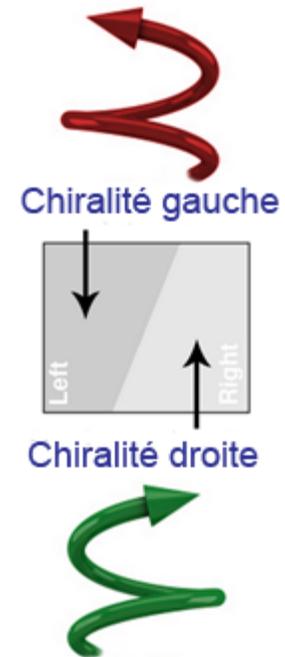
Venant du Big-Bang

~400 photons /cm<sup>3</sup>

~300 neutrinos /cm<sup>3</sup>

→ Recherche de WIMPS depuis 1985

Extension vers Les neutrinos Stériles ?

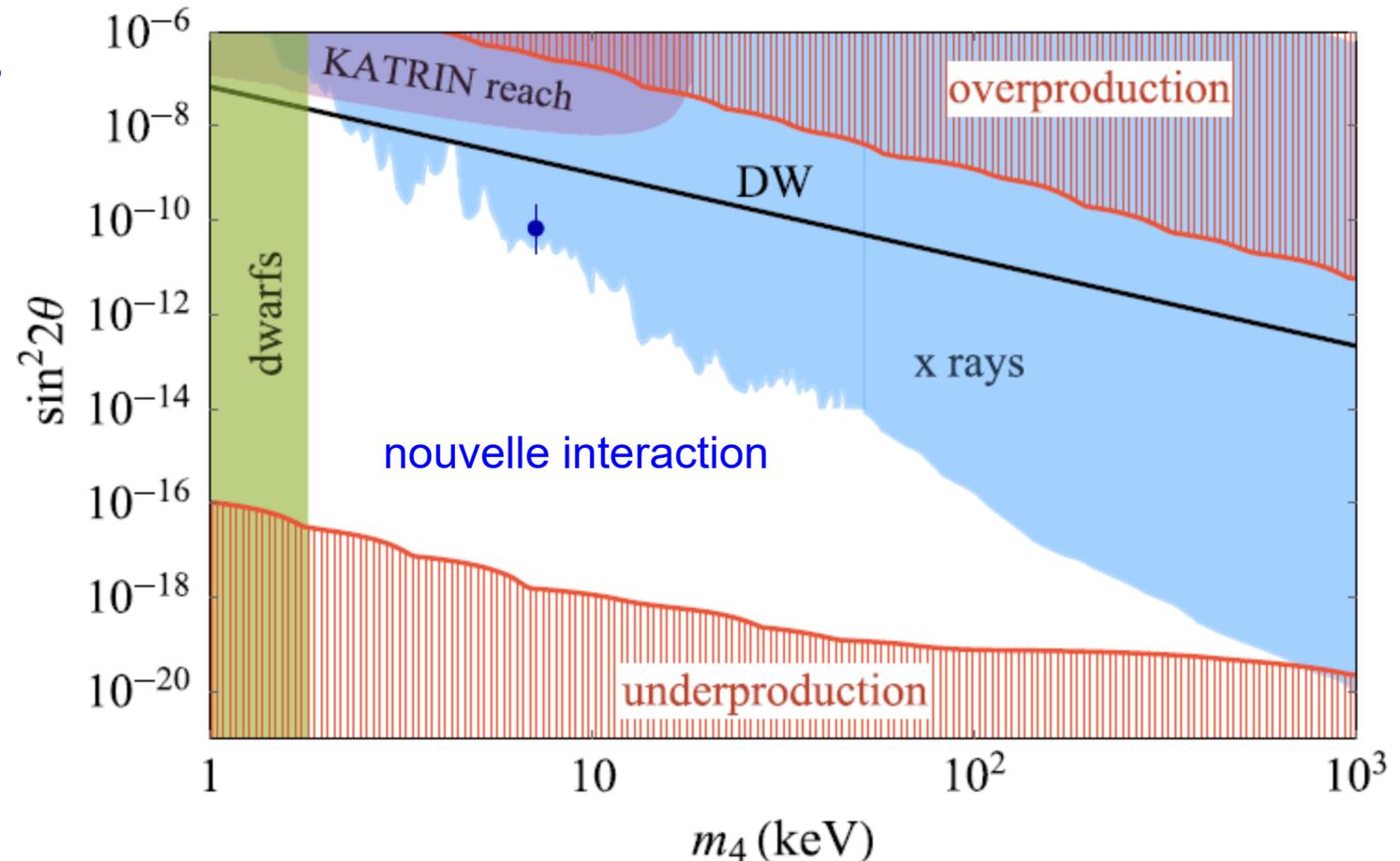


# 4<sup>ème</sup> neutrino, stérile, non thermique

**Mécanisme de Dodelson-Widrow (1994):** oscillation de neutrinos ( $\nu_a$ ,  $\nu_s$ ) au début de l'Univers,  $\nu_s$  hors équilibre mais s'accumulent, et peuvent rester gelés dans une **abondance relicue**,  
masse 2-30 keV

Mais, les  $\nu_s$  se désintègrent  
 $\nu_a$  et photon  $\rightarrow$  pas observés

Il faut une **nouvelle interaction**  
ou asymétrie pour sauver le modèle



# Résumé

## Historique de la constante cosmologique

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

## Matière noire exotique: galaxies, amas, univers

Particules issues de la symétrie?

Pas de SUZY dans les accélérateurs

## Problème de physique fondamentale

Energie du vide    Physique quantique

Infiniment petit  $\leftrightarrow$  Infiniment grand

## De nombreuses solutions pour le secteur noir

Particules Ultra-légères, Gravité quantique

Holographie, Gravité modifiée

