Le côté obscur de l'énergie: un univers en accélération

Camille Bonvin
Département de physique théorique

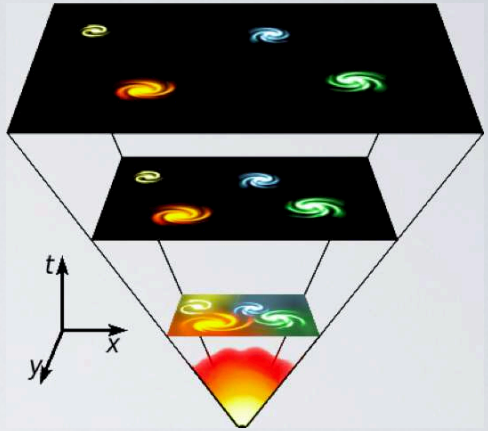
Résumé

- Etat de nos connaissances en cosmologie: le **Big Bang**
- Deux **ingrédients** fondamentaux:
  - Le modèle standard
  - La relativité générale
- Observation en 1998 d'un univers en **expansion accélérée**
  - Energie sombre
  - Gravitation modifiée

Théorie actuelle: le Big Bang

L'univers entier est contenu dans un seul **point**.

L'univers commence à **s'étendre**.



Histoire de l'expansion

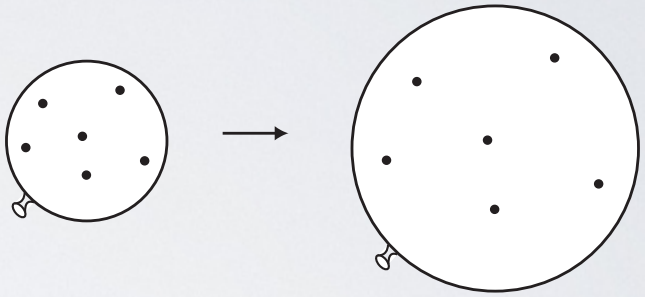
- Au début: soupe de particules.
- 3 minutes: les premiers atomes se forment → **nucléosynthèse**.
- 380'000 ans: **l'hydrogène neutre** se forme → les photons voyagent librement.
- 800 millions d'années: les atomes s'accrètent et forment les premières **étoiles** et les premières **galaxies**.
- Aujourd'hui notre univers a 13.7 milliards d'années.

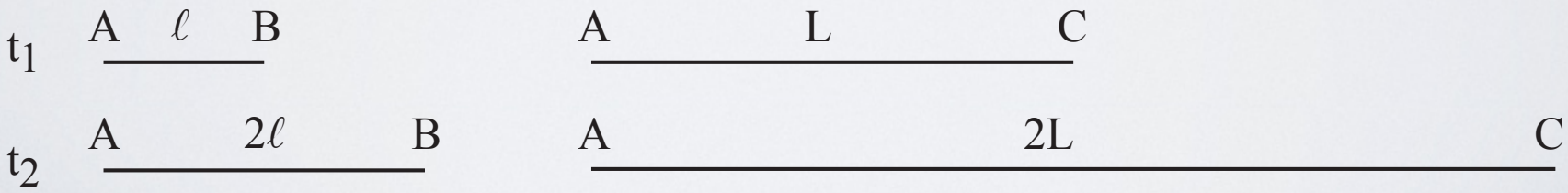
Observation: l'univers s'agrandit

- En 1930, Lemaître et Hubble ont observé que toutes les galaxies **s'éloignent** de nous.

- Les galaxies les plus **lointaines** s'éloignent plus **vite**.

→ Notre univers **s'agrandit**



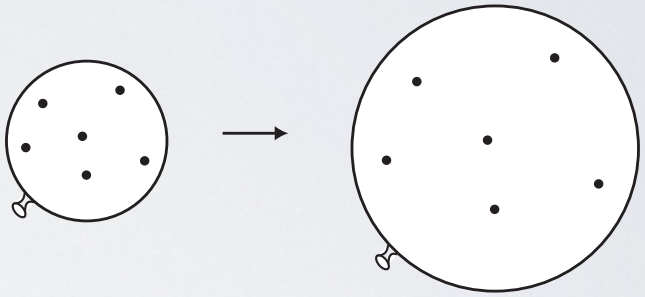


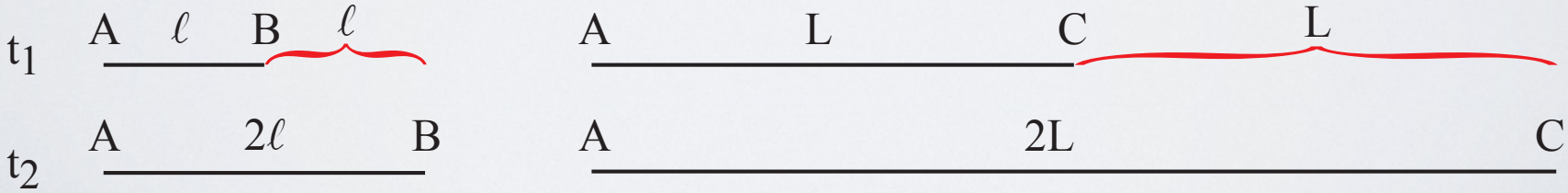
Observation: l'univers s'agrandit

- En 1930, Lemaître et Hubble ont observé que toutes les galaxies **s'éloignent** de nous.

- Les galaxies les plus **lointaines** s'éloignent plus **vite**.

→ Notre univers **s'agrandit**





Observation: l'univers s'agrandit

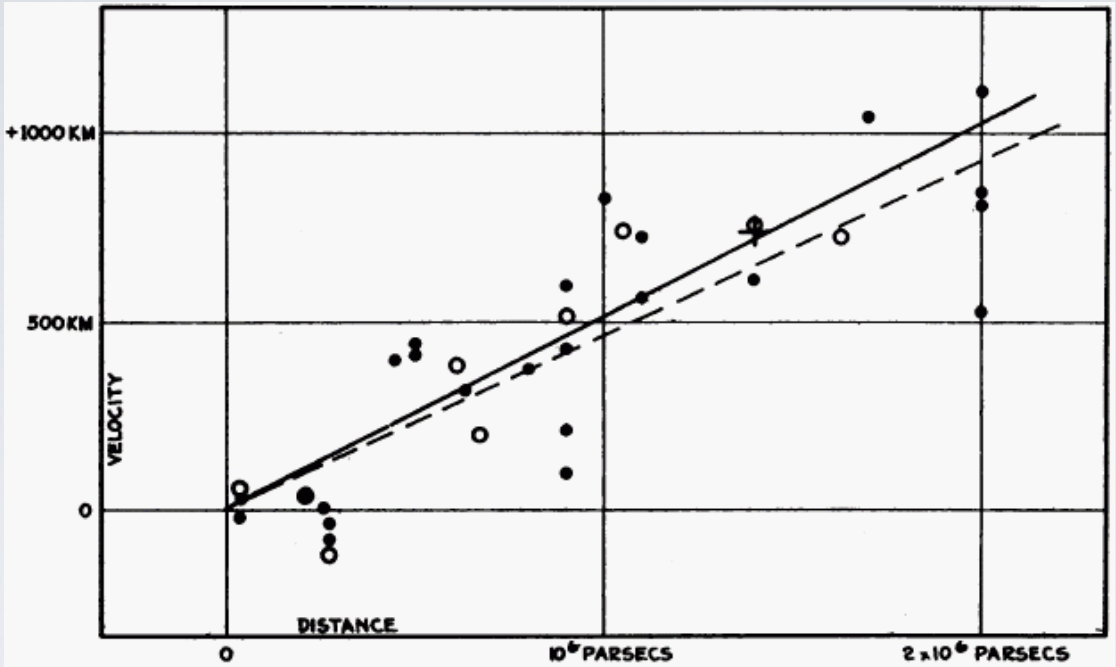


FIGURE 1
Velocity-Distance Relation among Extra-Galactic Nebulae.

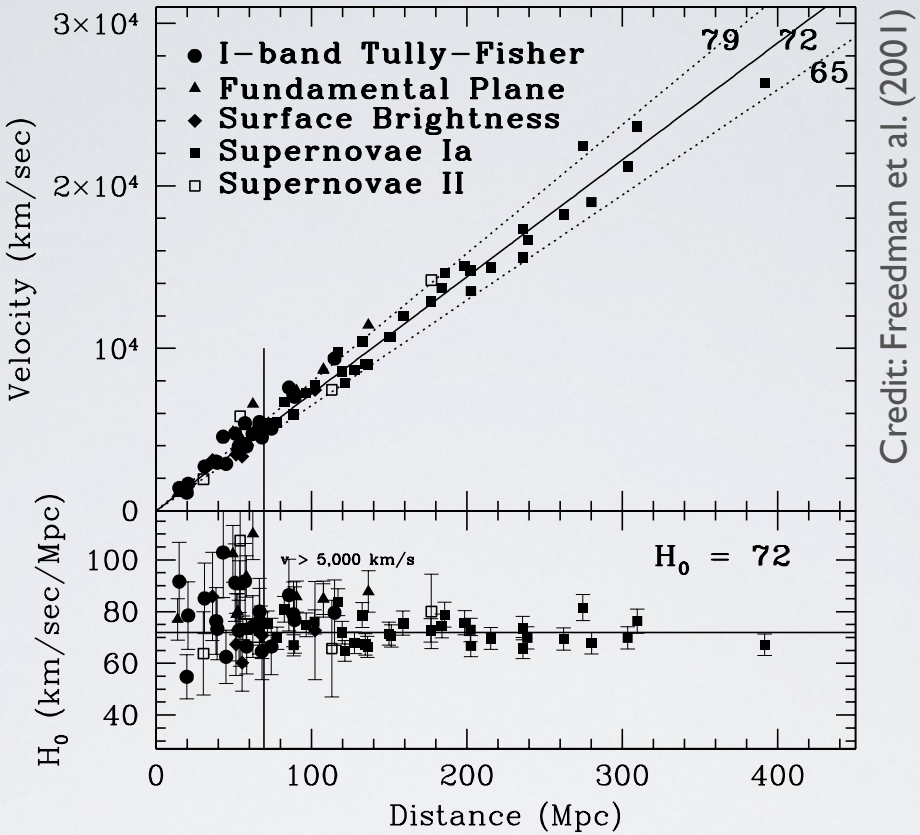
Credit: Hubble (1929)

Relation linéaire: $v = H_0 \cdot d$ H_0: constante de Hubble

Si on remonte dans le passé, la taille de l'univers décroît

→ Big Bang.

Observation: l'univers s'agrandit



Credit: Freedman et al. (2001)

Relation linéaire: $v = H_0 \cdot d$ H_0: constante de Hubble

Si on remonte dans le passé, la taille de l'univers décroît

→ Big Bang.

Observation: l'abondance des éléments

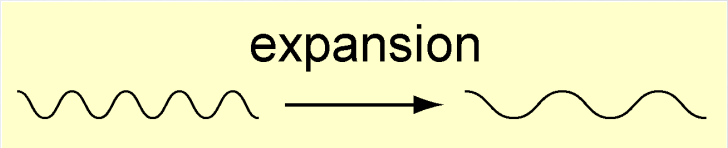
- Entre 3 et 20 minutes après le Big Bang on crée de l'**hydrogène**, de l'**hélium** et du **lithium**.
- L'abondance de chaque élément dépend de la quantité de protons, neutrons et photons.
- Les différentes abondances sont **reliées**.
- Cette relation est en **accord** avec les **observations**.

Observation: le fond cosmic micro-onde

- 380'000 après le Big Bang, l'**hydrogène** devient **neutre** et les photons voyagent librement.
- On a **observé** ces photons.
- En 1964, Wilkinson, Roll et Dicke ont construit une antenne pour détecter ces photons.
- Au même moment, Penzias et Wilson ont par hasard vu ce fond de photons, à 3.5 K (Prix Nobel 1978).
- Les photons sont **froids** car ils ont voyagé pendant plus de 13 milliards d'années.

Observation: le fond cosmic micro-onde

- Les photons ont **perdu** de l'énergie à cause de l'**expansion** de l'univers.
- Energie reliée à la longueur d'onde.
- L'expansion **étire** la longueur d'onde.



- Photons libérés à température 2970 K, observés à 3 K.

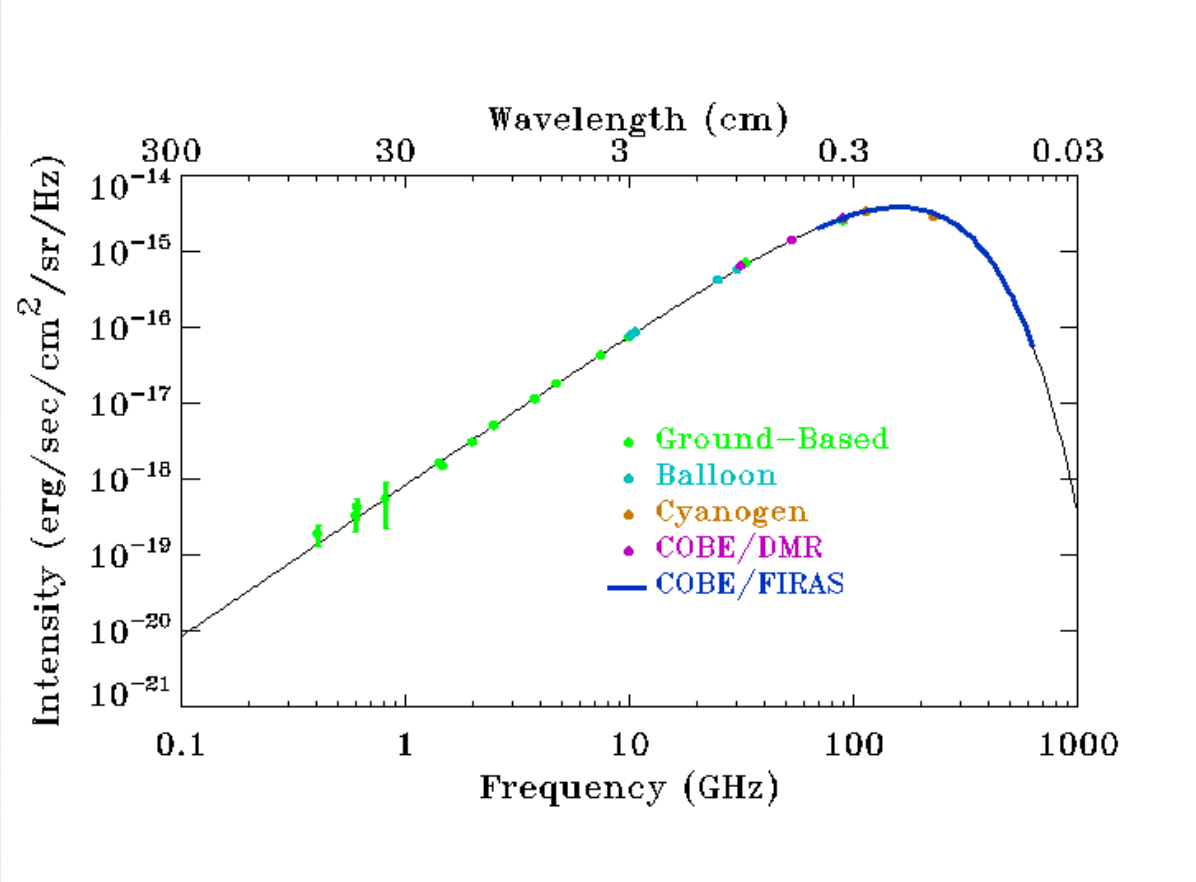
  → longueur d'onde: **micro-onde**

- **Preuve** très forte en faveur du Big Bang.

Observation: le fond cosmic micro-onde

De nombreuses autres expériences ont observé le CMB.

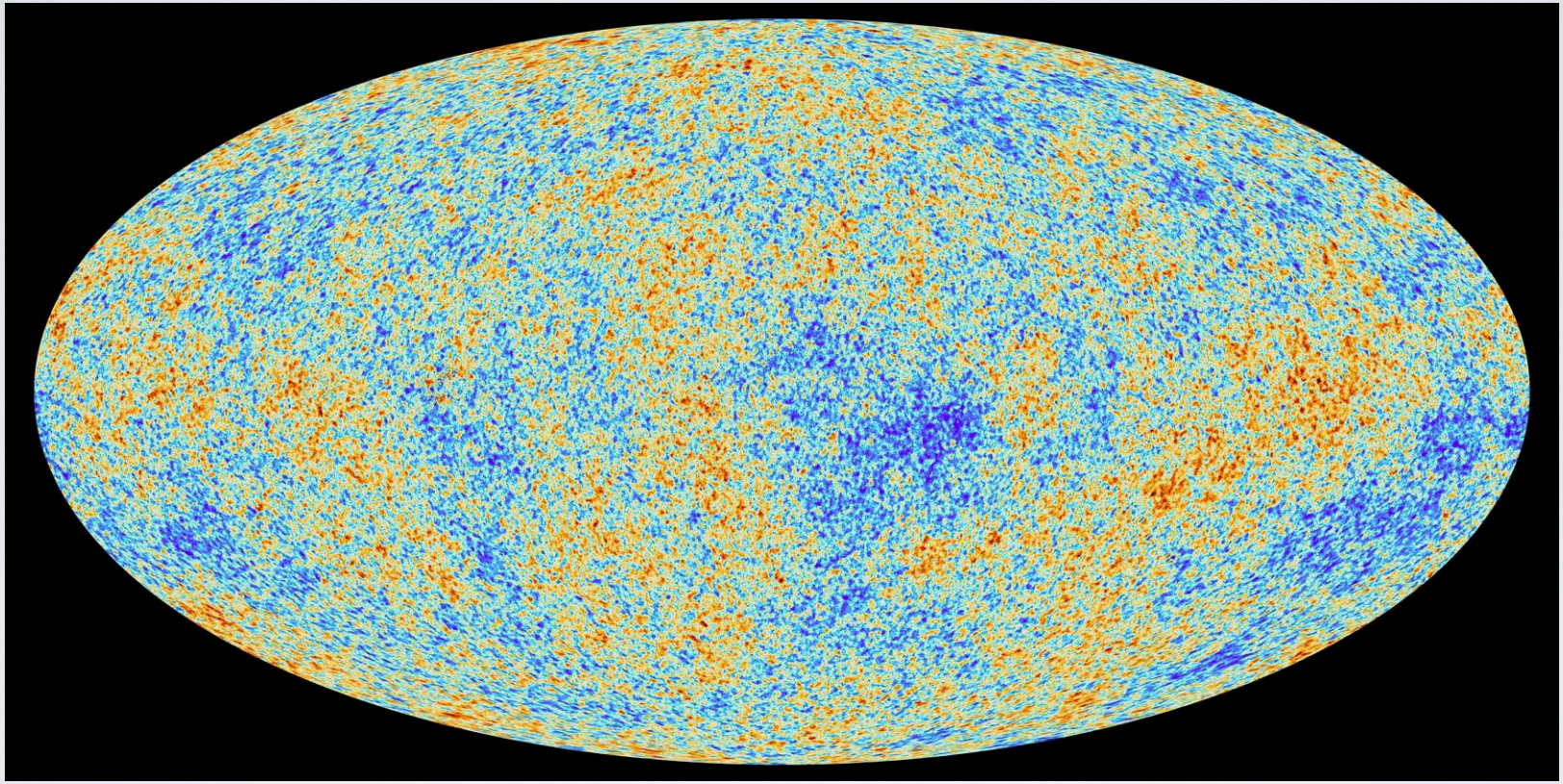
Deux résultats remarquables: **spectre** du **corps noir**, avec température 2.73 K.



Credit: NASA

Observation: le fond cosmic micro-onde

Fluctuations de température de l'ordre de 10^{-5} K



Credit: Planck

Carte de la **distribution** de **matière**.

Résumé: preuves en faveur du Big Bang

- Expansion de l'univers
- Abondance des éléments
- Fond cosmique micro-onde

Le Big Bang est-il en accord avec nos deux **théories fondamentales**?

- Le modèle standard
- La relativité générale

Le modèle standard

- **Théorie** de la **matière**: décrit le contenu de l'univers.

Boîte de Lego contient

  - **particules élémentaires** composant la matière: électrons, quarks, neutrinos, ...
  - particules décrivant les **interactions**: photons, gluons, ...

- Le modèle standard a été validé avec une extrême précision dans les accélérateurs.
- La dernière pièce de la boîte, le **boson** de **Higgs** a été découverte.

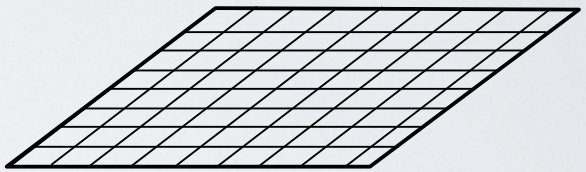
La Relativité Générale

- Théorie de la **gravitation** inventée par Einstein en 1915.
- Elle **complète** la théorie de Newton à haute énergie.

Newton: force attractive entre 2 masses

$$F_G = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

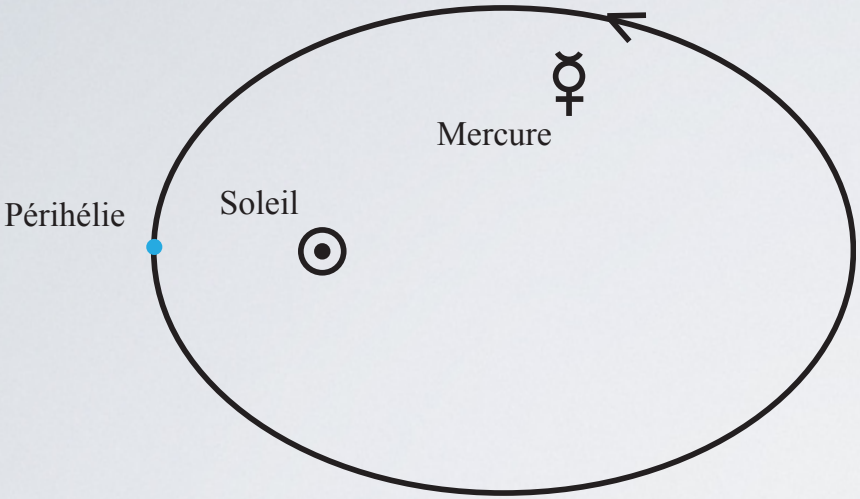
Einstein: univers déformé par les masses

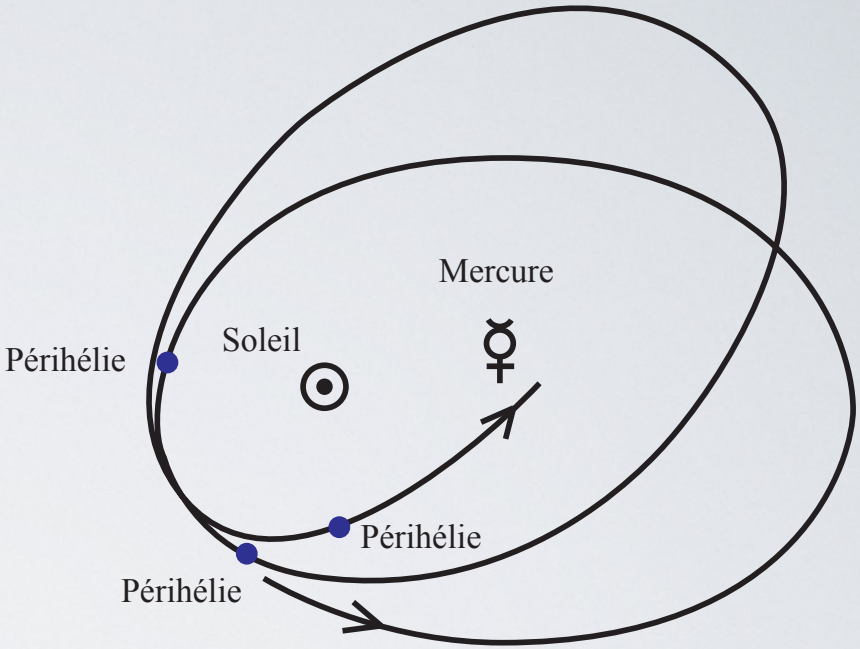


$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$ Géométrie = matière

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$$ Géodésique

Avance du périhélie de Mercure





Avance du **périhélie**: 45 secondes d'arc par siècle.

Temps pour fair un tour complet: 2.9 millions d'années.

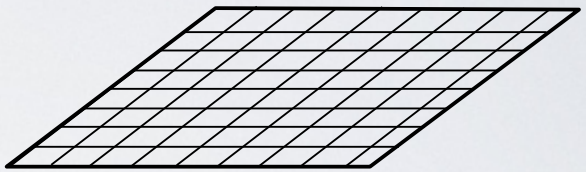
La Relativité Générale

- Théorie de la **gravitation** inventée par Einstein en 1915.
- Elle **complète** la théorie de Newton à haute énergie.

Newton: force attractive entre 2 masses

$$F_G = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

Einstein: univers déformé par les masses



$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$ Géométrie = matière

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$$ Géodésique

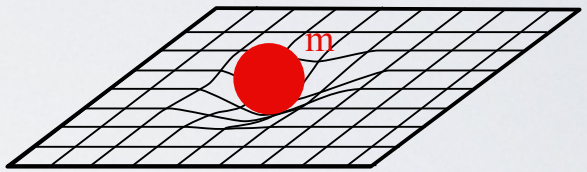
La Relativité Générale

- Théorie de la **gravitation** inventée par Einstein en 1915.
- Elle **complète** la théorie de Newton à haute énergie.

Newton: force attractive entre 2 masses

$$F_G = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

Einstein: univers déformé par les masses



$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$ Géométrie = matière

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$$ Géodésique

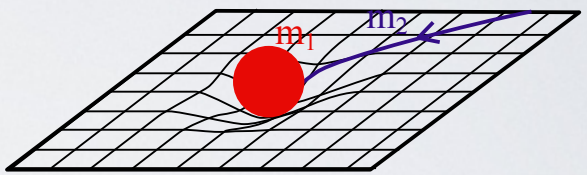
La Relativité Générale

- Théorie de la **gravitation** inventée par Einstein en 1915.
- Elle **complète** la théorie de Newton à haute énergie.

Newton: force attractive entre 2 masses

$$F_G = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

Einstein: univers déformé par les masses



$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$ Géométrie = matière

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$$ Géodésique

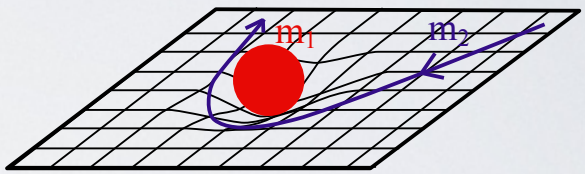
La Relativité Générale

- Théorie de la **gravitation** inventée par Einstein en 1915.
- Elle **complète** la théorie de Newton à haute énergie.

Newton: force attractive entre 2 masses

$$F_G = \frac{G m_1 m_2}{r^2}$$

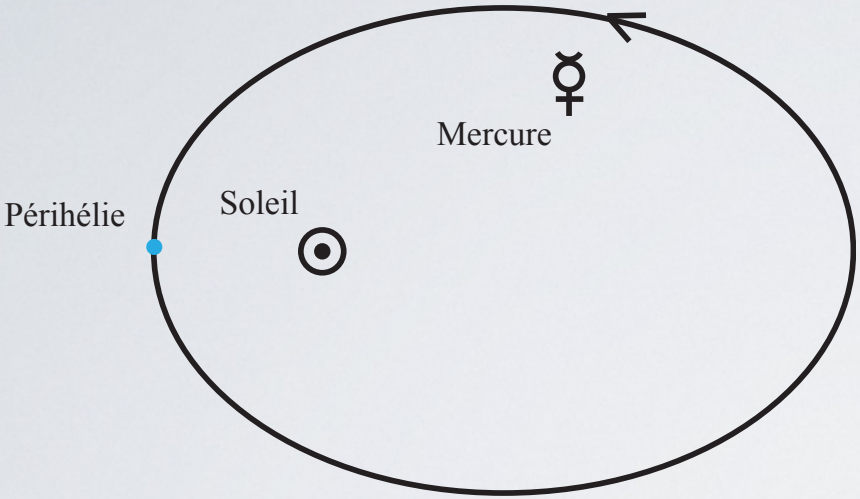
Einstein: univers déformé par les masses

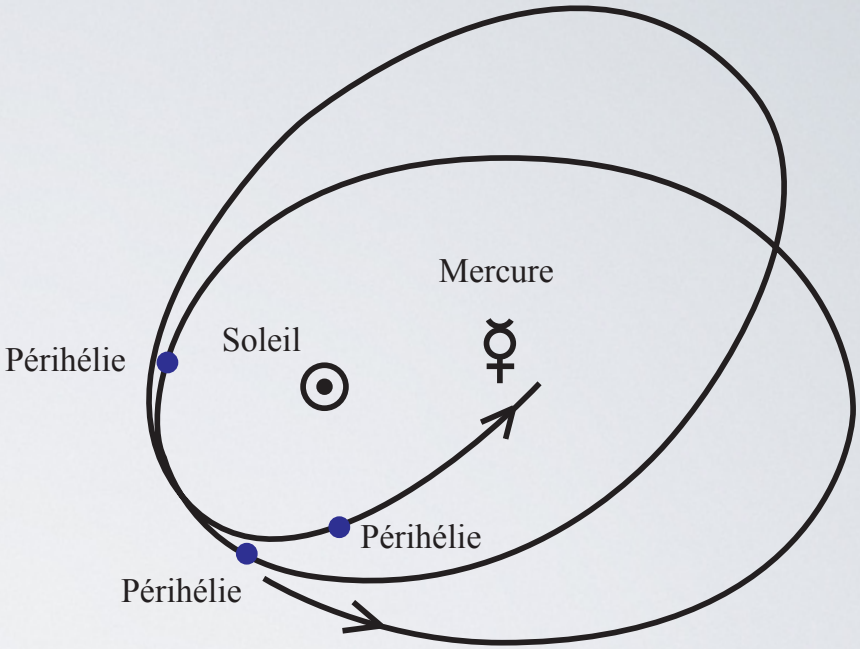


$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$ Géométrie = matière

$$\frac{dk^\mu}{d\lambda} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} k^\alpha k^\beta = 0$$ Géodésique

Avance du périhélie de Mercure





Avance du **périhélie**: 45 secondes d'arc par siècle.

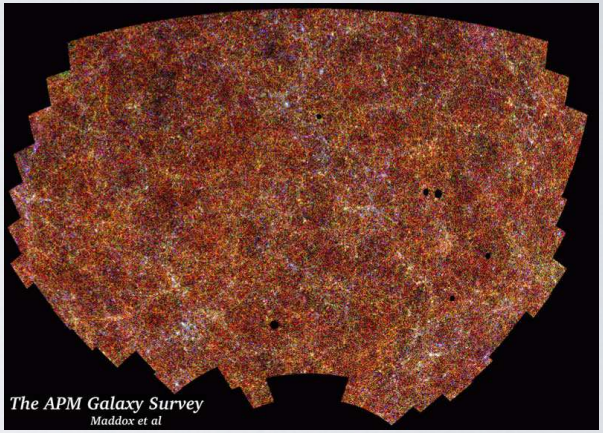
Temps pour fair un tour complet: 2.9 millions d'années.

Géométrie de l'univers

- Est-ce le modèle standard et la Relativité Générale sont en **accord** avec le **Big Bang**?

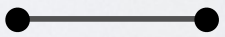
- La Relativité Générale relie la **géométrie** de l'univers à son **contenu**.

- Univers **homogène**: CMB et cartes de galaxies

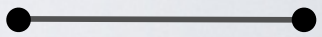


3 millions de galaxies
15% du ciel

- La géométrie est décrite par 2 quantités:
  - La **taille** de l'univers $a(t)$
  - La **courbure** de l'univers K

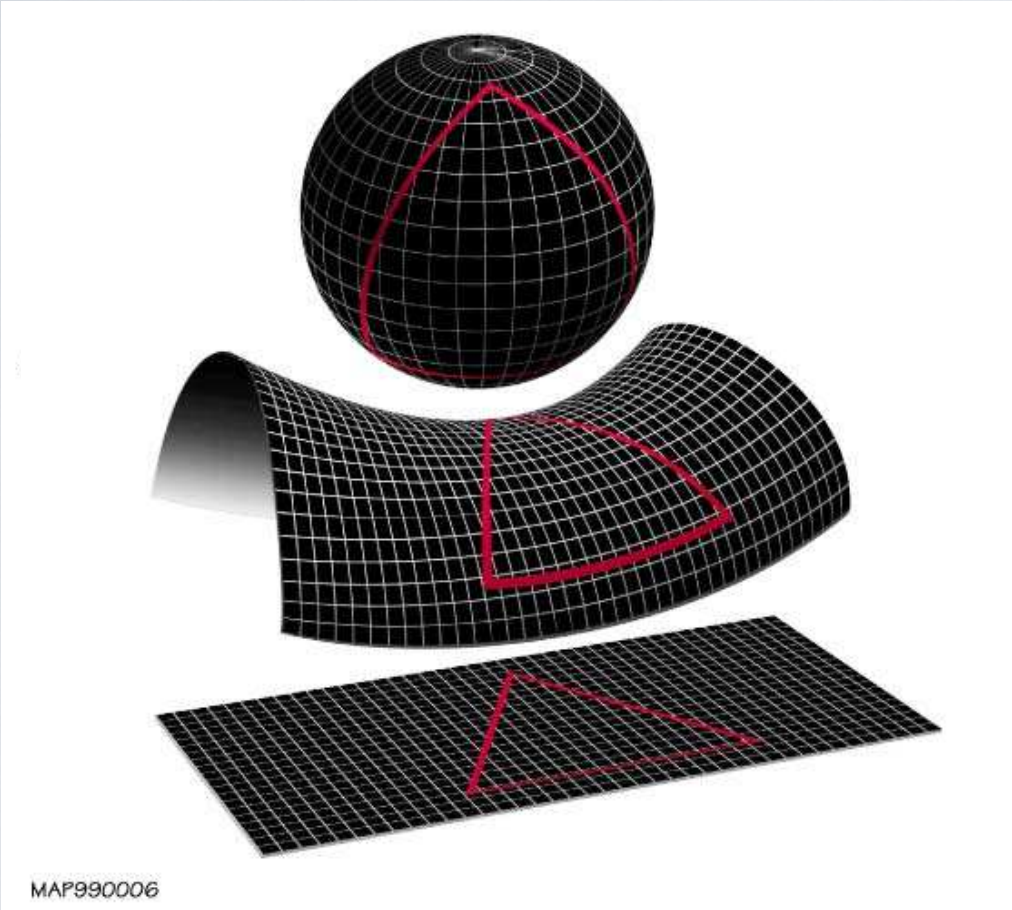


$d_1 = a(t_1) \cdot r$



$d_2 = a(t_2) \cdot r$

Courbure



courbure positive (sphère) $K > 0$

courbure négative (selle) $K < 0$

univers plat $K = 0$

Contenu

- On décrit le **contenu** au travers de la densité de particules.
- On compte le **nombre** de particules dans un volume N
- On divise par le **volume** V
- Densité $\rho = \dfrac{N}{V}$ dépend du **temps** mais pas de la position.

Equations d'Einstein

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$$

Equation de Friedmann

- La matière fait **varier** le facteur d'échelle.
- On a des solutions avec $\dot{a} < 0$ univers **décroît**

  et avec $\dot{a} > 0$ univers **croît**
- L'expansion de l'univers **ralentit**: $\dot{a}$ décroît au cours du temps.
- Pour la matière: le volume croit $V \sim a^3$, N est constant $\Big\} \rightarrow \rho \sim \frac{1}{a^3}$

Décélération de l'univers

$$\frac{d}{dt}\left[\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2}\right] = \frac{8\pi G}{3}\dot{\rho}(t)$$

$$2\frac{\dot{a}}{a}\left[\frac{\ddot{a}}{a} - \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2\right] - 2\frac{K\dot{a}}{a^3} = -8\pi G\rho\frac{\dot{a}}{a}$$

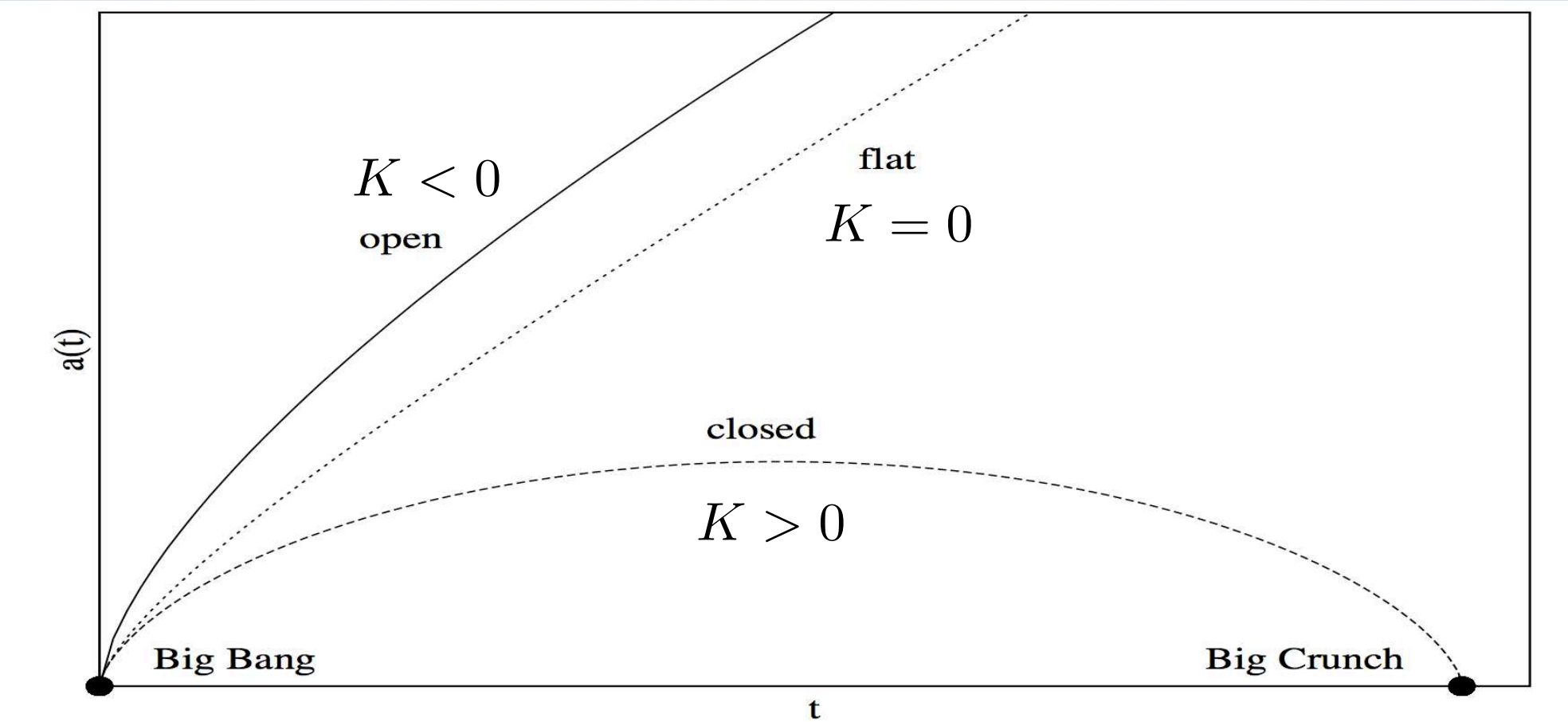
$$\frac{\ddot{a}}{a} = \underbrace{\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2}}_{\frac{8\pi G}{3}\rho} - 4\pi G\rho$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3}\rho - 4\pi G\rho = -\frac{4\pi G}{3}\rho \leq 0$$

la vitesse d'expansion décroit

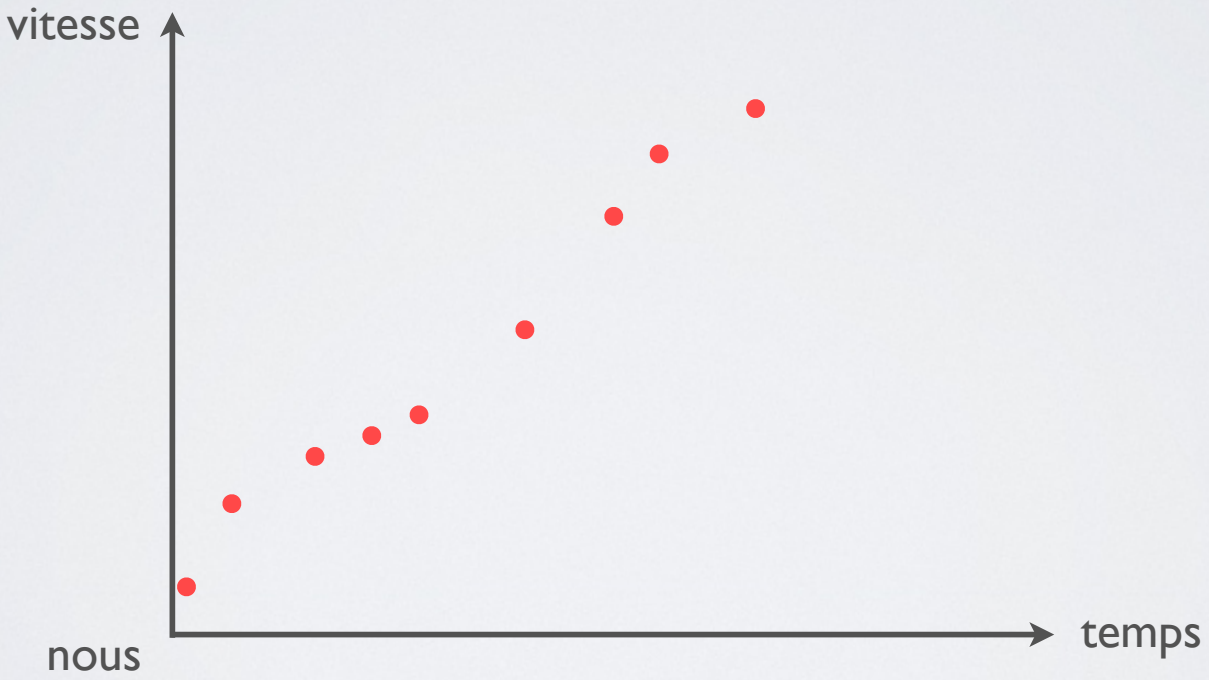
Solutions

La décélération de l'univers dépend de la **quantité** de **matière** et de la **courbure**.



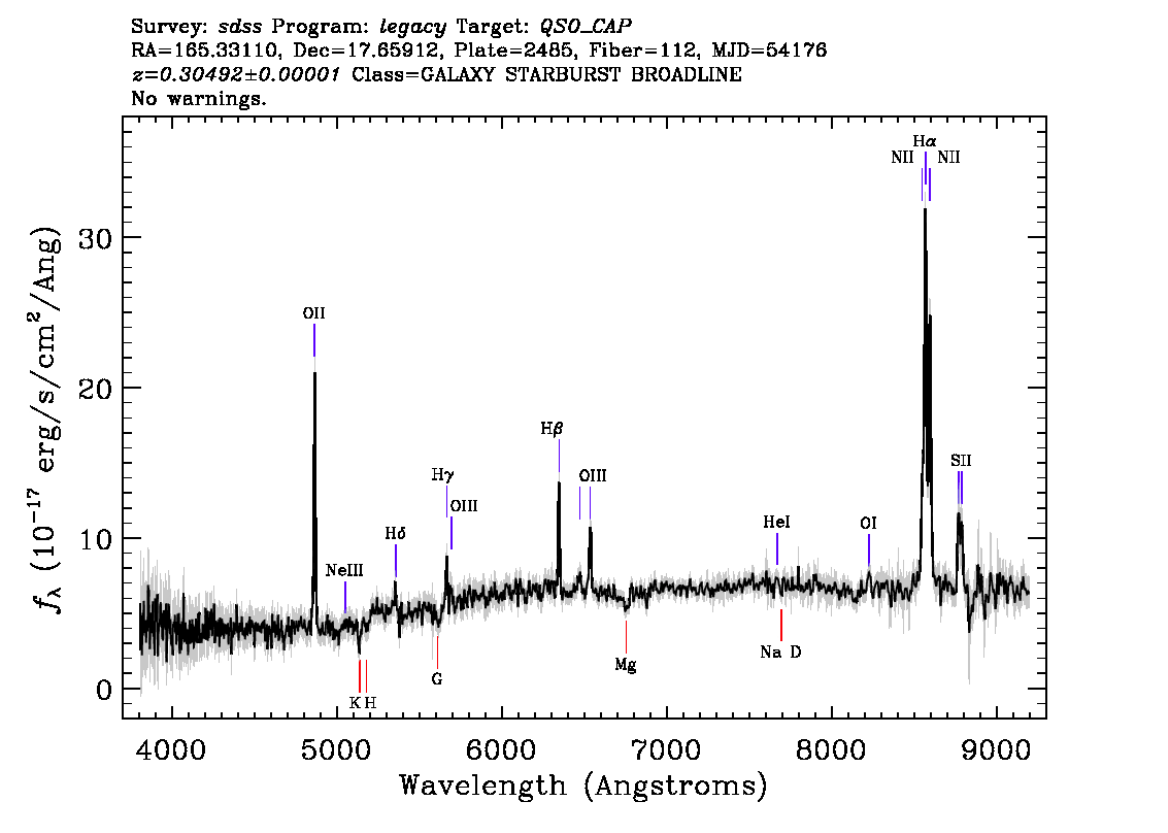
Mesurer l'expansion

Pour mesurer la vitesse d'expansion de l'univers, on doit mesurer la **vitesse** à laquelle les objets s'éloignent de nous en fonction du **temps**.



Mesurer la vitesse

Mesurer la **vitesse** est facile: on regarde le **spectre** d'une galaxie.



Si la galaxie s'éloigne de nous, les pics se déplacent au travers de l'effet **Doppler**.

Le **décalalage** nous donne la vitesse

Mesurer la distance

- L'axe du **temps** est difficile: on ne peut pas attendre des millions d'années pour comparer la vitesse à différents temps.
- En regardant **loin**, on regarde dans le **passé**: la lumière met du temps à nous parvenir.
- On remplace l'axe du temps par la **distance**.
- Mesurer la distance n'est pas facile.
- On utilise le fait que l'**énergie** émise par un object **décroît** comme $1/d^2$

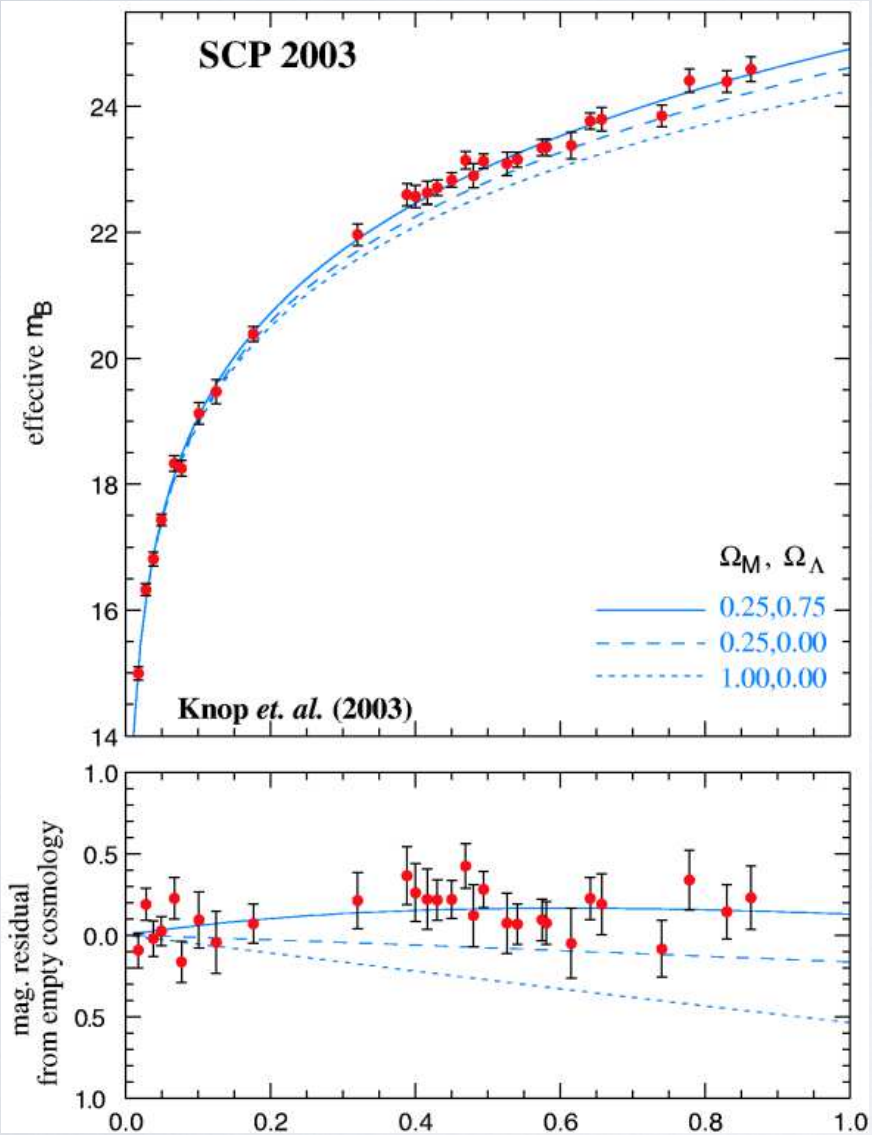
Mesurer la distance

- **Problème**: en général on ne sait pas la quantité d'énergie émise par une galaxie.
- On utilise les **supernovae** qui émettent toujours la même quantité d'énergie

$$d^2 = \frac{L}{4\pi F}$$

- Ces étoiles sont êtremement brillantes → on peut les voir très loin.
- La supernova la plus lointaine a explosé il y a plus de 10 milliards d'années.

Résultat



- **Problème**: aucune courbe théorique ne correspond aux données.
- Aucune valeur de la courbure et de la densité ne marchent.
- Raison: la courbe observée correspond à un univers en **accélération** $\ddot{a} > 0$

Réactions

- Erreur expérimentale. Peu probable car 2 groupes indépendants
- Les supernovae n'**explosent** pas toute de la même manière.
- La lumière est absorbée par la **poussière**.
- En 2011, le **prix Nobel** a été donné à Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess: for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae.

Conséquences

- Il faut changer quelque chose dans nos théories: **énergie sombre** ou modification des lois de la **gravitation**.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho(t)$$

- Si la densité d'énergie est **constante** on peut avoir $\ddot{a} > 0$

$$2\frac{\dot{a}}{a}\left[\frac{\ddot{a}}{a} - \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2\right] - 2\frac{K\dot{a}}{a^3} = 0$$

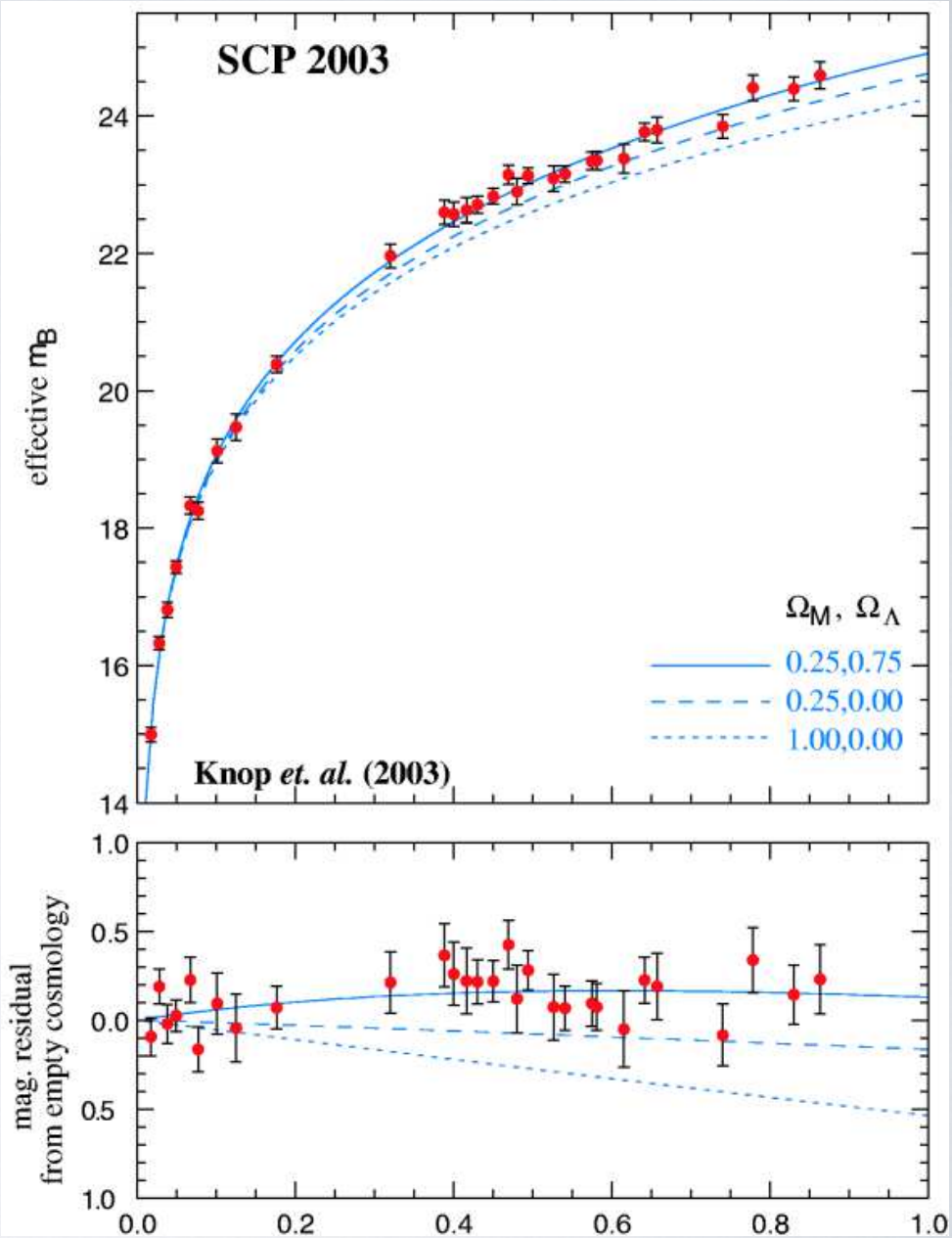
$$\frac{\ddot{a}}{a} = \frac{8\pi G}{3}\rho > 0$$ **accélération**

Constante cosmologique

Einstein l'avait introduit dans ses équations

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

biggest blunder of my life



Energie sombre

- La constante cosmologique ne se **dilue pas**. On peut avoir une autre forme d'énergie qui se dilue plus lentement que la matière.

- Cas limite: $\rho \sim 1/a^2$

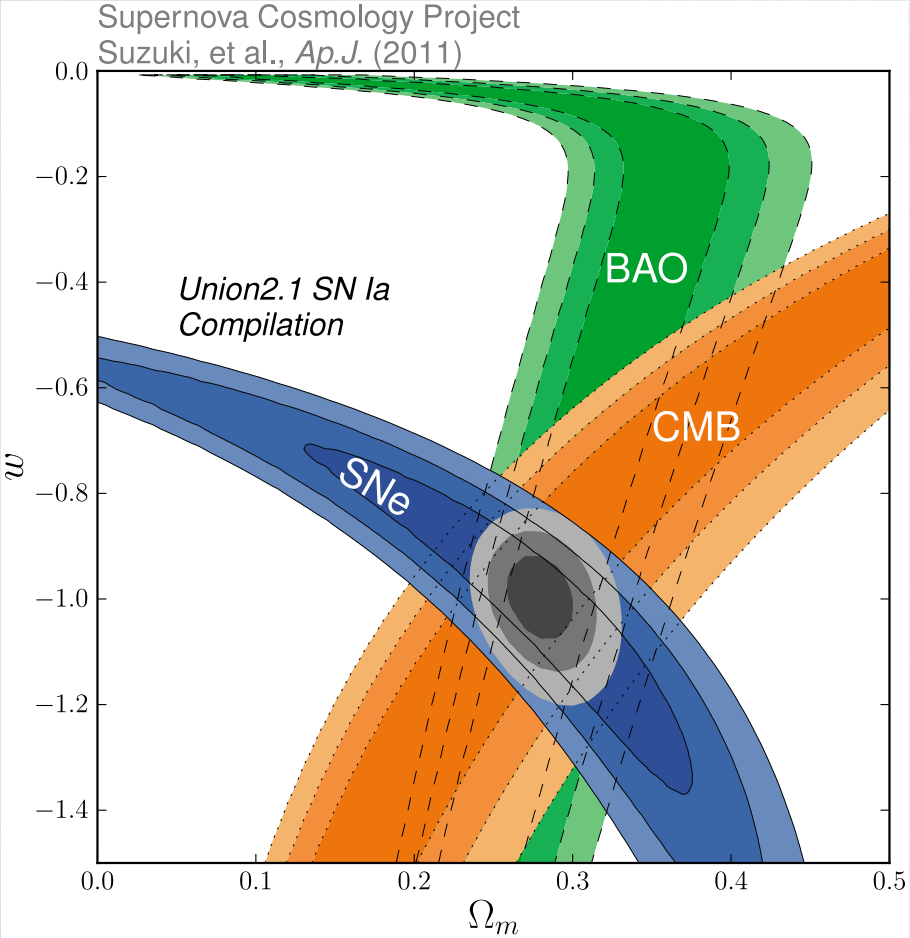
- La dilution dépend de la **pression**

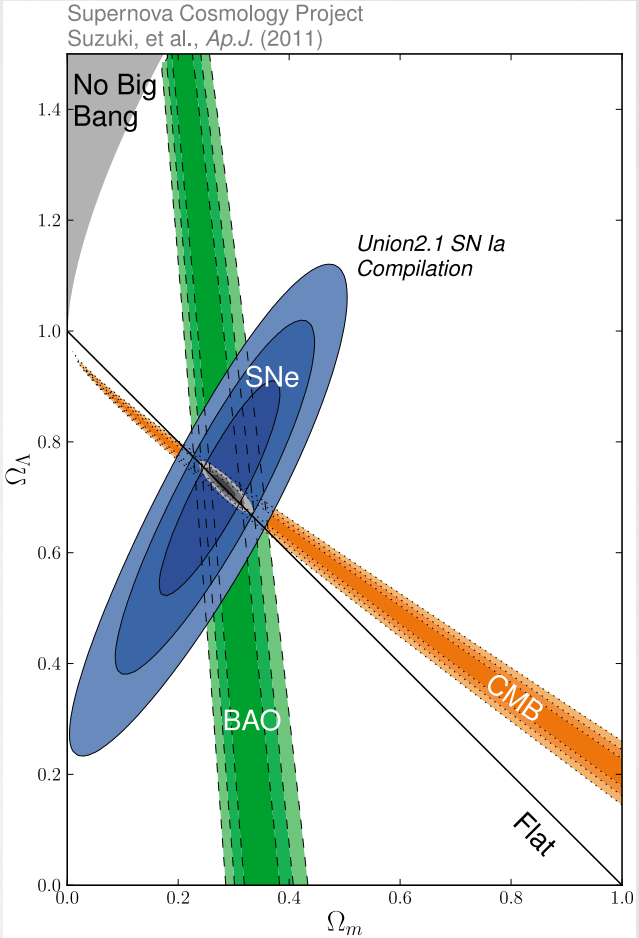
  - matière $P = 0$ $\rho \sim 1/a^3$
  - radiation $P = \rho/3$ $\rho \sim 1/a^4$
  - const. cosm. $P = -\rho$ $\rho \sim$ constante

Contraintes

Equation d'état $w = \dfrac{P}{\rho}$

Constante cosmologique $w = -1$ Accélération si $w < -1/3$

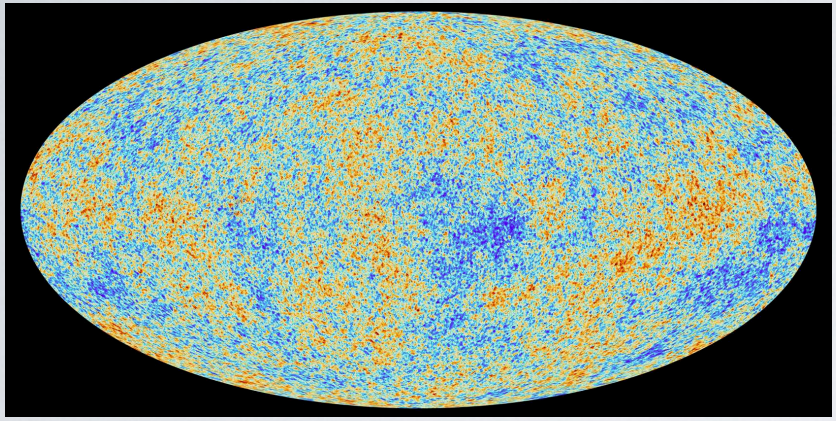




Modification de la gravitation

- Au lieu d'introduire de l'énergie sombre, on peut **modifier** les lois de la **gravitation**.
- On modifie les équations d'Einstein tel que même avec seulement de la matière $\ddot{a} > 0$
- Force **répulsive** à grande distance.
- Difficulté: retrouver les lois correctes à **petite distance**.

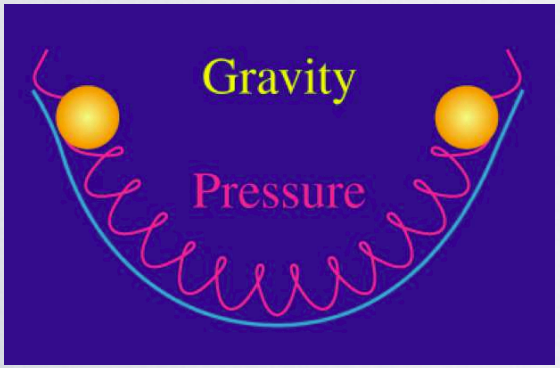
Autres preuves de l'accélération



Les photons n'ont pas tous la même température.

Les **fluctuations** ont une structure très particulière: **oscillations** accoustiques.

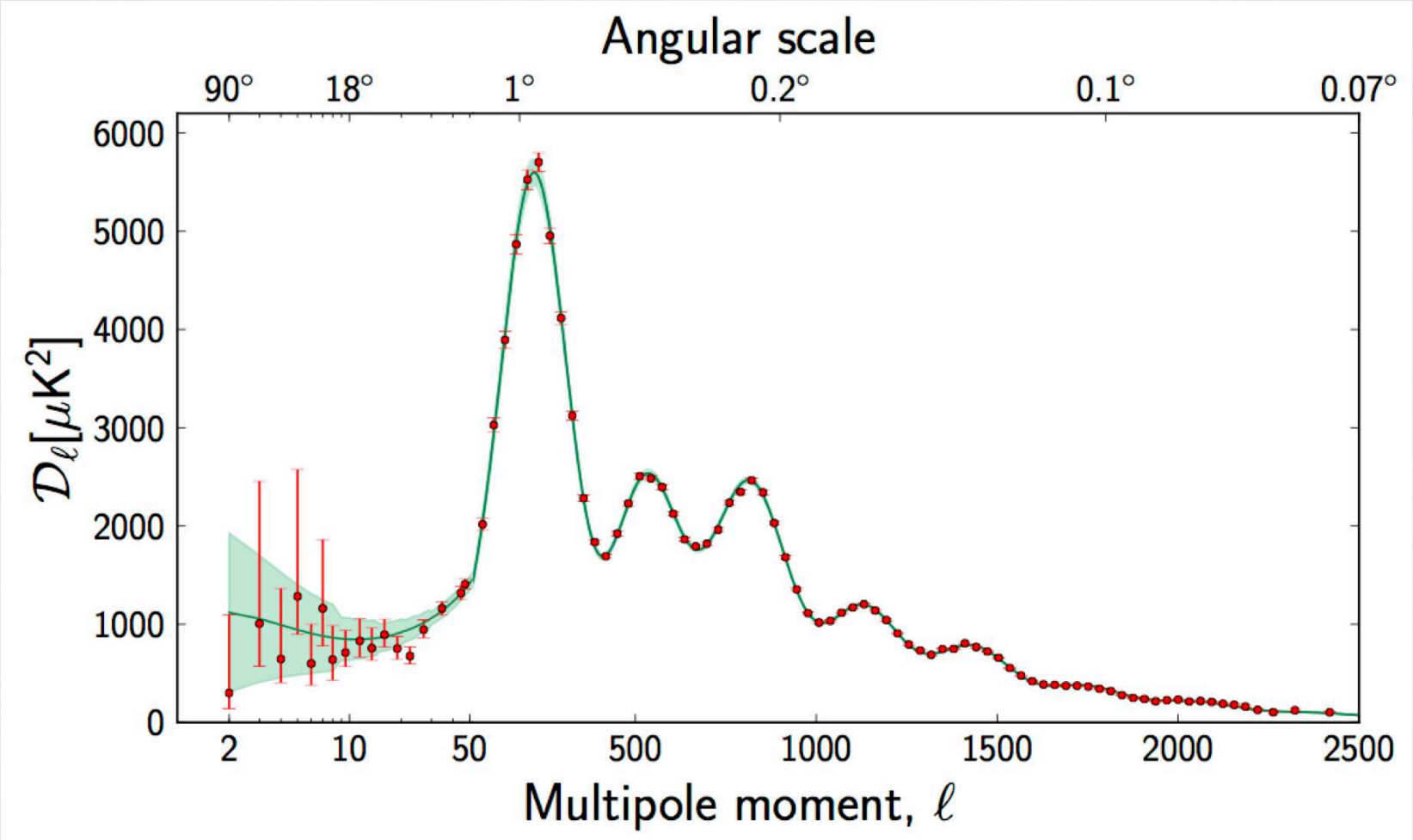
Avant que l'hydrogène devienne neutre, photons, électrons et protons sont **liés**: ils oscillent.



Après la recombinaison les photons arrêtent d'osciller, mais on voit la marque de ces **oscillations** dans leur **température**.

Fond cosmique micro-onde

Pic égale compression: on peut calculer la **position**



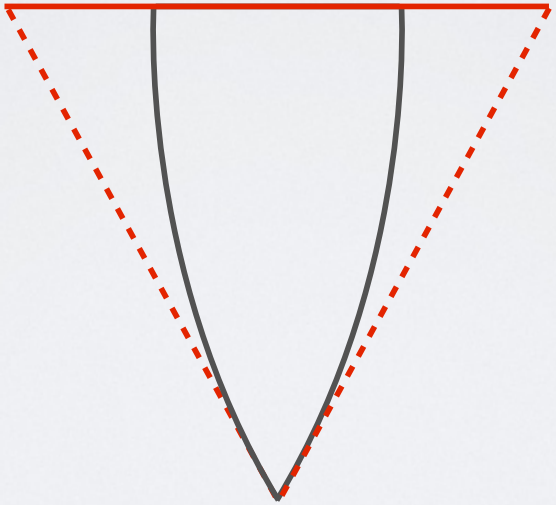
Fond cosmique micro-onde

La **taille** observée du pic dépend de la **courbure**

$K = 0$

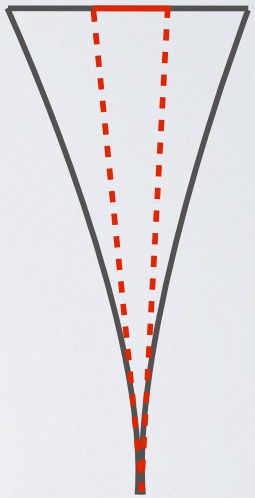
Observateur

$K > 0$



Observateur

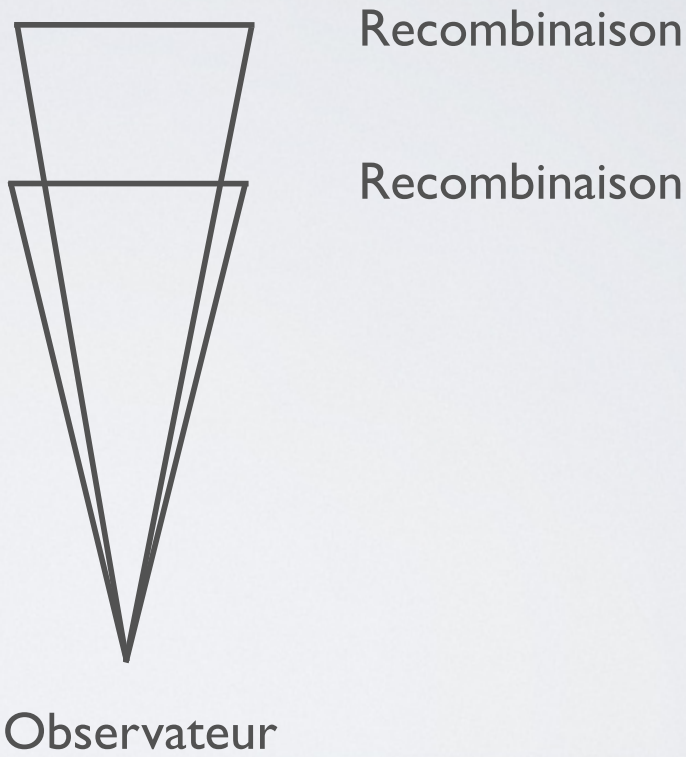
$K < 0$



Observateur

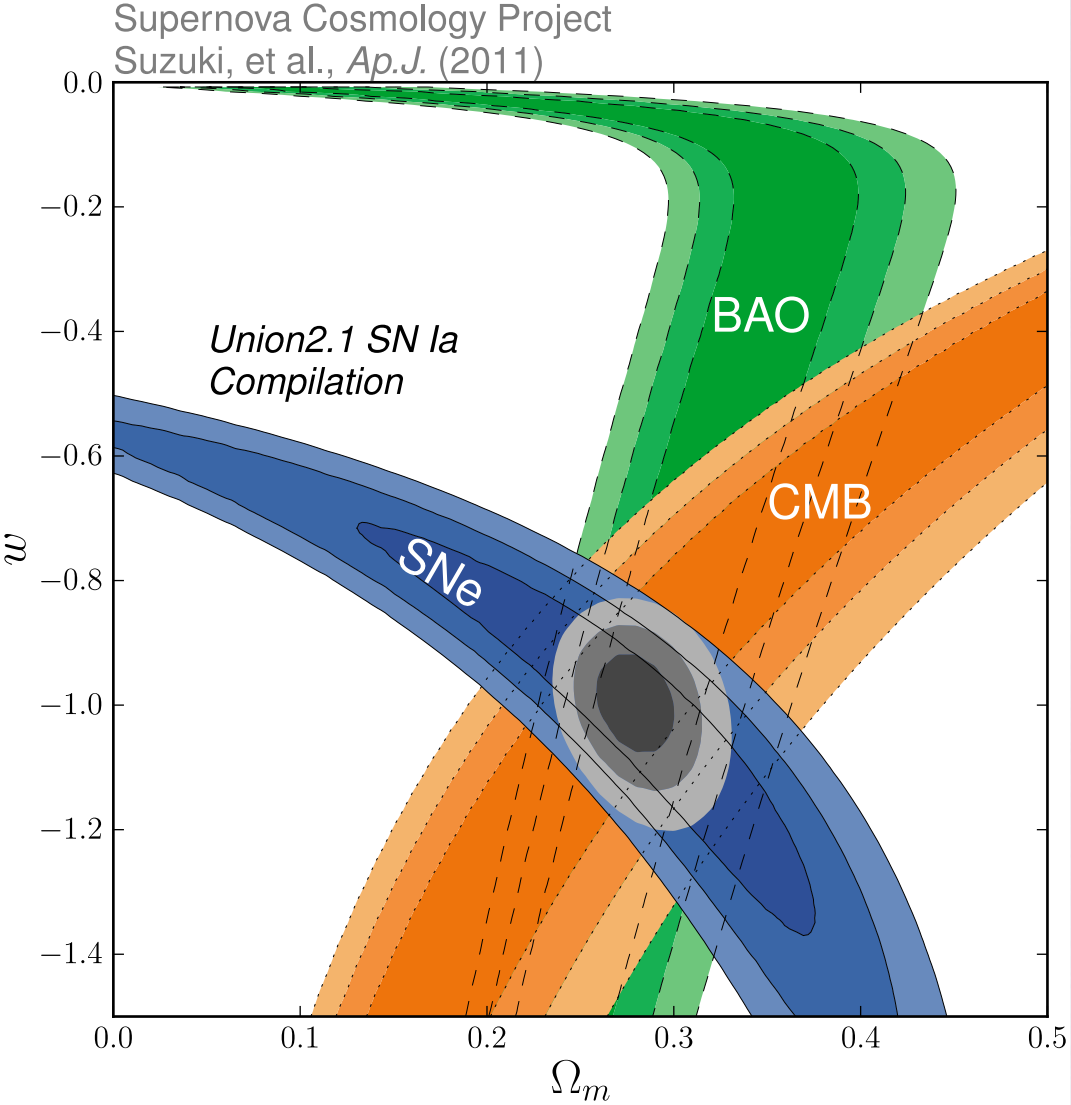
Fond cosmique micro-onde

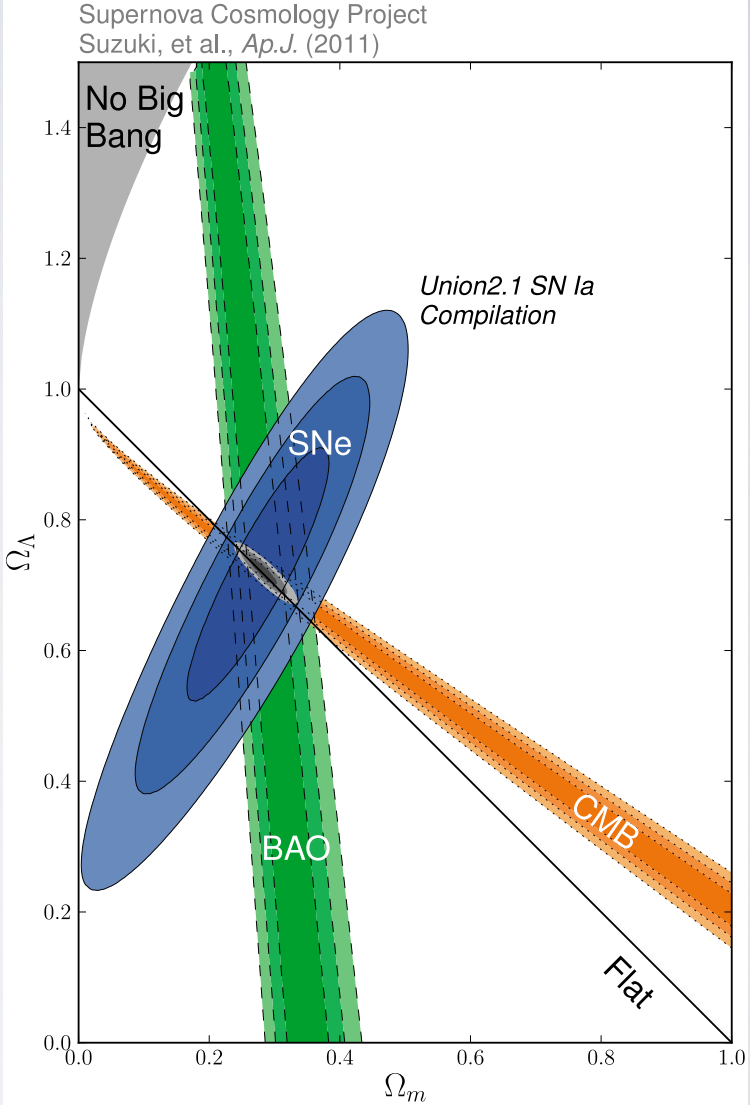
La taille observée du pic dépend de la **distance**. Cette distance est différente dans un univers en décélération ou en **accélération**.



Le CMB peut contraindre l'énergie sombre.

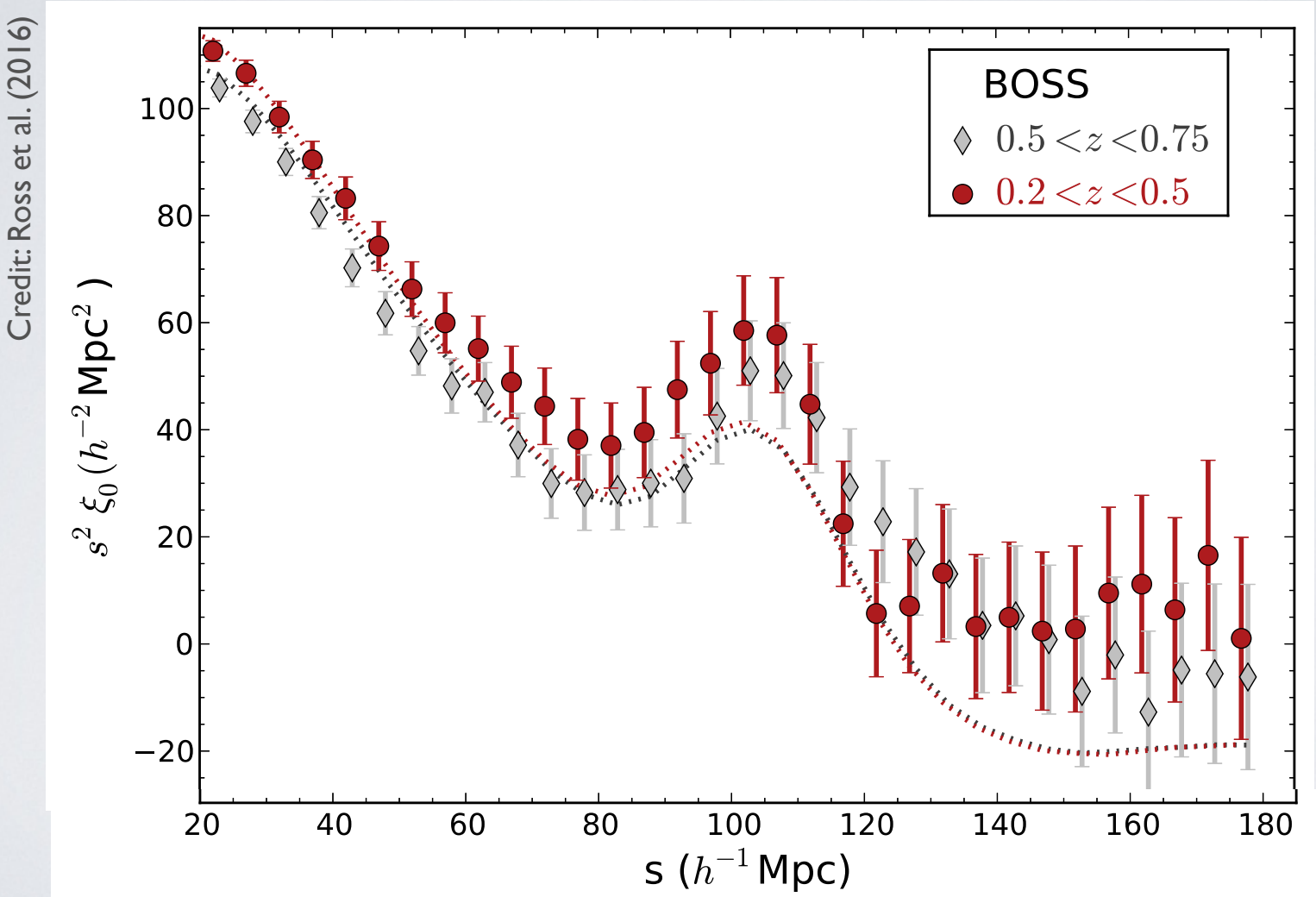
Fond cosmique micro-onde





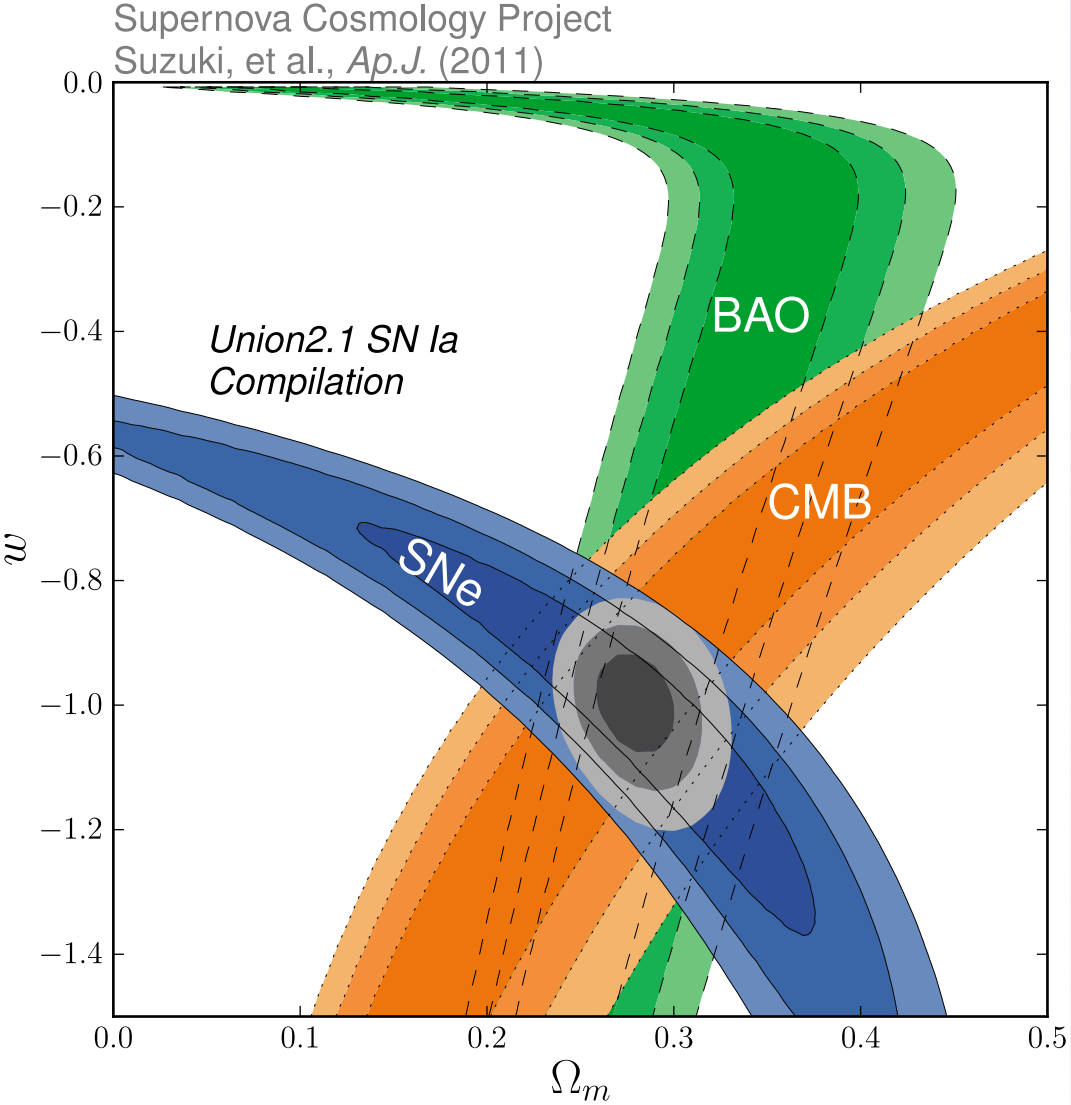
Oscillations baryoniques accoustiques

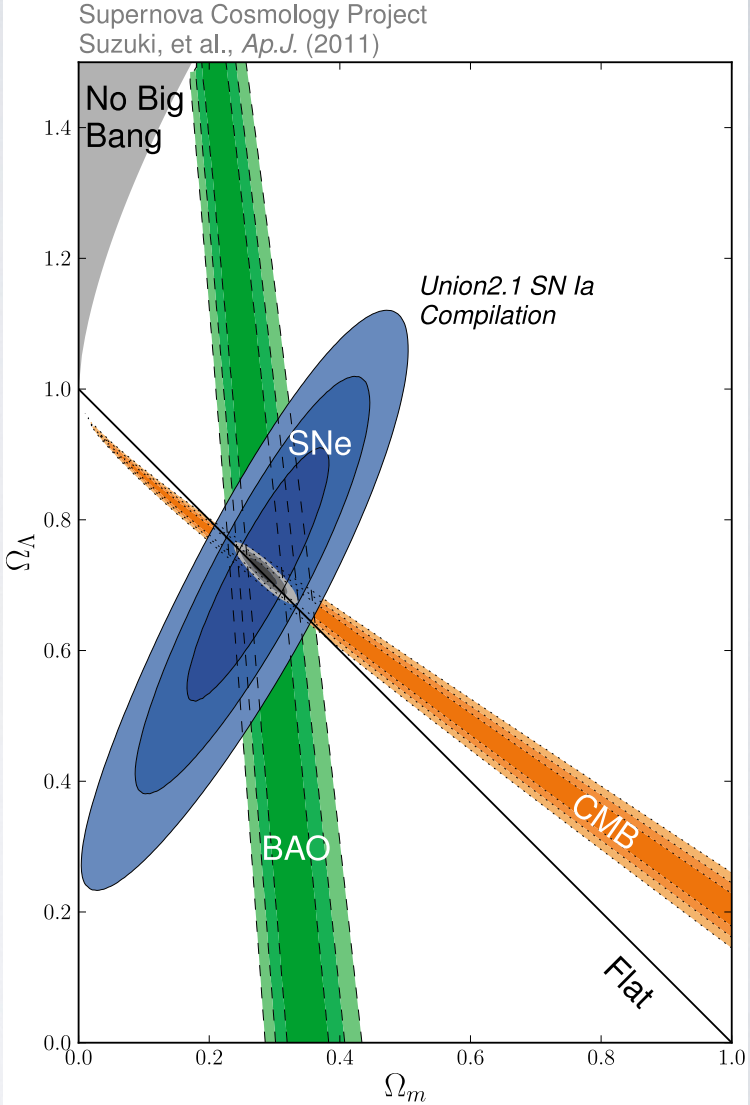
Les oscillations affectent aussi la matière.



Credit: Ross et al. (2016)

Fond cosmique micro-onde





Conclusions

- La théorie du **Big Bang** explique la naissance et l'évolution de notre univers.
- Cette théorie est **en accord** avec les prédictions du modèle standard et de la Relativité Générale.
- Les observations des supernovae, du CMB et des galaxies nous disent que l'univers est en **expansion accéléré**, qui n'est pas une solution des équations d'Einstein avec matière ordinaire.
- Soit on rajoute de l'**énergie sombre**.
- Soit on modifie les lois de la **gravitation**.

Notation

H_0	constante de Hubble
G	constante de Newton
$a(t)$	facteur d'échelle
K	courbure
ρ	densité d'énergie
P	pression
$w = \dfrac{P}{\rho}$	équation d'état

Notation

L luminosité

F flux

Λ constante cosmologique

$$\rho_c(t_0) = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$ densité critique aujourd'hui

$$\Omega_m = \frac{\rho_m(t_0)}{\rho_c(t_0)} = \frac{8\pi G \rho_m(t_0)}{3H_0^2}$$ fraction de matière

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$ fraction d'énergie sombre