Arpenter l'Univers

Ruth Durrer

Département de Physique Théoreique et CAP
Université de Genève
Suisse

Formation continue des enseignants secondaires en Physique, janvier 25, 2012

Contenu

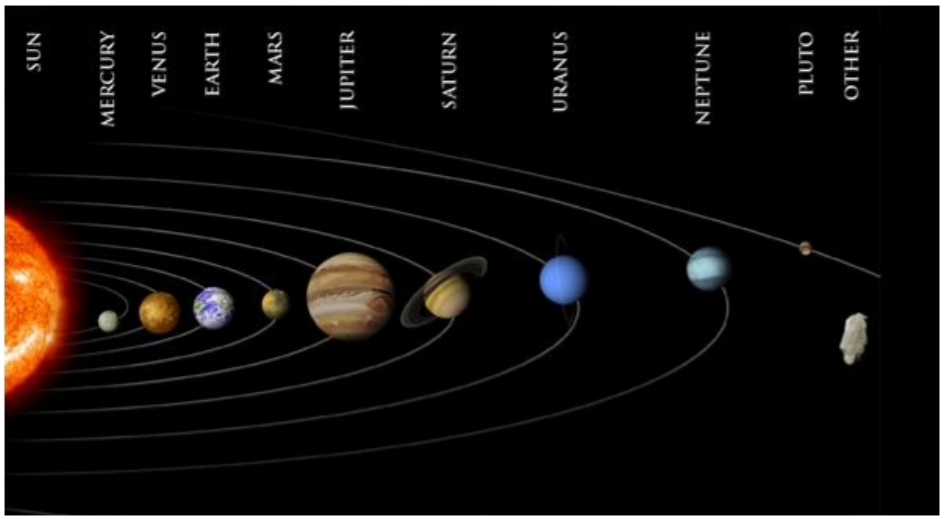
1. La taille de l'univers
2. L'expansion de l'univers
3. L'évidence pour l'énergie sombre
4. Des modèles pour l'énergie sombre
5. Conclusions

Des distances

La terre: rayon $\simeq$ 6000km

Des distances

Le système solaire $\simeq 7 \times 10^9$km ($\simeq$ 50au)
1 au $\simeq 150 \times 10^6$km est la distance moyenne entre la terre et le soleil

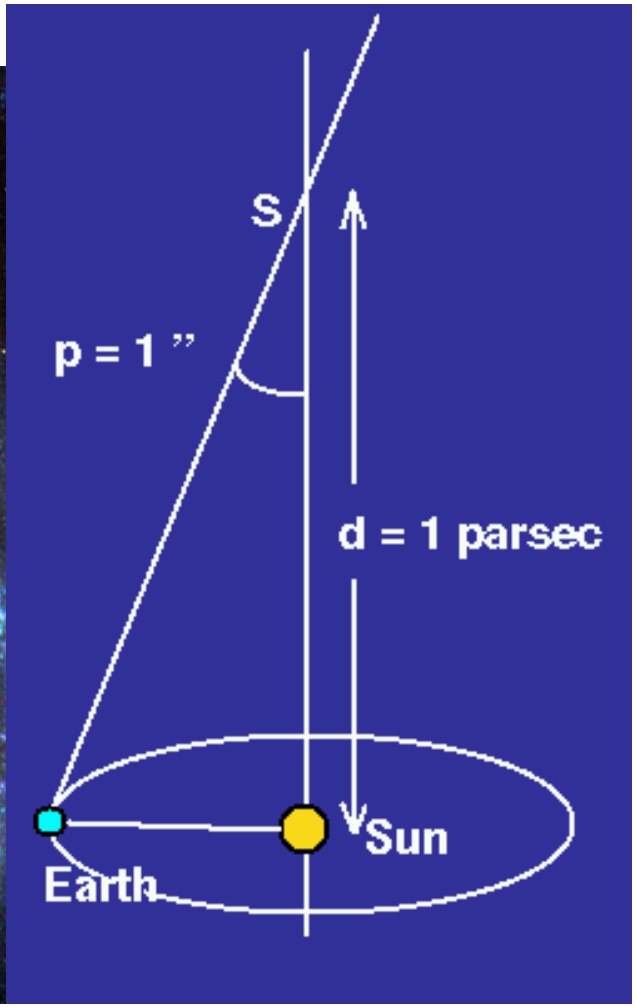


Des distances

La Voie Lactée (taille de la part visible) $\simeq 10^{18}$km $\simeq 30'000$parsec

Des distances

La Voie Lactée (taille de la part visible) $\simeq 10^{18}$km $\simeq 30'000$parsec

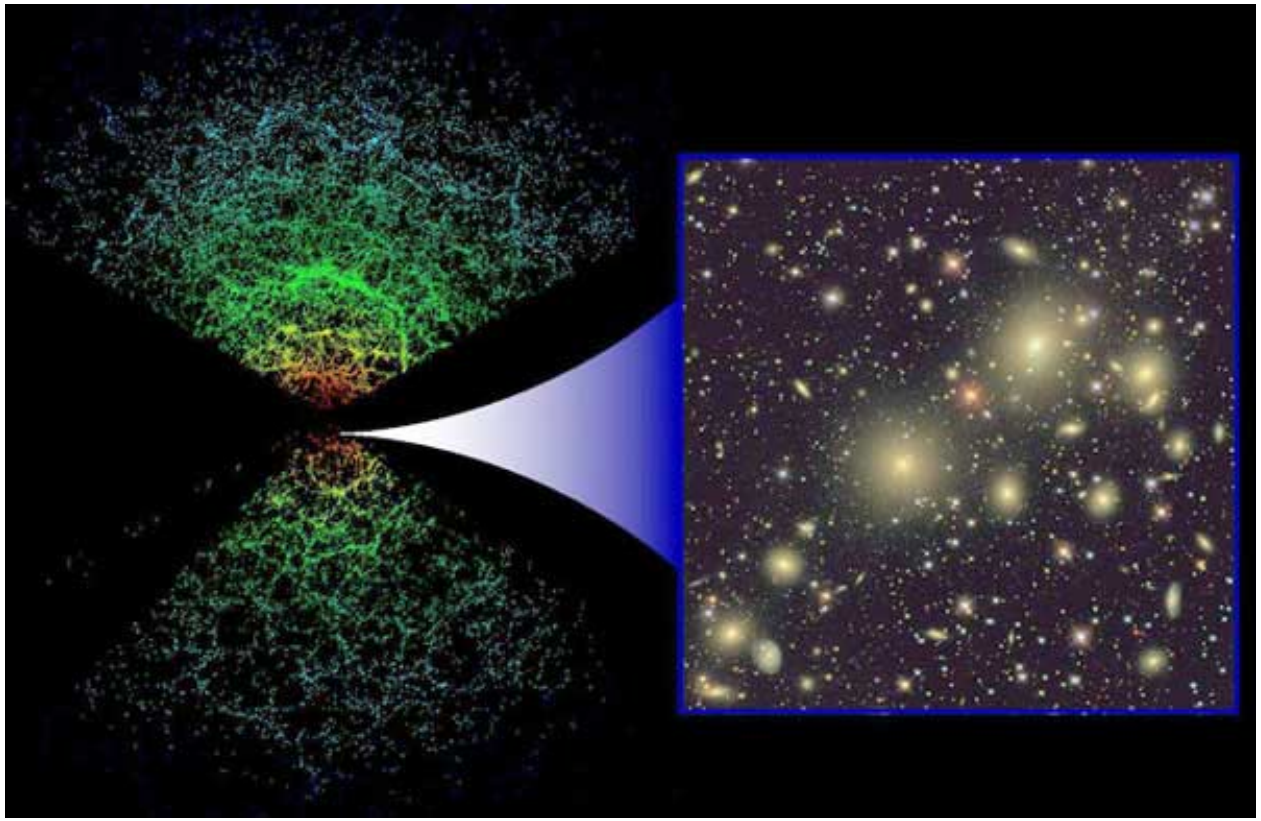


$1'' = 1^o/3600 = 1$seconde d'arc

1parsec $\simeq 3.26$ années lumière

Des distances

La 'taille de l'univers visible' (taille de Hubble) $\simeq$ 4000Mpc $= 4 \times 10^9$parsec
(Contient env. 10^{11} galaxies comme la Voie Lactée)



Chaque point représente une galaxie
(Sloan digital sky survey, SDSS)

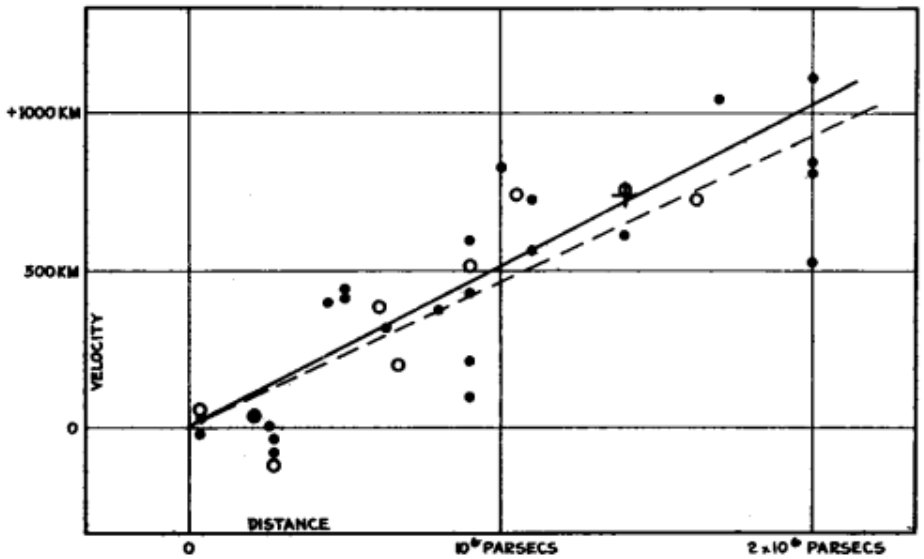
Notre Univers est en expansion

La gravitation newtonienne comme vous la connaissez est une interaction attractive.
Toute masse est attirée par toute autre masse.

Notre Univers est en expansion

La gravitation newtonienne comme vous la connaissez est une interaction attractive. Toute masse est attirée par toute autre masse.
Malgré ceci, les observations montrent que l'univers actuel est en expansion. Les galaxies s'eloignent les unes des autres avec une vitesse qui est proportionnelle à leur distance,

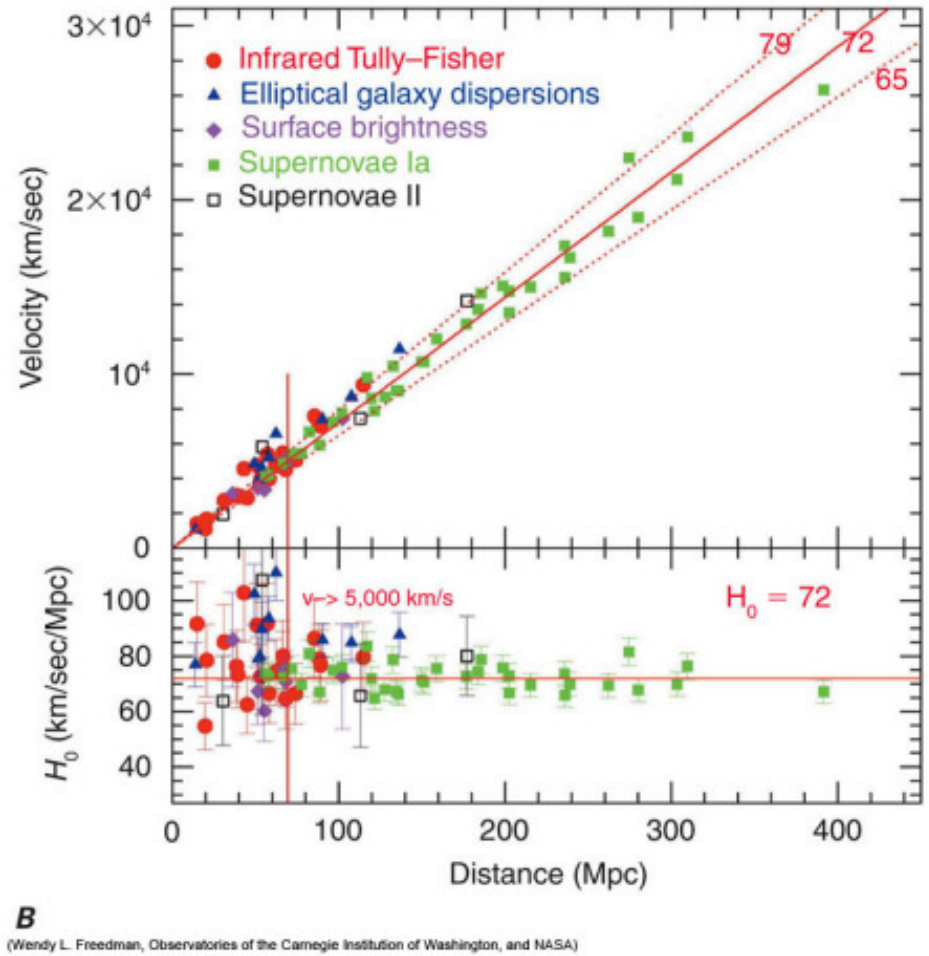
$$v = \dot{R} = H_0 \cdot R \qquad \text{(loi de Hubble)}$$



(Hubble 1932)

$H_0 \simeq 72\text{km/s/Mpc}$

Notre Univers est en expansion



$v = H_0 R$, $H_0 \simeq (72 \pm 7)$km/s/Mpc, W. Freedman et al. 2003.

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

- Pour mesurer la vitesse on mesure le décalage vers le rouge (redshift). C'est l'effet Doppler pour la lumière:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_e}{\lambda_e} = v/c\,, \qquad \text{si } z \ll 1\,.$$

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

- Pour mesurer la vitesse on mesure le décalage vers le rouge (redshift). C'est l'effet Doppler pour la lumière:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_e}{\lambda_e} = v/c\,, \qquad \text{si } z \ll 1\,.$$

- Mesurer le redshift c'est facile, mais mesurer la distance est difficile. Il faut des 'chandelles standardes' (ou des 'règles standardes').

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

- Pour mesurer la vitesse on mesure le décalage vers le rouge (redshift). C'est l'effet Doppler pour la lumière:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_e}{\lambda_e} = v/c\,, \qquad \text{si } z \ll 1\,.$$

- Mesurer le redshift c'est facile, mais mesurer la distance est difficile. Il faut des 'chandelles standardes' (ou des 'règles standardes').

- En cosmologie, regarder loin c'est regarder vers le passé.
  Nous voyons Andromède comme elle a été il y a 2 million d'années.

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

- Pour mesurer la vitesse on mesure le décalage vers le rouge (redshift). C'est l'effet Doppler pour la lumière:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_e}{\lambda_e} = v/c\,, \qquad \text{si } z \ll 1\,.$$

- Mesurer le redshift c'est facile, mais mesurer la distance est difficile. Il faut des 'chandelles standardes' (ou des 'règles standardes').

- En cosmologie, regarder loin c'est regarder vers le passé.
  Nous voyons Andromède comme elle a été il y a 2 million d'années.

- Un instant dans le passé peut être indiqué par son 'redshift' z.

Notre Univers est en expansion

Pour determiner le 'diagramme de Hubble' il faut mesurer deux choses: la vitesse et la distance des galaxies lointaines.

- Pour mesurer la vitesse on mesure le décalage vers le rouge (redshift). C'est l'effet Doppler pour la lumière:

$$z = \frac{\lambda - \lambda_e}{\lambda_e} = v/c\,, \qquad \text{si } z \ll 1\,.$$

- Mesurer le redshift c'est facile, mais mesurer la distance est difficile. Il faut des 'chandelles standardes' (ou des 'règles standardes').

- En cosmologie, regarder loin c'est regarder vers le passé.
  Nous voyons Andromède comme elle a été il y a 2 million d'années.

- Un instant dans le passé peut être indiqué par son 'redshift' z.

- La vitesse d'expansion de l'univers qui est $H_0 \simeq 72$km/s/Mpc a été différent dans le passé. Nous voulons la determiner en fonction du 'redshift' $H(z)$. Pour ceci il faut mesurer le redshift z et la distance d des galaxies lointaines.

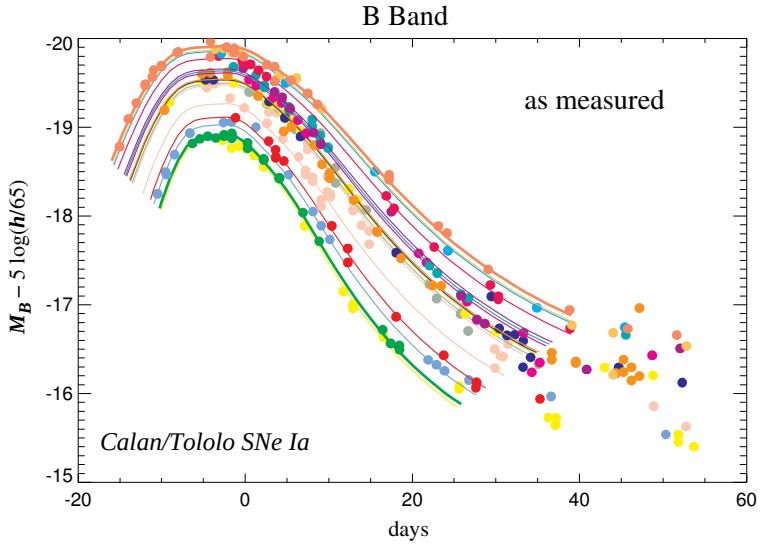
Chandelles standardes

Les chandelles standardes les plus puissantes sont les supernovae.

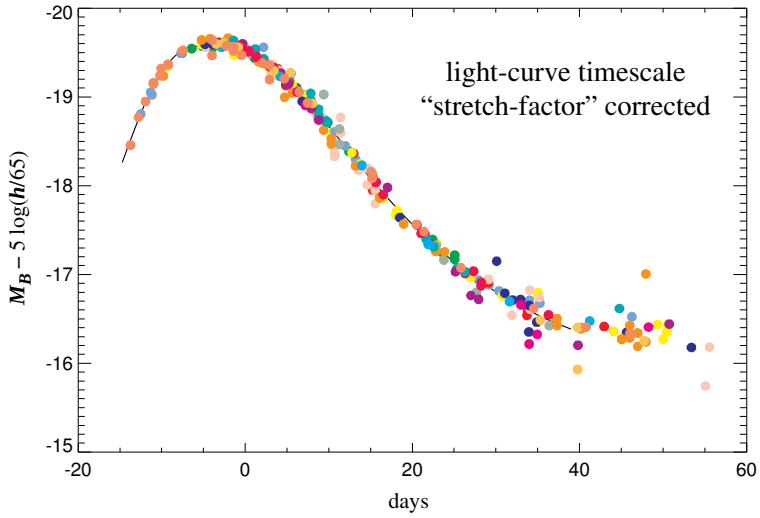
(SN1994D)

SNIa courbe de lumière

Après application d'un 'stretch factor' le maximum de la courbe de lumiére, c'est-à-dire la luminosité maximale est presque la même pour toutes les supernovae.

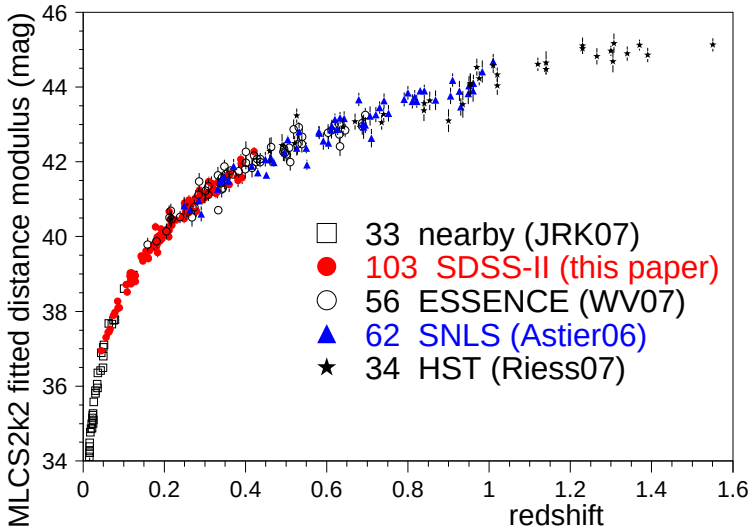


Sans application de la correction.

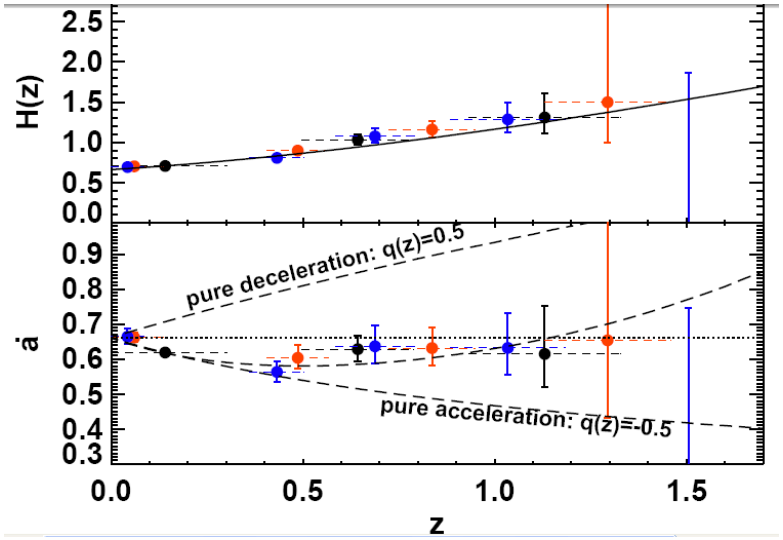


Après correction.

Notre Univers est en expansion accélérée



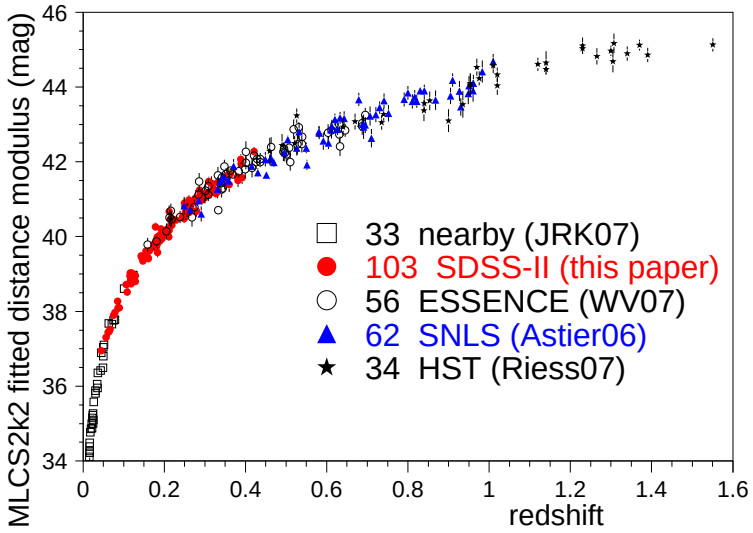
(Kessler et al. 2009)



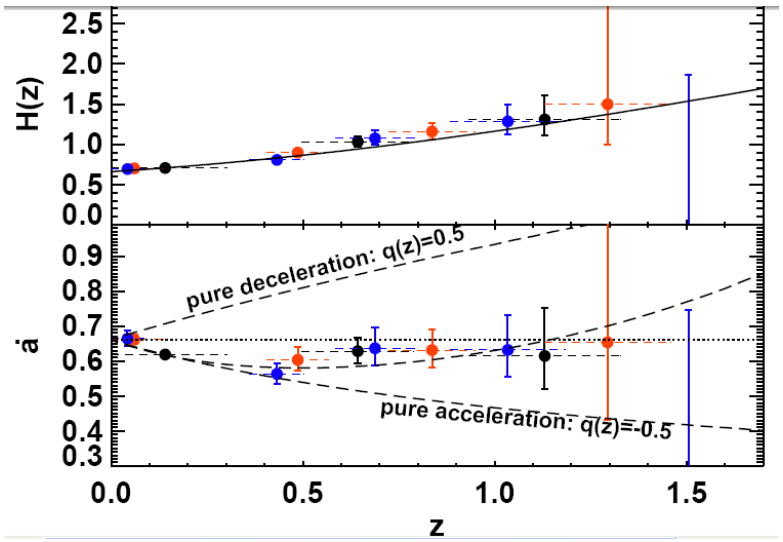
(Riess et al. 2007)

Distance modulus
$\propto$ log(luminosité apparante)
$\propto \log(1/d_L^2)$

Notre Univers est en expansion accélérée



(Kessler et al. 2009)



(Riess et al. 2007)

Distance modulus
$\propto$ log(luminosité apparante)
$\propto \log(1/d_L^2)$

$$d_L \propto \int \frac{dz}{H(z)}$$

$$H = \frac{\dot{R}}{R} = (1+z)\dot{R}(z)$$

$\dot{R}(z), \ddot{R} > 0$

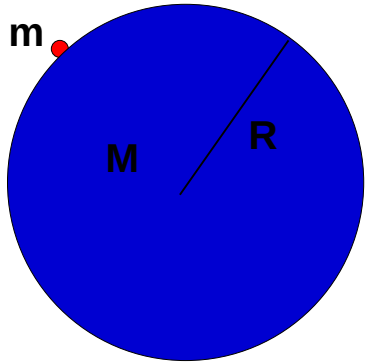
Prix Nobel 2011 en Physique

Adam G. Riess Brian P. Schmidt Saul Perlmutter

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

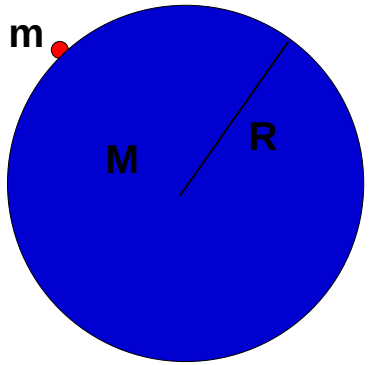
Considérons une masse teste m au bord d'une sphère à densité ρ, homogène, en expansion avec la vitesse $v = \dot{R}$.



$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$$

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Considérons une masse teste m au bord d'une sphère à densité ρ, homogène, en expansion avec la vitesse $v = \dot{R}$.



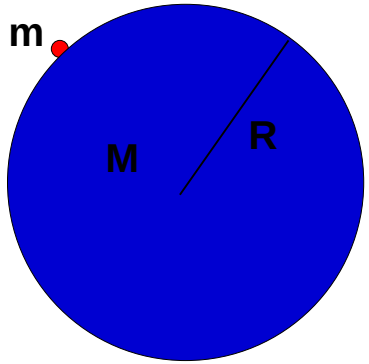
$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$$

Son énergie est

$$E = \frac{m}{2} v^2 + U = \frac{m}{2} v^2 - \frac{mMG}{R} = \frac{m}{2} v^2 - \frac{4\pi}{3} m\rho R^2 G$$

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Considérons une masse teste m au bord d'une sphère à densité ρ, homogène, en expansion avec la vitesse $v = \dot{R}$.



$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$$

Son énergie est

$$E = \frac{m}{2} v^2 + U = \frac{m}{2} v^2 - \frac{mMG}{R} = \frac{m}{2} v^2 - \frac{4\pi}{3} m\rho R^2 G$$

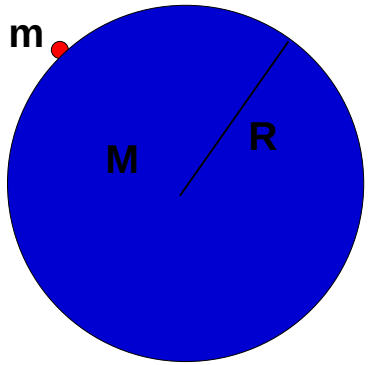
L'énergie est constante donc $2E/m =: -K = \text{constant} = \dot{R}^2 - 8\pi G\rho R^2/3 \quad (v = \dot{R})$.

Avec $H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2$ ceci donne

$$H^2 + \frac{K}{R^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Considérons une masse teste m au bord d'une sphère à densité ρ, homogène, en expansion avec la vitesse $v = \dot{R}$.



$$M = \frac{4\pi}{3} R^3 \rho$$

Son énergie est

$$E = \frac{m}{2} v^2 + U = \frac{m}{2} v^2 - \frac{mMG}{R} = \frac{m}{2} v^2 - \frac{4\pi}{3} m\rho R^2 G$$

L'énergie est constante donc $2E/m =: -K = \text{constant} = \dot{R}^2 - 8\pi G\rho R^2/3 \quad (v = \dot{R})$.

Avec $H^2 = \left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2$ ceci donne

$$H^2 + \frac{K}{R^2} = \frac{8\pi G}{3}\rho$$

Ceci est l'équation de Friedmann (1922).

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Pendant l'expansion la densité diminue,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3} R^3}\,, \qquad \dot{\rho} = -3\rho\frac{\dot{R}}{R}$$

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Pendant l'expansion la densité diminue,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3}\,, \qquad \dot{\rho} = -3\rho\frac{\dot{R}}{R}$$

Si nous insérons ceci dans la derivée de l'équation de Friedmann nous obtenons

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

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\rho < 0\,.$$

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Pendant l'expansion la densité diminue,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3}\,, \qquad \dot{\rho} = -3\rho\frac{\dot{R}}{R}$$

Si nous insérons ceci dans la derivée de l'équation de Friedmann nous obtenons

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

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\rho < 0\,.$$

Ceci est la 2ème équation de Friedmann (1922). Elle demande que l'expansion soit décélérée!

L'expansion de l'univers dans le cadre de la gravitation newtonienne

Pendant l'expansion la densité diminue,

$$\rho = \frac{M}{\frac{4\pi}{3}R^3}\,, \qquad \dot{\rho} = -3\rho\frac{\dot{R}}{R}$$

Si nous insérons ceci dans la derivée de l'équation de Friedmann nous obtenons

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

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3}\rho < 0\,.$$

Ceci est la 2ème équation de Friedmann (1922). Elle demande que l'expansion soit décélérée!

Dans le cadre de la relativité générale ces équations sont modifiées:

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

$$\frac{\ddot{R}}{R} = -\frac{4\pi G}{3c^2}(\rho_E + 3P) + \frac{\Lambda}{3}$$

Ici P est la pression et Λ est la **constante cosmologique**, $\rho_E = c^2\rho$.

En plus, K a maintenant une nouvelle interpretation. C'est la courbure de l'espace:

L'expansion accélérée

En introduisant les paramétres

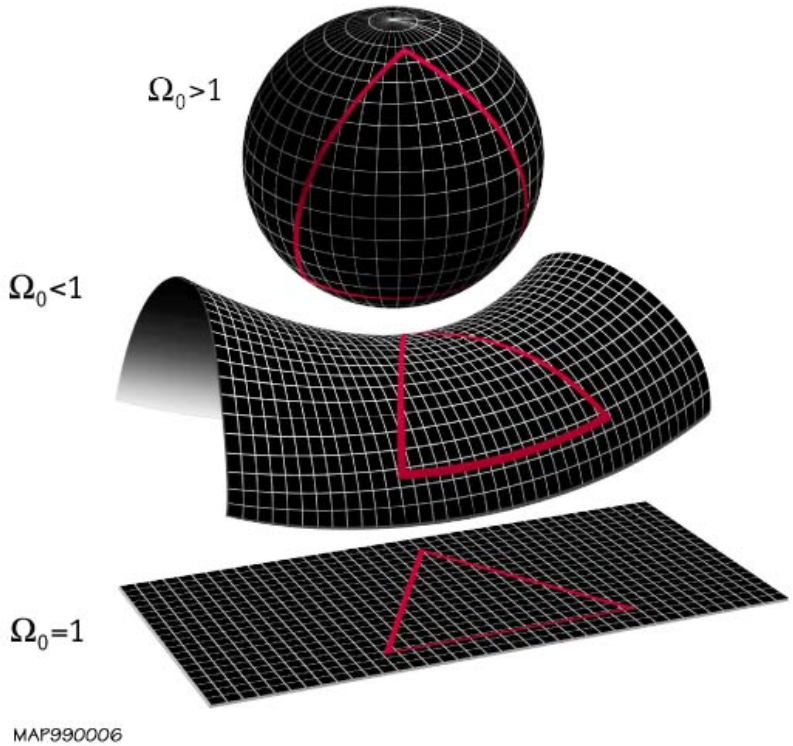
$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho_E}{3c^2H^2}\,, \qquad \Omega_K = -\frac{K}{R^2H^2}\,, \qquad \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3H^2}\,,$$

la première éq. de Friedmann devient $\Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_K = 1\,.$

$K > 0$ ($\Omega_K < 0$): espace sphèrique,

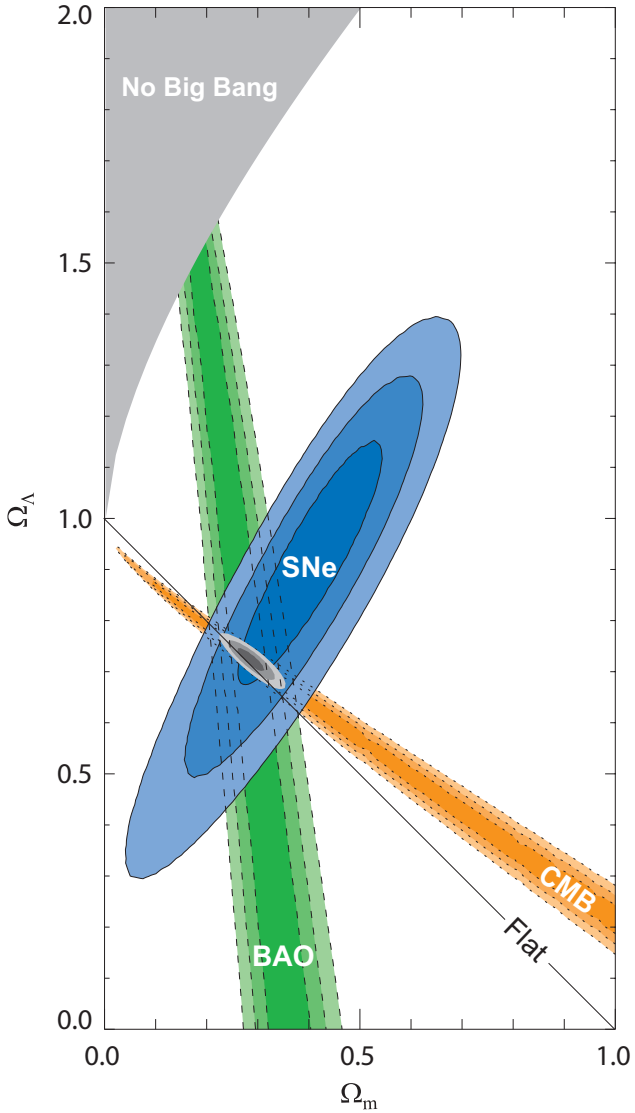
$K < 0$ ($\Omega_K > 0$): pseudo-sphère (selle),

$K = 0$ ($\Omega_K = 0$): espace plat.



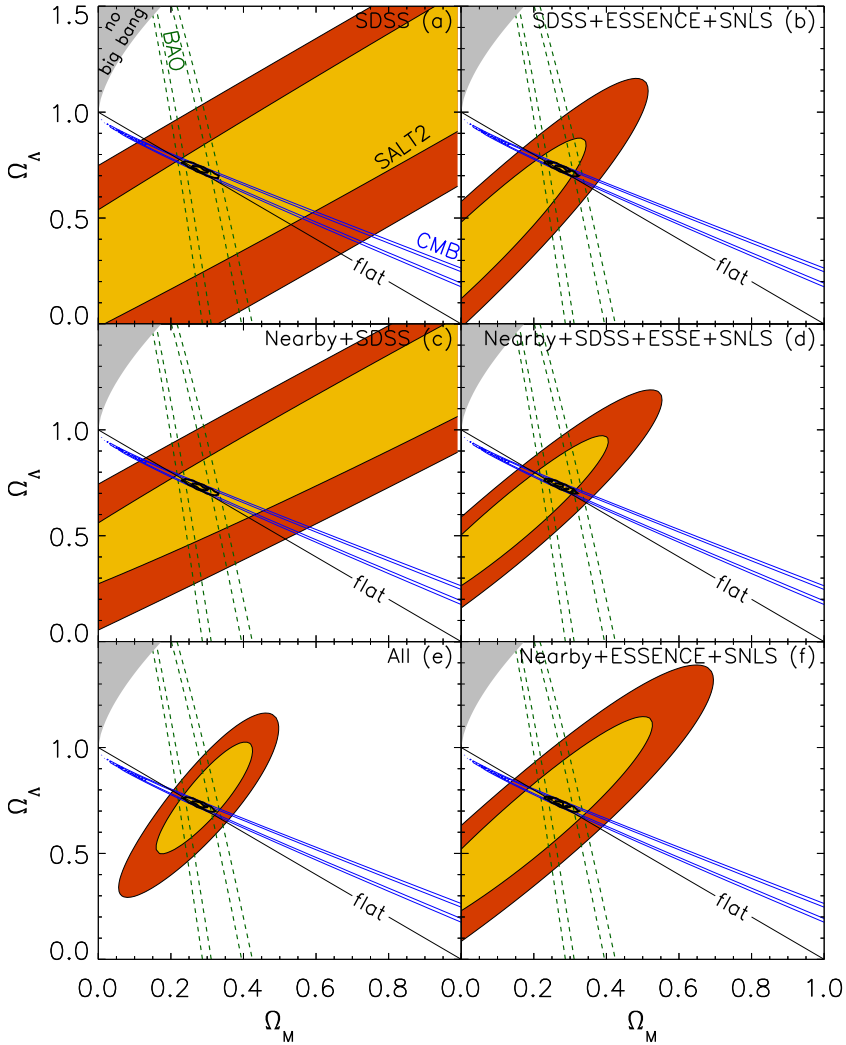
Notre Univers est en expansion accélérée

La fraction de matière, Ω_m, et de constante cosmologique, Ω_Λ (énergie sombre).



Notre Univers est en expansion accélérée

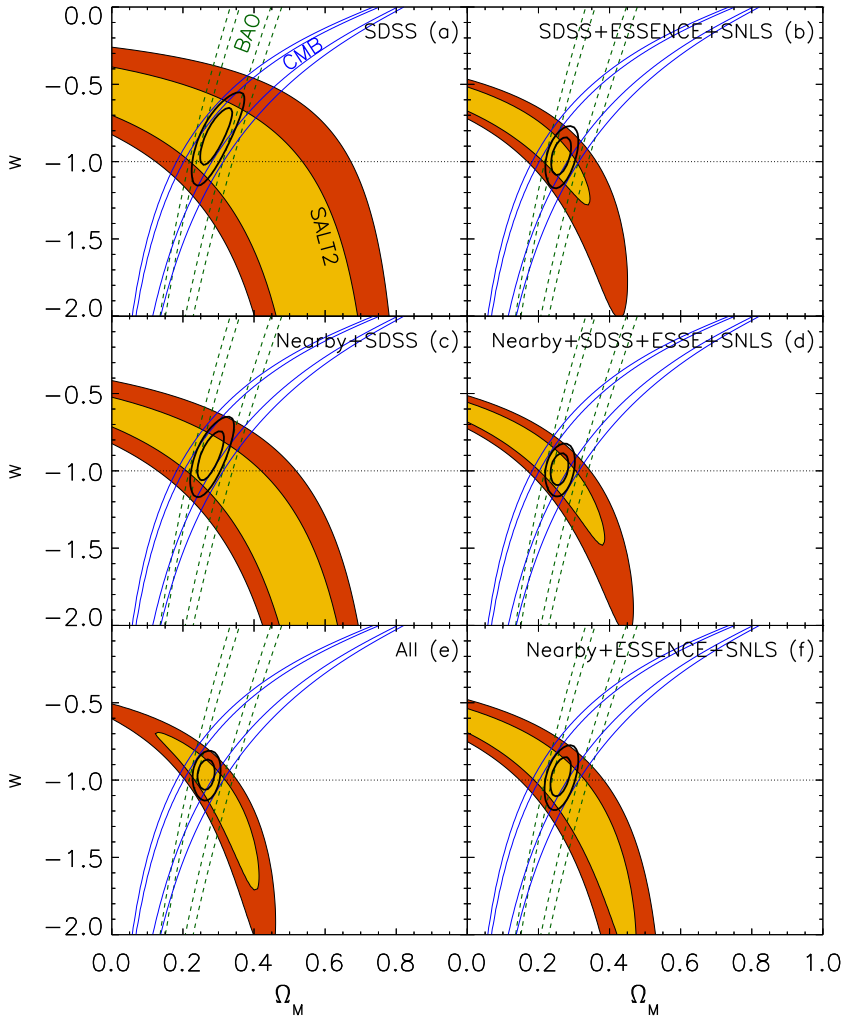
La fraction de matière et de constante cosmologique
(Kessler et al. ’09).



Notre Univers est en expansion accélérée

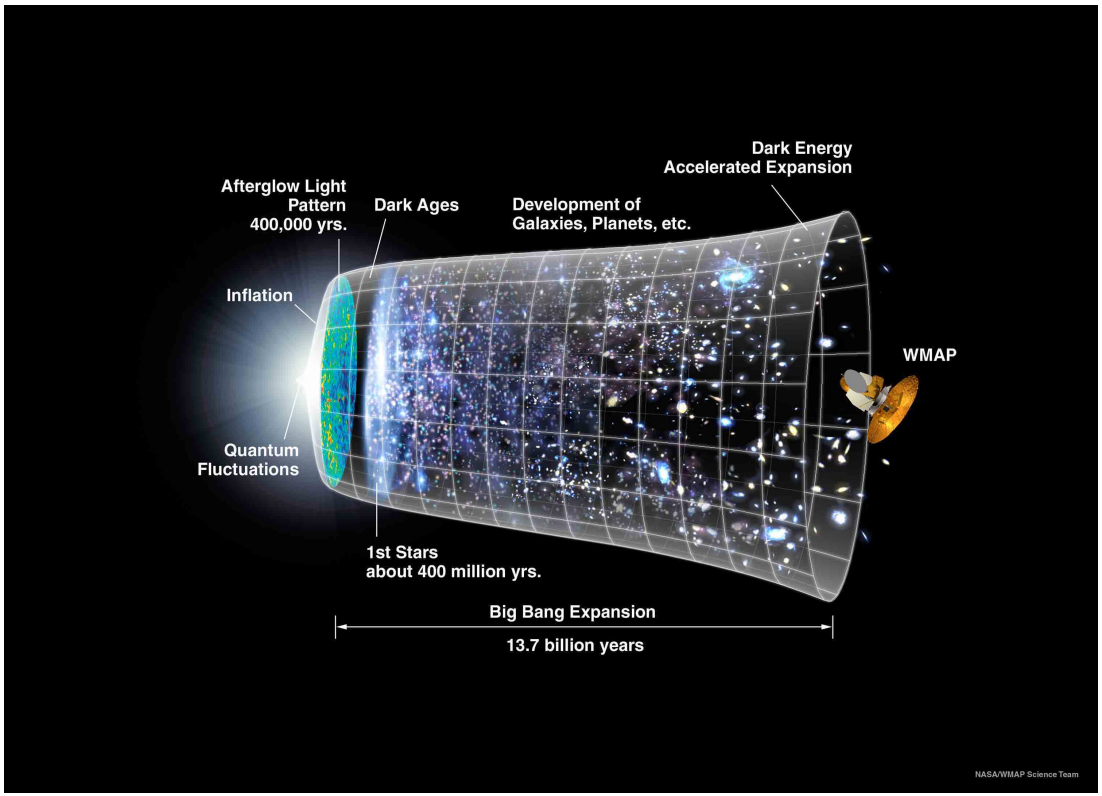
Si la pression est très négative, $P = w\rho_E$ avec $w < -1/3$ on peut avoir un univers en accélération sans constante cosmologique. Une telle composante est appelée énergie sombre. Une constante cosmologique correspond à une composante d'énergie sombre avec $w = -1$.

La fraction de matière et le paramètre w de l'énergie sombre
(Kessler et al. '09).



Histoire thermique

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.



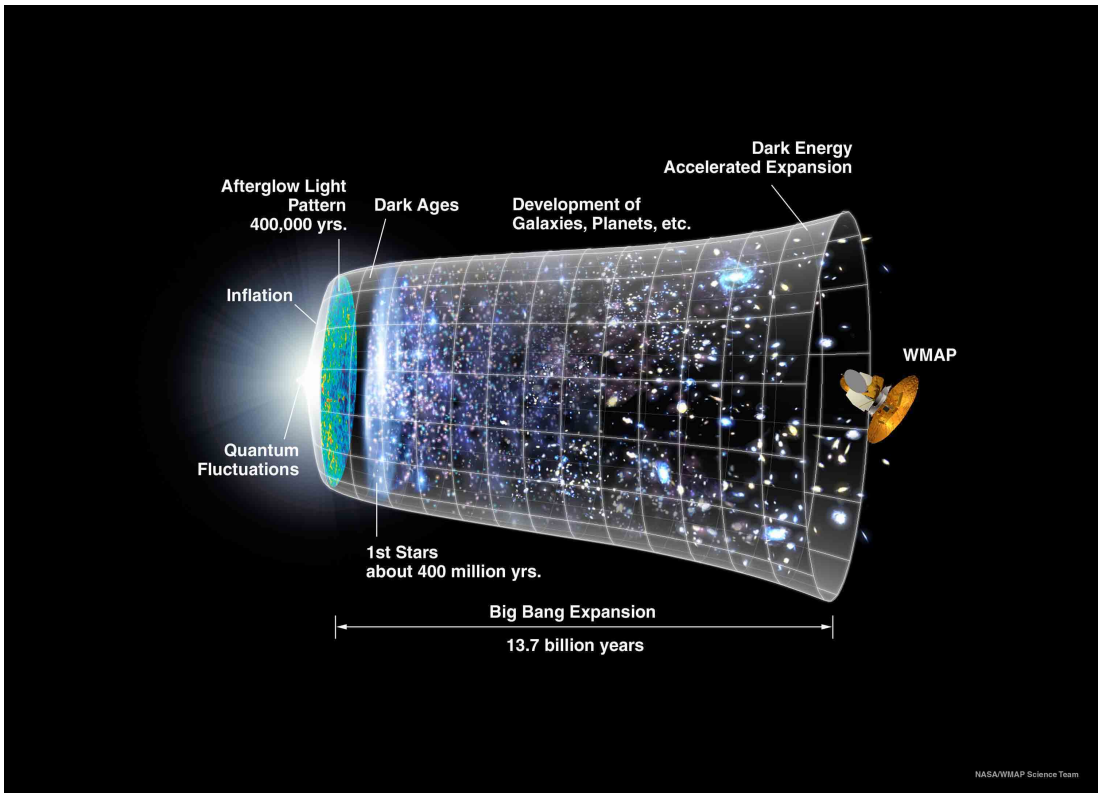
Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).

Histoire thermique

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.



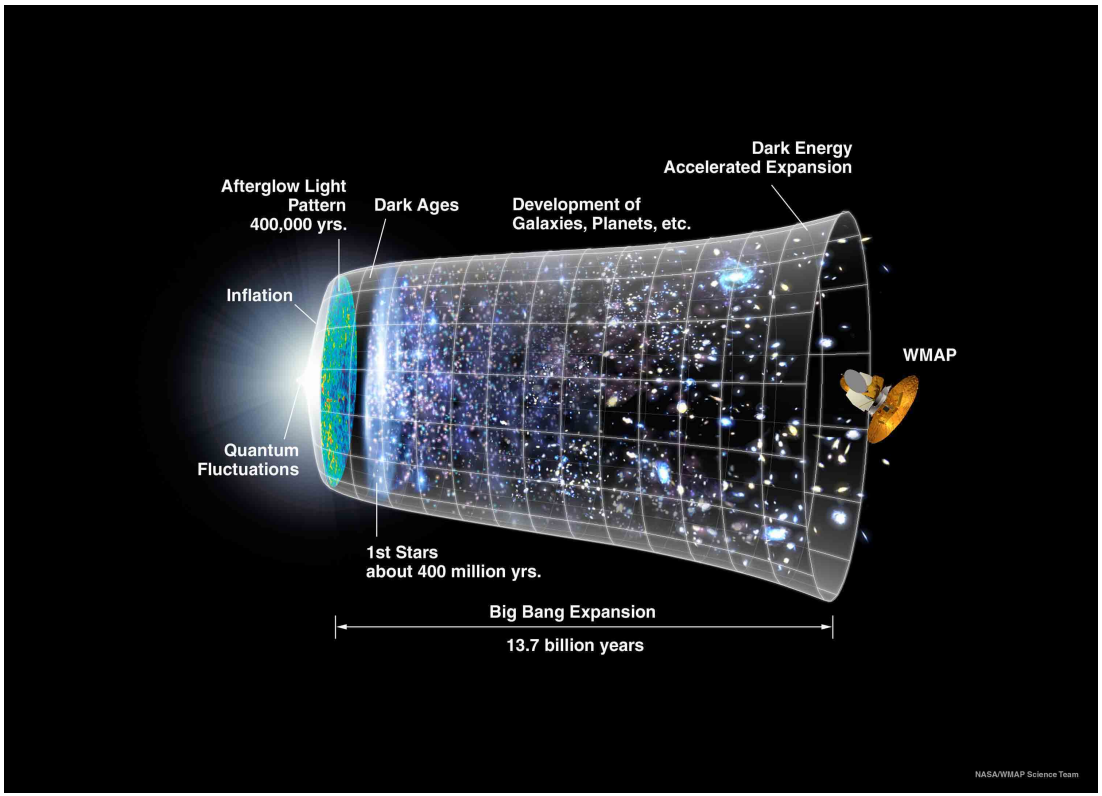
Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).
- La nucléosyhthèse (formation d'hélium,...)

Histoire thermique

Dans le passé l'univers n'a pas seulement été beaucoup plus dense qu'aujourd'hui mais aussi beaucoup plus chaud.

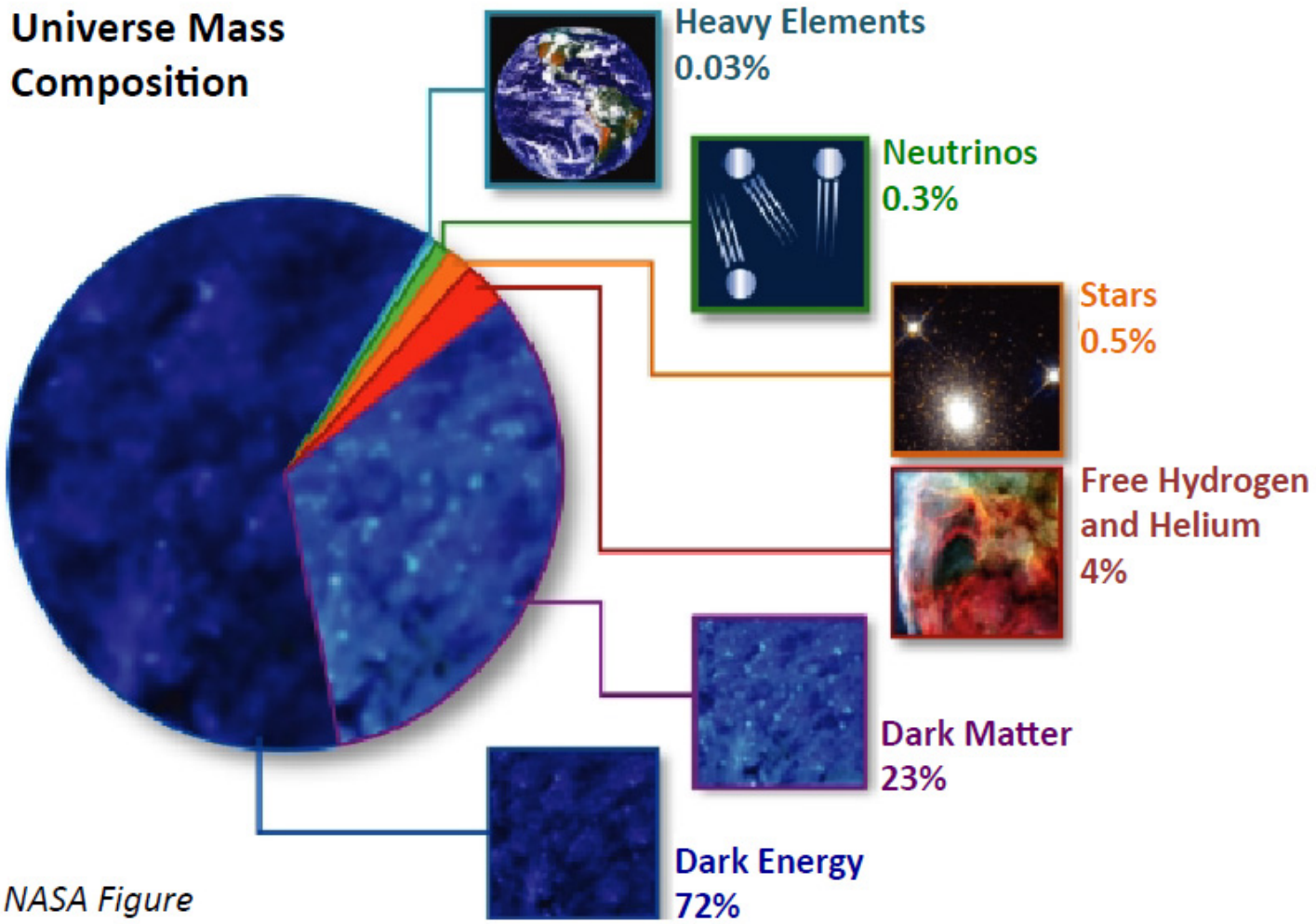


Age de l'Univers: $t_0 \simeq 13.7$ milliards d'années

Les événements les plus marquants dans l'univers chaud:

- La recombinaison (des électrons et protons en hydrogène neutre).
- La nucléosyhthèse (formation d'hélium,...)
- L'inflation ?

La composition cosmologique



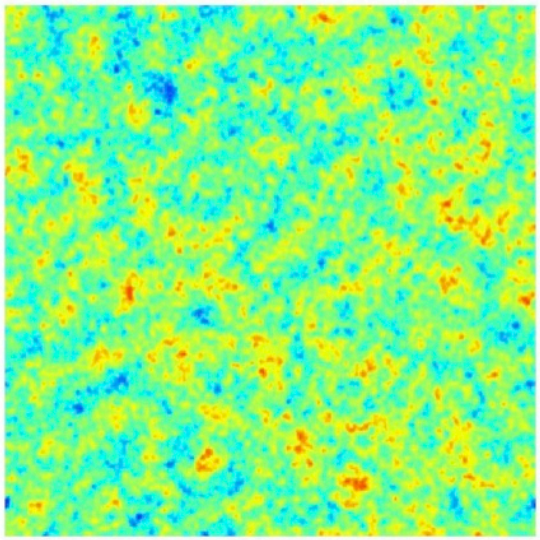
Evidence pour l'énergie sombre

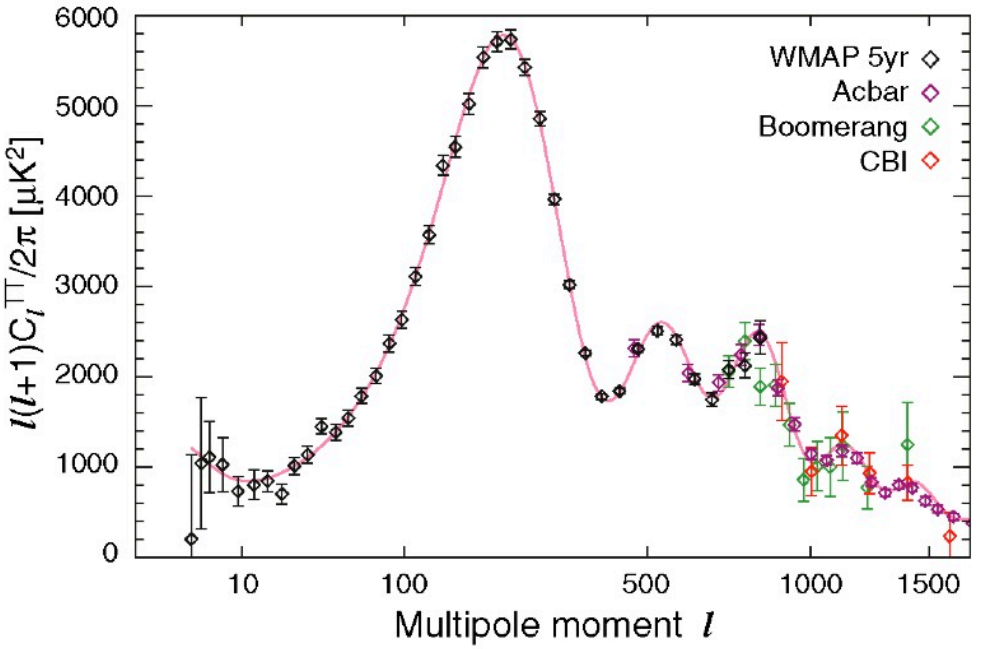
- Les distances des supernovae$\Rightarrow \dot{R}(t)$ est croissant pour $z \lesssim 0.5$ $(0 < z < 1.7)$

Evidence pour l'énergie sombre

- Les distances des supernovae$\Rightarrow \dot{R}(t)$ est croissant pour $z \lesssim 0.5$ $(0 < z < 1.7)$
- Les distances des pics acoustiques dans les anisotropies du fond cosmique micro-onde ($z = 1100$)

Evidence pour l'énergie sombre: pics acoustiques dans les anisotropies du fond cosmique micro-onde



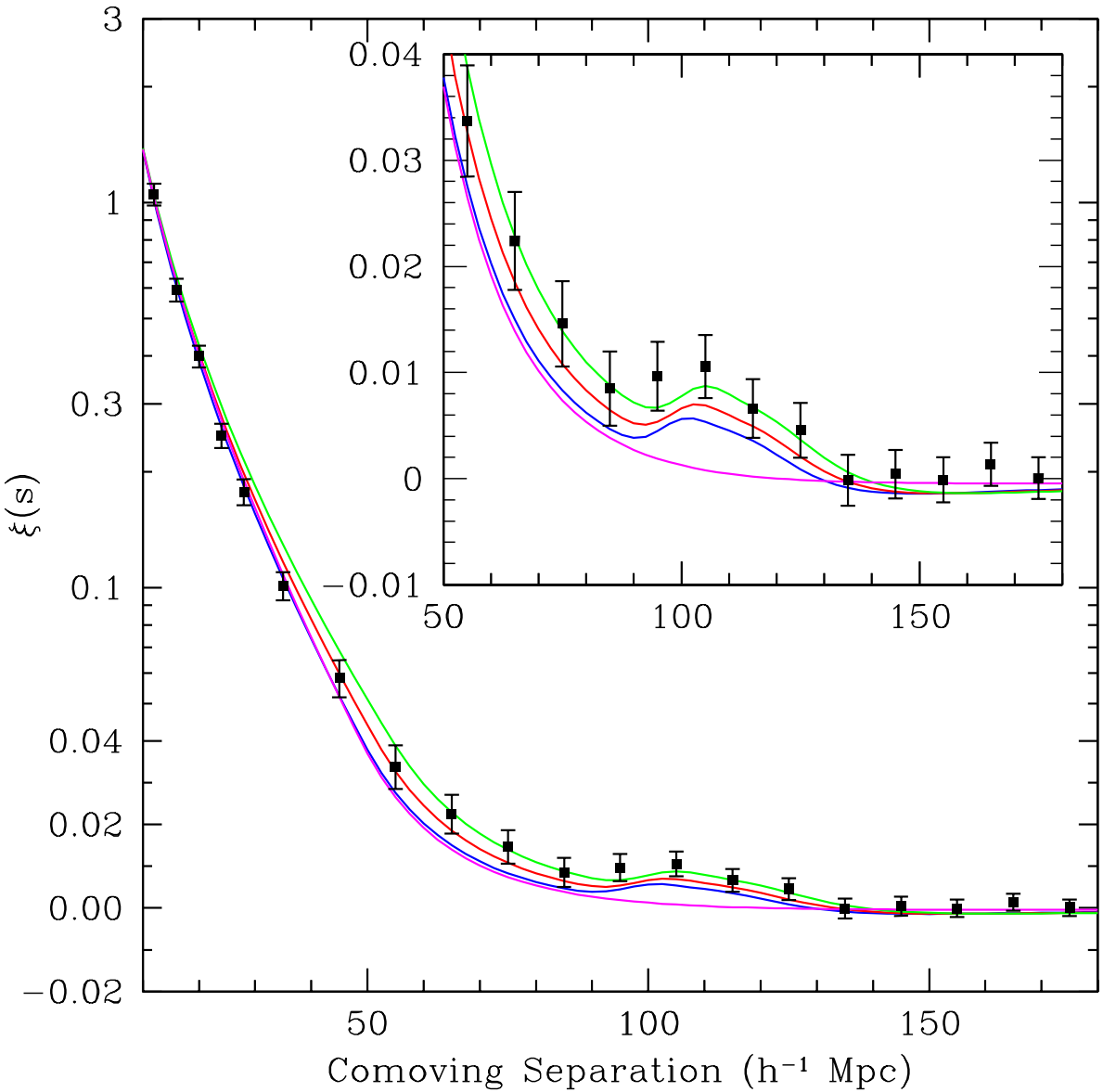


WMAP team

Evidence pour l'énergie sombre

- Les distances des supernovae$\Rightarrow \dot{R}(t)$ est croissant pour $z \lesssim 0.5$ $(0 < z < 1.7)$
- Les distances des pics acoustiques dans les anisotropies du fond cosmique micro-onde $(z = 1100)$
- Les oscillations acoustiques dans le spectre des galaxies (BAO) $(z \simeq 0.2 \quad z \simeq 0.35)$

Evidence pour l'énergie sombre: oscillations acoustiques BAO

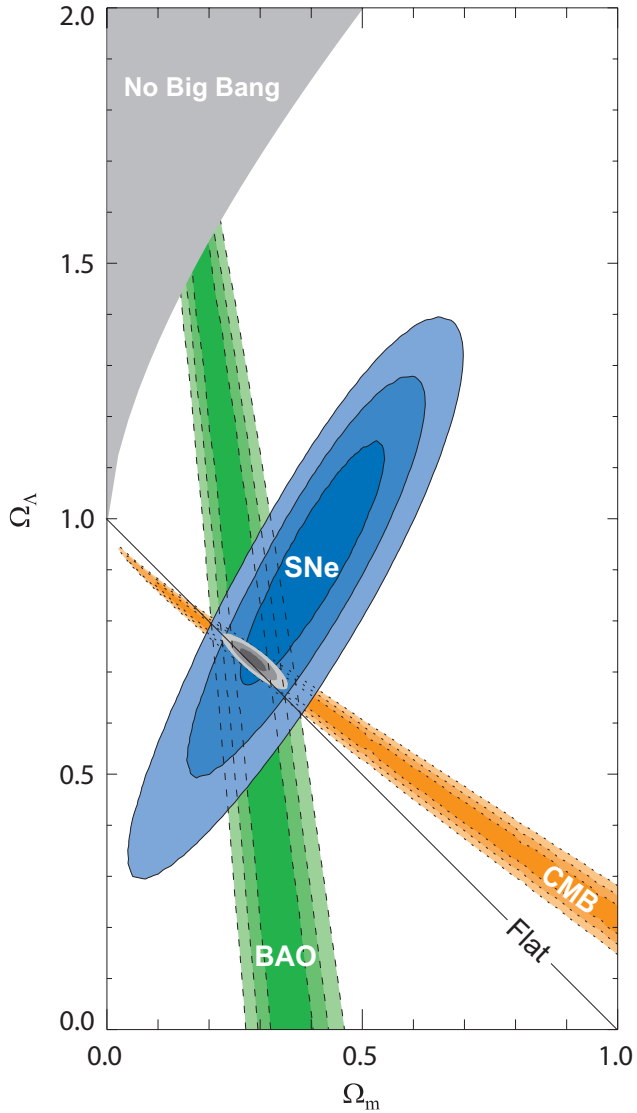


(Eisenstein et al. 2005)

Evidence pour l'énergie sombre

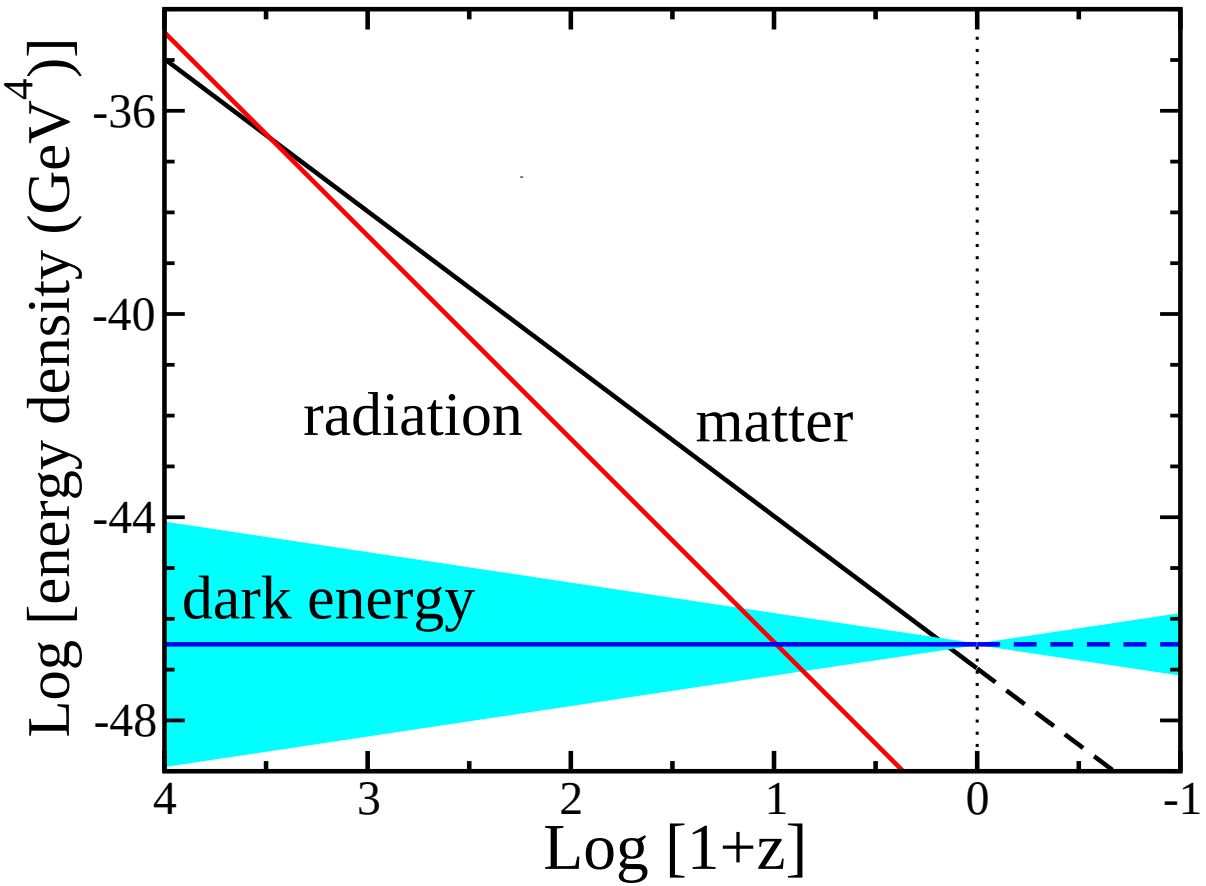
- Les distances des supernovae $\Rightarrow \dot{R}(t)$ est croissant pour $z \lesssim 0.5$ $(0 < z < 1.7)$
- Les distances des pics acoustiques dans les anisotropies du fond cosmique micro-onde $(z = 1100)$
- Les oscillations acoustiques dans le spectre des galaxies (BAO) $(z \simeq 0.2 \quad z \simeq 0.35)$
- L'abondance des amas de galaxies $\Rightarrow \quad \Omega_m \simeq 0.3.$

Notre Univers est en expansion accélérée



La fraction de matière et d'énergie sombre.

- Constante cosmologique/énergie du vide
  Elle représente un bon fit pour toutes les données mais on ne comprend pas sa valeur ni pourquoi elle commence à dominer 'maintenant'.



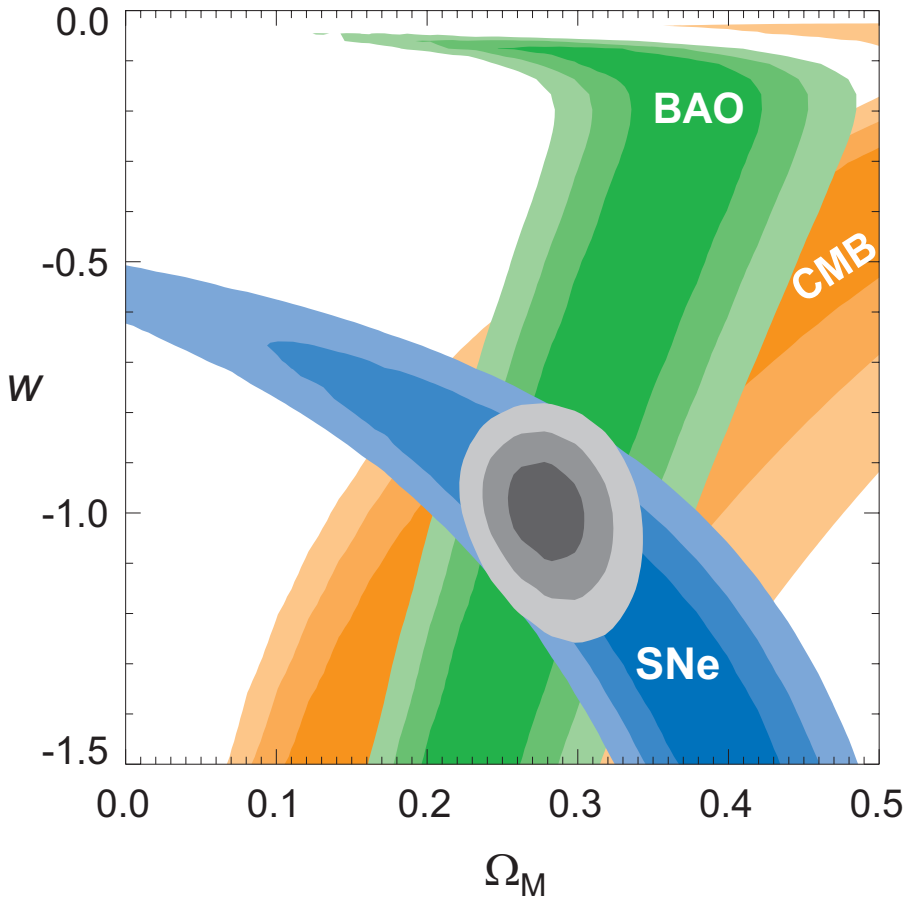
- Quintessence
  Un champ scalaire qui d'abord suit le comportement de la matière et de la radiation et de la matière et qui a commencé a dominer récemment.

modèles pour l'énergie sombre

- Quintessence
  Un champ scalaire qui d'abord suit le comportement de la matière et de la radiation et de la matière et qui a commencé a dominer récemment.
- Peut reproduire les données s'il de dévie pas trop du comportement d'une constante cosmologique.

modèles pour l'énergie sombre

- Quintessence
  Un champ scalaire qui d'abord suit le comportement de la matière et de la radiation et de la matière et qui a commencé a dominer récemment.
- Peut reproduire les données s'il de dévie pas trop du comportement d'une constante cosmologique.



$w = P/\rho_E$
=pression/(densité d'énergie)

modèles pour l'énergie sombre

- Modification de la gravitation à large distance, dimensions supplémentaires.

modèles pour l'énergie sombre

- Modification de la gravitation à large distance, dimensions supplémentaires.
- Backreaction: Si la formation des structure mène à des modifications suffisamment importantes de la géométrie, telle que la théorie des perturbations linéaires n'est pas suffisante, ceci pourrait modifier la relation entre distance et redshift...

Conclusions

- Observations SN
  Dix ans après la découverte de l'expansion accélérée les observations de plusieures centaines de supernovae la confirment fortement (plus que 5σ).

Conclusions

- Observations SN
  Dix ans après la découverte de l'expansion accélérée les observations de plusieures centaines de supernovae la confirment fortement (plus que 5σ).
- Données complémentaires
  Aussi d'autres observations (CMB, BAO, ...) requièrent une composante dominante avec une forte pression négative.

Conclusions

- Observations SN
  Dix ans après la découverte de l'expansion accélérée les observations de plusieures centaines de supernovae la confirment fortement (plus que 5σ).
- Données complémentaires
  Aussi d'autres observations (CMB, BAO, ...) requièrent une composante dominante avec une forte pression négative.
- Constante cosmologique
  Une constante cosmologique ou énergie du vide qui contribue environ 75% à la densité d'énergie de l'univers est en bon accord avec toutes les données.

Conclusions

- Observations SN
  Dix ans après la découverte de l'expansion accélérée les observations de plusieures centaines de supernovae la confirment fortement (plus que 5σ).
- Données complémentaires
  Aussi d'autres observations (CMB, BAO, ...) requièrent une composante dominante avec une forte pression négative.
- Constante cosmologique
  Une constante cosmologique ou énergie du vide qui contribue environ 75% à la densité d'énergie de l'univers est en bon accord avec toutes les données.
- Pression négative
  L'énergie sombre doit avoir une forte pression négative $P/c^2 = w\rho$ avec $w = -1 \pm 0.2$. Elle a commencé à dominer à un redshift de $z \simeq 0.4$ il y a environ 4 milliards d'années.

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Les observations sont claires et convaincantes, mais non-comprises:

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Les observations sont claires et convaincantes, mais non-comprises:
Indication à la gravitation quantique?

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Les observations sont claires et convaincantes, mais non-comprises:
Indication à la gravitation quantique?
Dimensions supplémentaires ?

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Les observations sont claires et convaincantes, mais non-comprises:
Indication à la gravitation quantique?
Dimensions supplémentaires ?
'Back reaction' ?

Conclusions

- Valeur sombre
  Toute estimation de l'énergie du vide à partir de la théorie des champs quantiques donne un résultat qui est maintes ordres de grandeur plus grand que la valeur mesurée.
- Théorie sombre
  Il existe une multitude de modèles pour l'énergie sombres, mais ils sont tous peu convaincants.
- Destin sombre
  Le futur de l'univers dépend fortement de la nature de l'énergie sombre. S'il s'agit d'une constante cosmologique, l'expansion de l'univers éloignera toute galaxie non-liée à nous tel que, dans une centaine de milliards d'années nous ne verrons plus que le groupe local de galaxies.

Les observations sont claires et convaincantes, mais non-comprises:
Indication à la gravitation quantique?
Dimensions supplémentaires ?
'Back reaction' ?

La cosmologie est un Eldorado pour les chercheurs qui aiment des problèmes ouverts!