

La découverte de l'accélération de l'univers ou comment mesurer les distances cosmiques

Christophe Ringeval

Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology
Institute of Mathematics and Physics

Louvain-la-Neuve, 25/11/2011

Le prix Nobel de Physique ?

- Prix décerné à des personnes “ayant apporté le plus grand bénéfice à l’humanité” dont...
- ... “une partie pour la découverte ou invention la plus importante en Physique” (A. Nobel)

L'expansion de l'Univers
Les supernovae de type Ia
Leur découverte



Photo: Ariel Zambelich, Copyright © Nobel Media AB

Saul Perlmutter



Photo: Belinda Pratten, Australian National University

Brian P. Schmidt



Photo: Homewood Photography

Adam G. Riess

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*”.

Plan

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Comment aller plus loin en redshift ?

Des super-chandelles standards

La masse de Chandrasekhar des naines blanches

Toutes de même luminosité ?

Leur découverte

L'accélération de l'expansion

La constante cosmologique

Une histoire de galaxies qui commence par la nôtre

L'expansion de l'Univers
Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge
Mesurer les distances
cosmiques
Made in Belgium

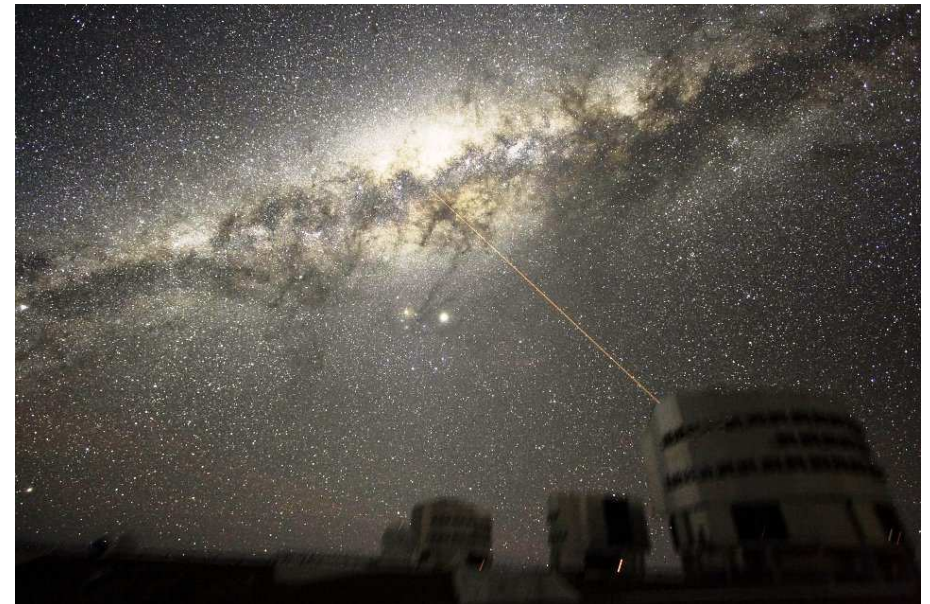
Les supernovae de type Ia

Leur découverte

Avec les yeux



Avec un appareil photo



Agglomération d'étoiles et poussières

L'expansion de l'Univers
 Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge
 Mesurer les distances
 cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia
Leur découverte

- T. Wright (1750): “La Voie Lactée est un disque d'étoiles liées entre elles par la gravitation”; “Certaines nébuleuses du ciel nocturne pourraient être des voies lactées séparées de la nôtre ?”
- Oui, et il y en a partout ! Avec un bon télescope:



Le décalage vers le rouge ou “redshift”

- Les galaxies les plus lointaines sont rouges ?

- Toutes les couleurs sont décalées de: $z = \frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{lab}} - 1 > 0$

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

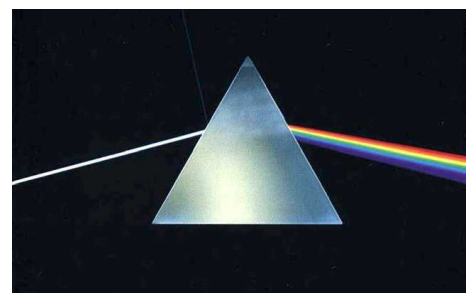
Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances cosmiques

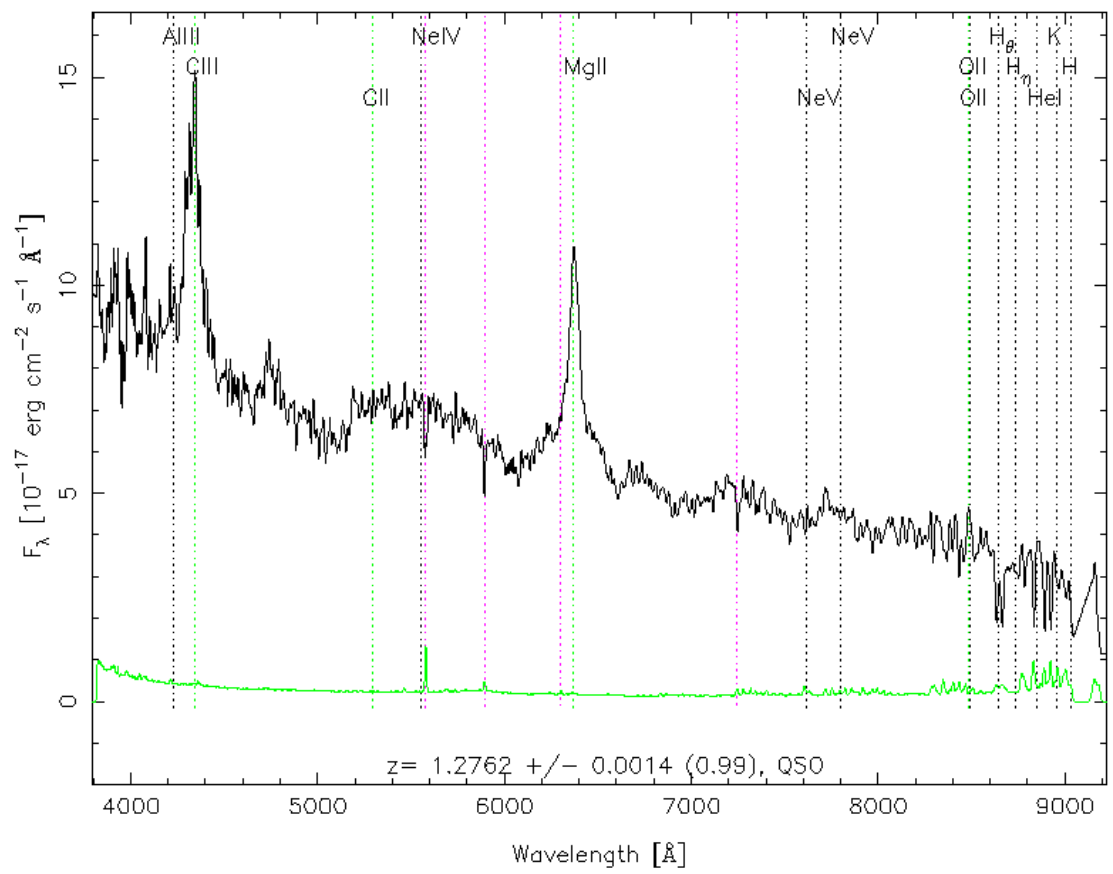
Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte



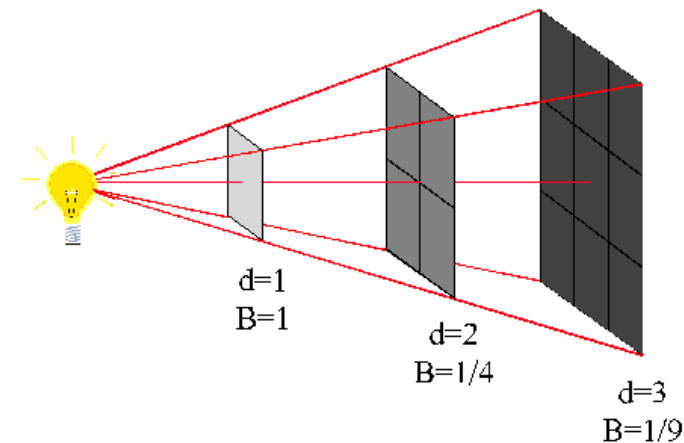
RA=18.84177, DEC=-0.82705, MJD=51789, Plate= 398, Fiber=298



La distance luminosité

L'expansion de l'Univers
 Une histoire de galaxies
 Le décalage vers le rouge
 Mesurer les distances cosmiques
 Made in Belgium
 Les supernovae de type Ia
 Leur découverte

- La brillance se dilue sur une sphère: $B = \frac{L}{4\pi D_L^2}$



- Il suffit d'en trouver une à distance connue ℓ et mesurer B

$$L = 4\pi B \ell^2 \quad \text{Watts}$$

- On peut maintenant mesurer la distance de toutes les autres

$$D_{L2} = \sqrt{\frac{L}{4\pi B_2}}$$

La méthode des échelles

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

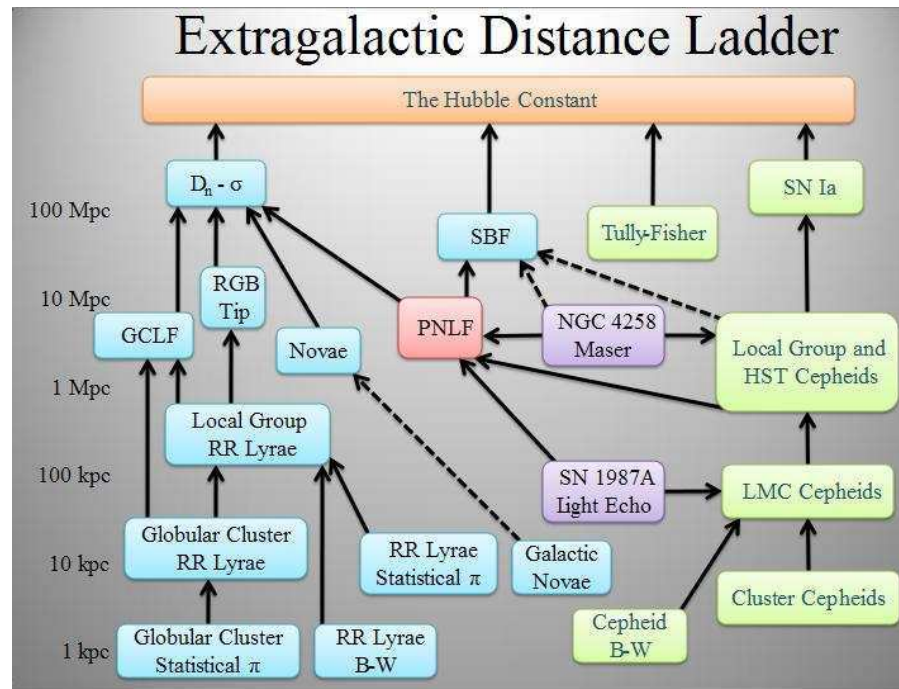
Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

- On fait ainsi de proche en proche (pas facile)



- En 1929, Hubble utilise des étoiles variables (Céphéïdes) comme chandelles standards et mesure D_L des galaxies lointaines

La loi de Hubble

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

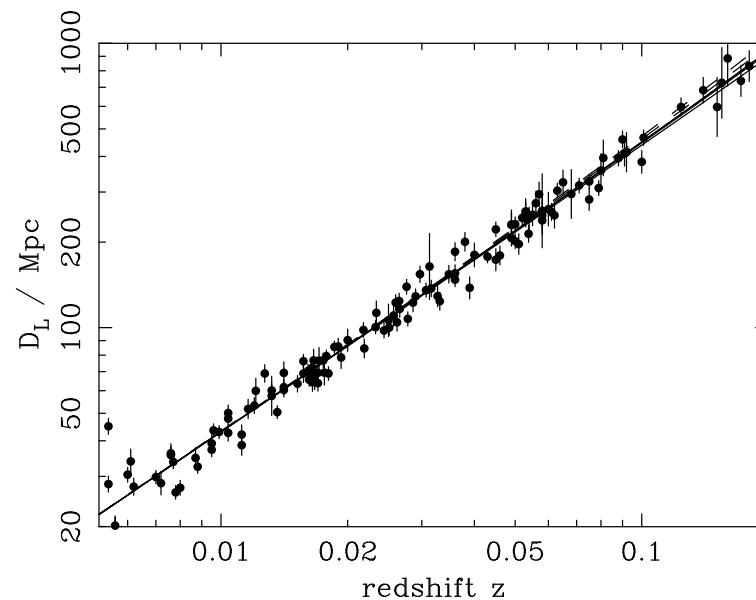
Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

- La distance luminosité est proportionnelle au redshift: $D_L = H_0^{-1} z$



- Interprétations classiques foireuses
 - ◆ Redshift = effet Doppler donc les galaxies lointaines nous fuient
 - ◆ Elles nous fuient selon la loi de Hubble, plus elles sont éloignées, plus elles s'échappent rapidement !

La solution made in Belgium

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies
Le décalage vers le rouge
Mesurer les distances
cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

- Prédit et compris par Georges Lemaître en 1927 (deux ans avant Hubble !)
 - ◆ Le redshift est la signature attendue de l'expansion de l'espace-temps
 - ◆ L'expansion de l'Univers est une conséquence naturelle de la loi de Gravitation aux distances cosmologiques
 - ◆ Analogie du pauvre: chez Newton, les planètes orbitent; chez Einstein, les distances intergalactiques augmentent !
- L'étirement de l'espace et du temps est donné par une fonction universelle, le facteur d'échelle $a(t)$
- Le facteur d'échelle $a(t)$ est complètement déterminé pourvu que l'on connaisse le contenu en énergie et impulsion de l'Univers à un instant donné

La distance luminosité chez Lemaître

■ Un extrait de LPHY2126

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

6) Corrections à la loi de Hubble ⁽³⁾

Rappel: observations $D_L \propto z$, peut-on la rehausser explicitement

$$a(t) = a(t_0) + \dot{a}_0(t-t_0) + \frac{1}{2}\ddot{a}_0(t-t_0)^2 + O(t-t_0)^3$$

On a $H_0 = \frac{\dot{a}_0}{a_0}$, paramètre de Hubble aujourd'hui

on définit $q_0 \equiv -\frac{a_0 \ddot{a}_0}{\dot{a}_0^2}$, paramètre de décelération aujourd'hui

$$\Rightarrow \frac{a(t)}{a_0} = 1 + H_0(t-t_0) - \frac{q_0 H_0^2}{2}(t-t_0)^2 + O(t-t_0)^3$$

$$\frac{1}{1+z} \Rightarrow \frac{z}{1+z} = H_0(t_0-t) + \frac{q_0 H_0^2}{2}(t_0-t)^2 + O(z^3)$$

Donne $z(t)$, on peut l'inverser pour avoir $t(z)$

$$\& \text{Au carré} \Rightarrow \frac{z^2}{(1+z)^2} = H_0^2(t_0-t)^2 + O(t-t_0)^3$$

$$\Rightarrow H_0(t_0-t) = \frac{z}{1+z} - \frac{q_0}{2} \frac{z^2}{(1+z)^2} + O(z^3)$$

$$\Rightarrow H_0(t_0-t) = z - \left(1 + \frac{q_0}{2}\right) z^2 + O(z^3)$$

$$\text{On a } D_L = a_0(1+z) f(x) \text{ avec } x = \int_{t_*}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} \Rightarrow$$

$$a_0 x = \int_t^{t_0} \frac{dt}{1 + H_0(t-t_0) + O(t-t_0)^2} = \int_t^{t_0} [1 - H_0(t-t_0) + O(t-t_0)^2]^{-1} dt$$

$$= t_0 - t + \frac{1}{2} H_0(t-t_0)^2 + O(t-t_0)^3$$

$$\text{On inverse de } z \quad a_0 x = \frac{1+z}{H_0} - \frac{1+q_0}{2H_0} z^2 \Rightarrow$$

$$a_0 x = \frac{z}{H_0} \left[1 - \frac{1+q_0}{2} z \right] + O(z^3)$$

Pour $z \ll 1$ ($\Leftrightarrow t \approx t_0$) on a $f(x) = x + O(x^3)$

$$\Rightarrow D_L = \frac{(1+z) z}{H_0} \left[1 - \frac{1+q_0}{2} z \right] + O(z^3) \Leftrightarrow$$

$$D_L = \frac{z}{H_0} \left[1 + \frac{1-q_0}{2} z \right] + O(z^3)$$

Pour $z \ll 1$, à l'ordre le + bas on retrouve la loi de Hubble

$$D_L = \frac{1}{H_0} z$$

Les corrections à la loi de Hubble sont dans le paramètre q_0 , de décelération: la loi de Hubble n'est pas exacte! D'ailleurs $H = \frac{\dot{a}}{a}$ et 1 fait !!

■ C'est la loi de Hubble-Lemaître, plus des petites déviations: q_0

Le paramètre de déccélération q_0

- Résolution des équations d'Einstein [Friedmann (1924) et Lemaître (1927)]

$$q_0 = \frac{\Omega_m}{2}$$

- Mesurer q_0 permet de déterminer la densité moyenne de matière dans l'Univers Ω_m
 - ◆ Nécessite de tester $D_L(z)$ précisément pour détecter les corrections
 - ◆ Et donc z le plus grand possible (pas facile)

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances
cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

Le paramètre de déccélération q_0

- Résolution des équations d'Einstein [Friedmann (1924) et Lemaître (1927)]

$$q_0 = \frac{\Omega_m}{2} - \Omega_\Lambda$$

- Mesurer q_0 permet de déterminer la densité moyenne de matière dans l'Univers Ω_m , si la constante cosmologique s'annule
 - ◆ Nécessite de tester $D_L(z)$ précisément pour détecter les corrections
 - ◆ Et donc z le plus grand possible (pas facile)
- À moins que l'espace-temps lui-même ne gravite et possède une constante cosmologique non-nulle Ω_Λ (considéré par Einstein lui-même)

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

Le paramètre de déccélération q_0

- Résolution des équations d'Einstein [Friedmann (1924) et Lemaître (1927)]

$$q_0 = \frac{\Omega_m}{2} - \Omega_\Lambda$$

- Mesurer q_0 permet de déterminer la densité moyenne de matière dans l'Univers Ω_m , si la constante cosmologique s'annule
 - ◆ Nécessite de tester $D_L(z)$ précisément pour détecter les corrections
 - ◆ Et donc z le plus grand possible (pas facile)
- À moins que l'espace-temps lui-même ne gravite et possède une constante cosmologique non-nulle Ω_Λ (considéré par Einstein lui-même)
- **Big Surprise**

A. Riess et al., *Astrophys. J.*, (1998): "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant"

S. Perlmutter et al., *Astrophys. J.* (1999): "Measurement of Ω and Λ from 42 high-redshift supernovae"

L'expansion de l'Univers

Une histoire de galaxies

Le décalage vers le rouge

Mesurer les distances cosmiques

Made in Belgium

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

Comment aller plus loin en redshift ?

- Avec des super-chandelles de 10^{37} Watts (10^{11} soleils)
- Supernovae: explosion thermonucléaire d'un astre en fin de vie



- Pendant quelques semaines, brille autant qu'une galaxie toute entière

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia
Comment aller plus loin
en redshift ?

Des super-chandelles
standards

La masse de
Chandrasekhar des naines
blanches

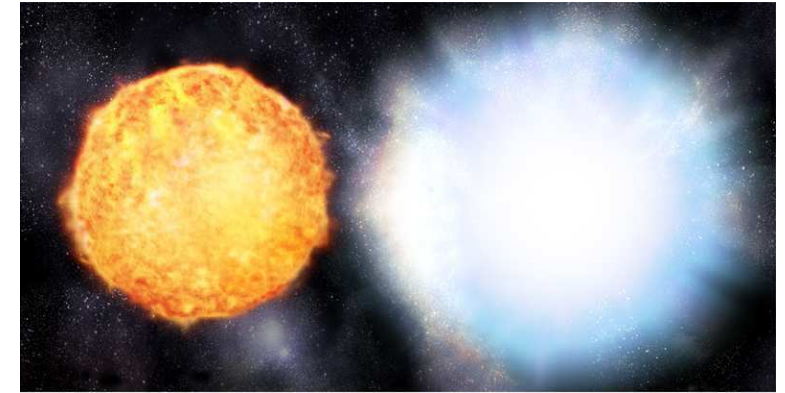
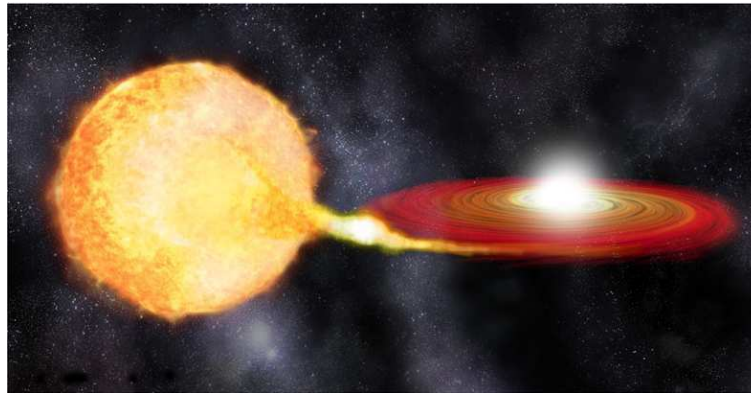
Toutes de même
luminosité ?

Leur découverte

Des super-chandelles standards

- Les supernovae de **type Ia**

- ◆ Explosion d'une "naine blanche" dans un système binaire



- ◆ Rare: 1 à 2 tous les mille ans / galaxie

- Naine blanche = cadavre chaud d'étoile banale

- ◆ Densité énorme (1 tonne/cm^3 , masse du Soleil dans la taille de la Terre), formée d'un gaz d'électrons et de noyaux d'atome (oxygène, carbone)

- ◆ Effondrement gravitationnel contrecarré par la pression de Fermi des électrons (force quantique)

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

Comment aller plus loin en redshift ?

Des super-chandelles standards

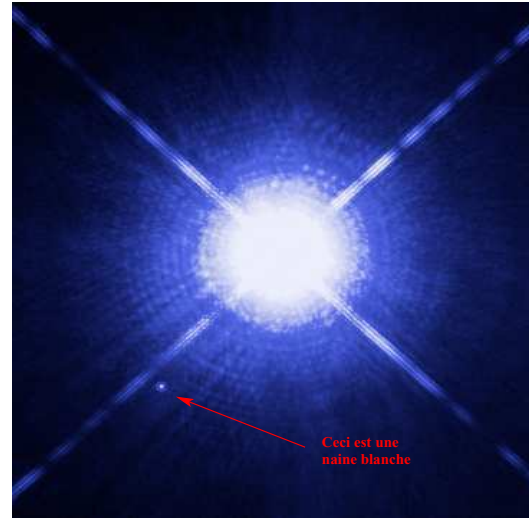
La masse de Chandrasekhar des naines blanches

Toutes de même luminosité ?

Leur découverte

La masse de Chandrasekhar des naines blanches

- Un exemple de naine blanche: Sirius B, autour de l'étoile la plus brillante du ciel



- L'équilibre entre gravité et force quantique a ses limites
 - ◆ S. Chandrasekhar, Prix Nobel 1983

$$M_{\max} = \sqrt{3\pi} \frac{M_{\text{Pl}}^3}{\mu_e^2 m_p^2} \simeq 1.4 M_{\odot}$$

- ◆ Lorsque la limite est atteinte... (simulation numérique)

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

Comment aller plus loin en redshift ?

Des super-chandelles standards

La masse de Chandrasekhar des naines blanches

Toutes de même luminosité ?

Leur découverte

Toutes de même luminosité ?

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

Comment aller plus loin en redshift ?

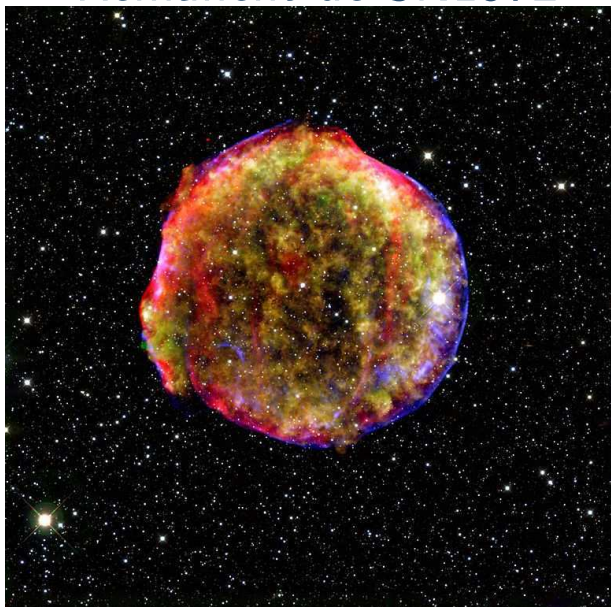
Des super-chandelles standards

La masse de Chandrasekhar des naines blanches

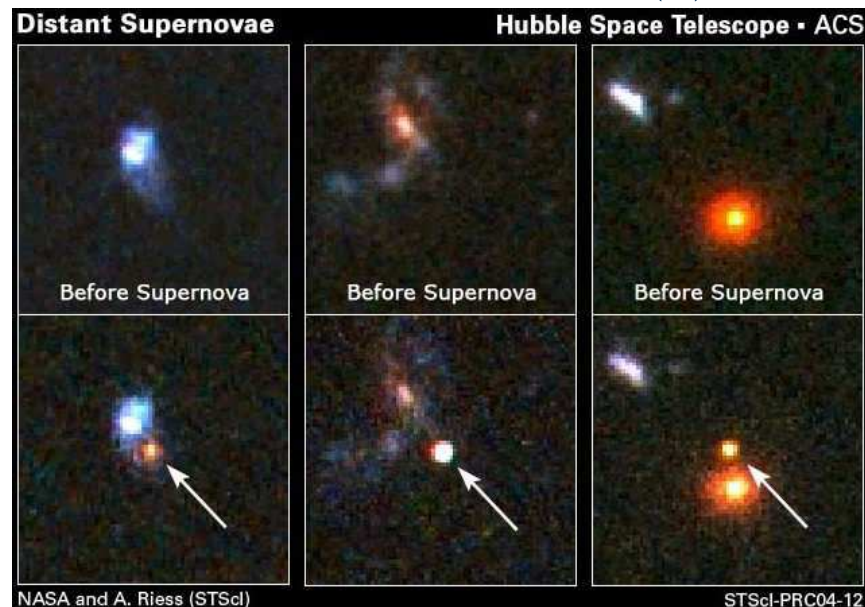
Toutes de même luminosité ?

Leur découverte

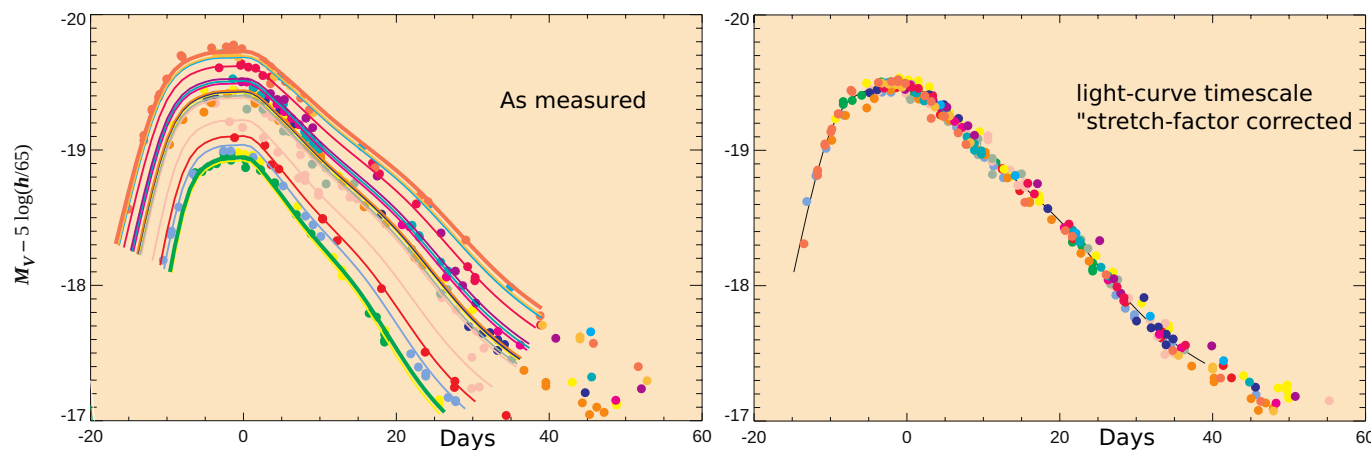
Remanent de SN1572



Celles utilisées pour $D_L(z)$



■ Courbes de luminosité



L'accélération de l'expansion

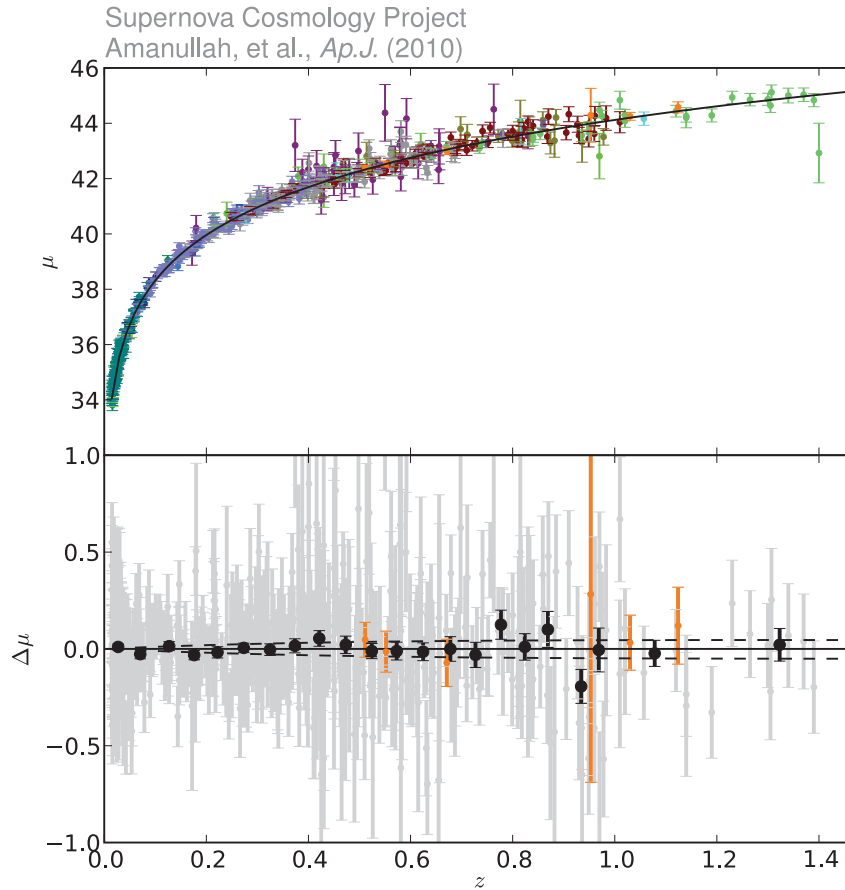
L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

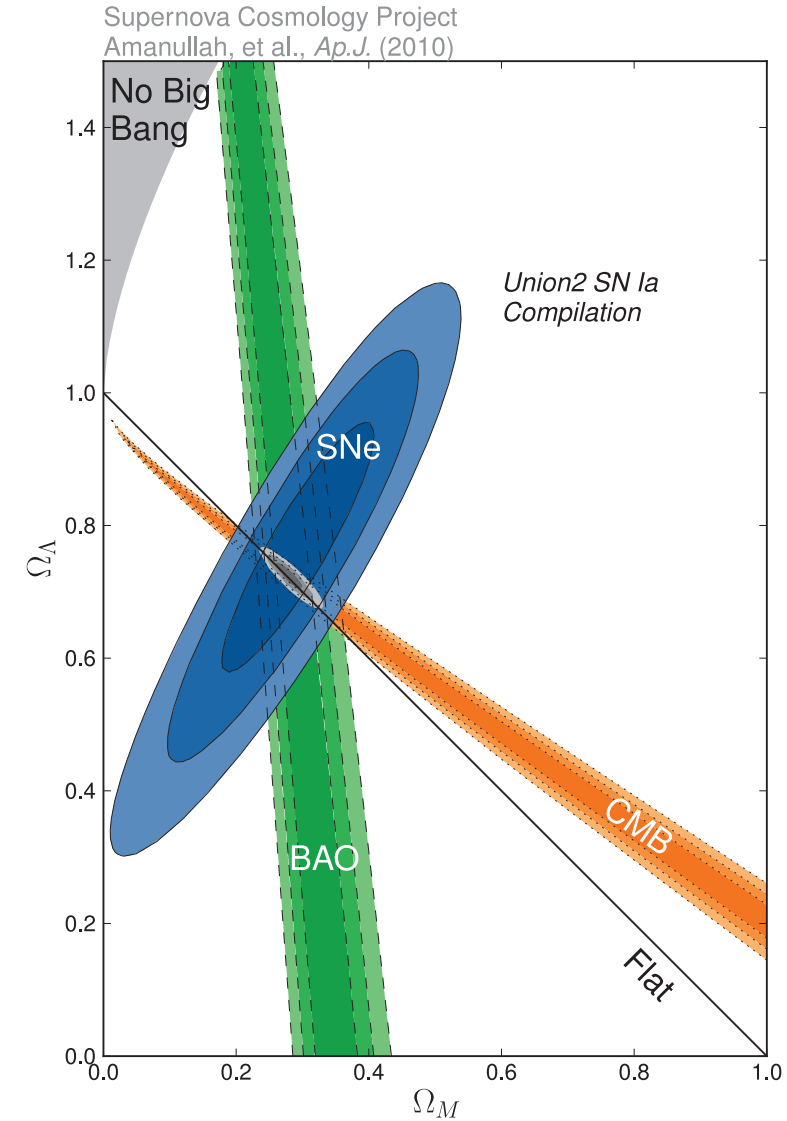
Leur découverte
L'accélération de
l'expansion

La constante
cosmologique

De la distance luminosité



On en déduit $q_0 < 0$



La constante cosmologique

L'expansion de l'Univers

Les supernovae de type Ia

Leur découverte

L'accélération de
l'expansion

La constante
cosmologique

- Aujourd'hui, la dynamique de l'univers est dominé par Ω_Λ
- Il y en a "plus" que de matière: $\Omega_\Lambda > \Omega_m$
- Son origine est actuellement inconnue:
 - ◆ Pour Einstein, Λ est la tension intrinsèque de l'espace-temps
 - ◆ Pourrait être la gravitation du vide quantique en physique des particules. La valeur prédite est trop grande :(
 - ◆ Pourrait être une nouvelle forme de matière, encore non-détecté sur Terre (Quintessence)
- Il va y avoir de l'action en Cosmologie dans les années à venir !
 - ◆ L'UCL en fera-t-elle partie ?