

# **Les Supernova de type 1a et l'accélération de l'expansion de l'univers**

***Serge Chaudourne***

*UJF OSUG Diffusion des Savoirs - TUE 353 Physique des étoiles*

# L'expansion de l'univers : Hubble 1929

*A RELATION BETWEEN DISTANCE AND RADIAL VELOCITY  
AMONG EXTRA-GALACTIC NEBULAE*

BY EDWIN HUBBLE

MOUNT WILSON OBSERVATORY, CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

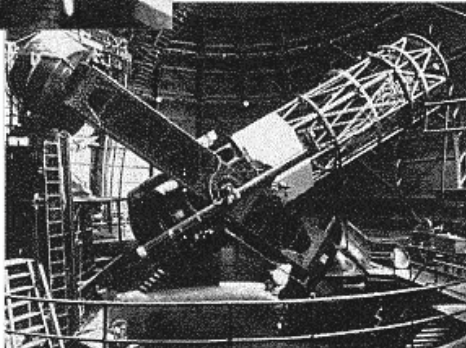
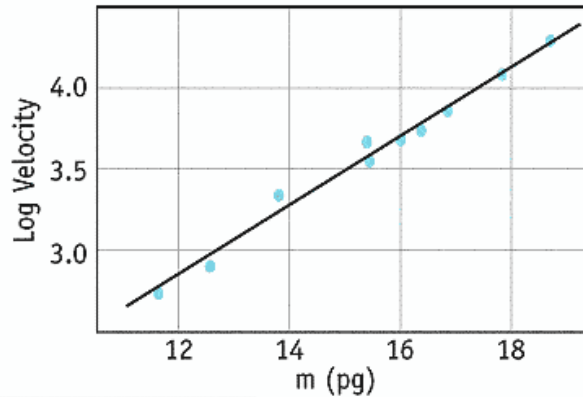
Communicated January 17, 1929

$$v = H_0 \cdot d$$

## DISCOVERY OF EXPANDING UNIVERSE



Edwin Hubble



Mt. Wilson  
100 Inch  
Telescope

## Une révélation

L'univers a une  
histoire.

Elle a commencé  
par le  
« Big-Bang »

**Prédiction théorique  
de Lemaître 1927**

Source image : guydoyen.fr

# Vérifier la relation de Hubble...

Pour cela il faut mesurer indépendamment :

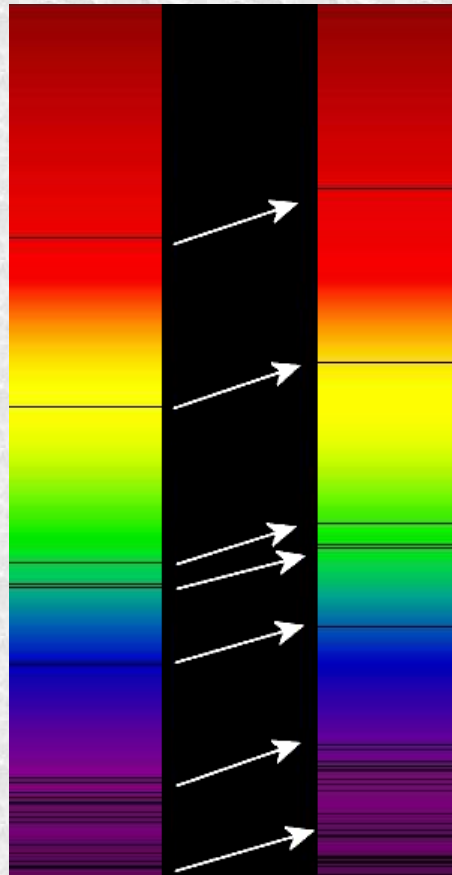
## La vitesse

*Redshift*

$$z \equiv \frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda}$$

$$z \simeq \frac{v}{c} \quad \text{si } z \ll 1$$

assimilable à un effet Doppler



Source image : Wikipedia

## La distance

$$f = \frac{L}{4\pi d_L^2}$$

$$m = -2,5 \log f + C = -2,5 \log L + 5 \log d_L + C'$$



# Les supernova type Ia

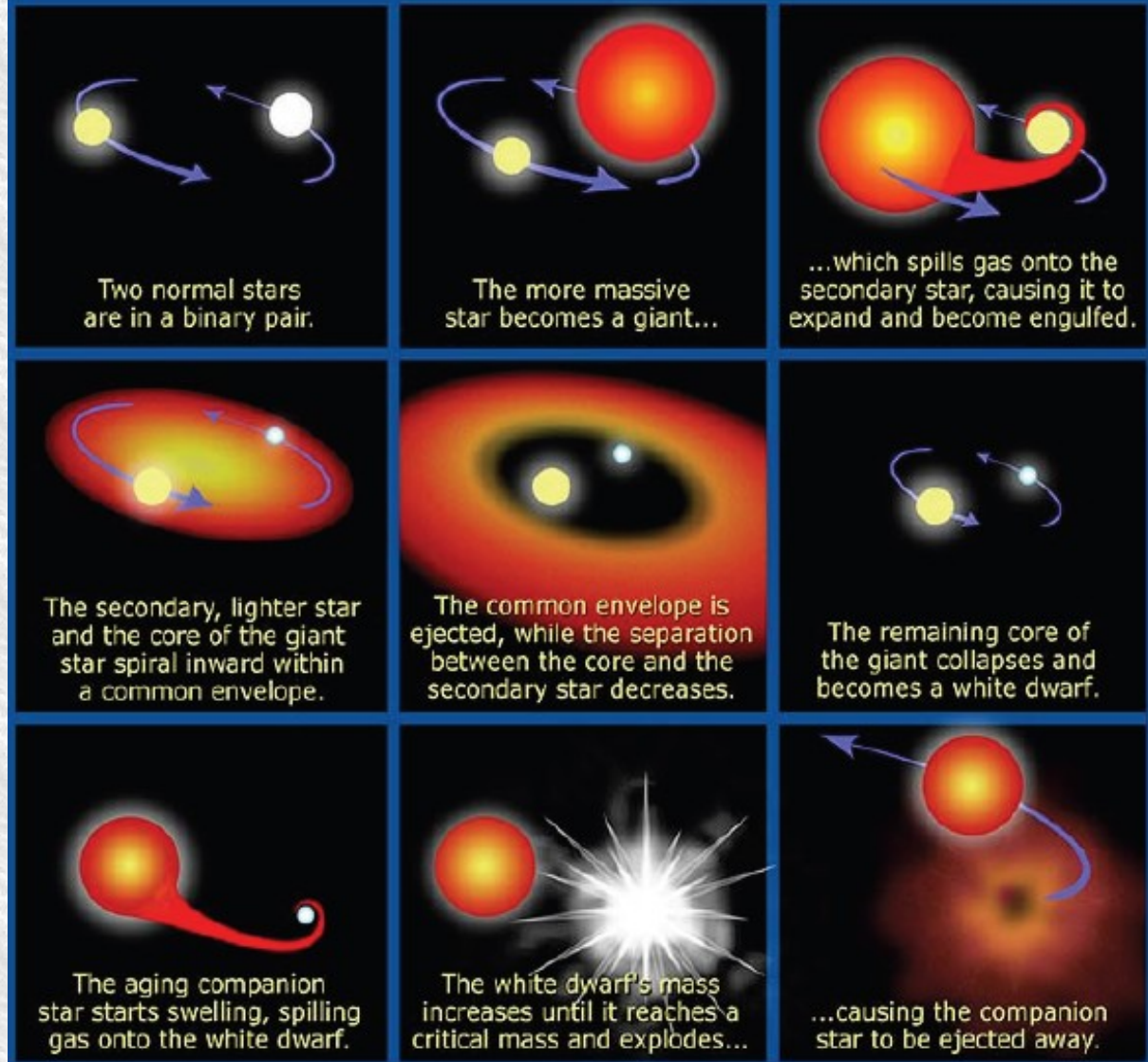
L'explosion thermonucléaire se déclenche lorsque la **masse de Chandrasekar** ( $\cong 1,4 M_{\odot}$ ) est atteinte.

Pour toutes les SN Ia, la même masse explose de la même manière  $\Rightarrow$  **même luminosité**

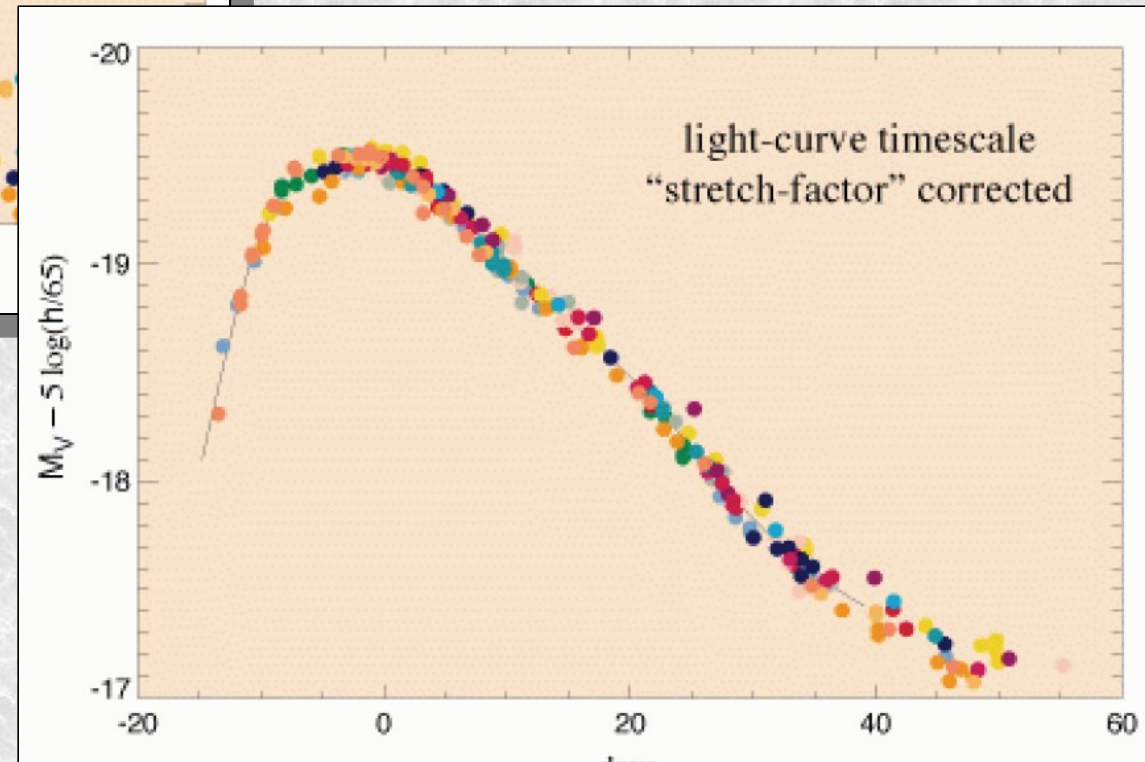
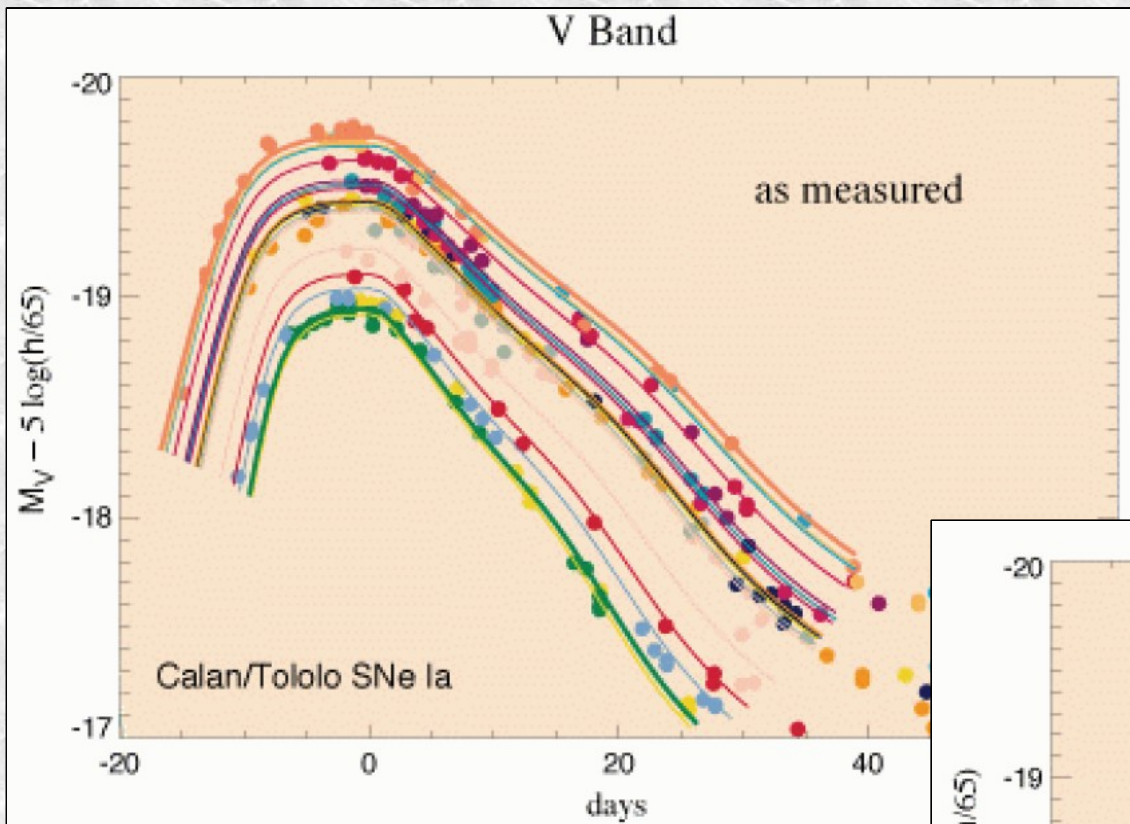


La supernova SN 1994D et la galaxie NGC4526

## The progenitor of a Type Ia supernova



# Mesure de distance par les SN 1a



# Que se passe-t-il aux distances cosmologiques ?

$$z > 0,3 \quad \text{ou} \quad d > 1250 \text{ Mpc}$$

$$1250 \text{ Mpc} \simeq 4 \cdot 10^9 \text{ al}$$

- Le signal qui nous parvient représente l'état de la source il y a **4 Milliards d'années !**
- Pendant le trajet de la lumière, **l'univers s'est dilaté**
- **Le temps et l'espace sont liés** en raison de la vitesse finie de la lumière
- Une interprétation **relativiste** est nécessaire (Einstein, 1913)

**Hypothèse cosmologique faible** : univers isotrope en tout point

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - k r^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right]$$

# L'univers relativiste

$z$  et  $H_0$  sont liés à l'évolution du facteur d'échelle de l'univers

$$\frac{a_0}{a} = 1 + z$$

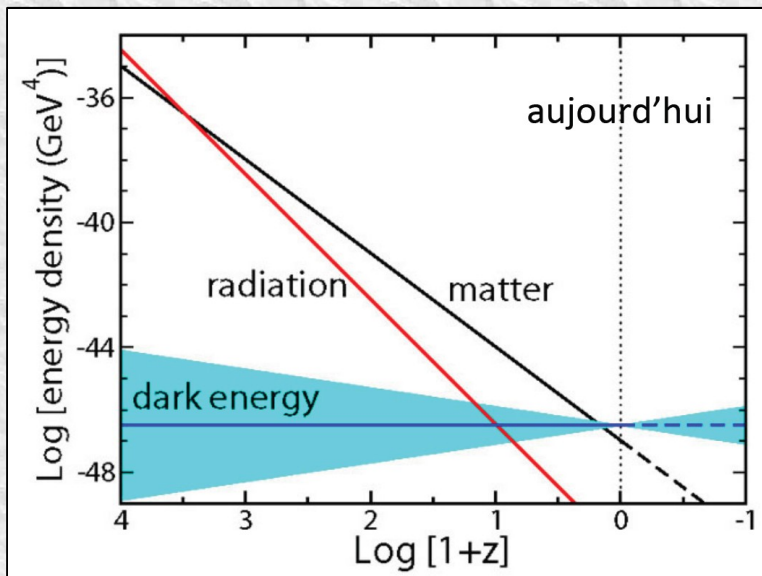
$$H_0 = \frac{\dot{a}_0}{a_0}$$

L'évolution du facteur d'échelle de l'univers est déterminé par les équations de Friedmann – Lemaître

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

$$\frac{d(\rho c^2 a^3)}{dt} = -p \frac{d(a^3)}{dt}$$

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



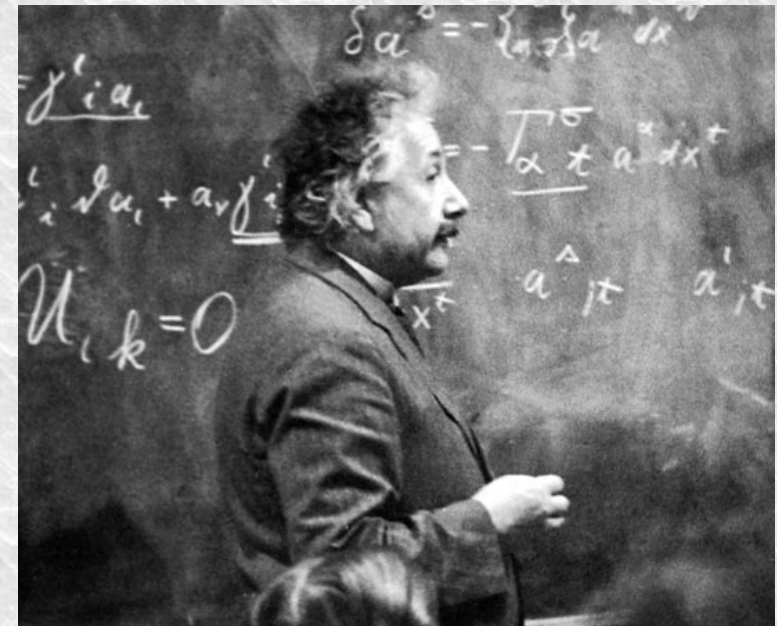
$$p = w \rho c^2$$

$$w_r = \frac{1}{3}$$

$$w_m = 0$$

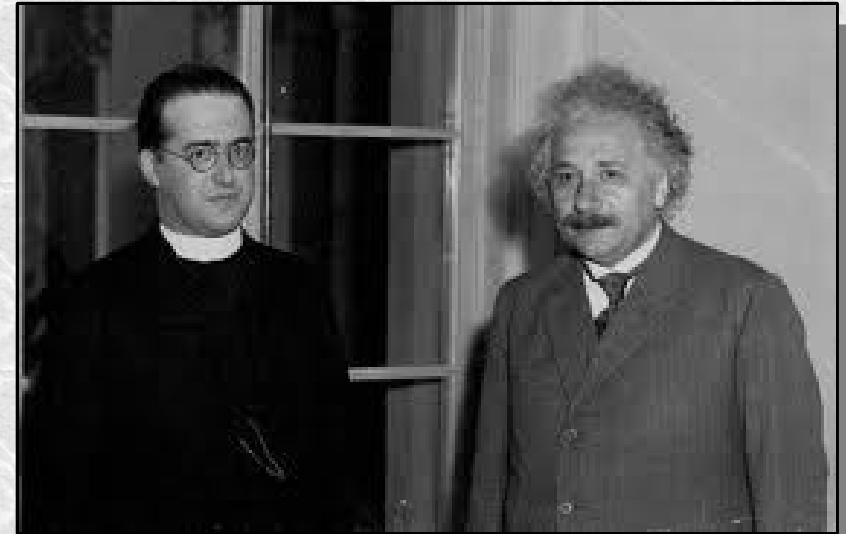
$$\rho = C_r a^{-4} + C_m a^{-3} + C_\Lambda$$

Aujourd'hui  $\rho_r$  est négligeable



# Mesure de l'expansion dans l'univers relativiste

Paramètre d'expansion à  $t_0$ :  $q_0 \equiv -\frac{\ddot{a}_0 a_0}{\dot{a}_0^2}$   
 $q_0 > 0$  décélération  
 $q_0 < 0$  accélération



Forme adimensionnelle  
des équations de Friedmann – Lemaître

$$\rho_c = \frac{3 H_0^2}{8 \pi G}$$

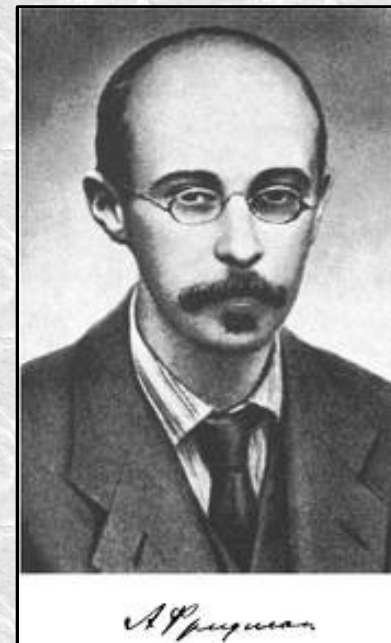
$$\Omega_M = \frac{\rho_0}{\rho_c} = \frac{8 \pi G \rho_0}{3 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda = \frac{\Lambda}{3 H_0^2}$$

$$\Omega_k = -\frac{k c^2}{a_0^2 H_0^2} = -\frac{k c^2}{\dot{a}_0^2}$$

$$\Omega_M - 2 \Omega_\Lambda = 2 q_0$$

$$\Omega_M + \Omega_\Lambda + \Omega_k = 1$$





# Estimation des paramètres cosmologiques à partir des SN Ia

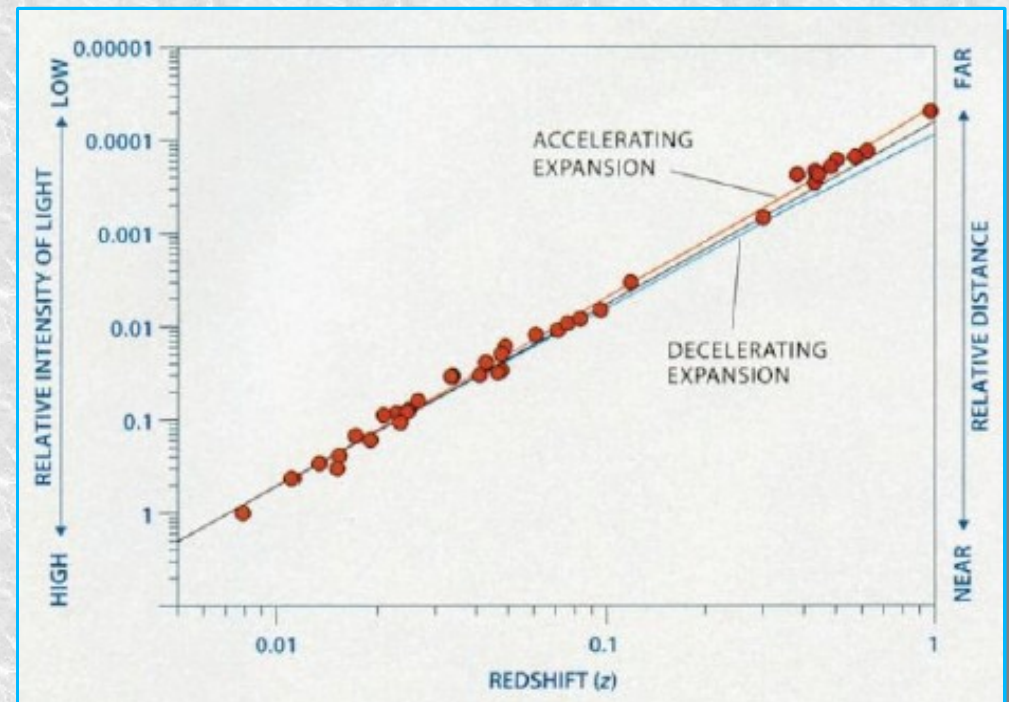
La distance  $d_L$  mesurée par les SN Ia dépend des paramètres cosmologiques !

$$d_L = \frac{1+z}{H_0 \sqrt{|\Omega_k|}} S \left( c \sqrt{|\Omega_k|} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M (1+z')^3 + \Omega_k (1+z')^2 + \Omega_\Lambda}} \right)$$

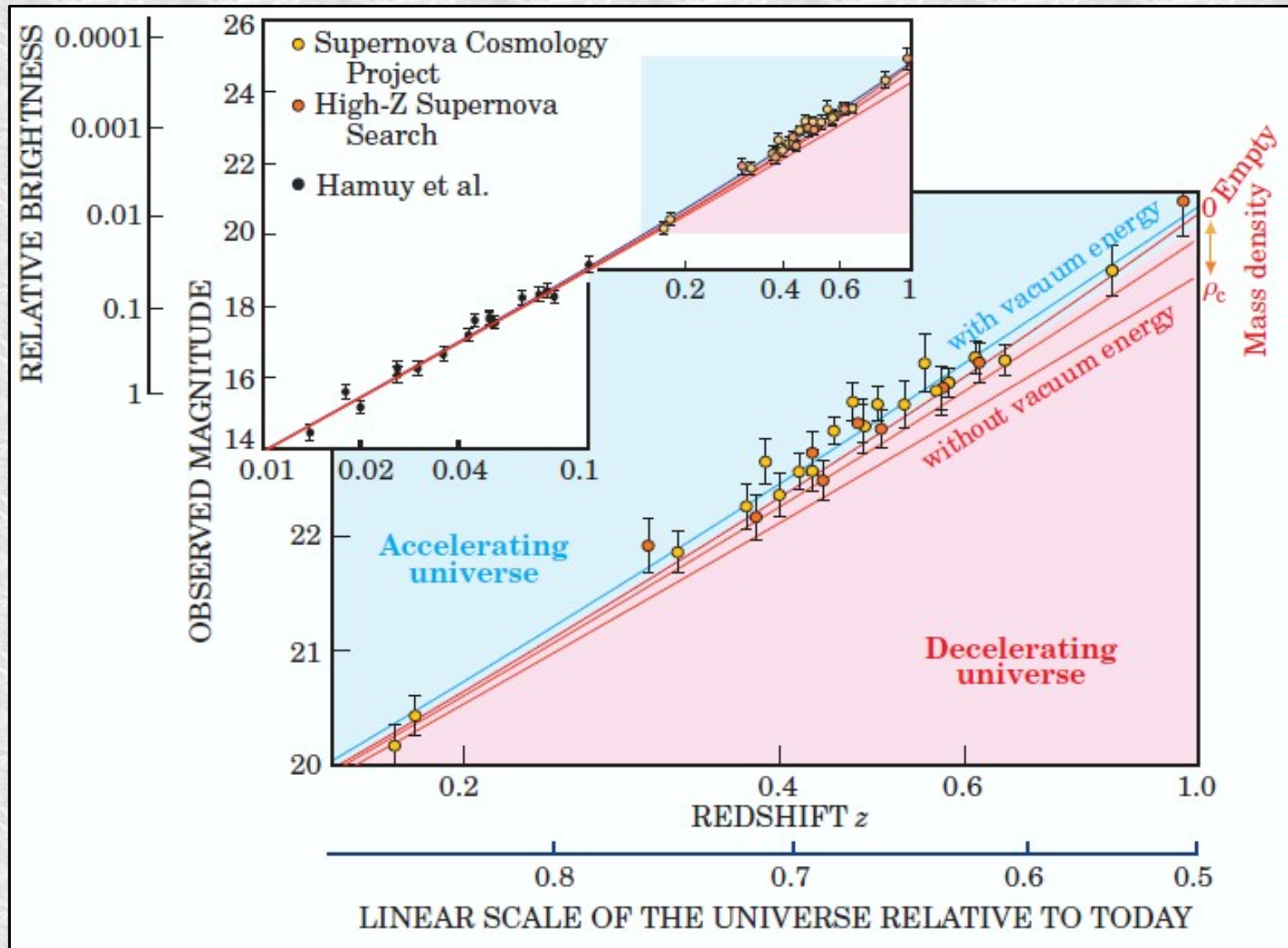
$$S(u) = \sin u \text{ si } \Omega_k < 0 \quad S(u) = u \text{ si } \Omega_k = 0 \quad S(u) = \sinh u \text{ si } \Omega_k > 0$$

Si  $z$  est suffisamment petit :

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

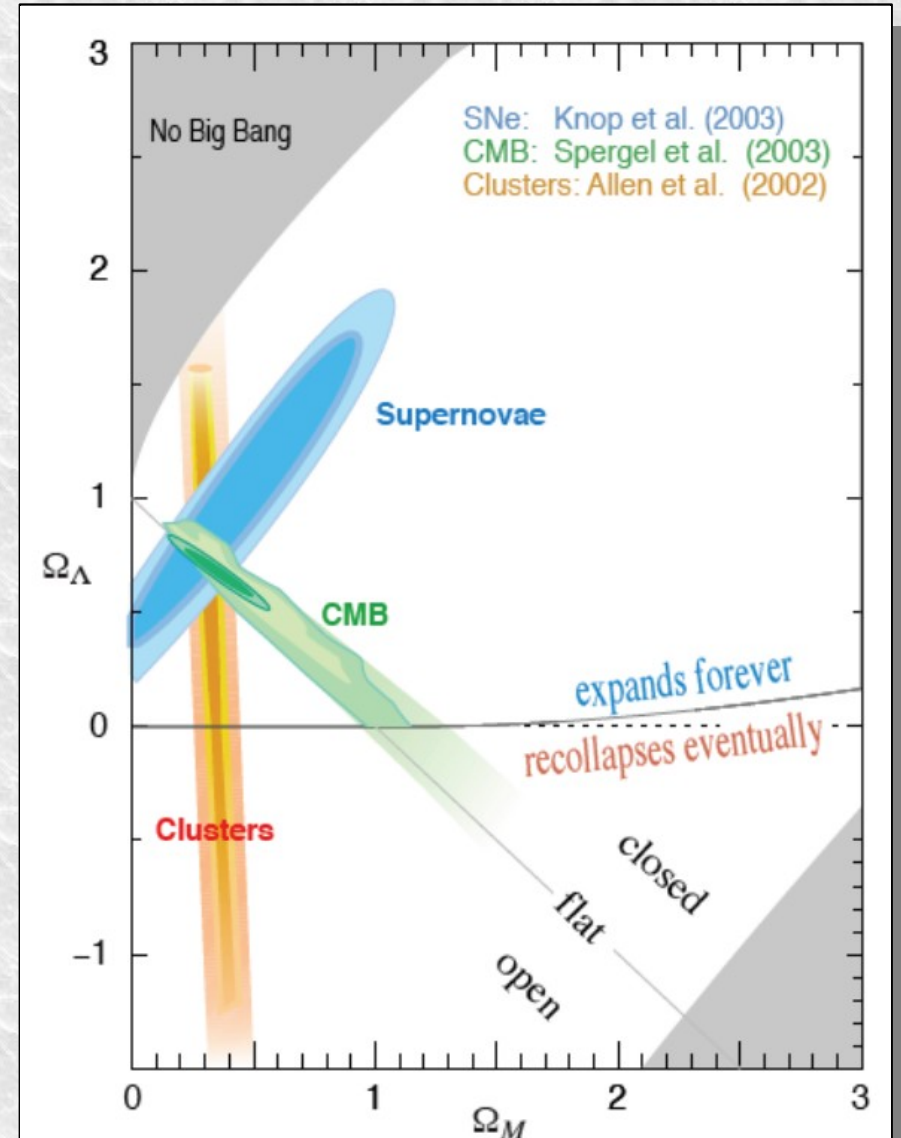
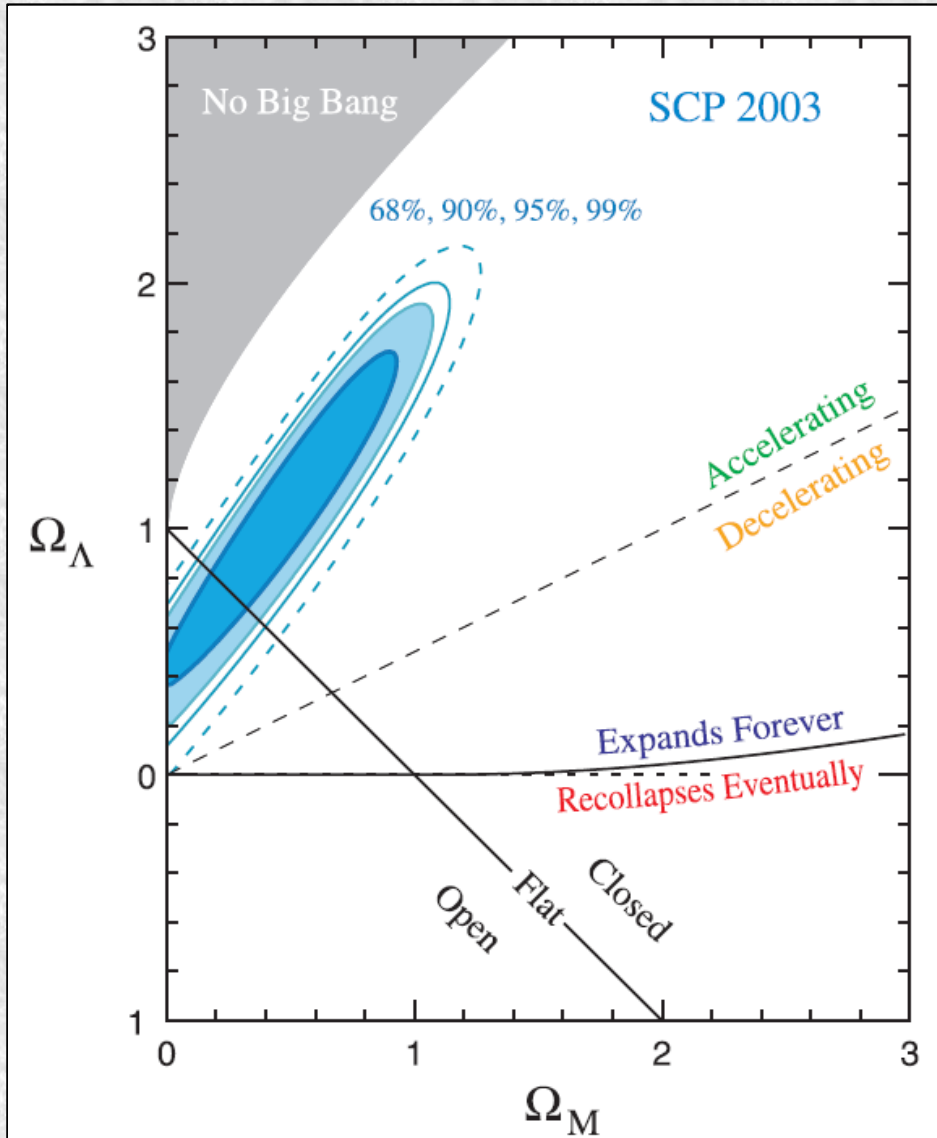


# L'expansion de l'univers s'accélère !



Source image : *Physics Today*, Avril 2003

# Estimation des paramètres cosmologiques



$\Omega_M \simeq 0,27 \quad \Omega_\Lambda \simeq 0,73 \quad \Omega_k \simeq 0 \quad (\text{univers plat}) \quad q_0 \simeq -0,60$

# Conclusion

Encore beaucoup de questions !

- Qu'est ce que l'énergie noire ?
- L'énergie noire qui ne se dilue pas serait issue du vide quantique, mais la mécanique quantique ne parvient pas à l'interpréter correctement
- Comprend-t-on suffisamment le fonctionnement des SN Ia pour mesurer correctement leur distance lumineuse ?
- L'accélération de l'expansion de l'univers ne serait-elle qu'une illusion due à une répartition inégale des masses dans l'univers ? [Wiltshire, 2007], [Smale, 2010]

