

# Lezione Fermi 27

*Luciano Maiani, AA 14-15*

## La scoperta della Dark Energy

### Sommario

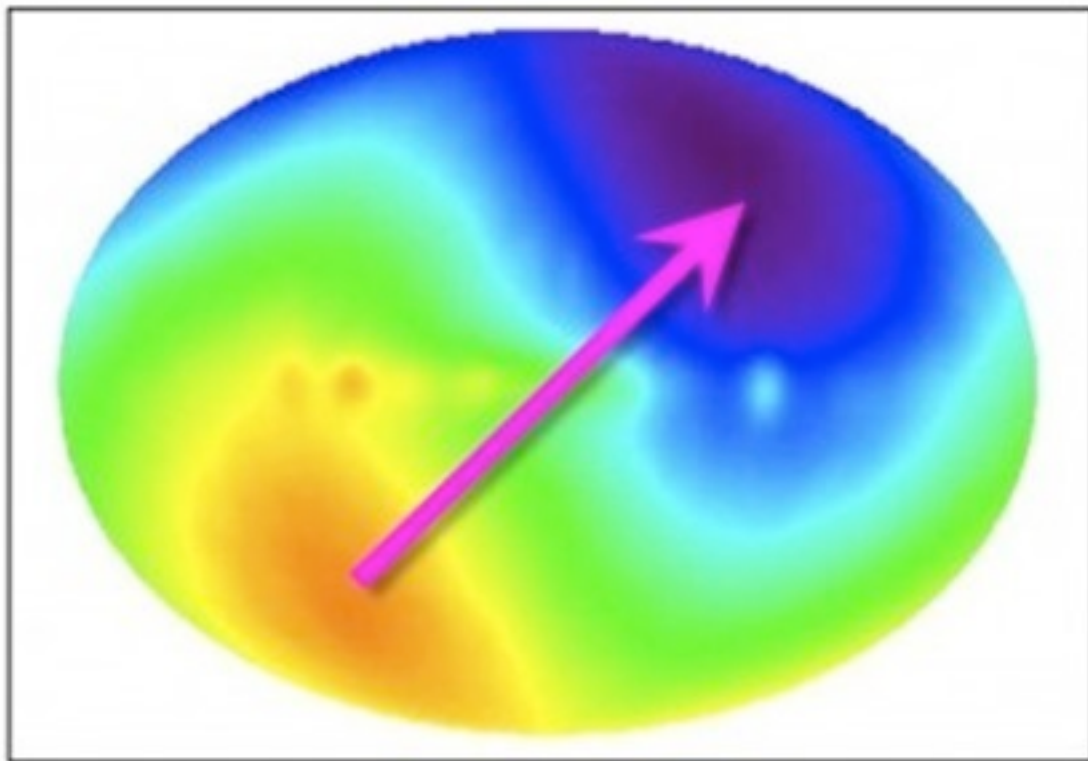
1. Spostamento verso il rosso, luminosita' e distanze
2. Il parametro di decelerazione
3. Supernovae I a per le grandi distanze
4. Dati da Nobel (2011)

# Doppler shift su grande scala

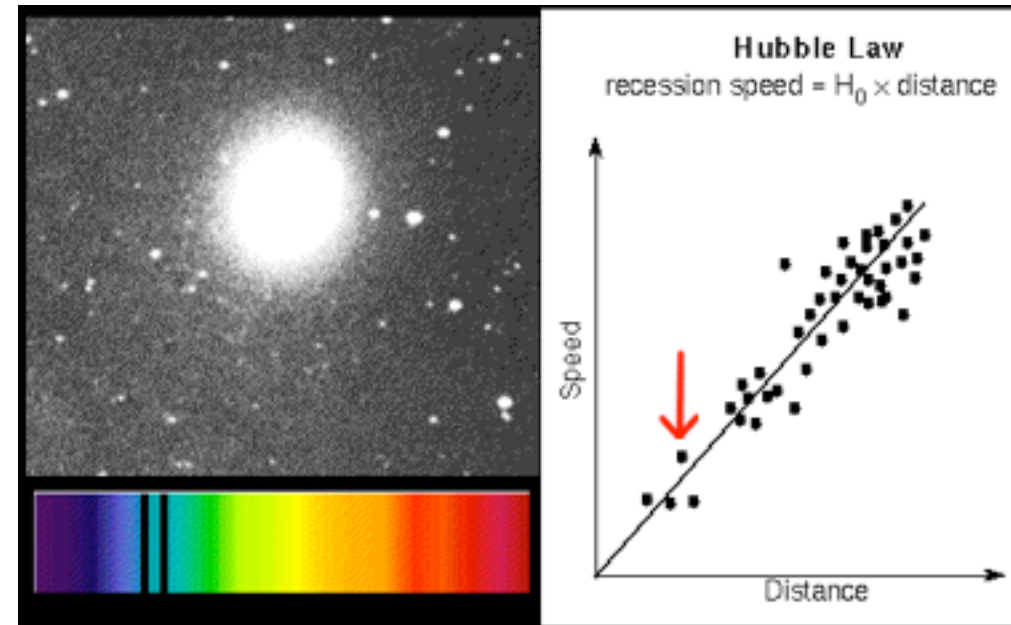
- in Cosmologia,  $v$ =vel. recessione

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} = \frac{\nu_0 - \nu}{\nu} =$$
$$= \frac{\nu_0}{\nu} - 1 = \sqrt{\frac{c+v}{c-v}} - 1$$

$\approx \beta$  per le galassie vicine



- doppler shift della radiazione del fondo cosmico dovuto al moto della Terra



*"I love hearing that lonesome wail of the train whistle as the magnitude of the frequency of the wave changes due to the Doppler effect."*

# La metrica di Robertson e Walker

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

$K = \text{curvatura} = -1, 0, +1$

- vedi: S. Weinberg, Gravitation and Cosmology, eq. (14.2.1)
- Intervallo tra due eventi molto vicini
- le coordinate  $(r, \theta, \phi)$  sono coordinate polari fisse per un dato osservatore tipico (coordinate comoventi), mentre nel tempo le distanze si estendono secondo il fattore  $a(t)$
- tra parentesi [] la metrica del foglio 3 dimensionale che, per l'omogeneità implicata dal P. Cosmologico, può solo essere di tre tipi: euclideo ( $K=0$ ), sferico ( $K=+1$ ), iperbolico ( $K=-1$ ). Il primo e il terzo sono di dimensione infinita, il secondo è di volume finito ma illimitato (dopo un giro si torna al punto di partenza e si inizia un nuovo giro)
- L'espansione è dovuta all'azione della gravità e quindi  $a(t)$  e  $K$  devono essere determinati dalle equazioni della Relatività Generale

# Red shift e metrica

- la luce parte ad un tempo (cosmico)  $t_1$  da una sorgente di coordinata  $r_1$  e arriva a noi che siamo a  $r=0$  al tempo  $t_0$
- la luce si muove con  $ds^2=0$

$$ds^2 = 0, \text{ ovvero } dt = a(t) \frac{dr}{\sqrt{1 + Kr^2}}$$
$$\int_{t_1}^{t_0} \frac{dt}{a(t)} = f(r_1) = \int_0^{r_1} \frac{dr}{\sqrt{1 + Kr^2}} \quad (= r_1, \text{ se } K = 0)$$

- questa relazione da' il tempo la distanza  $r_1$  in funzione del tempo di volo,  $t_0-t_1$ .
- La luce e' emessa in onde, di periodo (molto piccolo)  $T=\lambda/c=1/\nu$
- Indico con i suffissi 1 e 0 le grandezze alla sorgente e all'arrivo. Il tempo di emissione e di arrivo della cresta successiva a quella di prima si ottiene sostituendo:  $t_0 \rightarrow t_0+T_0$ ,  $t_1 \rightarrow t_1+T_1$  ma lasciando  $r_1$  fisso. Facendo la differenza dei due integrali, si trova:

$$\frac{\delta T_0}{a(t_0)} = \frac{\delta T_1}{a(t_1)}, \text{ ovvero}$$
$$\frac{\lambda_0}{a(t_0)} = \frac{\lambda_1}{a(t_1)} \rightarrow \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{a(t_0)}{a(t_1)} = z + 1$$

- questa relazione ci da' il red-shift (caratterizzato da  $z$ ) in termini della funzione di scala della metrica e della distanza, o della differenza dei tempi  $\Delta t=t_0 - t_1$

# distanza di luminosita'

- Per piccole distanze, la potenza (energia/sec) che riceviamo e' data da:  $l = \frac{L}{d^2}$
- Per calcolare in generale, dobbiamo tenere conto che tra emissione e assorbimento, la distanze si sono dilatate di un fattore  $a(t_0)/a(t_1)$
- Inoltre
  - se al tempo  $t_0$  la sorgente emetteva  $N_1$  fotoni al secondo, all'arrivo se ne avranno di meno, in rapporto di  $a(t_1)/a(t_0)$
  - ogni fotone ha minore energia (red shift) in rapporto di  $a(t_1)/a(t_0)$

$$l = \frac{L}{(a(t_0)r_1)^2} \cdot \left(\frac{a(t_1)}{a(t_0)}\right)^2$$

- Se definiamo la distanza di luminosita',  $d_L$ , dalla relazione:

$$l = \frac{L}{d_L^2}, \quad \text{segue : } d_L = \sqrt{\frac{L}{l}} = r_1 a(t_0) \frac{a(t_0)}{a(t_1)} = r_1 a(t_0)(1 + z)$$

## 2. Il parametro di decelerazione

- Per distanze non troppo grandi, ovvero per  $z$  piccoli ( $z < 0.1$ ) possiamo approssimare fino al secondo ordine in  $z$  tutte le differenze tra sorgente e ricevitore
- per definizione,  $a(t_0) = 1$ , e dobbiamo definire due parametri
  - la costante di Hubble attuale,  $H_0$ , e il parametro di decelerazione,  $q_0$ , definiti come:

$$H_0 = \frac{\dot{a}}{a}; \quad q_0 = -\frac{\ddot{a}a}{\dot{a}^2}$$

- (la definizione di  $q_0$  e' stata fatta pensando che l'Universo stesse decelerando, vedremo invece che l'U. accelera e  $q_0$  risulta negativo)
- Sviluppando in serie di  $\Delta t = t_1 - t_0 > 0$ , al secondo ordine si trova:

$$a(t_1) = a(t_0) \left[ 1 - H_0 \Delta t - \frac{1}{2} q_0 (H_0 \Delta t)^2 + \dots \right]$$

$$z = \left[ H_0 \Delta t + \left( 1 + \frac{q_0}{2} \right) (H_0 \Delta t)^2 + \dots \right]$$

$$r_1 = \left( \Delta + \frac{1}{2} H_0 \Delta^2 + \dots \right)$$

- eliminiamo  $\Delta t$  in favore di  $z$ , trovando:  $\Delta t = \frac{1}{H_0} \left[ z - \left( 1 + \frac{1}{2} q_0 \right) z^2 + \dots \right]$

- da cui, infine:  $d_L = \frac{1}{H_0} \left[ z + \frac{1}{2} (1 - q_0) z^2 + \dots \right]$

In questa approssimazione, possiamo ottenere  $H_0$  e  $q_0$  dalla relazione tra distanza, ottenuta dalle luminosita' assoluta e apparente, e dal red shift, misurato dallo spostamento delle righe spettrali,



# decelerazione (continua)

- Nell'Universo di Friedmann  $q_0$  e' determinato dalla composizione della densita' di energia e dai coefficienti per l'equazione di stato,  $w_i$  (lez. 20), che dettrminano la relazione tra densita' di energia e pressione per la radiazione, la materia non relativistica e la costante cosmologica (il "vuoto")

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{crit}}; \quad p_i = w_i \rho_i$$

$$w = \frac{1}{3}, 0, -1 \text{ per radiazione, materia, vuoto}$$

- e si ha:  $q_0 = \sum \Omega_i (1 + 3w_i)$
- L'Universo da almeno 10 Miliardi ha visto una prevalenza della materia non relativistica, quindi:  $q_0 = \Omega_M - 2\Omega_\Lambda$
- Per come lo abbiamo definito, l'Universo *accelera* se  $q_0 < 0$ , cioe' se l'effetto di repulsione dovuta alla costante cosmologica prevale sull'attrazione gravitazionale tra le masse presenti

# la misura delle densita' per grandi z

- Per valori di z grandi, quando lo sviluppo al secondo ordine non si applica si possono ottenere comunque le densita'  $\Omega_M$  e  $\Omega_\Lambda$ , ottenendoli da un fit della relazione tra luminosita' e z, secondo la formula

$$d_L(z, H_0, \Omega_M, \Omega_\Lambda) = \frac{1+z}{H_0} \int_0^z \frac{dz'}{\sqrt{\Omega_M(1+z')^3 + \Omega_\Lambda}}$$

- Valori ottimali di z per separare i due contributi (materia e vuoto) vanno da 0.3 a 2, i dati vanno fino a 0.8 circa
- nota: z=1 corrisponde ad una distanza di circa 8 Miliardi di anni-luce !
- nota: conoscendo la luminosita' assoluta della



# Supernovae Ia per le grandi distanze

- Supernova Ia: esplosione di una nana bianca che ha superato, per accrezione, il limite di Chandrasekar
- la luminosita' assoluta si puo' derivare dalla forma della curva di luce (L minore se curva piu' ripida), tarandola sulle SNIa nelle galassie a distanza conosciuta
- la difficolta' e' che le SN Ia sono rare, frequenza di un paio per millennio in una singola galassia (!!!) e la loro luminosita' dura solo dell'ordine del mese
- Un programma ad hoc per mettere a punto un sistema di rivelazione rapida: *Supernova on Demand*, iniziato nel 1988 coordinato da S. Perlmutter
- Esame con CCD-based wide-field imager ad un telescopio di 4 m telescope di porzioni del cielo (senza luna) prese a distanza di 10-15 giorni
- variazioni rivelate venivano inseguite con telescopi piu' potenti (in altri siti) per vedere se si trattava si SN Ia

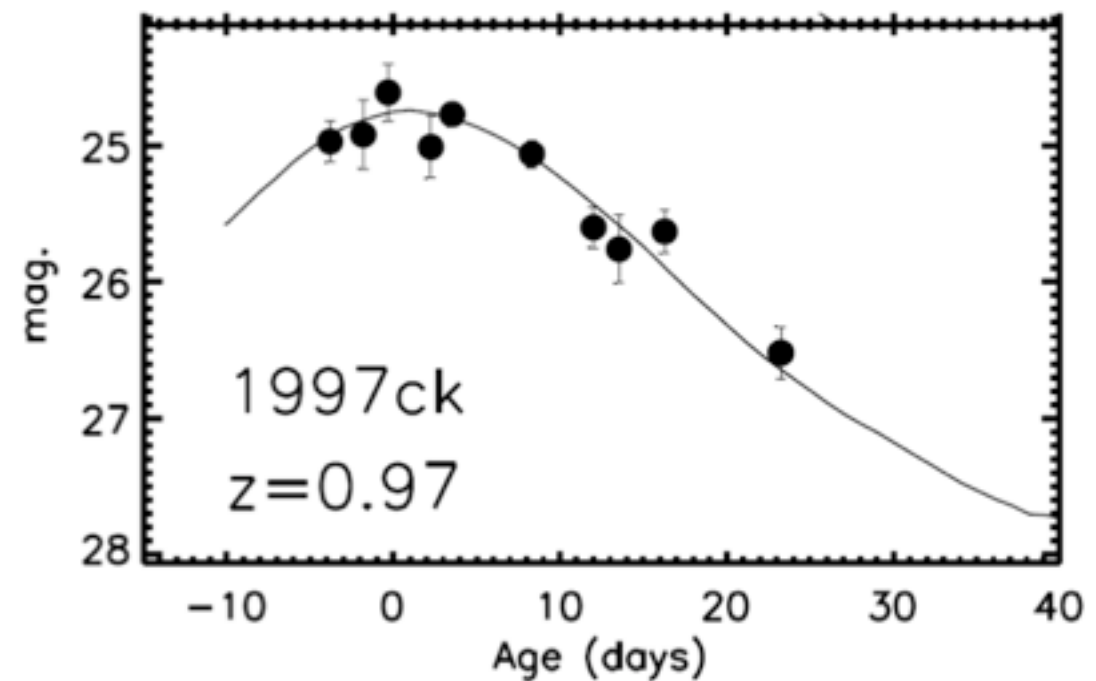


Figure 1. One of the high redshift supernovae of type Ia for which the HZT collaboration [27] could measure the magnitude, i.e., the luminosity, both before and after the peak luminosity.

## 4. Dati da Nobel (2011)

- Due collaborazioni dal 1994 (USA e Australia) per la misura della relazione distanza-red shift
- prime pubblicazioni 1998

*The two breakthrough papers [27, 28] implying that the expansion of the Universe does not slow down but actually accelerates, were submitted for publication later that year. The HZT article is based on observations of 16 SNe Ia mainly analyzed by Adam Riess, then a postdoctoral researcher at University of California at Berkeley, whereas the SCP paper, with Perlmutter as the driving force, includes 42 Type Ia SNe.*

*The fact that both groups independently presented similar - albeit extraordinary - results was a crucial aspect for their acceptance within the physics and astronomy community.*

### Press Release

4 October 2011

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2011

with one half to

**Saul Perlmutter**

The Supernova Cosmology Project

Lawrence Berkeley National Laboratory and University of California, Berkeley, CA, USA

and the other half jointly to

**Brian P. Schmidt**

The High-z Supernova Search Team

Australian National University,  
Weston Creek, Australia

and

**Adam G. Riess**

The High-z Supernova Search Team

Johns Hopkins University and Space Telescope Science Institute,  
Baltimore, MD, USA

*"for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"*

la distanza e' plottata come magnitudo, scala logaritmica, m grande=oggetto meno luminoso=piu' distante

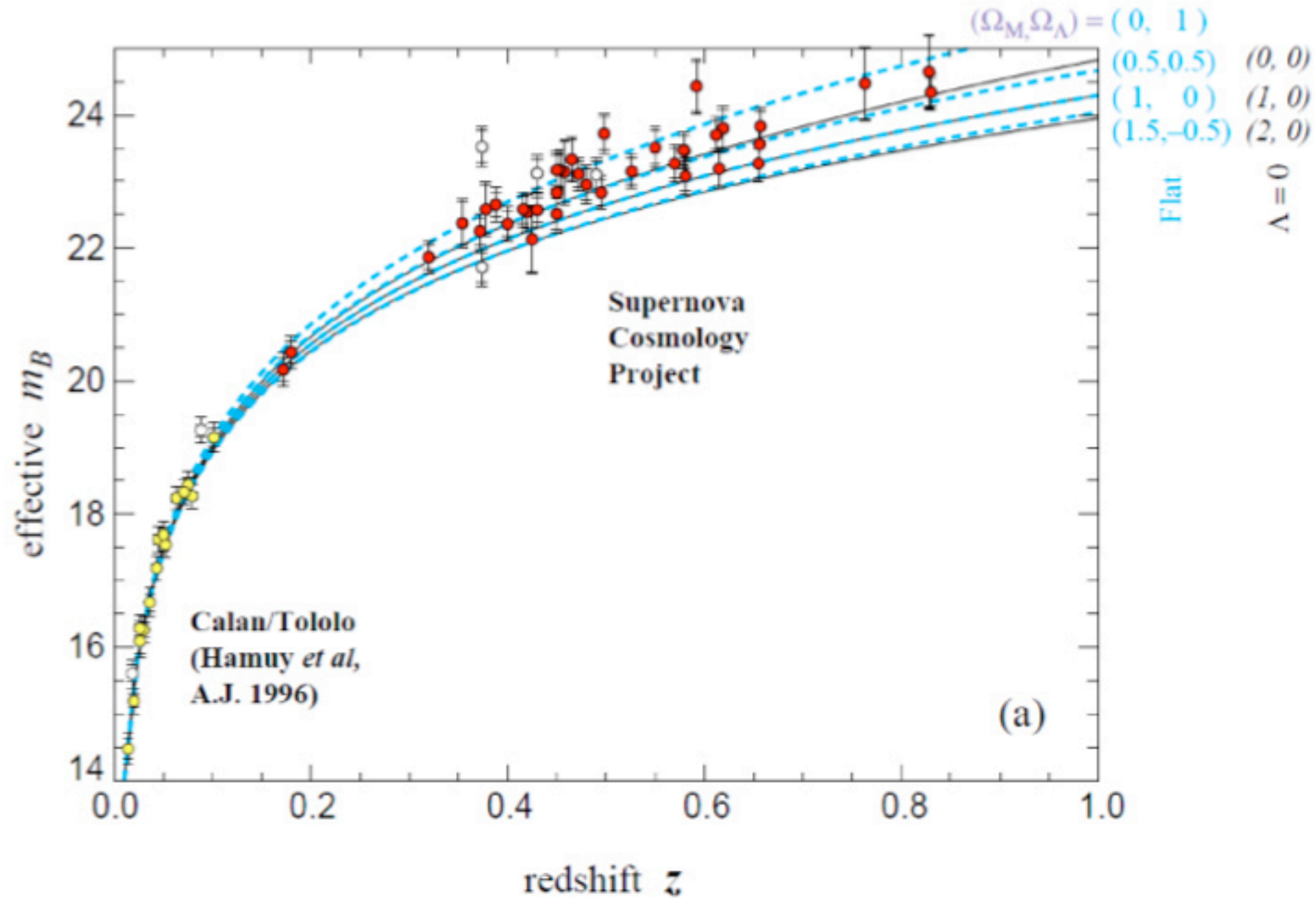


Figure 1: The Hubble diagram for 42 high redshift type Ia supernovae from SCP and 18 low redshift supernovae from the Calan/Tololo Supernova Survey. The solid curves represent a range of cosmological models with  $\Lambda = 0$  and  $\Omega_M = 0, 1$  and  $2$ . The dashed curves show a range of "flat" models where  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ . Note the linear redshift scale.



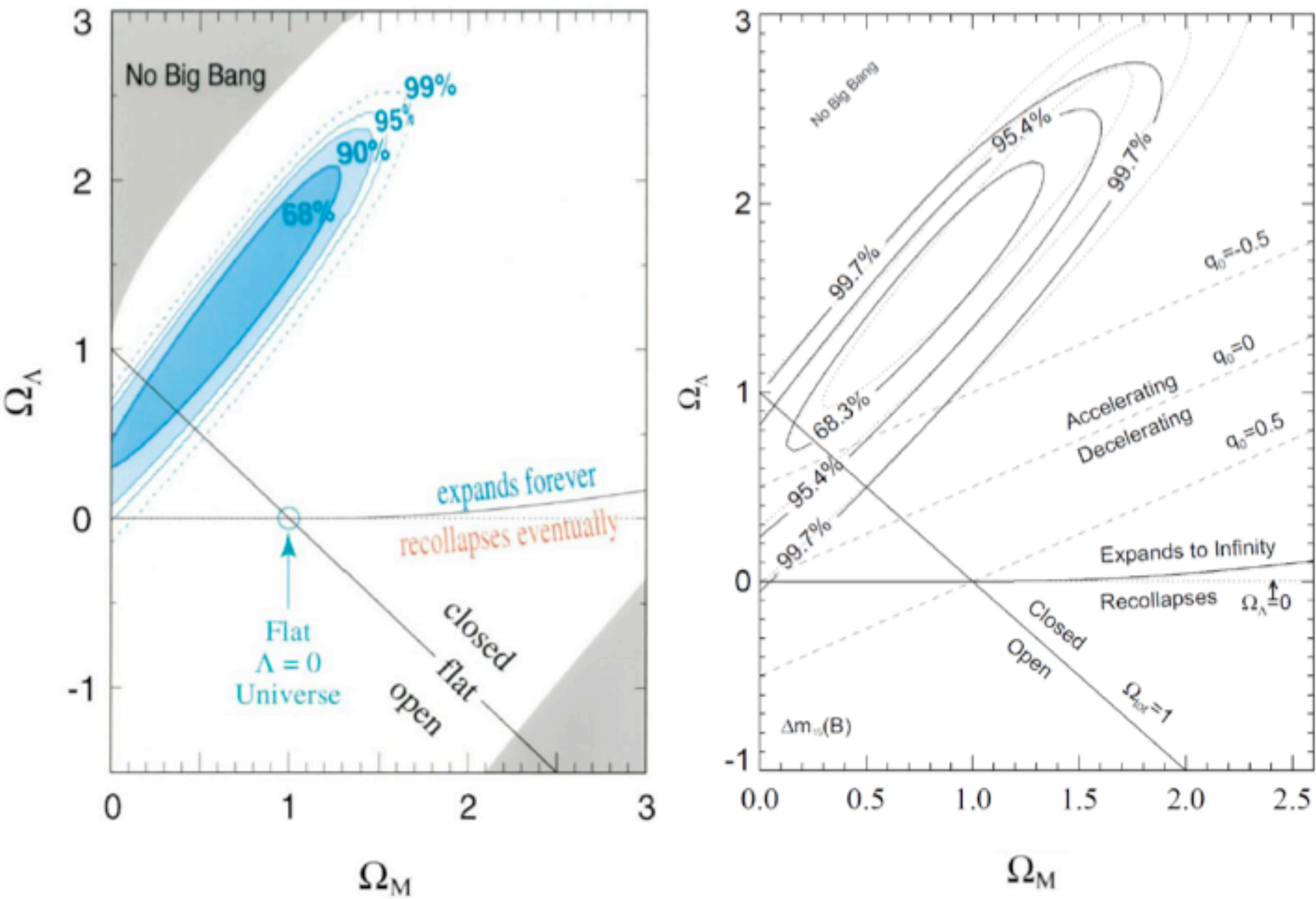


Figure 2. The left-hand panel shows the results of fitting the SCP supernova data to cosmological models, with arbitrary  $\Omega_M$  and  $\Omega_\Lambda$  [28]. The right-hand panel shows the corresponding results from HZT [27].

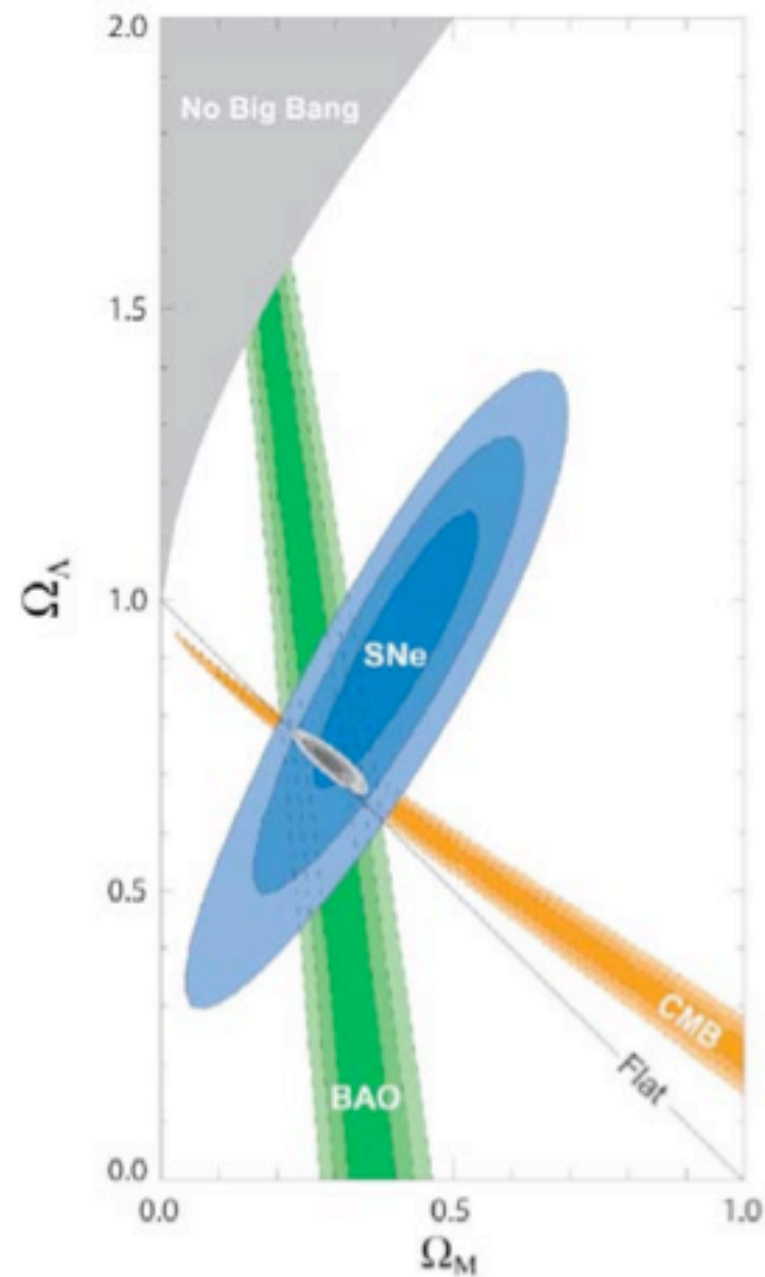


Figure 3. A summary figure from Review of Particle Properties, <http://rpp.lbl.gov>, showing the combination of supernova observations (SNe), the microwave background (CMB) and the spatial correlation between galaxies ("Baryon Acoustic Oscillations", BAO).