

# Как расширяется Вселенная?

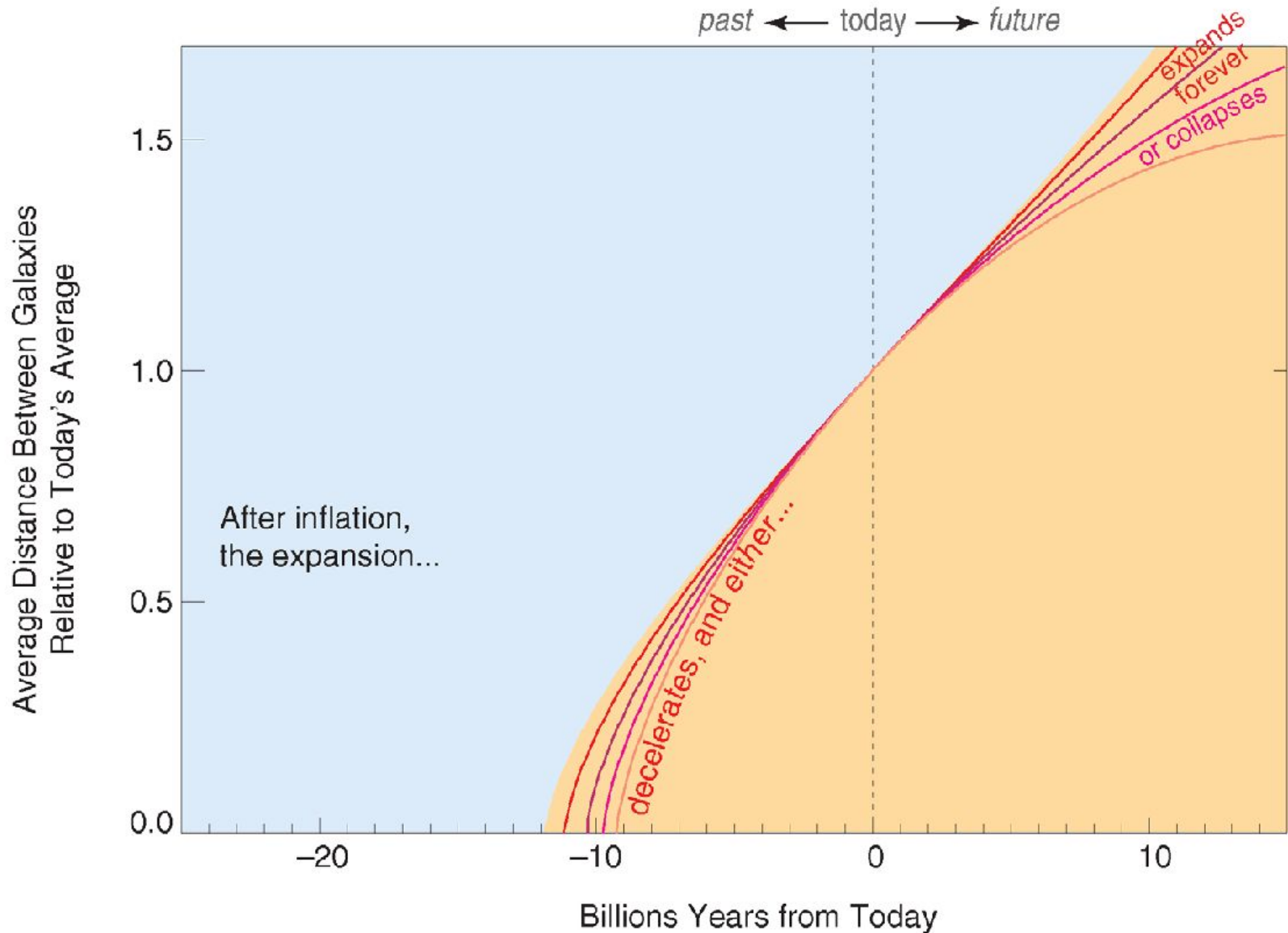
За что дают Нобелевскую премию?

Премия по физике за 2011 г. «За открытие ускоренного расширения Вселенной посредством наблюдения дальних сверхновых»

**Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam Riess**



# Будущее Вселенной можно определить зная ее прошлое



## Важнейший вопрос:

Динамика Вселенной на всех наблюдаемых этапах ее развития

Необходимо уметь измерять следующие параметры:

1. Скорость объекта на некотором расстоянии ( $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ )
2. Расстояние до объекта (эквивалентно моменту времени в прошлом, когда сигнал был испущен)

Наблюдения дают видимую яркость (поток) объекта и спектр объекта (очень непросто получить для удаленных слабых объектов).

Определение расстояния по яркости объекта требует использования классов объектов **с известным собственным энерговыделением.**



# Проблема Стандартной свечи!!!

## Astrophysical Journal 1938

### THE ABSOLUTE PHOTOGRAPHIC MAGNITUDE OF SUPERNOVAE\*

W. BAADE

#### ABSTRACT

A compilation of the photometric data for the 18 supernovae known at the end of 1937 is given. Former estimates have been replaced by photometric magnitudes after a redetermination of the magnitudes of comparison stars on the international system. The mean absolute photographic magnitude of the supernovae, derived from this material, is  $M_{\max} = -14.3 \pm 0.42$  (m.e.) with a dispersion  $\sigma_{M_{\max}} \approx 1.1$  mag. This result, together with the spectroscopic evidence, fully confirms the view that two classes of novae, common novae and supernovae, exist. Attention is drawn to the curious fact that 72 per cent of the known supernovae appeared in late-type spirals. B Cassiopeiae and the Crab nebula, which may have been galactic supernovae, are discussed.

When, after Ritchey's discovery of a nova in the spiral nebula NGC 6946 in 1917, novae were discovered in rapid succession in other extragalactic systems, a new way had been opened to settle the old question as to the constitution and the distances of these systems. The occurrence of novae in them afforded strong evidence for their stellar constitution. Moreover, their distances could be measured as soon as reliable values for the luminosities of the novae of our own galaxy were available. Nevertheless, the first applications of this method by H. D. Curtis and W. Baade were very satisfactory. The data reviewed in this



Галактики ?  
Сверхновые ???

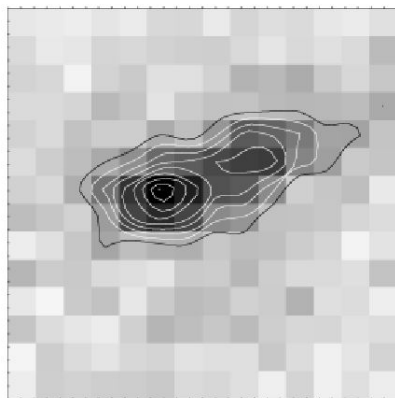
В середине 1980-х активно исследовались сверхновые типа Ia (SnIa) и началось активное внедрение CCD-приемников излучения совместно с методами компьютерной обработки изображений.

SnIa – наилучший из известных вариантов «стандартной свечи»

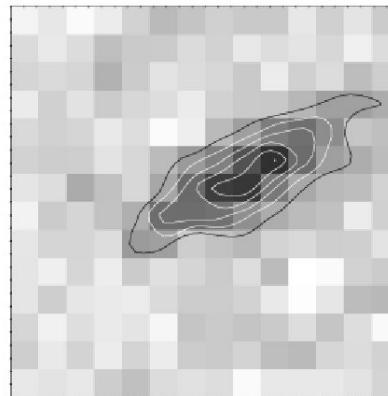
Panagia (1985)

Uomoto & Kirshner (1985)

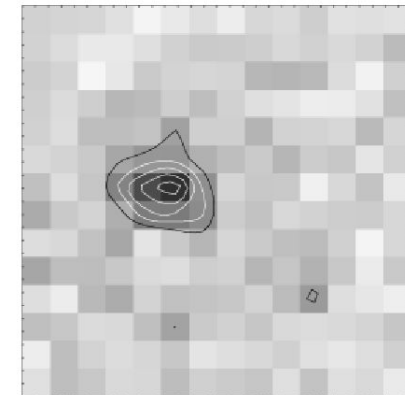
Wheeler & Levreault (1985)



—

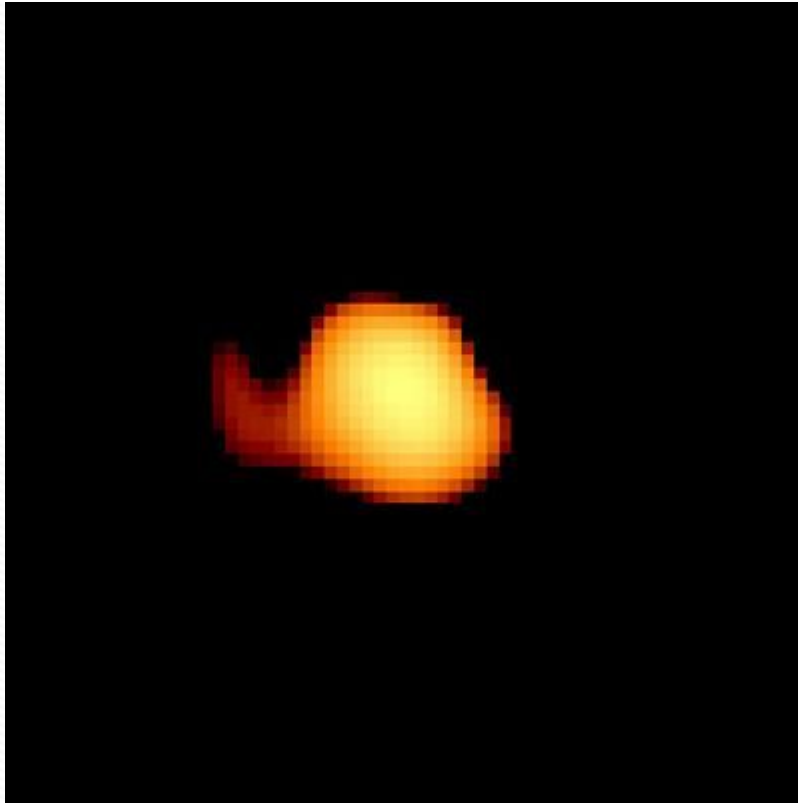


=



R. Muller:

Berkeley Automated Supernova Search with C. Pennypacker & S. Perlmutter



Расстояние до Миры - 417 св. лет  $\pm$  14 %.  
Компоненты находятся на расстоянии 70а.е.,  
орбитальный период около 400 лет.

Изображение переменной звезды Миры (омикрон Кита), сделанное космическим телескопом им. Хаббла в ультрафиолетовом диапазоне. На фотографии виден аккреционный «хвост», направленный от основного компонента — красного гиганта к компаньону — белому карлику

**НО**

Белый карлик имеет верхний предел массы в 1.4 массы Солнца.

Превышение этой величины ведет к коллапсу, разогреву и термоядерному взрыву гелиево-углеродно-кислородного белого карлика (SnIa)



**Стандартная свеча!!!**



Сверхновая SN 1994D в галактике NGC 4526 (яркая точка в нижнем левом углу)

## Трудности и проблемы наблюдения $S_nIa$ :

1. Возможно ли наблюдать их на больших расстояниях и в достаточно большом количестве для решения задач космологии?
2. Возможна ли надежная идентификация  $S_nIa$  вне зависимости от расстояния до них?
3. Насколько верны наши представления о «стандартной свече»? (Проблема пыли и возраста Вселенной на момент вспышки)
4. Возникали ли сверхновые  $S_nIa$  на промежутке времени более 5 млрд лет?



## **Проблема 1:**

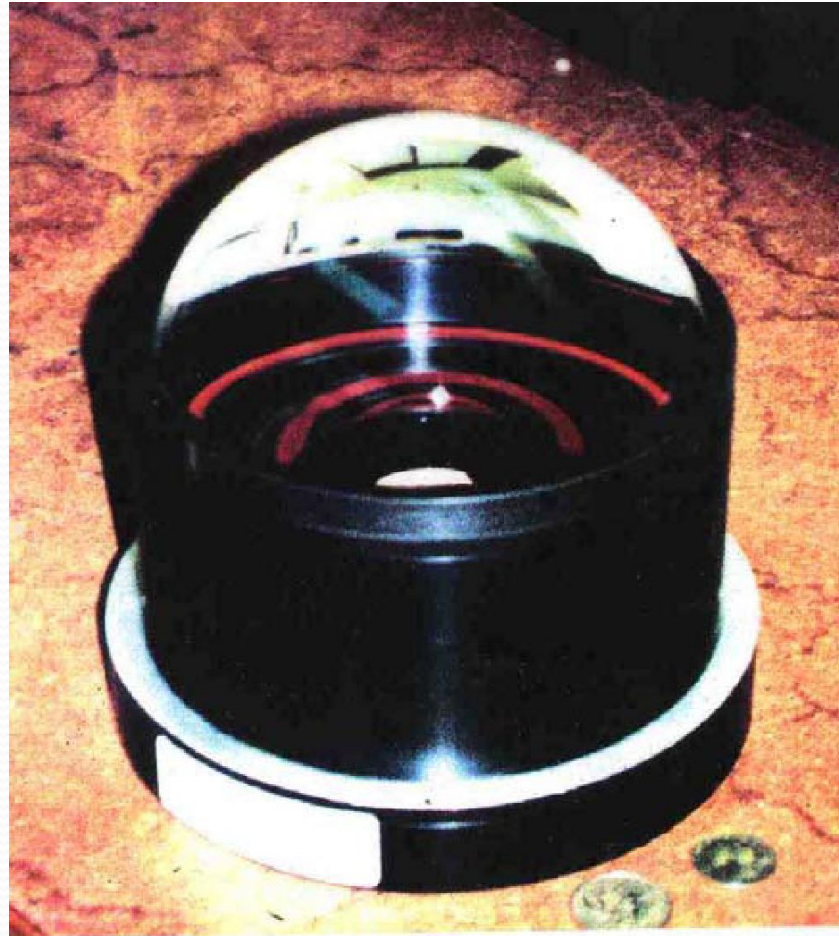
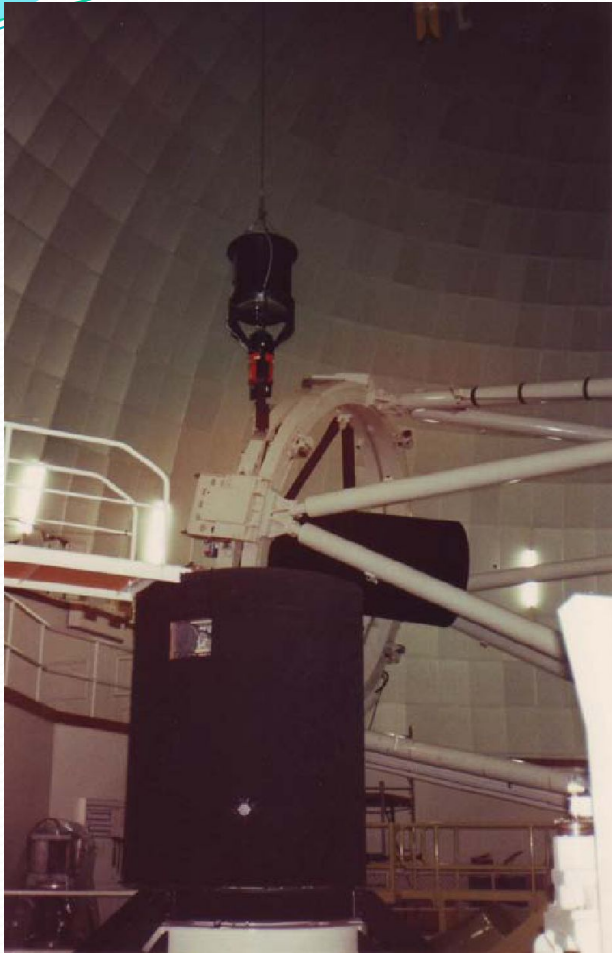
$Snl\alpha$  – достаточно редкое явление. Одна вспышка на галактику за 100-500 лет.

Заранее невозможно предсказать, какой участок неба необходимо наблюдать.

Процесс вспышки – быстрое явление. Объект необходимо обнаружить максимум через 10-15 дней после вспышки (до выхода на пик яркости). В противном случае не удастся наблюдать всю кривую блеска и использовать звезду как стандартную свечу.

## **Следствие:**

Очень сложно создать расписание наблюдений для крупных инструментов.



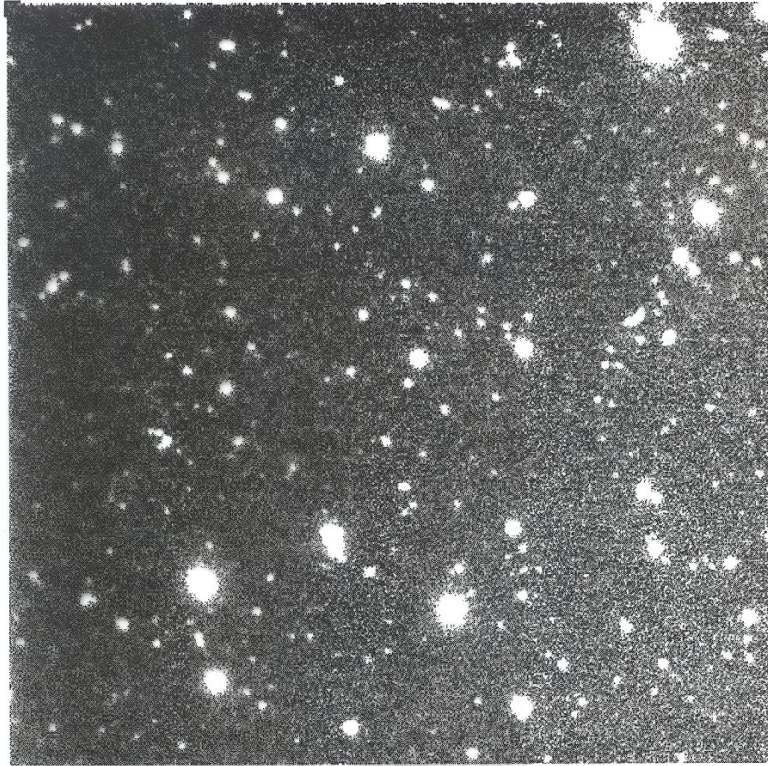
Pennypacker & Perlmutter 1987:

F/1 широкопольная CCD камера для Anglo-Australian 4-m telescope (AAT).

Крупный телескоп с широкопольной камерой может искать сверхновые с  $z > 0.3$ .

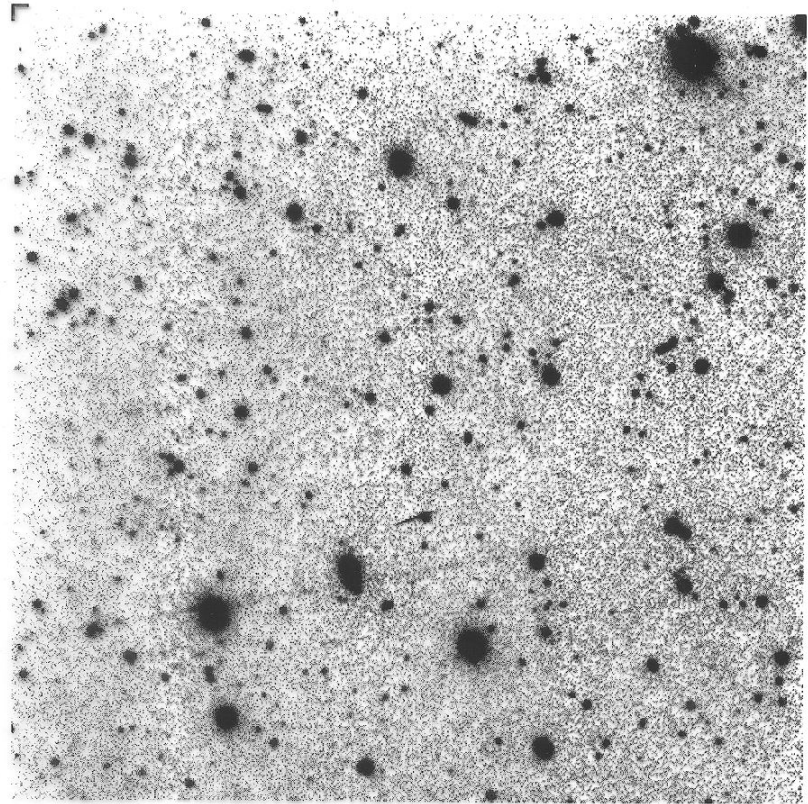
На каждом снимке фиксируются сотни галактик.

F855 7 01



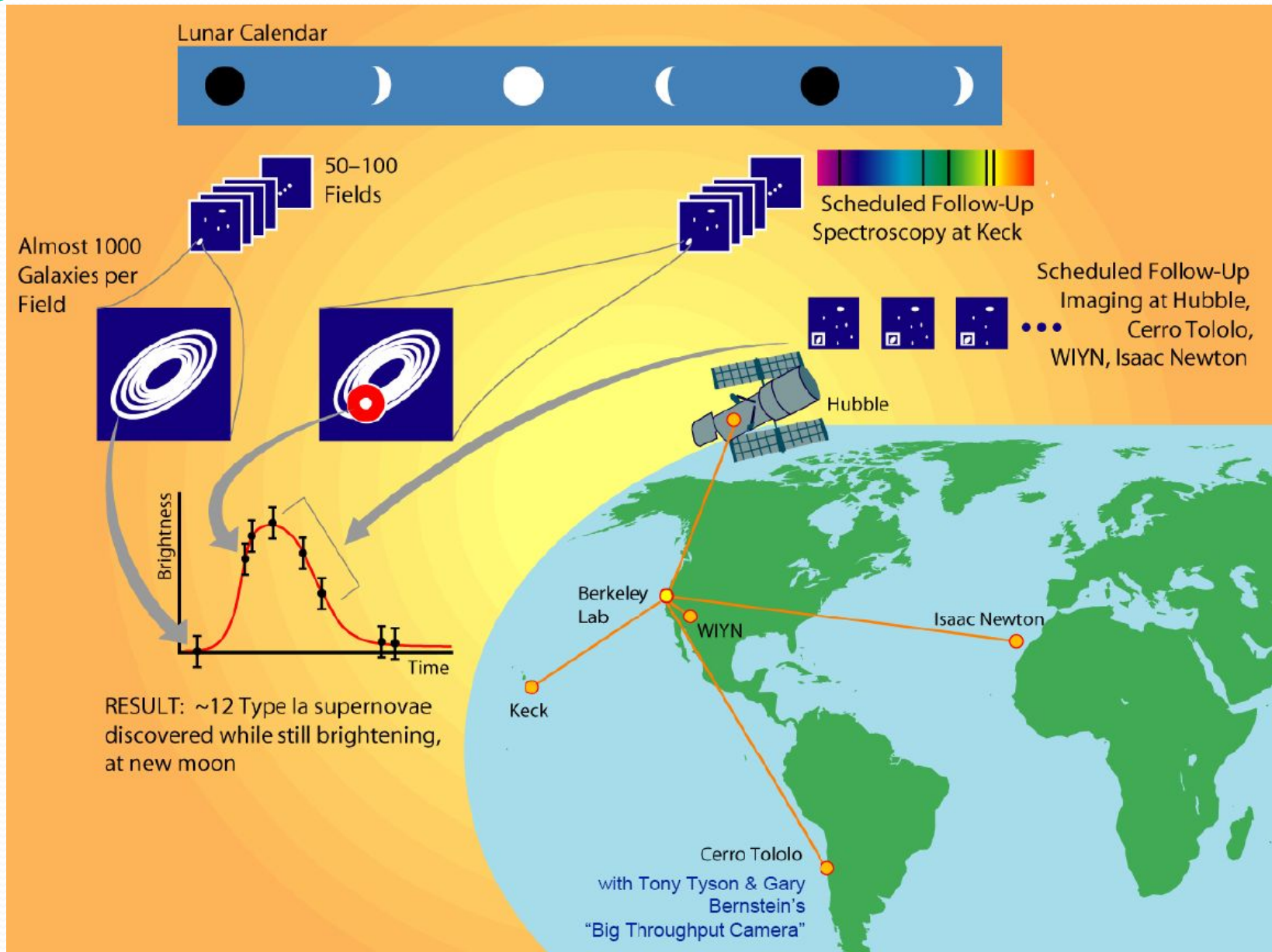
2950.00 3070.00

F855 7 01

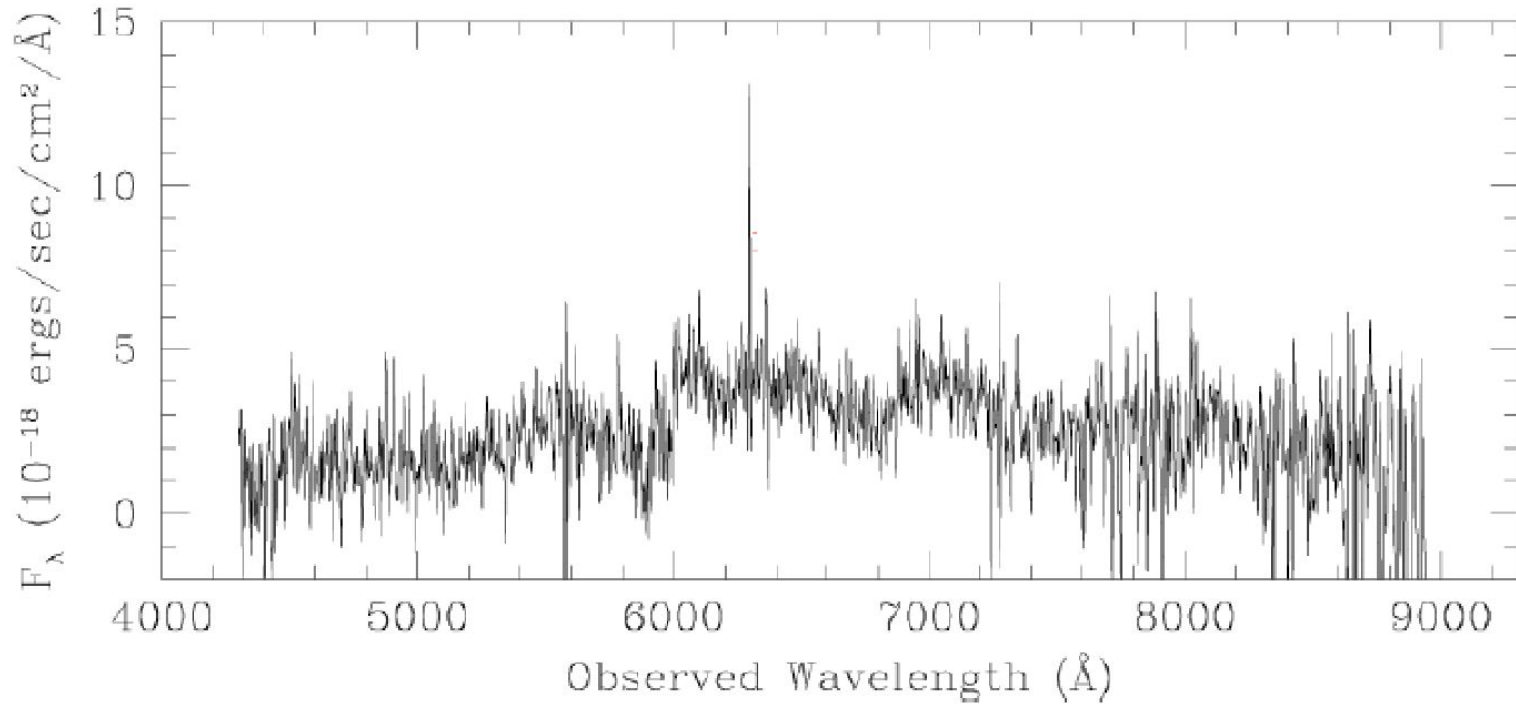


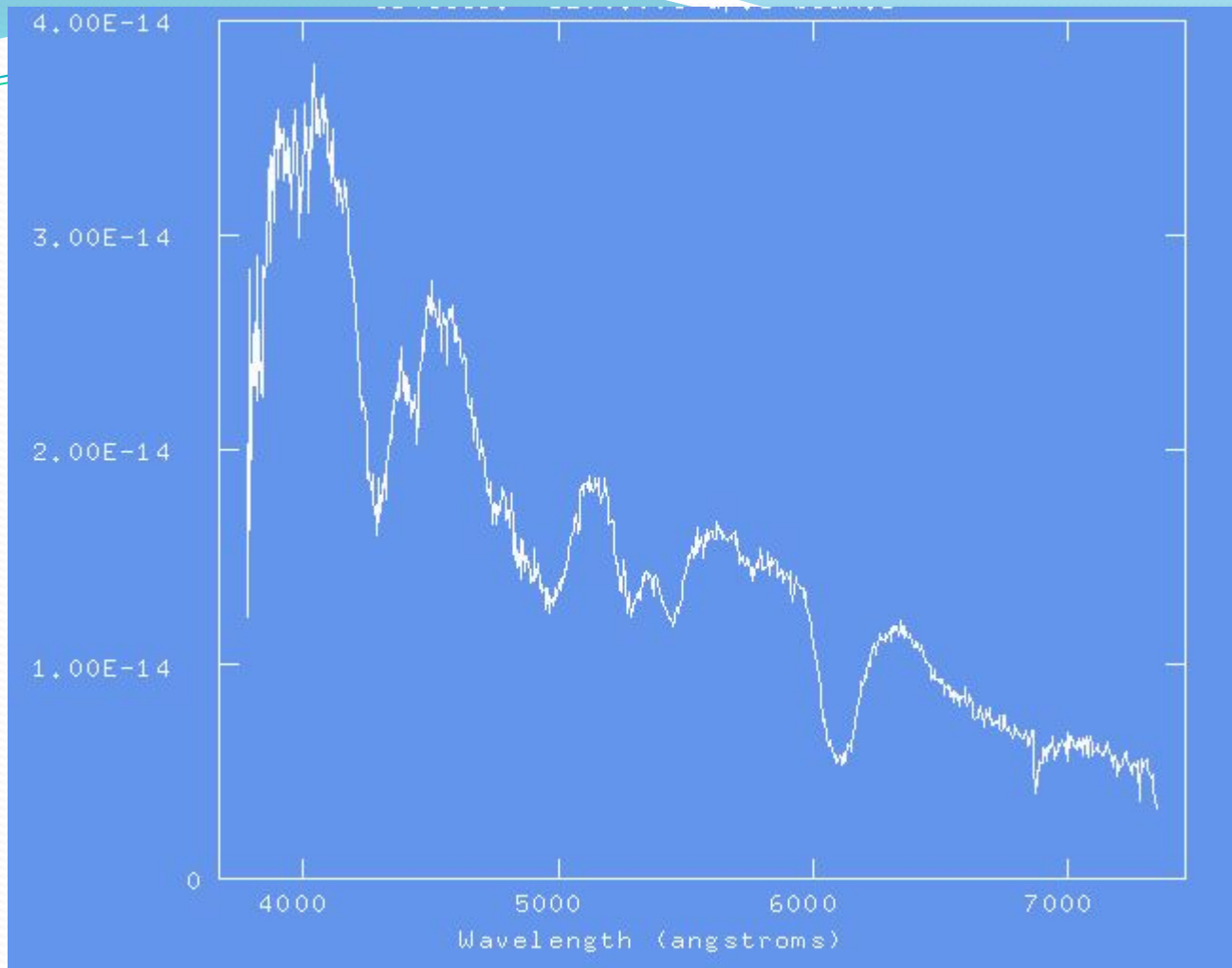
5555.46 5755.46

# Стратегия наблюдений

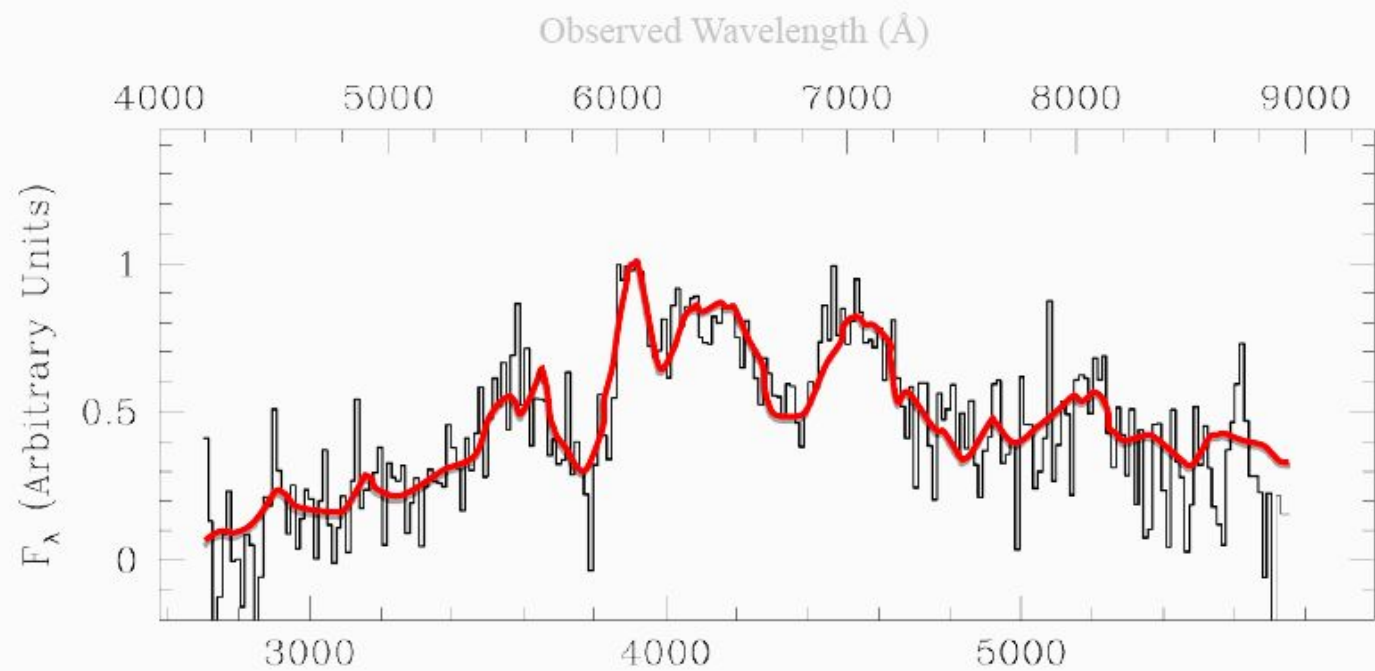


## Проблема 2 (идентификация сверхновых типа SnIa):

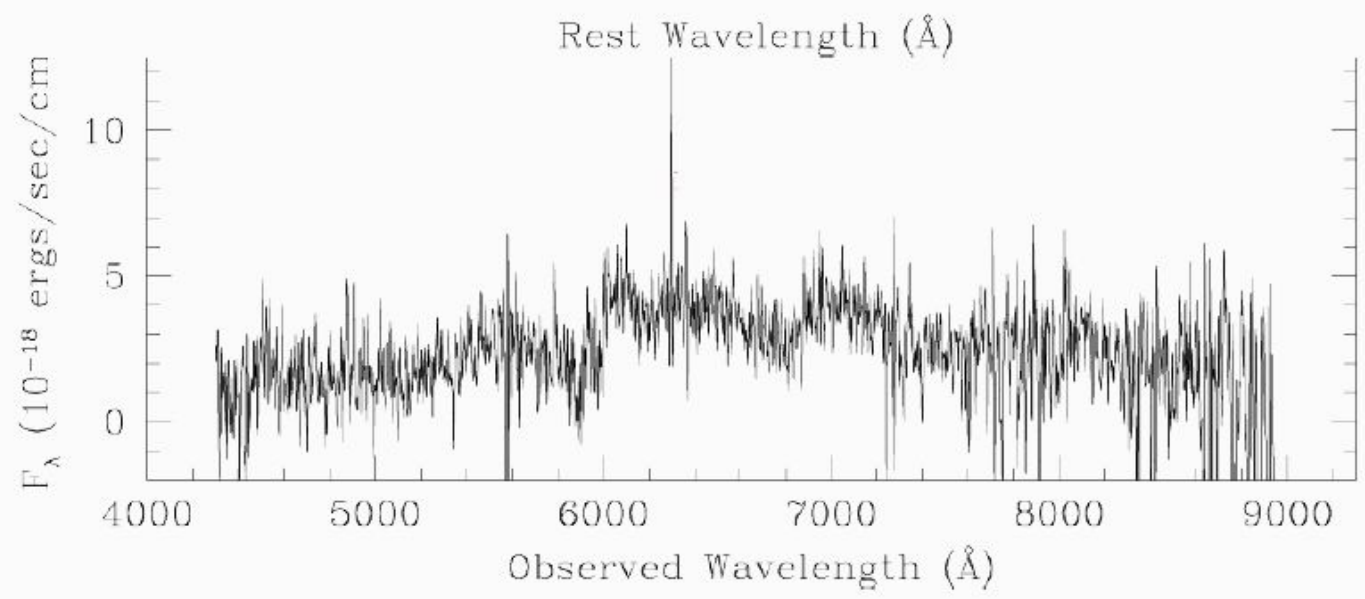


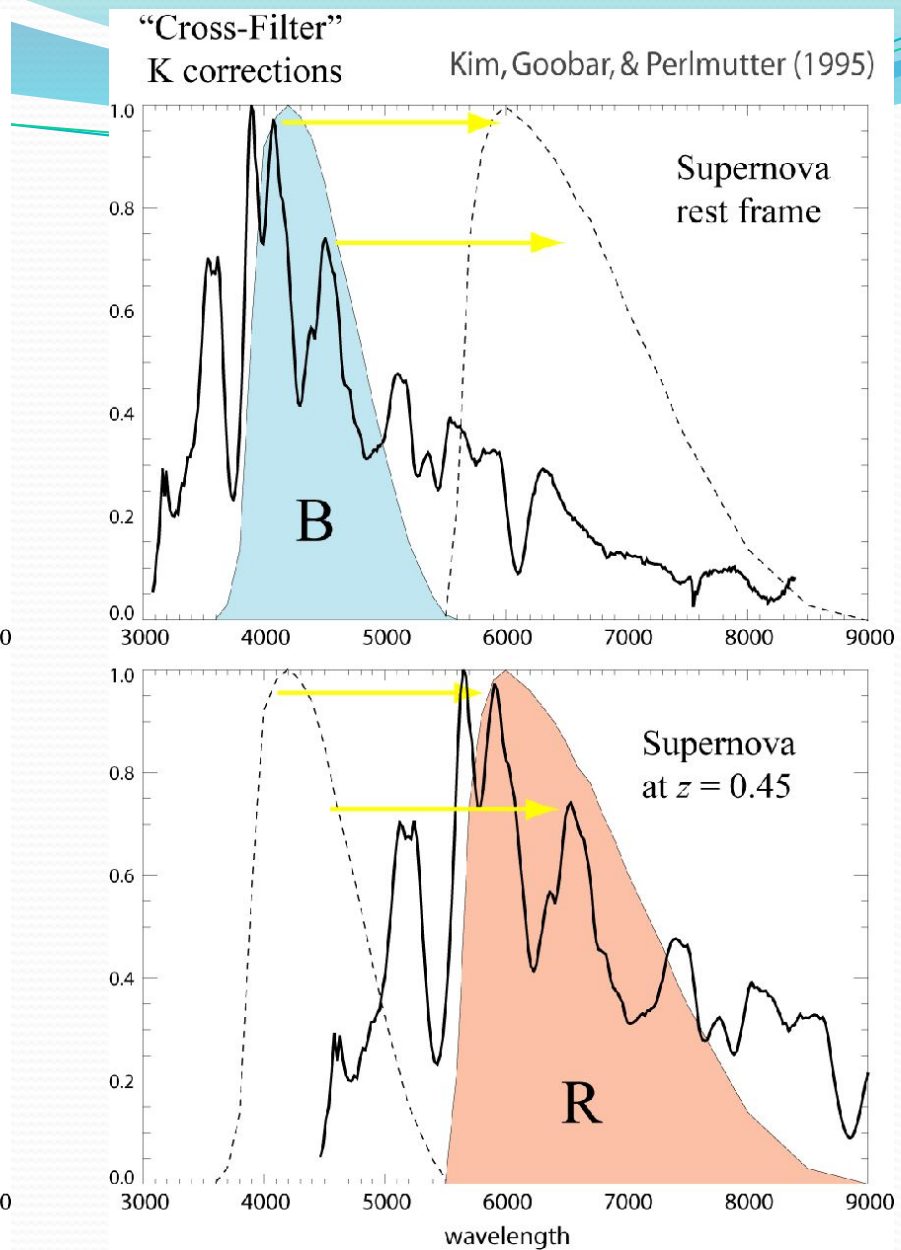
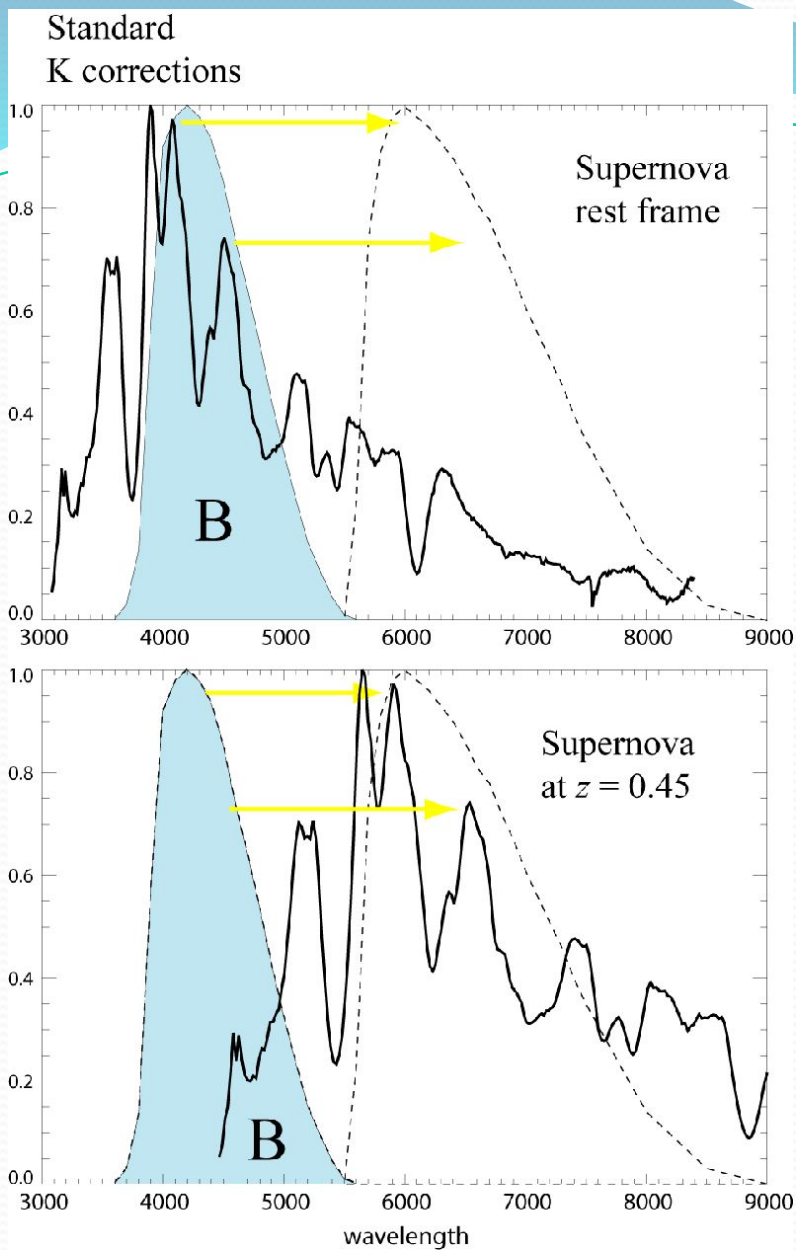


Спектр типичной сверхновой Ia SN 1995al вблизи максимума блеска. По оси ординат отложена интенсивность излучения. Самая сильная линия поглощения на длине волны около 6000 ангстрем принадлежит однократно ионизованному кремнию



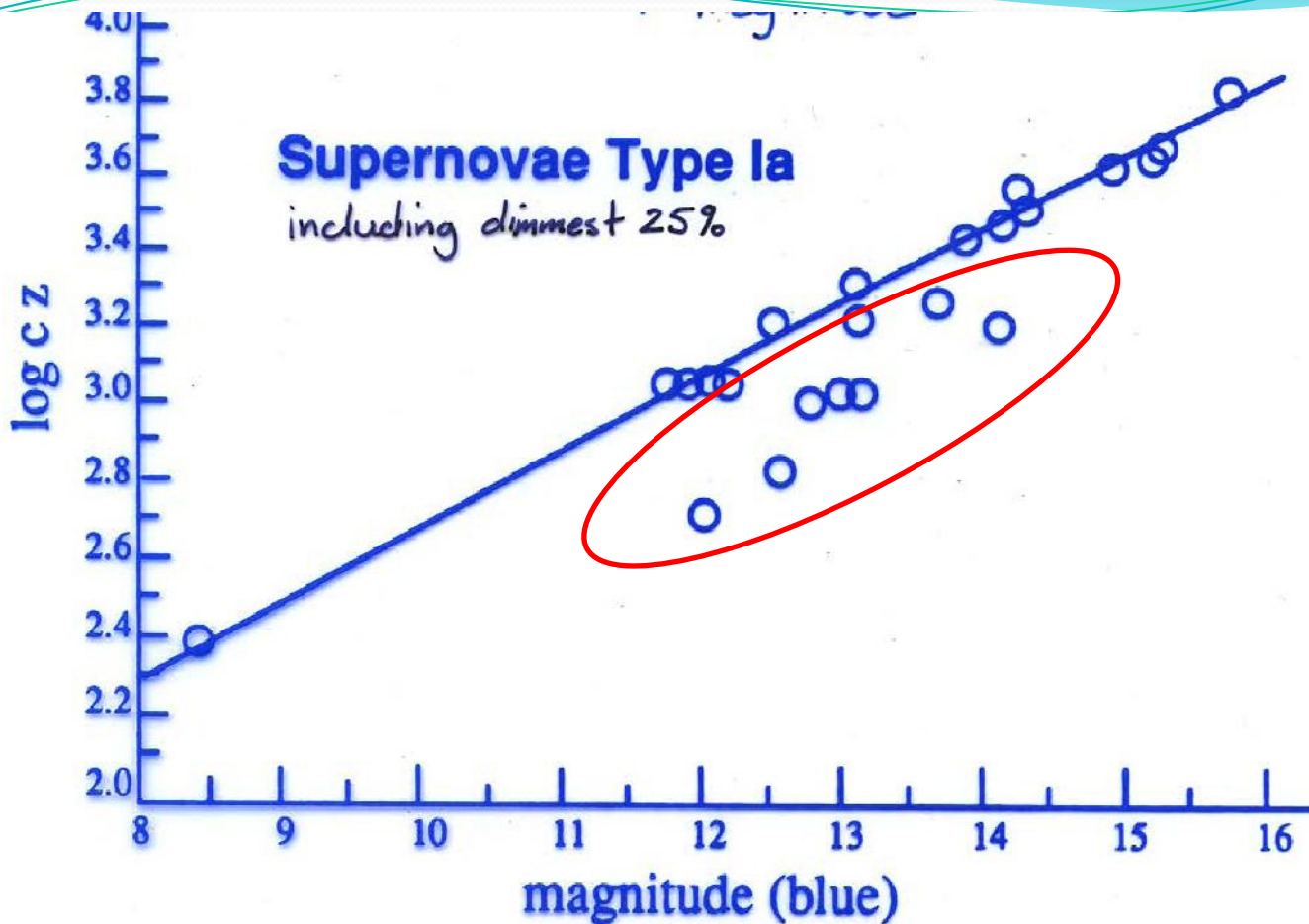
Snl a c z = 0.55





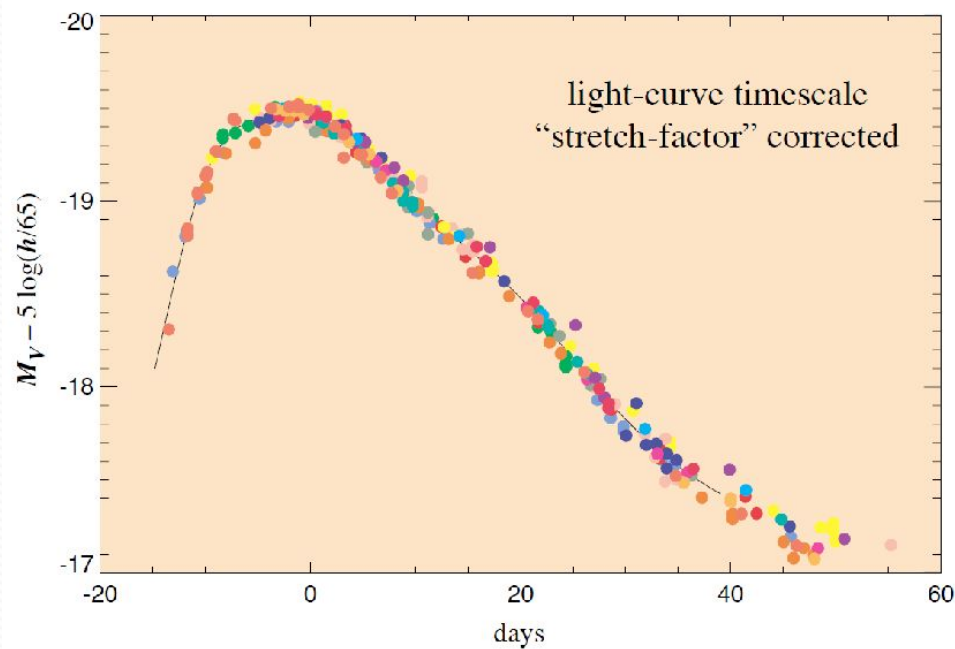
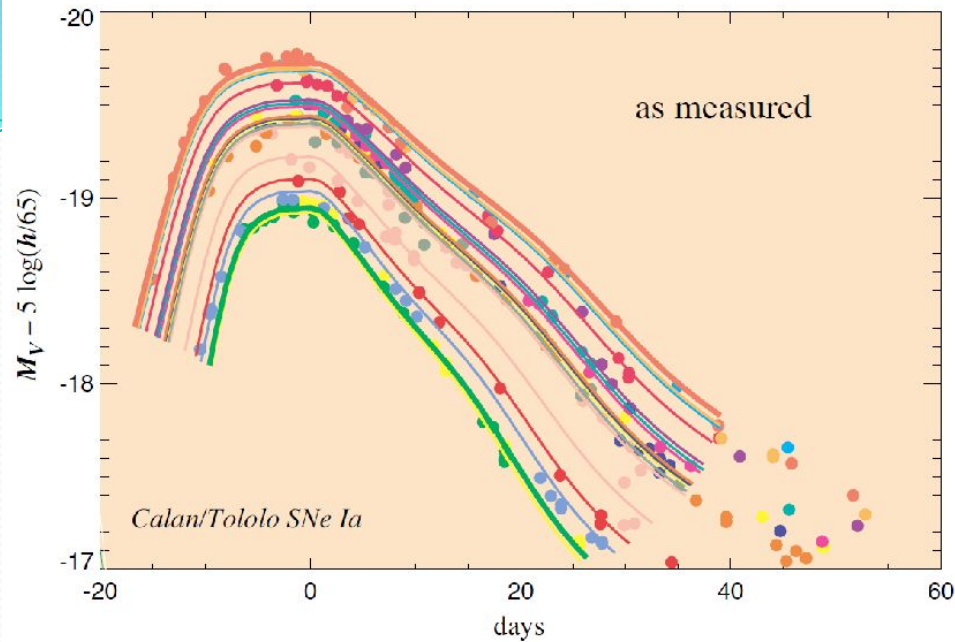
Коррекция потока за красное смещение спектра и коррекция поглощения пылью фильтрацией в двух полосах.





Сильно покрасневшие сверхновые. **Поглощение пылью или пекулярные???**  
**Проблема «Стандартной свечи»!!!**

## V Band



S<sub>NIa</sub> малой яркости обладают меньшими характерными временами нарастания и спада яркости. Наличие такой зависимости делает возможной коррекцию на общее характерное время для кривой блеска, что сводит все S<sub>NIa</sub> к одной абсолютной величине.

**Стандартная свеча!!!**

# Сверхновые типа Ia обладают всеми необходимыми свойствами, чтобы проверить ожидаемое замедление со временем расширения Вселенной

$$\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \frac{8\pi \rho_0 R_0^3 G}{3R} - \frac{8\pi GR_0^2}{3} \left( \rho_0 - \frac{3H_0^2}{8\pi G} \right) = \frac{8\pi \rho_0 R_0^3 G}{3R} - R_0^2 H_0^2 \left( \frac{\rho_0}{\rho_{cr,0}} - 1 \right)$$

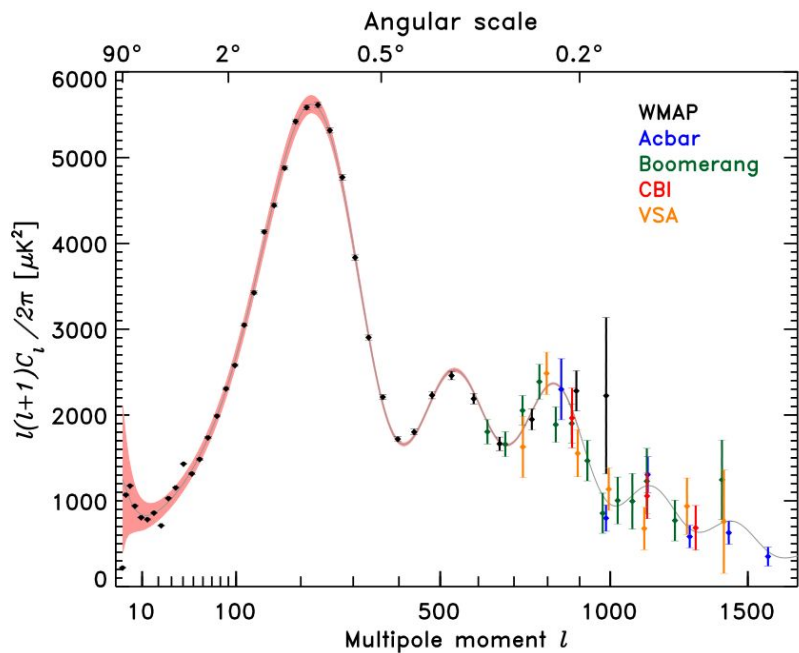
$$\rho_{cr,0} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h_{100}^2 \left[ \Gamma/\text{см}^3 \right]$$

**критическая плотность** в момент  $t_0$  (численно приведена критическая плотность в настоящее время, нормированная на значение постоянной Хаббла  $h_{100} = H_0/100$  км/с/Мпк)

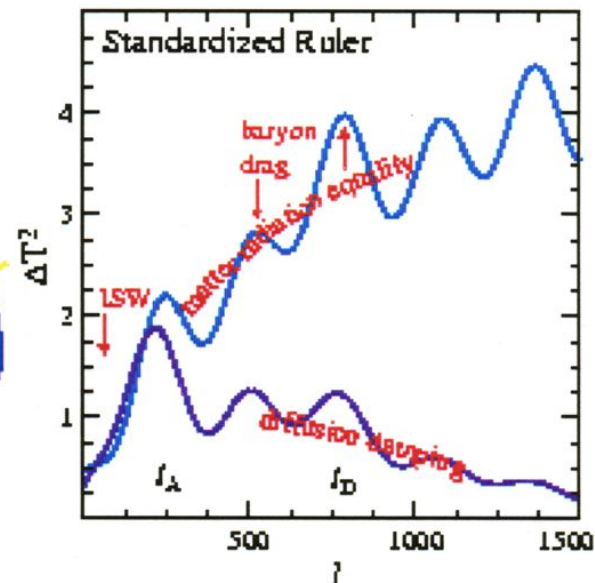
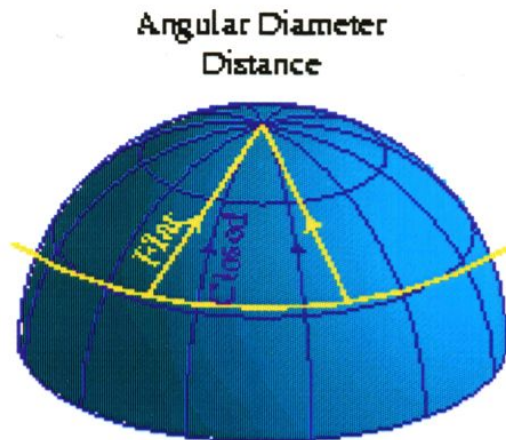
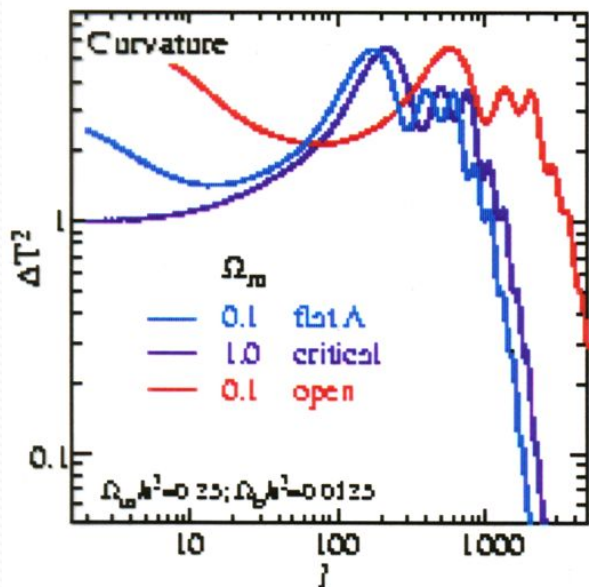
$$\Omega_{m,0} \equiv \frac{\rho_0}{\rho_{cr,0}} = \frac{8\pi G\rho_0}{3H_0^2} \quad \text{параметр плотности Вселенной}$$

$$\left(\frac{\dot{R}}{R(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \left(\frac{c}{R_c}\right)^2$$

$\Omega_{m,0} < 1 \Rightarrow R_c^2 < 0 \Rightarrow$  отрицательная кривизна, открытая Вселенная  
 $\Omega_{m,0} > 1 \Rightarrow R_c^2 > 0 \Rightarrow$  положительная кривизна, закрытая Вселенная  
 $\Omega_{m,0} = 1 \Rightarrow R_c^2 \rightarrow \infty \Rightarrow$  нет кривизны, плоская Евклидова Вселенная



Спектр мощности реликтового излучения (распределение энергии по угловым масштабам, то есть по мультиполям)  
Спектр получен по данным наблюдений: WMAP (2006), Acbar (2004) Boomerang (2005), CBI (2004) и VSA (2004). Розовая область показывает теоретические предсказания



Наблюдения свидетельствуют, что наше пространство в целом евклидово и радиус кривизны стремится к бесконечности.

В настоящее время  $dR/dt > 0$  (красное смещение – Вселенная расширяется), первое слагаемое  $\sim 1/R$ , значит, в прошлом скорость расширения была больше (т. е. расширение должно замедляться – очевидное свойство движения с учетом тормозящего действия гравитации), и в рассматриваемой модели в прошлом был момент такой, что  $dR/dt \rightarrow +\infty$  при  $R \rightarrow 0$  (сингулярность). Итак, **прошлое целиком определяется поведением первого слагаемого.**

$q_0 \equiv -\left(\frac{\ddot{R}R(t)}{R^2}\right)_0$ 

 параметр замедления, определяет замедление темпа разбегания галактик

Необходимо определить темп расширения Вселенной на различных красных смещениях с использованием SnIa

Для источника с известной светимостью  $L$  измеренный поток  $I$ . В таком случае, фотометрическое расстояние определяется как

$$I \equiv \frac{L}{4\pi d_L^2} \Rightarrow d_L = \frac{c}{H_0} \left( z + \frac{1}{2}(1 - q_0)z^2 + \dots \right)$$

$$d_L = \frac{cz}{H_0} \left( \frac{1 + z + \sqrt{1 + 2q_0z}}{1 + q_0z + \sqrt{1 + 2q_0z}} \right) - \text{аналитическое решение (Mattig, 1958)}$$

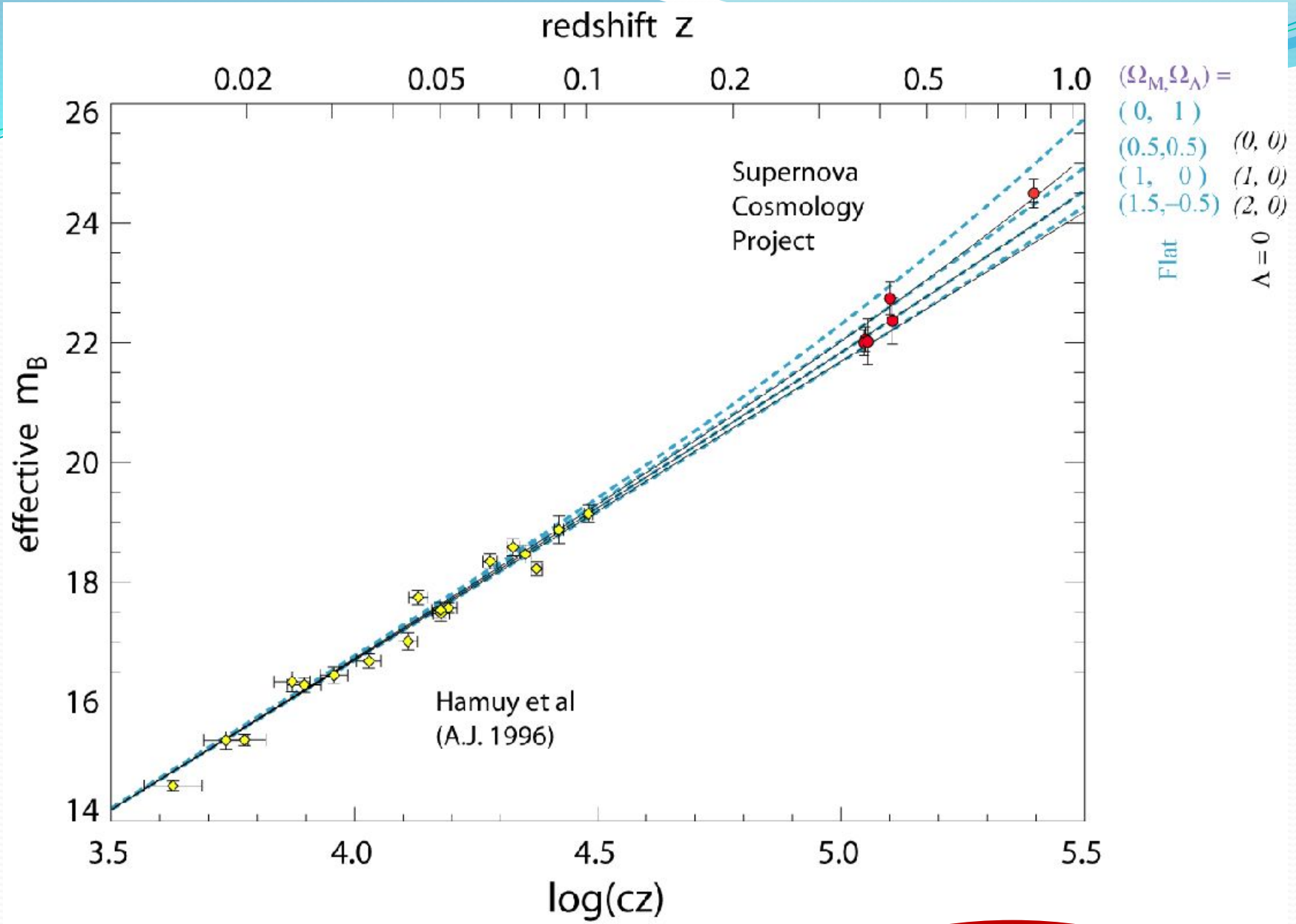
Для определения параметра замедления используются «стандартные свечи» (SNIa) и зависимость фотометрического расстояния от красного смещения.

$$m - M = 5 \log_{10} \left( \frac{d_L}{10 \text{ нк}} \right) \approx 5 \log_{10} \left( \frac{c}{H_0 \cdot 10 \text{ нк}} \right) + 5 \log_{10}(z) + 5 \log_{10} \left( 1 + \frac{1}{2}(1 - q_0)z + \dots \right)$$

$$m - M = 42.38 - 5 \log_{10}(h_0) + 5 \log_{10}(z) + 1.086(1 - q_0)z + \dots$$

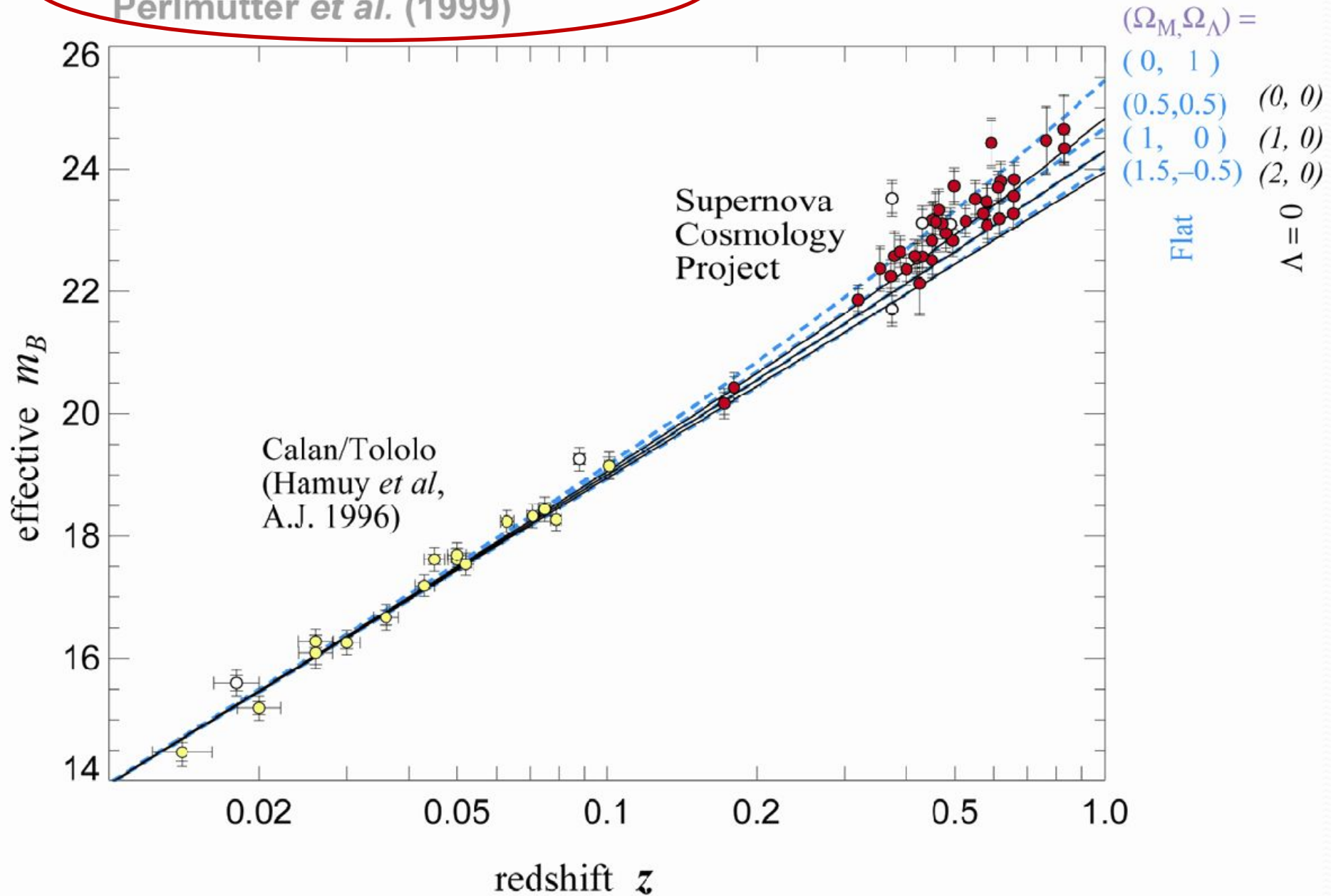
Для определения  $q_0$  нет необходимости в знании  $M$  и  $h_0$  с высокой точностью, но  $M$  должна быть константой. Для малых  $z$ :  $m \sim \log_{10} z$ . Для больших  $z$  кривая зависимости уходит вверх, что позволяет оценить  $q_0$ .

**Параметрами модуля расстояния ( $m-M$ ) являются красное смещение и плотность энергии гравитирующей материи (через постоянную Хаббла)**



Perlmutter, et al.  
Nature (1998)

Supernova Cosmology Project  
 Perlmutter *et al.* (1999)





Наблюдения большого числа SnIa к 1999 г. показали, что модели Большого Взрыва с преобладанием (либо полным доминированием) плотности энергии гравитирующего вещества и инфляционной стадией не могут воспроизвести результаты наблюдений SnIa. Далекие сверхновые оказались заметно слабее, чем должны были бы быть при замедляющемся расширении.

Система уравнений

Фридмана

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} - \frac{\kappa c^2}{a^2} \Leftrightarrow \dot{R}^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} R^2 + \frac{1}{3} \Lambda R^2 - \frac{c^2}{R_{c,0}^2} : \text{уравнение энергии}$$

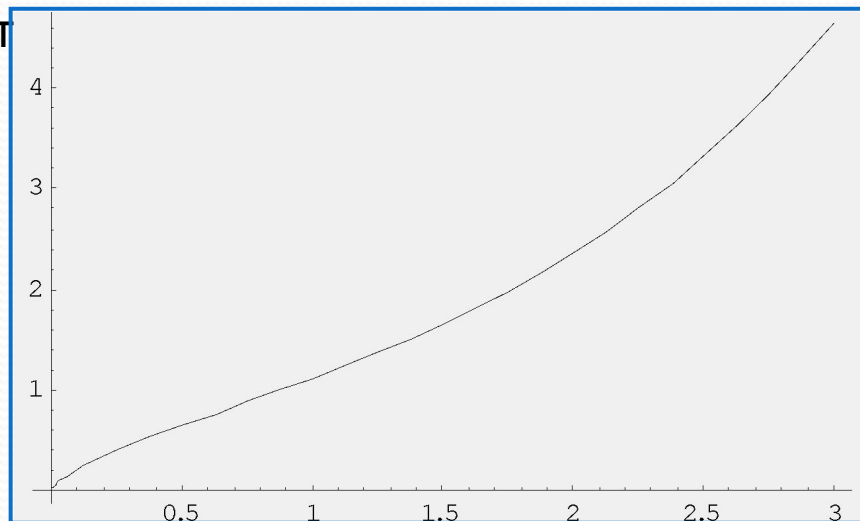
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left( \rho + 3 \frac{P}{c^2} \right) + \frac{1}{3} \Lambda c^2 \Leftrightarrow \ddot{R} = -\frac{4\pi GR}{3} \left( \rho + 3 \frac{P}{c^2} \right) + \frac{1}{3} \Lambda R : \text{уравнение движения}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = -3H \left( \rho + 3 \frac{P}{c^2} \right), \quad H(t) \equiv \frac{\dot{a}}{a(t)} : \text{уравнение неразрывности}$$

$$\Omega_m \equiv \frac{8\pi G\rho}{3H^2} = \frac{\rho}{\rho_{cr}}; \quad \Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda c^2}{3H^2}; \quad \Omega_c \equiv -\frac{\kappa c^2}{a^2 H^2} \Leftrightarrow 1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_c : \text{для любого } t$$

В случае  $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$  и  $P = 0$  (пылевидная материя) существует аналитическое решение для роста масштабного фактора

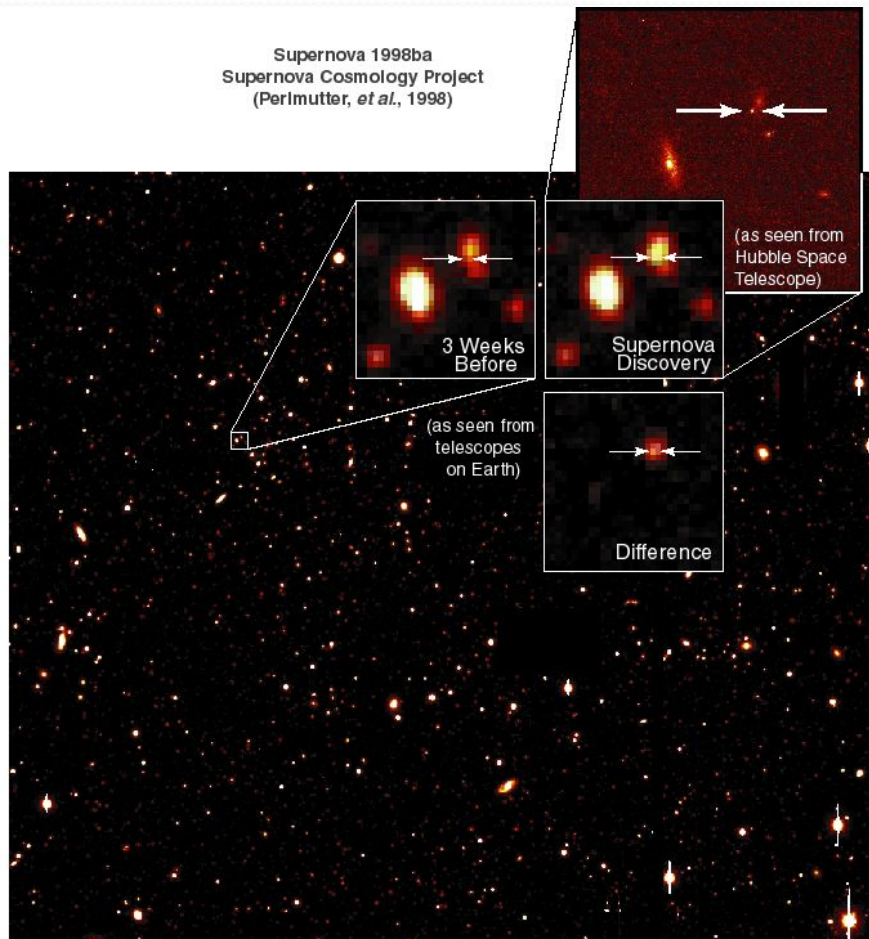
$$a(t) \propto \left( \sinh \left( \frac{3}{2} \sqrt{\frac{\Lambda}{3}} ct \right) \right)^{2/3}$$



Решение гладко переходит от степенного закона роста ( $a \sim t^{2/3}$  – соответствует классическому хаббловскому расширению при  $\rho_0 = \rho_{cr,0}$ ) к стадии экспоненциального расширения ( $a \sim \exp((\Lambda/3)^{1/2}t)$ ). Красное смещение  $z_{co}$ , на котором происходит смена режима ускорения на замедление, находится по формуле

$$1 + z_{co} = \left( \frac{2\Omega_\Lambda}{\Omega_m} \right)^{1/3}$$

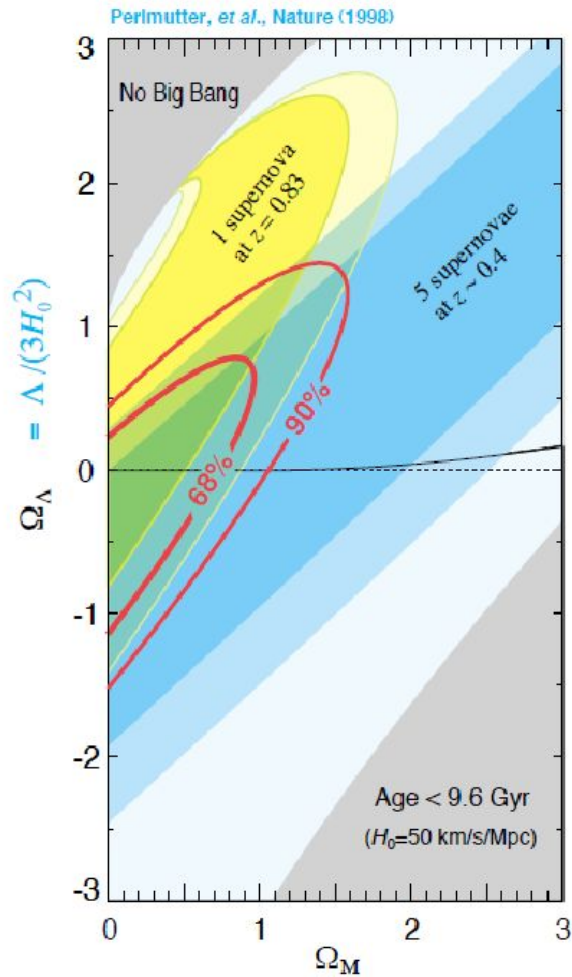
Наблюдения далеких сверхновых типа Ia свидетельствуют в пользу плоской модели с  $\Omega_\Lambda \approx 0.7$ , т. е. красное смещение, начиная с которого Вселенная расширяется с ускорением, всего около  $z_{co} \approx 0.6 \div 0.7$



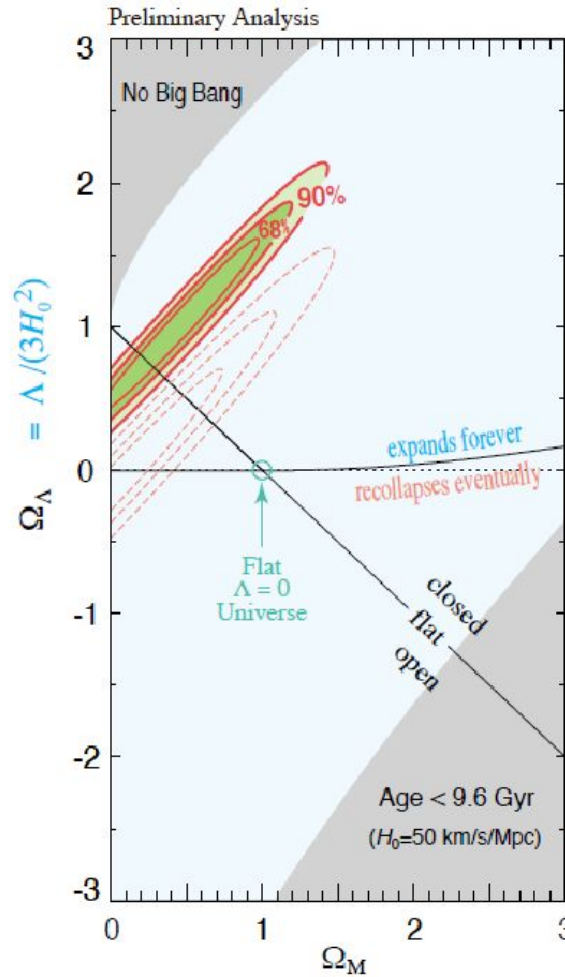
Наблюдения сверхновых, расположенных на разных дистанциях и анализ потока как функции плотности энергии гравитирующей материи и космологической постоянной дают возможность разделить влияние гравитирующей материи и космологической постоянной.

Показанная на рисунке Sn1998ba, была одной из первых сверхновых, явно указывающих на необходимость учета вклада космологической постоянной.

### Results: $\Omega$ vs $\Lambda$ from 6 supernovae



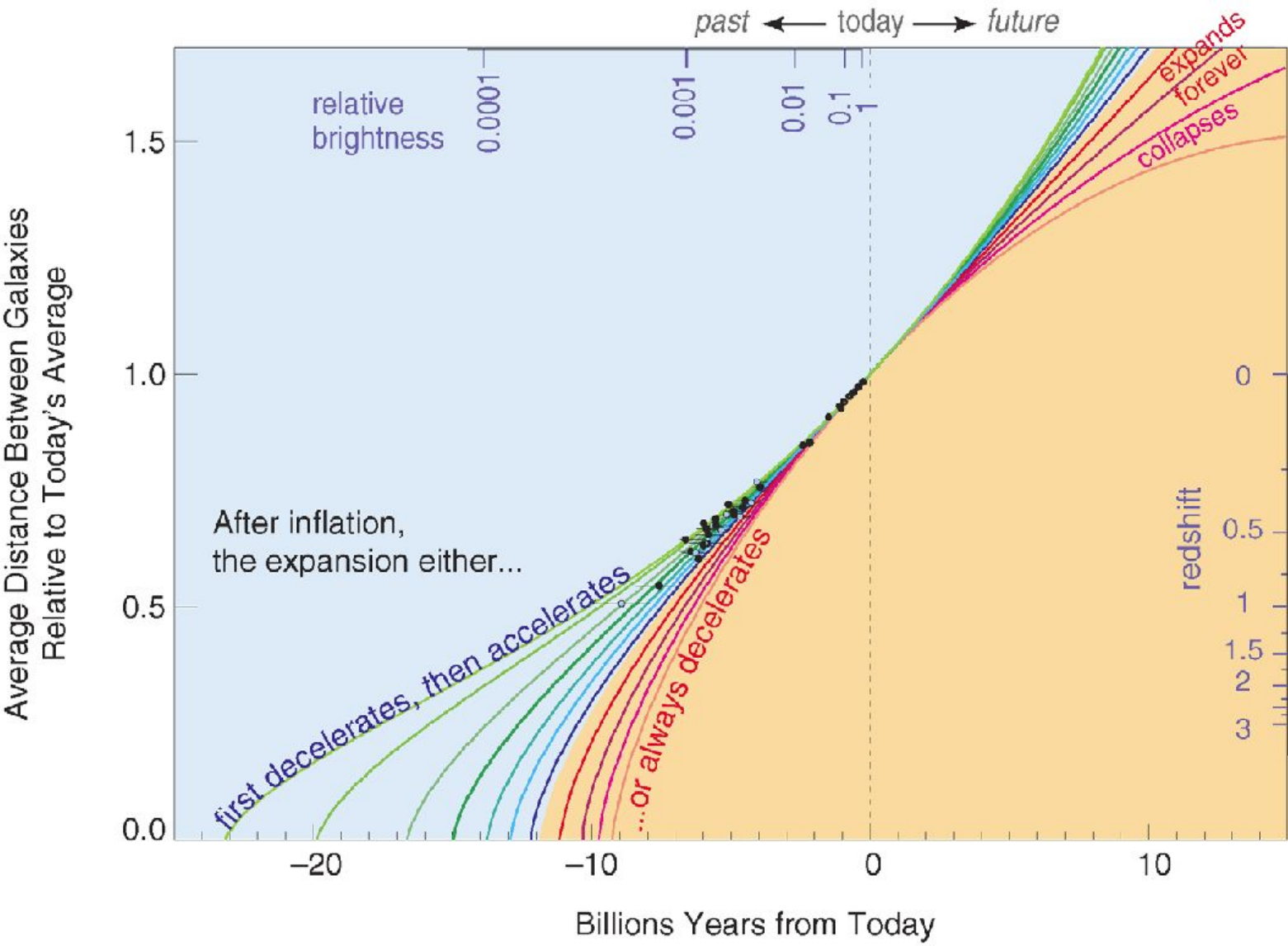
### Results: $\Omega$ vs $\Lambda$ from 40 supernovae

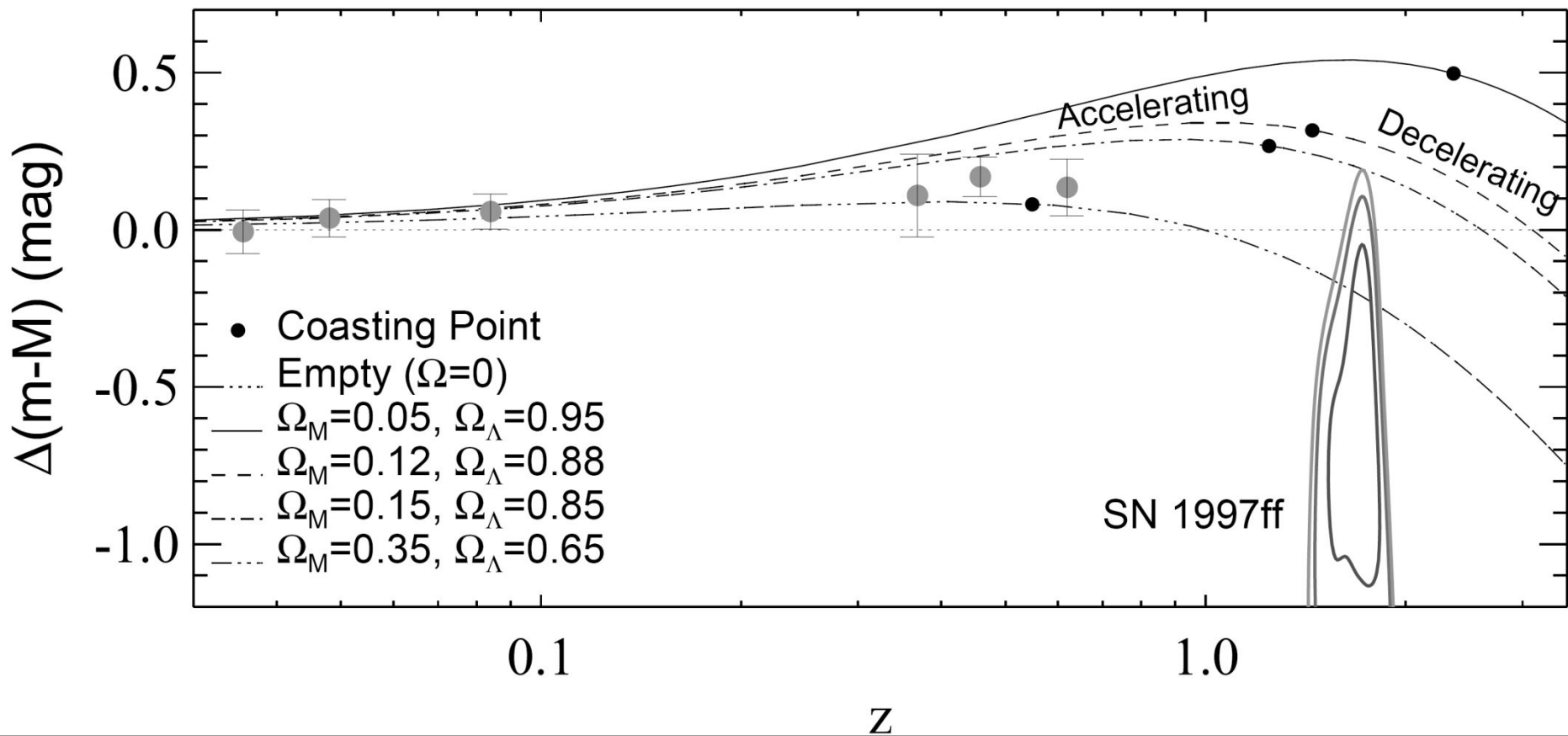


Параметрами при построении графиков являются красное смещение, плотность энергии гравитирующей материи и космологической постоянной

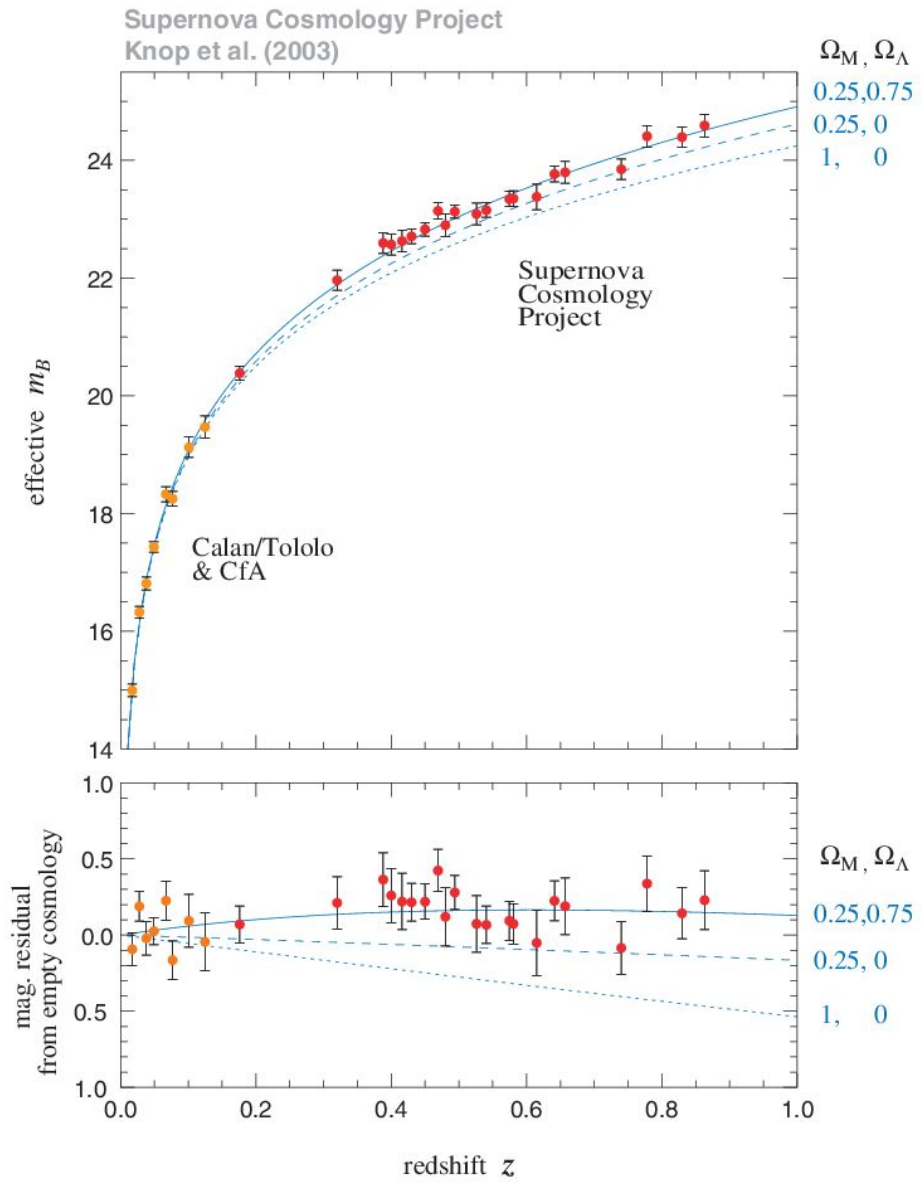
Расчеты определяют, какую видимую величину должна иметь сверхновая на наблюдаемом  $Z$  и при выбранных значениях космологических параметров  $\Omega_\Lambda, \Omega_m$

# Expansion History of the Universe

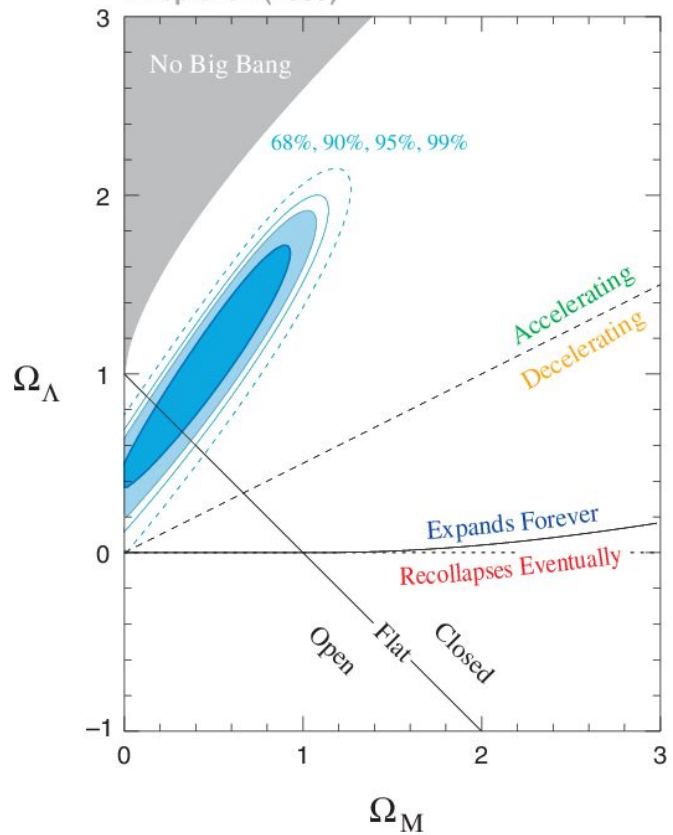




Разница в модулях расстояния известных космологических сверхновых Ia в различных космологических моделях относительно модели линейно однородно расширяющейся Вселенной («пустая Вселенная» с  $\Omega = 0$ ) (горизонтальная линия). До красных смещений  $z = 1$  индивидуальные сверхновые усреднены. Для каждой модели отмечена точка (черная точка), в которой ускорение сменяется замедлением. Свет от самой далекой SN1997ff был испущен в тот момент, когда Вселенная расширялась с замедлением. [Из работы A. Riess et al. 2001, astro-ph/0104455]

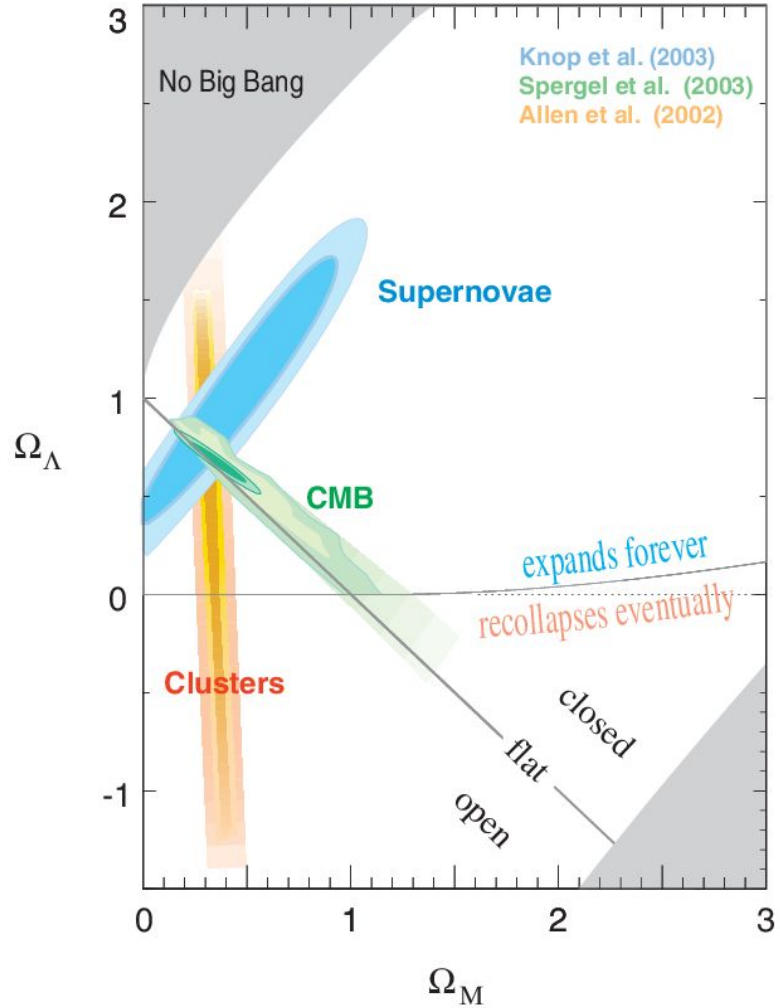


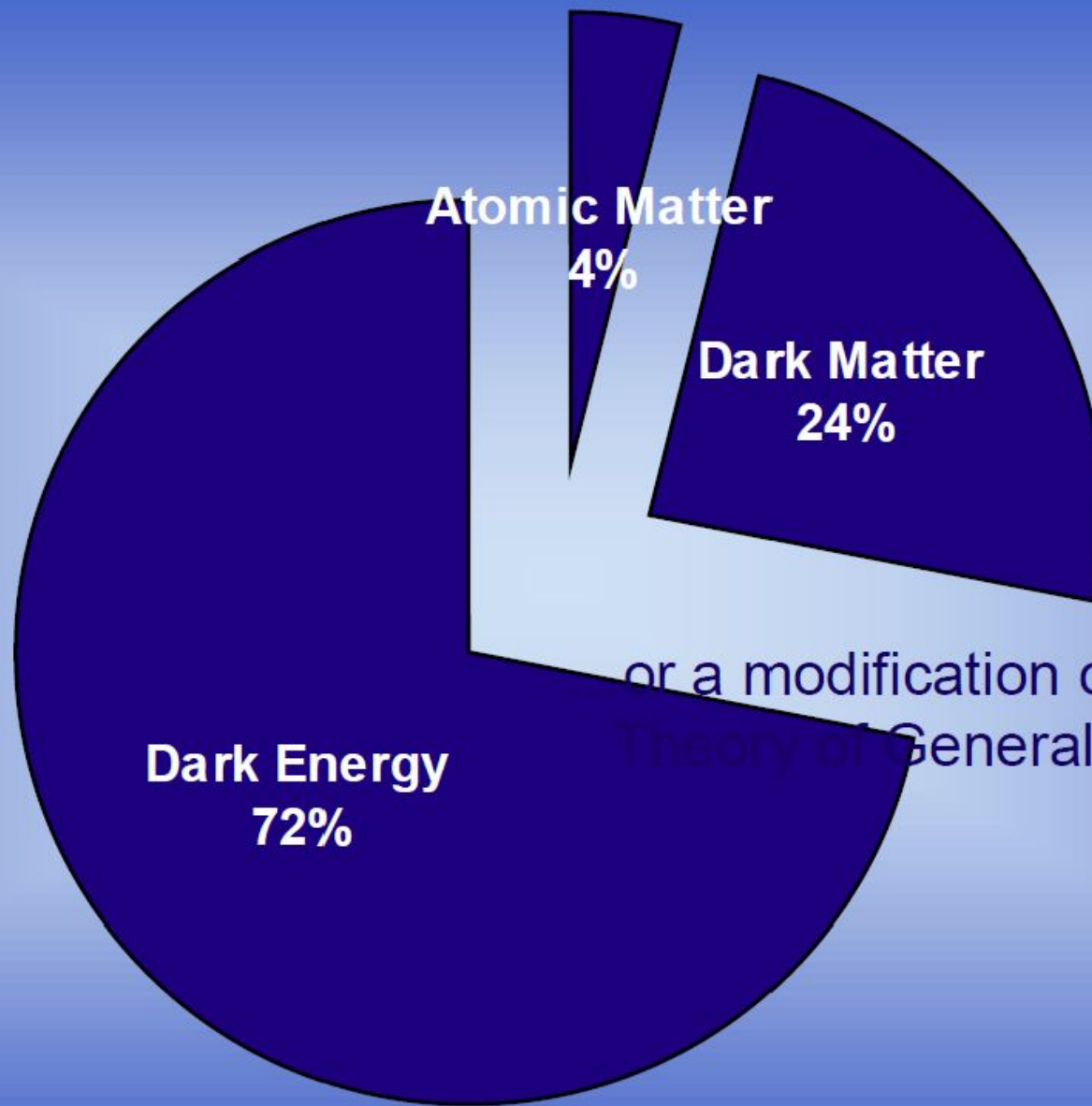
Supernova Cosmology Project  
Knop et al. (2003)





Supernova Cosmology Project





or a modification of Einstein's  
Theory of General Relativity?