



Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»  
Институт ядерной физики и технологий  
Кафедра физики элементарных частиц №40

# Ускоренное расширение Вселенной



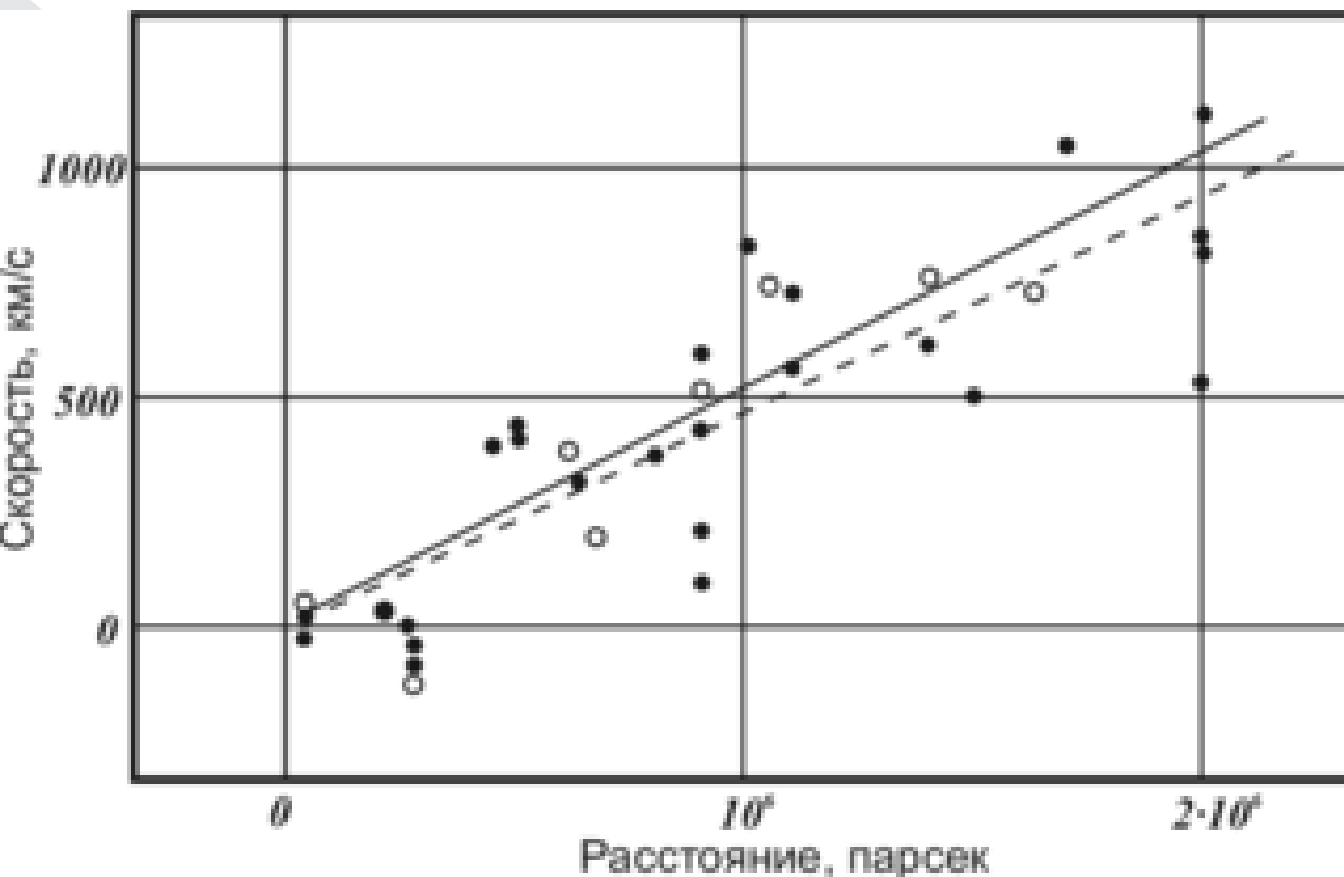
# История космологии



Слева — пластинка, полученная Эдвином Хабблом в ночь с 5 на 6 октября с помощью телескопа Hooker в обсерватории M.W. Observatory.

Справа — фотография галактики Андромеды, сделанная космическим телескопом “Хаббл” .

# История космологии



Закон Хаббла:

$$v = H_0 r$$

$v$  – скорость галактики

$r$  – расстояние до неё

$H_0$  – коэффициент пропорциональности

График из оригинальной работы Хаббла 1929 года

## Уравнение движения

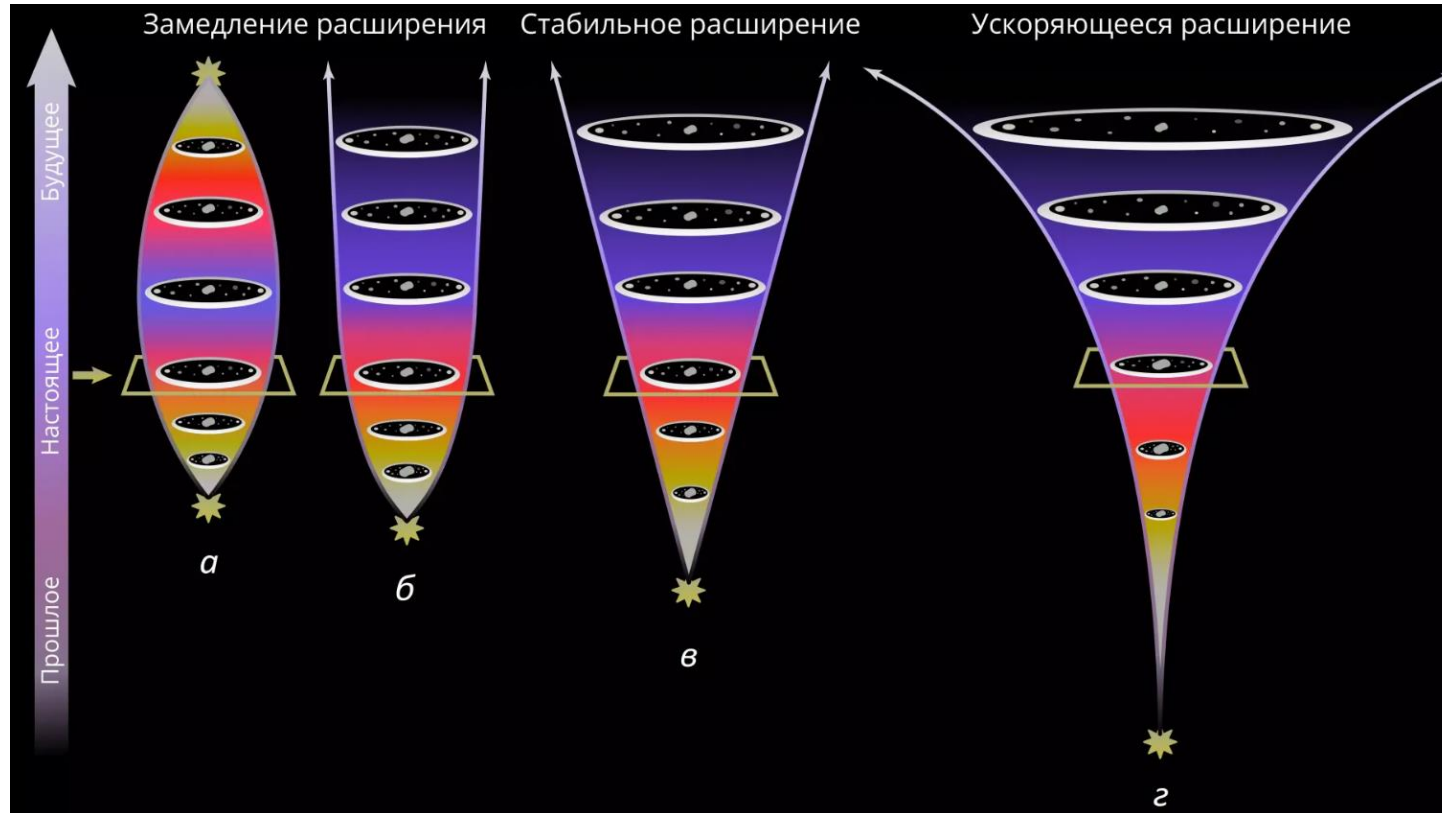
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} (\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

$\Lambda < 0$  – сжатие Вселенной

$\Lambda = 0$  – эволюция зависит от начальной плотности вещества

$\Lambda > 0$  – эволюция зависит от геометрии пространства

# Расширение Вселенной



а) и б)  $k = 1$  – Вселенная статична или сжимается

в)  $k \leq 0$  и  $\Lambda = 0$  – монотонное расширение

г)  $k \leq 0$  и  $\Lambda > 0$  – ускоренное расширение

# Нобелевская премия по физике 2011 года



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

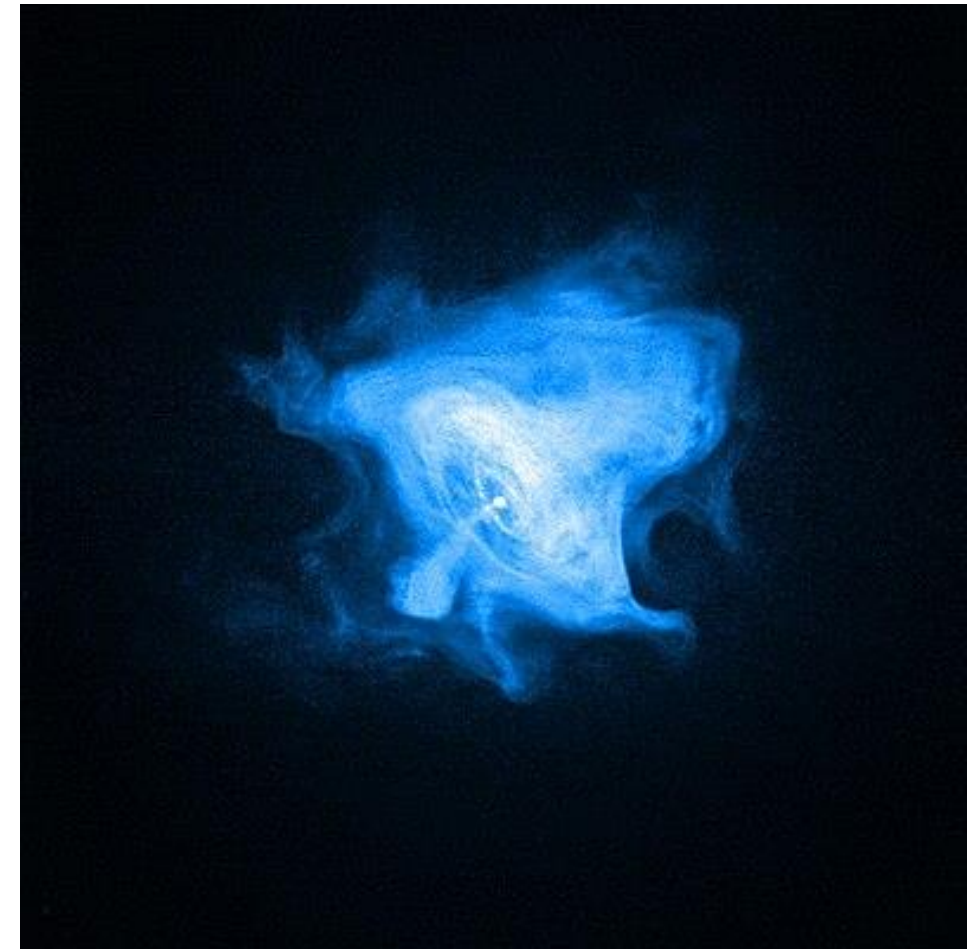
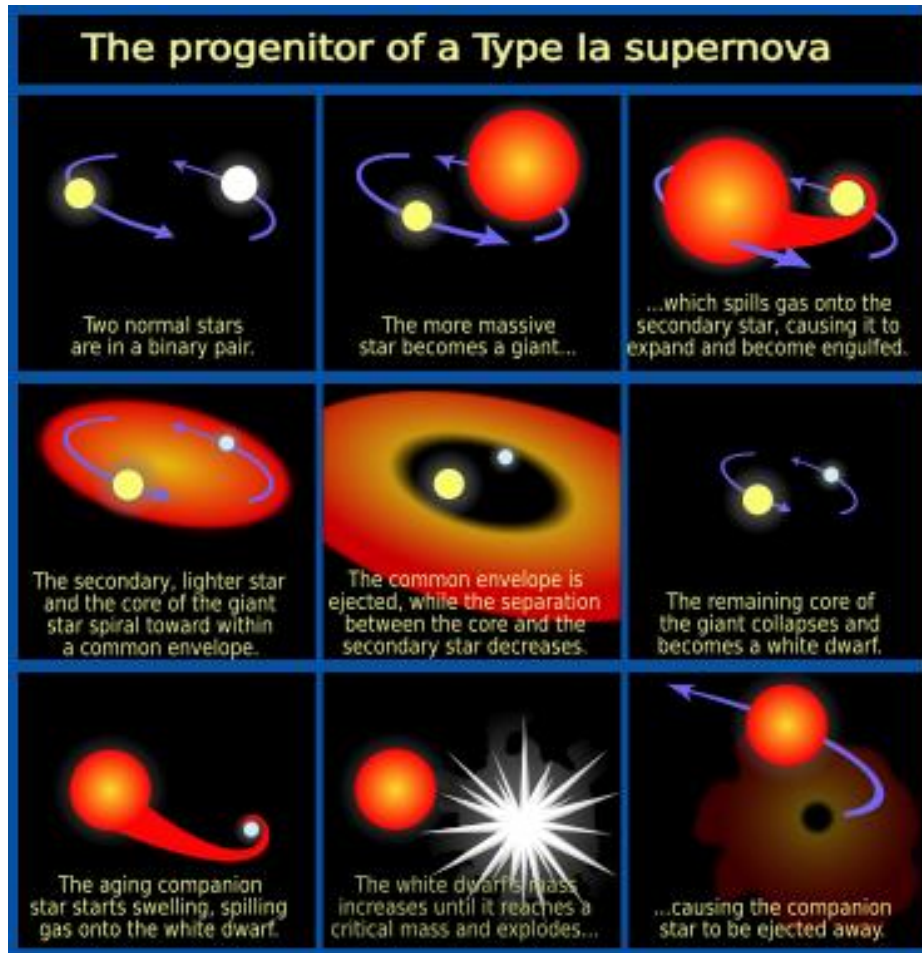
Adam G. Riess



Галактика NGC 4526.

Яркая точка в левом нижнем углу – сверхновая Ia.

# Сверхновые Ia (SNIa)



Механизм образования сверхновой Ia

Крабовидная туманность – остаток сверхновой



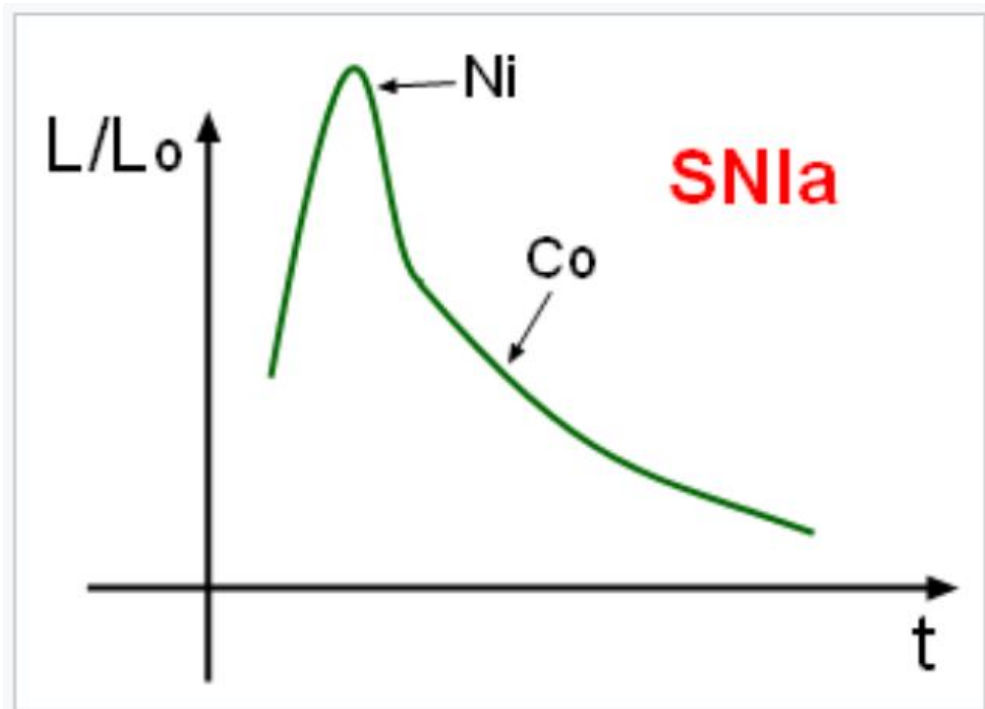


График зависимости светимости SN Ia от времени. Пик обусловлен распадом никеля-56 (Ni), дальнейшая светимость определяется распадом кобальта-56 (Co)



График зависимости светимости SN II от времени. Кривые блеска уникальны для каждой сверхновой.



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

**Saul Perlmutter**



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

**Brian P. Schmidt**



© The Nobel Foundation. Photo: U. Montan

**Adam G. Riess**

**Supernova Cosmology Project (SCP)**

**Команда 34 человек**

**42 сверхновые при  $0.18 < z < 0.83$**

**High-z Supernova Search Team (HZT)**

**Команда 26 человек**

**16 сверхновых при  $0.16 < z < 0.62$**

# Телескопы

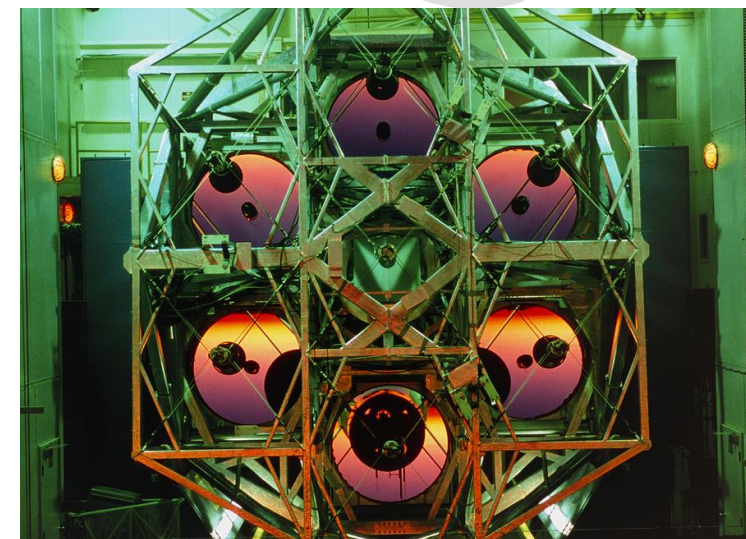


**Cerro Tololo, Чили**

**4-метровый телескоп Виктора Бланко**



**Обсерватория Кека, Гавайи  
Два 10-метровых телескопа**

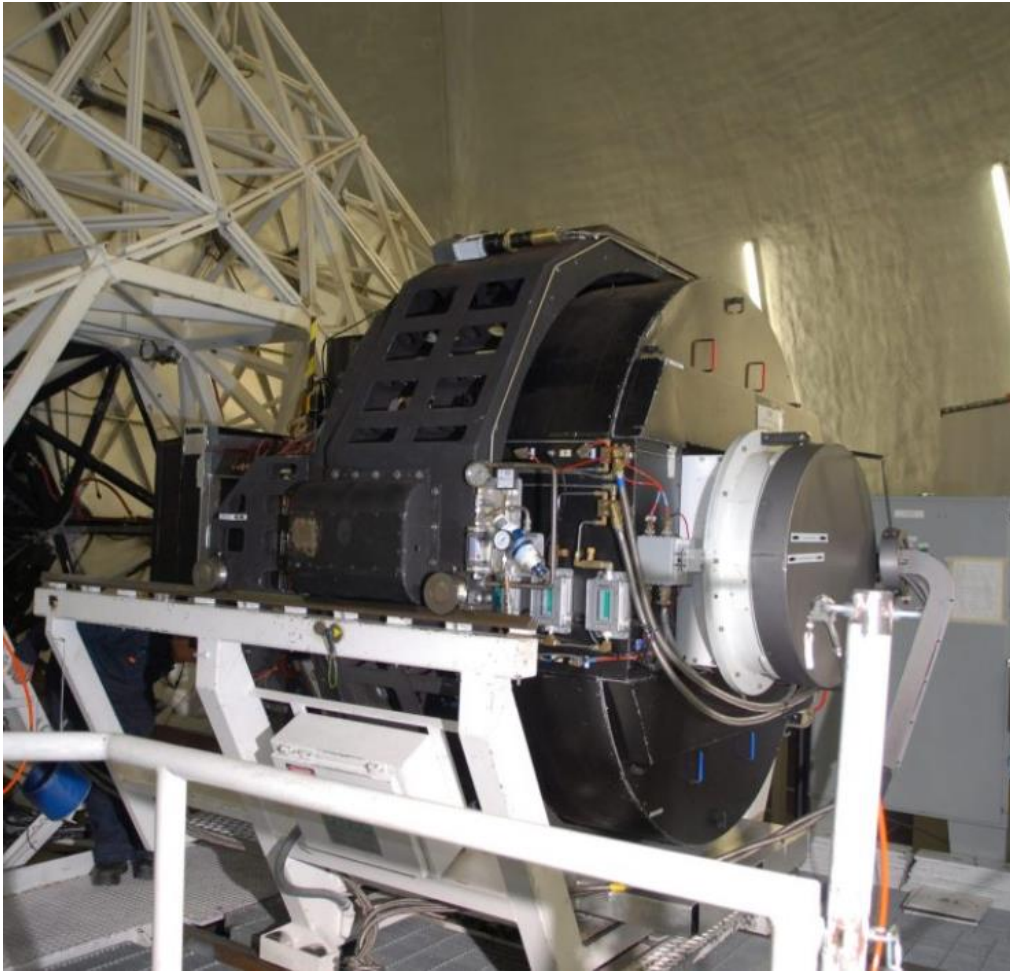


**Multiple Mirror Telescope, США  
6 зеркал диаметром 1,8 метра**



**European Southern Observatory, Чили  
3,6-метровый телескоп**

# Инструменты



**LRIS - Low-Resolution Imaging Spectrograph, спектрограф обсерватории Кека**

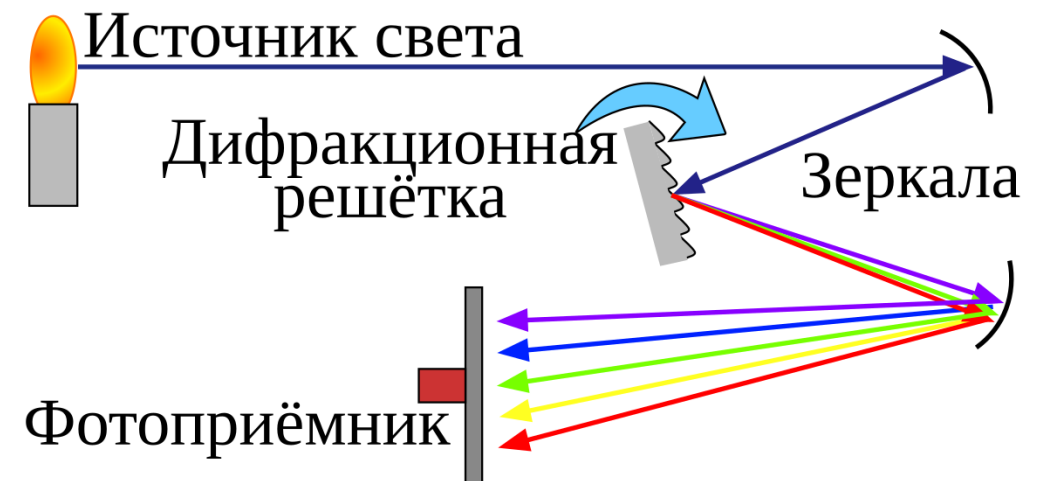
Для определения химического состава применяется спектрограф.

Сверхновые SN Ia:

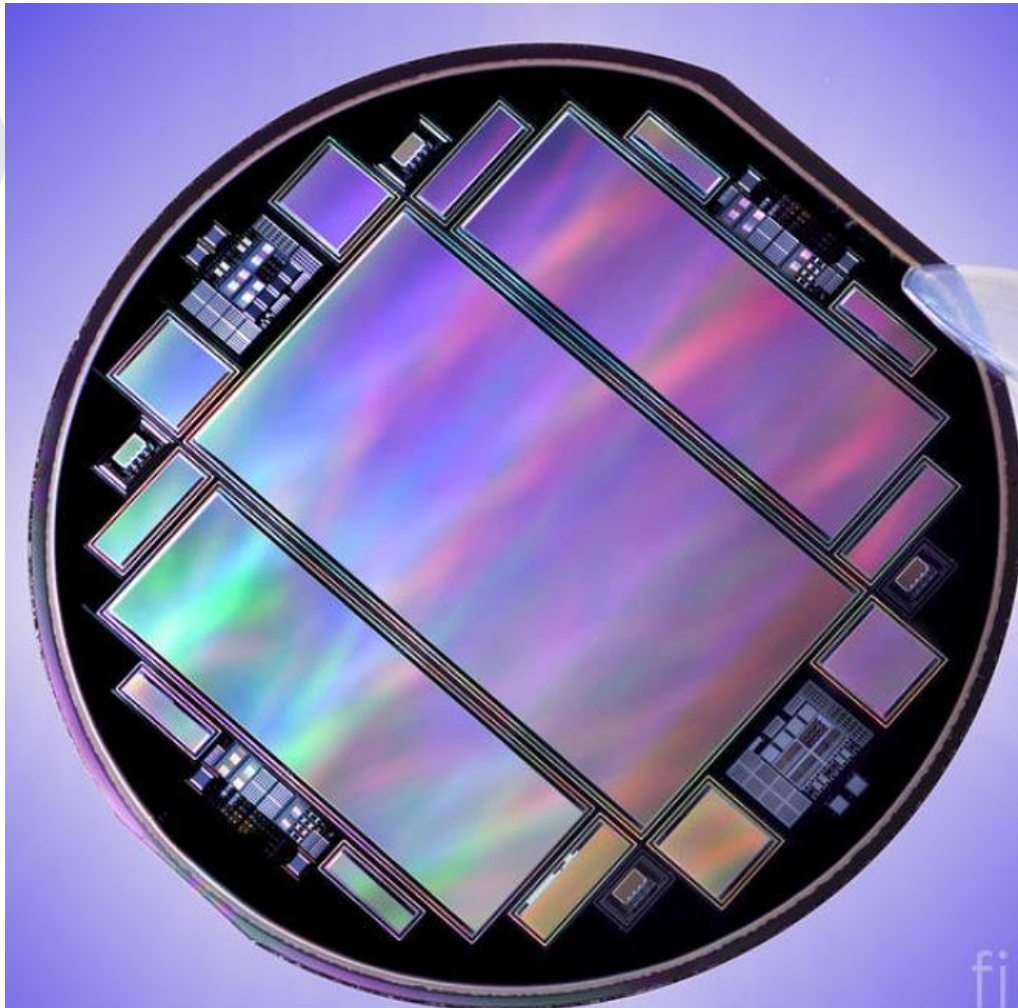
- Наличие кремния
- Отсутствие водорода и гелия

Сверхновые SN II:

- Наличие водорода



# Камера



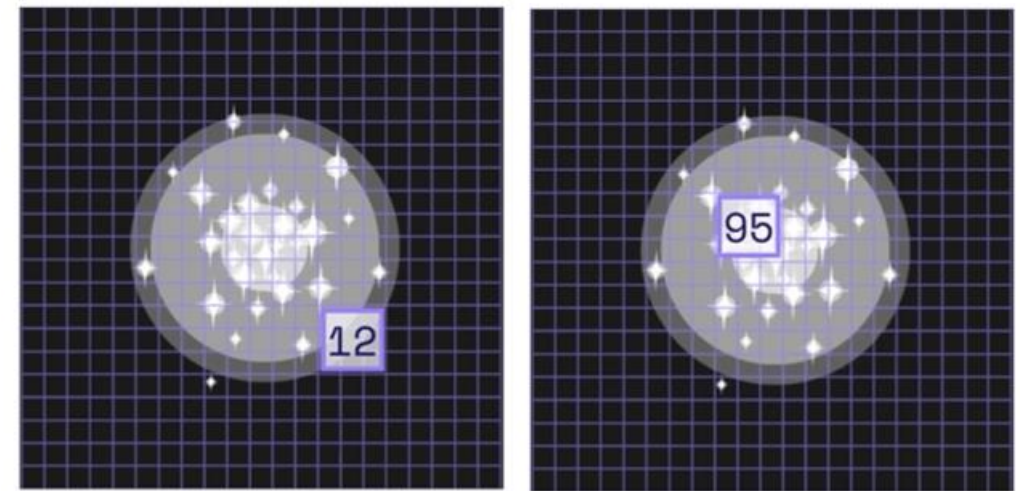
ПЗС матрица телескопа Кека

$$m = -5 \log_{10} \frac{F}{F_0}$$

$m$  – звёздная величина

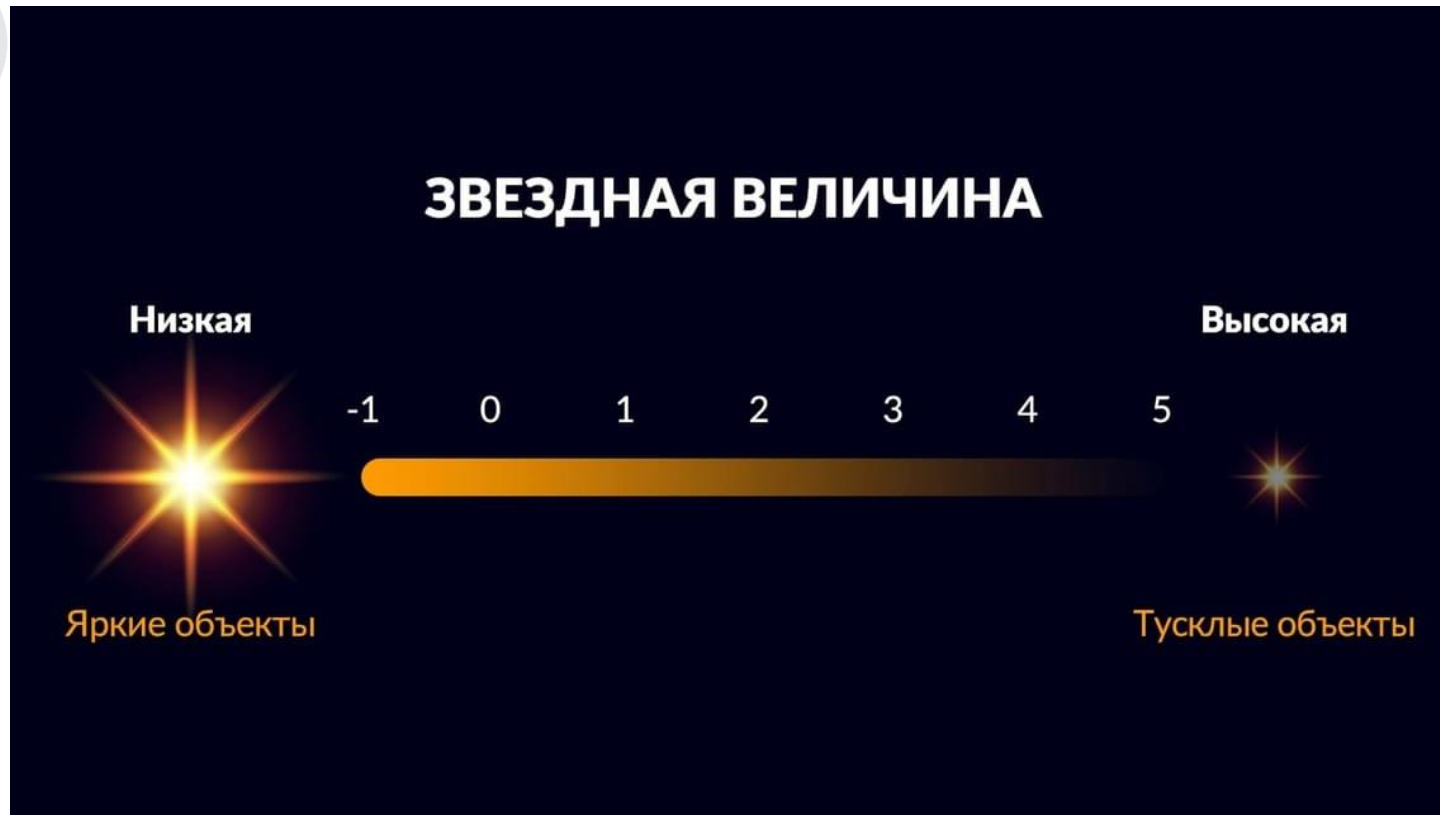
$F$  – наблюдаемая плотность потока

$F_0$  - точка отсчёта, плотность потока звезды со звёздной величиной равной 0



Яркость пикселя зависит от числа электронов (числа зарегистрированных фотонов)

# Определение расстояния до звёзд



Звёздная величина ( $m$ ) - это безразмерная числовая характеристика яркости объекта (от латинского *magnitudo*).

$$\mu = m - M = 5 \lg \frac{r}{10 \text{ Пк}}$$

$M$  – абсолютная з.в.

$m$  – наблюдаемая з.в.

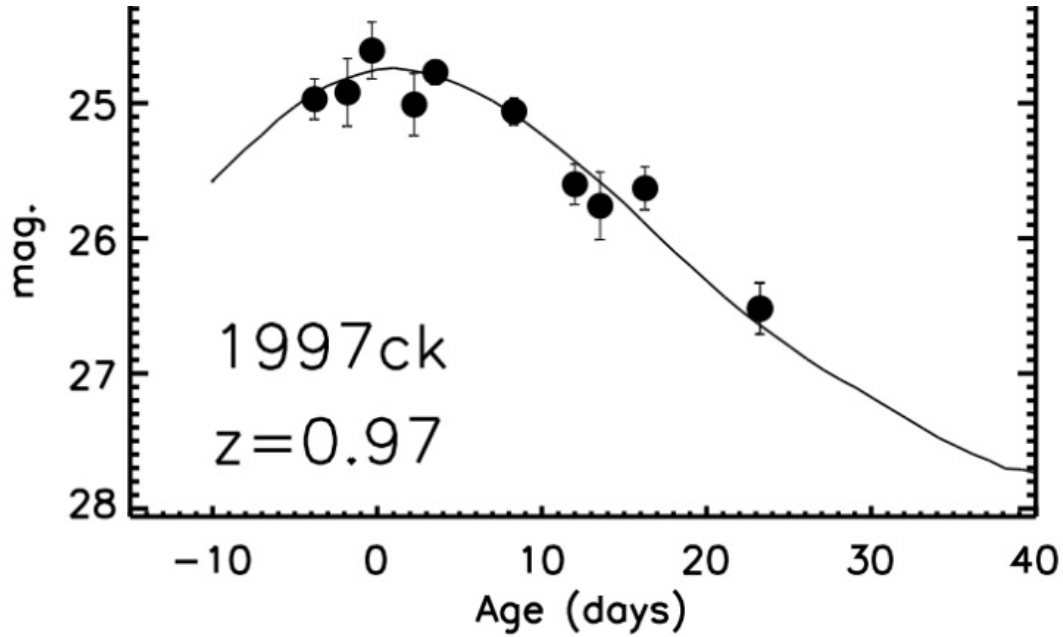
$\mu$  - модуль расстояния.

**Абсолютная звёздная величина SNIa в пике светимости составляет -19,5 mag**

**$m(\text{Солнца}) = -26.75 \text{ mag}$**

**$M(\text{Солнца}) = -4.8 \text{ mag}$**

## Наблюдаемая звёздная величина SNIa ( $z > 0.1$ – расстояние больше 1 млрд. св. лет)



Теоретическая модель:

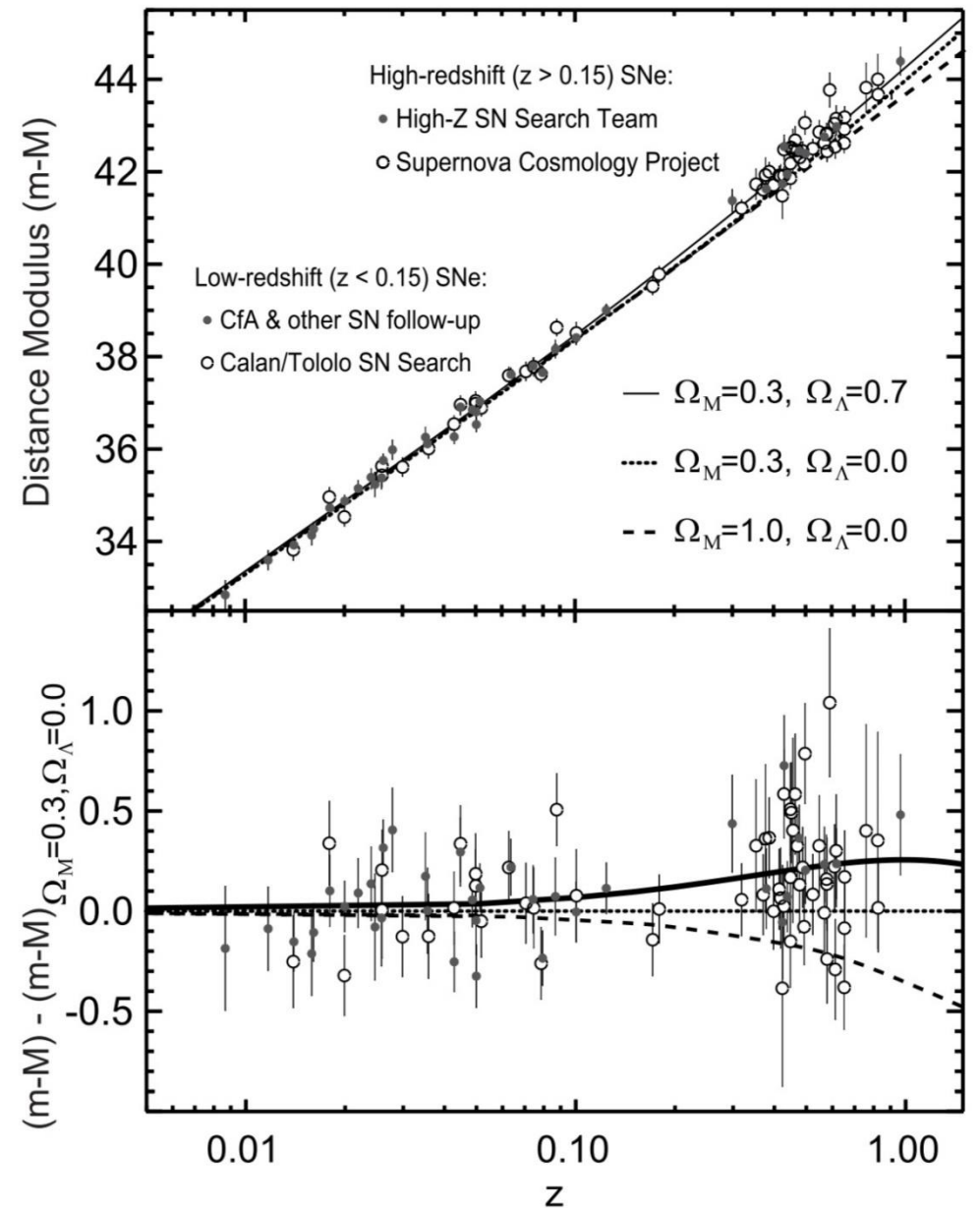
$$\mu = m - M = 5 \lg D_L + 25$$

$D_L$  - luminosity distance

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

Параметр замедления (если  $< 0$ , то Вселенная расширяется с ускорением):

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



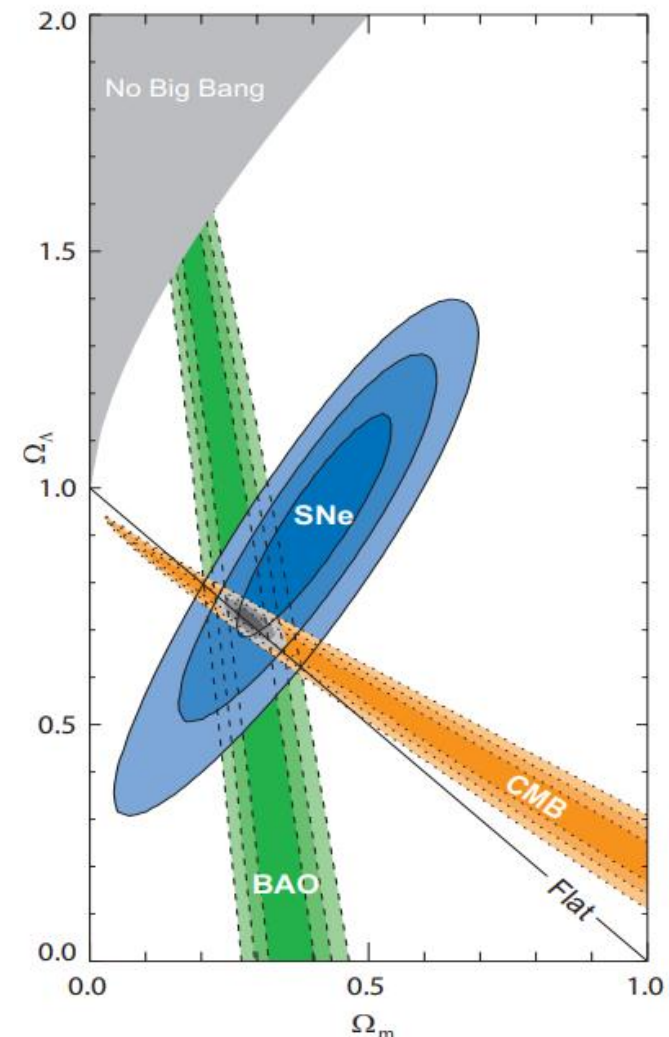
Верхний график - Диаграмма Хаббла  $\mu(z)$ .

Нижний – разница экспериментального и теоретического (для  $\Omega_\Lambda = 0.0, \Omega_M = 0.3$ ) модуля расстояния  $\mu(z)$ .

# Заключение

Результаты наблюдений двух независимых команд:

- ❑ Данные HZT включают в себя 16 сверхновых при  $0.16 < z < 0.62$ .
- ❑ Данные SCP включают в себя 42 сверхновых при  $0.18 < z < 0.83$ .
- ❑ Параметр Хаббла  $H_0 = 73 \pm 6$  (statistical)  $\pm 7$  (systematic) км/с МПк.
- ❑ Результаты анализа исключают  $\Omega_\Lambda = 0$ .
- ❑ Если бы Вселенная была  $\Omega_M = 1$ , то сверхновые были бы на 25% ярче.
- ❑ Для случая  $\Omega_M = \Omega_\Lambda = 0$ , сверхновые были бы на 15% тусклее.
- ❑ Положительное значение  $\Omega_\Lambda$  с достоверностью 99.9% ( $4.0\sigma$ ).



**Энергетические компоненты Вселенной.**

**SNe – сверхновые**

**CMB – реликтовое излучение**

**BAO – барионные акустические колебания**  
(колебания плотности видимой б.м. Вселенной, вызванные акустическими волнами плотности в первичной плазме ранней Вселенной).





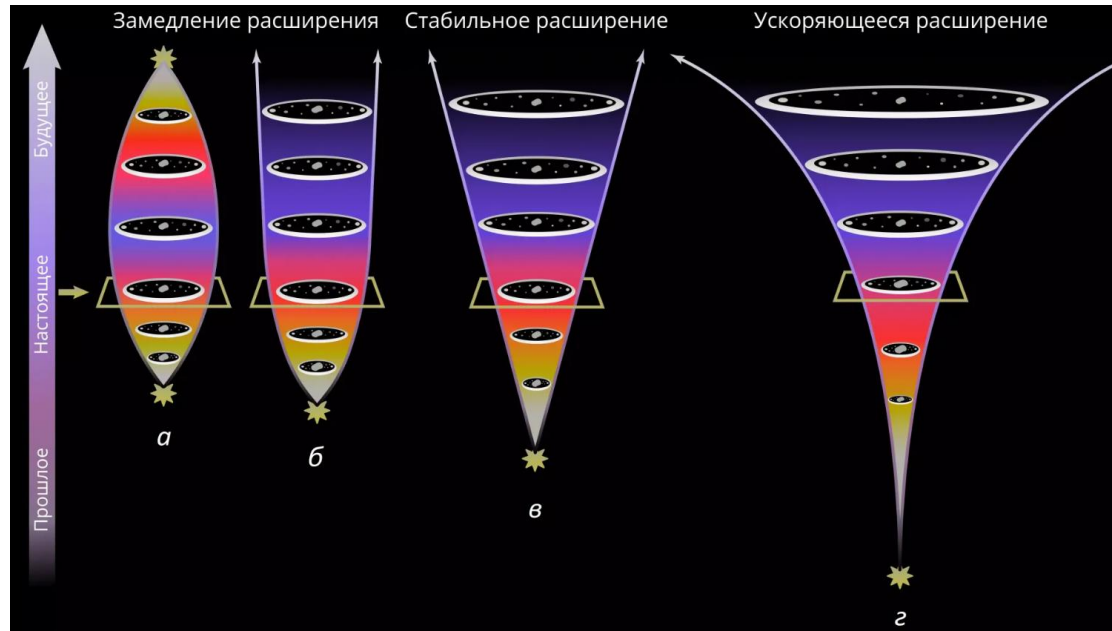
**МИФИ**

Национальный  
исследовательский  
ядерный университет

**Спасибо за внимание!**

25.12.2023

# Расширение Вселенной



При  $k=1$  выделенным значением является  $\Lambda_c = 4\pi G\rho$ . В этом случае существует такое значение  $R$ , при котором  $R' = 0$  и  $R'' = 0$ , то есть Вселенная статична.

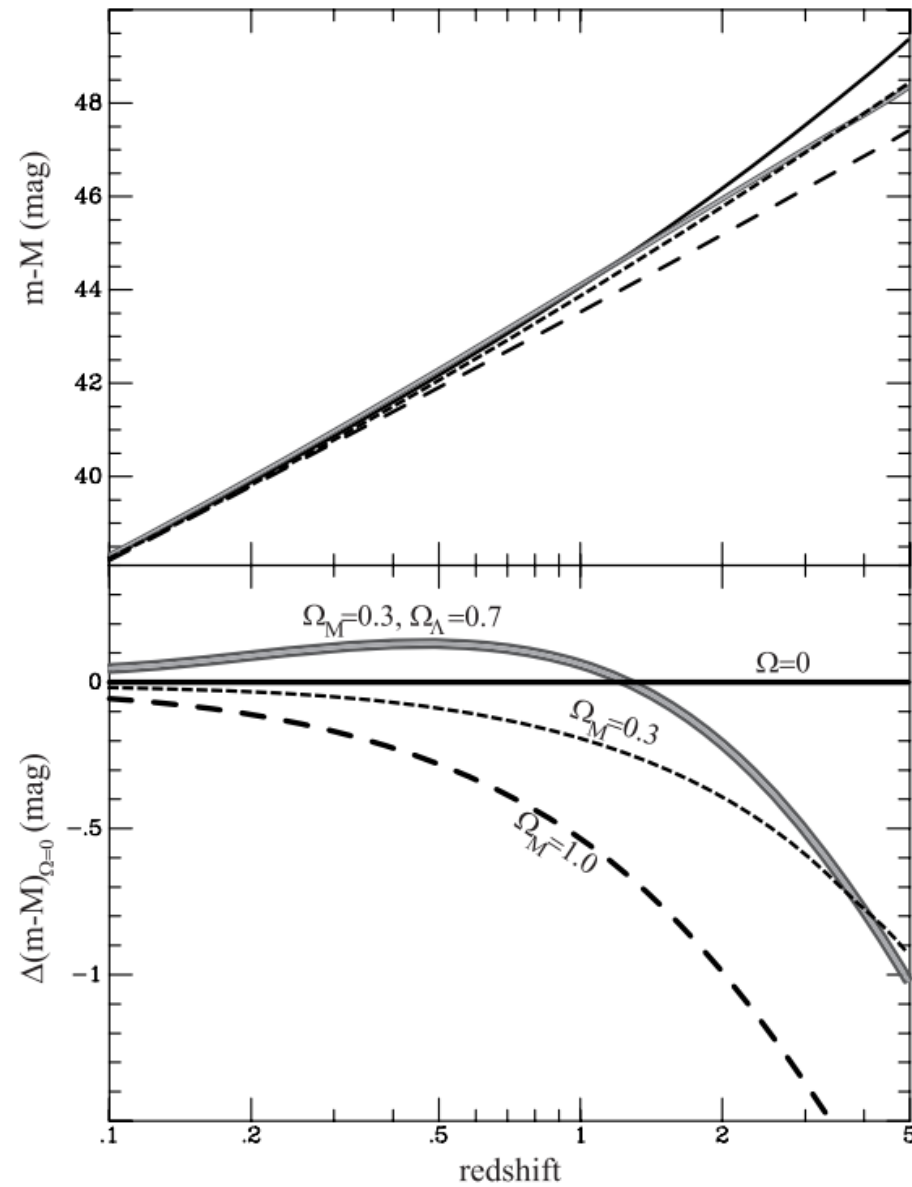
При  $\Lambda > \Lambda_c$  скорость расширения убывает до какого-то момента, а потом начинает неограниченно возрастать. Если  $\Lambda$  незначительно превышает  $\Lambda_c$ , то на протяжении некоторого времени скорость расширения остаётся практически неизменной.

В случае  $\Lambda < \Lambda_c$  всё зависит от начального значения  $R$ , с которого началось расширение. В зависимости от этого значения Вселенная либо будет расширяться до какого-то размера, а потом сожмётся, либо будет неограниченно расширяться.

# Типы сверхновых

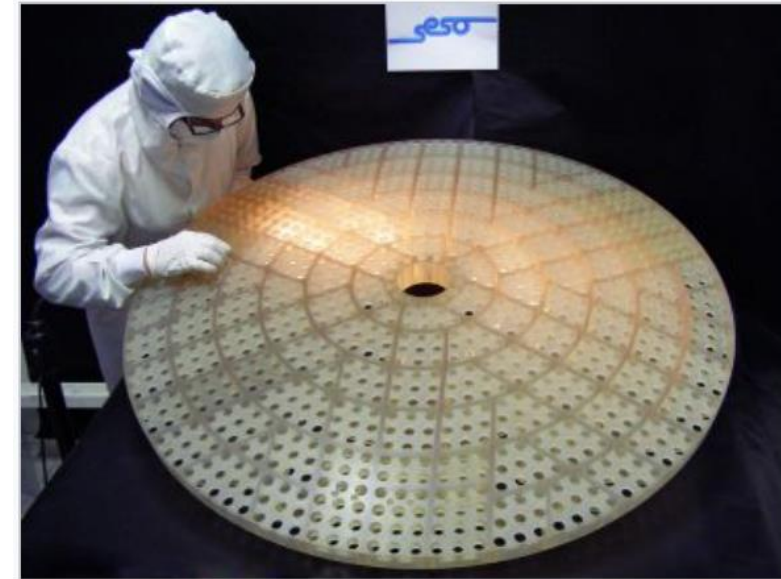
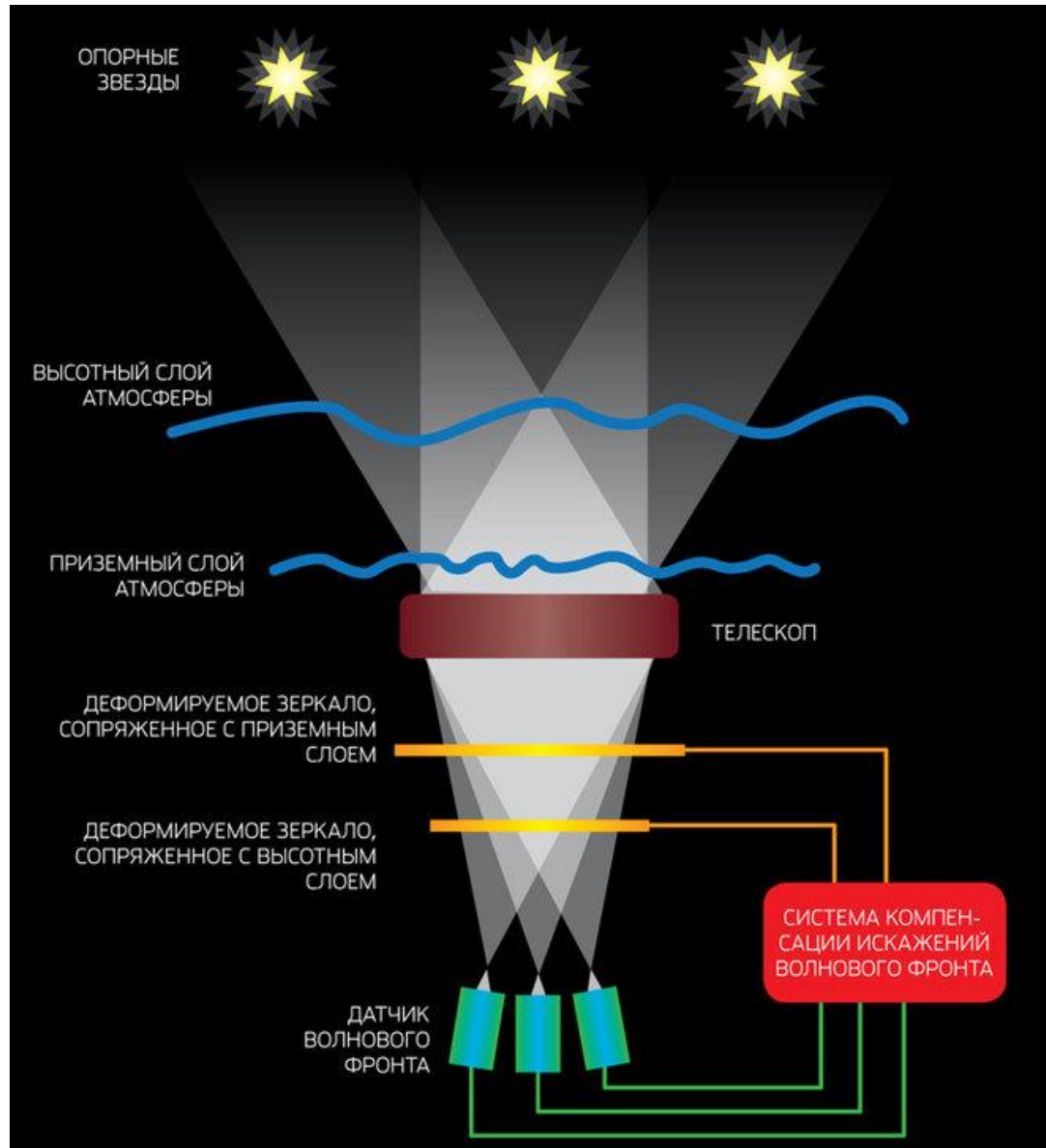


Класс	Подкласс		Механизм
I Линии водорода отсутствуют	Сильные линии ионизированного кремния (Si II) на 6150 Å	Ia После взрыва ничего не остаётся (даже карлика).	Термоядерный взрыв
		Iax <sup>[5]</sup> В максимуме блеска имеют меньшую светимость в сравнение с Ia. После взрыва остаётся белый карлик, который приобретает большую скорость движения.	
	Линии кремния слабые или отсутствуют	Ib Присутствуют линии гелия (He I).	Гравитационный коллапс
		Ic Линии гелия слабые или отсутствуют	
II Присутствуют линии водорода	II-P/L/N Спектр постоянен	II-P Кривая блеска имеет плато	
		II-L Звёздная величина линейно уменьшается со временем <sup>[6]</sup>	
	IIb Спектр со временем меняется и становится похожим на спектр Ib.	IIn Присутствуют узкие линии	



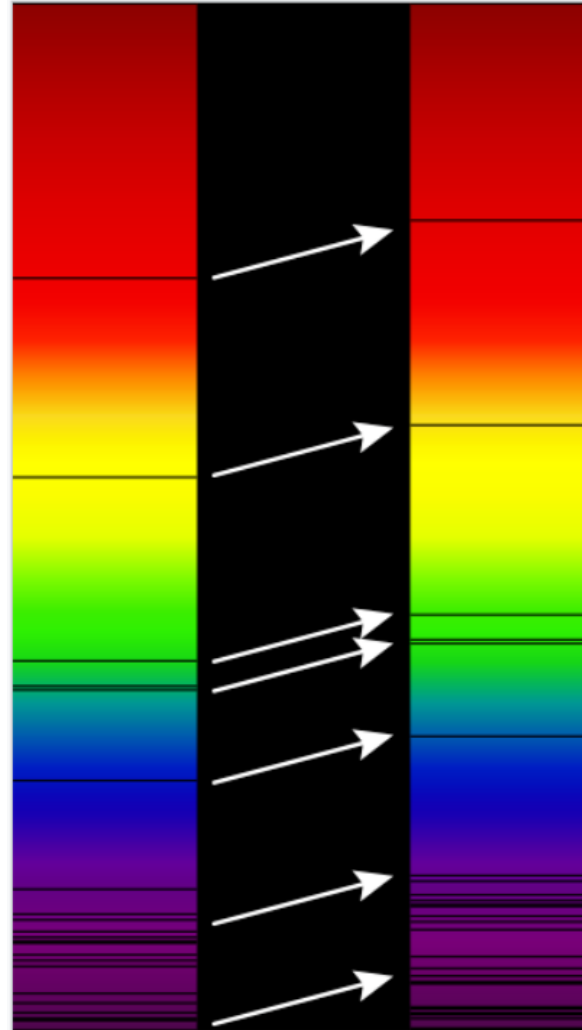
**Fig. 1.**  $D_L$  expressed as distance modulus ( $m - M$ ) for four relevant cosmological models;  $\Omega_M = 0, \Omega_\Lambda = 0$  (empty Universe, *solid line*);  $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0$  (*short dashed line*);  $\Omega_M = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$  (*hatched line*); and  $\Omega_M = 1.0, \Omega_\Lambda = 0$  (*long dashed line*). In the bottom panel the empty Universe has been subtracted from the other models to highlight the differences.

# Адаптивная оптика



Разработка новой системы деформируемых вторичных зеркал VLT. Проект предусматривает 1170 приводов, которые будут воздействовать на тонкую зеркальную оболочку, изменяя форму её отражающей оптической поверхности для коррекции флуктуаций света от звезд, создаваемых атмосферой Земли.

# Красное смещение



Вид спектра источника в  
отсутствие красного смещения  
(слева) и того же источника при  
наличии красного смещения  
(справа)

# Постоянная Хаббла



$$\left\{ \begin{array}{l} \lg v = 0.2m - 1 \\ v = Hr \\ \lg v = \lg H + \lg r \\ \lg r = 0.2(m - M) - 1 \end{array} \right.$$

**→**  $\lg H = 0.2M - 2$