

# Наблюдательные основы космологии

## ЛЕКЦИЯ 4

### Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной: теория инфляции и ускоренное расширение современной Вселенной

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна

[cosmologia@yandex.ru](mailto:cosmologia@yandex.ru)



Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга  
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова

МФК-2020/2021

# Программа курса

**ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Расширение Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 2. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.**

**Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ I)**

**ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.**

**Гравитационное линзирование (ЧАСТЬ II)**

**ЛЕКЦИЯ 4. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной: теория инфляции и ускоренное расширение современной Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 5. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ I)**

**ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ЧАСТЬ II)**

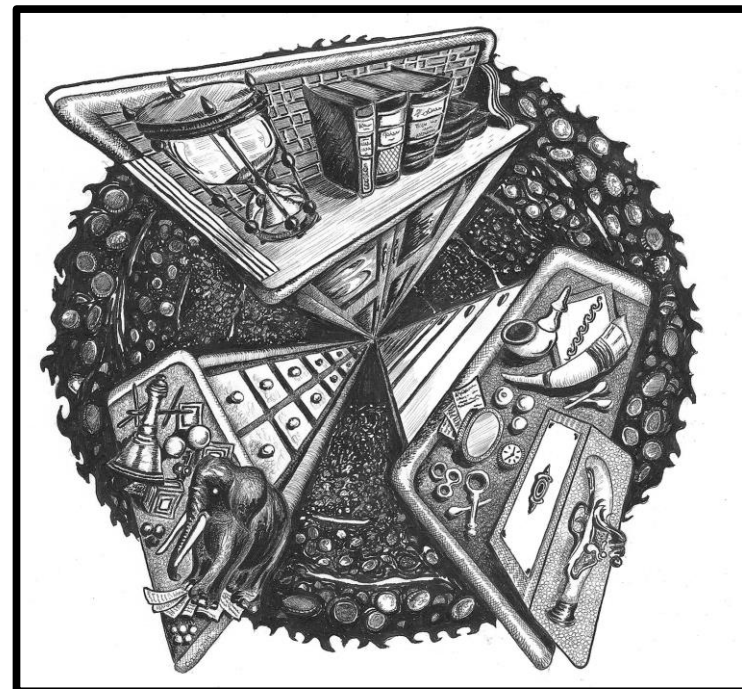
**ЛЕКЦИЯ 7. Иерархия объектов во Вселенной.**

**Крупномасштабная структура Вселенной**

**ЛЕКЦИЯ 8. Распространенность легких химических элементов. За пределами Стандартной модели физики частиц**

**ЛЕКЦИЯ 9. Гравитационные волны. Открытие гравитационных волн в двойных системах черных дыр и нейтронных звезд. Поиск космологических гравитационных волн**

**ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны**



# Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

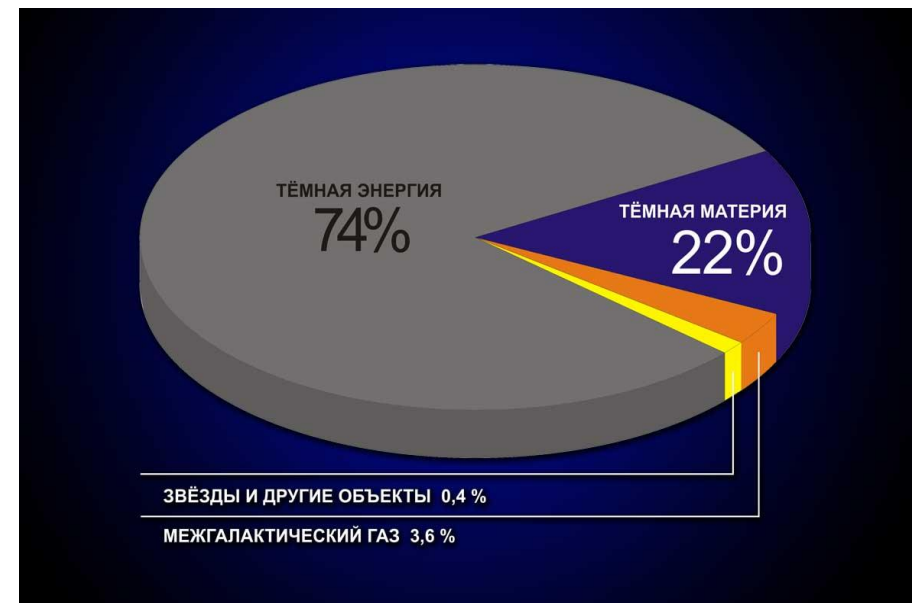
$\Lambda$ CDM

6\*. Темная материя

7\*. Темная энергия

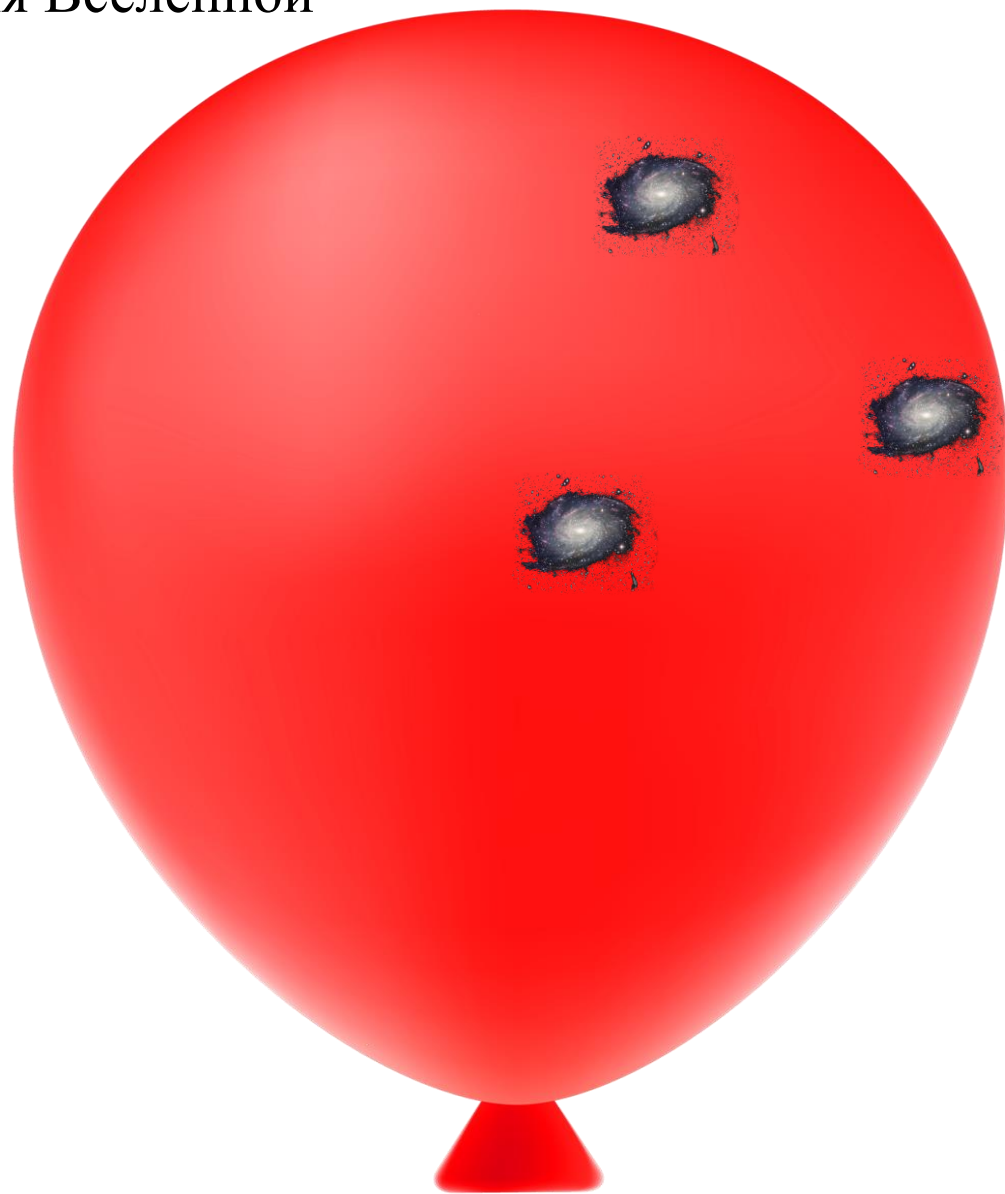
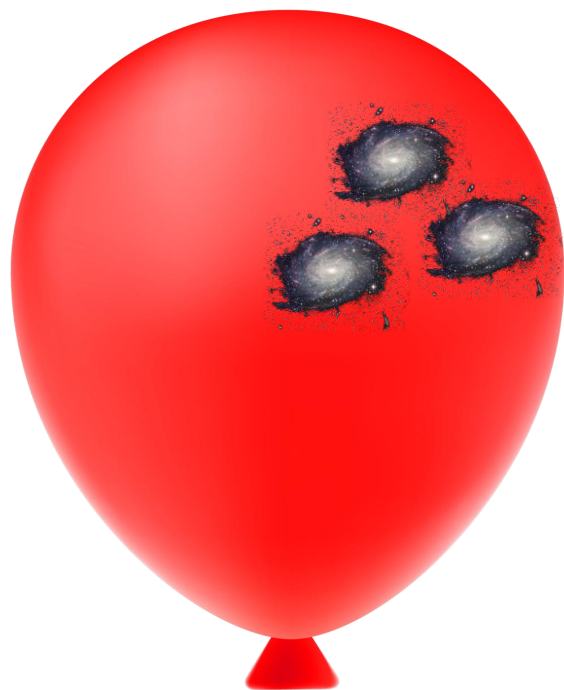
8\*. Космологические

*гравитационные волны?*



# Расширение Вселенной

Начало расширения – момент рождения Вселенной

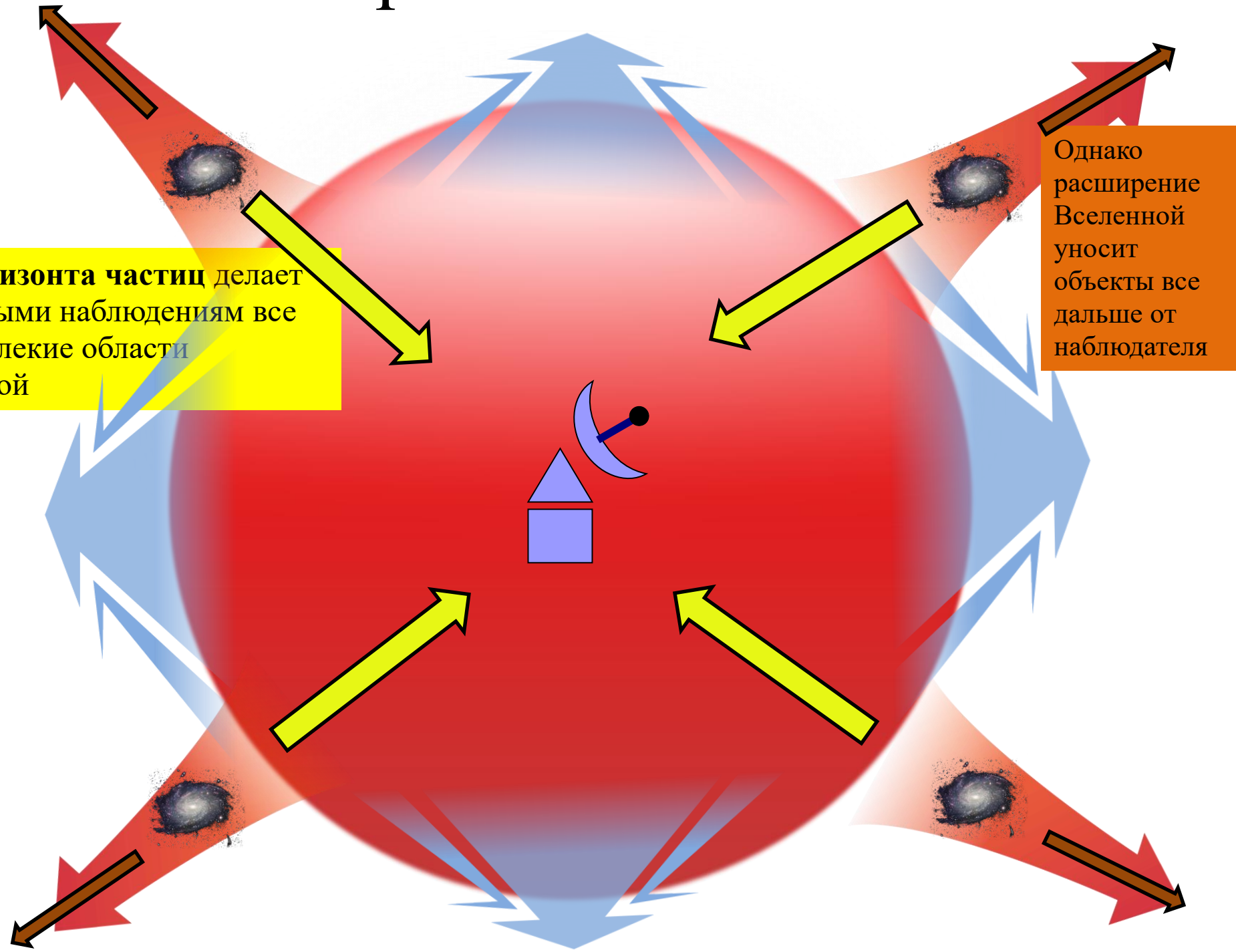


Согласно **Стандартной космологической модели**, начало расширения Вселенной – это момент ее рождения. Стандартная космологическая модель – это модель Большого взрыва.

В современной космологии развиваются альтернативные теории о начале Вселенной, например, теория циклической Вселенной и в ее же рамках понятие Большого отскока вместо Большого взрыва, когда считается, что до нашей Вселенной существовала другая Вселенная или, возможно, их последовательная серия. Существуют модели, позволяющие определить параметры таких «прошлых вселенных», однако наблюдательных проверок таких теорий нет.

**Гипотеза циклической Вселенной все равно не дает ответа на вопрос о происхождении нашей Вселенной, а просто отодвигает его назад в прошлое.** Вопрос о происхождении Вселенной – теоретический, поскольку в настоящий момент никак не может быть обоснован наблюдениями. Современные теории основываются на концепции многомерных пространств и развивающейся теории струн. В этих моделях рассматривается вечное рождение вселенных с различными свойствами из квантовых флуктуаций («пены пространства-времени») в многомерном пространстве, либо взаимодействие самих многомерных пространств, вложенных в пространства большей размерности. Множество вселенных называется Мультиленная или Мультимир.

# Расширение Вселенной

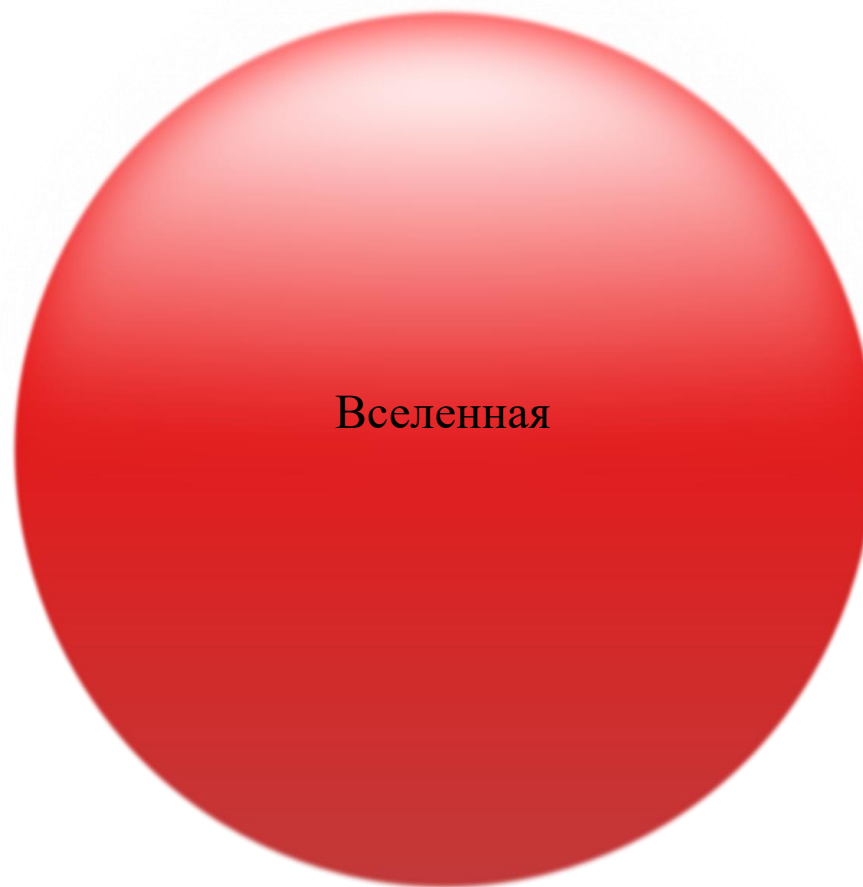


Рост горизонта частиц делает доступными наблюдениям все более далекие области Вселенной

Однако расширение Вселенной уносит объекты все дальше от наблюдателя

# Расширение Вселенной

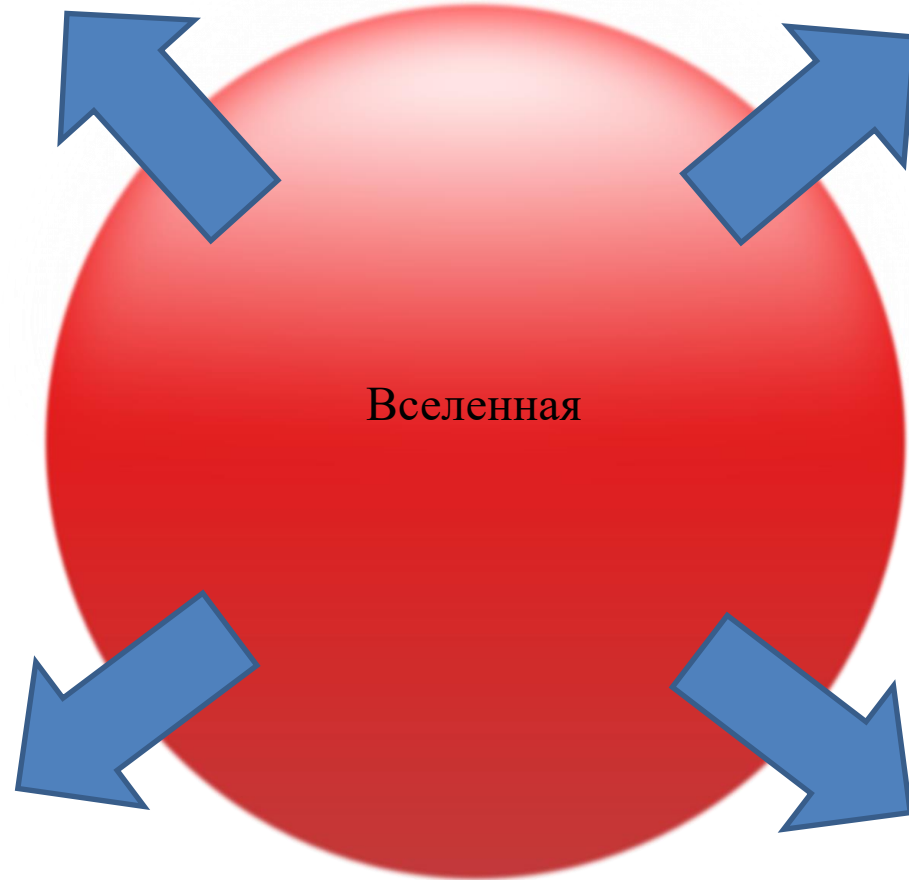
Темп расширения Вселенной полностью  
определяется заполняющим ее веществом



Вселенная

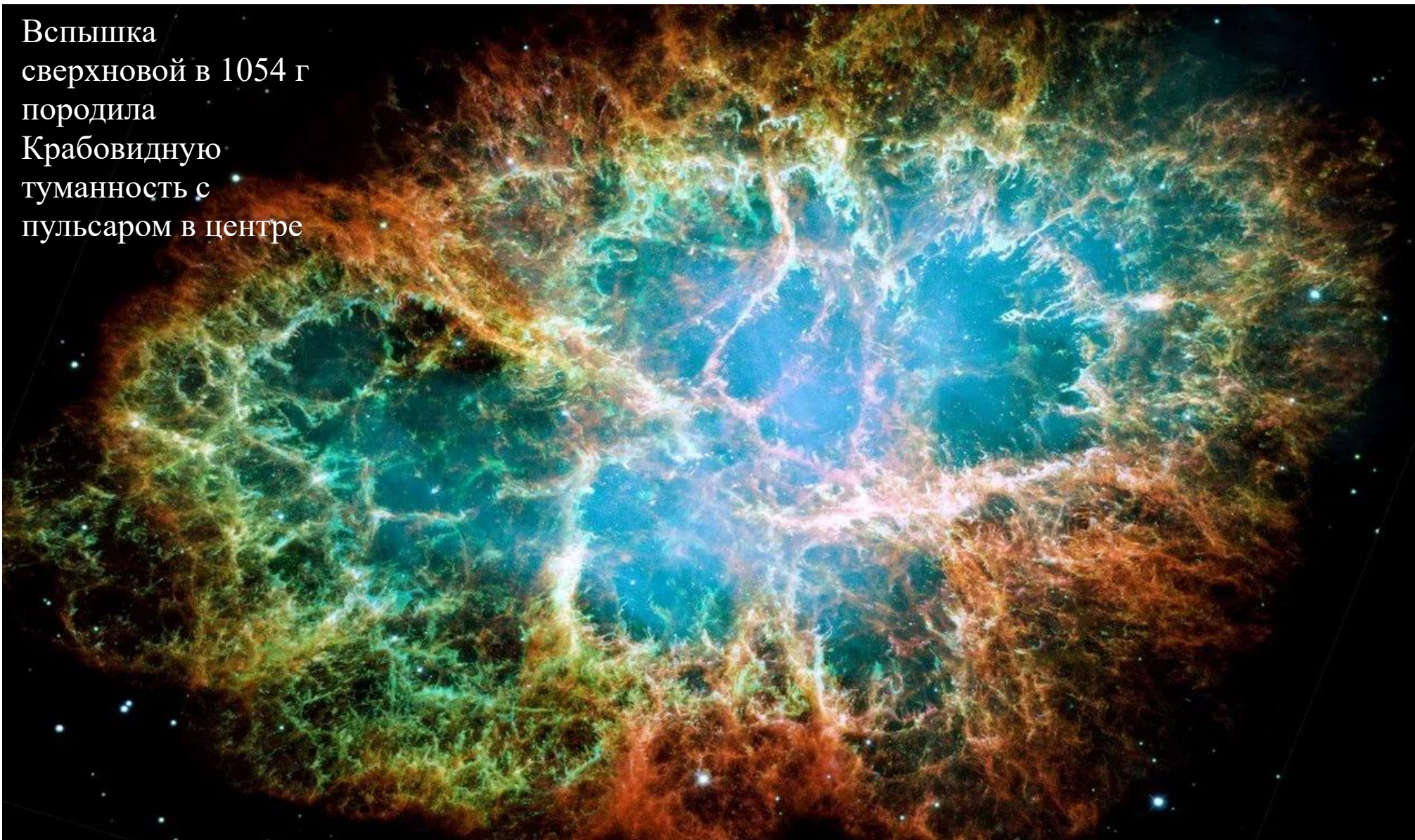
Мультиленная

В конце XX в. астрономы измерили характеристики Вселенной по **сверхновым звездам (SN) типа Ia**. Оказалось, что сейчас Вселенная расширяется не с замедлением (по инерции), а ускоренно.



# Сверхновые звезды

Вспышка  
сверхновой в 1054 г  
породила  
Крабовидную  
туманность с  
пульсаром в центре

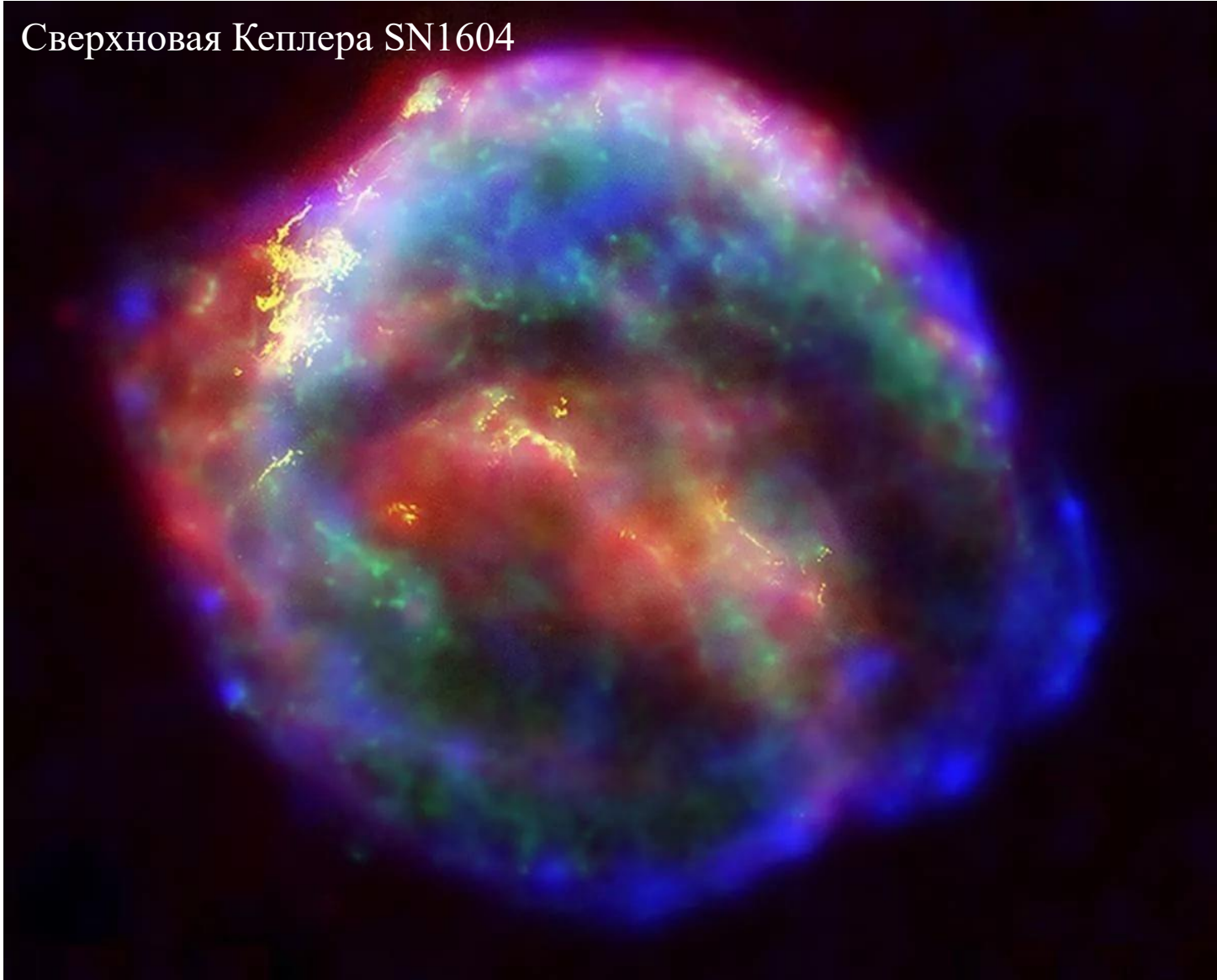


# Сверхновые звезды: Крабовидная туманность

- Одно из первых дошедших до нас свидетельств вспышки сверхновой – это описание «звезды-гостыи» в китайских хрониках. Эта звезда вспыхнула в нашей Галактике в 1054 году и была видна днем в течение одного месяца. Далее звезда стала угасать, но еще в течение двух лет ее можно было наблюдать невооруженным глазом.
- В настоящее время на месте «звезды-гостыи» находится Крабовидная туманность – остаток сверхновой 1054 года. В центре расположен **миллисекундный пульсар** (миллисекундный пульсар – это нейтронная звезда, с очень стабильным периодом вращения от 1 до десятка миллисекунд).

# Сверхновые звезды

Сверхновая Кеплера SN1604



# Сверхновые в галактиках

Взрыв сверхновой типа Ia SN 2014J в галактике M82 (снимок Хаббла). На расстоянии примерно 11.5 млн св. лет от Земли это самая близкая сверхновая такого типа, обнаруженная за последние несколько десятилетий. Взрыв в двойной системе из белого карлика и другой звезды, которая может быть вторым белым карликом, звездой, подобной нашему Солнцу, или гигантской звездой.



**Supernova 2014J in Galaxy M82**  
*Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS ■ ACS/WFC*

# Шкала расстояний

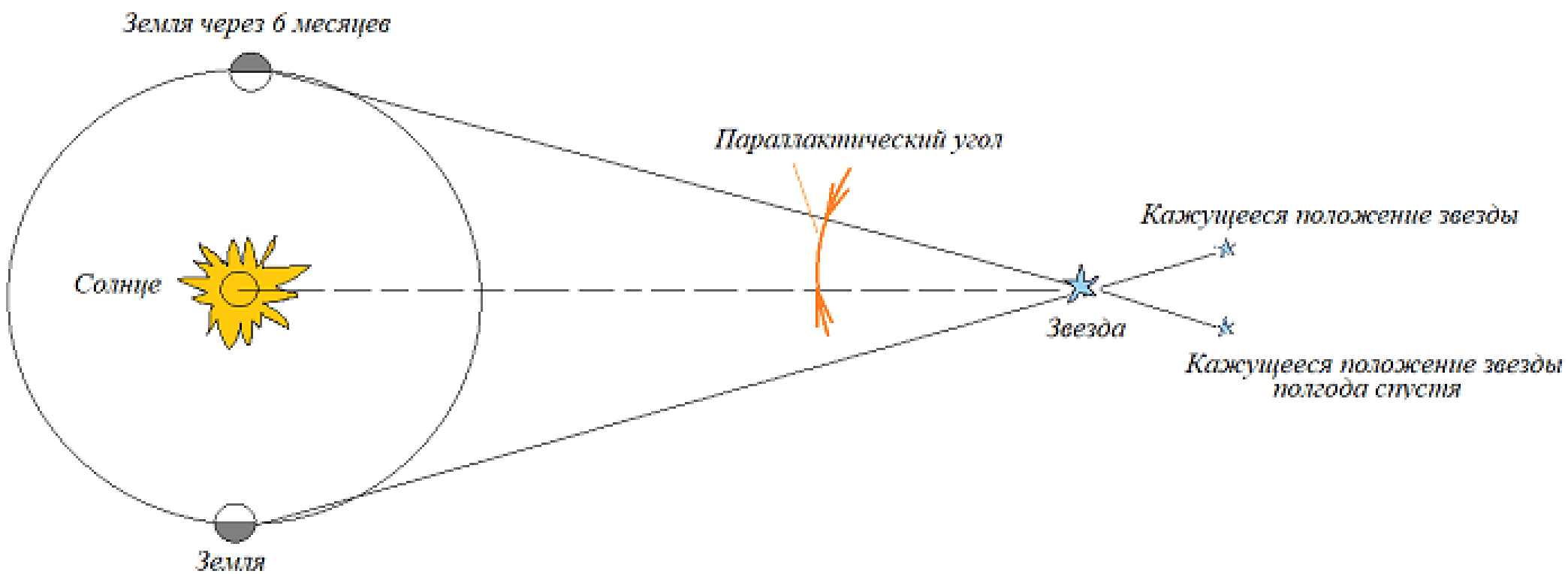
или **лестница космических расстояний**. Это шкала, которая используется в астрономии и космологии для измерений расстояний на разных масштабах: от масштабов Галактики до космологического горизонта.

В зависимости от удалённости объекта, до которого хотят измерить расстояние, используются разные методы и разные наборы т. н. **«стандартных свечей»** – особых объектов, расстояние до которых может быть определено с высокой точностью исходя из их физических свойств.

Светимость стандартных свечей определена достаточно точно и, следовательно, измеряя поток излучения от стандартных свечей, можно определять *болометрическое расстояние* до них, а также до объектов, рядом с которыми они находятся или которым принадлежат.

Для определения расстояний внутри нашей Галактики, от масштабов Солнечной системы до нескольких килопарсек, используются следующие методы.

1. Внутри Солнечной системы используются методы **лазерной и радиолокации** и измерение расстояний с помощью **космических искусственных спутников**.
2. На больших расстояниях используют методы **тригонометрического годичного параллакса**, **фотометрического параллакса (болометрическое расстояние)**, а также **группового (статистического) параллакса**, который представляет собой определение расстояний до звёздных скоплений по наблюдаемому распределению проекций скоростей их звёзд на небесную сферу. Космические телескопы Европейского космического агентства *Hipparcos* и *GAIA* (1989 и 2013 гг. запуска, соответственно) позволяют измерить расстояние до любой звезды нашей Галактики.



Измерение тригонометрических параллаксов дают расстояния только до ближайших звезд (1 кпк ).

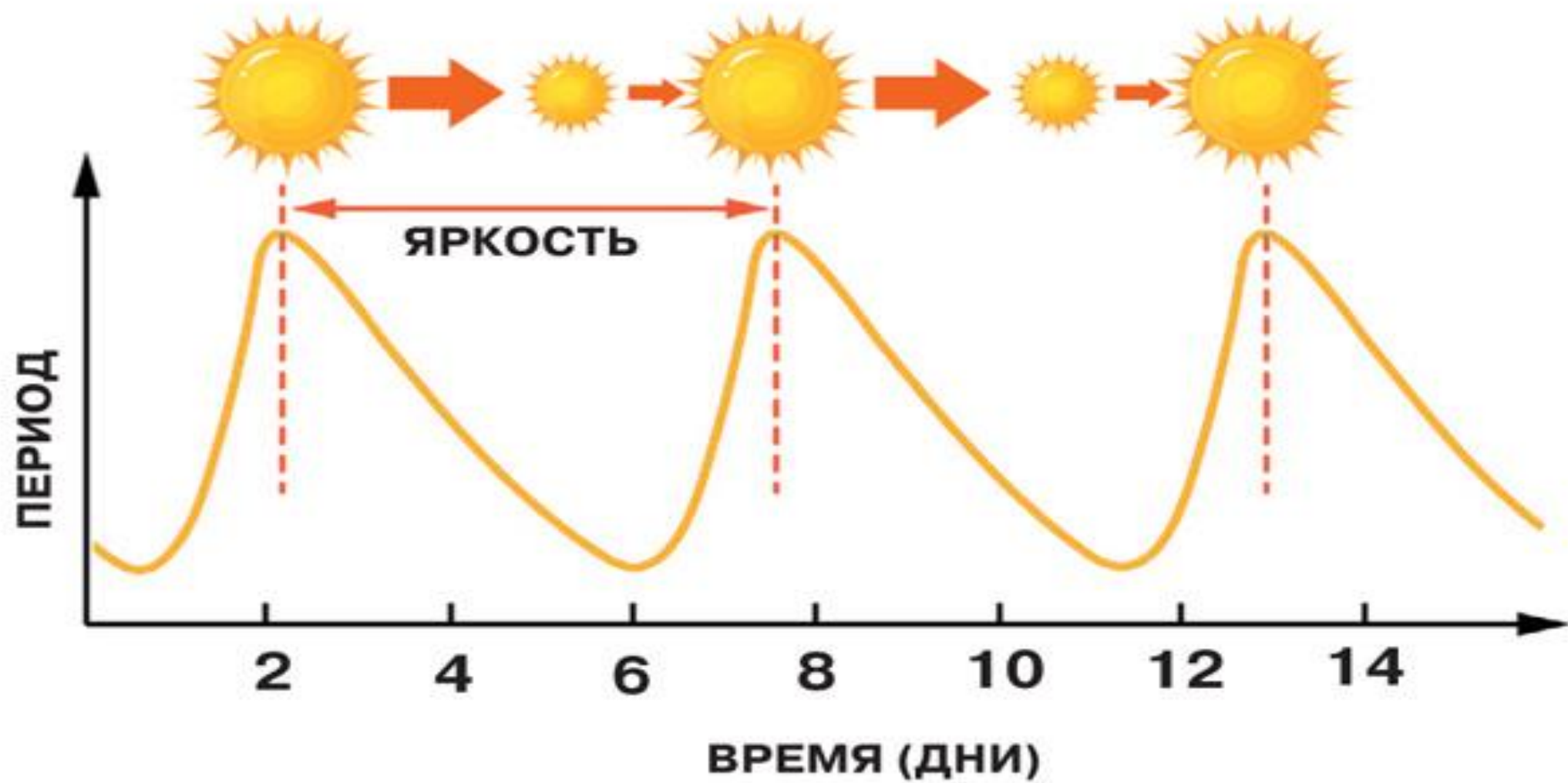
# Шкала расстояний

Для определения больших галактических и внегалактических расстояний существует более десятка различных методов. На практике для построения шкалы космических расстояний используются следующие основные методы:

1. по переменным звёздам **цефеидам**,
2. по **сверхновым звёздам типа Ia (SNe Ia)**,
3. по звёздам **красным гигантам**.

## Метод определения расстояний по цефеидам

Цефеиды – переменные звёзды с известной светимостью – обычно составляют первую «ступень» шкалы космических расстояний на масштабах, больших нашей Галактики, и с их помощью можно определять расстояния до ближайших галактик (до 20 Мпк) по известной эмпирической зависимости их светимости от периодов пульсации: **чем ярче звезда, тем больше период переменности её блеска.**



# Цефеиды и сверхновые в галактиках

(цефеиды отмечены желтыми кружочками)

SN 2011by +

Галактика NGC 3972

65 млн св. лет

(1 пк примерно 3.3 св. года,  
65 млн св. лет примерно 20 000 000 пк =  
20 Мпк)

# Цефеиды и сверхновые в галактиках

SN 2009ig +

Галактика NGC 1015  
118 млн св. лет

**Болометрическое расстояние  $L_b$**  – это расстояние до объекта, определяемое по светимости и световому потоку от этого объекта.

**Светимость  $L$**  – это полная энергия в единицу времени (эрг/с)

**Поток  $F$** , измеряемый наблюдателем, – это количество энергии через единичную площадку в единицу времени (эрг/см<sup>2</sup>/с).

$$L_b = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$$

**Светимость** сверхновых типа Ia в максимуме постоянна (с точностью 10%).

Зная **светимость** и **поток** можно найти расстояние до сверхновой.

Измеряя **спектр** сверхновой, можно узнать скорость, а зная еще и расстояние до нее, можно вычислить скорость галактики, которой принадлежит эта сверхновая, т.е. вычислить кинематические характеристики расширяющейся Вселенной.

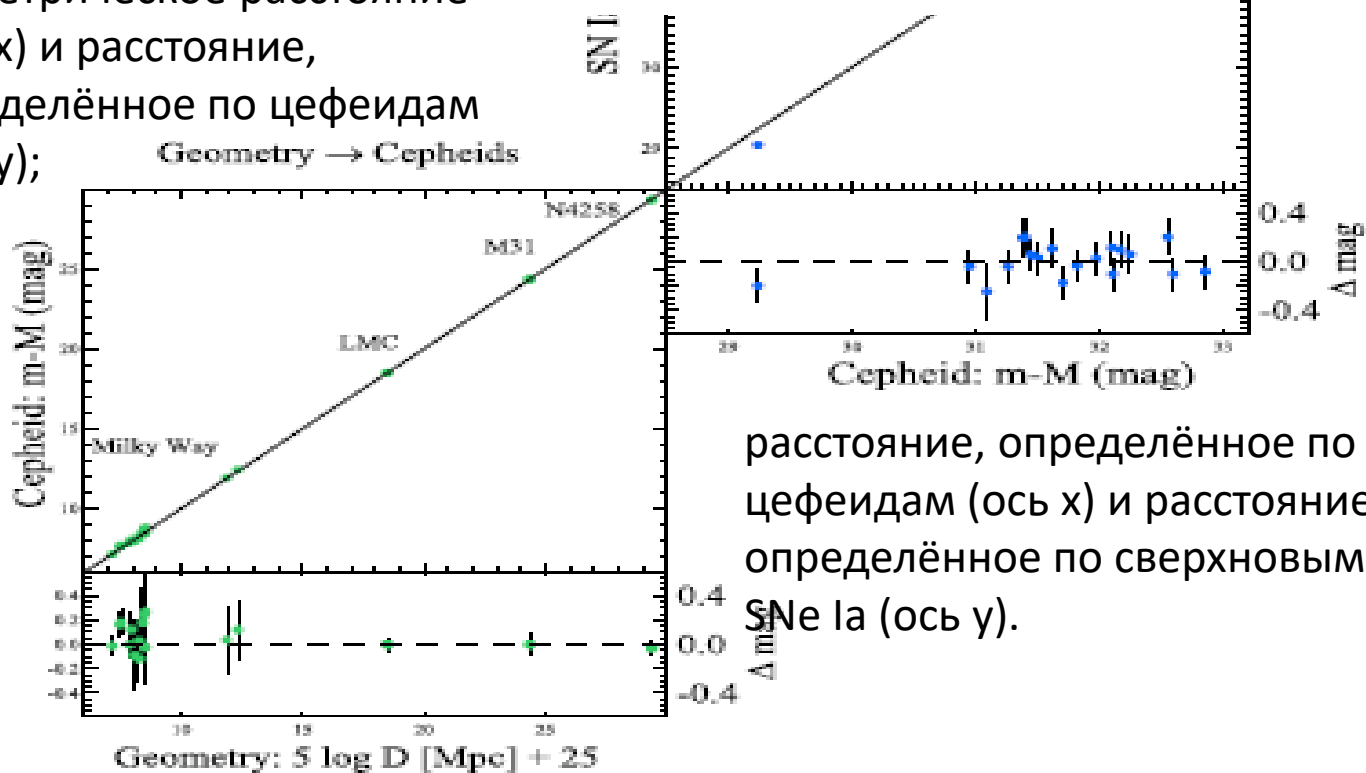
# Сверхновые типа Ia (SN Ia)

- **Общепринятая теоретическая модель звезд SN Ia – это термоядерный взрыв белого карлика** с массой около 1.3 массы Солнца (т.н. предел Чандрасекара). По мере приближения массы белого карлика к своей допустимой верхней границе вещество в нем теряет гидростатическую устойчивость (это происходит из-за т.н. нейтронизации вещества), что и приводит к термоядерному взрыву, но не к коллапсу.
- После взрыва оболочка звезды быстро расширяется и охлаждается, не обмениваясь теплотой с окружающим пространством. Потом начинается радиоактивный **распад никеля**, который образовался в термоядерной реакции. Процесс распада никеля и определяет форму кривой блеска SN Ia. Светимость в максимуме блеска определяется только массой никеля.
- **Светимость звезд SN Ia измеряется с точностью до одной десятой звездной величины** (звездная величина характеризует поток энергии от источника; чем меньше звездная величина, тем ярче объект).

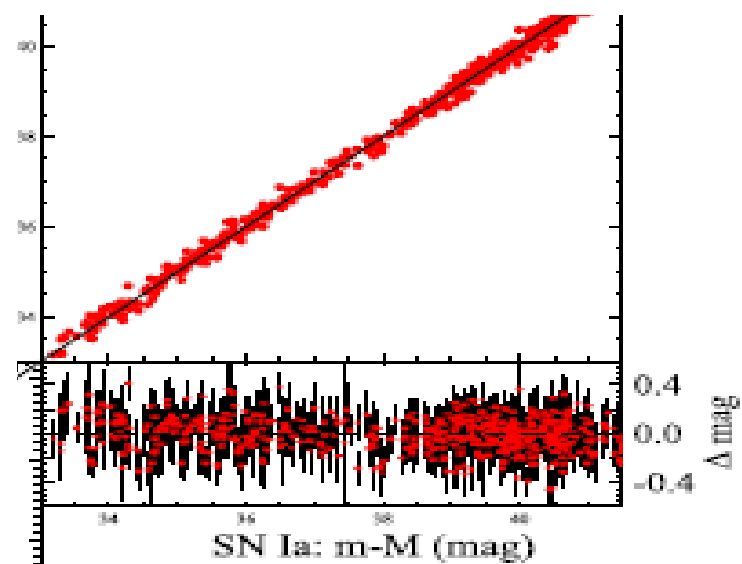
Для построения шкалы расстояний с ростом измеряемых масштабов последовательно используются разные методы, причём каждый последующий метод калибруется предыдущим.

Расстояние до сверхновых SNe Ia калибруется с помощью цефеид. В свою очередь, зависимость светимости далеких цефеид от их периодов калибруется несколькими способами (по данным нашей Галактики путём вычисления тригонометрических параллаксов принадлежащих ей цефеид, по данным галактики Большое Магелланово Облако путём наблюдения затменных двойных систем и др.)

геометрическое расстояние (ось x) и расстояние, определённое по цефеидам (ось y);



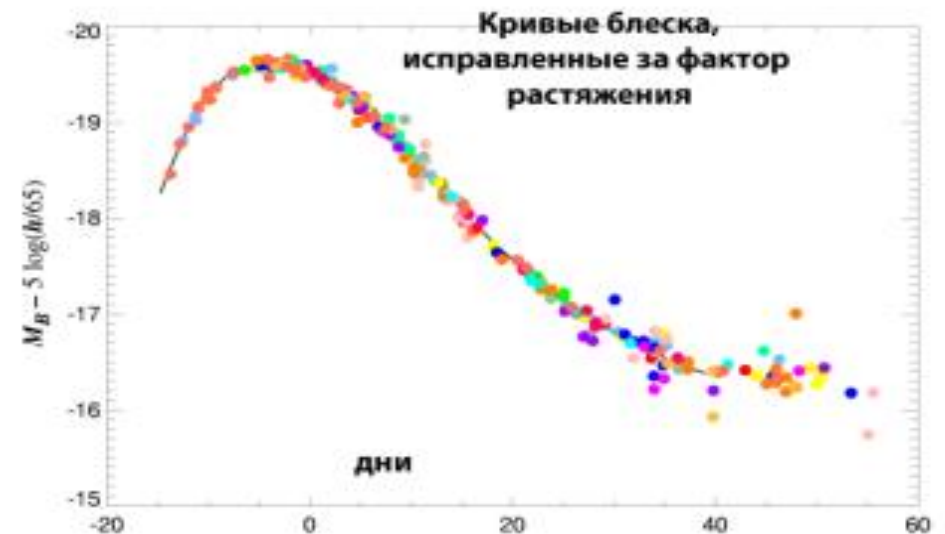
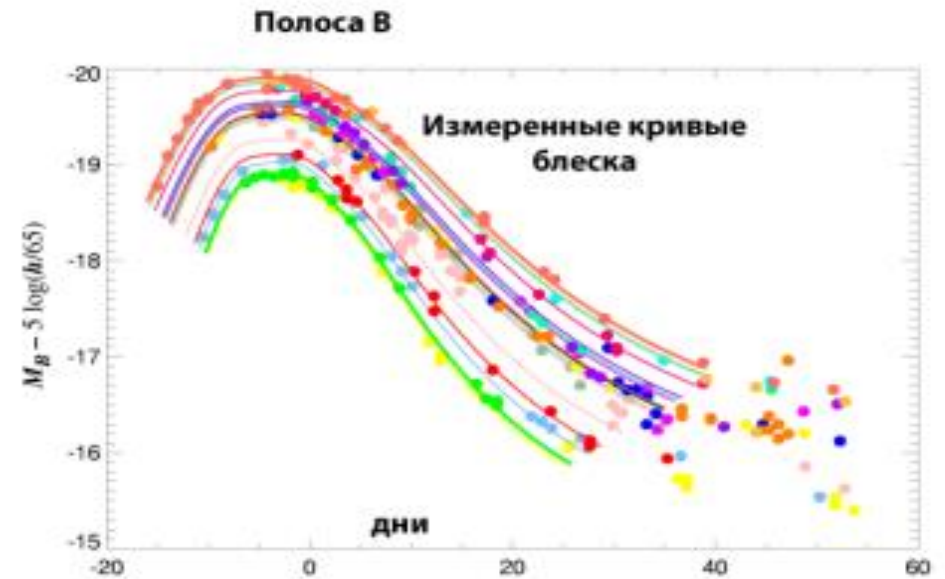
расстояние, определённое по цефеидам (ось x) и расстояние, определённое по сверхновым SNe Ia (ось y).



расстояние, определённое по сверхновым SNe Ia (ось x) и расстояние, определённое по красным смещениям (ось y).

# Сверхновые типа Ia (SN Ia)

Галактика NGC4526 и сверхновая SN Ia 1994d



# Как узнали о существовании темной энергии?

$V=Hr$ . Скорость – по вертикали, расстояние – по горизонтали. Чем дальше объект, тем выше его скорость. Закон Хаббла – первое наблюдательное подтверждение однородной и изотропной модели Фридмана, полученной им из уравнений Эйнштейна.

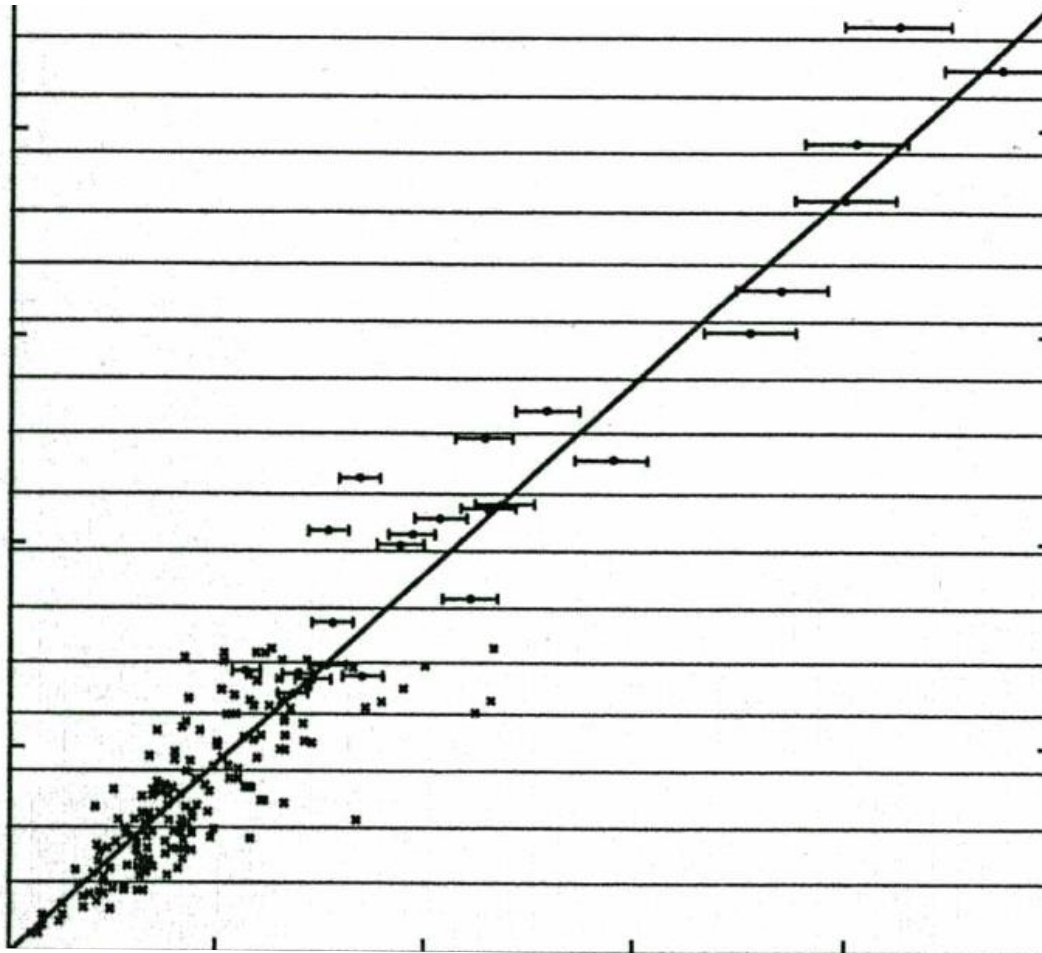


Диаграмма Хаббла для галактик. Черточками указано положение достаточно близких к нам галактик, расстояние до них не превышает 100 Мпк. Распределение галактик (с точностью до ошибок измерения, указанных горизонтальными отрезками) близко к линейному. Тангенс угла наклона представленной на рисунке линии соответствует постоянной Хаббла. Крестиками отмечены галактики, ошибки измерения которых малы.

# Как узнали о существовании темной энергии?

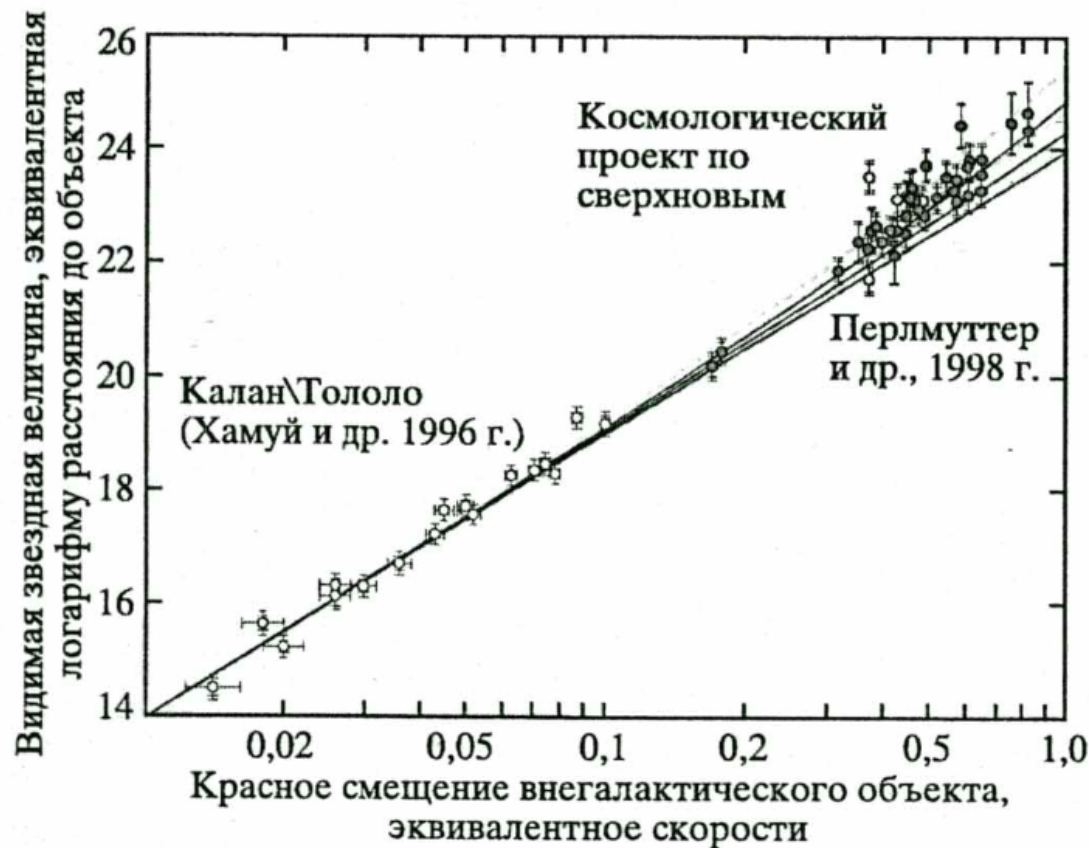
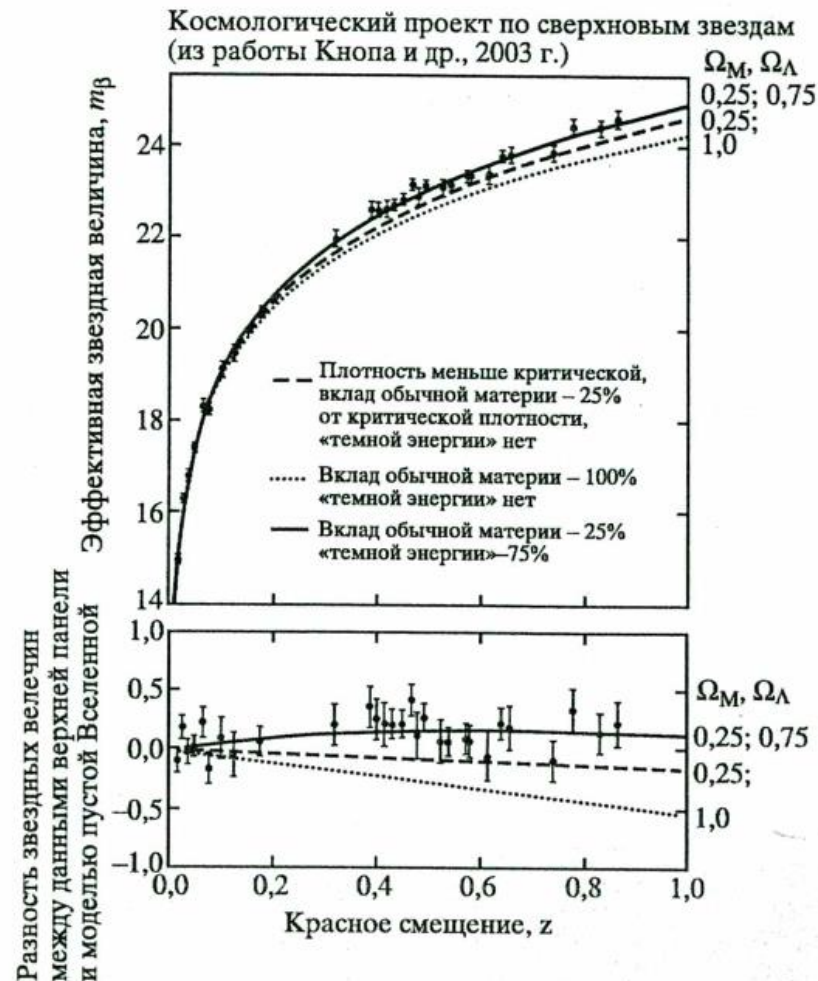


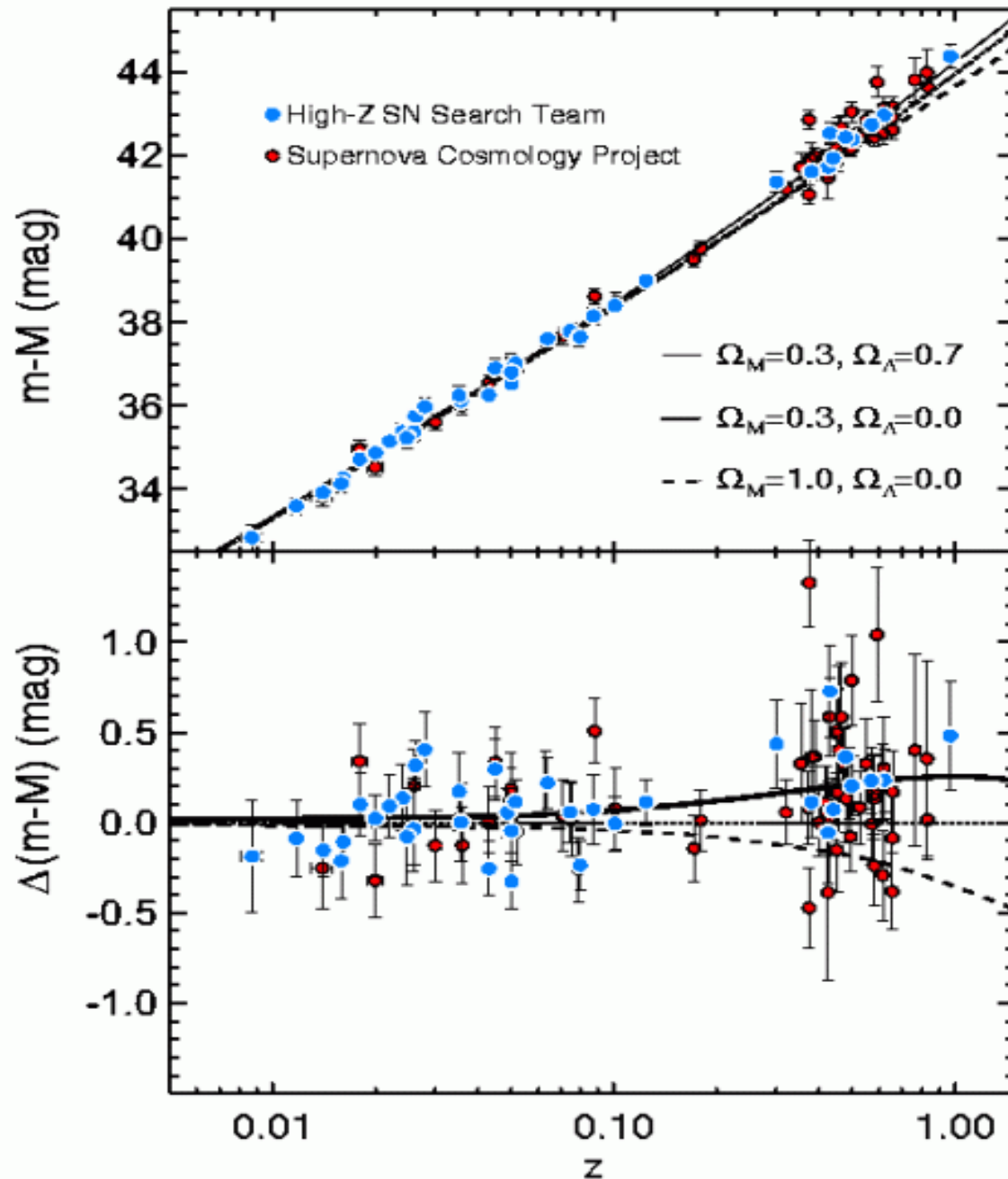
Диаграмма Хаббла, построенная по данным исследований сверхновых звезд типа SN Ia. По сравнению с диаграммой Хаббла для галактик она является "перевернутой". Красное смещение измеряется скоростью сверхновой звезды, деленной на скорость света. Видимая звездная величина пропорциональна логарифму расстояния до сверхновой звезды.

# Как узнали о существовании темной энергии?

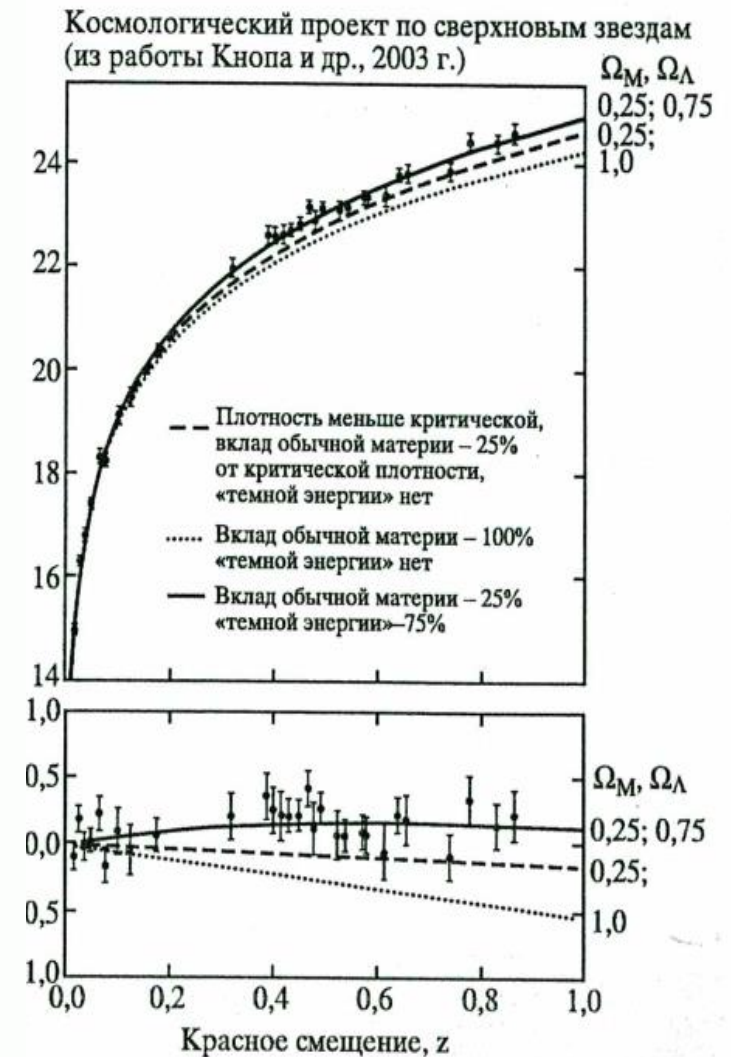
Диаграмма Хаббла для сверхновых звезд, построенная на основе результатов пятилетних исследований. Точность измерений выросла, что позволяет с уверенностью судить о наличии темной энергии, которая выявлена в нелинейной зависимости красного смещения от звездной величины (эквивалентно скорости удаления объектов от расстояния до них). Профиль кривой зависит от соотношения между плотностью материи (барионной и темного вещества) и темной энергии.



# Данные по далеким сверхновым



High-ZSN Search Team – группа  
Брайана Шмидта (с 1994 г.),  
Supernova Cosmology Project – Группа  
Сола Перлмуттера (с 1988 г.)



# Свойства темной энергии

- Темная энергия, в отличие от обычного вещества, равномерно распределена в пространстве. Если у этого типа материи и есть контраст плотности, то он должен быть очень мал, не выше нескольких долей процента.
- Темная энергия обладает свойством антигравитации, принципиально отличающим ее от любого другого вида материи.
- Темная энергия, возможно, обладает свойством идеальной жидкости (т.е. без вязкости и теплопроводности).
- Состав и происхождение темной энергии не известны.

# Нобелевская премия за открытие ускоренного расширения Вселенной, 2011 г.



Photo: Roy Kaltschmidt. Courtesy:  
Lawrence Berkeley National Laboratory

**Saul Perlmutter**



Photo: Belinda Pratten, Australian  
National University

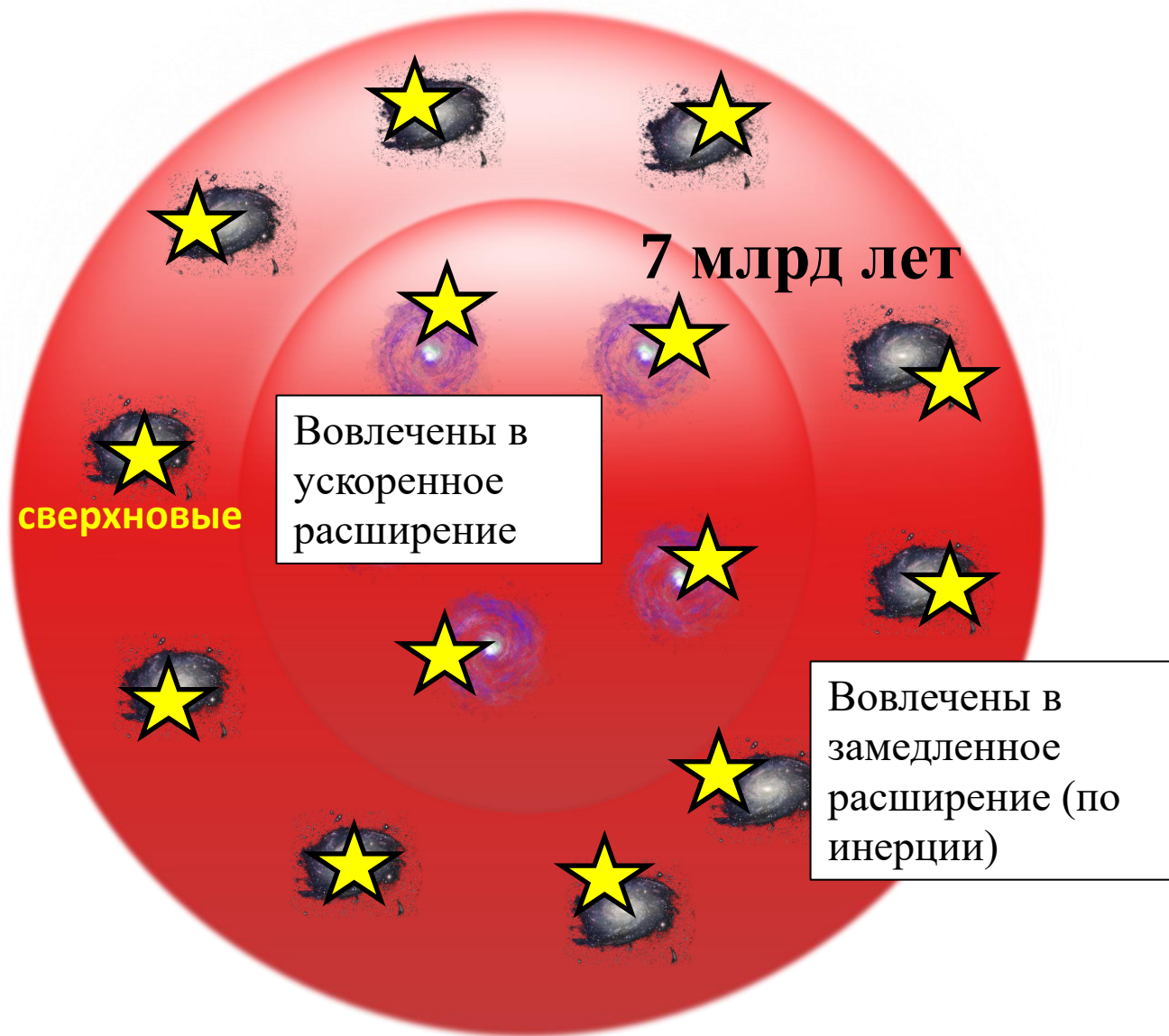
**Brian P. Schmidt**



Photo: Homewood Photography

**Adam G. Riess**

# Смена режима расширения Вселенной



# Смена режима расширения Вселенной

- Поскольку скорость света конечна, то в космологии наблюдаются объекты в более раннюю эпоху, отстоящие от нас на временной интервал, равный расстоянию до объекта, деленному на скорость света.
- Галактики, находящиеся от нас на расстоянии больше 7 млрд св. лет (красное смещение  $z=0.6$ ) подвержены глобальному движению с замедлением (т.е. движению по инерции).
- Свет от галактик, находящихся ближе к нам, был испущен позже, чем 7 млрд лет от Большого взрыва, поэтому эти галактики разлетаются от нас с ускорением.

# Как объяснить существование темной энергии?

- Наличие новой физической константы – **космологической постоянной  $\Lambda$** , вводимой в уравнения Эйнштейна (при расширении плотность не меняется; по размерности  $\Lambda$ -член обратно пропорционален квадрату расстояния);
- Существование энергии сплошной среды или поля, обладающая отрицательным давлением. Два основных вида: **квинтэссенция** (при расширении плотность медленно снижается) и **фантомная энергия** (при расширении плотность растет).
- Возможность существования динамичной сплошной среды или поля, меняющей свой вид со временем.

Первое уравнение Фридмана, которое определяет соотношение между кинетической и потенциальной энергией  
(скорость света взята для краткости  $c=1$ )

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}.$$

Для  $\Lambda=0$

$k = 0$  евклидово трехмерное пространство с бесконечными размерами

$k = 1$  риманово трехмерное пространство (трехмерная сфера) с конечными размерами

$k = -1$  трехмерное пространство Лобачевского (трехмерное “седло”) бесконечного размера

$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}.$$

Для  $\Lambda \neq 0$

$\Lambda < 0$  – дополнительная притягивающая сила

$\Lambda = 0$  – нет дополнительной силы

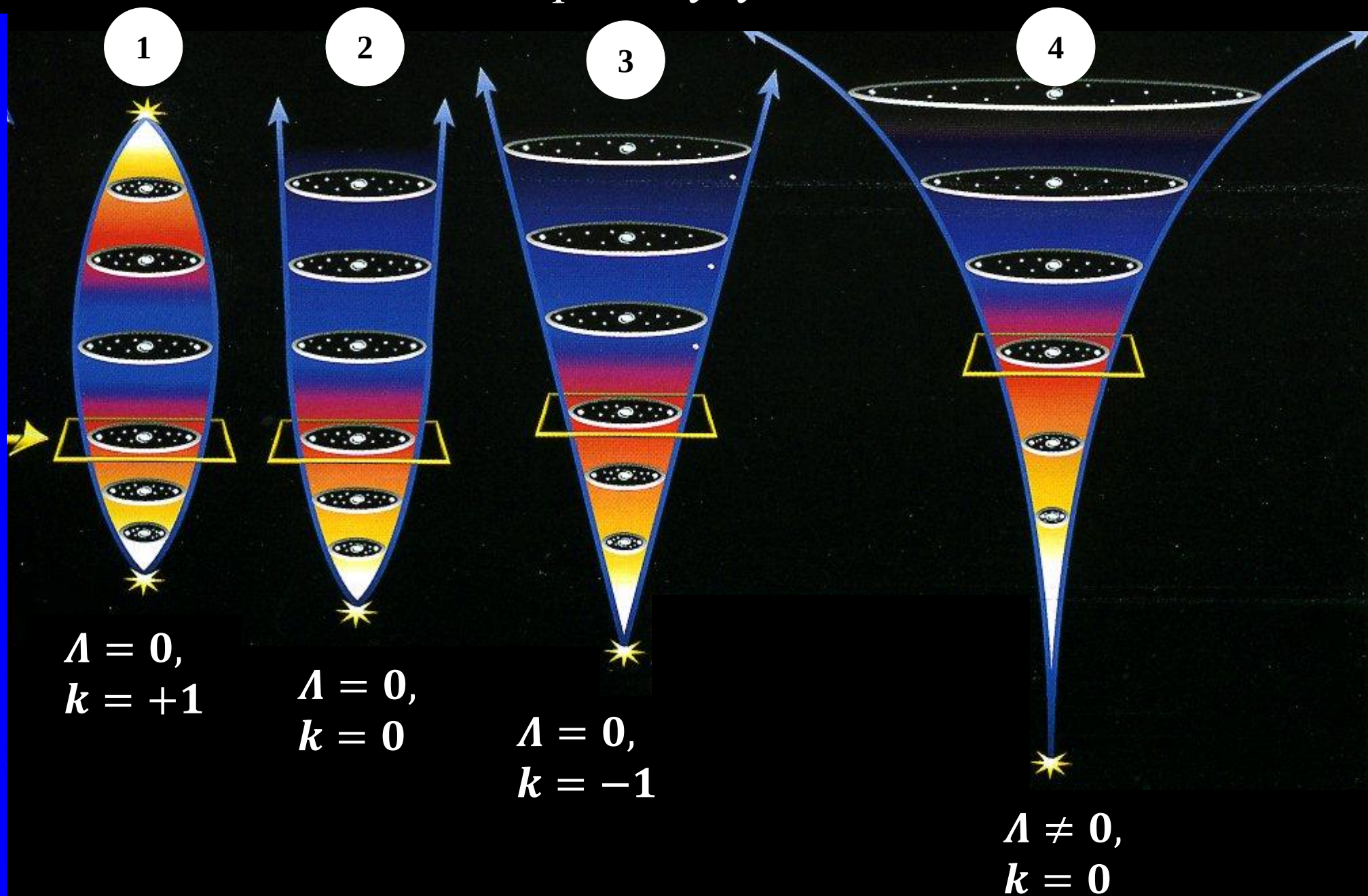
$\Lambda > 0$  – дополнительная отталкивающая сила

# Несколько сценариев будущего Вселенной

БУДУЩЕЕ

НАСТОЯЩЕЕ

ПРОШЛОЕ



# Λ-член, квинтэссенция и фантомная энергия

Уравнение состояния или четвертое уравнение Фридмана. Для темной энергии:

давление  $\rightarrow$   $p = q \rho c^2$   $\leftarrow$  скорость света  
параметр уравнения состояния  $\nearrow$   $q$   $\nwarrow$  плотность

*Слабое энергетическое условие: неотрицательная плотность энергии*  
*Сильное энергетическое условие: неотрицательное давление*

Отношение давления к плотности энергии покоя для обычных веществ почти равно нулю.

Для темной энергии в виде Λ-члена:  $q \sim -1$ .

$q > -1$  – квинтэссенция

$q < -1$  – фантомная энергия; скорость потока энергии вещества становится больше скорости света (т.н. нарушение условия энергодоминантности)

**Темная энергия характеризуется отрицательным давлением.**

# Отрицательное давление в природе

- Отрицательное давление существует не только в космологии. Оно существует в обыденной жизни. Например, при гребле веслами позади весла в воде образуются маленькие пузырьки – полости с отрицательным давлением.
- Отрицательное давление – это положительное натяжение, вынуждающее сближаться. Натяжения присутствуют, например, в атомах. Можно сблизить два атома водорода и образовать атом гелия. В атоме гелия действуют ядерные силы, которые вызывают натяжение и удерживают положительно заряженные частицы (протоны) от разлета. Натяжение дает отрицательный вклад в массу атома гелия: масса атома гелия меньше, чем масса двух отдельных протонов. Из-за действия сил натяжения возникает «дефект массы».

# Влияние темной энергии на будущее Вселенной

- Если темная энергия реализуется в виде космологической постоянной, то в далеком будущем может образоваться **фиксированный горизонт событий**.
- **Фиксированный горизонт событий** - это воображаемая сфера, в центре которой находится наблюдатель, а все, что находится вне этой сферы, для наблюдателя недостижимо. Материя и излучение оказываются как бы «запертыми вне горизонта событий», а не внутри него, как это происходит с черными дырами. Такая модель — это как бы «черная дыра наоборот».

**Не следует путать космологическое решение и решения типа «черная дыра» — математически они принципиально различны.**

Ближайшие к нам галактики — наш Млечный путь, Туманность Андромеды, карликовые галактики — сольются в одну большую, а далекие галактики, не связанные с нашей группой гравитационными силами, будут разлетаться все дальше и дальше, Вселенная для нас будет пустеть все больше и больше. Процесс может занять более 100 млрд лет. Реликтовое излучение перейдет из микроволнового диапазона в радиоволновой, а потом и вовсе рассеется. Многократное звездообразование сильно исказит первоначальный состав химических элементов.

# Влияние темной энергии на будущее Вселенной

- Если темная энергия окажется **фантомной темной энергией**, ее плотность будет расти с расширением Вселенной до бесконечности. Горизонта событий не будет, но расстояния между галактиками станут бесконечно велики.
- Если темная энергия окажется **квинтэссенцией**, то за конечное время Вселенная никогда не станет бесконечно большой. Горизонт событий не образуется. Все удаленные галактики останутся в доступной нам области видимости.

# Влияние темной энергии на будущее Вселенной

- Формирование космологического горизонта очень чувствительно к балансу двух противоположных характеристик Вселенной: полной массы Вселенной, которая определяет ее геометрию, и состава темной энергии, которая задает темп ее расширения.

**Аналогично тому, как нет окончательной модели рождения нашей Вселенной, так нет и окончательной модели конца Вселенной.**

Финальная стадия Вселенной сильно зависит от свойств и пропорций заполняющего его вещества, т.е. от соотношения и свойств обычной материи, темной материи и темной энергии. Различают сценарии вечного расширения либо возврата в начальную точку, которые в свою очередь подразделяются на классы в зависимости от поведения масштабного фактора, давления, плотности. Например, если темная энергия – фантомная, с растущей с расширением плотностью, то силы антигравитации в далеком будущем оказываются способными разорвать не только гравитационно-связанные системы, но даже атомы (модель Большого разрыва). Популярностью пользуются теории, имеющие т.н. «мягкие сингулярности» или вообще не имеющие сингулярностей, ни в прошлом, ни в будущем; они, в частности, обосновываются математическими свойствами сглаживающих многообразий Калаби-Яу, на которых основана топология струнных моделей.

# Вопросы за пределами Стандартной космологической модели

- Почему геометрия Вселенной так близка к плоской?
- Почему Вселенная так однородна на больших масштабах?
- Каково происхождение флуктуаций малой плотности, которые дали начало крупномасштабной структуре?
- Почему Вселенная расширяется?

# Проблема плоскостности

- Геометрия Вселенной, которую мы наблюдаем сегодня, близка к евклидовой, потому что средняя плотность энергии Вселенной почти равна критической плотности (или параметр полной плотности Вселенной равен единице):

$$\Omega_0 = \rho_0 / \rho_{c,0} = 1$$

Критическая плотность в современный момент времени

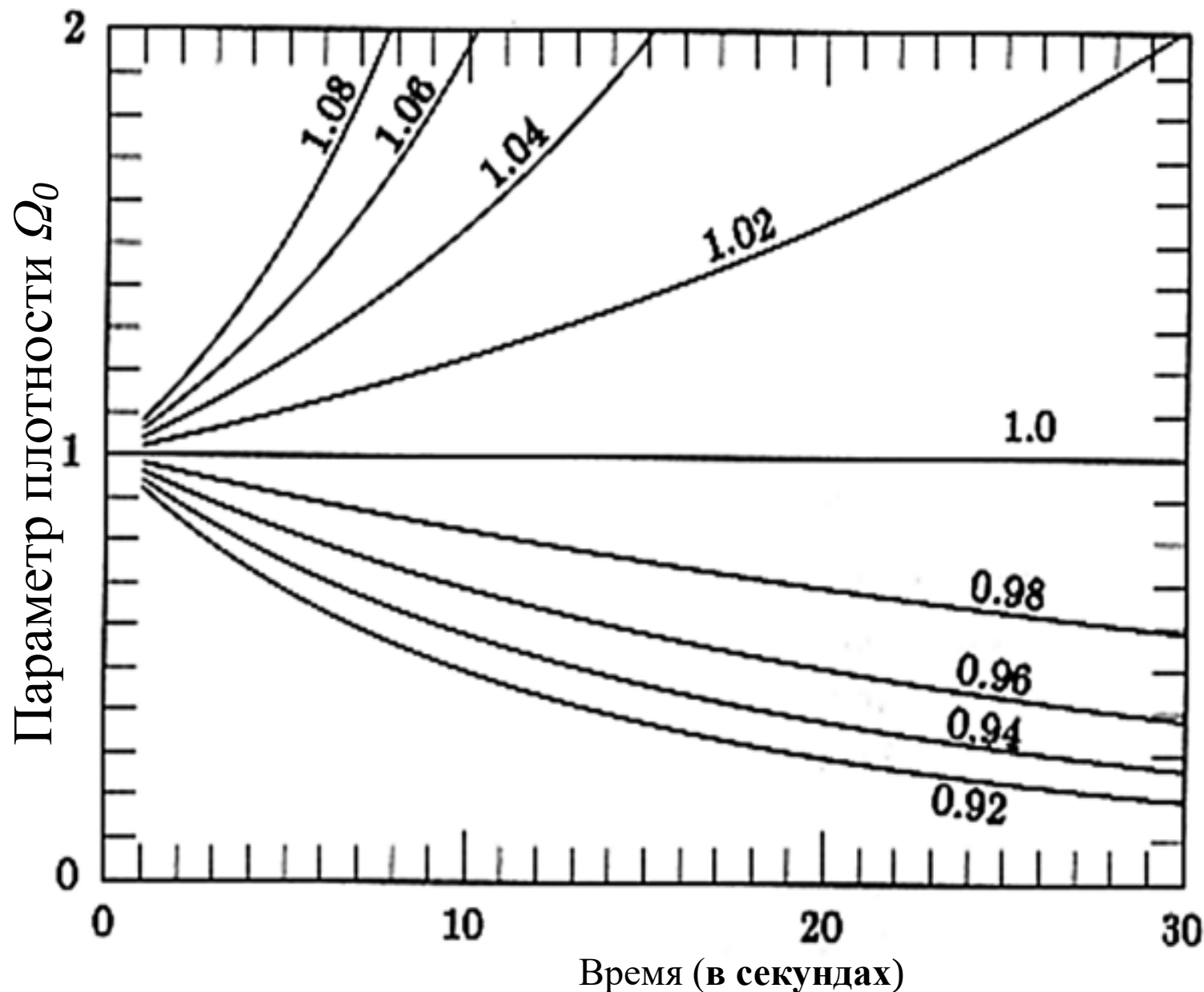
Полная плотность Вселенной в современный момент времени

Космологический параметр полной плотности Вселенной в современный момент времени

$$\frac{kc^2}{2} = \frac{1}{2}H_0^2 a_0^2 (\Omega_0 - 1) \quad \text{— первое уравнение Фридмана}$$

$\Omega_0$  отклоняется от единицы не более чем на 1%

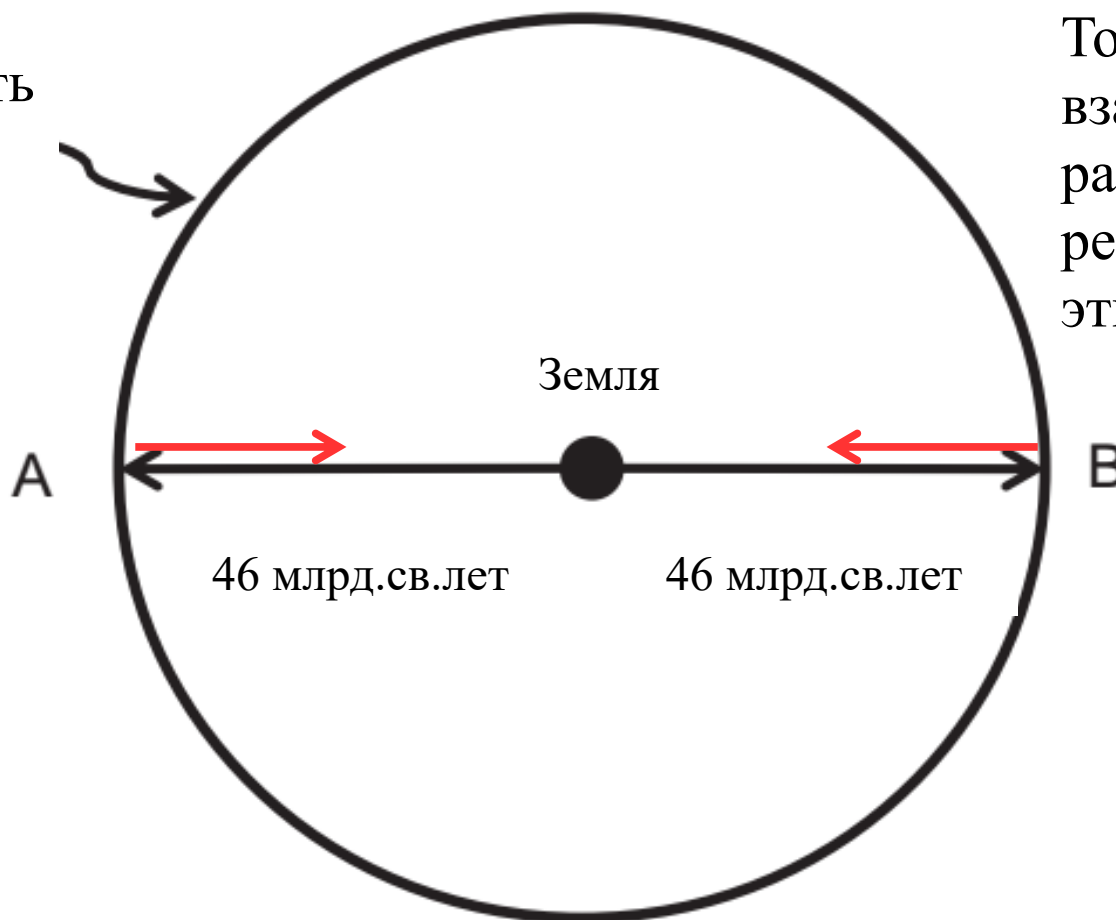
# Проблема плоскостности



*В современный момент времени  $\Omega_0 = 1$  с точностью 1%, только если при  $t = 1$  сек от рождения Вселенной  $\Omega_0$  было равно единице с точностью  $10^{-16}$*

# Проблема горизонта

Поверхность  
последнего  
рассеяния



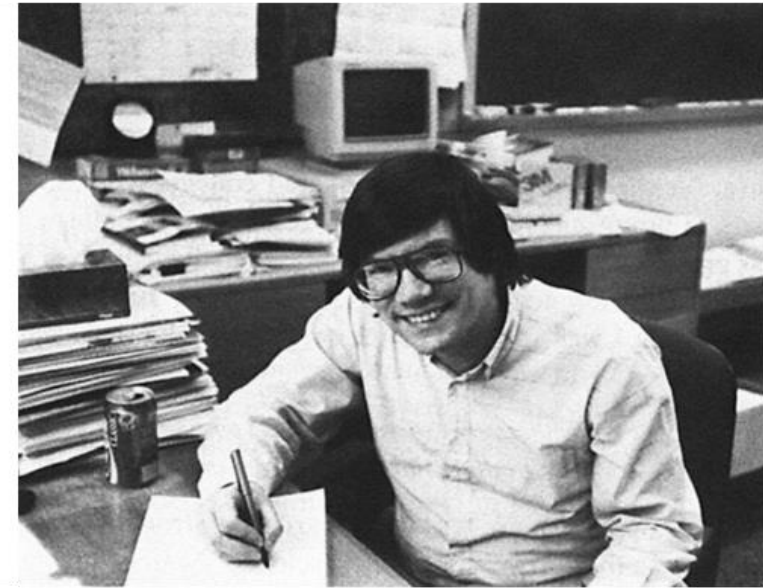
Точки А и В никогда не  
взаимодействовали, но  
разница температур  
реликтового излучения в  
этих точках 0.00001

В космологической модели Фридмана расширение Вселенной замедляется со временем, поэтому объекты, которые не находятся в причинном контакте сегодня, никогда не могли быть в причинном контакте раньше.

Проблемы горизонта и плоскостности можно решить, если считать, что ранняя Вселенная прошла стадию ускоренного расширения, которое было вызвано темной энергией ранней Вселенной, *энергией вакуума*.

**В ранней Вселенной была эпоха космологической инфляции**

Можно рассмотреть простейшую модель ранней Вселенной (модель Гута), добавив дополнительное физическое скалярное поле, отвечающее за инфляционное расширение.



Алан Гут



Если инфляция произошла при энергиях  $10^{16}$  ГэВ (энергия теории Великого объединения всех известных физических взаимодействий), то Вселенная расширится в  $10^{100}$  раз за  $10^{-35}$  с

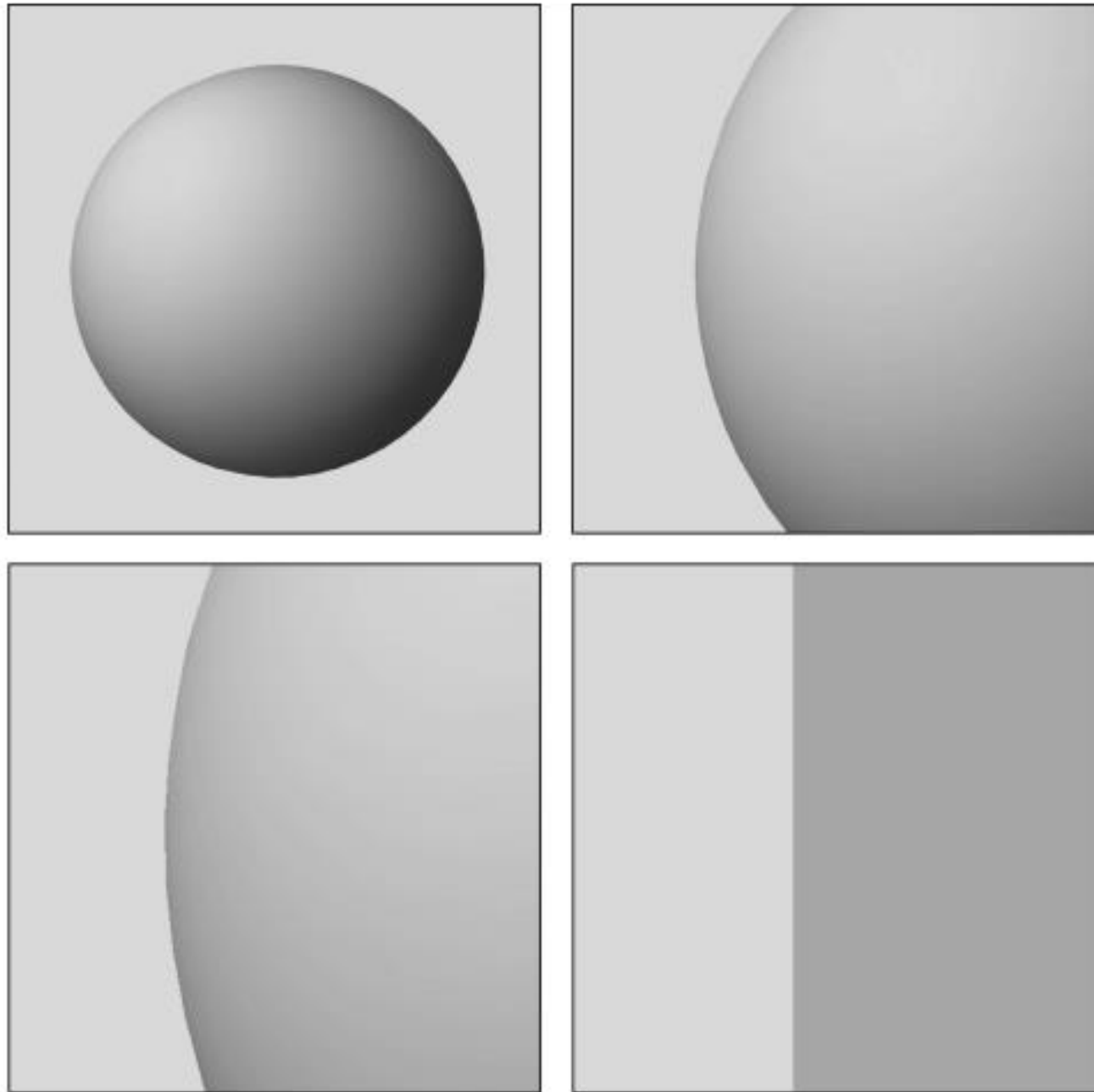
Вселенная ускоренно расширяется (стадия инфляции), находясь в состоянии **ложного вакуума**, потом переходит в состояние **истинного вакуума**, а избыток энергии идет на рождение огненного первичного шара (момент Большого взрыва) и его дальнейшего расширения уже по инерции.

Инфляционная стадия предположительно имела место при возрасте Вселенной от  $10^{-43}$  с до  $10^{-37}$  с от момента рождения Вселенной. «Инфляция» означает, что скорость роста масштабного фактора пропорциональна величине самого фактора (коэффициент пропорциональности – это параметр Хаббла).

$$\frac{da(t)}{dt} = Ha(t)$$

**Модель Гута – это синтез космологической модели Фридмана и гипотезы о принципиально новом состоянии материи, которое называется состоянием «ложного вакуума».**

Решение проблем **горизонта** и **плоскостности** в предположении, что ранняя Вселенная прошла стадию ускоренного (инфляционного) расширения



А. А. Старобинский развил теорию инфляции, основанную на квантовых поправках к общей теории относительности.

За несколько лет до первой статьи А. Гута он построил модель Вселенной с квадратичными поправками по скалярной кривизне.

$$S = \frac{c^4}{8\pi G} \int f(R) \sqrt{|g|} d^4x,$$

где  $G$  – гравитационная постоянная,  $|g|$  – определитель метрического тензора,  $x$  – четырехмерные координаты в пространстве-времени,  $\sqrt{|g|} d^4x$  – бесконечно малый объём четырёхмерного пространства-времени.

Случай  $f(R) = R$  соответствует обычной общей теории относительности Эйнштейна.

$$f(R) = R + \frac{R^2}{6\mu^2}$$

где  $\mu$  – это фиксированная по величине первичных возмущений плотности константа, равная  $1.3 \cdot 10^{-5} M_{Pl}$ .

Решение уравнений Эйнштейна, получающихся при наличии членов с квадратичной кривизной, при большом значении кривизны приводит к эффективной космологической постоянной.



А.А. Старобинский

# Более сложная модель инфляции — модель “медленного скатывания” (А. Линде)



Андрей Линде



Новое скалярное поле, предложенное А. Линде

Осцилляция вблизи минимума потенциала — это рождение вещества и излучения из энергии скалярного поля

Проблема **начальных флуктуаций и формирования крупномасштабной структуры** также решается, если предположить что ранняя Вселенная прошла стадию ускоренного (инфляционного) расширения согласно модели «медленного скатывания»



Первичный огненный шар рождается в чуть разные моменты времени в разных точках пространства

Теория инфляции предсказывает т.н. **масштабно-инвариантный спектр** начальных флуктуаций

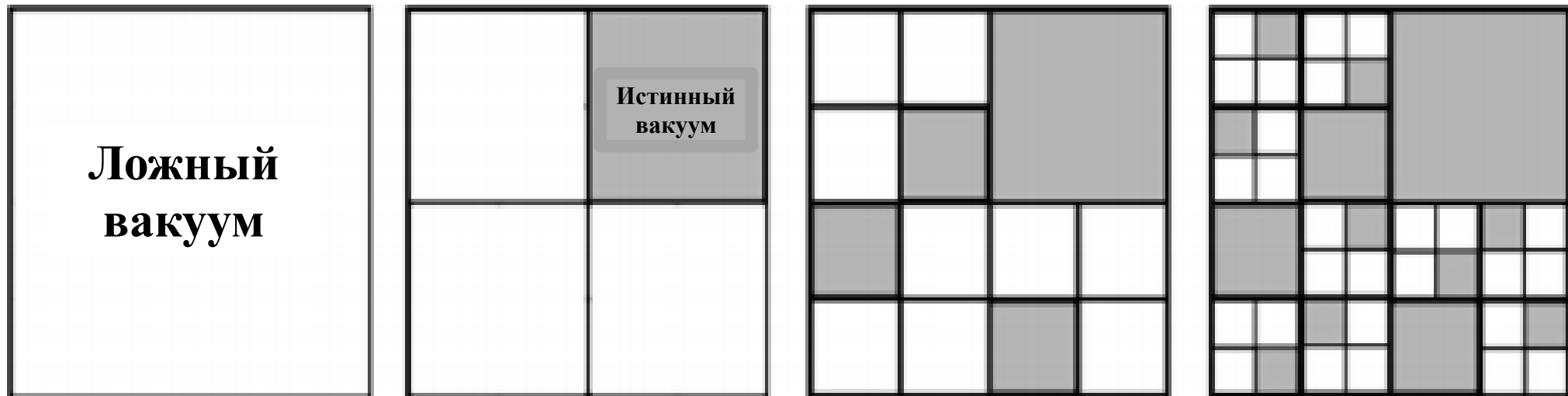


# Модель «вечной» инфляции

Раздувающаяся Вселенная управляется двумя конкурирующими процессами:  
**экспоненциальным ростом объема ложного вакуума и распадом ложного вакуума.**

*Аналогия – развитие бактерий, которые размножаются делением и разрушаются антителами. Результат зависит от того, какой процесс окажется эффективнее. Так, если бактерии будут уничтожаться быстрее, чем они размножаются, то они быстро вымрут. Если же размножение будет происходить быстрее, то количество бактерий будет быстро расти.*

В большинстве моделей инфляции скорость расширения объема намного выше, чем скорость распада ложного вакуума. Это означает, что расширение «выигрывает», а общий объем раздувающихся областей растет со временем. Распад ложного вакуума «запускается» вероятностными квантовыми процессами, поэтому оно происходит в случайных местах и в случайные моменты времени. Результатом является стохастическое «лоскутное одеяло» истинных и ложных областей вакуума.



Области фальшивого вакуума

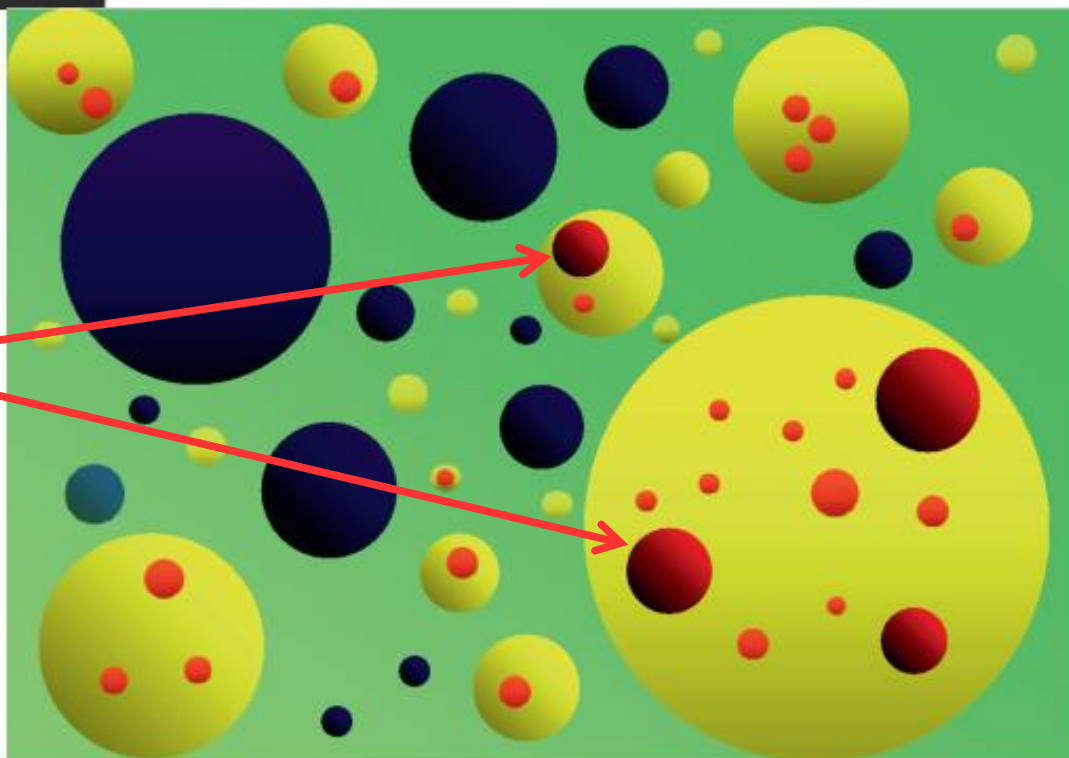


Области истинного вакуума

## Теория Мультимира (Мультиленной)

Инфляция закончилась

Во всех остальных областях  
инфляция продолжается



## ЛЕКЦИИ 5-6

# Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия

