

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 5

Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной. Ускоренное расширение современной Вселенной. Теория инфляции

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна
(cosmologia@yandex.ru)

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

Программа курса

ЛЕКЦИЯ 1. Предмет науки космологии. Современная Стандартная космологическая модель

ЛЕКЦИЯ 2. Расширение Вселенной. Возраст Вселенной. Понятие горизонта частиц.

Основные эпохи эволюции Вселенной

ЛЕКЦИЯ 3. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии.

Гравитационное линзирование

ЛЕКЦИЯ 4. Поиск темной материи методами наблюдательной космологии. Гравитационное линзирование (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

ЛЕКЦИЯ 5. Темная энергия в ранней Вселенной и в современной Вселенной. Ускоренное расширение современной Вселенной. Теория инфляции

ЛЕКЦИЯ 6. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия

ЛЕКЦИЯ 7. Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

ЛЕКЦИЯ 8. Планетные системы, галактики.

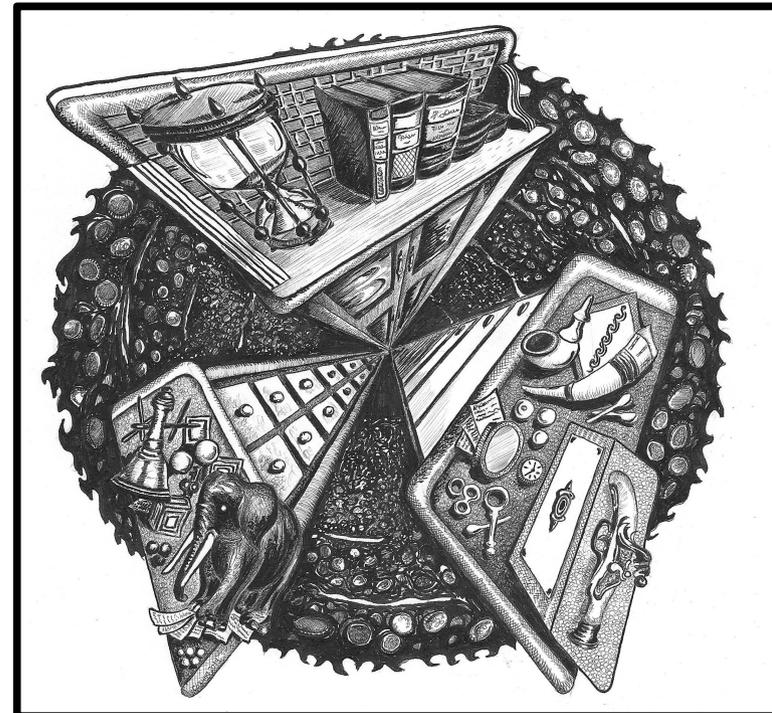
Крупномасштабная структура Вселенной

ЛЕКЦИЯ 9. Распространенность легких химических элементов. Образование химических элементов в звездах

ЛЕКЦИЯ 10. Космические струны: модели, свойства, основные методы поиска наблюдательными методами

ЛЕКЦИЯ 11. Гравитационные волны

ЛЕКЦИЯ 12. Модели будущего Вселенной, основанные на современных наблюдательных данных



Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели



1. Расширение Вселенной

2. Реликтовое излучение

3. Крупномасштабная структура Вселенной

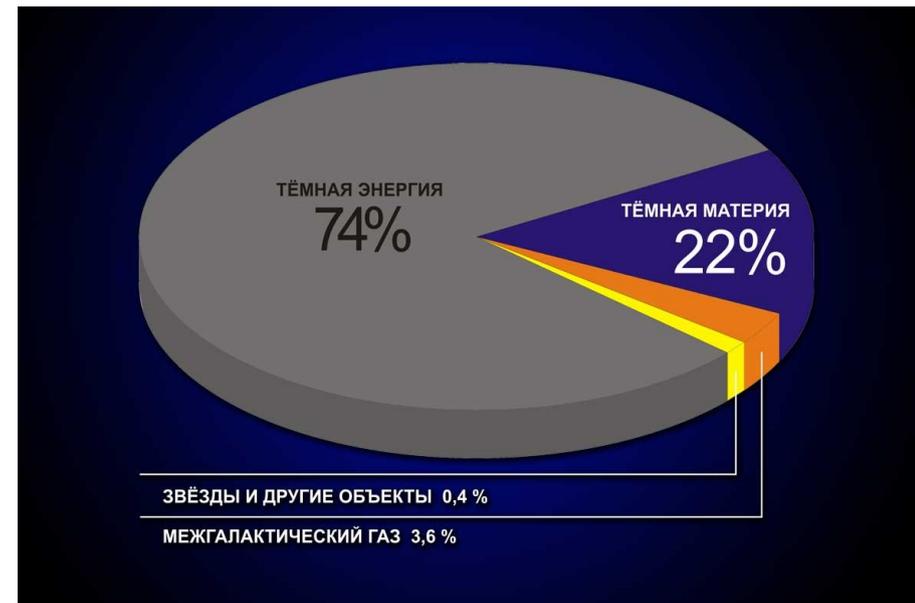
4. Распространенность легких химических элементов

5. Анизотропия реликтового излучения

6*. Темная материя

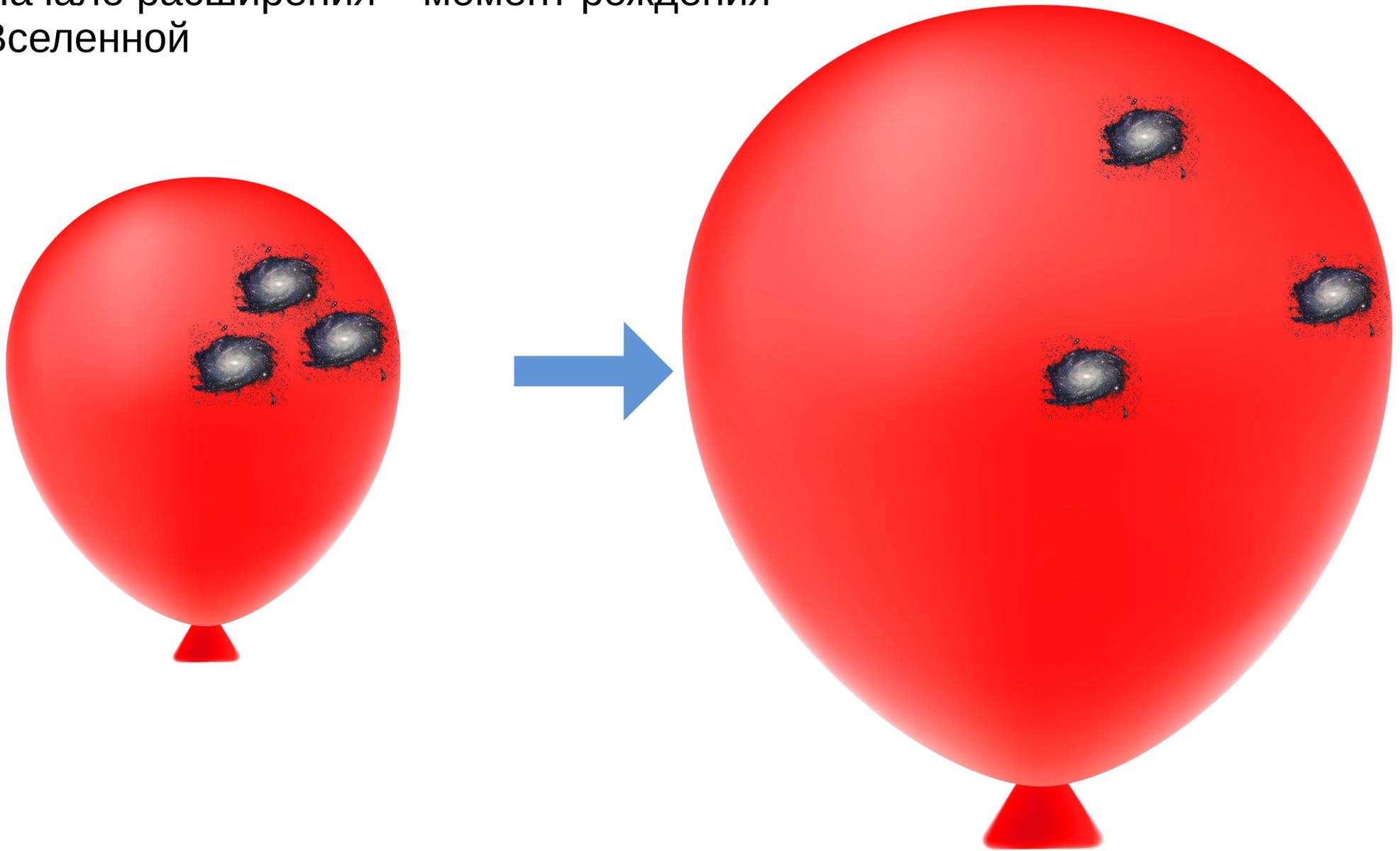
7*. Темная энергия

8*. Гравитационные волны



Расширение Вселенной

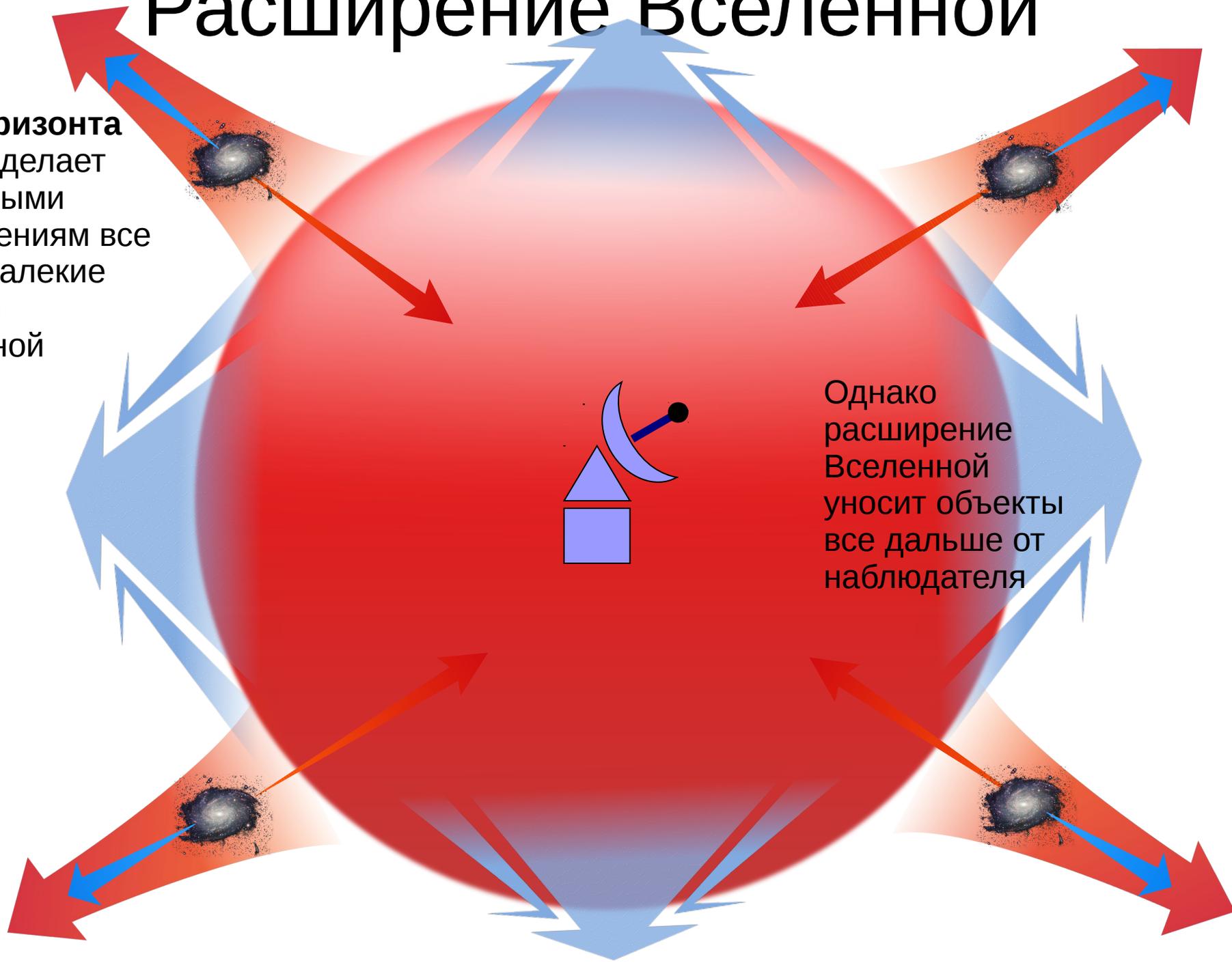
Начало расширения – момент рождения Вселенной



Расширение Вселенной

Рост горизонта частиц делает доступными наблюдениям все более далекие области Вселенной

Однако расширение Вселенной уносит объекты все дальше от наблюдателя



Расширение Вселенной

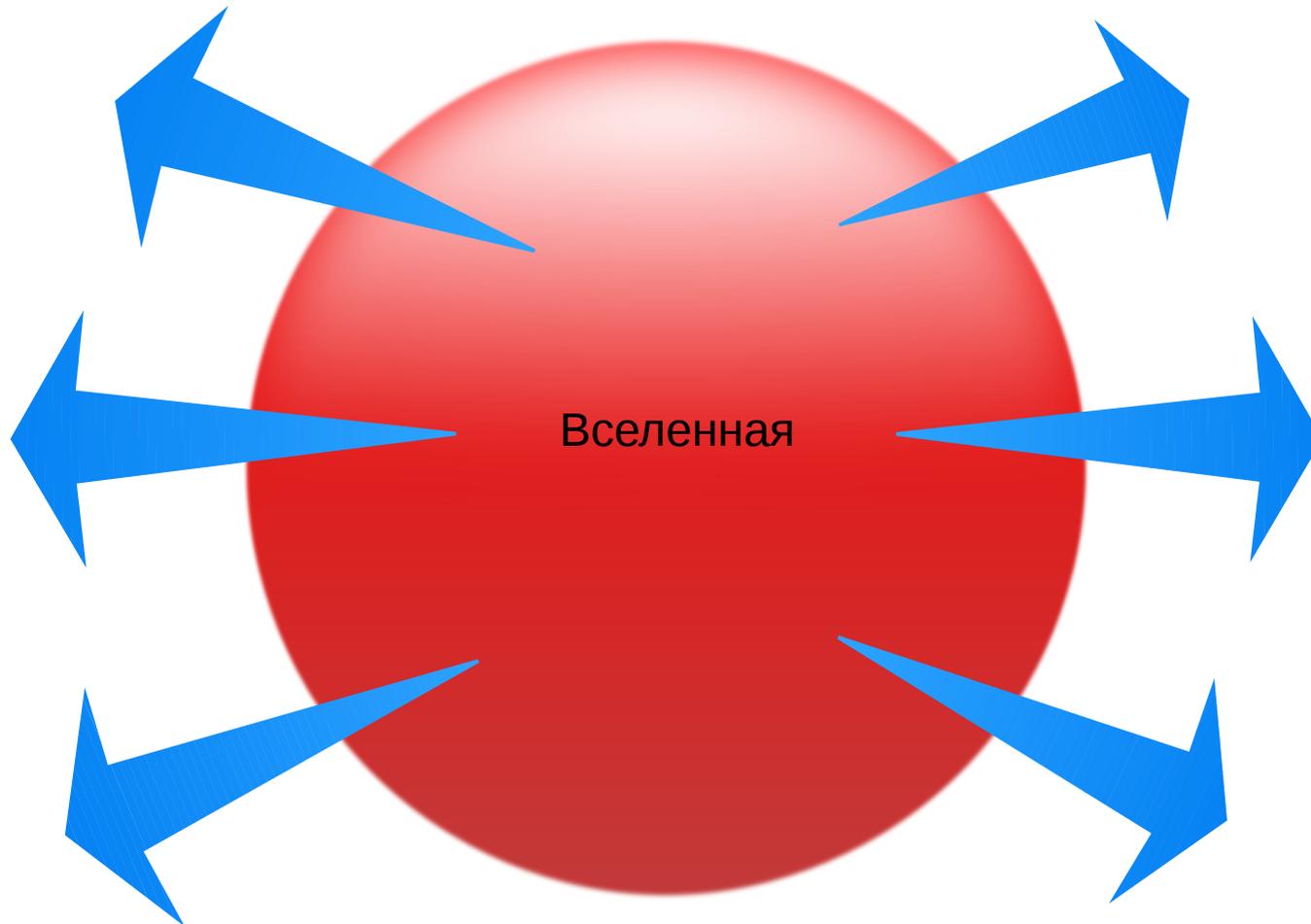
Темп расширения Вселенной полностью определяется заполняющим ее веществом



Вселенная

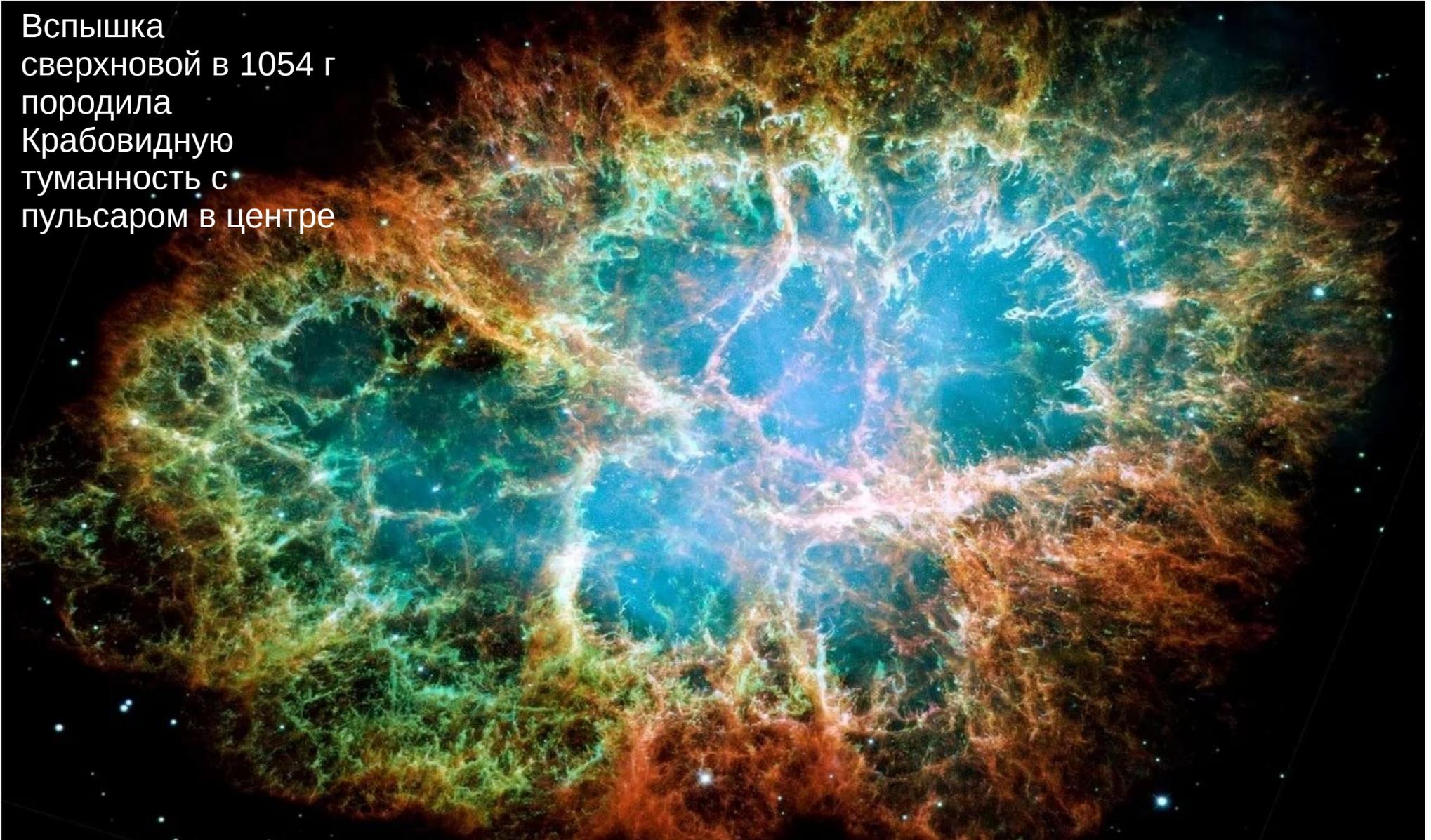
Мультиленная

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-гостя” в китайских хрониках. Эта звезда вспыхнула в нашей Галактике в 1054 году и была видна днем в течение одного месяца. Впоследствии звезда стала угасать, но еще в течение двух лет ее можно было наблюдать невооруженным глазом.
- В настоящее время на месте “звезды-гостя” находится Крабовидная туманность – остаток сверхновой 1054 года. В центре расположен миллисекундный пульсар.

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.



SN 2014J January 31, 2014

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

Шкала расстояний

Для вычисления расстояний в космологии используется так называемая **шкала (или лестница) расстояний**: в зависимости от удаленности объекта, используются разные методы, разные “стандартные свечи”. Существует более десяти методов определения галактических и внегалактических расстояний.

На практике чаще всего используются **методы Тулли-Фишера** (метод, основанный на связи массы и скорости вращения галактик) определение расстояний по **цефеидам** и **сверхновым типа Ia**, а также по звездам — **красным гигантам**. Для определения красных смещений далеких галактик также используется **метод Сюняева-Зельдовича**.

Цефеиды — переменные звезды с известной внутренней яркостью — обычно составляют первую «ступеньку» шкалы расстояний, и с их помощью можно определять расстояния до ближайших галактик. Для более отдаленных галактик требуются другие, более яркие объекты с известной внутренней яркостью — обычно это взрывающиеся звезды определенного типа, называемые сверхновыми типа Ia. **Астрономы проводят калибровку между этими двумя различными методами, используя близлежащие галактики, содержащие как цефеиды, так и сверхновые типа Ia.**

Цефеиды и сверхновые в галактиках

(цефеиды отмечены желтыми кружочками)

SN 2011by +

Галактика NGC 3972
65 млн св. лет



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/см²/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.

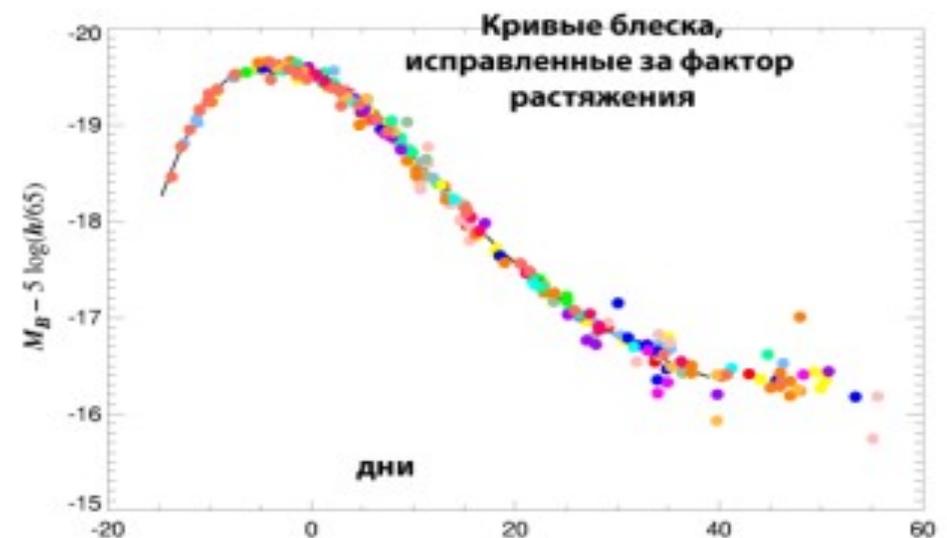
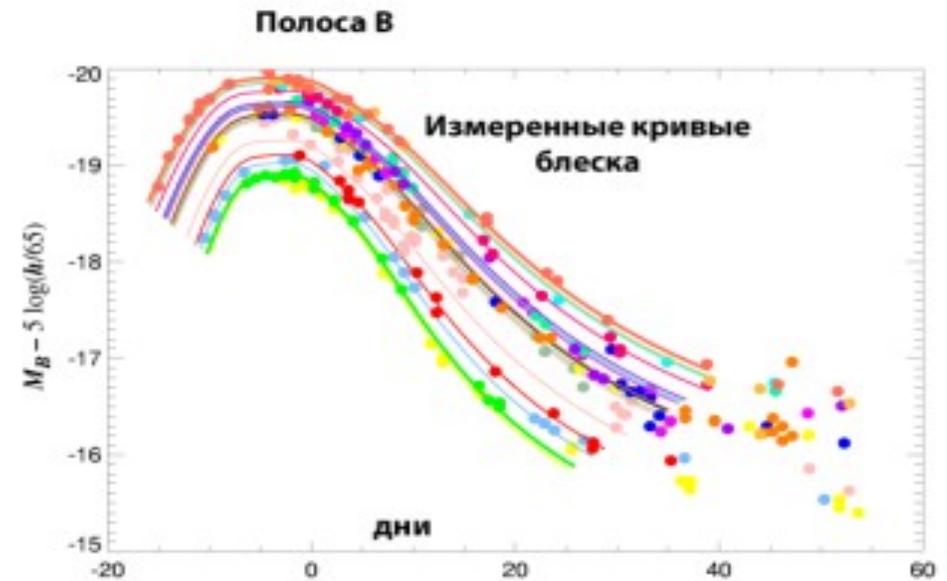
Измеряя **спектр** сверхновой, можно узнать скорость, а зная еще и расстояние до нее, можно вычислить кинематические характеристики расширяющейся Вселенной.

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).

Сверхновые типа Ia (SN Ia)

Галактика NGC4526 и сверхновая SN Ia 1994d



Как узнали о существовании темной энергии?

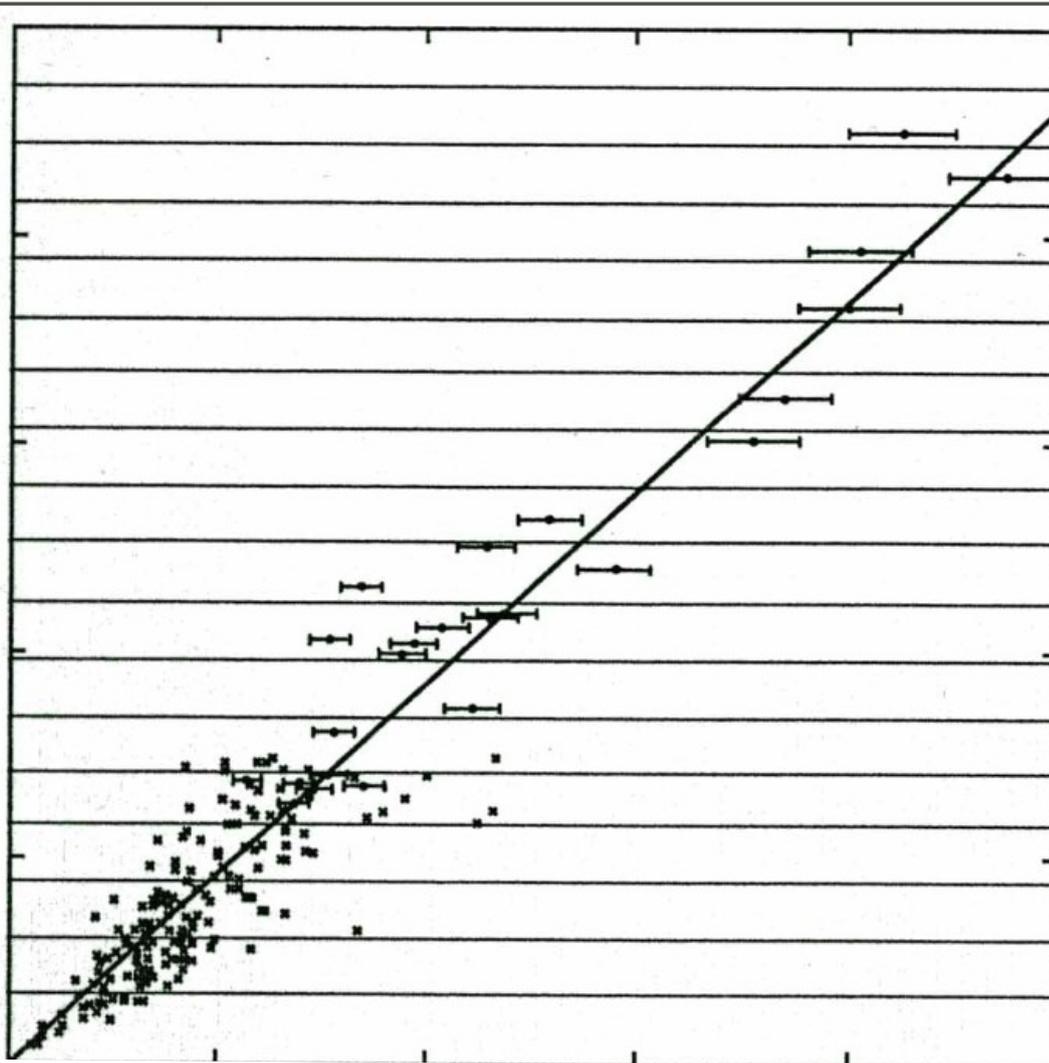


Диаграмма Хаббла для галактик. Черточками указано положение достаточно близких к нам галактик, расстояние до них не превышает 100 Мпк. Распределение галактик (с точностью до ошибок измерения, указанных горизонтальными отрезками) близко к линейному. Тангенс угла наклона представленной на рисунке линии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

Как узнали о существовании темной энергии?

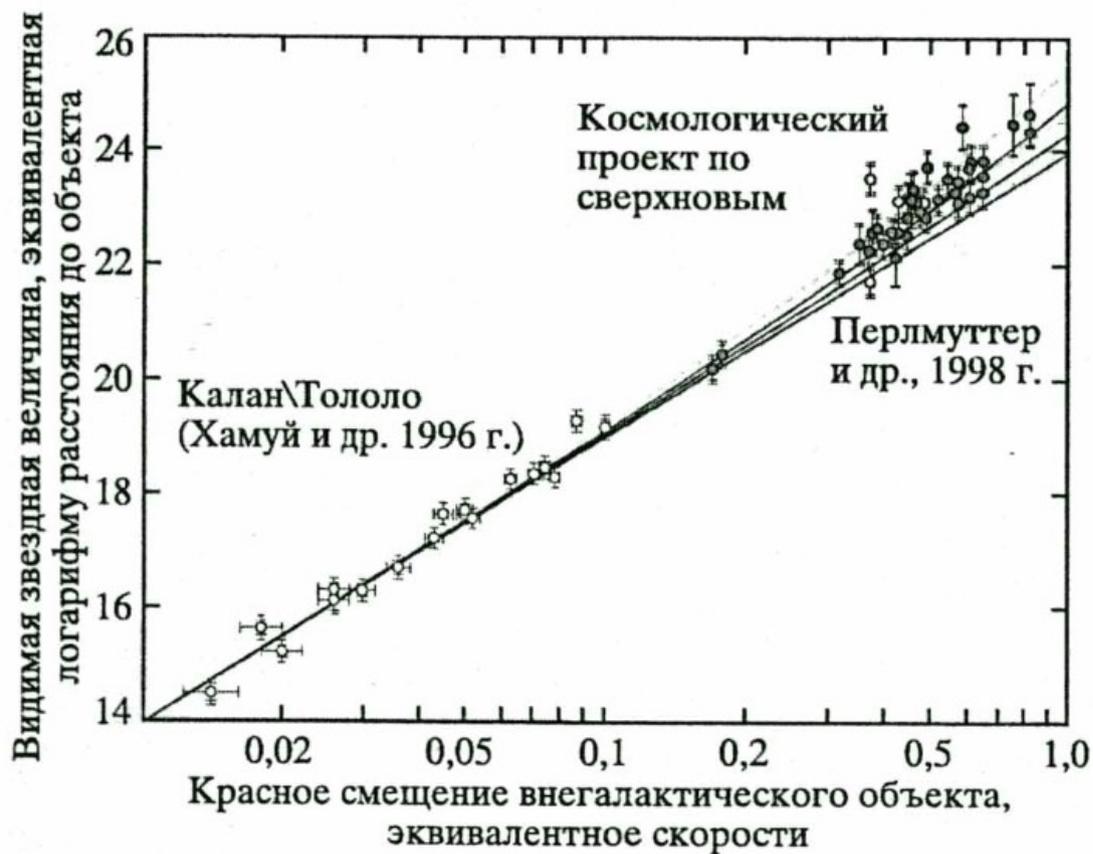
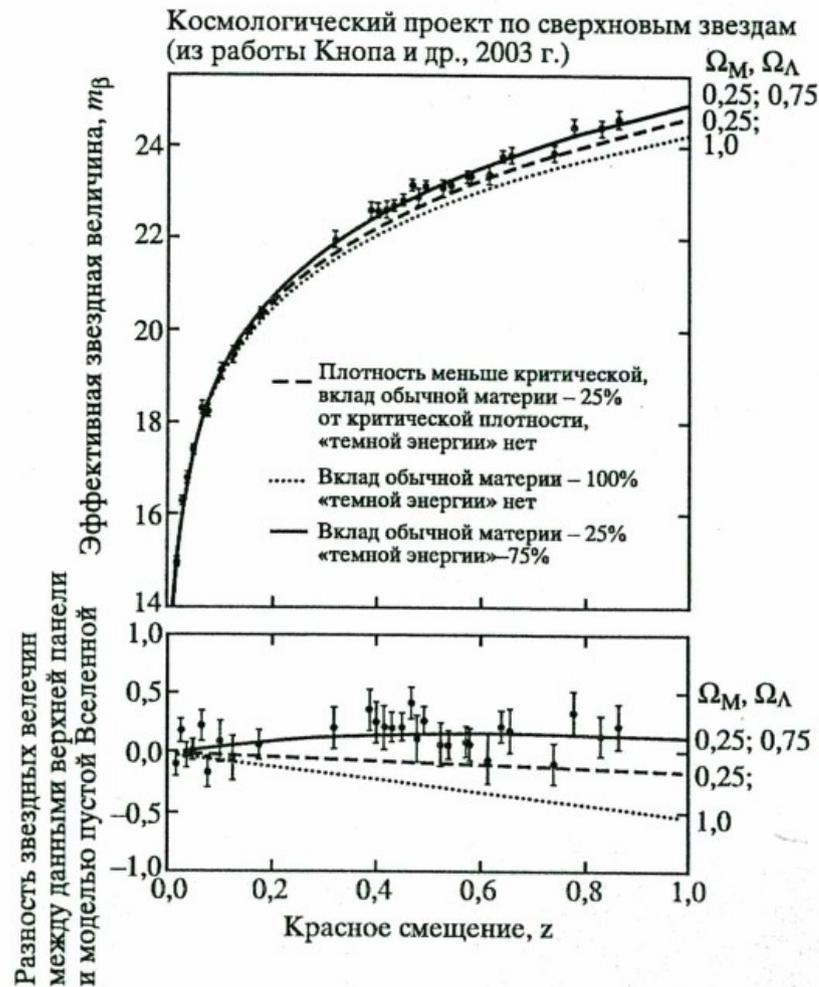


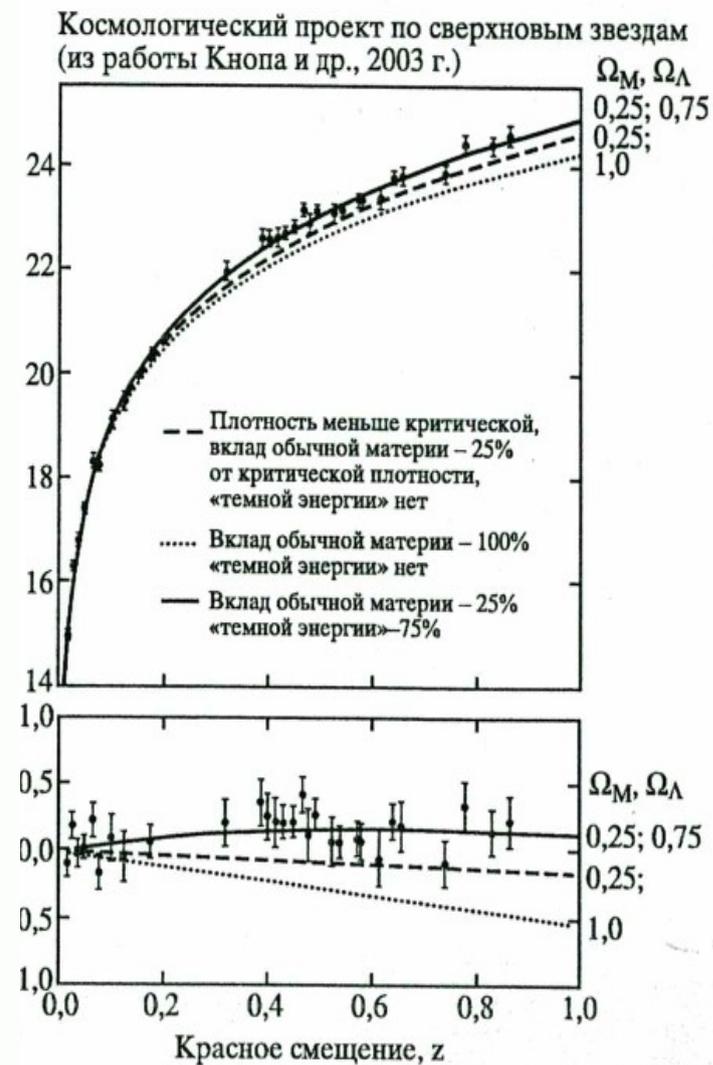
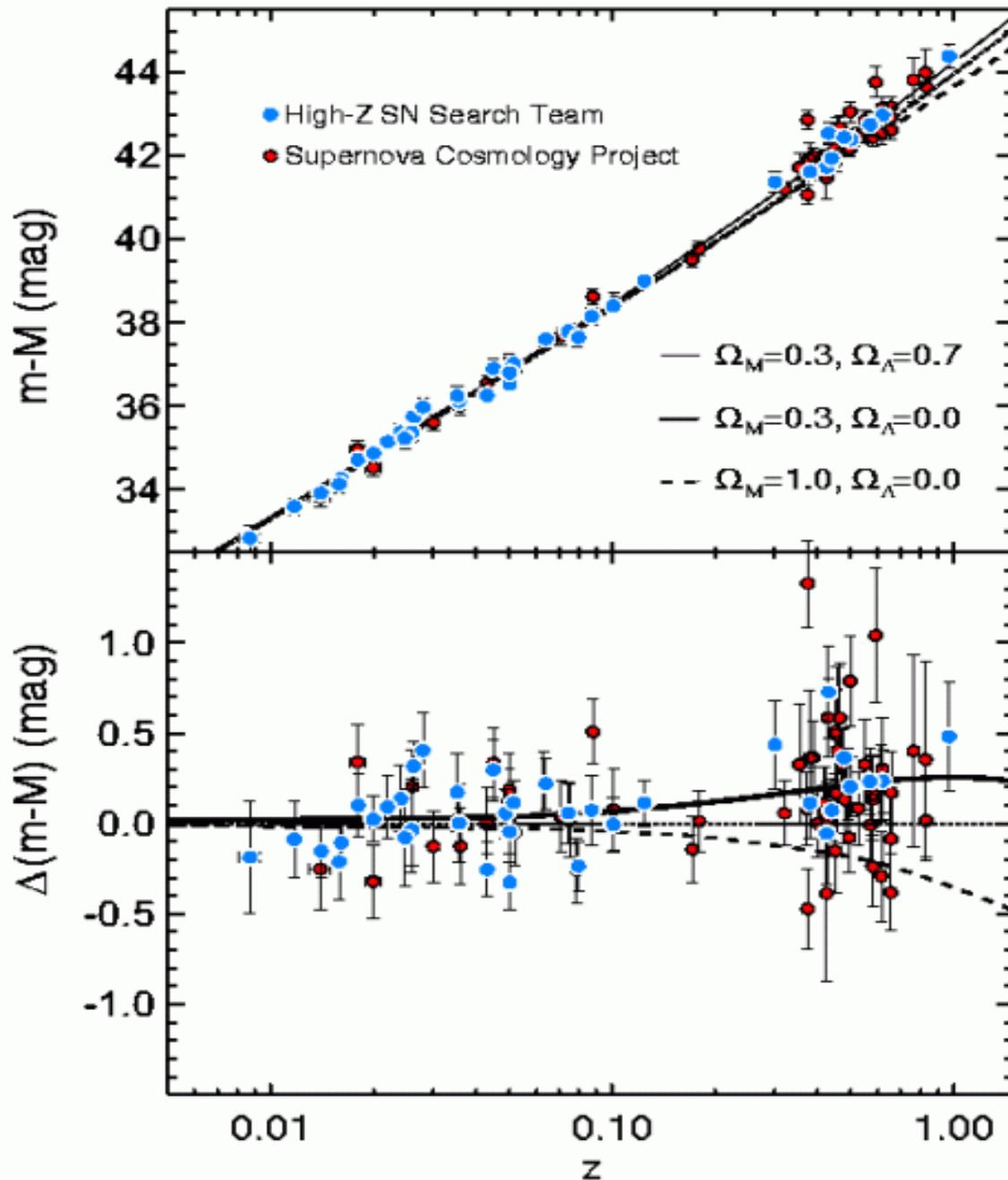
Диаграмма Хаббла, построенная по данным исследований сверхновых звезд типа SN Ia. По сравнению с диаграммой Хаббла для галактик она является "перевернутой". Красное смещение измеряется скоростью сверхновой звезды, деленной на скорость света. Видимая звездная величина пропорциональна логарифму расстояния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



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

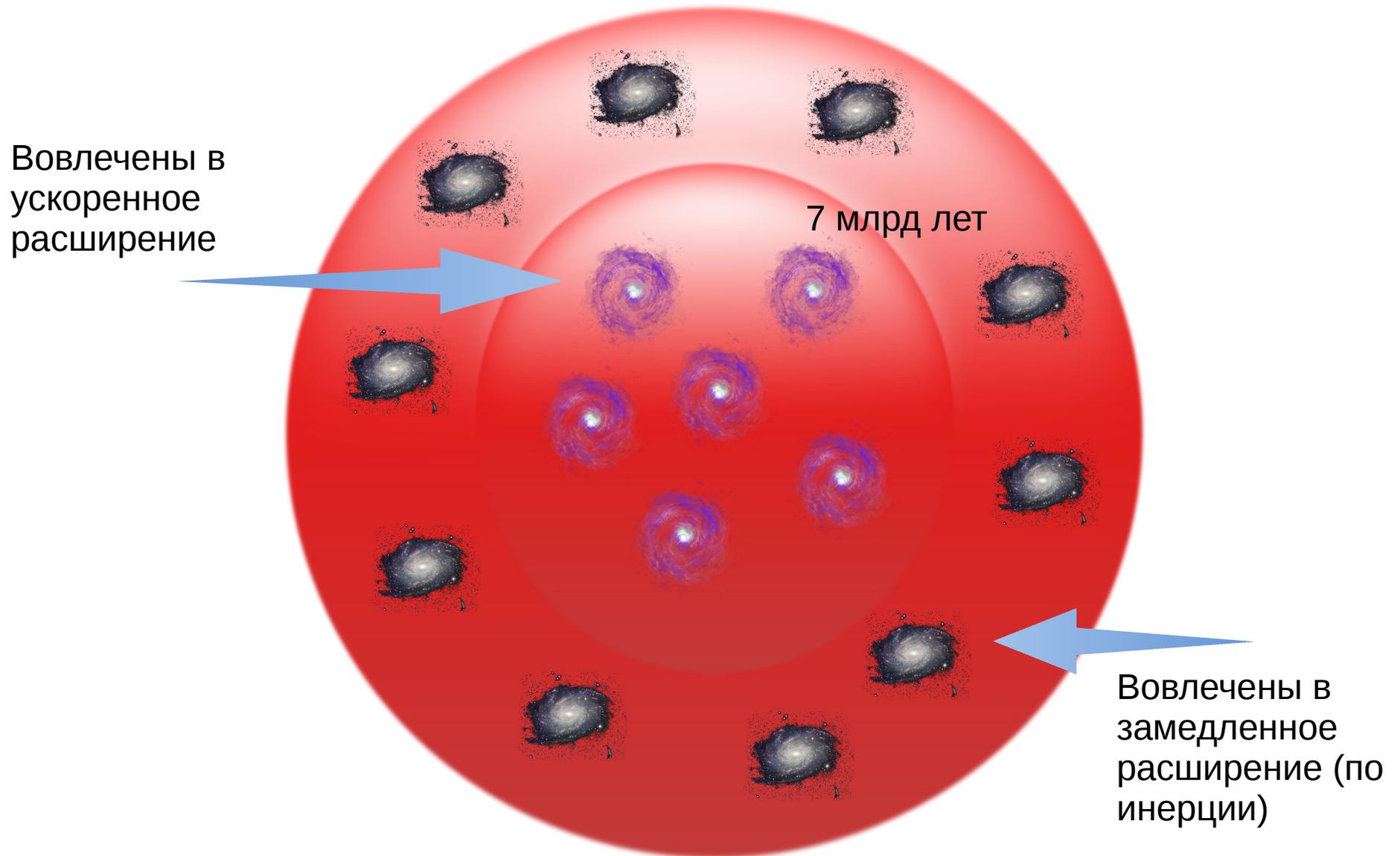
Brian P. Schmidt



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 Λ** , вводимой в уравнения Эйнштейна (при расширении плотность не меняется; по размерности Λ -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 Фрийдмана

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - \frac{4\pi}{3}Ga^2\rho = \frac{K}{\xi^2} + \frac{\Lambda}{6}a^2$$

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

Первое уравнение Фрийдмана

$$\frac{1}{2}\dot{a}^2 - \frac{4\pi}{3}Ga^2\rho = \frac{K}{\xi^2} + \frac{\Lambda}{6}a^2$$

Для $\Lambda \neq 0$

$\Lambda < 0$ – дополнительная притягивающая сила

$\Lambda = 0$ – нет дополнительной силы

$\Lambda > 0$ – дополнительная отталкивающая сила

Сценарии будущего Вселенной в зависимости от вида темной энергии

БУДУЩЕЕ

НАСТОЯЩЕЕ

ПРОШЛОЕ

1



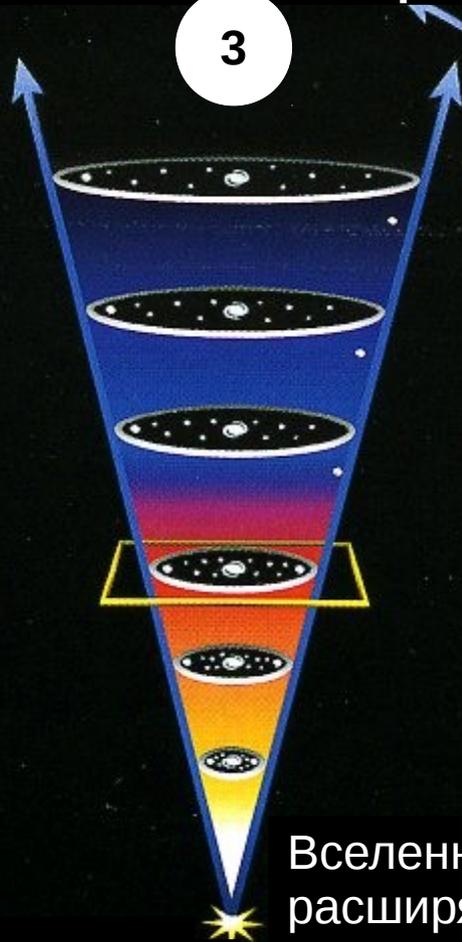
Пульсирующая модель Вселенной: после периода расширения наступает период сжатия, который заканчивается Большим хлопком

2



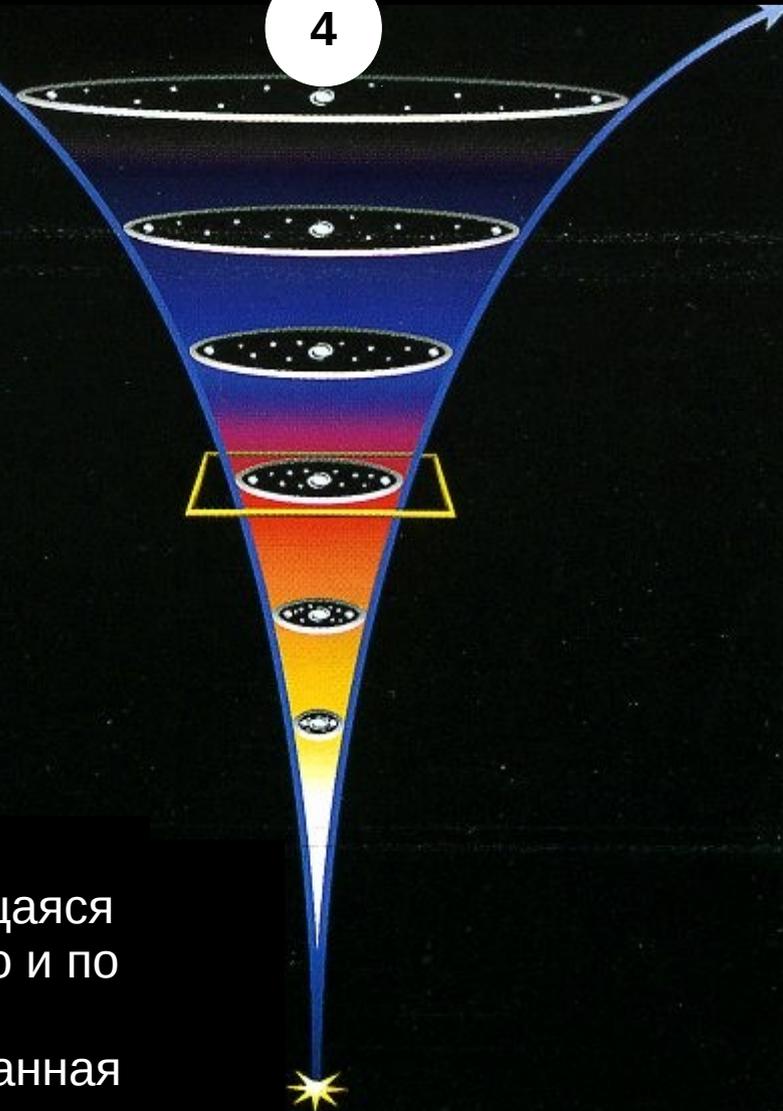
Вселенная с плотностью, в точности равной критической. Пространство евклидово и расширение замедляется

3



Вселенная, расширяющаяся равномерно и по инерции – общепризнанная модель до открытия темной энергии

4



Вселенная, расширяющаяся с ускорением, оставаясь при это евклидовой

Λ -член, квинтэссенция и фантомная энергия

Уравнение состояния или четвертое уравнение Фрийдмана:

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

давление \rightarrow p \leftarrow скорость света c^2
параметр уравнения состояния q \leftarrow плотность ρ

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**. 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”. Однако не следует путать космологическое решение и решения черной дыры – 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.

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.

Сегодня средняя плотность энергии почти равна критической плотности или параметр полной плотности Вселенной:

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

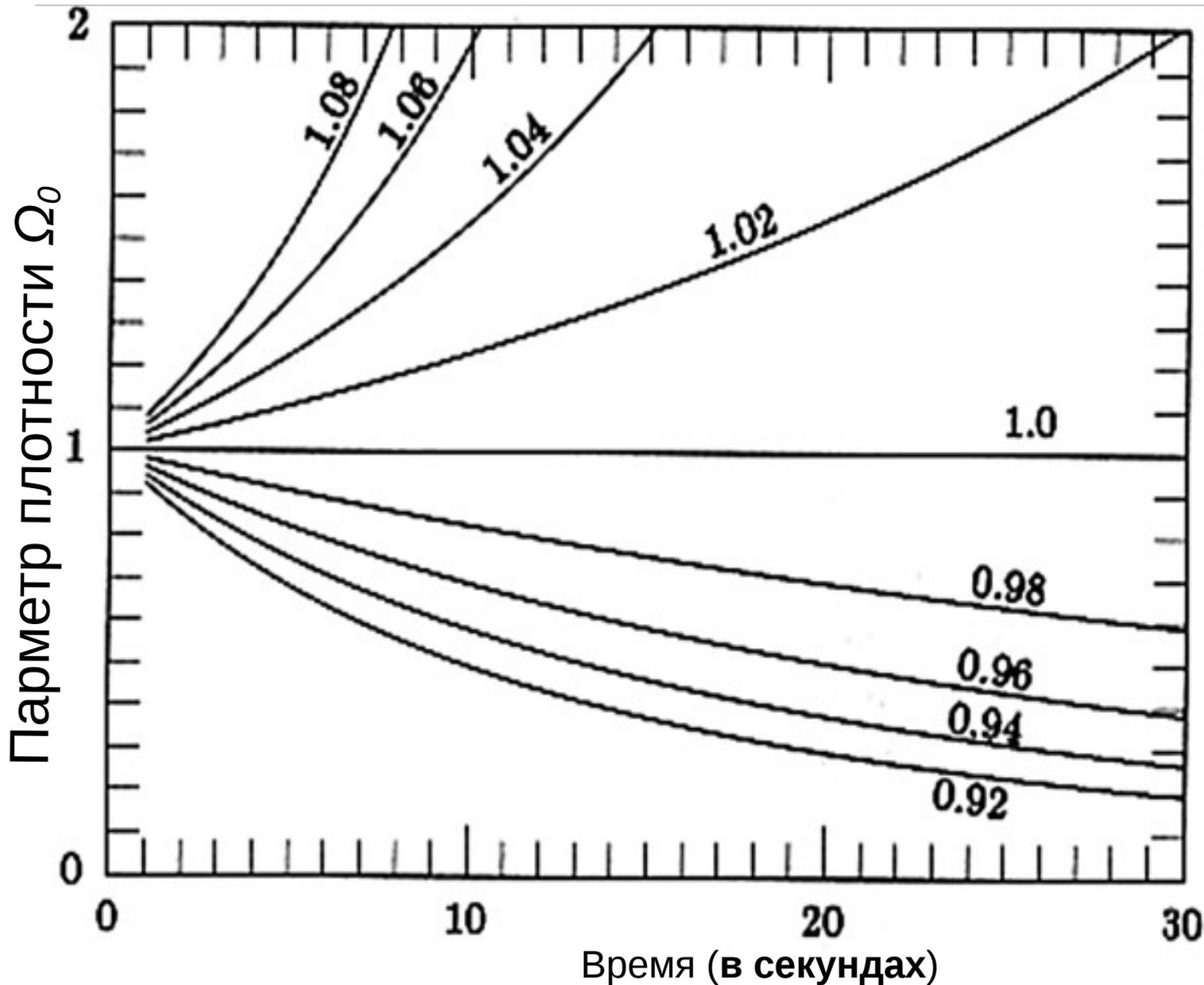
Критическая плотность в современный момент времени

Полная плотность Вселенной в современный момент времени

Космологический параметр полной плотности Вселенной в современный момент времени

Ω_0 отклоняется от единицы не более чем на 1%

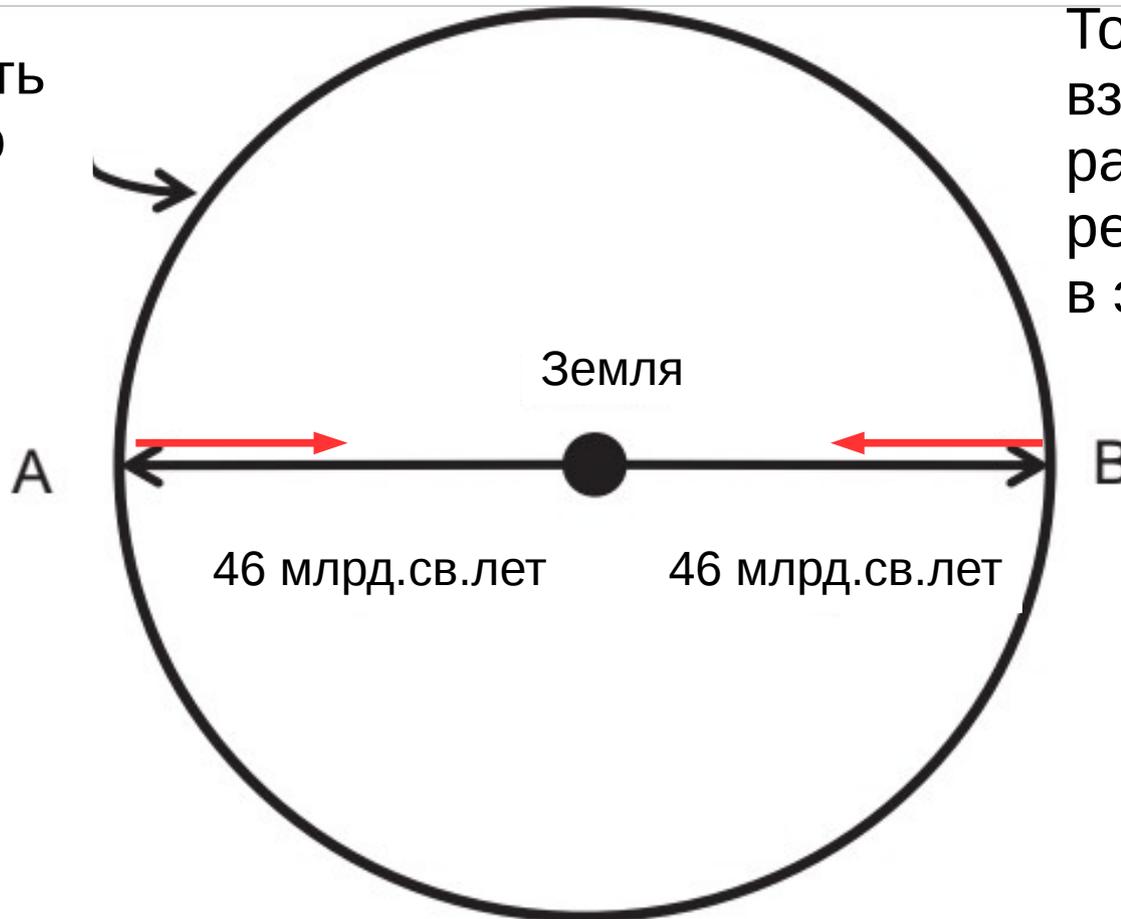
Проблема плоскостности



*В
современный
момент
времени $\Omega_0 = 1$
с точностью
1%, только
если при $t = 1$
сек от
рождения
Вселенной Ω_0
было равно
единице с
точностью
 10^{-16}*

Проблема однородности

Поверхность
последнего
рассеяния



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

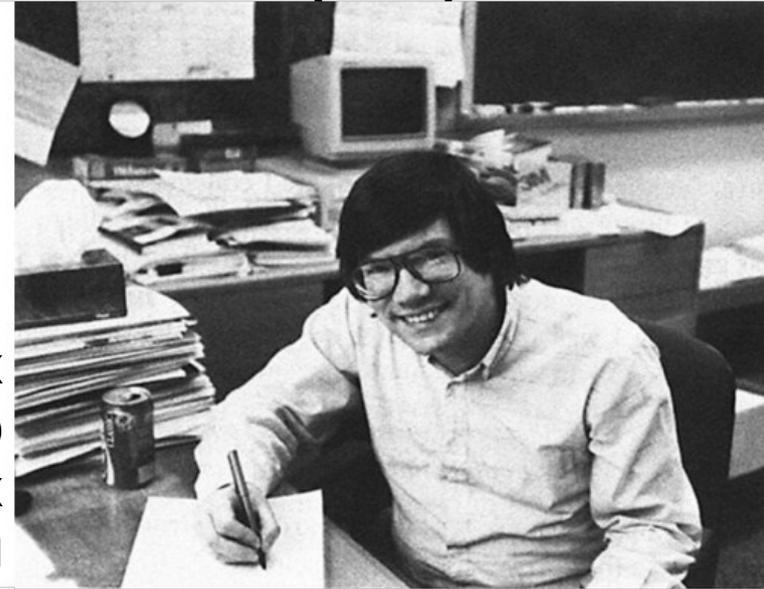
В космологической модели Фридмана расширение Вселенной замедляется со временем, поэтому объекты, которые не находятся в причинном контакте сегодня, никогда не могли быть в причинном контакте раньше.

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

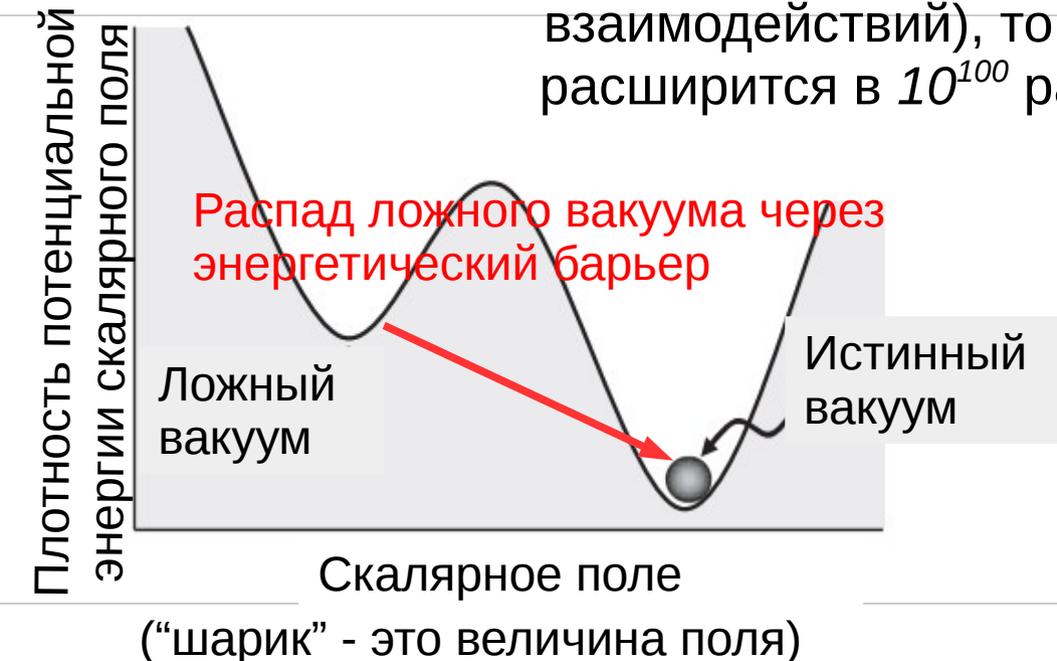
В ранней Вселенной была эпоха **космологической инфляции**

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

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

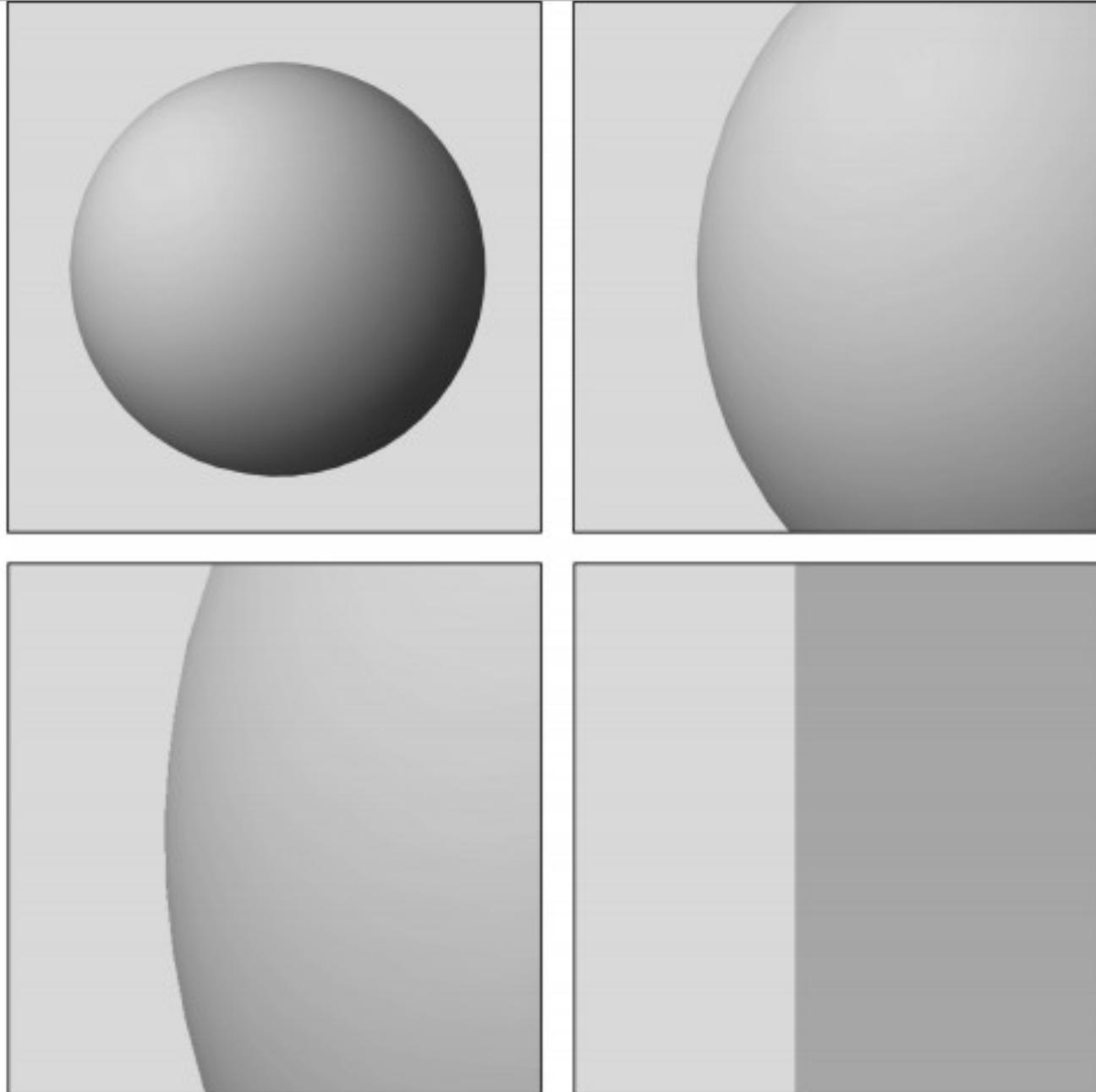


Алан Гут

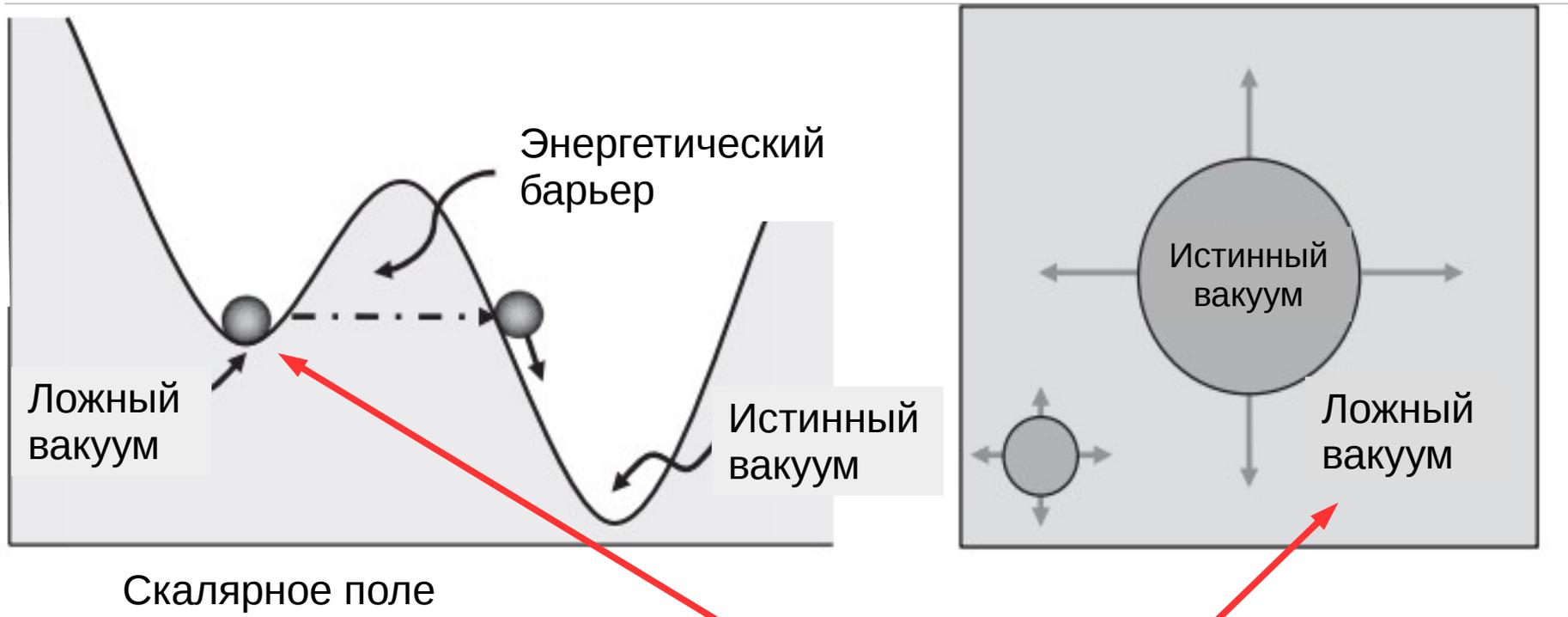


Вселенная ускоренно расширяется (стадия инфляции), находясь в состоянии **ложного вакуума**, потом переходит в состояние **истинного вакуума**, а избыток энергии идет на рождение огненного первичного шара и его расширения уже по инерции

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



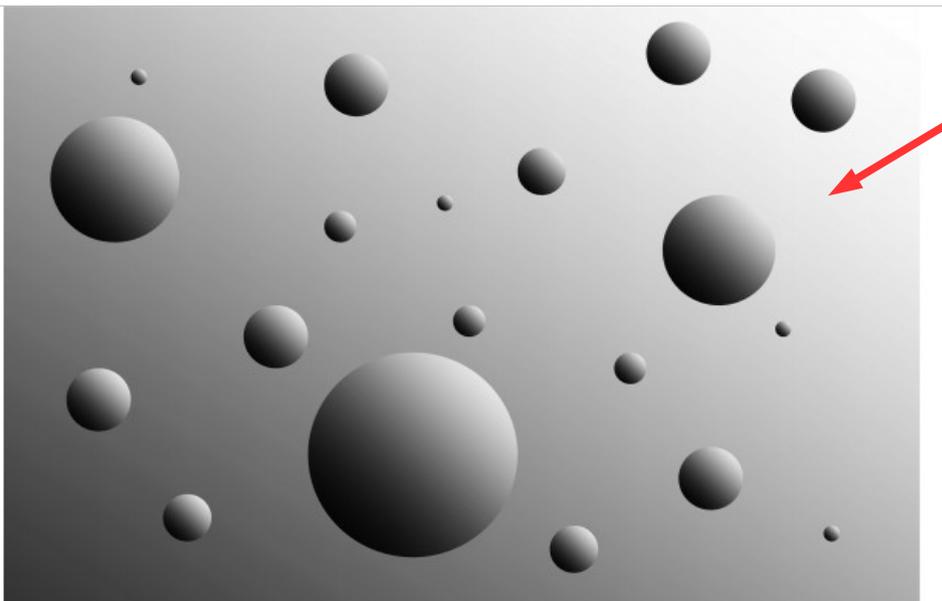
Плотность энергии



Стадия инфляции

Когда пузырьки сливаются вместе, то (в модели Гута) образуются обычное вещество и излучение.

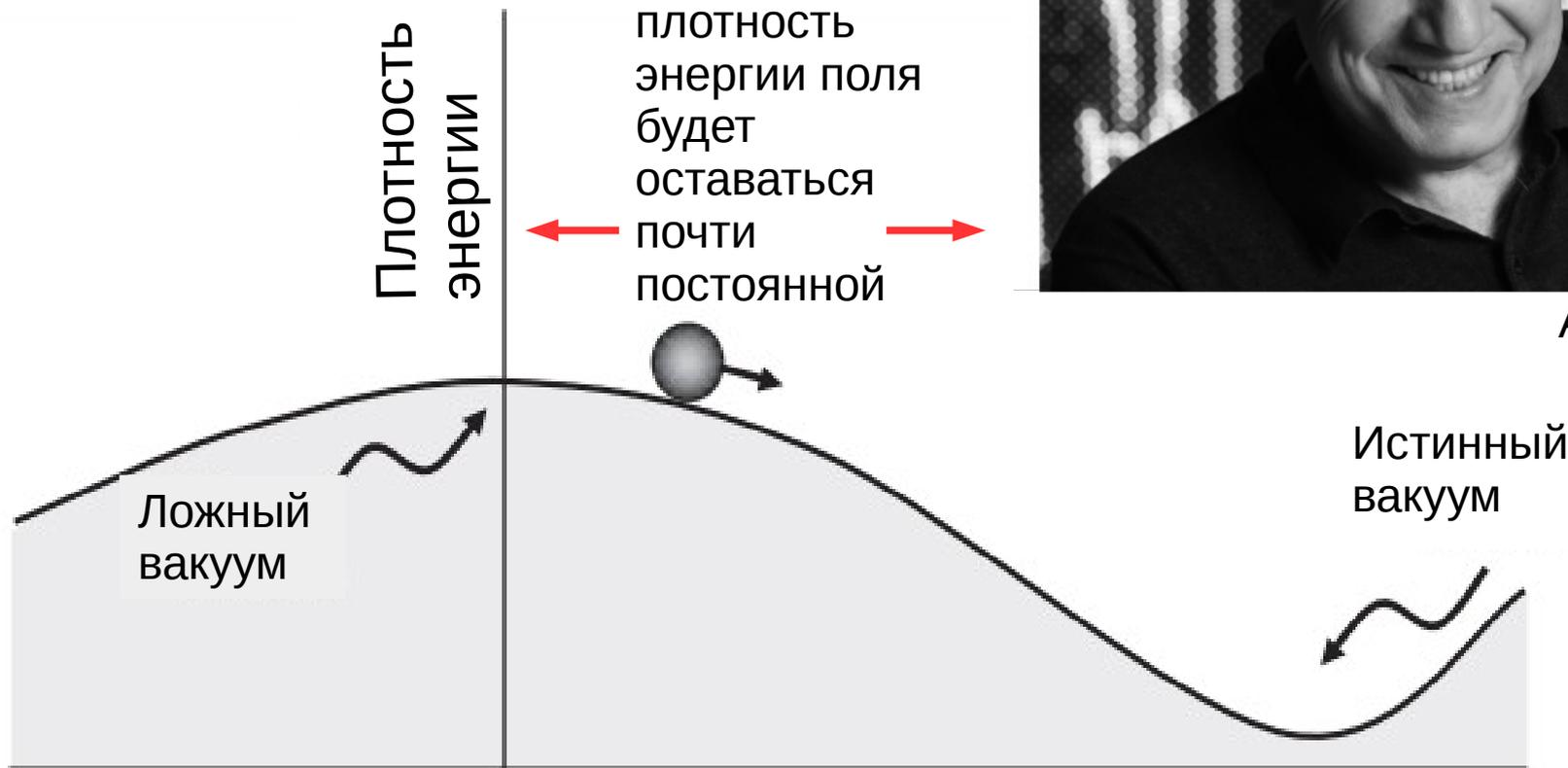
В такой простой модели возникает проблема в том в том, что окружающее пространство расширяется быстрее пузырьков – т.н. “проблема корректного завершения” инфляции



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



Андрей Линде



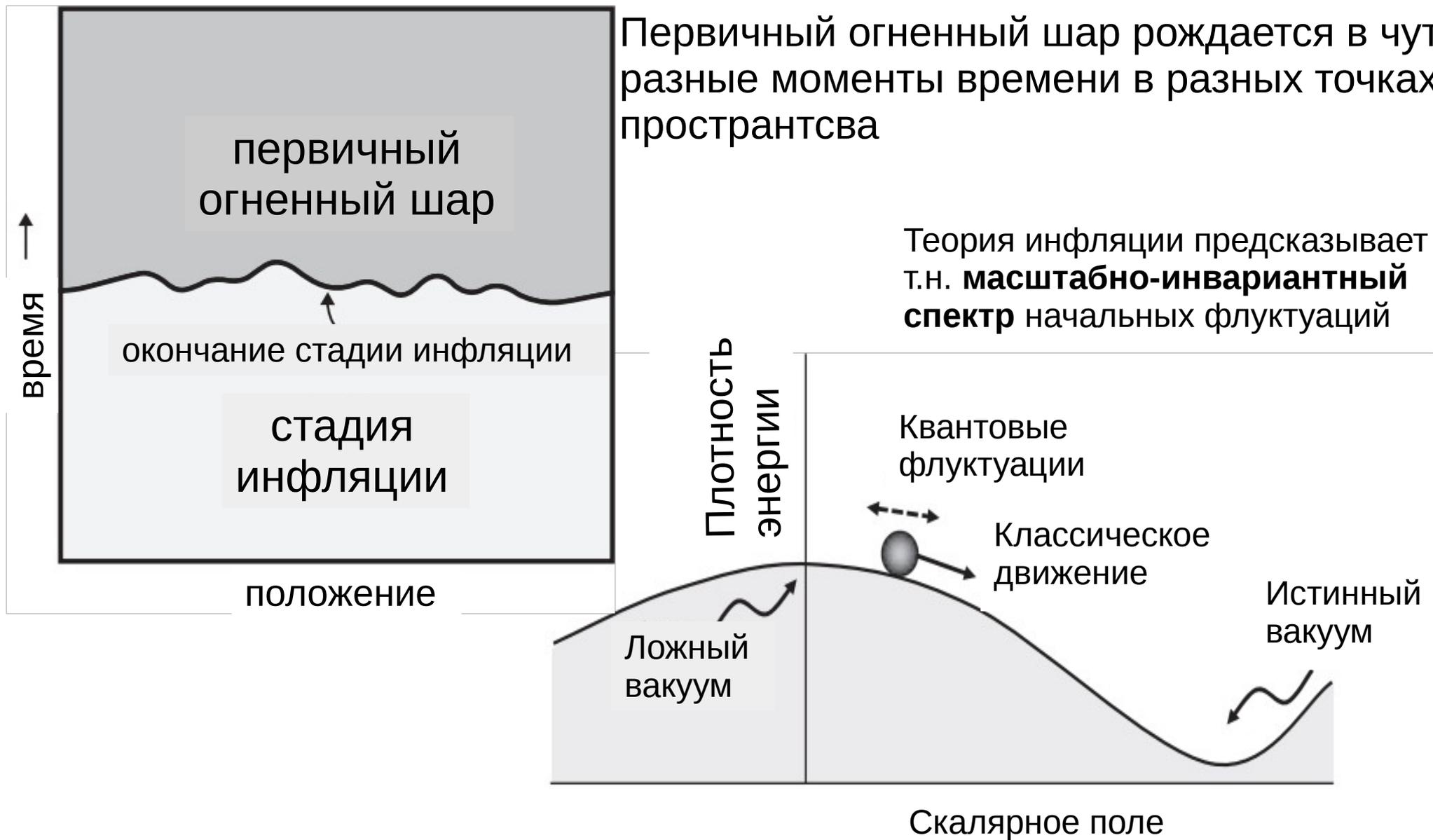
Новое скалярное поле, предложенное А. Линде

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

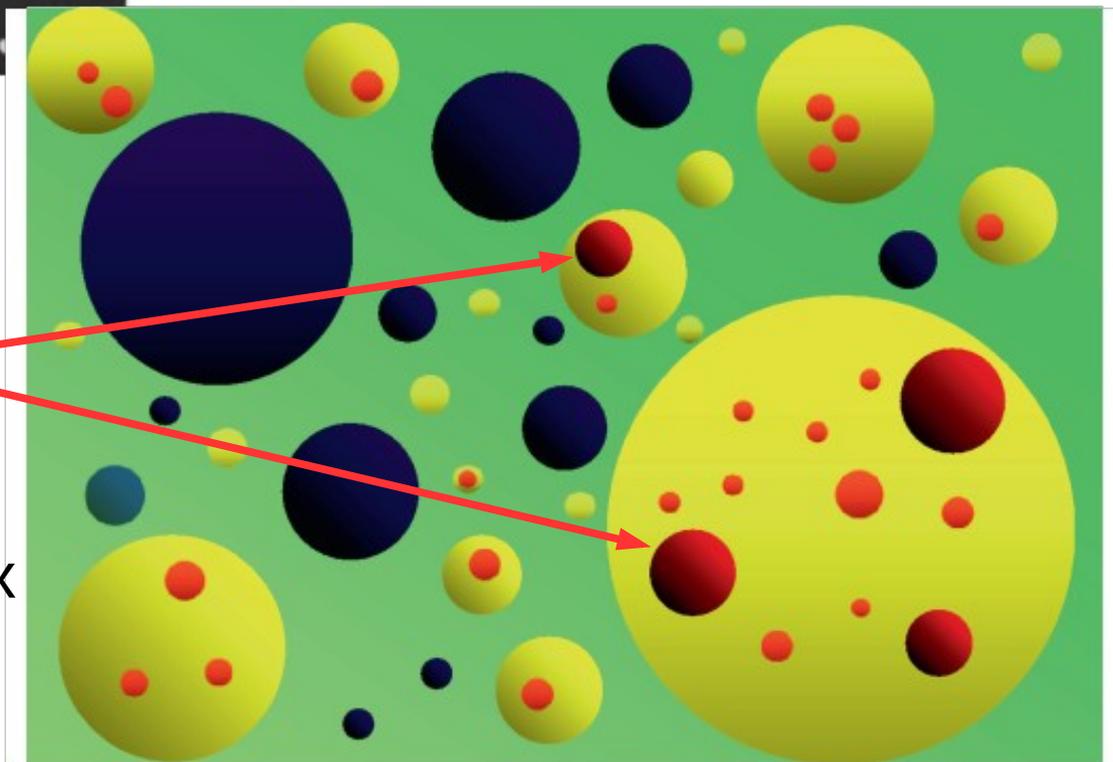


Области истинного вакуума

Теория мультивмира (мультиленной)

Инфляция закончилась

Во всех остальных областях инфляция продолжается



ЛЕКЦИЯ 6

Микроволновое фоновое реликтовое излучение и его анизотропия

