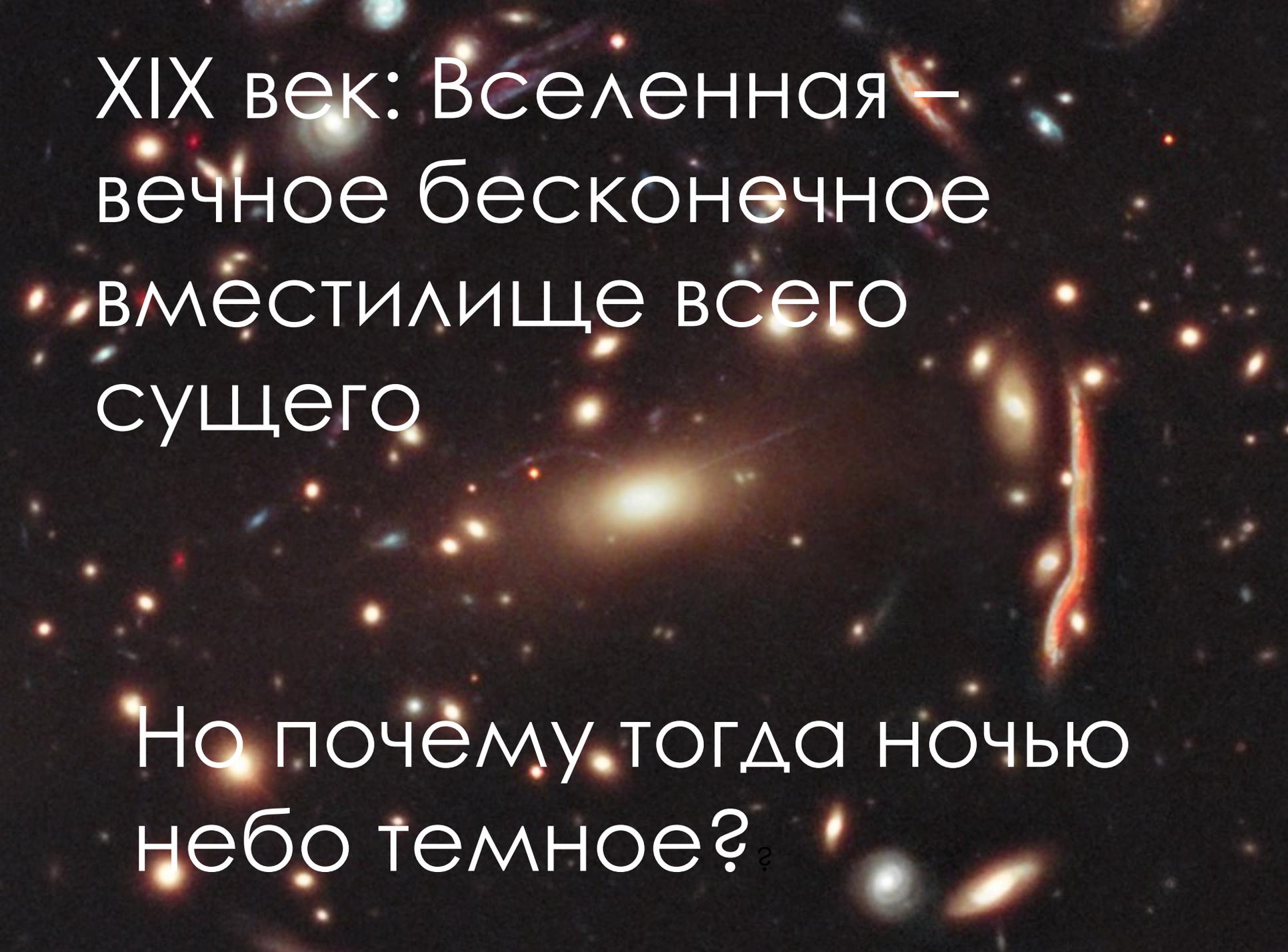


100 ЛЕТ РАЗВИТИЯ КОСМОЛОГИИ

От
Эйнштейна

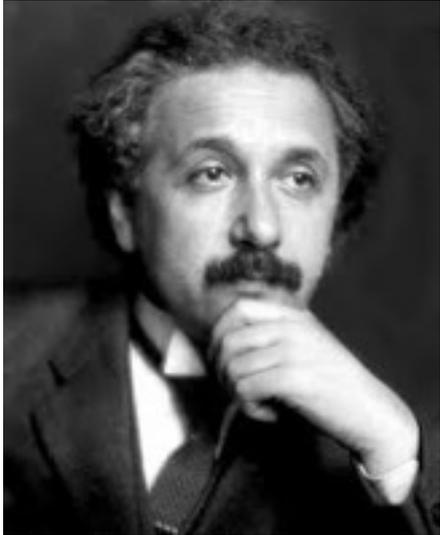
До «Планка»



XIX век: Вселенная –
вечное бесконечное
вместилище всего
сущего

Но почему тогда ночью
небо темное?

Первая космологическая революция 1916 - 1929



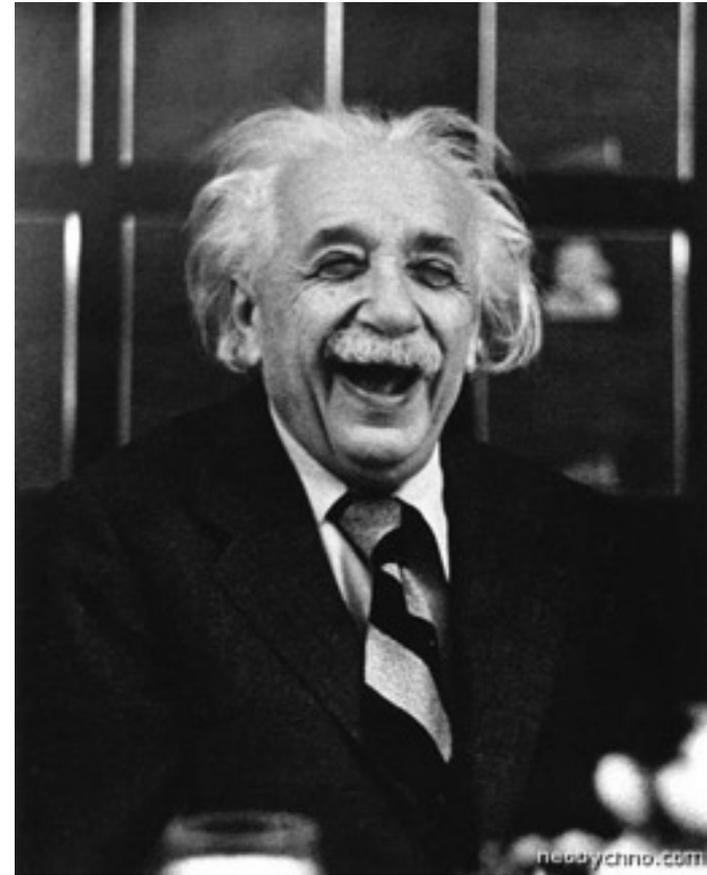
A. Friedmann



Уравнения Эйнштейна, 1916

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = k G T_{\mu\nu}$$

С виду ужас, на самом деле
– уникальная красота



1922 г.

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{16\pi}{3c^4} G \varepsilon - \frac{k}{R_0^2 a(t)^2}$$



$k > 0$ - Вселенная остановится и начнет сжиматься

$k < 0$ - Вселенная будет расширяться вечно

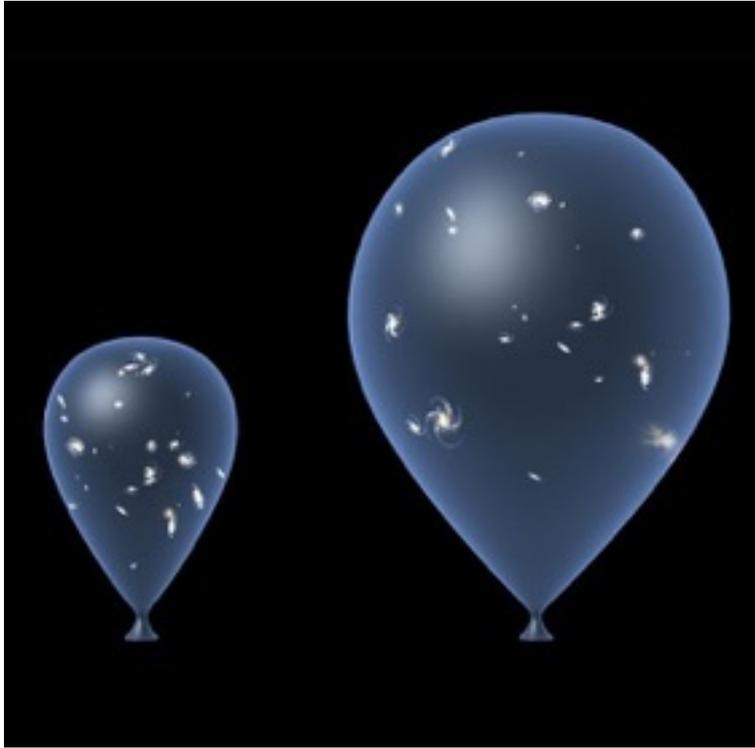
$k = 0$ - Вселенная остановится в бесконечном будущем

(Все оказалось не так)

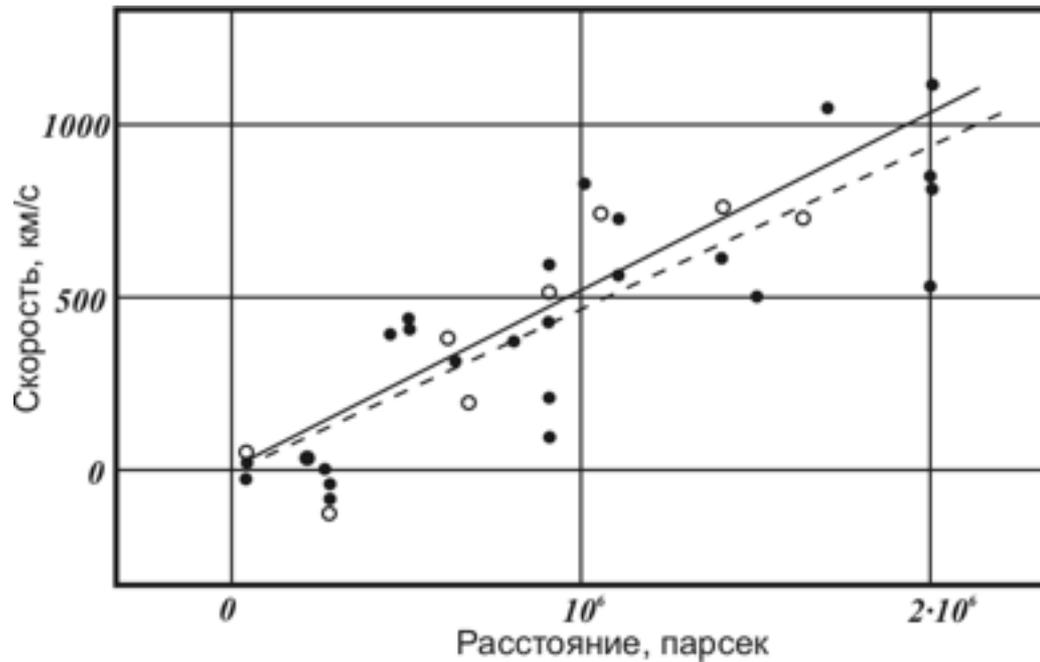
1925 г. Жорж Леметр:

Вселенная расширяется по закону Фридмана из «первичного атома»

Значит галактики разбегаются и это можно наблюдать

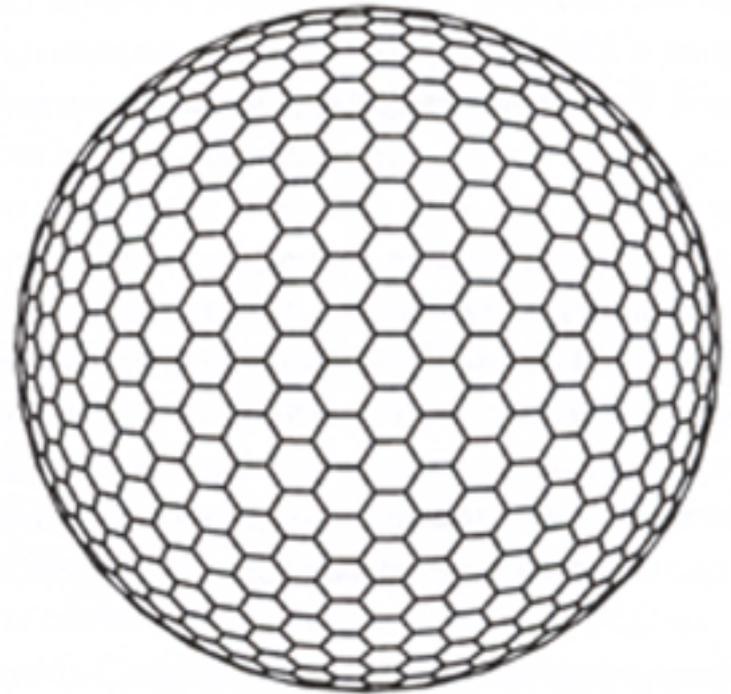
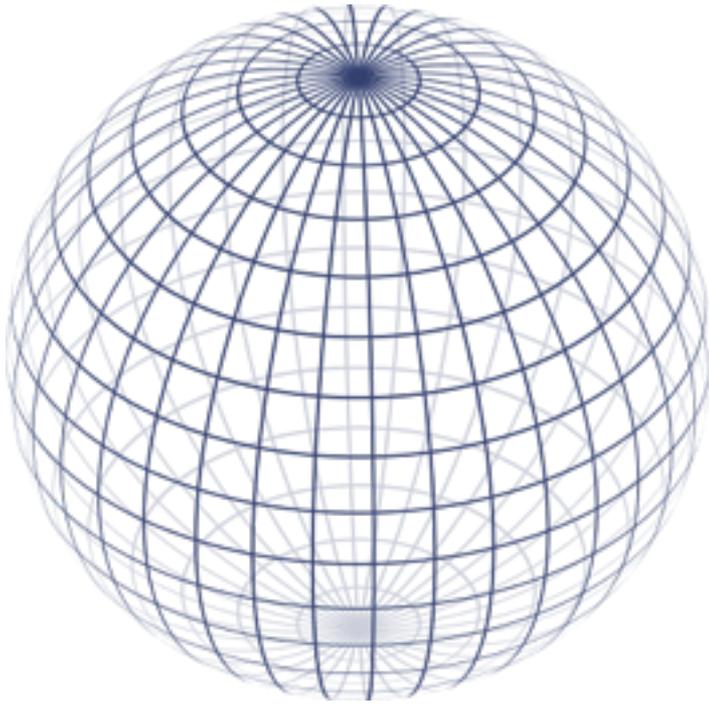


1929 г. Хаббл публикует закон красного смещения, ошибившись в определении своей постоянной в семь раз



Замкнутая вселенная

Вы здесь ↓



Важные вехи

Конец 40-х. Георгий Гамов – горячая Вселенная.

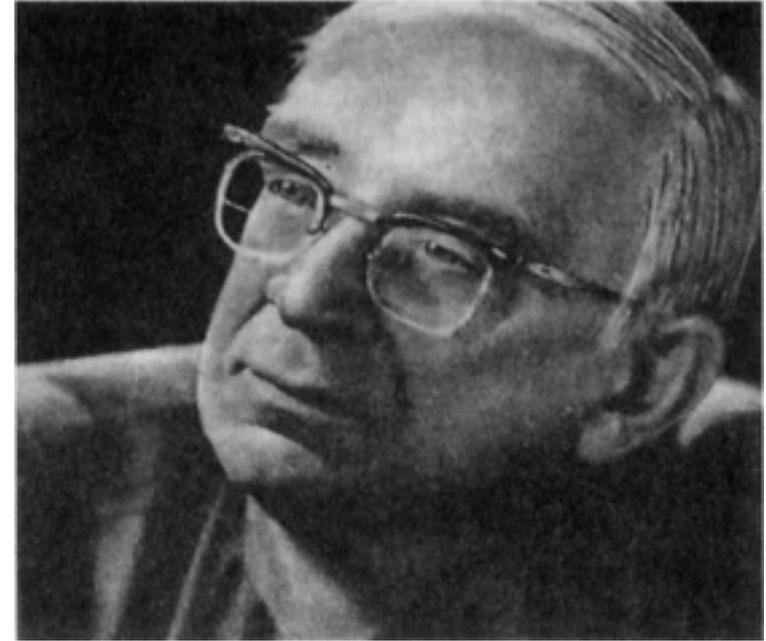
Георгий Гамов:

Температура Вселенной от 3 до 10 К

Так надо, чтобы правильно прошел нуклеосинтез в первые 3 минуты

1965г. - Открытие реликтового излучения. $T = 2.7 \text{ K}$

Реликтовое излучение – свет горячей плазмы, испущенной в эпоху ее рекомбинации в возраст Вселенной 380 тысяч лет



Статус в период 1965 – 1980

Концепция большого взрыва торжествует, но остались серьезные вопросы:

- Почему Вселенная так велика и динамически сбалансирована? Что дало такую точность?

- Вселенная всюду одинакова. Но разные ее области в начале ничего не знали друг о друге. Что так согласовало свойства Вселенной в причинно не связанных областях?

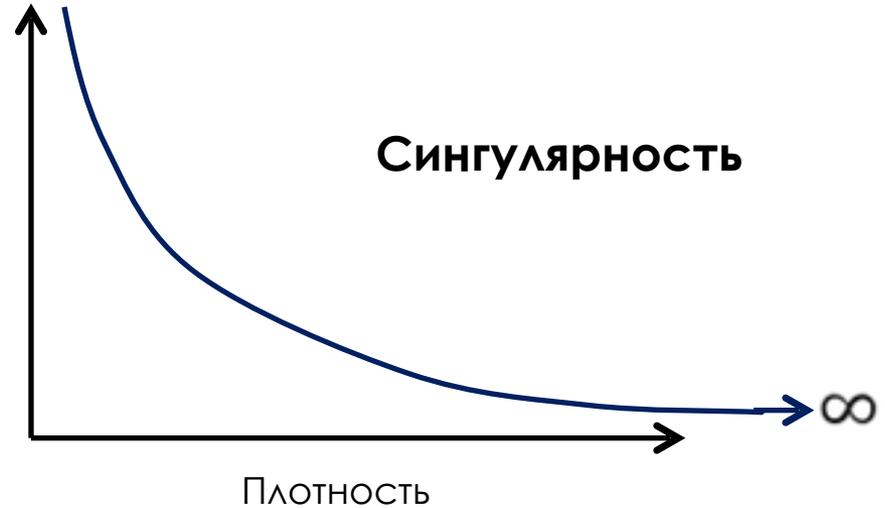
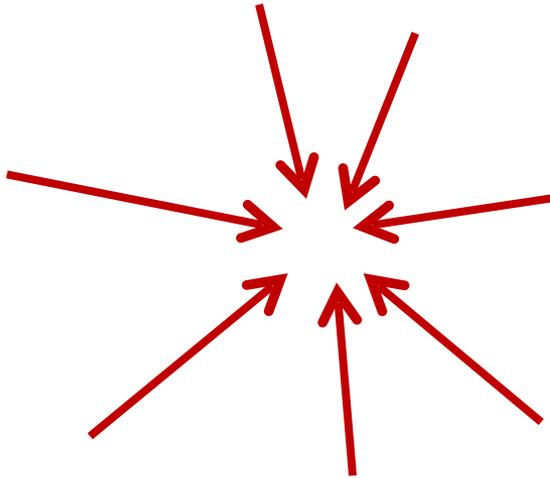
- Во вселенной огромное число частиц (или энтропия) – 10^{90} в наблюдаемой части. Откуда они взялись?

- Что послужило начальным толчком?

Это все – вопрос начальных условий.

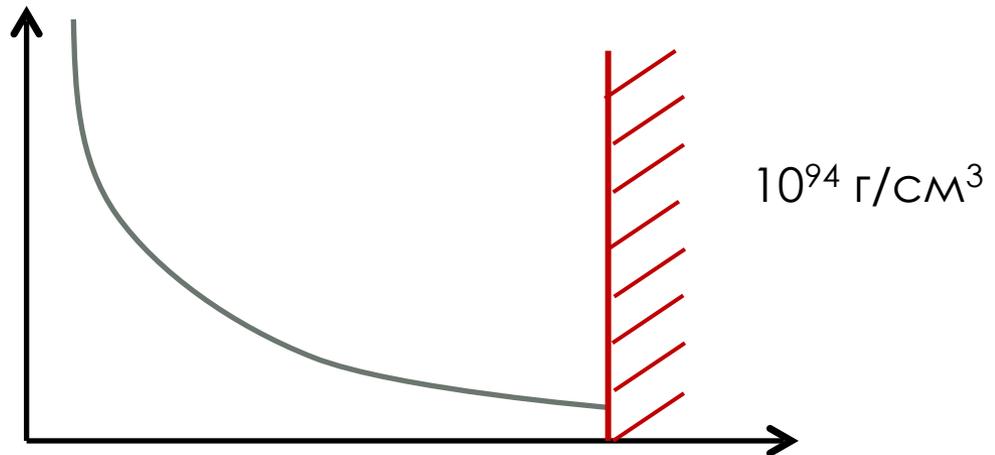
Кто задал такие начальные условия?!!

Классическая физика: ничто не может остановить гравитационный коллапс на поздней стадии!



Гравитация + квантовая механика: коллапс упирается в планковский предел

Классические пространство и время исчезают

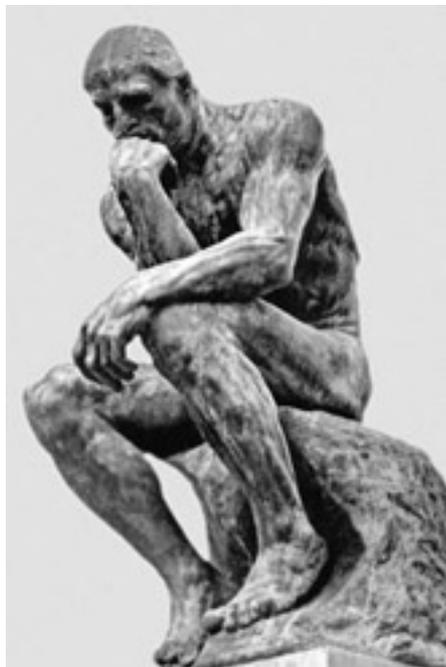


Значит расширение
Вселенной в своем начале
упирается в планковский
предел?

Так ли это?

Никким образом!

А как же?



Масса Планка = 10^{-5}
грамма (атом из двух
частиц массы Планка =
черная дыра)

Планковская длина 10^{-33} см
– гравитационный радиус
для массы Планка

(не существует объектов
меньшего размера)

Планковское время 10^{-43} с
(не существует процессов,
протекающих быстрее)

Планковская плотность
 10^{94} г/см³ (не существует
больших плотностей)

Вторая космологическая революция

Эйнштейн придумал Λ -член, а потом его дезавуировал.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} - 8\pi\Lambda g_{\mu\nu} = 16\pi c^{-4} G T_{\mu\nu}$$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 - 8/3\pi\Lambda = \frac{16\pi}{3c^4} G \varepsilon - \frac{k}{R_0^2 a(t)^2}$$

Что есть вакуум и почему его энергия равна нулю?

А если плотность энергии пустоты не равна нулю?

(«Тяжелое ничто» - Андрей Линде)

Пространство с тяжелым вакуумом экспоненциально расширяется!

Герои второй космологической революции: 1981 – 2014 г.



Космологическая инфляция!



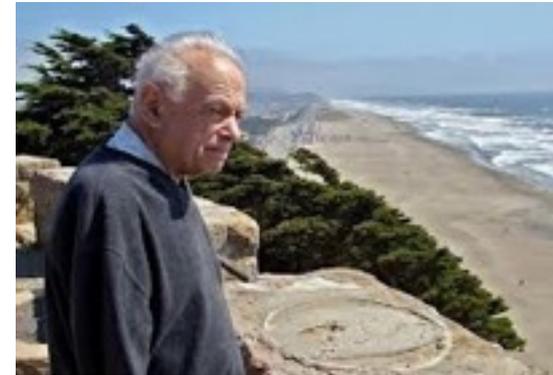
Космологическая инфляция

- 1969 г. – Эраст Глинер выступает с идеей что расталкивающий Λ член можно получить из физики вакуума

-1975 г. Дымникова и Глинер заявляют, что при положительной энергии вакуума можно из ничего сделать огромную Вселенную с огромным содержимым

- 1980 г. Алексей Старобинский публикует первую проработанную модель инфляции. Механизм выжил, сценарий – нет.

+ Муханов & Чибисов осознают необходимость инфляции для образования зародышей галактик



-1981г. Гут публикует свою неправильную но наглядную теорию космологической инфляции и путем интенсивной пропаганды ломает общественное мнение.



1982 г. Линде, Албрехт и Стейнхардт – новая инфляция

1983 г. Линде – хаотическая инфляция

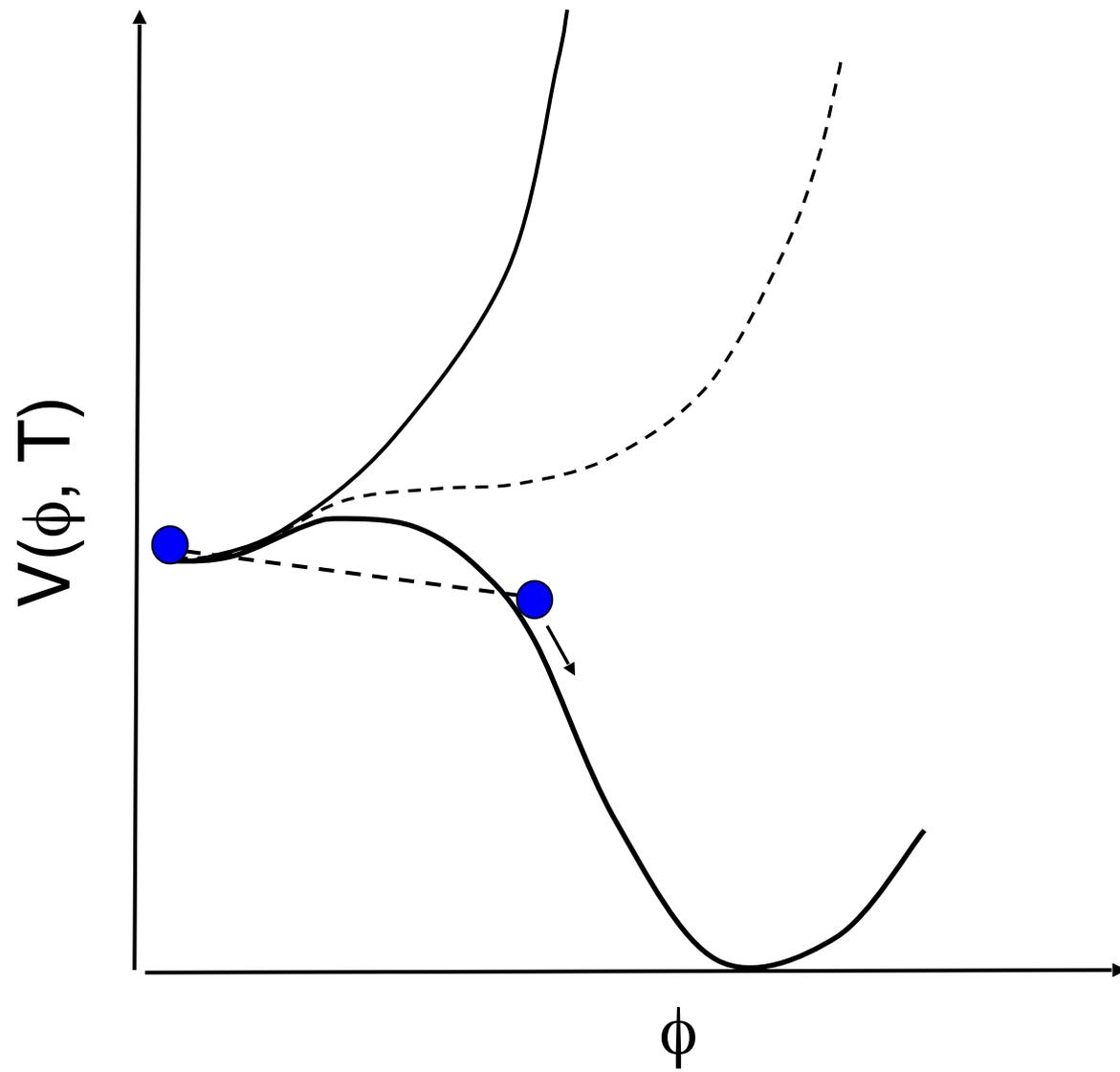
1986г. Линде – вечная инфляция

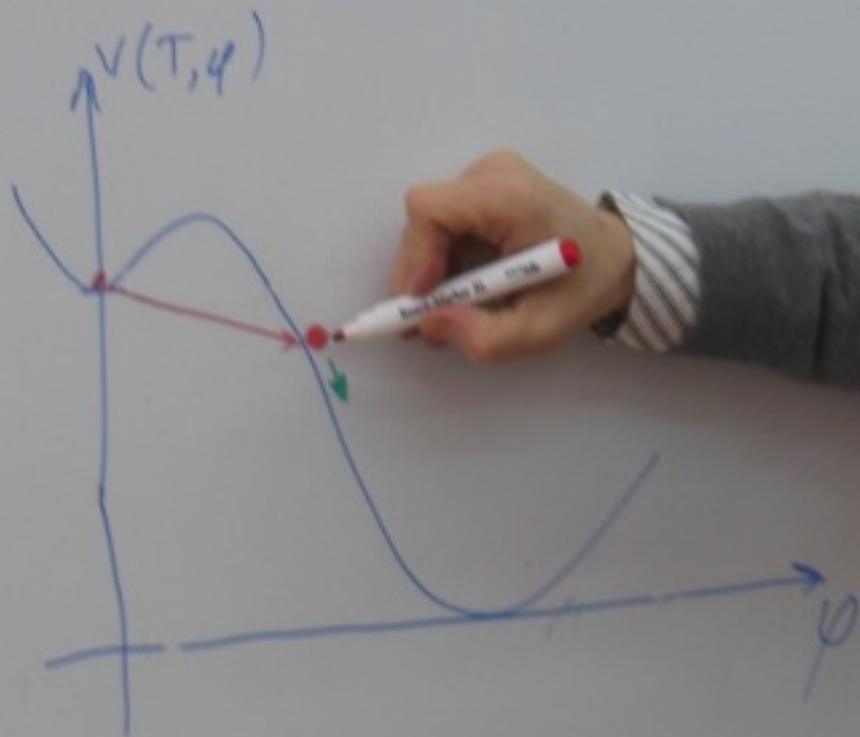
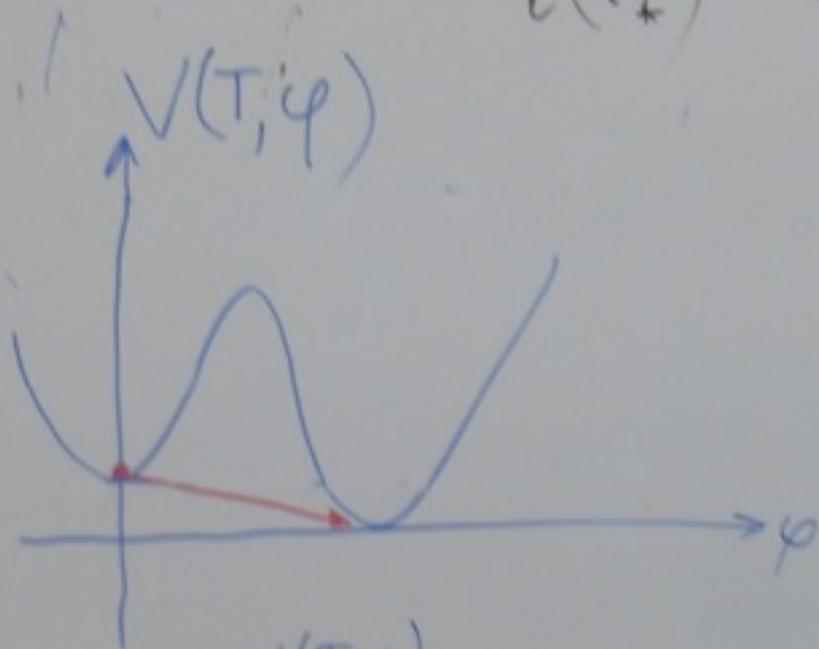
1998г. Открыто ускоренное расширение современной Вселенной

Инфляция прямо сейчас!



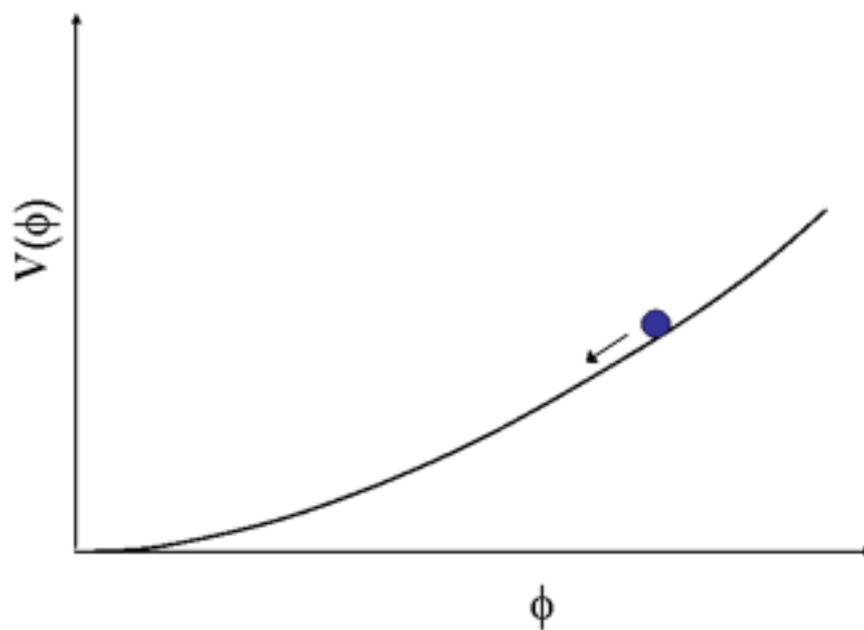
Инфляция Гута





2014.01.16

Хаотическая инфляция

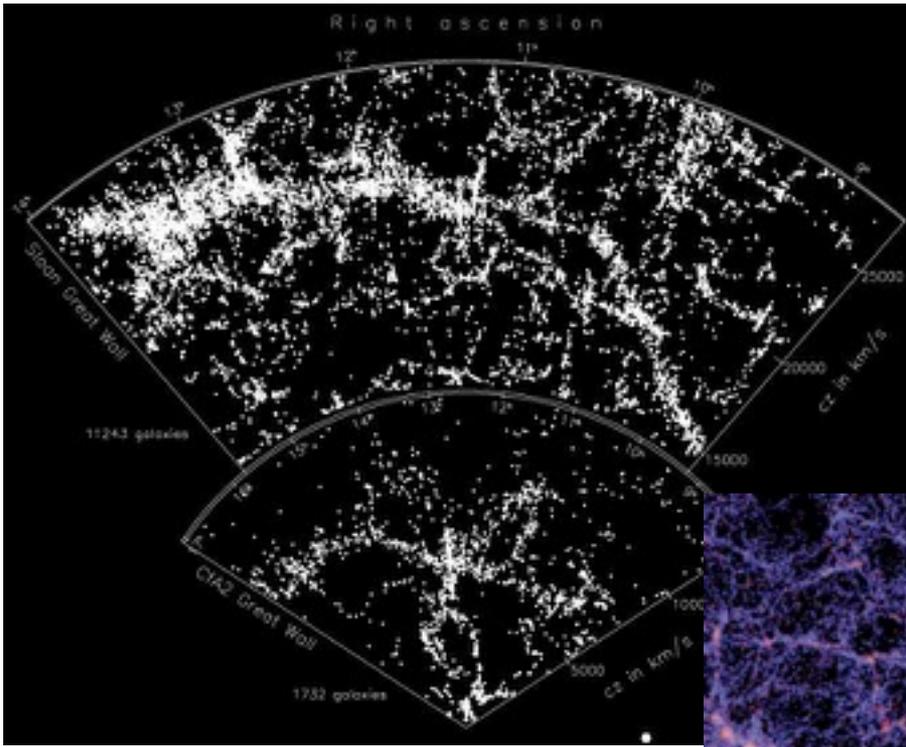


Ответы на вопросы

- Вселенная так велика и динамически сбалансирована, поскольку инфляция автоматически создает точнейший баланс между скоростью расширения и плотностью энергии.
- Вселенная всюду одинакова, поскольку изначально все ее части были в рядом. Потом они потеряли причинную связь, но сохранили общую биографию
- Гигантское число частиц во Вселенной – из-за «выгорания» поля, движущего инфляцию.
- Инфляция и есть начальный толчок, создающий вселенную практически из ничего:
- Энергия материи + отрицательная энергия связи = 0 всегда.

Вселенная даром!

Но есть еще один вопрос: откуда у Вселенной структура?



Крупномасштабная структура

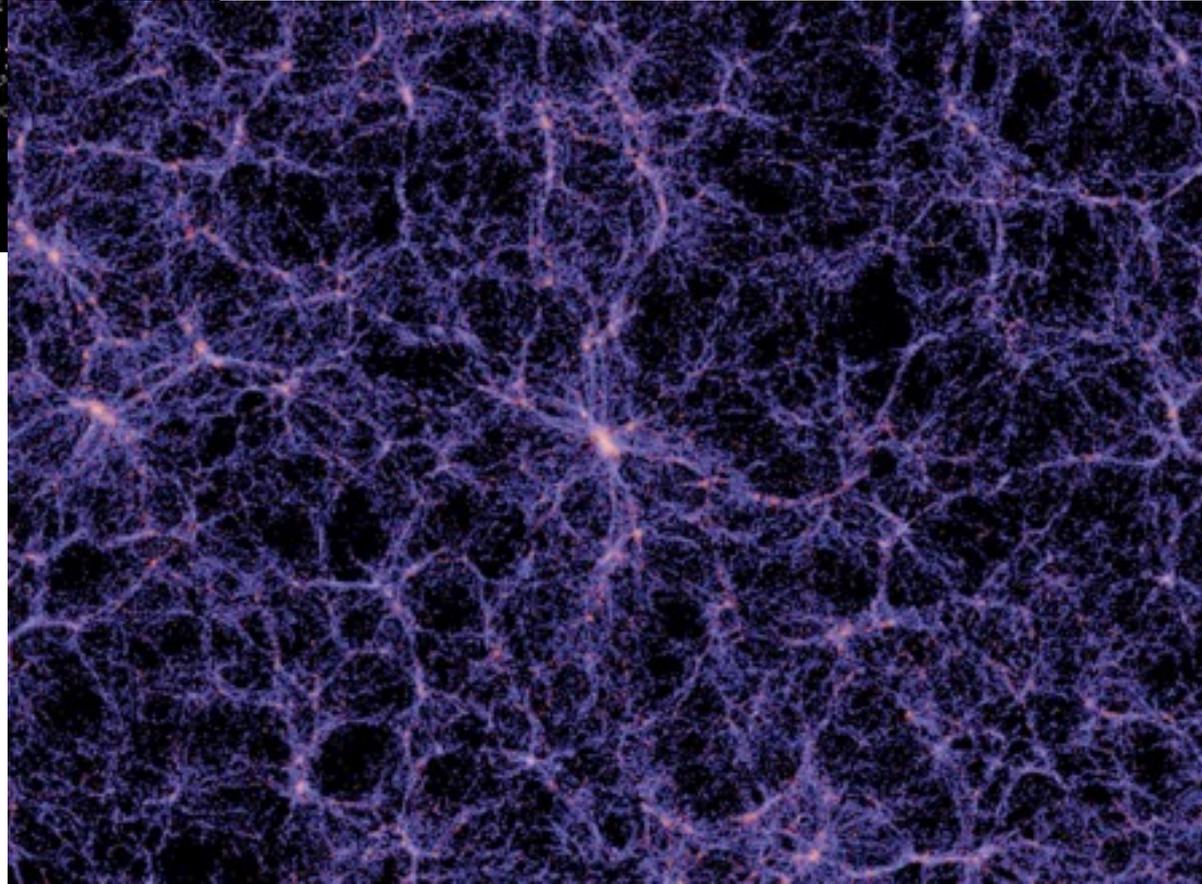
реальная
←

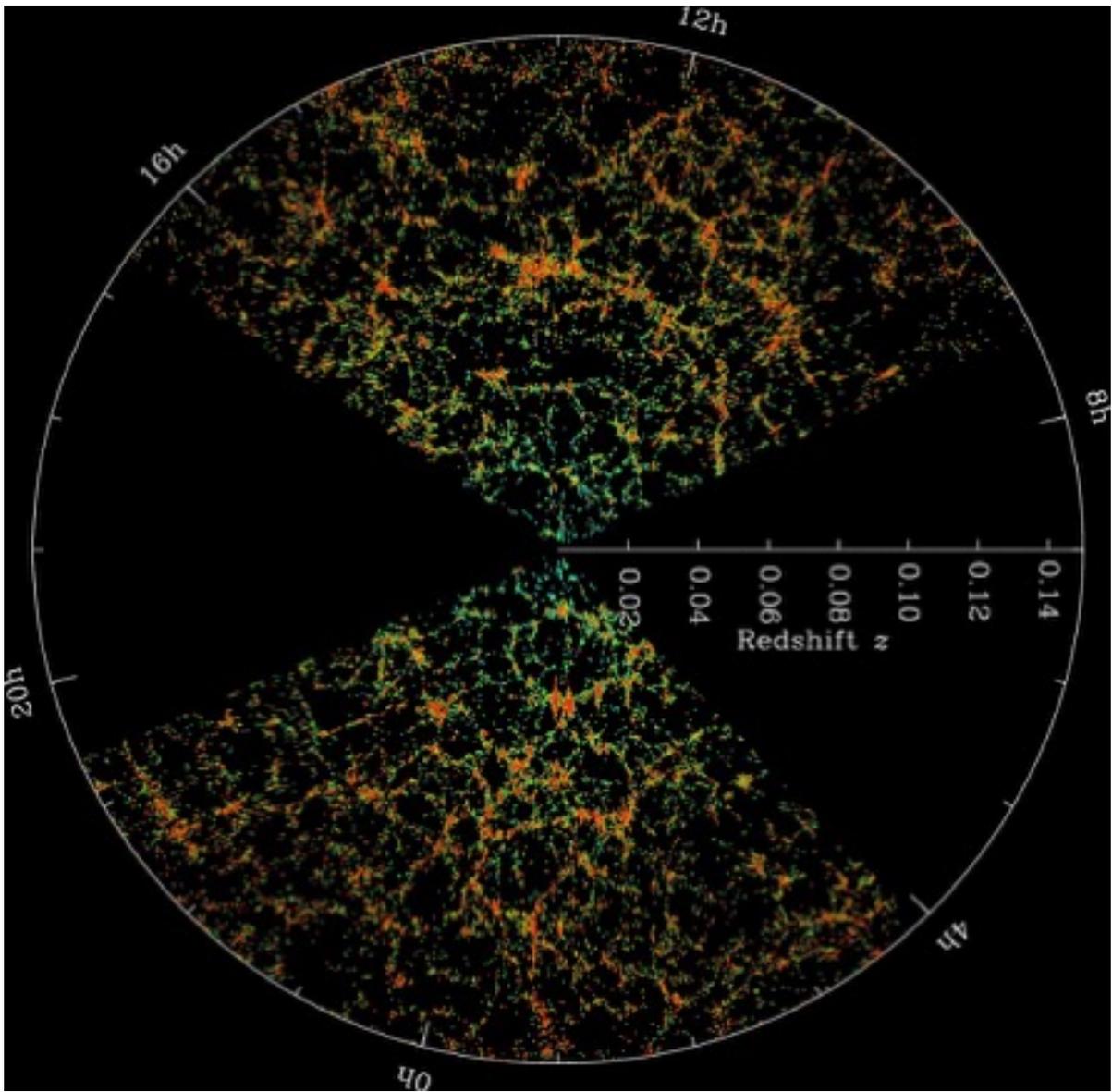
Откуда первичные
возмущения?

↓ смоделированная

Сеть каустик

Блики от ряби на стене
или сетка ярких полос
на мелком дне





Инфляция умеет делать и это!

Муханов Чибисов 1981

Есть вакуумные (нулевые) колебания любого поля

Если воздействовать на нулевые колебания, они могут превратиться в реальные флуктуации

Быстрое расширение пространства – тоже воздействие! (Лукаш 1980)

Инфляция – конвейер, генерирующий и растягивающий флуктуации

Результат: плоский спектр – флуктуации всех размеров имеют одинаковую амплитуду

Но не совсем плоский, поскольку «конвейер» чуть притормаживал!



Первичные неоднородности должны быть видны на карте реликтового излучения!

На момент рекомбинации они должны иметь контраст не меньше 10^{-3} , иначе не успеют образоваться галактики.

Середина 80-х: неоднородностей реликта на уровне 10^{-3} нет!

RATAN-600: неоднородностей реликта на уровне 10^{-4} нет!

На помощь приходит холодная темная материя: это она должна иметь контраст 10^{-3}

Но все равно первичные возмущения не могут быть меньше 10^{-5} , иначе темная материя не успеет скомковаться до 10^{-3}

RATAN-600 неоднородностей на уровне 10^{-5} нет!

Все нервничают ☹

1992 COBE – неоднородности реликта на уровне 10^{-5} есть!

WMAP 2001 – 2010

Полоса 0.32 – 1.3 см

Тепловое равновесие в тени ~40K

Зеркало 1.4 X 1.6 м

Данные открыты в 2002



«Планк» 2009 – 2013

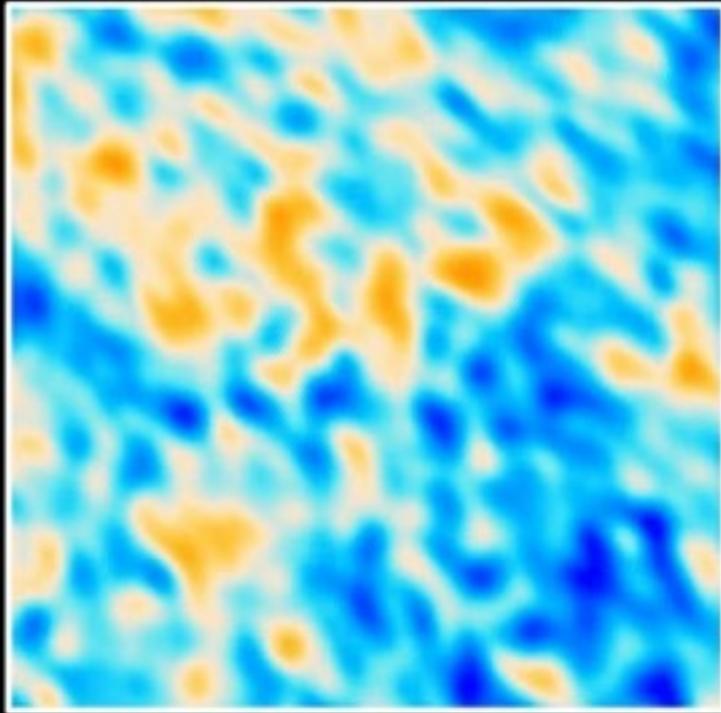
Полоса 0.035 – 1 см

Охлаждение гелием

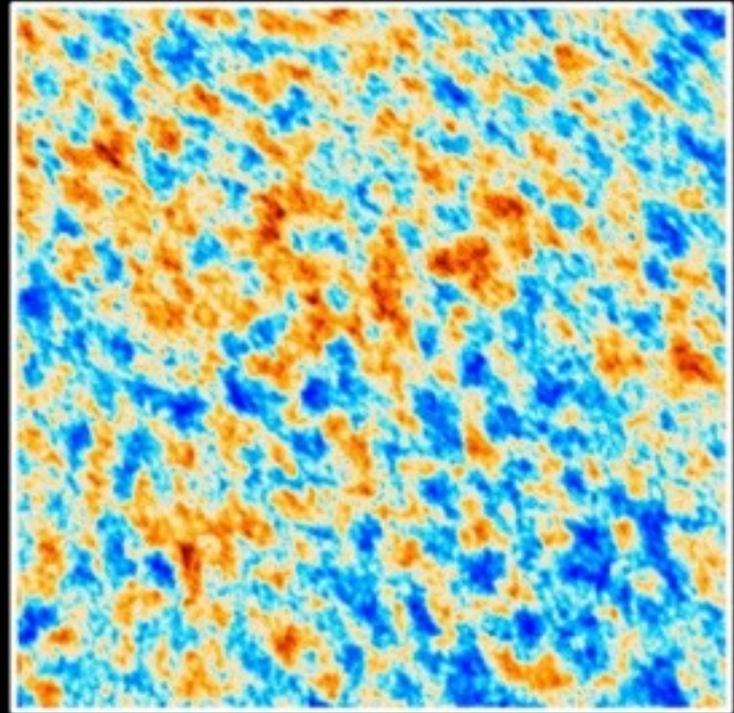
Зеркало 1.5 X 1.9 м

Данные открыты в 2013?





WMAP



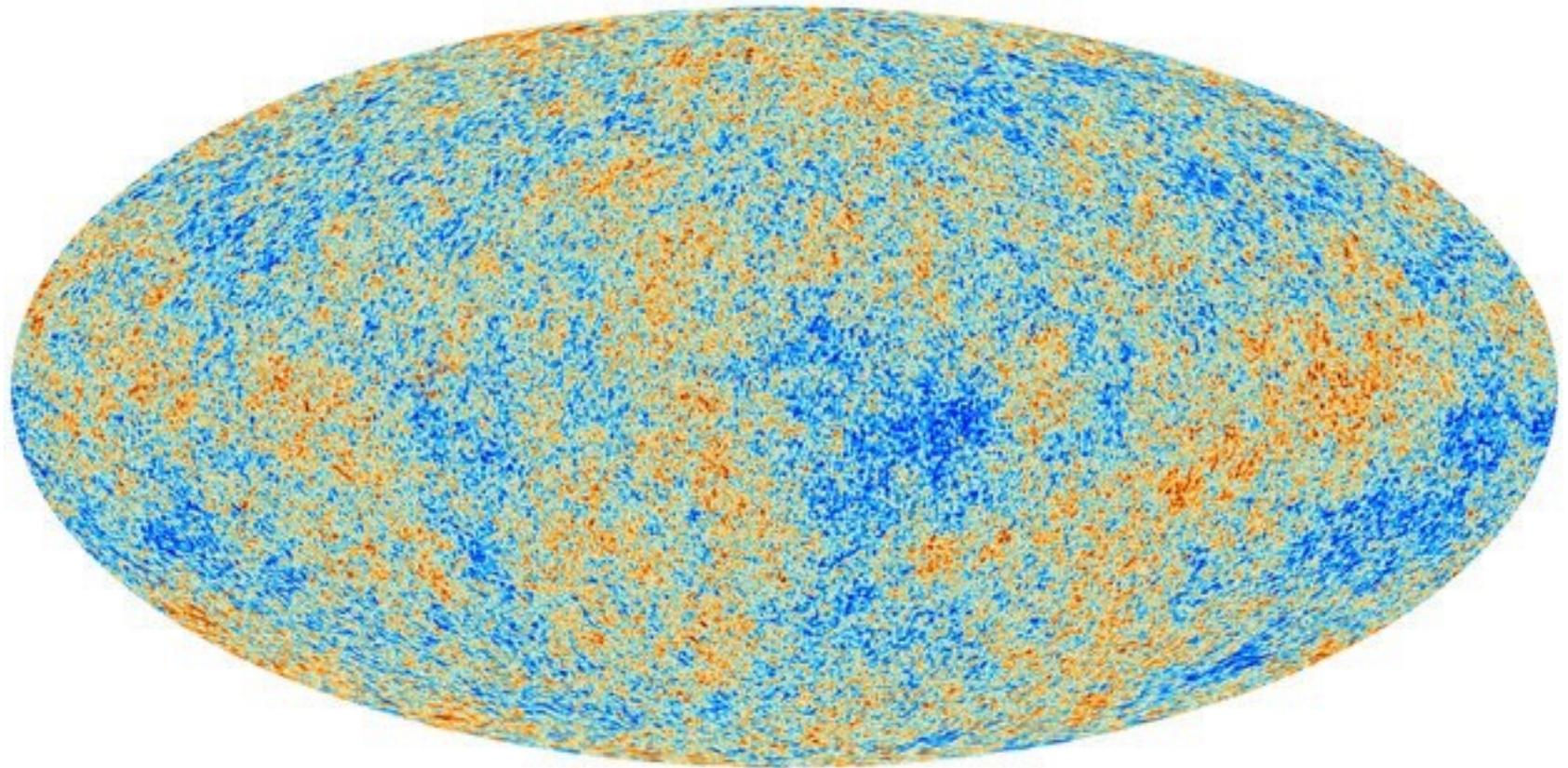
Planck

Что видно на этой картинке?

Холодное пятно, «пальцы», круги, а также “SH



Zuntz, Zibin, Zunkel & Zwart,
01/04/2014



Что мы должны увидеть на карте?

А.Д. Сахаров 1963 год.

При Большом взрыве рождаются **стоячие** звуковые волны.

Когда скорость звука падает, волны застывают.

Одни длины волн застывают с фазой π , 2π , 3π

Другие с $\pi/2$, $3\pi/2$, $5\pi/2$ – в минимуме

Разложение по угловым гармоникам должно описываться **осциллирующей** функцией Бесселя.

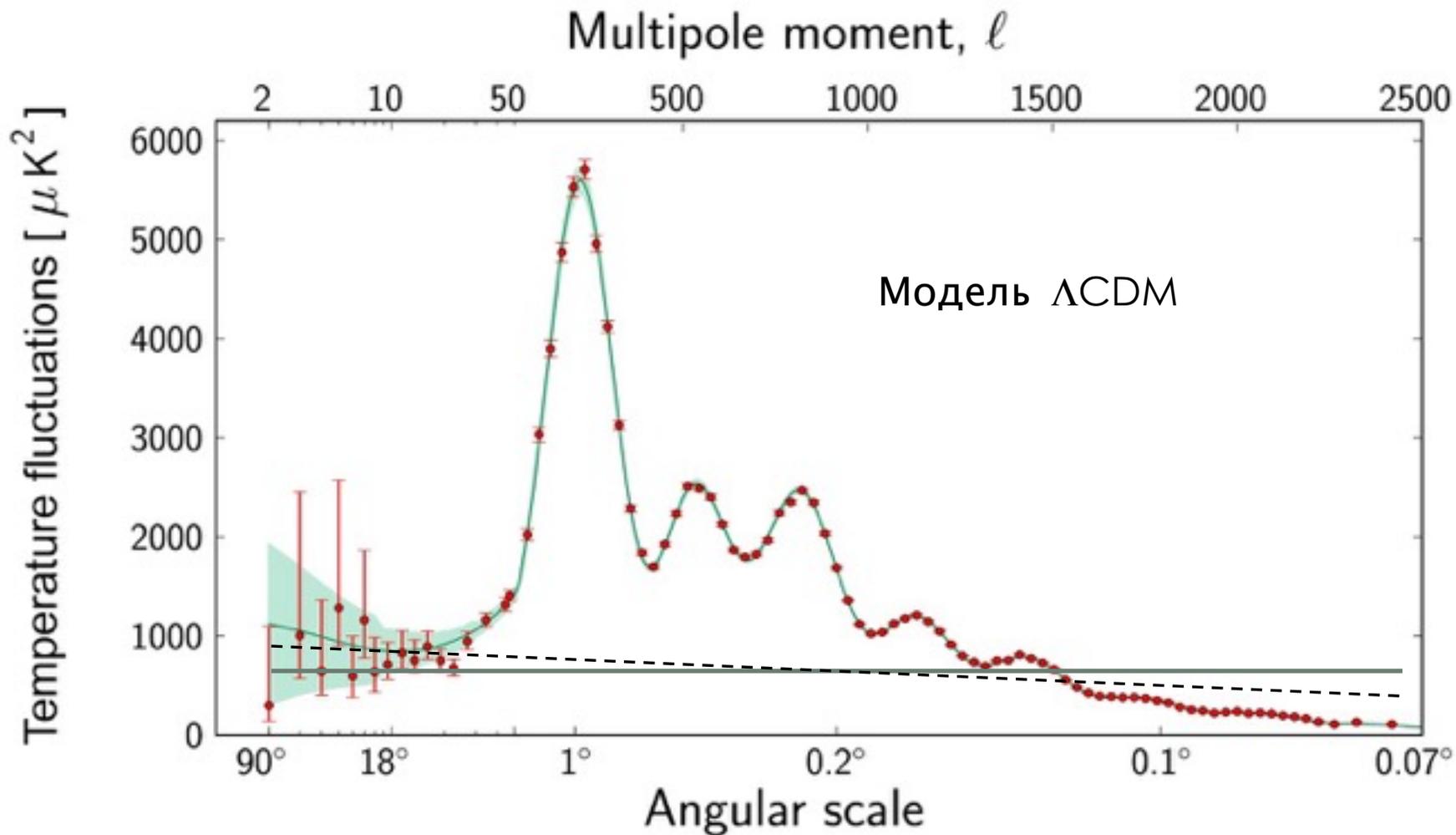
Сахаров взял неправильную модель Вселенной – холодную

Поэтому у него волны застывали слишком рано

На правильную модель пересчитали Сюняев с Зельдовичем и Пибблс с Юй Цзе Тай

Сахаровские осцилляции получили новый смысл – их можно напрямую наблюдать!





Контраст пятен в зависимости от размера

Подгонка кривой

1. Амплитуда первичных неоднородностей (вертикальная нормировка)
2. Наклон спектра неоднородностей (он не обязан быть в точности плоским)
3. Доля обычного вещества в массе Вселенной (влияет на высоту первого пика)
4. Доля темной материи (влияет на соотношение высоты пиков)
5. Кривизна (размер) Вселенной (влияет на угловую шкалу всей кривой - зная ее определим вклад темной энергии)
6. Оптическая толща электронов современной Вселенной (влияет на высоту подложки)

Наклон спектра

$n = 0.96 \pm 0.007$ ($n=1$ – плоский спектр: амплитуды неоднородностей всех размеров одинаковы)

Наблюдаемые неоднородности сгенерированы за 50 – 60 времен $1/H$ (e-фолдингов) до конца инфляции.

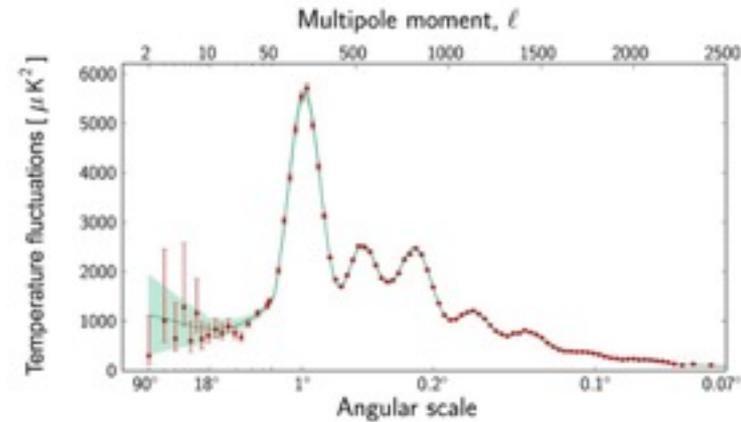
$n < 1$ означает, что инфляция к тому моменту уже замедлялась:
Поле, служащее мотором инфляции (инфлатон), ослабевало.

Так и должно быть!

Почему все так хорошо получается?

Подогнать такую кривую 6-ю параметрами все равно, что убить 30 зайцев 6-ю выстрелами.

Значит мы очень хорошо понимаем физику и биографию Вселенной



Тут замешаны: генерация неоднородностей, эффекты конца инфляции, смена режимов расширения, вход неоднородностей под горизонт, акустические волны, гравитационное взаимодействие обычной материи с темной, временной сценарий рекомбинации и многое другое

Все это научились хорошо считать за два десятилетия.

Огромное значение открытости данных WMAP

Предсказания теории инфляции

1. **Ω неотличима от 1** (Вселенная плоская) ++!!

По результатам WMAP и «Планка» выполняется с точностью лучше процента

2. **Плоский спектр, но не совсем плоский** ++!!

Предсказали Муханов с Чибисовым $n_s = 0.96$. подтверждено WMAP и «Планком»: $n_s = 0.96 \pm 0.007$

3. **Адиабатичность** (соотношение фотонов и барионов одинаково в сгущениях и разрежениях) +!

Положение акустических пиков - подтверждено

4. **Гауссовость** +!

Подтверждено «Планком» на уровне, закрывающем витиеватые модели инфляции

5. **Гравитационные волны** (Гришук, Старобинский)

(нет предсказаний по поводу амплитуды)

Тянуть с нобелевской премией по теории инфляции будет больше нельзя!

Статус теории инфляции:

Линде, Муханов, Старобинский:

Теория проста в идеологии, решает основные проблемы и правильно предсказала будущие наблюдения.

Альтернативы сложнее, требуют большего числа дополнительных сущностей и не дают ясных предсказаний.

Рубаков: пока не зарегистрировали гравитационные волны, альтернативные теории имеют право на существование (и стоит подождать с Нобелевской премией).

Однако, одна часть теории инфляции не имеет альтернатив:
квантовое рождение начальных возмущений (Муханов, Чибисов)

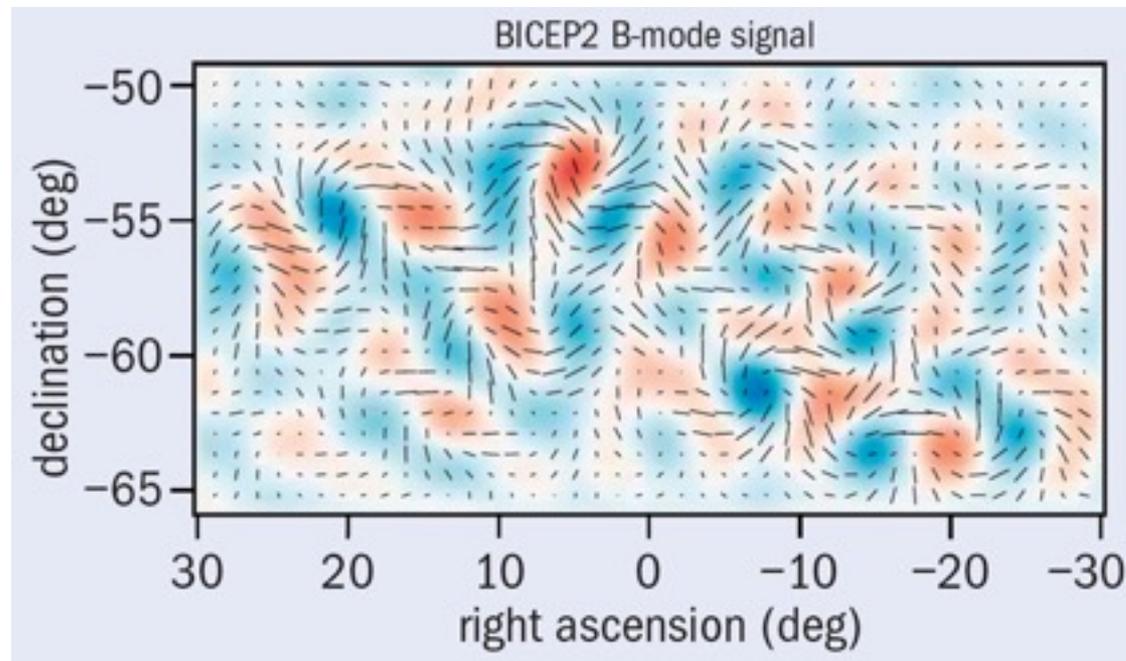
Вильям Оккам поддержал бы теорию инфляции, особенно модель Старобинского

BICEP 2, 2014



Александр Полнарев 1983:

Реликтовые гравитационные волны можно зарегистрировать по поляризации реликтового микроволнового излучения

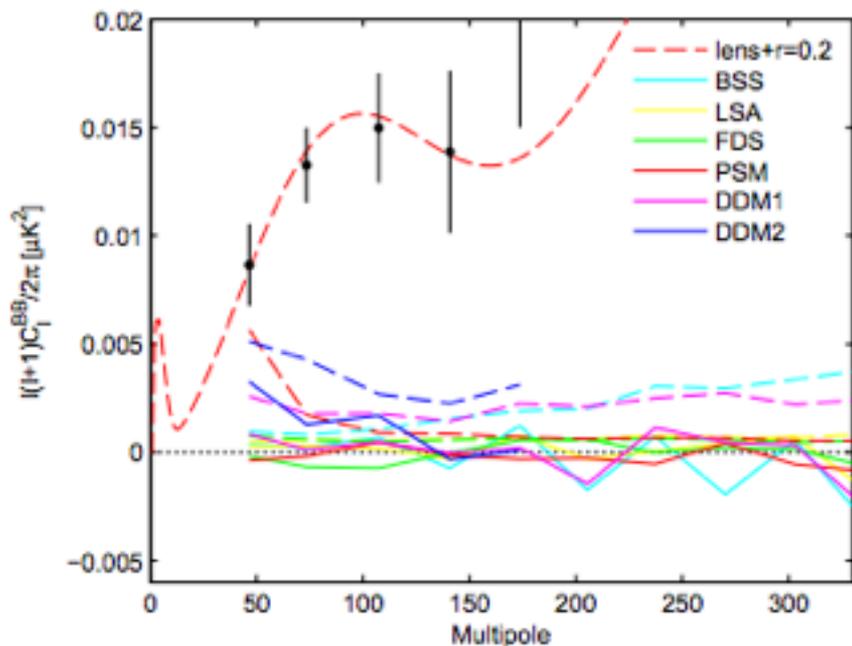


Сигнал слишком велик ($r \sim 0.2$) и противоречит другим данным

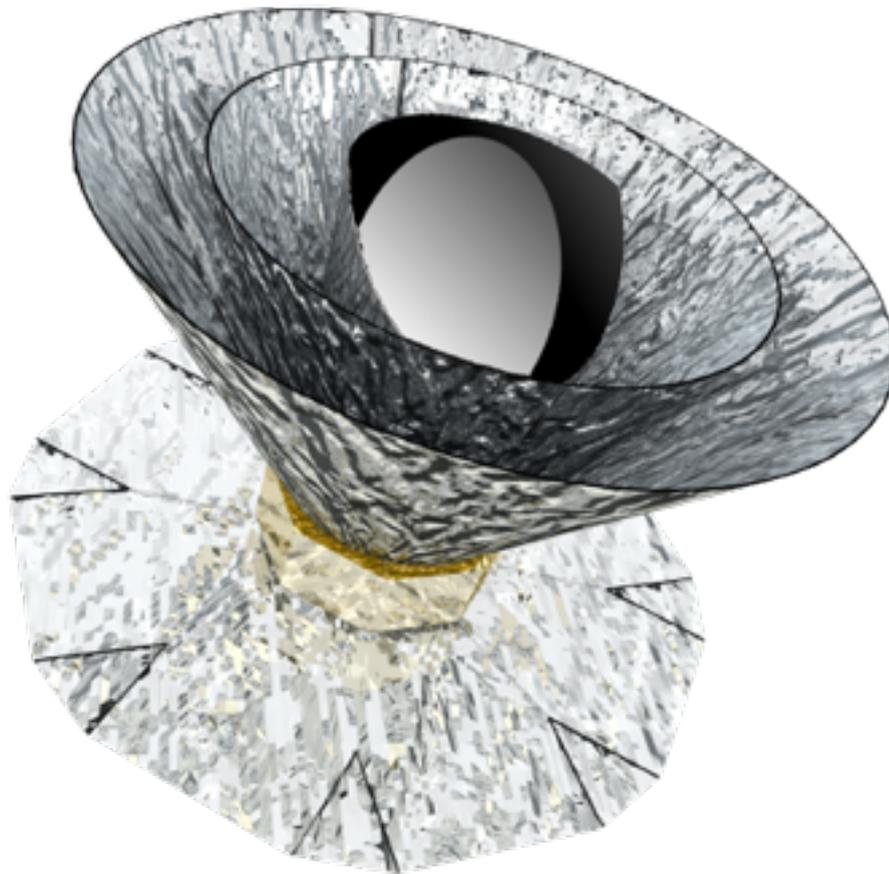
Старобинский: надо ожидать отношение тензорной к скалярной моде на уровне $r \sim 0.005$

Линде: целый ряд разных моделей дают одно и то же значение $r \sim 0.003 - 0.005$. Это Природа подсказывает нам что-то интересное.

Рано было пить шампанское!

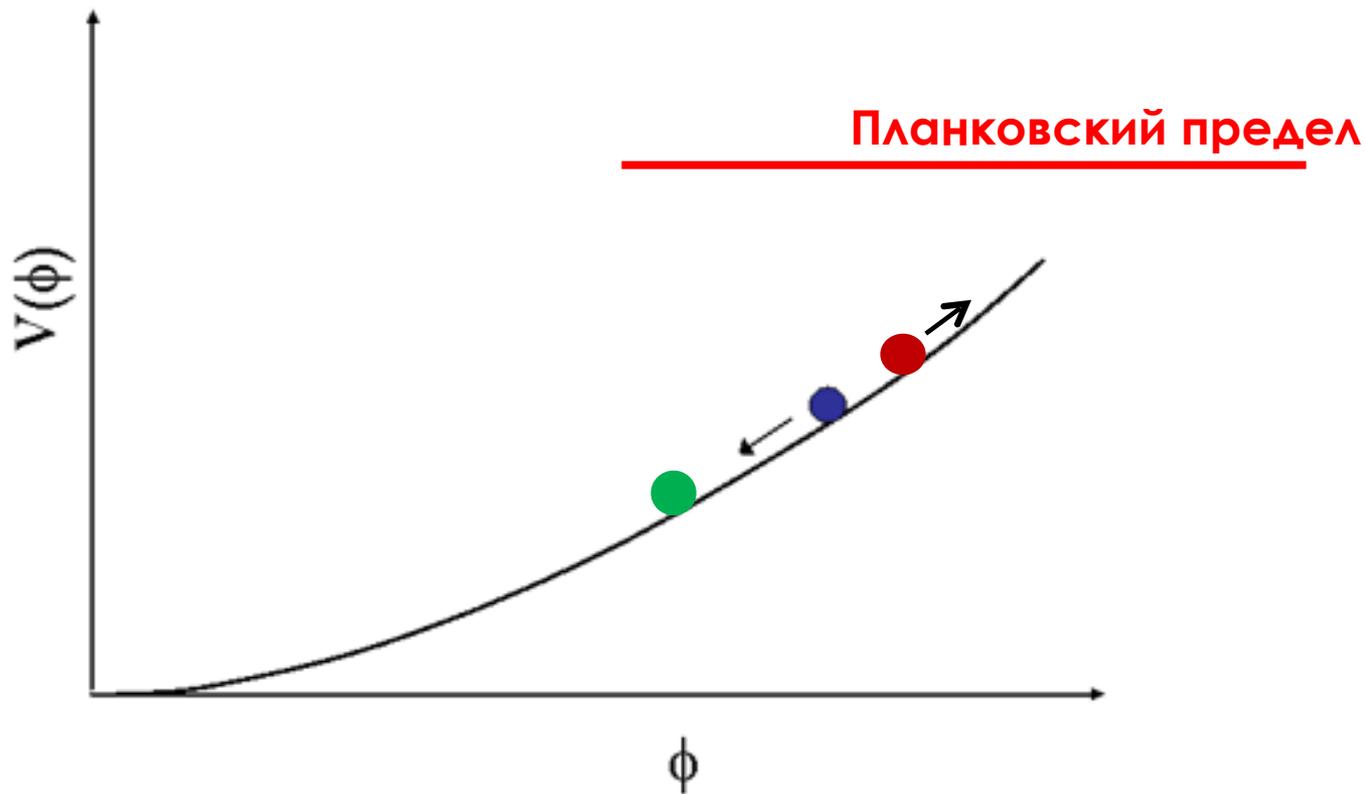


Лет через 5 или вероятней через 15 выпьем!



PRISM – обещают дойти до $r \sim 0.001$

Вечная инфляция Линде 1986







Андрей Линде



Вопрос:

Почему Вселенная точно «настроена» для существования человека?

- Масса нейтрона/масса протона
- Соотношение сильных и электромагнитных соотношений
- Легкий электрон
- Число измерений

Ответ:

Вселенных бесконечно много, и все они разные.
Мы появились в той, где могли.
(Антропный принцип)

Вопрос:

Откуда берется бесконечно много вселенных?

Ответ:

Это с неизбежностью делает космологическая
инфляция

Вопрос:

Почему вселенные разные?

Ответ:

Это могла бы делать теория струн

Чего мы не знаем?

- Какова конкретная природа тяжелого вакуума (инфлатона)?
- Какова амплитуда реликтовых гравитационных волн
- Имеет ли отношение к действительности теория струн
- Если да, то в какой из ее реализаций мы живем