

Вселенная

И страшным, страшным креном
К другим каким-нибудь
Неведанным вселенным
Повернут Млечный Путь.

Борис Пастернак



Вселенная

*Только две вещи
потрясают меня на этом свете:
звёздное небо над нами
и нравственный закон внутри нас*

Кант

**Вселенная – это ускоритель для бедных:
эксперимент не потребовал финансирования
и нам осталось лишь обрабатывать его результаты**

Зельдович

**Эволюцию мира можно сравнить с фейерверком,
который почти закончился:**

несколько красных угольков, пепел и дым.

**Стоя на остывшем пепле, мы видим
медленно угасающие солнца и пытаемся воскресить
исчезнувшее великолепие начала миров.**

Леметр

Темы лекции

1. Основные характеристики Вселенной.
2. Тёмные материя и энергия. Критическая плотность.
3. Расширение Вселенной. Закон Хаббла. Большой взрыв.
4. Микроволновое реликтовое излучение.
5. Фазовые переходы в горячей Вселенной. Догалактические этапы её эволюции.
6. Дозвёздный нуклеосинтез.
7. Звёздная эра. Ядерные реакции в звёздах.
8. Эволюция массивной звезды.
9. Сверхновые – коллапсирующие и термоядерные.
10. Распространение нуклидов в Солнечной системе.
11. *Проблема горизонта. Инфляционная космология.*
12. *Мультивселенные и параллельные миры.*
13. Конечные этапы эволюции Вселенной. Открытие её ускоренного расширения в современную эпоху.
Приложение: Образование тяжёлых элементов.

**Основные характеристики
наблюдаемой части Вселенной
в настоящее время**

Возраст t_0	$13,80 \pm 0,03$ млрд лет
Радиус (горизонт видимости) $R_0 = ct_0$	$\approx 1,3 \cdot 10^{28}$ см
Количество вещества-энергии	$\approx 3 \cdot 10^{56}$ г
Средняя плотность вещества-энергии	$\approx 0,85 \cdot 10^{-29}$ г/см ³
Барионное число (число нуклонов)	$\approx 2 \cdot 10^{81}$
Доля антивещества	$< 10^{-4}$
Постоянная Хаббла H	$67,4 \pm 0,5$ км/сек·мегапарсек

1 мегапарсек $\approx 3,1 \cdot 10^{19}$ км

**Характеристики
микроволнового реликтового излучения,
заполняющего всё пространство**

Температура микроволнового (реликтового) излучения	2,726 К
Плотность реликтовых фотонов	411 см ⁻³
Отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов n_γ/n_b	1,6·10 ⁹

Распространённость атомов (ядер)

	По числу	По массе
Водород	91%	70,7%
Гелий	8,9%	27,4%
Остальные	<0,2%	1,9%

Что известно о плотности (вещества + энергии) Вселенной?

Средняя плотность Вселенной ρ :

$$\frac{\rho}{\rho_{\text{к}}} = 1,00 \pm 0,01,$$

где $\rho_{\text{к}}$ – так называемая критическая плотность:

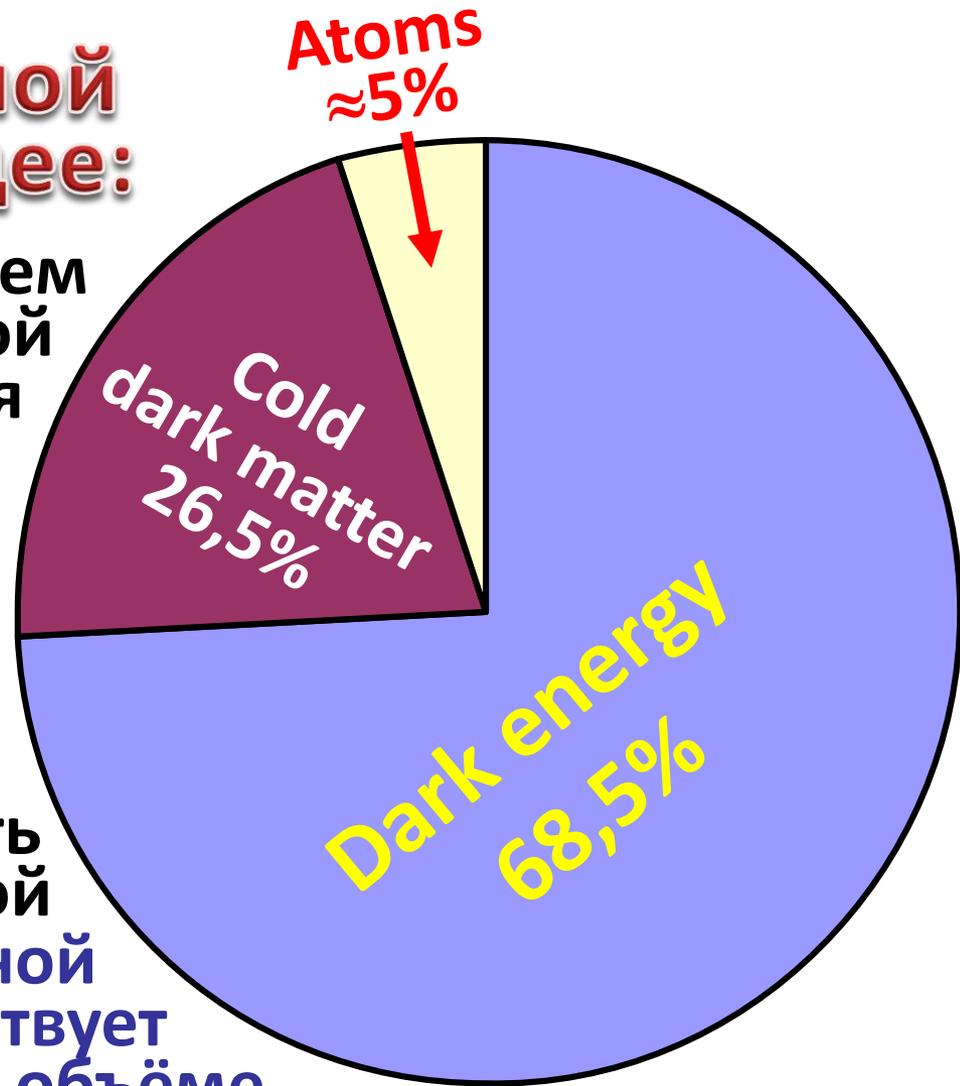
$$\rho_{\text{к}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 0,85 \cdot 10^{-29} \text{ г/см}^3.$$

Здесь H – постоянная Хаббла ($67,4 \pm 0,5$ км/сек·мегапарсек),
а G – гравитационная постоянная Ньютона.
Соотношение ρ и $\rho_{\text{к}}$ определяет геометрию и судьбу Вселенной.

О составе Вселенной известно следующее:

В среднем
во Вселенной
в **1 м³** содержится
количество
материи-энергии
эквивалентное
5-ти атомам водорода.
Но в среднем лишь
1 атом водорода
можно обнаружить
в **4 м³** нашей Вселенной

Средняя плотность Вселенной
(**$\approx 10^{-29}$ г/см³**) соответствует
одной дождевой капле в объёме,
равном объёму земного шара.



Распределение тёмной материи (синий цвет)
в скоплении галактик CL0024+1654,
находящейся от нас в 4,5 млрд свет. лет.

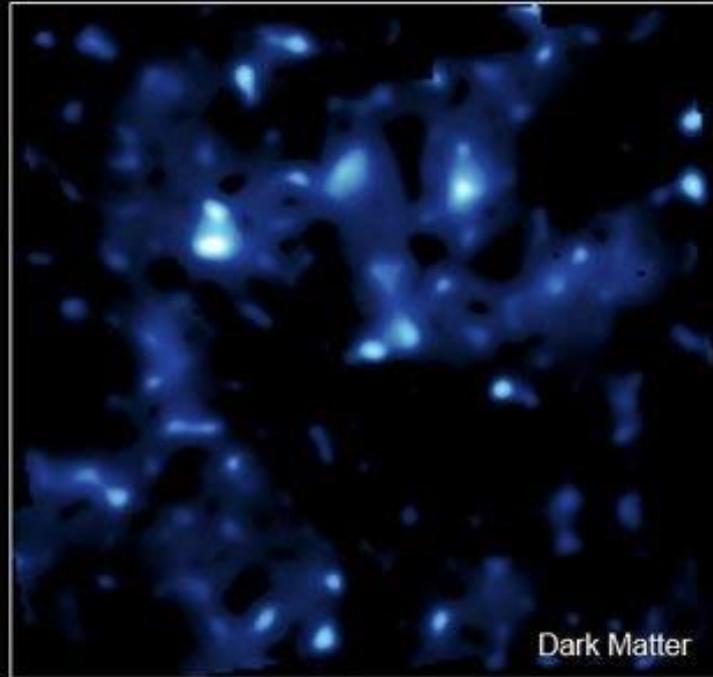


Распределение видимой (барионы) и тёмной материи в одном из скоплений галактик

Барионы



Тёмная материя



Cold dark matter

– это небарионная, гравитирующая стабильная материя, способная к кластеризации, не участвующая в электромагнитном и сильном взаимодействиях.

Основной кандидат это **WIMP**-частицы (*Weakly Interacting Massive Particles*).

Массы частиц **WIMP** от **10 ГэВ** до **10 ТэВ**.

Они, по-видимому, участвуют в слабом взаимодействии.

Возможно это нейтральные суперсимметричные частицы.

В состав холодной тёмной материи могут давать вклад реликтовые чёрные дыры, аксионы и некоторые другие экзотические формы материи.

Dark energy

– это энергия вакуумного типа (вакуумоподобная материя, квинтэссенция, космологический Λ -член в уравнении Эйнштейна для Вселенной).

Она обладает антигравитирующим свойством и ответственна за ускоренное расширение Вселенной.

**Вклад в полную плотность вещества-энергии
Вселенной различных форм материи
(в единицах $\rho_k \approx 0,85 \cdot 10^{-29}$ г/см³)**

БАРИОНЫ <i>в том числе звёзды</i>	$0,0493 \pm 0,0006$ $0,002 - 0,003$
ФОТОНЫ	$5,4 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$0,0012 - 0,003$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ	$0,265 \pm 0,007$
ТЁМНАЯ ЭНЕРГИЯ	$0,685 \pm 0,007$
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	$1,00 \pm 0,01$

Установлено, что Вселенная расширяется

Нестационарность (расширение или сжатие) Вселенной – естественный и неизбежный результат любой её модели, учитывающей гравитацию (ньютоновскую или эйнштейновскую) и Космологический Принцип (гипотезу об однородности и изотропности Вселенной).

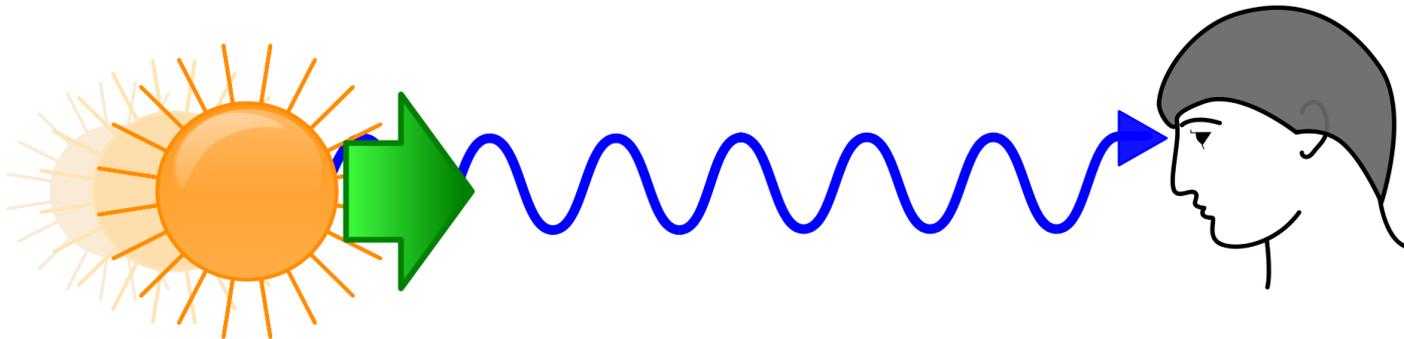
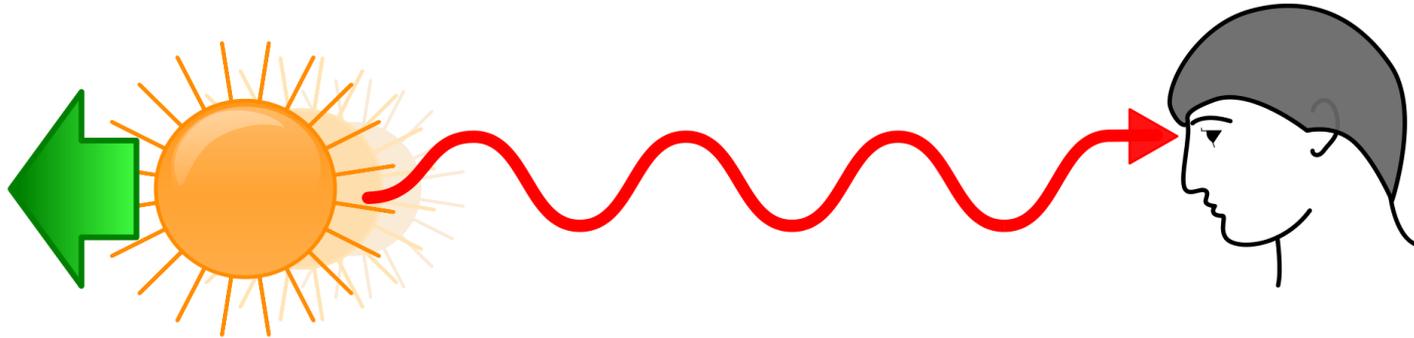
То, что Вселенная расширяется, следует из **красного смещения спектров видимого излучения удалённых галактик** (т.е. увеличения длин волн излучения) за счёт эффекта Доплера.

В **1929 г. Хабблом** (США) экспериментально установлен Закон Расширения Вселенной (**закон Хаббла**): скорость v разлёта двух удалённых галактик и расстояние R между ними связаны соотношением $v = HR$, где H – постоянная Хаббла (≈ 67 км/сек·мегапарсек).



Edwin Hubble
1889-1953

Красное и синее доплеровское смещения спектров видимого излучения



Закон Хаббла является прямым
математическим следствием
Космологического Принципа
и мог быть установлен уже **в 18 веке**.

Видимая Вселенная в больших масштабах
(**> 100 Мегалпарсек**) однородна и изотропна.

Она содержит не менее **10^{11}** галактик.
Наша галактика – *Млечный путь* – содержит
около **$2 \cdot 10^{11}$** звёзд.

То, что средняя плотность вещества-энергии
во Вселенной, по-существу, равна
критической, означает, что

Вселенная «плоская»
(описывается геометрией Евклида)
и будет расширяться неограниченно долго.

Крупномасштабная (> 100 Мегепарсек) структура наблюдаемой Вселенной

55000 галактик

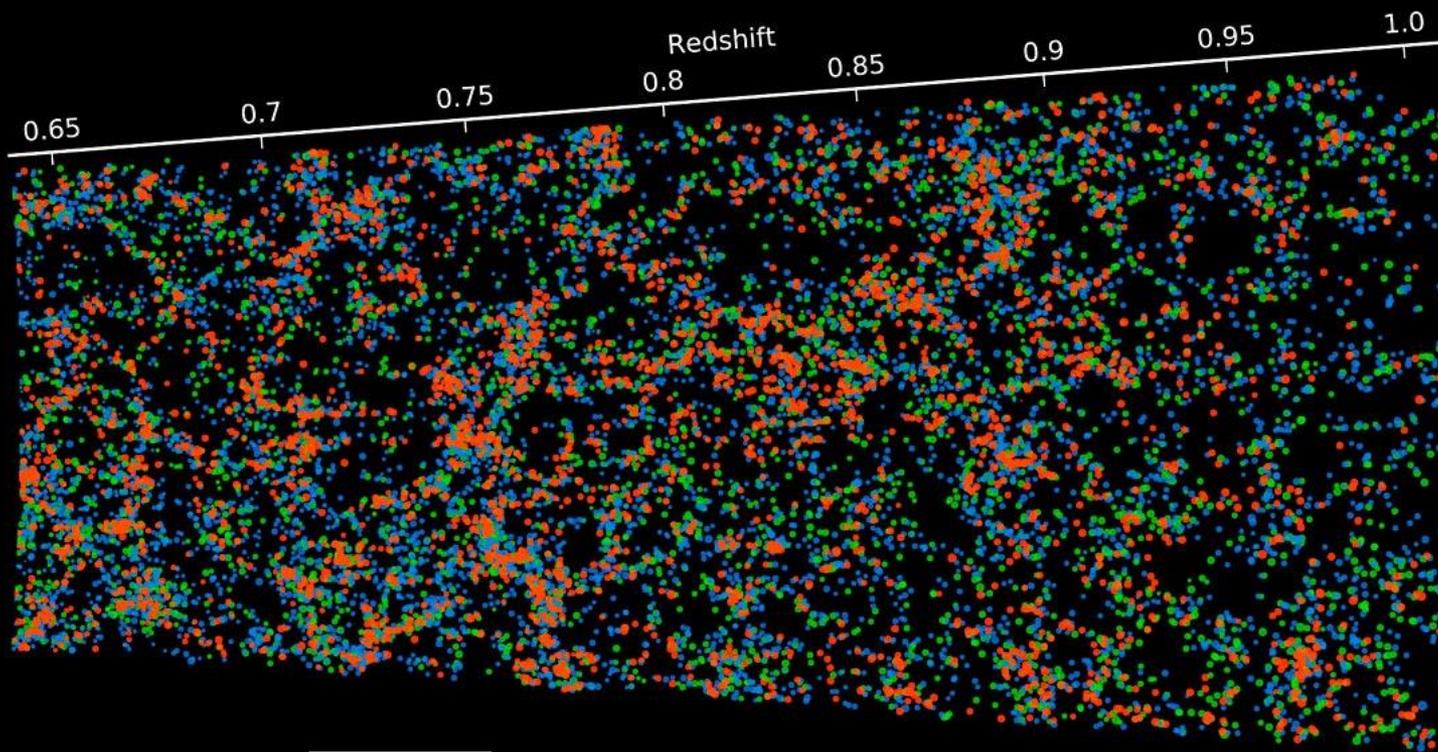
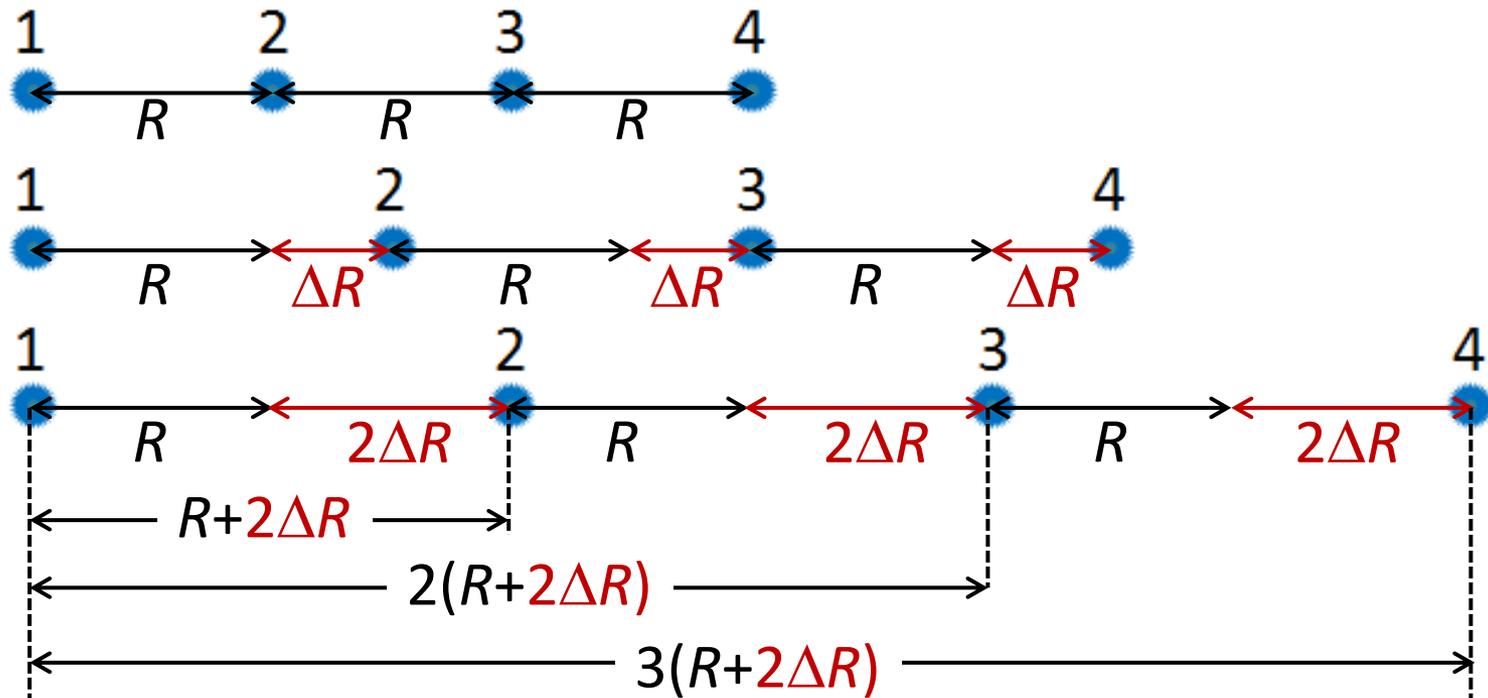


Иллюстрация справедливости закона Хаббла в однородной и изотропной Вселенной

Пусть имеются равноотстоящие галактики 1, 2, 3, 4

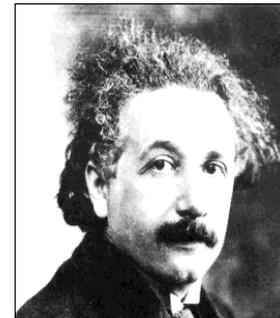
При однородном расширении Вселенной расстояние между ними за одно и то же время Δt возрастёт на одно и ту же величину ΔR , а за времена $2\Delta t$ – на величину $2\Delta R$:



Таким образом, при однородном расширении Вселенной расстояние между Галактиками (а значит и скорость v их удаления друг от друга) увеличивается пропорционально расстоянию R между ними, т.е. $v \sim R$, откуда и следует закон Хаббла $v = HR$.

Основоположники современной космологии

Einstein 1917 Стационарная
Вселенная



Eddington 1920 Ядерная энергия звёзд
($4p \rightarrow {}^4\text{He}$)



**Александр
Фридман** 1922 **Нестационарная
Вселенная**



Lemetre 1927 Эволюция
Вселенной как деление
«первичного атома»



Hubble 1929 Разбегание
галактик



**Георгий
Гамов** 1948

Теория
горячей Вселенная



Большой Взрыв (Big Bang)

В основе современной Стандартной космологической модели лежит концепция Большого Взрыва. Её первооснова – наблюдаемое разбегание галактик. Обратив стрелу времени, можно получить для возраста Вселенной (времени её «начала», когда все галактики сольются в одной точке) величину **около 14 млрд лет**. Существует несколько прямых следствий событий далёкого прошлого, подтверждающих концепцию Большого взрыва:

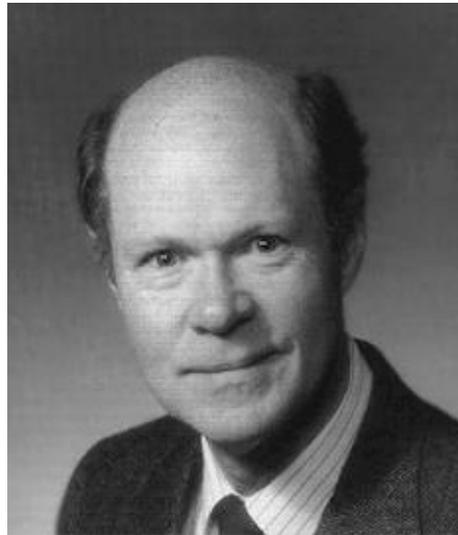
1. Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение (температура **2,7 K**).
2. Высокая распространённость гелия (**$\approx 1/4$** всех ядер по массе).
3. Соотношение между числом фотонов и барионов (**$\approx 10^9 : 1$** в пользу фотонов).

Микроволновое излучение было предсказано и рассчитано в 1948 г. **Гамовым** и его учениками **Альфером** и **Херманом** и открыто в 1965 г. радиоинженерами **Вильсоном** и **Пензиасом** (США) при наладке растровой радиоантенны.



Penzias

**Nobel
prize
1978**

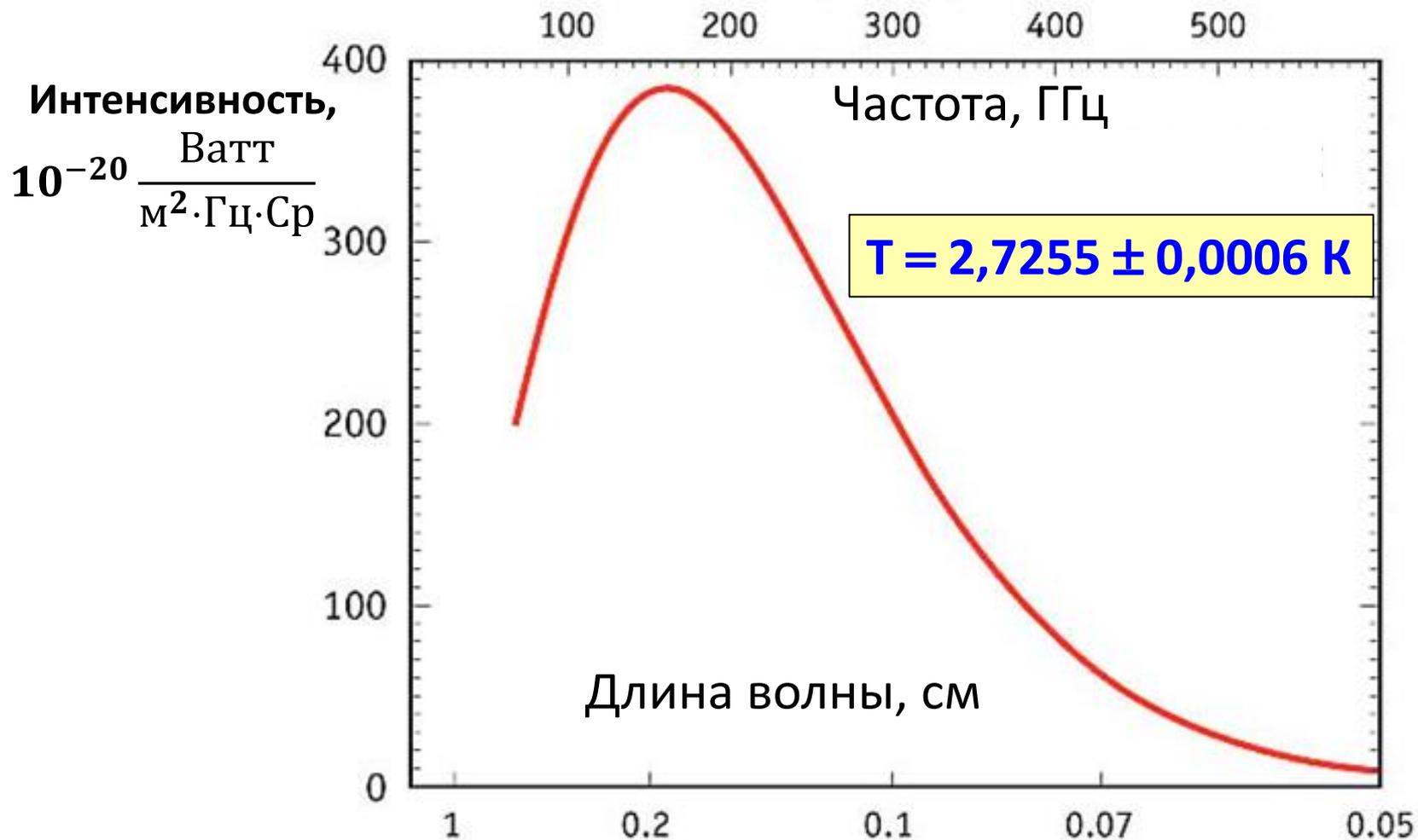


Wilson

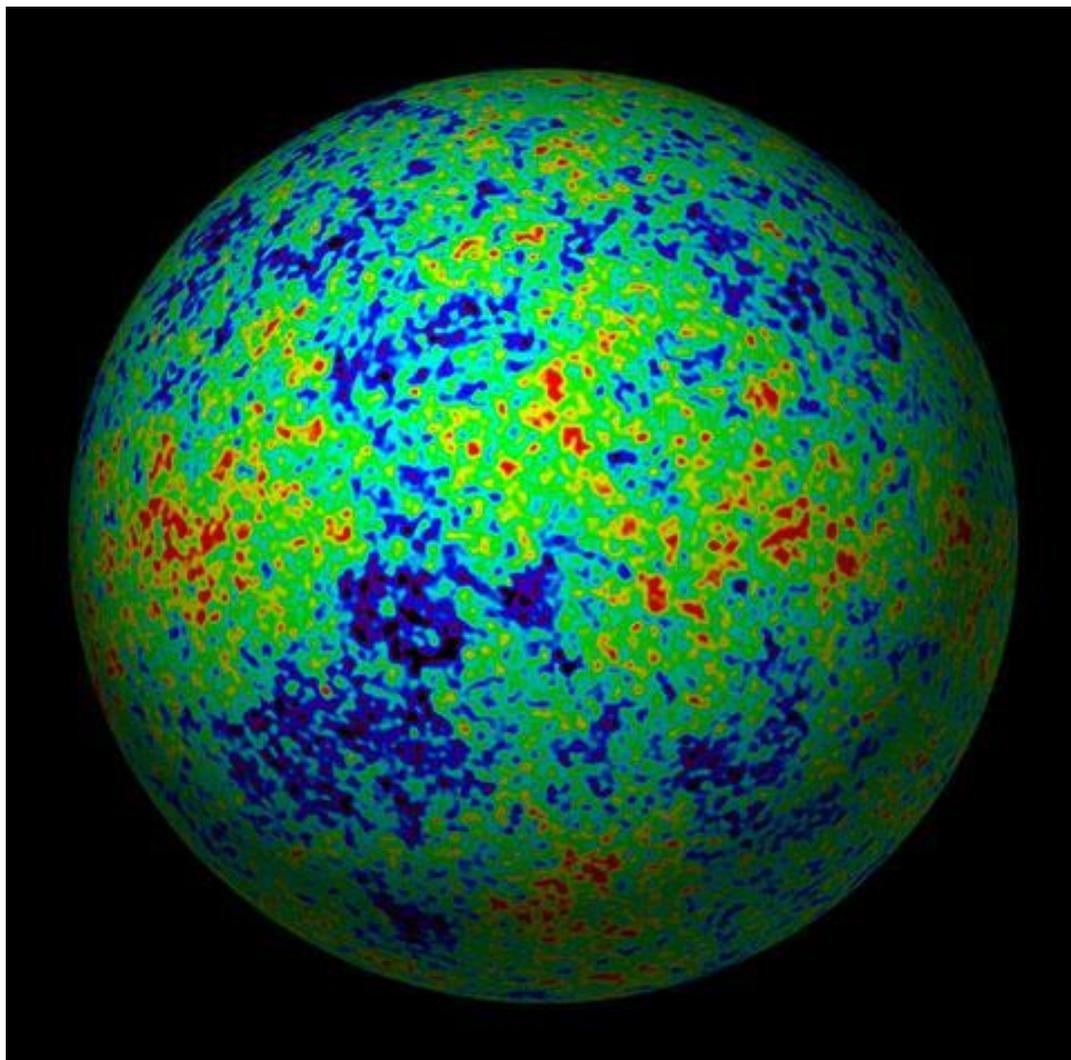


**Гамов
(1904 - 1968)**

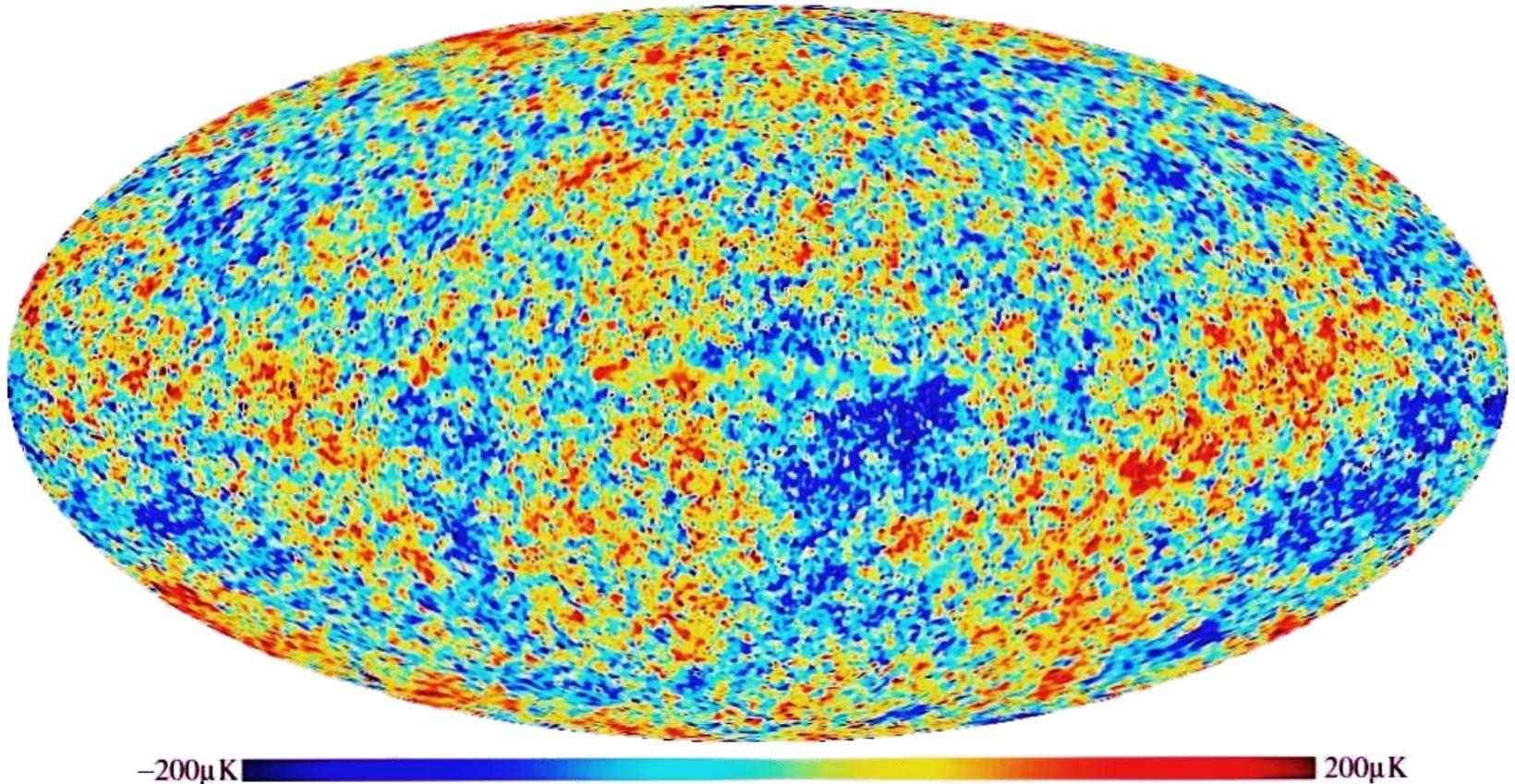
Спектр микроволнового реликтового излучения



**Всё пространство заполнено реликтовым излучением,
бомбардирующим Землю со всех направлений
и детально исследованным со спутников**



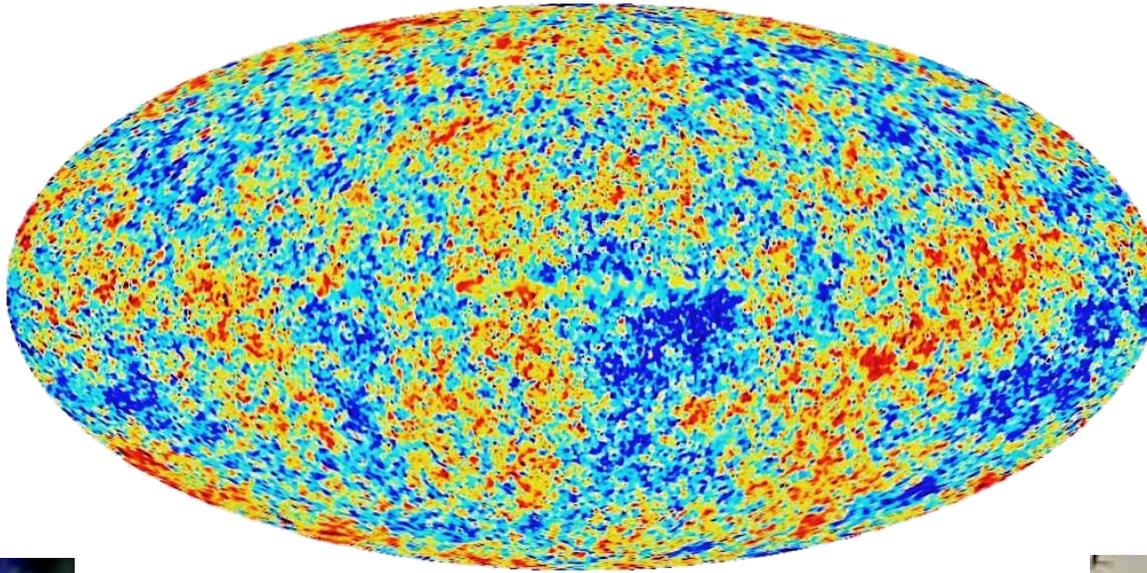
Это излучение возникло в горячем ($T \approx 3000$ К) состоянии примерно через 370 тысяч лет после Большого взрыва и остыло к настоящему времени до температуры $\approx 2,7$ К, соответствующей микроволнам (волнам миллиметрового диапазона)



Оказалось (1992 г.), что это излучение практически изотропно, т.е. одинаково во всех направлениях. Степень его анизотропии всего 10^{-5} .

Анизотропия космического микроволнового фонового (реликтового) излучения

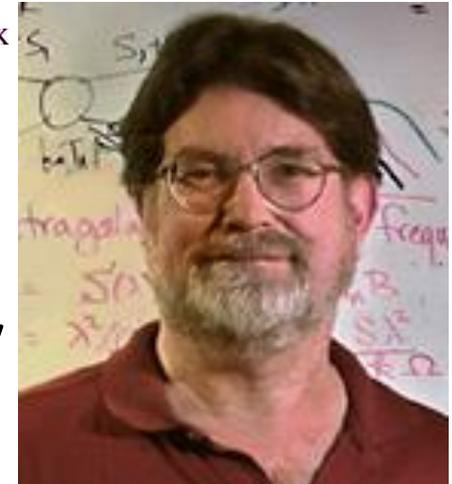
Это фотография Вселенной почти сразу после Большого Взрыва?



Mather



Smoot



-200 μ K  200 μ K

Степень анизотропии $\approx 10^{-5}$

Nobel prize 2006

for their discovery of the blackbody form and anisotropy of the cosmic microwave background radiation

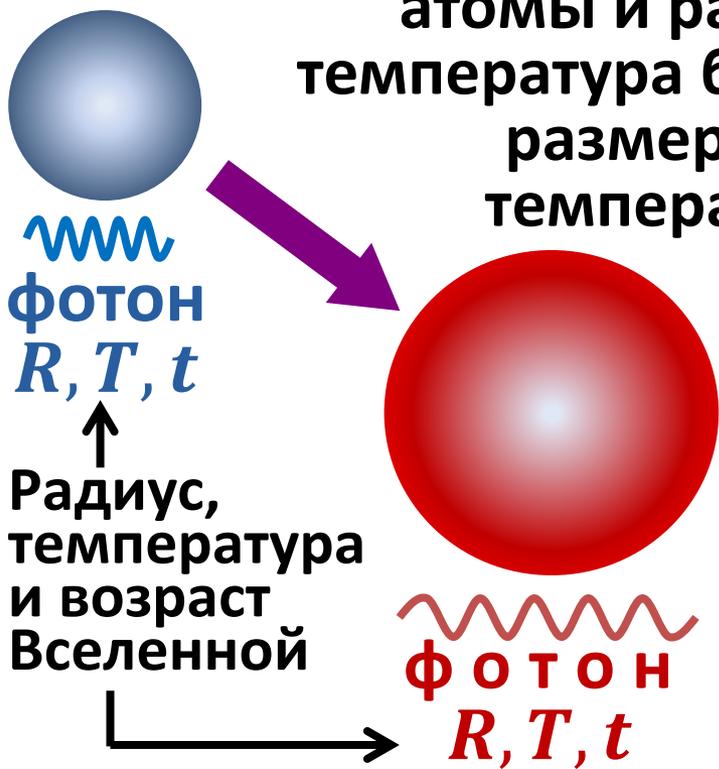
Расширение Вселенной и микроволновое фоновое (реликтовое) излучение

Реликтовое излучение – это остывший отблеск Большого Взрыва. Оно возникло через **373 000 лет** после Большого Взрыва, когда излучение перестало взаимодействовать с веществом вследствие превращения его в нейтральные атомы и размер Вселенной был $\approx 10^{25}$ см, а её температура была **3000 К**. К настоящему времени размер Вселенной $\approx 10^{28}$ см (или более) и температура реликтового излучения **2,73 К**.

Если длина волны реликтового излучения увеличивается за счёт расширения Вселенной, то выполняется соотношение $T/T = R/R$ и к настоящему времени должно быть

$$T = T \frac{R}{R} \approx (3000 \text{ К}) \frac{10^{25} \text{ см}}{10^{28} \text{ см}} = 3 \text{ К},$$

что хорошо согласуется с наблюдаемым в настоящее время значением **2,73 К**



$$\lambda \sim \frac{1}{E} \sim \frac{1}{T}$$

**Возникает вопрос:
как 14 млрд лет назад из «ничего» (нулевой энергии)
возникла столь массивная Вселенная?
Неужели мы имеем дело с невообразимо масштабным
нарушением закона сохранения энергии?**

На самом деле нарушения сохранения энергии нет, поскольку энергия гравитационного поля, связанного с объектом массой m , не только отрицательна, но и точно уравновешивает энергию массы покоя частицы, mc^2 . Если бы нам пришлось сжать объект до математической точки (сингулярности), то, как следует из общей теории относительности Эйнштейна, энергия его гравитационного поля равнялась бы $-mc^2$. Таким образом существует точное равновесие энергии массы покоя и гравитационной энергии:

$$mc^2 - mc^2 = 0.$$

Если систему частиц, нагретую до температур выше точки Великого объединения ($>10^{28} - 10^{29}$ К), подвергнуть охлаждению, то она, согласно ТВО (Теориям Великого Объединения), испытает по крайней мере два фазовых перехода с понижением степени симметрии:

1. При температуре $\approx 10^{28}$ К (энергии $\approx 10^{16}$ ГэВ) наступит конец Великого объединения.
 X - и Y -бозоны приобретают массы $\approx 10^{16}$ ГэВ/ c^2 .
Остальные частицы остаются безмассовыми.
2. При температуре $\approx 10^{15}$ К (энергии ≈ 100 ГэВ) разрушится электрослабая симметрия и слабое взаимодействие отделится от электромагнитного.
В этот момент кварки, лептоны и бозоны W^\pm и Z приобретают массы.

Гипотетический распад единого взаимодействия на отдельные составляющие по мере охлаждения физической системы, сопровождаемый снижением степени симметрии:

Единое взаимодействие.
Суперструны

$>10^{19}$ ГэВ, $<10^{-33}$ см, $<10^{-43}$ сек

Компактификация

Гравитация

Великое объединение

10^{19} ГэВ, 10^{-33} см, 10^{-43} сек

Спонтанное нарушение симметрии

Сильное взаимодействие

Электрослабое взаимодействие

10^{15} ГэВ, 10^{-29} см, 10^{-36} сек

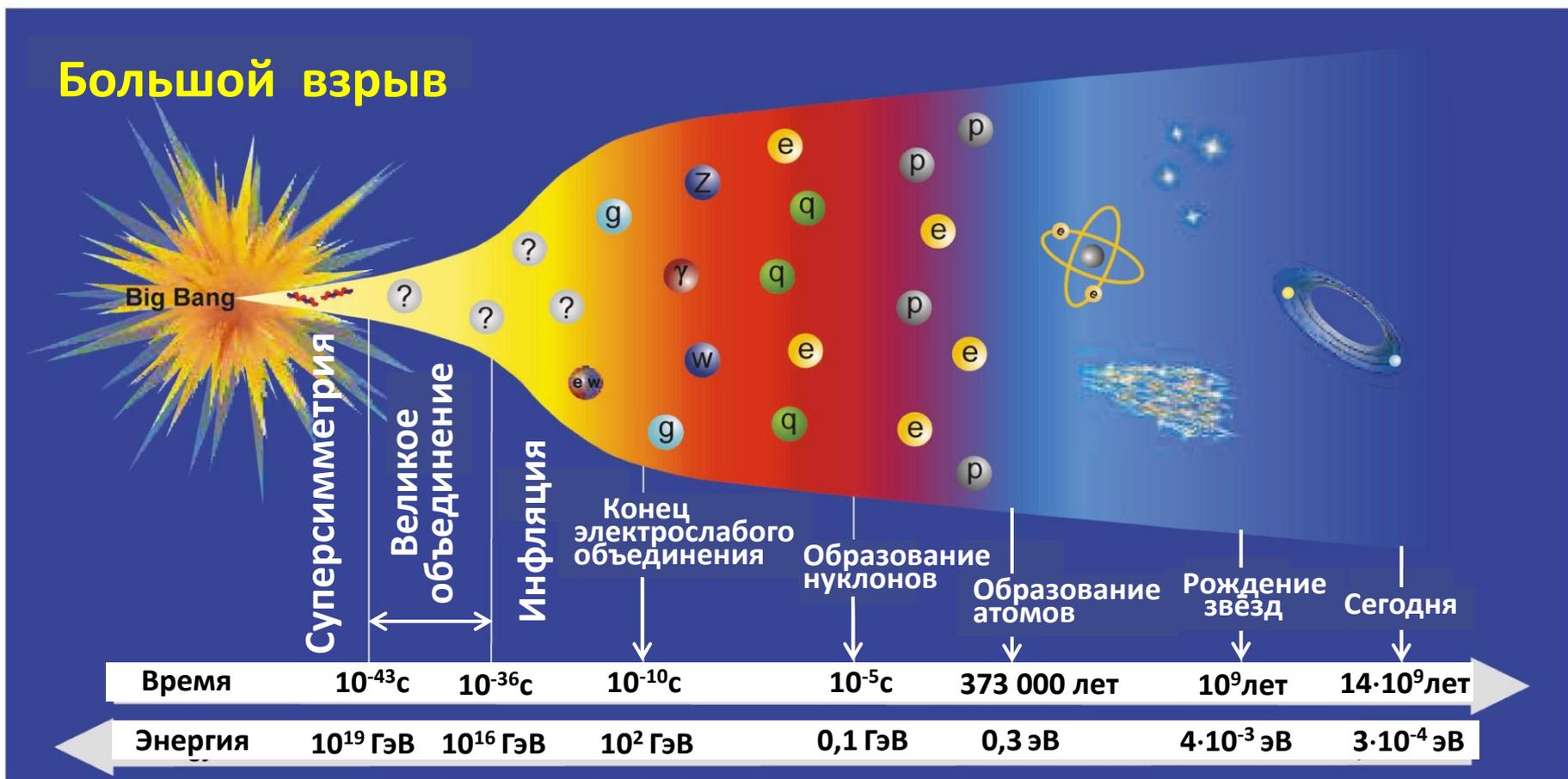
Спонтанное нарушение симметрии

Слабое взаимодействие

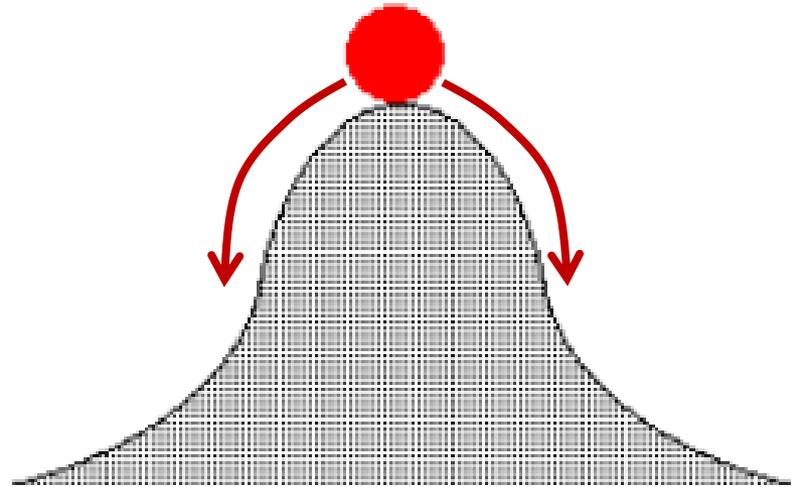
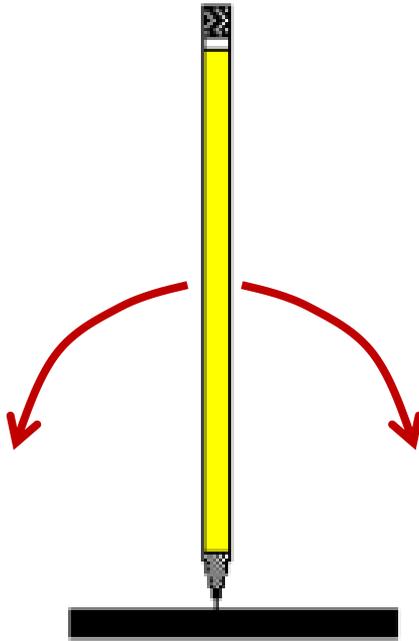
Электромагнитное взаимодействие

10^2 ГэВ, 10^{-16} см, 10^{-10} сек

Вселенная после Большого Взрыва, охлаждаясь, должна была пройти все стадии фазовых переходов с понижением степени симметрии



Простейшие примеры спонтанного нарушения симметрии:



Фазовые переходы с понижением степени симметрии происходят самопроизвольно (спонтанно) и поэтому носят название **спонтанного нарушения симметрии**.

Для этого постулируют (Хиггс, 1964)

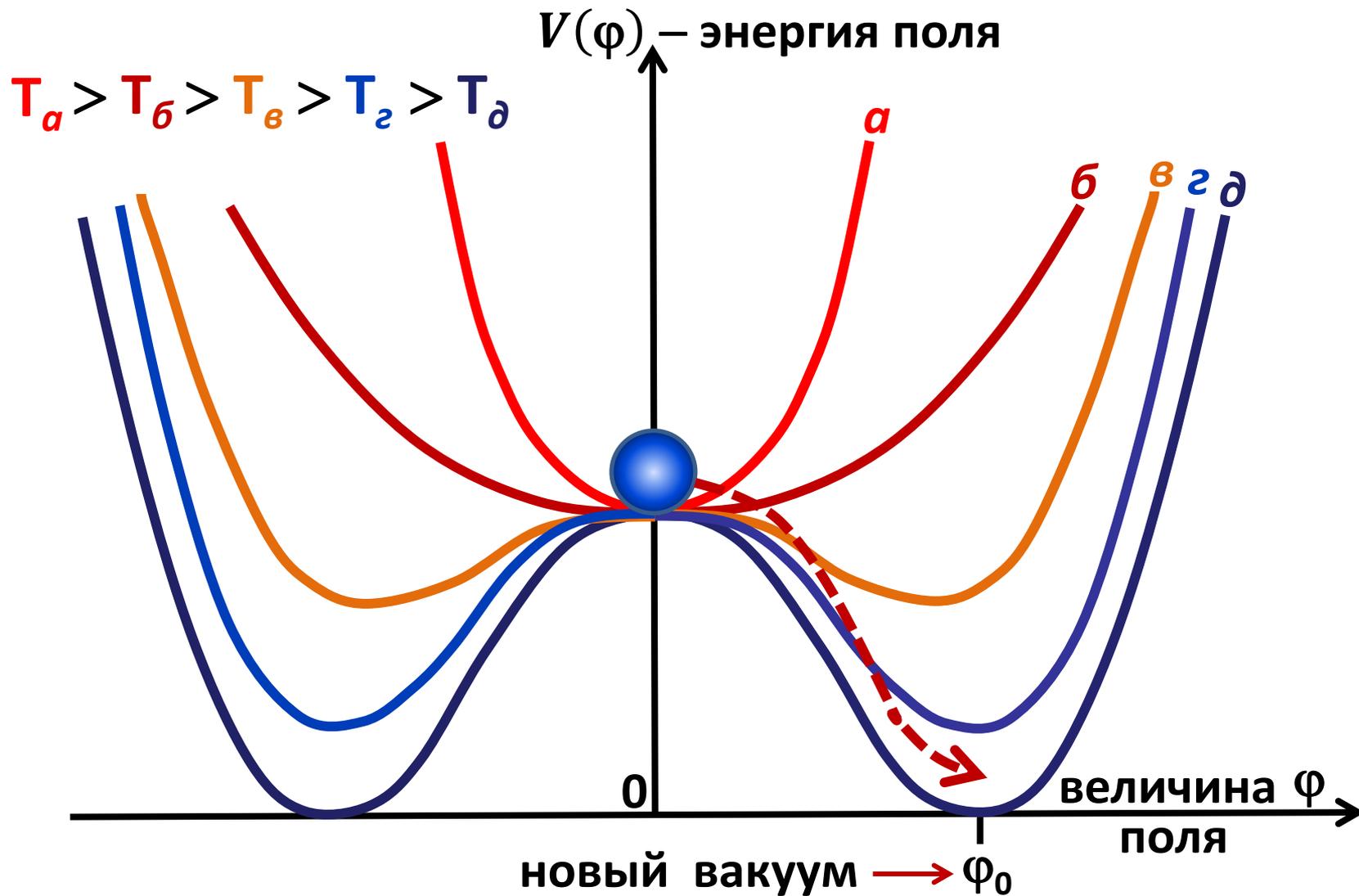
особое скалярное поле (их может быть несколько), квантами которого являются **бозоны типа хиггсовских**. Подтверждено, что именно механизм Хиггса ответственен за появление масс у фундаментальных частиц.

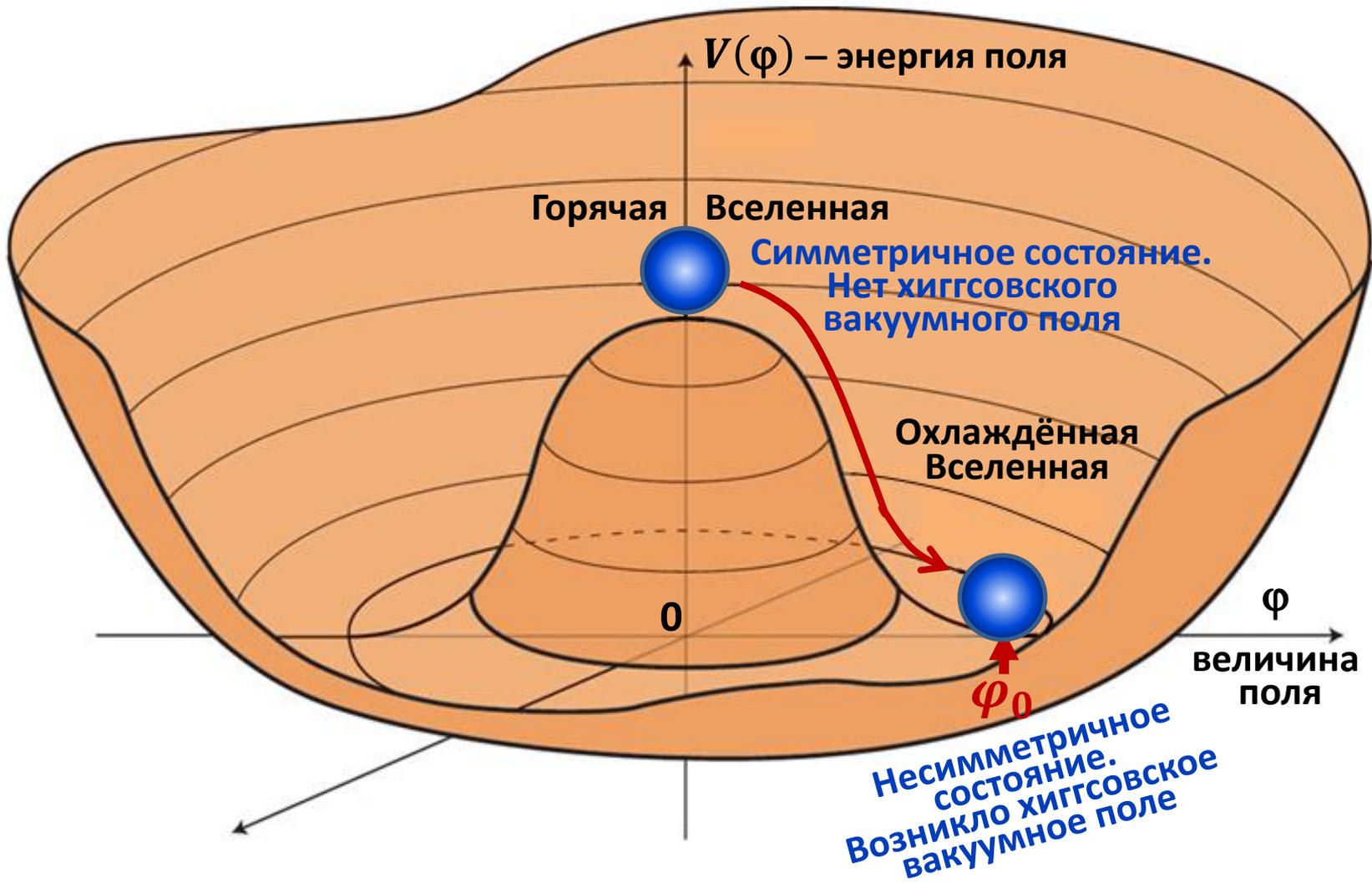
При спонтанном нарушении симметрии симметричные состояния (расположенные выше основного, т.е. при более высоких энергиях) при постепенном понижении энергии (охлаждении) за счёт сверхмалых возмущений переходят в несимметричные устойчивые состояния.

Примеры:

1. Спонтанное намагничивание твёрдого тела ниже температуры температуры Кюри – ферромагнетизм.
2. Кристаллизация жидкости ниже критической температуры.
3. Конденсация паров жидкости.
4. Сверхпроводимость.

Зависимость потенциальной энергии хиггсовских полей от температуры





Догалактические этапы эволюции Вселенной

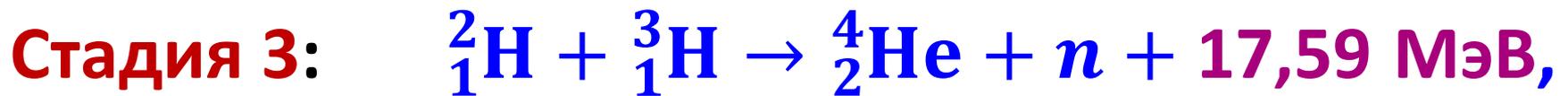
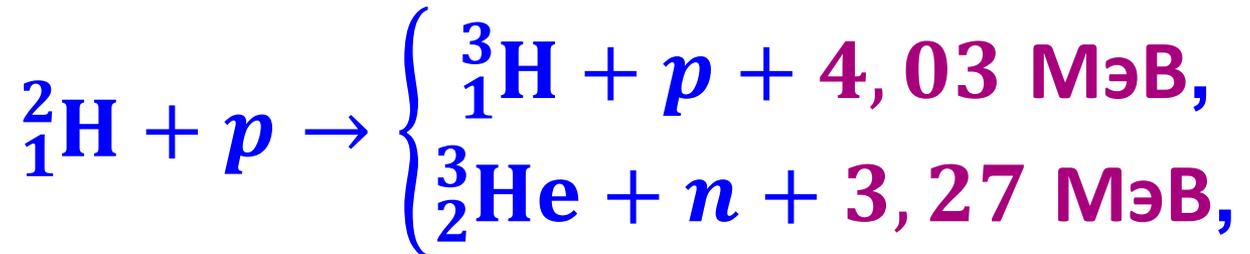
Время от Big Bang	Температура К	Этап/Событие
$< 10^{-43}$ сек	$> 10^{32}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение взаимодействий)
10^{-43} сек	10^{32}	Планковский момент Отделение гравитации
$10^{-43} - 10^{-36}$ с	$10^{32} - 10^{28}$	Великое объединение
10^{-36} сек	10^{28}	Конец Великого объединения
10^{-10} сек	10^{15}	Конец электрослабого объединения. Кварки, лептоны, бозоны приобретают массы
10^{-6} сек	10^{13}	Кварк-адронный фазовый переход
1 – 300 сек	$10^{10} - 10^9$	Дозвёздный синтез гелия
373 000 лет	$3 \cdot 10^3$	Образование атомов. Разделение вещества и излучения. (Вселенная прозрачна для излучения)

Дозвёздный нуклеосинтез

В период **1 – 300 сек** после Большого Взрыва образуются первые ядра тяжелее водорода.

В это время плотность Вселенной упала до $\approx 1 \text{ г/см}^3$, а температура – до $10^{10} - 10^9 \text{ К}$.

Цепочка основных реакций выглядит так:



За время около **5** мин **1/4** нуклонов Вселенной превратились в **гелий-4**. Практически все нейтроны оказались связанными в **гелии-4**. Дальнейшее снижение температуры и плотности Вселенной остановило реакции синтеза.

90% гелия-4 во Вселенной образуется в дозвездную эру (в звёздах его образуется не более 10%). Это доказывает существование дозвёздной стадии Вселенной, т.е. подтверждает концепцию Большого Взрыва.

В дозвёздном нуклеосинтезе образуется также в незначительных количествах дейтерий (${}^2_1\text{H}$), гелий-3 (${}^3_2\text{He}$) и даже ${}^7_3\text{Li}$.

Первые звёзды образуются уже через 0,1 – 0,3 млрд лет, первые галактики (скопления звёзд) – примерно через 0,4 – 1 млрд лет после Большого Взрыва.

Солнечная система зародилась через 9 млрд лет.

Все они состоят из вещества. Куда девалось огромное количество антивещества? Ведь Вселенная образовалась со всеми нулевыми суммарными аддитивными квантовыми числами и количество вещества в ней должно было равняться количеству антивещества. Одно из объяснений состоит в том, что в период ($10^{-36} - 10^{-32}$ сек) в результате нарушения *CP*-инвариантности и несохранения барионного числа возник небольшой ($\approx 10^{-9}$) избыток вещества над антивеществом и лишь этот избыток сохранился во Вселенной, поскольку остальная и главная доля материи и антиматерии ($\approx 1 - 10^{-9}$) аннигилировала, превратившись в фотоны (соотношение между числом фотонов и барионов ($\approx 10^9:1$ в пользу фотонов)).

Так например, в распаде нейтральных долгоживущих каонов:



образуется несколько больше e^+ , чем e^- и за счёт механизма обратного распада протона ($p \rightarrow \pi^0 + e^+$), предсказываемого теориями Великого объединения:



может образоваться больше протонов,
чем антипротонов.

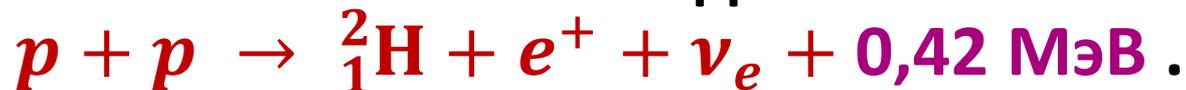
Звёздная эра. Ядерные реакции в звёздах

Гравитационное сжатие сгустков (компактных зон) в гигантских молекулярных облаках приводит к их разогреву и в конечном итоге к зажиганию звёзд. Сначала, за время $10^5 - 10^6$ лет, образуется **протозвезда**, разогретая до 10^6 К. Она светит за счёт освобождения гравитационной энергии при сжатии. Когда масса протозвезды достигает **0,1** массы Солнца ($0,1M_{\odot}$) в протозвезде возникает дополнительный (ядерный) источник энергии



(число атомов дейтерия во Вселенной составляет $10^{-4} - 10^{-5}$ от числа атомов водорода).

При дальнейшем сжатии и гравитационном разогреве протозвезды до 10^7 К начинается новый этап её горения – она превращается в обычную звезду, основным источником энергии которой являются реакции термоядерного синтеза. Стартовая среди них – реакция, идущая за счёт слабого взаимодействия:



Для её протекания внутри звезды Солнечной массы нужна энергия протонов ≈ 1 кэВ и плотность ≈ 100 г/см³.

Время её протекания внутри Солнца $6 \cdot 10^9$ лет

Дальнейшие реакции (один из вариантов так называемого *протон-протонного цикла*):



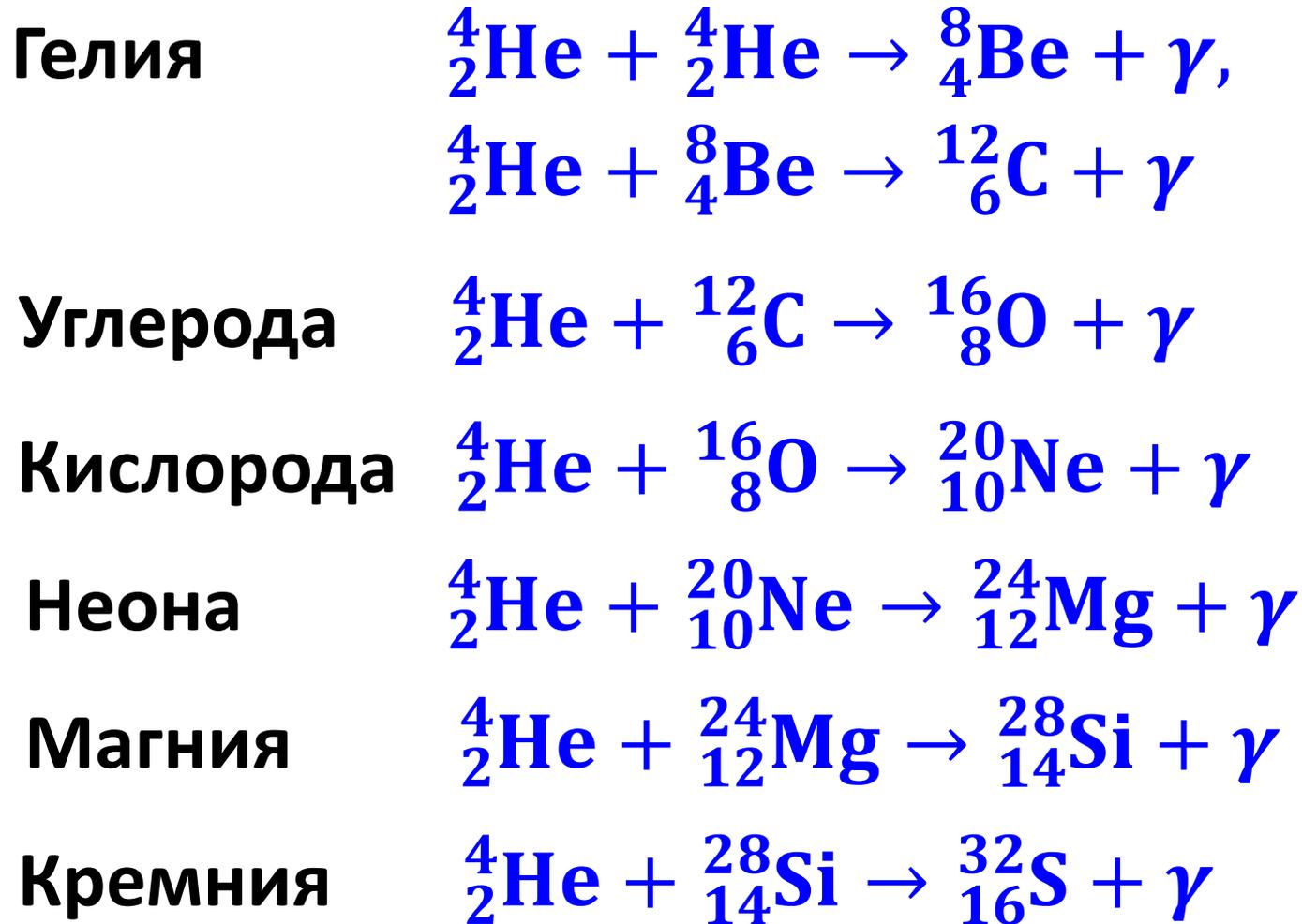
Протон-протонный (*pp*) цикл сводится к процессу:



Условия термоядерного горения различных ядер

Ядро	Температура, К	Плотность, г/см ³	Энергия
² H	10 ⁶	1	0,1 – 0,2 кэВ
¹ H	10 ⁷	100	1 кэВ
⁴ He	2·10 ⁸	10 ³ –10 ⁴	30 кэВ
¹² C, ¹⁶ O	8·10 ⁸	10 ⁴ –10 ⁵	0,1 МэВ
²⁸ Si	4·10 ⁹	10 ⁶ –10 ⁷	0,5 МэВ

Горение:



При повышении в центре массивной звезды температуры до $(3 - 5) \cdot 10^9 \text{ K}$ и плотности до $\approx 3 \cdot 10^7 \text{ г/см}^3$ создаются условия для горения кремния. На этой стадии эволюции массивных звёзд существенную роль начинают играть многочисленные реакции с участием протонов, нейтронов, α -частиц и γ -квантов, необходимые количества которых появляются внутри звезды за счёт реакций расщепления (главным образом под действием γ -квантов) уже образованных элементов.

Эти реакции с возросшей вероятностью начинают идти при высоких температурах ($\approx 10^9 \text{ K}$). Быстрый захват ядрами кремния и образующимися более тяжёлыми ядрами нуклонов и α -частиц приводит к возникновению большинства элементов в районе «железного максимума» в кривой распространённости элементов во Вселенной и формированию железной сердцевины звезды.

Возможные ядерные реакции синтеза в звездах различной массы

Масса, M_{\odot}	Возможные ядерные реакции
0,08	Нет
0,3	Горение водорода
0,7	Горение водорода и гелия
5,0	Горение водорода, гелия, углерода
25,0	Все реакции синтеза с выделением энергии

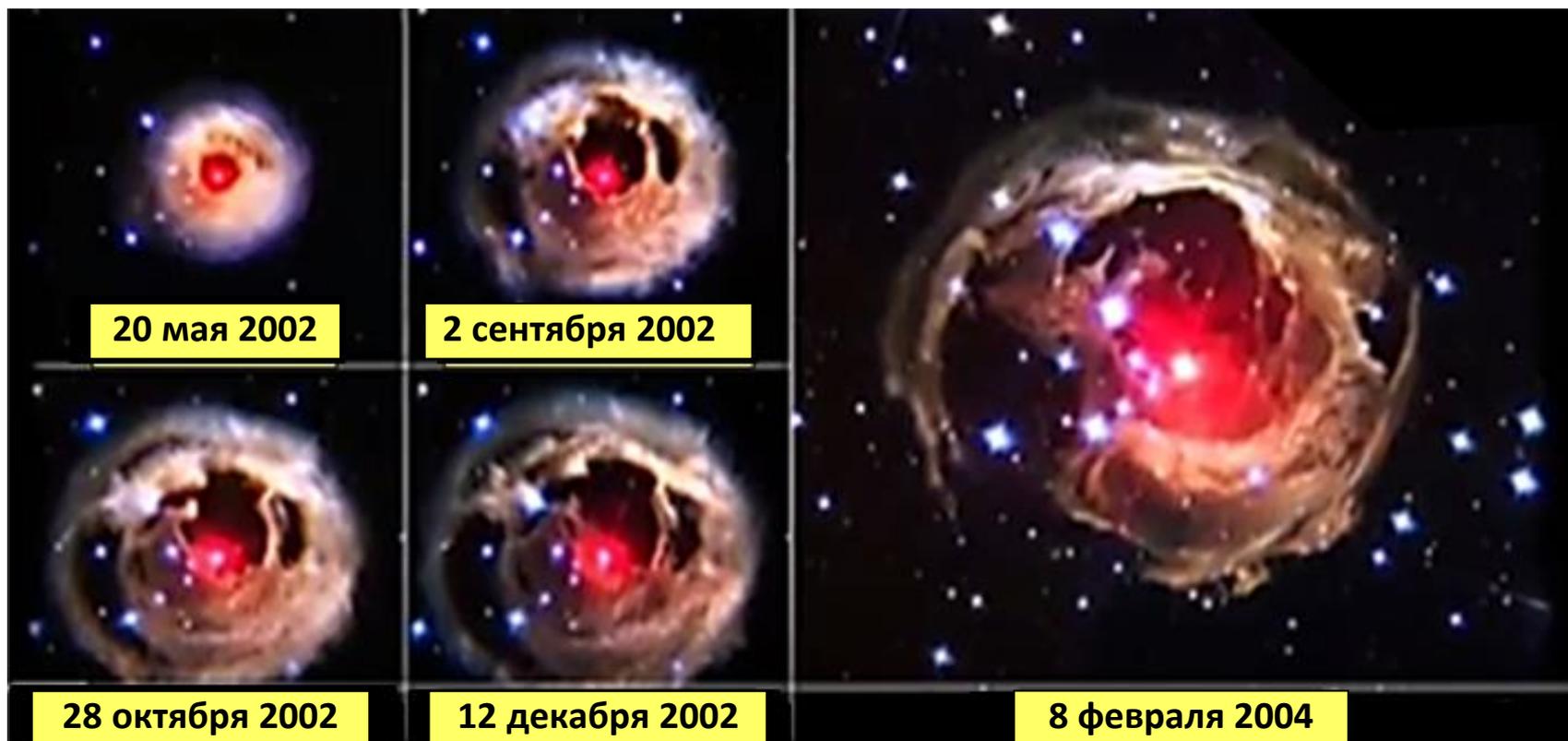
Пределы изменения характеристик звёзд

Характеристика	Пределы изменения относительно Солнца	Характеристики Солнца
Масса	$(0,08 - 120)M_{\odot}$	$2 \cdot 10^{33}$ г
Светимость	$(10^{-4} - 10^6)L_{\odot}$	$4 \cdot 10^{33}$ эрг/с
Радиус	$(10^{-2} - 10^3)R_{\odot}$	$7 \cdot 10^{10}$ см
Температура поверхности	$(0,3 - 20)T_{\odot}$	$6 \cdot 10^3$ К

Диаграмма эволюции звезды

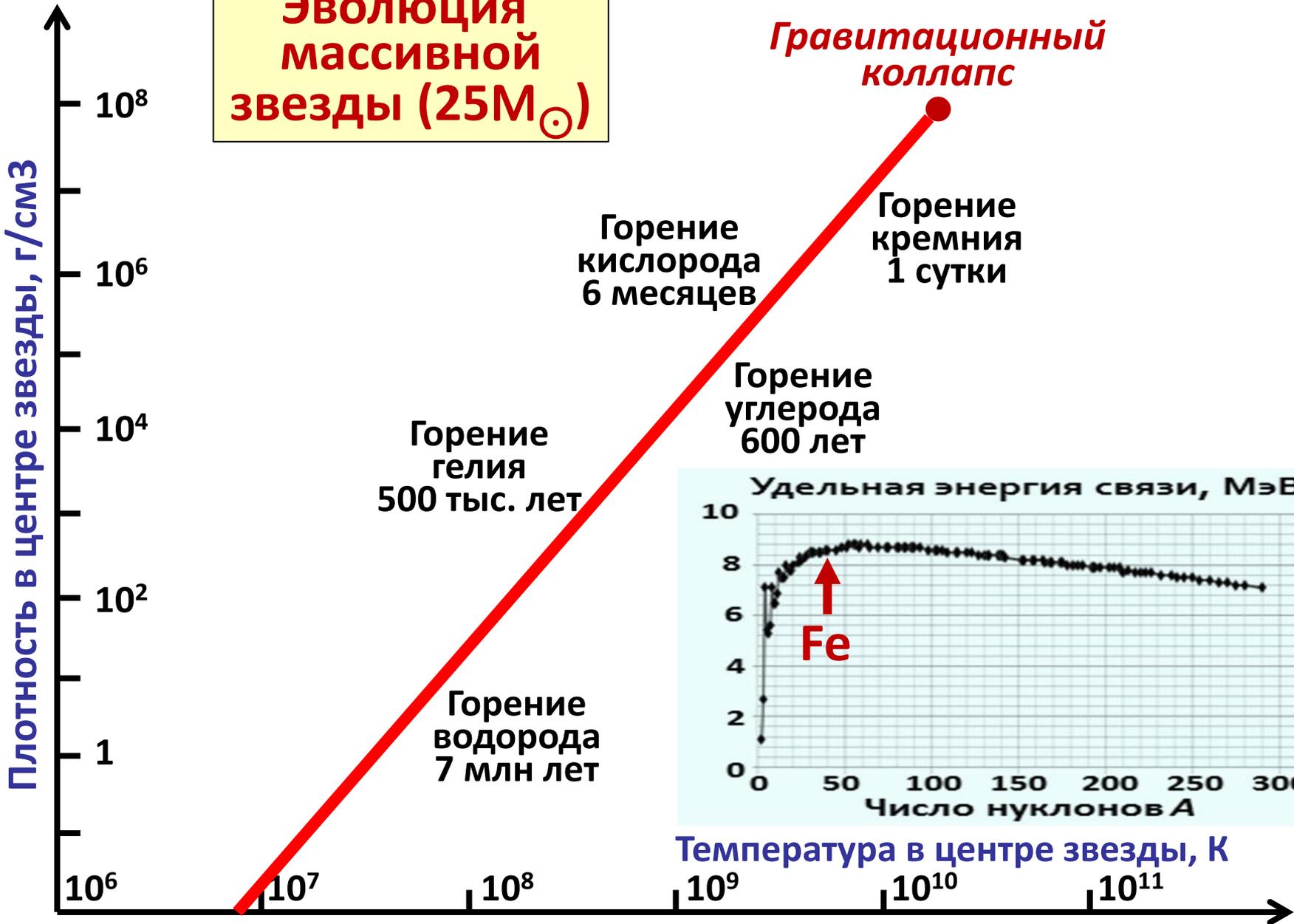


**Вспышка новой звезды (красного сверхгиганта)
в созвездии Единорога
(Млечный путь, 20 000 световых лет)**

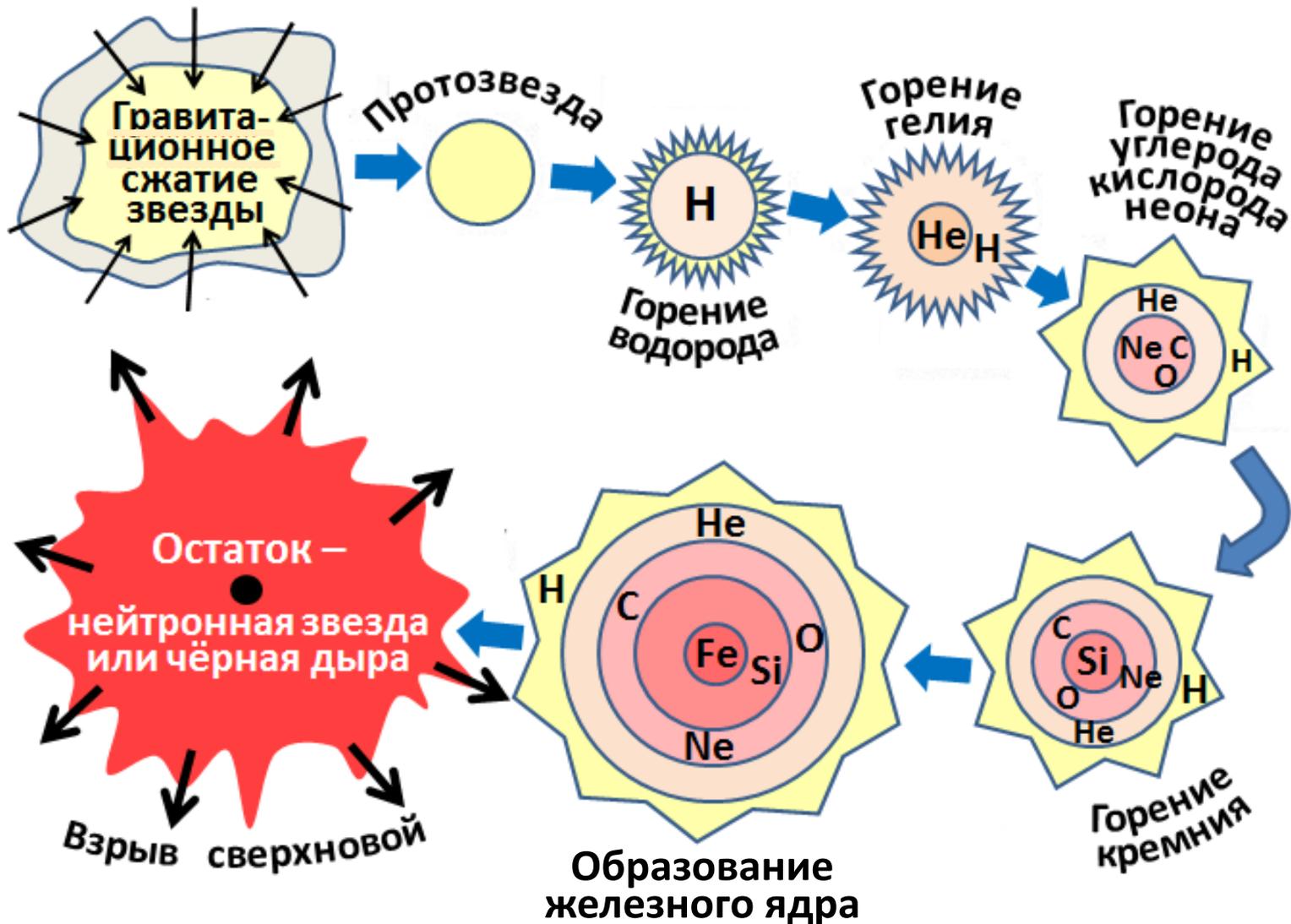


Радиус в 400 и свечение в 600 000 больше солнечного

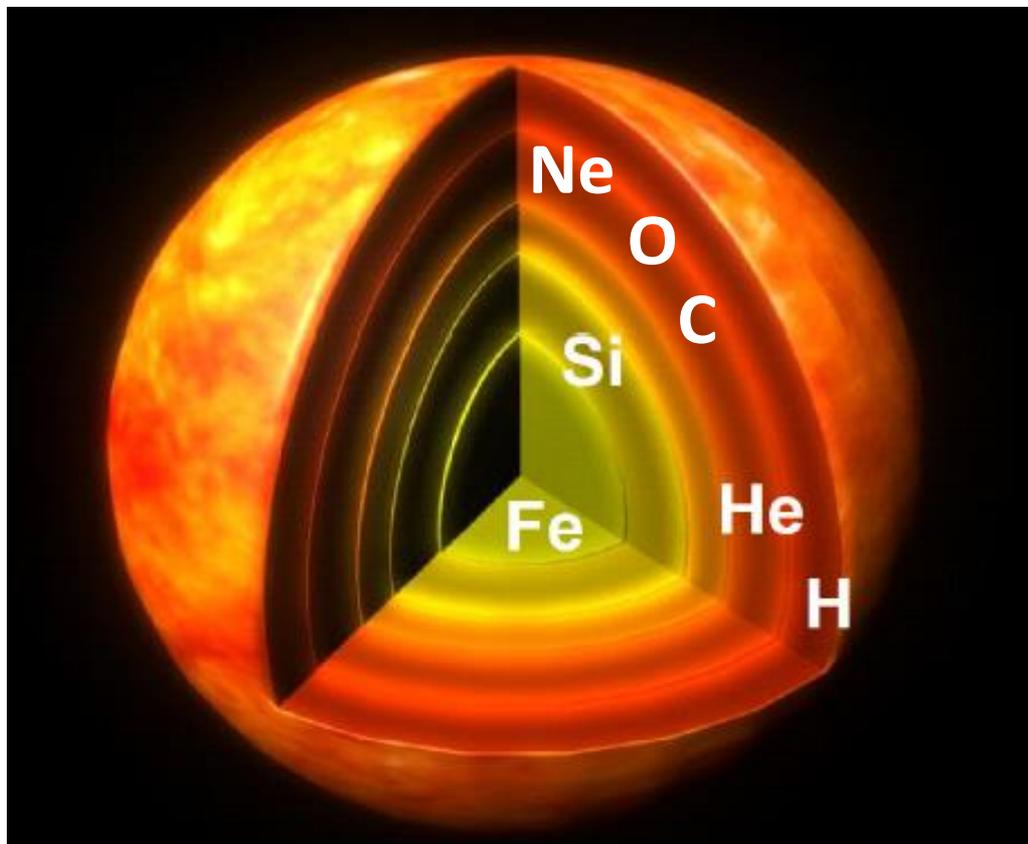
Эволюция массивной звезды ($25M_{\odot}$)

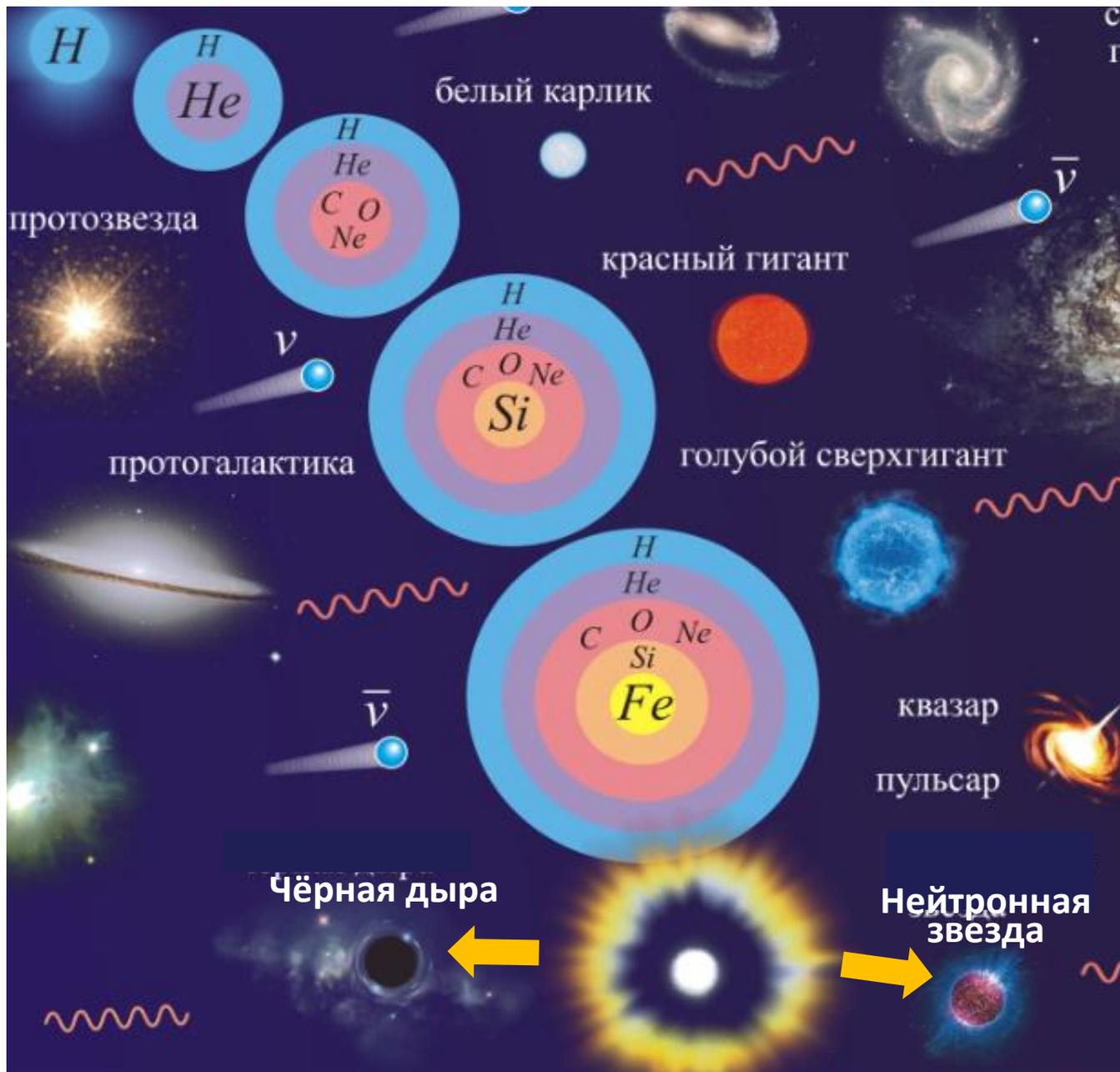


Основные этапы эволюции массивной ($> 25M_{\odot}$) звезды



Слоистая структура массивной звезды перед взрывом Сверхновой





Сверхновая

Сверхновые

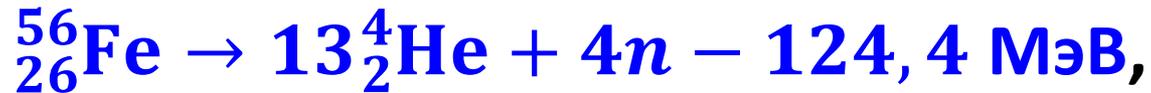
Реакции термоядерного синтеза в состоянии генерировать ядра вплоть до ядер «железного пика» ($A \approx 60$). Ядра более тяжёлые возникают в ходе эволюции самых массивных ($M > 10M_{\odot}$) звёзд.

Звёзды с начальной массой $M < 8M_{\odot}$ превращаются в белый карлик с конечной массой $0,5M_{\odot} < M < 1,4M_{\odot}$. Заключительной стадией жизни звёзд с массой $> 10M_{\odot}$

является **вспышка Сверхновой** (энергия взрыва достигает 10^{53} эрг). В центре массивной звезды внутри кремниевой оболочки начинает формироваться железное ядро. Эта центральная «железная» область массивной звезды начинает сжиматься. Ядерные источники внутри такой звезды исчерпаны и ядерный разогрев сердцевины звезды прекращается.

Ядро массивной звезды, прошедшей все стадии ядерного синтеза, разогревается лишь за счёт выделяющейся при сжатии гравитационной энергии.

Когда температура в центре массивной звезды достигает $5 \cdot 10^9$ К, а плотность 10^9 г/см³, там начинается расщепление под действием фотонов ядер группы железа на нуклоны и ядра гелия:



а также захват электронов свободными протонами и ядрами за счёт слабых сил, ведущий к образованию электронного нейтрино:



Эти реакции протекают с поглощением энергии и способствуют охлаждению центральной части звезды.

Число электронов и протонов внутри звезды резко уменьшается и там формируется нейтронное ядро.

Остановка ядерного синтеза в центре звезды и охлаждение за счёт нейтронизации приводят к падению давления внутри звезды.

Звезда теряет устойчивость и начинается коллапс железного ядра. Примерно за **0,1 сек** во внутренней области звезды образуется почти пустое пространство размером около **1000 км**, в центре которого находится будущая нейтронная звезда (её диаметр около **20 км**). В эту полость устремляется наружное вещество звезды, не успевшее до начала коллапса превратиться в железо.

Скорость падения наружных слоёв достигает **100 000 км/сек**. Вначале коллапса нейтрино свободно покидают ядро звезды. Однако, когда плотность внутри звезды достигает $\approx 5 \cdot 10^{11} \text{ г/см}^3$, происходит «запирание» нейтрино в её центре. Значительная часть нейтрино не успевает покинуть ядро и удерживается коллапсирующим ядром звезды.

Когда коллапсирующее ядро звезды достигает ядерной плотности ($10^{14} - 10^{15} \text{ г/см}^3$), коллапс резко прекращается. Температура достигает **10^{11} К** .

Падающие на ядро звезды внешние слои натываются на внезапно остановившийся плотный кор и возникает отражённая волна давления, которая со скоростью больше скорости звука в веществе звезды проходит до её поверхности.

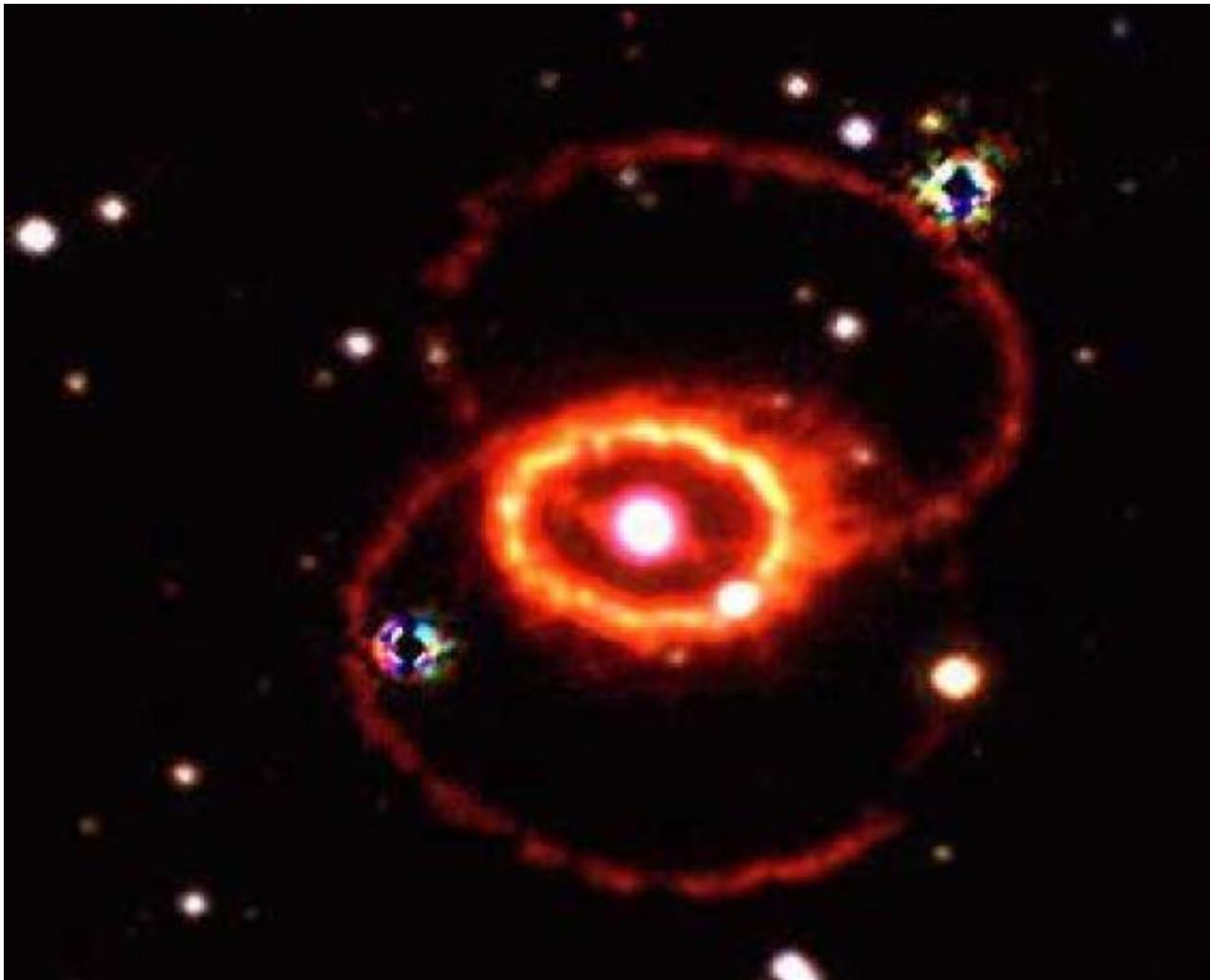
Эта ударная волна имеет энергию $\approx 10^{51}$ эрг и отбрасывает двигающуюся к центру звезды материю наружу. Звезда из режима коллапса переходит в режим взрыва. Запертые в коре звезды электронные нейтрино двигаются за ударной волной и выходят из звезды за время ≈ 10 мс.

Ударная волна нагревает внешнюю оболочку до 10^9 К и эта оболочка выбрасывается в окружающее пространство вместе с излучением и потоком нейтрино.

Невидимая (или слабо видимая) до этого с большого расстояния звезда мгновенно вспыхивает, излучая в максимуме светимости столько энергии, сколько излучает целая галактика из обычных звёзд.



В **1987 г.** наблюдали ярчайшую сверхновую 20 века – **SN 1987A** – в галактике Большое Магелланово Облако, удалённой от нас на **170 тыс. световых лет**. Фото слева – вспышка этой сверхновой. Фото справа – та же область до вспышки. Звезда, которая взорвётся, показана стрелкой.

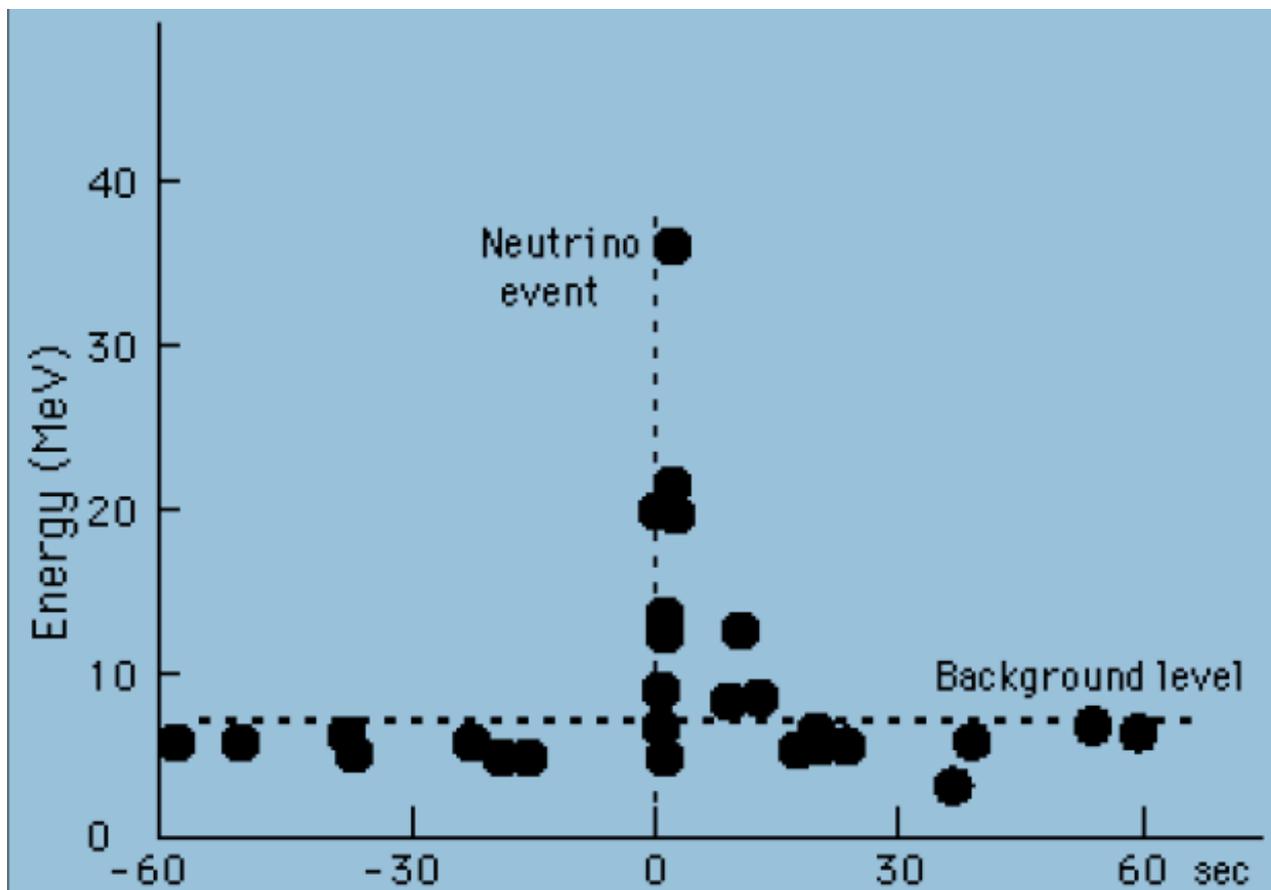


Снимок остатков сверхновой **SN 1987A**, сделанный **7** лет спустя.

В центре – расширяющийся плазменный шар из вещества сверхновой. Кольца вокруг него – яркое центральное и два бледных вдвое большего диаметра, – газ, выброшенный предсверхновой на разных стадиях её эволюции за тысячи лет до вспышки и разогретый световой волной от вспышки.

Нейтринный сигнал от SN 1987A

10 нейтрино с энергиями **8,6 – 35,4 МэВ** зарегистрированы 22 февраля 1987 г. подземным детектором Суперкамиоканде, (Япония, глубина 1 км) при взрыве SN 1987A



После взрыва сверхновой уплотнившееся ядро звезды может образовать **нейтронную звезду** или **чёрную дыру** в зависимости от массы вещества, оставшегося в центре взорвавшейся сверхновой. В **нейтронную звезду** превращаются звёзды с начальной массой до **30 – 40 M_{\odot}** , в **чёрную дыру** – самые массивные звёзды с начальной массой больше **30 – 40 M_{\odot}** .

Наряду с взрывом одиночной массивной звезды посредством коллапса железного ядра существует и другой механизм взрыва сверхновой, реализующийся в двойной звездной системе с белым карликом. Их называют **SN Ia**.

Эти сверхновые – результат термоядерной детонации белого карлика, захватывающего вещество звезды-соседки, и увеличивающей свою массу до критической.

Энергия взрыва фиксирована (**$2 \cdot 10^{52}$ эрг**). Поэтому сверхновые **SN Ia** играют в космологии роль «*стандартных свечей*».

Наблюдение за ними привело к открытию тёмной энергии.

Для образования тяжёлых ядер решающую роль играют реакции множественного захвата нейтронов более лёгкими ядрами.

Нужные нейтронные потоки могут формироваться при взрывах сверхновых, слиянии нейтронных звёзд в двойных системах и в оболочках красных гигантов (см. Приложение к данной Лекции).



Инфляционная космология

***Это самый современный вариант
теории Большого взрыва***

Популярные научные издания:

И.Д. Новиков

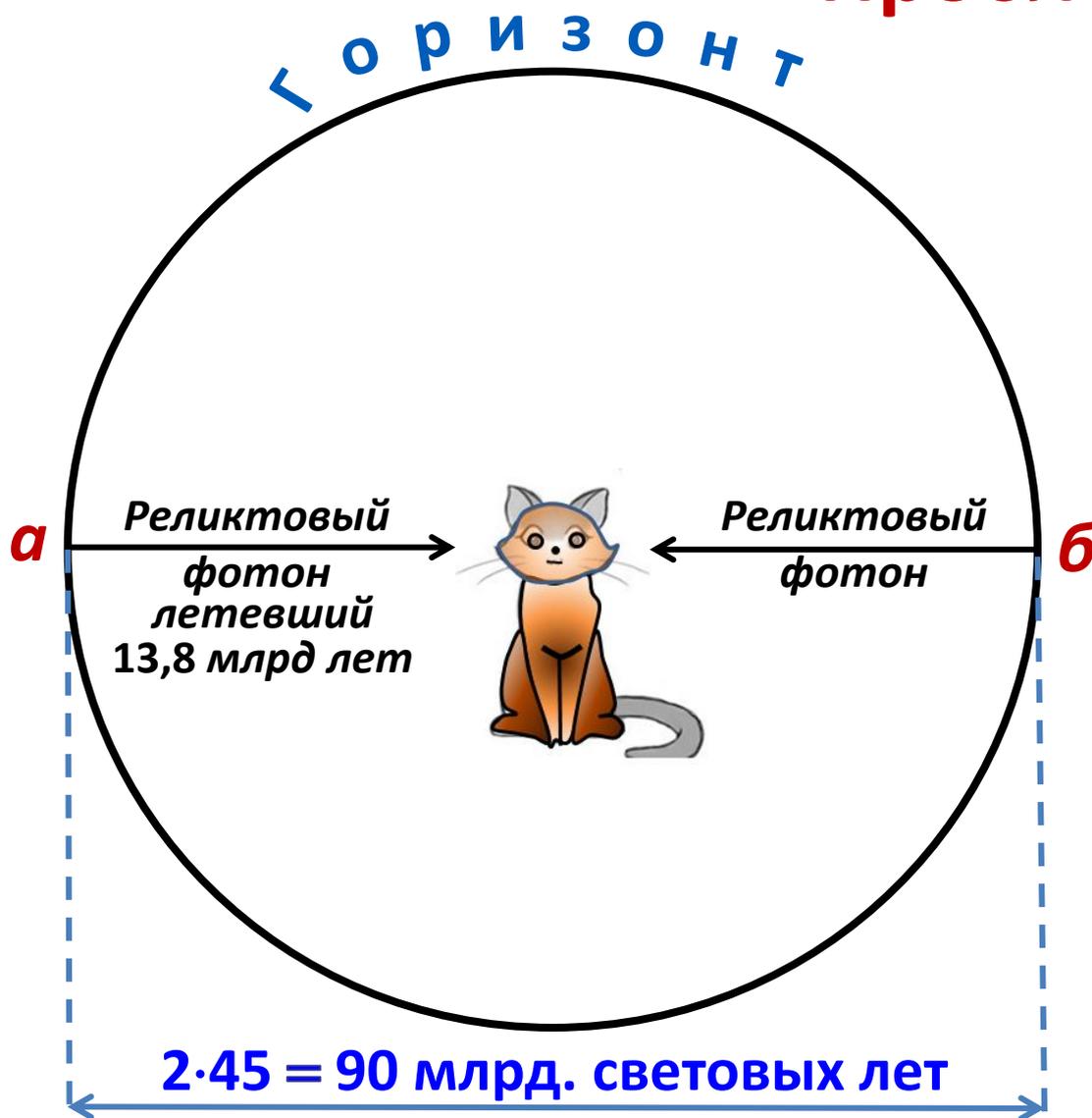
«Как взорвалась Вселенная»

Брайан Грин

**«ТКАНЬ КОСМОСА. Пространство, время и
текстура реальности»,**

**«Скрытая реальность. Параллельные миры и
глубинные законы космоса».**

Проблема горизонта



Луч из точки *а* не успел дойти до точки *б*, а температуры в этих точках одинаковы!

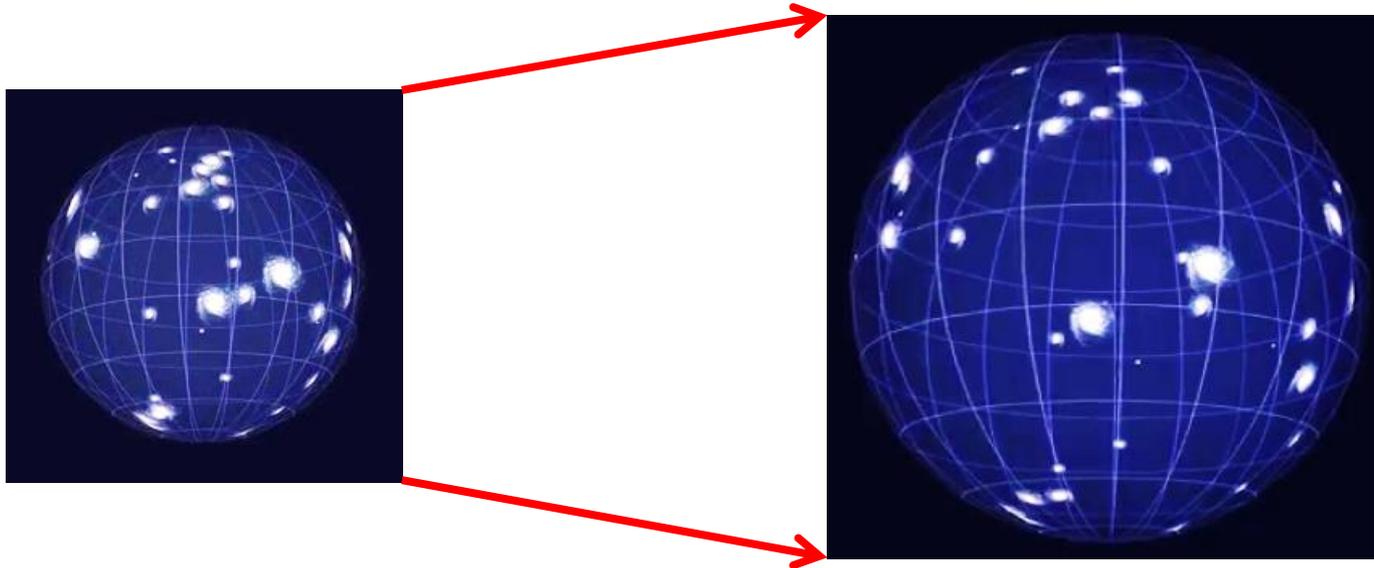
Области пространства расширились слишком быстро для установления теплового равновесия

За время существования Вселенной (13,8 млрд лет) Вселенная, расширяясь, достигла радиуса в 45 млрд световых лет

Области пространства удаляются друг от друга со скоростями больше скорости света.

Предел скорости, устанавливаемый светом, относится к движению сквозь пространство, но не к скорости расширения самого пространства. Общая теория относительности не накладывает никаких ограничений на скорость расширения пространства. Галактики «вморожены» в пространство и могут удаляться друг от друга со сверхсветовыми скоростями.

Двумерная модель расширения пространства



Расширение пространства не влияет на размер галактик, звёзд, планет и других компактных структур Вселенной

[Видео на Лекции](#)

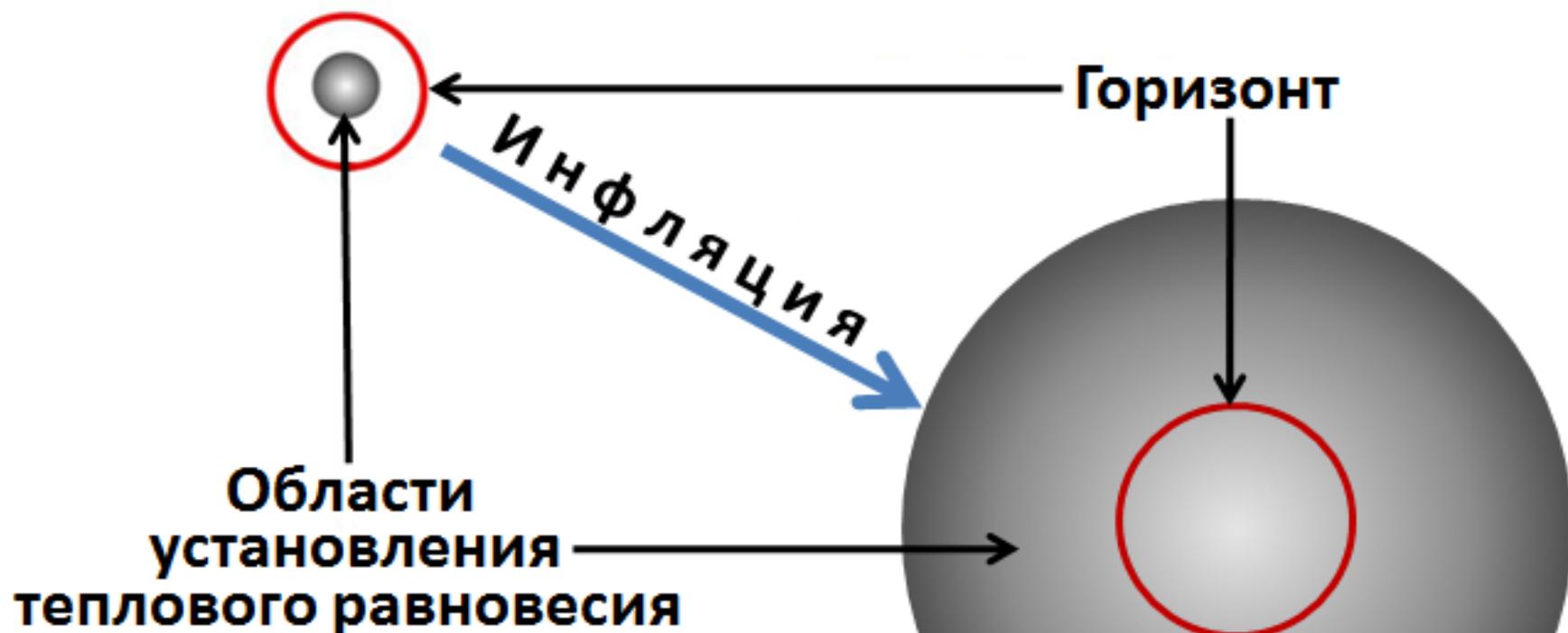
Проблема горизонта

портит стандартную теорию Большого взрыва, потому что области пространства отдаляются слишком быстро для установления теплового равновесия.

Инфляционная теория решает эту проблему, уменьшая скорость разделения областей пространства в начальные моменты времени и обеспечивая таким образом достаточно времени для выравнивания температуры.

Затем наступает непродолжительный период чрезвычайно быстрого ускоряющегося расширения, которое компенсирует «вялый старт» и быстро разносит участки пространства на огромные расстояния.

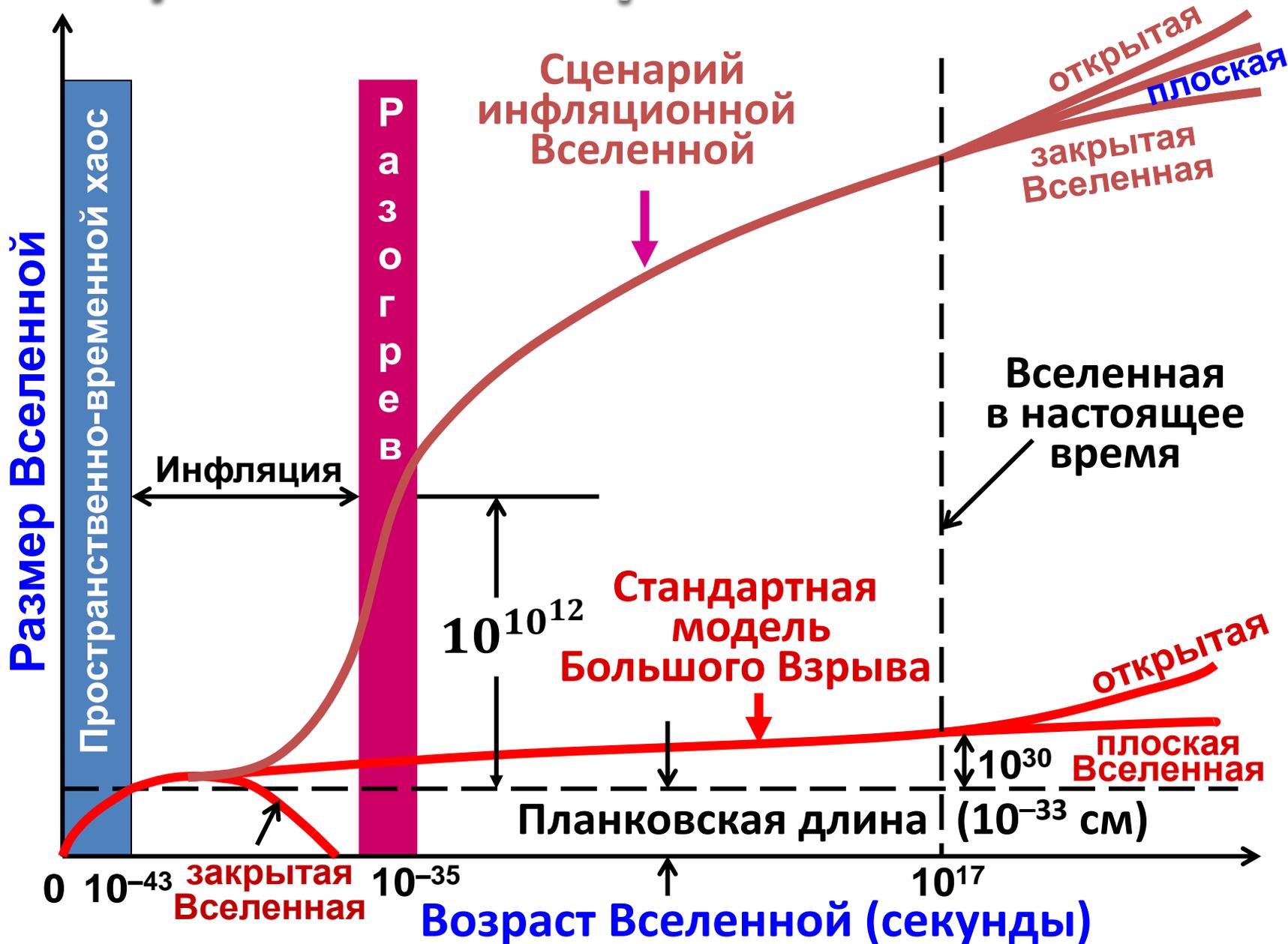
Скорость расширения пространства опережает скорость увеличения горизонта



Видео на Лекции

Инфляция – быстрое расширение Вселенной, обусловленное особым состоянием имевшегося во Вселенной в самую раннюю эпоху состоянием скалярного поля, заполняющего всё пространство и играющего роль антигравитирующего вакуума. Эволюция Вселенной в инфляционном сценарии отличается от стандартного сценария Большого Взрыва. Инфляция может увеличить размер Вселенной в $10^{10^7} - 10^{10^{12}}$ раз и даже области Планковской длины (10^{-33} см) во много раз превысят радиус наблюдаемой Вселенной (10^{28} см). Инфляция также предсказывает плоское (Евклидово) пространство. В стандартном сценарии Большого Взрыва предсказывается увеличение Планковской области только до **0,001 см**.

Эволюция Вселенной в различных моделях



Из наблюдений за дальними
термоядерными сверхновыми
Ia установлено ускоряющееся
расширение Вселенной
в современную эпоху



*Saul
Perlmutter*

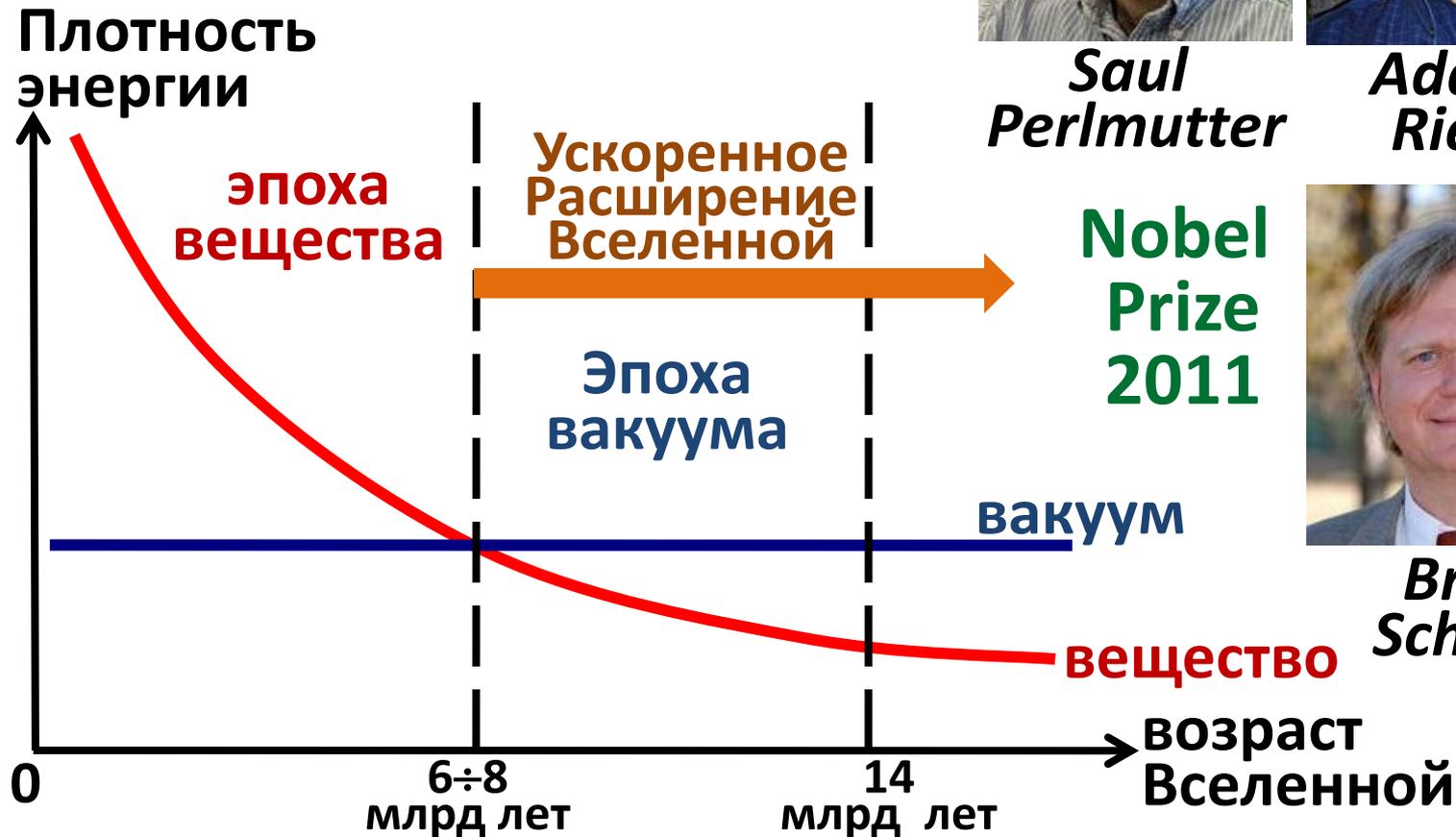


*Adam
Riess*

**Nobel
Prize
2011**



*Brian
Schmidt*



Примерно через 100 миллиардов лет все галактики, за исключением самых близких, будут раскиданы в разные стороны раздувающимся пространством со скоростями больше световой, так что мы не сможем их увидеть независимо от мощности телескопов. Если эти идеи верны, то в далёком будущем Вселенная станет безбрежным пустым и уединённым местом.

Брайан Грин

История Вселенной с учётом инфляции и вакуумной антигравитации

Современное ускоренное расширение за счёт тёмной энергии

Момент разделения света и вещества, 370 000 лет

Эпоха темноты

Рождение и жизнь галактик, звёзд, планет и др.

Инфляция (10^{-35} сек)

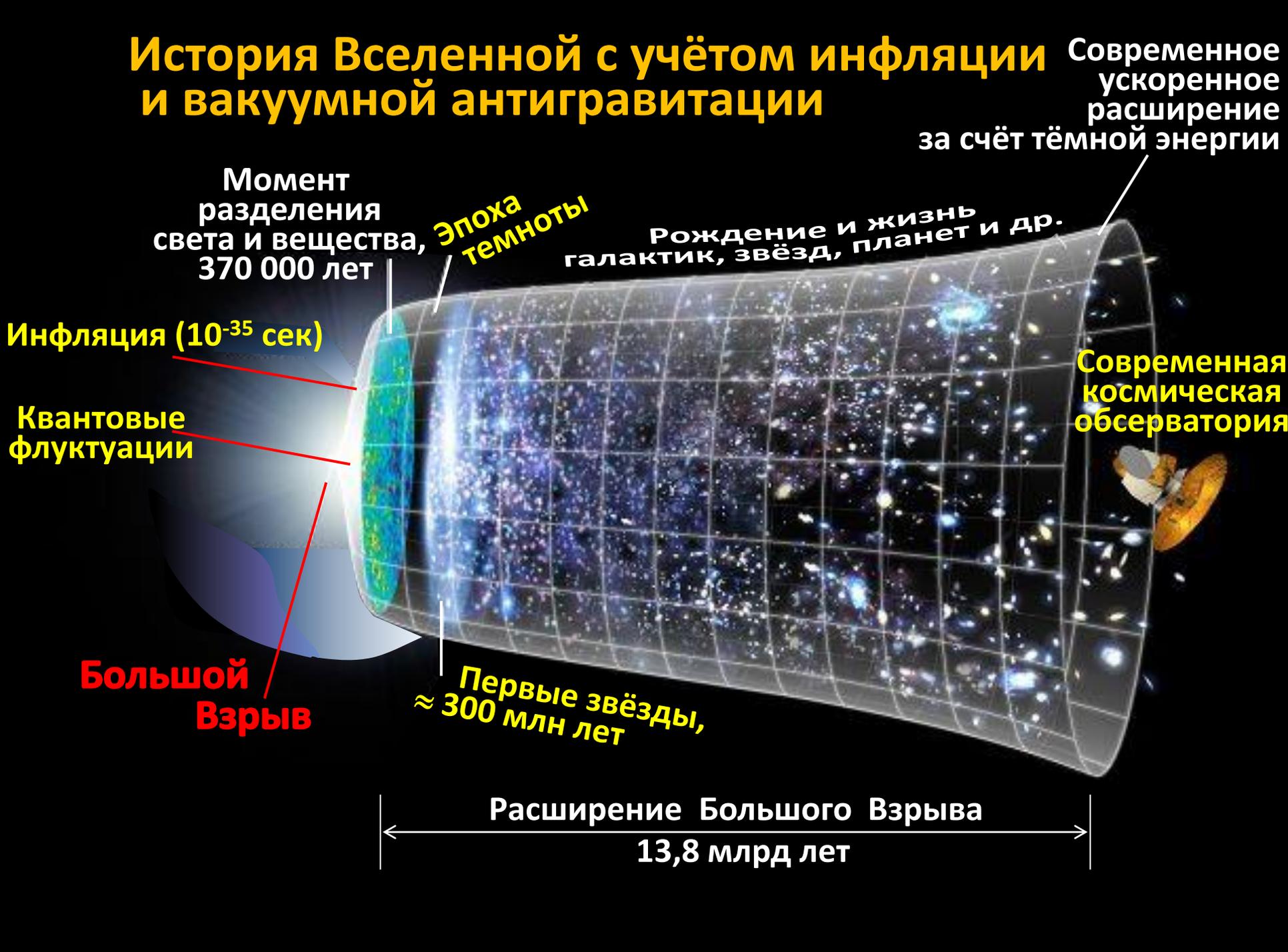
Квантовые флуктуации

Современная космическая обсерватория

Большой Взрыв

Первые звёзды, ≈ 300 млн лет

Расширение Большого Взрыва
13,8 млрд лет



Инфляционный сценарий формирования крупномасштабных структур Вселенной

Квантовый мир неоднороден из-за флуктуаций, присущих принципу неопределённости.

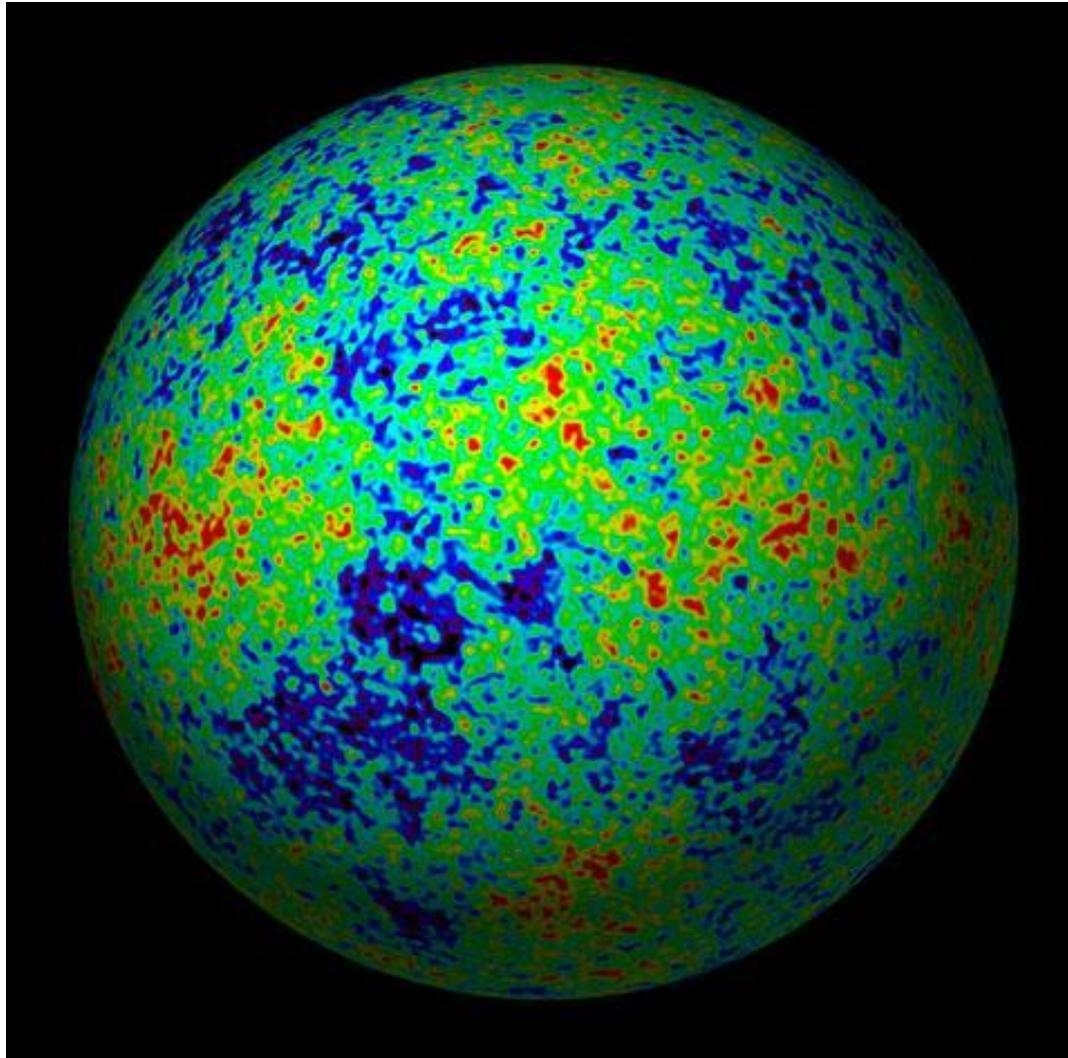
Пережив невообразимо масштабное инфляционное расширение, такие неоднородности могли быть растянуты до огромных макроскопических размеров, обеспечив семена для формирования больших астрофизических образований вроде галактик, звёзд, планет и других массивных тел.

Согласно инфляционной теории более чем 100 миллиардов галактик, сияющих в пространстве как небесные бриллианты, являются не чем иным как росписью квантовой механики.

Брайан Грин

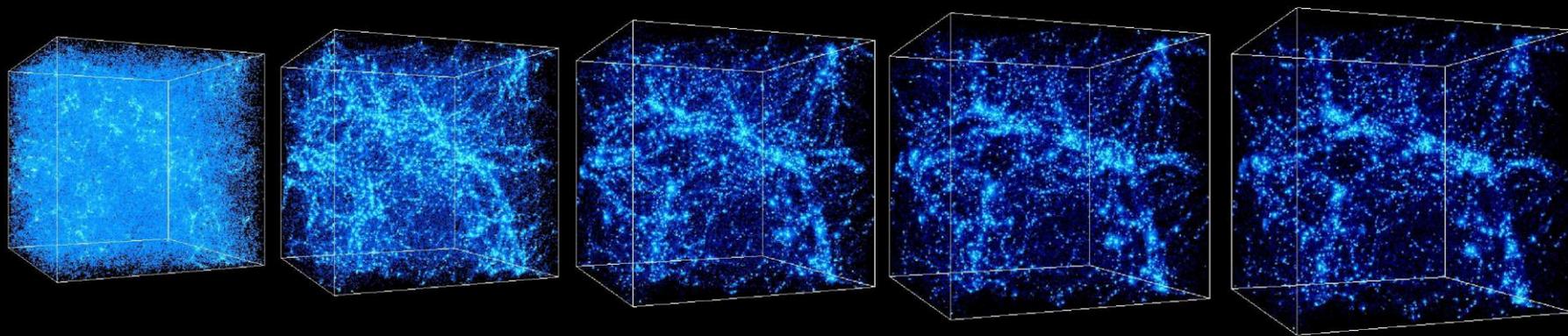


Инфляция рассматривает температурную карту реликтового излучения как проявление квантовых флуктуаций в момент Большого взрыва



Фотография Вселенной в момент Большого Взрыва?!

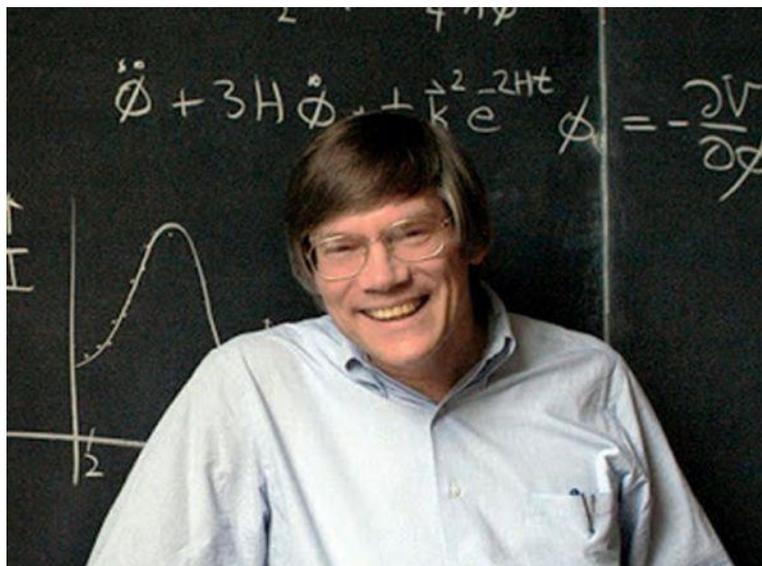
**Вот так из квантовых неоднородностей
могла возникнуть
крупномасштабная структура Вселенной**



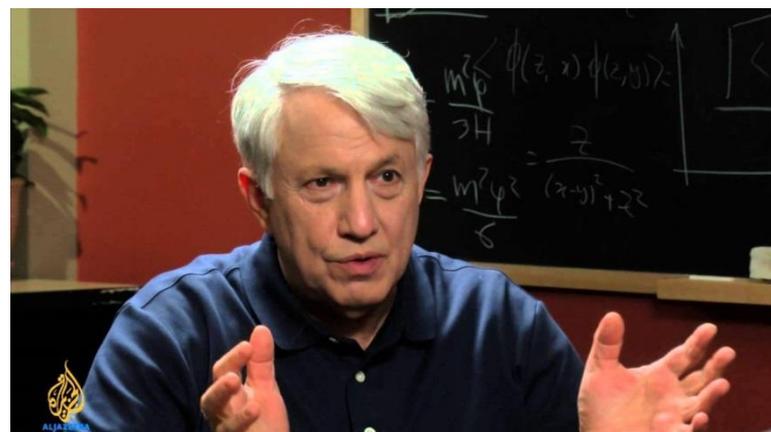
В р е м я

Основоположники инфляционной космологии (1979-1982)

**Алексей Старобинский
(Россия), окончил
физ-фак МГУ, 1972**



**Андрей Линде
(Россия), окончил
физ-фак МГУ, 1972**



Alan Guth (USA)

А. Линде (из журнала Scientific American, 1994)

Если я и мои коллеги правы, мы можем скоро распрощаться с идеей, что наша Вселенная была одним огненным шаром созданным в результате Большого взрыва. Мы исследуем новую теорию, основанную на возникшем в 1979 г. взгляде, что Вселенная прошла через стадию инфляции. В течение этого времени, как утверждает эта теория, космос приобрел экспоненциально большие размеры за бесконечно малую долю секунды. После завершения этого периода Вселенная продолжила свою эволюцию согласно модели

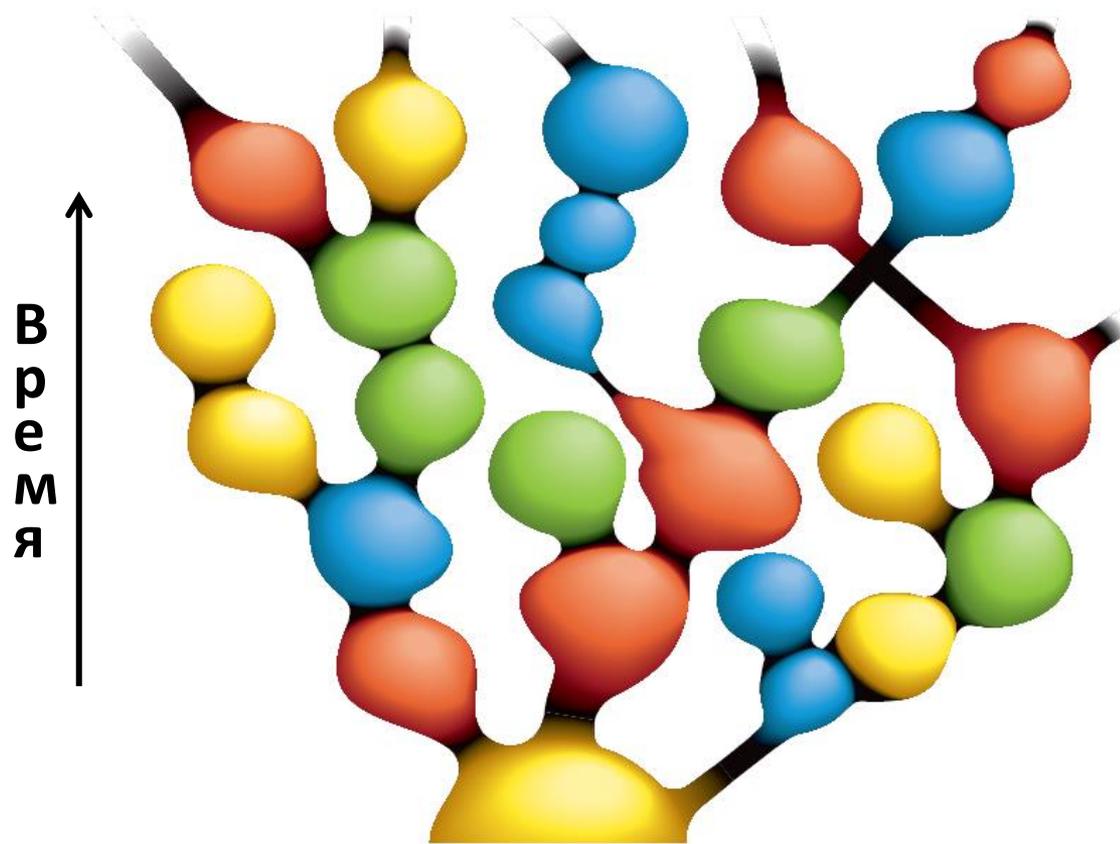
Большого взрыва. По мере улучшения инфляционного сценария его разработчики открыли удивительные следствия. Одно из них состоит в фундаментальном изменении того, как нам видится космос. Последние версии инфляционной теории утверждают, что вместо того чтобы быть одним расширяющимся огненным шаром Вселенная – это огромный, растущий фрактал. Он состоит из множества инфляционных шаров, производящих новые шары, которые в свою очередь производят другие шары и так далее ...

Из этой инфляционной теории следует, что если Вселенная содержит, по крайней мере, один инфляционный домен достаточно большого размера, она начнёт непрерывно производить новые инфляционные домены.

Инфляция в каждой точке может кончиться быстро, но много других мест будут продолжать расширяться. Полный объём всех этих доменов будет расти без конца. По существу, одна инфляционная Вселенная рождает другие инфляционные пузыри, которые в свою очередь рождают другие.

Этот процесс, который я назвал вечной инфляцией, идёт как цепная реакция, производя фракталоподобную картину Вселенной. В этом сценарии Вселенная, как целое, бессмертна. Каждая часть Вселенной может произойти из сингулярности где-то в прошлом и может закончиться сингулярностью где-то в будущем. Однако, нет конца эволюции всей Вселенной.

Самовоспроизводящийся космос (Multiverse)



Самовоспроизводящийся космос возникает как растущие ветви инфляционных пузырей. Разные цвета отражают «мутацию» законов физики родительских Вселенных. Свойства пространства в каждом пузыре не зависят от времени образования пузыря. В этом смысле каждая Вселенная как целое может быть стационарной даже хотя «внутренность» каждого пузыря описывается теорией Большого Взрыва.

Идея Мультивселенных (Multiverses). Параллельные миры.

Многие из магистральных разработок в фундаментальной теоретической физике – релятивистской и квантовой физике, космологии, теории объединения, вычислительной физике – приводят к идее о том или ином типе параллельных вселенных

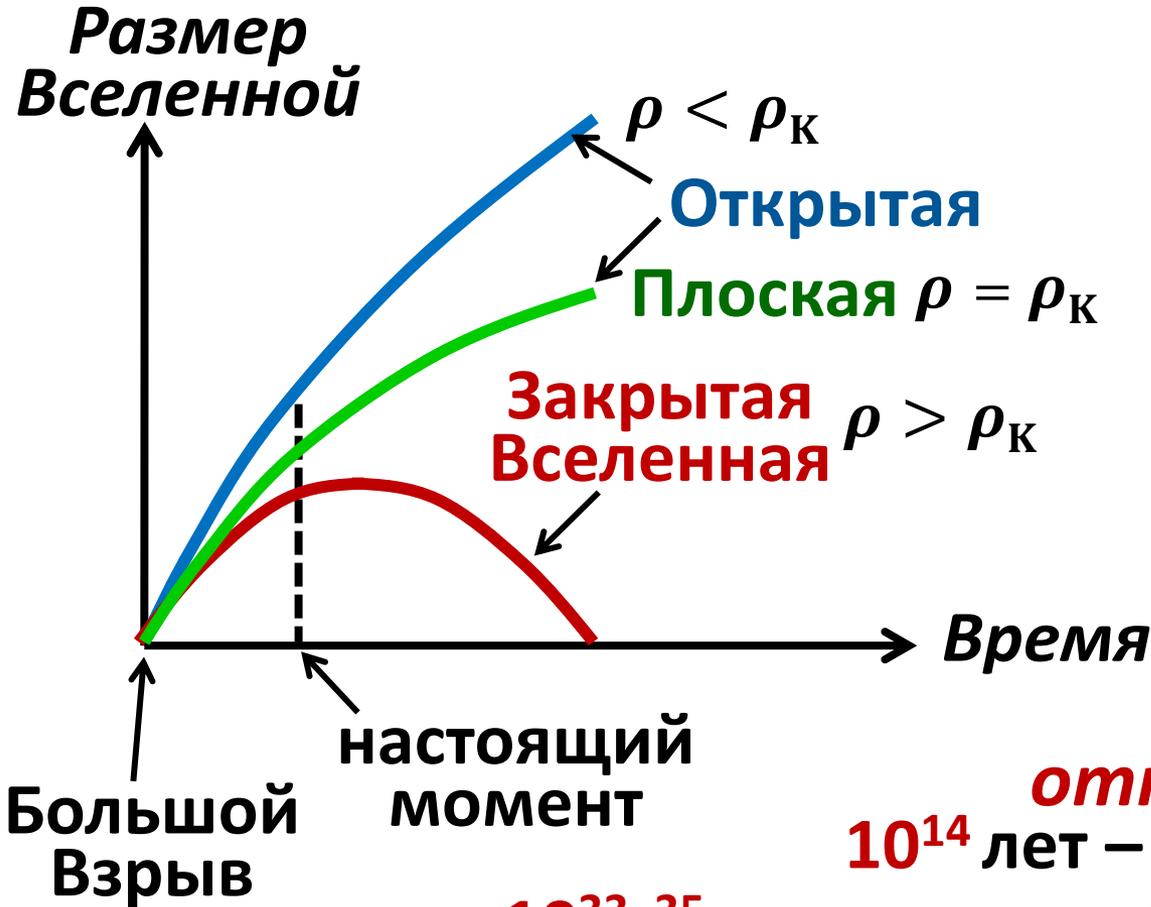
К идее о параллельных мирах приводят:

- Квантовая механика с её вероятностными предсказаниями.
- Инфляционная космология с её дочерними вселенными.
- Теория струн с её разнообразием форм и размеров дополнительных пространственных измерений и сценарием мира на бране.

К параллельным мирам приводит даже естественная идея о бесконечности нашей Вселенной

число различных конфигураций частиц внутри космического горизонта огромно, но конечно $\approx 10^{10^{122}}$ (единица с 10^{122} нулями) и в бесконечной Вселенной неизбежно их повторение

Конечные стадии эволюции Вселенной



$$\frac{\rho}{\rho_K} = 1,00 \pm 0,01$$

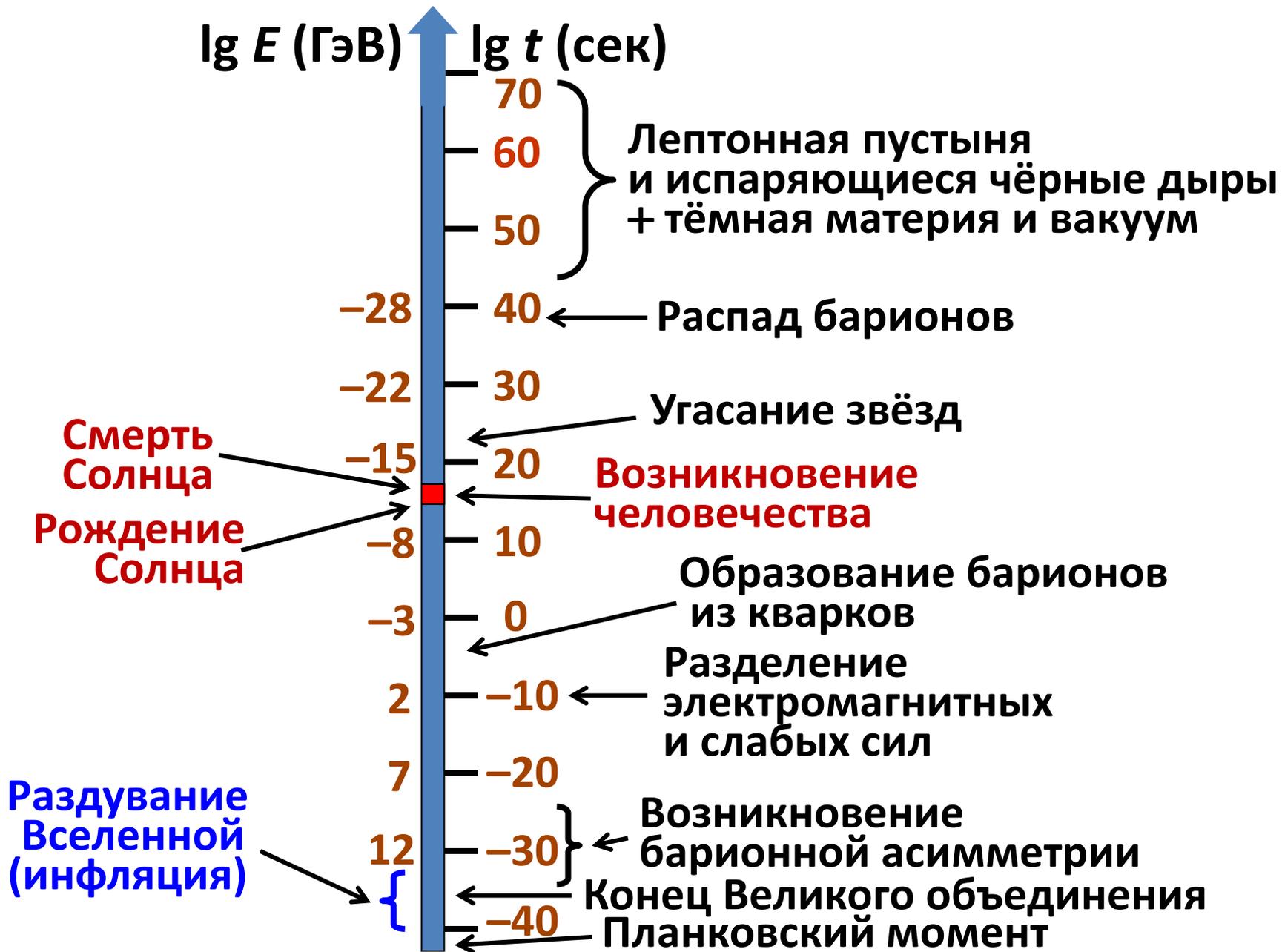
Конечные стадии открытой Вселенной:

10^{14} лет – угасание всех звёзд,

10^{33-35} лет – распад барионов (протонов),

10^{69-96} лет – испарение чёрных дыр,

10^{100} лет – лептонная пустыня (электроны, позитроны, нейтрино, антинейтрино) и фотоны + тёмная материя и вакуум



Да будет так,
Ведь есть всему начало,
И есть конец логической игры.
И слово, что исток обозначало,
Над бездною когда-то прозвучало,
Из мрака вызвав звёздные миры.

Когда же обесценится творенье
И разум тот пресытится игрой –
То распадутся призрачные звенья,
Исчезнет Время, кончится Движение
И будет Свет
Над вечной пустотой.

М. Катус

Приложение: Образование тяжёлых элементов. *s*- и *r*-процессы.

В процессе термоядерного синтеза в звёздах образуются элементы вплоть до железа. Дальнейший синтез невозможен, так как ядра группы железа имеют наибольшую удельную энергию связи. Образованию же тяжелых ядер в реакциях с заряженными частицами (протонами и другими легкими ядрами) препятствуют возросшие кулоновские барьеры. Для образования тяжелых элементов решающую роль играет захват ядрами нейтронов – реакция (n, γ) :



В результате цепочки чередующихся процессов захвата ядрами одного или нескольких нейтронов с последующим их β^- -распадом растут массовые числа A и заряд Z ядер и из исходных ядер группы железа образуются все более тяжелые элементы вплоть до конца Периодической таблицы.

Если образовавшееся в процессе (1) ядро $(A + 1, Z)$ нестабильно, то при малых плотностях нейтронов более вероятен β^- -распад этого ядра



чем захват им следующего нейтрона. Условие такого процесса: $\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta}$, где $\tau_{n\gamma}$ - время жизни ядра до захвата нейтрона, а τ_{β} - время жизни ядра до β^- -распада. Такой процесс называют *медленным* или *s-процессом* (от англ. slow).

Характерные значения τ_{ny} в этом процессе – **годы**. Так как в **s-процессе** β -распад, как правило, опережает захват следующего нейтрона, то образующиеся ядра располагаются в районе линии стабильности, не сильно удаляясь от неё. Полагают, что **s-процесс** происходит при горении гелиевой оболочки красных гигантов. В них создаются условия для генерации необходимых потоков нейтронов в реакциях слияния гелия с изотопами углерода и неона:



Плотности нейтронов, обеспечивающие **s-процесс**, оценивают на уровне 10^8 - 10^9 см^{-3} .

Если плотности нейтронов достигают $\approx 10^{20} \text{ см}^{-3}$, то время жизни ядра до захвата нейтрона снижается до $\approx 10^{-3} \text{ сек}$ и начинает выполняться условие $\tau_{ny} \ll \tau_{\beta}$. Ядро успевает захватить **10-20 нейтронов** прежде чем испытает β -распад. Такой процесс называют **быстрым** или **r-процессом** (от англ. rapid). Необходимые для **r-процесса** плотности нейтронов могут возникать при взрывах сверхновых и слиянии нейтронных звёзд в двойных системах. Этот механизм образования элементов называют взрывным нуклеосинтезом. **r-процесс** может протекать и в насыщенных нейтронами недрах сверхновых. Он ответственен за образование нейтроно-избыточных ядер.