

Наблюдательные основы космологии

ЛЕКЦИЯ 1

Предмет науки космологии. Расширение Вселенной

д.ф.-м.н. Сажина Ольга Сергеевна

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)

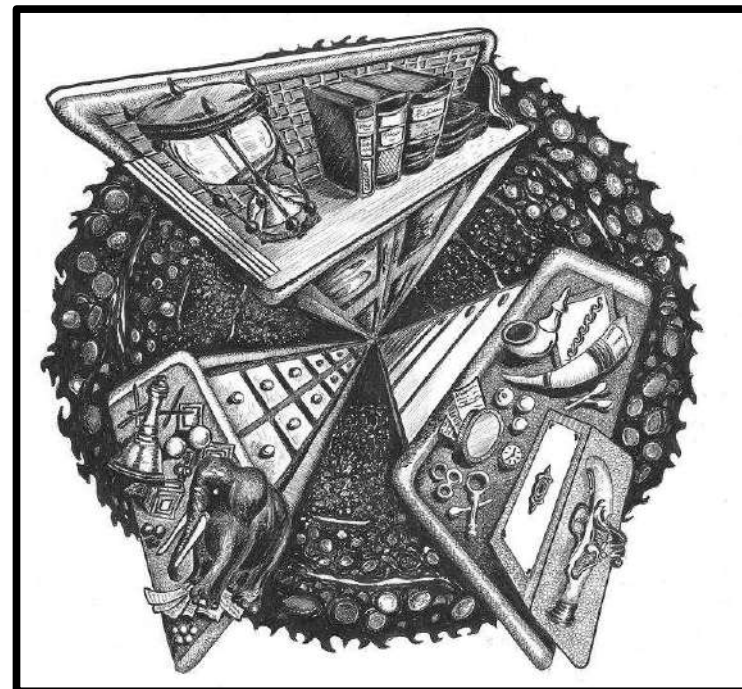
ЛЕКЦИЯ 7. Иерархия объектов во Вселенной.

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



Космология – это наука и Вселенной в целом. Она изучает развитие Вселенной от нескольких мгновений после ее рождения до сегодняшнего момента времени.

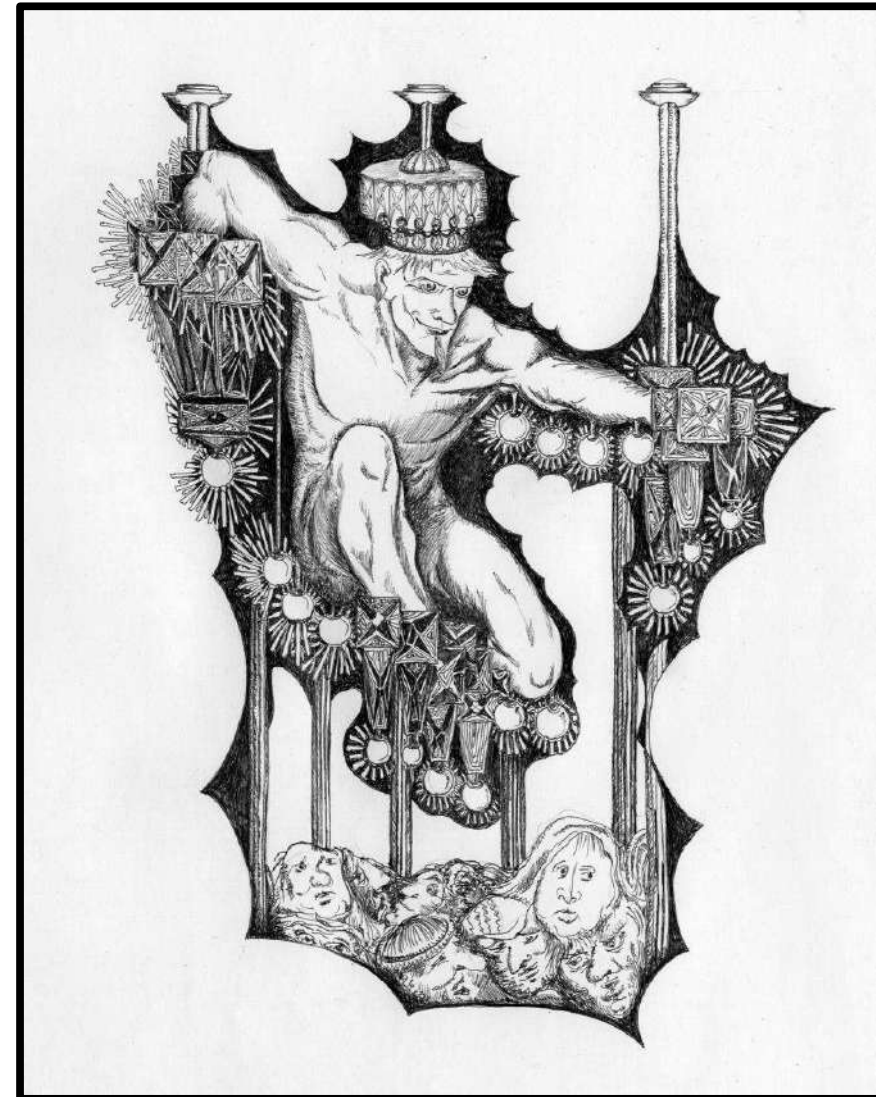
Современная космология основывается на наблюдениях и способна воссоздать развитие Вселенной на промежутке времени в **14 млрд лет**.

Космология стала возможной как симбиоз

(1) **астрономии,**
(2) **физики элементарных частиц,**
(3) **теоретической физики**
и благодаря
наблюдательной и экспериментальной
базе.

Отличительные черты космологии:

(1) **гигантские временные и**
пространственные масштабы,
(2) **отход от изучения циклических,**
повторяющихся процессов, характерных
для окружающего мира,
(3) **“ускоритель бедного человека”.**



Космология 40 лет назад...

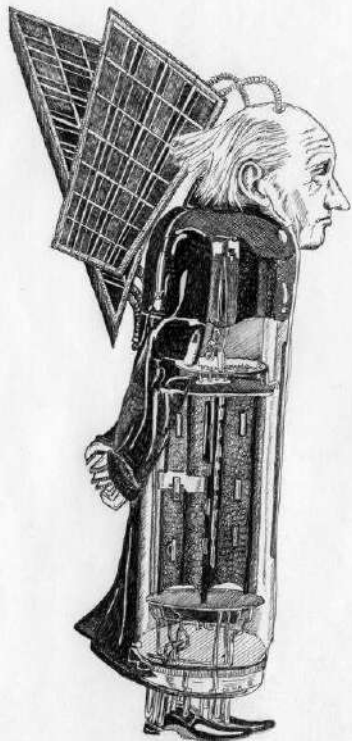


...и космология сегодня



Примерный вид окружающего нас космоса в очень далеком будущем

Нам повезло, что человечество живет сейчас, а не миллиарды лет спустя, иначе наблюдать космологам было бы почти нечего...



Клапауциус



Достижения в математических теориях, стремительное совершенствование инструментов наблюдения, а также та эпоха, в которую человечеству посчастливилось оказаться во Вселенной, – все это делает наше время золотым веком космологии.

?

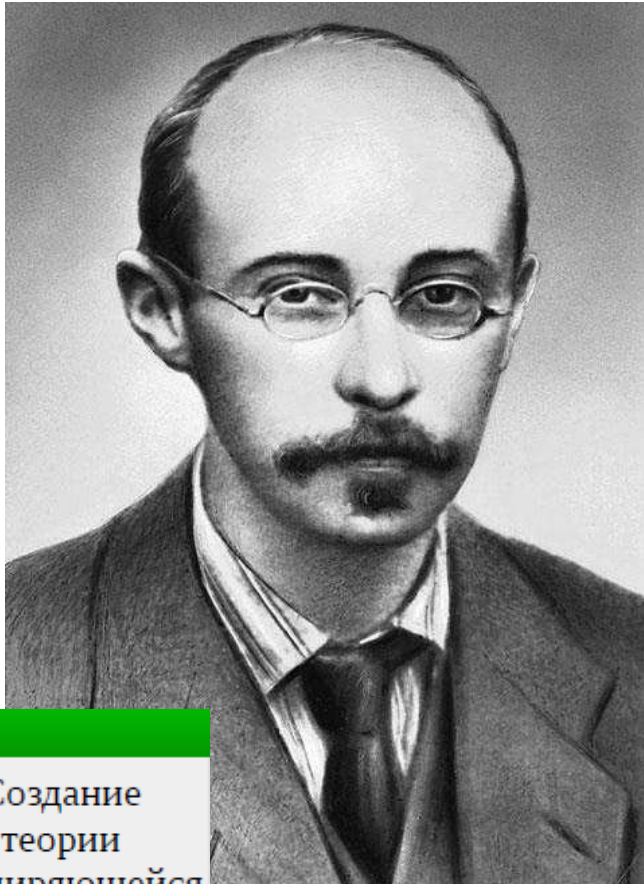


Трурль

Рождение космологии как науки

- А. А. Фридман

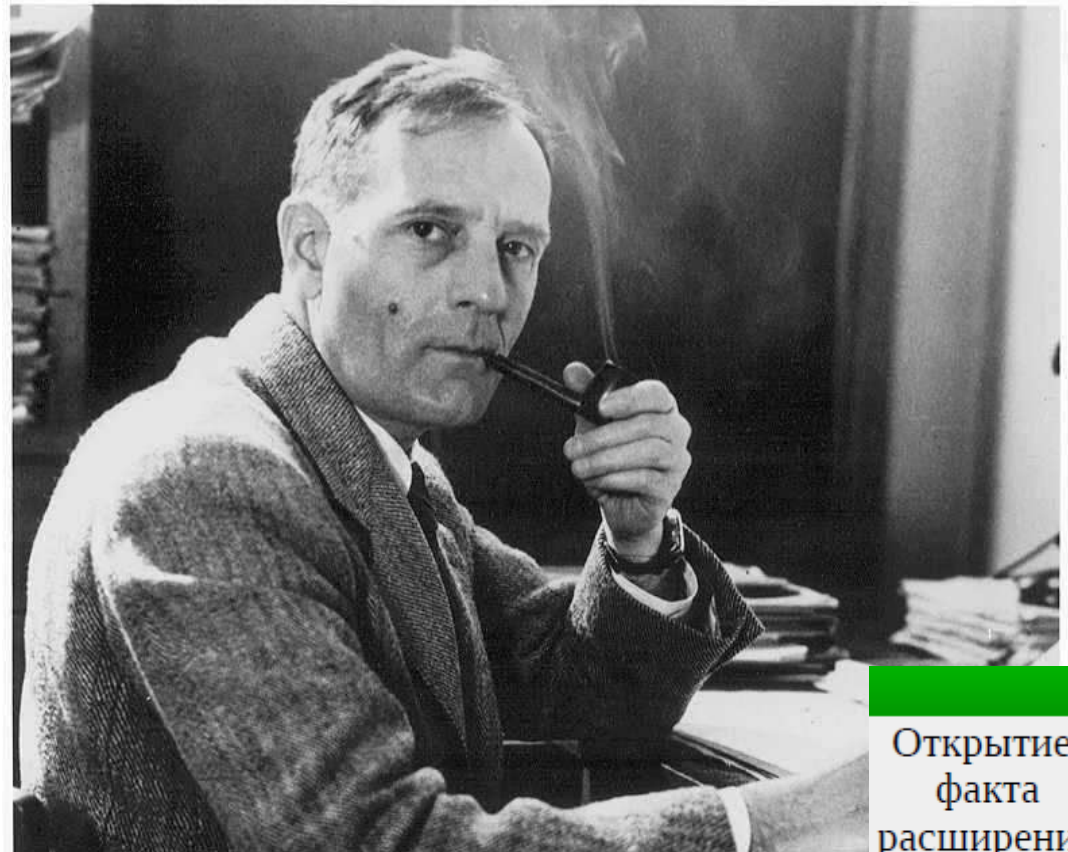
(СССР, 1922 г.)



Создание
теории
расширяющейся
Вселенной

- Эдвин Хаббл

(США, 1929 г.)



Открытие
факта
расширения
нашей
Вселенной

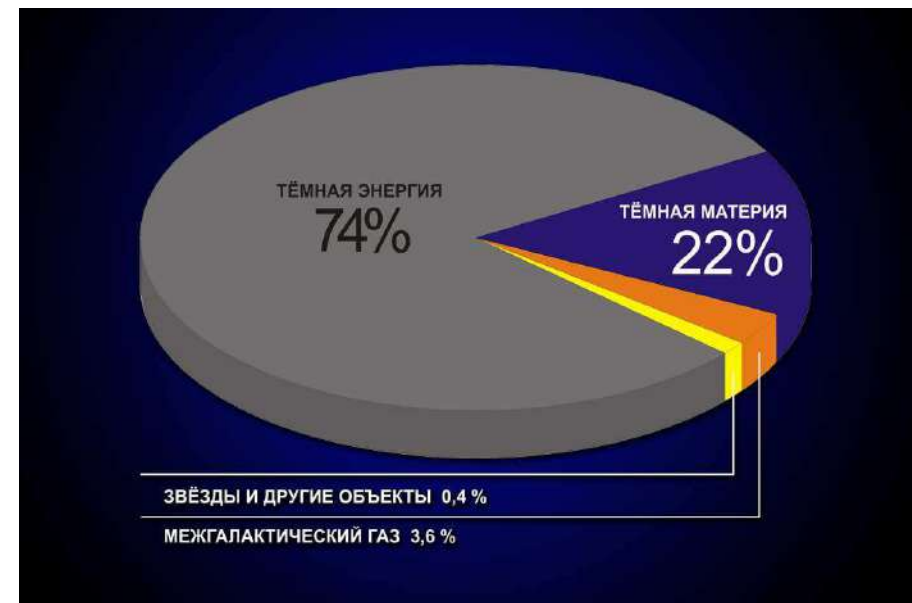
Пять ключевых наблюдательных тестов Стандартной космологической модели

1. Расширение Вселенной
2. Реликтовое излучение
3. Крупномасштабная структура Вселенной
4. Распространенность легких химических элементов
5. Анизотропия реликтового излучения

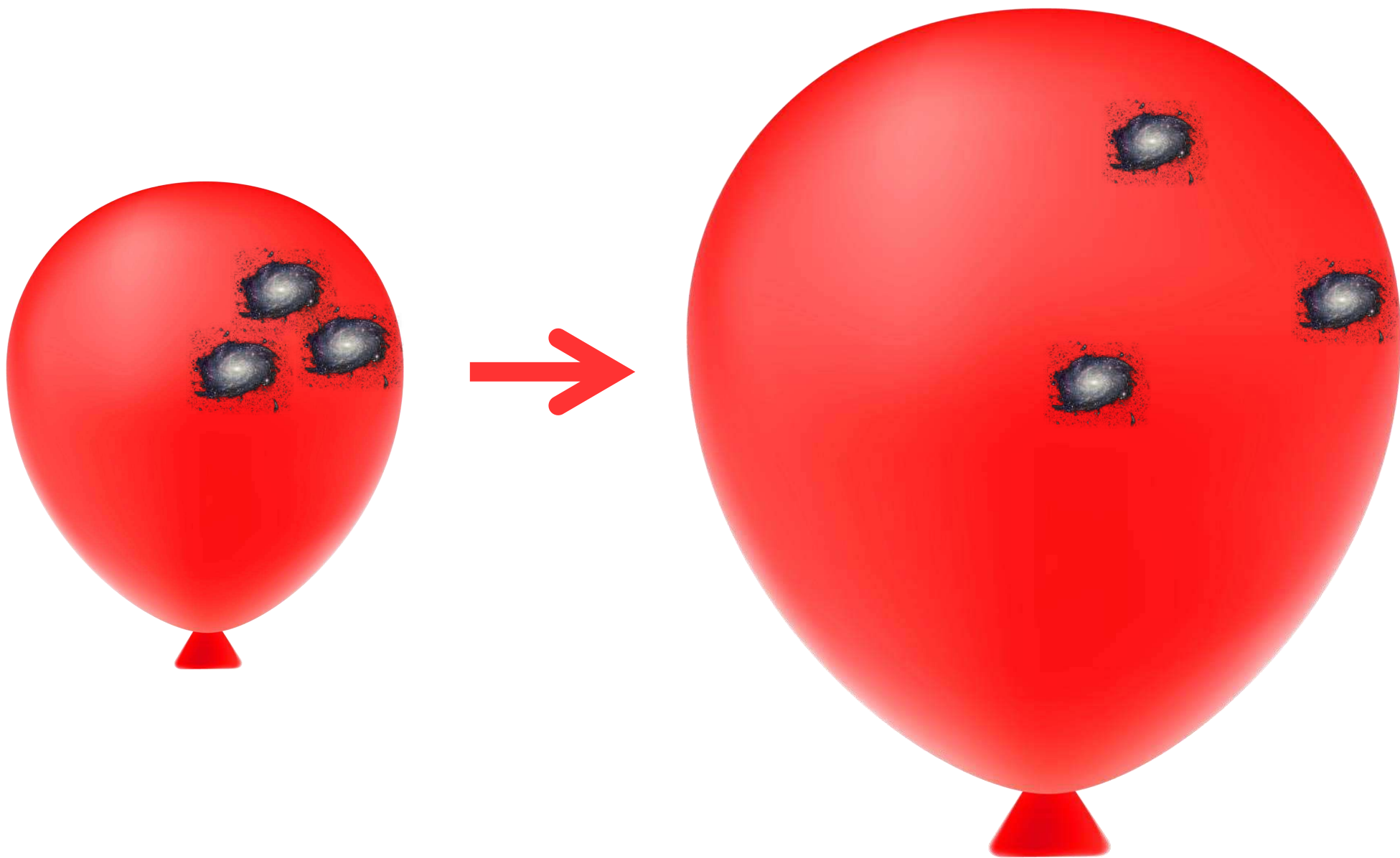


- 6*. Темная материя
- 7*. Темная энергия
- 8*. *Космологические*

гравитационные волны?



Расширение Вселенной

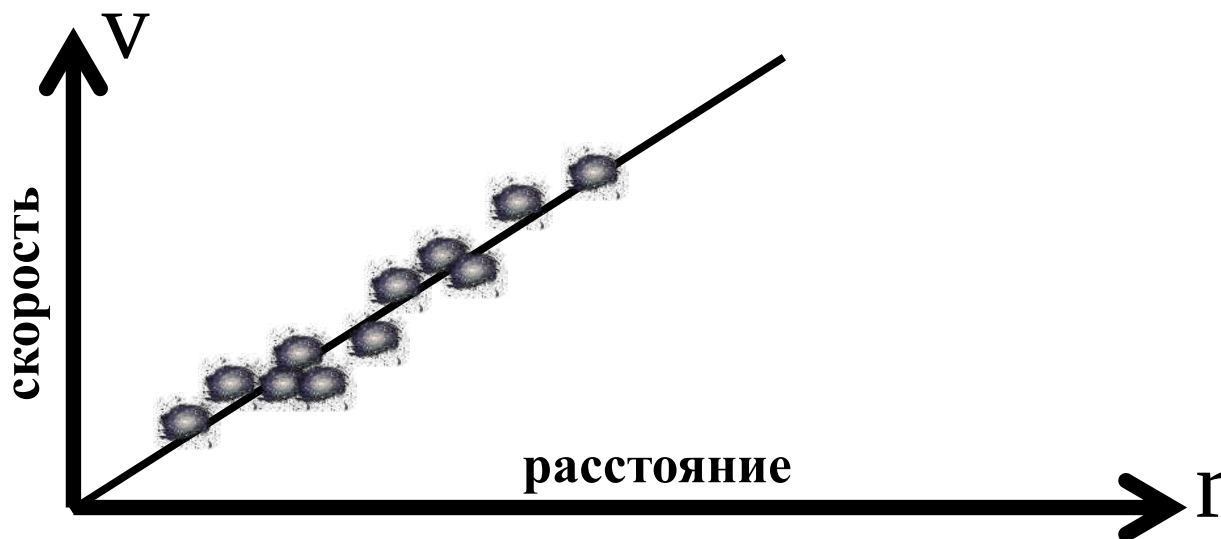


Закон расширения Вселенной называется **закон Хаббла**:

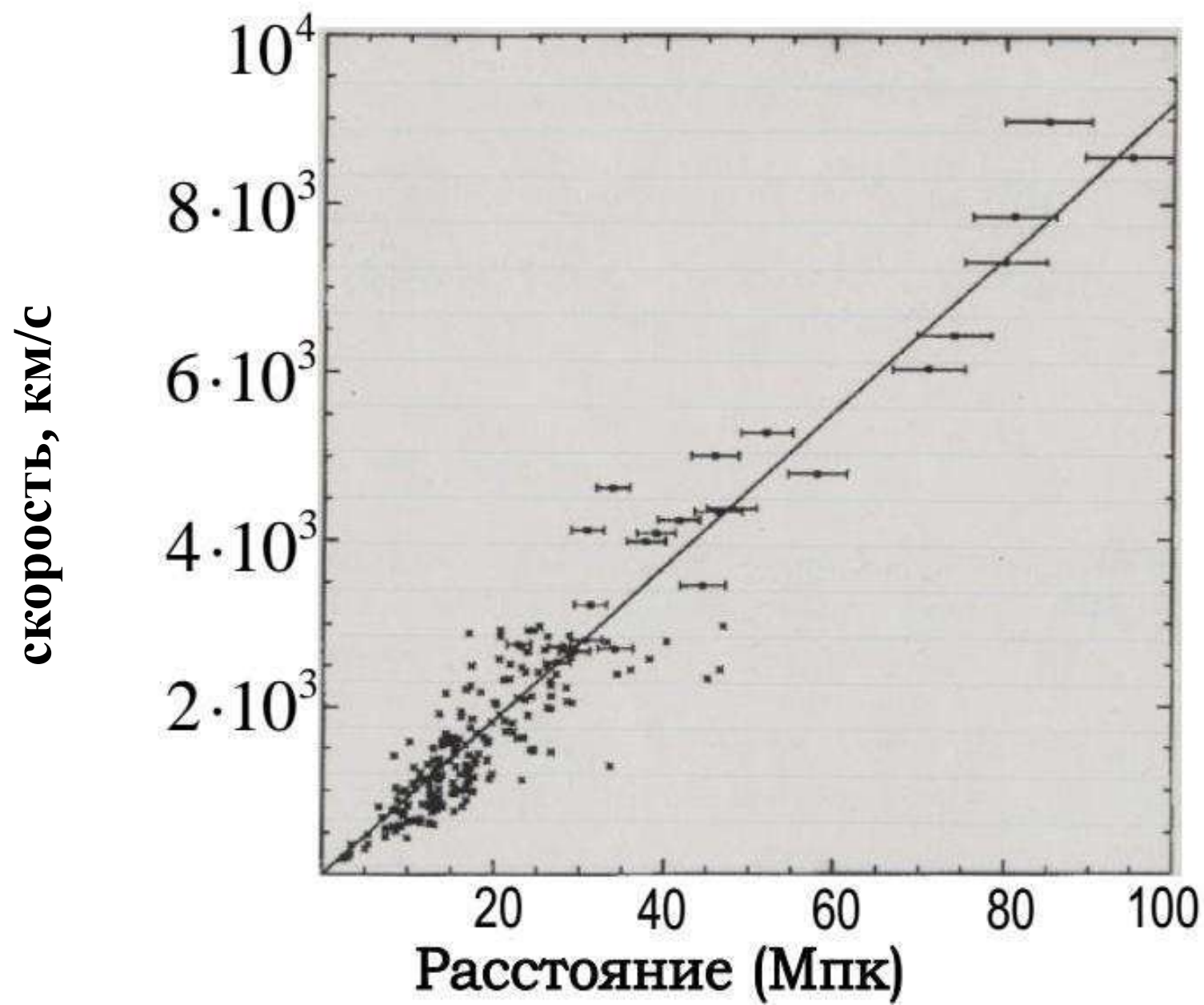
$$\vec{V} = H \vec{r}$$

Закон Хаббла – это краеугольный камень космологии, который обособил ее в отдельную науку. Это первое наблюдательное подтверждение **однородной и изотропной теоретической модели Фридмана**, полученной им на основе решений уравнений Эйнштейна.

Современное значение параметра Хаббла: $H_0 = 67.8$ км/с/Мпк (по данным 2015 г.). Параметр Хаббла зависит от времени. Обратная величина параметра Хаббла примерно равна возрасту Вселенной.



Закон справедлив для внегалактических масштабов. Чем дальше от нас объект — тем выше его скорость.



1 Мпк = 1 000 000 пк $\sim$ 200 млрд радиусов орбиты Земли

Реликтовое излучение

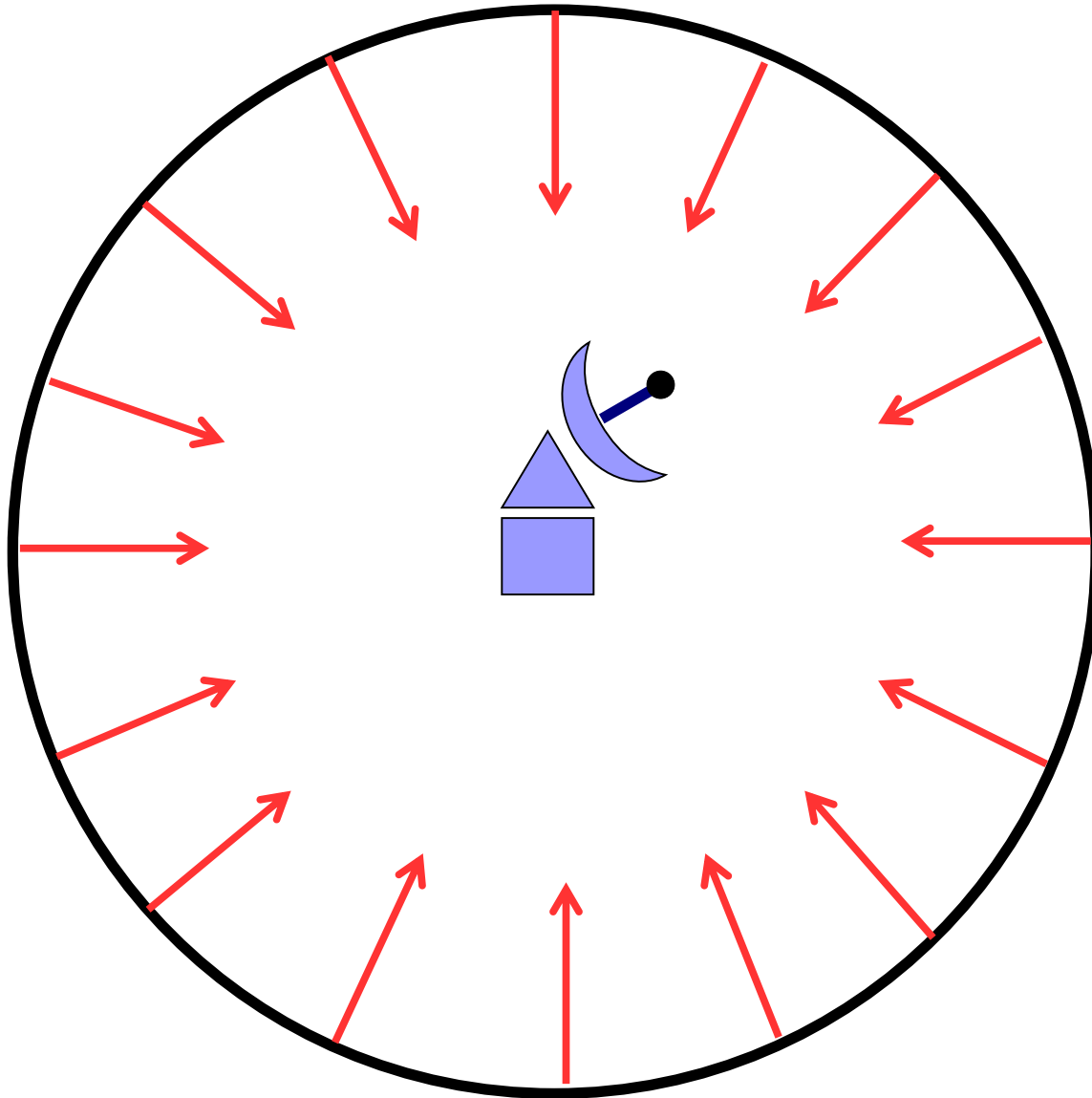
- Г.А. Гамов, 1946 г.



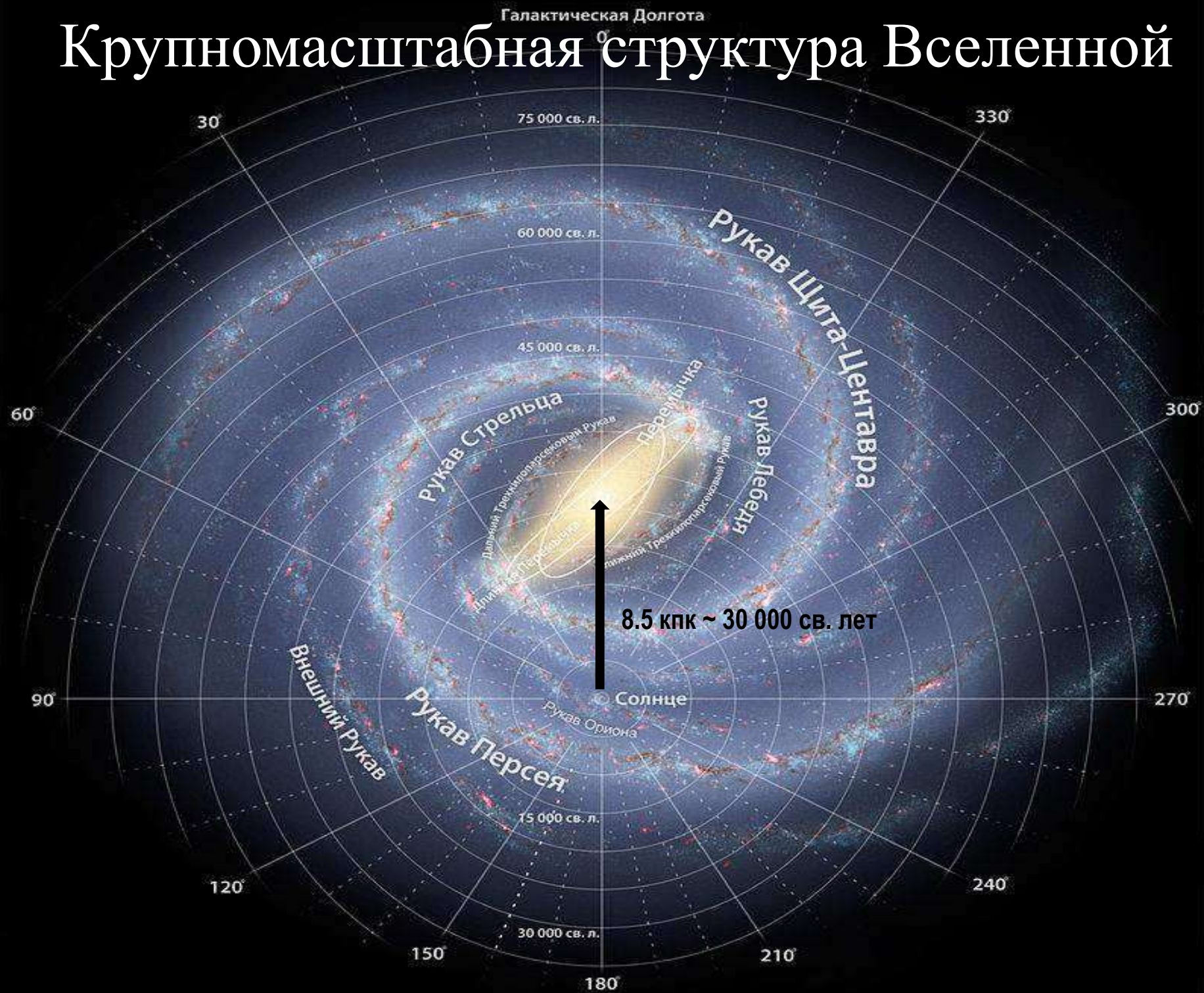
- А. Пензиас и Р. Вильсон, 1965 г. (1978 г. – Нобелевская премия)



Температура реликтового излучения $T = 2.726 \text{ К}$. Реликтовое излучение с большой точностью однородно и изотропно и приходит к нам со всех сторон, «из прошлого». Реликтовое излучение свидетельствует о том, что в прошлом наша Вселенная была более плотная и горячая.



Крупномасштабная структура Вселенной





Галактика М87 в созвездии
Дева

Галактика М31
в созвездии
Андромеда

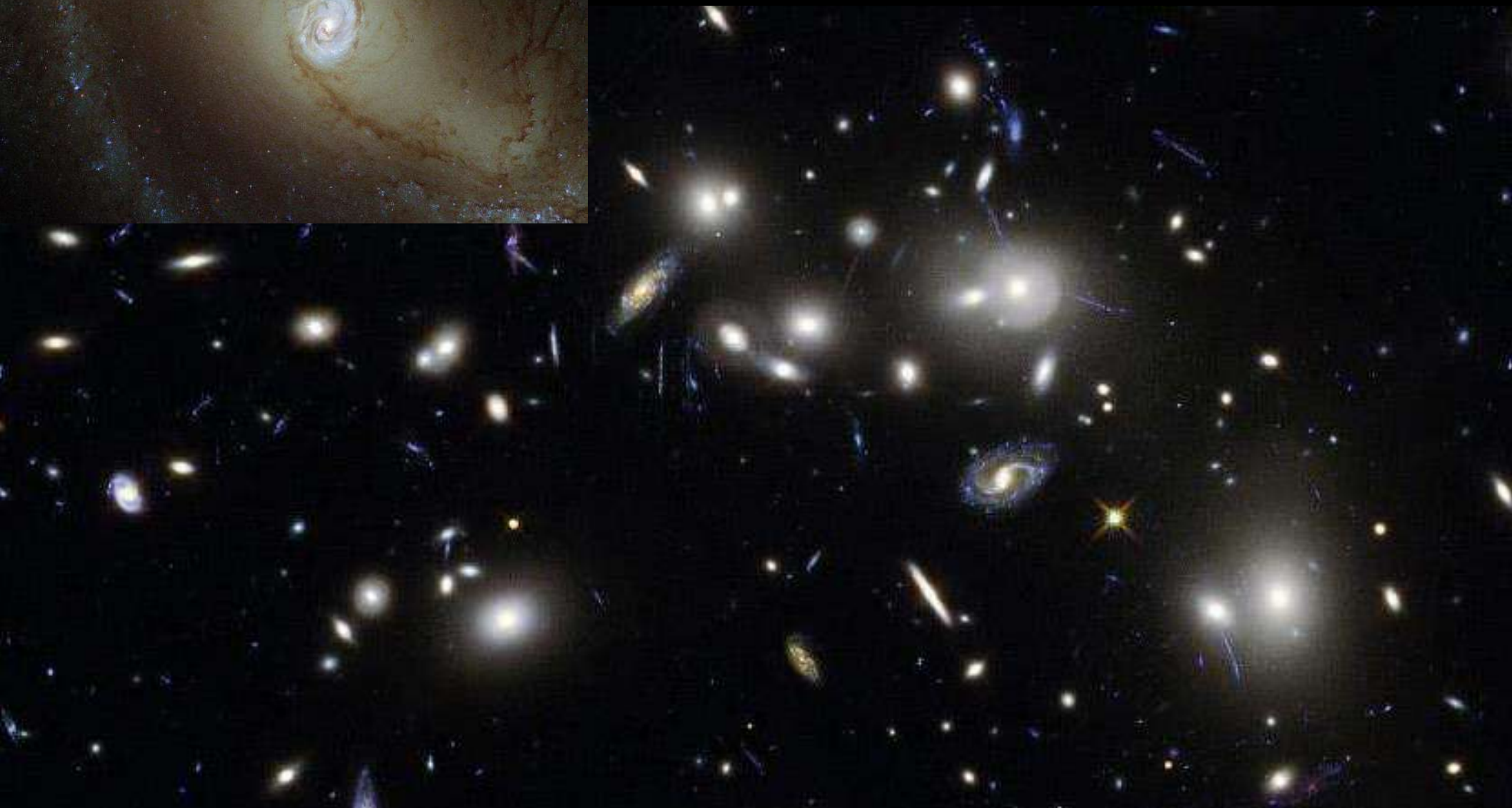


Нерегулярная карликовая галактика в
созвездии Стрельца

**Видимая
Вселенная
насчитывает около
100 млрд галактик**



Поперечный размер средней галактики около 100 000 св. лет. Типичная галактика состоит из сотен миллиардов звезд



Скопление галактик состоит из сотен и тысяч галактик. Типичный размер скопления около 30 млн св. лет.

Сверхскопление из тысяч галактик



На сверхбольших масштабах, начиная со 200 Мпк,
Вселенная становится однородной

Крупномасштабная структура – это строение Вселенной на масштабах, существенно превышающих размеры отдельных галактик, т. е. от нескольких мегапарсек до сотен мегапарсек.

Отдельные галактики при этом выступают как «пробные частицы», объекты меньших размеров в космологии не рассматриваются.

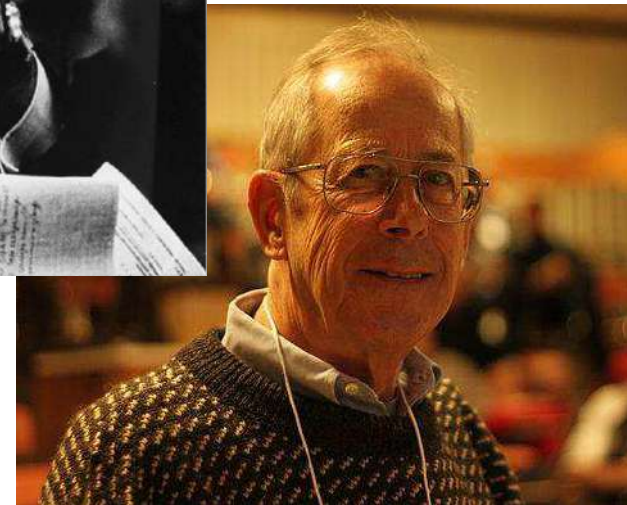
Элементы крупномасштабной структуры:

1. *скопления и сверхскопления галактик,*
2. *филаменты,*
3. *«стенки», образованные галактиками, между которыми находятся*
4. *большие пустоты, почти не содержащие галактик (войды).*

Небольшие неоднородности вещества существовали на ранних стадиях эволюции Вселенной – именно они и развились в скопления галактик, галактики, планетные системы, который мы сегодня наблюдаем.

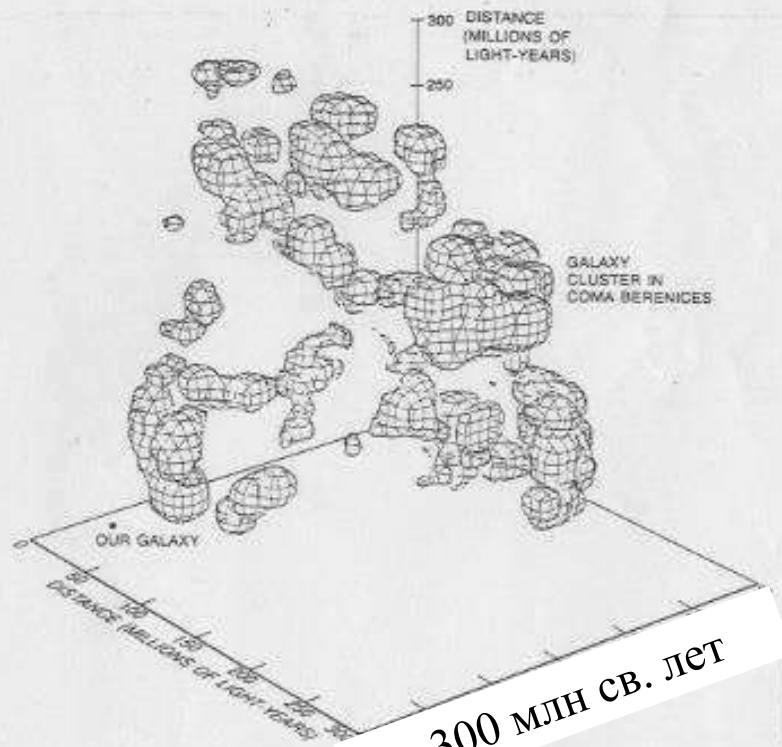
Неоднородности плотности вещества возникают из-за гравитационной неустойчивости и формируют **крупномасштабную структуру Вселенной**.

Основоположники теории эволюции космологических возмущений плотности: Д. Джинс, Е.М. Лифшиц, Я.Б. Зельдович, Д. Пиблс и др.

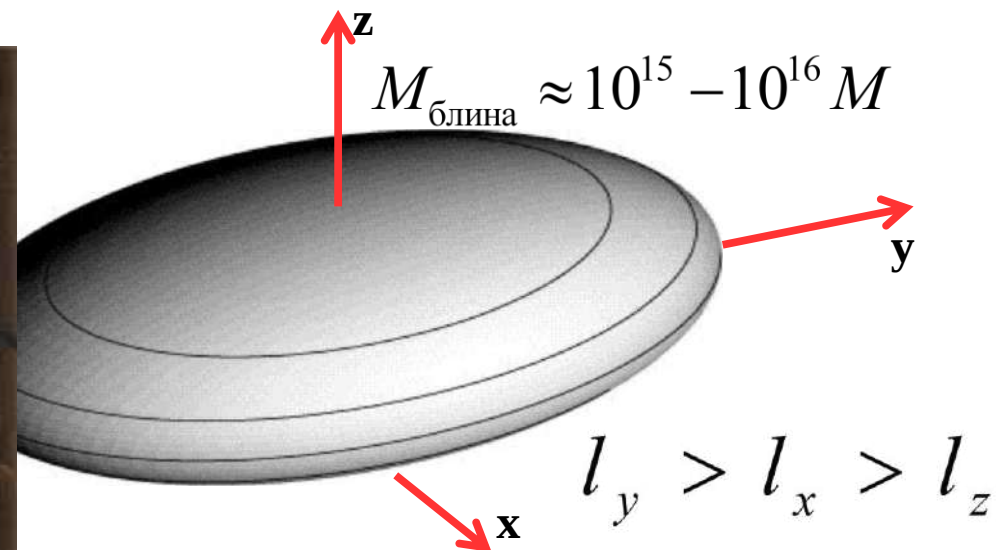
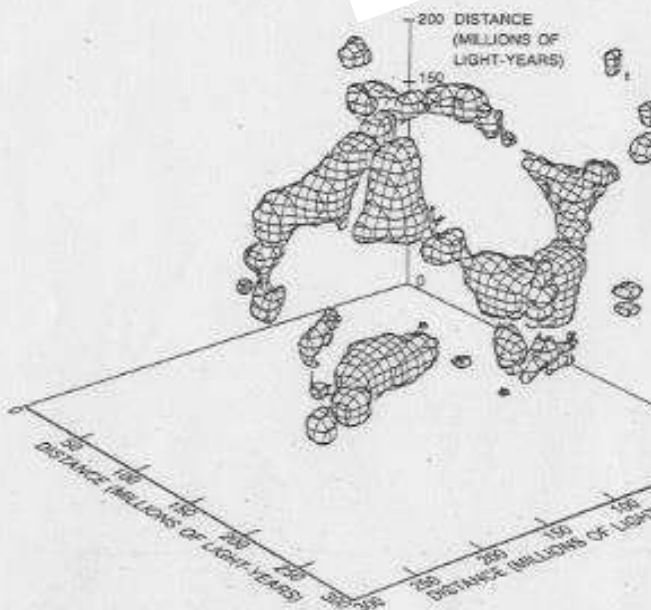


Наблюдаемое скопление галактик в созвездии Волосы Вероники

Моделирование вида скопления галактик на основе модели “блинов” Я.Б. Зельдовича



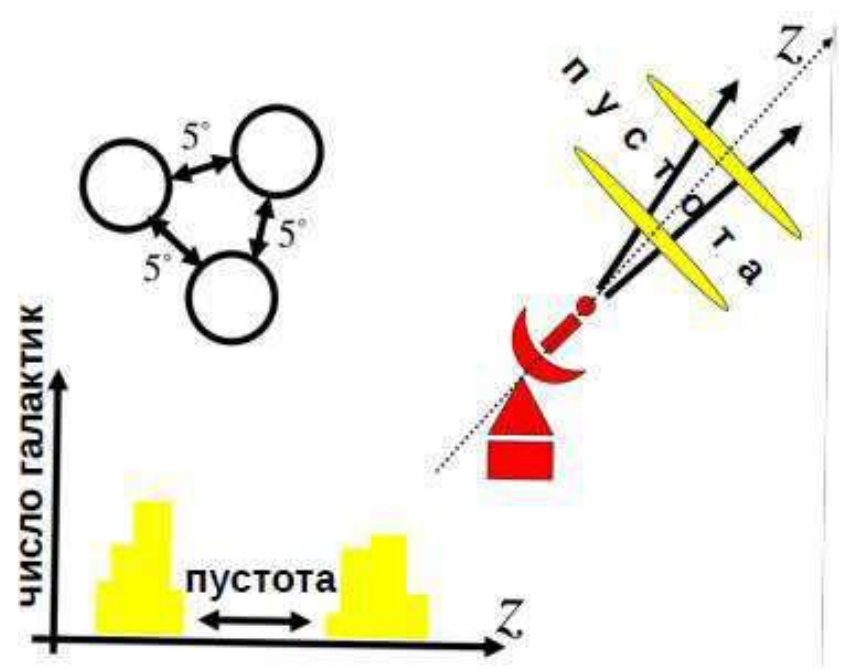
0 – 300 млн св. лет

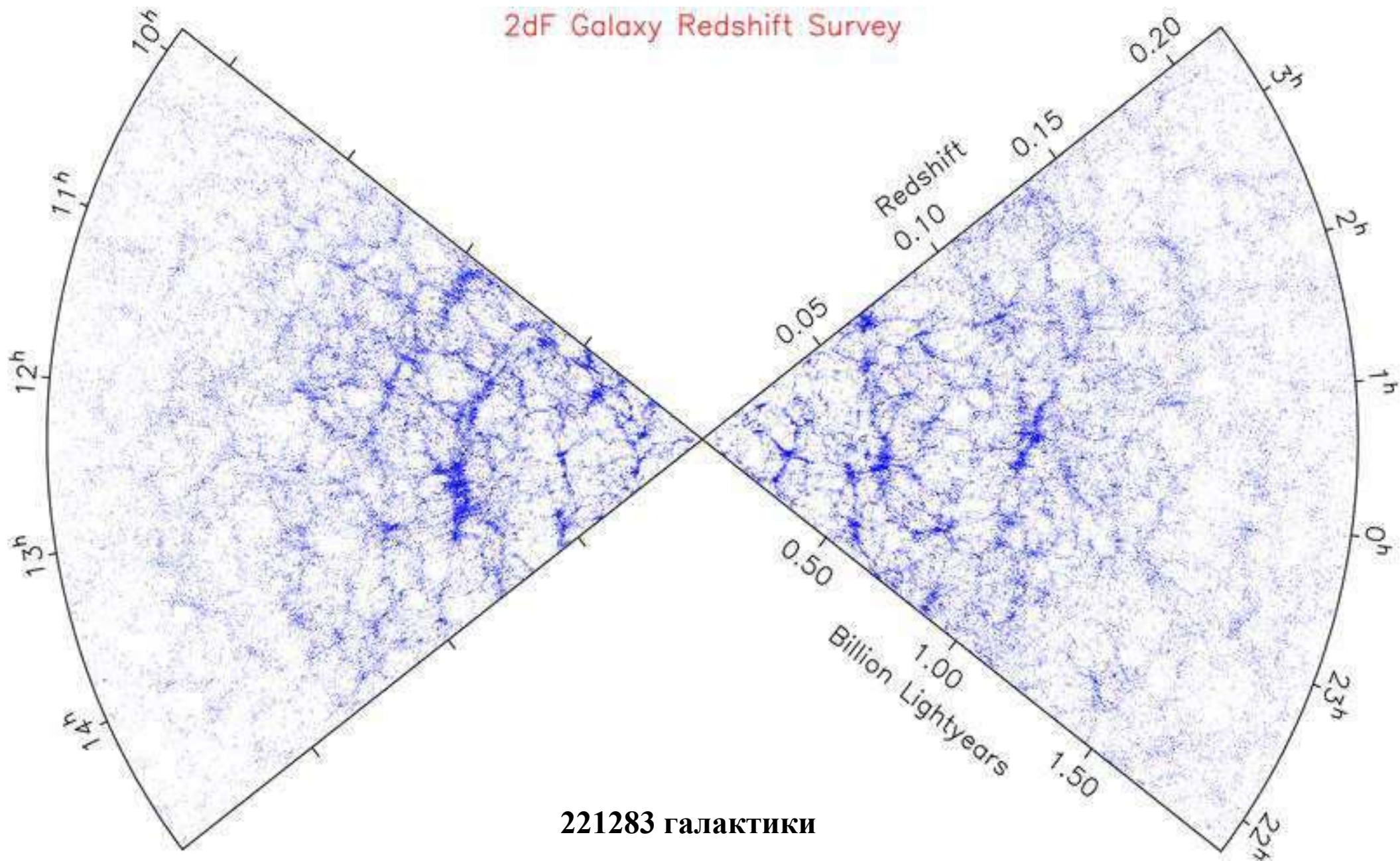


На небе было выбрано три поля галактик на расстоянии примерно пять градусов. В каждом поле было посчитано количество галактик и измерены расстояния до этих галактик.

Распределение зависимости числа галактик от расстояния до них демонстрировало два четких пика, разделенных почти пустым пространством.

Т.е. прямые вдоль луча зрения «проткнули» два «блина» крупномасштабной структуры.

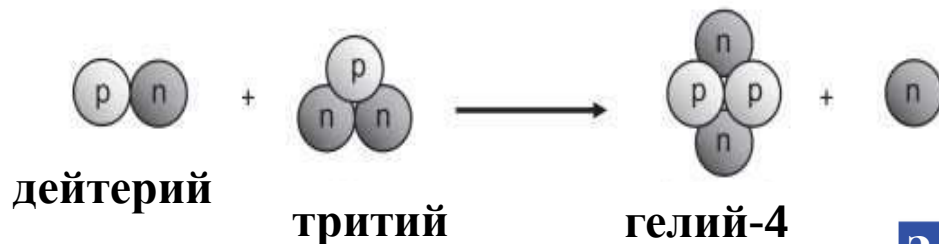
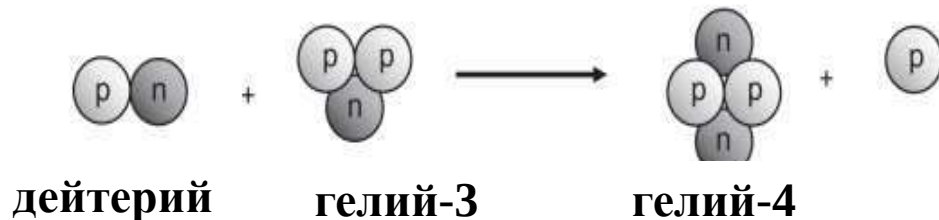




Наблюдательное подтверждение крупномасштабной структуры

Распространенность легких химических элементов

Первичный нуклеосинтез



Стандартная космологическая модель предсказывает

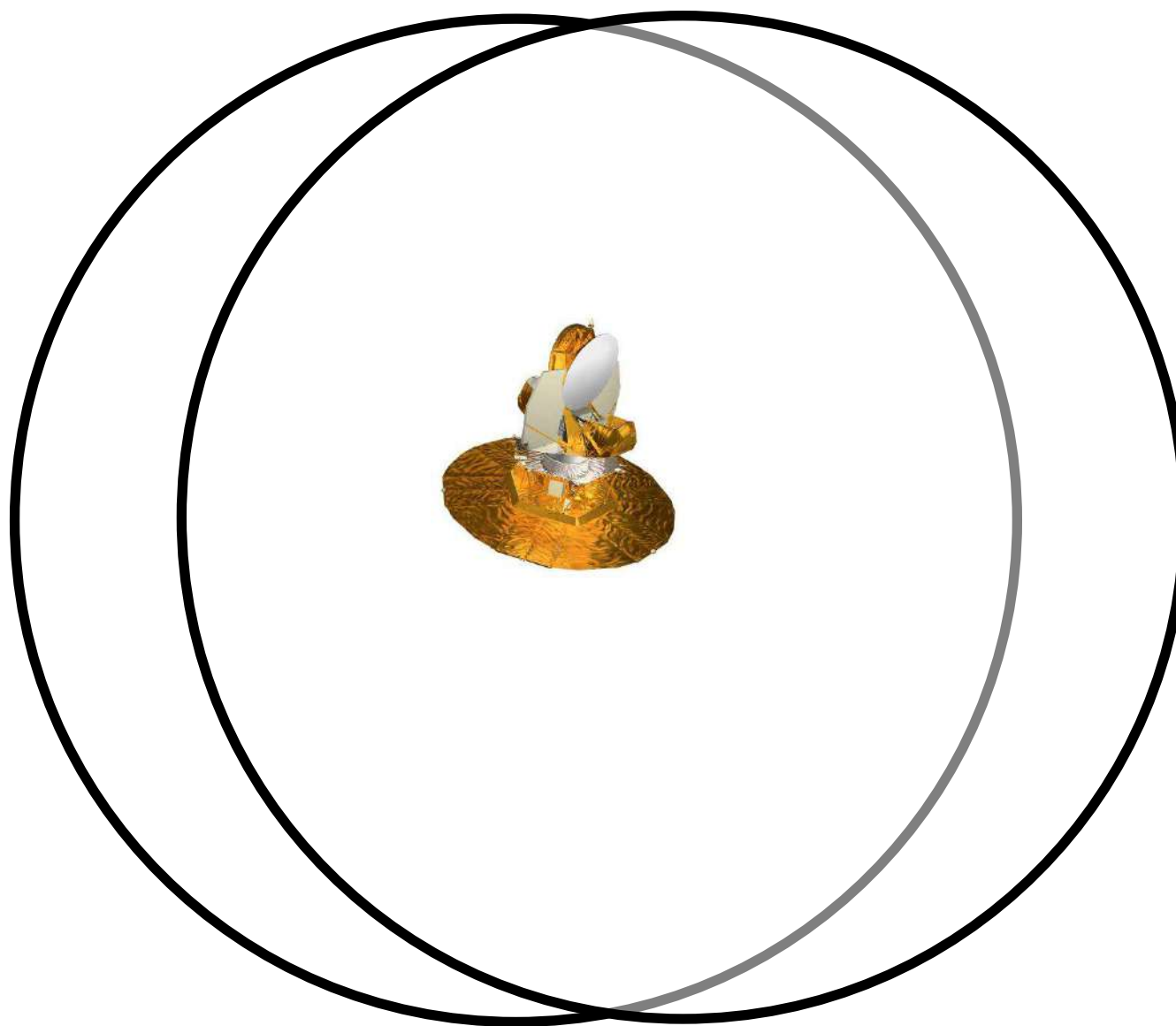
~75% водорода,
~25% гелия-4,

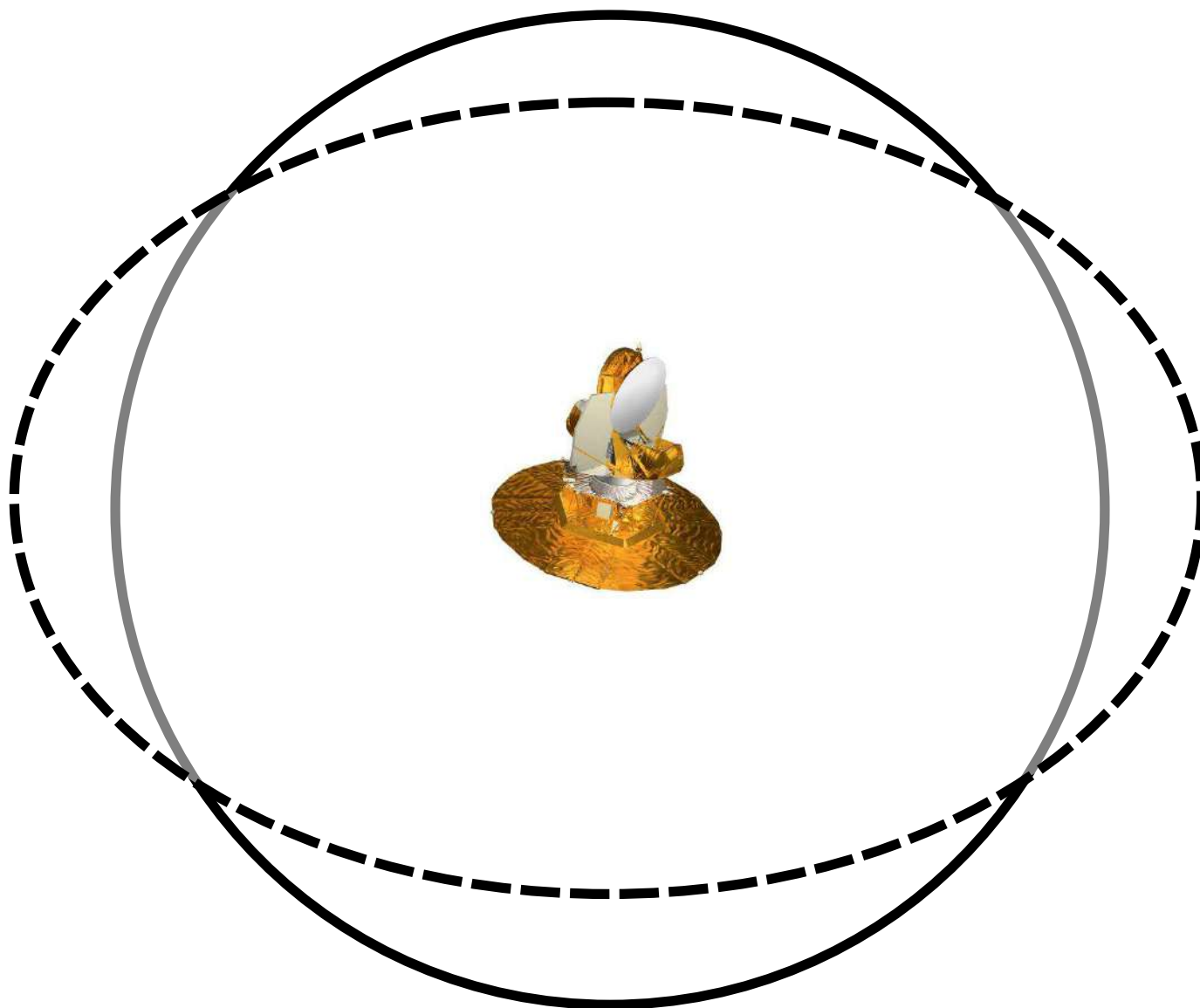
что хорошо согласуется с наблюдениями.

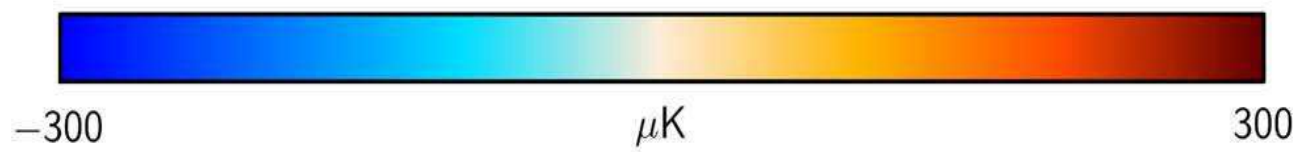
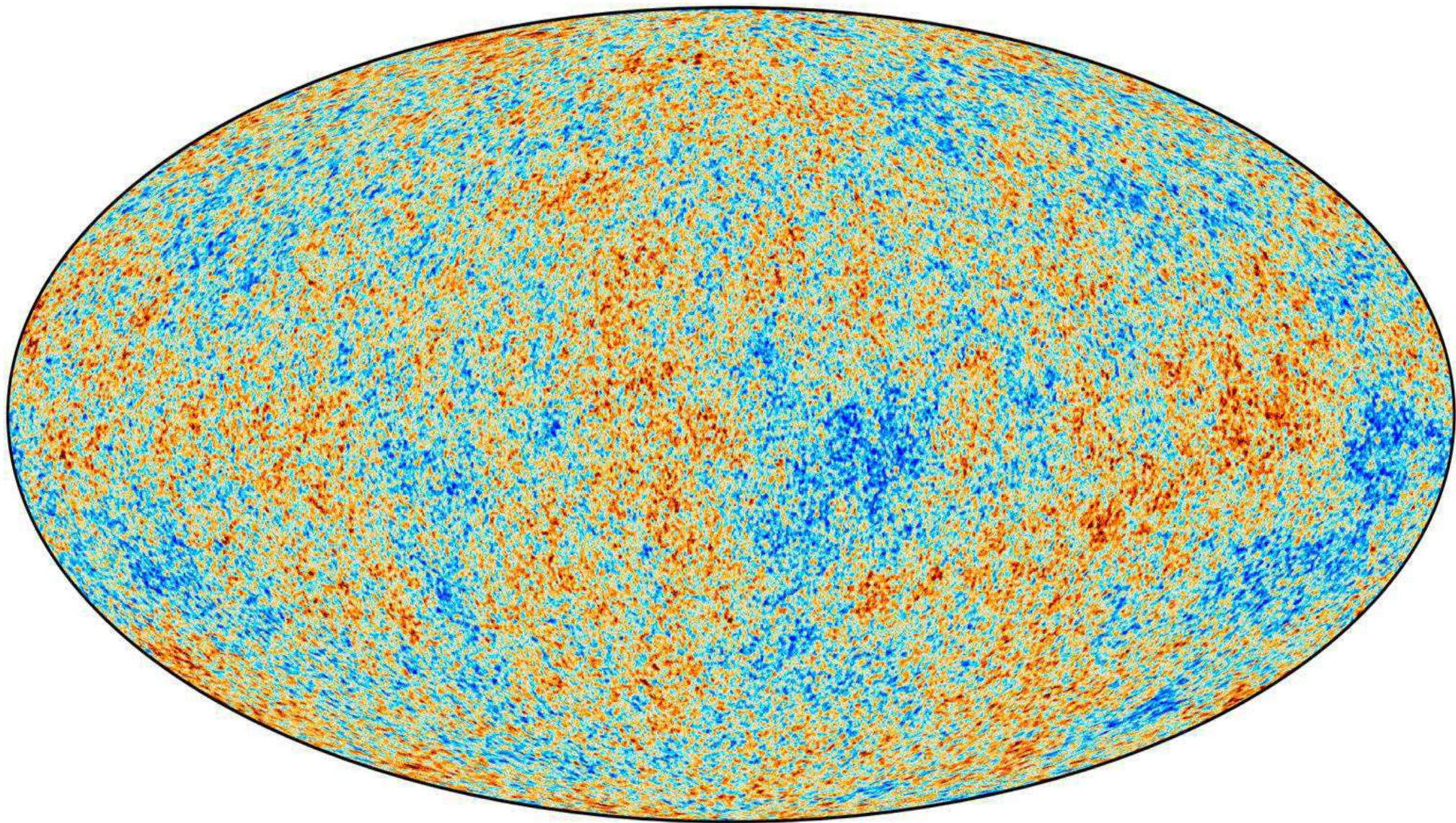


Звездный нуклеосинтез

Анизотропия реликтового излучения







Анизотропия реликтового излучения

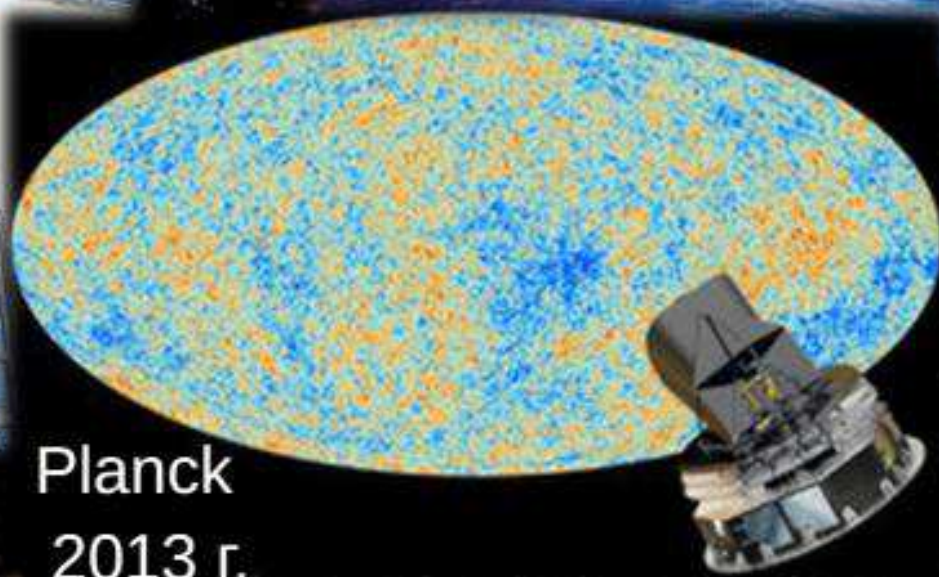
«Реликт»
1992 г.



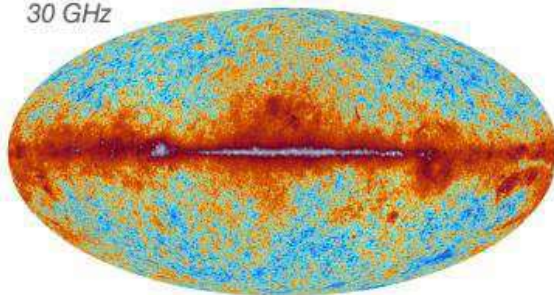
COBE
1992 г.



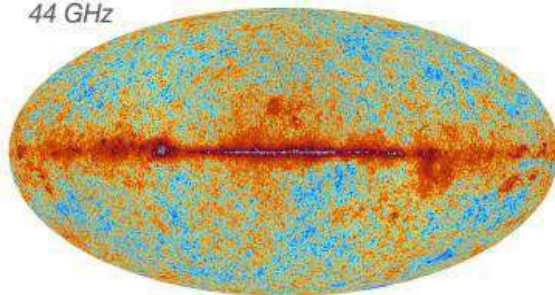
Planck
2013 г.



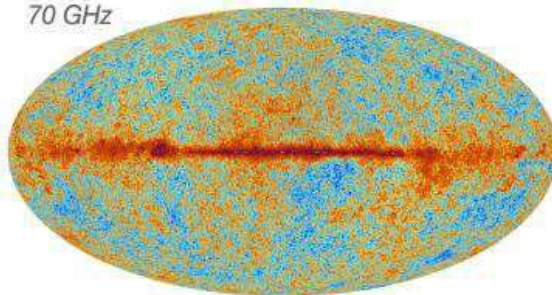
30 GHz



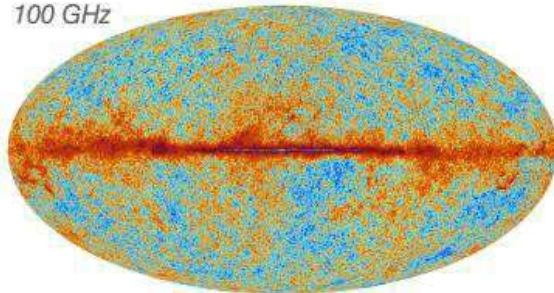
44 GHz



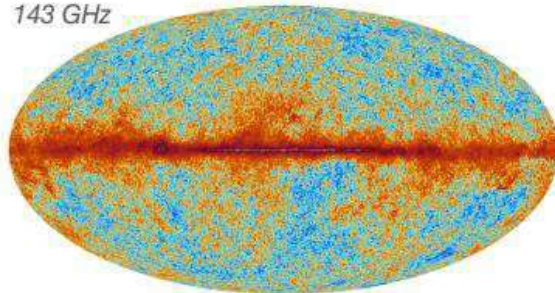
70 GHz



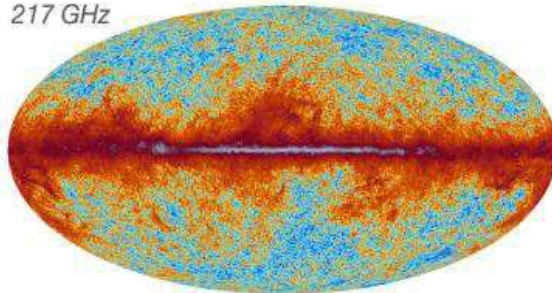
100 GHz



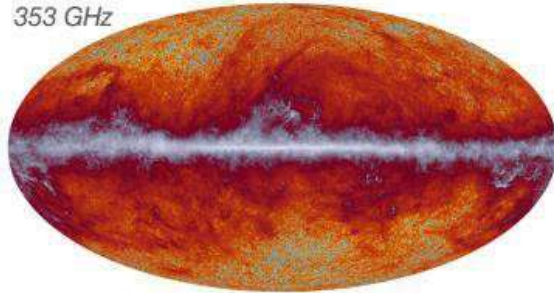
143 GHz



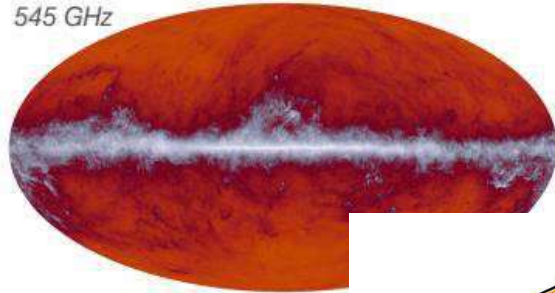
217 GHz



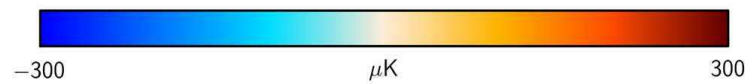
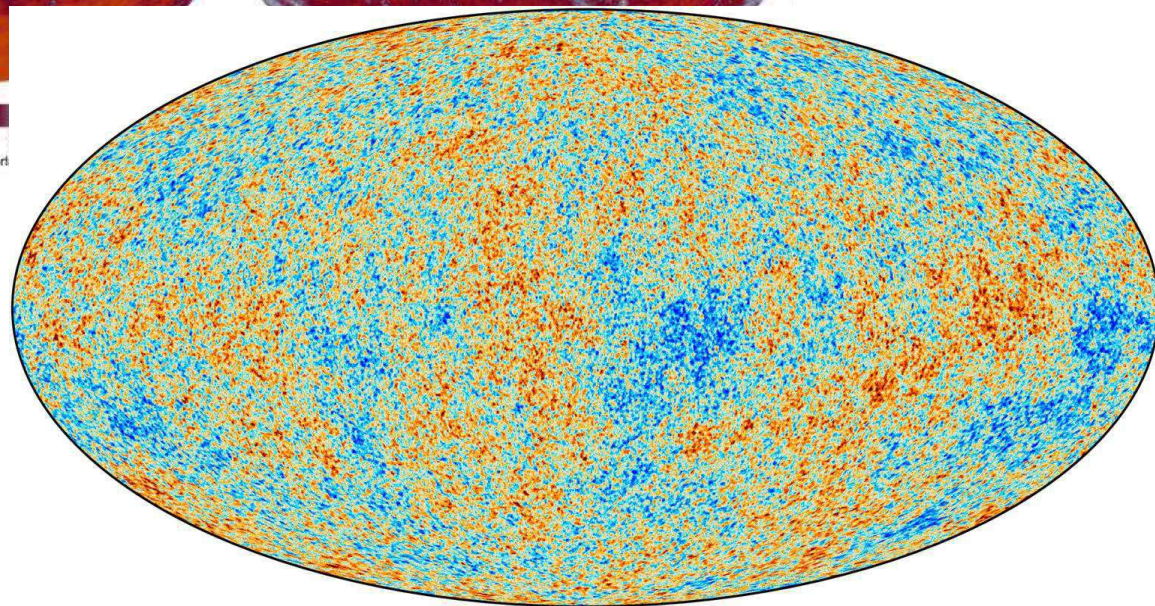
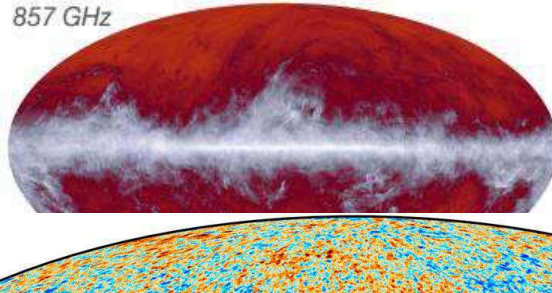
353 GHz



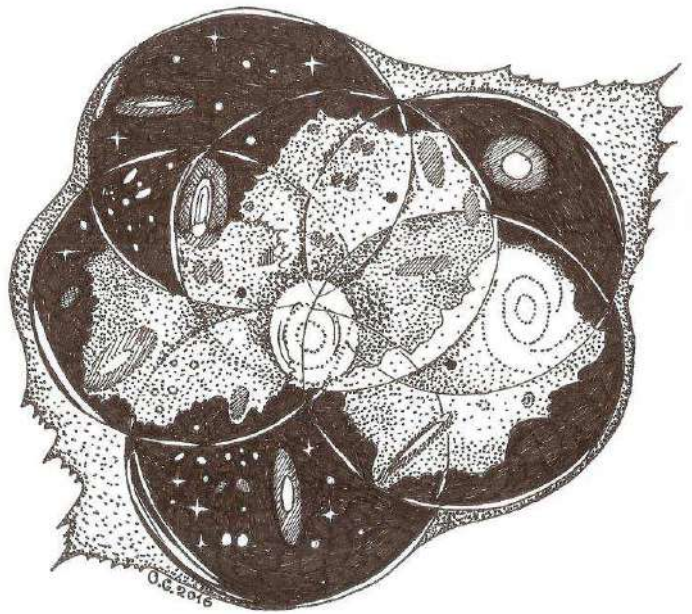
545 GHz



857 GHz



* Темная материя



Вселенная содержит около **100 млрд галактик**, каждая из которых состоит из миллионов звезд, пыли и межгалактического газа, а также планет, спутников и других менее значительных частей.

Темная материя — это вещество, невидимое в телескопы, но подверженное гравитационному взаимодействию.

На темную материю и обычное вещество приходится около 30% полной массы Вселенной.

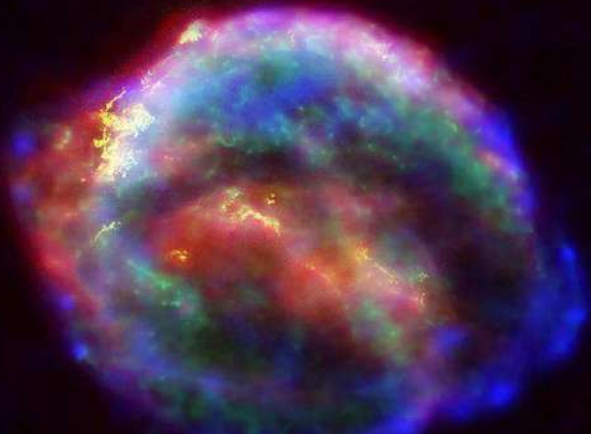
Скопление галактик
Абель 1689 в
созвездии Девы;
изображение с
телескопа Хаббла

* Темная энергия

Темная энергия вызывает наблюдаемое ускоренное расширение современной Вселенной.

Ускоренное расширение было обнаружено в наблюдениях сверхновых звезд.

Природа и состав темной энергии пока не известны.



сверхновая Кеплера SN1604

Галактика NGC4526 и
сверхновая SN Ia 1994d



* Гравитационные волны

В 2015 году были обнаружены гравитационные волны от слияния двух черных дыр. Сигнал был зарегистрирован детектором американского проекта LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory), совместно с группой российских ученых (В.Б. Брагинский, С.П. Вятчанин, В.П. Митрофанов).

В.Б. Брагинский

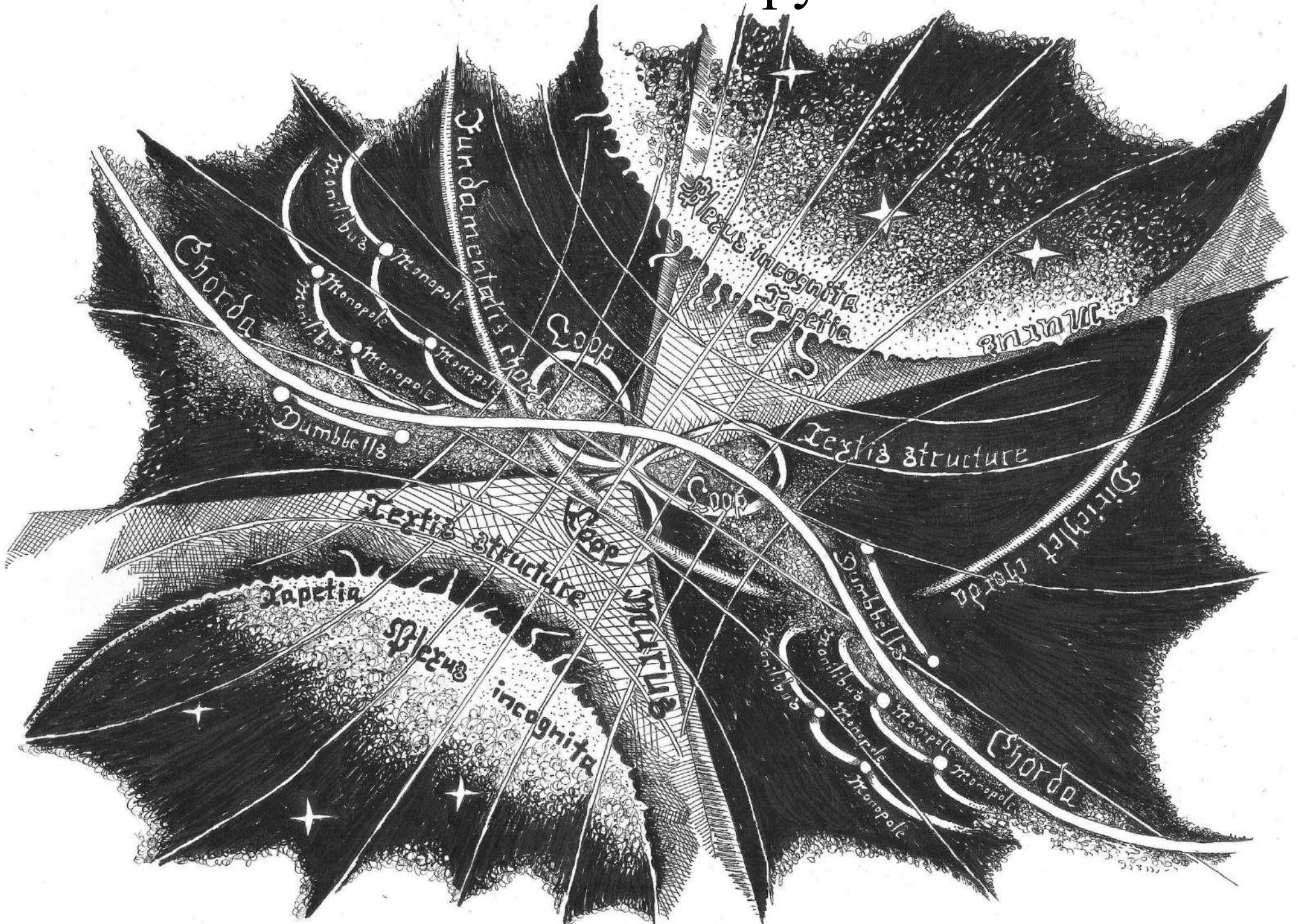
Открытие гравитационных волн не только блестяще подтвердило предсказания общей теории относительности А. Эйнштейна, но стало началом новой эры **гравитационно-волновой астрономии**. Основные источники гравитационных волн:

- (1) сливающиеся черные дыры промежуточных и сверхбольших масс,
- (2) двойные звезды,
- (3) сливающиеся нейтронные звезды,
- (4) космические струны,
- (5) фазовые переходы во Вселенной (**космологические гравитационные волны**), связанные с расширением ранней Вселенной,
- (6) инфляционная стадия ранней Вселенной (**космологические гравитационные волны**).

Космологические гравитационные волны пока не открыты



* Космические струны и «все-все-все»



Расширение Вселенной

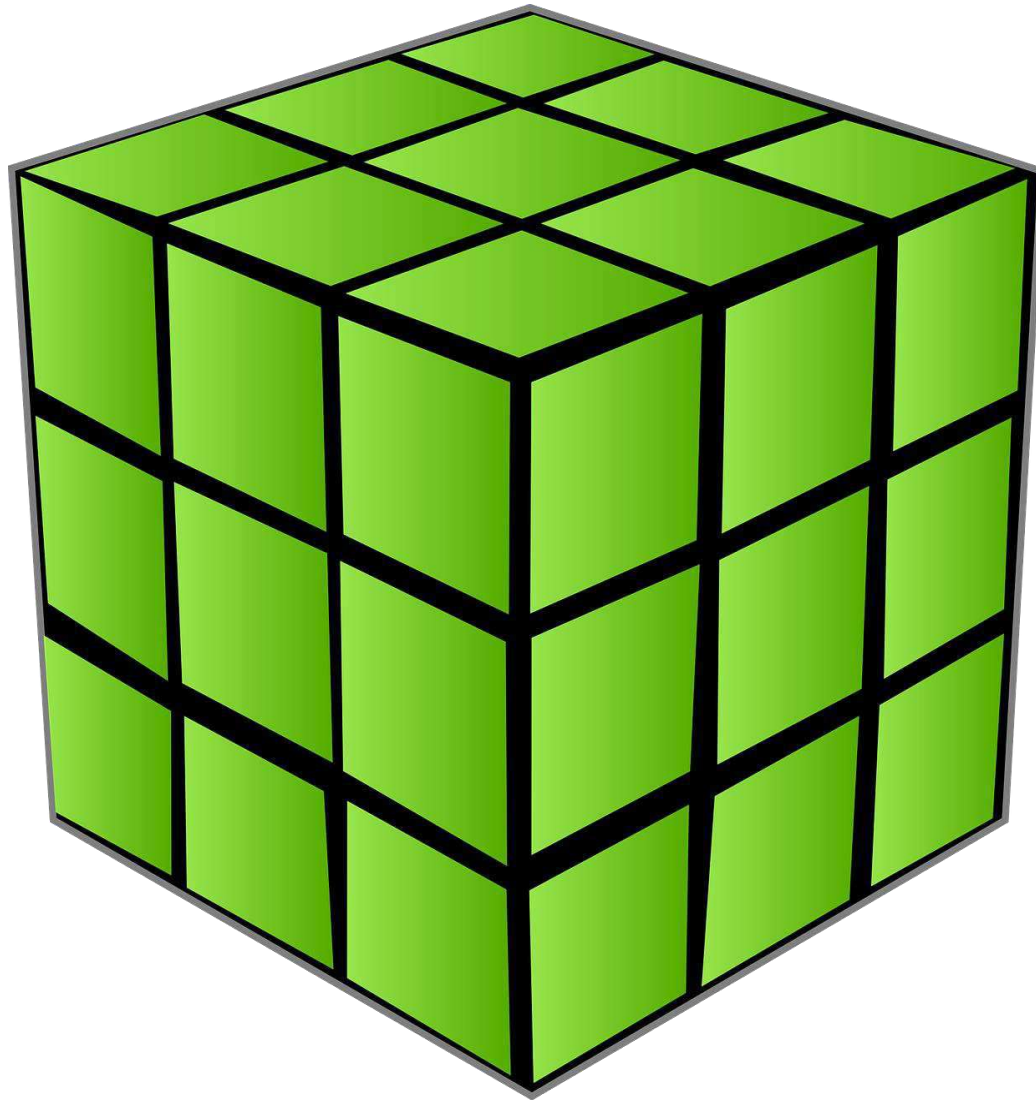
Новые кинематические понятия, которые дала космология

Космологический горизонт
частиц

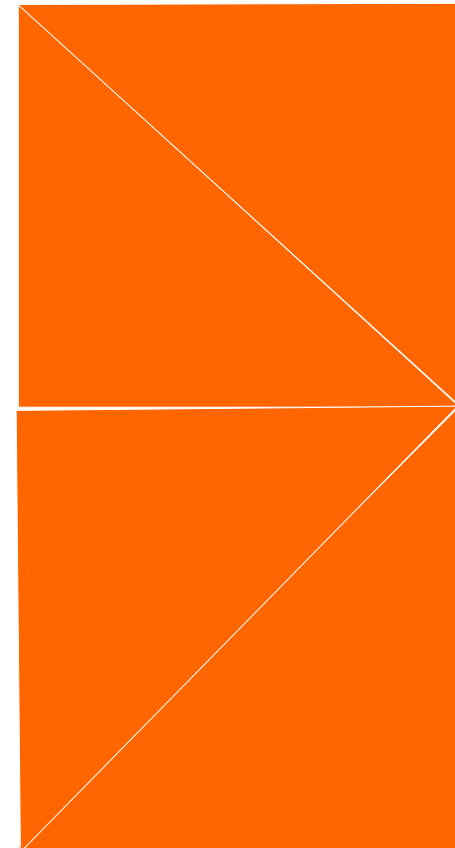
Радиус космологического
горизонта частиц

- В трехмерно-плоском пространстве-времени мы видели бы события только внутри шара, **радиус которого равен произведению скорости света на время, прошедшее с момента рождения Вселенной (13.7 млрд св. лет).**
- От более далеких объектов или областей пространства световой сигнал до нас еще не дошел. Скорость света — это предельная скорость распространения информации. Следовательно, нет способа узнать о том, что происходит вне этого **радиуса горизонта частиц.**

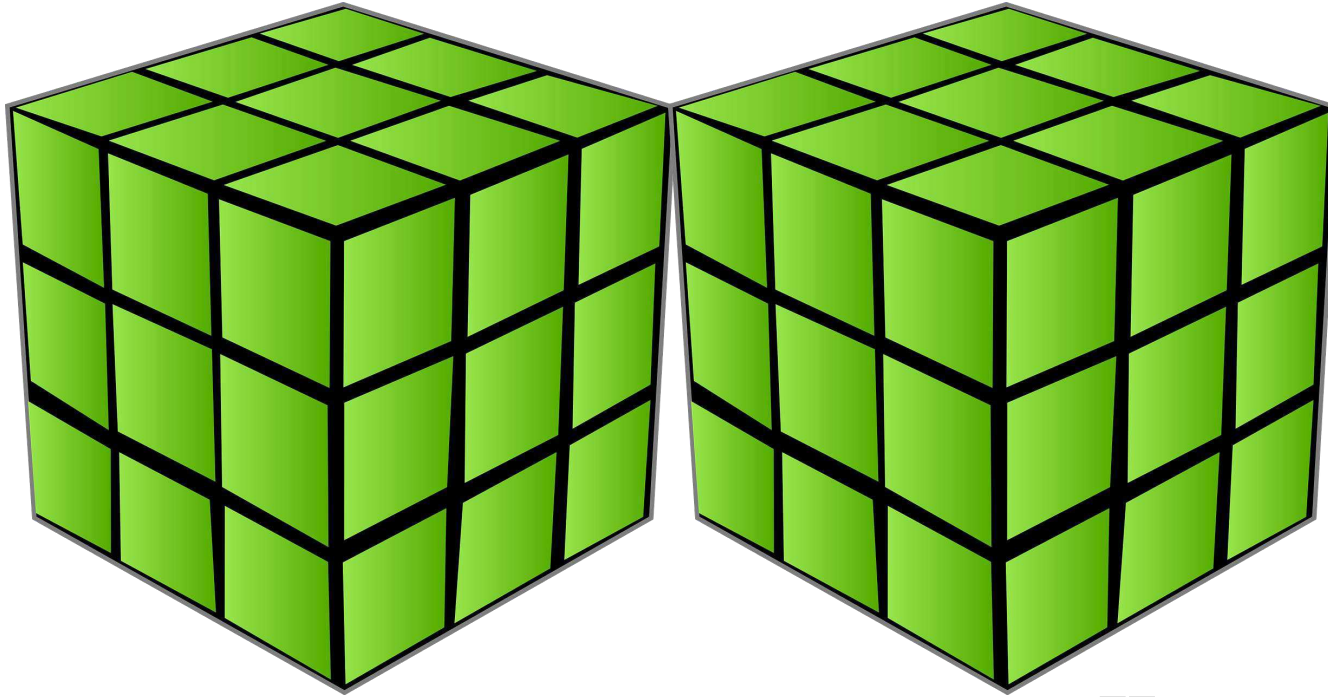
“Плоское” (или евклидово) трехмерное пространство



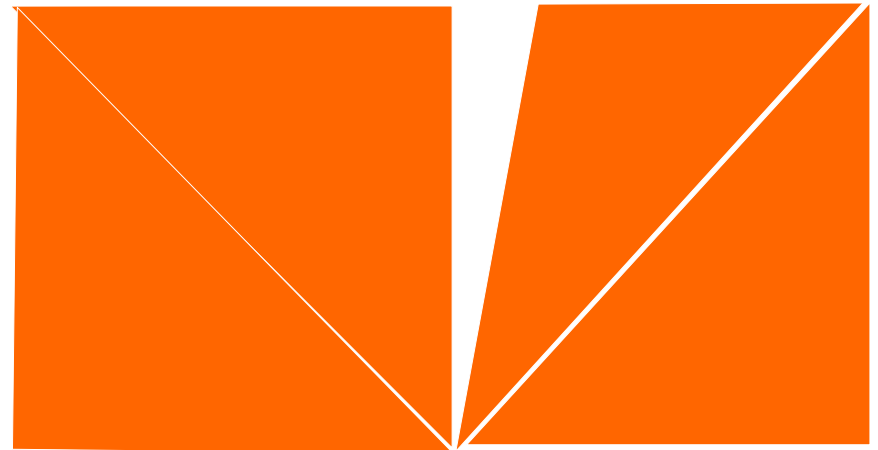
**Плоское
(евклидово)
двумерное
пространство**

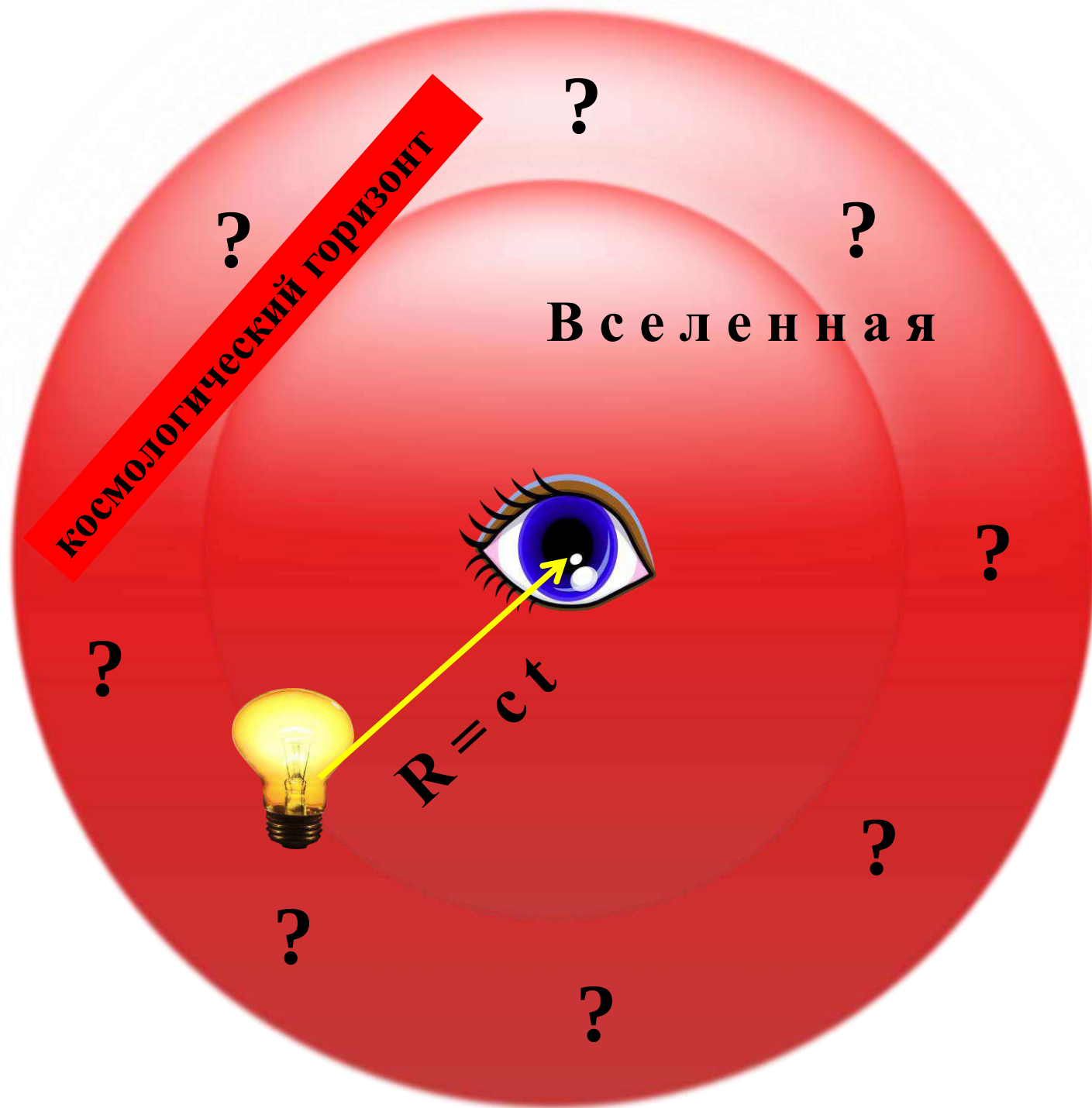


“Неплоское” (неевклидово) трехмерное пространство

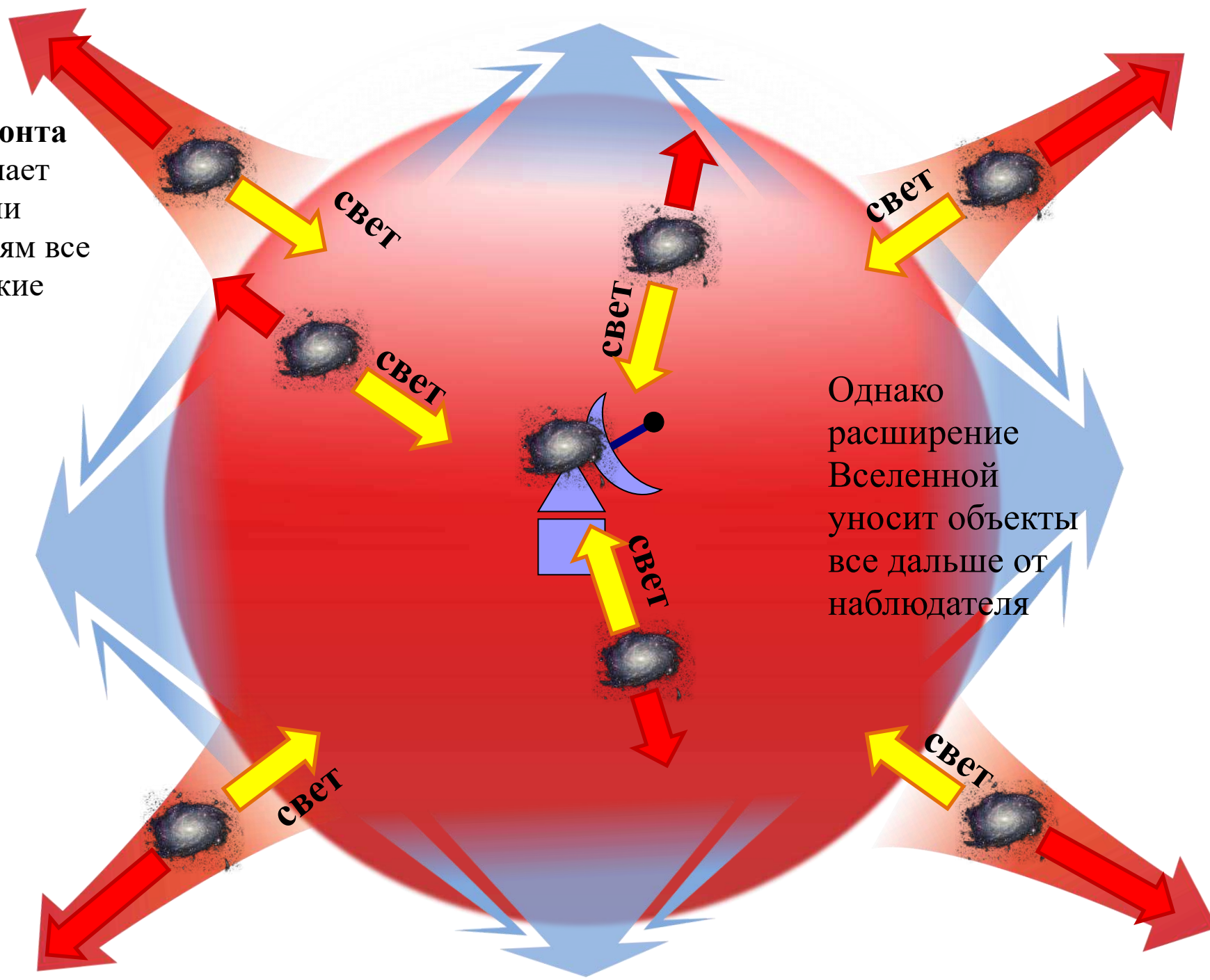


Неплоское (неевклидово) двумерное пространство



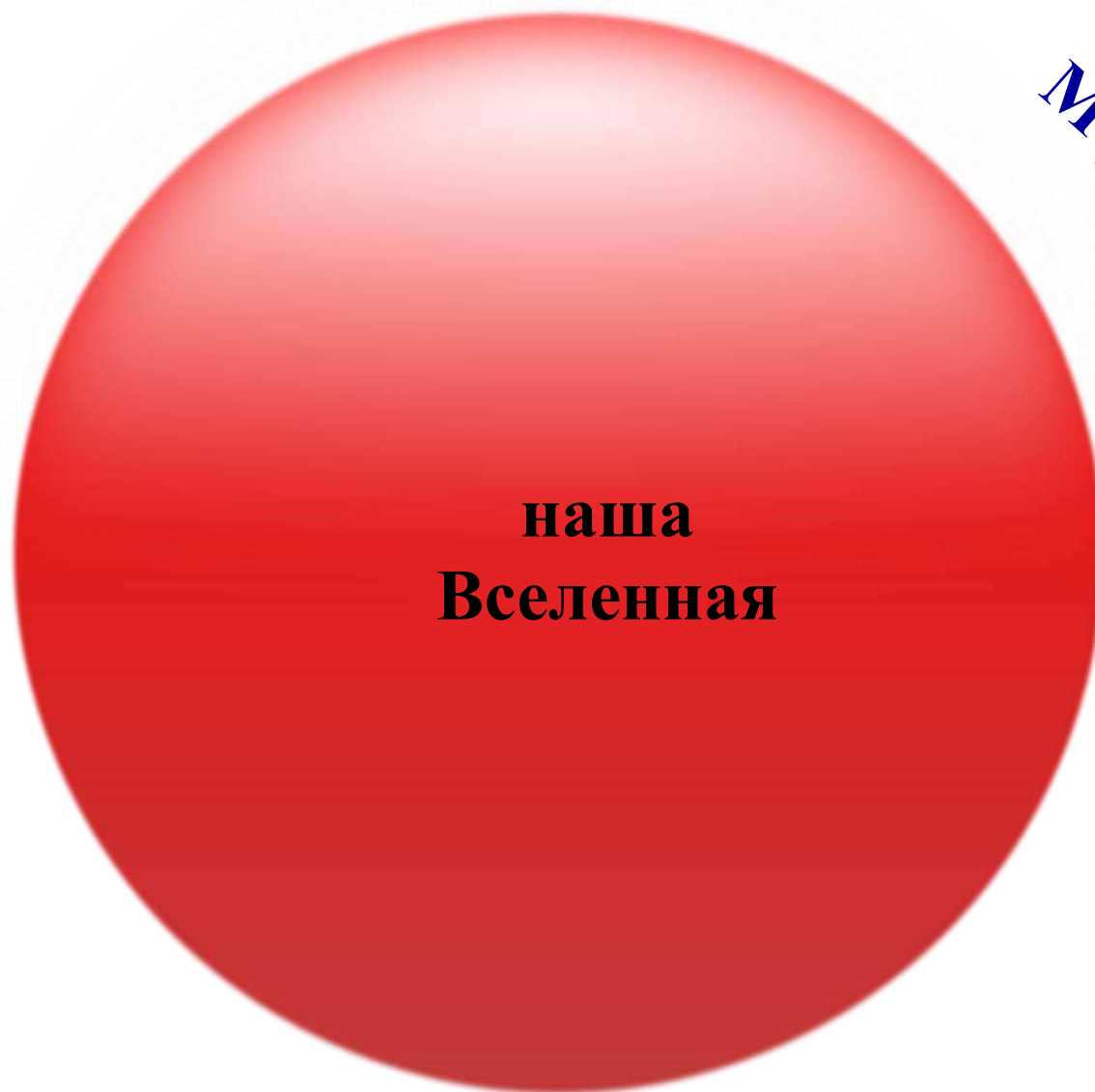


Рост горизонта
частиц делает
доступными
наблюдениям все
более далекие
области
Вселенной



Однако
расширение
Вселенной
уносит объекты
все дальше от
наблюдателя

Темп расширения Вселенной полностью
определяется заполняющим ее веществом



**наша
Вселенная**

Мультиленная

Как вычислить возраст Вселенной?

1. Простая оценка: обратная величина современного значения параметра Хаббла H_0 примерно равна возрасту Вселенной:

$$\frac{1}{67.8 \text{ км/сек/Мпк}} \sim 14 \text{ млрд лет.}$$

2. Более точно возраст Вселенной нужно вычислять с учетом особенностей темпа ее расширения. Темп расширения Вселенной зависит от ее состава.

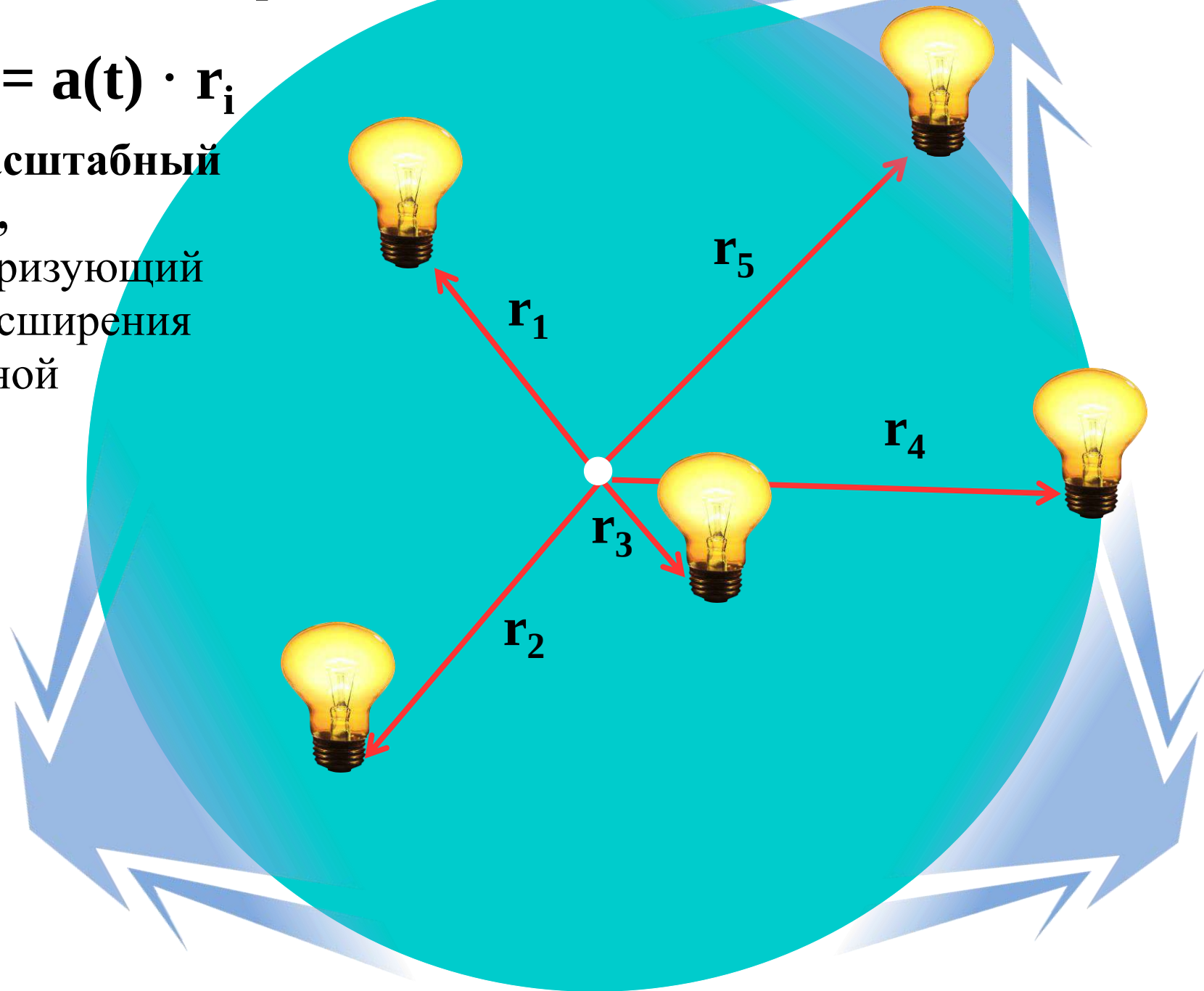
Как измеряются расстояния во Вселенной?

- 1. Метрическое расстояние**
- 2. Космологическое расстояние**
- 3. Угловое расстояние**
- 4. Боллометрическое расстояние**

Метрическое расстояние L – это физическое расстояние до объекта, т.е. “измеряемое линейкой”

$$L_i(t) = a(t) \cdot r_i$$

$a(t)$ - масштабный
фактор,
характеризующий
темп расширения
Вселенной



Метрическое расстояние L – это физическое расстояние до объекта, т.е. “измеряемое линейкой”

$$L_i(t) = a(t) \cdot r_i$$

$a(t)$ - масштабный
фактор,
характеризующий
темп расширения
Вселенной



Физическое расстояние L_i называют еще **эйлерово расстояние**, а r_i – **лагранжево расстояние** или “бирка”.

Космологическое расстояние L_c – это метрическое расстояние, где $\mathbf{r}$ выражается через конформное время η :

Конформное время η определяется через обычное физическое время t :

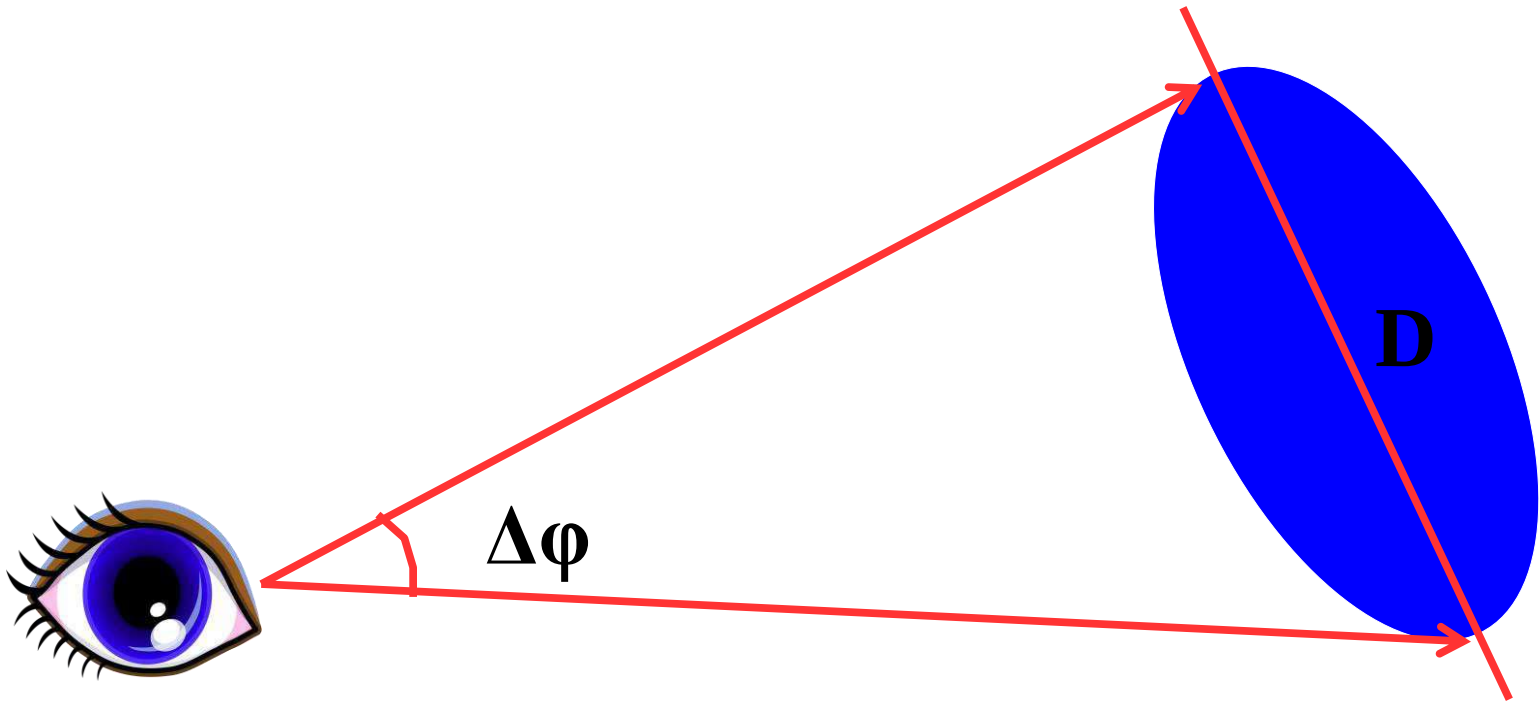
$$dt = a(t) \cdot d\eta$$

Тогда расстояние $\mathbf{r} = \mathbf{c} \cdot \eta = \int_{t_{\text{излучения}}}^{t_{\text{наблюдения}}} \mathbf{c} \cdot \frac{dt}{a(t)}$

Космологическое расстояние: $L_c = a(t) \cdot \mathbf{r} = a(t) \cdot \int_{t_{\text{излучения}}}^{t_{\text{наблюдения}}} \mathbf{c} \cdot \frac{dt}{a(t)}$

Угловое расстояние L_a (или расстояние по угловому размеру)— это отношение физического размера объекта к углу, под которым наблюдатель видит этот объект

$$L_a = \frac{D}{\Delta\varphi}$$



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).

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

Связь между расстояниями в космологии:

$$L_c = \sqrt{L_a \cdot L_b}$$

L_c – космологическое расстояние

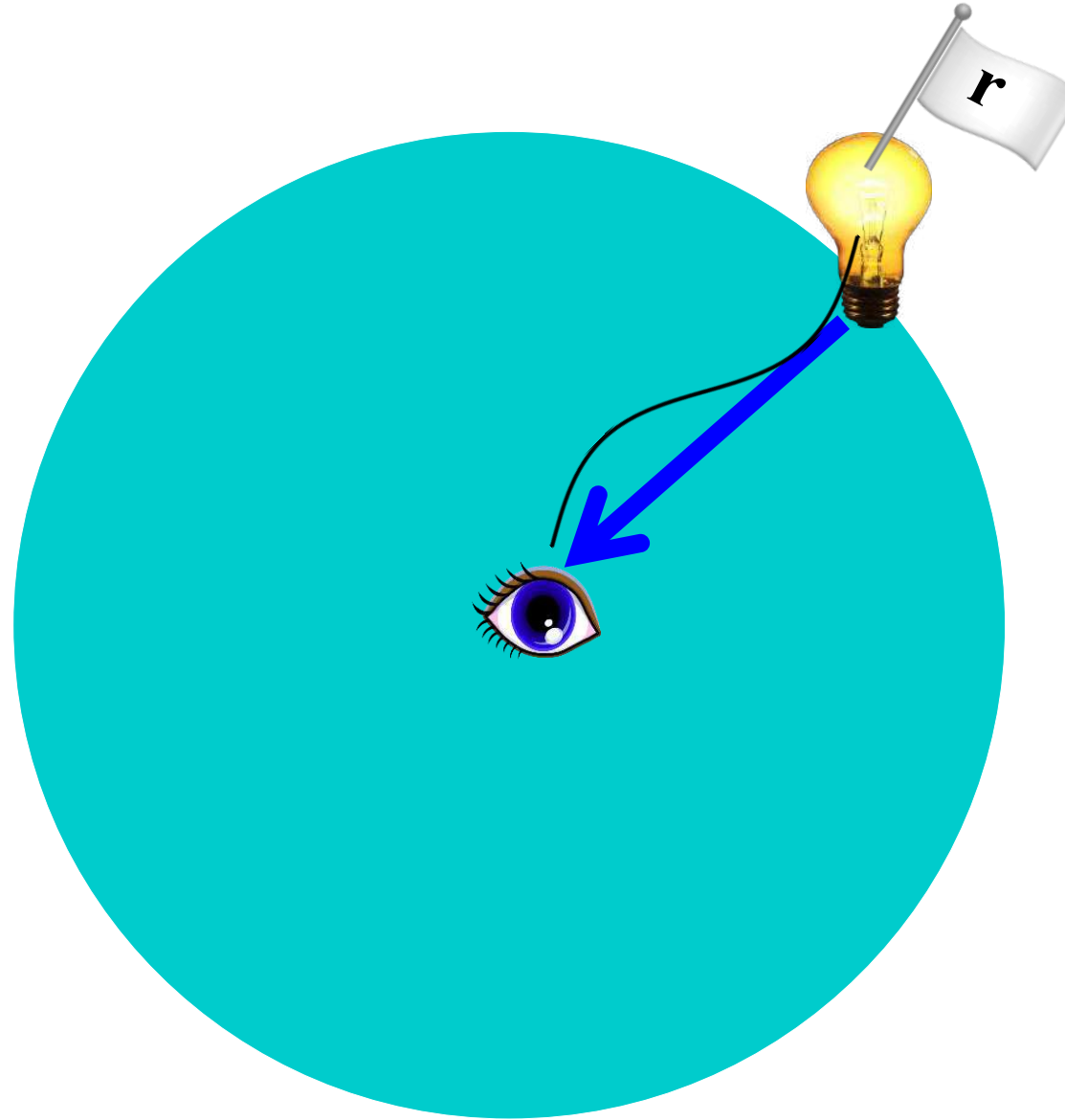
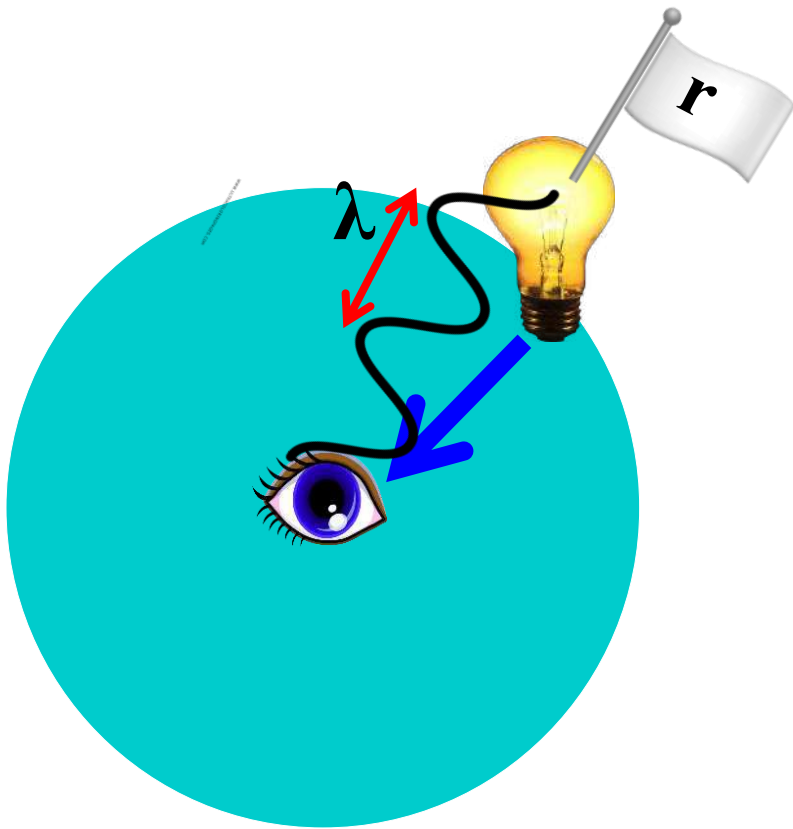
L_a – угловое расстояние

L_b – болометрическое расстояние

Космологическое расстояние

$$\mathbf{L}(t) = \mathbf{a}(t) \cdot \mathbf{r}$$

$$\frac{a(t_1)}{a(t_2)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_2}{v_1}$$



λ — длина волны (в метрах)

ν — частота волны (в герцах)

$$\lambda[\text{м}] = \frac{c [\text{м/с}]}{\nu [\text{Гц}]}$$

c — скорость света

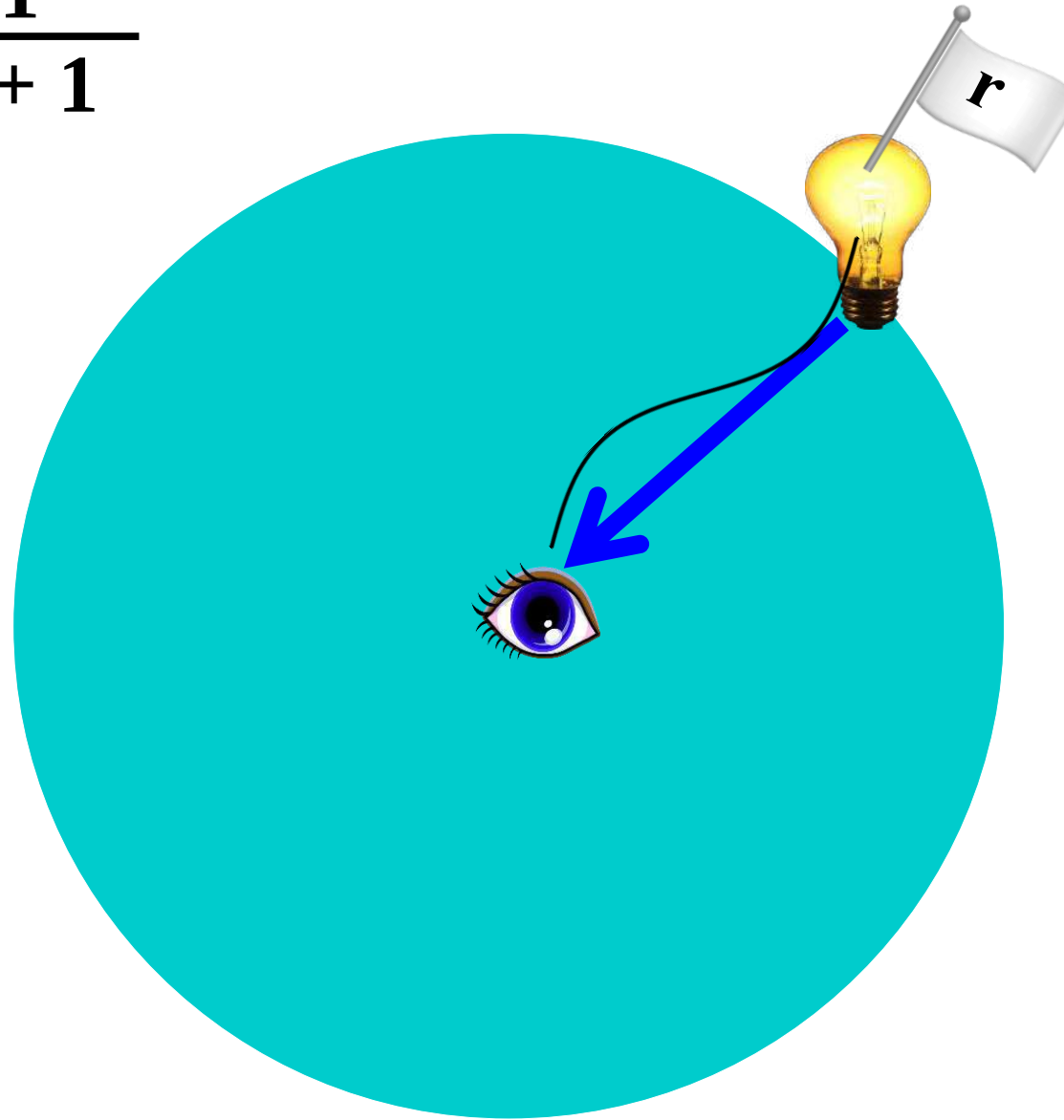
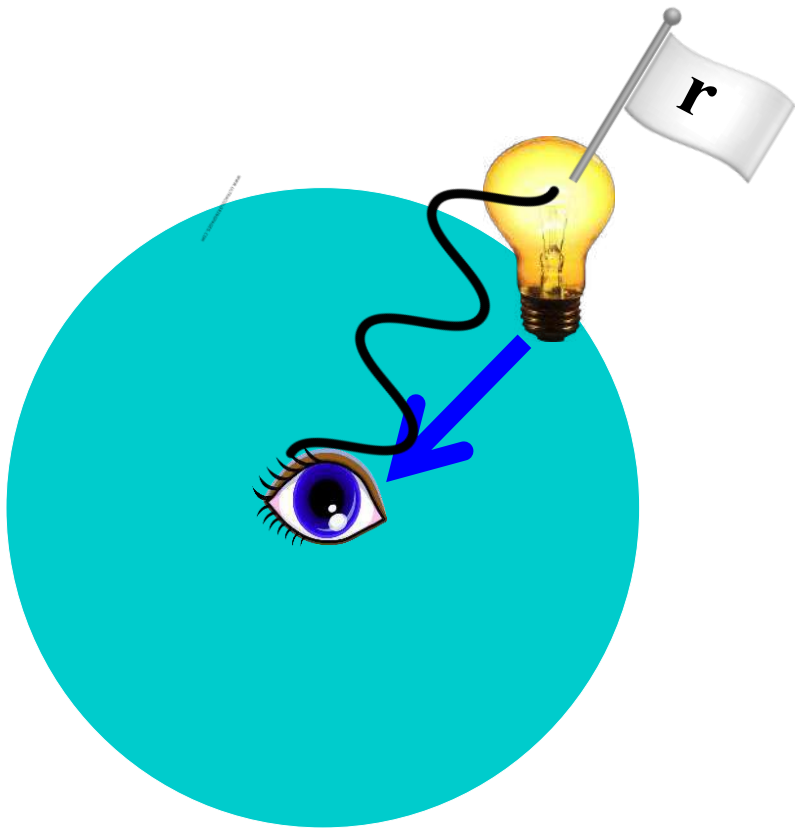
$$\nu = 50 \text{ Гц} \longrightarrow \lambda = 6 \cdot 10^6 \text{ м}$$

$$\nu = 2.4 \text{ ГГц} \longrightarrow \lambda = 12.5 \text{ см}$$

Красное смещение

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1}$$

$$\frac{a(t_1)}{a(t_2)} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{z + 1}$$



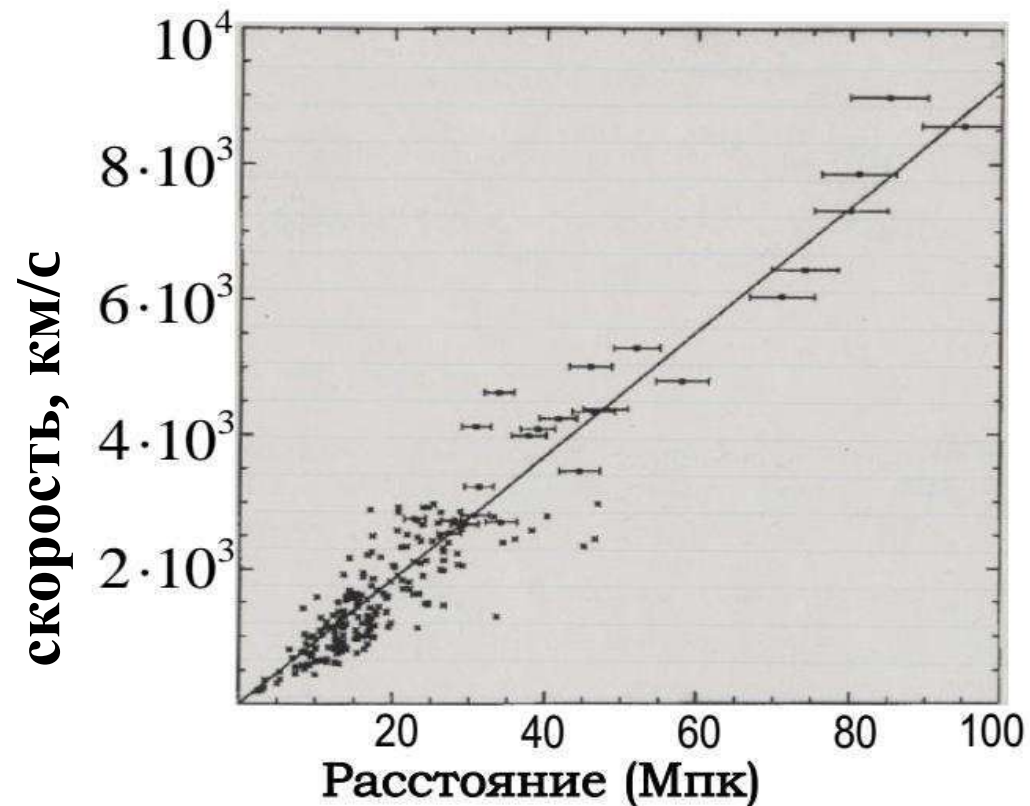
Закон Хаббла

(v и $L(t)$ – это физические скорость и расстояние)

$$v = H \cdot L(t)$$

$$L(t) = a(t) \cdot r$$

$$v = \frac{dL(t)}{dt}$$



Следовательно, параметр Хаббла можно выразить через масштабный фактор:

$$H = H(t) = \frac{da(t)}{dt} \bigg/ a(t) = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$$

$$\frac{a(t)}{a(t_0)} = \frac{1}{z(t) + 1}$$

$$a(t_0) = a_0 = 1$$

$$\frac{da}{dt} = - \frac{1}{(z + 1)^2} \frac{dz}{dt}$$

$$H = - \frac{1}{z + 1} \frac{dz}{dt}$$

Космологическое расстояние в современный момент времени t_0 , выраженное через параметр Хаббла:

$$L_c = a(t_0) \cdot r = a(t_0) \cdot \int_{t_{\text{излучения}}}^{t_0} c \cdot \frac{dt}{a(t)} = \int_{t_{\text{излучения}}}^{t_0} c \cdot (1+z) dt = \int_0^{Z_{\text{излучения}}} \frac{cdz}{H(z)}$$

Космологическое расстояние $L_c = \int_0^{z_{\text{излучения}}} \frac{cdz}{H(z)}$

Радиус Вселенной: $L_{\text{Вселенная}} = \int_0^{\infty} \frac{cdz}{H(z)}$

Возраст Вселенной: $T_{\text{Вселенная}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{z+1} \frac{dz}{H(z)}$

$$H = \frac{da}{dt} \cdot \frac{1}{a}$$

$$a = \frac{1}{1+z}$$

$$da = -\frac{1}{(1+z)^2} dz$$

$$dt = \frac{da}{a} \cdot \frac{1}{H}$$

Для того, чтобы найти зависимость параметра Хаббла от красного смещения $H(z)$, необходимо вывести и решить первое уравнение Фридмана.

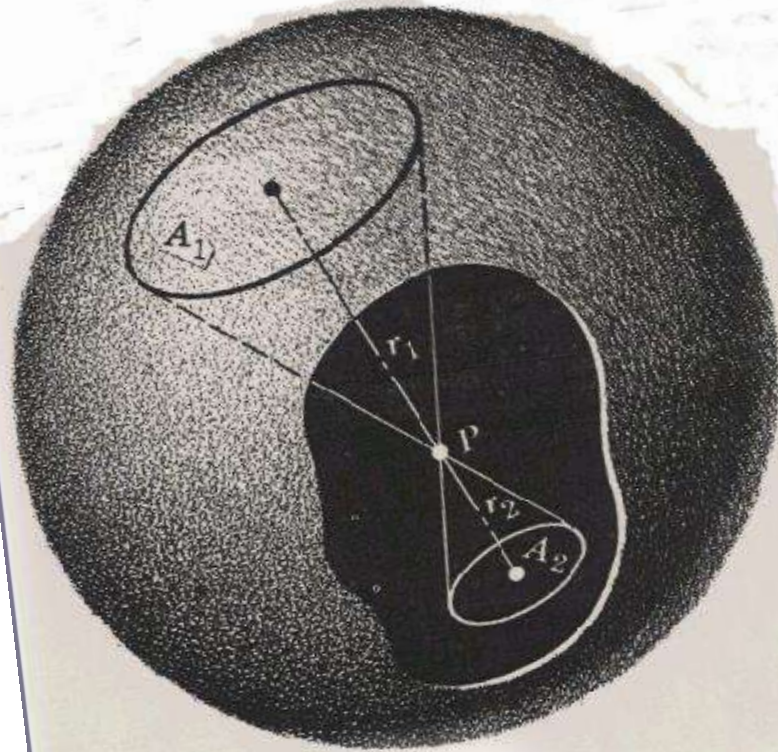
Уравнения Фридмана определяют расширение изотропной и однородной Вселенной в общей теории относительности Эйнштейна.

Выведем первое уравнение Фридмана в приближении теории Ньютона.

Рассмотрим модель:
полая тонкостенная сфера и
наблюдатель в произвольной точке Р.
На наблюдателя будут действовать две
силы:

$$\vec{F}_1 = \frac{GM_1}{r_1^2} \vec{n}_1$$

$$\vec{F}_2 = \frac{GM_2}{r_2^2} \vec{n}_2$$



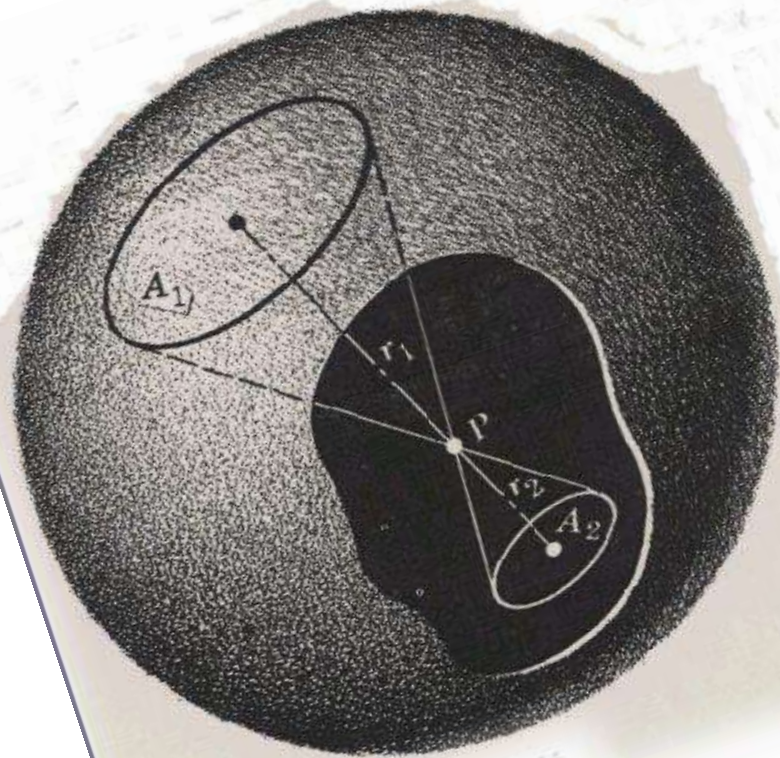
Суммарная сила, действующая на любую точку внутри тонкостенной сферы с некоторой массой, будет равна нулю.

Аналогично равна нулю результирующая сила, действующая на любую точку внутри шара, однородно и изотропно заполненного веществом.

Это означает, что на галактику, которая движется от наблюдателя, оказывает влияние только масса, расположенная внутри сферы с радиусом, равным расстоянию от наблюдателя до этой галактики. Вся масса, расположенная дальше от наблюдателя, на движение галактики не влияет.

$$M_1 = \rho A_1 \Delta r = \rho \cdot r_1^2 d\Omega \cdot \Delta r,$$

$$M_2 = \rho A_2 \Delta r = \rho \cdot r_2^2 d\Omega \cdot \Delta r.$$



$$\vec{F}_1 = -\rho d\Omega \cdot \Delta r \cdot \vec{n}_1$$

$$\vec{F}_2 = -\rho d\Omega \cdot \Delta r \cdot \vec{n}_2$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = -\rho d\Omega \cdot \Delta r \cdot \left(\vec{n}_1 + \vec{n}_2 \right) = 0.$$

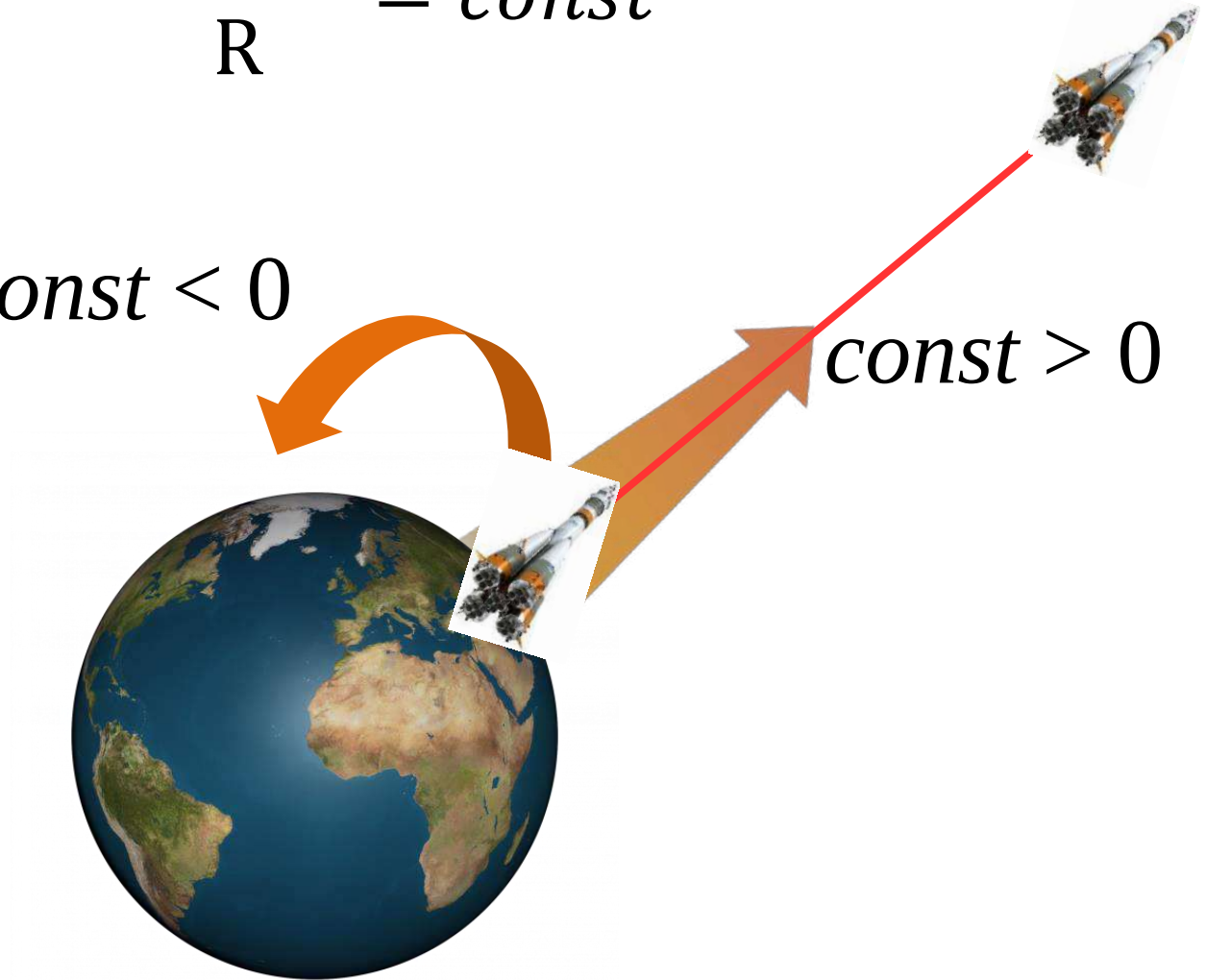
Закон сохранения энергии для частицы в гравитационном поле Земли:

$$v^2 - \frac{2GM_{\oplus}}{R} = \text{const}$$

$\text{const} = 0$

$\text{const} < 0$

$\text{const} > 0$





$$v^2 - \frac{2GM_{\oplus}}{R} = \textit{const}$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dr(t)}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{r(t)} = \textit{const} \equiv K, \quad r(t) = a(t) \cdot \xi$$

$$M = \rho V = \frac{4\pi}{3} r^3(t) \rho = \frac{4\pi}{3} a^3(t) \rho \xi^3$$

Закон сохранения энергии для частиц в расширяющейся однородной и изотропной Вселенной:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{dr(t)}{dt} \right)^2 - \frac{GM}{r(t)} = \text{const} \equiv K$$

$$\frac{1}{2} \dot{a}^2 - \frac{4\pi}{3} G a^2 \rho = \frac{K}{\xi^2}$$

**первое
уравнение
Фридмана**

Физический смысл постоянной **K** нельзя объяснить в рамках ньютоновского подхода.

Этот параметр имеет смысл **кривизны пространства**. В евклидовой Вселенной **K=0**.

$$H^2 = \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho = \frac{8\pi G}{3} \left(\rho_{\text{материя}} + \right. \\ \left. + \rho_{\text{темная энергия}} + \rho_{\text{излучение}} + \dots \right)$$

Зависимость плотности заполняющего Вселенную вещества от темпа расширения Вселенной

“обычная” материя и темная материя


$$\rho_{\text{материя}} = \rho_m = \rho_{0m} \cdot \left(\frac{a_0}{a(t)} \right)^3 = \rho_{0m} \cdot (1 + z)^3,$$

$$\rho_{\text{излучение}} = \rho_r = \rho_{0r} \cdot \left(\frac{a_0}{a(t)} \right)^4 = \rho_{0r} \cdot (1 + z)^4,$$

$$\rho_{\text{темная энергия}} = \rho_{\Lambda} = \textit{const.}$$

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \begin{array}{l} \text{критическая} \\ \text{плотность} \\ \text{Вселенной} \end{array} \rightarrow H^2 = H_0^2 \frac{\rho}{\rho_{\text{кр}}}$$

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_{\text{кр}}} \quad \text{– параметр полной плотности Вселенной, один из основных космологических параметров}$$

$$\Omega_0 = \frac{\rho_0}{\rho_{\text{кр}}} \quad \text{– современное значение параметра полной плотности Вселенной}$$

$$\Omega_0 = \Omega_{m0} + \Omega_{\Lambda} + \Omega_{r0} + \dots$$

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

Если Вселенная плоская (кривизна равна нулю), то плотность Вселенной равна критической плотности. И наоборот, если плотность Вселенной равна критической, то Вселенная плоская.

Первое уравнение Фридмана в произвольный момент времени, зависящее от космологических параметров в современный момент времени

$$\begin{aligned} H^2 &= \left(\frac{\dot{a}}{a} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho \\ &= \frac{8\pi G}{3} \cdot (\rho_{\text{материя}} + \rho_{\text{темная энергия}} + \rho_{\text{излучение}} + \dots) \\ &= H_0^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_{\text{кр}}} \\ &= H_0^2 \cdot (\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda} + \Omega_{r0}(1+z)^4) \end{aligned}$$

$$\Omega_{m0} = 0.308 \qquad \Omega_{\Lambda} = 0.686 \qquad \Omega_{r0} = 8.6 \cdot 10^{-5}$$

Величины параметров плотности для разных типов вещества получены из сопоставления Стандартной космологической модели с реальными наблюдательными данными

Радиус Вселенной: $L_{\text{Вселенная}} = \int_0^{\infty} \frac{cdz}{H(z)}$

Возраст Вселенной: $T_{\text{Вселенная}} = \int_0^{\infty} \frac{1}{z+1} \frac{dz}{H(z)}$

$$T = \frac{1}{H_0} \int_0^{\infty} \frac{dz}{\left(1+z\right) \cdot \sqrt{\Omega_{m0}(1+z)^3 + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{r0}(1+z)^4}} = 13.7 \text{ млрд. лет.}$$

$$L = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{\sqrt{\Omega_{m0}(1+\tilde{z})^3 + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{r0}(1+\tilde{z})^4}}$$

- Плоская Вселенная, доминированная пылью:

$$T = \frac{2}{3H_0}$$

- Плоская Вселенная, доминированная излучением:

$$T = \frac{1}{2H_0}$$

Размер горизонта частиц разный в разных моделях. Так, во Вселенной, доминированной пылью,

$$L = \frac{2c}{H_0} \approx 8.8 \text{ Гпк}$$

Во Вселенной, доминированной излучением,

$$L = \frac{c}{H_0} \approx 4.4 \text{ Гпк}$$

Красное смещение z	Расстояние (в Гпк)		
	Космологическое L_c	болометрическое L_b	угловое L_a
0.5	1.96	2.94	1.31
1.5	4.49	11.47	1.84
3	6.73	26.93	1.68
4	7.61	38.06	1.52
5	8.27	49.59	1.38
10	10.07	110.72	0.92



$$L = \frac{c}{H_0} \int_0^z \frac{d\tilde{z}}{\sqrt{\Omega_{m0}(1 + \tilde{z})^3 + \Omega_{\Lambda 0} + \Omega_{r0}(1 + \tilde{z})^4}}$$

Эпохи расширения Вселенной

- Инфляционное ускоренное расширение
- Доминирование излучения
- Доминирование вещества (пыли)
- Смена расширения по инерции на ускоренное расширение

Зависимость масштабного фактора от времени при разном составе Вселенной:

Плоская Вселенная,
доминированная пылью

$$a(t) = a_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{2/3}$$

Плоская Вселенная,
доминированная излучением

$$a(t) = a_0 \sqrt{\frac{t}{t_0}}$$

Плоская Вселенная,
доминированная темной энергией
в виде Λ -члена

$$a(t) = a_0 e^{Ht}$$

a_0 — современное значение масштабного фактора, принято равным 1,
 t_0 — современные момент времени (момент времени наблюдения).

Всего есть три уравнения Фридмана и еще одно дополнительное уравнение состояния вещества. Уравнения Фридмана имеют простой аналог в классической механике.

Первое уравнение Фридмана показывает соотношение между кинетической и потенциальной энергией:

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

Второе уравнение Фридмана определяет ускорение:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3p}{c^2} \right) + \frac{\Lambda c^2}{3}.$$

Третье уравнение Фридмана – это закон сохранения вещества (в механике жидкости оно также носит название уравнение непрерывности):

$$\dot{\rho} = -3 \frac{\dot{a}}{a} \left(\rho + \frac{p}{c^2} \right).$$

Каждое из трех уравнений является следствием двух других.

Четвертое, дополнительное, уравнение – это **уравнение состояния вещества**:

$$p(\rho) = q\rho c^2.$$

Конечная судьба Вселенной определяется постоянной кривизны k и космологической постоянной Λ .

ЛЕКЦИЯ 2

Поиск темной материи методами наблюдательной космологии. Гравитационное линзирование

