

Крупномасштабная структура Вселенной

Н.Б. Железнов

Темы лекции 7

Нейтронные звезды

Черные дыры

Крупномасштабная структура Вселенной

Вселенная Фридмана

Реликтовое излучение

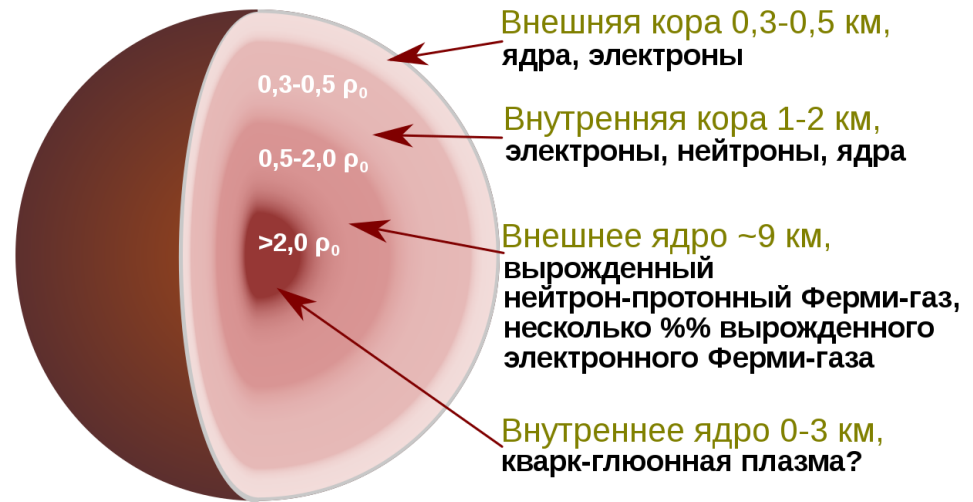
Нейтронная звезда

Нейтронная звезда — сверхплотная звезда, образующаяся в результате взрыва сверхновой. Вещество нейтронной звезды состоит в основном из нейтронов.

Нейтронная звезда имеет ядерную плотность (10^{14} - 10^{15} г/см³) и типичный радиус 10-20 км. Дальнейшему гравитационному сжатию нейтронной звезды препятствует давление ядерной материи, возникающее за счёт взаимодействия нейтронов. Это давление вырожденного существенно более плотного нейтронного газа в состоянии удерживать от гравитационного коллапса массы вплоть до $3M_{\odot}$. Таким образом, масса нейтронной звезды меняется в пределах $(1.4-3)M_{\odot}$.

Нейтрино, образующиеся в момент коллапса сверхновой, быстро охлаждают нейтронную звезду. Её температура по оценкам падает с 10^{11} до 10^9 К за время около 100 с. Дальше темп остывания уменьшается. Однако он высок по космическим масштабам. Уменьшение температуры с 10^9 до 10^8 К происходит за 100 лет и до 10^6 К — за миллион лет.

Известно ≈ 1200 объектов, которые относят к нейтронным звёздам. Около 1000 из них расположены в пределах нашей галактики.



Плотность вещества в слоях указана в единицах ядерной плотности ρ_0 ($\sim 2,8 \cdot 10^{17}$ кг/м³).

Автор: Д.Ильин,

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=83389941>

Предел Чандрасекхара

Предел Чандрасекхара – верхний предел массы $M_{\text{ч}}$ холодного невращающегося белого карлика. Установлен С. Чандрасекаром (США) в 1931 г. Давление p внутри белого карлика (Б.к.) определяется электронным вырожденным газом и зависит только от плотности вещества ρ . С увеличением ρ электронный газ становится релятивистским, и эта зависимость асимптотически приближается к закону

$$p = K \rho^{4/3}$$
$$K = \frac{1}{8} \left(\frac{3}{\pi} \right)^{1/3} \frac{hc}{(m_u \mu_e)^{4/3}} \approx \frac{1,244 \cdot 10^{15}}{\mu_e^{4/3}} \left[\frac{\text{см}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{г}^{1/3}} \right]$$

Здесь m_u атомная единица массы, μ_e – молекулярная масса, приходящаяся на один электрон [число электронов в ед. объема равно $\rho / (m_u \mu_e)$]. Чем больше масса \mathfrak{M} Б.к., тем точнее выполняется соотношение и тем лучше строение Б.к. соответствует модели политропного шара. Теория политропных газовых шаров – гидростатически равновесных сферически-симметричных конфигураций была развита в конце 19 - начале 20 вв. Дж. Лейном (США), А. Риттером (Германия) и Р. Эмденом (Швейцария). Согласно этой теории имеется однозначная связь между постоянной K и \mathfrak{M} политропного шара:

$$K = 0,3639 \cdot G \mathfrak{M}^{2/3}$$

где 0,3639 – коэффициент, определяемый условием гидростатического равновесия. Подставляя значение K из одного выражения в другое, получаем предельную массу $\mathfrak{M}_{\text{ч}}$ Б.к.

$$\mathfrak{M}_{\text{ч}} = \frac{0,1967}{(m_u \mu_e)^2} \left(\frac{hc}{G} \right)^{3/2} = \frac{5,83}{\mu_e^2} \mathfrak{M}_{\odot}$$

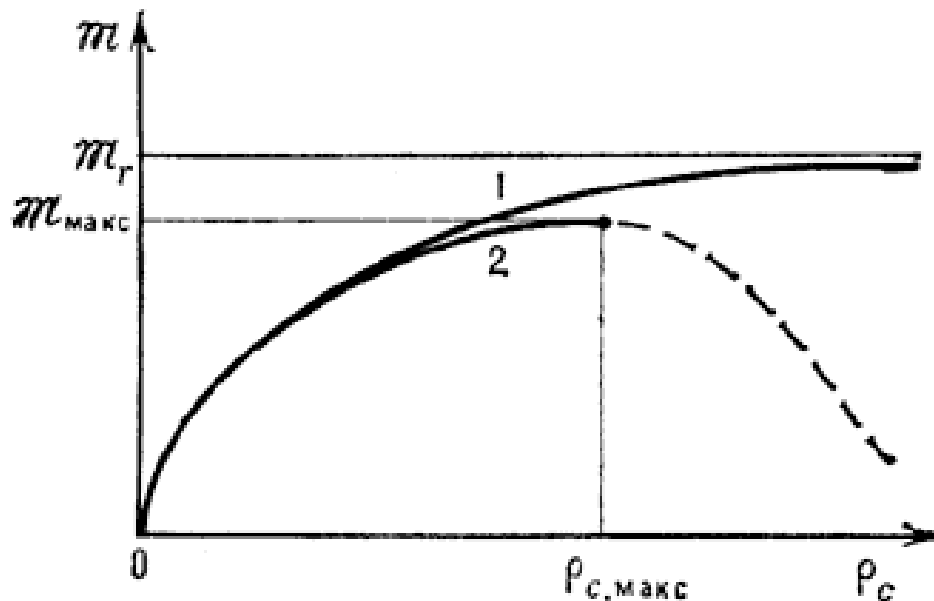
Д. К. Надежин, "Физика Космоса", 1986.

URL: <http://www.astronet.ru/db/msg/1188234>

Предел Чандрасекхара

	${}^1\text{H}$	${}^4\text{He}, {}^{12}\text{C}, {}^{14}\text{N}, {}^{16}\text{O}, {}^{20}\text{Ne}, {}^{24}\text{Mg}, {}^{28}\text{Si}, {}^{40}\text{Ca}, \dots$ - в чистом виде или смешанные в любой пропорции	${}^{52}\text{Cr}$	${}^{56}\text{Fe}$	${}^{59}\text{Co}$	${}^{58}\text{Ni}$
μ_e	1,01	2,00	2,16	2,15	2,18	2,07
$\frac{M_{\text{ч}}}{M_{\odot}}$	5,73	1,46	1,24	1,26	1,22	1,36

При достаточно больших плотностях на структуру реальных Б.к. начинают заметно влиять процессы нейтронизации вещества и эффекты общей теории относительности.



Качественный вид зависимости массы белых карликов от их центральной плотности.

1 - идеальные белые карлики, для которых $M \rightarrow M_{\text{ч}}$ при $\rho_c \rightarrow \infty$;

2 - реальные белые карлики:

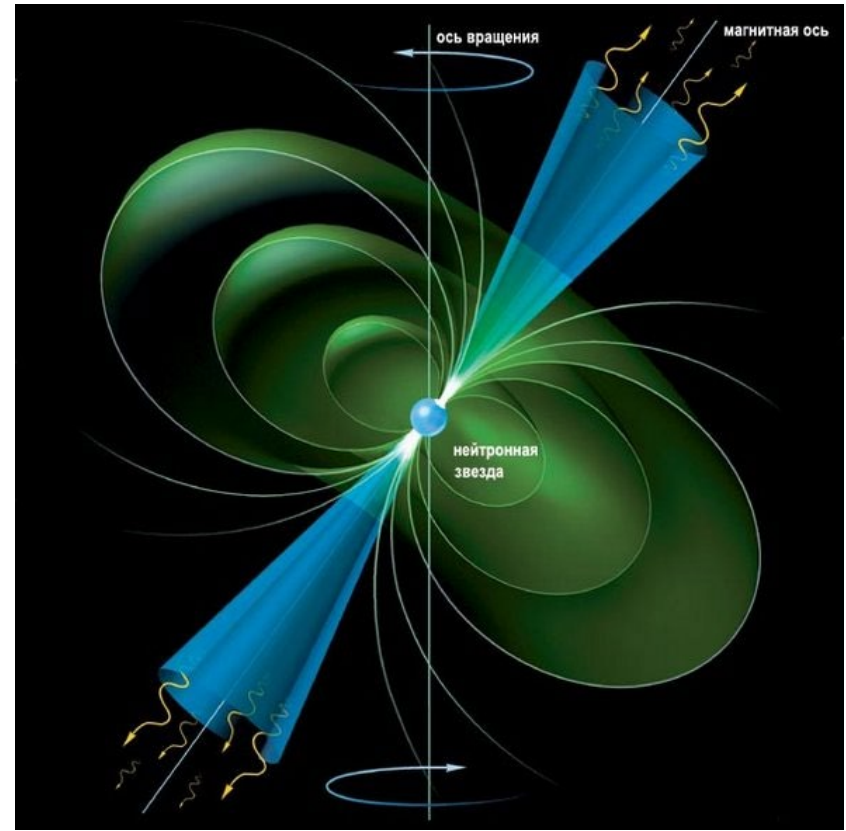
максимальной массе $M_{\text{макс}}$ соответствует конечная центральная плотность $\rho_{c,\text{макс}}$.

Штриховой отрезок кривой соответствует неустойчивым конфигурациям.

Классификация нейтронных звезд. Радиопульсар

Радиопульсар — космический источник импульсного радиоизлучения, приходящего на Землю в виде периодически повторяющихся всплесков (импульсов).

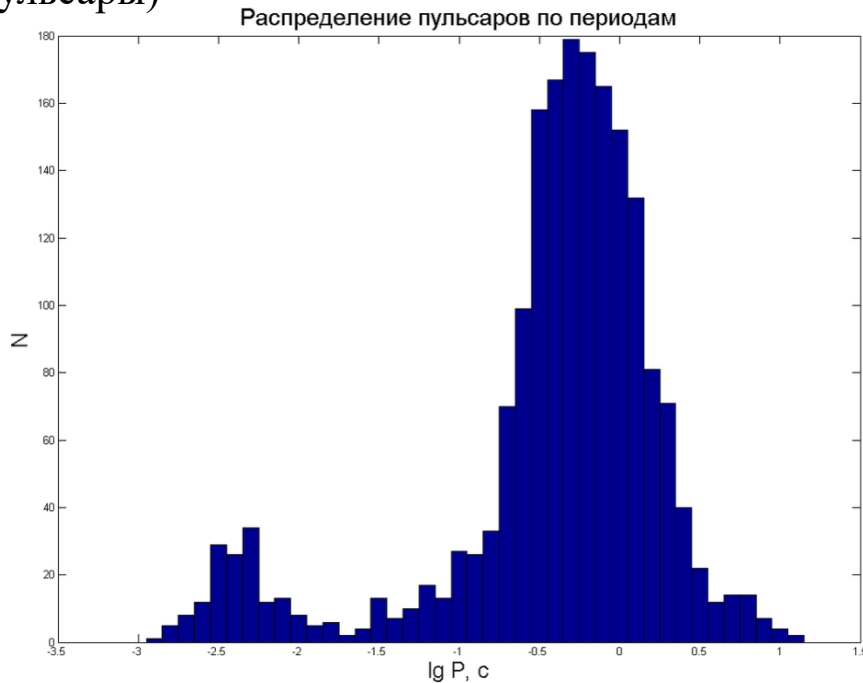
Сильные магнитные поля и малый период вращения. В простейшей модели магнитосферы, магнитное поле вращается твердотельно, то есть с той же угловой скоростью, что и тело нейтронной звезды. На определенном радиусе $R_L = c/\omega$ линейная скорость вращения поля приближается к скорости света. Этот радиус называется «радиусом светового цилиндра». За этим радиусом обычное дипольное магнитное поле существовать не может, поэтому линии напряжённости поля в этом месте обрываются. Заряженные частицы,двигающиеся вдоль силовых линий магнитного поля, через такие обрывы могут покидать нейтронную звезду и улетать в межзвёздное пространство.



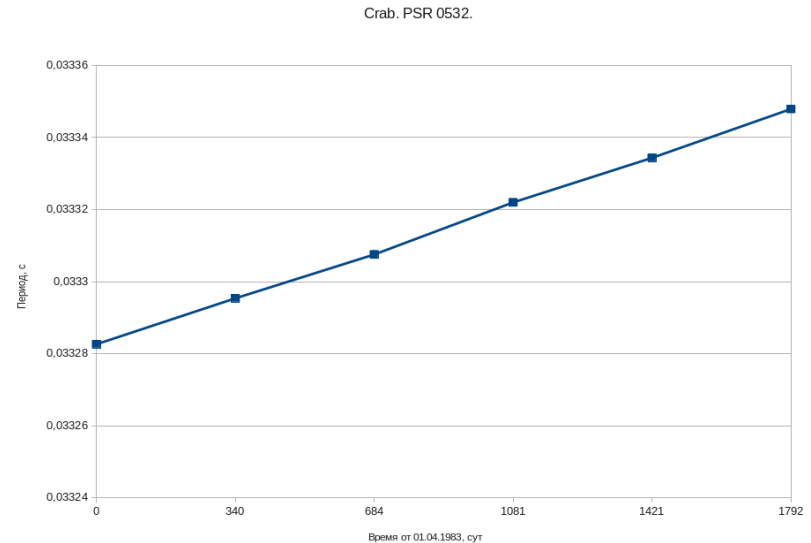
Пульсары были открыты в июне 1967 года Дж. Белл на меридианном радиотелескопе Маллардской радиоастрономической обсерватории Кембриджского университета на длине волны 3,5 м (85,7 МГц). К 2020 году обнаружено уже свыше 2800 радиопульсаров, более половины из которых были обнаружены обсерваторией Паркса в Австралии. Из них 140 входят в состав шаровых скоплений; 21 найден в Магеллановых облаках. По теоретическим оценкам, число доступных наблюдениям радиопульсаров в Галактике оценивается как $(24 \pm 3) \cdot 10^3$, а полное их число — $(240 \pm 30) \cdot 10^3$.

Вращение пульсаров

Максимальный известный период радиопульсара составляет 11,77 с, а минимальный — 0,0014 с (1,4 мс). Распределение пульсаров по периодам имеет два максимума: больший максимум соответствует периоду 0,6 с (нормальные пульсары), а меньший — периоду 4 мс (миллисекундные пульсары)



<https://ru.wikipedia.org/w/index.php?curid=1291377>

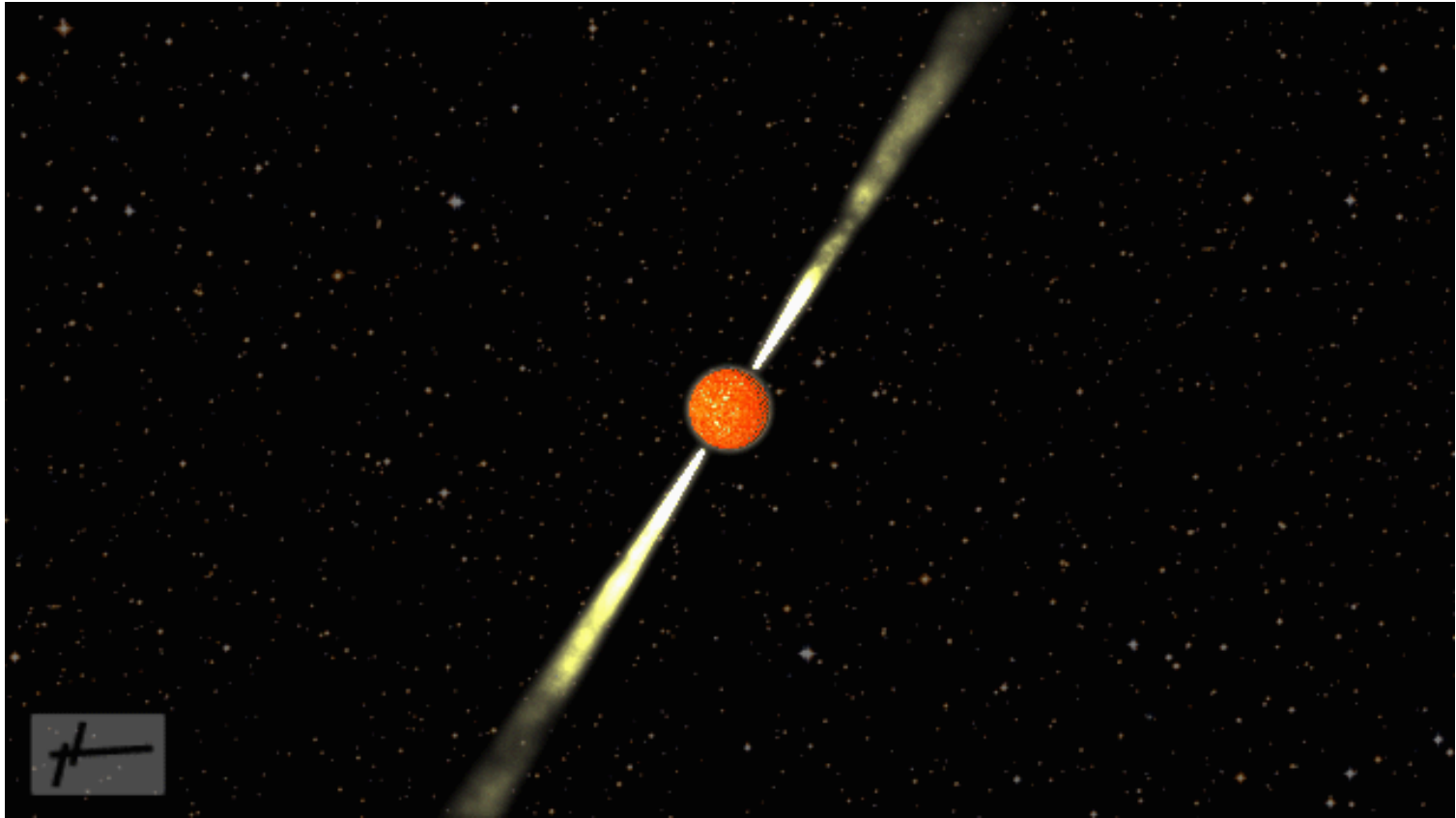


Изменение периода пульсара в
Крабе по данным спутника
Астрон

В отличие от обычных звёзд, пульсары имеют не чернотельный, а степенной спектр, что является важным свидетельством синхротронной природы излучения.

Излучение пульсаров сильно поляризовано. У пульсара PSR B0833-45 степень линейной поляризации близка к 100 %. Позиционный угол в пределах импульса для большинства пульсаров меняется монотонно, но у некоторых — скачком. Изменение поляризационных параметров вдоль среднего профиля является важной характеристикой пульсара.

Пульсар



<http://www.bolshoyvopros.ru/questions/3176042-chem-otlichaetsja-pulsar-ot-nejtronnoj-zvezdy.html>

Классификация нейтронных звезд

«Пропеллер»

Скорость вращения уже недостаточна для эжекции частиц, поэтому такая звезда не может быть радиопульсаром. Однако скорость вращения всё ещё велика, и захваченное магнитным полем окружающее нейтронную звезду вещество не может упасть на поверхность, то есть аккреция вещества не происходит. Нейтронные звёзды данного типа практически не наблюдаемы и изучены плохо.

Аккретор (рентгеновский пульсар)

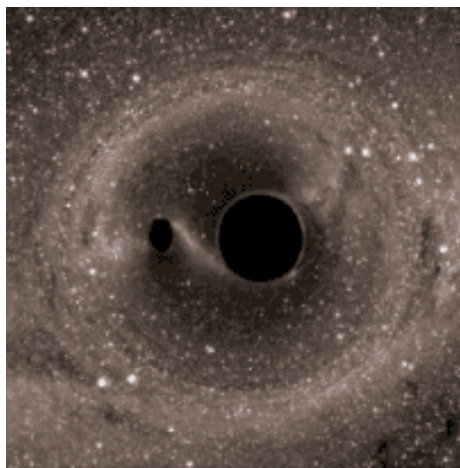
Скорость вращения снижается настолько, что веществу теперь ничего не препятствует падать на такую нейтронную звезду. Падая, вещество, уже будучи в состоянии плазмы, движется по линиям магнитного поля и ударяется о поверхность тела нейтронной звезды в районе её полюсов, разогреваясь при этом до десятков миллионов градусов. Вещество, нагретое до столь высоких температур, ярко светится в мягком рентгеновском диапазоне. Размер области, в которой происходит столкновение падающего вещества с поверхностью тела нейтронной звезды, очень мала — всего около 100 метров. Это горячее пятно из-за вращения звезды периодически затмевается телом звезды, поэтому наблюдаются регулярные пульсации рентген-излучения. Такие объекты и называются рентгеновскими пульсарами.

Георотатор

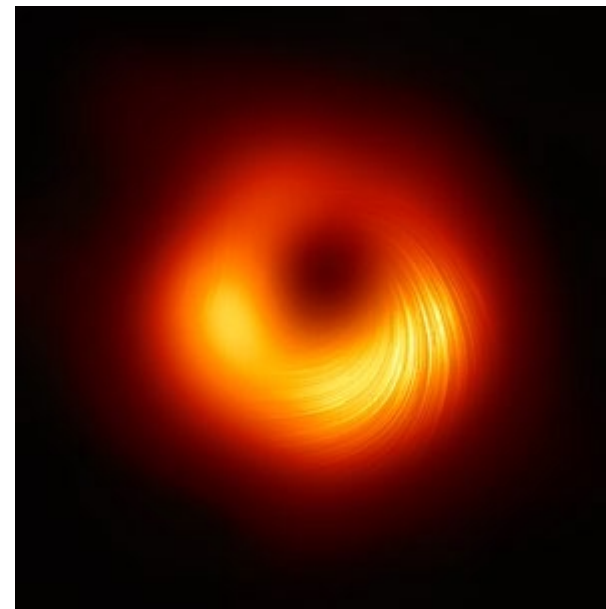
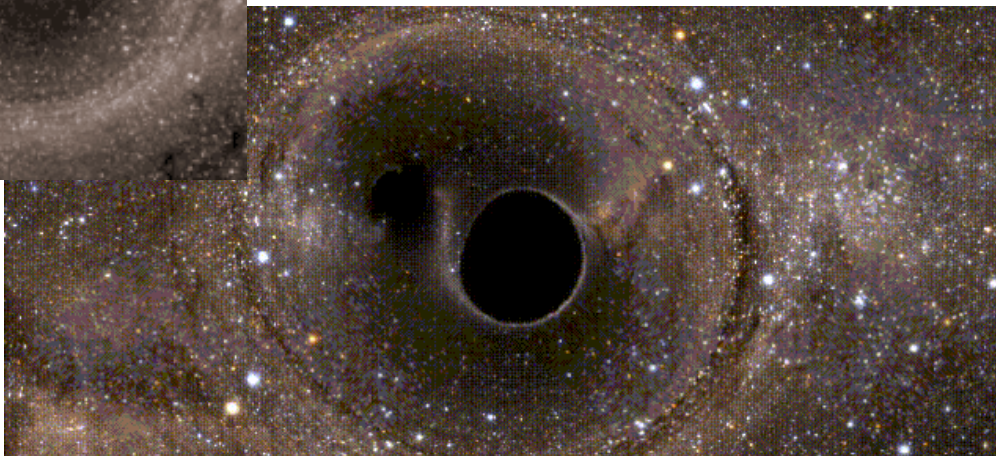
Скорость вращения таких нейтронных звёзд мала и не препятствует аккреции. Но размеры магнитосферы таковы, что плазма останавливается магнитным полем раньше, чем она будет захвачена гравитацией. Подобный механизм работает в магнитосфере Земли, из-за чего данный тип нейтронных звёзд и получил своё название.

Черные дыры

Чёрная дыра — область пространства-времени, гравитационное притяжение которой настолько велико, что покинуть её не могут даже объекты, движущиеся со скоростью света, в том числе кванты самого света. Граница этой области называется горизонтом событий. В простейшем случае сферически симметричной чёрной дыры он представляет собой сферу с радиусом Шварцшильда, который считается характерным размером чёрной дыры.



Слияние двух черных дыр



Сверхмассивная чёрная дыра в центре галактики М 87. Это первое в истории качественное изображение тени чёрной дыры, полученное напрямую в радиодиапазоне (Event Horizon Telescope)

Радиус Шварцшильда

В ньютоновском поле тяготения для частиц, покоящихся на бесконечности, с учётом закона сохранения энергии:

$$-\frac{GMm}{r} + \frac{mv^2}{2} = 0, \quad \text{т.е.} \quad v^2 = \frac{2GM}{r}.$$

Пусть гравитационный радиус r_g — расстояние от тяготеющей массы, на котором скорость частицы становится равной скорости света $v = c$. Тогда

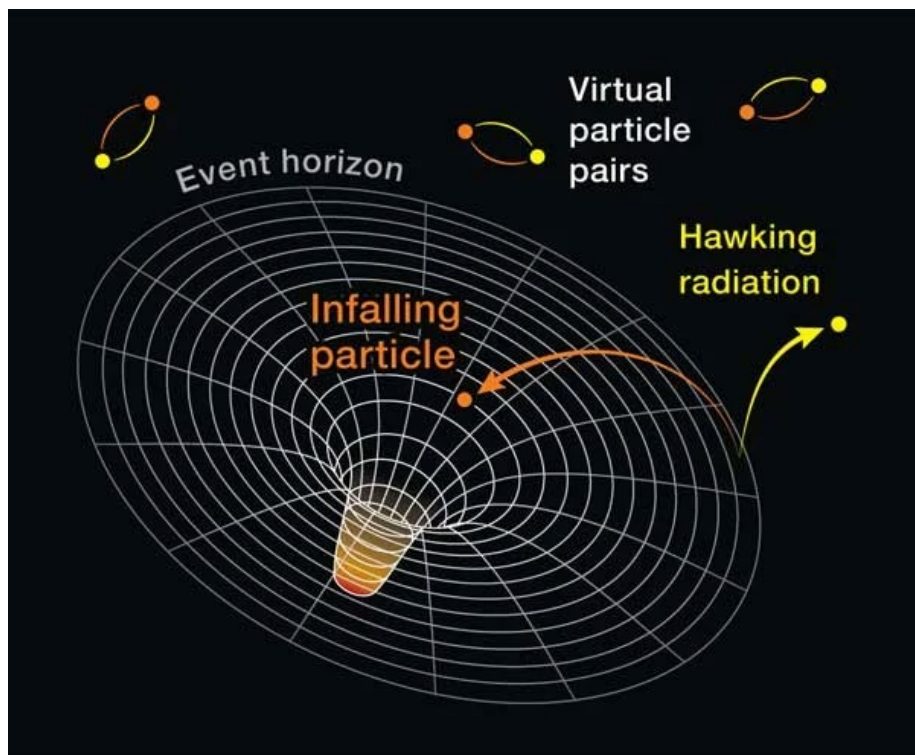
$$r_g = \frac{2GM}{c^2}.$$

$$r_g \approx 2,95 \cdot (M / M_{\odot}) \text{ км}$$

$$r_{g\odot} = \frac{2GM_{\odot}}{c^2} = \frac{2\mu_{\odot}}{c^2} = 2,953\,250\,077(2) \text{ км}$$

$$r_{g\oplus} = \frac{2GM_{\oplus}}{c^2} = \frac{2\mu_{\oplus}}{c^2} = 8,870\,056\,078(18) \text{ мм}$$

Излучение Хокинга



Из-за квантовых эффектов на горизонте событий возникает пара виртуальных фотонов.

Горизонт событий

Один из них падает в дыру, другой улетает прочь. В результате из виртуальных они превращаются в реальные.

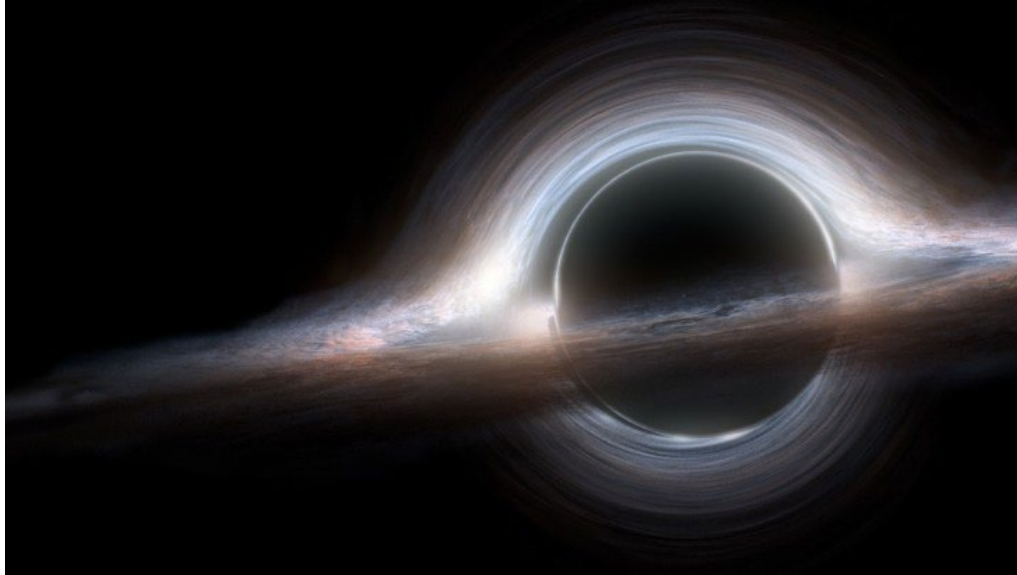
Гравитация растягивает испущенный фотон.

Фотон Хокинга

https://zen.yandex.ru/media/different_angle/kak-rojdaiutsia-i-umiraiut-chernye-dyry-5bfa8c95f66ec500aa5c074a

<http://www.modcos.com/articles.php?id=138>

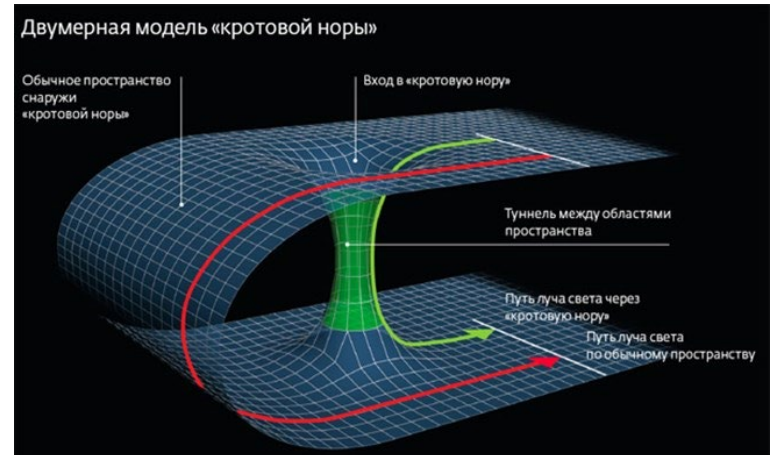
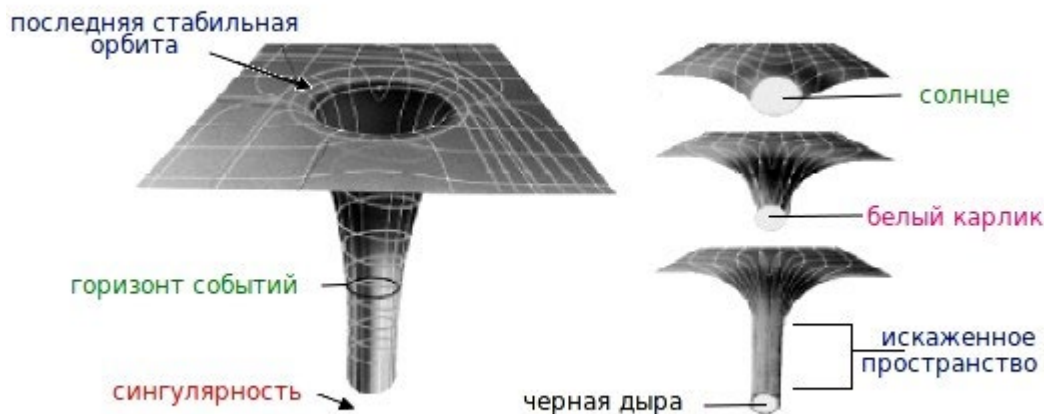
Что внутри черной дыры?



Ближайшая черная дыра удалена от Земли на 3000 световых лет. (V616 Monocerotis или V616 Mon). Ее вес достигает 9-13 масс Солнца. Cygnus X-1 (15 масс Солнца от Земли в 6 тысячах световых лет

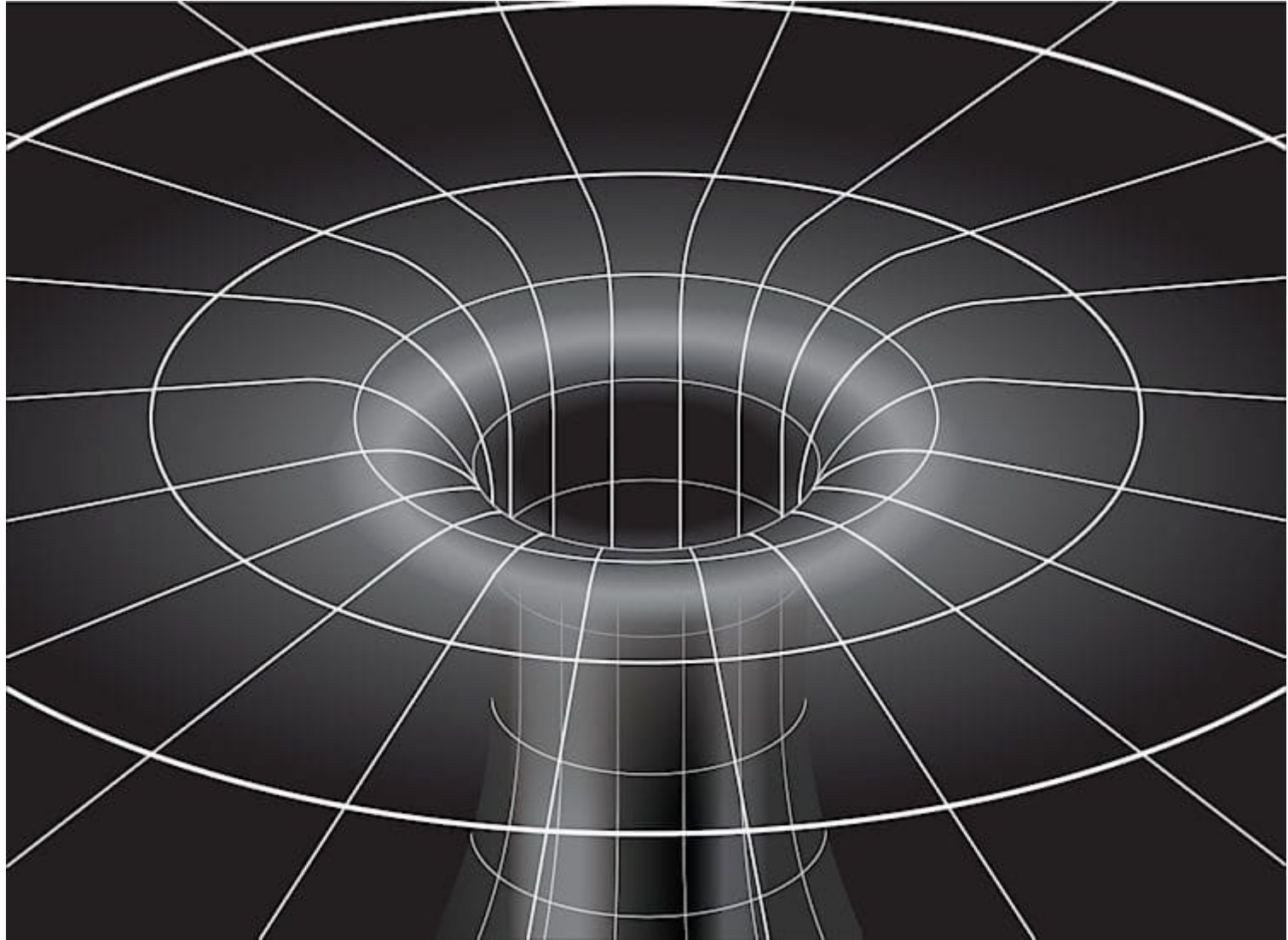
Кротовые норы

примеры гравитационных воронок



<http://darkbook.ru/krotovyye-nory-v-kosmose-cto-takoye-krotovaya-nora>

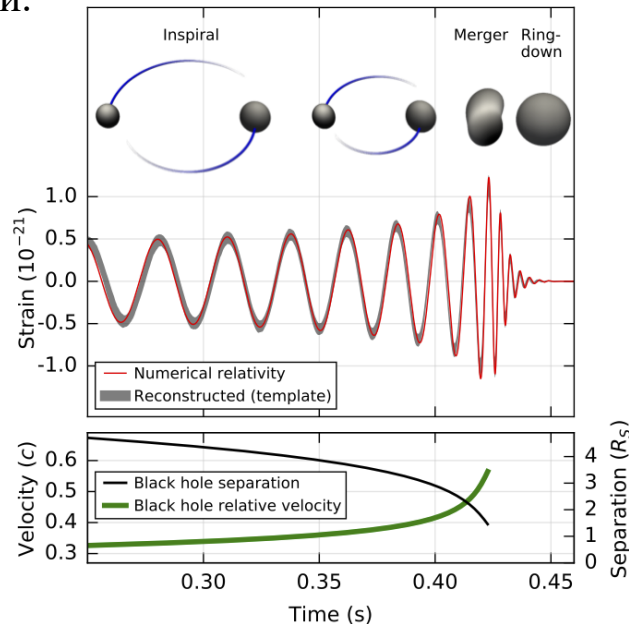
Пространство и время меняются местами



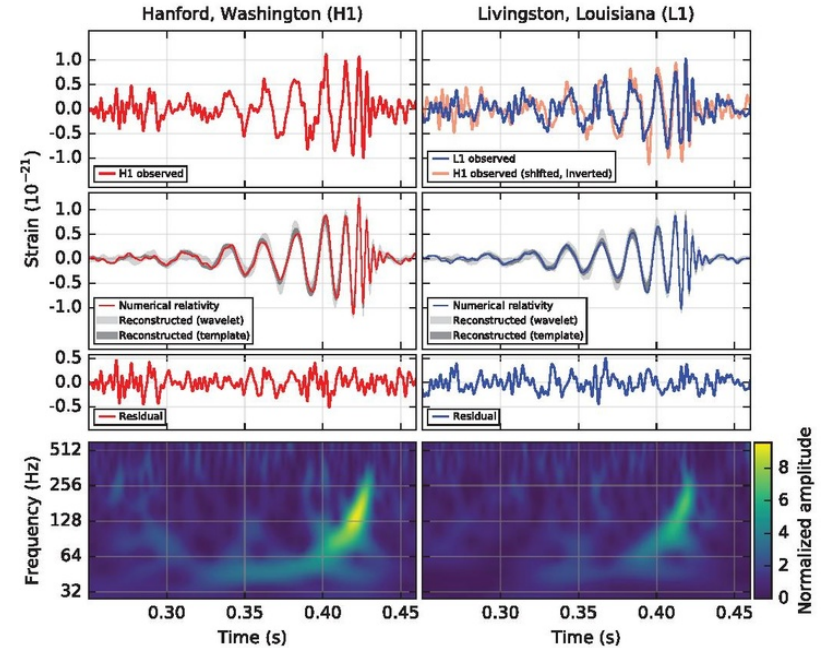
Гравитационные волны (событие GW150914)



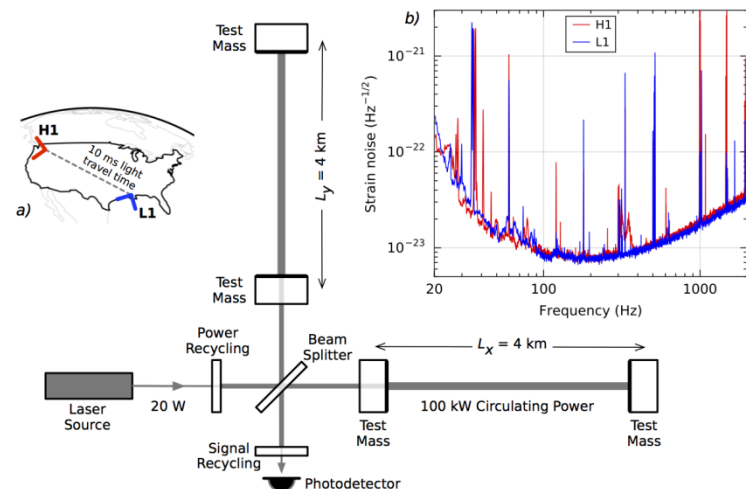
14 сентября 2015 год в 09:50:45 UTC два детектора LIGO (расположенные в США) одновременно наблюдали гравитационно-волновой сигнал GW150914. Сигнал соответствует предсказаниям Общей Теории Относительности (ОТО) для слияния двух черных дыр массами 36 и 29 солнечной.



<https://habr.com/post/390457/>



<http://physics.aps.org/featured-article-pdf/10.1103/PhysRevLett.116.061102>



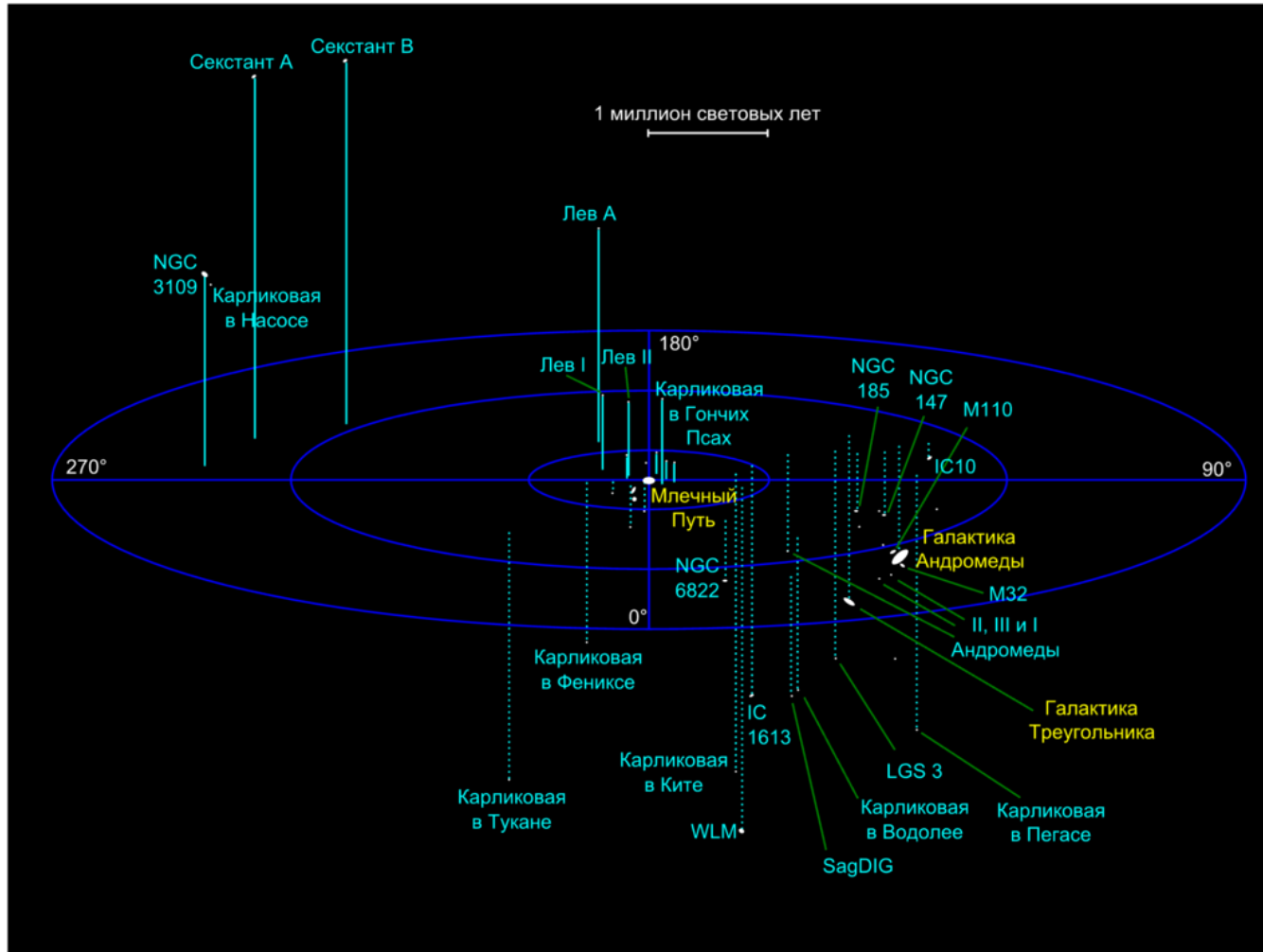
<https://habr.com/post/390457/>

«Наш адрес во Вселенной»

- Планетарная система: Солнечная система
- Межзвёздное облако: Местное межзвёздное облако
- Галактический рукав: Рукав Ориона
- Галактика: Млечный Путь
- Скопление галактик: Местная группа
- Местный лист
- Сверхскопление галактик: Местное сверхскопление (Девы)
- Сверхскопление галактик: Ланиакя
- Стена: Комплекс сверхскоплений Рыб-Кита
- Нить Персея-Пегаса

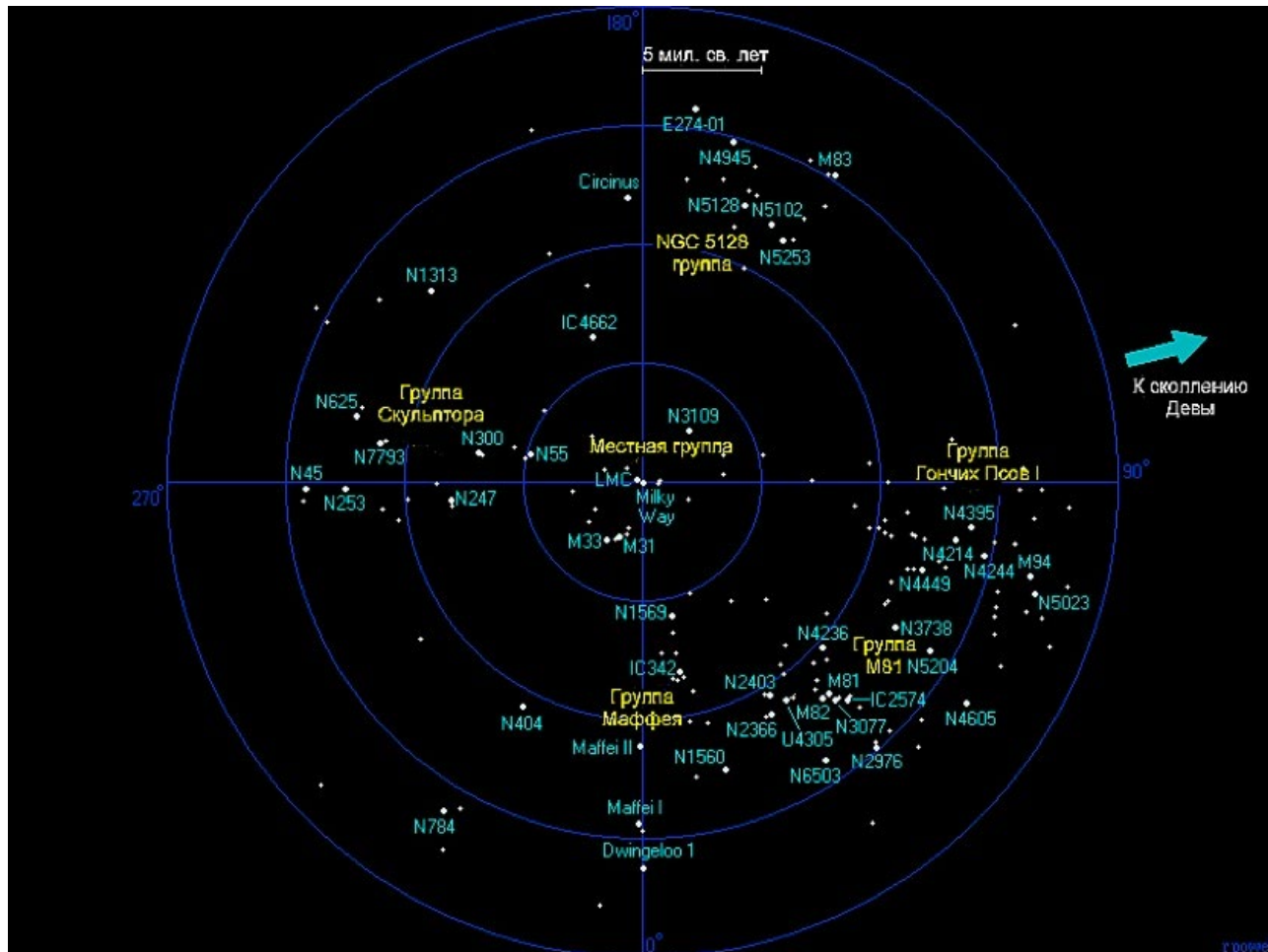
Местная группа галактик

Местная группа галактик — гравитационно связанная группа галактик, диаметром 3 мегапарсека (~10 миллионов световых лет) и массой около 2 триллионов солнечных масс, включающая в себя Млечный Путь, галактику Андромеды (M31) и галактику Треугольника (M33), а также несколько десятков менее крупных галактик.



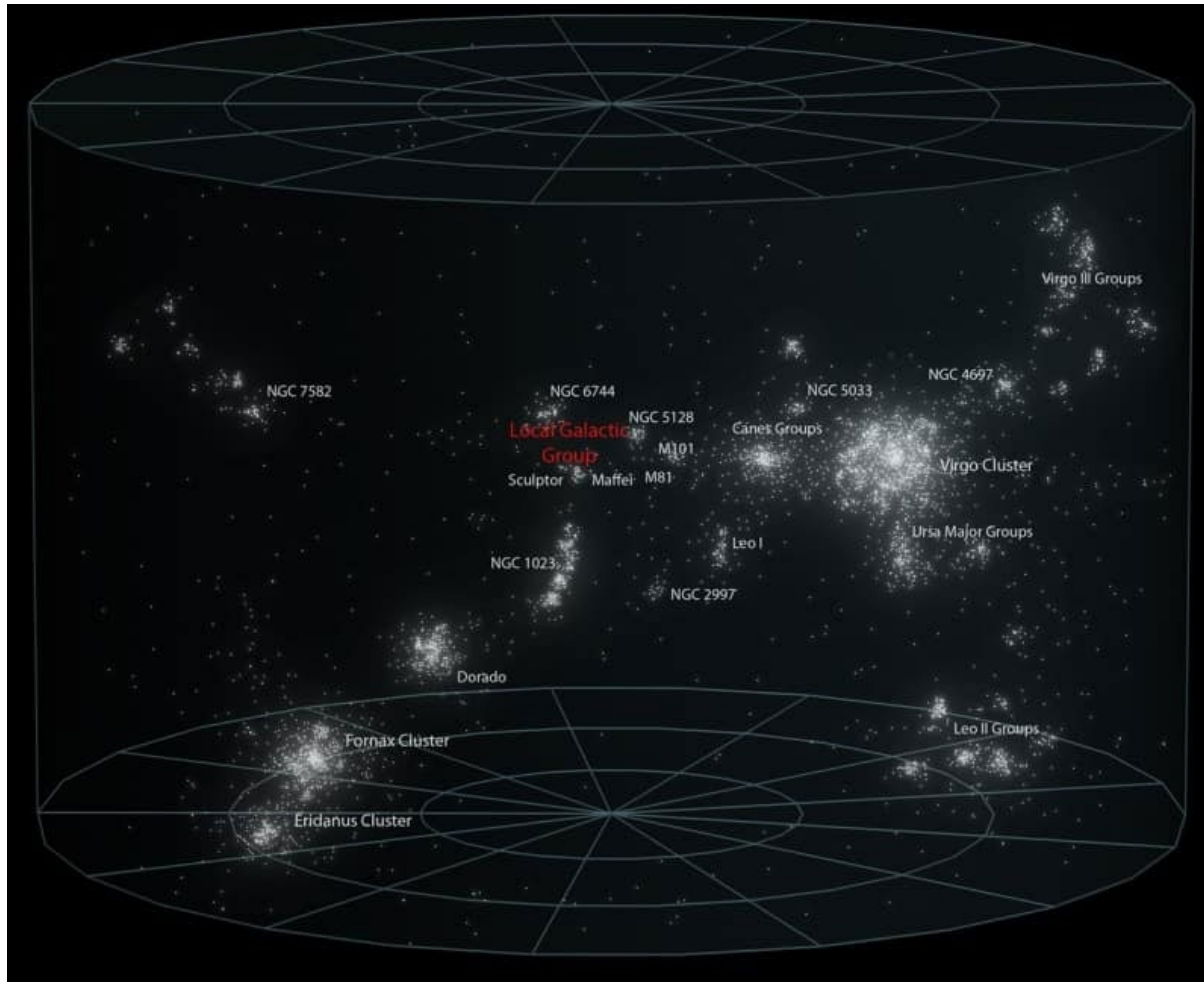
Местный лист галактик

Местный лист галактик — деталь крупномасштабной структуры Вселенной, галактическая нить, содержащей в себе Местную группу галактик вместе с нашей Галактикой. Имеет радиус примерно 7 мегапарсек (23 млн световых лет) и толщину 1,5 Мпк (5 млн св. лет). Местный лист является частью Местного сверхскопления галактик. Наклон Местного листа относительно плоскости Местного сверхскопления составляет примерно 8° .



Сверхскопление Девы

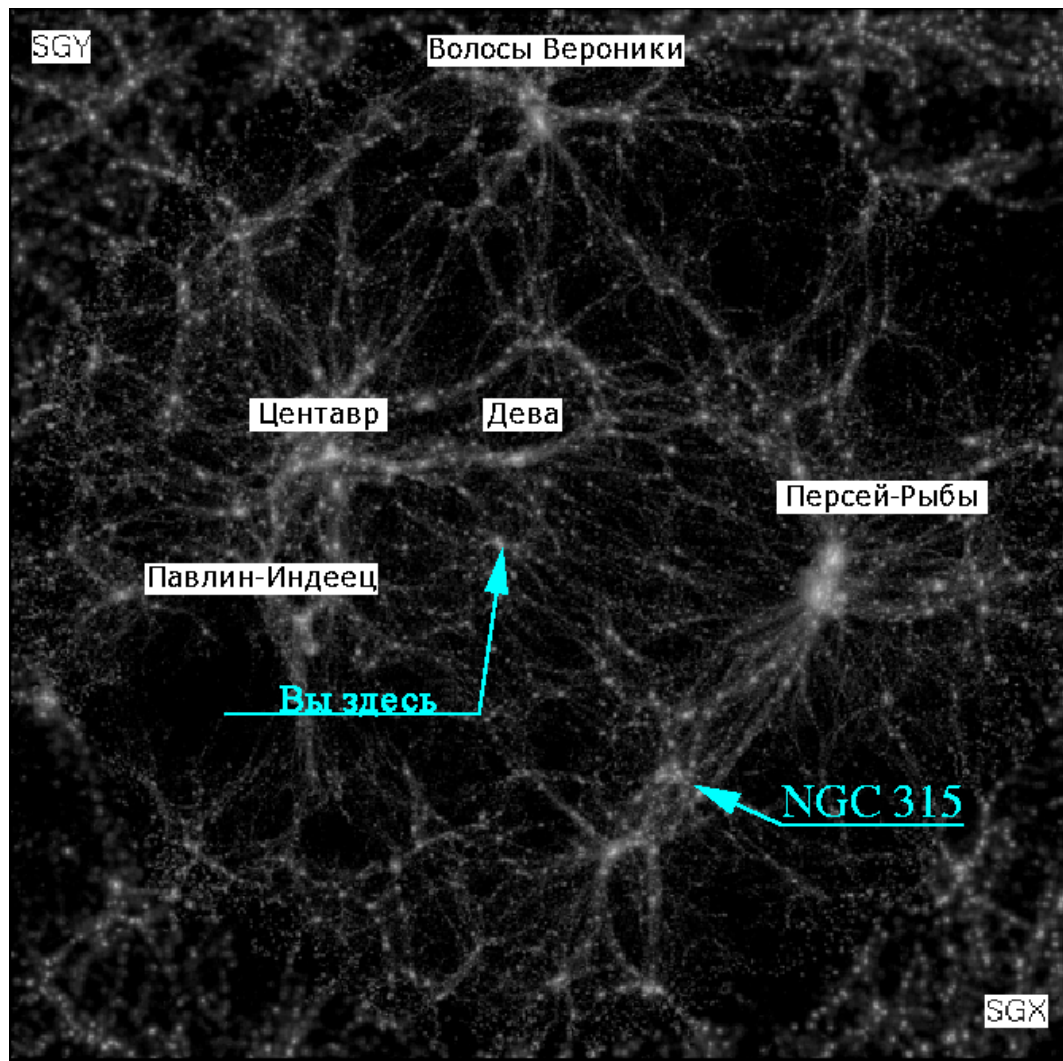
Местное сверхскопление галактик (Сверхскопление Девы, или Суперкластер Девы) — нерегулярное сверхскопление галактик размером около 200 миллионов световых лет, включающее Местную группу галактик, скопление галактик в Деве и несколько других скоплений и групп галактик. Всего в состав Местного сверхскопления входят как минимум 100 групп и скоплений галактик (с доминирующим скоплением Девы в центре) и около 30 тысяч галактик; его масса по порядку величины 10^{15} масс Солнца ($2 \cdot 10^{45}$ кг).



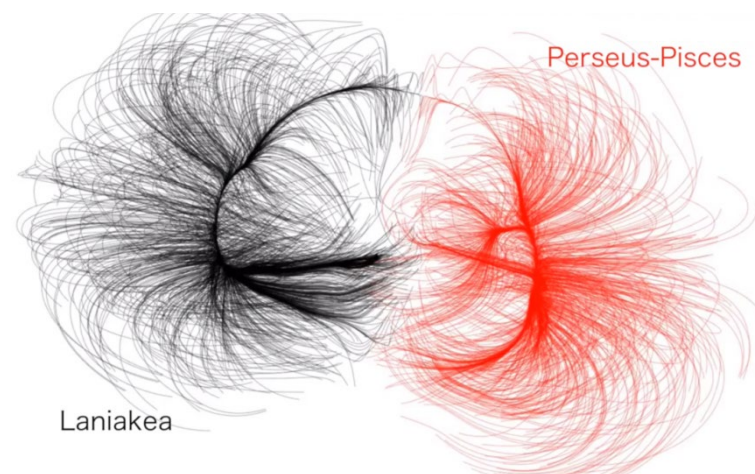
<http://news-video.ru/sverxskoplenie-devy-nashe-mesto-obitaniya-vo-vselennoj/>

Сверхскопление галактик: Ланиакее

Ланиакее (по-гавайски — «необъятные небеса») — сверхскопление галактик, в котором, в частности, содержатся Сверхскопление Девы (составной частью которого является Местная группа, содержащая галактику Млечный Путь с Солнечной системой) и Великий аттрактор, в котором расположен центр тяжести Ланиакее. Диаметр Ланиакее примерно равен 520 миллионам световых лет. Ланиакее состоит примерно из 100 тысяч галактик, движущихся совместно к некоторой области в космосе], а масса её примерно равна 10^{17} массам Солнца (примерно в 100 раз больше массы Сверхскопления Девы). Соседним с Ланиакеей является сверхскопление Персея-Рыб из цепи Персея-Пегаса (входящей в Комплекс сверхскоплений Рыб-Кита). Ланиакее была выделена по согласованным траекториям галактик.

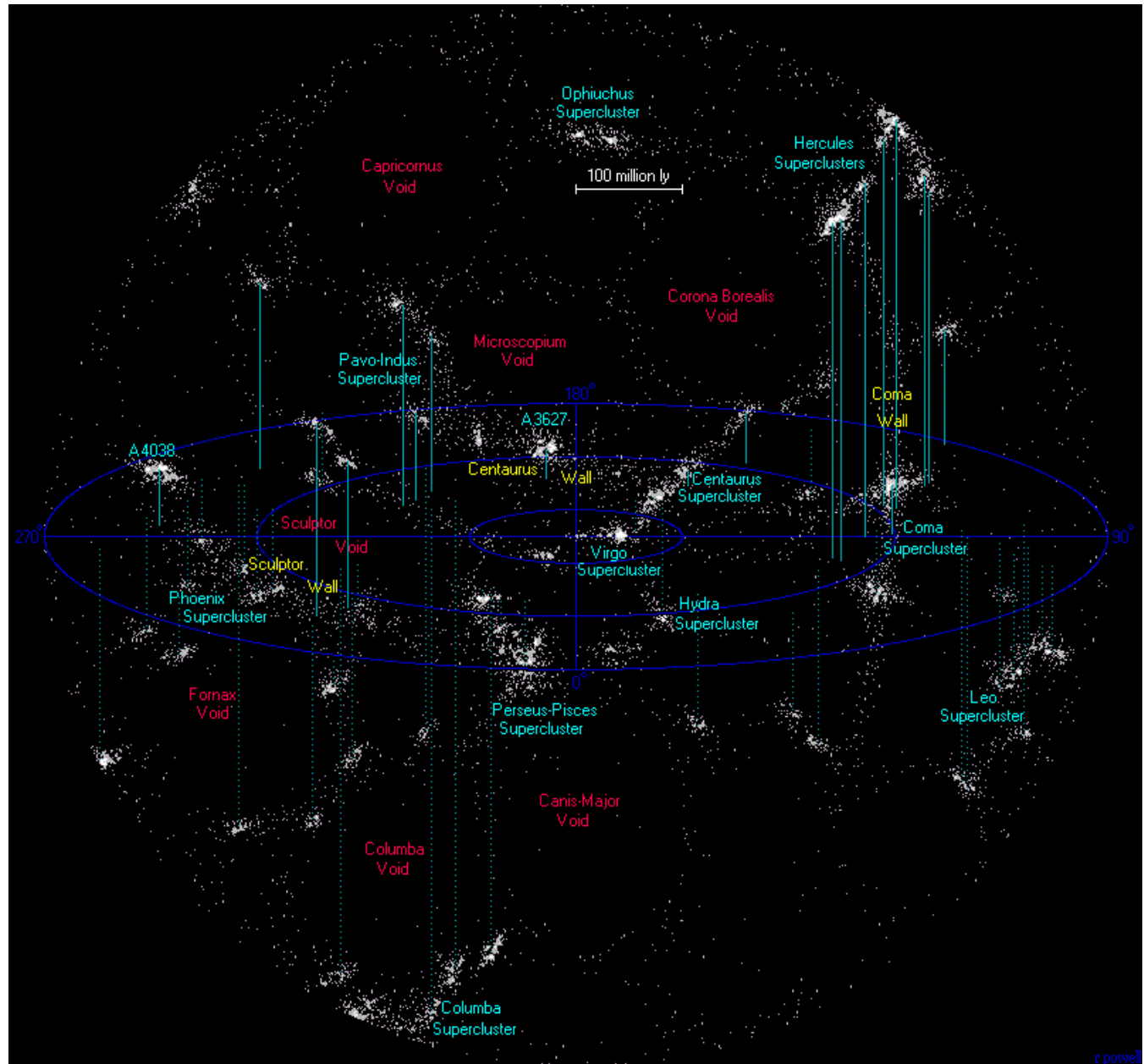


Ланиакеея



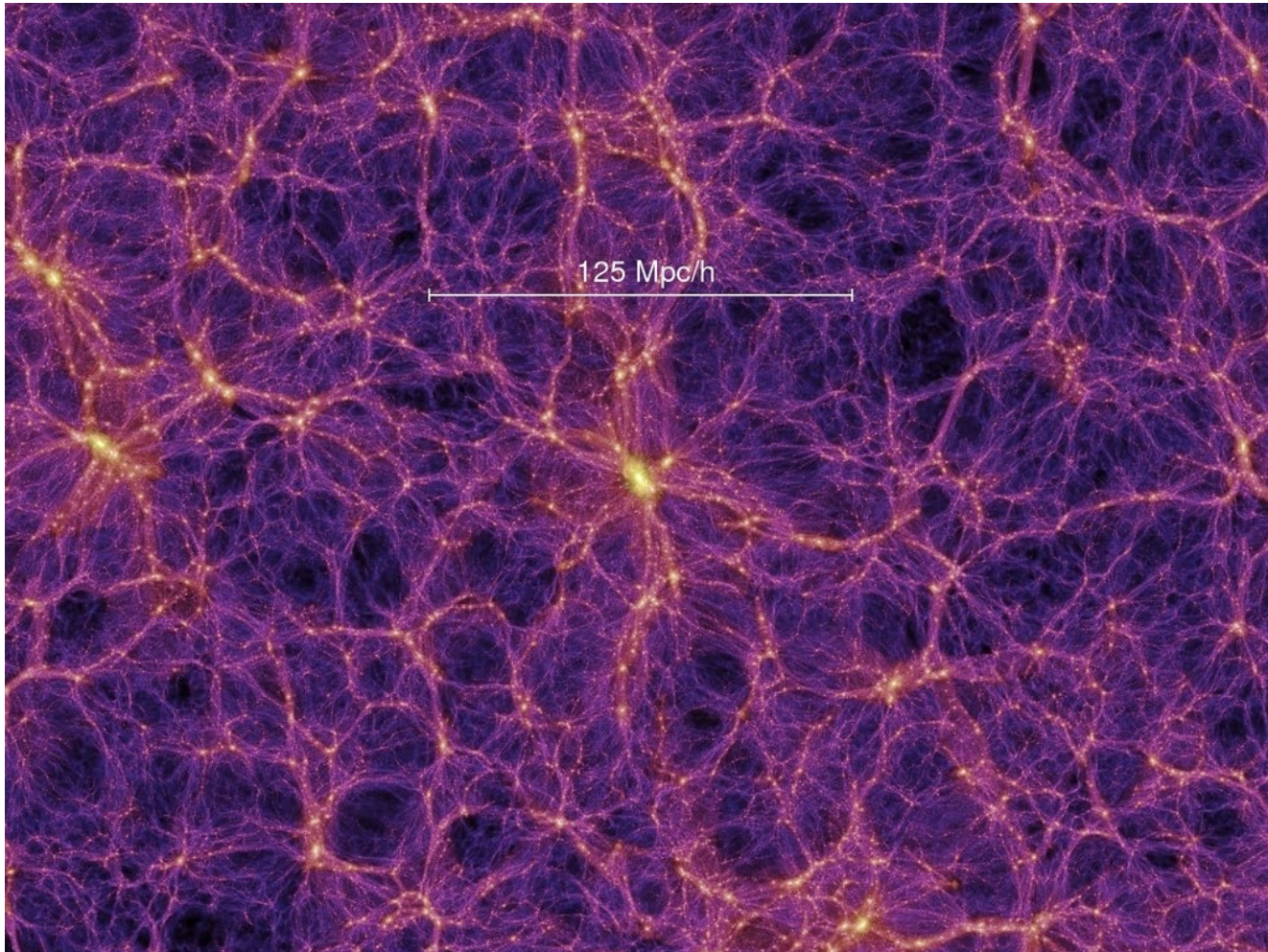
Комплекс сверхскоплений Рыб-Кита

Размер комплекса сверхскоплений Рыб-Кита оценивается примерно в 1,0 миллиард световых лет в длину и в 150 миллионов световых лет в ширину. Комплекс включает в себя около 60 скоплений галактик, и, по оценкам, их общая масса составляет 10^{18} солнечных масс (примерно на 1 порядок больше массы Ланиакеи).



Нить Персея-Пегаса. Крупномасштабная структура Вселенной

Нить Персея-Пегаса - глобальная суперструктура, состоящая из двух сверхскоплений - Сверхскопления Рыб-Персея и Сверхскопления Рыб-Кита

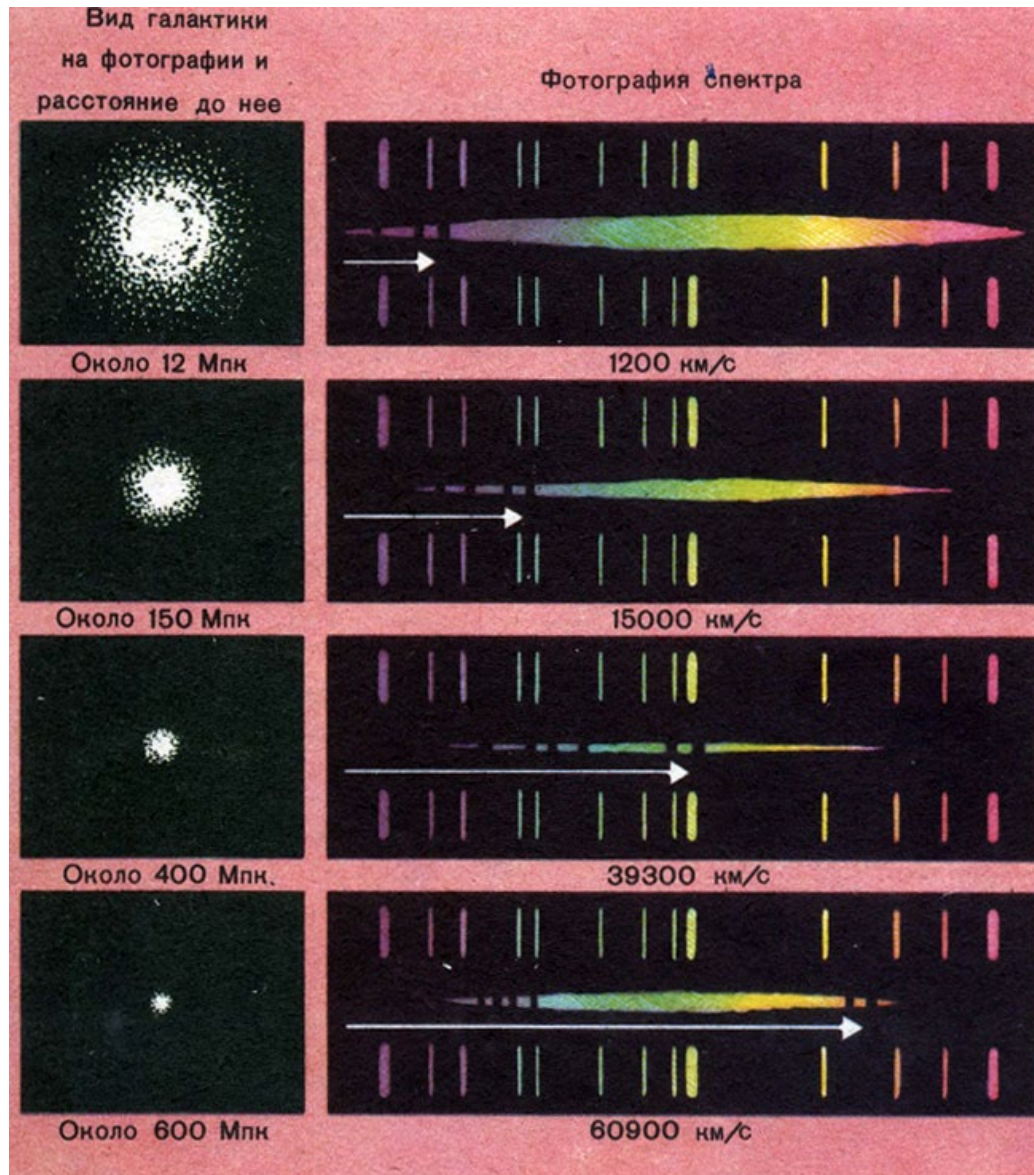


Крупномасштабная структура Вселенной



Крупномасштабная структура Вселенной, как она выглядит из нашей Галактики по данным обзора SDSS. Яркость каждой точки отражает плотность распределения галактик в данном направлении в последовательно сменяющихся сечениях постоянной толщины 10 Мпк, так что линейный масштаб изображения растёт по мере перехода к более удалённым слоям — поэтому размер структур кажется уменьшающимся. Протяжённое яркое пятно в нижней части картины — Великая стена Слоуна. (https://ru.wikipedia.org/wiki/Крупномасштабная_структура_Вселенной)

Расширение Вселенной. Красное смещение



Красное смещение в спектрах галактик возрастает с расстоянием до них (на фотографии спектра заметнее всего две главные линии поглощения ионизованного кальция). Ширина спектра зависит от видимого размера и яркости галактики. Яркие линии — спектр земного источника света

Расширение Вселенной. Определение расстояний до галактик

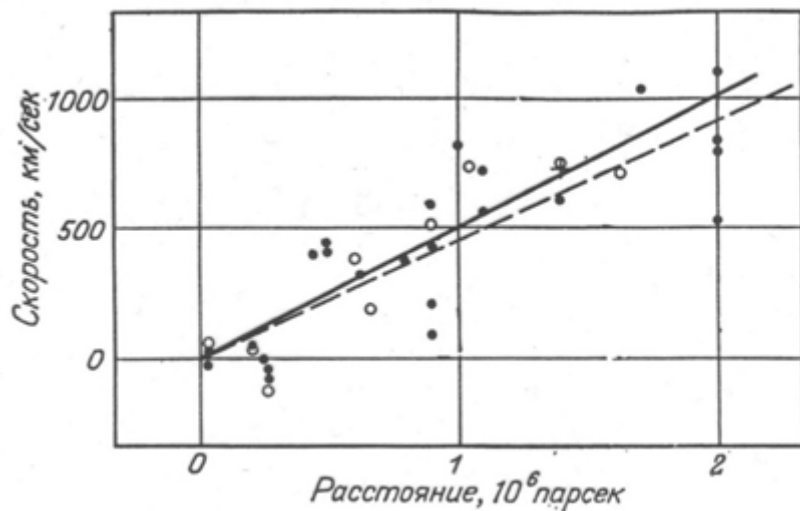
1. Стандартная формула $M = m + 5 - 5 \lg r$ [пк]
2. Цефеиды (период – светимость)
3. Гигантские области H II с известным линейным размером d , угловые размеры которого θ'' можно измерить. Тогда:

$$d = r \theta'' / 206265.$$

Для далеких галактик используется метод определения расстояния по красному смещению. В 1929 г. Хаббл нашел, что величина красного смещения (лучевой скорости галактики, определяемой по эффекту Доплера $v = c \Delta\lambda/\lambda = cz$) пропорциональна расстоянию до нее:

$$v = H r.$$

Величина H называется **постоянной Хаббла**. По имевшемуся у него скудному материалу Хаббл определил значение постоянной $H = 540 \text{ км/с/Мпк}$.



Последние определения постоянной Хаббла дают для нее значение $H = 72 \text{ км/с/Мпк}$ (с ошибкой $\approx 10 \%$).

ULAS J1342+0928 — квазар, расположенный в созвездии Волопаса. По состоянию на конец 2017 г. являлся самым удалённым из всех известных квазаров с красным смещением ($z = 7.54$) в 13.1 млрд. световых лет от Земли. Связанная с квазаром сверхмассивная чёрная дыра имеет массу «800 миллионов масс Солнца»

Установление Хабблом закона $v = H r$.

Расширение Вселенной

Вселенная Фридмана (метрика Фридмана — Леметра — Робертсона — Уокера) — одна из космологических моделей, удовлетворяющих полевым уравнениям общей теории относительности (ОТО), первая из нестационарных моделей Вселенной. Получена Александром Фридманом в 1922 г. Модель Фридмана описывает однородную изотропную в общем случае нестационарную Вселенную с веществом, обладающую положительной, нулевой или отрицательной постоянной кривизной. Эта работа учёного стала первым основным теоретическим развитием ОТО после работ Эйнштейна 1915—1917 гг.

Геометрия однородной изотропной Вселенной — это геометрия однородного и изотропного трёхмерного многообразия. Метрикой таких многообразий является **метрика Фридмана — Робертсона — Уокера (FWT)**

$$ds^2 = dt^2 - a^2(t) \left(dx^2 + k \frac{(x dx)^2}{1 - kx^2} \right),$$

где a — масштабный фактор, t — время в единицах скорости света, s — интервал,

k принимает значение:

$k = 0$ для трёхмерной плоскости,

$k = 1$ для трёхмерной сферы,

$k = -1$ для трёхмерной гиперболы,

$x = \{x_1, x_2, x_3\}$ — трёхмерный радиус-вектор в кваздекартовых координатах.

Основные уравнения. Критическая плотность.

Если же выражение для метрики подставить в уравнения ОТО для идеальной жидкости, то получим следующую систему уравнений:

Название	СИ
Уравнение энергии	$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \left(\frac{kc^2}{a^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$
Уравнение движения	$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}$
Уравнение неразрывности	$\frac{d\rho}{dt} = -3H \left(\rho + \frac{P}{c^2}\right)$

где Λ — космологическая постоянная, ρ — средняя плотность Вселенной, P — давление, c — скорость света.

Постоянная Хаббла: $H = \frac{\dot{a}(t_1)}{a(t_1)}$

Подставив в уравнение энергии, записанного для текущего момента, выражение для постоянной Хаббла (H_0), приведём его к виду:

$$1 = \Omega_m + \Omega_k + \Omega_\Lambda,$$

$$\text{где } \Omega_m = \frac{\rho}{\rho_{cr}}, \Omega_\Lambda = \frac{8\pi G\Lambda c^2}{\rho_{cr}}, \rho_{cr} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}, \Omega_k = -\frac{kc^2}{a^2 H^2},$$

Критическая плотность Вселенной ρ_{cr} — выделенное значение плотности материи (вещества и энергии) Вселенной, от которого зависят глобальные геометрические свойства вселенной в космологических моделях.

Динамика расширения

Плотность вещества и тёмной энергии, отнесённая к критической, сама критическая плотность и вклад кривизны пространства соответственно. Если переписать уравнение следующим образом

$$\Omega_k = 1 - (\Omega_m + \Omega_\Lambda) = 1 - \left(\frac{\rho + \rho_\Lambda}{\rho_{cr}} \right),$$

то станет очевидно, что:

$$k = \begin{cases} -1, & \rho + \rho_\Lambda < \rho_{cr} \\ 0, & \rho + \rho_\Lambda = \rho_{cr} \\ 1, & \rho + \rho_\Lambda > \rho_{cr} \end{cases}$$

$\rho < \rho_{cr}$ — пространство с отрицательной кривизной, открытая вселенная;

$\rho = \rho_{cr}$ — плоская, открытая вселенная;

$\rho > \rho_{cr}$ — положительная кривизна пространства, вселенная замкнута.

$\Lambda < 0$

Если значение космологической постоянной отрицательно, то действуют только силы притяжения и более никаких. Правая часть уравнения энергии будет неотрицательной только при конечных значениях R . Это означает, что при некотором значении R_c Вселенная начнёт сжиматься при любом значении k и вне зависимости от вида уравнения состояния.

$\Lambda = 0$

В случае, если космологическая постоянная равна нулю, то эволюция целиком и полностью зависит от начальной плотности вещества

$$\left(\frac{da}{dt} \right)^2 = G \frac{8\pi\rho_0 a_0^3}{3a} - a_0^2 H_0 \left(\rho_0 - \frac{3H_0^2}{8\pi G} \right).$$

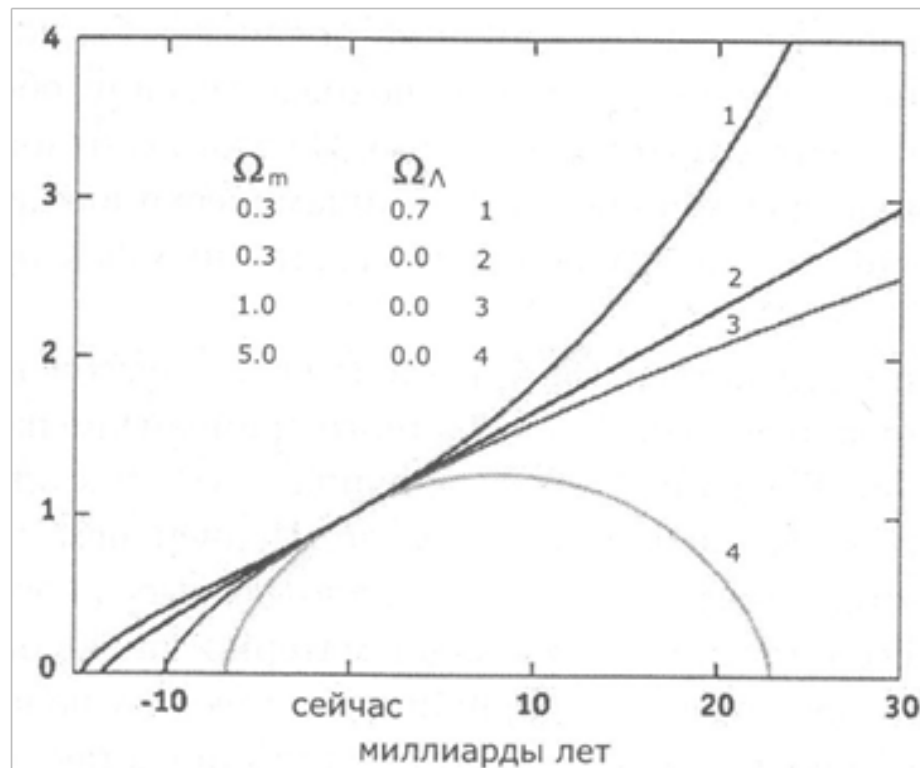
$\Lambda > 0$

Если $\Lambda > 0$ и $k \leq 0$, то Вселенная монотонно расширяется, но в отличие от случая с $\Lambda = 0$ при больших значениях R скорость расширения растёт:

$$R \propto \exp[(\Lambda/3)^{1/2} t].$$

Изменение масштабного фактора со временем для разных моделей Вселенной.

Что касается будущего нашей Вселенной, то рассчитаны разные модели при разных значениях доли плотности всей материи (видимой и скрытой) Ω_m и «темной энергии» Ω_Λ в единицах критической массы. Отметим, что доля наблюдаемого вещества (видимой материи) составляет не более 0.05. Наличие темной энергии обеспечивает наблюдаемое (в частности, по данным о сверхновых типа Ia) ускоренное расширение Вселенной. Изменение масштабного фактора (от которого зависят все расстояния во Вселенной) со временем для разных моделей представлено на рис. Согласно современным представлениям $\Omega_m \approx 0.3$. Остальное приходится на темную энергию. Природа темной энергии пока не установлена.



Пространственная кривизна

Пространственная кривизна

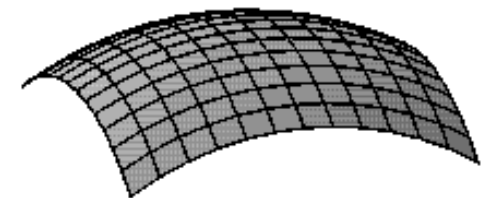
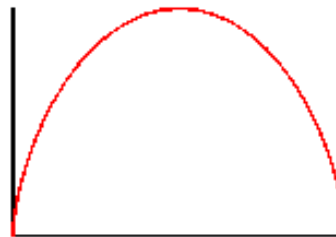
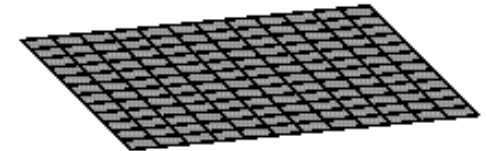
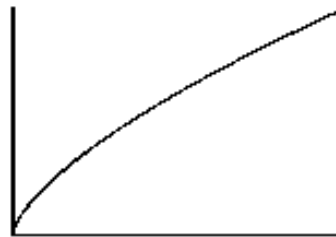
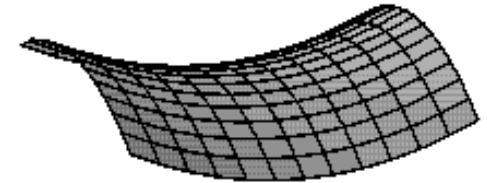
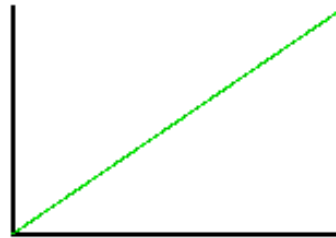
$$\Omega = \rho/\rho_{\text{крит}}$$

Для $\Omega < 1$ Вселенная имеет отрицательную кривизну или гиперболическую геометрию.

Для $\Omega = 1$, Вселенная имеет Евклидову или плоскую геометрию.

Для $\Omega > 1$, Вселенная имеет положительную кривизну или сферическую геометрию.

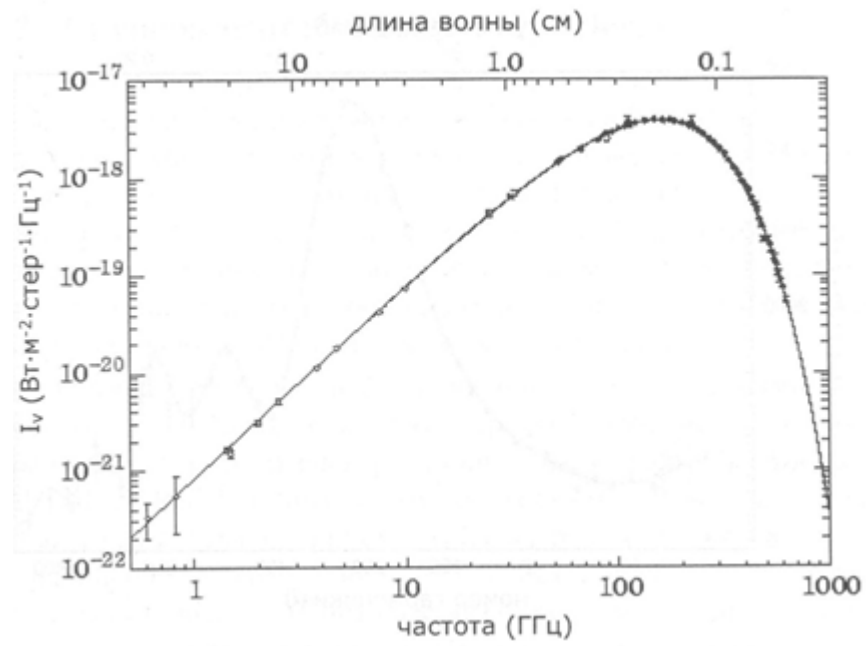
Случай нулевой плотности имеет гиперболическую геометрию.



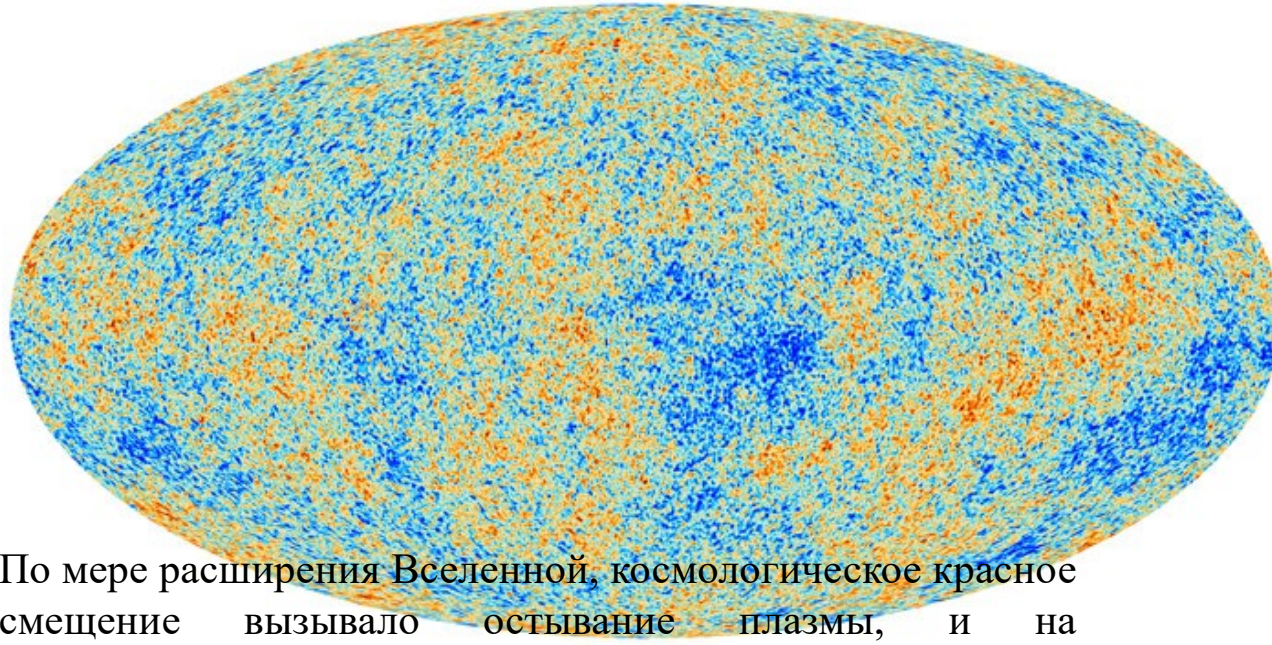
Реликтовое излучение

В 40-х годах прошлого века после пионерских теоретических работ Гамова успешно разрабатывалась модель «большого взрыва», с которого началось расширение. В первые секунды своего существования Вселенная была очень горячей (модель «горячей Вселенной», предложенная Гамовым) и излучение ее следовало закону Планка. По мере расширения температура падала, но распределение энергии по-прежнему должно было оставаться чернотельным. Оценки температуры в настоящий момент давали значения порядка нескольких градусов Кельвина. Модель горячей Вселенной получила наблюдательное подтверждение в результате обнаружения в 1964 г. Пензиасом и Вильсоном изотропного теплового излучения с температурой 2.7 К. Спектр его представлен на рис., на котором сплошная кривая дает планковский спектр для $T = 2.726$ К; она идеально представляет результаты наблюдений. Излучение получило название **реликтового**, поскольку оно отражает свойства Вселенной на самых ранних этапах ее развития.

Спектр реликтового излучения;
сплошная кривая – чернотельный
спектр с температурой 2.726 К.



Реликтовое излучение

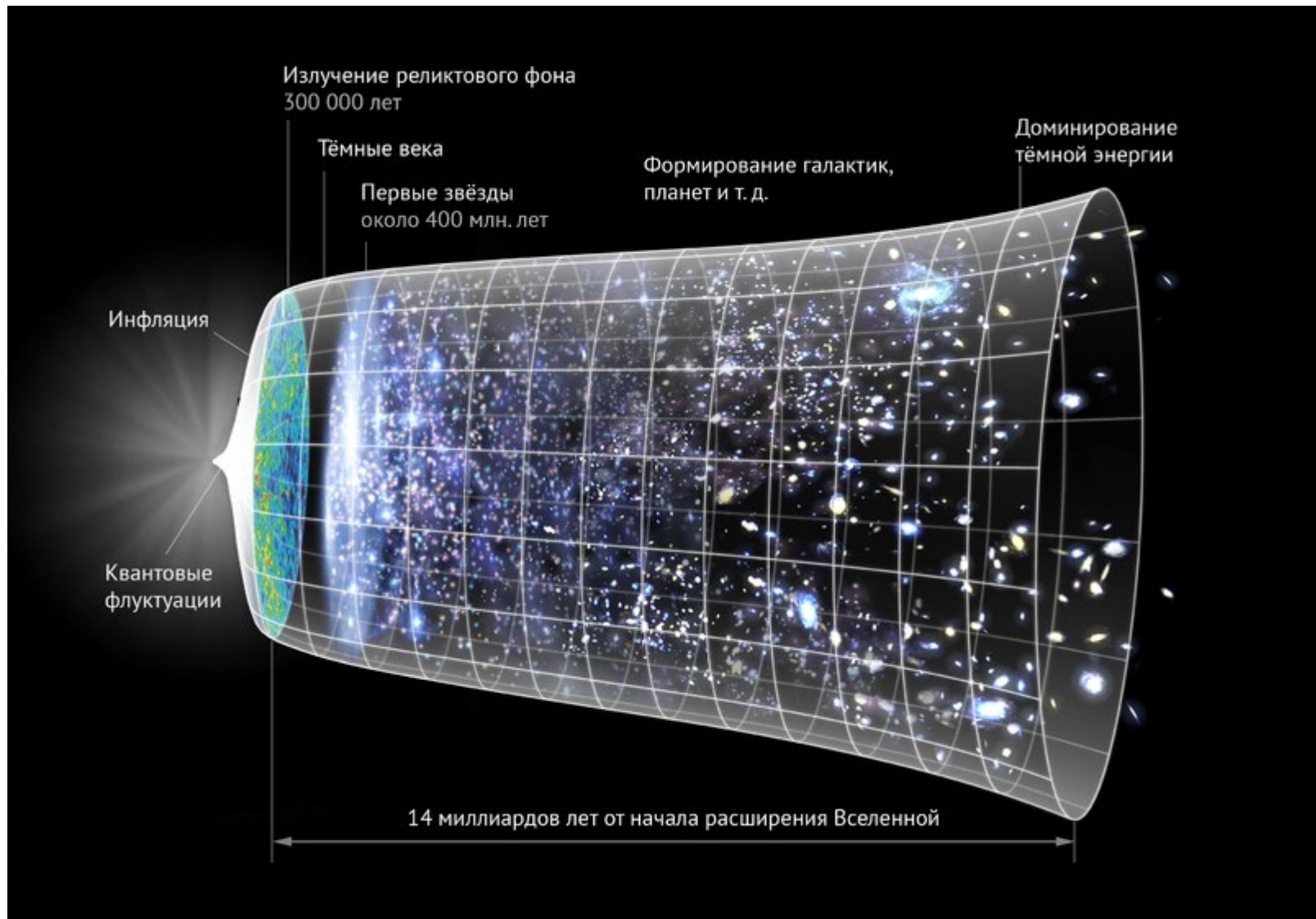


Карта флуктуаций реликтового излучения в галактических координатах по данным космической обсерватории «Планк». Синим цветом обозначены области, которые примерно на пару десятков микрокельвинов холоднее красных.

По мере расширения Вселенной, космологическое красное смещение вызывало остывание плазмы, и на определённом этапе замедлившиеся электроны получили возможность соединиться с замедлившимися протонами (ядрами водорода) и альфа-частицами (ядрами гелия), образуя атомы. Это случилось при температуре плазмы около 3000 К и примерном возрасте Вселенной 380 000 лет. Свободного пространства между частицами стало больше, заряженных частиц стало меньше, фотоны перестали так часто рассеиваться и теперь могли свободно перемещаться в пространстве, практически не взаимодействуя с веществом. Реликтовое излучение и составляют те фотоны, которые были в то время излучены плазмой в сторону будущего расположения Земли



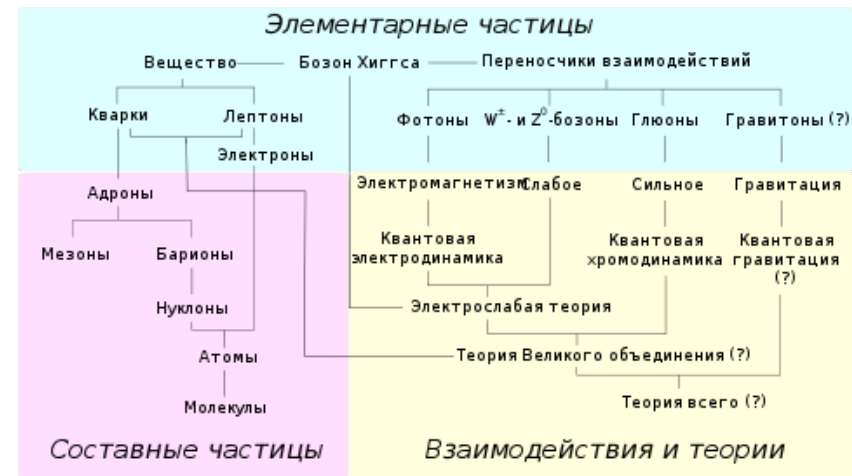
Расширение Вселенной.



Хронология эволюции Вселенной

Эра	Возраст	Температура	Состояние
Планка	10^{-47} — 10^{-36} с	10^{32} К	Господствует одно универсальное взаимодействие, от которого под конец эры Планка отделяется гравитационное взаимодействие
Инфляции	10^{-36} — 10^{-33} с	10^{27} К	Выделяется сильное (ядерное) взаимодействие. Происходит резкое «вздутие» (инфляция) Вселенной
Кварков	10^{-33} — 10^{-12} с	10^{25} К	Образуются кварки и антикварки, элементарные частицы
Возникновения электромагнитных и слабых взаимодействий	10^{-12} — 10^{-6} с	10^{16} К	Появляются электромагнитные и слабые взаимодействия
Протонно-нейтронная	10^{-6} — 10^{-4} с	10^{13} К	Из кварков образуются протоны, нейтроны и их антитела, антипротоны и антинейтроны
Лептонная	10^{-4} — 10 с	10^{12} — 10^9 К	Большинство античастиц распадается. Число протонов превосходит число нейтронов. Образуются лептоны, например, электрон и позитрон. Большинство позитронов распадается
Начала нуклеосинтеза	10 с— 10^6 лет	10^9 К	Образуются ядра атомов гелия, дейтерия, лития, а также бериллия. Вещество начинает преобладать над излучением. Вселенная становится прозрачной. Образуется реликтовое излучение, имеющее ныне температуру 2,7 К. Преобладание вещества приводит к росту значимости гравитационных сил. Возникают гравитационные неустойчивости

Эра	Возраст	Температура	Состояние
Образования галактик и звезд	10^6 — 10^{10} лет		Образуются галактики и звезды. В звездах нуклеосинтез приводит к образованию атомов химических элементов вплоть до атомов железа. Взрывы звезд приводят к образованию так называемых сверхновых звезд. Эти взрывы приводят к образованию атомов элементов, более тяжелых, чем атомы железа. Возраст Солнца около 5 млрд лет
Образования планет	10^{10} лет		Планеты, в том числе и Земля, образуются из газово-пылевых облаков. Возраст Земли около 4,6 млрд лет

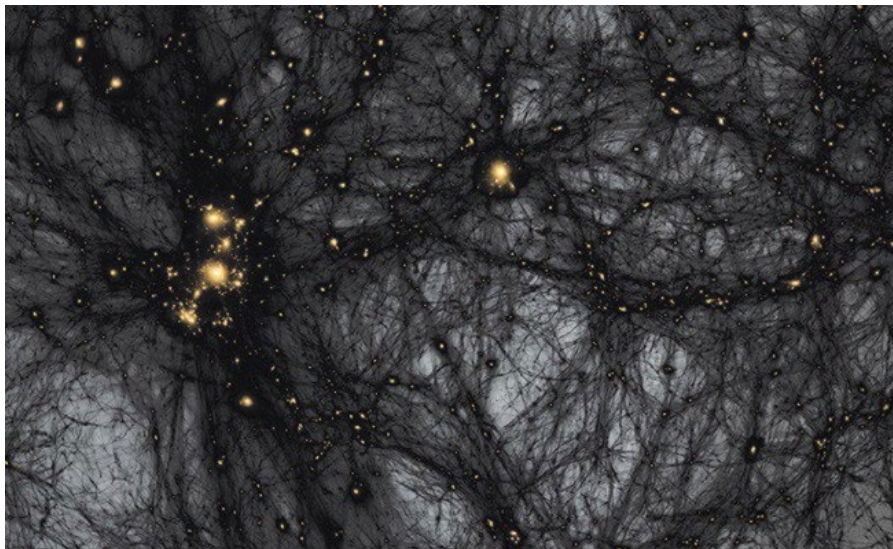


Хаббловский радиус

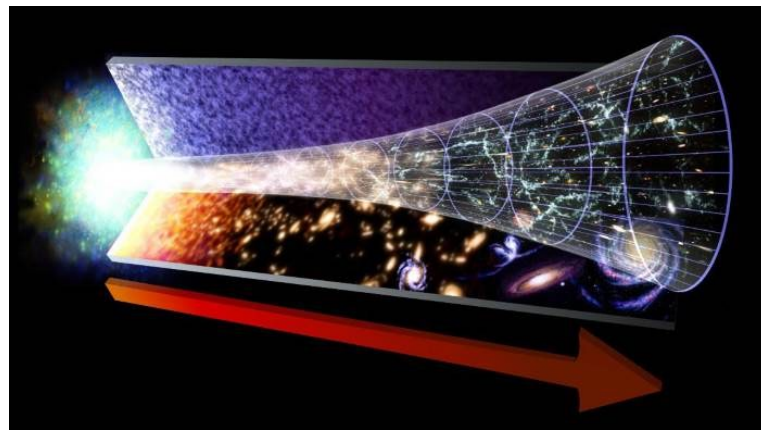
Хаббловский радиус (горизонт событий для любого наблюдателя) определяется как
 $\sim 10^{28} (50 \text{ км/с/Мпк}/H_0) \text{ см}$ или
 $\sim 4000 (50 \text{ км/с/Мпк}/H_0) \text{ Мпк}$
(H_0 — современное значение постоянной Хаббла).

Расширение Вселенной, темная материя, темная энергия

Сущность тёмной энергии является предметом споров. Известно, что она очень равномерно распределена, имеет низкую плотность, и не взаимодействует сколько-нибудь заметно с обычной материей посредством известных фундаментальных типов взаимодействия — за исключением гравитации. Поскольку гипотетическая плотность тёмной энергии невелика (порядка 10^{-29} г/см³), её вряд ли удастся обнаружить лабораторным экспериментом. Тёмная энергия может оказывать такое глубокое влияние на Вселенную (составляя 70 % всей энергии) только потому, что она однородно наполняет пустое (в иных отношениях) пространство.



Тёмная материя в астрономии и космологии, а также в теоретической физике — гипотетическая форма материи, которая не испускает электромагнитного излучения и напрямую не взаимодействует с ним. Это свойство данной формы вещества делает невозможным её прямое наблюдение.



На сегодня всё!