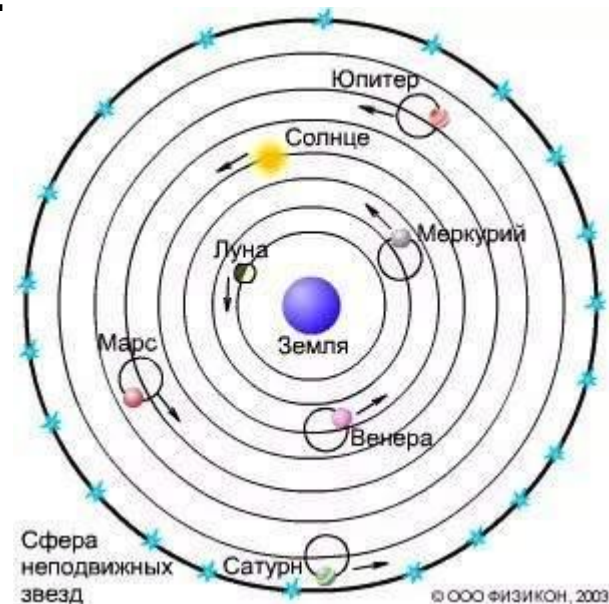


# ОСНОВЫ СОВРЕМЕННОЙ КОСМОЛОГИИ

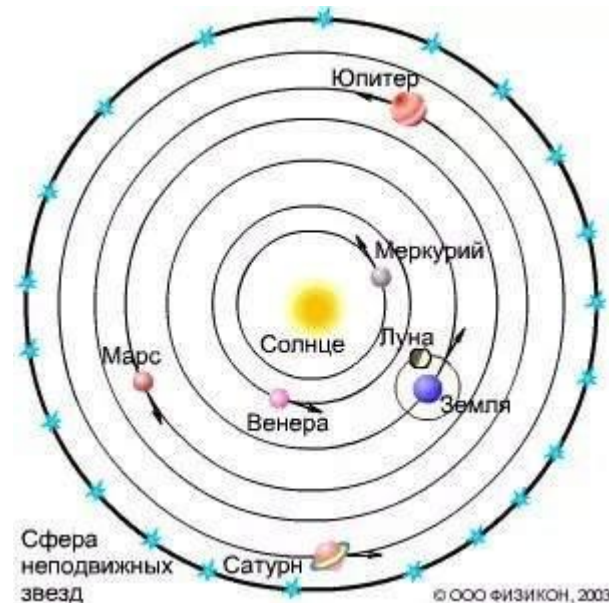
# Космология начала XX века

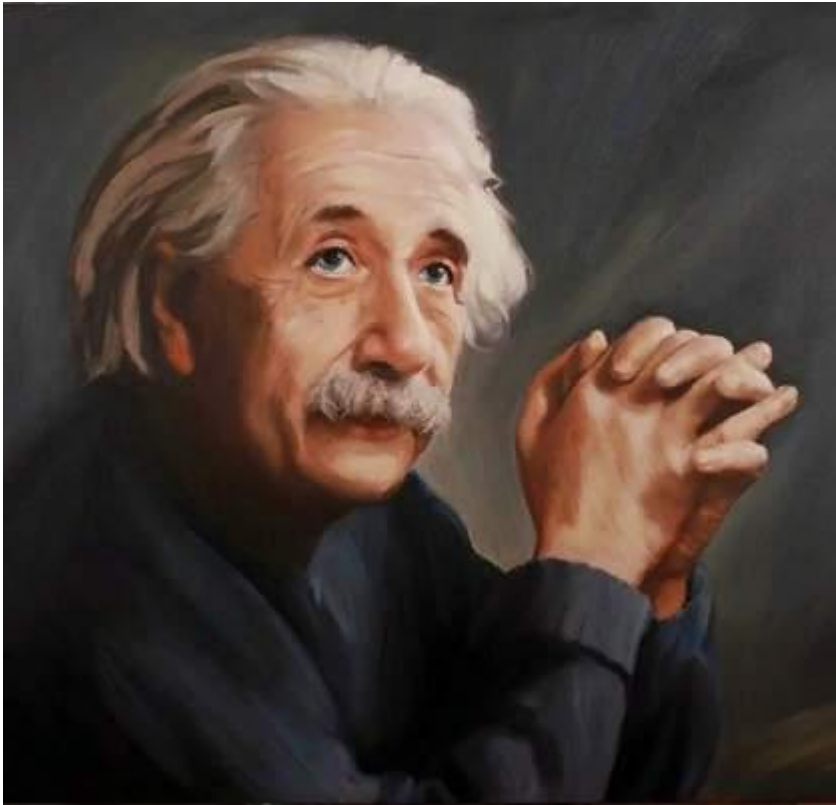
**Космология** – раздел астрономии, который изучает строение и эволюцию Вселенной в целом, используя при этом методы и достижения физики, математики и философии.

**Геоцентрическая система Аристотеля–Птолемея** стала первой научно обоснованной космологической моделью Вселенной.



Спустя 1500 лет её сменила новая космологическая модель – **гелиоцентрическая система, предложенная Коперником**.





Теоретическим фундаментом современной космологии явилась созданная **Альбертом Эйнштейном** (1879–1955) в начале XX в. общая теория относительности – **релятивистская теория тяготения**.

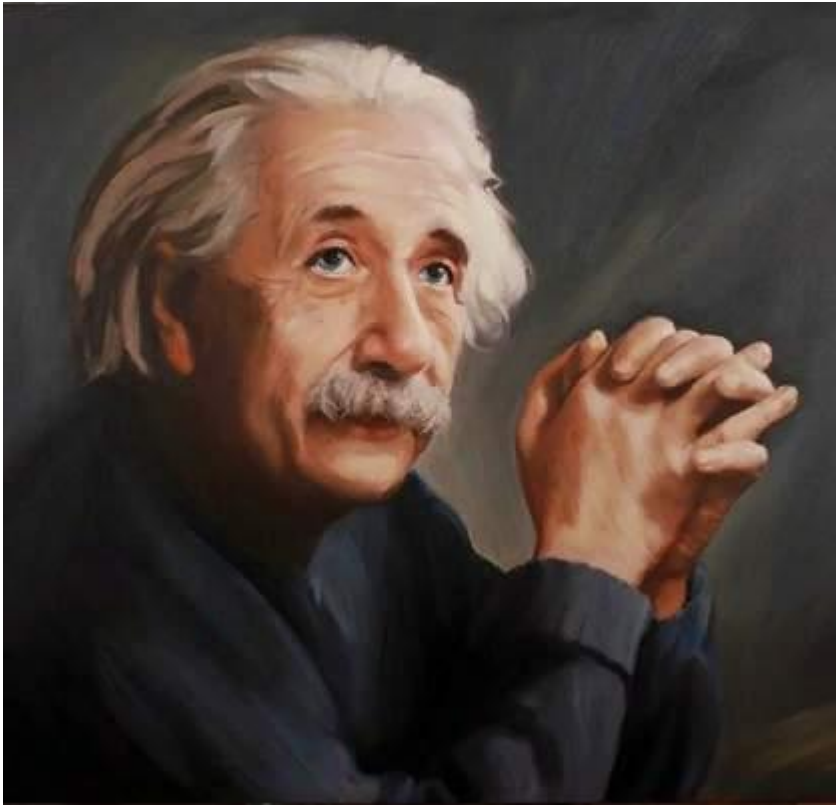
Наиболее существенным отличием современных космологических моделей, первые из которых были разработаны **Александром Александровичем Фридманом** (1888–1925) на основе теории Эйнштейна, является их **эволюционный характер**.

Идея глобальной эволюции Вселенной оказалась столь необычной, что первоначально не была принята даже самим создателем теории относительности, таким выдающимся учёным, как Эйнштейн.

Даже позднее, когда стало очевидно, что все объекты во Вселенной изменяются с течением времени, казалось, что процессы, происходящие в её отдельных составных частях, не меняют облика всей Вселенной.



Портрет А. А. Фридмана  
работы художника М. М. Девятова



Для уравнений теории относительности, применённых ко всей Вселенной, Эйнштейн стал искать решения, описывающие её состояние, не меняющееся со временем.

Для того чтобы уравновесить силы тяготения, он предположил, что кроме них во Вселенной существует сила отталкивания.

Эта сила должна быть универсальной, зависящей только от расстояния между телами и не зависящей от их массы.

Ускорение, которое она будет создавать этим телам, должно быть пропорционально расстоянию:

$$a = \text{const} \cdot R.$$

Так в уравнениях появилась обусловленная гипотетическими силами отталкивания космологическая постоянная — *лямбда-член*.

В 1922–1924 годах российский математик Фридман вывел из общей теории относительности Эйнштейна уравнения, которые описывали общее строение и эволюцию Вселенной.

Решения, полученные Фридманом для этих космологических уравнений, означали, что материя в масштабах однородной и изотропной Вселенной не может находиться в покое – **Вселенная должна либо сжиматься, либо расширяться.**

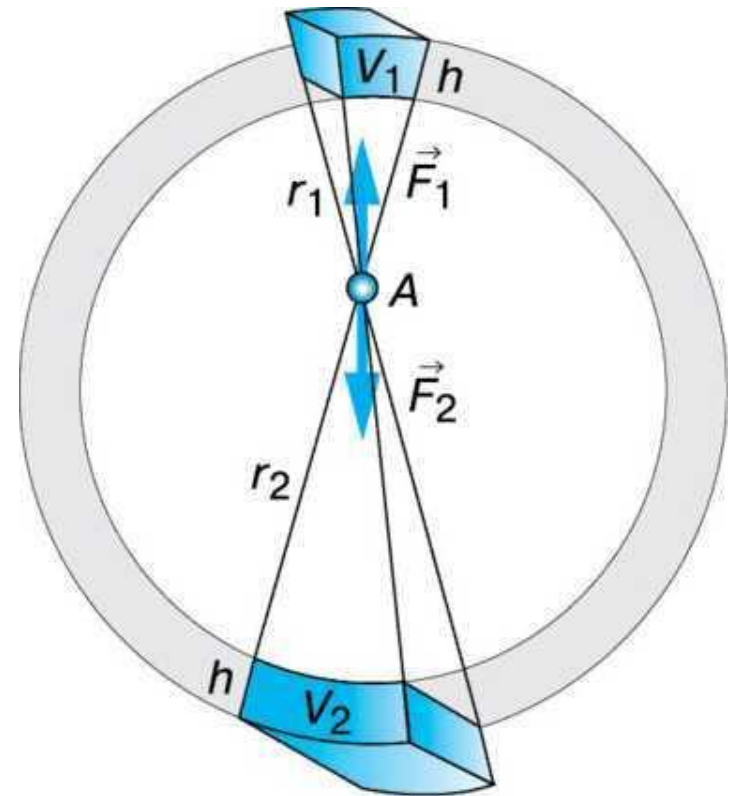


Суть этого вывода, сделанного на основе математически строгого решения уравнений, можно объяснить довольно просто, оперируя только привычными понятиями теории тяготения Ньютона.

Будем исходить из предположения, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной можно считать однородным.

Тогда галактика, которая находится на поверхности шара произвольного радиуса, притягивается к его центру согласно закону всемирного тяготения с силой, прямо пропорциональной массе шара  $M$  и обратно пропорциональной квадрату его радиуса  $R$ .

Все остальные галактики, лежащие вне этого шара, не меняют величины этой силы.



Объяснение нестационарности Вселенной

Для доказательства этого важного утверждения произвольно выделим во Вселенной шаровой слой толщиной  $h$  такого радиуса, чтобы внутри него оказались не только галактика  $A$ , но и весь шар радиусом  $R$ .



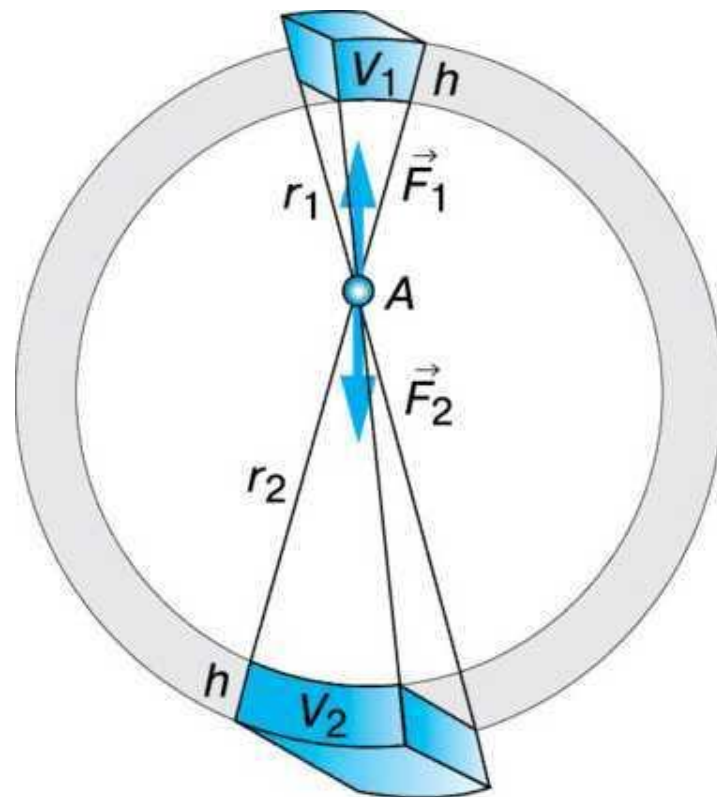
Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику А со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя  $V_1$  и  $V_2$ .

Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова –  $h$ , а площади  $S_1$  и  $S_2$  и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя –  $r_1$  и  $r_2$ :

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$$



Объяснение нестационарности Вселенной

Силы, с которыми эти массы притягивают галактику  $A$ , согласно закону всемирного тяготения равны:

$$F_1 = \frac{GM_1m}{r_1^2} \text{ и } F_2 = \frac{GM_2m}{r_2^2},$$

где  $m$  — масса галактики  $A$ .

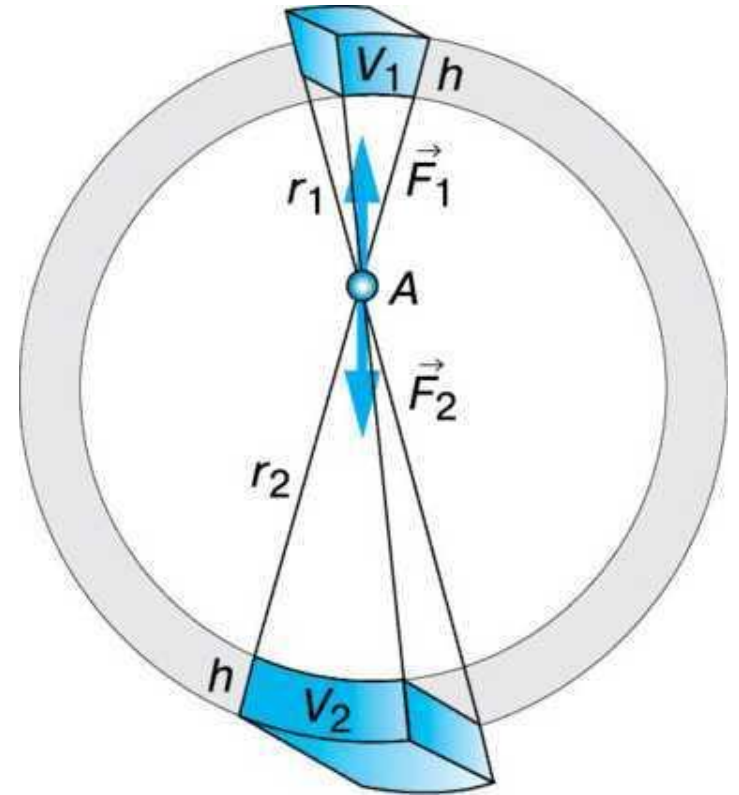
Запишем отношение этих сил  $\frac{F_1}{F_2} = \frac{M_1r_2^2}{M_2r_1^2}$

и, подставив в него значение  $\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$ ,

получим  $\frac{F_1}{F_2} = 1$ , или  $F_1 = F_2$ .

Таким образом, эти силы, равные по абсолютной величине и направленные в противоположные стороны, уравновешивают друг друга.

Значит, галактики, находящиеся вне шара радиусом  $R$ , не влияют на величину силы, с которой галактика  $A$  притягивается галактиками, находящимися внутри этого шара.



Объяснение нестационарности Вселенной

Следовательно, можно написать следующее выражение для ускорения, которое имеет одна из этих галактик по отношению к галактике, расположенной в его центре:

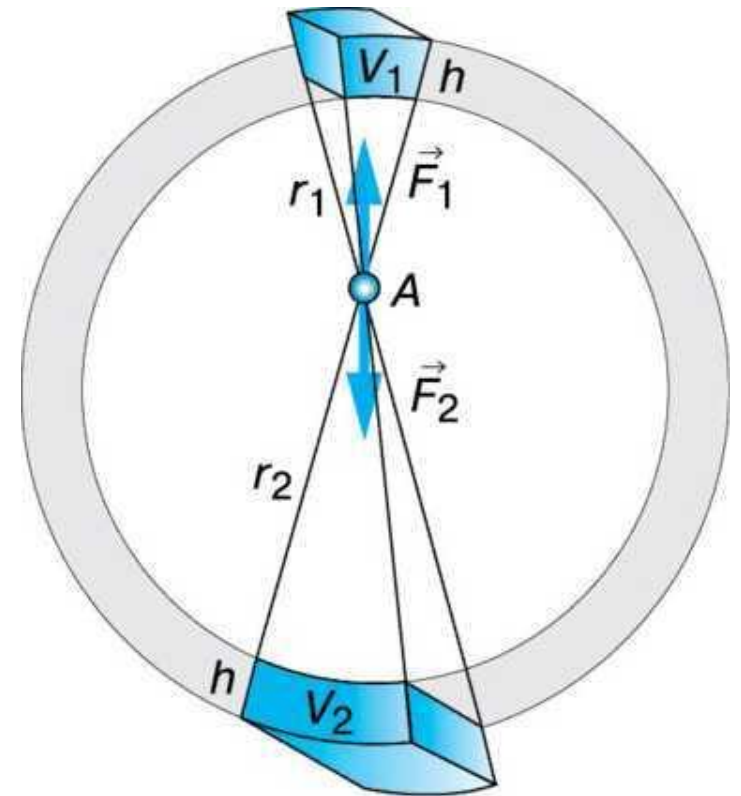
$$a = -\frac{GM}{R^2}$$

Знак «минус» означает, что ускорение соответствует притяжению, а не отталкиванию.

Из этой формулы следует, что Вселенная должна быть нестационарной, поскольку в ней действует тяготение.

Галактики могут находиться в покое только мгновение. В следующий момент они придут в движение и будут сближаться под действием сил тяготения.

Если же в начальный момент галактики будут иметь скорости, направленные так, чтобы они удалялись друг от друга, то в этом случае тяготение будет тормозить расширение Вселенной.



Объяснение нестационарности  
Вселенной

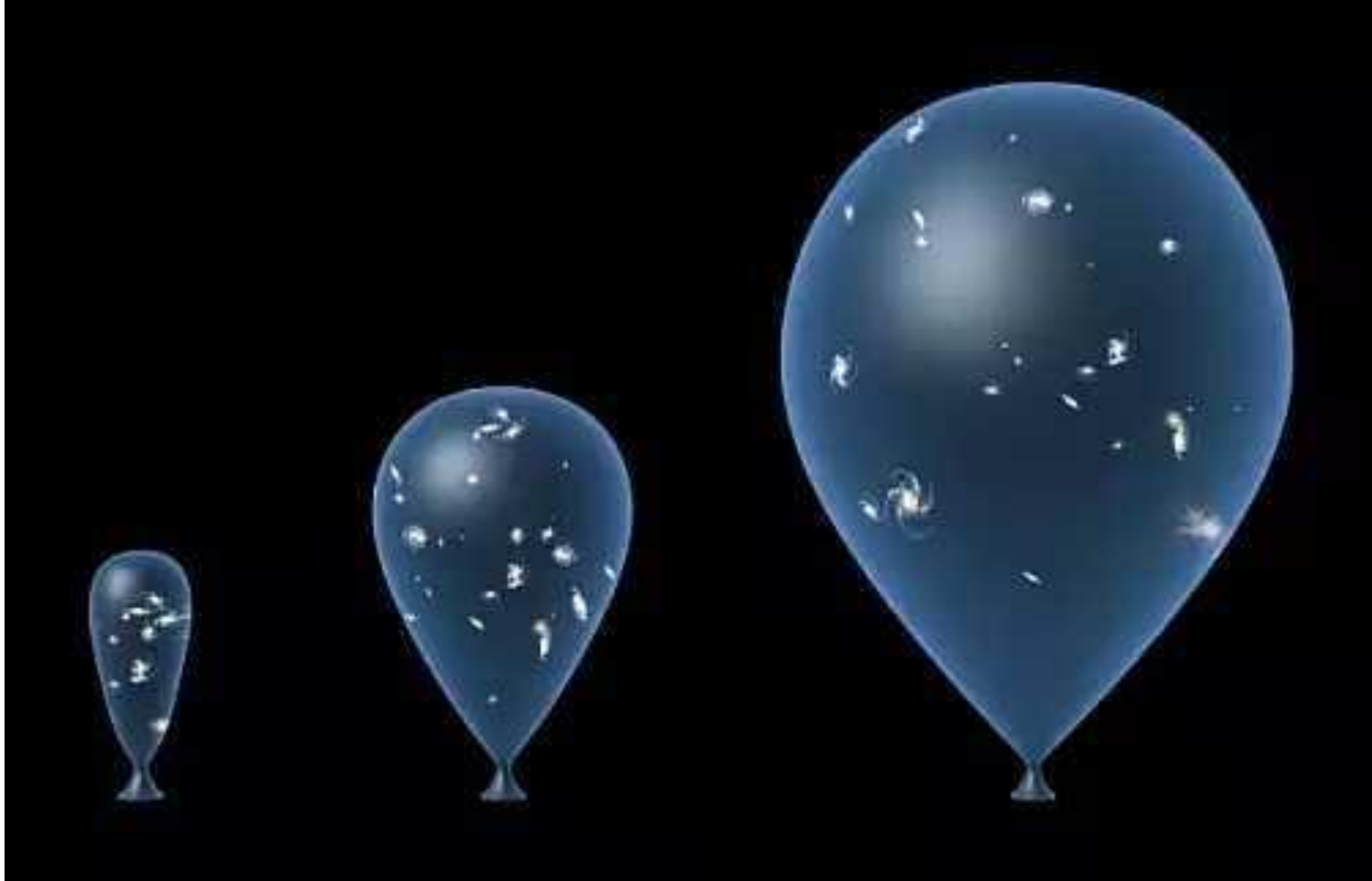
Теоретические выводы Фридмана получили важное наблюдательное подтверждение в открытом Хабблом законе пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию:

$$v = HR.$$

Этот закон не выполняется только для нескольких ближайших галактик, включая туманность Андромеды.

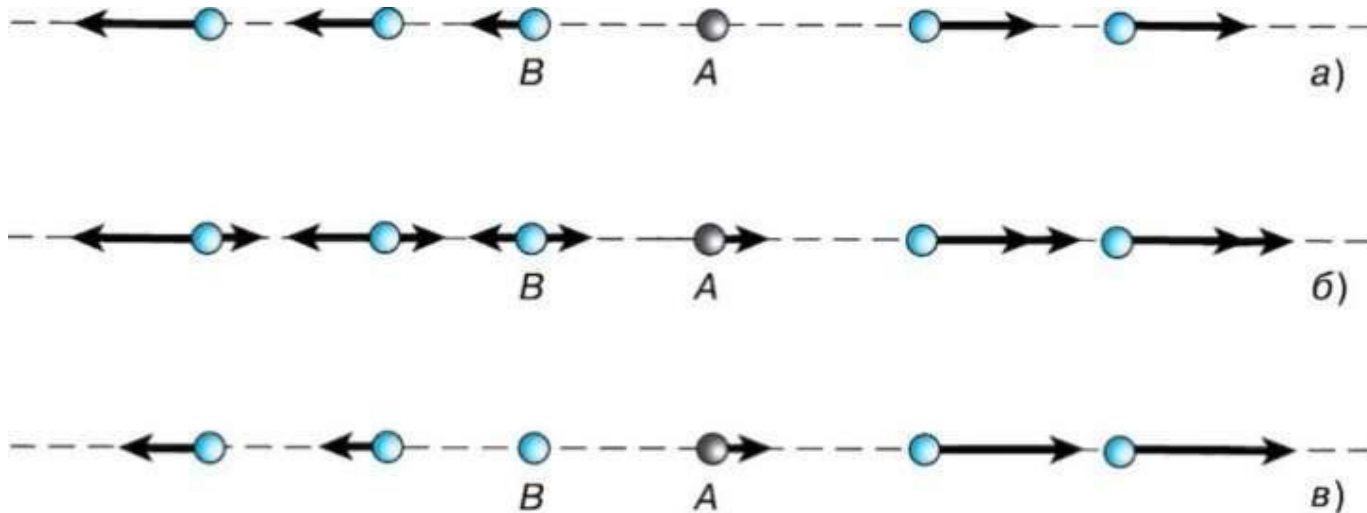


Точно такая же картина «разбегания» галактик будет наблюдаться для любой другой галактики Вселенной.



Разбегание галактик часто иллюстрируют тем, как расходятся точки, нанесенные на поверхность надуваемого воздушного шарика

Выберем в пространстве, занятом галактиками, произвольно направленную прямую, которая проходит через нашу Галактику.



На этой прямой окажется несколько галактик, которые удаляются со скоростями, подчиняющимися закону Хаббла, от нашей Галактики *A* (рис. а).

Теперь попробуем представить, какую картину разбегания галактик мы увидим, если перенесёмся на галактику *B*.

Для того чтобы определить скорости всех галактик относительно неё, надо из скоростей, изображённых на рисунке а, вычесть скорость галактики *B* (рис. б).

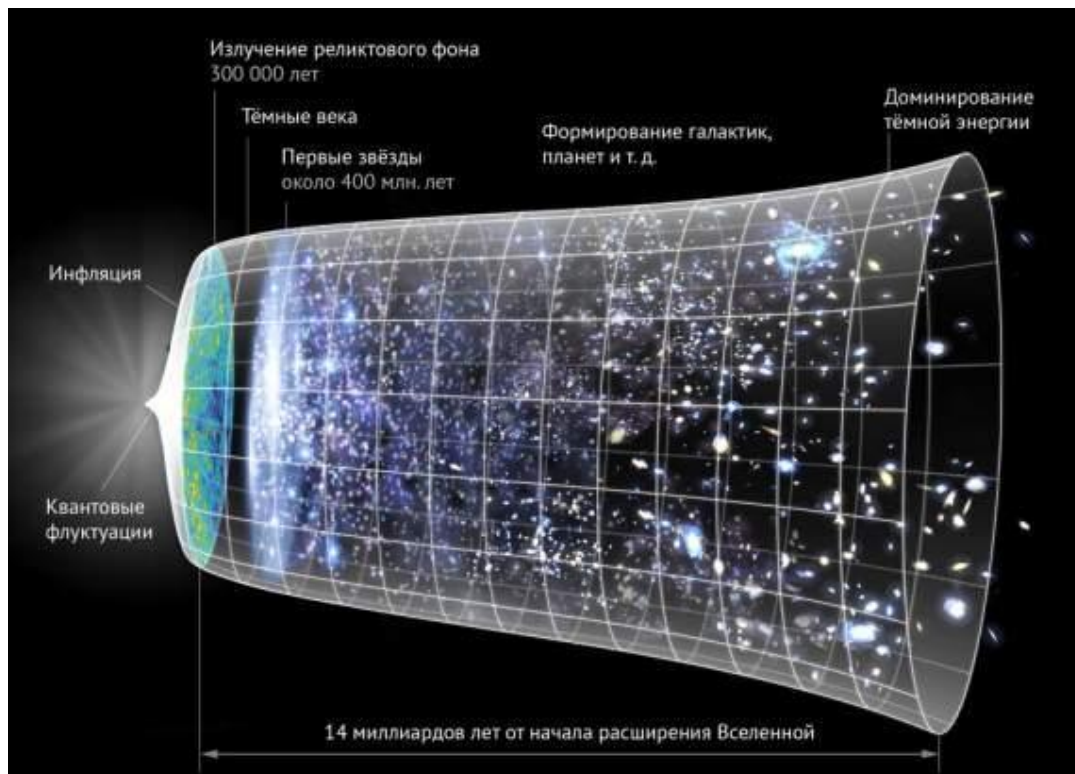
Полученная картина, которая представлена на рисунке в, принципиально не отличается от предыдущей: скорости удаления галактик по-прежнему пропорциональны расстояниям.

Для того чтобы узнать, когда примерно началось наблюдаемое расширение, необходимо воспользоваться постоянной Хаббла  $H$ .

Галактика, находящаяся от нас на расстоянии  $R$ , удаляется со скоростью  $HR$ .

Следовательно, разделив расстояние, пройденное галактикой с момента начала расширения, на её скорость, мы получим:

$$\frac{R}{HR} = \frac{1}{H}.$$



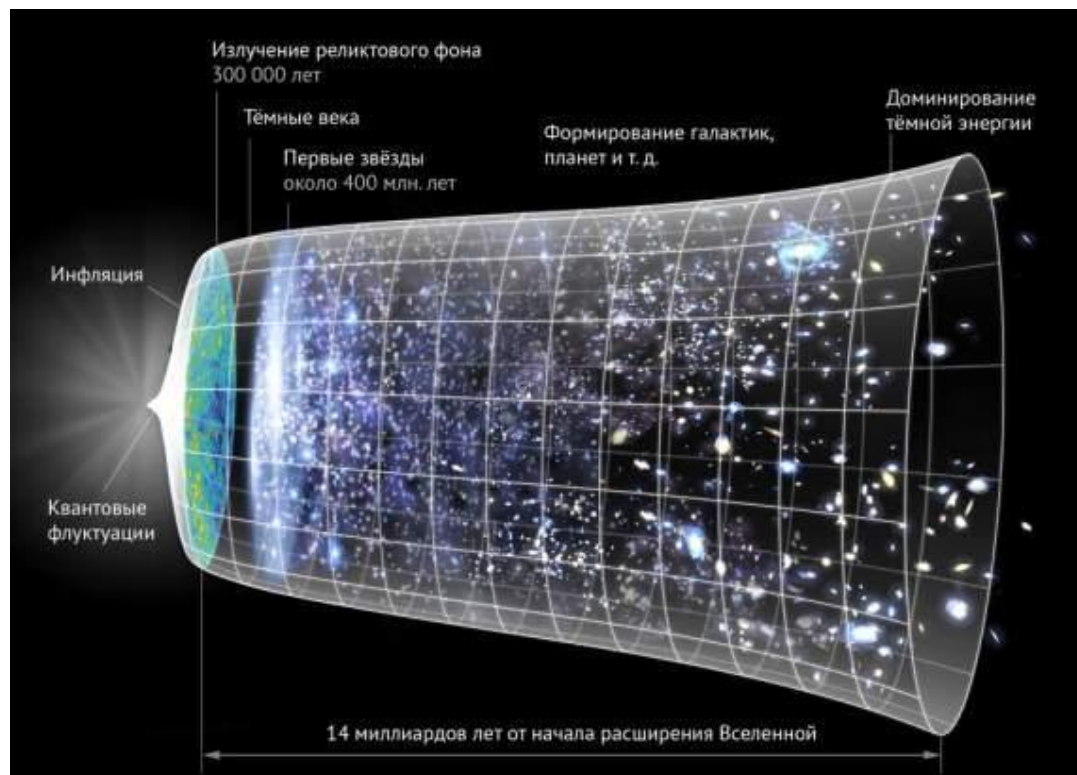
Величина, обратная постоянной Хаббла, даёт примерную оценку времени, которое прошло с момента начала расширения Вселенной – примерно **13,5 млрд лет**.

Открытие Хабблом «красного смещения» и работы Фридмана, показавшего, что Вселенная не может быть стационарной, явились только началом исследований эволюции Вселенной.

Взаимное удаление галактик означает, что в прошлом они были гораздо ближе друг к другу, чем теперь.

В ещё более раннюю эпоху плотность вещества была так велика, что во Вселенной не могло существовать ни галактик, ни звёзд и никаких других наблюдаемых ныне объектов.

Расчёты прошлого, проведённые на основе космологических моделей Фридмана, показывают, что в момент начала расширения Вселенной её вещество должно иметь огромную (бесконечно большую) плотность.



Перед наукой встала задача изучения тех физических процессов, которые происходят в расширяющейся Вселенной на разных этапах её эволюции вплоть до современности, а также тех, которые предстоят во Вселенной в будущем.



# Основы современной КОСМОЛОГИИ

В 1948 г. в работах **Георгия Антоновича Гамова** и его сотрудников была выдвинута гипотеза о том, что вещество во Вселенной на начальных стадиях расширения имело не только большую плотность, но и высокую температуру.

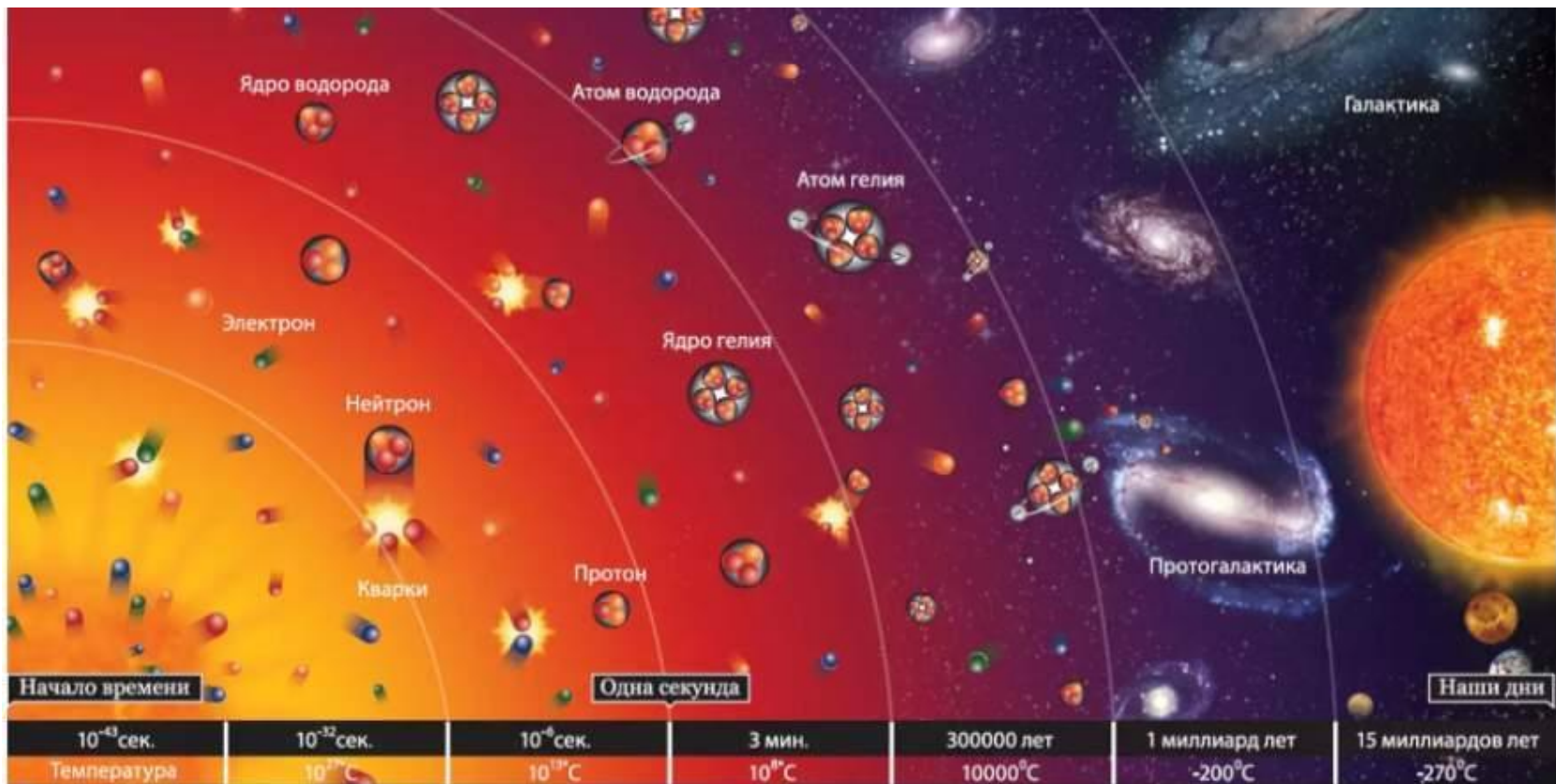


Георгий Антонович Гамов  
(1904 – 1968)

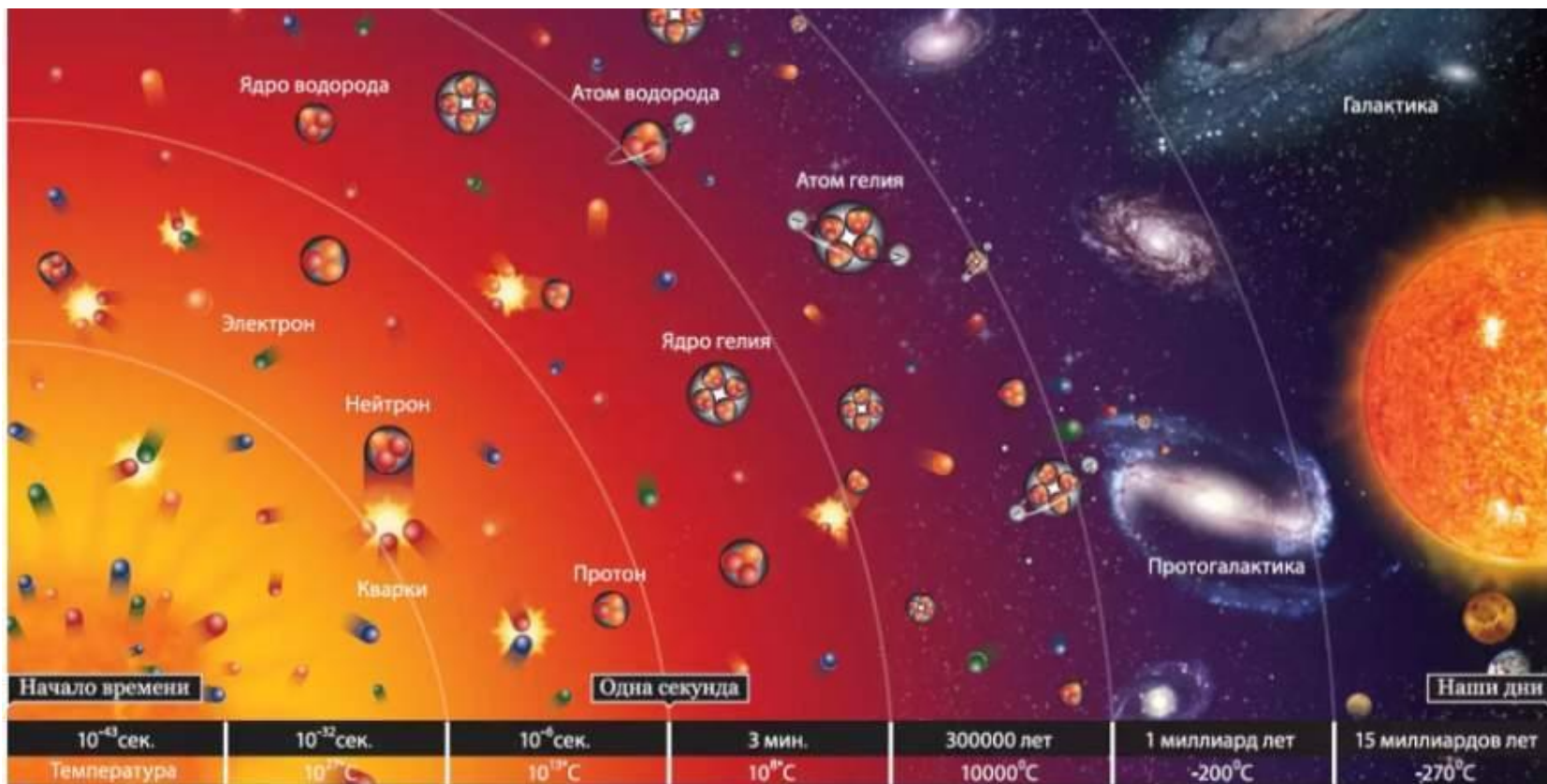
Спустя 0,1 с после начала расширения температура была около  $3 \cdot 10^{10}$  К.

При столь высокой температуре взаимодействие фотонов высокой энергии, которых в горячем веществе было много, приводило к образованию пар всех известных частиц и античастиц: электрон – позитрон, нейтрино – антинейтрино и т.п.

При аннигиляции этих пар снова рождались фотоны, а протоны и нейтроны, взаимодействуя с ними, превращались друг в друга.



При очень высокой температуре сложные атомные ядра существовать не могут – они моментально были бы разрушены окружающими энергичными частицами, поэтому не образуются даже ядра дейтерия, хотя нейтроны и протоны существуют.

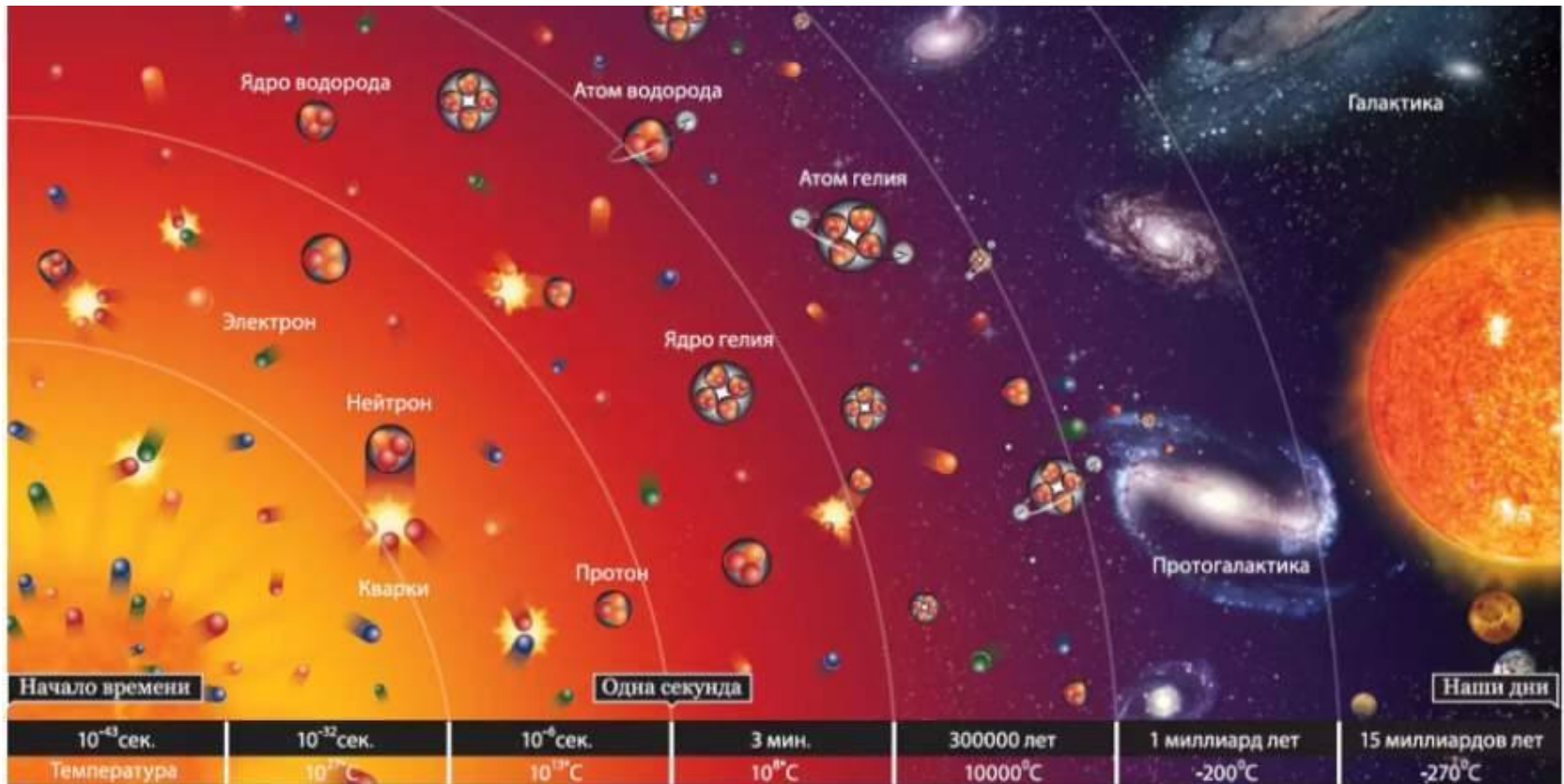


По мере расширения плотность вещества и его температура уменьшаются.

Позднее, когда температура в расширяющейся Вселенной опустится ниже 1 млрд К, станет возможным сохранение некоторого количества ядер дейтерия и, следовательно, образование гелия.

Согласно расчётам, к этому моменту нейтроны составят примерно 15% массы всего вещества. Остальное вещество – протоны (ядра атомов водорода).

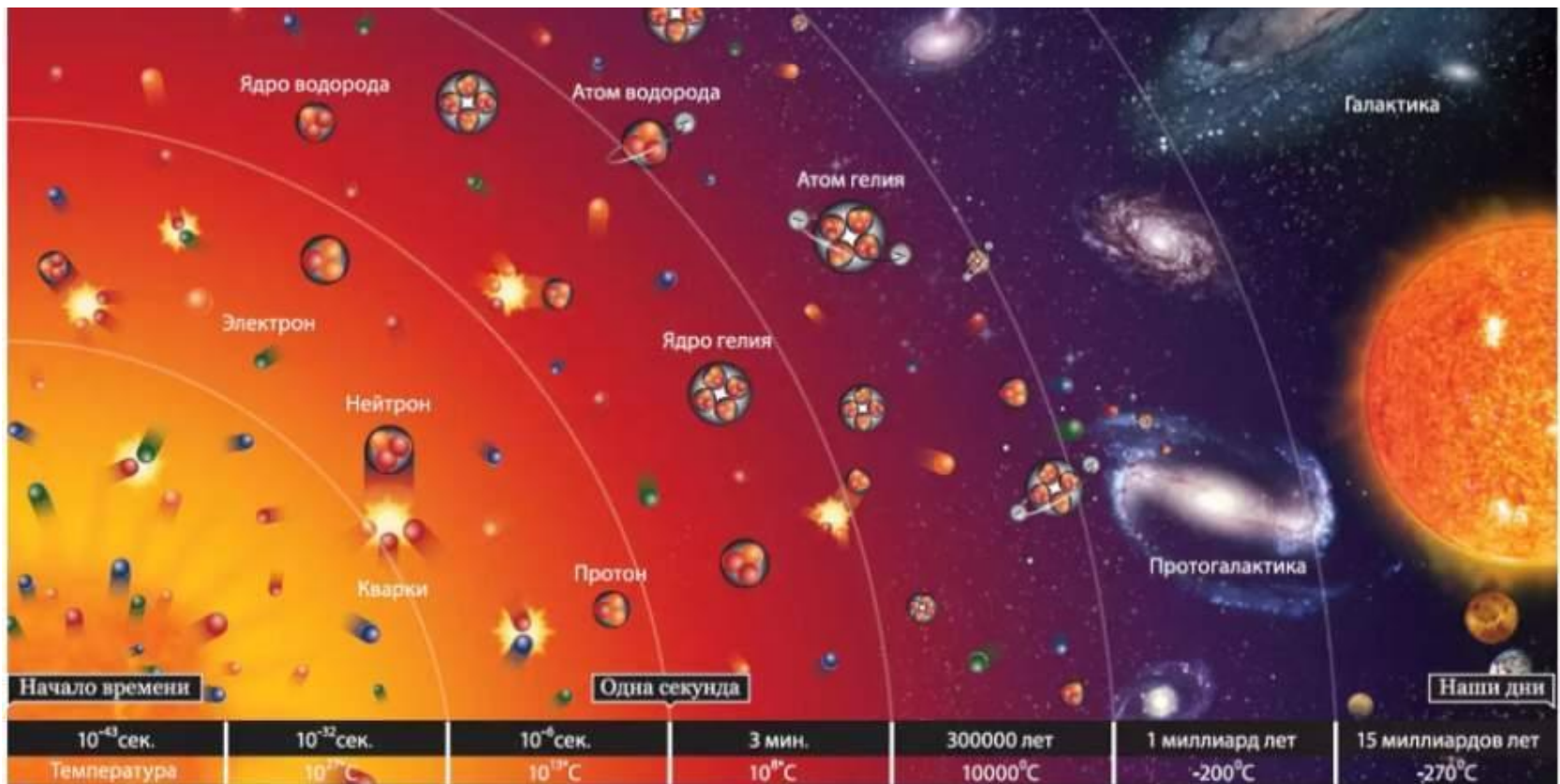
Соединение равного количества протонов и нейтронов приведёт к образованию дейтерия, а в процессе следующих ядерных реакций образуются ядра гелия.



Рассматривая ядерные реакции в горячем веществе в начале космологического расширения, удалось рассчитать, что в процессе этих реакций могли образоваться только водород и гелий.

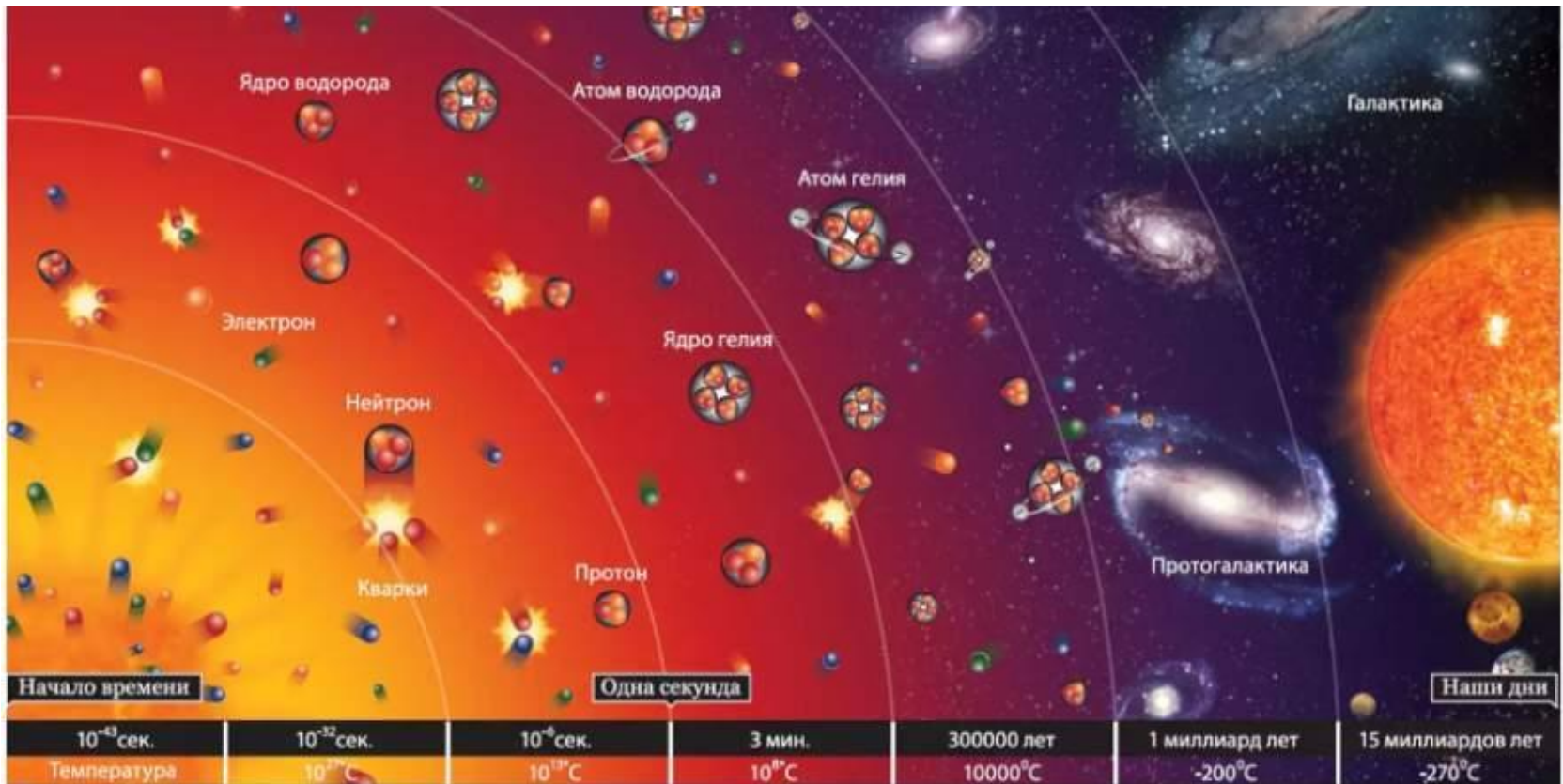
Спустя пять минут после начала расширения, когда температура во Вселенной становится недостаточной для термоядерных реакций, вещество состоит из смеси ядер водорода (70% массы) и ядер гелия (30%).

Таким его состав остаётся до того времени, пока не происходит образование звёзд и галактик



Исследования показали, что содержание гелия в звёздах и межзвёздном веществе действительно составляет около 30% по массе.

Это достаточно хорошо согласуется с выводами теории, которая основана на предположении о «горячей Вселенной».

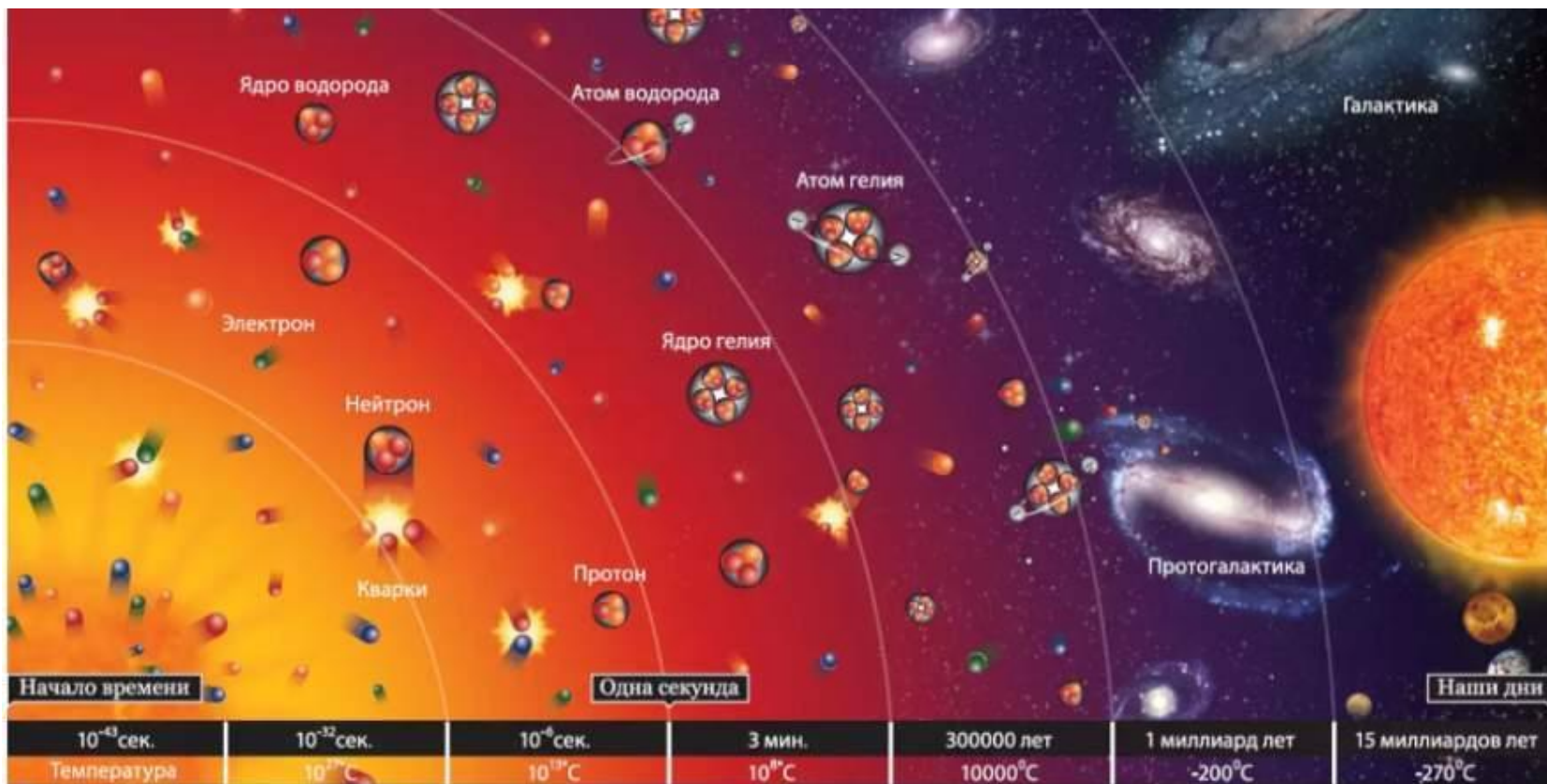


Спустя примерно миллион лет после начала расширения, когда температура снижается до 4000 К, ядра атомов водорода и гелия, захватывая электроны, превращаются в нейтральные атомы.

Эта эпоха явилась важнейшим этапом в эволюции Вселенной.

Во-первых, только с появлением нейтрального вещества становится возможным формирование отдельных небесных тел и их систем.

Во-вторых, излучение, которое играло важную роль в процессах, происходивших прежде, практически не взаимодействовало с нейтральным веществом.

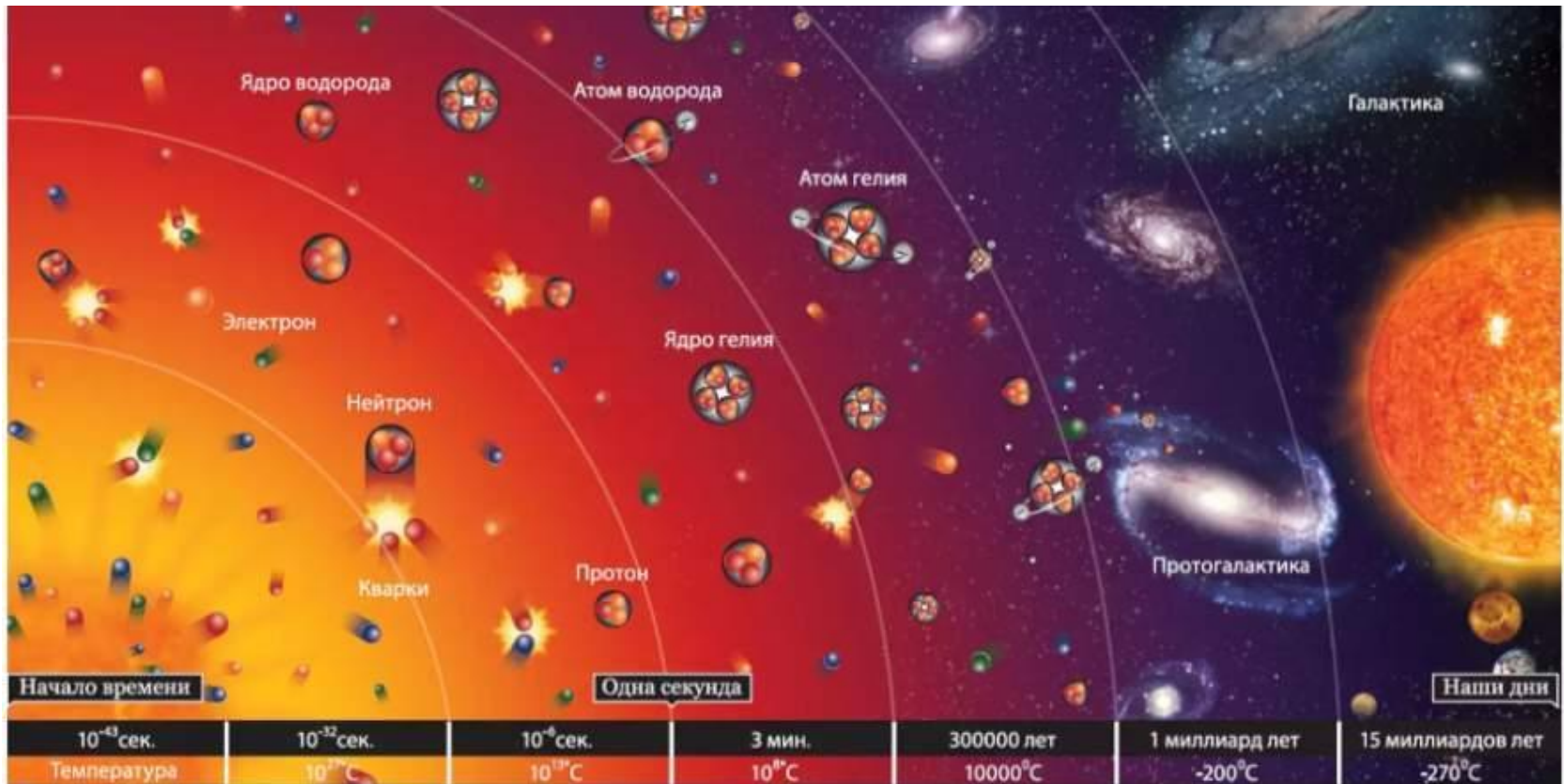




Иначе говоря, теория «горячей Вселенной» предсказывала существование в настоящее время реликтового электромагнитного излучения, оставшегося от того далёкого прошлого, когда вещество во Вселенной было плотным и горячим.

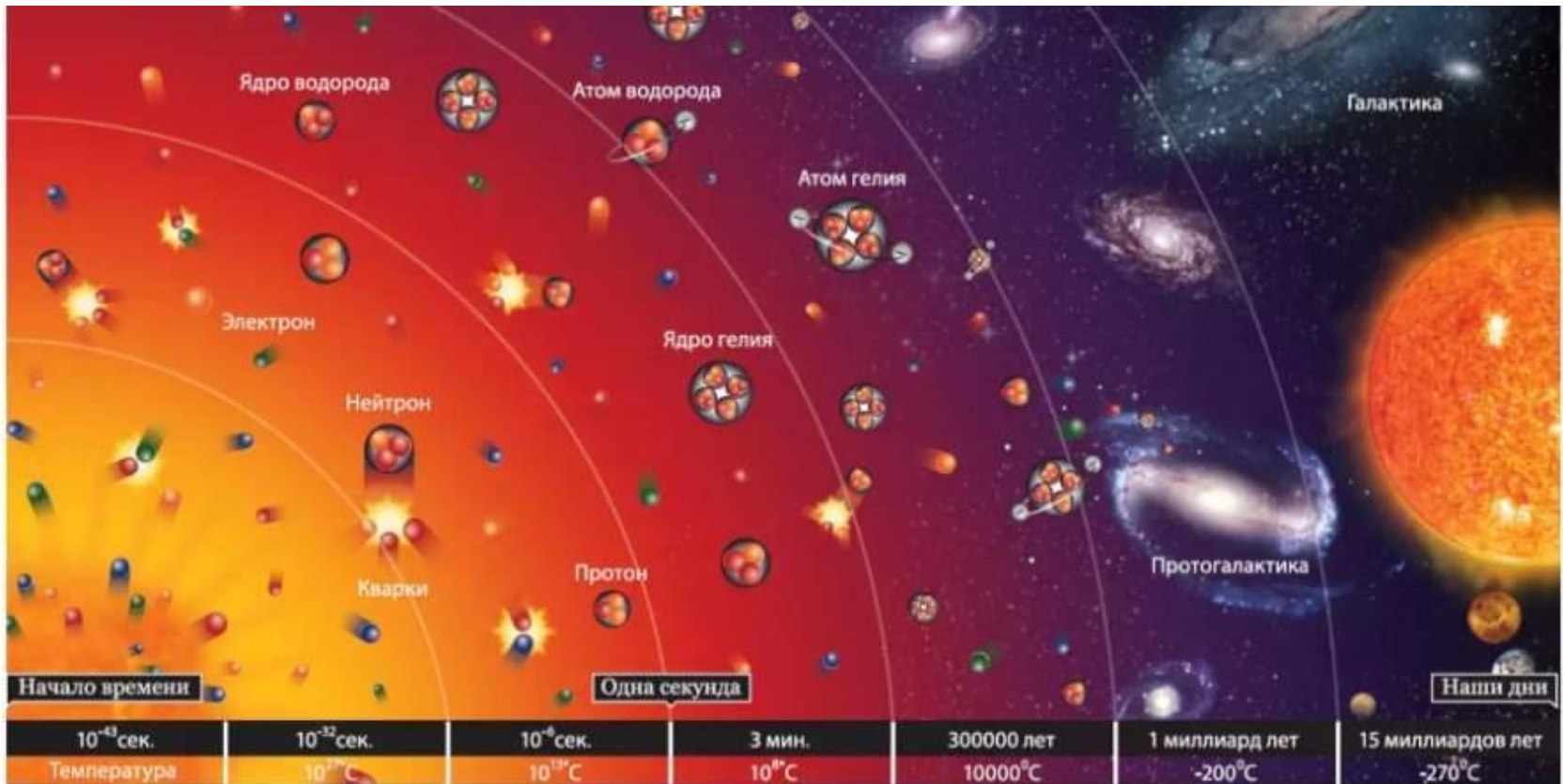
Температура этого излучения, которая в процессе космологического расширения уменьшалась так же, как и температура вещества, должна составлять в нашу эпоху всего несколько кельвинов.

Это излучение, получившее название **реликтового**, было случайно обнаружено на волне 7,35 см американскими инженерами А. Пензиасом и Р. Вильсоном.



Открытие реликтового излучения явилось одним из важнейших научных открытий XX века, которое подтвердило, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей.

Авторы этого открытия в 1978 г. удостоены Нобелевской премии по физике.

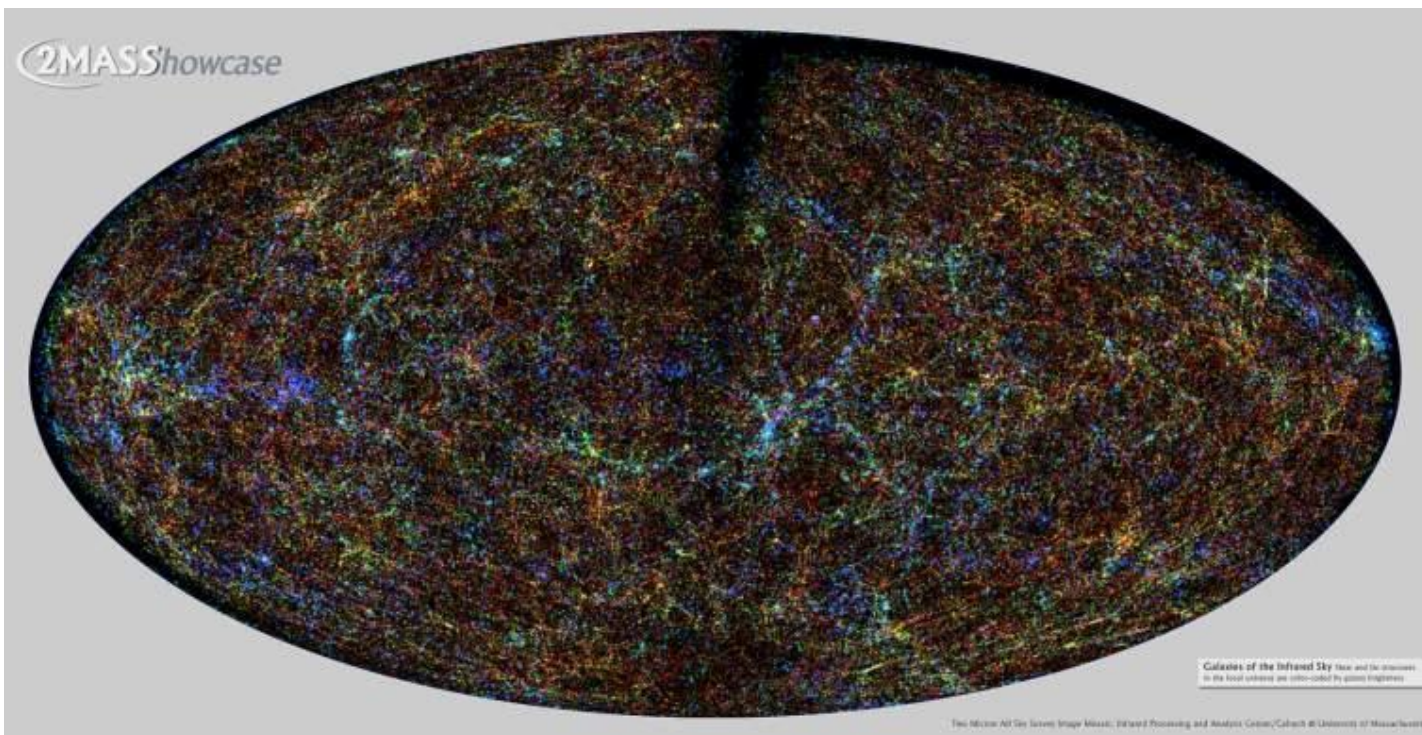


Обнаружение реликтового излучения — очень важное, но не единственное достижение космологии за последние десятилетия.

К их числу относится **теоретическое исследование крупномасштабной структуры Вселенной**, проведённое академиком **Я.Б.Зельдовичем** и его учениками.

В процессе эволюции Вселенной флуктуации плотности вещества под действием гравитации должны постепенно превращаться в объекты, напоминающие по своей форме блины.

Наблюдения подтвердили, что именно такие структуры образуют во Вселенной галактики, их скопления и сверхскопления.



**Крупномасштабная структура Вселенной, как она выглядит в инфракрасных лучах с длиной волны 2,2 мкм.**

Яркость галактик показана цветом от синего (самые яркие) до красного (самые тусклые).

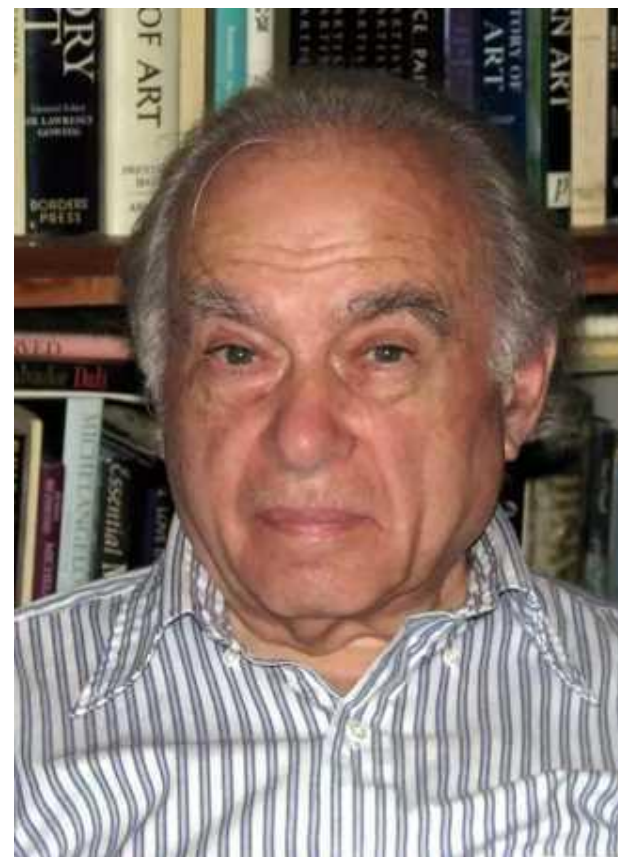
Тёмная полоса по диагонали и краям картины — расположение Млечного Пути, пыль которого мешает наблюдениям

Теория горячей расширяющейся Вселенной, которая опирается на работы А.А. Фридмана и Г.А.Гамова, стала общепризнанной, хотя не смогла дать ответ на два важных вопроса: в чём первопричина взаимного удаления галактик и как в дальнейшем будет происходить расширение Вселенной.

Найти ответы на эти вопросы удалось новому поколению учёных. Оба ответа оказались весьма неожиданными.

В 1965 г. российский физик-теоретик **Э. Б. Глинер** выдвинул гипотезу, согласно которой **начальным состоянием Вселенной был вакуум.**

Дальнейшие исследования показали, что для гравитационных сил вакуума характерно не привычное всем притяжение, а отталкивание.



Эраст Борисович  
Глинер

Чтобы ответить на вопрос, как в дальнейшем будет происходить расширение Вселенной, необходимо было установить зависимость скорости удаления галактики от расстояния до неё.

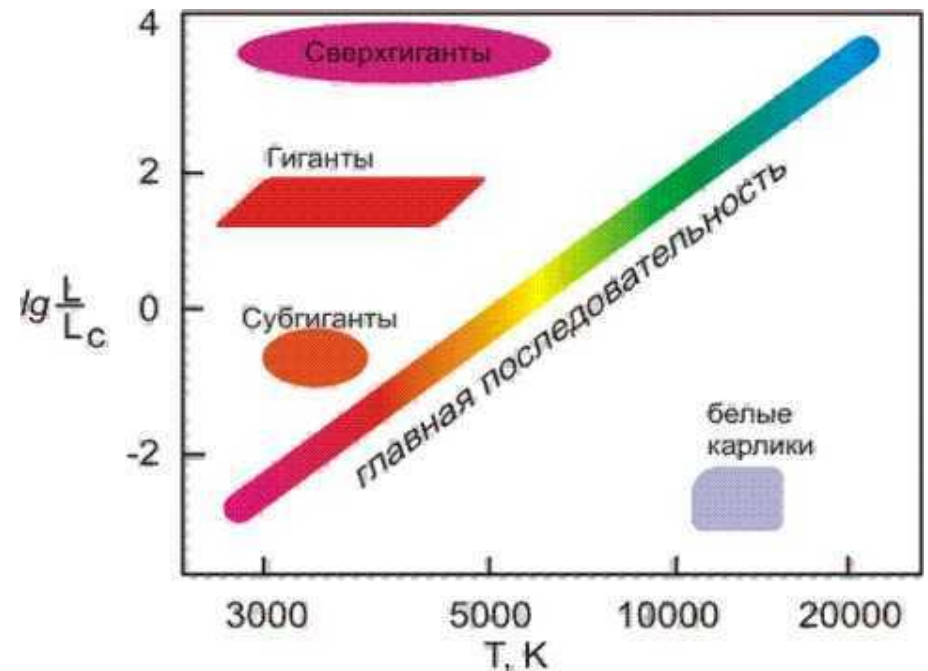
В первом приближении она выражается законом Хаббла:  $v = HR$ .

Чтобы проверить, насколько эта зависимость выполняется для наиболее удалённых объектов, необходимо определить скорость галактики и её расстояние независимо друг от друга.

Для таких огромных расстояний используется **метод фотометрического параллакса**.

Поток фотонов, приходящих от источника излучения и регистрируемых наблюдателем, обратно пропорционален квадрату расстояния до источника.

Если известна мощность излучения (светимость) наблюдаемого объекта, то, измерив поток света, можно вычислить, на каком расстоянии этот объект находится.



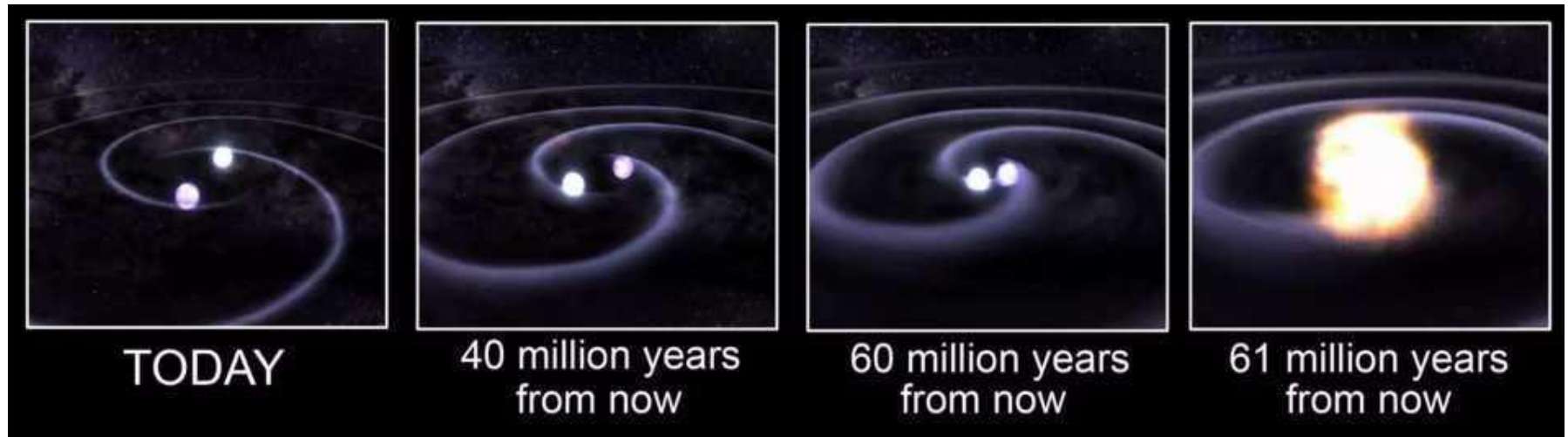
Фотометрический способ.

Установлена связь между мощностью излучения звезды (светимостью) — и температурой поверхности (цветом). На диаграмму Герцшпрунга-Рассела наносятся звезды с известным параллаксом, а для других — находят расстояния.

Оказалось, что объектами с известной светимостью являются наиболее яркие сверхновые звёзды, светимость которых в момент вспышки сравнима со светимостью целой галактики – сверхновые типа *Ia*, порождаемые термоядерными взрывами белых карликов.

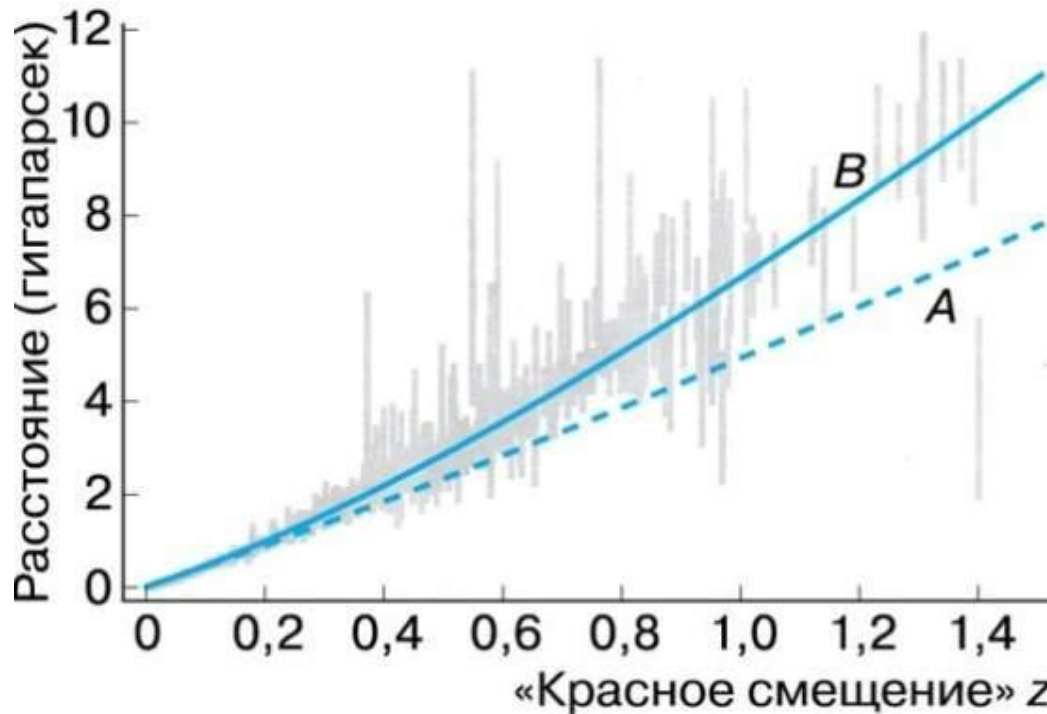
При наблюдениях этих звёзд независимо измерялись две величины: **«красное смещение» линий в спектре** и **блеск звезды** (освещённость, создаваемая звездой на плоскости, перпендикулярной лучу зрения).

Зная величину светимости сверхновой типа *Ia*, можно вычислить расстояние до каждой из них.



Подтверждена гипотеза о том, что все сверхновые типа Ia являются продуктом слияния двух белых карликов

На графике показаны кривые, которые соответствуют двум возможным вариантам зависимости расстояния до звезды от «красного смещения».



Кривая A соответствует известному закону Хаббла.

Кривая B при малых  $z$  практически сливается с кривой A, но при больших значениях  $z$  проходит значительно выше.

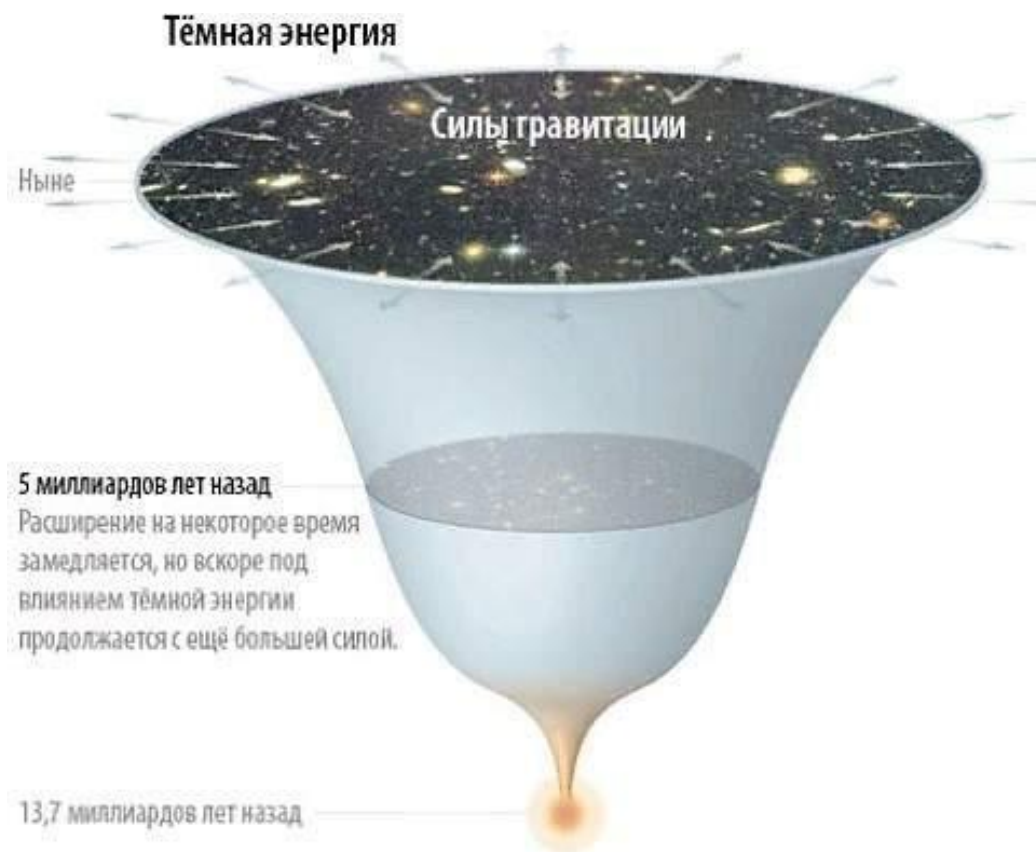
Наблюдаемое отклонение существенно превышает ошибки измерения, что и позволило сделать вывод: **Вселенная расширяется с ускорением.**

Это означает, что **расширение Вселенной будет продолжаться неограниченно.**

Учёные пришли к выводу: наблюдаемое ускорение создаёт неизвестный прежде вид материи, который обладает свойством **антигравитации**.

Он получил название **тёмной энергии**.

За это открытие две группы учёных получили Нобелевскую премию по физике за 2011 г.



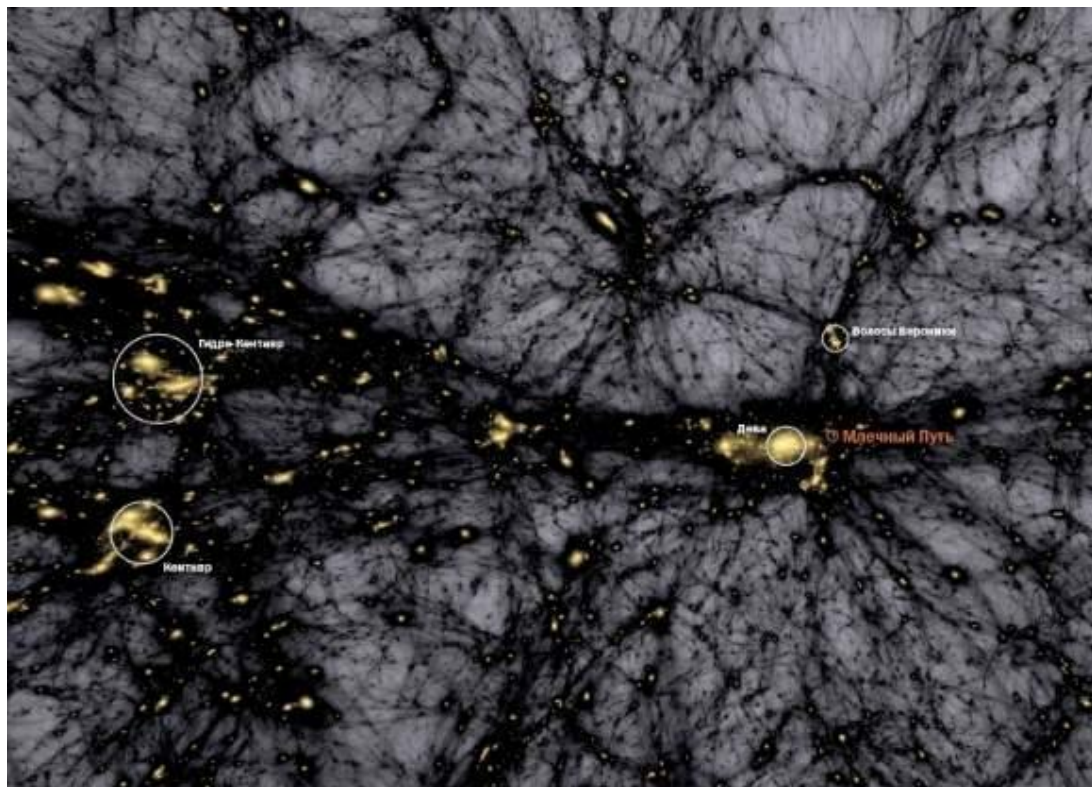
Открытие антитяготения, которое оказалось неожиданным для большинства людей, подтвердило предвидение А.Эйнштейна.



Выяснился глубокий смысл  $\lambda$ -члена в уравнениях общей теории относительности. А.Эйнштейн, по существу, выдвинул гипотезу о наличии во Вселенной материи, которая создаёт не притяжение, а отталкивание.

Дальнейшие исследования позволили выяснить, что по своей природе **тёмная энергия является практически однородной**, в отличие от двух других составляющих Вселенной – «обычной» и тёмной материи, которые распределены в космическом пространстве неоднородно, образуя звёзды, галактики и другие объекты.

Можно считать, что **тёмная энергия – это свойство самого пространства**.



Суперкомпьютер создал изображение на основе данных о гравитационном поле: «паутина» **темной материи** с развешанными на ней гроздьями из **галактических скоплений** в местах пересечения гигантских темных нитей.

Одно только созвездие Девы стало пристанищем для тысяч галактик.

Детальный анализ анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуры Вселенной позволил определить плотность каждого из трёх видов материи.

Было установлено, что «обычная» материя, изучению которой человечество посвятило всю предшествующую историю, составляет всего лишь **несколько процентов** массы Вселенной.

Примерно **26%** составляет **тёмная материя**, а **69%**, большая часть массы Вселенной, приходится на долю **тёмной энергии** – нового вида материи, уникальные свойства которой ещё предстоит изучить.

## Роль темных сил в жизни Вселенной



**Большой взрыв**  
13,8 миллиарда лет назад  
Рождение Вселенной из горячего и плотного пузырька размером с атом. За несколько микросекунд она расширилась с невероятной скоростью.

**Образование темной материи**  
Первые мгновения жизни Вселенной  
В первые секунды произошло образование темной материи. Она тут же начала взаимодействовать с привычной нам барионной материей посредством гравитации, постепенно обжимая частицы последней друг с другом.

**Появление первых звезд**  
100 миллионов лет после Большого взрыва  
Водородные облака, образовавшиеся благодаря гравитационному воздействию темной материи, начинают коллапсировать, и в их недрах запускается реакция ядерного синтеза, создающего тяжелые элементы и освещающего Вселенную.

**Расширение замедляется**  
1 миллиард лет после Большого взрыва  
Звезды группируются в галактики, галактики собираются в скопления, при этом структуру Вселенной задает гравитационное поле темной материи. Масса темной материи настолько велика, что ее гравитация удается замедлить расширение Вселенной.

**Проблески темной энергии**  
4–8 млрд лет после Большого взрыва  
Падение скорости расширения Вселенной на протяжении миллиардов лет сменяется ростом. Но почему? Новая загадочная сила (названная темной энергией) начинает соперничать с гравитацией, расталкивая части Вселенной и вновь ускоряя ее расширение.

**Все шире и шире**  
Настоящее время  
Вселенная продолжает расширяться, и нам еще предстоит понять, что ждет ее (и нас с вами) в будущем.

Из чего состоит Вселенная

