МЕГАМИР: СОВРЕМЕННЫЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ

Тема 4

План лекции

1. Наблюдаемая структура Вселенной
2. Общая теория относительности как фундамент современной космологии
3. Проблема происхождения и основных этапов эволюции Вселенной

Крупномасштабная структура Вселенной

Основными единицами крупномасштабной структуры Вселенной являются галактики, в которых собрано подавляющее большинство звезд. Галактики, как правило, также не встречаются поодиночке, они входят в состав разного рода систем. Наименьшими среди них являются группы галактик: системы размера порядка нескольких десятков миллионов световых лет, в состав которых входят несколько десятков галактик, из которых только одна-две крупные. Примером является Местная группа галактик, куда входят две гигантские спирали наша Галактика (Млечный Путь) и Туманность Андромеды (M31), а также около 30 карликовых галактик, в основном спутников нашей Галактики и M31.

В видимой части вселенной порядка 100 млрд. галактик.

Крупномасштабная структура Вселенной

Значительно больше по размеру скопления галактик, где в области размерами около 50 млн. световых лет располагается вплоть до нескольких тысяч галактик; именно скопления галактик являются наибольшими гравитационно-связанными системами во Вселенной. Примерами скоплений являются Virgo — ближайшее к нам скопление, видимое в направлении созвездия Девы, и Coma — гигантское скопление галактик в созвездии Волосы Вероники (на следующем слайде)

Крупномасштабная структура Вселенной

Крупномасштабная структура Вселенной

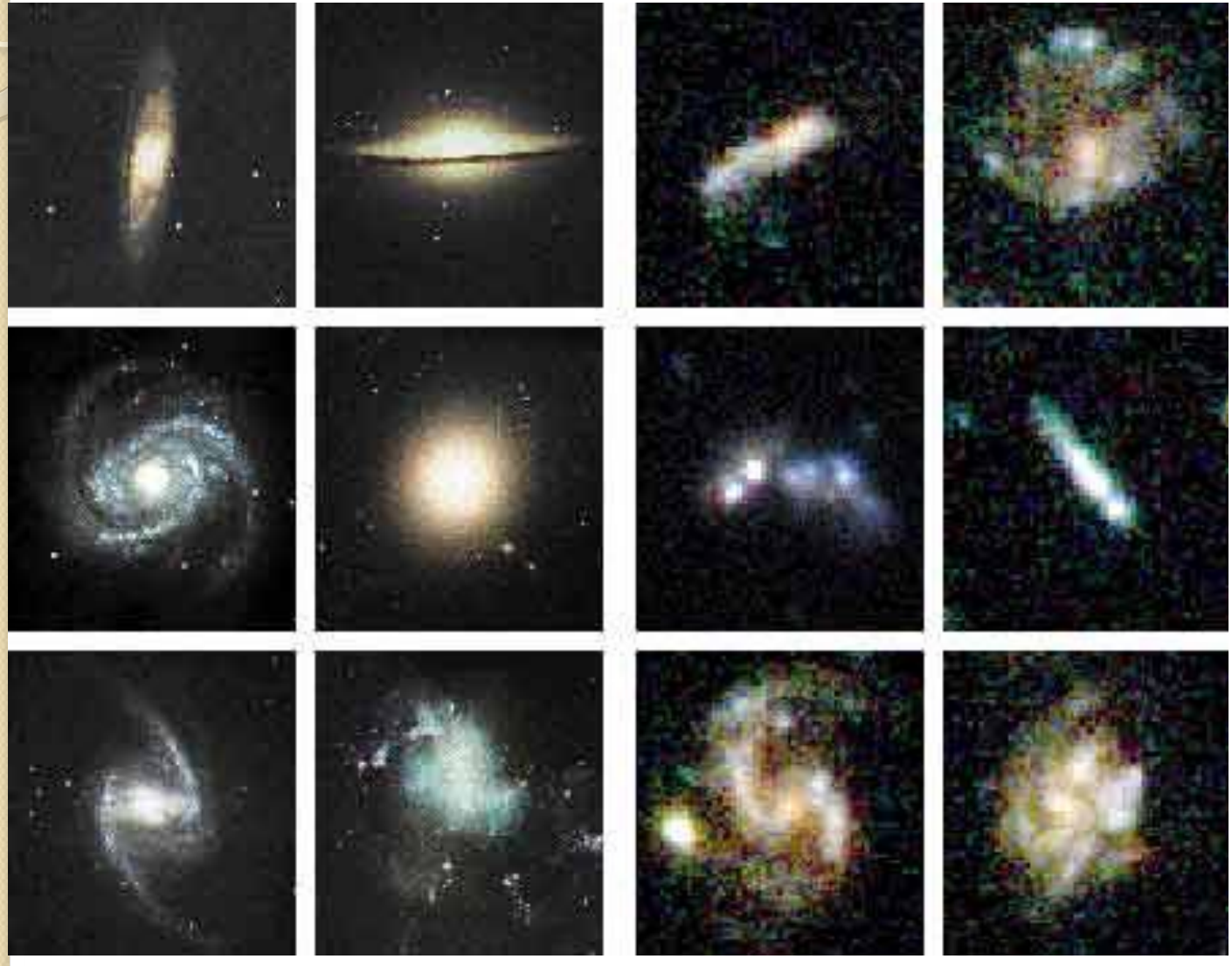
Размеры видимой части вселенной составляют примерно 14 миллиардов световых лет (один световой год - это расстояние, которое проходит свет в вакууме за один год). По оценкам некоторых ученых протяженность вселенной достигает 90 миллиардов световых лет. Для того, чтобы было удобно оперировать со столь огромными расстояниями используют такую величину как Парсек. 1 парсек = 3,2616 световых лет.

Крупномасштабная структура Вселенной

Наконец, существуют и сверхскопления галактик. Эти системы по форме напоминают ленты или цепочки длиной в несколько сотен миллионов световых лет, в состав которых входят десятки скоплений галактик и сотни групп; эти цепочки сосредоточены в основном внутри плоских слоев, между которыми находится пространство, практически свободное от галактик. Таким образом, в очень больших масштабах Вселенная имеет ячеистую структуру, напоминающую “ноздреватую” структуру хлеба.

Сверхскопления галактик - наибольшие структуры в обозримой части Вселенной.

Формы галактик



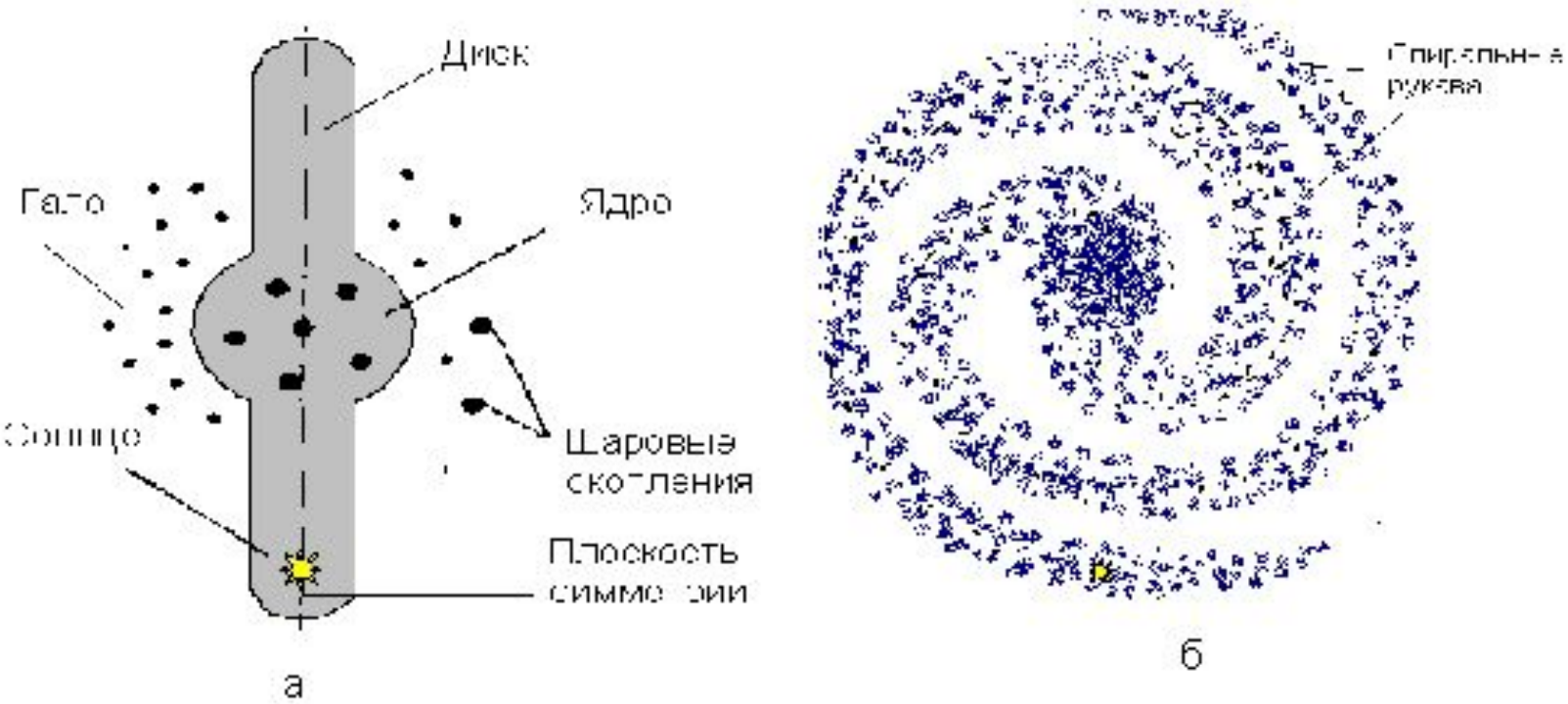
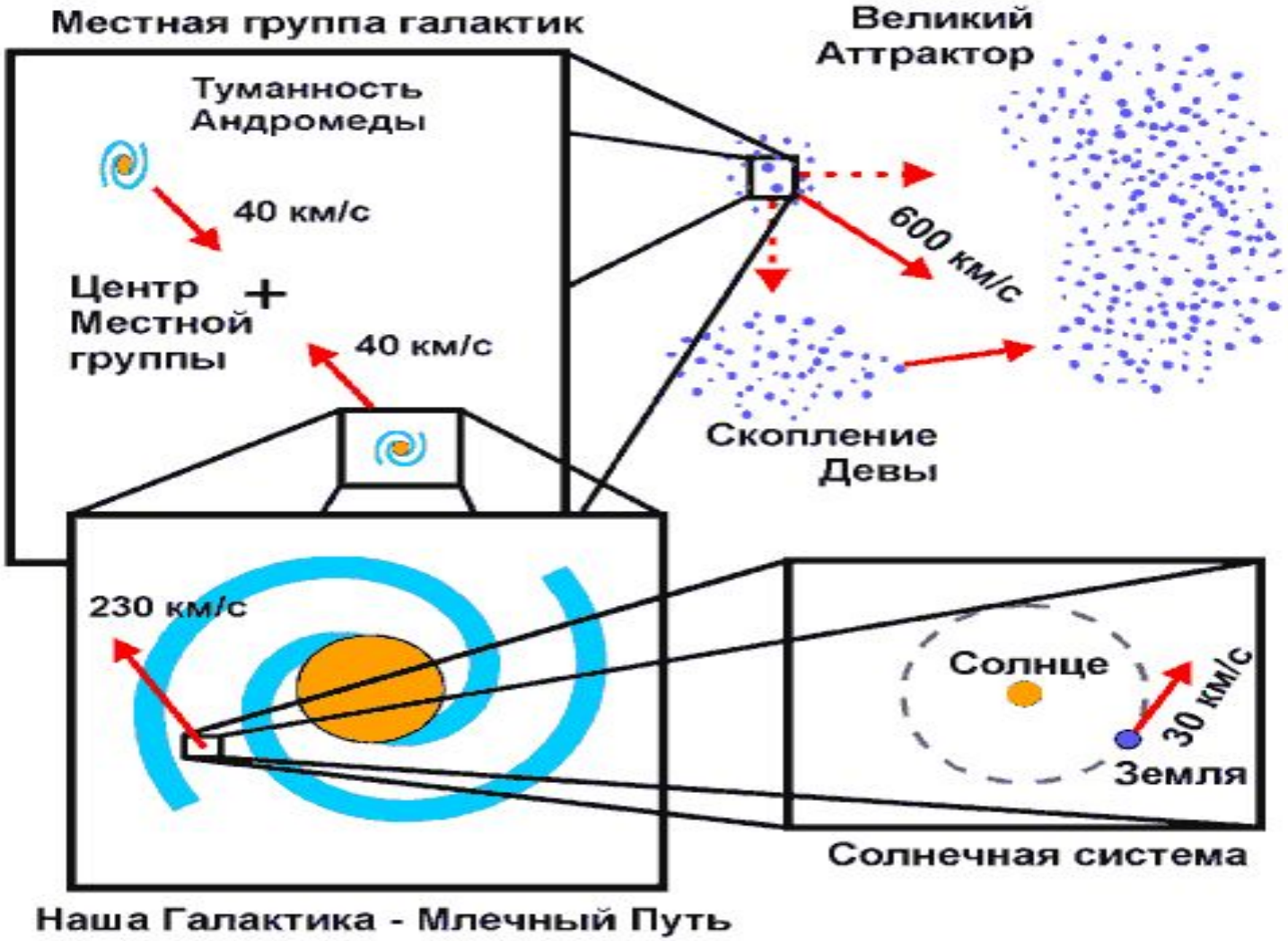


Рис.2. Схема нашей галактики
а – вид «сбоку», б – вид в плане

Иерархия движений, в которых принимает участие наша планета



Звезды

Звезды очень разнообразны по своей яркости, размерам, температуре и другим параметрам. К звездам относят такие объекты как белые, желтые, черные карлики, нейтронные звезды, красные, белые, голубые гиганты и сверхгиганты, квазары и пульсары.

Звезды не неподвижны. Скопление большого числа звезд вращаются вокруг некого единого центра. Такие скопления называют галактиками, а центры вращения - центром галактики. Исследование галактик показало, что большая часть материи, из которой состоят галактики, мы по непонятным причинам не видим. Такую материю в науке принято называть темной материей.

Особый интерес представляют центры галактик. По современным представлениям, на роль объекта, находящегося в центе галактики подходит черная дыра.

Главная последовательность звезд

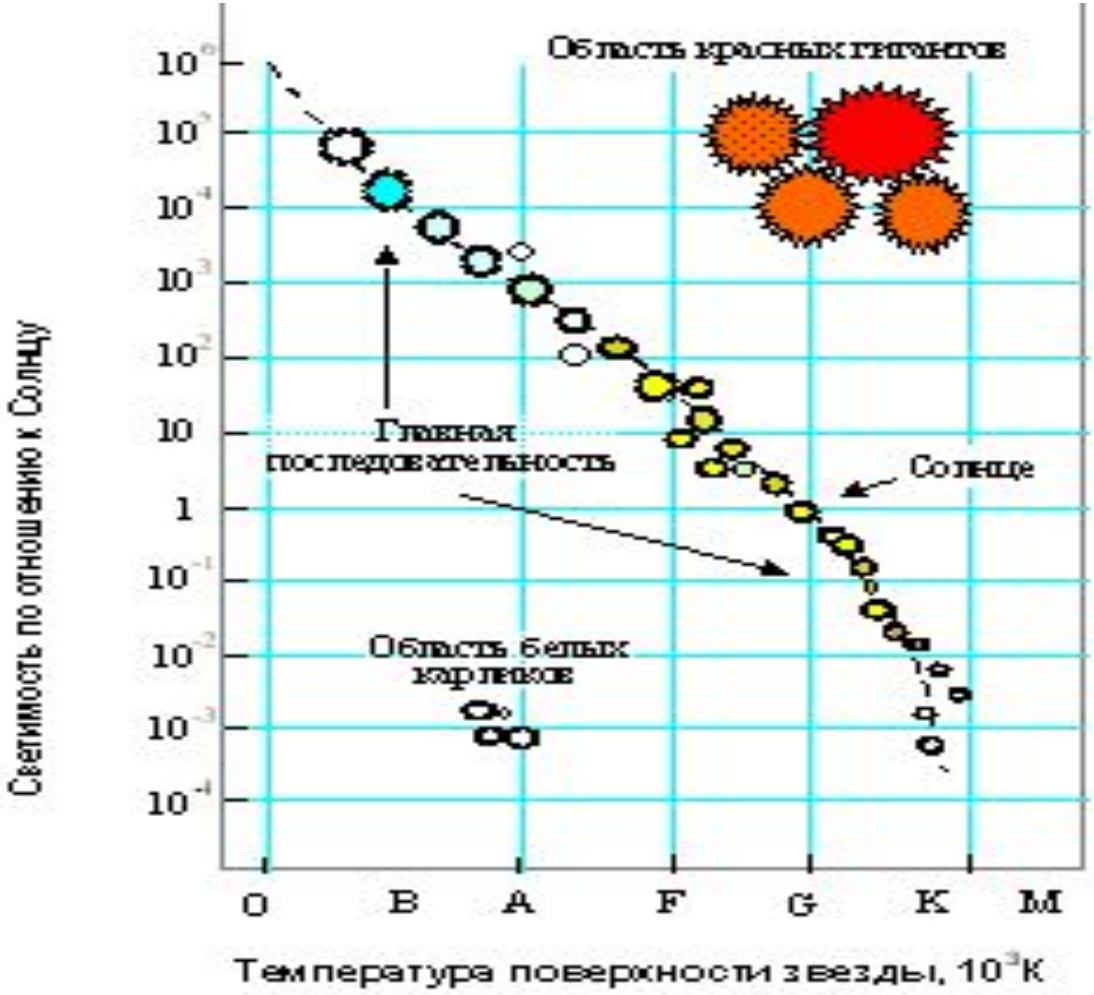


Рис. 1. Диаграмма Герцшпрунга-Рессела (схематично)

ОТО – фундамент современной космологии

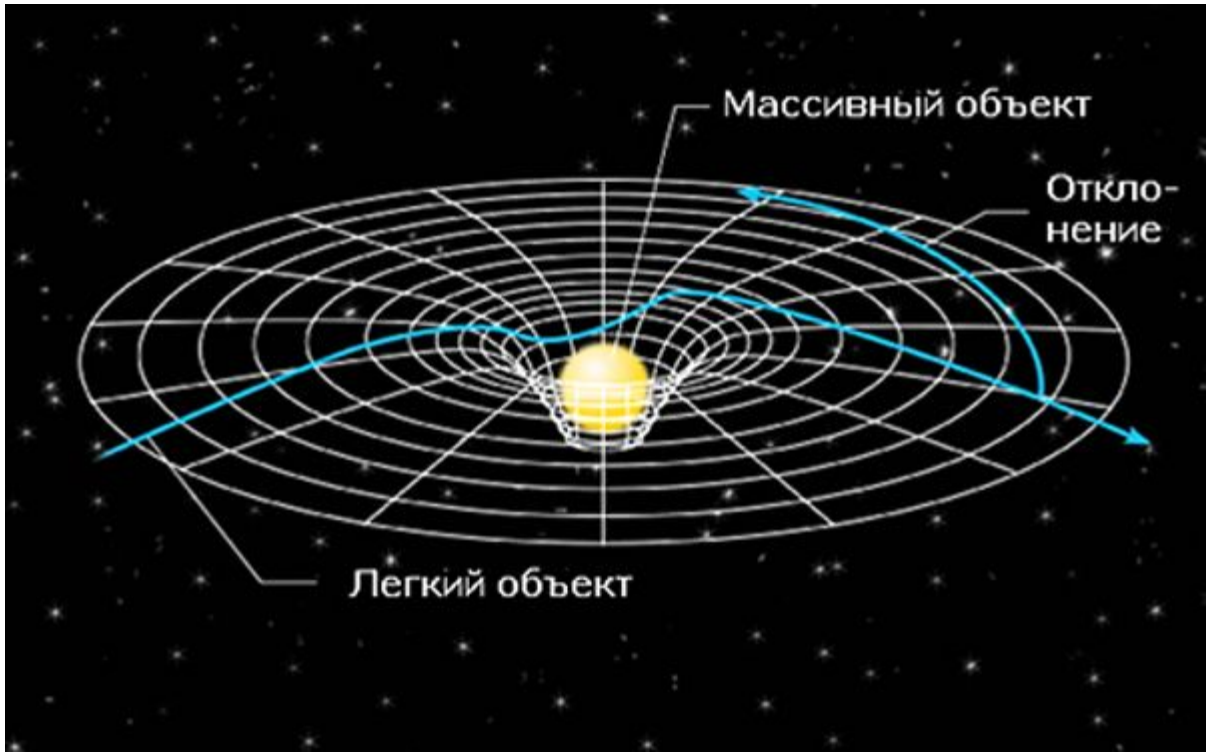
Общая теория относительности – это современная теория тяготения.

В классической теории тяготения (ньютоновской) пространство и время понимаются как независимые физические величины, существующие вне связи с веществом. В эйнштейновской концепции пространство и время образуют единый континуум, тесно связанный с веществом. Массивное вещество искривляет пространственно-временной континуум, при этом радиус кривизны обратно пропорционален корню квадратному из плотности вещества.

Понимание гравитации в ОТО

ОТО выступает как теория гравитационного поля, создаваемого присущим веществу гравитационным зарядом. В зависимости от плотности массы и ее распределения вещество искривляет пространственно-временной континуум. Взаимное влияние искривлений ПВК, вызываемых телами, и создает эффект гравитационного взаимодействия между ними.

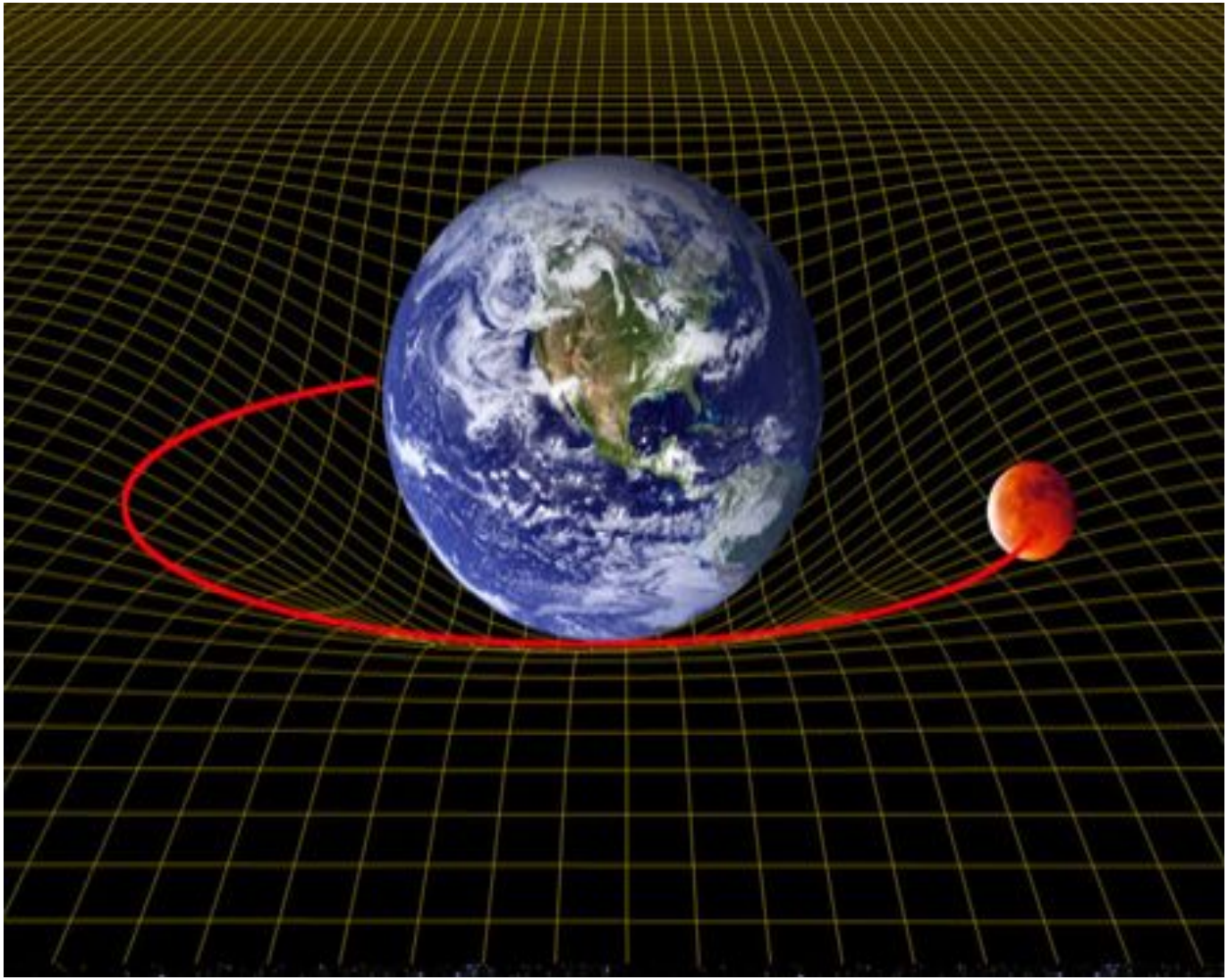
Гравитация в ОТО рассматривается как проявление искривления пространства-времени



В 2004 году для измерения тонких эффектов влияния Земли на окружающее пространство-время американцы запустили спутник Gravity Probe B.

И в 2007 г. исследователи вынесли окончательный вердикт — Земля действительно искривляет пространство вокруг себя в полном соответствии с уравнениями теории относительности. При высоте полёта спутника в 642 километра длина окружности его орбиты превышает 40 тыс. км. Полёт аппарата показал, что точное значение этой длины примерно на три сантиметра меньше, чем следует из евклидовой геометрии, то есть рассчитанное по известной любому школьнику формуле $2\pi R$. Так происходит из-за того, что масса Земли словно прогибает пространство, создавая «ямку» и нарушая плоскую геометрию космоса.

Геодезическое искажение пространства-времени



Большой взрыв

Астрономы употребляют термин «Большой взрыв» в двух взаимосвязанных значениях. С одной стороны этим термином называют само событие, ознаменовавшее зарождение Вселенной 13,7 миллиардов лет назад; с другой — весь сценарий ее развития с последующим расширением и остыванием.

Концепция Большого взрыва появилась на основе открытий А.Фридмана и Э. Хаббла, сделанных в 1920-е годы.

А.А.ФРИДМАН (1888 – 1925)

А.А.Фридман получил устойчивое нестационарное решение уравнений ОТО применительно ко Вселенной. Это означало, что Вселенная может существовать только в движении, она либо расширяется, либо сжимается.

Э.Хаббл (1889-1953)

Открытие Э.Хаббла

Э.Хаббл в 1929 обнаружил, что большинство галактик удаляется от нас, при этом между радиальными скоростями движения галактик и расстоянием до них имеется линейная зависимость (закон Хаббла).

Скорости же движения галактик определялись по т.н. «красному смещению», интерпретируемому как проявление оптического эффекта Допплера.

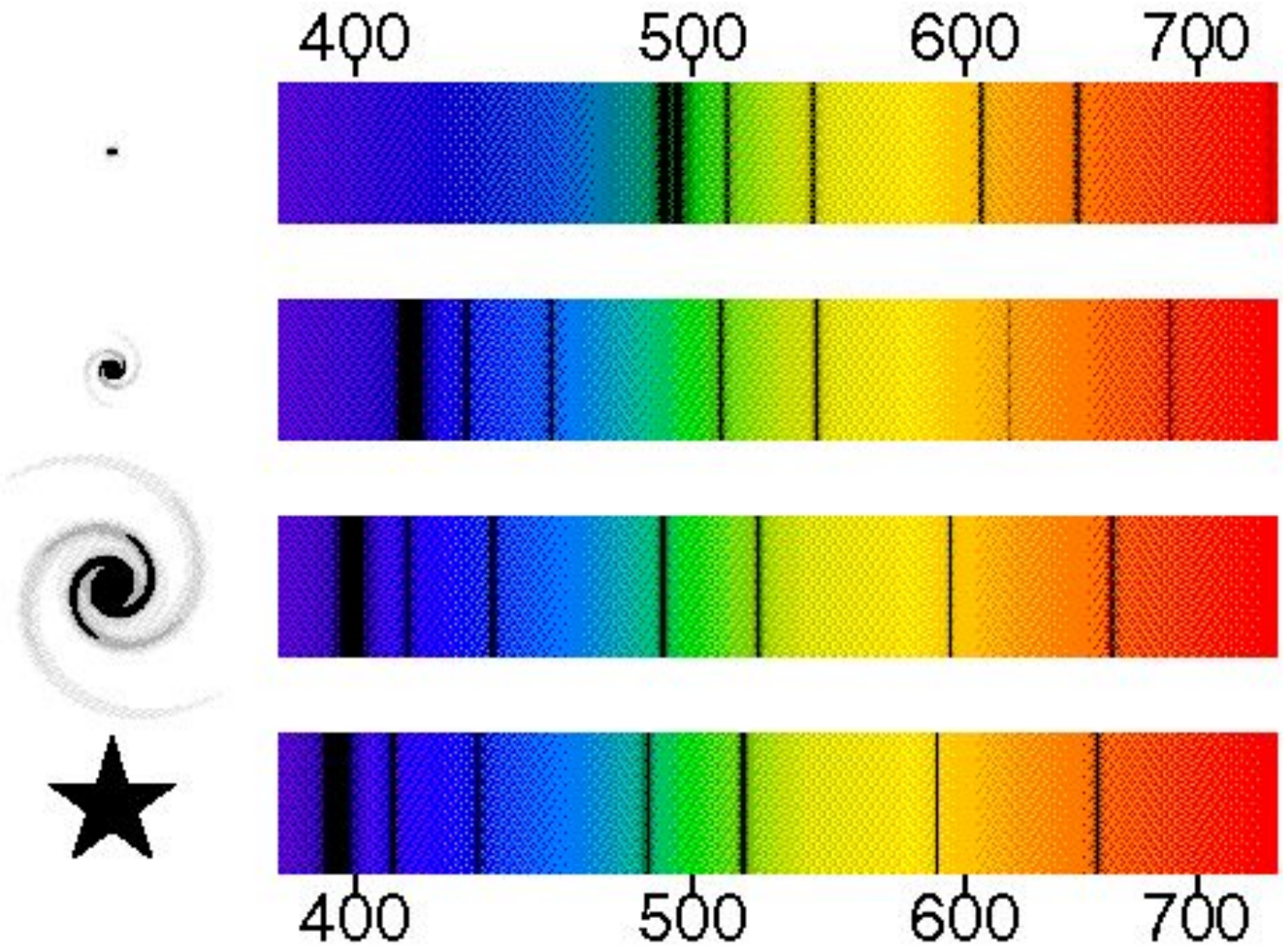
Красное смещение

Красное смещение – это наблюдаемый в спектрах излучения галактик сдвиг линий, присущих определенным химическим элементам, в сторону более длинных волн по сравнению с их нормальным положением.

Сдвиг может вызываться оптическим эффектом Допплера, возникающим при наблюдении спектра светящегося объекта, движущегося относительно наблюдателя. При таком объяснении сдвиг в длинноволновую область (красное смещение) означает, что объект удаляется от наблюдателя.

При этом скорость удаления, регистрируемая по сдвигу спектральных линий, тем больше, чем дальше находится галактика.

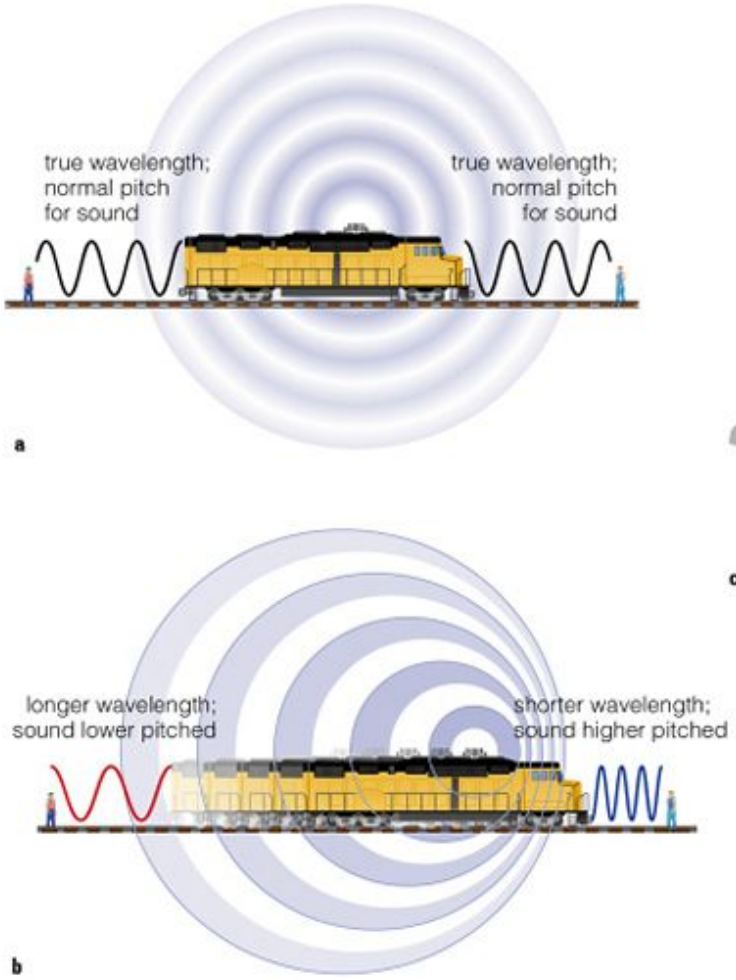
Красное смещение

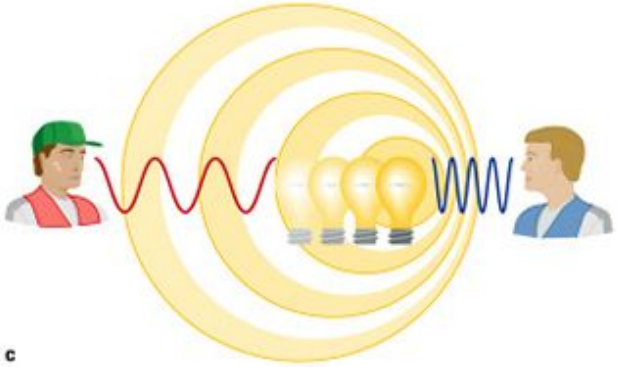


Эффект Допплера

Суть эффекта Доплера, открытого пражским математиком в 1842 г., заключается в том, что для любого волнового процесса относительное движение источника и приемника сопровождается изменением длины волны излучения. При их взаимном удалении длина волны возрастает (красное смещение) и, наоборот, при сближении – длина волны уменьшается (синее смещение).

Эффект Допплера





Георгий Антонович Гамов (1904-1968)

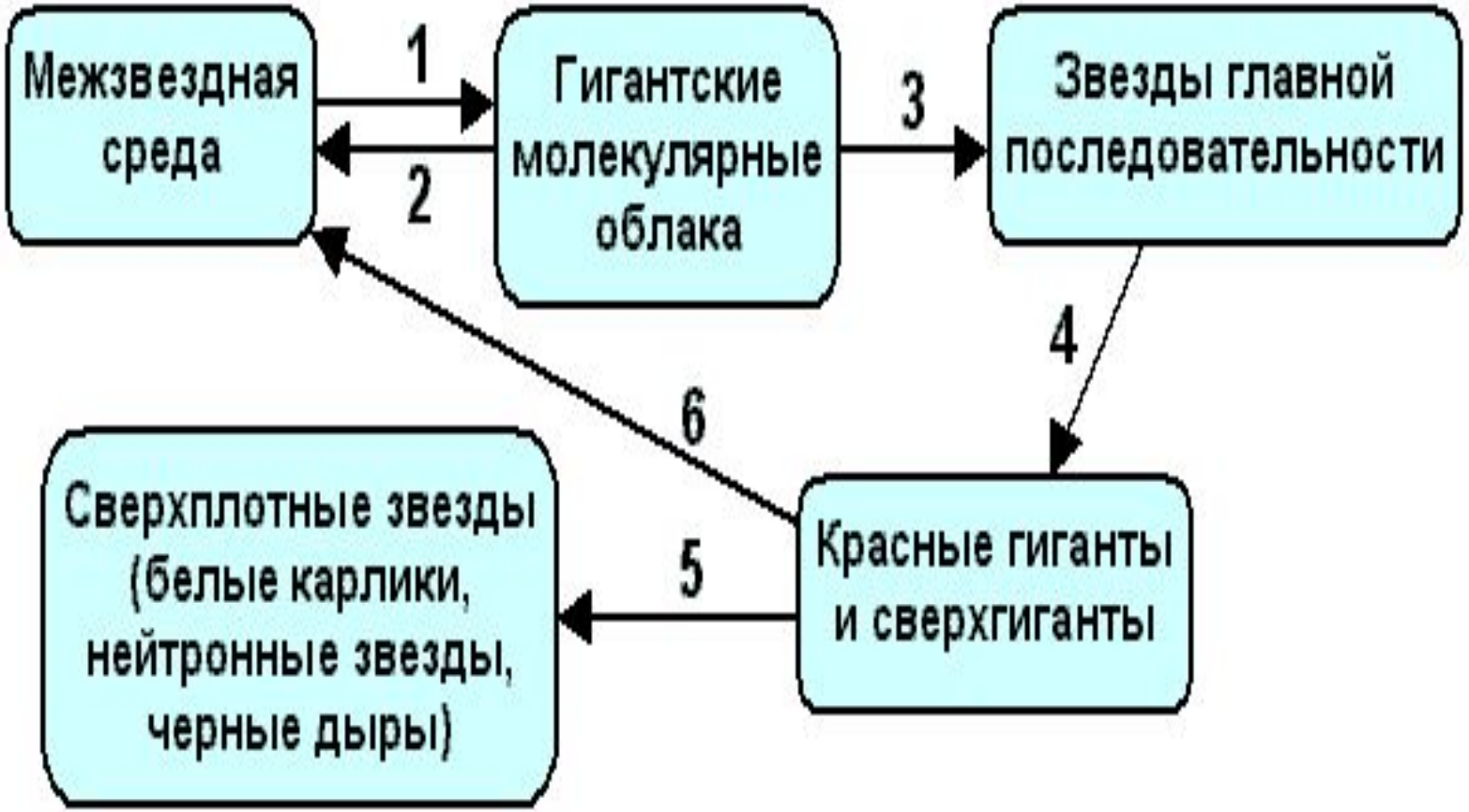
Модель «горячей Вселенной»

Ученик А.Фридмана Г.Гамов разработал модель «горячей» Вселенной, рассматривая ядерные реакции, протекавшие в самом начале расширения Вселенной, и назвал ее «космологией Большого Взрыва».

Возраст Вселенной Г.Гамов определил в 15-20 миллиардов лет. Он предположил, что t° вещества была очень велика и падала с расширением Вселенной. Его расчеты показали, что Вселенная в своей эволюции проходит ряд этапов. Ныне их называют «эрами».

Этапы эволюции Вселенной

- ***Эра адронов*** (продолжительность эры – 0,0001 с, t° - 10^{12} градусов по Кельвину, плотность - 10^{14} г/см^3)
- ***Эра лептонов*** (продолжительность – 10 с, t° - 10^{10} градусов, плотность - 10^4 г/см^3)
- ***Фотонная эра*** (продолжается 1 млн. лет, к концу эры t° падает до 3000°, плотность уменьшается на 5-6 порядков; главную роль играет излучение; в середине эры излучение отделяется от вещества и появляются условия для образования первичных атомов)
- ***Звездная эра*** (начинается процесс образования протозвезд и протогалактик)



Общая схема эволюции материи в Галактике. Пронумерованы следующие процессы: 1, 3 - гравитационная фрагментация, 2 - распад гигантских молекулярных облаков под действием излучения активности молодых звезд, 4 - образование кольцевого (слоистого) источника энергии звезды и превращение ее в красного гиганта, 5 - сжатие ядра звезды, 6 - сброс оболочки звезды (в виде планетарной туманности, вспышки Новой или Сверхновой) или потеря вещества в виде звездного ветра.

Ранняя Вселенная

Ранняя Вселенная была очень горячей. Даже если протоны и нейтроны при столкновении объединялись и формировали более тяжелые ядра, время их существования было ничтожным, потому что уже при следующем столкновении с еще одной тяжелой и быстрой частицей ядро снова распадалось на элементарные компоненты. Выходит, что с момента Большого взрыва должно было пройти около трех минут, прежде чем Вселенная остыла настолько, чтобы энергия соударений несколько смягчилась и элементарные частицы начали образовывать устойчивые ядра. В истории ранней Вселенной это ознаменовало открытие окна возможностей для образования ядер легких элементов. Все ядра, образовывавшиеся в первые три минуты, неизбежно распадались; в дальнейшем начали появляться устойчивые ядра.

Ранняя Вселенная

Однако это первичное образование ядер (так называемый нуклеосинтез) на ранней стадии расширения Вселенной продолжался очень недолго. Вскоре после первых трех минут частицы разлетелись так далеко друг от друга, что столкновения между ними стали крайне редкими, и это ознаменовало закрытие окна синтеза ядер. В этот краткий период первичного нуклеосинтеза в результате соударений протонов и нейтронов образовались дейтерий (тяжелый изотоп водорода с одним протоном и одним нейтроном в ядре), гелий-3 (два протона и нейтрон), гелий-4 (два протона и два нейтрона). Все более тяжелые элементы образуются позже — при формировании звезд

Эмпирические подтверждения космологии Большого взрыва

- Красное смещение
- Реликтовое излучение

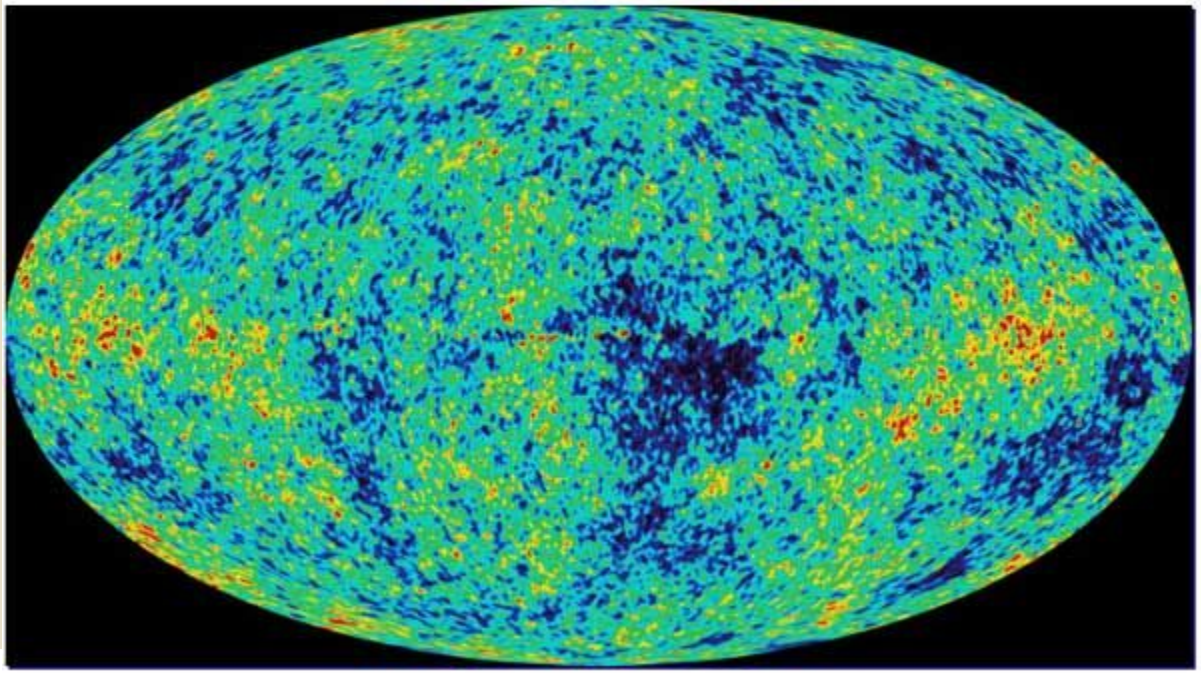
Реликтовое излучение

В 1964 году американские физики А.Пензиас и Р.Уилсон обнаружили предсказанный Г.Гамовым эмпирический факт: Вселенная наполнена электромагнитным излучением в микроволновом диапазоне частот. Последовавшие измерения показали, что это характерное классическое излучение черного тела, свойственное объектам с температурой около –270°С (3 К), т. е. всего на три градуса выше абсолютного нуля.

Простая аналогия поможет нам интерпретировать этот результат. Представьте, что вы сидите у камина и смотрите на угли. Пока огонь горит ярко, угли кажутся желтыми. По мере затухания пламени угли тускнеют до оранжевого цвета, затем до темно-красного. Когда огонь почти затух, угли перестают испускать видимое излучение, однако, поднеся к ним руку, вы почувствуете жар, что означает, что угли продолжают излучать энергию, но уже в инфракрасном диапазоне частот. Чем холоднее объект, тем ниже излучаемые им частоты и больше длина волн. По сути, Пензиас и Уилсон определили температуру «космических углей» Вселенной после того, как она остывала на протяжении 13,7 миллиардов лет: ее фоновое излучение оказалось в диапазоне микроволновых радиочастот.

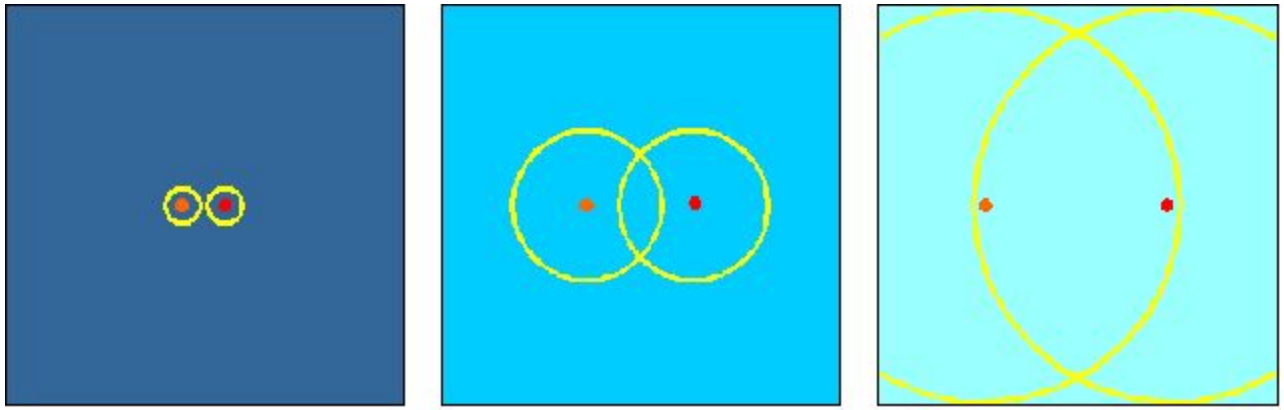
Исторически это открытие и предопределило выбор в пользу космологической теории Большого взрыва.

WMAP и температура неба



Это картинка флуктуаций интенсивности реликтового радиоизлучения , отражающего квантовые флуктуации, возникшие на конечной стадии инфляции, примерно в 10–30 (в минус тридцатой степени) сек. после начала "рождения" нашей Вселенной.

Космический горизонт



1 млрд. лет 6 млрд. лет 13 млрд. лет

Расширение космического горизонта в расширяющейся Вселенной. На рисунке показан квадрат со стороной примерно 80 млрд. св. лет. Красные точки - "галактики". Желтым цветом показано кольцо удаляющихся от галактики фотонов, испущенных в момент большого Взрыва. Это кольцо расширяется со скоростью света относительно галактик, через которые оно проходит. Галактика слева становится доступной для наблюдений из галактики справа только тогда, когда кольцо фотонов левой галактики достигает правой.

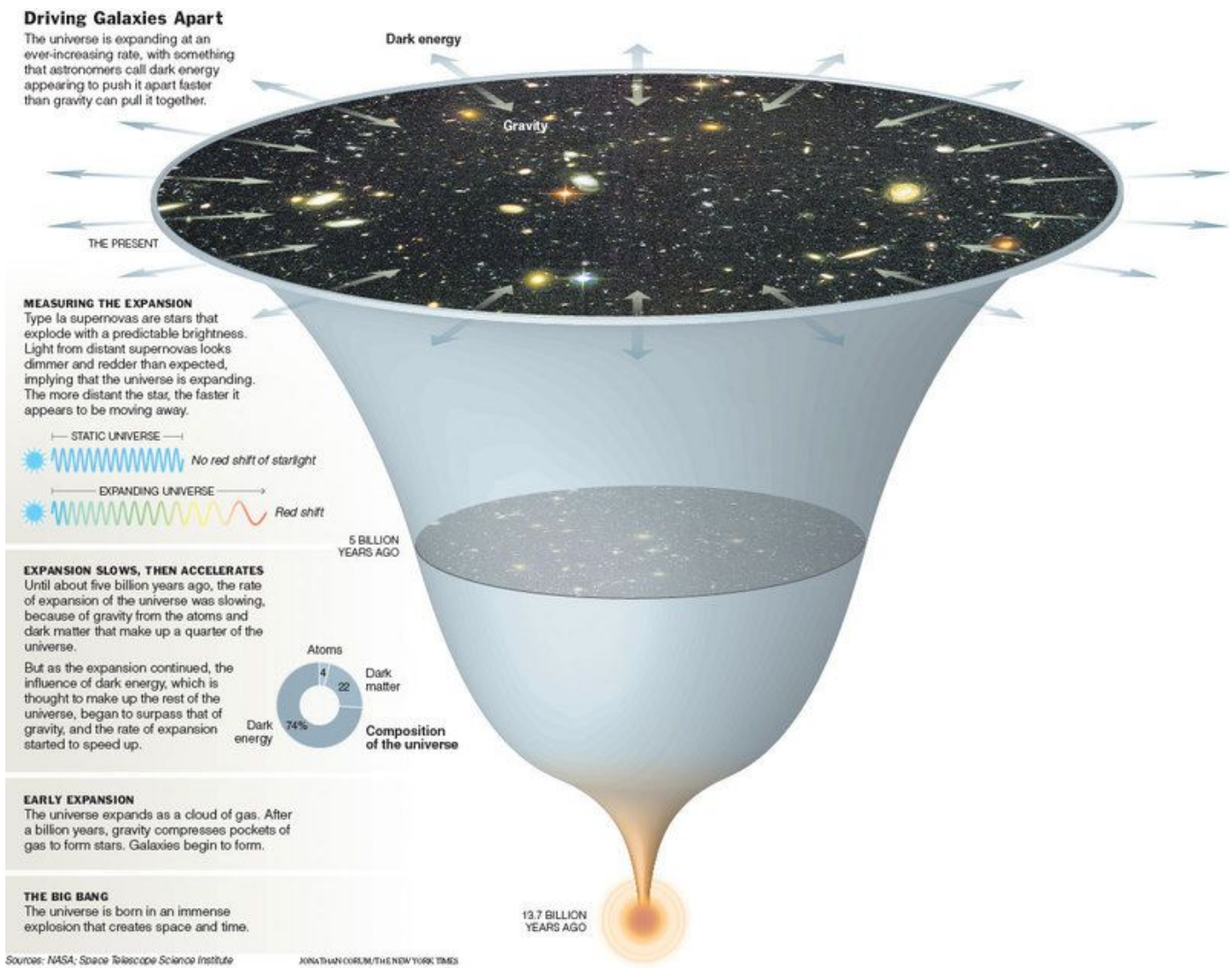
Ускоренное раширение

В 90-х годах XX века из исследований группы

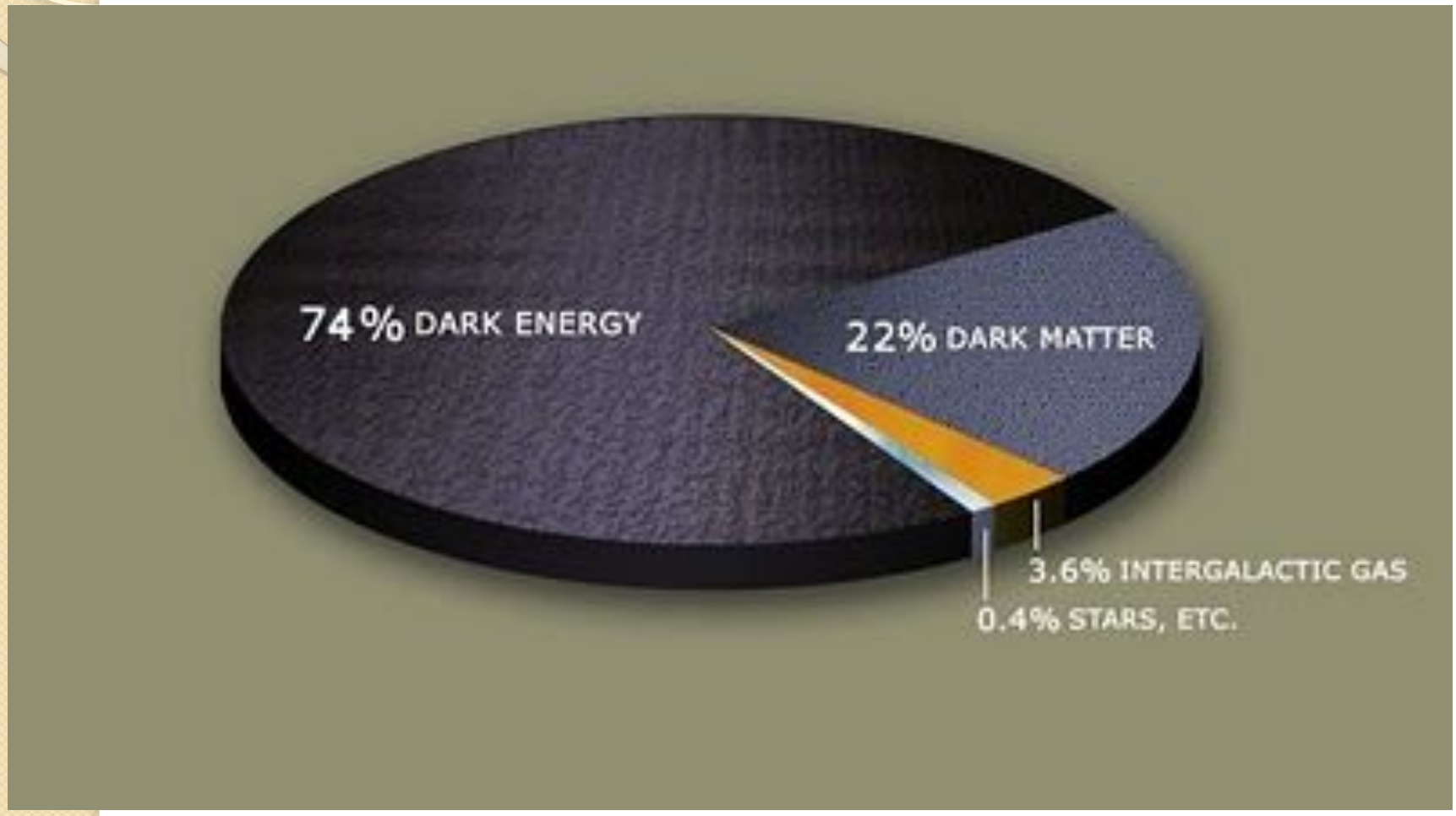
С. Перлмуттера и группы А. Райса и Б. Шмидта удалённых сверхновых звёзд был сделан вывод, что Вселенная расширяется с ускорением. В современных космологических теориях это явление обычно объясняют тем, что значительную долю полной массы Вселенной составляет так называемая "тёмная энергия" — неизвестный вид энергии с отрицательным давлением.

Диаграмма показывает изменение темпа расширения Вселенной с момента её рождения около 13.7 млрд. лет назад. Чем более пологой выглядит кривая, тем выше скорость расширения. Наклон кривой заметно меняется где-то 5-7 млрд. лет назад — с этого времени разлёт объектов во Вселенной начал происходить нарастающими темпами.

Ускоренное расширение Вселенной



Состав Вселенной по данным WMAP



Темная энергия

Существует два варианта объяснения сущности тёмной энергии:

- тёмная энергия есть космологическая константа — неизменная энергетическая плотность, равномерно заполняющая пространство Вселенной (другими словами, постулируется ненулевая энергия вакуума);
- тёмная энергия есть некая квинтэссенция — динамическое поле, энергетическая плотность которого может меняться в пространстве и времени.

Тёмная энергия также должна составлять значительную часть так называемой скрытой массы Вселенной.