

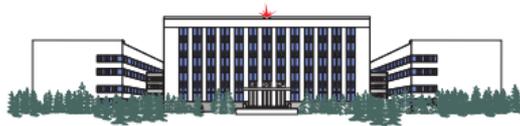
Плазма в космосе

Лекция №2

Вселенная сегодня

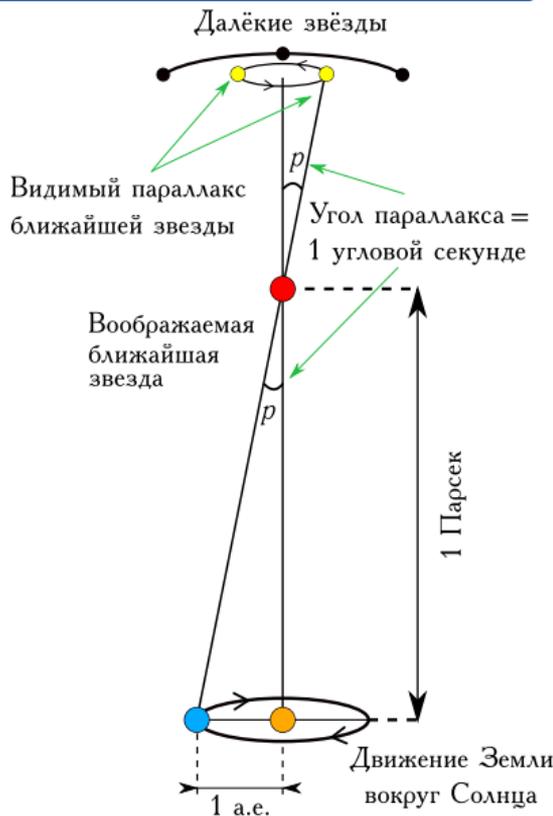
Анненков Владимир, с.н.с. лаб. 9-1

16 сентября 2021



Астрономические размеры

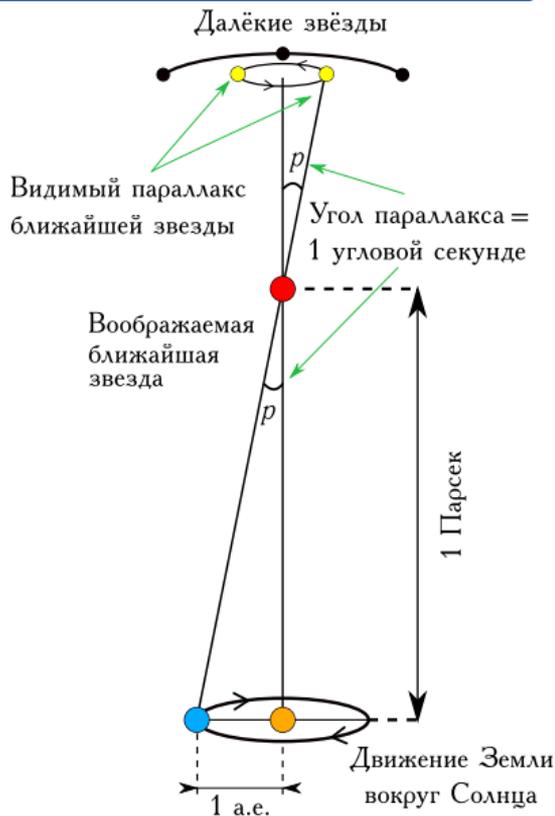
Естественной мерой расстояний в Солнечной системе является **астрономическая единица (а.е.)**.
 $1 \text{ а.е.} \simeq 1.5 \cdot 10^{13} \text{ см} \approx 500 \text{ световых секунд}$ – это большая полуось земной орбиты.



Астрономические размеры

Из-за годичного движения Земли вокруг Солнца положение светила на небе, находящегося на некотором расстоянии будет смещаться от среднего положения. В астрономии это явление называют **годовым параллаксом**.

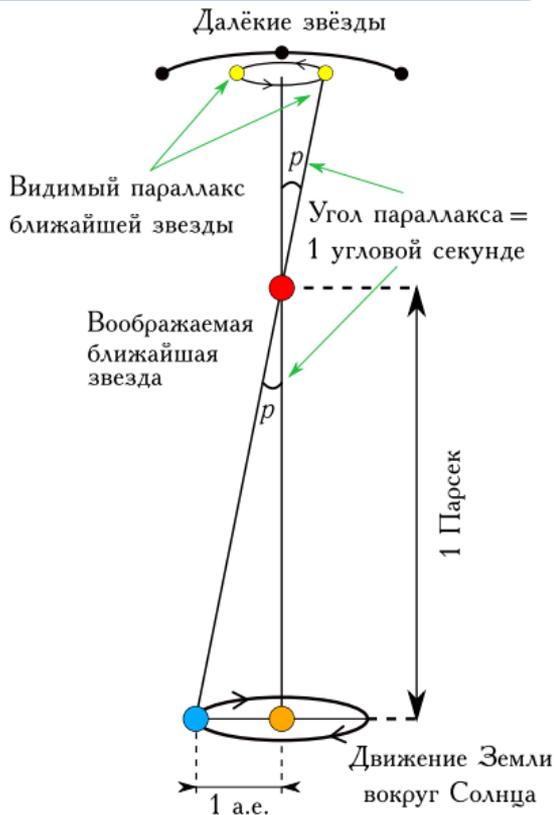
Парсек (параллакс-в-секунду) – расстояние, с которого отрезок равный большой полуоси земной орбиты и расположенный перпендикулярно лучу зрения, виден под углом $1''$.



Астрономические размеры

Поскольку в радианной мере $1'' \approx 1/206265$, находим 1 парсек = 206265 а.е. $\simeq 3 \cdot 10^{18}$ см. Зная годичный параллакс, выраженный в секундах дуги, расстояние в парсеках определяется по формуле:

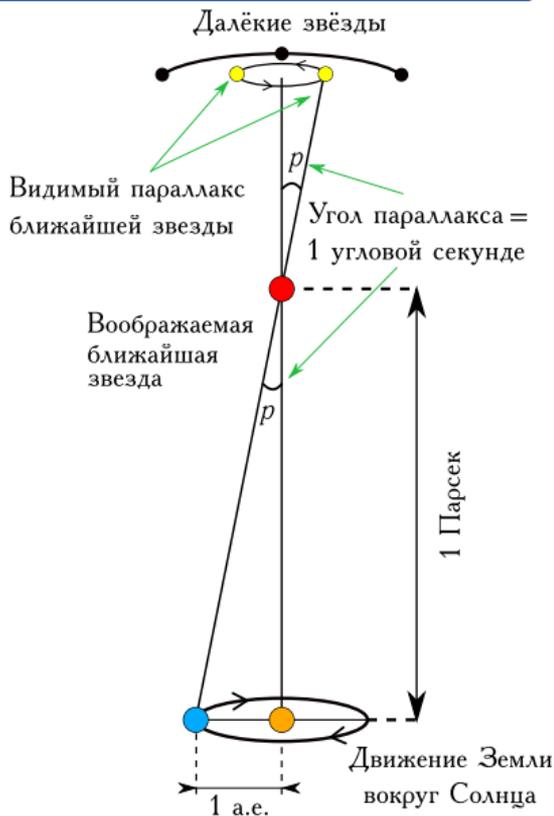
$$d(\text{пк}) = \frac{1}{\pi''}.$$



Астрономические размеры

Прямое определение расстояний до звезд, основанное на измерении их годовичного параллакса, ограничивается астрометрической точностью определения положения звезд на небесной сфере.

Максимальное расстояние, измеряемое по параллаксам, не превышает 1 кпк.

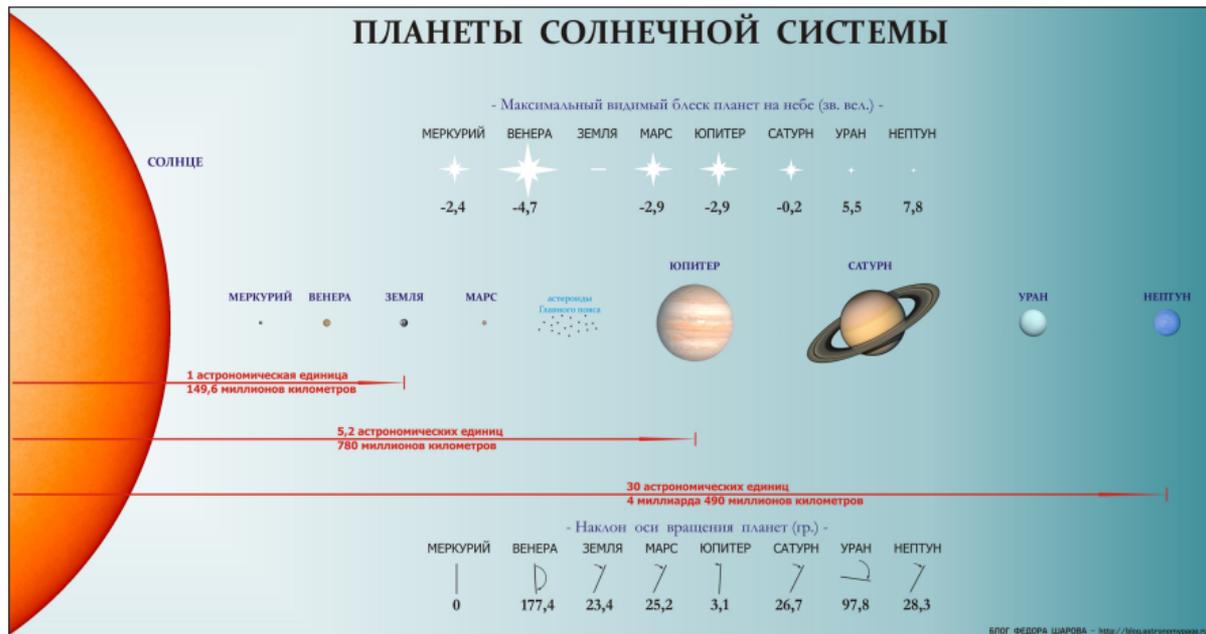


Соответствие единиц длины

	см	а.е.	пк	свет. сек.	свет. час	свет. год
см	1	$6.68 \cdot 10^{-14}$	$3.24 \cdot 10^{-19}$	$3.34 \cdot 10^{-11}$	$9.27 \cdot 10^{-15}$	$1.057 \cdot 10^{-18}$
а.е.	$1.5 \cdot 10^{13}$	1	$4.85 \cdot 10^{-6}$	499	0.14	$1.58 \cdot 10^{-5}$
пк	$3.08 \cdot 10^{18}$	$2.06 \cdot 10^5$	1	$1.03 \cdot 10^8$	$2.86 \cdot 10^4$	3.26
свет. сек.	$2.998 \cdot 10^{10}$	$2.004 \cdot 10^{-3}$	$9.7 \cdot 10^{-9}$	1	$2.8 \cdot 10^{-4}$	$3.17 \cdot 10^{-8}$
свет. час	$1.08 \cdot 10^{14}$	7.21	$3.5 \cdot 10^{-5}$	3600	1	$1.14 \cdot 10^{-4}$
свет. год	$9.46 \cdot 10^{17}$	63241	0.3	$3.16 \cdot 10^7$	8766	1

Солнечная система

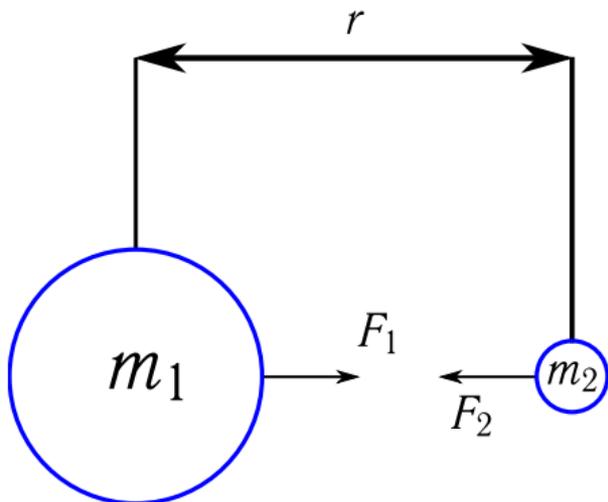
ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ



Характерные масштабы Солнечной системы в логарифмической шкале.
Изображение взято с <http://blog.astronomy.ru/>

Измерение масс

Закон всемирного тяготения



$$F_1 = F_2 = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Из второго закона Ньютона и закона всемирного тяготения:

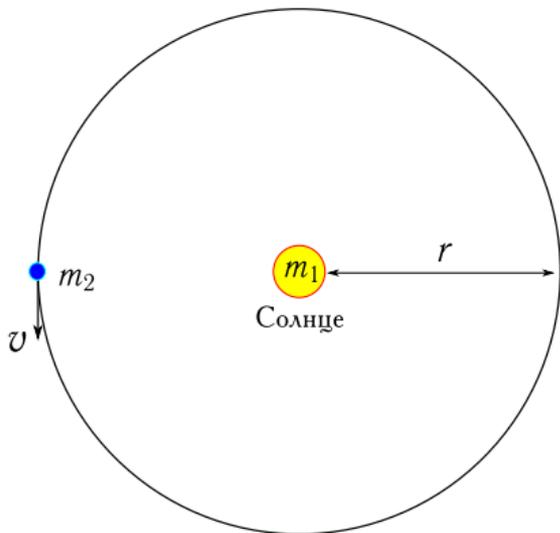
$$m_2 a = G \frac{m_1 \cdot m_2}{R^2} \quad (1)$$

$$m_1 = a \frac{R^2}{G} \quad (2)$$

Масса Земли:

$$M_{\oplus} \approx 5.9722 \times 10^{24} \text{ кг}$$

Двойные системы, $m_1 \gg m_2$



Рассмотрим круговую орбиту.
Центростремительная сила,
действующая на спутник:

$$F_{ц} = m_2 \frac{v^2}{r} = m \omega^2 r,$$

где $\omega = \frac{2\pi}{T}$ - угловая скорость,
 T - период вращения.

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{r^3}{GM}$$

$$m_1 = 4\pi^2 \frac{r^3}{GT^2}$$

$$F_{ц} = F_{грав}$$
$$m_2 r \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 = g \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Двойные системы, $m_1 \gg m_2$

Для некруговых орбит и с учётом вращения вокруг центра масс:

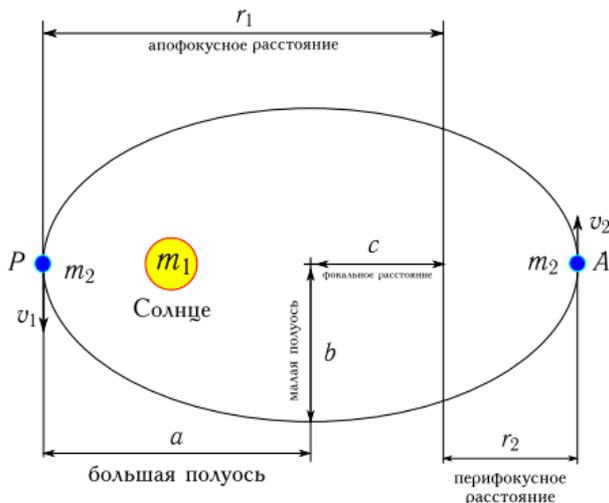
$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G(m_1 + m_2)}{4\pi^2}$$

Пренебрегая массой спутника:

$$m_1 = 4\pi^2 \frac{a^3}{GT^2}$$

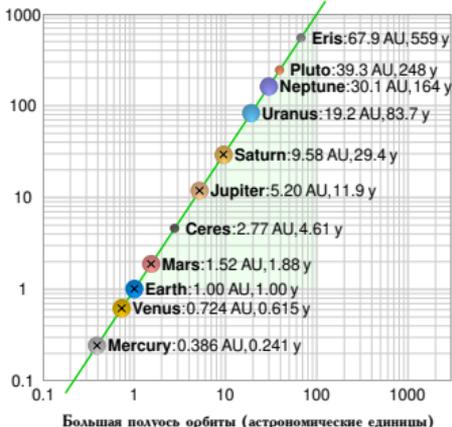
Масса Солнца:

$$M_{\odot} \approx 1.99 \cdot 10^{30} \text{ кг.}$$

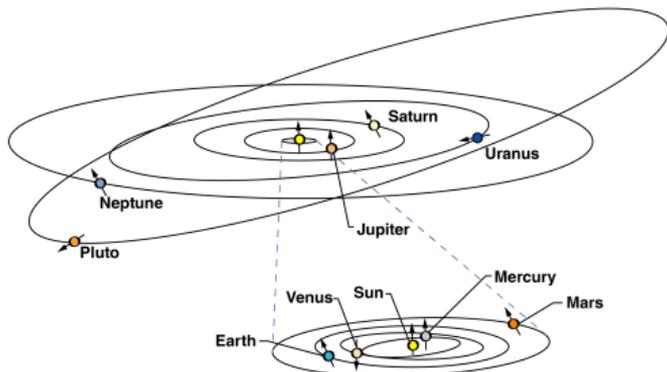


Солнечная система

Орбитальный период (земные годы)



View looking from the edge of the solar system



Enlargement of inner solar system

Планета	Большая полуось (AU)	Период (дни)	a^3/T^2 (10^{-6} AU ³ /дни ²)
Меркурий	0.38710	87.9693	7.496
Венера	0.72333	224.7008	7.496
Земля	1	365.2564	7.496
Марс	1.52366	686.9796	7.495
Юпитер	5.20336	4332.8201	7.504
Сатурн	9.53707	10775.599	7.498
Уран	19.1913	30687.153	7.506
Нептун	30.0690	60190.03	7.504

А если спутников нет?

А если спутников нет?

- Можно запустить спутник.

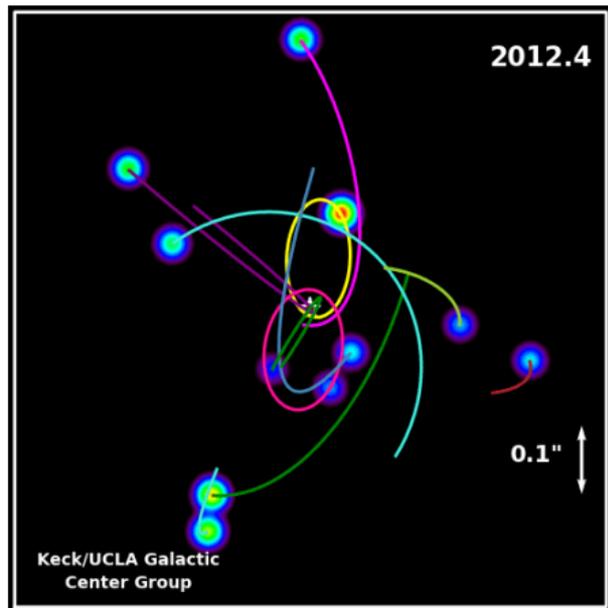
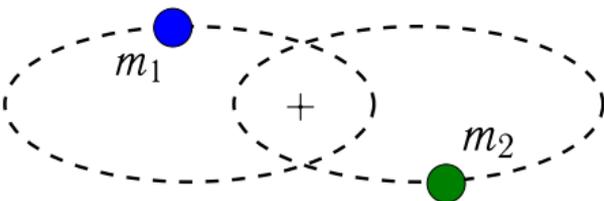
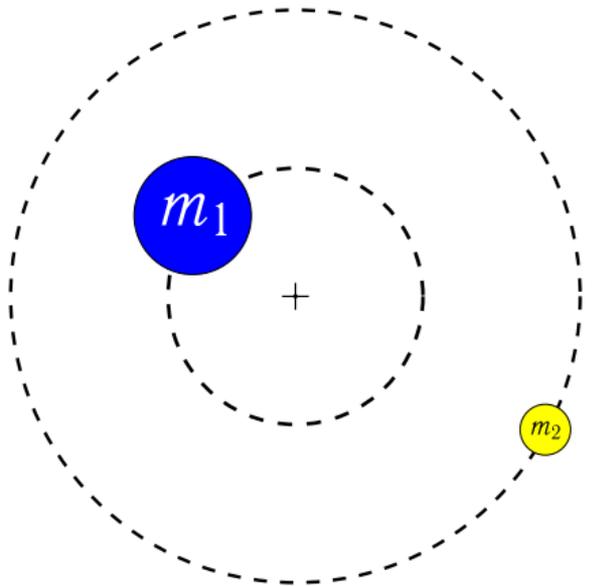
А если спутников нет?

- Можно запустить спутник.
- Можно исследовать гравитационное влияние на орбиты других соседних планет/звёзд.

А если спутников нет?

- Можно запустить спутник.
- Можно исследовать гравитационное влияние на орбиты других соседних планет/звёзд.
- Можно оценить массу исходя из модели строения объекта.

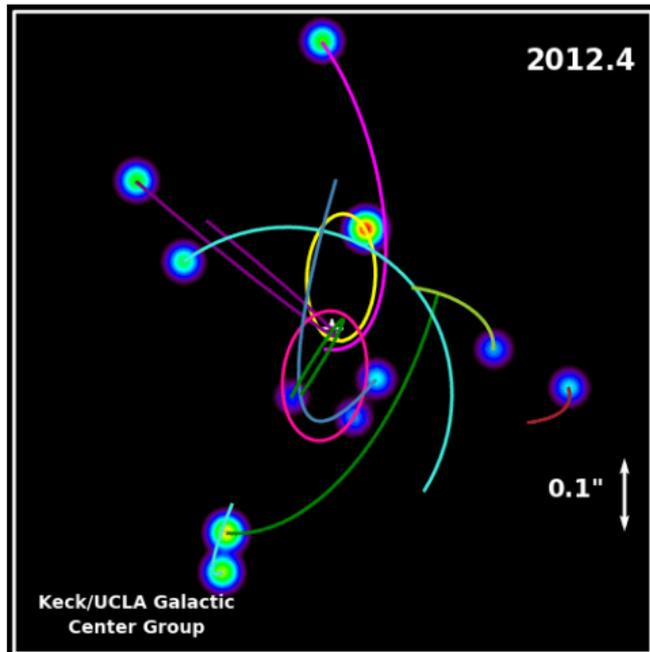
Двойные системы



Измерение скоростей

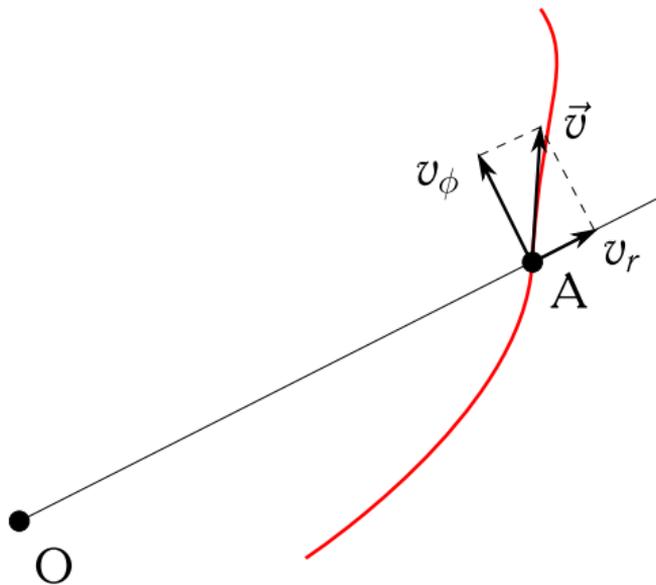
Измерение скоростей

- Визуально (зная расстояние до объекта).



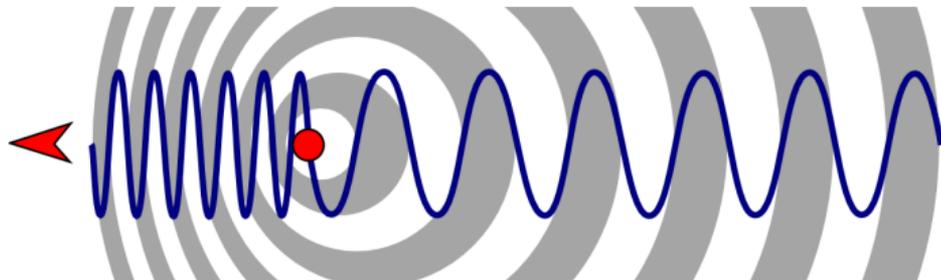
Измерение скоростей

- Как правило плоскость движения объекта не перпендикулярна лучу зрения.
- Возможно измерение только лучевой (радиальной) скорости.



Измерение скоростей

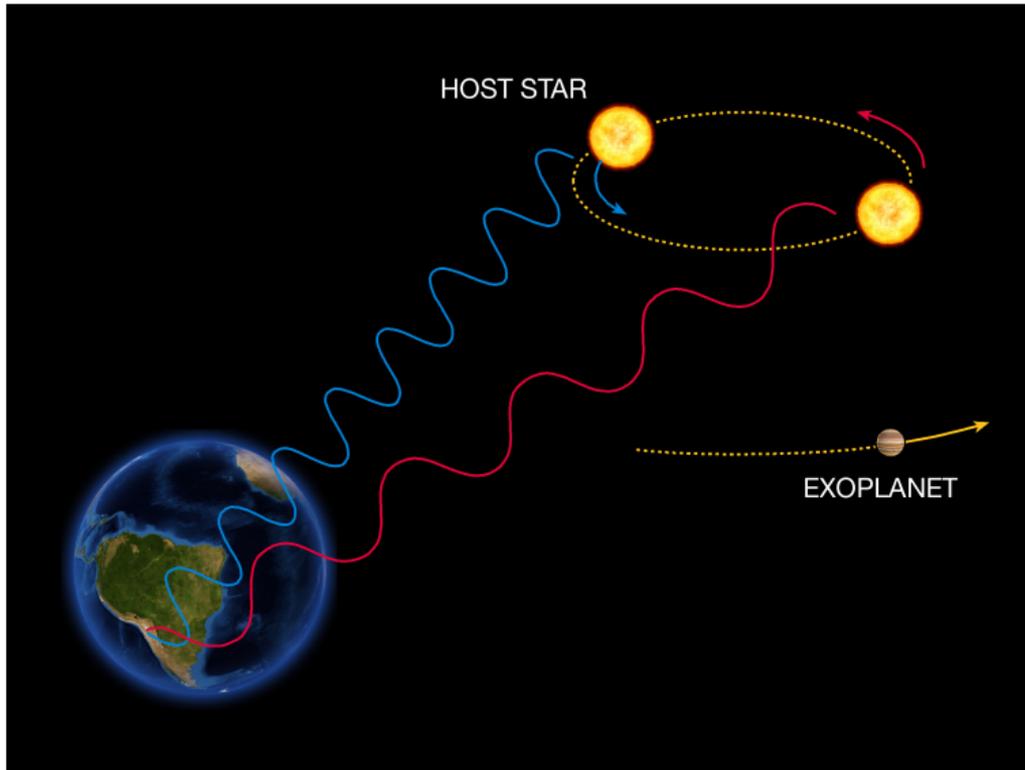
- Лучевая скорость вычисляется за счёт эффекта Доплера



$$\omega = \omega_0 \cdot \frac{\sqrt{1 - v^2/c^2}}{1 - v/c \cdot \cos \theta},$$

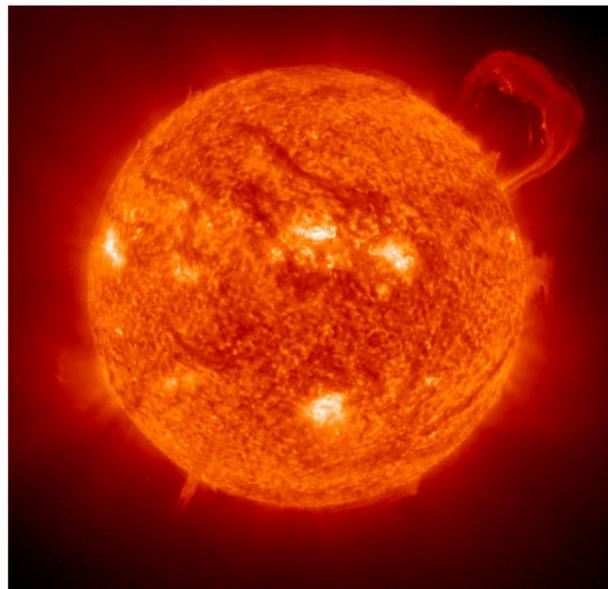
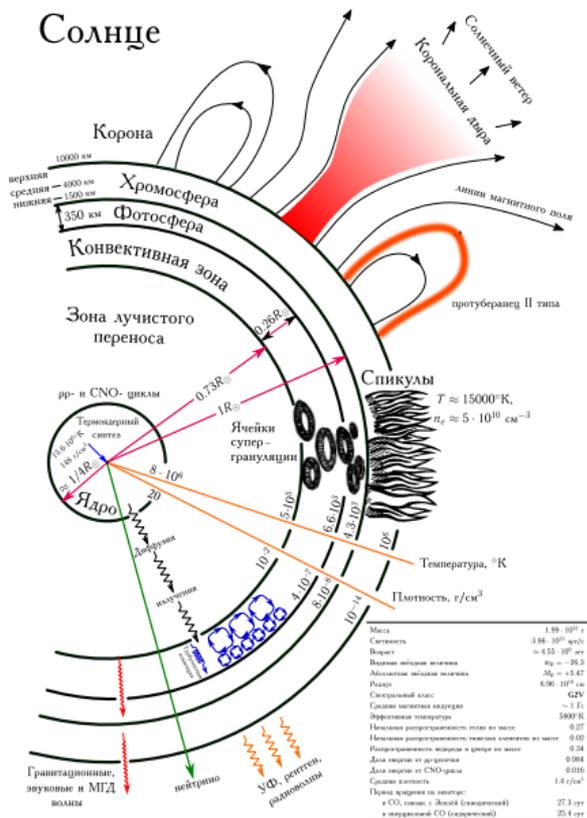
где c – скорость света, v – скорость источника относительно приёмника, θ – угол между направлением на источник и вектором скорости в системе отсчёта приёмника.

Измерение скоростей



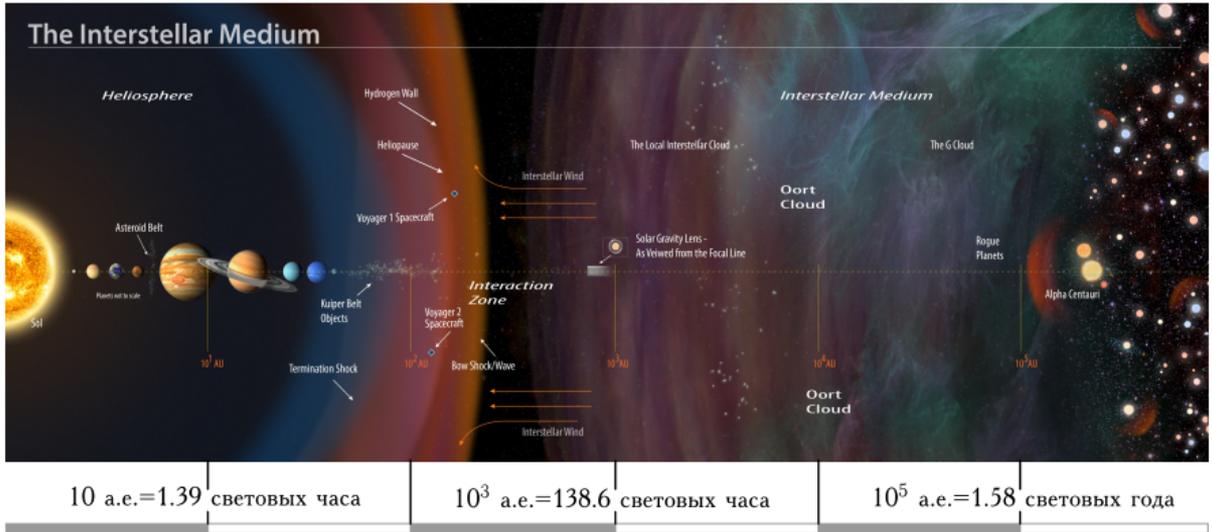
Солнце

Солнце



Солнечный протуберанец
(фотография SOHO)

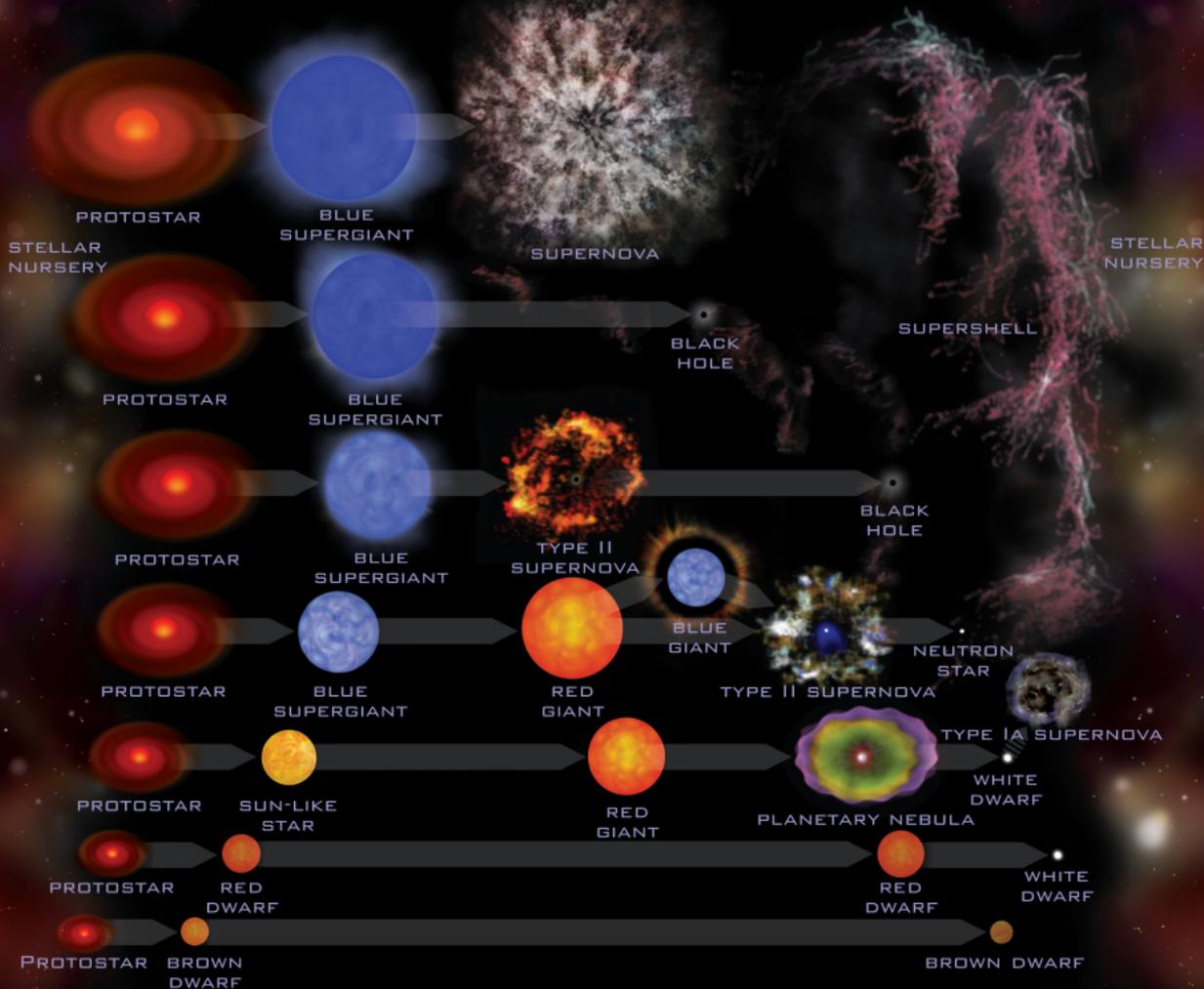
Солнечная система



100 a.e. = 13.9 световых часа

10^4 a.e. = 0.16 световых года

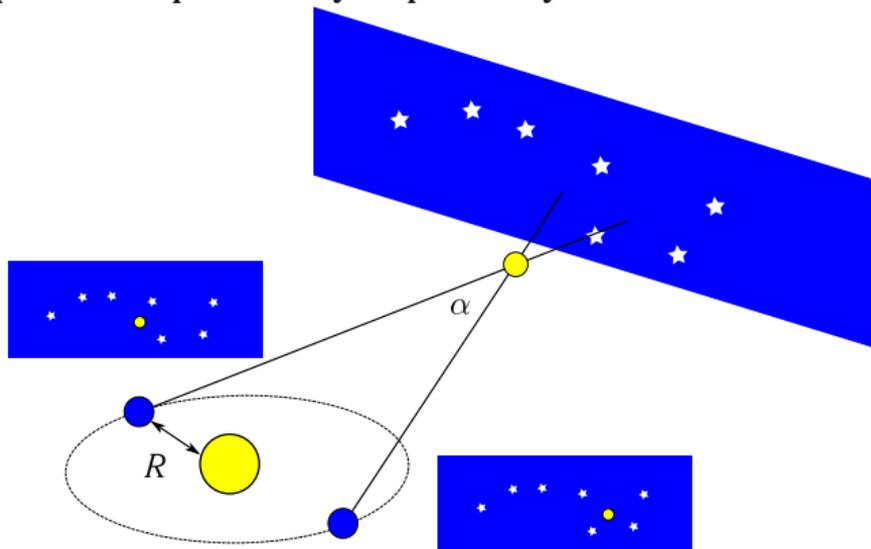
Характерные масштабы Солнечной системы в логарифмической шкале.
Изображение взято с www.nasa.gov



Измерение расстояний^е

Измерение расстояний

- По тригонометрическому параллаксу



$$D = \frac{2R}{2 \sin \alpha/2} \approx \frac{2R}{\alpha},$$

где D – искомое расстояние, R – радиус орбиты Земли.

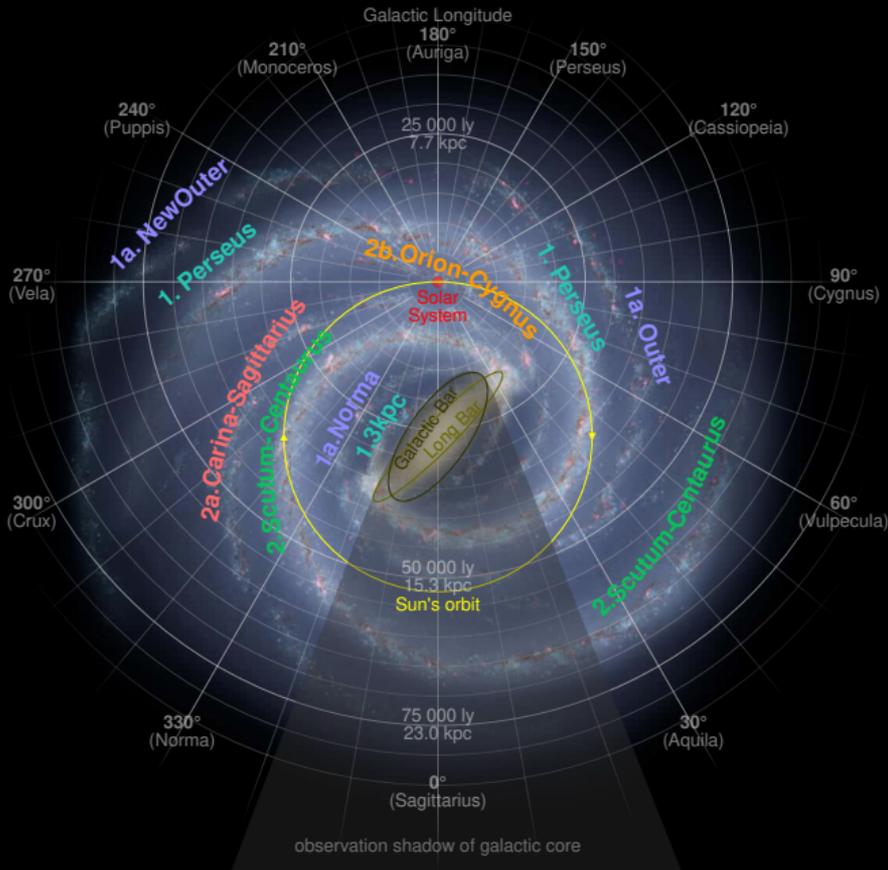
Измерение расстояний

- С использованием **стандартных свечей**

Если из теоретических моделей известна интенсивность I_0 , с которой излучает объект, то детектируемая интенсивность I_1 позволит оценить расстояние до звезды.

Стандартные свечи:

- **Цефеиды** – переменные звёзды с хорошо изученной зависимостью период — светимость;
- **Красные гиганты** – яркие звёзды в конце эволюции;
- **Новые** и **сверхновые** – мощные кратковременные вспышки на поздней стадии эволюции звёзд;
- и т.д.





Barred Spiral



Irregular



Spiral



Peculiar



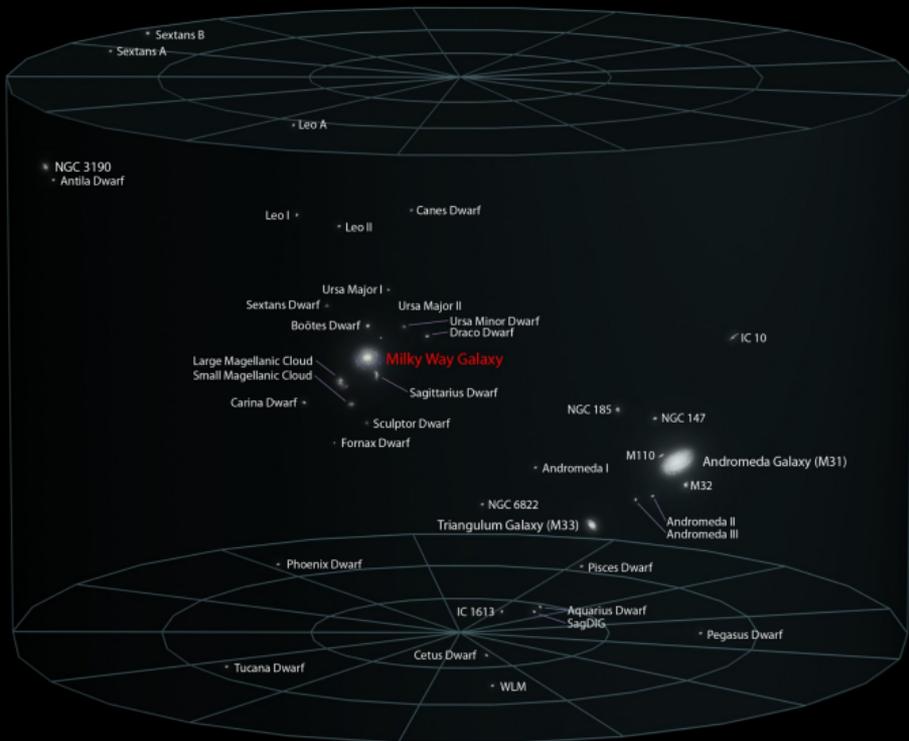
Elliptical



Lenticular

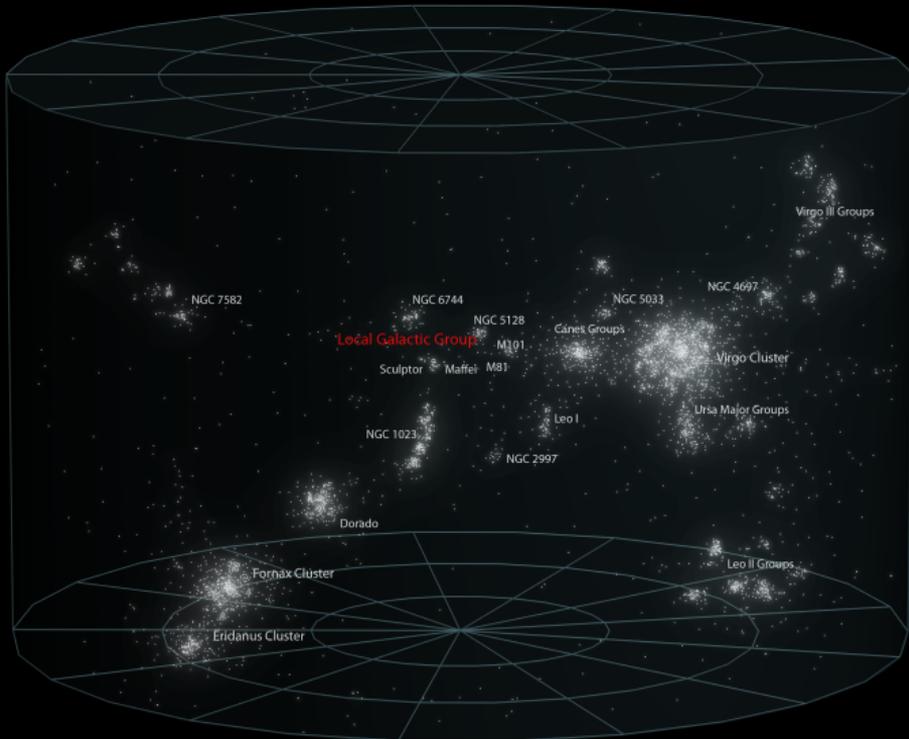
Местная группа галактик

Local Galactic Group



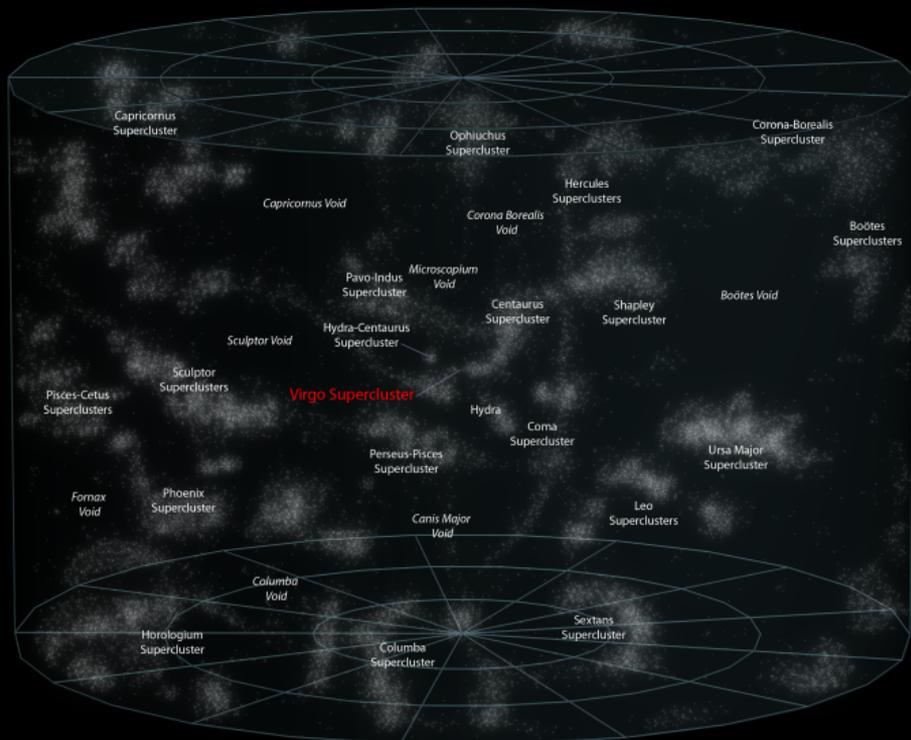
Местное сверхскопление галактик

VIRGO SUPERCLUSTER

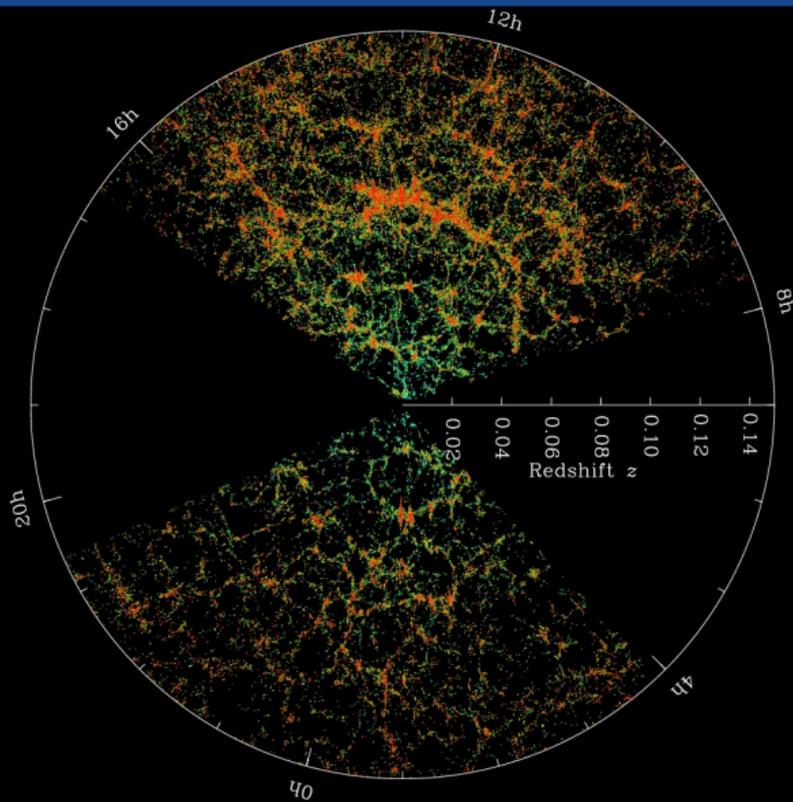


Местный суперкластер

LOCAL SUPERCLUSTERS



Однородность и изотропия



Крупнейший каталог галактик и квазаров — каталог SDSS (Sloan Digital Sky Survey).

Однородность и изотропия

- Вселенная становится в среднем однородной и изотропной на характерных расстояниях $\Delta l \approx 200$ Мпк.
- Однородность на масштабах порядка Δl означает, что средняя плотность вещества в ячейках с размером Δl (в объеме Δl^3) одинакова с точностью до случайных флуктуаций для любой выбранной наугад области.
- Изотропия означает **отсутствие выделенных направлений** во Вселенной.

Состояние вещества во Вселенной

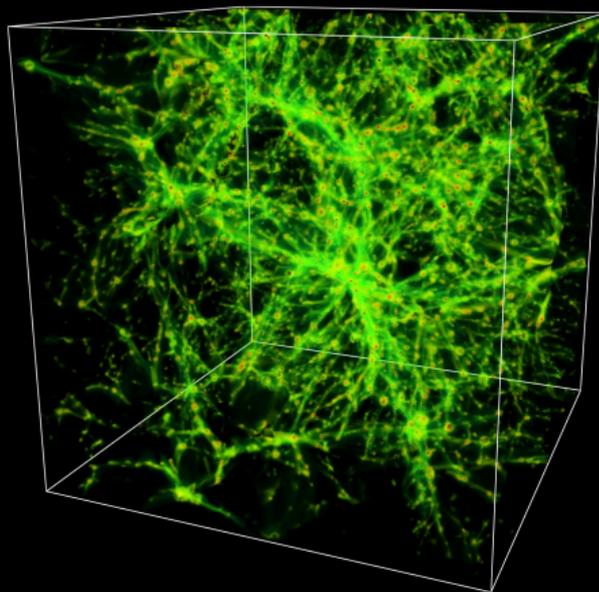
И планеты, и звезды, и галактики существуют не в абсолютной пустоте, а в разреженной среде, сложным образом взаимодействуя с ней. Принято разделять эту среду на:

- межпланетную;
- межзвездную;
- межгалактическую.

Межгалактический газ

- Наиболее разрежен межгалактический газ. Он наблюдается в скоплениях галактик, в которых удерживается суммарным гравитационным полем галактик и так называемой темной (или «скрытой») массой, состав которой неизвестен.
- Температура межгалактического газа достигает $10^7 \dots 10^8$ К, поэтому его излучение принимается лишь в рентгеновском диапазоне.
- При такой температуре газ представляет собой высокоионизованную плазму практически прозрачную для видимого света, поскольку концентрация частиц в ней очень мала — $10^{-4} - 10^{-3} \text{ см}^{-3}$, что позволяет видеть сквозь газ далекие галактики
- При этом полная масса межгалактического газа в скоплении галактик может превышать суммарную массу всех галактик скопления.

Межгалактический газ



Компьютерное моделирование межгалактического газа

Межзвездная Среда

- Наиболее сложная по своим свойствам среда – **межзвездная**. Она крайне неоднородна на самых различных масштабах и содержит газ с очень сильно различающимися плотностями и температурами — от нескольких К (молекулярные облака) до величины порядка миллиона К (горячие пузыри разреженной плазмы, связанные со взрывом сверхновых звезд).
- Межзвездная среда пронизывается потоками высокоэнергичных частиц — космическими лучами, распространяющимися по всем направлениям.
- Она при этом замагничена, причем плотности энергии магнитного поля, теплового и турбулентного движения газа и энергии космических лучей сопоставимы между собой.
- Поскольку в межзвездной среде при любой температуре всегда присутствуют свободные электроны, среда электропроводна, и магнитное поле оказывает большое влияние на характер ее движения.

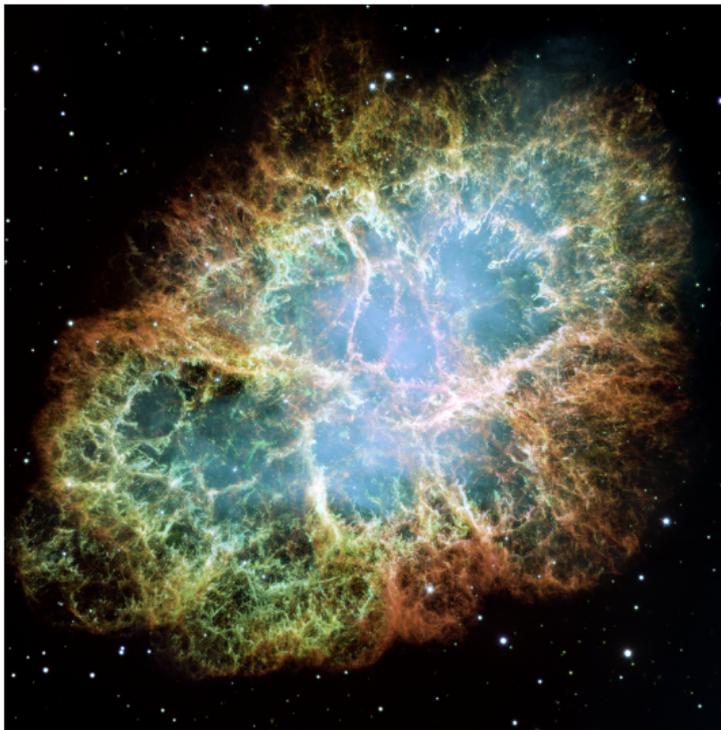
Молекулярные облака



Молекулярное облако,
отделившееся от туманности
Килья.

- В молекулярных облаках наблюдаются достаточно сложные молекулы, вплоть до простых органических соединений.
- Защищенный от воздействия нагревающего излучения газ внутри молекулярных облаков остывает до очень низких температур, и в нем создаются условия, приводящие к гравитационной неустойчивости и сжатию газа в звезды.

Остатки сверхновых

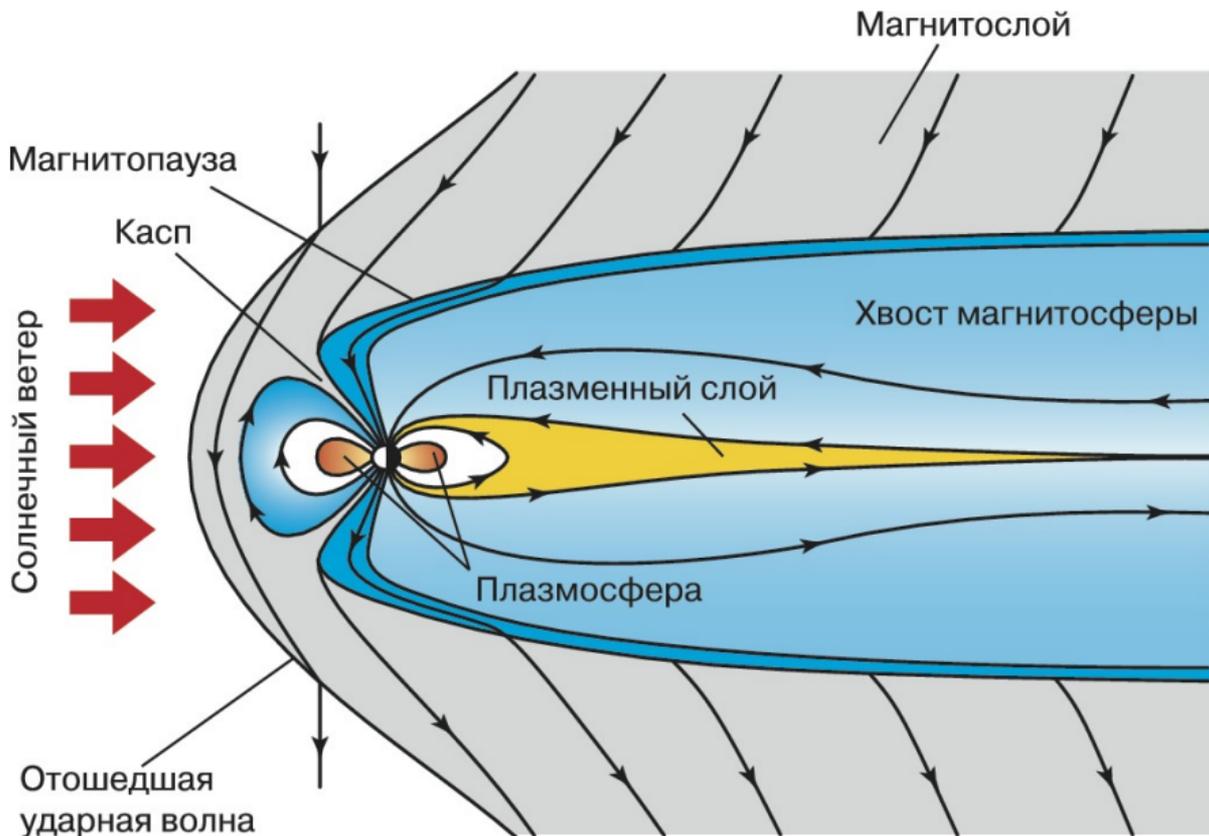


Крабовидная туманность

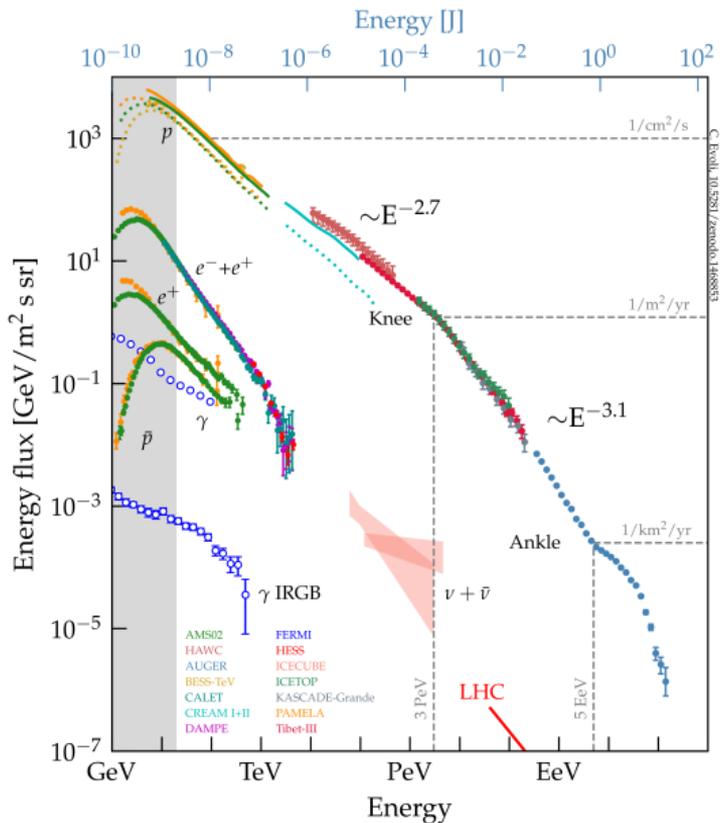
Межпланетная среда

- В солнечной системе — это прежде всего расширяющийся ионизованный газ внешней атмосферы (короны) Солнца.
- Его температура порядка миллиона градусов, а концентрация протонов — несколько атомов на см^3 (на расстоянии Земли).
- Эта среда прозрачна для света. Как и газ, образующий атмосферу Солнца и звезд, межпланетная среда хорошо проводит ток и замагничена, что рождает сложные плазменные эффекты при ее взаимодействии с ионизованным газом комет или магнитосферами планет.

Магнитосфера Земли



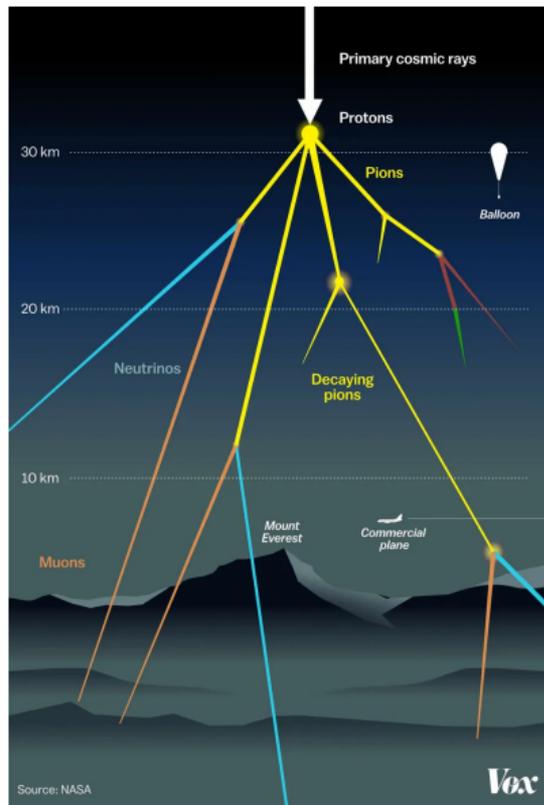
Космические лучи



Космические лучи



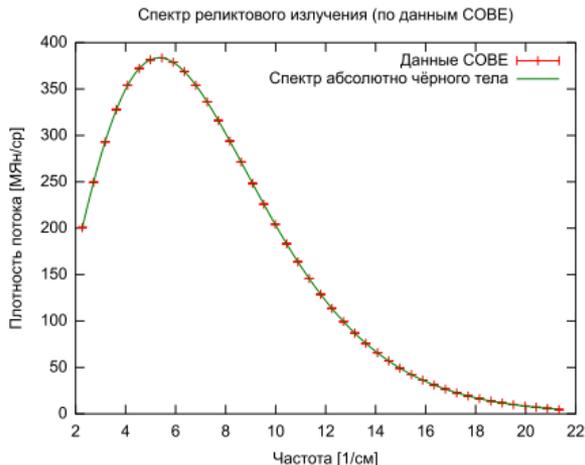
Один из детекторов установки Tunka-133. Изучается энергетический спектр и массовый состав космических лучей в диапазоне от 10 до 10^3 ПэВ.



Реликтовое излучение

Современная Вселенная заполнена газом невзаимодействующих фотонов – **реликтовым излучением**.

Плотность числа реликтовых фотонов составляет примерно **400** штук на кубический сантиметр.

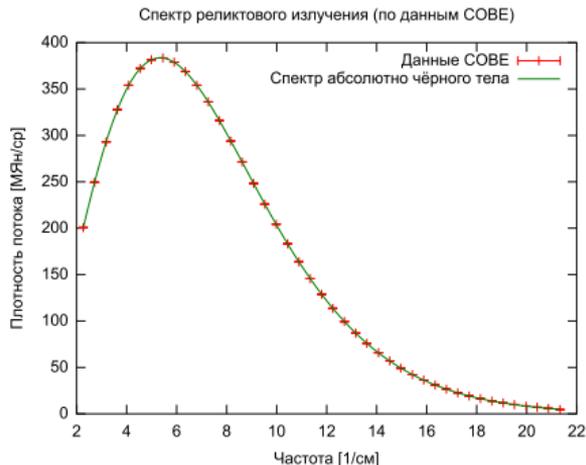


Реликтовое излучение

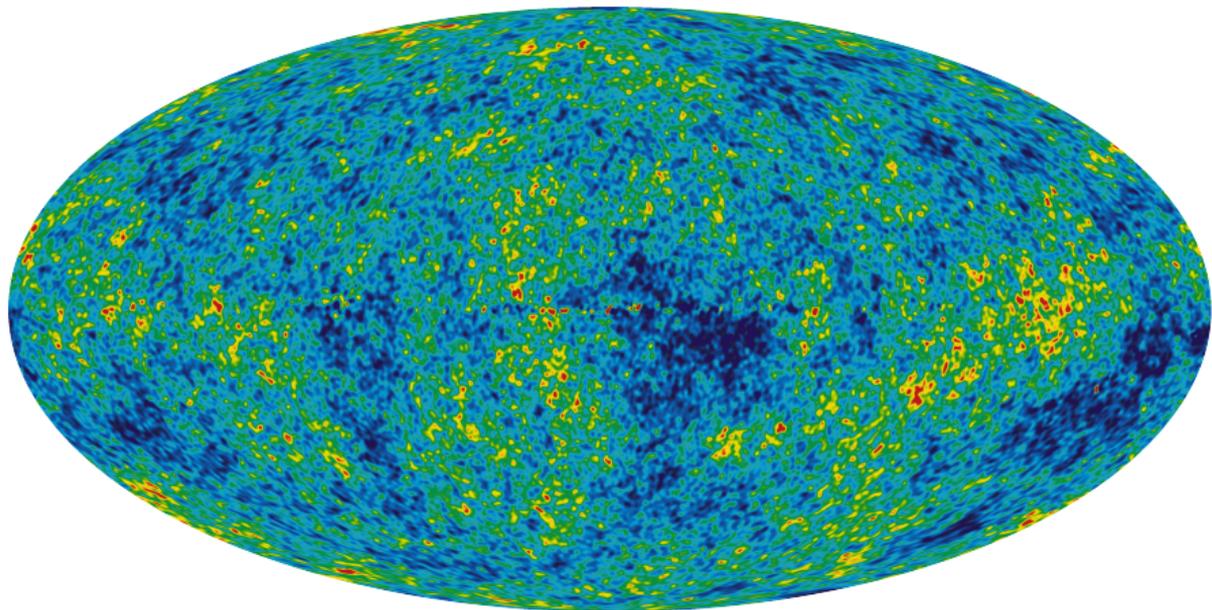
Распределение фотонов по энергиям имеет тепловой планковский спектр, характеризуемый температурой

$$T_0 = 2.7255 \pm 0.0006^\circ\text{K}.$$

Температура фотонов, приходящих с разных направлений на небесной сфере, одинакова на уровне примерно 10^{-4} . Это ещё одно свидетельство однородности и изотропии Вселенной.



Анизотропия реликтового излучения



Панорама анизотропии реликтового излучения с исключённым изображением Галактики, изображением радиоисточников и изображением дипольной анизотропии. Красные цвета означают более горячие области, а синие цвета — более холодные области. По данным спутника WMAP

Открытие реликтового излучения

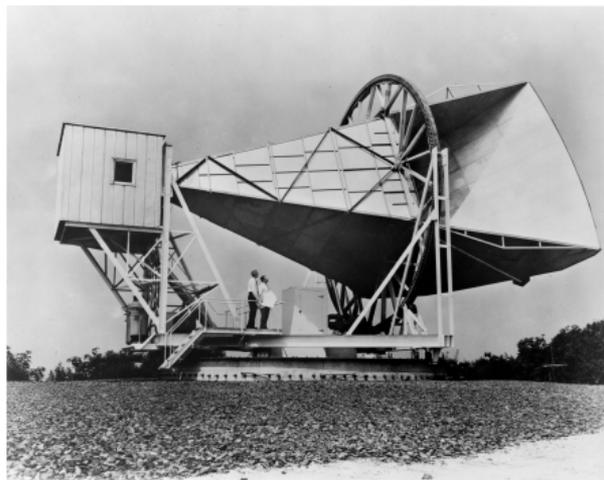
- В 1948 году существование реликтового излучения было предсказано Георгием Гамовым, Ральфом Альфером и Робертом Германом на основе созданной ими первой теории горячего Большого взрыва
- В 1955 аспирант-радиоастроном Тигран Арамович Шмаонов в Пулковской обсерватории провёл измерения радиоизлучения из космоса на длине волны 32 см и экспериментально обнаружил шумовое СВЧ излучение, распределение яркости которого не зависело от зенитного угла. После защиты диссертации он опубликовал об этом статью в неастрономическом журнале "Приборы и техника эксперимента" и никто не обратил внимание на это сообщение.

Открытие реликтового излучения

- В 1964 г. А.Г. Дорошкевич и И.Д. Новиков вычислили диапазон волн, в котором яркость реликтового излучения должна значительно превосходить яркость других небесных источников, а следовательно, искать его следы нужно именно в этом диапазоне. Однако радиоастрономы не обратили внимание на статью теоретиков.
- Результаты Гамова широко не обсуждались. Однако они были вновь получены Робертом Дикке и Яковом Зельдовичем в начале 1960-х годов. В 1964 году это подтолкнуло Дэвида Тодда Вилкинсона и Питера Ролла, коллег Дикке по Принстонскому университету, к созданию радиометра Дикке для измерения реликтового излучения.

Открытие реликтового излучения

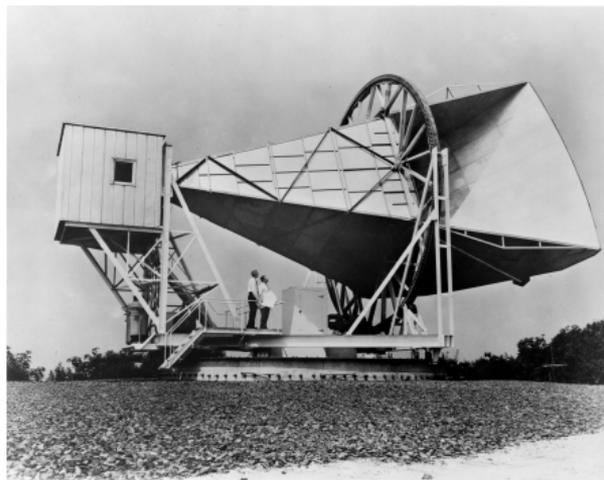
- Окончательно реликтовое излучение было открыто в 1965 г. Арно Пензиасом и Робертом Вудроу Вильсоном из Bell Telephone Laboratories в Холмдейле (штат Нью-Джерси, США).
- Они создали новый радиометр для экспериментов в области радиоастрономии и спутниковых коммуникаций. При испытаниях этого прибора они обнаружили некий избыточный шум.



Рупорно-параболическая антенна в Холмдейле, 1962 год.

Открытие реликтового излучения

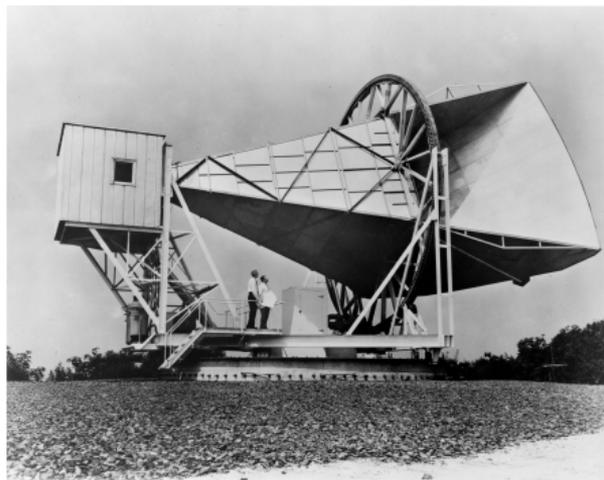
- При испытаниях этого прибора они обнаружили некий избыточный шум.
- Пензиас и Вильсон написали статью об открытии нового источника излучения и направили её в [Astrophysical Journal](#).
- Статья попала на рецензию к Дикке, который мгновенно оценил её, дал положительную рецензию и сам написал короткую заметку, содержащую интерпретацию полученных результатов.



Рупорно-параболическая антенна в Холмдейле, 1962 год.

Открытие реликтового излучения

- За эту работу Пензиас и Вильсон были удостоены Нобелевской премии за 1978 год.



Рупорно-параболическая антенна в Холмдейле, 1962 год.

Мораль

Мораль

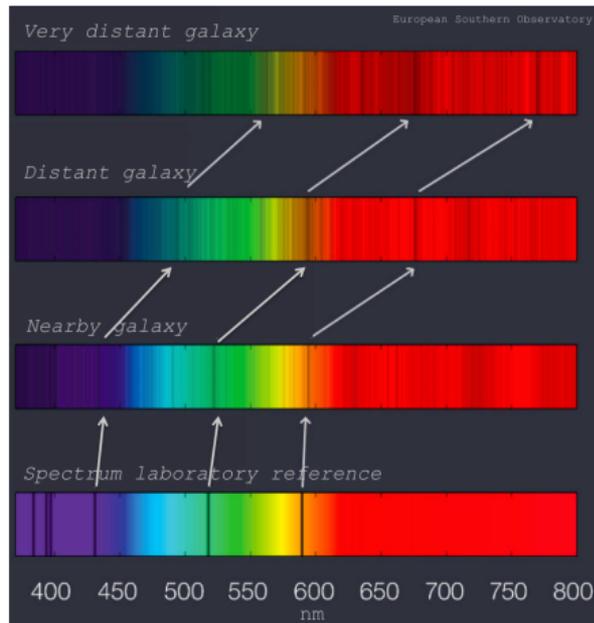
Хотите получить Нобелевскую премию –
публикуйтесь в журналах, которые читают.

Расширение Вселенной

1910–1922, В. Слайфер (США)
— первые измерения красного
смещения в спектрах небольшого
числа галактик

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$$

где λ_{em} , λ_{obs} — излучаемая и
наблюдаемая длина волны
спектральной линии.



Расширение Вселенной

1929, Э. Хаббл (США) —
открытие закона
пропорциональности между
скоростью удаления галактик и
расстоянием до них $v = H_0 l$;
скорость удаления галактики
определяется по красному
смещению и интерпретируется
эффектом Доплера; первое
измерение постоянной
(параметра) Хаббла
 $H_0 = 500$ км/с/Мпк.

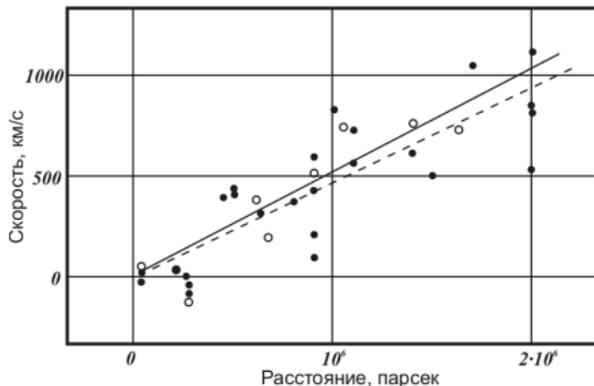


График полученный Хабблом по
наблюдению цефеид с помощью
100-дюймового (254 см) телескопа
обсерватории Маунт-Вилсон.

Расширение Вселенной

- **Вселенная расширяется:** галактики удаляются друг от друга!

Расширение Вселенной

- **Вселенная расширяется:** галактики удаляются друг от друга!
- $a(t)$ – **масштабный фактор**, увеличивающийся со временем.
- Расстояние между двумя удалёнными объектами во Вселенной пропорционально $a(t)$, а плотность частиц убывает как $a(t)^{-3}$.
- Темп расширения Вселенной, т. е. относительное увеличение расстояний в единицу времени, характеризуется параметром Хаббла

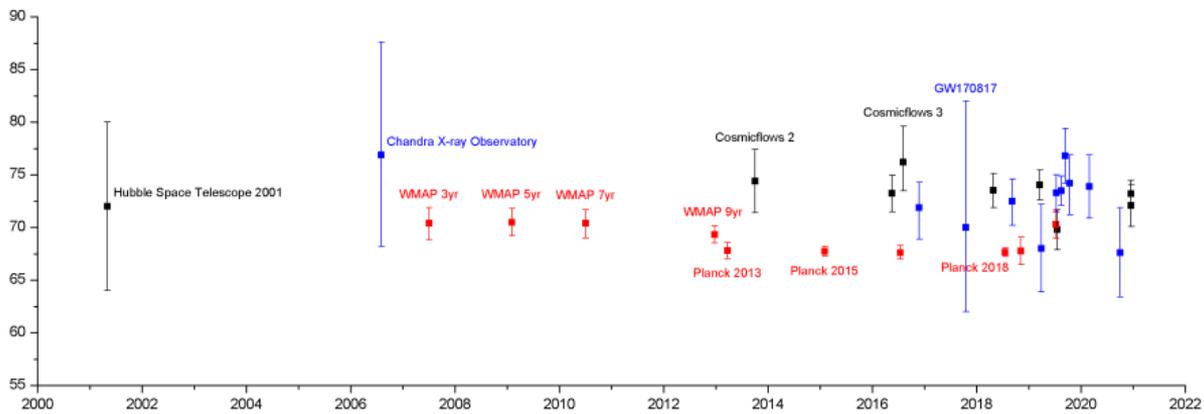
$$H(t) \equiv \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}.$$

- H_0 – современное значение параметра Хаббла.

Расширение Вселенной

- Для измерения параметра Хаббла в качестве стандартных свеч традиционно используют **цефеиды** — переменные звёзды, чья переменность связана известным образом со светимостью.
- Связь эту можно выявить, изучая цефеиды в каких-нибудь компактных звёздных образованиях, например, в Магеллановых Облаках.
- Поскольку расстояния до всех цефеид внутри одного компактного образования с хорошей степенью точности можно считать одинаковыми, отношение наблюдаемых яркостей таких объектов в точности равно отношению их светимостей.
- Период пульсаций цефеид может составлять от суток до нескольких десятков суток, за это время светимость изменяется в несколько раз.
- В результате наблюдений была построена зависимость светимости от периода пульсаций: чем ярче звезда, тем больше период пульсаций.

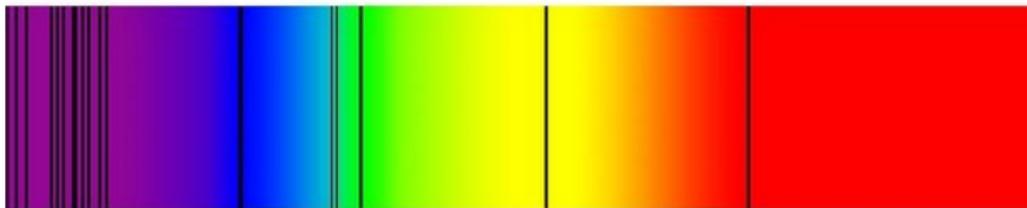
Расширение Вселенной



Современная оценка $H_0 \approx 67.4 \pm 0.5$ км/с/Мпк.

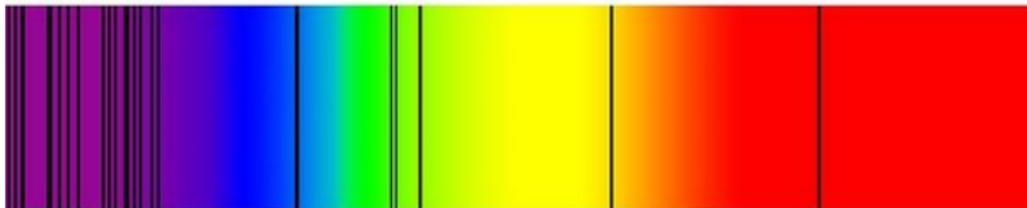
Расширение Вселенной

Линии поглощения от Солнца



Линии поглощения от суперкластера галактик BAS11

$v = 0.07c$, $d = 1$ млрд. световых лет



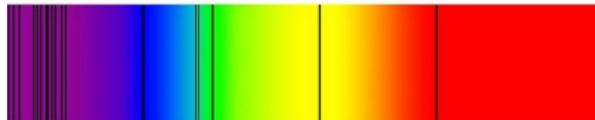
Из-за расширения пространства Вселенной увеличивается и длина волны фотона, испущенного в далёком прошлом. Как и все расстояния, длина волны растёт пропорционально $a(t)$. В результате фотон испытывает красное смещение.

Расширение Вселенной

- Количественно красное смещение z связано с отношением длин волн фотона в момент испускания и в момент поглощения

$$\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_{em}} \equiv 1 + z$$

Линии поглощения от Солнца



Линии поглощения от суперкластера галактик BAS11
 $v = 0.07c$, $d = 1$ млрд. световых лет



- Красное смещение — непосредственно измеряемая величина: длина волны в момент излучения определяется физикой процесса, а λ_{obs} прямо измеряется.
- Таким образом, идентифицировав набор линий испускания (или поглощения) и определив, насколько они смещены в красную область спектра, можно измерить красное смещение источника.

- Параметр Хаббла в действительности имеет размерность $[t^{-1}]$, поэтому современная Вселенная характеризуется временным масштабом

$$H_0^{-1} = \frac{1}{h} \cdot \frac{1}{100} \frac{\text{с} \cdot \text{Мпк}}{\text{км}} = \frac{1}{h} \cdot 3 \cdot 10^{17} \text{ с} = \frac{1}{h} \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

что для $h = 0.7$ составляет

$$H_0^{-1} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ лет}$$

и космологическим масштабом расстояний, который определяется как произведение возраста на скорость света,

$$H_0^{-1} = \frac{1}{h} \cdot 3000 \text{ Мпк},$$

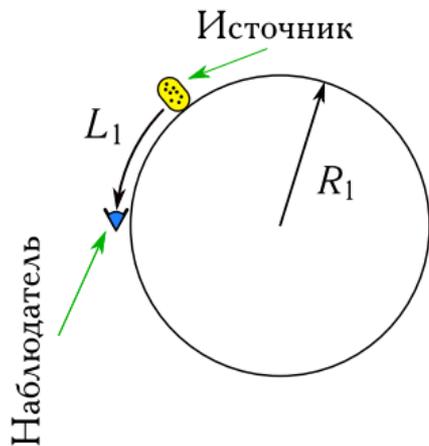
- В расширяющейся Вселенной расстояние до наиболее удаленных объектов, доступных наблюдениям, часто характеризуют величиной, называемой хаббловским радиусом.
- Он определяется как произведение современного возраста Вселенной на скорость света и равен ≈ 4300 Мпк.
- Иногда эту величину условно называют радиусом Вселенной, но по смыслу это лишь размер ее наблюдаемой части.

Расширение Вселенной

Вселенная расширяется, но при этом остаётся глобально однородной и изотропной. Т.е. нет выделенного направления и нет "**точки начала расширения**". Это обусловлено тем, что растягивается само пространство, в результате чего все расстояния увеличиваются.

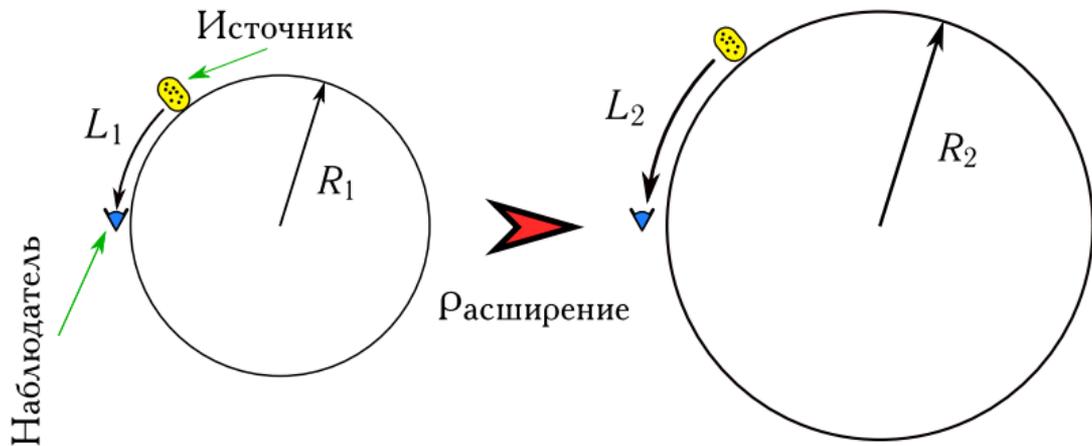
Расширение Вселенной

Вселенная расширяется, но при этом остаётся глобально однородной и изотропной. Т.е. нет выделенного направления и нет "точки начала расширения". Это обусловлено тем, что растягивается само пространство, в результате чего все расстояния увеличиваются.



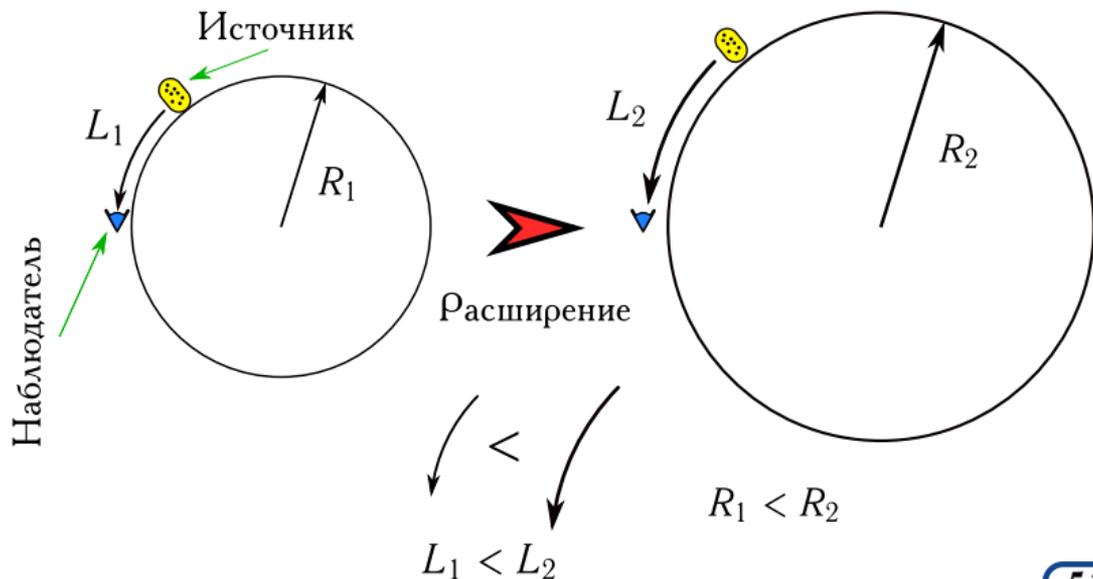
Расширение Вселенной

Вселенная расширяется, но при этом остаётся глобально однородной и изотропной. Т.е. нет выделенного направления и нет "точки начала расширения". Это обусловлено тем, что растягивается само пространство, в результате чего все расстояния увеличиваются.

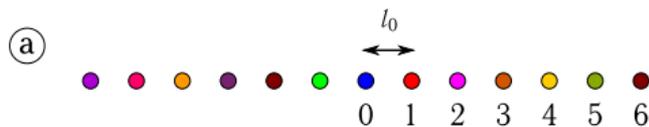


Расширение Вселенной

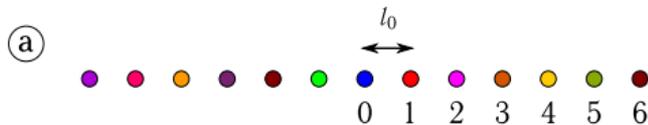
Вселенная расширяется, но при этом остаётся глобально однородной и изотропной. Т.е. нет выделенного направления и нет "точки начала расширения". Это обусловлено тем, что растягивается само пространство, в результате чего все расстояния увеличиваются.



Сверхсветовое расширение



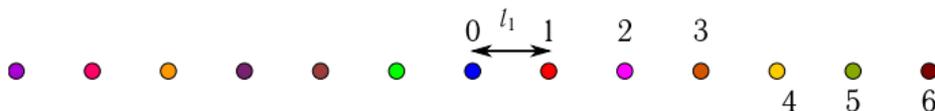
Сверхсветовое расширение



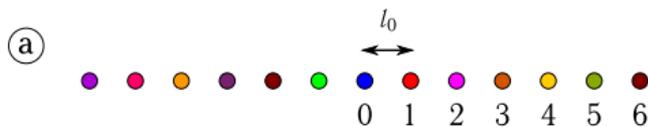
$$\Delta t = 1$$

$$\Delta l = 0.25$$

(б)



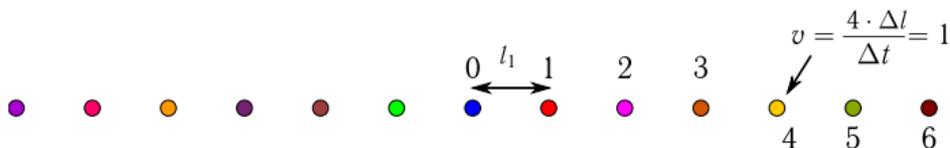
Сверхсветовое расширение



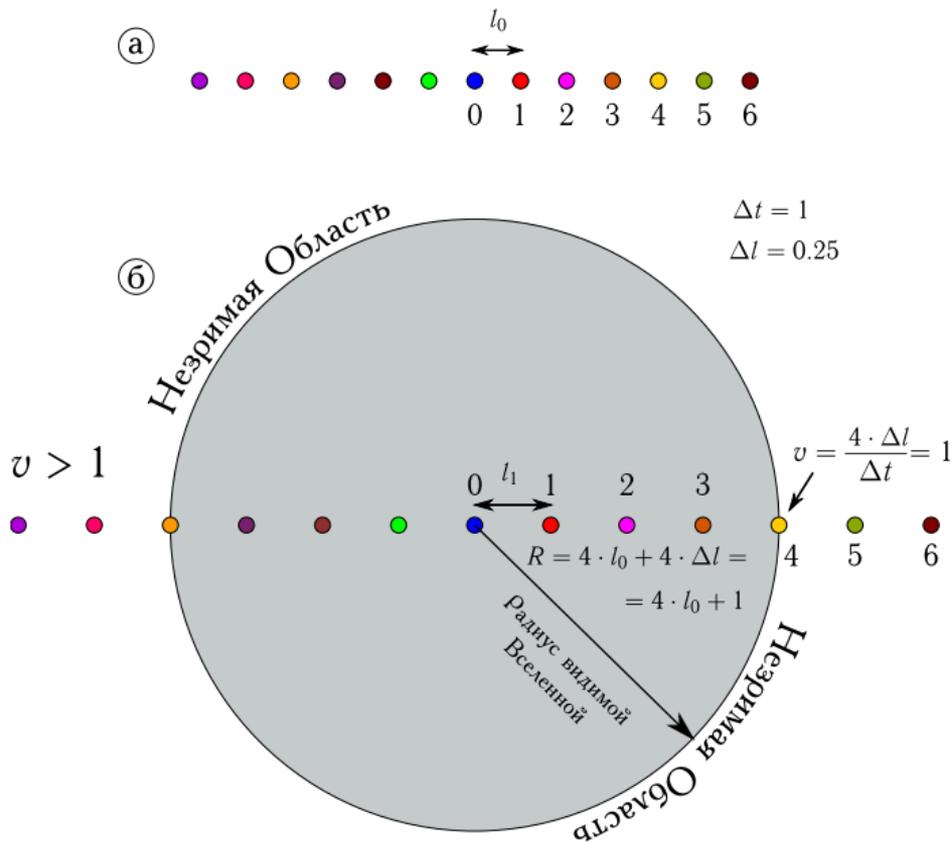
$$\Delta t = 1$$

$$\Delta l = 0.25$$

(б)



Сверхсветовое расширение



Ускоренное расширение

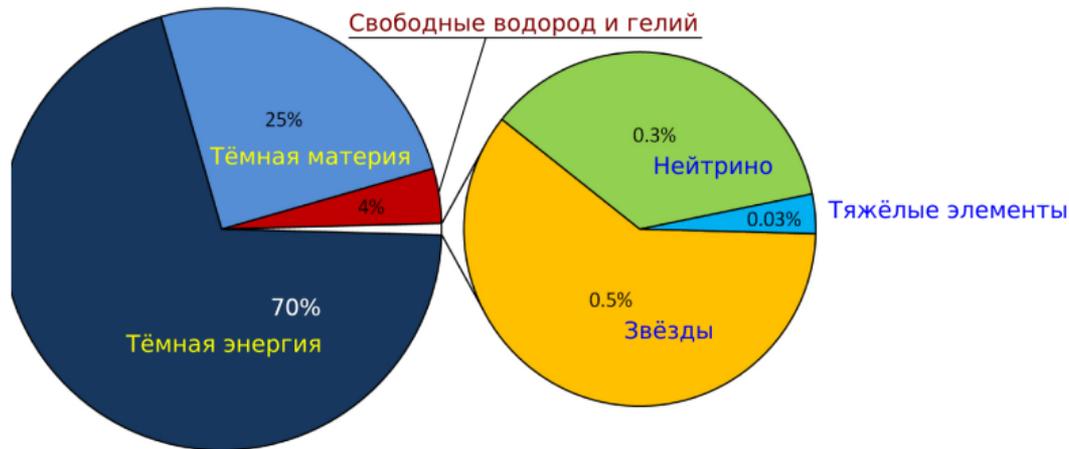
- В 1998 году два коллектива независимо наблюдали вспышки сверхновых Ia в далёких-далёких галактиках.
- Идея заключалась в том, что поскольку сверхновые типа Ia имеют почти одинаковую яркость (стандартная свеча), а объекты, находящиеся дальше, кажутся более тусклыми, мы можем использовать наблюдаемую яркость этих сверхновых для измерения расстояния до них.
- Затем это расстояние можно сравнить с космологическим красным смещением сверхновой, которое измеряет, насколько расширилась Вселенная с момента появления сверхновой.
- Неожиданным результатом стало то, что объекты во Вселенной удаляются друг от друга с ускорением.
- Возможным объяснением является наличие **тёмной энергии** (энергия вакуума).

Состояние вещества во Вселенной

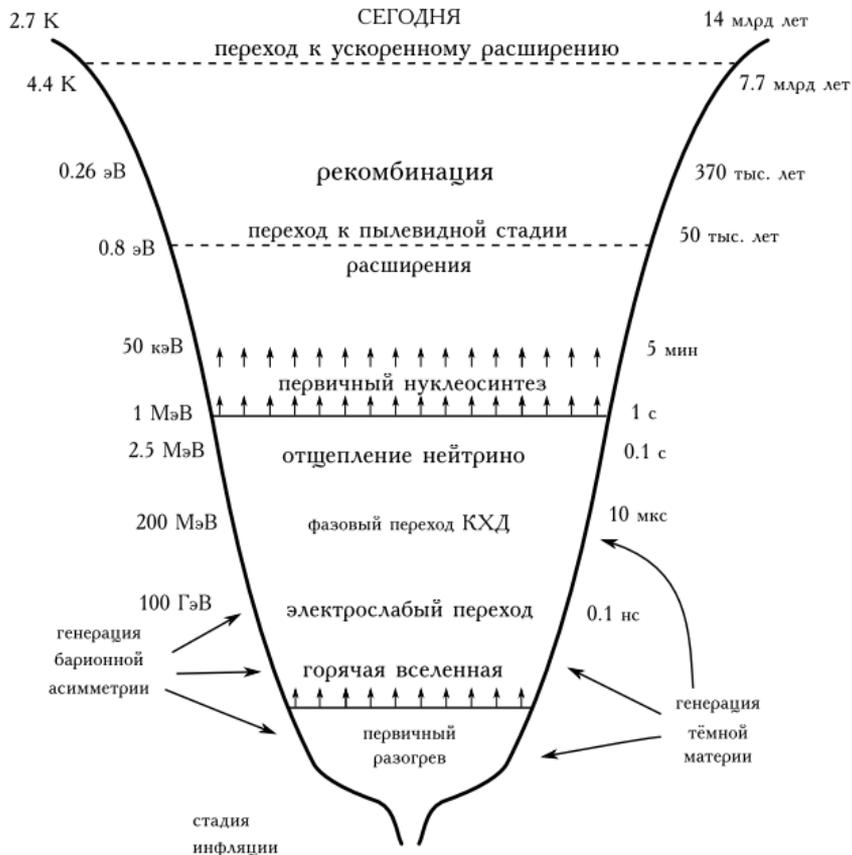
- Барионная асимметрия Вселенной (антивещества в природе не наблюдается).
- Основная форма существования вещества в природе — это газ с самыми различными значениями концентрации частиц и температуры.
- Газ при любой плотности и температуре, на любых расстояниях от нас (за исключением некоторых планет) состоит из водорода и гелия с небольшим включением более тяжелых элементов.
- Различают плотный горячий газ, непрозрачный для излучения, с температурой от нескольких тысяч до нескольких сотен миллионов градусов, и диффузную разреженную среду.
- Плотный газ содержится в звездах. Благодаря наличию термоядерной плазмы в центральной области звезд, энергия, образующаяся при синтезе атомных ядер, поддерживает температуру звезд и их устойчивость в течение миллионов (для наиболее массивных звезд) и миллиардов (для большинства звезд) лет.
- Доля вещества, приходящегося на планеты, рождающиеся вместе со звездами, ничтожно мала.

Тёмная материя

- 1 Наблюдается аномально быстрое вращение внешних областей галактик и эффекты гравитационного линзирования, не объясняемые наблюдаемой материей.
- 2 Ведутся поиски **тёмной материи** – вещества, оказывающего только гравитационное воздействие.



История Вселенная



Заключение

- ① Во Вселенной расстояния астрономически велики.
- ② На больших масштабах Вселенная однородна.
- ③ Существует асимметрия вещество/антивещество.
- ④ Имеет место проблема скрытой массы.
- ⑤ Пространство Вселенной расширяется, поэтому **любые** два не гравитационносвязанные объекта удаляются друг от друга.
- ⑥ Расширение по-видимому происходит с ускорением.
- ⑦ Вселенная заполнена практически однородным реликтовым излучением с температурой 2.73 градуса.

На следующей лекции

- ① История Вселенной с сотворения мира до наших дней и далее.