Лекция 2. Единство материального мира

Соболев А. Н.

Единство материального мира

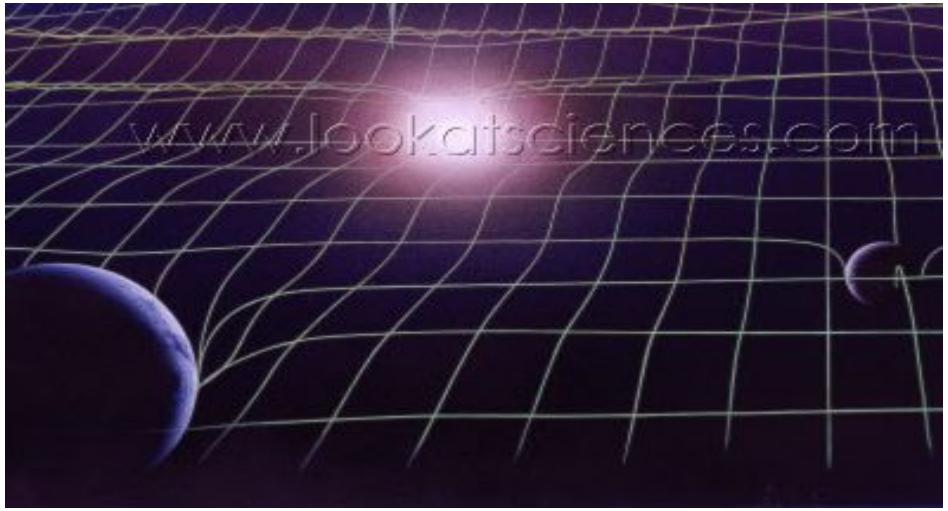
- **Формы:**
  - вещественная
  - энергетическая
  - структурная
- **Доказательства:**
  - одинаковость вещественного состава всех известных материальных объектов
  - малое число фундаментальных взаимодействий и законов, обнаруживающих единую природу
  - взаимопревращения различных видов материи
  - …

Фундаментальные взаимодействия

- **4 вида фундаментальных взаимодействий:**
  - Гравитационное
    - Между любыми массивными телами
  - Слабое
    - Между кварками
  - Электромагнитное
    - Между заряженными телами
  - Сильное ядерное
    - Между нуклонами в ядре и между кварками в нуклоне

Гравитационное взаимодействие

- **Гравитация –**взаимодействие, заключающееся во взаимном притяжении всех тел друг к другу
- Передается посредством **гравитационного поля**
- Квант поля **не обнаружен**



Отступление: вещество и поле

- **Две формы материи:**
  - вещество
    - находится в определенных точках пространства
  - поле
    - находится во всех точках пространства
- **Проявляются поля в виде взаимодействия** тел, **переносимого с конечной скоростью,** причем таковое осуществляется посредством возмущений поля
- Единица возмущения поля – **квант**
  - его удобно представить в виде частицы-переносчика взаимодействия

Гравитация в механике

- В рамках классической механики описывается **законом всемирного тяготения** Ньютона:

$$F = G\frac{m_1 \cdot m_2}{r^2},$$

  - где $G = 6{,}673 \cdot 10^{-11}$ Н·м^2·кг$^{-2}$ – гравитационная постоянная

- **Сильные** гравитационные **поля** описываются ОТО как **возмущения пространства-времени**

Электромагнитное взаимодействие

- **Электромагнитное взаимодействие –** взаимодействие электрических зарядов, как покоящихся, так и движущихся.
- Осуществляется посредством **электромагнитного поля**
- Частица-переносчик взаимодействия – **фотон**

Кое-что о кварках

- **Кварк – фундаментальная частица**
  - электрический заряд – e/3
  - не наблюдается в свободном состоянии
- **Предсказан М. Гелл-Манном**
  - Нобелевская премия по физике, 1969

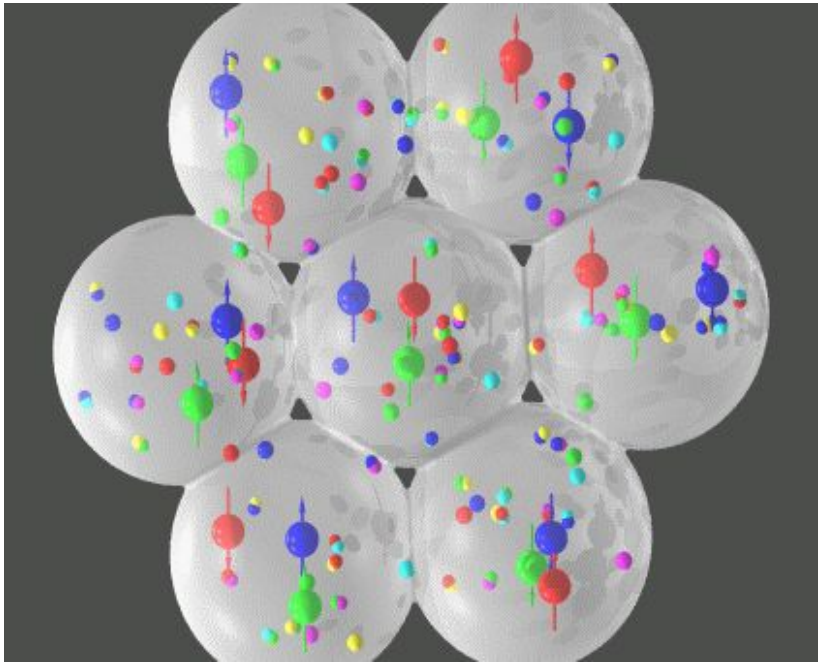
- **Свойства** кварков**:**
  - «аромат» (6 различных)

Верхний	Странный	Прелестный
Нижний	Очарованный	Истинный

  - «цвет» (3 различных): RGB

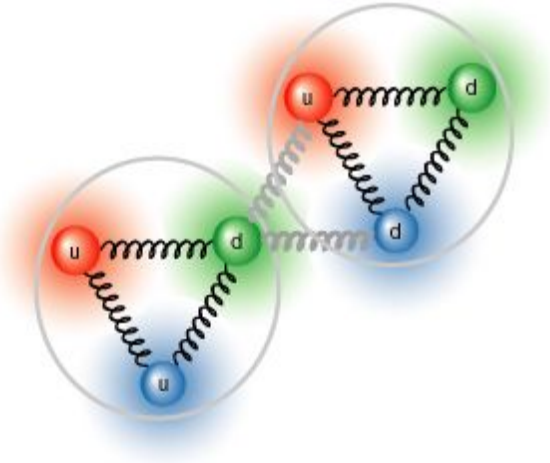
Взаимодействие кварков

- **Сильное взаимодействие** изменяет цвет кварка
- **Слабое взаимодействие** изменяет аромат кварка



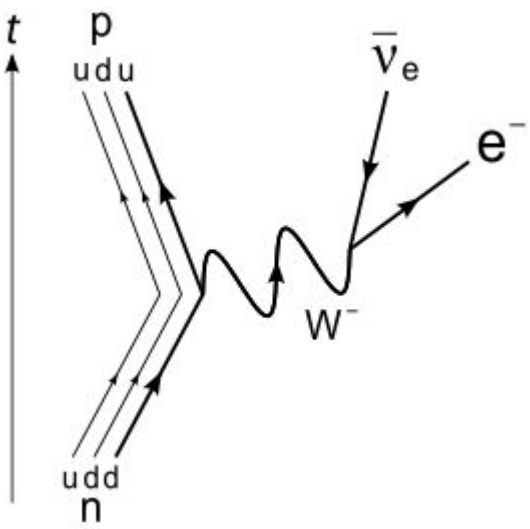
Сильное ядерное взаимодействие

- **Сильное взаимодействие –** взаимодействие кварков внутри элементарных частиц, которое может изменить их цвет
- Взаимодействие обеспечивает **связь между протонами и нейтронами** внутри ядра
- Частица-переносчик – **π-мезон, глюон**



Слабое взаимодействие

- **Слабое взаимодействие –** обмен ароматом между кварками
- Ответственно за **β-распад** нейтрона
- Частица-переносчик – **W^{+-0}-бозон**



- **Свойства:**
  - близкодействующее
  - переносится массивными частицами
  - нарушает CP-симметрию природы

Сравнение фундаментальных взаимодействий

Вид взаимодействия	Сравнительная величина	Радиус действия
Сильное	1	10^{-15} м
Электромагнитное	10^{-2}	∞
Слабое	10^{-14}	10^{-18} м
Гравитационное	$6 \cdot 10^{-42}$	∞

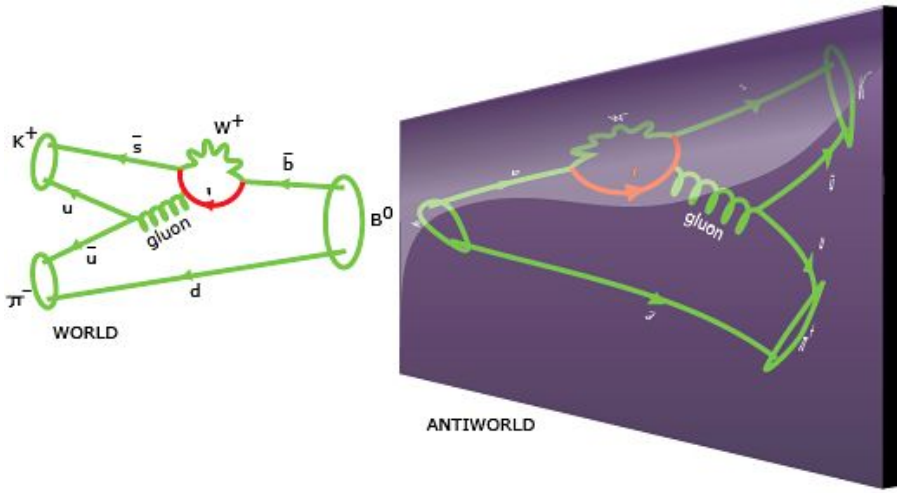
Симметрия

- **Симметрия –** неизменность структуры и свойств материальных объектов при каких-либо преобразованиях
  - Фундаментальное свойство природы!

- **3 вида симметрии в физике:**
  - C (charge) – относительно замены частиц античастицами
  - P (parity) – относительно замены правого на левое
  - T (time) – относительно движения времени

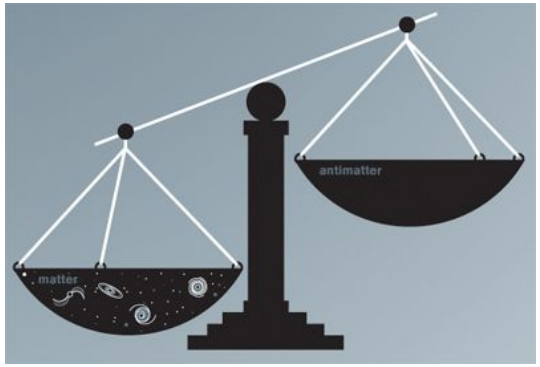
Теорема CPT

- **Теорема CPT утверждает:**
  - Все физические законы инвариантны относительно одновременного наложения C-, P- и T-симметрий
    - Другими словами, жизнь в зеркальном отображении нашей Вселенной текла бы точно так же, как и здесь



Нарушение симметрии

- **Если в природе все симметрично, почему существуем мы с вами?**
  - Ведь в процессе Большого взрыва должно было появиться одинаковое количество вещества и антивещества
- **Нарушение CP-симметрии –** неинвариантность законов физики относительно операции зеркального отражения с одновременной заменой всех частиц на античастицы



Таким образом,

- некоторые реакции в физике элементарных частиц идут не так, как их зеркальные отображения!
  - Нобелевская премия по физике, 2008

- **Почему в сильном взаимодействии CP-симметрия не нарушается?**
  - Никто не знает…
- **Как так случилось, что Вселенная полностью состоит из материи?**
  - Никто не знает…

Закон сохранения энергии

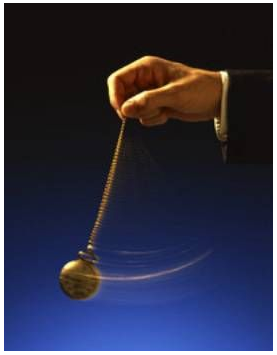
- **Энергия изолированной** (замкнутой) **физической системы сохраняется с течением времени**
  - для каждой конкретной замкнутой системы, вне зависимости от её природы можно определить некую величину, называемую энергией, которая будет сохраняться во времени
    - *«что сколько чего у одного тела отнимется, столько присовокупится к другому…» (М. Ломоносов)*

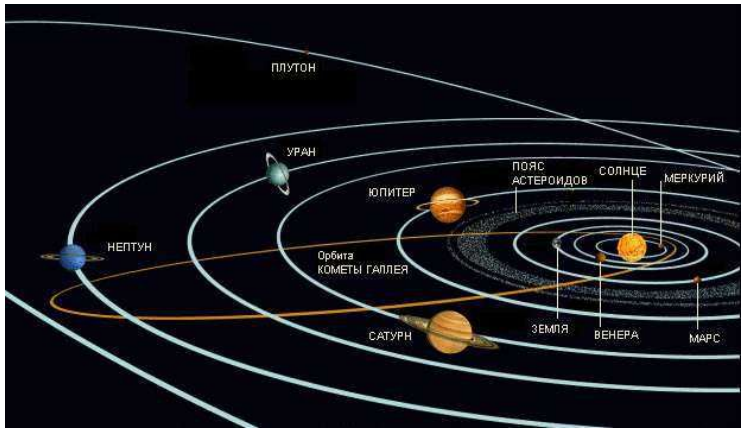
ЗСЭ в механике

- **Закон сохранения механической энергии**
  - Полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют только консервативные силы, остаётся постоянной:

$$E = T + U = const$$

  - Т.е., в отсутствие сил трения движение может продолжаться вечно!



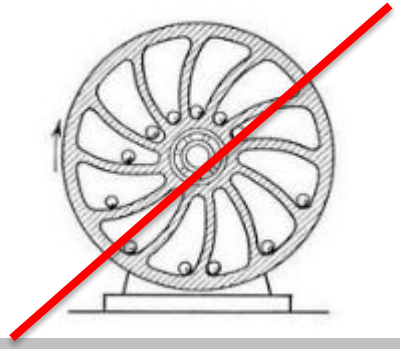


ЗСЭ в термодинамике

- **Первое начало термодинамики:**
  - Количество теплоты, полученное системой, идёт на изменение её внутренней энергии и совершение работы против внешних сил:

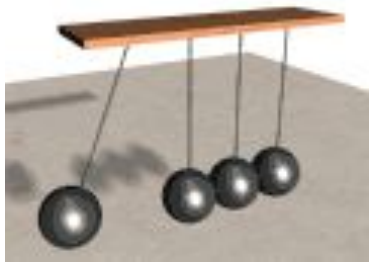
$$Q = \Delta U + A$$

    - невозможность существования вечного двигателя первого рода, который совершал бы работу, не черпая энергию из какого-либо источника



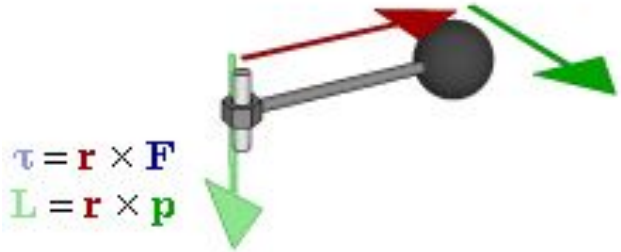
Закон сохранения импульса

- **Сумма импульсов всех тел (или частиц) замкнутой системы есть величина постоянная**
  - для каждой такой системы можно выбрать величину, характеризующую движение, которая при движении в пустом пространстве сохраняется во времени, а при наличии взаимодействий скорость изменения которой будет определяться суммой приложенных сил

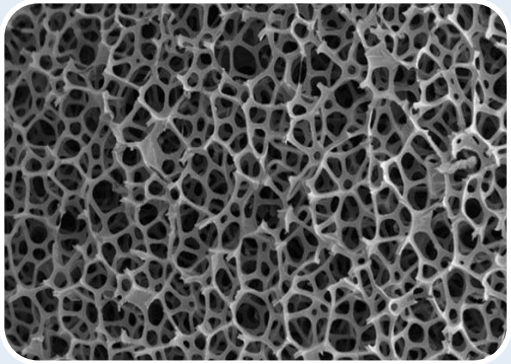


Закон сохранения момента импульса

- **Момент импульса замкнутой системы относительно любой неподвижной точки не изменяется со временем**
  - Момент импульса - величина, зависящая от того, какова масса вращающегося тела, как она распределена относительно оси вращения и с какой скоростью происходит вращение.



Структурные уровни материи



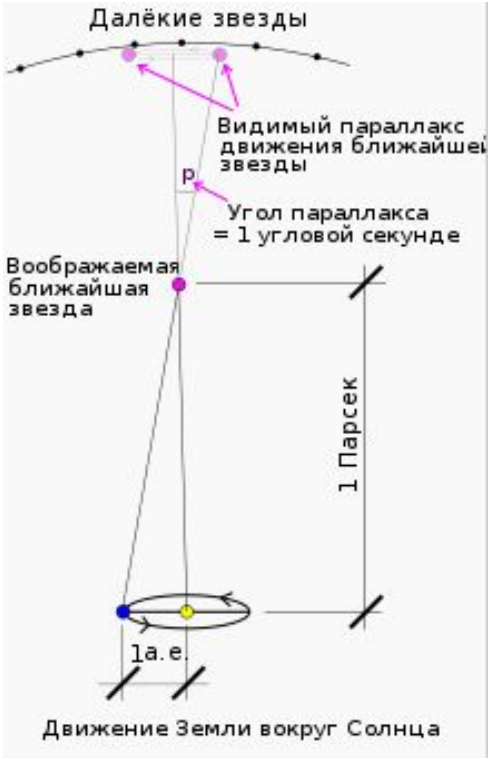
Мегамир

Макромир

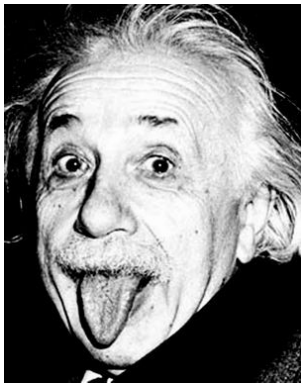
Микромир

Мегамир

- **Мегамир –** планеты, звезды, звездные скопления, галактики, метагалактика (наблюдаемая часть Вселенной) и Вселенная в целом
- **Масштаб**
  - 1 световой год = расстояние, проходимое светом за 1 год
    - 300 000 км/с · 31 556 926 с = 9.460528×10^{12} км
  - 1 парсек = 3,26 световых года



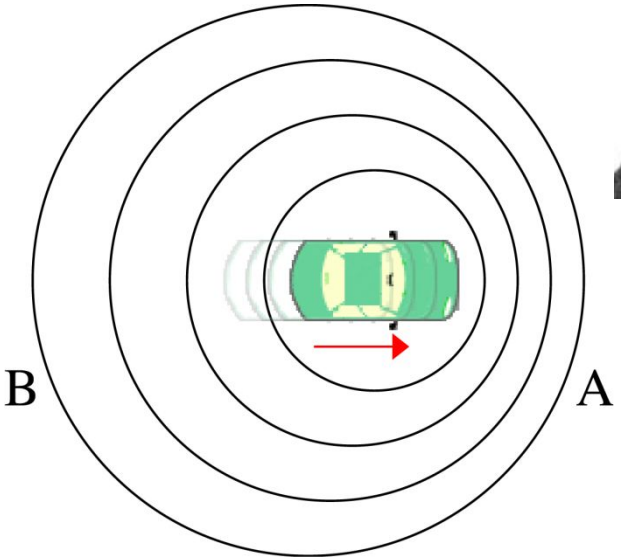
Вселенная



- **Вопросы:**
  - Откуда взялась Вселенная?
  - Что происходит со Вселенной сейчас?
- **Теория:**
  - Общая теория относительности Эйнштейна
    - Предполагает расширение Вселенной
- **Два доказательства расширения Вселенной:**
  - Космологическое красное смещение
  - Анизотропия реликтового излучения
    - Нобелевская премия по физике, 1978, 2006

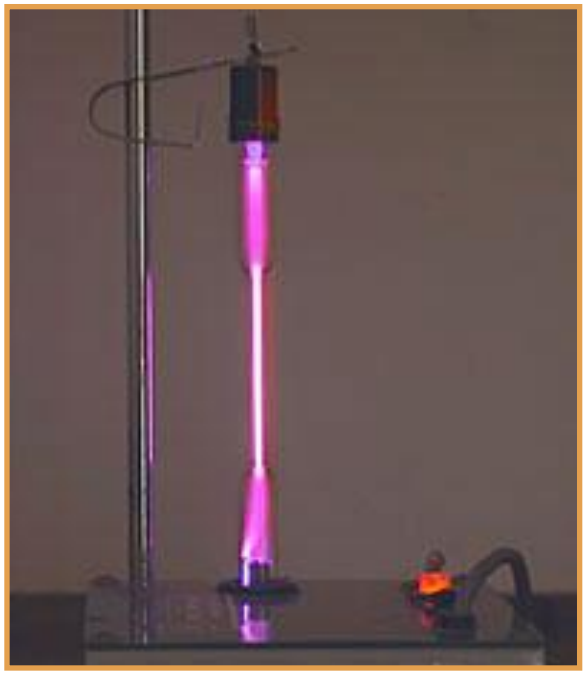
Отступление: эффект Допплера

- **Эффект Допплера -** изменение частоты и длины волн, регистрируемых приёмником, вызванное движением их источника и/или движением приёмника.
  - Кристиан Допплер, 1842



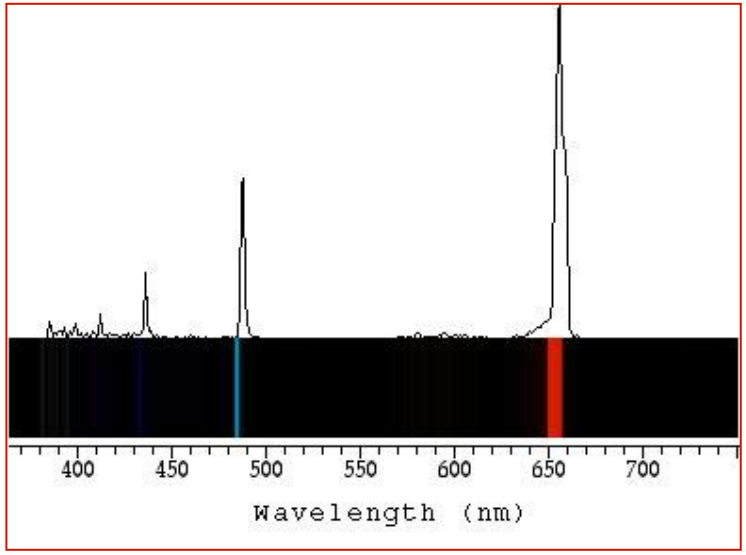
Космологическое красное смещение

- **Э. Хаббл, 1929**
  - Линии спектра водорода в Галактиках



Водородная лампа

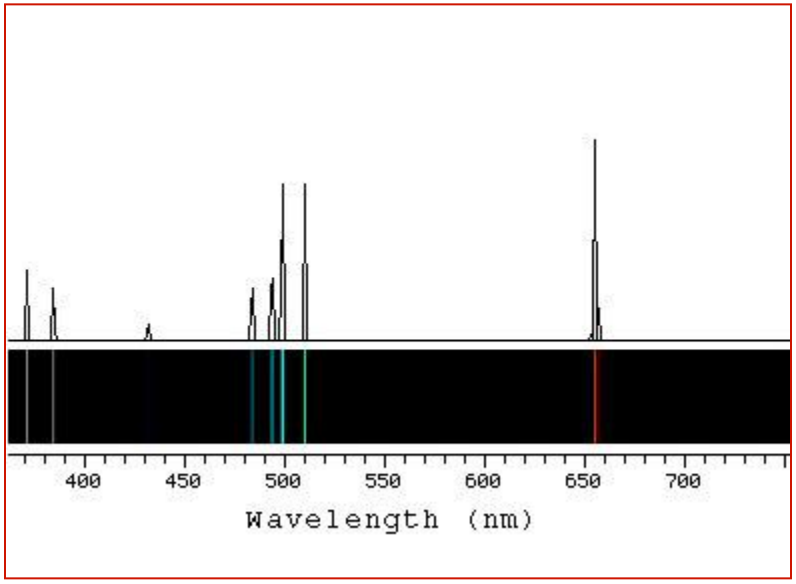
Спектр, излучаемый элементом, уникален для каждого элемента



Космологическое красное смещение

Туманность Ориона

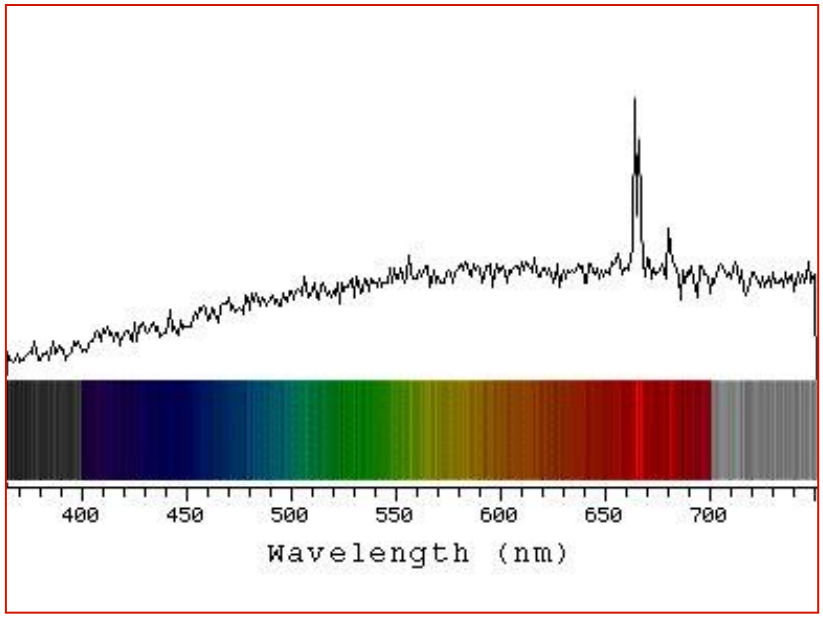
Когда мы видим определенный паттерн линий в спектре, мы понимаем, что там присутствует водород



Космологическое красное смещение

Галактика UGC 12915

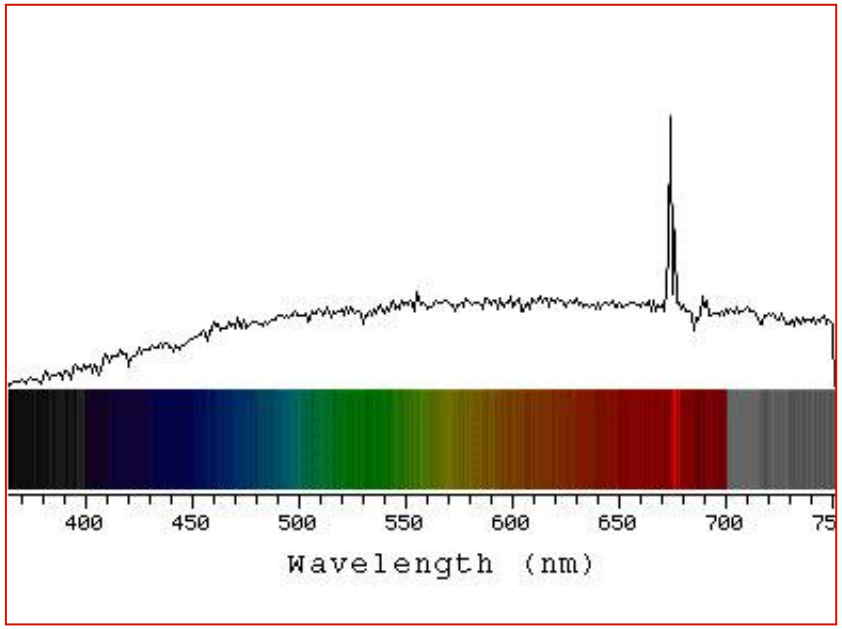
Здесь виден тот же самый паттерн,
но сдвинутый вправо



Космологическое красное смещение

Галактика UGC 12508

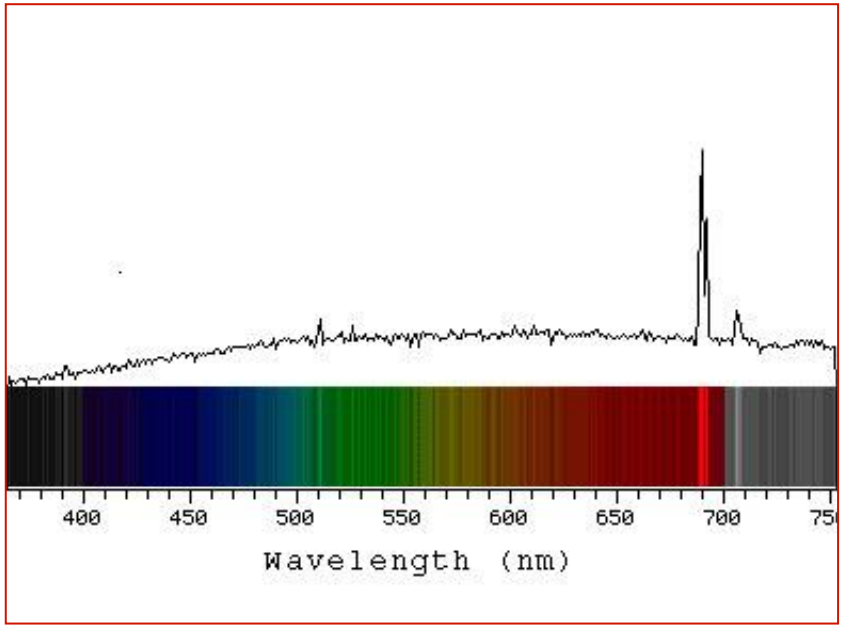
Чем дальше галактика,
тем больше сдвиг в красную область



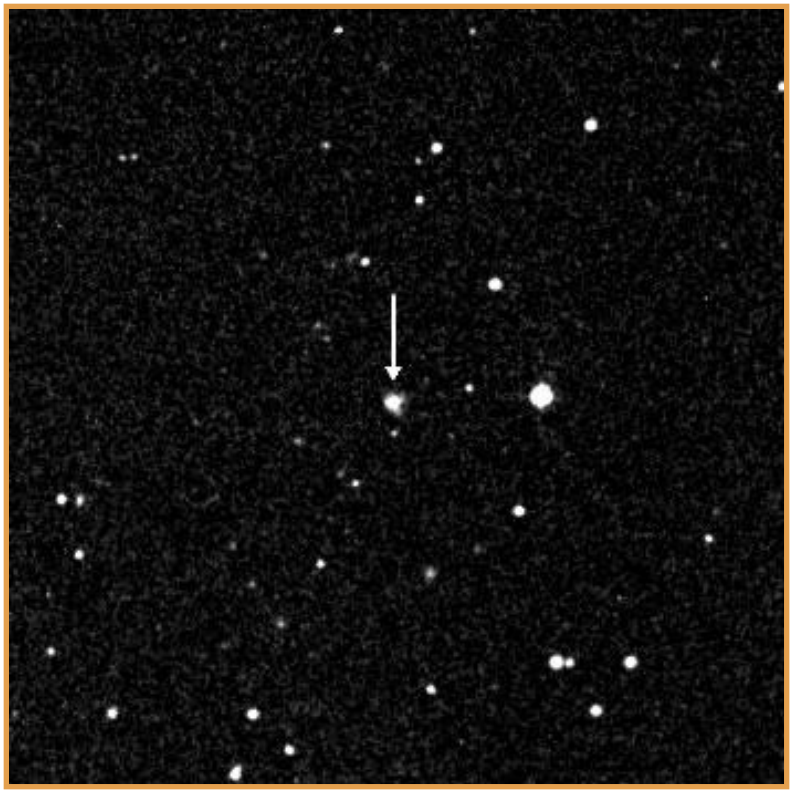
Космологическое красное смещение

Галактика KUG 1750

Чем больше красное смещение,
тем быстрее удаляется галактика

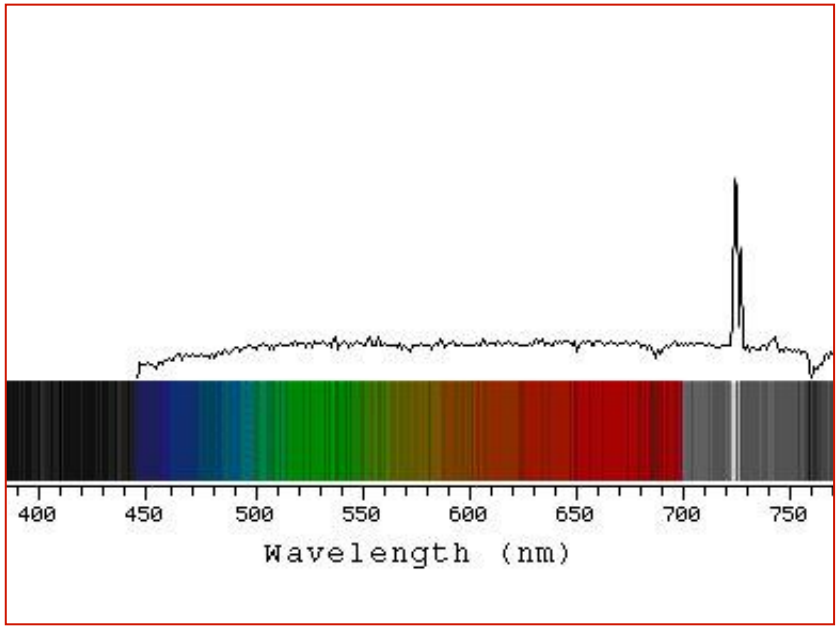


Космологическое красное смещение



Галактика KUG 1217

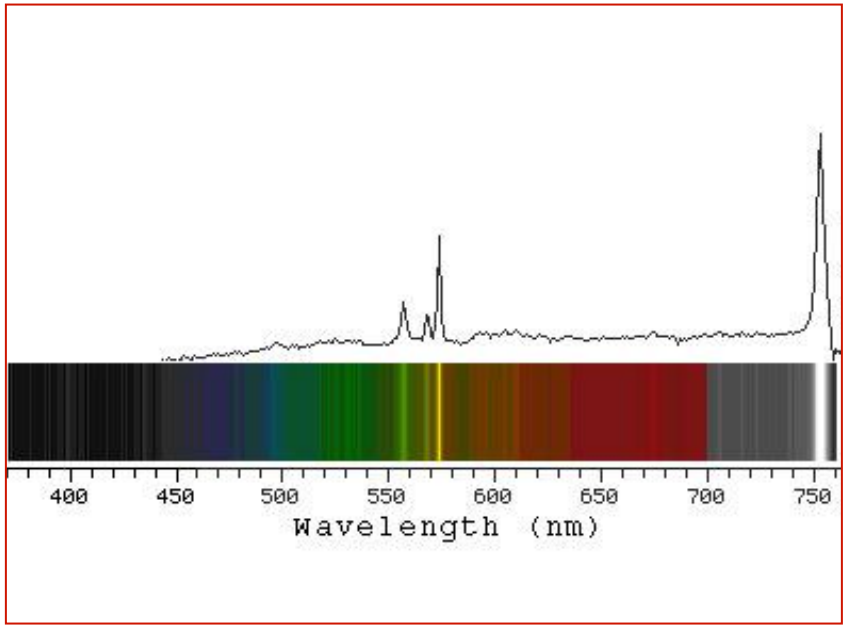
Удаление галактик вызвано расширением пространства



Космологическое красное смещение

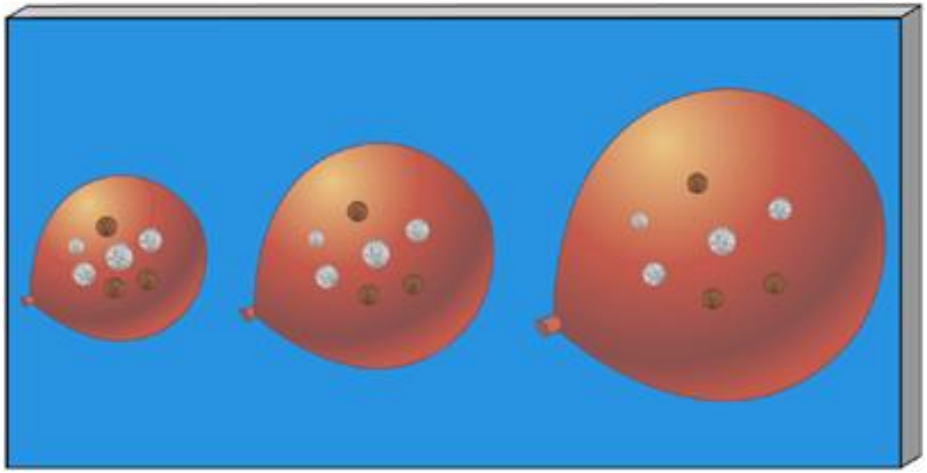
Галактика IRAS F09159

Красное смещение –
свидетельство расширения Вселенной



Теория Большого взрыва

- **Вселенная расширяется**
  - Если мы повернем время вспять, Вселенная начнет сжиматься
  - Настанет такой момент, когда она сожмется в точку
    - Проблема сингулярности как начального состояния Вселенной



Реликтовое излучение

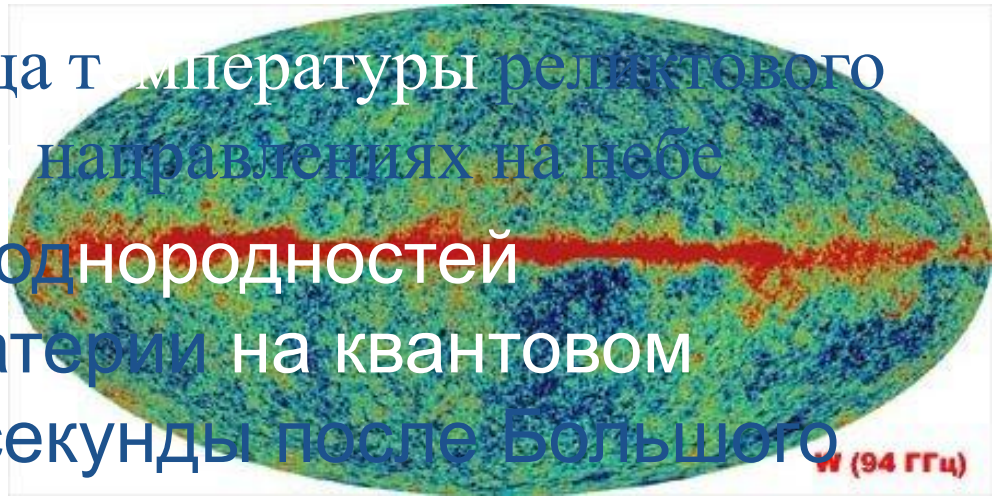
- **Реликтовое излучение –** космическое электромагнитное излучение с высокой степенью изотропности и со спектром, характерным для абсолютно чёрного тела с температурой 2,725 К.
  - А. Пензиас и Р. Вилсон
    - Нобелевская премия по физике, 1978

- **Возникновение реликтового излучения:**
  - Отделение излучения от материи через 400 000 лет после Большого взрыва

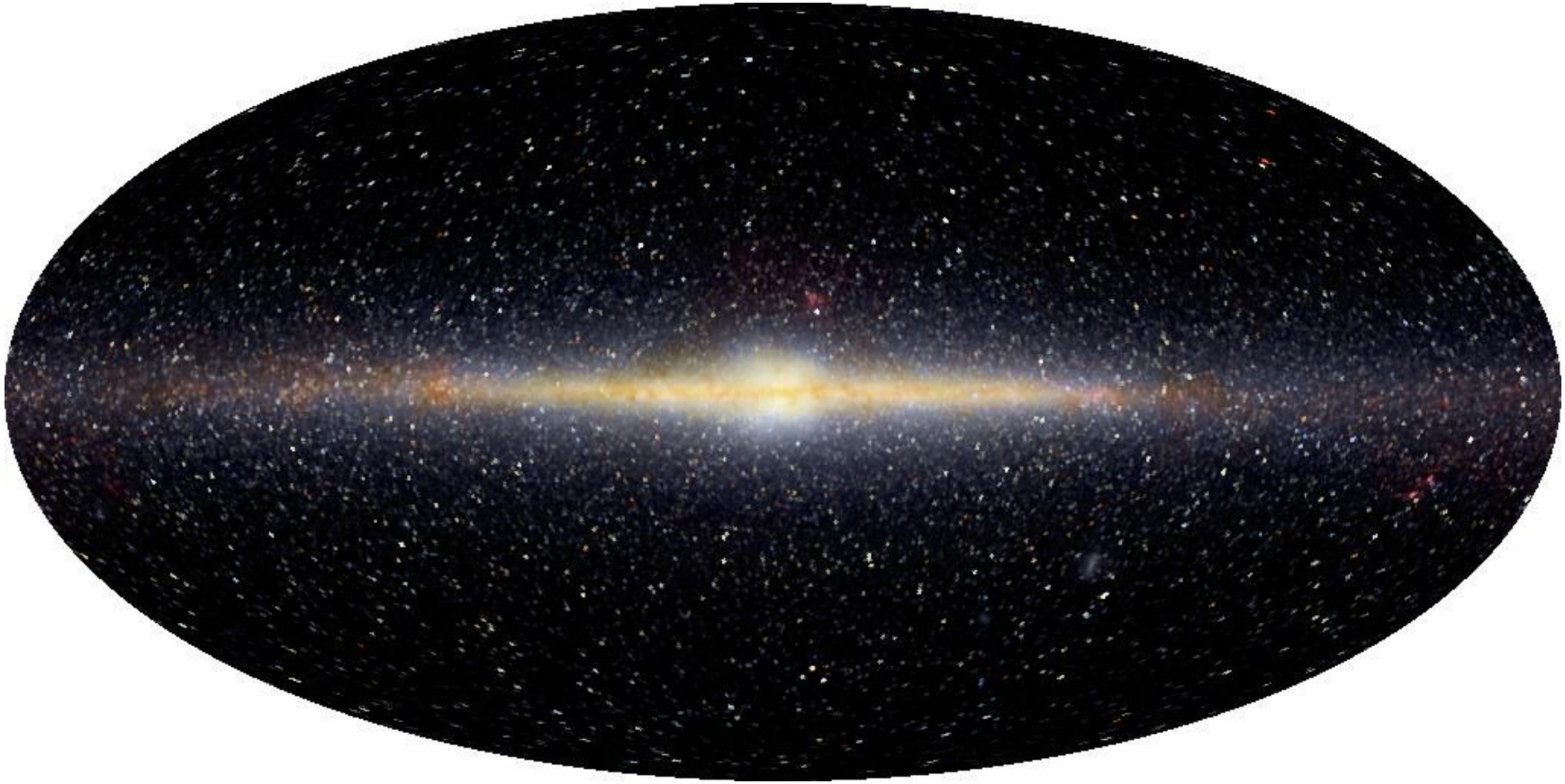
Анизотропия реликтового излучения

- **Анизотропия** – разница температуры реликтового излучения направлениях на небе
  - Свидетельство неоднородностей распределения материи на квантовом уровне в первые секунды после Большого взрыва, из которых затем возникла структура Вселенной
    - Игорь Струков, РЕЛИКТ-1
    - Дж. Смут, Дж. Мэтер

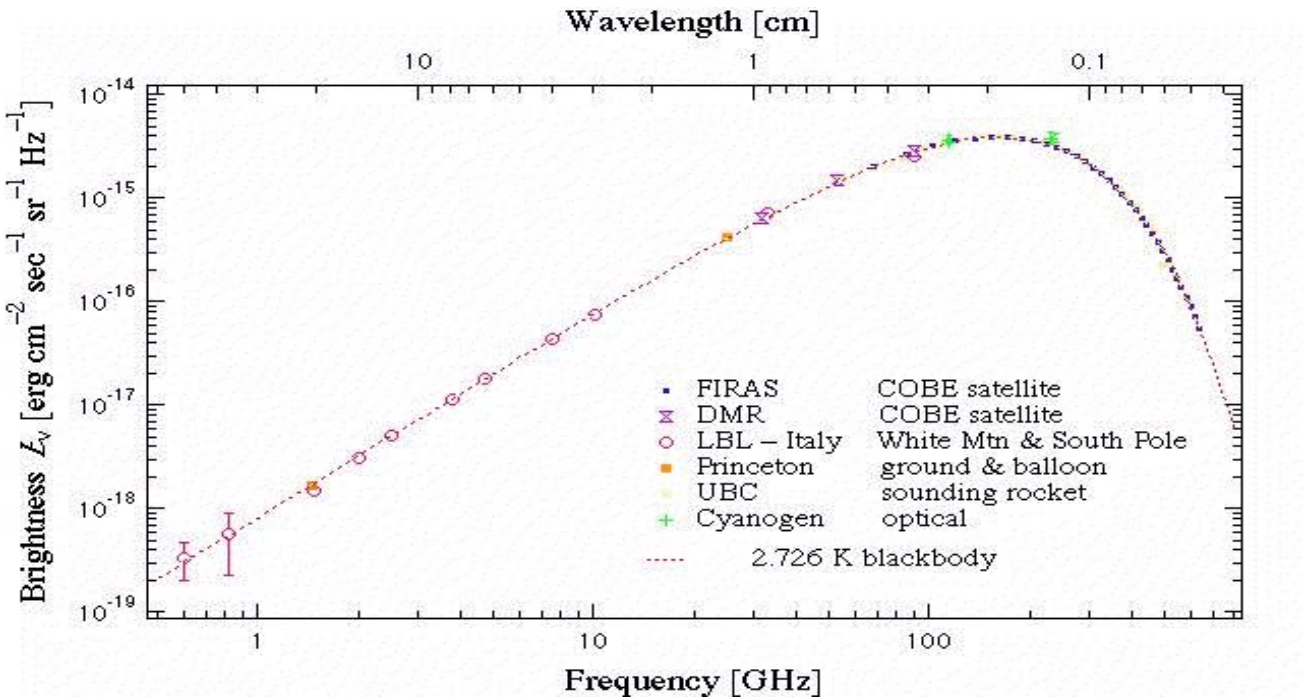
  Нобелевская премия по физике, 2006



Карта Вселенной (ИК спектр)

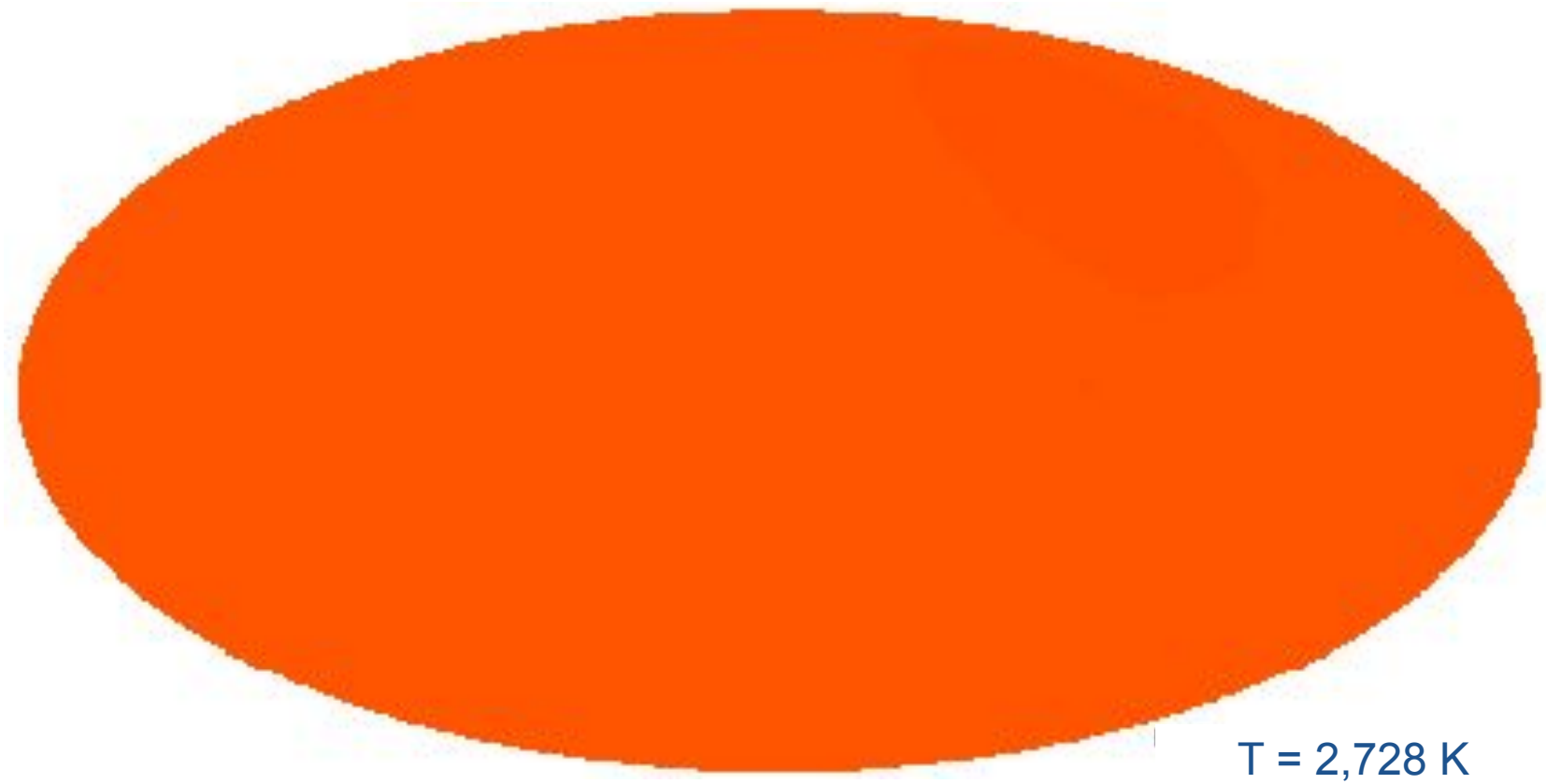


Спектр микроволнового излучения



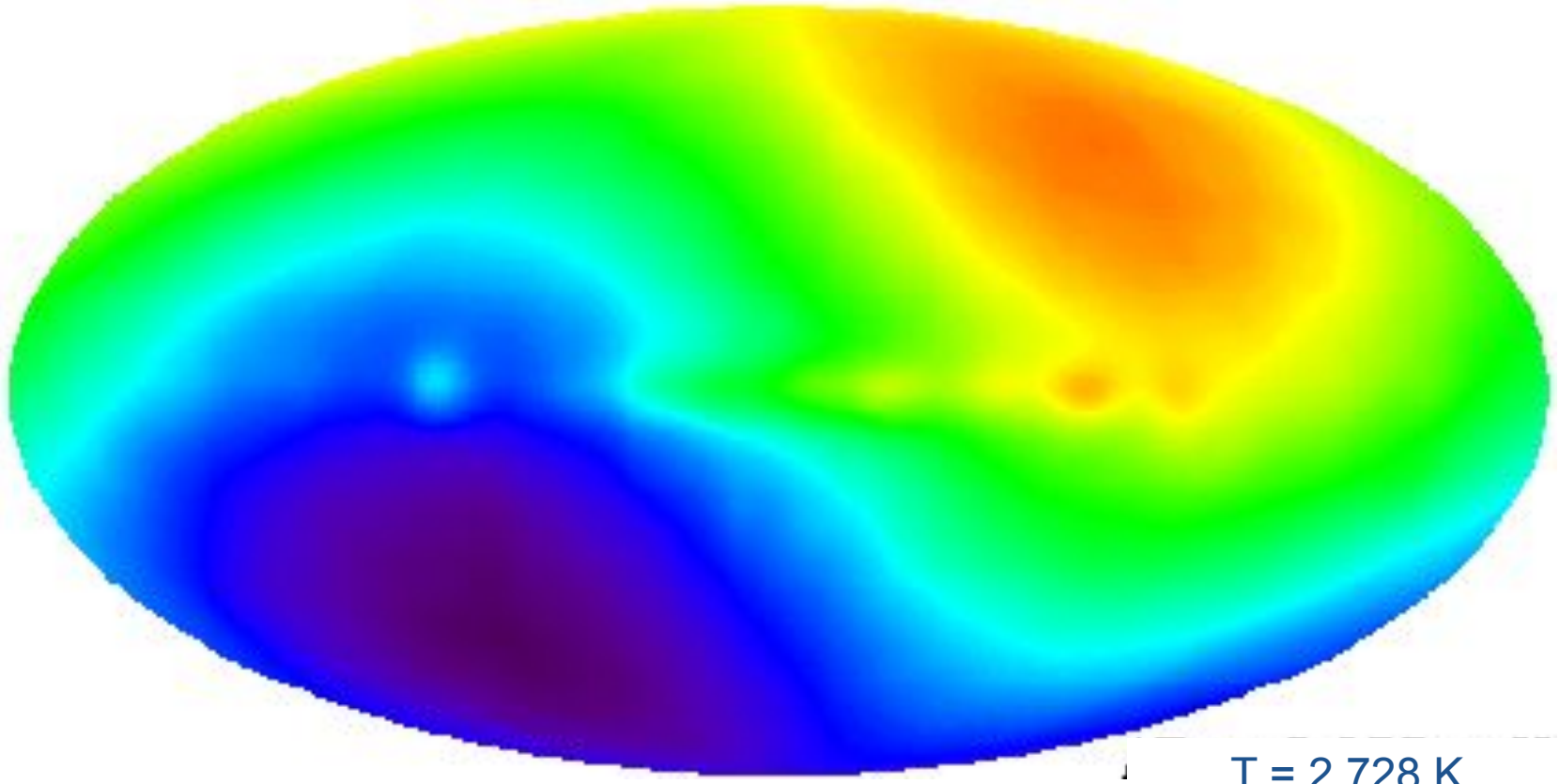
- **Спектр совпадает со спектром абсолютно черного тела**
  - Ранняя Вселенная была равновесно горячей
    - Не наблюдается притока энергии спустя ~1 месяц с момента появления Вселенной!

Карта Вселенной (микроволновой спектр)



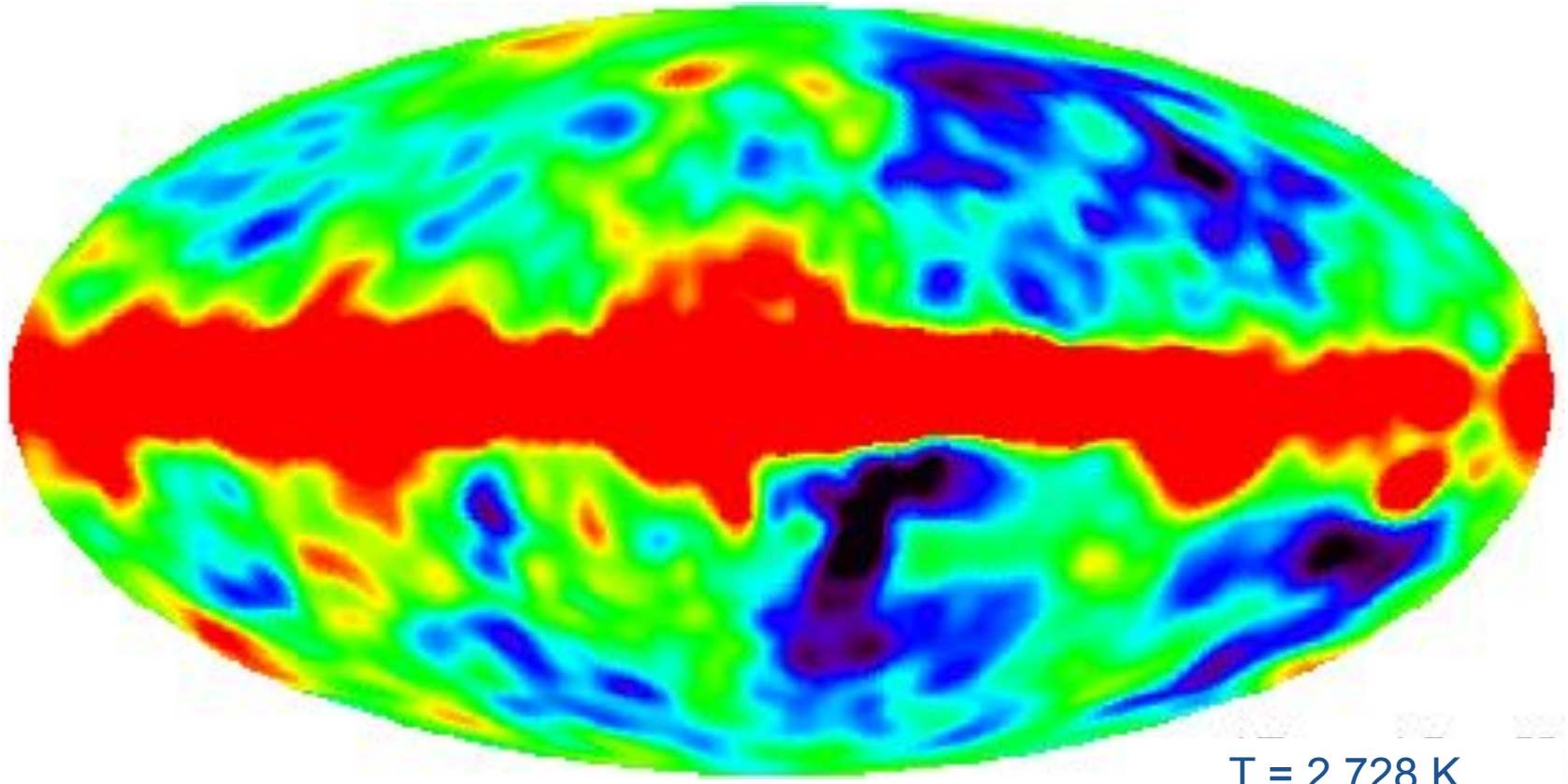
T = 2,728 K
ΔT=0.1 K

Карта Вселенной (микроволновой спектр)



T = 2,728 K
ΔT=0.00335 K

Карта Вселенной (микроволновой спектр)



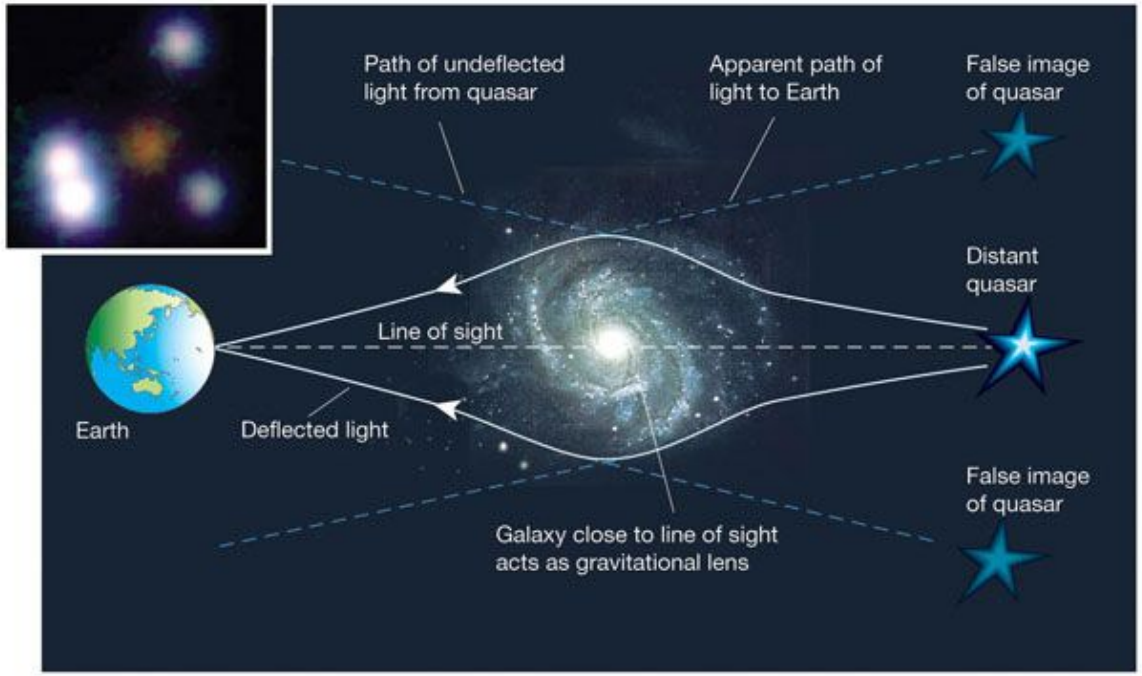
T = 2,728 K
ΔT=0.000006 K

Темная материя

- **Предсказание ОТО:**
  - Во Вселенной больше материи, чем мы видим
- **Откуда следует?**
  - Гравитационное линзирование
  - Проблема скрытой массы

Гравитационные линзы

- **Постулат ОТО:**
  - Свет отклоняется в гравитационном поле



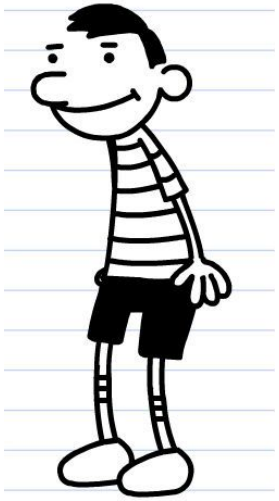
  - Зная теорию, мы можем посчитать массу линзы

Темная материя

- Чтобы получить такую картинку, необходима масса, в 5 раз большая, чем мы видим
  - Существует что-то, чего мы не видим, но что участвует в гравитационном взаимодействии => темная материя

Что есть темная материя?

- **Никому не известно!**
- **Поиск темной материи**
  - Барионная
    - MACHOs (massive astrophysical compact halo objects) = различного рода невидимые черные дыры



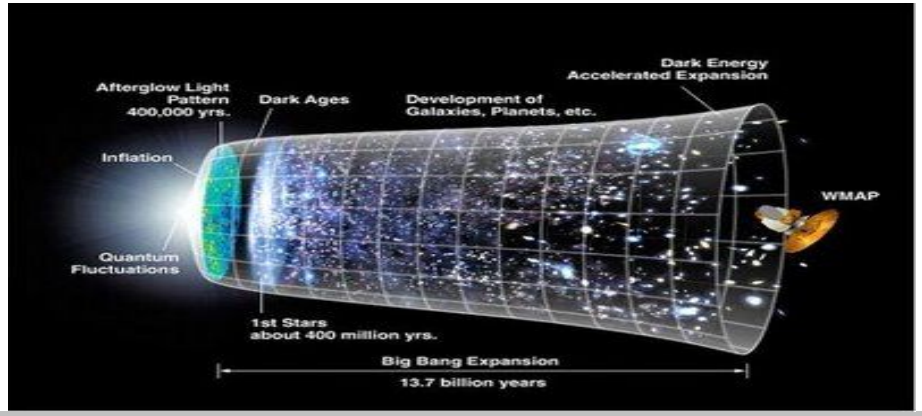
  - Небарионная
    - WIMPs (weakly interactive massive particles) = невзаимодействующие элементарные частицы

Темная энергия

- Теория Большого взрыва предполагает расширение Вселенной
  - Однако гравитация – единственная сила, действующая на больших расстояниях, и она только притягивает

    Расширение Вселенной должно смениться ее сжатием?

    Как именно расширяется Вселенная?

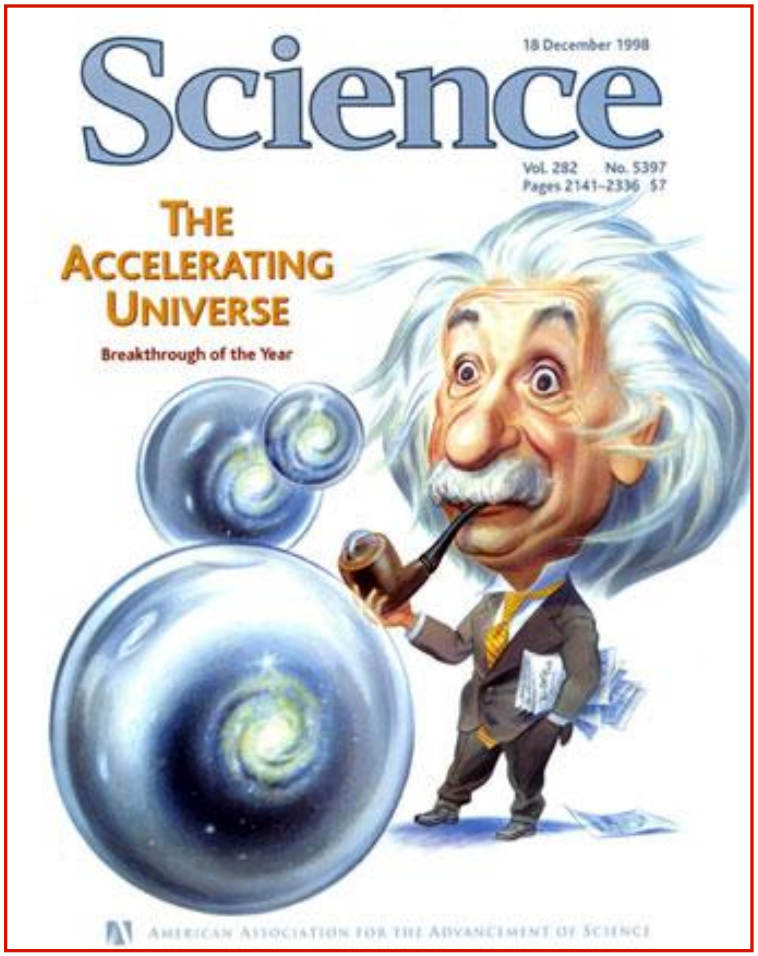


Как расширяется Вселенная?

- **Наблюдение:**
  - Вселенная расширяется с ускорением!

    И это согласуется с ОТО

theory of relativity lies nearest at hand; whether, from the standpoint of present astronomical knowledge, it is tenable, will not here be discussed. In order to arrive at this consistent view, we admittedly had to introduce an extension of the field equations of gravitation which is not justified by our actual knowledge of gravitation. It is to be emphasized, however, that a positive curvature of space is given by our results, even if the supplementary term is not introduced. That term is necessary only for the purpose of making possible a quasi-static distribution of matter, as required by the fact of the small velocities of the stars.

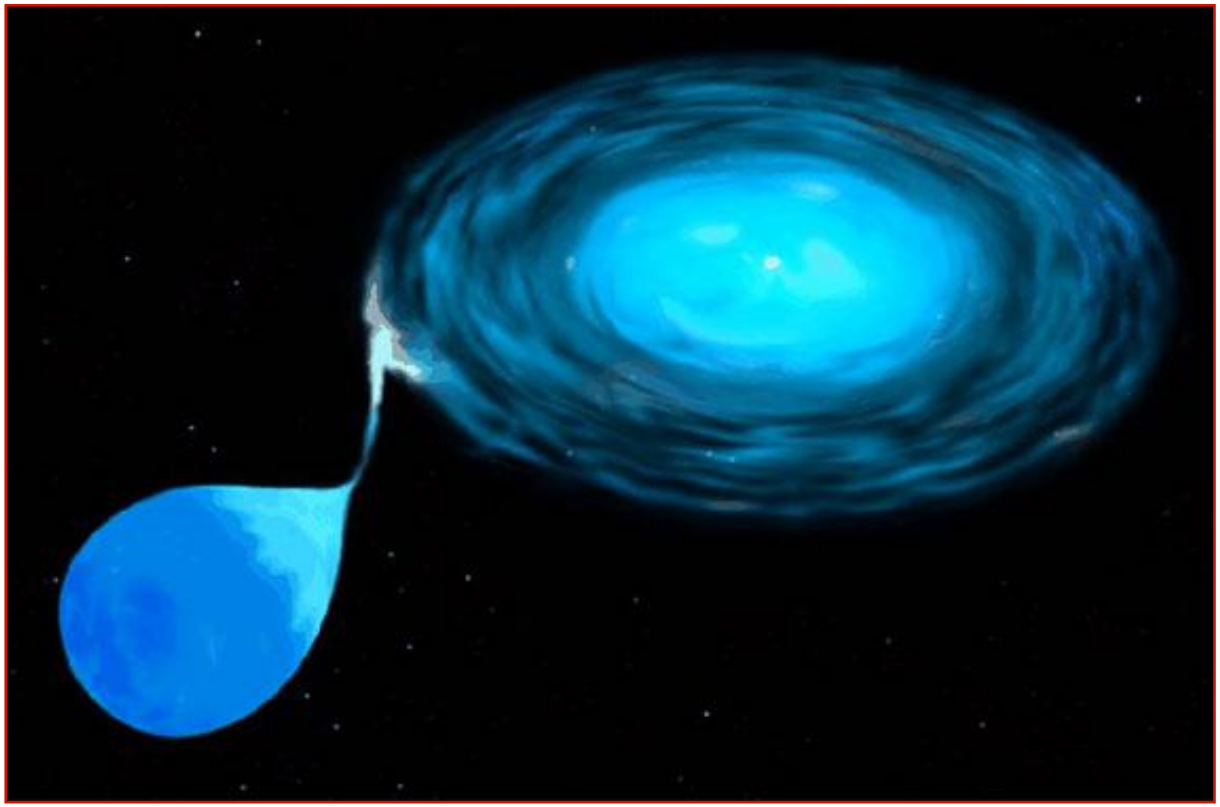


Откуда мы это знаем?

- Можно использовать сверхновые типа Ia как «стандартные свечи»
- **Что такое «сверхновая Ia»?**

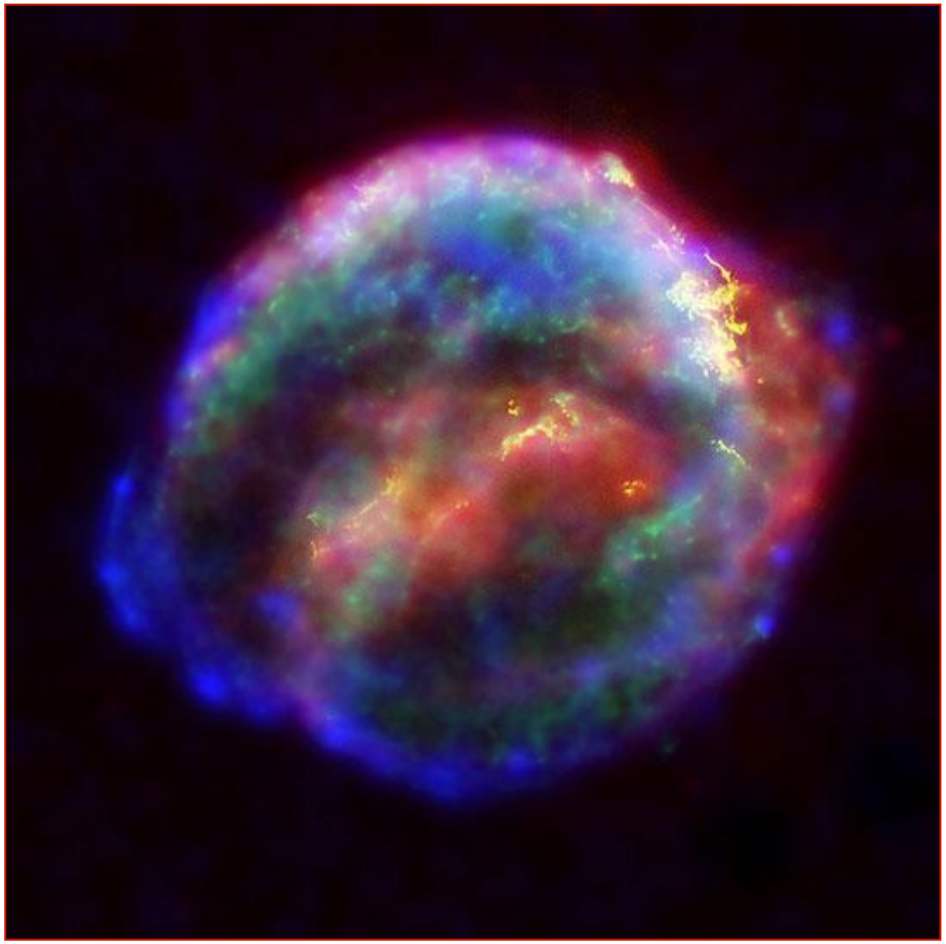
Умирающая звезда становится белым карликом

Что такое «сверхновая Ia»?



Белый карлик снимает водород со второй звезды в системе…

Что такое «сверхновая Ia»?



…и использует его, чтобы взорваться, как водородная бомба! БУХ!!!

Что такое «сверхновая Ia»?

Взрыв сверхновой может затмить миллиарды звезд в Галактике…

Что такое «сверхновая Ia»?

…и может быть увиден из далекой-далекой галактики, через много-много лет

Темная энергия

- **Расстояние до галактики может быть измерено**
  - из красного смещения
    - зависит от степени расширения Вселенной
  - из наблюдения сверхновых Ia
    - настоящее расстояние, которое преодолел свет
- **Второе расстояние оказывается больше первого!**
- **Вселенная расширяется с положительным ускорением!**
  - Гравитация = притяжение => существует что-то, чего мы не знаем – темная энергия

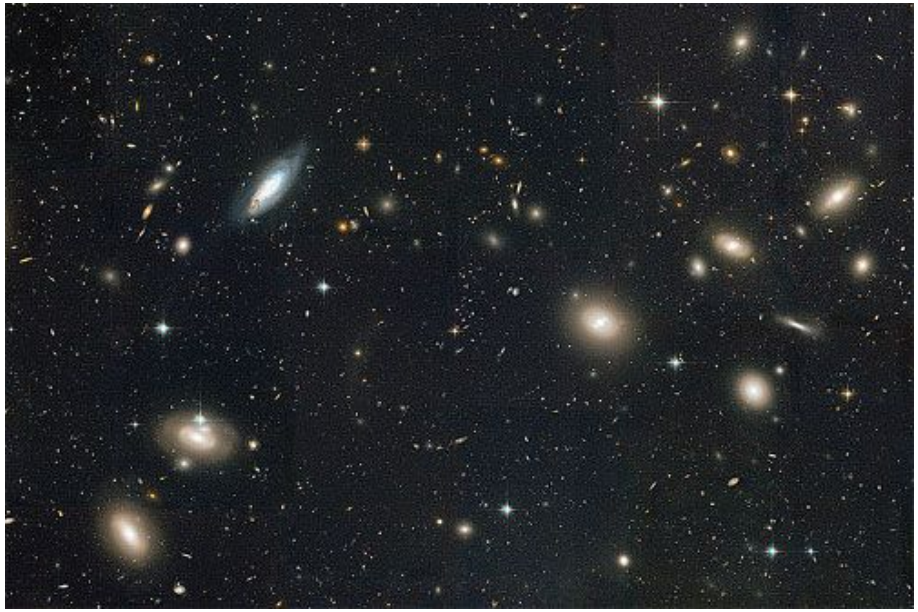
Темное vs светлое

Вопросы без ответа

- **Что послужило причиной Большого взрыва?**
- **Что было перед ним?**
- **Что есть темная материя и темная энергия?**

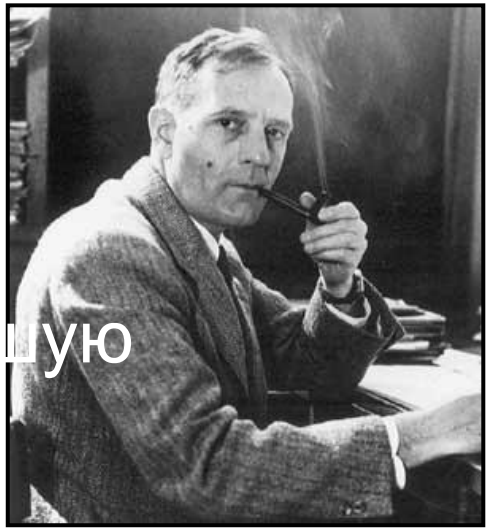
Галактики

- **Галактики –** это четко ограниченные гравитационные звездные системы, включающие также межзвездный газ и пыль, галактическое магнитное поле и космические лучи.



Открытие галактик

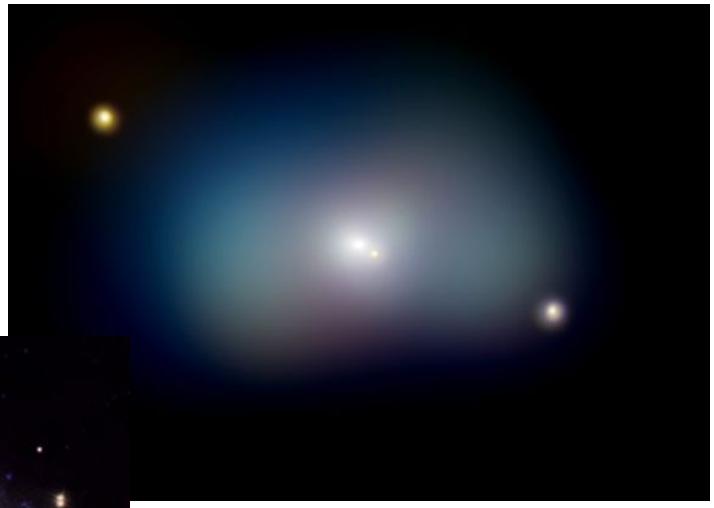
- **Э. Хаббл, 1924**
  - Измерил расстояние до М31 (туманности Андромеды) и получил величину, много боль шую диаметра Млечного пути

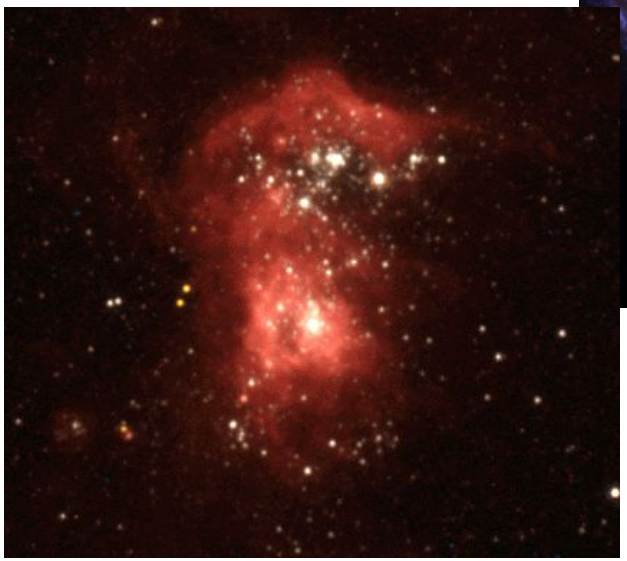


Туманность Андромеды

Виды галактик

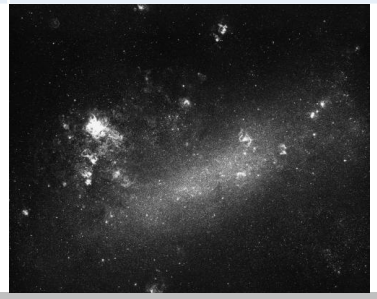
- **Эллиптические (E)**
- **Спиральные (S)**
- **Неправильные (I)**





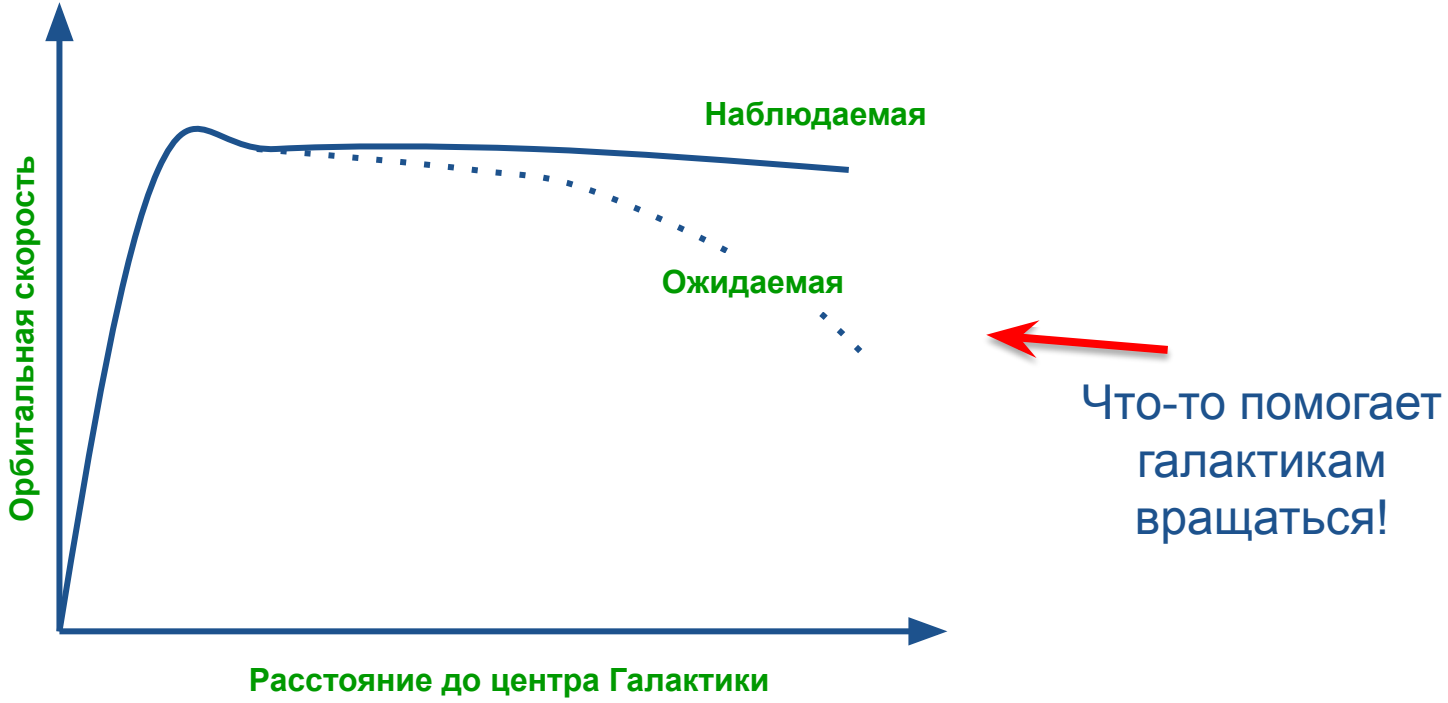
Размеры галактик

Свойство	S	E	I
Масса ($M_\odot$)	$10^9..4x10^{12}$	$10^5..10^{13}$	$10^8..3x10^{10}$
Светимость ($L_\odot$)	$10^8..2x10^{10}$	$3x10^5..10^{11}$	$10^7..3x10^9$
Диаметр (кПк)	4..200	1..180	1..10
% / total	77%	20%	3%



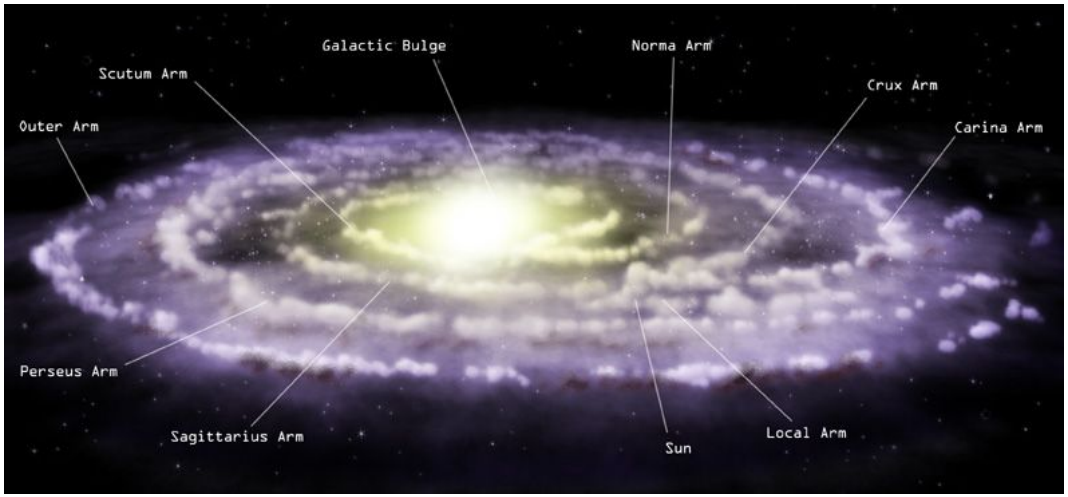
Скрытая масса

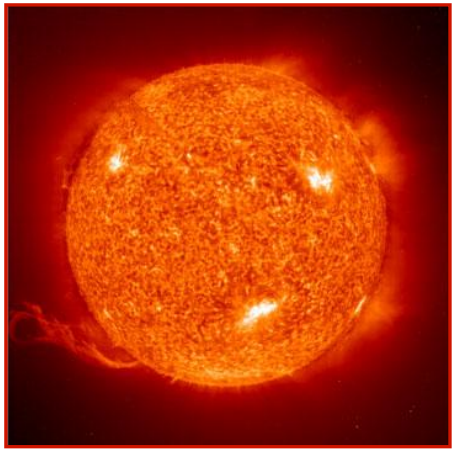
- **Красное смещение позволяет нам вычислить скорость движения материи**
  - Мы можем узнать скорость вращения галактик!



Млечный Путь

- **Млечный Путь –** спиральная Галактика, в которую входит наша Солнечная система
- **Размер:**
  - 10^{11} звезд
  - Диаметр: ~30 кПк
  - Масса: $3 \cdot 10^{12}$ масс Солнца



Звезды

- **Звезды –** небесные тела, в которых идут в данный момент термоядерные реакции
- **Состав звезд:**
  - Водород (92 ат.%; 75 масс.%)
  - Гелий (8 ат.%; 25 масс.%)
    - Доказывает теорию Большого взрыва как начала Вселенной