Введение в космологию

Наука о возникновении и развитии Вселенной

Дмитрий Доценко
dima@latnet.lv

2003

Литература

- **S. Hokings**, *Īsi par laika vēsturi*, 1997, “Madris”
- *http://www.astr.ua.edu/keel/galaxies*
- Физика космоса: Маленькая энциклопедия, 1984
- **Дж. Силк**, *Большой Взрыв*, 1982
- **С. Вейнберг**, *Первые три минуты*, 1980
- **П. Девис**, *Суперсила*, 1980
- **E.L. Wright,** *Lecture Notes,* 1997-2002, *http://www.astro.ucla.edu/~wright/*
- **J.V. Narlikar**, *An Introduction to Cosmology*, 2002

План лекций

1. Внегалактическая астрономия
2. Космологические модели
3. Теория Большого Взрыва (Эра Планка и инфляция)
4. Теория Большого Взрыва (от эры кварков до конца существования Вселенной)

1 лекция
Внегалактическая астрономия

- Исторический обзор
- Классификация галактик
- Активные галактики
- Скопления галактик и крупномасштабная структура
- Шкала расстояний

1 лекция
Внегалактическая астрономия

- **Исторический обзор**
- Классификация галактик
- Активные галактики
- Скопления галактик и крупномасштабная структура
- Шкала расстояний

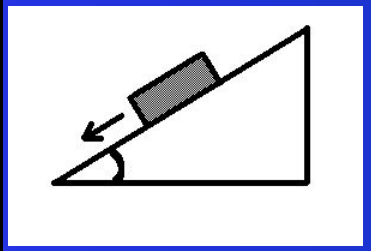
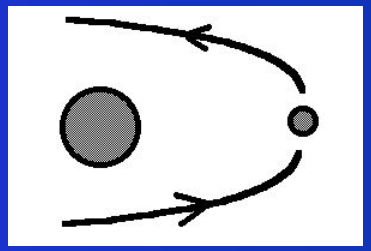
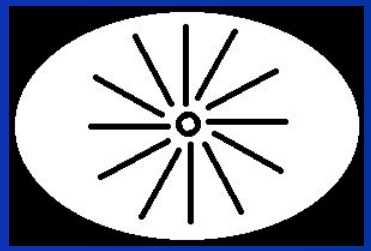
Введение

Космология настолько жа далека от астрономии, насколько астрономия, являясь разделом физики, далека от физики.

Причина этого – совершенно иные внешние условия, происходящие процессы, характерные температуры и плотности.

Для того, чтобы понять специфику космологии и ввести необходимую терминологию, рассмотрим развитие космологии как науки.

Характерные величины

	Физика	**Астрономия**	**Космология**
Размеры объектов, м	$10^{-13} – 10^{4}$	$10^{4} – 10^{19}$	$10^{-35} – 10^{26}$
Темпера-тура, К	$10^{-9} – 10^{9}$	$10^{0} – 10^{8}$	$10^{0} – 10^{32}$
Пример			

Первые идеи космологии

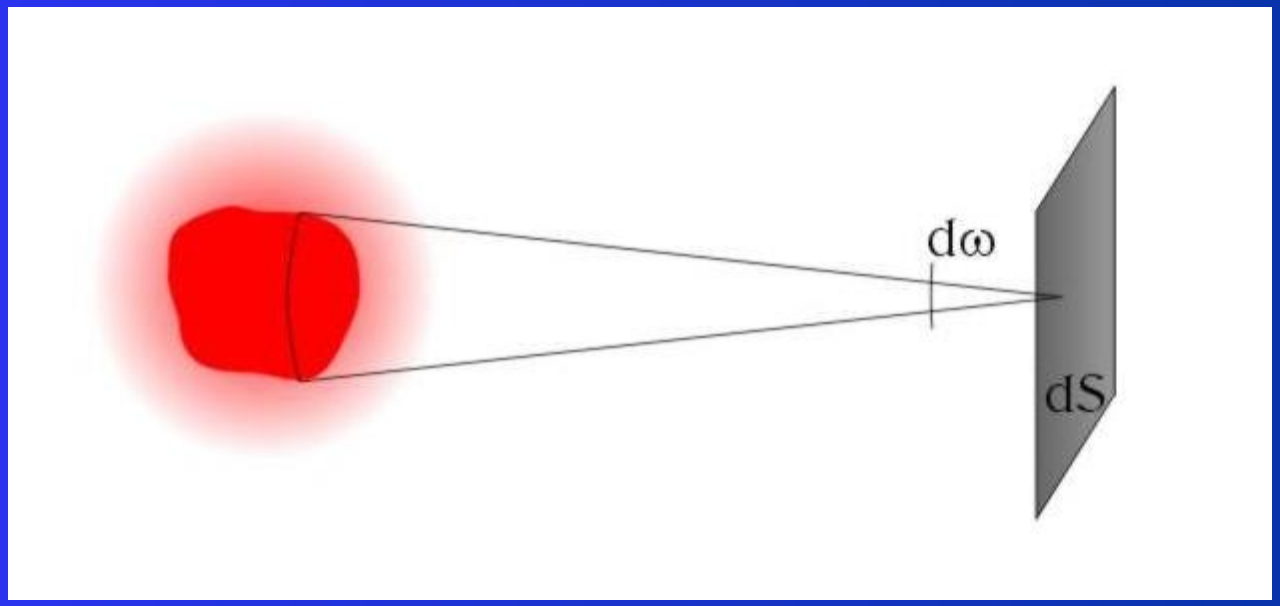
- Исторически первый был сформулирован ***парадокс Ольберса*** (1744 г., Шезо)
- Также была сформулирована гипотеза «***островов – вселенных***» (1755 г., Кант)
- Оба этих вопроса было невозможно решить с помощью техники тех времен. Они были решены лишь в начале 20 века.

Парадокс Ольберса

- Другое название – *фотометрический парадокс*
- Его сформулировал в 1744 году ***Ж. Шезо*** (Швейцария) и в 1826 году ***Г. Ольберс*** (Германия)
- *Парадокс* – очевидное противоречие теории и данных наблюдений
- Верен для бесконечной и статичной вселенной

Парадокс Ольберса

- ***Видимая поверхностная яркость объекта***: Поток света от объекта Φ на единицу поверхности dS с единицы пространственного угла $d\omega$.



Парадокс Ольберса

$$\frac{d\Phi}{d\omega dS} = \Phi \frac{dS}{S_{sferas}} : \frac{S_{objekta}}{S_{sferas}} : dS = \frac{\Phi}{S_{objekta}}$$

- **Видимая поверхностная яркость не зависит от расстояния до объекта!**

Парадокс Ольберса

- Если Вселенная бесконечна и статична, то луч, направленный в любом направлении, рано или поздно пересечет какую-нибудь звезду
- Поэтому яркость всего неба должна быть такой же, как у Солнца

Это не так!

Парадокс Ольберса

- Есть два пути решения противоречия:
  - У Вселенной есть граница, за которой нет светящегося вещества
  - Свет далеких звезд невидим
- Верны оба этих решения:
  - Из-за конечного возраста Вселенной существует горизонт видимости
  - У света далеких звезд есть сдвиг длин волн, вызванный расширением пространства

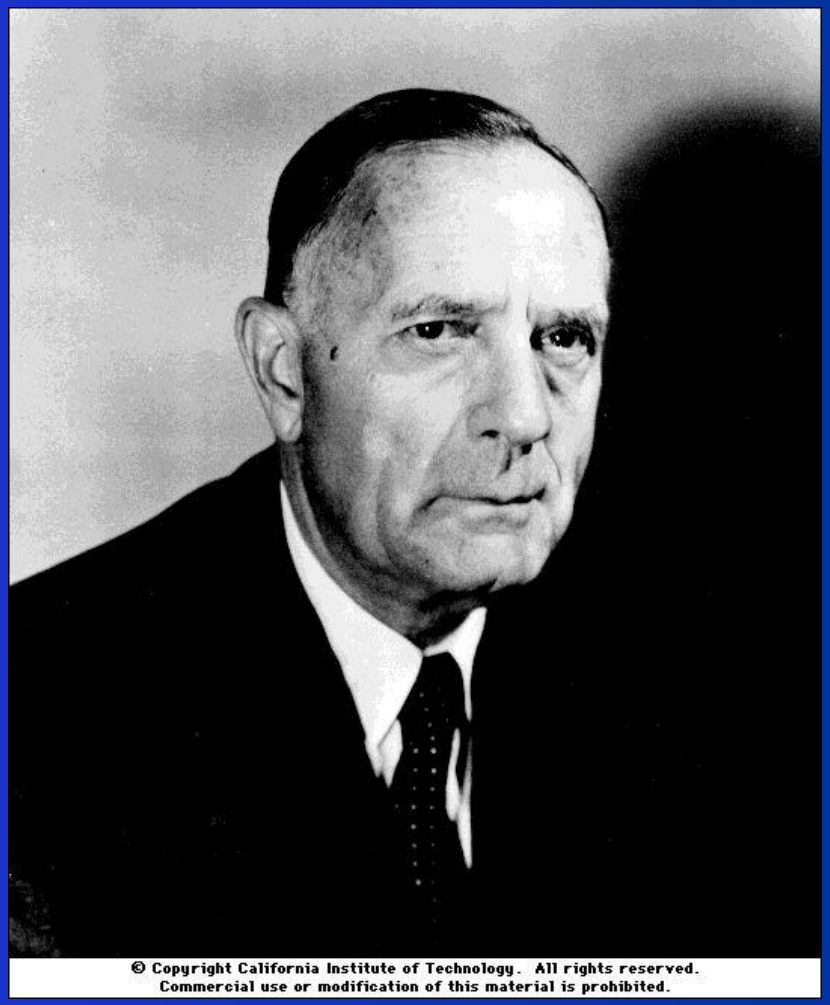
Галактики и Вселенная

- В 1755 году Иммануил Кант предложил гипотезу о том, что некоторые туманные объекты, видимые в телескоп, являются «островами – вселенными», отделенными от нашей звездной системы огромными пустотами
- В 1845 году Уильям Парсон с помощья своего 72-х дюймового телескопа обнаружил, что у некоторых таких «туманностей» видна спиральная структура и принял точку зрения Канта.
- Однако в то время не было экспериментальных фактов, которые могли бы подвердить эту гипотезу

Галактики и Вселенная

Эдвин Хаббл
(1889 – 1953)

Решил столетний спор о том, является ли Вселенная и Галактика одним и тем же

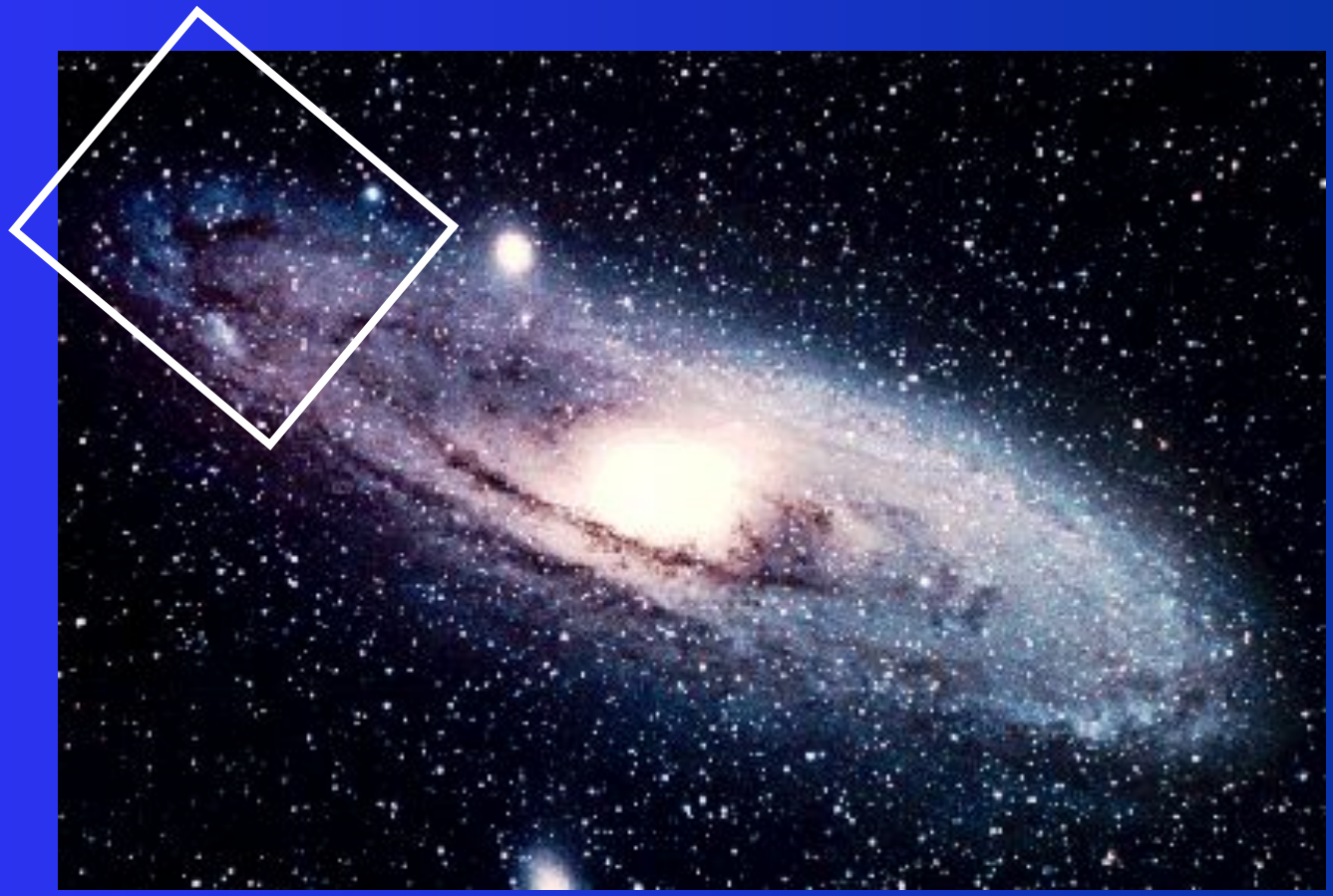


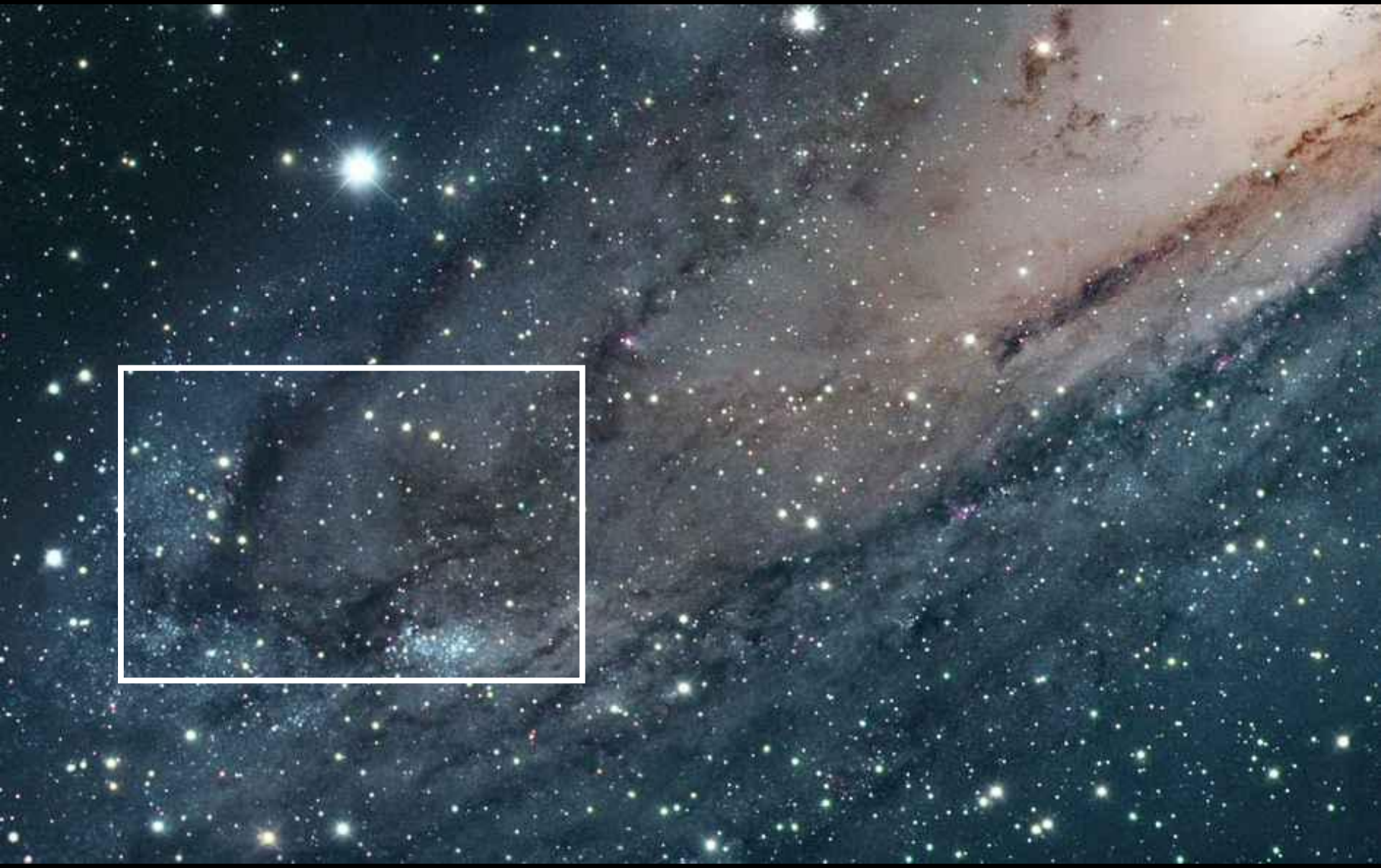
Туманность Андромеды

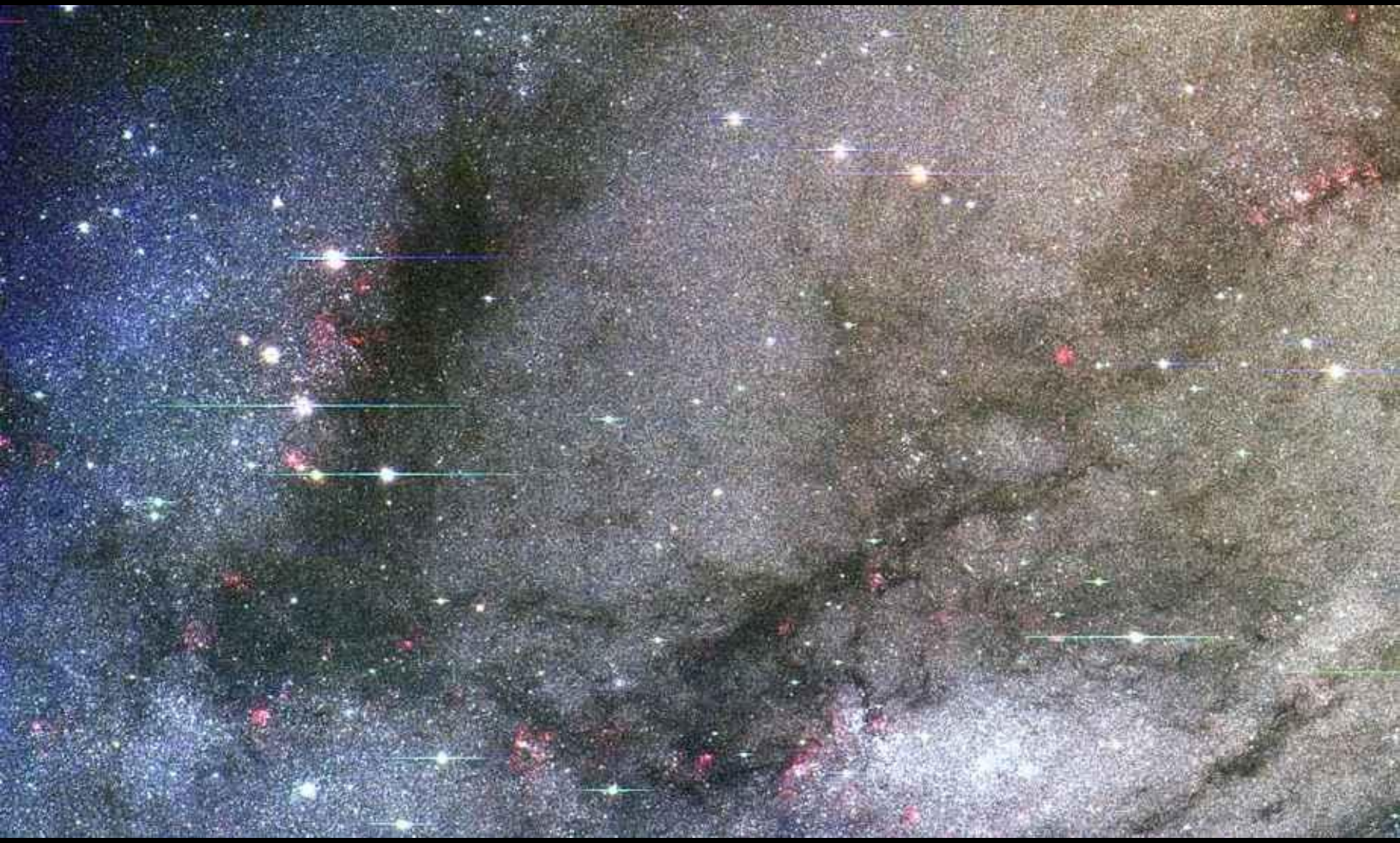
24 августа 1925 года Э. Хаббл наблюдал туманность Андромеды на 100-дюймовом телескопе обсерватории Маунт-Вильсон (США).

- Увидел отдельные звезды (было сделано и раньше)
- По цефеидам определил расстояние!
- «Туманность» оказалась *другой огромной галактикой*!

Туманность Андромеды







1 лекция
Внегалактическая астрономия

- Исторический обзор
- **Классификация галактик**
- Активные галактики
- Скопления галактик и крупномасштабная структура
- Шкала расстояний

Мир галактик

- Исследовав особенности строения более 1000 разных галактик, Хаббл разделил их в четыре основные класса:
  - **Эллиптические (E** – *elliptical*)
  - **Линзообразные (S0** – *lenticular*)
  - **Спиральные –** обычные **(S** – *spiral*) и пересечённые **(SB** – *spiral barred*)
  - **Неправильные (Ir** – *irregular*)

Мир галактик

Подклассы галактик

- Эллиптические: от **E0** до **E7** по вытянусти $10\,(a - b) / a$ *(влияют эффекты проекции)*
- Спиральные: **Sa**, **Sb**, **Sc** (**SBa**, **SBb**, **SBc**)
  - Размеры ядра (**Sa** – большое, **Sc** – очень малое)
  - Раствор спирали (**Sa** – плотная, **Sc** – открытая)
  - Разделение ветвей на отдельные звезды-сверхгиганты и районы HII (**Sa** – однородные ветви, **Sc** – клочковатые ветви)

Мир галактик

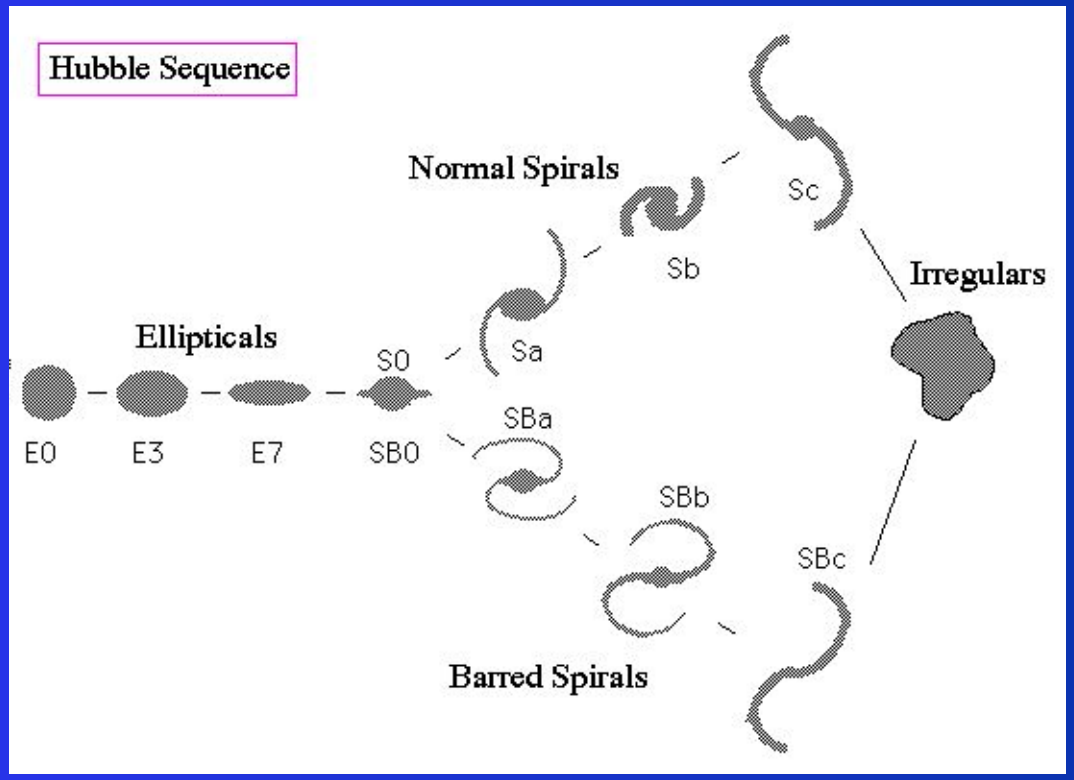
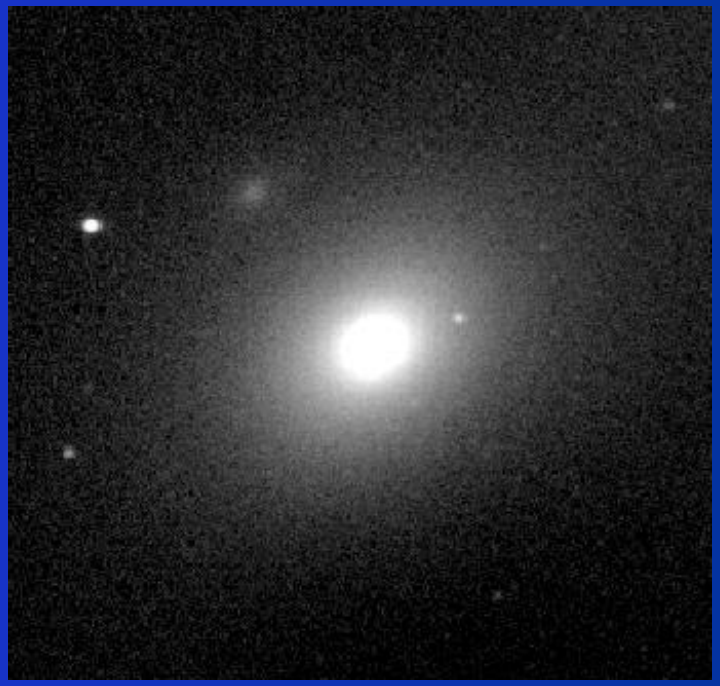


Диаграмма галактик Хаббла

Мир галактик

E0 (M87) Эллиптические галактики **E5 (M107)**

Мир галактик



M104

M86

S0 – Линзообразные галактики

Мир галактик

Sa (M94) Спиральные галактики **Sc (M101)**

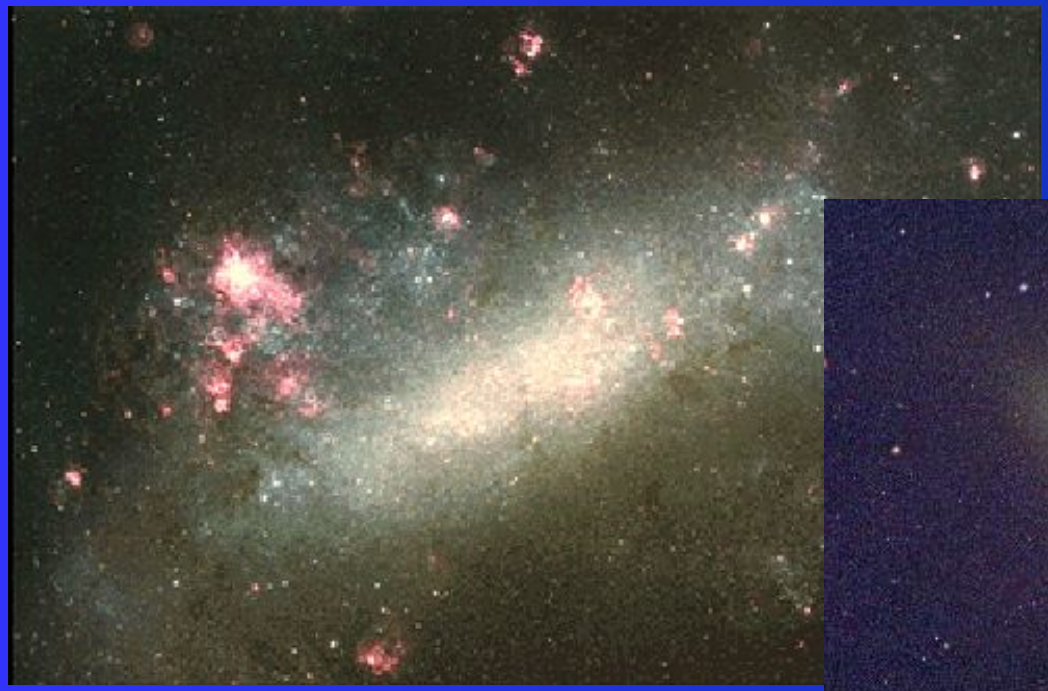
Мир галактик

SBa (NGC2523)

SBb (NGC1300)

Пересеченные спиральные галактики

Мир галактик



Irr1 (LMC)

Irr2 (M82)

Неправильные галактики

Мир галактик

Тип	Эллипти-ческие	Спиральные	Непра-вильные
Централь-ное ядро	Только ядро	Sa – большое, Sc – маленькое	Нет
Спираль-ные ветви	Нет	Sa – плотные, глад-кие, Sc – открытые, клочковатые	У неко-торых – остатки
Часть массы газа	Почти нет	Sa – около 1%, Sc – около 5 – 10%	10 - 50%

Мир галактик

Тип	Эллипти-ческие	Спиральные	Непра-вильные
Молодые звезды	Нет	Sa – следы, Sc – много	Доминируют
Возраст звезд	Старые (около 10^{10} лет)	Sa – некоторые молодые, Sc – больше	В основном молодые (есть и очень старые)
Спектральный тип	G-K	Sa – G-K, Sc – A-F	A-F

Мир галактик

Тип	Эллипти-ческие	Спиральные	Непра-вильные
Цвет	Красный	→	Голубой
Масса ($M_{Солнца}$)	$10^8 – 10^{13}$	$10^9 – 10^{12}$ Sa – больше	$10^8 – 10^{11}$
Светимость ($L_{Солнца}$)	$10^6 – 10^{11}$	$10^8 – 10^{11}$ Sa – больше	$10^8 – 10^{11}$

Мир галактик

- Диаграмма Хаббла не является ***эволюционной последовательностью***, т.к. возраст галактик всех типов составляет от 12 до 13 млрд. лет.
- Но она характеризует ***степень эволюции*** галактики
- В эллиптических галактиках звезды образовались давно, истощив запасы газа, а в спиральных галактиках процессы звездообразования происходят и сейчас.
- Причина – разные условия возникновения и вращения прото-галактики

Мир галактик

- **Вращение**.
  - *Вращающееся газовое облако* сжимается медленнее и образует плоскую дискообразную структуру. Процессы звездообразования продолжаются многие миллиарды лет.
  - *Невращающееся облако* сжимается намного быстрее и сильнее, в результате чего протогалактический газ быстро собирается в звезды (за несколько миллиардов лет).

Мир галактик

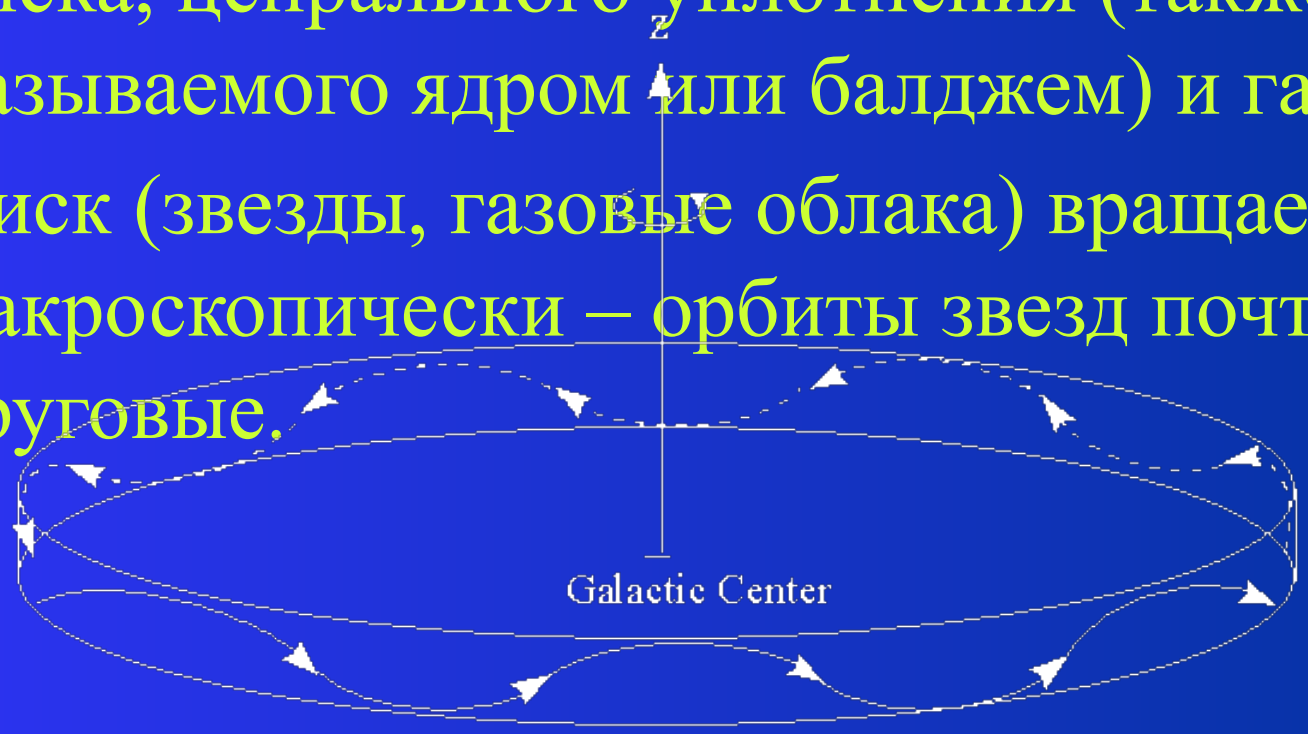
- **Окружение**.
  - При столкновениях галактик газовые облака в них сильно сжимаются, из-за чего происходят всплески звездообразования.
  - При объединении галактик теряется угловой момент и образуется эллиптическая галактика.

Эллиптические галактики

- Нет магроскопического вращения – звёзды движутся как по почти радиальным орбитам, так и по круговым.

Спиральные галактики

- Состоят из трёх выраженных частей – диска, ценрального уплотнения (также называемого ядром или балджем) и гало.
- Диск (звезды, газовые облака) вращается макроскопически – орбиты звезд почти круговые.



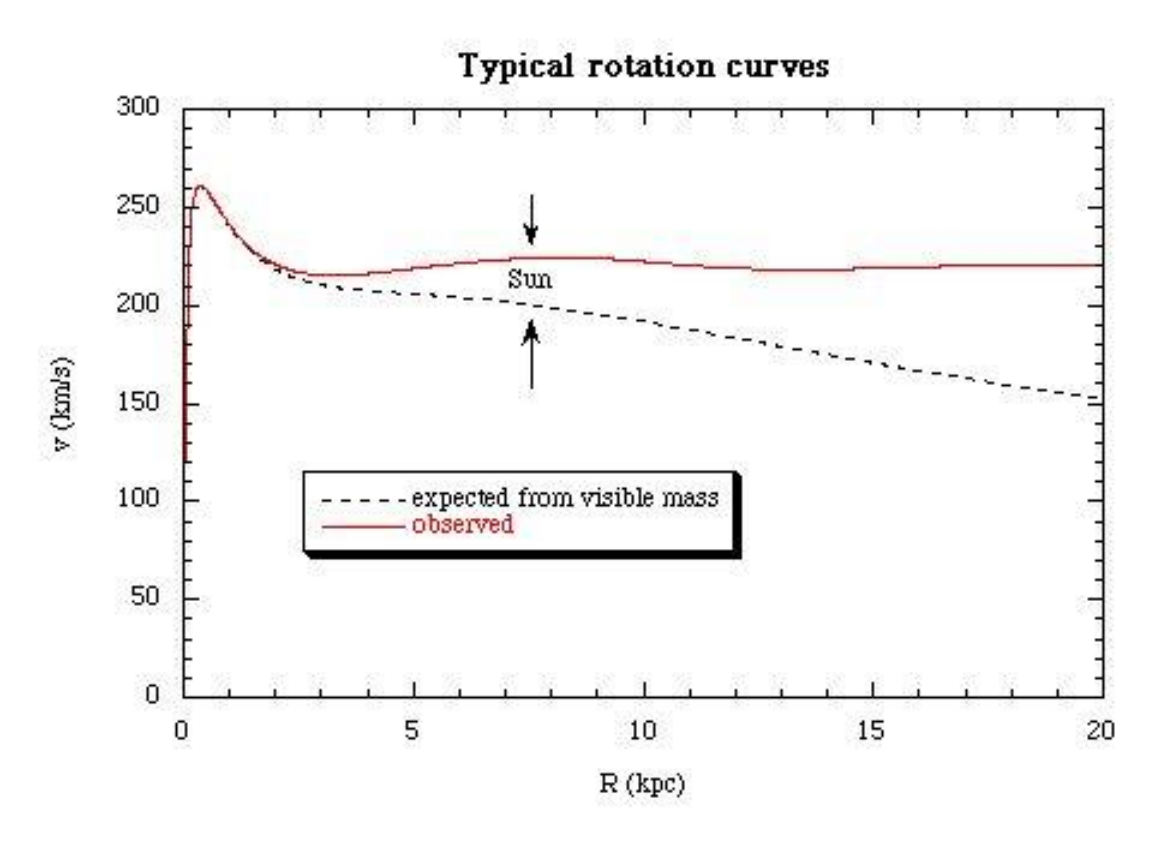
Спиральные галактики

- ***Кривые вращения*** (зависимость скорости вращения звезд от расстояния до центра галактики) отличаются от теоретически рассчитанных!
- Наблюдаемой массы слишком мало для того, чтобы вызвать наблюдаемое быстрое вращение звезд галактики.

$$V_{зв}=\sqrt{GM/R_{зв}},$$

где M – часть массы галактики, находящаяся ближе к центру галактики, чем данная звезда

Спиральные галактики



Кривая вращения нашей Галактики

Спиральные галактики

Предложено два пути решения этой проблемы:

- **Тёмная материя** – вещество, не входящее в звёзды, газ или пыль, однако обладающее существенной массой.
- **Модифицированная Ньтоновская динамика** – немного измененный закон притяжения, причем так, чтобы наблюдаемые кривые совпали с теоретически ожидаемыми.

Данные наблюдений исключают второй вариант.

1 лекция
Внегалактическая астрономия

- Исторический обзор
- Классификация галактик
- **Активные галактики**
- Скопления галактик и крупномасштабная структура
- Шкала расстояний

Активные галактики

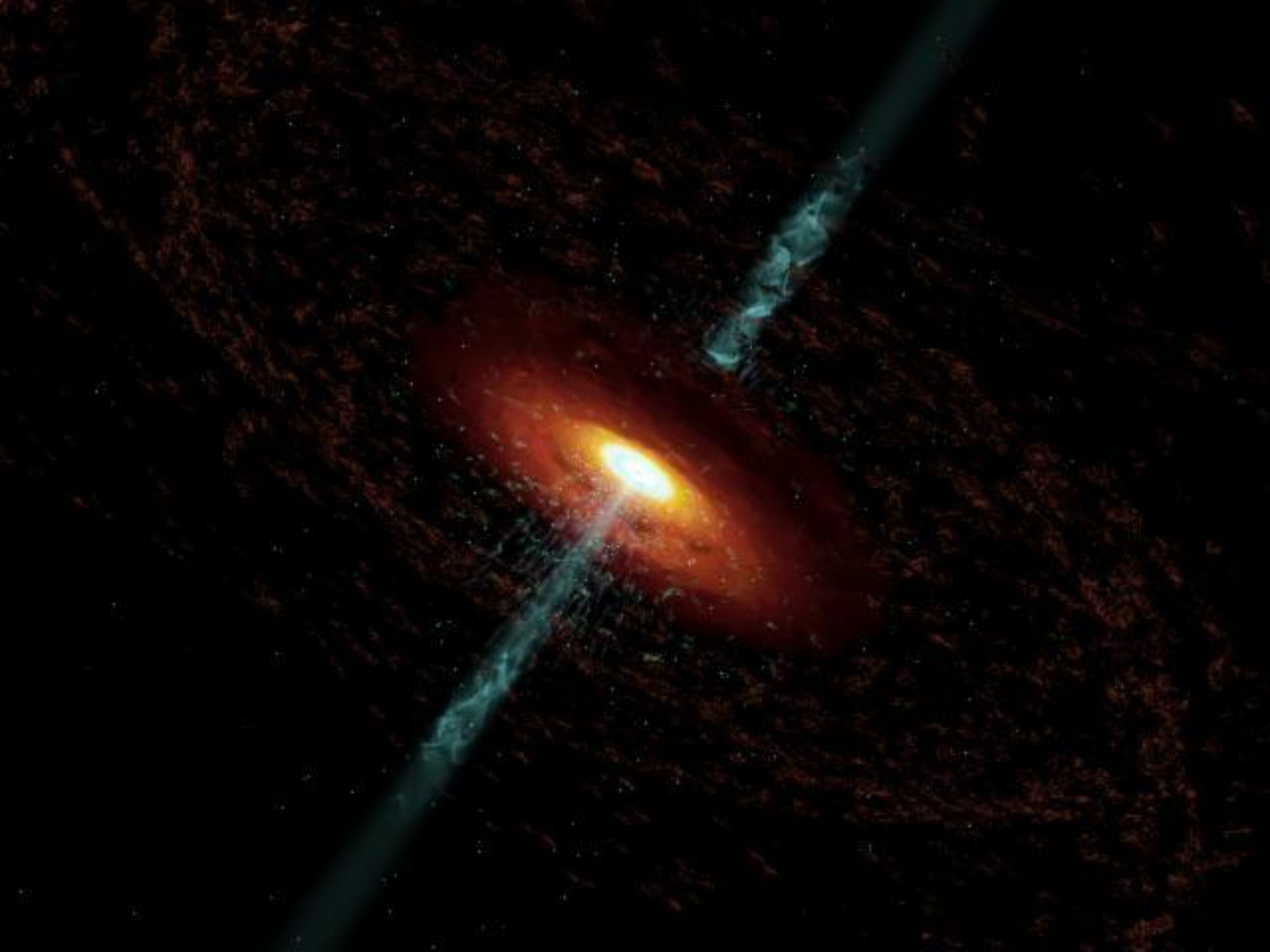
Активными называют галактики, в ядрах которых происходят процессы с огромным энерговыделением (составляют 1-2% от всех).

- Радиогалактики
- Сейфертовские галактики
- Квазары
- Блазары

Видим прошлое – те стадии эволюции, которые для близких галактик уже завершились.

Активные галактики

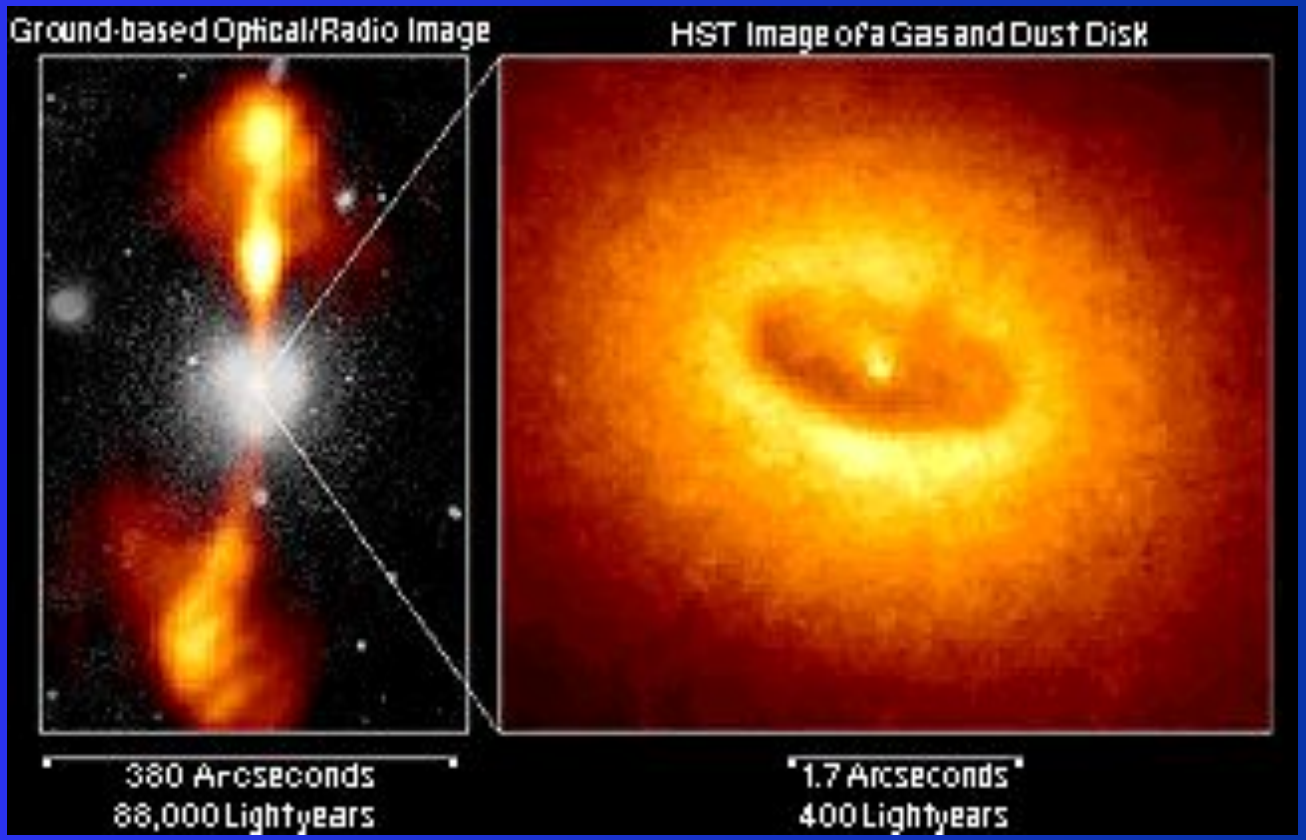
- Причина активности – сверхмассивная черная дыра (ЧД) в ядре галактики. Чем моложе галактика, тем больше материи падает в черную дыру, и тем больше активное ядро излучает.
- Итак, мы видим излучение, но не от самой черной дыры, а от той материи, которая почти туда упала.



Активные галактики

- Почему же падающая материя излучает?
  - ***Тепловое излучение*** – при падении это вещество ускоряется, нагревается (до $T \sim 10^7$К), и в результате столкновений начинает излучать.
  - ***Синхротронное излучение*** (см. далее)
  - ***Сверхкритическая аккреция*** – выброс материи с полюсов вращающейся ЧД при слишком быстром ее падении

Активные галактики

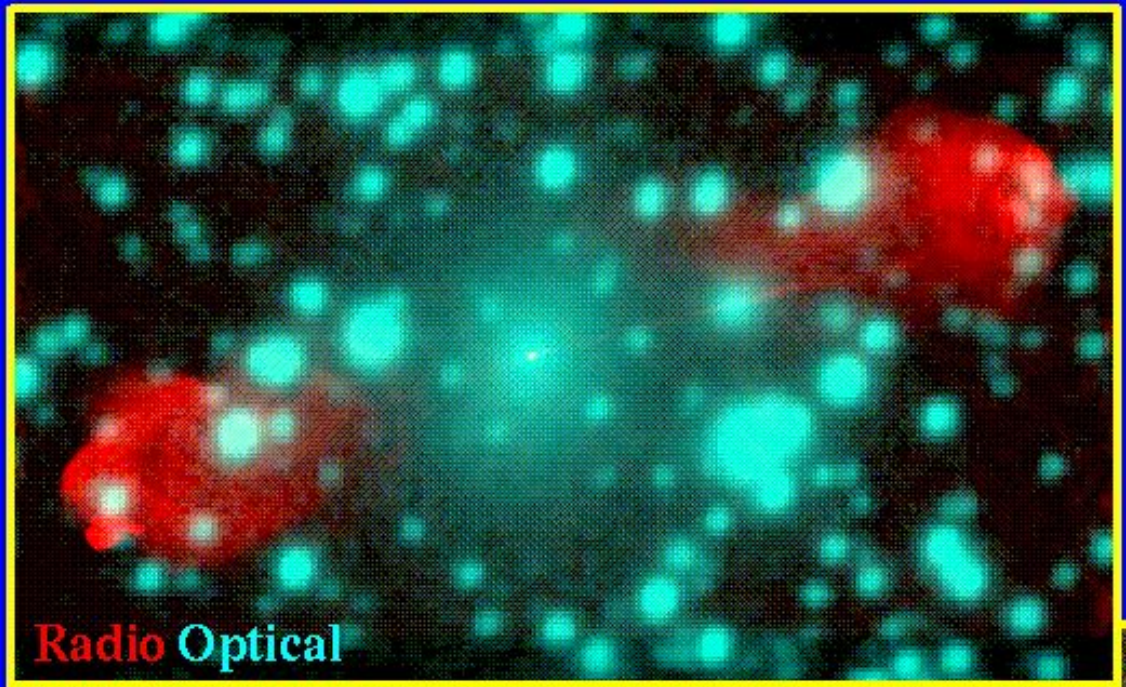


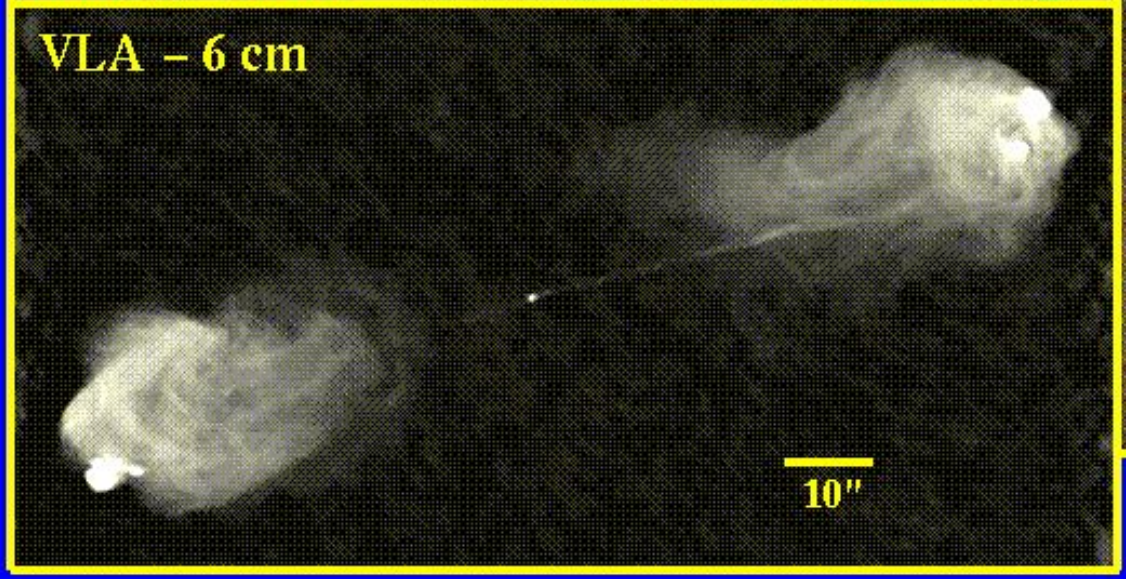
Ядро активной галактики NGC 4261

Радиогалактики

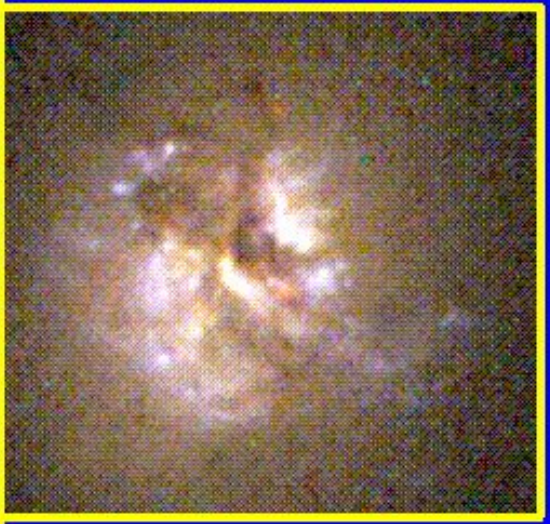
- Мощность излучения радиоволн сравнима с мощностью излучения в оптическом диапазоне (10^{35} – 10^{37} Дж/с), что нельзя объяснить процессами рождения и смерти звезд.
- Радиоизлучение в основном идет от двух областей, между которых находится сама галактика. У многих видны тонкие струи, идущие из ядра галактики к этим областям.

Cygnus A
(3C 405)





HST closeup



5″

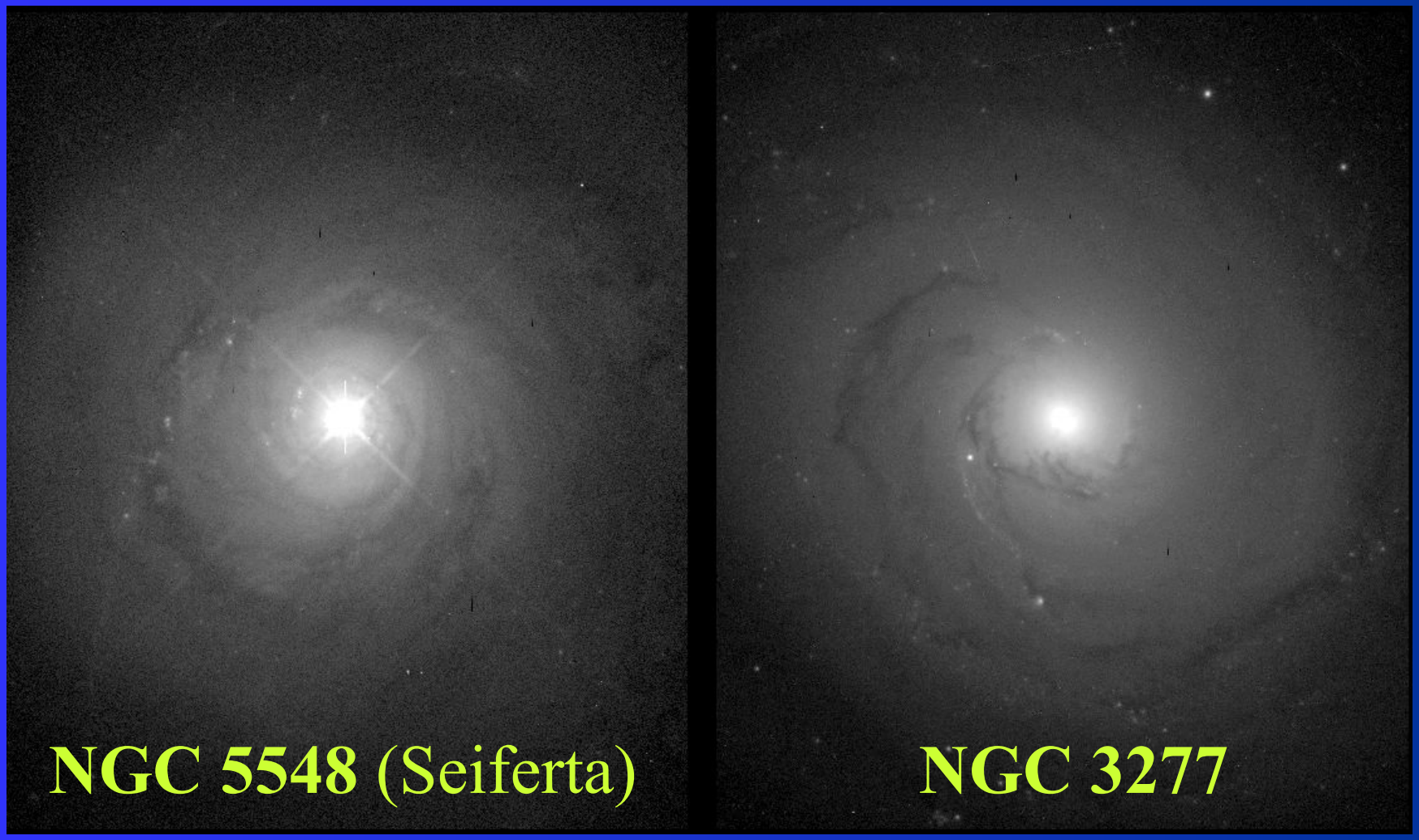
Радиогалактики

- ***Синхротронное радиоизлучение*** этих галактик образуется релятивистскими электронами при движении в магнитных полях галактики и межгалактической среды.
- Электроны были ускорены вблизи активного ядра сильным магнитным полем сверхмассивной черной дыры.

Сейфертовские галактики

- В ядре галактики наблюдаются яркие и сильно расширенные (из-за быстрого движения газа) спектральные линии излучения. Высокая степень ионизации этого газа не может быть вызвана звездами галактики.
- Часто видно и само звездообразное ядро.
- Ядро излучает как в рентгеновском (до 100 кэВ), так и в радио-диапазоне. Преобладает тепловой спектр. Яркость переменная.

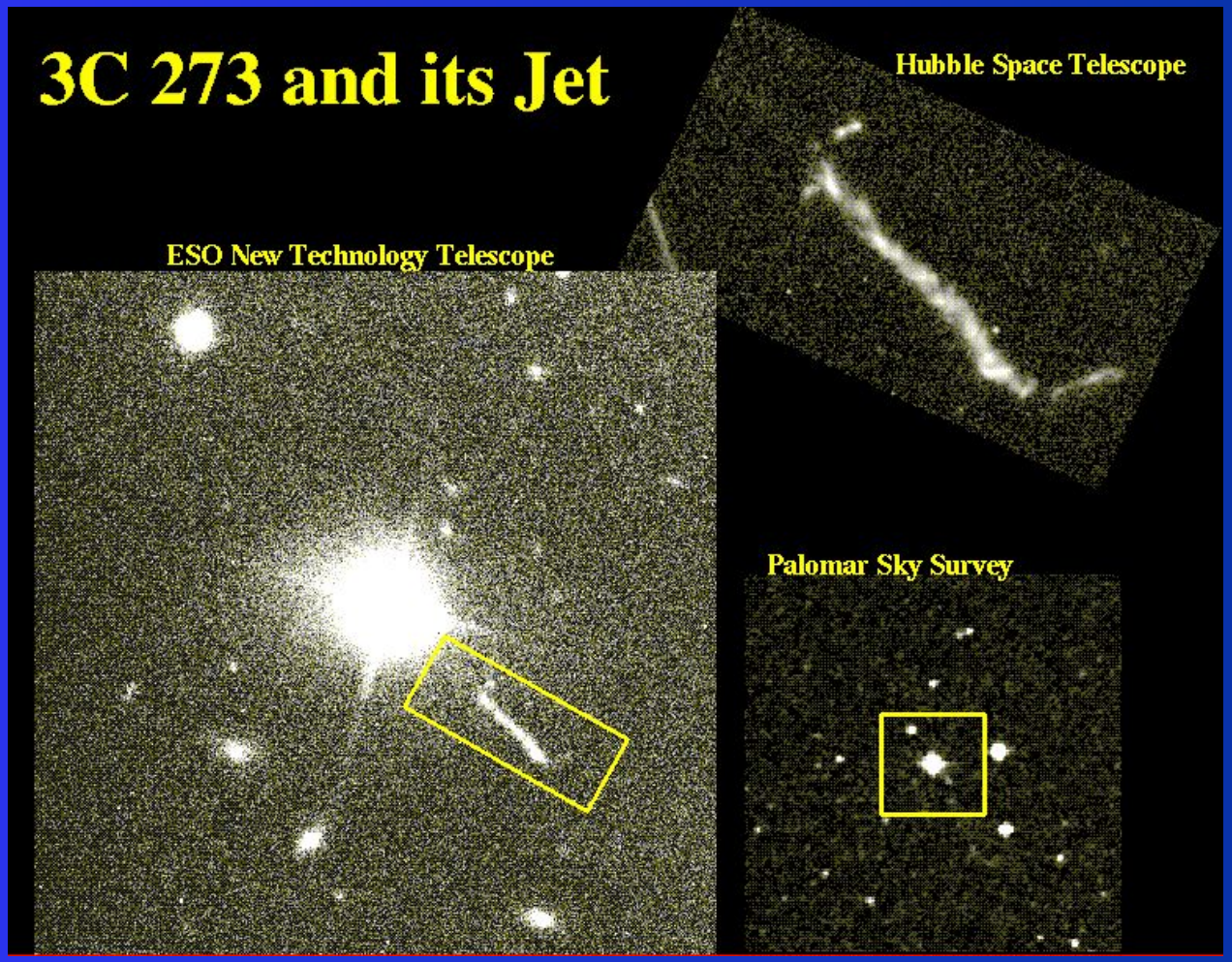
Сейфертовские галактики



Квазары

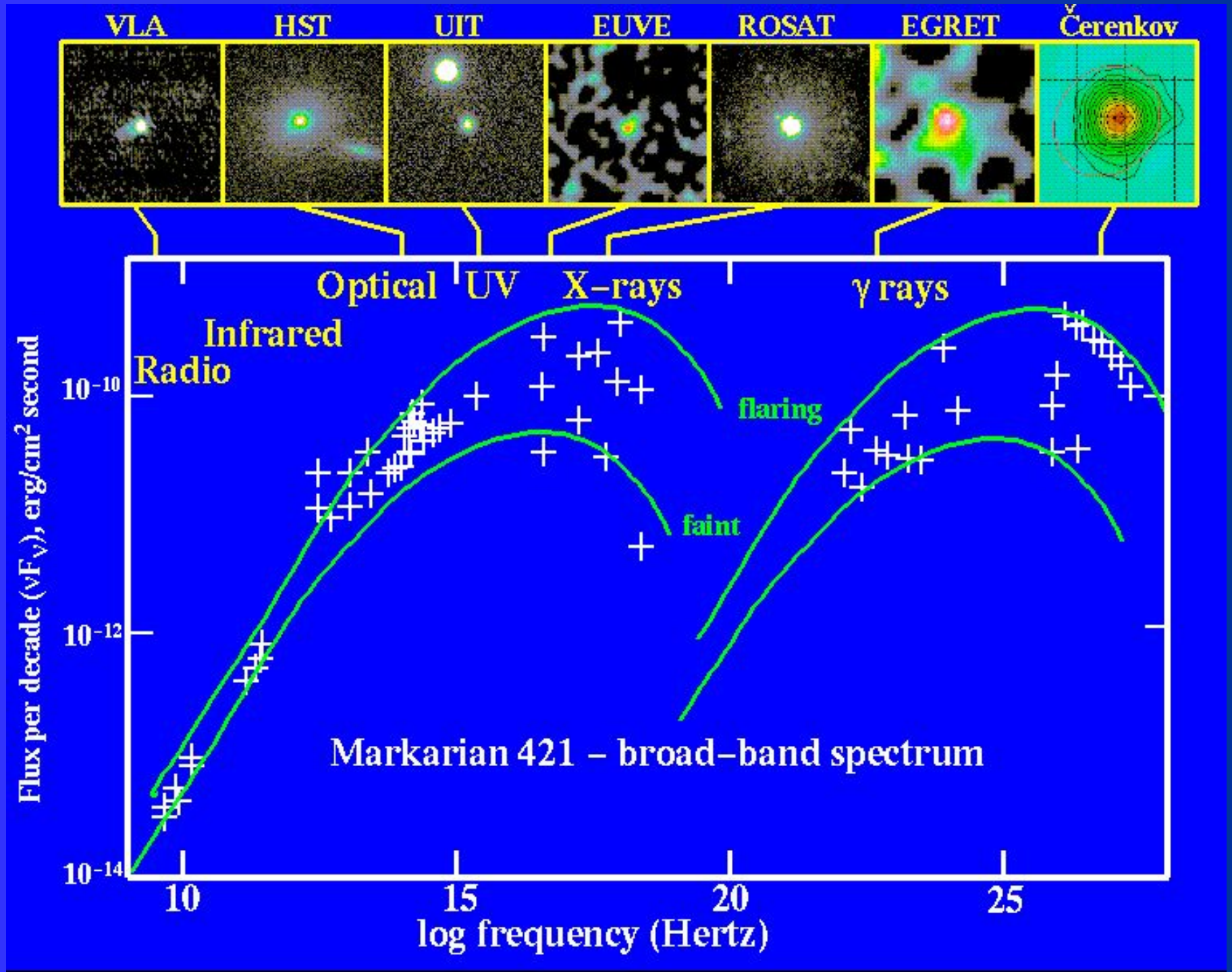
- Ядро галактики многократно превосходит по яркости все звезды галактики. Квазары – самые яркие объекты во Вселенной (10^{40} Дж/с).
- Находятся очень далеко – на расстояниях до 10 миллиардов световых дет
- Излучают гамма-излучение до 100 МэВ (некоторые – даже до 1 ТэВ)
- Только у некоторых была обнаружена содержащая это ядро галактика.

Квазары


3C 273 and its Jet
Hubble Space Telescope
ESO New Technology Telescope
Palomar Sky Survey

Блазары

- Интесивность переменная с коротким периодом – от минут до дней. Отсюда следует, что размер источника мал (порядка размера Солнечной системы).
- В спектре нет спектральных линий от радиоволн до гамма-лучей.
- Скорее всего, они наблюдаются, когда струя, исходящая из активного ядра, направлена на нас.

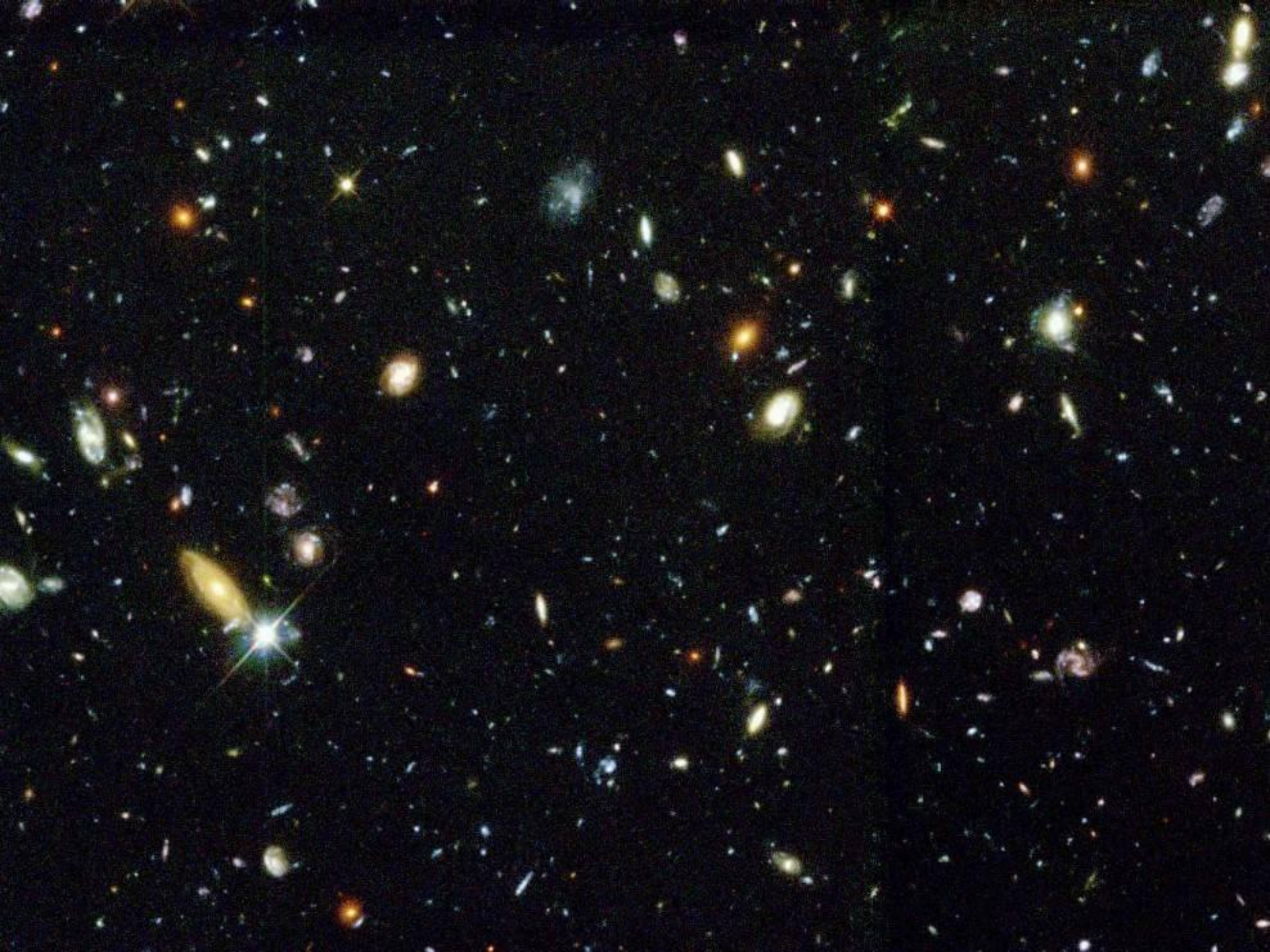

VLA
HST
UIT
EUVE
ROSAT
EGRET
Čerenkov
Optical
UV
X-rays
γ rays
Infrared
Radio
flaring
faint
Markarian 421 – broad-band spectrum
Flux per decade (νFν), erg/cm² second
10⁻¹⁰
10⁻¹²
10⁻¹⁴
10
15
20
25
log frequency (Hertz)

1 лекция
Внегалактическая астрономия

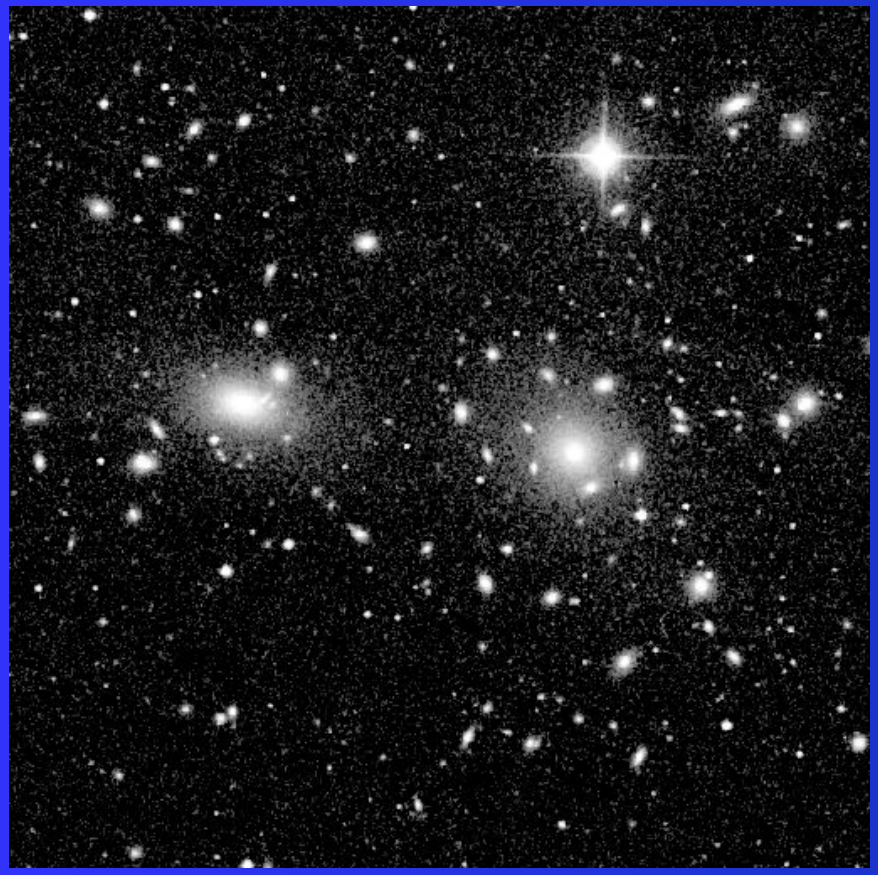
- Исторический обзор
- Классификация галактик
- Активные галактики
- **Скопления галактик и крупномасштабная структура**
- Шкала расстояний

Скопления галактик и крупномасштабная структура

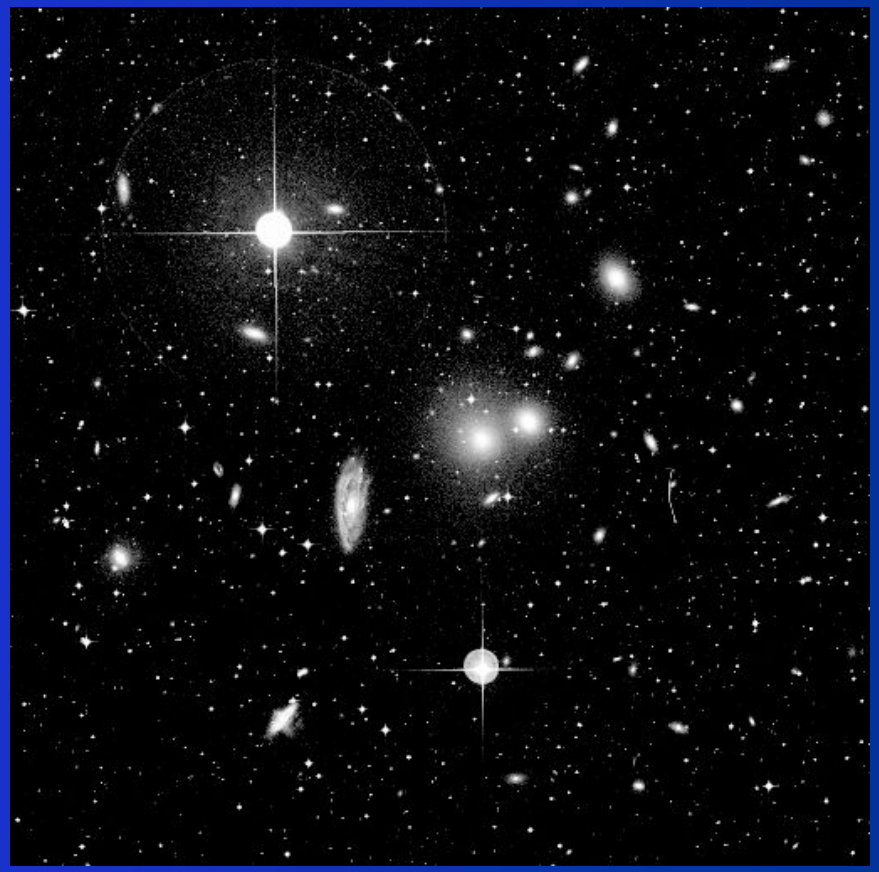
- Скопления галактик - классификация
- Масса скоплений галактик
- Взаимодействие галактик
- Межгалактический газ
- Крупномасштабная структура
- Космологический принцип
- Тёемная материя



Скопления галактик

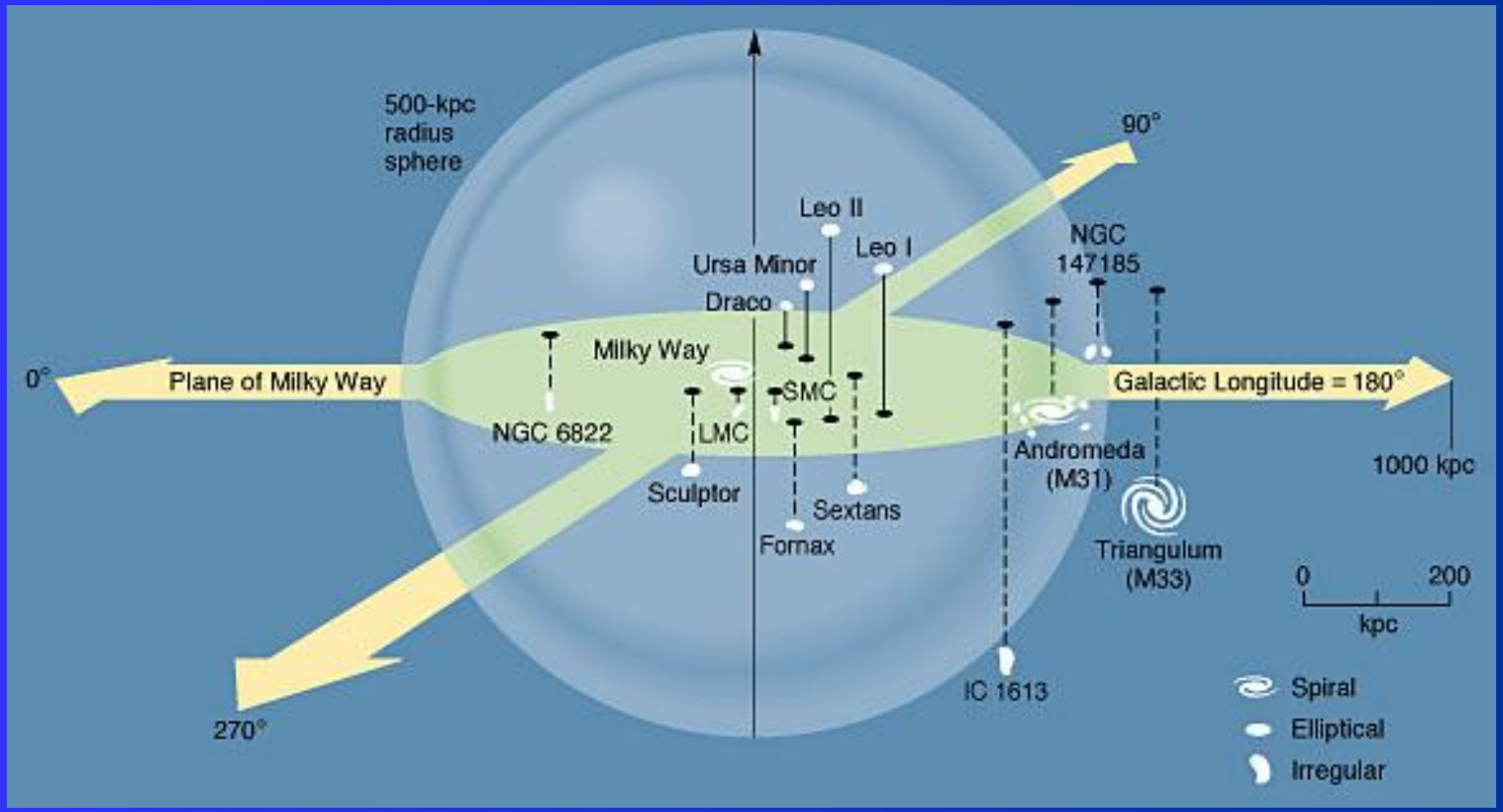


Скопление в созвездии Волос Вероники



Скопление в созвездии Гидры

Скопления галактик



Местная группа галактик

Скопления галактик

- Малые скопления (от 3 до десятков галактик) называют ***группами галактик***. Наша Галактика принадлежит Местной Группе.
- Большие скопления (от десятков до тысяч галактик) так и называют – ***скоплениями галактик***. К нам близки скопления в созвездиях Девы и Волос Вероники.
- Ещё большие сколления называются ***сверх-скоплениями галактик***. В наше сверхскопление входит около 20 тысяч галактик.

Скопления галактик

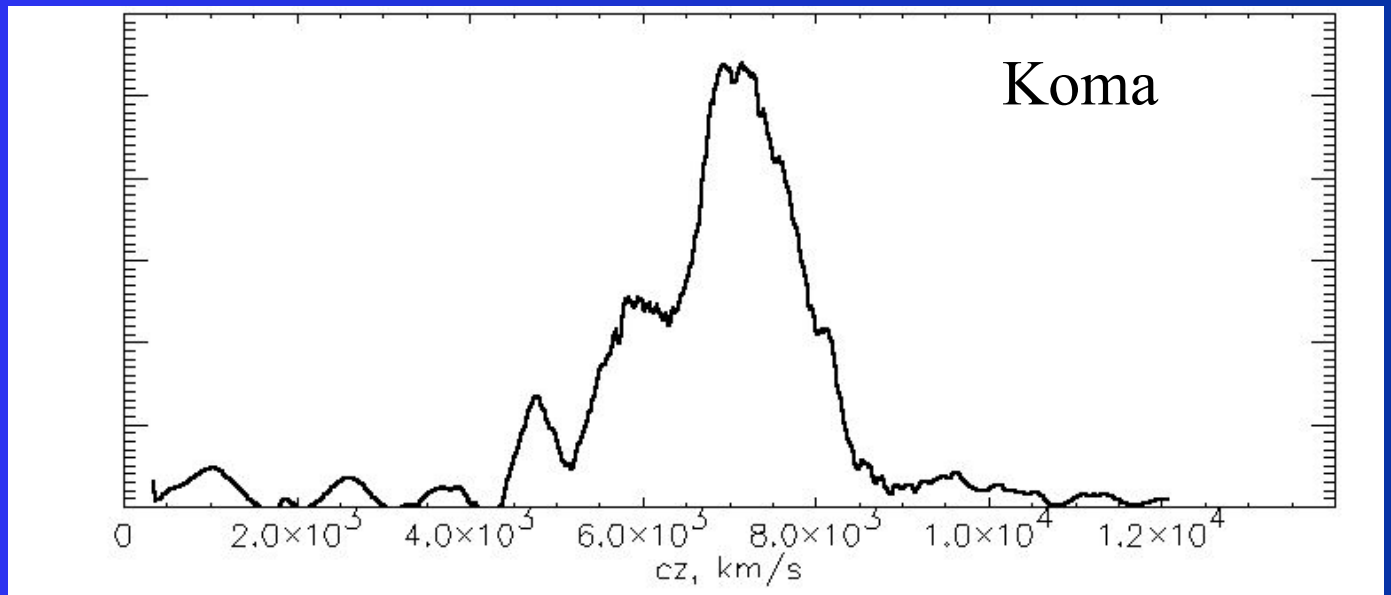
- Причина объединения галактик – ***гравитационная нестабильность***
- При взаимном пртяжении многих тел сама собой образуется «скопление» этих тел
- В основном скопления галактик находятся в ***динамическом равновесии*** – кинетическая энергия движения отдельных галактик не позволяет скоплению сжаться

Есть исключения!

Как газ!

Масса скоплений галактик

- По сдвигу спектральных линий отдельных галактик из-за эффекта Допплера можно рассчитать разброс их скоростей вокруг центра масс скопления



Масса скоплений галактик

Из этого разброса скоростей можно оценить массу скопления. Действительно, согласно теореме о вириале в случае динамического равновесия выполняется отношение:

$$U = -2T,$$

где U и T есть соответственно потенциальная и кинетическая энергии системы (усредненные по времени). Считаем, что по порядку величины потенциальная энергия равна:

$$U = -GM/R$$

где M – масса и R – размер скопления галактик

Масса скоплений галактик

А кинетическая энергия скопления по порядку величины равна

$$T = M \langle v^2 \rangle / 2$$

где $\langle v^2 \rangle$ - усредненный по галактикая квадрат их скоростей относительно центра масс скопления.

Отсюда получим ***динамическую оценку*** массы скопления галактик:

$$M = \langle v^2 \rangle R / G$$

Масса скоплений галактик

- Существует и другой способ оценки – масса скопления есть сумма масс отдельных галактик
- Этот способ дает существенно меньшие результаты (в 10-100 раз), так как в нем не учитываются
  - Масса межгалактического газа и
  - Масса межгалактической темной материи

Взаимодействие галактик

- При движении в пределах скопления галактики могут столкнуться или пройти сквозь друг друга
- В результате взаимодействия резко ускоряются процессы звездообразования
- Форма галактик искажается
- Некоторые галактики теряют момент импульса и сливаются с центральной элииптической галактикой скопления, содержащей обычно 1-10% от массы всех галактик

Межгалактический газ

Все скопления галактик являются источниками рентгеновского излучения. Это излучение горячего (температурой 30 – 100 млн К) межгалактического газа.

- Тормозное излучение – свободно-свободные переходы
- Рекомбинационное излучение – образование атомов

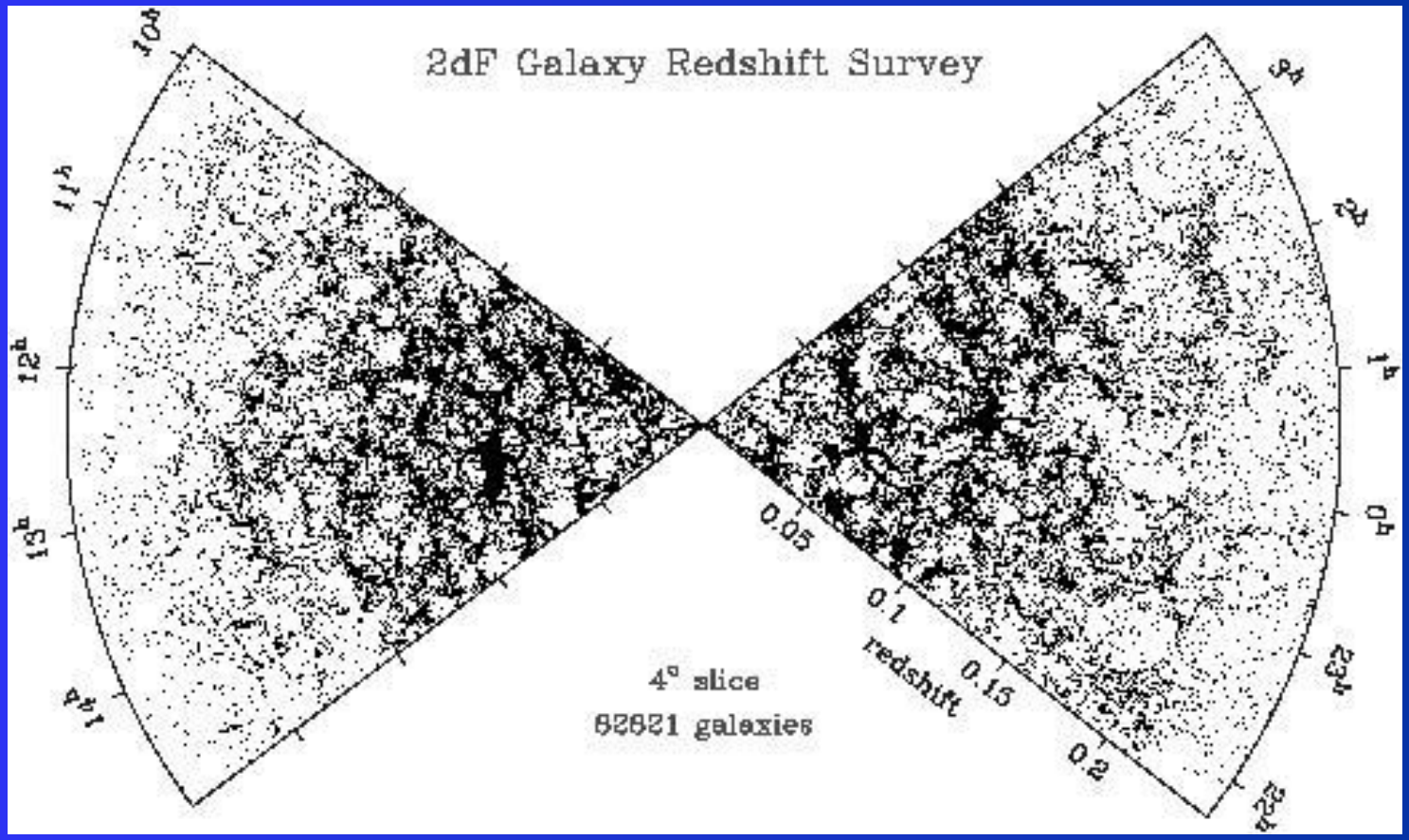
Плотность газа – около 10^{-3} частиц в $см^3$

Оптический и рентгеновский снимки скопления

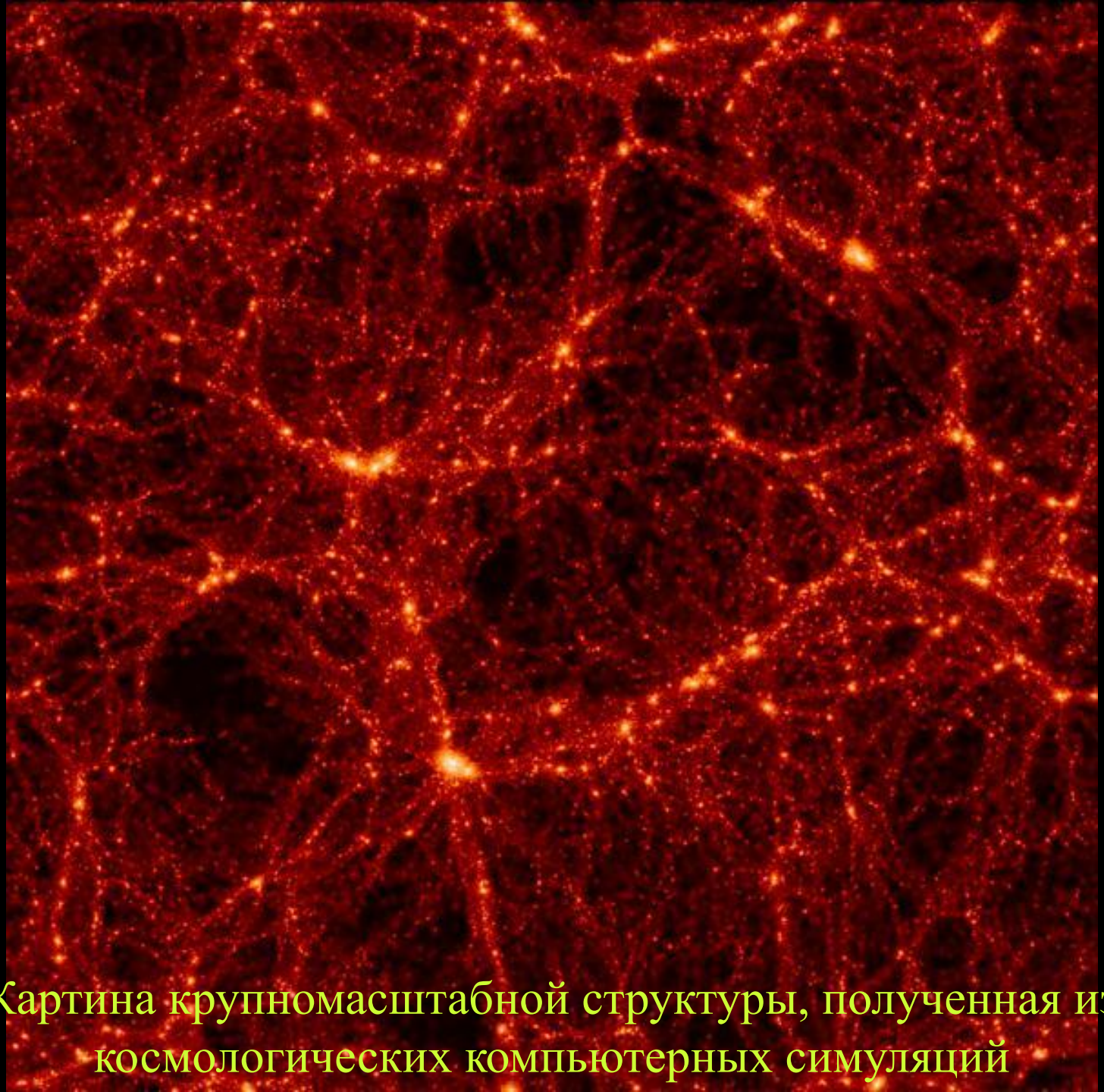
Крупномасштабная структура

- Скопления галактик в пространстве образуют ***крупномасштабную*** ячеистую ***структуру***. Между скоплениями (0D), “струнами” (1D) и стенами (2D) галактик находятся огромные пустоты
- Ячейки нерегулярны, поскольку они образовались в результате случайных процессов

Крупномасштабная структура



Наблюдаемая крупномасштабная структура галактик. Расстояние оценено по закону Хаббла.

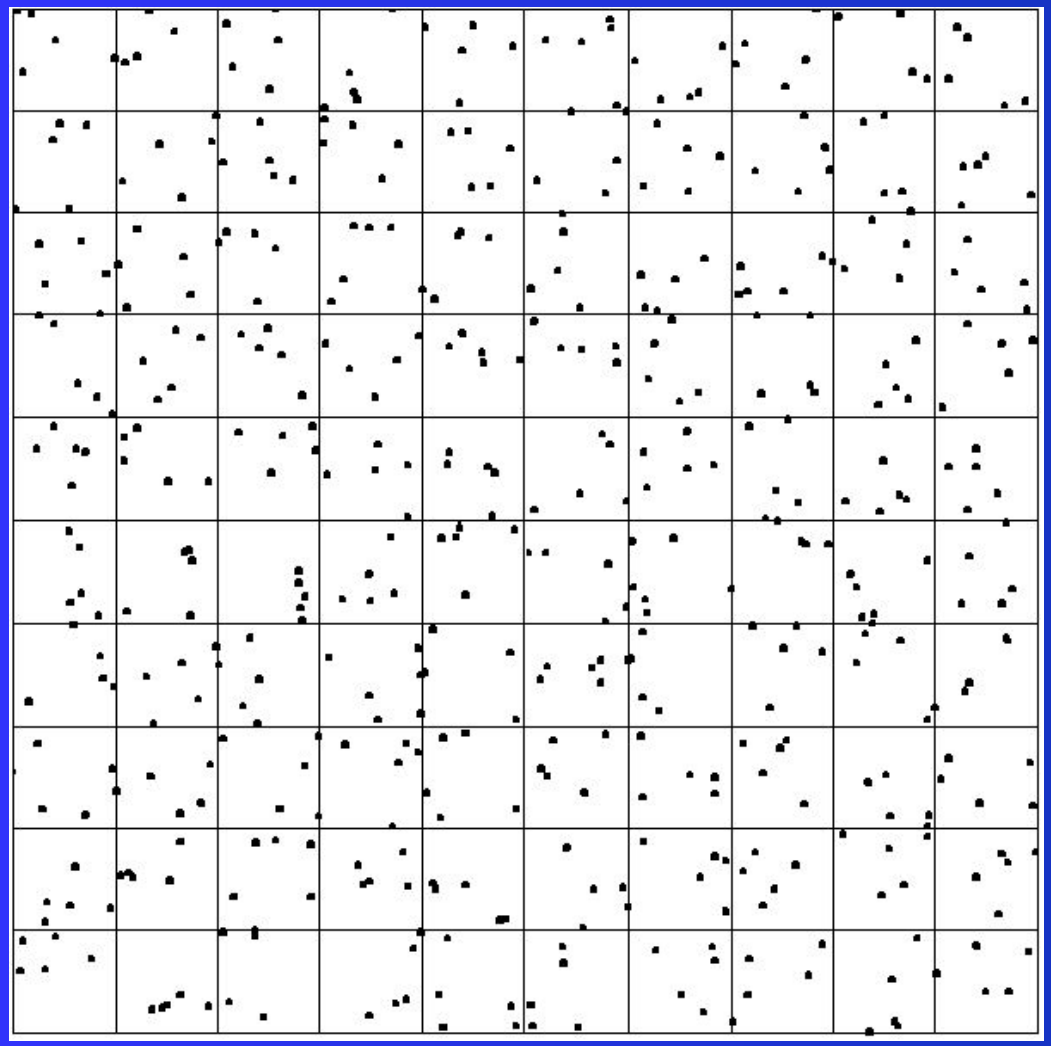


Картина крупномасштабной структуры, полученная из космологических компьютерных симуляций

Крупномасштабная структура

- ***Наши наблюдения***:
  - Проводя наблюдения в разных направлениях, мы видим примерно одну и ту же картину
  - Похожи как крупномасштабная структура, так и свойства реликтового излучения.
- ***Наши выводы***:
  - **Вселенная изотропна** *(в больших масштабах)*
  - **Вселенная однородна** *(в больших масштабах)*

Крупномасштабная структура



Вселенная обнородна в больших масштабах, но неоднородна в малых

Космологический принцип

- ***Для всех наблюдателей Вселенная выглядит одинаково, независимо от их места наблюдения***, или
- ***Мы не находимся в особом месте Вселенной***

(Эдвард Артур Милн, 1935)

Этот ***космологический принцип*** является главной аксиомой физической космологии

Тёмная материя

- С разных сторон нам приходят указания о том, что существует какая-то невидимая нам материя:
  - Кривые вращения спиральных галактик
  - Разброс скоростей галактик в скоплениях
  - Высокая температура межгалактического газа
- Впервые эта проблема была замечена еще в 1933 году (Фриц Цвики), однако до конца она не решена до сих пор

Тёмная материя

Возможные формы существования

1. ***MACHO*** (*Massive Astrophysical Compact Halo Objects*) – массивные несветящиеся тела
   - ***Черные дыры*** массой от 1 до 1000 $M_{Солнца}$
   - ***Коричневые и черные карлики*** – очень слабосветящиеся звёзды

Однако по данным наблюдений их слишком мало для того, чтобы составлять значительную часть тёмной метерии

Тёмная материя

Возможные формы существования

2. Неизвестные элементарные частицы

- ***Реликтовые нейтрино*** – слишком маленькая масса
- ***WIMP*** (*Weakly Interacting Massive Particle*) – очень массивные неизвестные частицы. К примеру, нейтралино – самая легкая супер-симметричная частица
- ***Аксионы*** – легкие неизвестные частицы, необходимые в теории поля

1 лекция
Внегалактическая астрономия

- Исторический обзор
- Классификация галактик
- Активные галактики
- Скопления галактик и крупномасштабная структура
- **Шкала расстояний**

Шкала расстояний

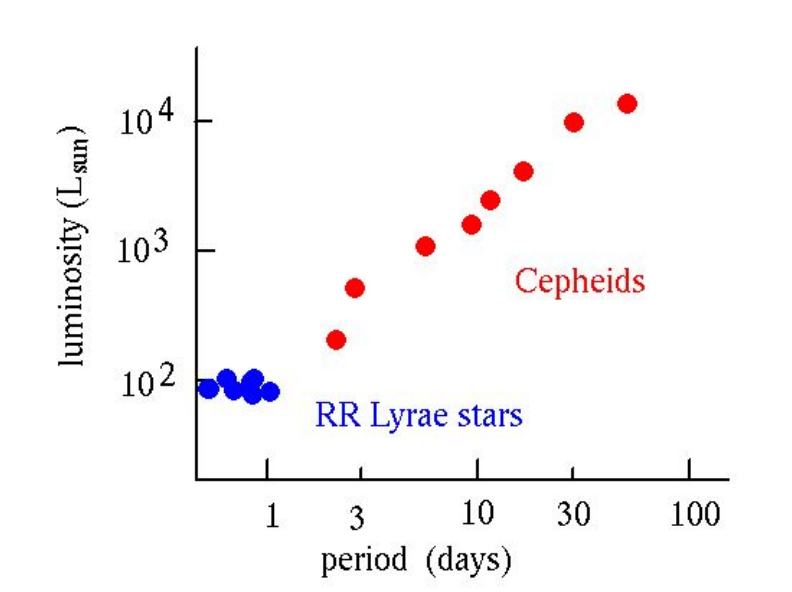
- Как определяют расстояния в космологии?
  - До близких галактик – по цефеидам
  - До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера
  - До далеких галактик – по сверхновым
  - До скоплений галактик – по закону Хаббла

Шкала расстояний

- Как определяют расстояния в космологии?
  - **До близких галактик – по цефеидам**
  - До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера
  - До далеких галактик – по сверхновым
  - До скоплений галактик – по закону Хаббла

Шкала расстояний

- Для цефеид (класса переменных звезд - сверхгигантов) эмпирически найдено соотношение между абсолютной яркостью и периодом переменности



Шкала расстояний

- Как определяют расстояния в космологии?
  - До близких галактик – по цефеидам
  - **До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера**
  - До далеких галактик – по сверхновым
  - До скоплений галактик – по закону Хаббла

Шкала расстояний

- Цефеиды можно различить в близких галактиках
- По ним градуируют ***соотношение Талли-Фишера*** (1977 г.) для спиральных галактик, связывающее их яркость со скоростью вращения

$$M_B = -7.48\,(\log W_R - 2.50) - 19.55$$

- Скорость вращения характеризуют шириной линии водорода 21 см (из-за эффекта Допплера)
- Причина – иассивные галактики вращаются быстрее

Шкала расстояний

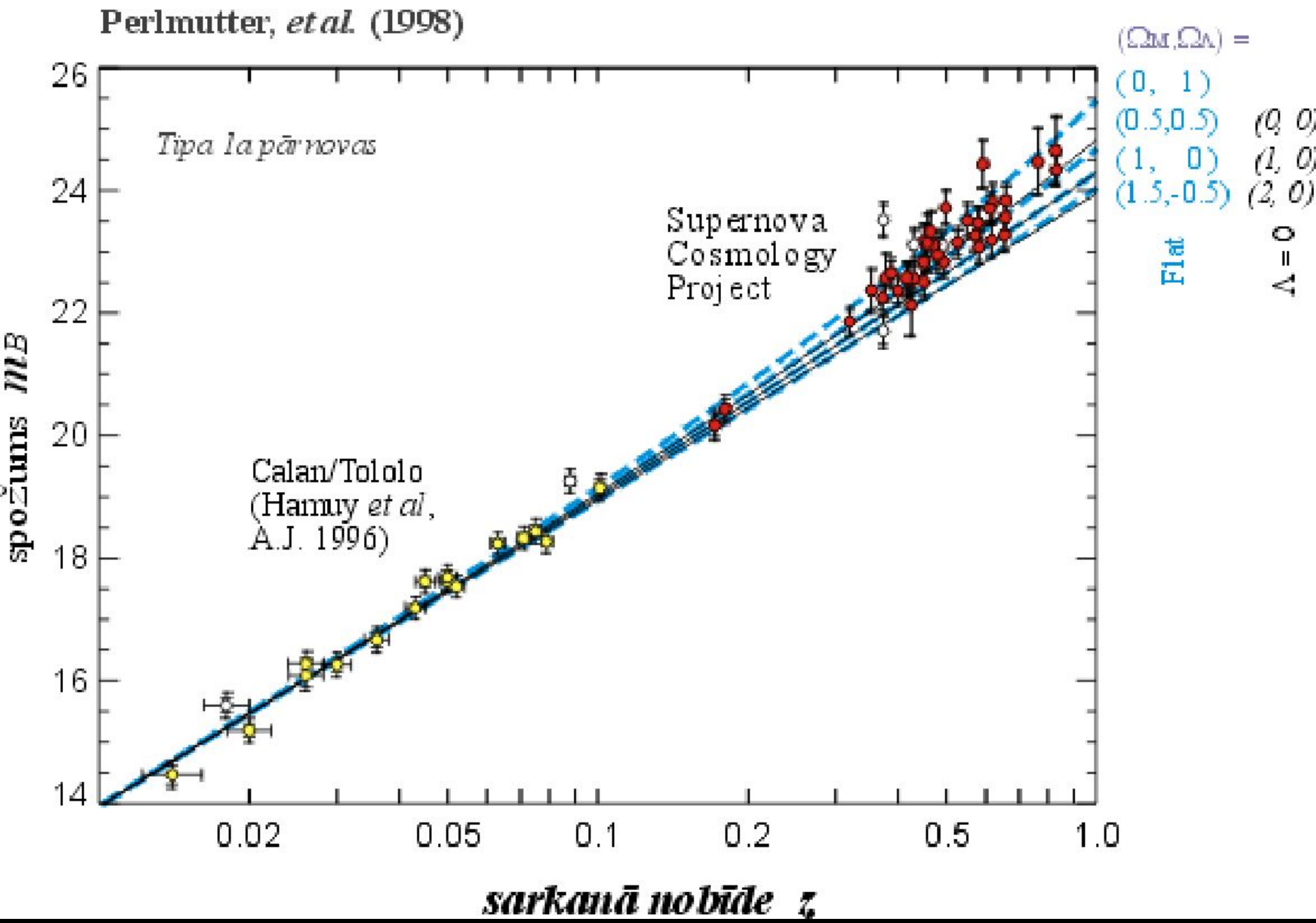
- Для эллиптических галактик существует похожее ***соотношение Фабера-Джексона*** между абсолютной яркостью и ширинами линий поглощения, переведёнными в км/с по фомуле эффекта Допплера
- Обе зависимости эмпирические и статистические (а не функциональные)

Шкала расстояний

- Как определяют расстояния в космологии?
  - До близких галактик – по цефеидам
  - До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера
  - **До далеких галактик – по сверхновым**
  - До скоплений галактик – по закону Хаббла

Шкала расстояний

- Оказывается, что у сверхновых типа 1а абсолютная яркость в максимуме интенсивности почти постоянна. Наблюдая изменение звездной величины сверхновой во времени, находят максимум и из видимого блеска – расстояние
- Конечно, остается неясным, была ли у древних сверхновых такая же яркость, как у недавних.
- Предположим, что эффектов эволюции нет


Perlmutter, et al. (1998)
Tipa Ia pārnovas
Supernova Cosmology Project
Calan/Tololo (Hamuy et al, A.J. 1996)
spožums mB
sarkanā nobīde z
(ΩM,ΩΛ) =
(0, 1)
(0.5,0.5)
(1, 0)
(1.5,-0.5)
(0, 0)
(1, 0)
(2, 0)
Flat
Λ = 0
26
24
22
20
18
16
14
0.02
0.05
0.1
0.2
0.5
1.0

Шкала расстояний

- Как определяют расстояния в космологии?
  - До близких галактик – по цефеидам
  - До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера
  - До далеких галактик – по сверхновым
  - **До скоплений галактик – по закону Хаббла**

Закон Хаббла

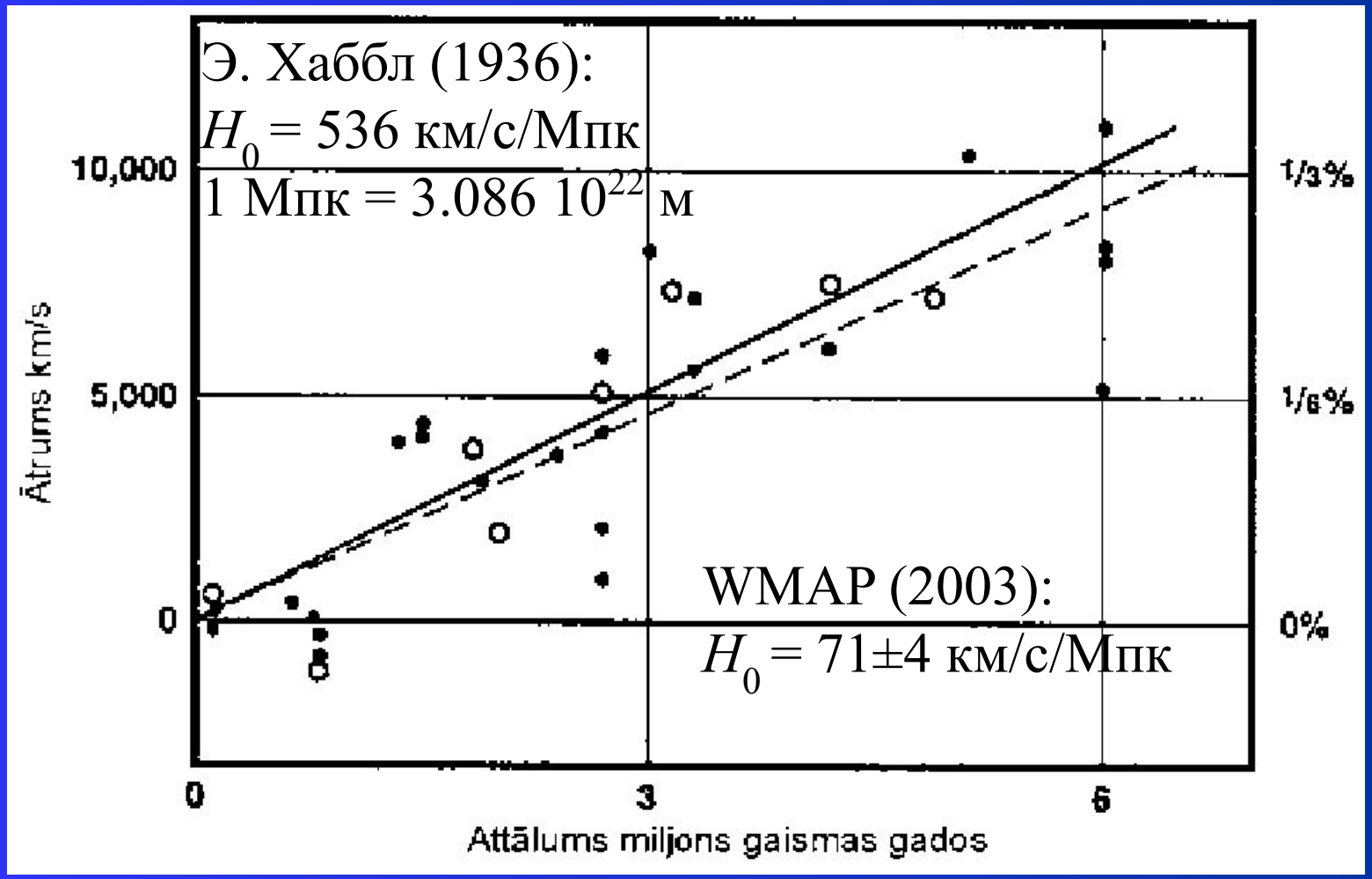
- С 1912 по 1925 год В.М. Слайфер измерил сдиги длин волн в спектрах более 20 объектов, позднее классифицированных как галактики
- Он был удивлён тем, что почти у всех этих объектов сдвиги длин волн были в красную сторону

В.М. Слайфер

Закон Хаббла

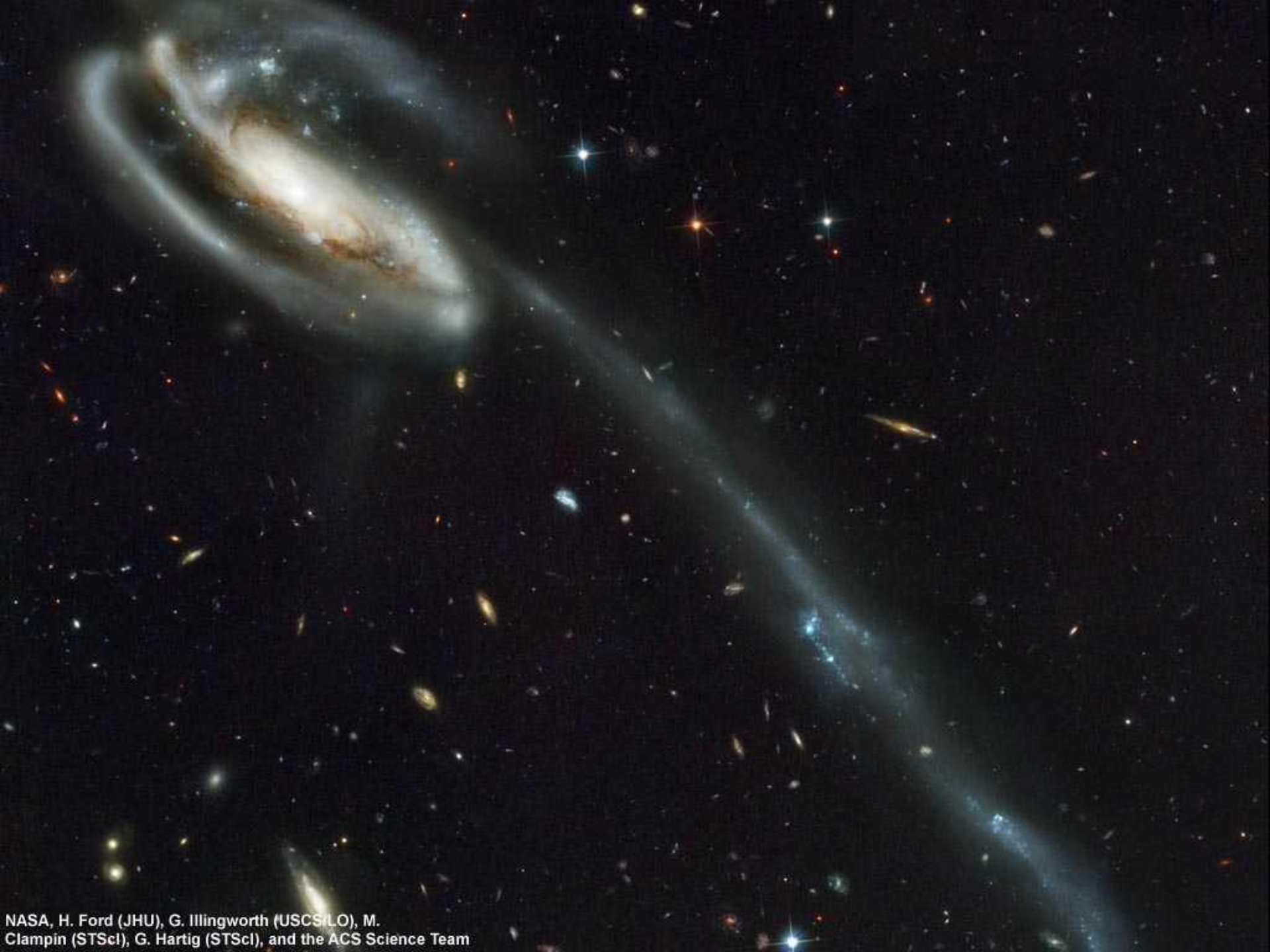
- Позже Эдвин Хаббл и Мильтон Хьюмасон пронаблюдали много больше галактик
- Они обнаружили линейную зависимость этого красного смещения от яркости галактик
- Предполагая, что все галактики одинаковой яркости, это зависимость от расстояния до галактики

Закон Хаббла



Закон Хаббла

- В отличие от предыдущих методик определения расстояния, из сказанного не ясна физическая причина этого ***закона Хаббла***
- Однако именно он является одним из основ физической космологии
- Поэтому рассмотрим его подробнее... на следующей лекции



NASA, H. Ford (JHU), G. Illingworth (USCS/LO), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), and the ACS Science Team