

# 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 же 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	$10^{-13} - 10^4$	$10^4 - 10^{19}$	$10^{-35} - 10^{26}$
Температура, 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.

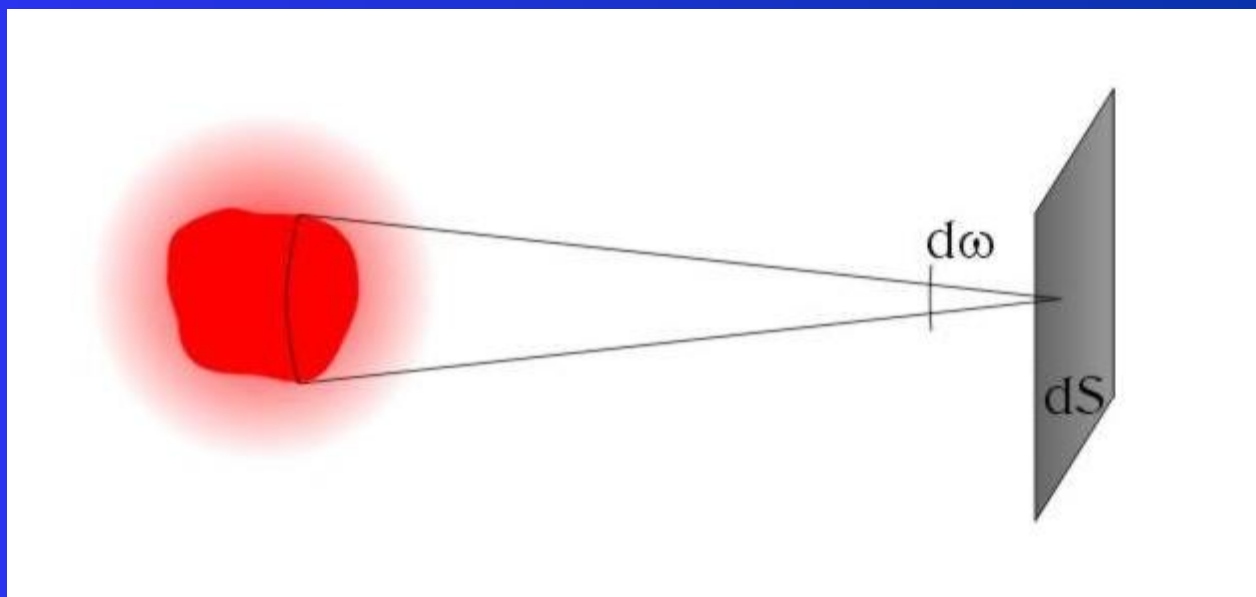


# Парадокс Ольберса

- 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  $\Phi$  на единицу поверхности  $dS$  с единицы пространственного угла  $d\omega$ .



# Парадокс Ольберса

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

- 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**

**дом!**

# 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

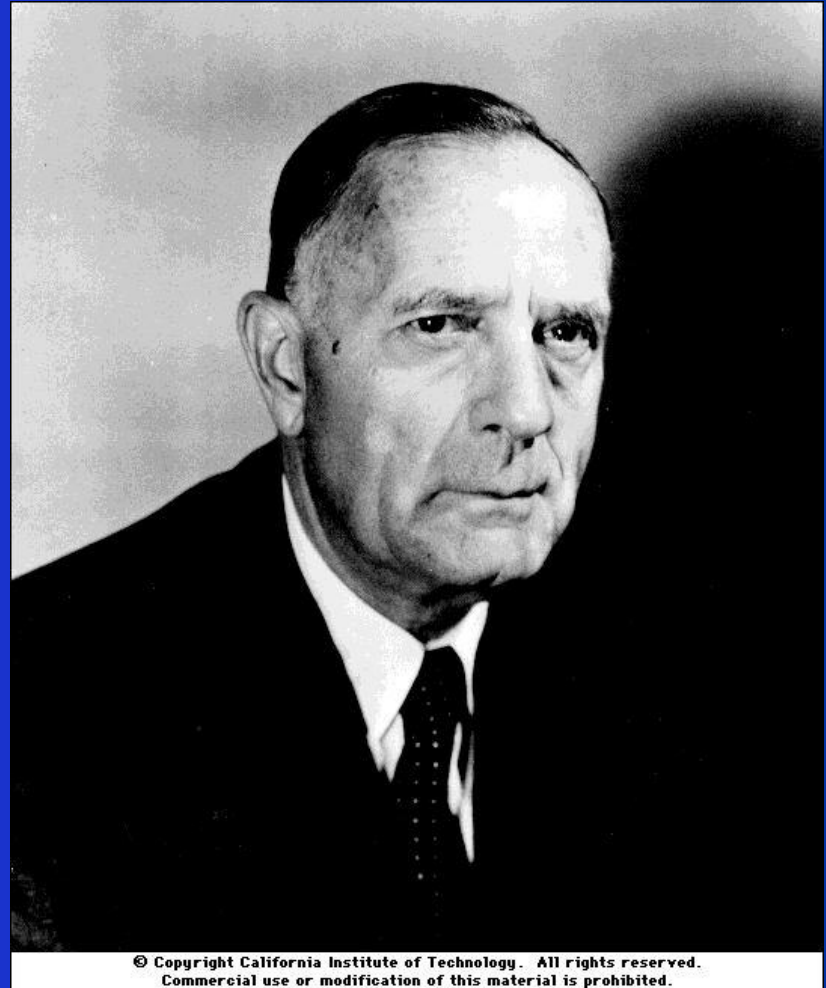
# Галактики и Вселенная

- 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 помощью 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 подтвердить эту гипотезу

# Галактики и Вселенная

Эдвин Хаббл  
(1889 – 1953)

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



© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved.  
Commercial use or modification of this material is prohibited.

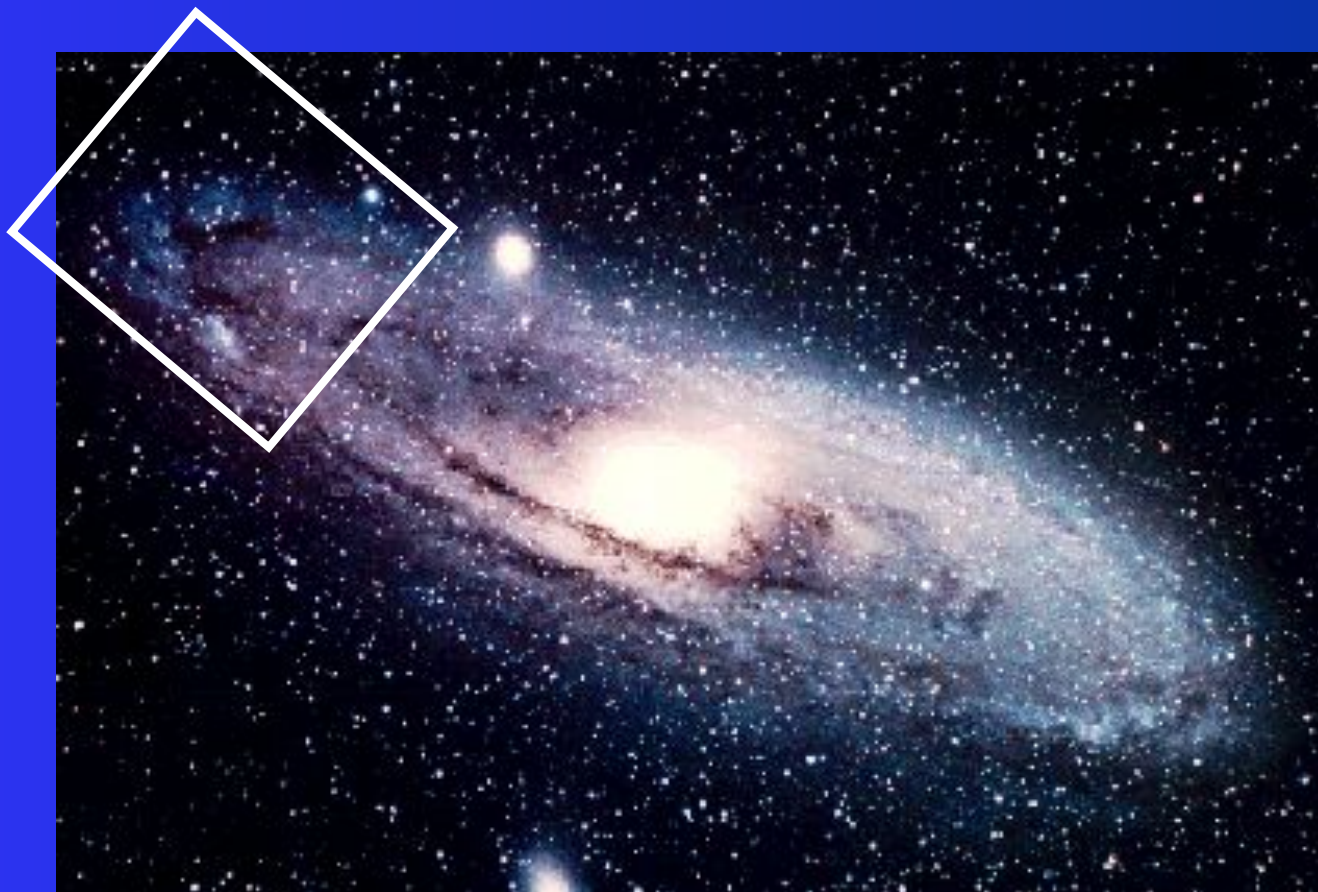
# Туманность Андромеды

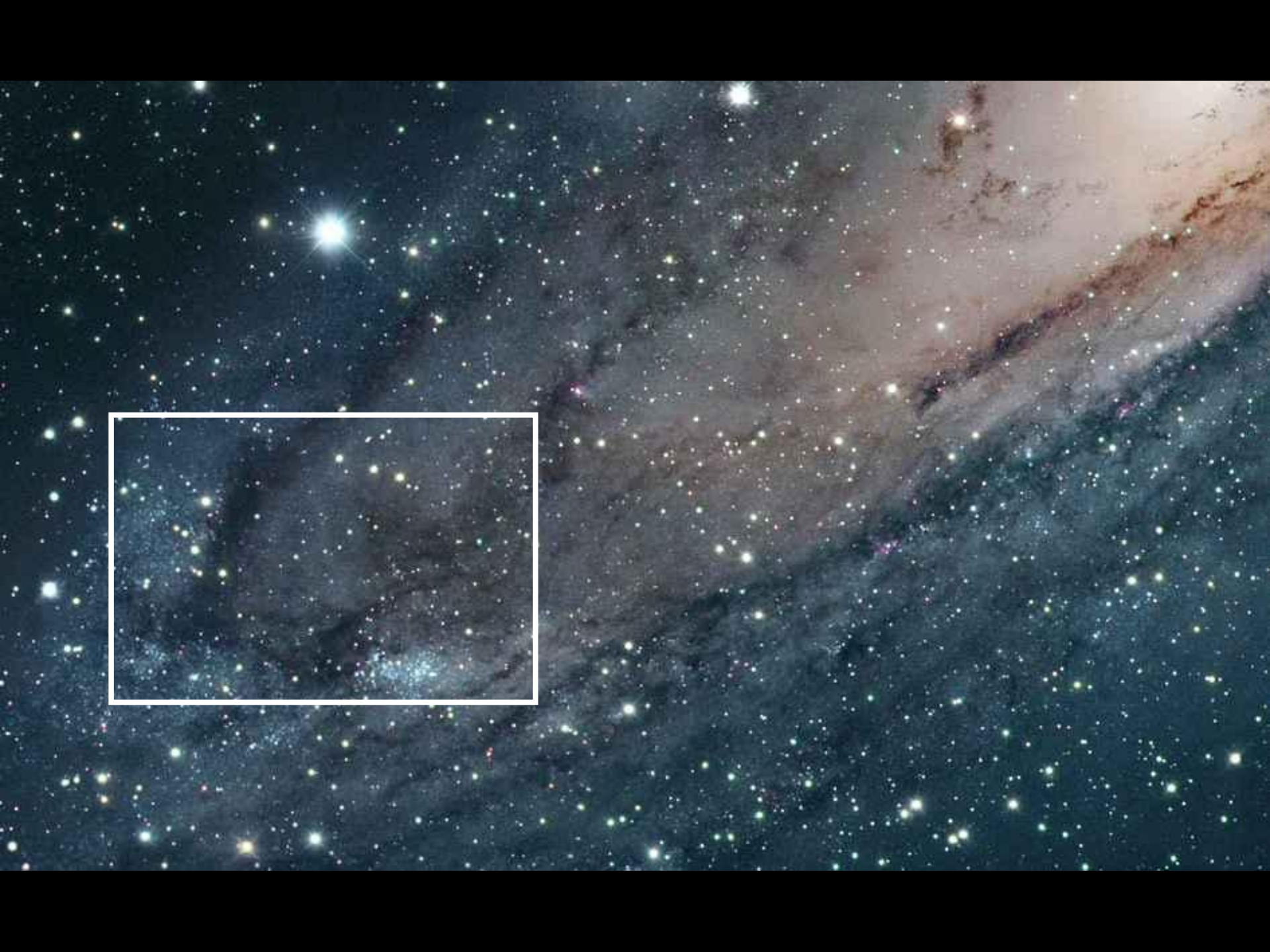
24 августа 1925 года Э. Хаббл наблюдал туманность Андромеды на 100-дюймовом телескопе обсерватории Маунт-Вильсон (США).

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

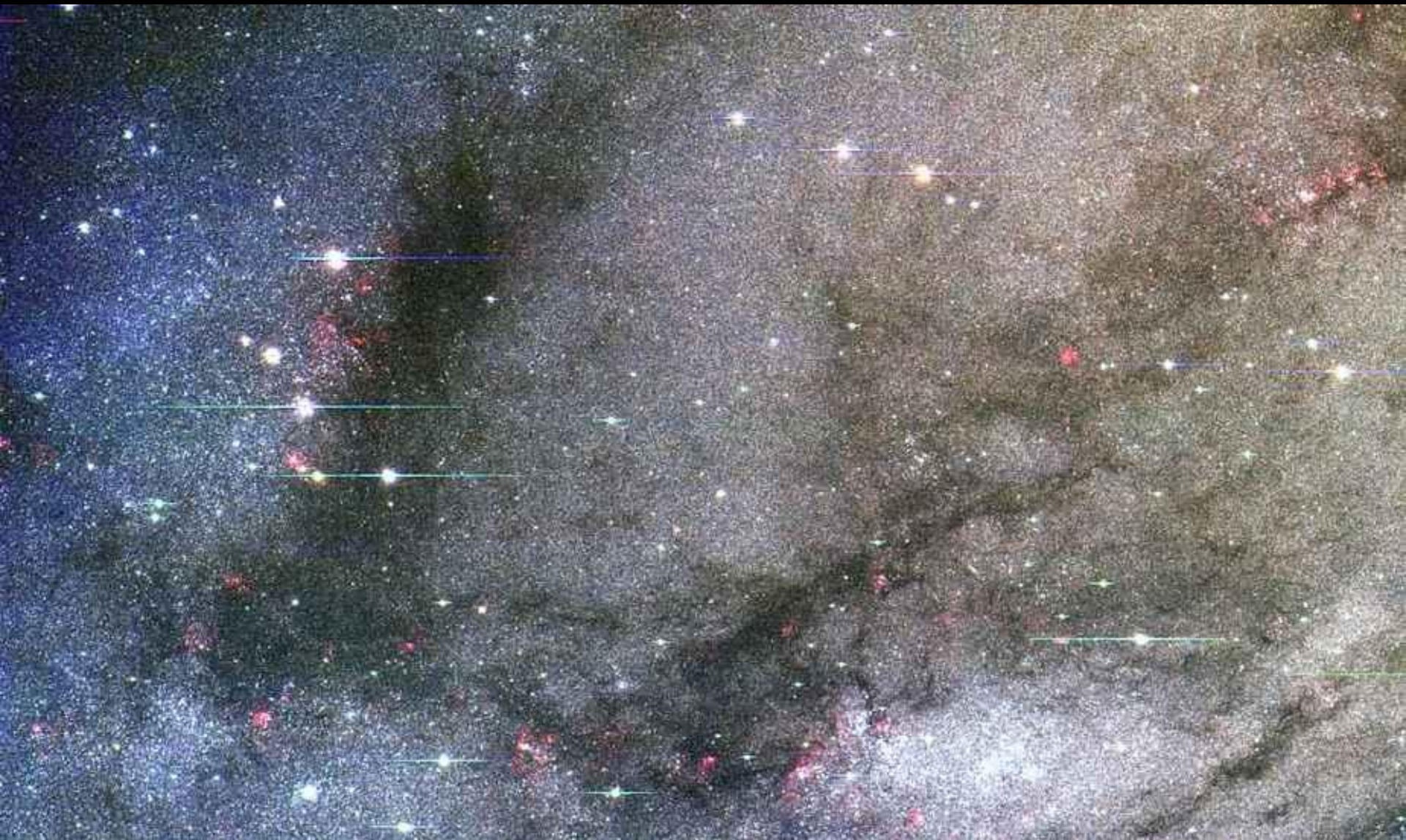


# Туманность Андромеды









# 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 вытянутости  $10(a - b) / a$  (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

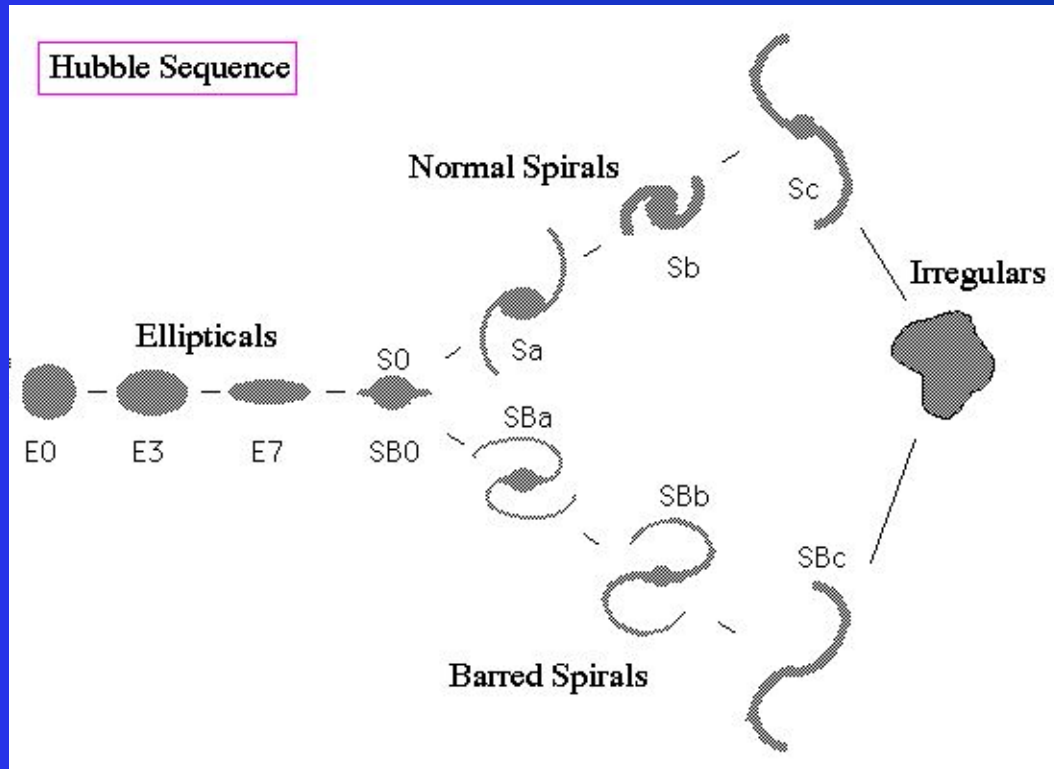


Диаграмма галактик Хаббла

# Мир галактик



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



# Мир галактик



**M104**

**S0** – Линзообразные галактики

**M86**

# Мир галактик



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

# Мир галактик



**SBb (NGC1300)**

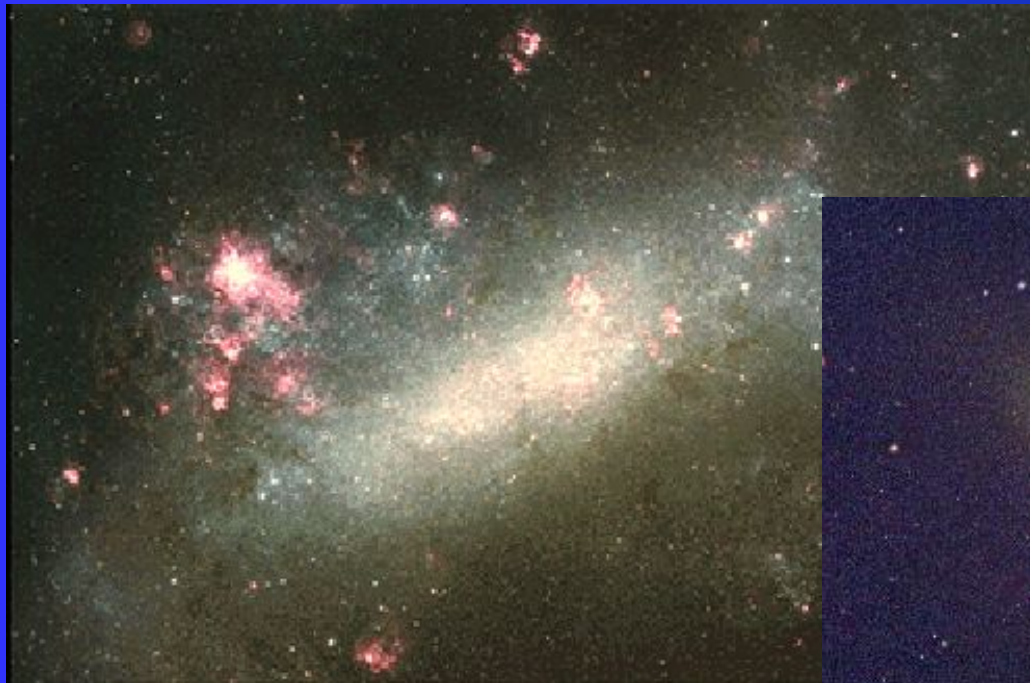


**SBa (NGC2523)**

Пересеченные  
спиральные галактики



# Мир галактик



**Irr1 (LMC)**

**Irr2 (M82)**



Неправильные галактики

# Мир галактик

Тип	Эллиптические	Спиральные	Неправильные
Центральное ядро	Только ядро	Sa – большое, Sc – маленькое	Нет
Спиральные ветви	Нет	Sa – плотные, гладкие, Sc – открытые, клочковатые	У некоторых – остатки
Часть массы газа	Почти нет	Sa – около 1%, Sc – около 5 – 10%	10 - 50%

# Мир галактик

Тип	Эллиптические	Спиральные	Неправильные
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 ( $M_{\text{Солнца}}$ )	$10^8 - 10^{13}$	$10^9 - 10^{12}$ Sa – больше	$10^8 - 10^{11}$
Светимость ( $L_{\text{Солнца}}$ )	$10^6 - 10^{11}$	$10^8 - 10^{11}$ 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 макроскопического вращения – звёзды движутся как по почти радиальным орбитам, так и по круговым.



# Спиральные галактики

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



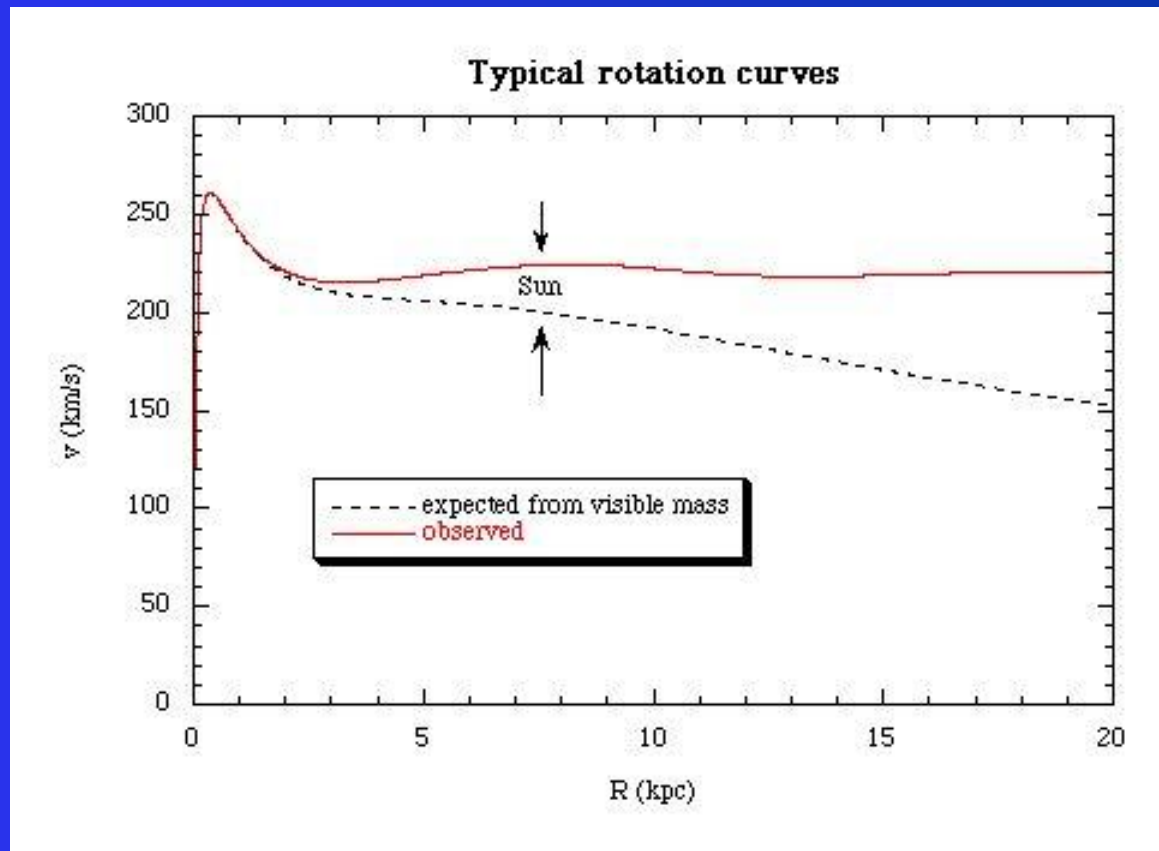
# Спиральные галактики

- *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.

$$V_{\text{зв}} = \sqrt{GM/R_{\text{зв}}},$$

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

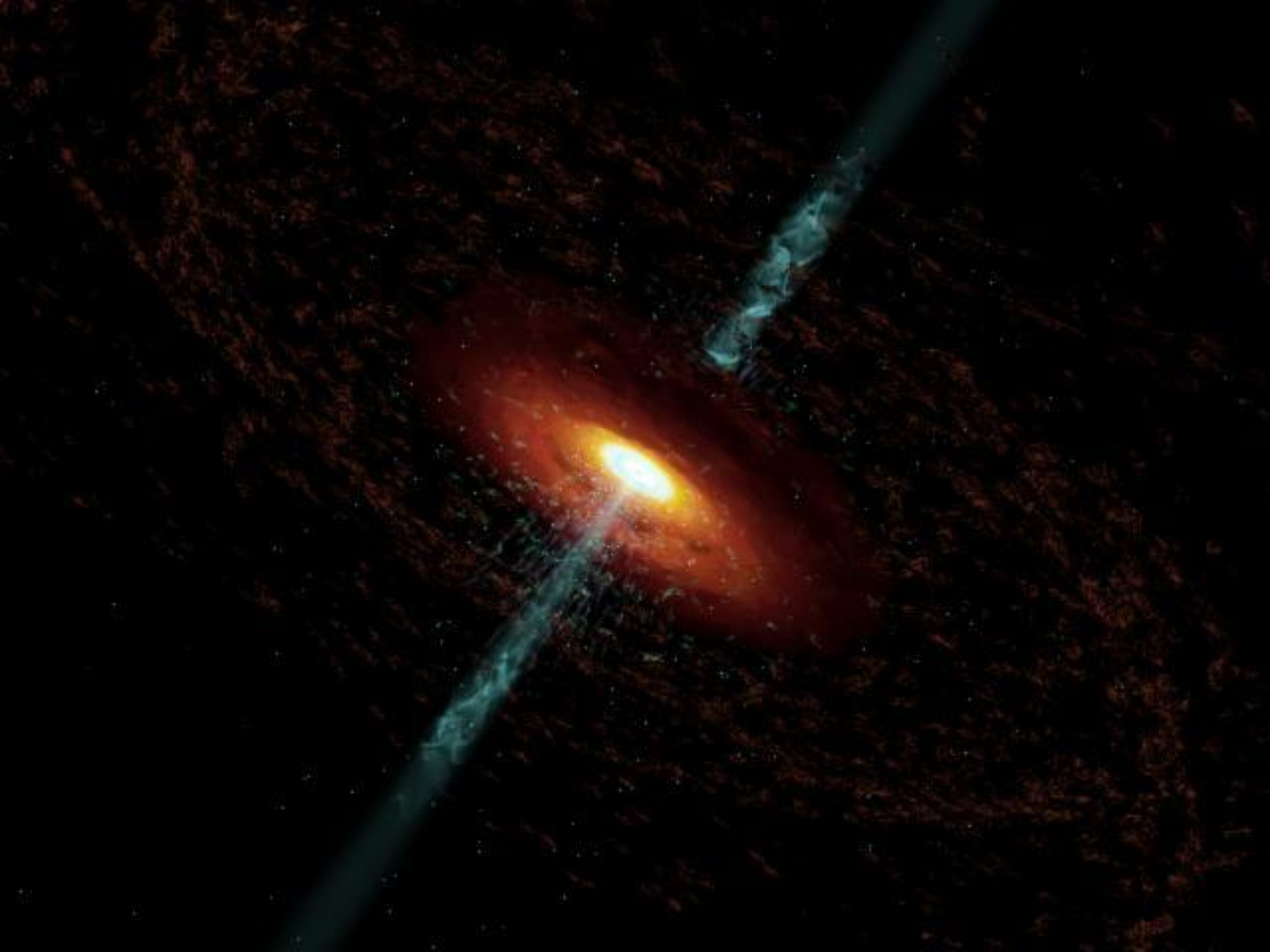
*Активными* называют галактики, в ядрах которых происходят процессы с огромным энерговыделением (составляют 1-2% от всех).

- Радиогалактики
- Сейфертовские галактики
- Квазары
- Блазары

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

# АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ

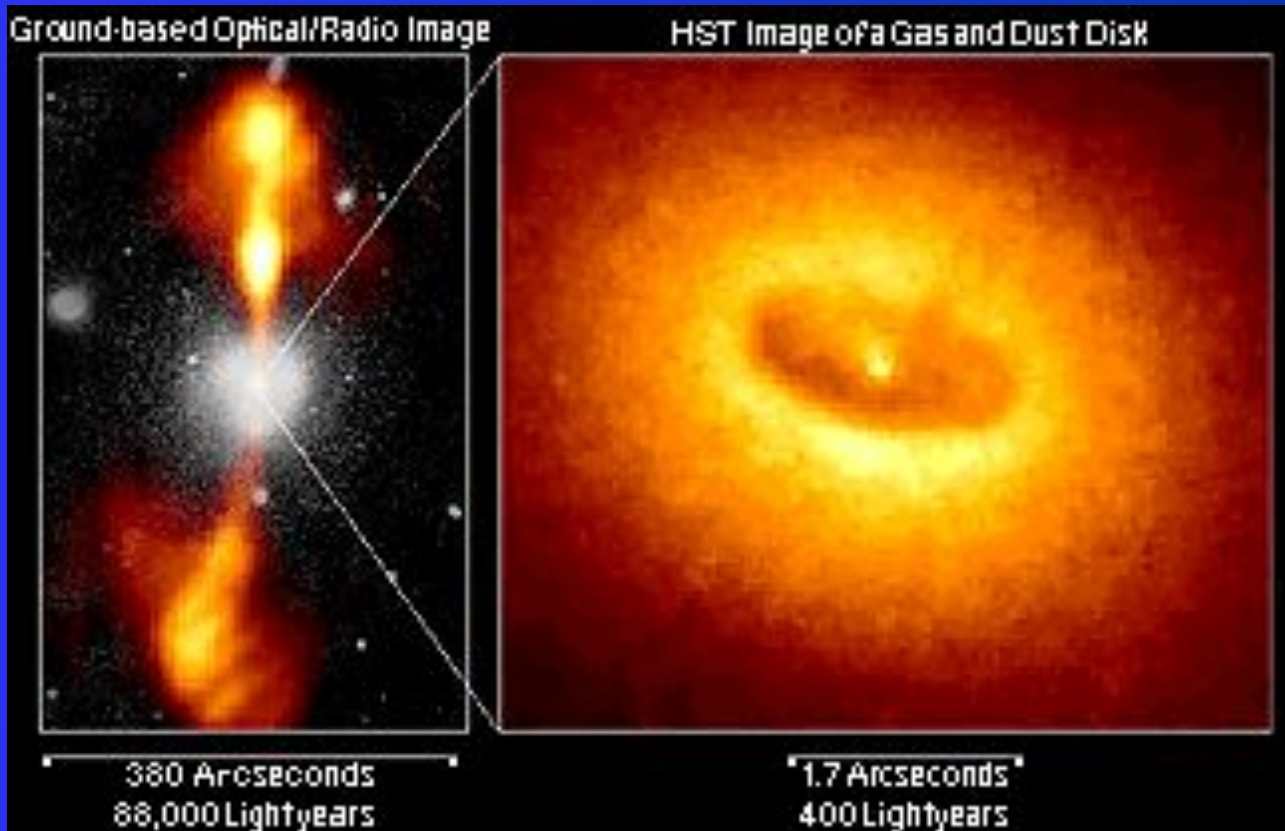
- Причина активности – сверхмассивная черная дыра (ЧД) в ядре галактики. Чем моложе галактика, тем больше материи падает в черную дыру, и тем больше активное ядро излучает.
- Итак, мы видим излучение, но не от самой черной дыры, а от той материи, которая почти туда упала.



# АКТИВНЫЕ ГАЛАКТИКИ

- Почему же падающая материя излучает?
  - *Тепловое излучение* – при падении это вещество ускоряется, нагревается (до  $T \sim 10^7 \text{K}$ ), 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



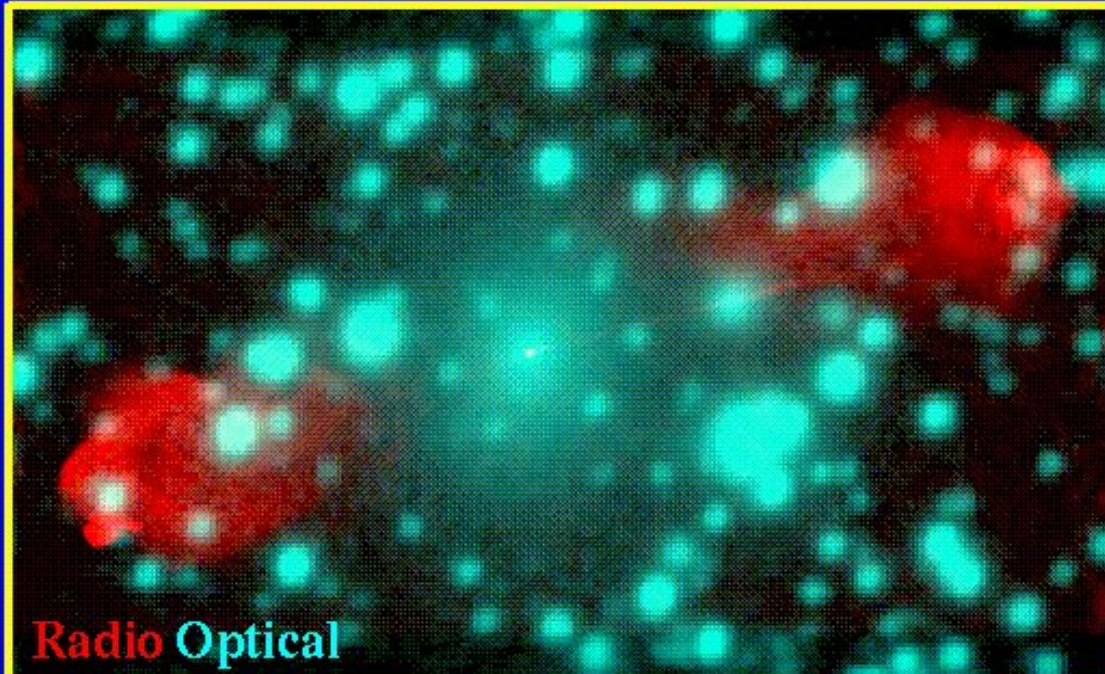
Ядро активной галактики NGC 4261

# Радиогалактики

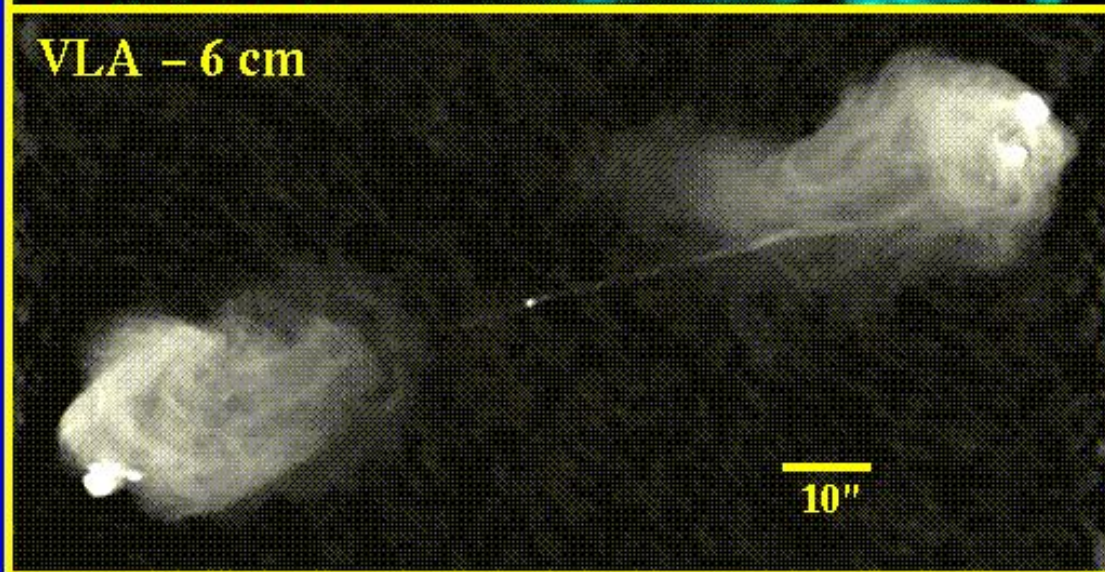
- Мощность излучения радиоволн сравнима с мощностью излучения в оптическом диапазоне ( $10^{35} - 10^{37}$  Дж/с), что нельзя объяснить процессами рождения и смерти звезд.
- Радиоизлучение в основном идет от двух областей, между которых находится сама галактика. У многих видны тонкие струи, идущие из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



# Cygnus A (3C 405)



Radio Optical



VLA - 6 cm

10"



HST closeup

5"

# Радиогалактики

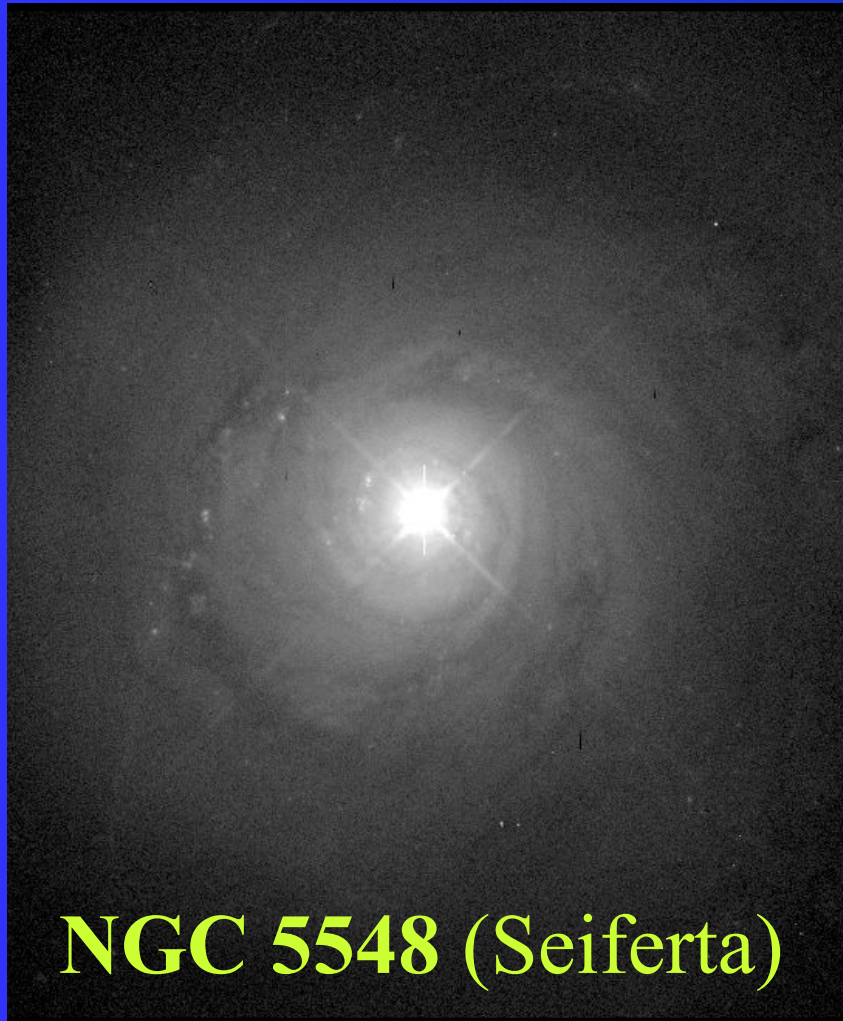
- *Синхротронное радиоизлучение* этих галактик образуется релятивистскими электронами при движении в магнитных полях галактики и межгалактической среды.
- Электроны были ускорены вблизи активного ядра сильным магнитным полем сверхмассивной черной дыры.



# 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



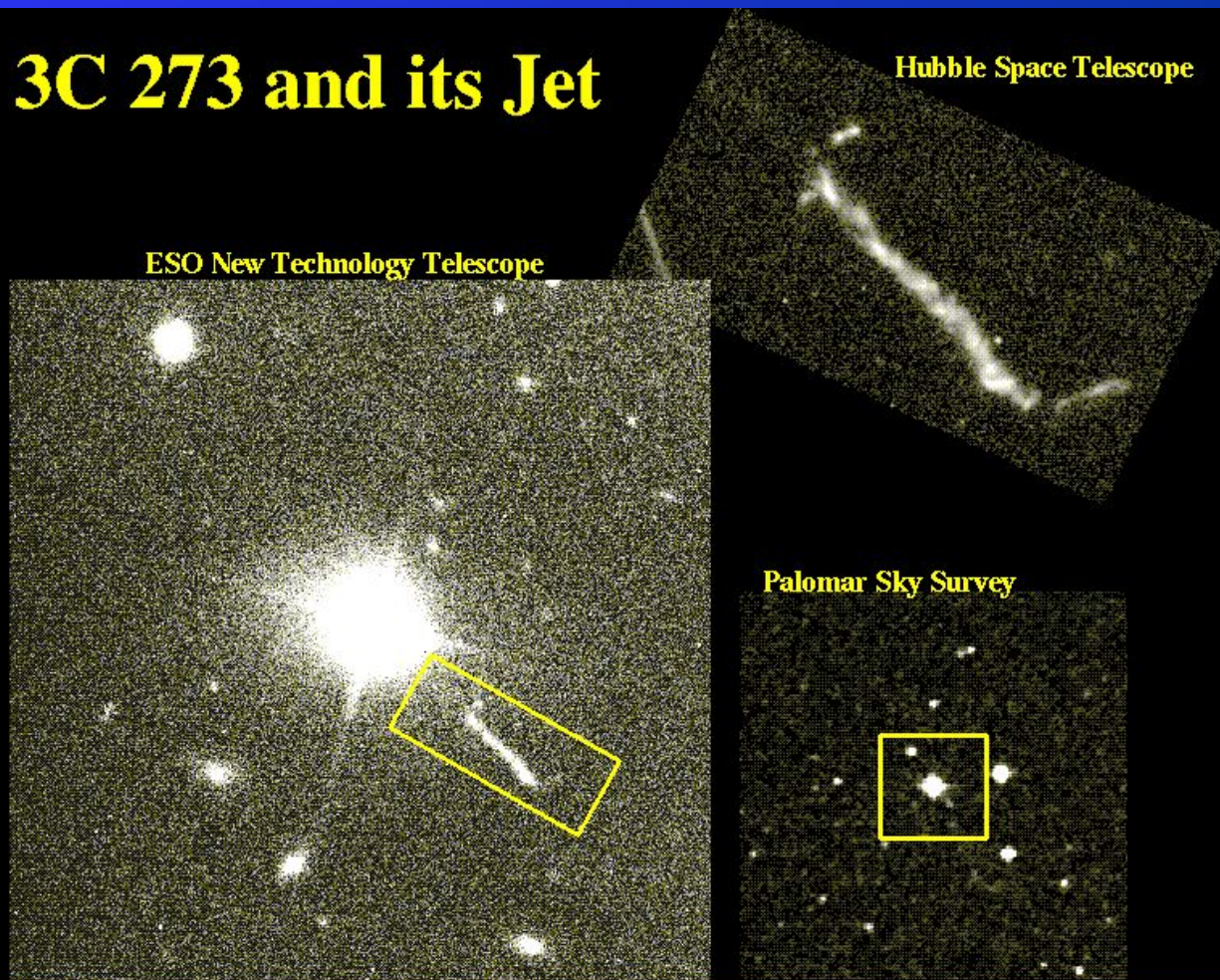
# Квazarы

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



# Квазары

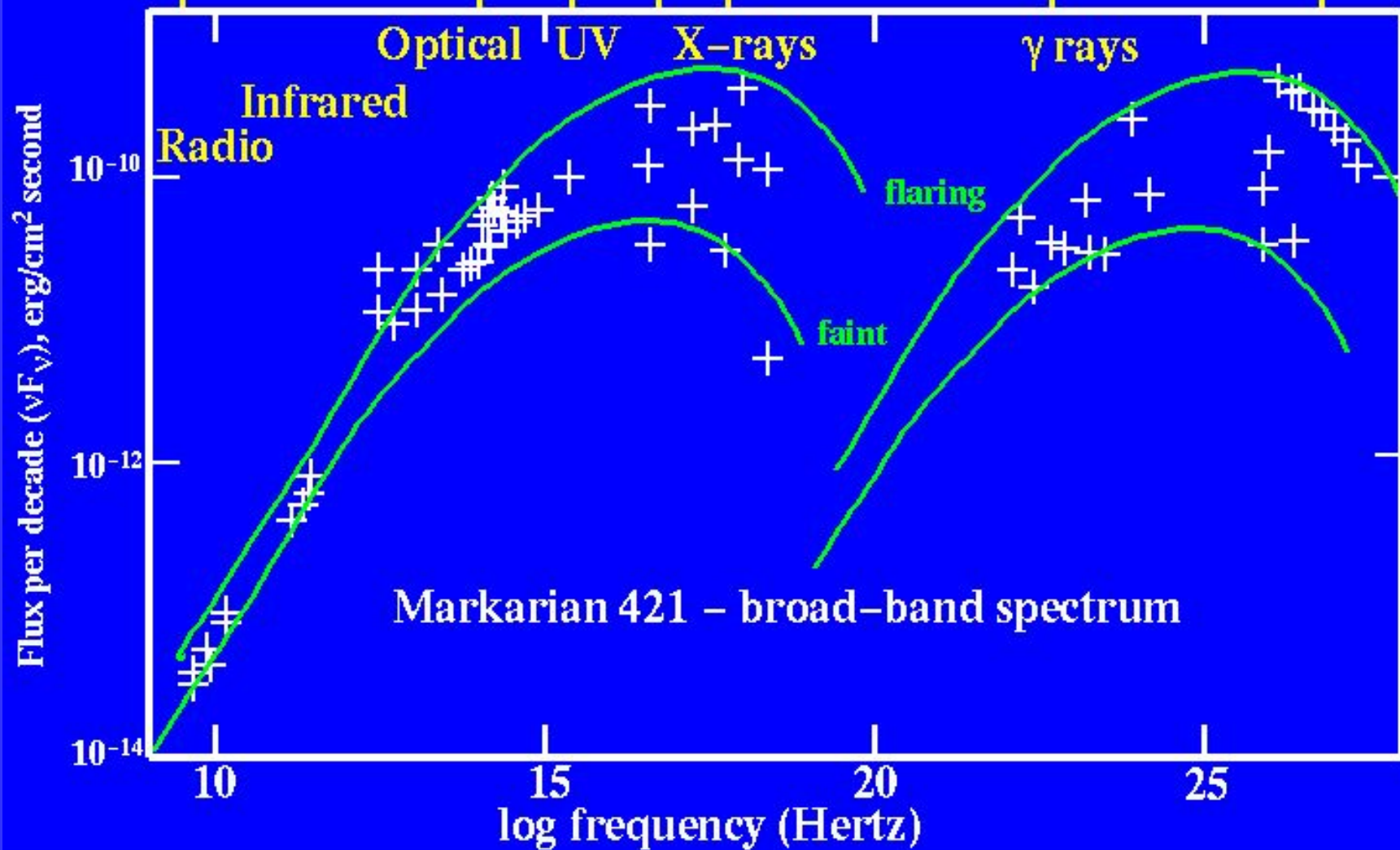
## 3C 273 and its Jet



# Блазары

- Интенсивность 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.





# 1 лекция

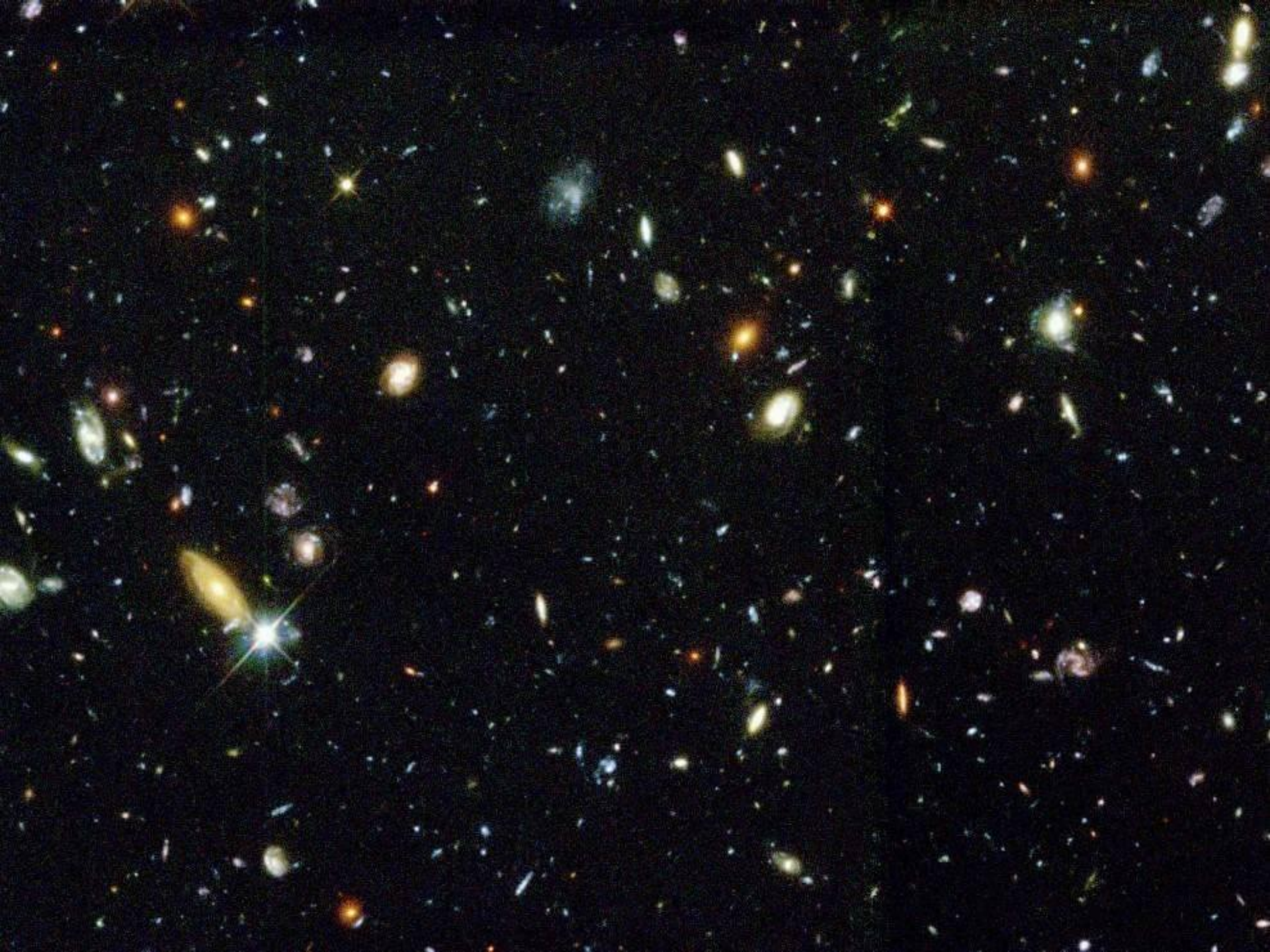
## Внегалактическая астрономия

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

# Скопления галактик и крупномасштабная структура

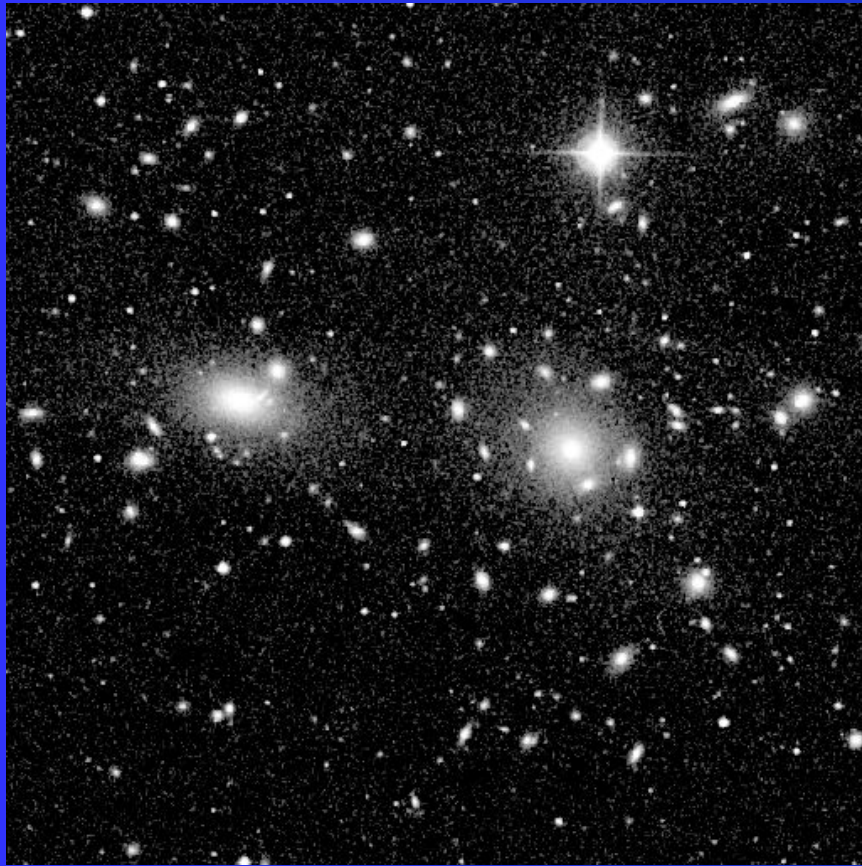
- Скопления галактик - классификация
- Масса скоплений галактик
- Взаимодействие галактик
- Межгалактический газ
- Крупномасштабная структура
- Космологический принцип
- Тёмная материя



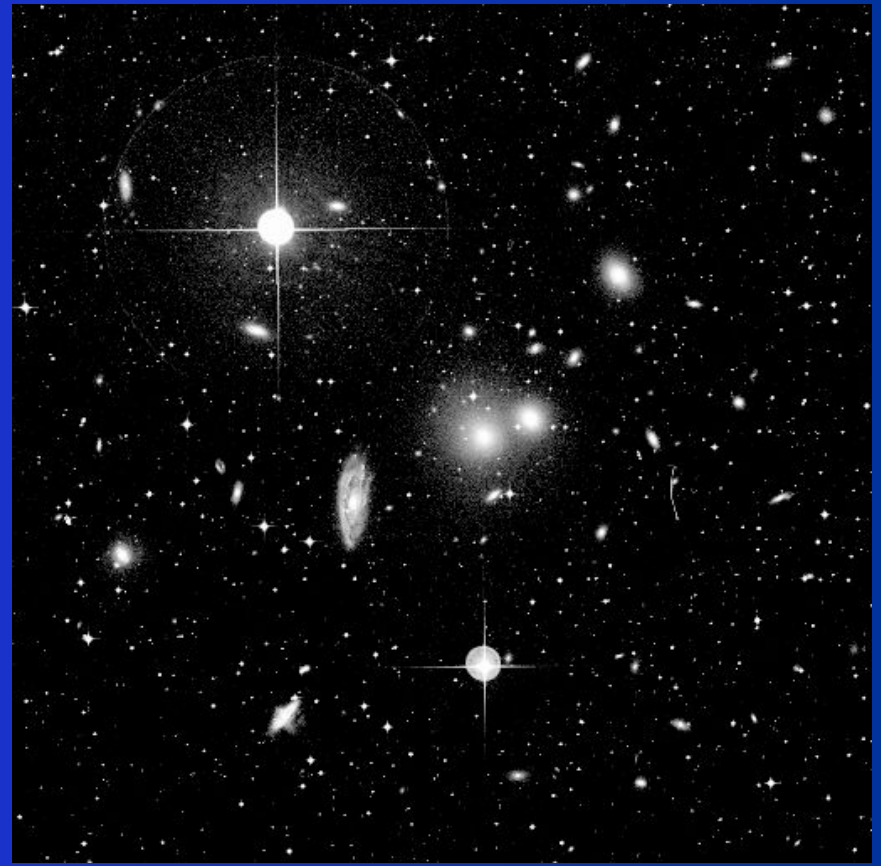




# Скопления галактик

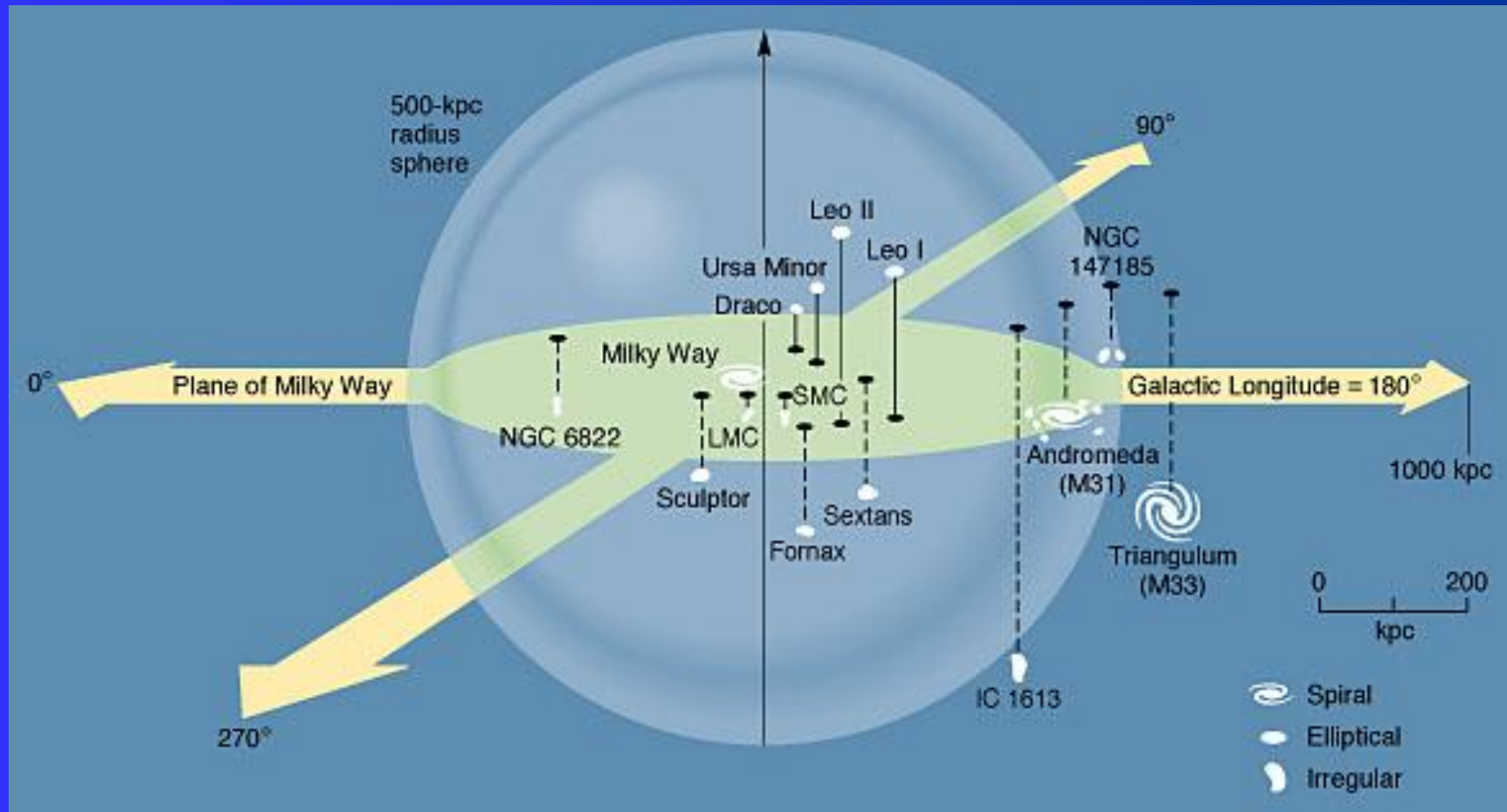


Скопление в созвездии  
Волос Вероники



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 скопления называются *сверхскоплениями галактик*. В наше сверхскопление входит около 20 тысяч галактик.

# Скопления галактик

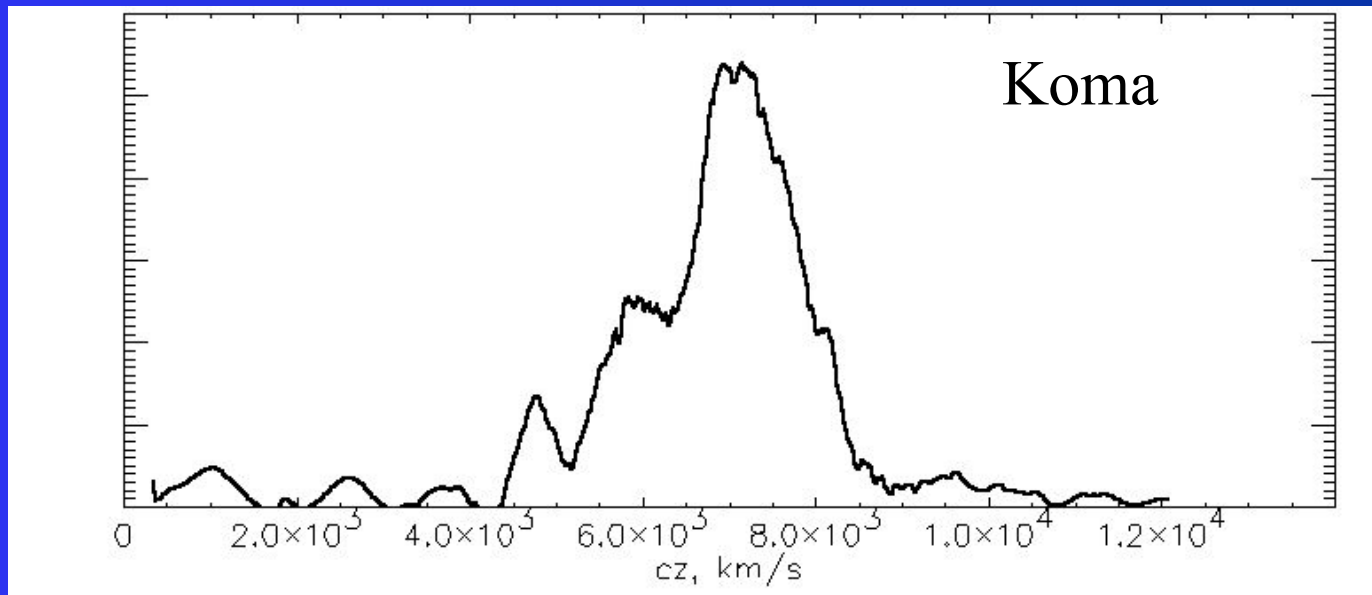
- Причина объединения галактик — *гравитационная неустойчивость*
- При взаимном пртяжении многих тел сама собой образуется «скопление» этих тел
- В основном скопления галактик находятся в *динамическом равновесии* — кинетическая энергия движения отдельных галактик не позволяет скоплению сжаться

Есть исключения!

Как газ!

# Масса скоплений галактик

- По сдвигу спектральных линий отдельных галактик из-за эффекта Доплера 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:

$$U = - 2 T,$$

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

$$U = - G M / R$$

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 галактикам 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 эллиптической 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  $\text{см}^3$

NGC 2300

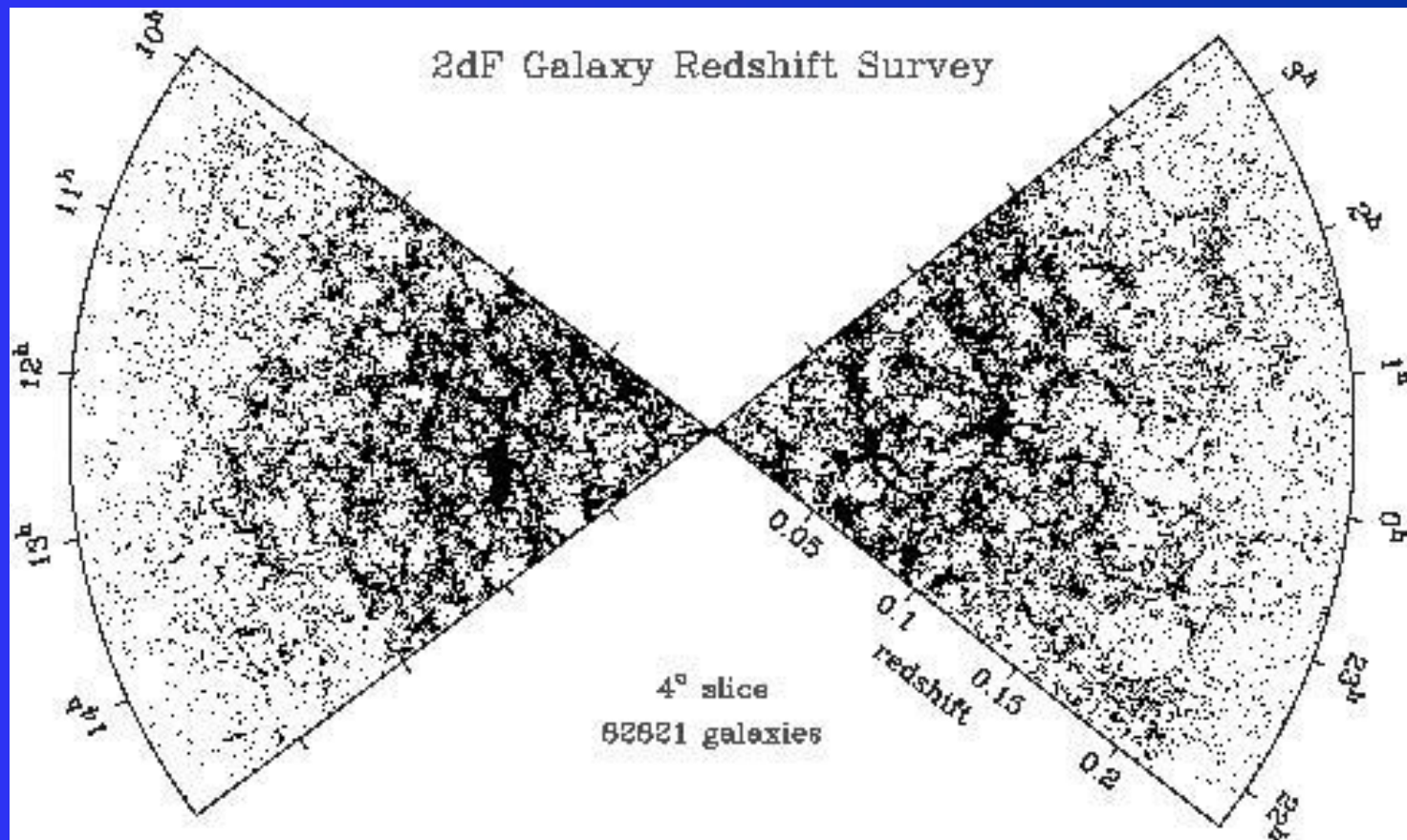
Оптический и рентгеновский снимки скопления

# Крупномасштабная структура

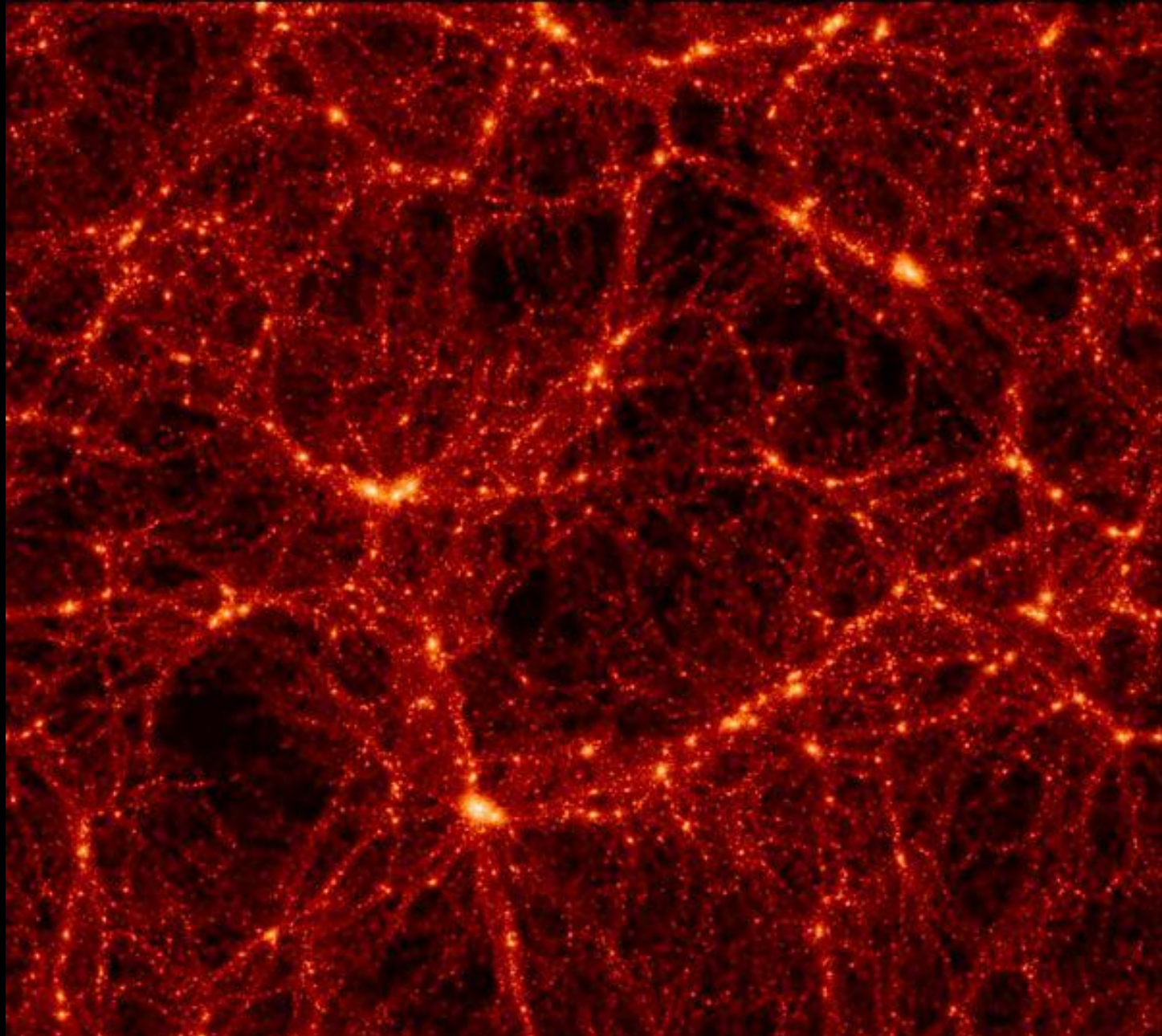
- Скопления галактик в пространстве образуют *крупномасштабную* ячеистую *структуру*. Между скоплениями (0D), “струнами” (1D) и стенами (2D) галактик находятся огромные пустоты
- Ячейки нерегулярны, поскольку они образовались в результате случайных процессов



# Крупномасштабная структура



Наблюдаемая крупномасштабная структура галактик.  
Расстояние оценено по закону Хаббла.



Картина крупномасштабной структуры, полученная из  
космологических компьютерных симуляций

# Крупномасштабная структура

- *Наши наблюдения:*

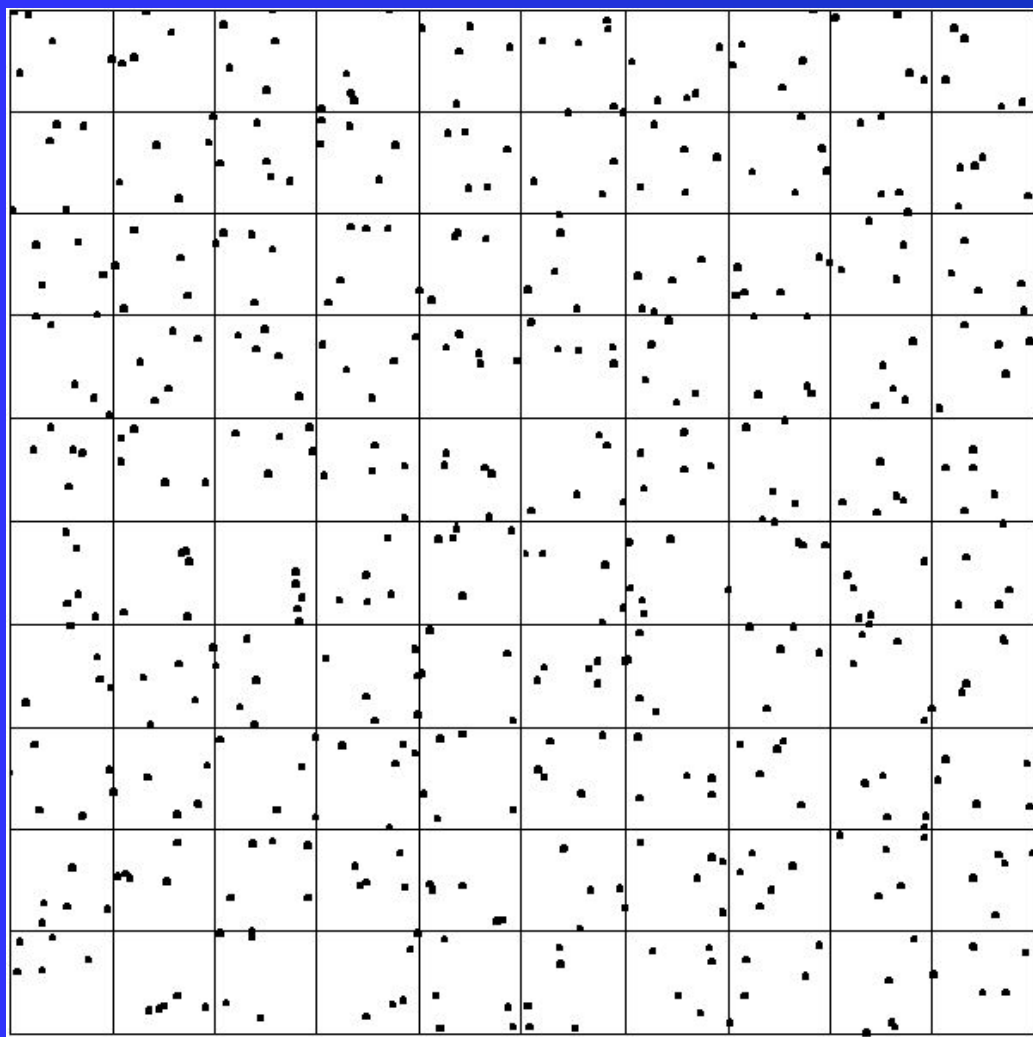
- Проводя наблюдения в разных направлениях, мы видим примерно одну и ту же картину
- Похожи как крупномасштабная структура, так и свойства реликтового излучения.

- *Наши выводы:*

- **Вселенная изотропна** (в больших масштабах)
- **Вселенная однородна** (в больших масштабах)



# Крупномасштабная структура



Вселенная однородна  
в больших масшта-  
бах, 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. МАСНО** (*Massive Astrophysical Compact Halo Objects*) – массивные несветящиеся тела

– *Черные дыры* массой от 1 до 1000  $M_{\text{Солнца}}$

– *Коричневые и черные карлики* – очень слабосветящиеся звёзды

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



# 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 суперсимметричная 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

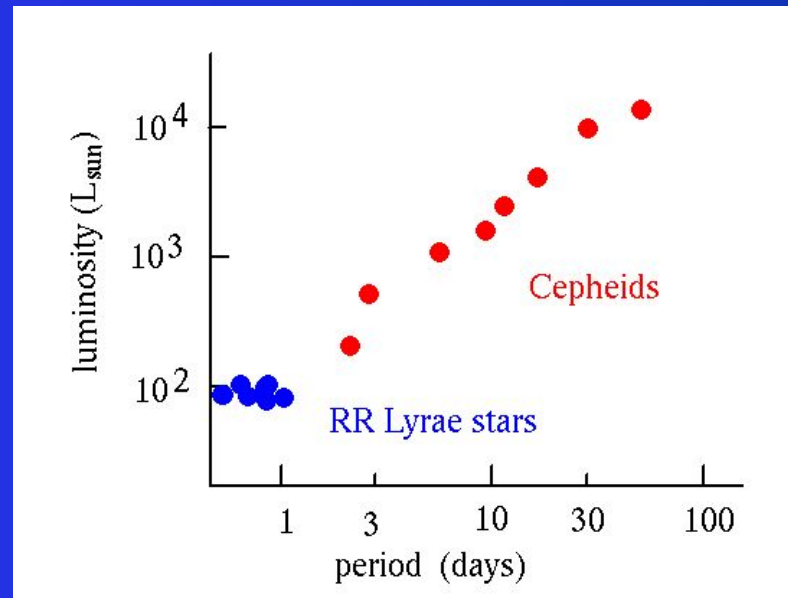
- Как определяют расстояния в космологии?
  - До близких галактик – по цефеидам
  - До далеких галактик – по соотношению Талли-Фишера
  - До далеких галактик – по сверхновым
  - До скоплений галактик – по закону Хаббла

# 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 – массивные 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 формуле эффекта Доплера
- Обе зависимости эмпирические и статистические (а не функциональные)

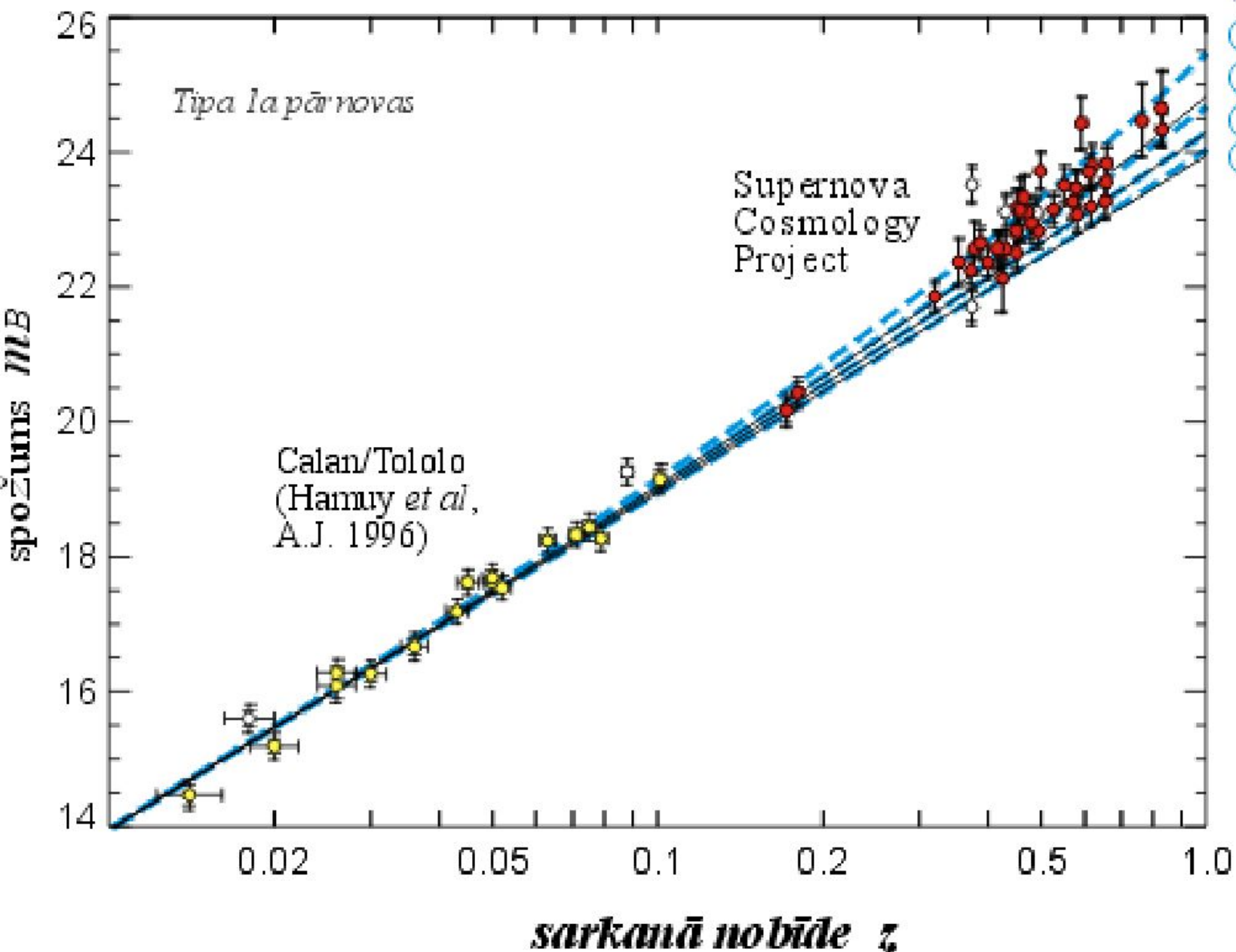
# Шкала расстояний

- 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 Ia 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)



# 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 сдвиги 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

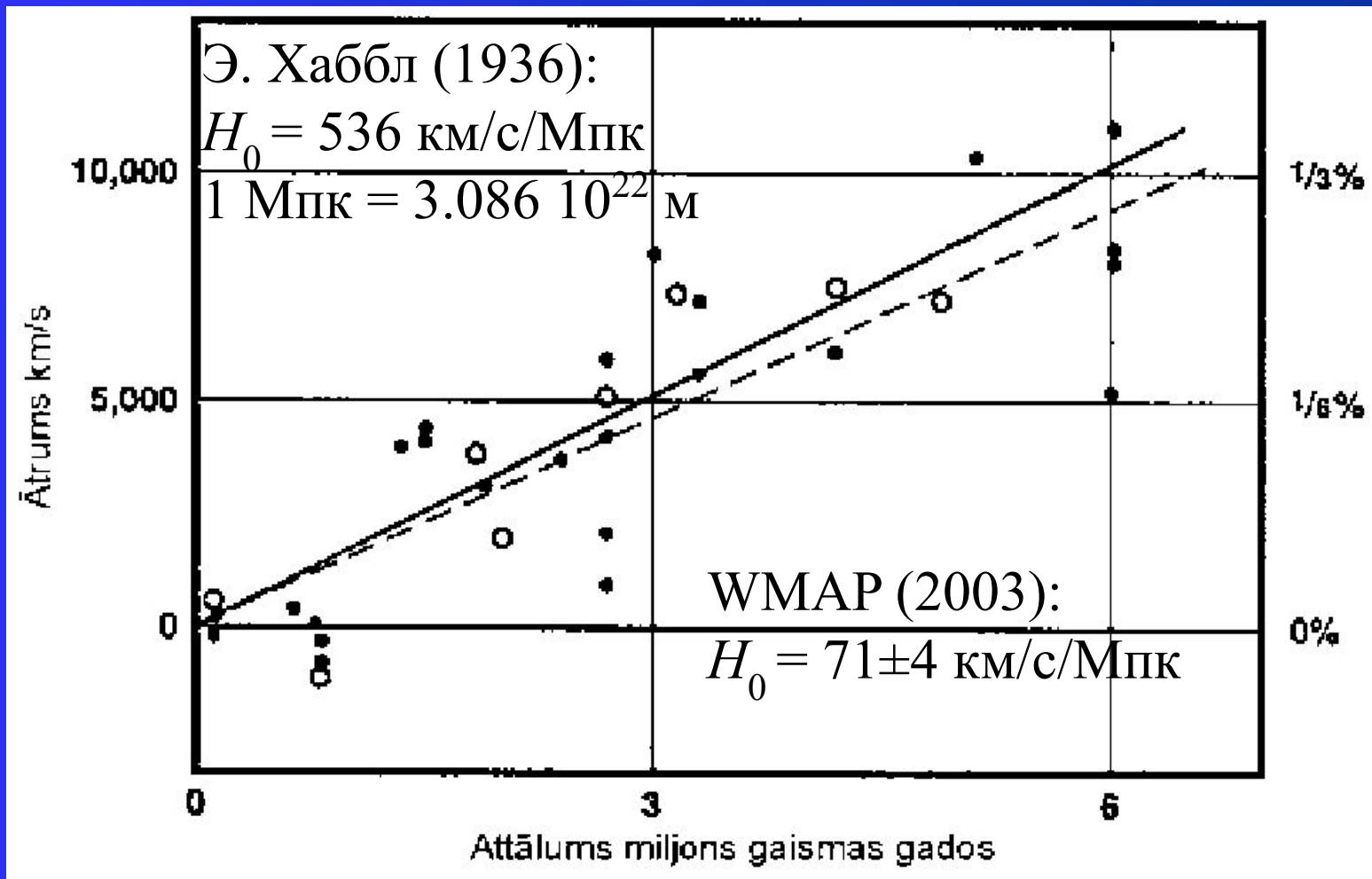


В.М. Слайфер

# Закон Хаббла

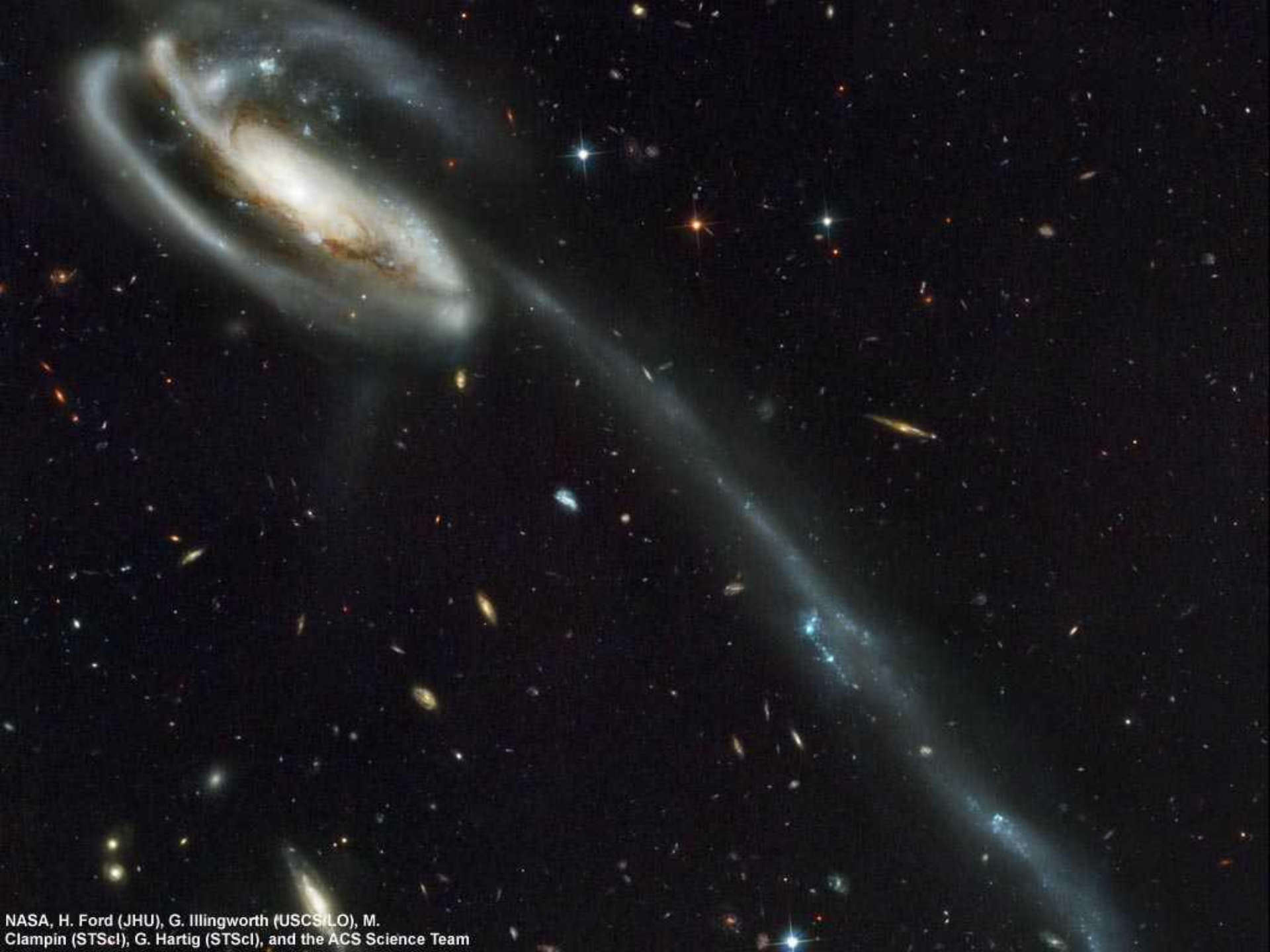
- Позже Эдвин Хаббл и Мильтон Хьюмасон пронаблюдали много больше галактик
- Они обнаружили линейную зависимость этого красного смещения от яркости галактик
- Предполагая, что все галактики одинаковой яркости, это зависимость от расстояния до галактики

# 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