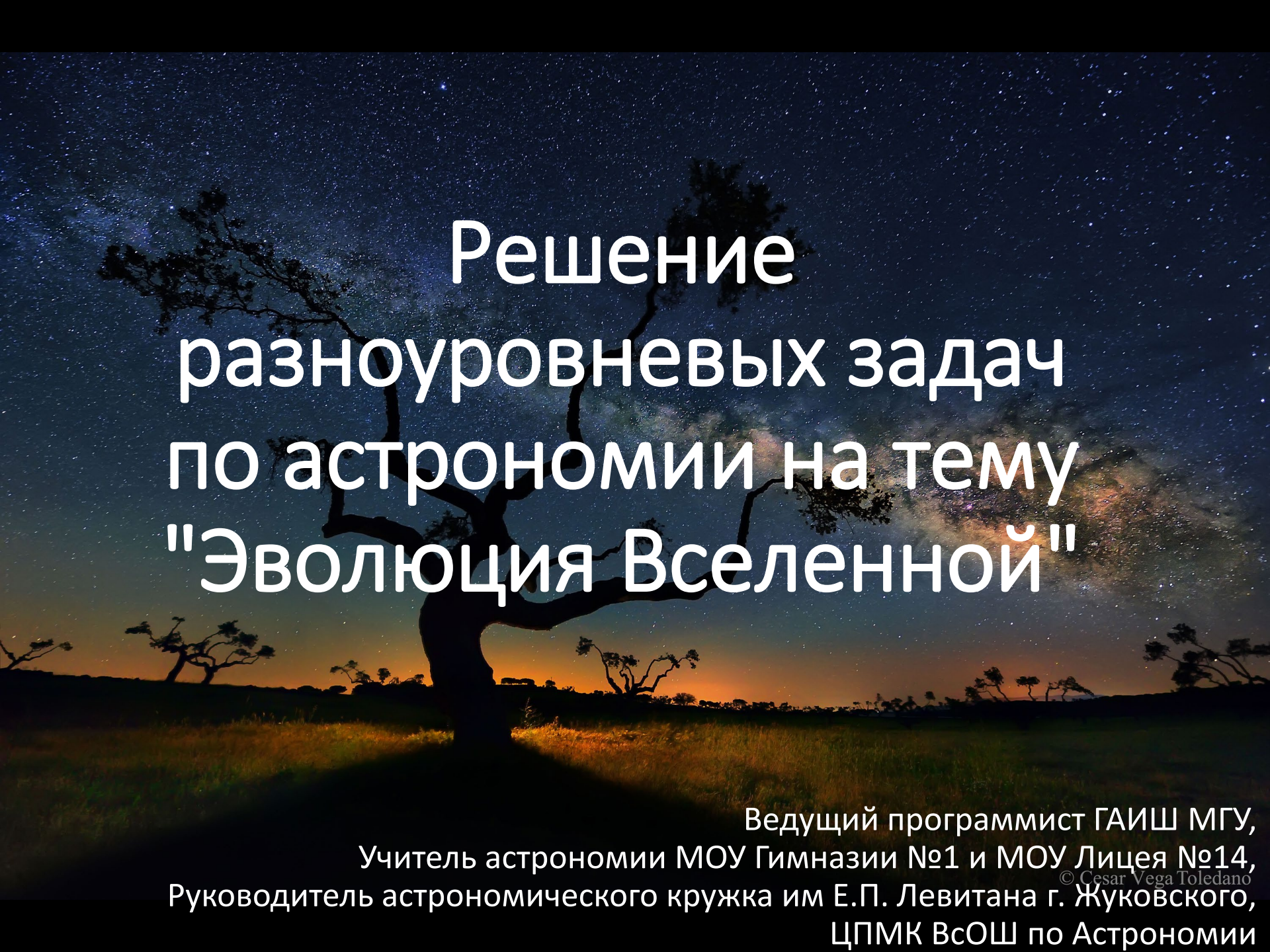




Решение разноуровневых задач по астрономии на тему "Эволюция Вселенной"

Ведущий программист ГАИШ МГУ,
Учитель астрономии МОУ Гимназии №1 и МОУ Лицея №14,
Руководитель астрономического кружка им Е.П. Левитана г. Жуковского,
ЦПМК ВсОШ по Астрономии

ЗАДАЧНИК (ГОТОВИТСЯ К ВЫПУСКУ)

Авторы:

ТАТАРНИКОВ Андрей Михайлович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, автор более 60 научных статей.

Педагог дополнительного образования в Астрономической школе «Вега» г. Железнодорожного. Член ЦПМК Всероссийской олимпиады школьников по астрономии и ПМК Москвы и Московской области.

ТАТАРНИКОВА Анна Александровна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им. П. К. Штернберга МГУ им. М. В. Ломоносова, автор более 40 научных статей.

Руководитель кружка «Олимпиадная астрономия» в Москве.

ФАДЕЕВ Евгений Николаевич, младший научный сотрудник Астрокосмического центра Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, 9 научных статей. В 2017—2019 гг. — главный тренер команды Москвы на Всероссийской олимпиаде школьников. Член ЦПМК Всероссийской олимпиады школьников по астрономии и ПМК Москвы.

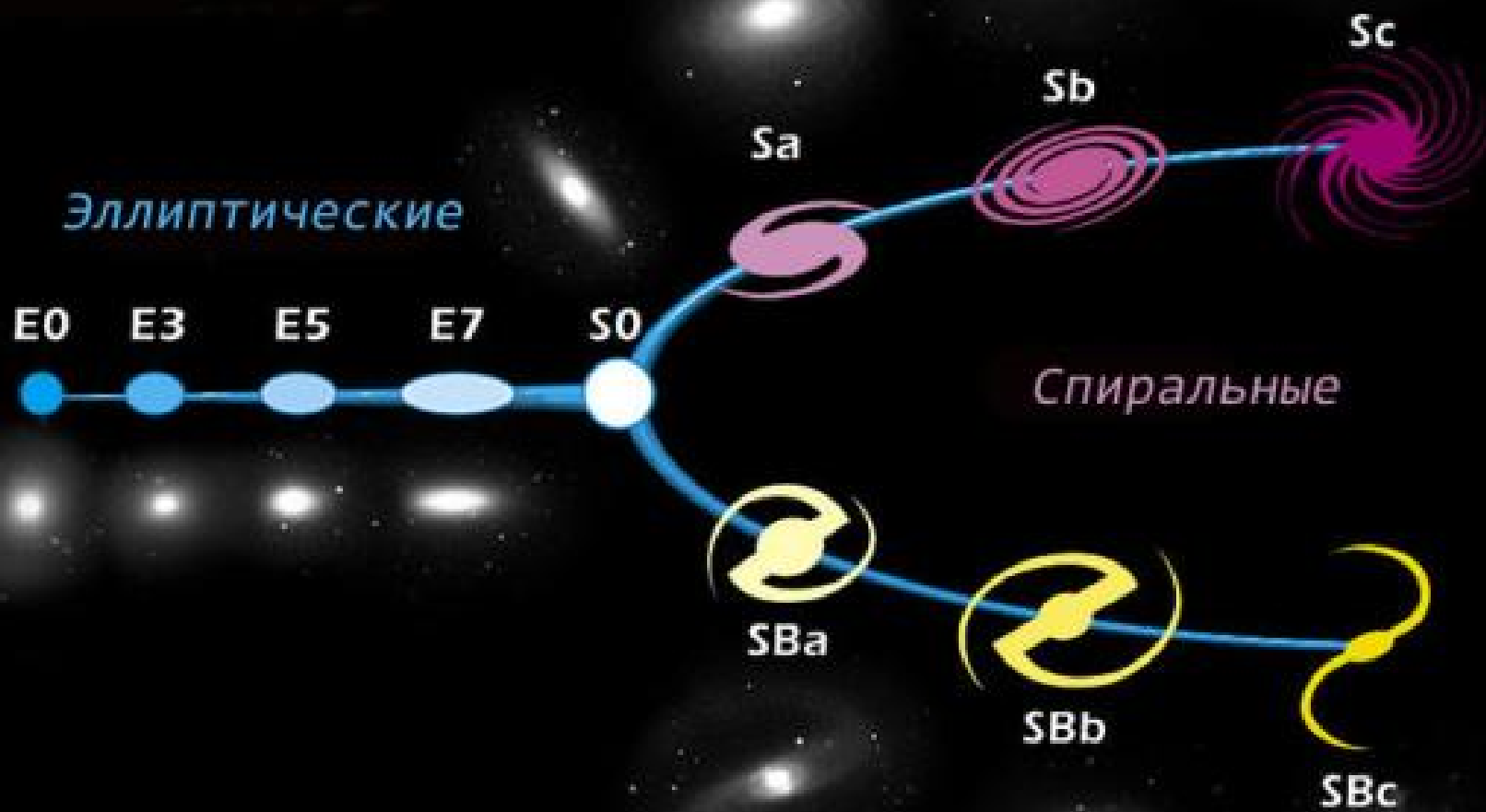


А. М. Татарников,
А. А. Татарникова,
Е. Н. Фадеев
Астрономия. 10—11 кл.
Задачник
(под ред. А. В. Засова,
В. Г. Сурдина)
Формат 70×90 1/16.
Обложка

В издании представлено более 500 задач по курсу астрономии для 10—11 классов, для большей части которых даны ответы. Задачник по содержанию и структуре соответствует учебнику А. В. Засова, В. Г. Сурдина «Астрономия. 10—11 классы». Каждая глава задачника состоит из небольшого теоретического введения, нескольких задач

с подробным решением и ответом и задач для самостоятельного решения, которые представлены на трёх уровнях сложности. Задачник можно использовать как для текущей работы на уроке астрономии, так и для подготовки к решению задачи 24 ЕГЭ по физике.

Классификация Эдвина Хаббла



~50 AU
~0.0002 пк

~100 пк

~200 кпк

~2 Мпк

~50 Мпк

SOLAR SYSTEM

SUN'S NEIGHBORHOOD

GALACTIC REALM

LOCAL GROUP

SUPERCLUSTER

Знания о далёких галактиках базируются на данных о близких звёздах, населении ближайших галактиках и на умении определять расстояния до астрономических объектов

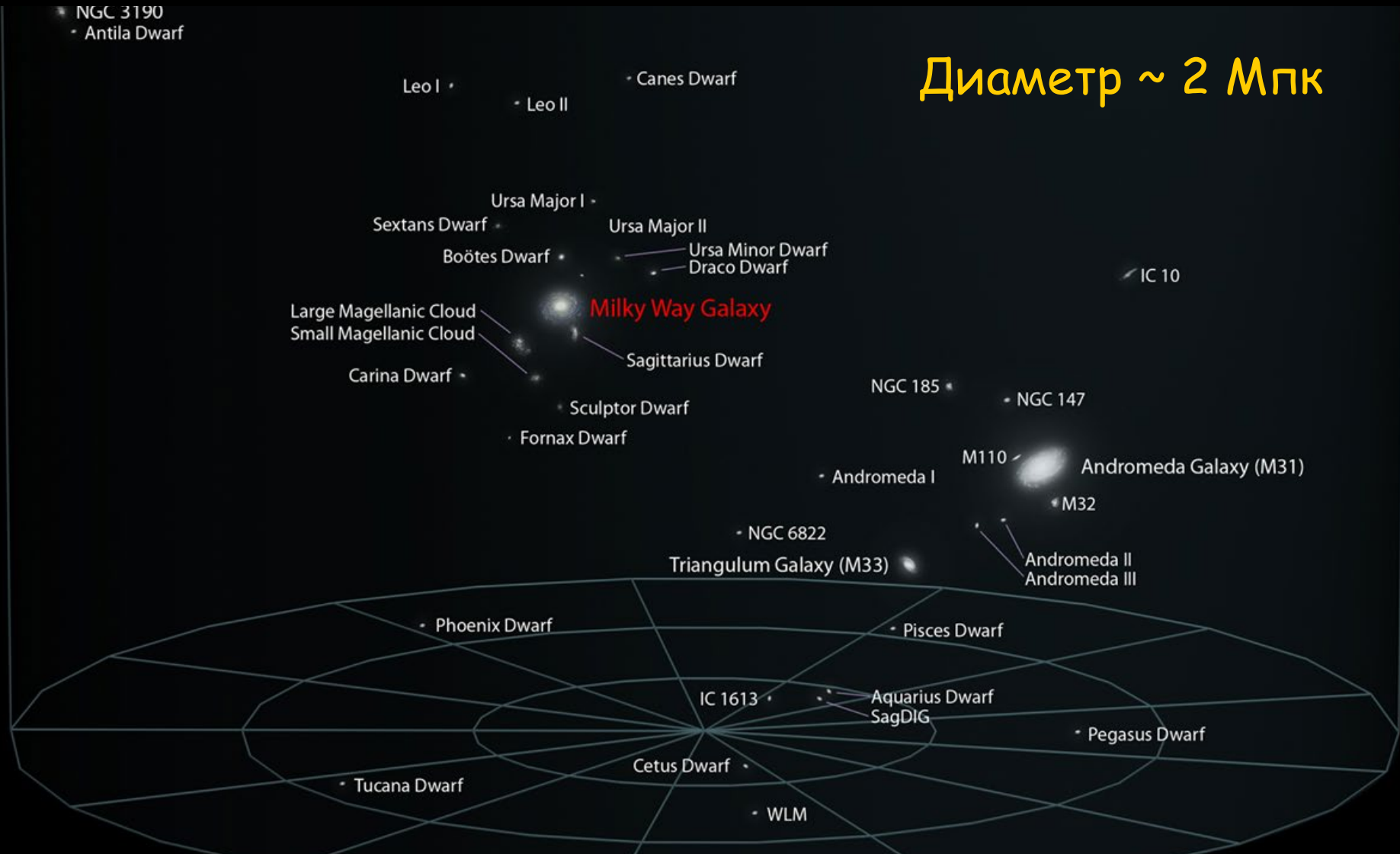
ГРУППА



Неоднородное распределение галактик: иерархия

Местная Группа галактик: Млечный Путь, Туманность Андромеды (M31), M32 (Треугольник) и их ярчайшие спутники:

~ 50 членов по состоянию на 2000 г.



Ближайшие группы галактик





Abell 1689

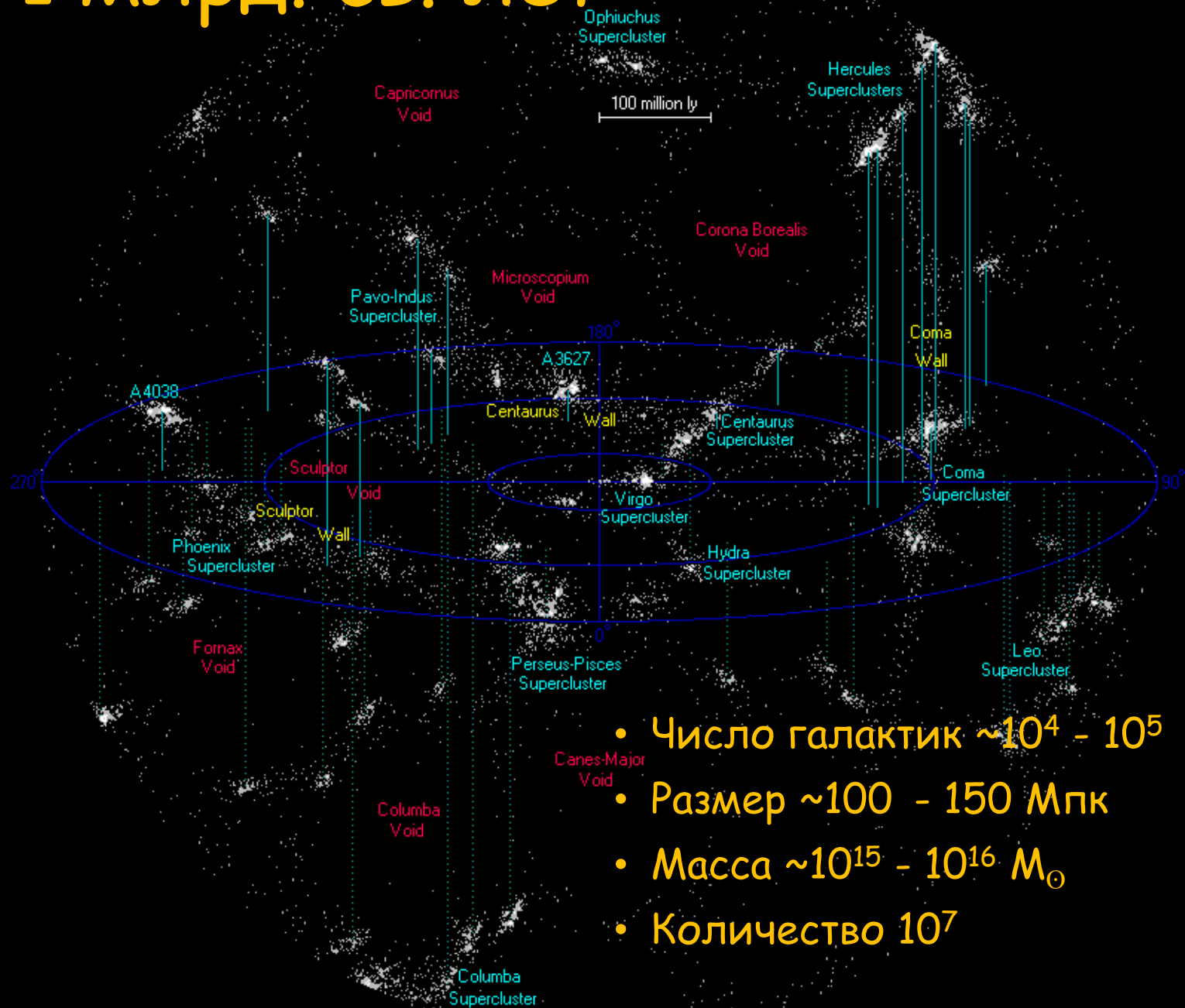
- Число галактик $\sim 10^3$
- Размер ~ 10 Мпк
- Масса $\sim 10^{14} - 10^{15} M_{\odot}$

Gravitational Lens in Galaxy Cluster Abell 1689



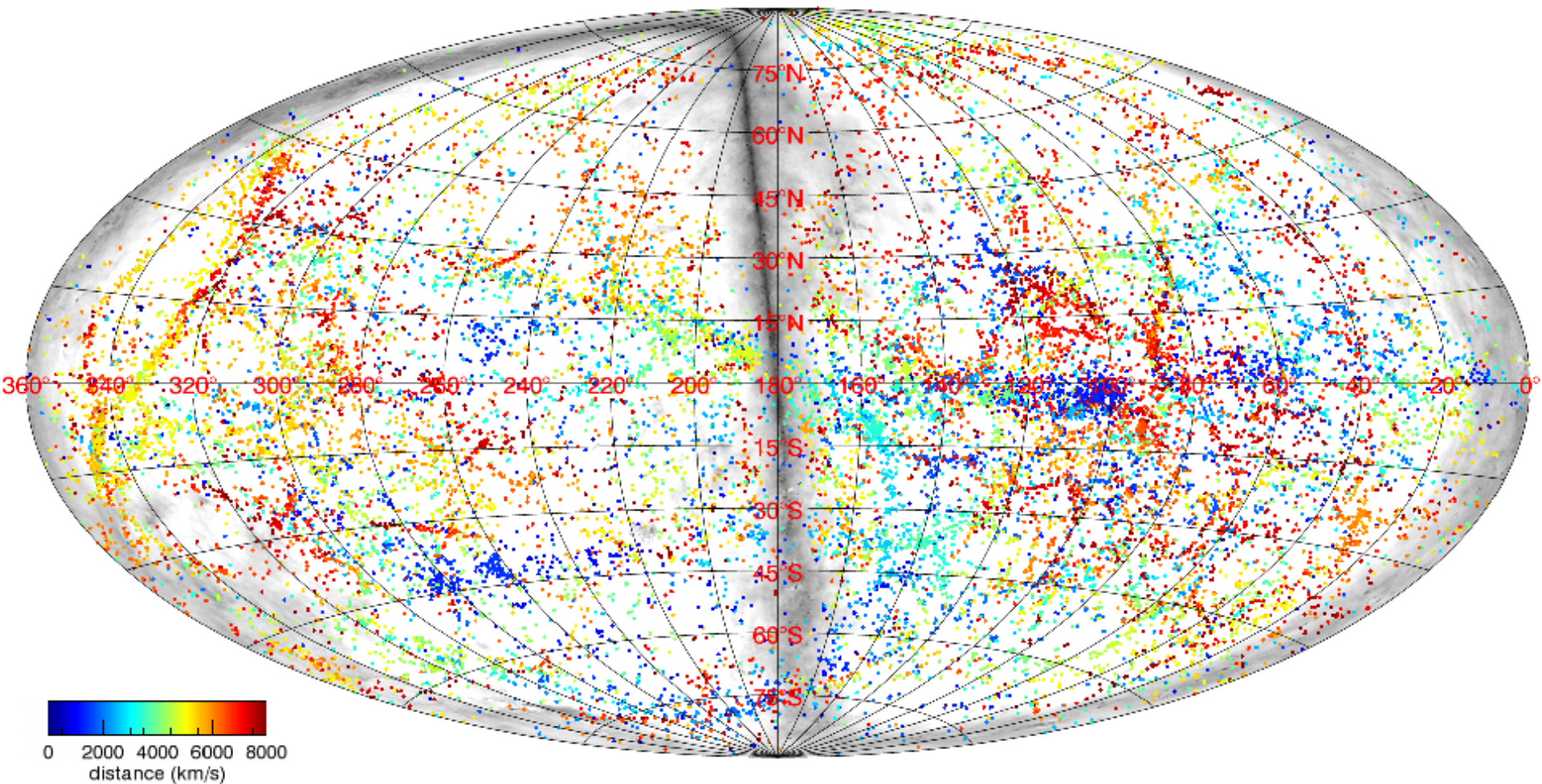
HUBBLESITE.org

1 млрд. св. лет

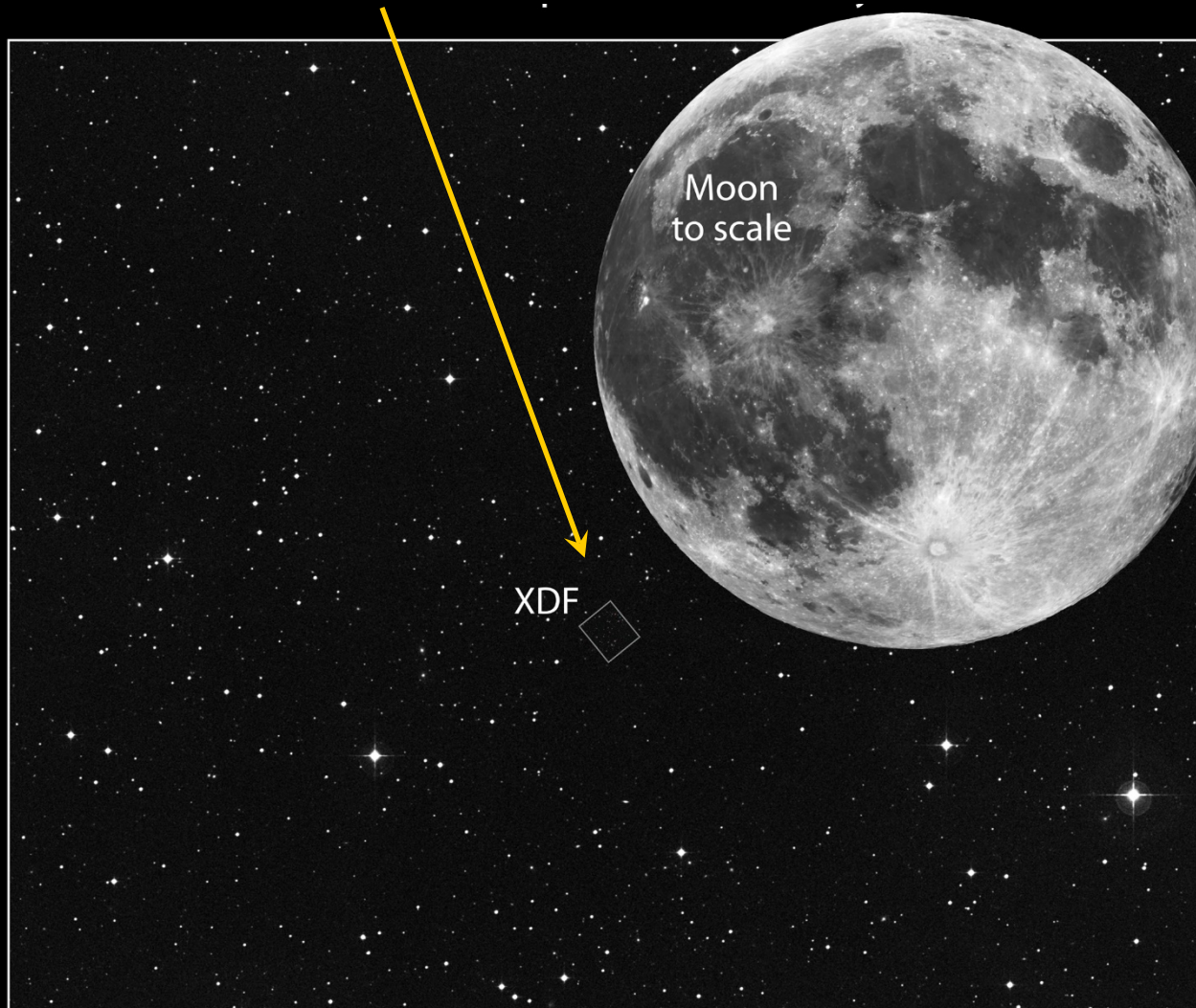


- Число галактик $\sim 10^4 - 10^5$
- Размер $\sim 100 - 150$ Мпк
- Масса $\sim 10^{15} - 10^{16} M_{\odot}$
- Количество 10^7

- Внегалактическая система координат: Supergalactic Equator (связан с распределением крупных сверхскоплений) и галактический экватор



Размер Хаббловского сверхглубокого поля на небе



Созвездие Печи
(Fornax) на
южном небе

Размер поля $\sim 1^\circ$

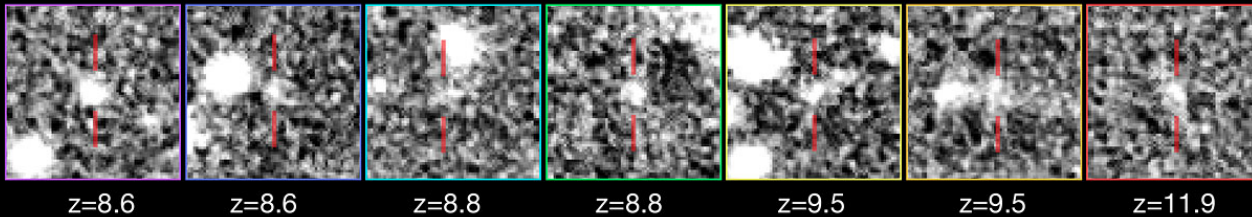
Много ли галактик во Вселенной ?



Хubble XDF:
Хаббловское
сверхглубокое
поле (суммарная
экспозиция
~550 часов за 10
лет наблюдений
в оптике и ИК)

Предел $V \sim 30^m$
~300 тыс.
гал./кв. град.

До $z \approx 11.9$
(возраст Вселенной
~400–600 млн. лет)





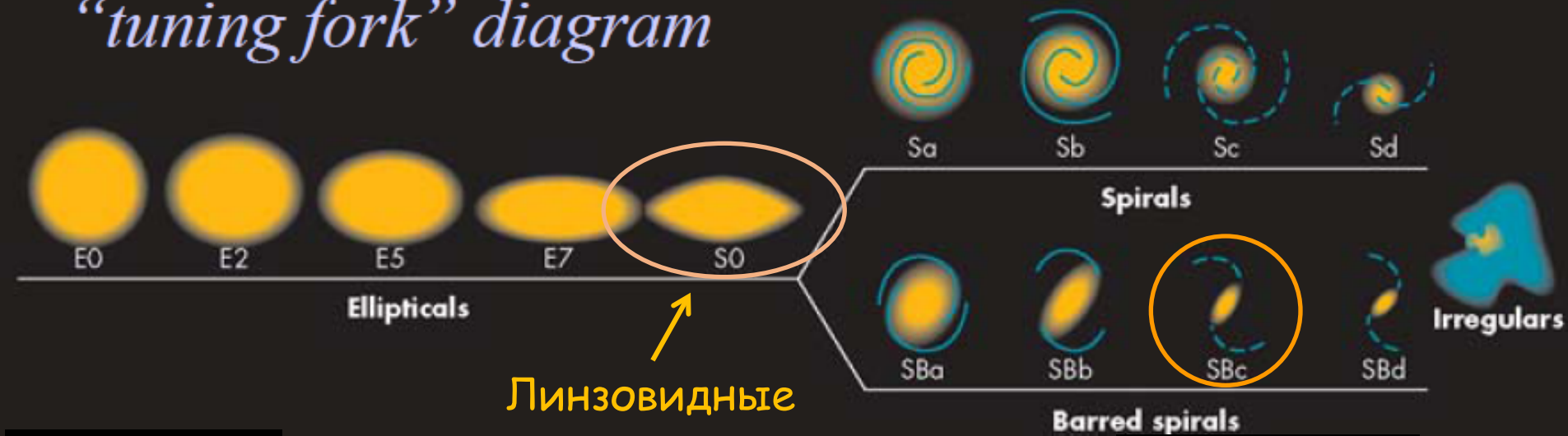
Всего 1
звезда в
кадре !

- Галактик
ярче 30^m
на небе
~14 млрд.
(звёзд ярче 20^m
~1 млрд.)

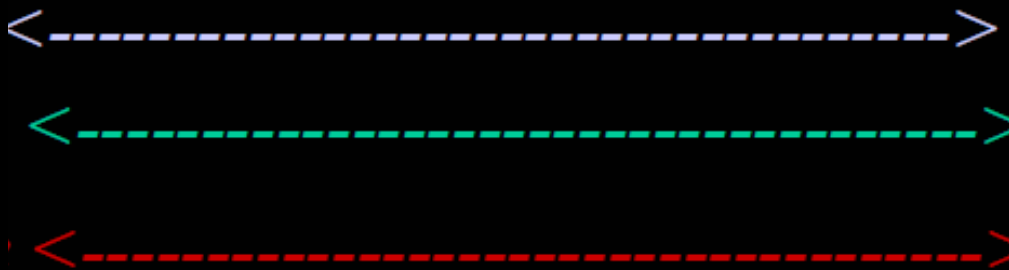
Хаббловская схема классификации галактик по форме и морфологическим типам (1-я половина XX века)

("камертонная" диаграмма)

"tuning fork" diagram



Краснее
Мало газа
Балджи
ярче
Много
старых
звёзд

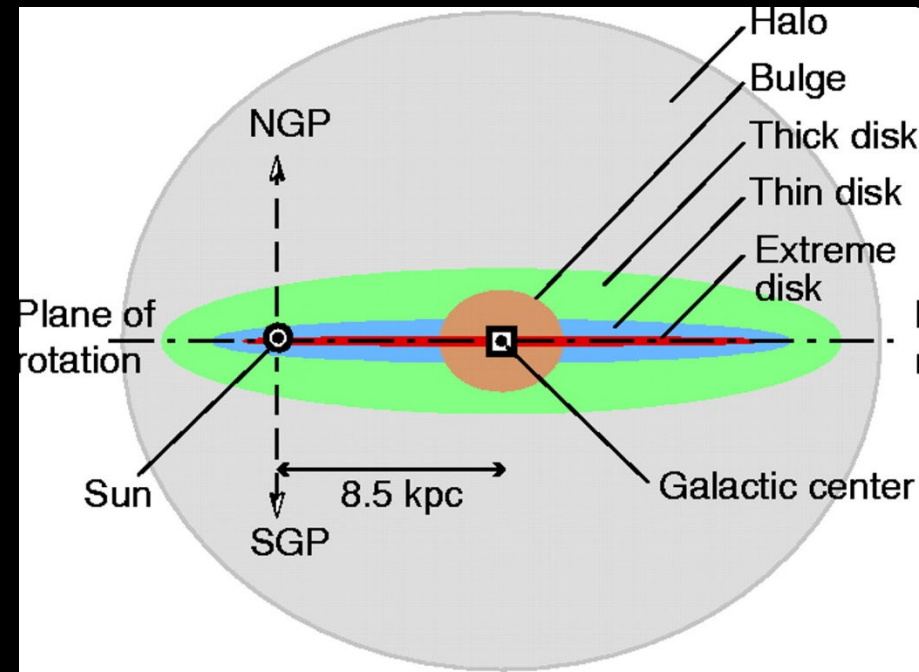


Голубее
Много газа
Балджи
слабее
Много
молодых
звёзд

- Спиральные галактики “устроены” намного сложнее большинства эллиптических:
 - Все многокомпонентные
 - Разновозрастные населения
 - Кинематически, химически и эволюционно - разные типы населений
- Типичная эллиптическая галактика по большинству свойств $\approx$ похожа на огромный балдж спиральной галактики или на шаровое скопление

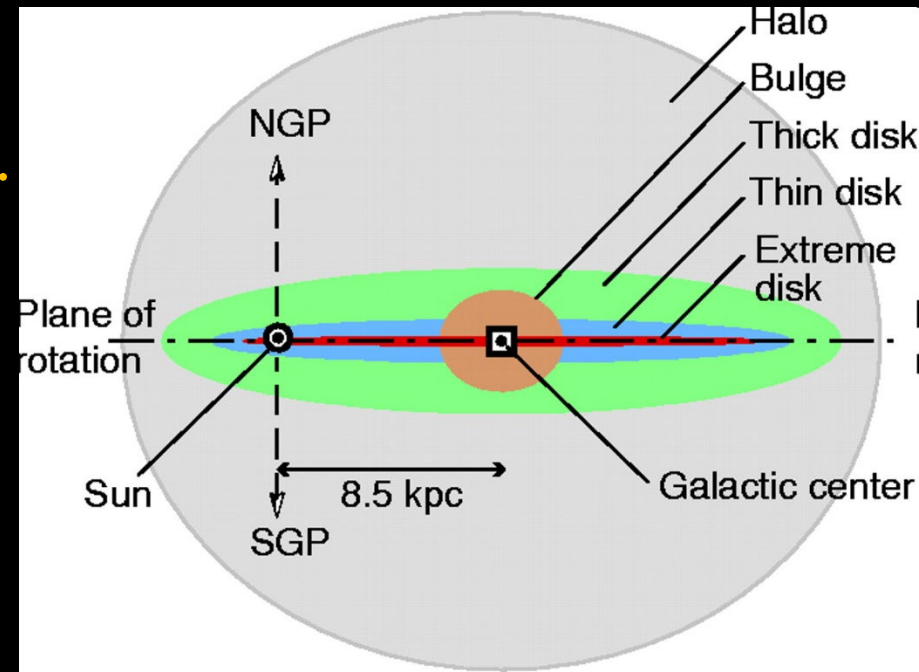
Компоненты спиральной галактики

- **Тонкий диск:** Возрасты звёзд от ~ 1 млн. до ~ 10 млрд. лет, химический состав $\sim$ солнечный. Газ ($\sim 10\%$): нейтральный, ионизованный и молекулярный водород (в облаках).
Пыль. Рассеянные скопления и ОВ-ассоциации.
Звездообразование **Спиральный узор.** Быстрое вращение и почти круговые орбиты звёзд. Экспоненциальный профиль плотности. Характерный размер 200 кпк x 30 кпк. Экспоненциальная шкала: ~ 2.5 -6 кпк.
- **Барионное гало:** Старые (>10 млрд. лет) звёзды с большим дефицитом тяжёлых химич. элементов (субкарлики). Шаровые скопления. Высоко-скоростные облака нейтрального и ионизов. водорода. Слабое вращение. Вытянутые орбиты. Степенной профиль плотности. Характерный размер ~ 10 -20 кпк



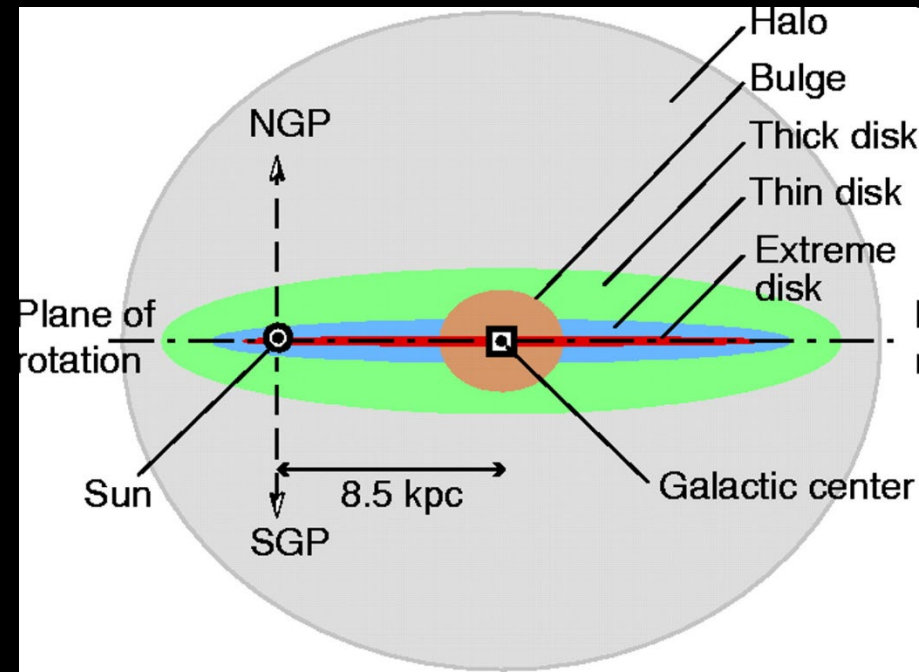
Компоненты спиральной галактики

- **Балдж:** центральное (трёхосное) сгущение старых (>10 млрд. лет) звезд; химический состав - от умеренного дефицита тяжелых элементов до заметного избытка. Вращение. Профиль плотности Серсика. Характерный размер ~ 1 кпк. Вдоль последовательности ($Sa \rightarrow Sb \rightarrow Sc$) относительный вклад балджа в общую массу уменьшается
- **Бар:** вытянутая структура длиной 4-7 кпк. Вращение
- **Толстый диск:** старые (>10 млрд. лет) звезды с промежуточным химическим составом. Относительно быстрое вращение (~ 160 км/с). Экспоненциальный профиль плотности. Характерный размер $(2-3) \times 30$ кпк.
- Следы приливного разрушения карликовых спутников Галактики



Компоненты спиральной галактики

- **Темное гало:** Характерный размер > 100 кпк. Даёт основной вклад в массу за пределами 10 кпк от центра. Полная масса на порядок выше барионной ($\sim 10^{12} M_{\odot}$). Небарионная материя? Субзвёзды (коричневые карлики)? Планеты, ...?
- **Ядро:** Экстремально горячий газ. Ядерное звёздное сверхскопление.
- Часто – мощные вспышки звездообразования. Высокие скорости газа и звёзд (> 1000 км/с).
- Сверхмассивная одиночная или двойная черная дыра ($10^6 - 10^9 M_{\odot}$) ($4.5 \times 10^6 M_{\odot}$ в Млечном Пути).

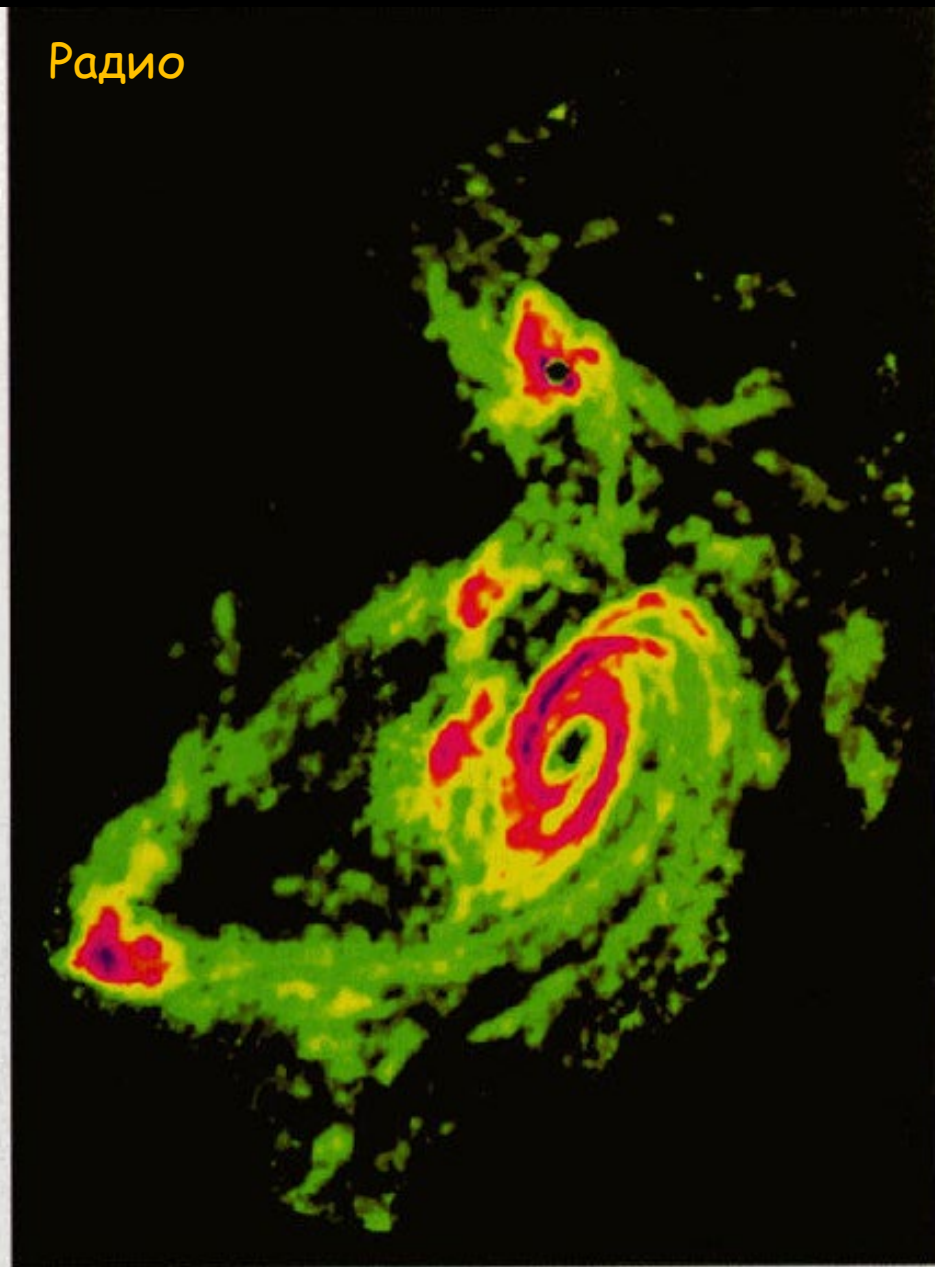


- Характерный пример:
- Размеры спиральных галактик в разных диапазонах (оптика/радио)
- Газовый диск (в основном нейтральный водород, HI - радио, 21 см) заметно больше звездного (УФ, оптика)
- Млечный Путь:
 - ~60 кпк - диаметр газового диска
 - ~30-35 кпк - диаметр звёздного диска

Оптика



Радио



Группа M81 + M82: Оптика и радио (21 см, нейтральный водород)

0.15 μm NUV

Горячие звёзды

0.4-0.8 μm
Оптика

Звёзды и газ

1.2-2.2 μm

Холодные звёзды
NIR

3.6 μm

Звёзды и пыль

8.0 μm MIR

Пыль в областях звездообразования

24 μm

70 μm

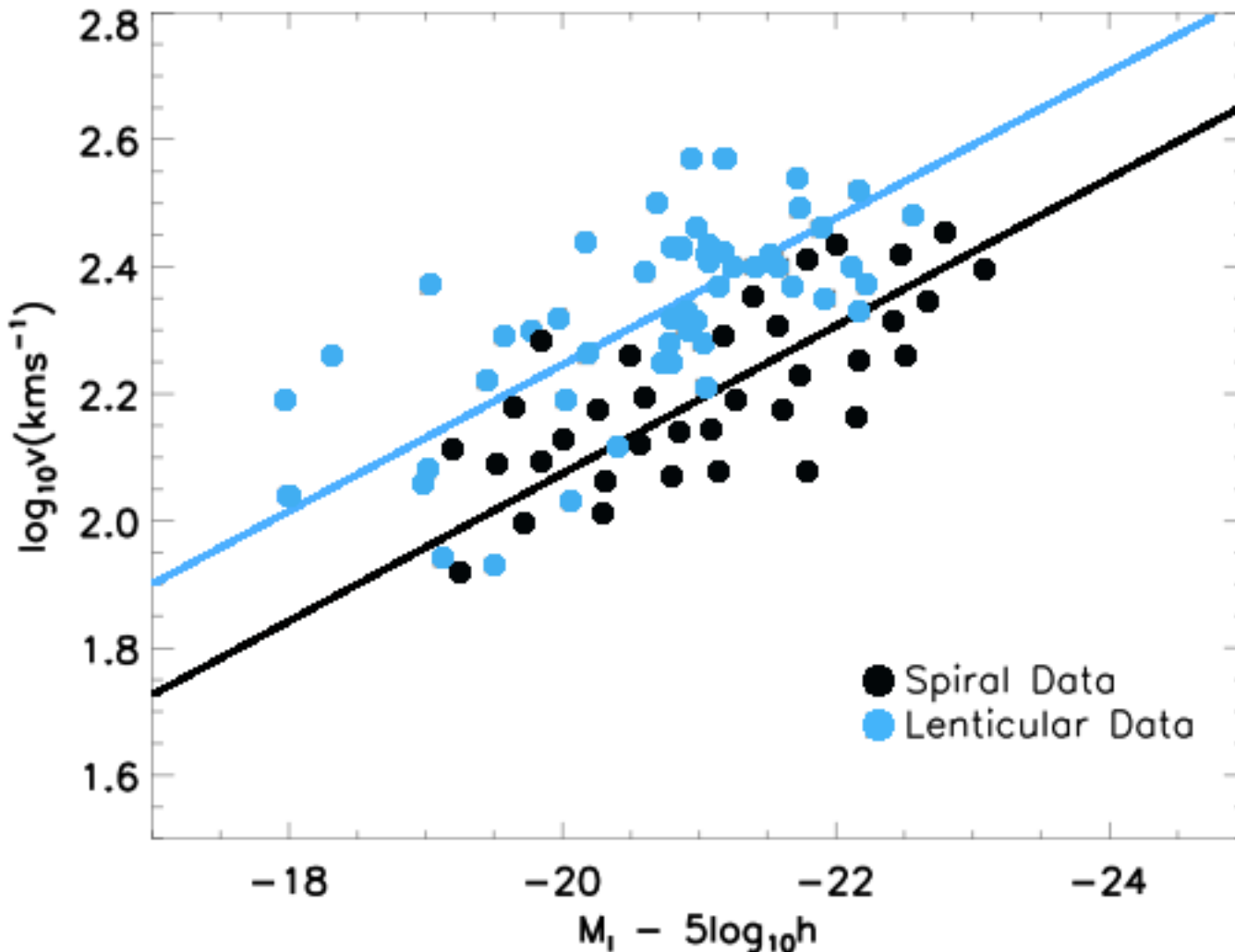
FIR

160 μm

Комплексы пыли и
диффузная пыль в дисках

M51

Зависимость Талли-Фишера (1977 г.) Спиральные галактики



$$L \sim (v_{max})^\beta$$

$$\lambda = 4000 \text{ \AA}$$

$$\beta = 3.0$$

$$\lambda = 8000 \text{ \AA}$$

$$\beta = 3.2$$

$$\lambda = 12000 \text{ \AA}$$

$$\beta = 4.2$$

Соотношение Фабер — Джексона (1976 г.)

Эллиптические

$$L \sim \sigma^4 \sim \sigma^4$$

$$U = -\alpha \frac{GM}{R}$$

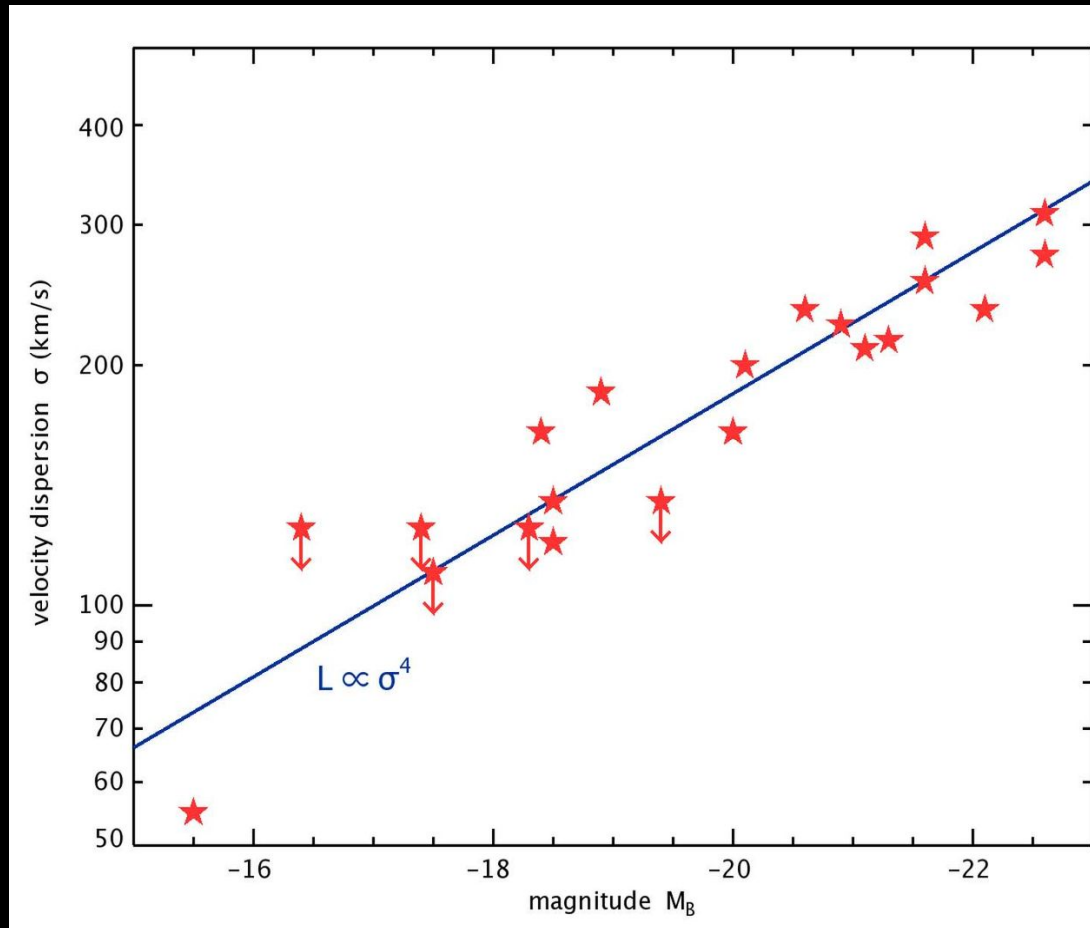
$$\rho = \text{const} \quad \alpha = \frac{3}{5}$$

$$3\sigma^2 = V^2 \quad 2K+U=0$$

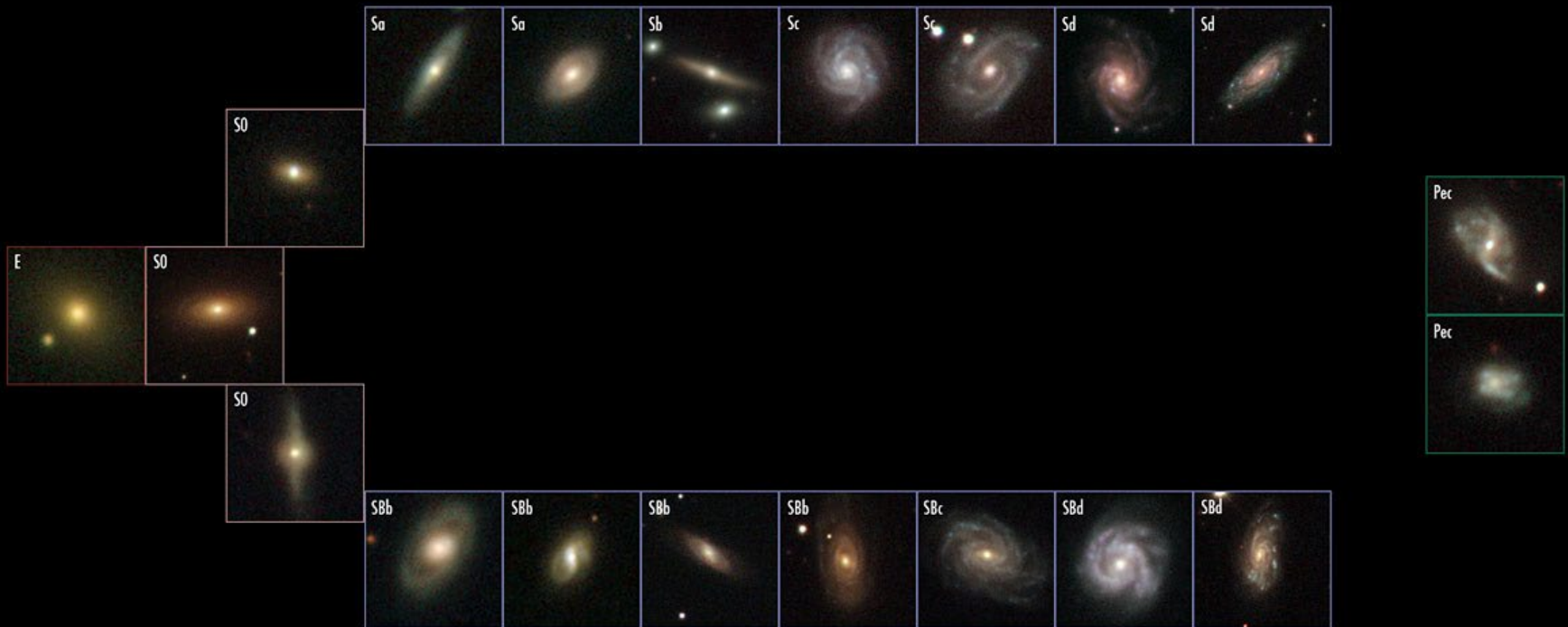
$$\sigma^2 = \frac{1}{5} \frac{GM}{R}$$

$$M \sim L \quad R \sim \frac{LG}{\sigma^2} \quad B = \frac{L}{4\pi R^2}$$

$$L \sim 4\pi \left(\frac{LG}{\sigma^2} \right)^2 \quad B \sim \frac{\sigma^4}{4\pi G^2 B}$$



Local Galaxies



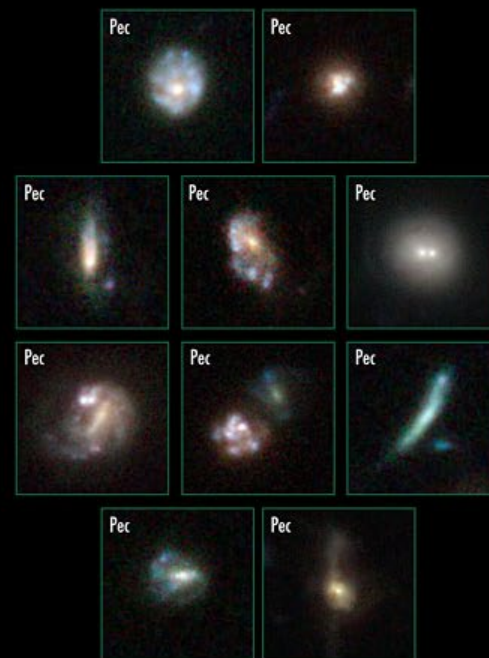
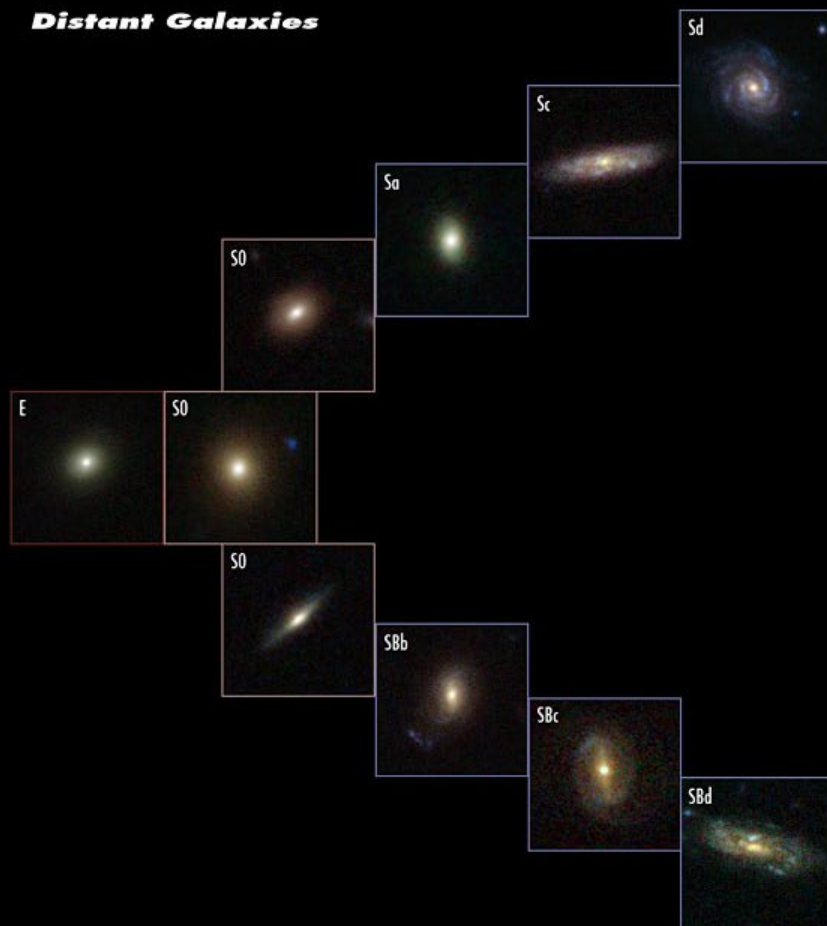
E 3%

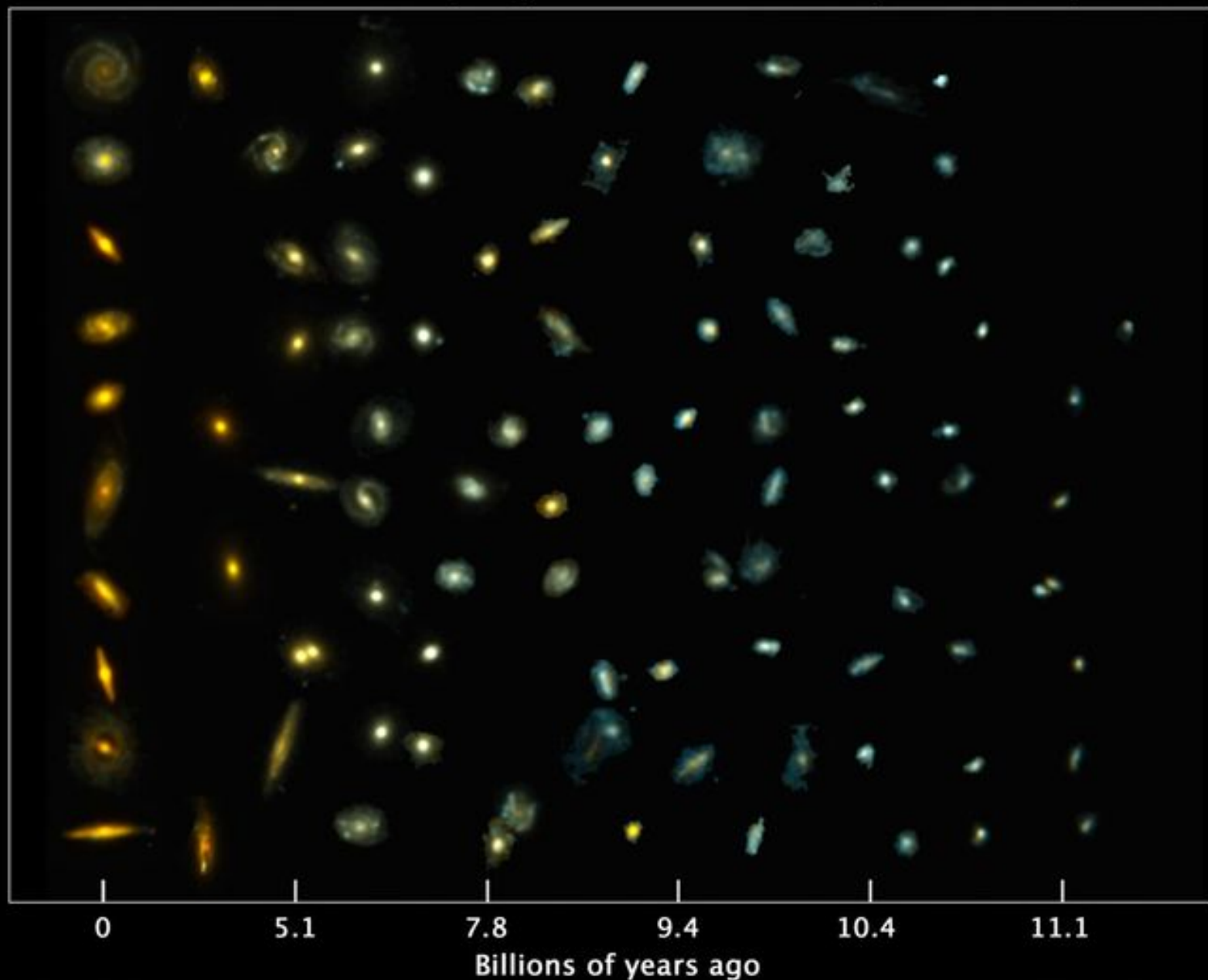
SO 15%

Spiral 72%

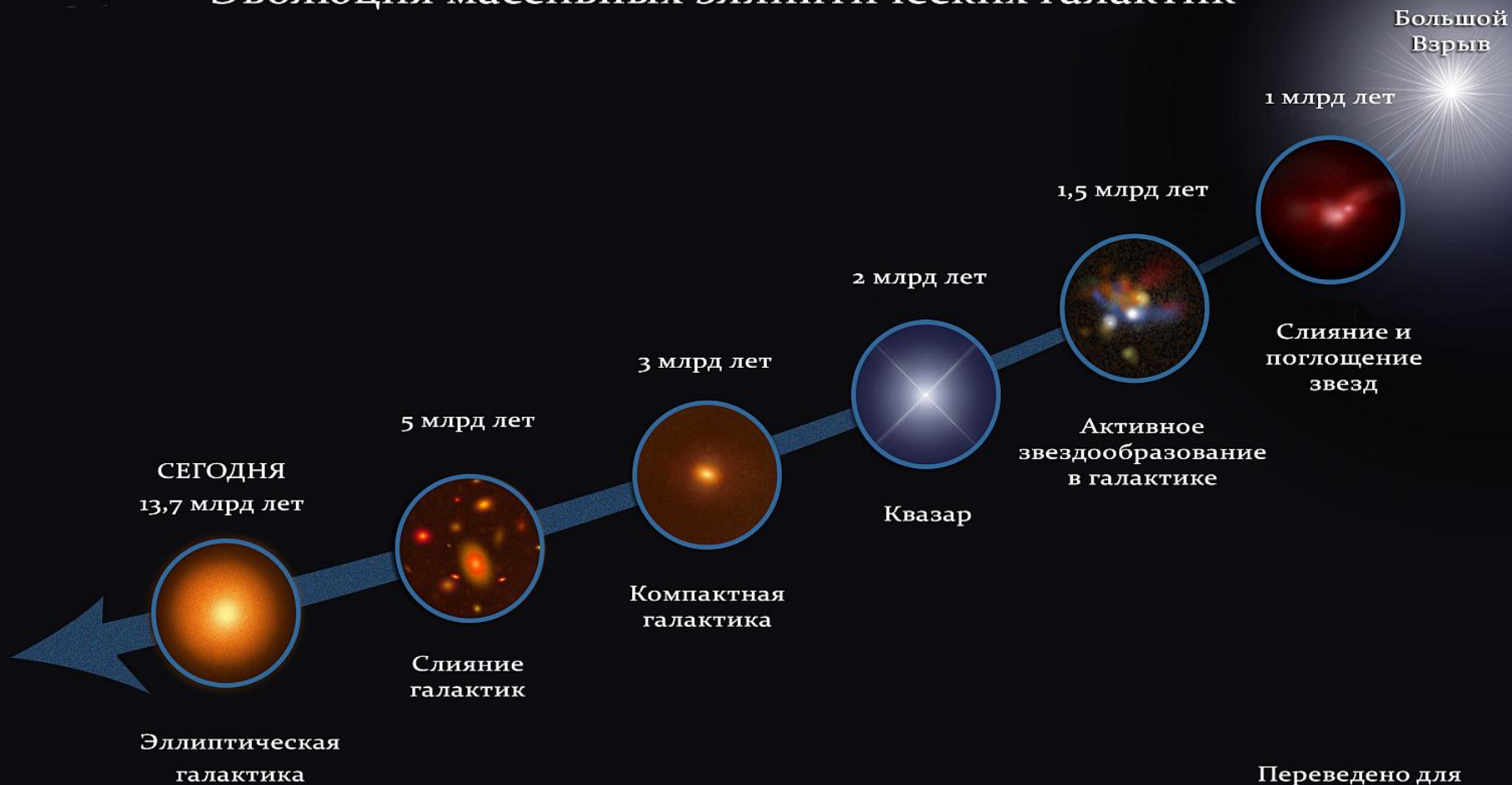
Peculiar 10%

Distant Galaxies





Эволюция массивных эллиптических галактик



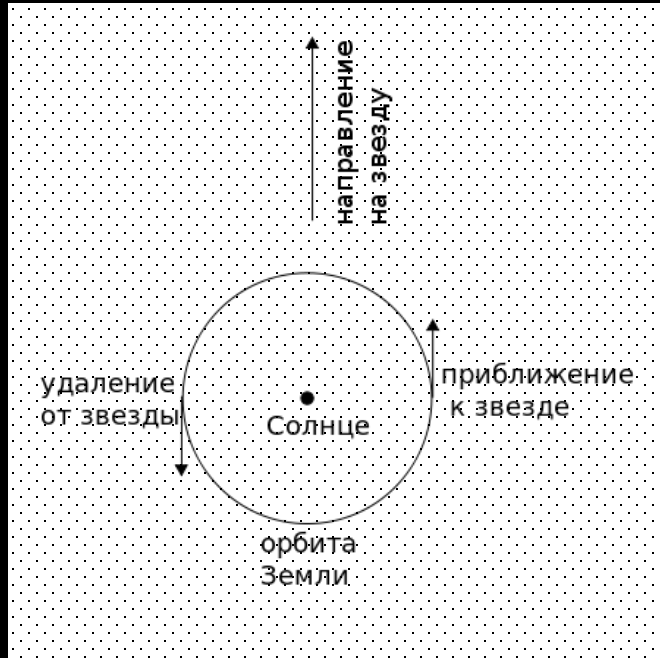
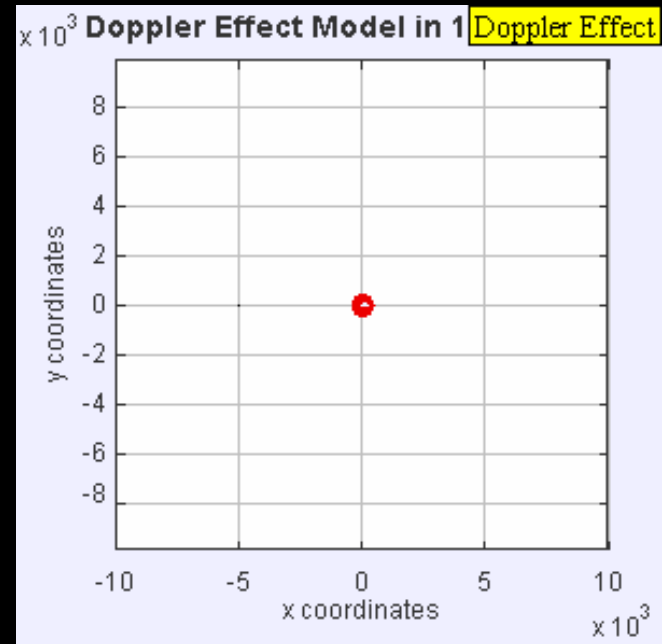
Переведено для
<http://spacegid.com/>



Большой
взрыв

Эффект Доплера и красное смещение

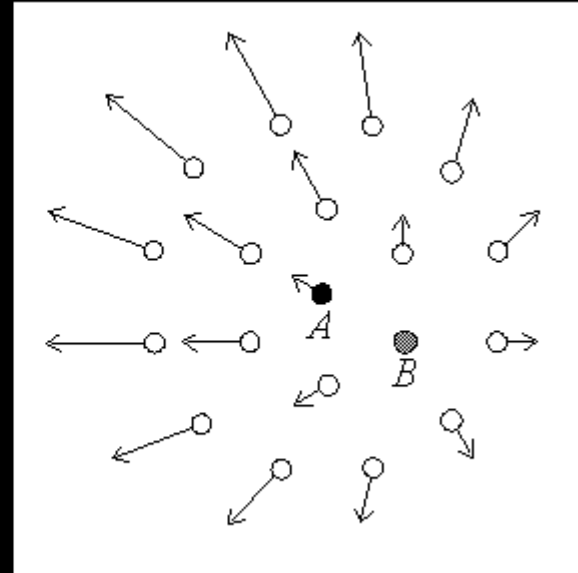
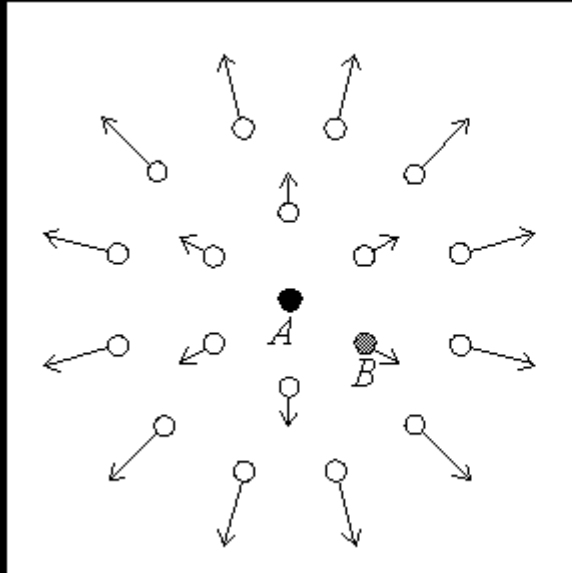
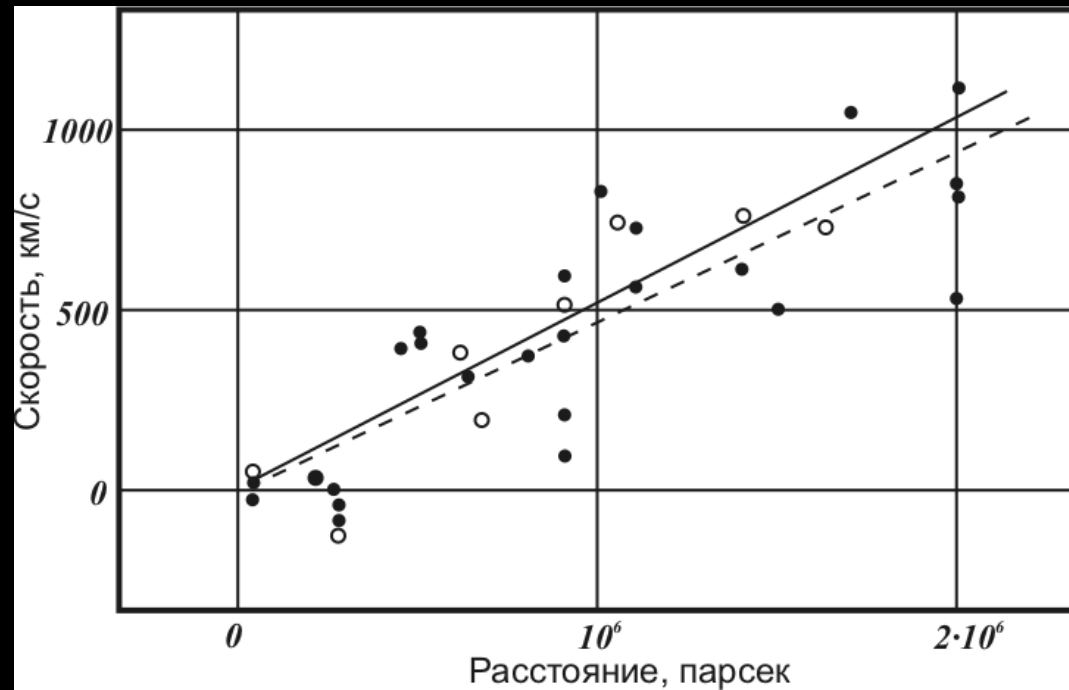
- $\frac{\lambda_{\text{набл}} - \lambda_{\text{изл}}}{\lambda_{\text{изл}}} = \frac{V}{c} = z$
- $\frac{\lambda_{\text{набл}}}{\lambda_{\text{изл}}} = 1 + z$



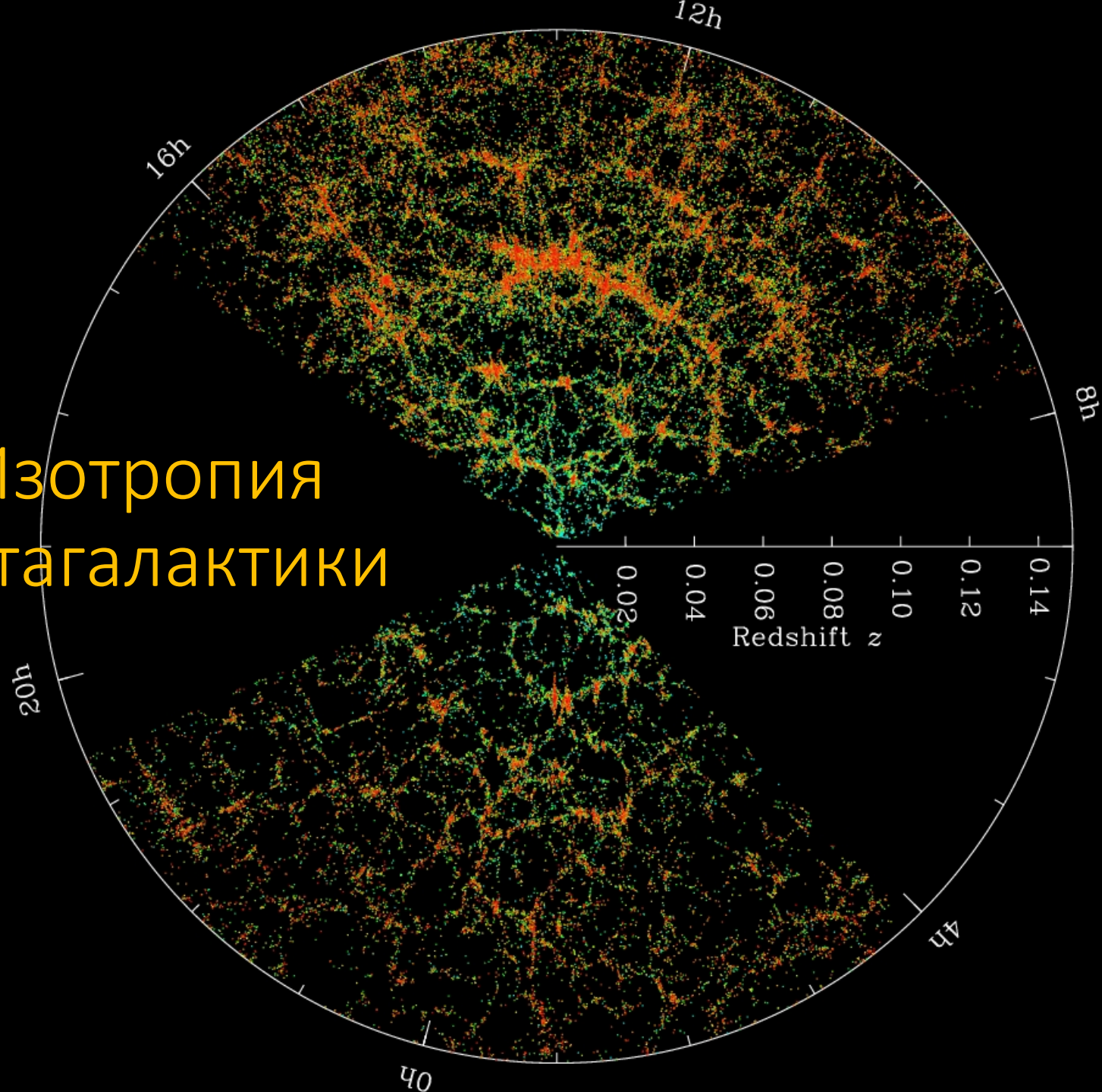
- $\sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} = 1 + z$
- $\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}} = (1 + z)^2$
- $\frac{v}{c} = \frac{(1 + z)^2 - 1}{(1 + z)^2 + 1}$

Закон Хаббла

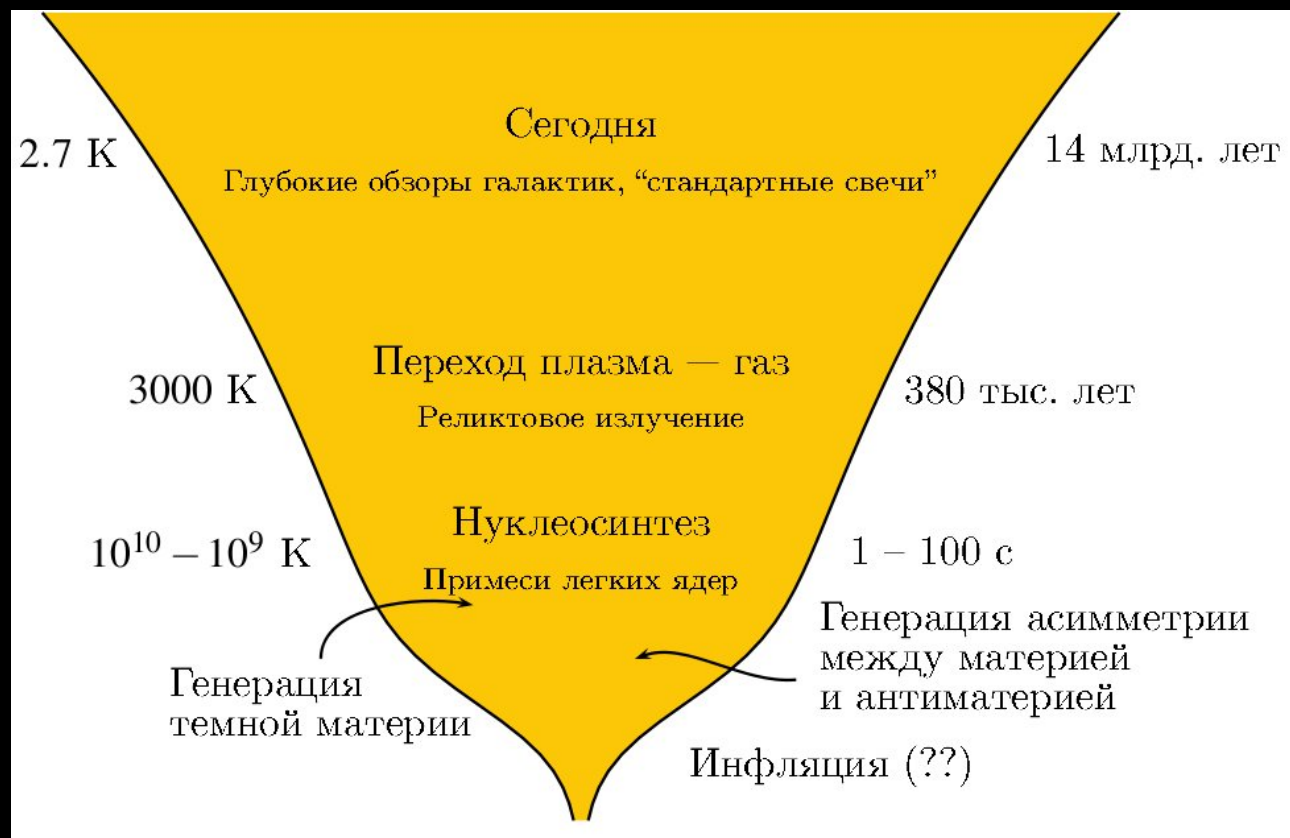
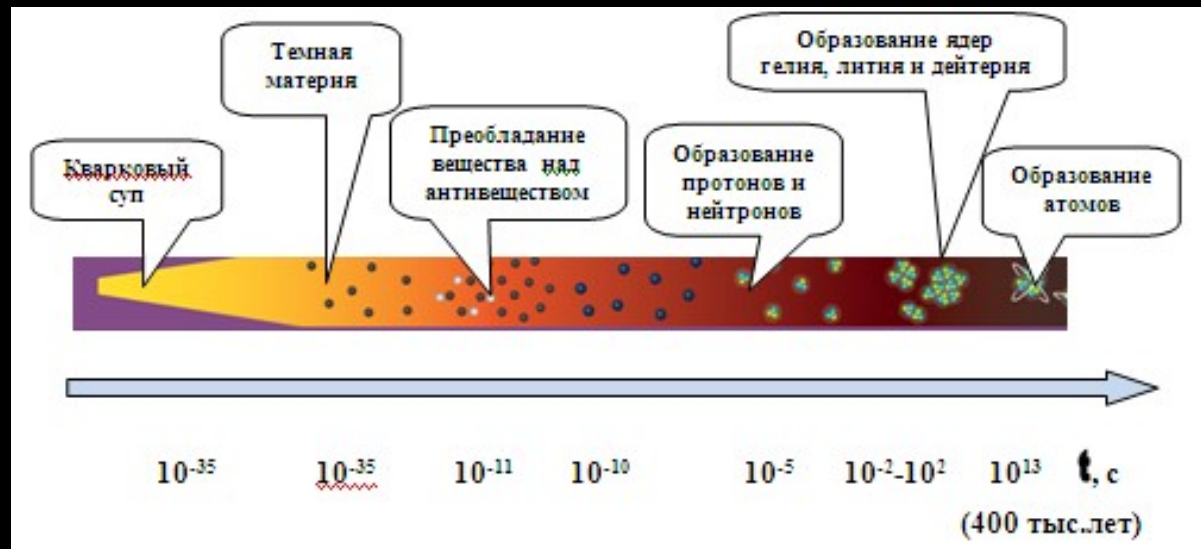
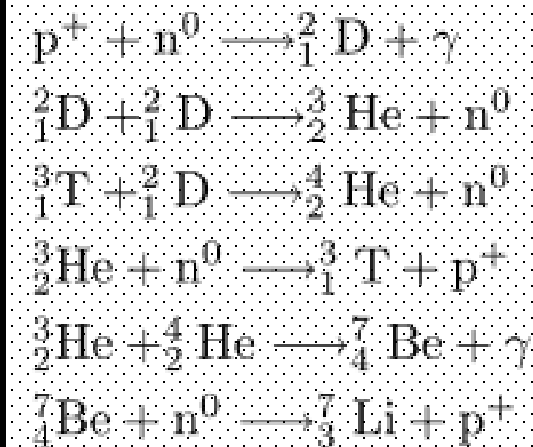
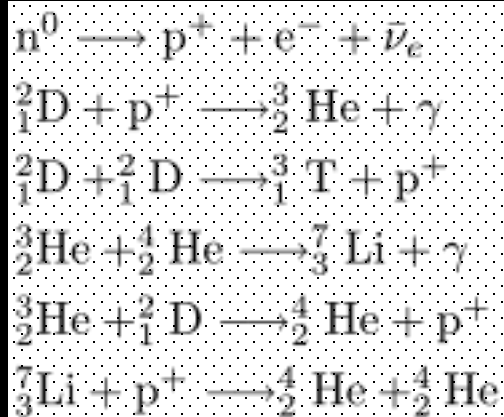
- $V = H_0 R \frac{V}{c} = cz$
- $H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)}$
- $t_H = \frac{R}{V} = \frac{1}{H_0}$



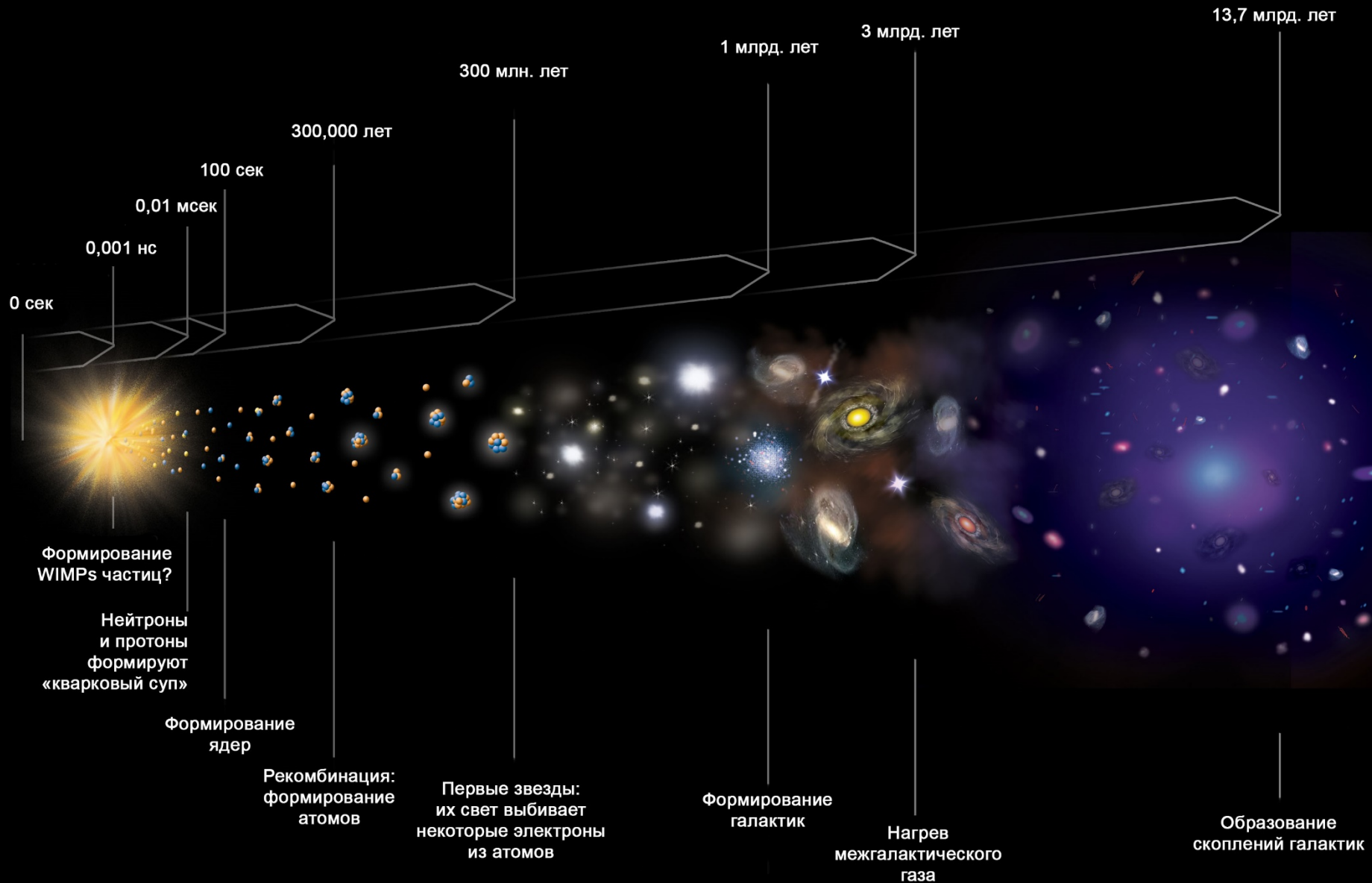
Изотропия метагалактики



Химический состав



КОСМИЧЕСКАЯ ШКАЛА ВРЕМЕНИ И ЭВОЛЮЦИИ ВСЕЛЕННОЙ



ПЕРЕВЕДЕНО ДЛЯ САЙТА SPACEGID.COM

• **Задача.** Как меняется галактика на больших временных интервалах?

1. Показатель цвета увеличивается, светимость растёт
2. Показатель цвета увеличивается, светимость падает
3. Показатель цвета уменьшается, светимость падает
4. Показатель цвета уменьшается, светимость растёт.

• **Ответ:** 2 - Показатель цвета увеличивается, светимость падает

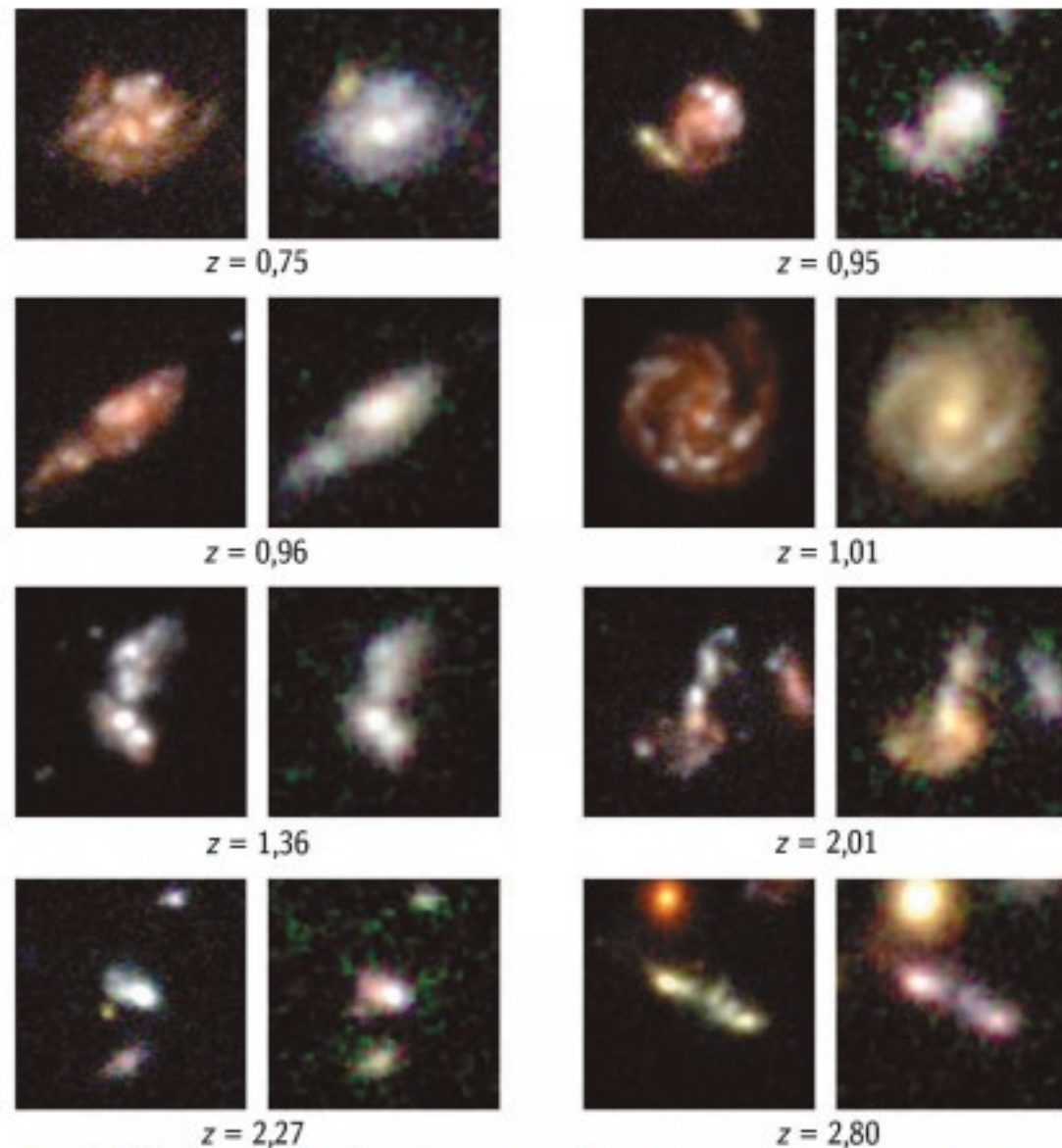
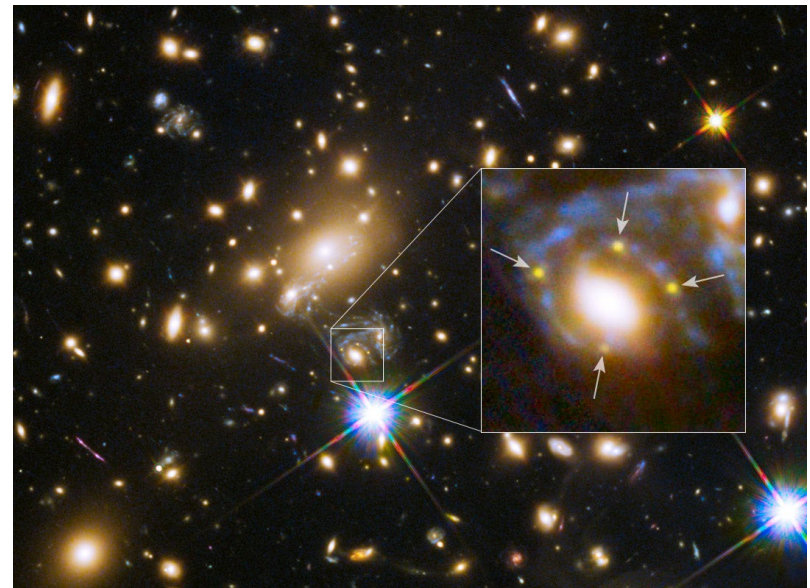
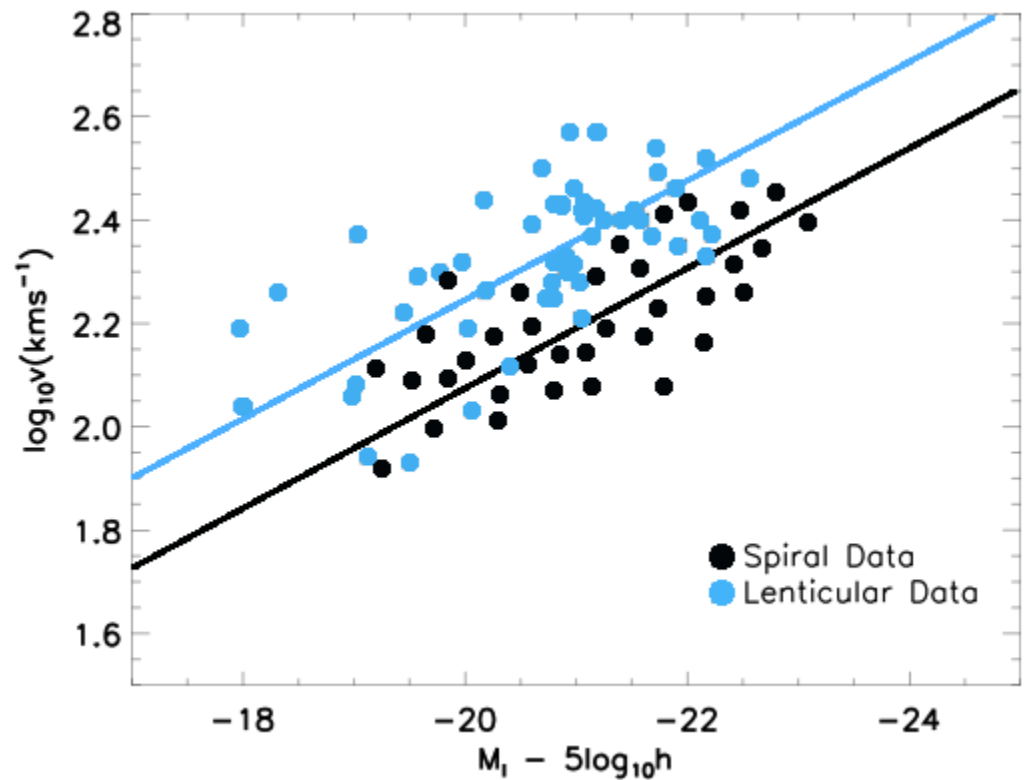
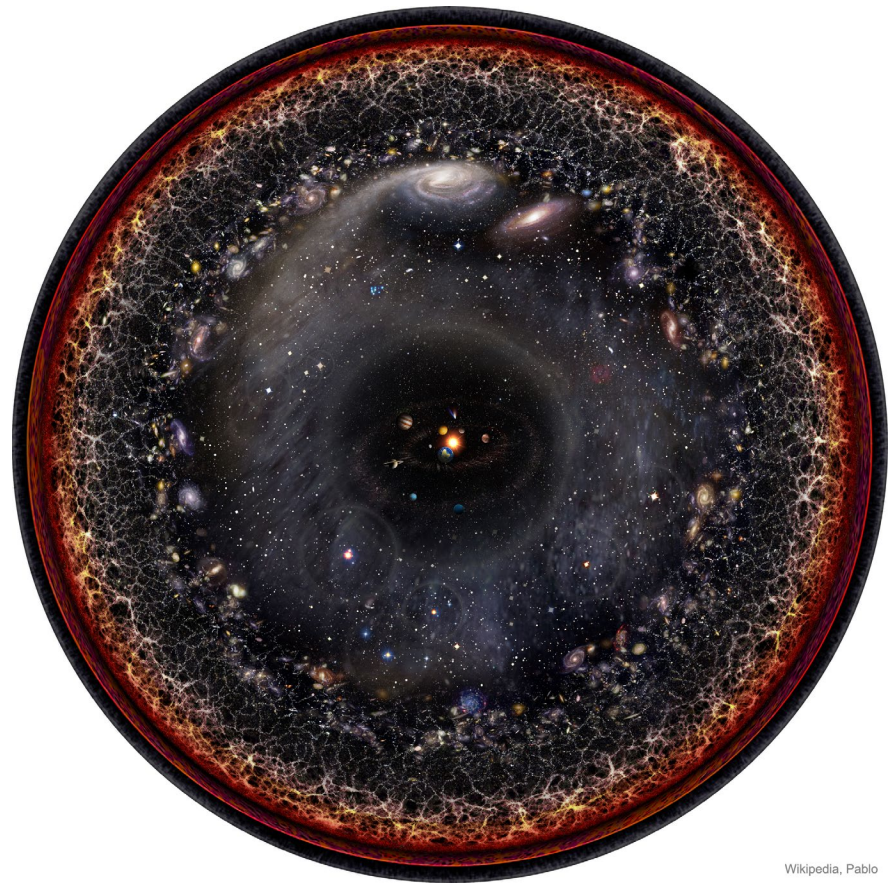


Рис. 1.6. Изменение морфологии типичной галактики с ростом красного смещения в Глубоком хаббловском поле. В каждой паре снимков левое изображение получено в оптическом диапазоне спектра, а правое — в ближней инфракрасной области на длине волны 2 мкм.

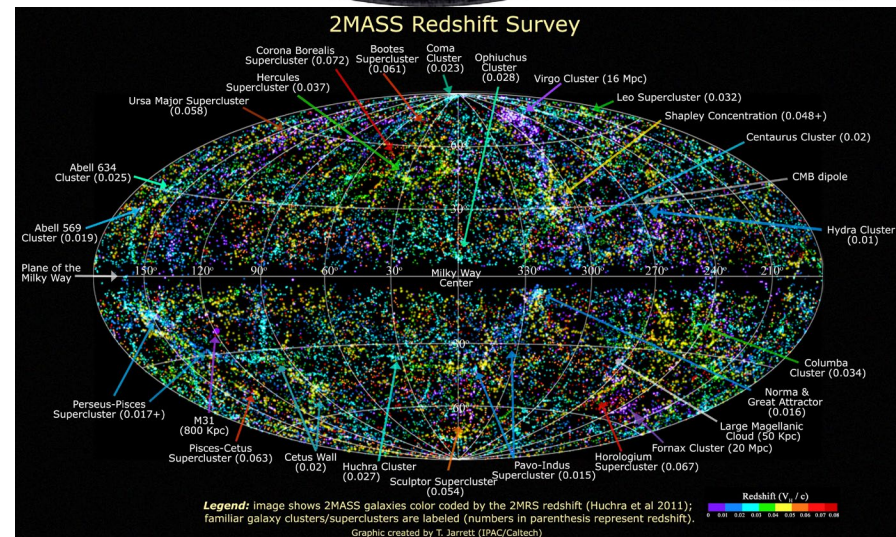
- **Задача.** Какие методы можно использовать для определения расстояния до далёких галактик:
радиолокация,
годовой параллакс,
суточный параллакс,
соотношение Талли-Фишера, соотношение период-светимость для цефеид,
сверхновые типа Ia.
- **Ответ:** соотношение Талли-Фишера,
сверхновые типа Ia.



- **Задача.** Выберите верное утверждение:
- Вселенная — это вся область пространства, доступная наблюдениям
- Вселенная — это безграничный материальный мир, рассматриваемый с точки зрения астрономии
- Вселенная — это объект, состоящий из всех наблюдаемых звёзд и галактик, тёмного вещества и тёмной энергии.
- **Ответ:** Вселенная — это безграничный материальный мир, рассматриваемый с точки зрения астрономии



Wikipedia, Pablo



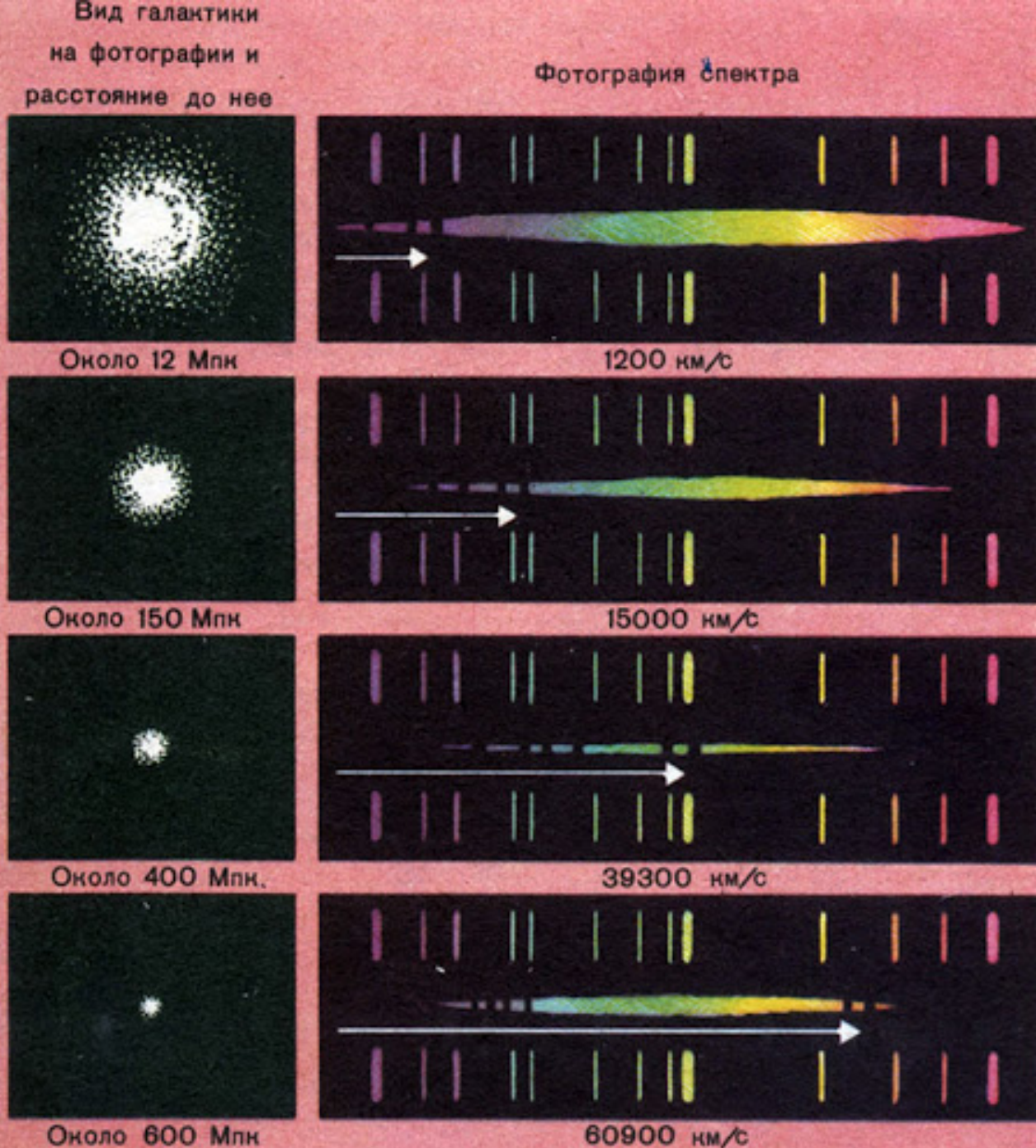
- **Задача.** Скорость удаления галактики 4350 км/с. Чему равно расстояние до неё?

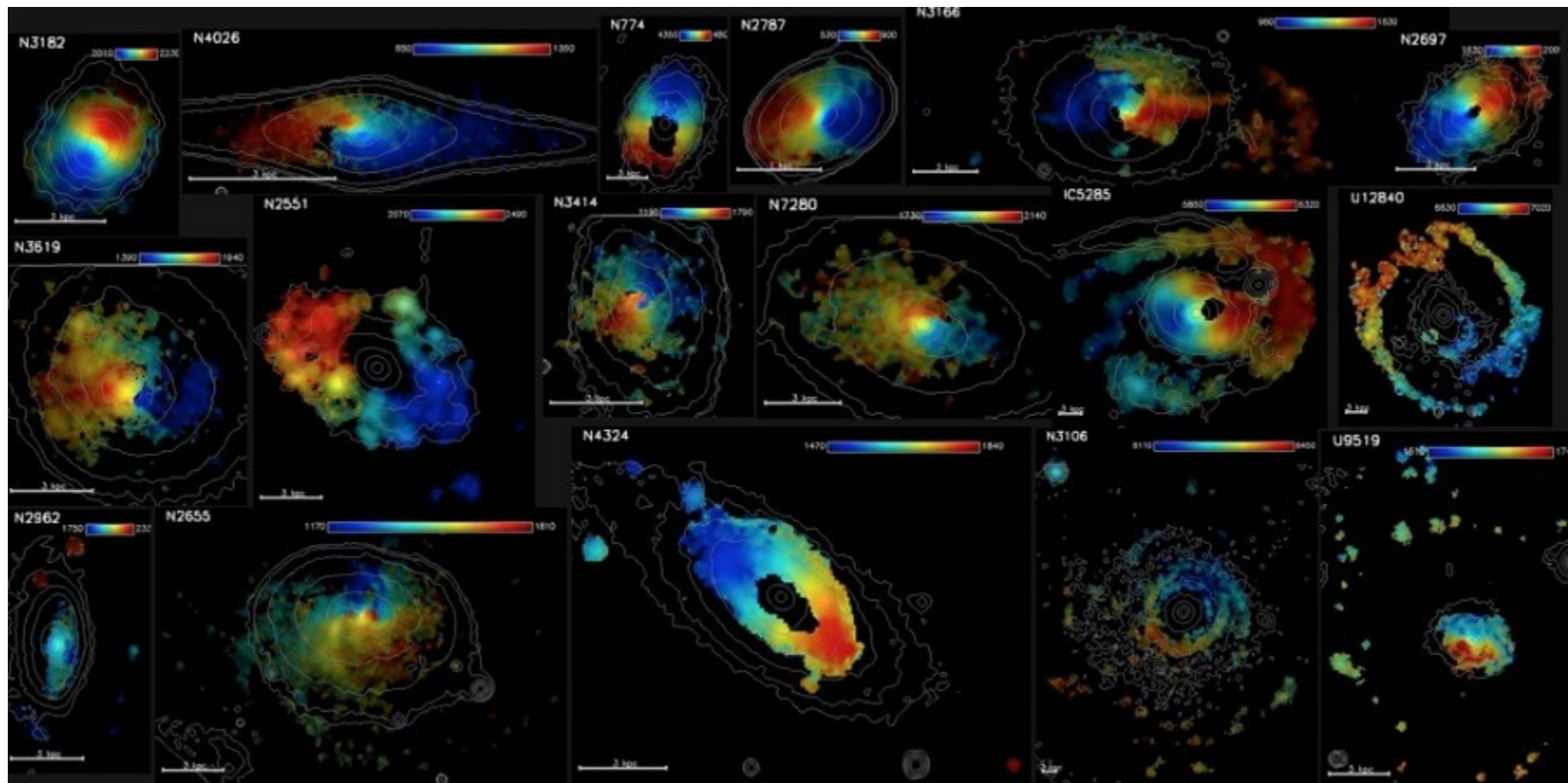
- **Решение.**

$$V \ll c \quad V = HR$$

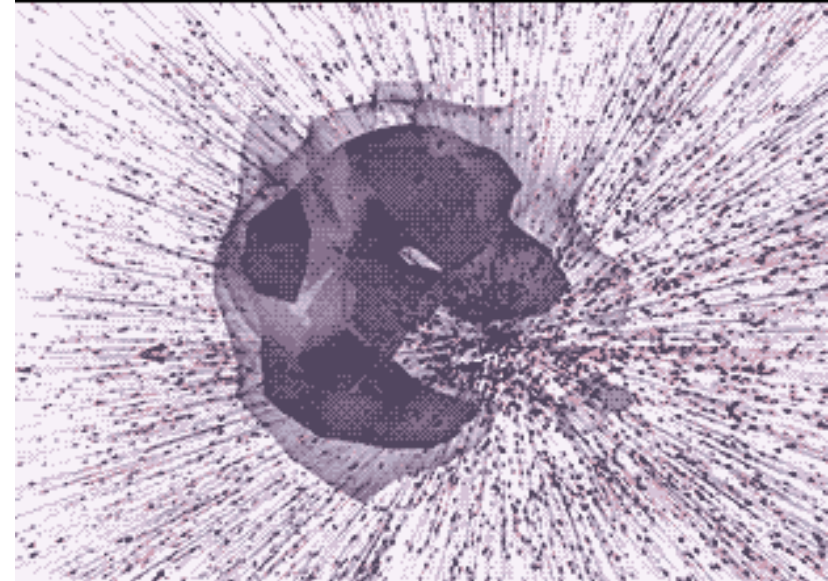
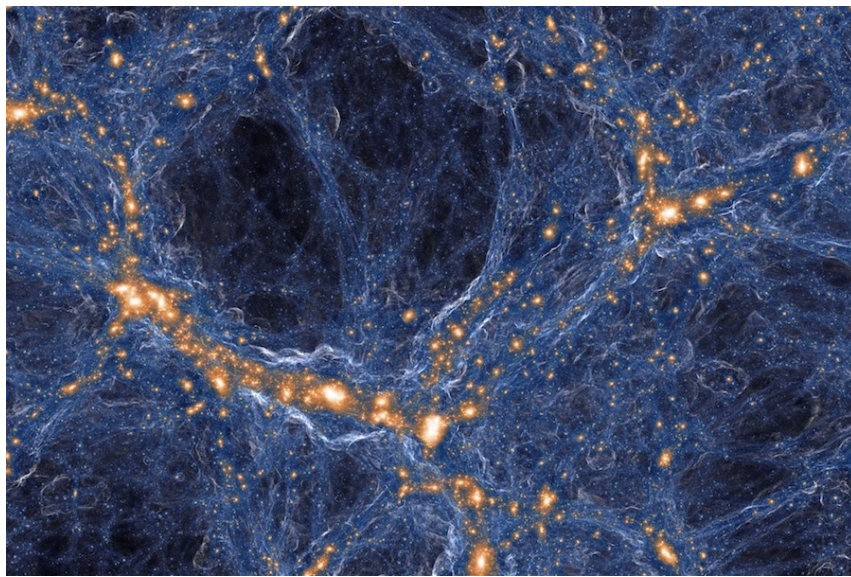
- $$R = \frac{V}{H} = \frac{4350}{70} = 62 \text{ Мпк}$$

- **Ответ:** примерно 62 Мпк.





- **Задача.** Какие методы можно использовать для измерения скорости движения галактик: эффект Доплера, изменение угловых размеров, изменение цвета, изменение периода пульсаров в двойных системах, соотношение Талли-Фишера.
- **Ответ:** эффект Доплера.



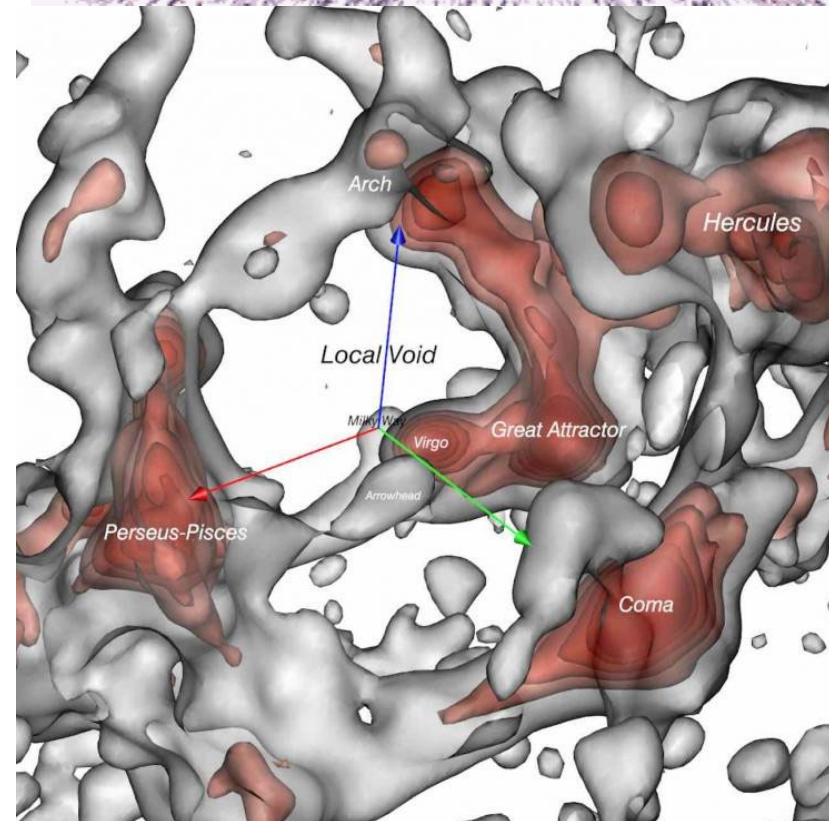
- **Задача.** Чему равно расстояние до галактики, если её красное смещение 0,01?

- **Решение.**

$$V \ll c \quad V = HR \quad z = \frac{V}{c}$$

$$R = \frac{V}{H} = \frac{cz}{H} = \frac{3000}{70} = 42.8 \text{ Мпк}$$

- **Ответ:** примерно 43 Мпк.



- **Задача.** Чему равна скорость галактики и её красное смещение, если расстояние до неё 570 Мпк?

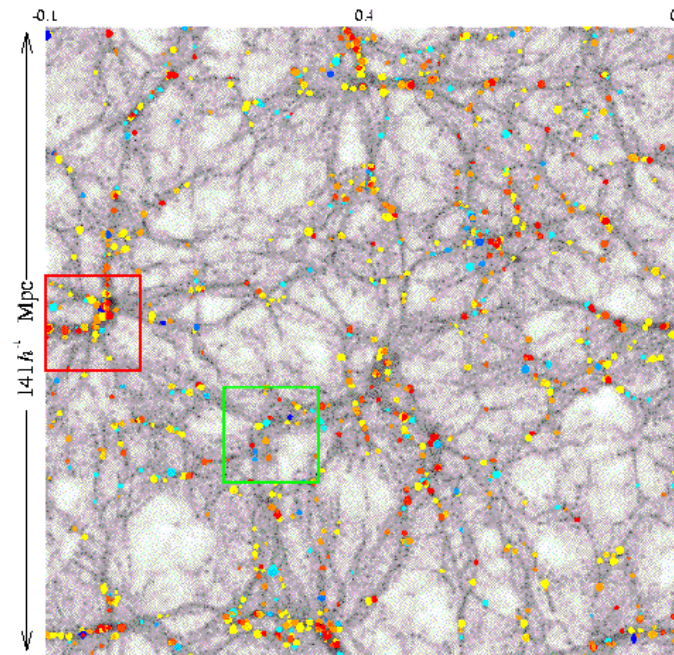
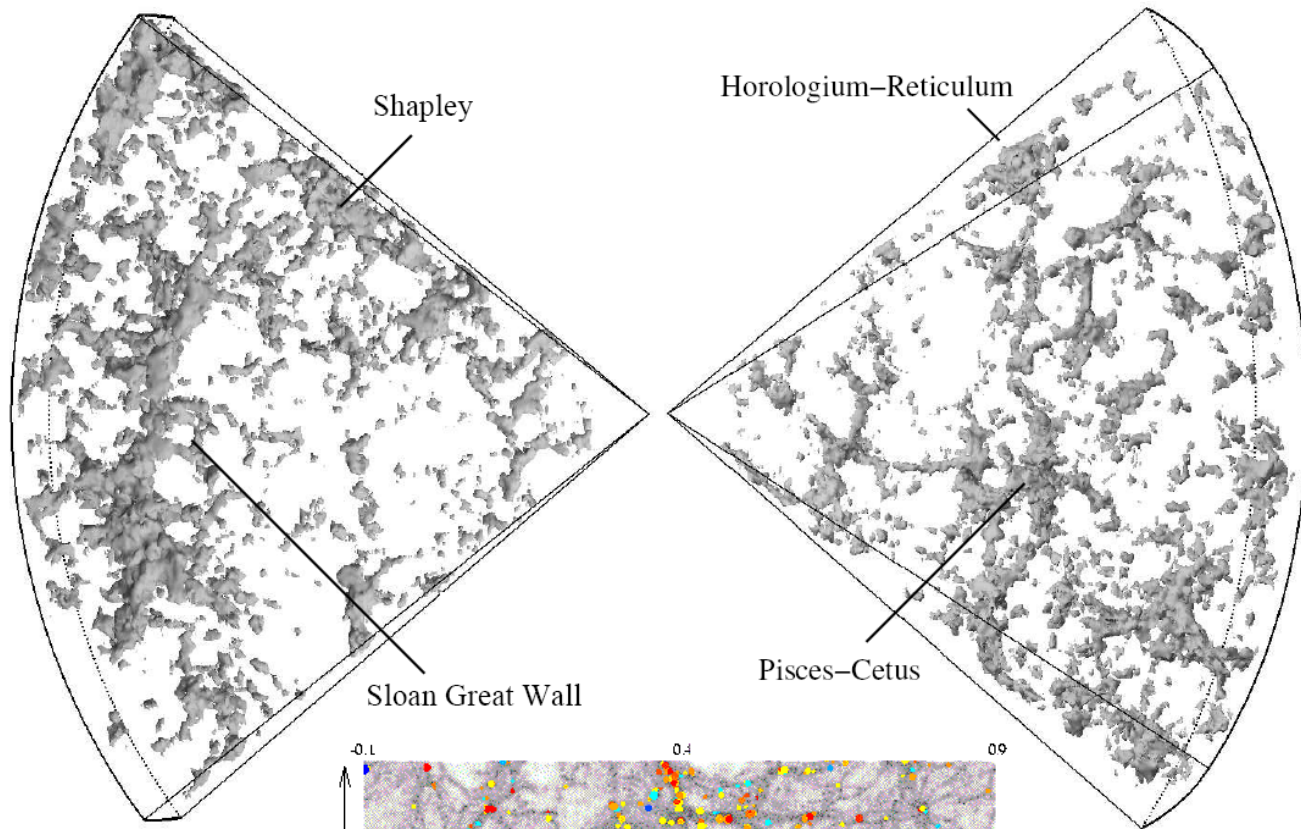
• **Решение.**

$$V = HR \quad z = \frac{V}{c}$$

- $V = HR = 570 \cdot 70 = 3.99 \cdot 10^4 \text{ км/сек}$

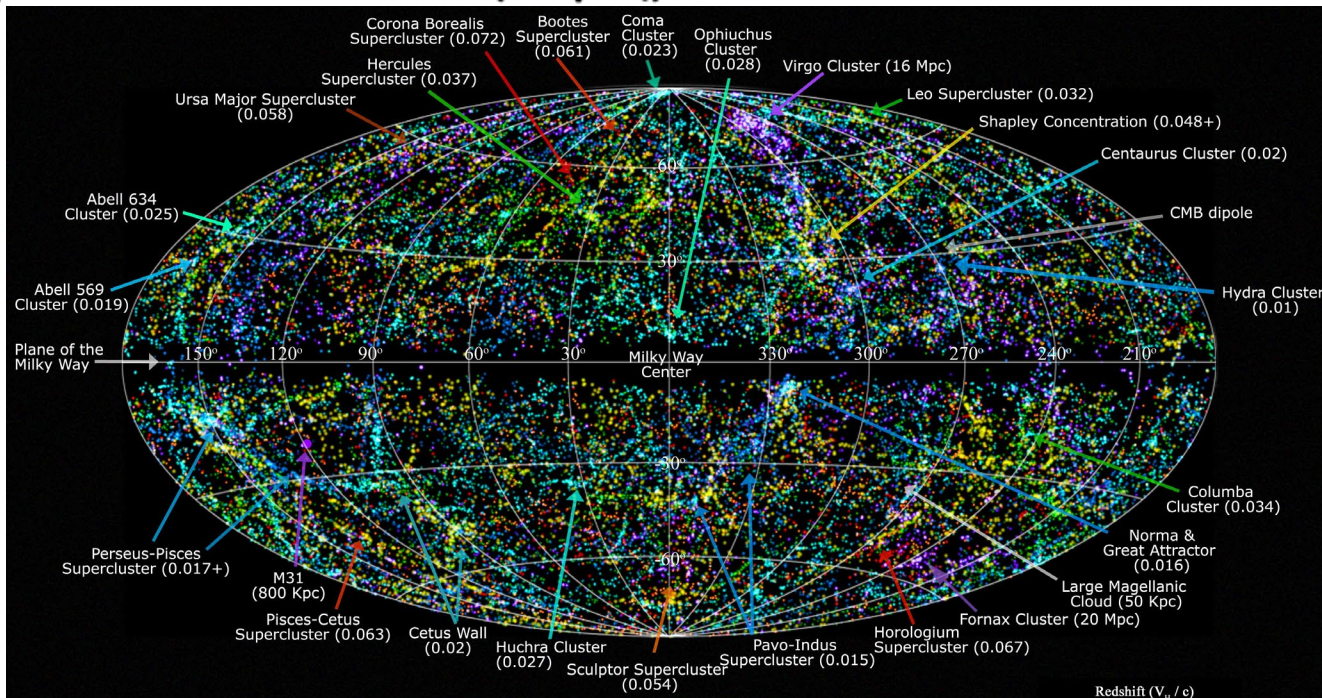
- $z = \frac{V}{c} = \frac{4 \cdot 10^4}{3 \cdot 10^5} = 0.13$

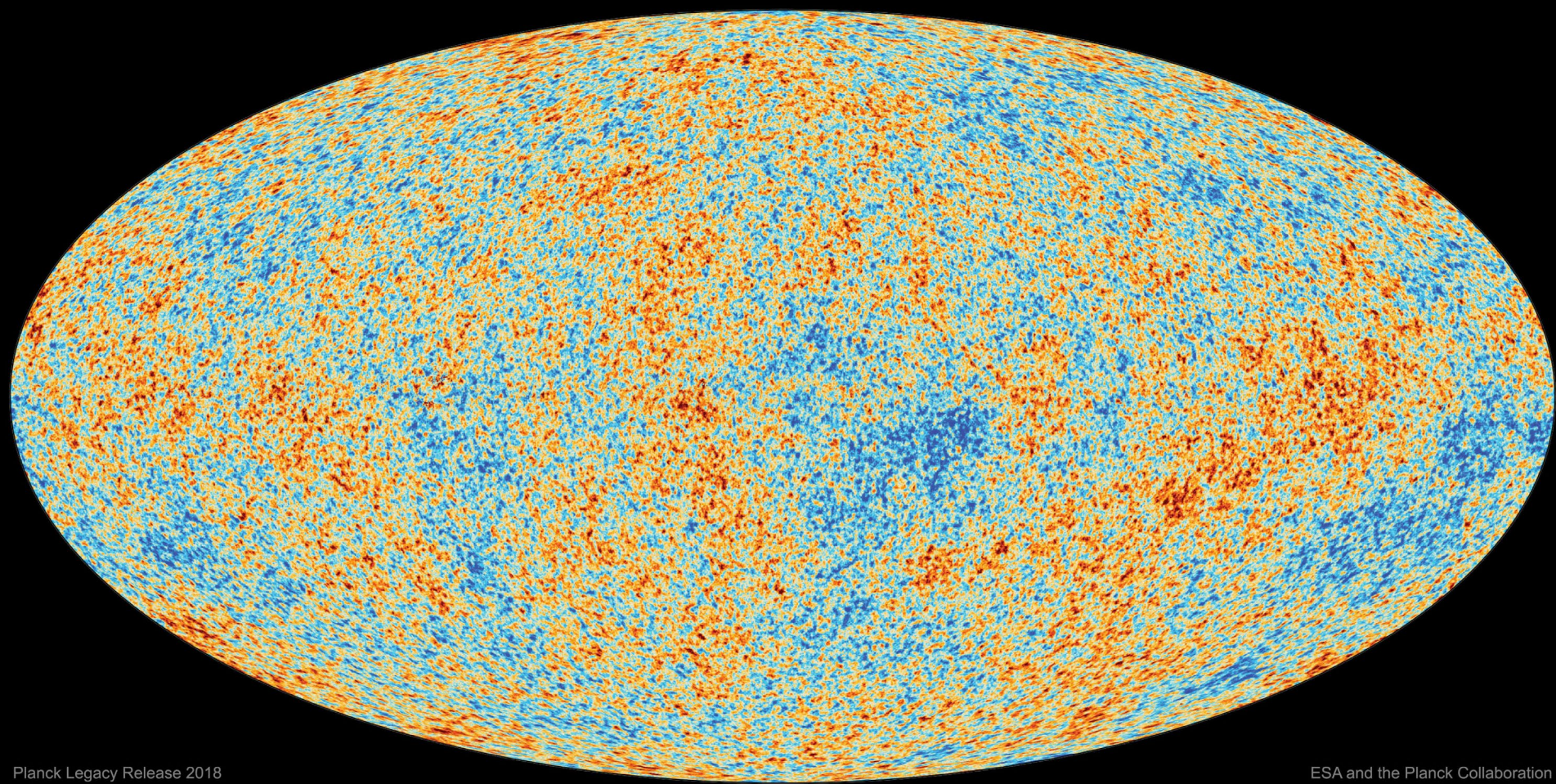
- **Ответ:** примерно 40000 км/с;
 $z \approx 0.13$.



- **Задача.** Постоянная Хаббла равна $H_0 = 70 \text{ км}/(\text{с} \cdot \text{Мпк})$. Выразите её в единицах СИ. Какую размерность она будет иметь?
- **Решение:**
Чтобы перевести размерность нужно разделить величину постоянной на Мпк выраженной в метрах

$$H_0 = \frac{70 \cdot 10^3}{206265 \cdot 1.5 \cdot 10^{11} \cdot 10^6} = 2.3 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1} \text{ или Гц}$$
- **Ответ:** $2,3 \cdot 10^{-12} \text{ с}^{-1}$ ($2,3 \cdot 10^{-12} \text{ Гц}$); постоянная Хаббла имеет размерность частоты (герц).





Planck Legacy Release 2018

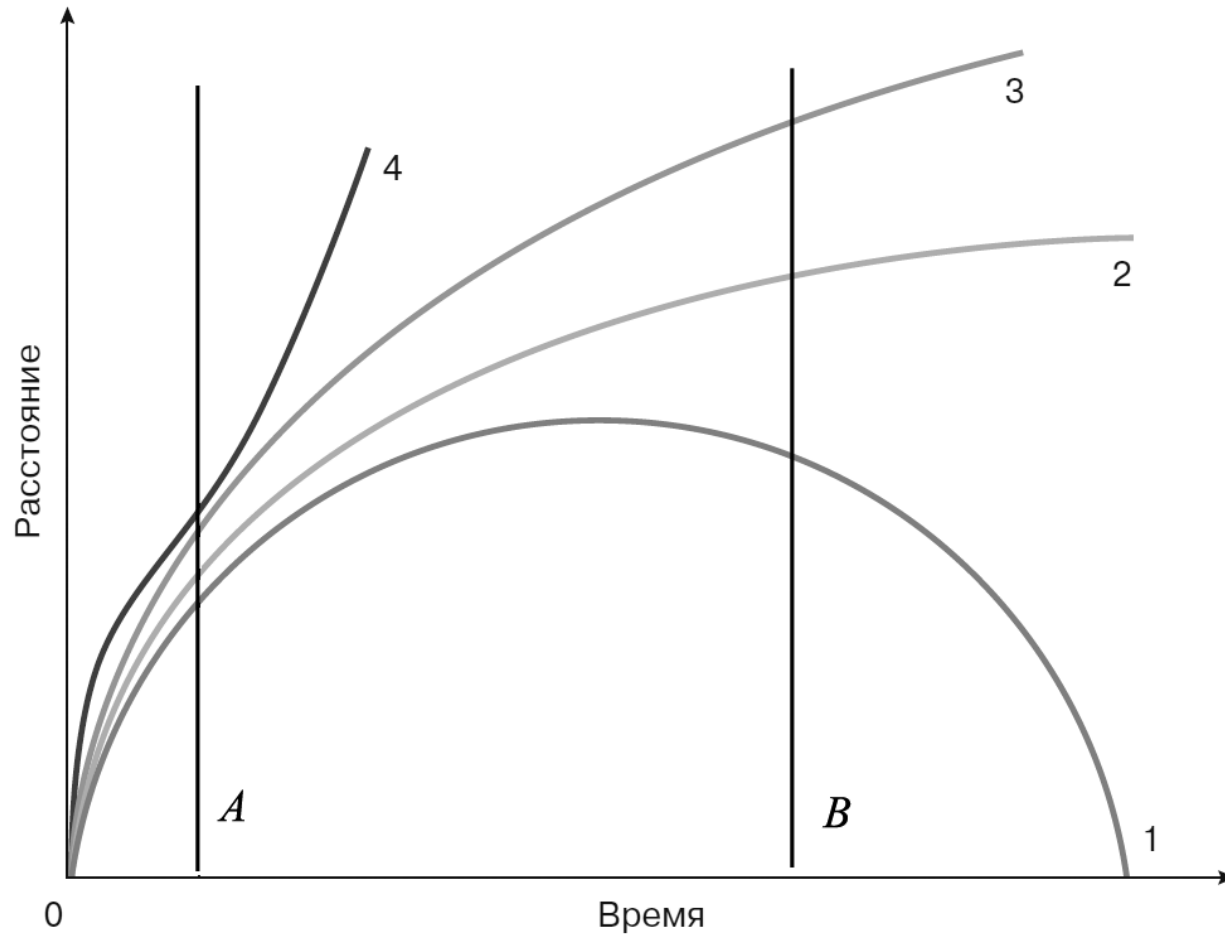
ESA and the Planck Collaboration

Задача. Реликтовое излучение это:

- 1. Космические лучи, приходящие к нам от далёких галактик
- 2. Фотоны гамма-излучения, ослабленные атмосферой Земли
- 3. Фотоны, оставшиеся от эпохи рекомбинации водорода
- 4. Излучение реликтовых чёрных дыр

Ответ: 3 - Фотоны, оставшиеся от эпохи рекомбинации водорода

- **Задача.** Какая из кривых реализуется в нашей Вселенной? В какой точке шкалы времени (А или В) находится наша Вселенная сейчас?



- **Ответ:** А-4 Б-2 В-4 Г-1

- **Задача.** Во время кульминации в зените галактики с красным смещением 0,02 у горизонта наблюдается галактика, скорость которой равна 4200 км/с. Каково расстояние между галактиками?
- **Решение:** Галактики в зените и на горизонте разделяет 90° по большому кругу на небесной сфере. Найдем расстояние до галактики в зените:

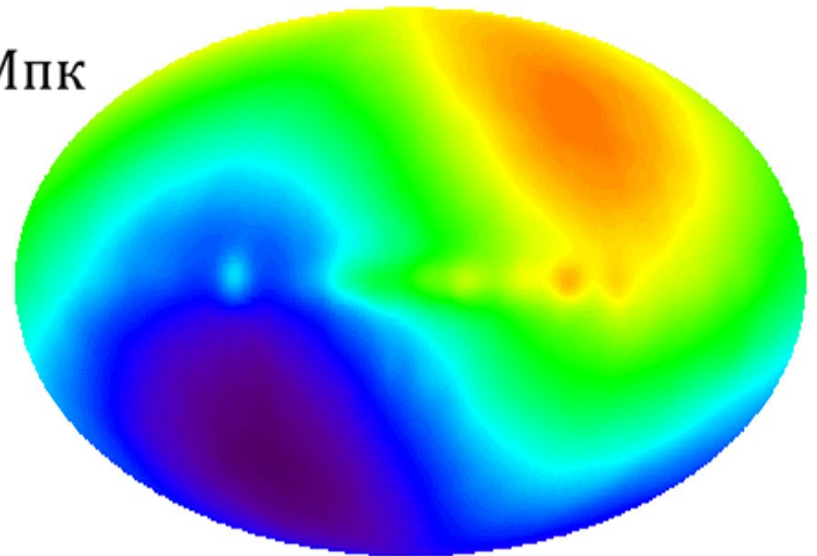
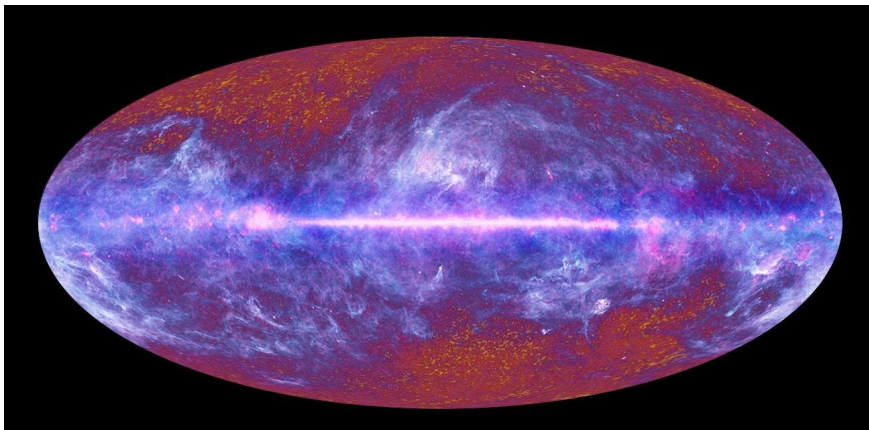
$$R_1 = \frac{cz}{H} = \frac{6000}{70} = 86 \text{ Мпк}$$

Найдем расстояние до галактики у горизонта:

$$R_2 = \frac{V}{H} = \frac{4200}{70} = 60 \text{ Мпк}$$

Найдем взаимное расстояние по теореме Пифагора:

$$\Delta = \sqrt{R_1^2 + R_2^2} = \sqrt{86^2 + 60^2} = 104.9 \text{ Мпк}$$



Задача. В таблицу внесены некоторые параметры галактик, полученные по измерениям положения линии $H\alpha$ в их спектрах. Заполните пустые ячейки и расставьте галактики в порядке увеличения расстояния до Солнца.

№	z	$ \Delta\lambda $, нм	λ , нм	V , км/с	D , Мпк
1	0,1		721,9		
2					1000
3	0,04	26,3		12000	
4				-300	

$$V \ll c$$

$$V = HR$$

$$z = \frac{V}{c} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}$$

Ответ: допускаются небольшие отличия, связанные с округлением промежуточных ответов
Порядок галактик: 4 – 3 – 1 – 2.

№	z	$ \Delta\lambda $, нм	λ , нм	V , км/с	D , Мпк
1	0,1	65,6	721,9	30000	429
2	0,23	151	807,2	69000	1000
3	0,04	26,3	682,6	12000	171
4	-0,001	0,66	655,6	-300	---

**Сброшенные
оболочки
звезды AG Киля**

Спасибо за внимание!

Ссылки

- Группа задач Астрономических олимпиад в контакте в документах есть задачи олимпиад разных уровней с решениями в разделе Ресурсы - <https://vk.com/astroolympiads>
- Сайт ВсОШ по Астрономии с архивами задач и результатами – <http://www.astroolymp.ru/>
- Сайт Московской Астрономической олимпиады <http://mosastro.olimpiada.ru>
- Сайт Санкт-Петербургской астрономической олимпиады <http://school.astro.spbu.ru/?q=olymp>
- Фотоальбом НАСА - <https://photojournal.jpl.nasa.gov/>
- Проект карта Вселенной на разных масштабах - <http://www.atlasoftheuniverse.com/>
- Виртуальный планетарий- <https://celestiaproject.net/ru/>
- Виртуальный планетарий - <http://www.stellarium.org/>
- Задачи и Упражнения по Общей Астрономии - <http://www.astronet.ru/db/msg/1175352/node1.html>