

ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 7

1. **(4 балла).** Светимость массивных звёзд главной последовательности определяется эффективностью CNO-цикла. Его удельное энерговыделение примерно равно $\varepsilon = 5$ МэВ/нуклон. Зная это и считая, что непрозрачность ядрах таких звёзд определяется томпсоновским рассеянием на свободных электронах, получите верхнюю оценку минимального времени t_{\max} , которое проведёт массивная звезда на главной последовательности.
2. **(6 баллов).** Воспользовавшись теоремой вириала для политропного шара покажите, что такой шар оказывается неустойчивым при показателе адиабаты $\gamma < 4/3$.

РЕШЕНИЕ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ 7

(I) Максимальная светимость, которую может иметь такая массивная звезда определяется эддингтоновским пределом. Для систем с доминированием томпсоновского рассеяния

$$L_{\text{Edd}} \approx 1.38 \cdot 10^{38} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \text{ эрг с}^{-1}.$$

Эффективность CNO-цикла:

$$\varepsilon = 5 \text{ МэВ/нуклон} = 5 \cdot 10^6 \times 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг} / 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ г} \approx 5 \cdot 10^{18} \text{ эрг г}^{-1}.$$

Верхняя оценка времени жизни звезды получается, если предположить, что *вся* масса звезды будет так или иначе участвовать в термоядерных реакциях. Тогда:

$$t < \frac{\varepsilon M}{L_{\text{Edd}}} = \frac{\varepsilon M_{\odot}}{1.38 \cdot 10^{38} \text{ эрг с}^{-1}} \approx 7.2 \cdot 10^{13} \text{ с} = \mathbf{2.3 \cdot 10^6 \text{ лет.}}$$

РЕШЕНИЕ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ 7

(2) Теорема вириала для политропного самогравитирующего шара с показателем адиабаты γ записывается как:

$$W = -3(\gamma - 1)U,$$

где W – гравитационная энергия шара, а U – тепловая. Таким образом полная энергия такой системы равна:

$$E = U - 3(\gamma - 1)U = (4 - 3\gamma)U.$$

Система является связанной в том случае если её полная энергия отрицательна, переходит в состояние безразличного равновесия в случае $E = 0$ и становится неустойчивой, если $E > 0$. С учётом того, что внутренняя энергия всегда положительно, получаем, что условие $E > 0$ эквивалентно

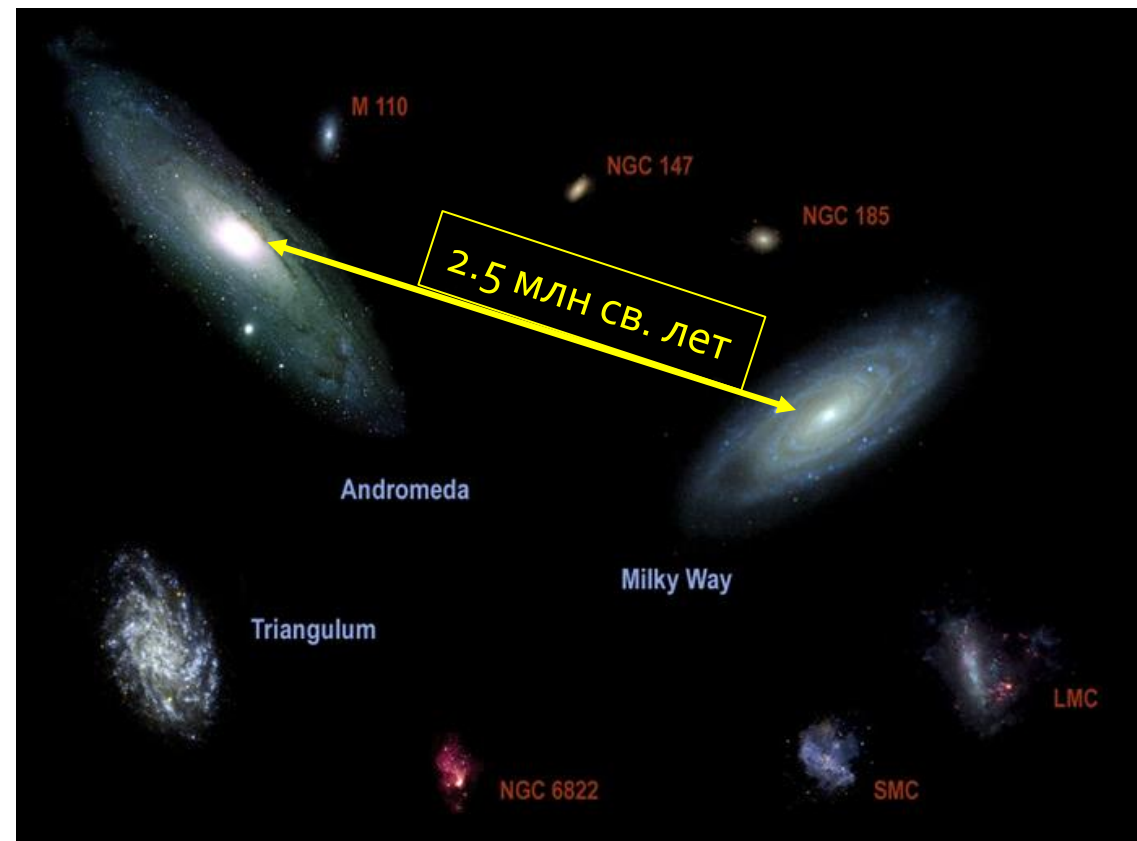
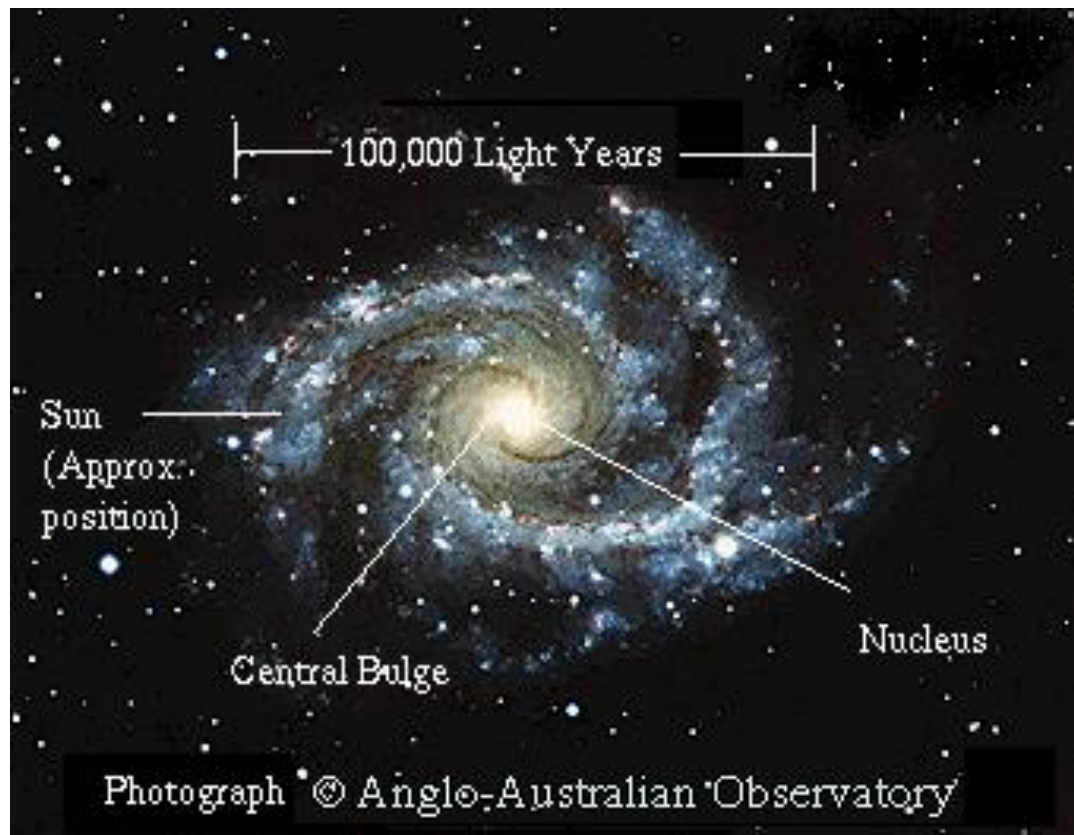
$$4 - 3\gamma > 0 \Leftrightarrow \gamma < 4/3.$$

ЛЕКЦИЯ 8: ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

ВВЕДЕНИЕ В АСТРОФИЗИКУ. ВШЭ 2022/2023. БАКАЛАВРЫ, 4-Й МОДУЛЬ.

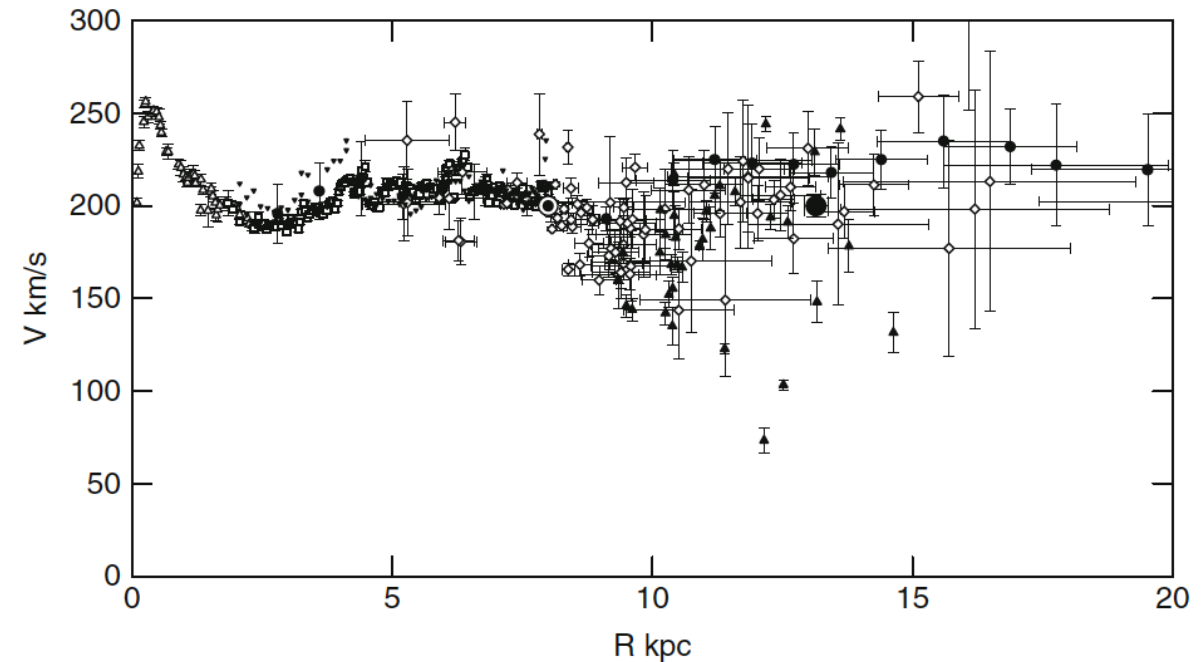
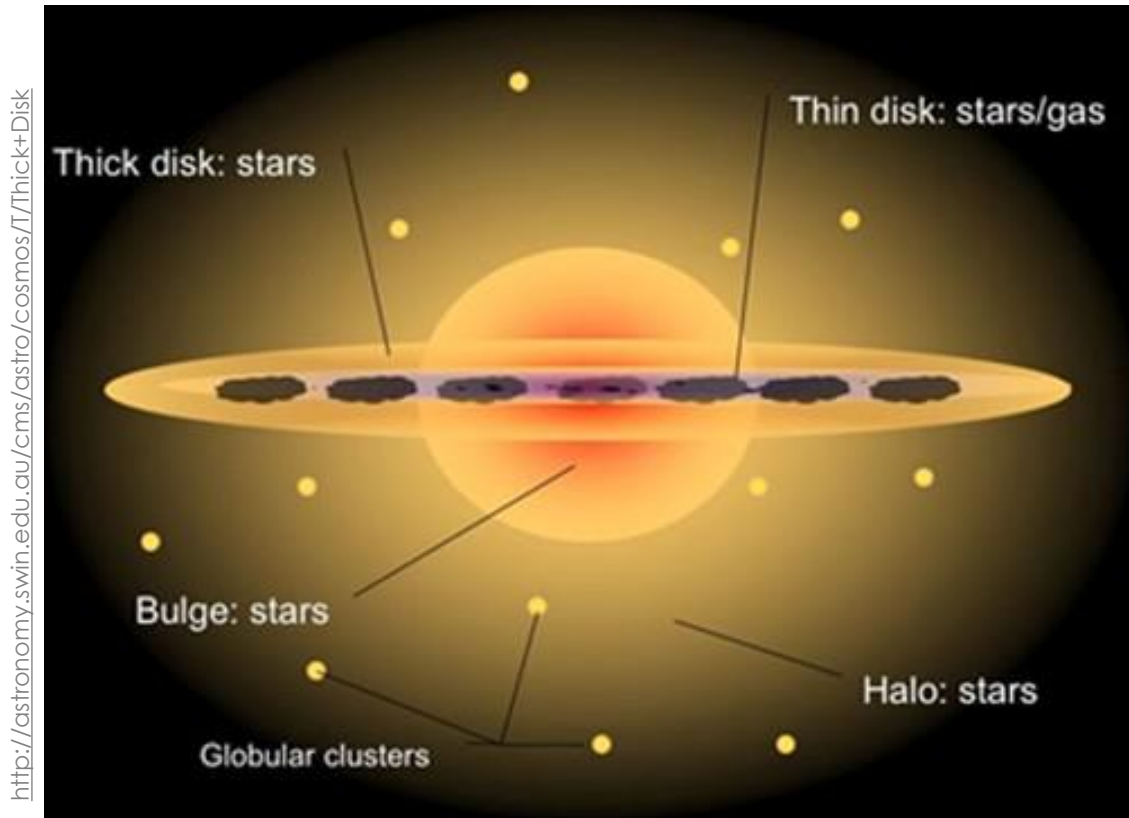
АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

ГАЛАТИКИ – СВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ ЗВЁЗД



- В средней галактике $\sim 10^{11}$ звёзд, всего во Вселенной $\sim 10^{11}$ галактик.
- Галактики имеют спутники
- Галактики организованы иерархически (группы, скопления, сверхскопления...)

КИНЕМАТИКА ЗВЕЗД В МЛЕЧНОМ ПУТИ



- Круговые скорости около 250 км/с
- Скорость убегания 500-800 км/с (зависит от расстояния)
- Пекулярные скорости около 30 км/с

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

astro-ph/9603106

$$\Phi = \Phi_H + \Phi_C + \Phi_D.$$

$$\Phi_H = \frac{1}{2}V_H^2\ln(r^2 + r_0^2)$$

$$\Phi_C = -\frac{GM_{C_1}}{\sqrt{r^2 + r_{C_1}^2}} - \frac{GM_{C_2}}{\sqrt{r^2 + r_{C_2}^2}}.$$

$$\Phi_D = \Phi_{D_1} + \Phi_{D_2} + \Phi_{D_3}.$$

$$\Phi_{D_n} = \frac{-GM_{D_n}}{\sqrt{(R^2 + (a_n + \sqrt{(z^2 + b^2)})^2)}}$$

ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

Component	Parameter	Value
Dark Halo	r_0	8.5 kpc
	V_H	220 km s ⁻¹
Bulge/Stellar-halo	r_{C_1}	2.7 kpc
	M_{C_1}	$3.0 \times 10^9 M_\odot$
Central comp.	r_{C_2}	0.42 kpc
	M_{C_2}	$1.6 \times 10^{10} M_\odot$
Disk	b	0.3 kpc
	M_{D_1}	$6.6 \times 10^{10} M_\odot$
	a_1	5.81 kpc
	M_{D_2}	$-2.9 \times 10^{10} M_\odot$
	a_2	17.43 kpc
	M_{D_3}	$3.3 \times 10^9 M_\odot$
	a_3	34.86 kpc

$n = 1, 2, 3$

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

astro-ph/9603106

$$\Phi = \Phi_H + \Phi_C + \Phi_D.$$

$$\Phi_H = \frac{1}{2} V_H^2 \ln(r^2 + r_0^2)$$

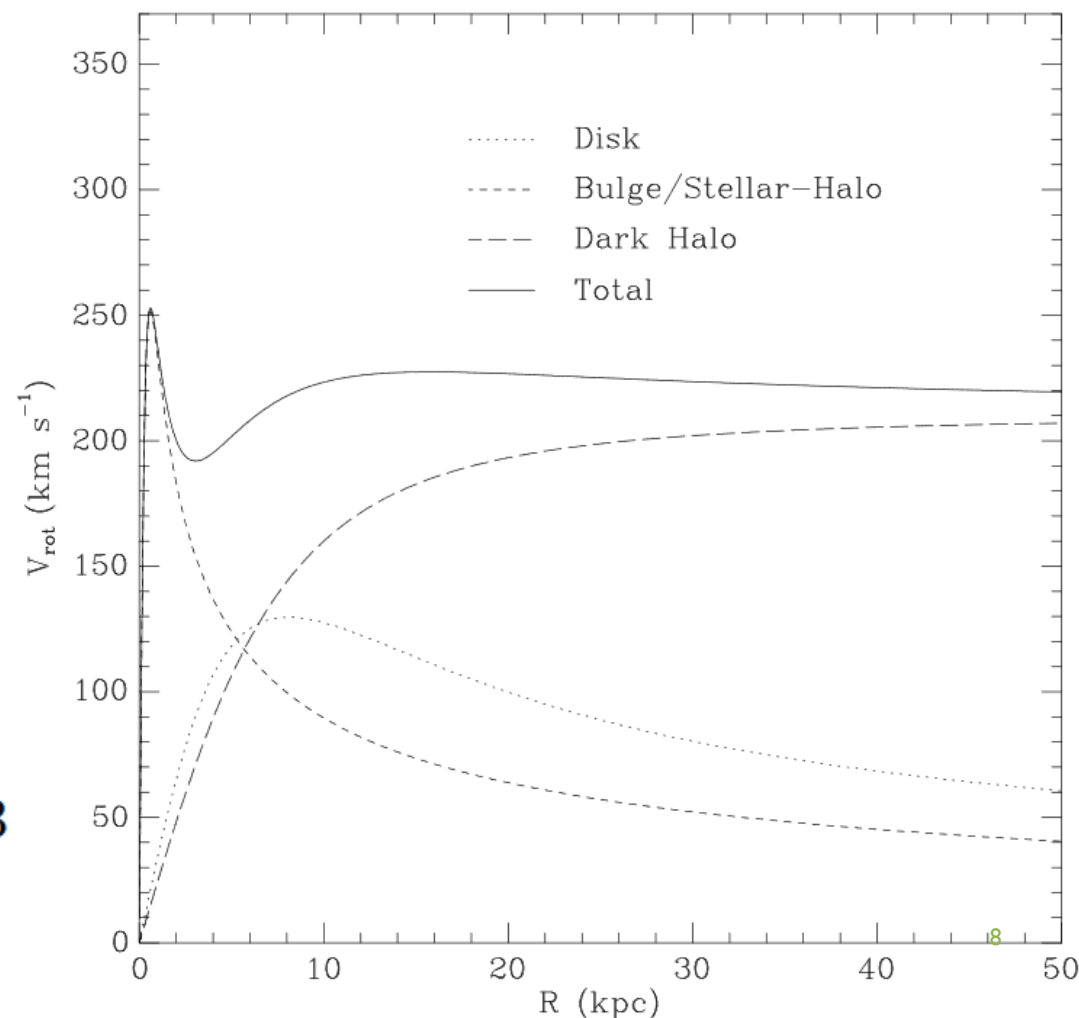
$$\Phi_C = -\frac{GM_{C_1}}{\sqrt{r^2 + r_{C_1}^2}} - \frac{GM_{C_2}}{\sqrt{r^2 + r_{C_2}^2}}.$$

$$\Phi_D = \Phi_{D_1} + \Phi_{D_2} + \Phi_{D_3}.$$

$$\Phi_{D_n} = \frac{-GM_{D_n}}{\sqrt{(R^2 + (a_n + \sqrt{(z^2 + b^2)})^2)}}$$

$n = 1, 2, 3$

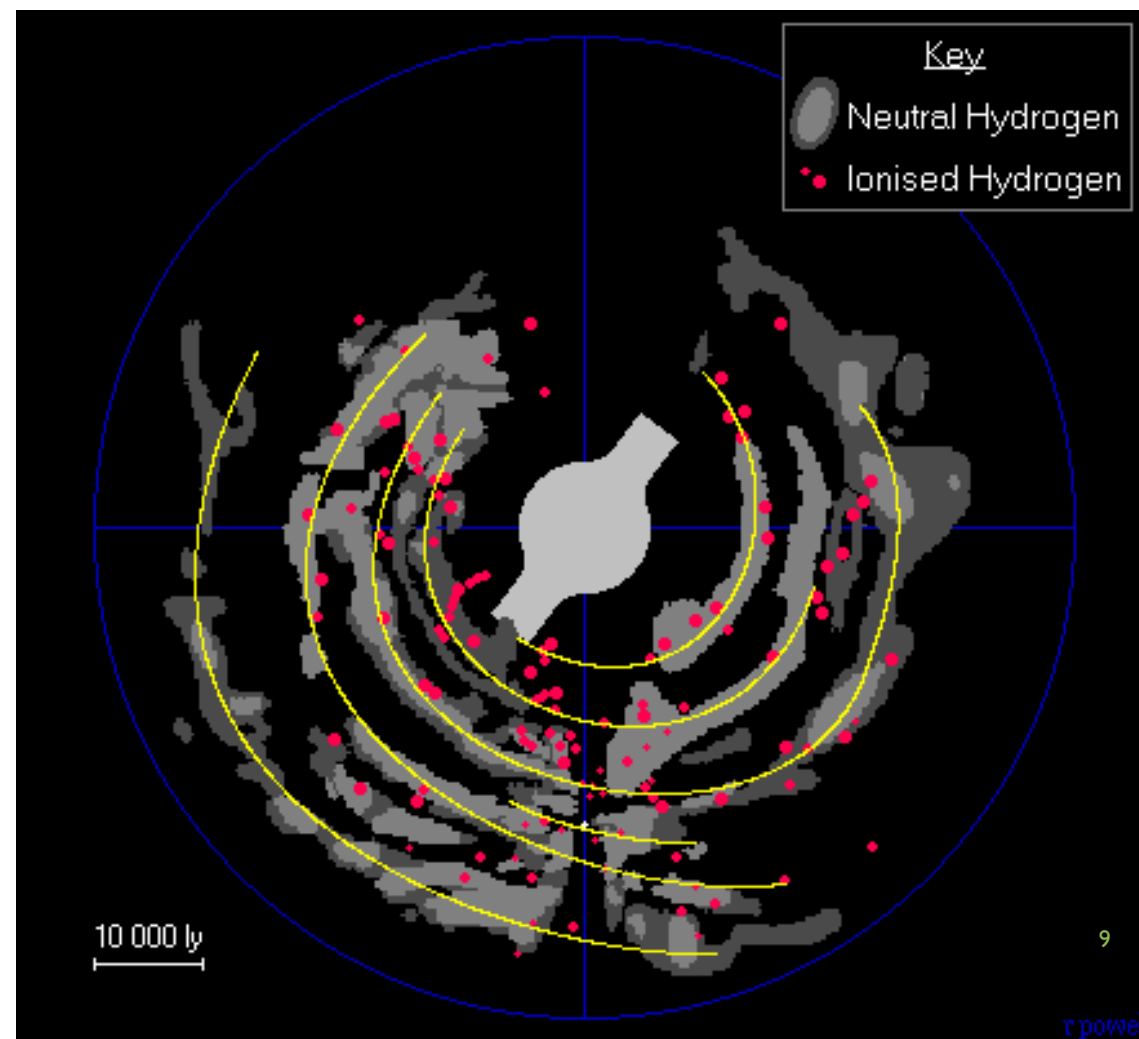
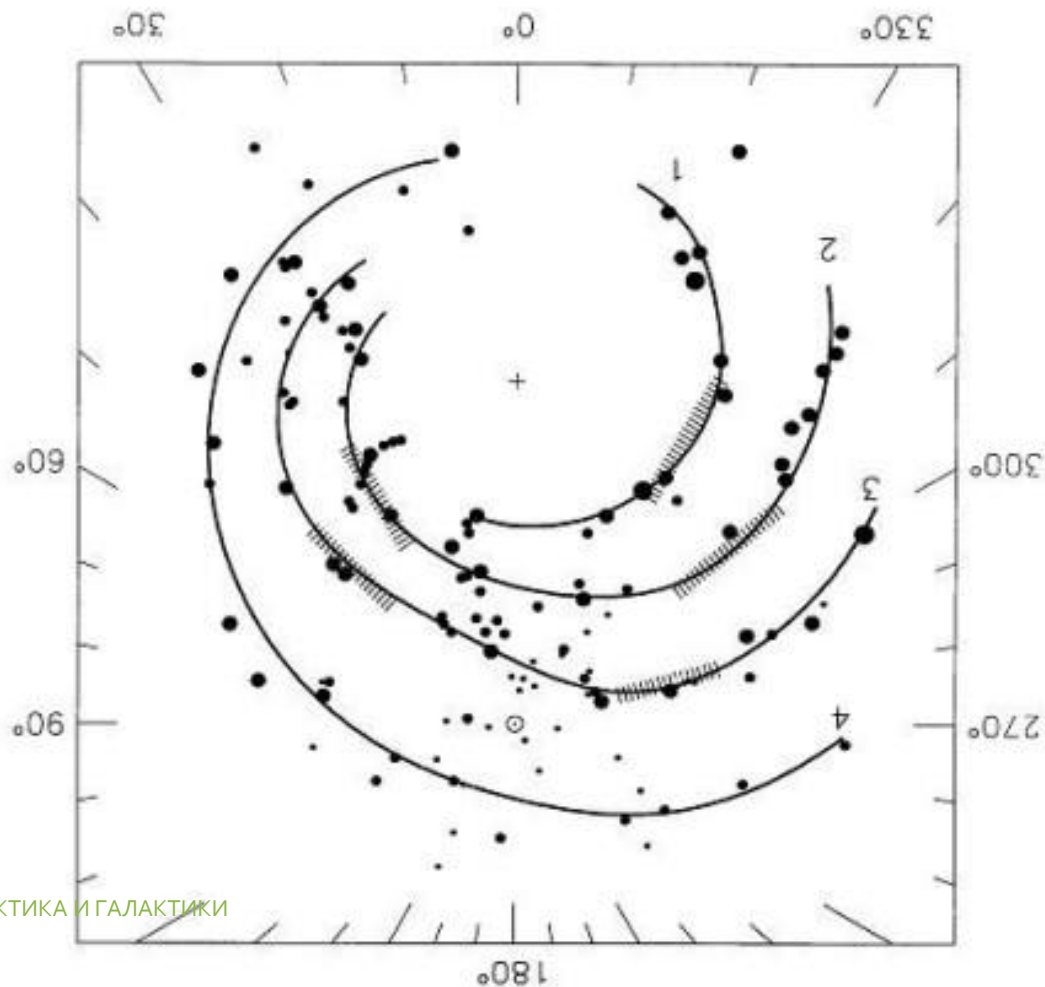
ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ



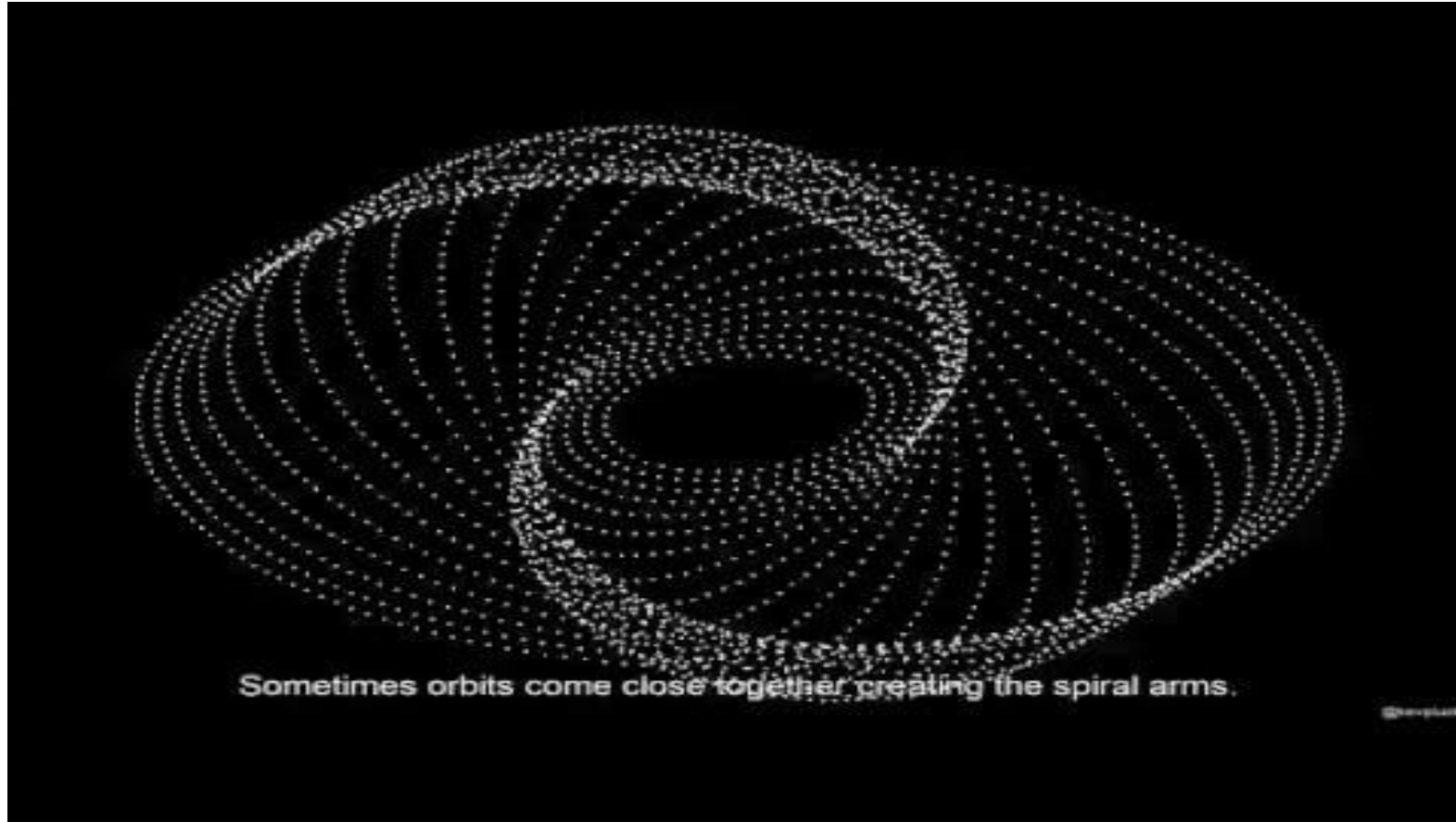
СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ

- Расстояние Солнца от центра Галактики 8 кпк.
- Скорость вращения на солнечном радиусе 230-250 км/с.
- У нас примерно 4 спиральных рукава, не считая ответвлений (шпуров)

J.H. Taylor, J.M. Cordes



СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ – ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ



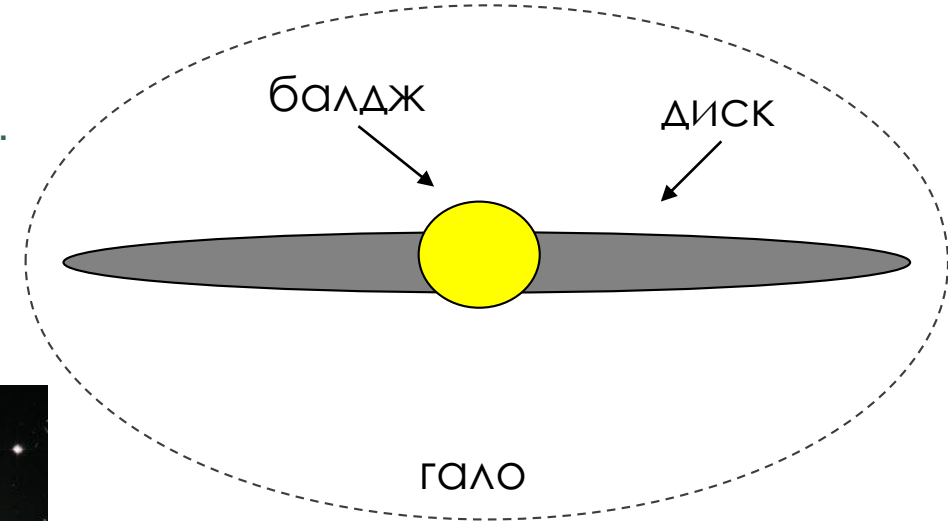
Grand Design Spiral

МЕЖЗВЁЗДНАЯ СРЕДА



ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

Межзвездная среда концентрируется к плоскости Галактики. Хорошо виден вклад пыли в поглощение света звезд.



Газ есть не только в галактическом диске, но в других частях его плотность не достигает больших значений и не начинается формирование новых звезд.

ФАЗЫ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

Component	Fractional volume	Scale height (pc)	Temperature (K)	Density (particles/cm ³)	State of hydrogen	Primary observational techniques
Molecular clouds	< 1%	80	10–20	10 ² –10 ⁶	molecular	Radio and infrared molecular emission and absorption lines
Cold neutral medium (CNM)	1–5%	100–300	50–100	20–50	neutral atomic	H I 21 cm line absorption
Warm neutral medium (WNM)	10–20%	300–400	6000–10000	0.2–0.5	neutral atomic	H I 21 cm line emission
Warm ionized medium (WIM)	20–50%	1000	8000	0.2–0.5	ionized	H α emission and pulsar dispersion
H II regions	< 1%	70	8000	10 ² –10 ⁴	ionized	H α emission and pulsar dispersion
Coronal gas Hot ionized medium (HIM)	30–70%	1000–3000	10 ⁶ –10 ⁷	10 ⁻⁴ –10 ⁻²	ionized (metals also highly ionized)	X-ray emission; absorption lines of highly ionized metals, primarily in the ultraviolet

[arxiv:1803.02277](https://arxiv.org/abs/1803.02277) Межзвездная среда: от молекул до звездообразования

[arxiv:1412.5182](https://arxiv.org/abs/1412.5182) Физические процессы в межзвездной среде

[arxiv:1206.4090](https://arxiv.org/abs/1206.4090) Межзвездное поглощение и межзвездная поляризация

[arxiv:1104.2949](https://arxiv.org/abs/1104.2949) Межзвездная пыль

[arxiv:2004.06113](https://arxiv.org/abs/2004.06113) Жизненный цикл молекулярного облака

МИР ГАЛАКТИК: ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ



Шарль Мессье (1730-1817),
охотник за кометами

В 1744 г. публикует первый
каталог туманных объектов
(45 шт, сейчас – 110).

В современном каталоге
Мессье содержится 40
галактик.

МИР ГАЛАКТИК: РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ



Весто Слайфер
(1875-1963)



Генриетта Ливитт
(1868-1921)



Жорж Леметр
(1894-1966)



Эдвин Хаббл
(1889-1953)

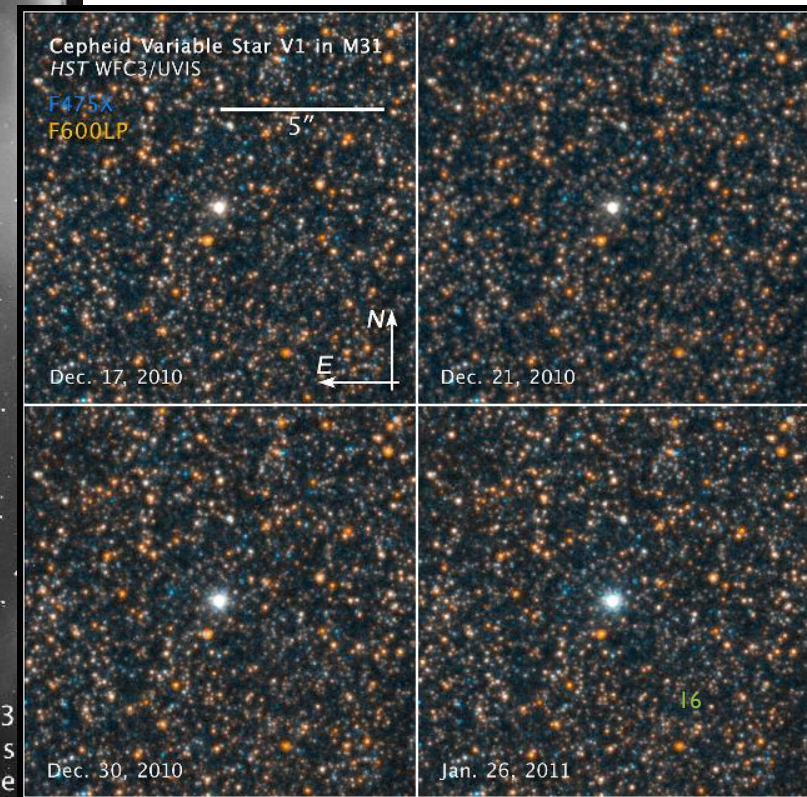
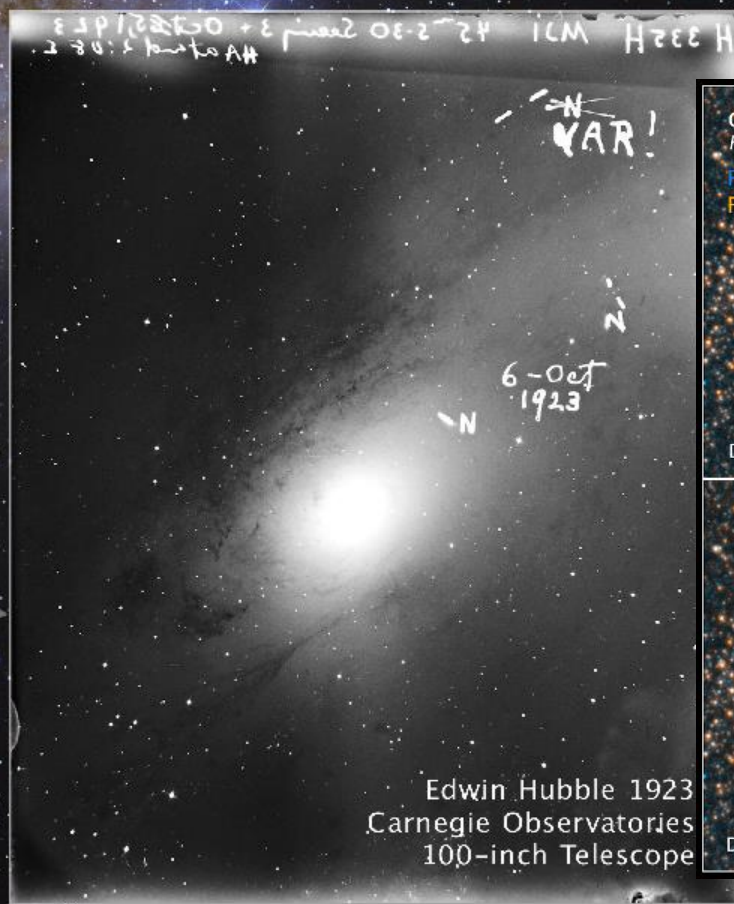
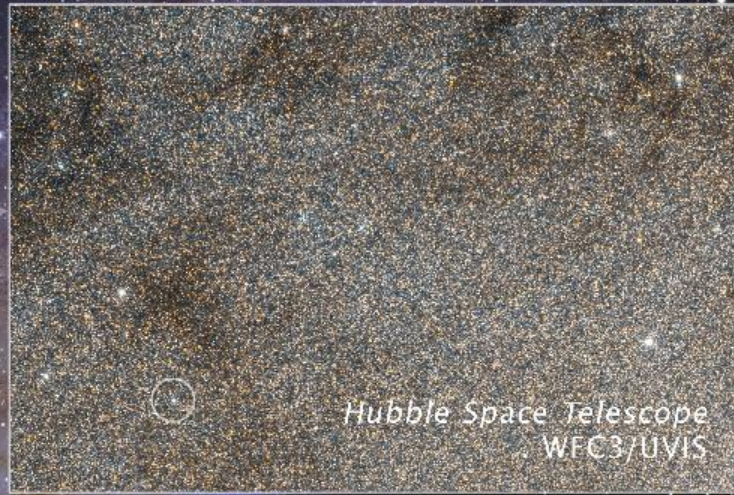


Милтон Хьюмасон
(1891-1972)



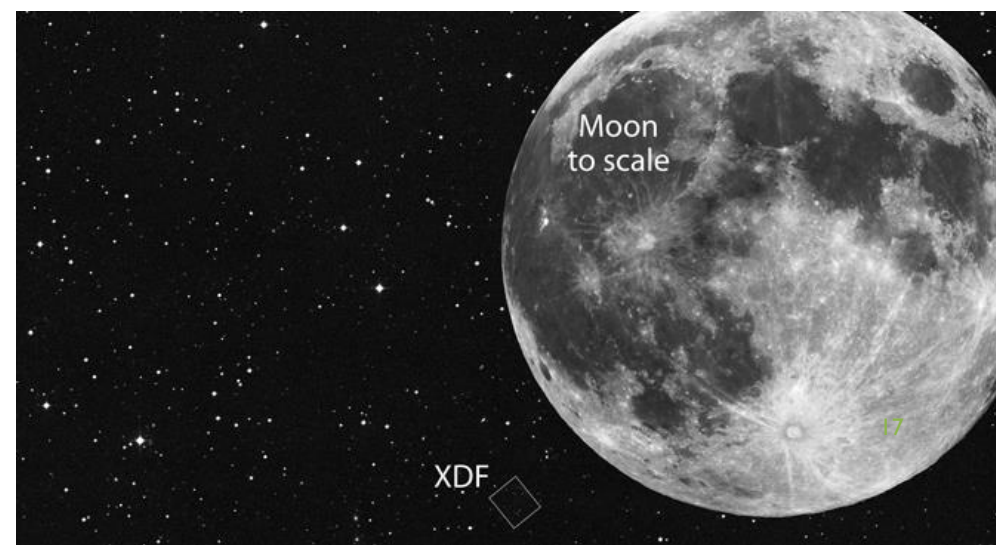
ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

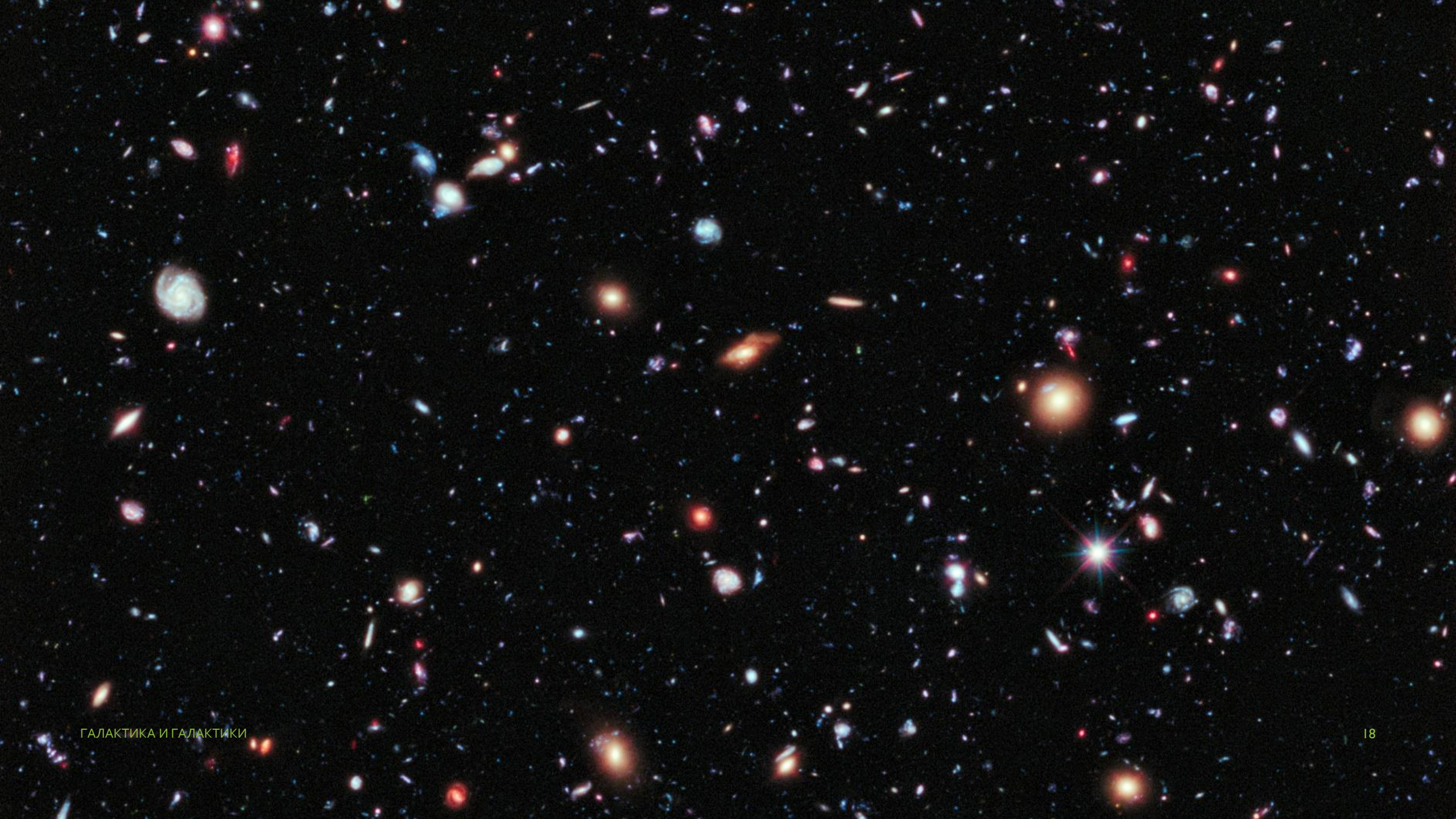
Photo: R. Gendler





Созвездие Печь
2003-2004 гг





ЗООПАРК ГАЛАКТИК



Дисковая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная

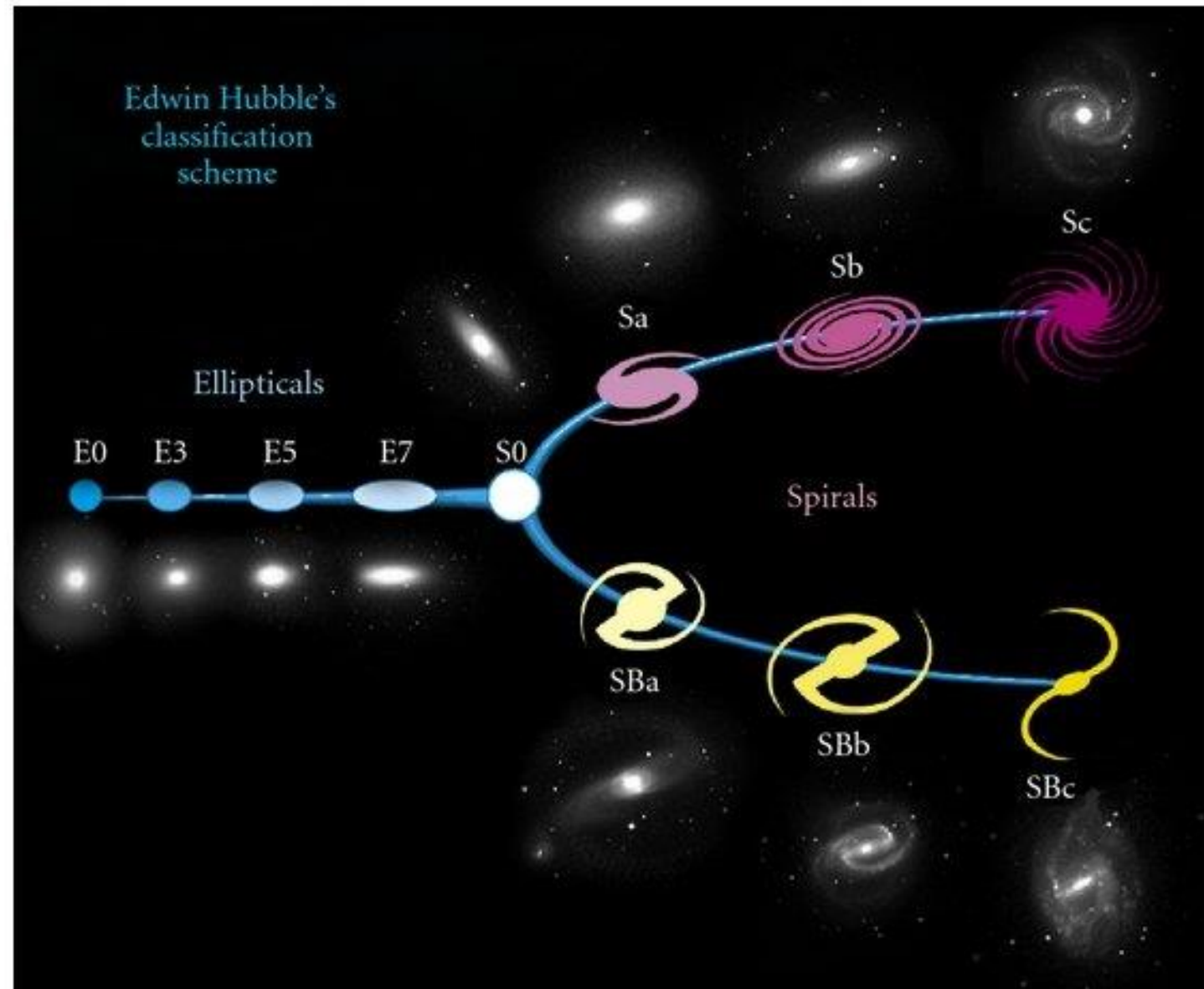
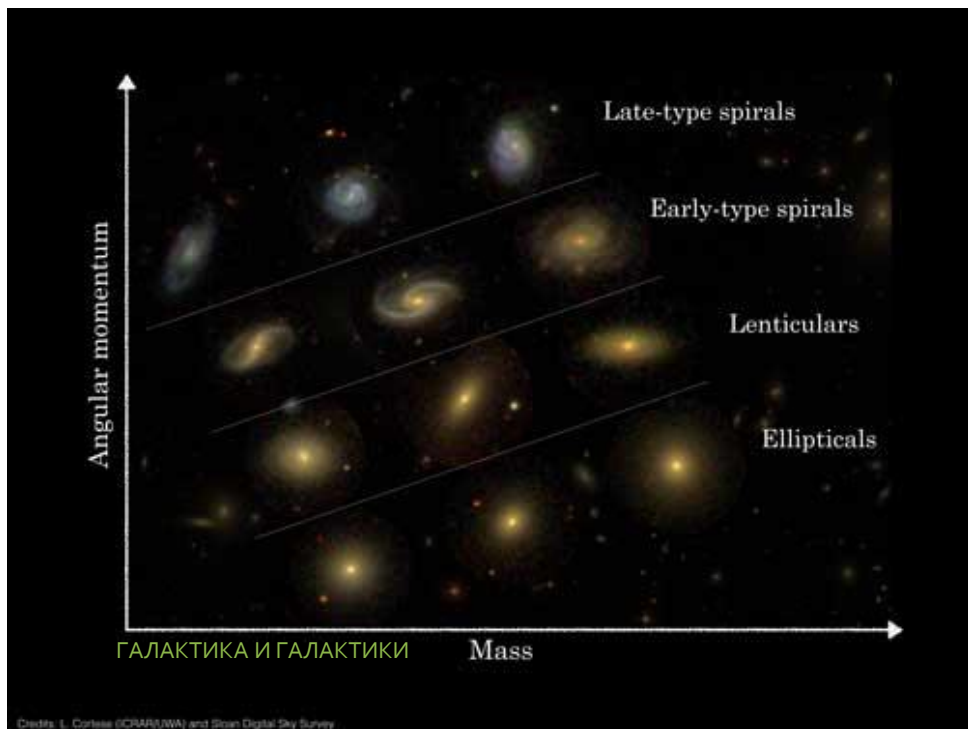


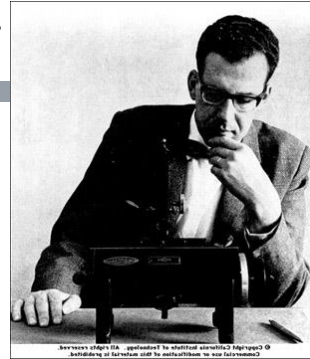
Эллиптическая



Взаимодействующие

КАМЕРТОН ХАББЛА



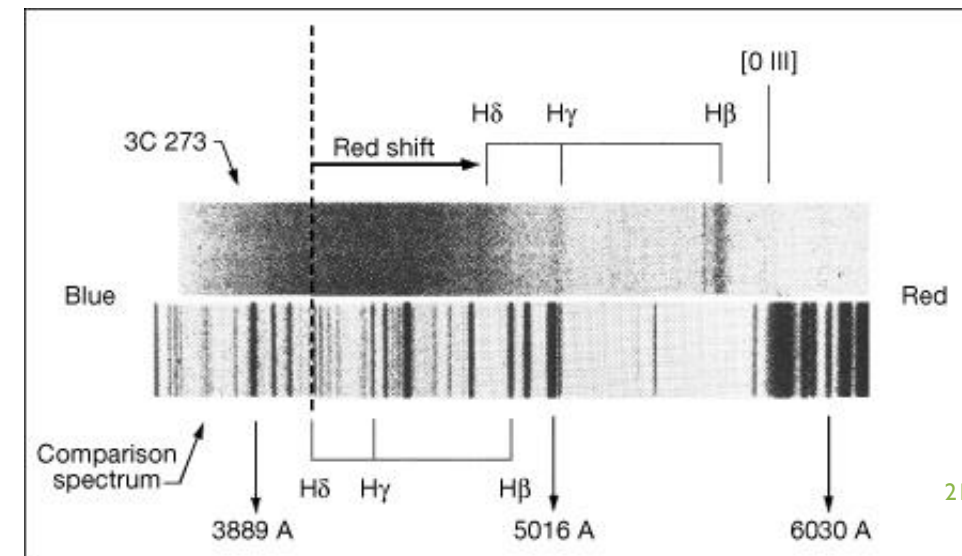


АКТИВНЫЕ ЯДРА: КВАЗАРЫ



Квазары начали открывать как радиоисточники в конце 50-х гг. Также их удалось обнаружить в оптическом диапазоне, как звездopodobные источники (сам термин появился в 1964 г.)

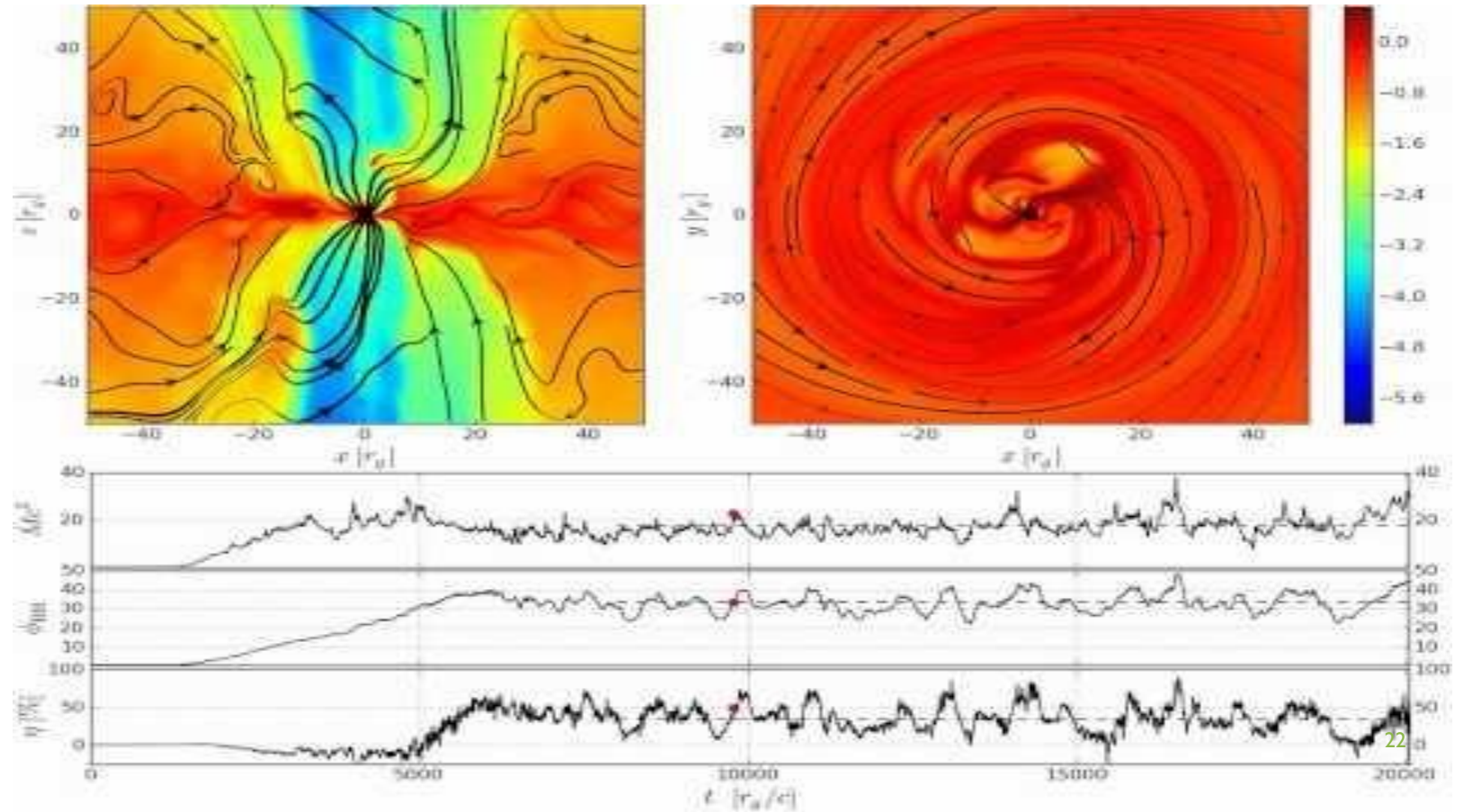
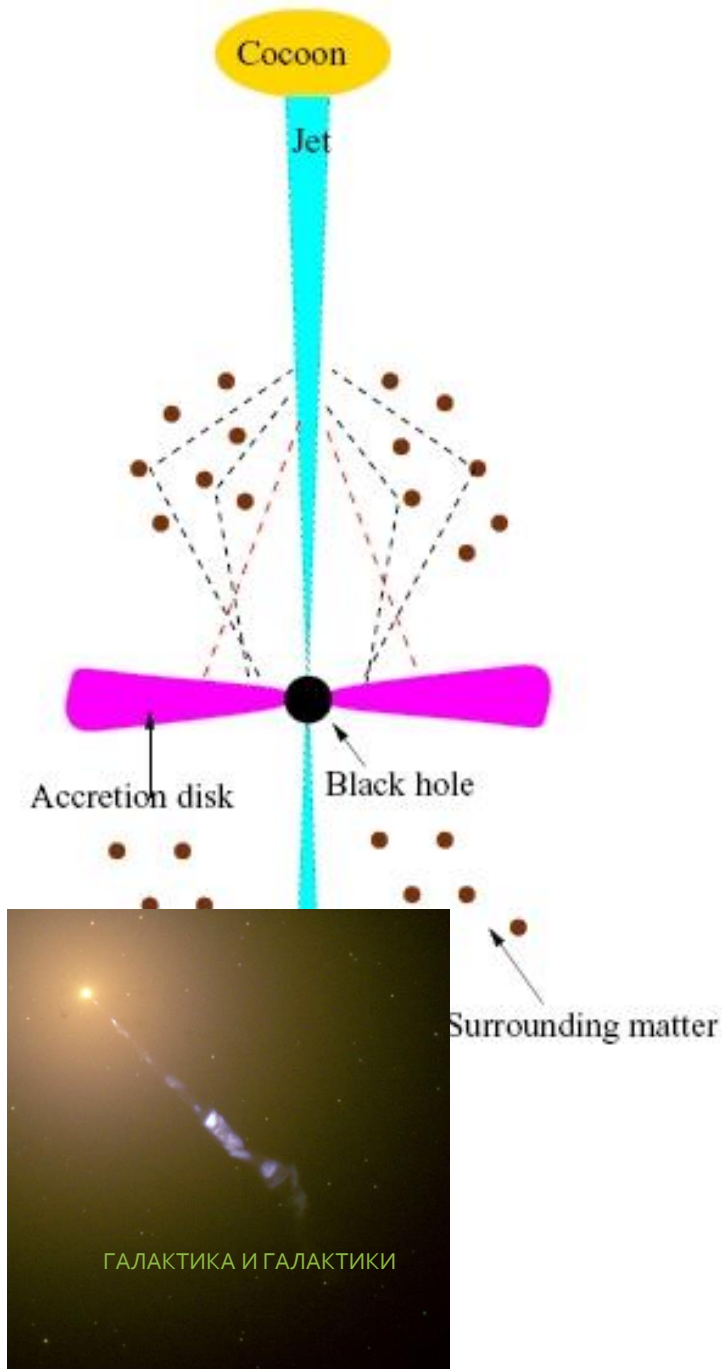
Долгое время шли дискуссии о природе этих «радиозвезд».



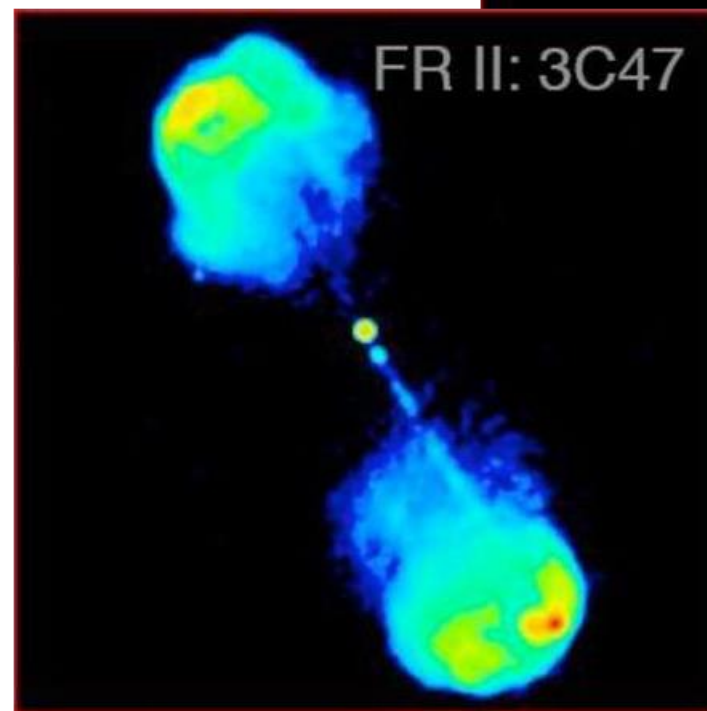
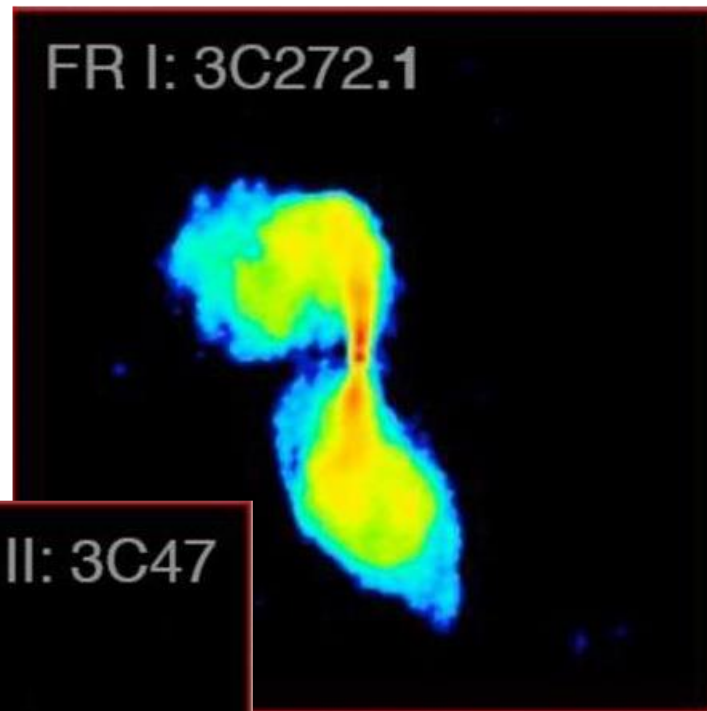
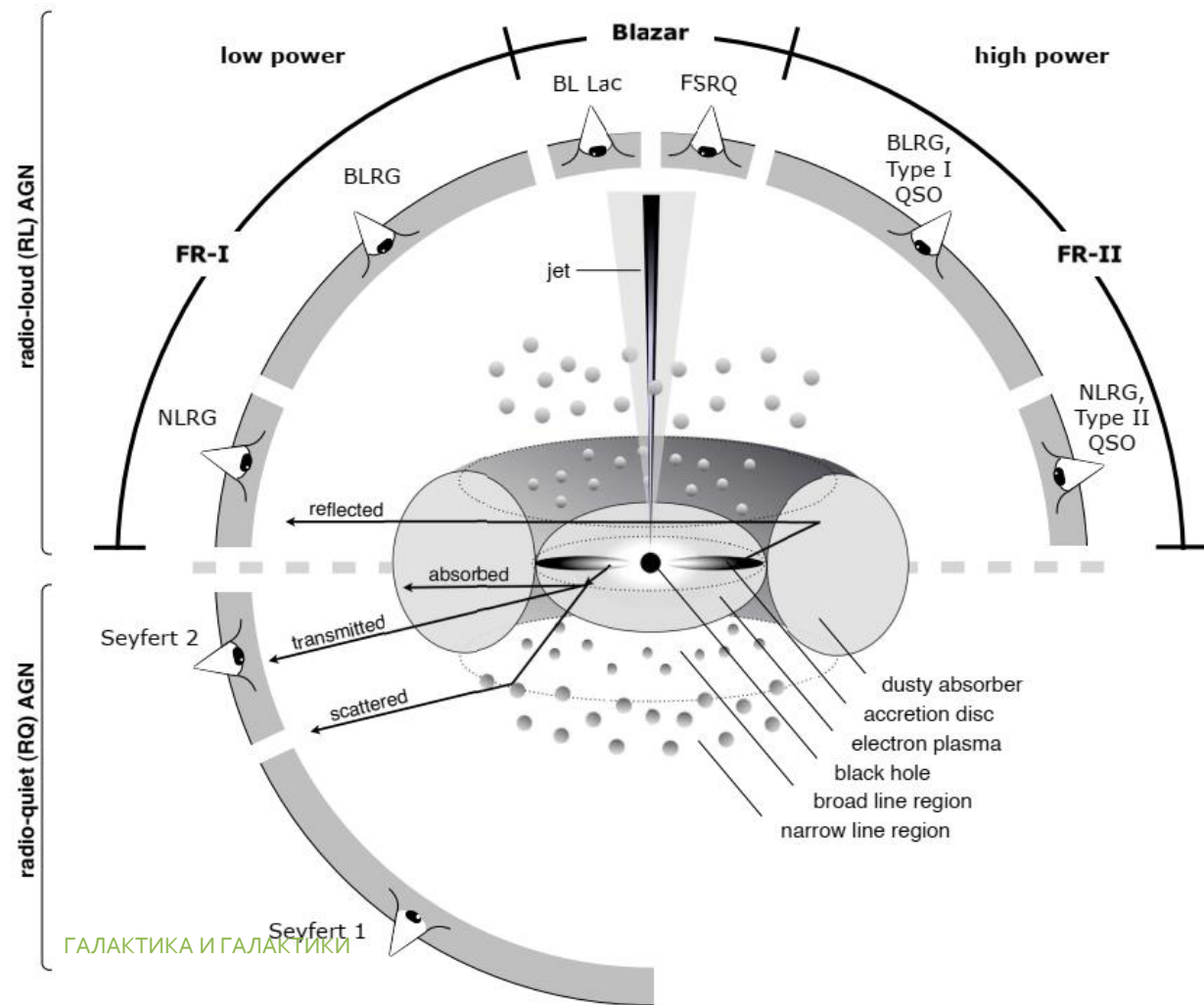
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ДЖЕТЫ

$$M_{BH} = 10^7 - 10^9 M_{\odot}$$

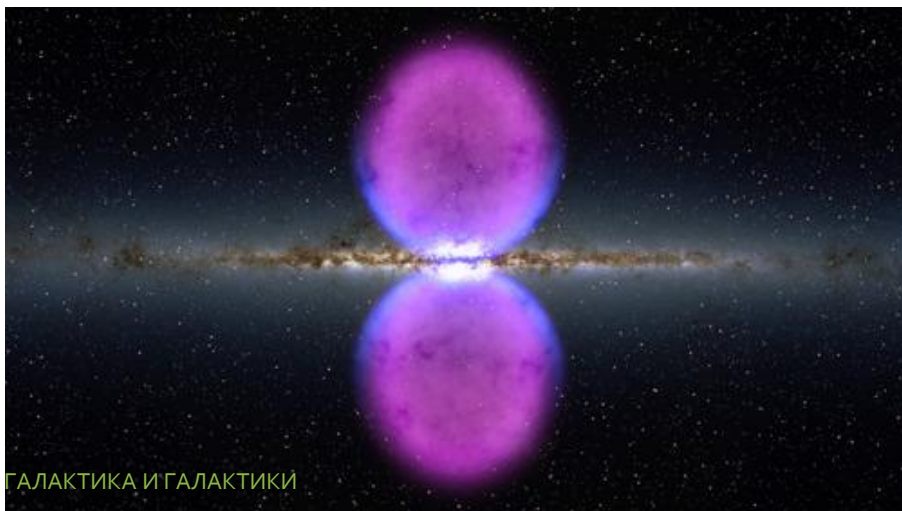
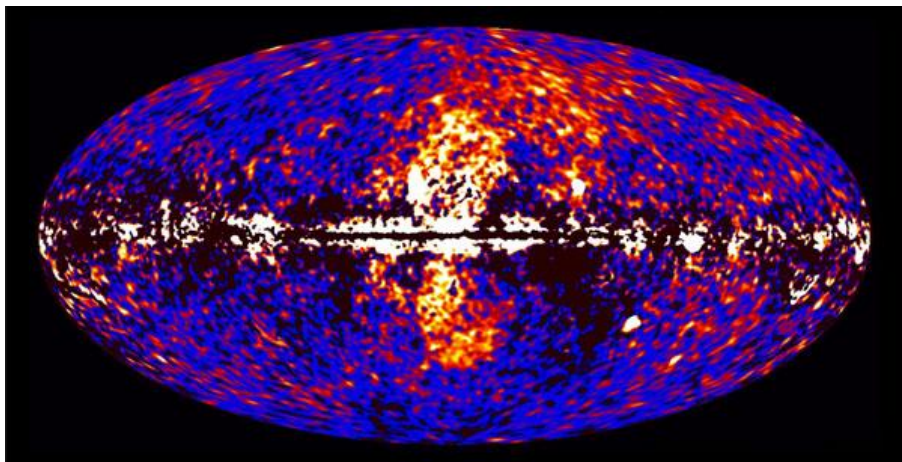
$$L(< \sim L_{Edd}) \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ эрг/с}$$



ГЕОМЕТРИЯ АКТИВНЫХ ЯДЕР



ПУЗЫРИ ФЕРМИ



ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

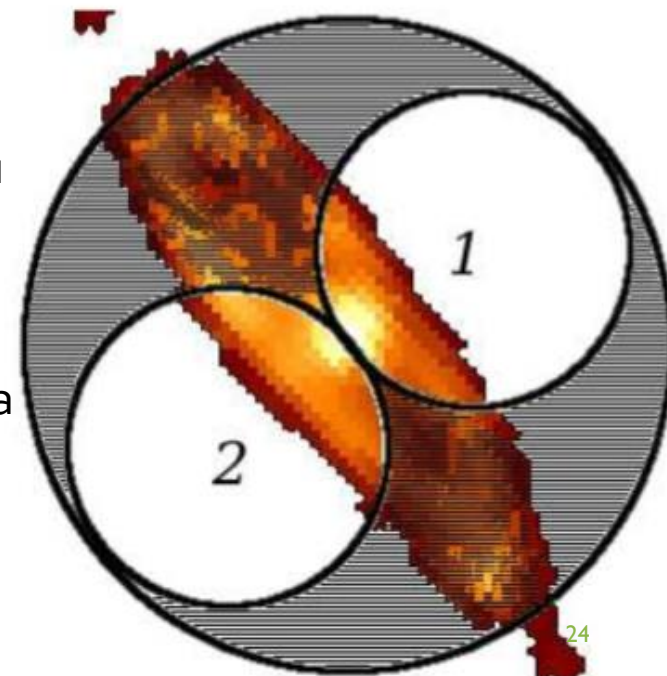
Возраст пузырей в MW от 10 до 100 млн лет.

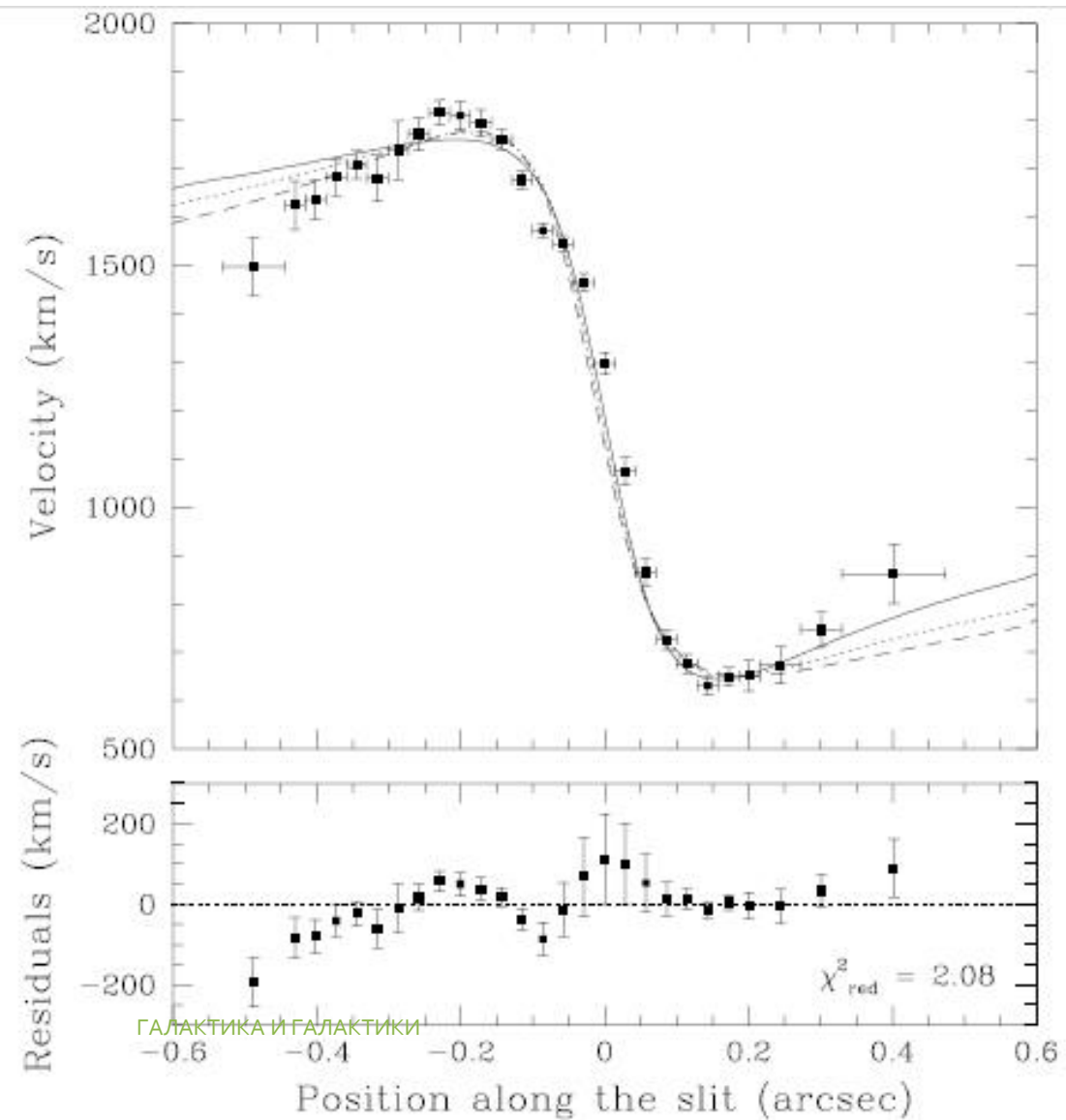
Возникновение такой структуры может быть связано с прошлой активностью центральной черной дыры.

В Туманности Андромеды – аналогичные структуры (там ЧД на порядок массивнее нашей).

Светимость пузырей в M31 на порядок выше, чем у нас.

1603.07245

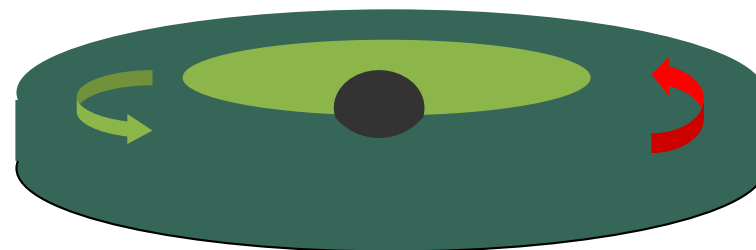




Для M87 скорости газа измерены
внутри одной миллисекунды дуги
(5pc).

Масса $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Одна из самых тяжелых черных дыр





Мы видим, что далекие галактики только формируются.
Они не похожи на симметричные галактики вокруг нас.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК

Путь роста массы галактики – «или слияние или поглощение» (с)

«Галактический каннибализм»



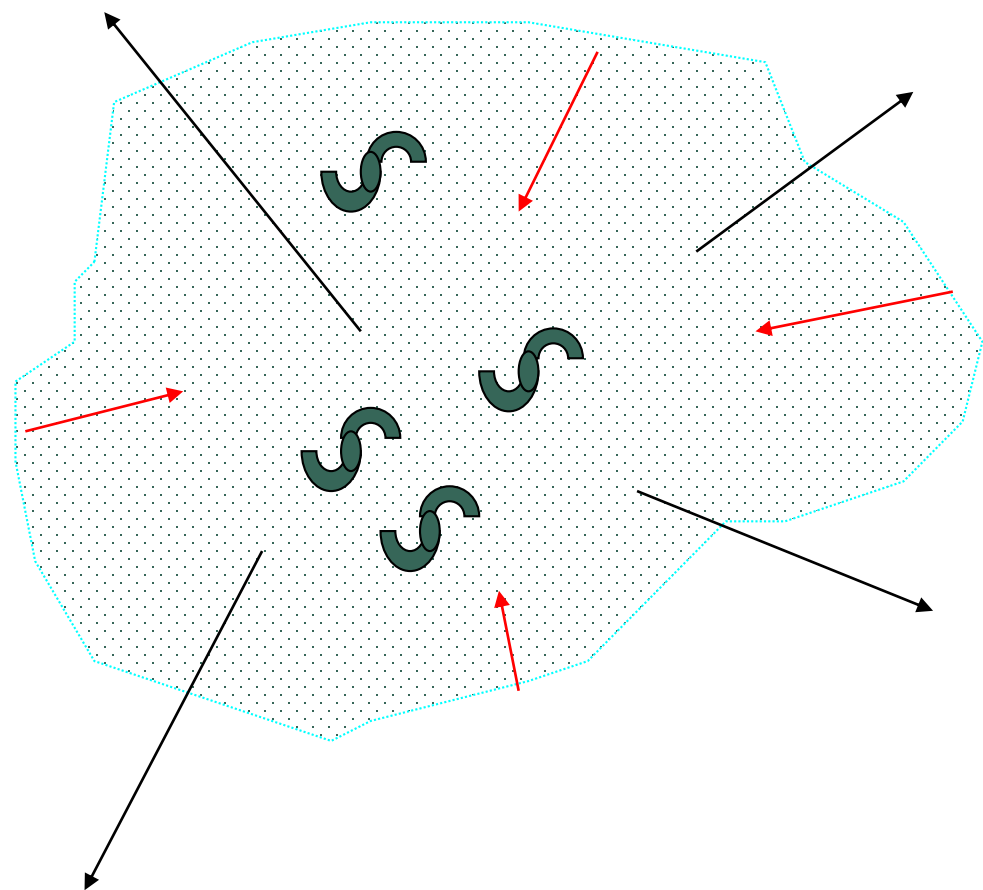


Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

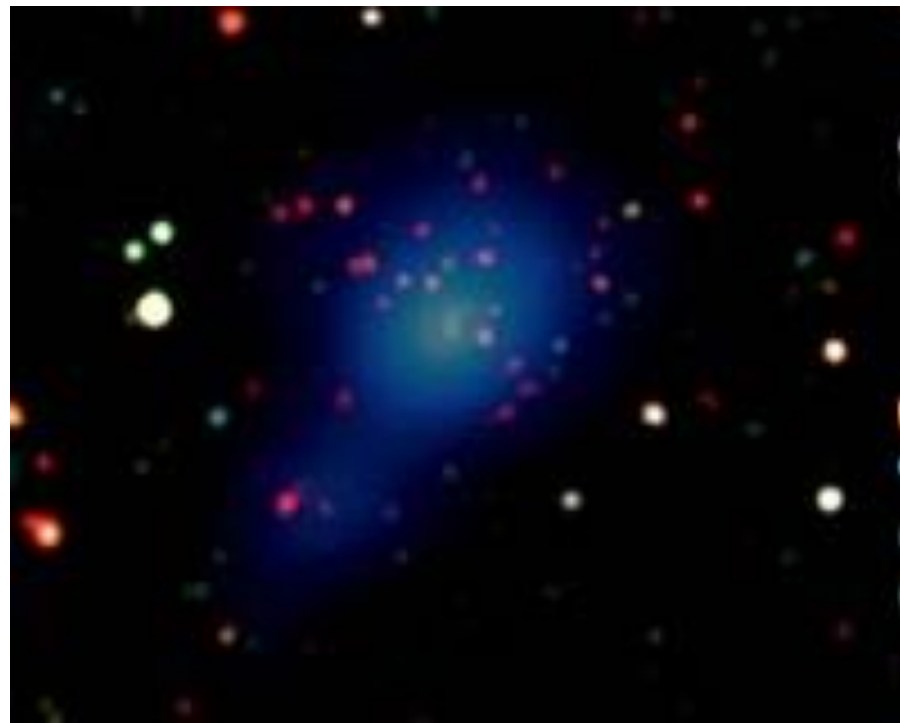
МОТИВАЦИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

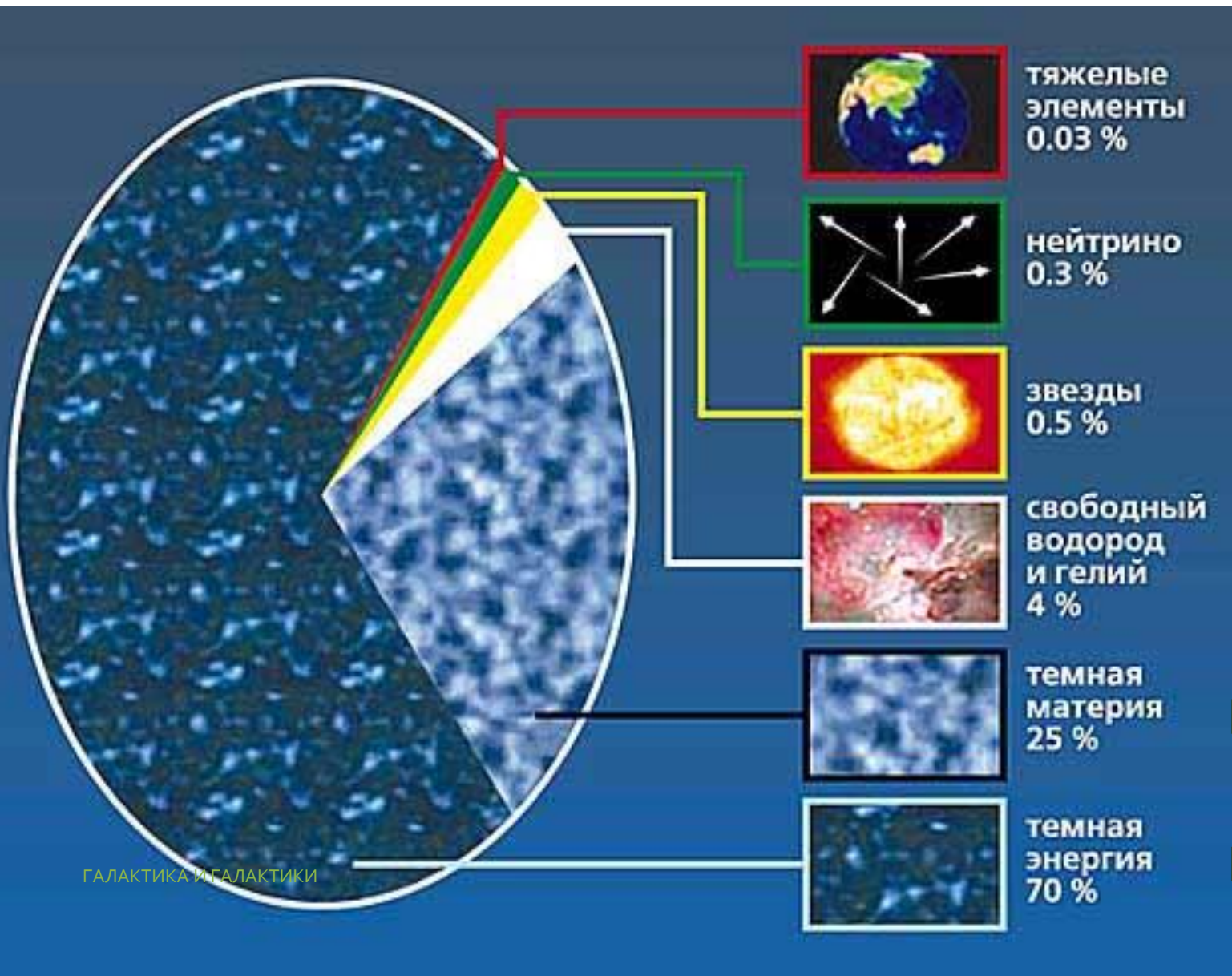
Сама идея появилась в 30-гг. благодаря работам Фрица Цвикки.



ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

Подсчет массы видимого вещества в скоплениях галактик показывал, что его недостаточно для того, чтобы галактики и газ не разлетелись.





Большую часть материи, заполняющей вселенную, мы можем наблюдать лишь косвенными методами.

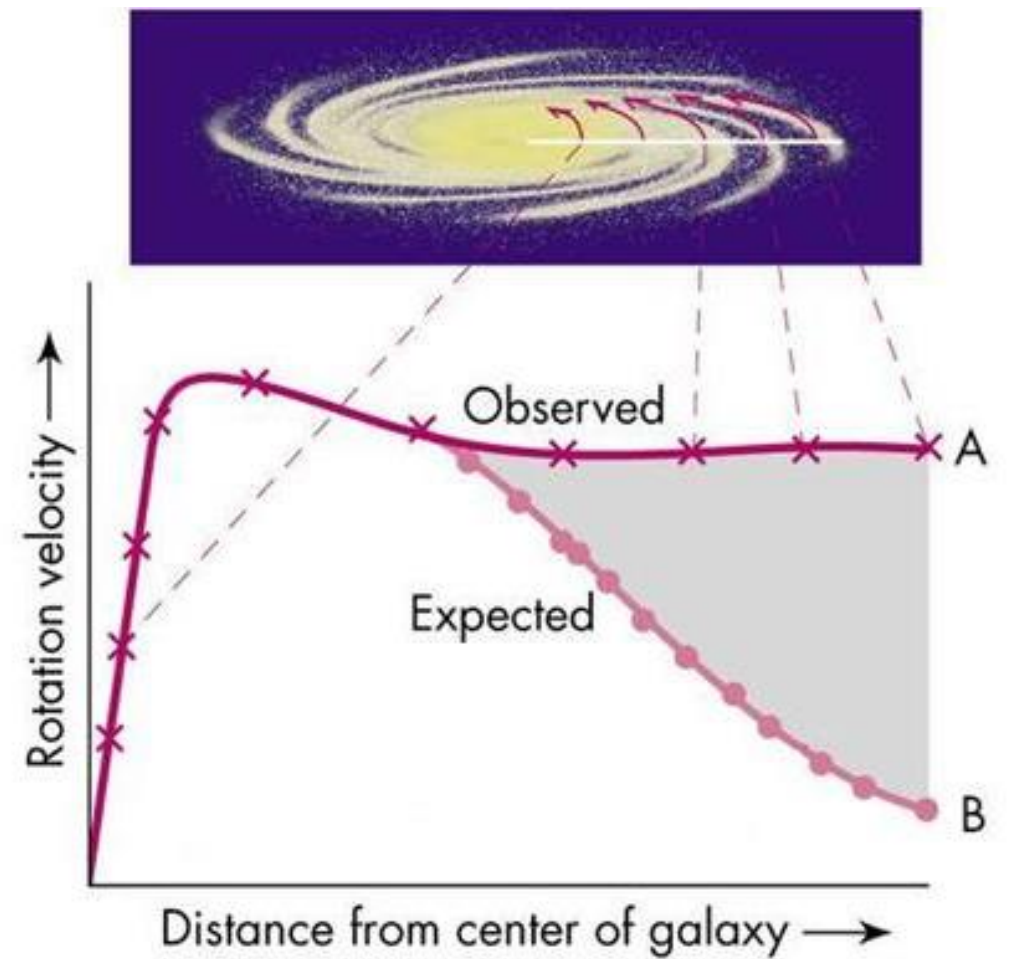
Неизвестные частицы

Неизвестные поля или вакуум



ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

См. обзор Засов и др. в УФН N1 2017 г.



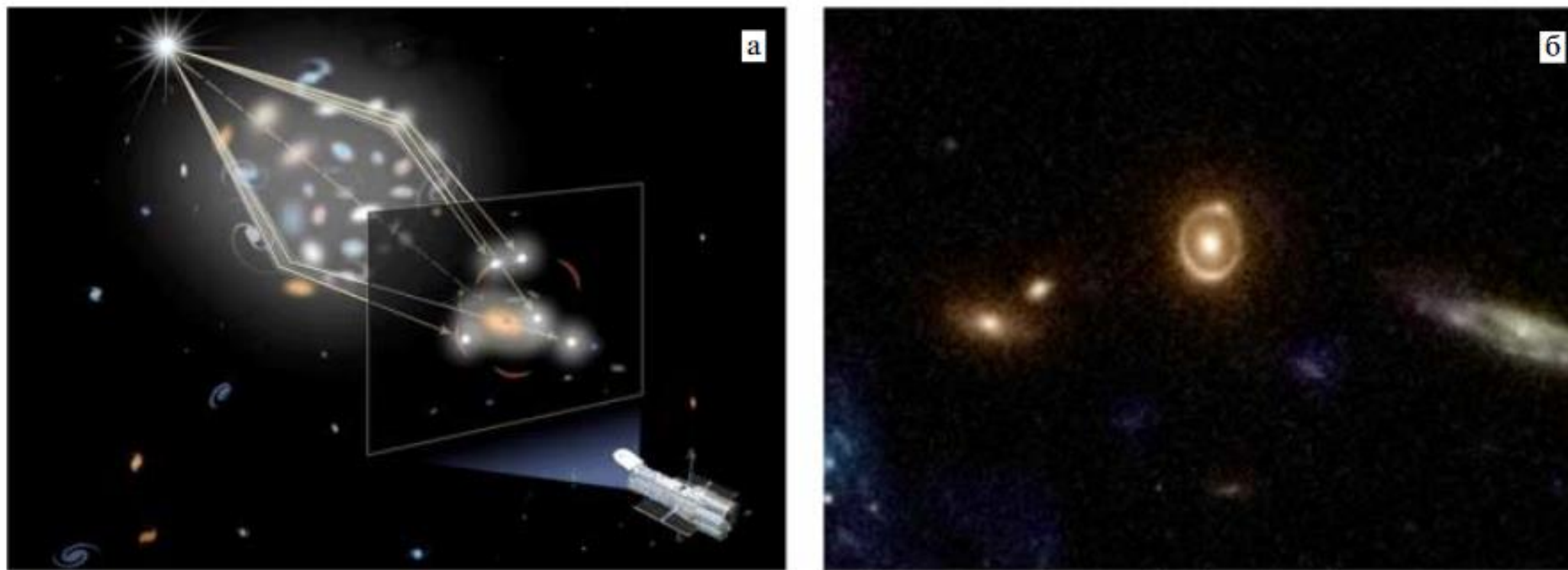
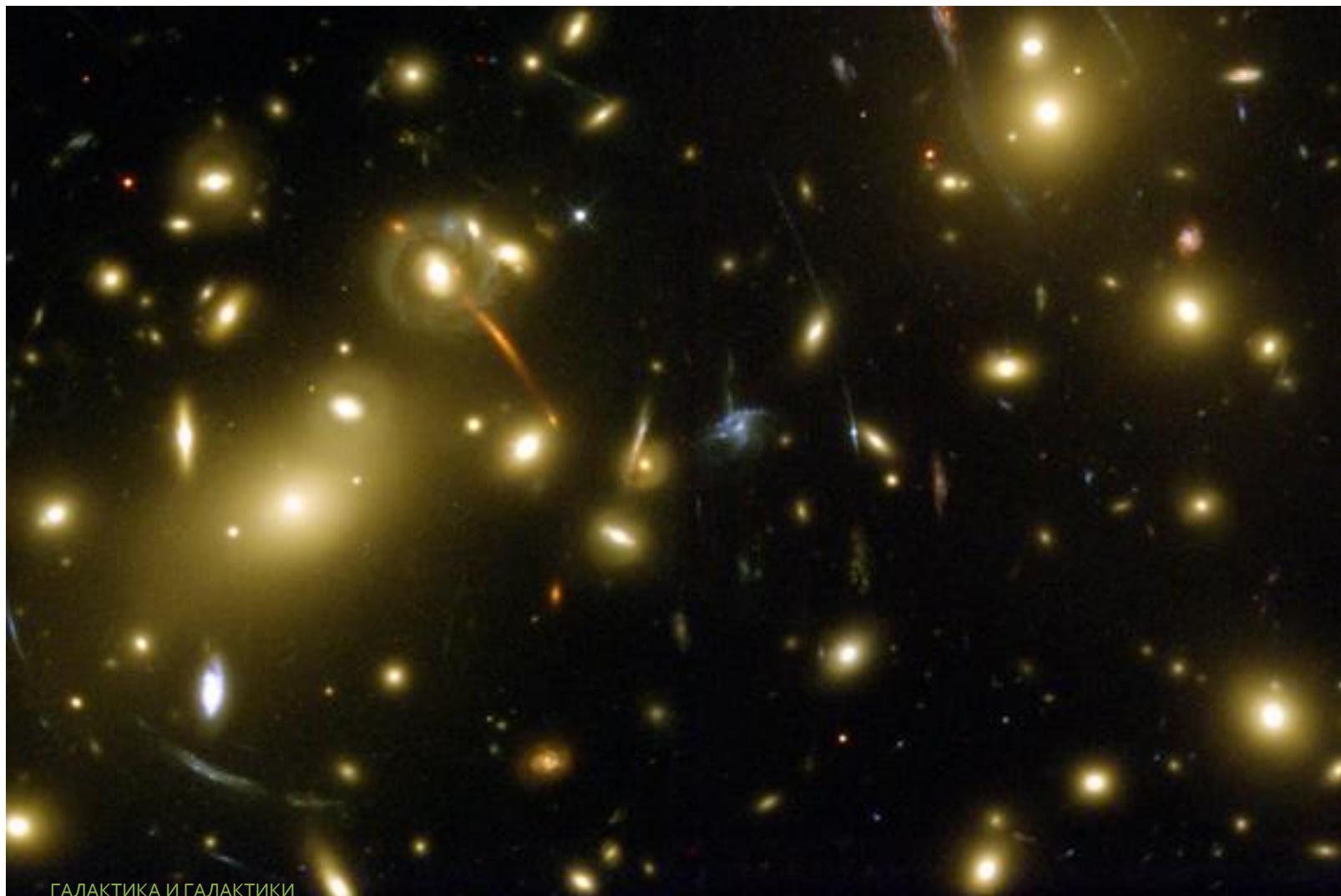


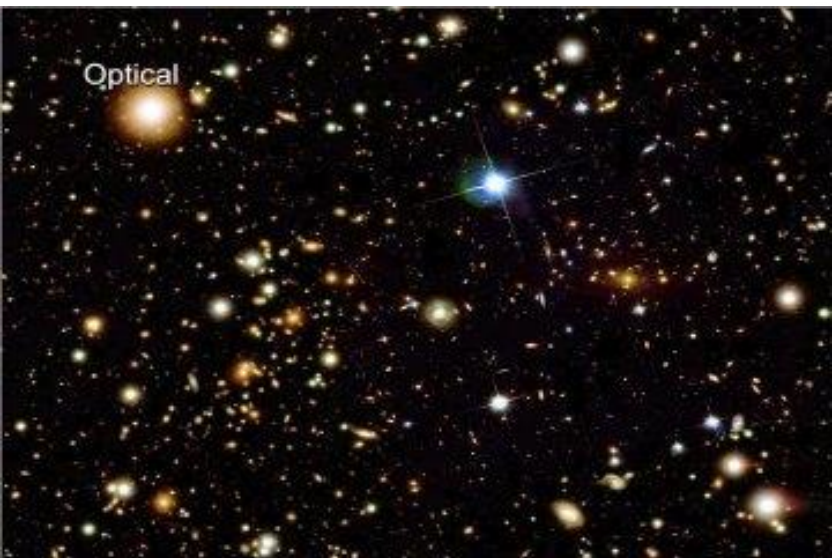
Рис. 16. (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038 + 4133 (телескоп Хаббла).

По линзированию проводятся оценки массы как для скоплений галактик, так и для отдельных галактик.

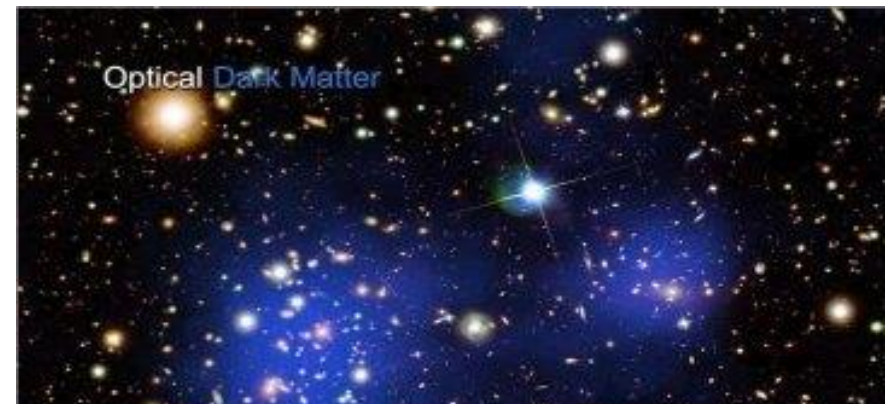


ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

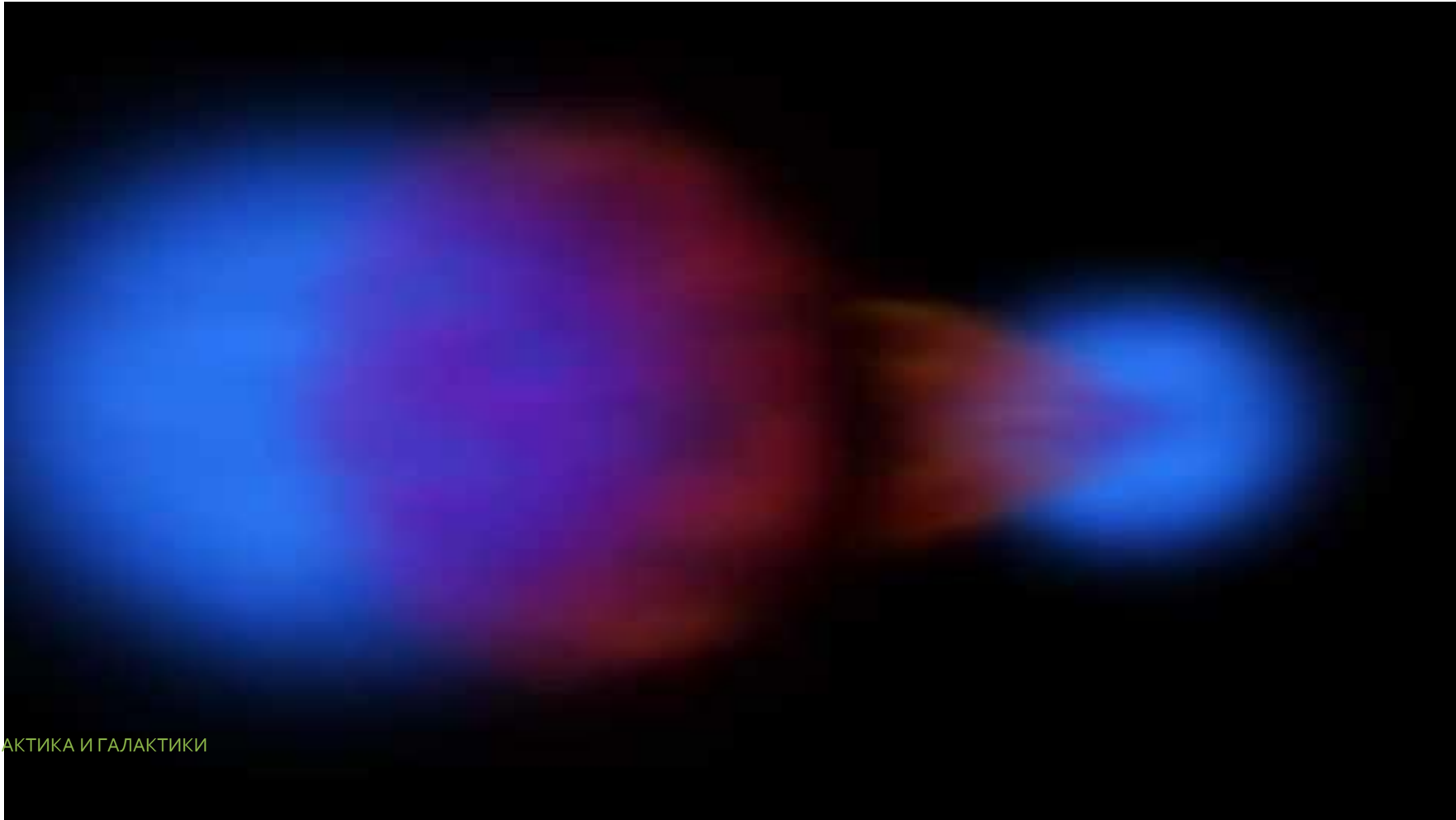
Благодаря эффекту
гравитационного линзирования
мы можем «видеть невидимое»
и измерять его массу!



Сталкивающиеся скопления галактик
1E 0657-56 (Bullet cluster)

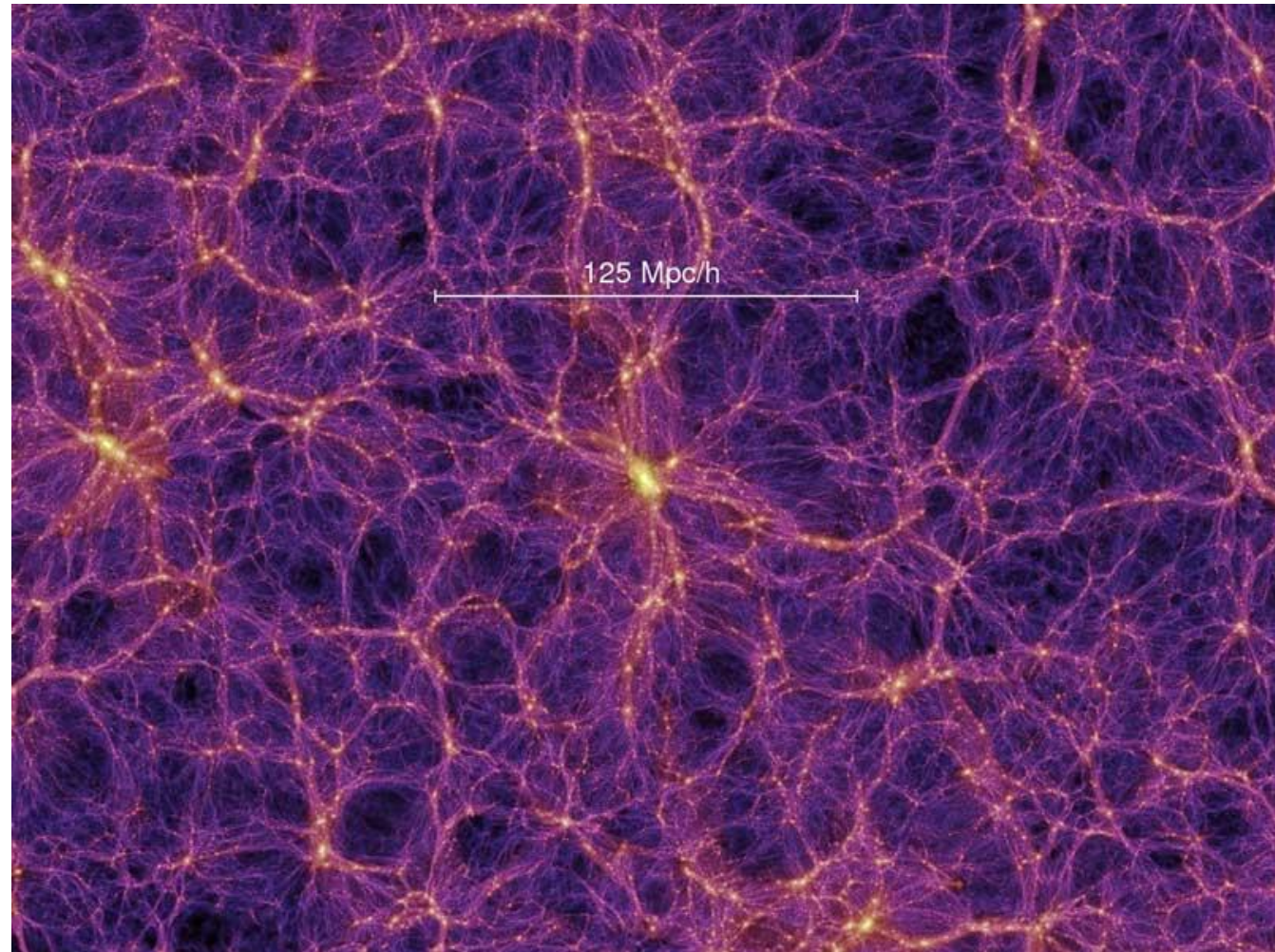


СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК

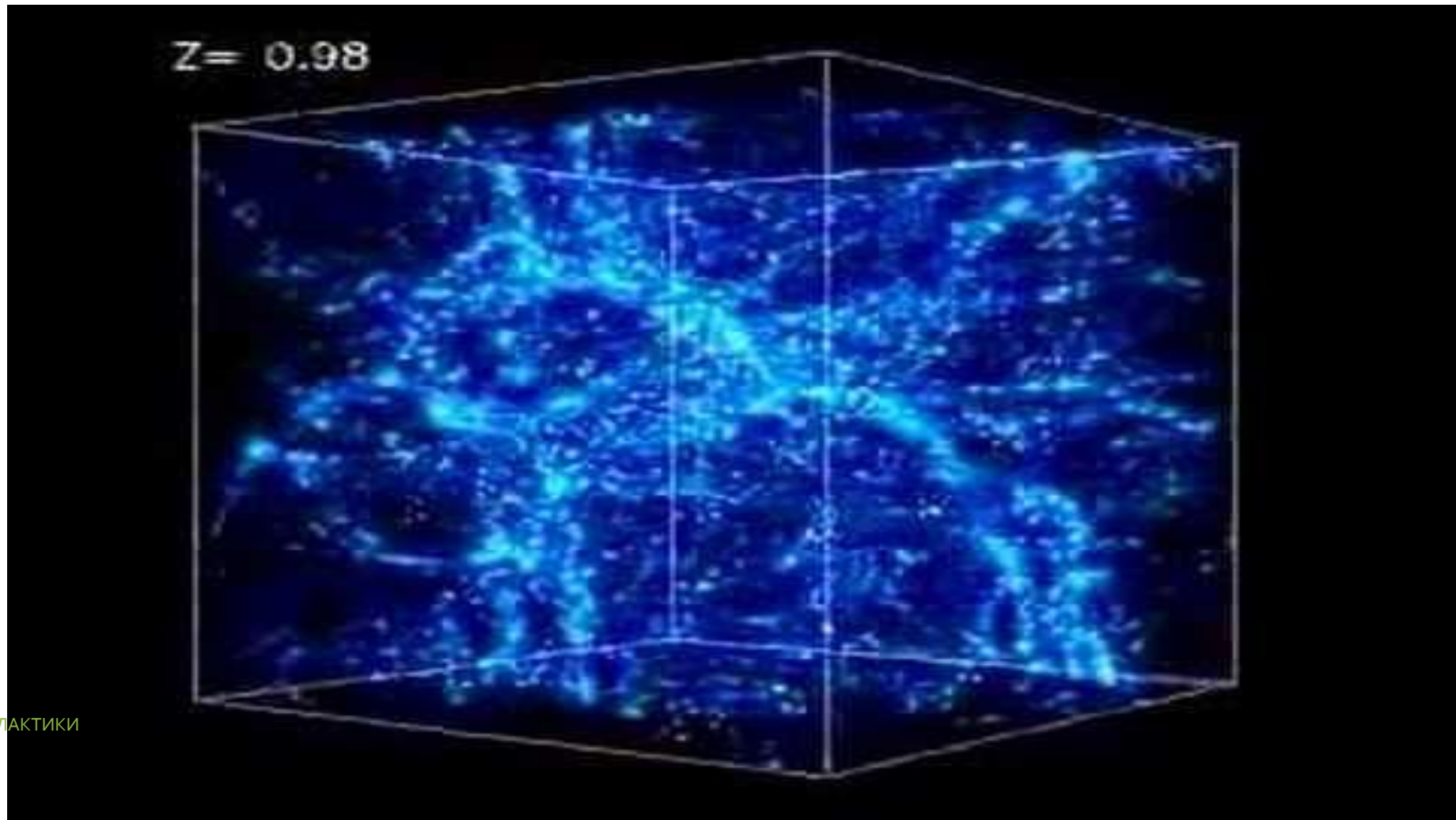


Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом.
Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ – т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

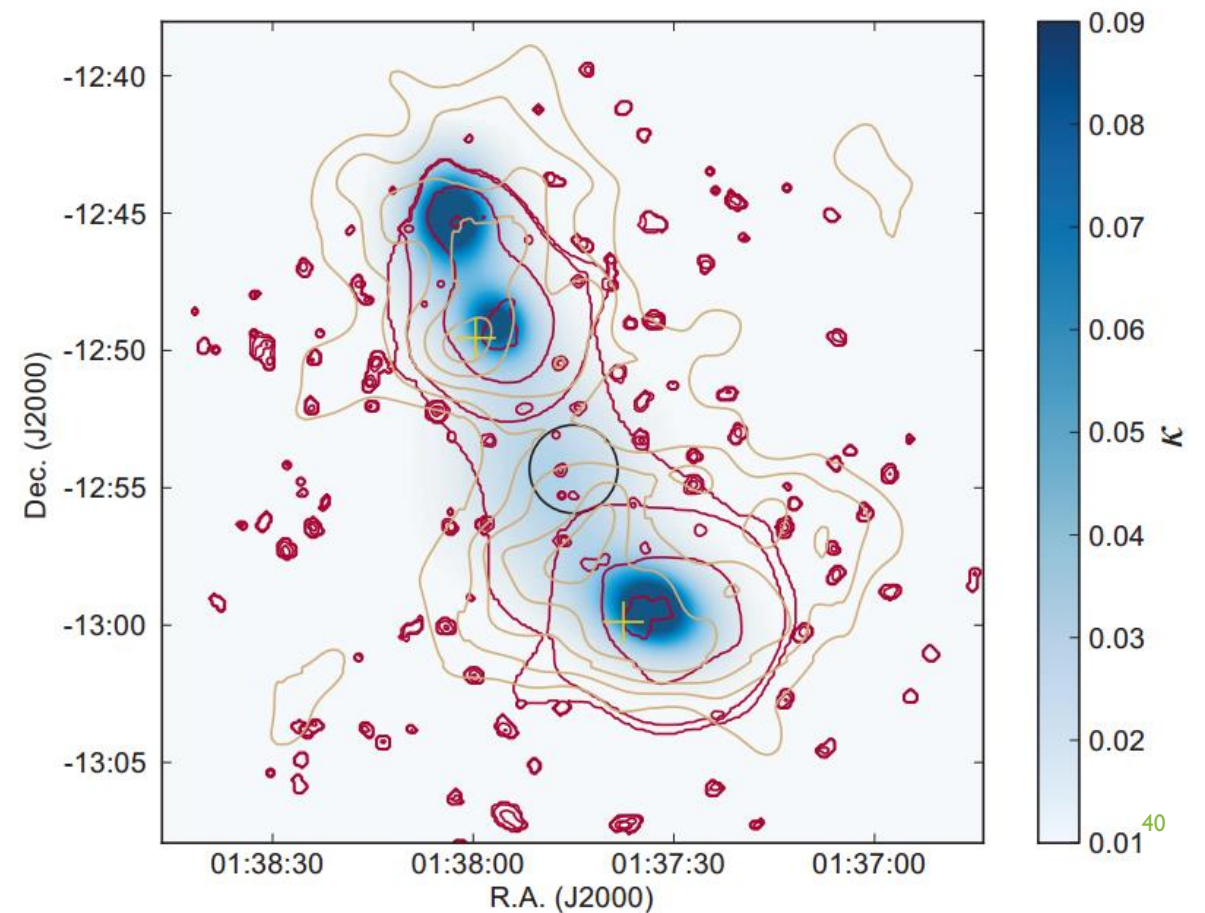
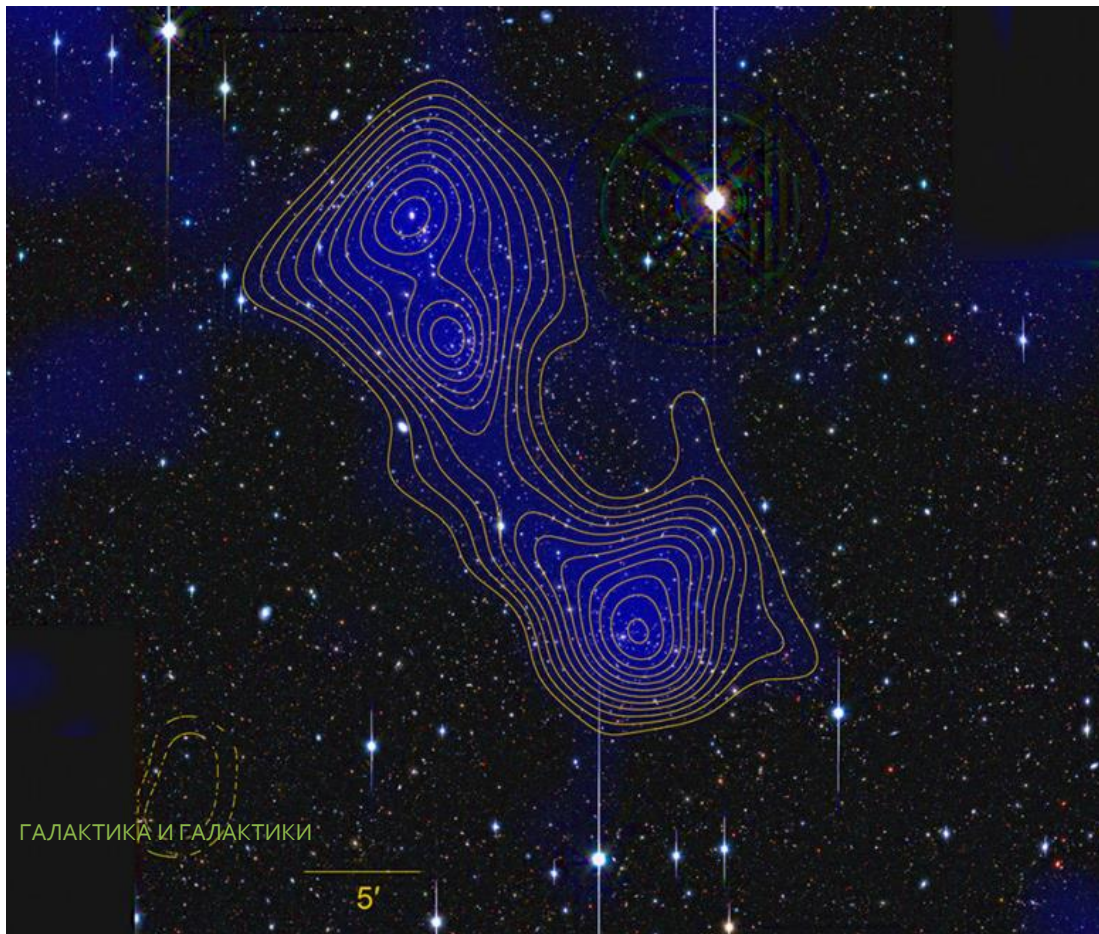


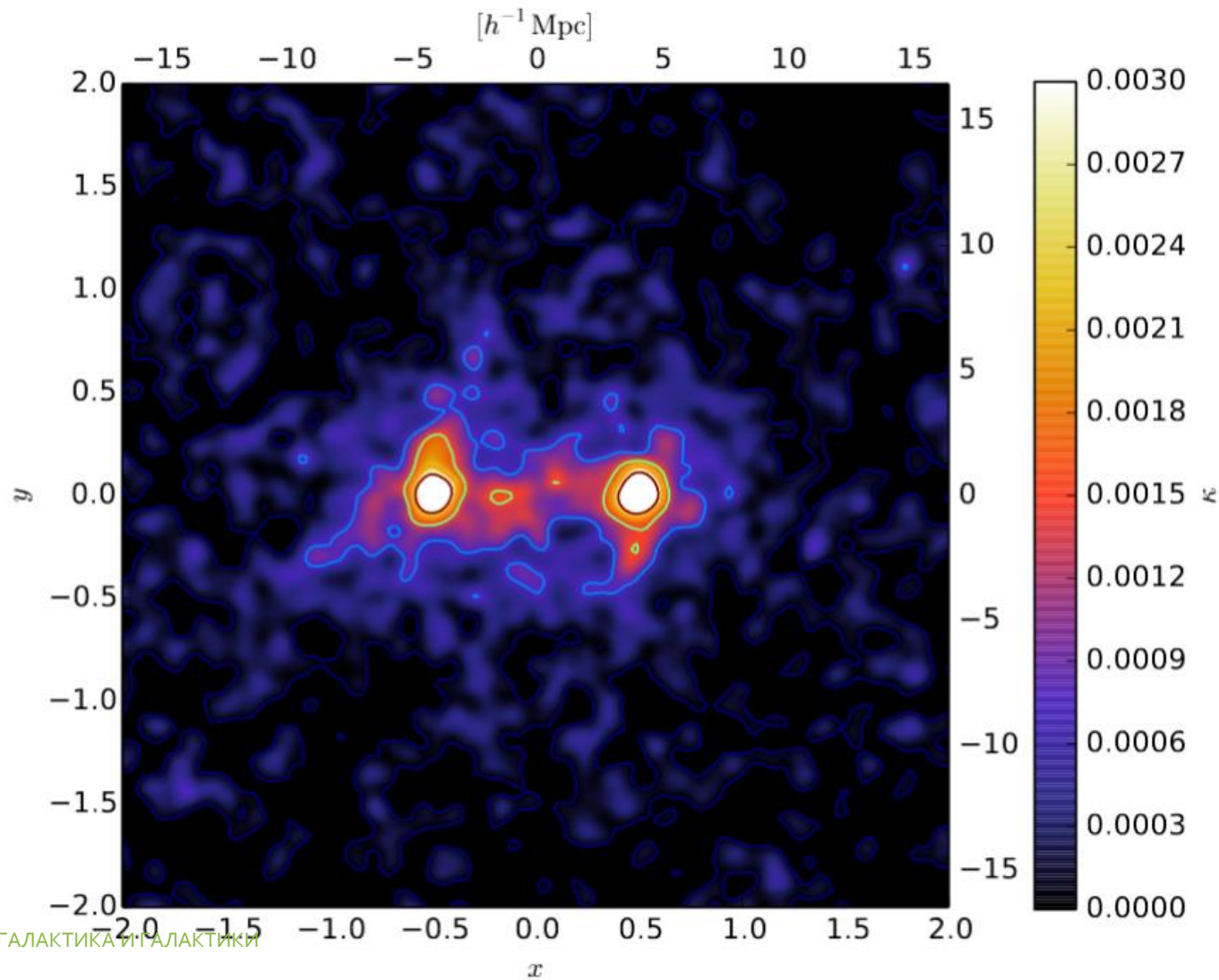
КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА



ВОЛОКНА ТЁМНОГО ВЕЩЕСТВА

Скопления A222/223. $z \sim 0.2$ Между скоплениями 18 Мпк.
Распределение массы восстанавливается по линзированию.
Массы газа не хватит для объяснения массы волокна.

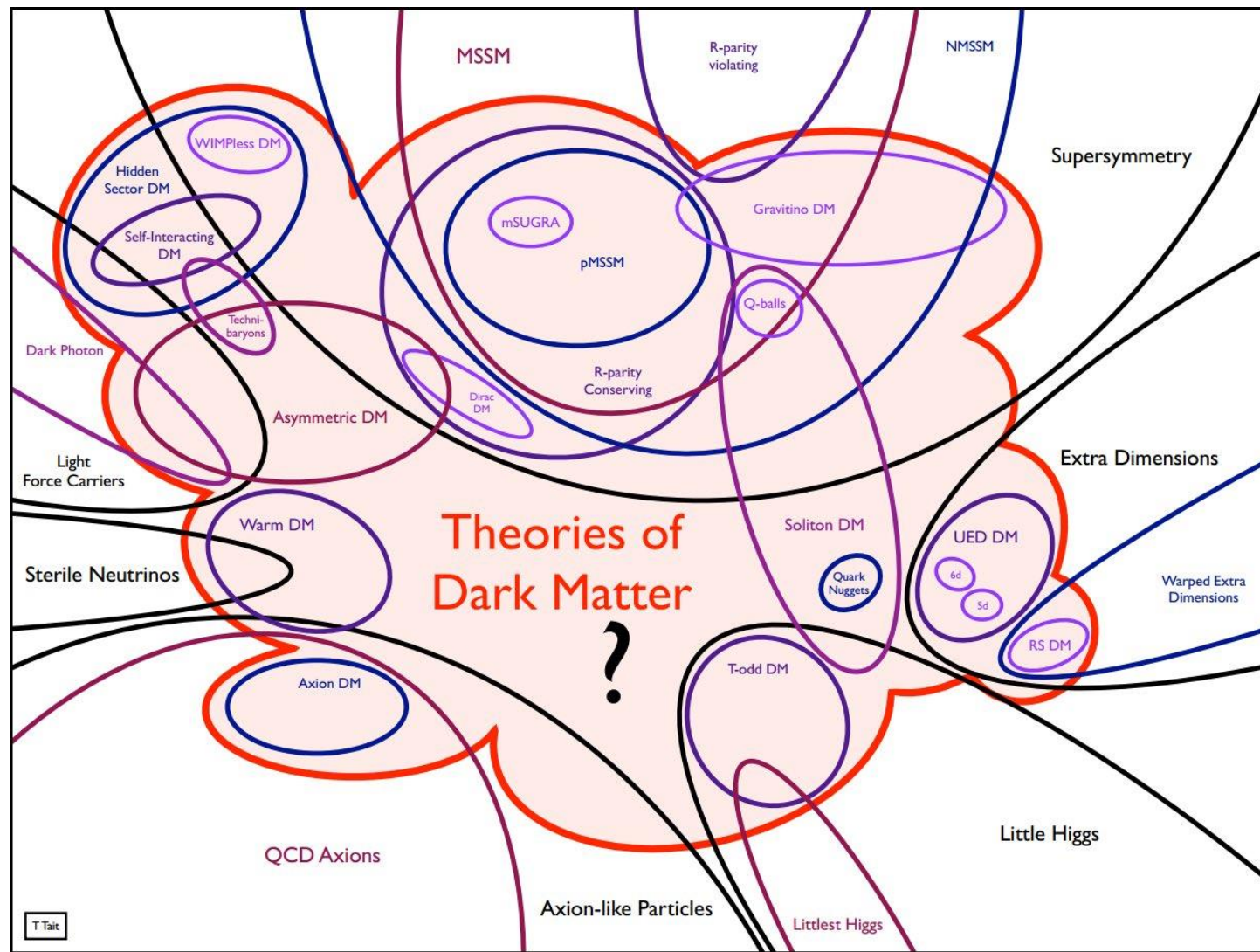




Результат получен не для какой-то конкретной пары галактик, а в результате сложения данных по многим парам.

Распределение массы определено по слабому линзированию.

$$(1.6 \pm 0.3) \times 10^{13} M_{\odot}$$
 for a stacked filament region $7.1 h^{-1}$ Mpc long and $2.5 h^{-1}$ Mpc



ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 9

Ультрамощные рентгеновские источники (Ultraluminous X-ray Sources, ULXs) – это точечные источники рентгеновского излучения в других галактиках, не совпадающие ядрами этих галактик и светимость которых оценивается в, как минимум, 10^{39-40} эрг/с. Одним из таких источников является объект **M82 X-2**, расположенный в галактике **M82** ($d = 3.3$ Мпк). Наблюдаемый поток от этого источника в диапазоне энергий 0.5-30 кэВ равен примерно $F_x \sim 10^{-11}$ эрг $\text{см}^{-2} \text{с}^{-1}$.

Этот объект показывает периодические (с периодом 1.4 секунды) пульсации, которые интерпретируются как период вращения нейтронной звезды. А сама система **M82 X-2** представляется как двойная, в которой идёт аккреция со звезды главной последовательности (звезды-донора) на, собственно, нейтронную звезду.

Считая, что излучение **M82 X-2** изотропно, рассчитайте темп аккреции \dot{M} , необходимый для поддержания наблюдаемой светимости этого источника и выразите его в единицах эддингтоновского темпа \dot{M}_{Edd} . Под \dot{M}_{Edd} понимается такой темп, при котором источник имеет эддингтоновскую светимость (для своей массы).