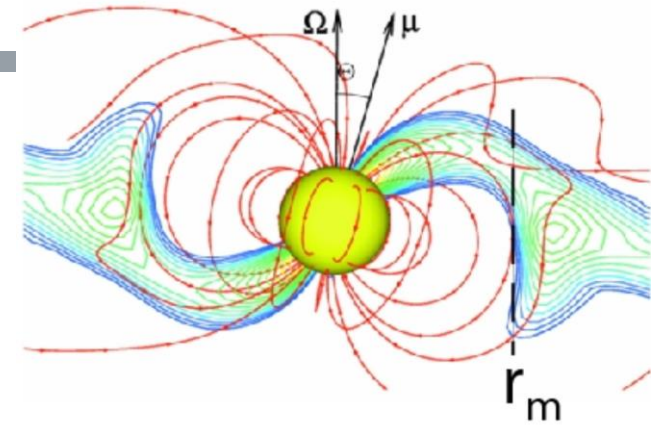


## ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ 8



Рассмотрим аккрецию (падение) вещества на намагниченную нейтронную звезду. Магнитное поле звезды считаем дипольным. Также считаем, что вещество свободно падает на звезду с бесконечности под действием её гравитации с нулевой начальной скоростью. Пусть падение происходит в плоскости магнитного экватора. Вращением звезды пренебрегаем. На некотором радиусе  $r_m$  свободное падение вещества будет остановлено давлением магнитного поля и в дальнейшем материя будет двигаться преимущественно вдоль магнитных силовых линий. Такой радиус  $r_m$  называется *радиусом магнитосферы* аккрецирующей нейтронной звезды. Покажите, что по порядку величины радиус магнитосферы равен *Альфвеновскому радиусу* и в системе СГС записывается как:

$$r_m \sim r_A = \left( \frac{\mu^4}{2GM_*\dot{M}^2} \right)^{\frac{1}{7}},$$

где  $\mu$  – дипольный момент звезды,  $M_*$  – её масса, а  $\dot{M}$  -- темп аккреции [г/сек].

## РЕШЕНИЕ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ 8

Падающая плазма останавливается в тот момент, когда её лобовое давление  $\rho v^2$  сравнивается с давлением магнитного поля  $B^2/8\pi$ . При этом, раз поле дипольное, то  $B = \mu R^3$ . С другой стороны, при аккреции с темпом  $\dot{M}$ , поток вещества через сферу любого произвольного радиуса радиуса  $R$  должен быть равен  $\rho v = \dot{M}/4\pi R^2$  в силу закона сохранения массы. Наконец, коль скоро мы считаем, что вещество падает свободно из бесконечности, то на радиусе  $R$  скорость падения вещества будет равна  $v = \sqrt{2GM/R}$  из закона сохранения энергий.

Таким образом условие равенства давлений запишется как:

$$\frac{\mu^2 R^6}{8\pi} = \rho v \cdot v = \frac{\dot{M}}{4\pi R^2} \sqrt{\frac{2GM}{R}},$$

откуда, выражая  $R = r_A$ , и получаем классическую формулу для Альфвеновского радиуса:

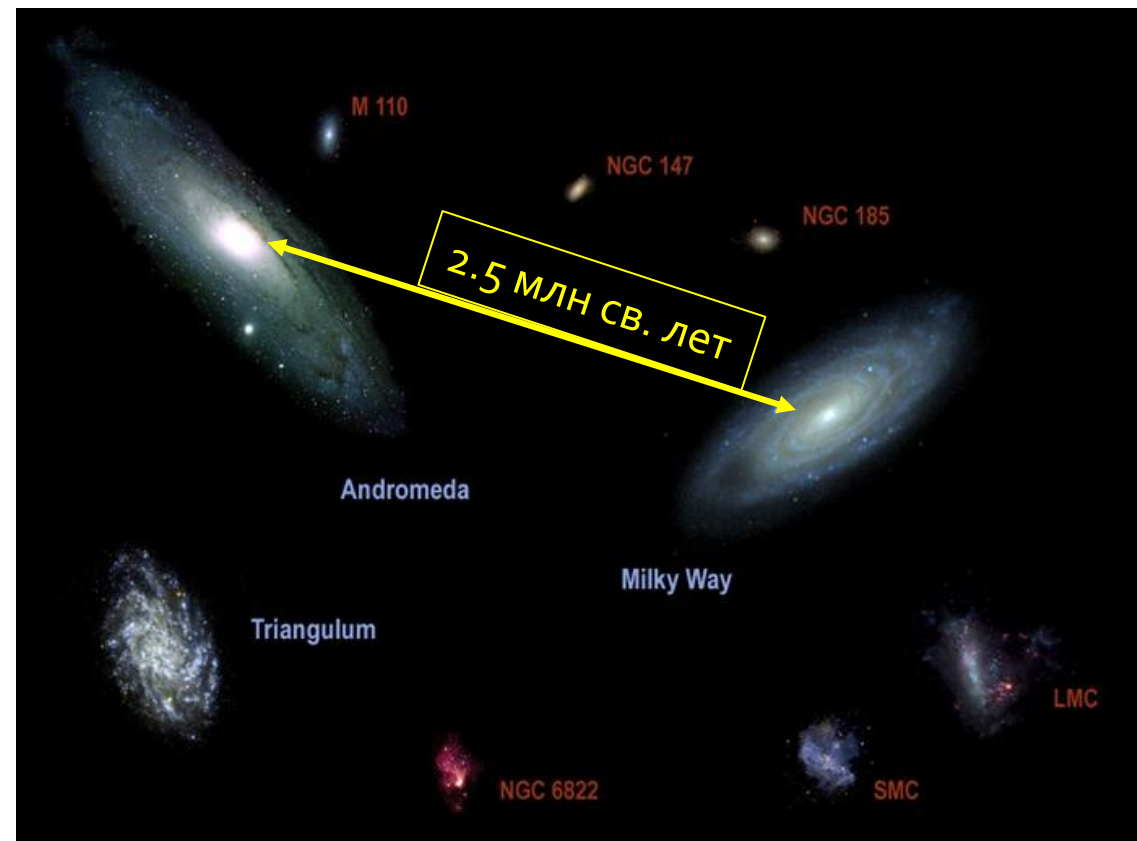
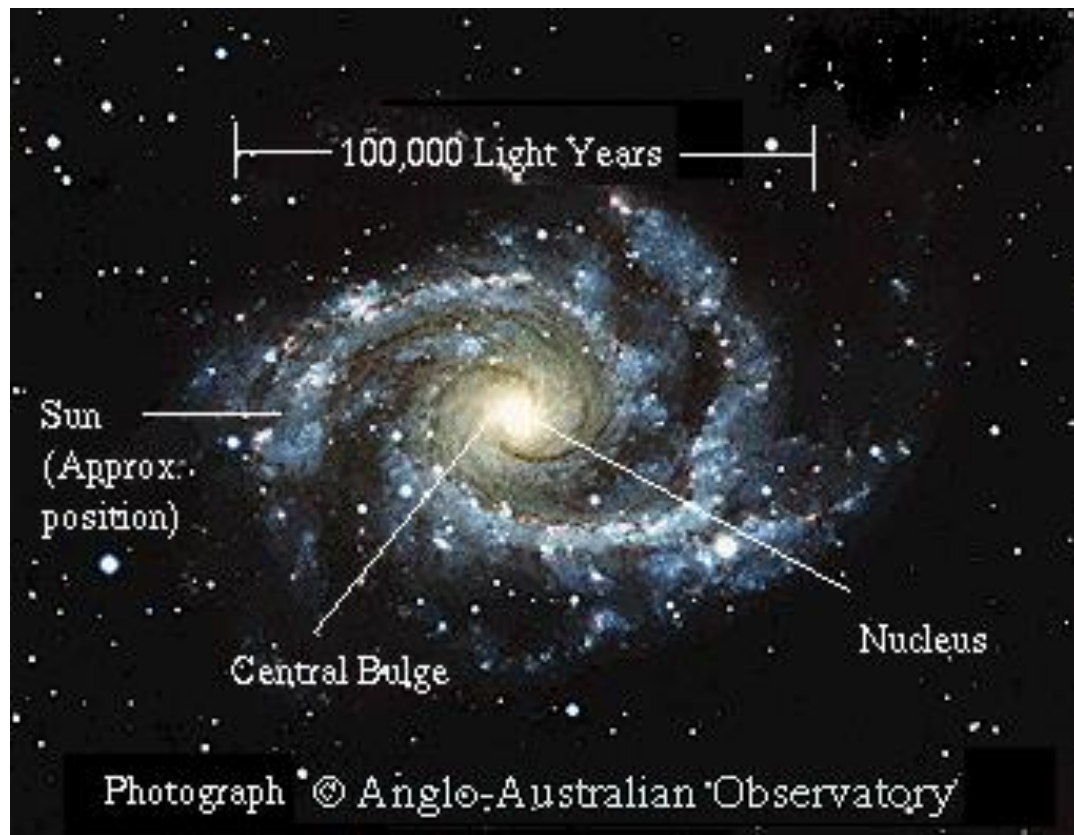
$$r_A = \left( \frac{\mu^4}{2GM_* \dot{M}^2} \right)^{\frac{1}{7}}.$$

# ЛЕКЦИЯ 8: ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

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

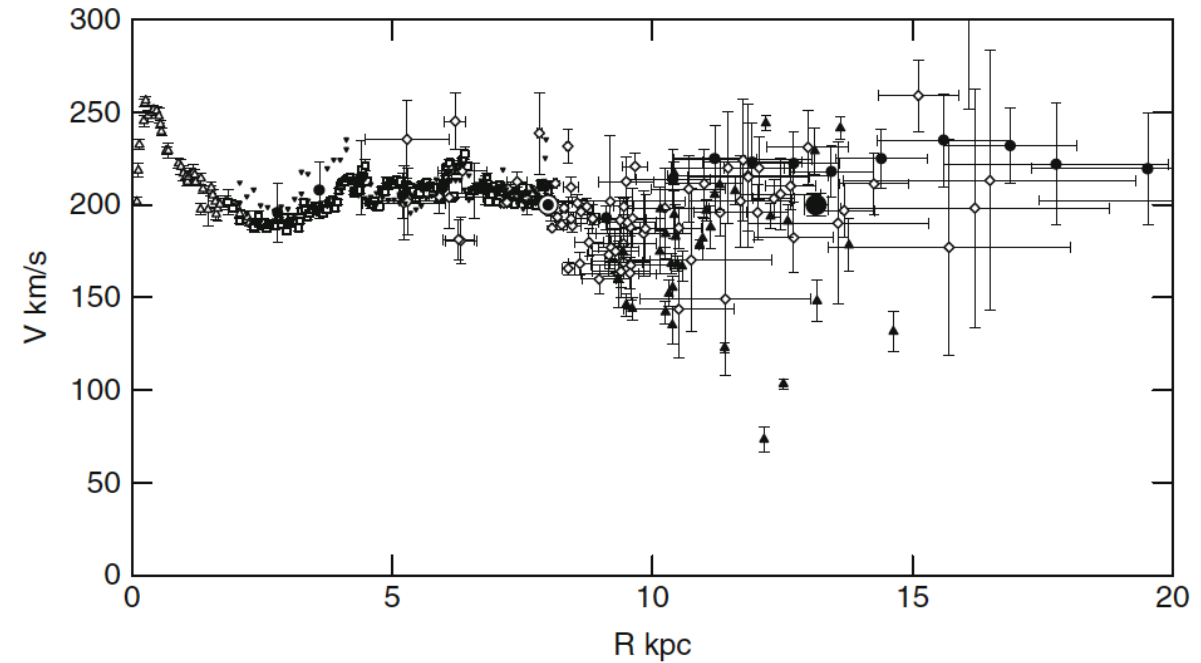
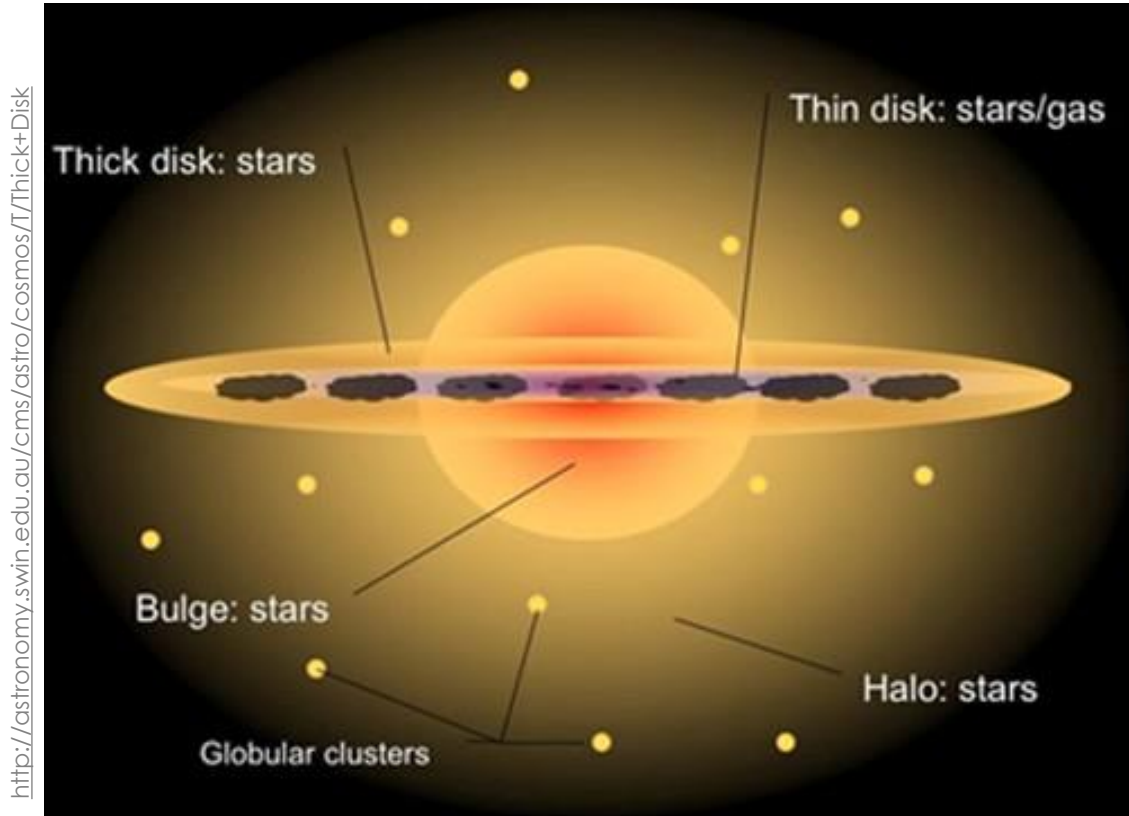
АНТОН БИРЮКОВ (АСТРОНОМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ МГУ ИМ. М.В. ЛОМОНОСОВА И ВШЭ), К.Ф.-М.Н

# 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

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

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

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

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

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

$$n = 1, 2, 3$$

Component	Parameter	Value
Dark Halo	$r_0$	8.5 kpc
	$V_H$	220 km s <sup>-1</sup>
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

# ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ

astro-ph/9603106

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

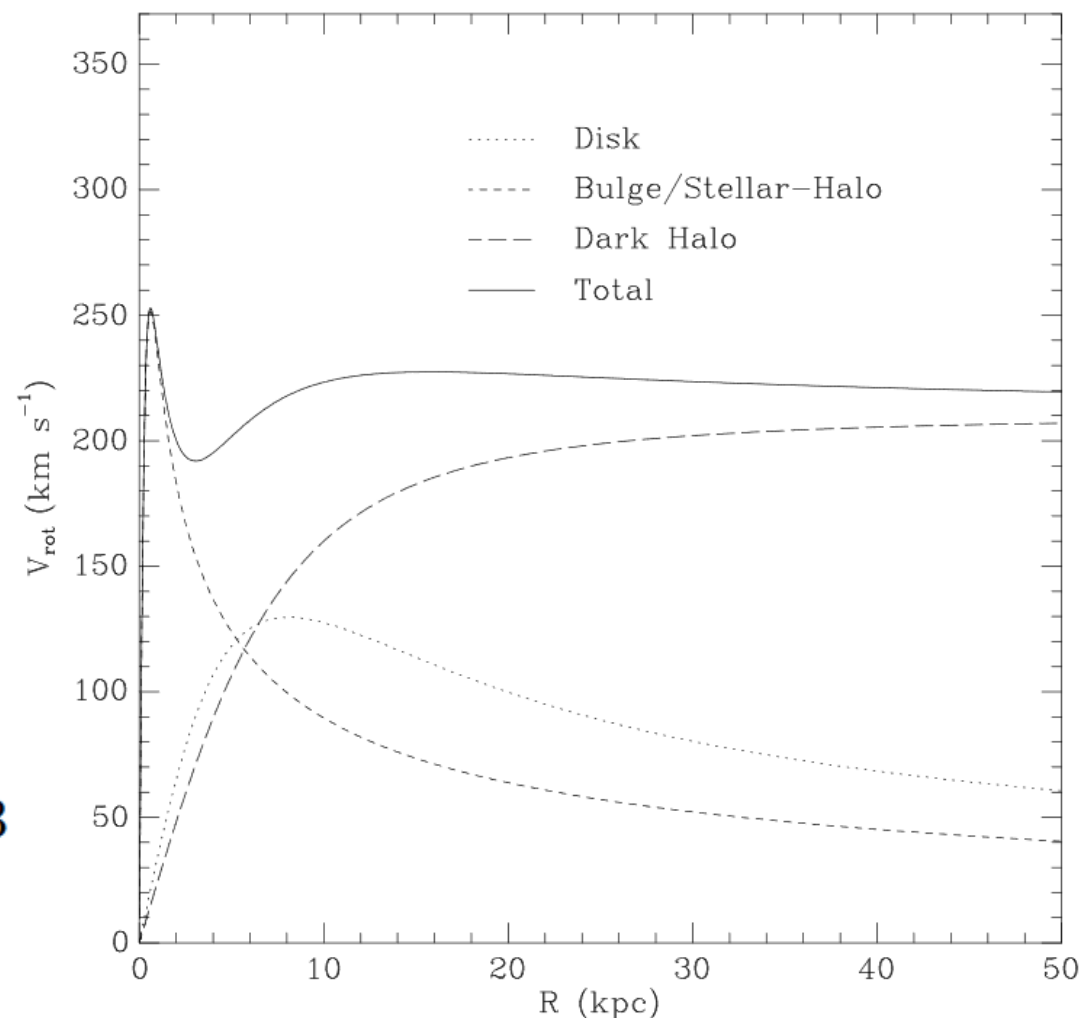
$$\Phi_H = \frac{1}{2} V_H^2 \ln(r^2 + r_0^2)$$

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

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

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

$n = 1, 2, 3$

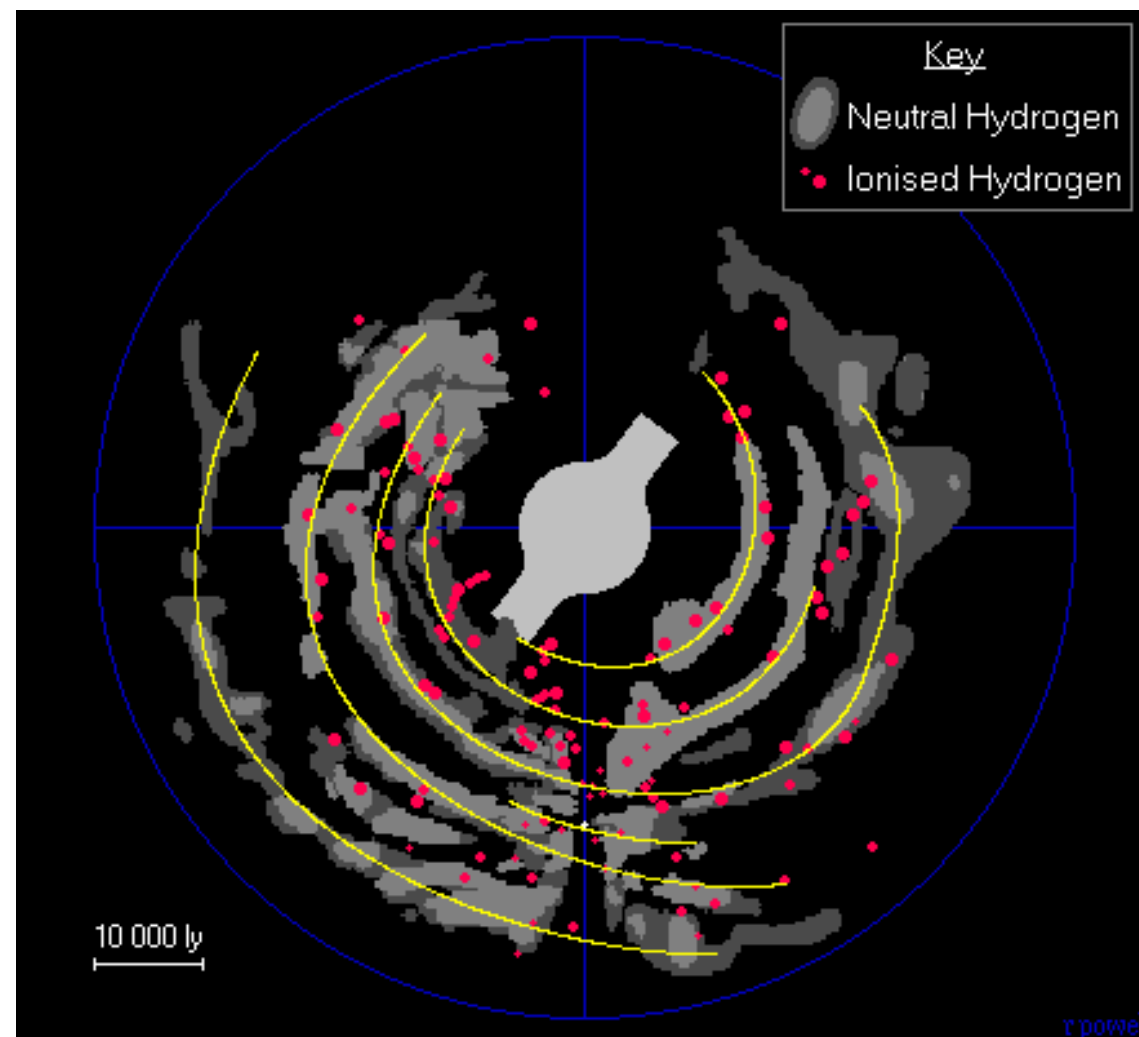
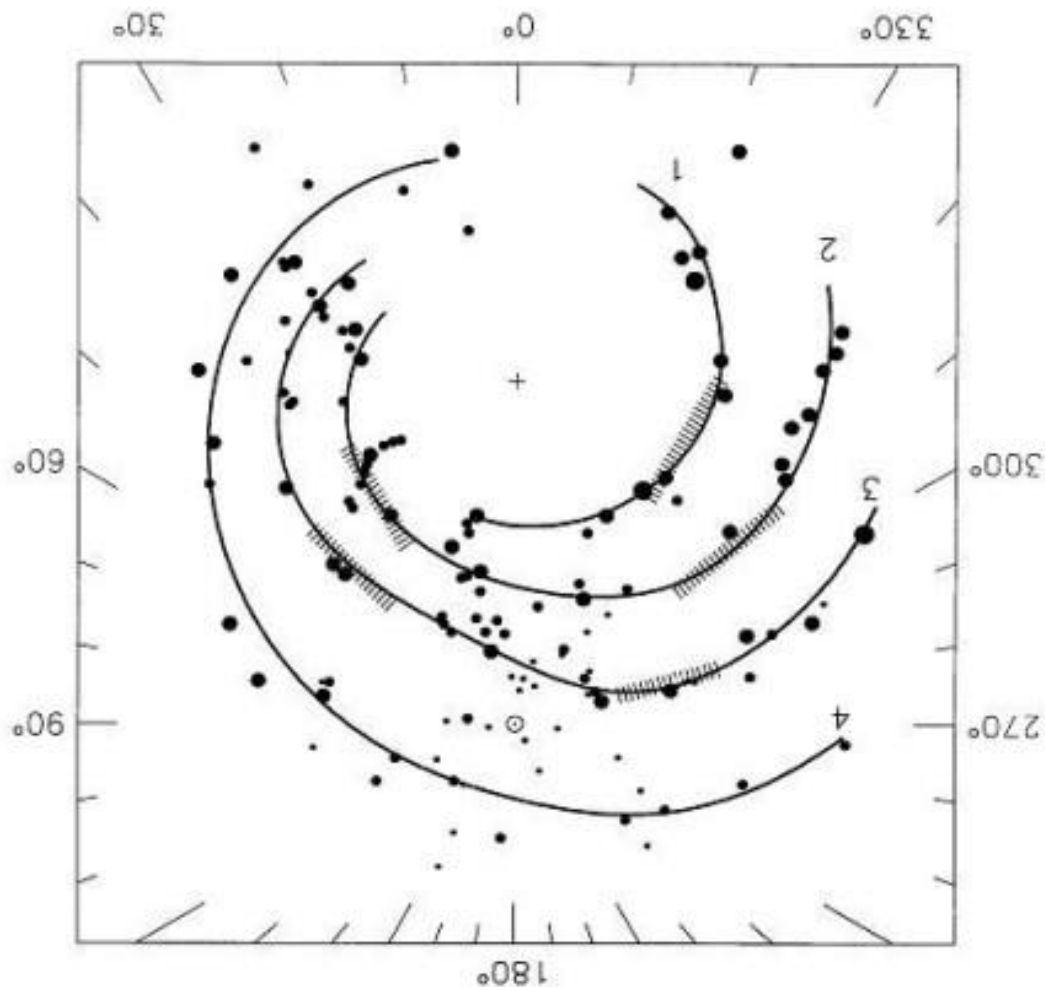




# СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ

- 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

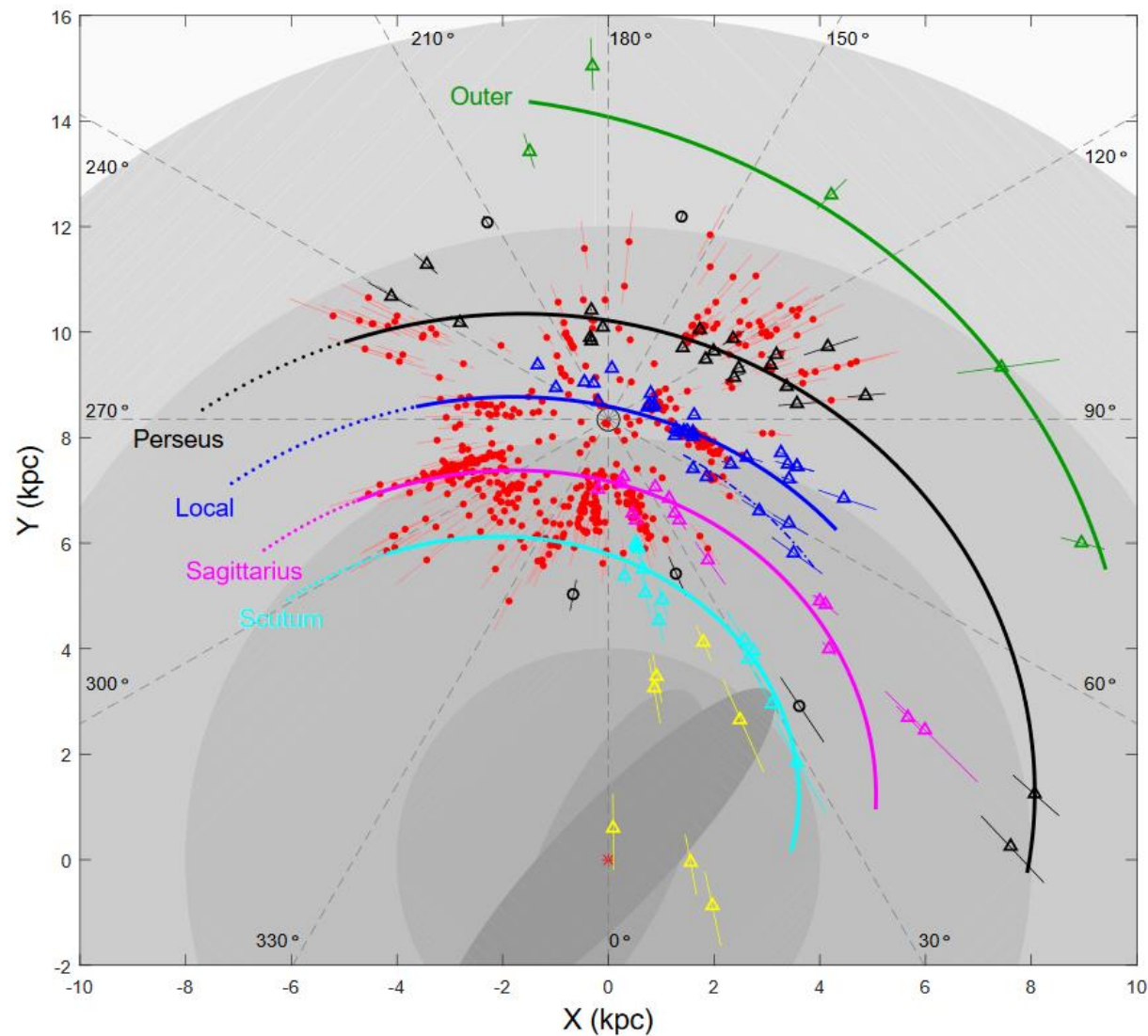




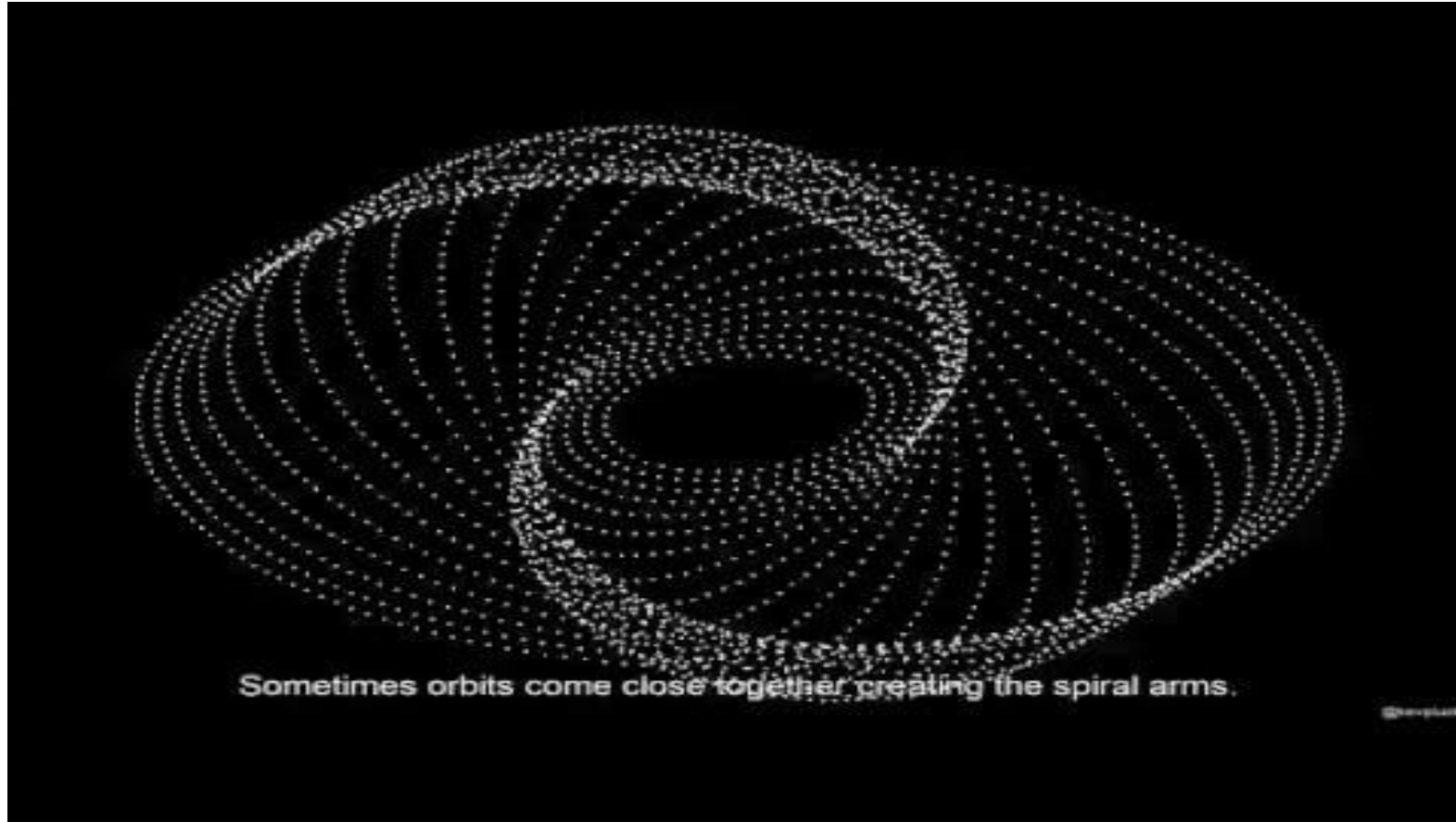
# СТРУКТУРА МЛЕЧНОГО ПУТИ



Галактика должна быть похожа на M101:  
есть как grand design спирали,  
так и мелкие ветви



# СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ – ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ



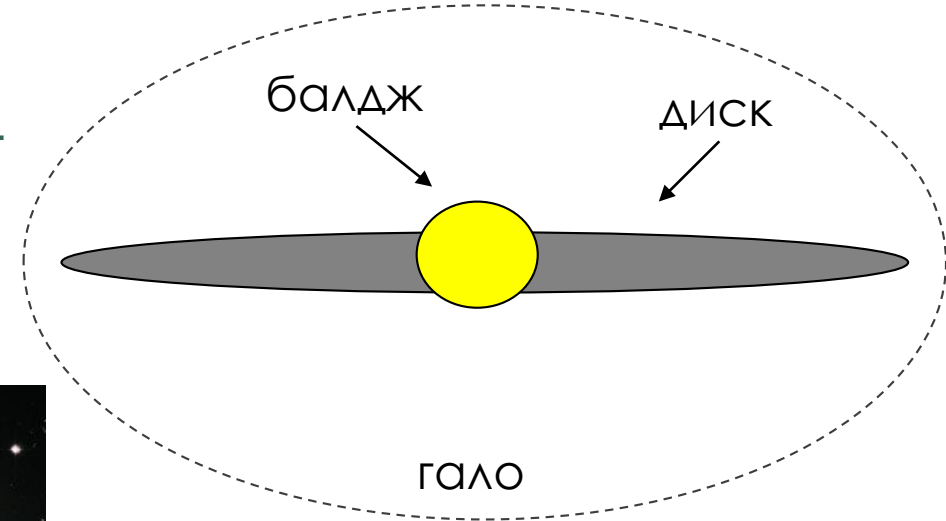
Grand Design Spiral

<https://www.youtube.com/watch?v=IMReQ6hVw5s>

# МЕЖЗВЁЗДНАЯ СРЕДА



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 <sup>3</sup> )	State of hydrogen	Primary observational techniques
Molecular clouds	< 1%	80	10–20	10 <sup>2</sup> –10 <sup>6</sup>	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 $\alpha$ emission and pulsar dispersion
H II regions	< 1%	70	8000	10 <sup>2</sup> –10 <sup>4</sup>	ionized	H $\alpha$ emission and pulsar dispersion
Coronal gas Hot ionized medium (HIM)	30–70%	1000–3000	10 <sup>6</sup> –10 <sup>7</sup>	10 <sup>-4</sup> –10 <sup>-2</sup>	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)

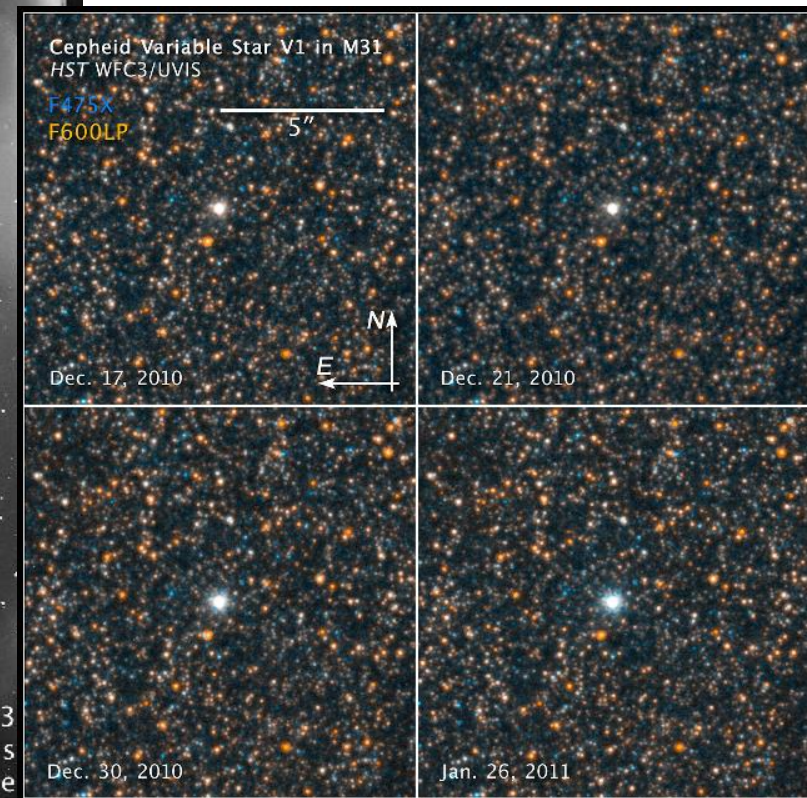
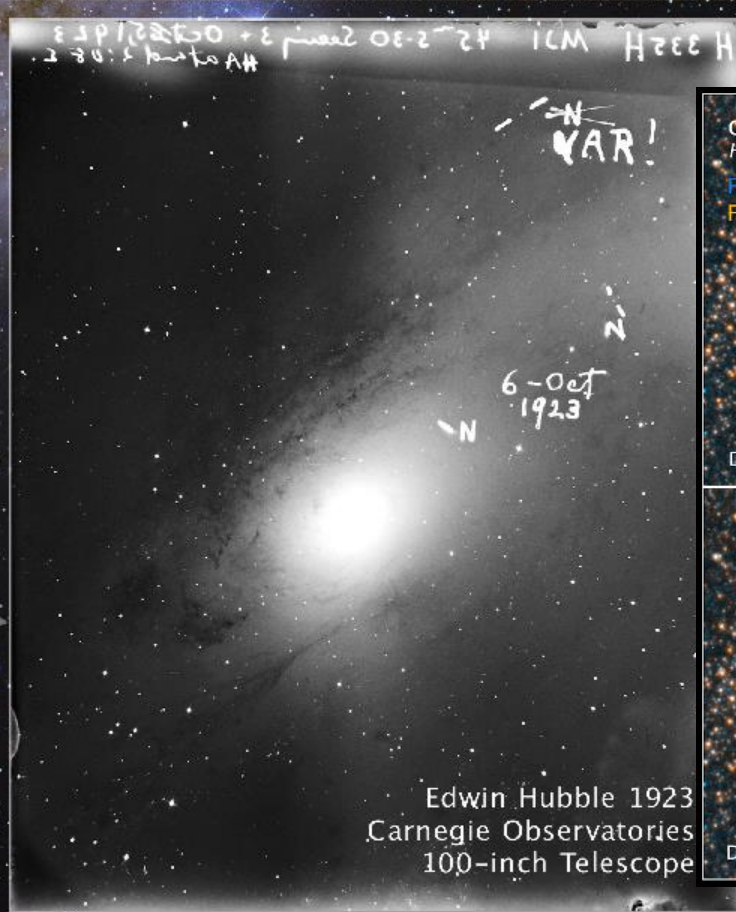
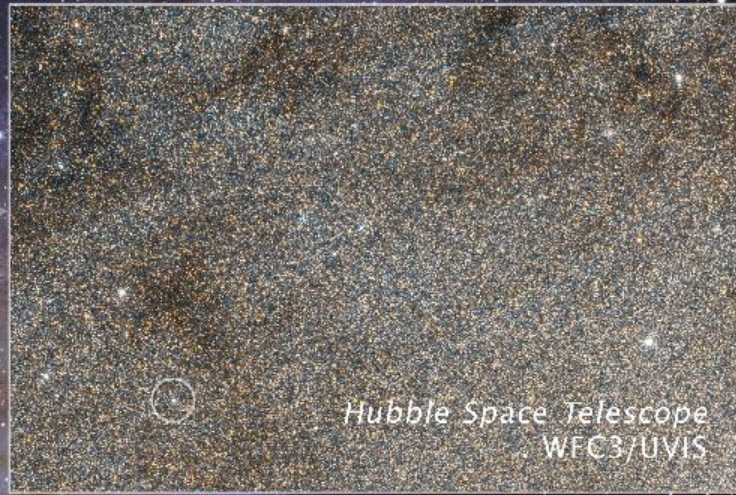


Милтон Хьюмасон  
(1891-1972)





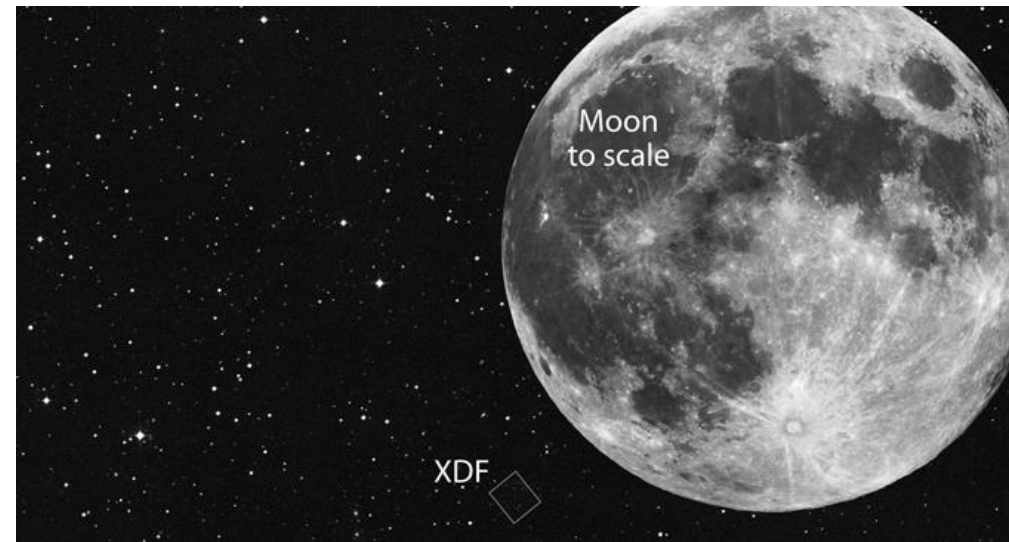
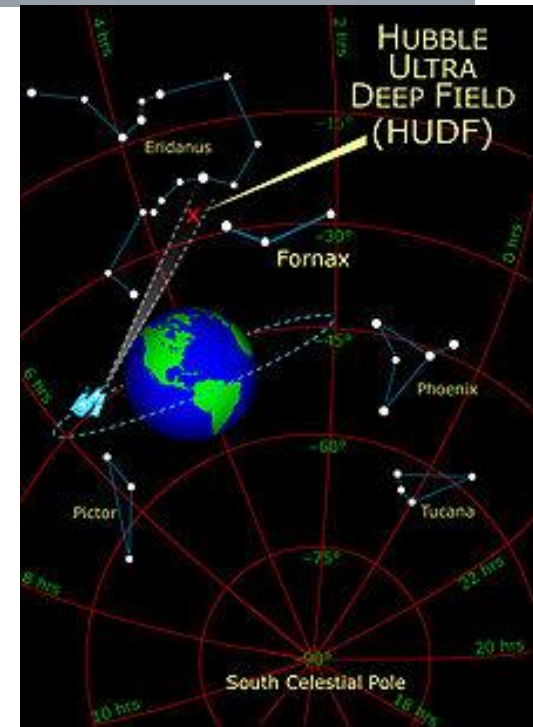
Photo: R. Gendler



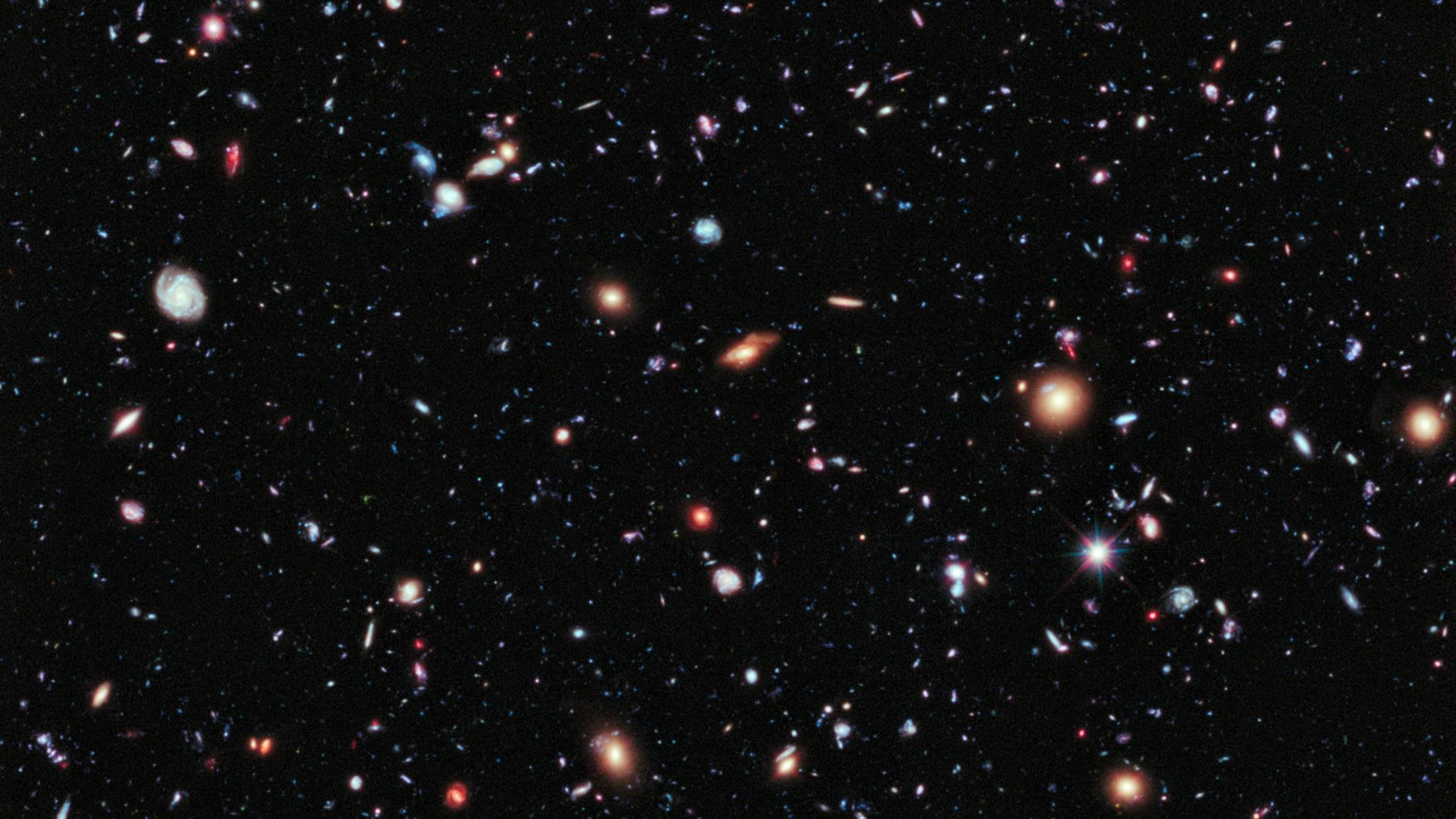




Созвездие Печь  
2003-2004 гг









# ЗООПАРК ГАЛАКТИК



Дисковая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная

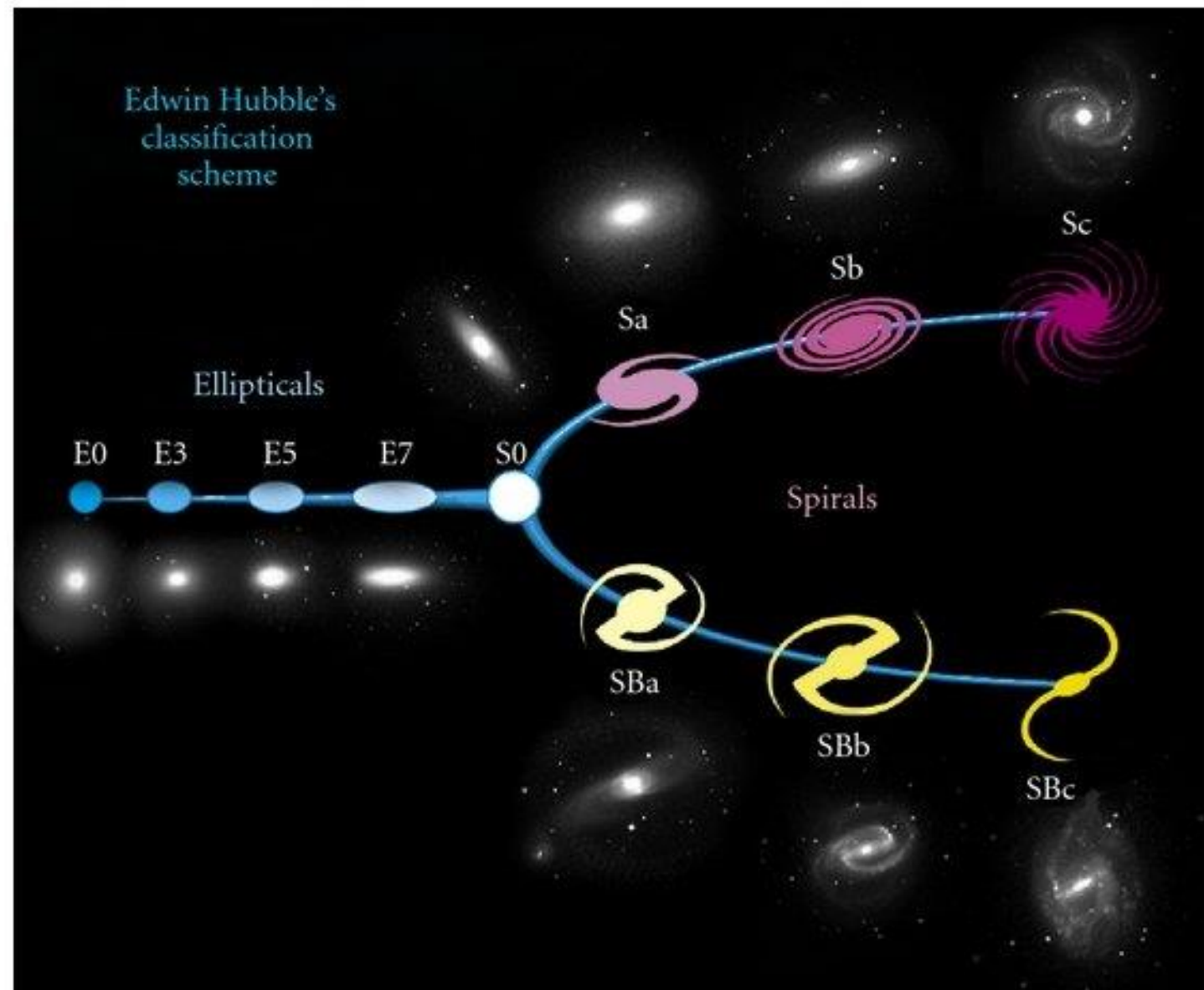
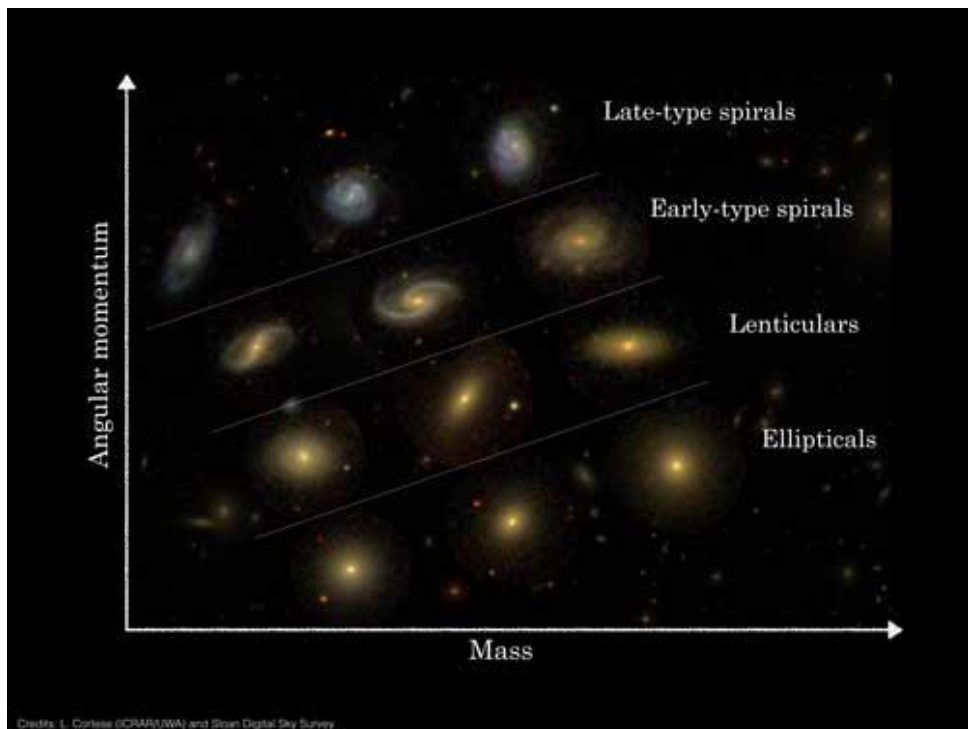


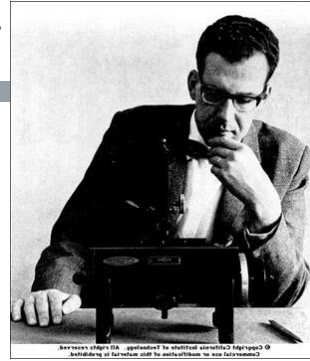
Эллиптическая



Взаимодействующие

# КАМЕРТОН ХАББЛА



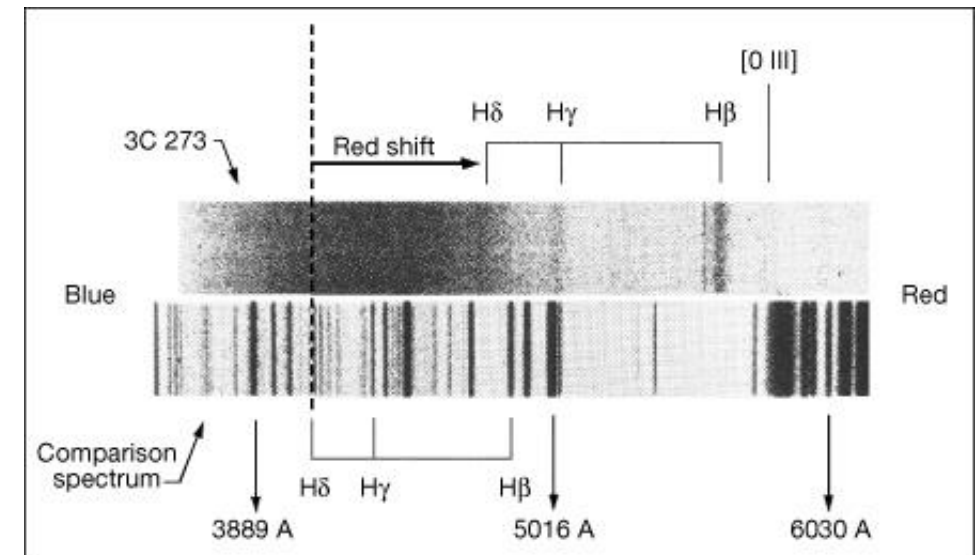


# АКТИВНЫЕ ЯДРА: КВАЗАРЫ



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».





Cocoon

Jet

Accretion disk

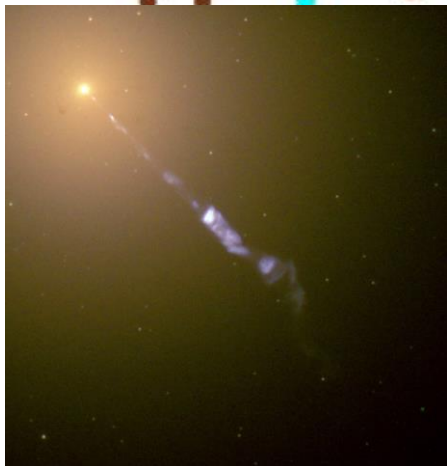
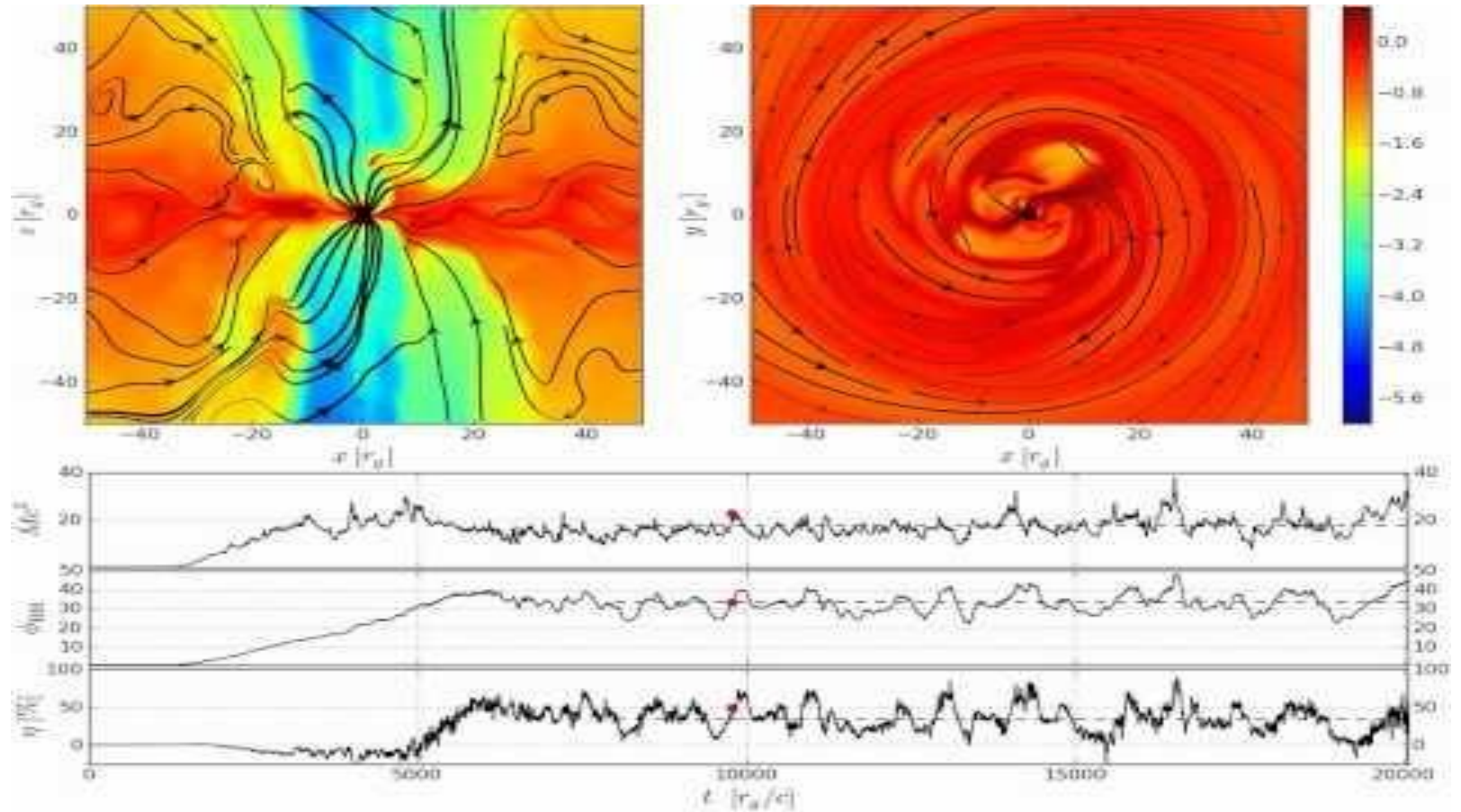
Black hole

Surrounding matter

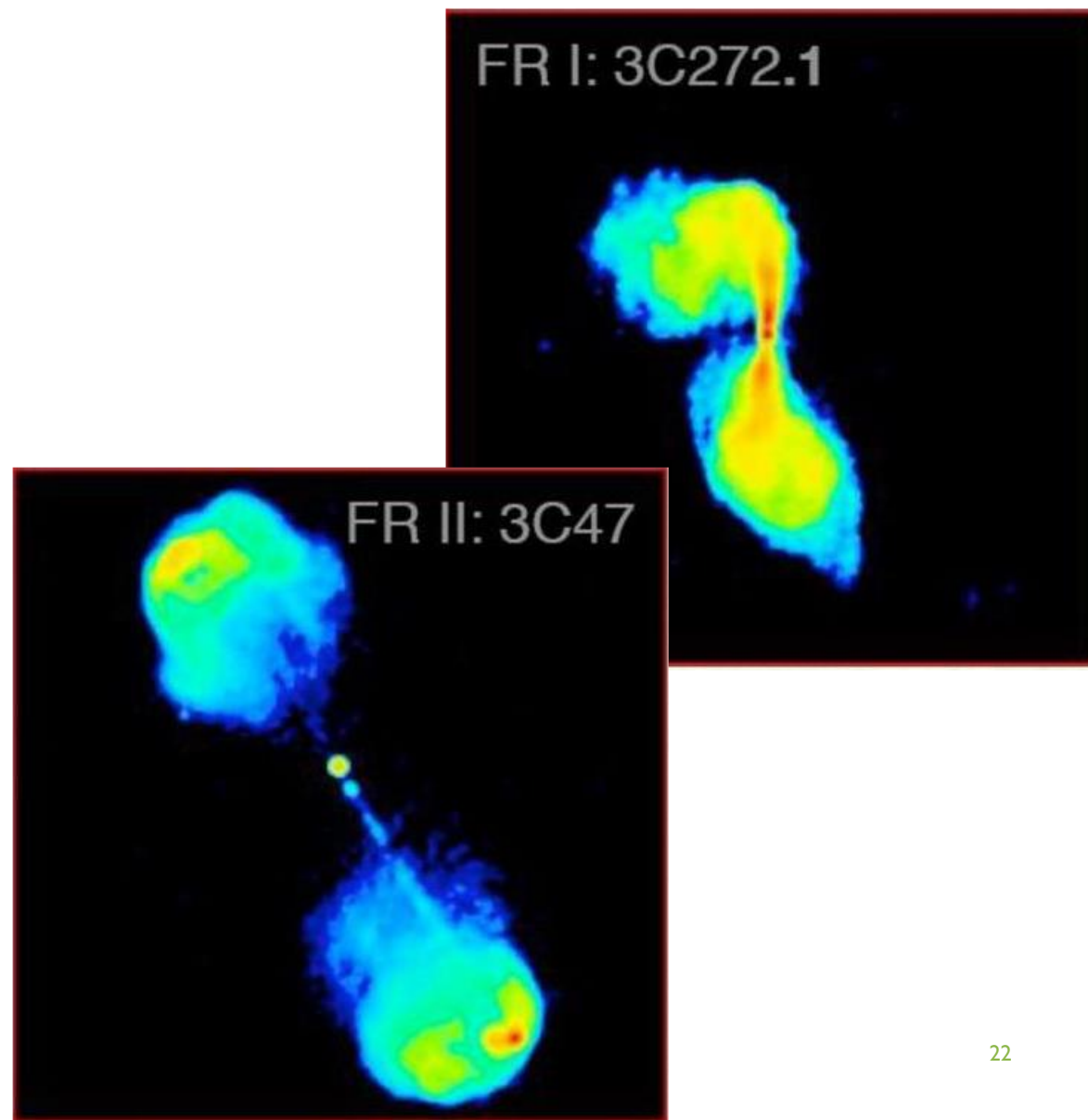
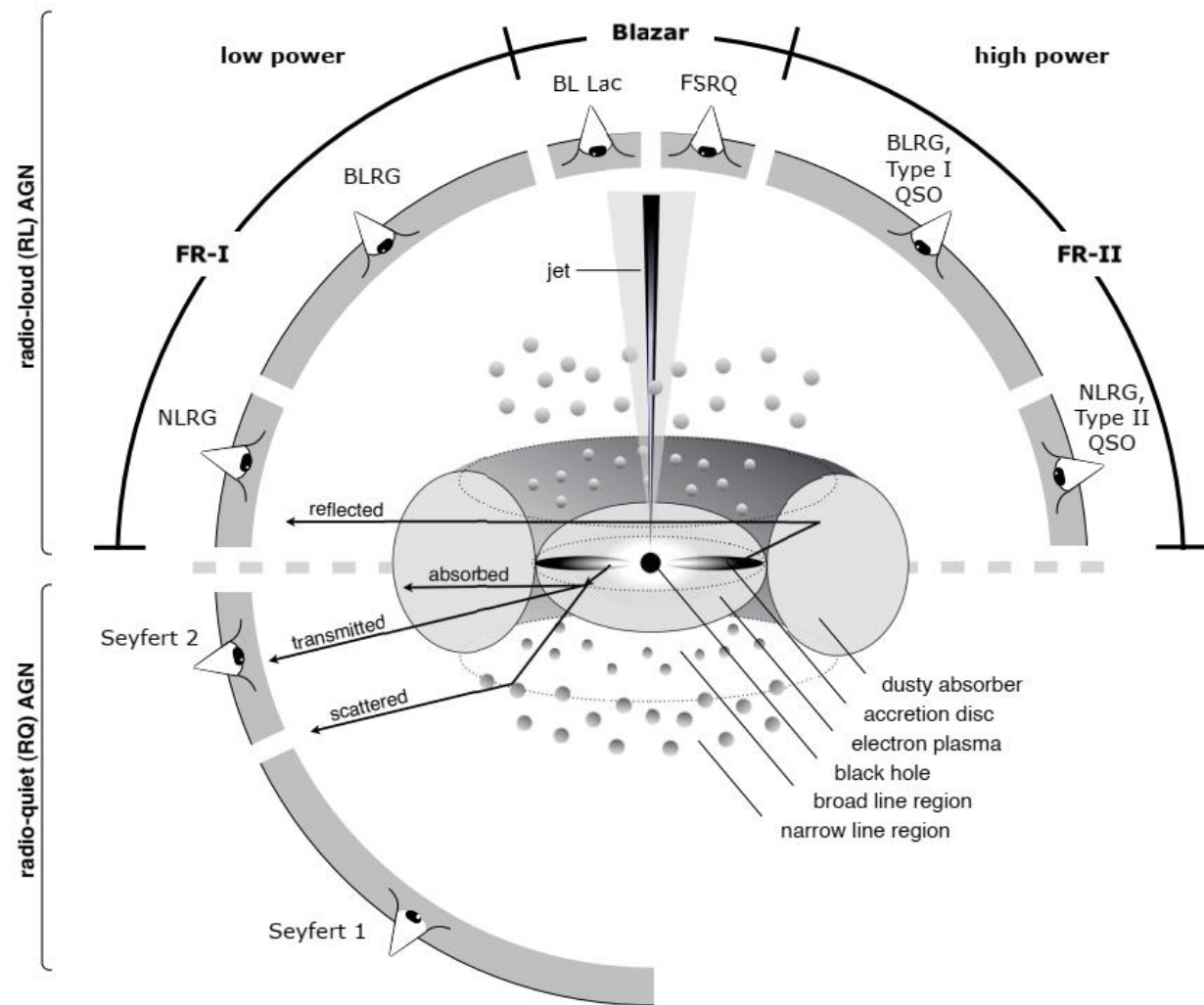
# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ДЖЕТЫ

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

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

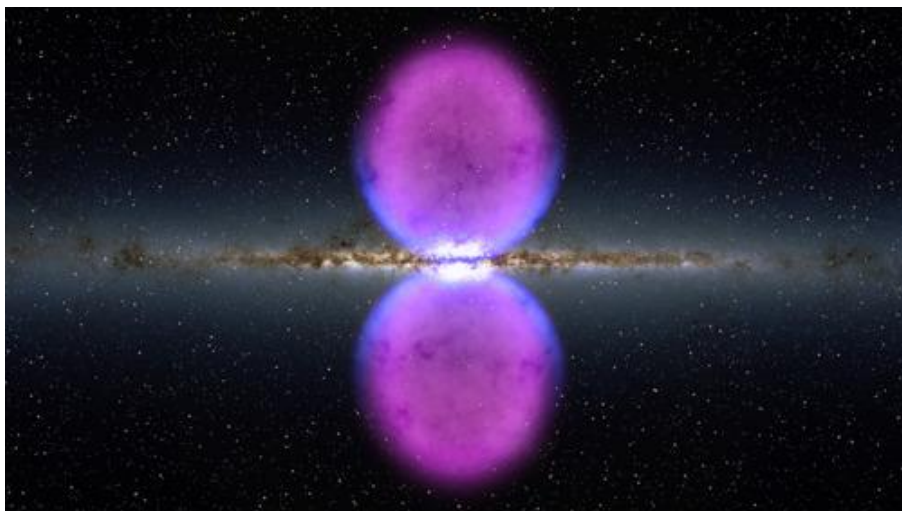
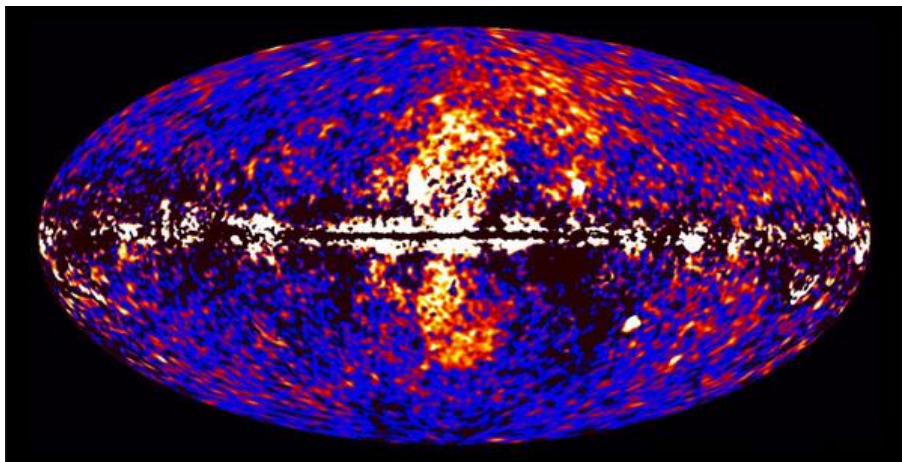


# ГЕОМЕТРИЯ АКТИВНЫХ ЯДЕР





# ПУЗЫРИ ФЕРМИ



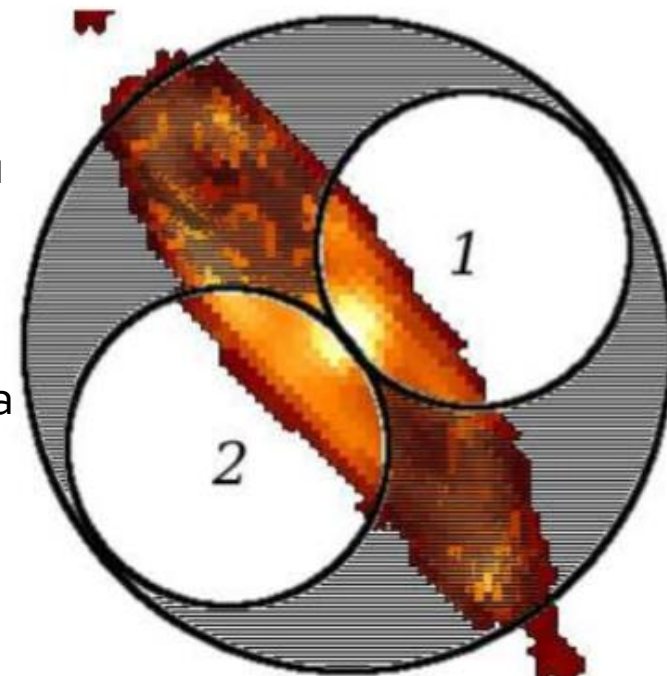
Возраст пузырей в MW от 10 до 100 млн лет.

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.

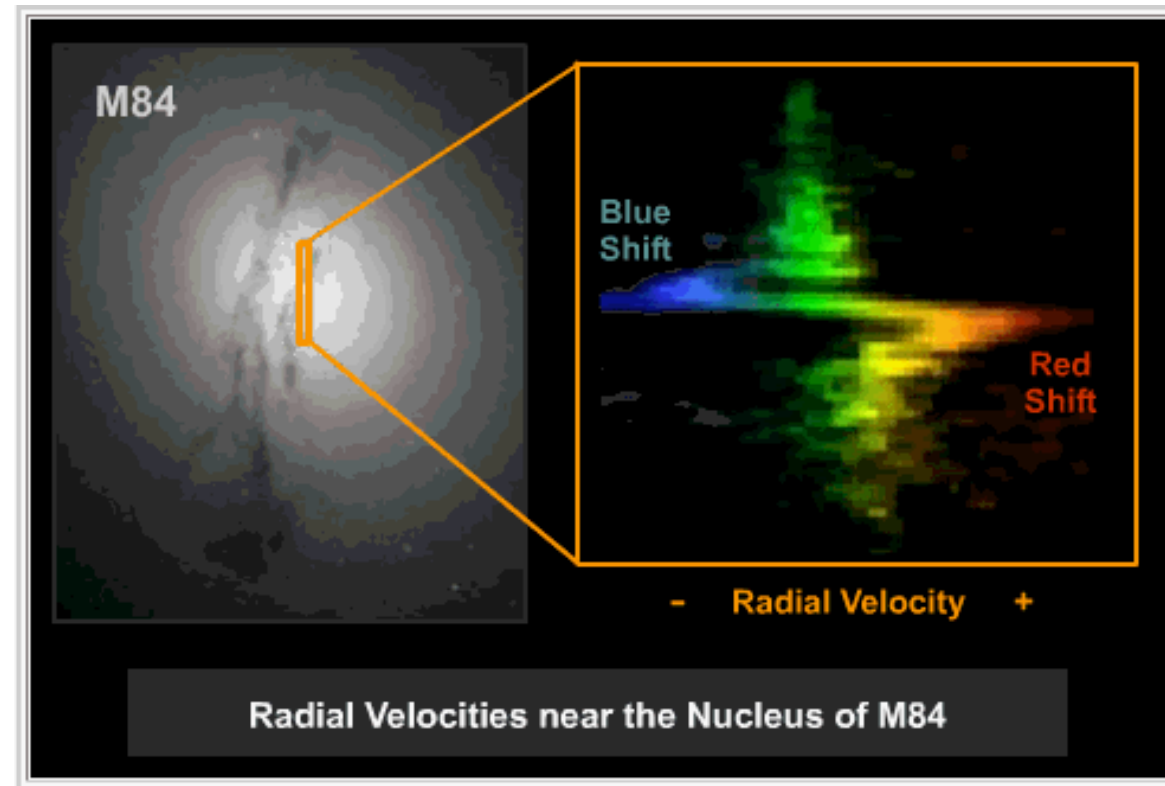
1603.07245

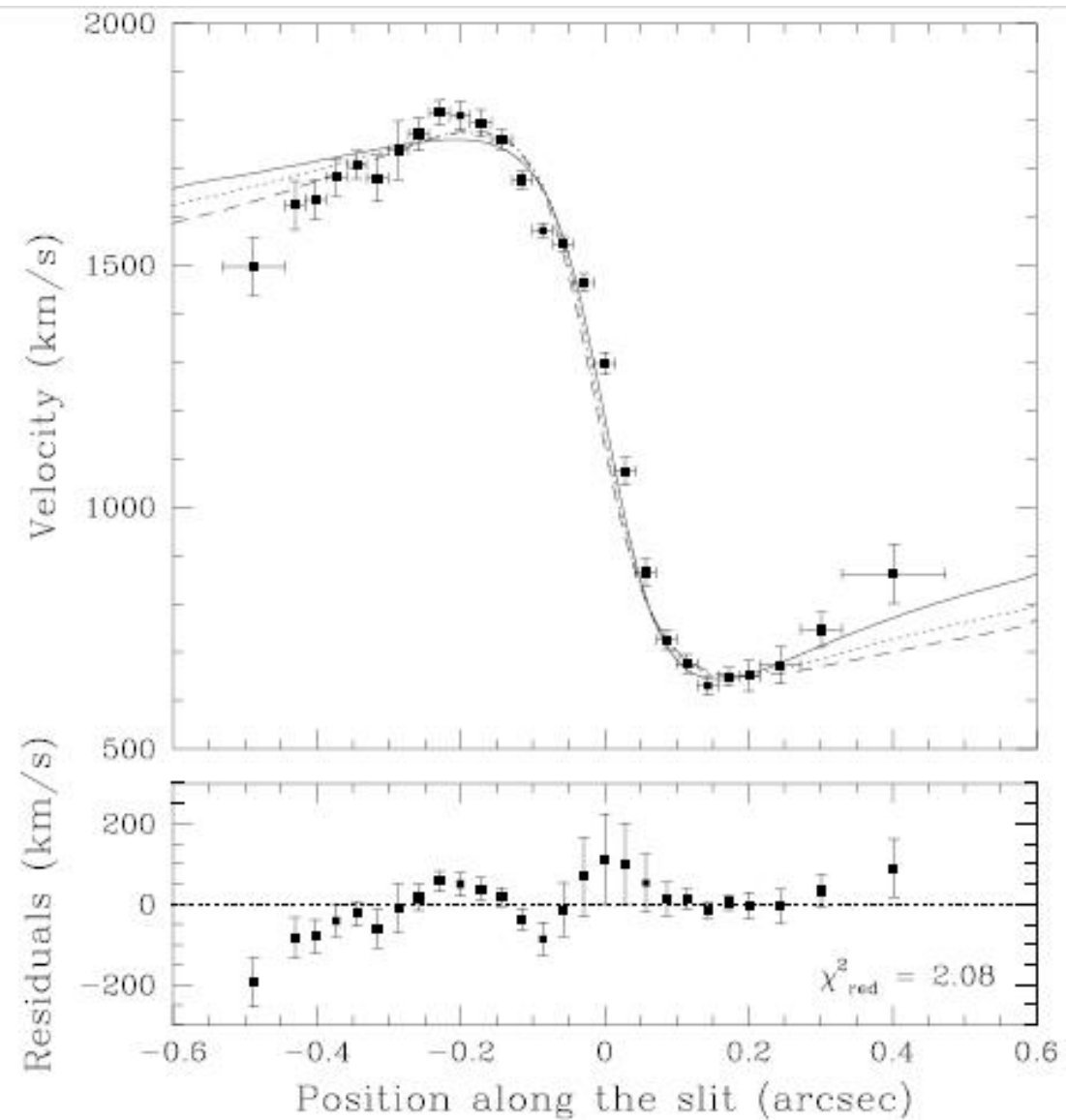


# МАССЫ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- Соотношение между массой черной дыры и массой балджа
- Измерение орбит звезд и мазерных источников
- Кинематика газа
- Профиль звездной плотности
- Реверберационное картирование

Конечно, всегда можно дать верхний предел на массу, исходя из того, что светимость не превосходит критическую (эддингтоновскую).

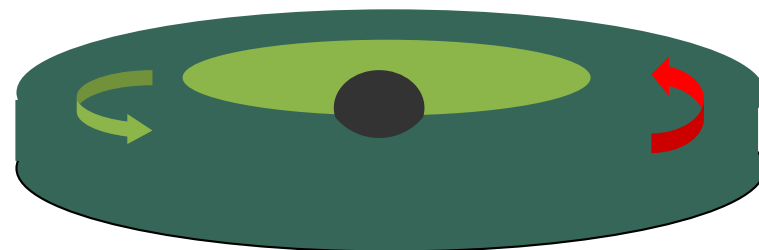


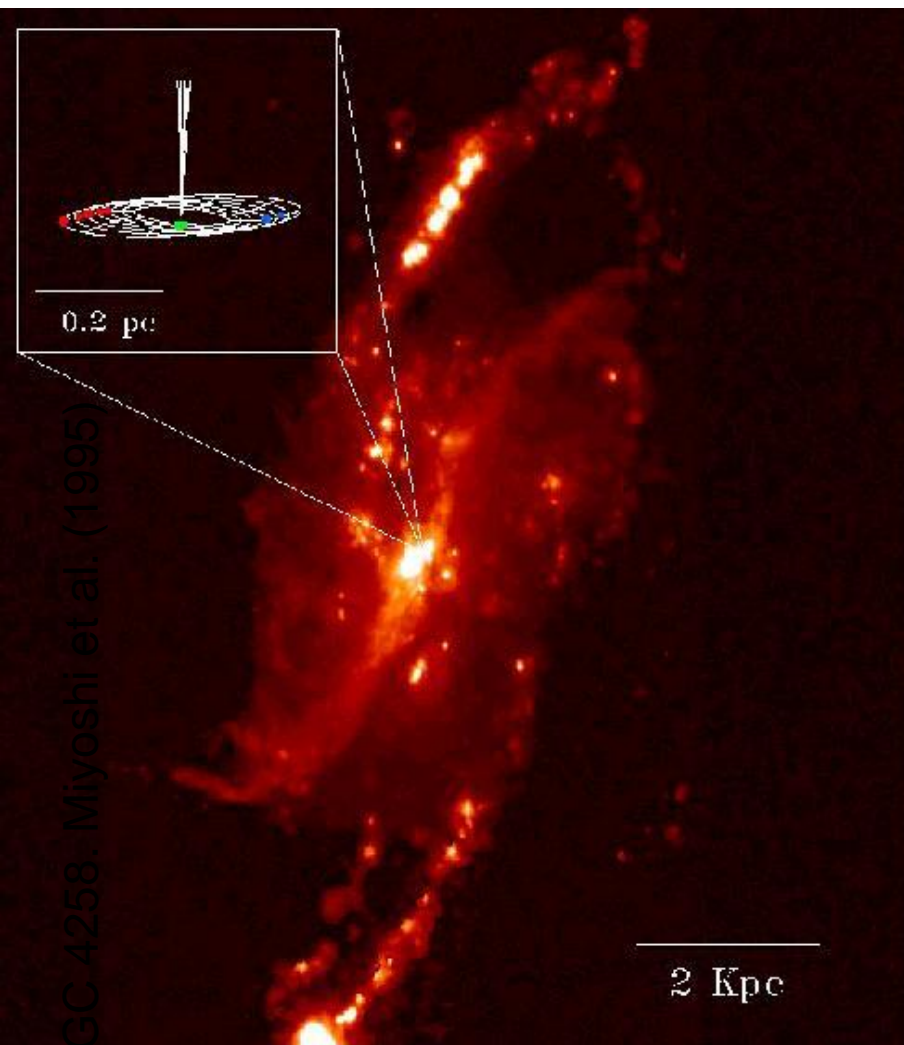


Для M87 скорости газа измерены  
внутри одной миллисекунды дуги  
(5pc).

Масса  $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Одна из самых тяжелых черных дыр

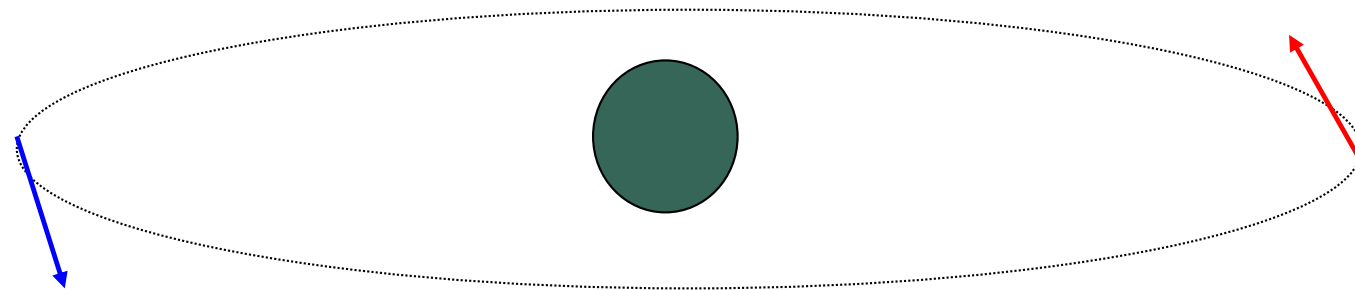




NGC 4258. Miyoshi et al. (1995)

Наблюдая движение мазерных источников в галактике **NGC 4258**, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

Это наиболее точный метод.







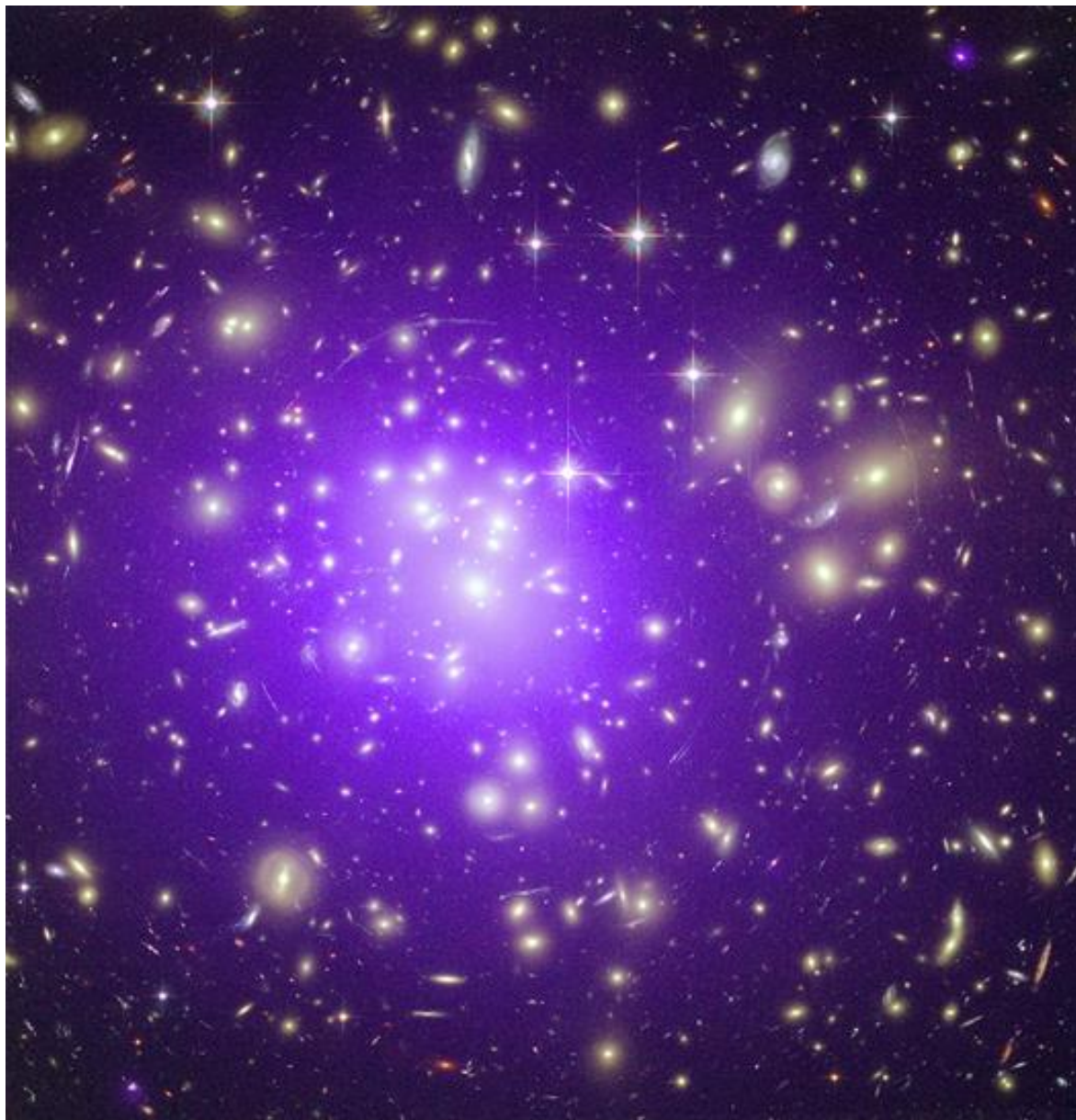
Мы видим, что далекие галактики только формируются.  
Они не похожи на симметричные галактики вокруг нас.

# ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК

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

«Галактический каннибализм»





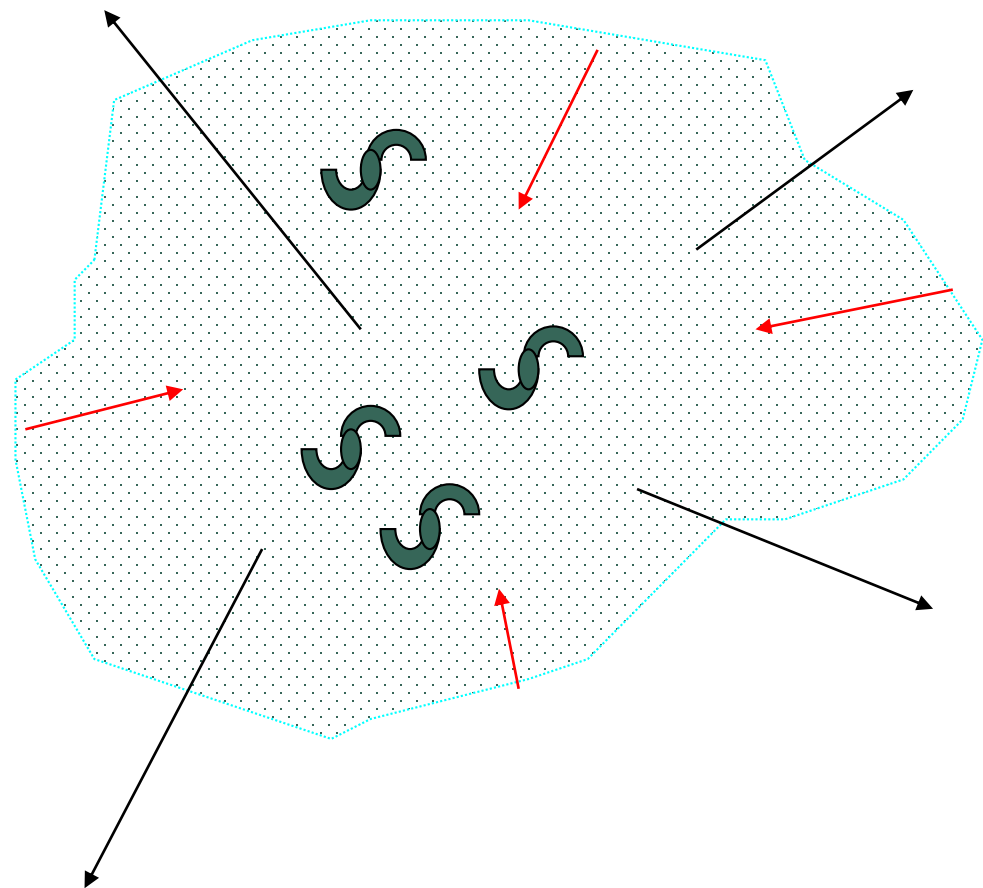
Мы видим, что скопления  
возникают постепенно.

На больших расстояниях  
скопления еще не успели  
сформироваться.

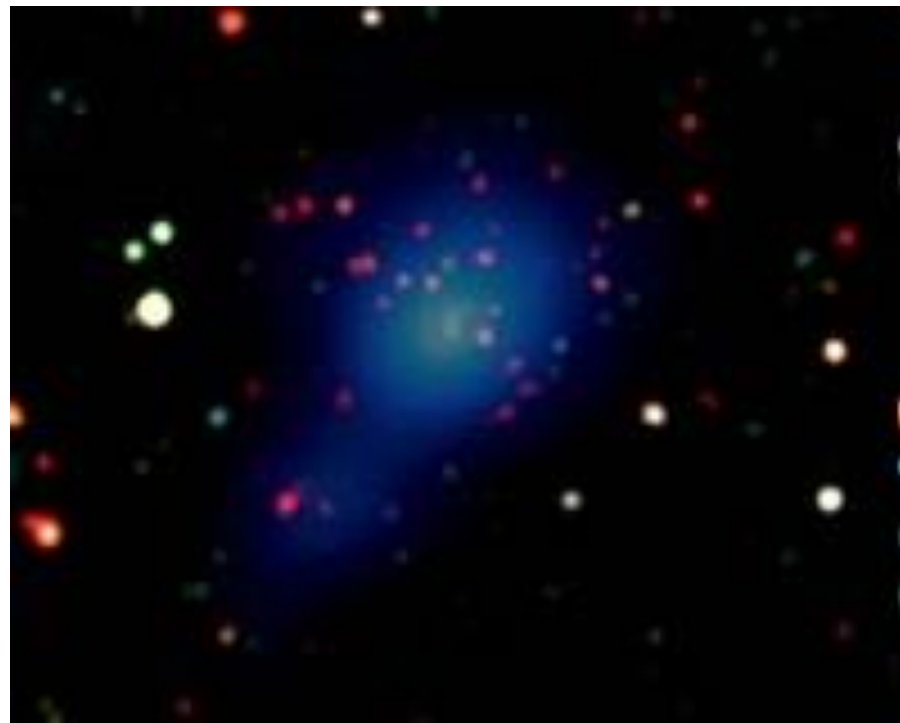


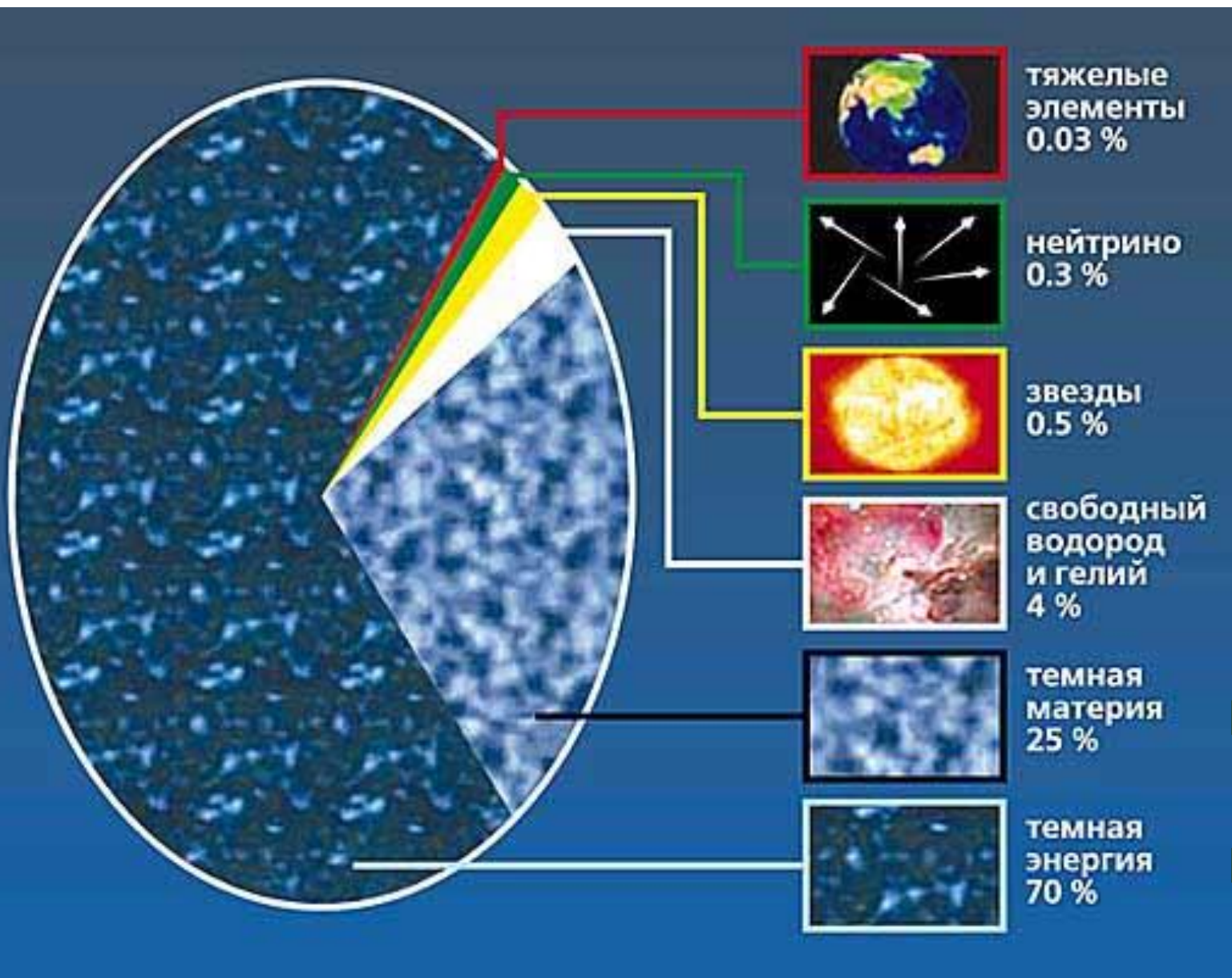
# МОТИВАЦИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

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



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

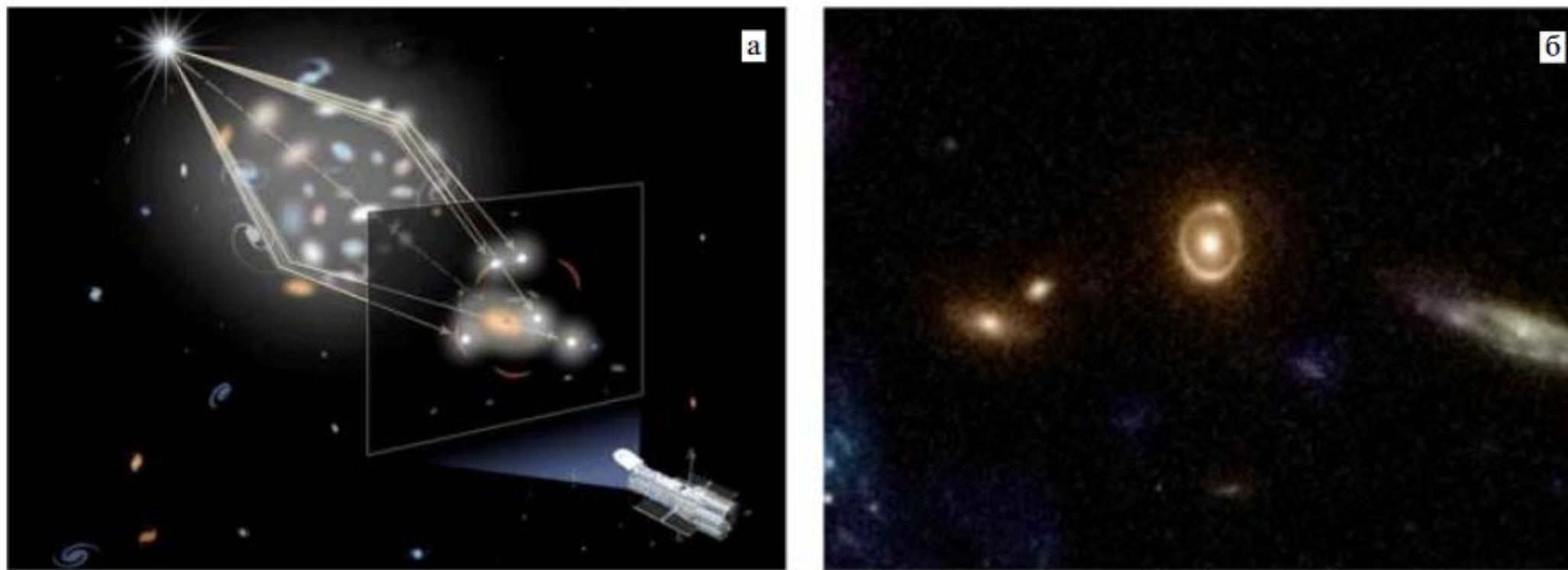




Большую часть материи, заполняющей вселенную, мы можем наблюдать лишь косвенными методами.

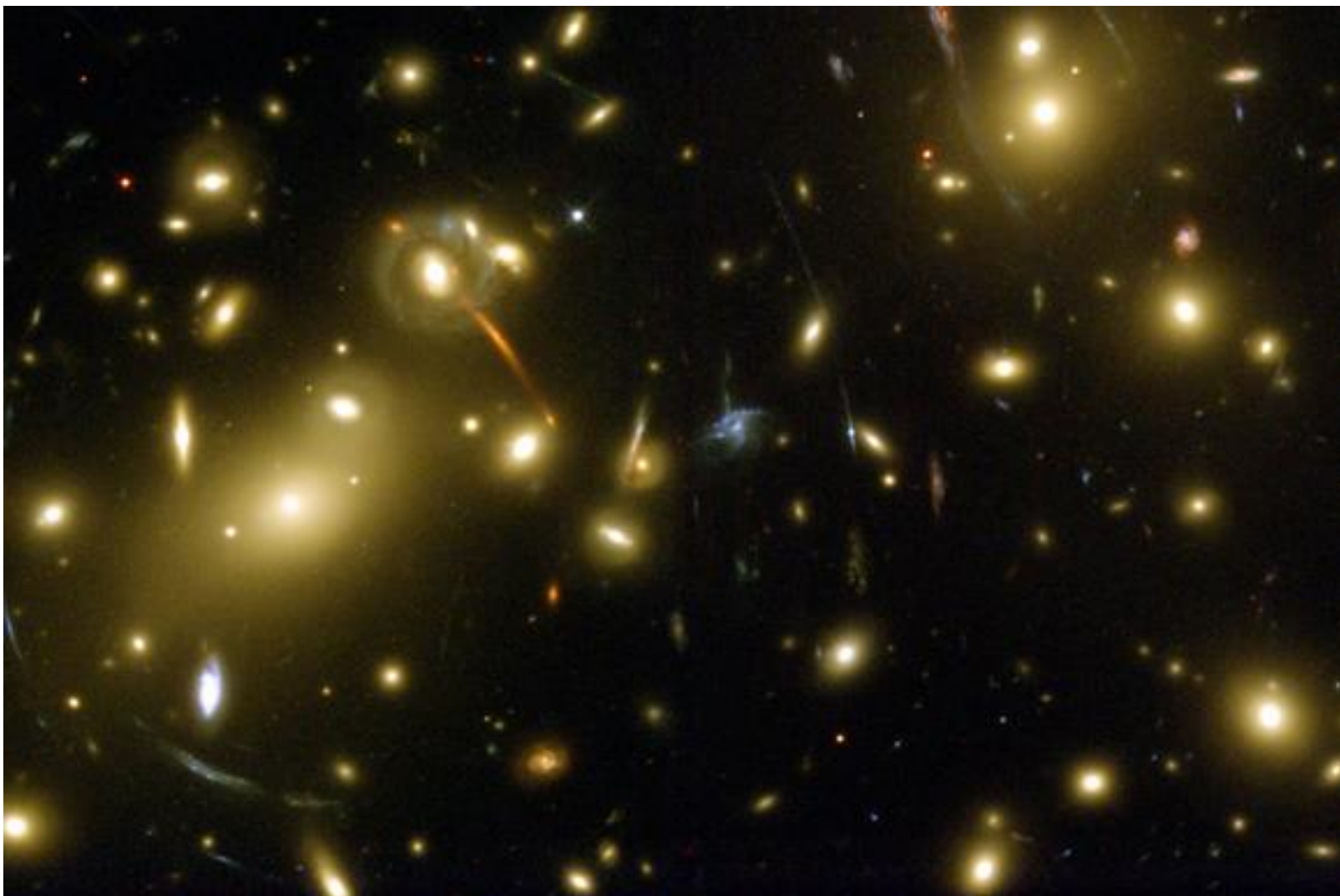
Неизвестные частицы

Неизвестные поля или вакуум



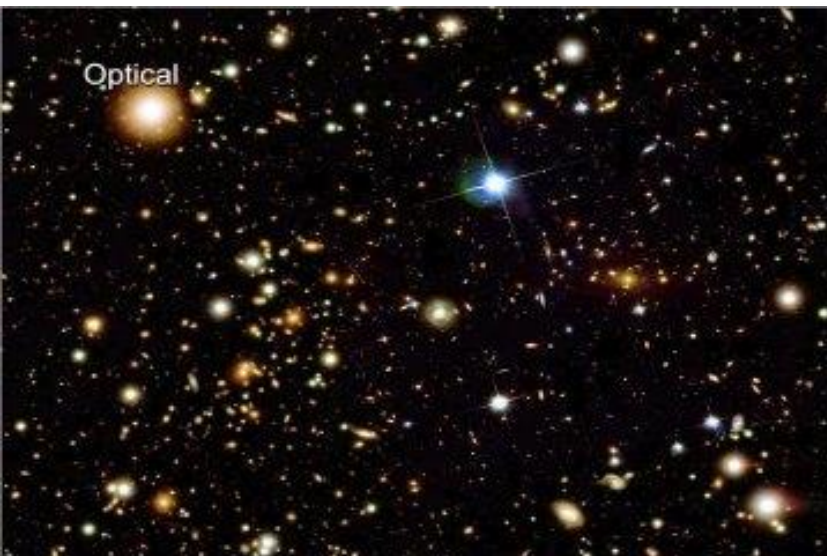
**Рис. 16.** (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038 + 4133 (телескоп Хаббла).

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



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



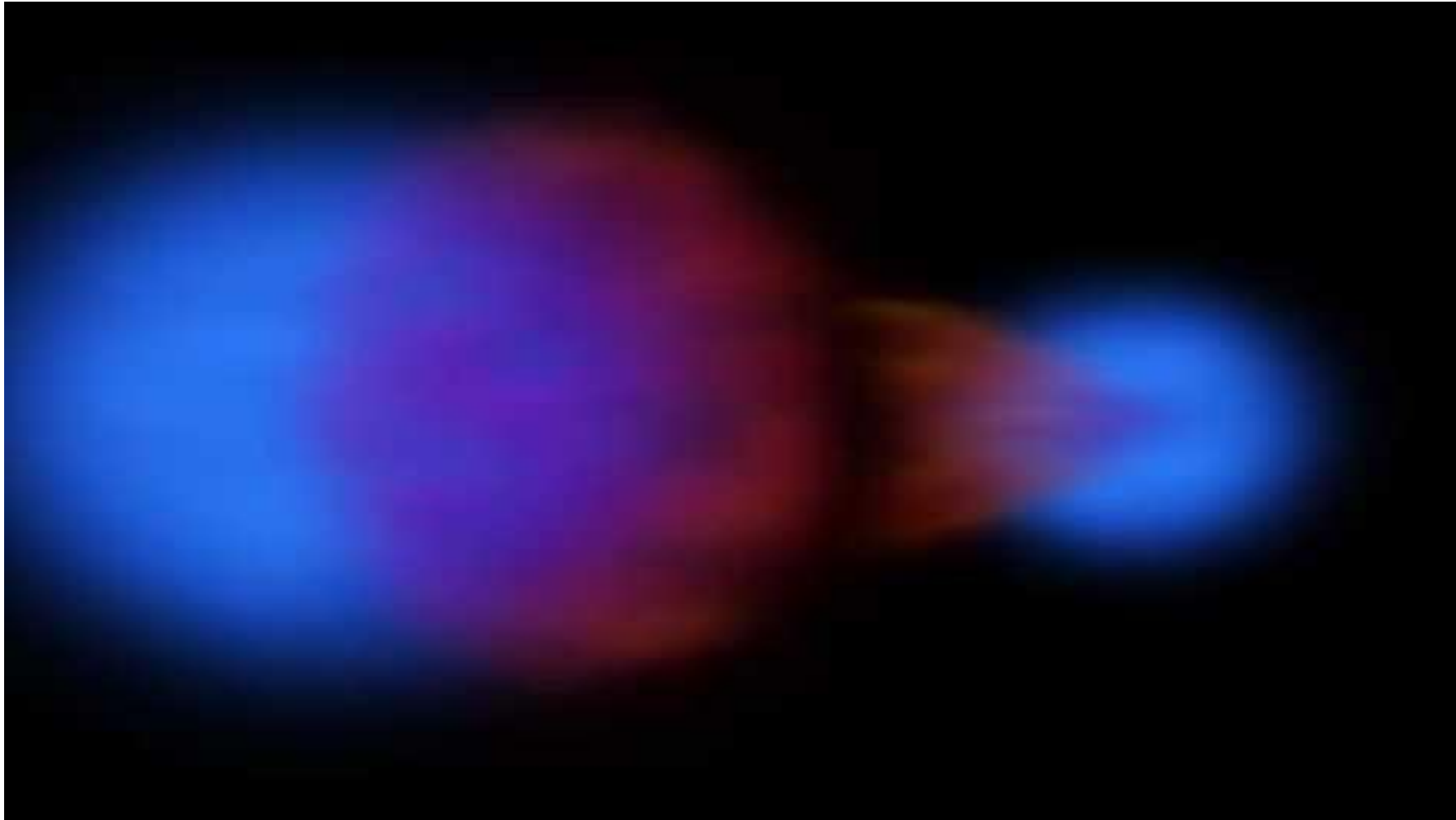


Сталкивающиеся скопления галактик  
1E 0657-56 (Bullet cluster)



---

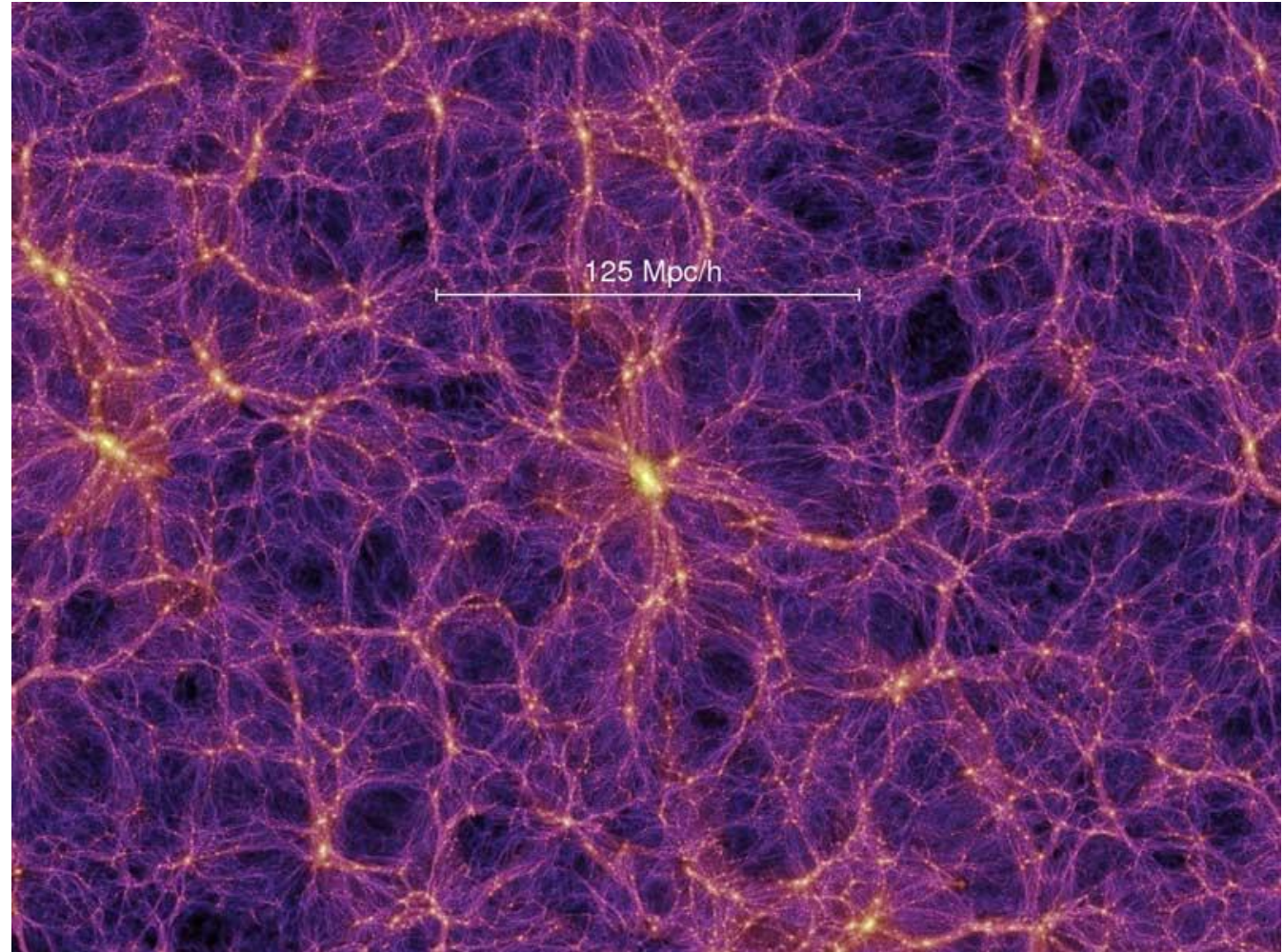
# СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК





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

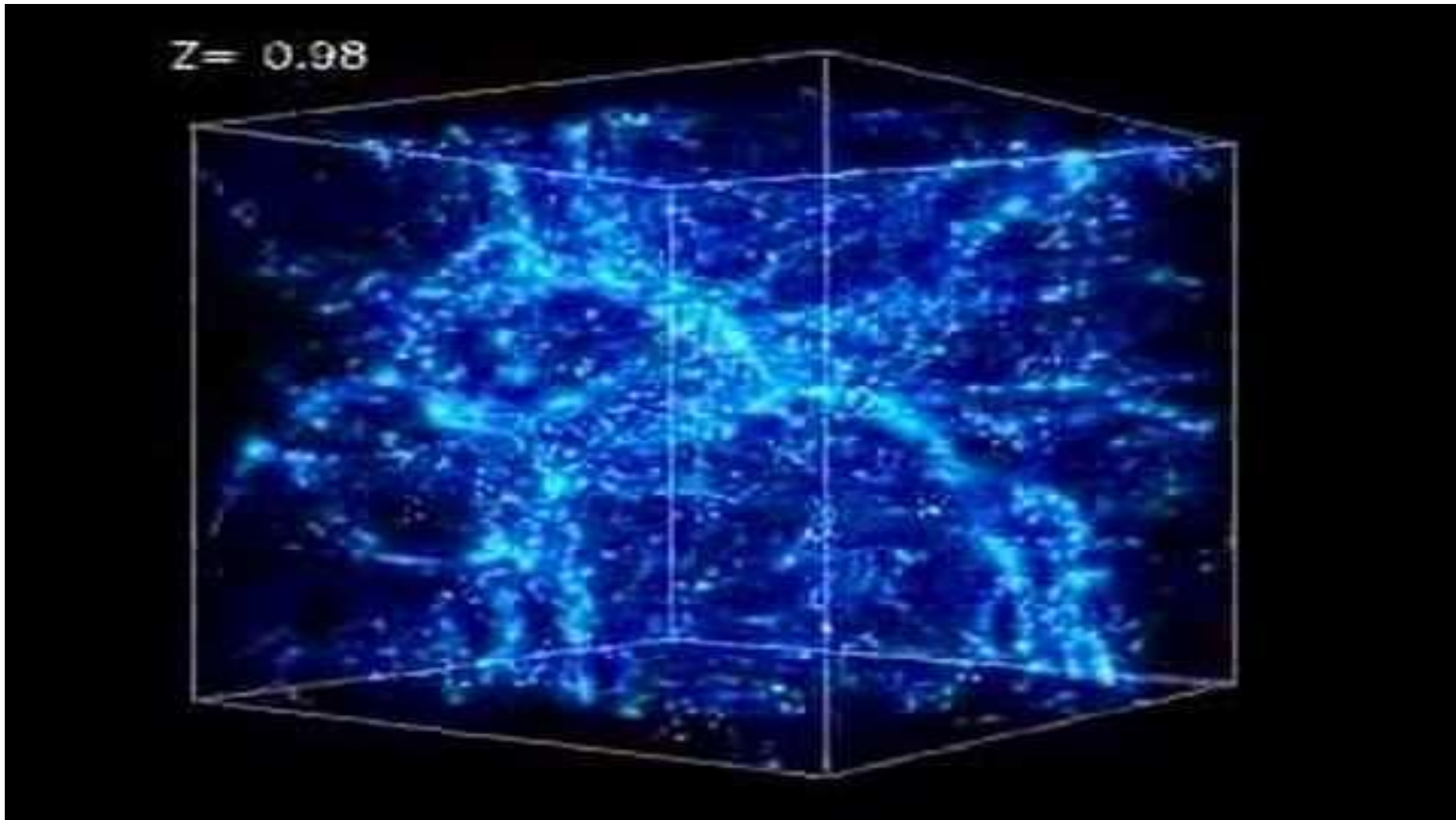
Как увидеть сам скелет вселенной?





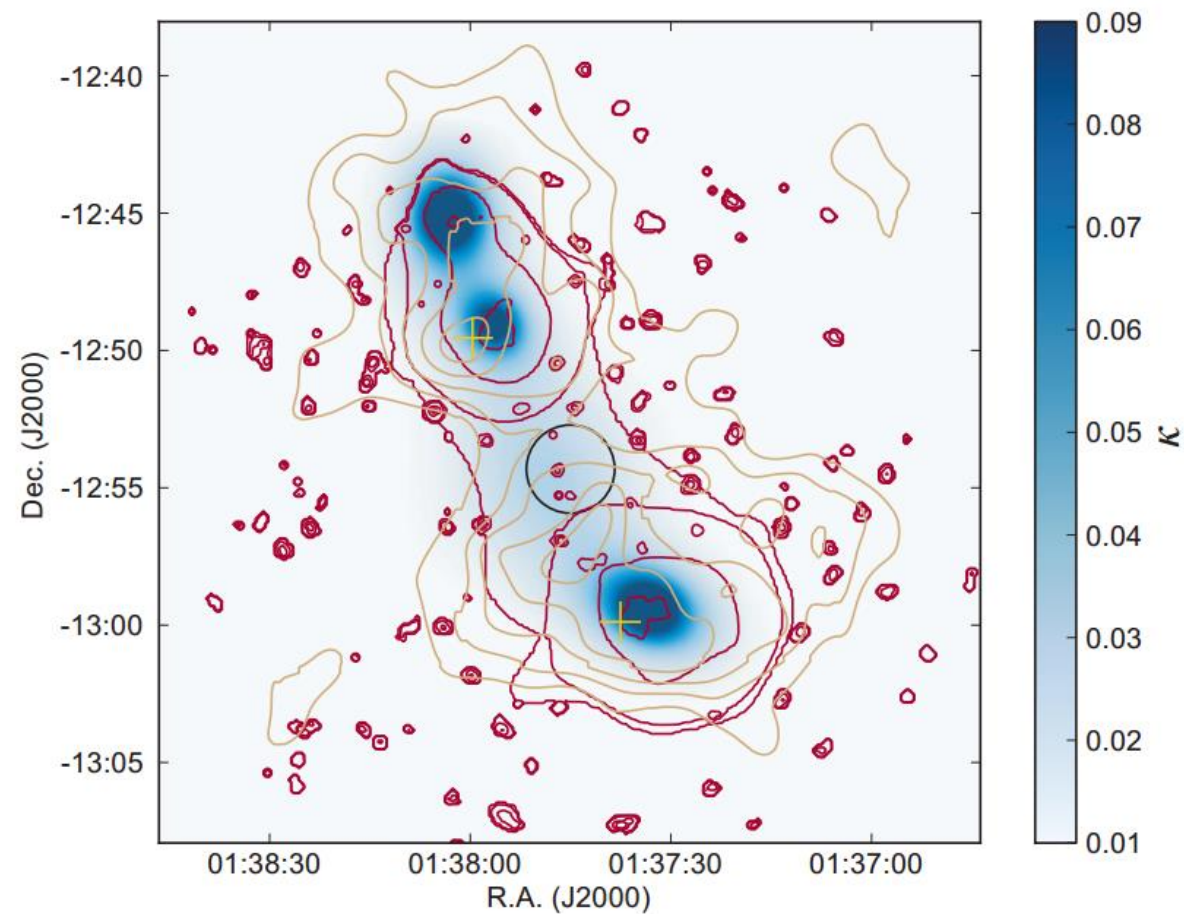
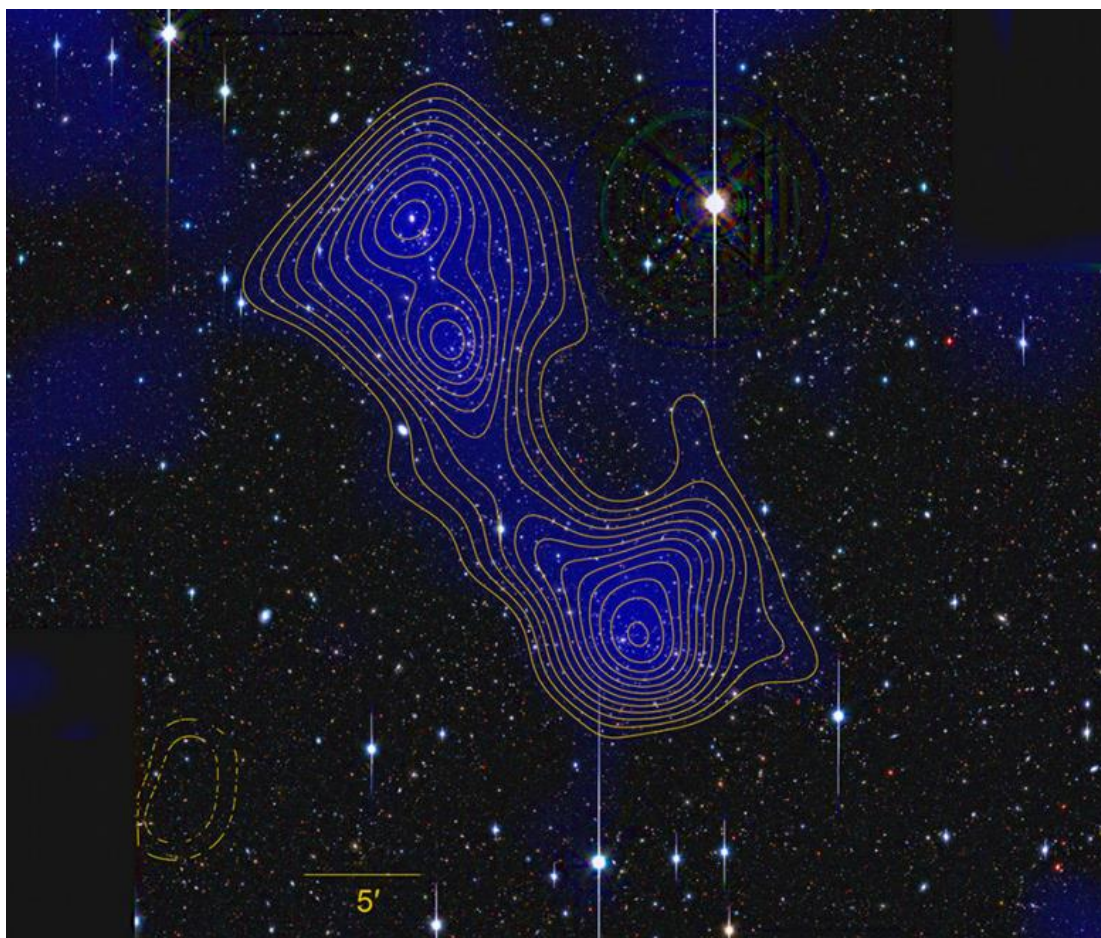
# КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА

А. Кравцов и др.

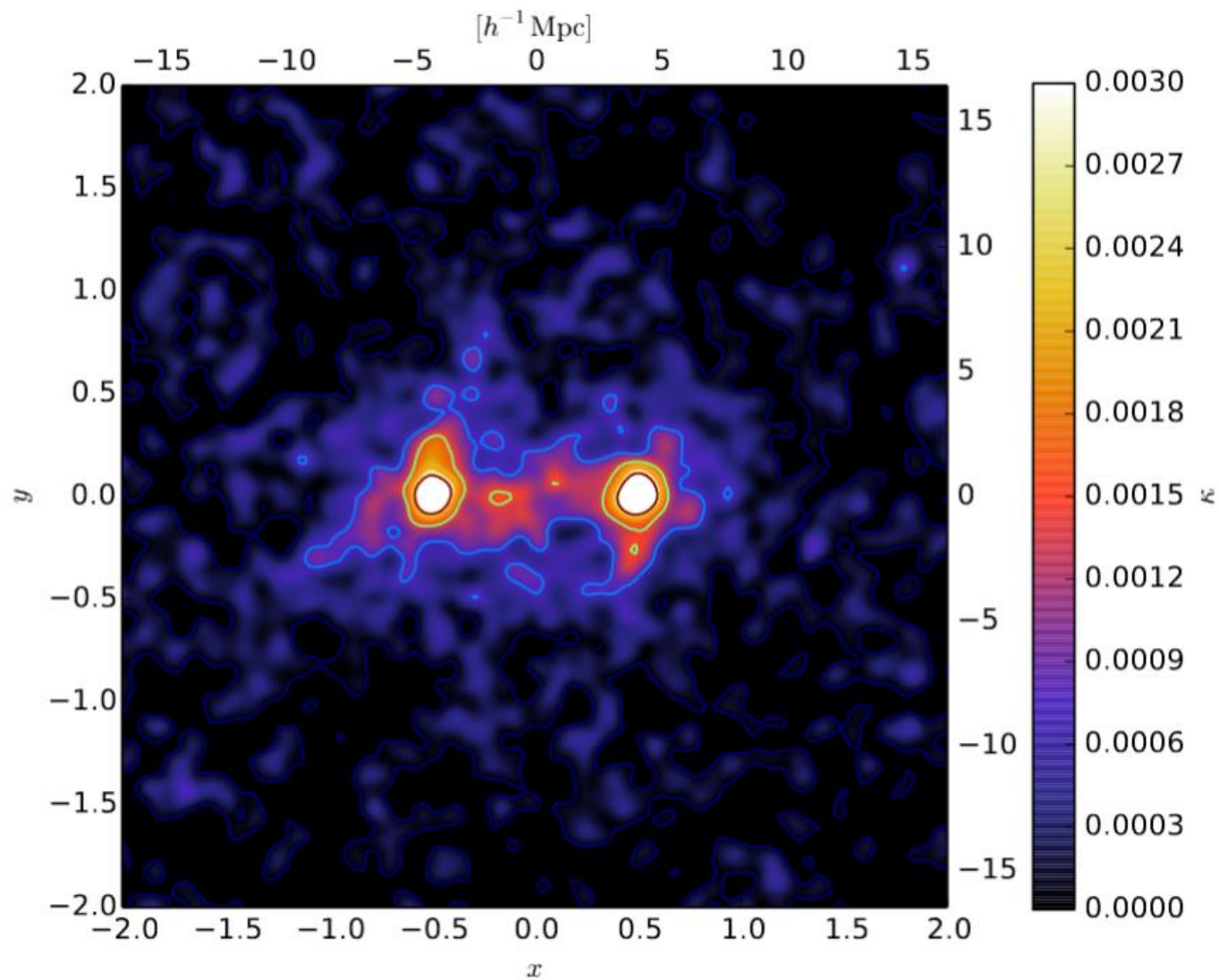


# ВОЛОКНА ТЁМНОГО ВЕЩЕСТВА

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





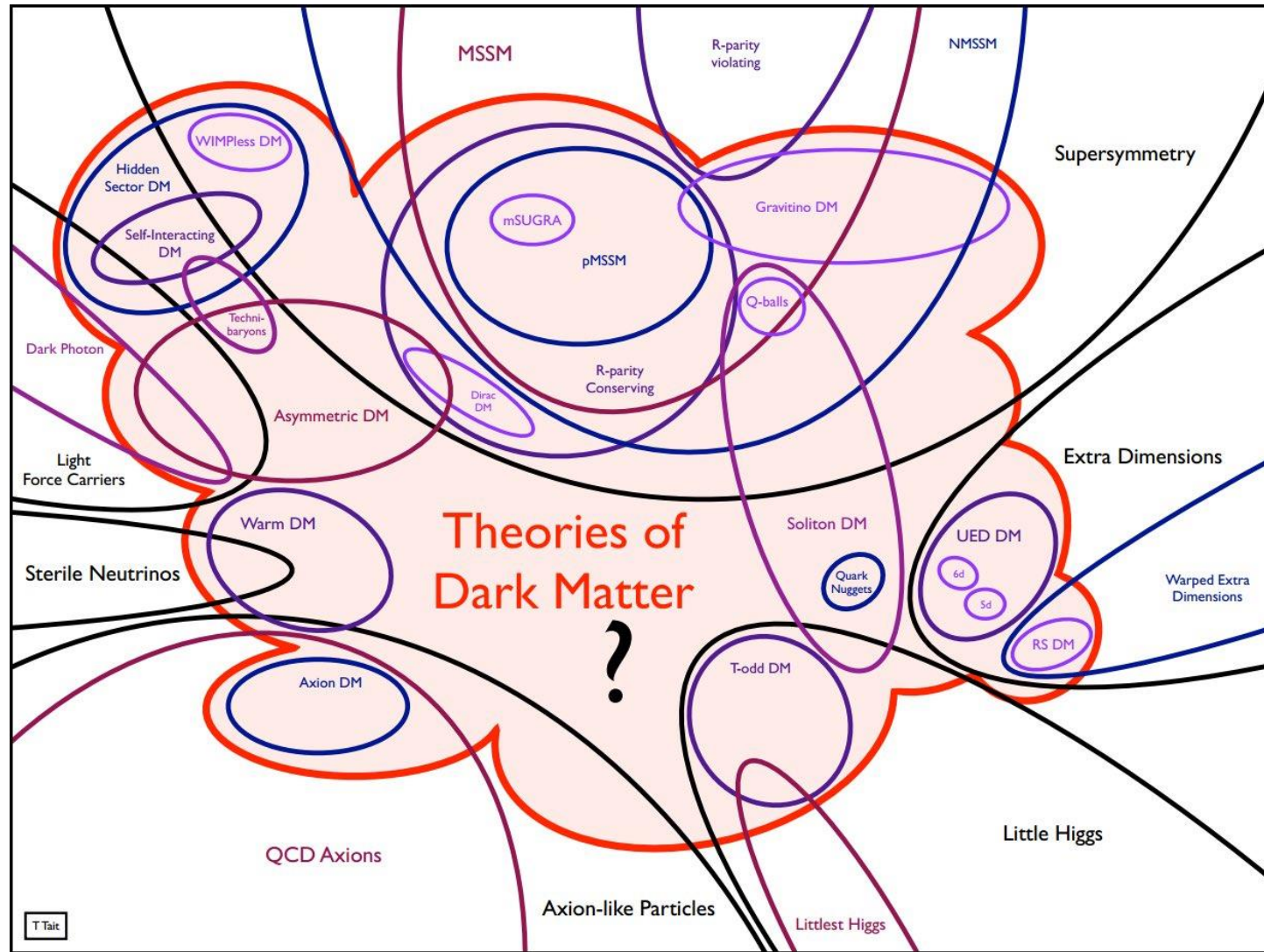


Результат получен не для какой-то конкретной пары галактик, а в результате сложения данных по многим парам.

Распределение массы определено по слабому линзированию.

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





## 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 см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

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  $\dot{M}_{\text{Edd}}$ . Под  $\dot{M}_{\text{Edd}}$  понимается такой темп, при котором источник имеет эддингтоновскую светимость (для своей массы).