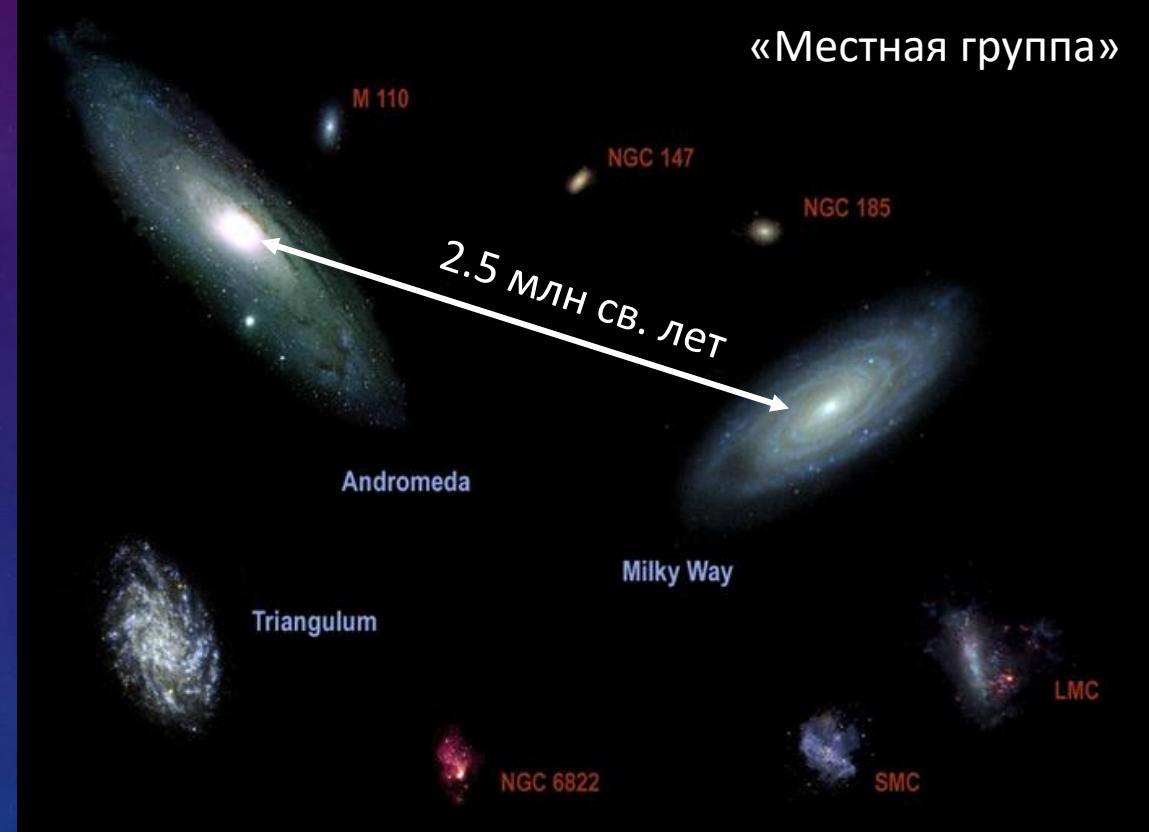
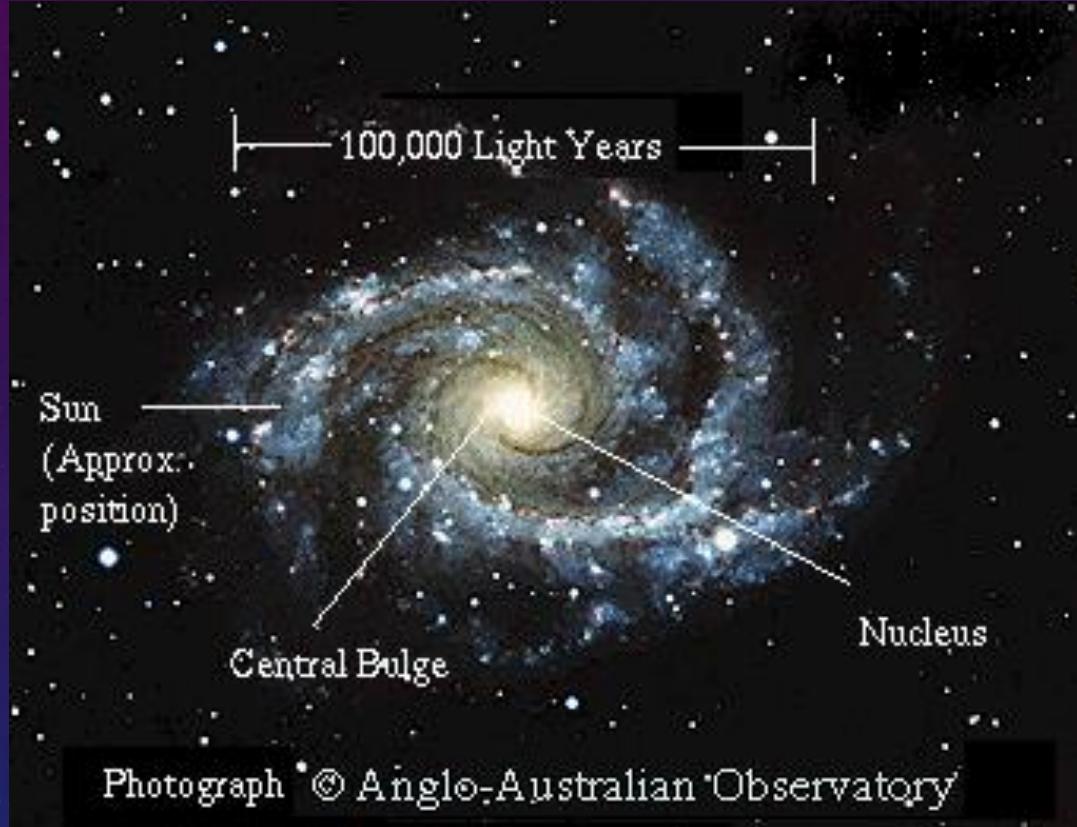


МИР ГАЛАКТИК

(ЛЕКЦИЯ 10. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

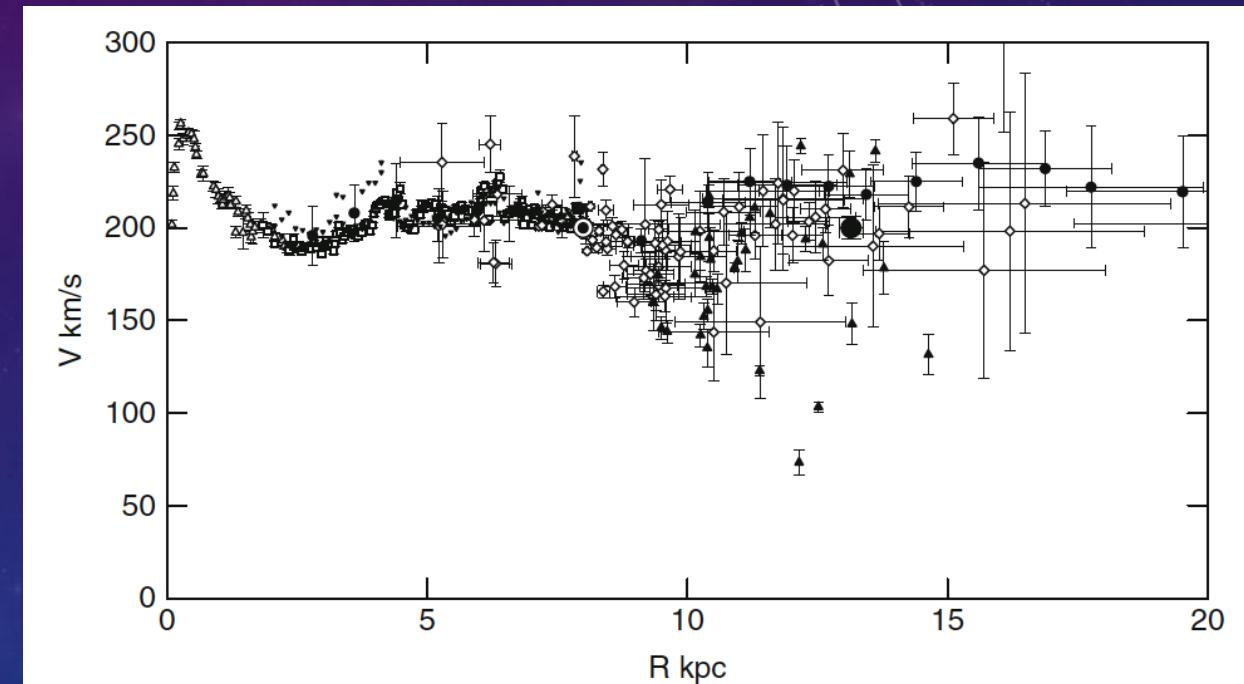
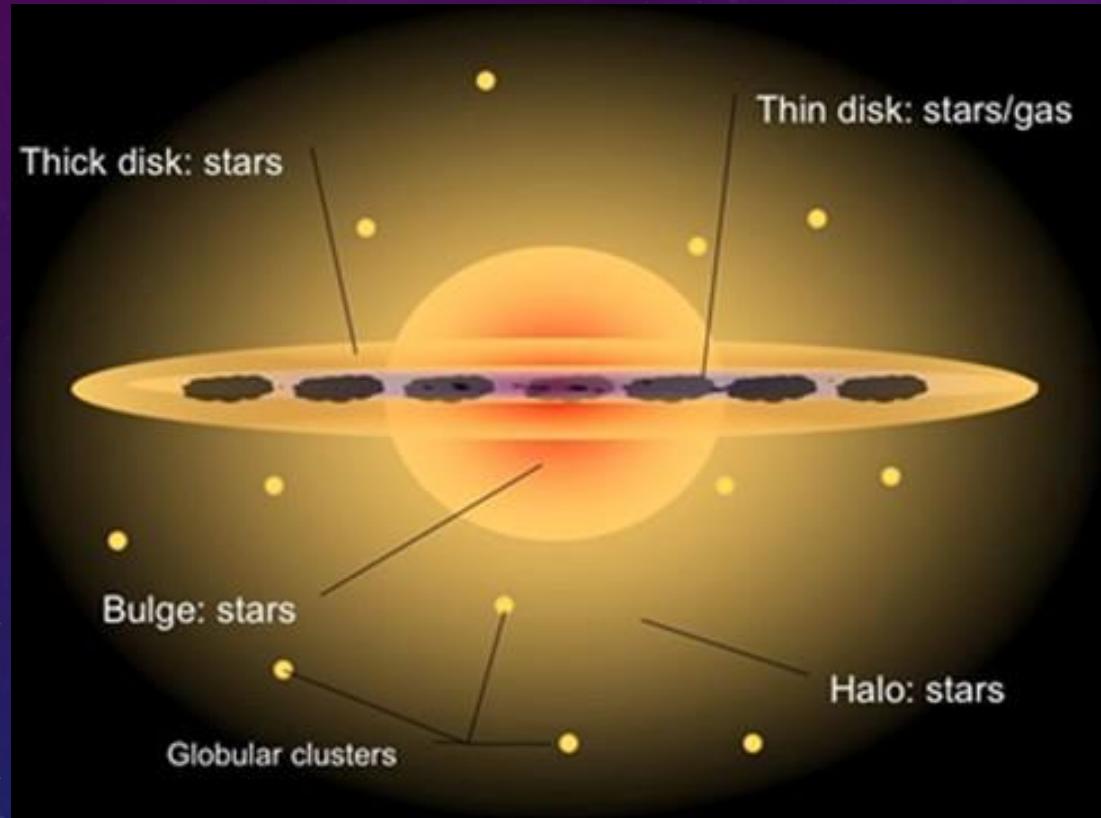
МЛЕЧНЫЙ ПУТЬ – НАША ГАЛАКТИКА



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

СКОРОСТИ ЗВЁЗД В МЛЕЧНОМ ПУТИ

<http://astronomy.swin.edu.au/cms/astro/cosmos/T/Thick+Disk>



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

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ 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^{-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

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГАЛАКТИКИ

astro-ph/9603106

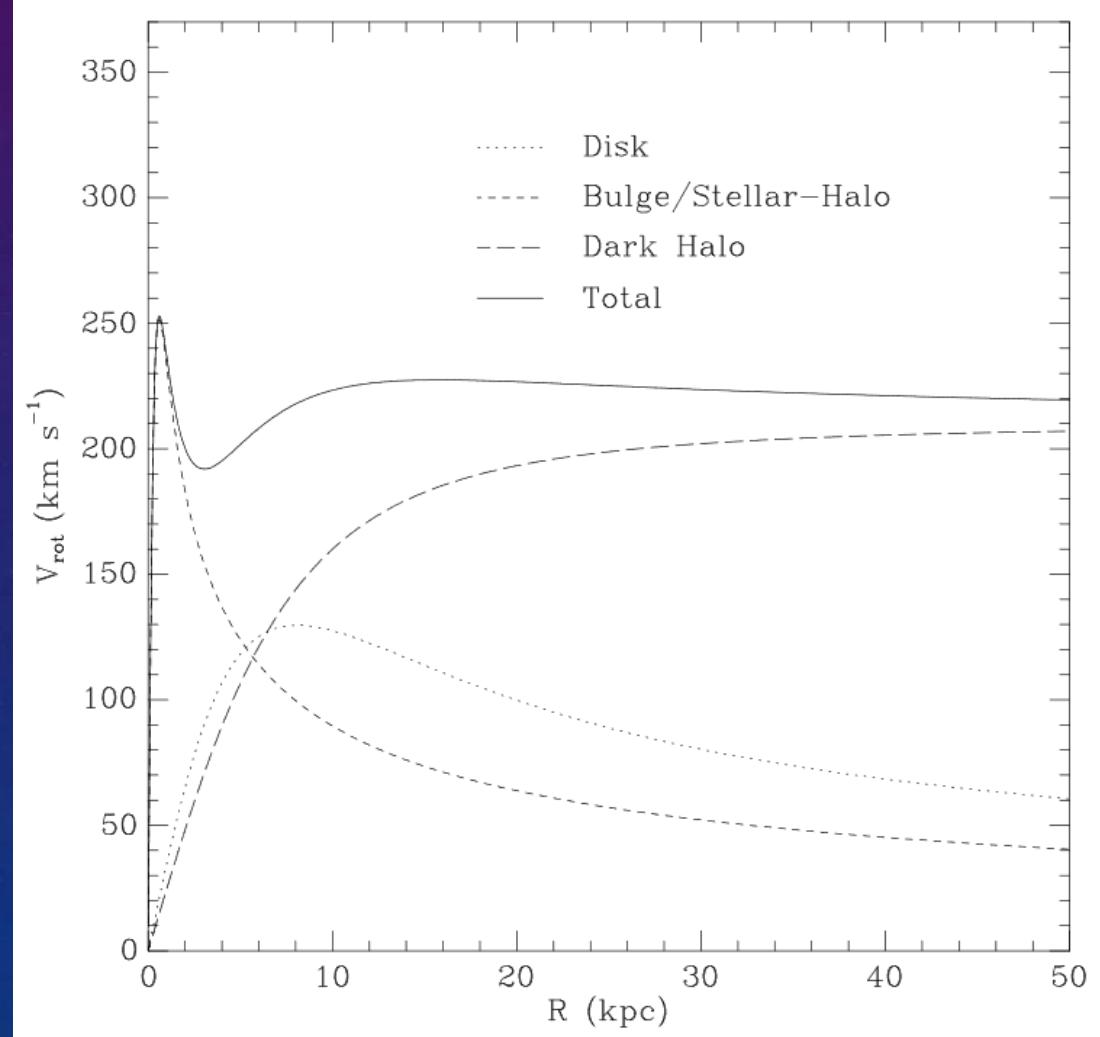
$$\Phi = \Phi_H + \Phi_C + \Phi_D.$$

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

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

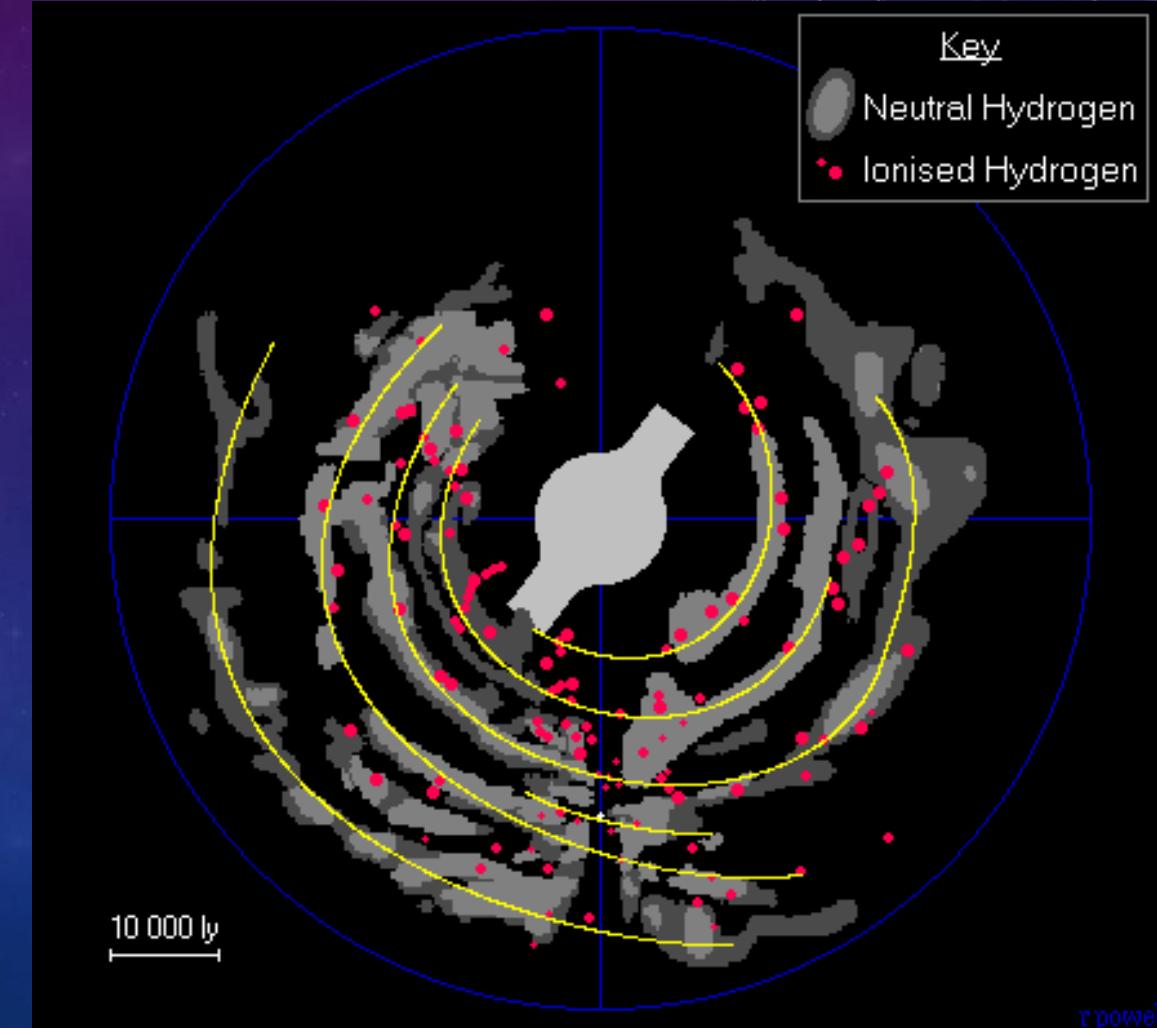
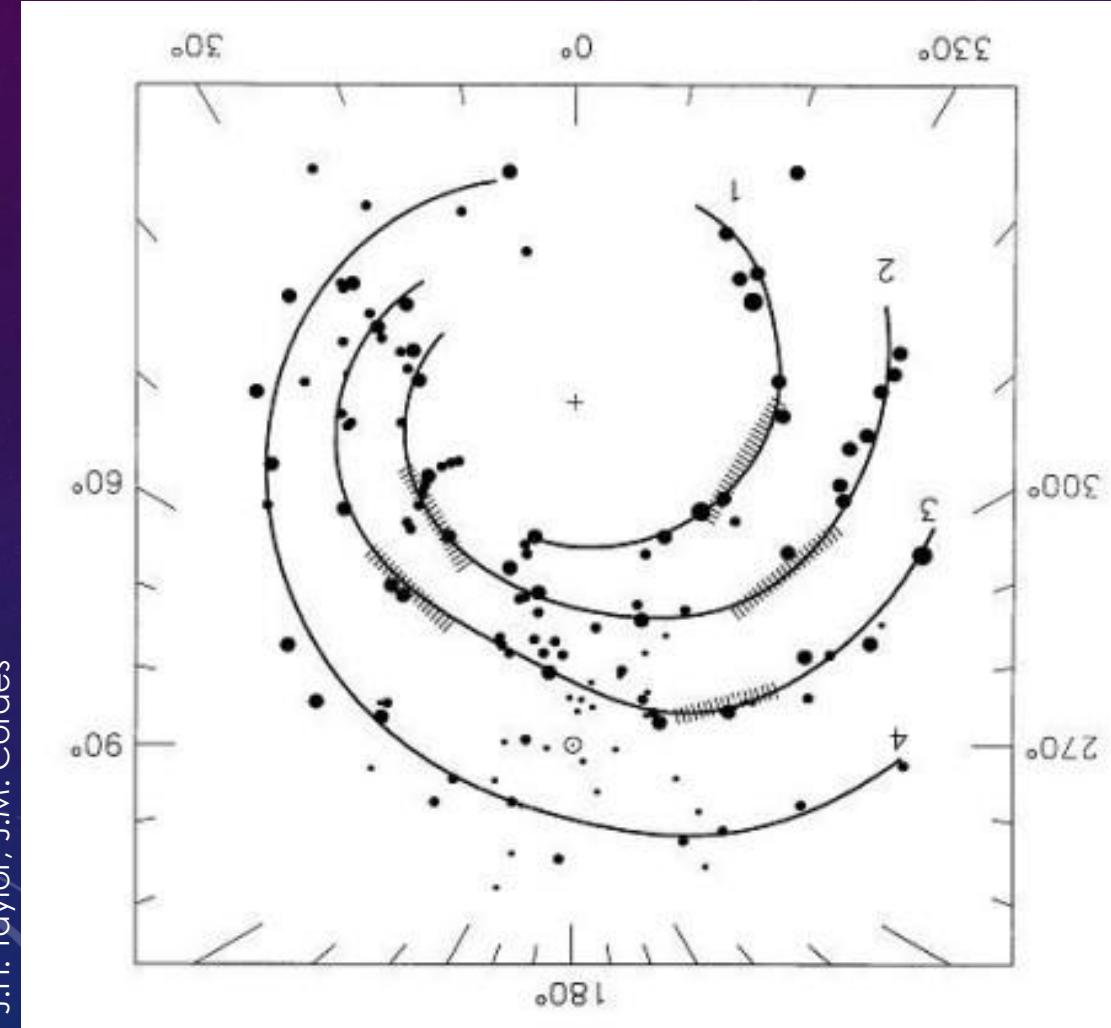
$$\Phi_D = \Phi_{D_1} + \Phi_{D_2} + \Phi_{D_3}.$$

$$\Phi_{D_n} = \frac{-GM_{D_n}}{\sqrt{(R^2 + (a_n + \sqrt{(z^2 + b^2)})^2)}}$$
 $n = 1, 2, 3$



- 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)

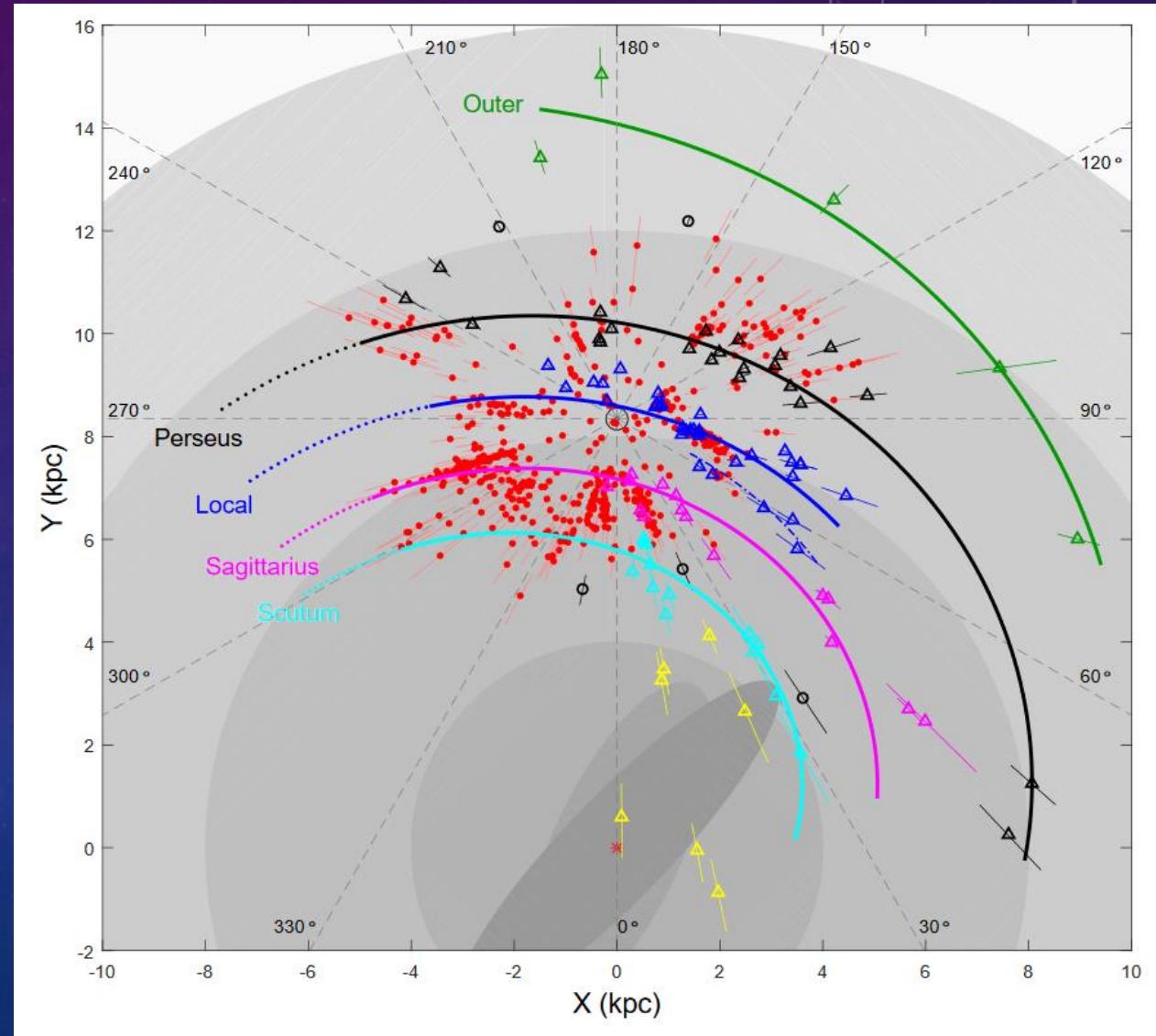
СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ



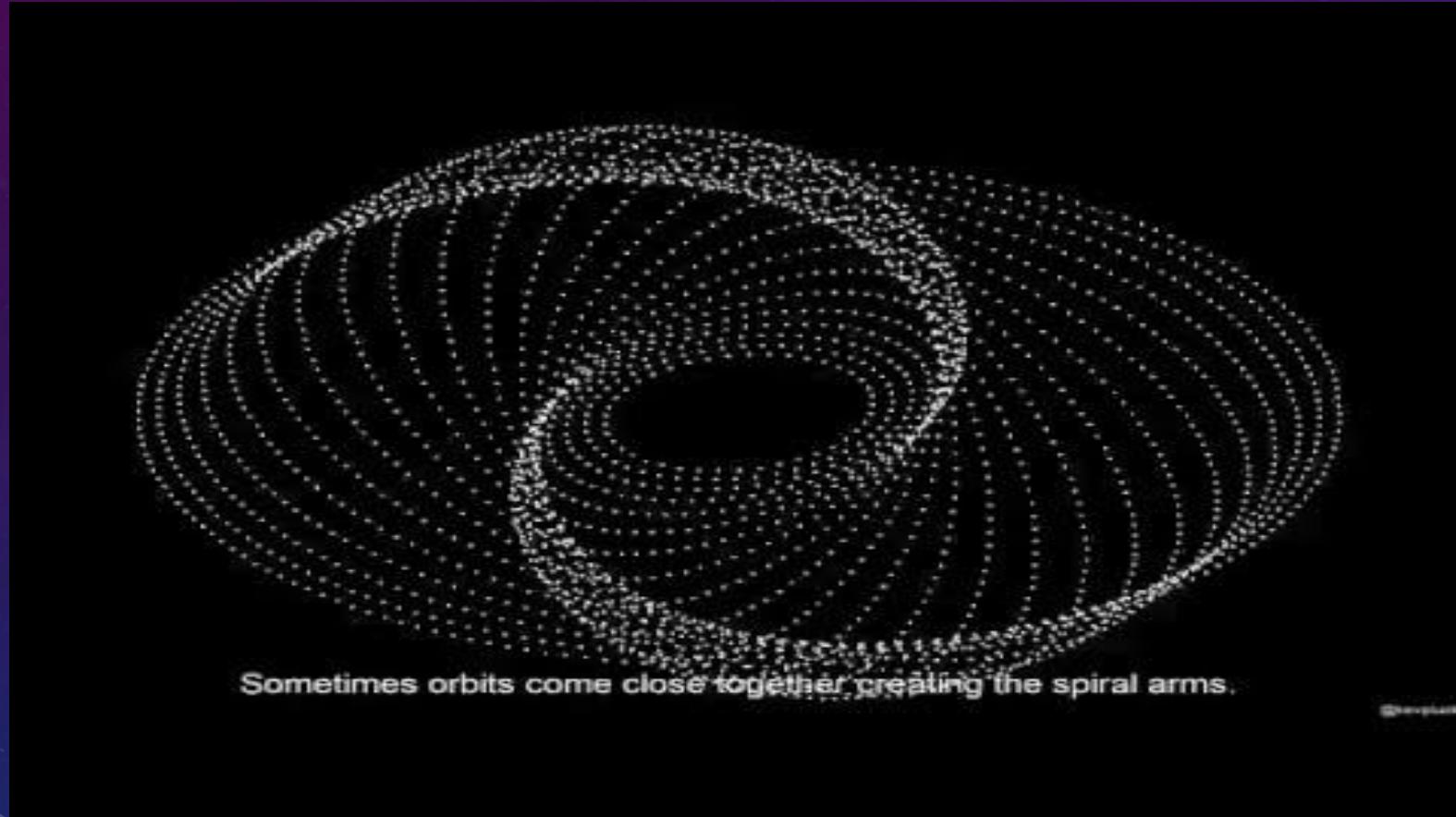
СТРУКТУРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ



Должно быть похоже на M101:
как grand design спирали,
так и мелкие ветви



СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ



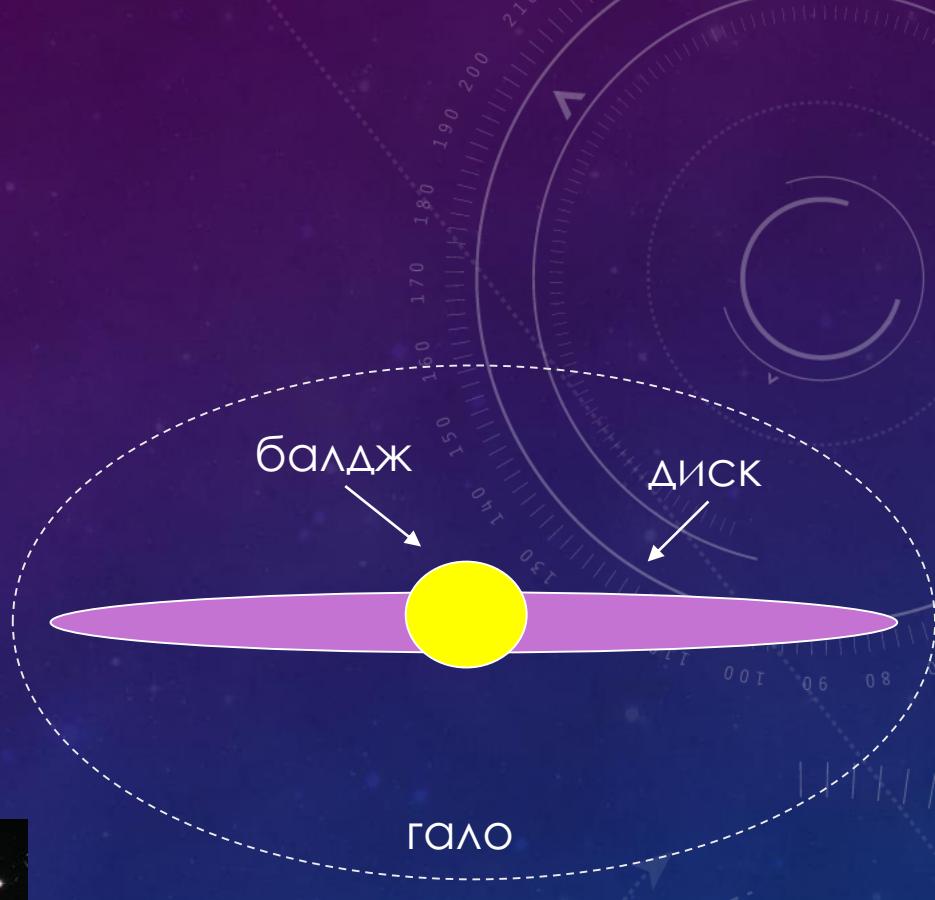
Sometimes orbits come close together, creating the spiral arms.

Grand Design Spiral

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 МЕЖЗВЁЗДНОЙ 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)



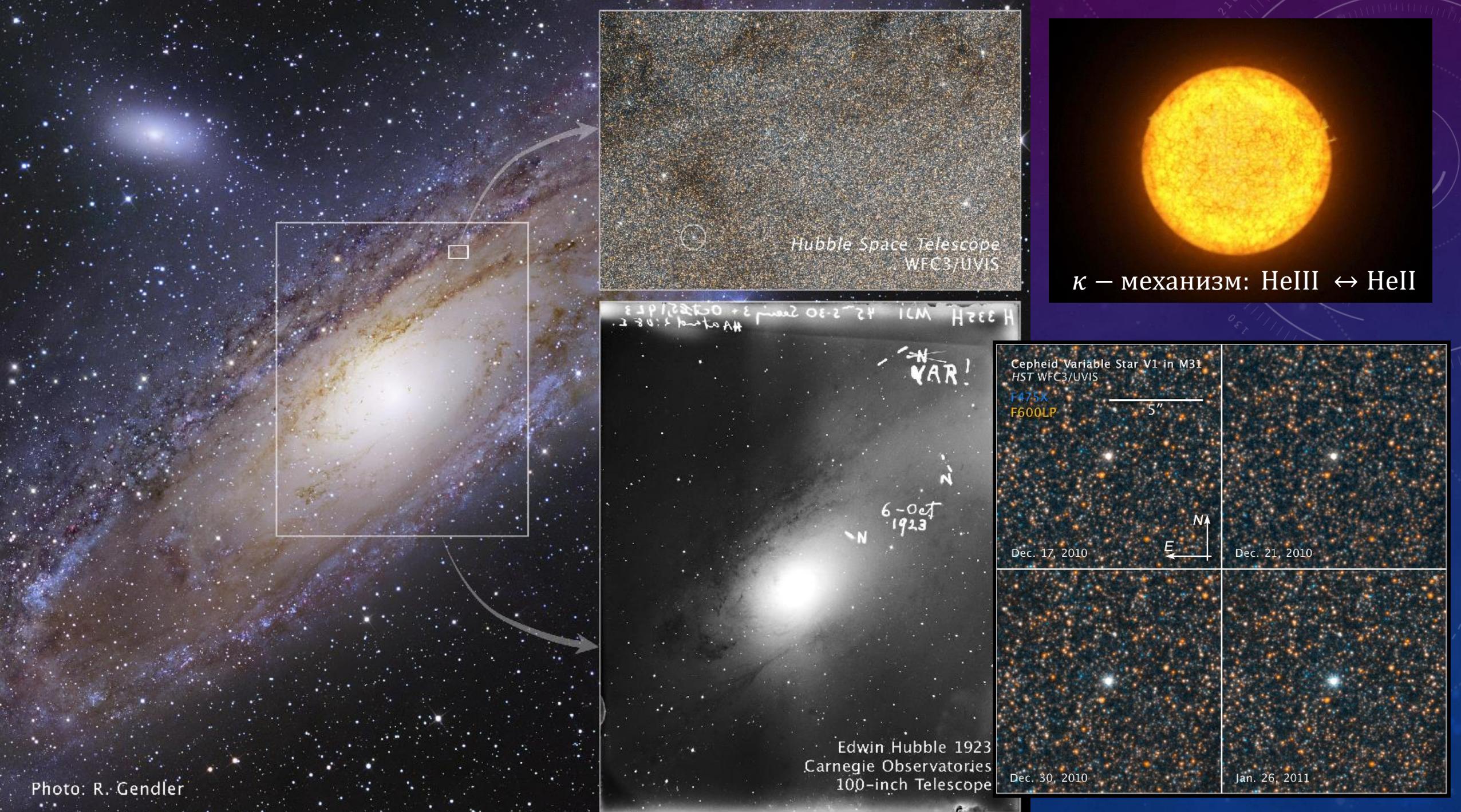
Жорж Леметр
(1894-1966)



Эдвин Хаббл
(1889-1953)



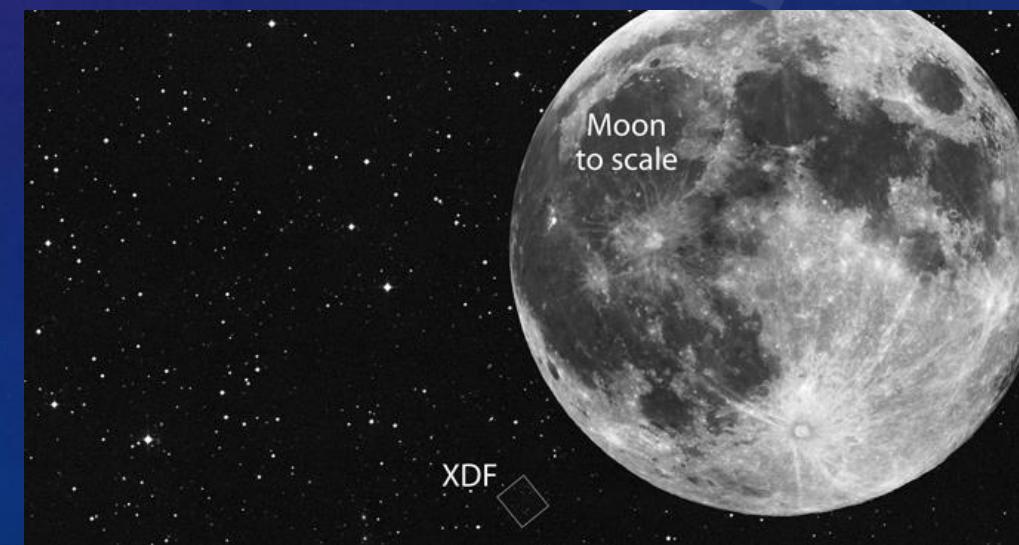
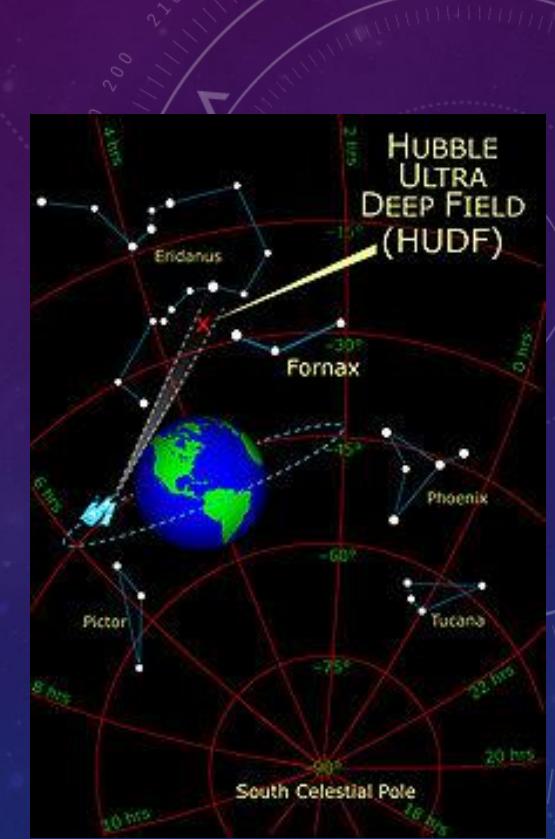
Милтон Хьюмасон
(1891-1972)

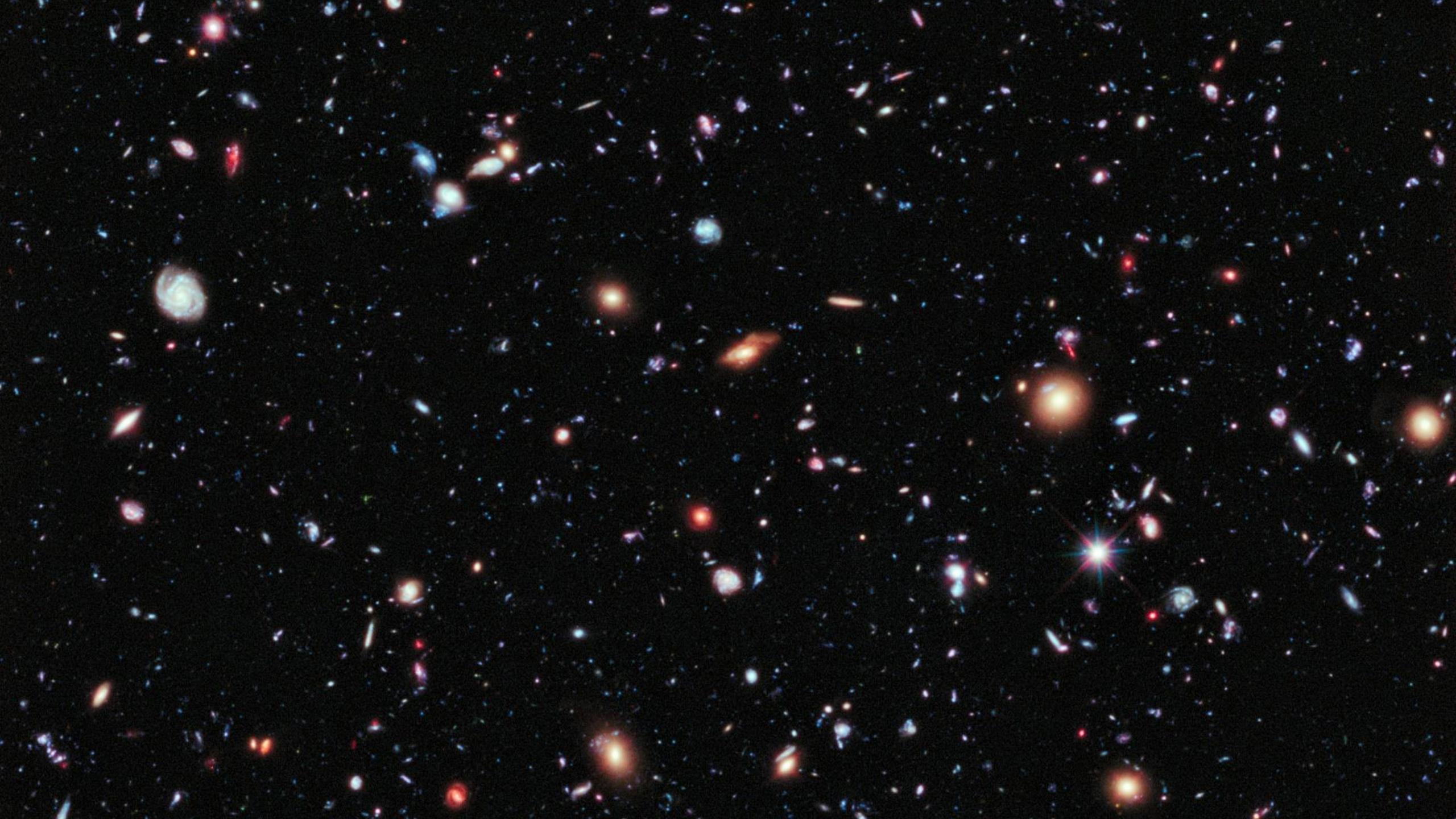


HUBBLE ULTRA DEEP FIELD



Созвездие Печь
2003-2004 гг





ЗООПАРК ГАЛАКТИК



Дисковая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная

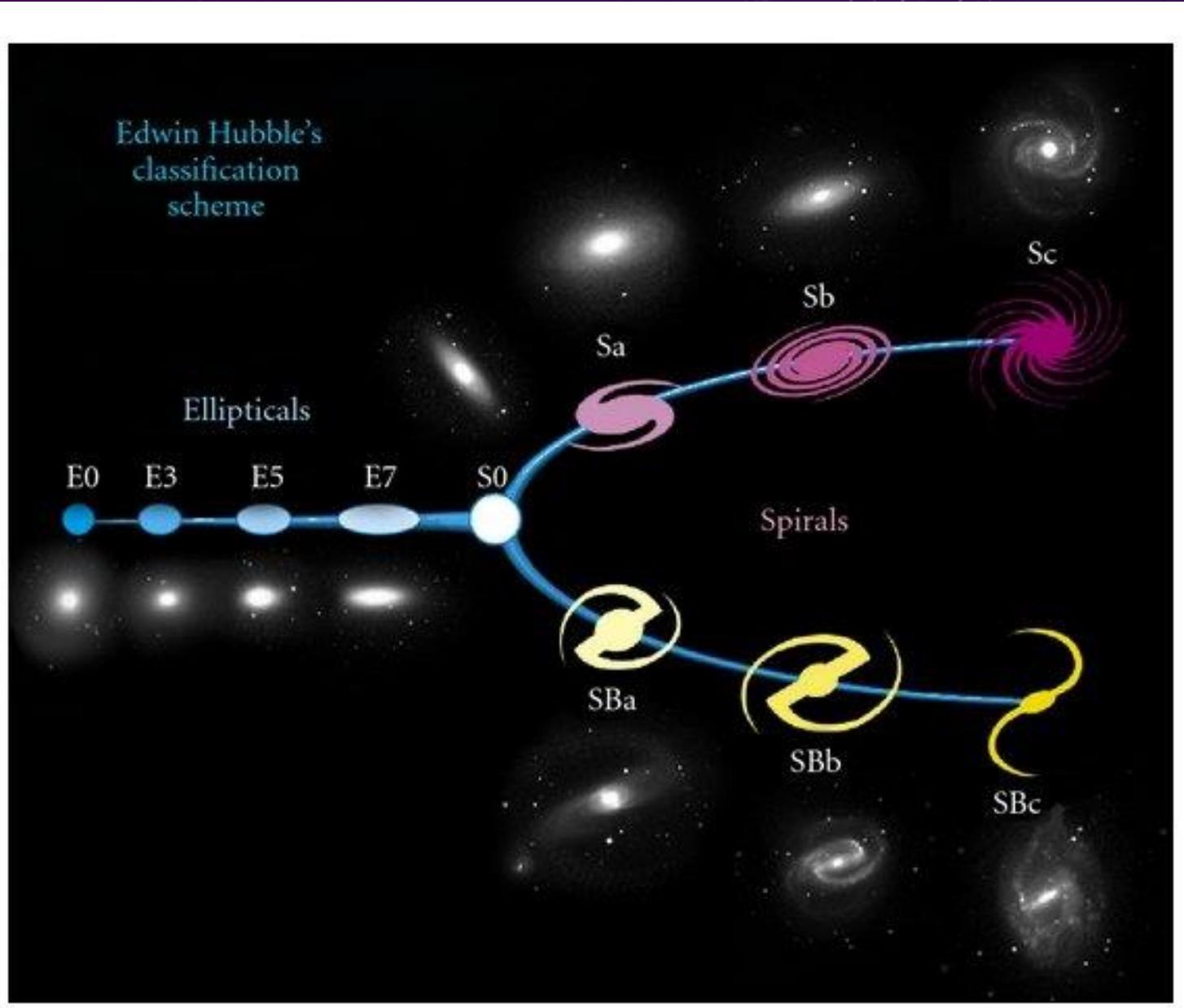
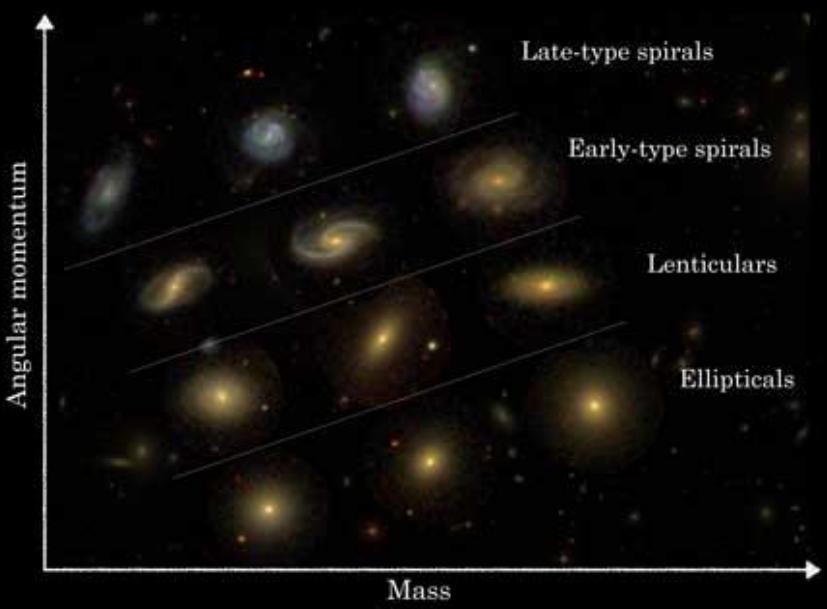


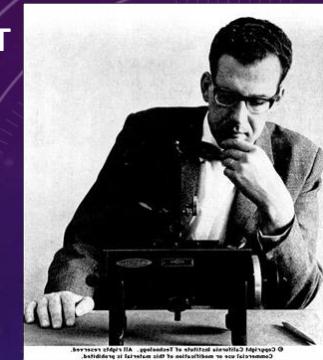
Эллиптическая



Взаимодействующие

КАМЕРТОН ХАББЛА



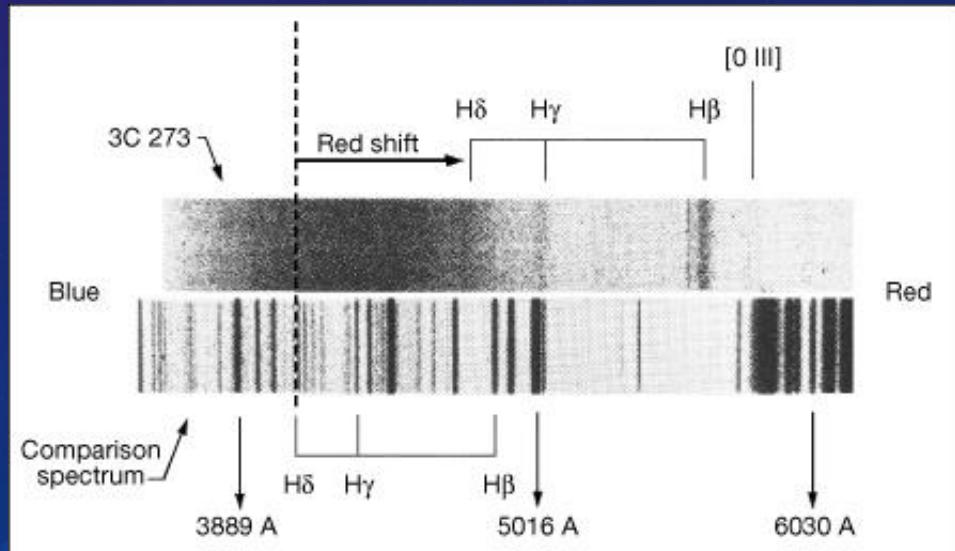


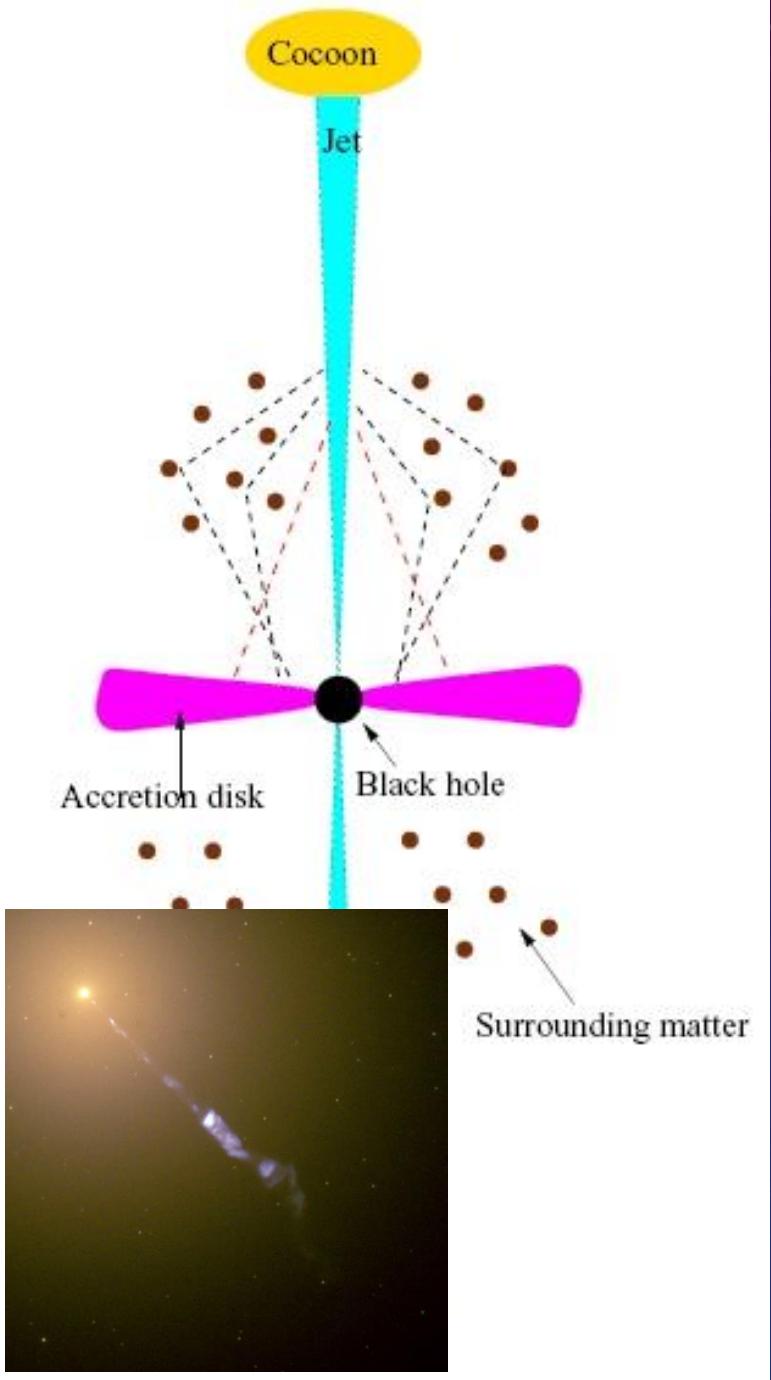
АКТИВНЫЕ ЯДРА: КВАЗАРЫ



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

Долгое время шли дискуссии о природе этих «радиозвезд».

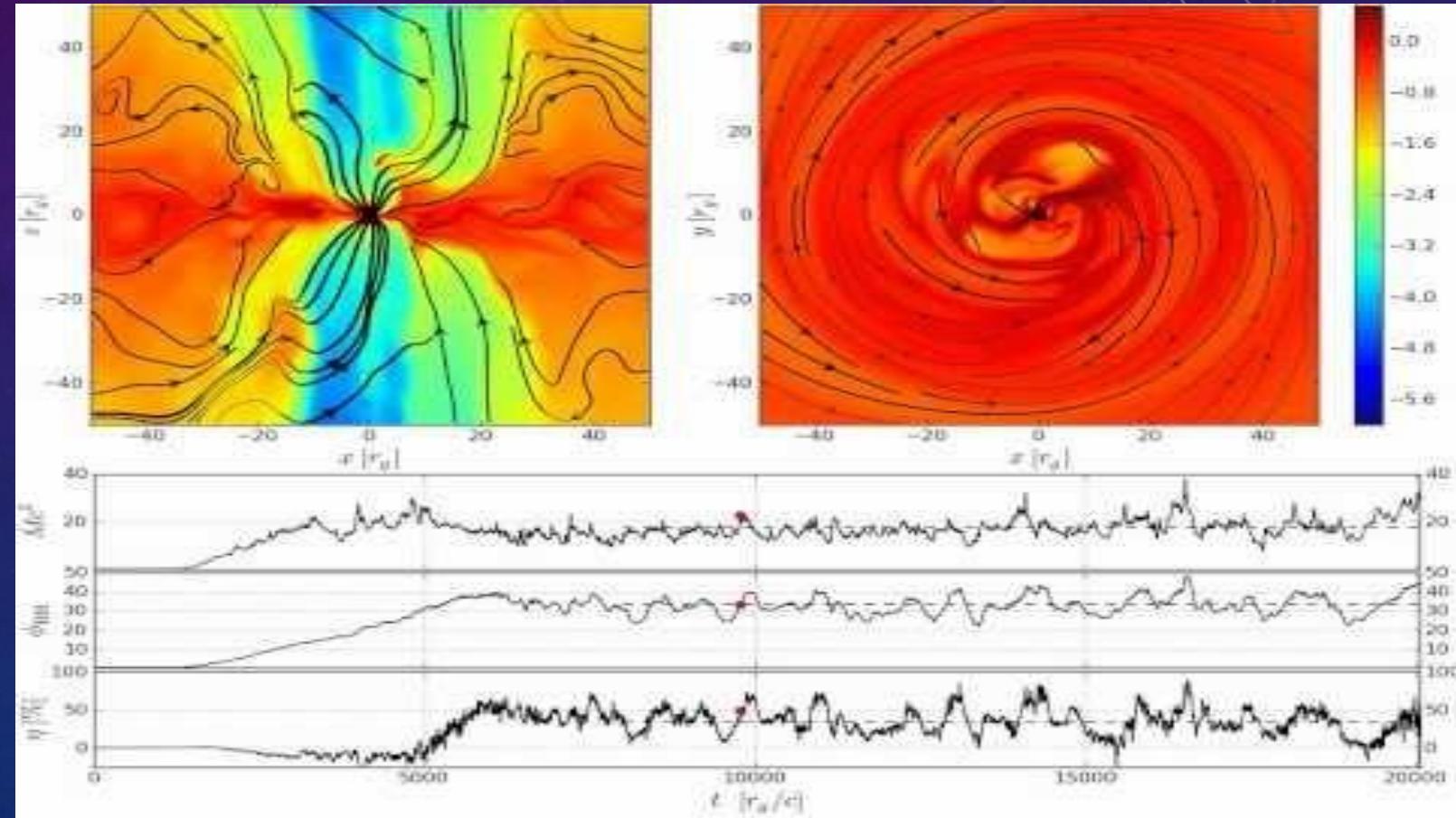




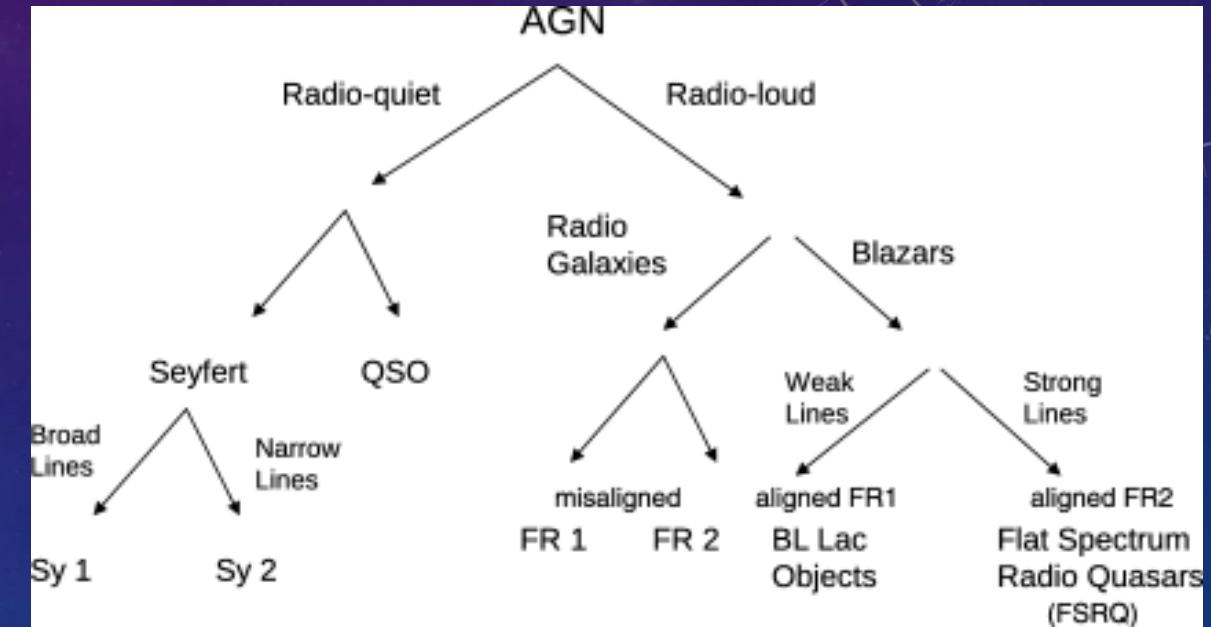
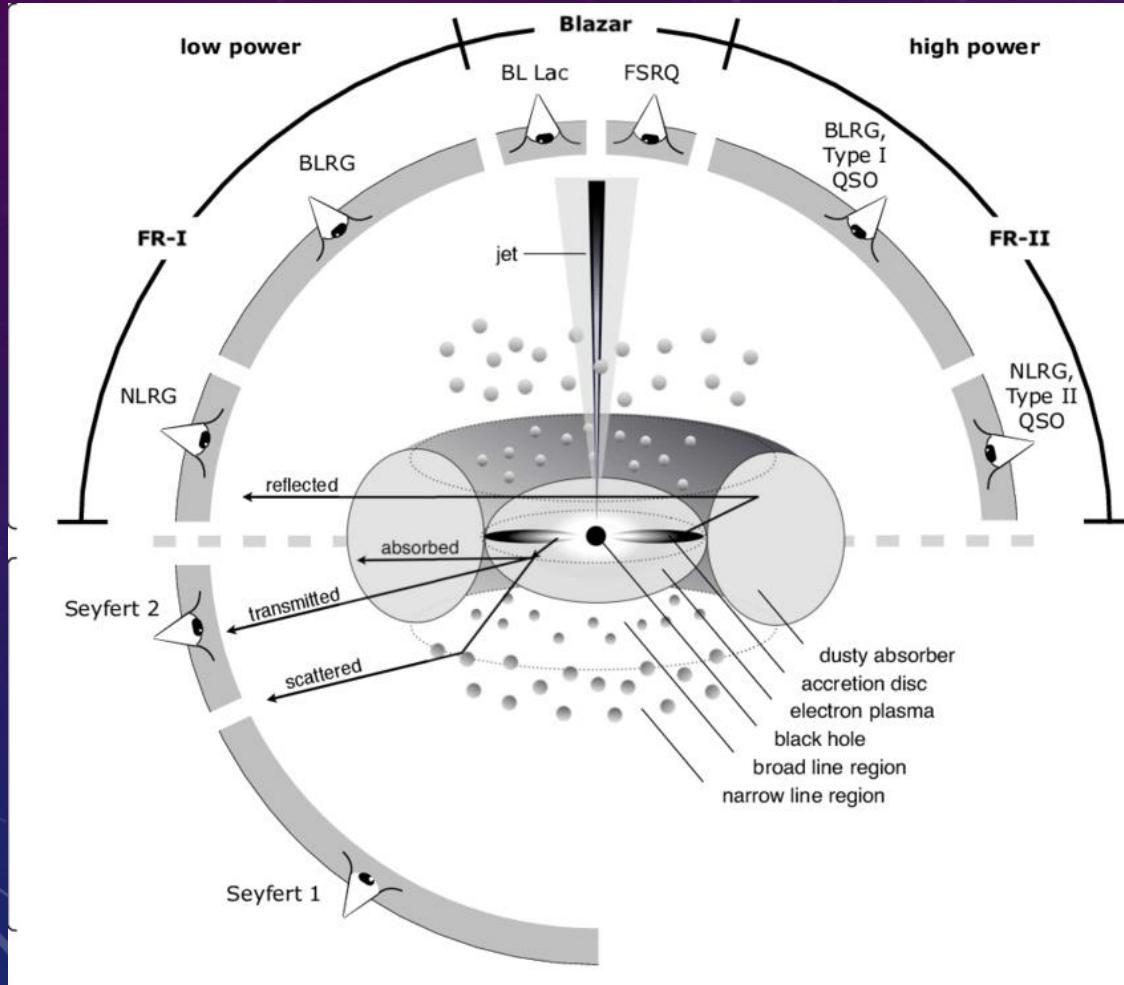
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ИХ ДЖЕТЫ

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

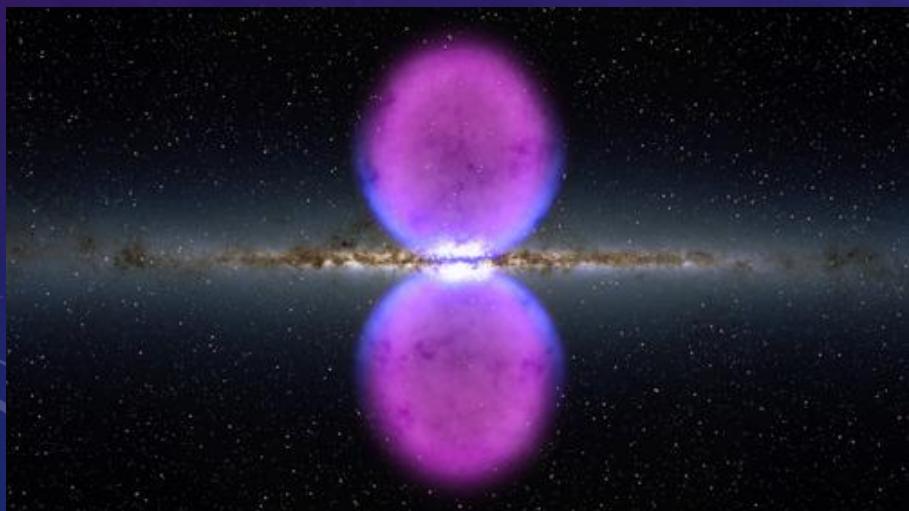
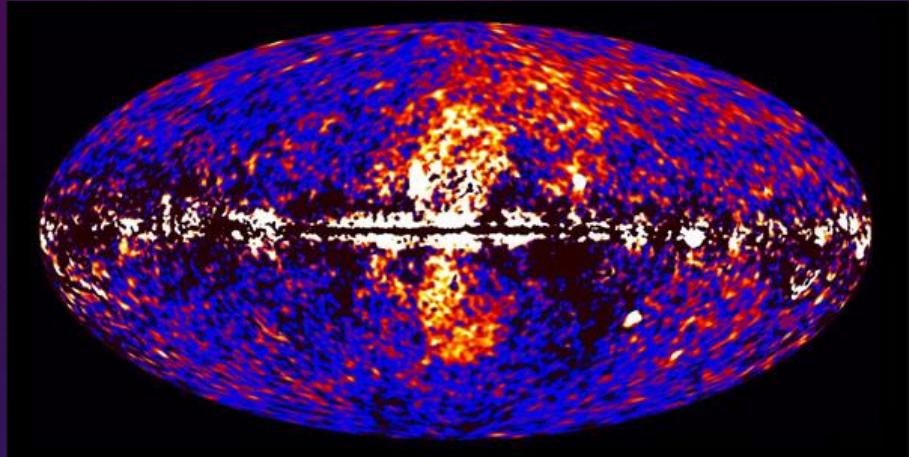
$$L(< \sim L_{Edd}) \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ эрг/с}$$



ГЕОМЕТРИЯ АКТИВНЫХ ЯДЕР



ПУЗЫРИ ФЕРМИ

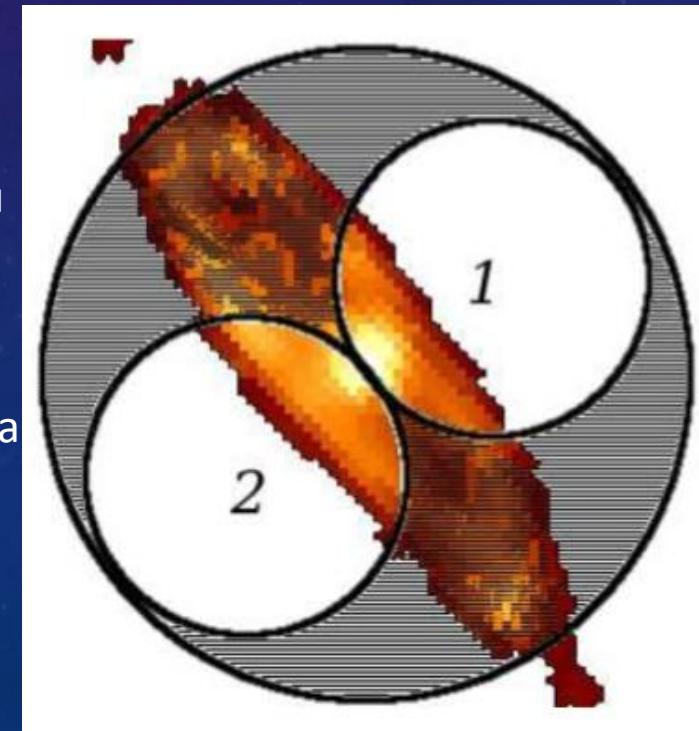


Возраст пузырей в MW от 10 до 100 млн лет.

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

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

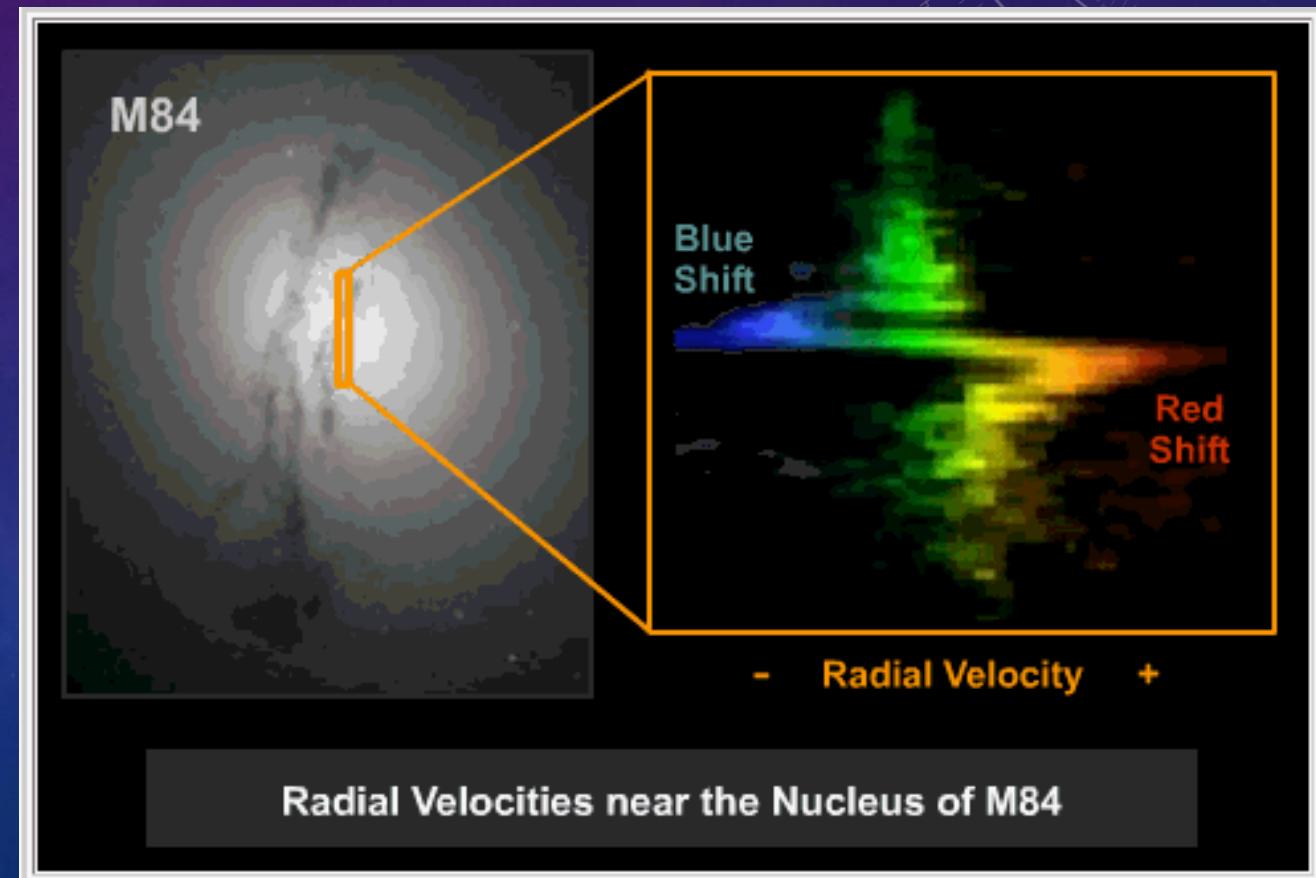
Светимость пузырей в M31 на порядок выше, чем у нас.



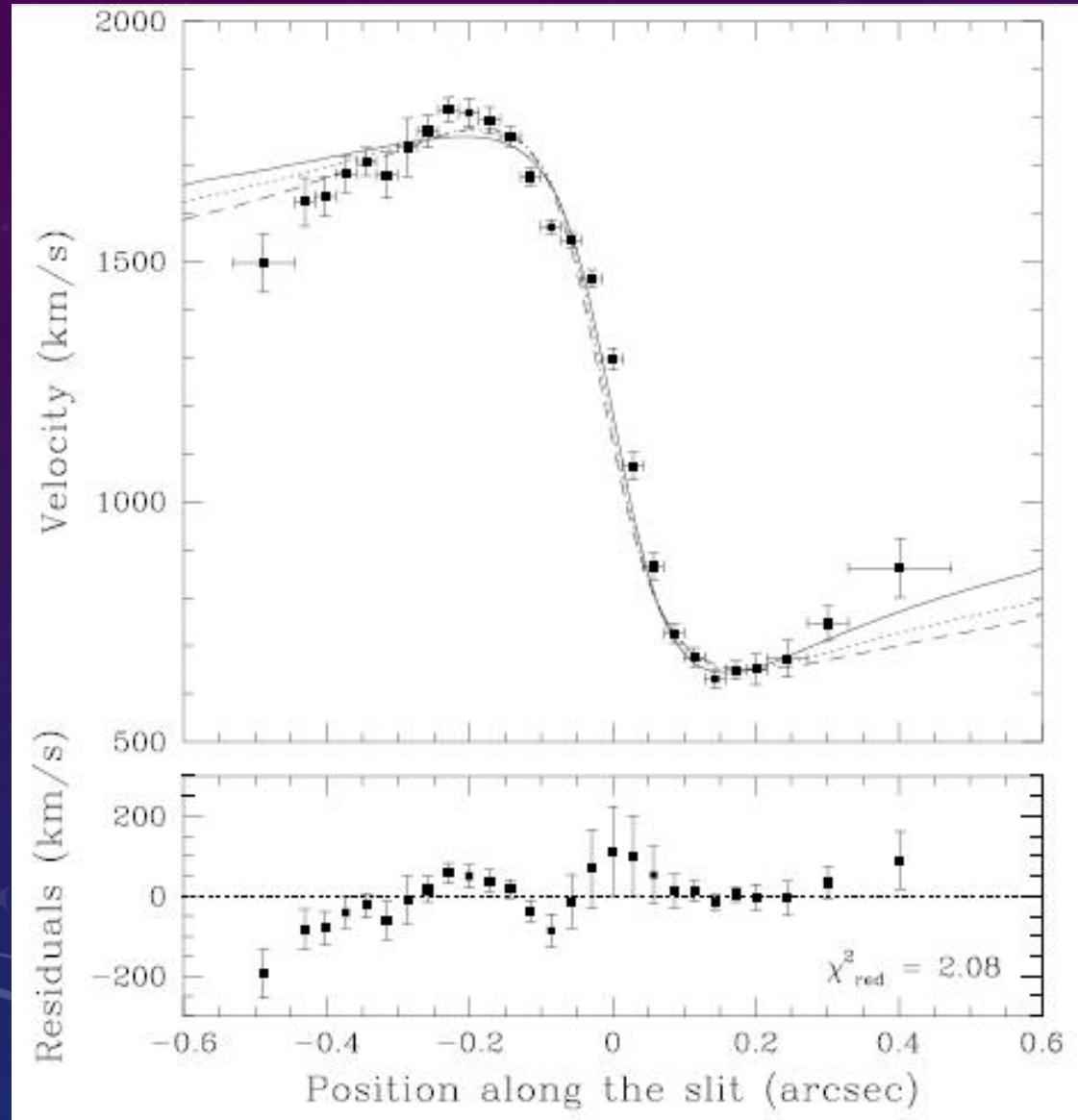
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- 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).



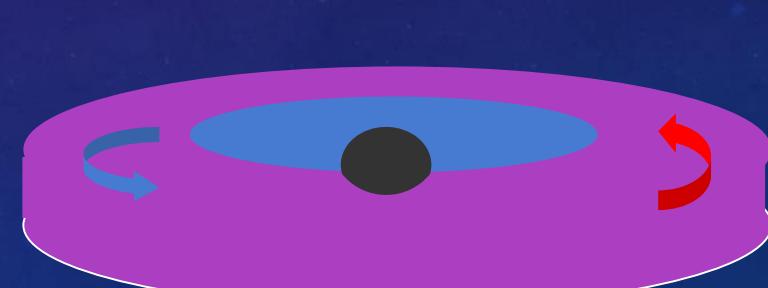
КИНЕМАТИКА ГАЗА

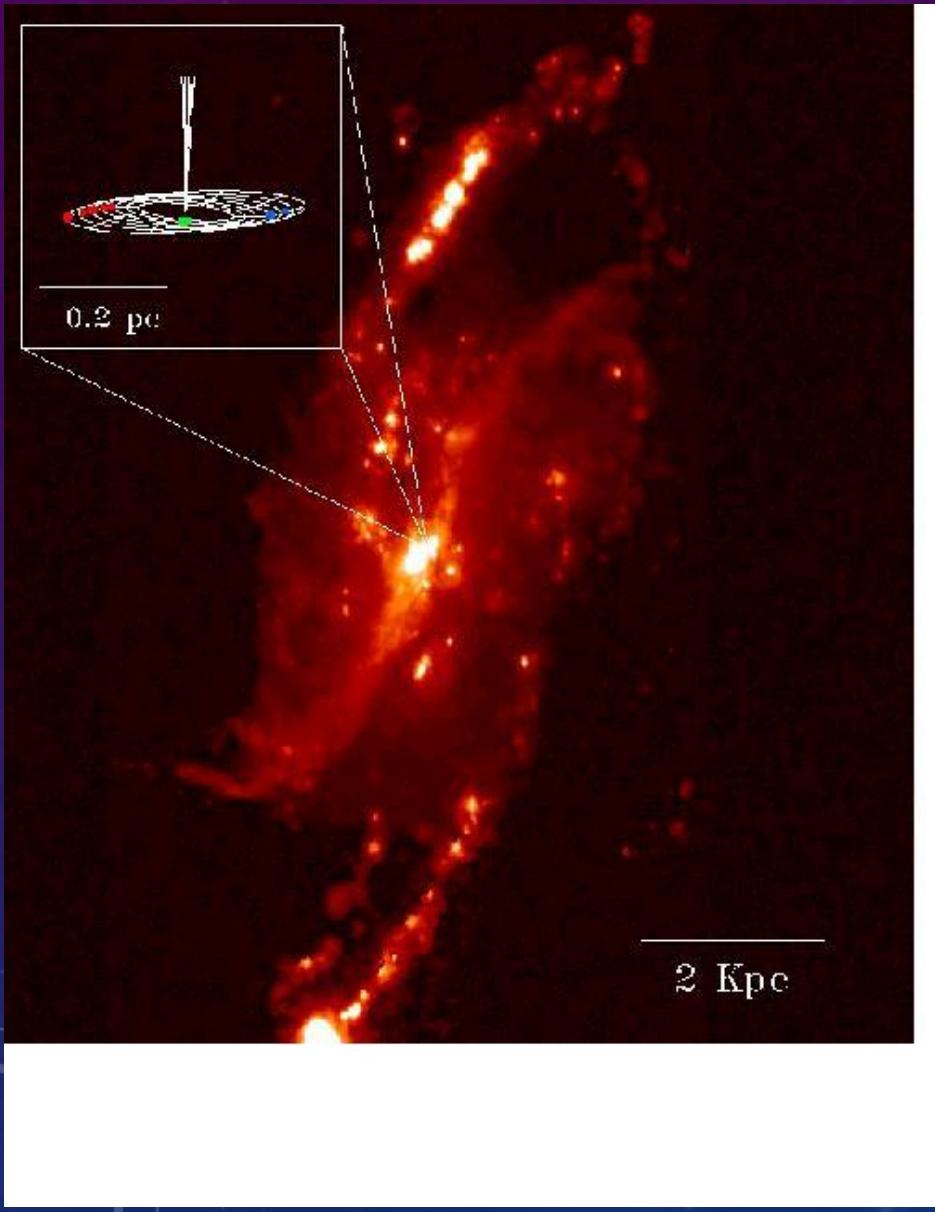


Для M87 скорости газа измерены
внутри одной миллiseкунды дуги
(5pc).

Масса $3 \cdot 10^9 M_\odot$

Одна из самых тяжелых черных дыр





МАЗЕРЫ

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.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



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»



ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ

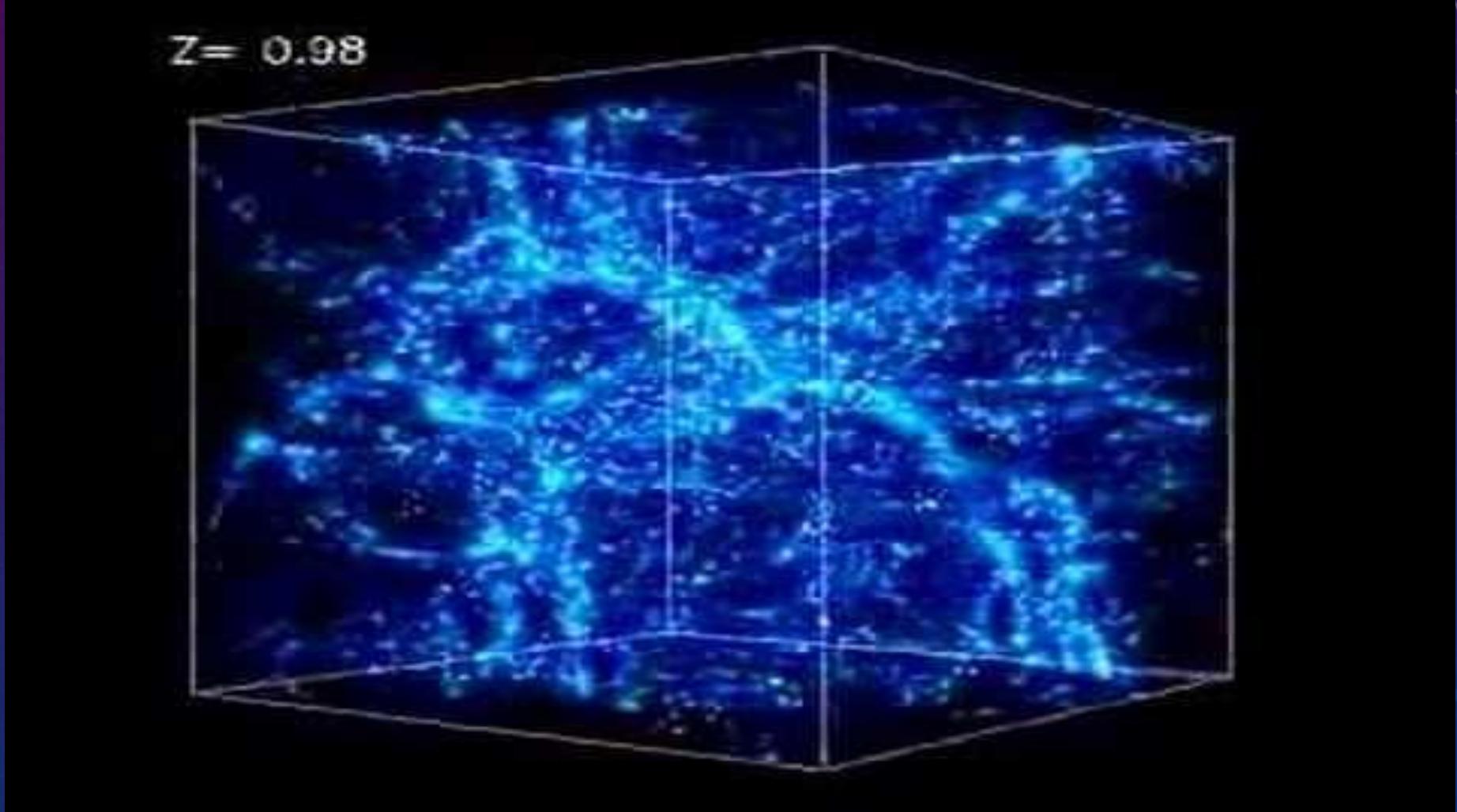


Мы видим, что скопления возникают постепенно.

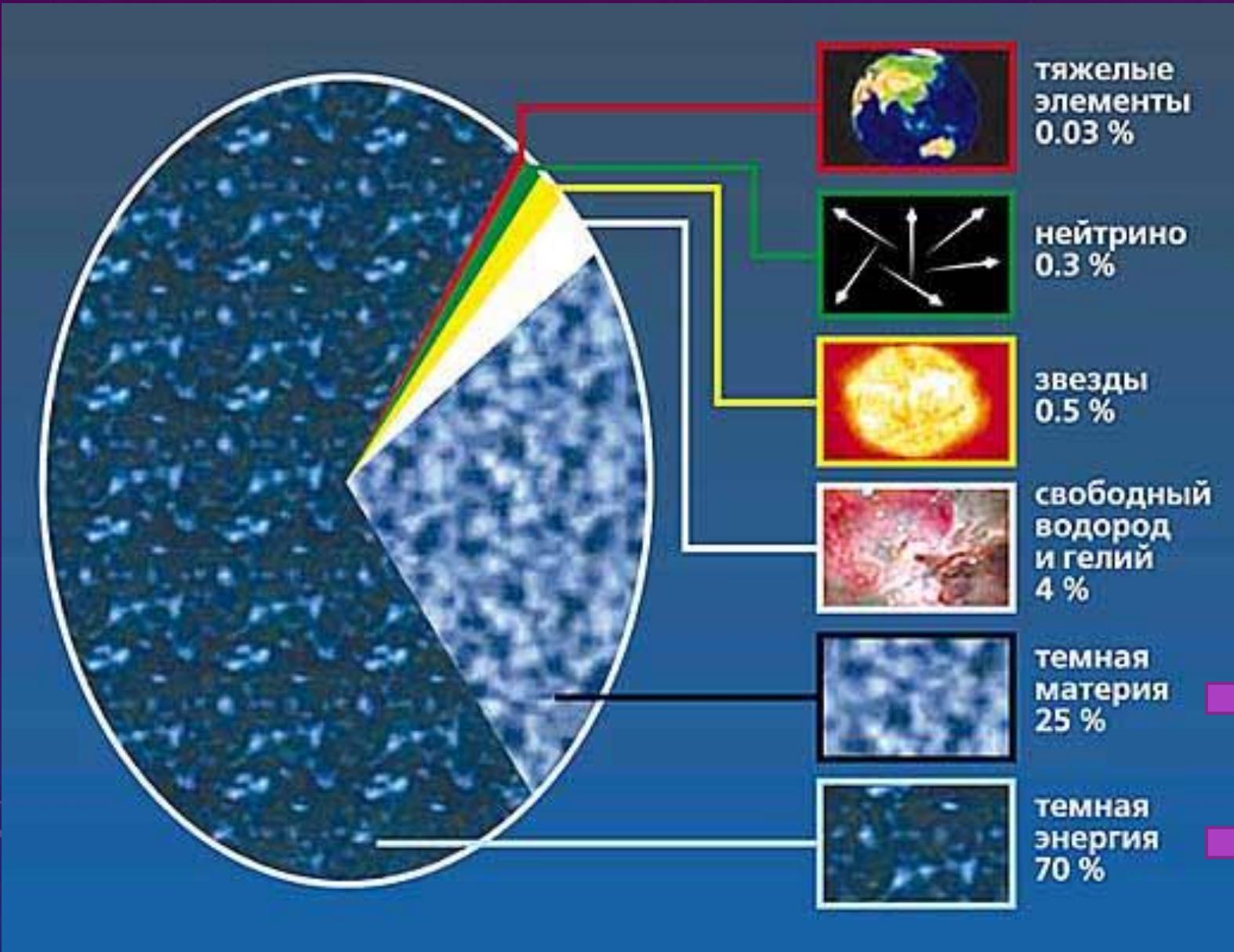
На больших расстояниях скопления еще не успели сформироваться.

КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА

А. Кравцов и др.



СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ



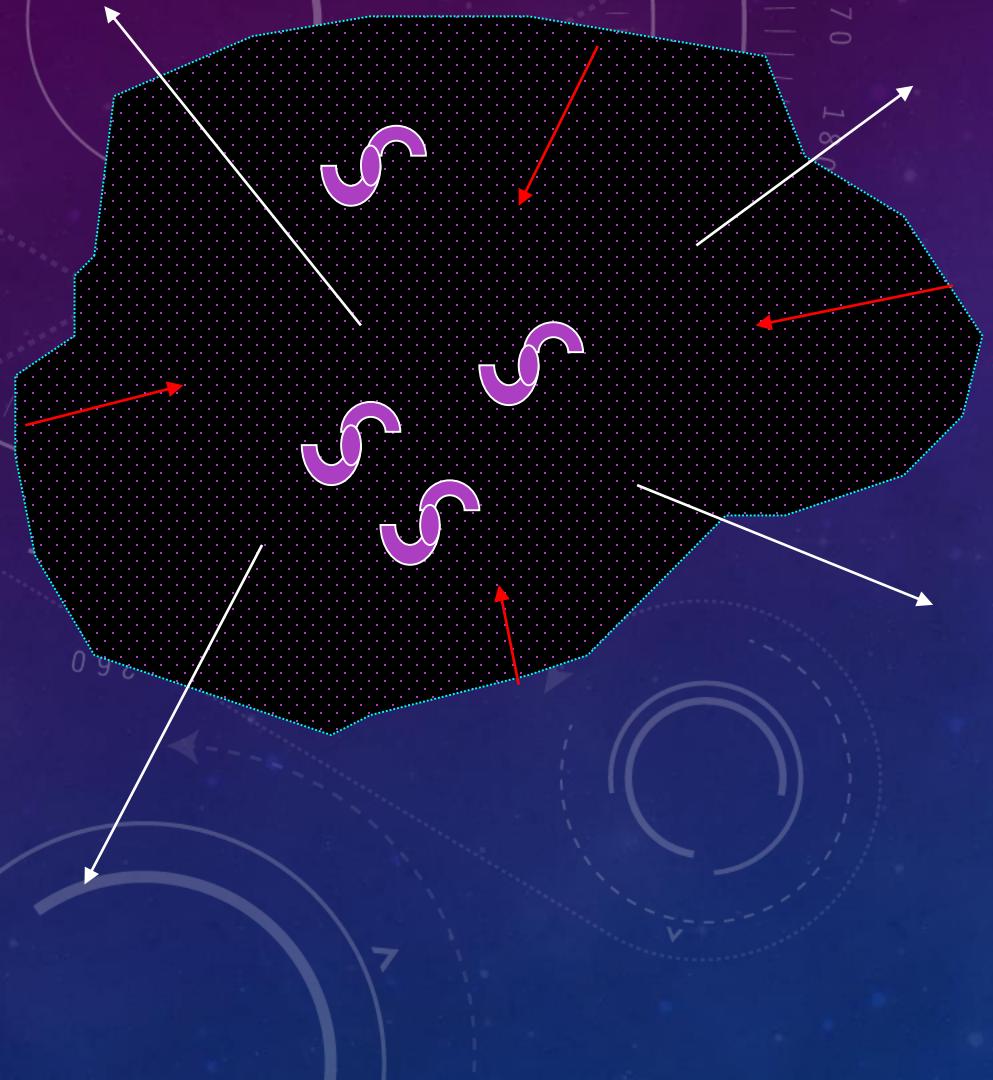
Большую часть материи, заполняющей вселенную, мы можем наблюдать лишь косвенными методами.

Неизвестные частицы

Неизвестные поля или вакуум

МОТИВАЦИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

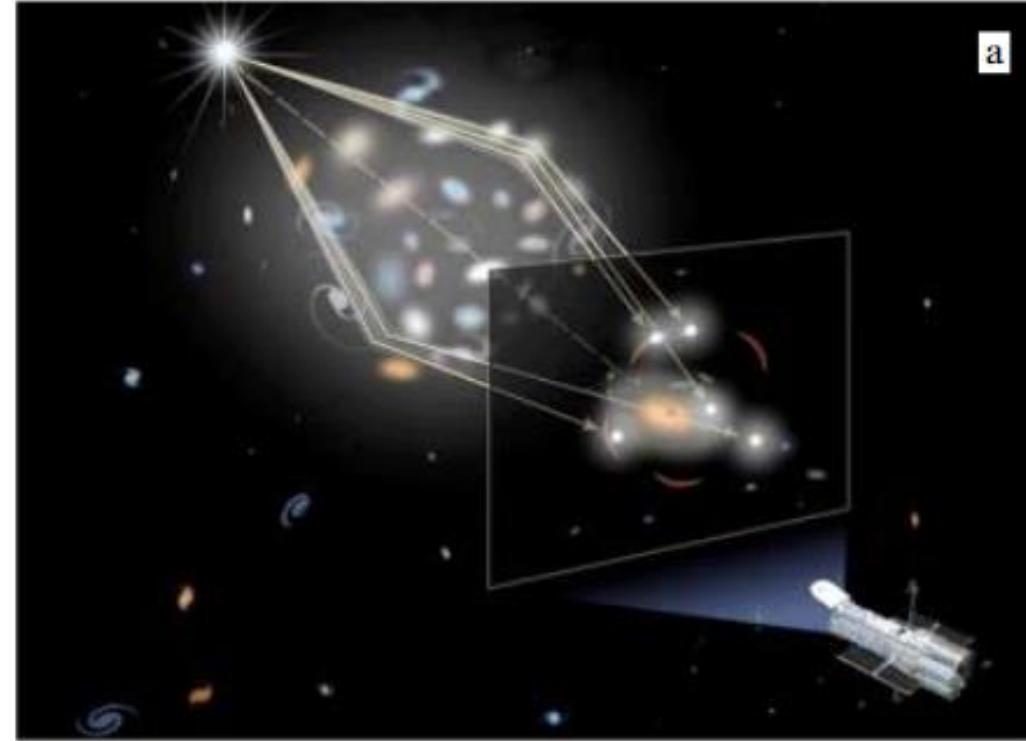
Сама идея появилась в 30-гг. благодаря работам Фрица Цвикки.



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



ЛИНЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА МАССЫ



а



б

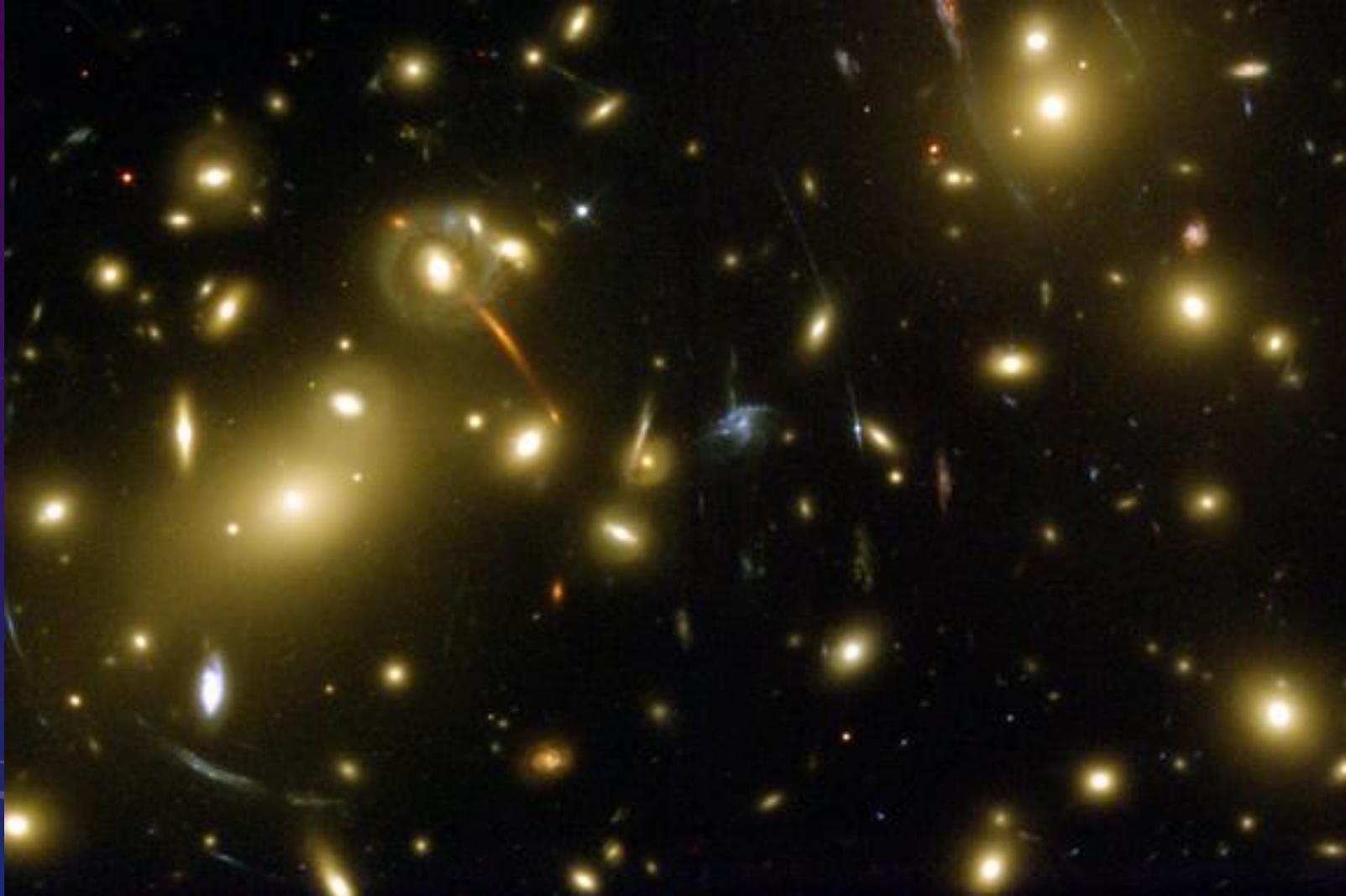
Рис. 16. (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038+4133 (телескоп Хаббла).

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

СИЛЬНЫЙ ПРЯМОЙ АРГУМЕНТ

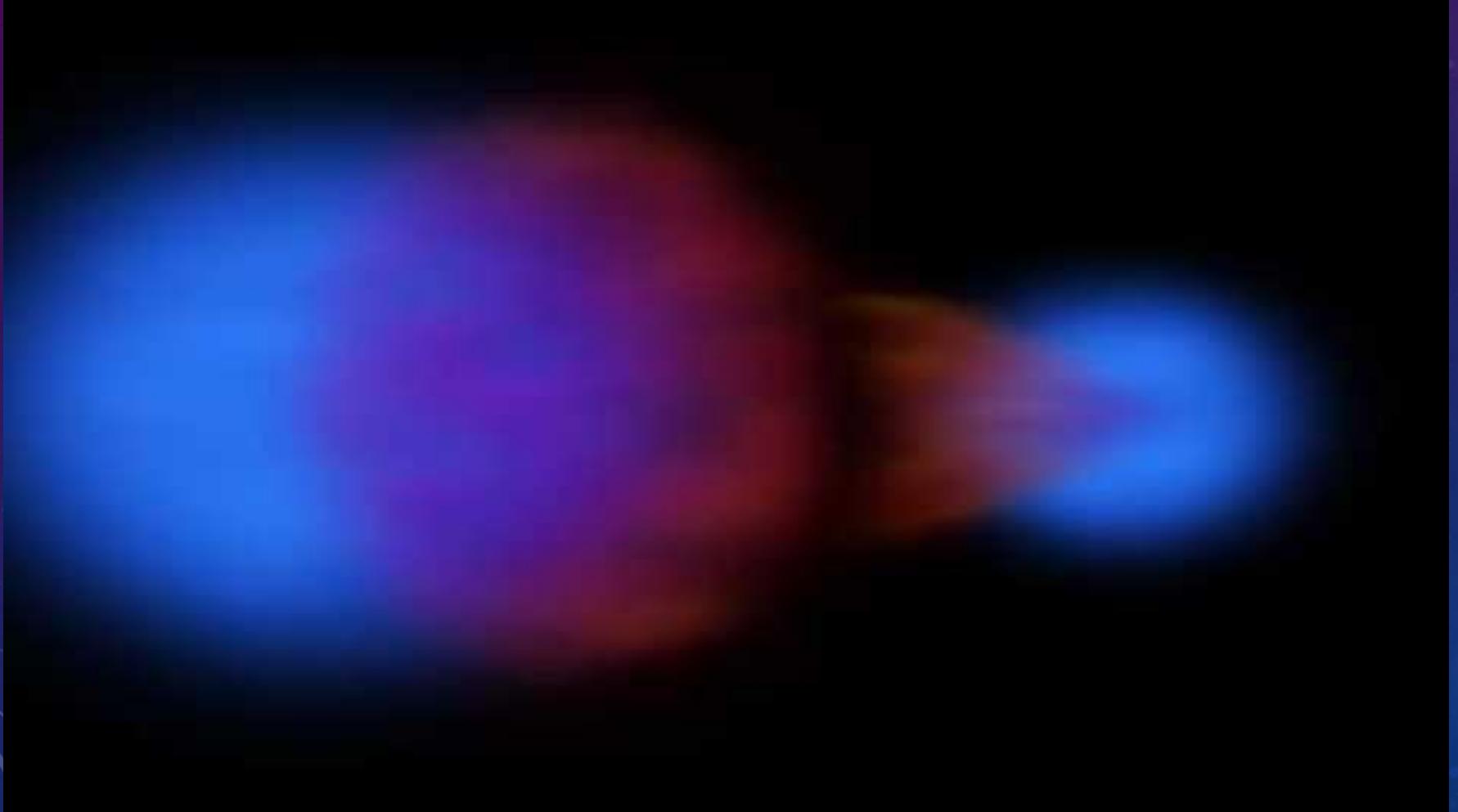


ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ



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

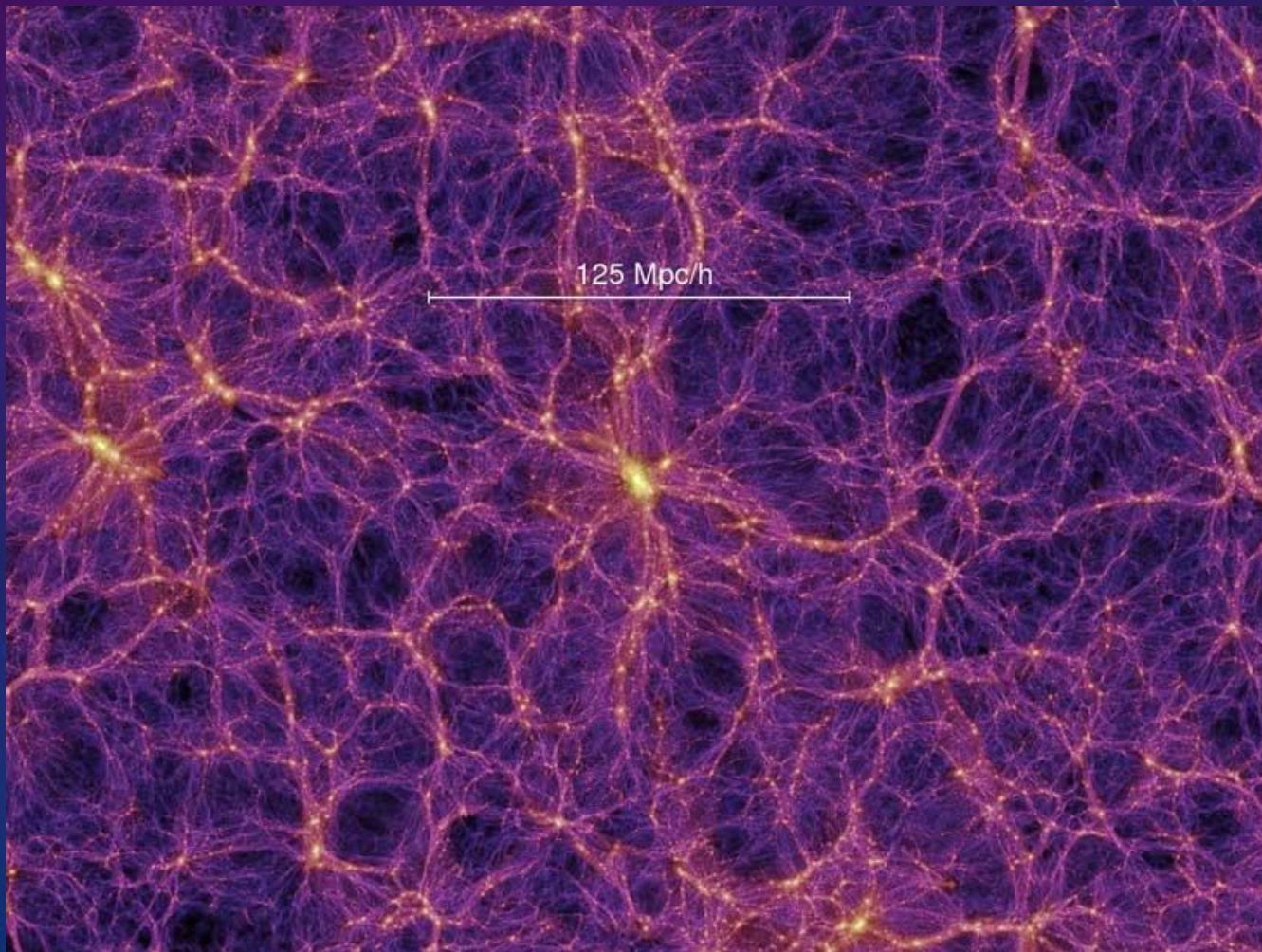
СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК



СКЕЛЕТ ВСЕЛЕННОЙ

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

Как увидеть сам скелет вселенной?

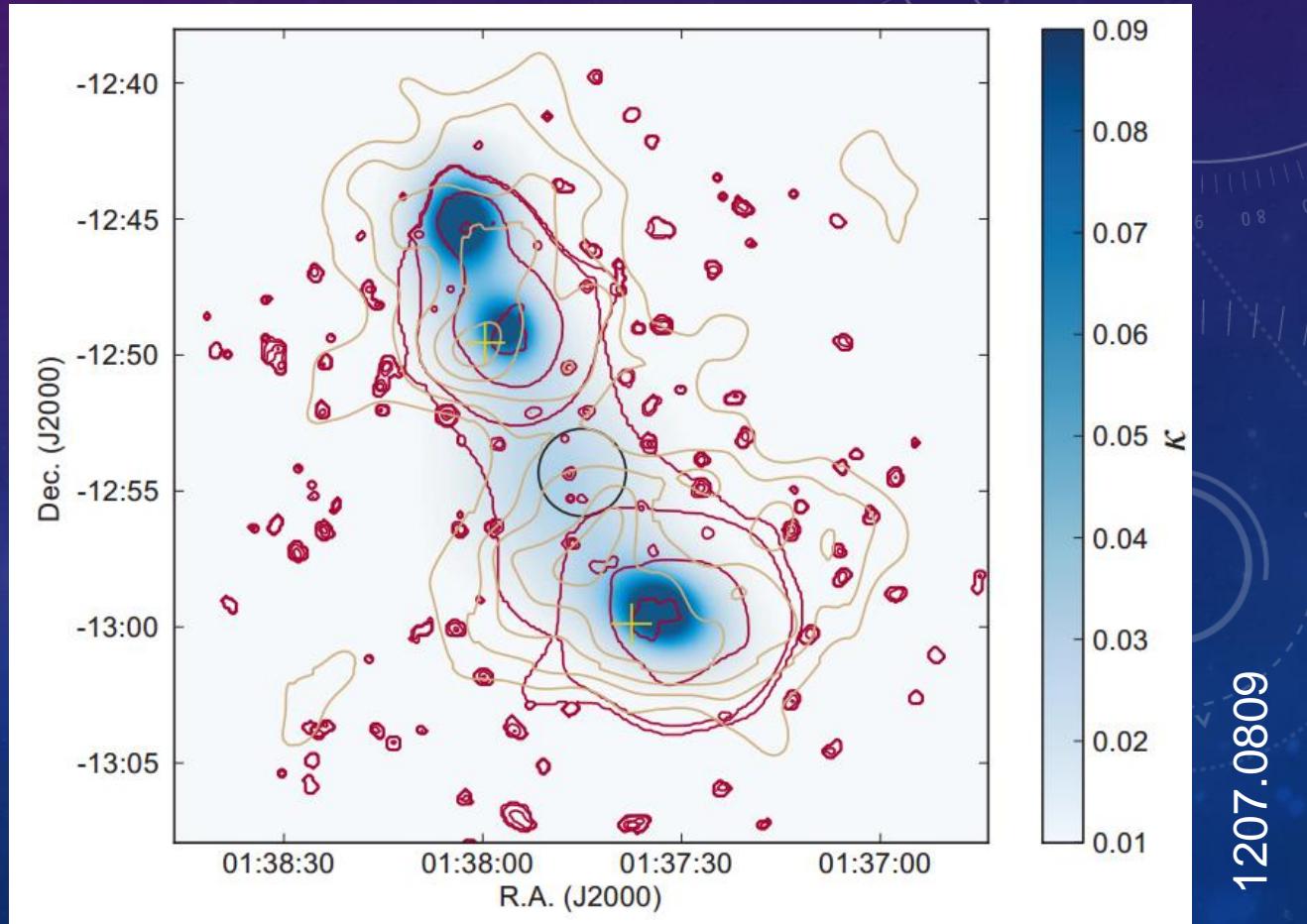
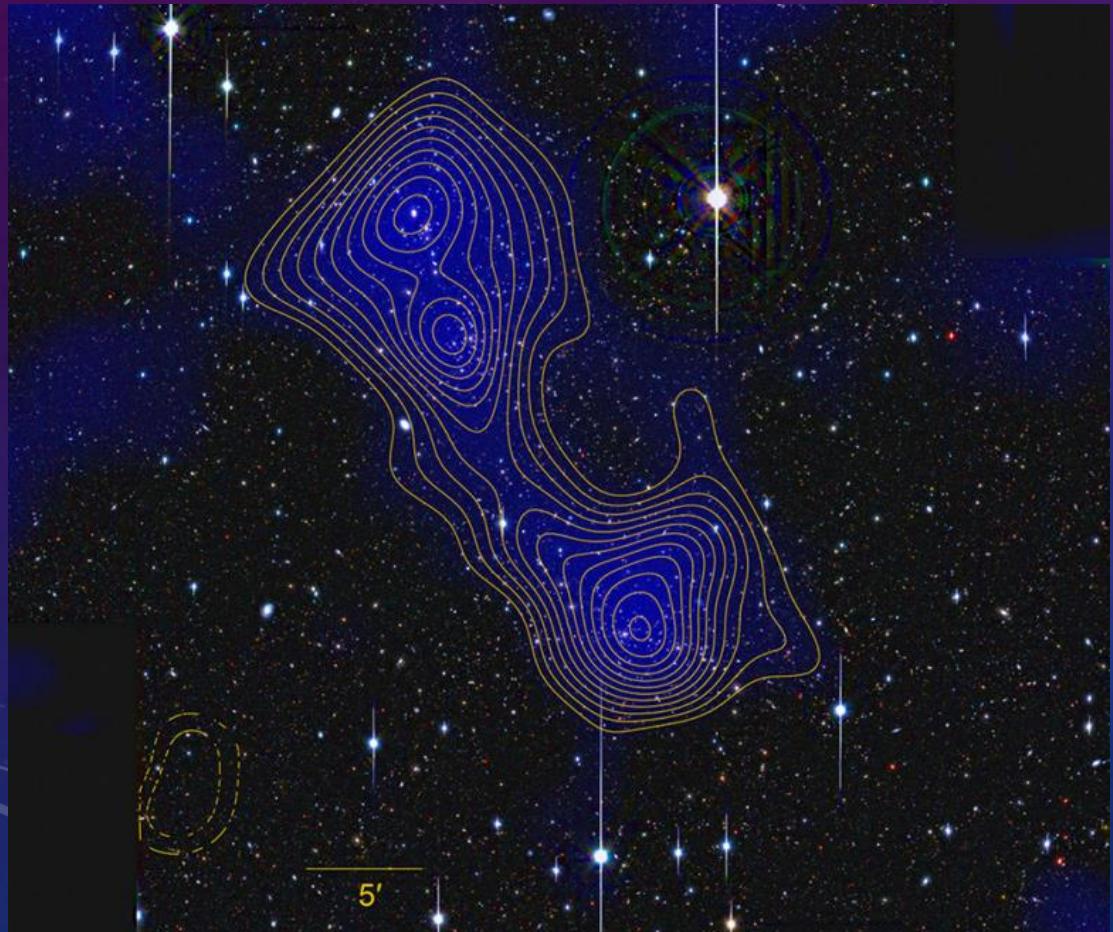


ВОЛОКНО ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

Скопления A222/223. $z \sim 0.2$ Между скоплениями 18 Мпк.

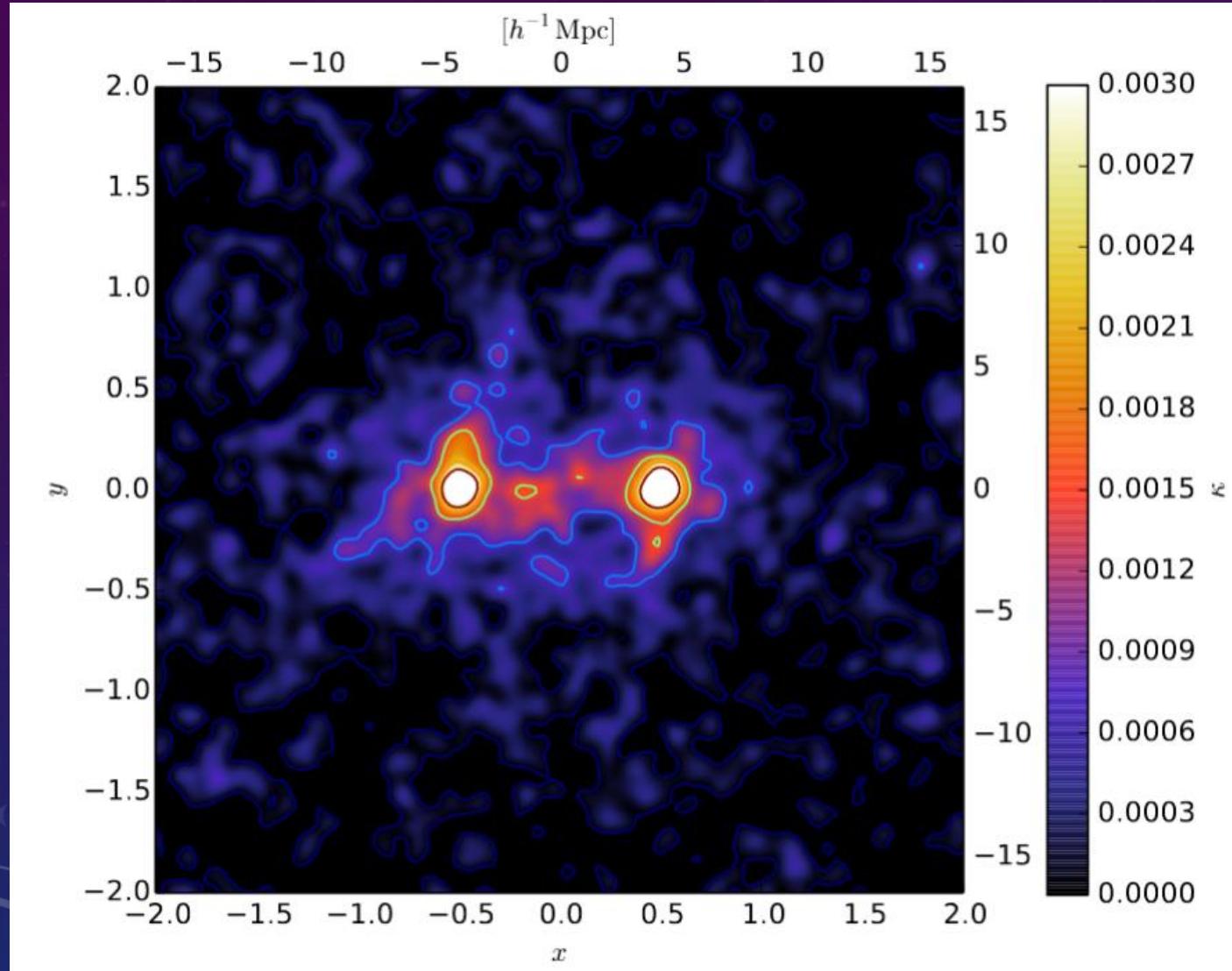
Распределение массы восстанавливается по линзированию.

Массы газа не хватит для объяснения массы волокна.



1207.0809

«МОСТ» МЕЖДУ ГАЛАКТИКАМИ

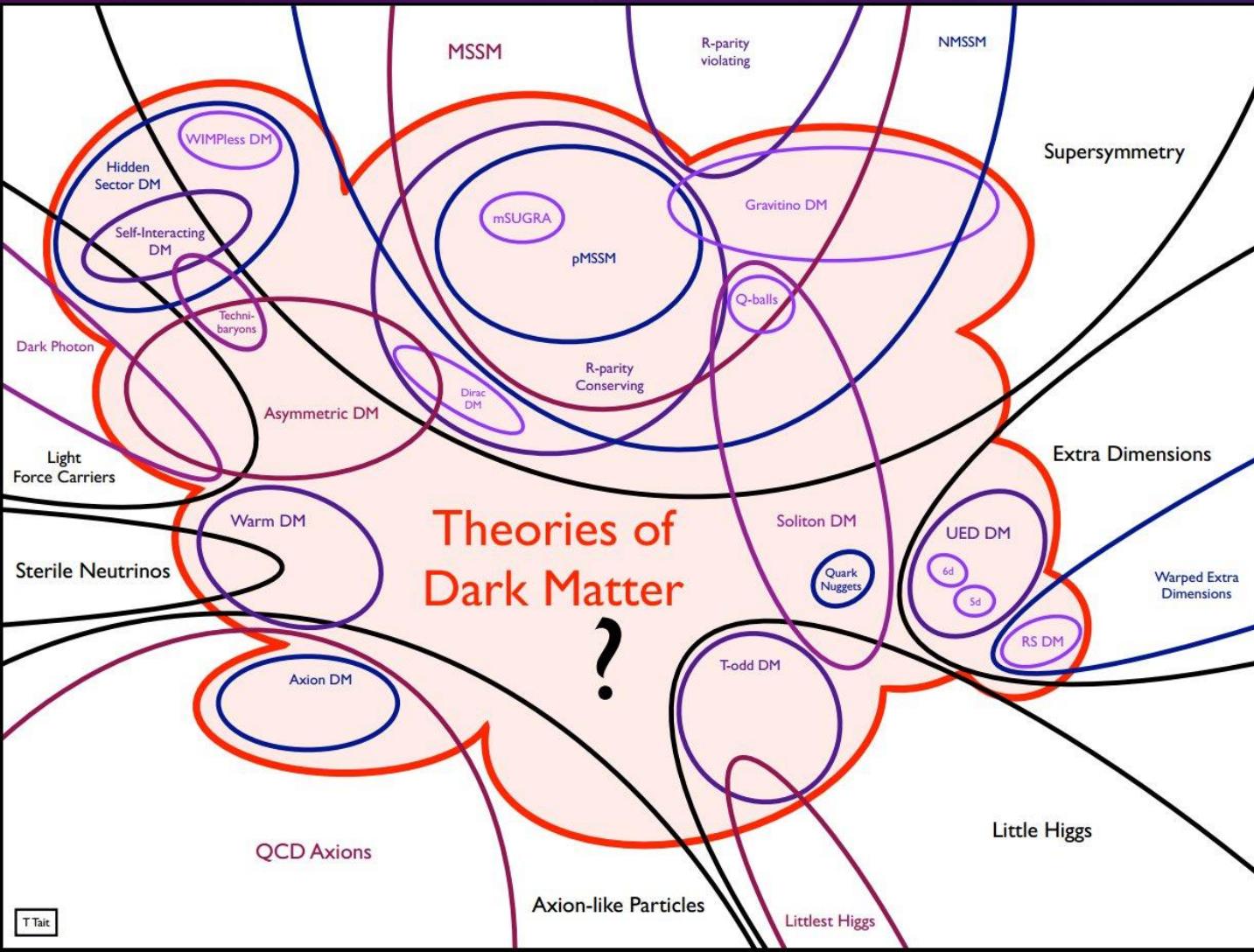


$(1.6 \pm 0.3) \times 10^{13} M_{\odot}$ for a stacked filament region $7.1 h^{-1}$ Mpc long and $2.5 h^{-1}$ Mpc

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

Распределение массы определено по слабому линзированию.

ЧТО ТАКОЕ ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ?

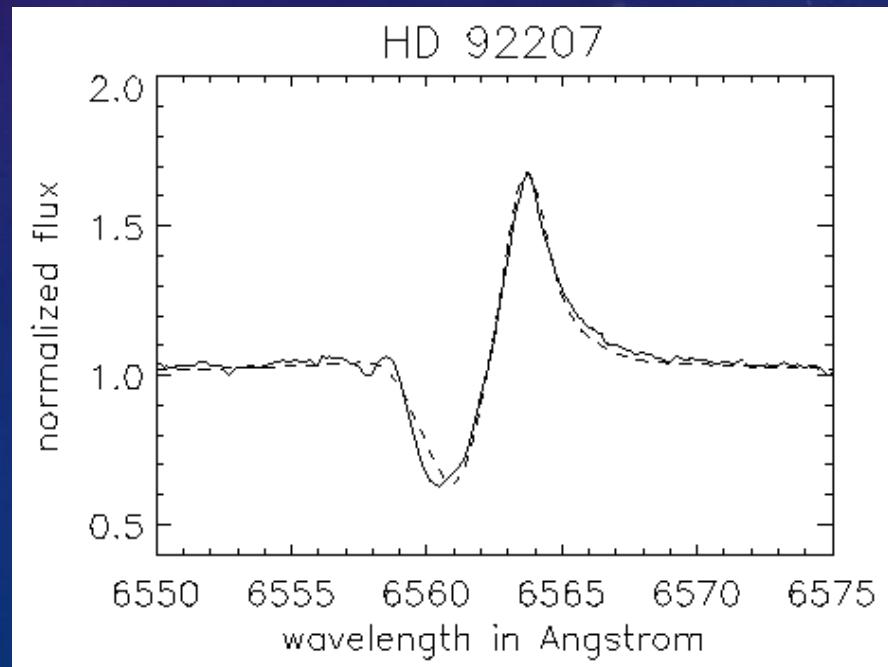


КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА №2

(К ЛЕКЦИЯМ 8-9. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

- (6 балла) Рассчитайте (в любом разумном приближении) теоретический радиус белого карлика массой $M = 0.6M_{\odot}$ с учётом его уравнения состояния. Ответом должно быть число в R_{\odot}
- (4 баллов). Для нейтронной звезды радиуса $R = 10$ км, массы $M = 1.5M_{\odot}$ и с индукцией (дипольного) магнитного поля на поверхности $B = 10^{12}$ Гс, рассчитайте:
 - предельный минимальный период её вращения P_{\min} («центробежный предел»);
 - её радиосветимость L_r [эрг/с] при периоде P_{\min} , считая, что на радиоизлучение тратится около 10^{-10} потерь энергии её вращения;
 - расстояние, с которого такой источник может быть зарегистрирован, зная, что чувствительность детектора на телескопе составляет $F_{\min} = 1$ мЯн, а наблюдения проводятся в полосе частот шириной 1 ГГц.
- (К ПРЕДЫДУЩЕЙ КОНТРОЛЬНОЙ, 3 балла) Линии водорода в спектрах некоторых звёзд-гигантов обладают своеобразной формой, называемой *формой типа R Cygni* (то есть Р Лебедя – по имени звезды-архетипа, у которой такое наблюдалось впервые). В синем крыле таких линий наблюдается *абсорбция*, а в красном – *эмиссия*. Дайте качественную интерпретацию такому виду спектральной линии.



ОТВЕТЫ

Задача 1.

Для политропного шара «давление за счёт гравитации»

$P_c = \frac{\xi GM}{R} \cdot \frac{M}{xR^3}$, где пусть $\xi = 1$ и $x = 1$. Хотя другие варианты (например $\xi \approx e^{-1} \approx 0.364$, $x = 4\pi/3$ тоже зачитываются).

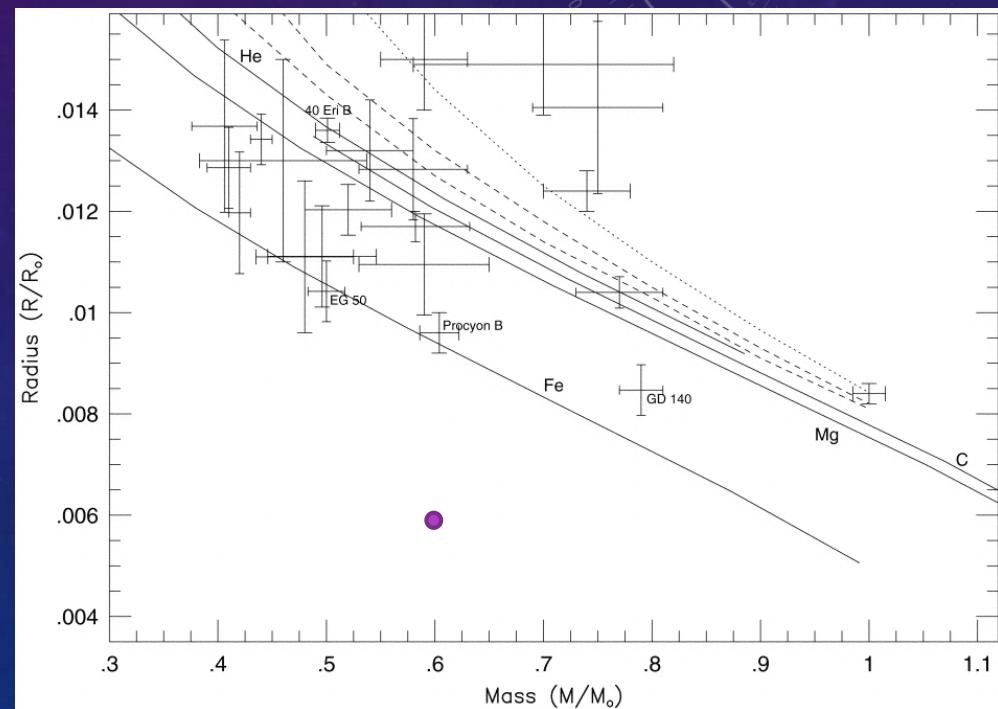
Тогда сила тяготение на единицу площади поверхности БК $P_g = GM^{2/3}\rho^{4/3}$. С другой стороны, давление вырожденного нерелятивистского (так как масса БК мала) газа:

$$P_d = K_{5/3} \rho^{5/3}, \text{ где}$$

$$K_{5/3} = \left(\frac{3}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \frac{h^2}{20m_e} (Y_e m_p)^{-5/3} \approx 9.96 \cdot 10^{12} \cdot Y_e^{-5/3}$$

Приравнивая $P_c = P_d$ и считая что $Y_e = 2$ получаем

$$R = G^{-1} K_{5/3} M^{-1/3} \approx 4421 \text{ км или } 0.006 R_\odot \text{ км.}$$



ОТВЕТЫ

Задача 2.

Предельный период определяется равенством центробежной силы и силы тяготения на поверхности НЭ:

$$mg = m\Omega_{\max}^2 R, \text{ то есть } \Omega_{\max} \approx 1.42 \cdot 10^4 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ или } P_{\min} = \frac{2\pi}{\Omega_{\max}} = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}} \approx 0.44 \text{ мс}$$

Потери вращательной энергии $W = B^2 R^6 \Omega^4 c^{-3} \approx 1.5 \cdot 10^{45}$ эрг/с, а радиосветимость $L_r = 1.5 \cdot 10^{35}$ эрг/с.

Принимаемый поток излучения: $F = \frac{L_r}{4\pi d^2 \Delta\nu} > F_{\min} = 1 \text{ мЯн} = 10^{-26} \text{ эрг} \cdot \text{см}^{-2} \text{с}^{-1} \text{Гц}^{-1}$, откуда

$$d < \sqrt{\frac{L_r}{4\pi F_{\min} \Delta\nu}} \approx 3.4 \cdot 10^{25} \text{ см} \approx 11 \text{ Мпк}, \text{ где } 1 \text{ пк} = 3.08 \cdot 10^{18} \text{ см}$$

ОТВЕТЫ

Задача 3

