

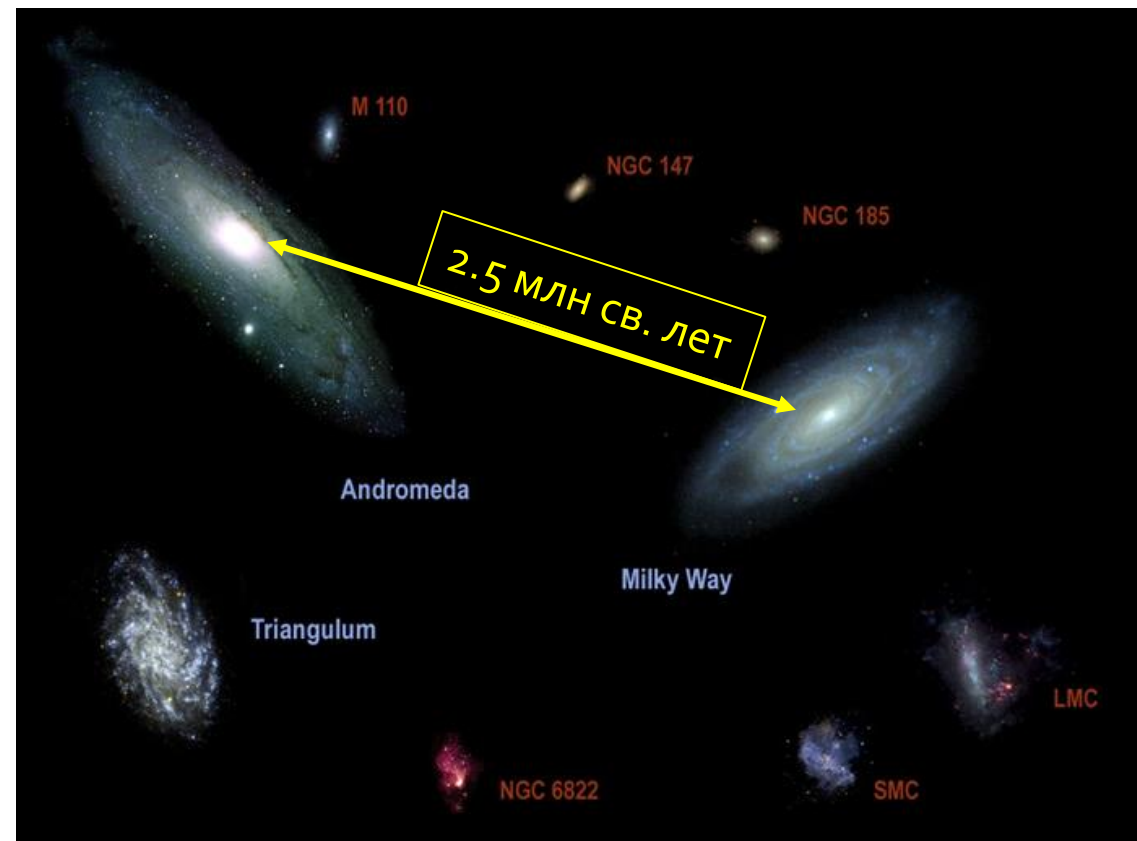
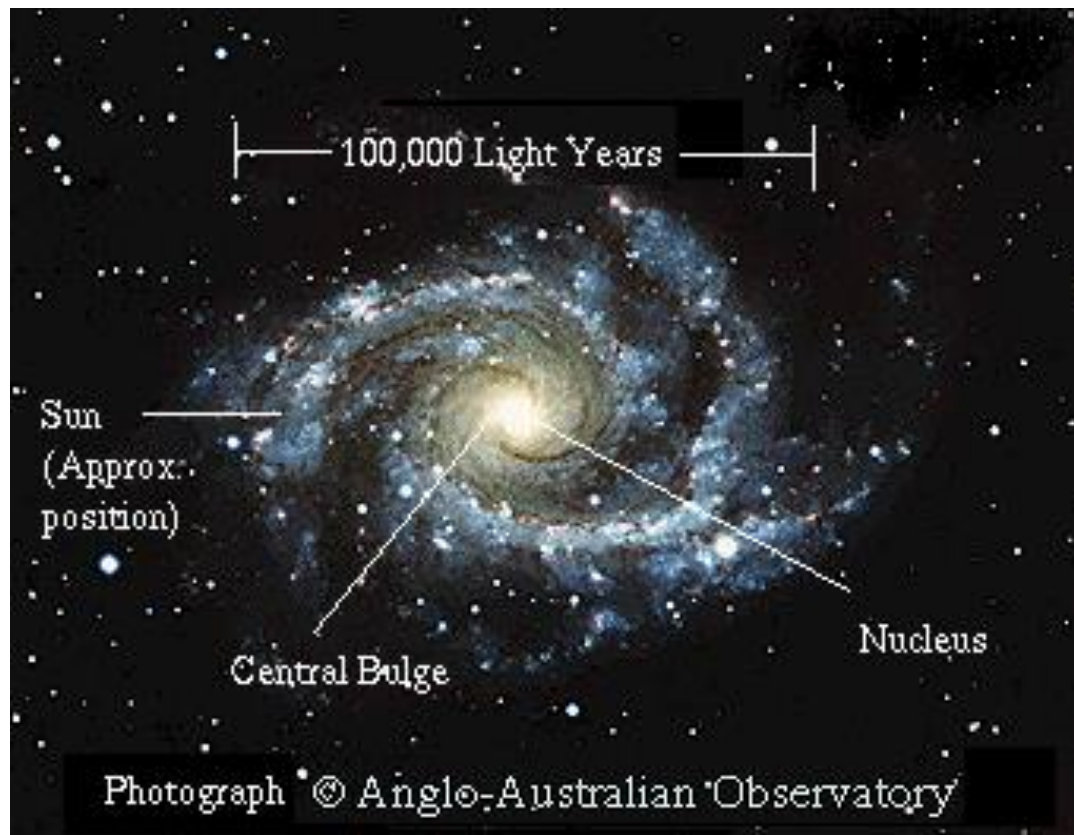


# ГАЛАКТИКА И ГАЛАКТИКИ

АНТОН БИРЮКОВ. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА», ОСЕНЬ 2022. ФАКУЛЬТЕТ ФИЗИКИ ВШЭ.

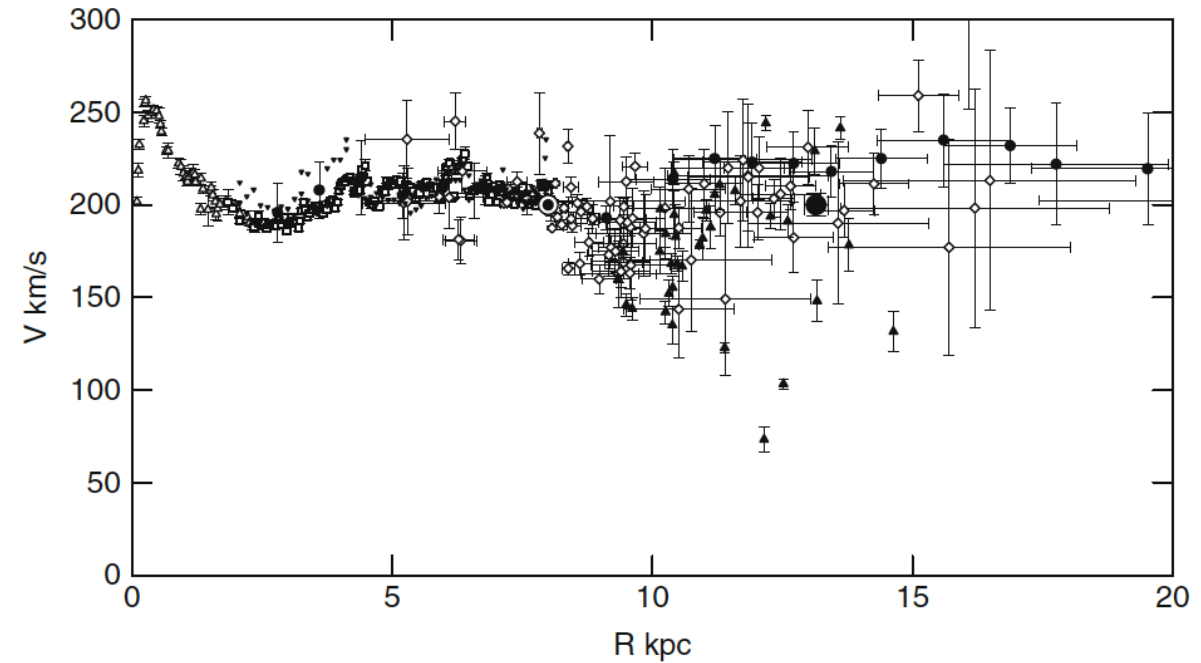
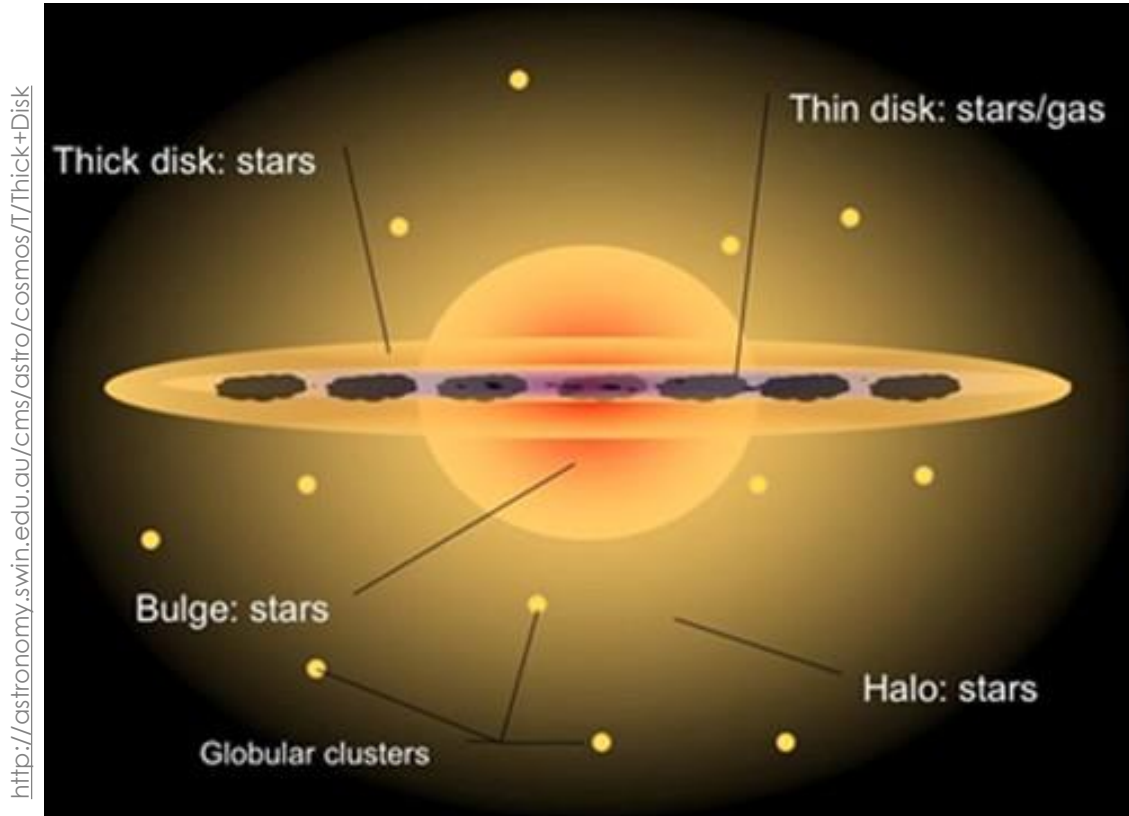


# ГАЛАТИКИ – СВЯЗНЫЕ СИСТЕМЫ ЗВЁЗД



- 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
	$M_{C_1}$	$3.0 \times 10^9 M_\odot$
	$r_{C_2}$	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

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

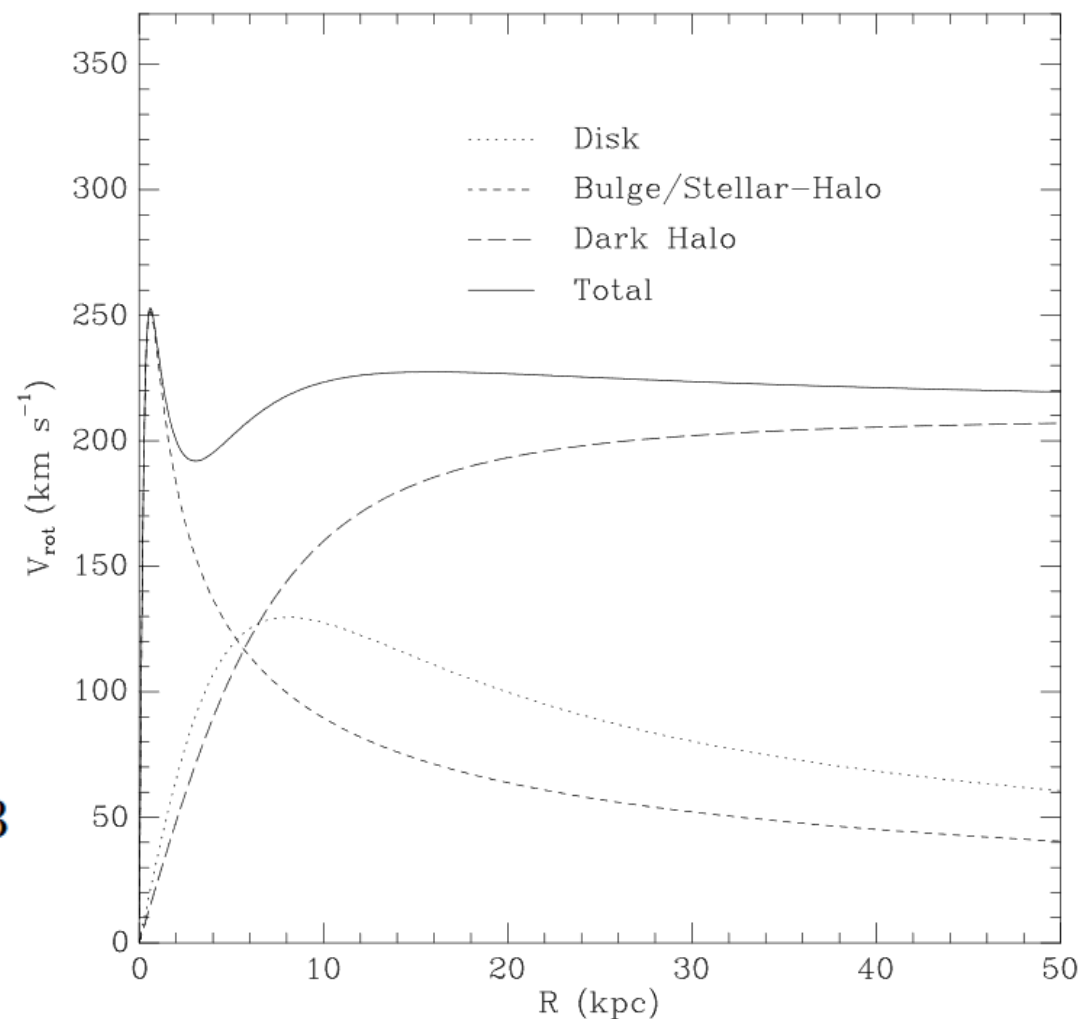
$$\Phi_H = \frac{1}{2} V_H^2 \ln(r^2 + r_0^2)$$

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

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

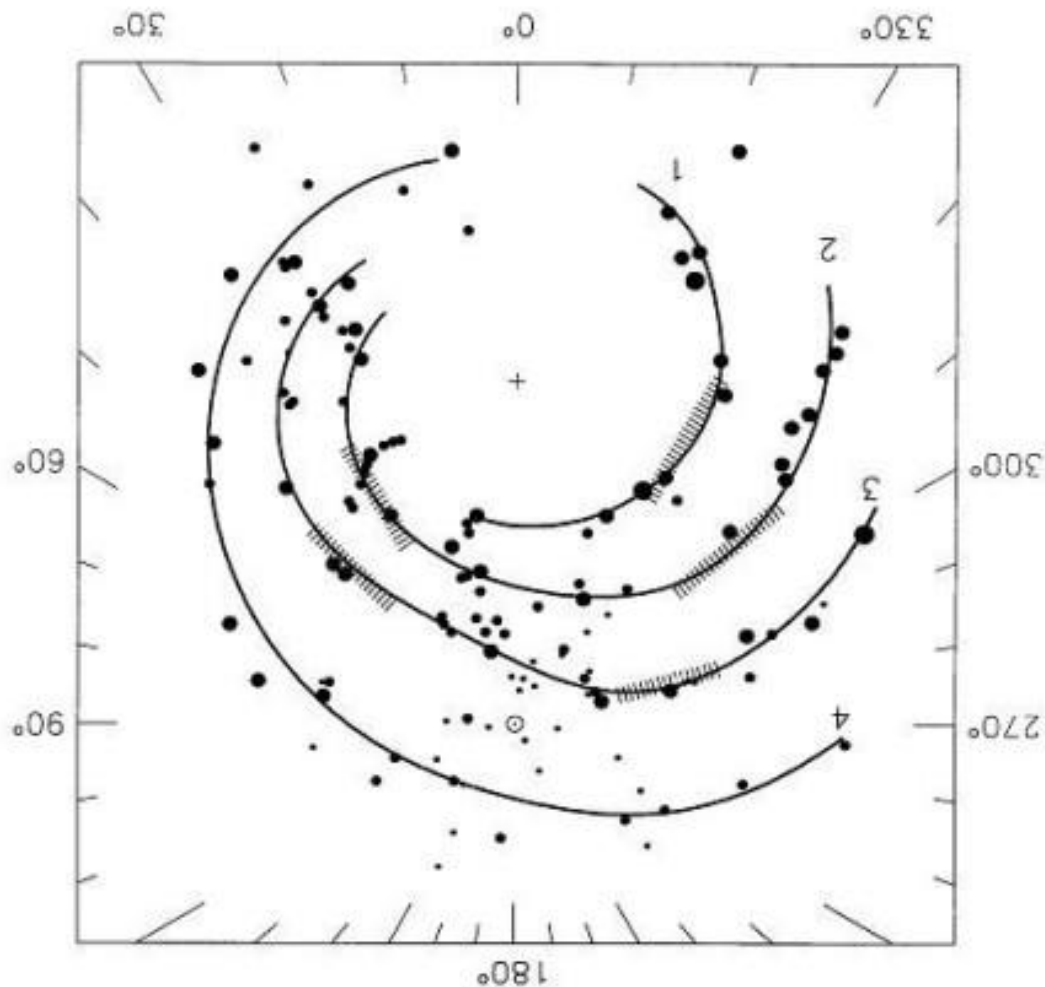
$$\Phi_{D_n} = \frac{-GM_{D_n}}{\sqrt{(R^2 + (a_n + \sqrt{(z^2 + b^2)})^2)}}$$

$n = 1, 2, 3$

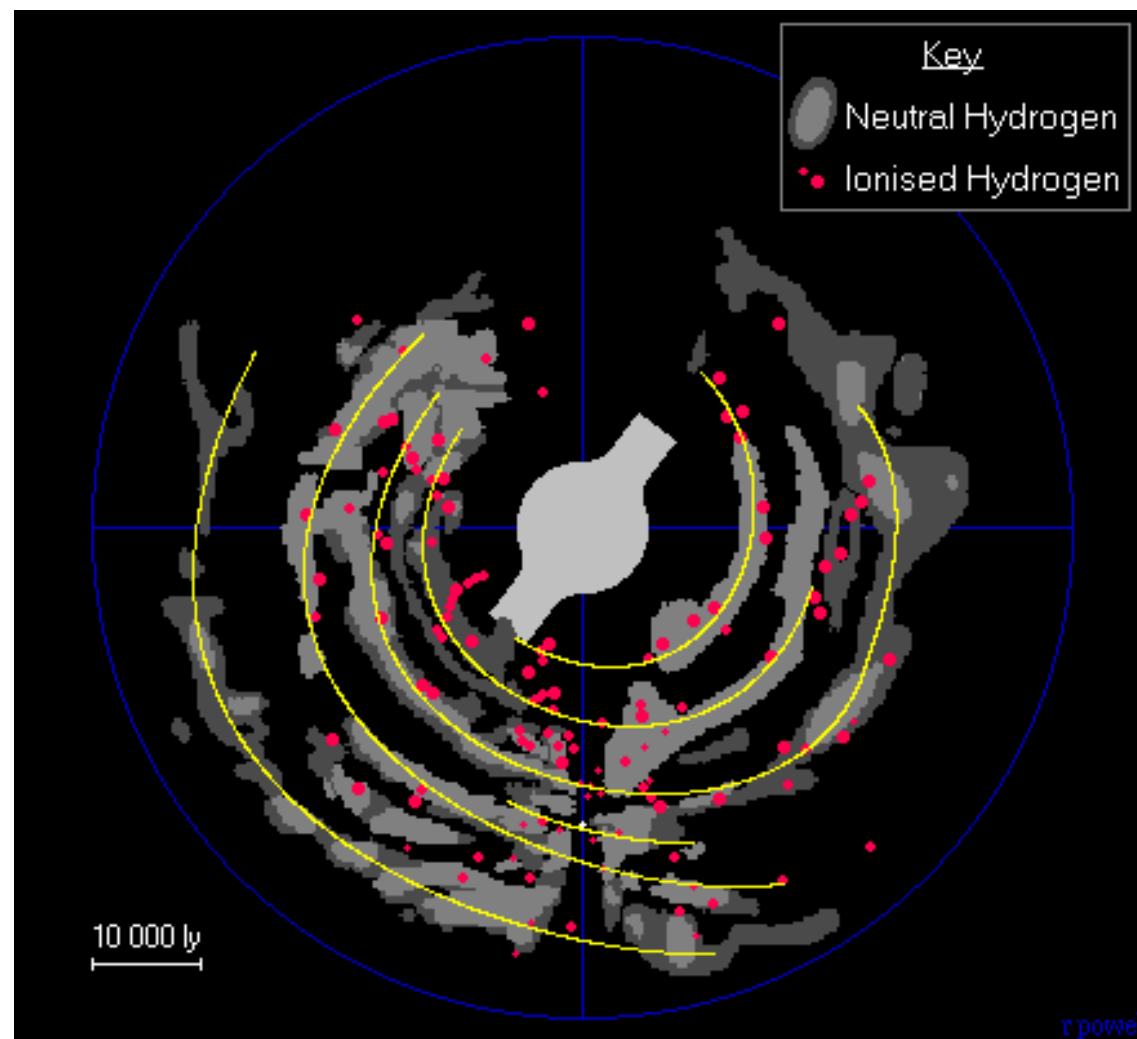


# СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ

- 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)

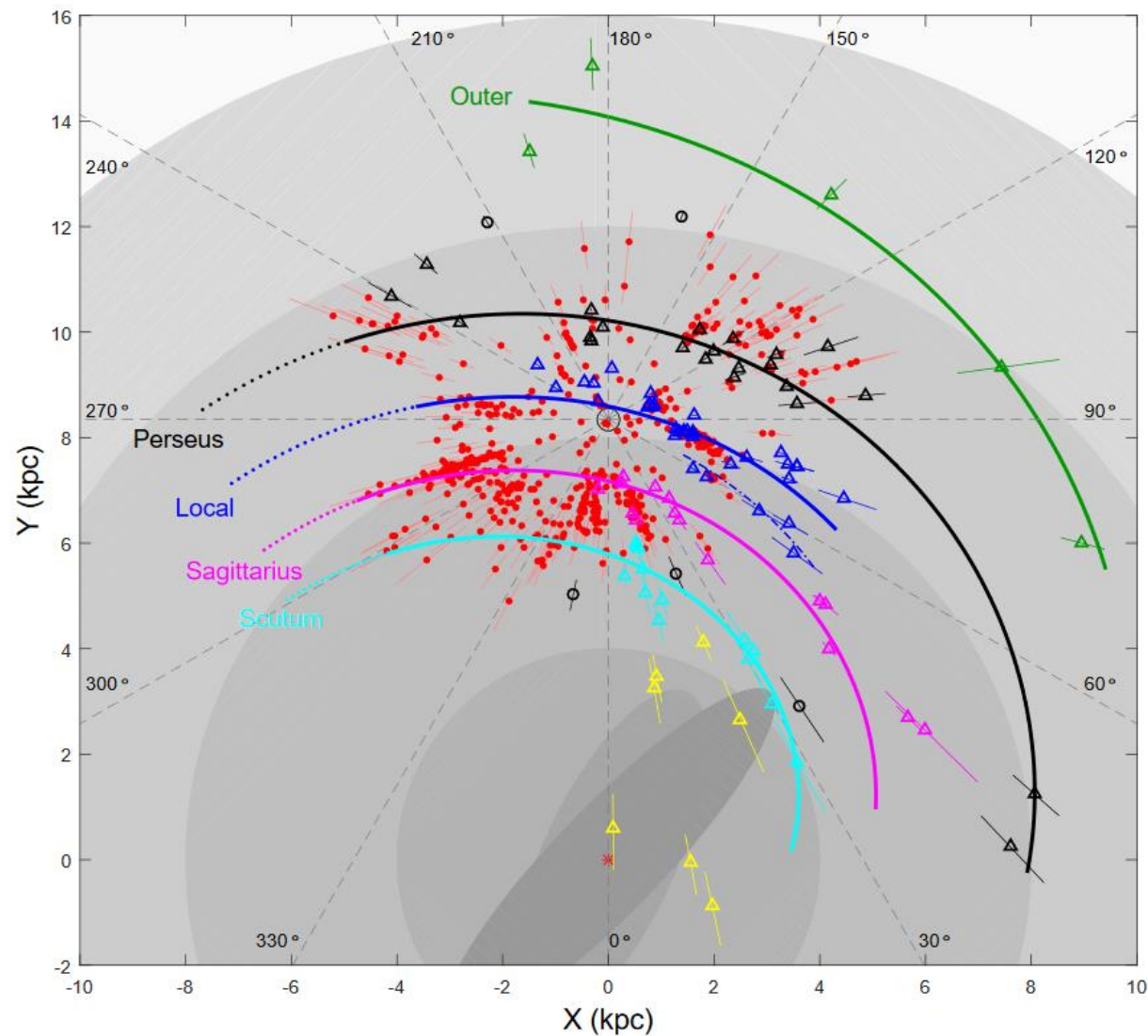


J.H. Taylor, J.M. Cordes



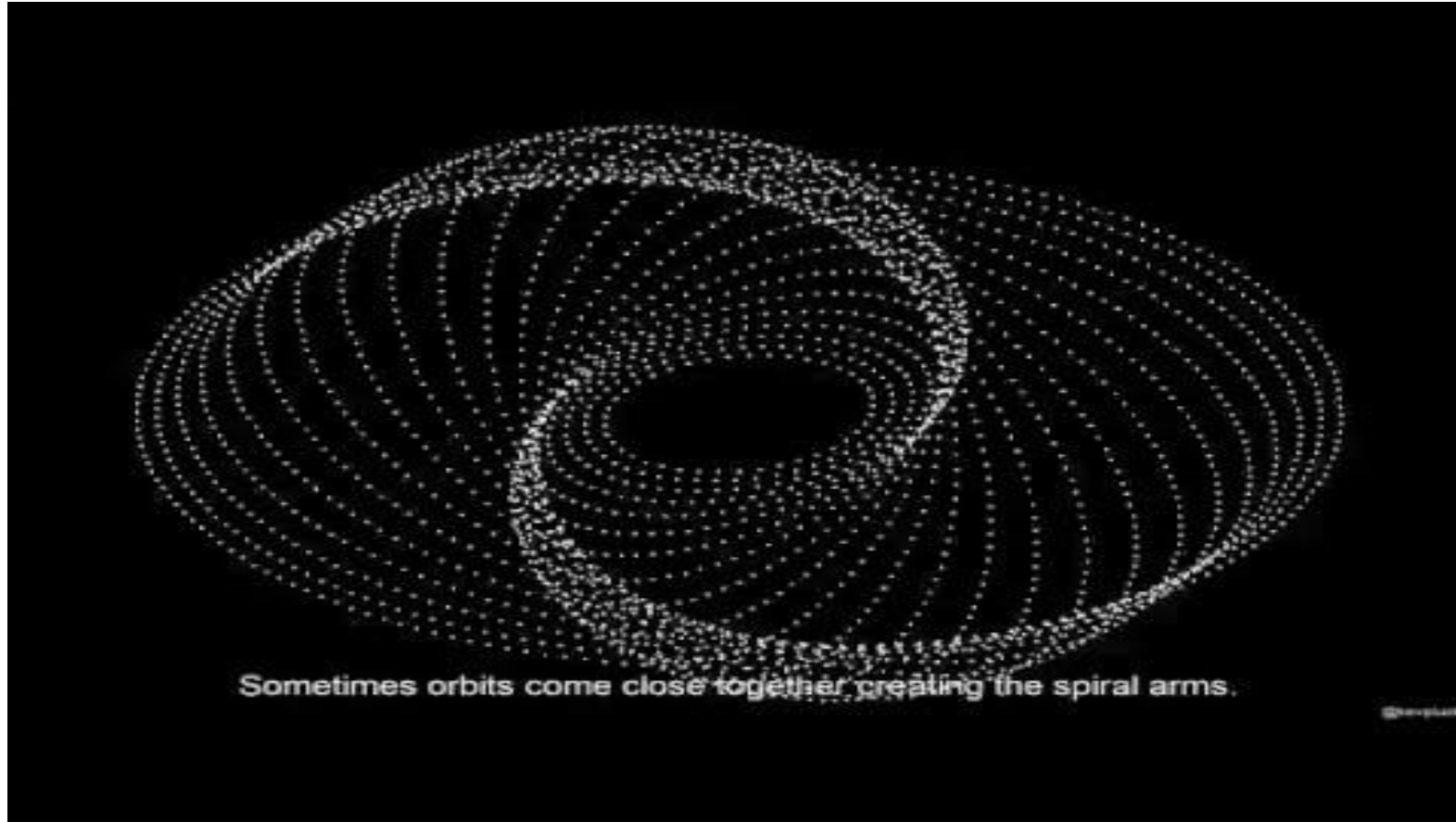


# СТРУКТУРА МЛЕЧНОГО ПУТИ



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

# СПИРАЛЬНЫЕ ВЕТВИ – ВОЛНЫ ПЛОТНОСТИ



Grand Design Spiral

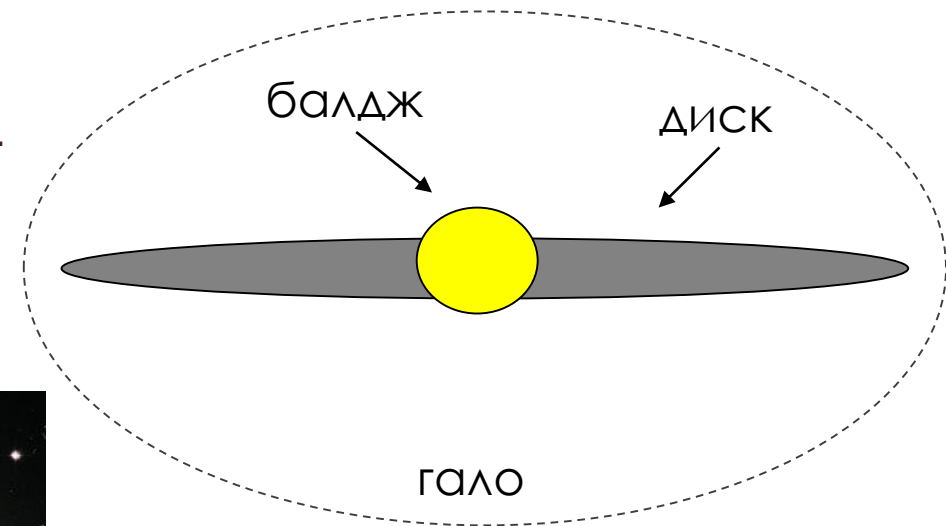
<https://www.youtube.com/watch?v=IMReQ6hVw5s>



# 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](#) Межзвездная среда: от молекул до звездообразования  
[arxiv:1412.5182](#) Физические процессы в межзвездной среде  
[arxiv:1206.4090](#) Межзвездное поглощение и межзвездная поляризация  
[arxiv:1104.2949](#) Межзвездная пыль  
[arxiv: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)

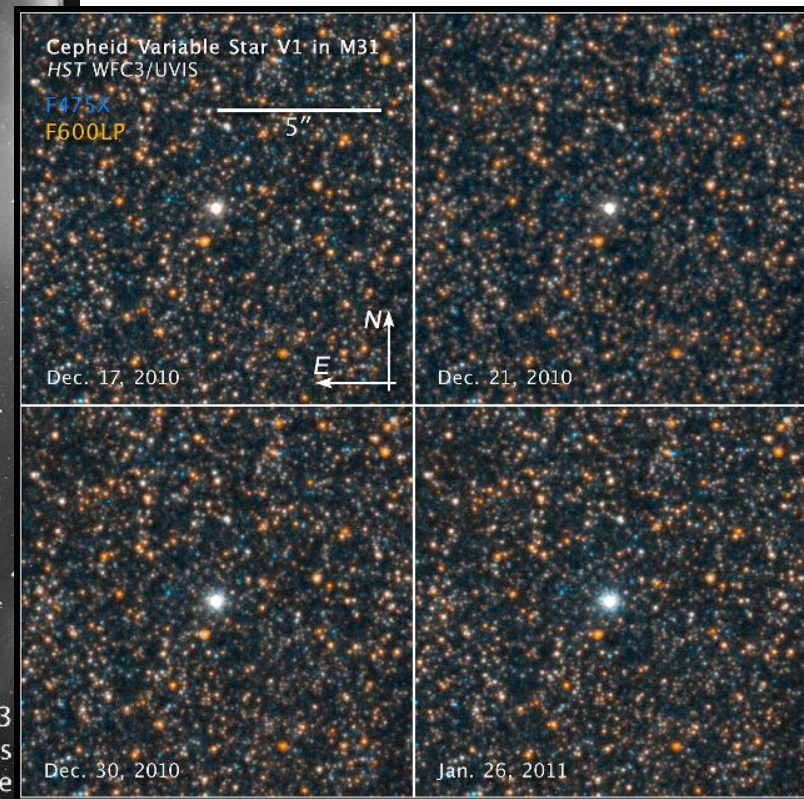


Милтон Хьюмасон  
(1891-1972)





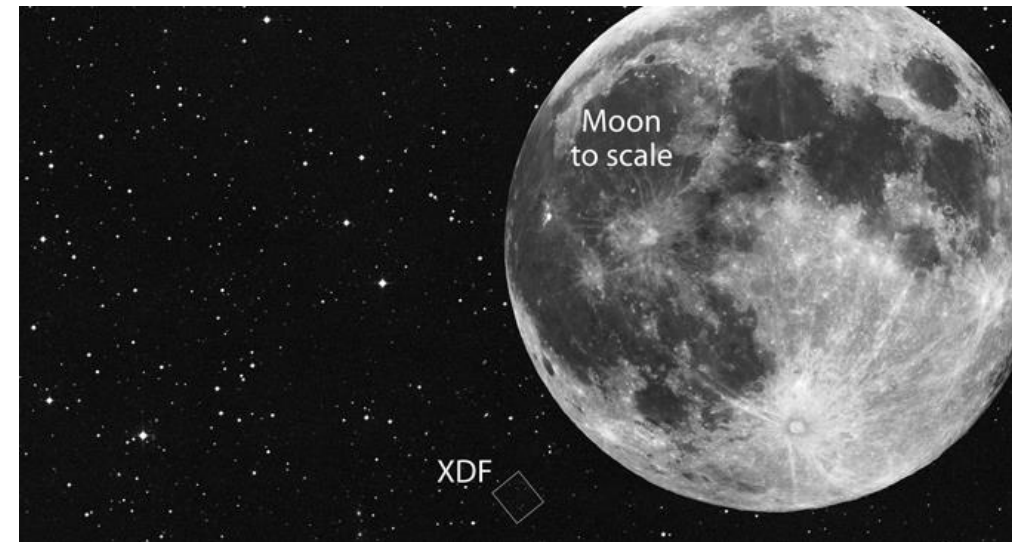
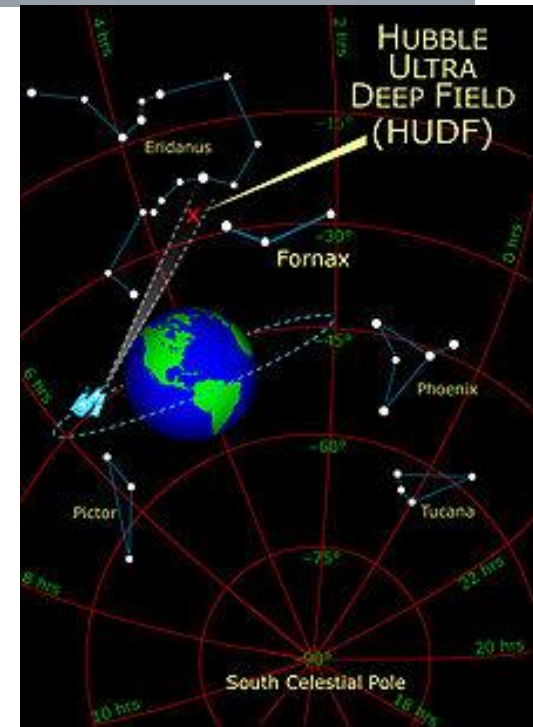
Photo: R. Gendler



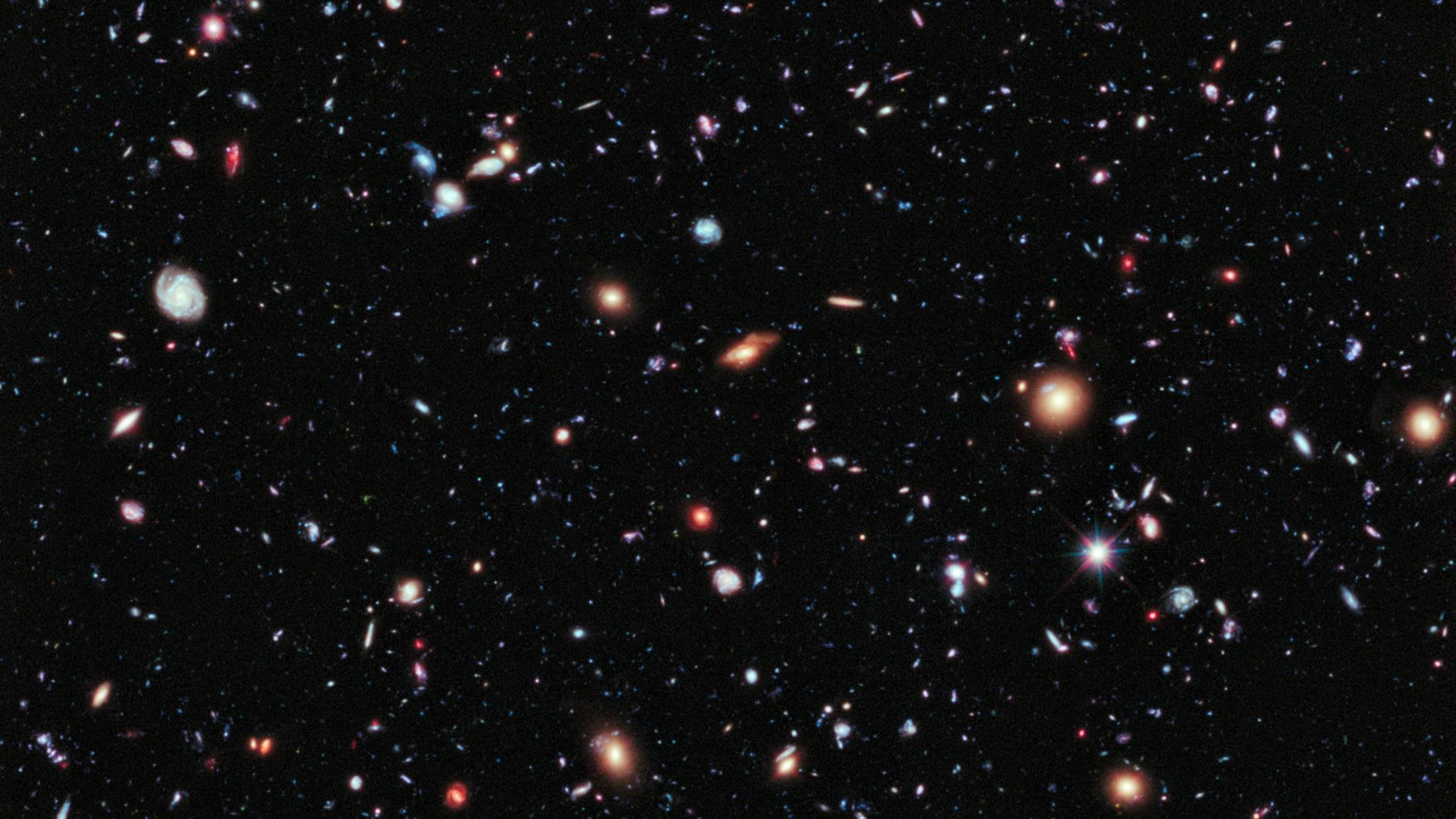




Созвездие Печь  
2003-2004 гг









# ЗООПАРК ГАЛАКТИК



Дисковая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная

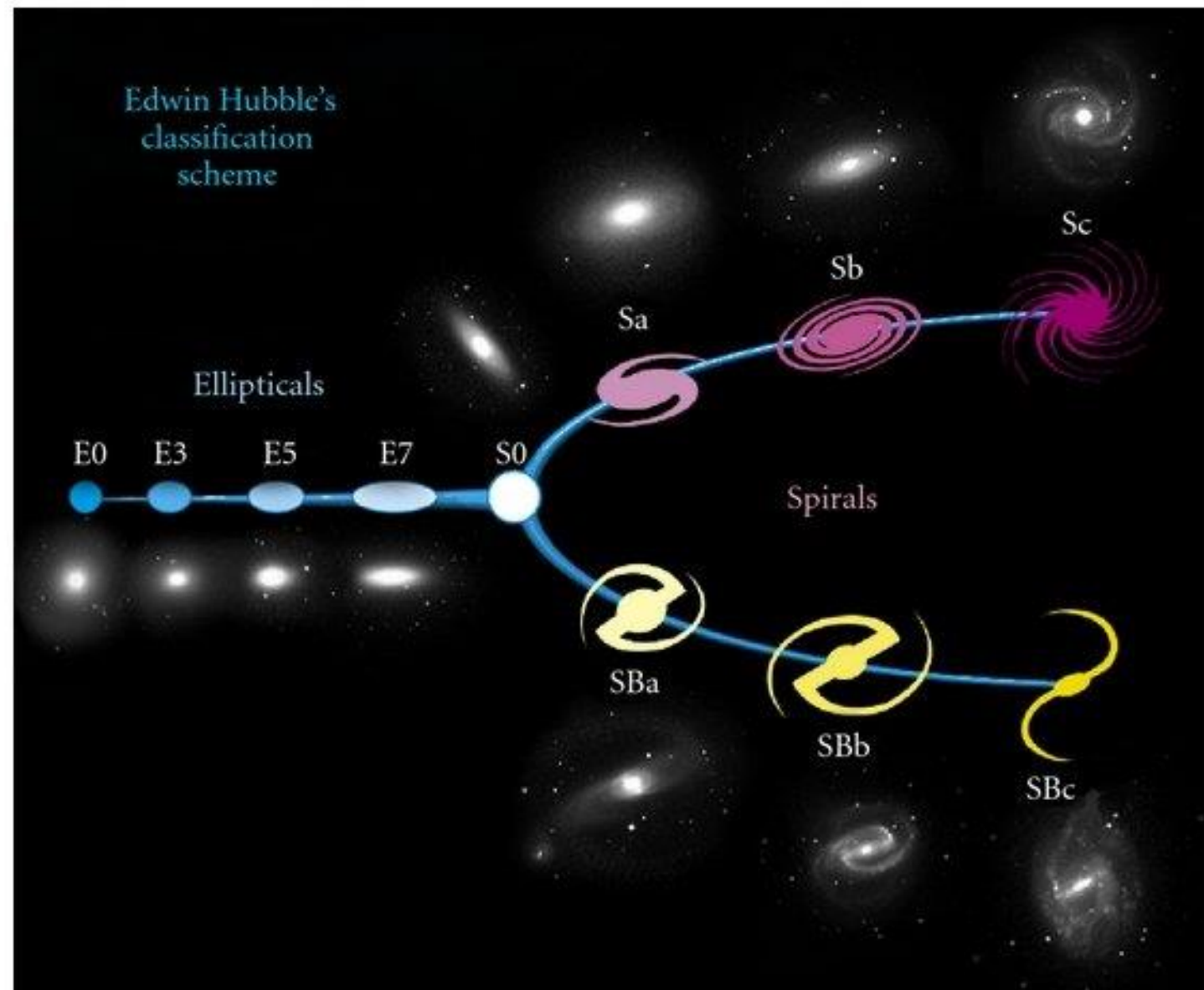
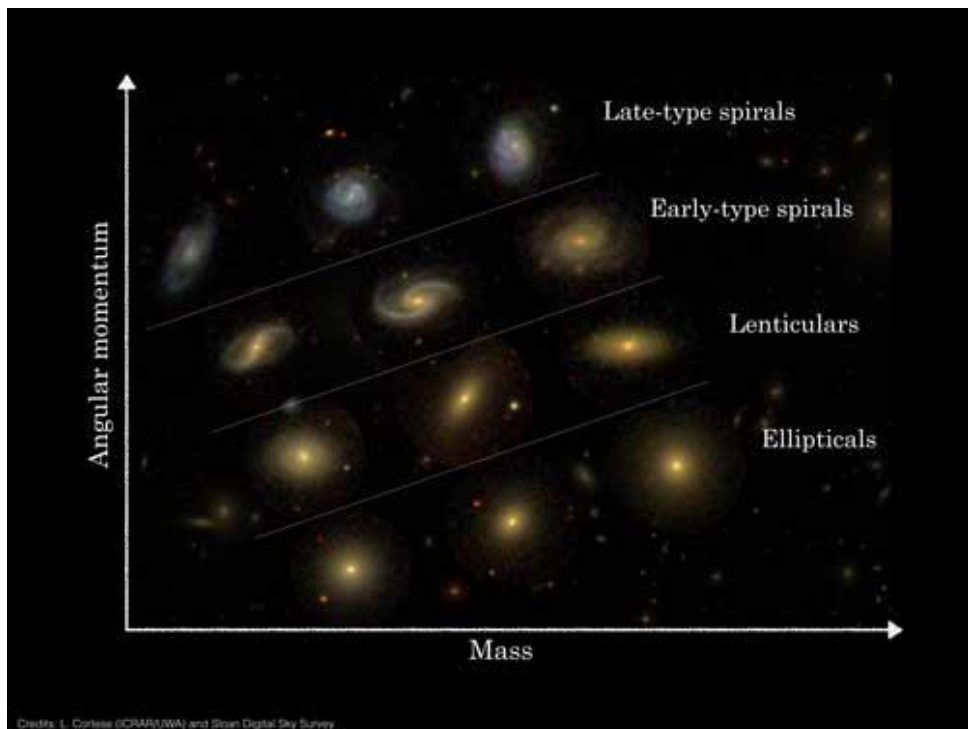


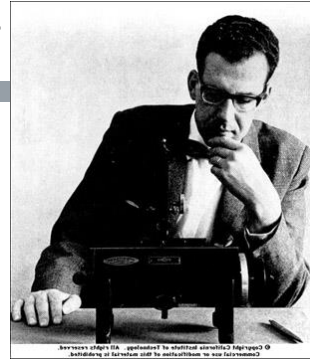
Эллиптическая



Взаимодействующие

# КАМЕРТОН ХАББЛА



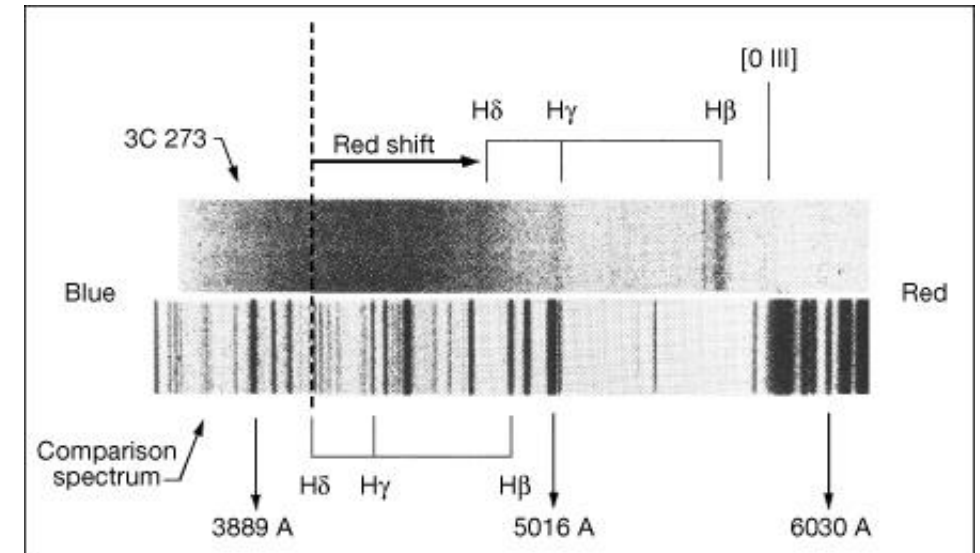


# АКТИВНЫЕ ЯДРА: КВАЗАРЫ



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».

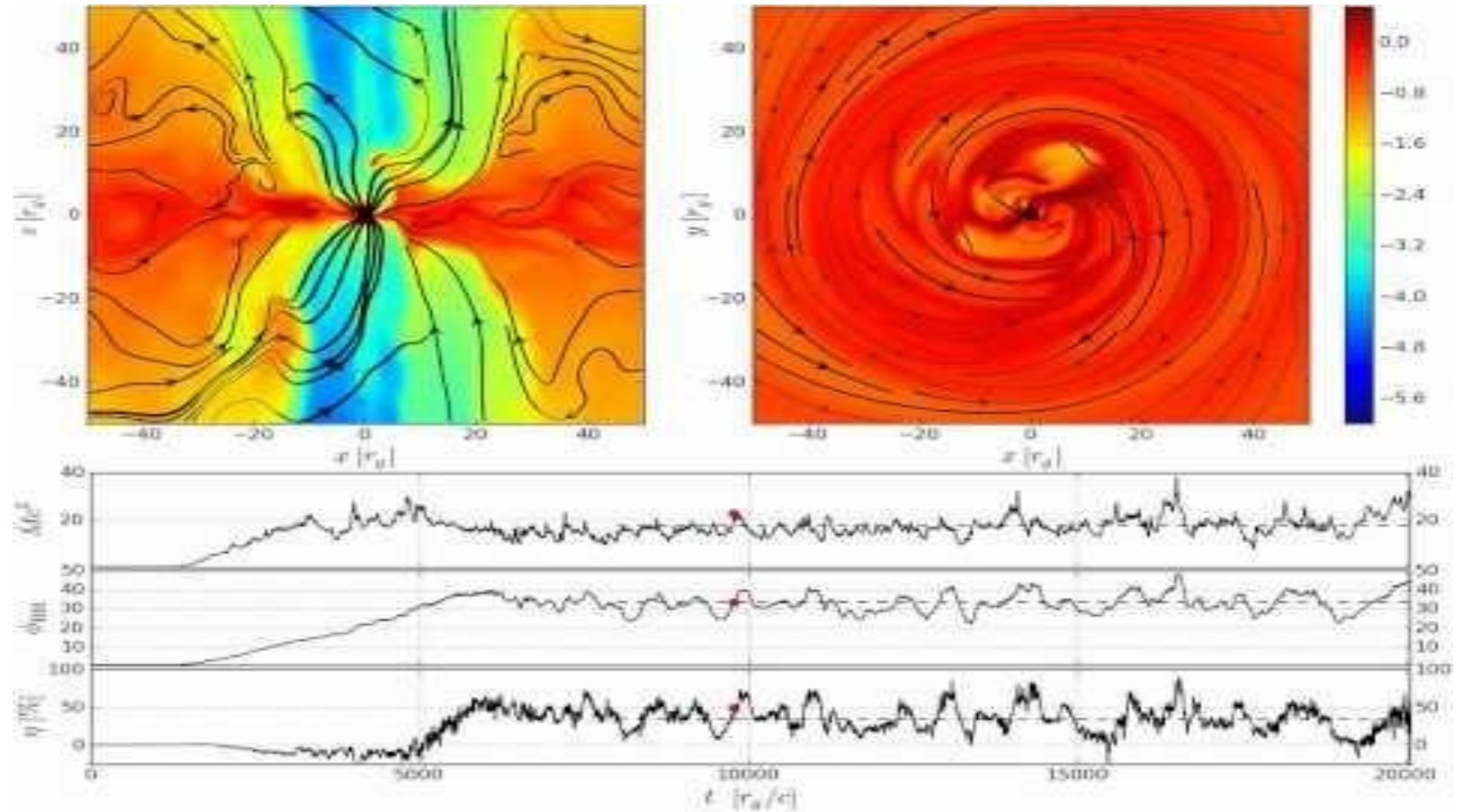
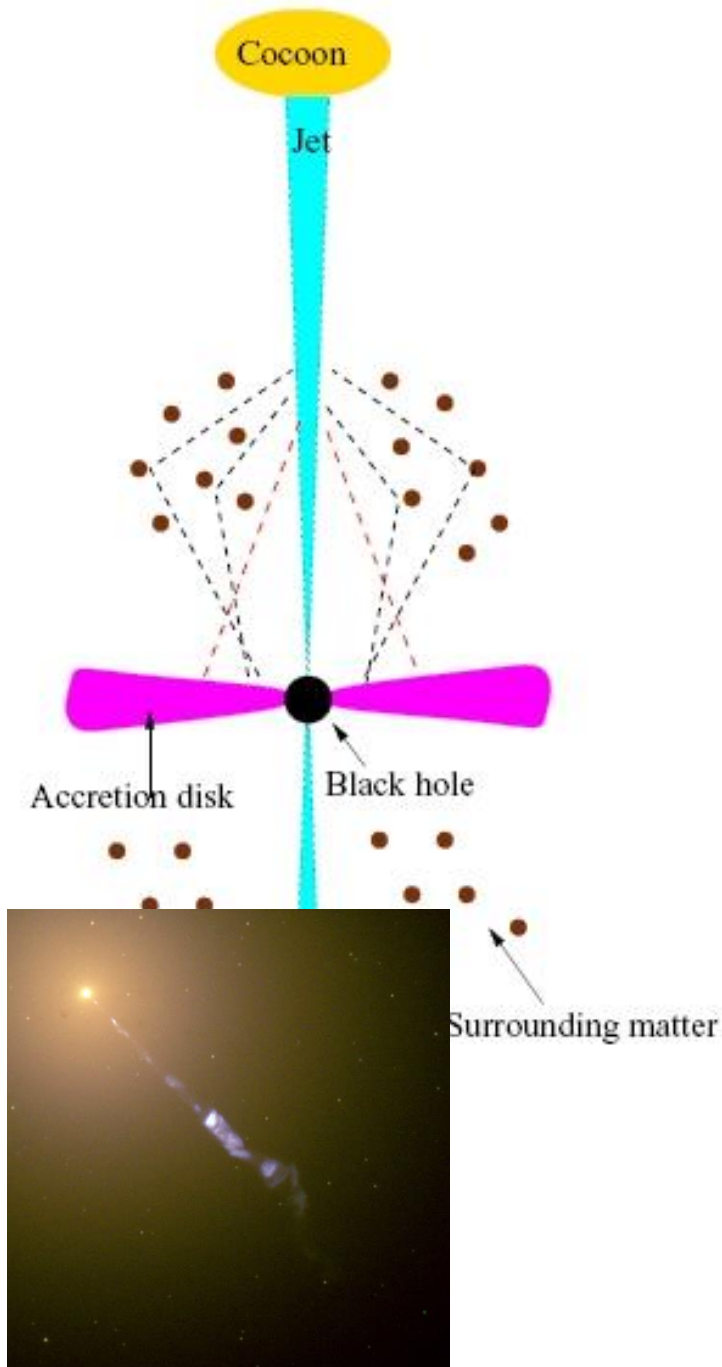




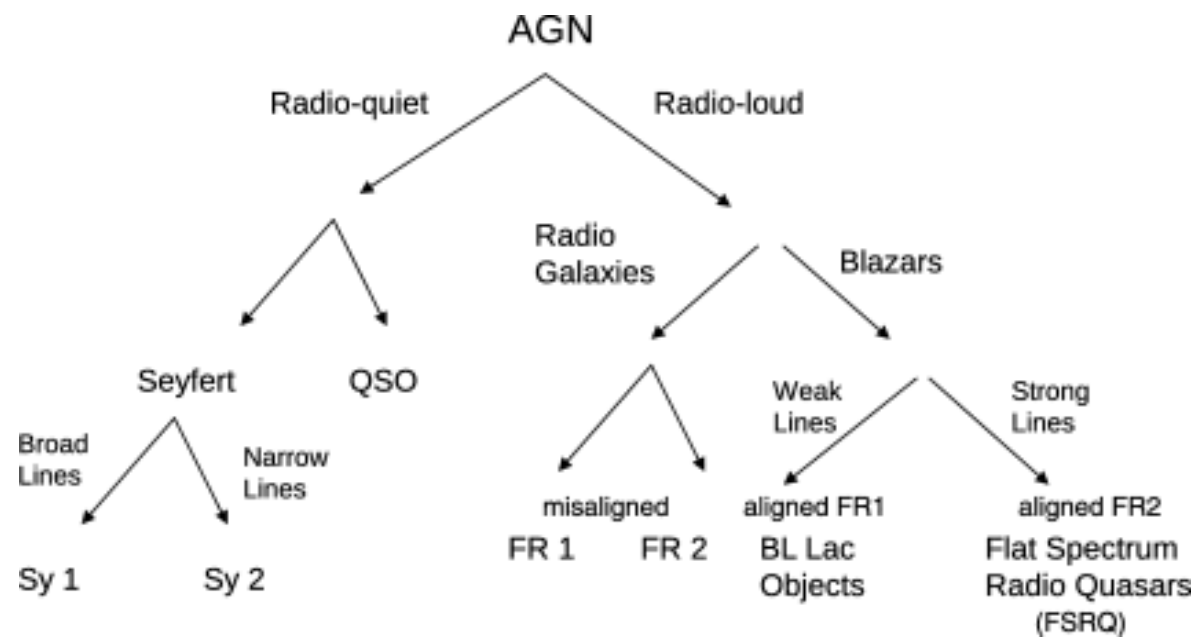
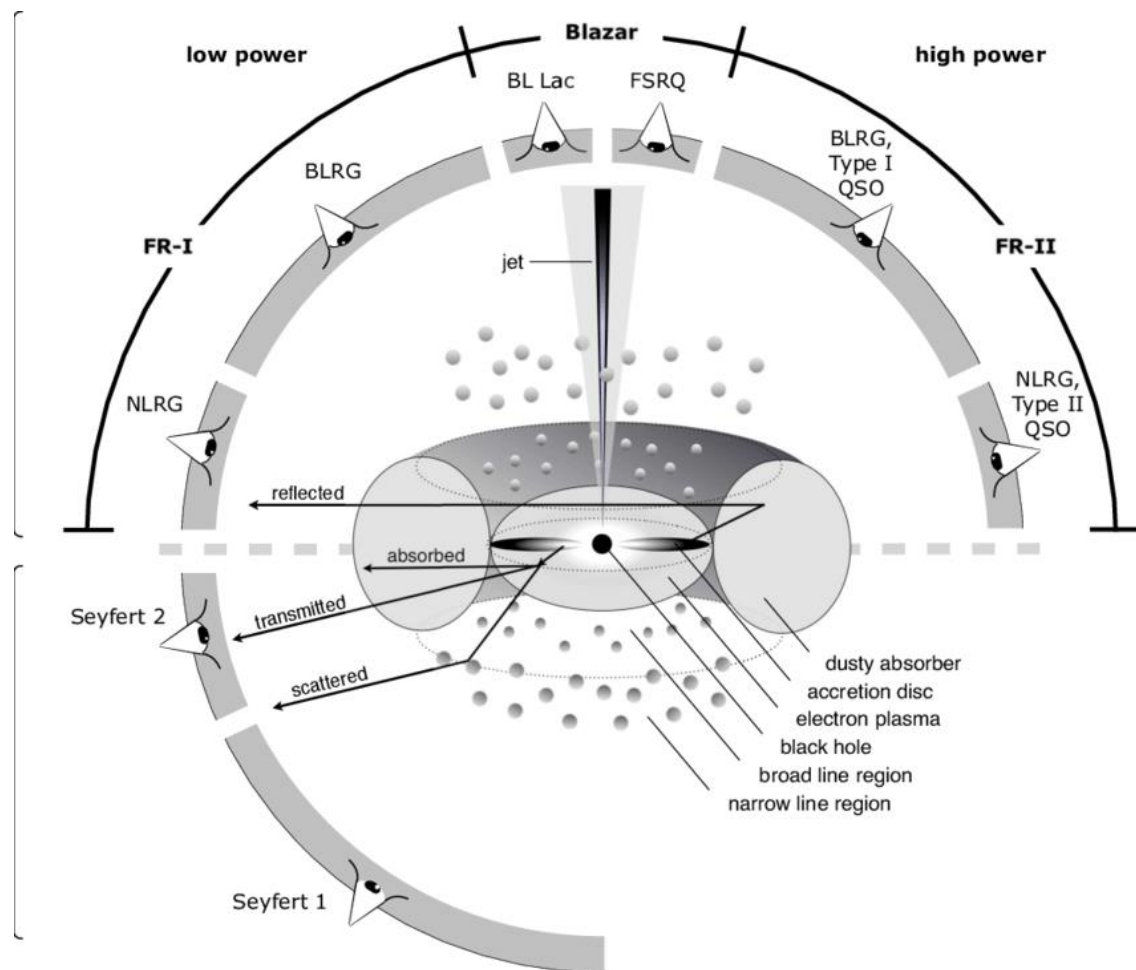
# ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ДЖЕТЫ

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

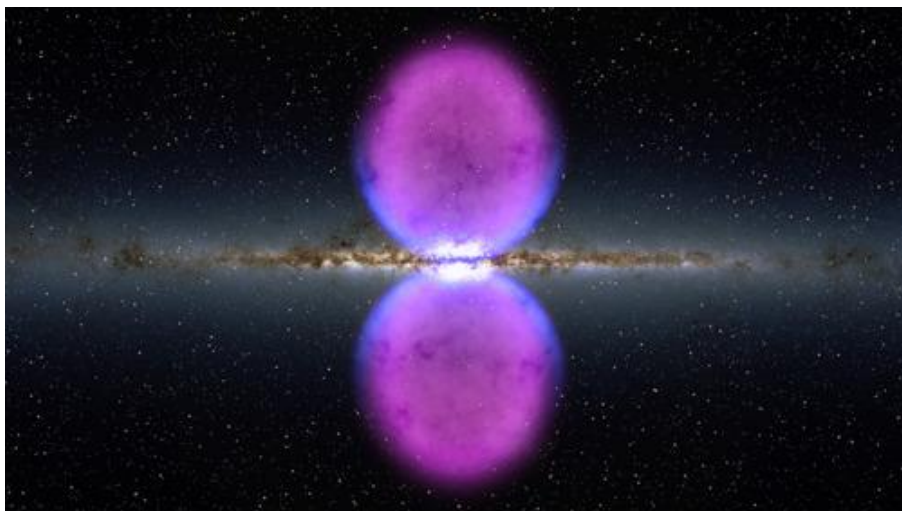
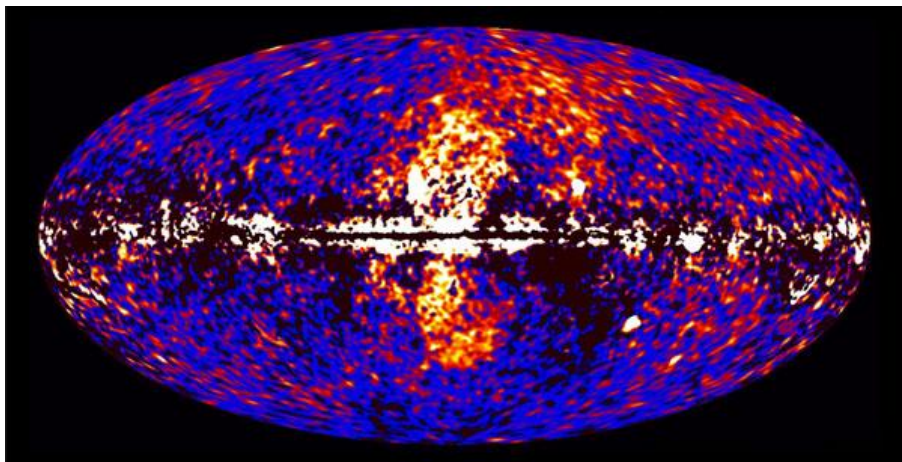
$$L(< \sim L_{Edd}) \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ эрг/с}$$



# ГЕОМЕТРИЯ АКТИВНЫХ ЯДЕР



# ПУЗЫРИ ФЕРМИ



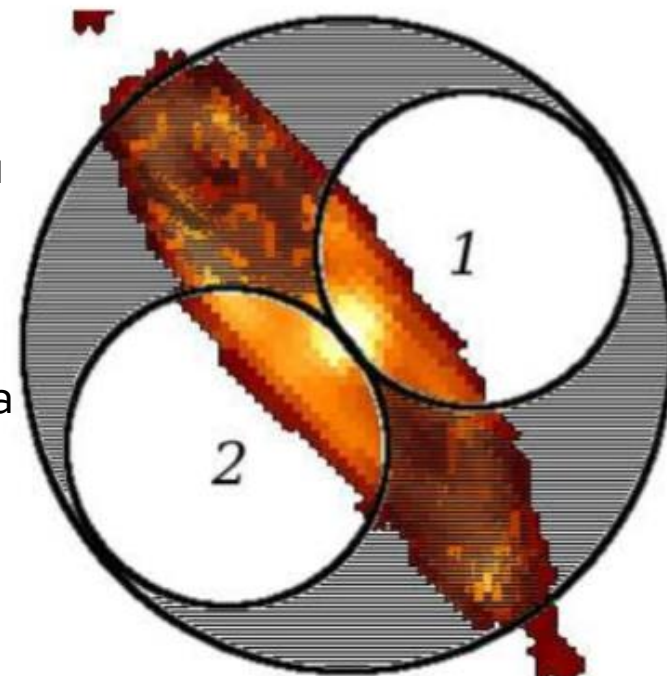
Возраст пузырей в MW от 10 до 100 млн лет.

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 М31 на порядок выше, чем у нас.

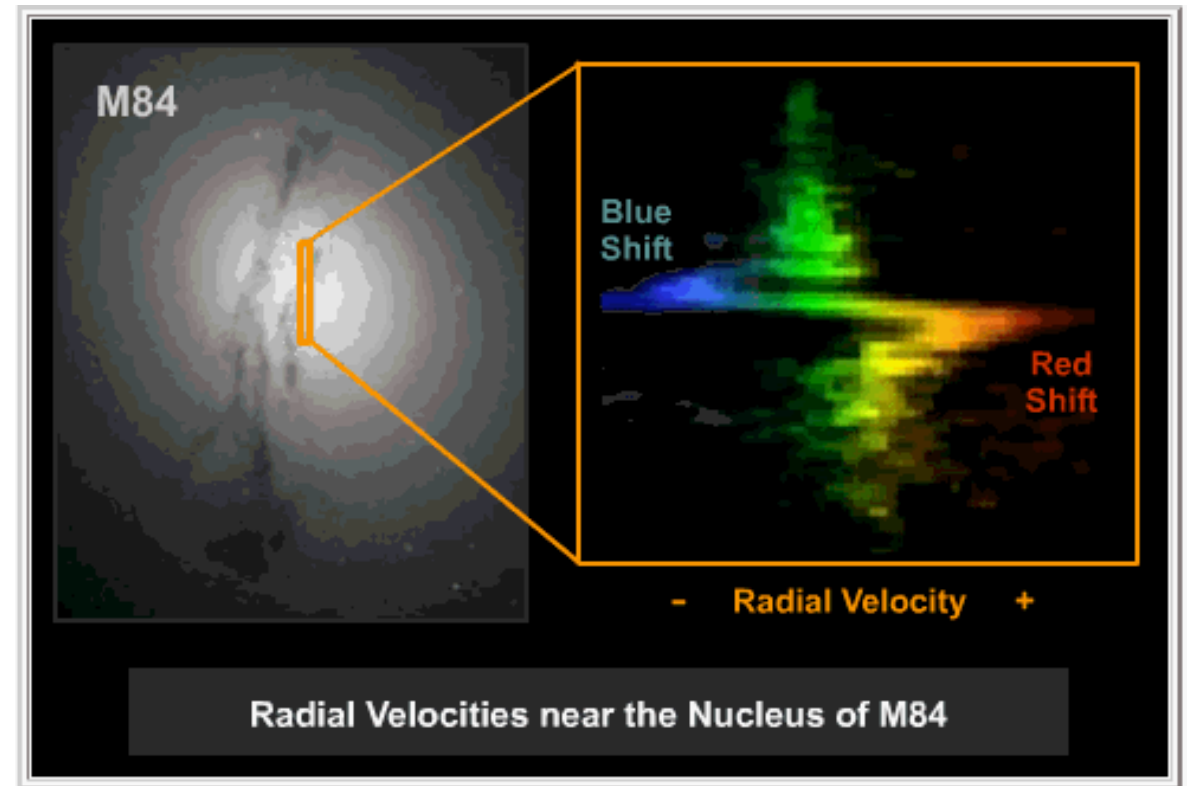
1603.07245



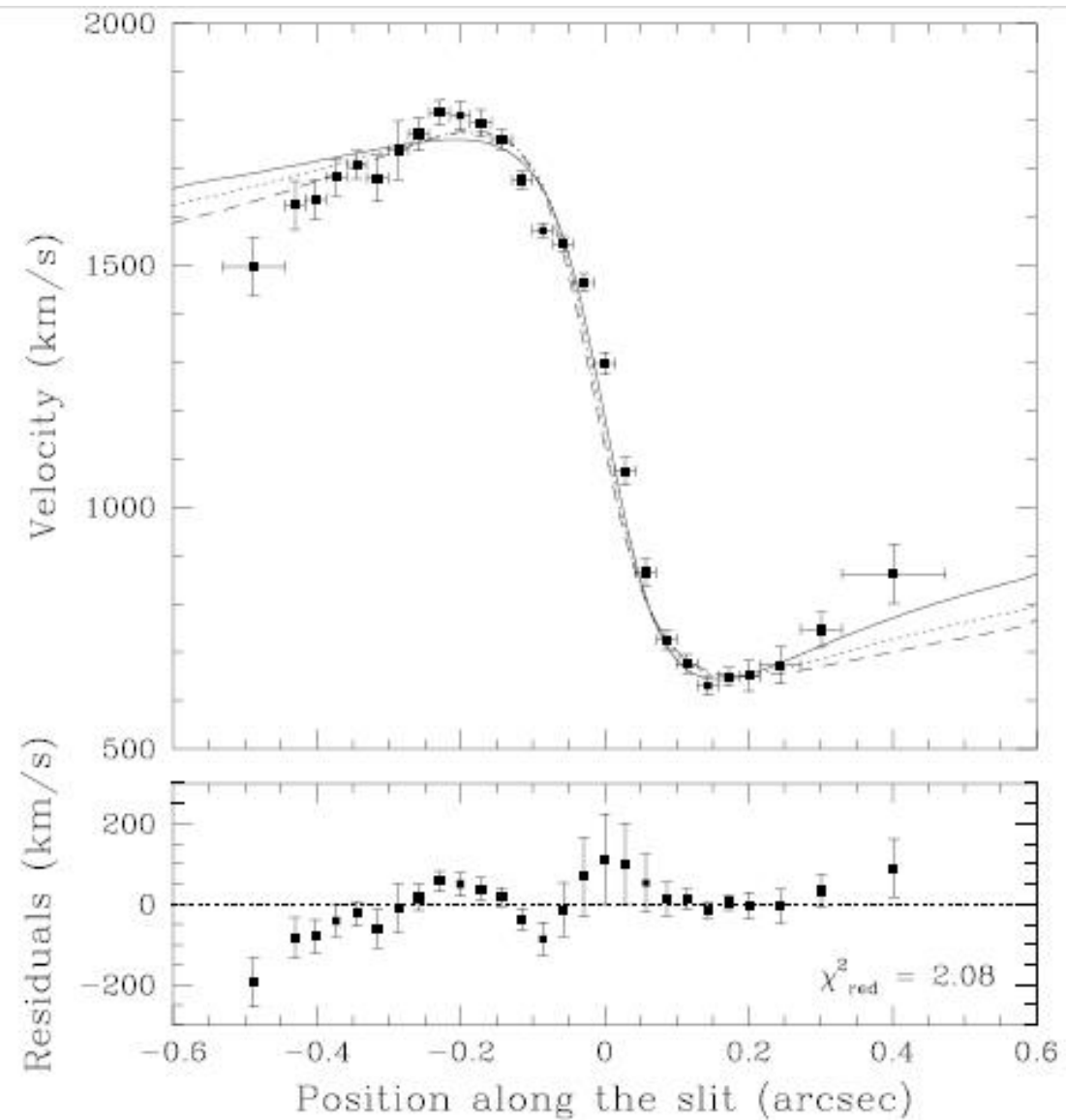
# МАССЫ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- 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).



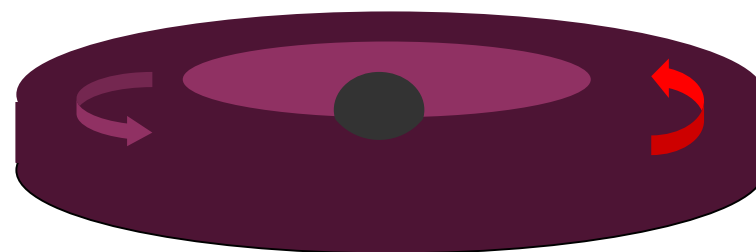




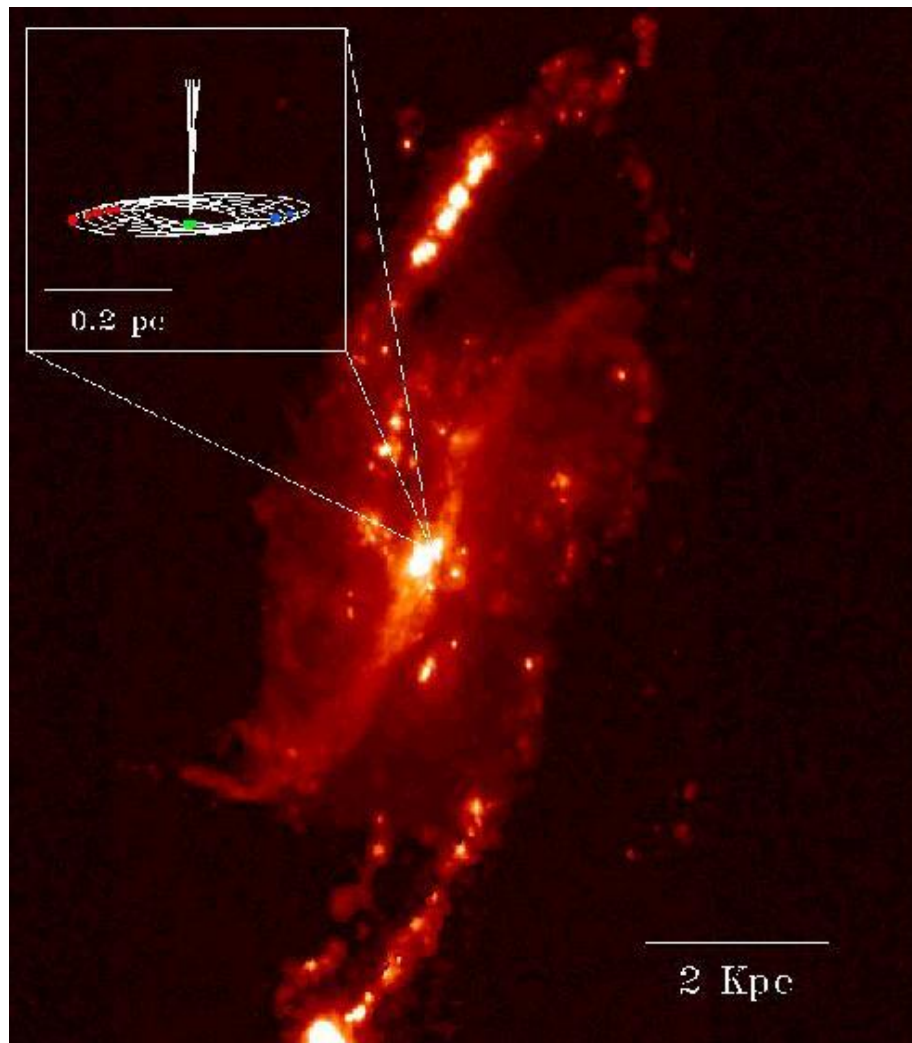
Для М87 скорости газа измерены  
внутри одной миллисекунды дуги  
(5pc).

Масса  $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$

Одна из самых тяжелых черных дыр

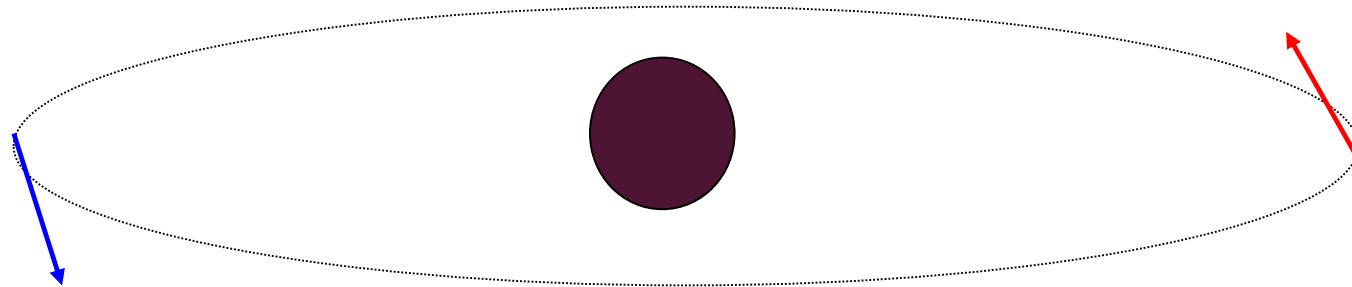






Наблюдая движение мазерных источников в галактике **NGC 4258**, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

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»





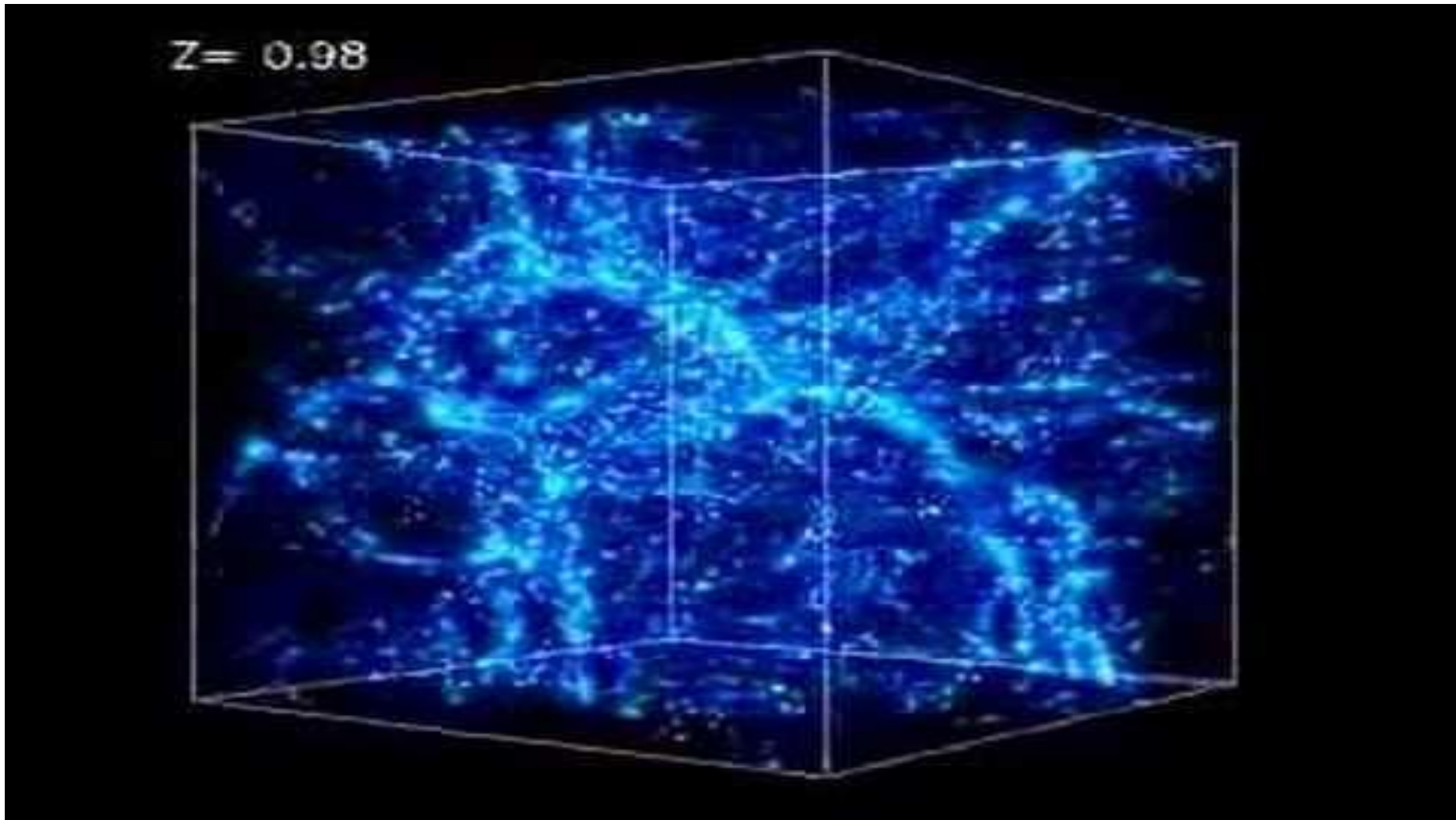


Мы видим, что скопления  
возникают постепенно.

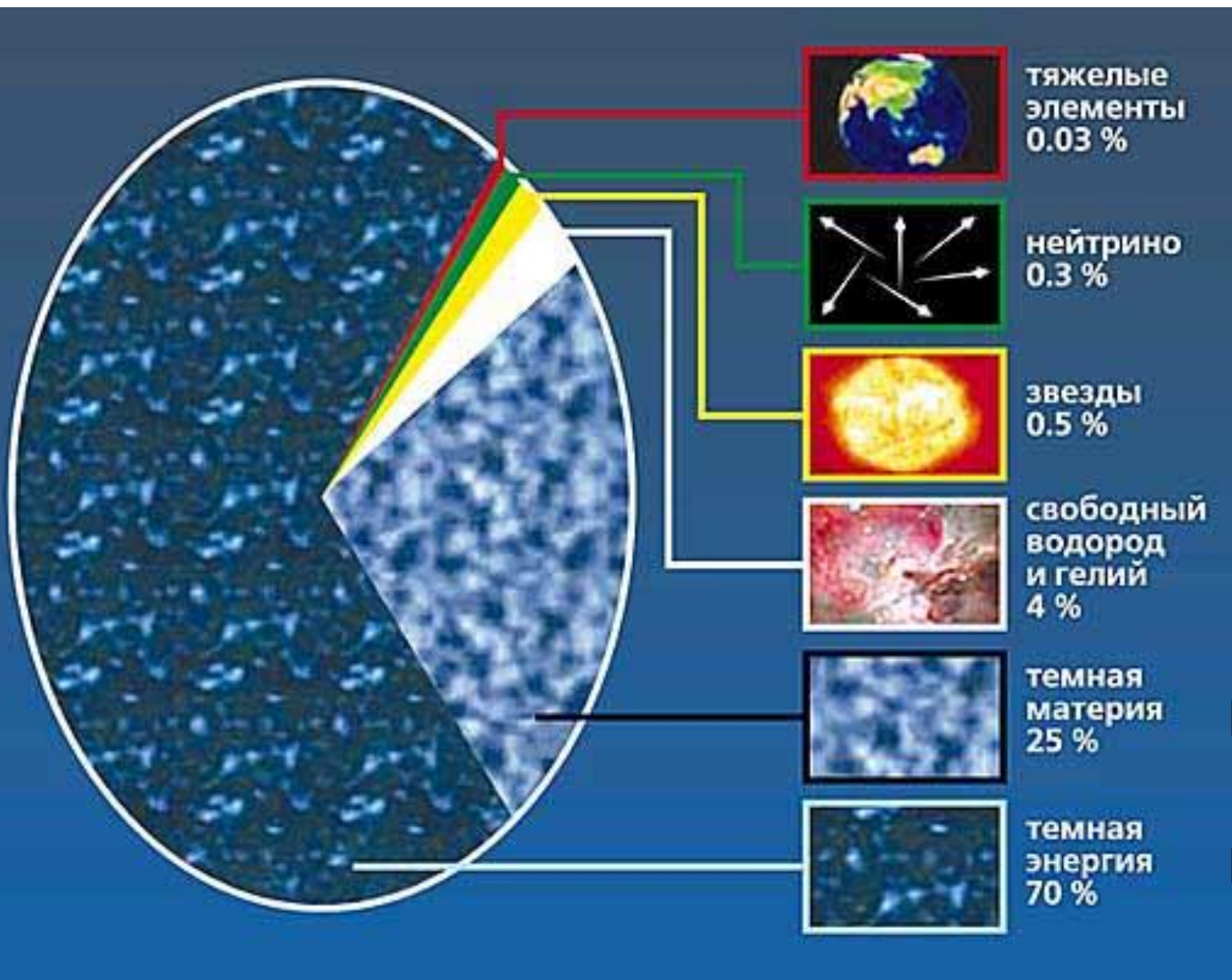
На больших расстояниях  
скопления еще не успели  
сформироваться.

# КРУПНОМАСШТАБНАЯ СТРУКТУРА

А. Кравцов и др.







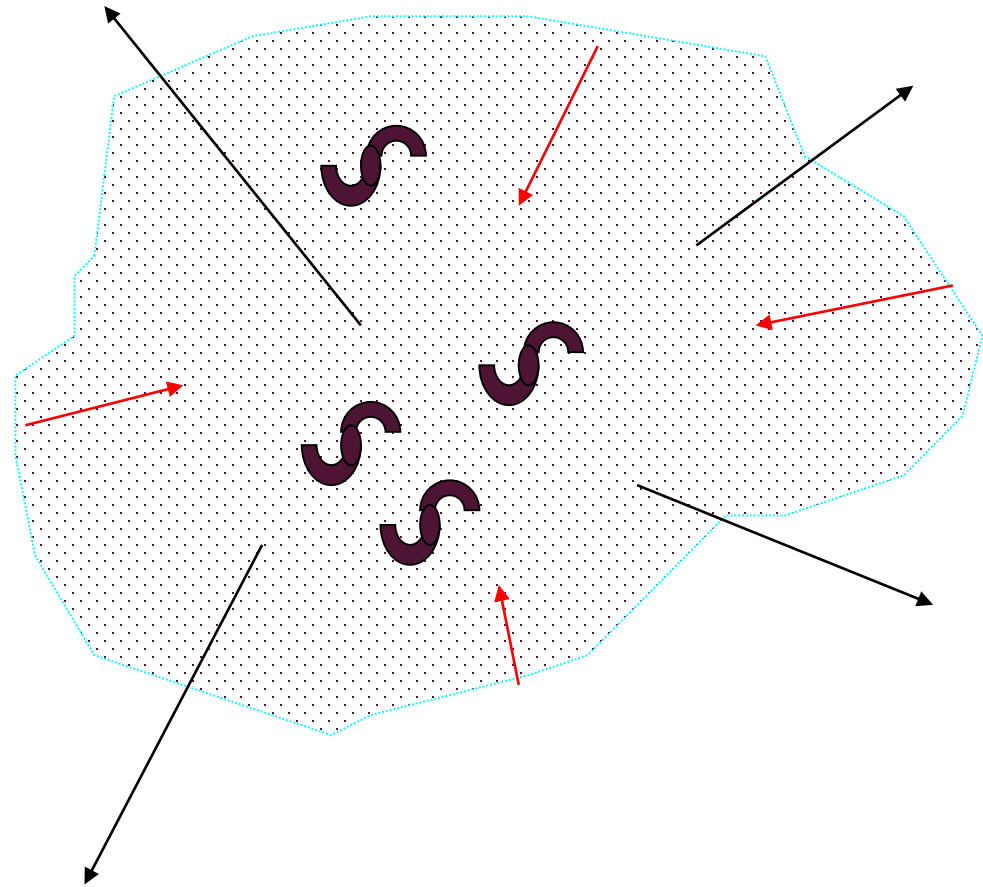
Большую часть материи, заполняющей вселенную, мы можем наблюдать лишь косвенными методами.

Неизвестные частицы

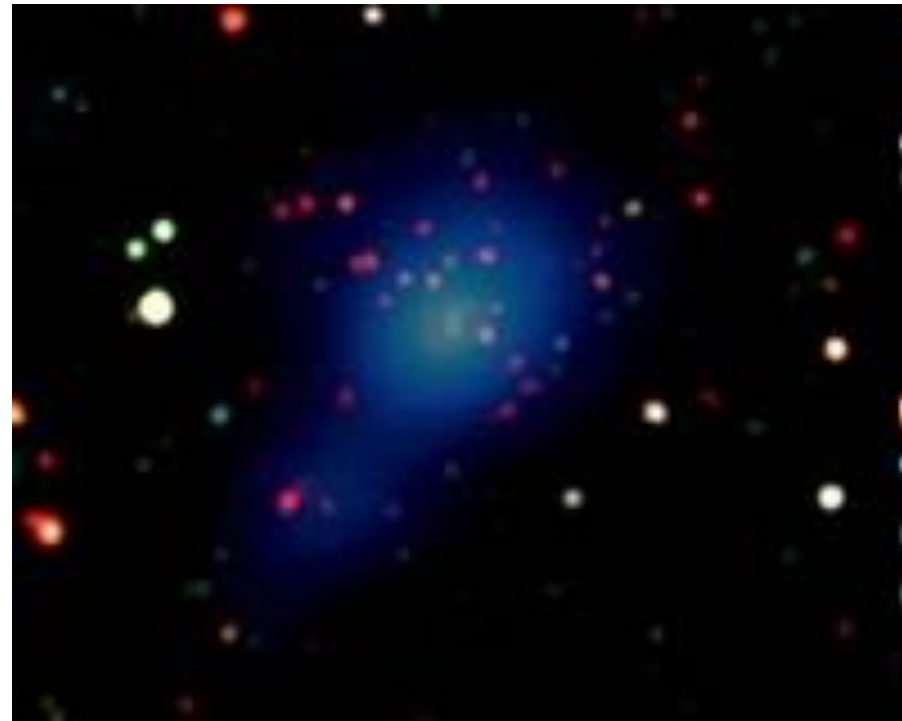
Неизвестные поля или вакуум

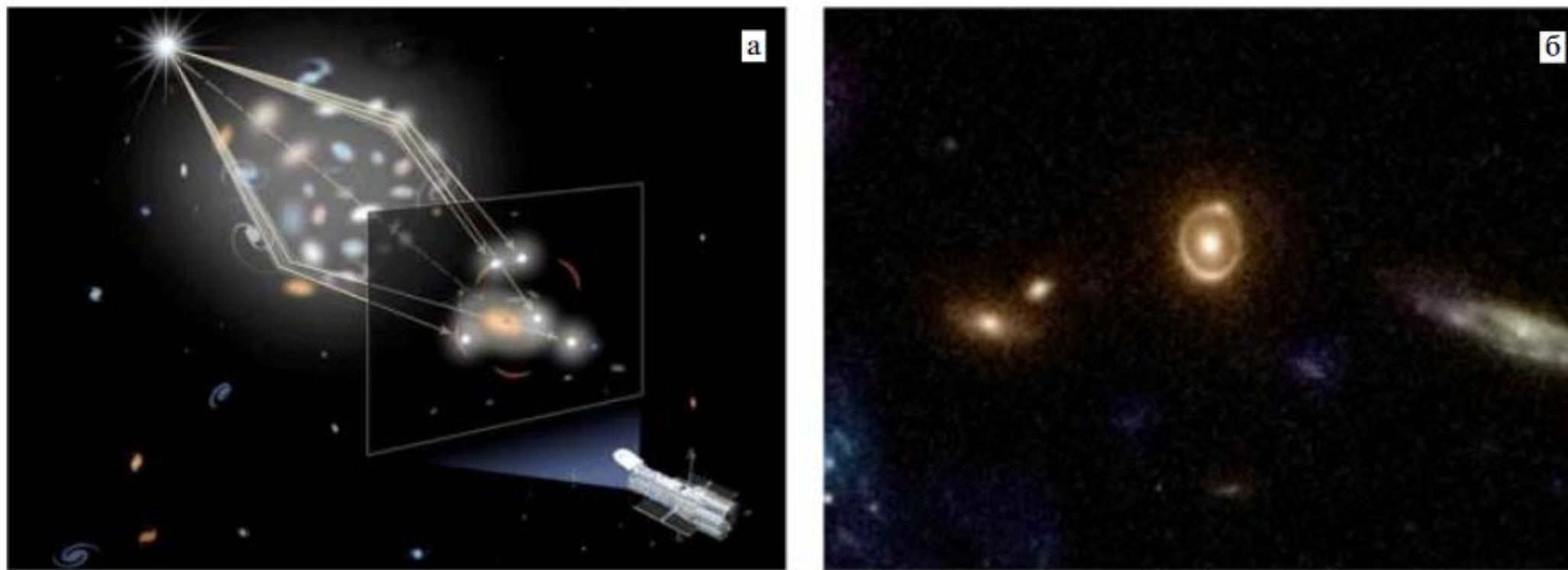
# МОТИВАЦИЯ ТЁМНОЙ МАТЕРИИ

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.

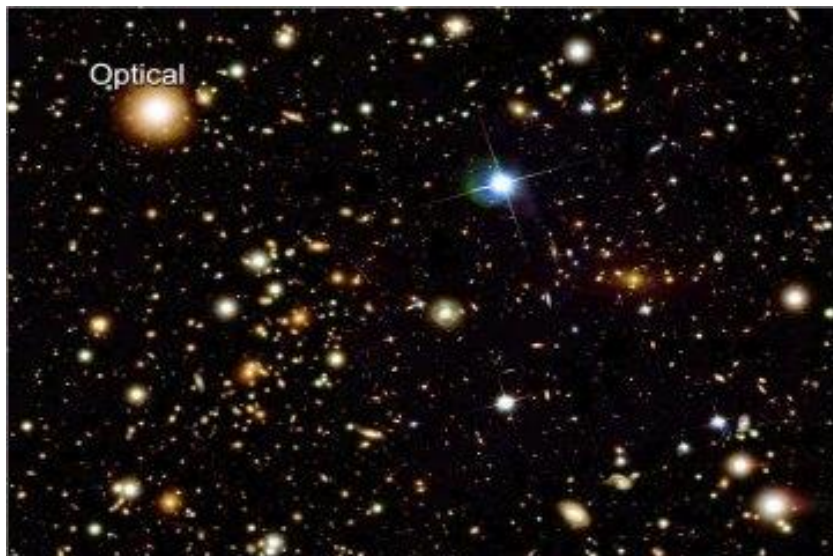




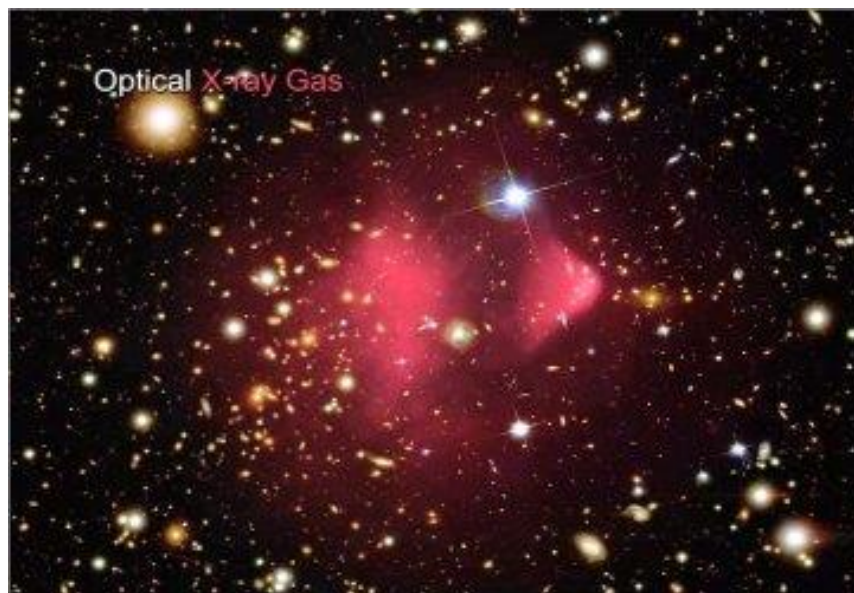
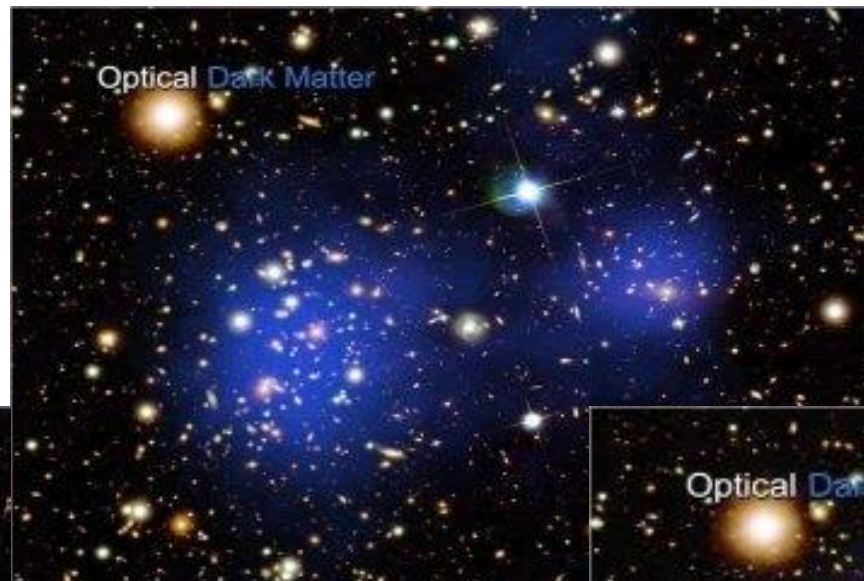
**Рис. 16.** (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038 + 4133 (телескоп Хаббла).

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





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

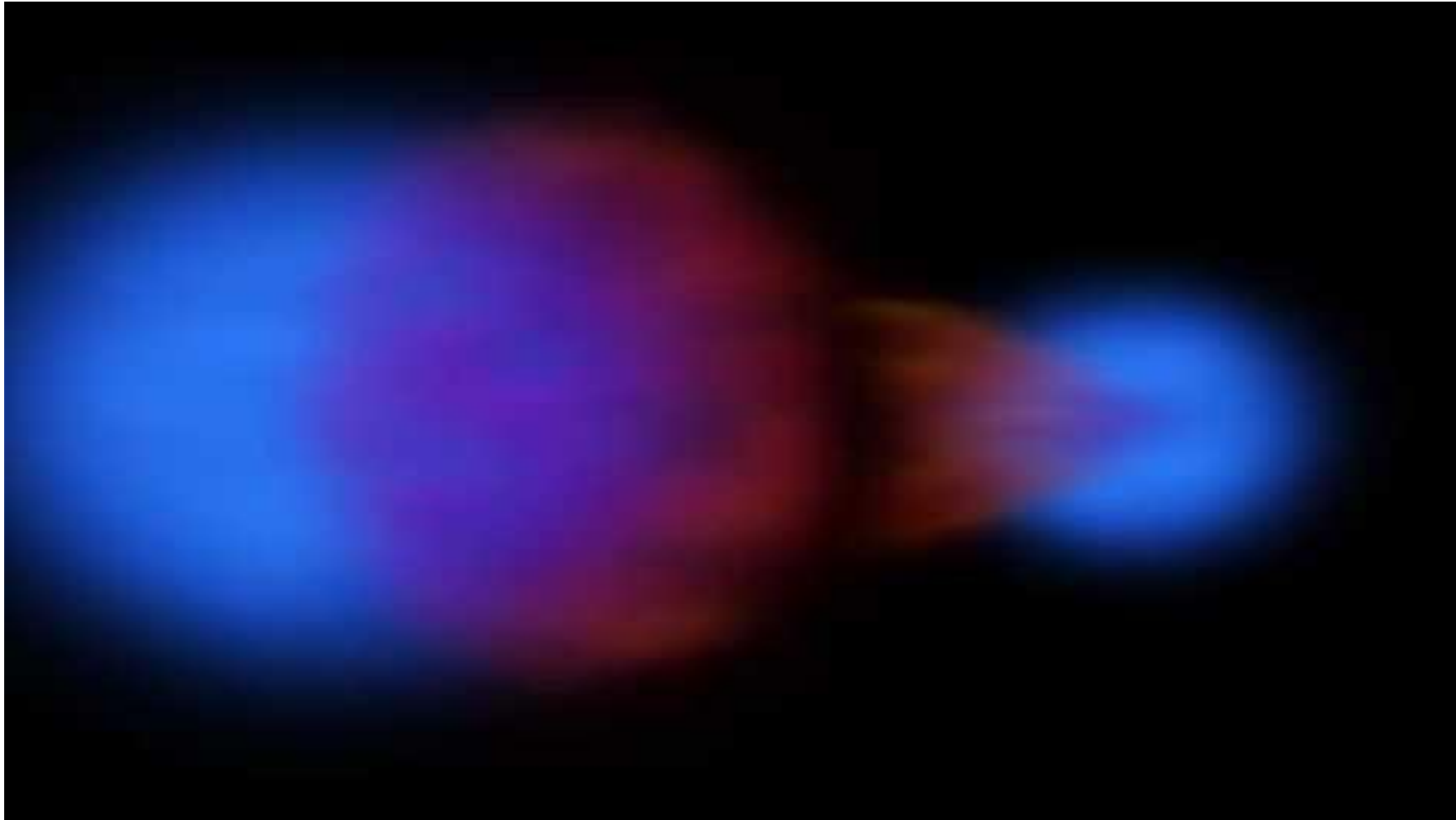




Благодаря эффекту  
гравитационного линзирования  
мы можем «видеть невидимое»  
и измерять его массу!

---

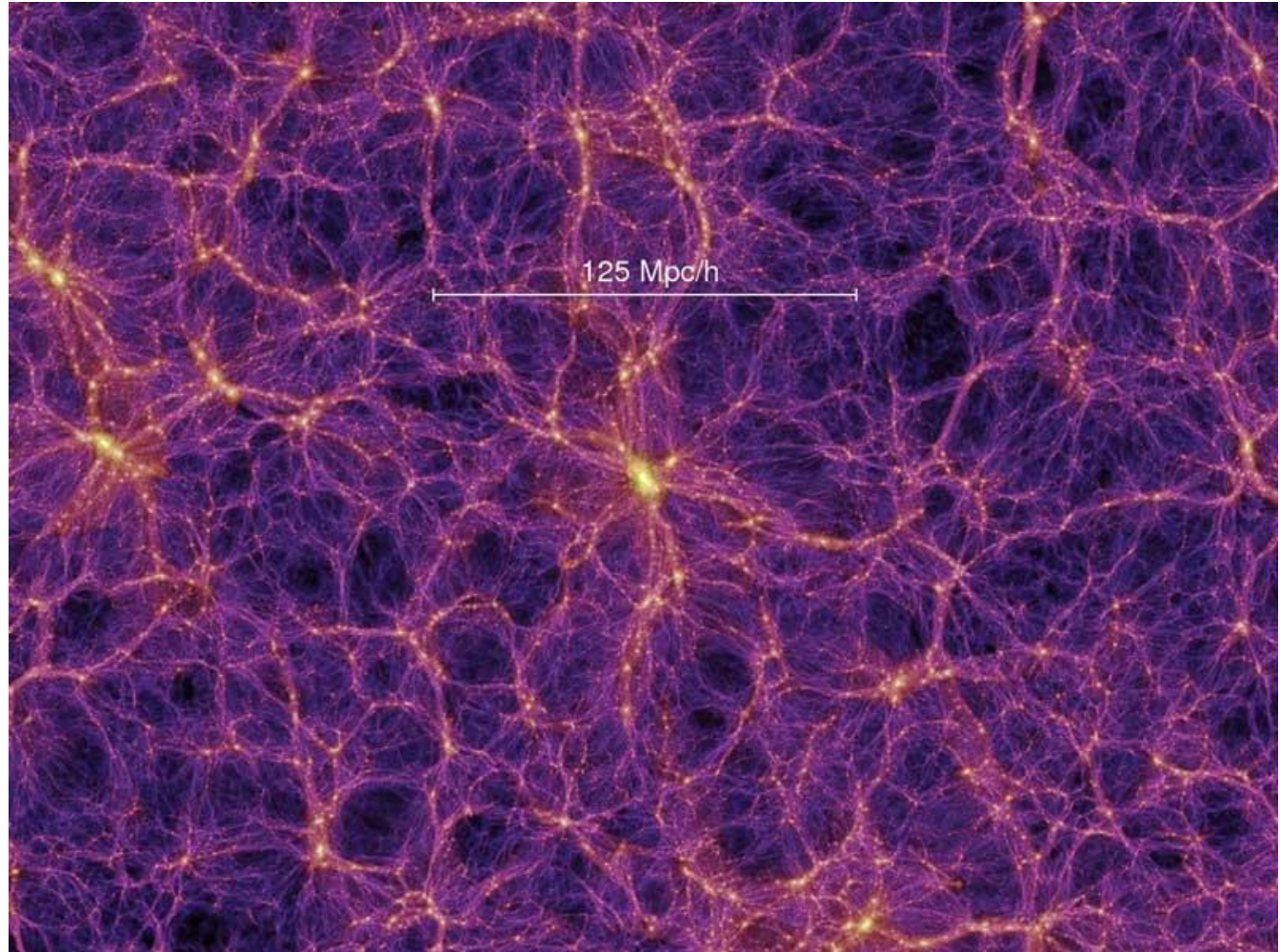
# СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК





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

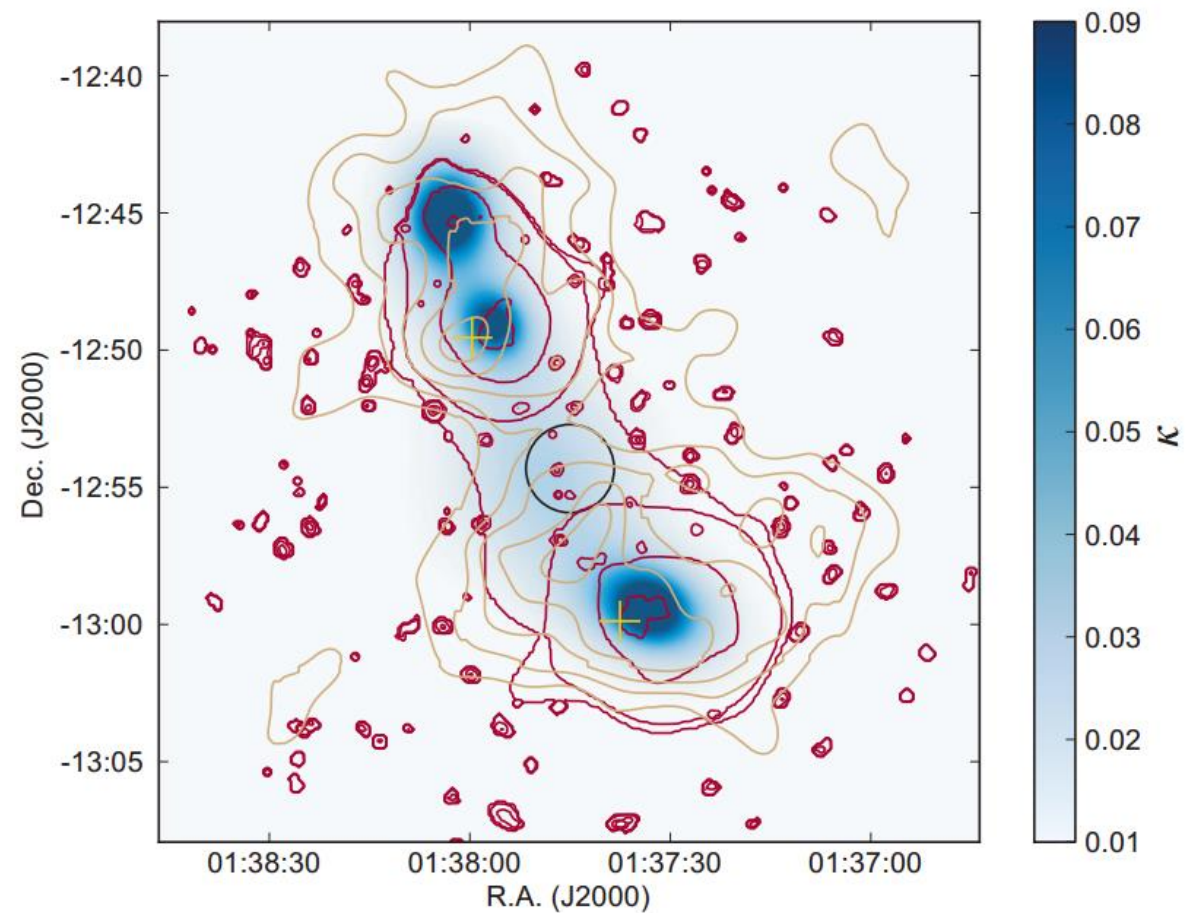
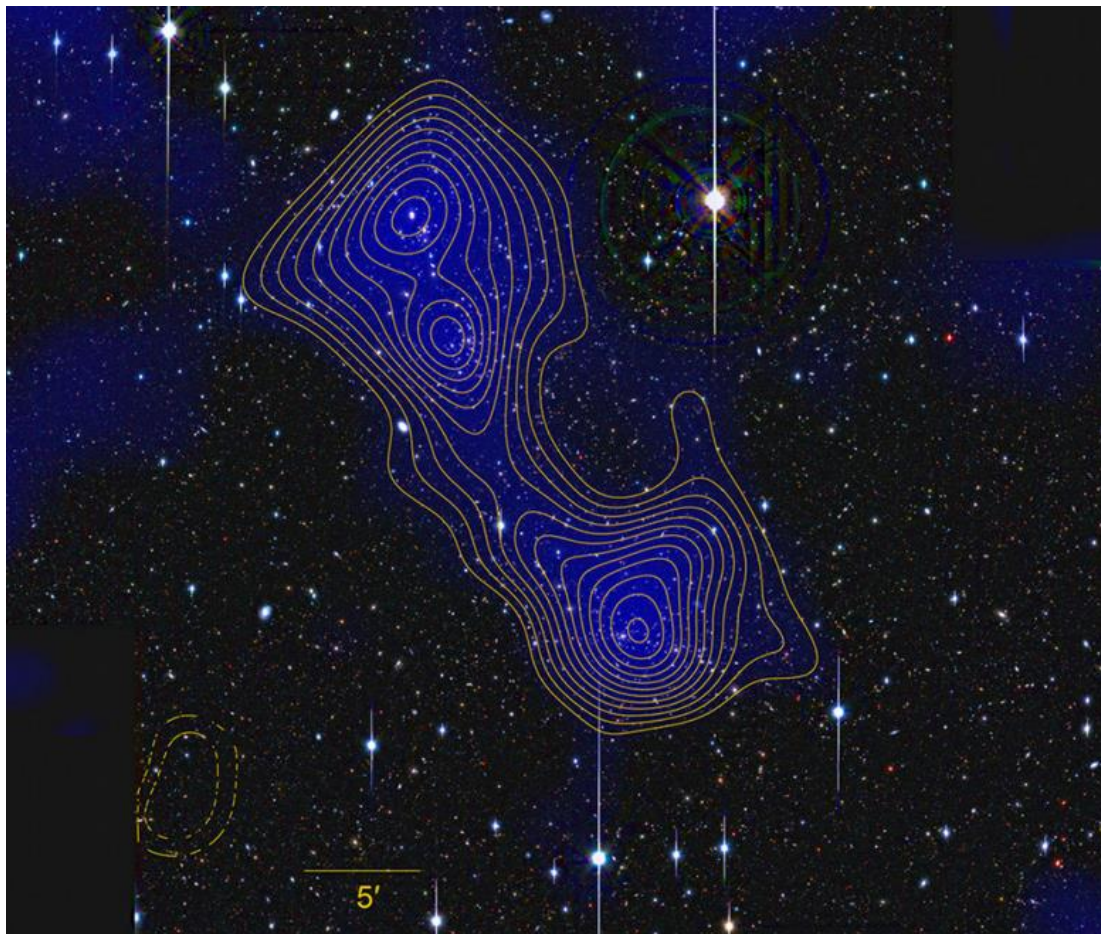
Как увидеть сам скелет вселенной?

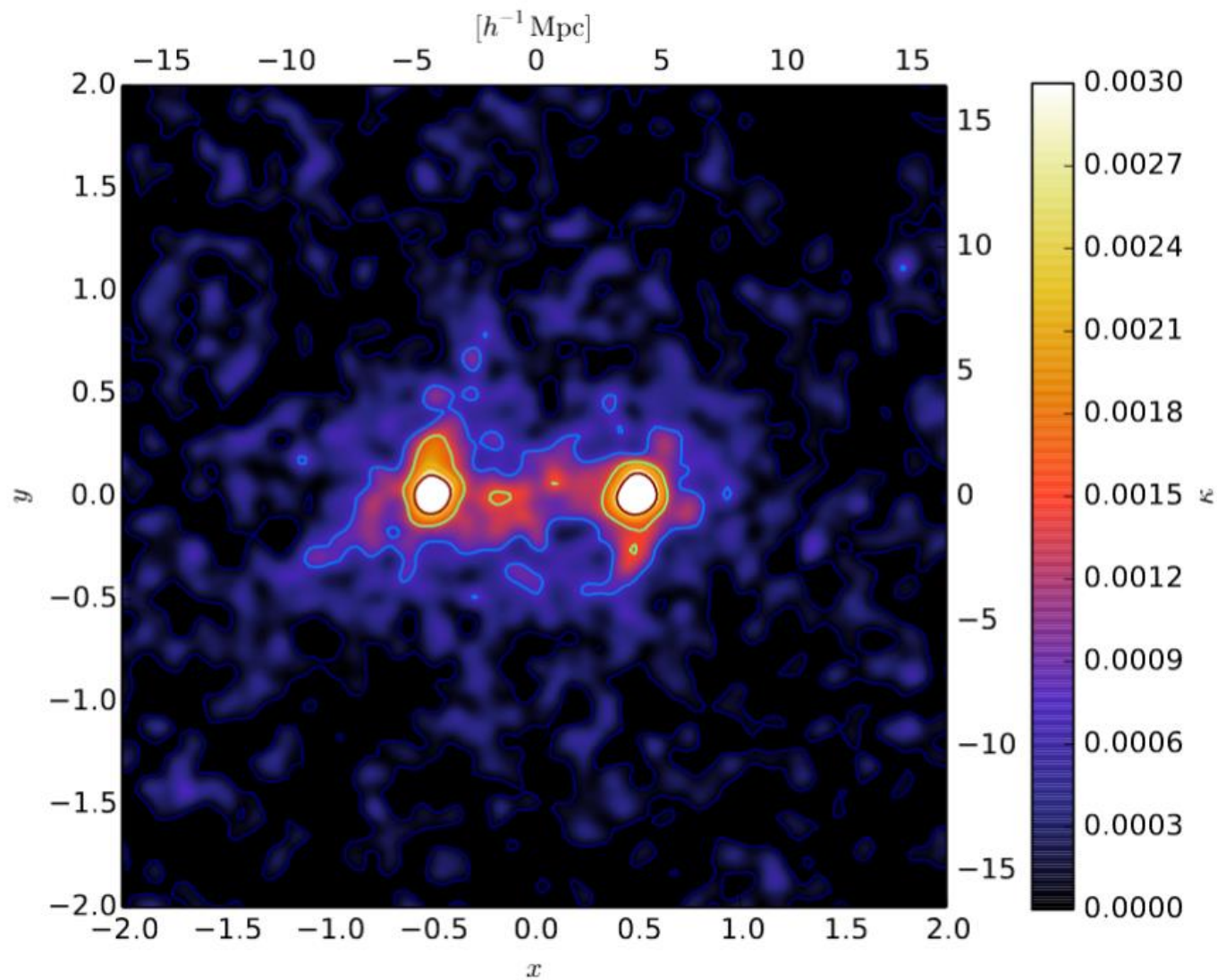




# ВОЛОКНА ТЁМНОГО ВЕЩЕСТВА

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  $2.5 h^{-1} \text{ Mpc}$



