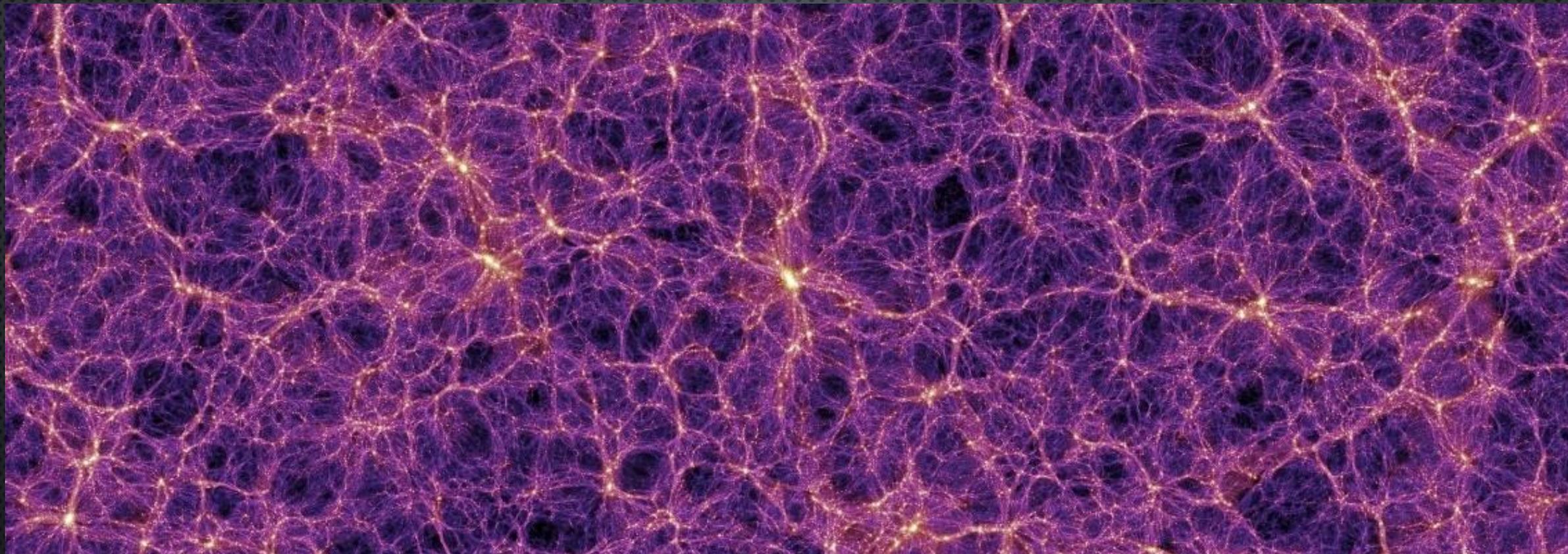


МИР ГАЛАКТИК И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО



СЕРГЕЙ ПОПОВ

НАША ГАЛАКТИКА

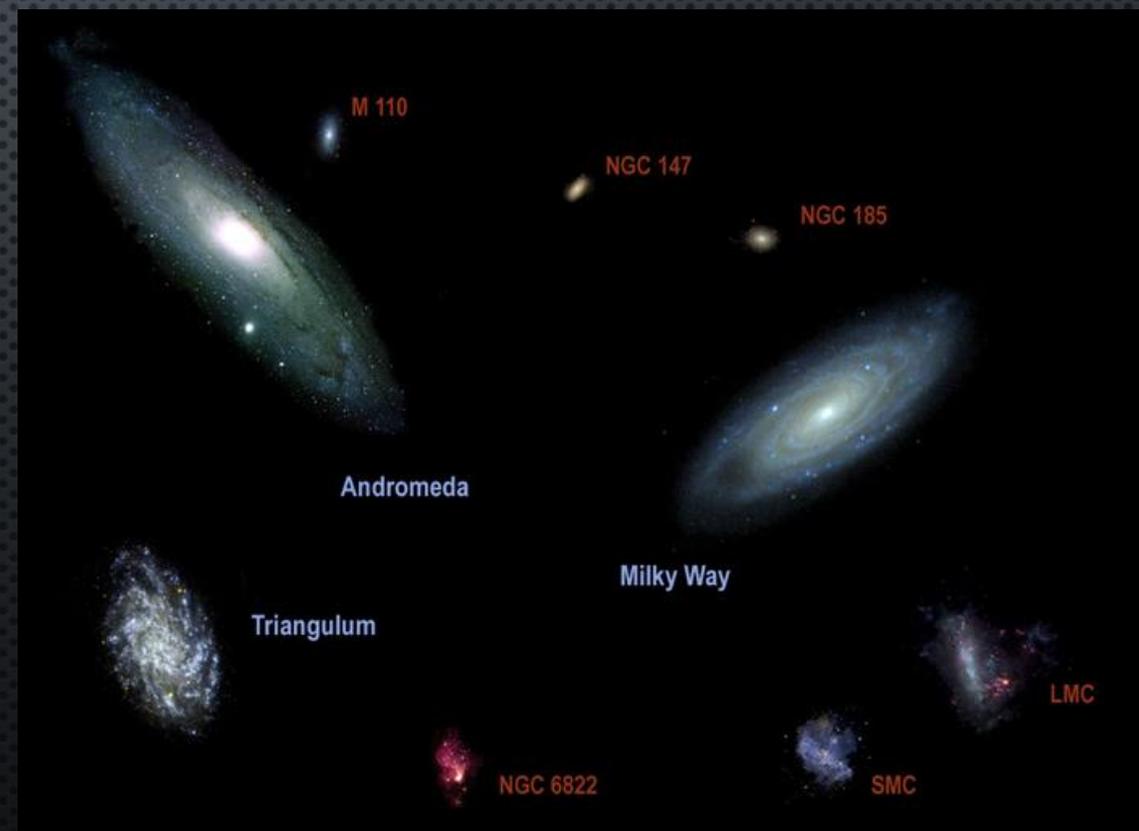
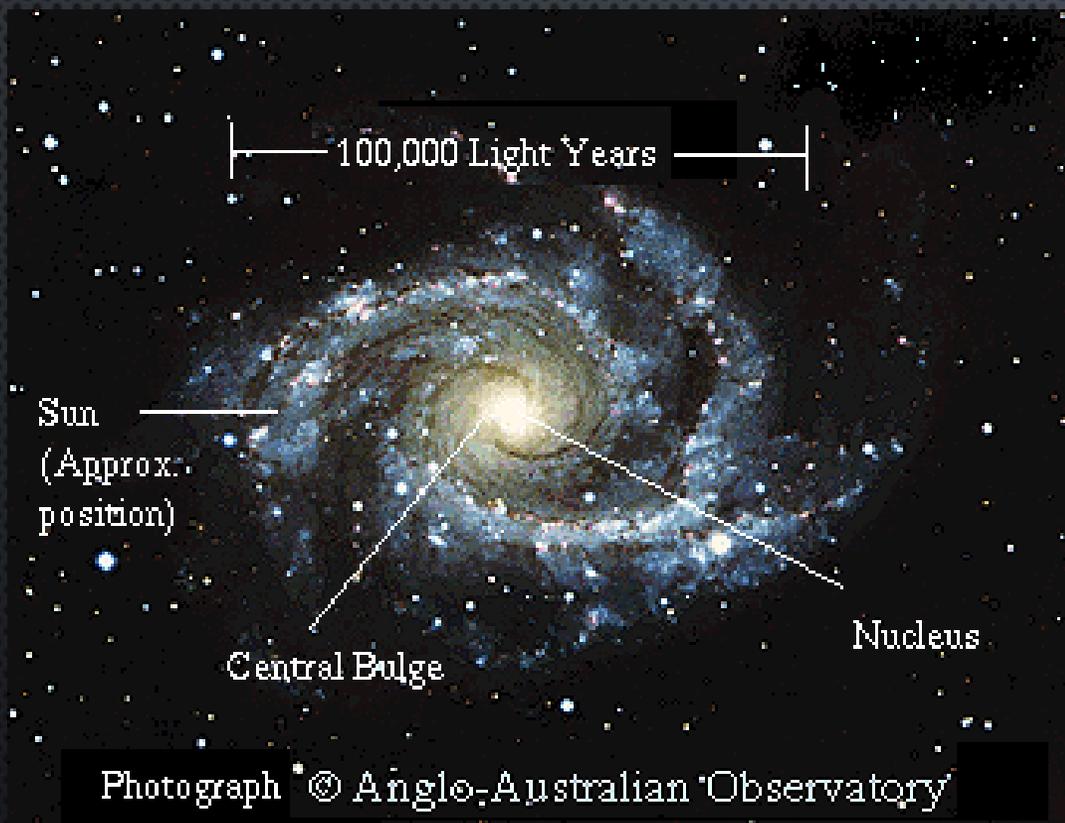
Наша Галактика – одна из многих подобных систем.

В видимой части вселенной около 100 миллиардов крупных галактик.

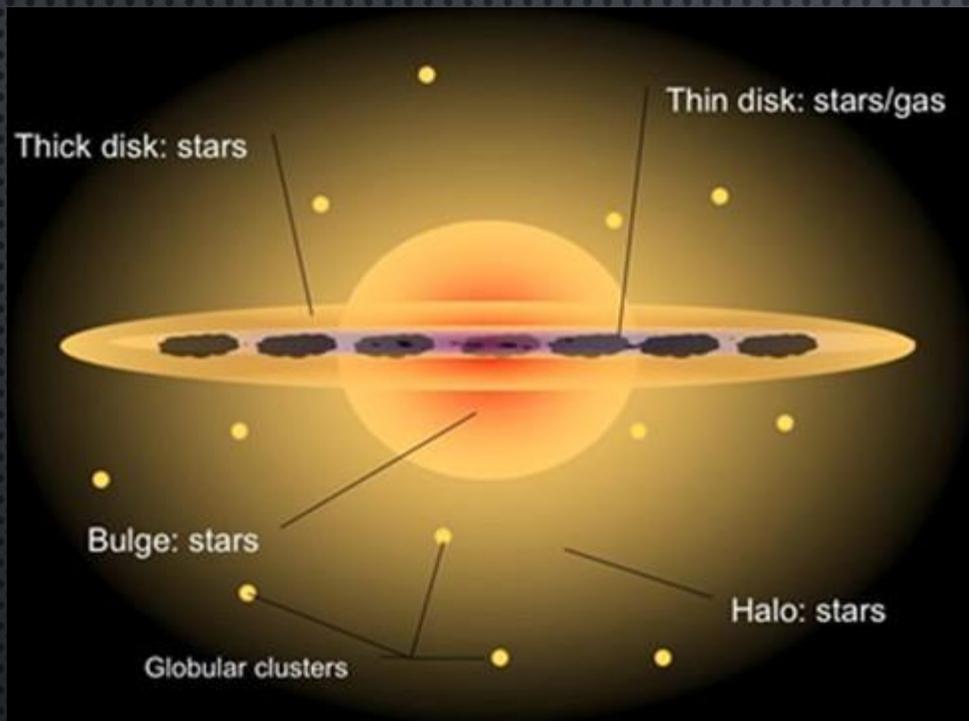
Они окружены небольшими спутниками.

Размер галактики около 100 000 световых лет.

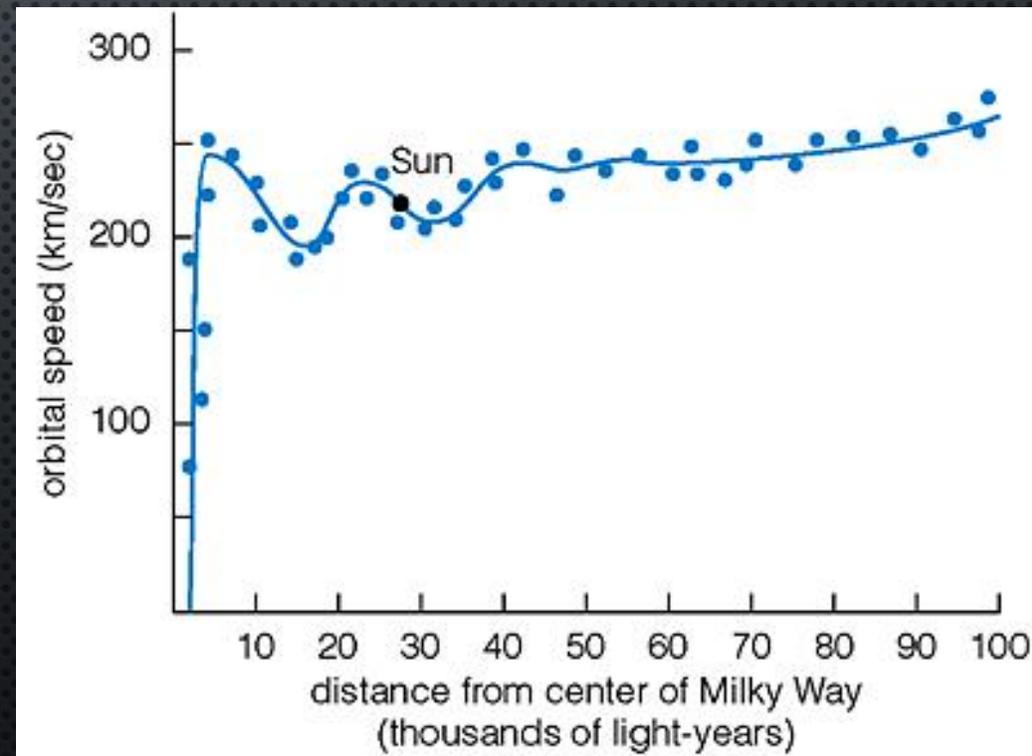
До ближайшей крупной галактики около 2.5 миллионов световых лет.



СКОРОСТИ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ



Круговые скорости звезд в Галактике довольно велики - >200 км/с. Это позволяет оценить скорость убегания. С учетом гало она оказывается ~ 500 км/с, и зависит от расстояния от центра.



Однако звезды диска двигаются друг относительно друга с небольшими скоростями: порядка 30 км/с.

ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГАЛАКТИКИ

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

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

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

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

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

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

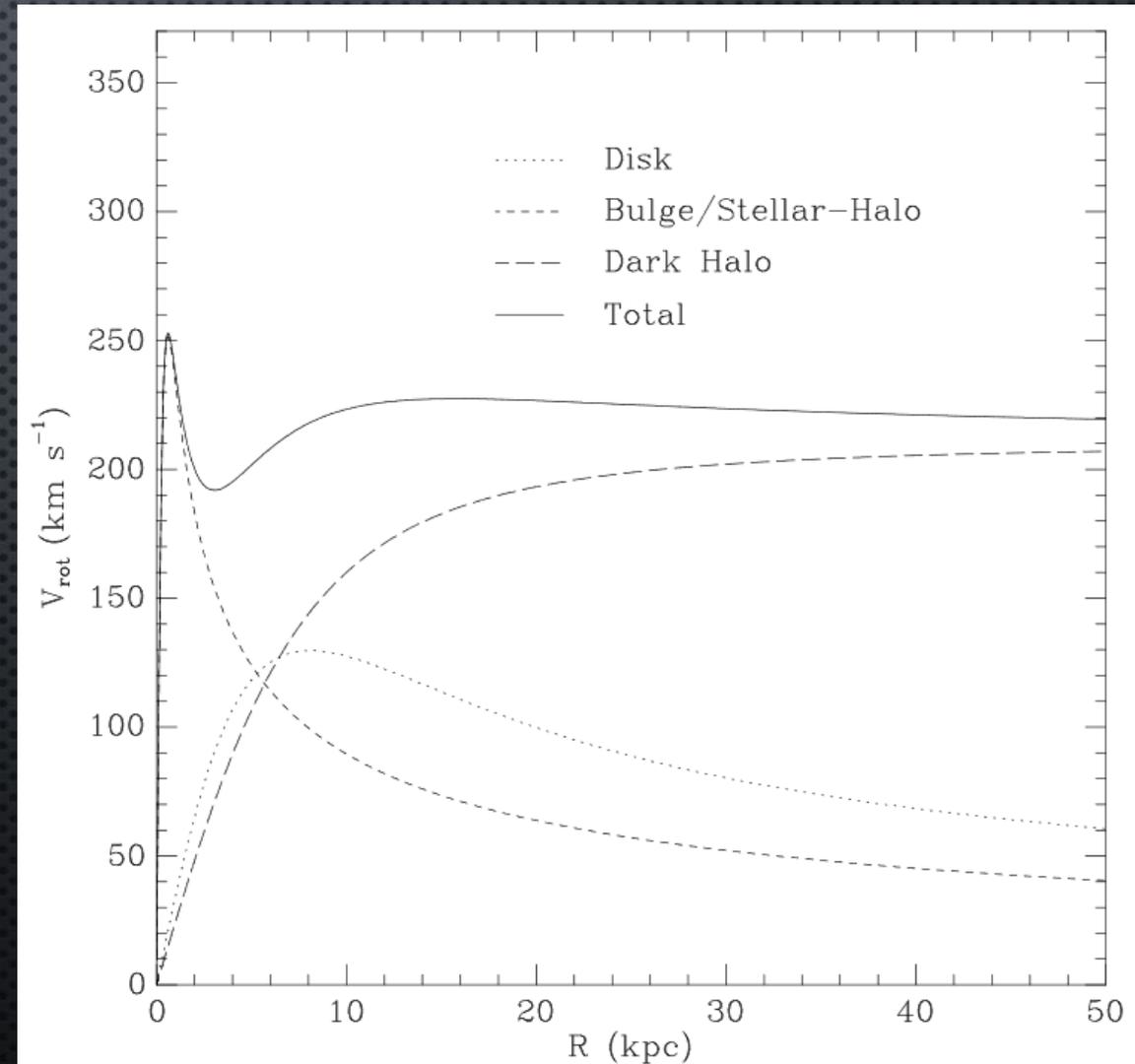
$$\Phi = \Phi_H + \Phi_C + \Phi_D$$

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

$$\Phi_C = -\frac{GM_{C1}}{\sqrt{r^2 + r_{C1}^2}} - \frac{GM_{C2}}{\sqrt{r^2 + r_{C2}^2}}$$

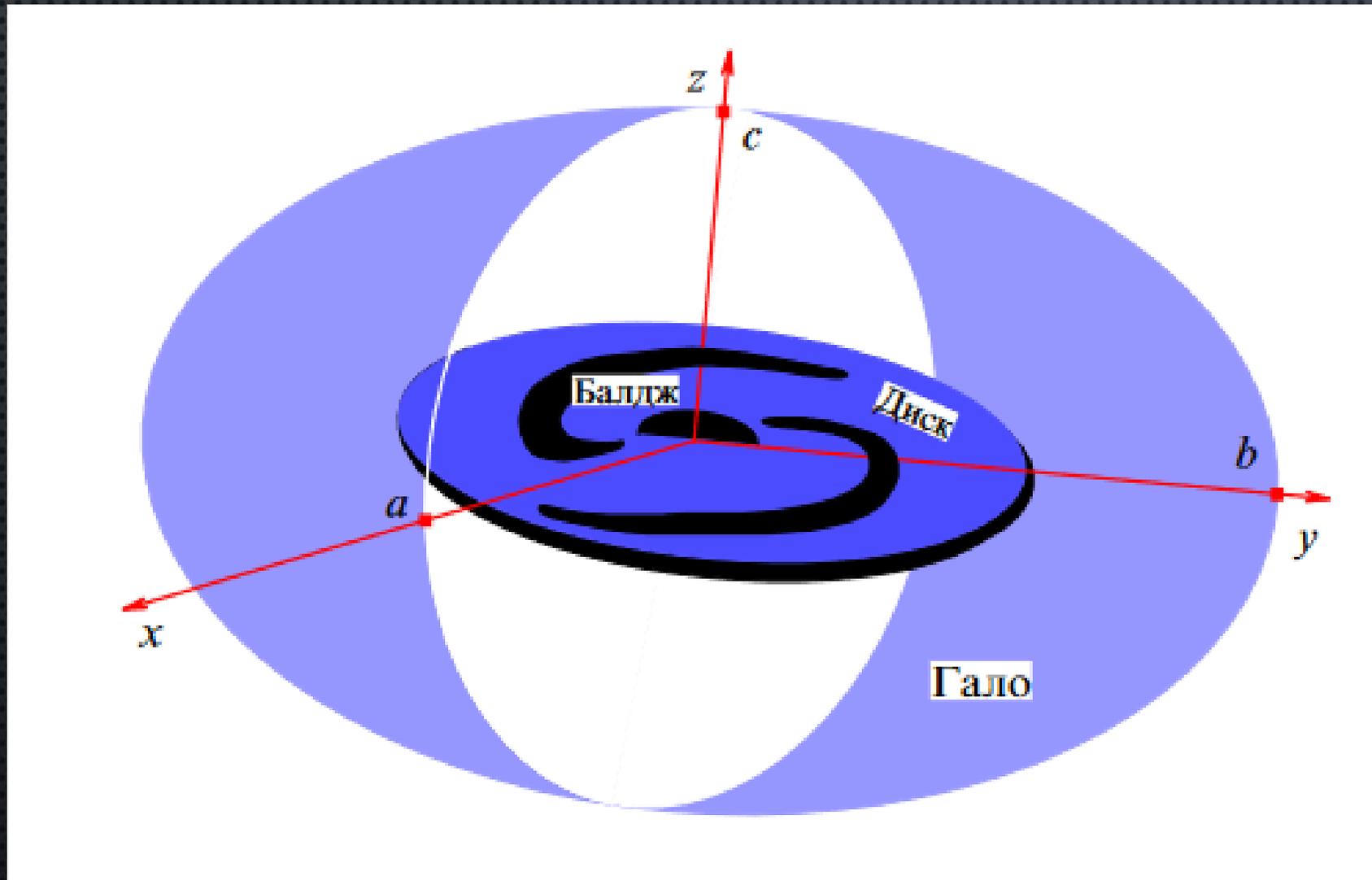
$$\Phi_D = \Phi_{D1} + \Phi_{D2} + \Phi_{D3}$$

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

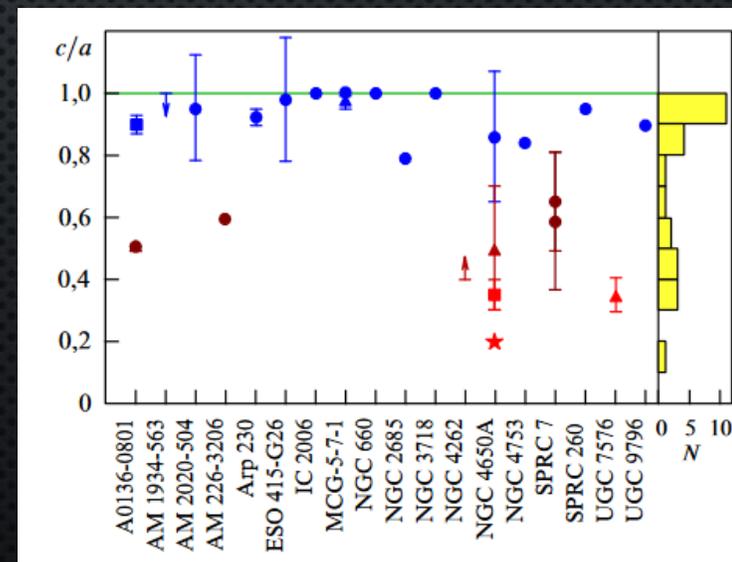


СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО. ТРЕХОСНОЕ ГАЛО

Засов и др. (УФН 2017)

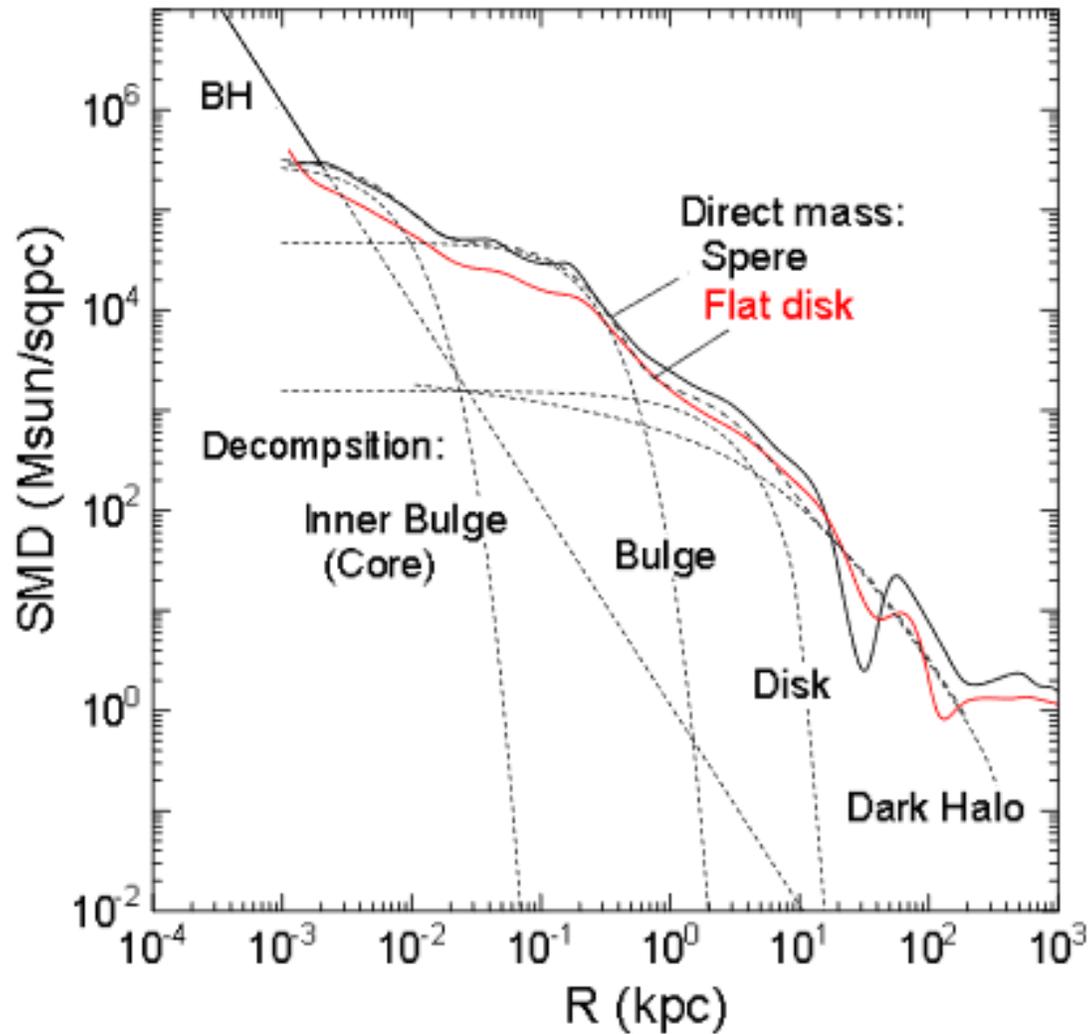


Темное вещество присутствует по всем частям галактики. Однако основная масса приходится на гало, т.к. темное вещество плохо «остывает». И, т.о., плохо формирует компактные структуры.



Форма гало зависит от процесса формирования галактики.

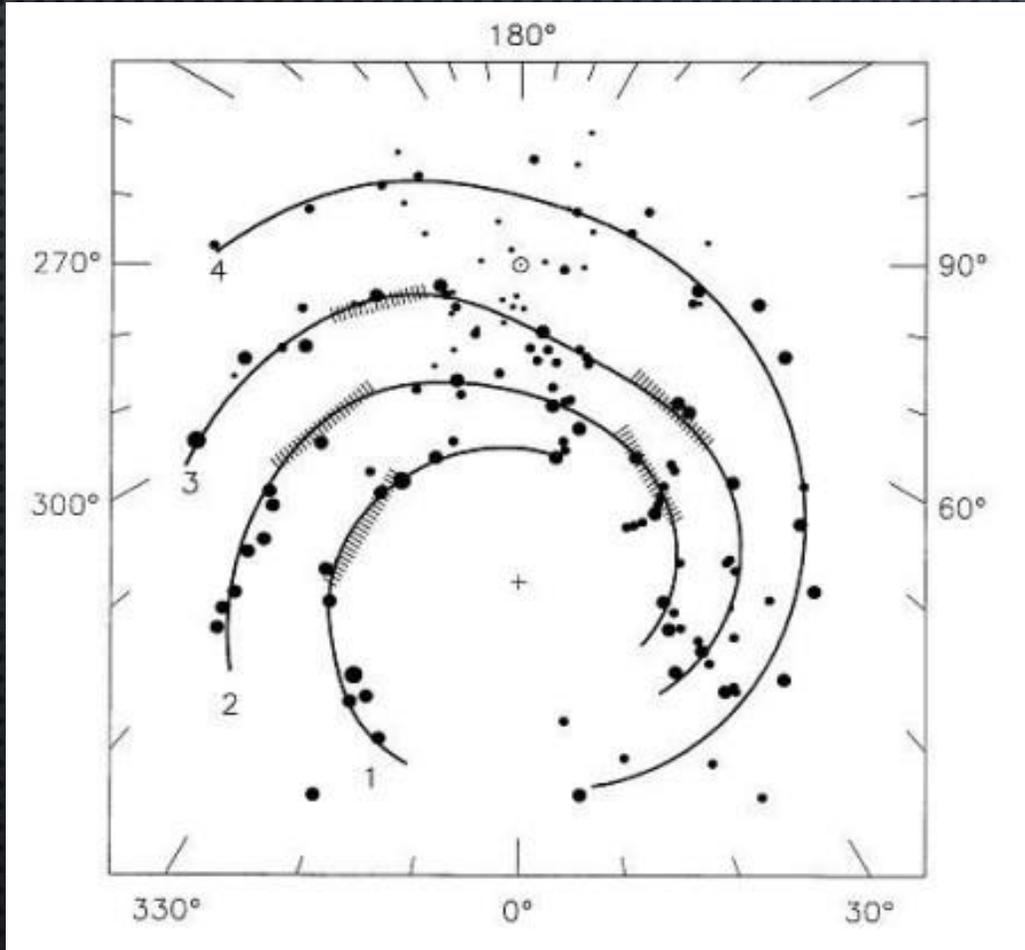
РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТНОЙ ПЛОТНОСТИ



Directly calculated SMD of the Milky Way by spherical (black thick line) and flat-disk assumptions by log-log plot, compared with the result by deconvolution method (dashed lines).

The straight line represents the black hole with mass $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$.

ОБЛАКА ВОДОРОДА И СПИРАЛИ

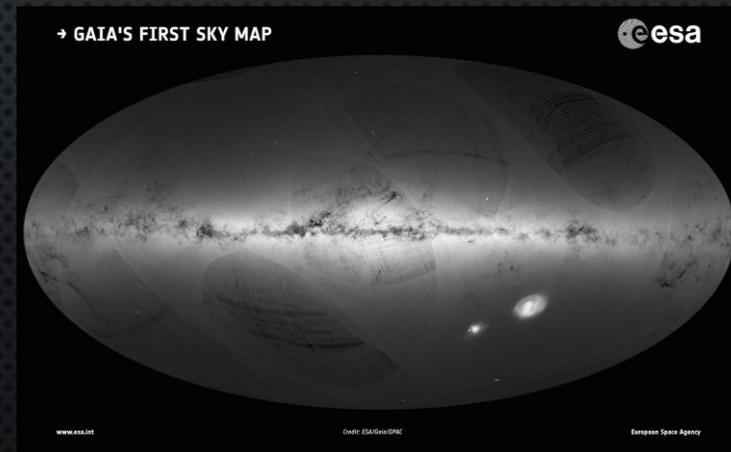


Расстояние Солнца от центра Галактики 8.2-8.5 кпк.
Скорость вращения на солнечном радиусе 230-250 км/с.

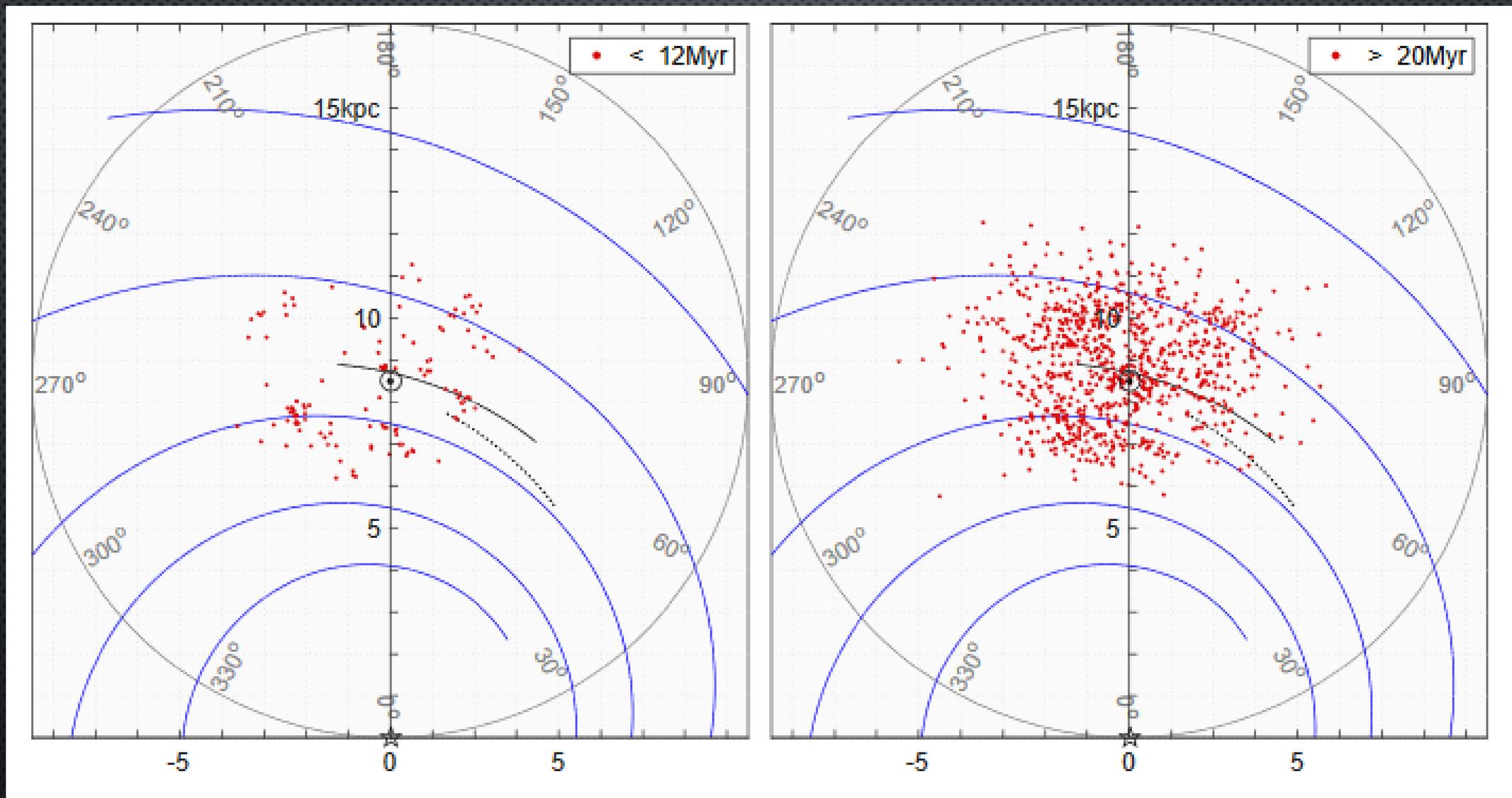
Из-за того, что мы находимся в диске,
структуру Галактики трудно изучать.

На данный момент у нас нет точных
данных о спиральных ветвях.

Данные спутника GAIA должны дать
ответ о структуре Галактики.



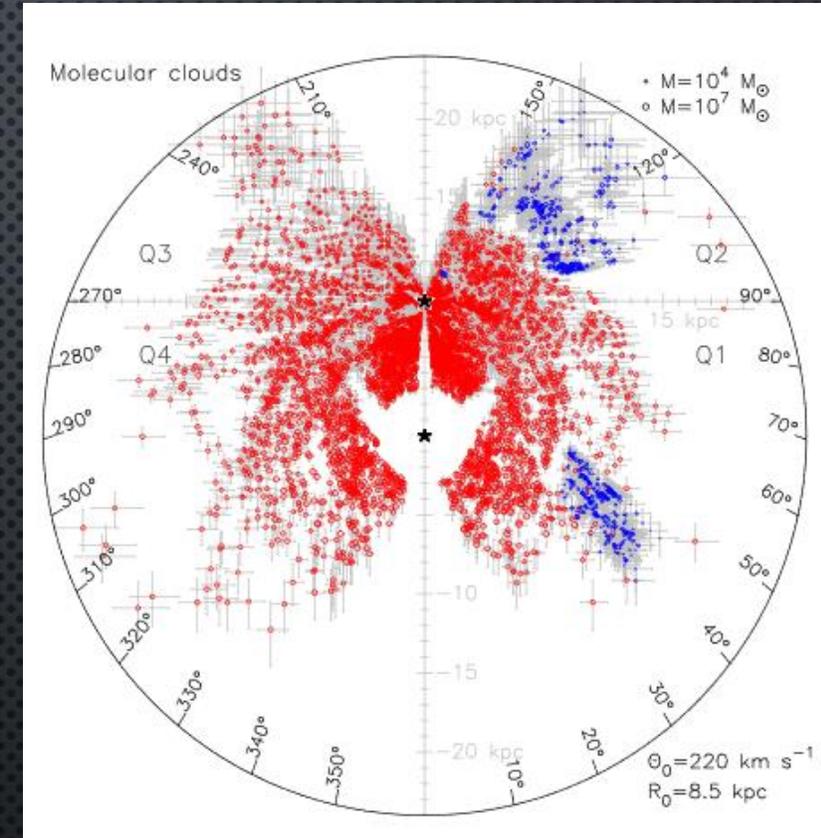
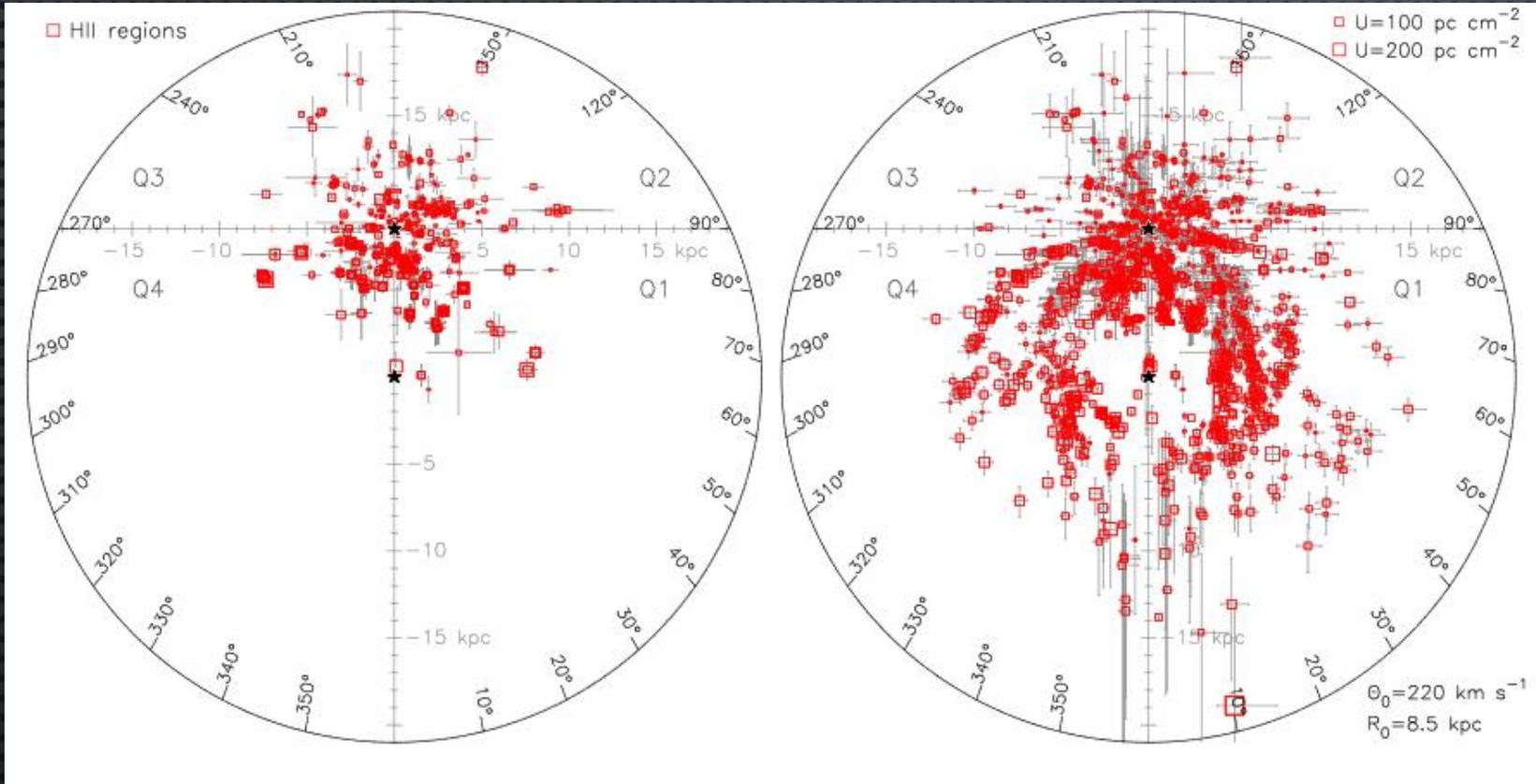
МОЛОДЫЕ РАССЕЯННЫЕ СКОПЛЕНИЯ И СПИРАЛИ



1810.08819

Сверху вниз: Внешний рукав, рукав в Персее, Местный рукав, рукав Стрелец-Киль, рукав Щит-Центавр, рукав Корма.

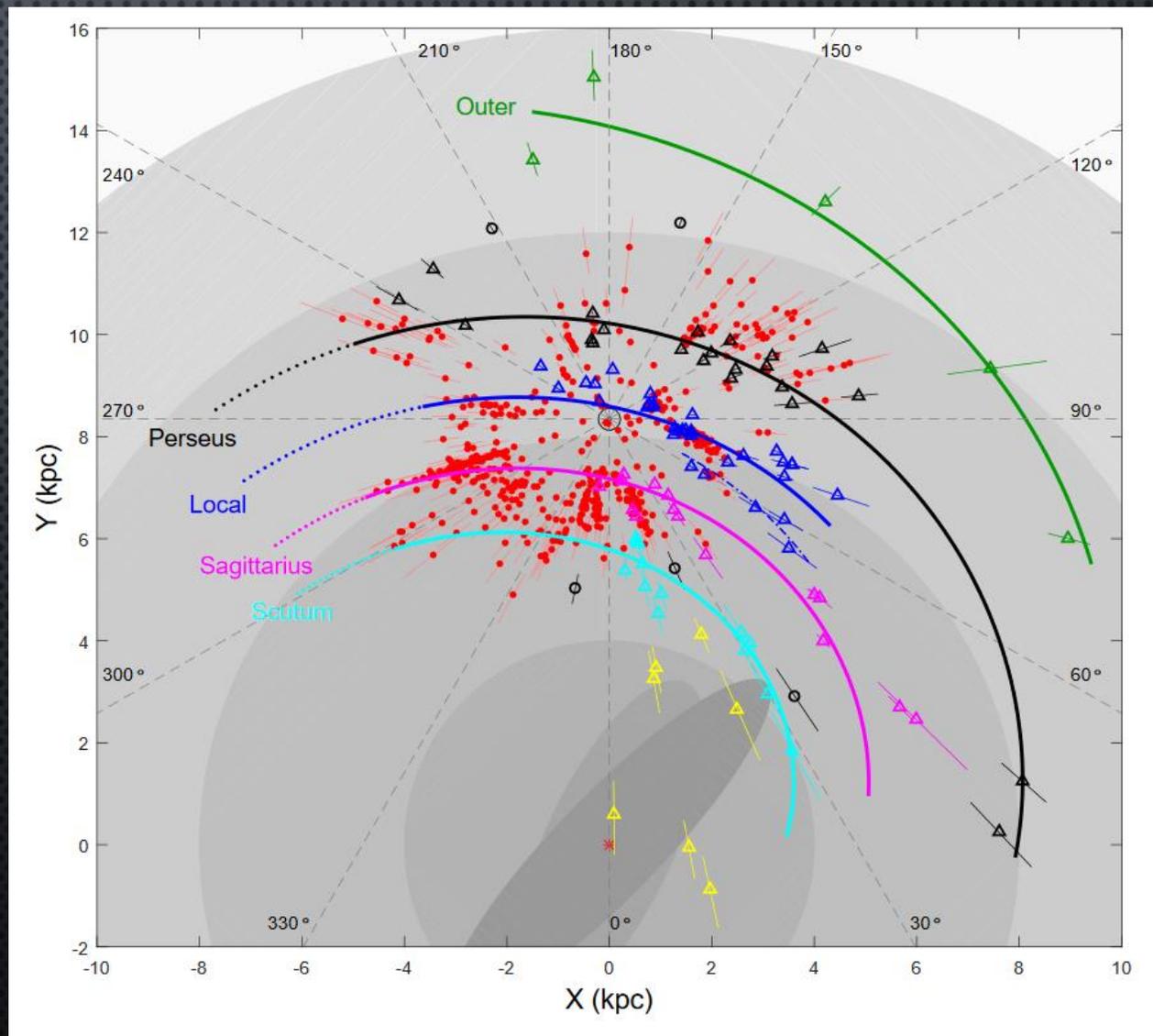
ОБЛАКА ВОДОРОДА И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА



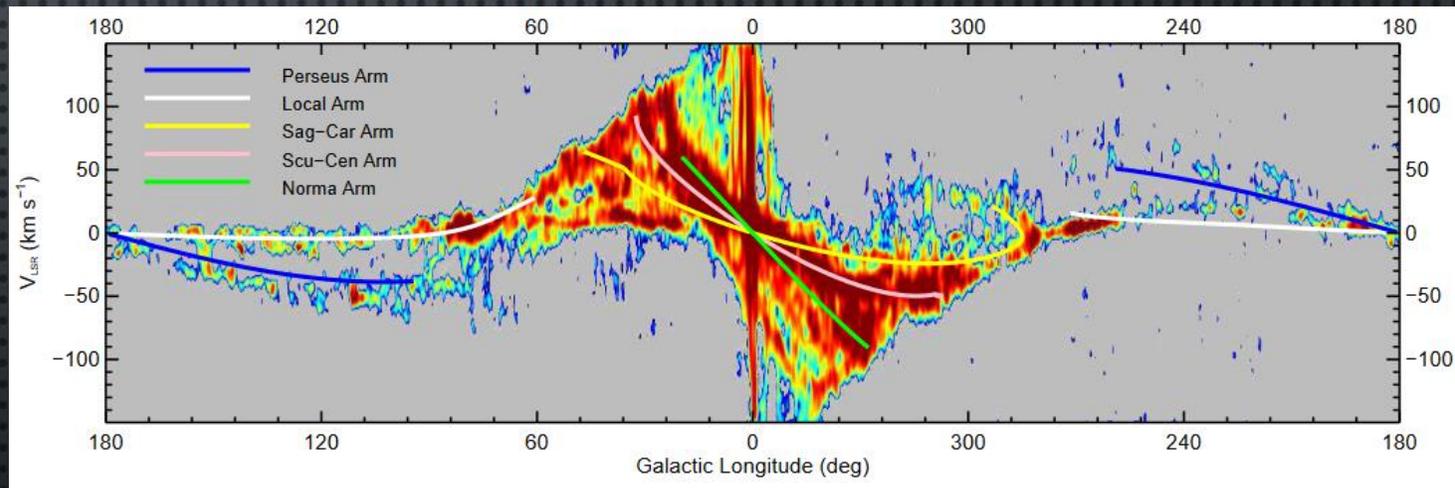
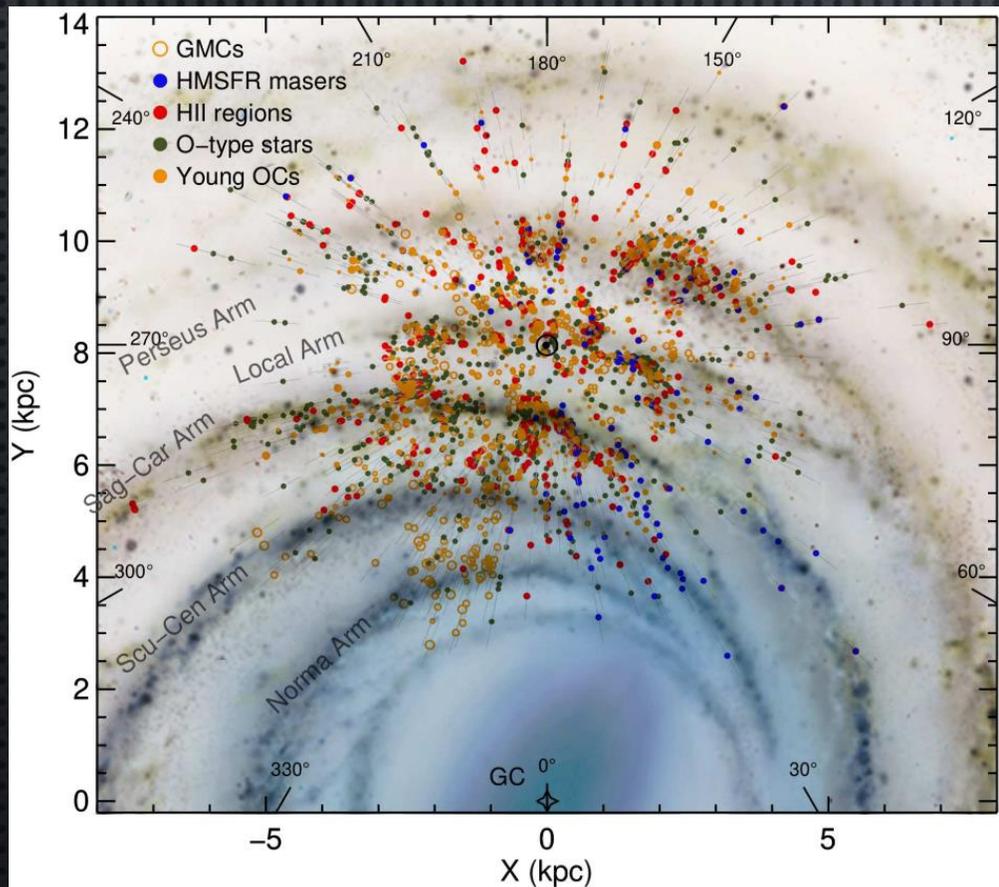
СТРУКТУРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ



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

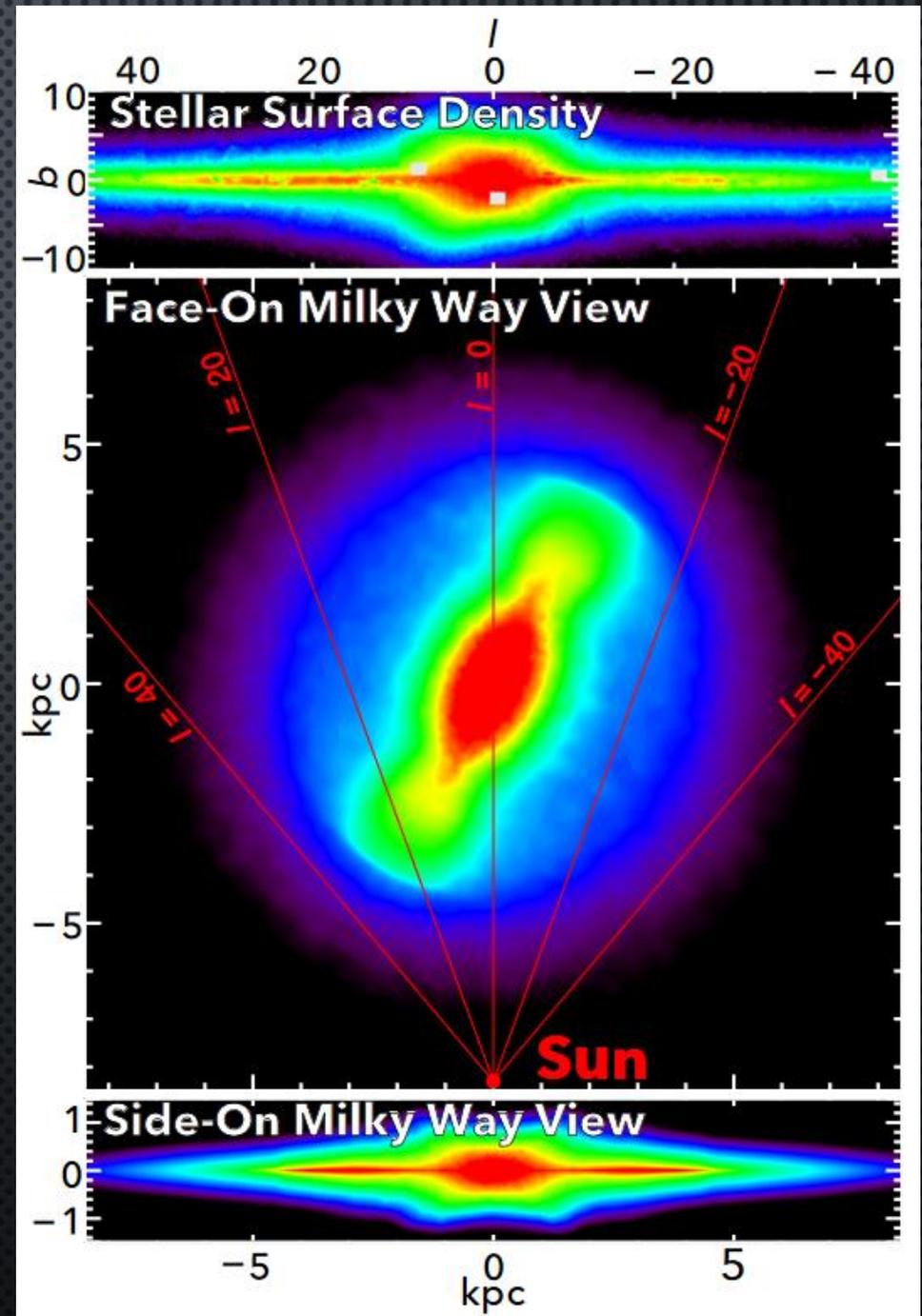


СВОЙСТВА БЛИЗКИХ РУКАВОВ

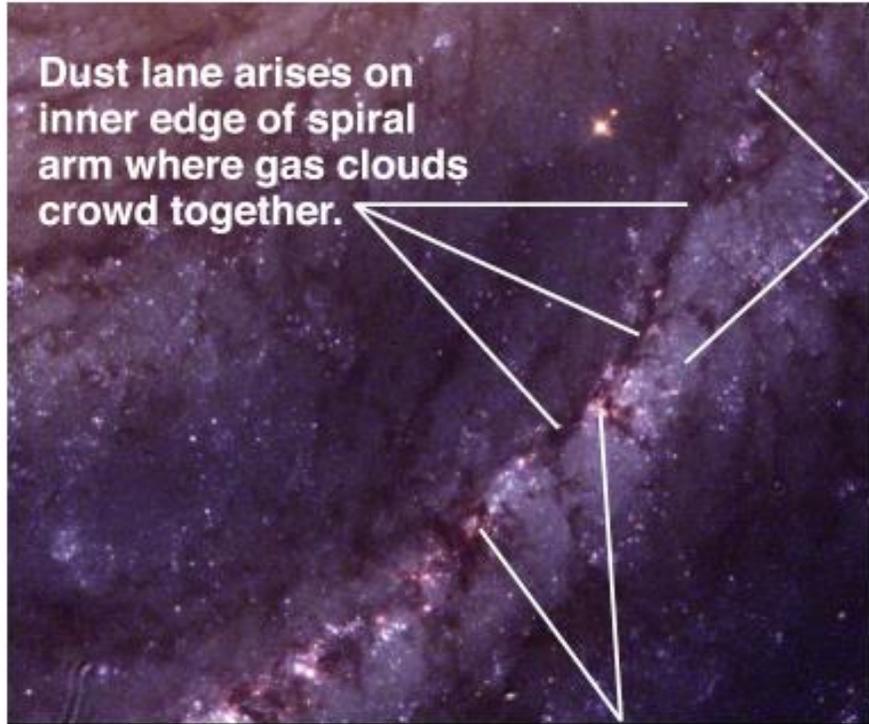


Arm	β Range (deg)	β_{kink} (deg)	R_{kink} (kpc)	$\psi_{<}$ (deg)	$\psi_{>}$ (deg)	Width (kpc)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Perseus	-28 → 28	32.7	9.57	3.9	19.9	0.26
Local	-22 → 39	-2.0	8.46	4.4	12.6	0.23
Sagittarius-Carina 1	-57 → 17.5	-22.8	7.92	11.9	22.2	0.33
Sagittarius-Carina 2	17.5 → 48	17.5	5.95	21.3	0.2	0.25
Scutum-Centaurus	-50 → 41	-26.3	6.47	-0.5	16.5	0.25
Norma	-38 → 18	18.0	4.5	1.3	19.0	0.07

ГАЛАКТИЧЕСКИЙ БАР



РУКАВА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

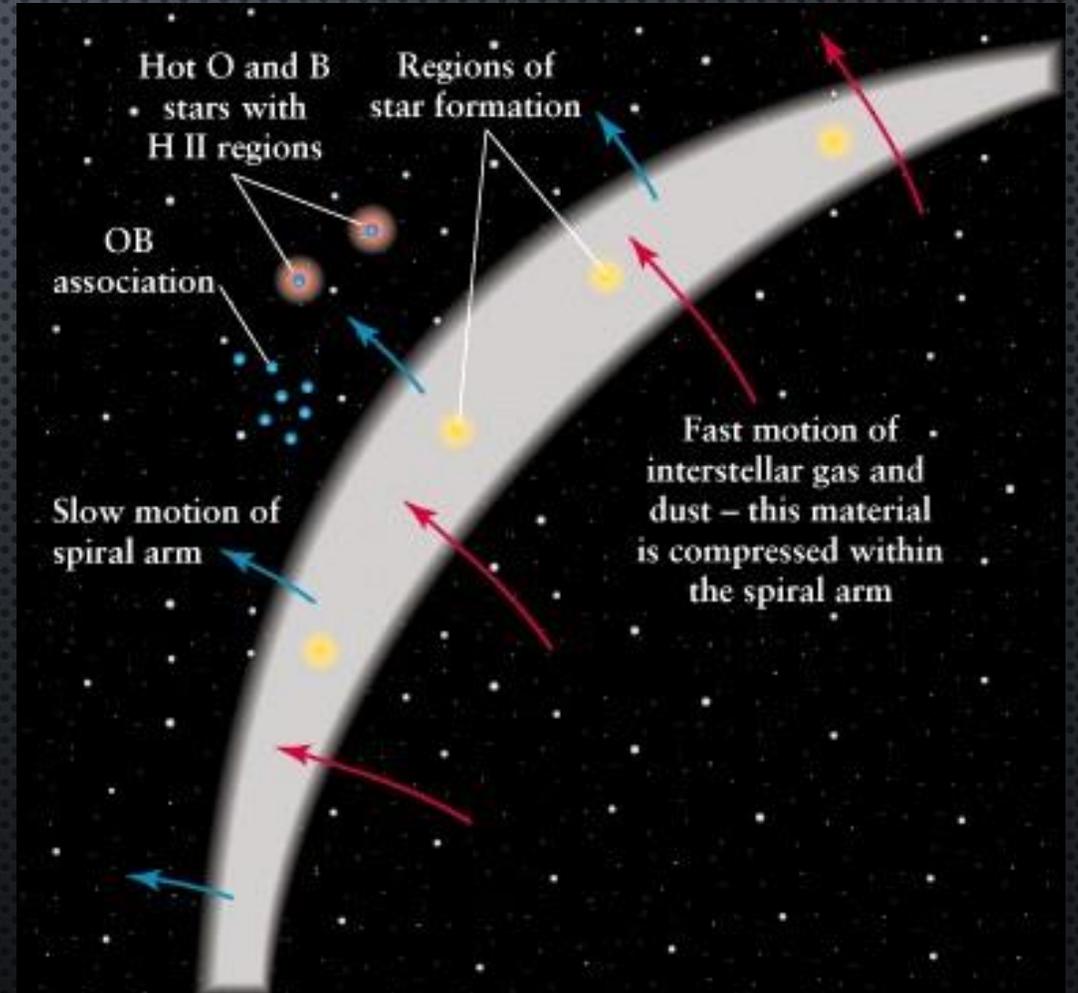


Dust lane arises on inner edge of spiral arm where gas clouds crowd together.

Young blue stars are found on outer edge of spiral arm.

Ionization nebulae arise where newly forming blue stars are ionizing gas clouds.

Copyright © Addison Wesley



Hot O and B stars with H II regions

Regions of star formation

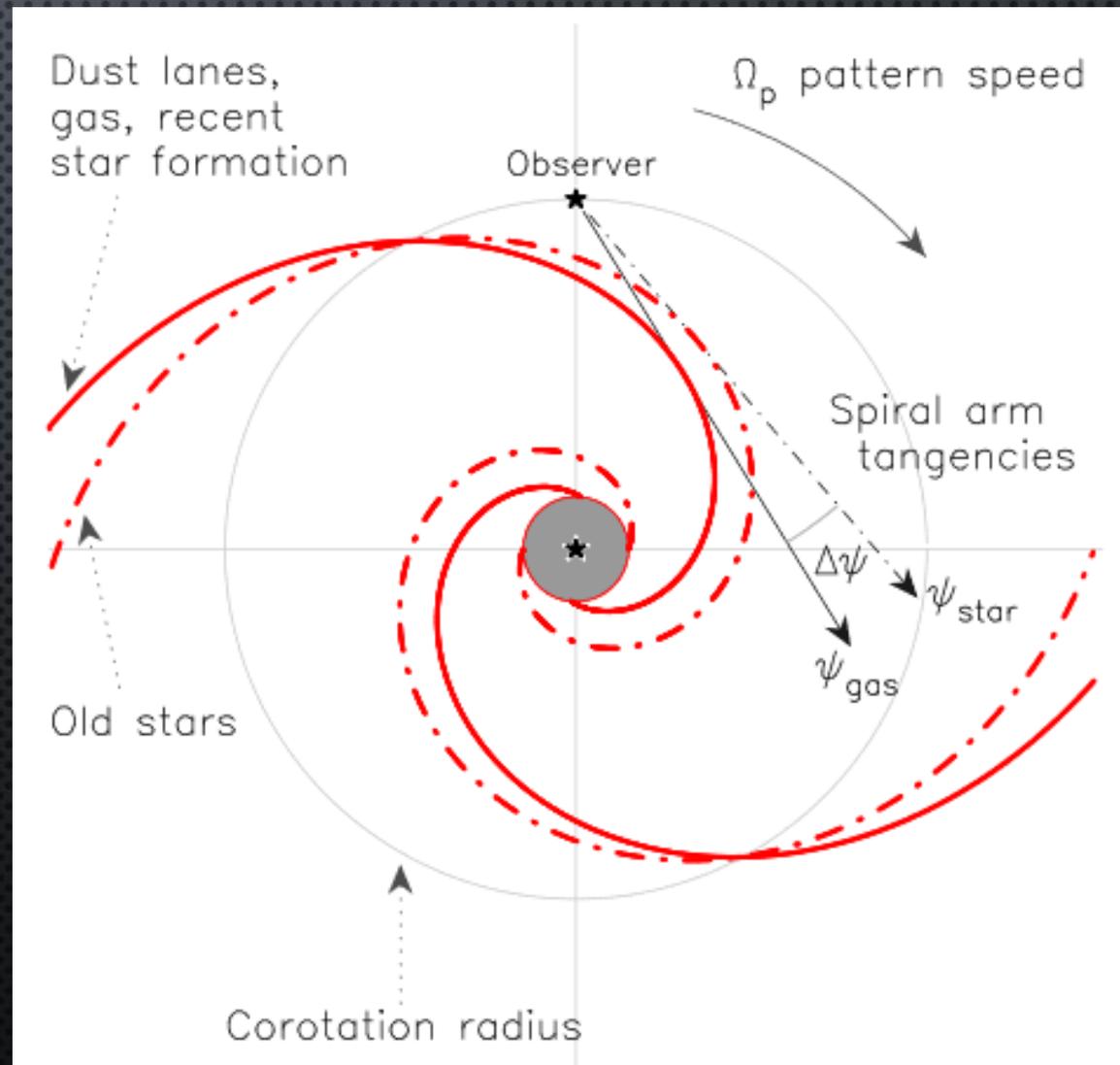
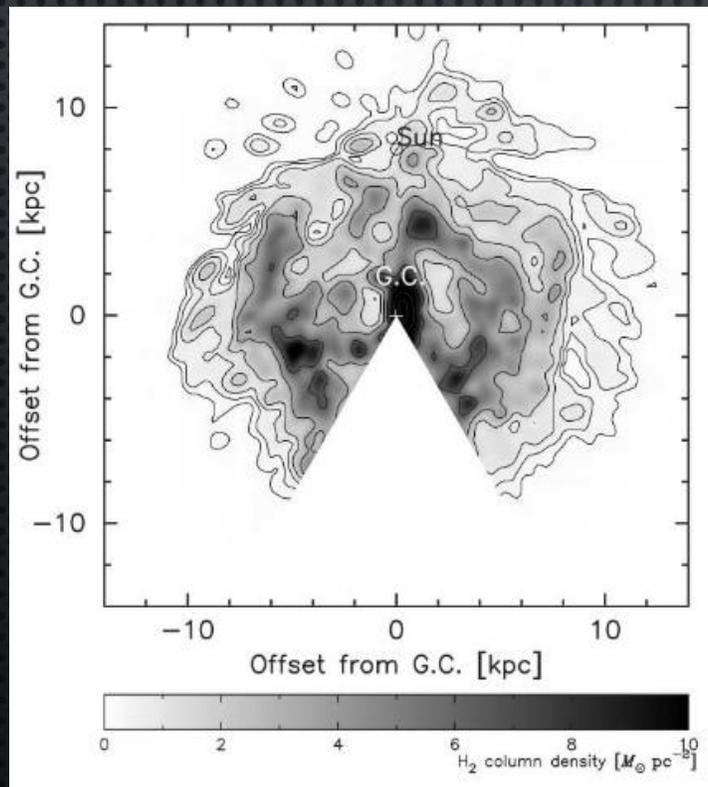
OB association

Slow motion of spiral arm

Fast motion of interstellar gas and dust – this material is compressed within the spiral arm

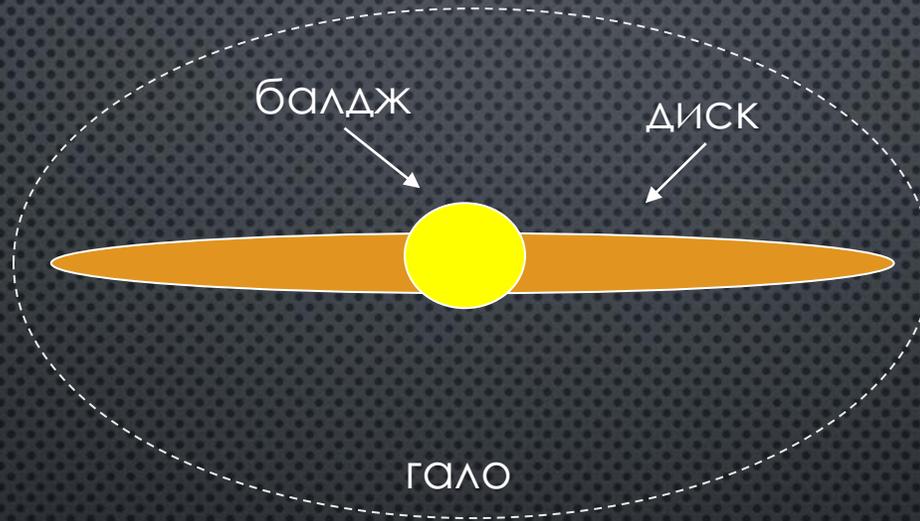
ВРАЩЕНИЕ СПИРАЛЕЙ И ЗВЕЗД

Вращение спирального узора происходит с одной и той же угловой скоростью на разных расстояниях от центра. Скорость звезд выше вблизи центральной части. Скорости сравниваются на радиусе коротации.



Молекулярные облака в Галактике.

МЕЖЗВЕЗДНАЯ 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.

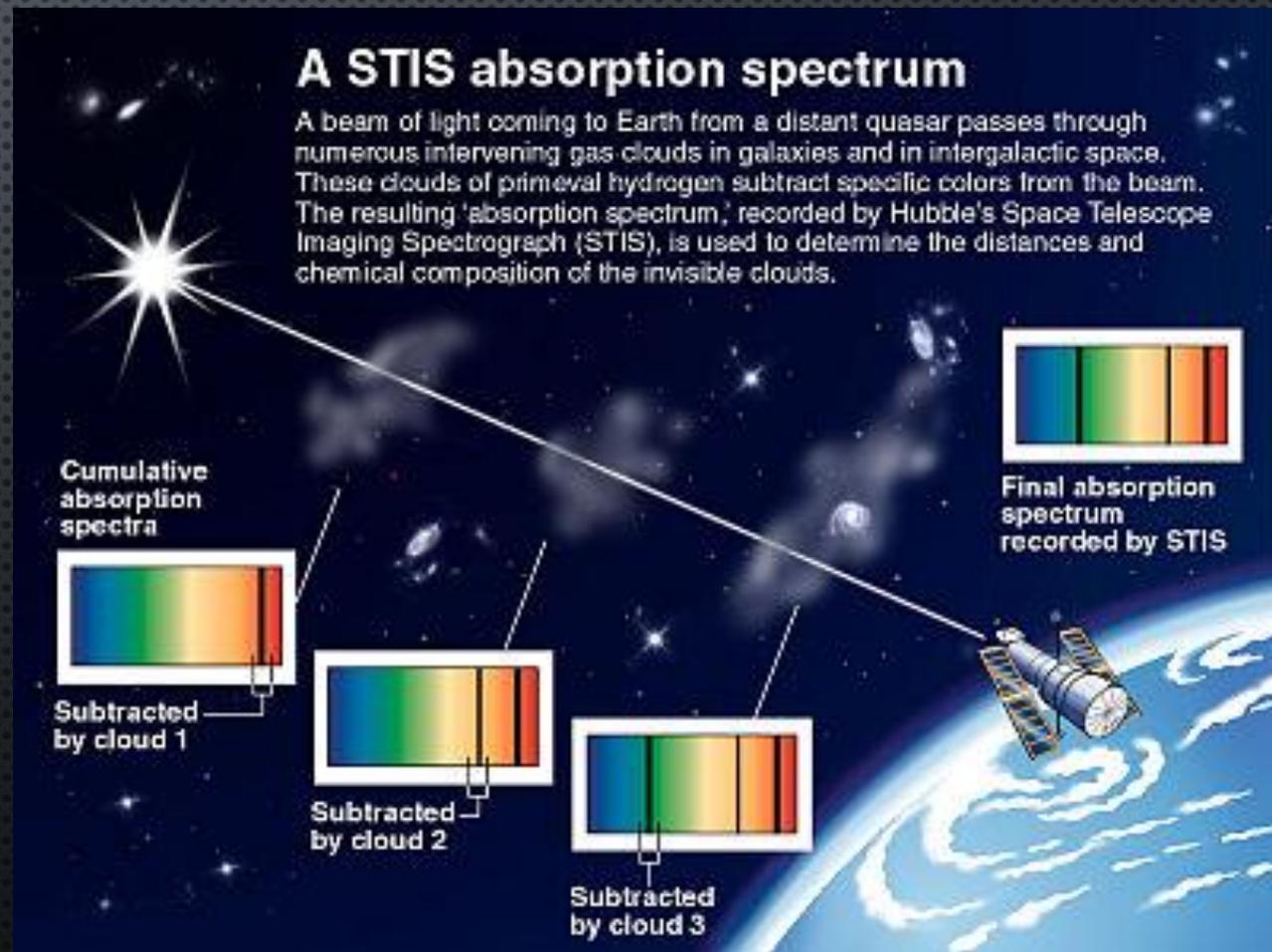


ОТКРЫТИЕ МЕЖЗВЕЗДНОЙ СРЕДЫ

В течение сотен лет считалось, что пространство между звезд совсем пусто. В 1904 году Иоганн Гартман смог получить спектр, который однозначно говорил, что свет звезды частично поглощался «по дороге», т.е. между звездами.



Иоганн Гартман



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

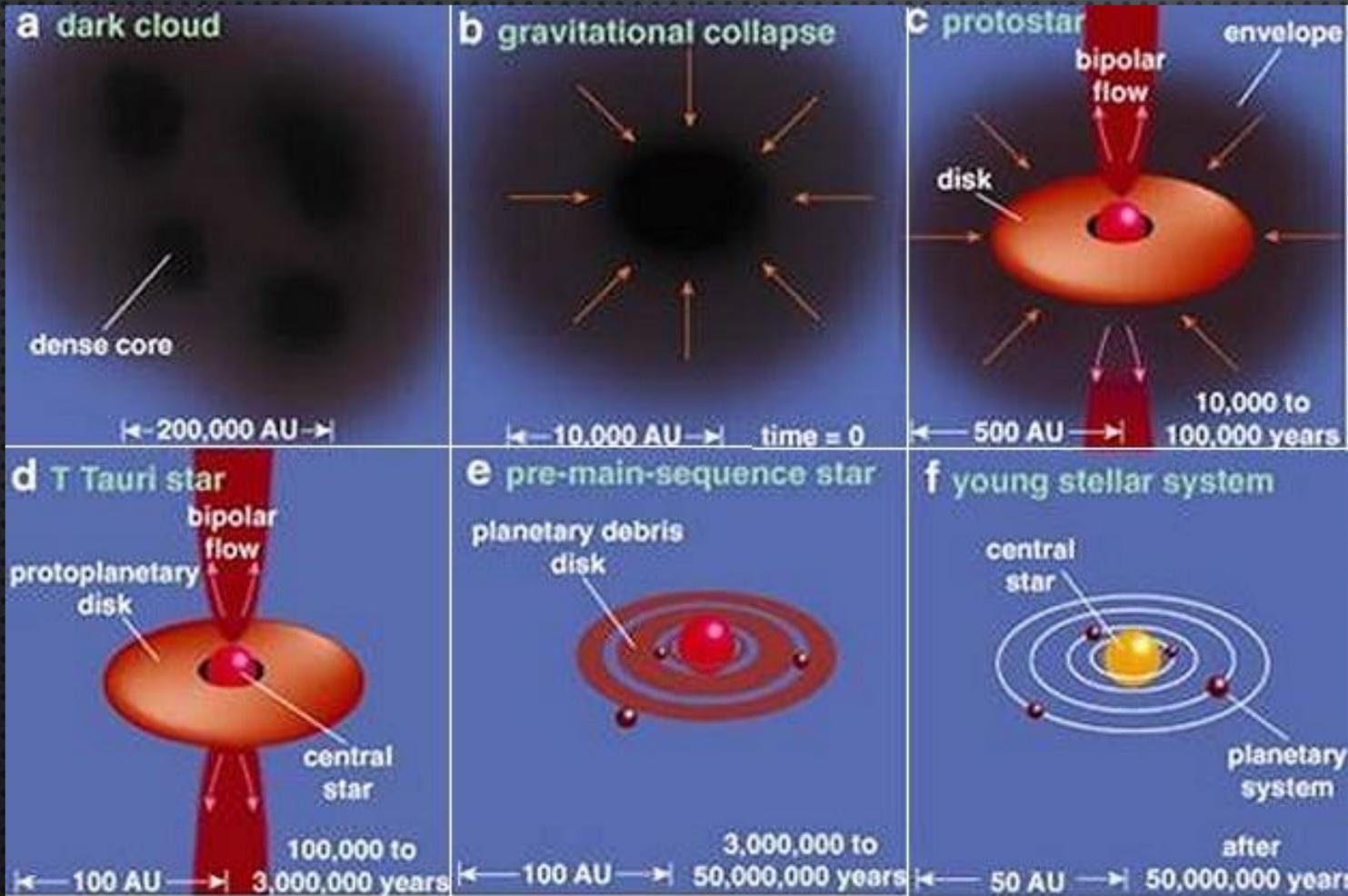
[arxiv:1412.5182](https://arxiv.org/abs/1412.5182) Физические процессы в межзвездной среде

[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

ЭТАПЫ ОБРАЗОВАНИЯ ЗВЕЗДЫ



Образование звезды начинается с постепенного сжатия плотного облака межзвездного газа и пыли.

Как правило, звезды образуются скоплениями и группами.

Весь процесс занимает от нескольких миллионов до нескольких десятков миллионов лет.

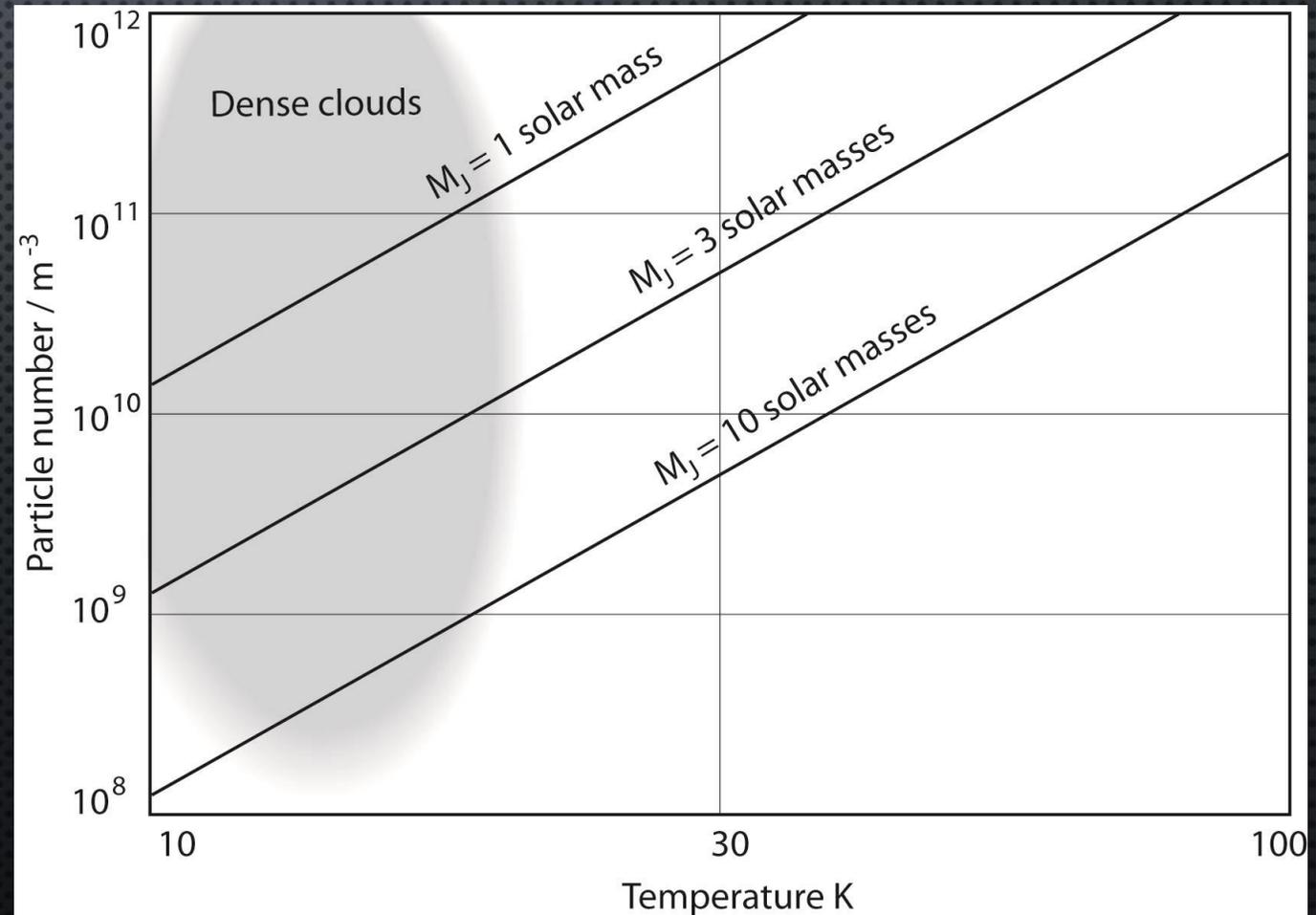
В настоящее время мы наблюдаем объекты на всех стадиях образования звезд и планетных систем.

МАССА ДЖИНСА

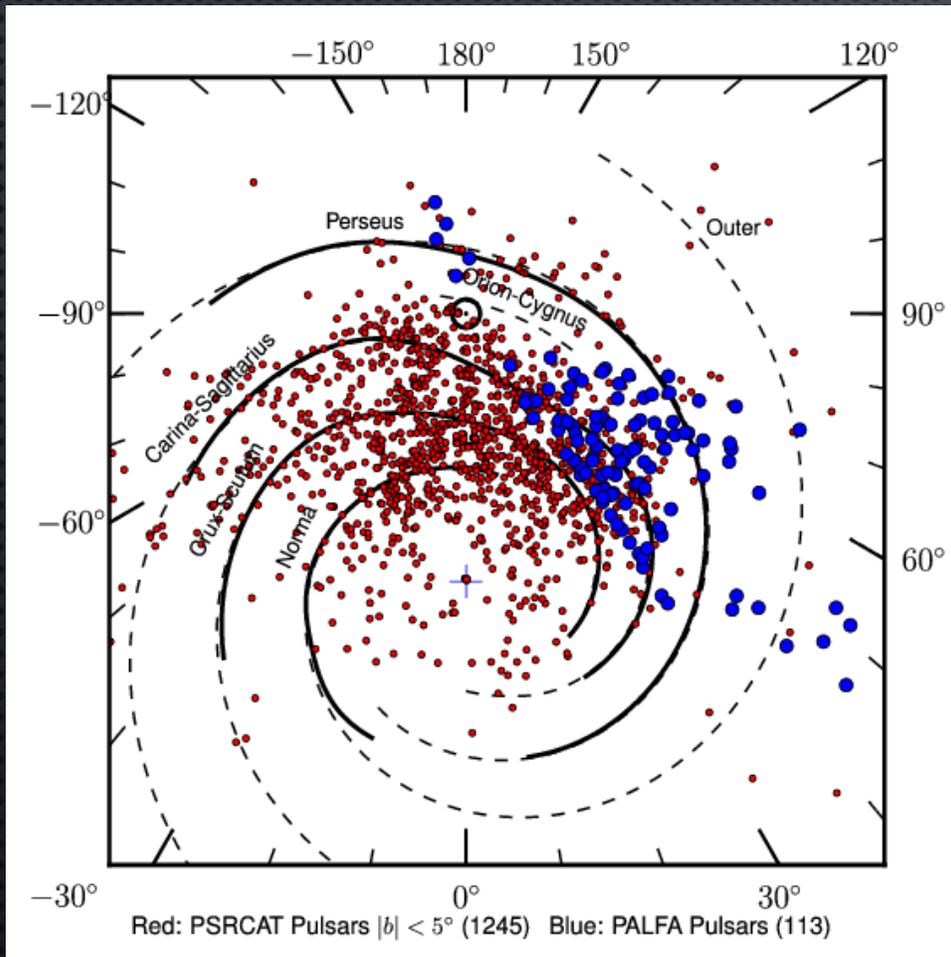
Для начала гравитационного сжатия, приводящего к образованию звезды, облако газа и пыли должно быть достаточно плотным и холодным.

Для данной температуры и плотности существует критическая масса – масса Джинса.

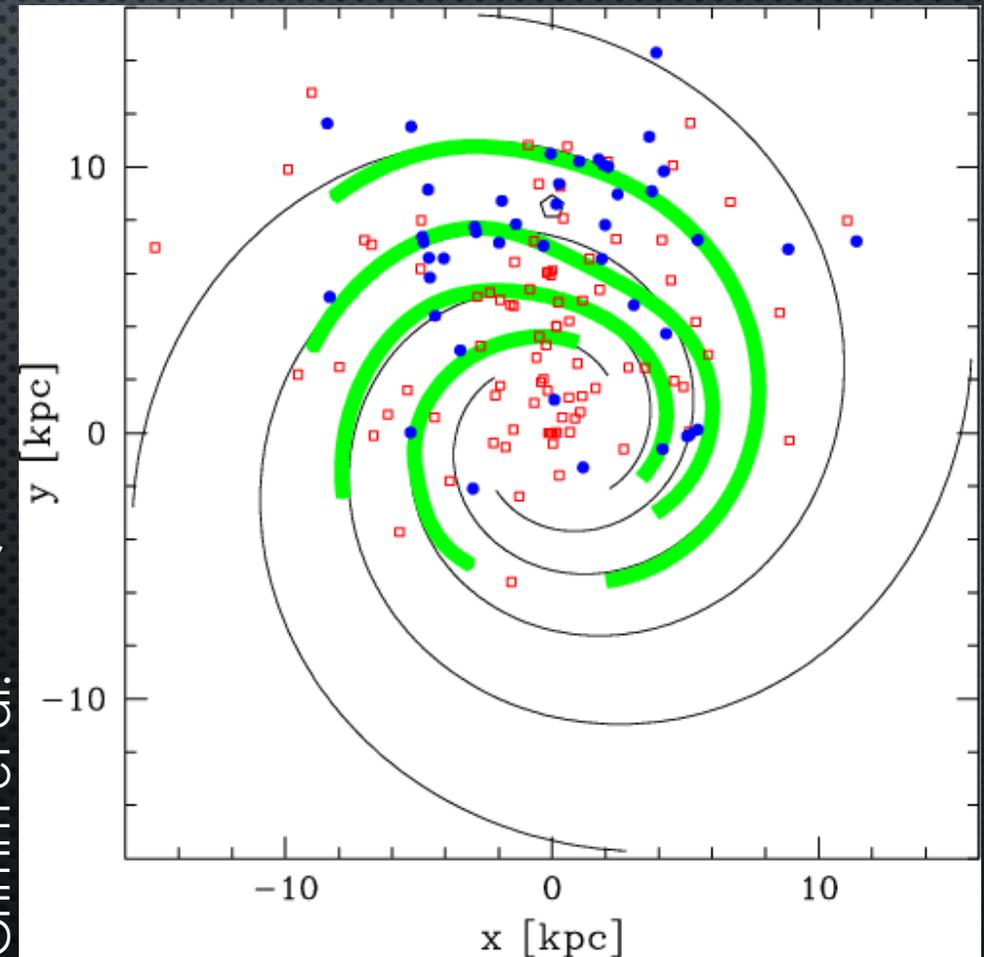
$$M_J = \left(\frac{5kT}{Gm} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$



НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ГАЛАКТИКЕ



Радиопульсары и массивные рентгеновские двойные системы концентрируются к плоскости Галактики и к спиральным ветвям, как и все молодые объекты.



Grimm et al.



Дискосая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная



Эллиптическая

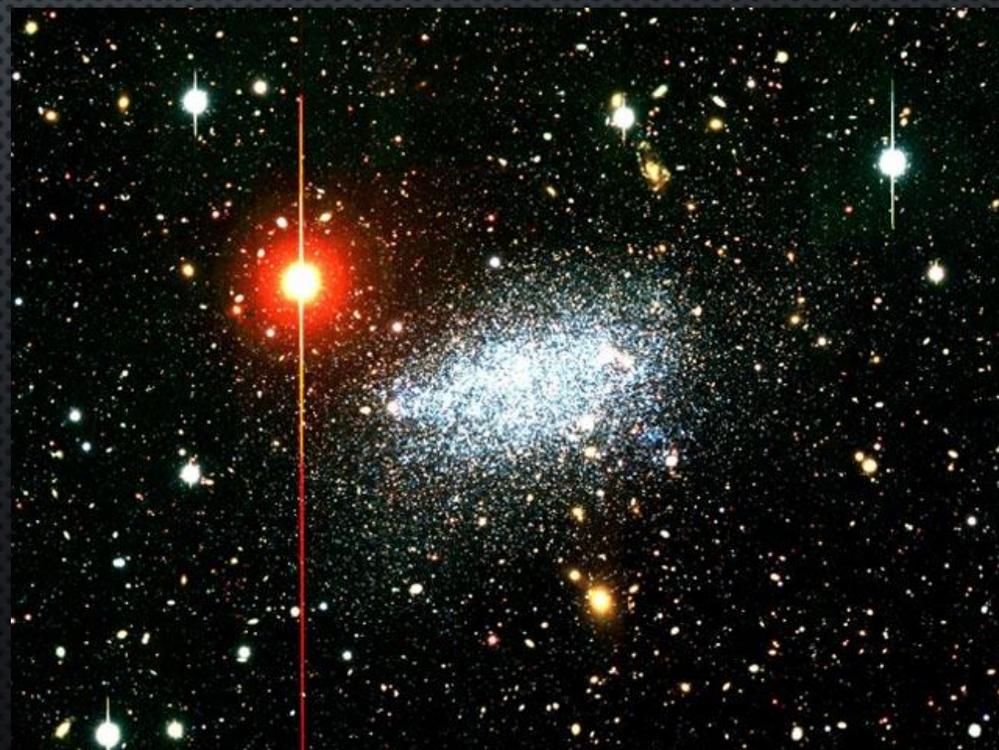


Взаимодействующие

МИР ГАЛАКТИК



Люди давно наблюдали «туманности», про которые не было ясно: газ это или нет. Часть из них оказалась огромными звездными системами – галактиками. Но достоверно установить это удалось только в 20-е гг. 20 века.



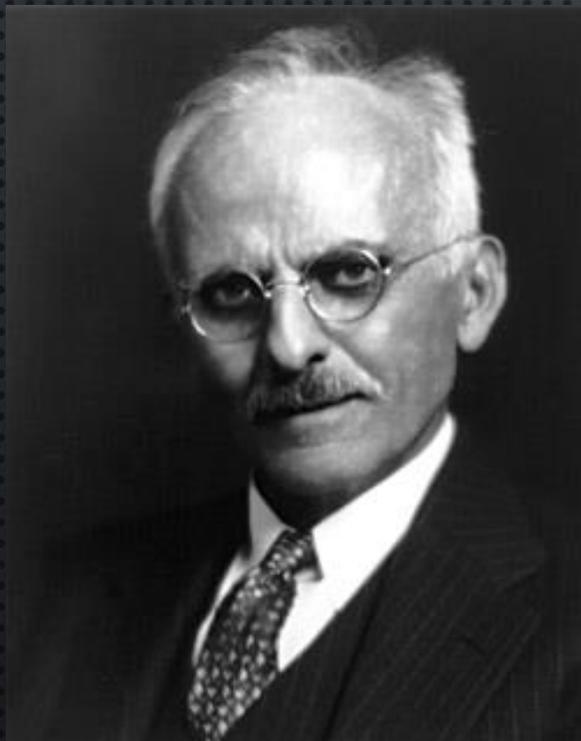
ВЕЛИКИЙ СПОР

1920 Great Debate



Гигантские
звездные
системы –
«звездные
острова»

Все туманности
находятся
внутри нашей
Галактики



Гебер Кертис



Харлоу Шепли

Неточности были
в аргументации
обеих сторон,
однако в целом
прав оказался
Гербер Кертис.

Ответ дали
наблюдения.

РАСКРЫЛАСЬ БЕЗДНА ...



Эдвин Хаббл

Главный результат был получен в 1922-23 г. Эдвином Хабблом. С помощью нового 2.5-метрового телескопа ему удалось обнаружить цефеиды в нескольких близких галактиках, начиная с М31 – Туманности Андромеды (первые из них обнаружил Дункан в 1922 г.). Это дало возможность определить расстояние.

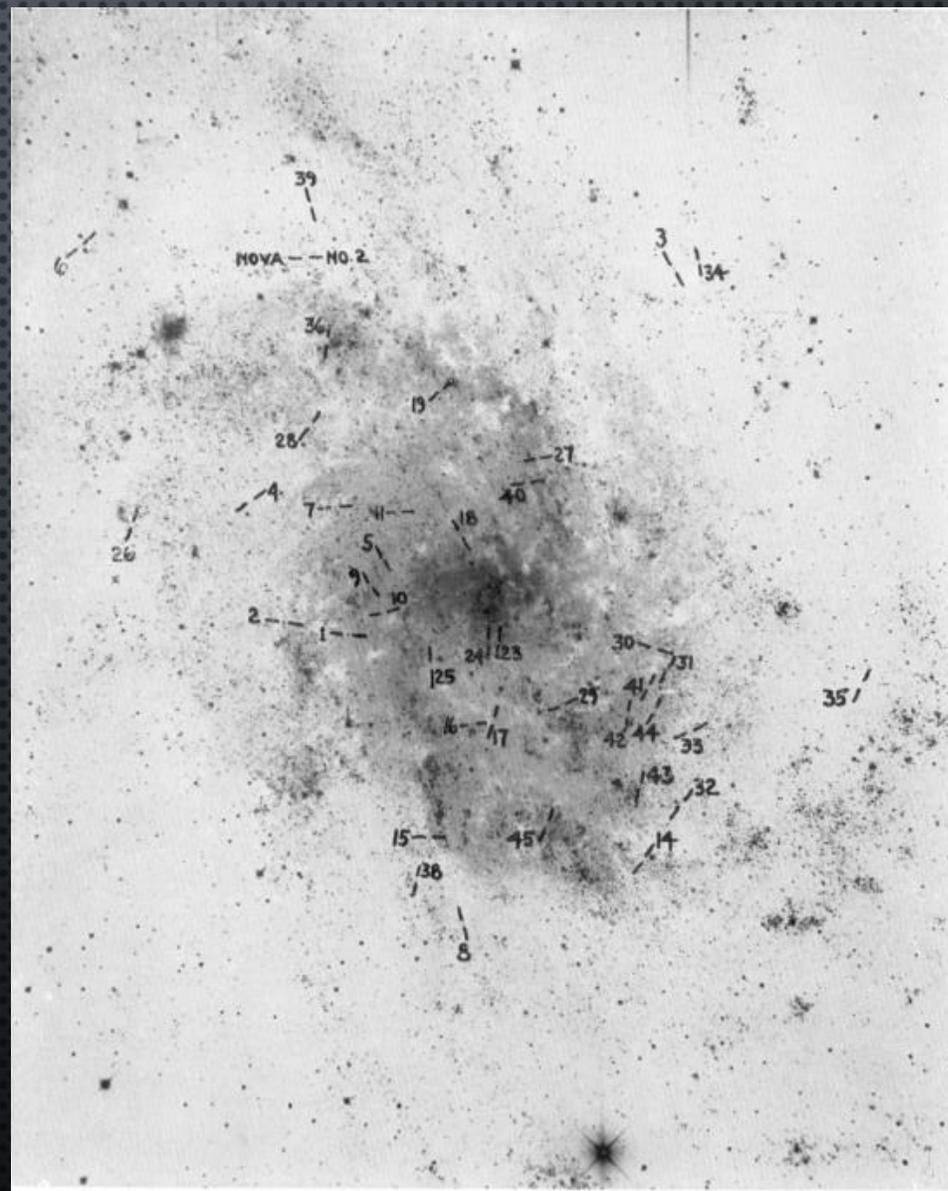
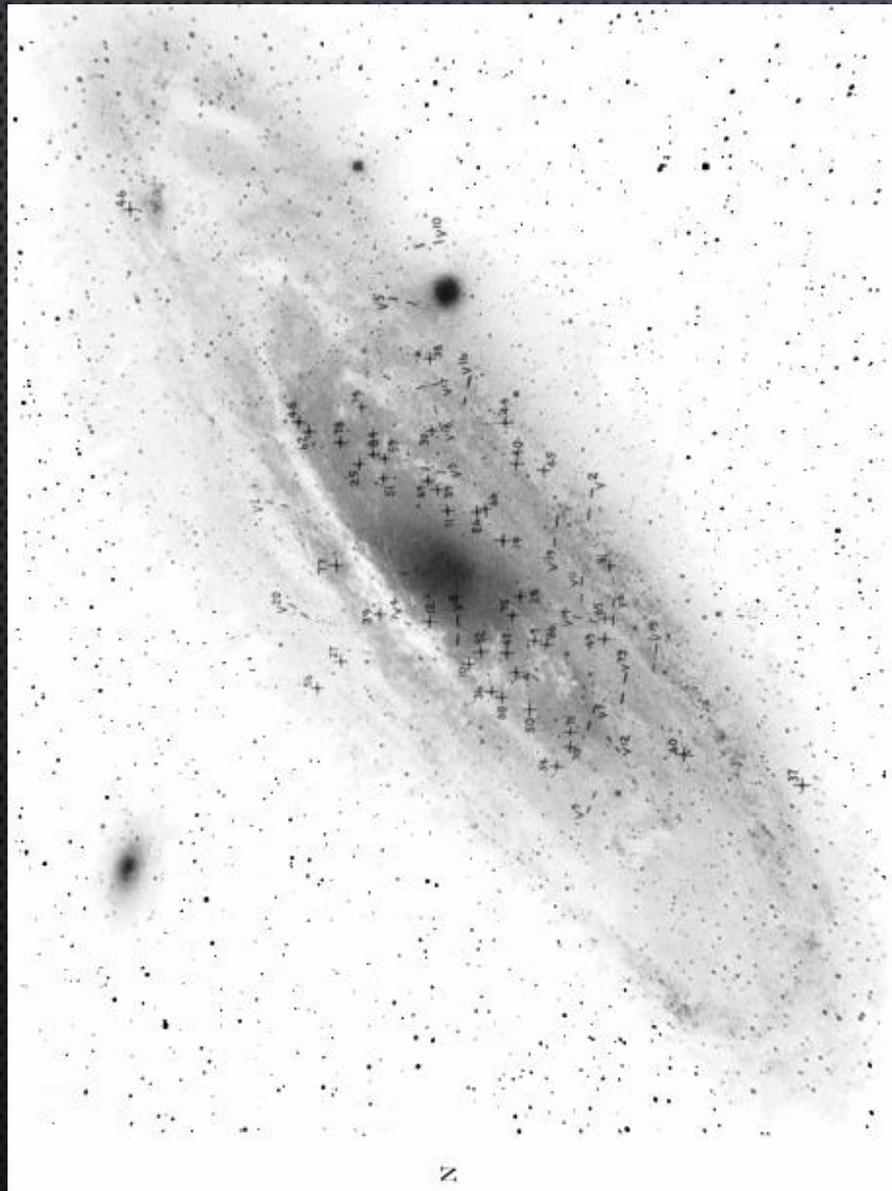


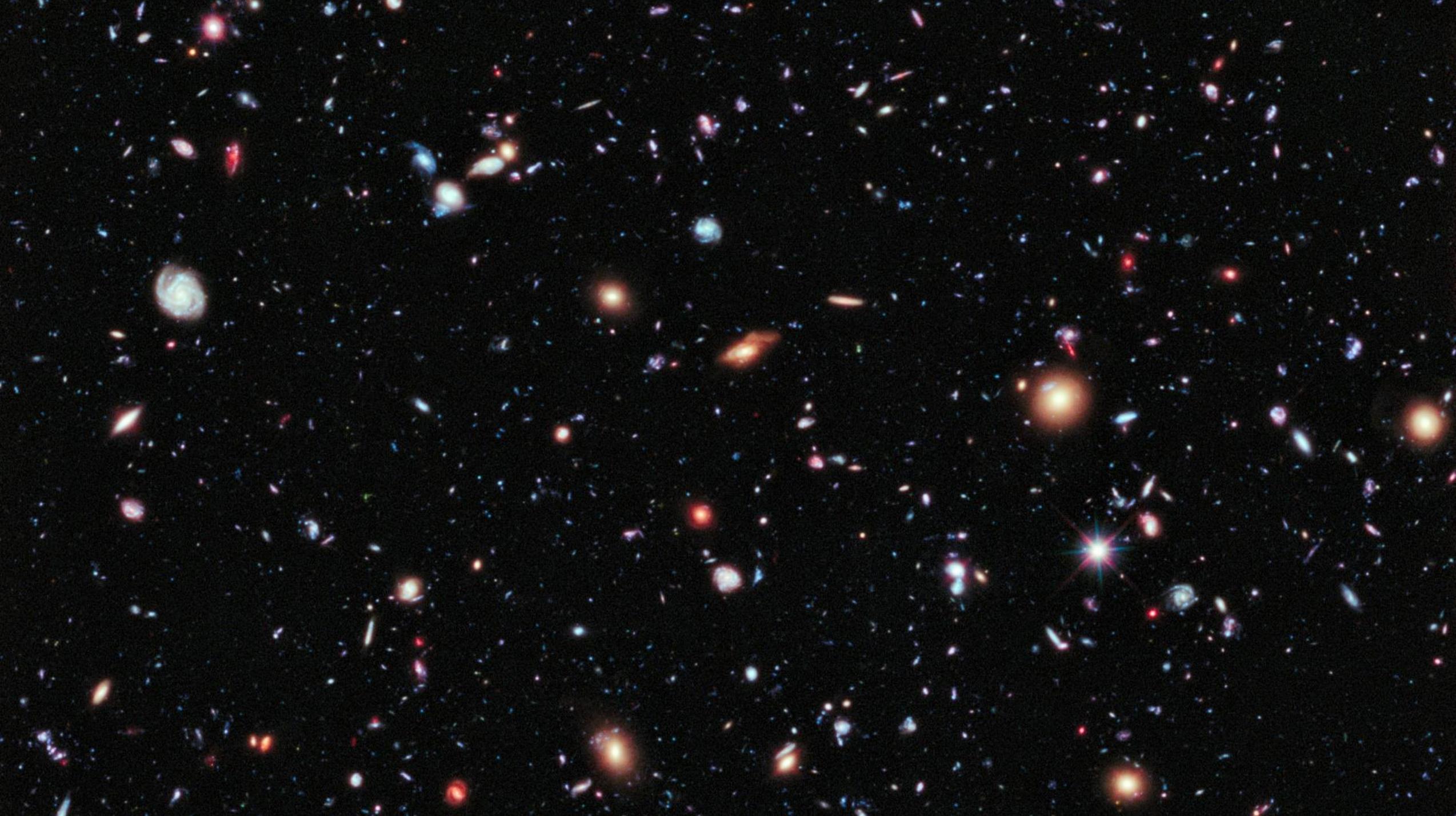
Эрнст Эпик

В том же 1922 г. Эрнст Эпик предложил метод определения расстояний, который показал, что М31 находится за пределами нашей Галактики.

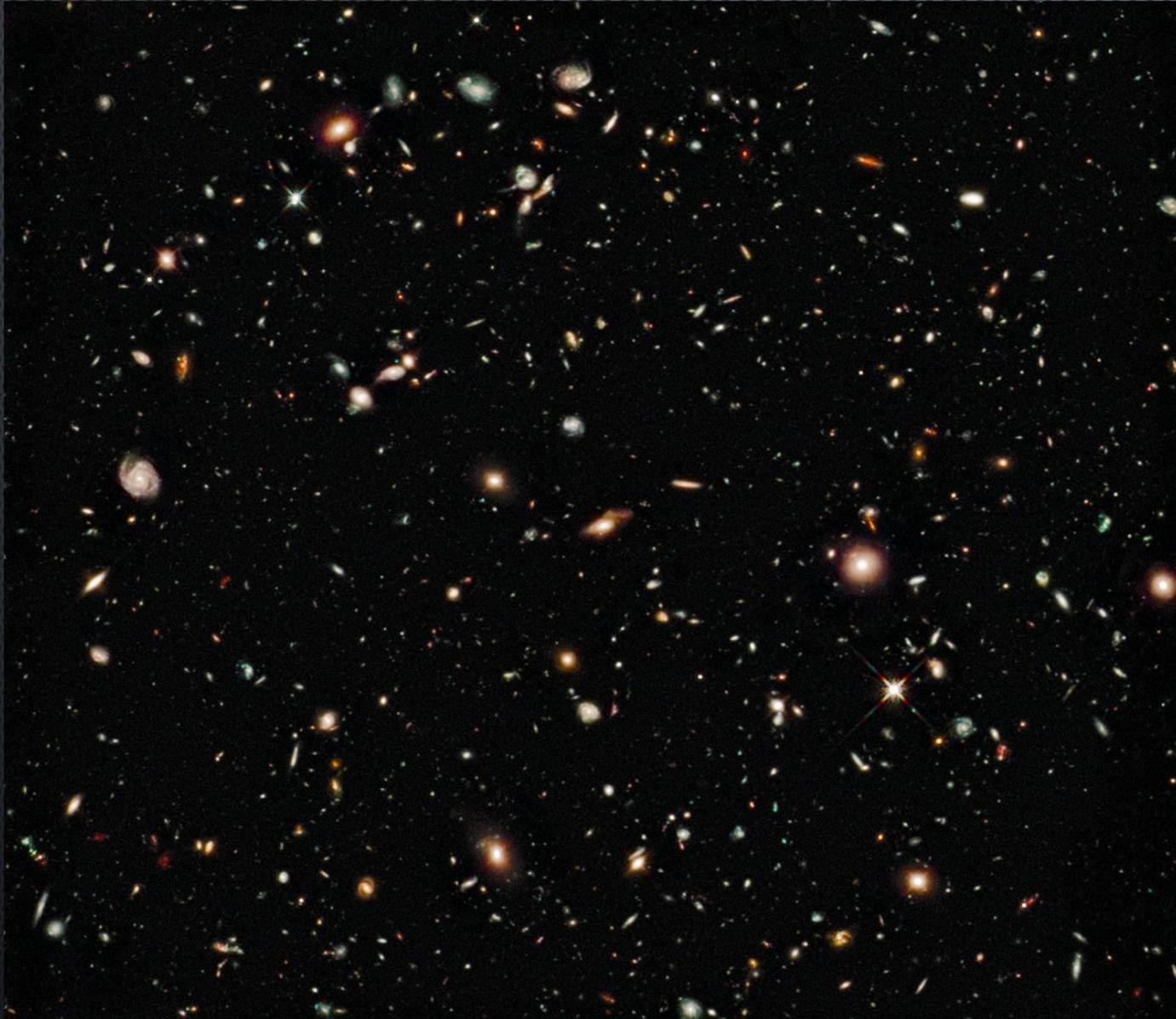


СНИМКИ ХАББЛА

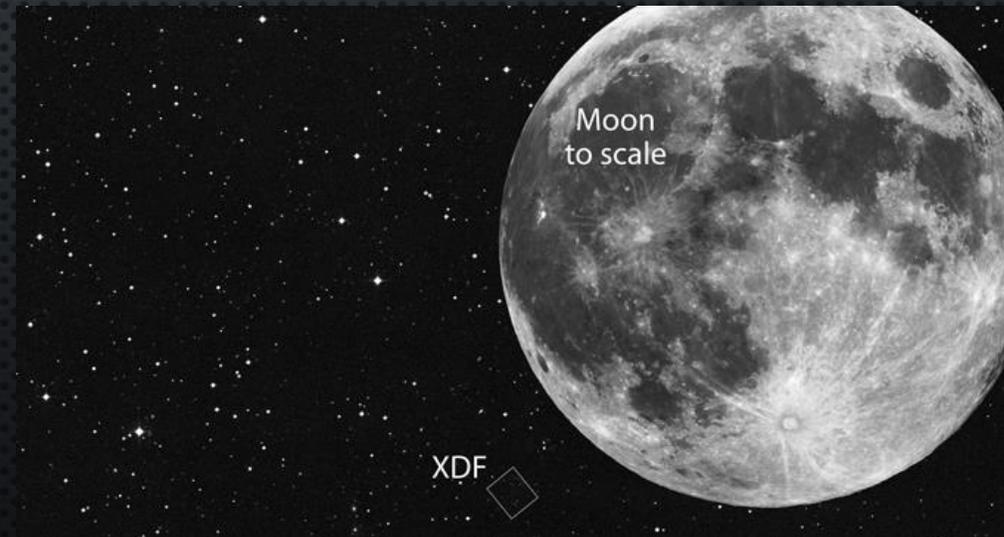




HUBBLE ULTRA DEEP FIELD



Созвездие Печь
Наблюдения 2003-2004



КВАЗАРЫ



Квазизвездные объекты

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.)

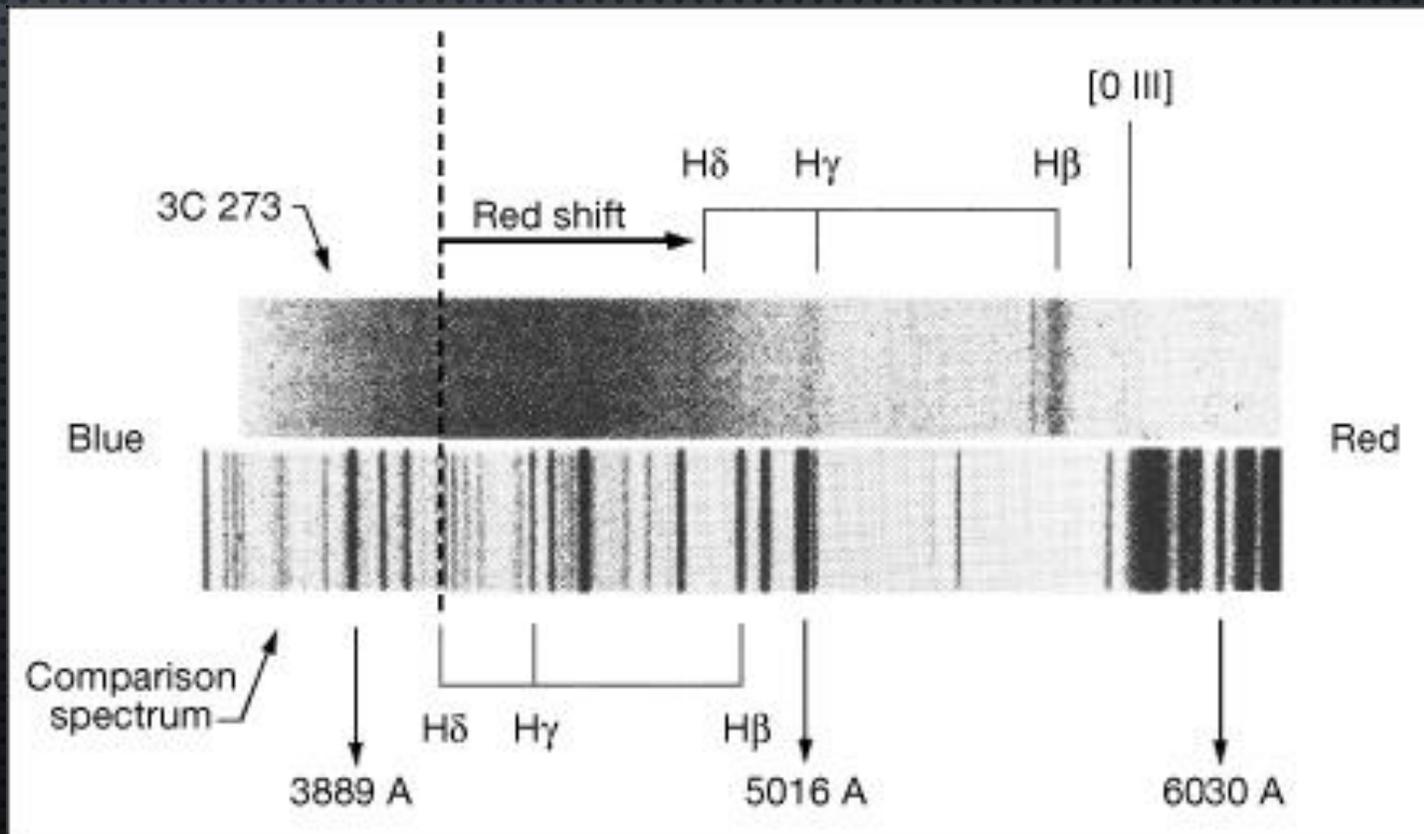
Долгое время шли дискуссии о природе этих «радиозвезд».

РАЗГАДКА

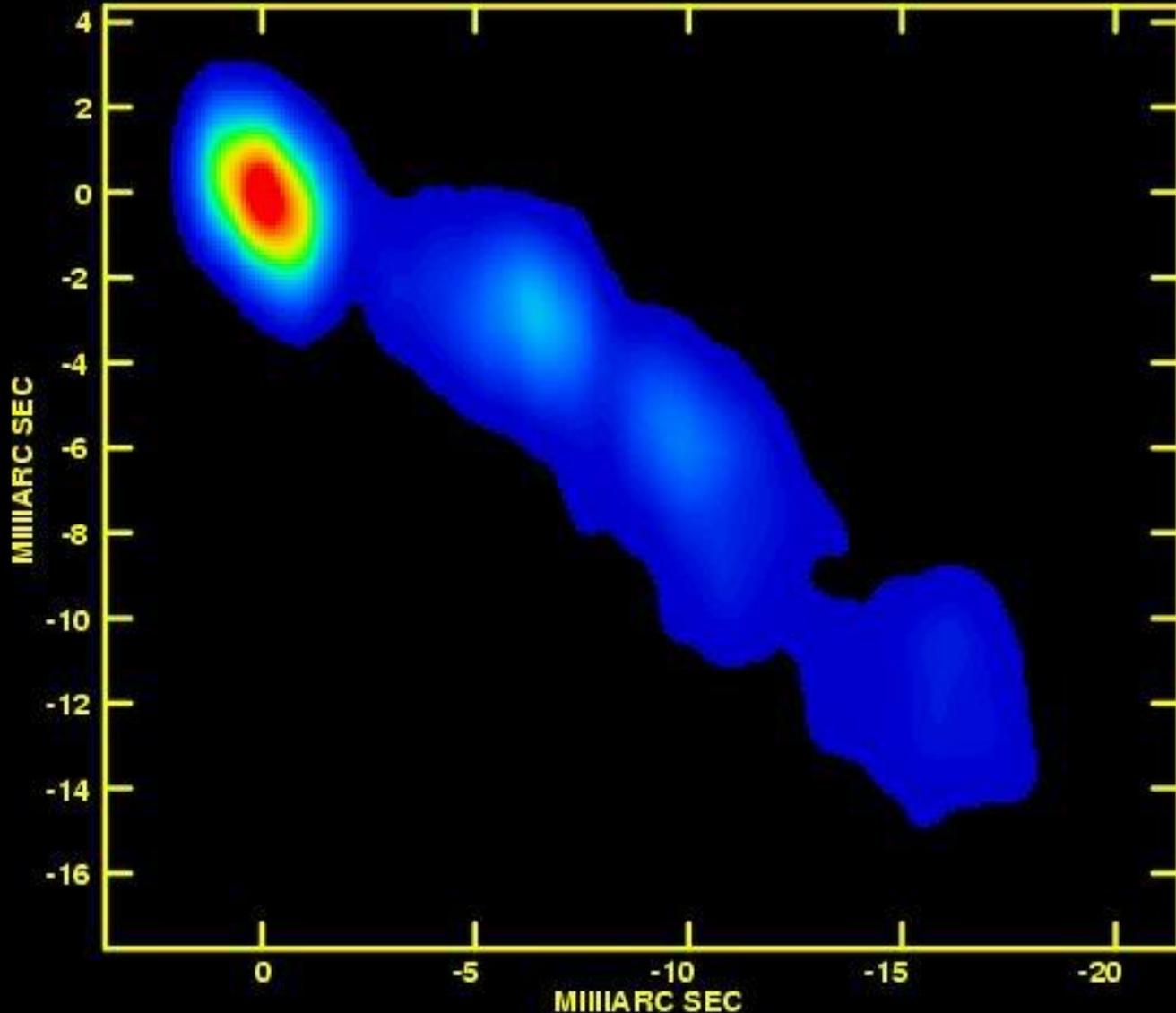


Мартин Шмидт

Линии в спектре сильно сдвинуты. В соответствии с расширением вселенной это соответствует очень большому расстоянию (в случае 3C273 – 2.4 млрд св. лет). Значит – это чрезвычайно мощные источники, но при этом очень небольшие по размеру



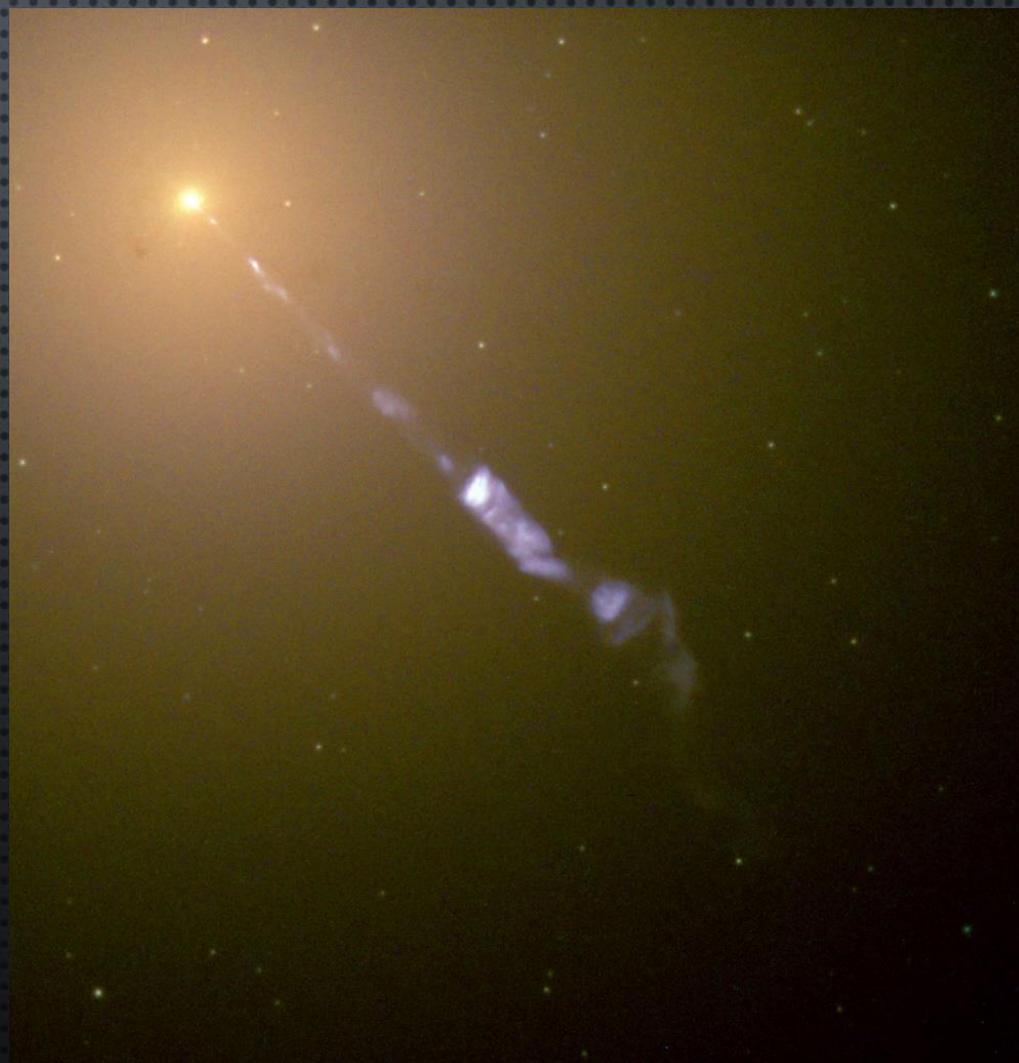
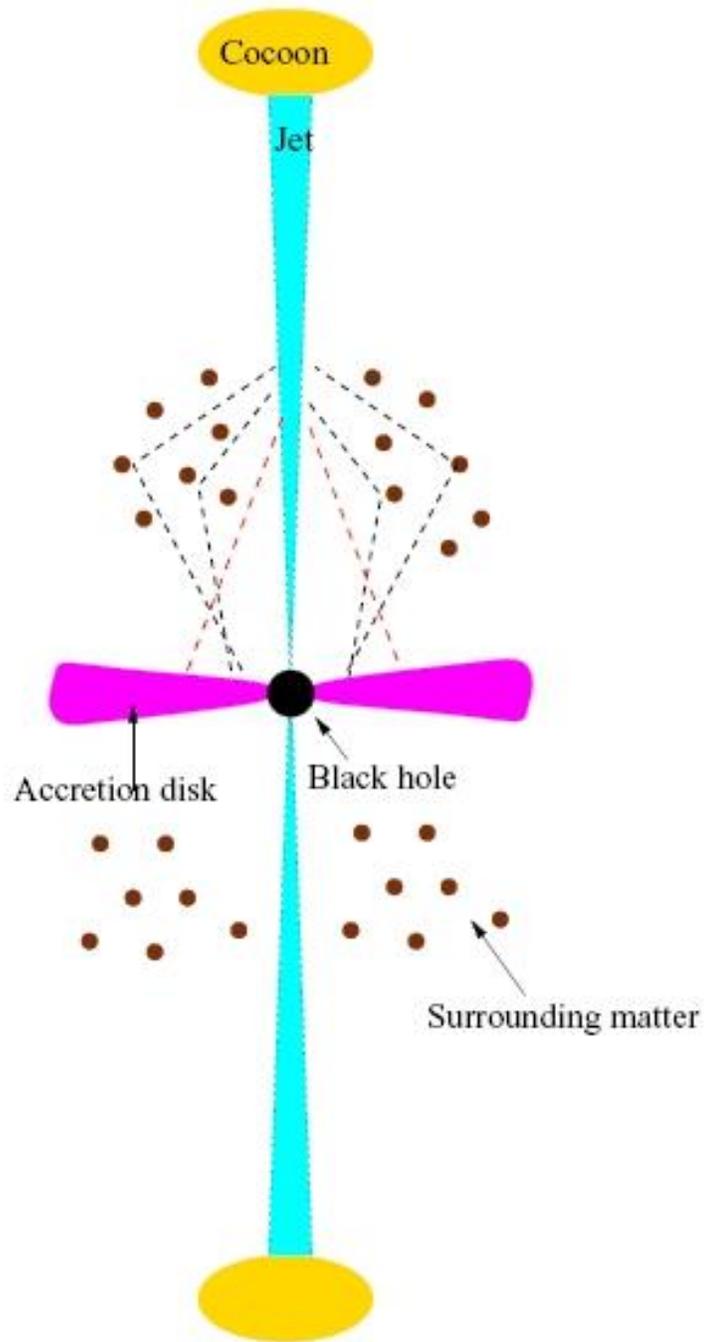
ПРИРОДА КВАЗАРА



Сверхмассивные черные дыры в центрах галактик, на которые течет много вещества, образуя аккреционный диск. При этом выделяется энергия, а также с огромной скоростью в виде струй выбрасывается газ.

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И ИХ ДЖЕТЫ

$M_{\text{BH}} = 10^7 - 10^9 M_{\odot}$
 $L (< \sim L_{\text{Edd}}) \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ эрг/с}$
< несколько Мпк

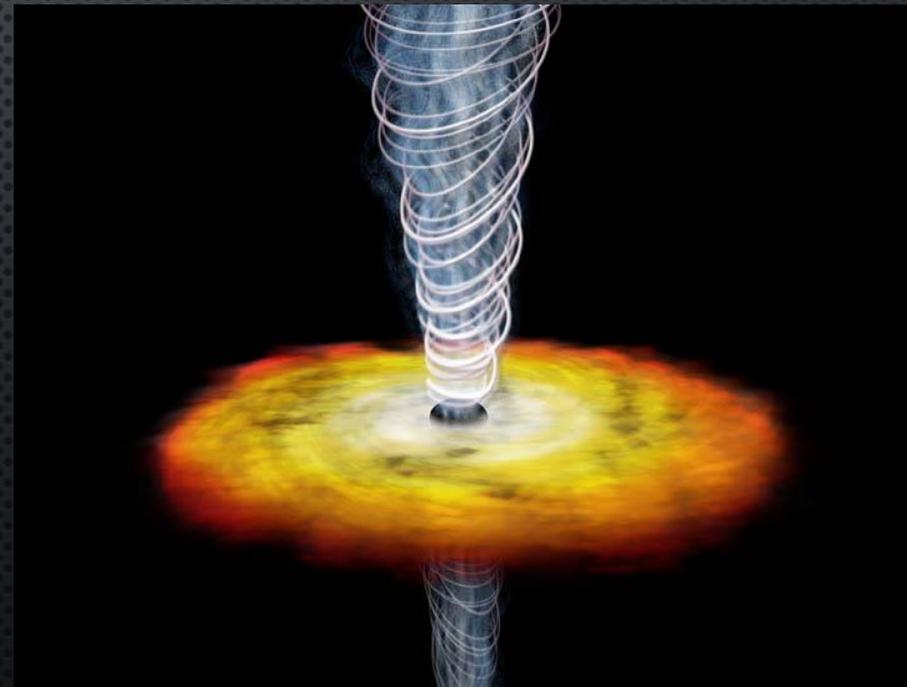
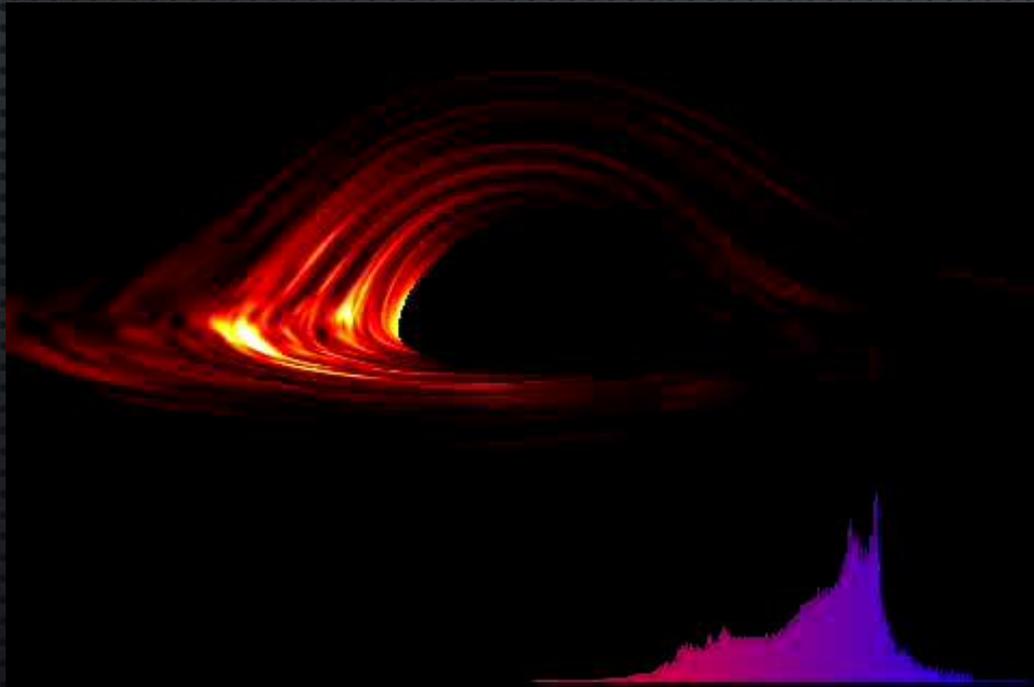


ЧЕМ ВАЖНО ОТКРЫТИЕ КВАЗАРОВ?

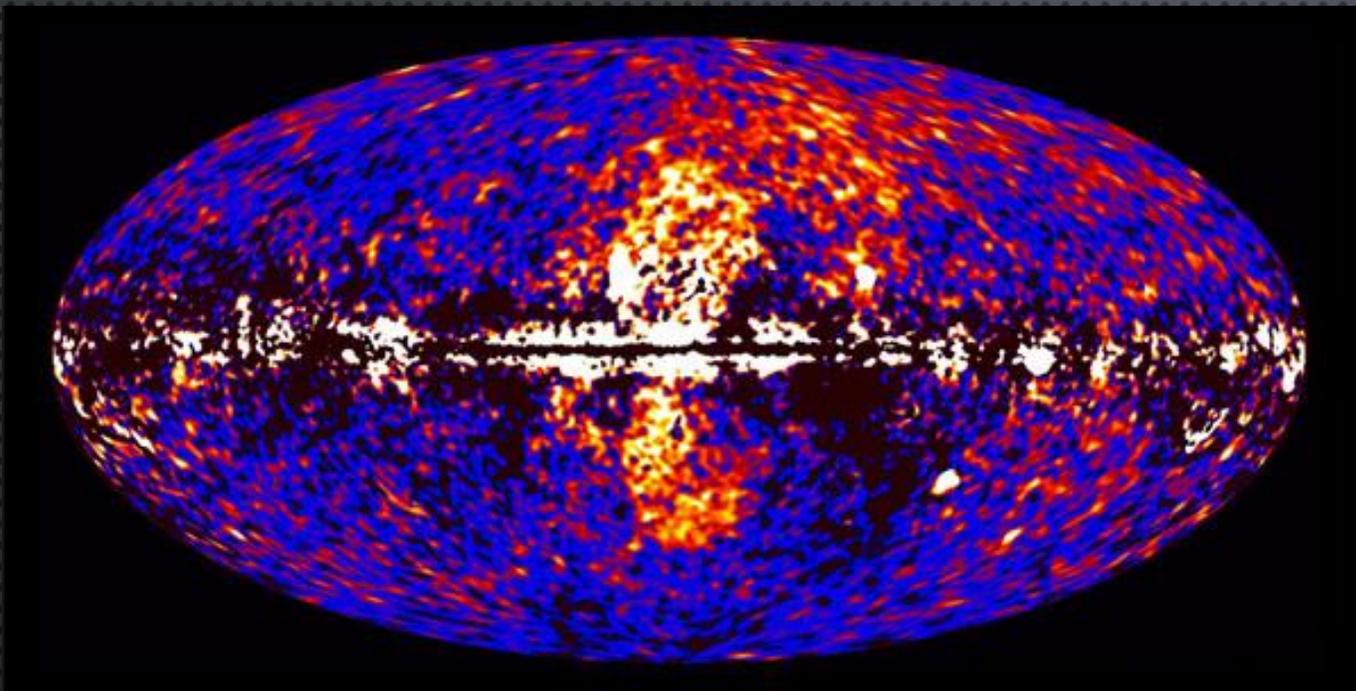
Во-первых, квазары раздвинули границы наблюдаемого мира: они были дальше известных тогда галактик.

Во-вторых, возникла необходимость объяснять, как же они работают.

Это дало дорогу концепции сверхмассивных черных дыр.



ПУЗЫРИ ФЕРМИ



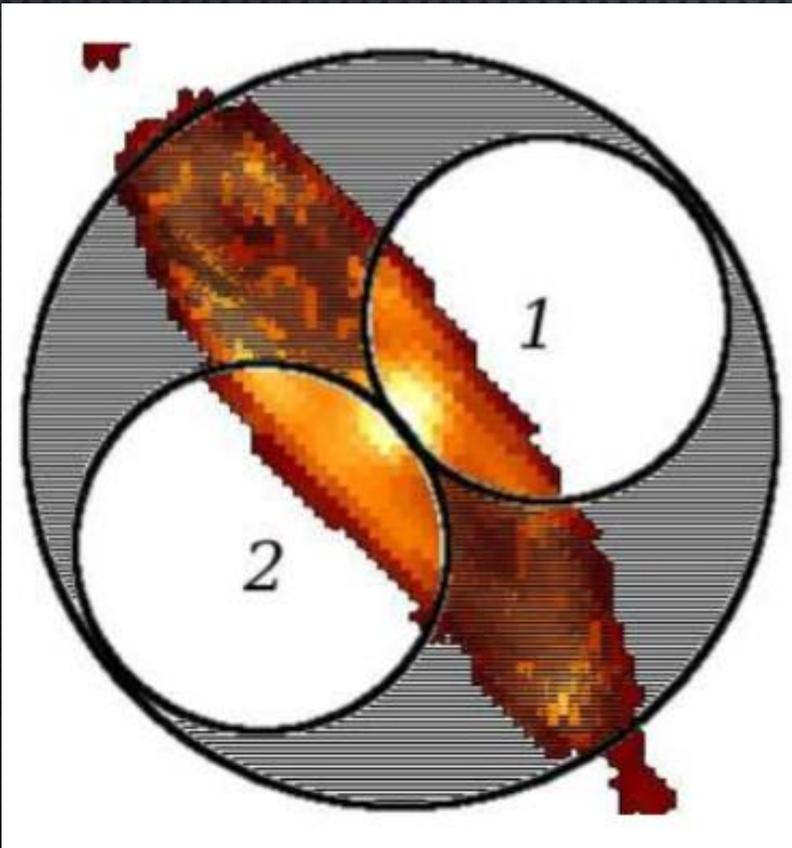
Возраст пузырей от 10 до 100 млн лет.

Активность черной дыры
или вспышка звездообразования?



ПУЗЫРИ В М31

Обработка данных спутника Ферми для Туманности Андромеды и ее окрестностей выявили существование структуры, которая очень напоминает Пузыри Ферми в нашей Галактике.

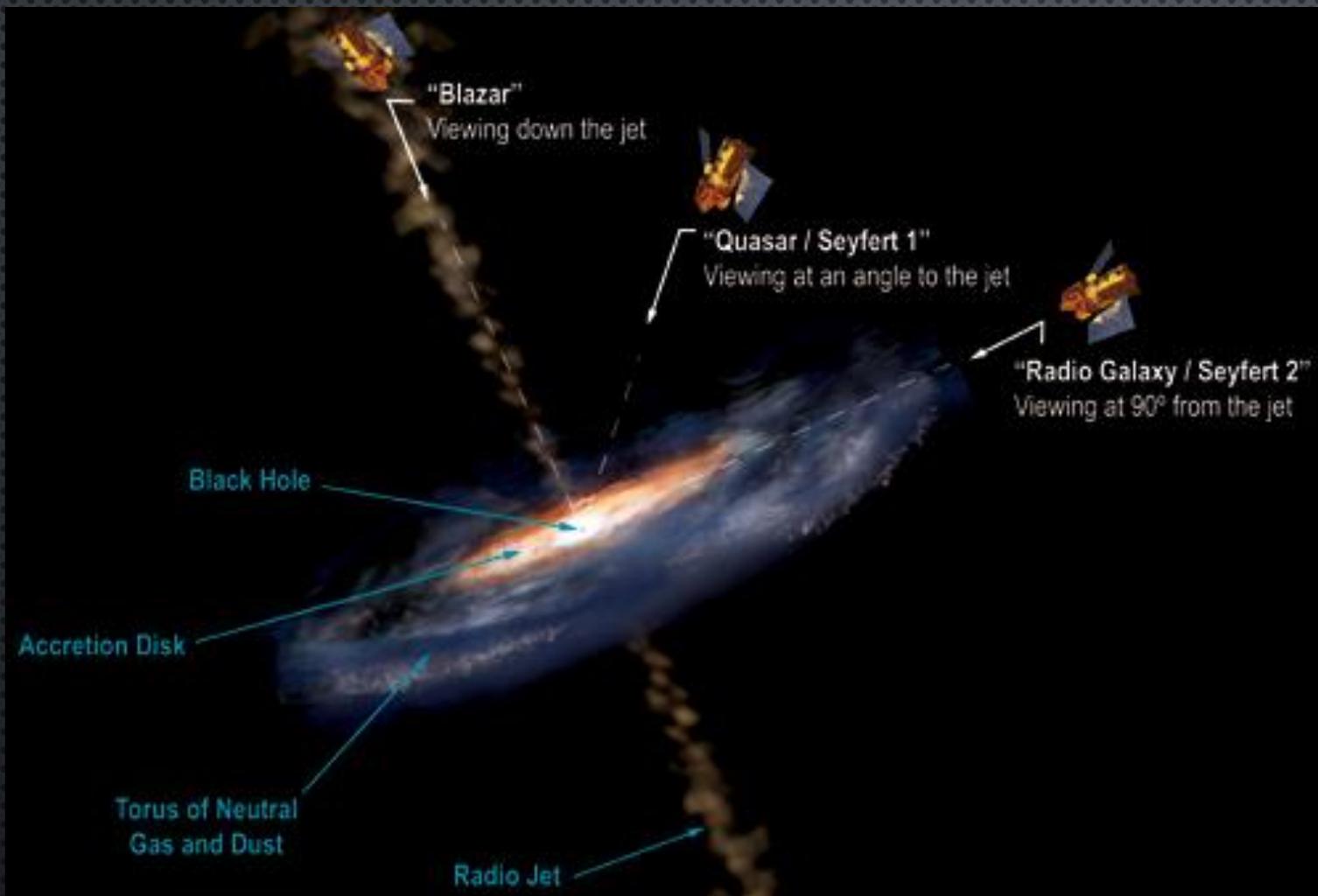


Возникновение такой структуры может быть связано с прошлой активностью центральной черной дыры.

В Туманности Андромеды она в десятки раз тяжелее, чем в нашей Галактике.

Светимость пузырей в М31 примерно на порядок выше, чем у Пузырей Ферми в нашей Галактике.

ЕДИНАЯ МОДЕЛЬ



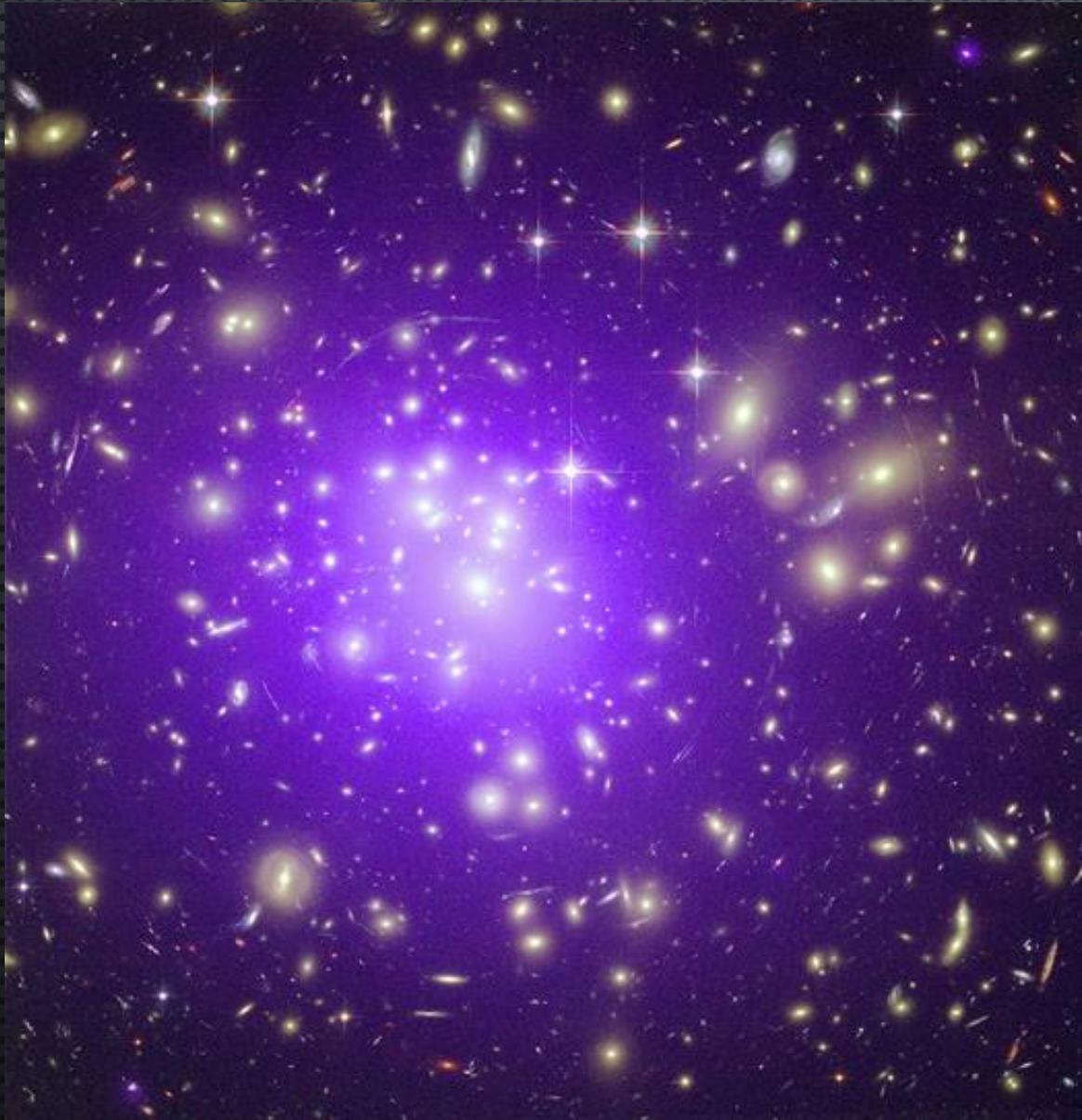
В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



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

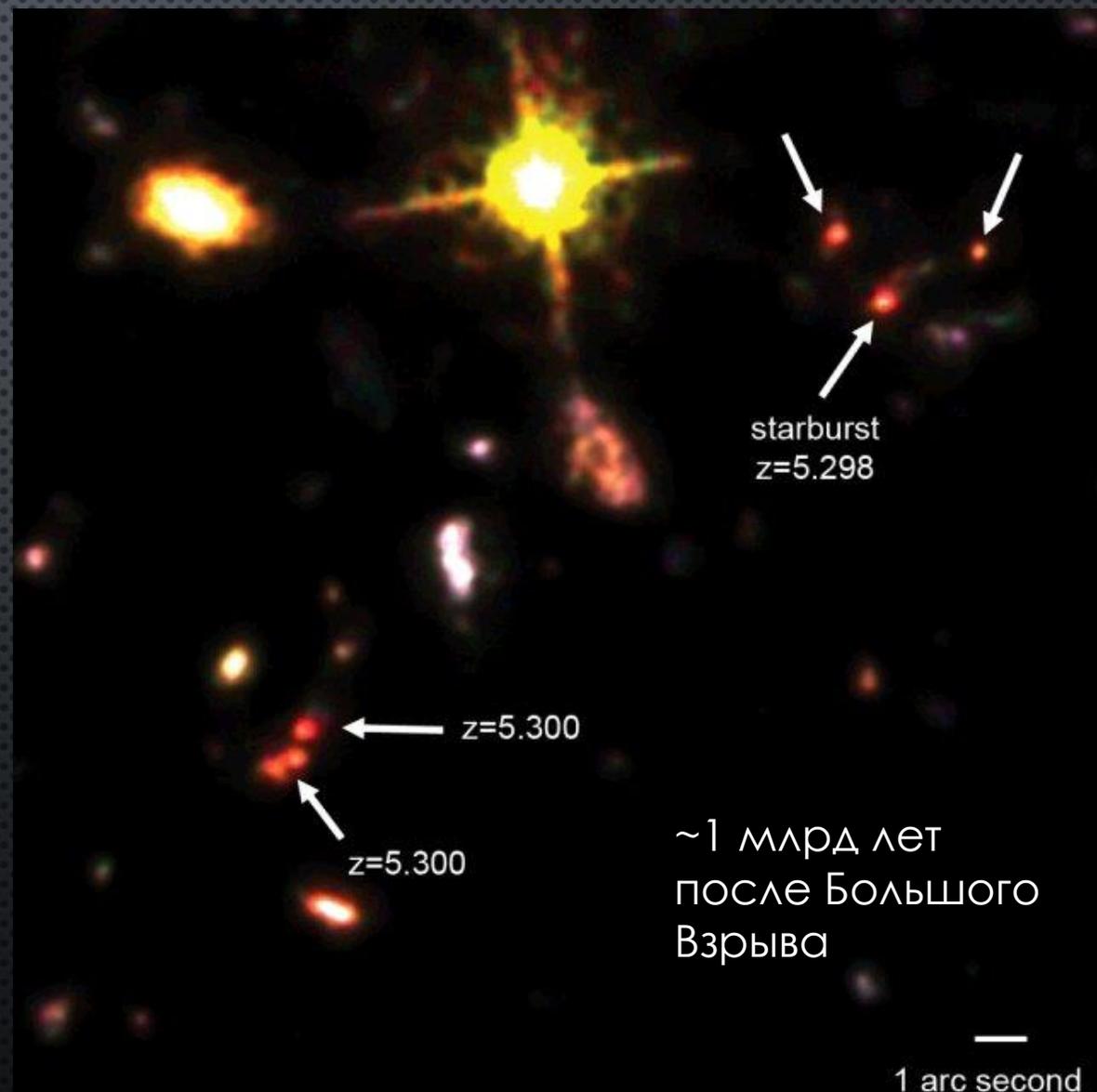
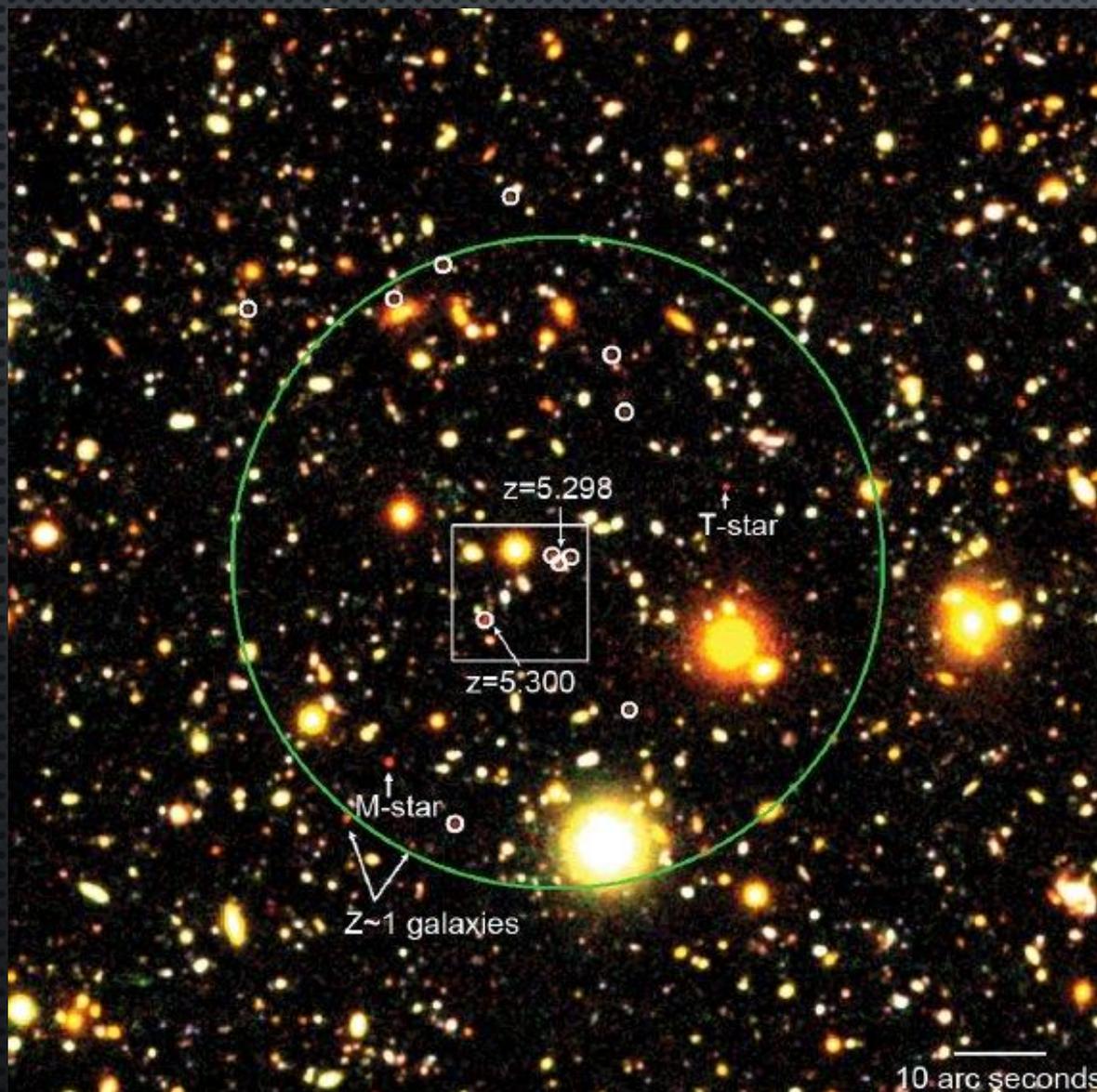
ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ



Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

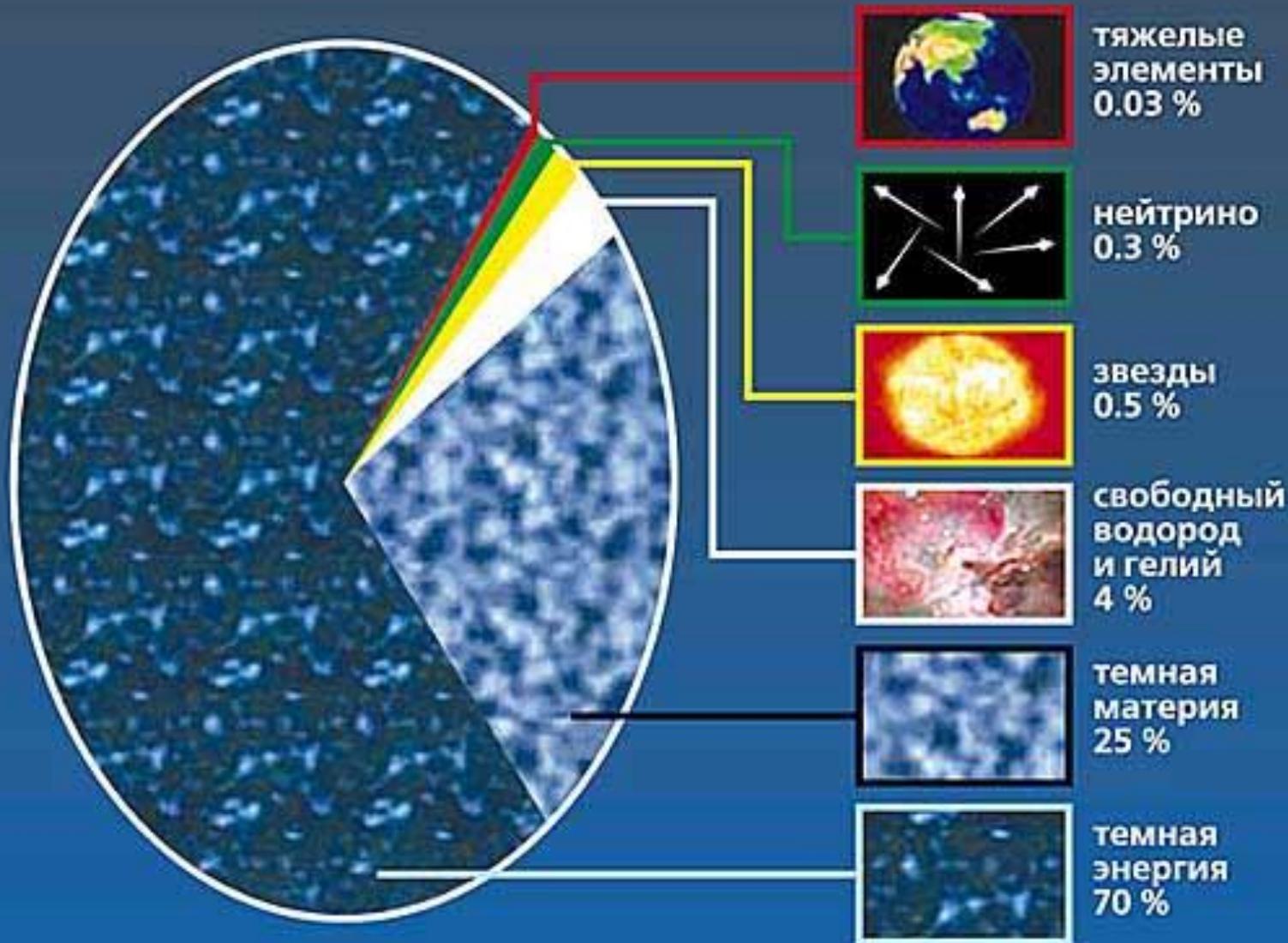
На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

ДАЛЕКОЕ ПРОТОСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК



~1 млрд лет
после Большого
Взрыва

СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ



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

Неизвестные частицы
Нейтралино? Аксионы?



Неизвестные поля или вакуум

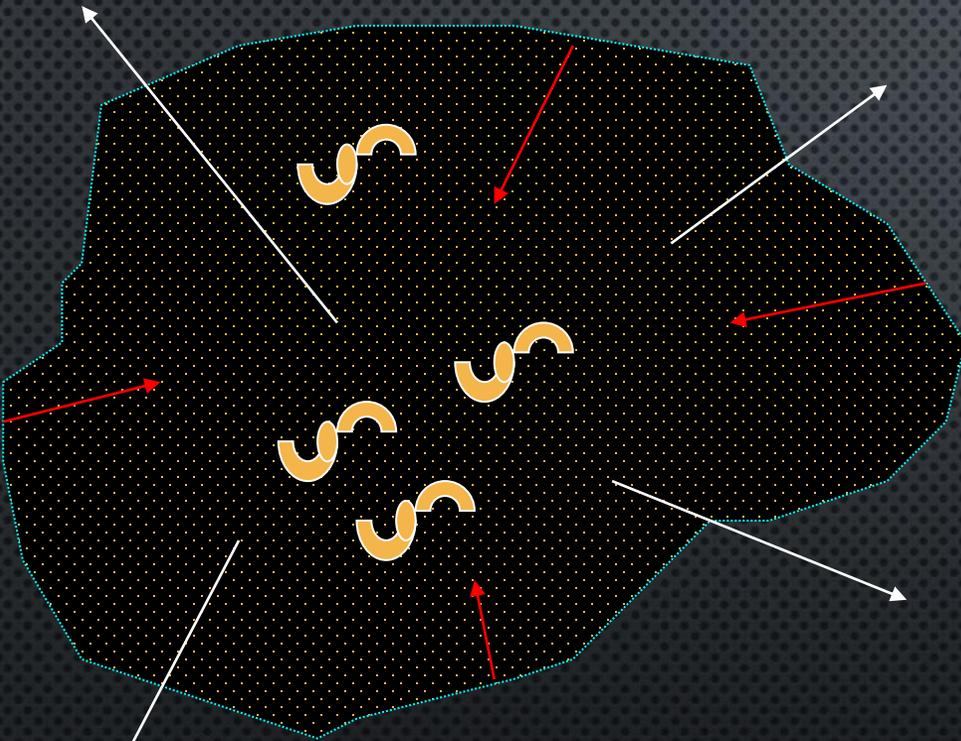
КОГДА И ЗАЧЕМ ЕГО ПРИДУМАЛИ?

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.

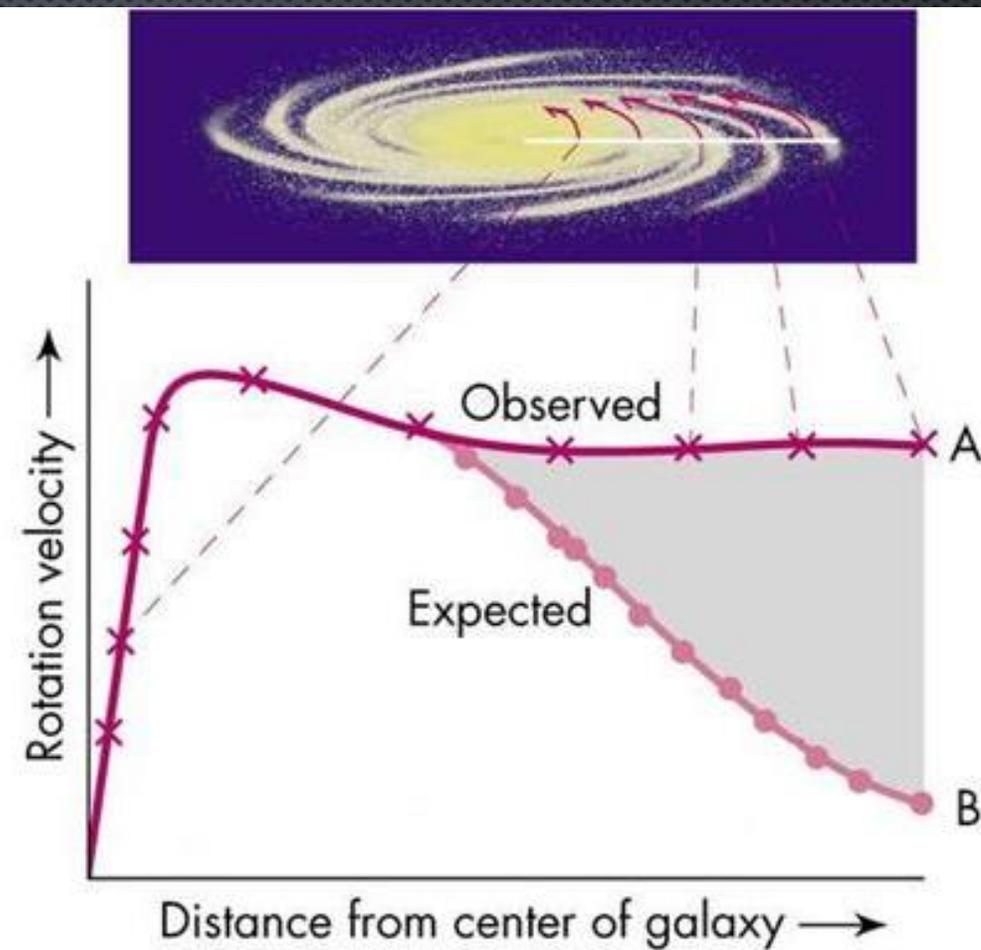


<http://www.spacedaily.com>



См. также работу Оорта (1932 г.) о вертикальном движении звезд в диске Галактики.

ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК



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

КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК

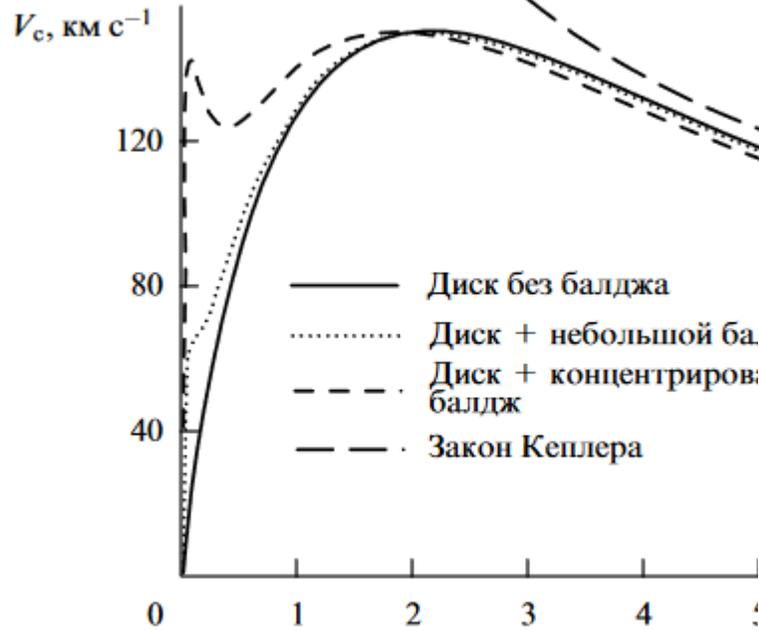


Рис. 2. Кривые вращения в отсутствие гало.

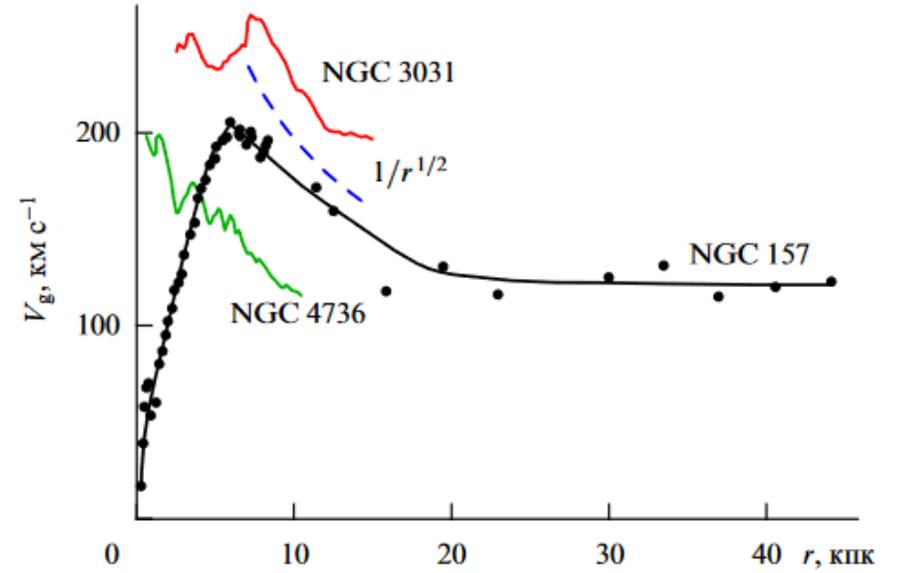
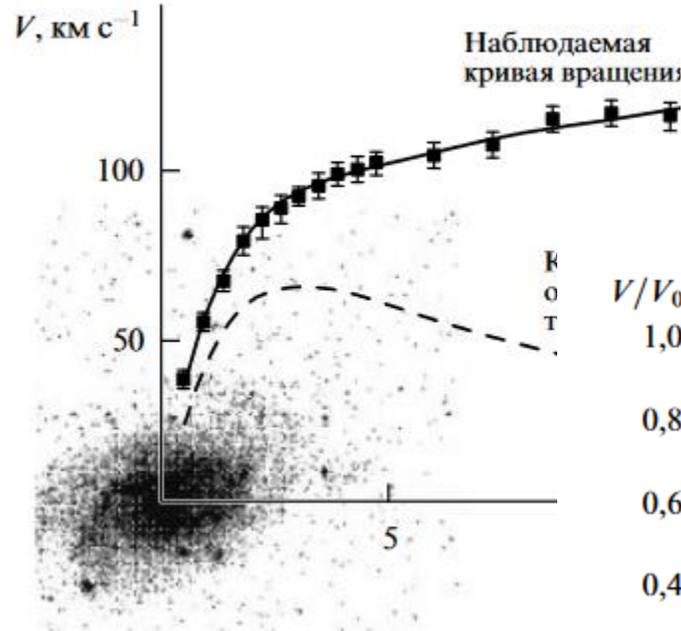
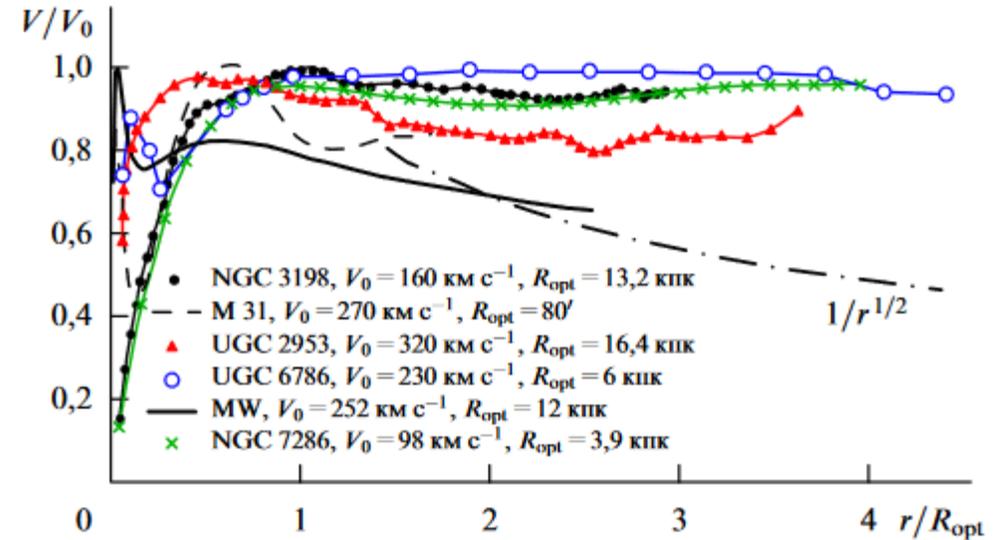


Рис. 5. Примеры кривых вращения спиральных галактик с убыванием скорости вращения в пределах оптических границ: NGC 157 [53], NGC 4736, NGC 3031 [54]. Штриховая линия — кеплеровская кривая вращения $\propto 1/\sqrt{r}$.



Весной 2017 г. появилось несколько новых важных примеров галактик, в которых вклад темного вещества по данным наблюдений довольно мал.

ЛИНЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА МАССЫ

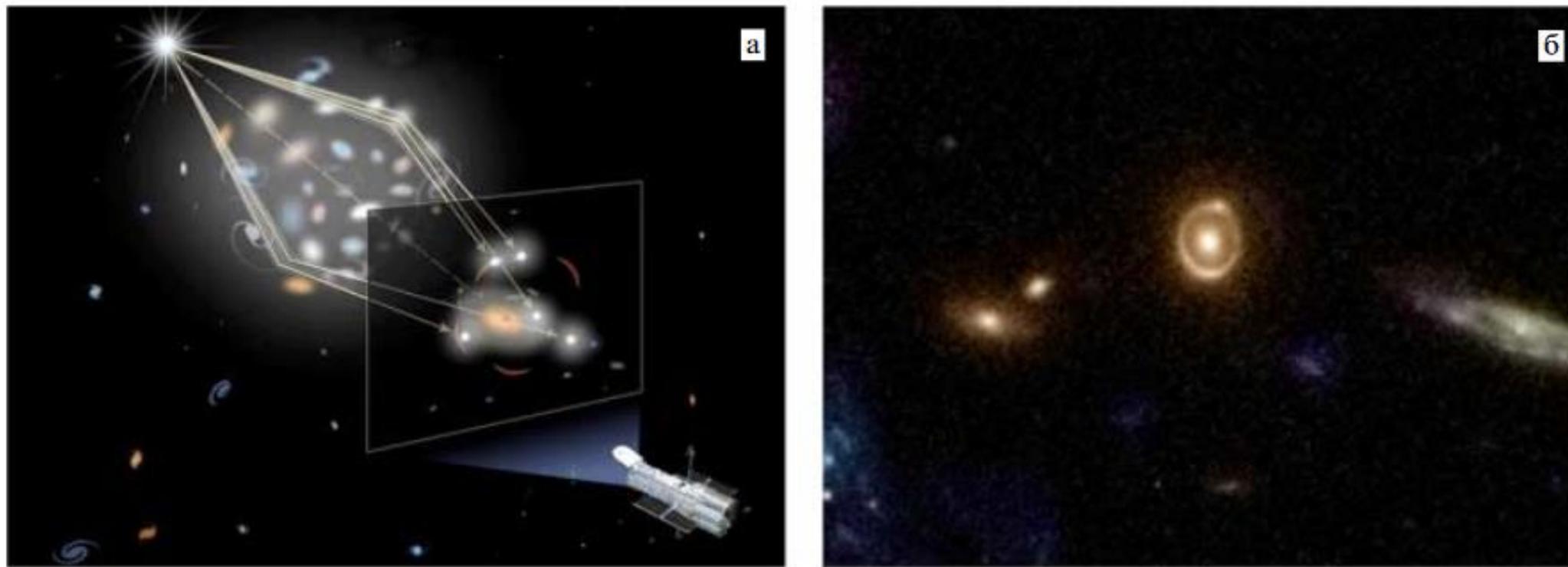


Рис. 16. (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038 + 4133 (телескоп Хаббла).

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

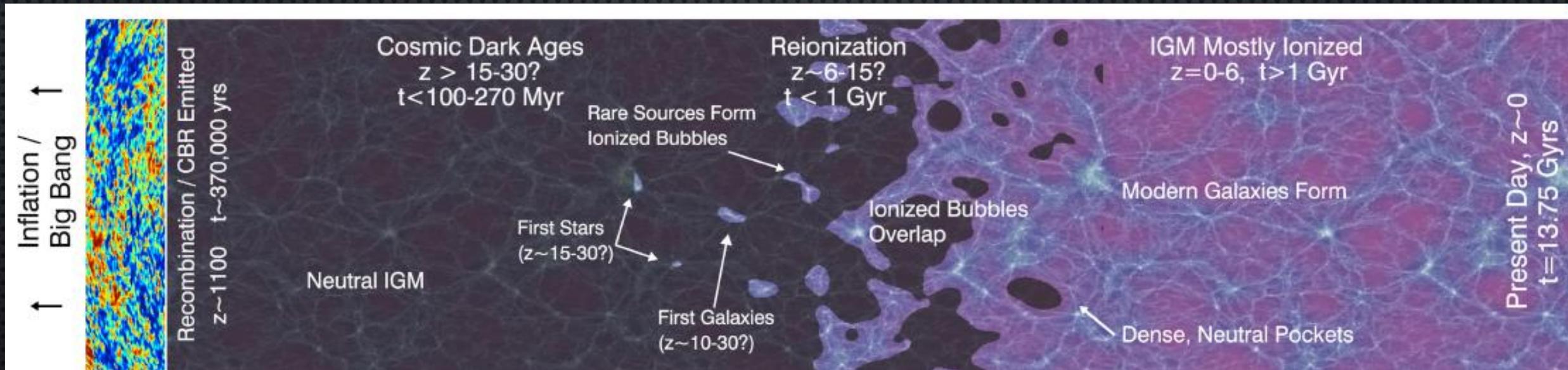
ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

В начале вселенная была горячей. В течение сотен тысяч лет это были ионизованные водород и гелий.

Спустя примерно 370 000 лет после начала расширения вещество рекомбинировало – стало нейтральным.

Наступили «темные времена».

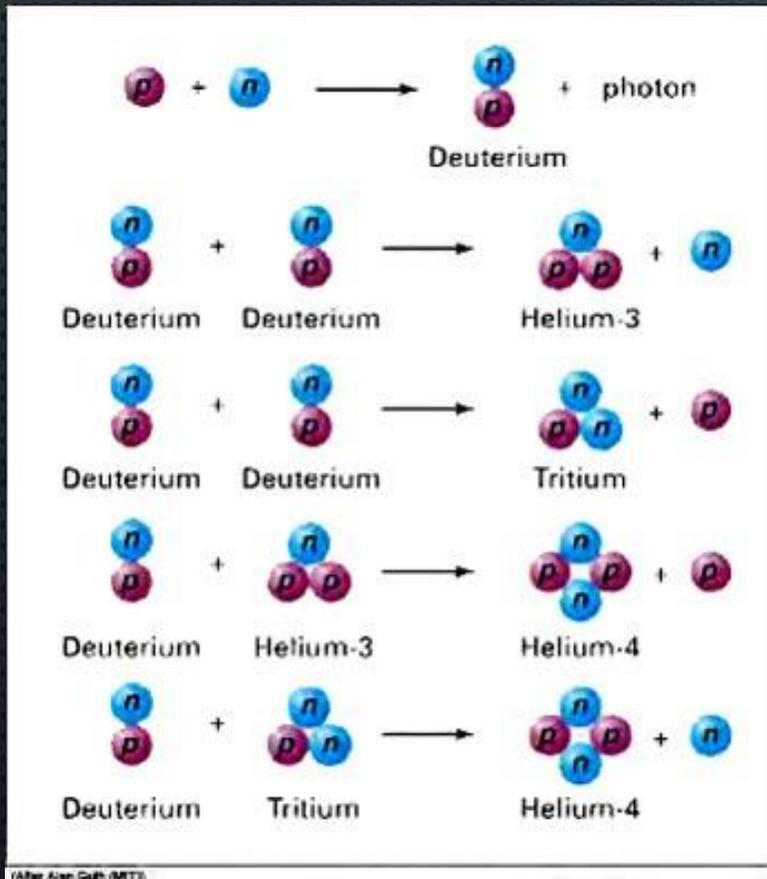
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



РЕЛИКТОВОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ

После работ Фридмана и открытия расширения вселенной стало ясно, что в своей молодости вселенная имела большую плотность. Но была ли она при этом горячей или холодной???

Правильная модель была построена на основе расчета синтеза гелия.



Чтобы успеть создать гелий в расширяющейся Вселенной, надо, чтобы она была не только плотной, но и горячей. От этой горячей эпохи до наших дней должно было дожить излучение, изрядно остыв.



Ральф Альфер



Георгий Гамов

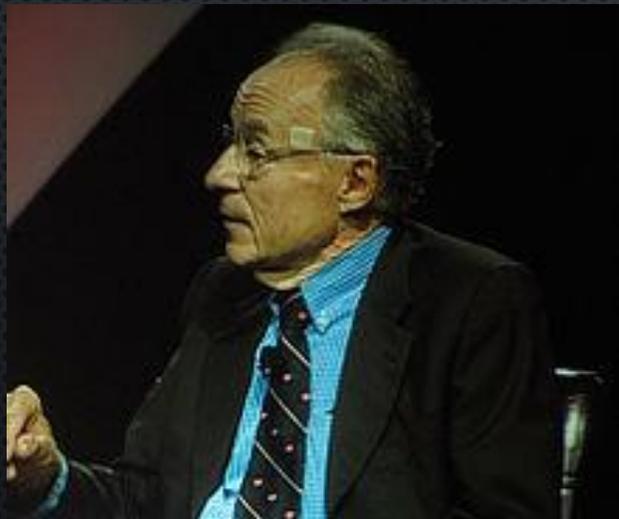
НЕОЖИДАННОЕ ОТКРЫТИЕ

Хотя реликтовое излучение было предсказано, и его следы его присутствия даже были известны (но не распознаны), и были планы искать его целенаправленно, само открытие произошло достаточно случайно.

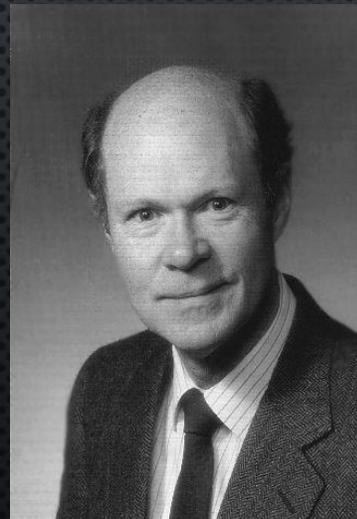
ПОМЕХИ! ШУМ В РАДИОЭФИРЕ!!!!

Но, после открытия, осознание того, что было найдено пришло очень быстро, потому что теоретики уже ждали.

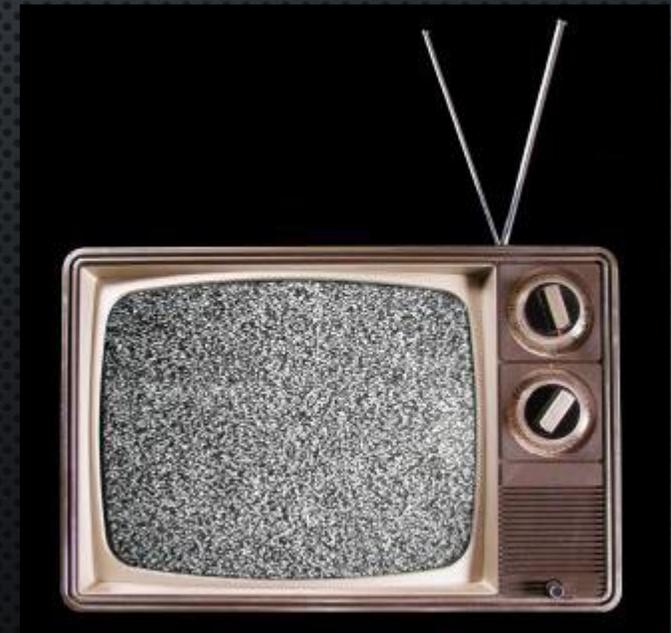
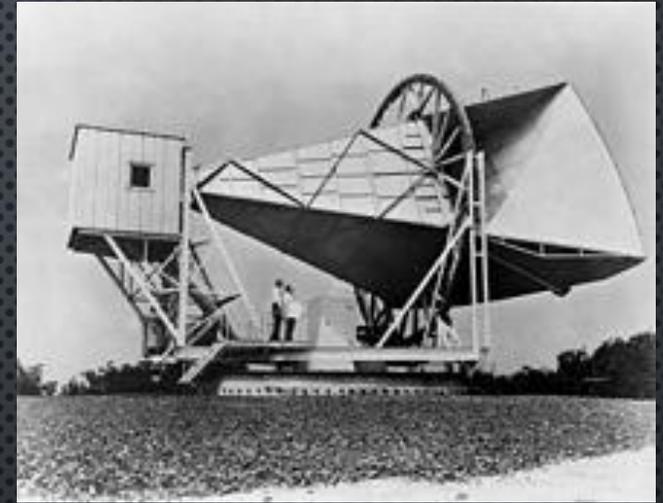
За свое открытие Пензиас и Вилсон в 1978 г. получили Нобелевскую премию по физике.



Арно Пензиас

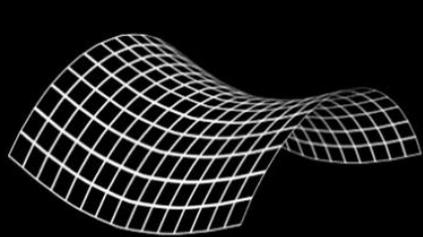
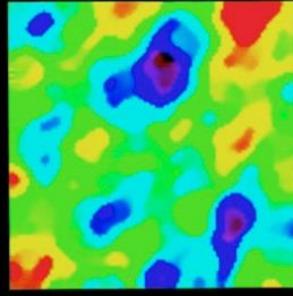
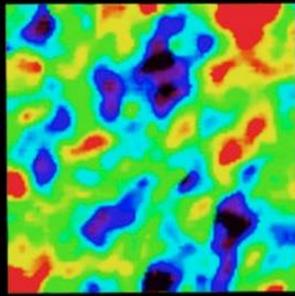
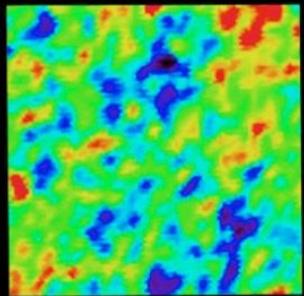


Роберт Вилсон

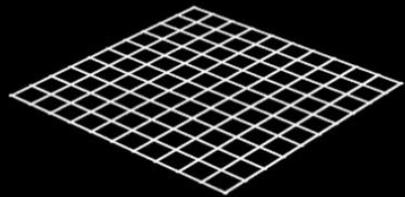


ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

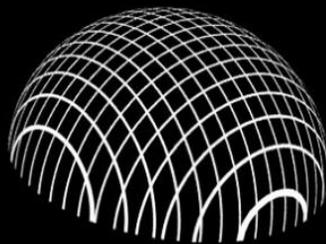
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT



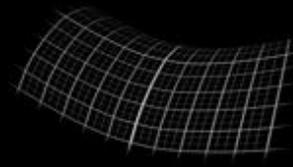
CLOSED

Наблюдения позволяют определить среднюю плотность вселенной.

Данные по первичному синтезу элементов позволяют отдельно определить плотность барионного вещества.

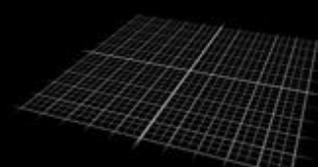
$$\Omega_{\text{Total}} < 1$$

LOWER
DENSITY



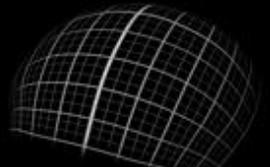
$$\Omega_{\text{Total}} = 1$$

CRITICAL
DENSITY

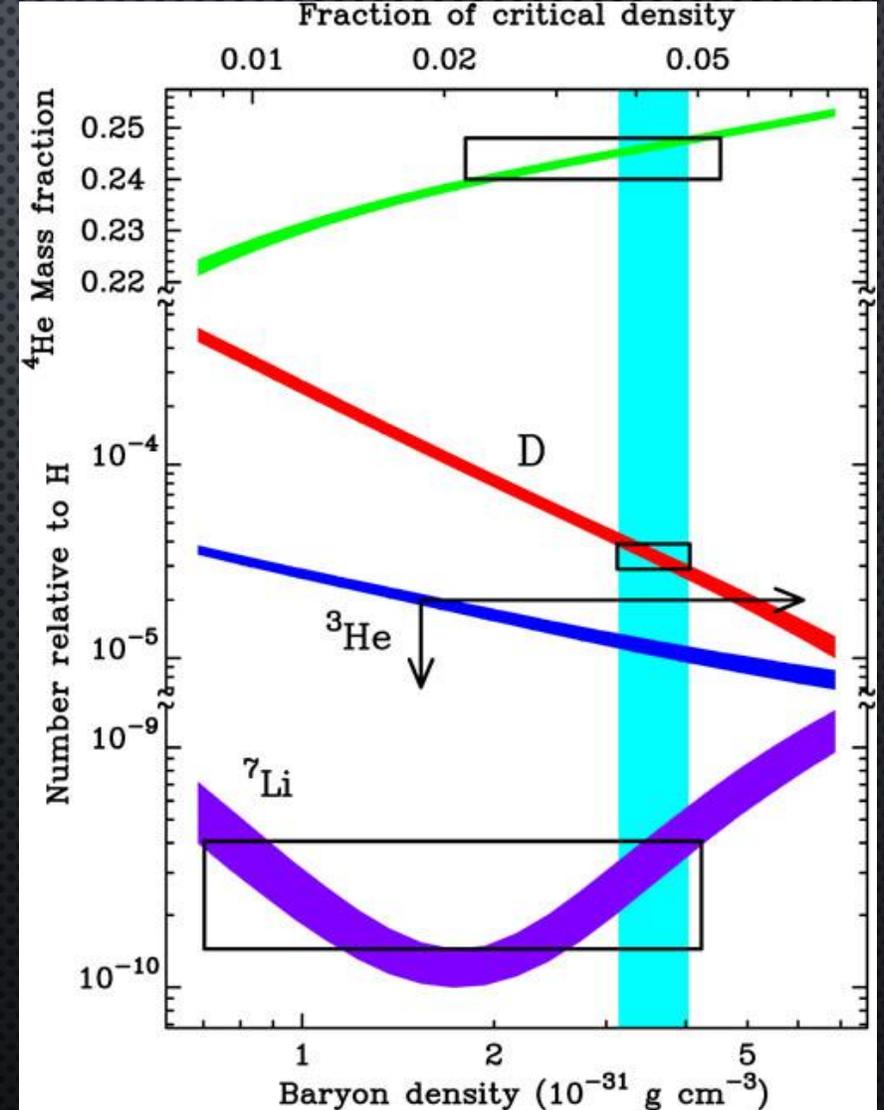
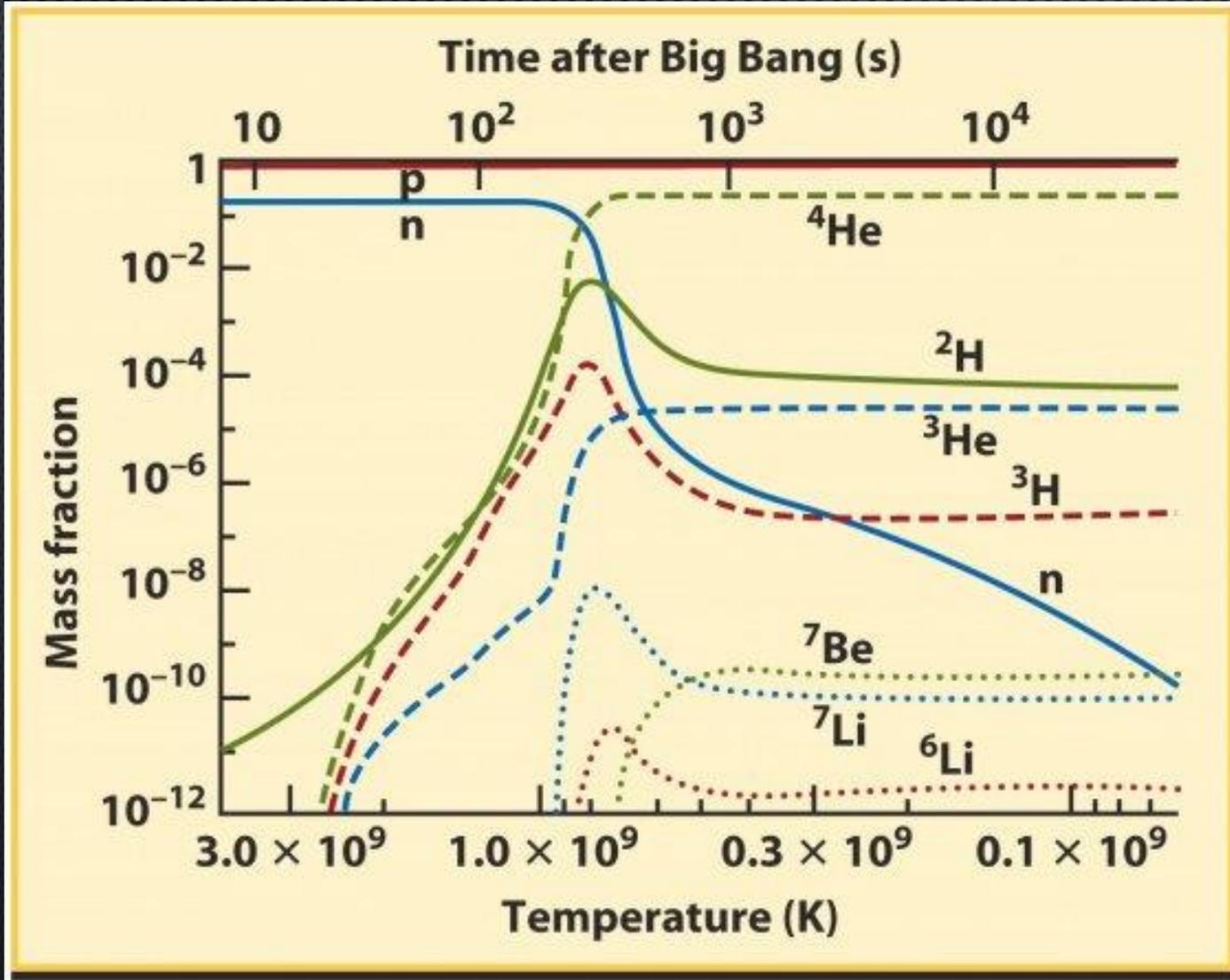


$$\Omega_{\text{Total}} > 1$$

HIGHER
DENSITY

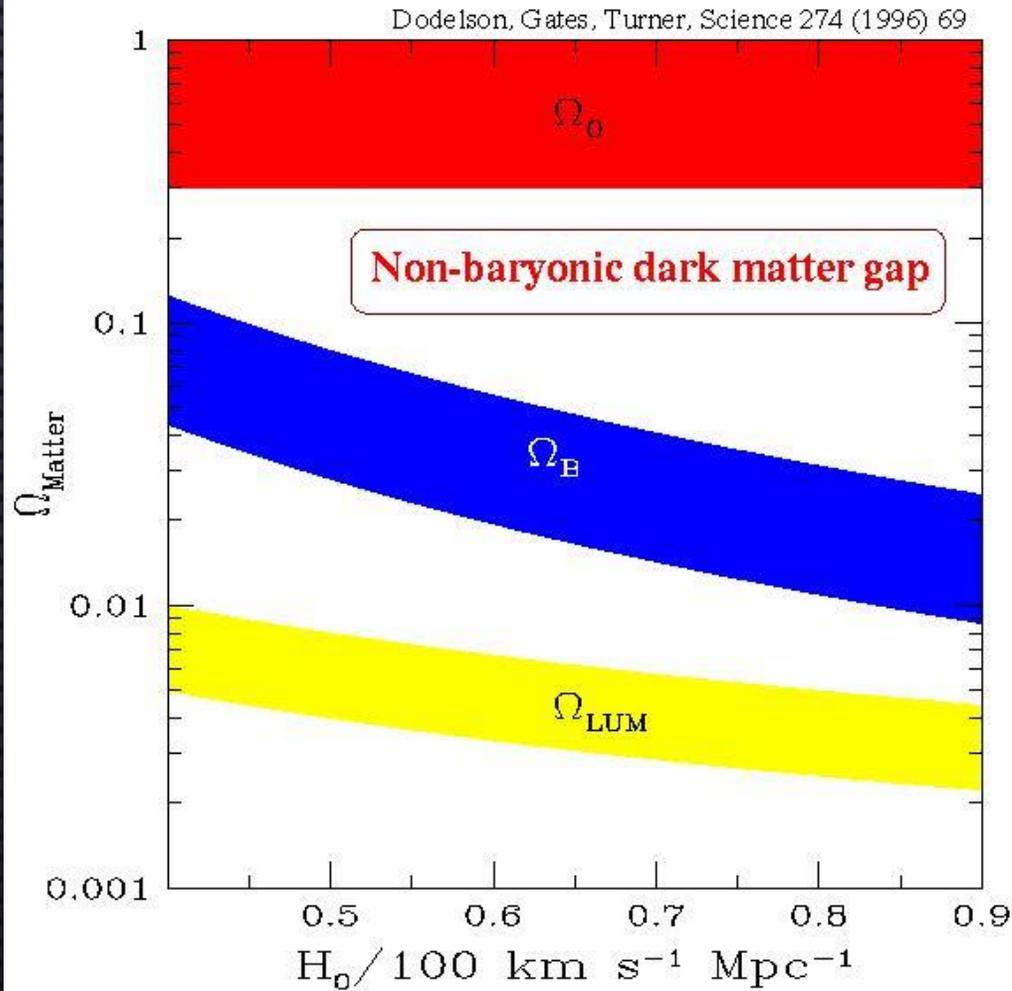


ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ



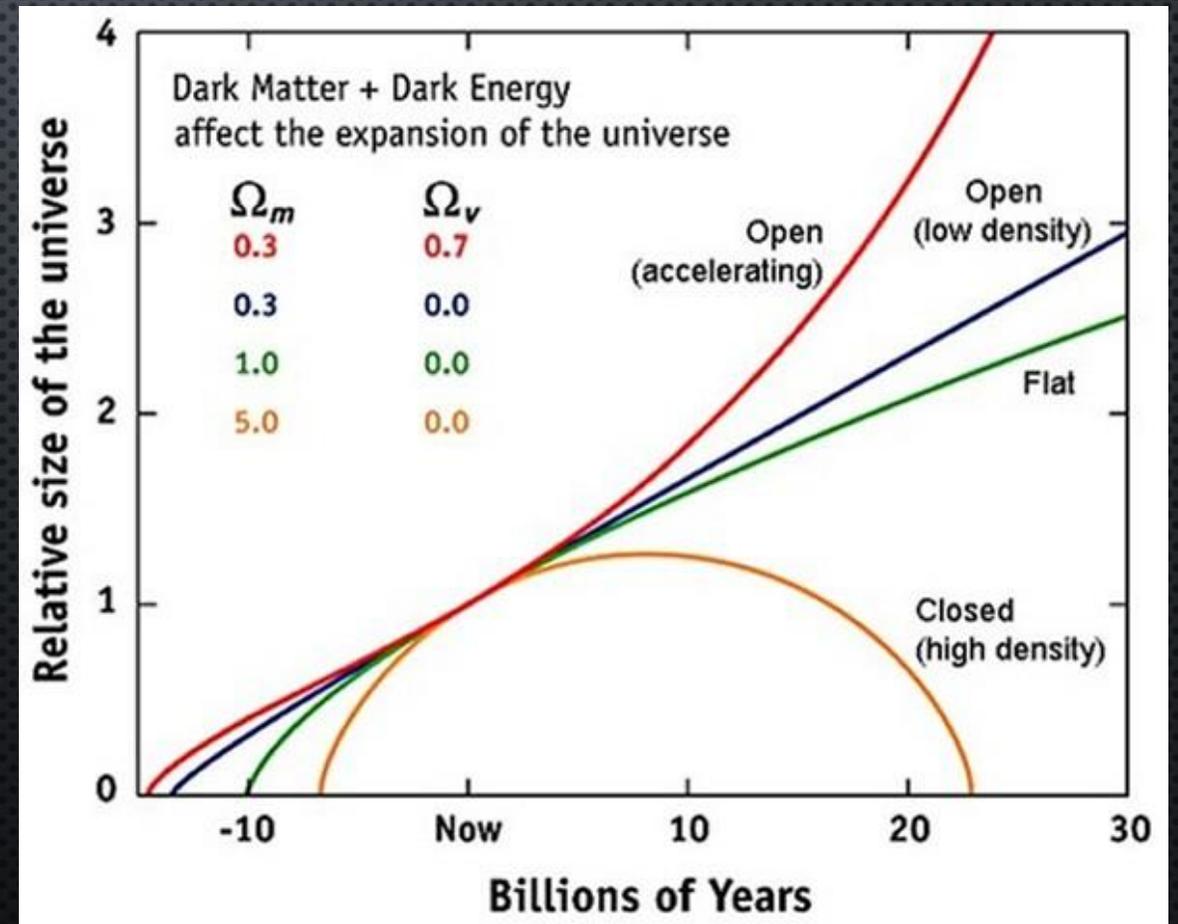
НУКЛЕОСИНТЕЗ + РЕЛИКТ = ПРОБЛЕМА ДЛЯ БАРИОНОВ

Motivation for non-baryonic dark matter



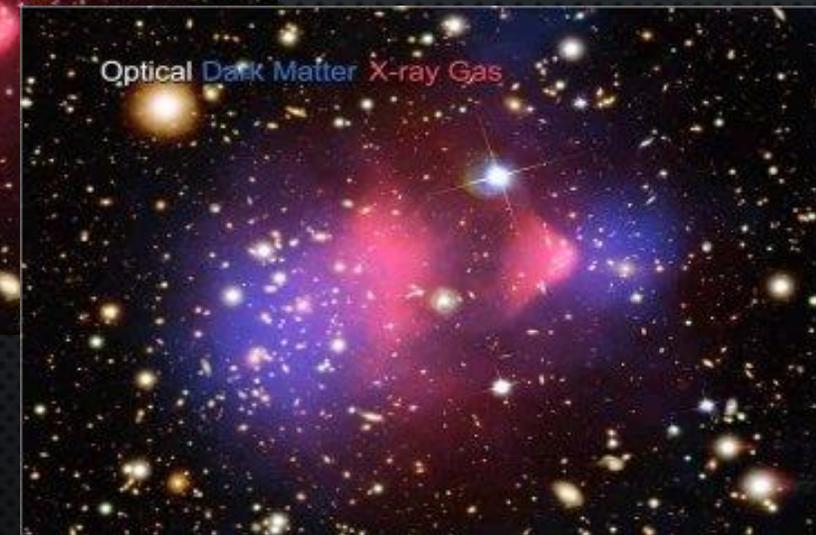
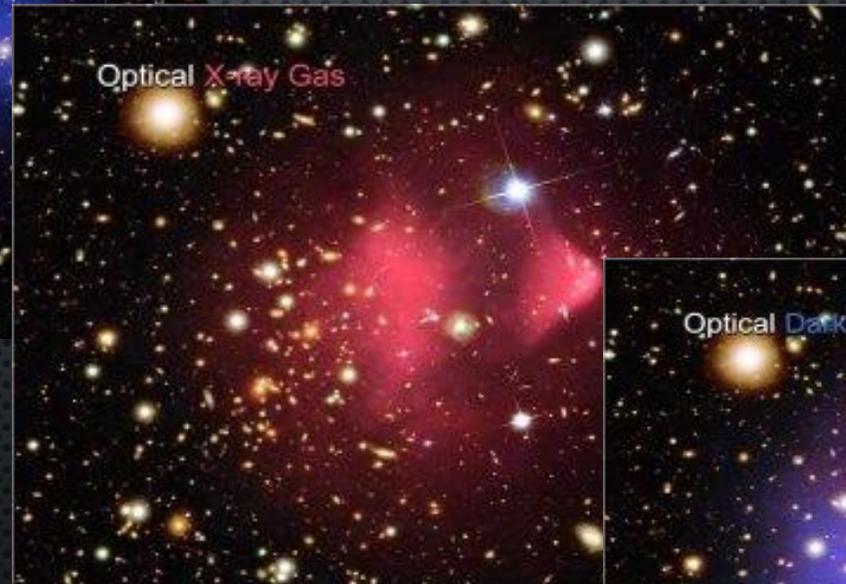
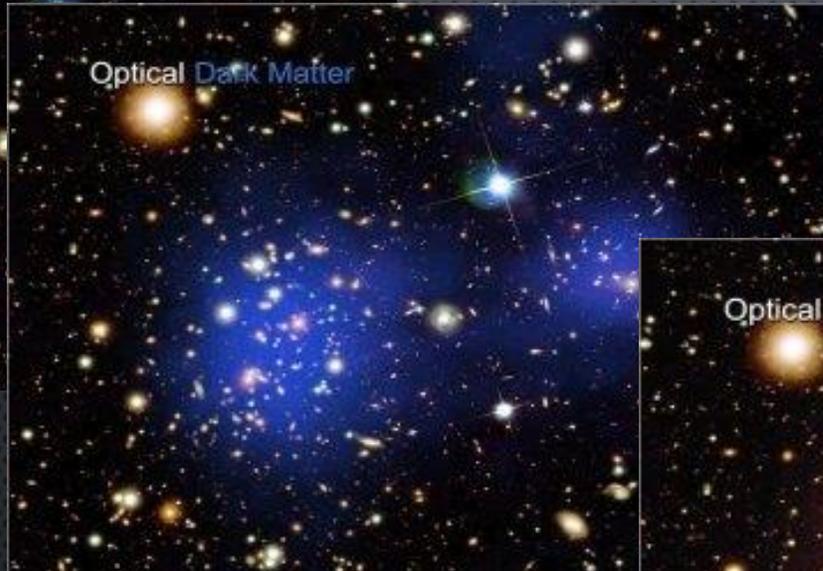
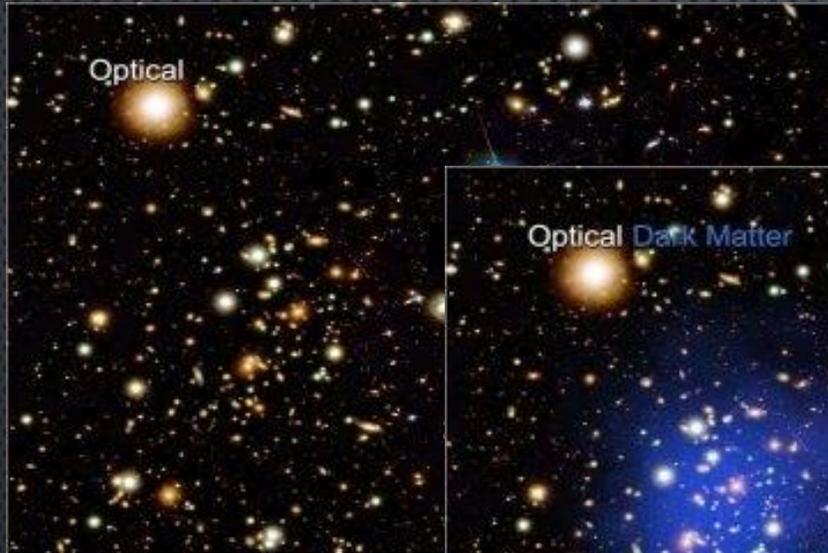
XIth Rencontres de Blois '99

Данные по содержанию элементов вместе с данными по реликтовому излучению однозначно говорят о том, что барионов не хватает для объяснения плотности вселенной!



СИЛЬНЫЙ ПРЯМОЙ АРГУМЕНТ

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

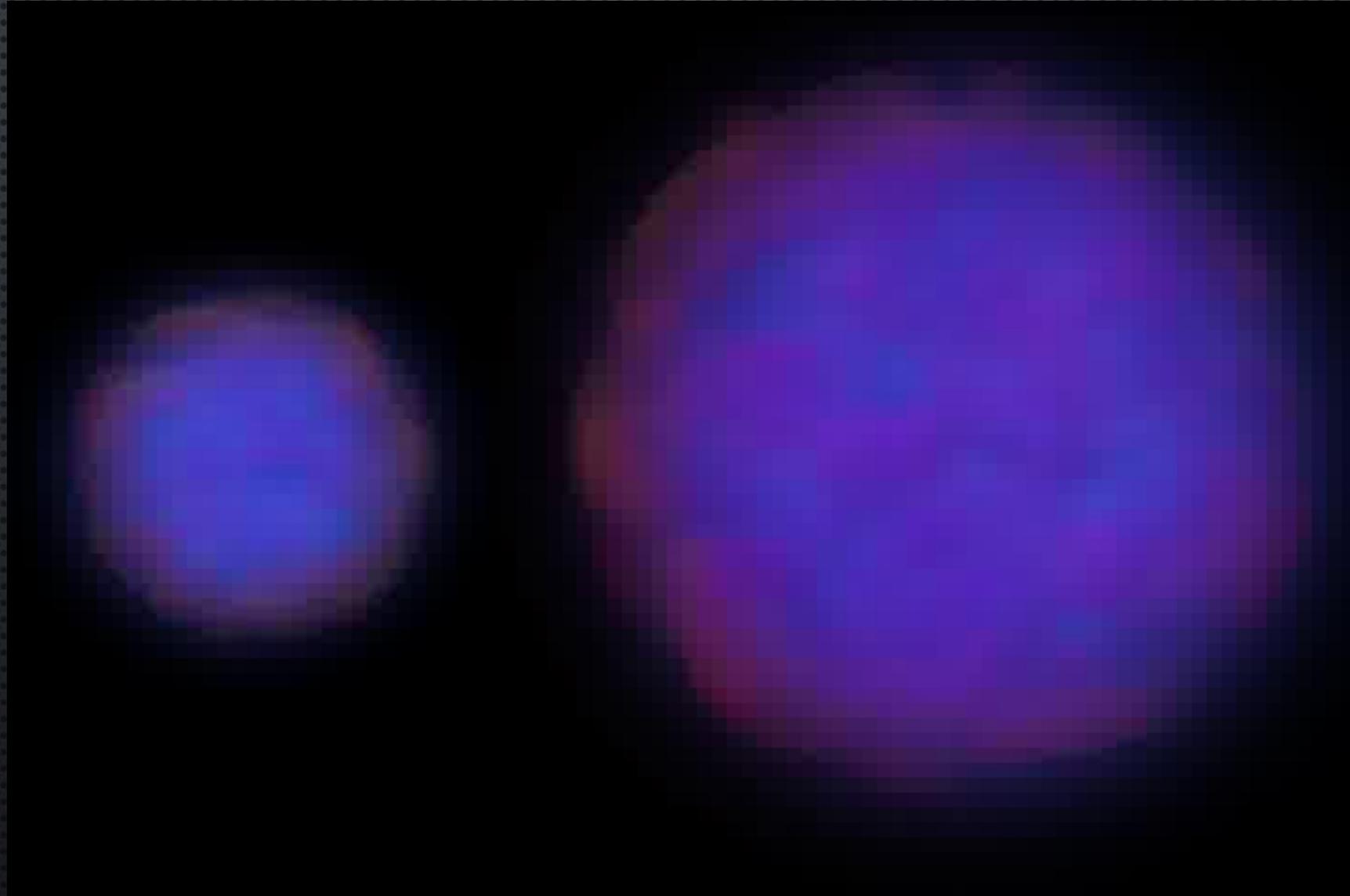


ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ



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

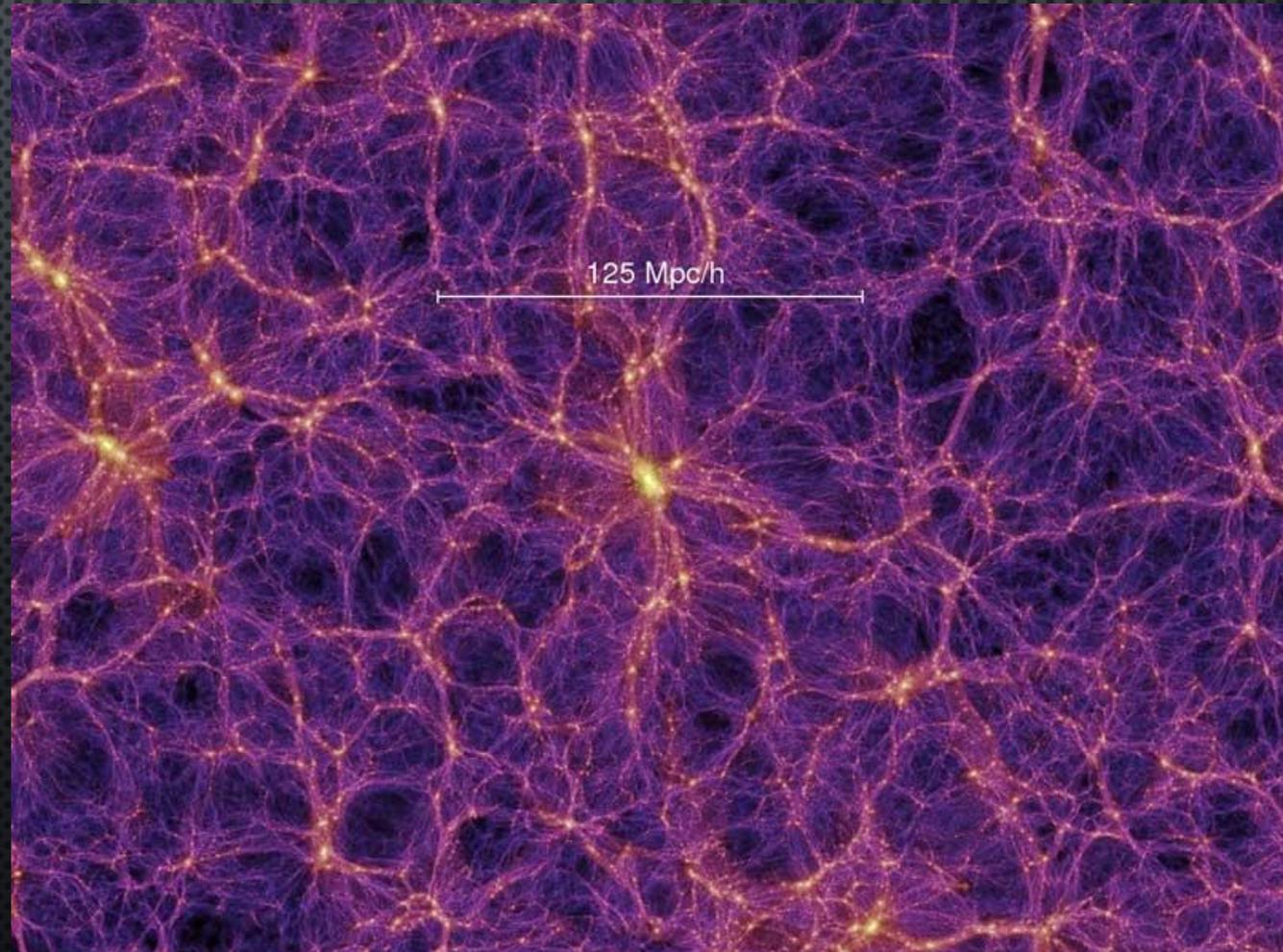
СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК



СКЕЛЕТ ВСЕЛЕННОЙ

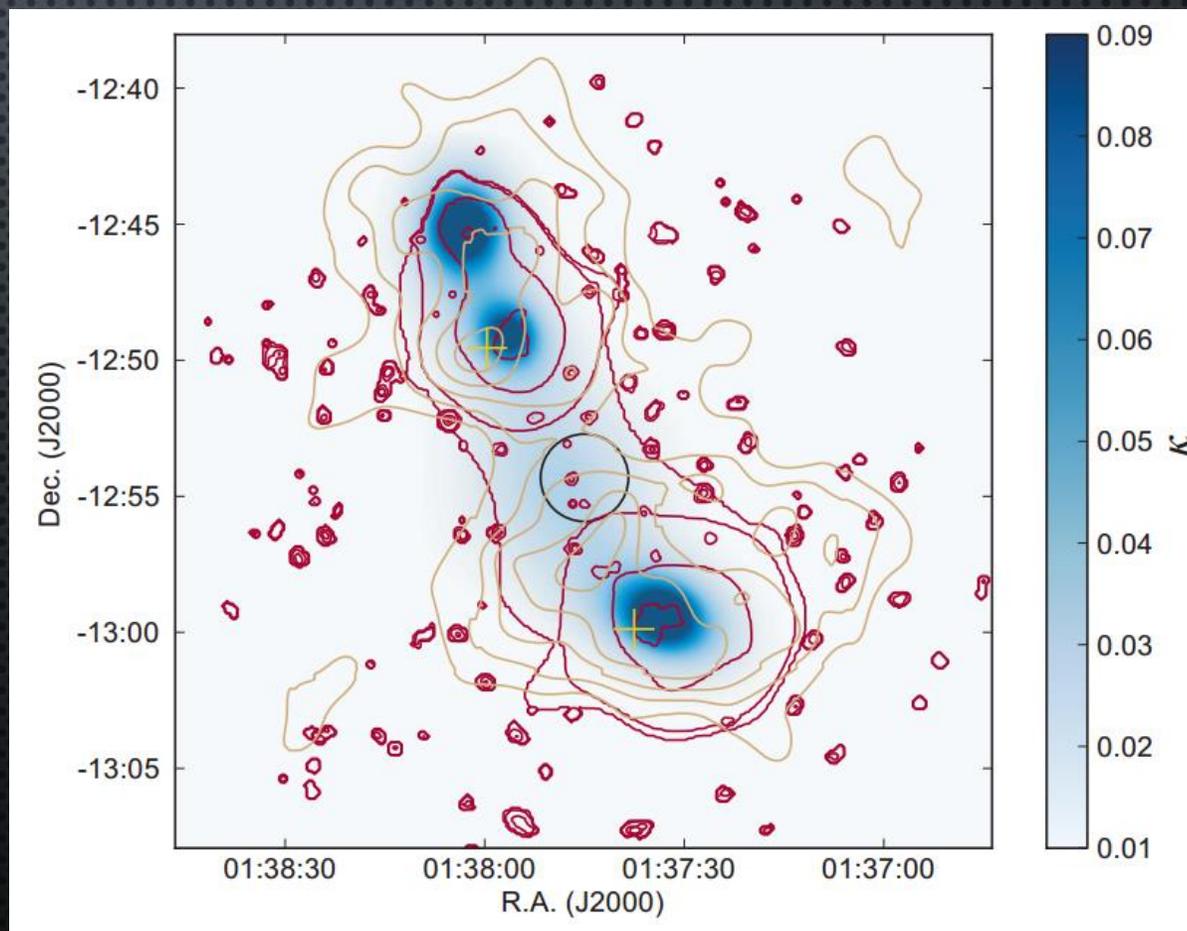
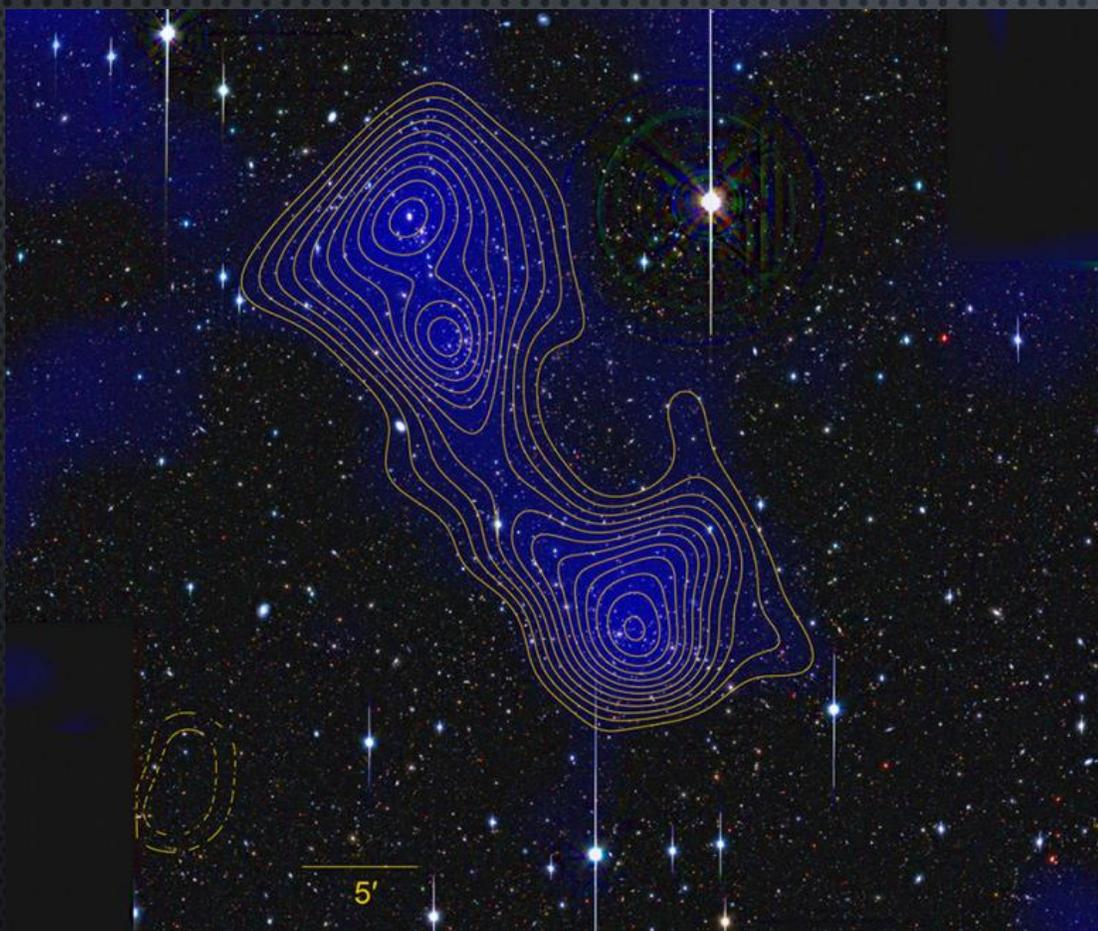
Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом. Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ – т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

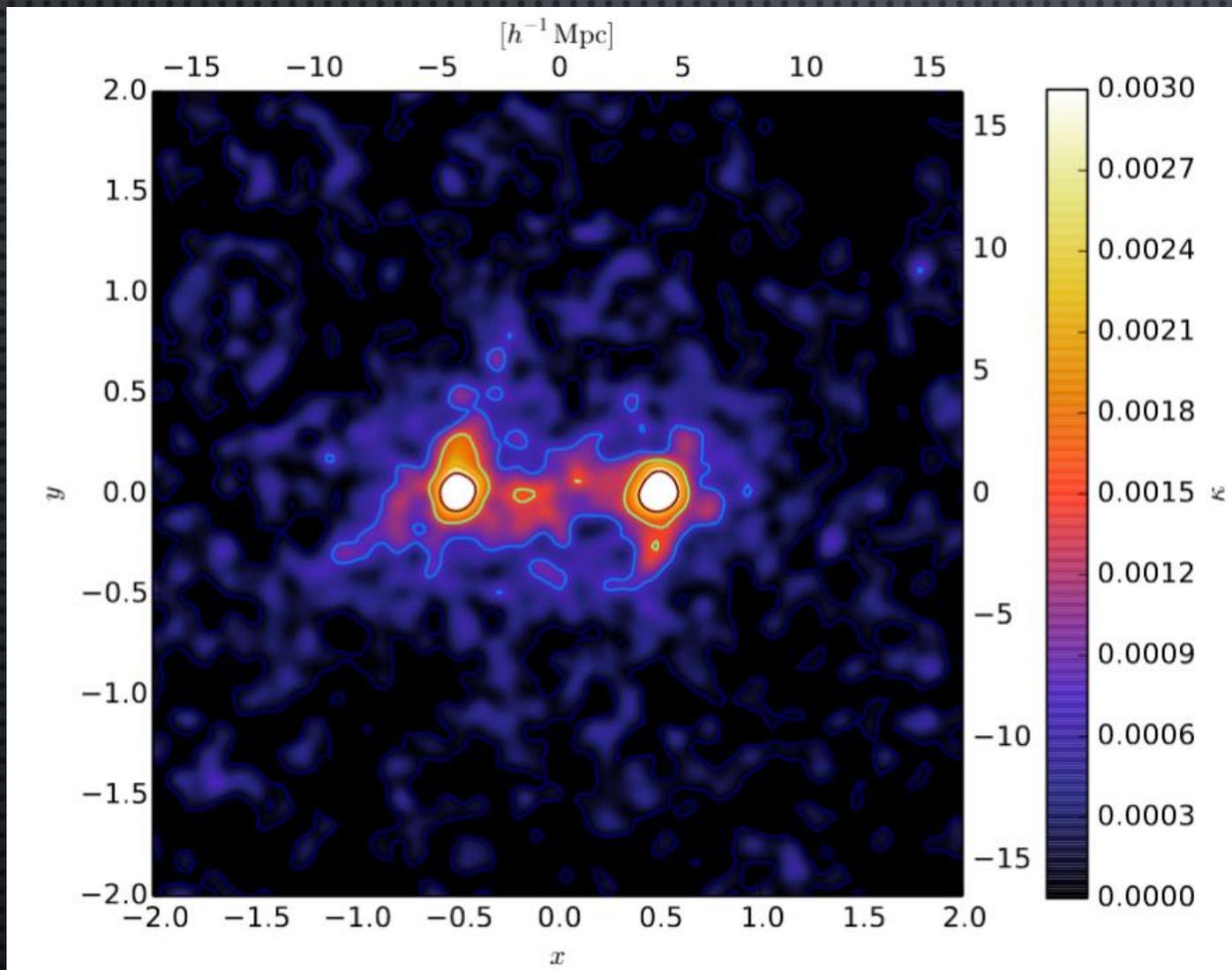


ВОЛОКНО ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

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



«МОСТ» МЕЖДУ ГАЛАКТИКАМИ

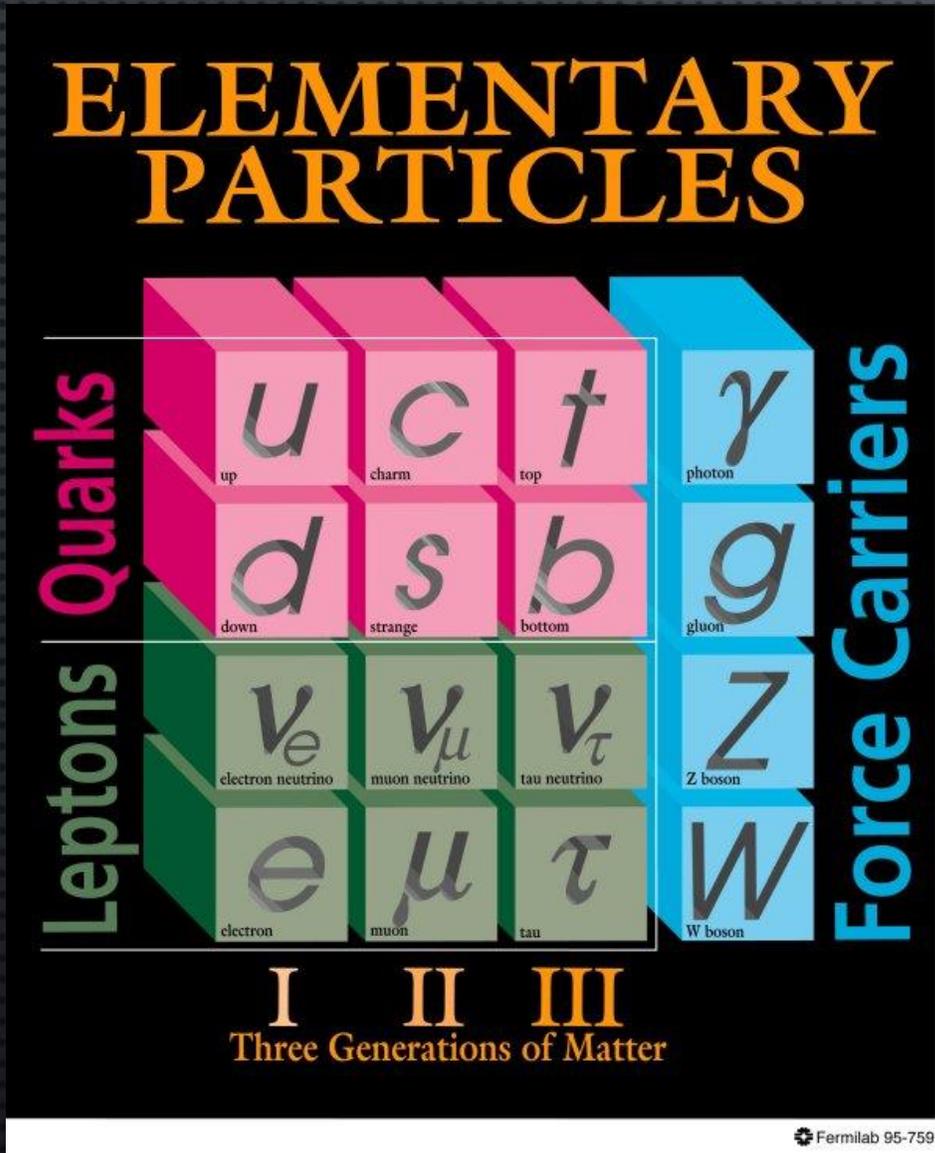


Результат получен не для какой-то конкретной пары галактик, а в результате сложения данных по многим парам.

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

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ



Частицы темного вещества должны быть другими, т.е. это не могут быть частицы Стандартной модели.

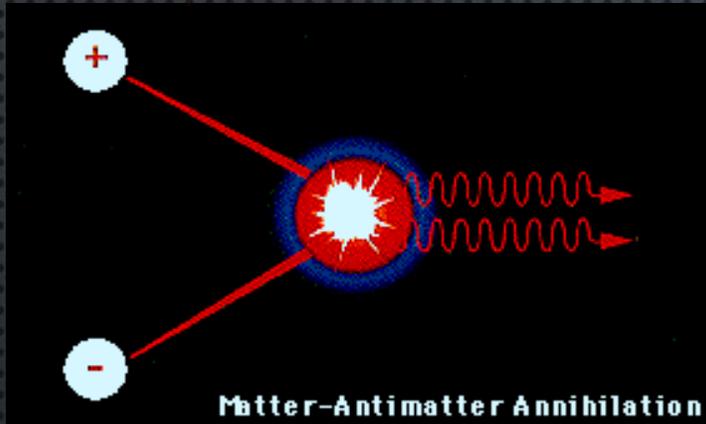
Обсуждаются самые разные варианты.

Какие-то из кандидатов можно обнаружить в лабораторных экспериментах или астрономических наблюдениях.

А какие-то надолго останутся неуловимыми.

ПОИСК ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

- 1) Частицы темного вещества пытаются поймать в подземных лабораториях. Есть основания думать, что в ближайшие годы это будет сделано.



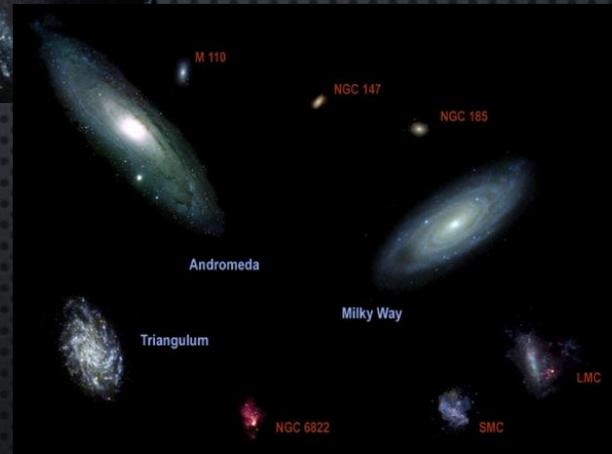
- 2) Также можно искать гамма-лучи от аннигиляции частиц темного вещества

Такие исследования активно ведутся с помощью обсерватории имени Ферми и наземных гамма-телескопов.

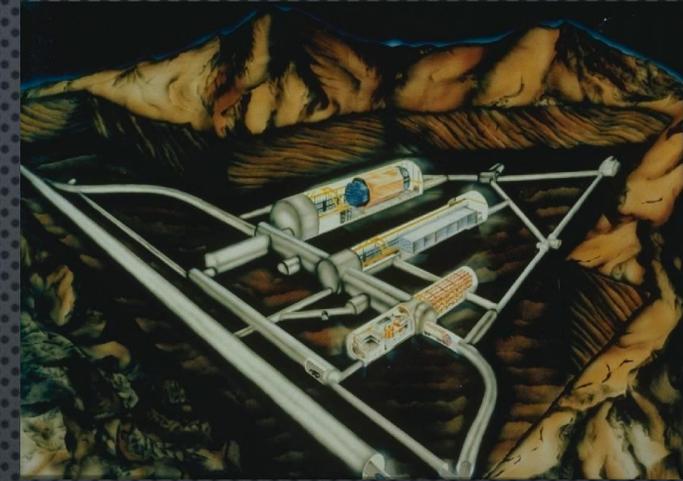


Галактика

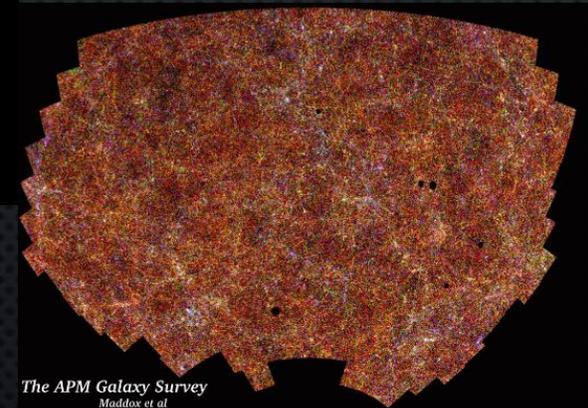
- 3) Поиск античастиц от аннигиляции или распада частиц темного вещества. (см. УФН 2017 N1)



Близкие галактики



Фон от далеких галактик

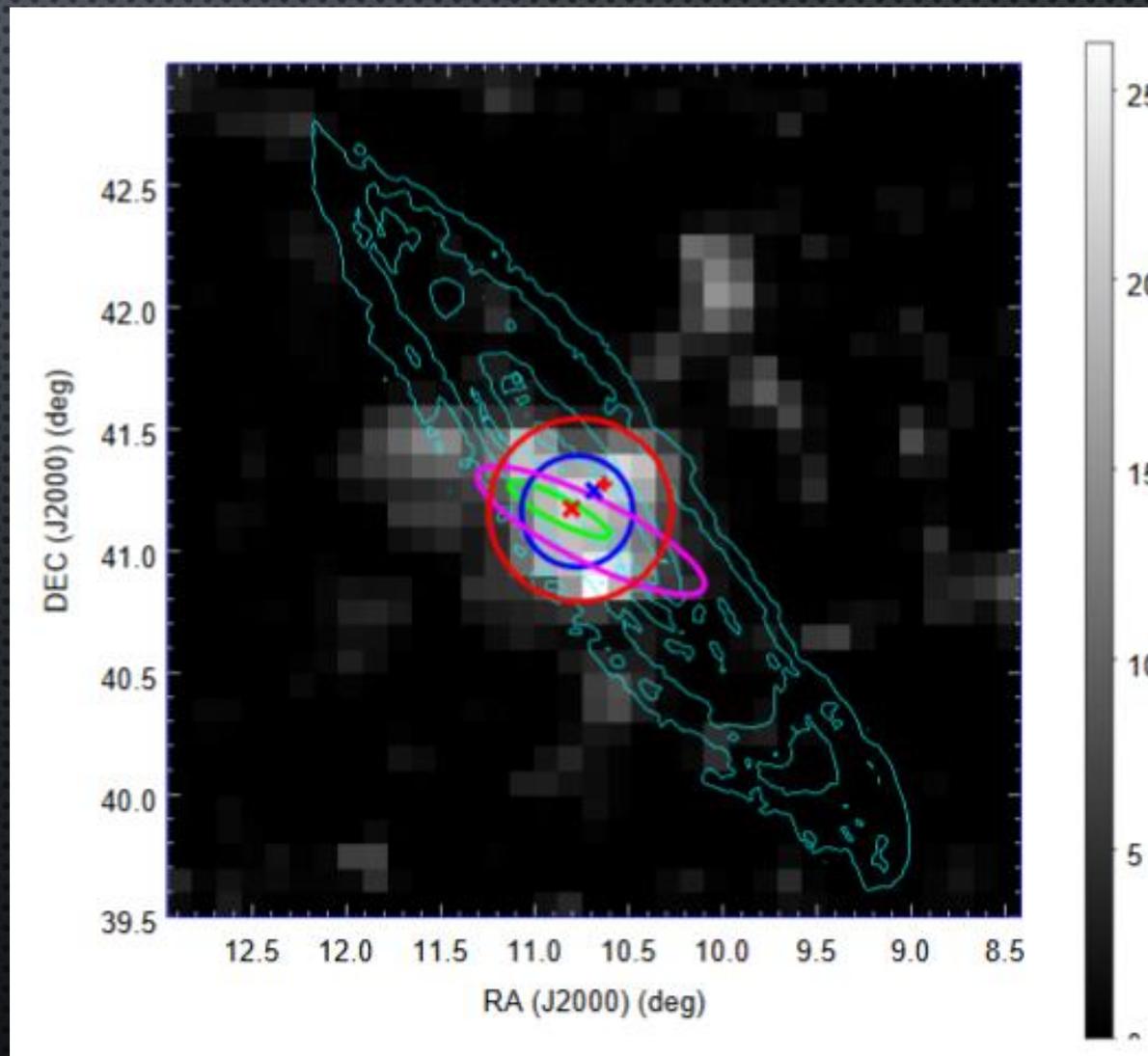
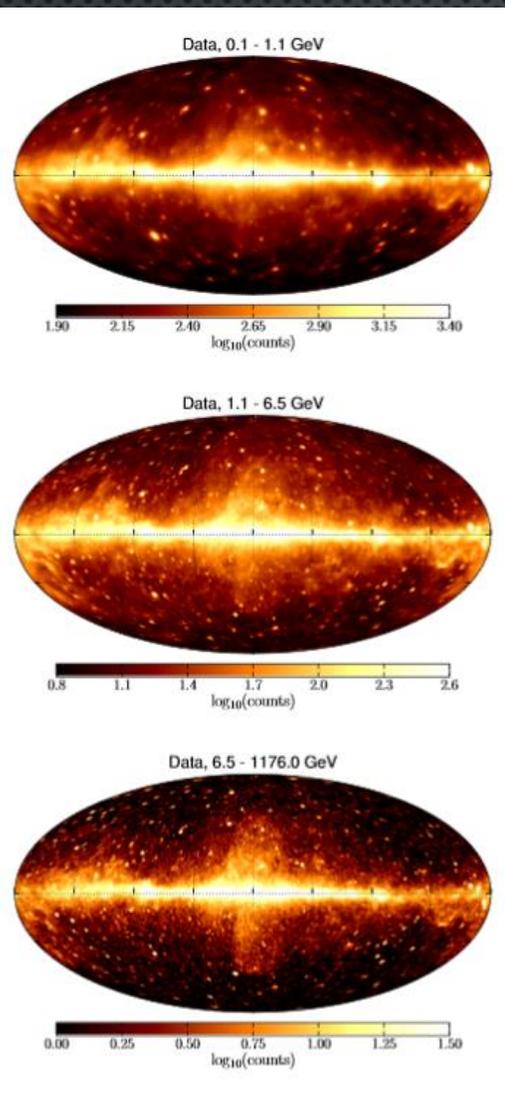


Так же была надежда найти что-то на LHC

АННИгиЛЯЦИОННЫЙ СИГНАЛ

От центра нашей Галактики пока не видно. Сигнал есть, но его приходится объяснять другими причинами.

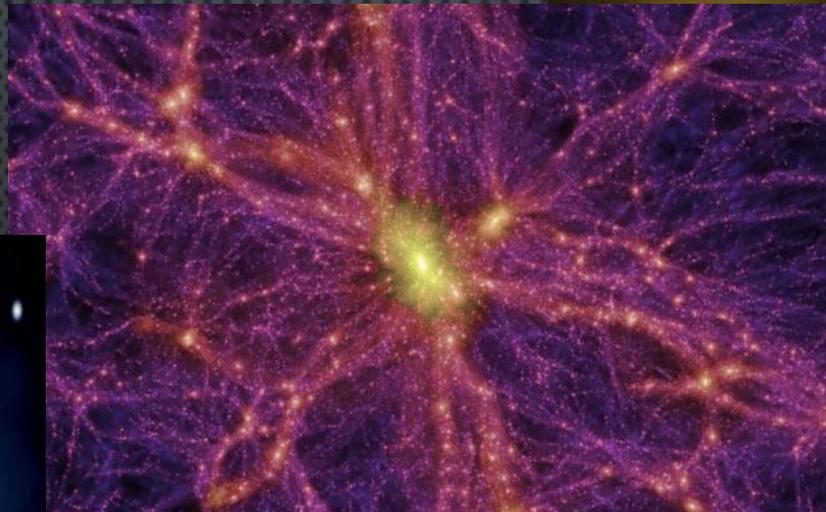
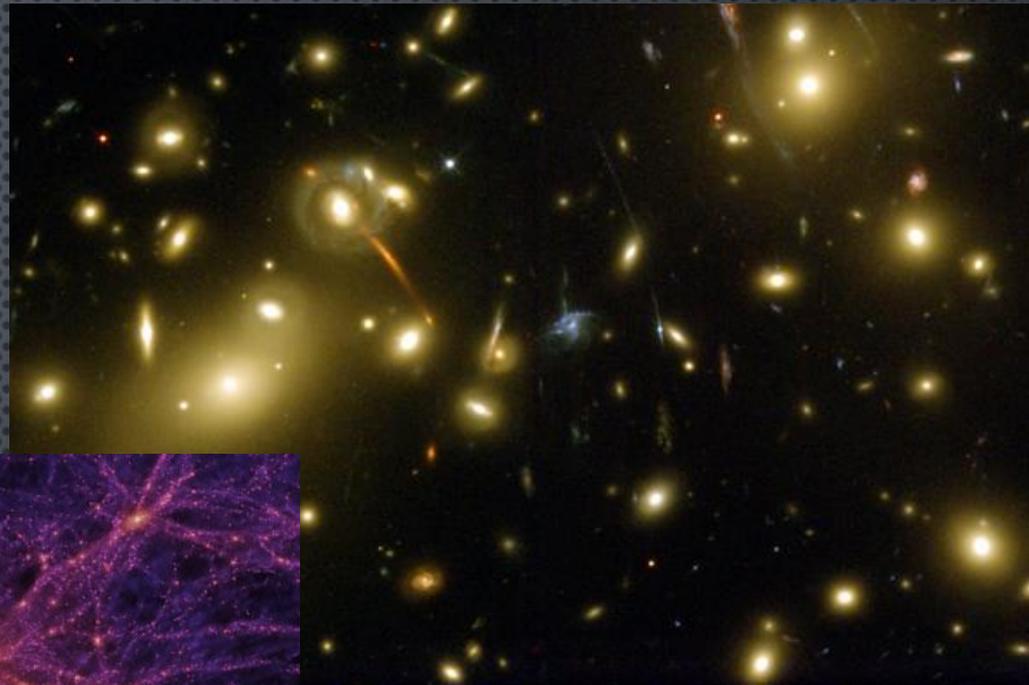
Появились сообщения об избыточном сигнале от центра М31.



(ТЕМНЫЕ) ФАКТЫ И НАДЕЖДЫ

Темная материя проявляется себя благодаря своей гравитации:

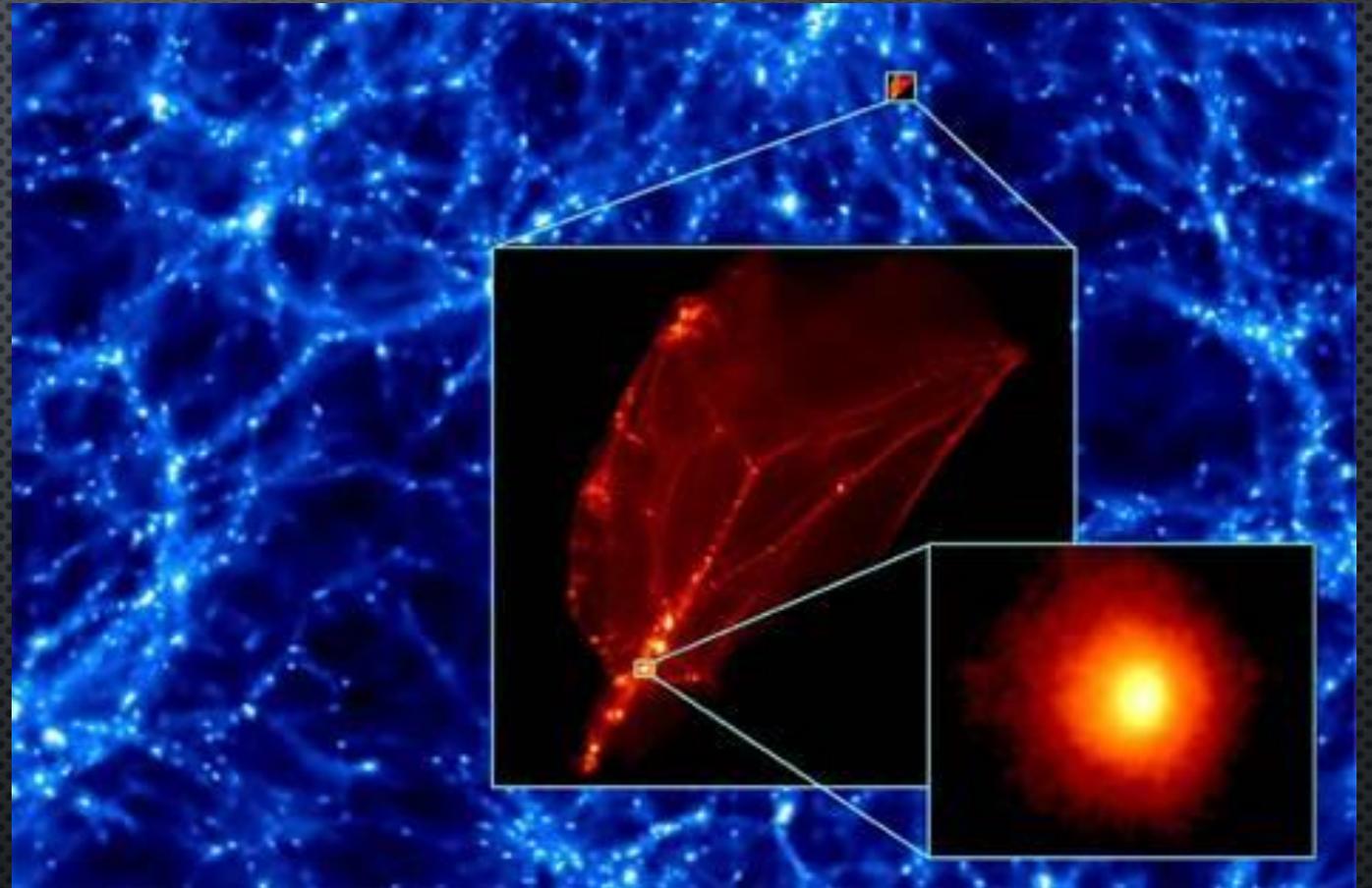
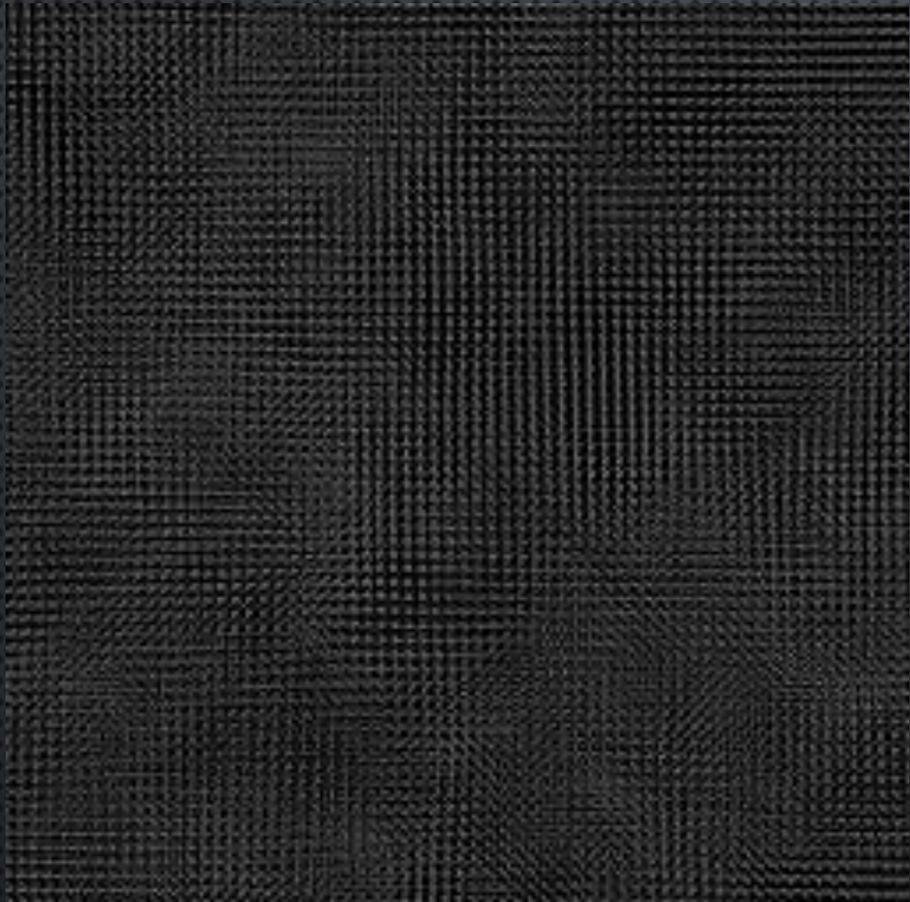
- в скоплениях галактик
- в отдельных галактиках
- в линзировании
- в росте структуры
- в полной плотности вселенной



Мы надеемся увидеть:

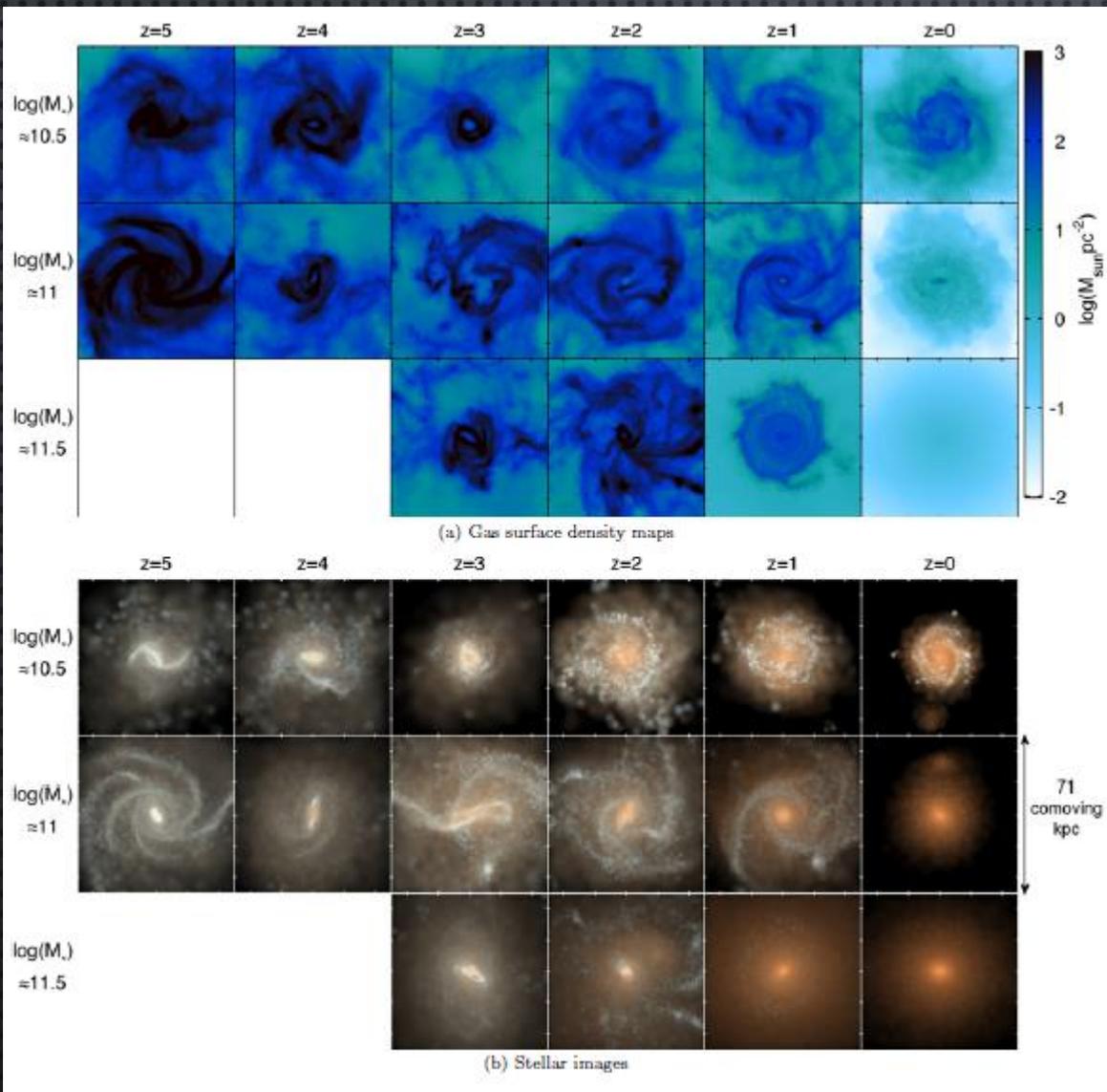
1. Прямое взаимодействие в лабораторных экспериментах;
2. Результаты аннигиляции
 - наблюдая гамма-излучение
 - наблюдая античастицы.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



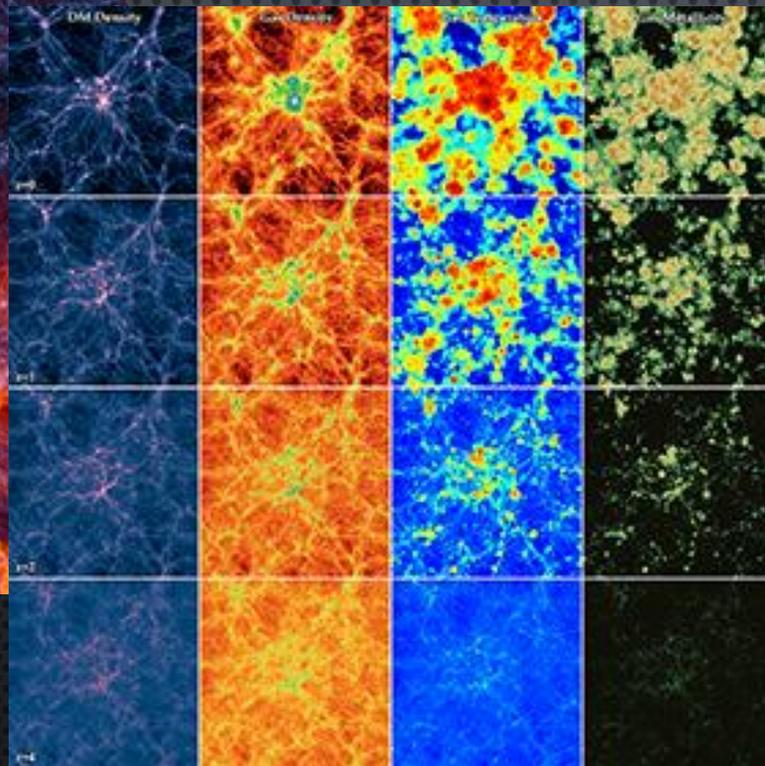
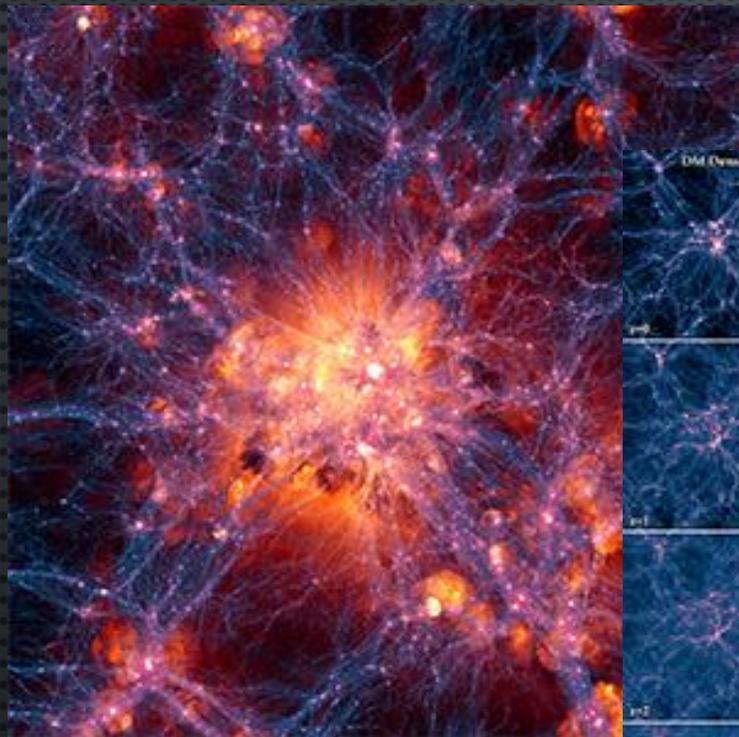
Постепенно формируется галактика, где самым массивным элементом является гало темной материи.
Как же распределено вещество в этом гало?

КРУПНЫЕ ГАЛАКТИКИ

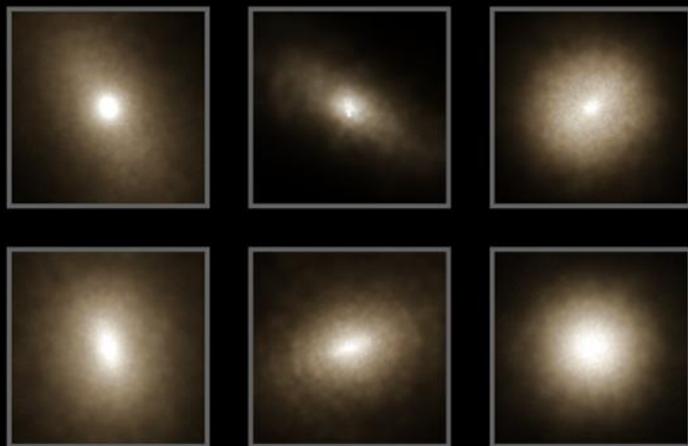


Прямо можно изучать, как образуются галактики разного вида и сравнивать с данными наблюдений.

... ДО САМЫХ
ДО ОКРАИН ...



ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



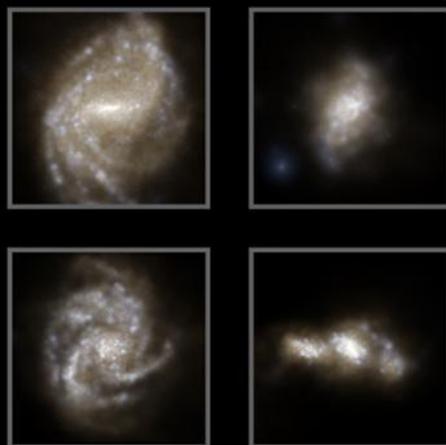
ellipticals



disk galaxies



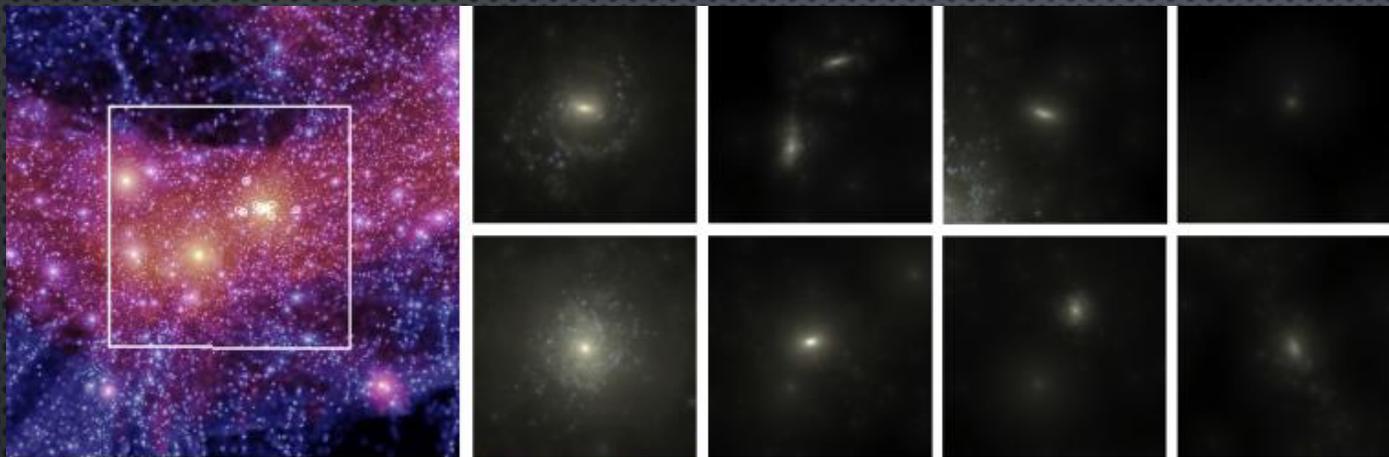
irregular



Галактики, полученные в результате численного моделирования, неотличимы от наблюдаемых.

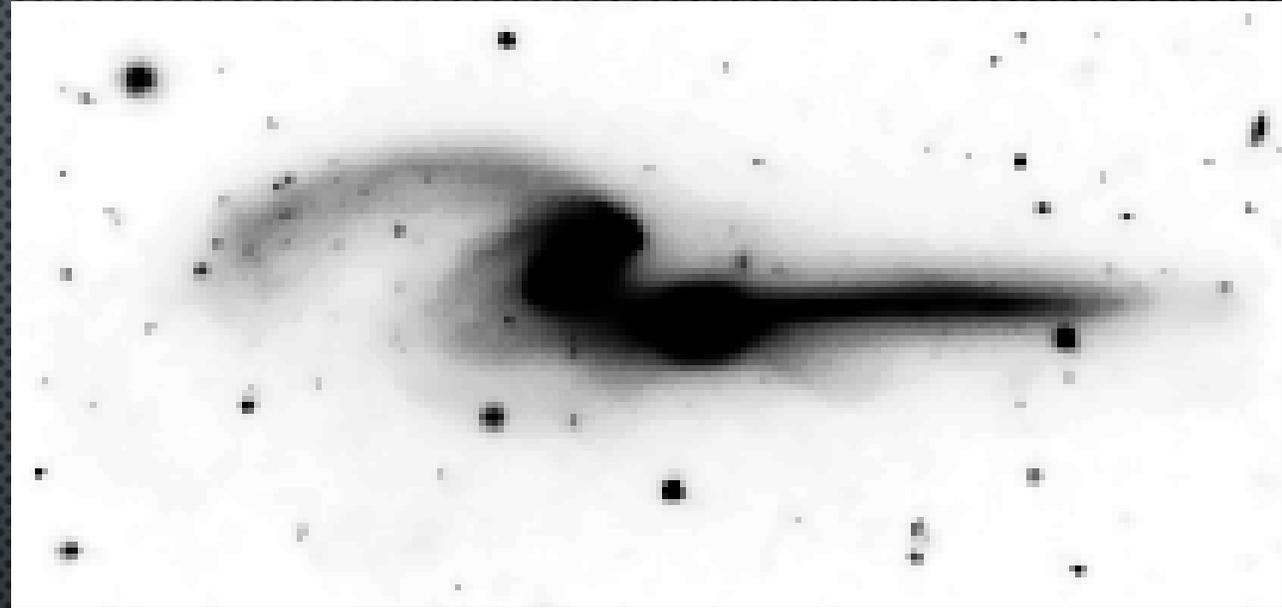
Исследуя «компьютерные галактики», можно проследить эволюцию наблюдаемых галактик определенных типов.

МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК



Решены все
основные проблемы,
связанные
со свойствами
Местной группы.

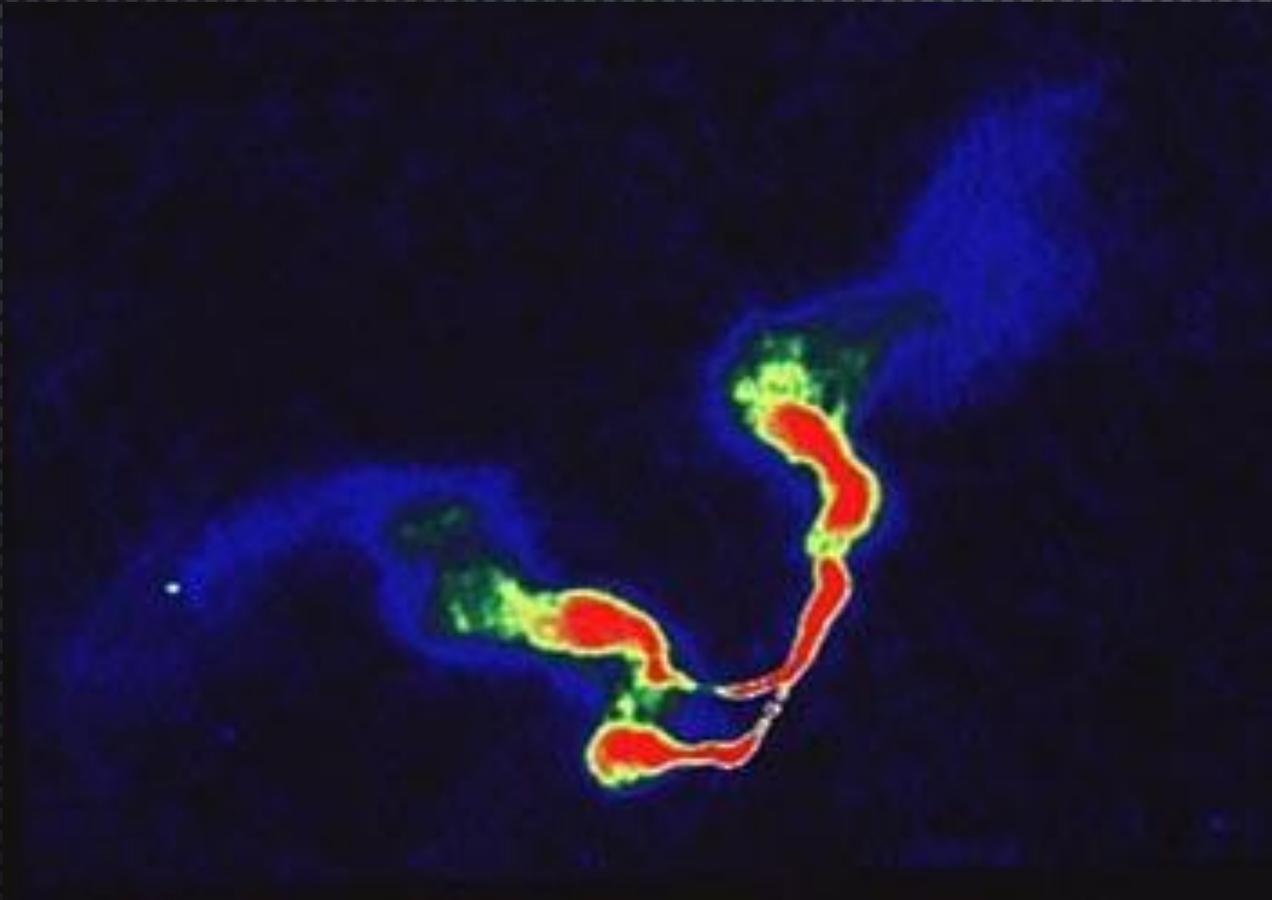
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ



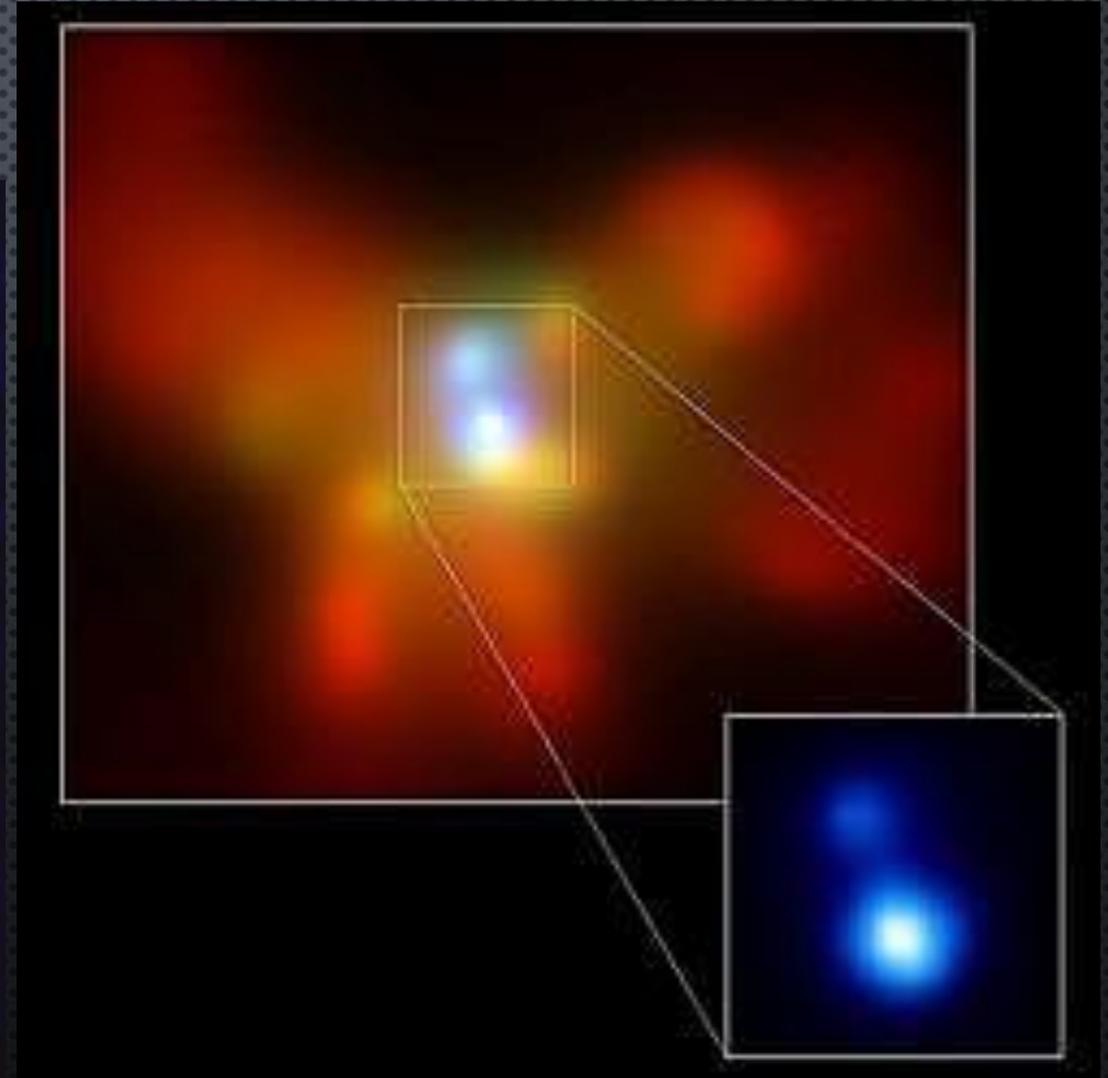
(Hibbard, Barnes)

ПРИМЕРЫ ДВОЙНЫХ ДЫР

Две пары джетов или двойное активное ядро.

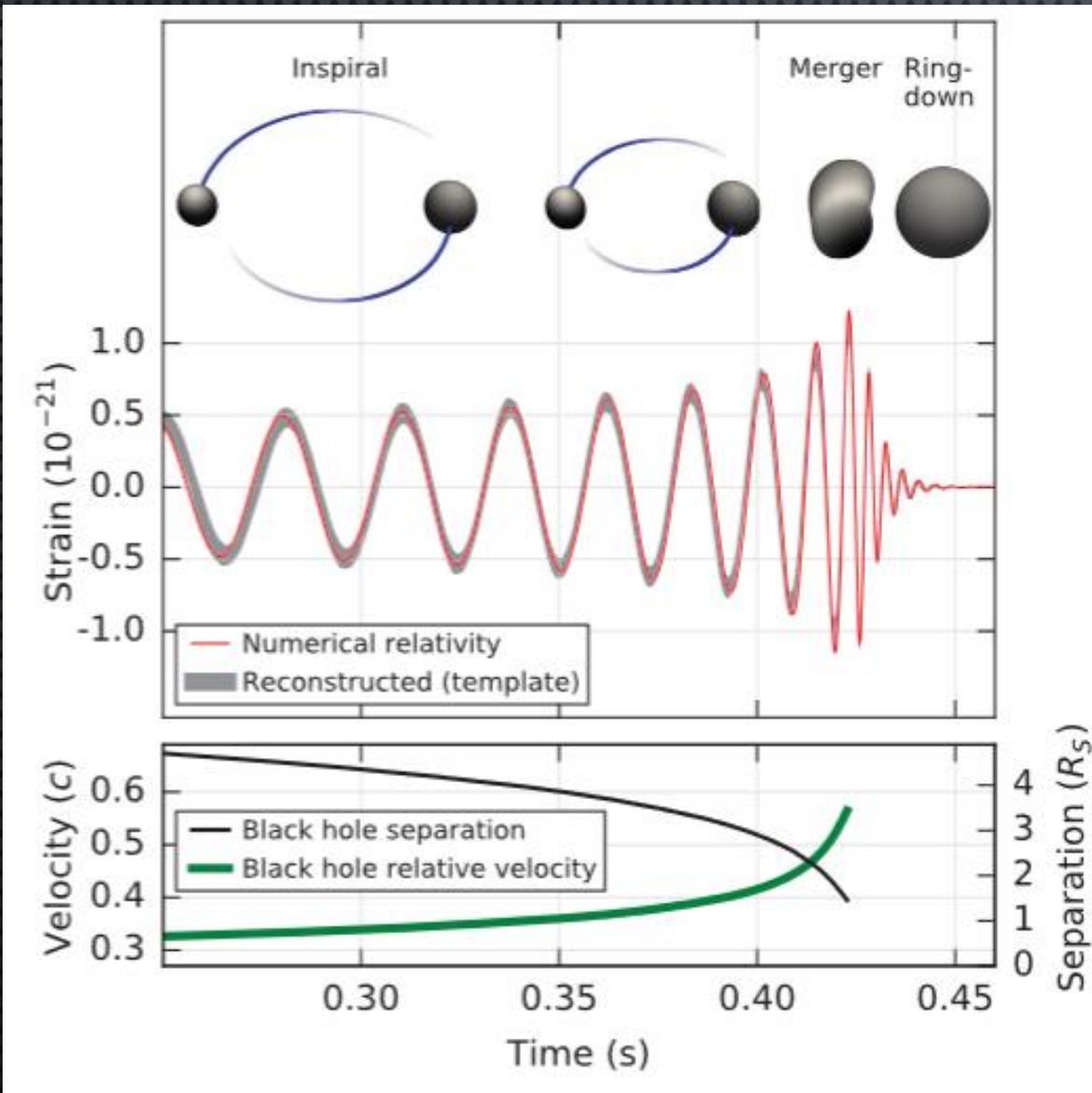


3C 75



Abell 400

СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



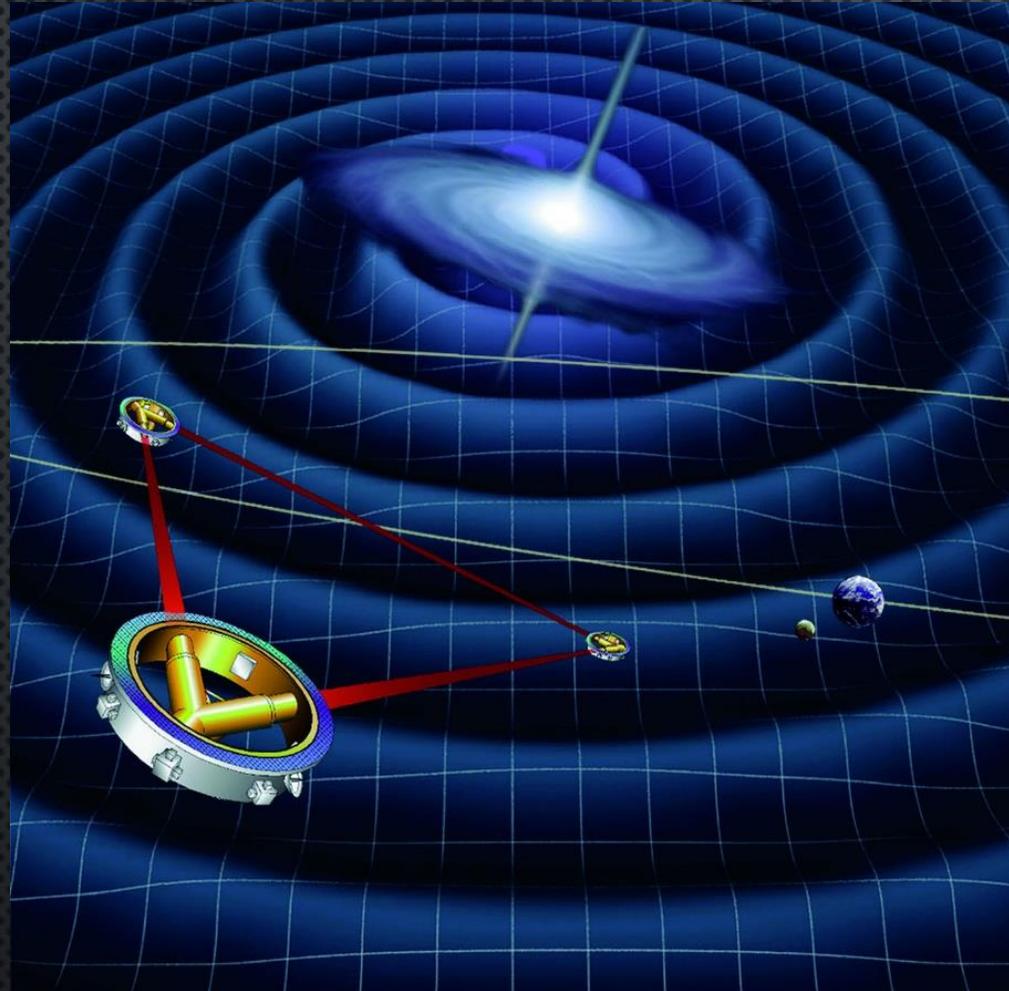
В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр.

Для нейтронных звезд это сложно, т.к. мы недостаточно точно знаем EoS. Для черных дыр – потому что ОТО плохо поддается прямым численным расчетам.

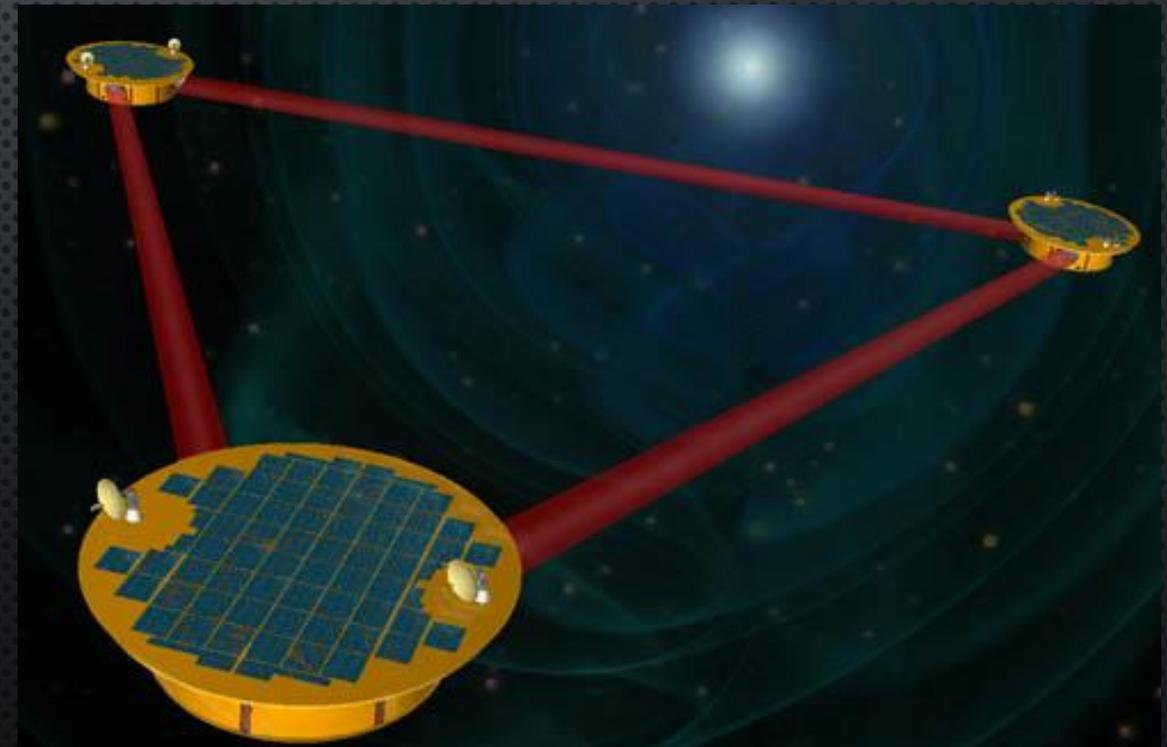
Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознавания слабых всплесков на фоне шумов.

КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ELISA

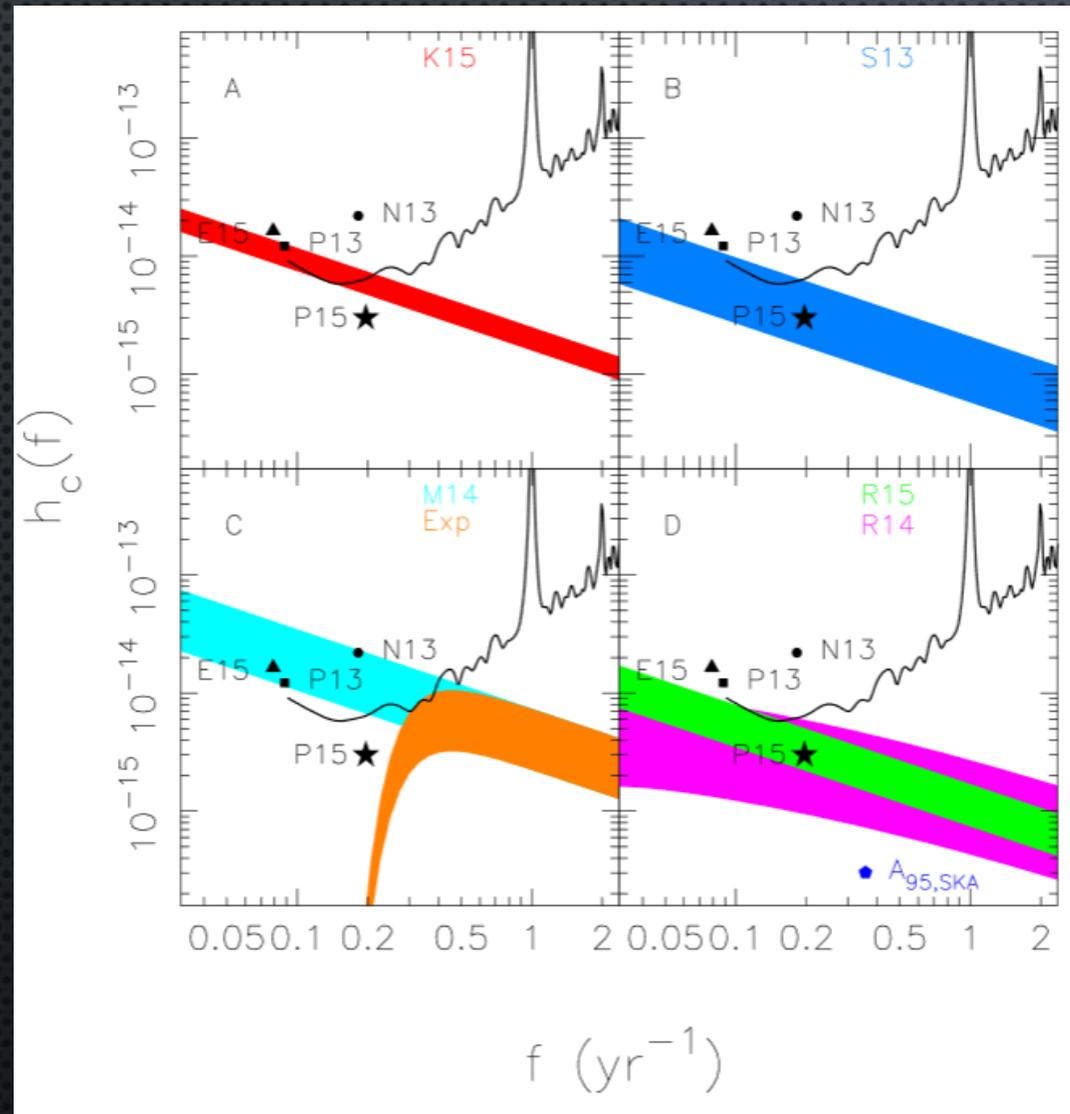
Изначально смета проекта составляла 2.5 миллиарда долларов.
NASA сняла свое финансирование.
ESA одобрена заявка на запуск упрощенного варианта в 2032-34 г.
NASA вернулась в проект.
Успешно отработал прототип.



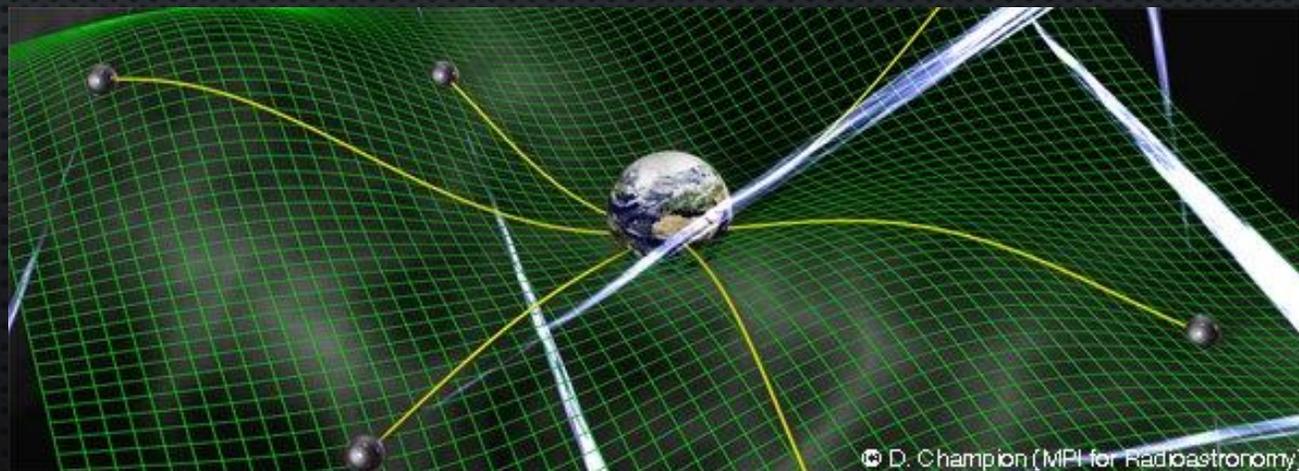
В отличие от LIGO и VIRGO, который ищут сигналы от слияний компактных объектов звездных масс, eLISA будет искать слияния сверхмассивных черных дыр.



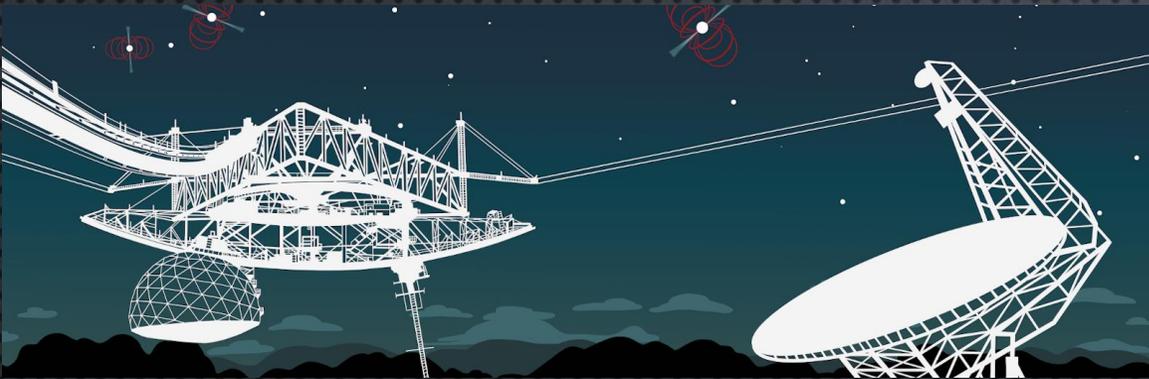
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР



Гравитационные волны от сверхмассивных черных дыр ищут с помощью наблюдения радиопульсаров. Работает три независимые группы.



NANOGRAV: 12.5 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ



Впервые PTA заявляет о каком-либо сигнале. Правда, что это за сигнал – непонятно.

Появилось уже довольно много публикаций, пытающихся проинтерпретировать сигнал.

Сигнал не связан с ошибками часов или с недостаточно точно учитываемыми параметрами движения Солнечной системы.

Сигнал не похож на ожидаемый от фона гравитационных волн от сливающихся сверхмассивных черных дыр.

