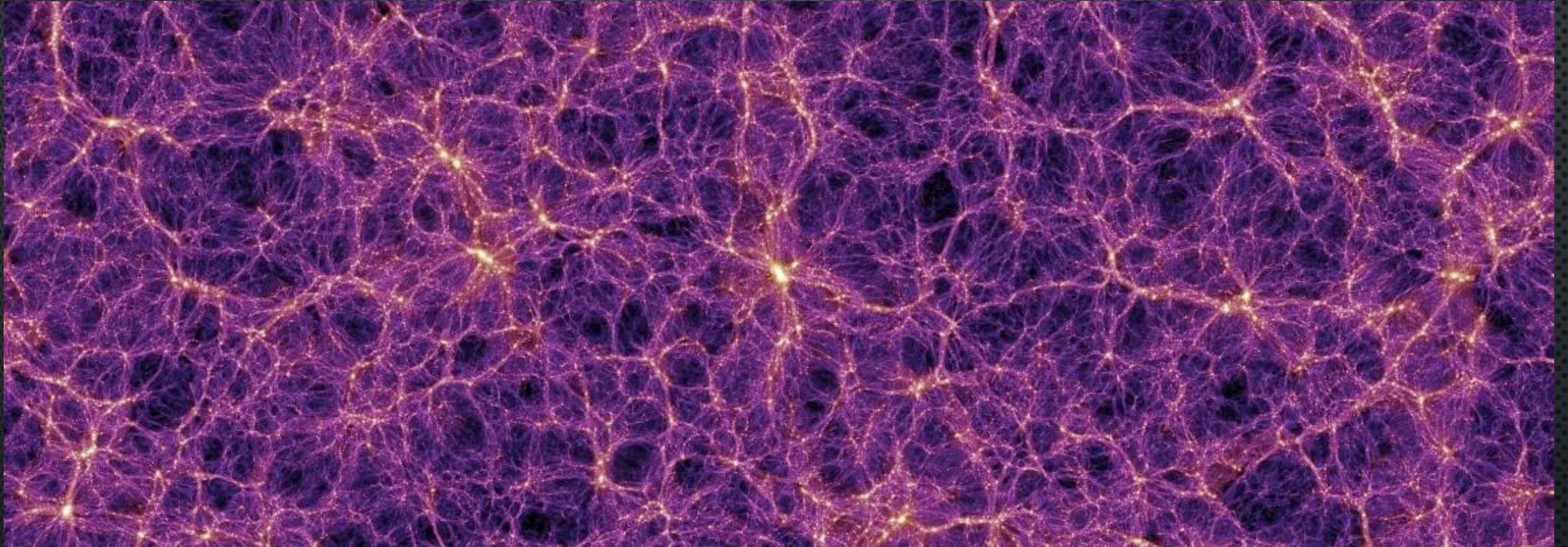


МИР ГАЛАКТИК



СЕРГЕЙ ПОПОВ

НАША ГАЛАКТИКА

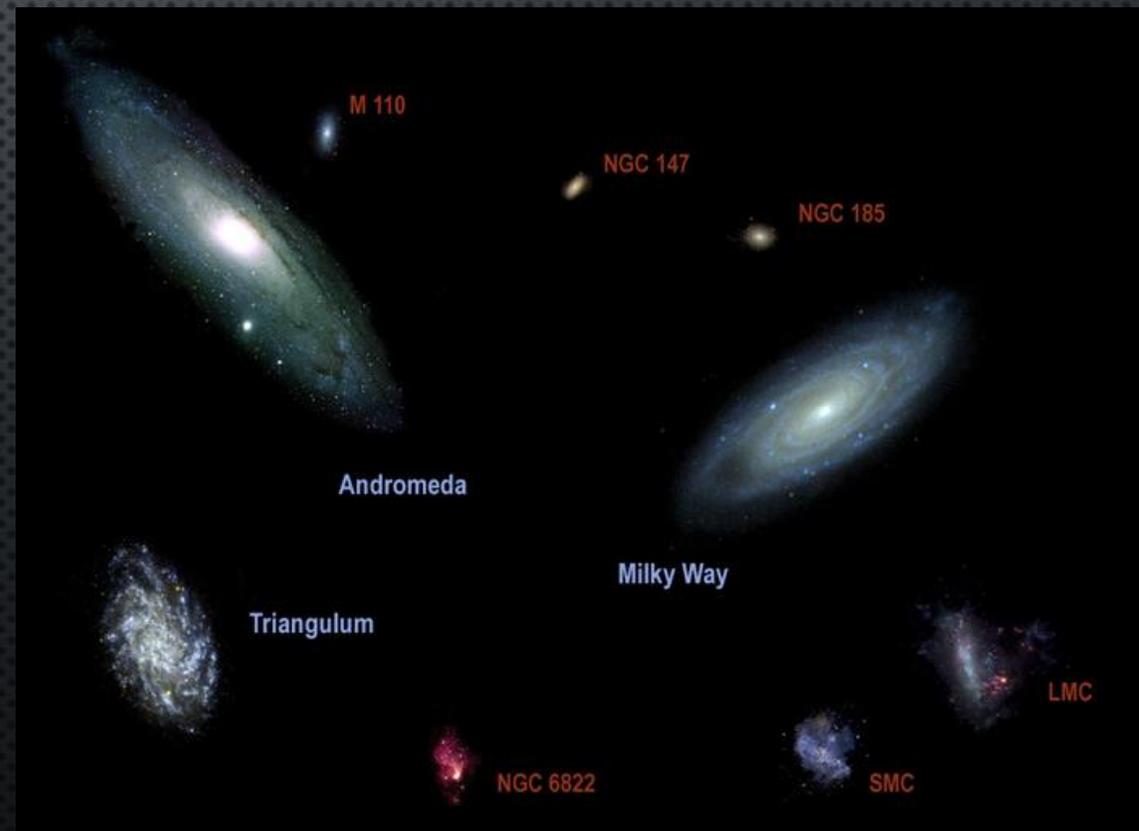
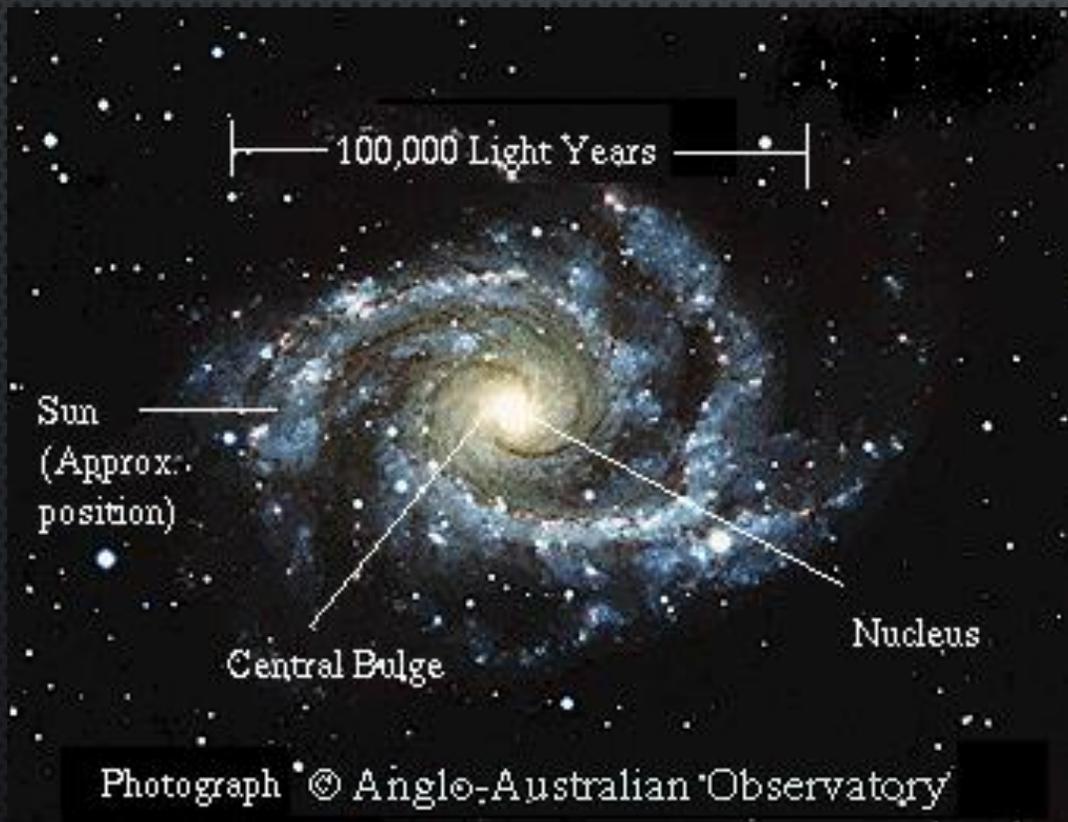
Наша Галактика – одна из многих подобных систем.

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.





Дискосая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная



Эллиптическая

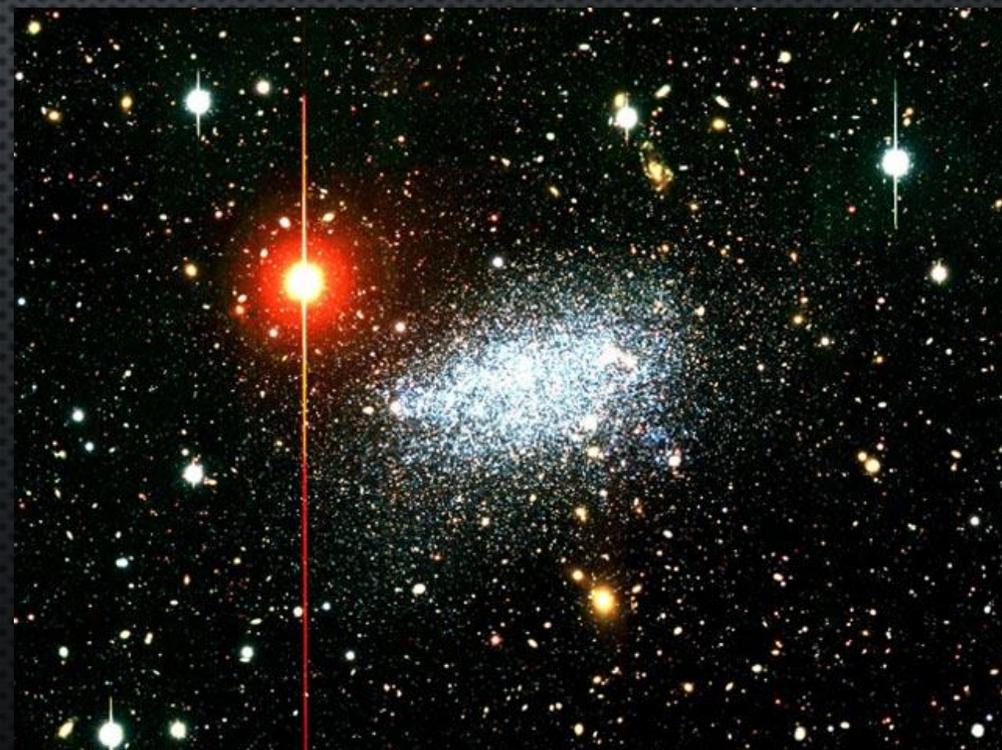


Взаимодействующие

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
Гебер 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.

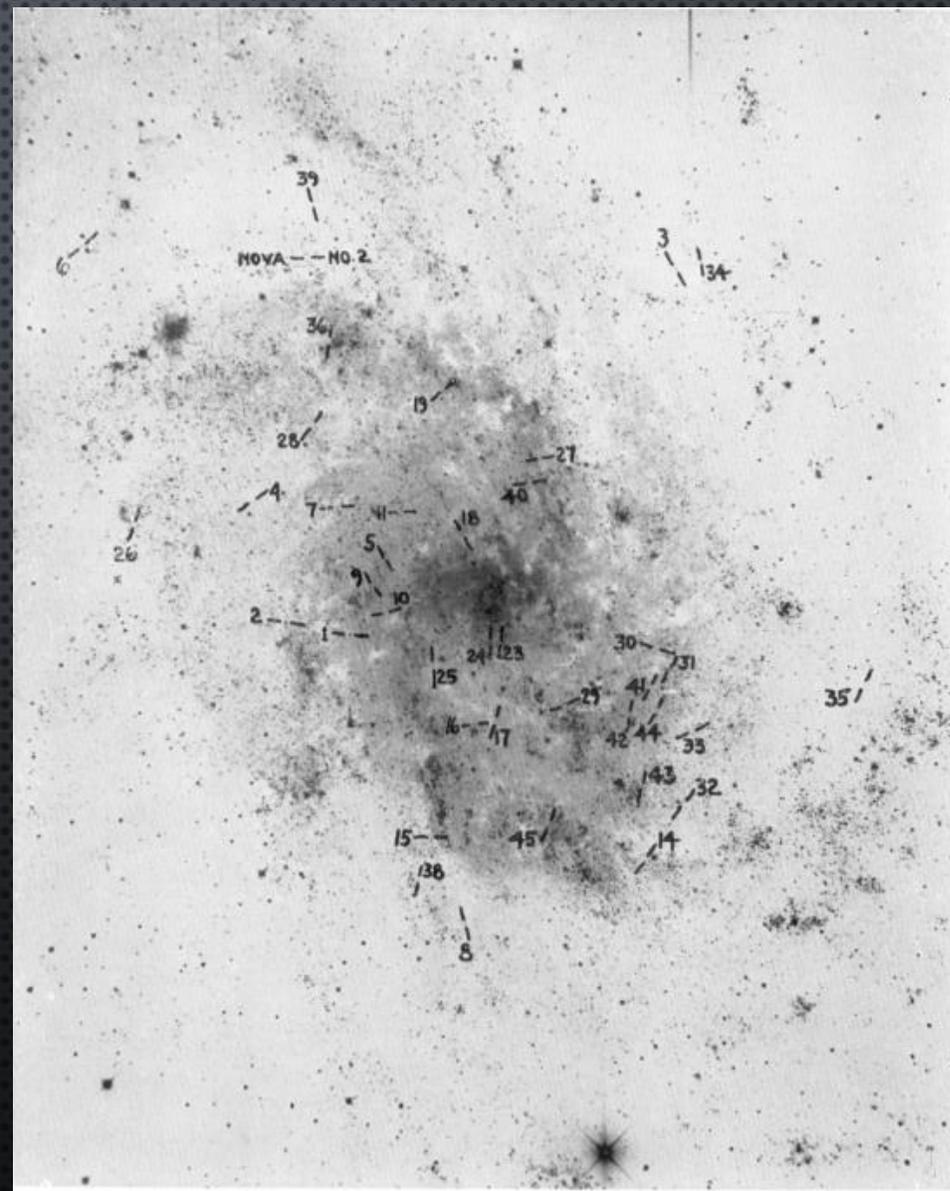
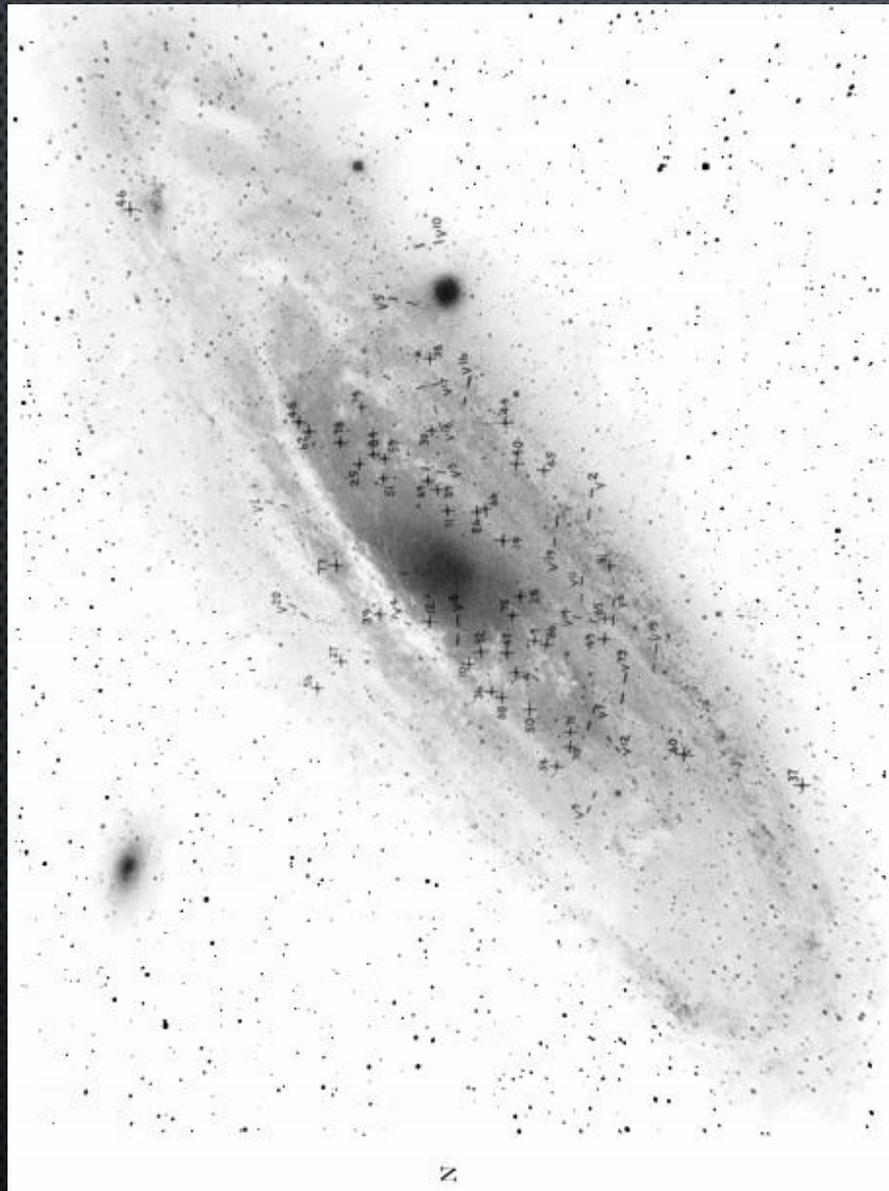


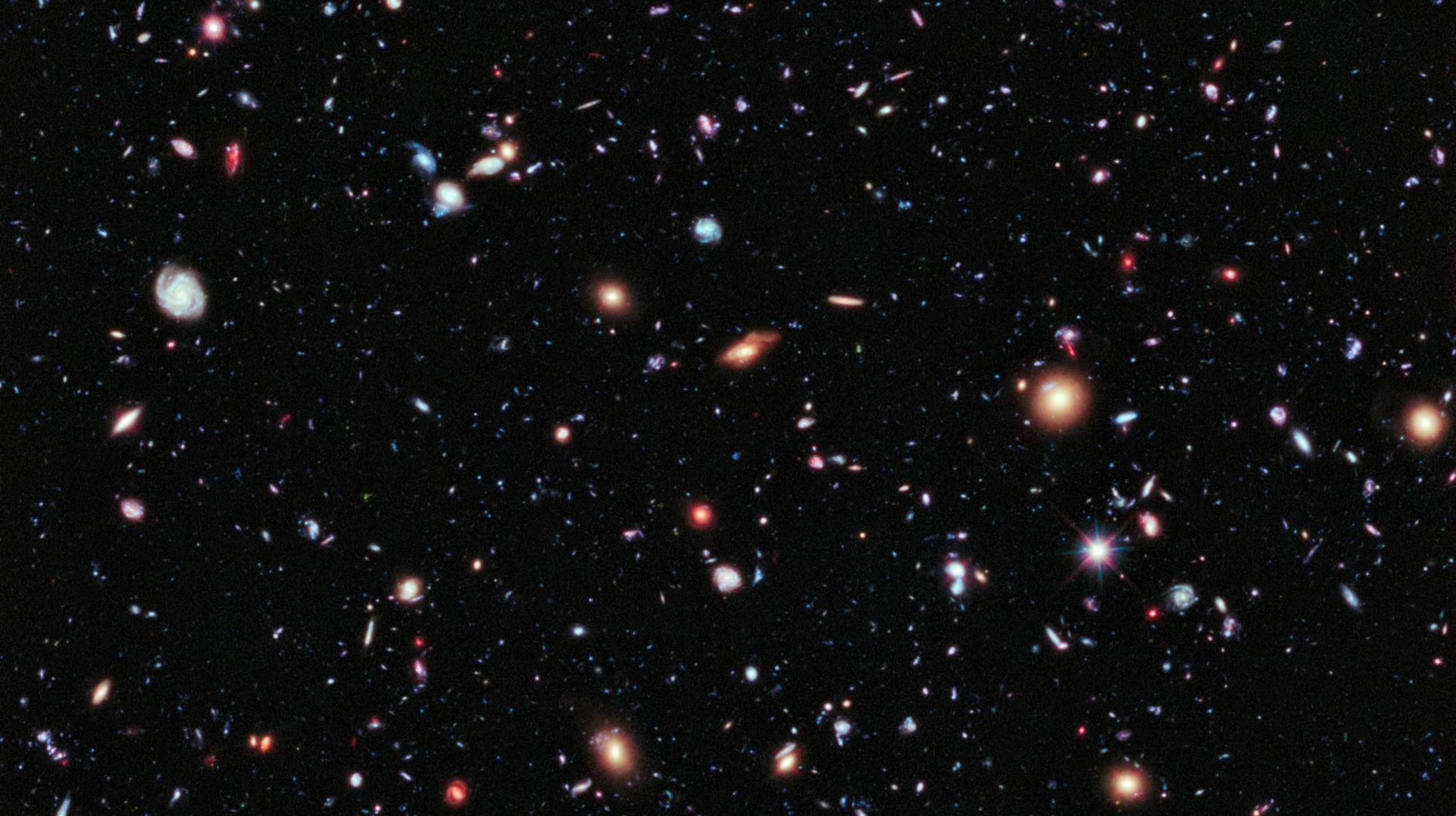
Эрнст Эпик

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



СНИМКИ ХАББЛА

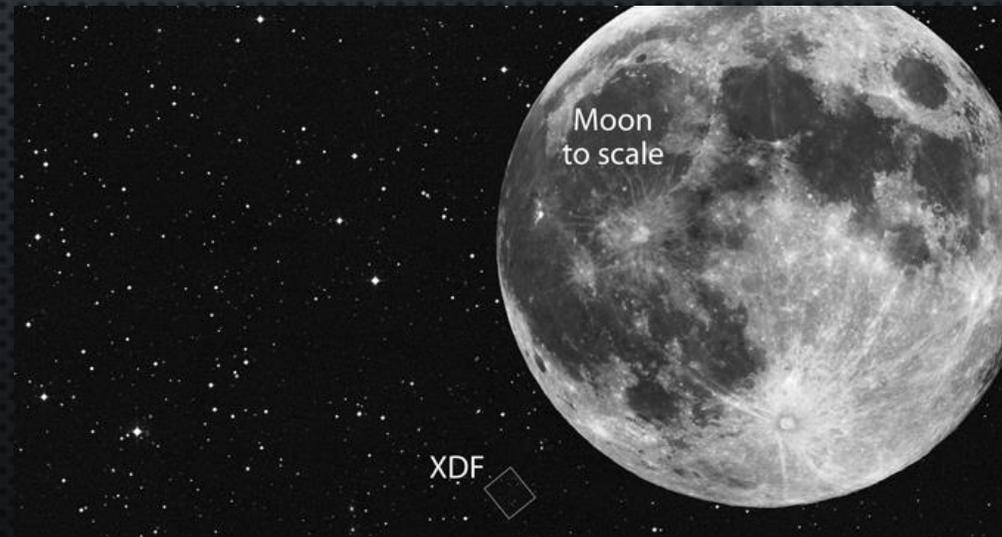




HUBBLE ULTRA DEEP FIELD



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».

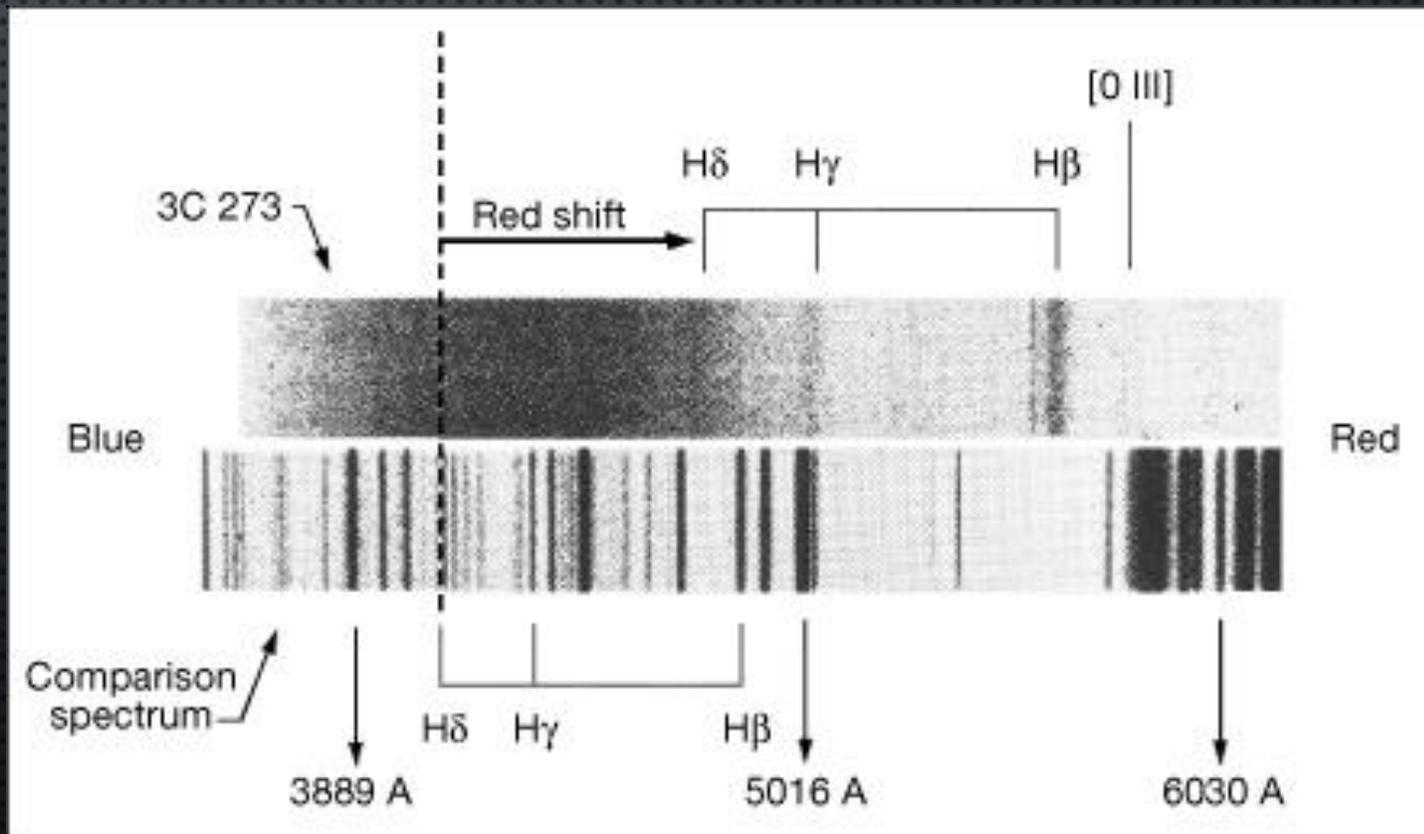
РАЗГАДКА



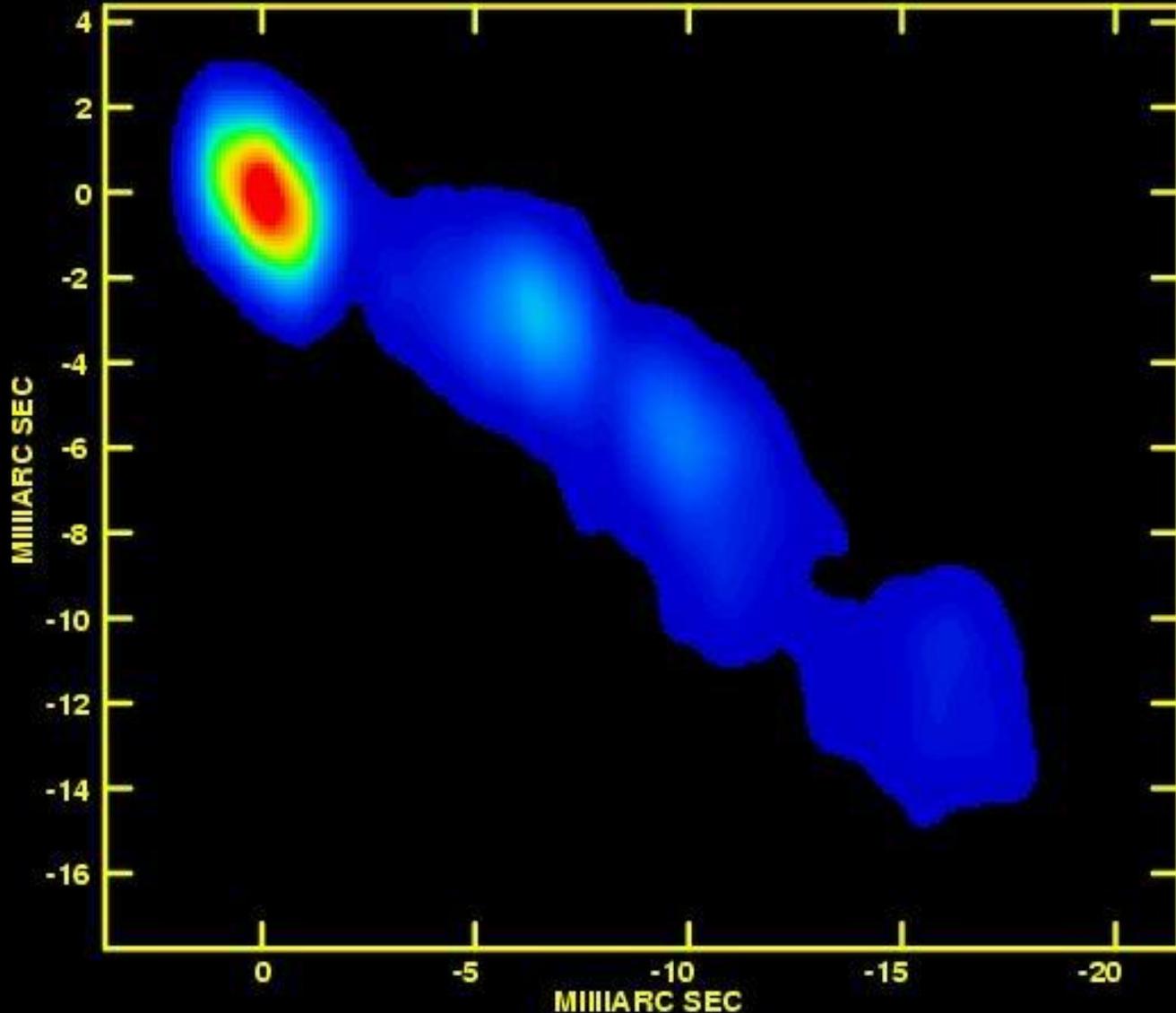
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

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



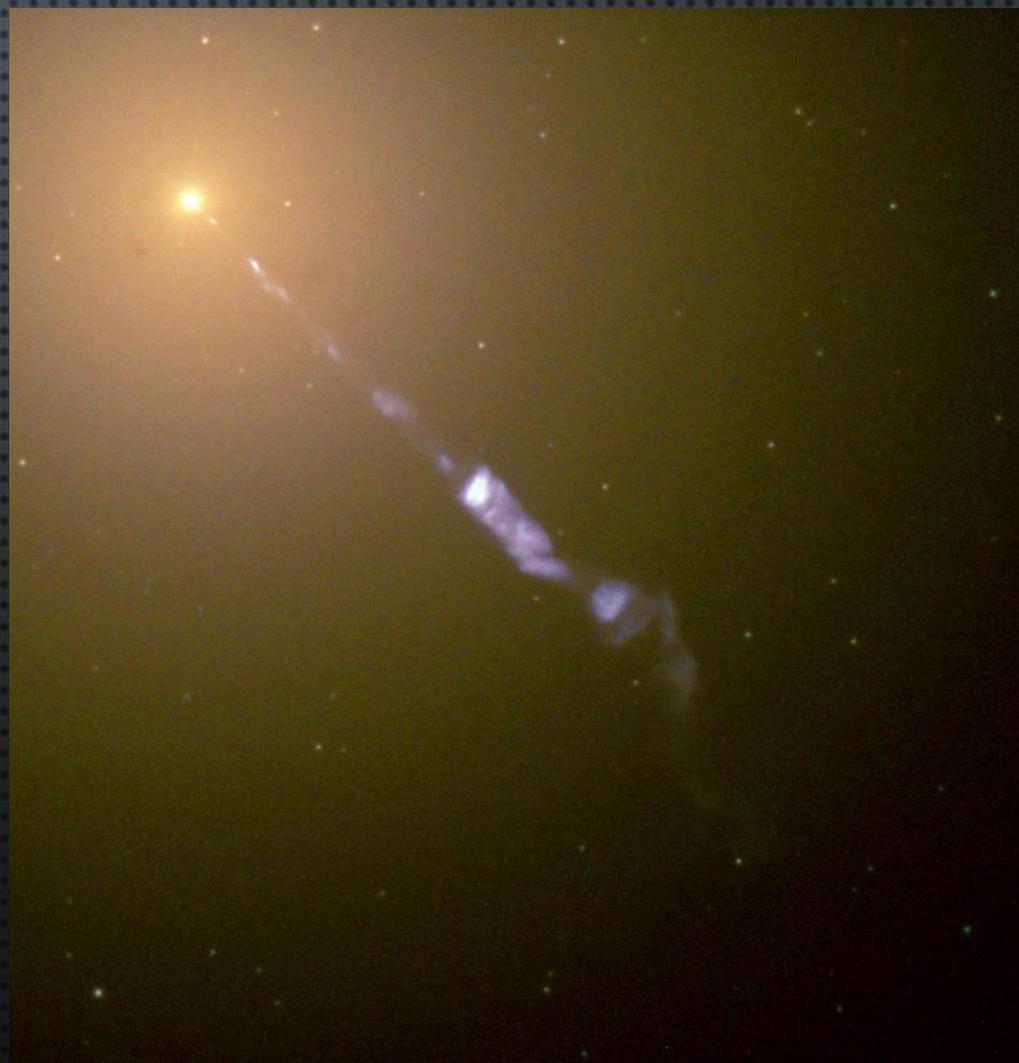
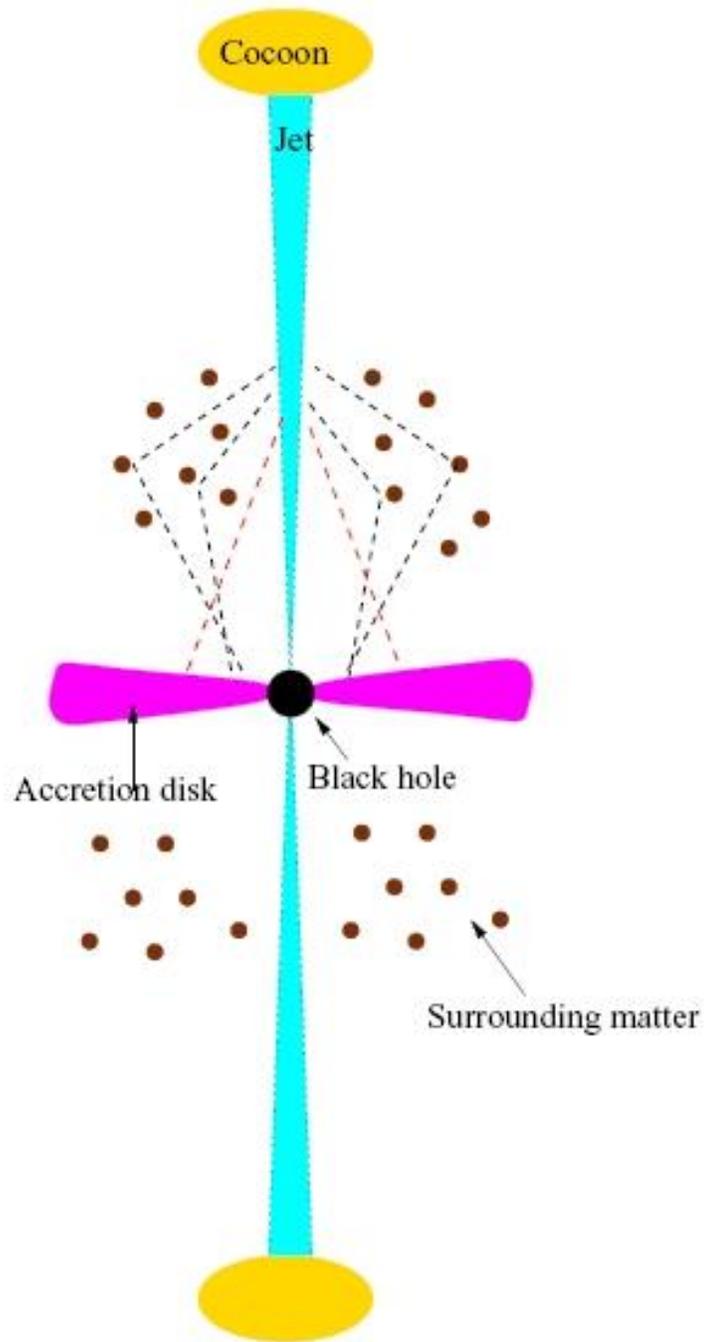
ПРИРОДА КВАЗАРА



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

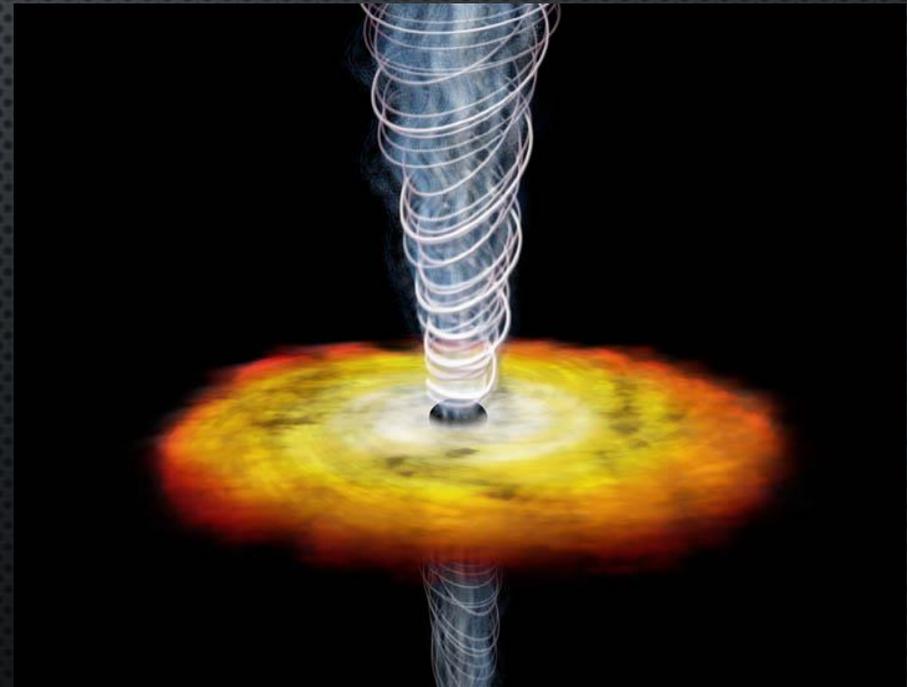
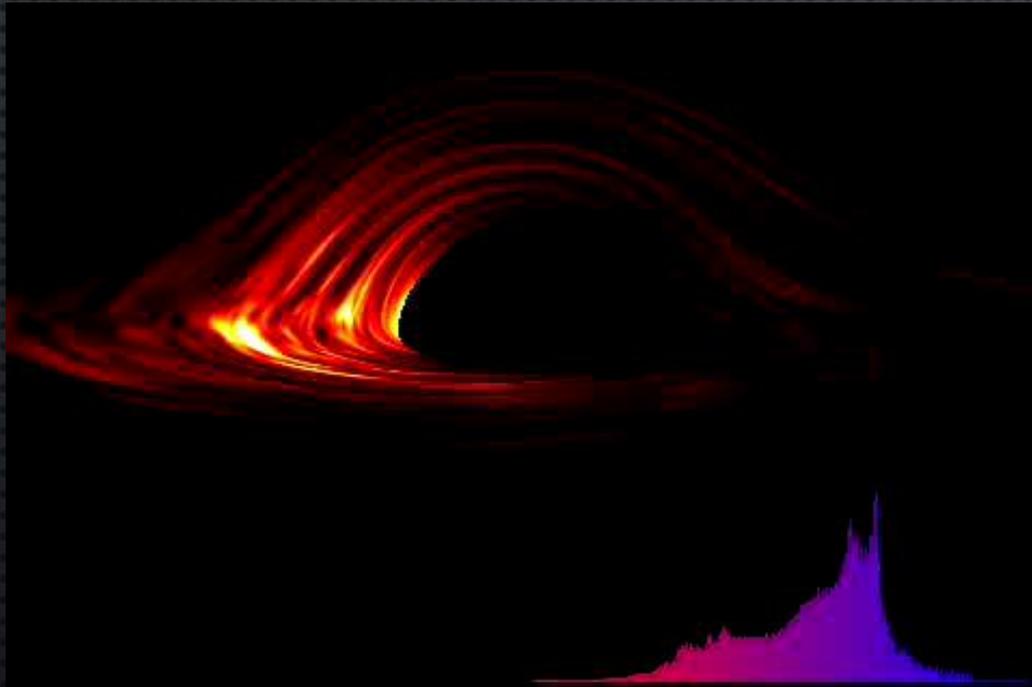


ЧЕМ ВАЖНО ОТКРЫТИЕ КВАЗАРОВ?

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

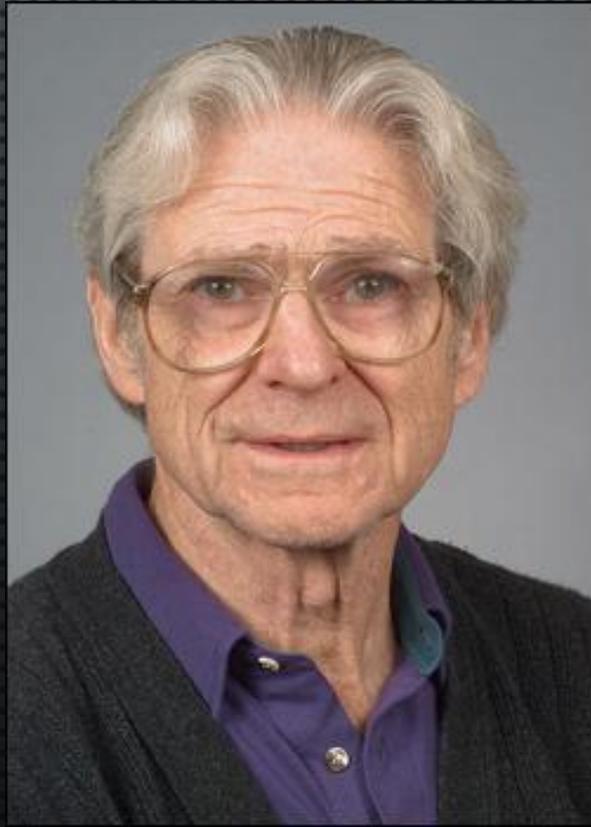
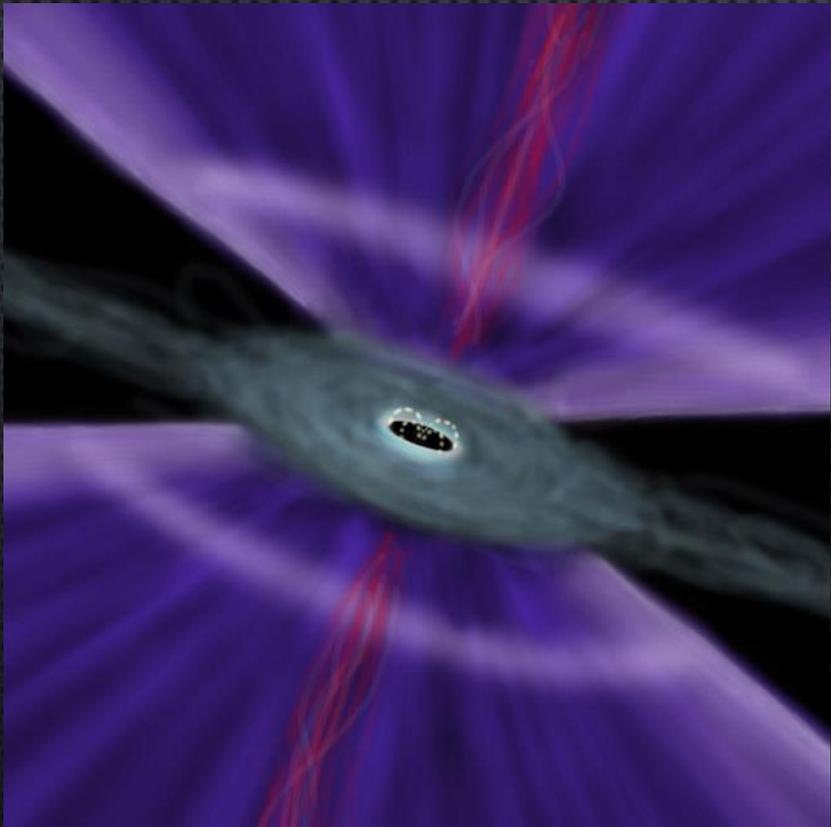
Во-вторых, возникла необходимость объяснять, как же они работают.

Это дало дорогу концепции сверхмассивных черных дыр.



НЕМНОГО ИСТОРИИ ...

История начинается в 60-е гг.,
когда были идентифицированы квазары (Шмидт 1963).
Немедленно была высказана гипотеза
об аккреции вещества сверхмассивными черными дырами.
(Солпитер, Зельдович, Новиков, Линден-Белл)



САМАЯ ДОСТОВЕРНАЯ ЧД – SGR A*

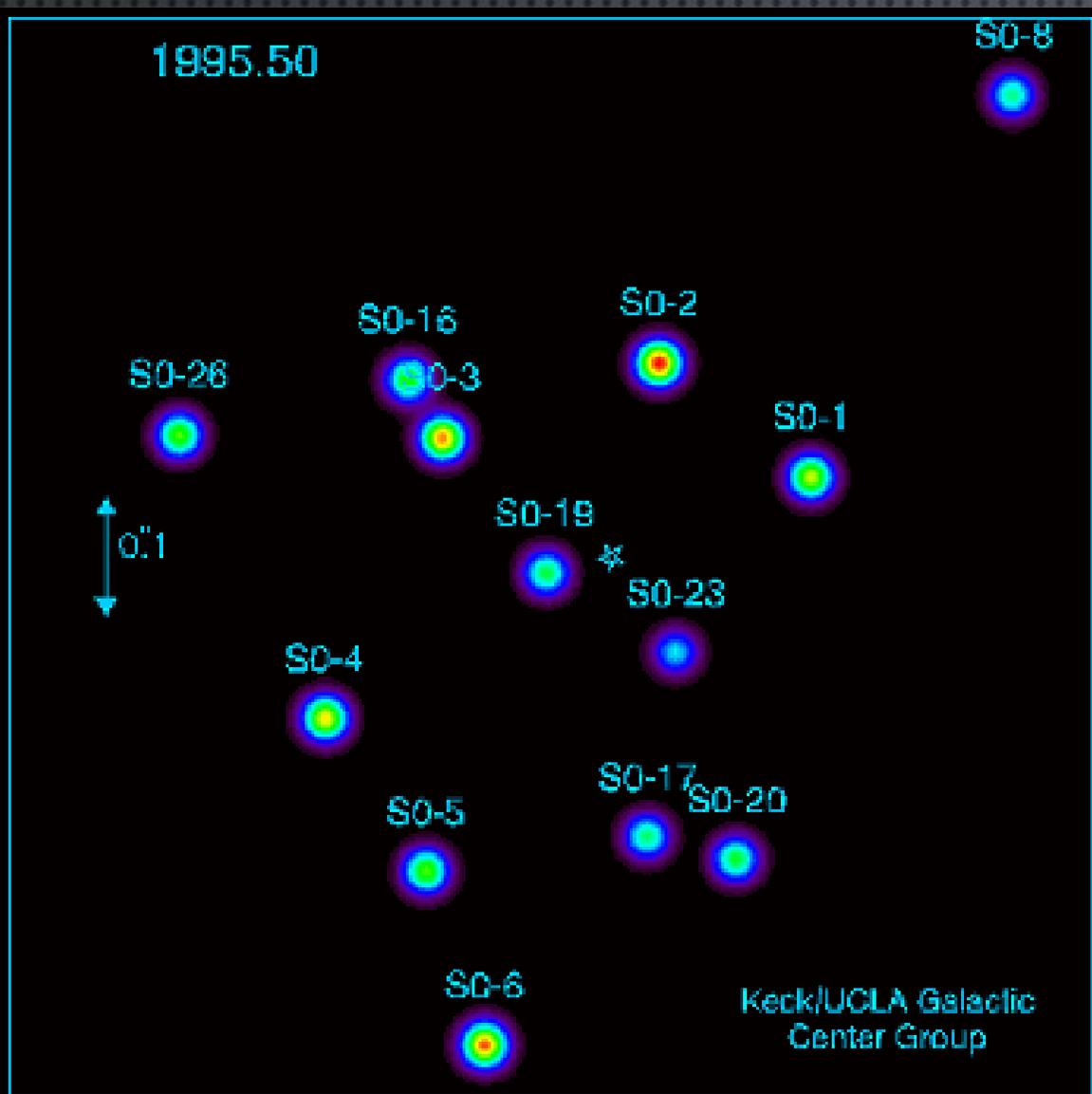
1992

10 light days



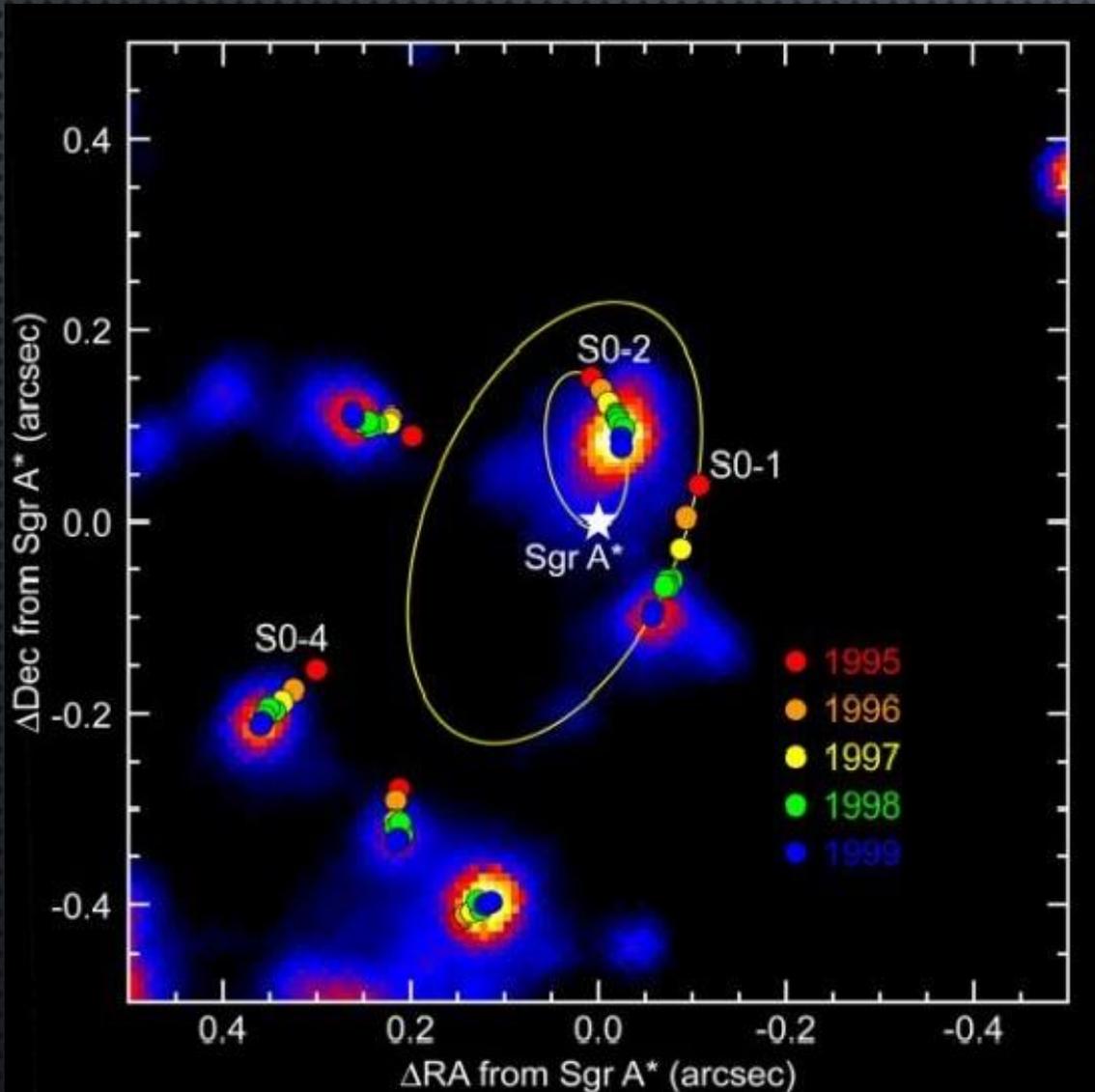
Звездные орбиты с 1992 по 2007

... И ОНА СТАНОВИТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ДОСТОВЕРНОЙ



Наблюдения продолжаются,
и растет число звезд
с известными орбитами.

SGR A*



Случай Sgr A* уникален. Благодаря прямым измерениям нескольких звездных орбит стало возможным точно определить массу центрального объекта.

Кроме того, есть жесткий предел на размер центрального объекта, что важно для обсуждения альтернатив.

Звезда S0-2 имеет орбитальный период 15.2 лет и большую полуось примерно 0.005 пк.

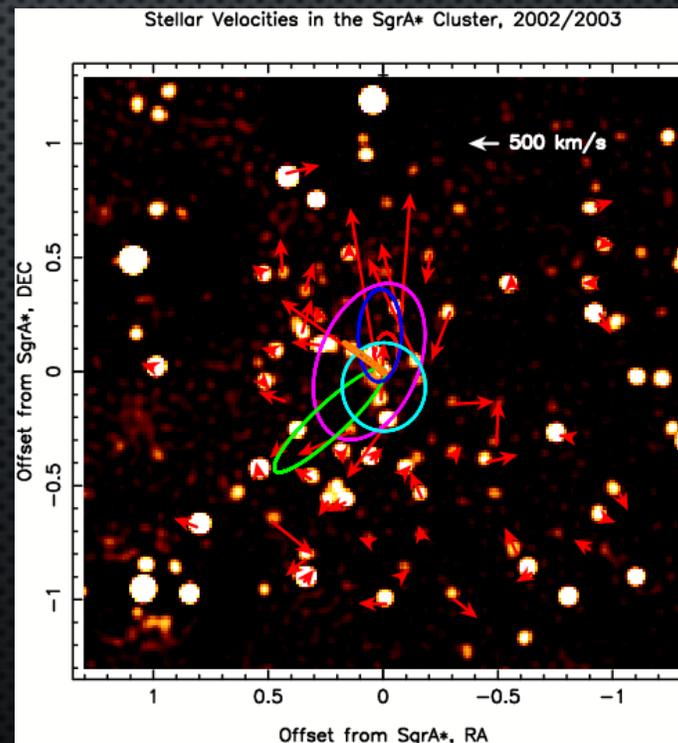
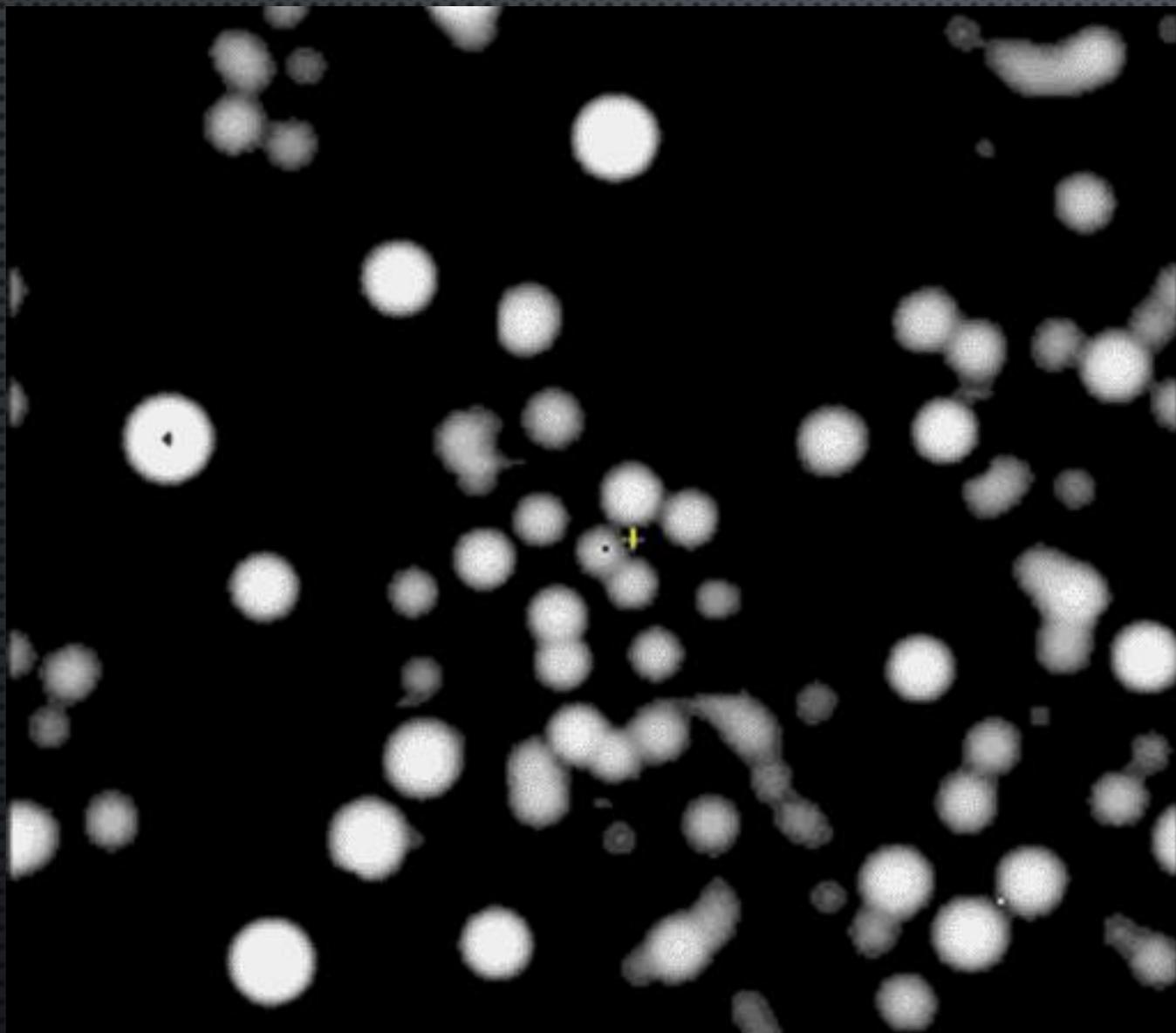
ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА ВОКРУГ SGR A*

С высокой точностью мы знаем динамику внутри центральной угловой секунды.

Оценка массы ЧД $(2-4) 10^6 M_{\odot}$

Было бы здорово открыть радиопульсар около Sgr A*

(APOD A. Eckart & R. Genzel)

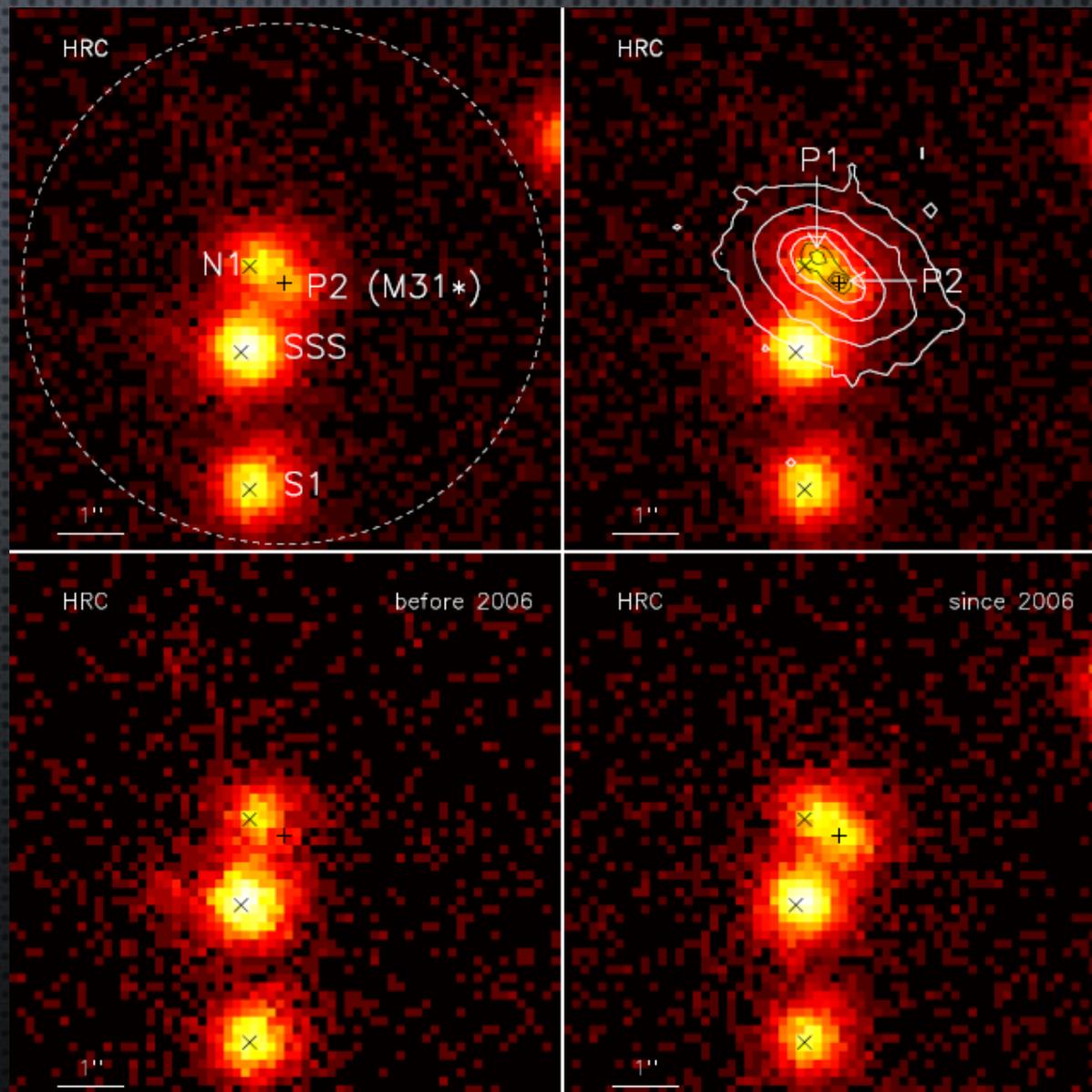


ЧЕРНАЯ ДЫРА В ТУМАННОСТИ АНДРОМЕДЫ

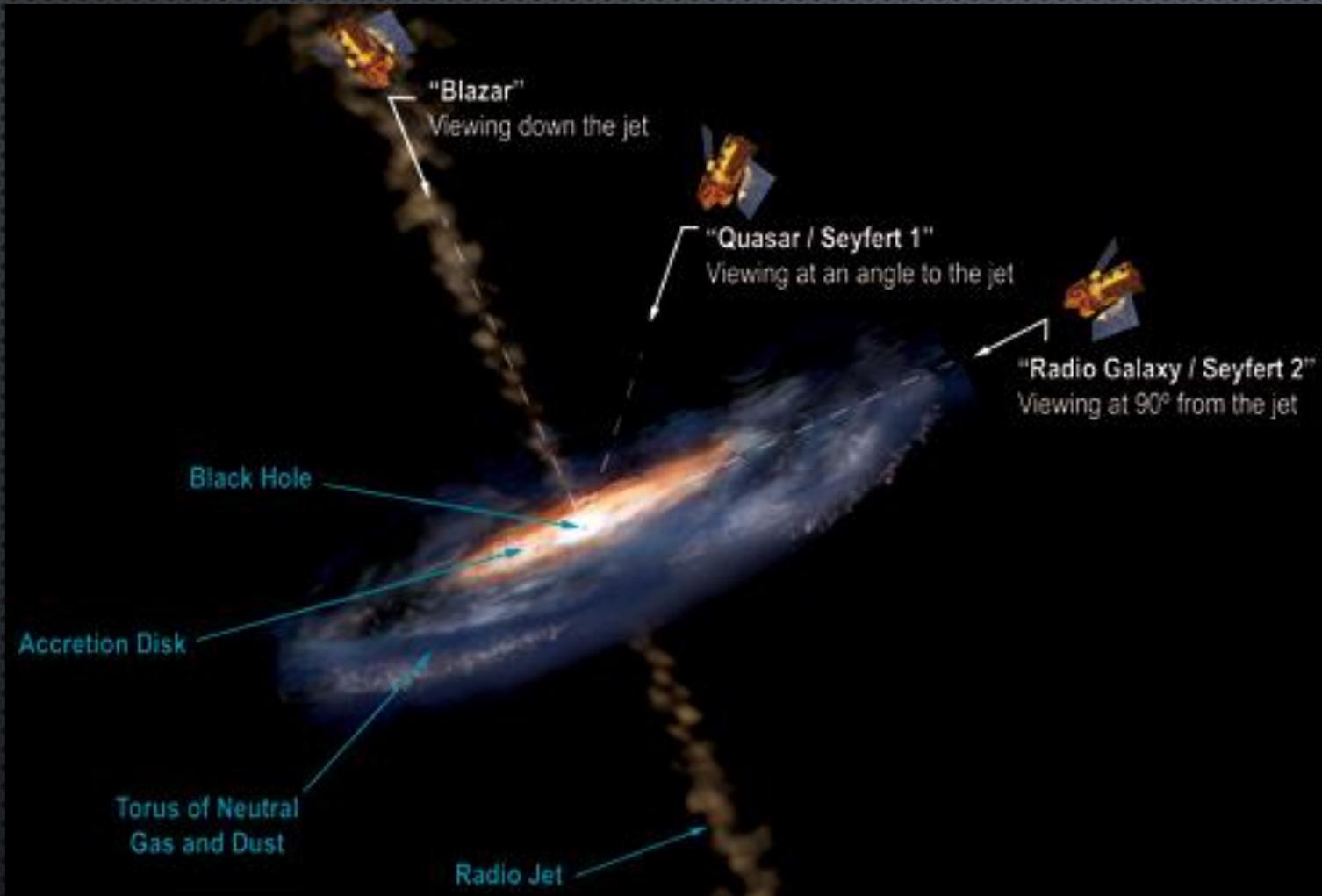
В Туманности Андромеды, как и в нашей Галактике, есть сверхмассивная черная дыра. Причем, в М31 она раз в 50 тяжелее - ее масса 100-200 миллионов солнечных.

Так же, как и у нас, "монстр спит": светимость составляет миллиардные доли от предельной, т.н. Эддингтоновской.

Правда, у нас дыра время от времени "всхрапывает" во сне: происходят вспышки. Теперь изменения активности дыры открыли и в М31.



ЕДИНАЯ МОДЕЛЬ

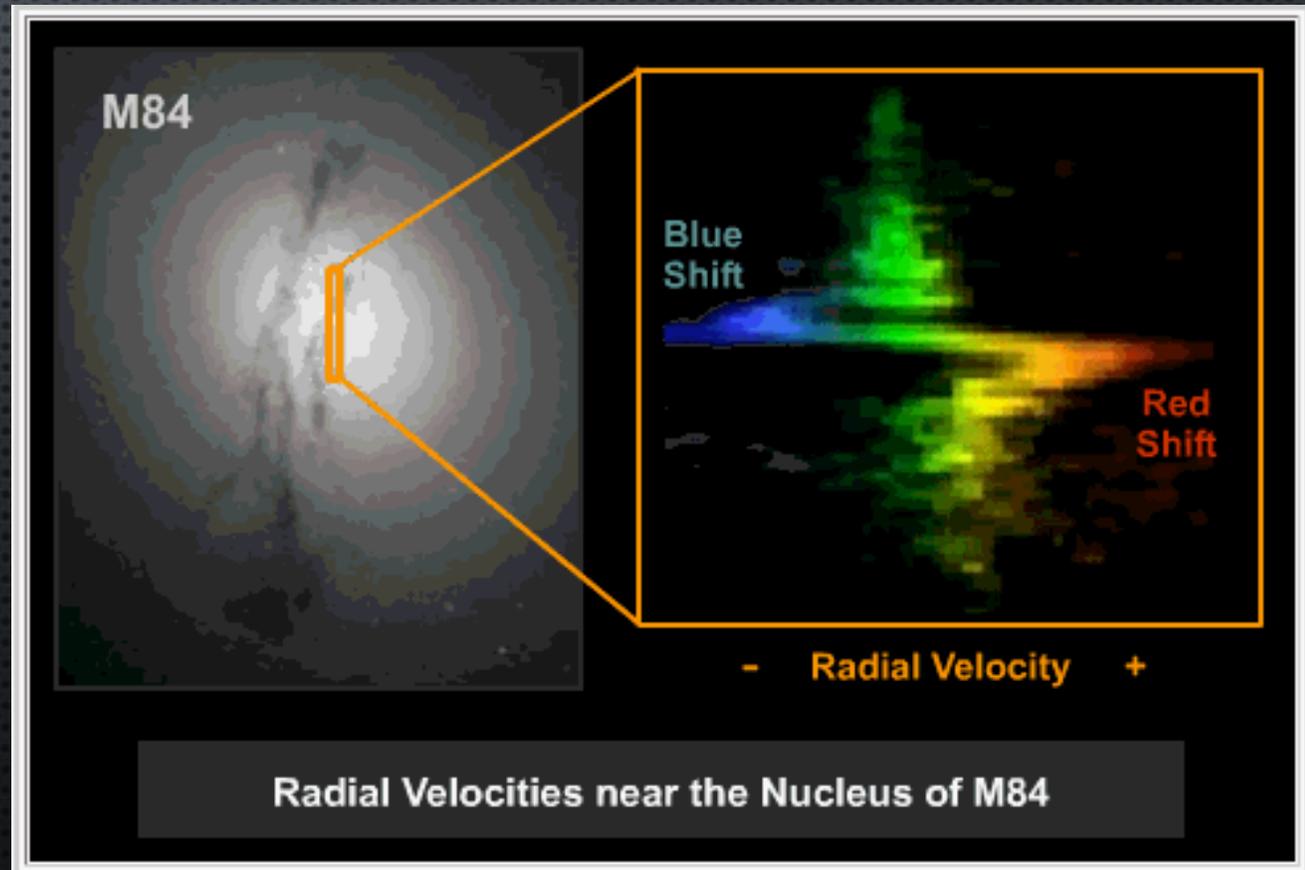


В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

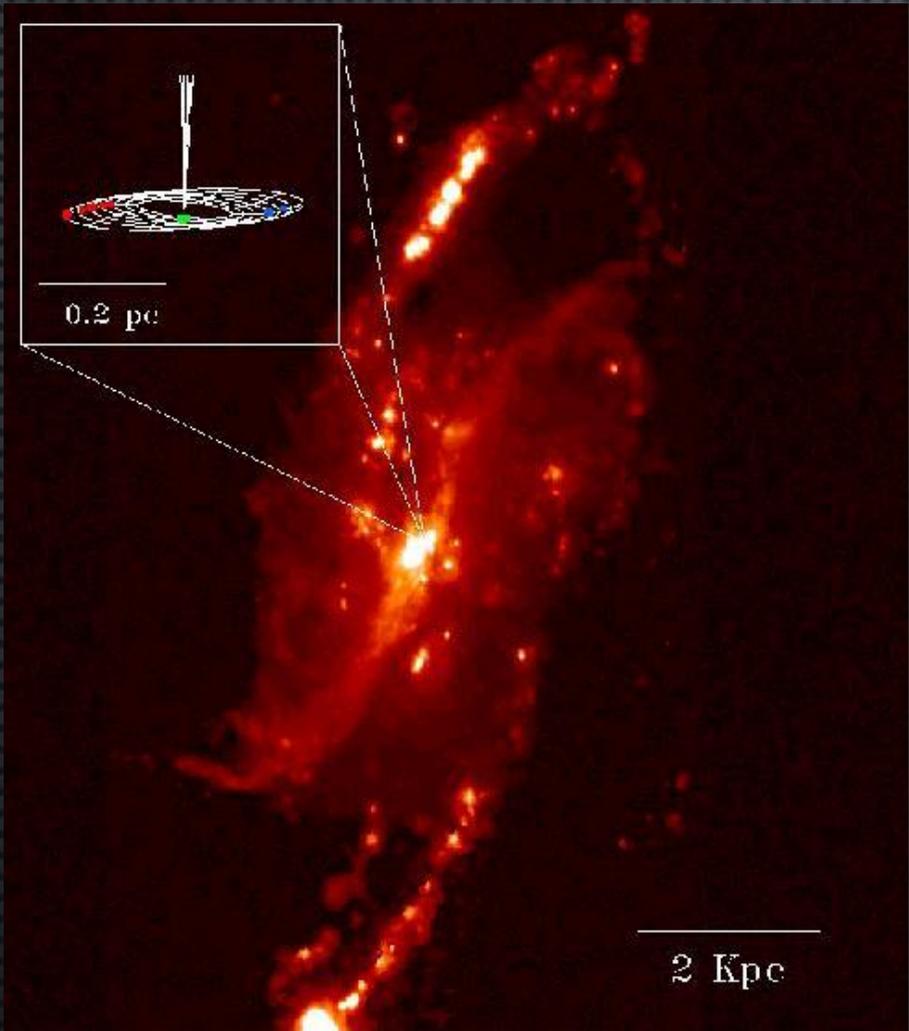
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- 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).



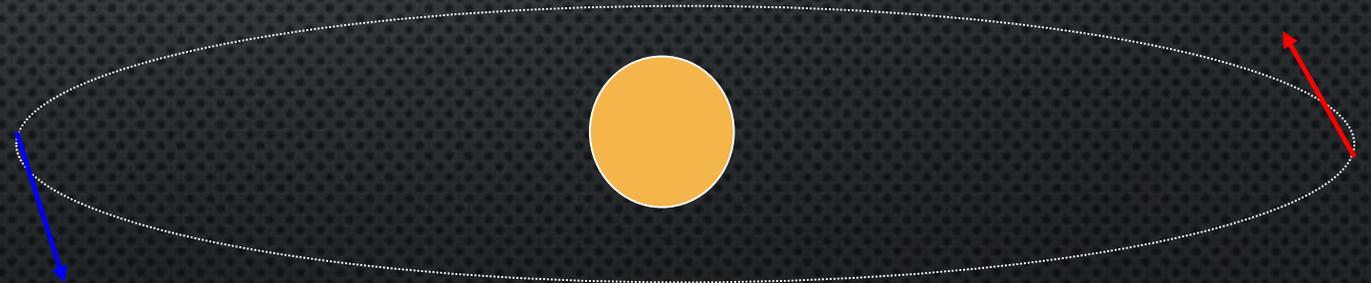
МАЗЕРЫ



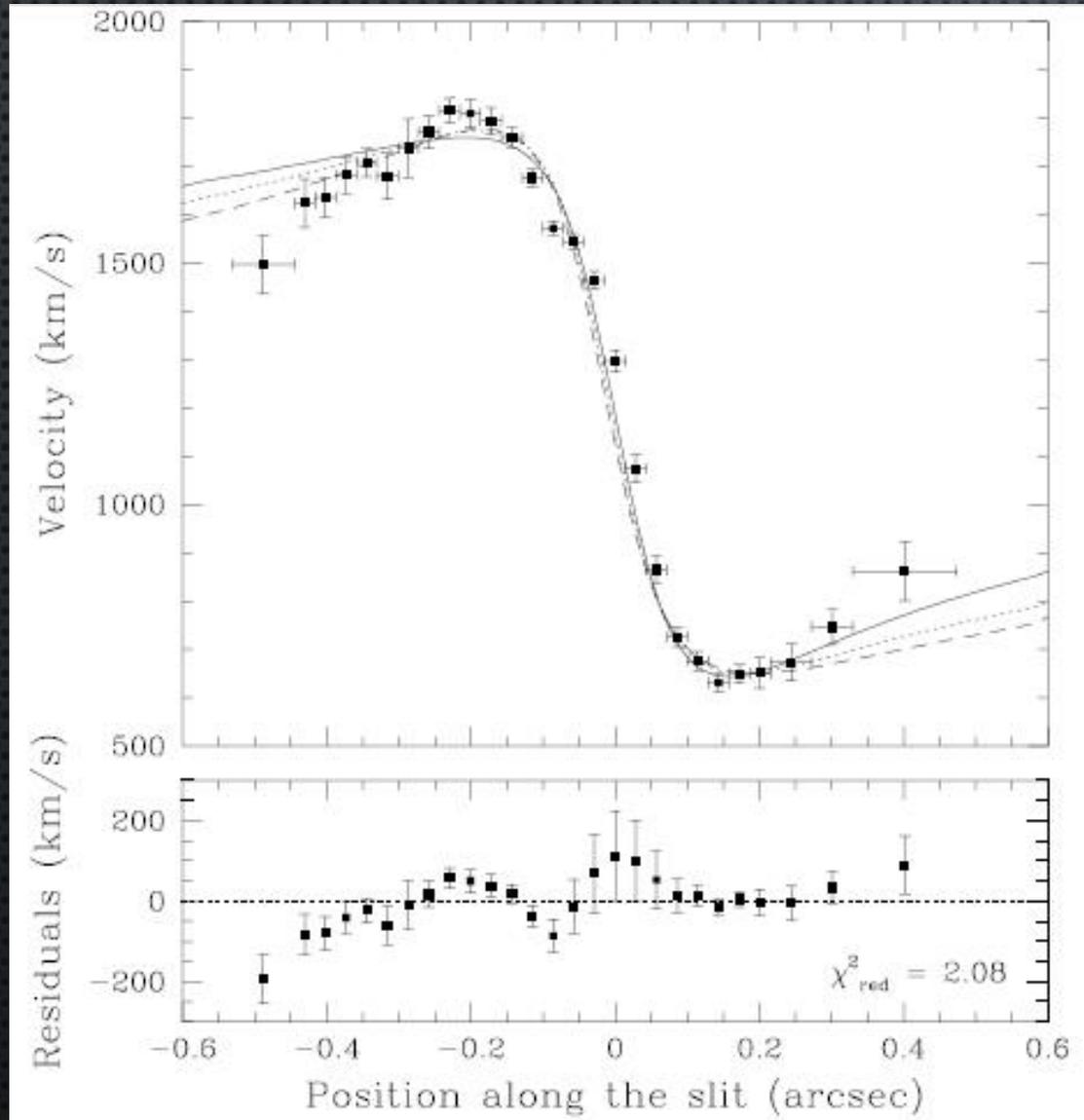
NGC 4258. Miyoshi et al. (1995)

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.



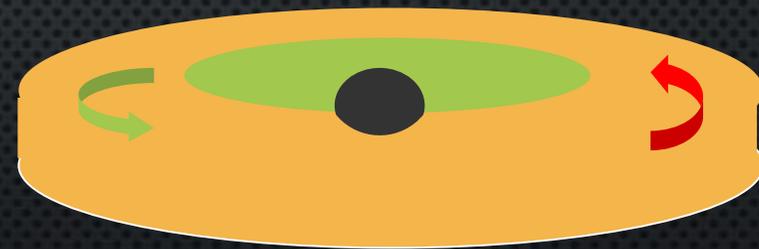
КИНЕМАТИКА ГАЗА



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

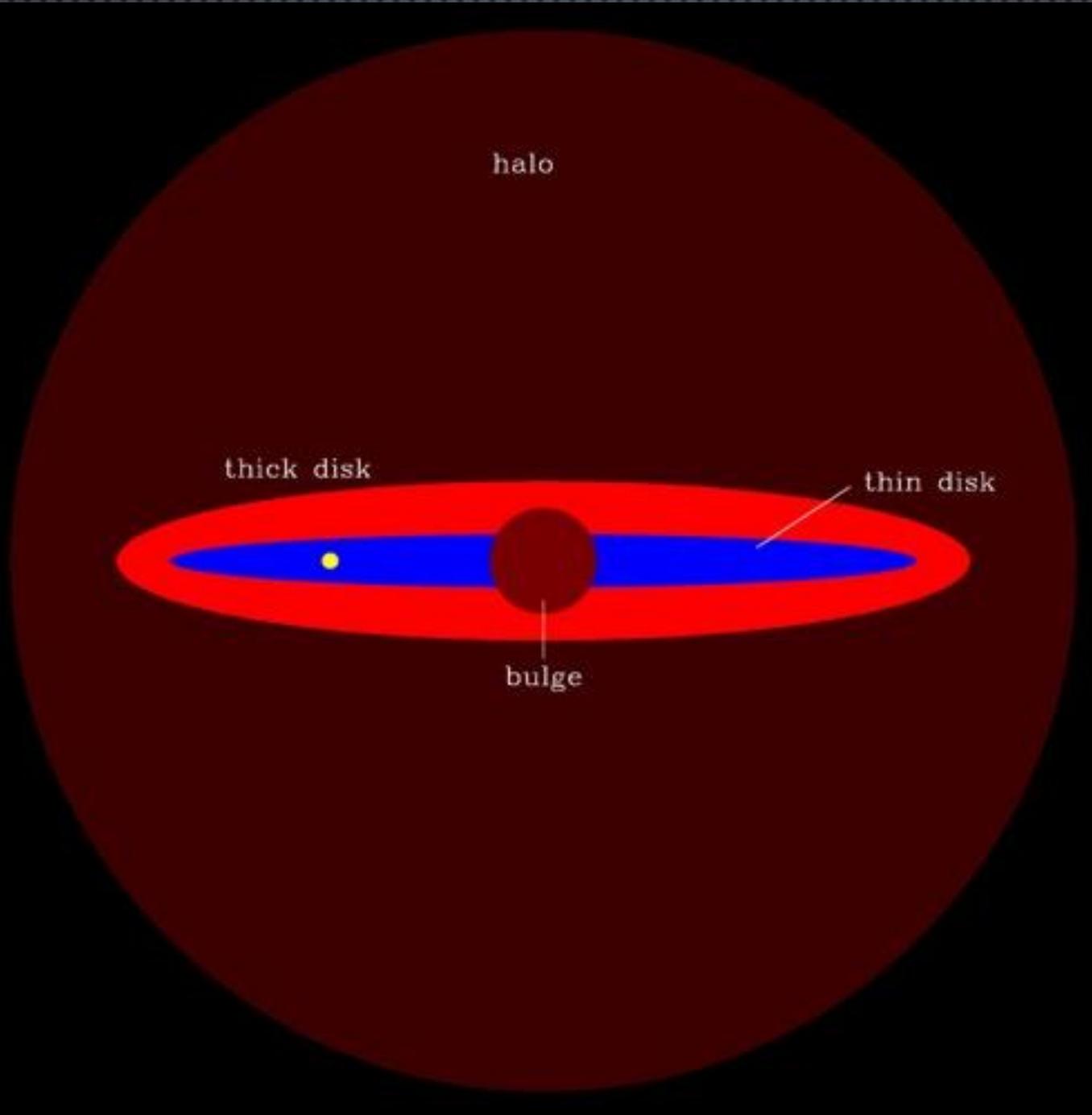
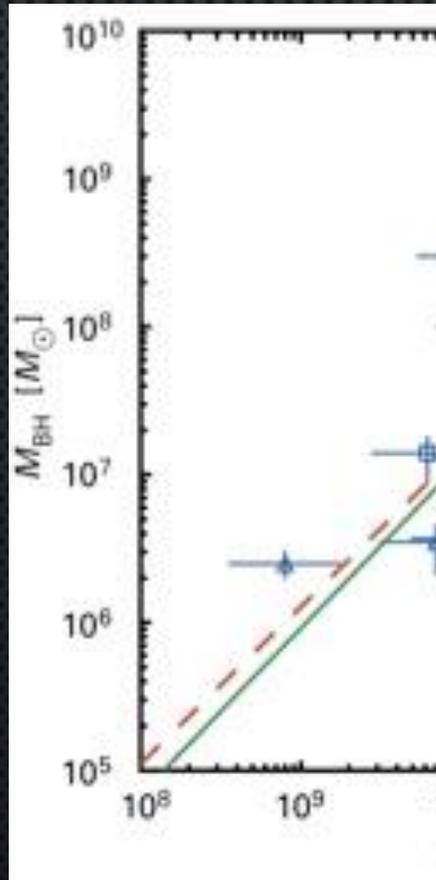
Масса $3 \cdot 10^9 M_0$.

Одна из самых тяжелых черных дыр



СОС ЧЕРН

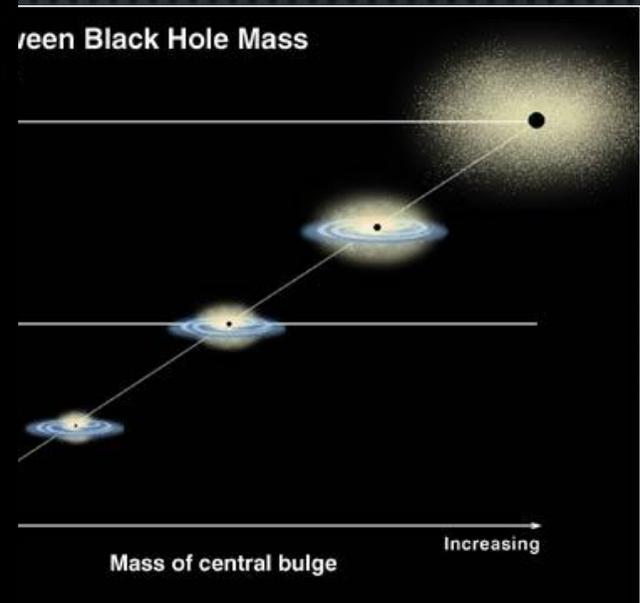
Со
ИМЕ



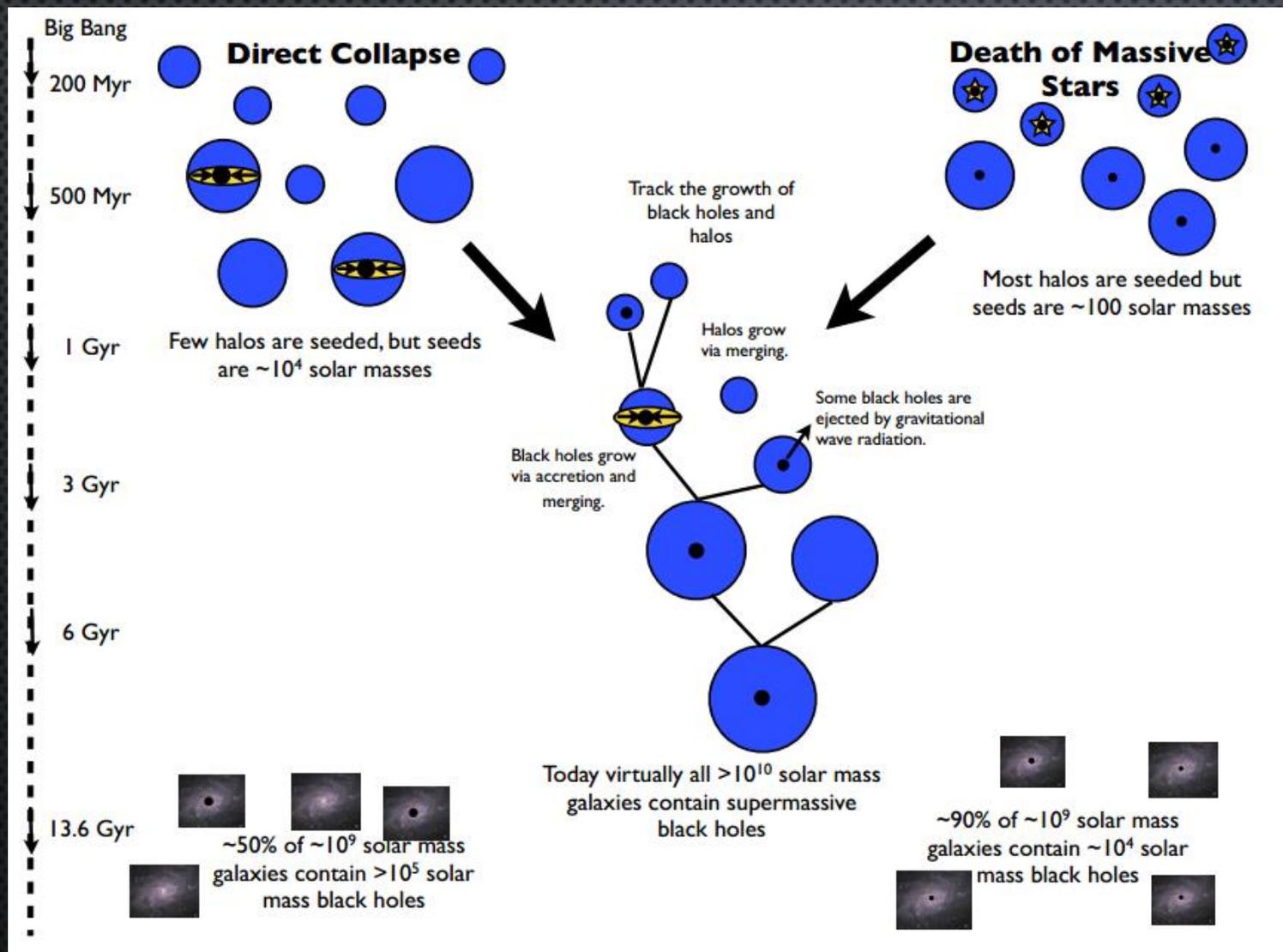
САМИ

ДЖЕМ

процента



СЦЕНАРИИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИИ МАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР



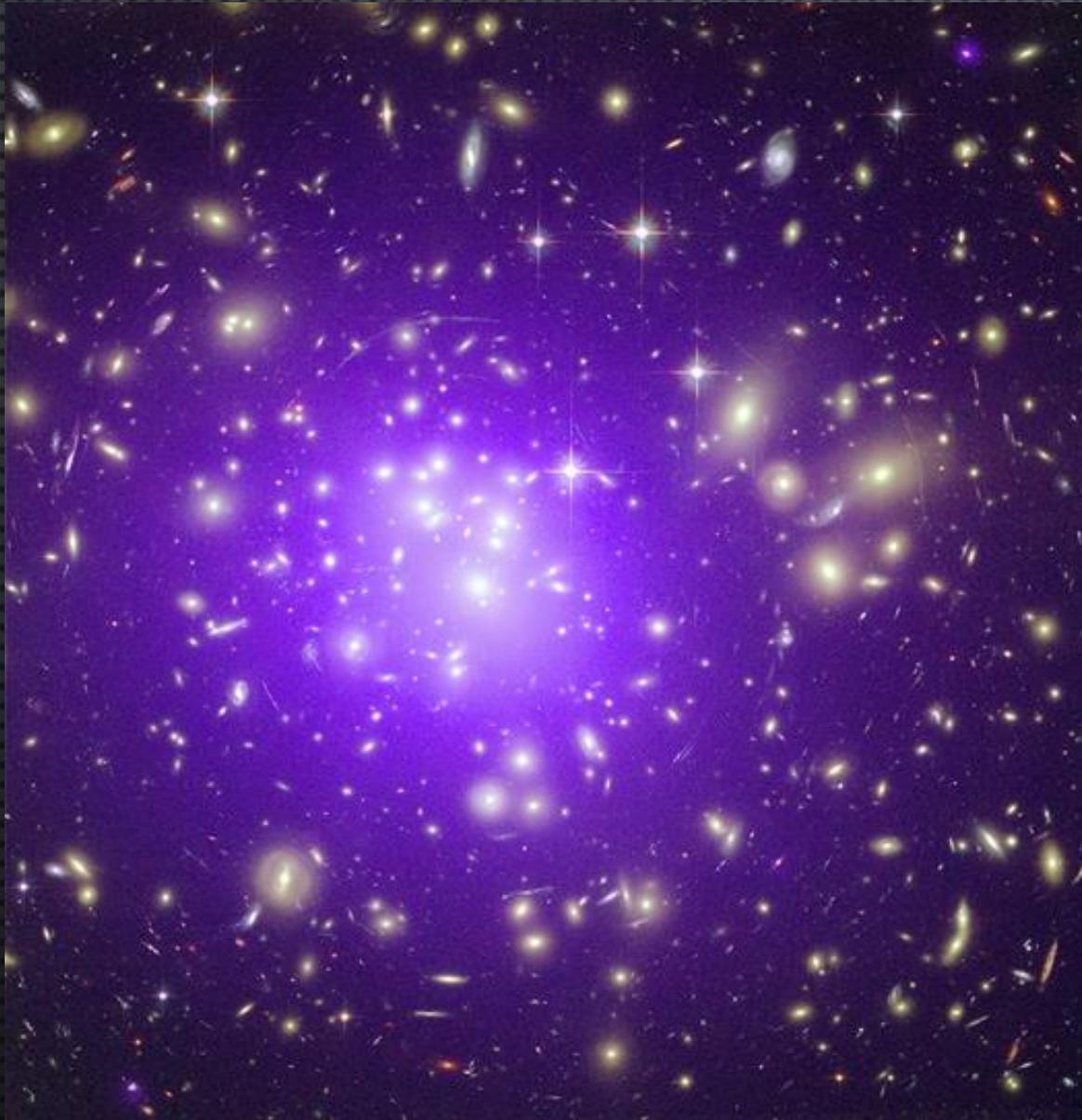
1. Прямой коллапс газовых облаков. Образование более массивных черных дыр.
2. Черные дыры из звезд первого поколения.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



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

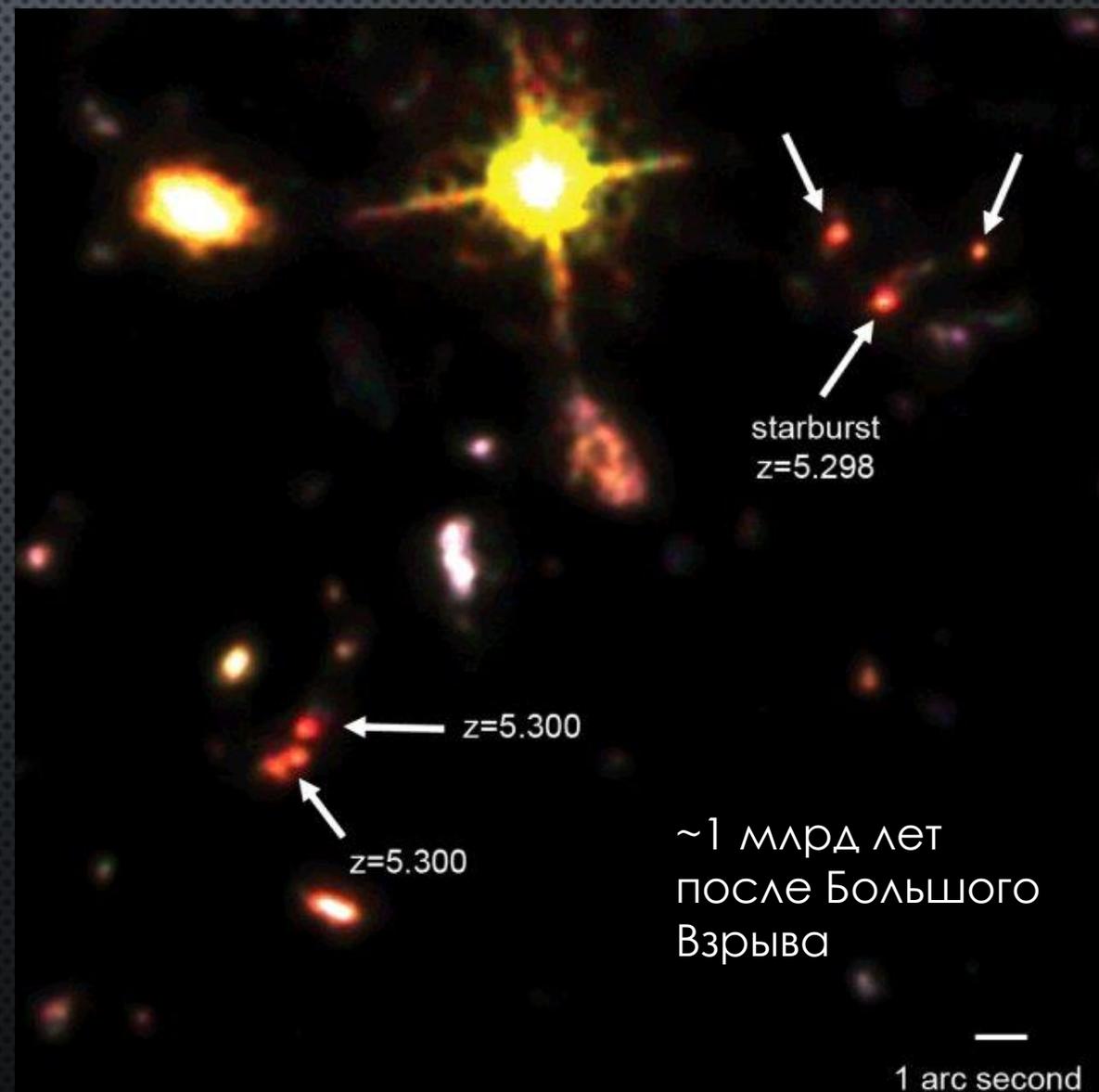
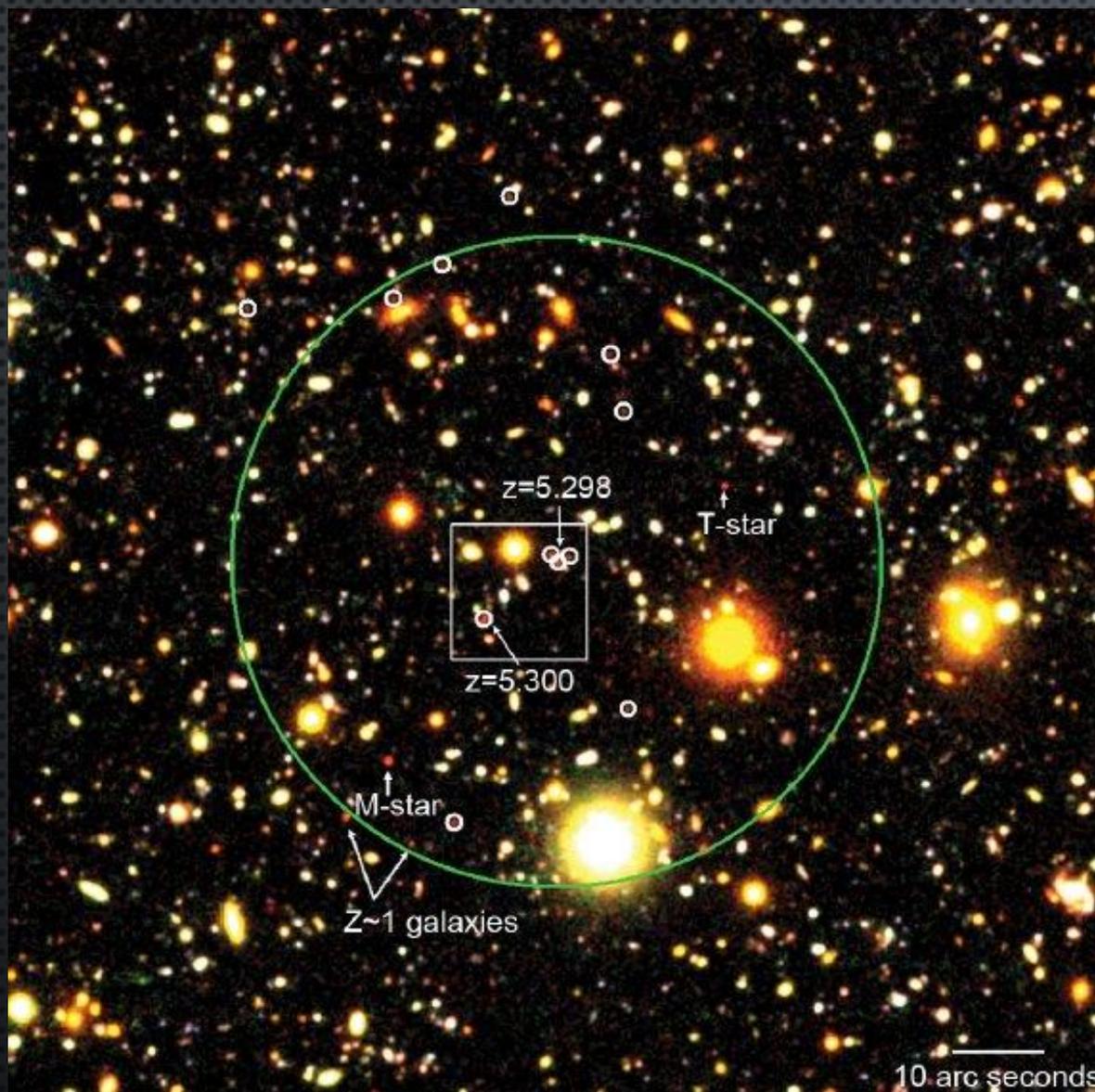
ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ



Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

ДАЛЕКОЕ ПРОТОСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК

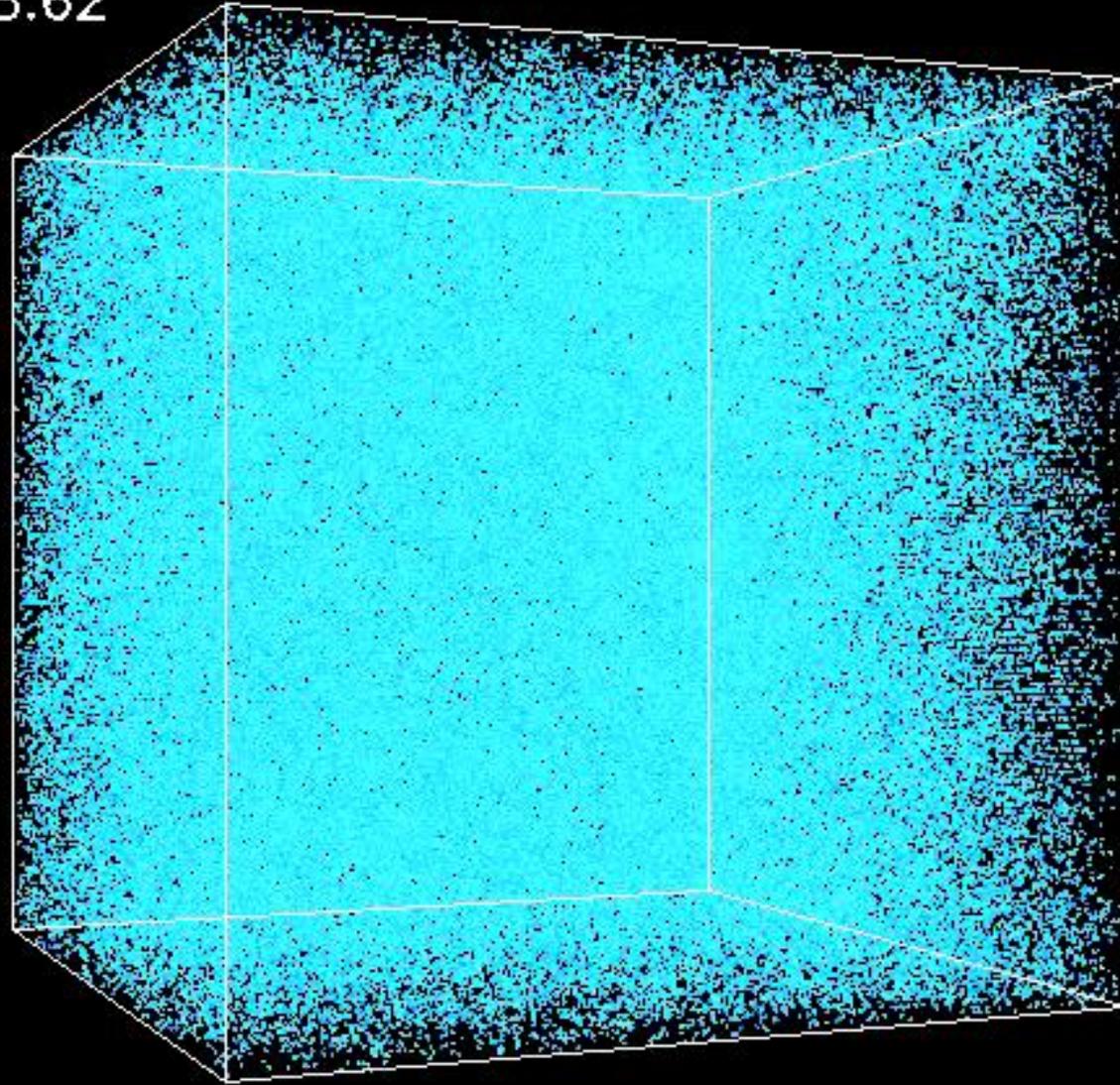


~1 млрд лет
после Большого
Взрыва

1101.3586

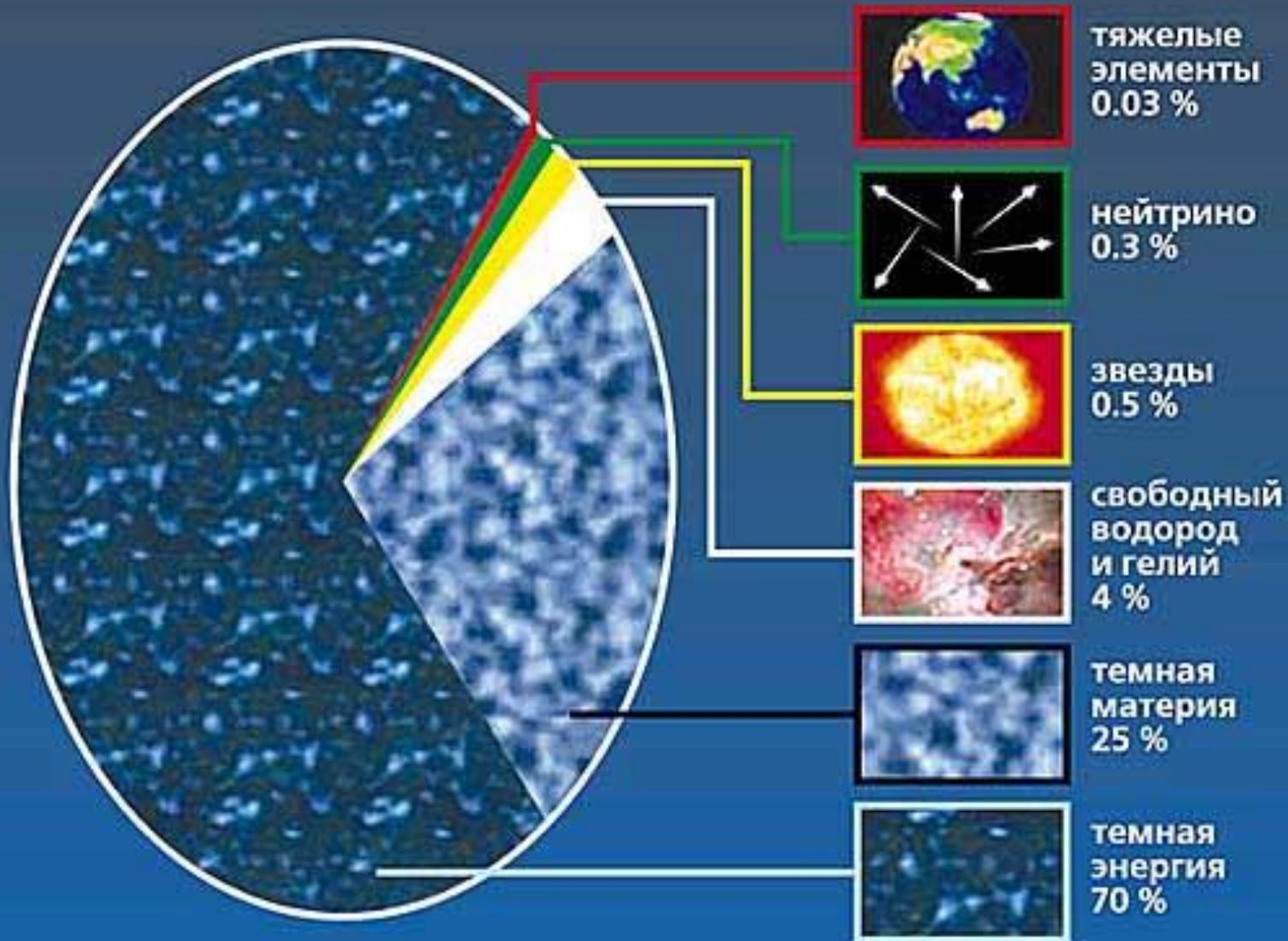
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

$Z=28.62$



А. Кравцов и др.

СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ



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

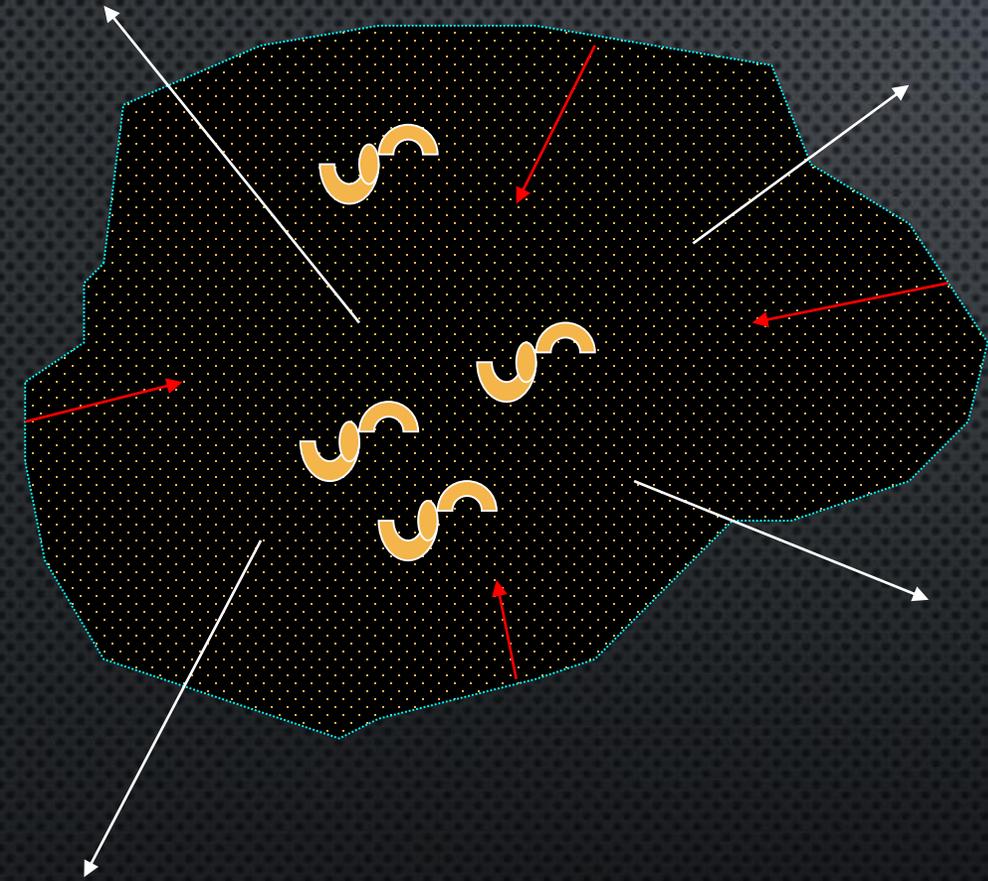
Неизвестные частицы
Нейтралино? Аксионы?



Неизвестные поля или вакуум

КОГДА И ЗАЧЕМ ЕГО ПРИДУМАЛИ?

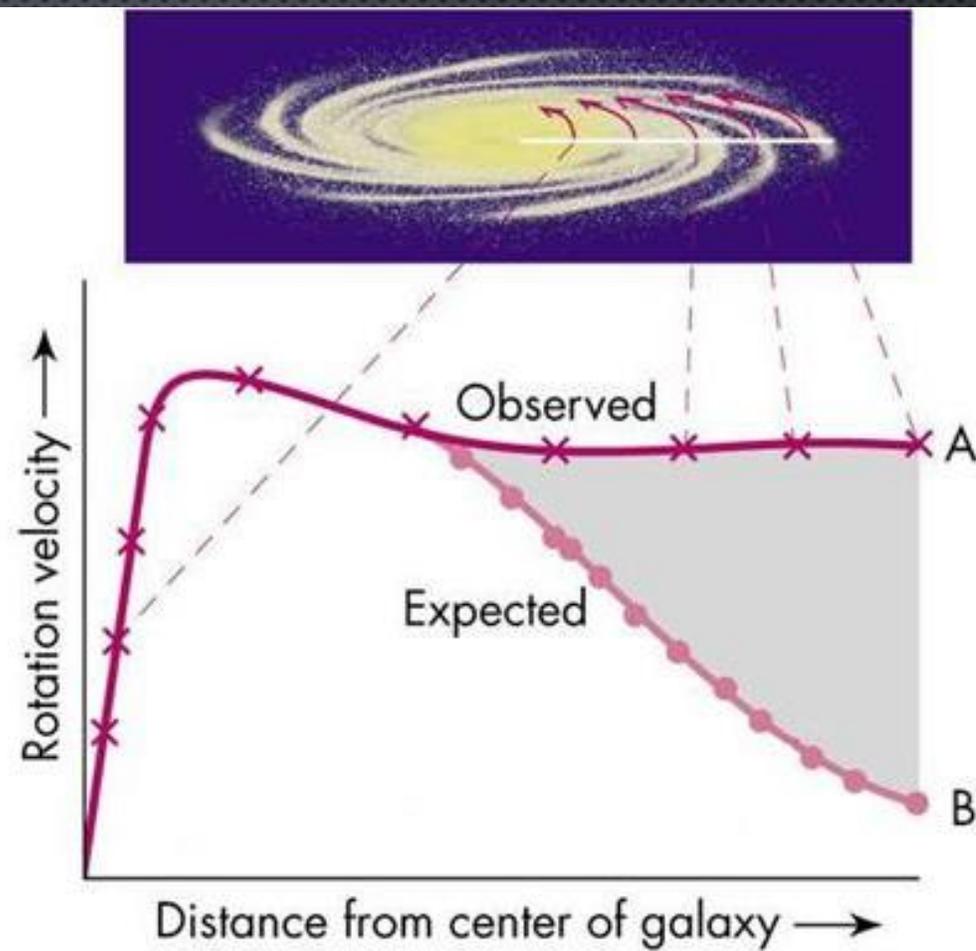
Сама идея появилась в 30-гг. благодаря работам Фрица Цвикки.



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



ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК



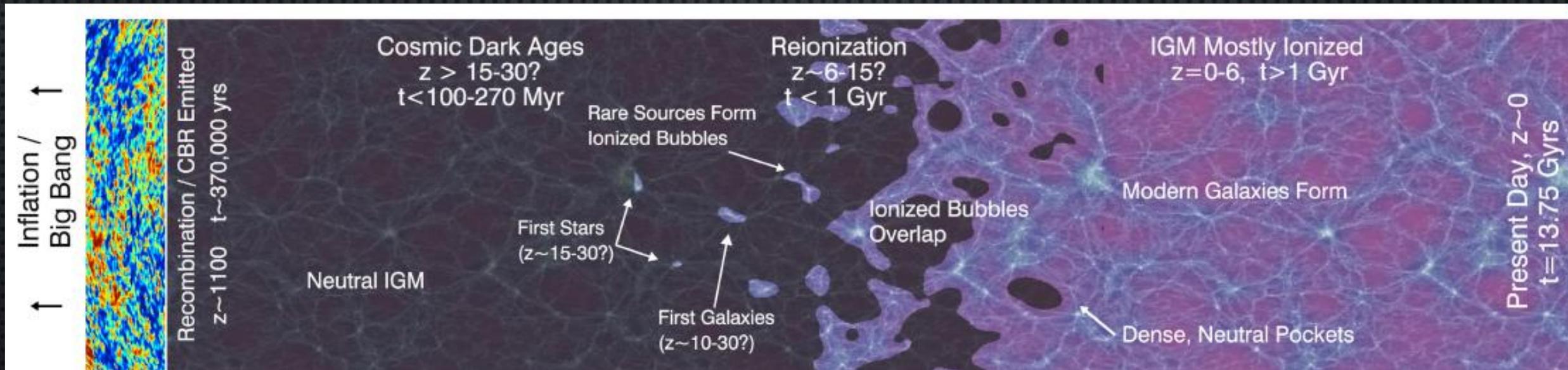
ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

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».

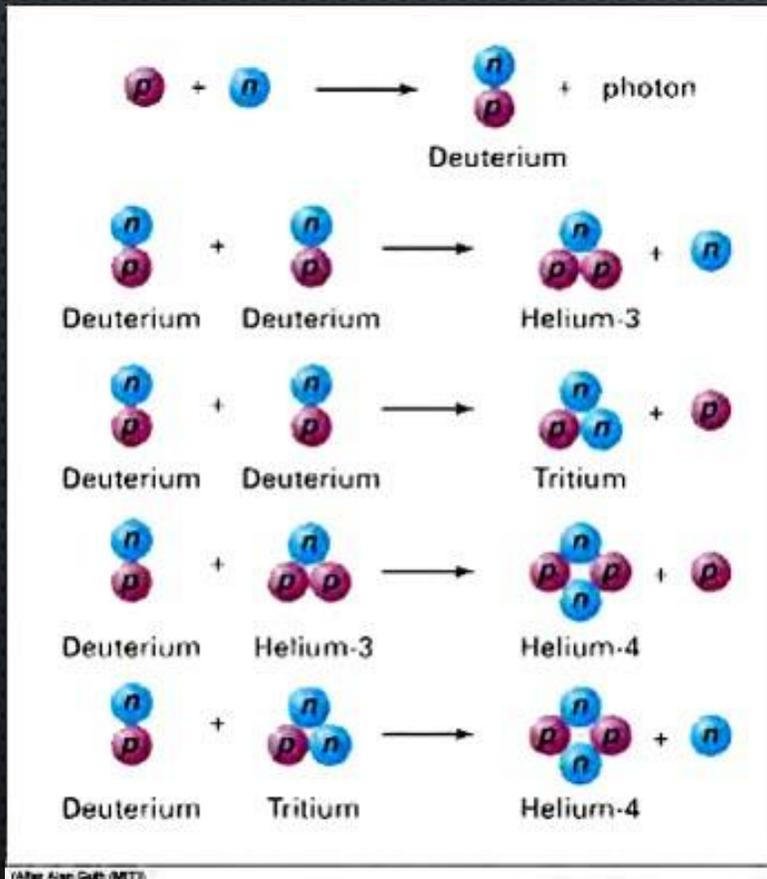
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



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

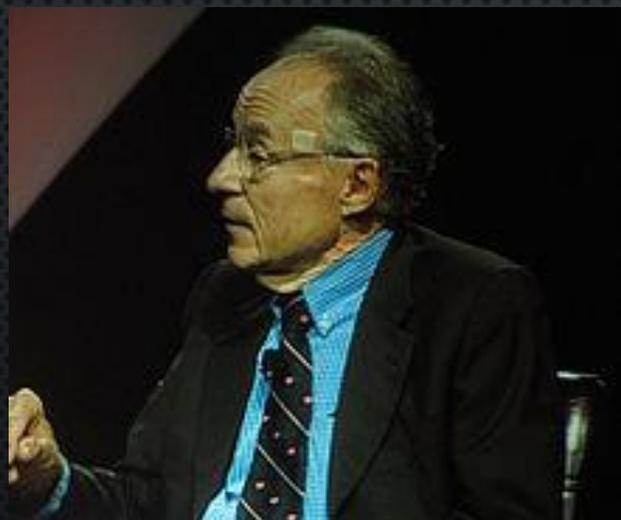
НЕОЖИДАННОЕ ОТКРЫТИЕ

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.

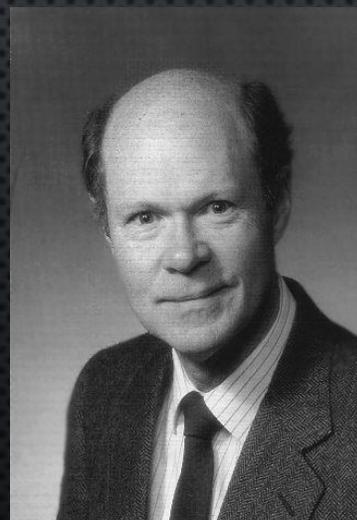
ПОМЕХИ! ШУМ В РАДИОЭФИРЕ!!!!

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

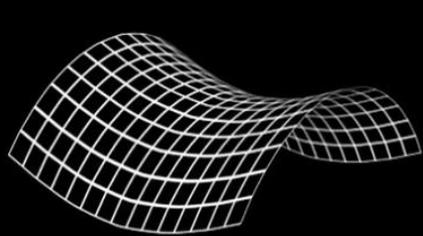
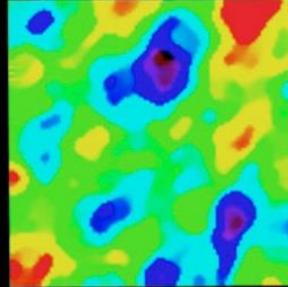
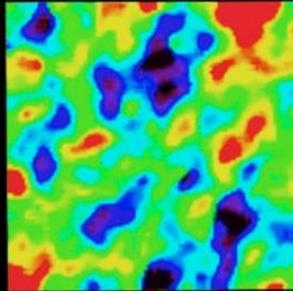
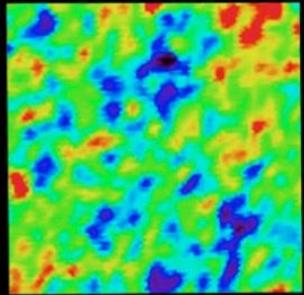


Роберт Вилсон

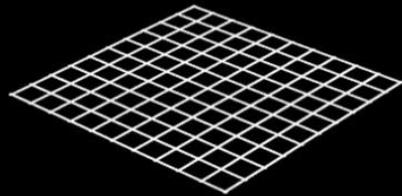


ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

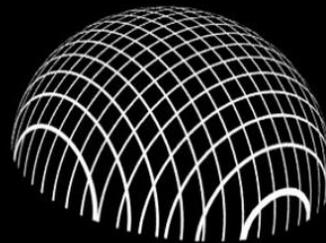
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT



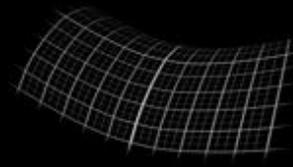
CLOSED

Наблюдения позволяют определить среднюю плотность вселенной.

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

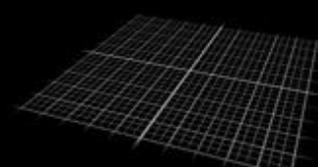
$$\Omega_{\text{Total}} < 1$$

LOWER
DENSITY



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

CRITICAL
DENSITY

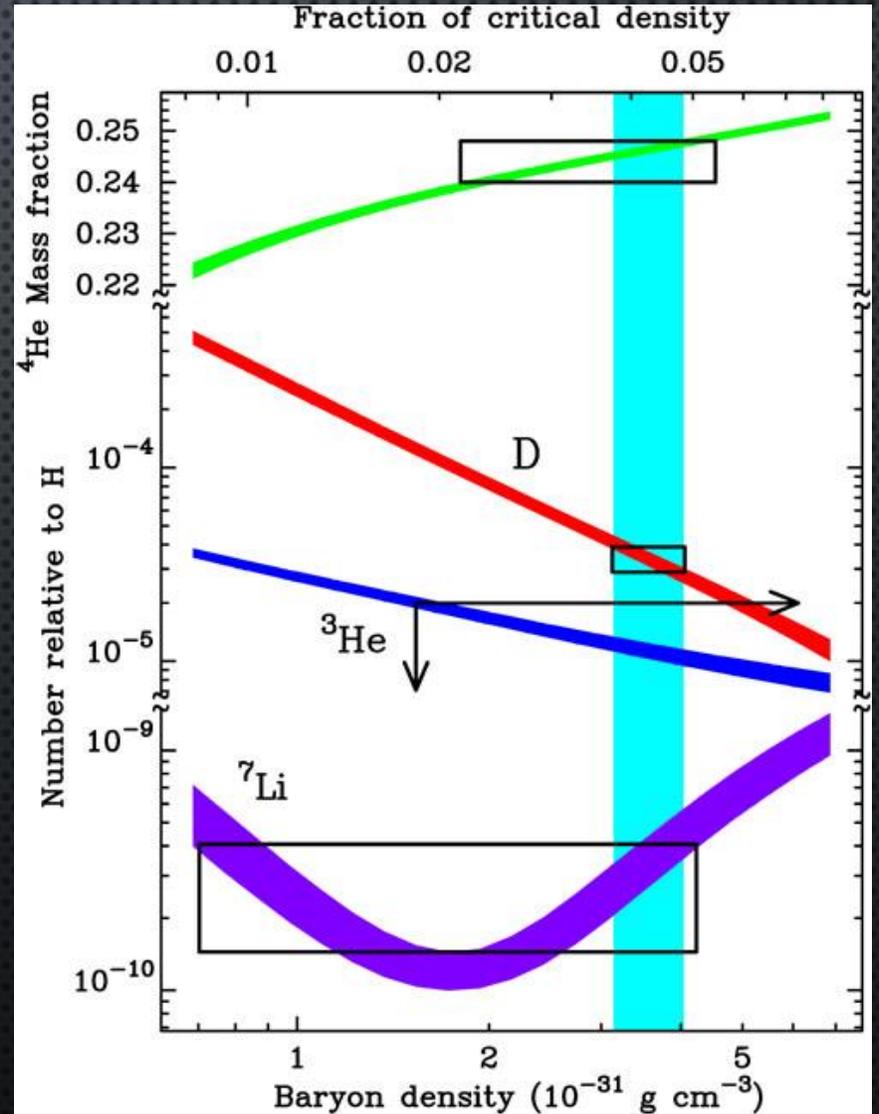
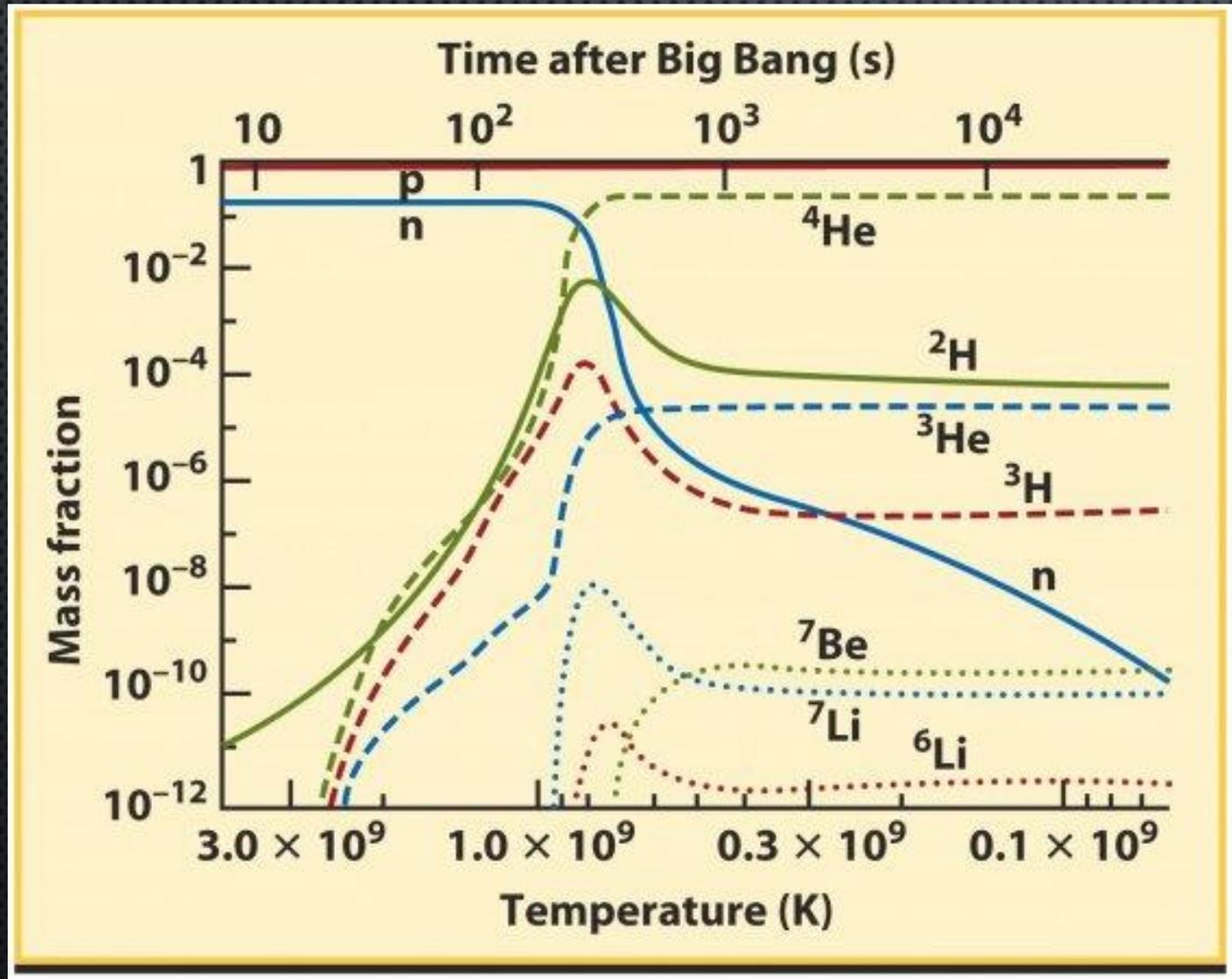


$$\Omega_{\text{Total}} > 1$$

HIGHER
DENSITY

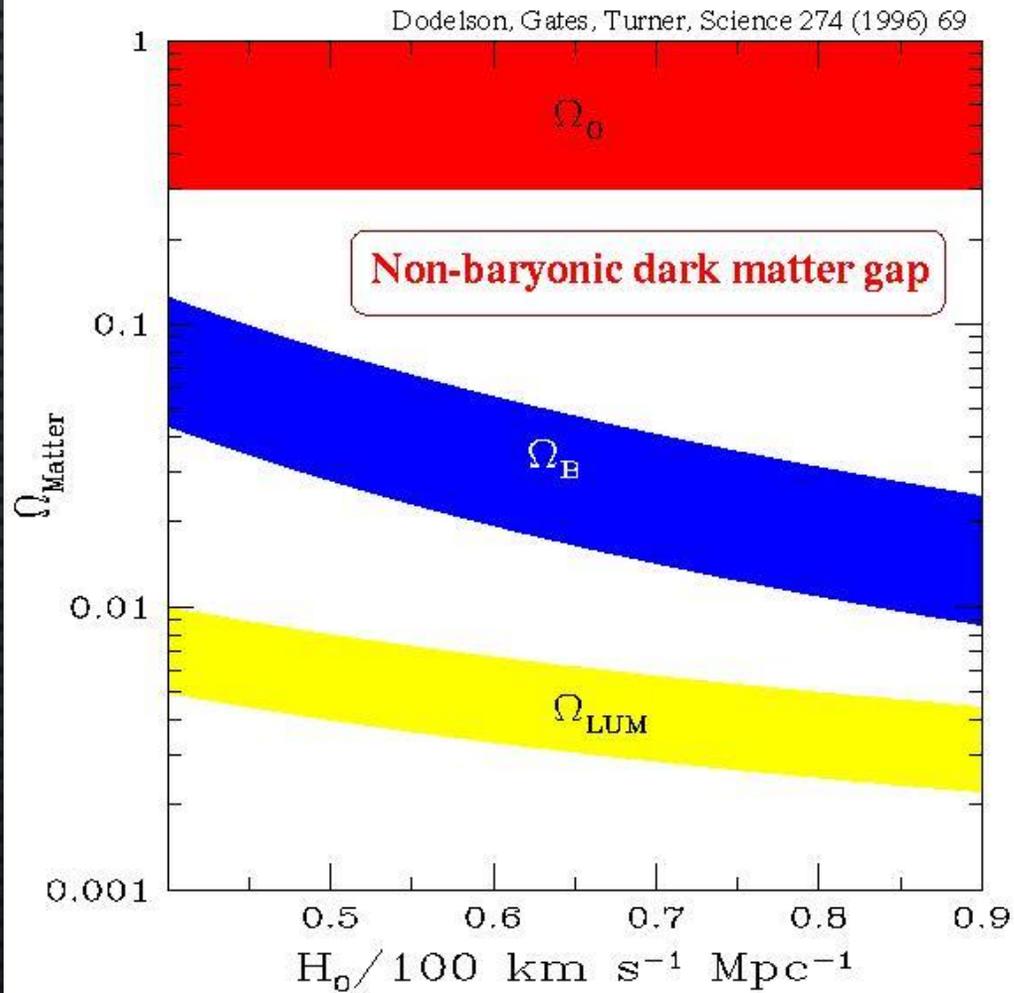


ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ



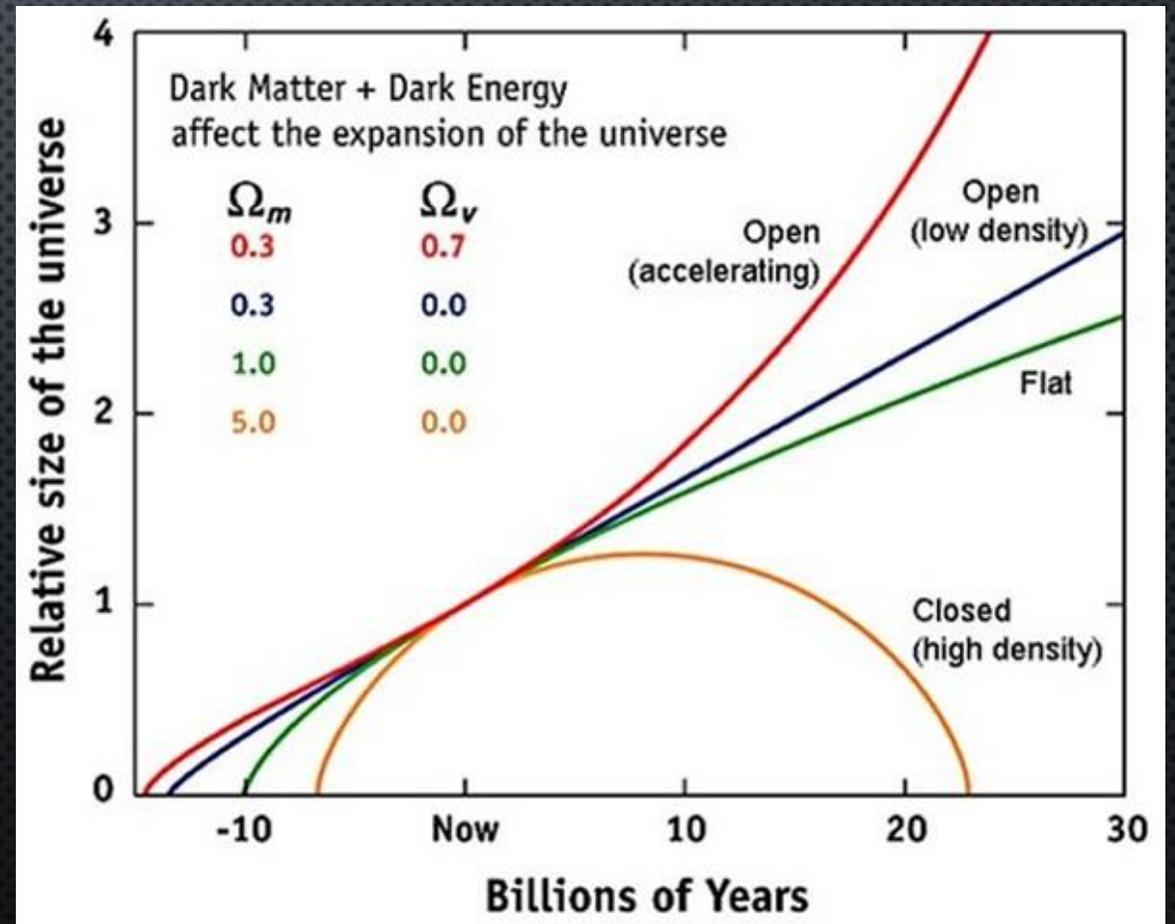
НУКЛЕОСИНТЕЗ + РЕЛИКТ = ПРОБЛЕМА ДЛЯ БАРИОНОВ

Motivation for non-baryonic dark matter

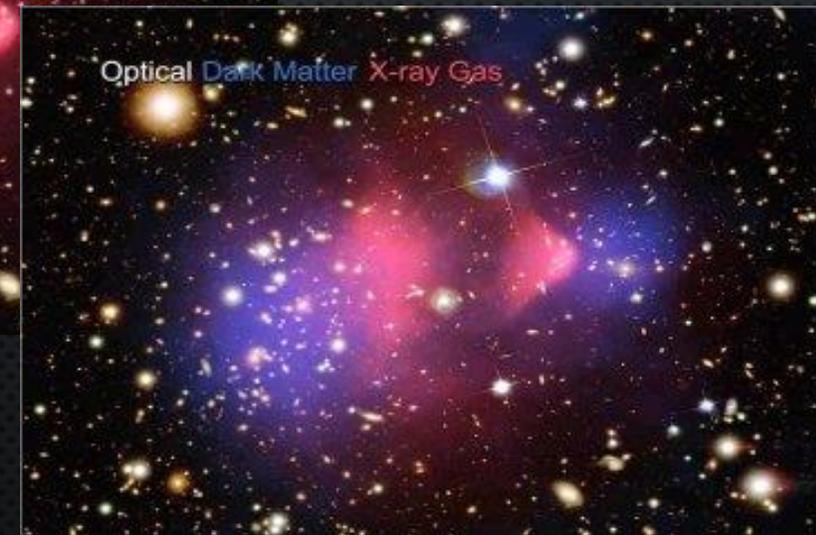
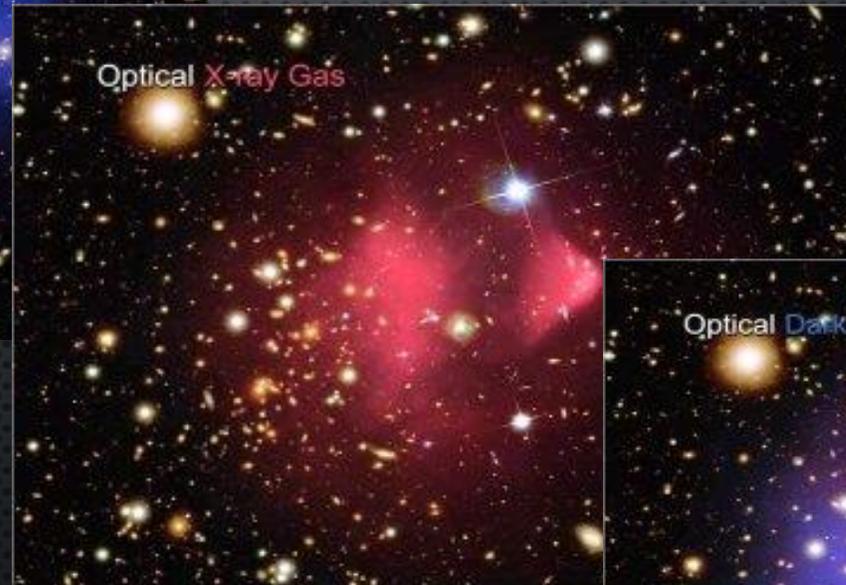
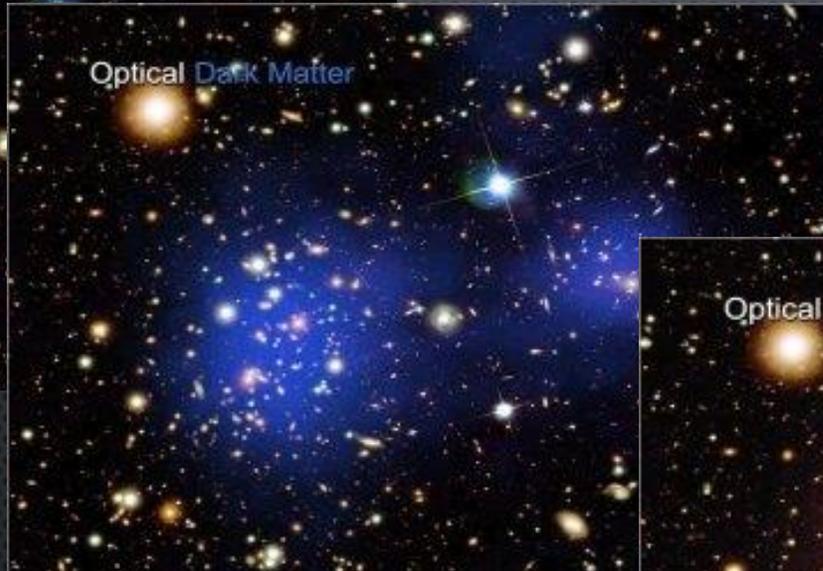
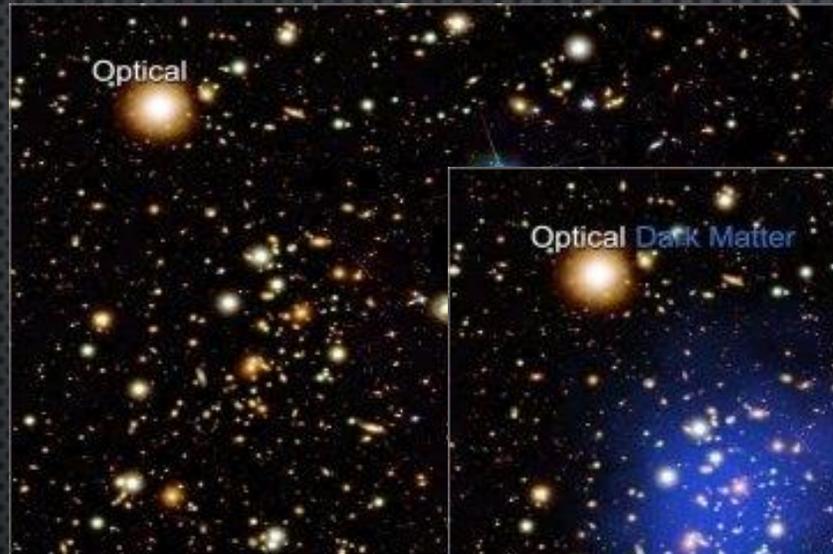


XIth Rencontres de Blois '99

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



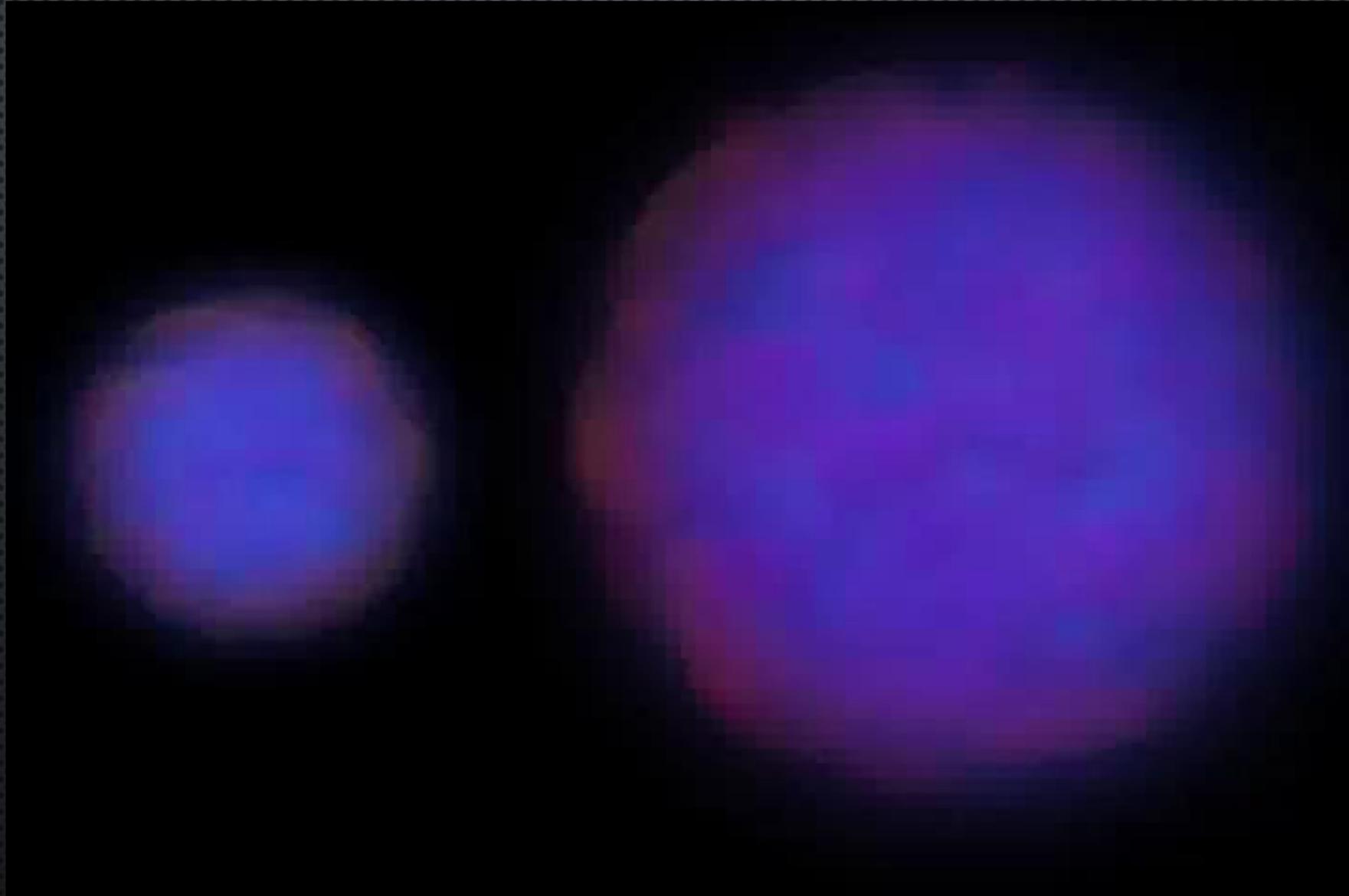
Сталкивающиеся скопления галактик
1E 0657-56 (Bullet cluster)

ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ



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

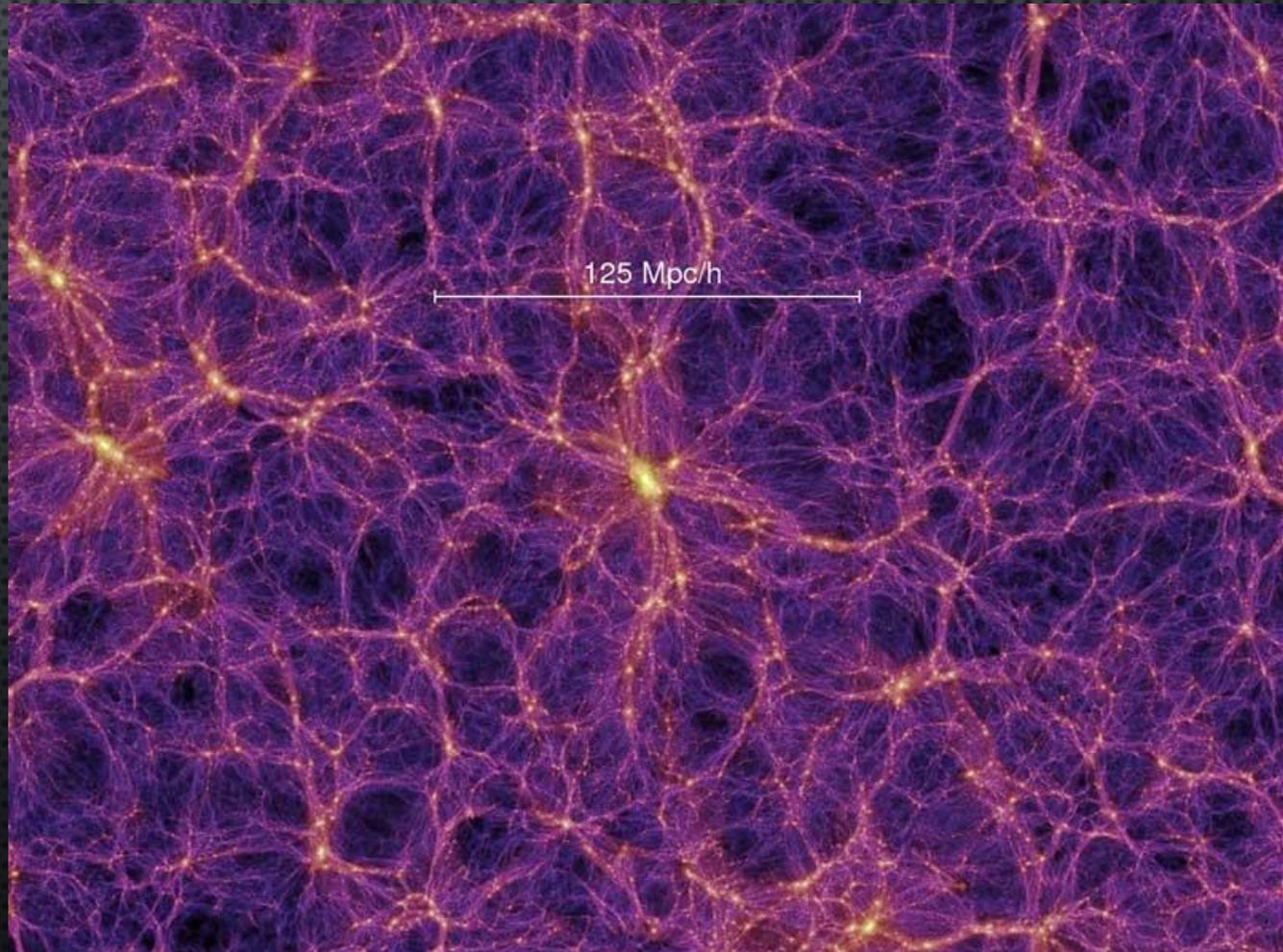
СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК



СКЕЛЕТ ВСЕЛЕННОЙ

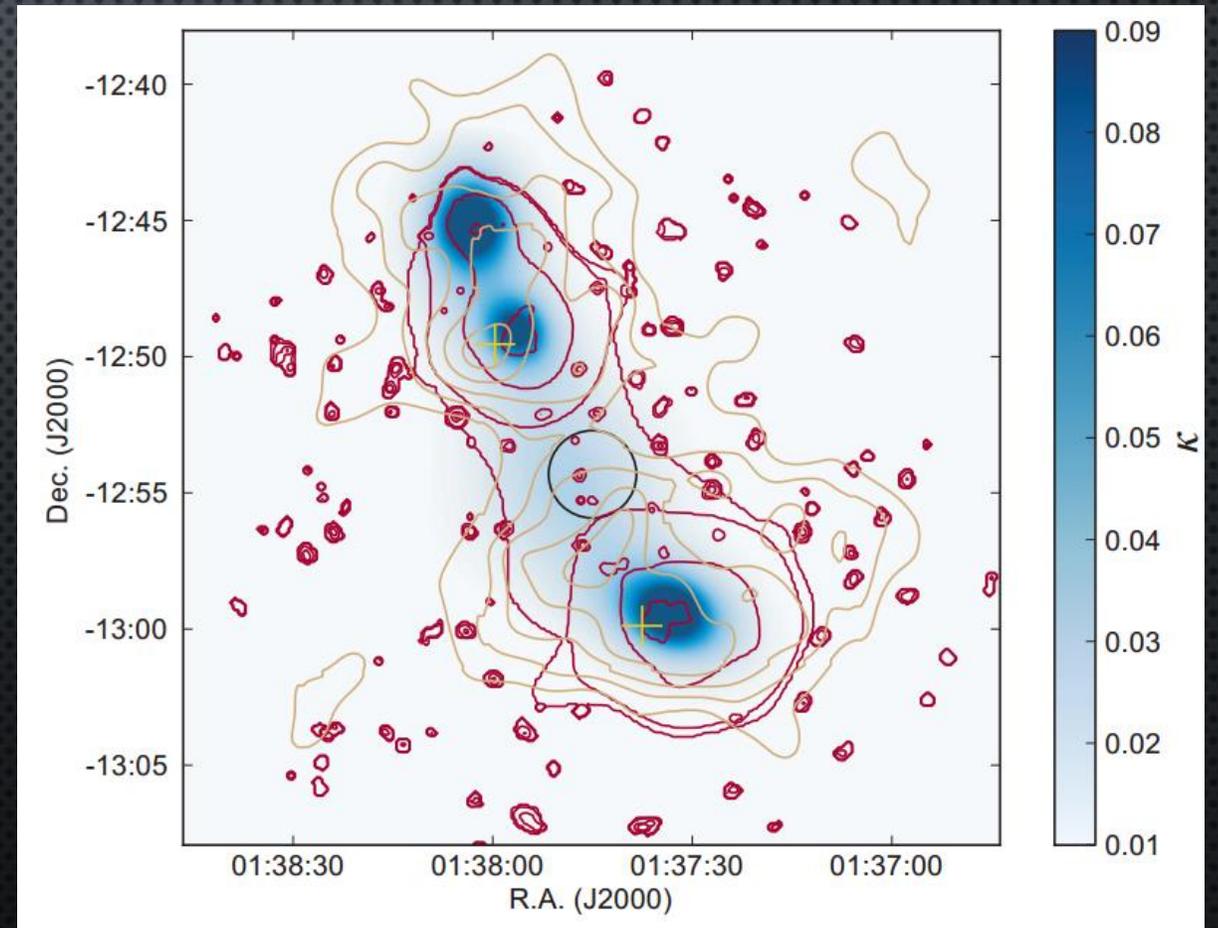
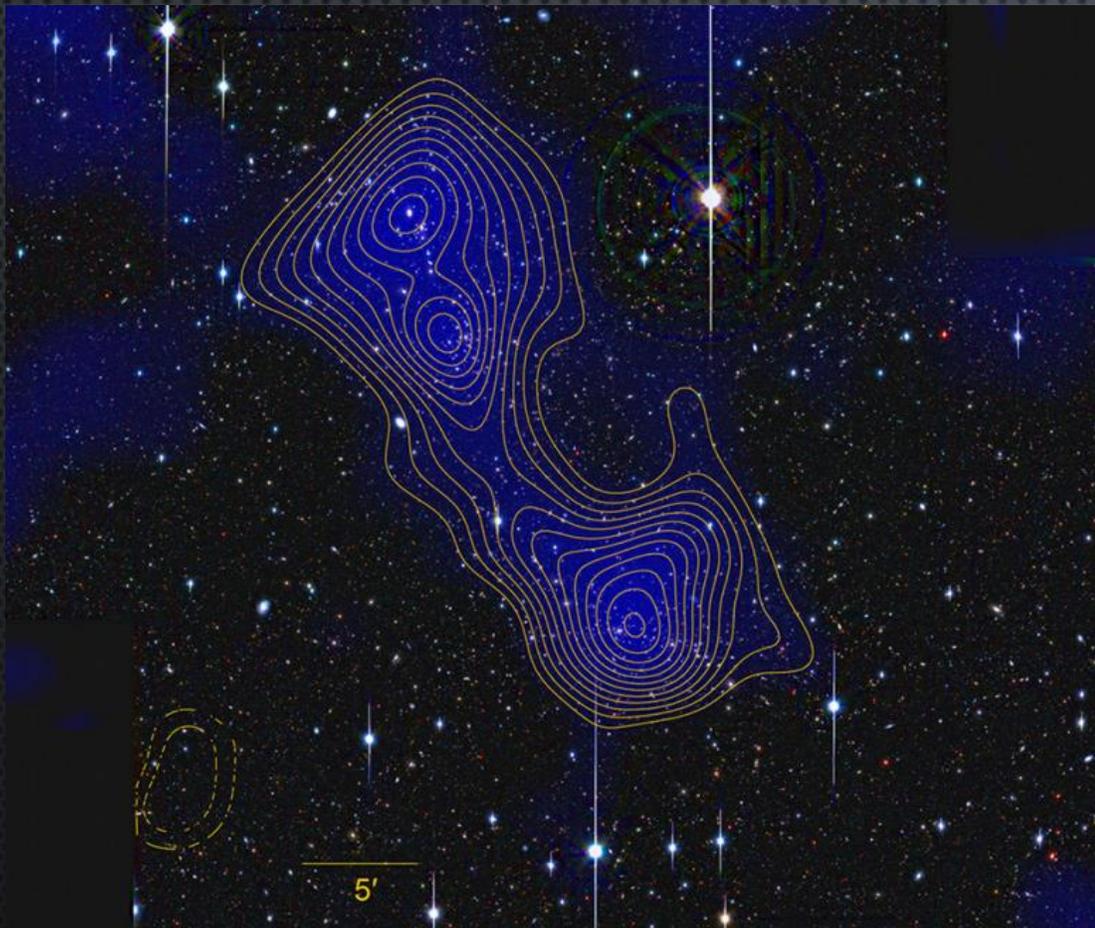
Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом. Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ – т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

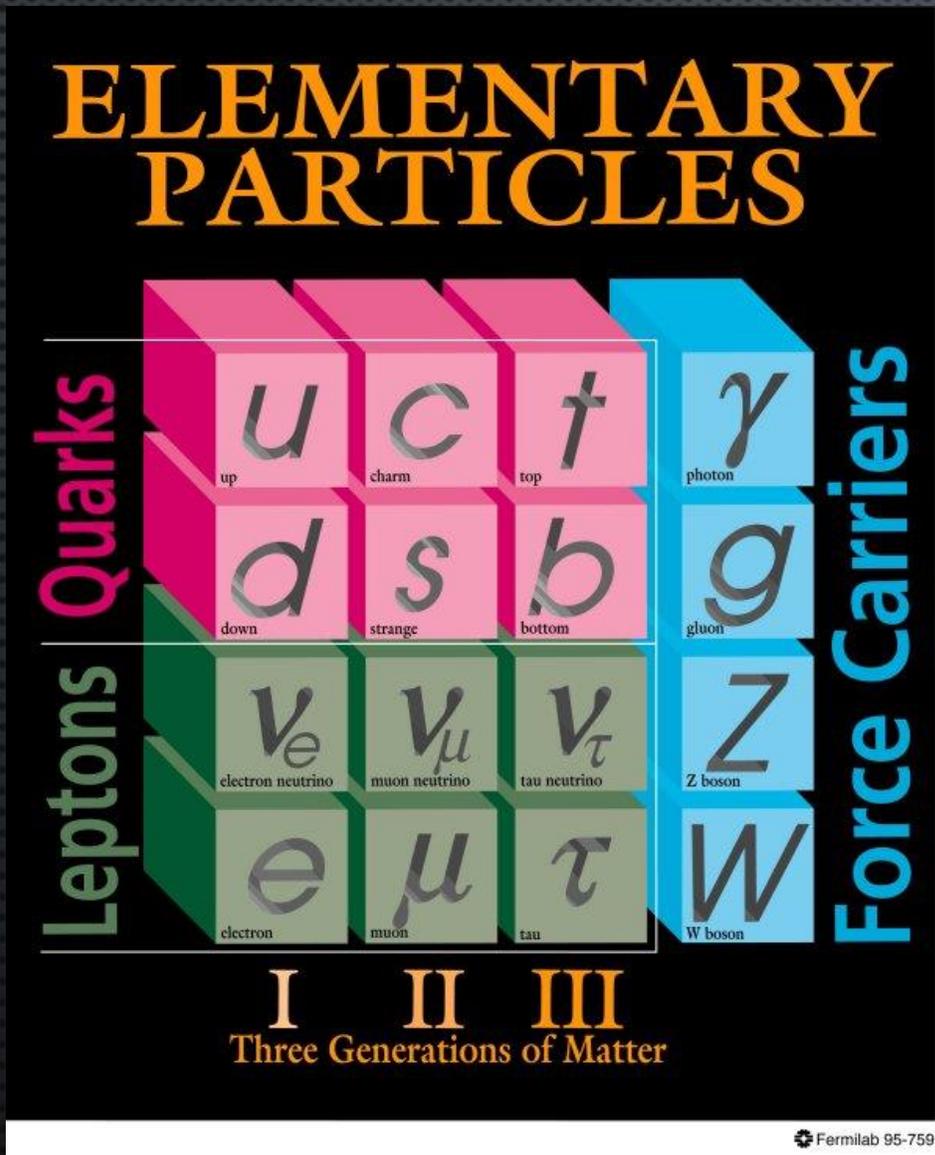


ВОЛОКНО ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

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



СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ



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

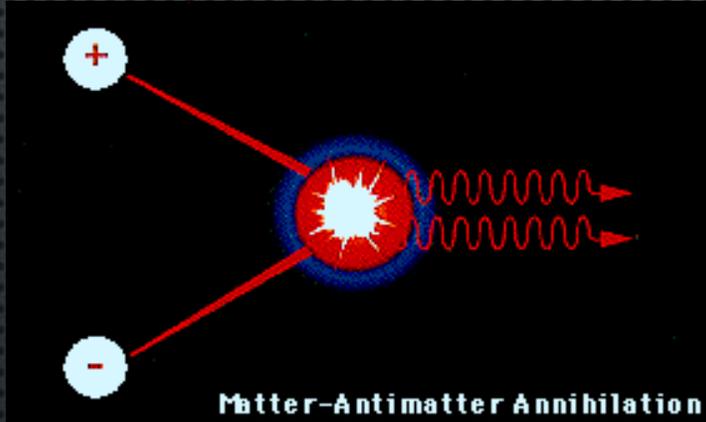
Обсуждаются самые разные варианты.

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.

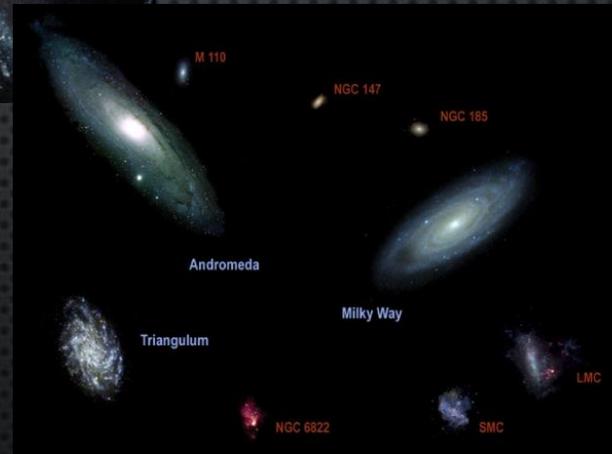


- 2) Также можно искать гамма-лучи от аннигиляции частиц темного вещества

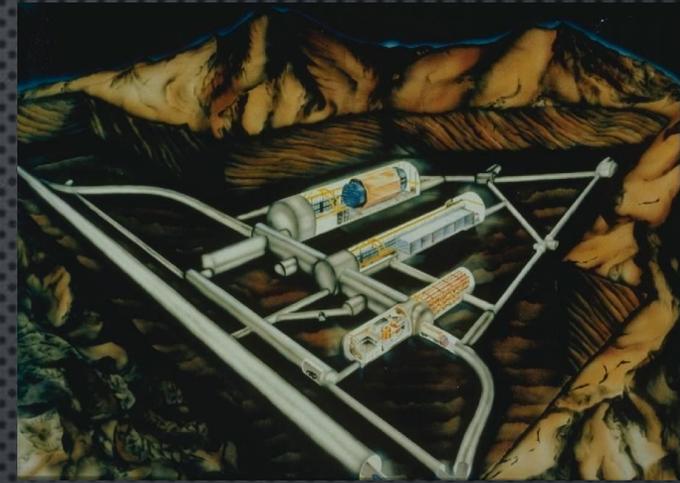
Такие исследования активно ведутся с помощью обсерватории имени Ферми и наземных гамма-телескопов.



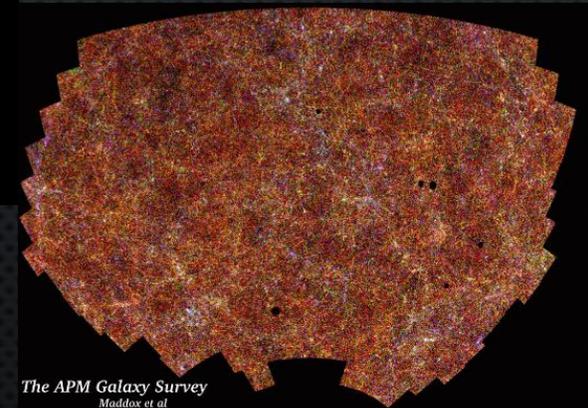
Галактика



Ближние галактики



Фон от далеких галактик

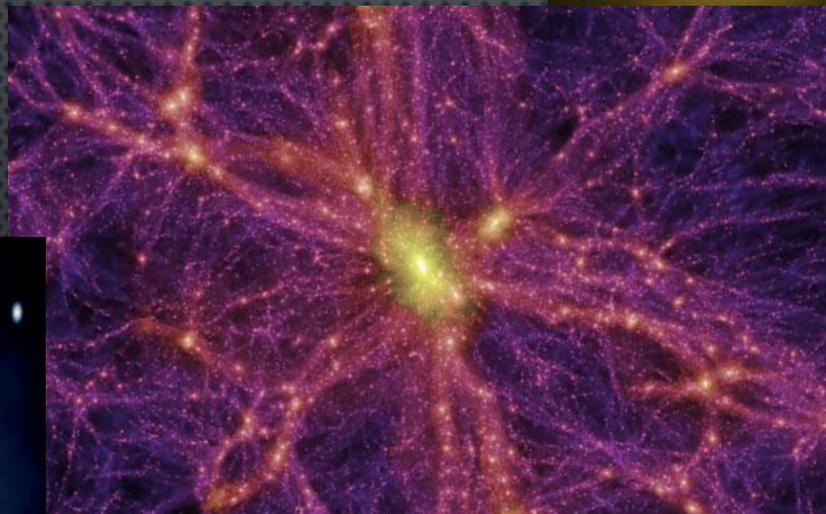
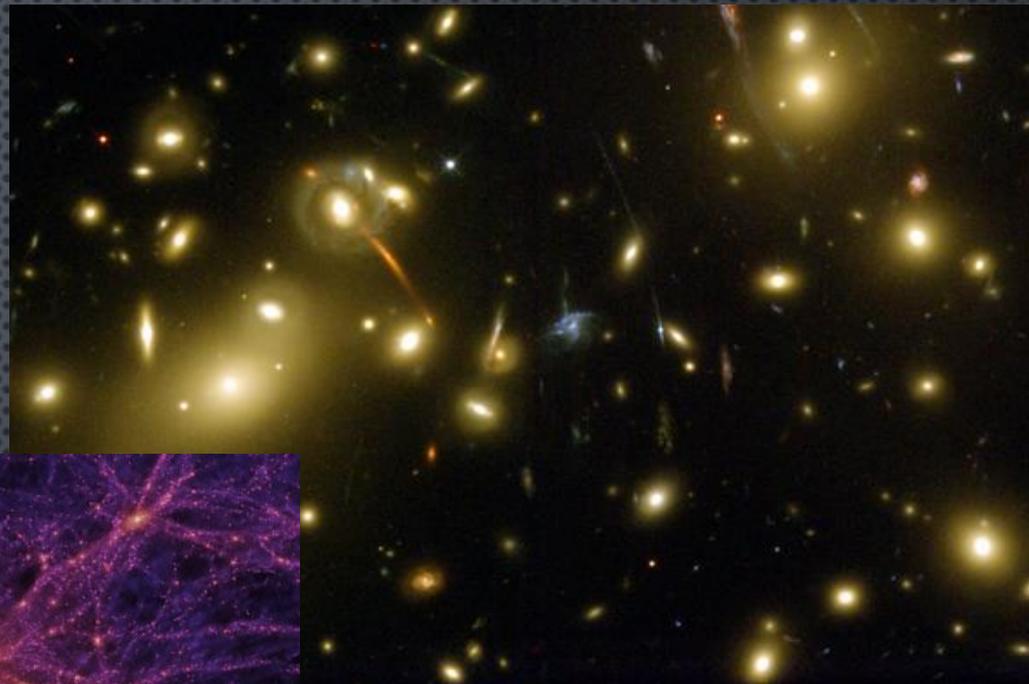


Так же была надежда найти что-то на LHC

(ТЕМНЫЕ) ФАКТЫ И НАДЕЖДЫ

Темная материя проявляется себя благодаря своей гравитации:

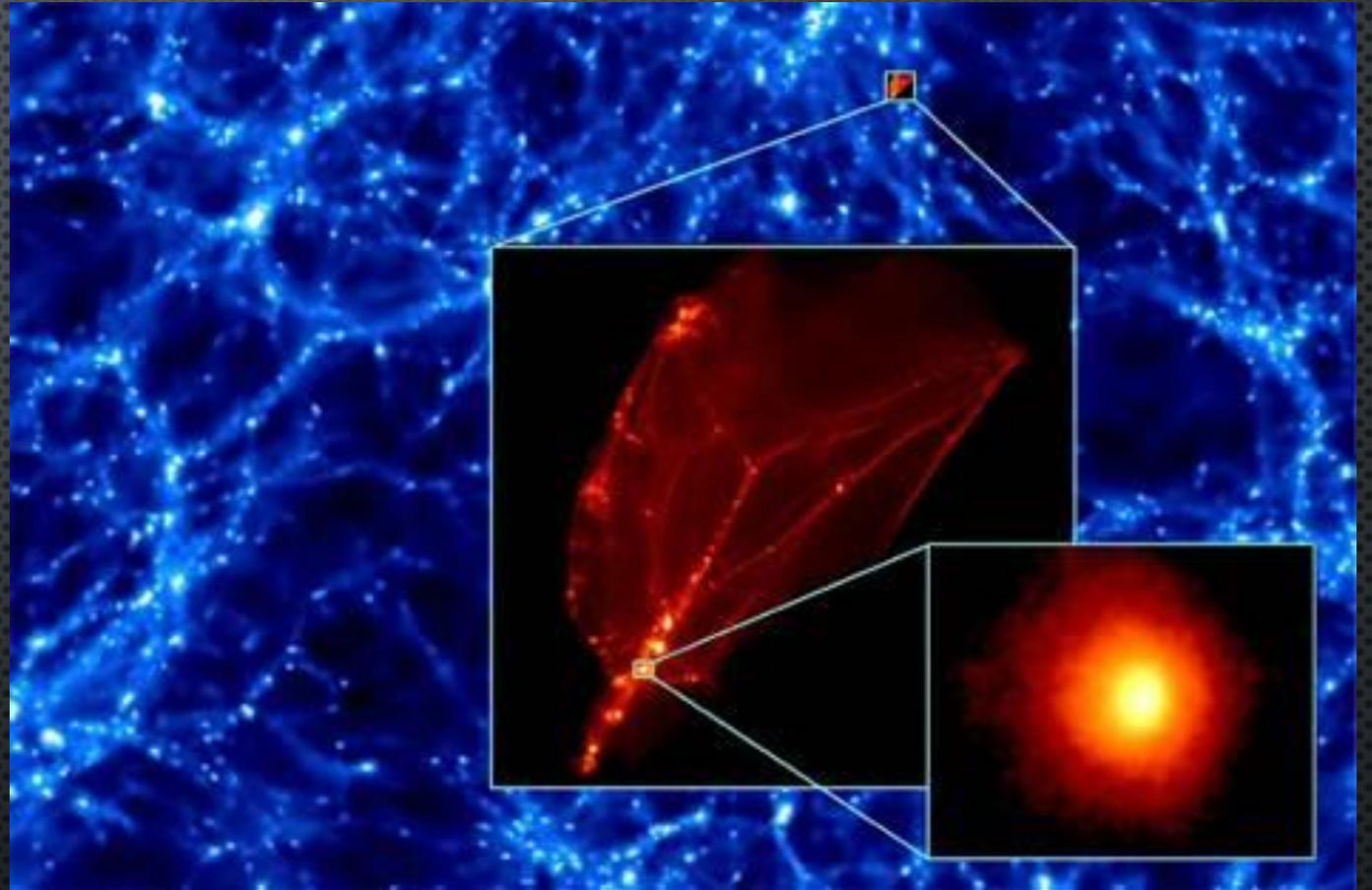
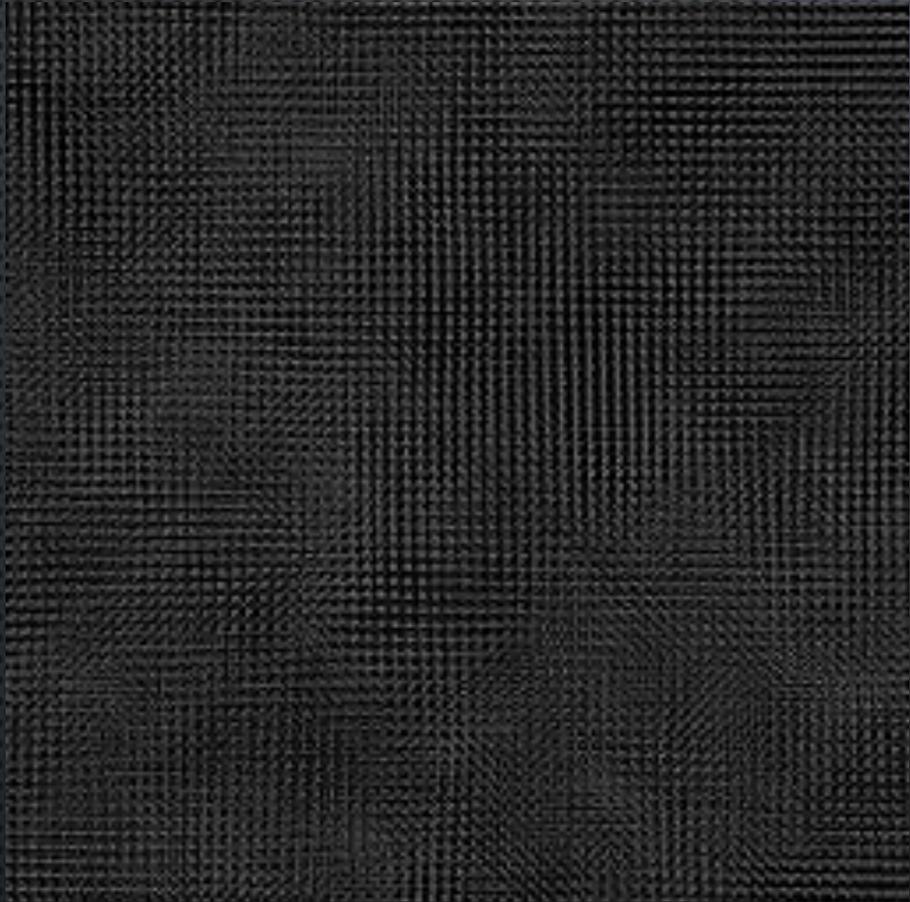
- в скоплениях галактик
- в отдельных галактиках
- в линзировании
- в росте структуры
- в полной плотности вселенной



Мы надеемся увидеть:

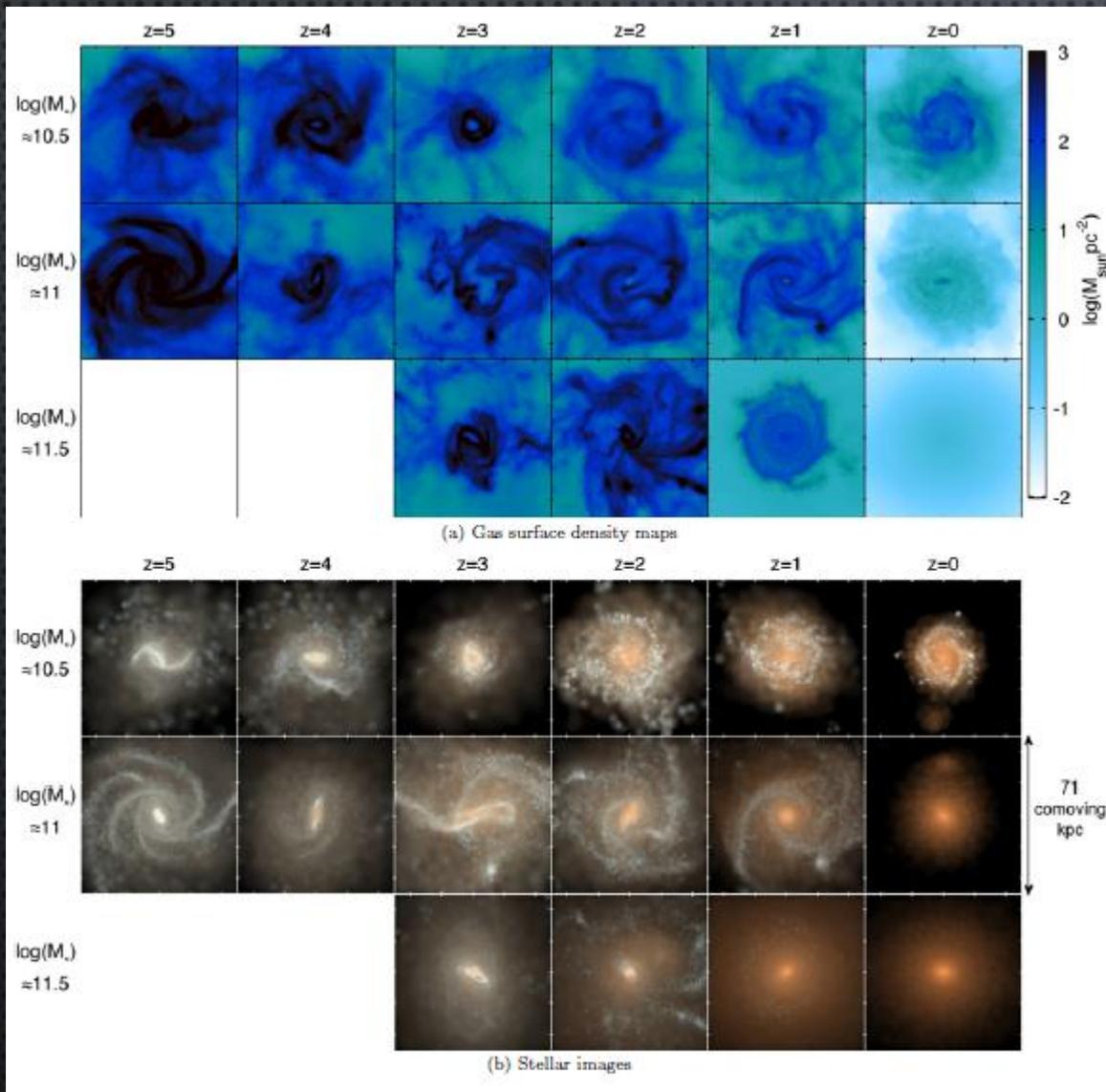
1. Прямое взаимодействие в лабораторных экспериментах;
2. Результаты аннигиляции
 - наблюдая гамма-излучение
 - наблюдая античастицы.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



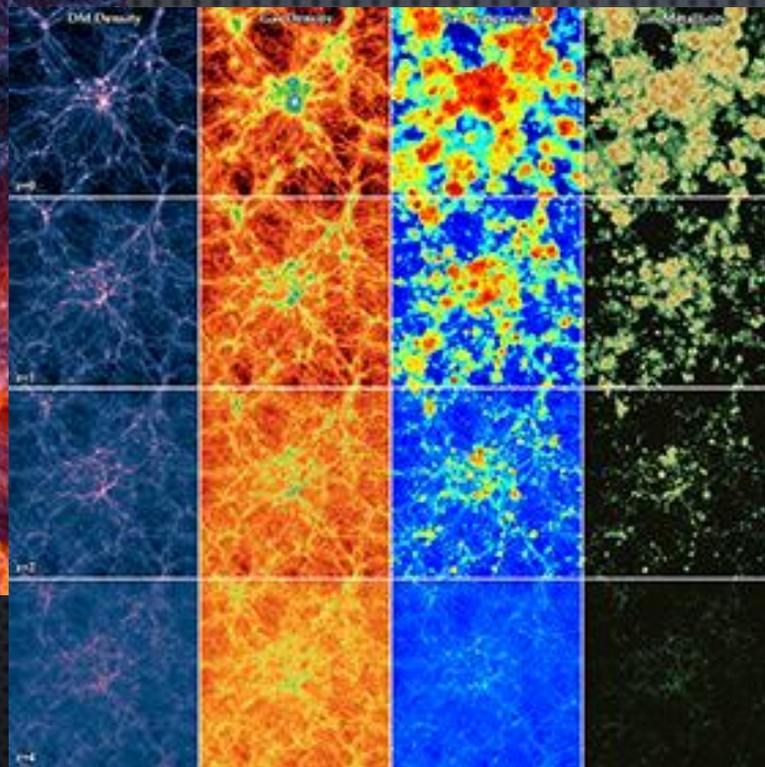
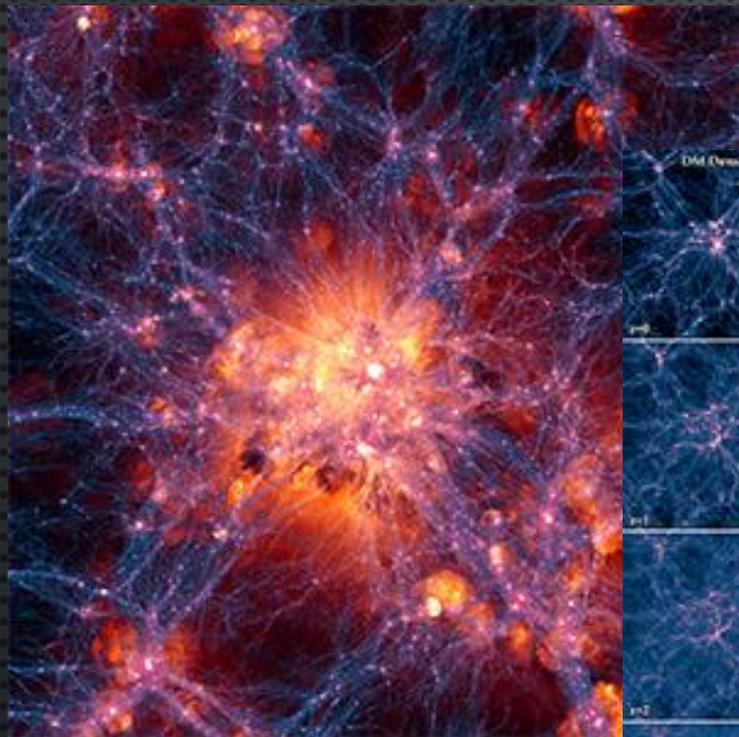
Постепенно формируется галактика, где самым массивным элементом является гало темной материи.
Как же распределено вещество в этом гало?

КРУПНЫЕ ГАЛАКТИКИ

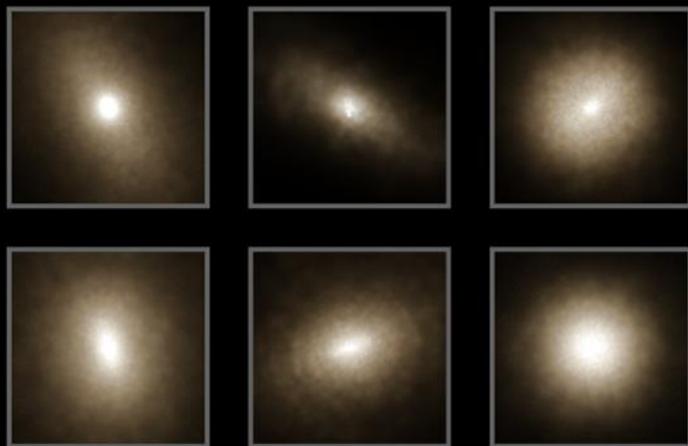


Прямо можно изучать, как образуются галактики разного вида и сравнивать с данными наблюдений.

... ДО САМЫХ
ДО ОКРАИН ...



ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



ellipticals



disk galaxies



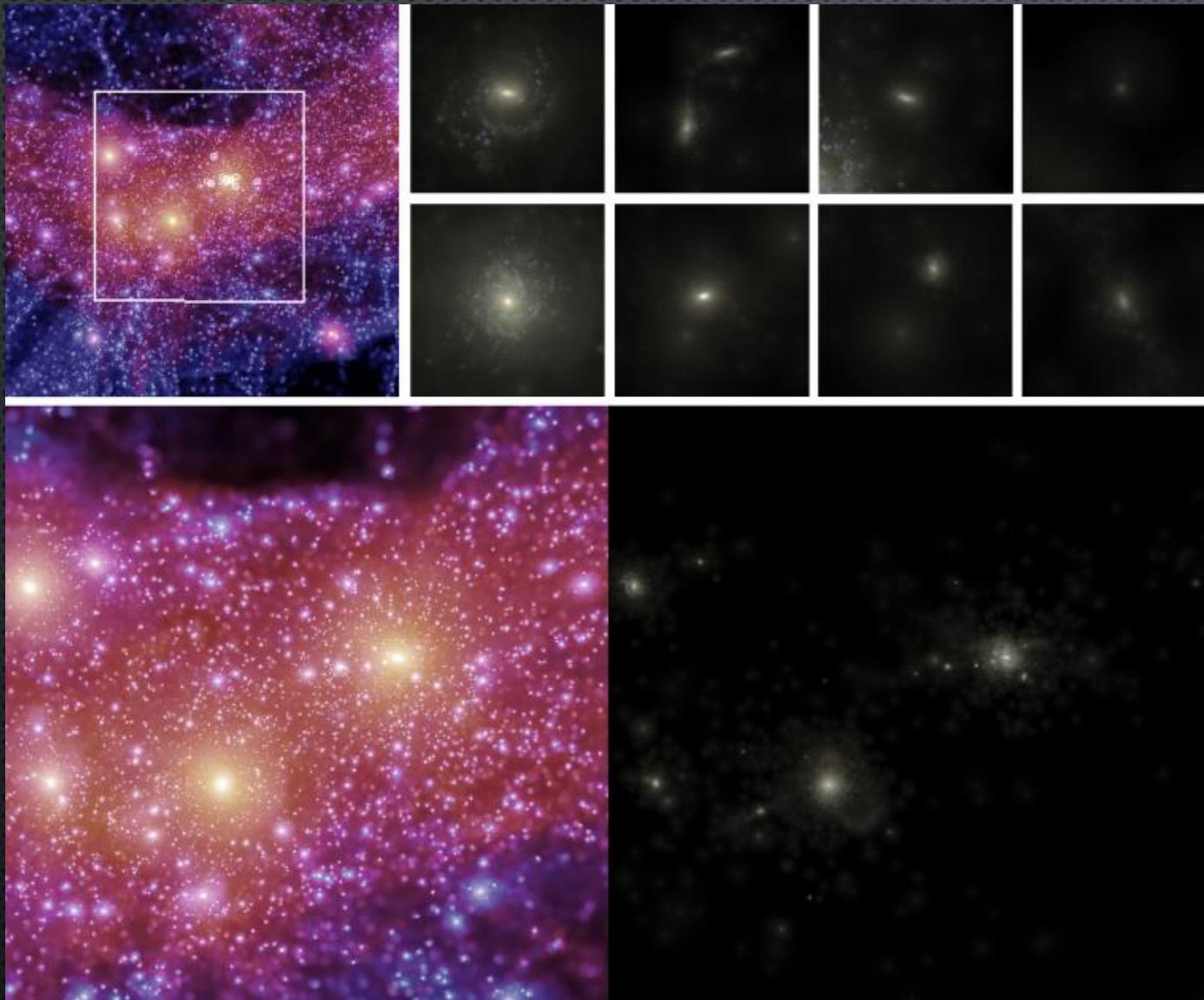
irregular



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

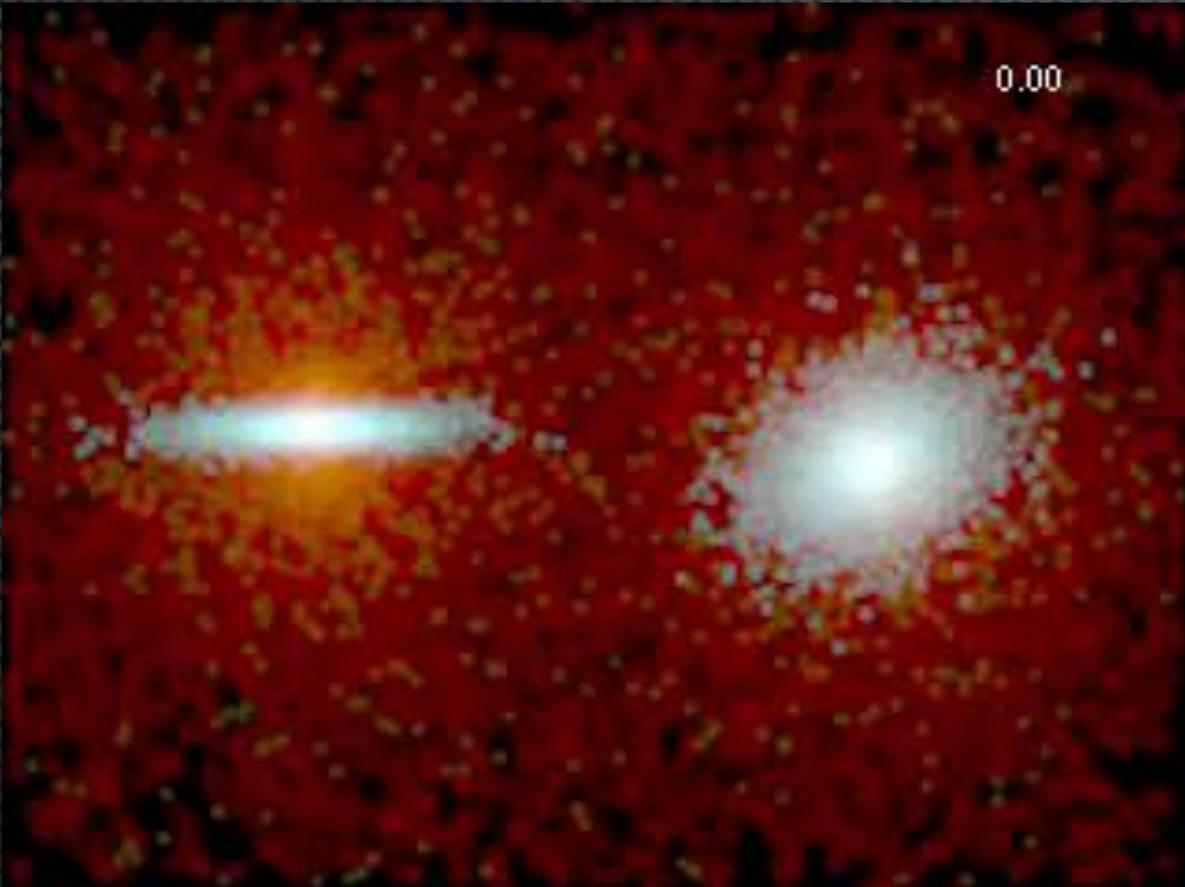
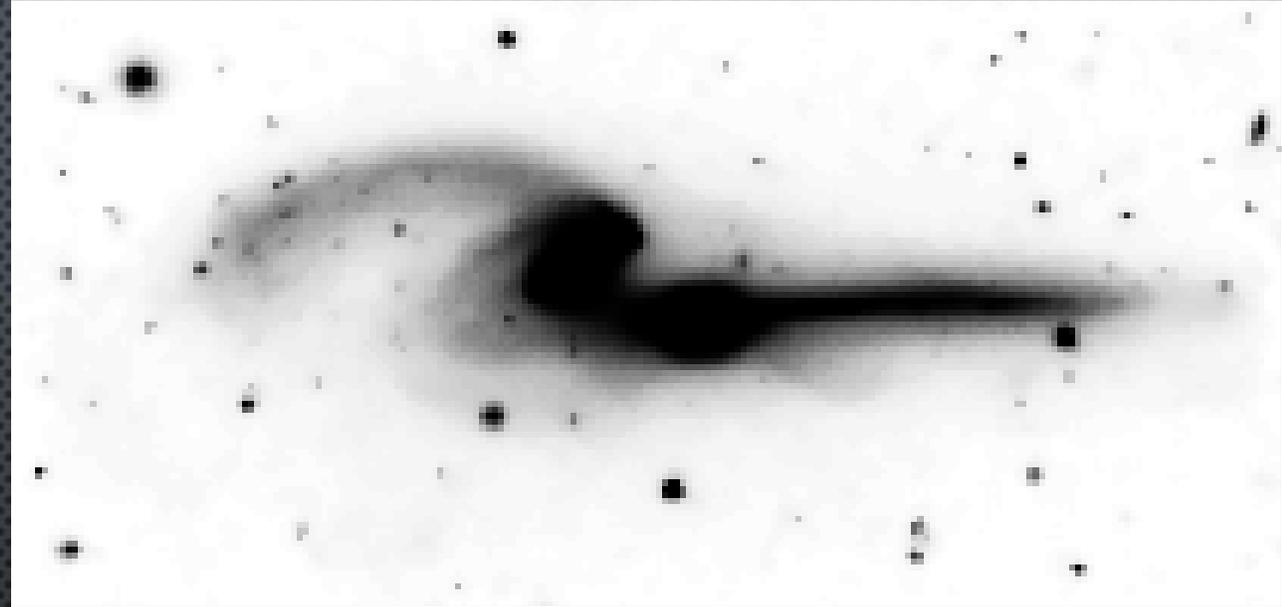
Исследуя «компьютерные галактики», можно проследить эволюцию наблюдаемых галактик определенных типов.

МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК



Решены все
основные проблемы,
связанные
со свойствами
Местной группы.

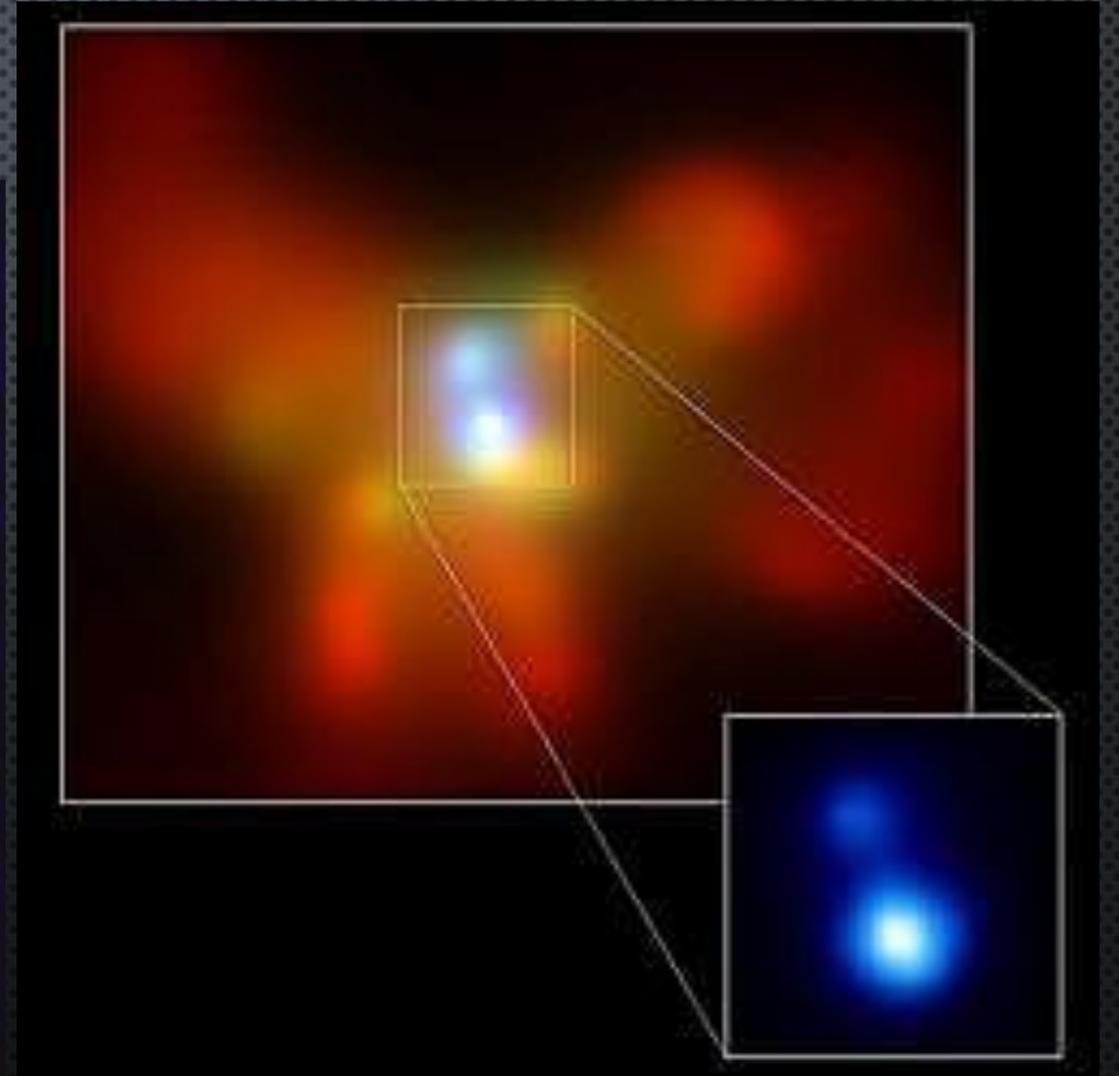
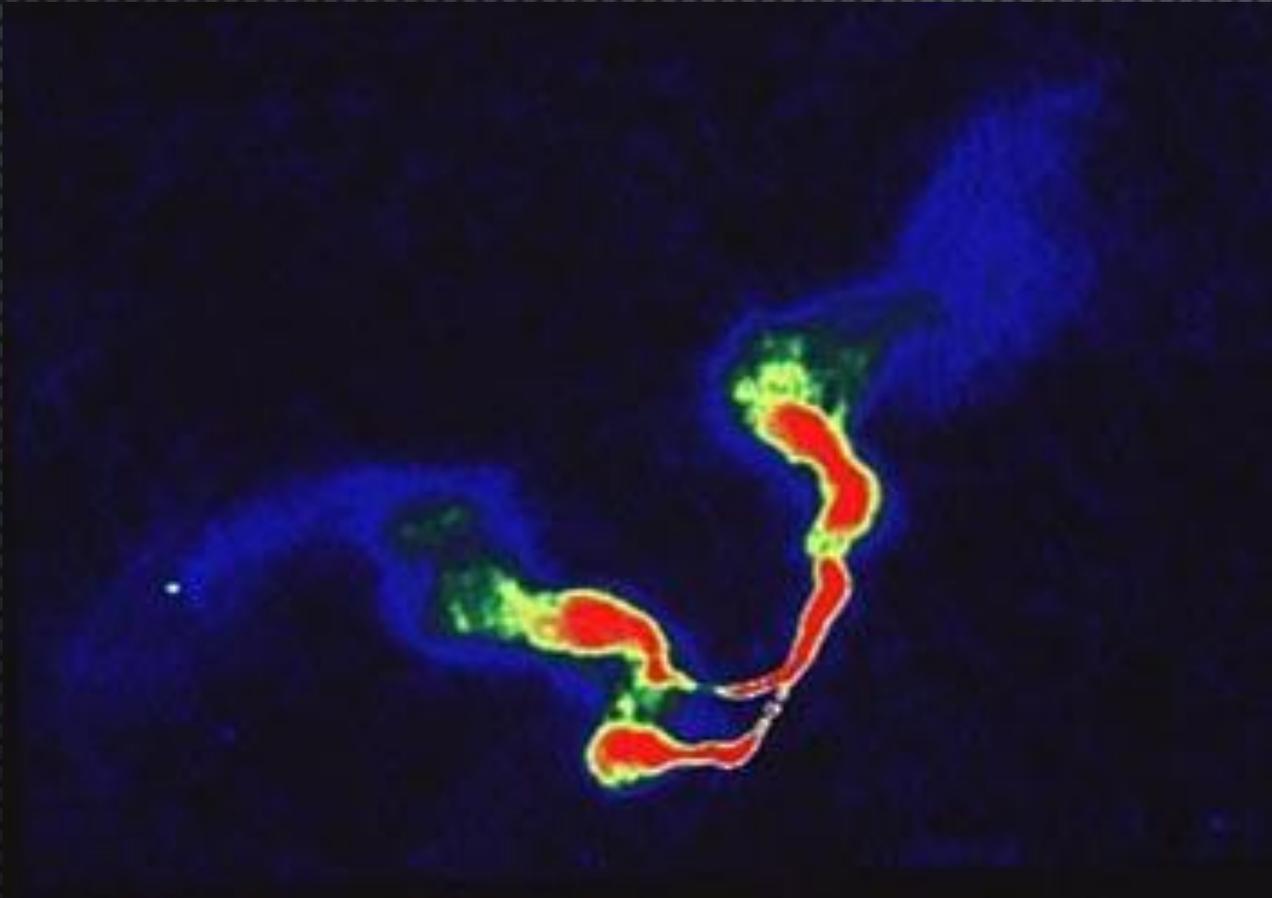
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ



(Hibbard, Barnes)

ПРИМЕРЫ ДВОЙНЫХ ДЫР

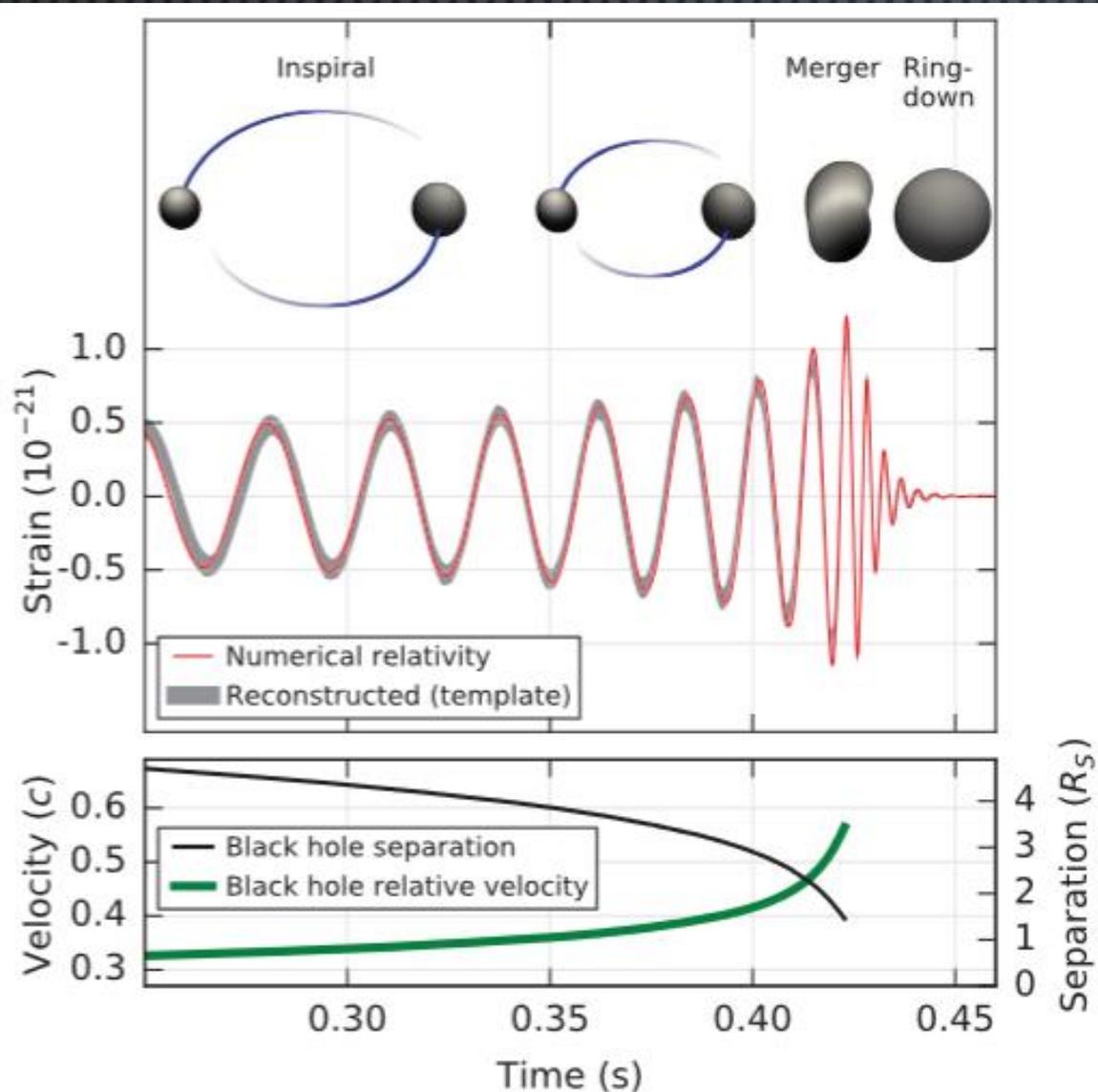
Две пары джетов или двойное активное ядро.



Abell 400

3C75

СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



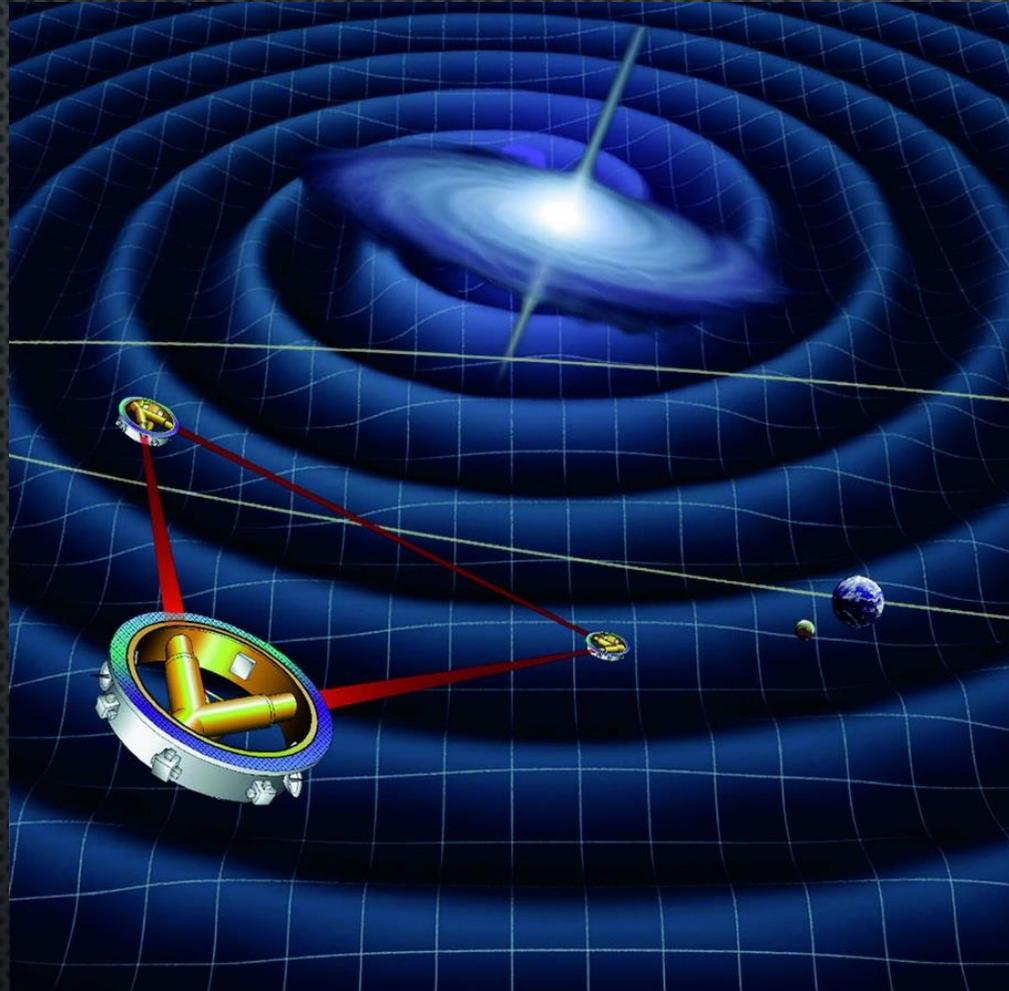
В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр.

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

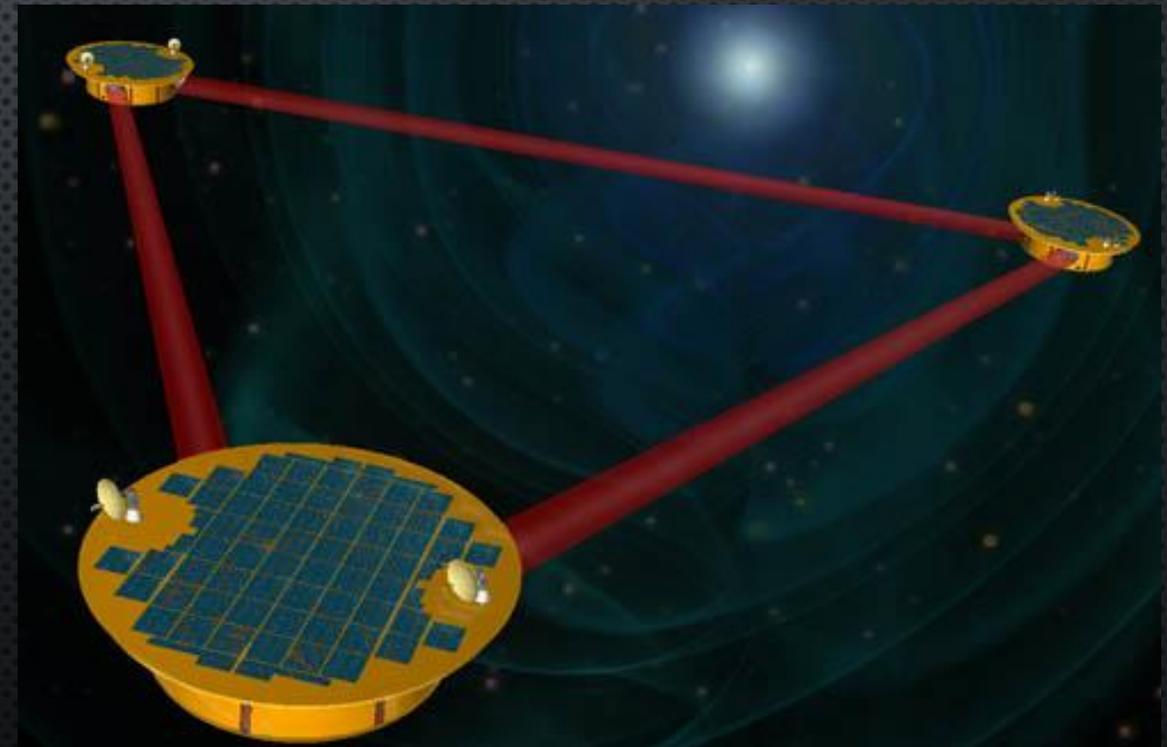
Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознавания слабых всплесков на фоне шумов.

КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ELISA

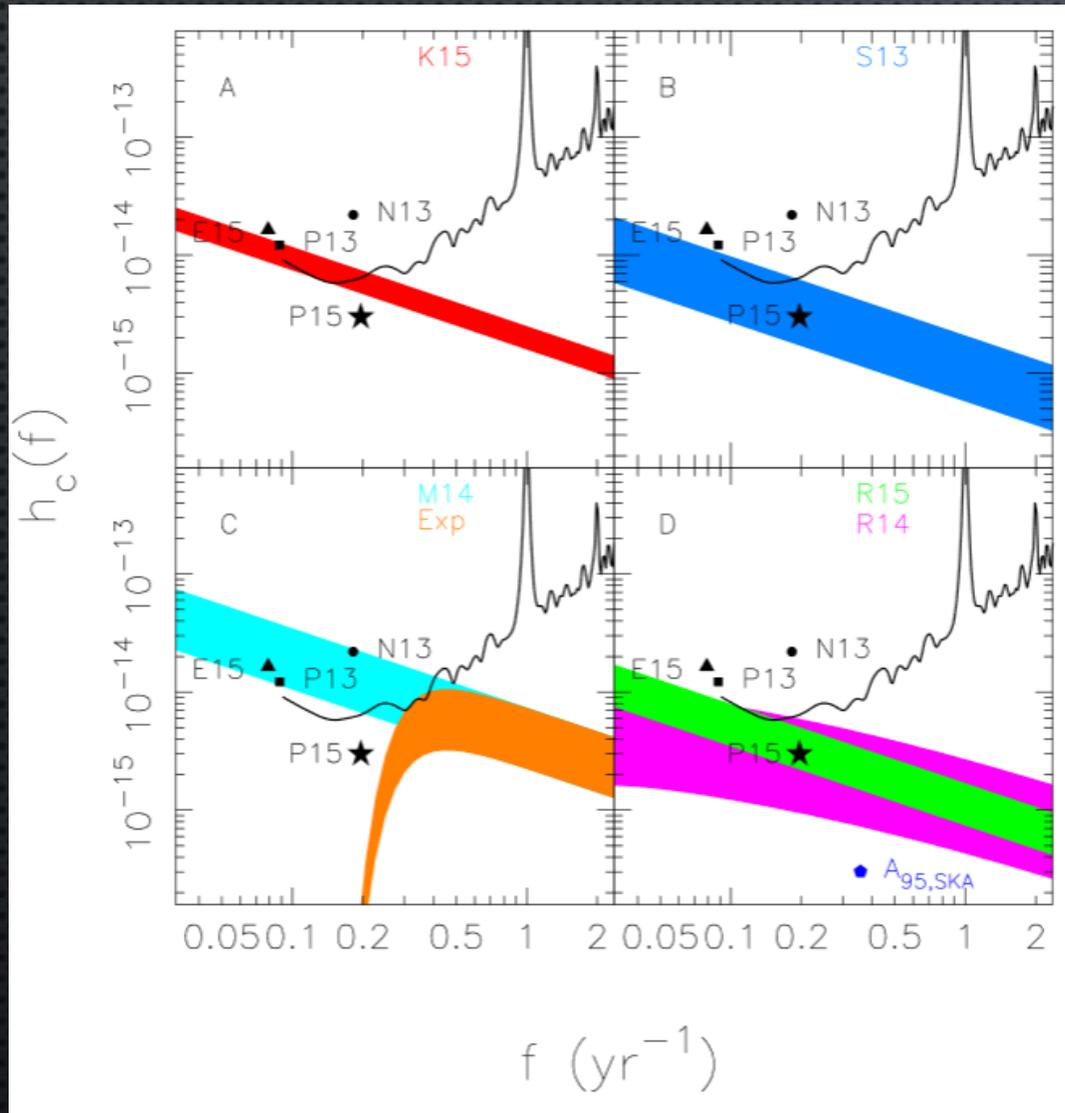
Изначально смета проекта составляла 2.5 миллиарда долларов.
NASA сняла свое финансирование.
ESA одобрена заявка на запуск упрощенного варианта в 2032-34 г.
NASA вернулась в проект.
Успешно отработал прототип.



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



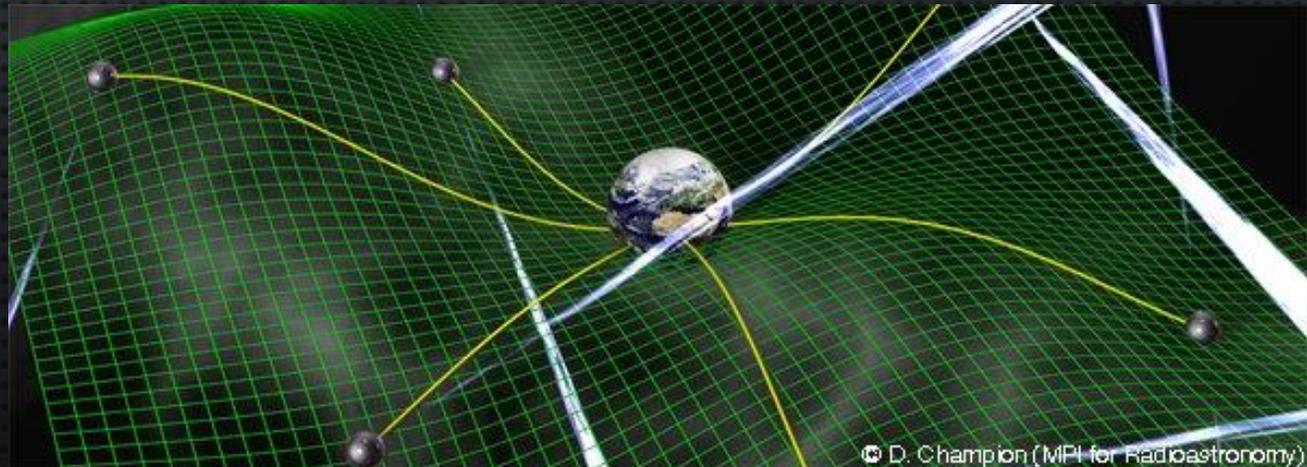
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР



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

Одна из них представила в 2015 году важные верхние пределы на сигнал.

Еще чуть-чуть и или такие волны откроют, или придется менять модели эволюции галактик и их ядер.



© D. Champion (MPI for Radioastronomy)