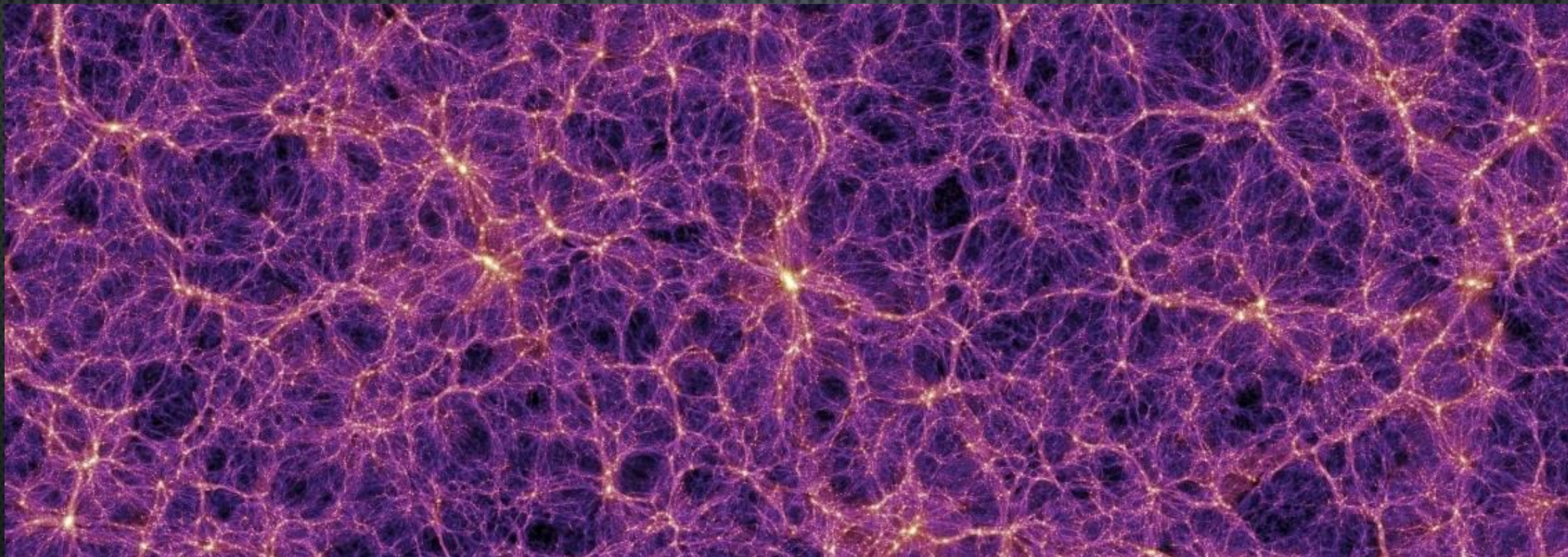


АСТРОФИЗИКА

Лекция 10

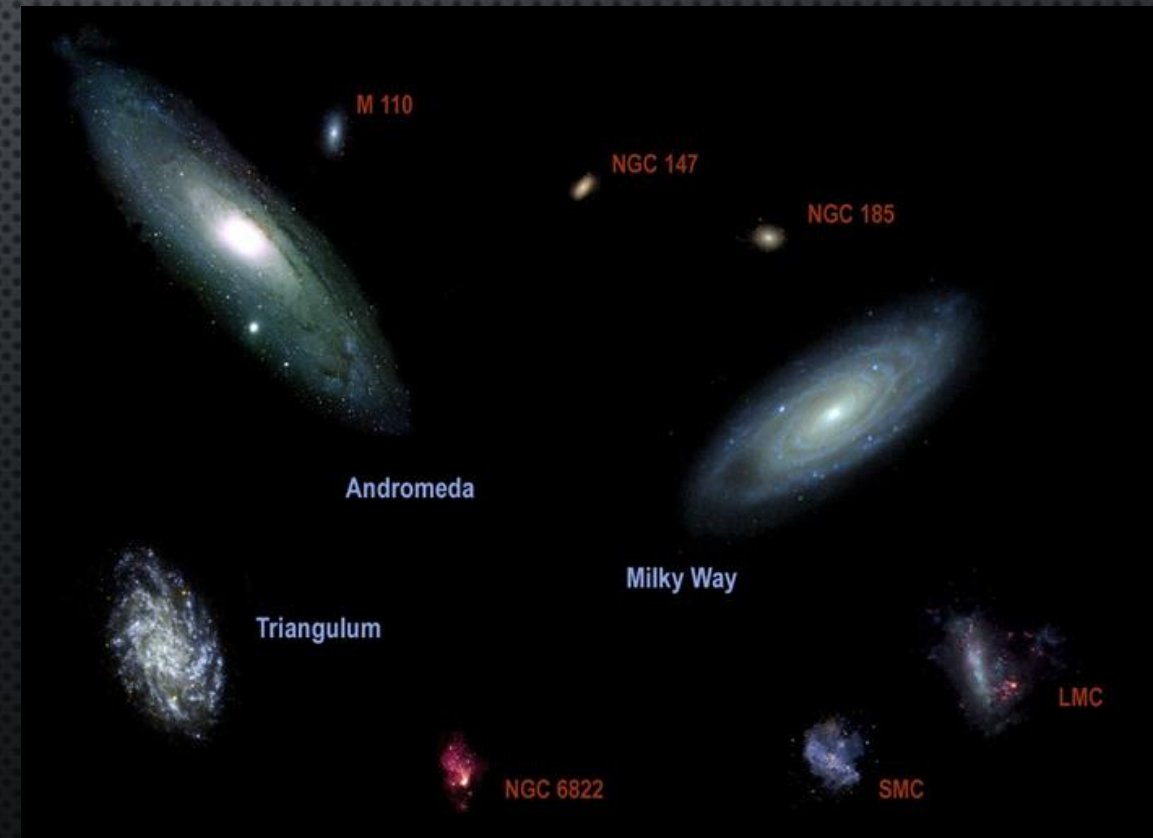
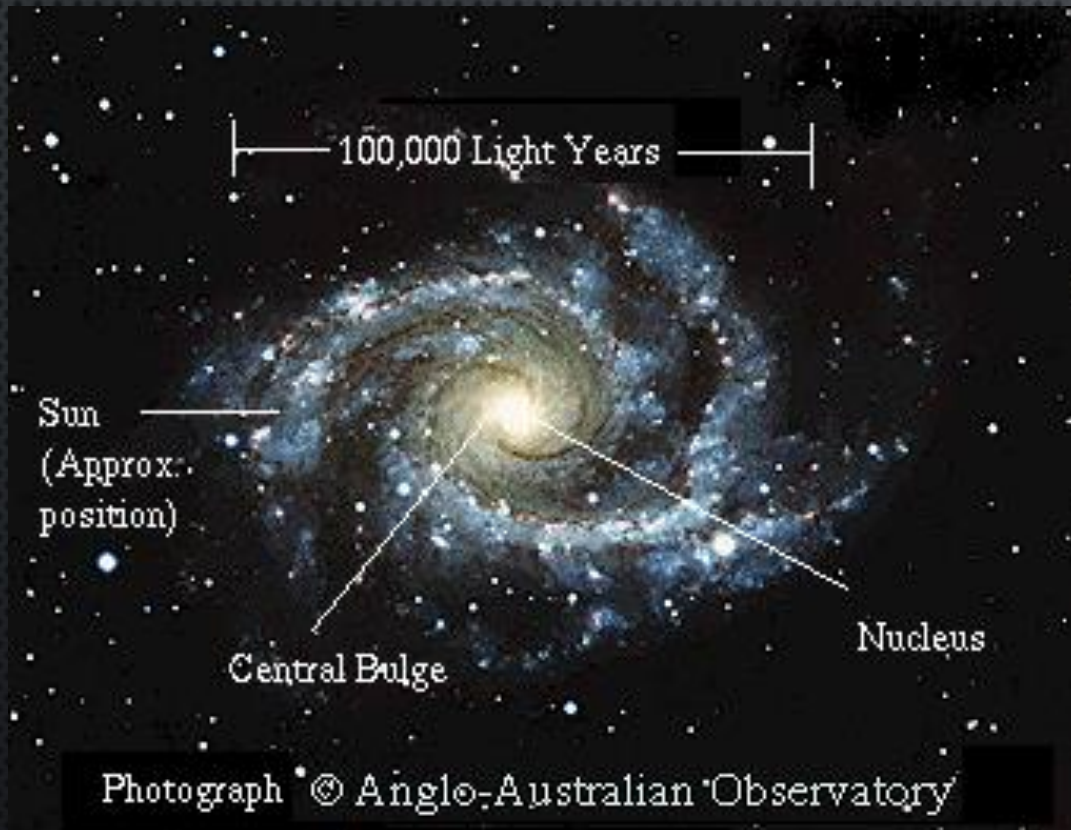
МИР ГАЛАКТИК И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО



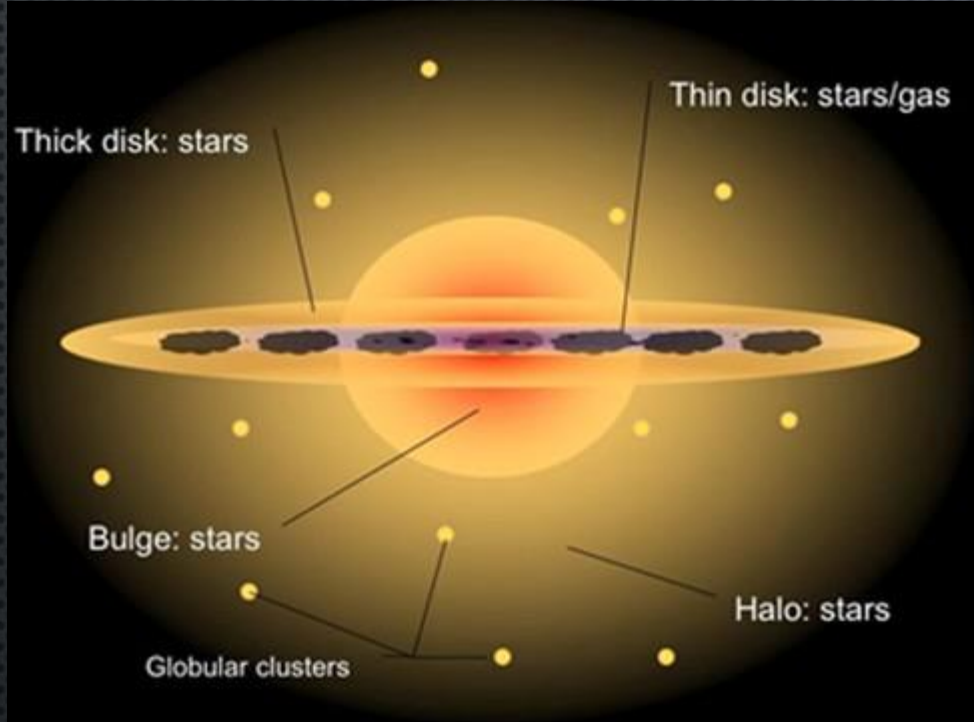
СЕРГЕЙ ПОПОВ

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.

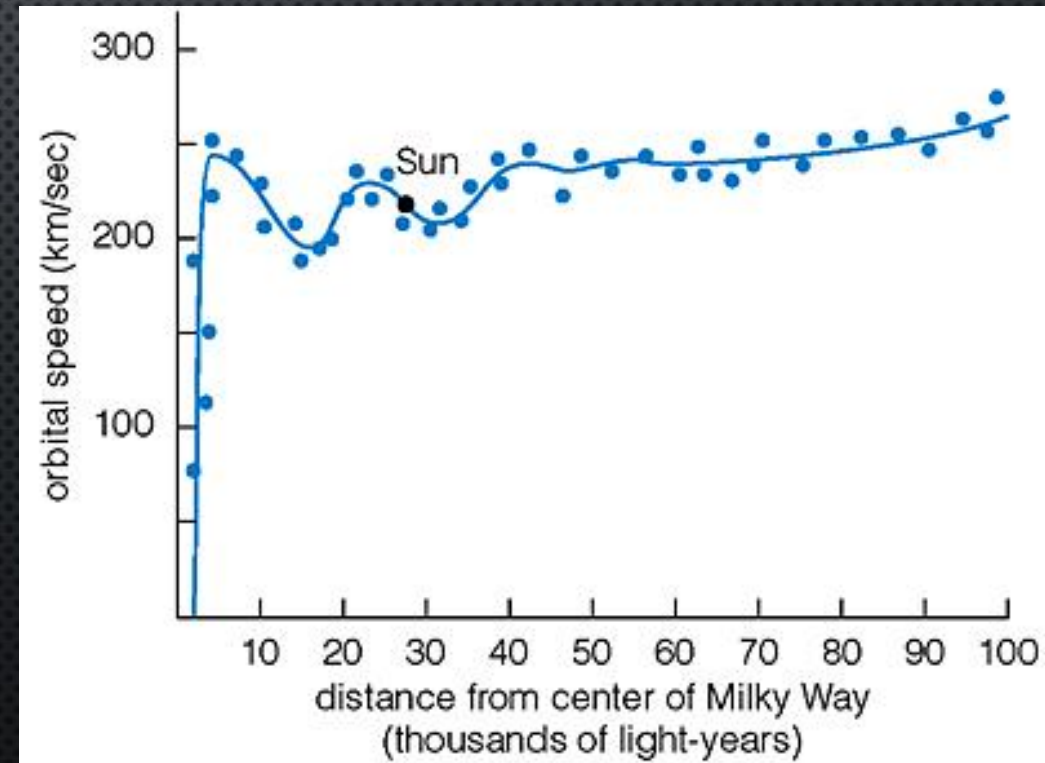


СКОРОСТИ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ



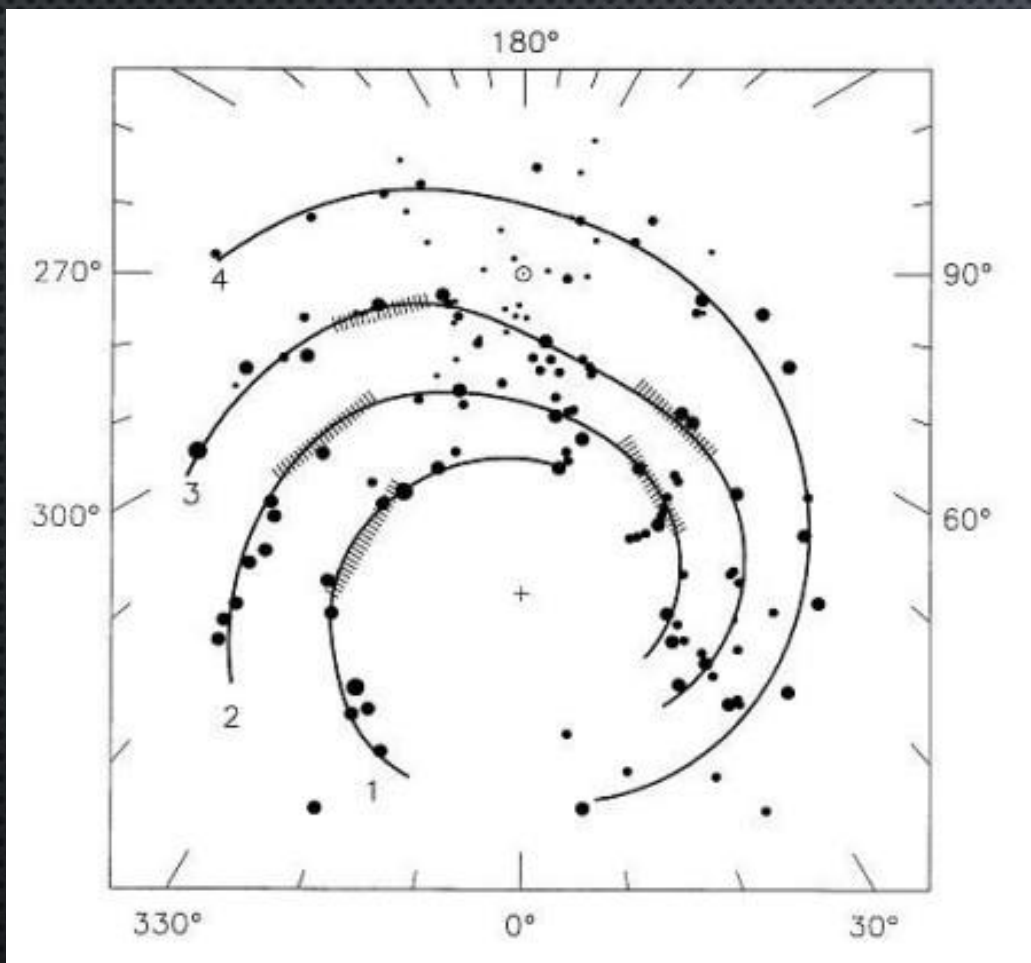
Круговые скорости звезд в Галактике довольно велики - >200 км/с.

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.

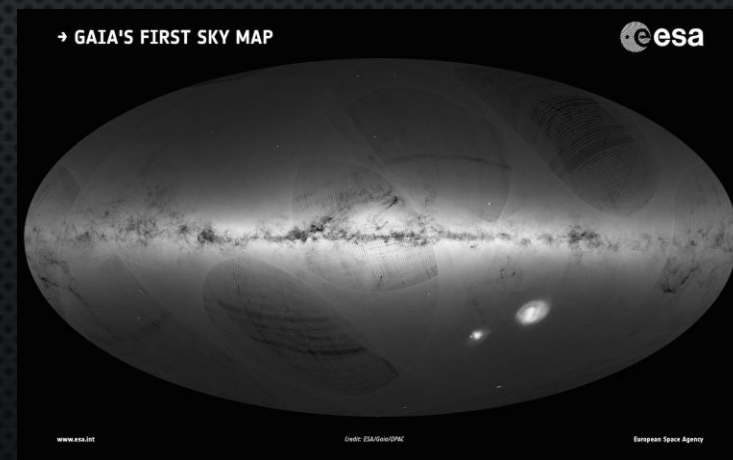
ОБЛАКА ВОДОРОДА И СПИРАЛИ



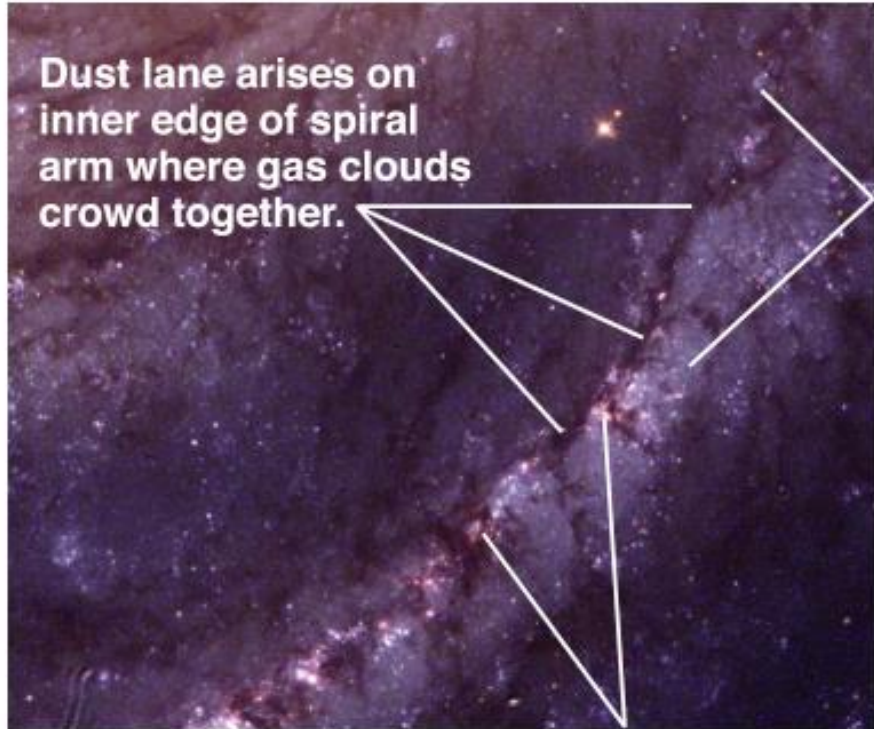
Из-за того, что мы находимся в диске, структуру Галактики трудно изучать.

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

Данные спутника GAIA должны дать ответ о структуре Галактики.



РУКАВА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

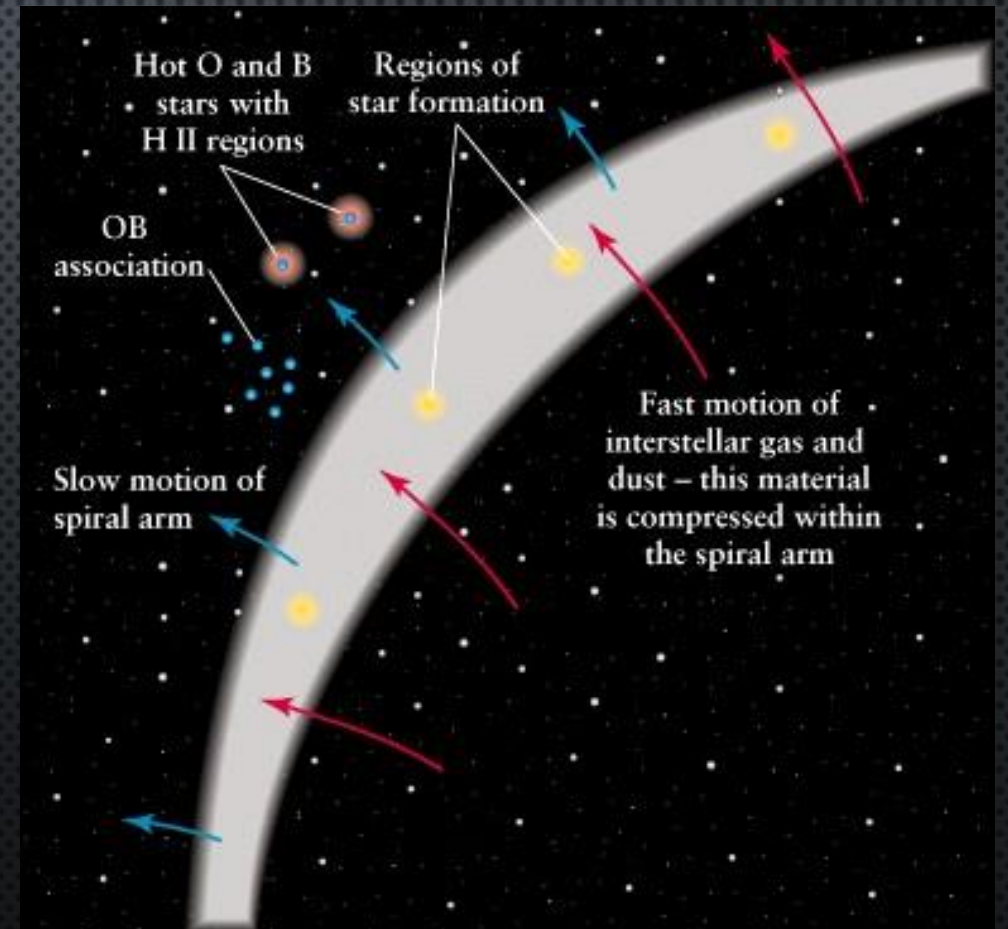


Dust lane arises on inner edge of spiral arm where gas clouds crowd together.

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

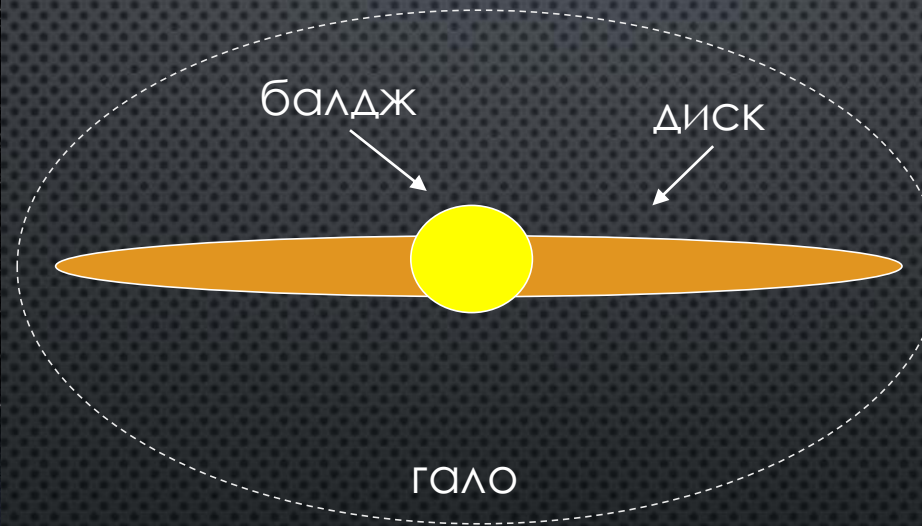
Regions of star formation

OB association

Slow motion of spiral arm

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

МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

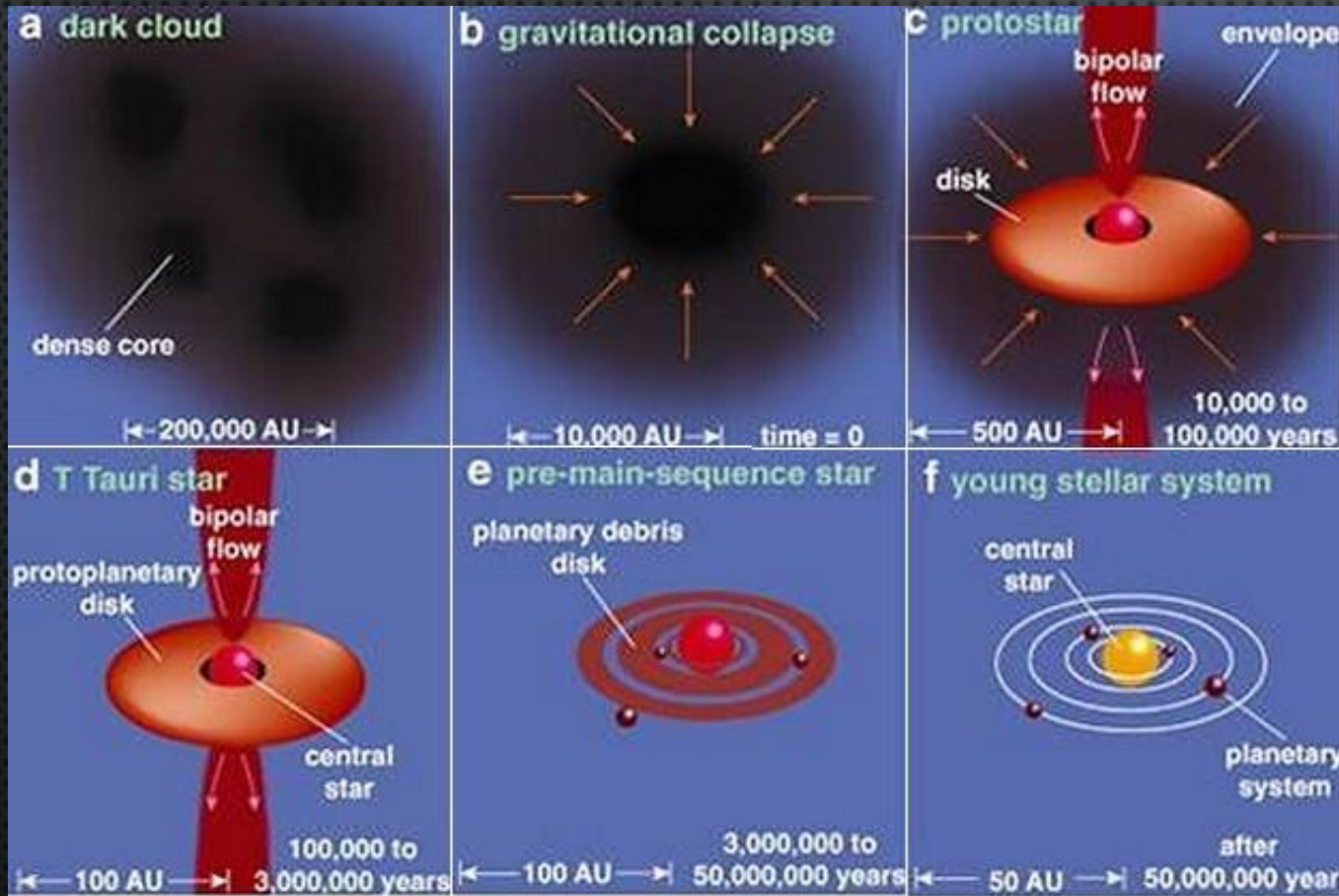


Газ есть не только в галактическом диске, но в других частях его плотность не достигает больших значений и не начинается формирование новых звезд.

Межзвездная среда концентрируется к плоскости Галактики. Хорошо виден вклад пыли в поглощение света звезд.



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.

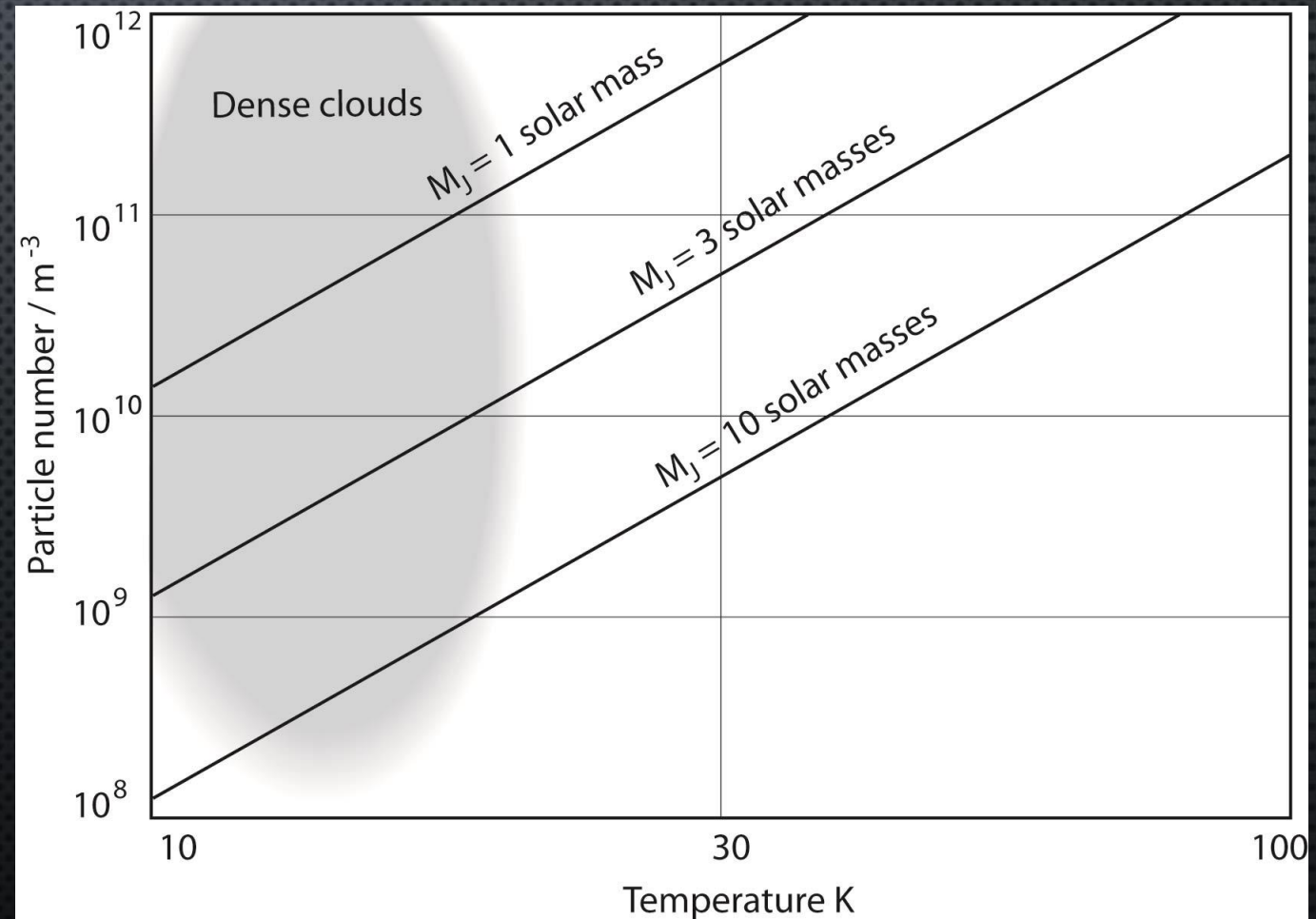
В настоящее время мы наблюдаем объекты на всех стадиях образования звезд и планетных систем.

МАССА ДЖИНСА

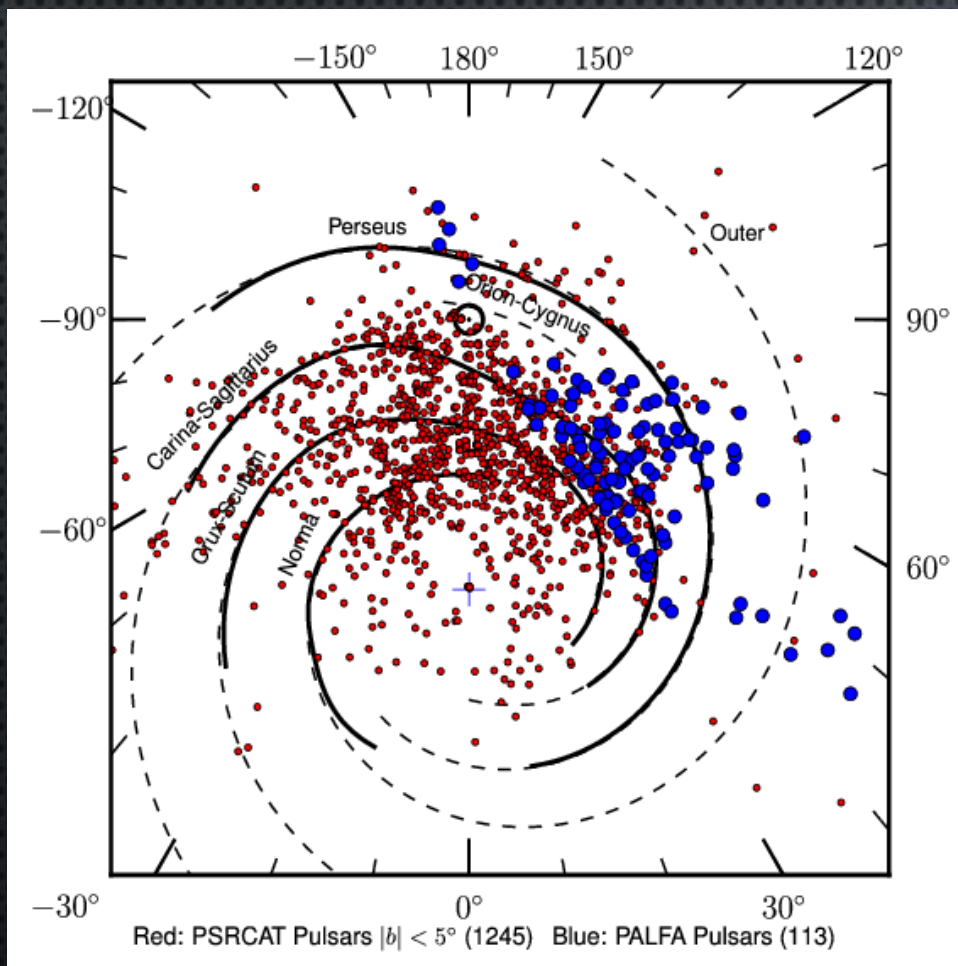
Для начала гравитационного сжатия, приводящего к образованию звезды, облако газа и пыли должно быть достаточно плотным и холодным.

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

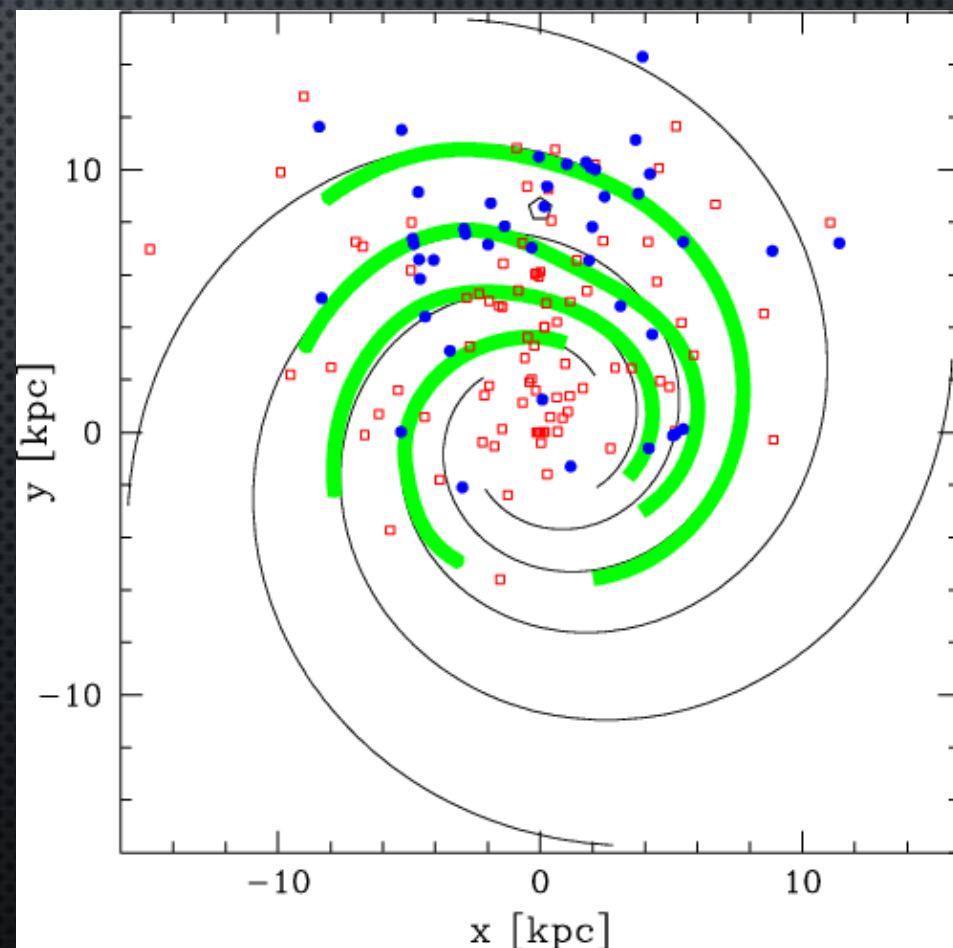
$$M_J = \left(\frac{5kT}{Gm} \right)^{3/2} \left(\frac{3}{4\pi\rho} \right)^{1/2}$$



НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ГАЛАКТИКЕ



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





Дискосая спиральная



Неправильная карликовая



Линзовидная



Эллиптическая

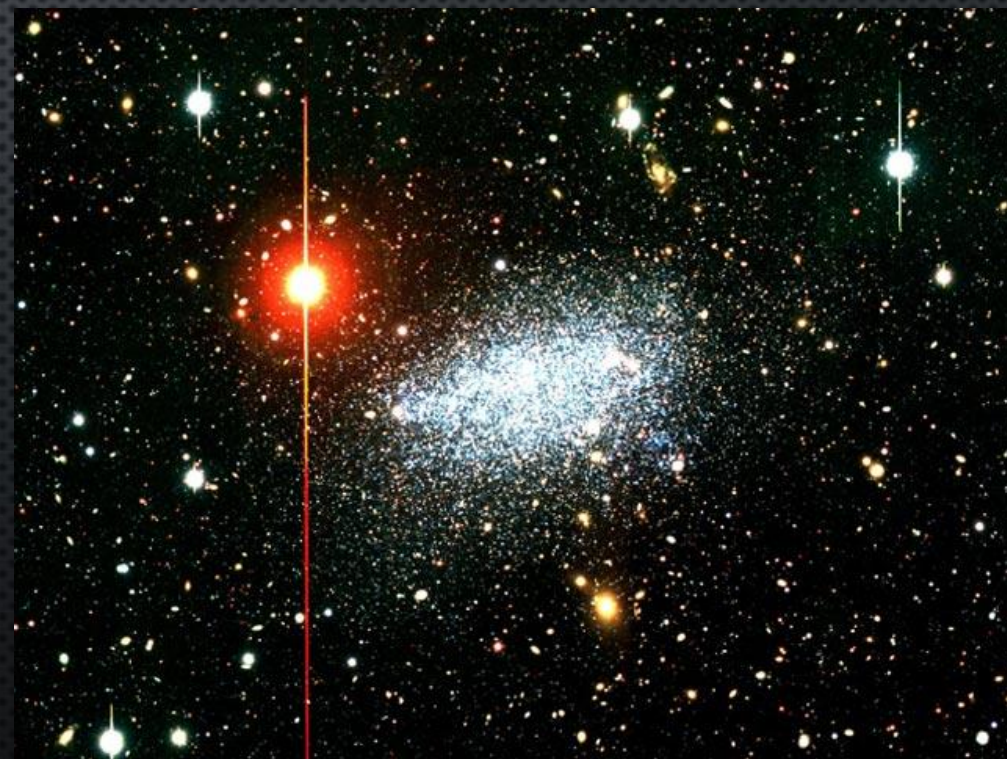


Взаимодействующие

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»



Гебер Кертис

Все туманности
находятся
внутри нашей
Галактики



Харлоу Шепли

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

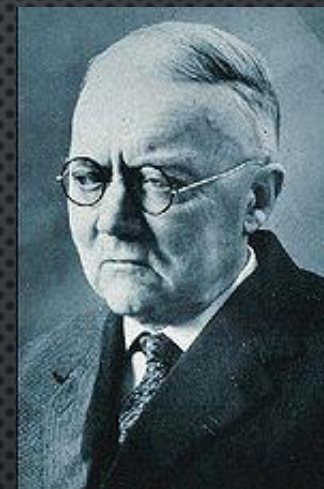
Ответ дали
наблюдения.

РАСКРЫЛАСЬ БЕЗДНА ...



Эдвин Хаббл

Главный результат был получен в 1922-23 г. Эдвином Хабблом. С помощью нового 2.5-метровго 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.

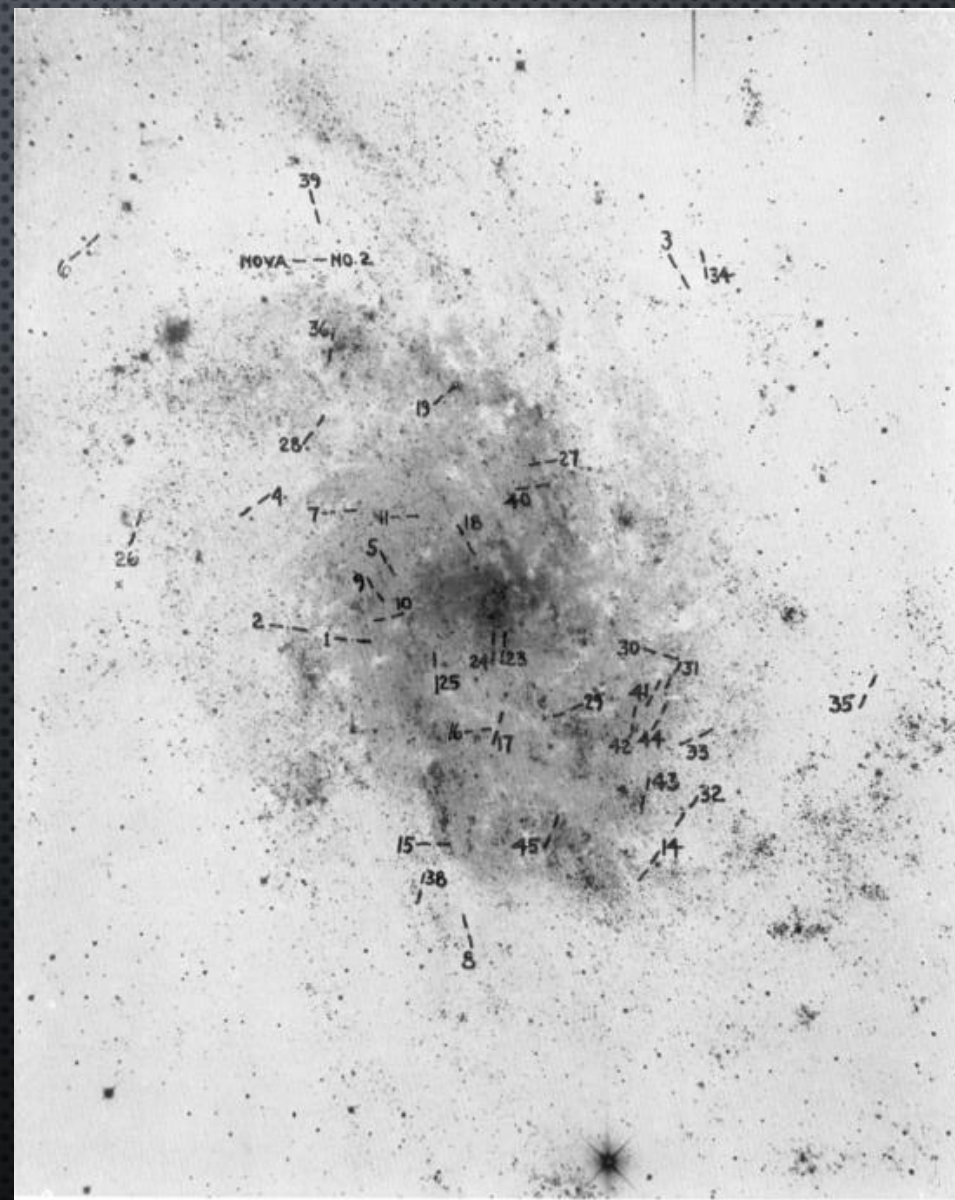
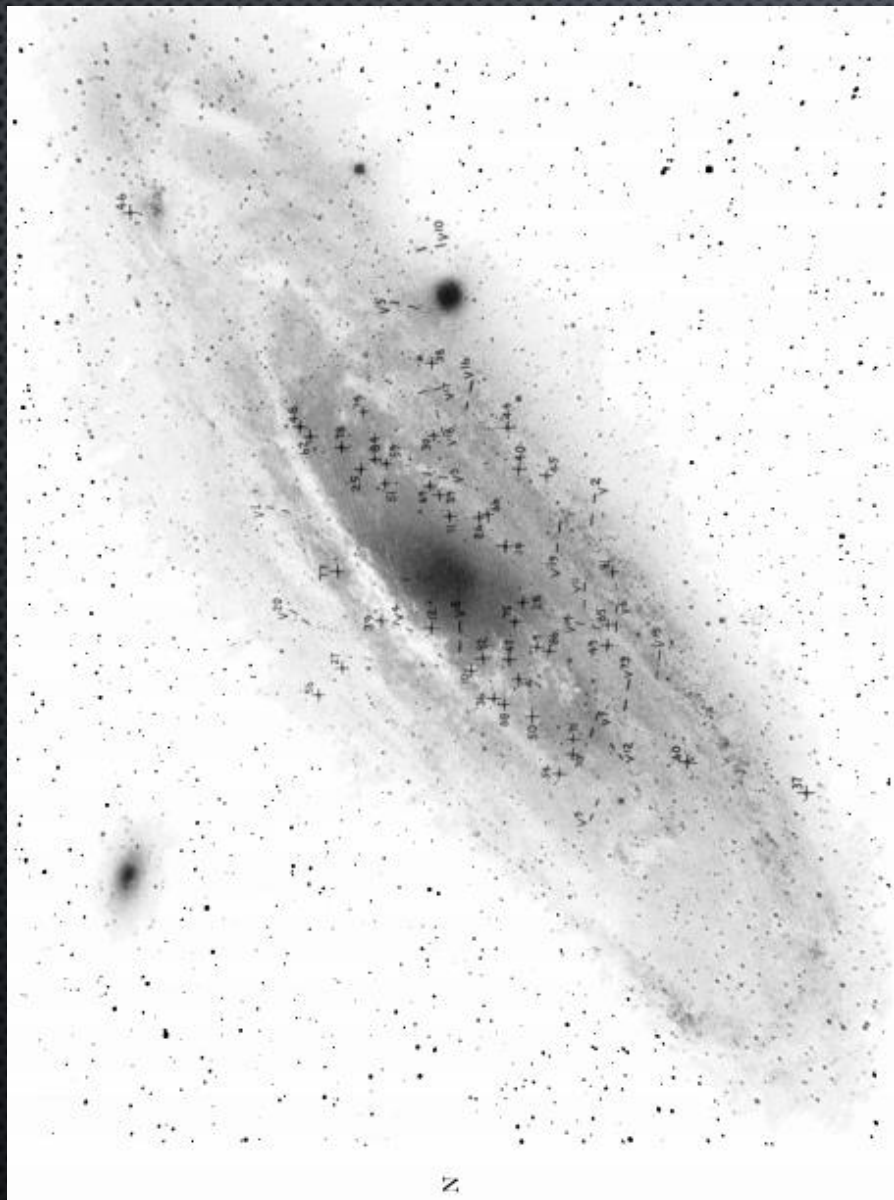


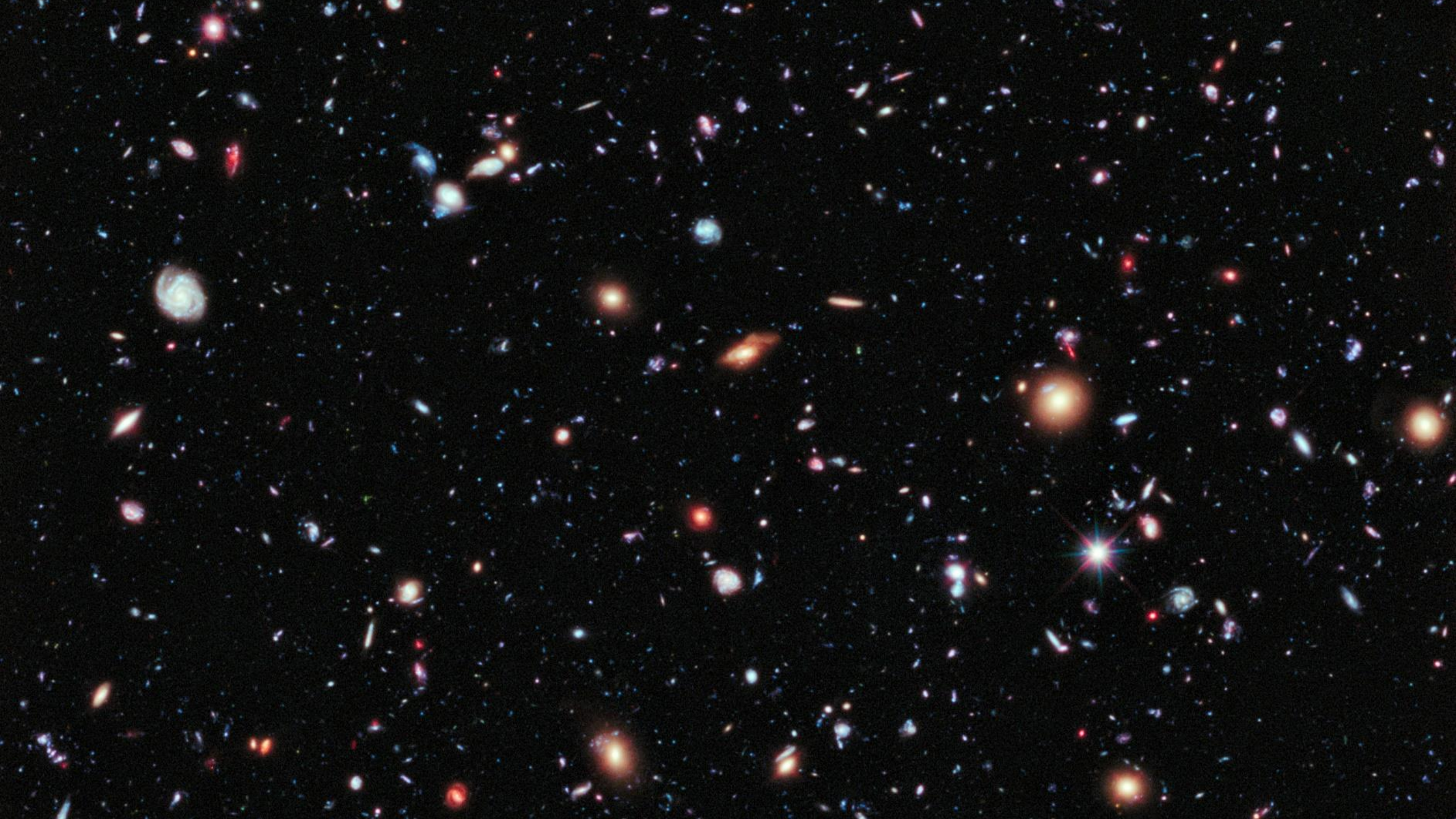
Эрнст Эпик

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.)

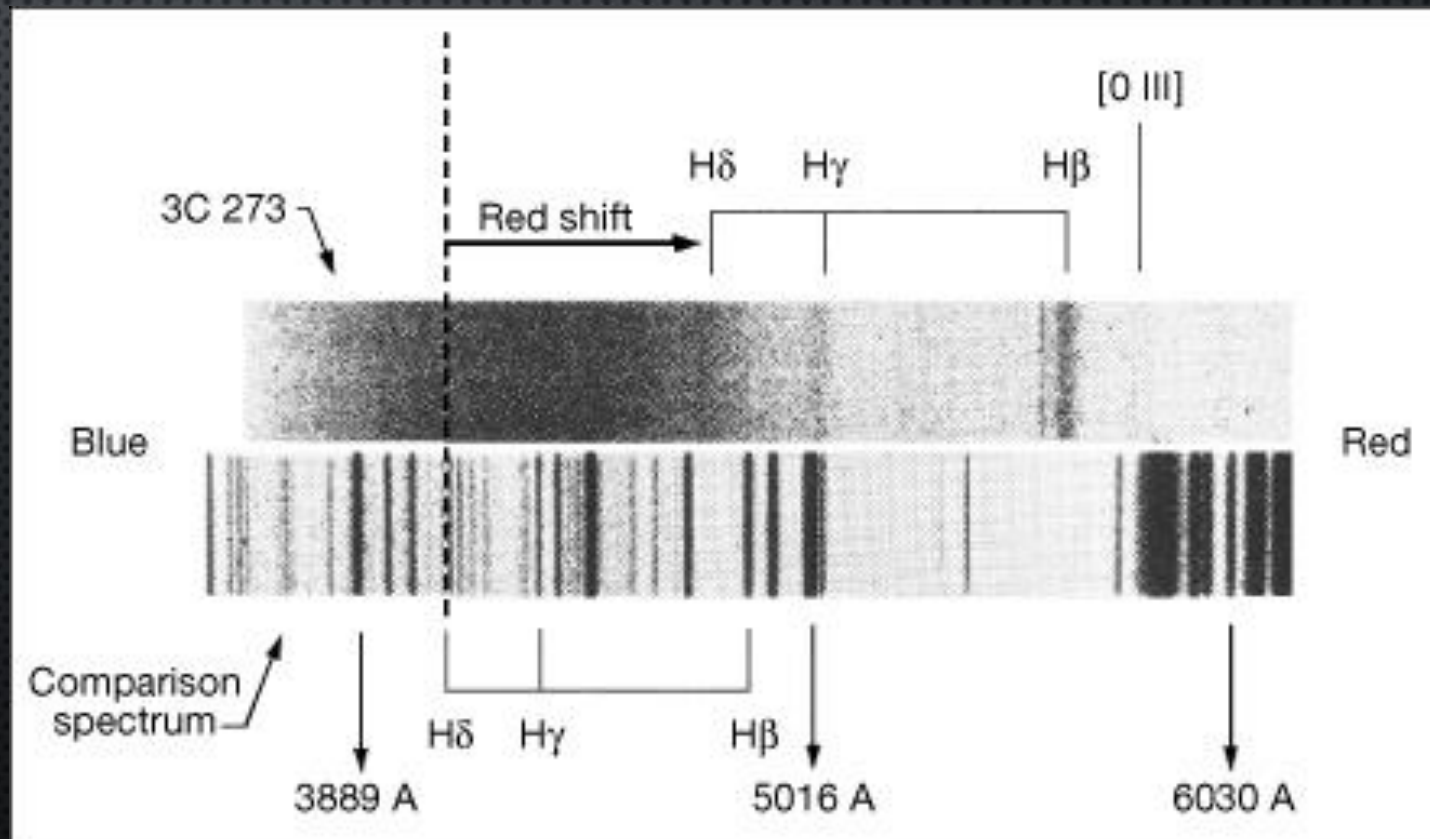
Долгое время шли дискуссии о природе этих «радиозвезд».

РАЗГАДКА

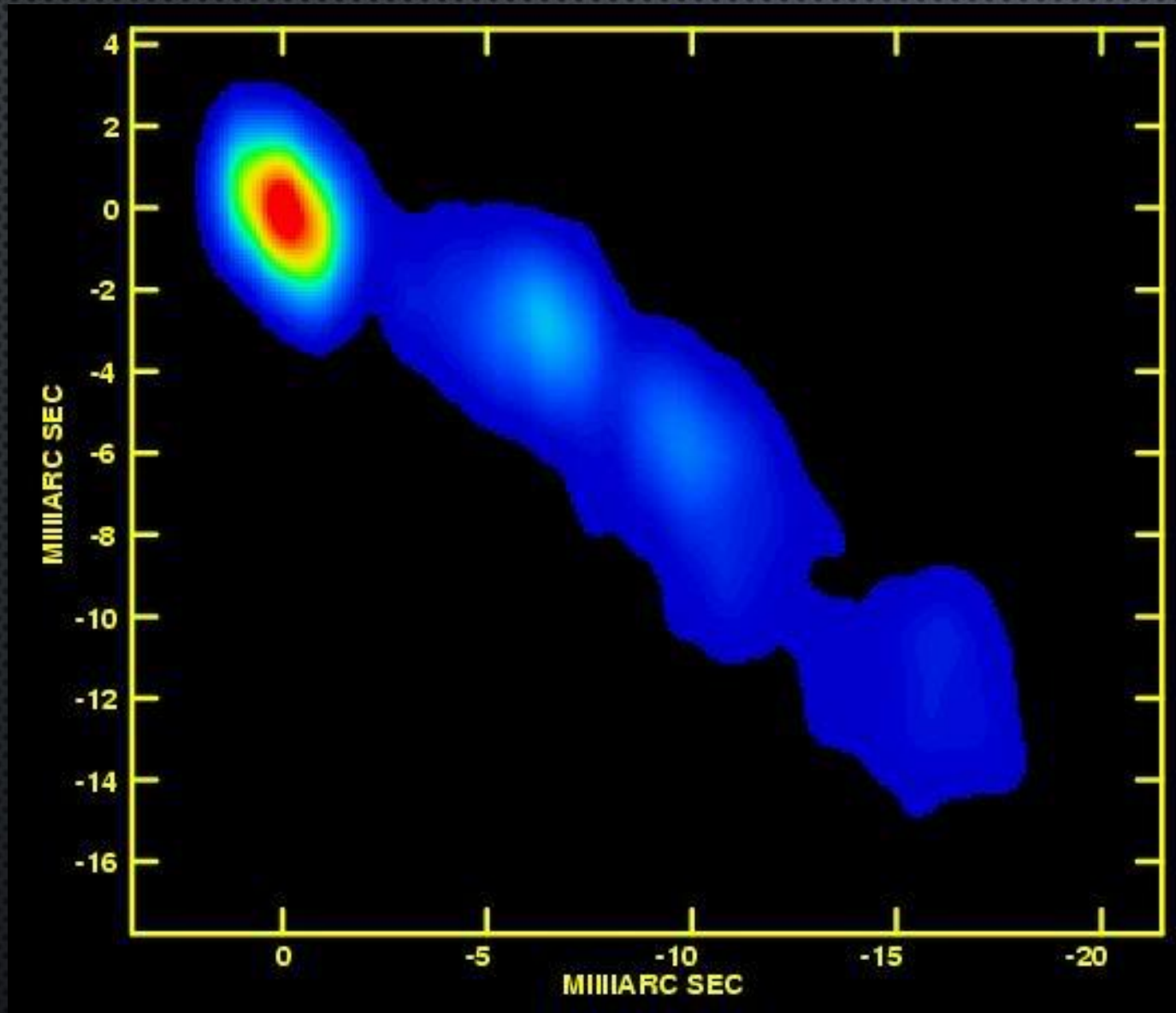


Мартин Шмидт

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



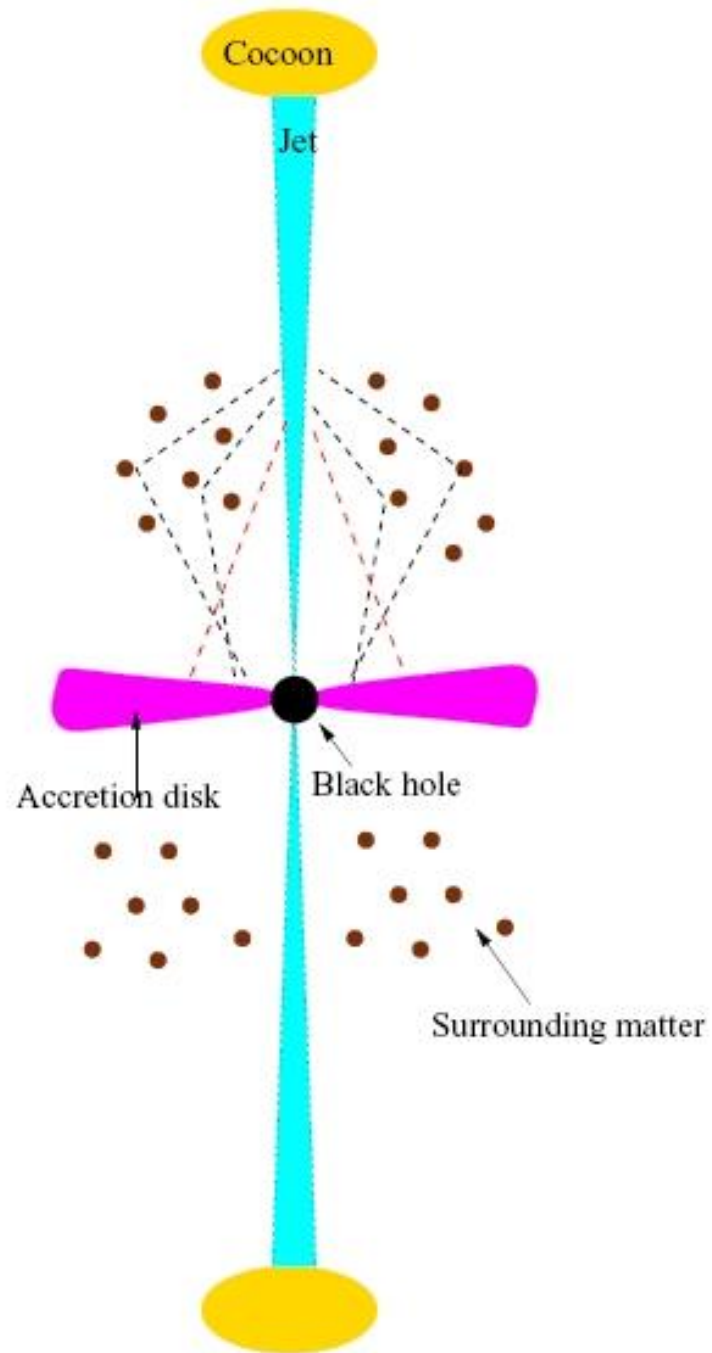
ПРИРОДА КВАЗАРА



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

$M_{\text{BH}} = 10^7 - 10^9 M_0$
 $L(< \sim L_{\text{Edd}}) \sim 10^{42} - 10^{47} \text{ эрг/с}$
< несколько Мпк

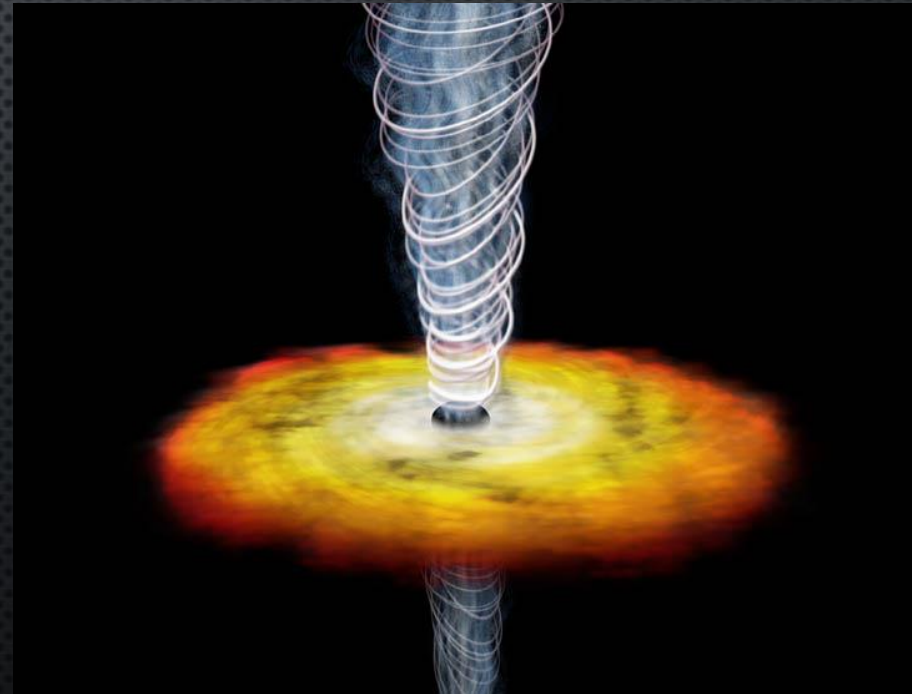
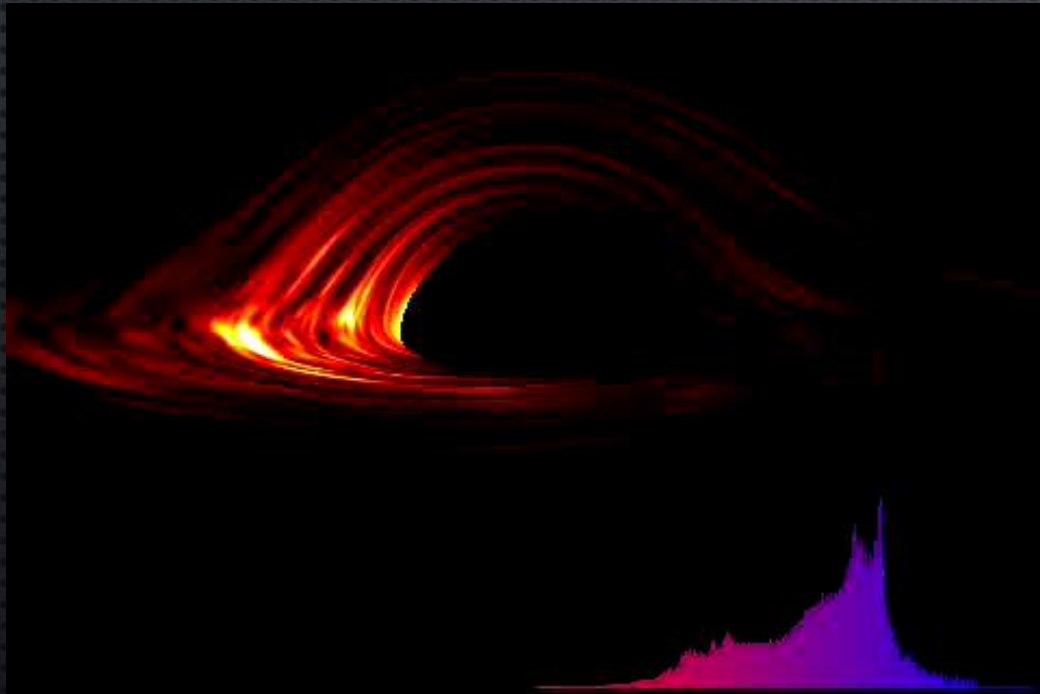


ЧЕМ ВАЖНО ОТКРЫТИЕ КВАЗАРОВ?

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

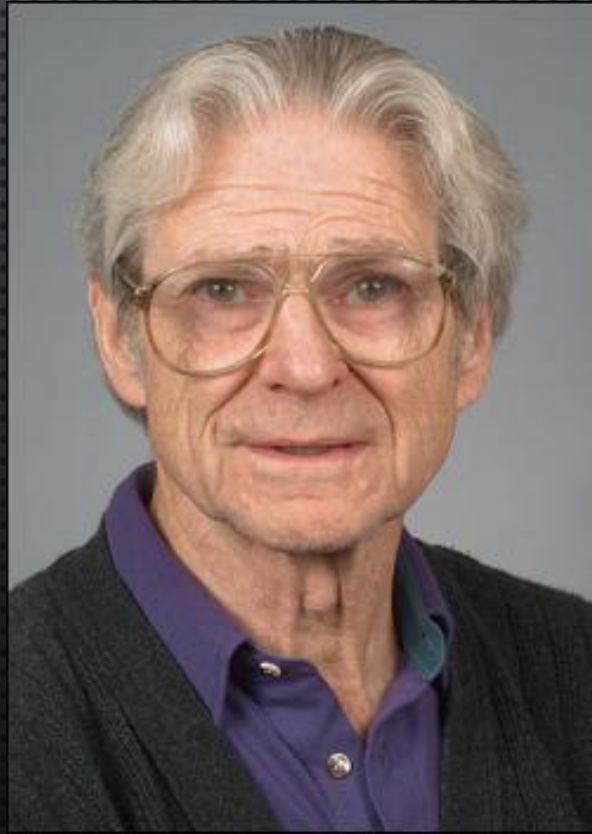
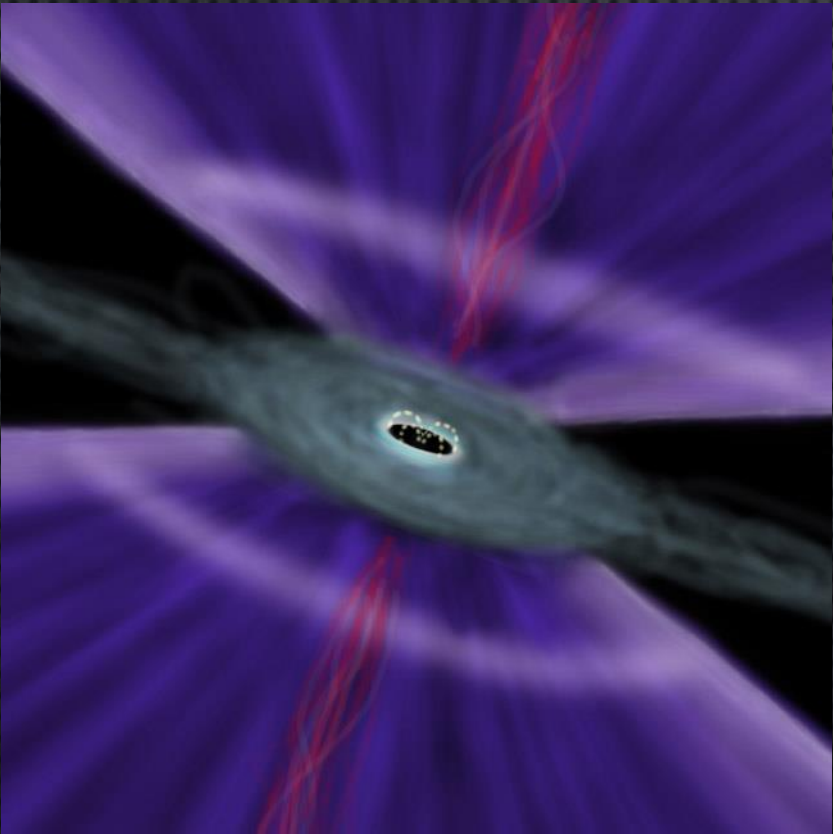
Во-вторых, возникла необходимость объяснять, как же они работают.

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*

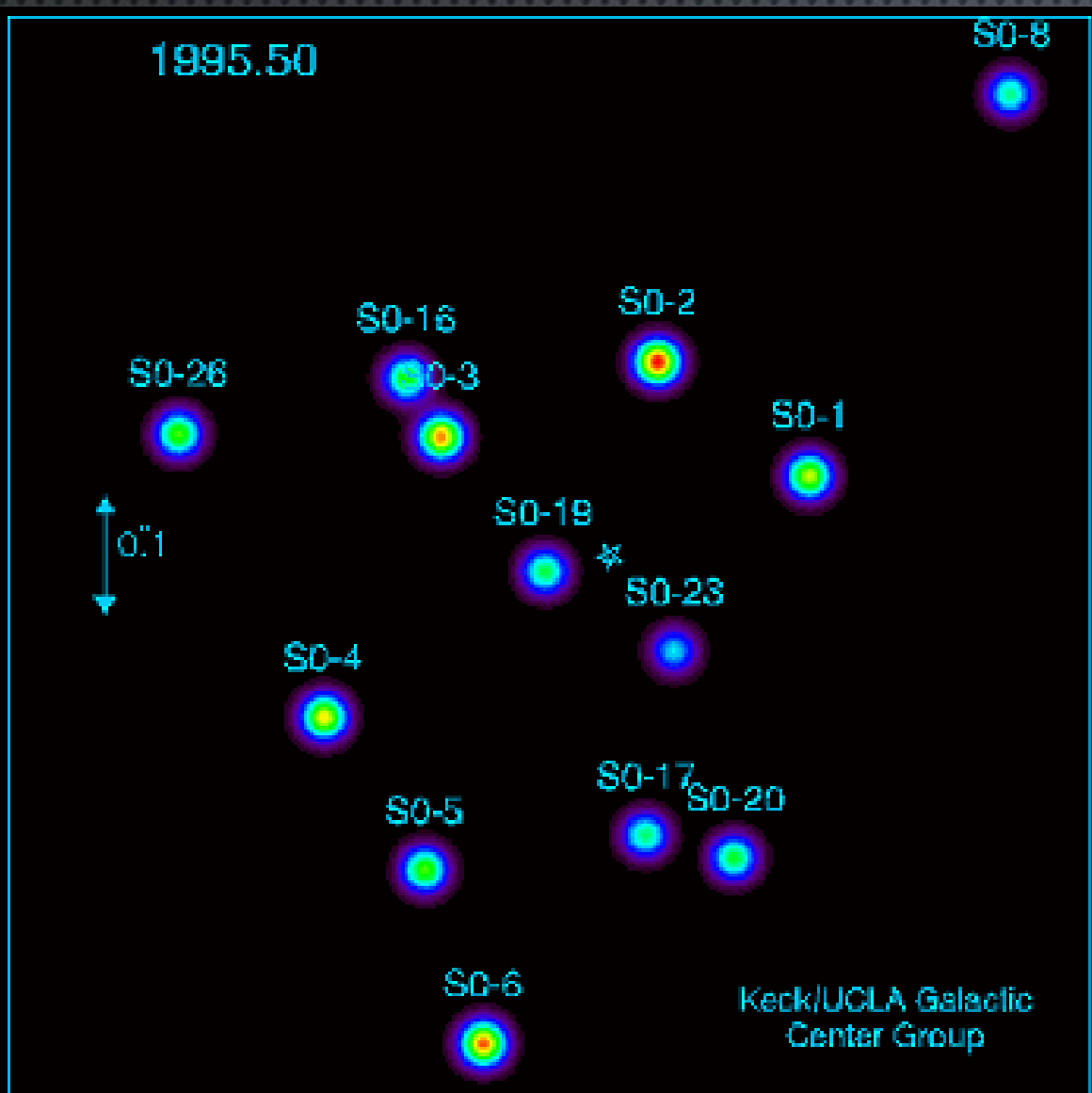
1992

10 light days

Звездные орбиты с 1992 по 2007

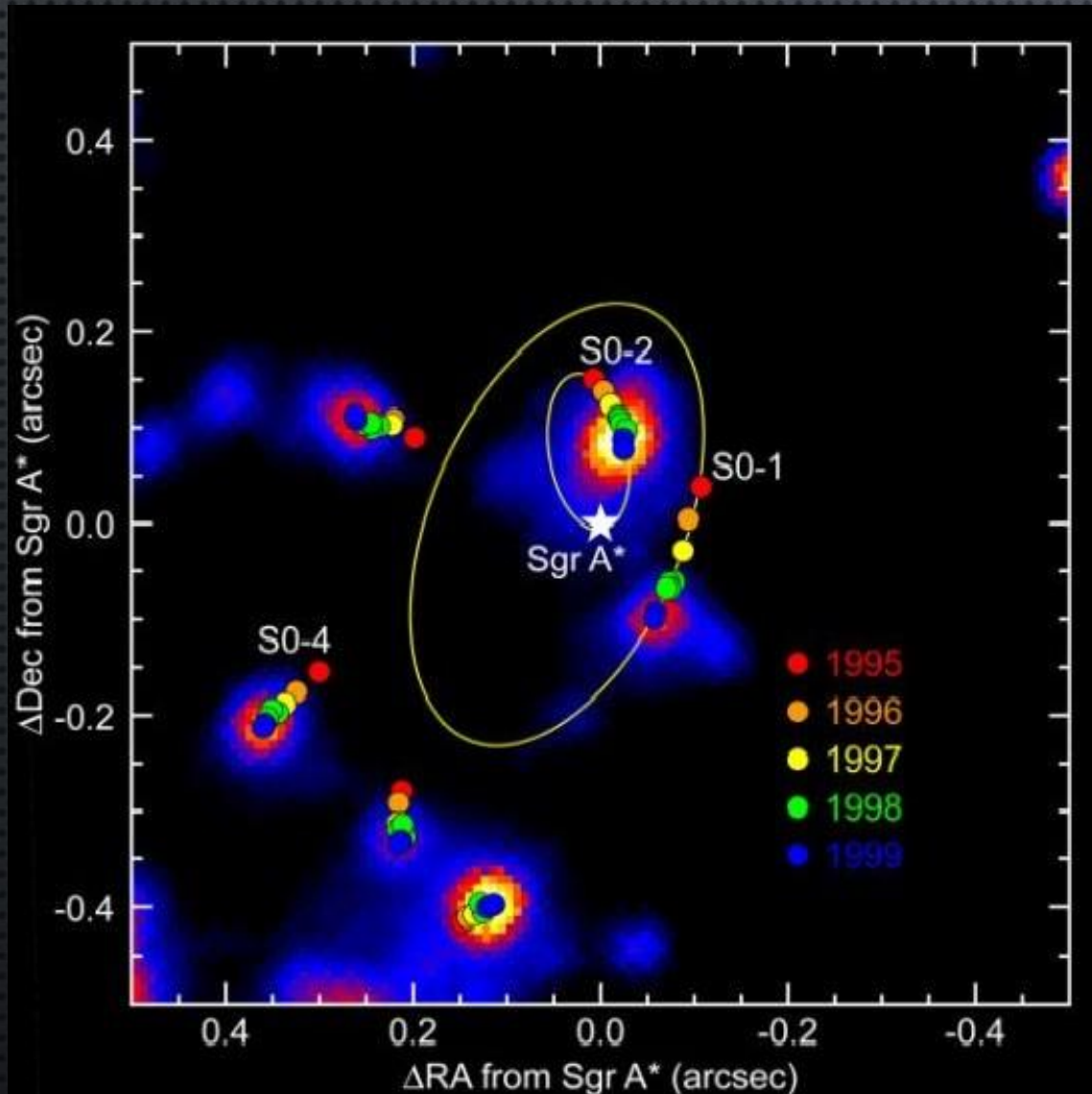


... И ОНА СТАНОВИТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ДОСТОВЕРНОЙ



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.

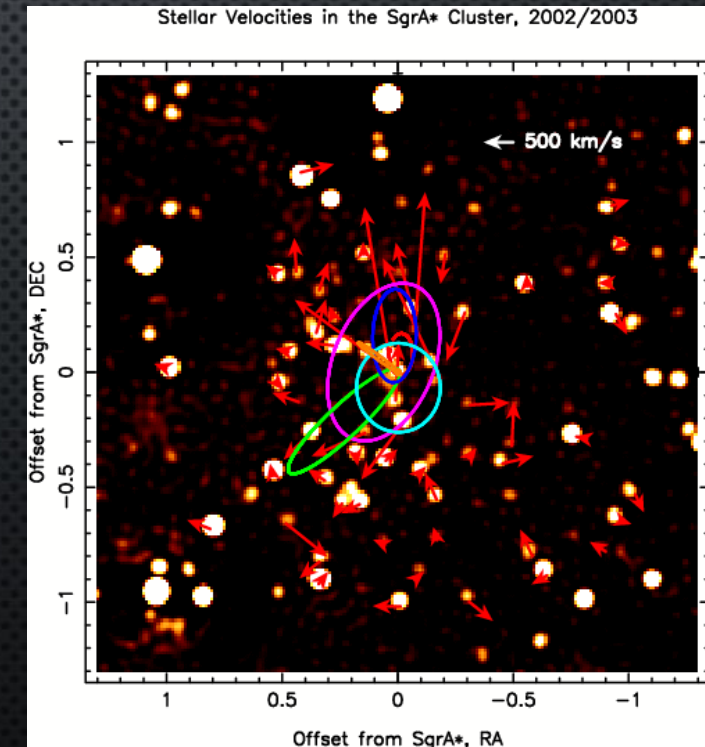
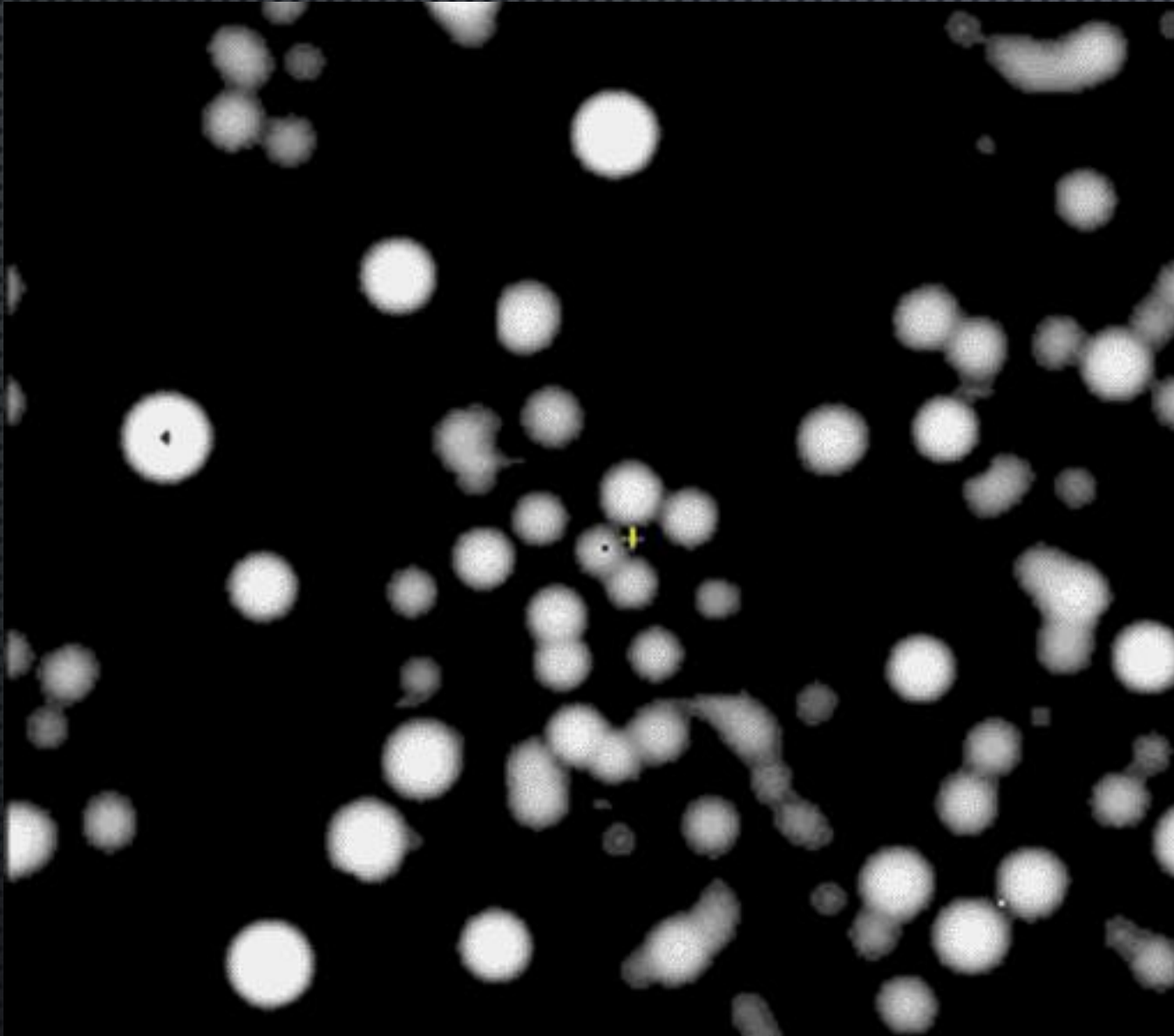
ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА ВОКРУГ SGR A*

С высокой точностью
мы знаем динамику внутри
центральной угловой секунды.

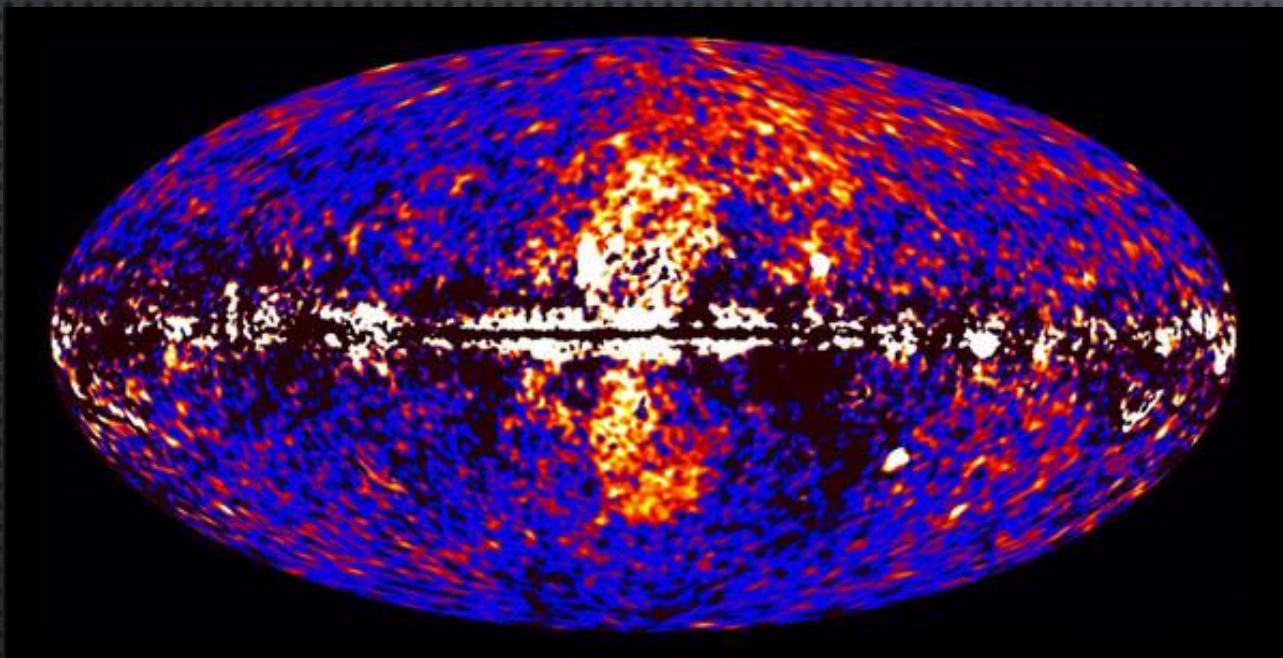
Оценка массы ЧД $(2-4) \cdot 10^6 M_\odot$

Было бы здорово открыть
радиопульсар около Sgr A*

(APOD A. Eckart & R. Genzel)

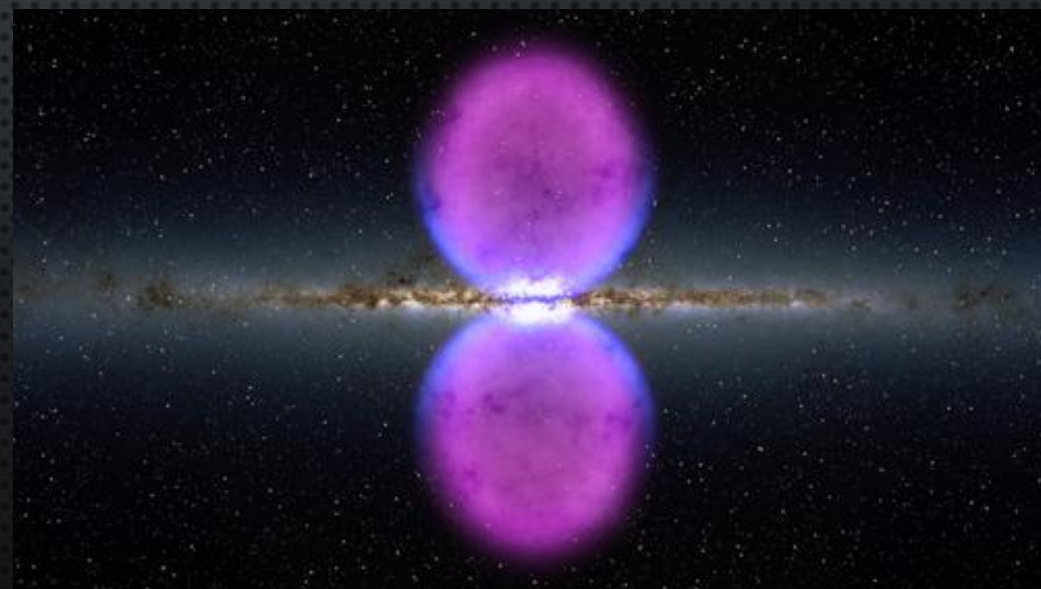


ПУЗЫРИ ФЕРМИ



Возраст пузырей от 10 до 100 млн лет.

Активность черной дыры
или вспышка звездообразования?

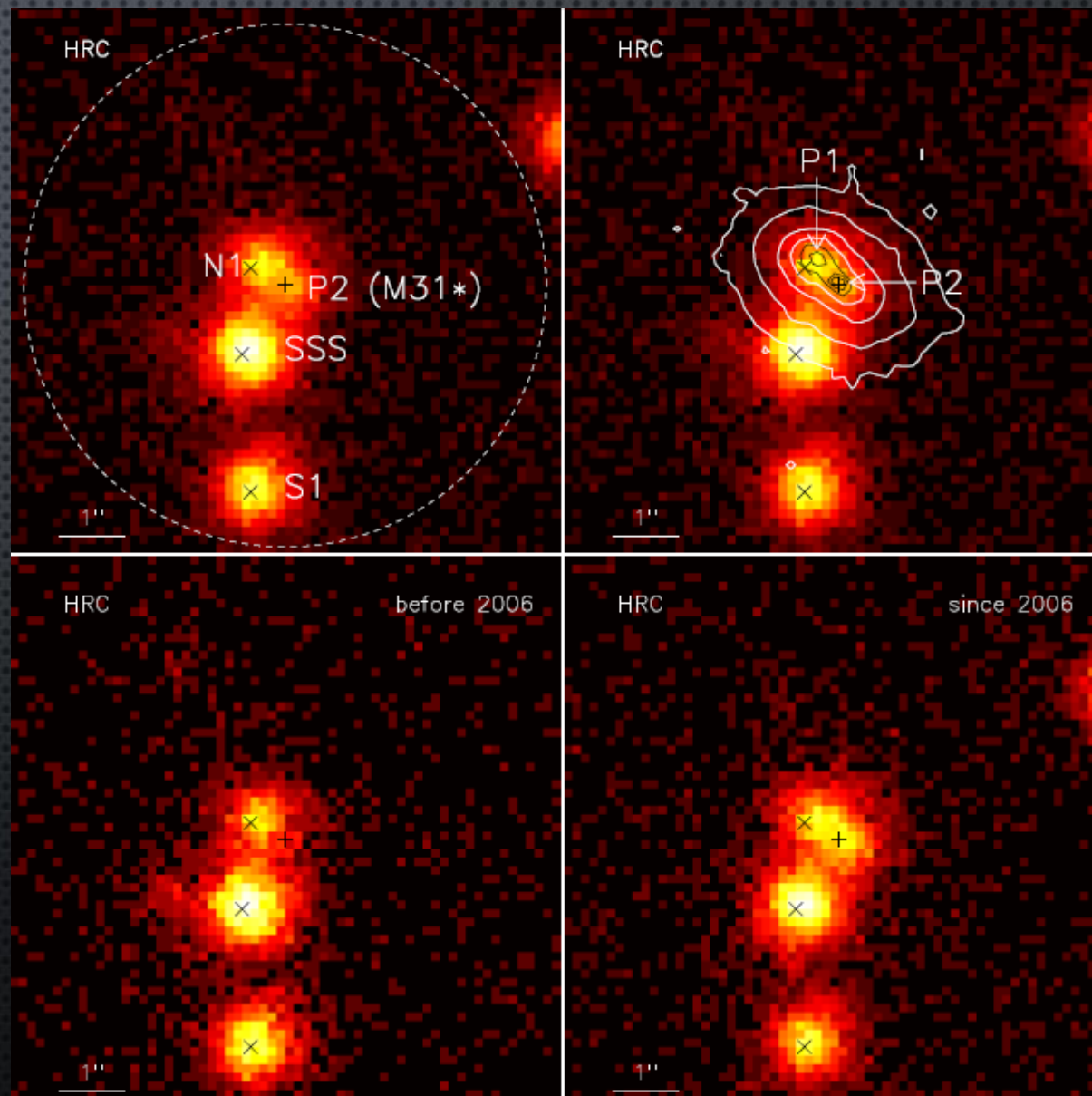


ЧЕРНАЯ ДЫРА В ТУМАННОСТИ АНДРОМЕДЫ

В Туманности Андромеды, как и в нашей Галактике, есть сверхмассивная черная дыра. Причем, в M31 она раз в 50 тяжелее - ее масса 100-200 миллионов солнечных.

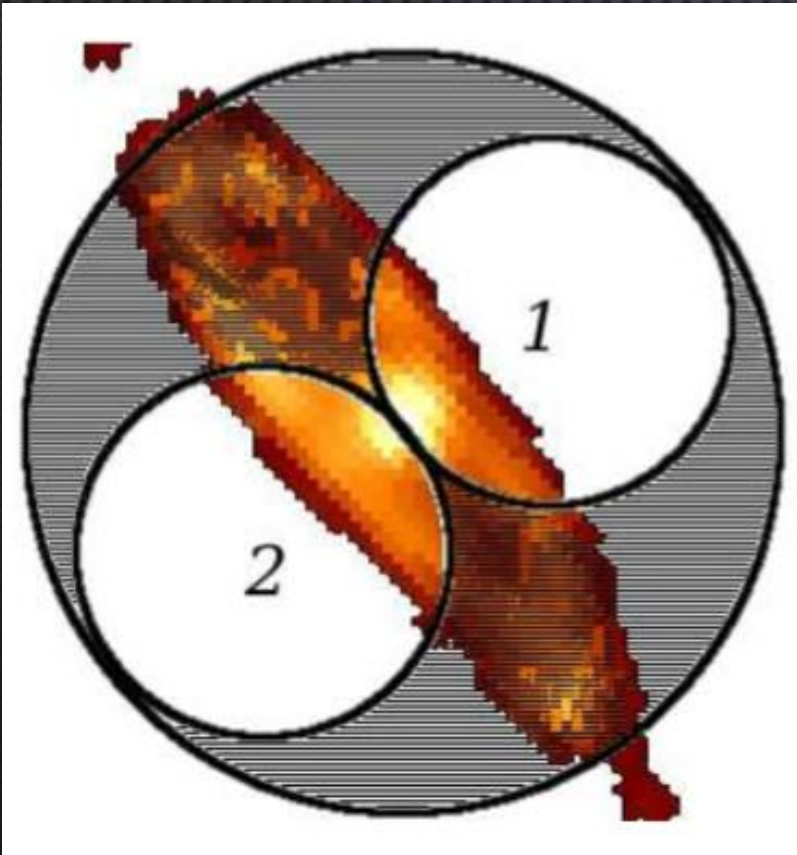
Так же, как и у нас, "монстр спит": светимость составляет миллиардные доли от предельной, т.н. Эддингтоновской.

Правда, у нас дыра время от времени "всхрапывает" во сне: происходят вспышки. Теперь изменения активности дыры открыли и в M31.



ПУЗЫРИ В М31

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

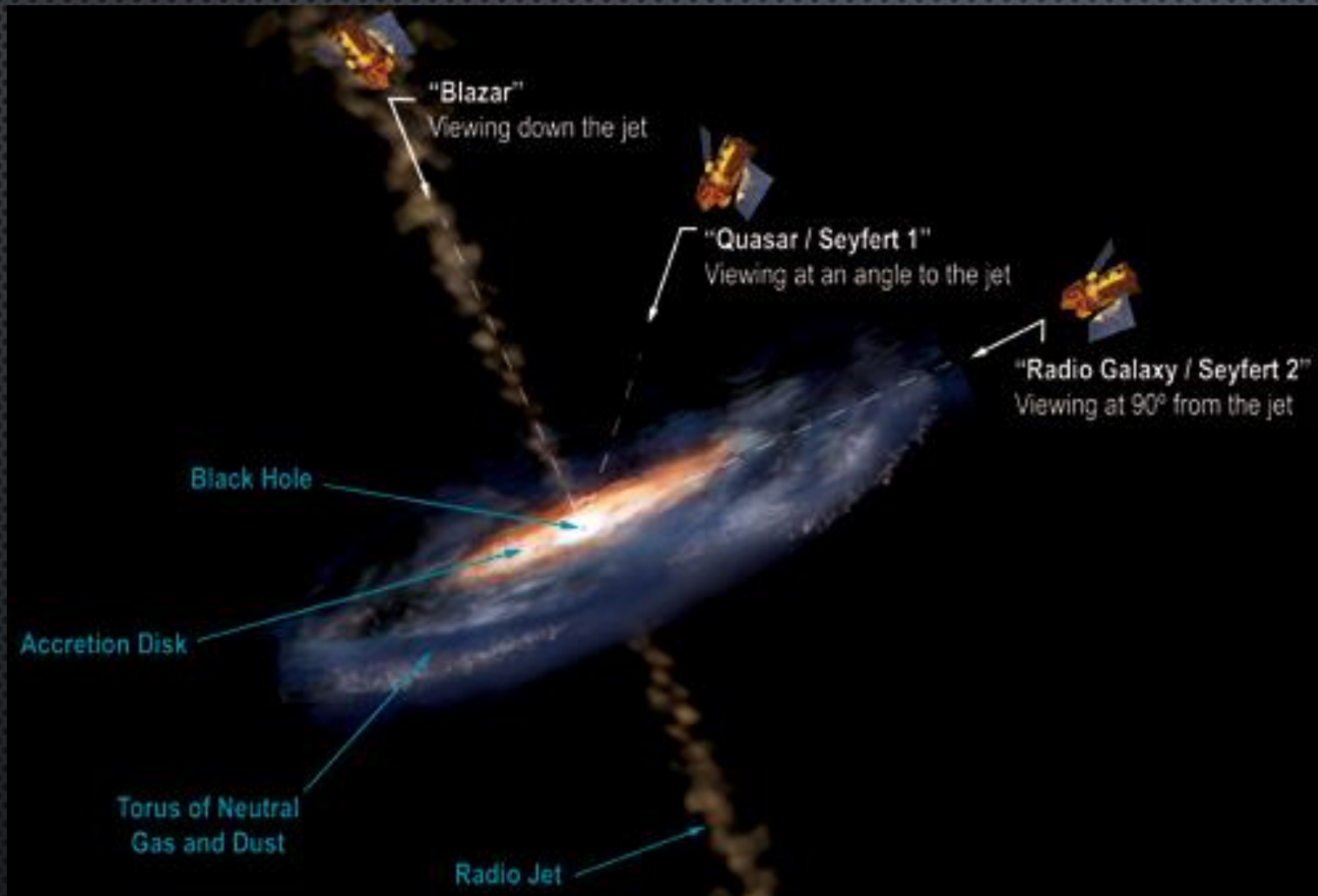


Возникновение такой структуры может быть связано с прошлой активностью центральной черной дыры.

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

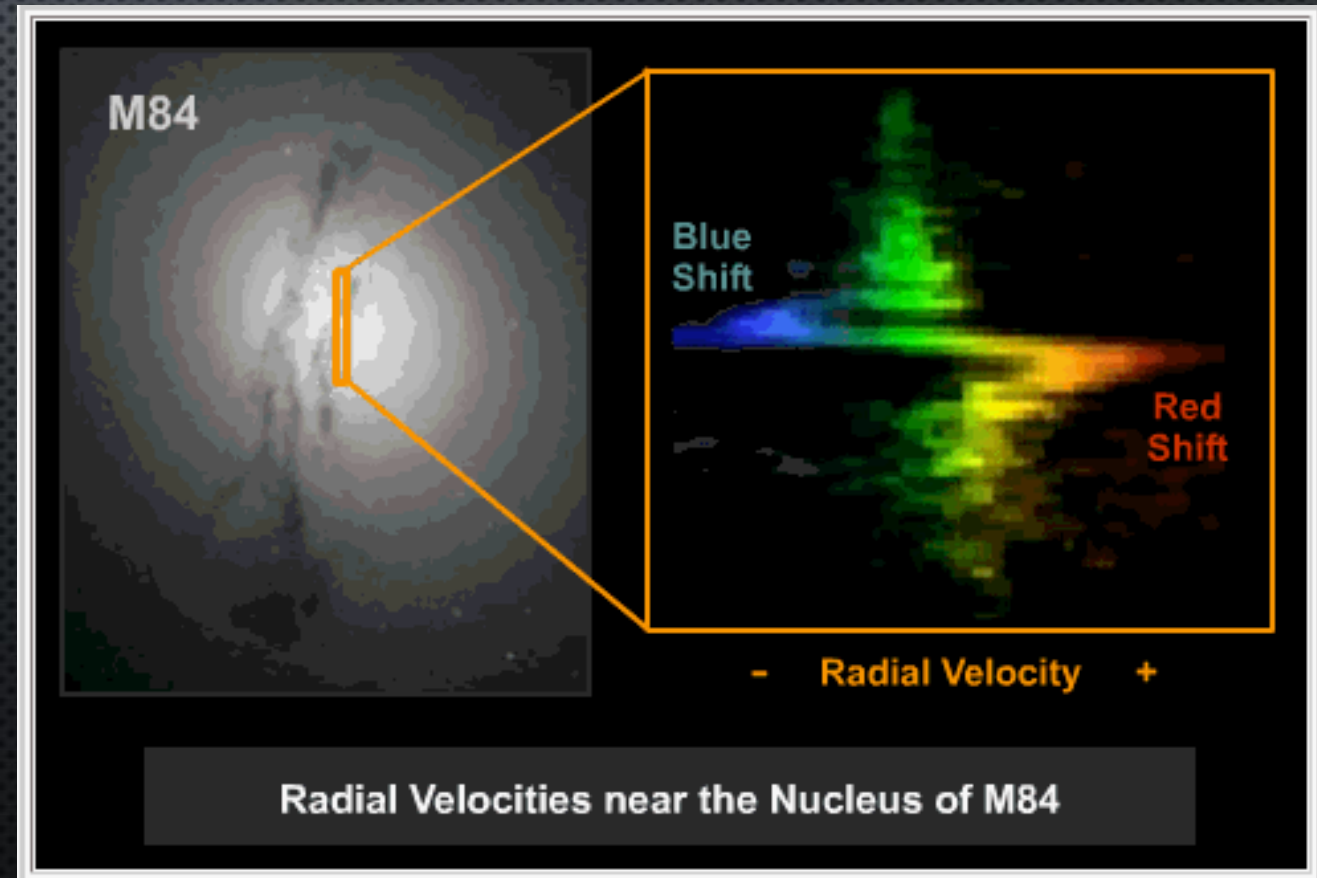


В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

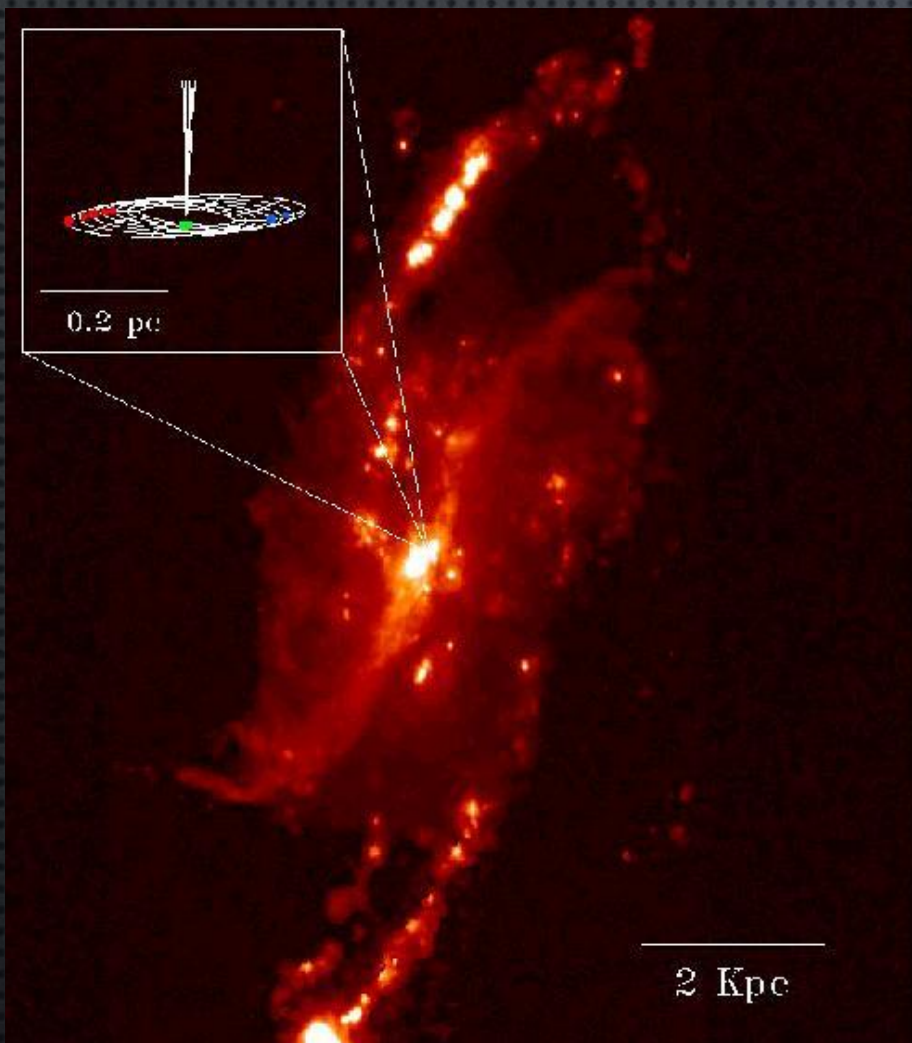
ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- 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).

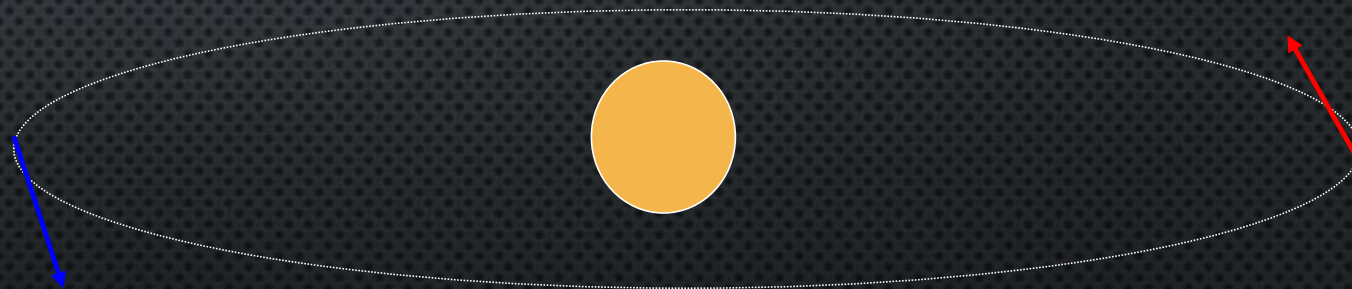


МАЗЕРЫ

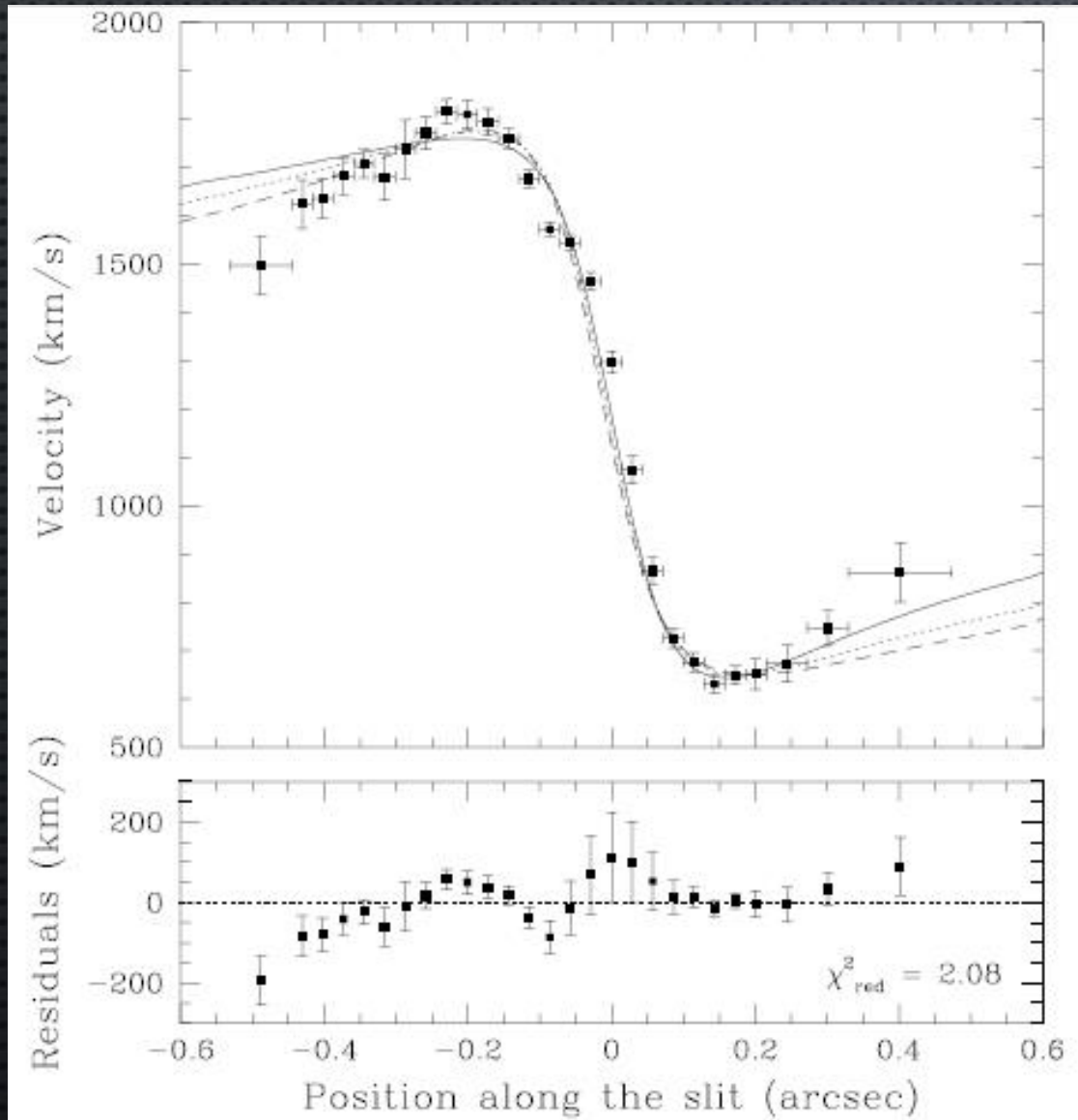


Наблюдая движение мазерных источников в галактике NGC 4258, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

Это наиболее точный метод.



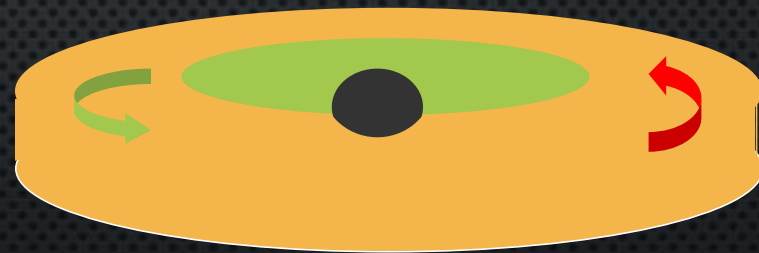
КИНЕМАТИКА ГАЗА



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

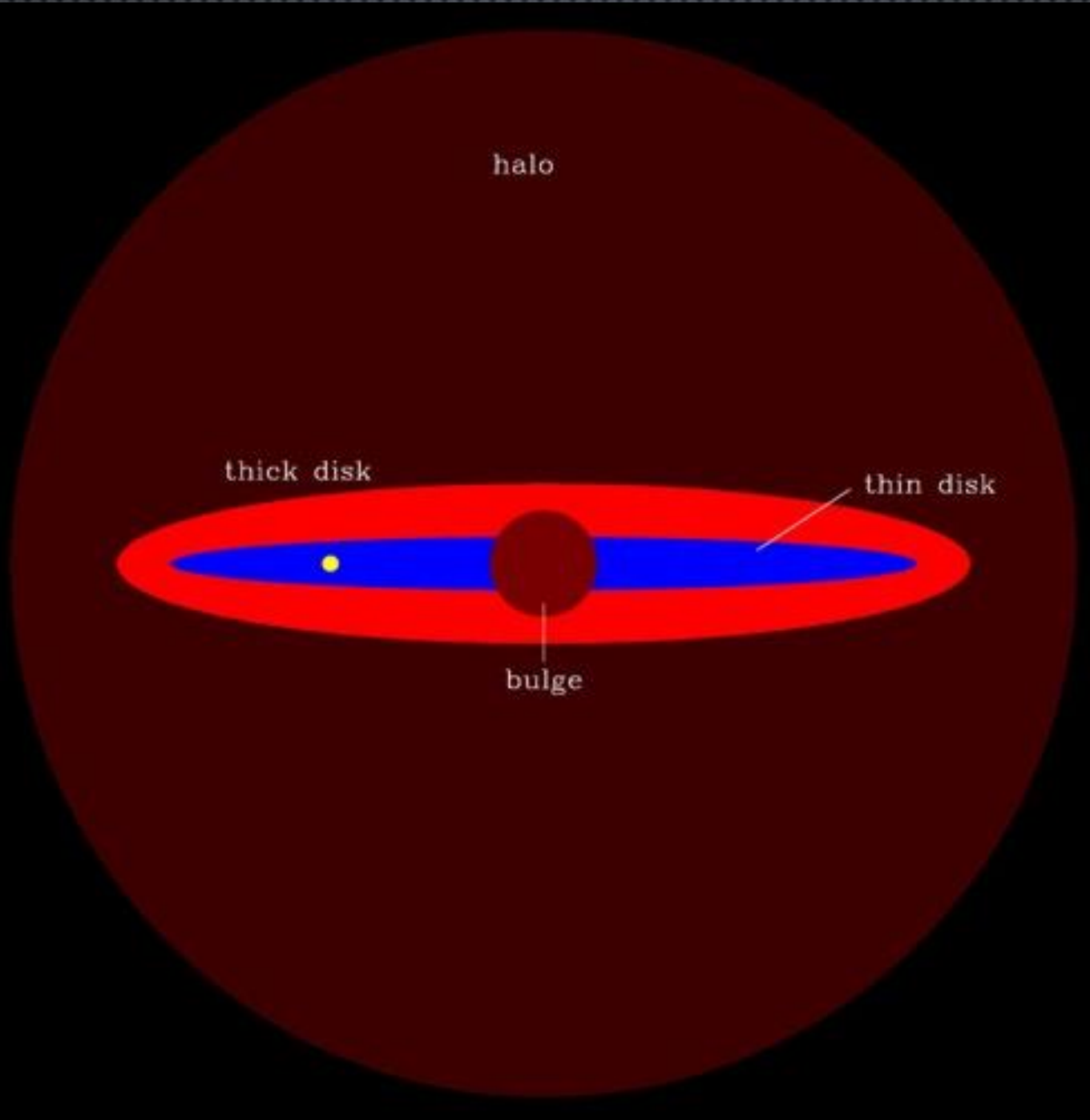
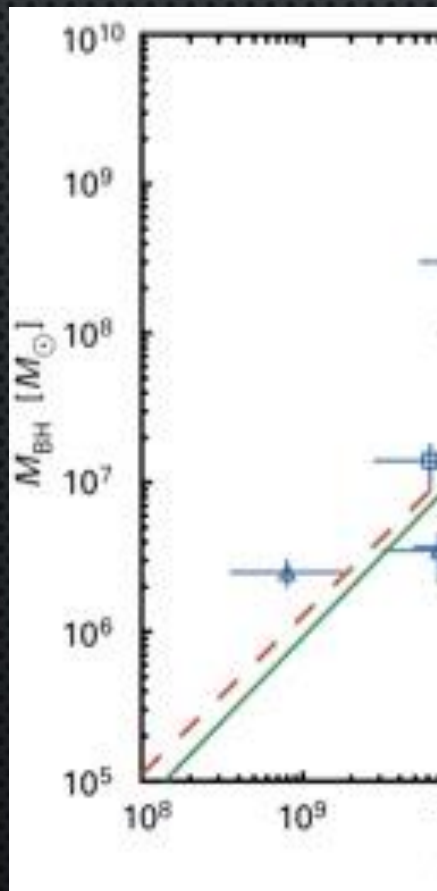
Масса $3 \cdot 10^9 M_{\odot}$.

Одна из самых тяжелых черных дыр



СОС
ЧЕРН

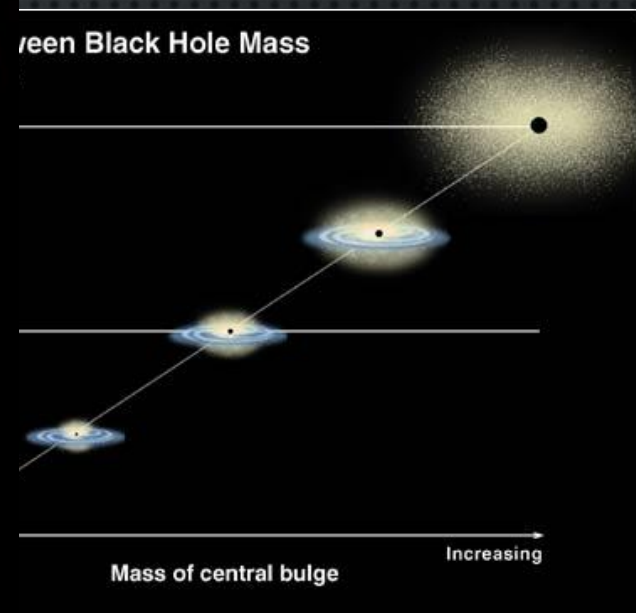
Сол
ИМС



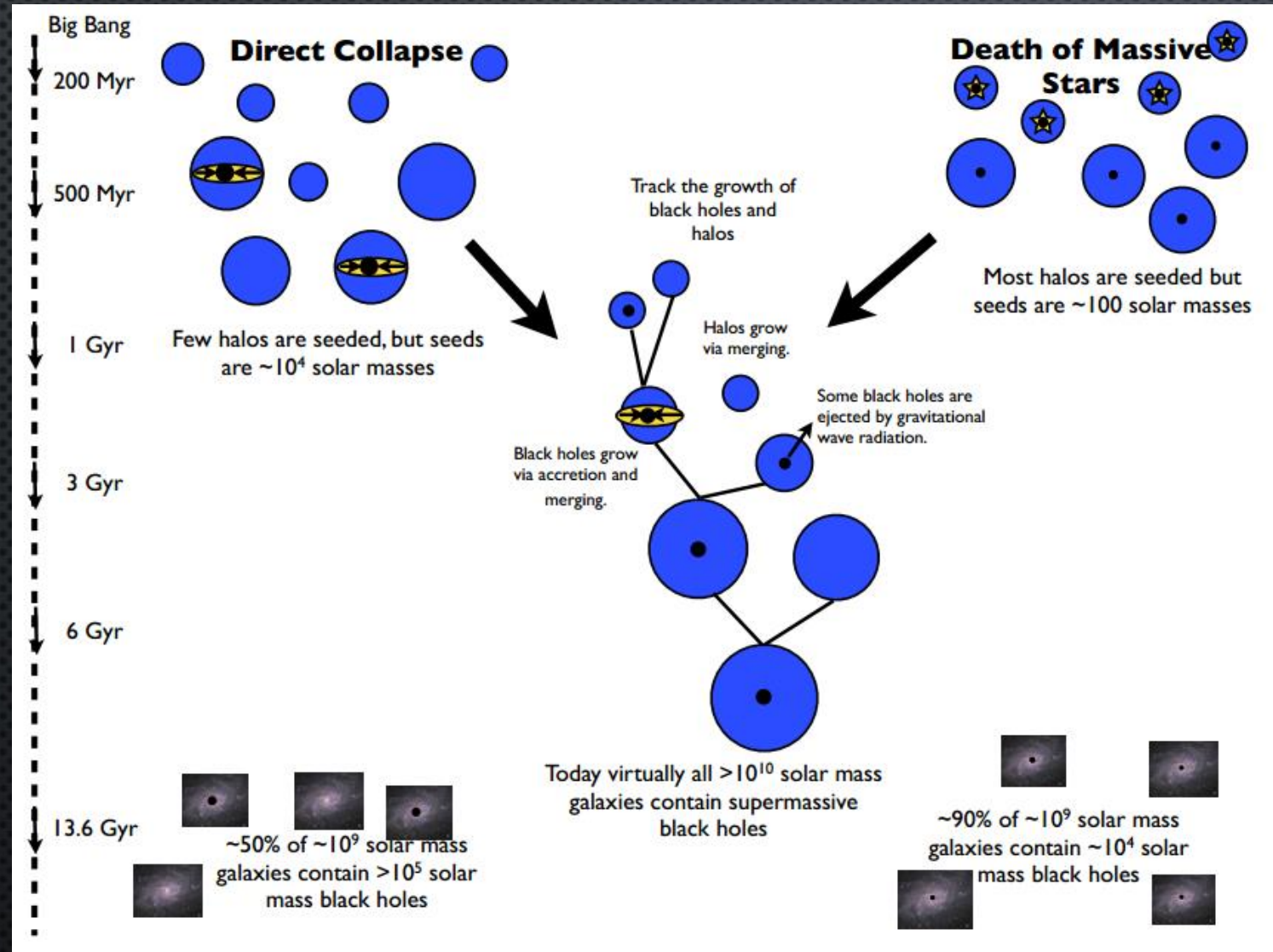
САМИ

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.

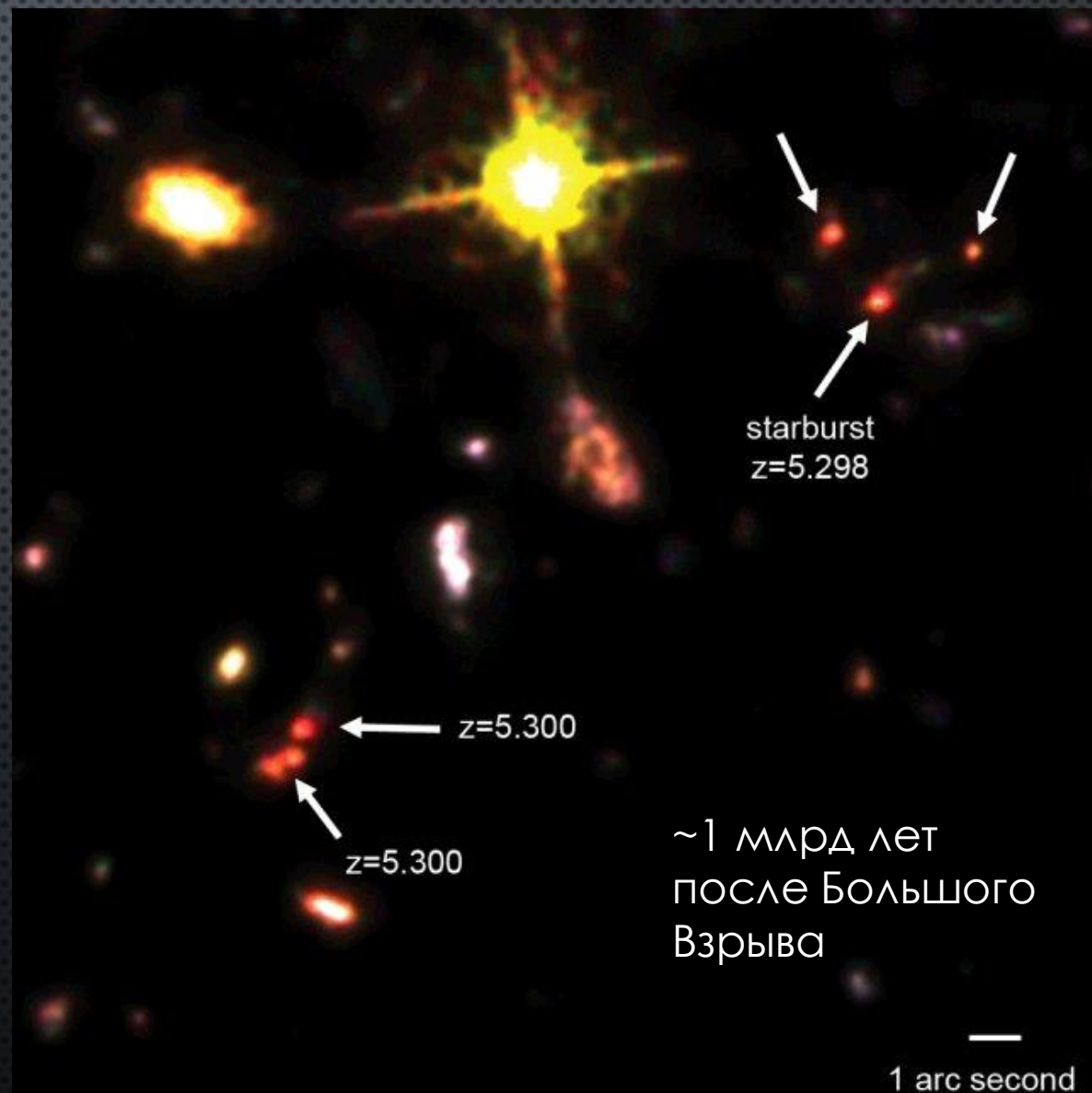
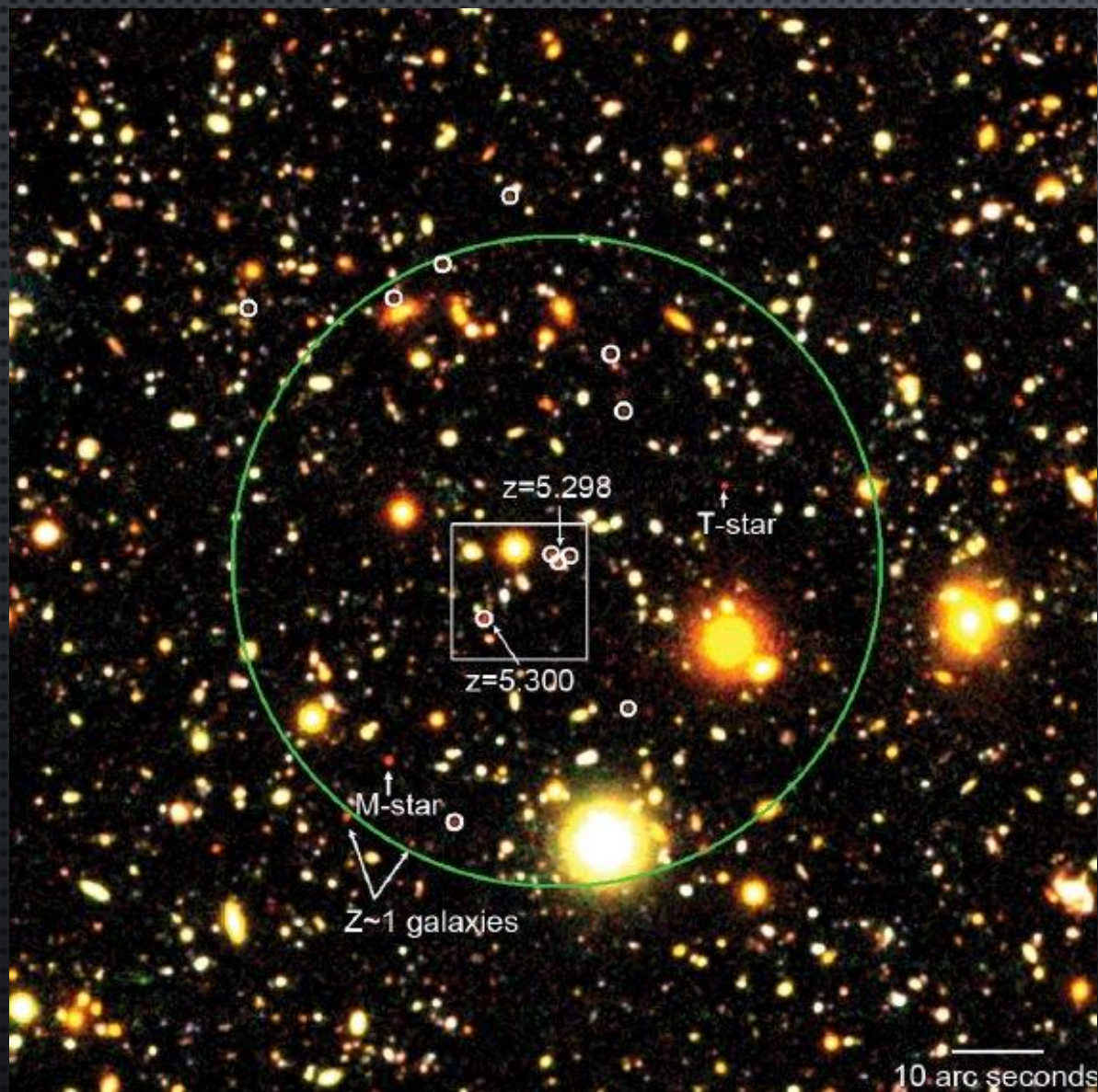
ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ



Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

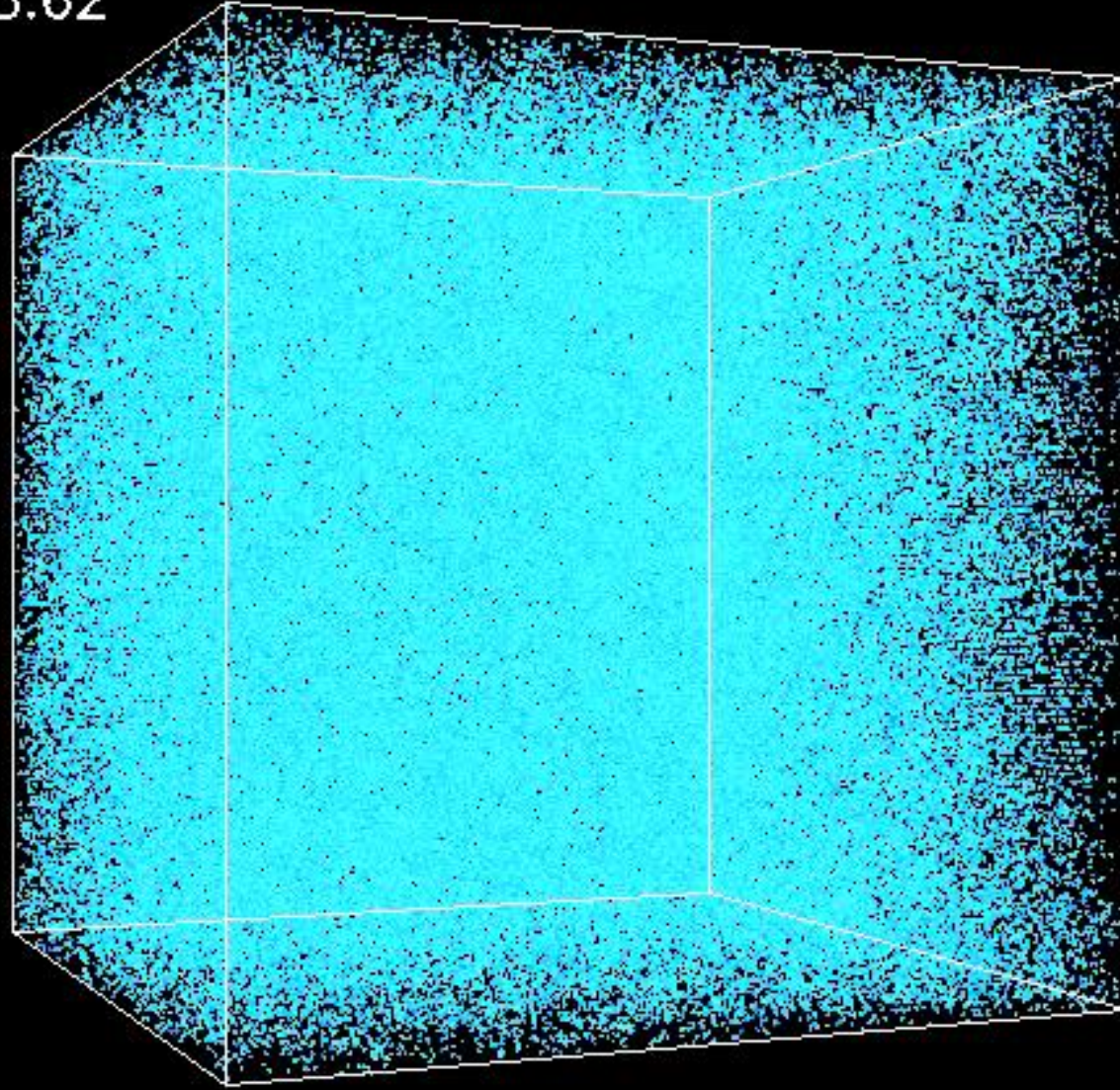
На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

ДАЛЕКОЕ ПРОТОСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК



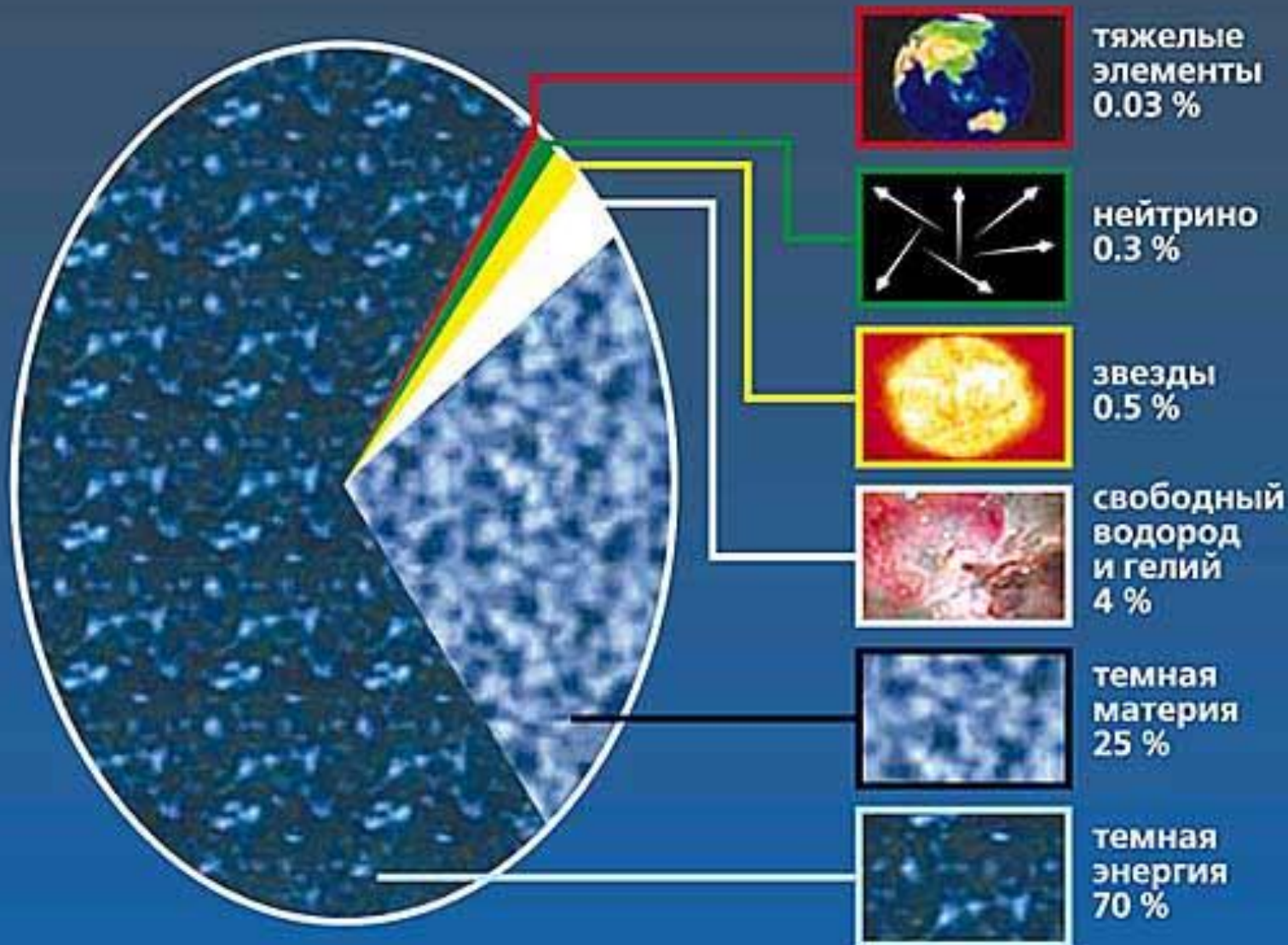
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

$Z=28.62$



А. Кравцов и др.

СОСТАВ ВСЕЛЕННОЙ



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

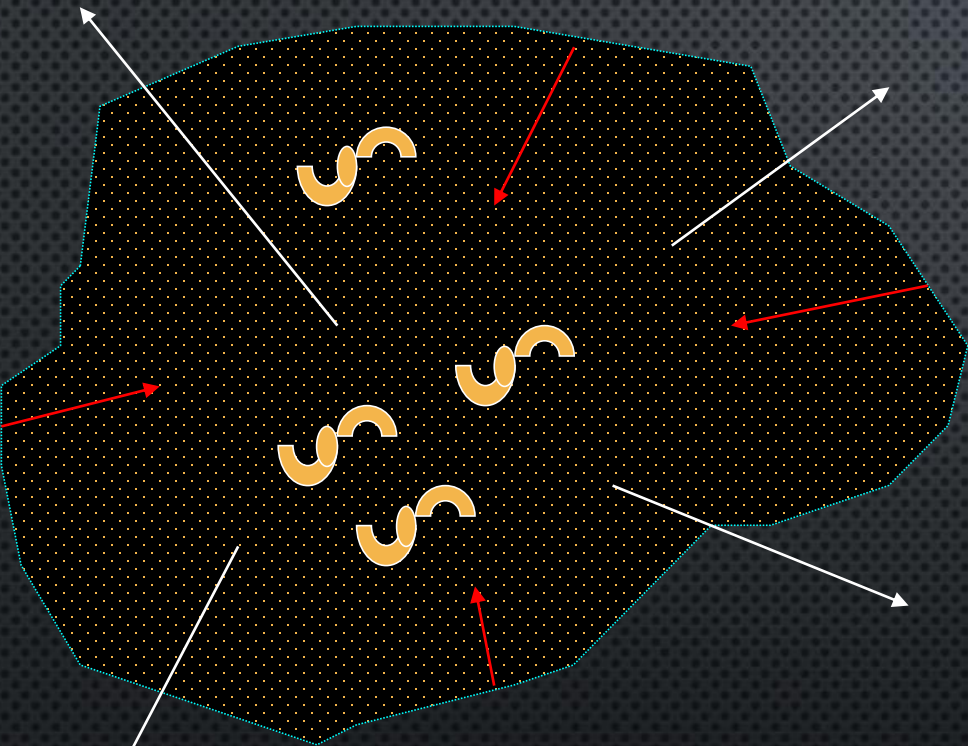
Неизвестные частицы
Нейтралино? Аксионы?



Неизвестные поля или вакуум

КОГДА И ЗАЧЕМ ЕГО ПРИДУМАЛИ?

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



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

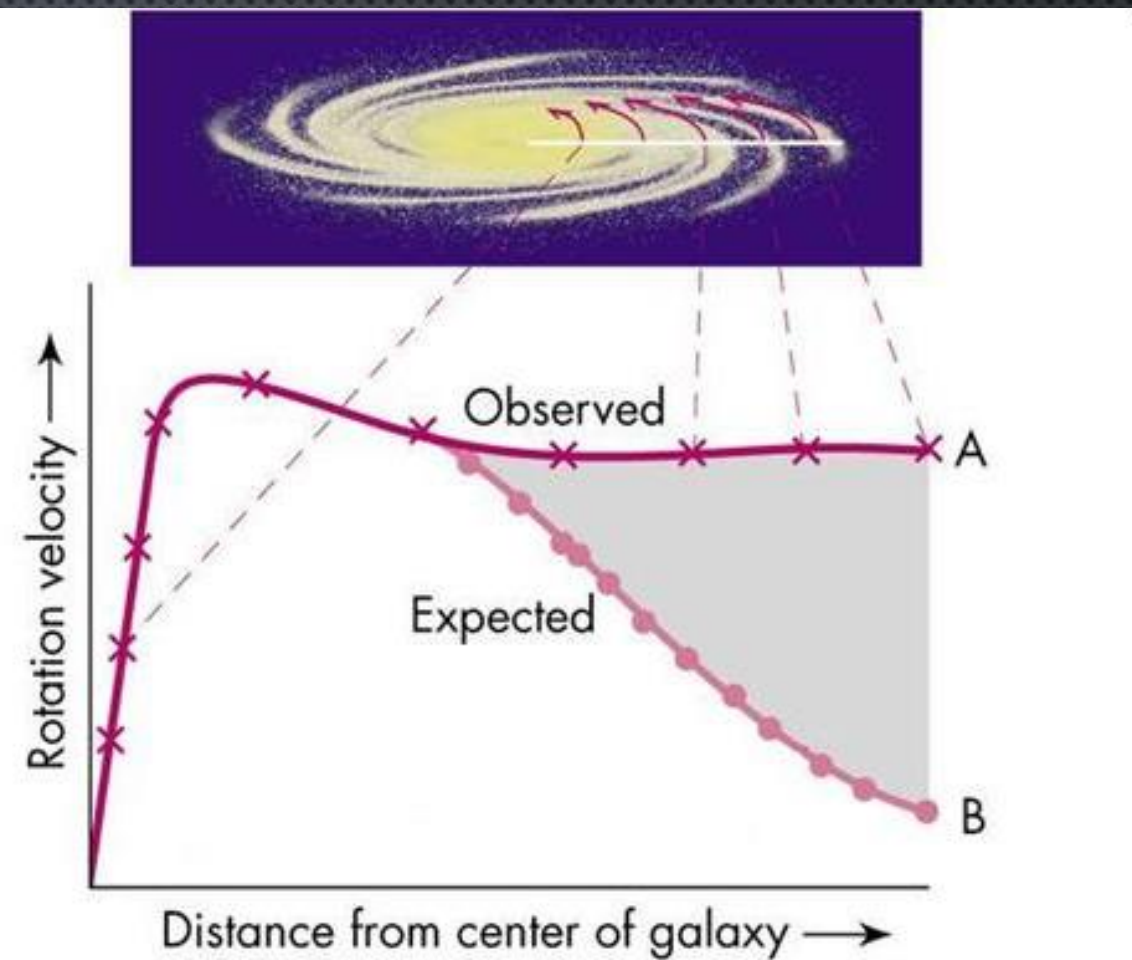
Подсчет массы видимого вещества
в скоплениях галактик показывал,
что его недостаточно для того,
чтобы галактики и газ не разлетелись.



ВРАЩЕНИЕ ГАЛАКТИК



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



КРИВЫЕ ВРАЩЕНИЯ ГАЛАКТИК

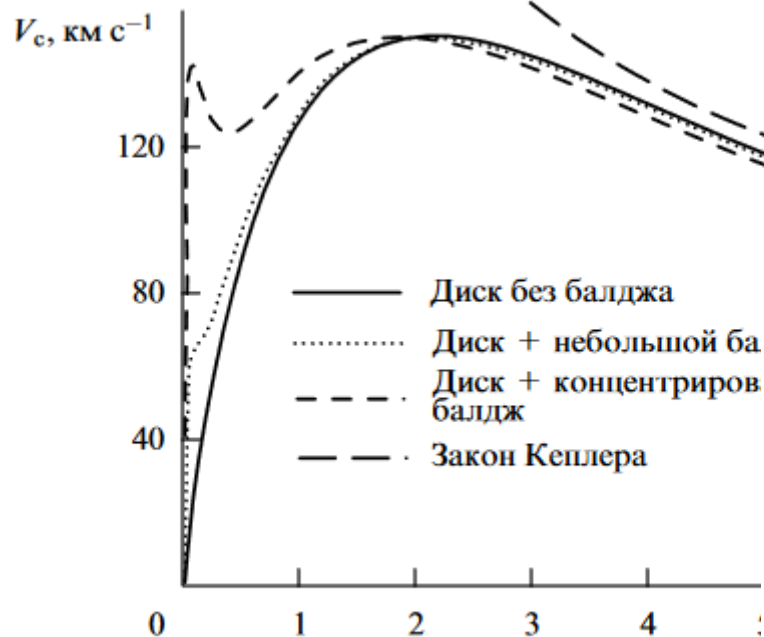


Рис. 2. Кривые вращения в отсутствие гало.

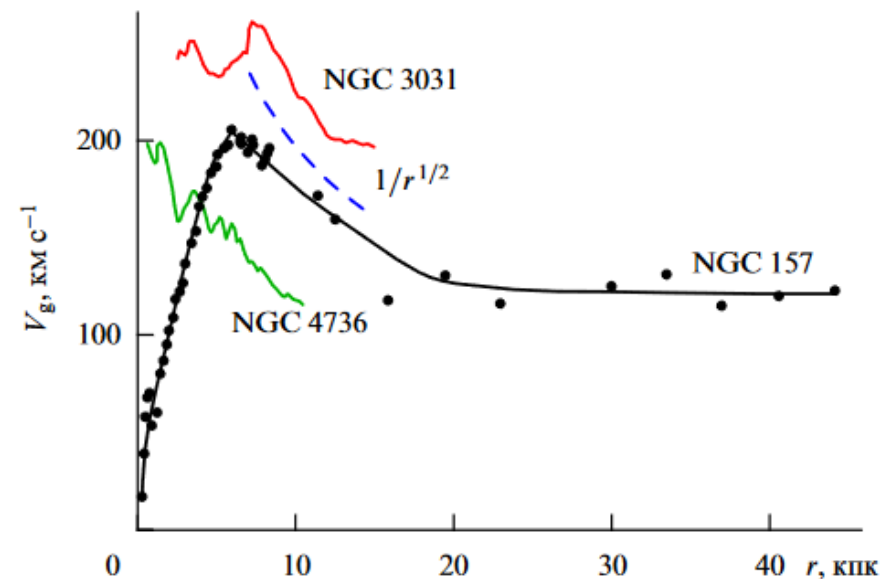
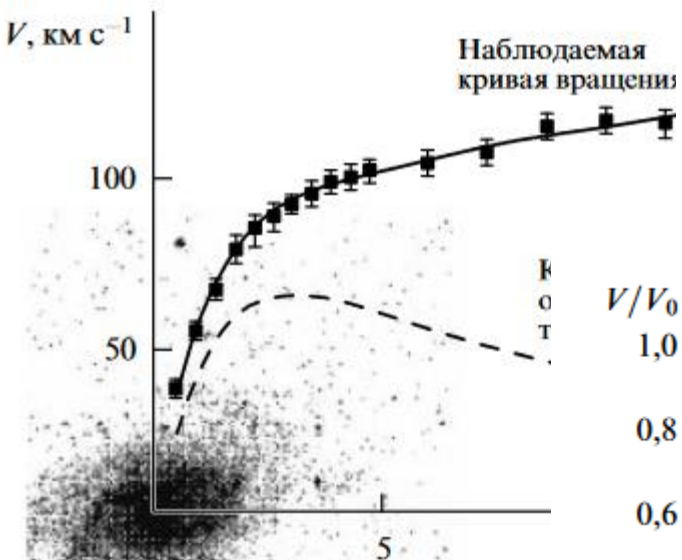
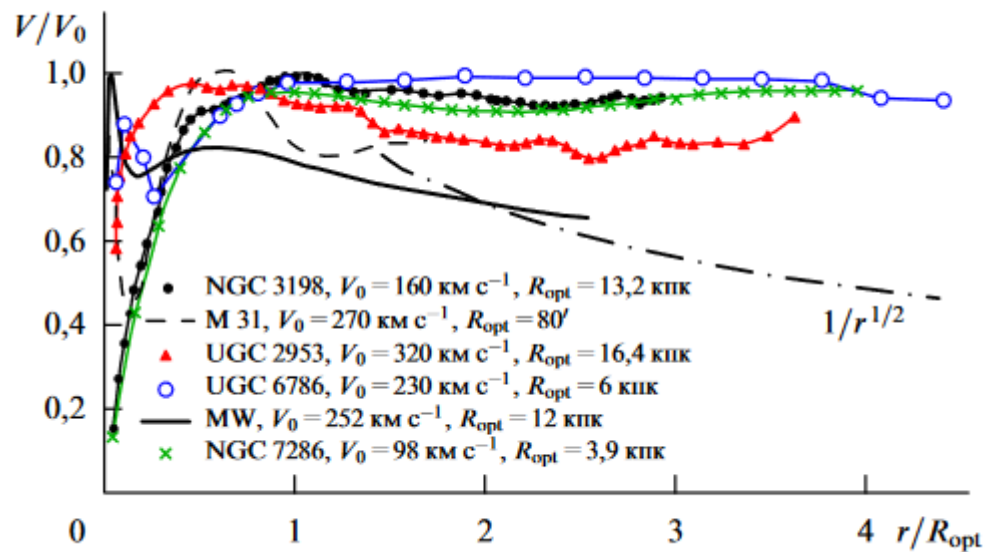


Рис. 5. Примеры кривых вращения спиральных галактик с убыванием скорости вращения в пределах оптических границ: NGC 157 [53], NGC 4736, NGC 3031 [54]. Штриховая линия — кеплеровская кривая вращения $\propto 1/\sqrt{r}$.



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

ЛИНЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА МАССЫ

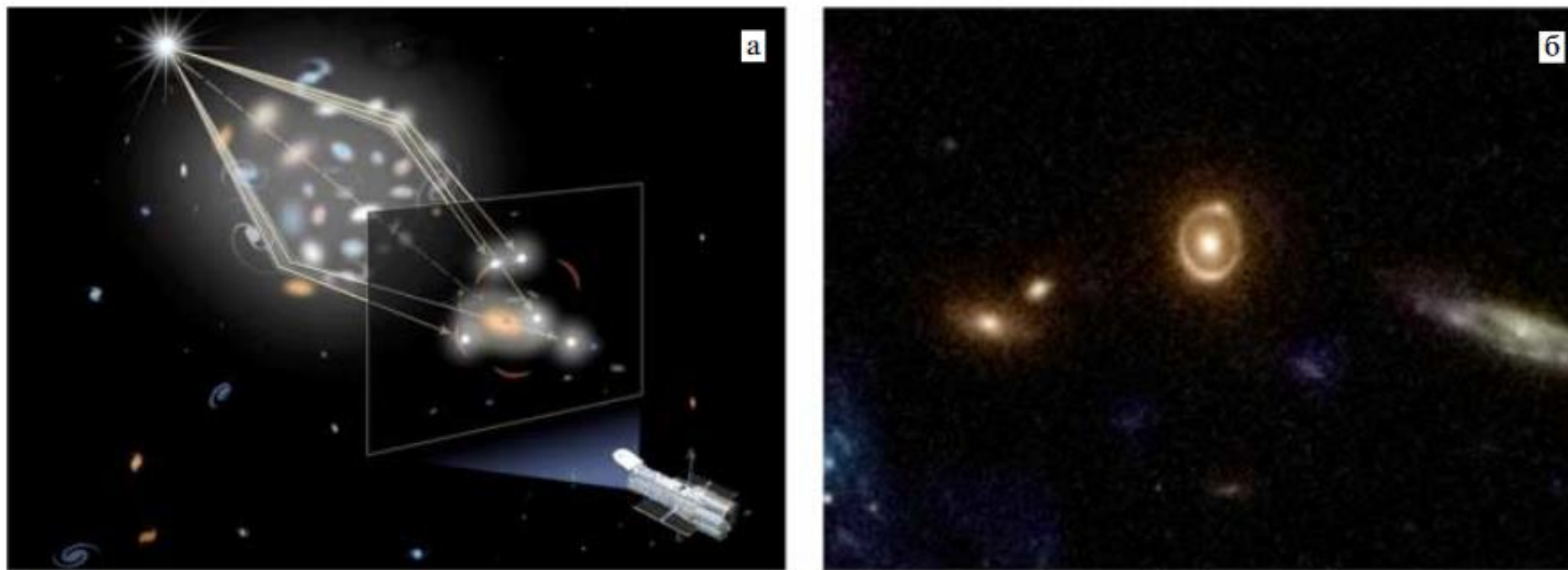


Рис. 16. (а) Иллюстрация хода лучей в гравитационной линзе. (б) Изображение почти идеального кольца Эйнштейна на гравитационной линзе 0038 + 4133 (телескоп Хаббла).

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

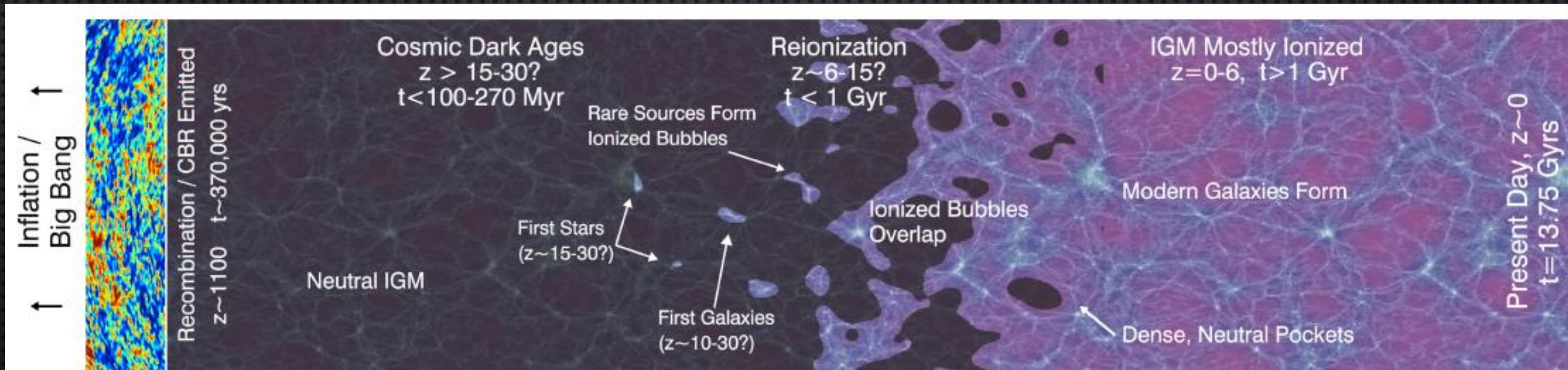
ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

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».

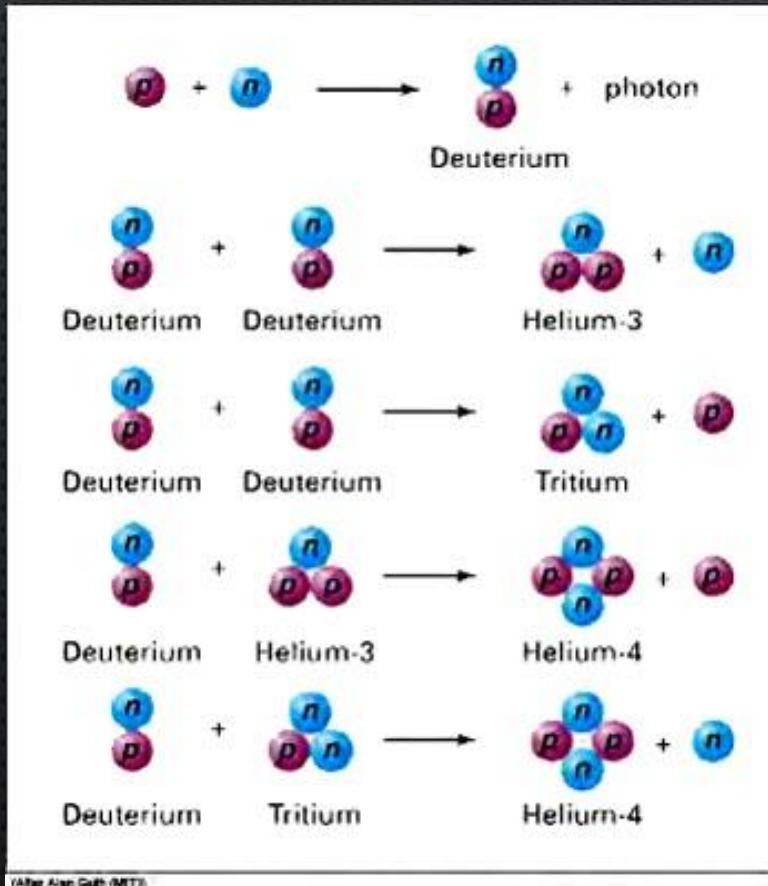
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



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