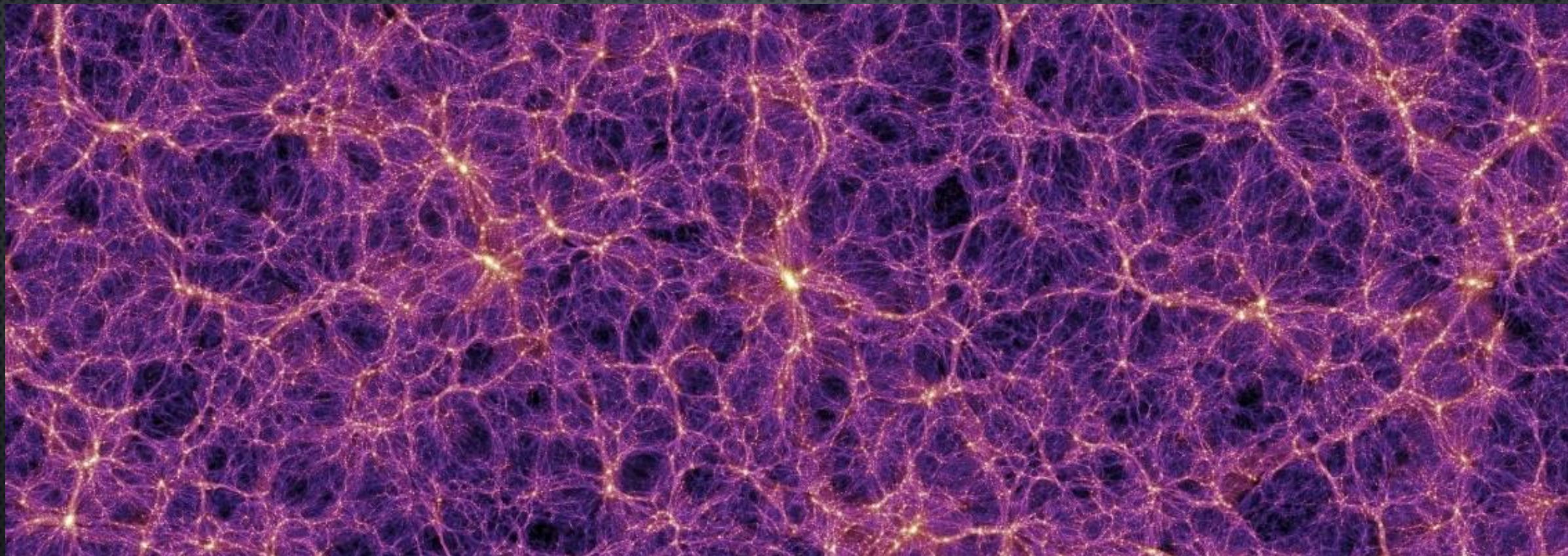


# МИР ГАЛАКТИК И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО



СЕРГЕЙ ПОПОВ

# НАША ГАЛАКТИКА

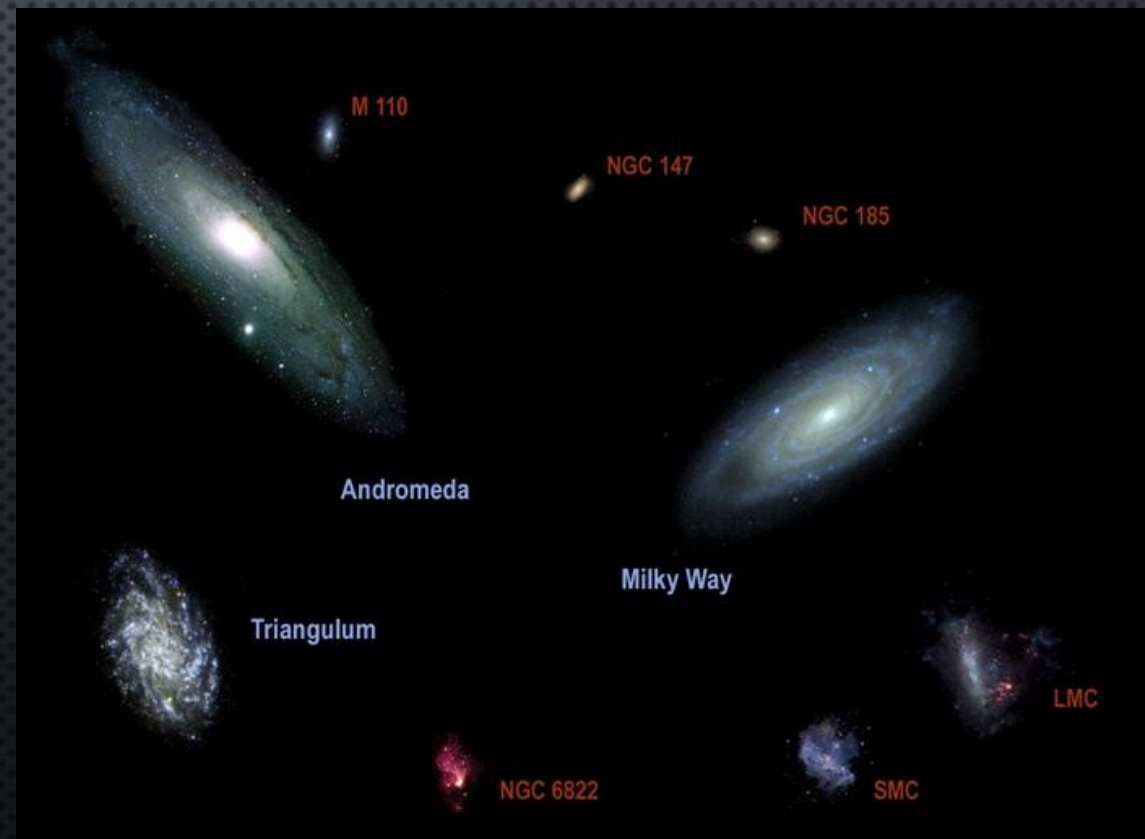
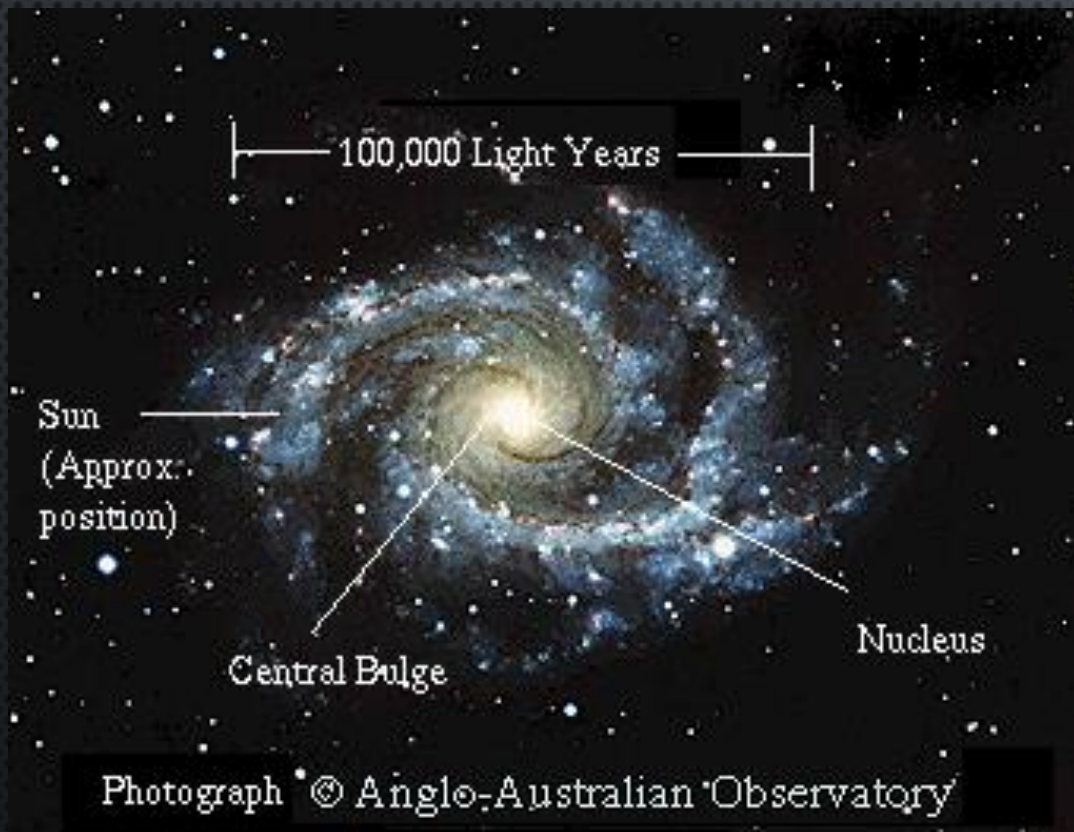
Наша Галактика – одна из многих подобных систем.

В видимой части вселенной около 100 миллиардов крупных галактик.

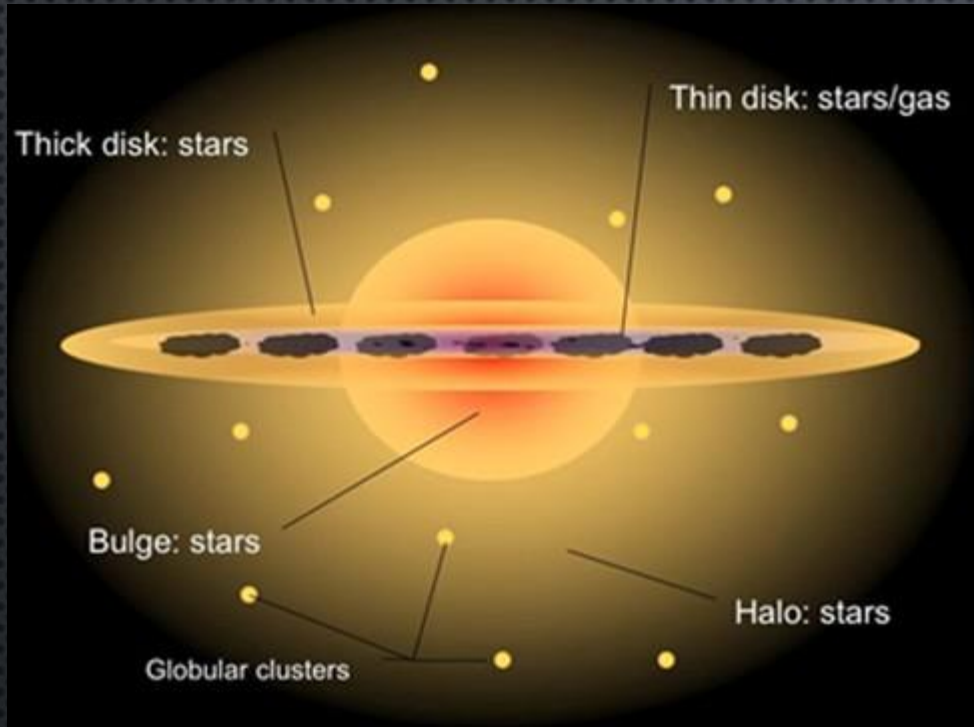
Они окружены небольшими спутниками.

Размер галактики около 100 000 световых лет.

До ближайшей крупной галактики около 2.5 миллионов световых лет.



# СКОРОСТИ ЗВЕЗД В ГАЛАКТИКЕ



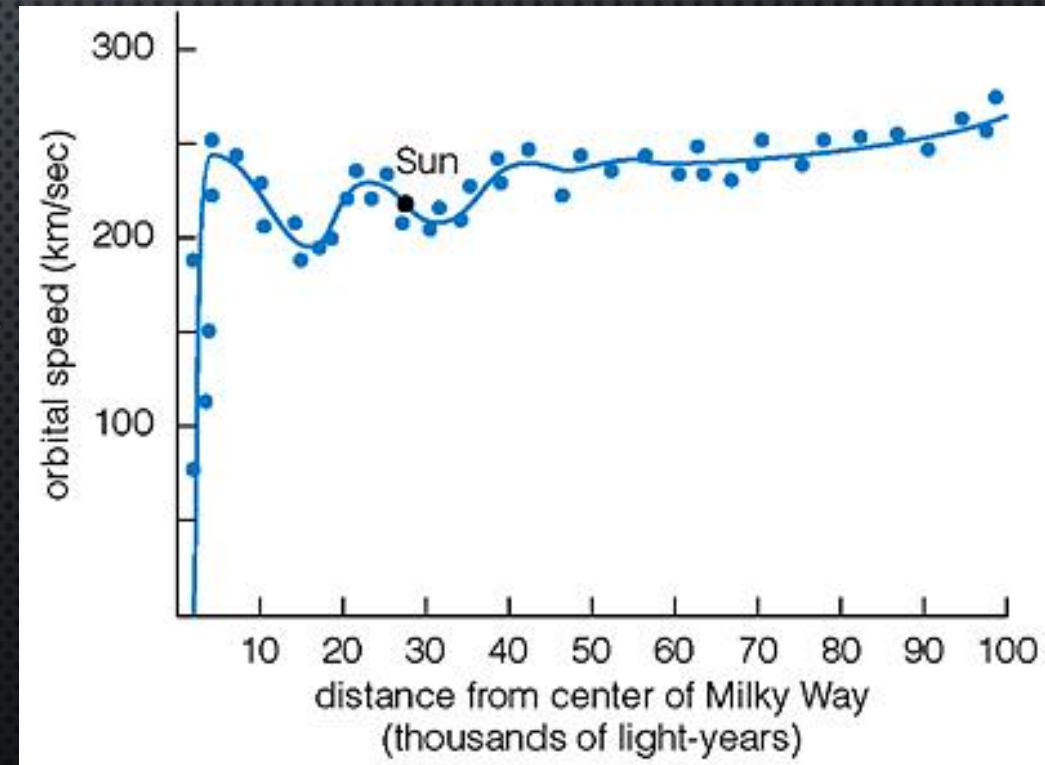
Круговые скорости звезд в Галактике

довольно велики -  $>200$  км/с.

Это позволяет оценить скорость убегания.

С учетом гало она оказывается  $\sim 500$  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

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

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

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

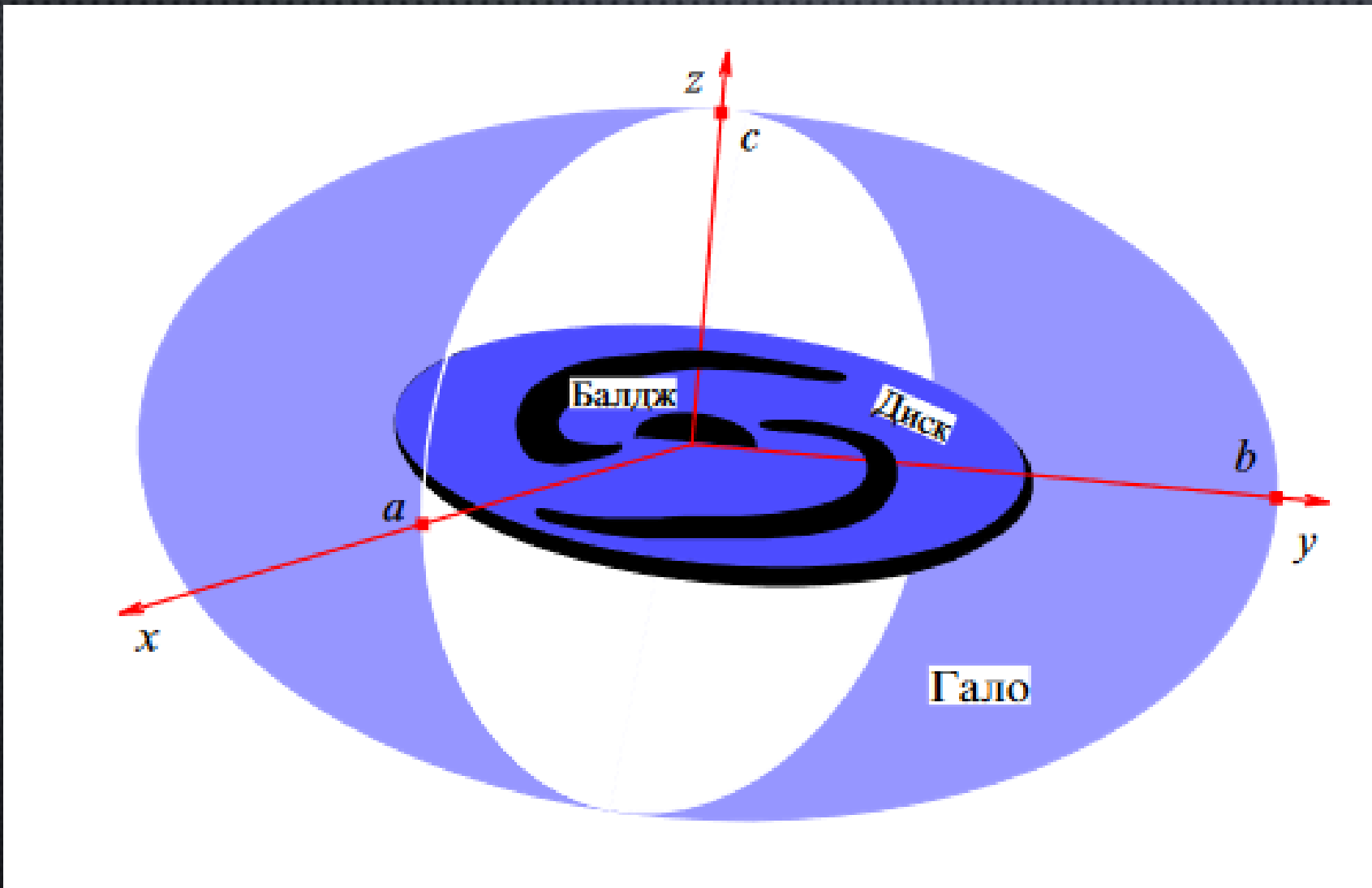
$$\Phi_D = \Phi_{D1} + \Phi_{D2} + \Phi_{D3}$$

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

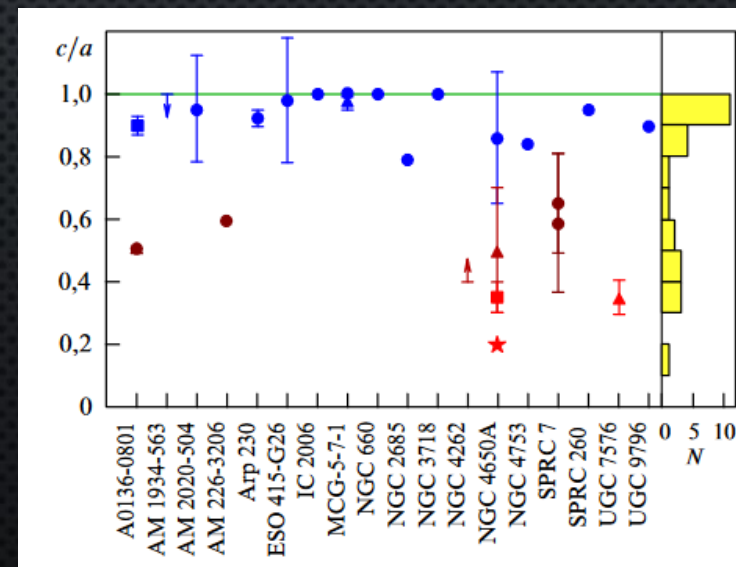
Component	Parameter	Value
Dark Halo	$r_0$	8.5 kpc
	$V_H$	220 km s <sup>-1</sup>
Bulge/Stellar-halo	$r_{C1}$	2.7 kpc
	$M_{C1}$	$3.0 \times 10^9 M_\odot$
Central comp.	$r_{C2}$	0.42 kpc
	$M_{C2}$	$1.6 \times 10^{10} M_\odot$
Disk	$b$	0.3 kpc
	$M_{D1}$	$6.6 \times 10^{10} M_\odot$
	$a_1$	5.81 kpc
	$M_{D2}$	$-2.9 \times 10^{10} M_\odot$
	$a_2$	17.43 kpc
	$M_{D3}$	$3.3 \times 10^9 M_\odot$
	$a_3$	34.86 kpc

# СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО. ТРЕХОСНОЕ ГАЛО

Засов и др. (УФН 2017)

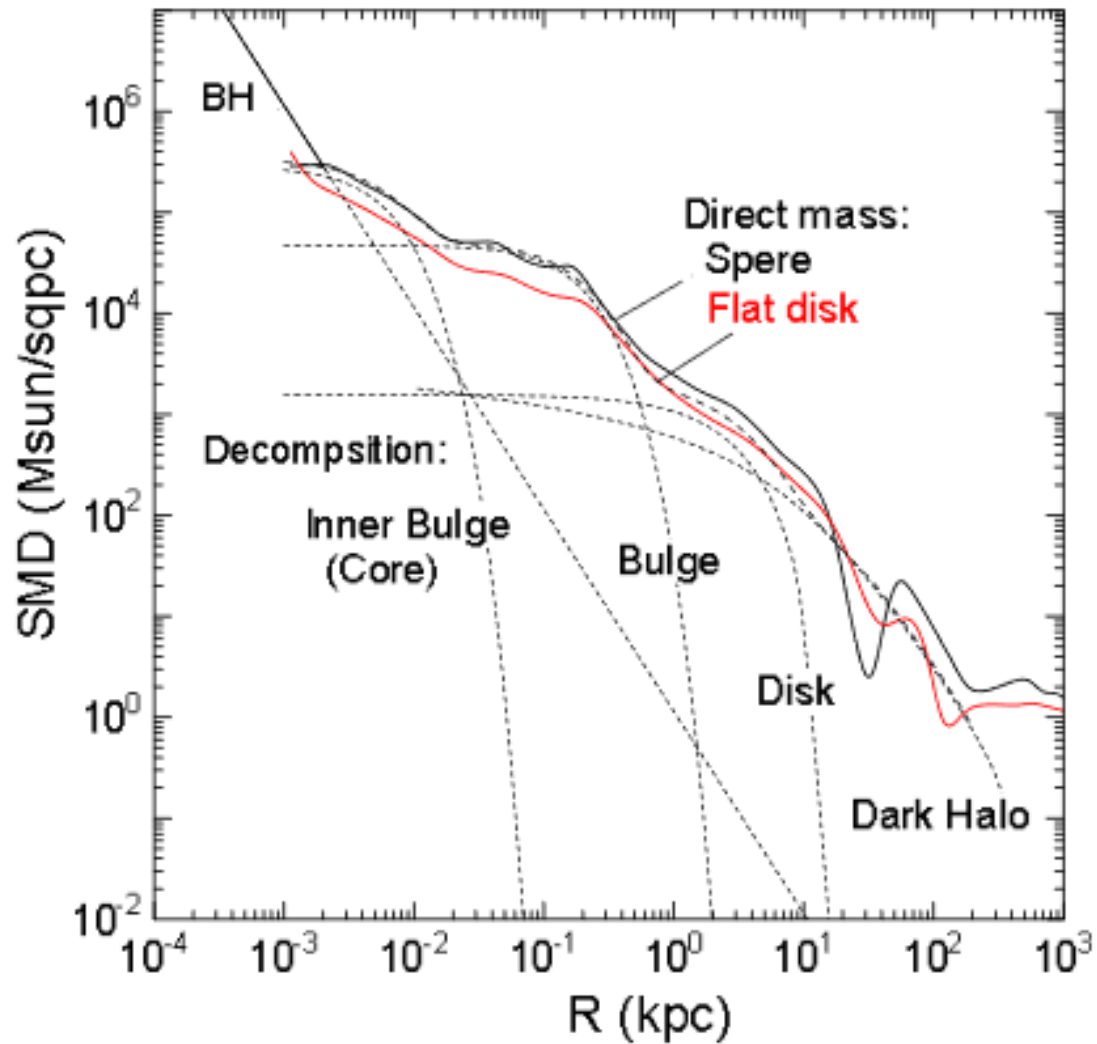


Темное вещество присутствует по всем частям галактики. Однако основная масса приходится на гало, т.к. темное вещество плохо «остывает». И, т.о., плохо формирует компактные структуры.



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  $3.6 \times 10^6 M_{\odot}$ .

# ГРАВИТАЦИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ГАЛАКТИКИ

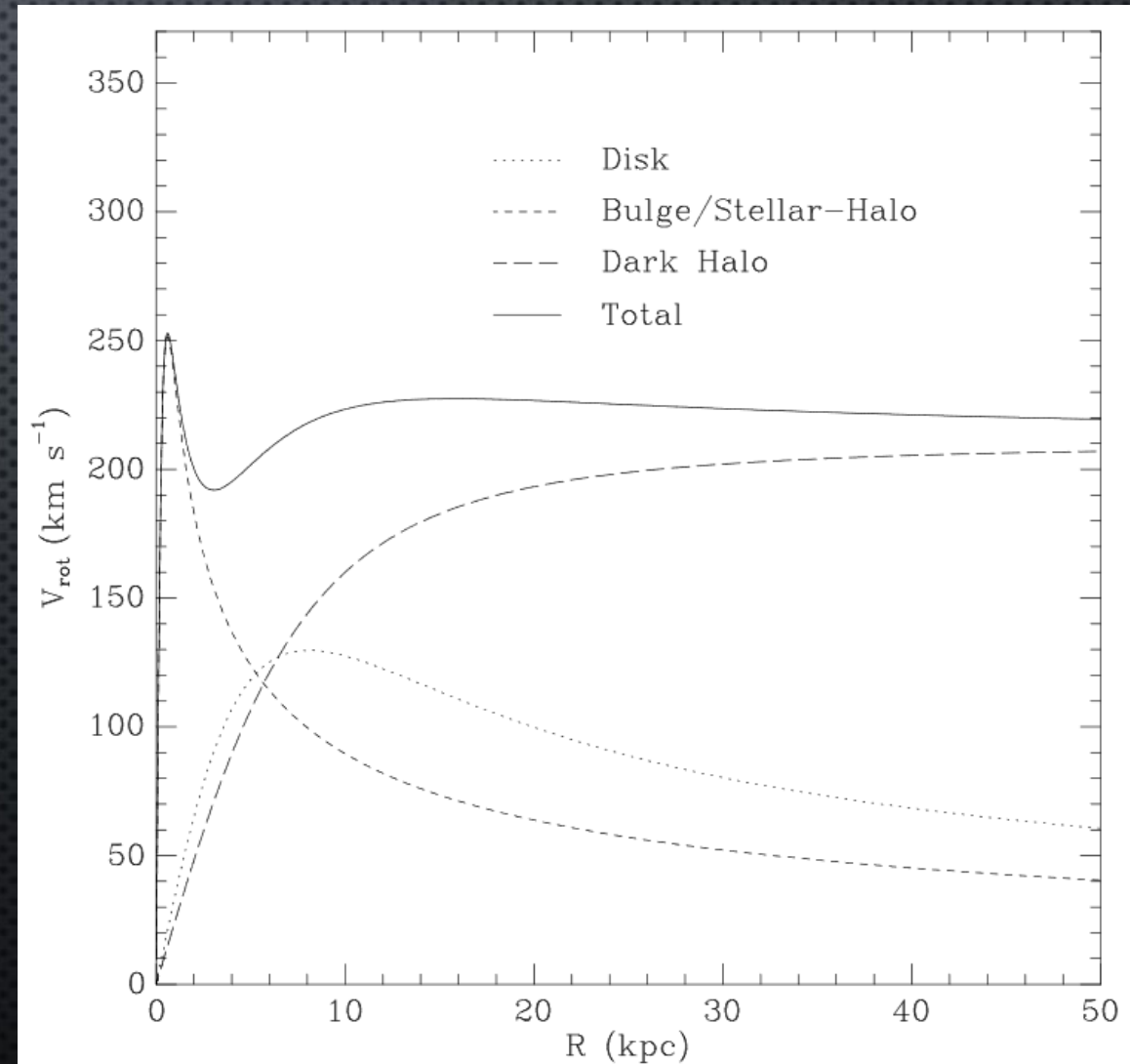
$$\Phi = \Phi_H + \Phi_C + \Phi_D$$

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

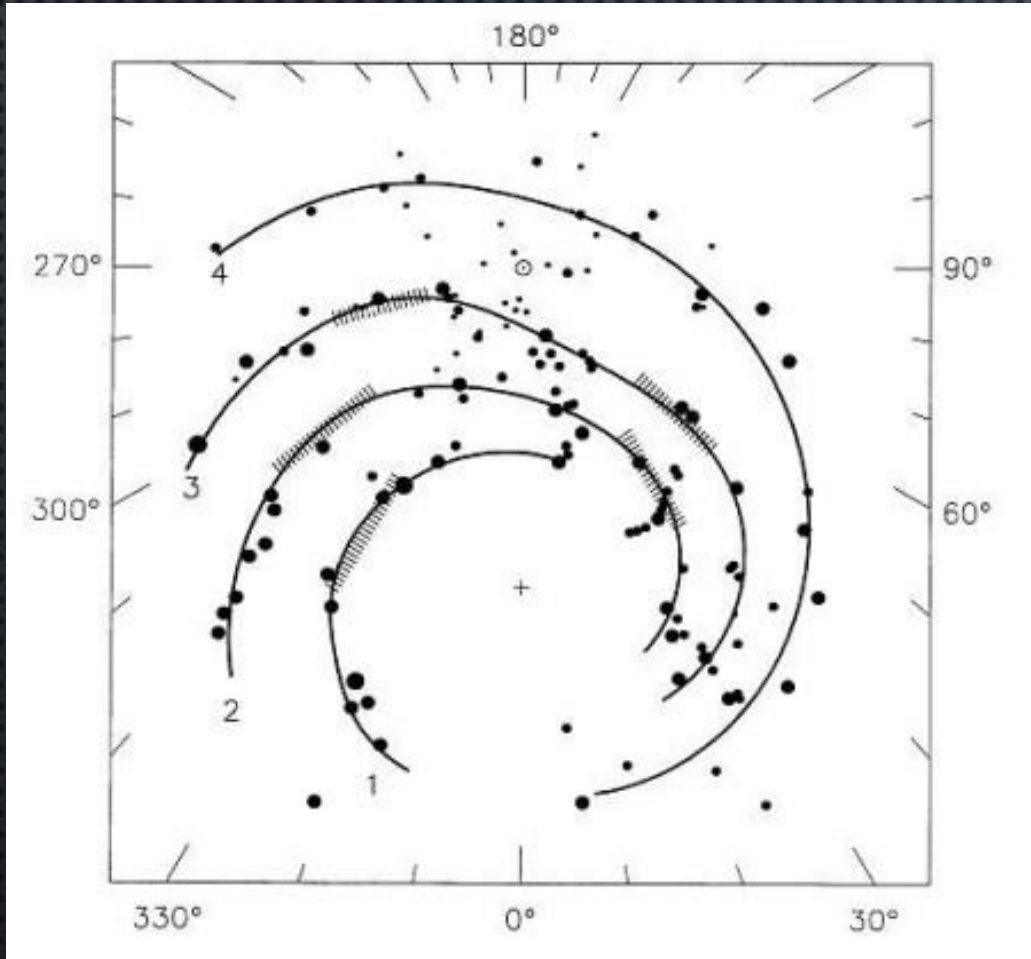
$$\Phi_C = -\frac{GM_{C_1}}{\sqrt{r^2 + r_{C_1}^2}} - \frac{GM_{C_2}}{\sqrt{r^2 + r_{C_2}^2}}$$

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

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



# ОБЛАКА ВОДОРОДА И СПИРАЛИ

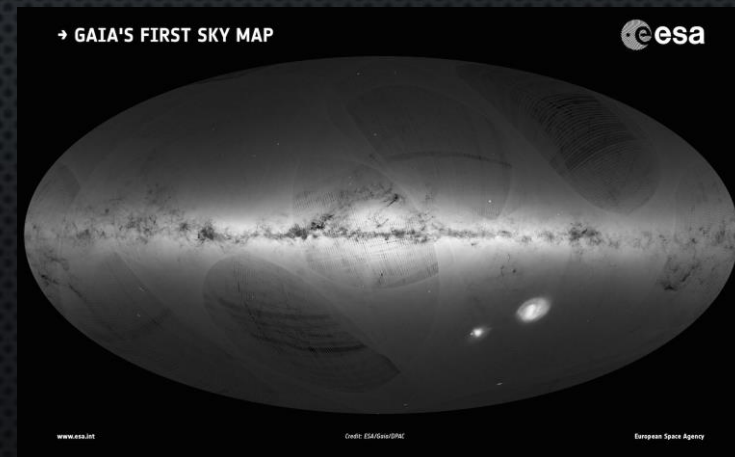


Расстояние Солнца от центра Галактики 8.2-8.5 кпк.  
Скорость вращения на солнечном радиусе 230-250 км/с.

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

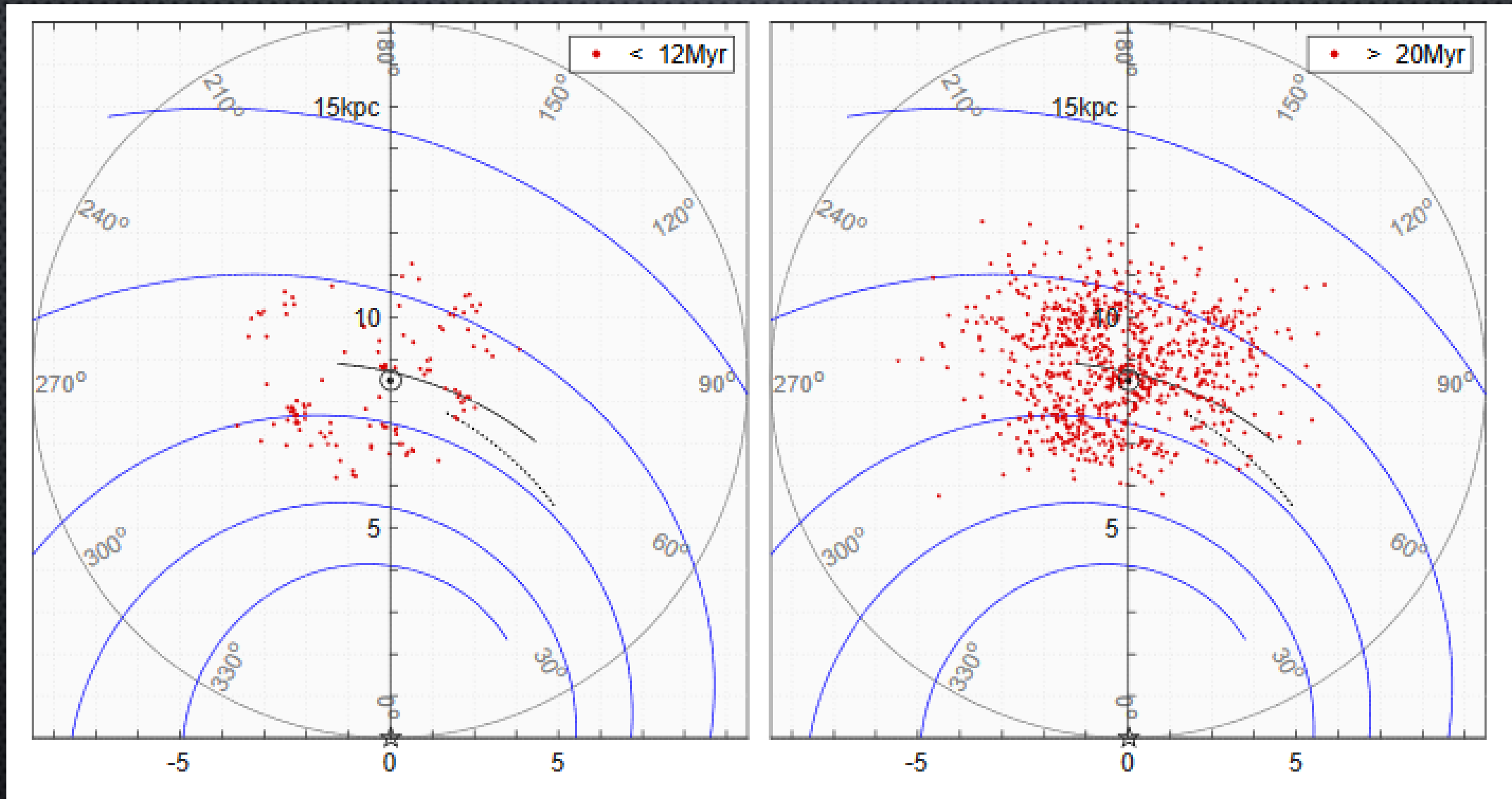
На данный момент у нас нет точных  
данных о спиральных ветвях.

Данные спутника GAIA должны дать  
ответ о структуре Галактики.





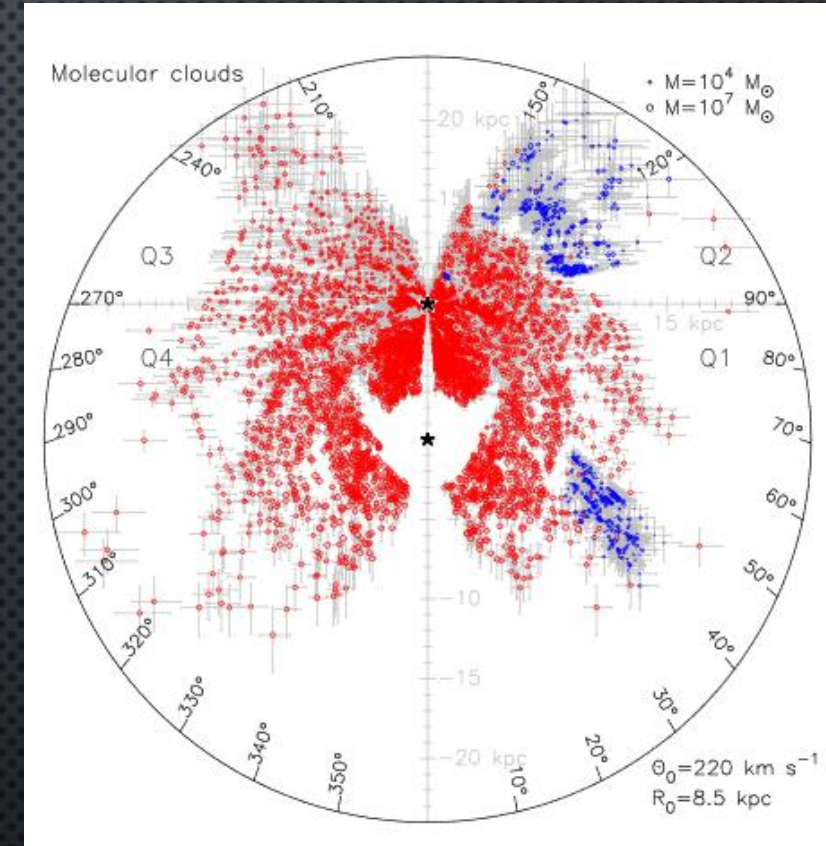
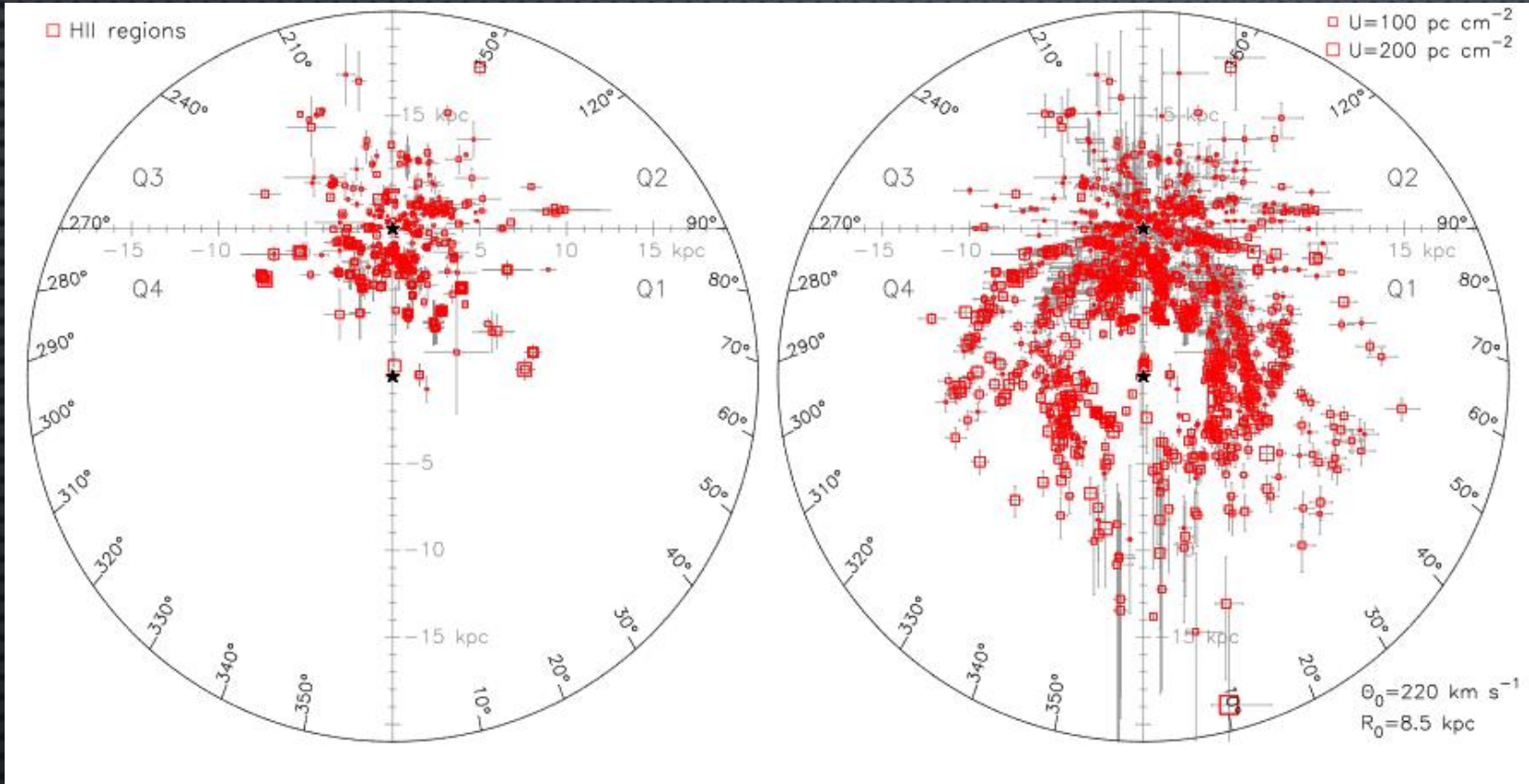
# МОЛОДЫЕ РАССЕЯННЫЕ СКОПЛЕНИЯ И СПИРАЛИ



1810.08819

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

# ОБЛАКА ВОДОРОДА И МОЛЕКУЛЯРНЫЕ ОБЛАКА

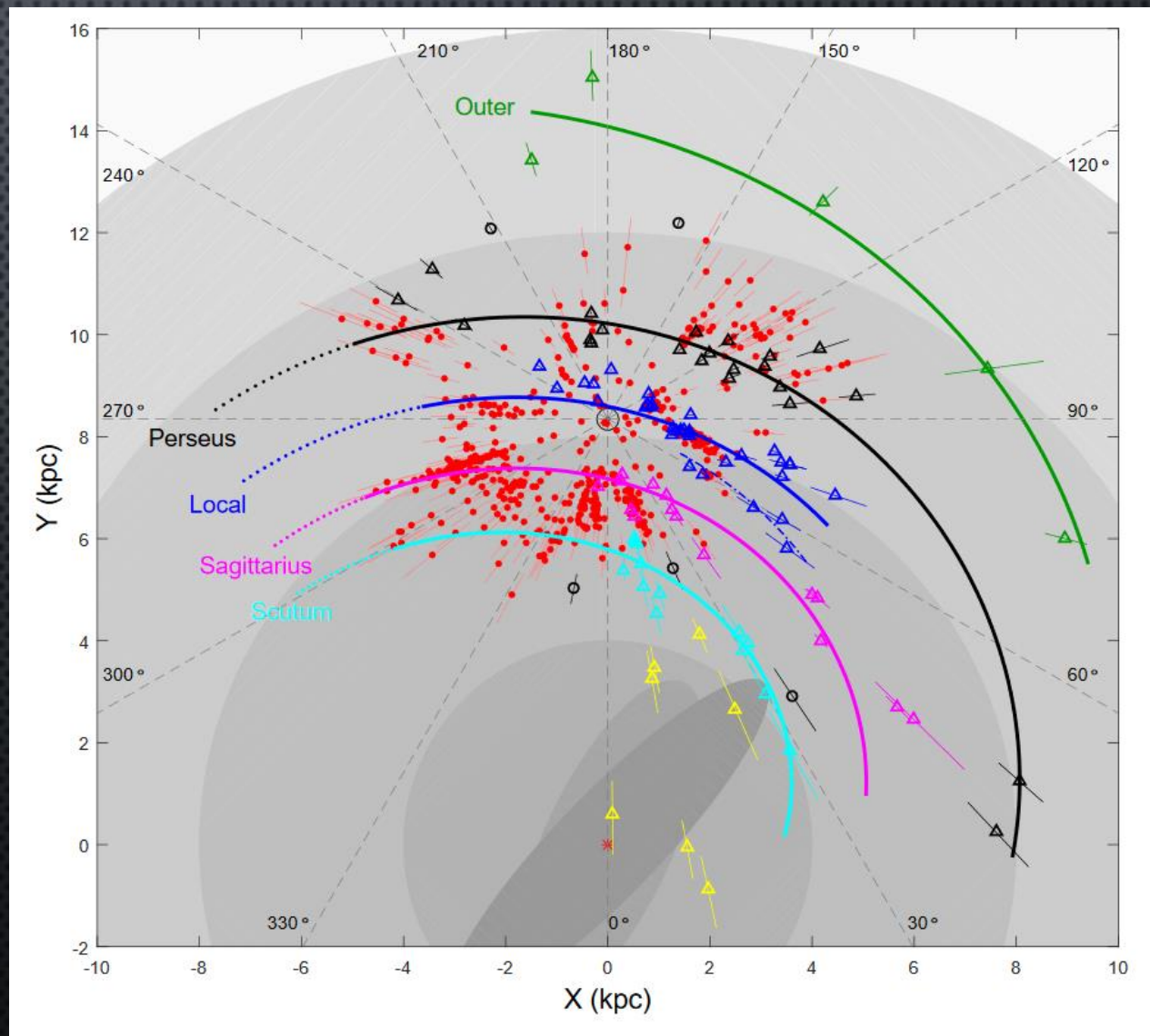


# СТРУКТУРА НАШЕЙ ГАЛАКТИКИ



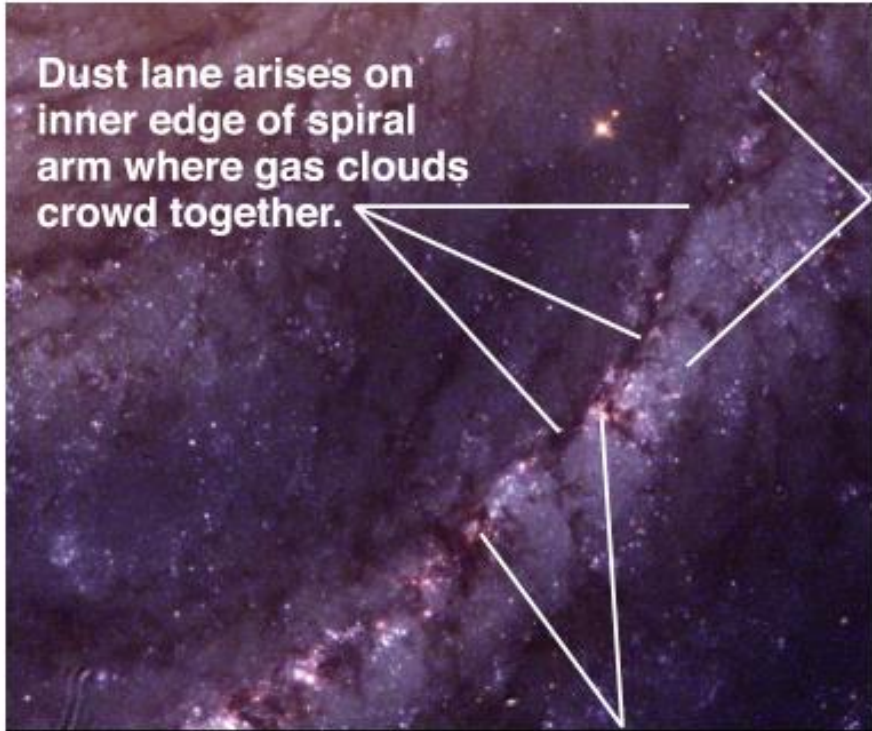
M 101

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



# РУКАВА И ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЕ

<http://cse.ssl.berkeley.edu>

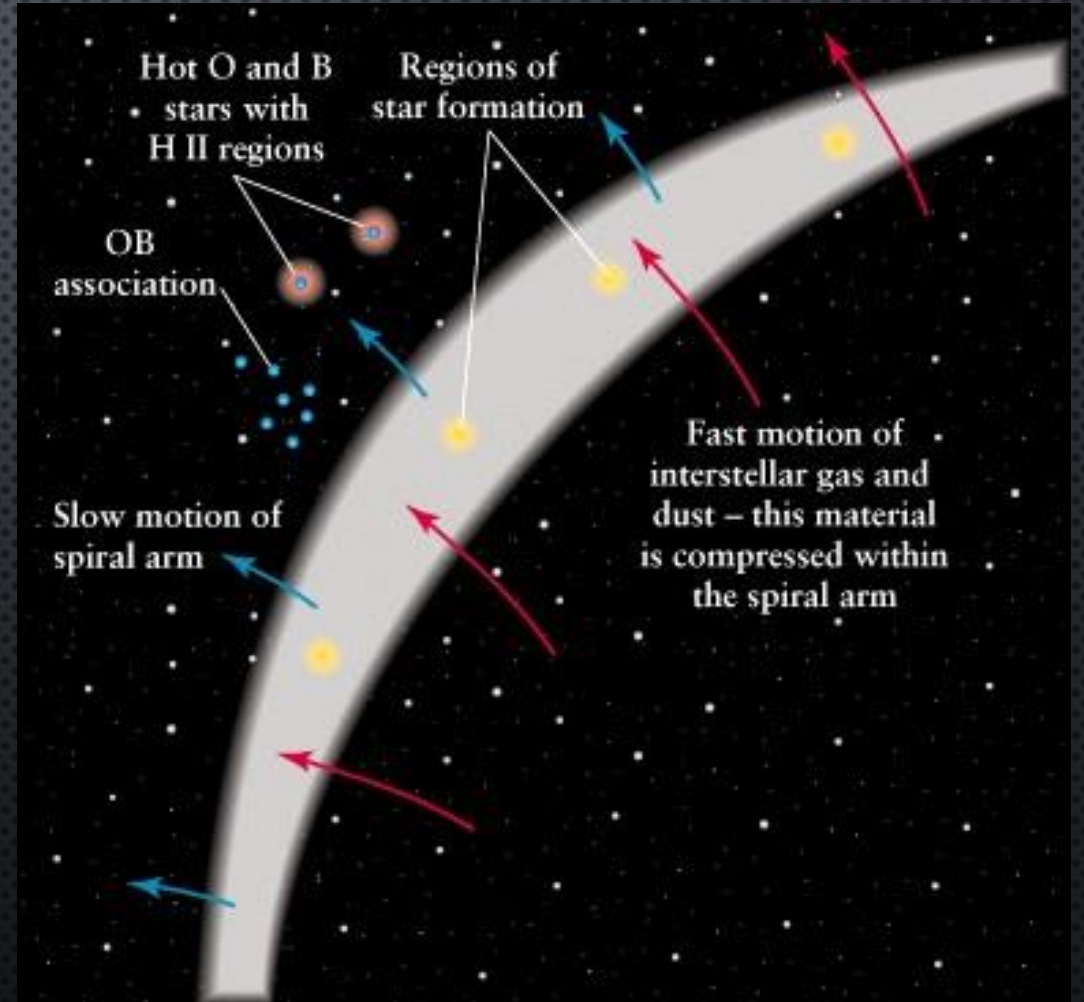


Dust lane arises on inner edge of spiral arm where gas clouds crowd together.

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

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

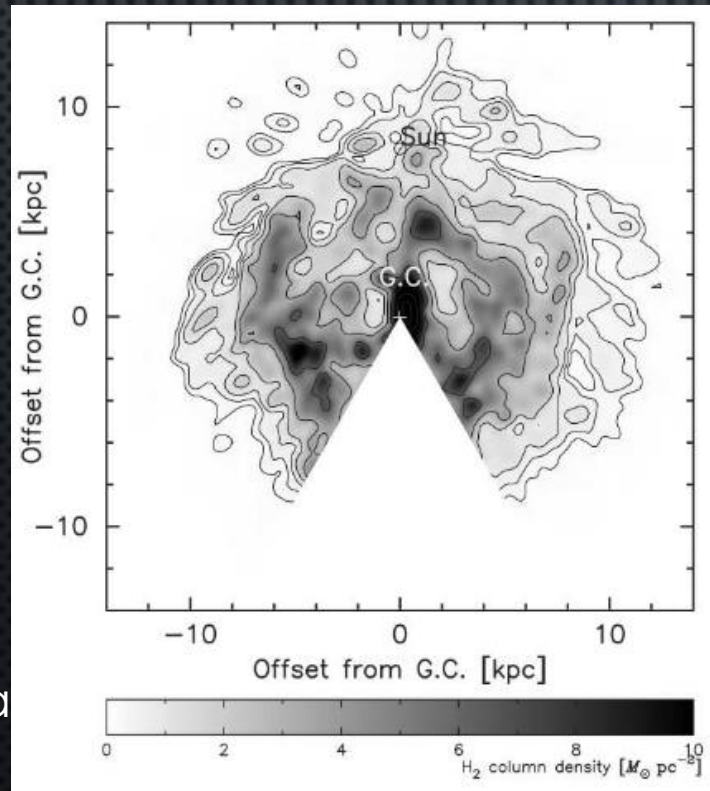
Copyright © Addison Wesley



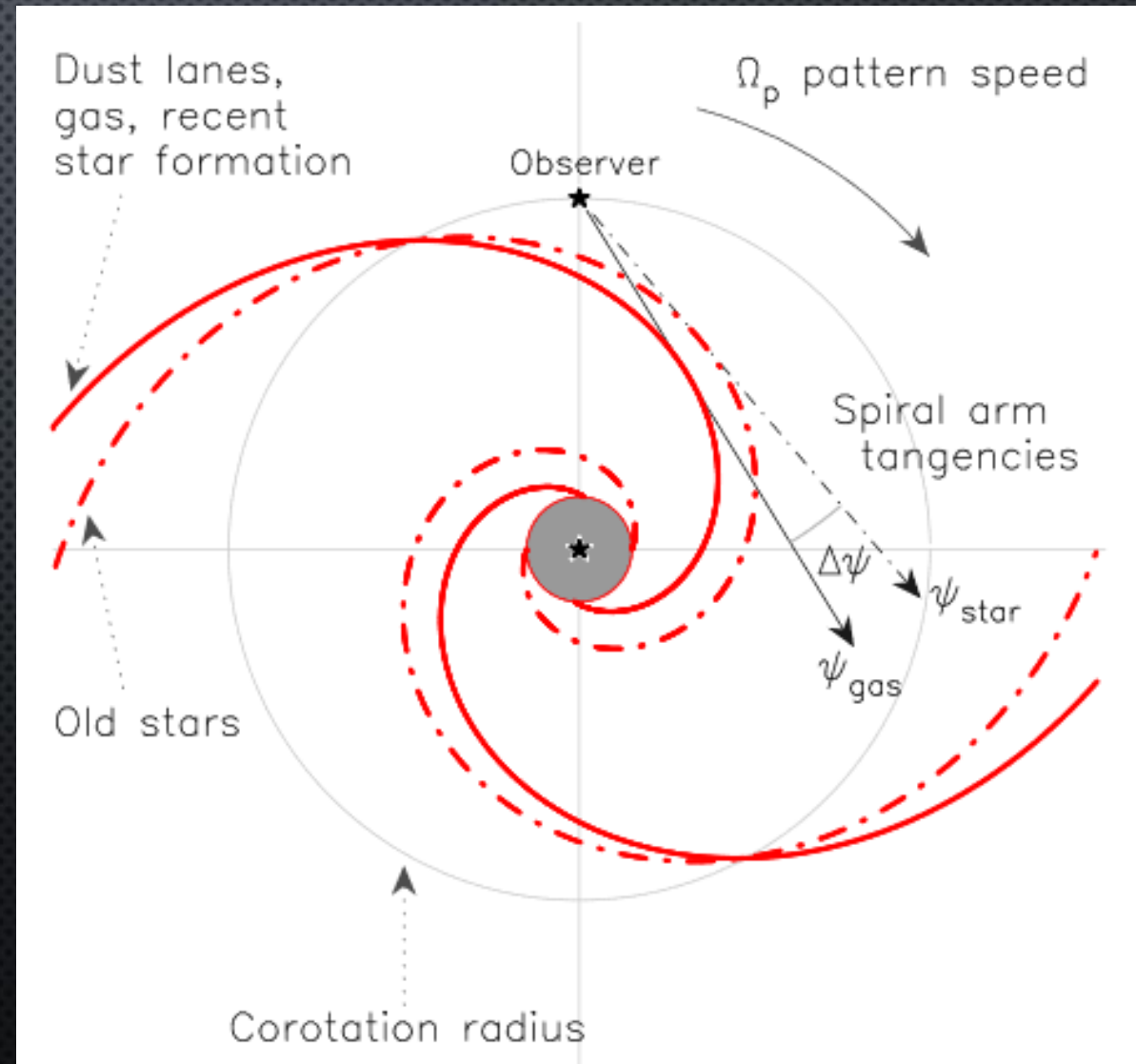
<http://frigg.physastro.mnsu.edu>

# ВРАЩЕНИЕ СПИРАЛЕЙ И ЗВЕЗД

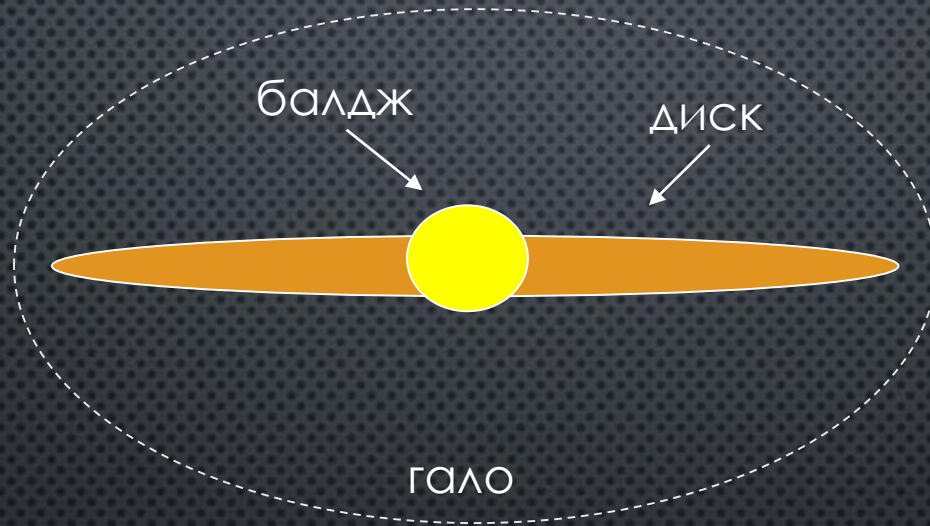
Вращение спирального узора происходит с одной и той же угловой скоростью на разных расстояниях от центра. Скорость звезд выше вблизи центральной части. Скорости сравниваются на радиусе коротации.



Молекулярные облака в Галактике.



# МЕЖЗВЕЗДНАЯ СРЕДА

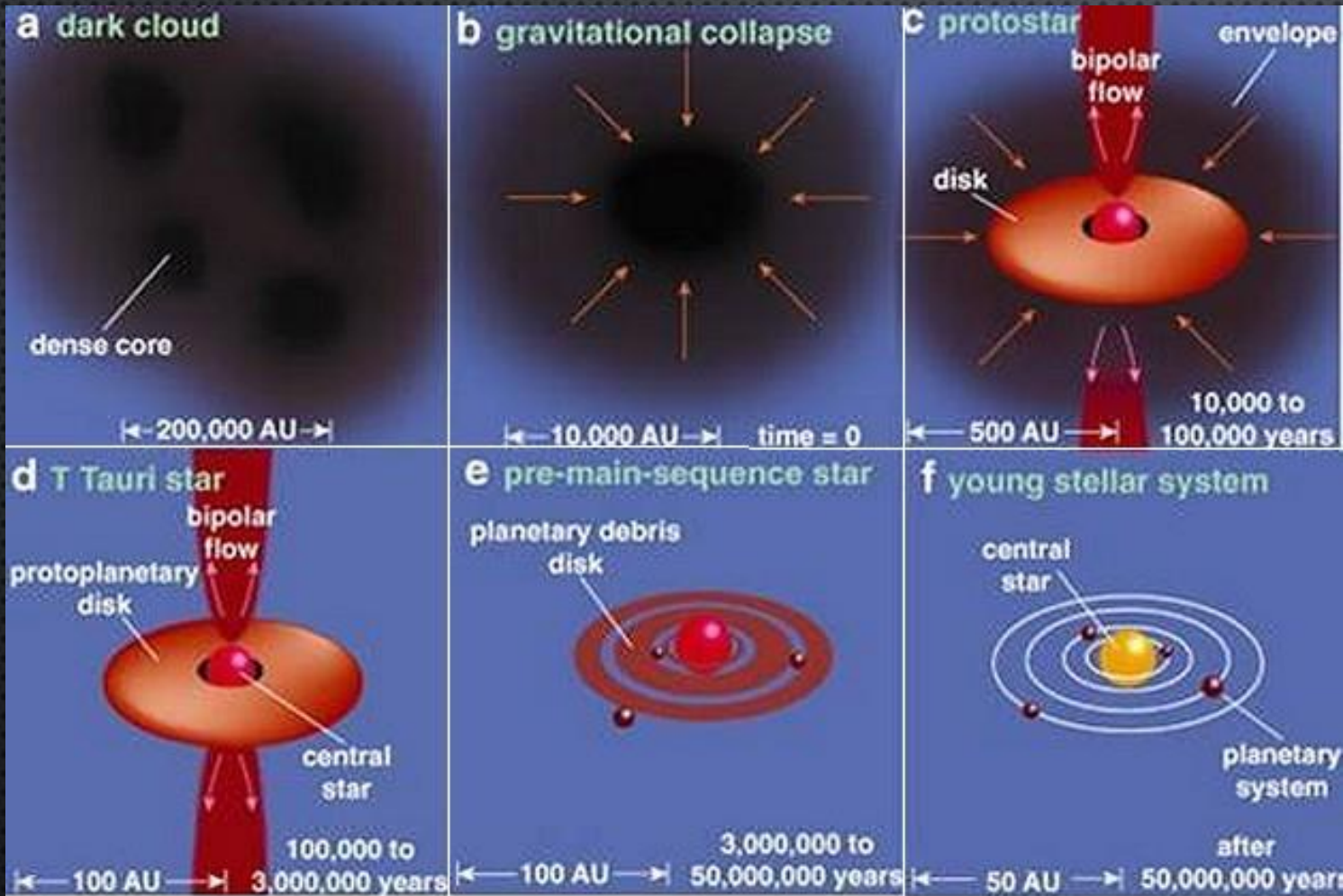


Межзвездная среда концентрируется к плоскости Галактики. Хорошо виден вклад пыли в поглощение света звезд.

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



# 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.

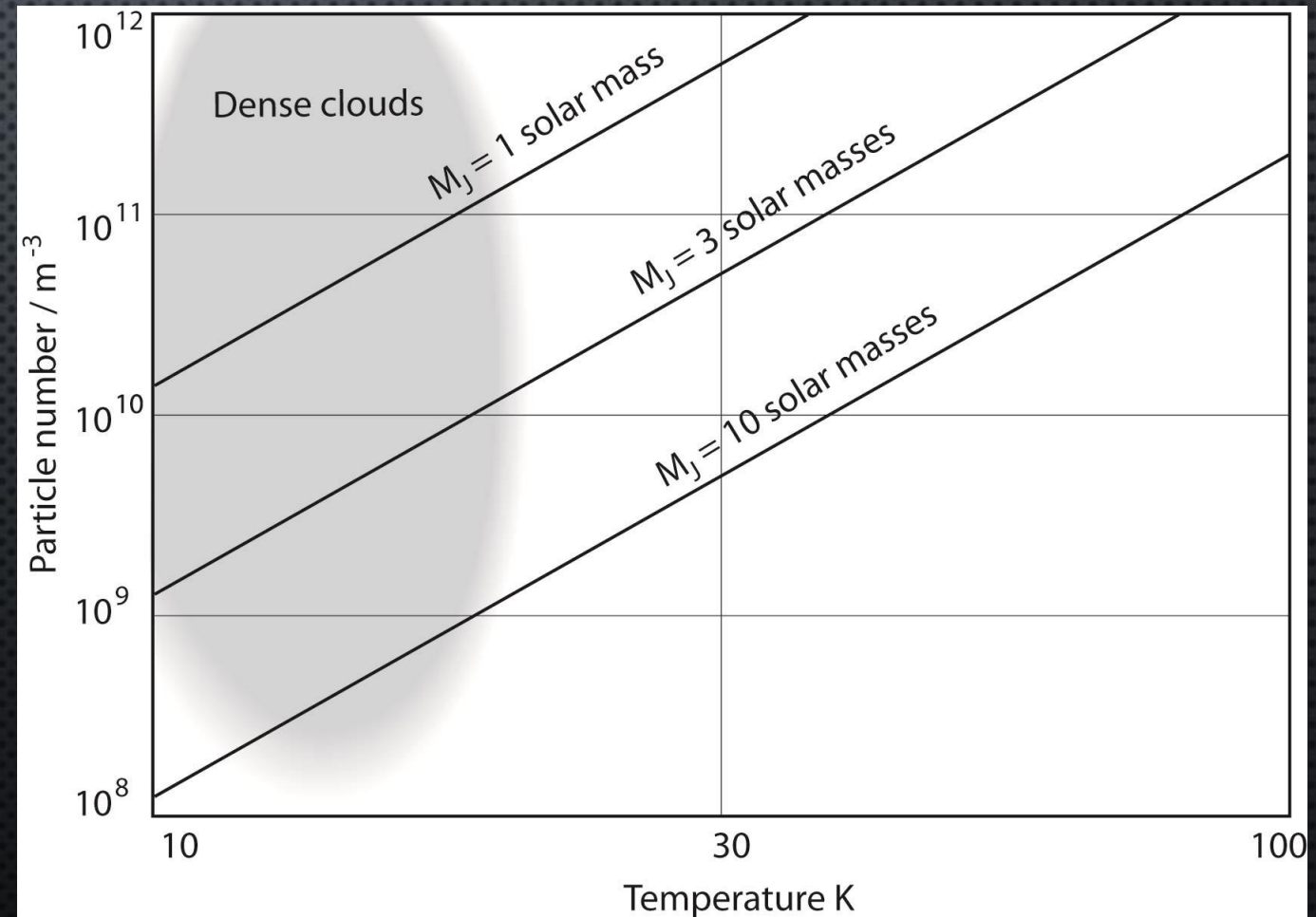
В настоящее время мы наблюдаем объекты на всех стадиях образования звезд и планетных систем.

# МАССА ДЖИНСА

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

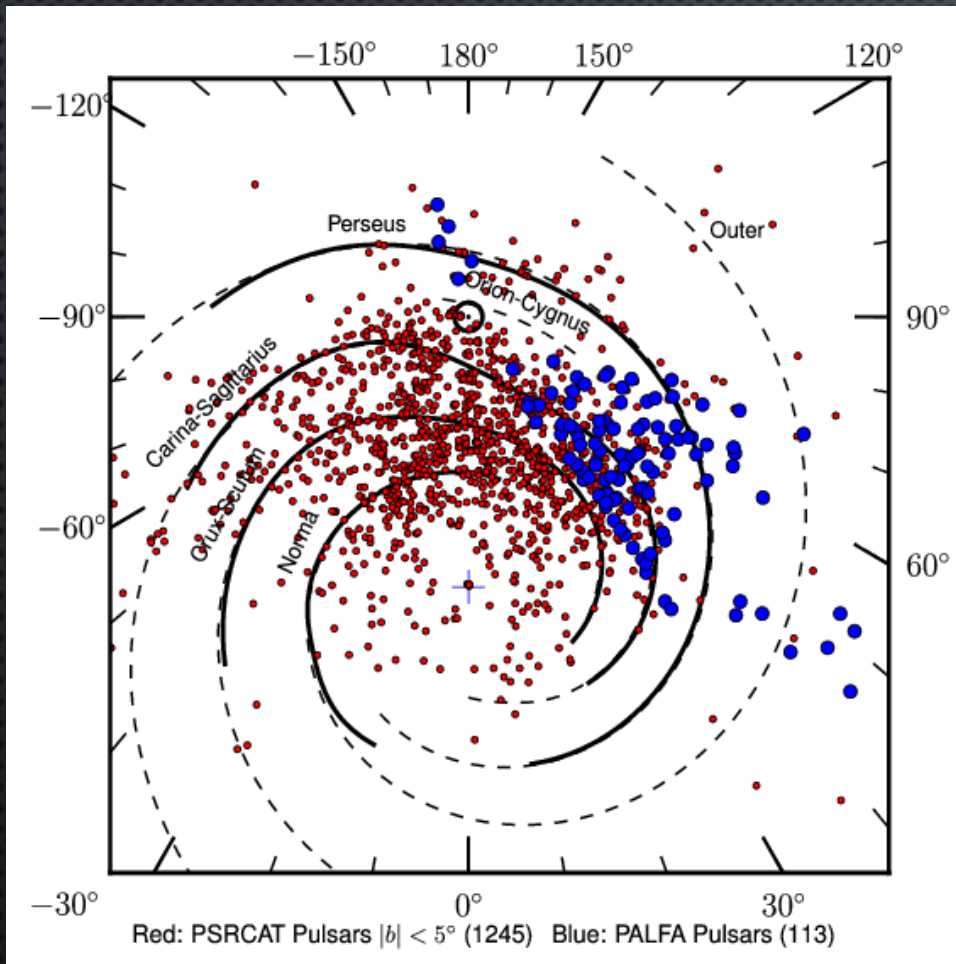
Для данной температуры и плотности существует критическая масса – масса Джинса.

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

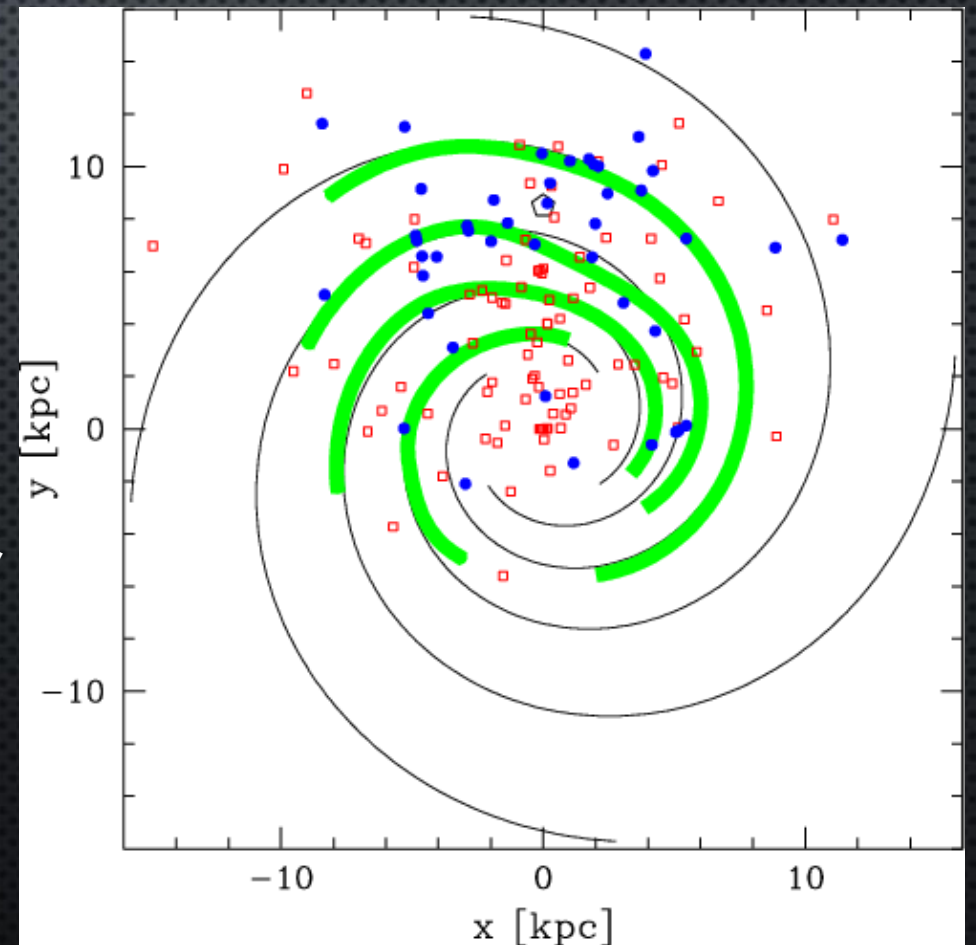




# НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ГАЛАКТИКЕ



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

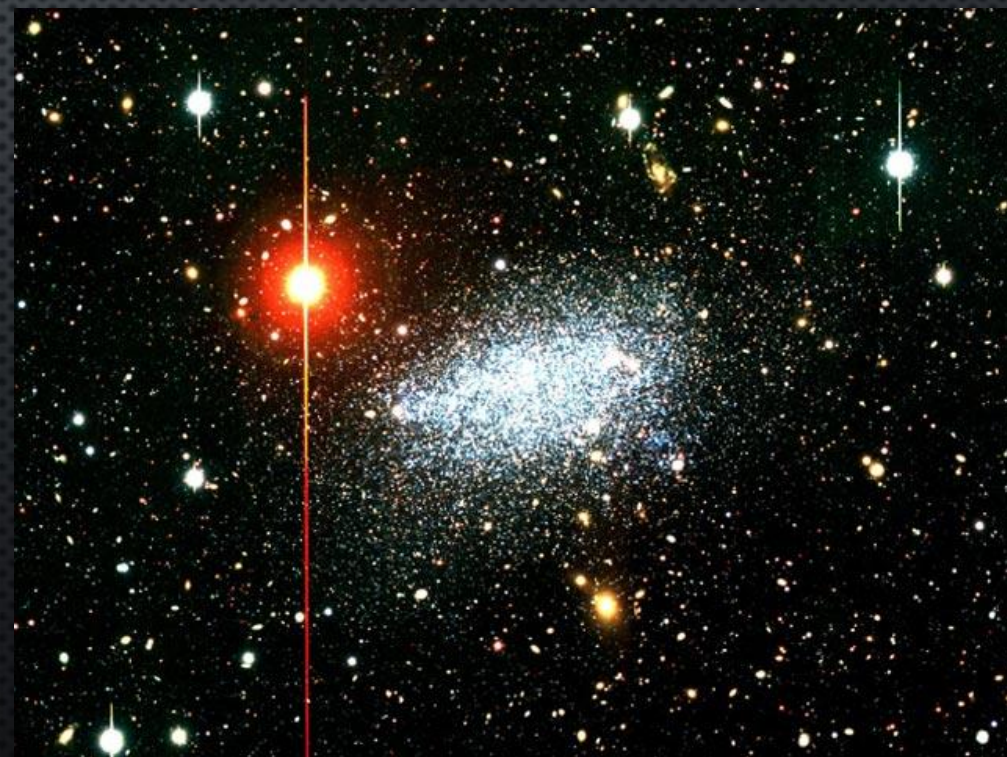


Взаимодействующие

# 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»

Все туманности  
находятся  
внутри нашей  
Галактики



Гебер Кертис



Харлоу Шепли

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

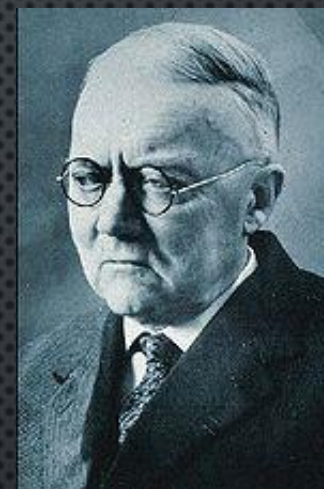
Ответ дали  
наблюдения.

# 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.

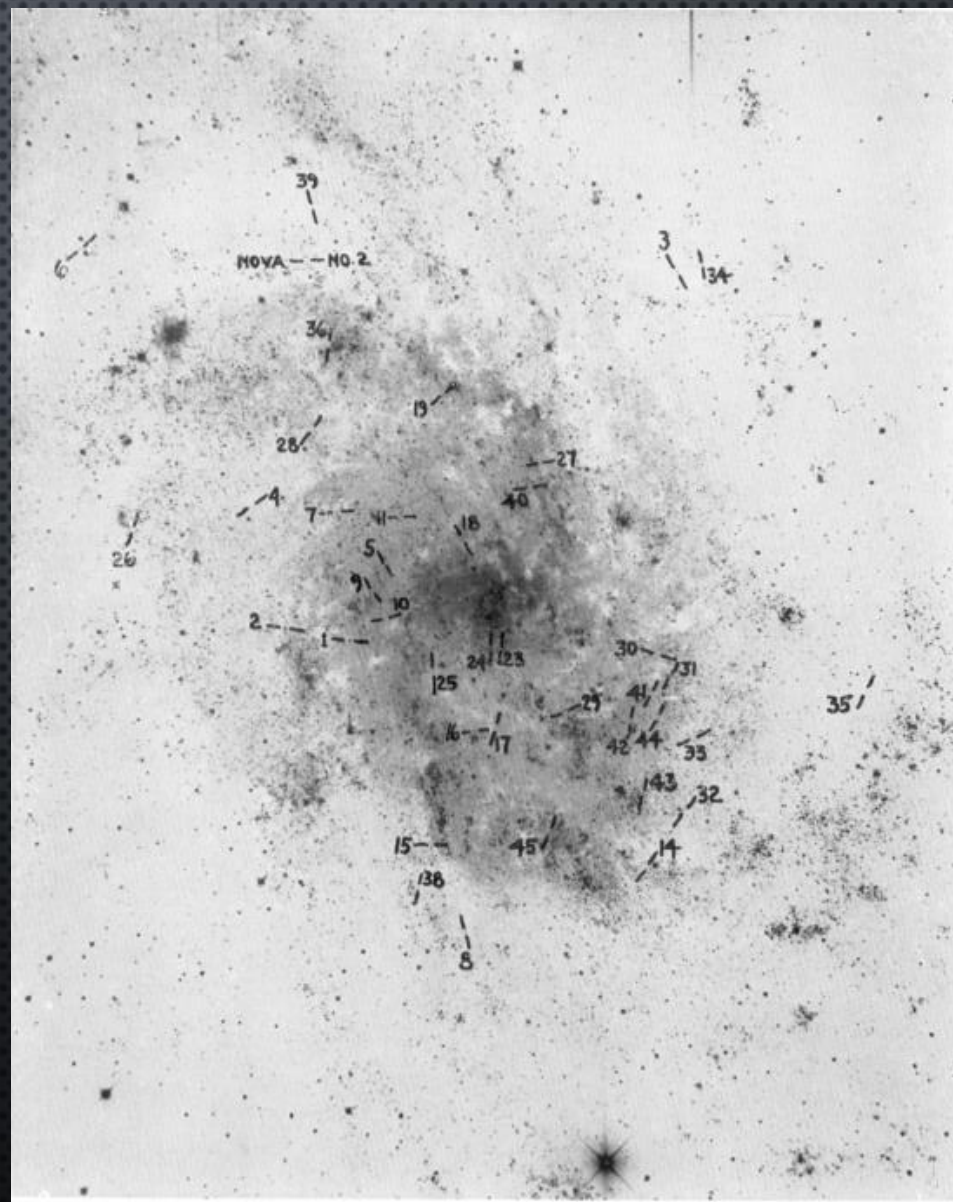
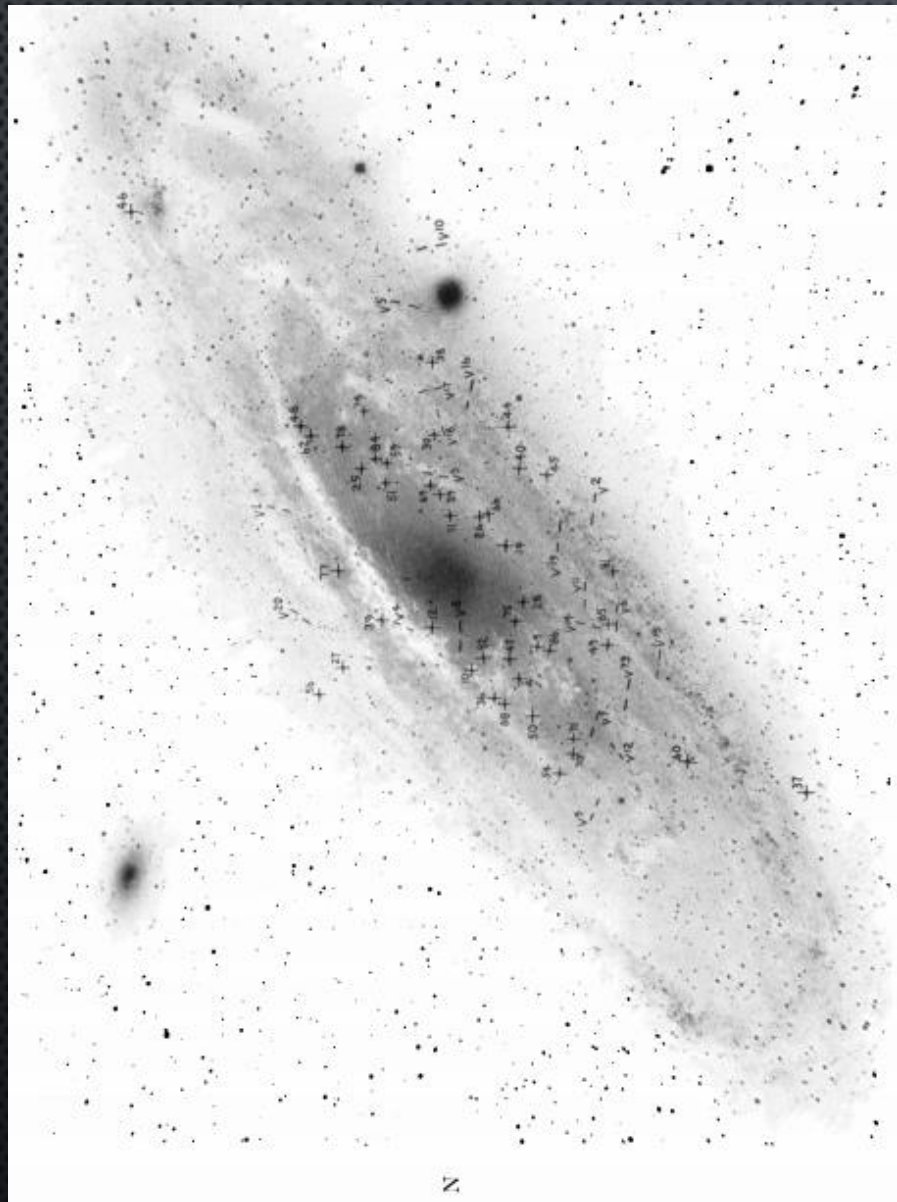


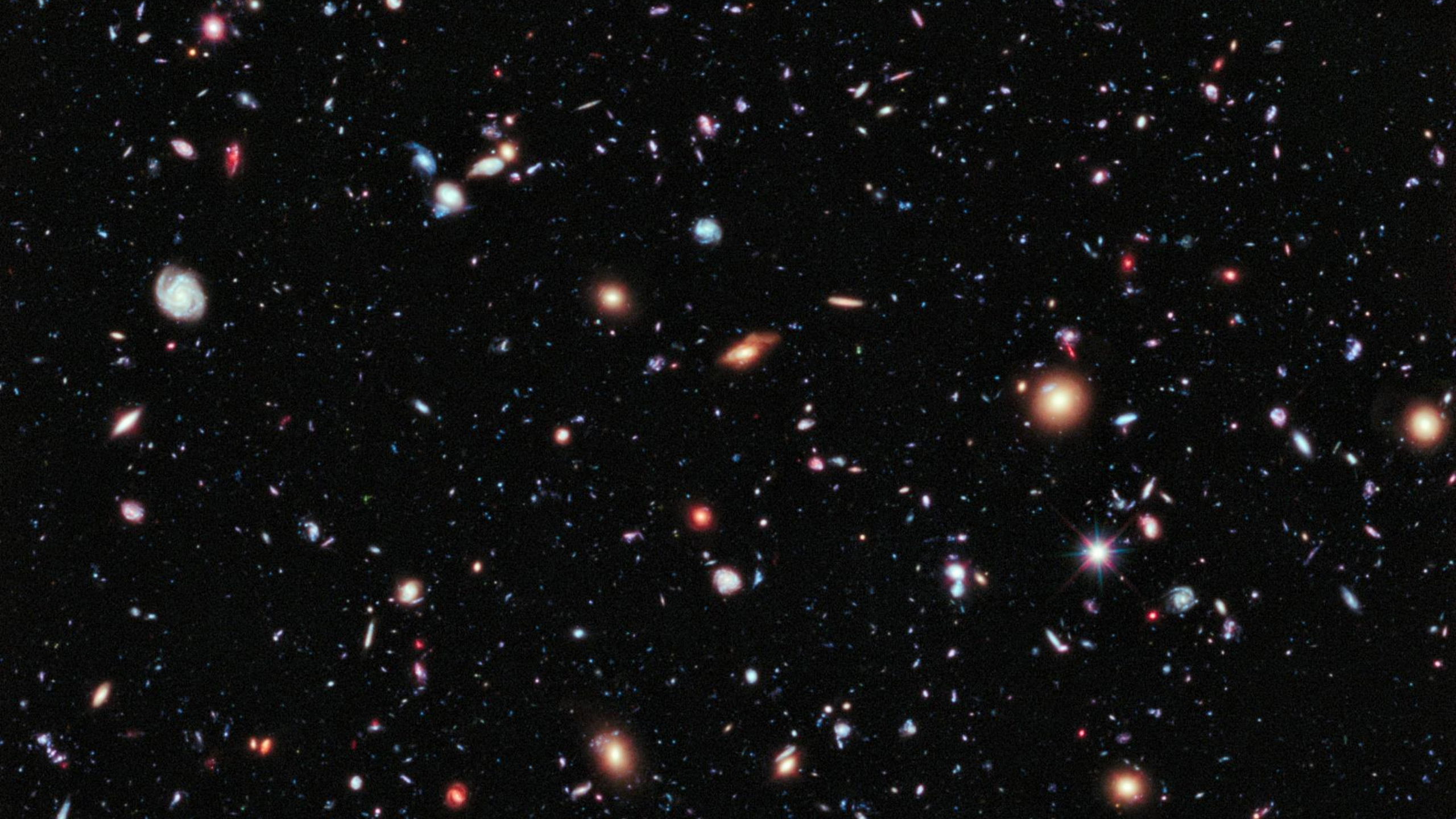
Эрнст Эпик

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».

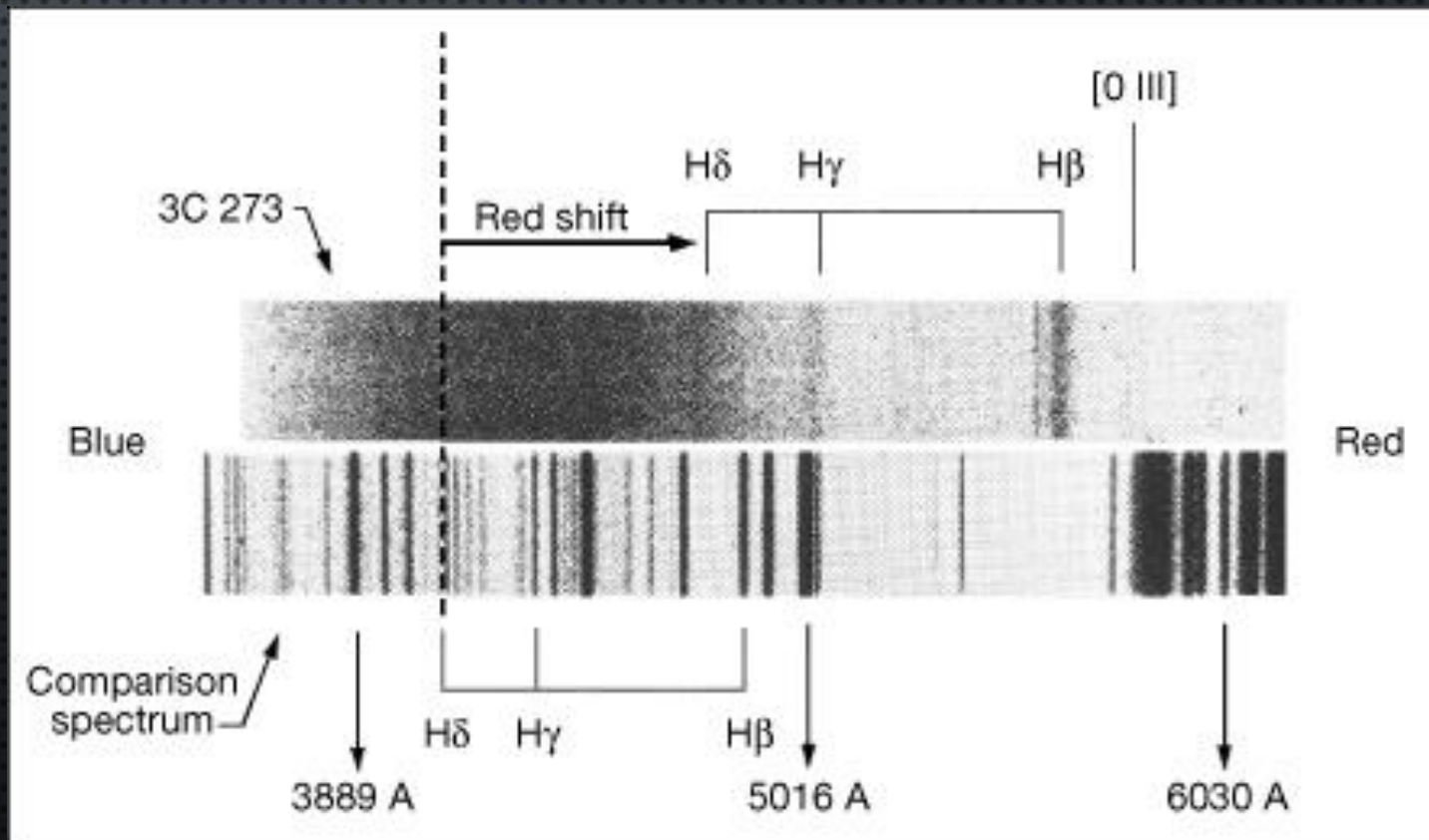
# РАЗГАДКА



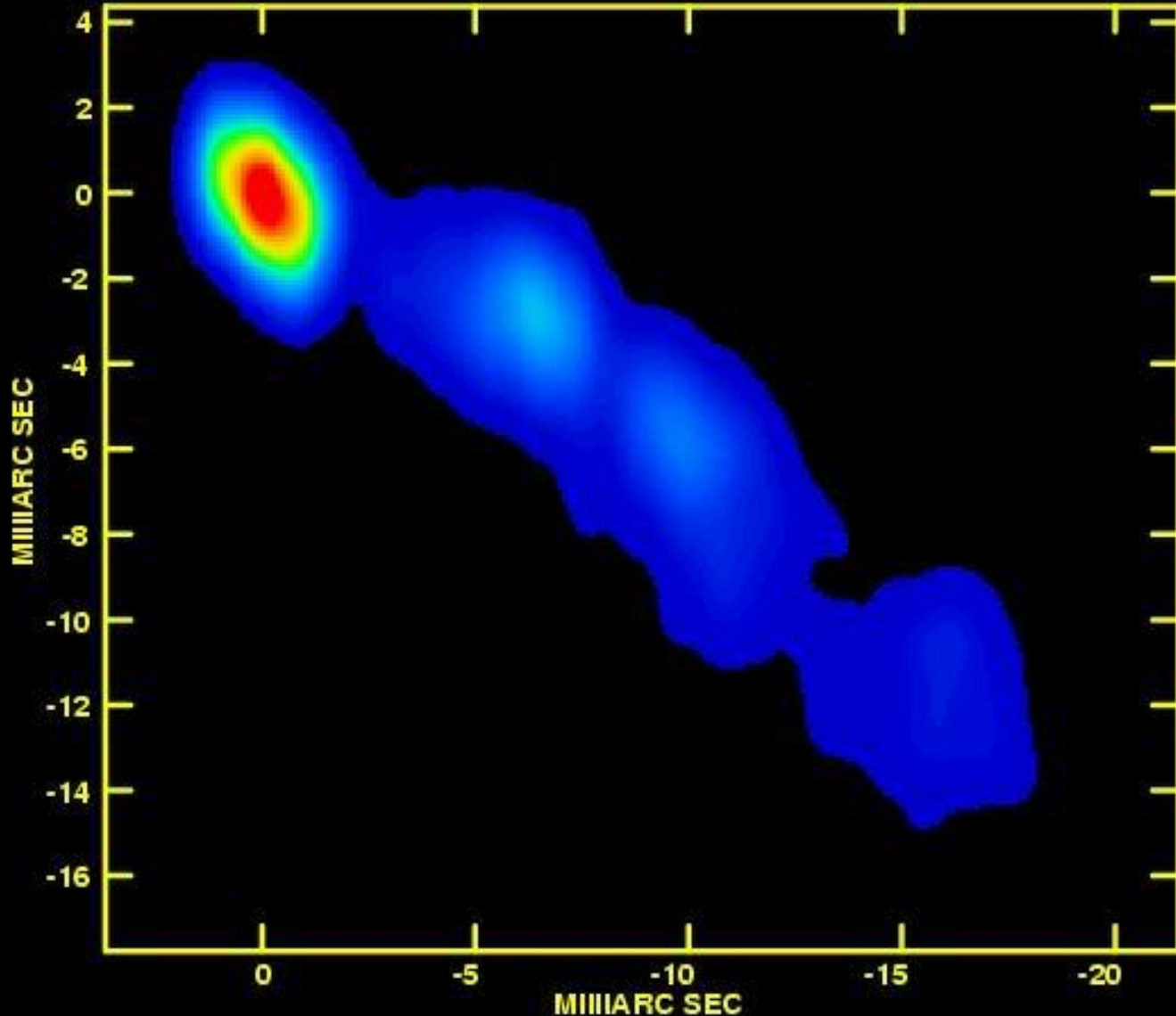
© Copyright California Institute of Technology. All rights reserved. Commercial use or modification of this material is prohibited.

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



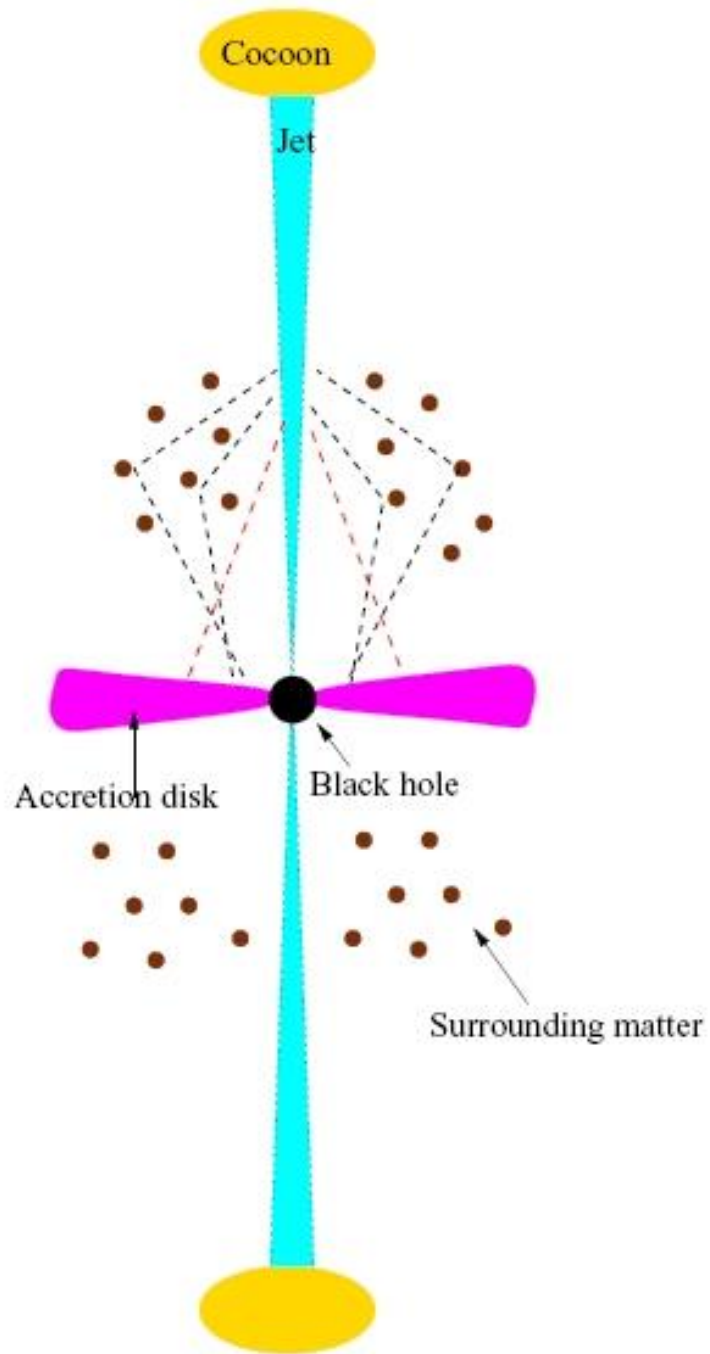
# ПРИРОДА КВАЗАРА



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

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

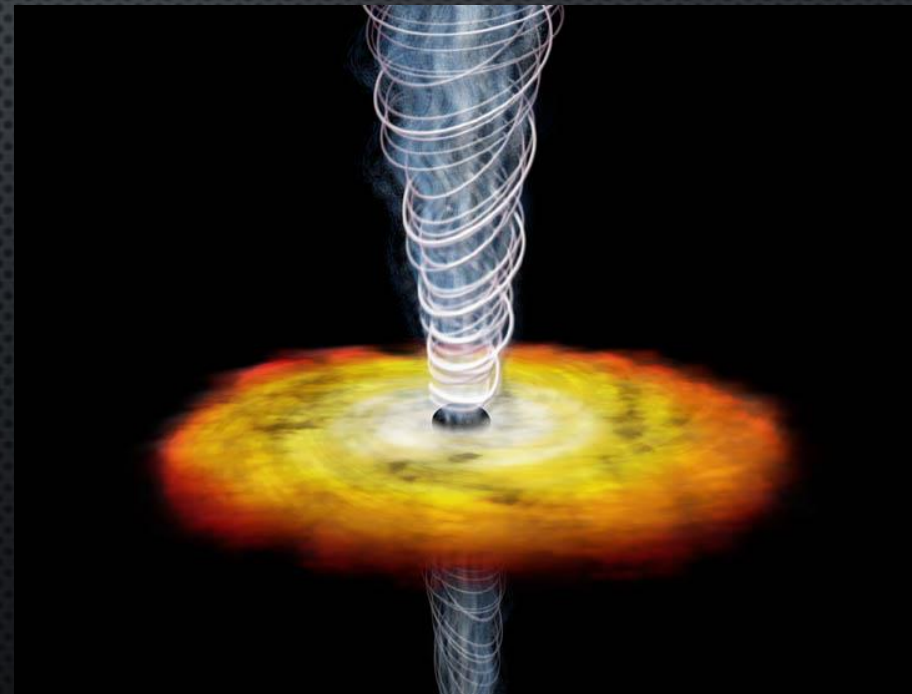
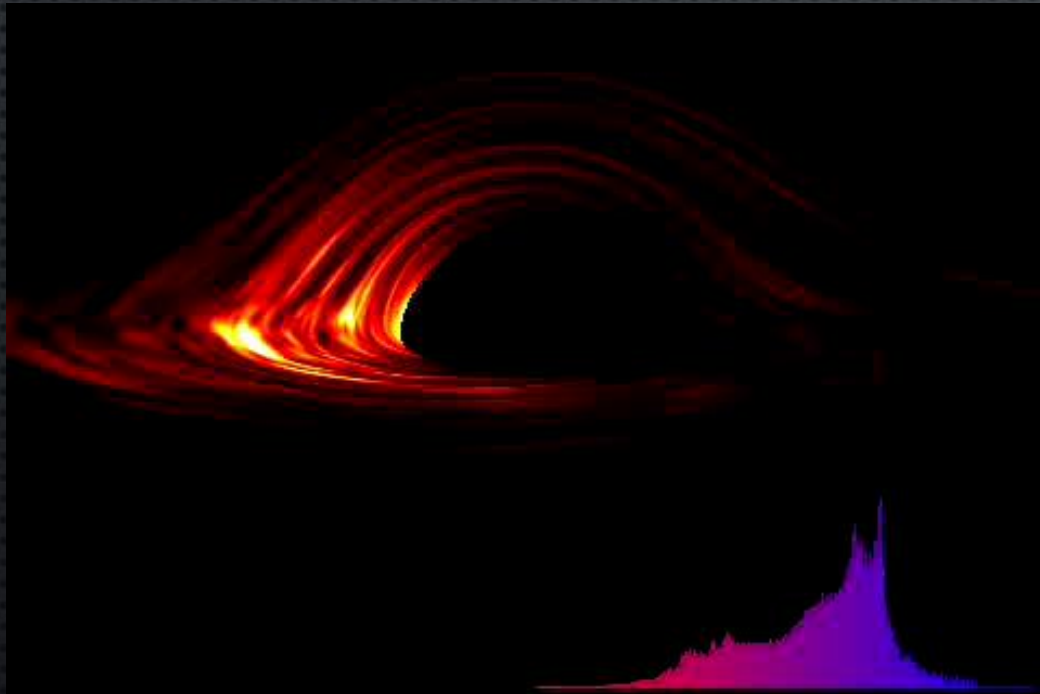


# ЧЕМ ВАЖНО ОТКРЫТИЕ КВАЗАРОВ?

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

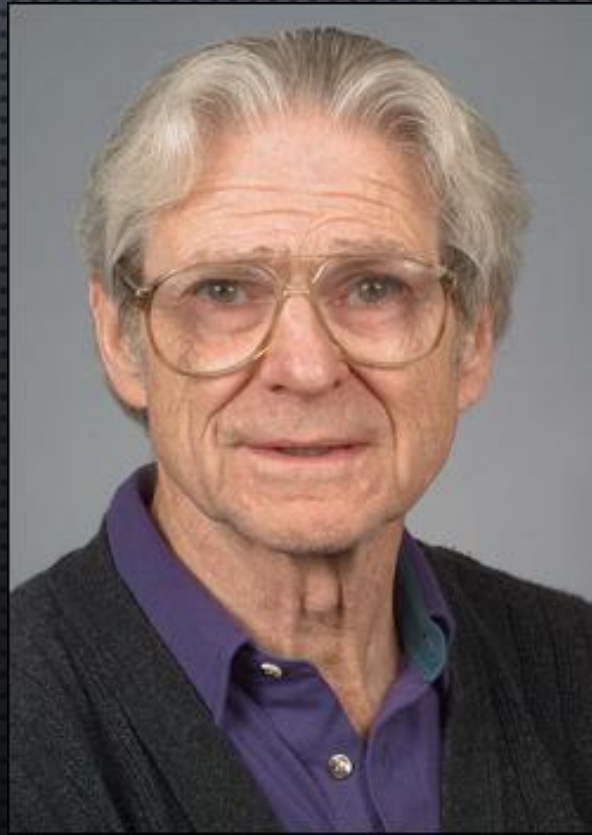
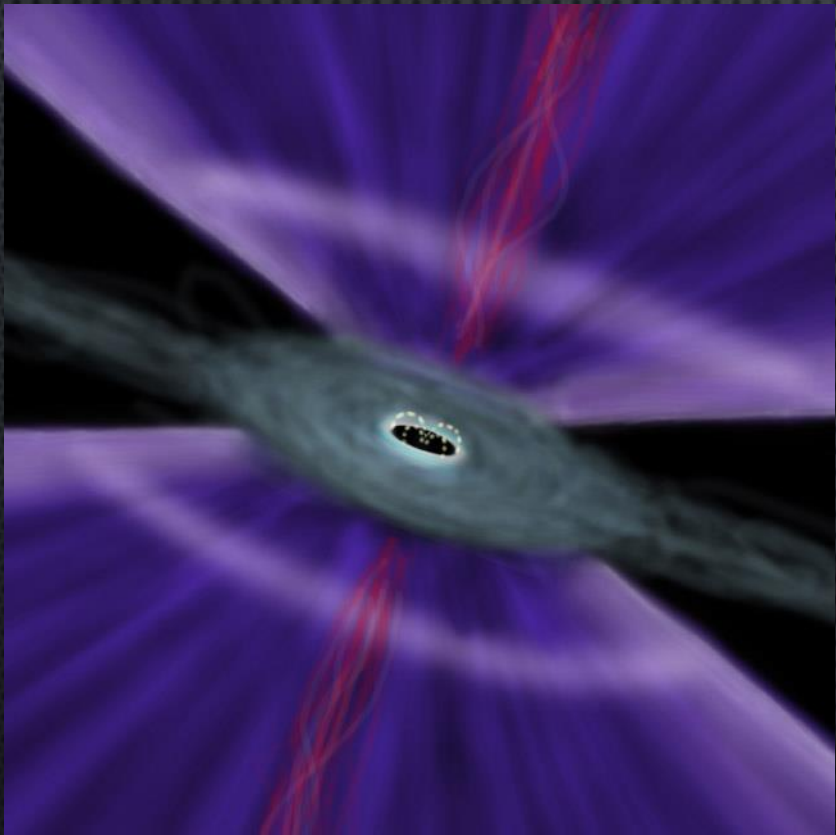
Во-вторых, возникла необходимость объяснять, как же они работают.

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\*

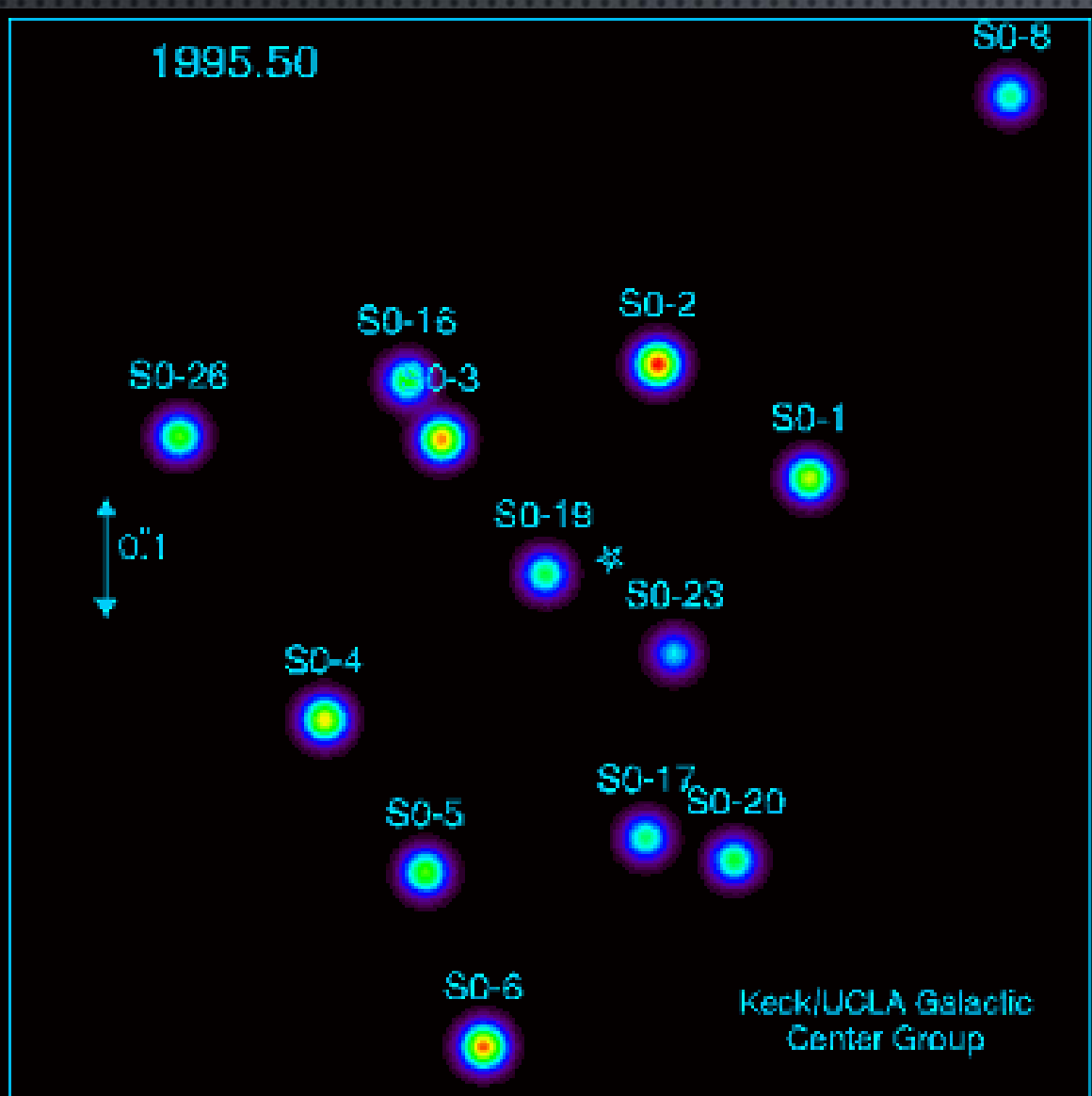
1992

10 light days



Звездные орбиты с 1992 по 2007

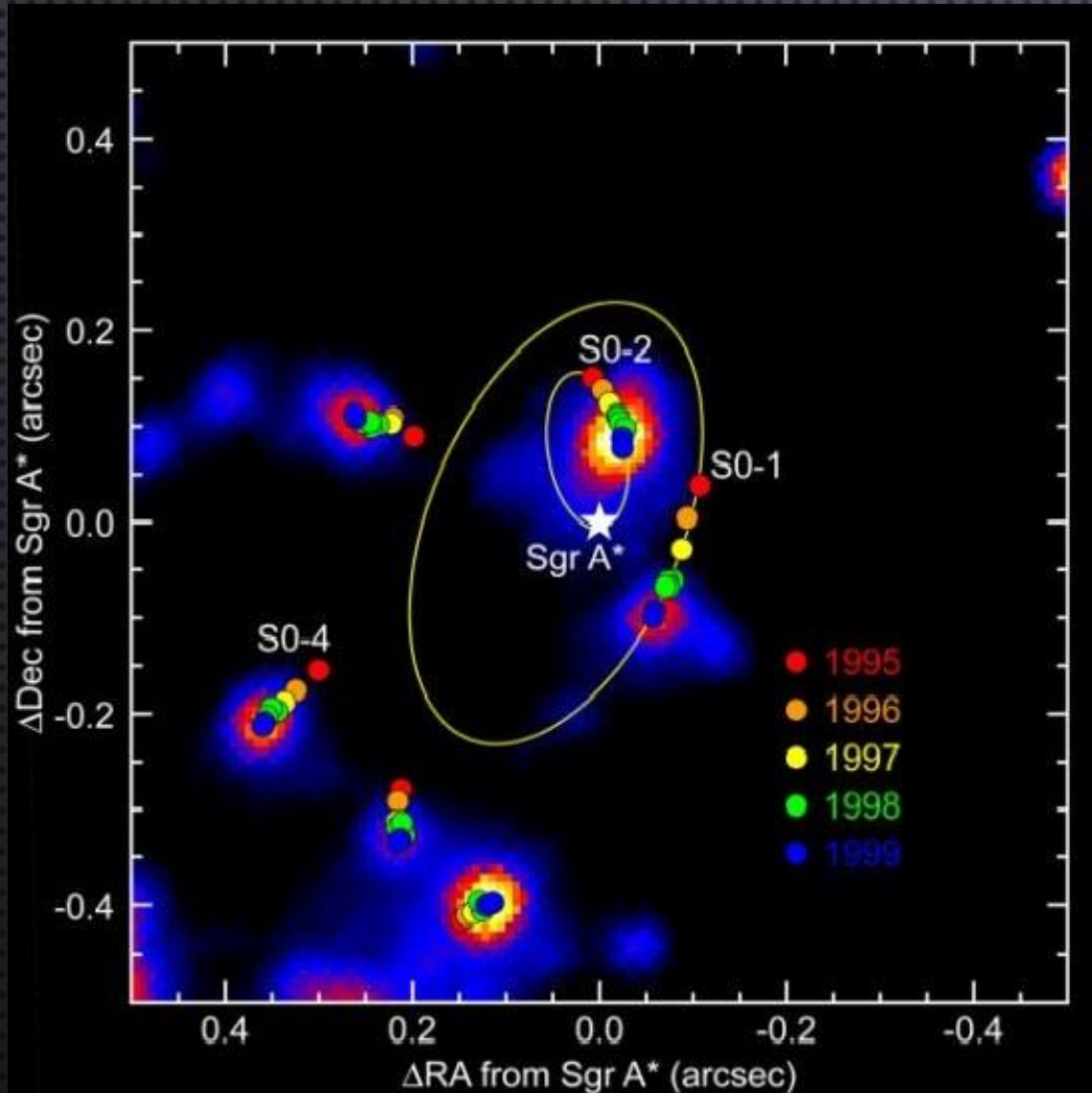
# ... И ОНА СТАНОВИТСЯ ВСЕ БОЛЕЕ ДОСТОВЕРНОЙ



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.

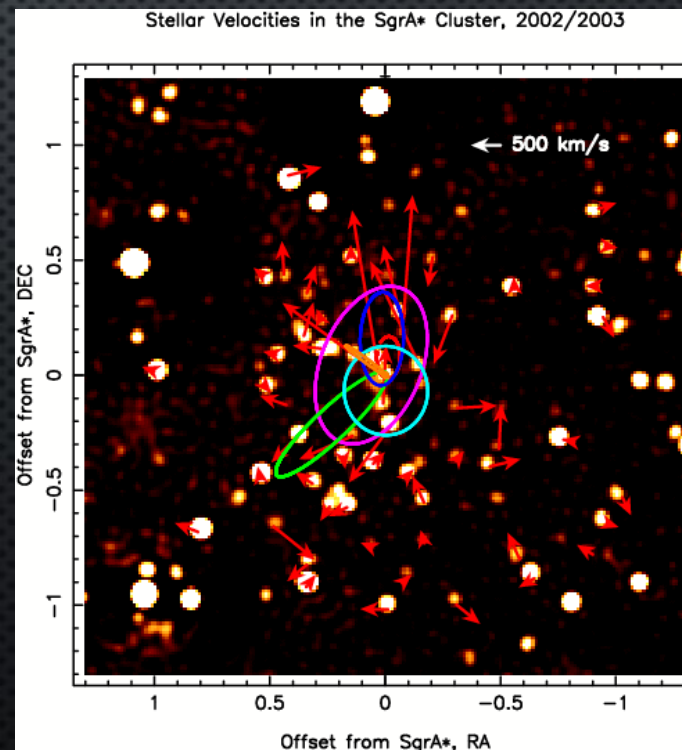
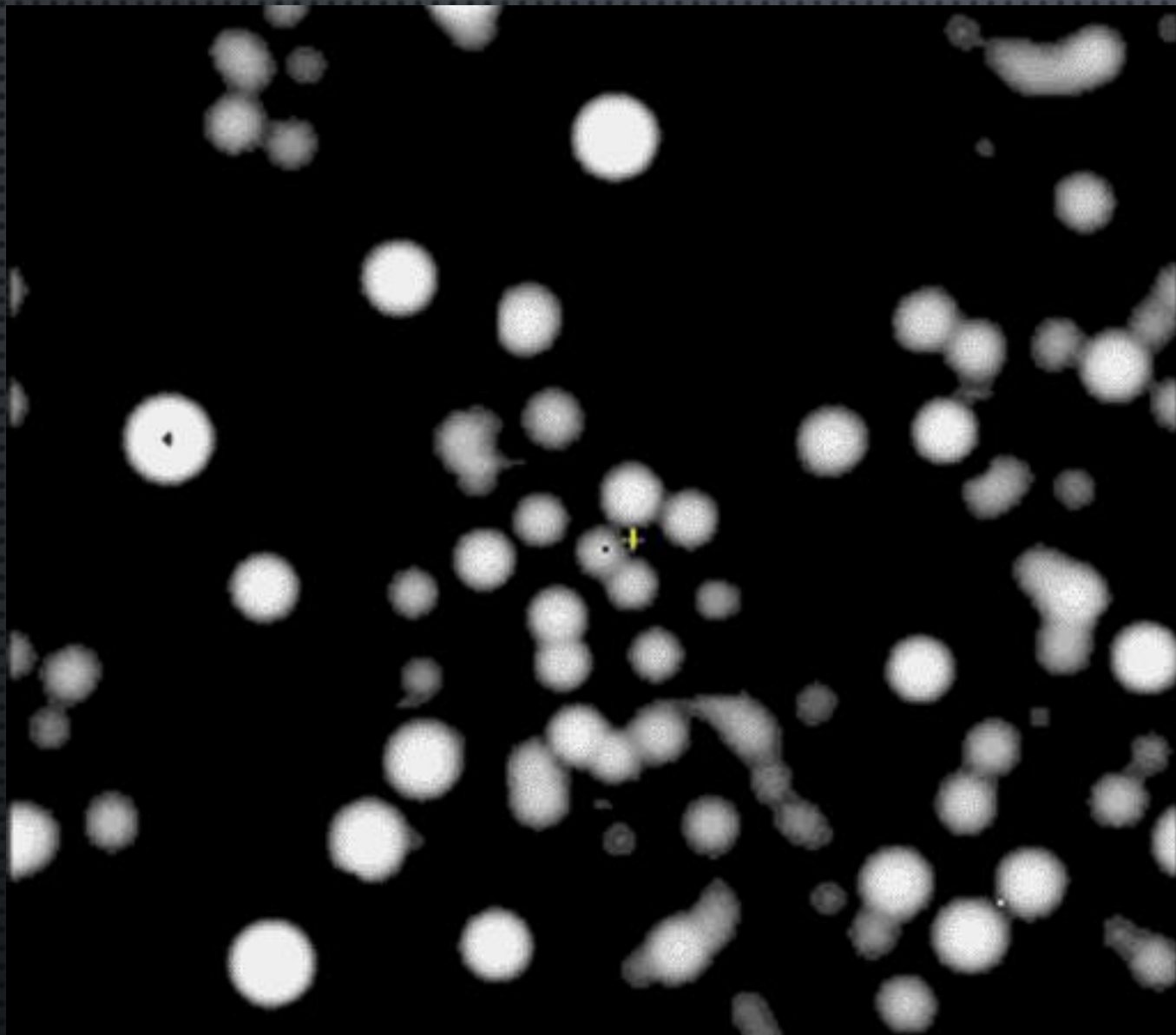
# ЗВЕЗДНАЯ ДИНАМИКА ВОКРУГ SGR A\*

С высокой точностью мы знаем динамику внутри центральной угловой секунды.

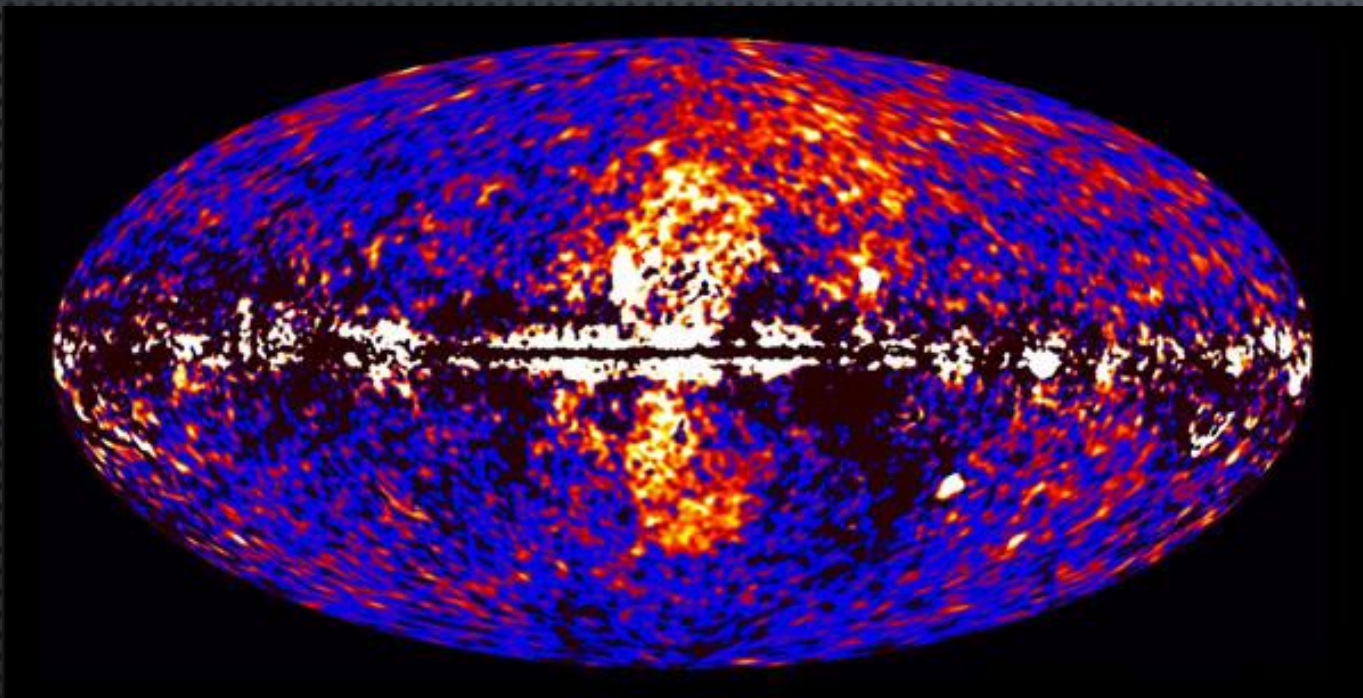
Оценка массы ЧД  $\sim 4 \cdot 10^6 M_{\odot}$

Было бы здорово открыть радиопульсар около Sgr A\*

(APOD A. Eckart & R. Genzel)

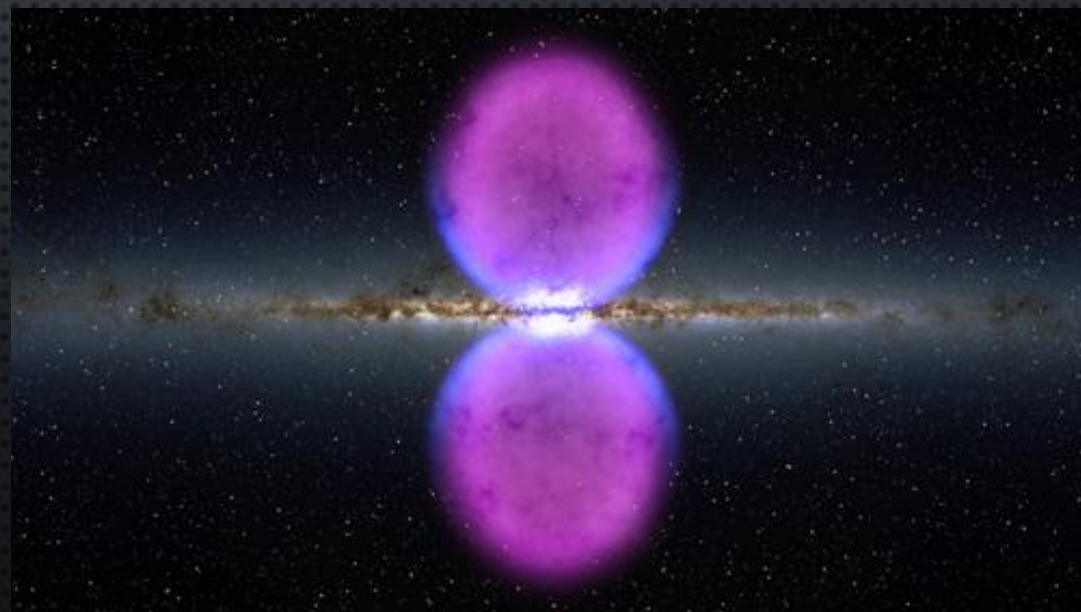


# ПУЗЫРИ ФЕРМИ



Возраст пузырей от 10 до 100 млн лет.

Активность черной дыры  
или вспышка звездообразования?

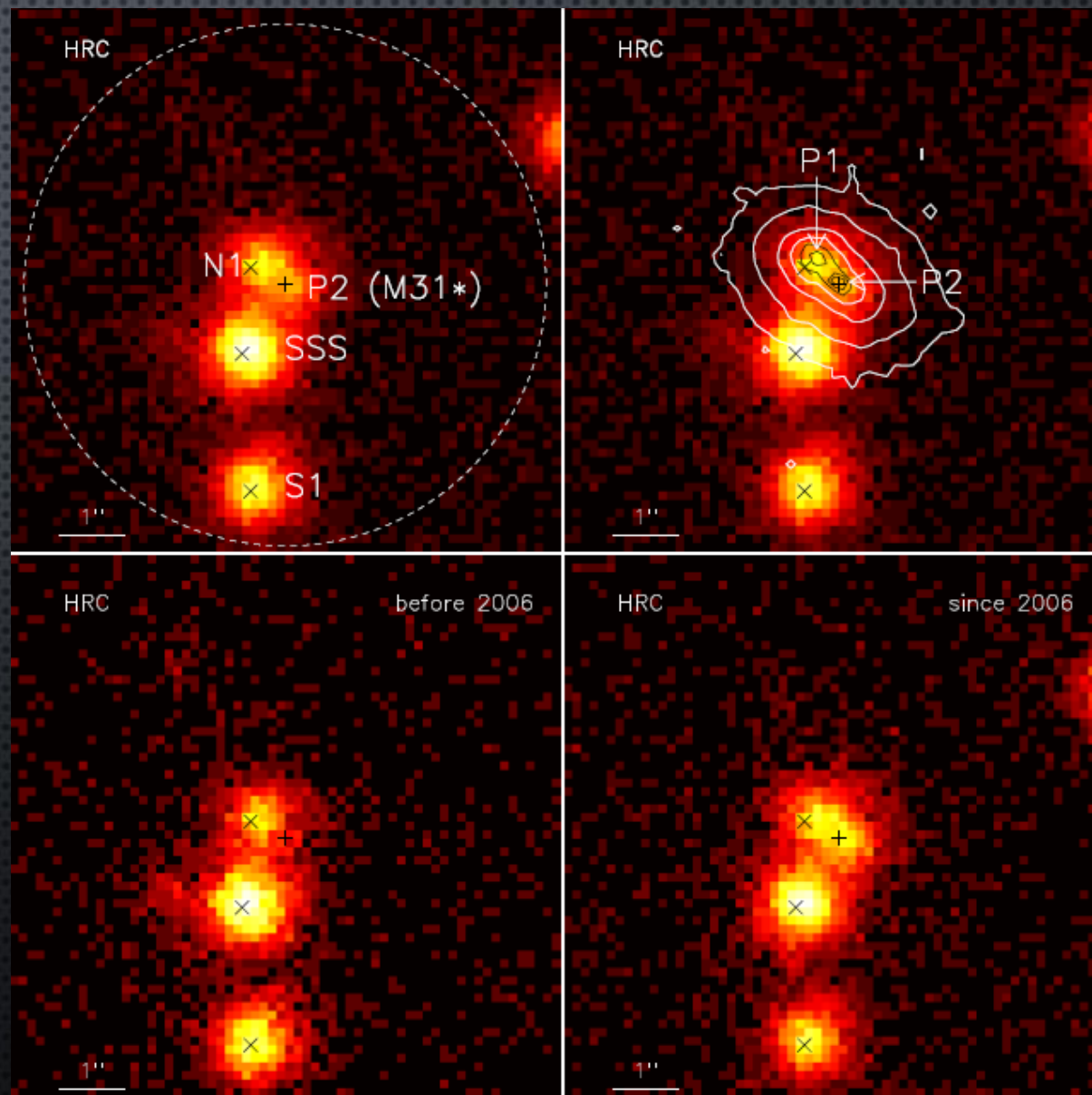


# ЧЕРНАЯ ДЫРА В ТУМАННОСТИ АНДРОМЕДЫ

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

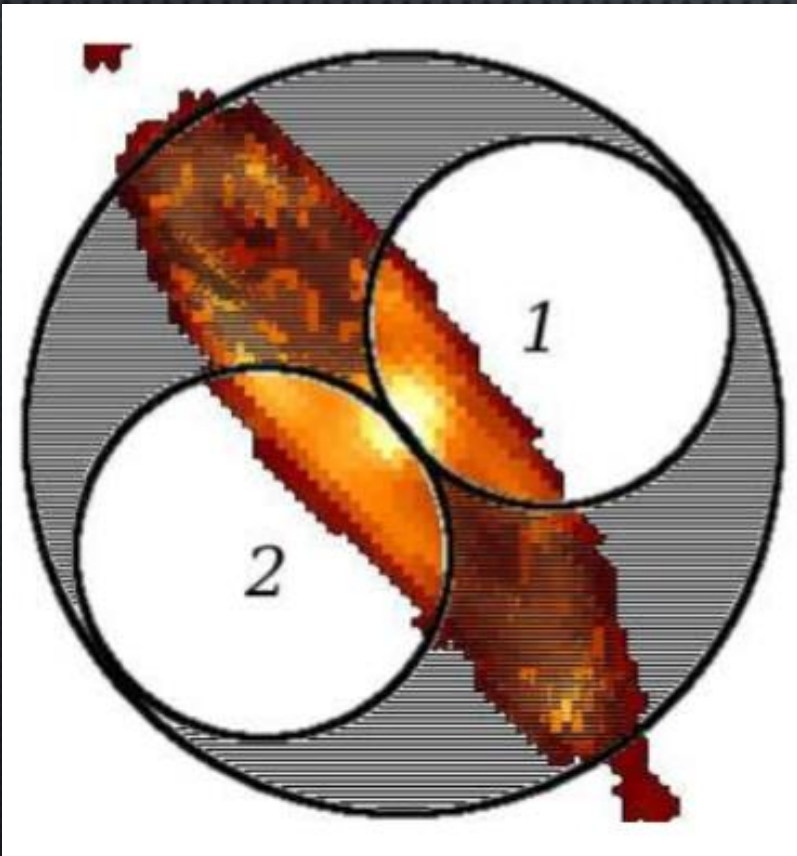
Так же, как и у нас, "монстр спит": светимость составляет миллиардные доли от предельной, т.н. Эддингтоновской.

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



# ПУЗЫРИ В М31

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

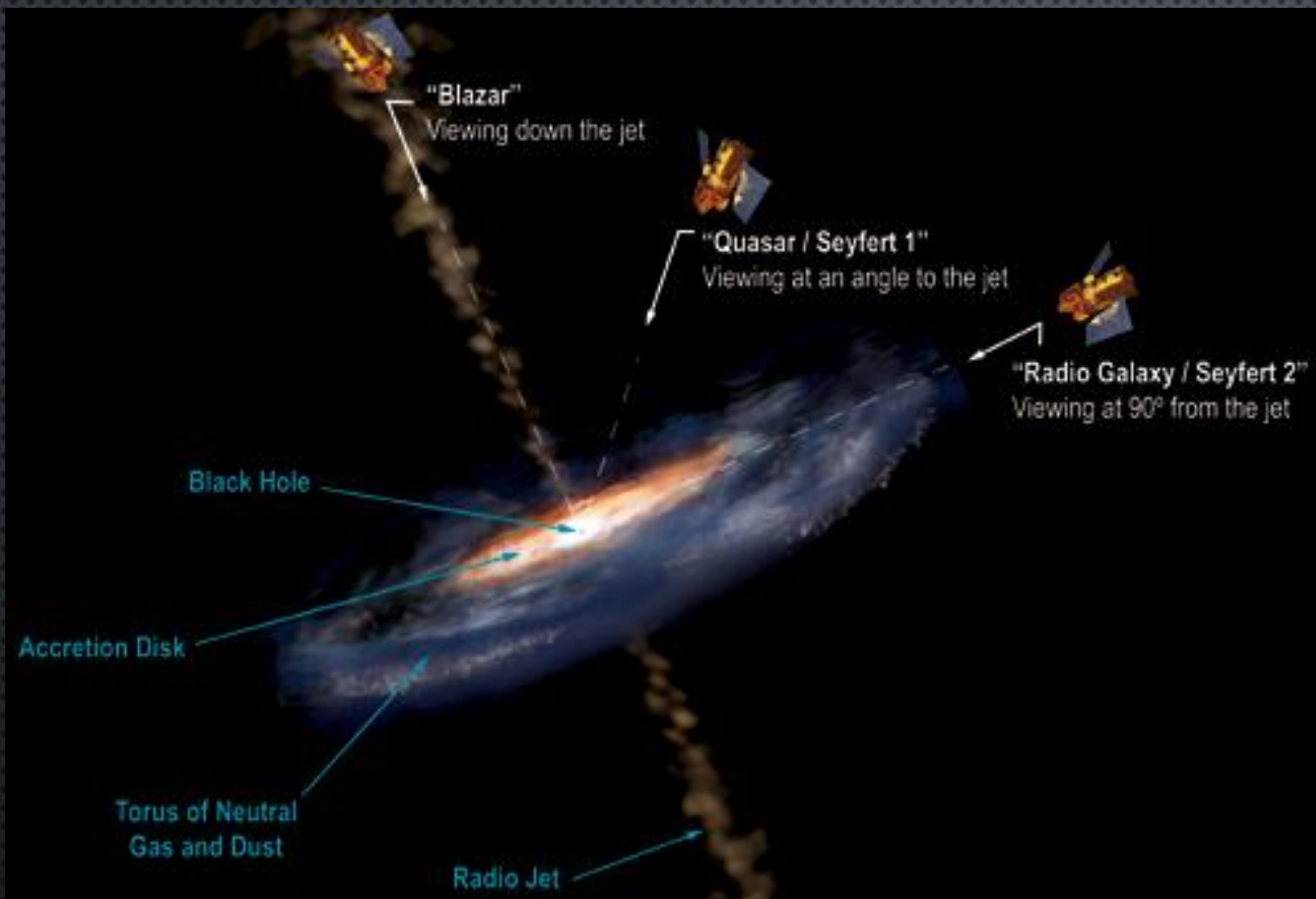


Возникновение такой структуры может быть связано с прошлой активностью центральной черной дыры.

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

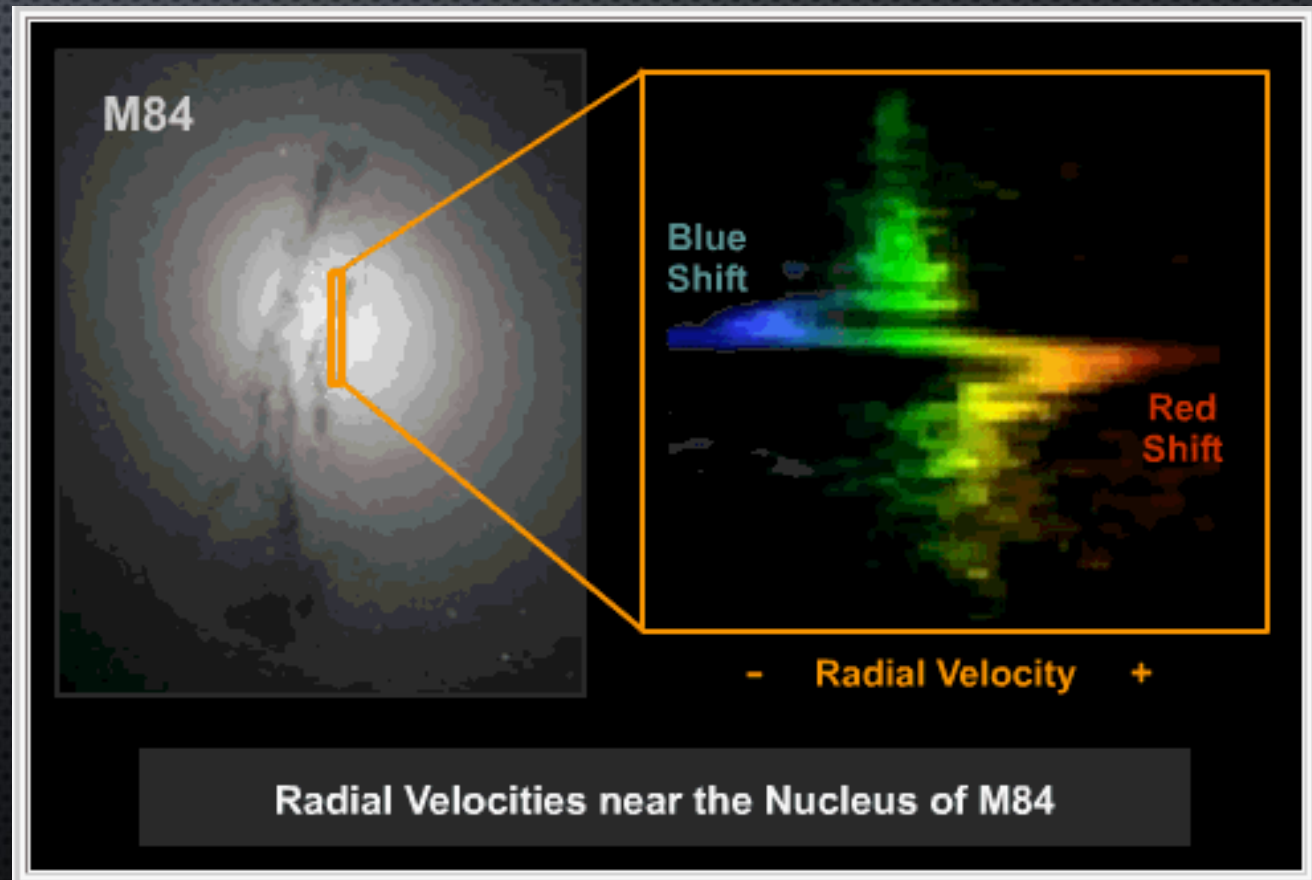


В рамках единой модели свойства различных активных галактик объясняются свойствами тора вокруг черной дыры и его ориентацией.

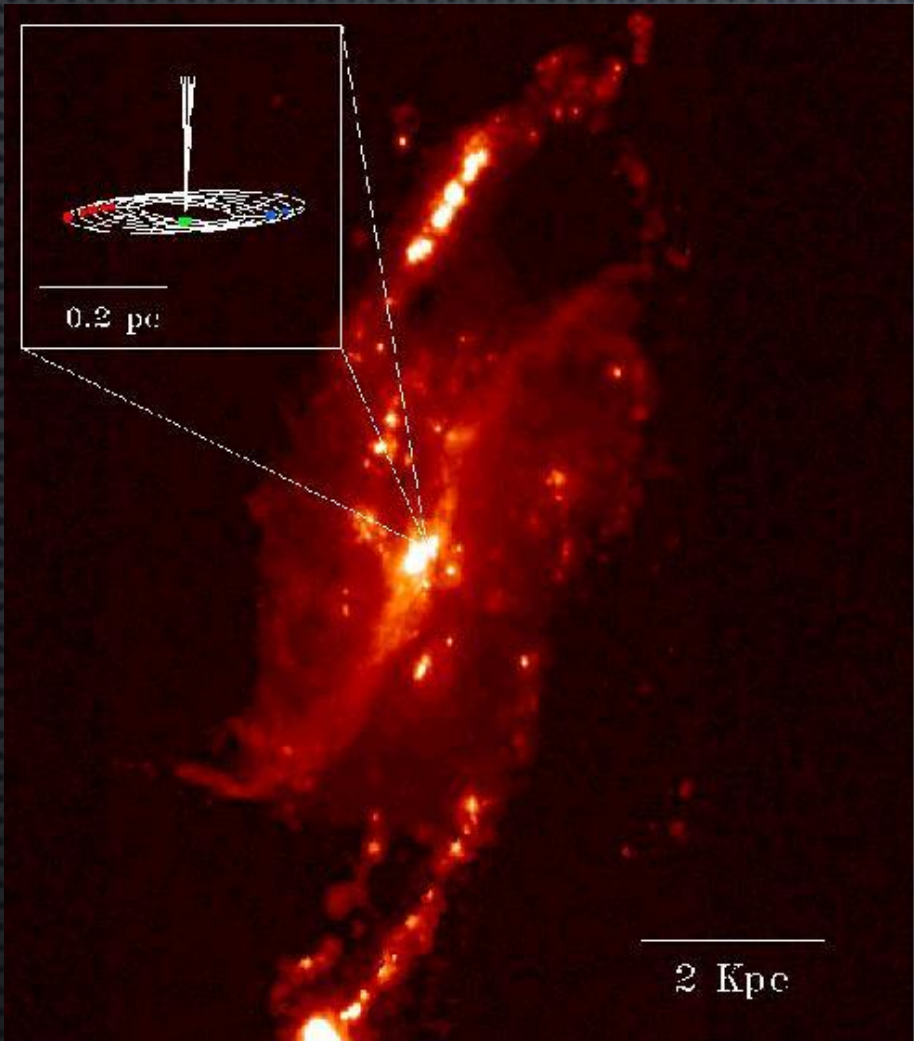
# ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАСС СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР

- 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).

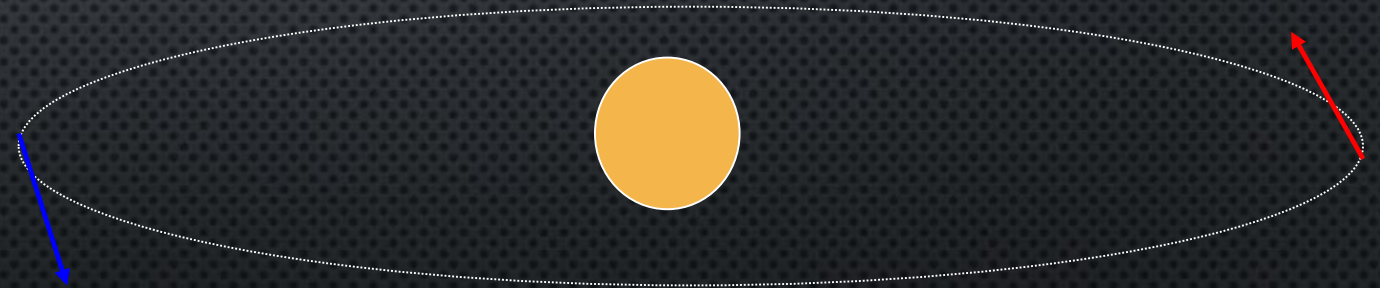


# МАЗЕРЫ



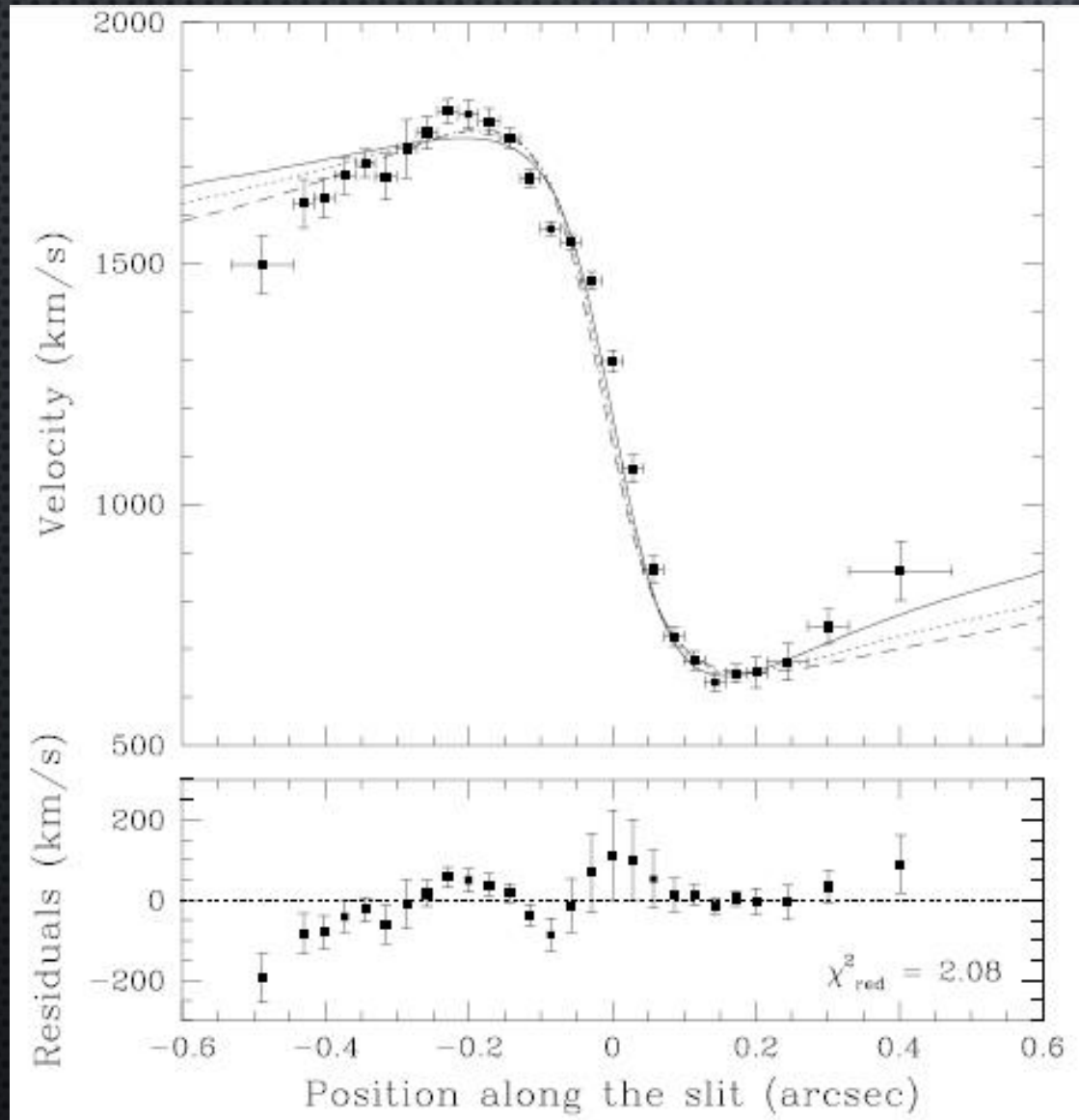
Наблюдая движение мазерных источников в галактике NGC 4258, стало возможным измерить массу внутри 0.2 пк. Получено значение 35-40 миллионов масс Солнца.

Это наиболее точный метод.





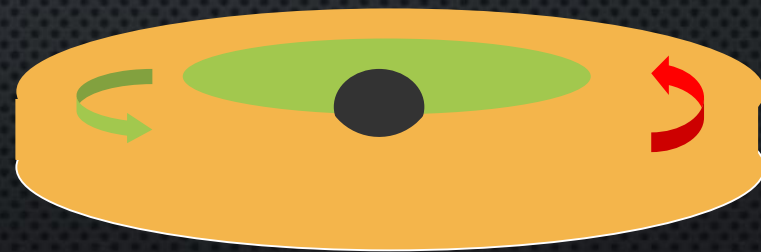
# КИНЕМАТИКА ГАЗА



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

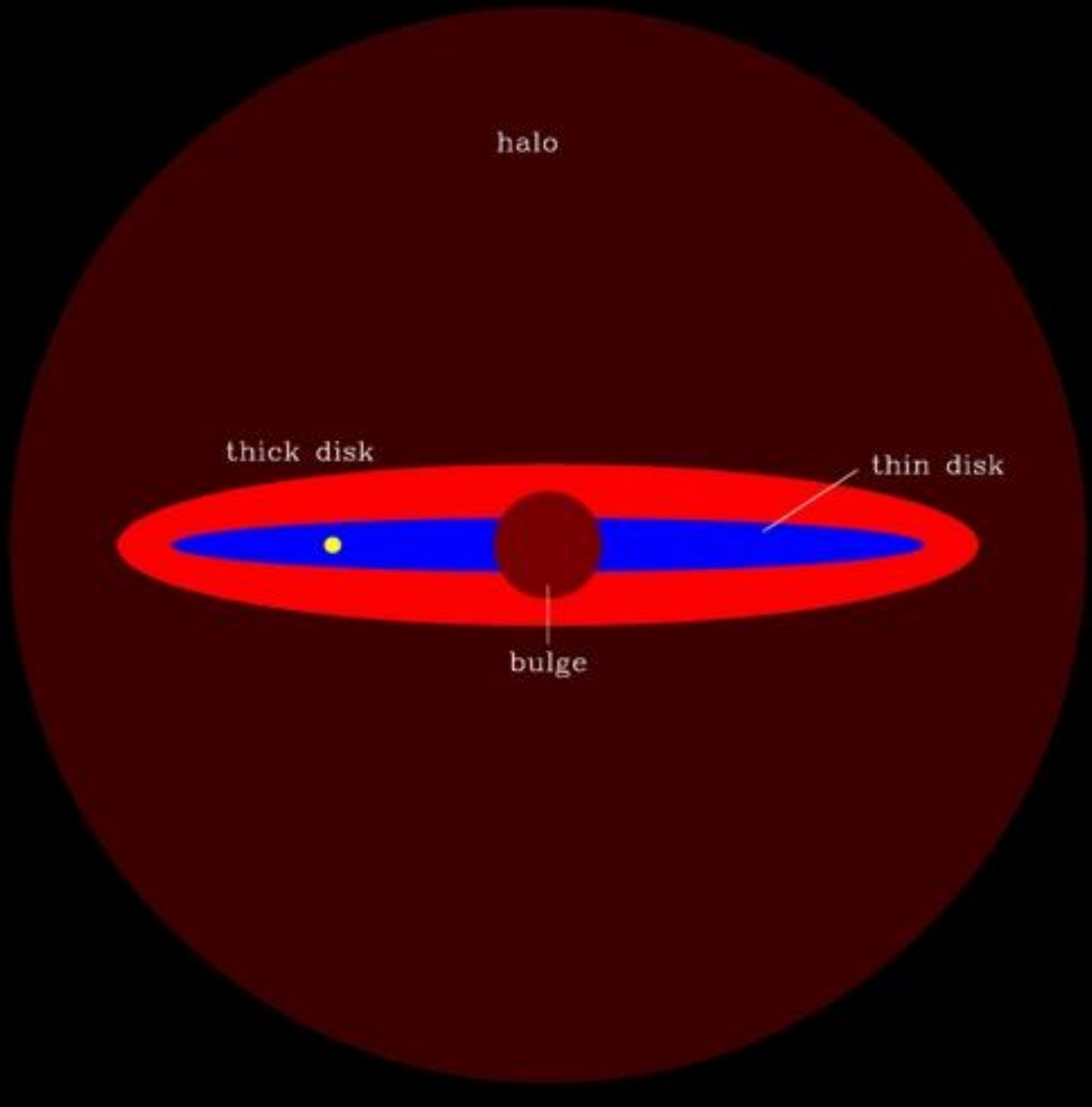
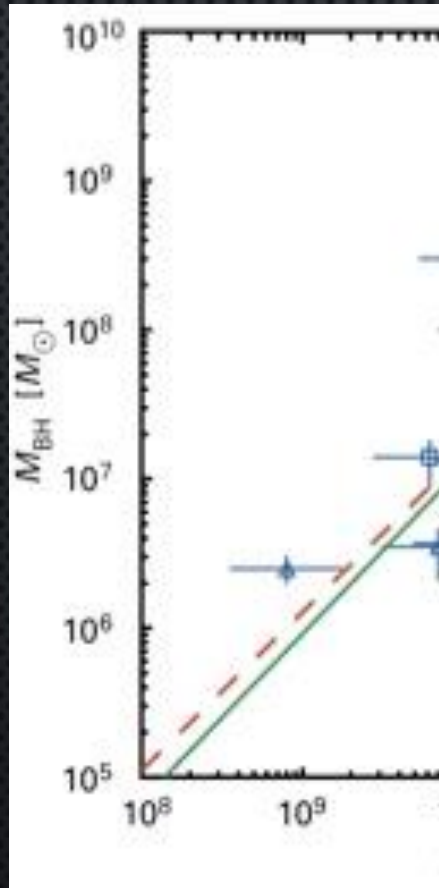
Масса  $3 \cdot 10^9 M_0$ .

Одна из самых тяжелых черных дыр



# СОС ЧЕРН

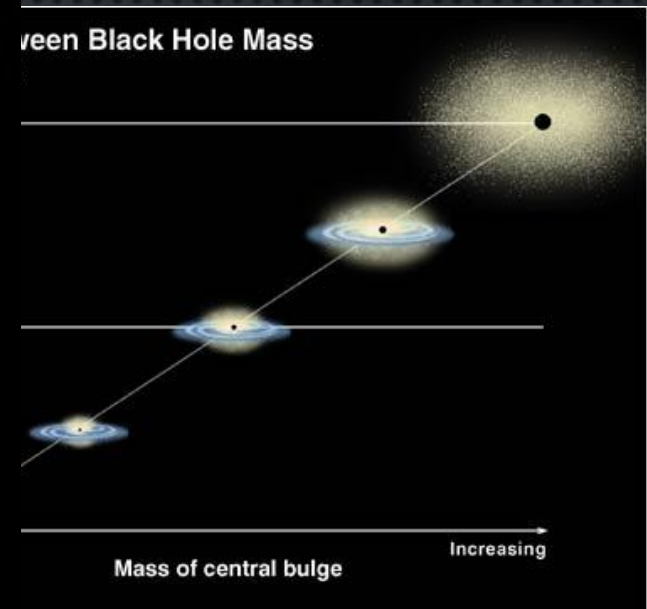
Сол  
ИМС



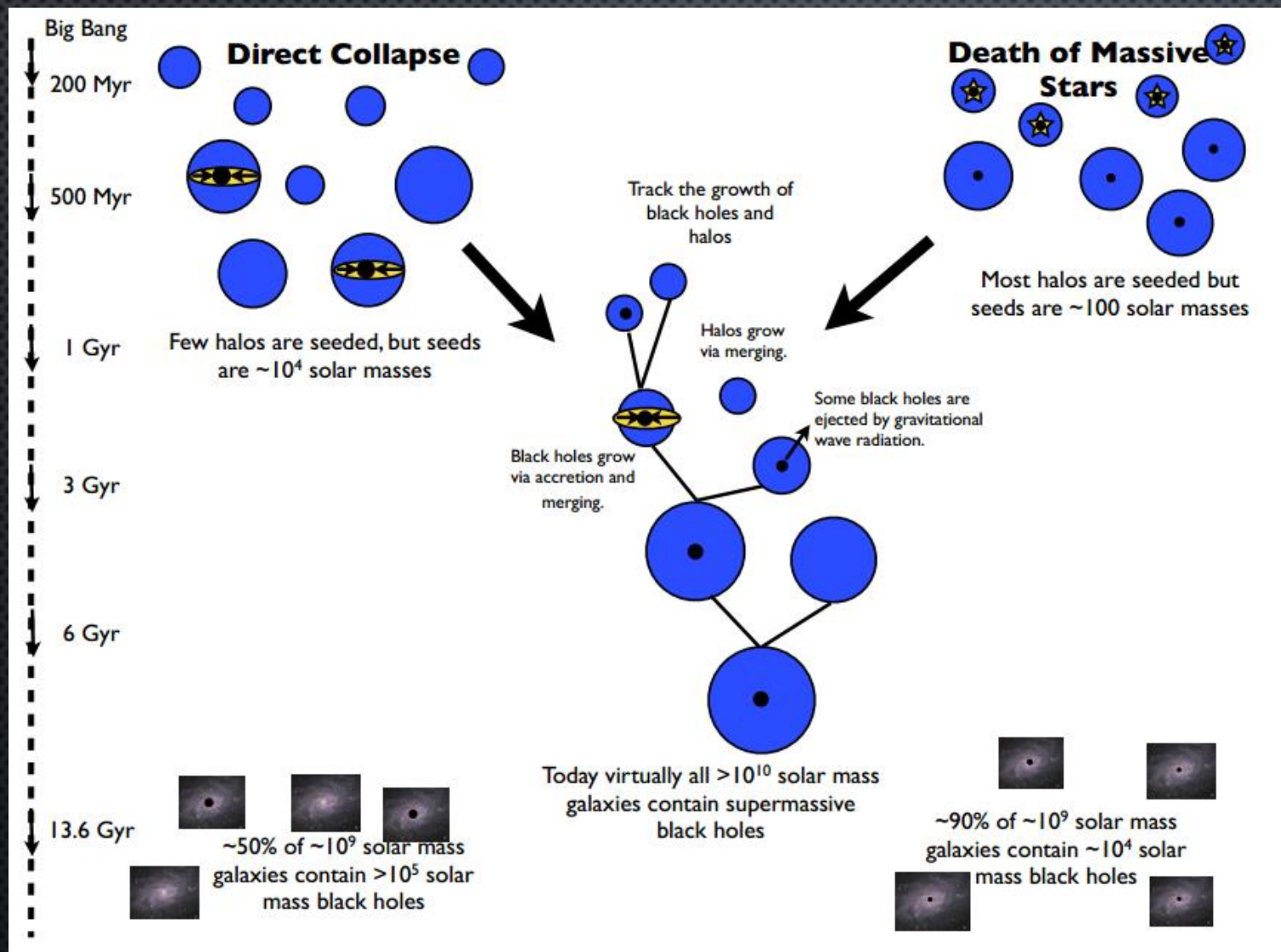
# САМИ

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.

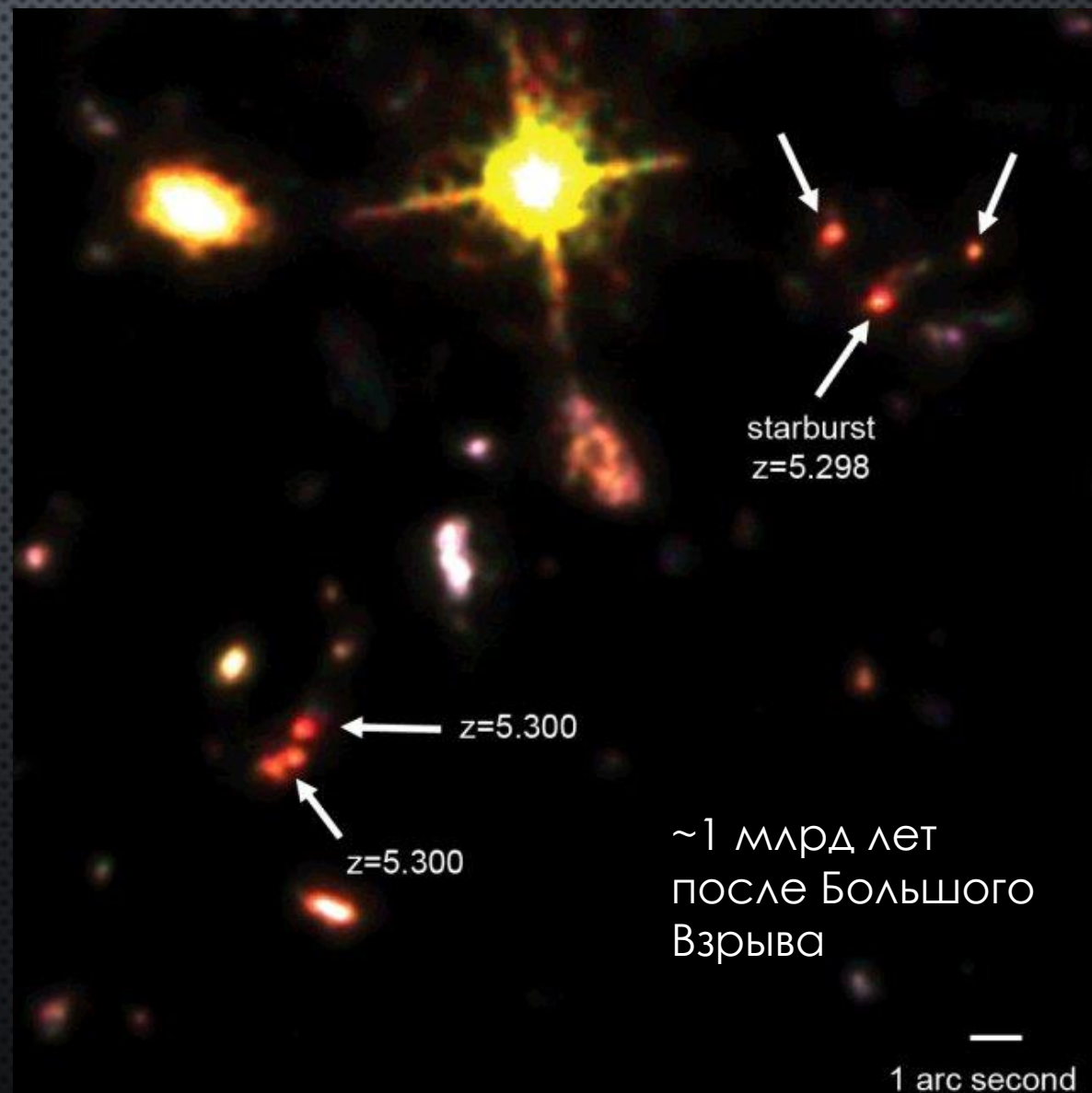
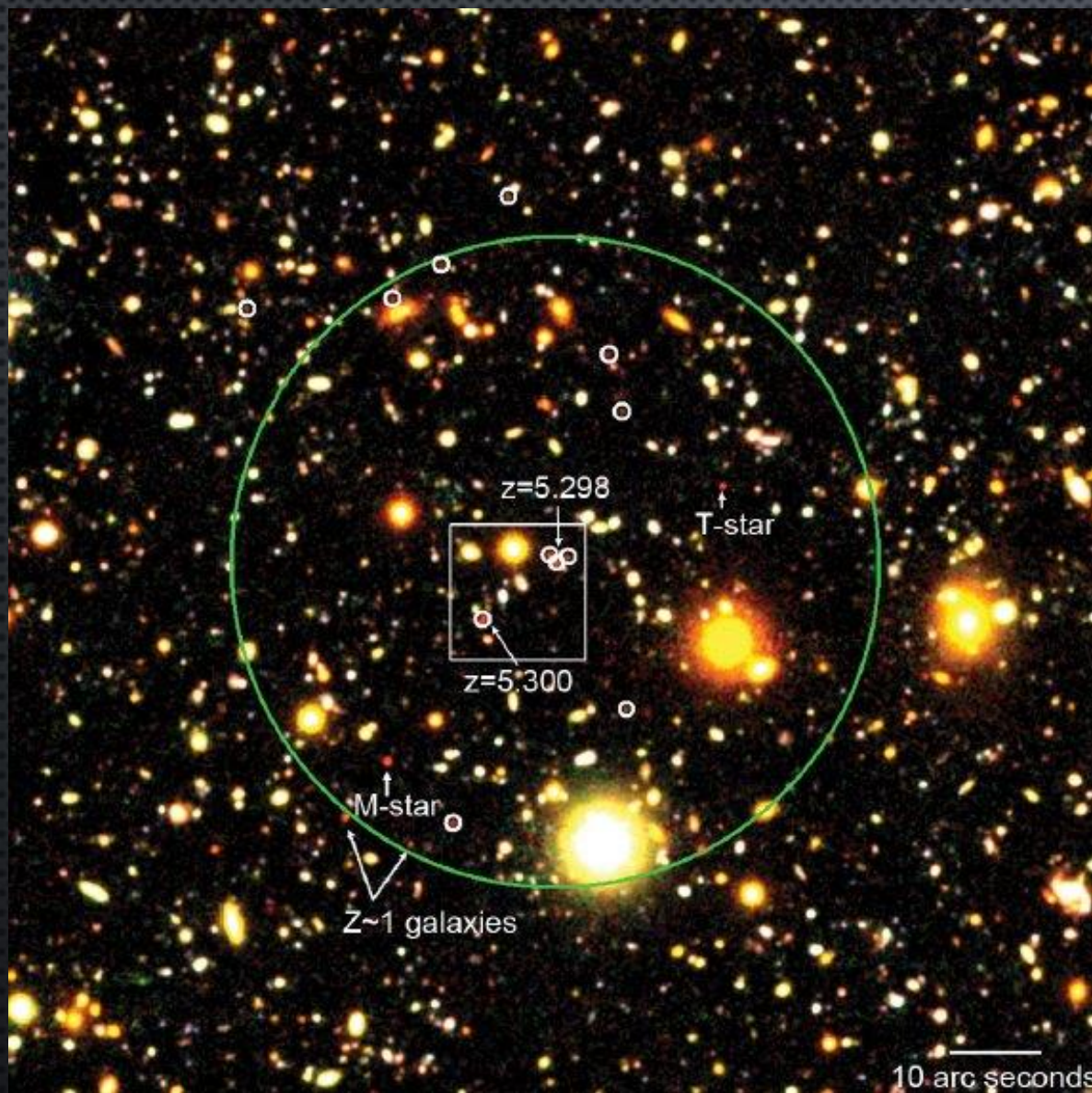
# ФОРМИРОВАНИЕ СКОПЛЕНИЙ



Мы видим, что скопления  
возникают постепенно.

На больших расстояниях  
скопления еще не успели  
сформироваться.

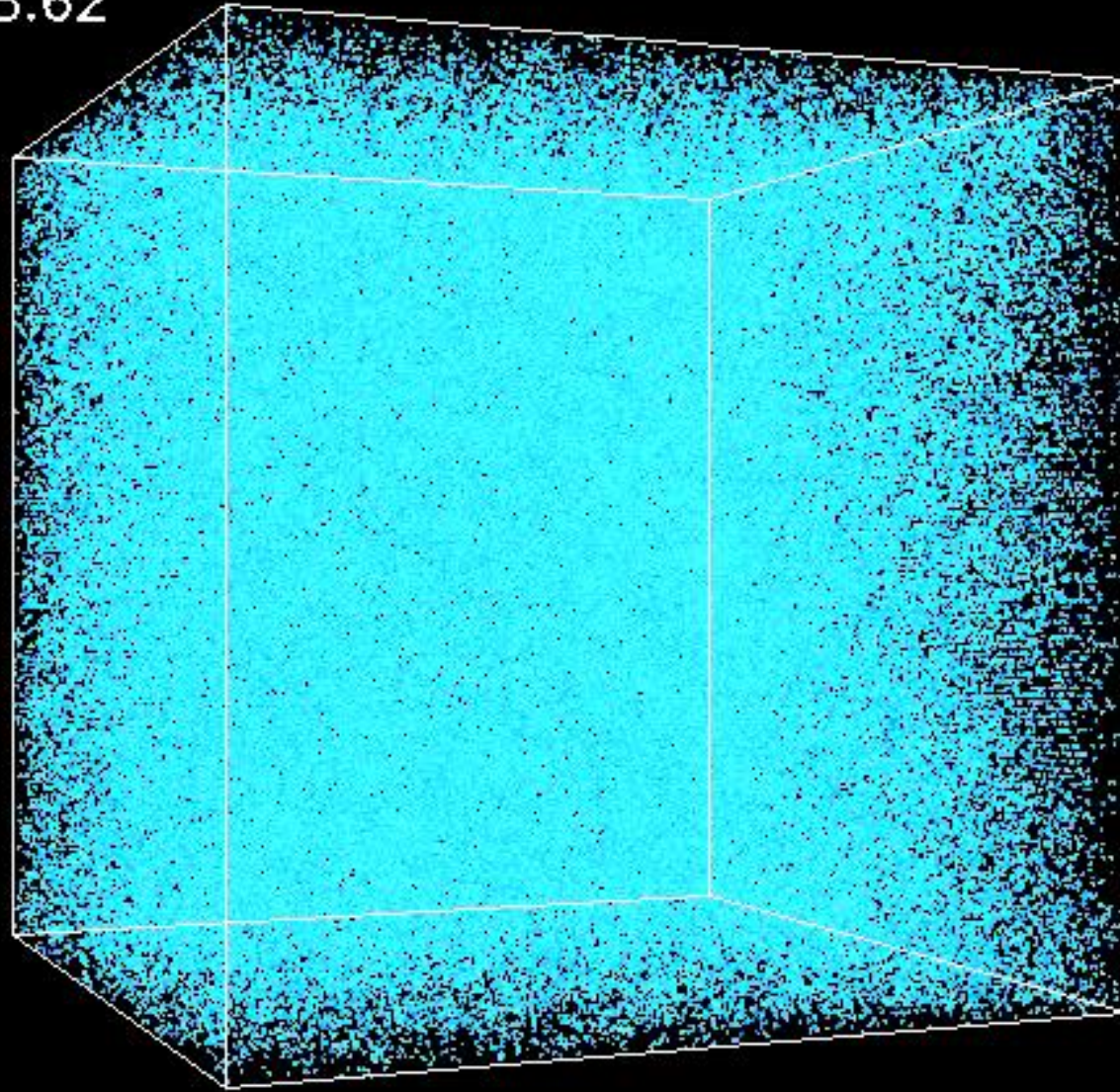
# ДАЛЕКОЕ ПРОТОСКОПЛЕНИЕ ГАЛАКТИК



~1 млрд лет  
после Большого  
Взрыва

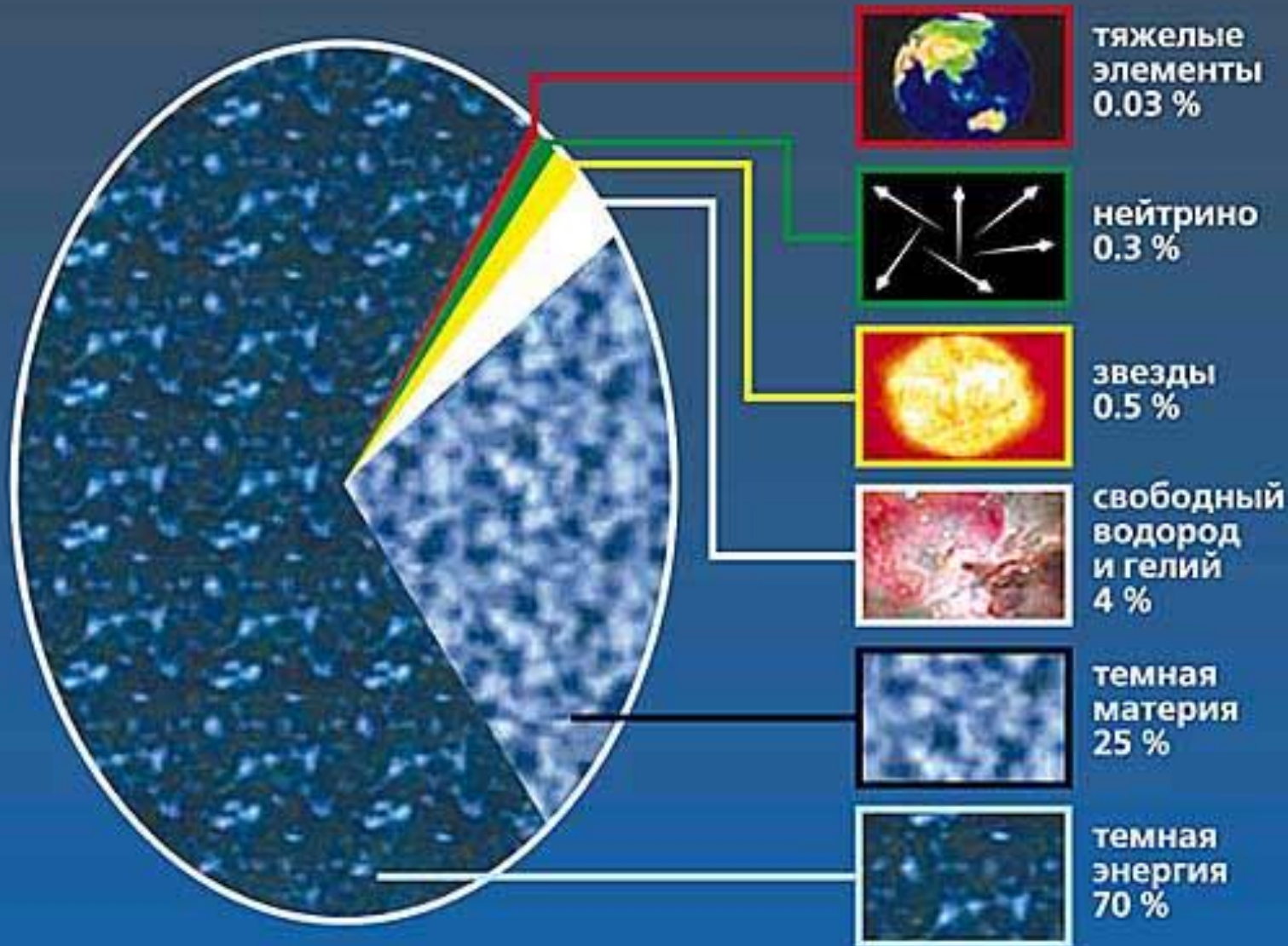
# ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ

$Z=28.62$



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



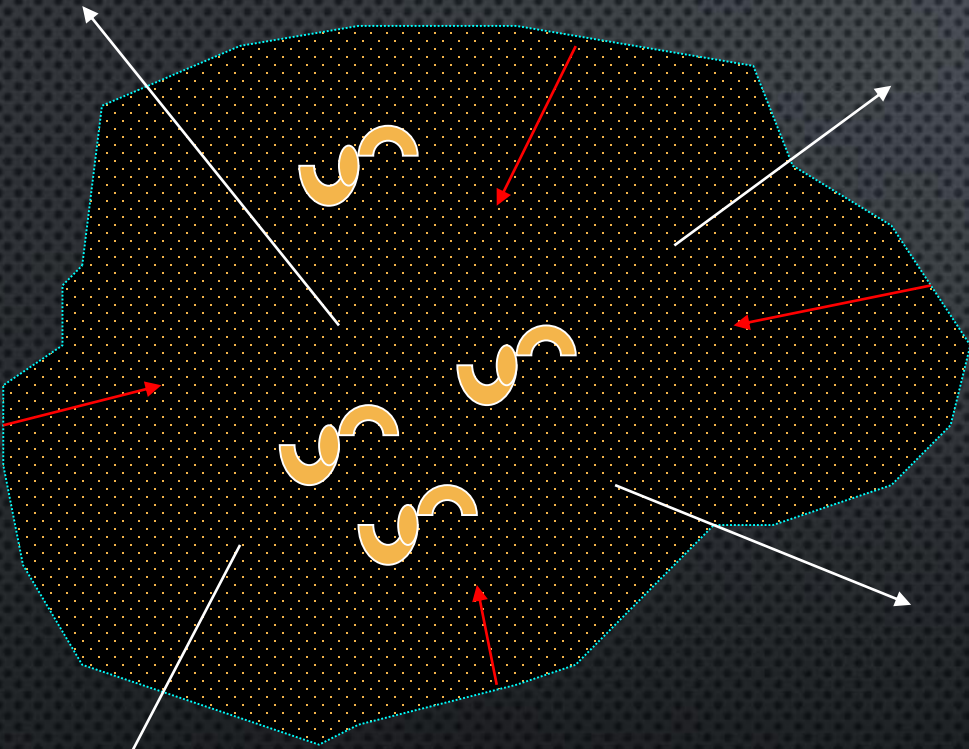
# КОГДА И ЗАЧЕМ ЕГО ПРИДУМАЛИ?

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.

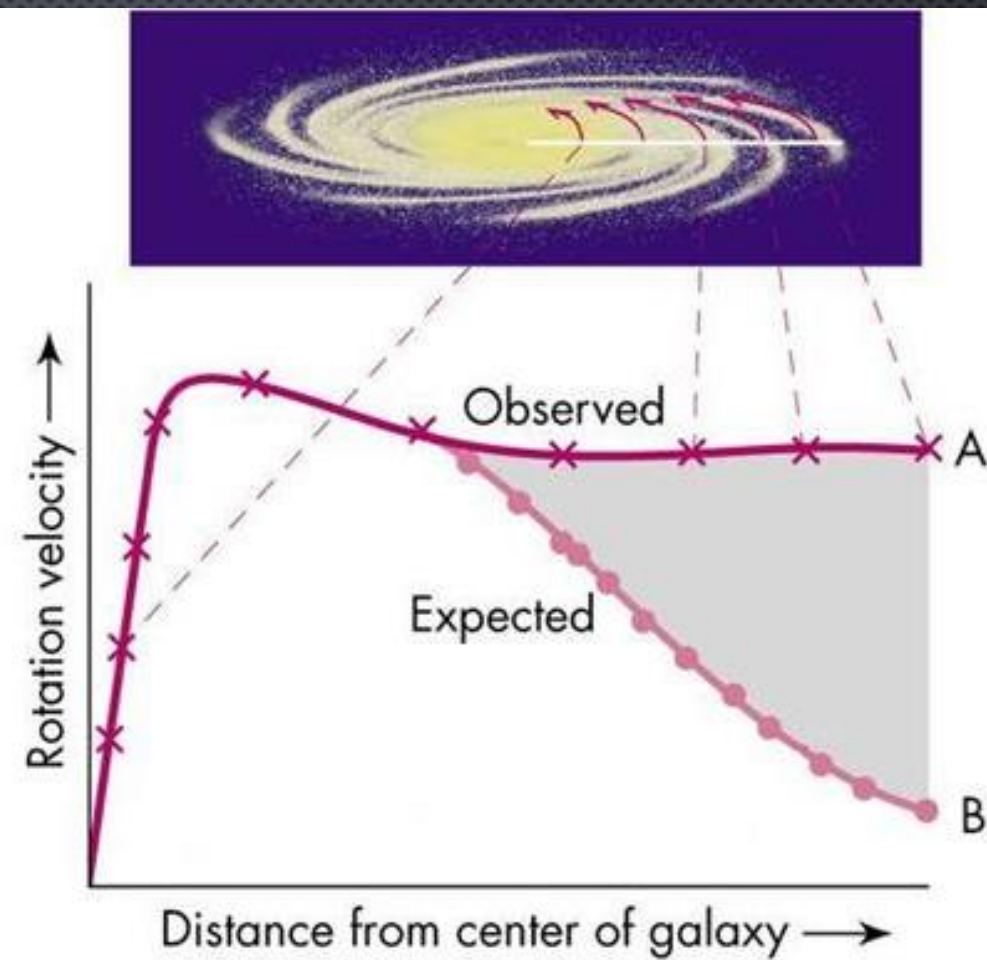


<http://www.spacedaily.com>



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

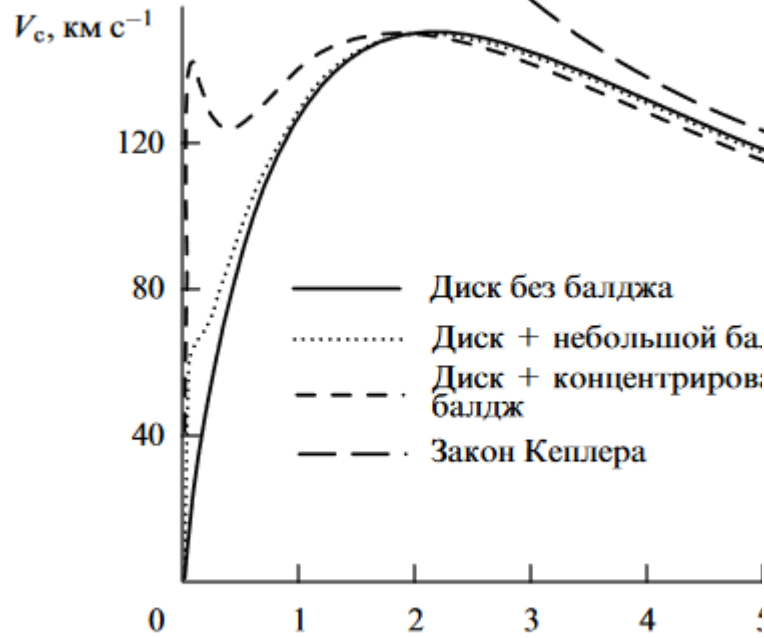
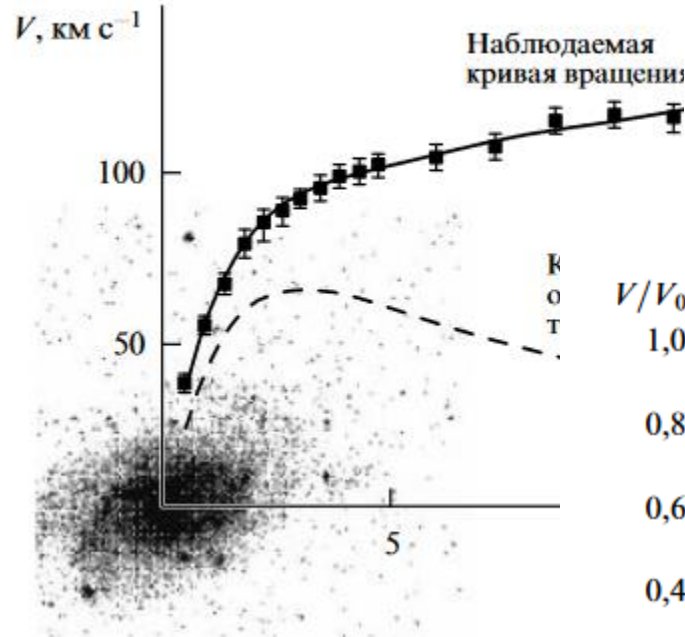


Рис. 2. Кривые вращения в отсутствие гало.



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

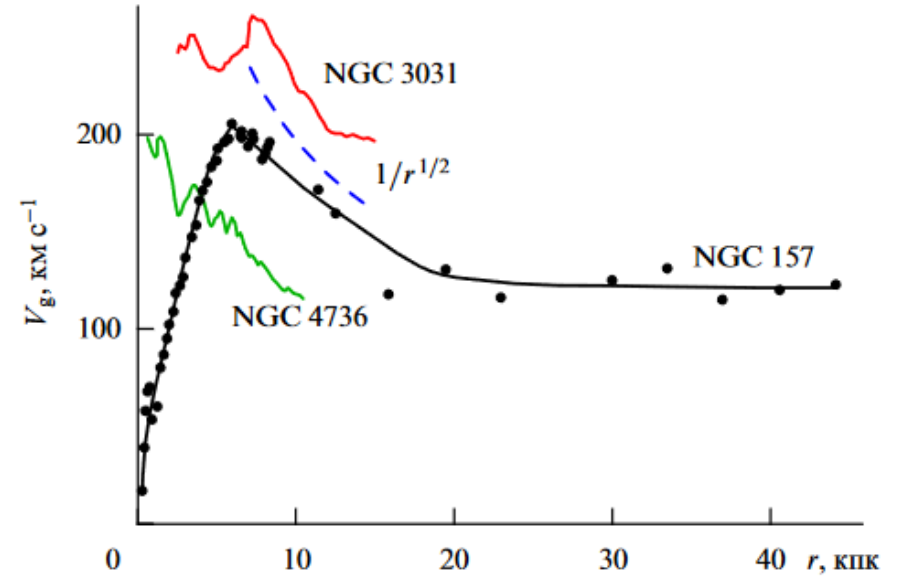
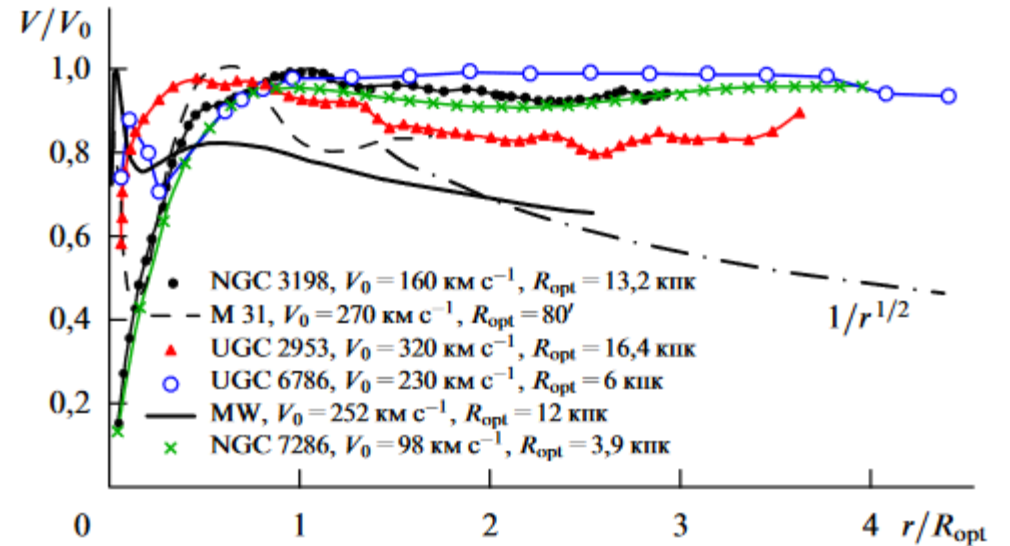
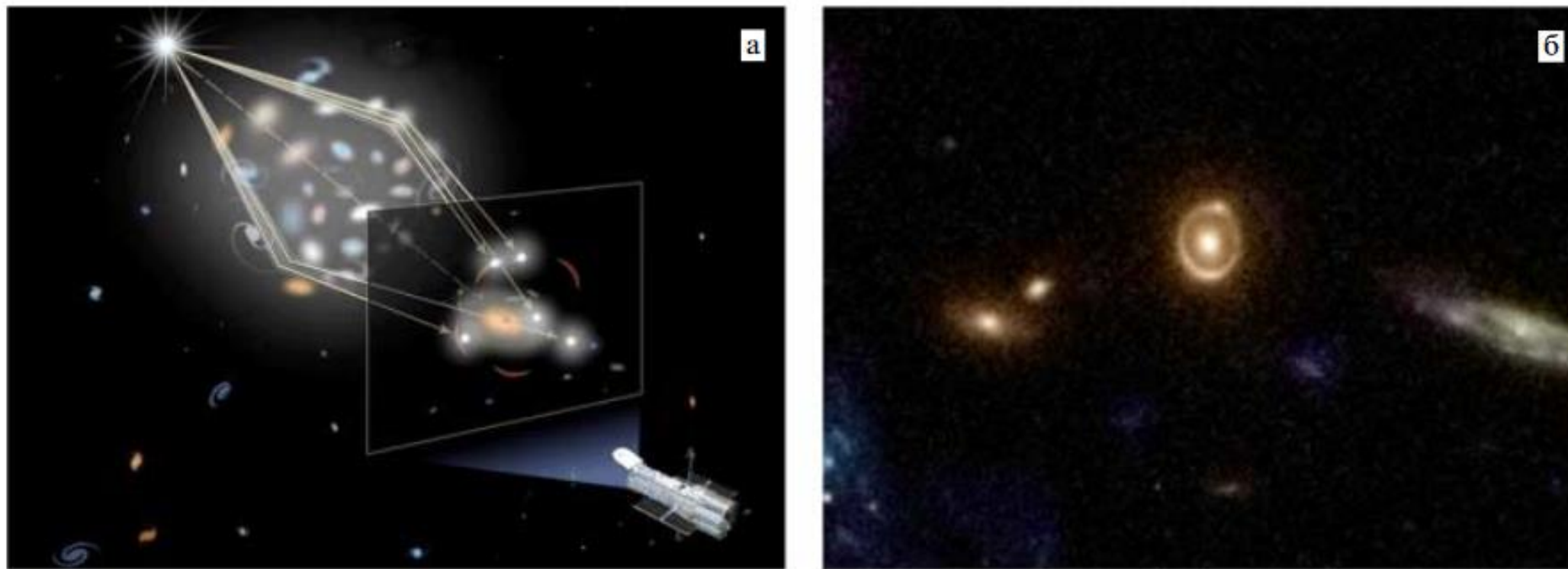


Рис. 5. Примеры кривых вращения спиральных галактик с убыванием скорости вращения в пределах оптических границ: NGC 157 [53], NGC 4736, NGC 3031 [54]. Штриховая линия — кеплеровская кривая вращения  $\propto 1/\sqrt{r}$ .



# ЛИНЗИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА МАССЫ

Засов и др. (УФН 2017)



**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.

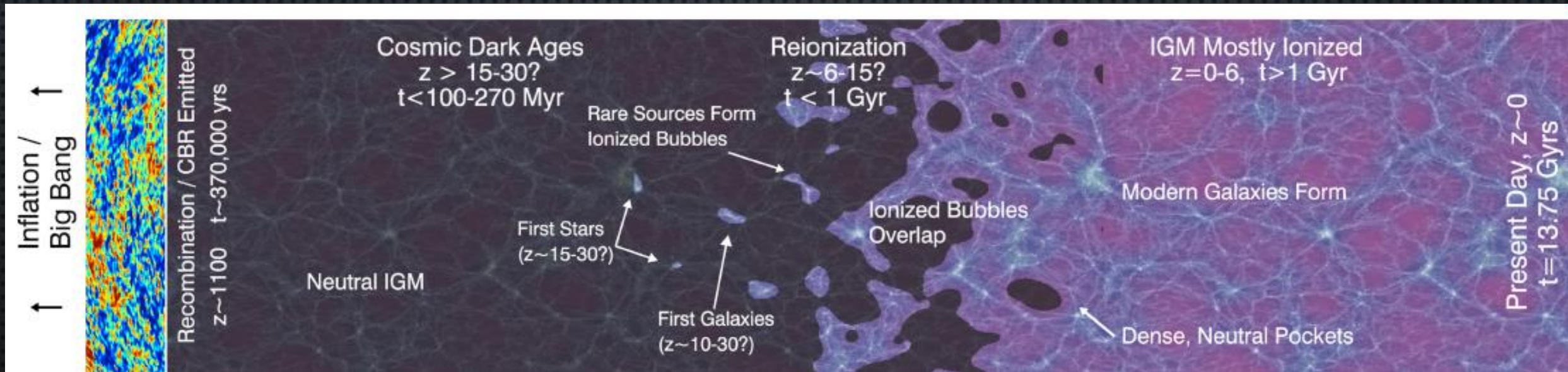
# ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

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».

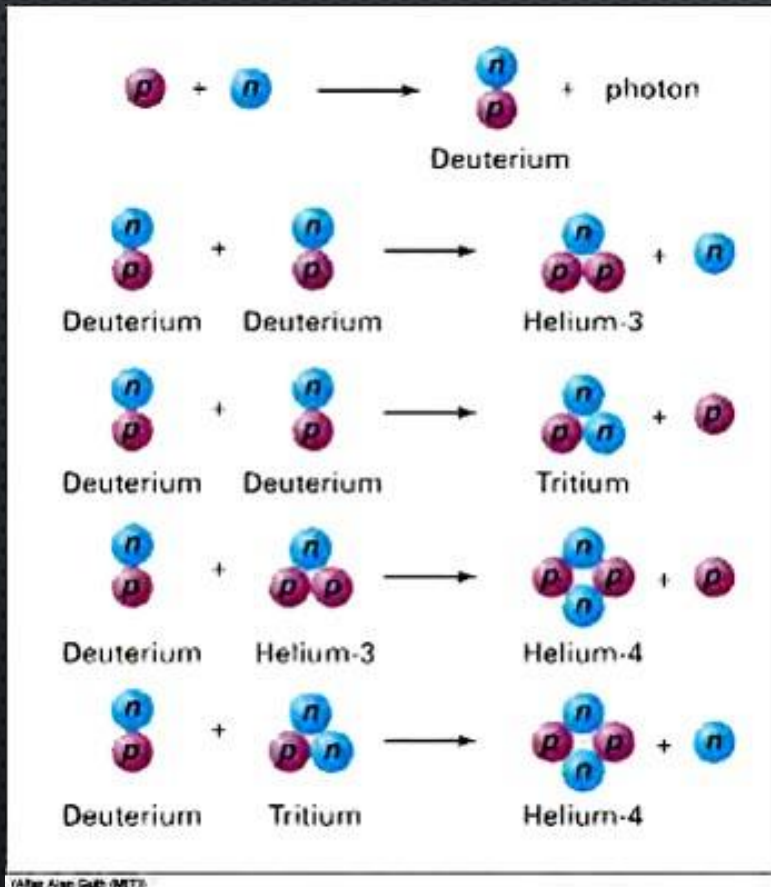
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



# 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

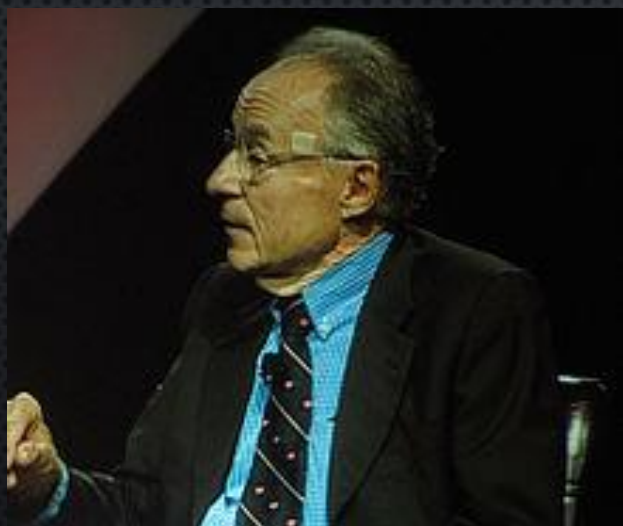
# НЕОЖИДАННОЕ ОТКРЫТИЕ

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.

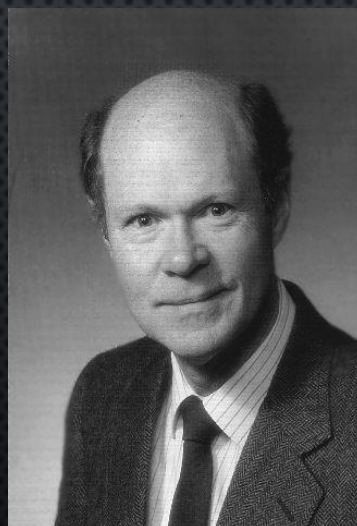
## ПОМЕХИ! ШУМ В РАДИОЭФИРЕ!!!!

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

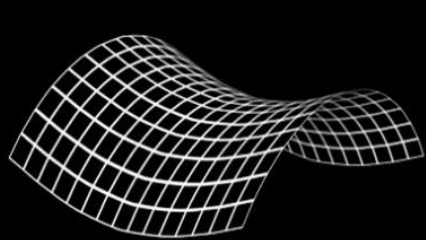
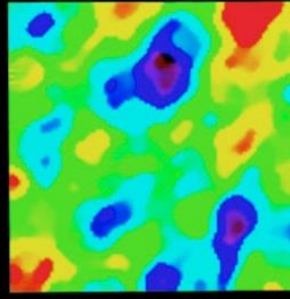
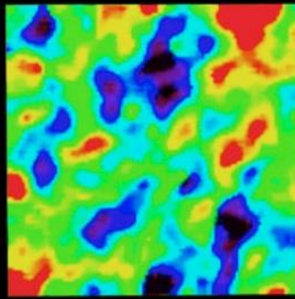
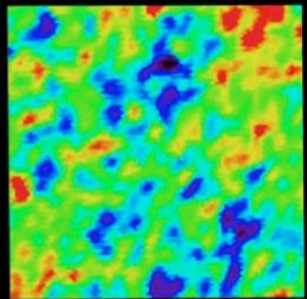


Роберт Вилсон

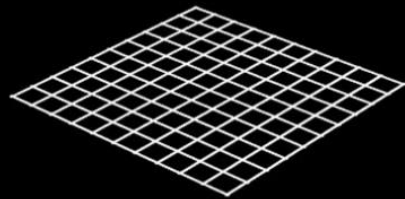


# ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

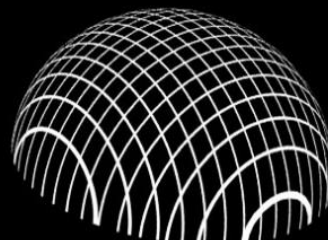
## GEOMETRY OF THE UNIVERSE



**OPEN**



**FLAT**



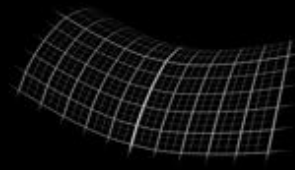
**CLOSED**

Наблюдения позволяют определить среднюю плотность вселенной.

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

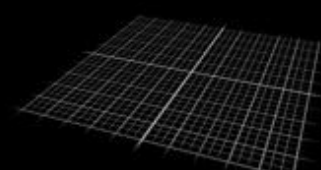
$$\Omega_{\text{Total}} < 1$$

LOWER  
DENSITY



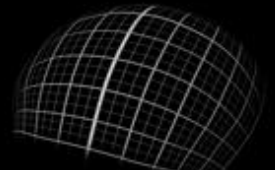
$$\Omega_{\text{Total}} = 1$$

CRITICAL  
DENSITY



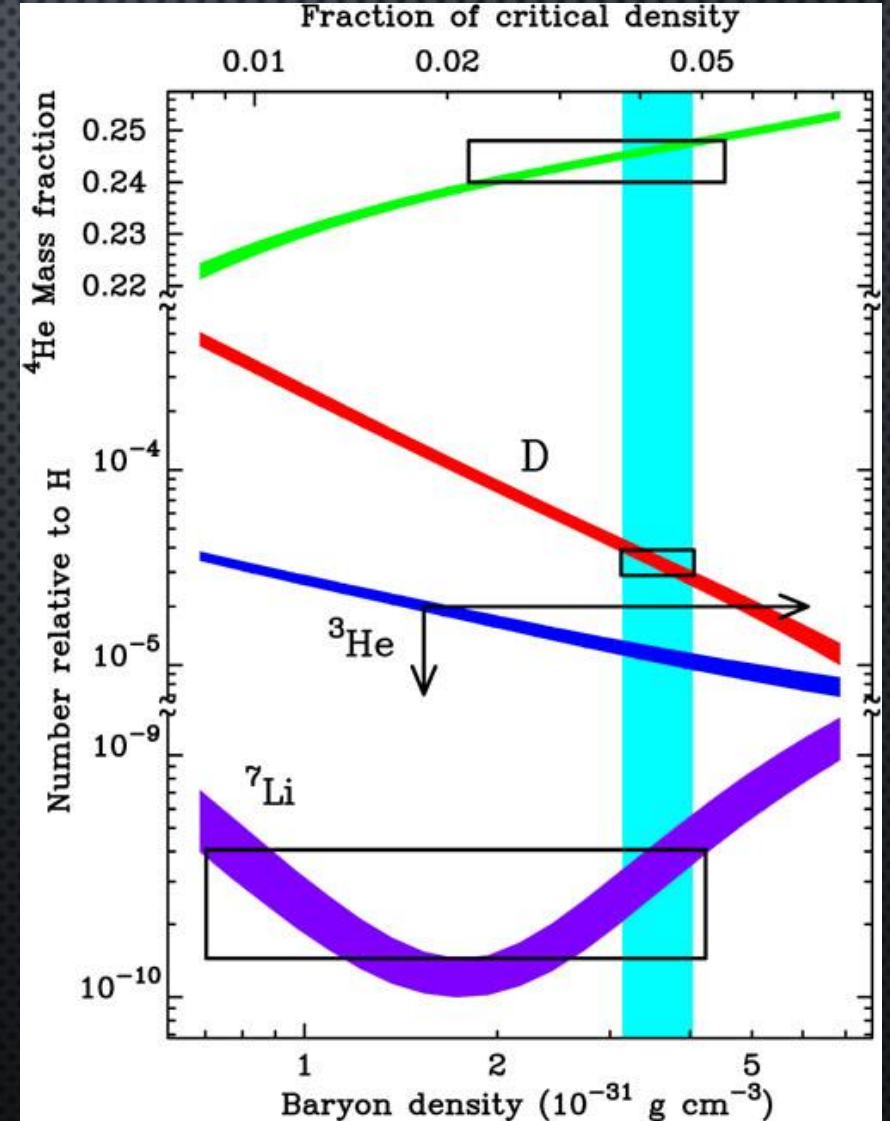
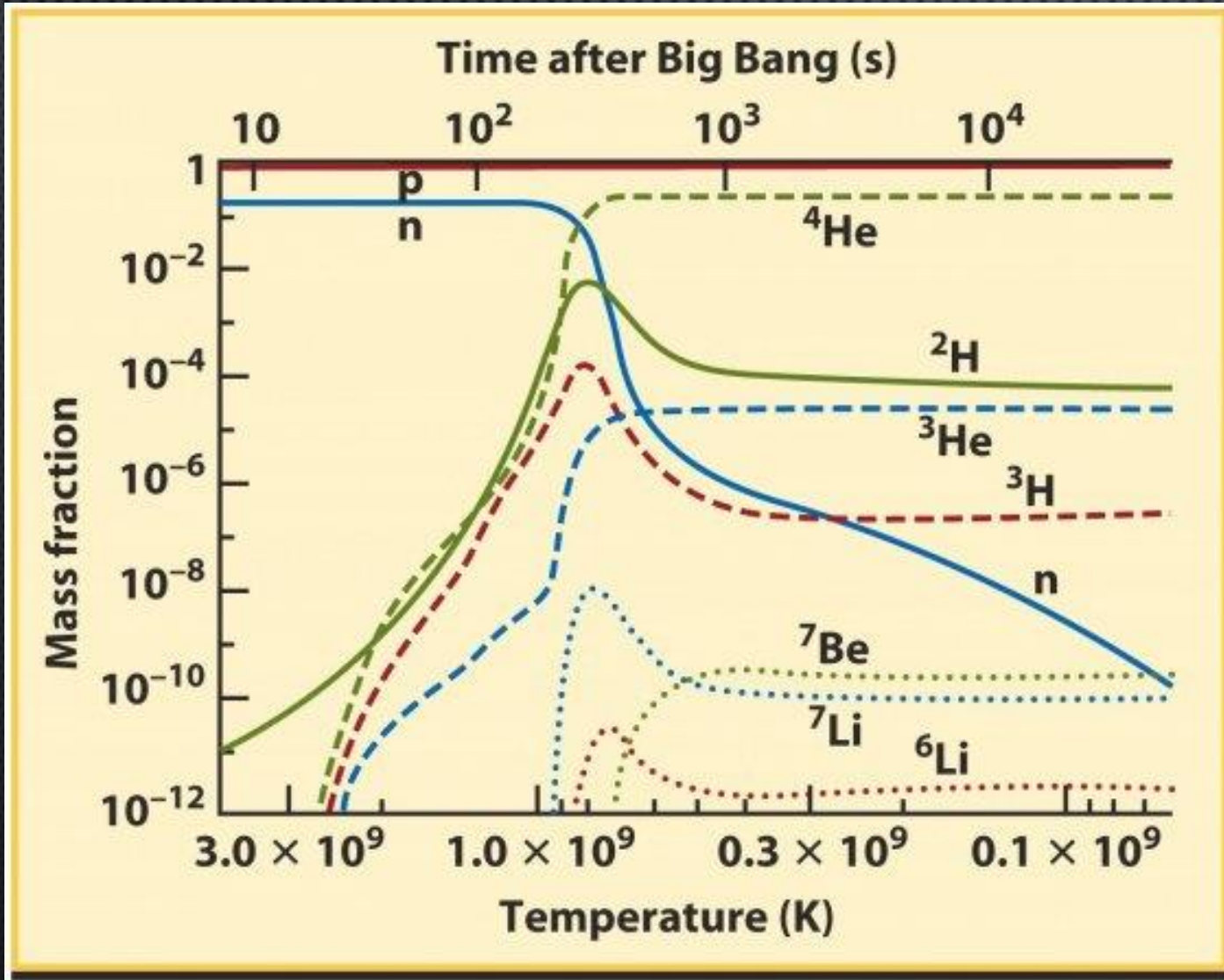
$$\Omega_{\text{Total}} > 1$$

HIGHER  
DENSITY



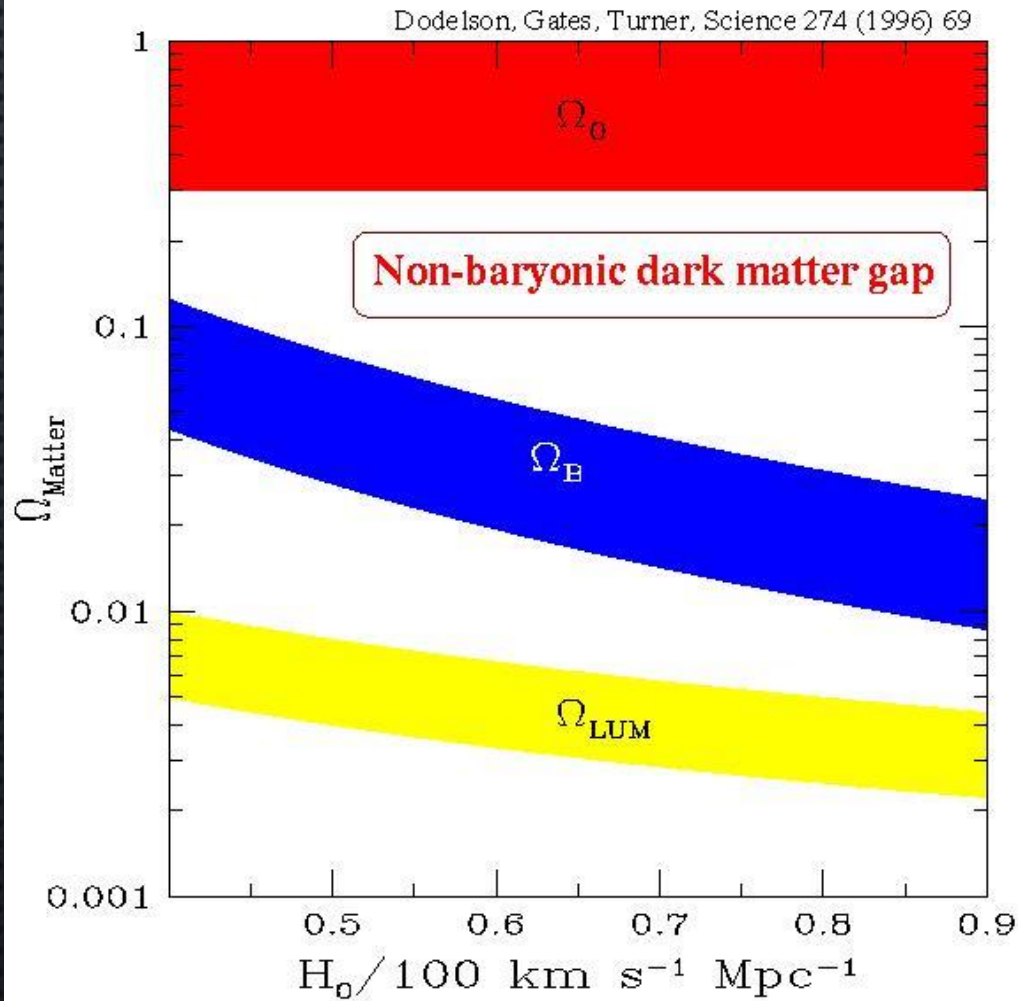


# ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ



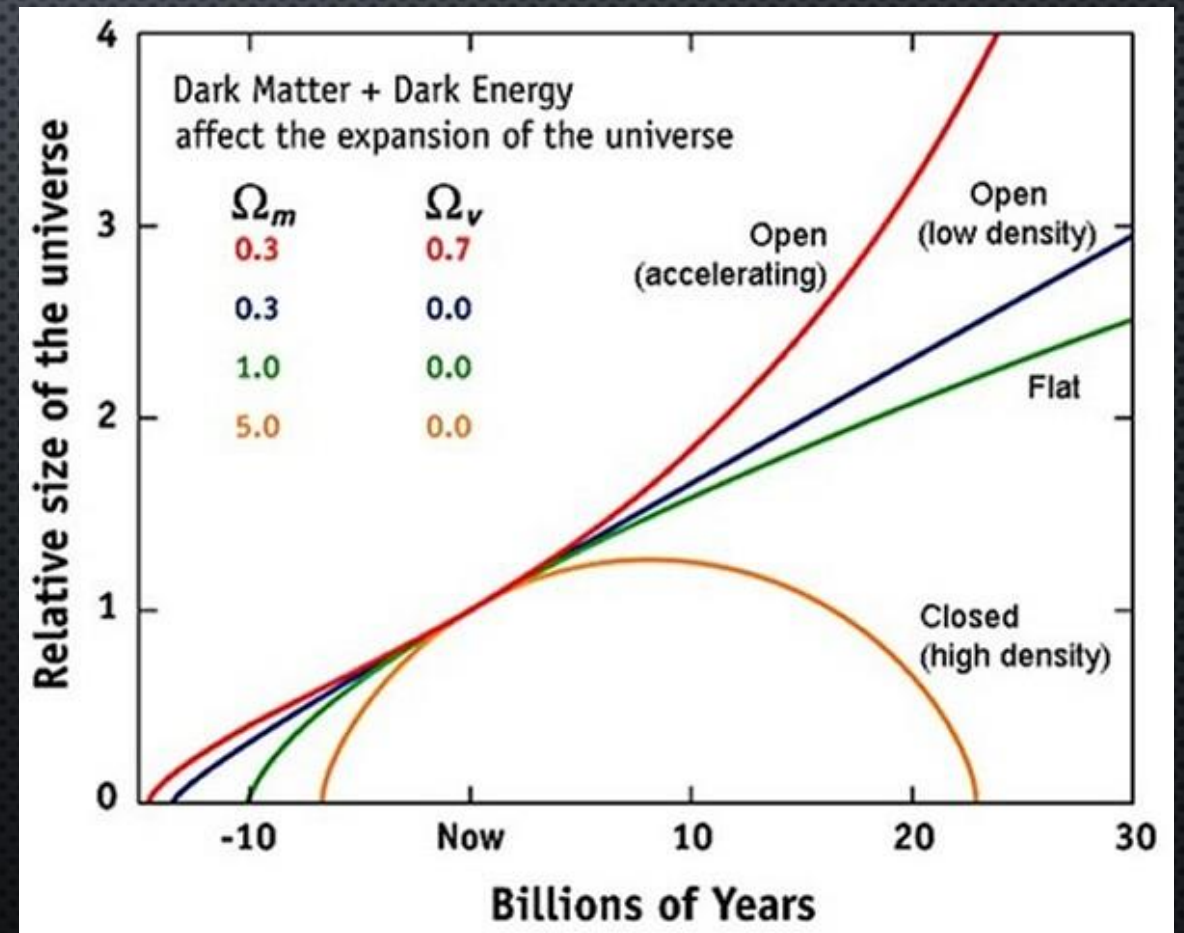
# НУКЛЕОСИНТЕЗ + РЕЛИКТ = ПРОБЛЕМА ДЛЯ БАРИОНОВ

## Motivation for non-baryonic dark matter

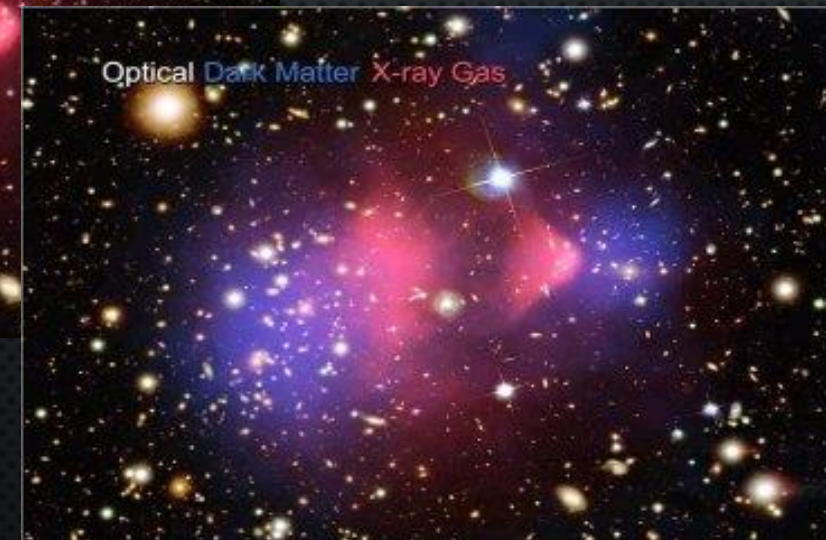
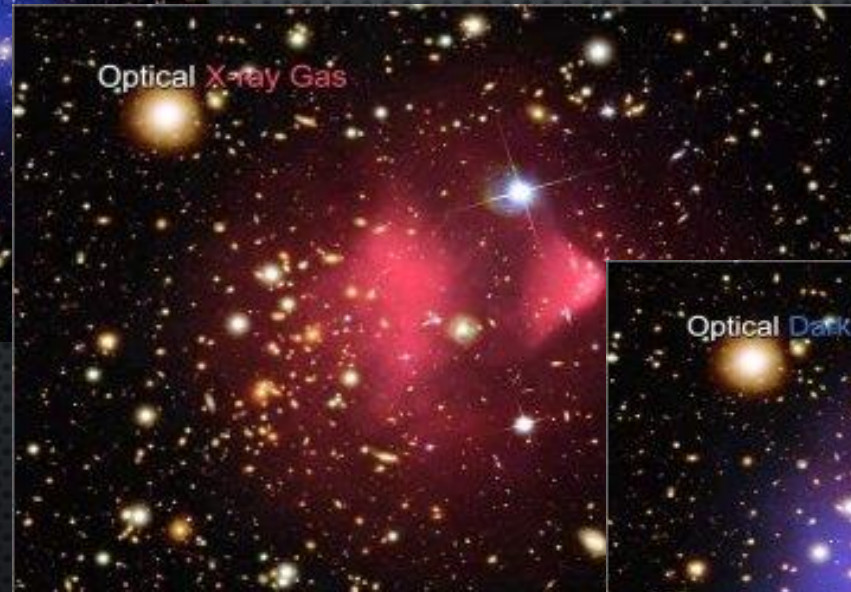
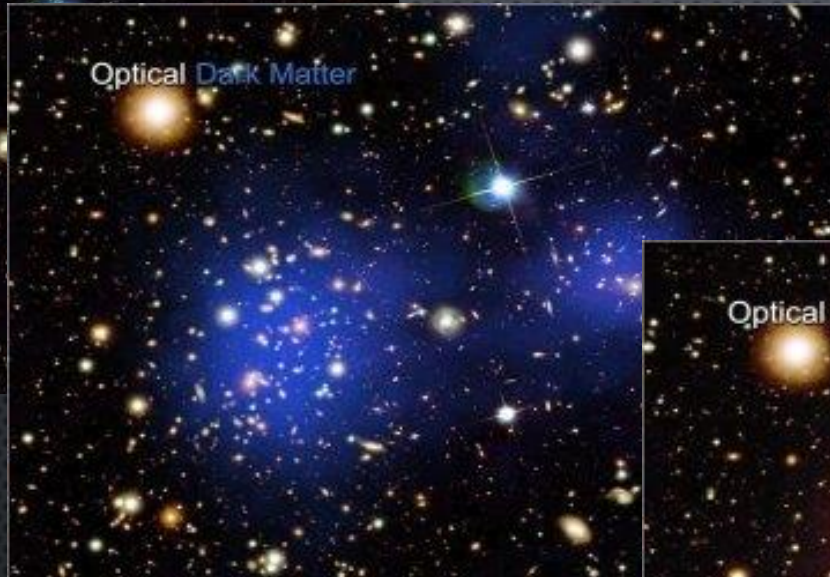
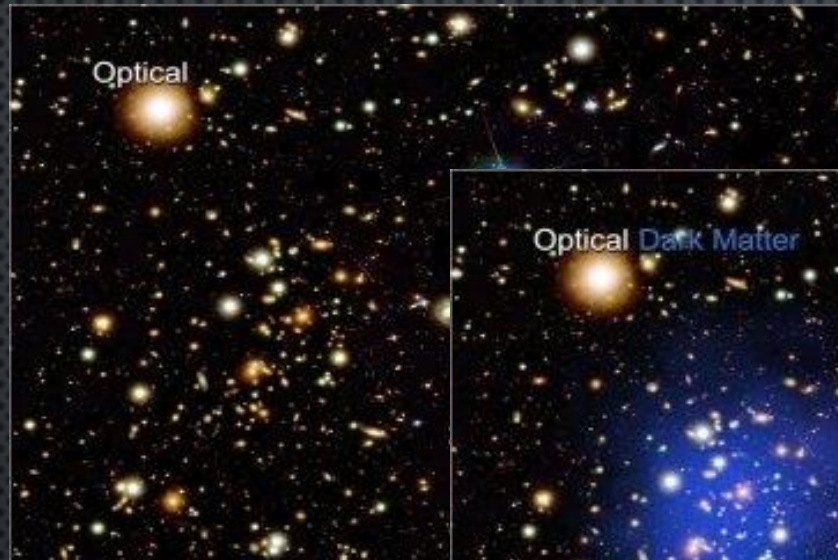


XIth Rencontres de Blois '99

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

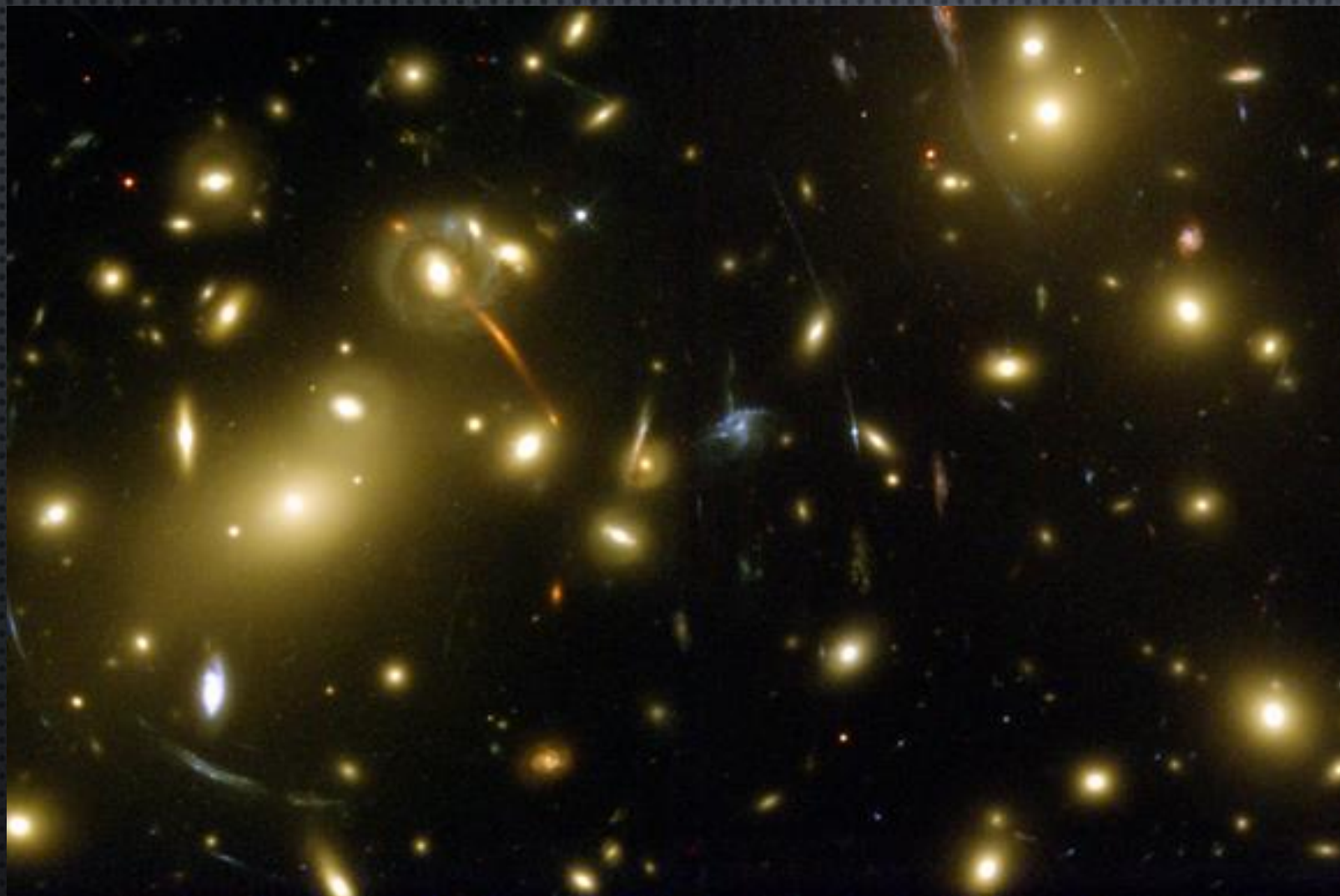


# СИЛЬНЫЙ ПРЯМОЙ АРГУМЕНТ



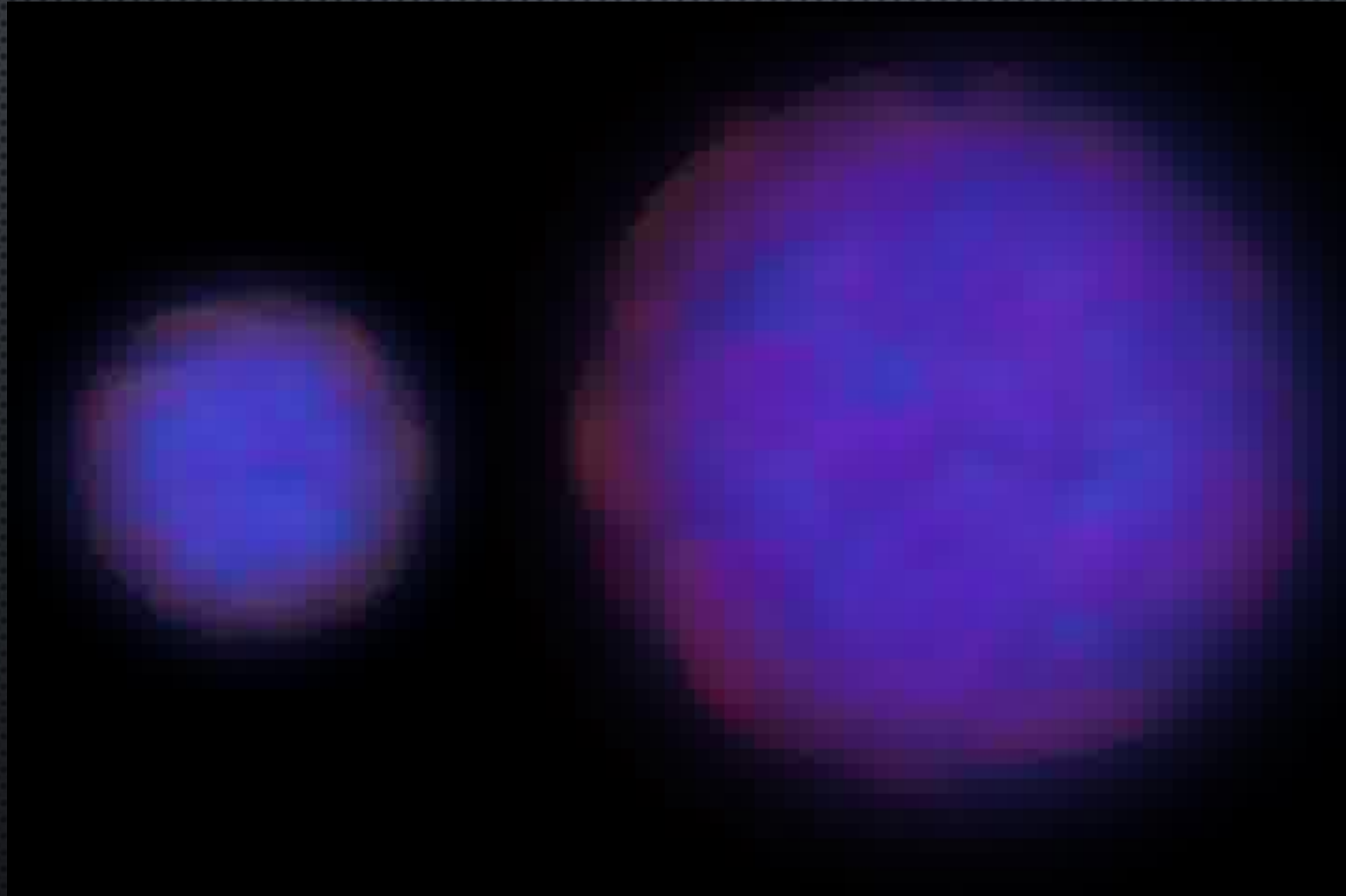
Сталкивающиеся скопления галактик  
1E 0657-56 (Bullet cluster)

# ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ



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

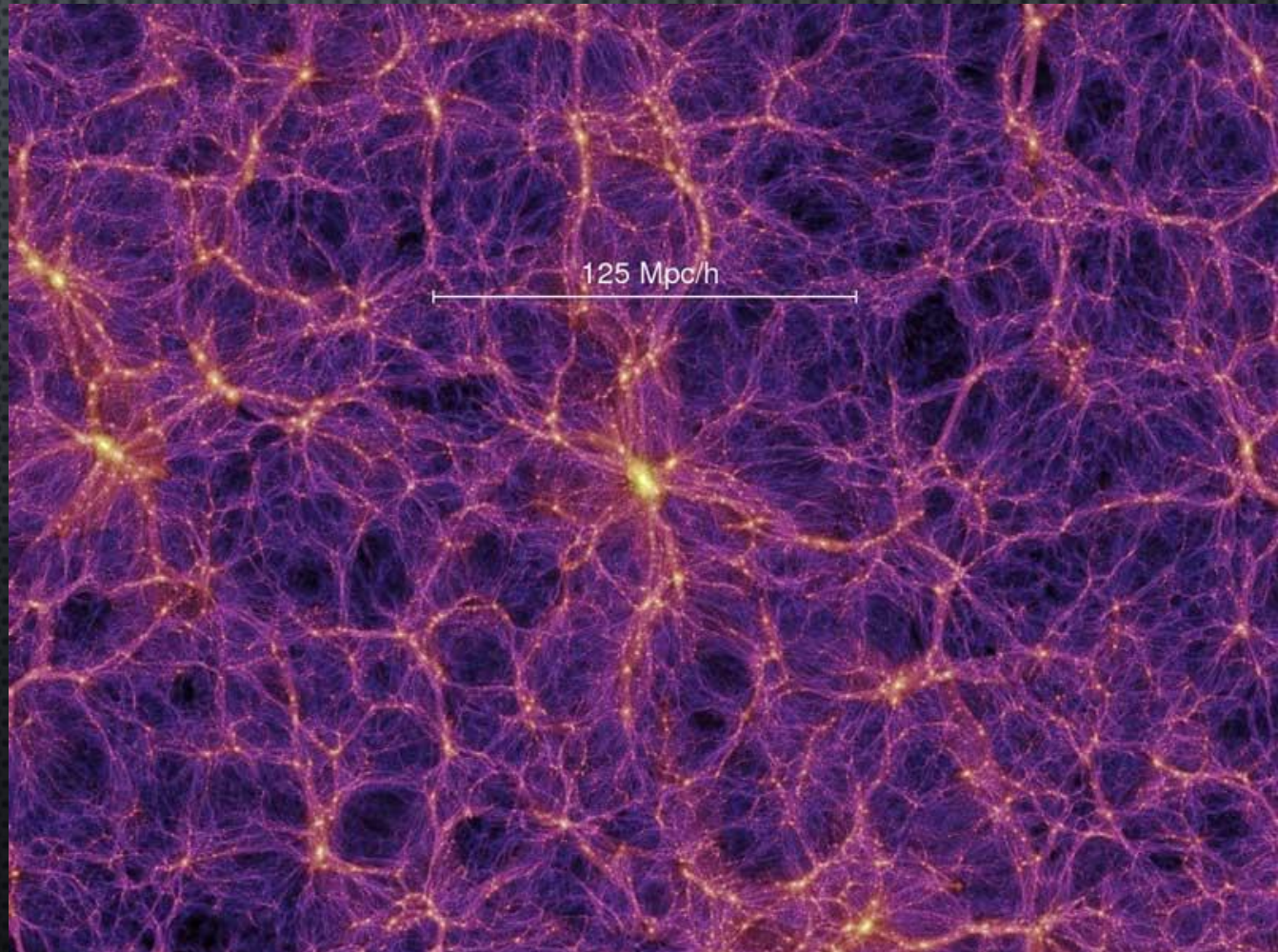
# СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК



# СКЕЛЕТ ВСЕЛЕННОЙ

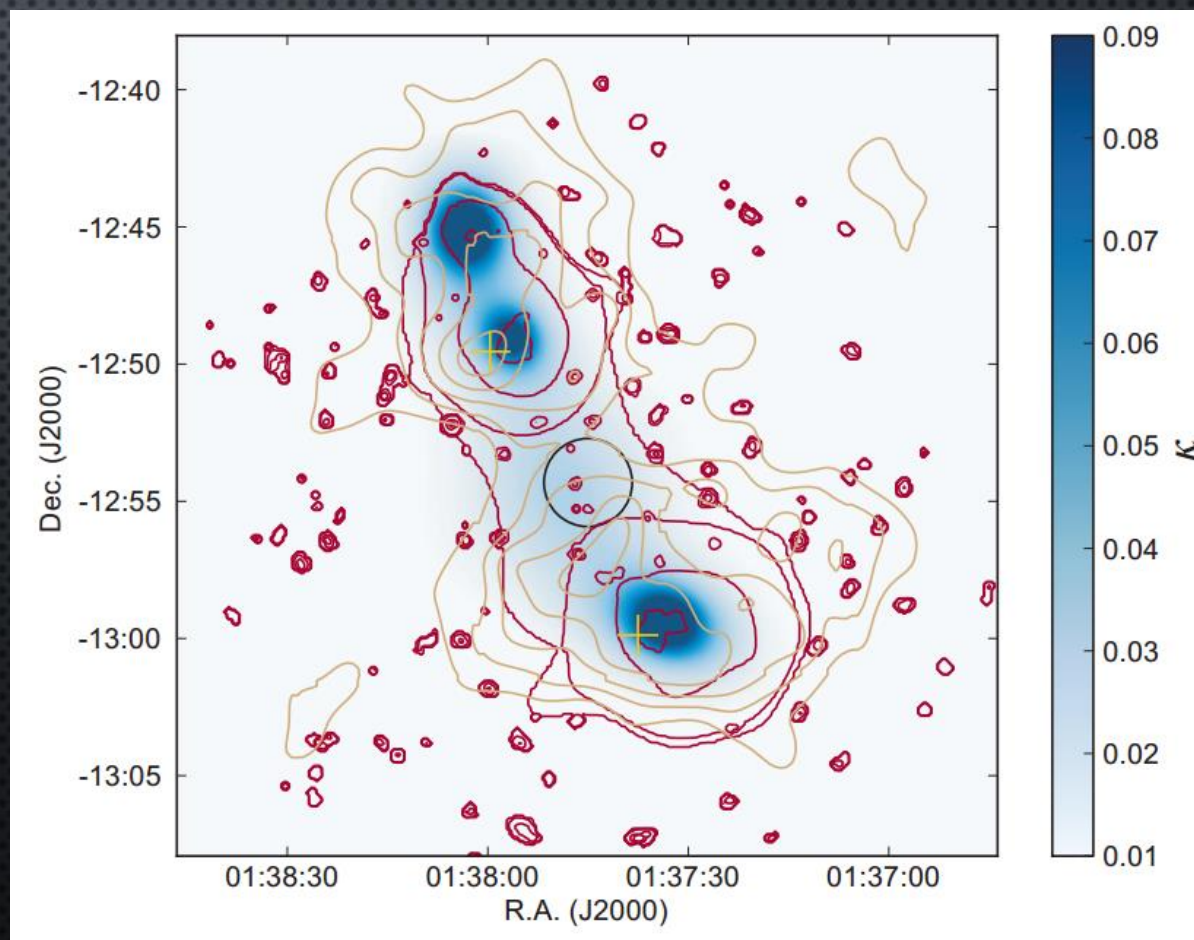
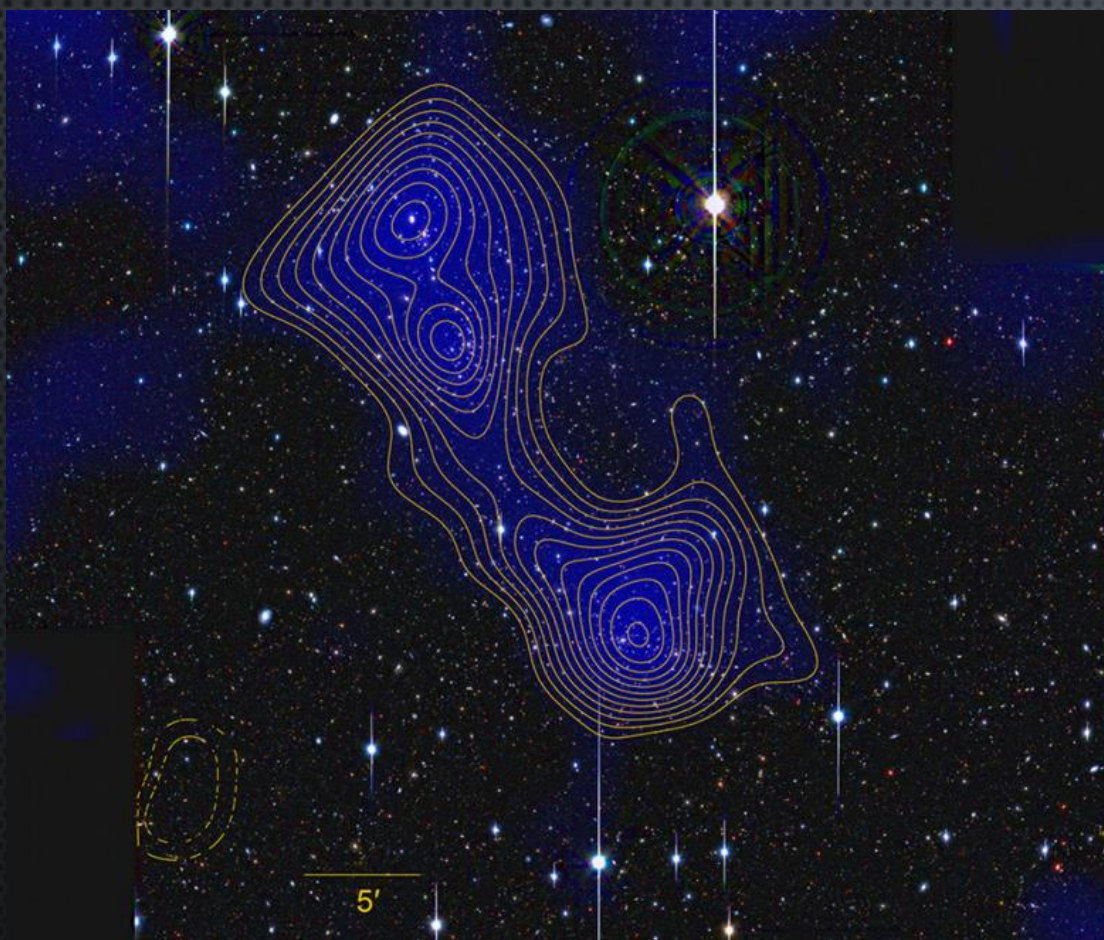
Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом. Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ – т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

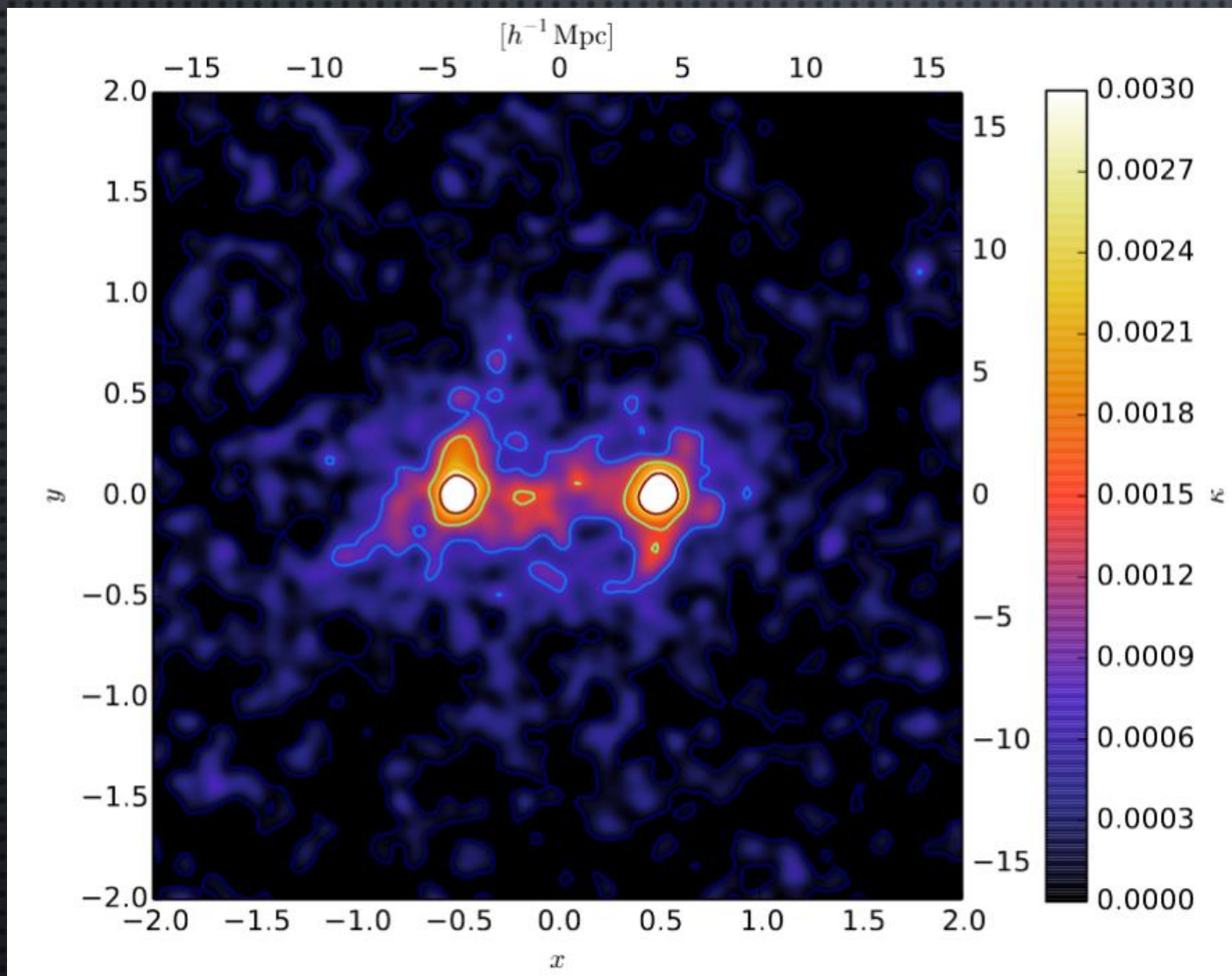


# ВОЛОКНО ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

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



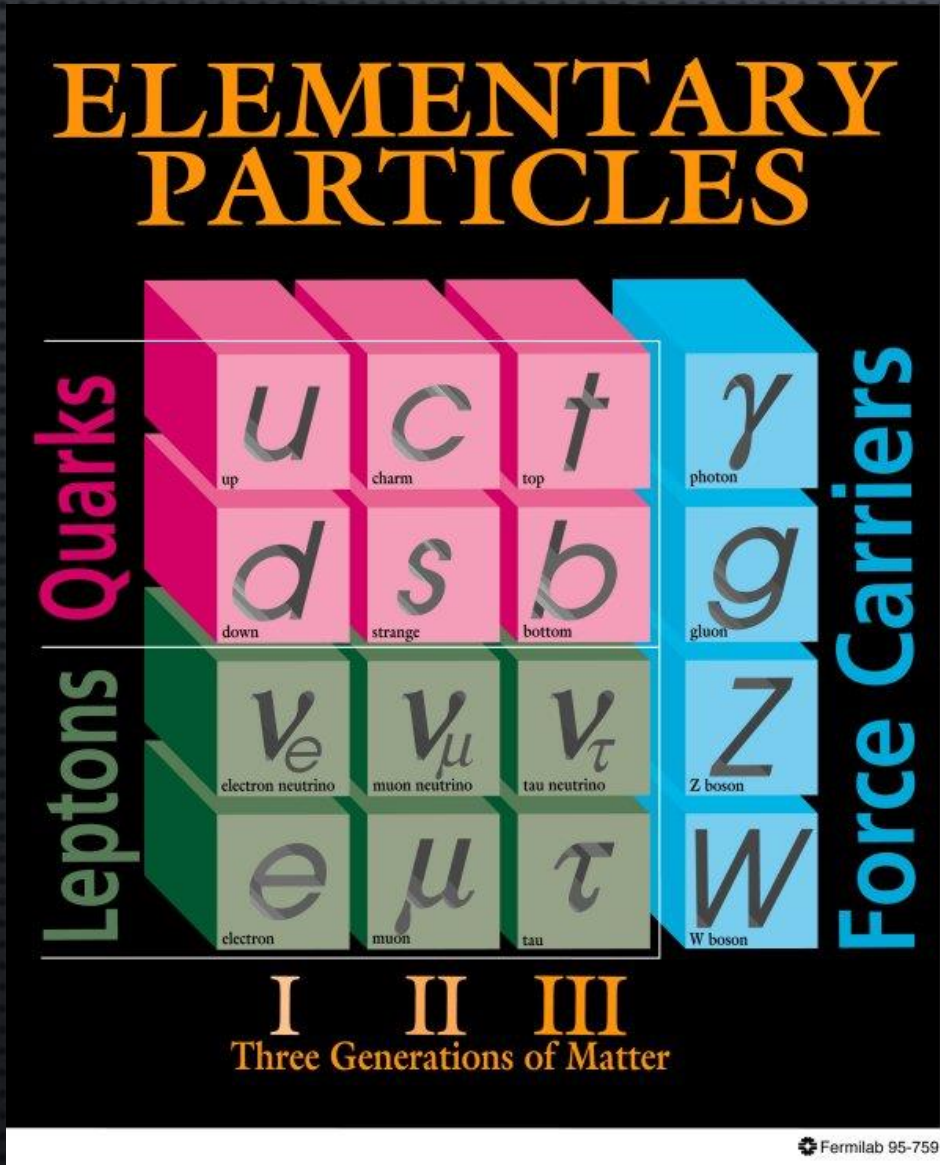
Результат получен не для какой-то конкретной пары галактик, а в результате сложения данных по многим парам.

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.

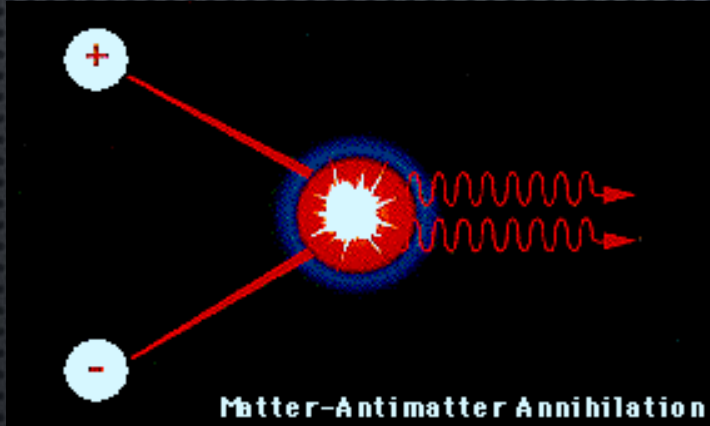
Обсуждаются самые разные варианты.

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.



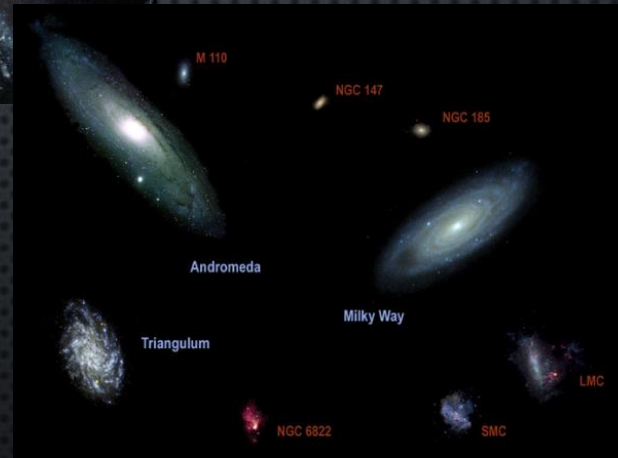
- 2) Также можно искать гамма-лучи от аннигиляции частиц темного вещества

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

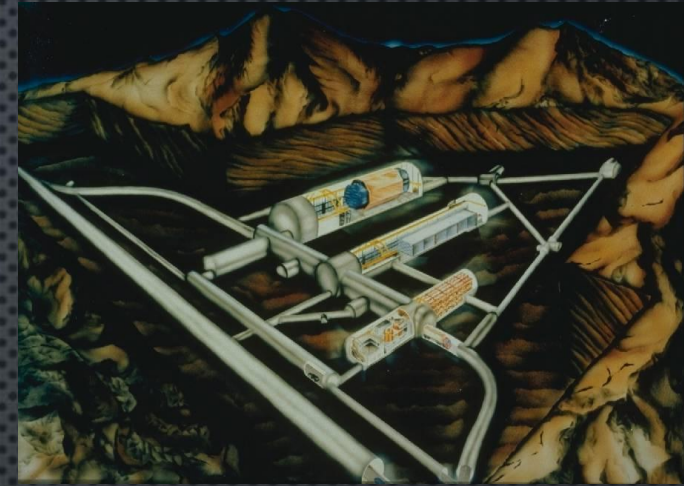


Галактика

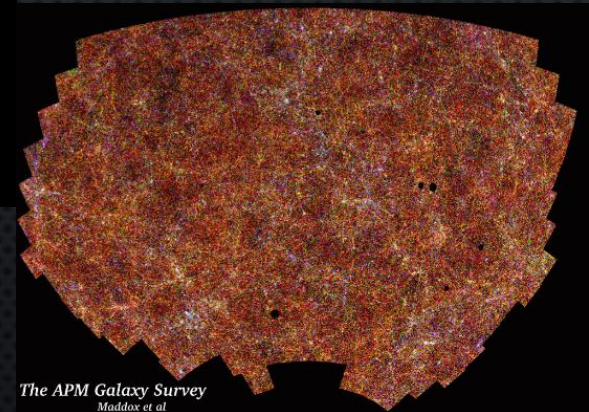
- 3) Поиск античастиц от аннигиляции или распада частиц темного вещества. (см. УФН 2017 N1)



Ближние галактики



Фон от далеких галактик

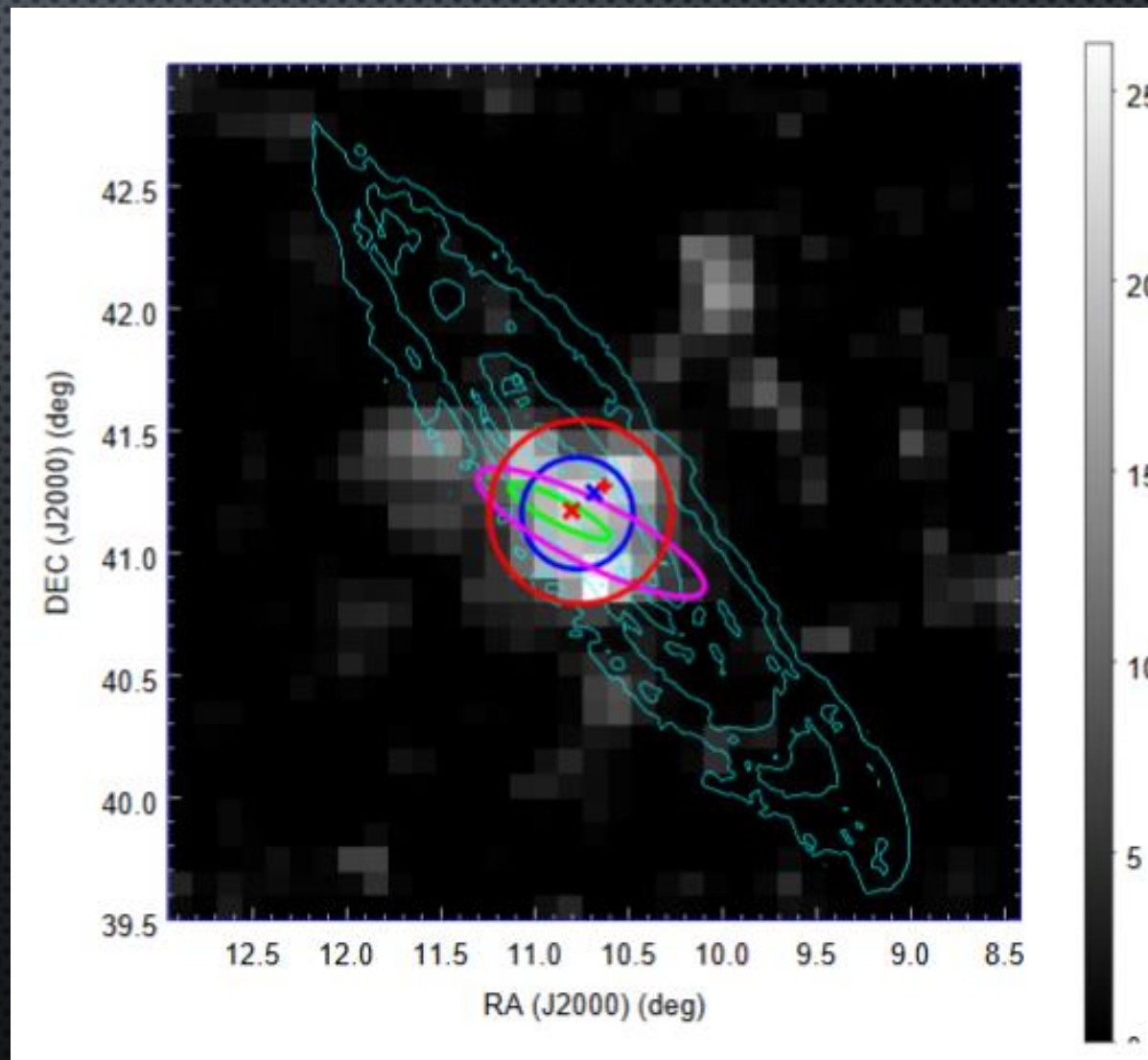
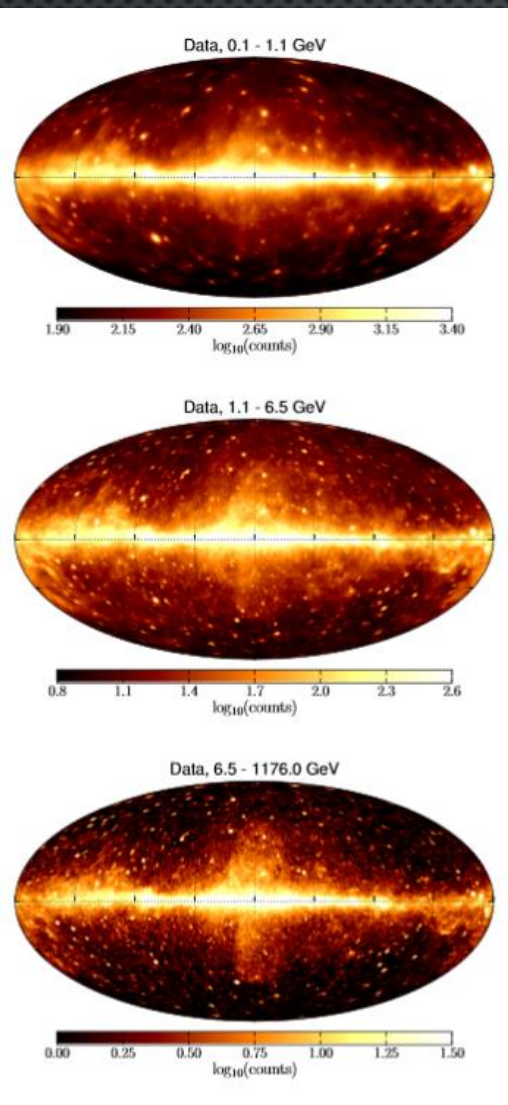


Так же была надежда найти что-то на LHC

# АННИгиЛЯЦИОННЫЙ СИГНАЛ

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

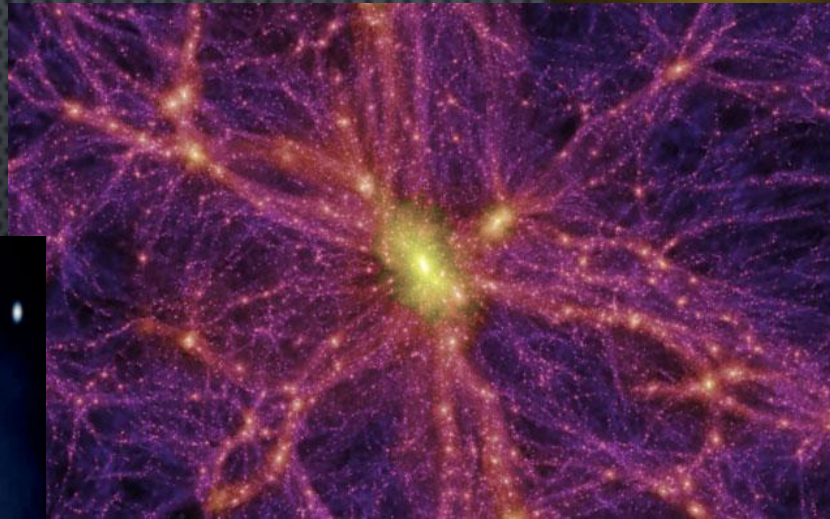
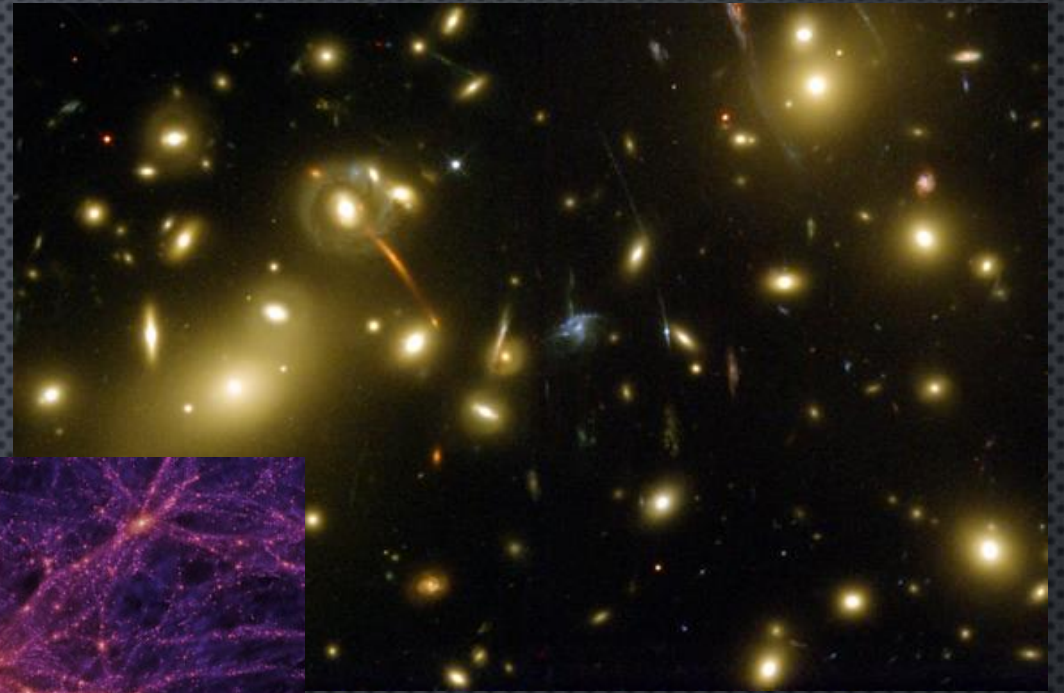
Появились сообщения об избыточном сигнале от центра М31.



# (ТЕМНЫЕ) ФАКТЫ И НАДЕЖДЫ

Темная материя проявляется себя благодаря своей гравитации:

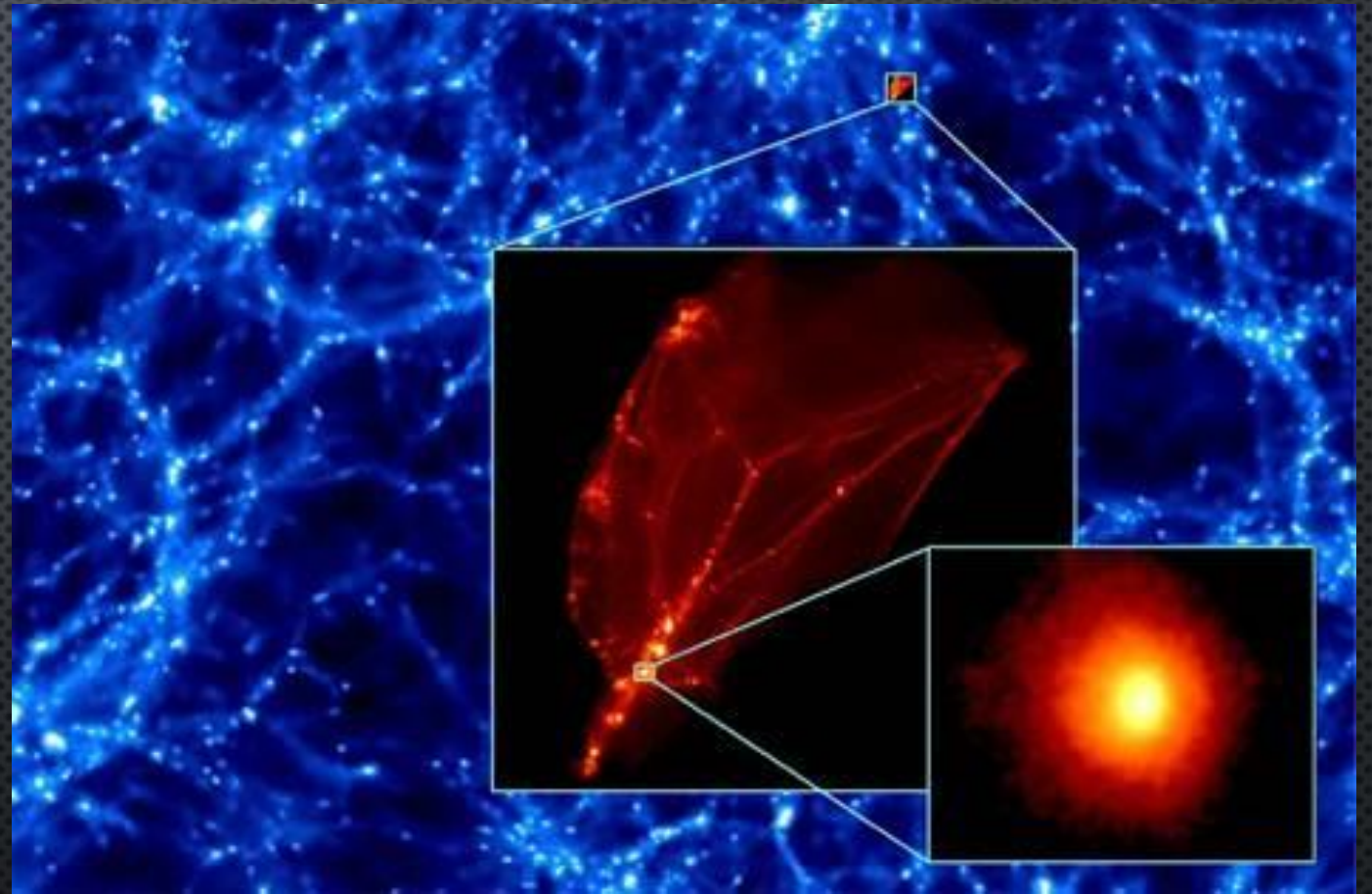
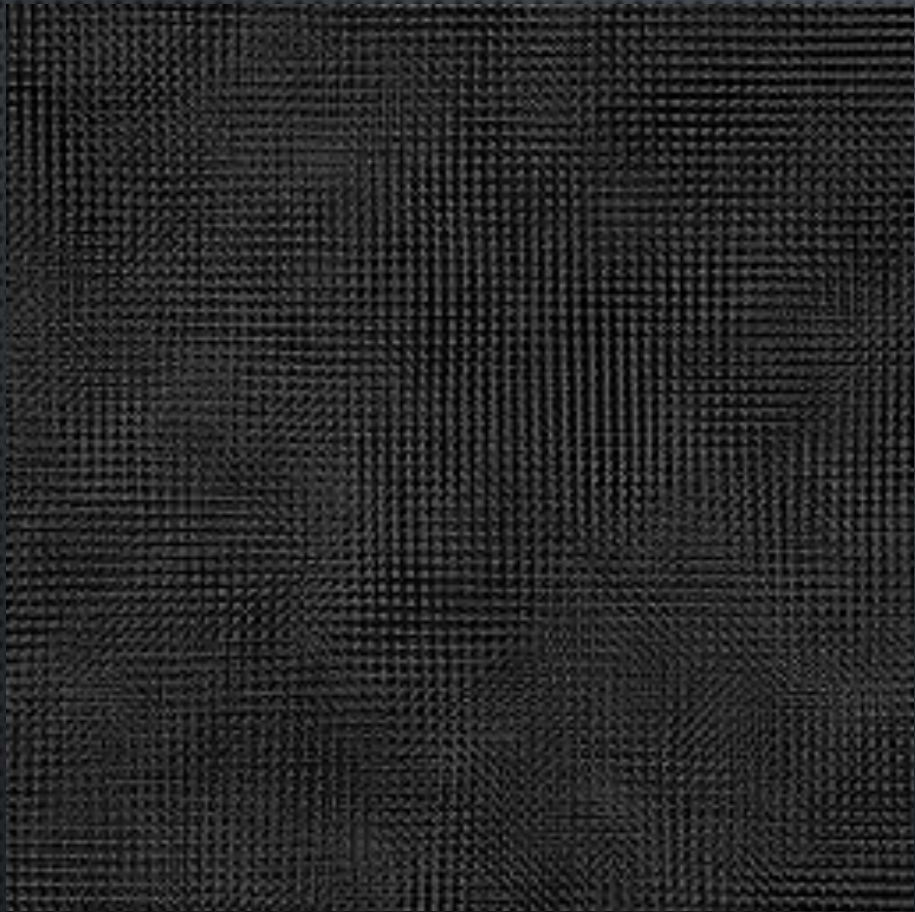
- в скоплениях галактик
- в отдельных галактиках
- в линзировании
- в росте структуры
- в полной плотности вселенной



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?

# КЛАССИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla \varphi &= 0, \\ \nabla^2 \varphi - 4\pi G \rho &= 0. \end{aligned}$$

$$\rho = \rho_0 + \delta\rho, \mathbf{v} = \delta\mathbf{v}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \delta\rho}{\partial t} + \rho_0 \nabla \cdot \delta\mathbf{v} &= 0, \\ \frac{\partial \delta\mathbf{v}}{\partial t} + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s \nabla \delta\rho + \frac{1}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)_\rho \nabla \delta s + \nabla \delta\varphi &= 0, \\ \nabla^2 \delta\varphi - 4\pi G \delta\rho &= 0, \end{aligned}$$

$$\delta u_i = \delta_i \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \quad \delta_i(t) = \delta_{0i} \exp(i\omega t)$$

$$v_s^2 = (\partial p / \partial \rho)_s$$

$$\begin{aligned} \omega \delta_0 + \mathbf{k} \cdot \mathbf{V} &= 0, \\ \omega \mathbf{V} + \mathbf{k} v_s^2 \delta_0 + \frac{\mathbf{k}}{\rho_0} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)_\rho \Sigma + \mathbf{k} \Phi &= 0, \\ k^2 \Phi + 4\pi G \rho_0 \delta_0 &= 0, \end{aligned}$$

$$\omega^2 - v_s^2 k^2 + 4\pi G \rho_0 = 0$$

$$\lambda_J = v_s \left( \frac{\pi}{G \rho_0} \right)^{1/2}$$

$$\lambda > \lambda_J$$

$$\omega = \pm i (4\pi G \rho_0)^{1/2} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_J}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2}$$

$$\tau \equiv |\omega|^{-1} = (4\pi G \rho_0)^{-1/2} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_J}{\lambda} \right)^2 \right]^{-1/2}$$

$$\frac{\delta\rho}{\rho_0} = \delta_0 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}) \exp(\pm |\omega| t),$$

$$\delta\mathbf{v} = \mp i \frac{\mathbf{k} \delta_0}{k^2} (4\pi G \rho_0)^{1/2} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_J}{\lambda} \right)^2 \right]^{1/2} \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} \pm |\omega| t),$$

$$\delta\varphi = -\delta_0 v_s^2 \left( \frac{\lambda}{\lambda_J} \right)^2 \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} \pm |\omega| t),$$

# ФЛУКТУАЦИИ ПЛОТНОСТИ В ПЫЛЕВОЙ ВСЕЛЕННОЙ

$$\rho = \rho_0 \left( \frac{a_0}{a} \right)^3,$$

$$\mathbf{v} = \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{r},$$

$$\varphi = \frac{2}{3} \pi G \rho r^2,$$

$$p = p(\rho, S),$$

$$s = \text{const.};$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 \frac{a}{a_0}.$$

$$\delta \rho + 3 \frac{\dot{a}}{a} \delta \rho + \frac{\dot{a}}{a} (\mathbf{r} \cdot \nabla) \delta \rho + \rho (\nabla \cdot \delta \mathbf{v}) = 0,$$

$$\delta \dot{\mathbf{v}} + \frac{\dot{a}}{a} \delta \mathbf{v} + \frac{\dot{a}}{a} (\mathbf{r} \cdot \nabla) \delta \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla \delta p - \nabla \delta \varphi,$$

$$\nabla^2 \delta \varphi - 4\pi G \delta \rho = 0,$$

$$\delta \dot{s} + \frac{\dot{a}}{a} (\mathbf{r} \cdot \nabla) \delta s = 0,$$

$$\delta u_i = u_i(t) \exp(i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r}),$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi a_0}{\lambda_0 a} = k_0 \frac{a_0}{a}$$

$$\dot{D} + 3 \frac{\dot{a}}{a} D + i\rho \mathbf{k} \cdot \mathbf{V} = 0,$$

$$\dot{\mathbf{V}} + \frac{\dot{a}}{a} \mathbf{V} + i v_s^2 \mathbf{k} \frac{D}{\rho} + i \frac{\mathbf{k}}{\rho} \left( \frac{\partial p}{\partial s} \right)_\rho \Sigma + i \mathbf{k} \Phi = 0,$$

$$k^2 \Phi + 4\pi G D = 0,$$

$$\dot{\Sigma} = 0.$$

$$\Sigma = 0 \text{ and } \mathbf{V} \text{ parallel to } \mathbf{k}$$

$$\ddot{\delta} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} + (v_s^2 k^2 - 4\pi G \rho) \delta = 0$$

# ПЫЛЕВАЯ ПЛОСКАЯ ВСЕЛЕННАЯ

$$\rho = \frac{1}{6\pi G t^2},$$

$$a = a_0 \left( \frac{t}{t_0} \right)^{2/3},$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{2}{3t},$$

$$v_s = \left( \frac{5k_B T_m}{3m} \right)^{1/2} = \left( \frac{5k_B T_{0m}}{3m} \right)^{1/2} \frac{a_0}{a}$$

$$\ddot{\delta} + \frac{4\dot{\delta}}{3t} - \frac{2}{3t^2} \left( 1 - \frac{v_s^2 k^2}{4\pi G \rho} \right) \delta = 0.$$

$$\delta_+ \propto t^{2/3}$$



# РАДИАЦИОННО-ДОМИНИРОВАННАЯ ВСЕЛЕННАЯ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho + \frac{p}{c^2} \right) \mathbf{v} = 0,$$

$$v_s = c/\sqrt{3}.$$

$$\left( \rho + \frac{p}{c^2} \right) \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) + \nabla p + \left( \rho + \frac{p}{c^2} \right) \nabla \varphi = 0,$$

$$\nabla^2 \varphi - 4\pi G \left( \rho + 3 \frac{p}{c^2} \right) = 0;$$

$$\ddot{\delta} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \dot{\delta} + (v_s^2 k^2 - \frac{32}{3} \pi G \rho) \delta = 0,$$

$$a = a_{\text{eq}} \left( \frac{t}{t_{\text{eq}}} \right)^{1/2},$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = \frac{1}{2t},$$

$$\ddot{\delta} + \frac{\dot{\delta}}{t} - \frac{1}{t^2} \left( 1 - \frac{3v_s^2 k^2}{32\pi G \rho} \right) \delta = 0.$$

$$\delta_+ \propto t,$$

$$p = w \rho c^2$$

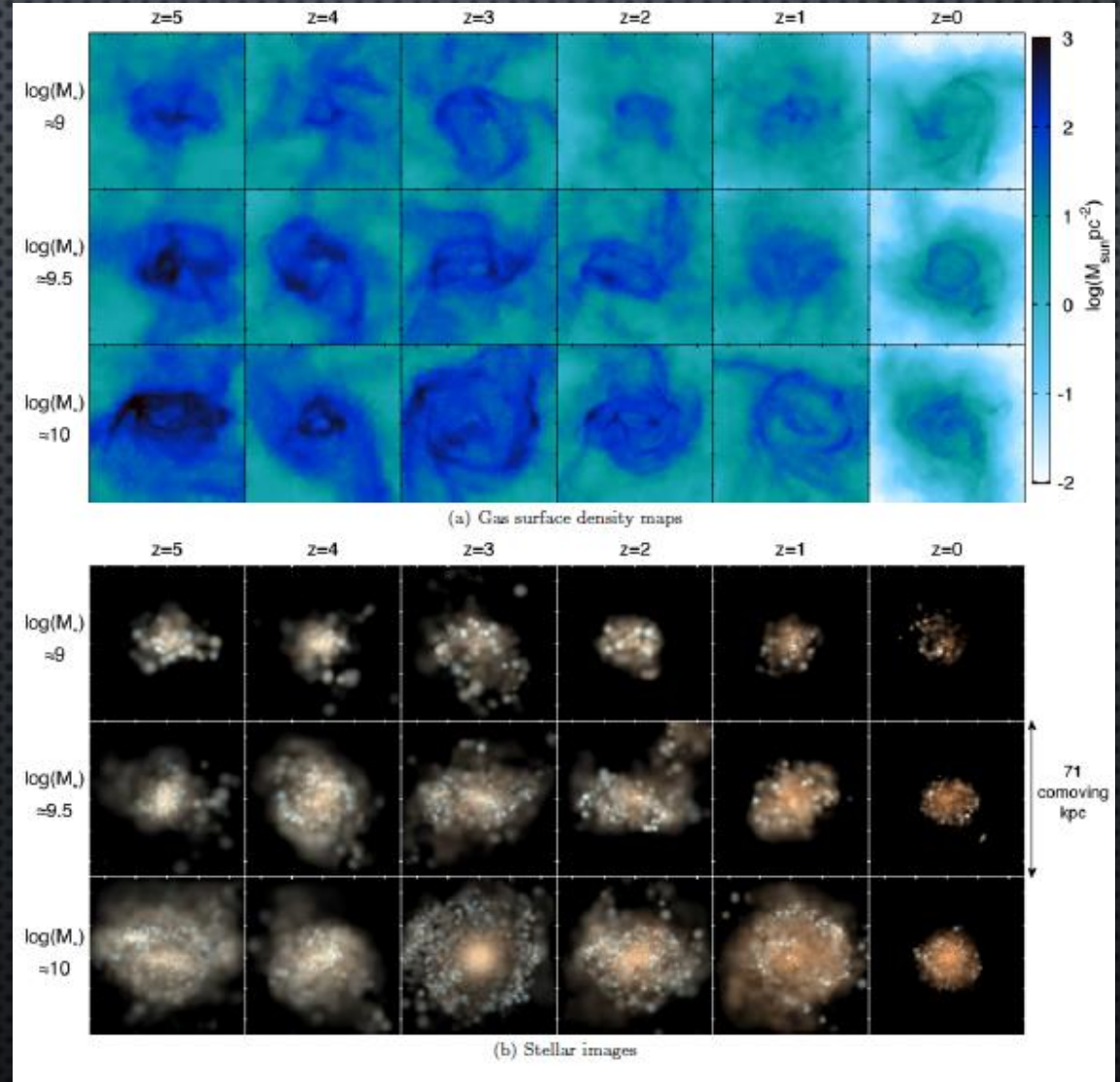
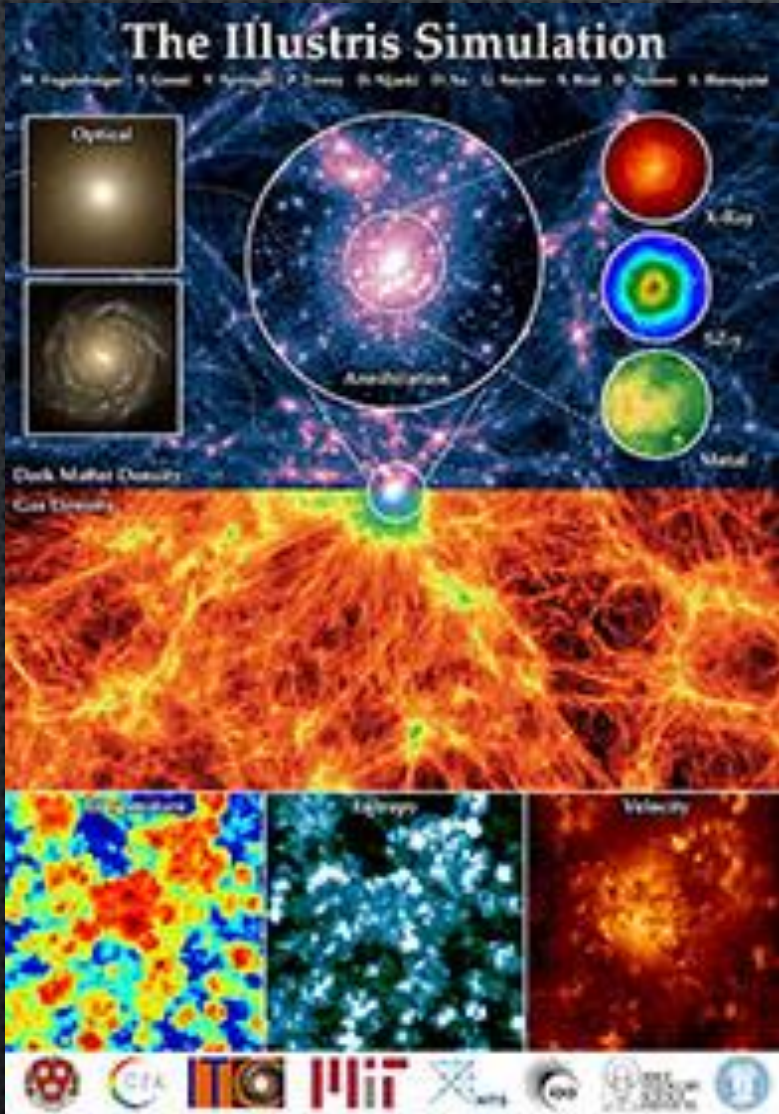
$$v_s = w^{1/2} c \text{ for } w > 0,$$

$$\lambda'_J = \frac{\sqrt{24}}{5 + 9w} v_s \left( \frac{\pi}{G \rho} \right)^{1/2}$$

$$\lambda \gg \lambda'_J$$

$$\delta_+ \propto t^{2(1+3w)/3(1+w)}$$

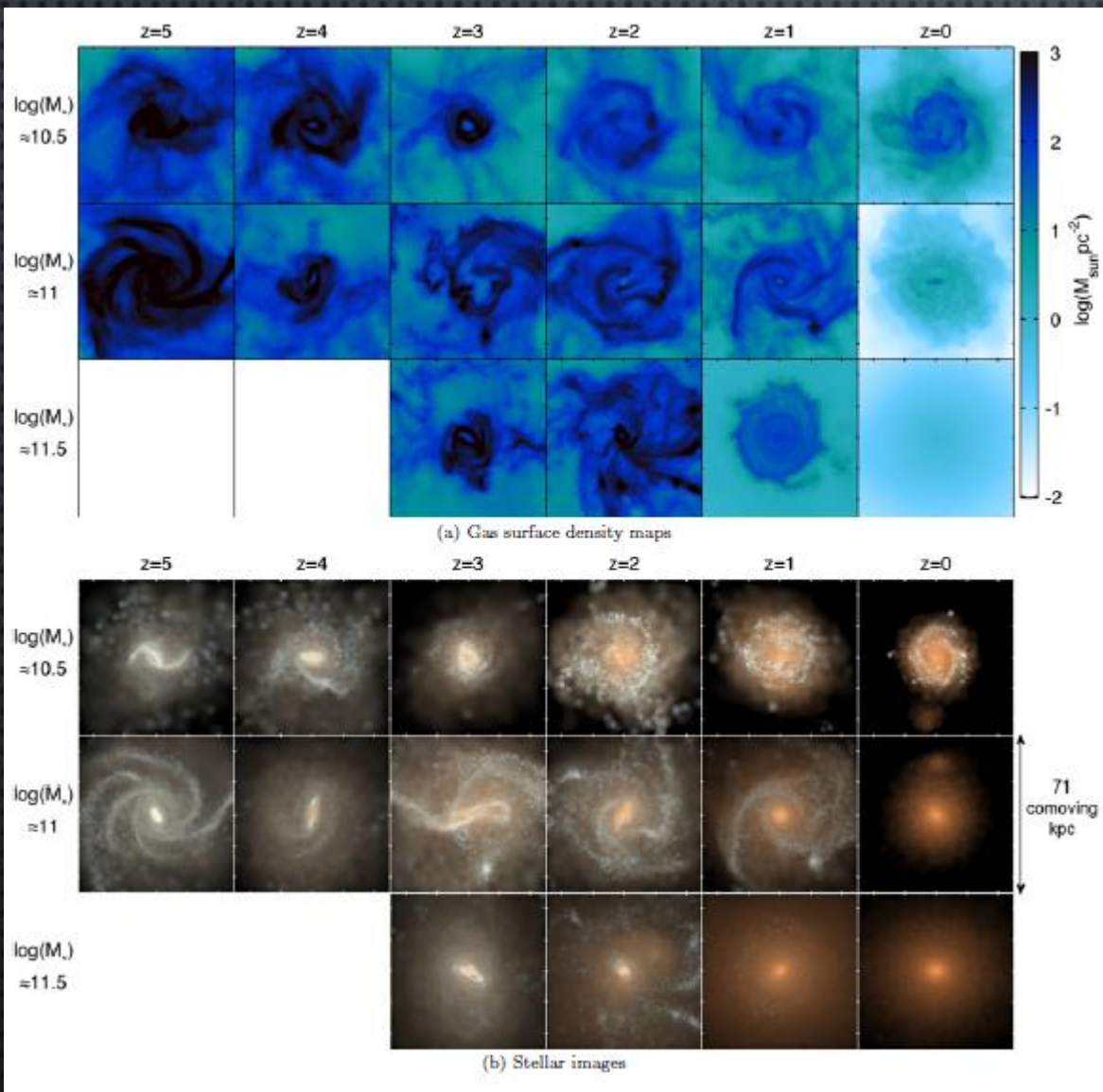
# ILLUSTRIS



Новое численное моделирование формирования галактик и крупномасштабной структуры

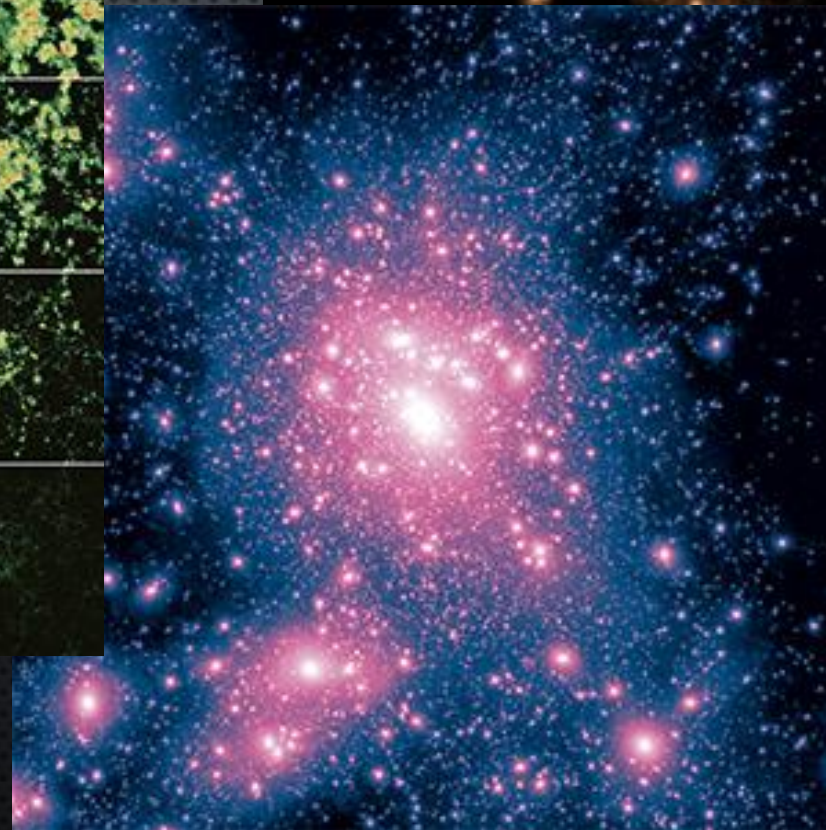
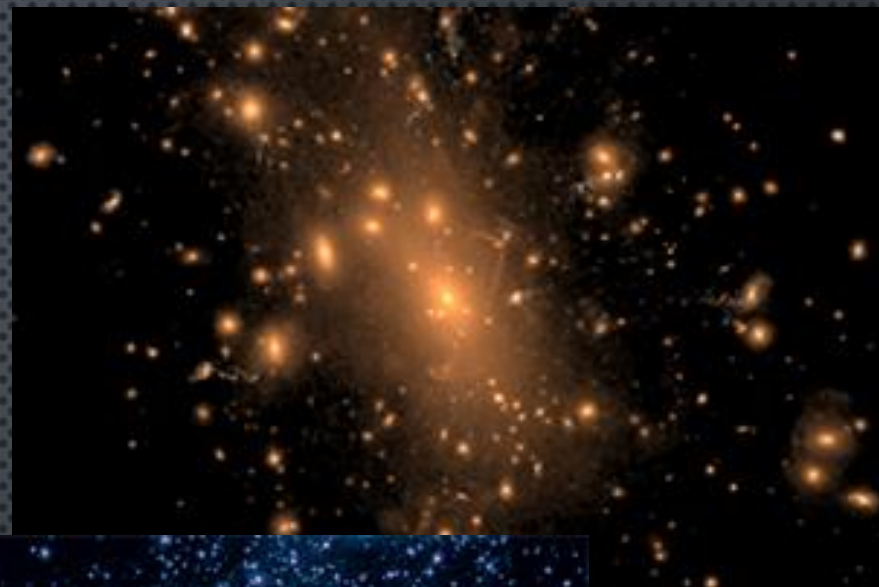
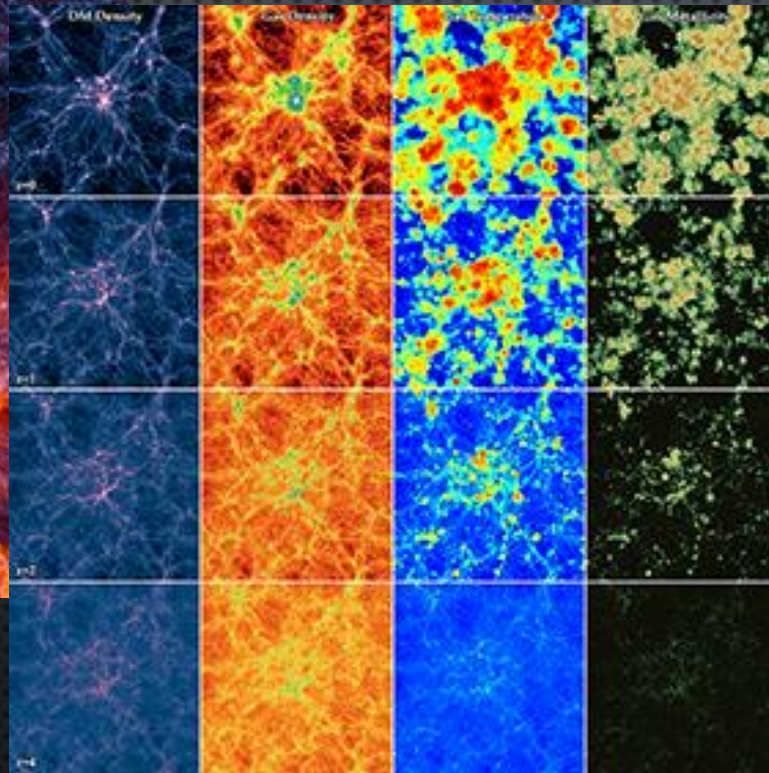
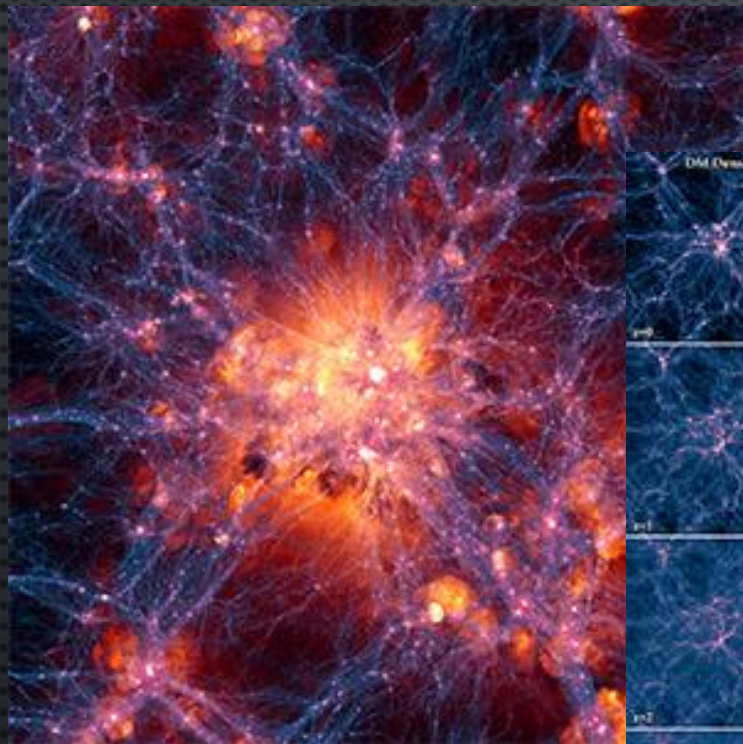
1405.3749

# КРУПНЫЕ ГАЛАКТИКИ

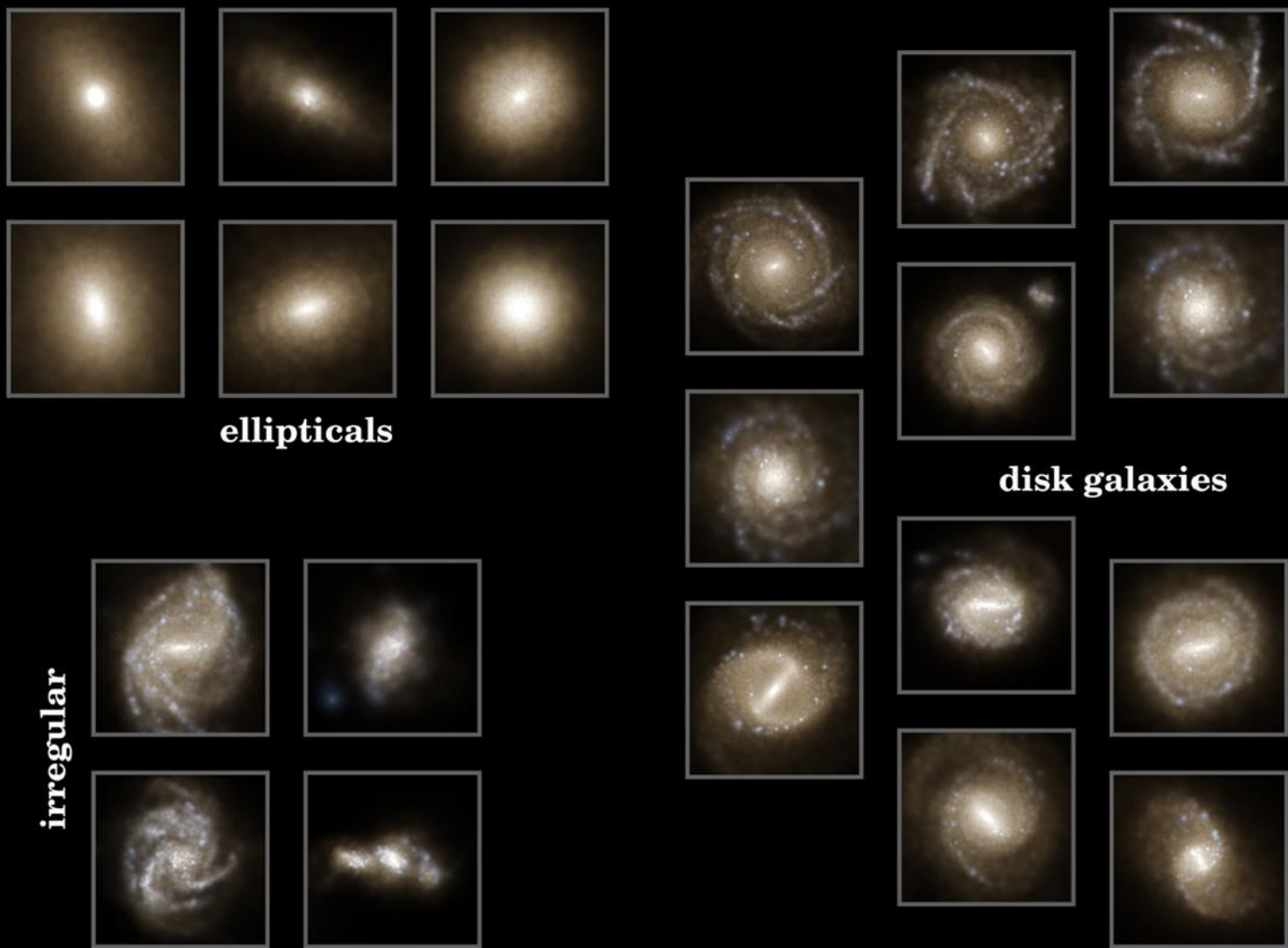


Прямо можно изучать, как образуются галактики разного вида и сравнивать с данными наблюдений.

... ДО САМЫХ  
ДО ОКРАИН ...



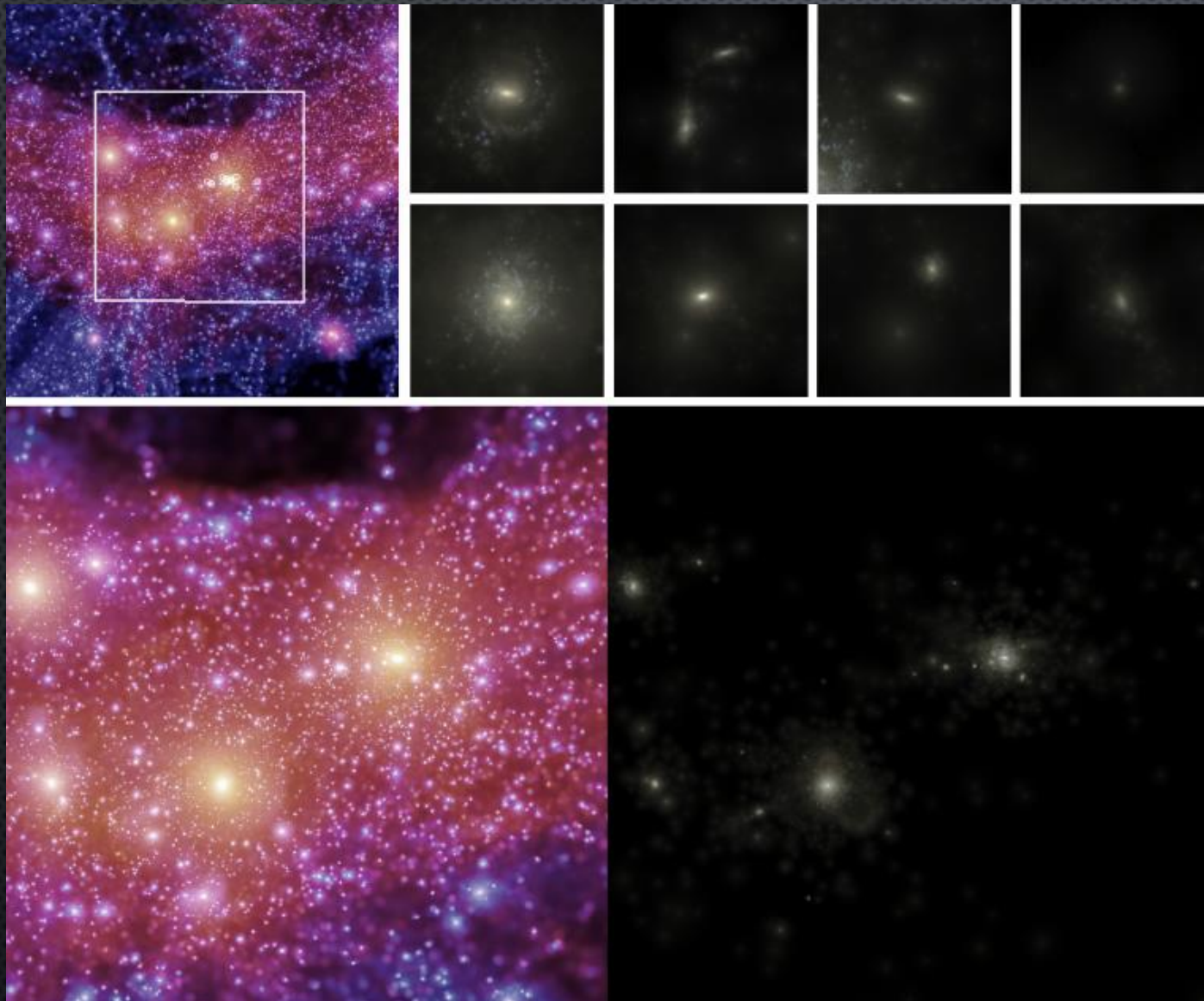
# ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



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

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

# МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

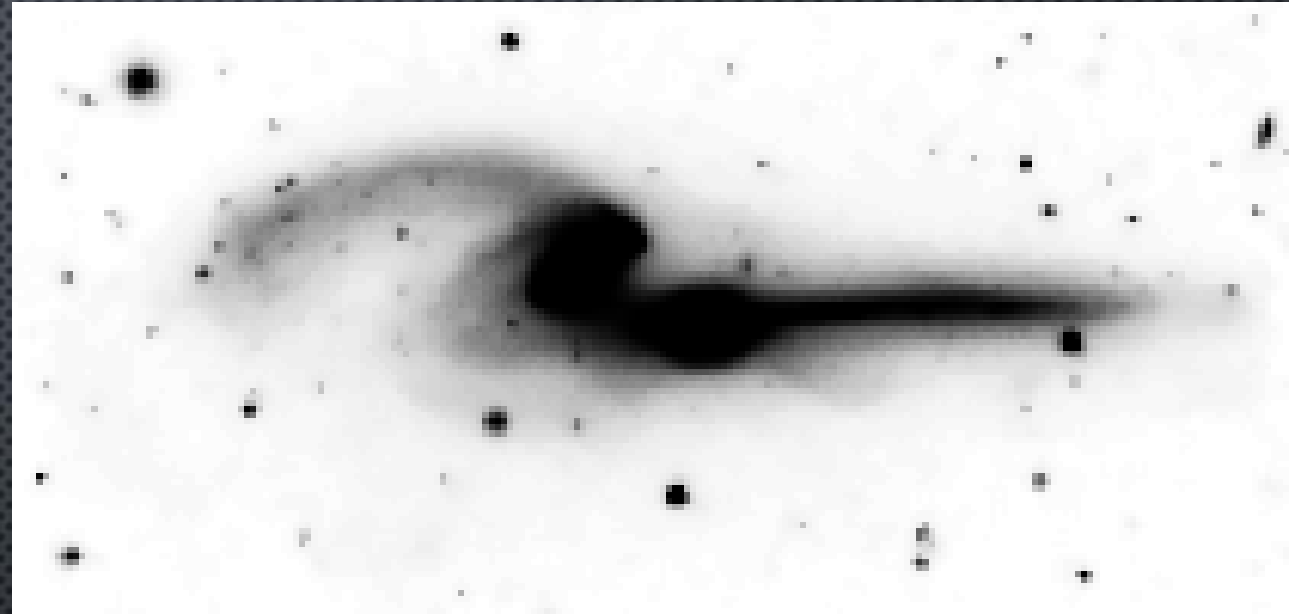


Решены все  
основные проблемы,  
связанные  
со свойствами  
Местной группы.

# ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ

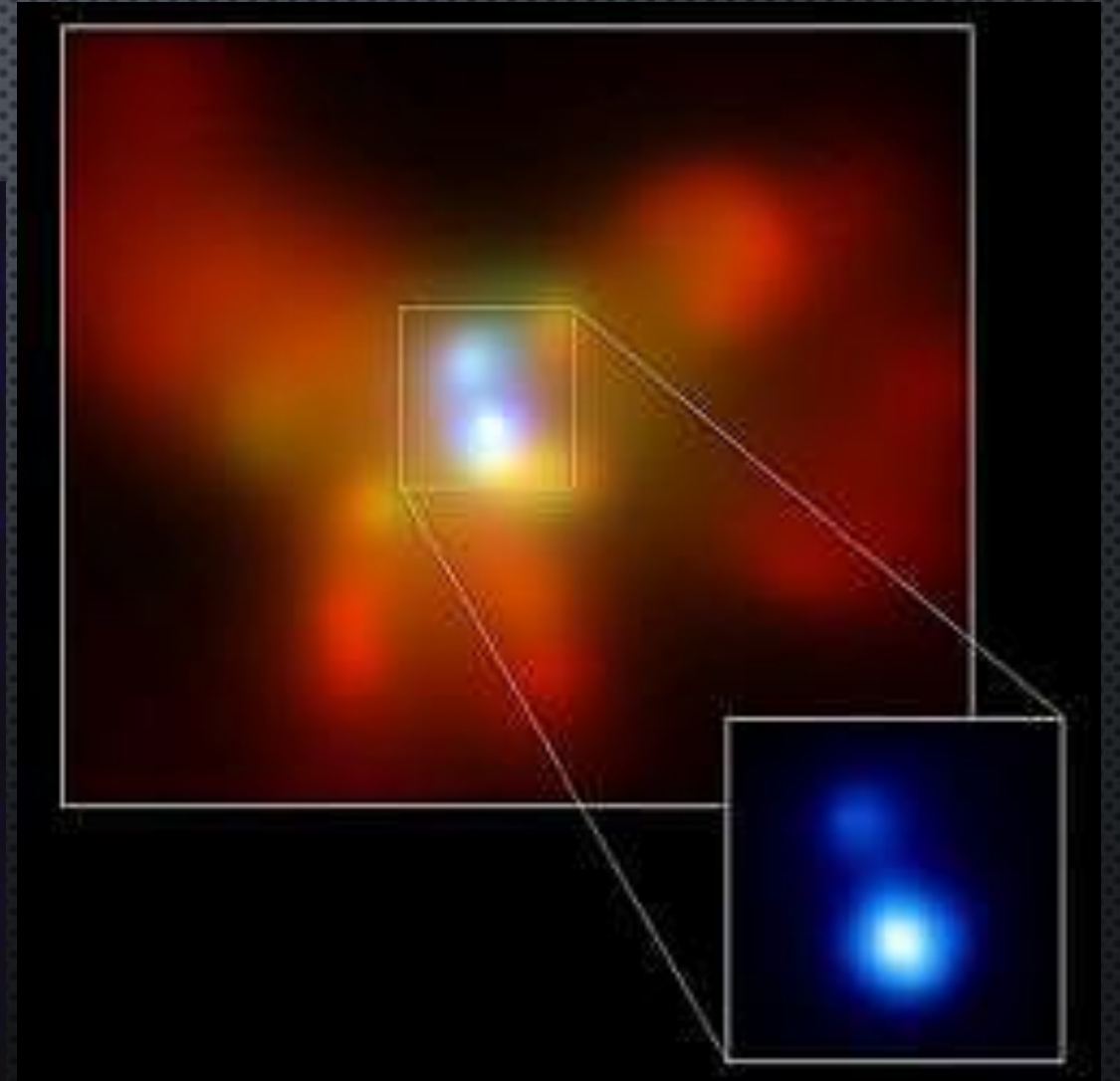
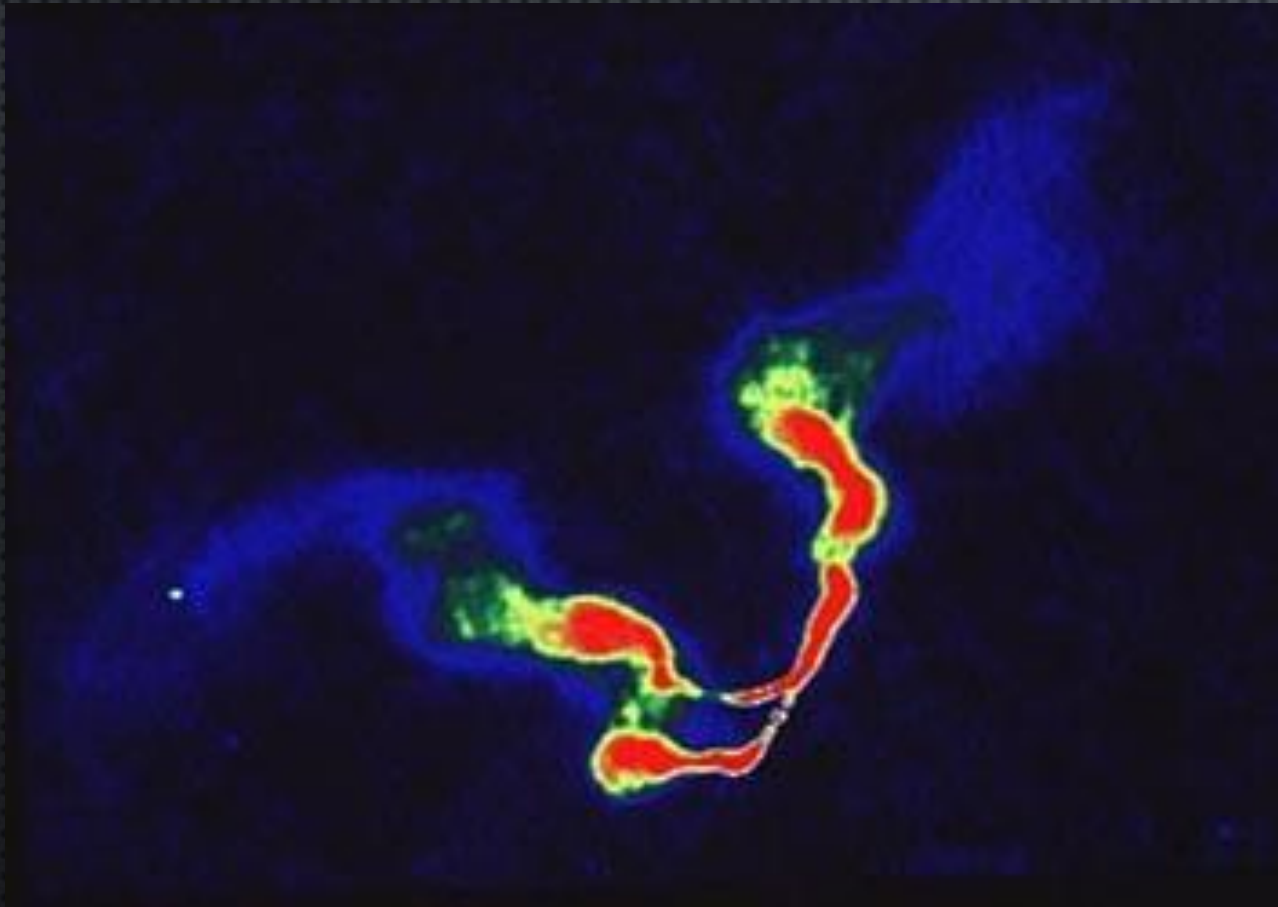


(Hibbard, Barnes)



# ПРИМЕРЫ ДВОЙНЫХ ДЫР

Две пары джетов или двойное активное ядро.

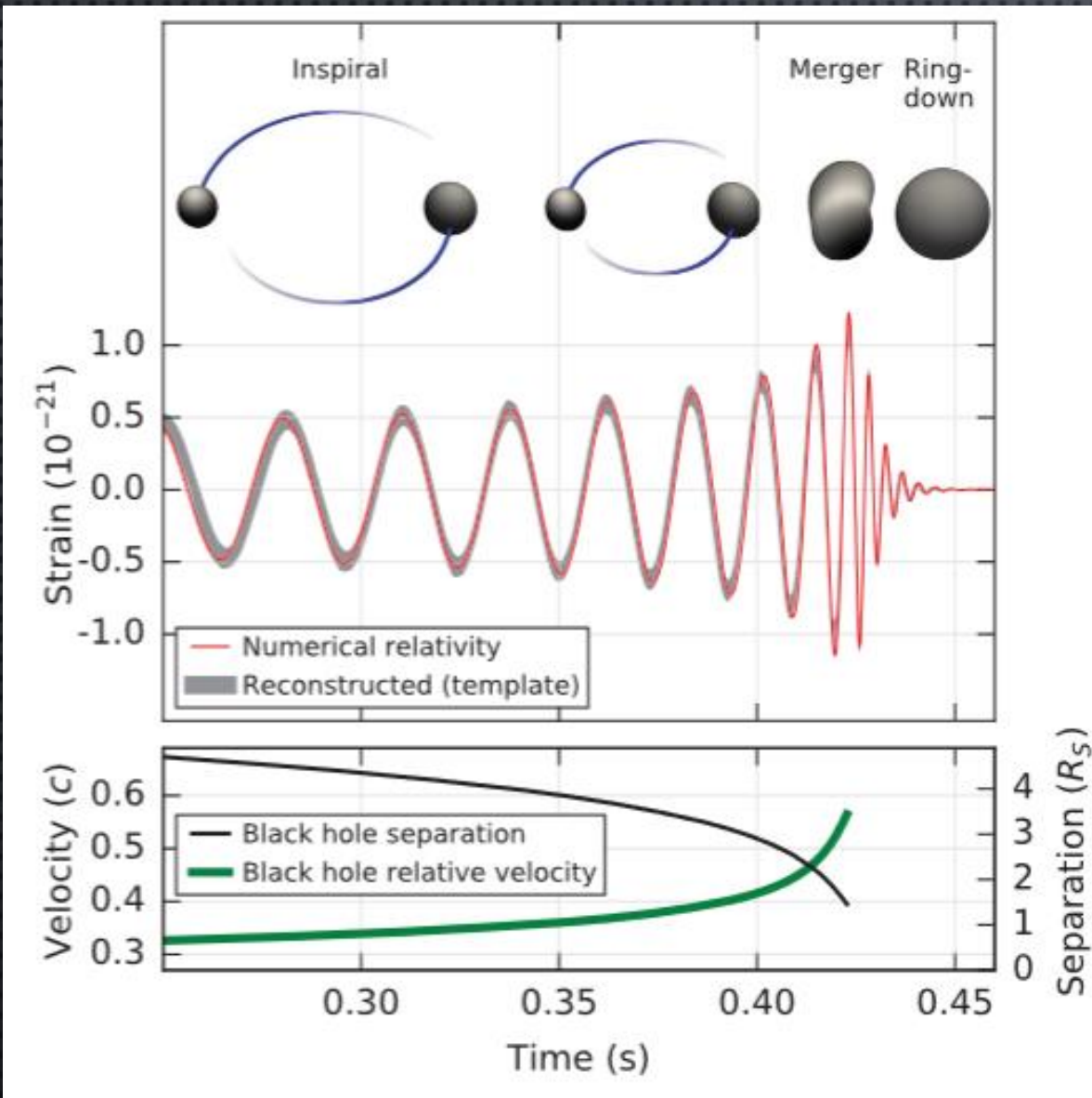


Abell 400

3C75



# СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



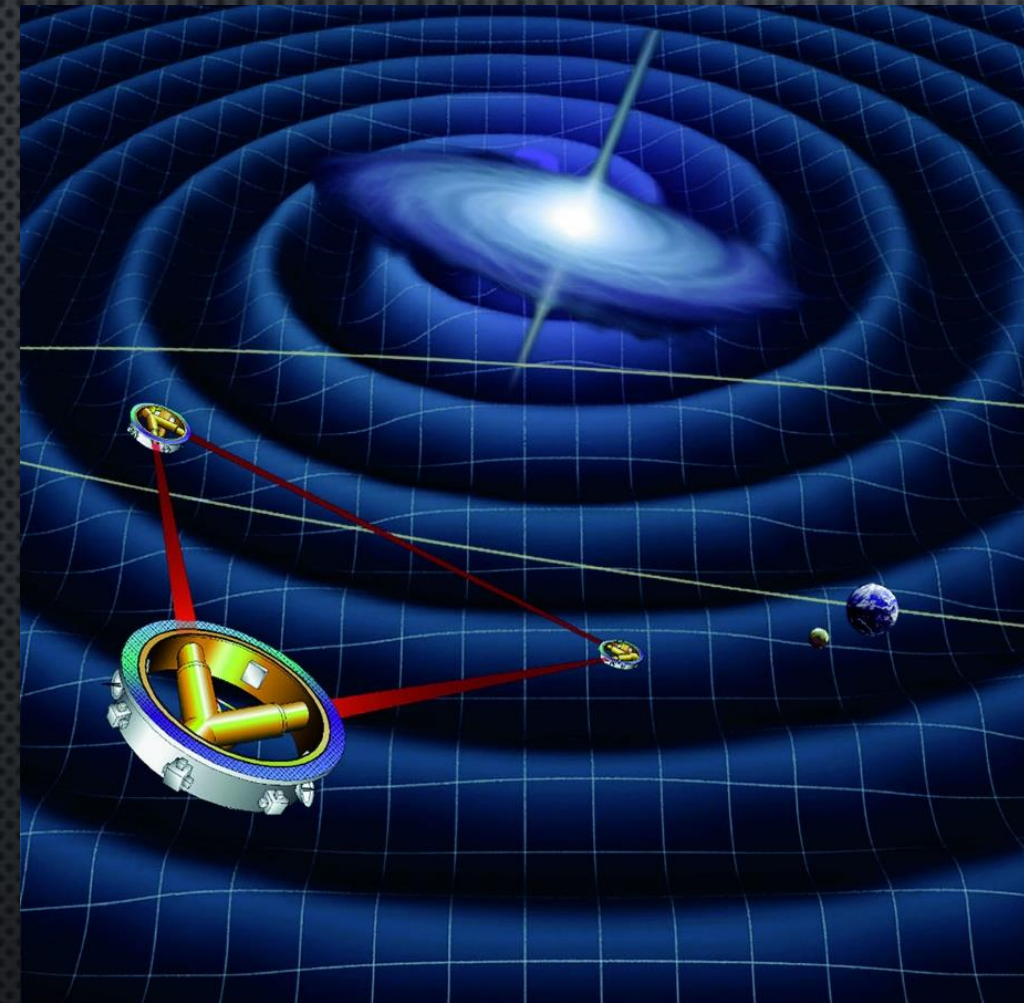
В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр.

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

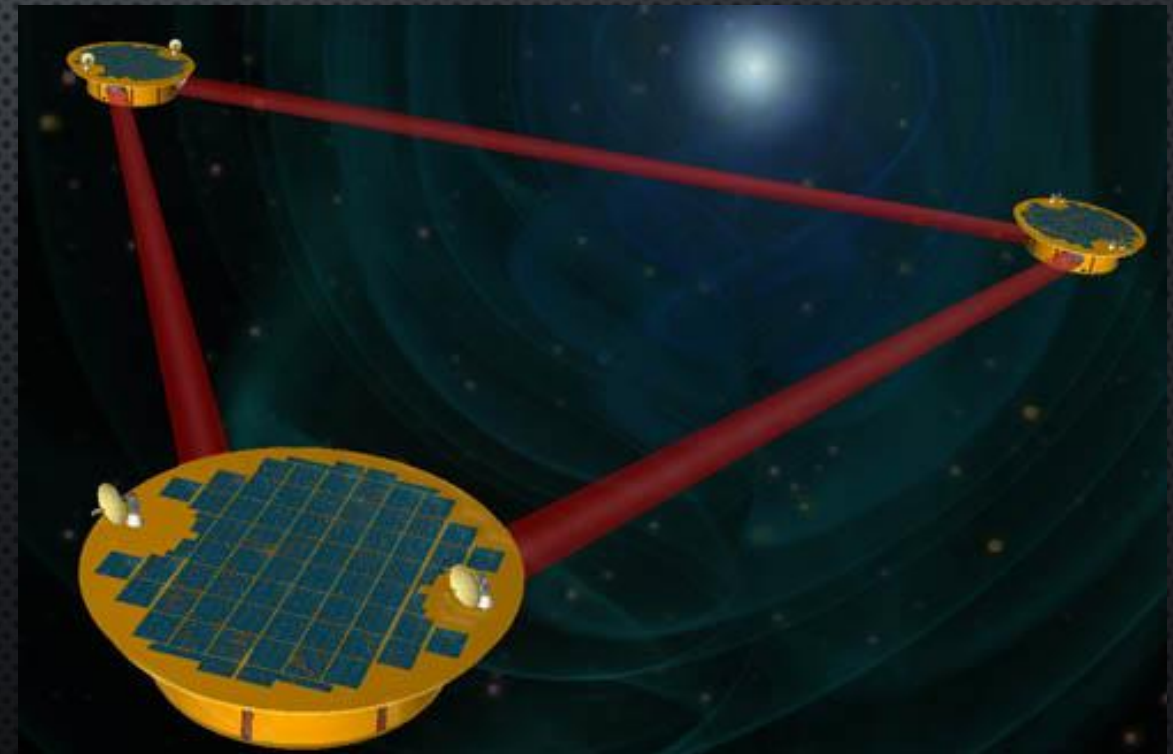
Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознавания слабых всплесков на фоне шумов.

# КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ELISA

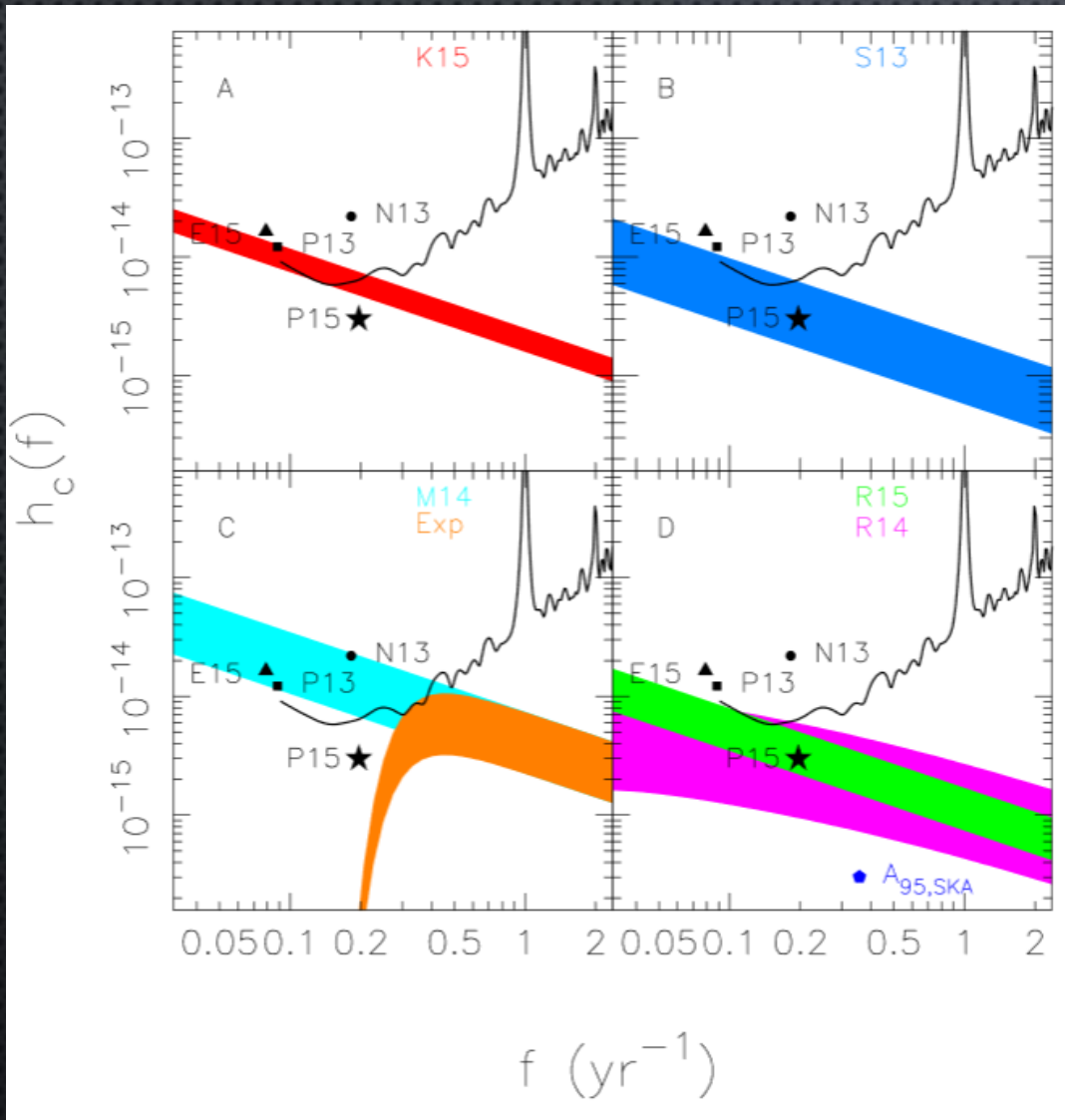
Изначально смета проекта составляла 2.5 миллиарда долларов.  
NASA сняла свое финансирование.  
ESA одобрена заявка на запуск упрощенного варианта в 2032-34 г.  
NASA вернулась в проект.  
Успешно отработал прототип.



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.

