

АСТРОФИЗИКА

Лекция 11

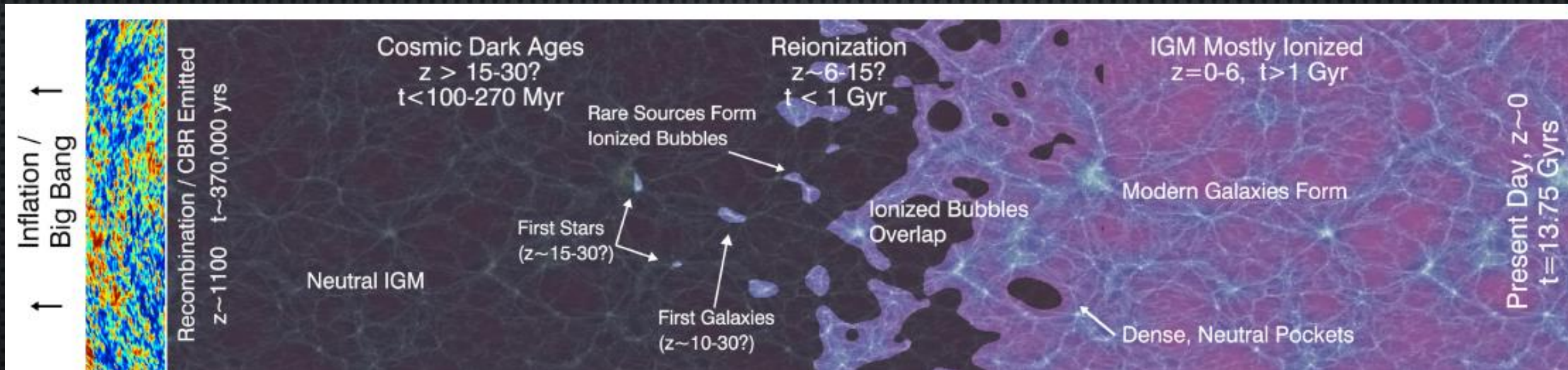
ИСТОРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

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».

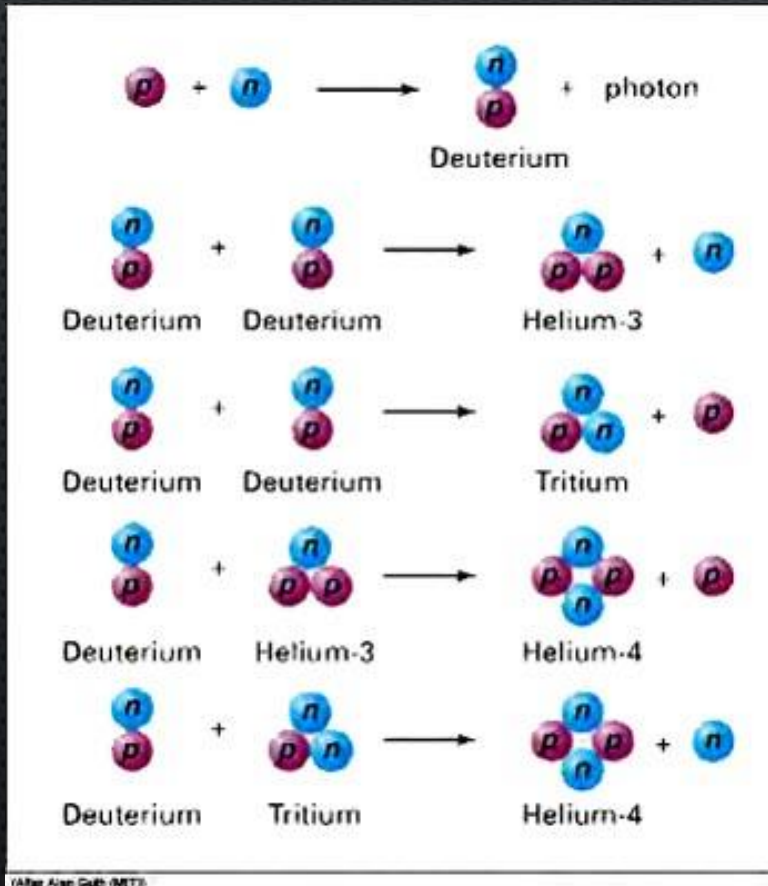
Постепенно начали появляться первые звезды и квазары. Возникали галактики.



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

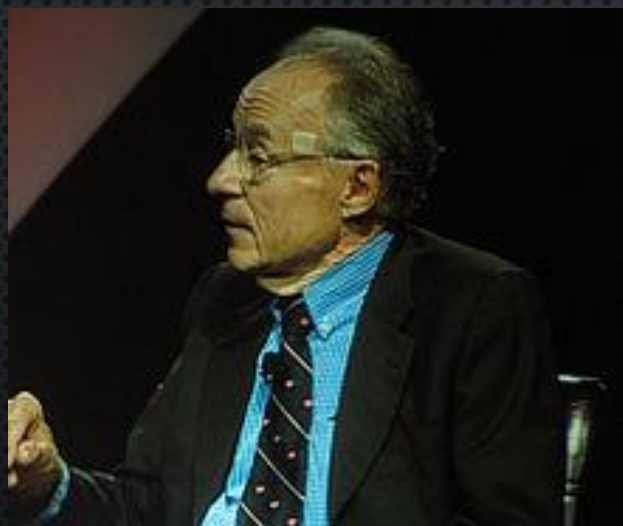
НЕОЖИДАННОЕ ОТКРЫТИЕ

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.

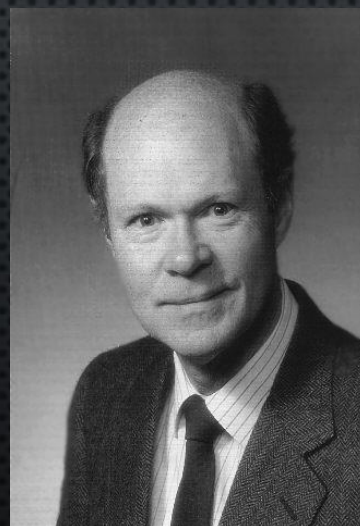
ПОМЕХИ! ШУМ В РАДИОЭФИРЕ!!!!

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

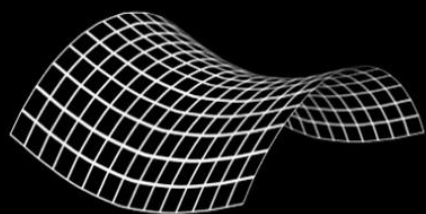
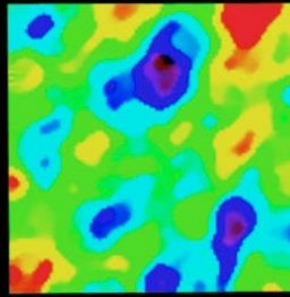
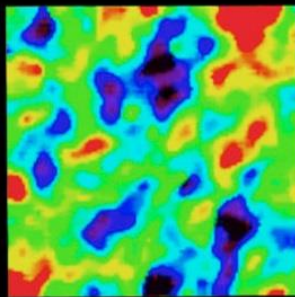
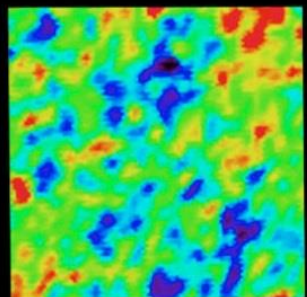


Роберт Вилсон

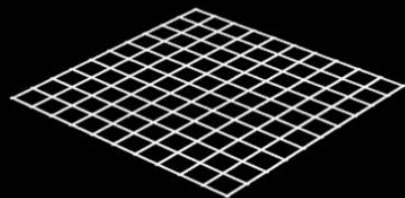


ПЛОТНОСТЬ ВСЕЛЕННОЙ

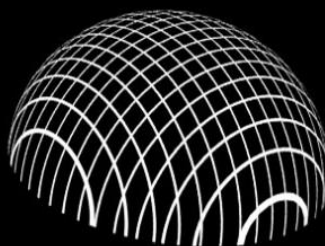
GEOMETRY OF THE UNIVERSE



OPEN



FLAT



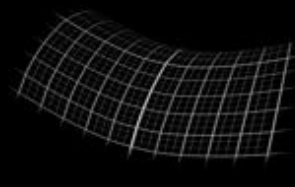
CLOSED

Наблюдения позволяют определить среднюю плотность вселенной.

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

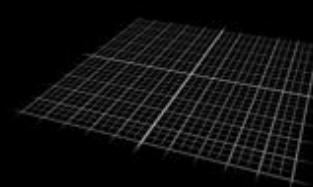
$$\Omega_{\text{Total}} < 1$$

LOWER
DENSITY



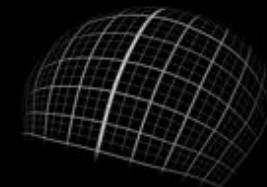
$$\Omega_{\text{Total}} = 1$$

CRITICAL
DENSITY

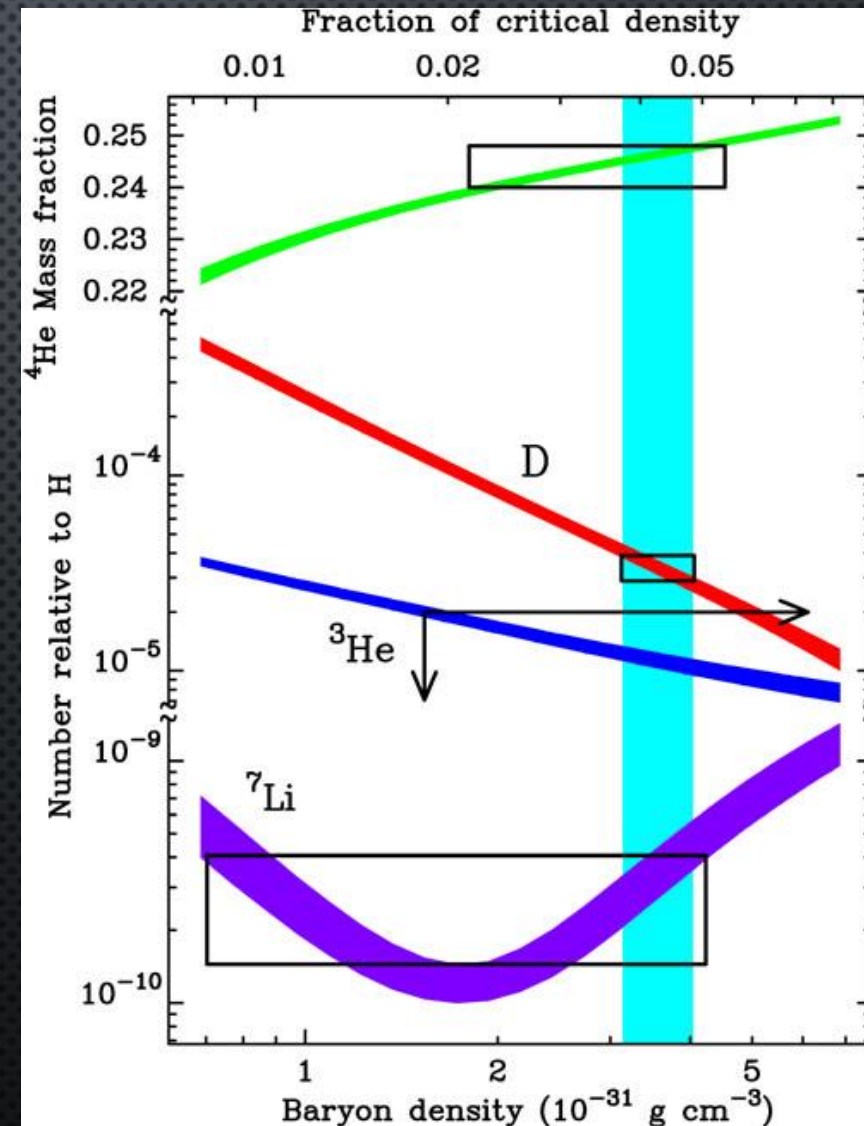
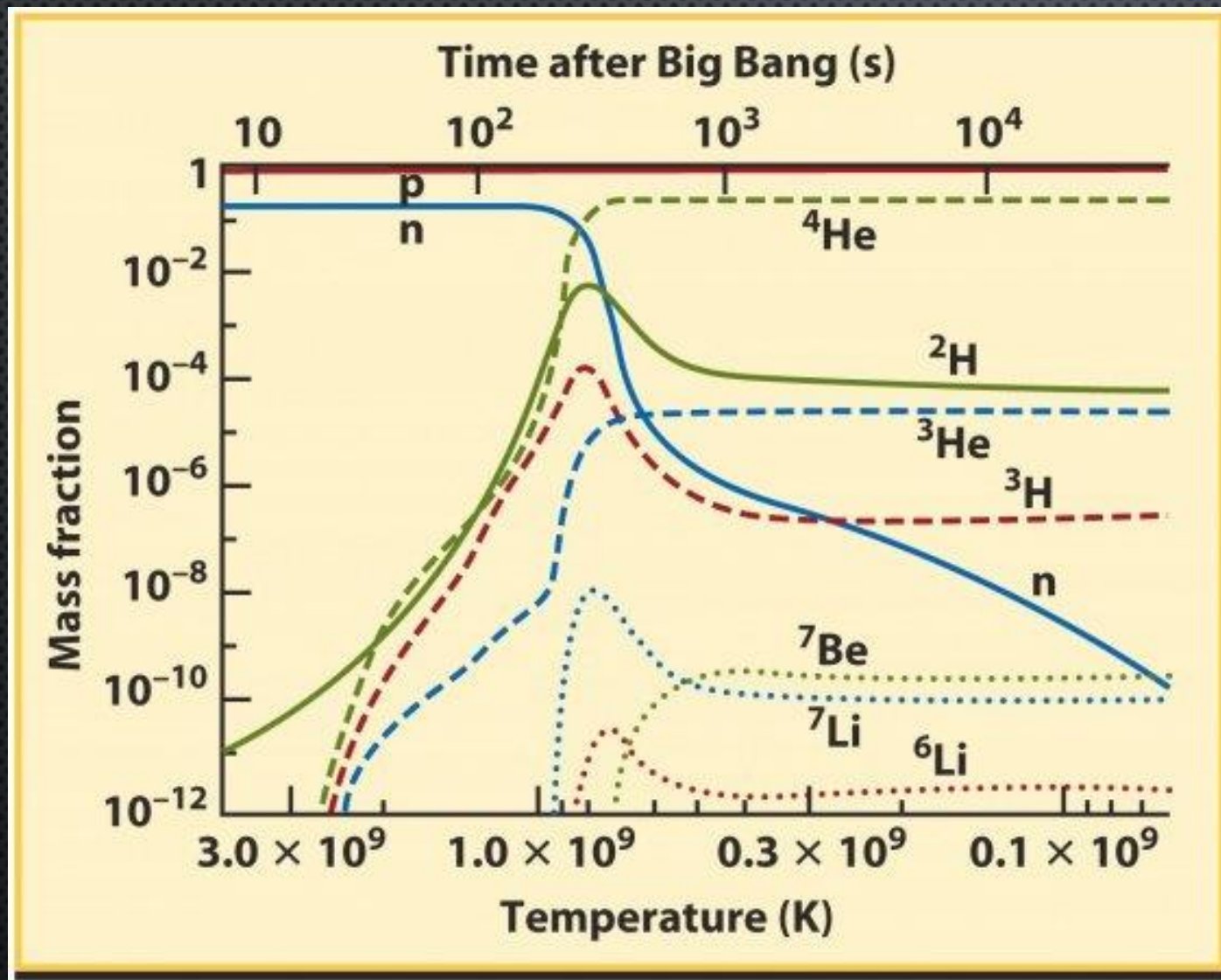


$$\Omega_{\text{Total}} > 1$$

HIGHER
DENSITY

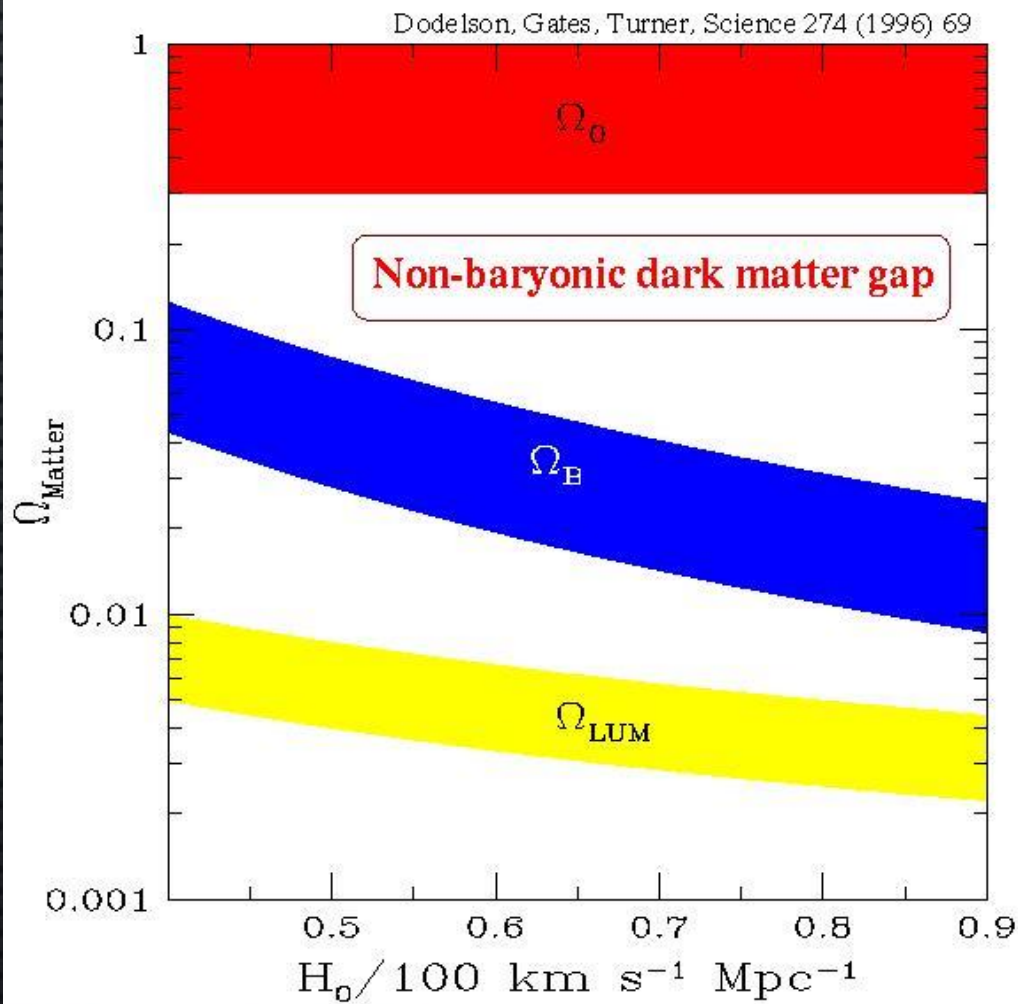


ПЕРВИЧНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ



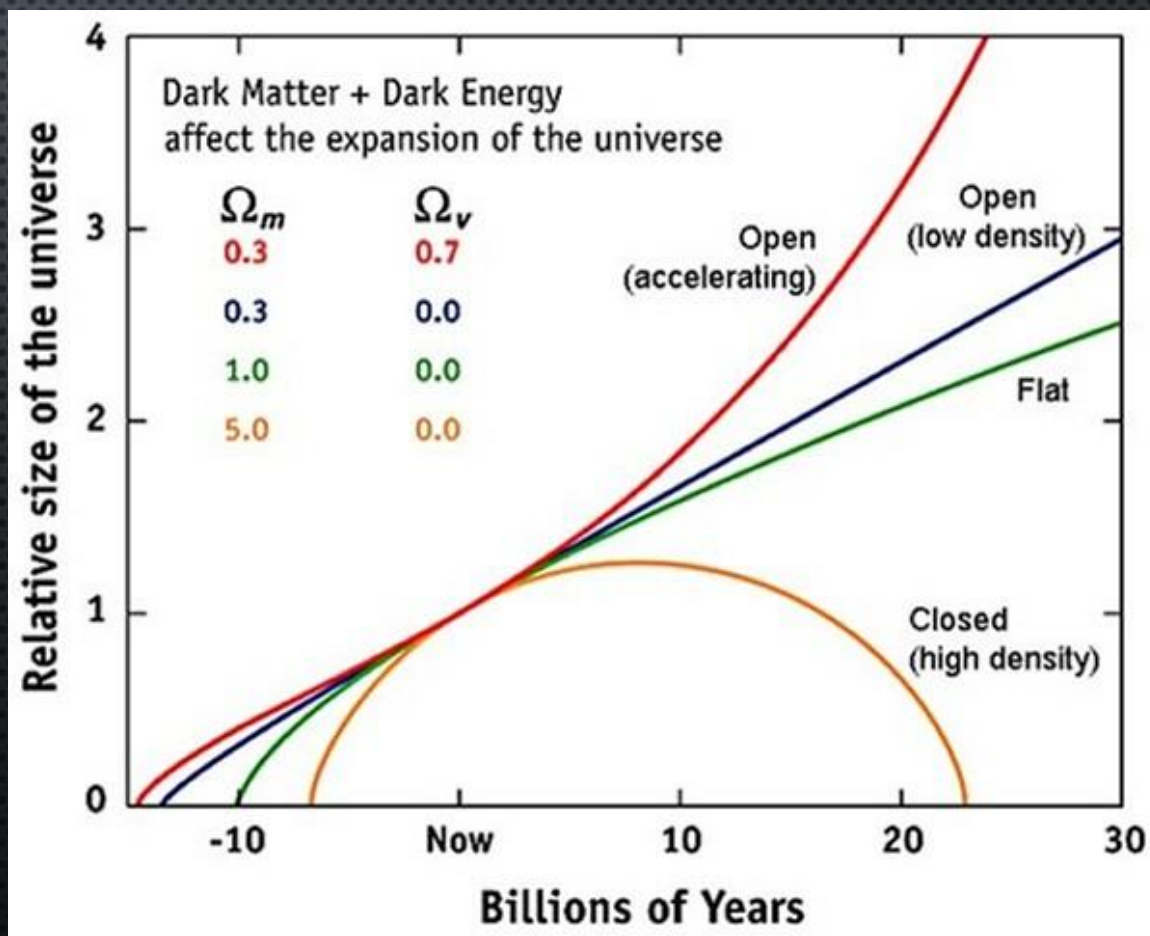
НУКЛЕОСИНТЕЗ + РЕЛИКТ = ПРОБЛЕМА ДЛЯ БАРИОНОВ

Motivation for non-baryonic dark matter



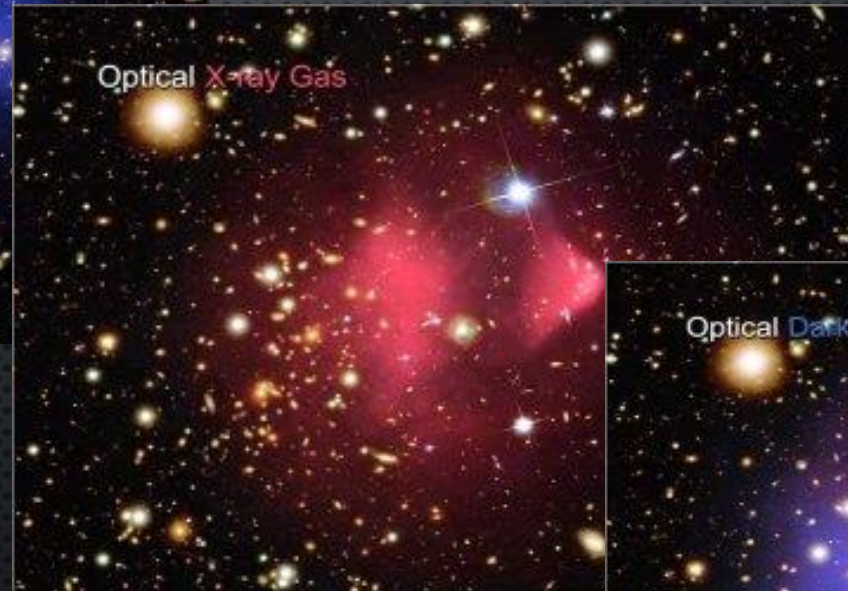
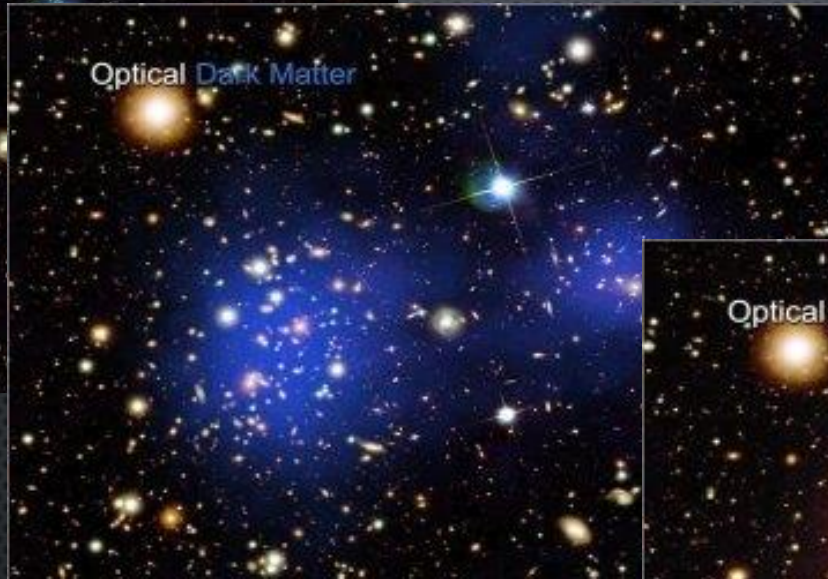
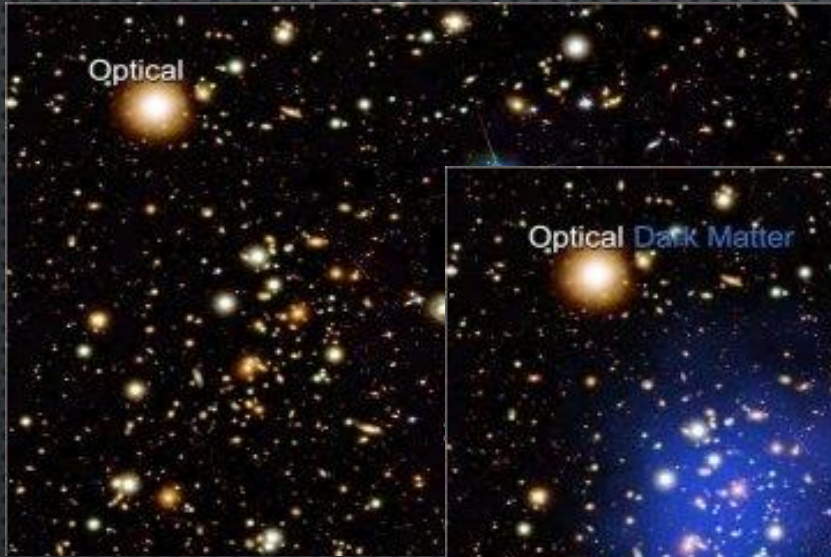
XIth Rencontres de Blois '99

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

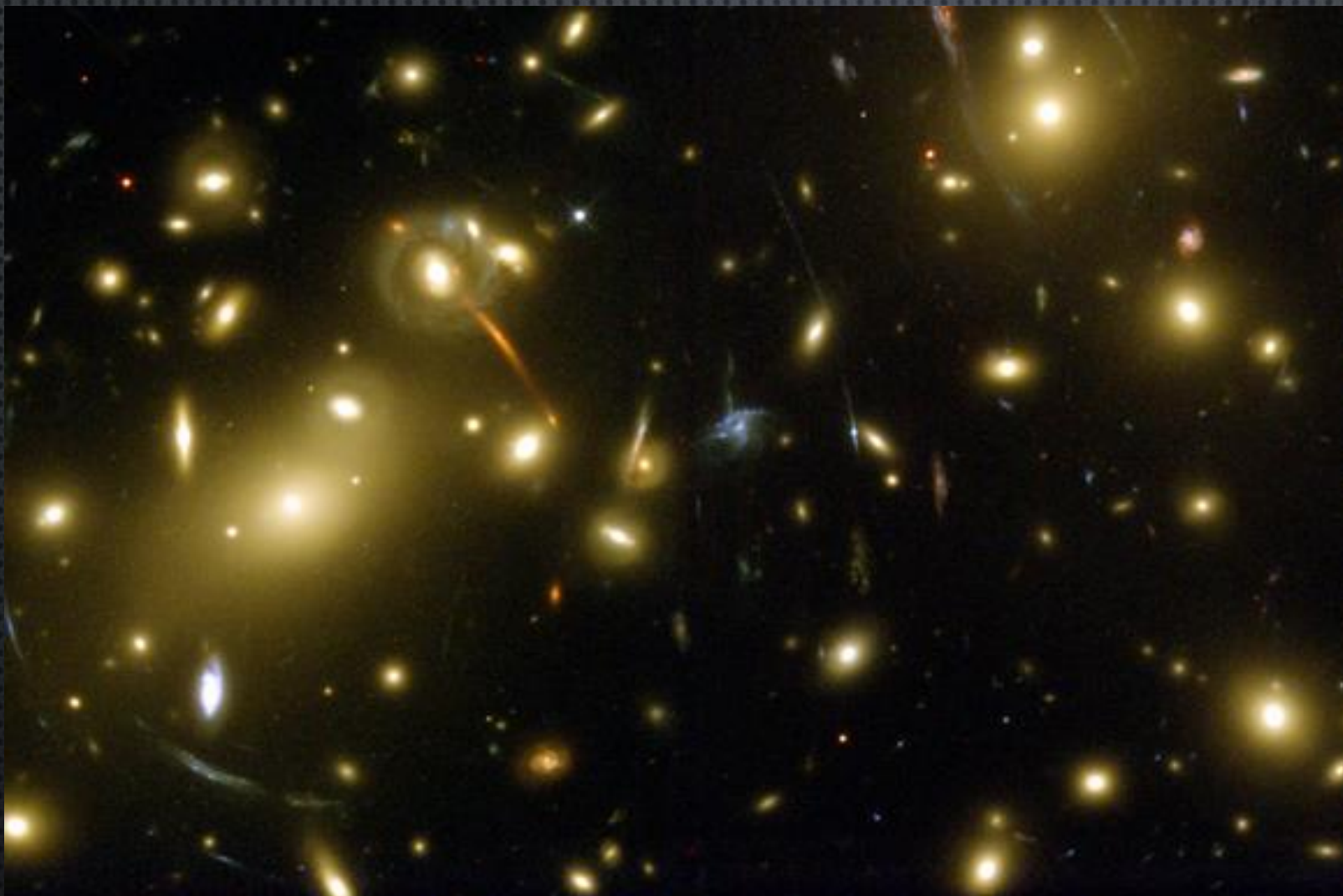


СИЛЬНЫЙ ПРЯМОЙ АРГУМЕНТ

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

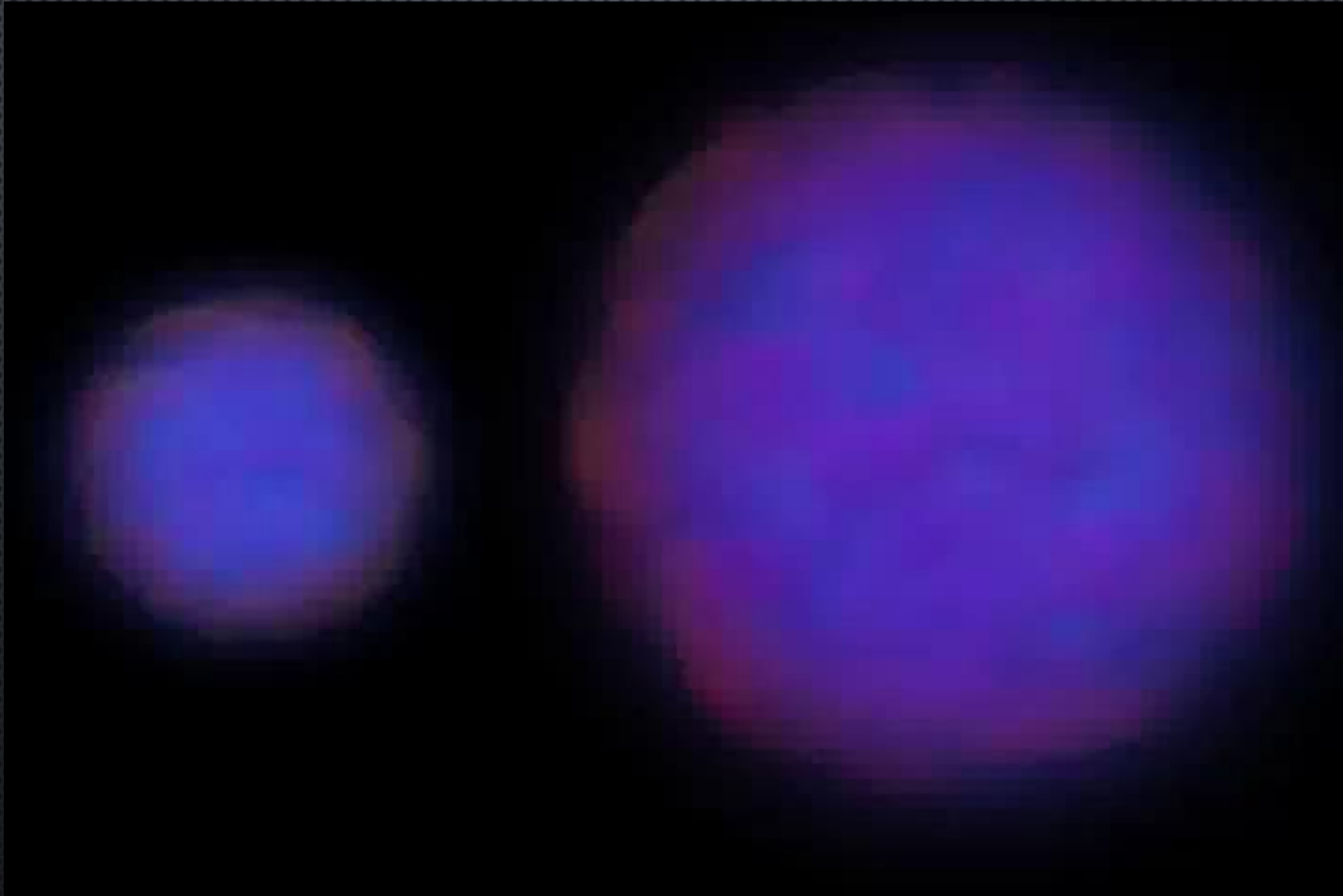


ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ



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

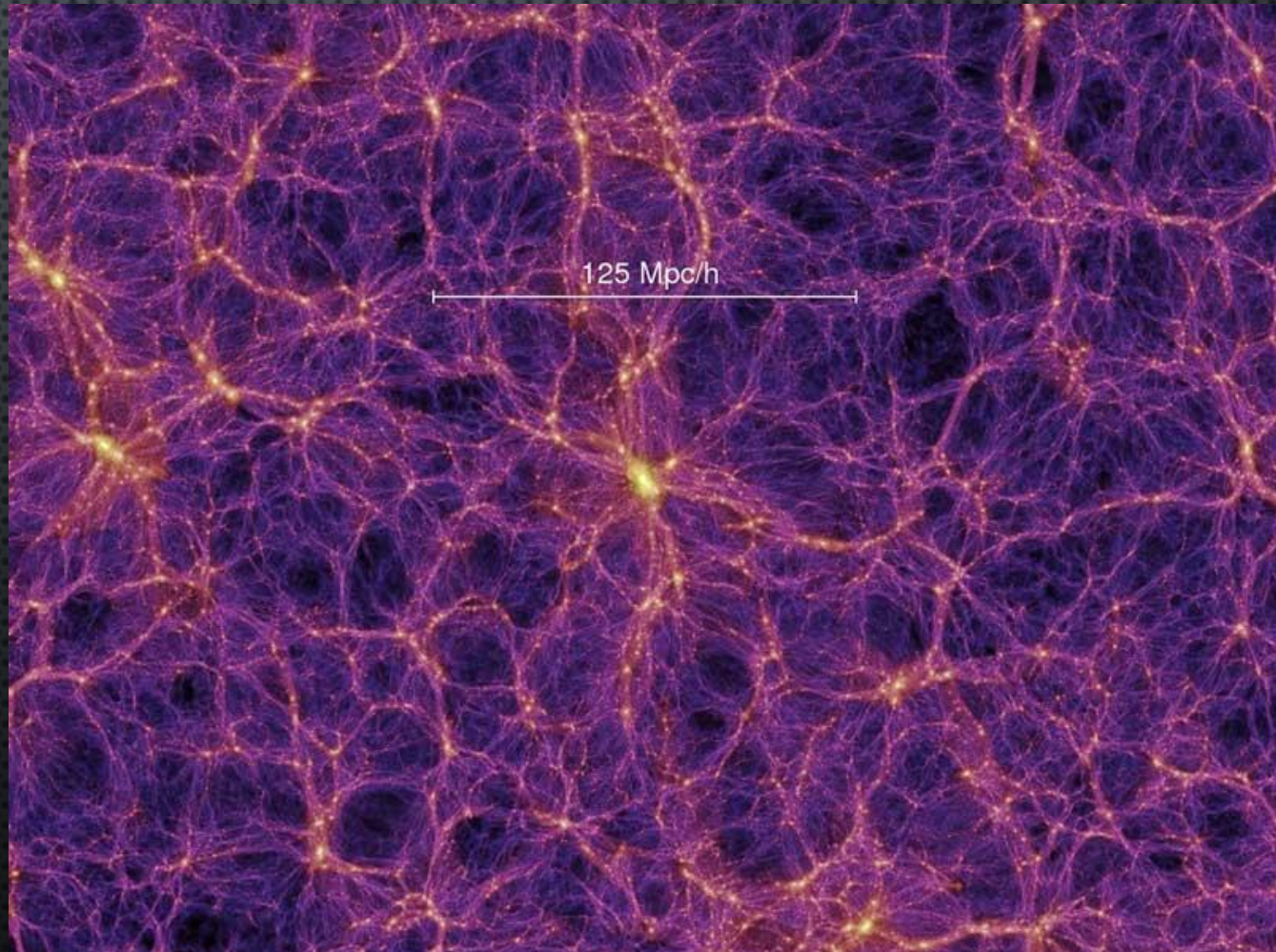
СТОЛКНОВЕНИЕ СКОПЛЕНИЙ ГАЛАКТИК



СКЕЛЕТ ВСЕЛЕННОЙ

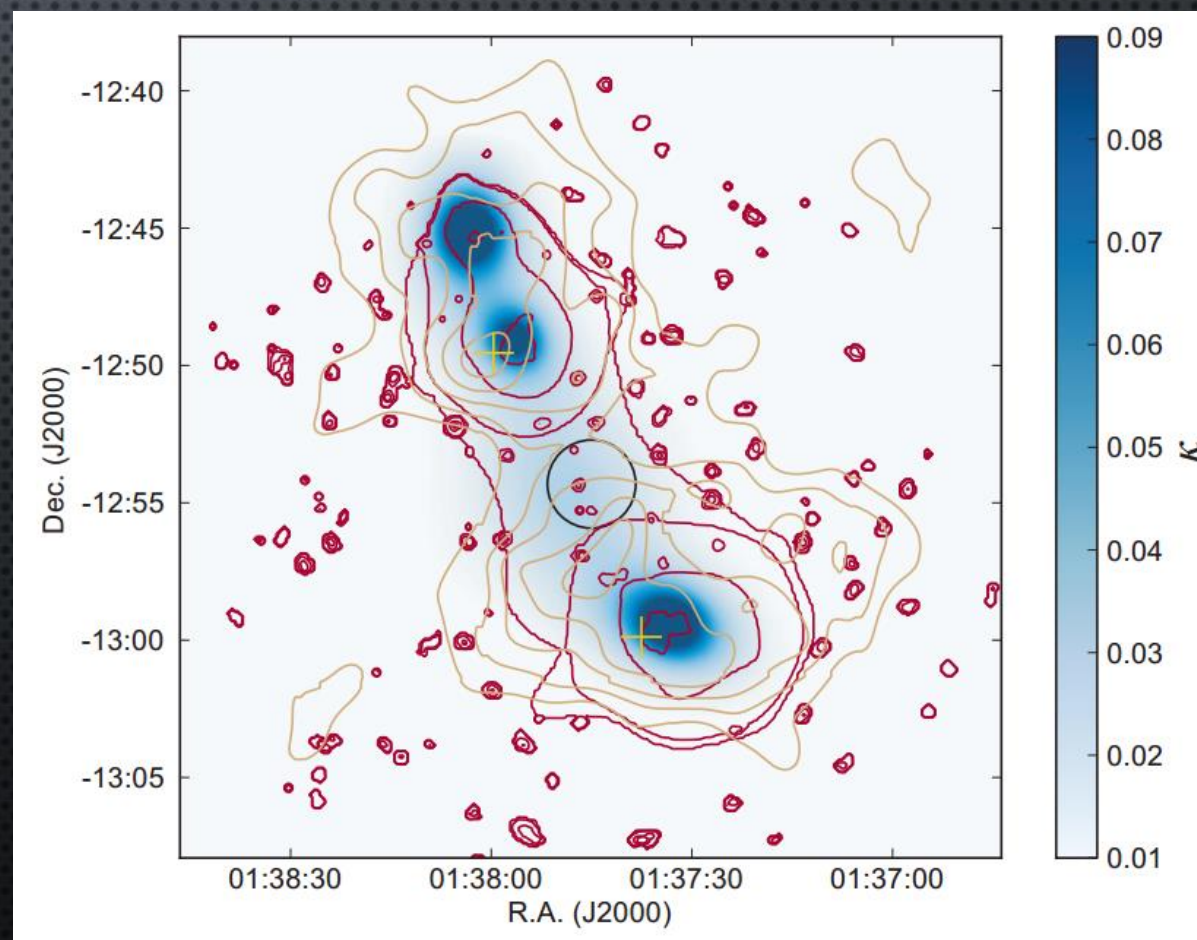
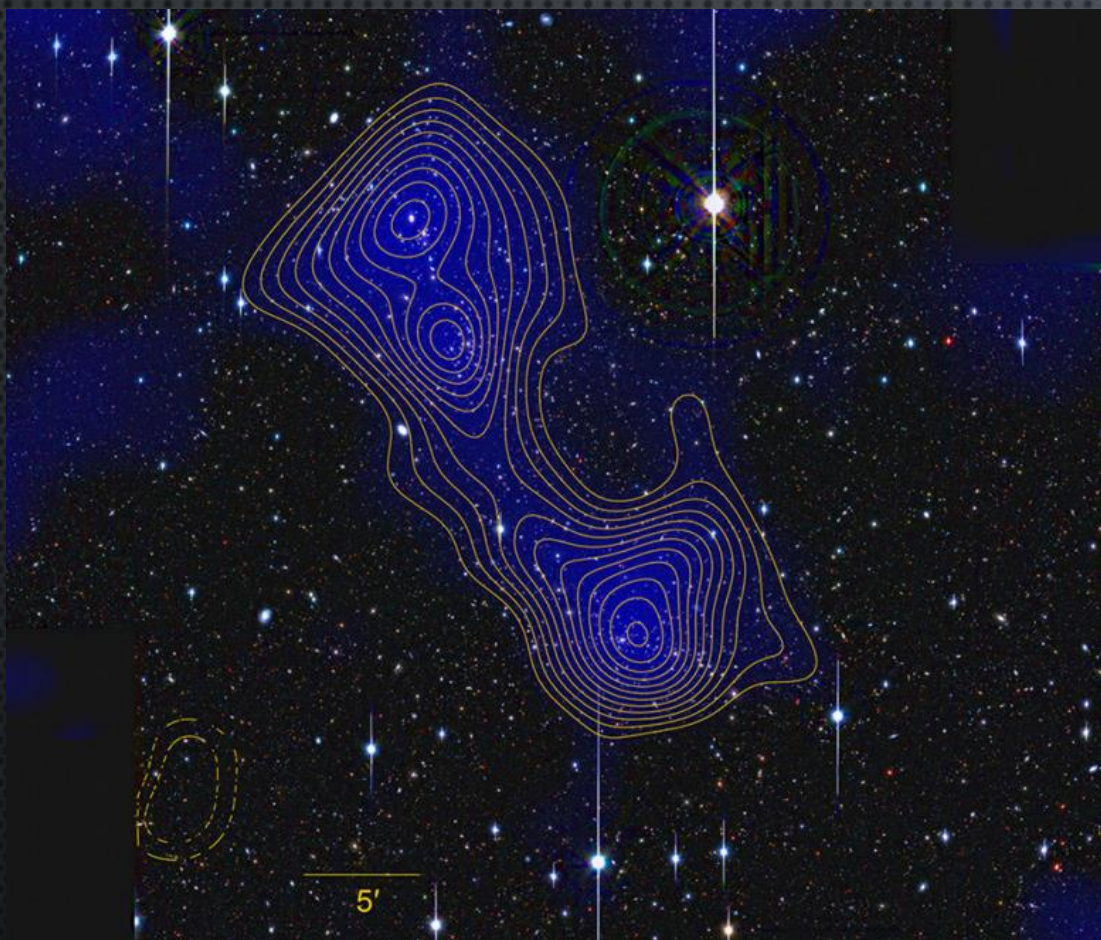
Крупномасштабная структура формируется в основном темным веществом. Но видим мы галактики, их скопления, горячий газ — т.е., обычное вещество.

Как увидеть сам скелет вселенной?

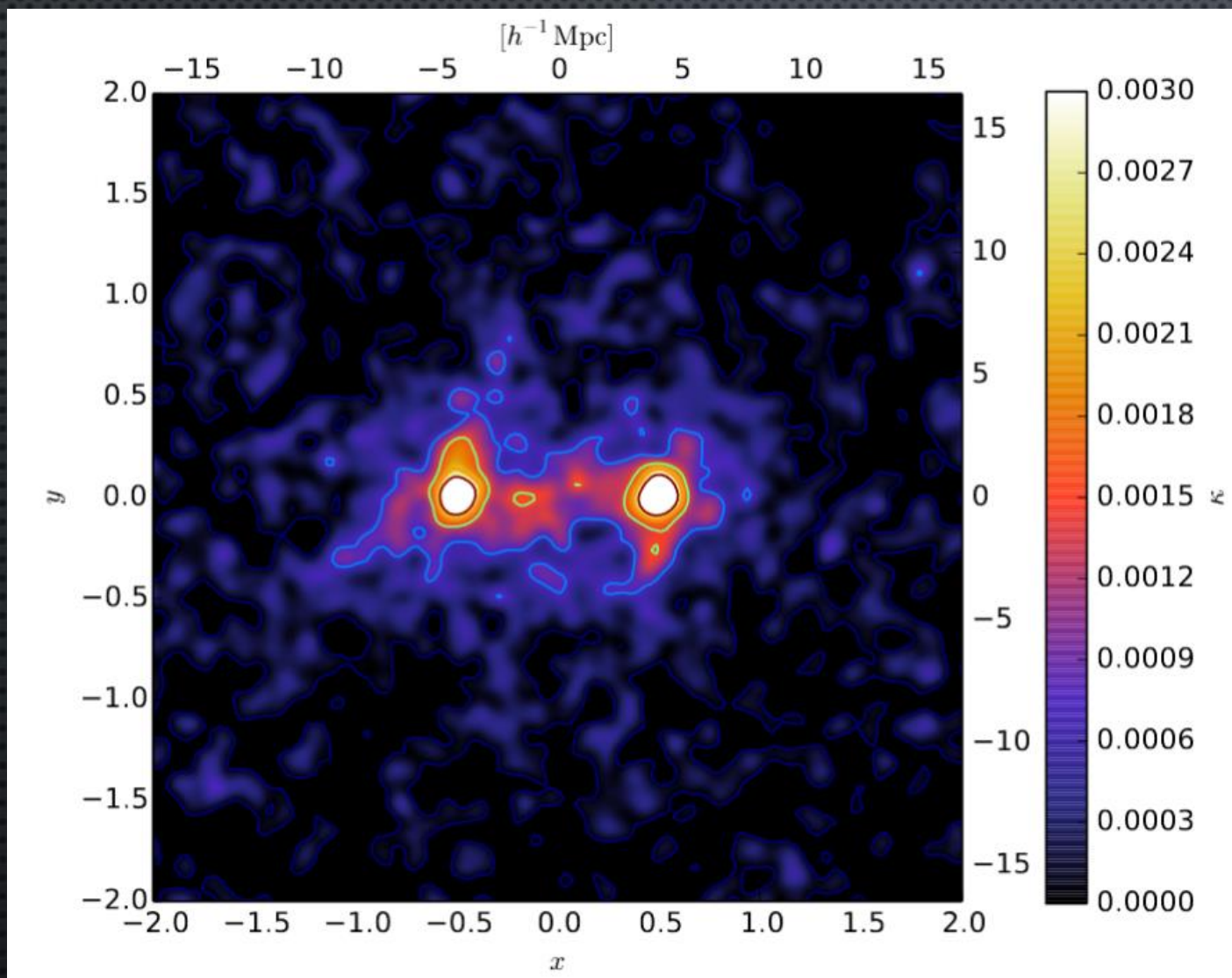


ВОЛОКНО ТЕМНОГО ВЕЩЕСТВА

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 СКОПЛЕНИЯМИ

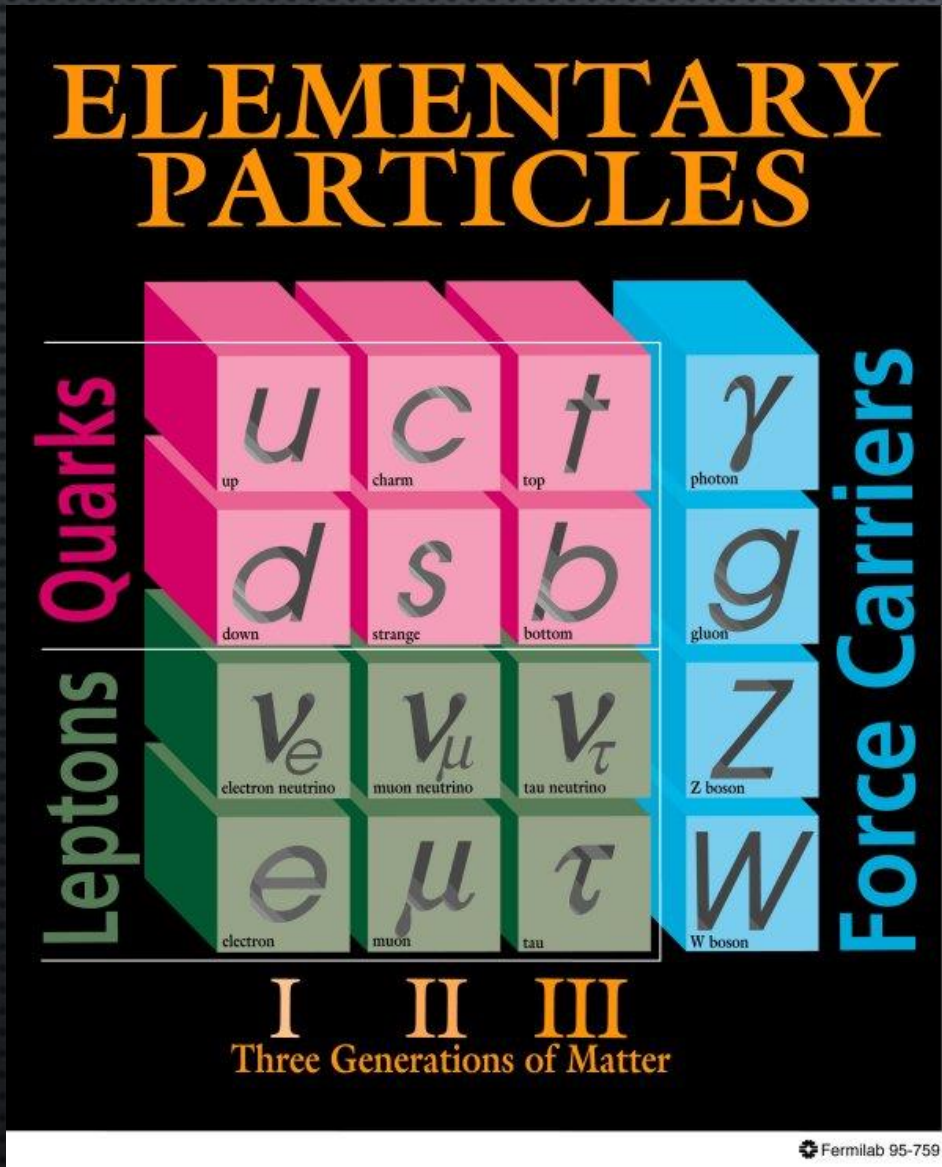


Результат получен не для какой-то конкретной пары галактик, а в результате сложения данных по многим парам.

Распределение массы определено по слабому линзированию.

$(1.6 \pm 0.3) \times 10^{13} M_{\odot}$ for a stacked filament region $7.1 h^{-1} \text{ Mpc}$ long and $2.5 h^{-1} \text{ Mpc}$

СТАНДАРТНАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ



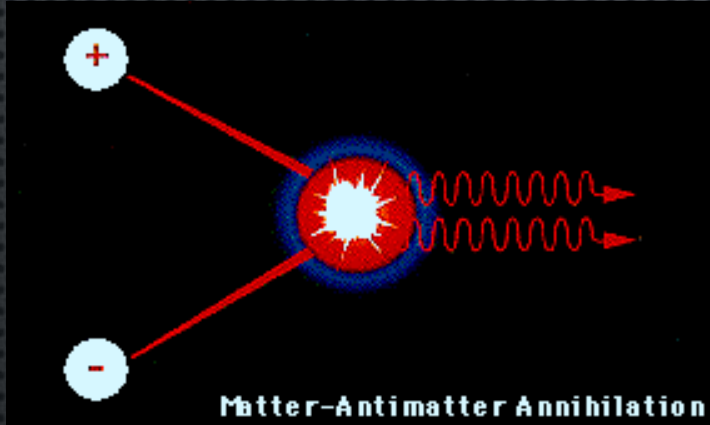
Частицы темного вещества должны быть другими, т.е. это не могут быть частицы Стандартной модели.

Обсуждаются самые разные варианты.

Какие-то из кандидатов можно обнаружить в лабораторных экспериментах или астрономических наблюдениях. А какие-то надолго останутся неуловимыми.

ПОИСК ТЕМНОЙ МАТЕРИИ

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



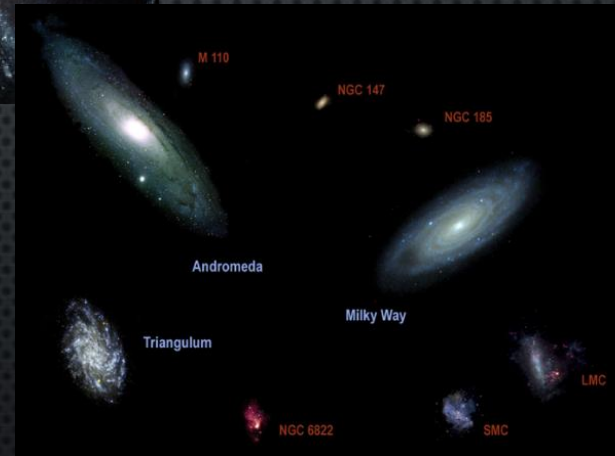
- 2) Также можно искать
гамма-лучи
от аннигиляции частиц
темного вещества

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

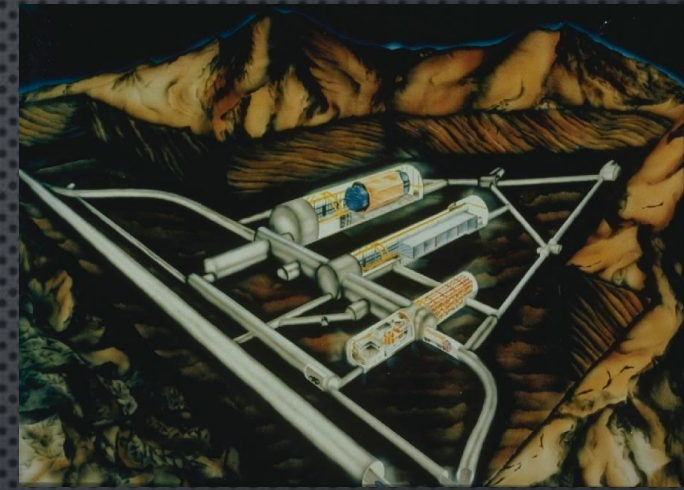


Галактика

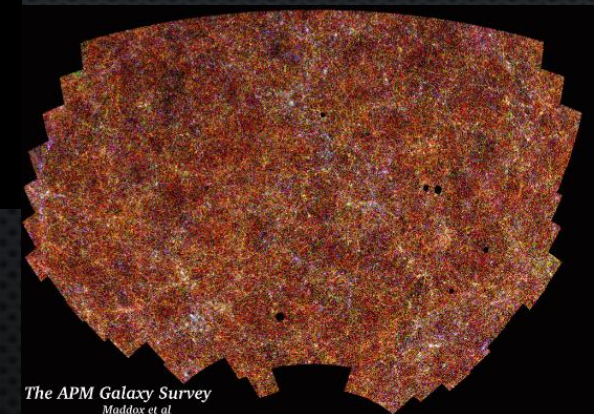
- 3) Поиск античастиц
от аннигиляции или
распада частиц
темного вещества.
(см. УФН 2017 N1)



Близкие галактики



Фон от далеких галактик

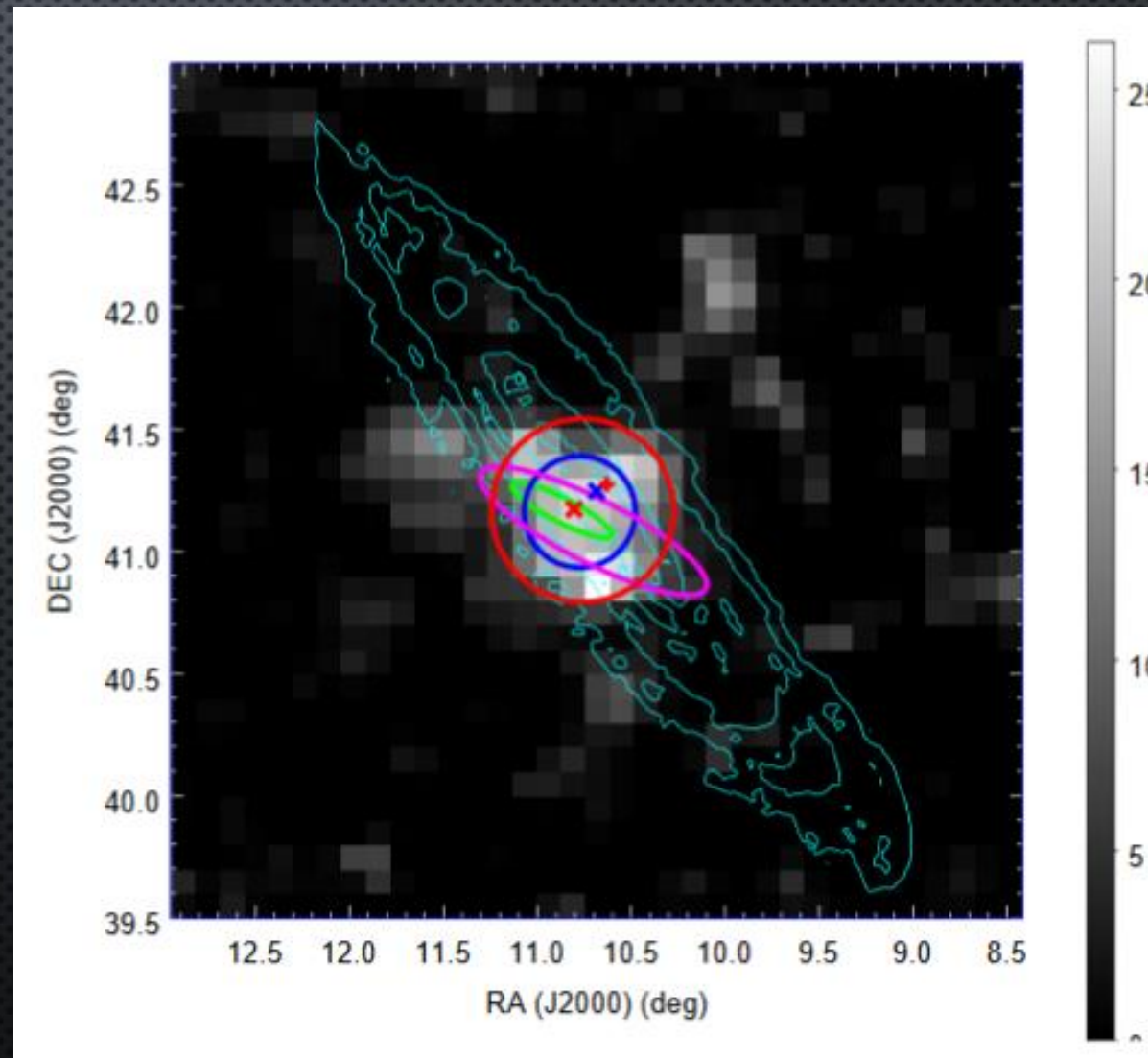
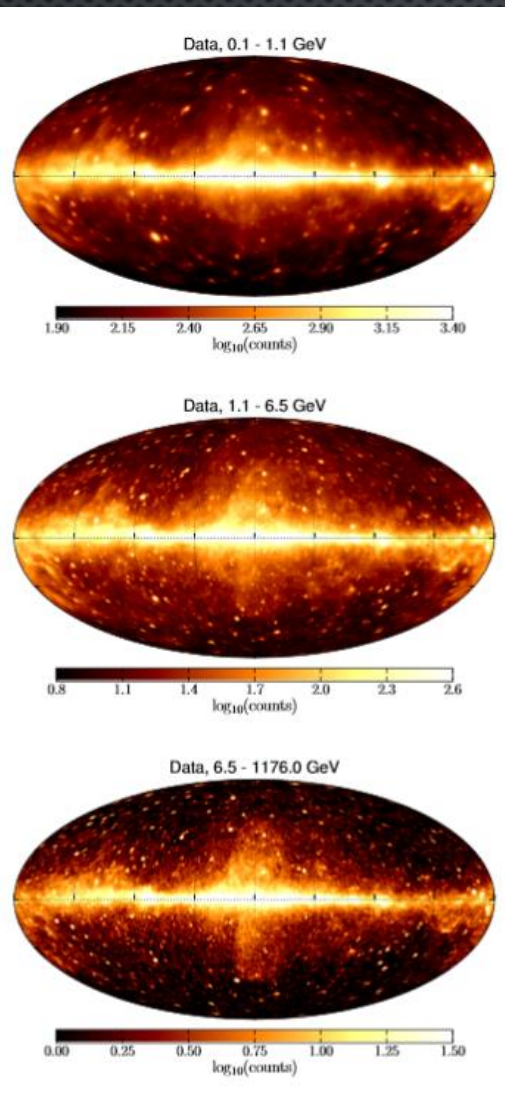


Так же была надежда найти что-то на LHC

АННИЛЯЦИОННЫЙ СИГНАЛ

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

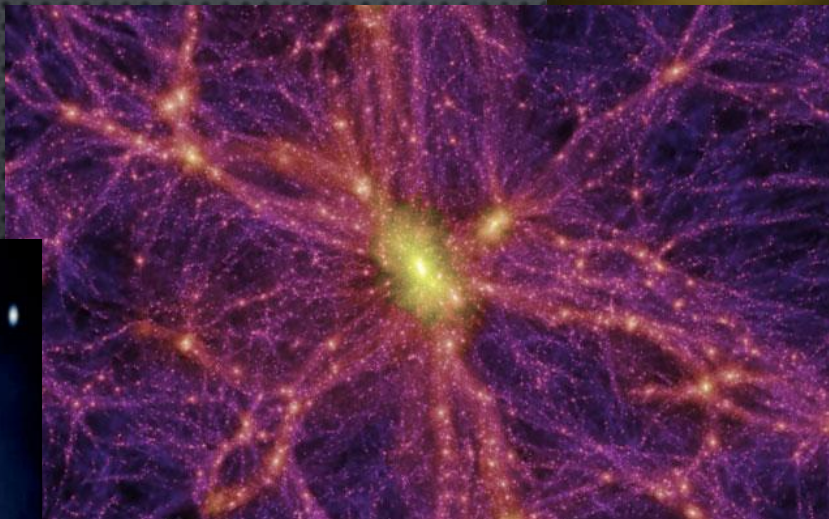
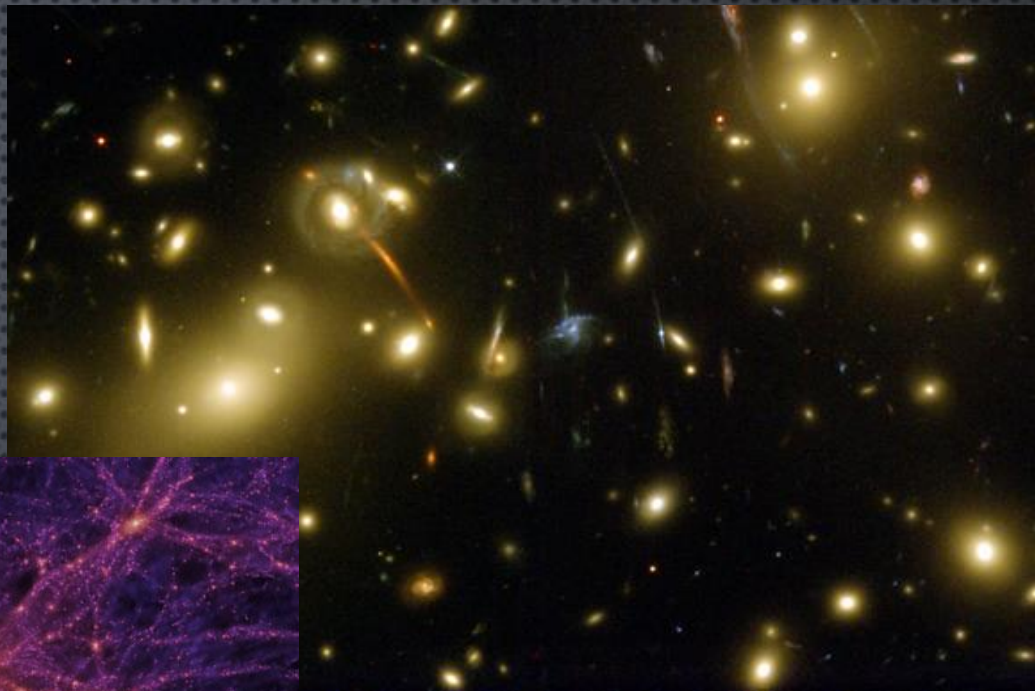
Появились сообщения об избыточном сигнале от центра M31.



(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

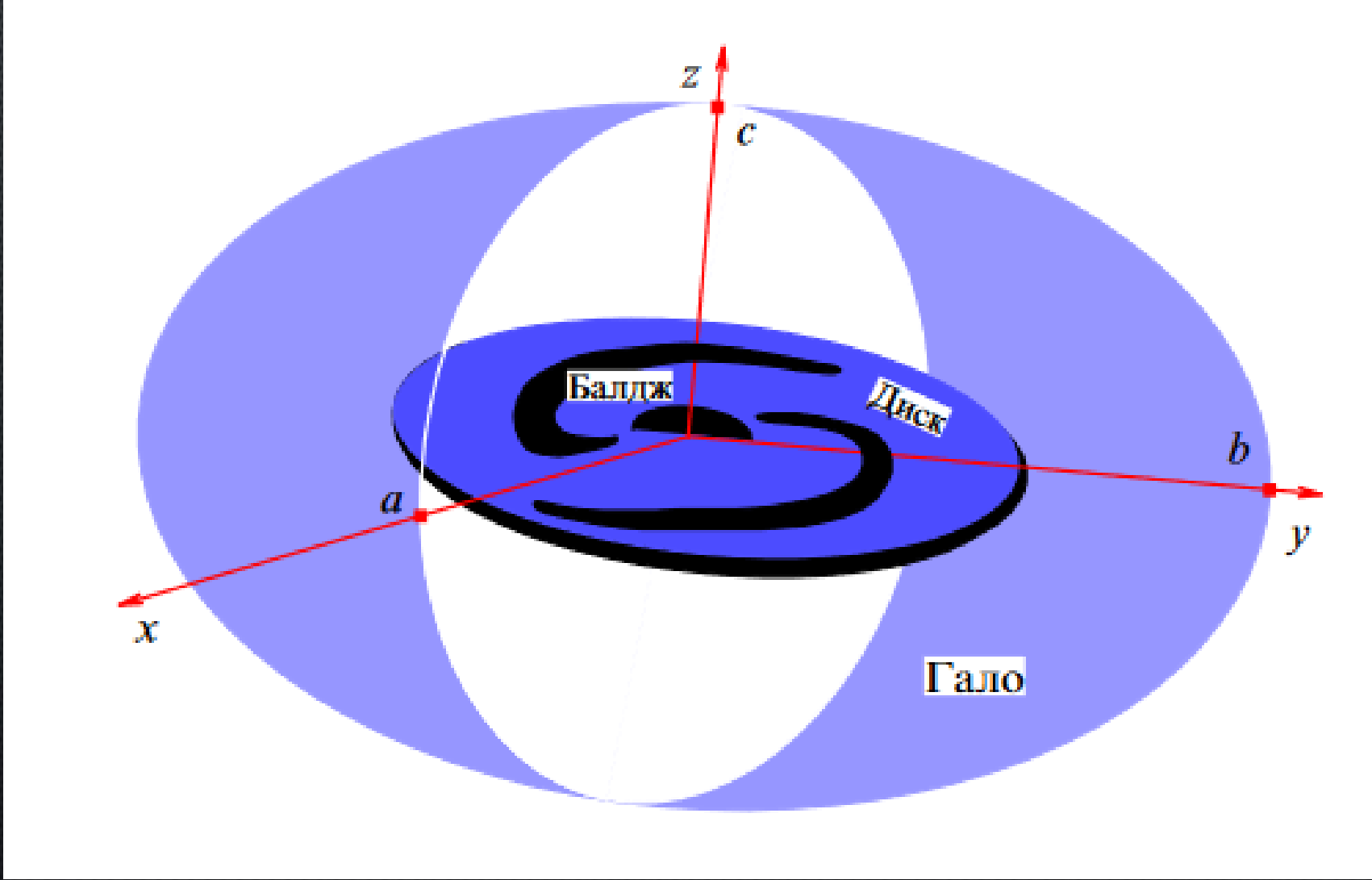


Мы надеемся увидеть:

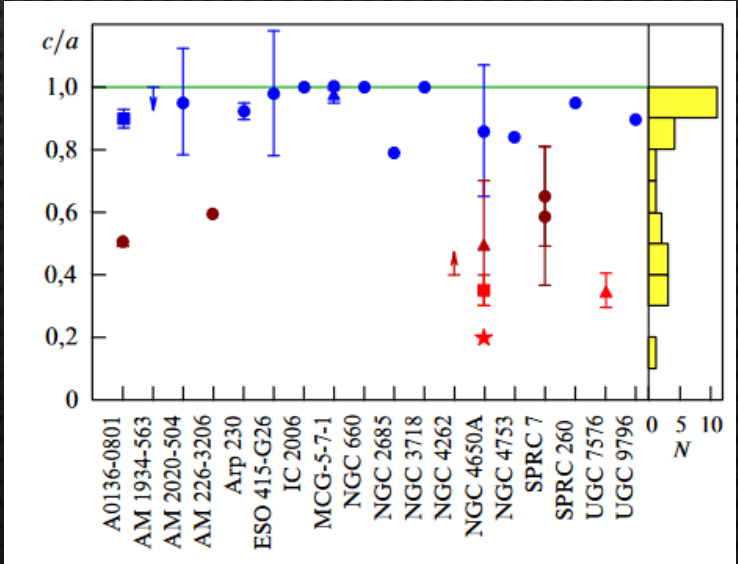
1. Прямое взаимодействие в лабораторных экспериментах;
2. Результаты аннигиляции
 - наблюдая гамма-излучение
 - наблюдая античастицы.

СТРУКТУРА ГАЛАКТИКИ И ТЕМНОЕ ВЕЩЕСТВО. ТРЕХОСНОЕ ГАЛО

Засов и др. (УФН 2017)

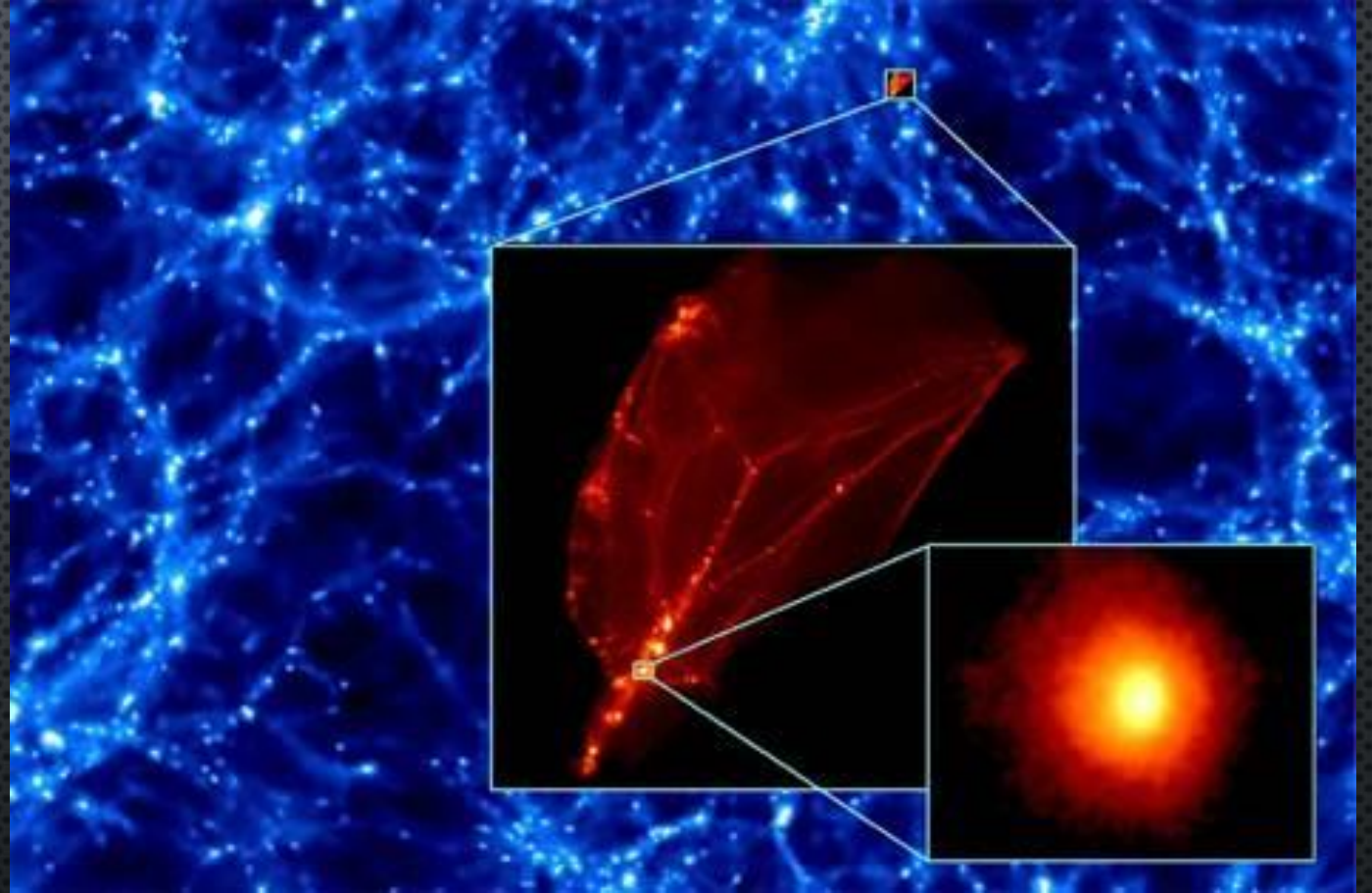
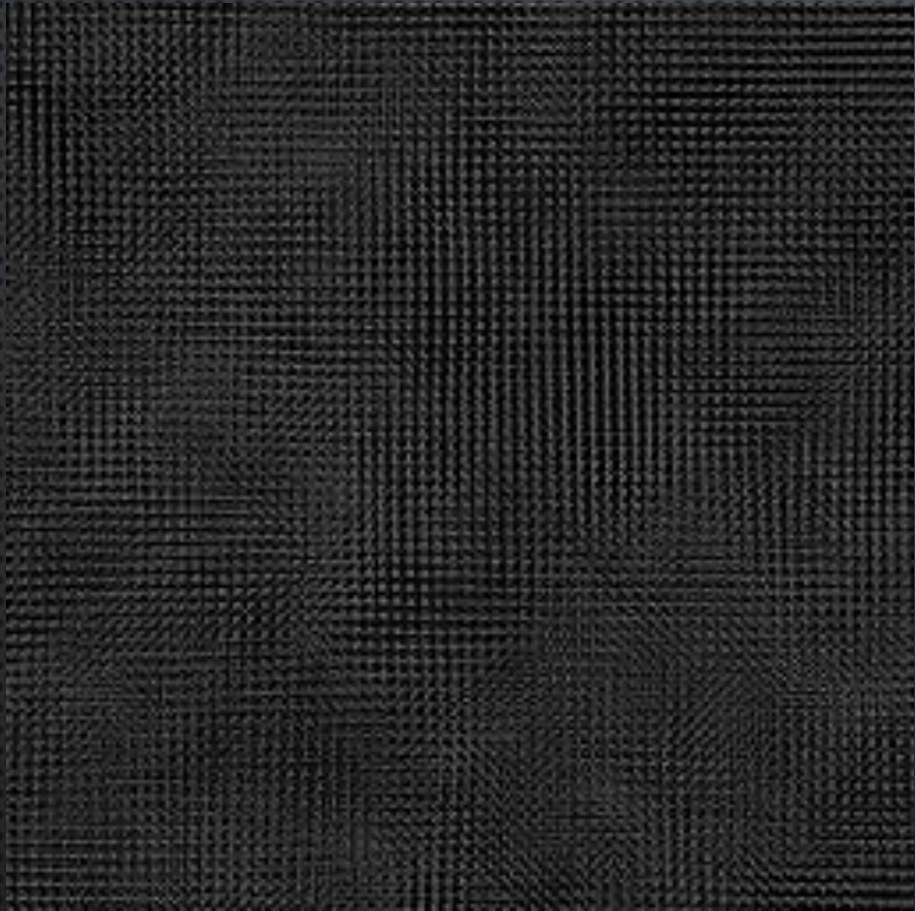


Темное вещество присутствует по всем частям галактики. Однако основная масса приходится на гало, т.к. темное вещество плохо «остывает». И, т.о., плохо формирует компактные структуры.



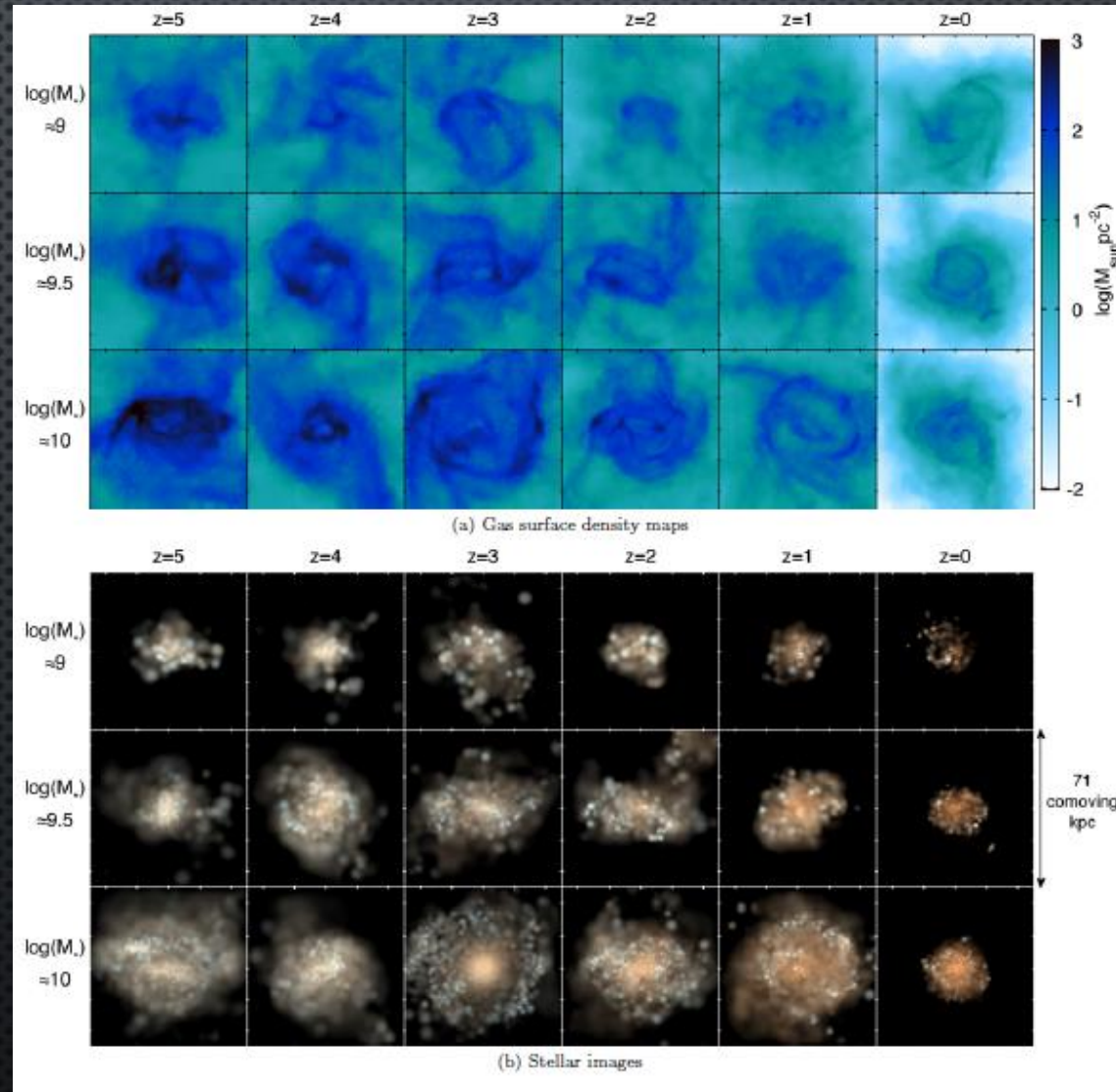
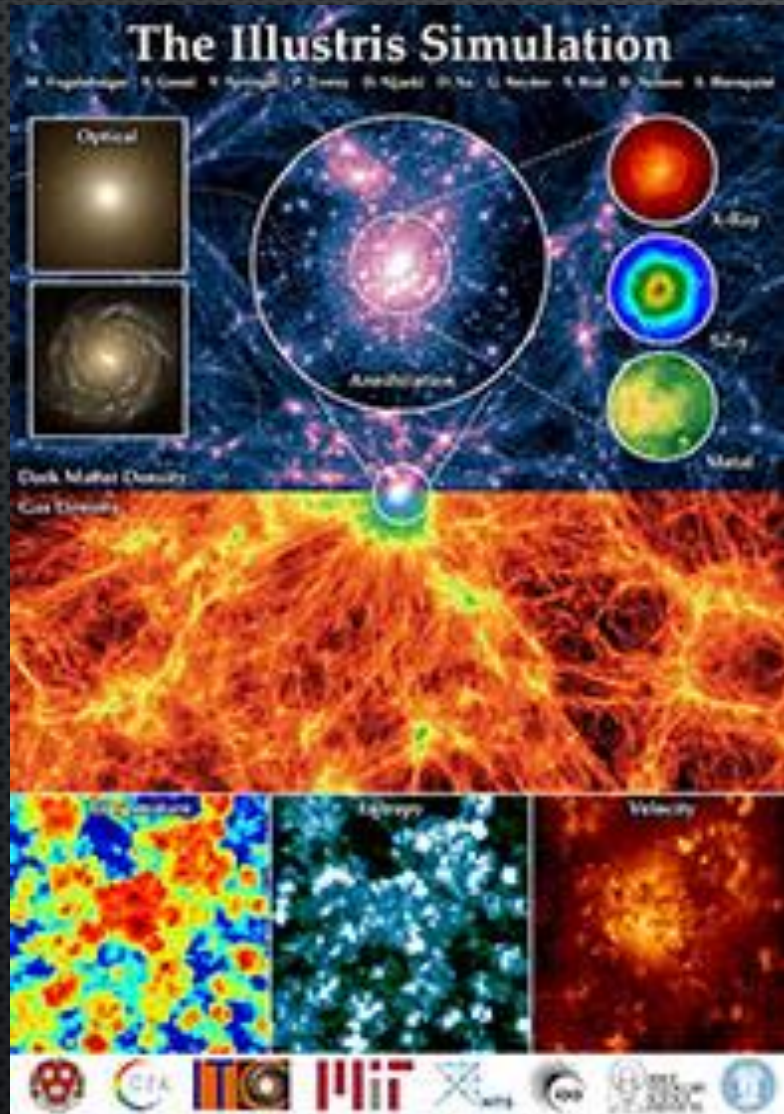
Форма гало зависит от процесса формирования галактики.

ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



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

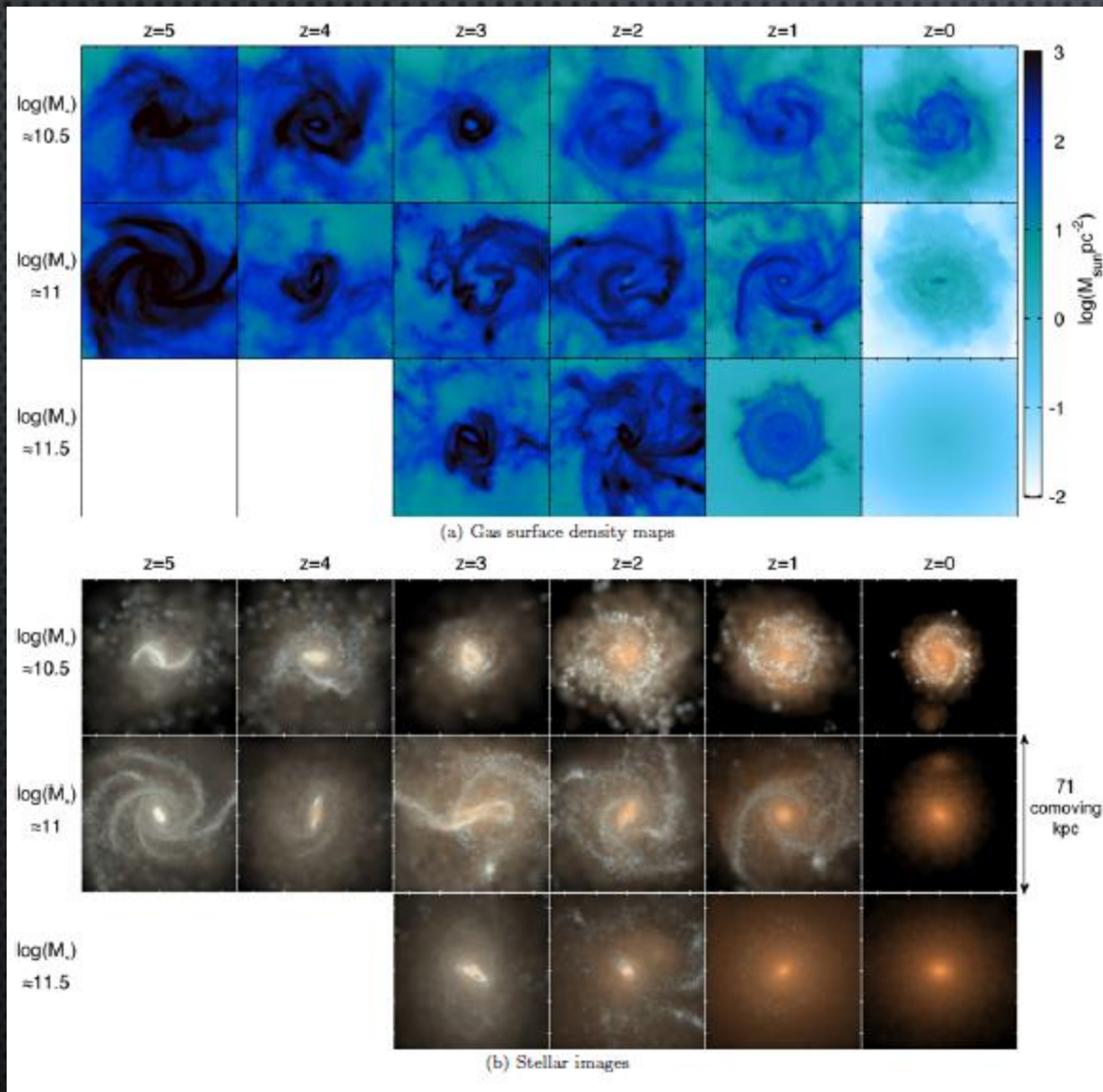
ILLUSTRIS



Новое численное моделирование формирования галактик и крупномасштабной структуры

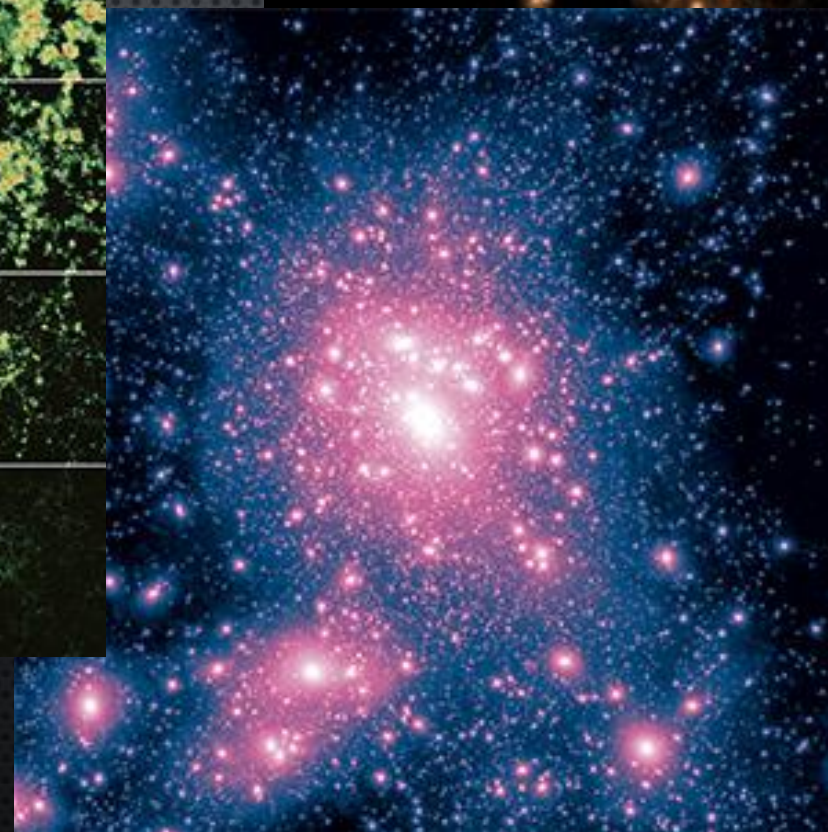
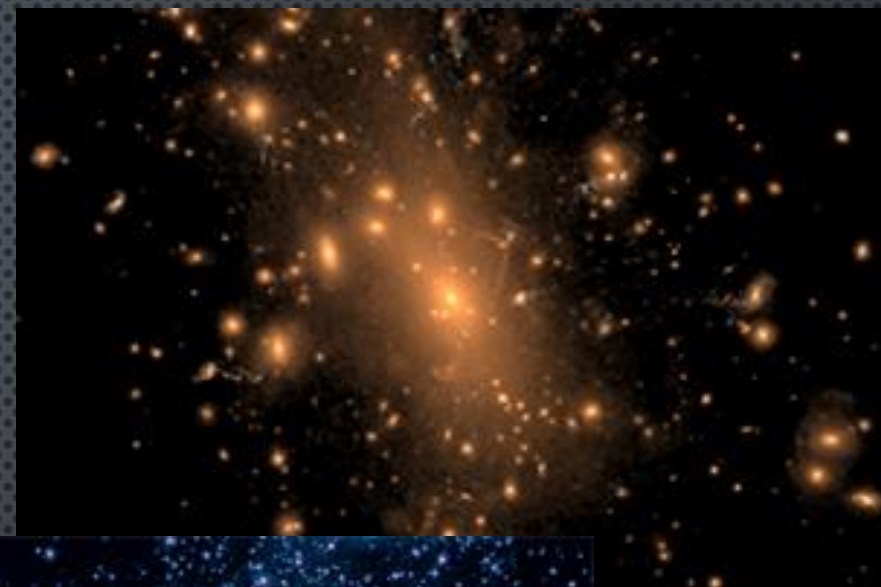
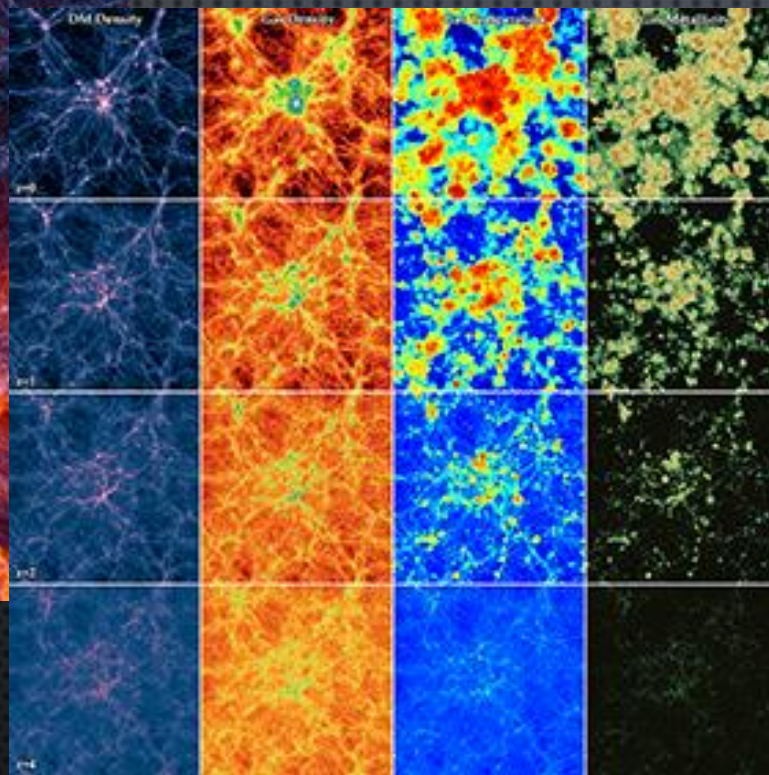
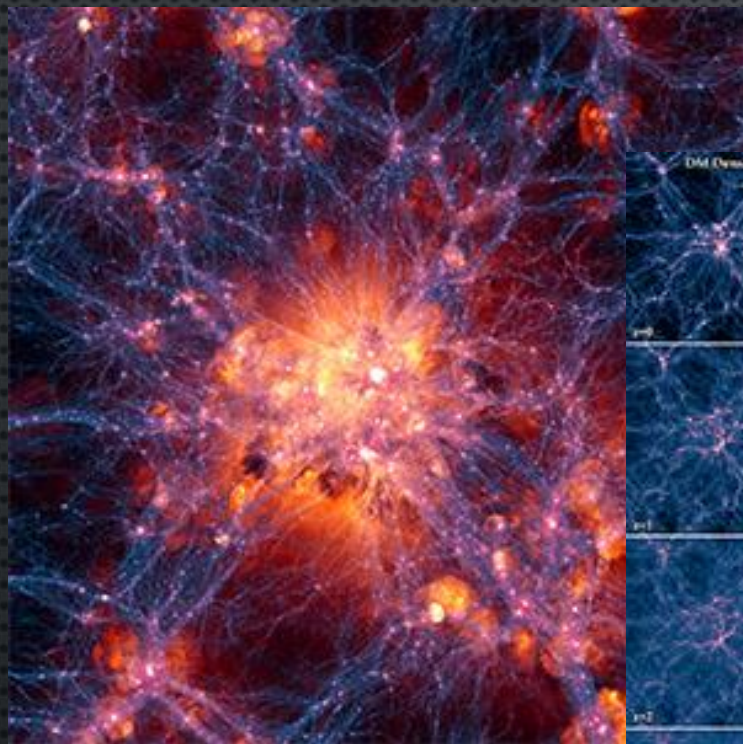
1405.3749

КРУПНЫЕ ГАЛАКТИКИ

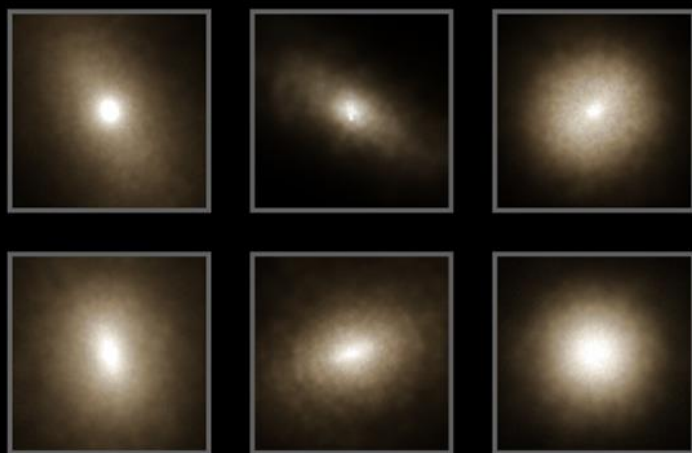


Прямо можно изучать, как образуются галактики разного вида и сравнивать с данными наблюдений.

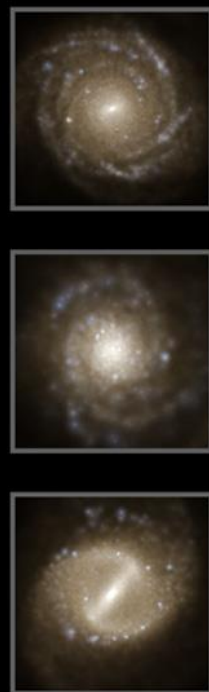
... ДО САМЫХ
ДО ОКРАИН ...



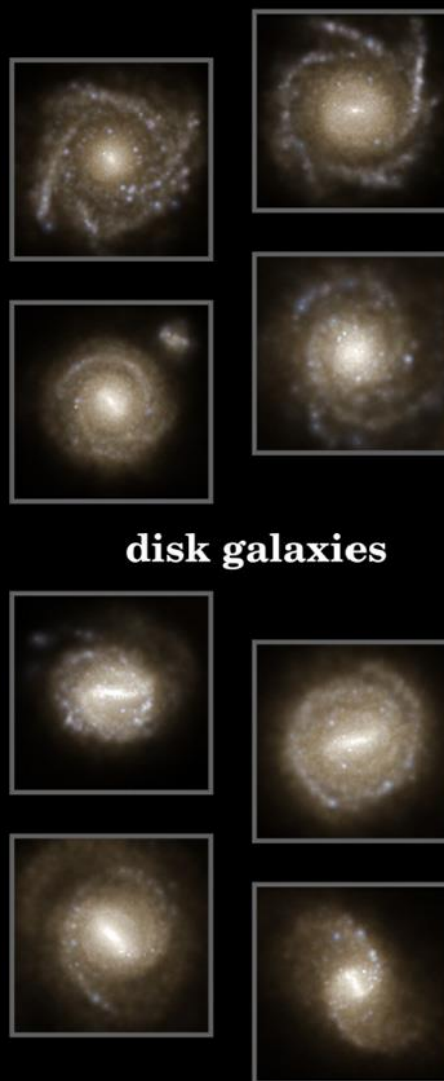
ФОРМИРОВАНИЕ ГАЛАКТИК



ellipticals



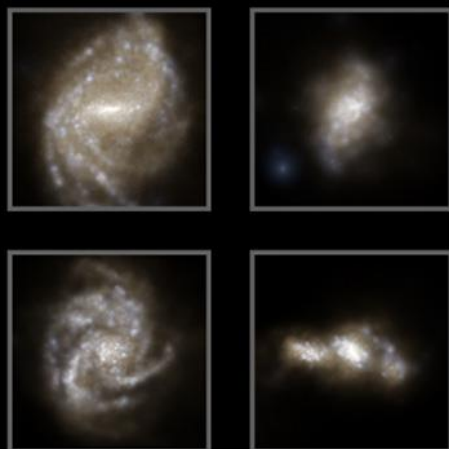
disk galaxies



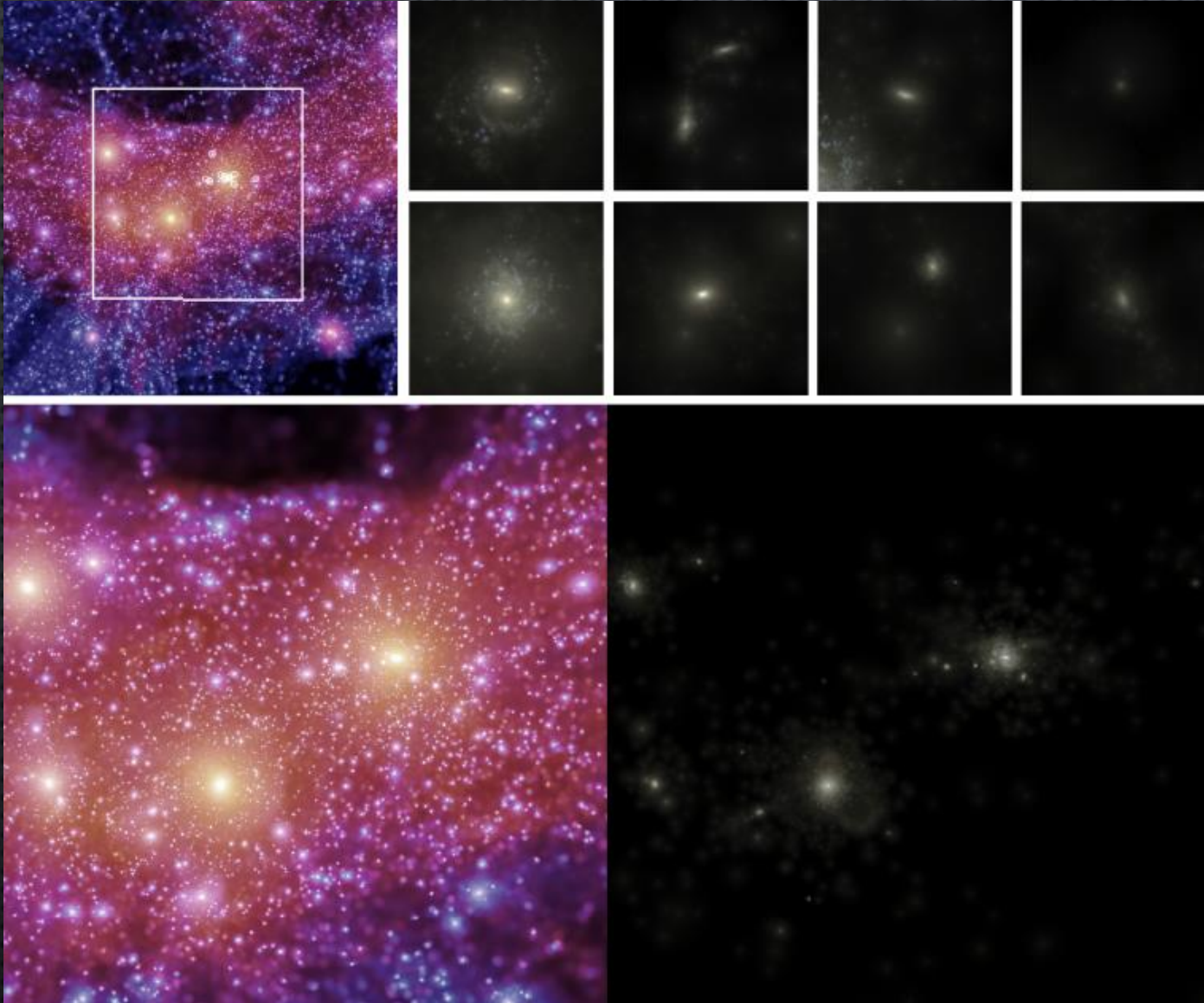
Галактики, полученные в результате численного моделирования, неотличимы от наблюдаемых.

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

irregular

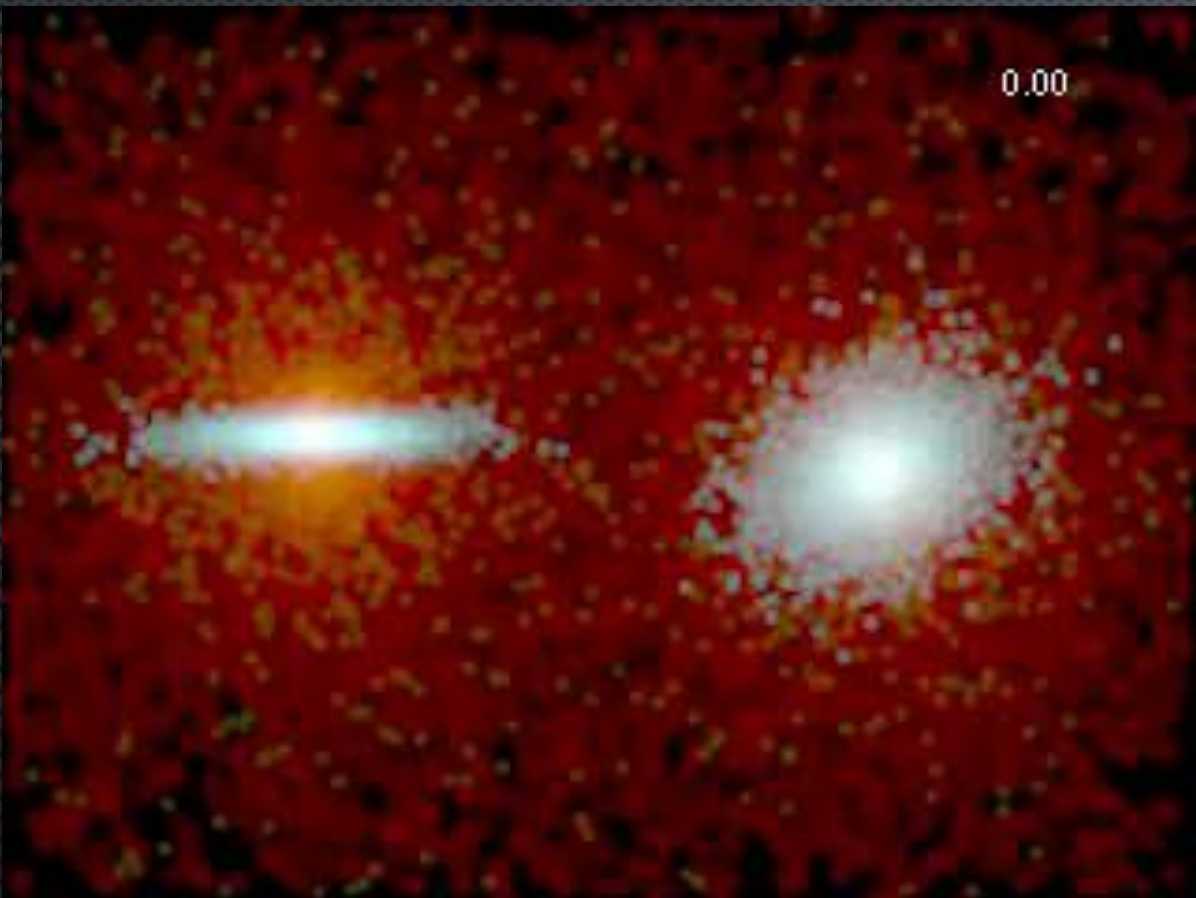


МЕСТНАЯ ГРУППА ГАЛАКТИК

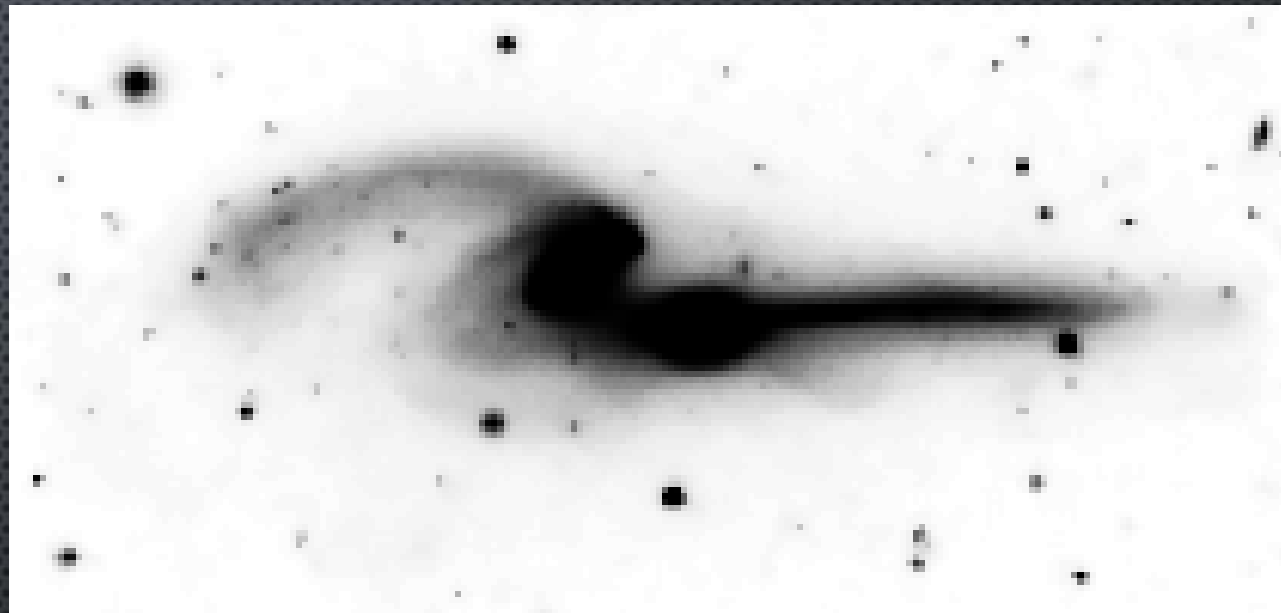


Решены все
основные проблемы,
связанные
со свойствами
Местной группы.

ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИЕ ГАЛАКТИКИ

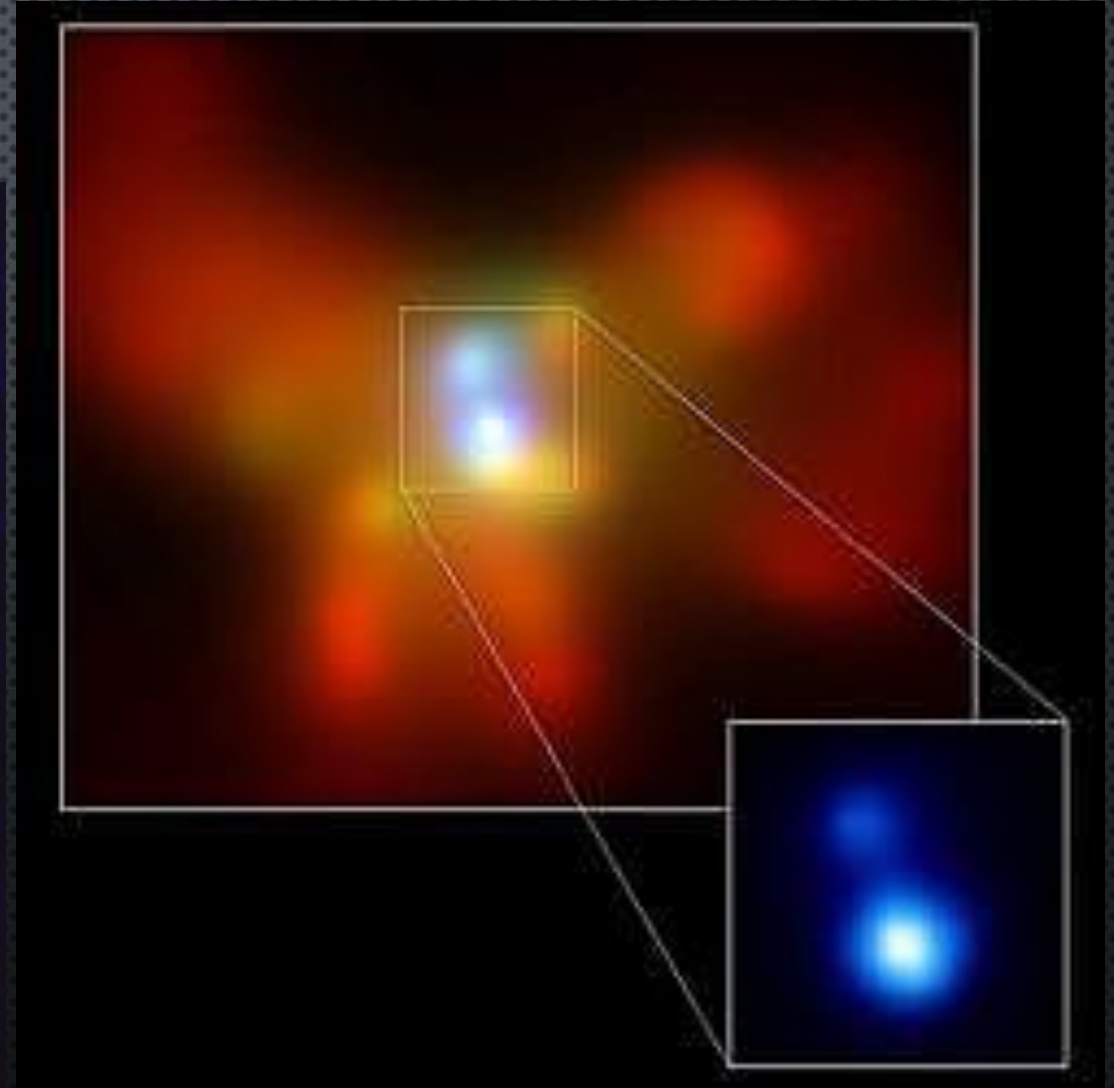
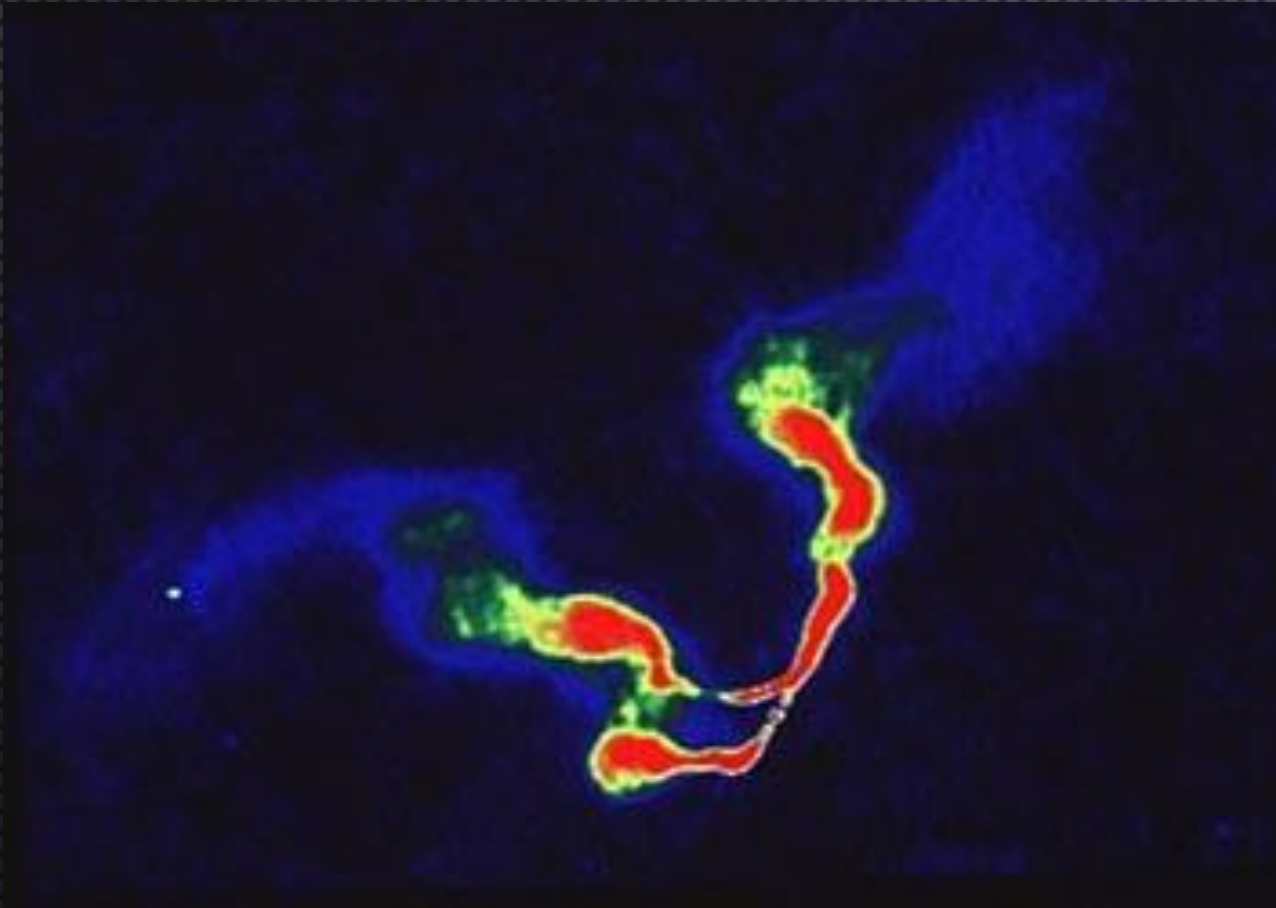


(Hibbard, Barnes)



ПРИМЕРЫ ДВОЙНЫХ ДЫР

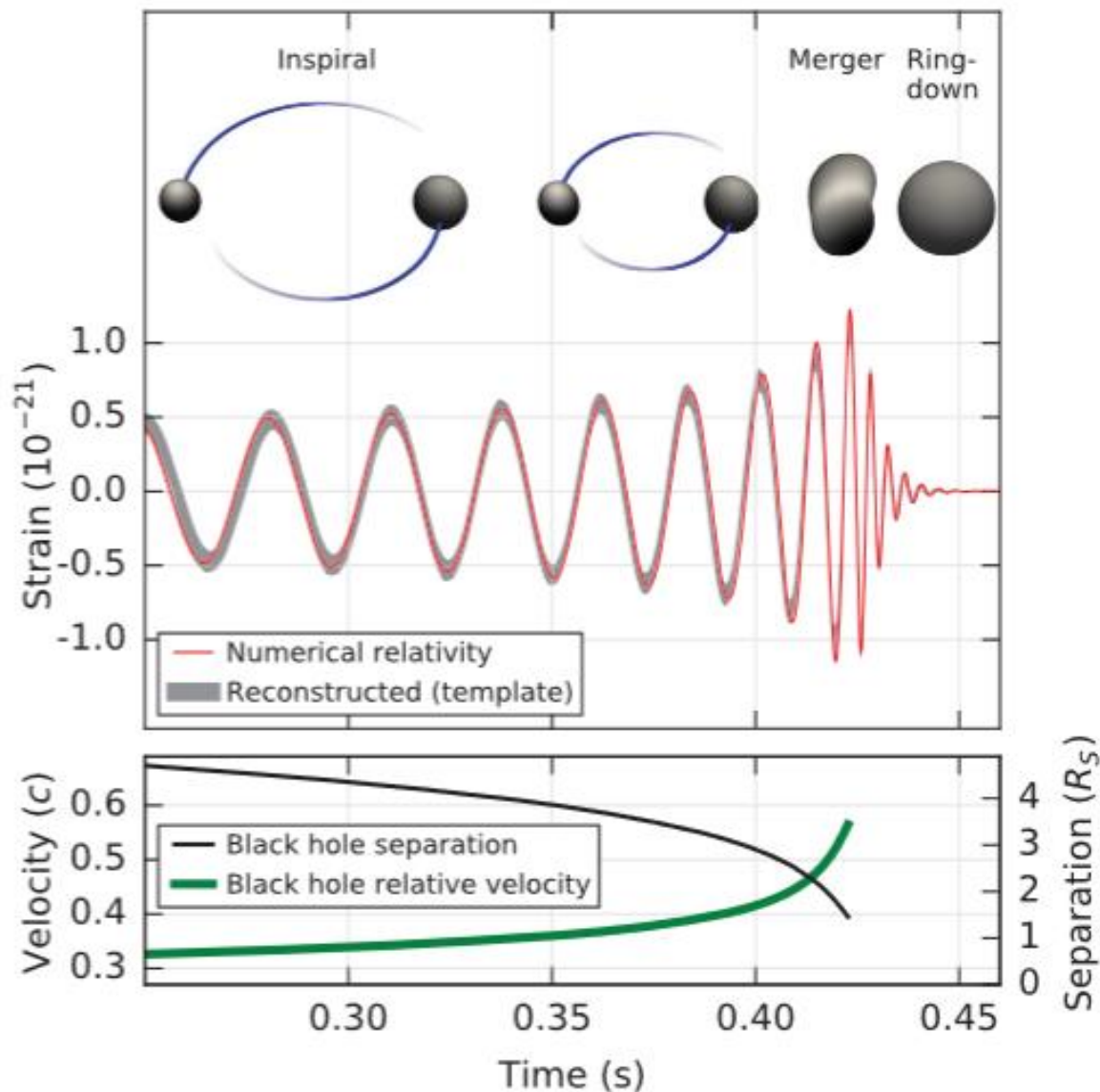
Две пары джетов или двойное активное ядро.



Abell 400

3C75

СЛИЯНИЕ ДВУХ ЧЕРНЫХ ДЫР



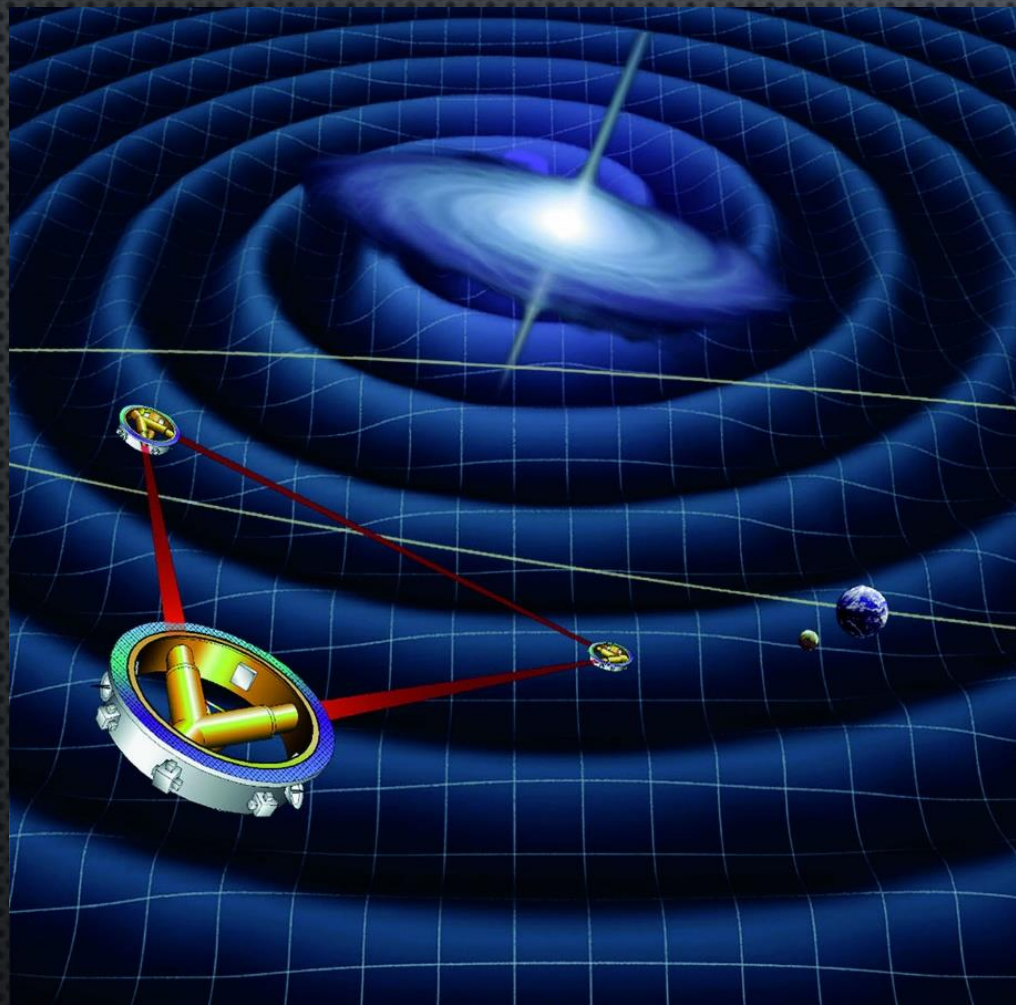
В течение многих лет несколько групп ученых занимались расчетами форм ожидаемых сигналов от слияний нейтронных звезд и черных дыр.

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

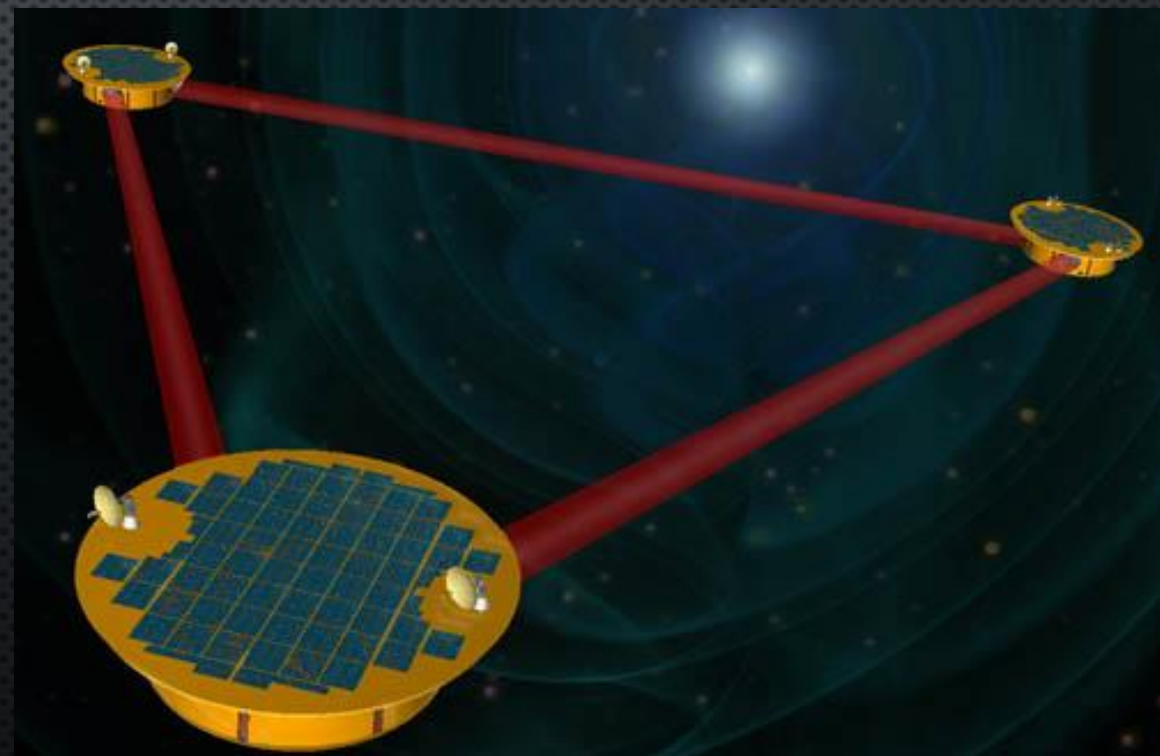
Тем не менее, удалось достаточно хорошо рассчитать формы сигналов, что критично для распознавания слабых всплесков на фоне шумов.

КОСМИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ ELISA

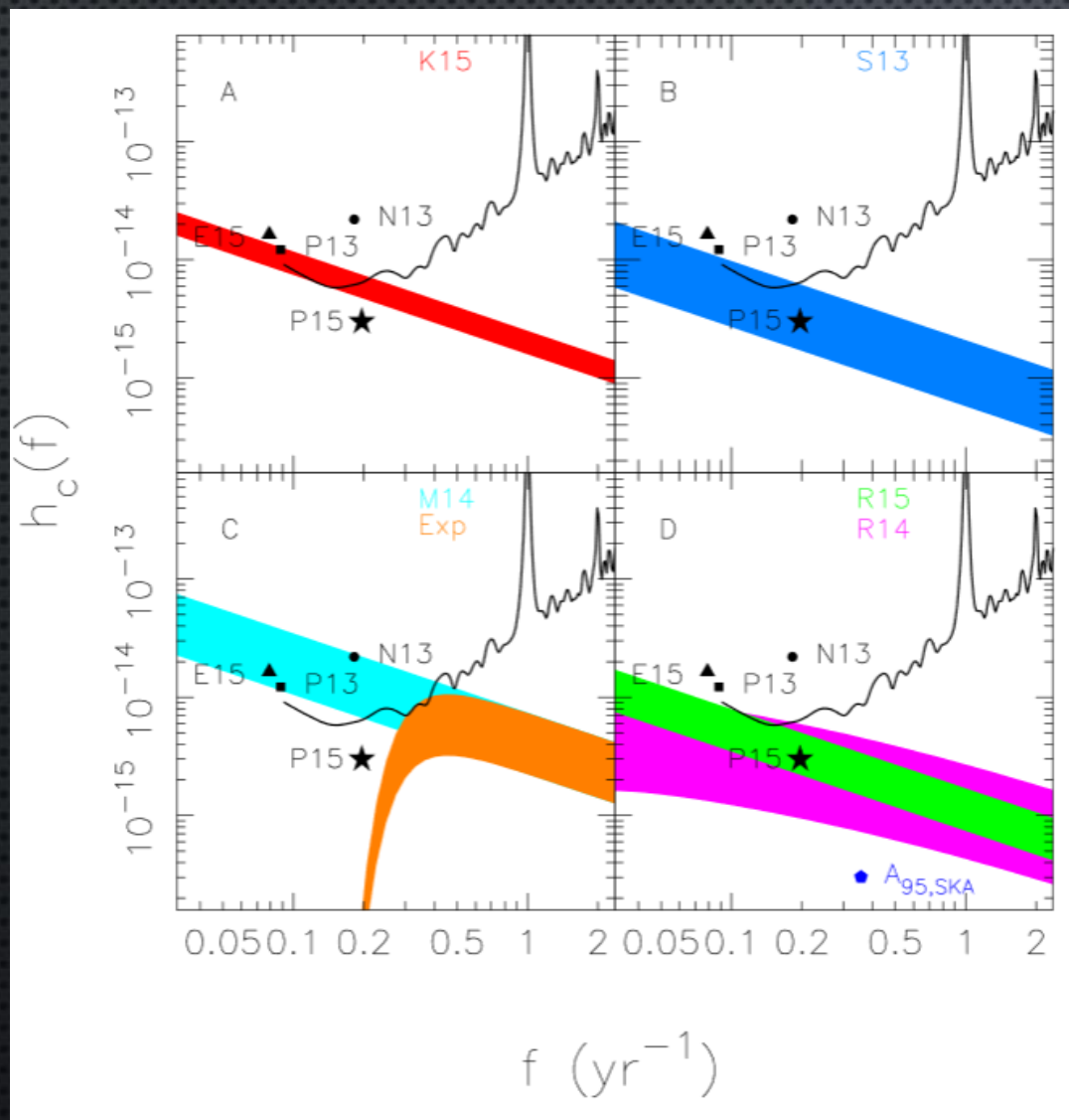
Изначально смета проекта составляла 2.5 миллиарда долларов.
NASA сняла свое финансирование.
ESA одобрена заявка на запуск упрощенного варианта в 2032-34 г.
NASA вернулась в проект.
Успешно отработал прототип.



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



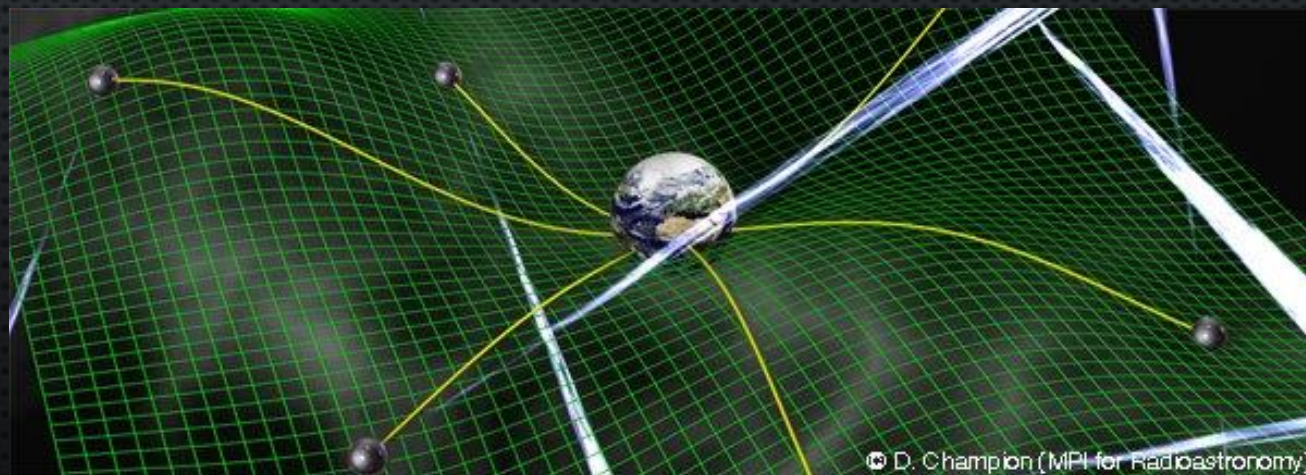
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ ОТ СВЕРХМАССИВНЫХ ЧЕРНЫХ ДЫР



Гравитационные волны от сверхмассивных черных дыр ищут с помощью наблюдения радиопульсаров. Работают 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.



Космология - 1

Сергей Попов
(ГАИШ МГУ)



Hubble Ultra Deep Field



Созвездие Печь
Наблюдения 2003-2004



Формирование галактик



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

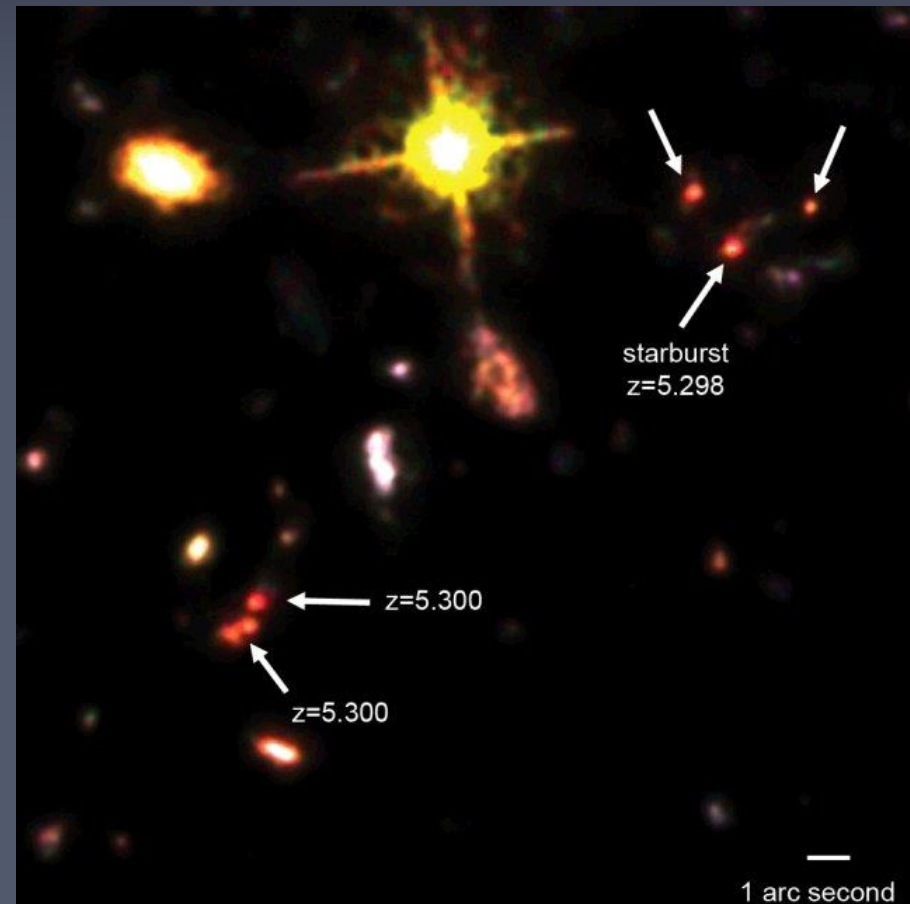
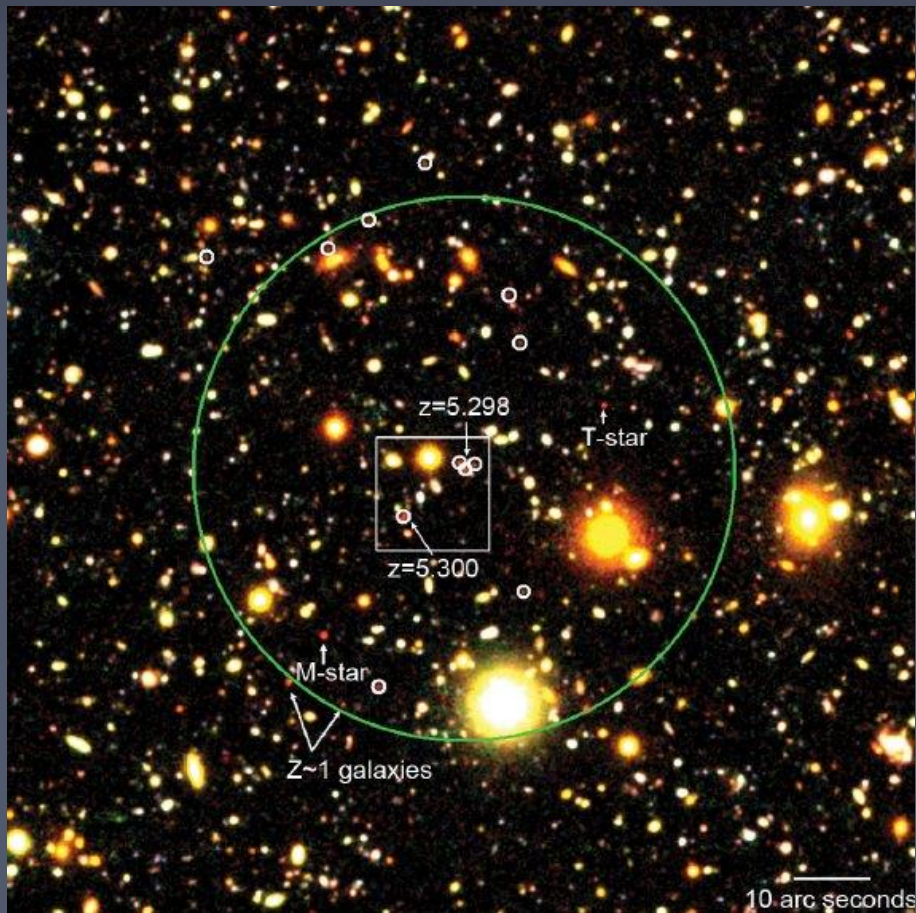
Формирование скоплений



Мы видим, что скопления
возникают постепенно.

На больших расстояниях
скопления еще не успели
сформироваться.

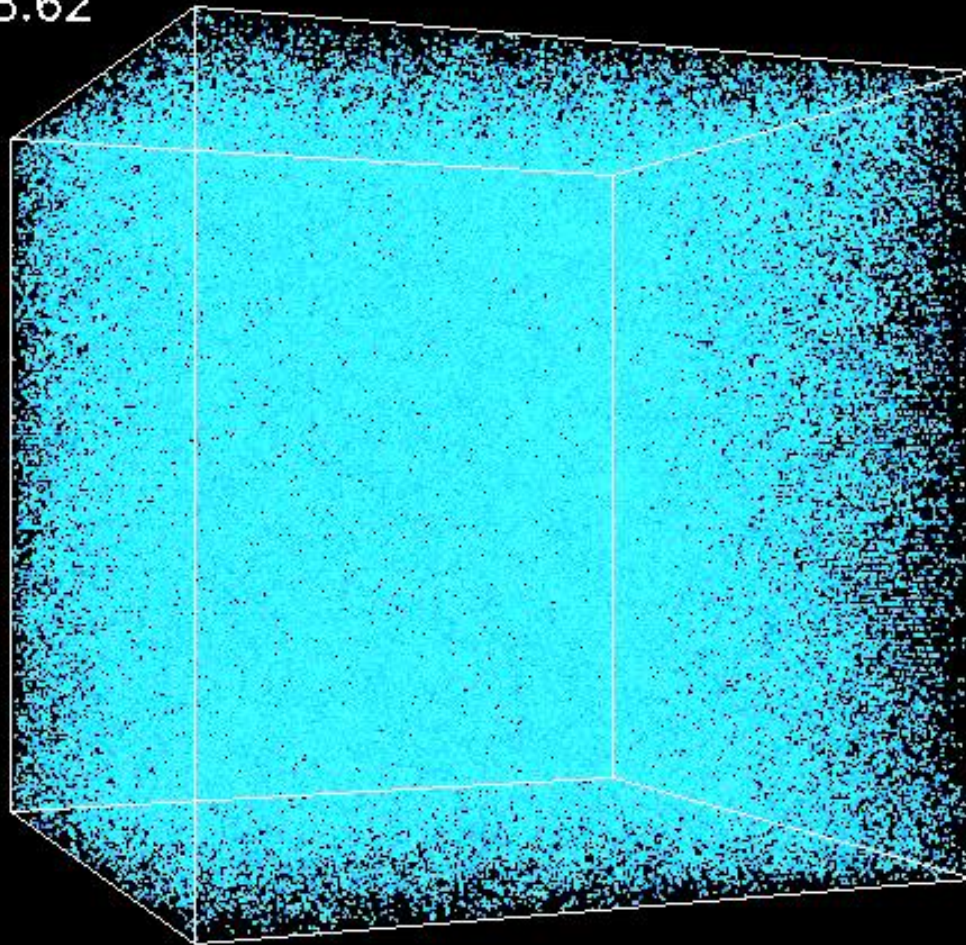
Дальнее протоскопление галактик



$Z=5.3$

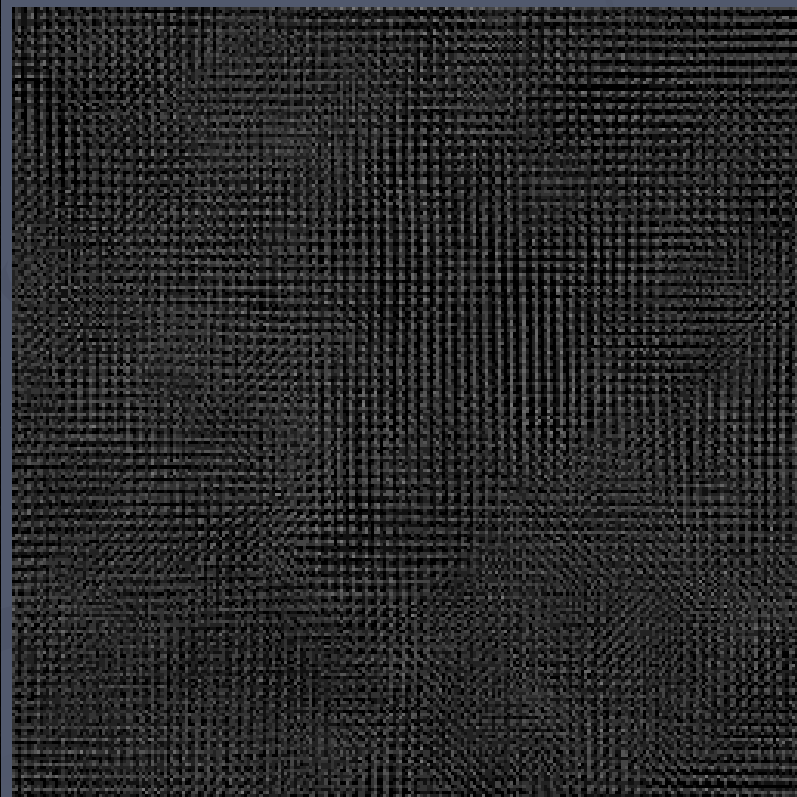
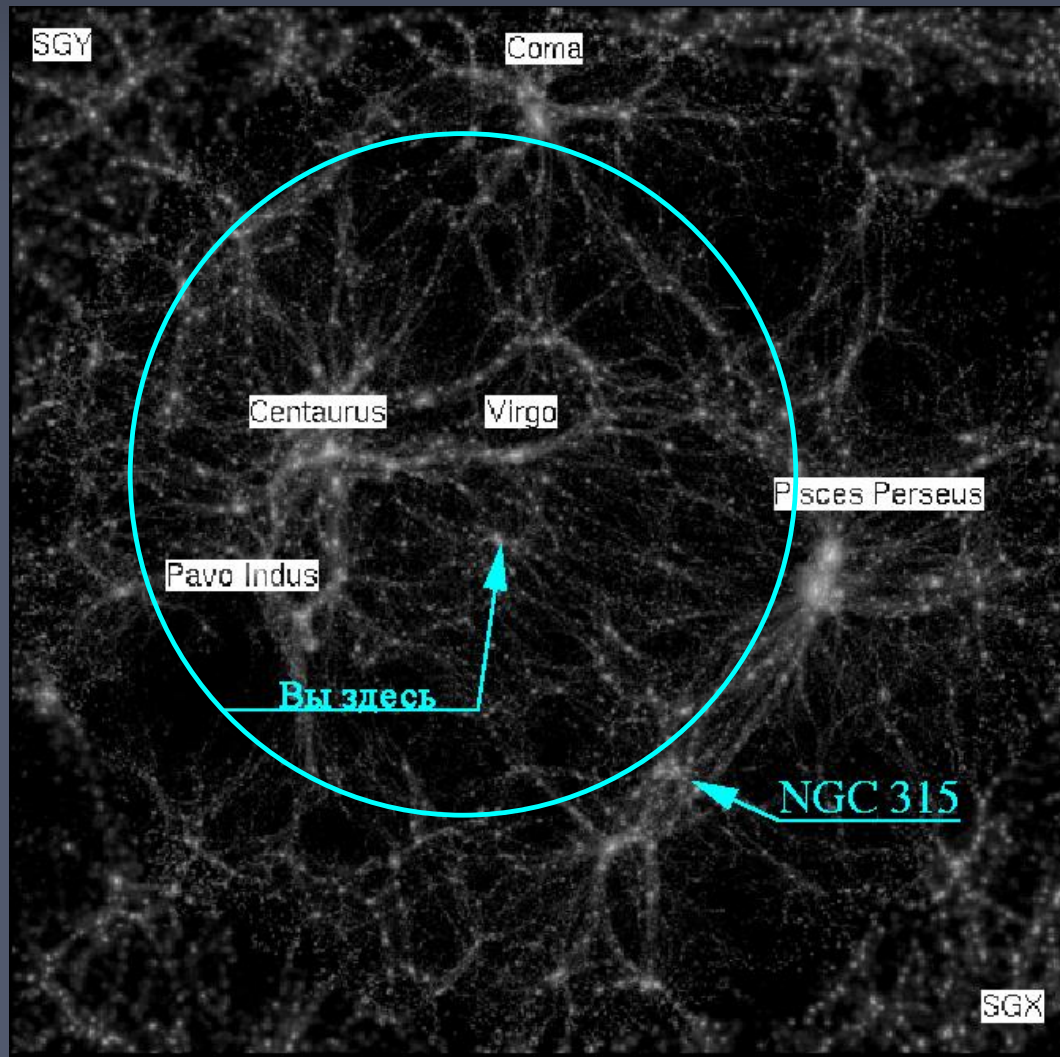
Формирование структуры

$Z=28.62$



А. Кравцов и др.

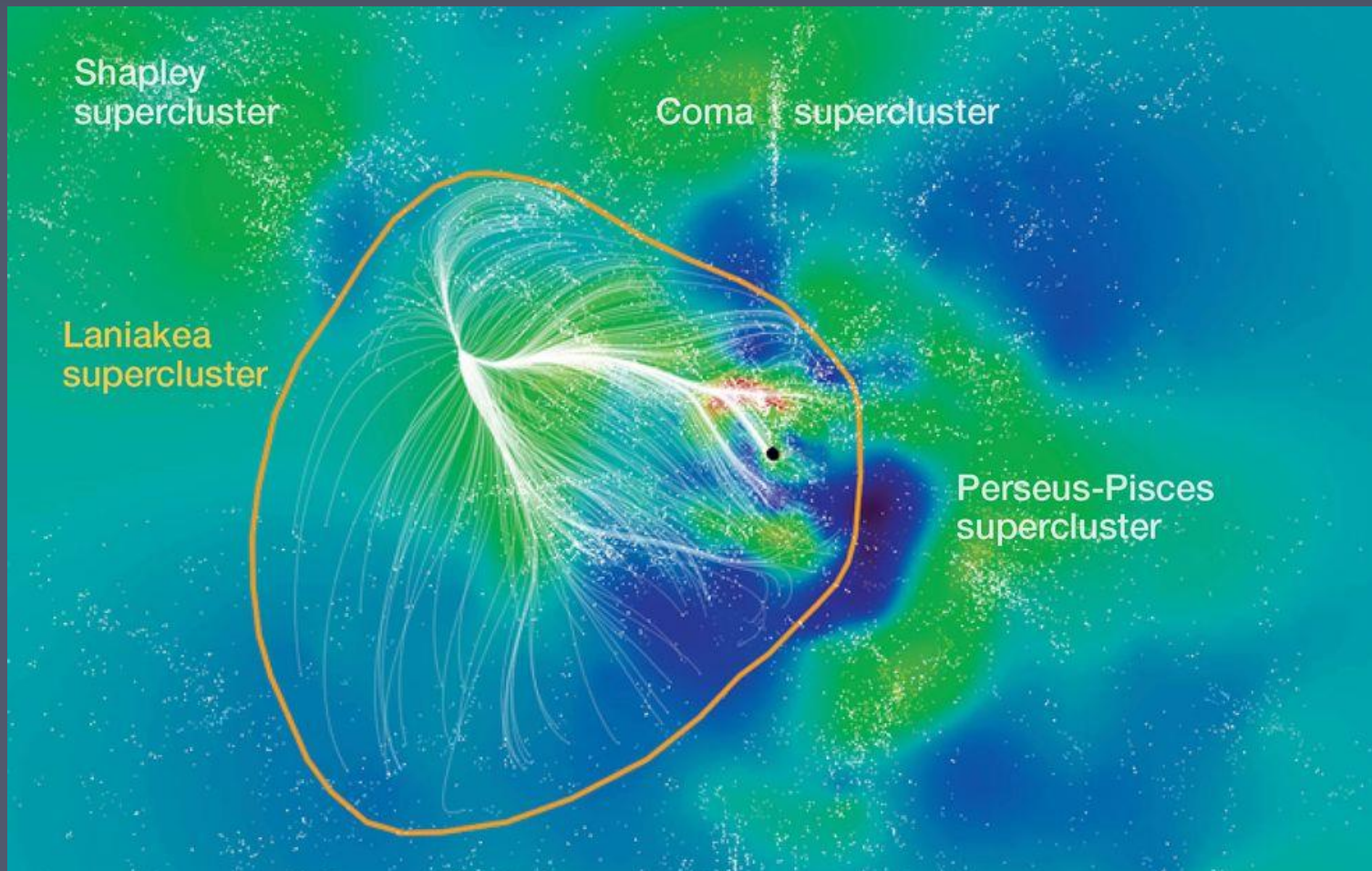
Наши «большие окрестности»



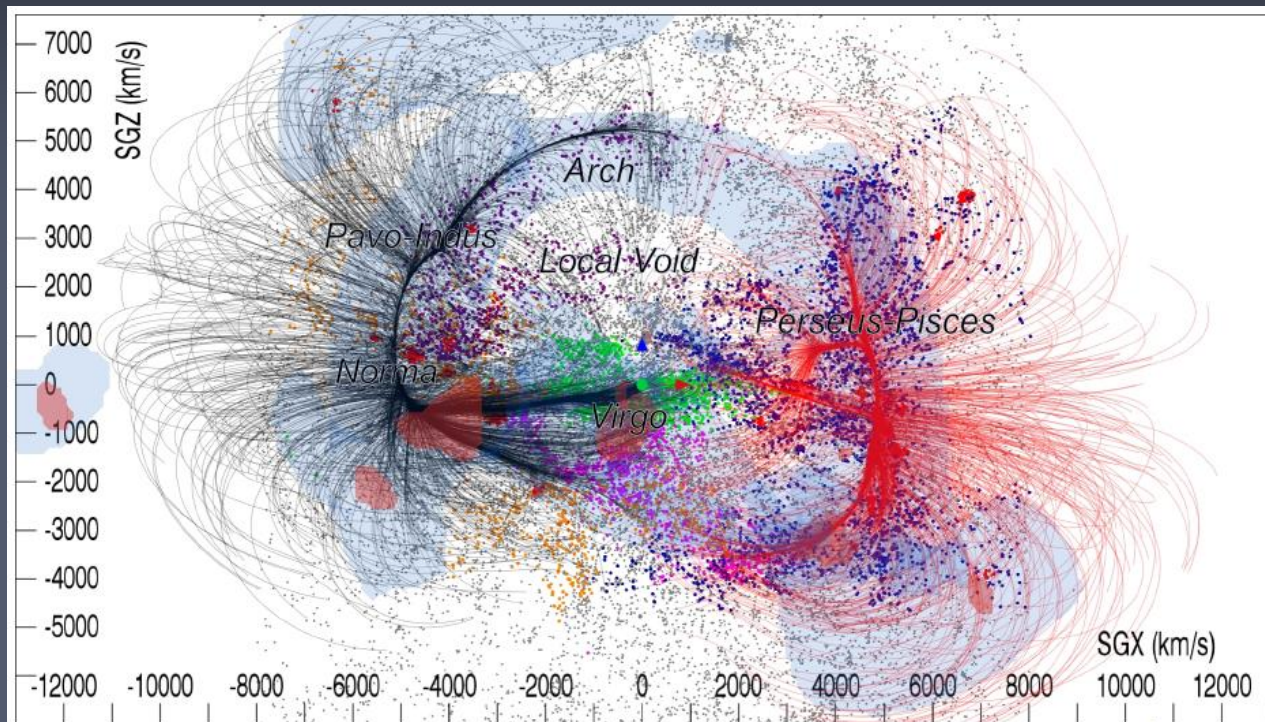
Ланиакееа

~100000 крупных галактик.

Полмиллиарда световых лет в поперечнике.

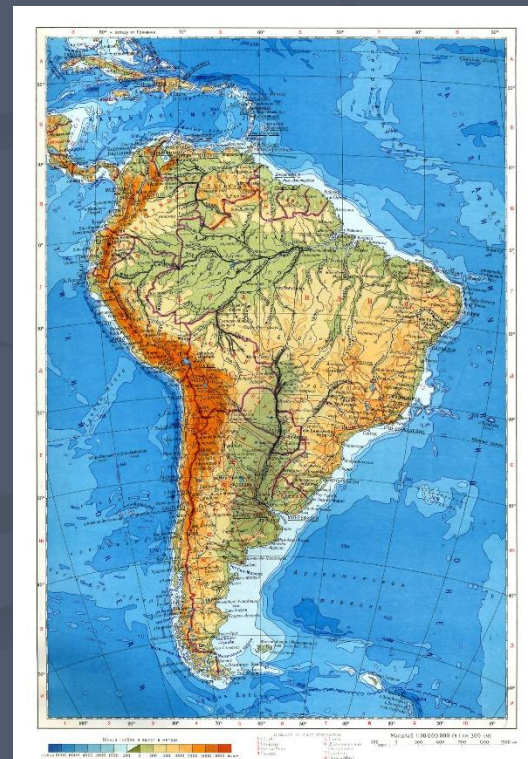


Структура потоков внутри 80 Мпк



1409.0880

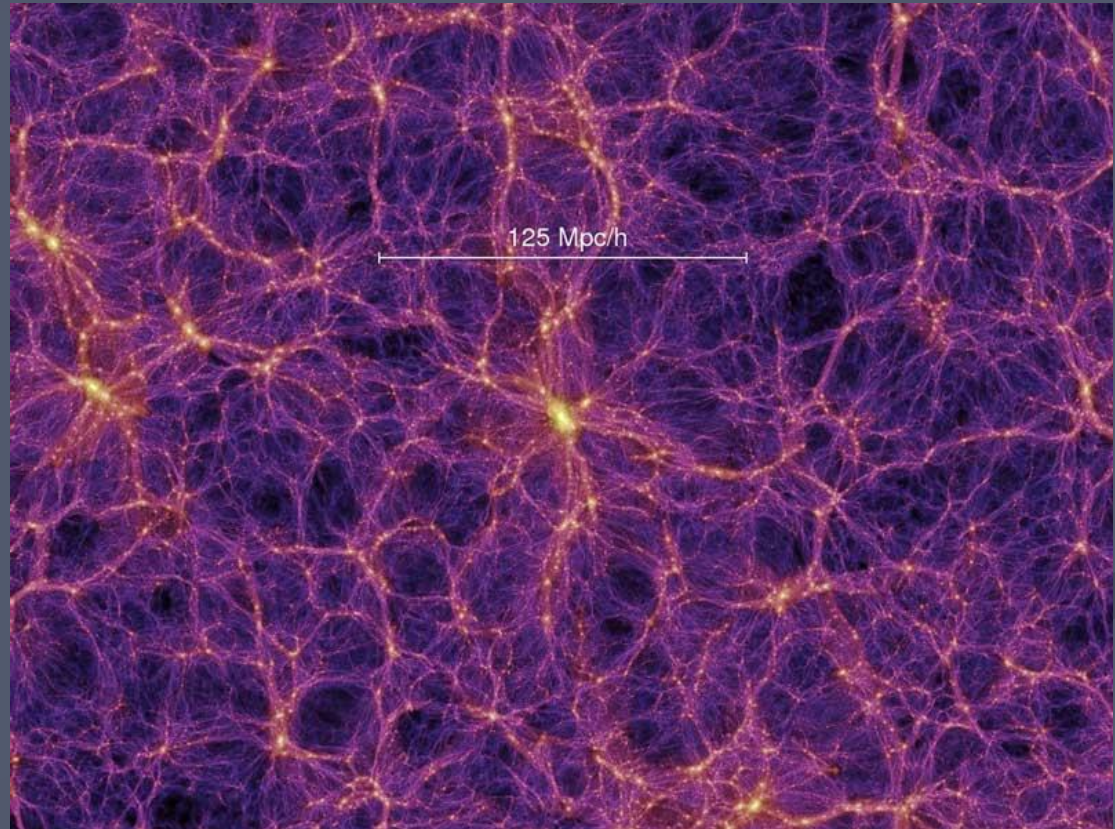
Теперь мы знаем, как образуется «наше»
сверхскопление галактик.



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?

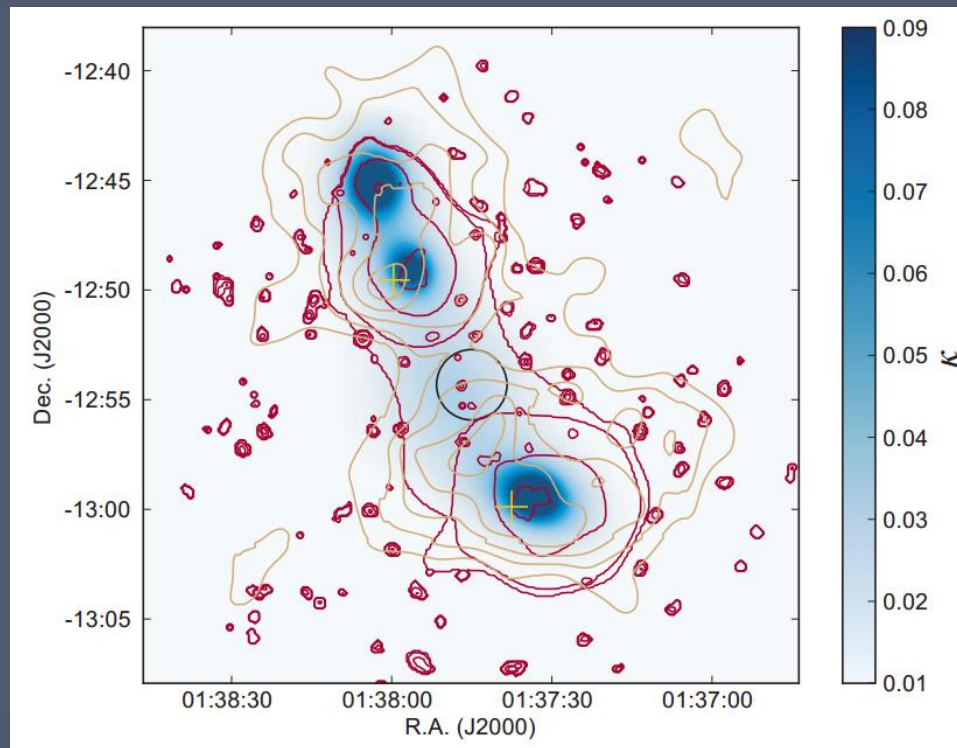
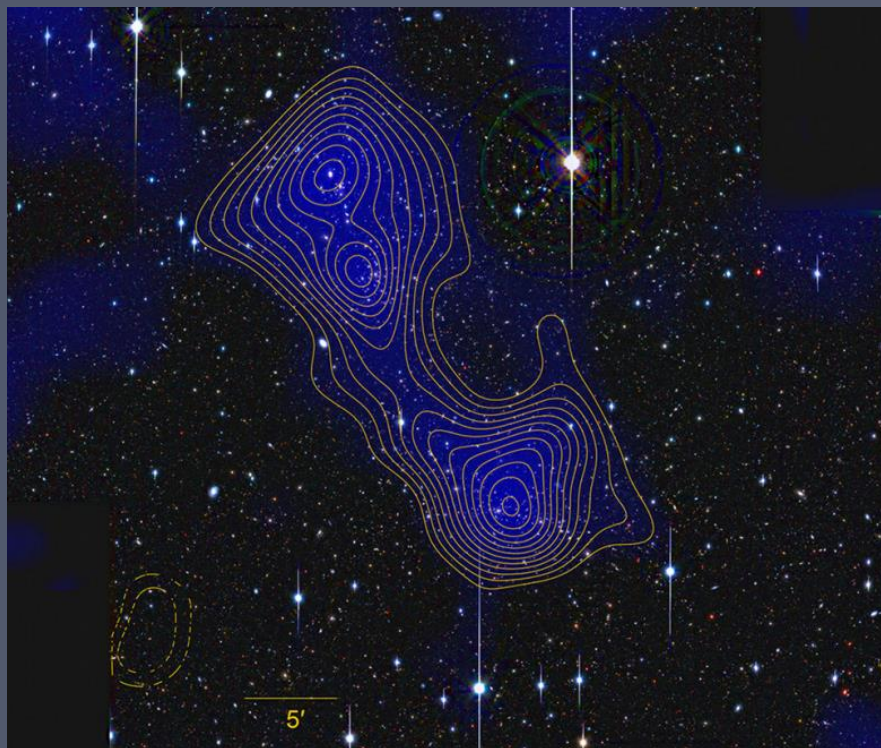


Волокно темного вещества

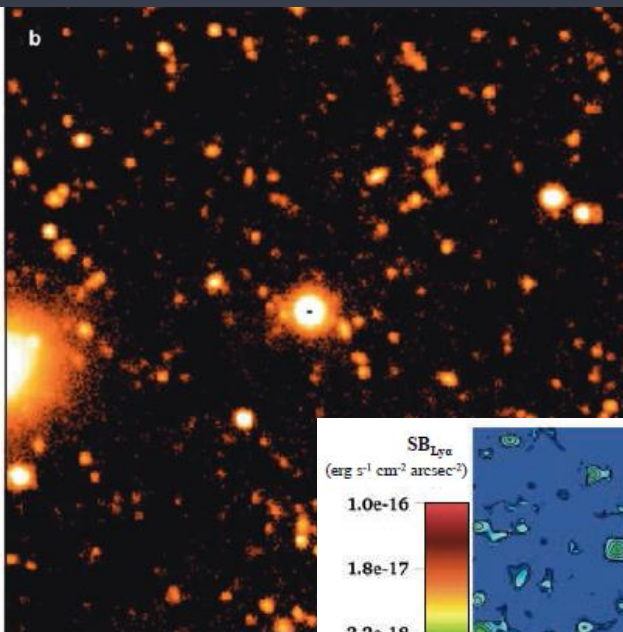
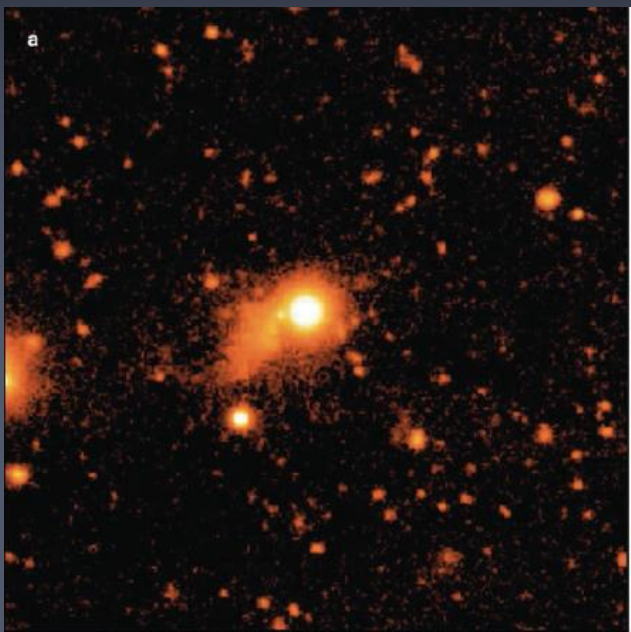
Скопления A222/223. $z \sim 0.2$ Между скоплениями 18 Мпк.

Распределение массы восстанавливается по линзированию.

Массы газа не хватит для объяснения массы волокна.

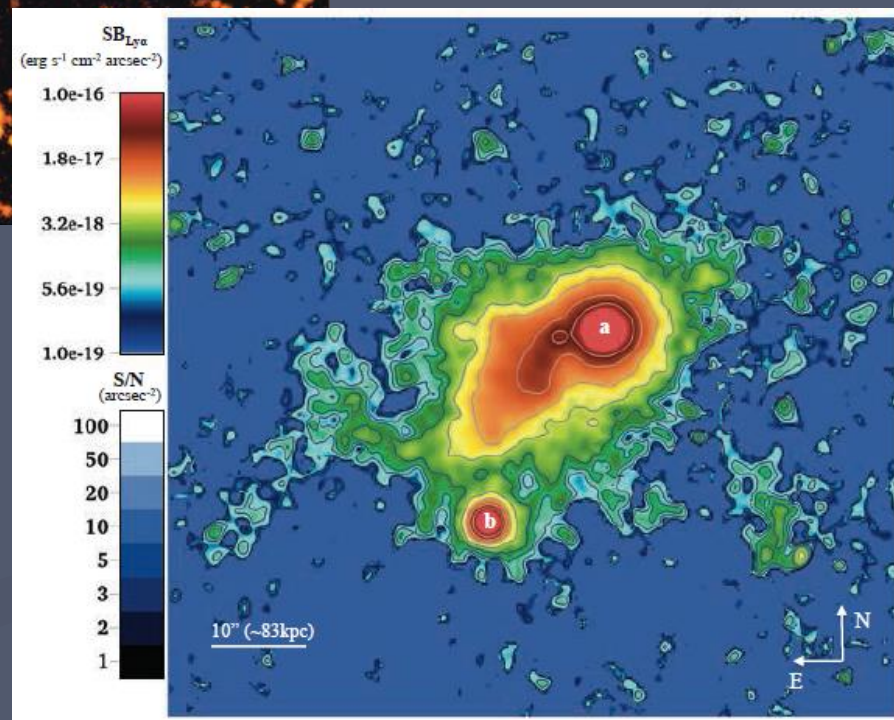


Волокно космической сети

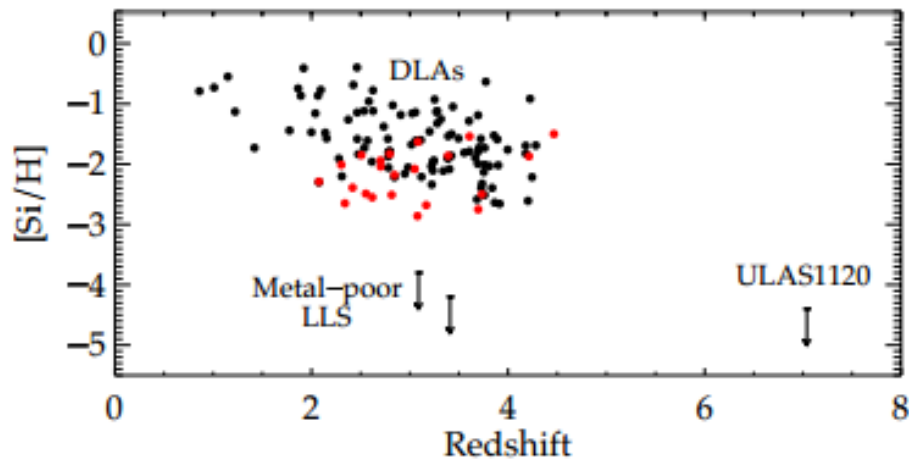
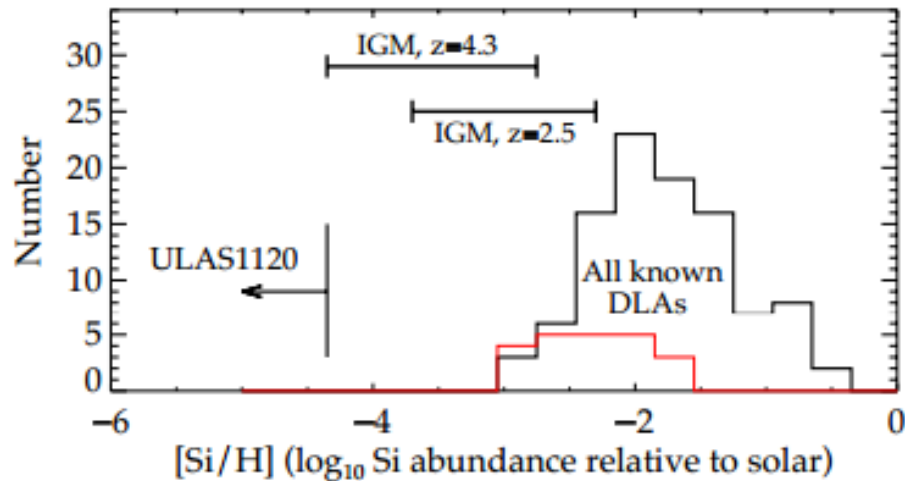


1401.4469

Около квазара на $z \sim 2.3$
в линии лайман-альфа
обнаружено газовое волокно
протяженностью более млн. св. лет



Очень малометаллический газ на $z=7$



772 млн лет после Большого Взрыва.

Т.о., мы видим, что меняется химический состав вселенной.

В итоге, вся вселенная предстает эволюционирующей

Глядя в прошлое

- По эффекту Сюняева-Зельдовича
- По возбуждению линий

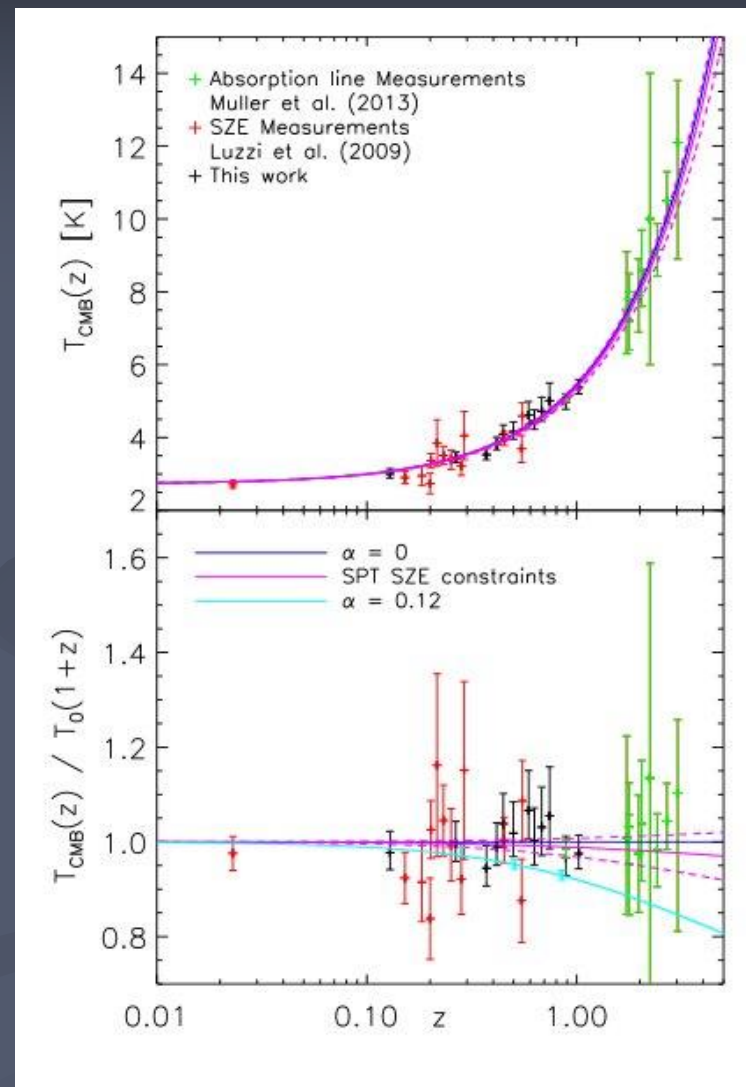
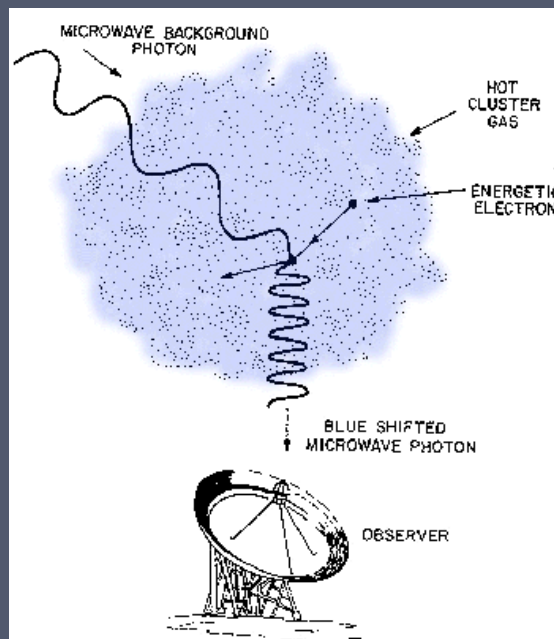


Измерение температуры реликта на разных красных смещениях

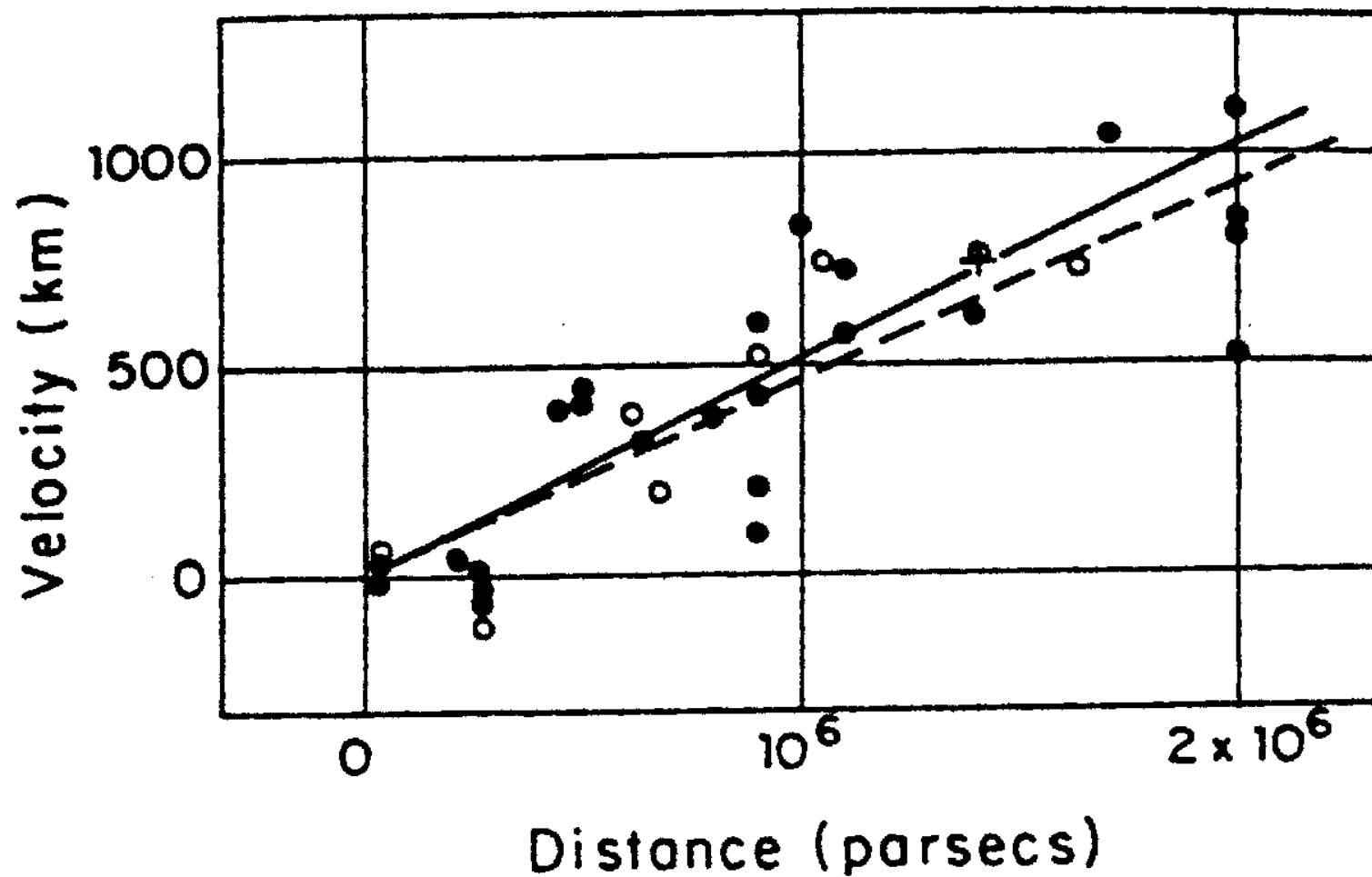
Как остывает реликт?

На South Pole Telescope авторы исследовали 158 скоплений галактик на $z=0.05-1.35$

Благодаря наблюдениям на разных частотах по эффекту Сюняева-Зельдовича удалось определить эволюцию температуры реликтового излучения.

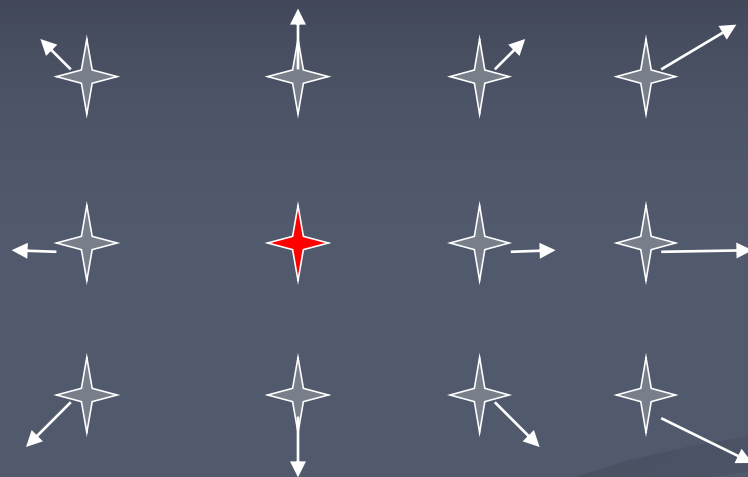


Расширение вселенной

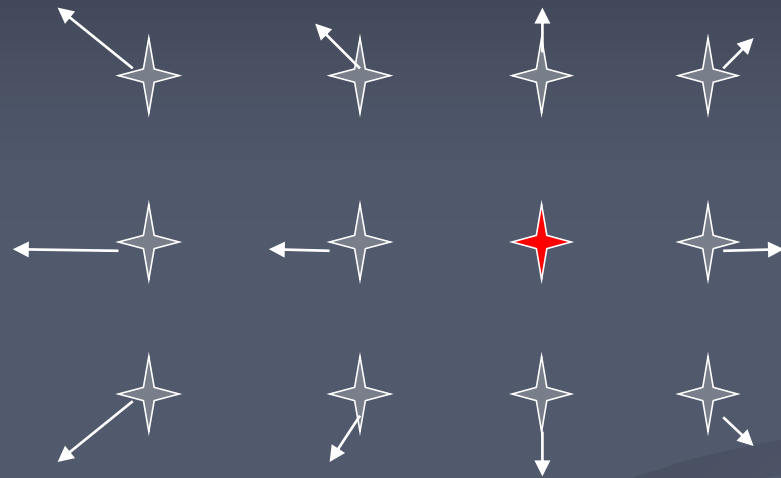


Хаббл 1929 г.

Как это работает?



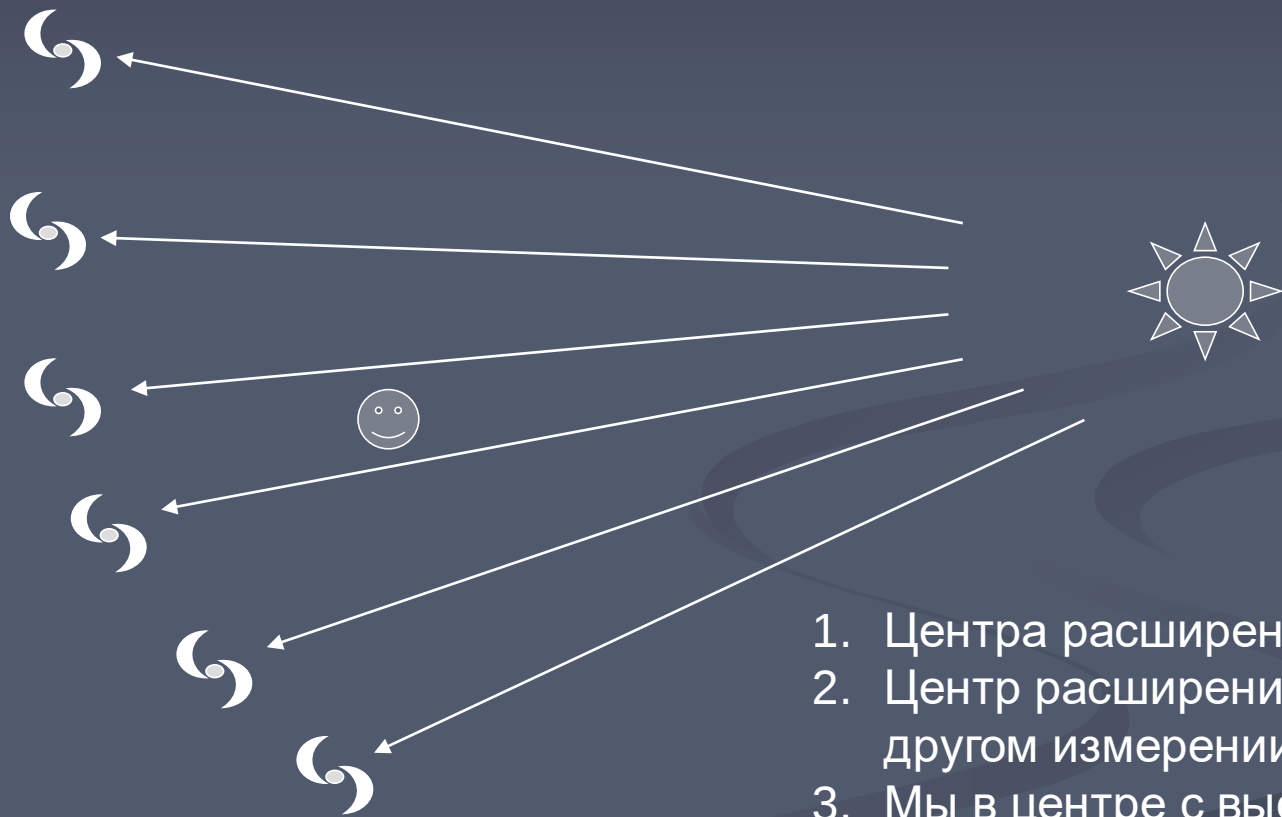
Как это работает?



Чем дальше галактика — тем быстрее она удаляется.
Центра расширения нет. Если мы перелетим в другое место,
то картина расширения не изменится.



Где центр расширения?



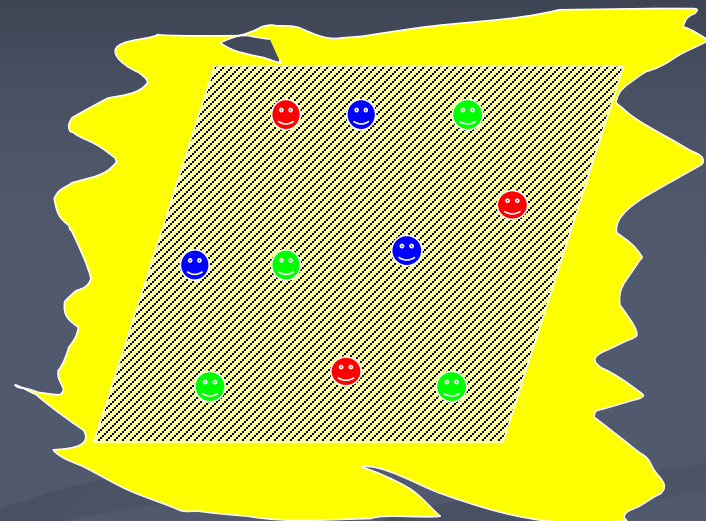
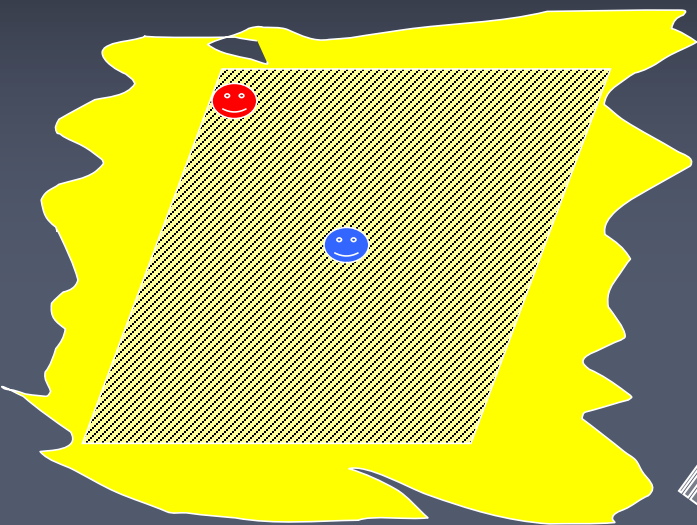
1. Центра расширения нет
2. Центр расширения в другом измерении
3. Мы в центре с высокой точностью (но это было бы крайне трудно объяснить).

Область наблюдения

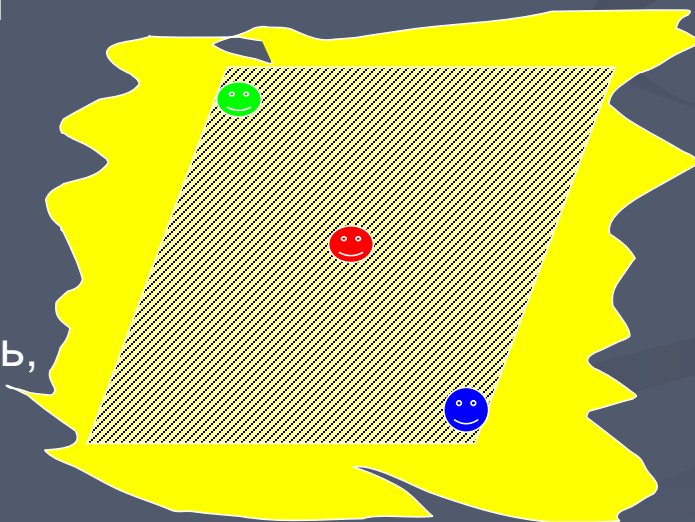


Для наблюдений нам доступна конечная область пространства, но вселенная там не заканчивается.

Конечна ли вселенная?



Нам для наблюдений доступна лишь конечная область. Но мы видим, что в далеких галактиках все примерно также, т.е., мы можем думать, что оттуда видна такая же картина. Да и почему нет?

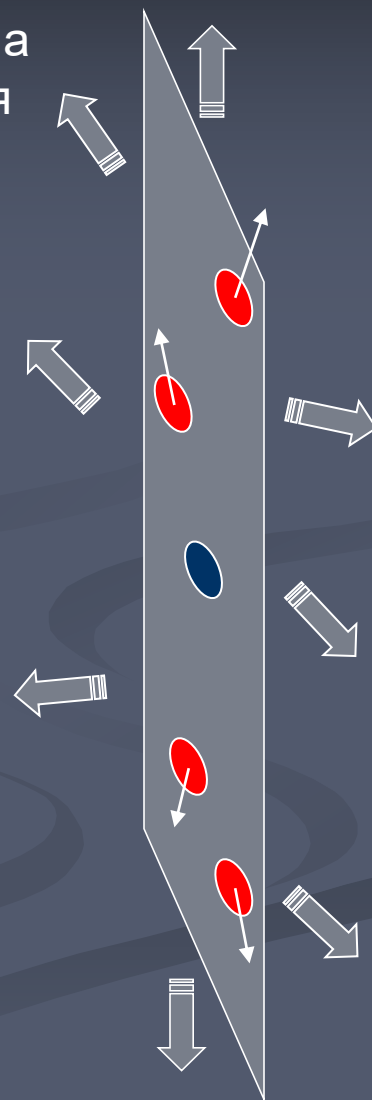
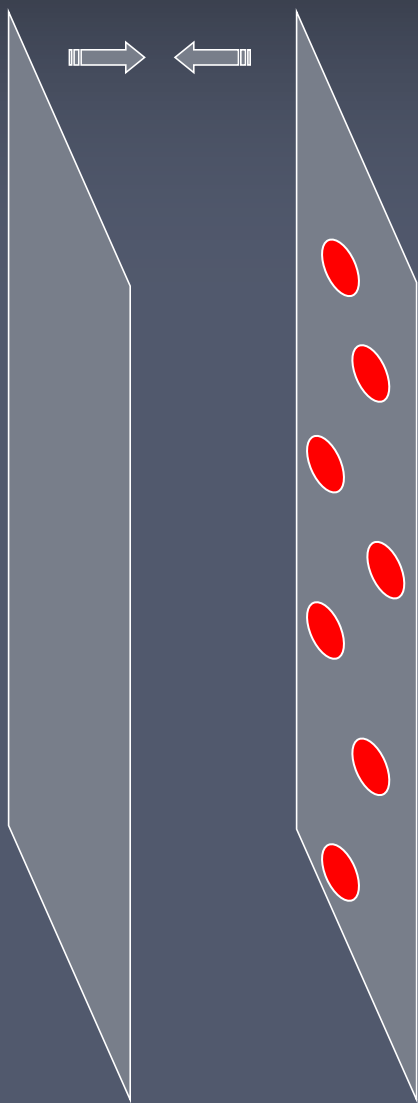


Мы не можем сказать, насколько вселенная больше той области, которую мы можем сейчас наблюдать.

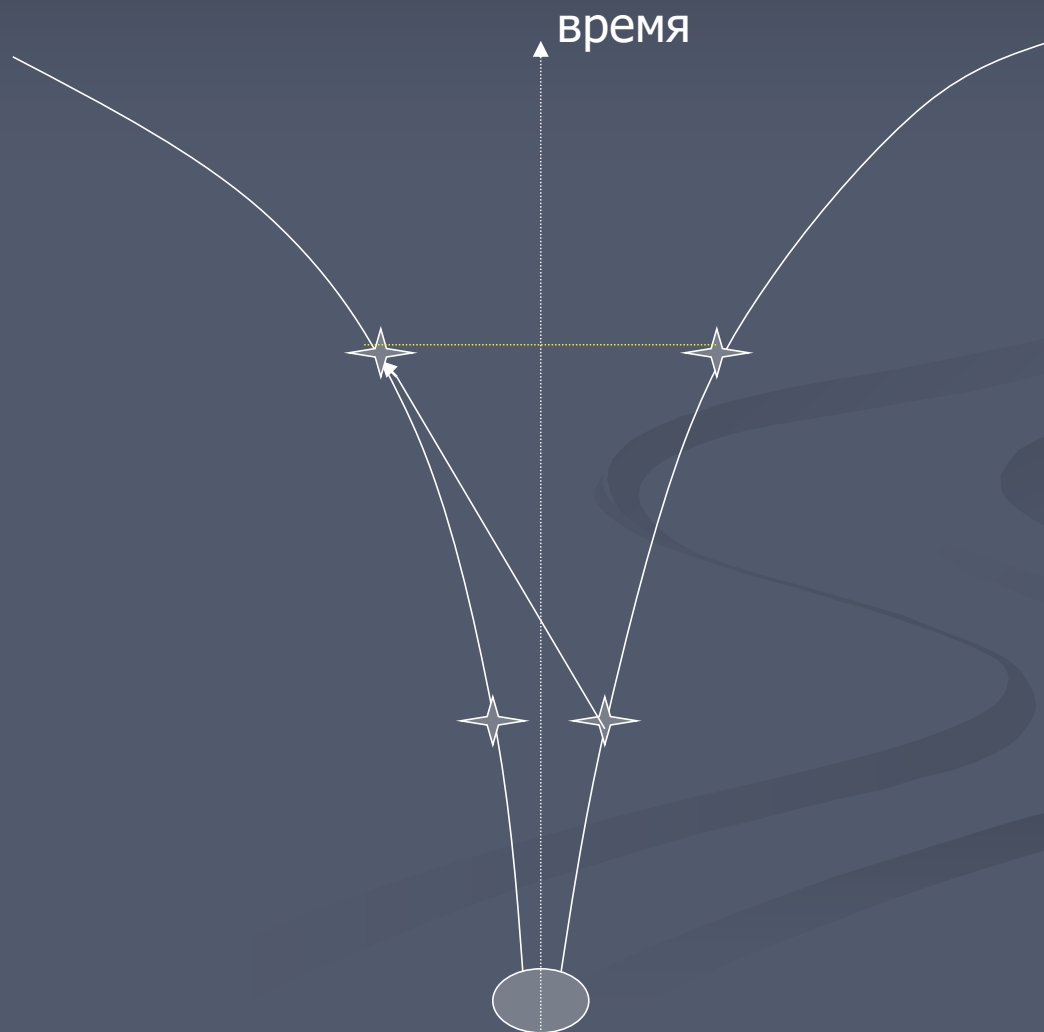
Простая иллюстрация

Эта сильно упрощенная картина помогает понять, что вселенная может быть безграничной и при этом расширяющейся

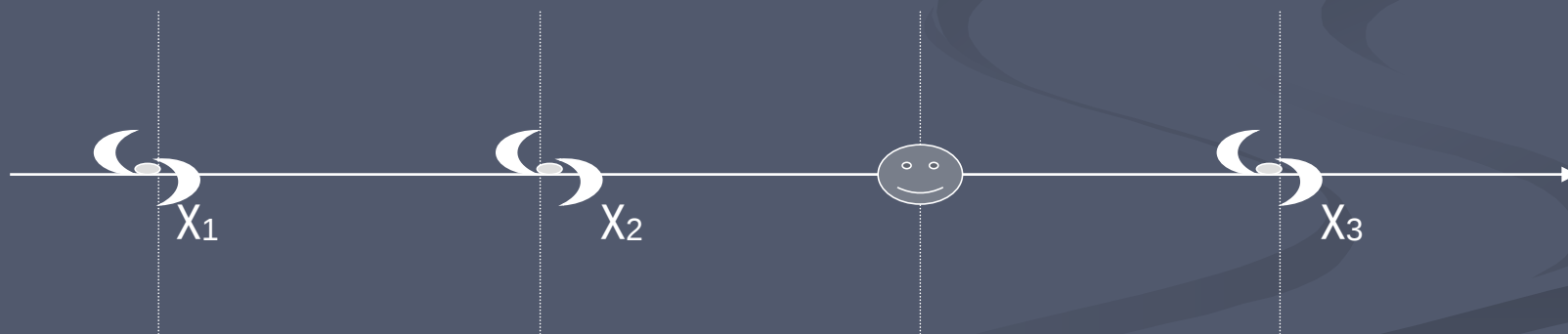
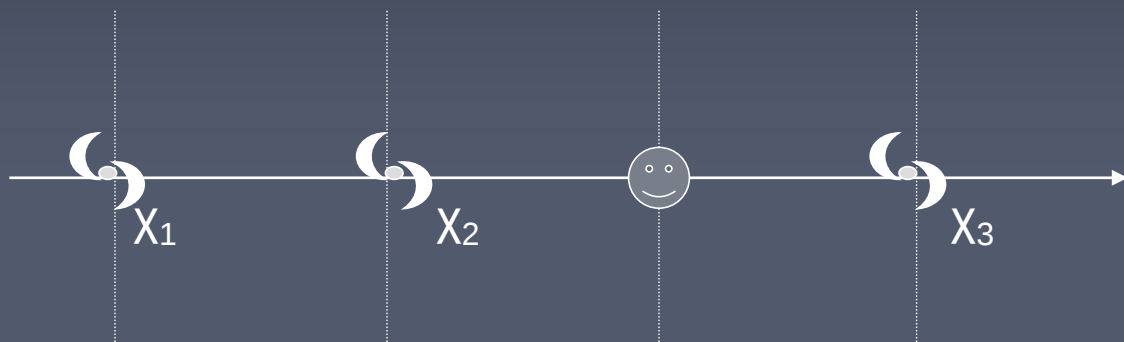
Важно, что уже в «момент ноль» вселенная может иметь конечный размер или даже сразу быть бесконечной.



Особенности в космологии

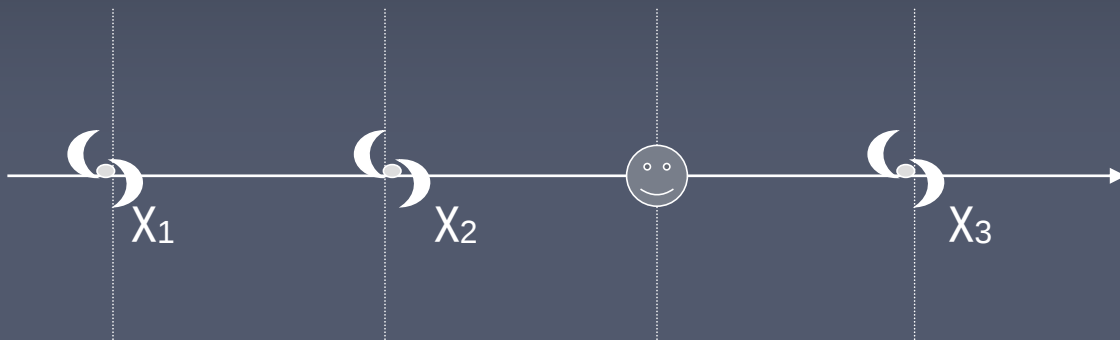


Сопутствующее расстояние

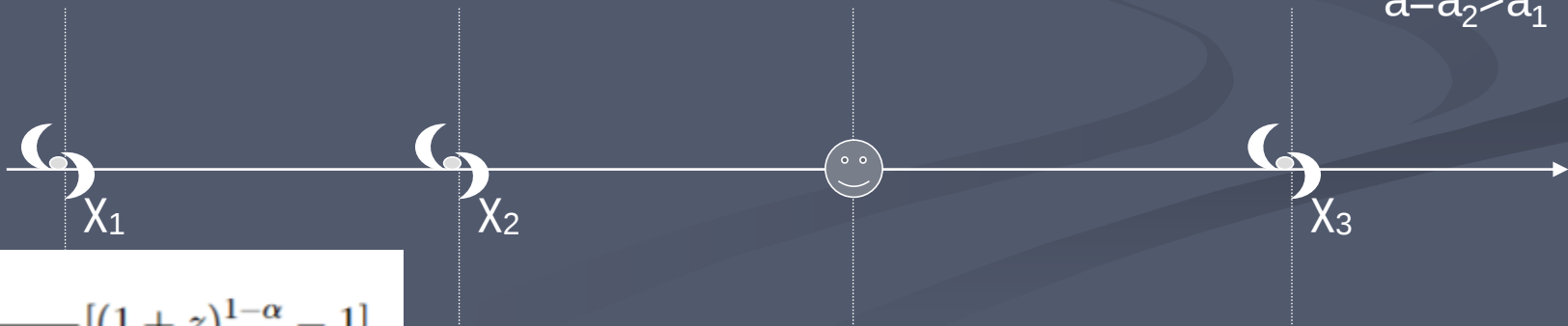


Собственное расстояние

$$d = a\chi$$



$t = t_1$
 $a = a_1$
 a – масштабный фактор

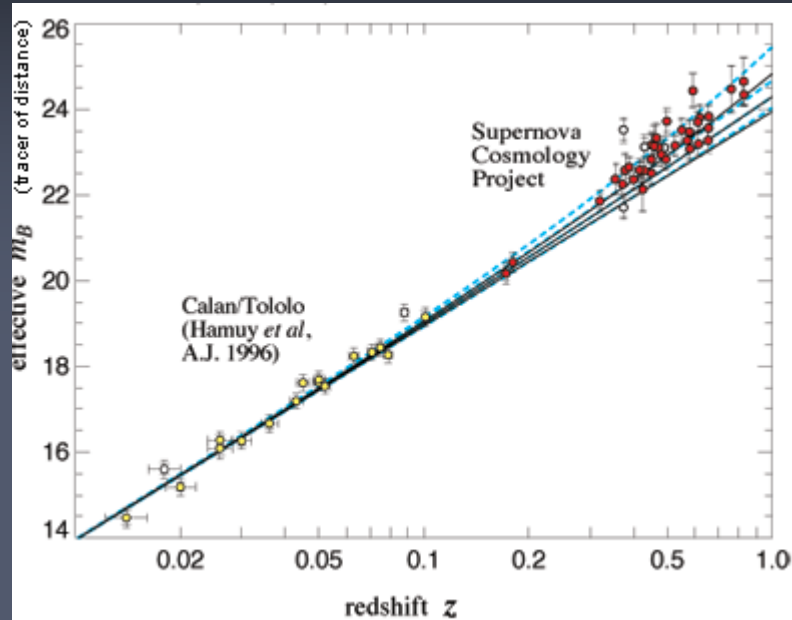


$t = t_2 > t_1$
 $a = a_2 > a_1$

$$d = \frac{c}{(1 - \alpha)H_0} [(1 + z)^{1-\alpha} - 1].$$

$d \sim z$ при $z \approx 0$

Закон Хаббла



$$v = H d$$

H – постоянная Хаббла.

$$72 \pm 2 \text{ км/с/Мпк}$$

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a(t)^2 dl^2.$$

$$H = \dot{a}/a$$

$$a^2(t) dl^2 = d\ell^2$$

$$dd = a(t) dl$$

$$d = a(t) \int dl = a\chi$$

$$v = dd/dt = (da/dt)\chi = [(da/dt)/a](a\chi) = Hd$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Релят. материя:} \quad \rho_r(z) = \rho_r(0)(1+z)^4, \\ \text{Нерелят. материя:} \quad \rho_m(z) = \rho_m(0)(1+z)^3, \\ \text{Кривизна:} \quad \rho_c(z) = \rho_c(0)(1+z)^2, \\ \text{Вакуум:} \quad \rho_\Lambda(z) = \text{const} \end{array} \right\} \Rightarrow$$

$$H^2(z) = H_0^2 \left(\Omega_r(1+z)^4 + \Omega_m(1+z)^3 + \Omega_c(1+z)^2 + \Omega_\Lambda \right)$$