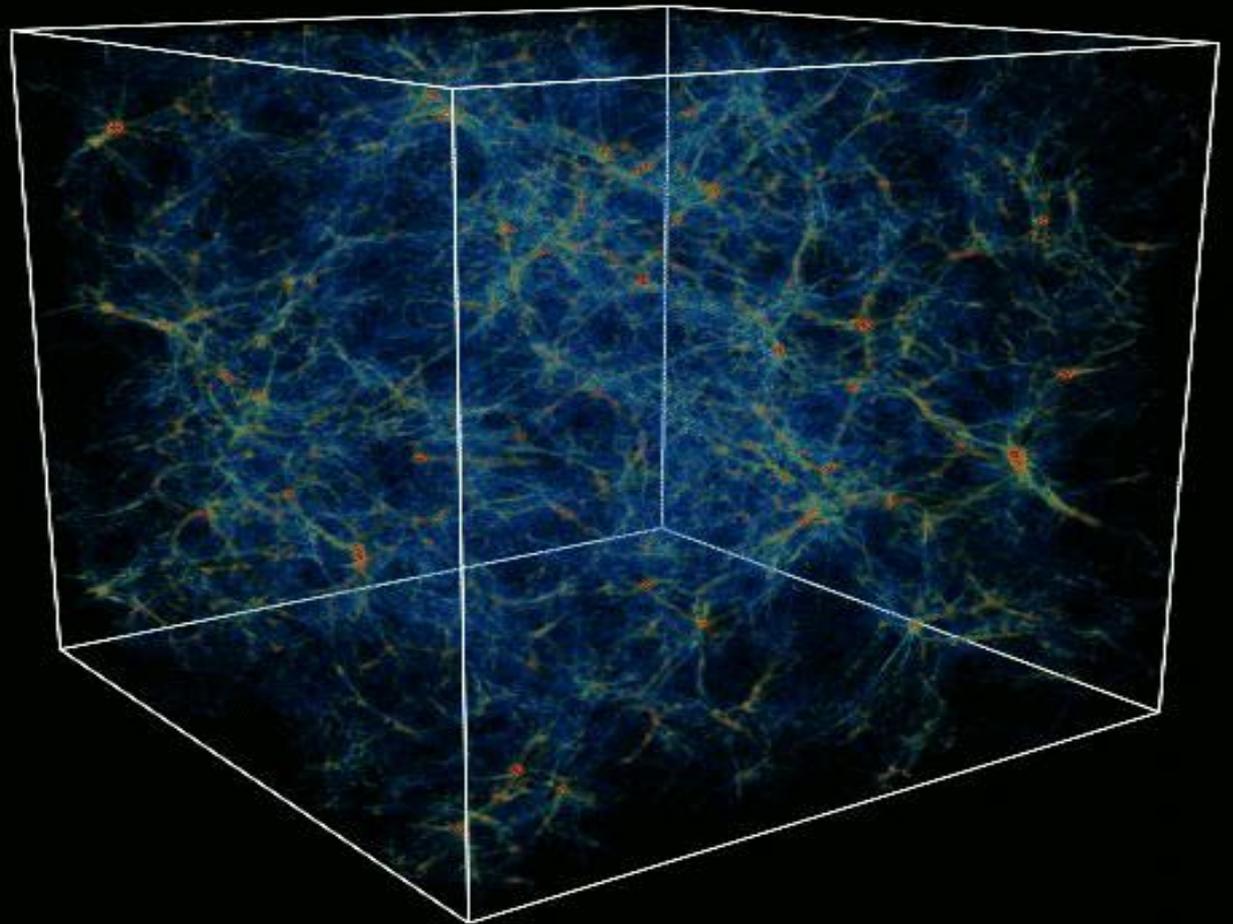


Горячая вселенная и происхождение галактик

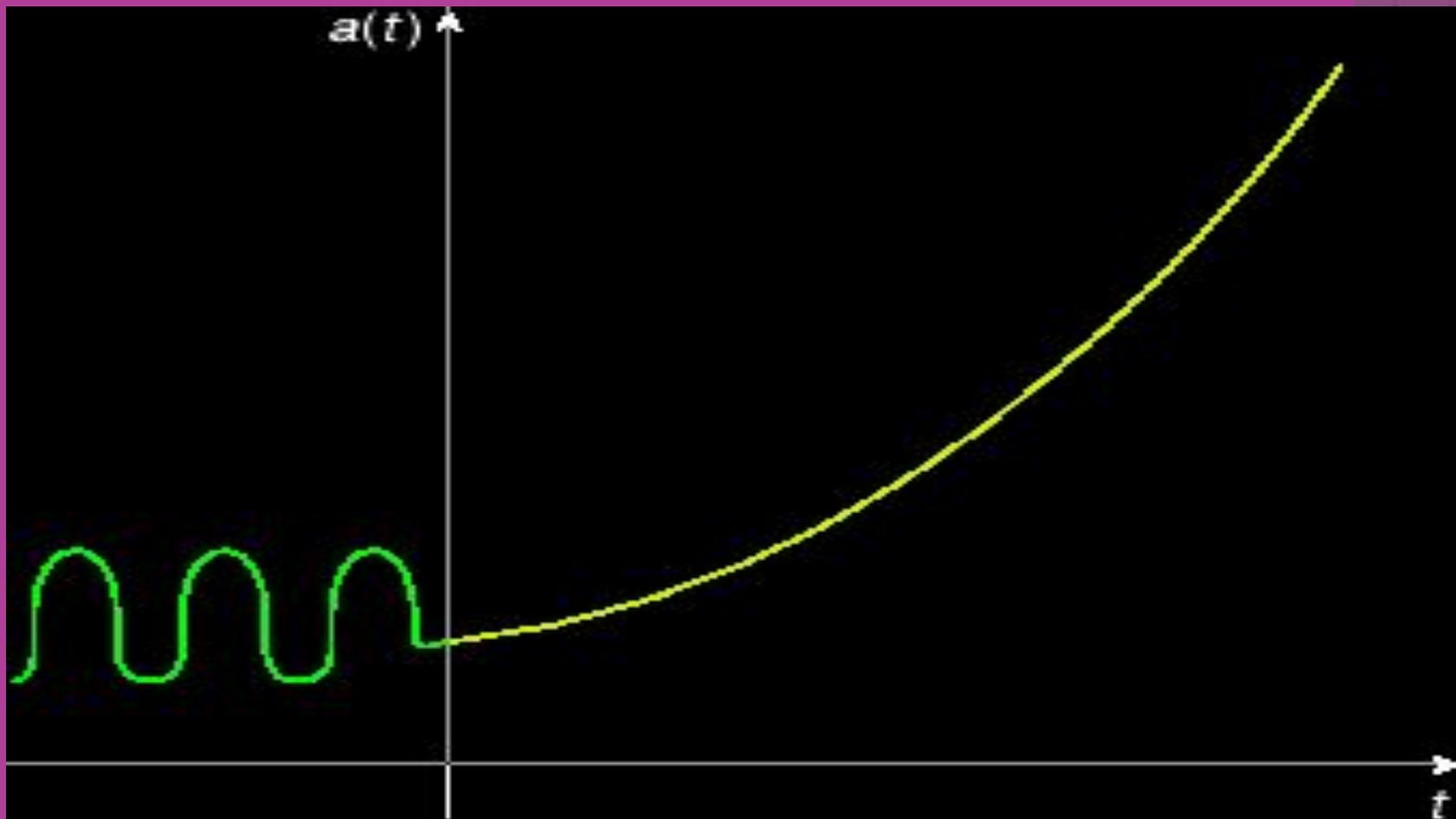




ГОРЯЧАЯ МОДЕЛЬ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА

- ◆ *Вселенная однородна и изотропна на больших масштабах (космологический принцип);*
- ◆ *Вселенная заполнена излучением, оставшимся от эпохи, когда она была «горячей»;*
- ◆ *Образование элементов во Вселенной происходило в соответствии с теорией первичного нуклеосинтеза.*

1. Рождение Вселенной



*Эволюция масштабного фактора со временем.
Волнистой линией показана область квантовой эволюции
Вселенной,
сплошной линией – область квазиклассической эволюции и
выход на*

2. РАСШИРЯЮЩАЯСЯ ВСЕЛЕННАЯ

В КОСМОЛОГИИ РАЗЛИЧАЮТ ТРИ ОСНОВНЫХ УРАВНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ.

- ◆ Пылеподобное:
 $p = 0, a(t) \sim t^{2/3}$
(современная Вселенная)
- ◆ Радиационно-доминированное:
 $p = \rho c^2/3, a(t) \sim t^{1/2}$
(эпоха нуклеосинтеза)
- ◆ Уравнение состояния фальшивого вакуума:
 $p = -\rho c^2/3, a(t) = a_1 e^{H(t-t')} + a_2 e^{-H(t-t')}$
(стадия инфляции)

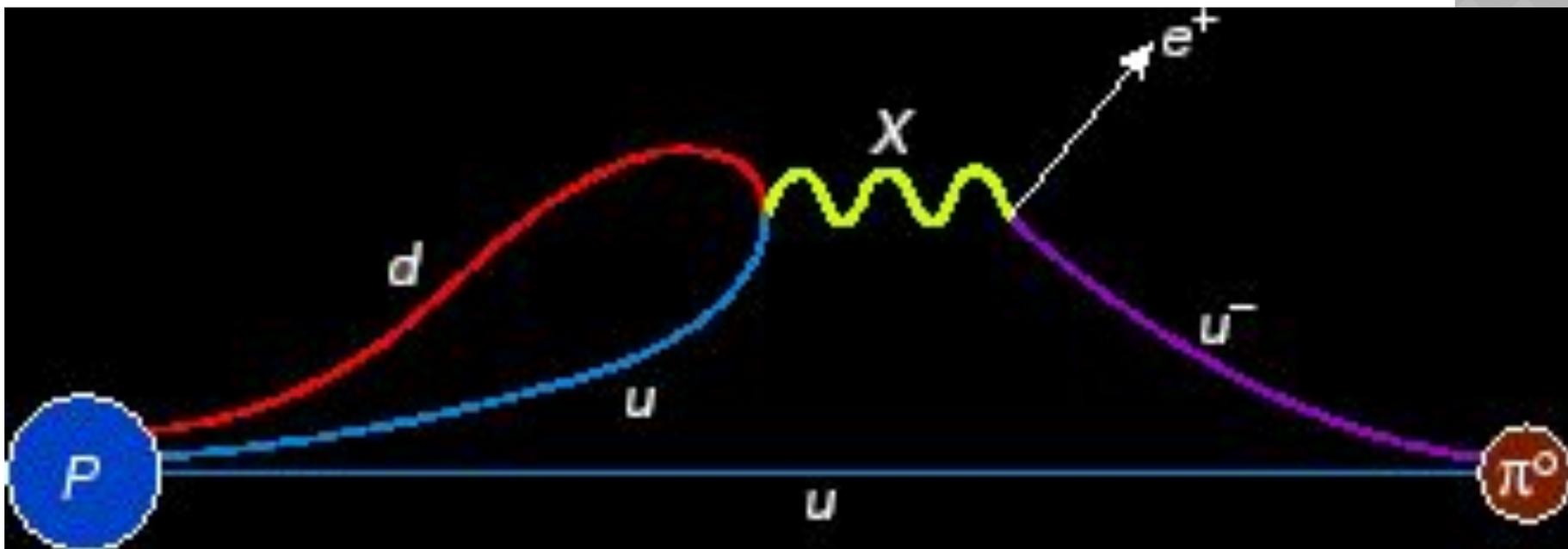
Вакуумные квантовые флуктуации, которые обычно проявляются только в микроскопических масштабах, в экспоненциально расширяющейся Вселенной быстро увеличивают свою длину и амплитуду и становятся космологически значимыми. Таким образом, возникшие впоследствии скопления галактик и сами галактики являются макроскопическими проявлениями квантовых флуктуаций на ранних этапах развития Вселенной.

3. СТАДИЯ БАРИОСИНТЕЗА

Уравнение состояния вещества с отрицательным давлением неустойчиво: оно должно смениться обычным (положительным или равным нулю) давлением. Поэтому инфляционная фаза развития Вселенной довольно быстро кончается. С окончанием этого этапа рождается обычная материя.

СООТНОШЕНИЕ ВЕЩЕСТВА И АНТИВЕЩЕСТВА:

$$***[N_P - N_{P^{\sim}}]/N_{\Gamma} \approx 10^{-9}***$$



Схематичное изображение распада протона p . Сплошными тонкими линиями показаны реальные частицы – кварки d , u , \bar{u} (протон является составной частицей, в которую входят кварки и глюоны), позитрон e^+ и π^0 -мезон. Жирная волнистая линия представляет

Когда температура Вселенной понижается до 10^{16} – 10^{17} К, в горячей плазме, наполняющей Вселенную, происходит электрослабый фазовый переход: слабые и электромагнитные взаимодействия, бывшие до этого момента едиными, расщепляются на обычные электромагнитные и слабые взаимодействия с участием нейтрино.

4. НУКЛЕОСИНТЕЗ

Примерно при температуре $T \approx 10^{11}$ К происходит конфайнмент (невылетание) кварков. «Кварковый суп» превращается в протоны и нейтроны, которые затем, в процессе первичного нуклеосинтеза, соединяются в первичные легкие ядра.

После эпохи образования протонов и нейтронов нуклеосинтез является наиболее замечательной эпохой. Он начинается через 1 секунду после Большого Взрыва и продолжается вплоть до ~ 100 секунд. В этот период синтезируются легкие ядра: ${}^4\text{He}$ (25%), дейтерий ${}^2\text{H}$ ($3 \cdot 10^{-5}\%$), ${}^3\text{He}$ ($2 \cdot 10^{-5}\%$), ${}^7\text{Li}$ ($10^{-9}\%$), т.е. начинает рождаться привычное нам вещество.

Основные эпохи эволюции ранней Вселенной

Название эпохи и соответствующие ей физические процессы	Время от Большого Взрыва, секунды	Температура, К
Рождение классического пространства-времени	10^{-43}	10^{32}
Стадия инфляции	$\sim 10^{-42} - 10^{-36}$	Меняется в очень широких пределах
Рождение вещества	10^{-36}	$\sim 10^{29}$
Рождение барионного избытка	10^{-35}	$\sim 10^{29}$
Электрослабый фазовый переход	10^{-10}	$\sim 10^{16} - 10^{17}$
Конфайнмент кварков	10^{-4}	$\sim 10^{12} - 10^{13}$
Первичный нуклеосинтез	1 - 200	$\sim 10^9 - 10^{10}$

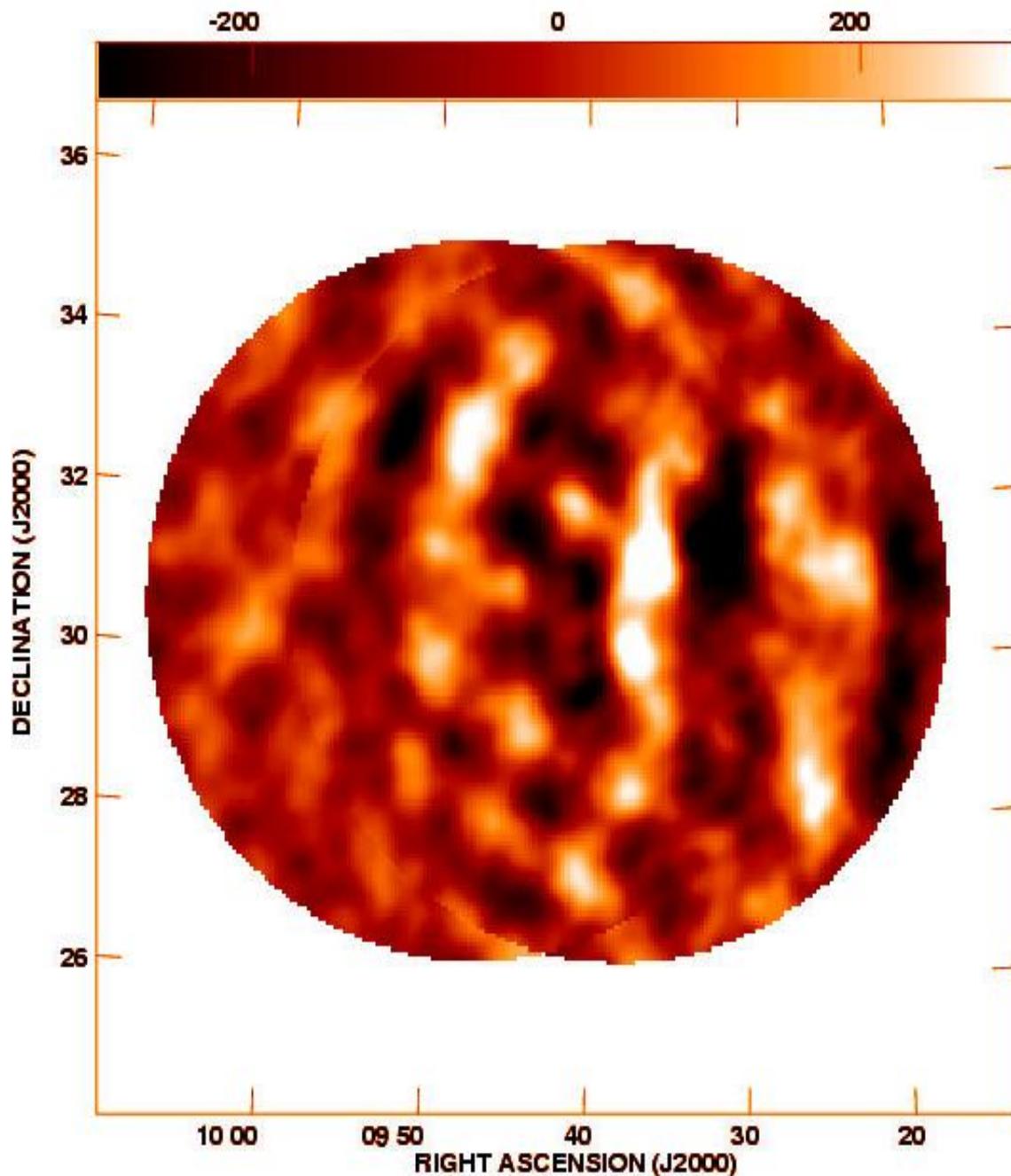
5. ЭПОХА ДОМИНИРОВАНИЯ СКРЫТОЙ МАССЫ

Эпоха доминирования (преобладания) скрытой массы в зависимости от типа носителя скрытой материи наступает примерно при температуре $T \approx 10^5$ К. Начиная с этой эпохи растут малые возмущения плотности вещества, которые к нашему времени увеличиваются настолько, что появляются галактики, звезды и планеты.

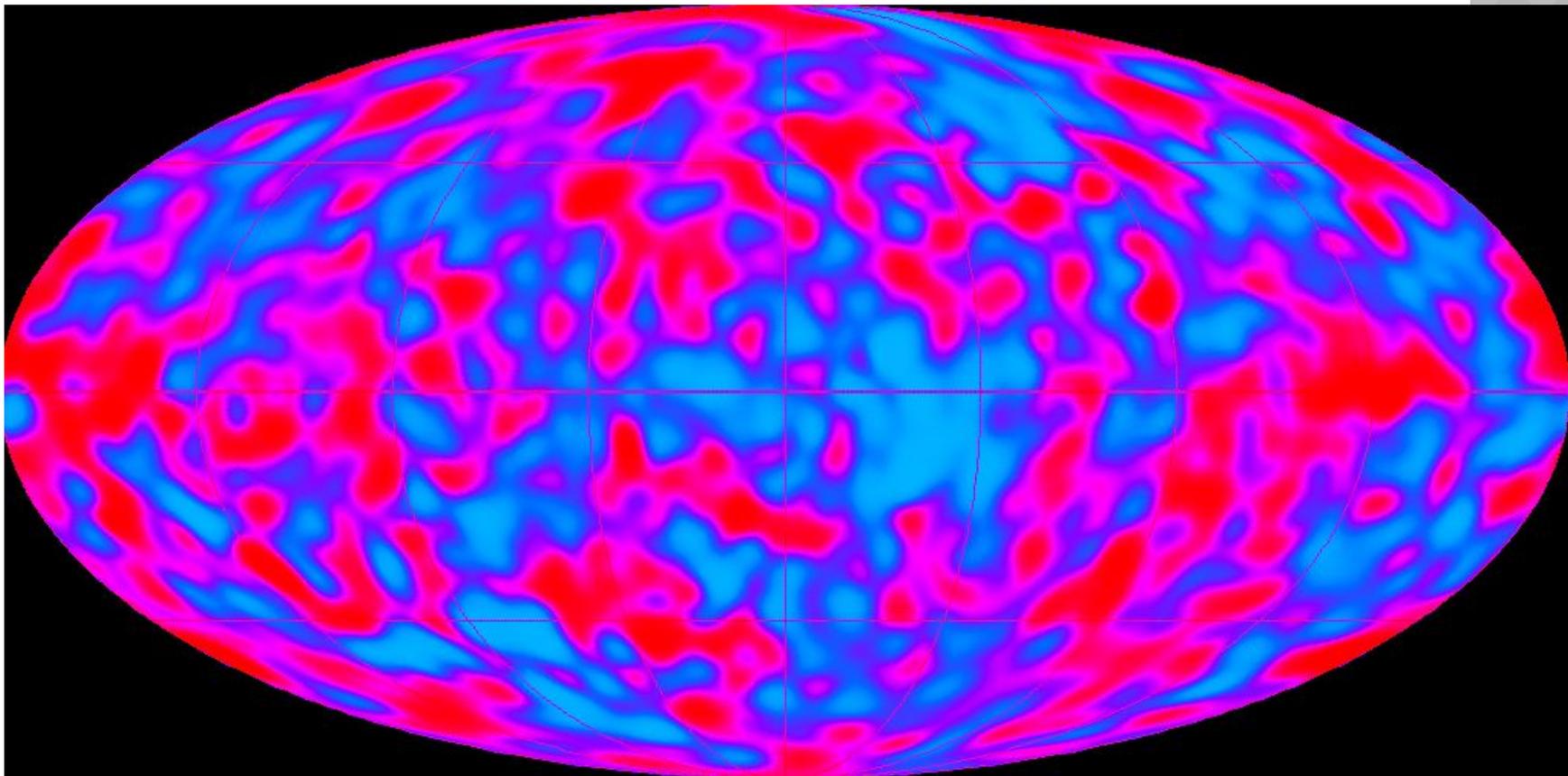
5. ЭПОХА РЕКОМБИНАЦИИ ВОДОРОДА

*В процессе рекомбинации водорода протоны и электроны объединяются, и образуется водород – самый распространенный элемент во Вселенной. Эпоха рекомбинации совпадает с эпохой «просветления» Вселенной: плазма исчезает и вещество становится прозрачным. Температура этой эпохи известна очень хорошо из лабораторной физики:
 $T \approx 4500 - 3000 \text{ K}$.*

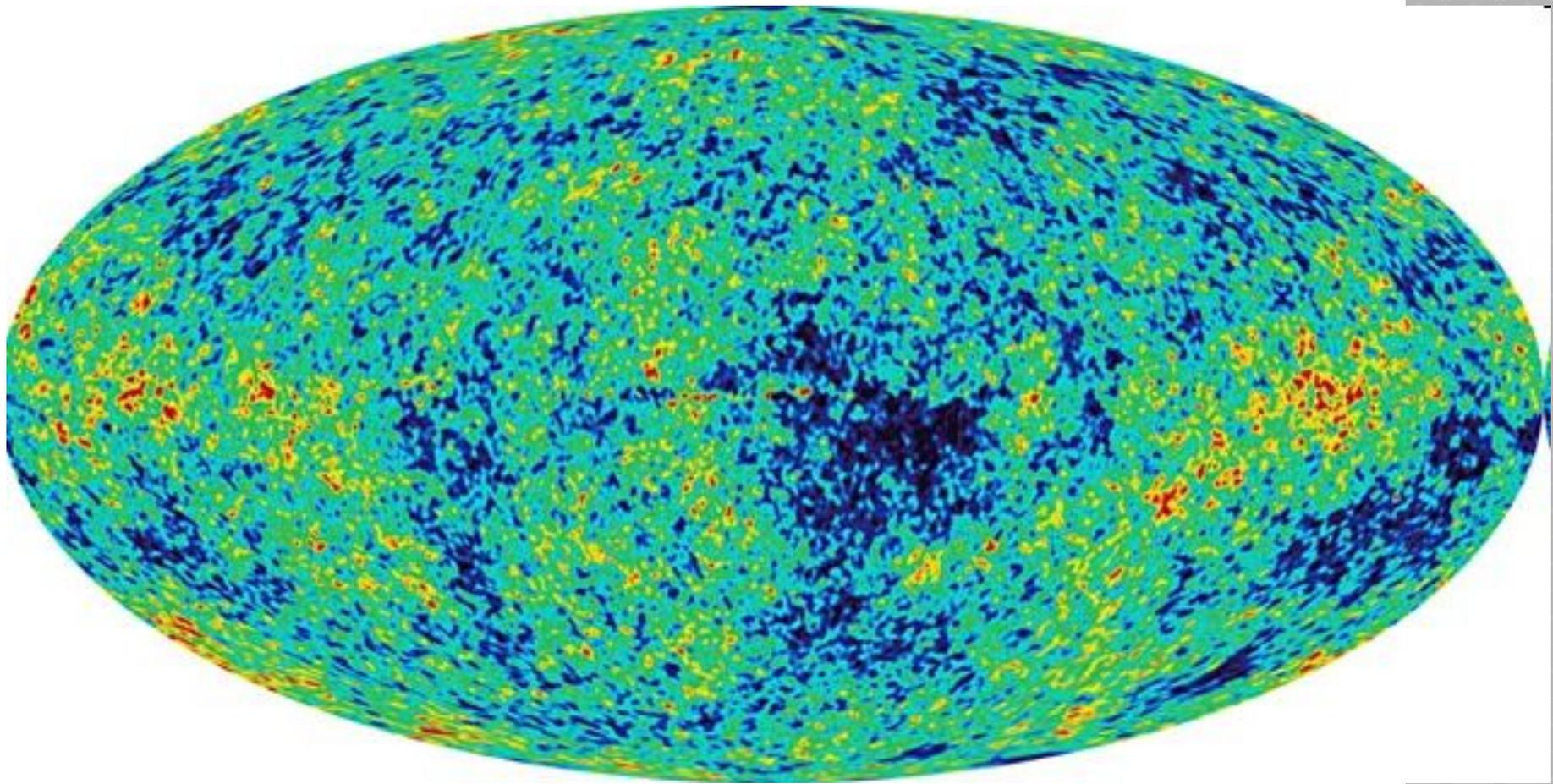
После рекомбинации фотоны доходят до наблюдателя, практически не взаимодействуя с веществом по дороге, составляя реликтовое излучение, энергетический спектр которого в настоящее время соответствует спектру абсолютно черного тела, нагретого до температуры 2,75 К. Разница в температурах ~ 3000 К и ~ 3 К обусловлена тем, что с эпохи просветления Вселенной ее размеры увеличились примерно в 1000 раз.



Неоднородности реликтового фона – самые старые объекты, доступные наблюдениям. Они отражают флуктуации температуры горячей плазмы, которая заполняла Вселенную, прежде чем в результате расширения вещество охладилось, и образовались привычные нам галактики и звезды.

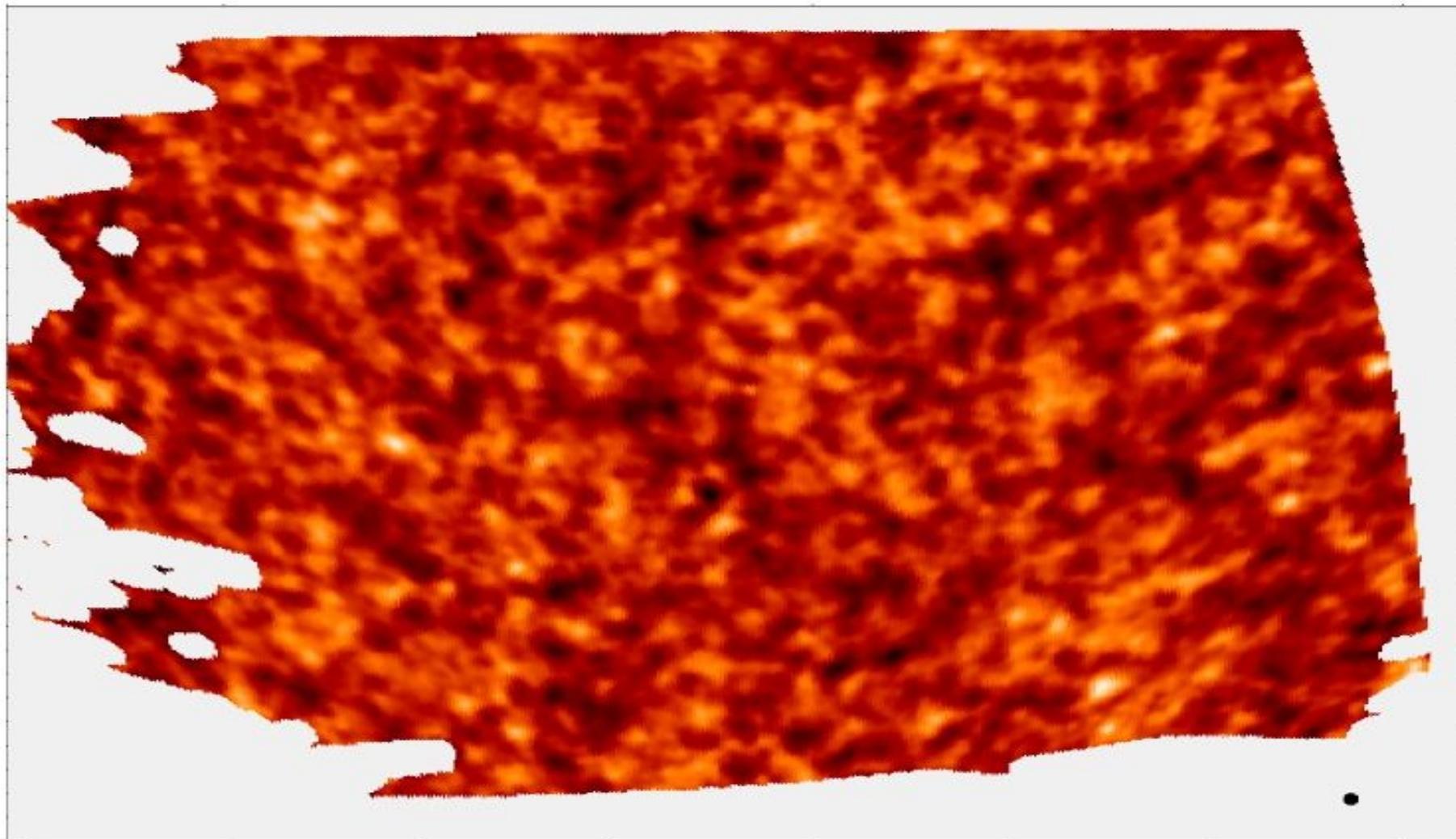


Микроволновой фон за вычетом фона галактических источников и доплер-эффекта от движения Солнечной системы в пространстве.



*Анизотропия микроволнового фона во Вселенной:
380 тысяч лет спустя после Большого Взрыва.*

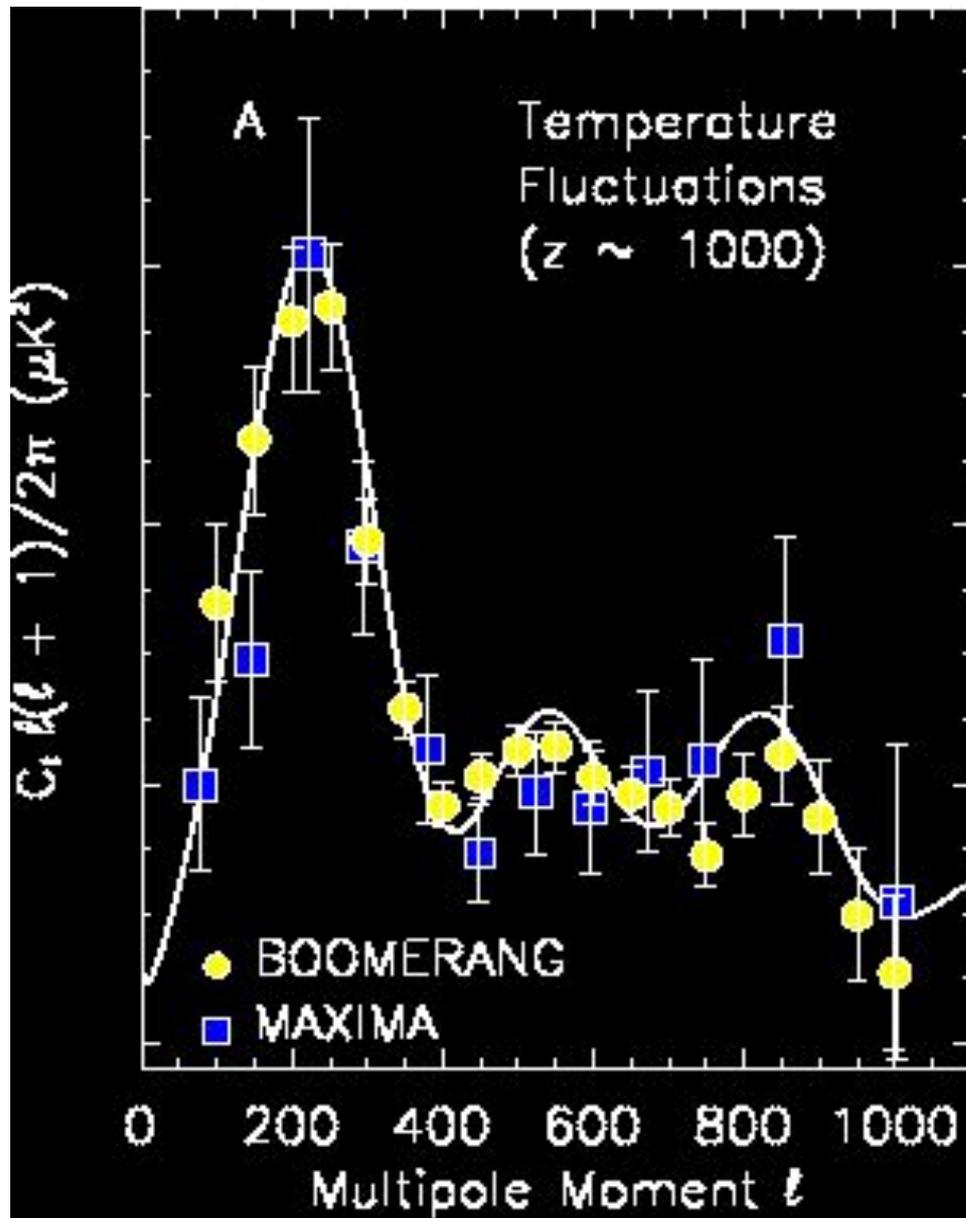
*Это изображение с высоким разрешением получено
орбитальной
космической станцией (WMAP) им. Вилкинсона (Wilkinson).*



Проект
BOOMERANG

Изображение на предыдущем слайде было получено с помощью микроволнового телескопа, запущенного на воздушном шаре над Антарктикой в 1998 году в рамках проекта **BOOMERANG**.

Полученные результаты позволили космологам сделать много интересных выводов, в частности, о том, что кривизна нашей Вселенной с хорошей точностью равна нулю, а также подтвердить модель инфляционной Вселенной.



Угловой спектр флуктуаций реликтового излучения по данным экспериментов MAXIMA и BOOMERANG. Сплошная кривая – теоретическое предсказание флуктуаций температуры реликтового излучения, полученная из анализа пространственного распределения вещества. Обращает на себя внимание факт наличия второго и третьего пиков в спектре, однозначно подтверждающих представления об изначальной фазовой скоррелированности флуктуаций. Это могло

Движение плазмы к моменту рекомбинации не может быть произвольным: движения плазмы в масштабах, соответствующих массам меньше $10^{13} \div 10^{14} M_{\odot}$, затухают. В зависимости от закона спада возмущений средняя масса образующихся облаков газа и скоплений в большей или меньшей степени превосходит эту величину.

***5. ОБРАЗОВАНИЕ
КРУПНОМАСШТАБНОЙ
СТРУКТУРЫ ВСЕЛЕННОЙ***

Образование сверхскоплений галактик условно приходится на красное смещение $z \approx 10$, когда температура реликтовых фотонов падает до 30 К.

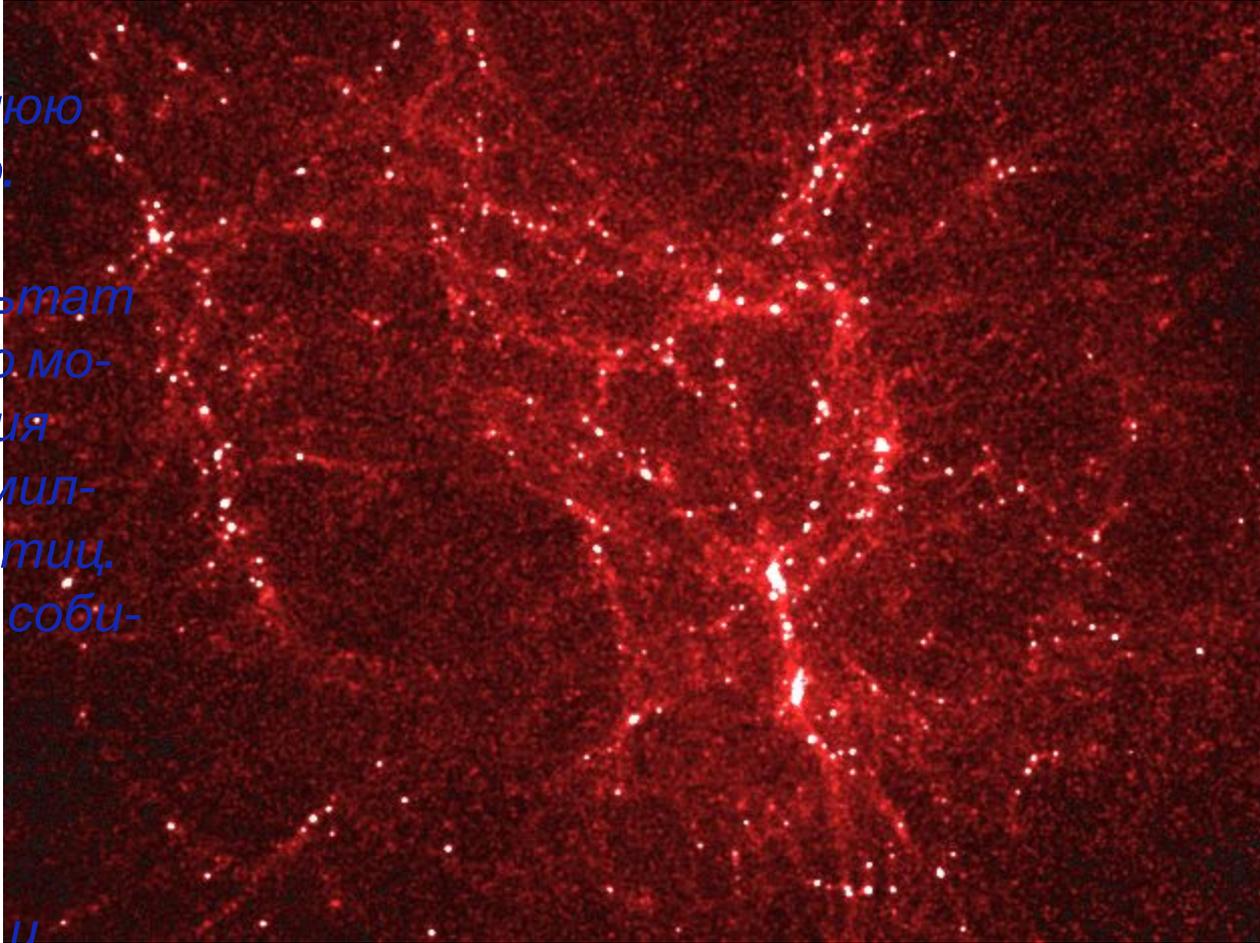
В нейтральной среде с малыми начальными возмущениями плотности возникают плотные уплощенные облака газа. Влияние приливных сил приводит к одномерному сжатию в «блин» вместо симметричного комка. Для основной массы вещества адиабатическое сжатие сменяется ударной волной, бегущей по падающему веществу. В результате возникает очень своеобразное распределение вещества в формирующемся диске – «блине», с острым максимумом плотности в окрестности центра и быстрым убыванием на периферии.

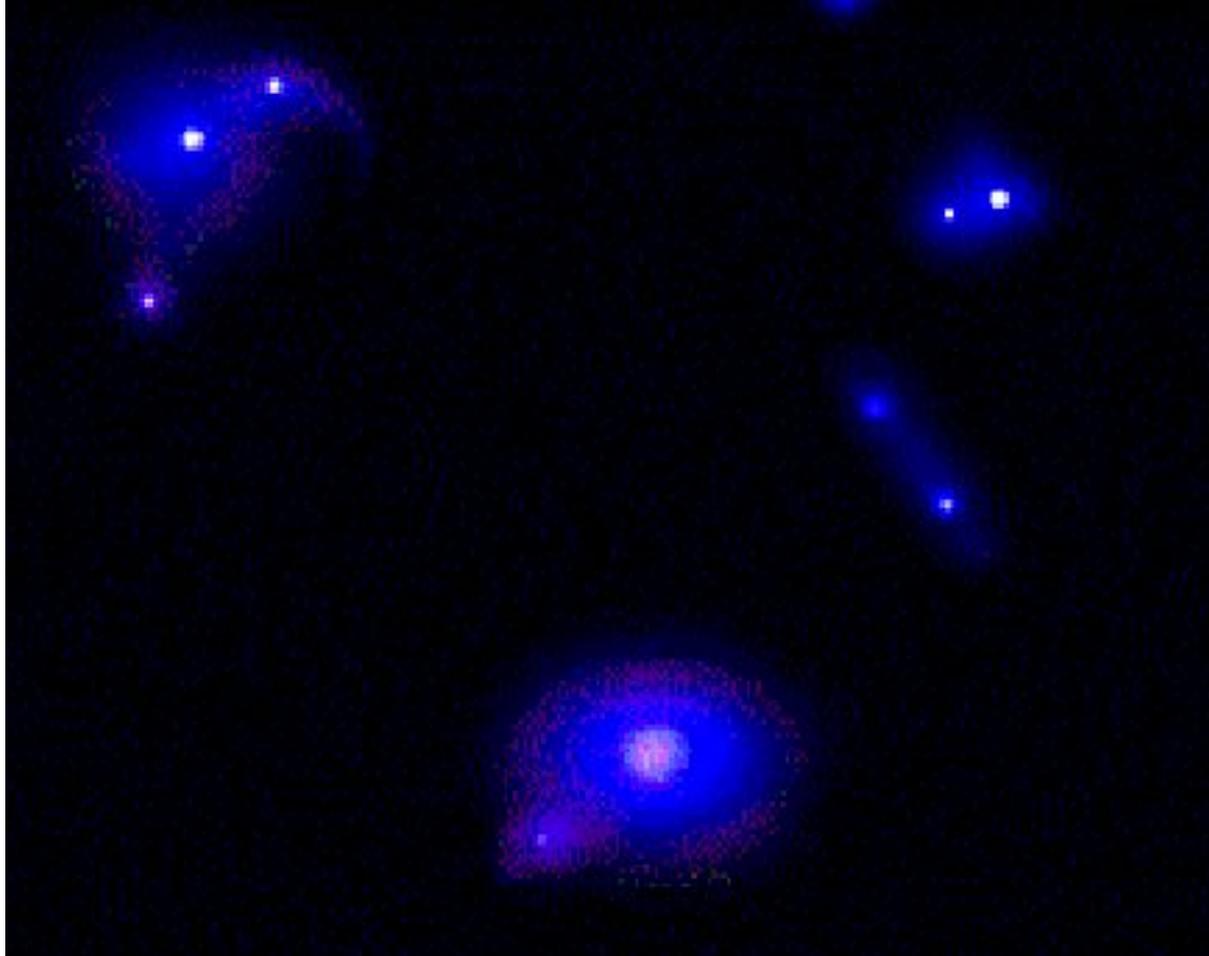
«Блин», в первую очередь вследствие развития гравитационной неустойчивости, распадается на отдельные облака. В свою очередь, те тоже могут распасться на двойные, реже - кратные системы галактик; при этом практически весь момент переходит в орбитальный. Часть газа, сжатого ударной волной, остывает и превращается в галактики, часть остается горячей и входит в состав межгалактической среды.

Дальнейшая эволюция сжатого вещества в галактики и звезды определяется всей совокупностью процессов, протекающих в веществе, и физическими условиями в нем. Важную роль играет возникающее в сжатом веществе вихревое движение.

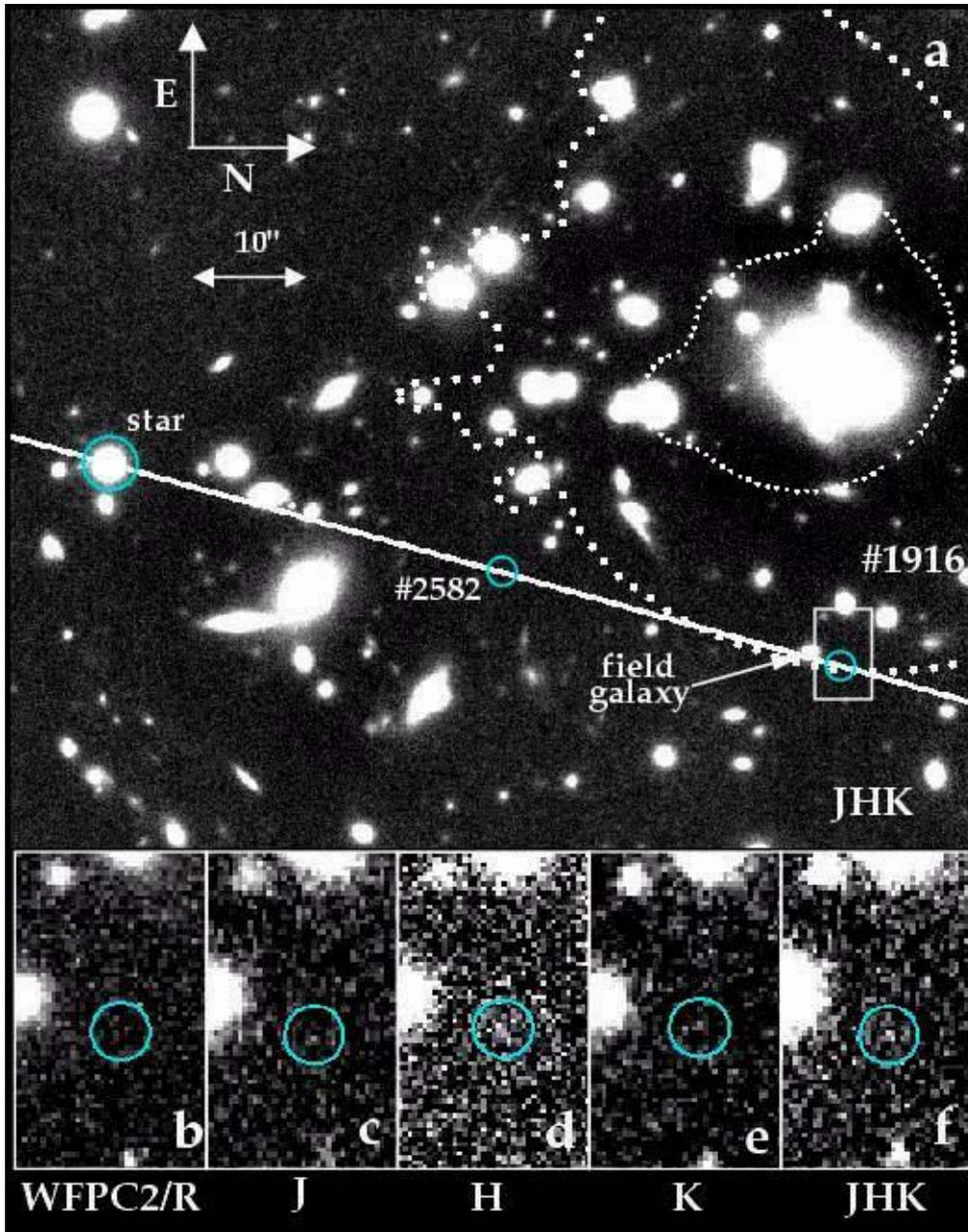
Кадр из фильма
IMAX,
изобража-
ющий раннюю
Вселенную.

Это результат
численного мо-
делирования
эволюции мил-
лионов частиц.
Вещество соби-
рается в
конгло-
мераты,
образуя
галактики и
длинные
волокна.





*Еще один результат численного моделирования.
Так, по мнению С.Паскарела (Аризонский университет),
выглядела
Вселенная в возрасте 2 миллиарда лет. Эти сгустки,
состоящие из
газа, сливались, формируя галактики, которые мы видим*



Изображение галактики #1916

из скопления Abell 1835, полученное на одном из 8.2-метровых телескопов VLT в Чили (ESO).

Спектр объекта #1916 содержит только одну сильную линию с наблюдаемой длиной волны 1.337 микрон, которая, вероятнее всего, соответствует линии

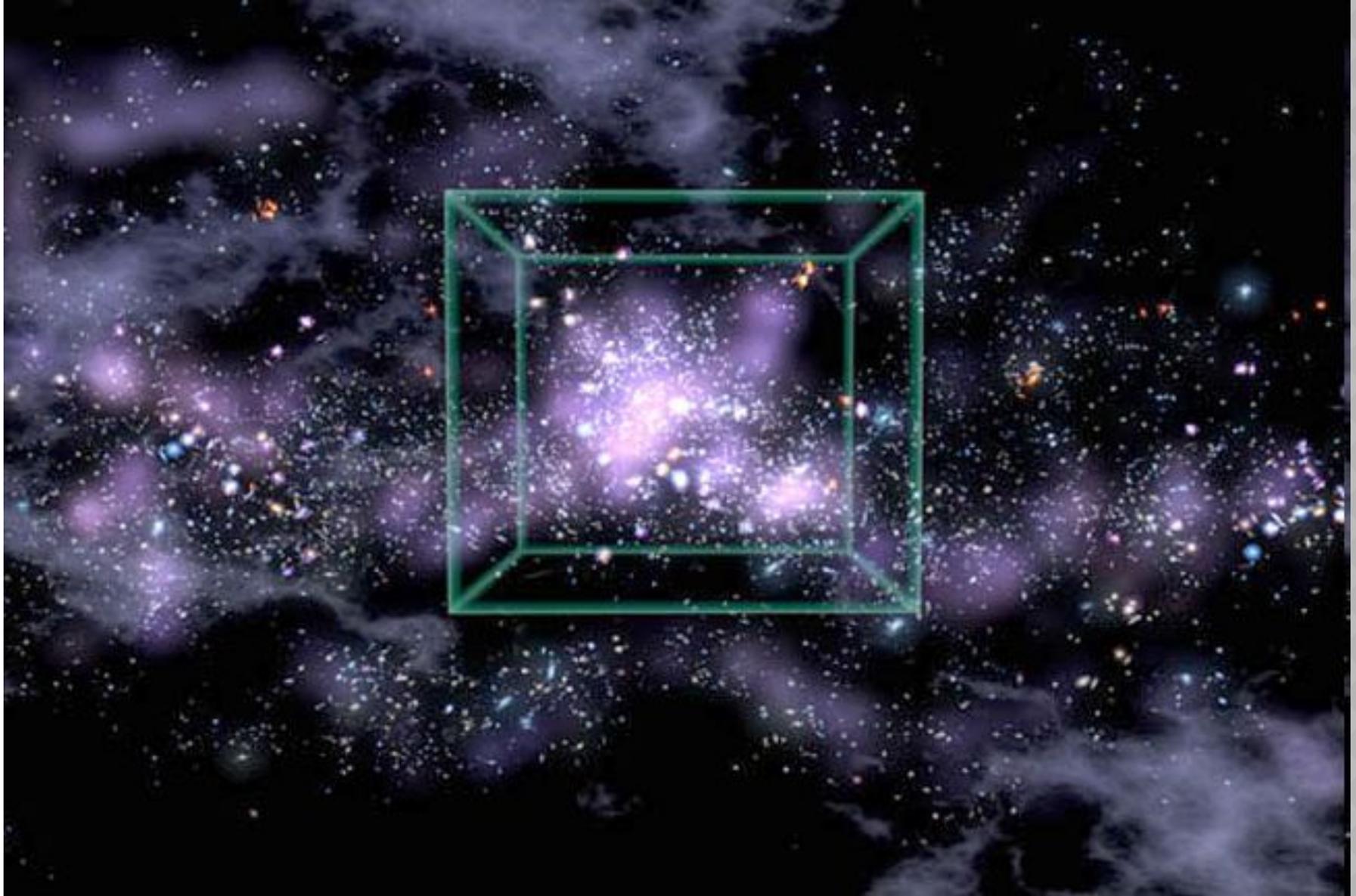
$\text{Ly}\alpha$. Сопоставление наблюдаемой и лабораторной длины волны линии (1215.67Å) дает величину красного смещения $z=10.0$.

Более точное моделирование

Составное
изображение
скопления галактик
RDCS 1252.9-2927 по
наблюдениям Chandra,
HST и VLT.

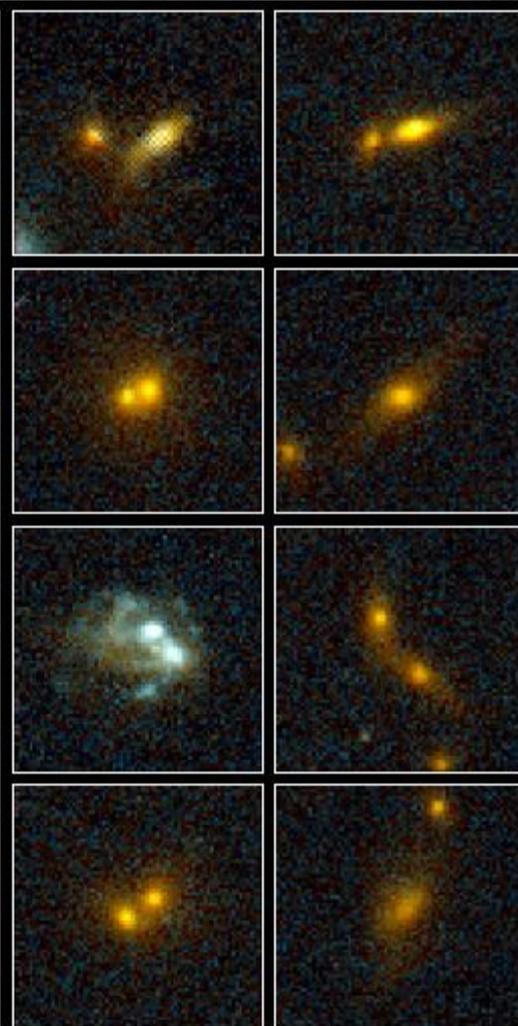
Скопление находится
на
расстоянии около 9
мил-
лиардов световых
лет и,
следовательно, уже
су-
ществовало, когда
воз-
раст Вселенной был
ме-
нее 5 миллиардов лет.
Для массы этого





Смоделированная компьютером часть ранней Вселенной, содержащая цепочку (волокно) галактик. Сторона наложенного куба имеет длину около 300 миллионов световых лет.

*Сталкивающиеся галактики в скоплении MS1054-03,
расположенном на
расстоянии 8 миллиардов световых лет.*

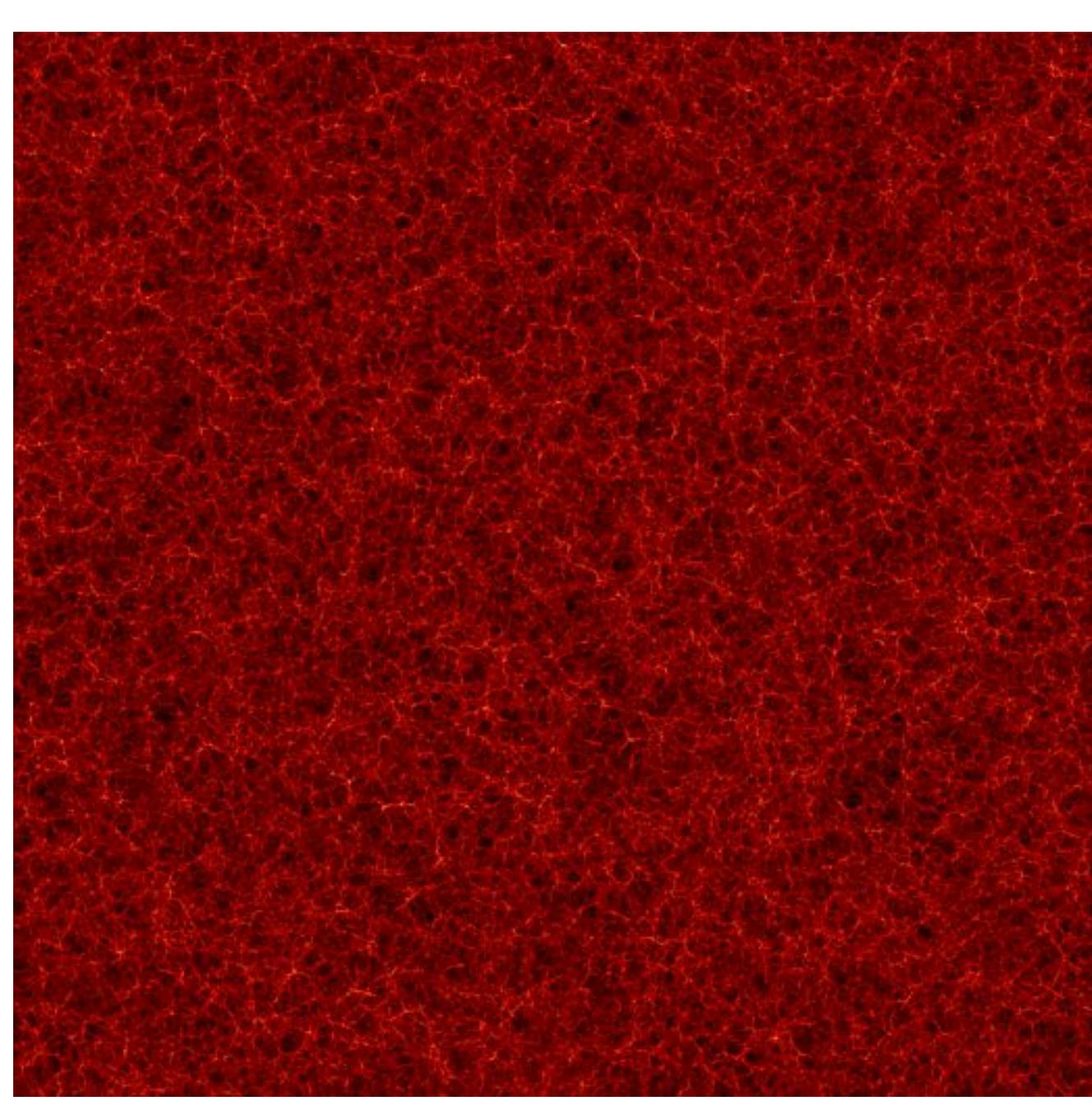


Galaxy Cluster MS1054-03

PRC99-28 • STScI OPO • P. van Dokkum (University of Groningen), ESA and NASA

HST • WFPC2

В промежутке от $z \approx 10$ до $z \approx 0$ лежит эпоха нелинейной стадии эволюции внегалактических объектов, то есть эпоха обычных галактик, квазаров, скоплений и сверхскоплений галактик.



Крупномасштабная структура современной Вселенной по результатам компьютерного моделирования. Карта покрывает область, составляющую миллиард световых лет в поперечнике. Волокна на карте содержат в себе тысячи галактик, тогда как там

Размеры войдов составляют порядка 10-30 Мпк. Большие войды занимают около 50 процентов объема Вселенной.

Справа - построенная методом многих тел (N-body) компьютерная модель войда на $z = 0$, т.е. "сейчас". Использовалась стандартная на сегодняшний день модель с Λ -членом и холодной темной материей.

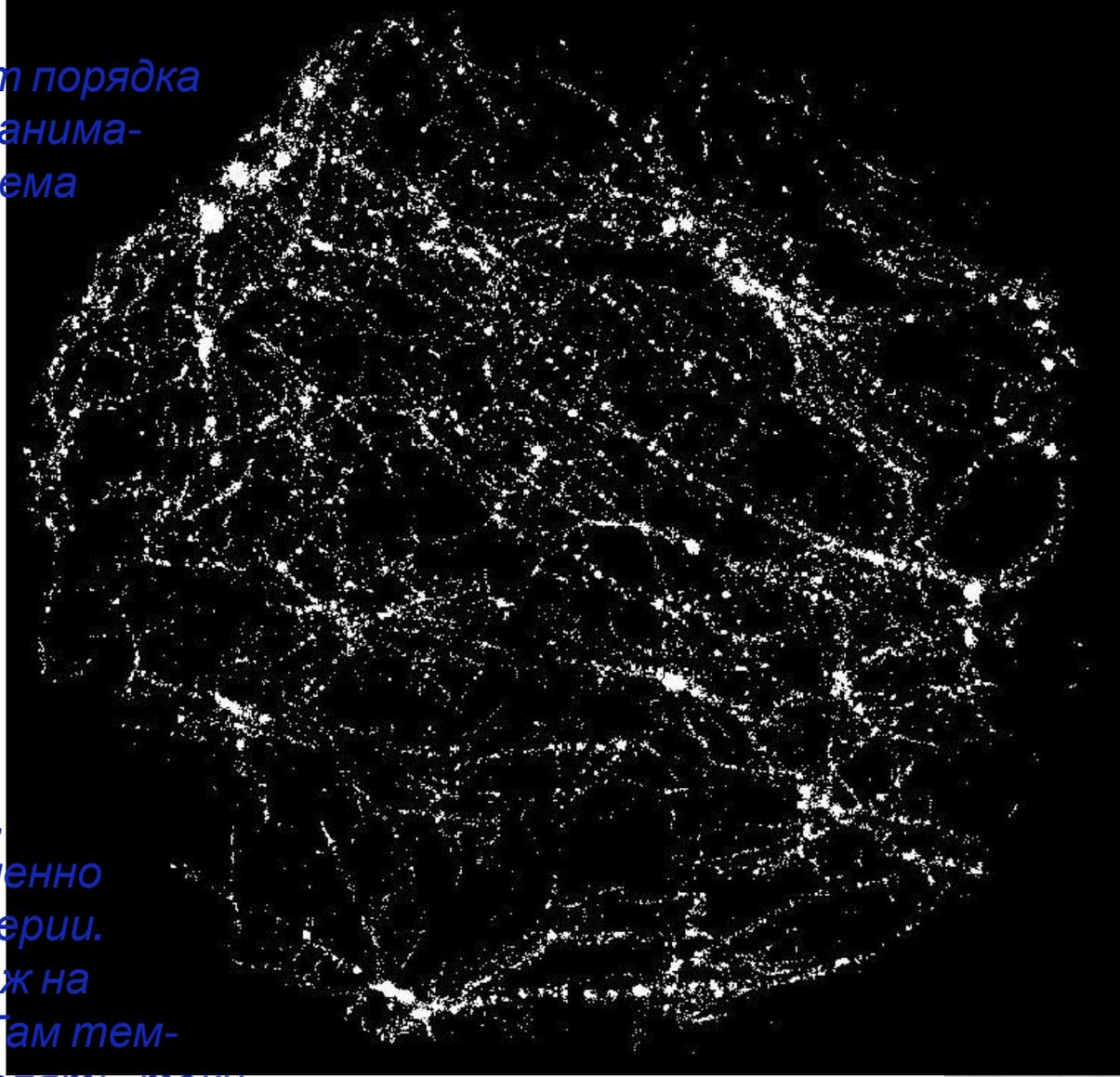
Целью расчета является именно распределение темной материи.

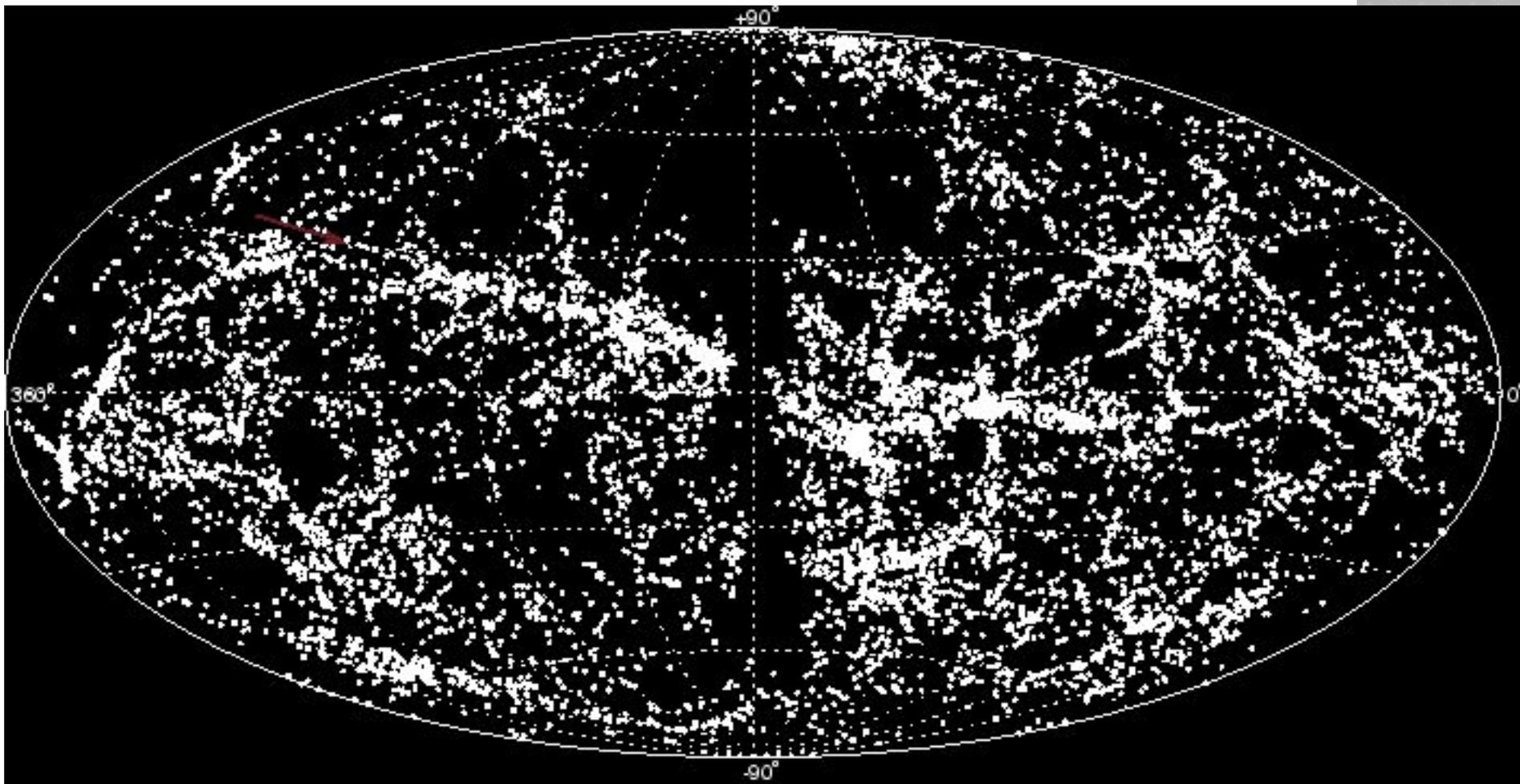
Оказывается, что войд похож на "Вселенную в миниатюре". Там темная материя распределена опять-таки

в виде структуры с волокнами и войдами! Разница только в том, что все мас-

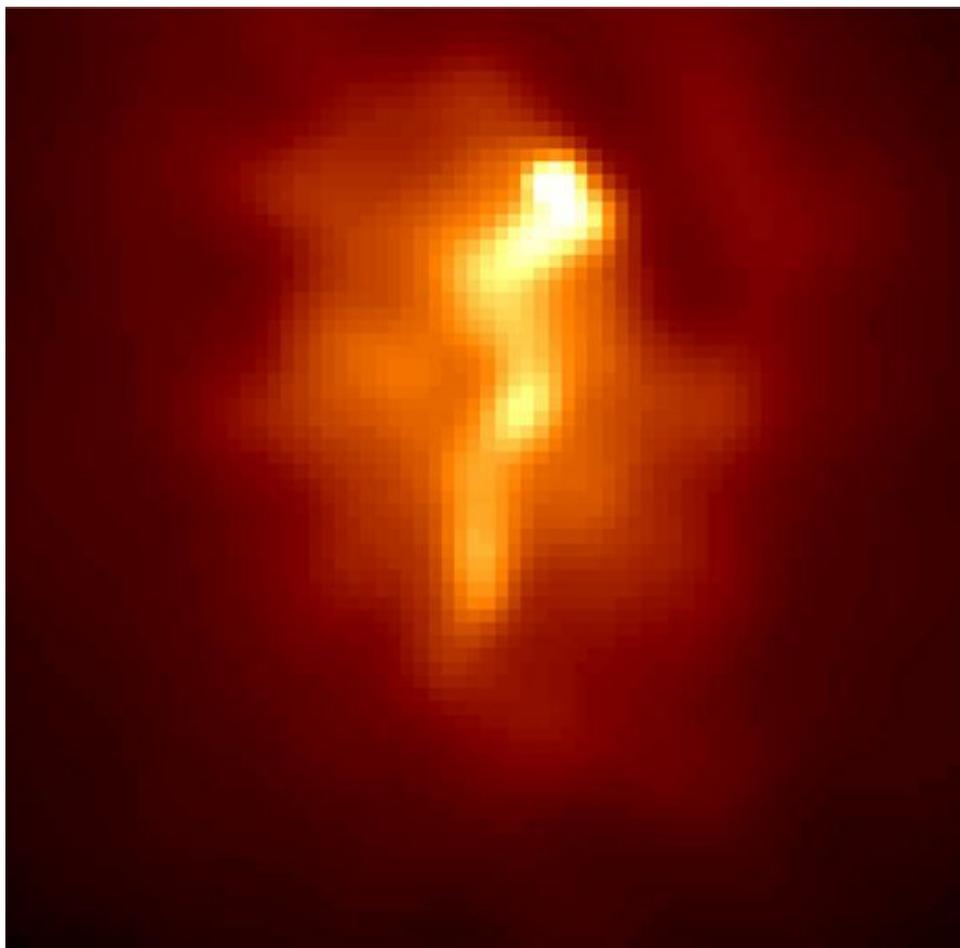
сы (массы гало темной материи) на четыре порядка меньше.

Собственно, поэ-



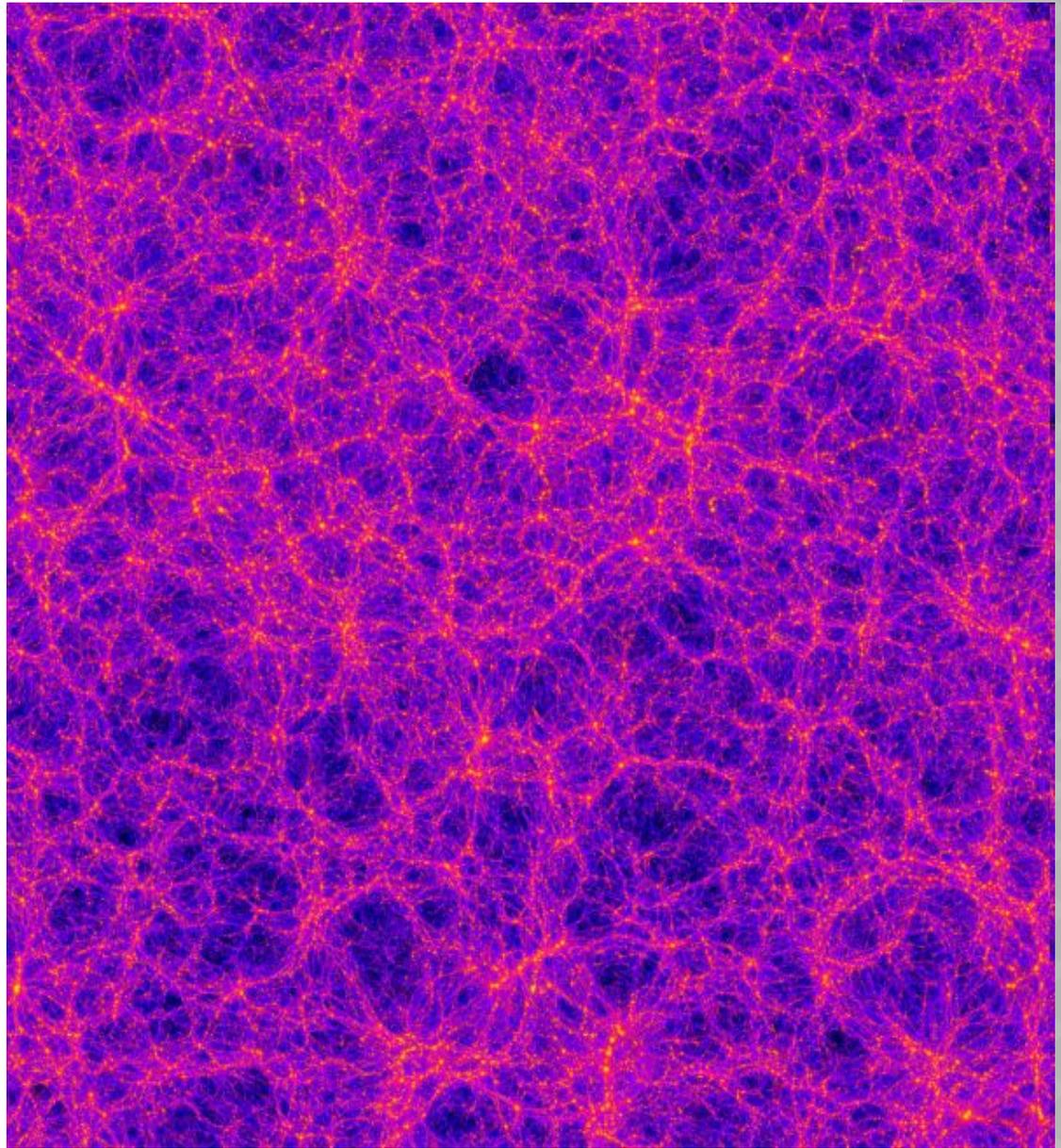


Распределение по небу галактик со скоростями от 2000 до 5000 км/с. Стрелкой отмечена блиноподобная структура в созвездиях Гидры-Центавра-Телескопа-Павлина-Индейца. Наша Галактика и Местное сверхскопление лежат на периферии этой стены, практически в ее плоскости, поэтому она видна как узкая полоска галактик на небе, протянувшись на 180°



Еще в начале семидесятых астрономам стало ясно, что скопления галактик погружены в разреженные облака горячего газа, которые ярко светят в рентгеновском диапазоне. На этом снимке с космической рентгеновской обсерватории Chandra виден хорошо выраженный "охлаждающийся поток" в центральной части скопления Abell 1795.

Это изображение
получе-
но в результате
компью-
терного
моделирования
ожидаемого
распреде-
ления горячего газа в слое
Вселенной, имеющем в
поперечнике 2.7 милли-
ардов световых лет и тол-
щину 0.3 миллиарда
све-
товых лет.
Наблюдения
рентгенов-
ской обсерватории
Chandra подтвердили
су-
ществование

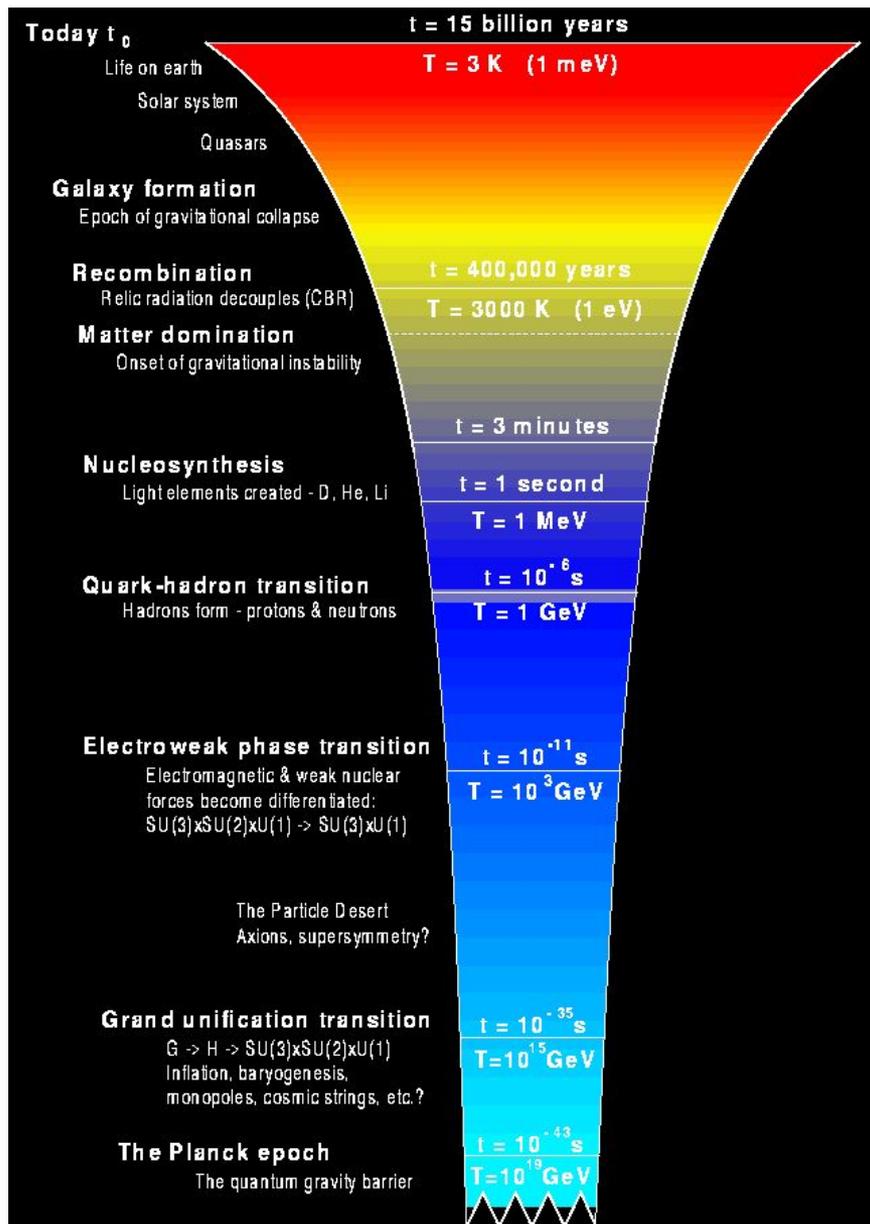




Скопление галактик в созвездии

Волосы Вероники (или скопление Кома) - одно из самых плотных скоплений .

Большинство галактик, входящих в его состав, эллиптические.



*Hubble Ultra
Deep Field.*

*Самое глубокое
проникновение
во Вселенную
в видимом
свете.*

