ВВЕДЕНИЕ В КОСМОЛОГИЮ
лекция 6

Образование структуры
($4 \cdot 10^5$ – $13 \cdot 10^9$ лет)

- Джинсовская неустойчивость
- Рост возмущений в расширяющейся Вселенной
- Роль тёмной материи (ТМ) и её природа
- Нелинейная стадия коллапса; модели гало ТМ
- Иерархическое скучивание, формализм Пресса-Шехтера
- Методы численного моделирования структуры
- Образование галактик, роль барионов

Джинсовская неустойчивость (в плоском пространстве)

Sir James Jeans, 1902

Коллапс газового облака повышенной плотности на фоне однородной среды

Время свободного падения: $t_{ff} = \dfrac{1}{\sqrt{G\rho}}$;

Время выравнивания давления: $t_s = R/c_s$ (c_s – скорость звука).

Коллапс происходит при $t_{ff} < t_s$, или $R > \lambda_J = c_s/\sqrt{G\rho}$, или $M > M_J$.

масса Джинса

Более точное рассмотрение: малые возмущения на однородном фоне

$$\frac{\partial^2 \delta\rho}{\partial t^2} = c_s^2 \nabla^2 \delta\rho + 4\pi G\rho\delta\rho$$

$$\delta\rho \propto \exp(ikx - i\omega t) \quad , \qquad \omega^2 = k^2 c_s^2 - 4\pi G\rho.$$

Неустойчивы (экспоненциально) гармоники с $k < \sqrt{4\pi G\rho}/c_s$.

Джинсовская неустойчивость (в межзвёздной среде)

Адиабатическое расширение газа: $T \propto a^{-3(\gamma-1)}$.

После рекомбинации: газ с температурой $T = T_{rec} \cdot (a/a_{rec})^{-2}$.

$$c_s^2 = \frac{\partial P}{\partial \rho} = \frac{kT}{m_p};$$

$$c_s \propto a^{-1}\ ; \quad R_J \propto a^{1/2}\ ; \quad M_J \propto a^{-3/2}.$$

В цифрах: $M_J \simeq 10^6\, M_\odot\, (z/z_{rec})^{3/2}$ на линейной стадии,

$$M_J \simeq 6\, M_\odot \left(\frac{T}{10\ \mathrm{K}}\right)^{3/2} \left(\frac{n}{10^3\ \mathrm{cm}^{-3}}\right)^{-1/2}$$ в нынешних условиях.

В расширяющейся Вселенной: $$\frac{\dot{a}}{a} = \sqrt{\frac{8\pi G\rho}{3}};$$

а максимальная скорость роста возмущений $\gamma = \sqrt{4\pi G\rho}$.

Необходимо рассмотрение роста флуктуаций в расширяющейся Вселенной

Рост флуктуаций в расширяющейся Вселенной

Нерелятивистская жидкость

Возмущение плотности $\delta \equiv \dfrac{\rho(\mathbf{r})}{\rho_0} - 1$ (overdensity).

Линеаризованное уравнение для возмущений:

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} + \left(\frac{c_s^2\, \mathbf{v}_{\|}^2}{a^2} - 4\pi G\, \rho \right) \delta = 0$$

Для крупномасштабных возмущений можно пренебречь давлением (волновое число $\mathbf{k} \equiv \mathbf{v}_{\|}/a$ мало по сравнению с R_J^{-1}).
Тогда в материально-доминированную эпоху
$H = \dfrac{2}{3t}\,, \quad 4\pi G\rho = \dfrac{2}{3t^2}\,,$ и решения имеют вид

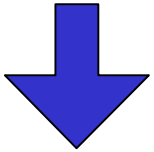
$\delta \propto t^{-1}$ (убывающая) и $\delta \propto t^{2/3} \propto a$ (растущая мода).

В эпоху доминирования Λ-члена $H = \text{const}\,, \quad \rho \to 0\,,$
и $\delta = \alpha + \beta \exp(-2Ht) \to \text{const}$ (рост структуры прекращается).

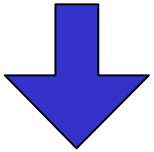
Рост флуктуаций в расширяющейся Вселенной

Возмущения барионной компоненты

На момент рекомбинации $\frac{\delta\rho_b}{\rho_b} \simeq 3\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-4}$;
на линейной стадии возмущения могут вырасти в
$a_0/a_{rec} = 1 + z_{rec} \simeq 10^3$ раз,
что явно недостаточно для образования галактик.



Необходимо, чтобы возмущения плотности и грав. потенциала обеспечивались другим (небарионным) веществом, не связанным с излучением к моменту рекомбинации



Аргумент в пользу существования небарионной тёмной материи

Рост флуктуаций в расширяющейся Вселенной

Релятивистская жидкость
(тепловое излучение до рекомбинации)

$$\ddot{\delta} + 2H\dot{\delta} + \left(\frac{c^2\, \mathbf{v}_{\|}^2}{3a^2} - \frac{32\pi}{3} G\,\rho \right) \delta = 0$$

В радиационно-доминированную эпоху $H = 1/2t$, $\frac{32\pi}{3} G\,\rho = 1/t^2$,
и возмущения с длиной волны $1/k \equiv a/v_{\|} \lesssim ct$ не растут
(«входят под горизонт» и превращаются в звуковые волны).

Возмущения с $1/k \gtrsim ct$ имеют вид $\quad \delta \propto t^{-1} \quad$ и $\quad \delta \propto t.$

Флуктуации в излучении с длиной волны меньше горизонта
не растут из-за давления излучения, а флуктуации плотности
барионов до рекомбинации жёстко связаны с излучением.

Кроме того, в интервале времени $z_{matter} \sim 3000 < z < z_{rec} \sim 1000$
флуктуации плотности барионов уменьшаются из-за вязкости
(затухание Силка) при 1/k< ~10 Мпк.
Т.о. рост галактик (1/k ~ 100 Кпк) тоже обусловлен тёмной материей.

Тёмная материя: наблюдательные свидетельства

- Образование крупномасштабной структуры Вселенной
- Избыток массы во внешних частях галактик (кривые вращения галактик)
- Избыток массы в скоплениях галактик (по дисперсии скоростей галактик и по массе гравитационных линз)
- Реликтовый фон: $\Omega_m \sim 0.27$, но $\Omega_{bar} \sim 0.04$

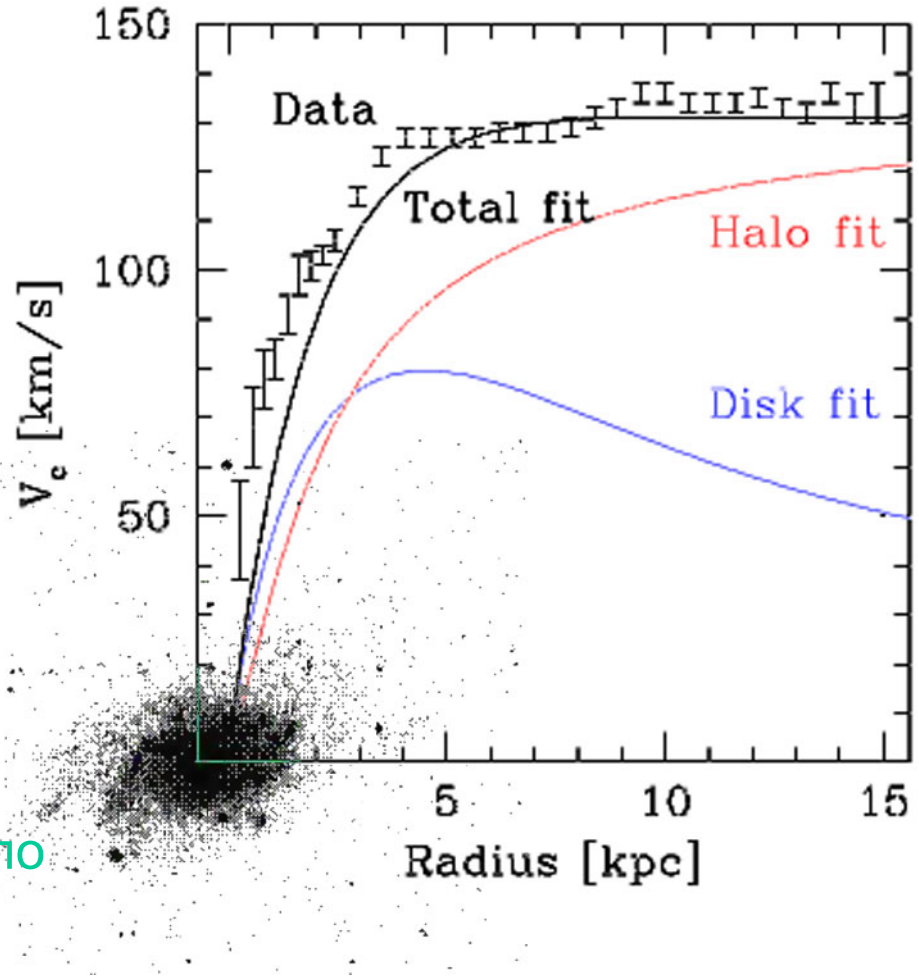
Тёмная материя: кривые вращения галактик

Масса в пределах радиуса r $\Longleftrightarrow$
скорость орбитального вращения:

$$\frac{v^2}{r} = \frac{GM_{in}(r)}{r^2}$$

Кеплеровская область: $v \propto r^{-1/2}$.

Измерения:
плоские кривые вращения
$v \approx \text{const}$.



Также: стабилизация возмущений
в диске массивным сферическим гало

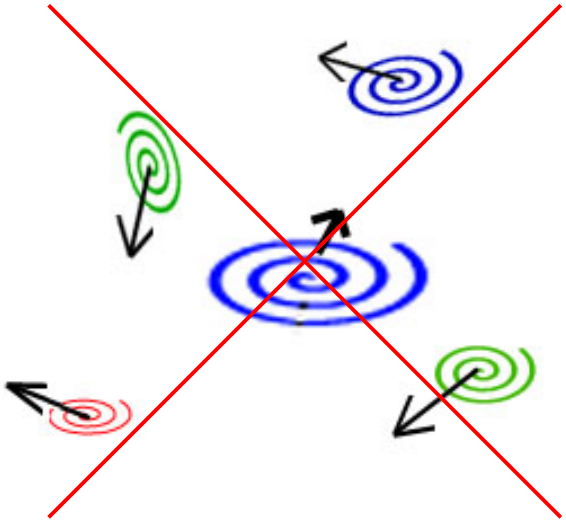
V.Rubin, 1975

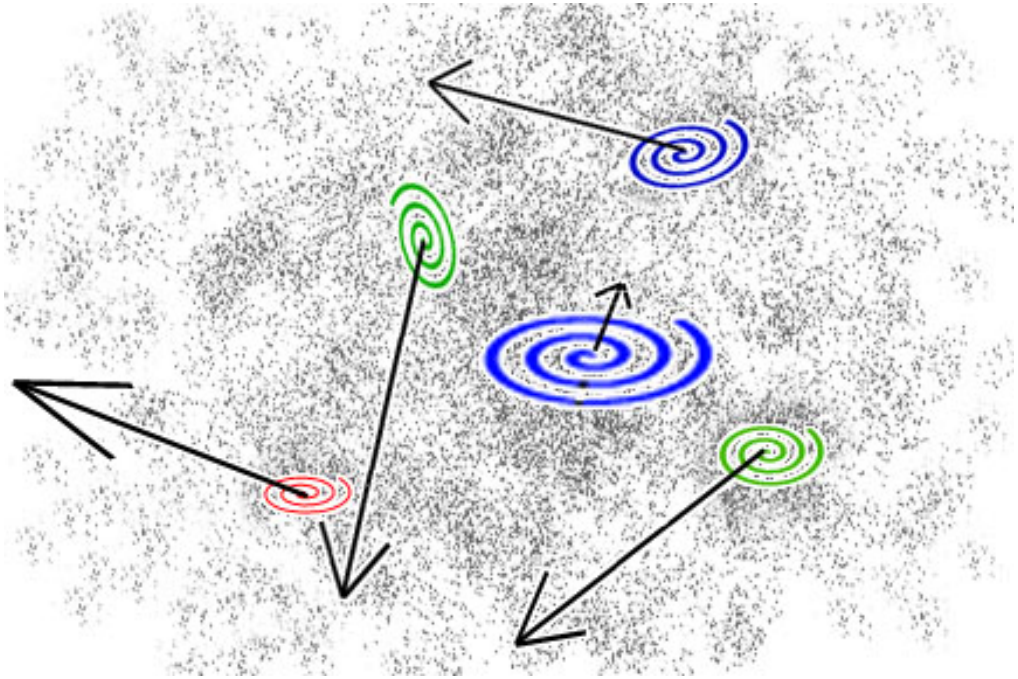
Тёмная материя: дисперсия скоростей в скоплениях

Теорема вириала: $2E_{kin} + E_{pot} = 0.$

$$E_{kin} = \frac{M\langle v^2\rangle}{2}\ ; \qquad E_{pot} = \frac{G\,M^2}{\langle r\rangle} \quad \Longrightarrow \quad M = \frac{\langle v^2\rangle\,\langle r\rangle}{G}\ .$$

Проблема: средние скорости гораздо больше, чем ожидается из наблюдаемой массы

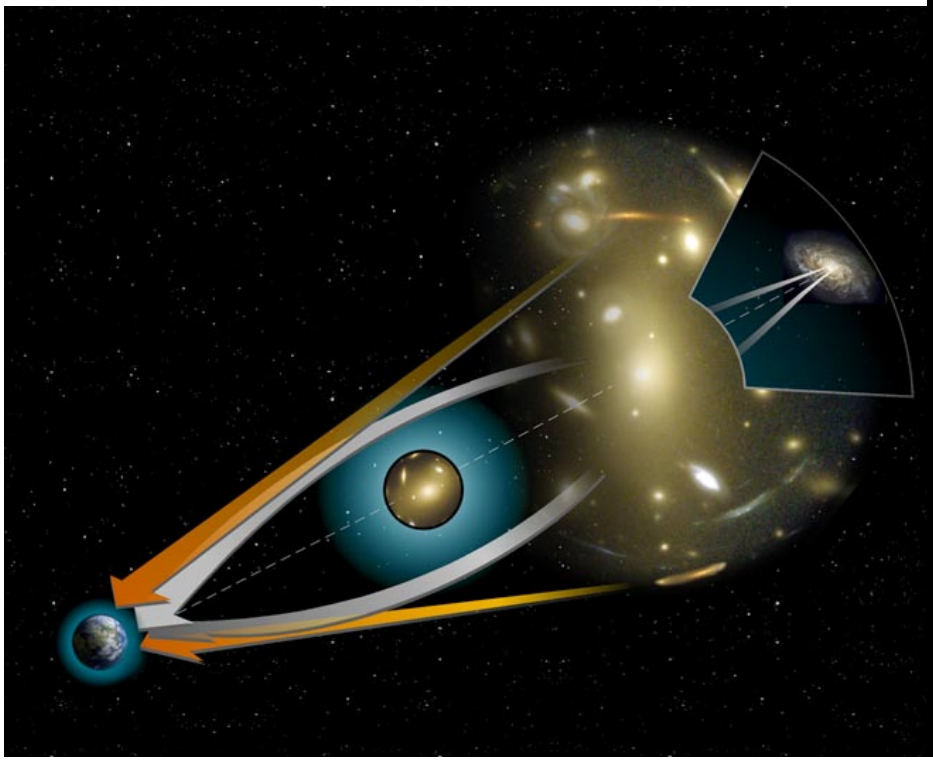


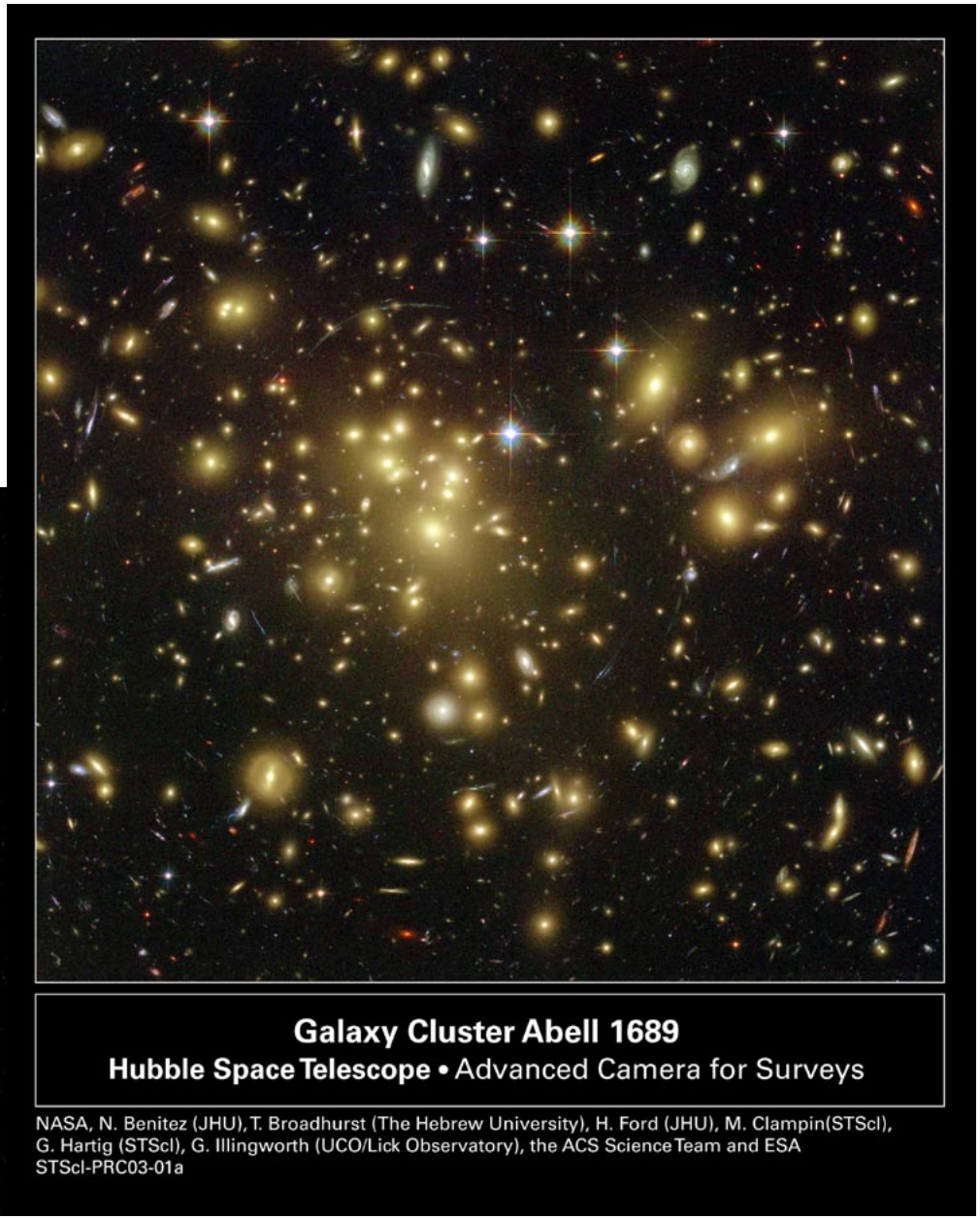


F.Zwicky, 1933

Тёмная материя: гравитационное линзирование

Наблюдения далёких галактик сквозь линзирующие их скопления галактик позволяют оценить массу скопления-линзы

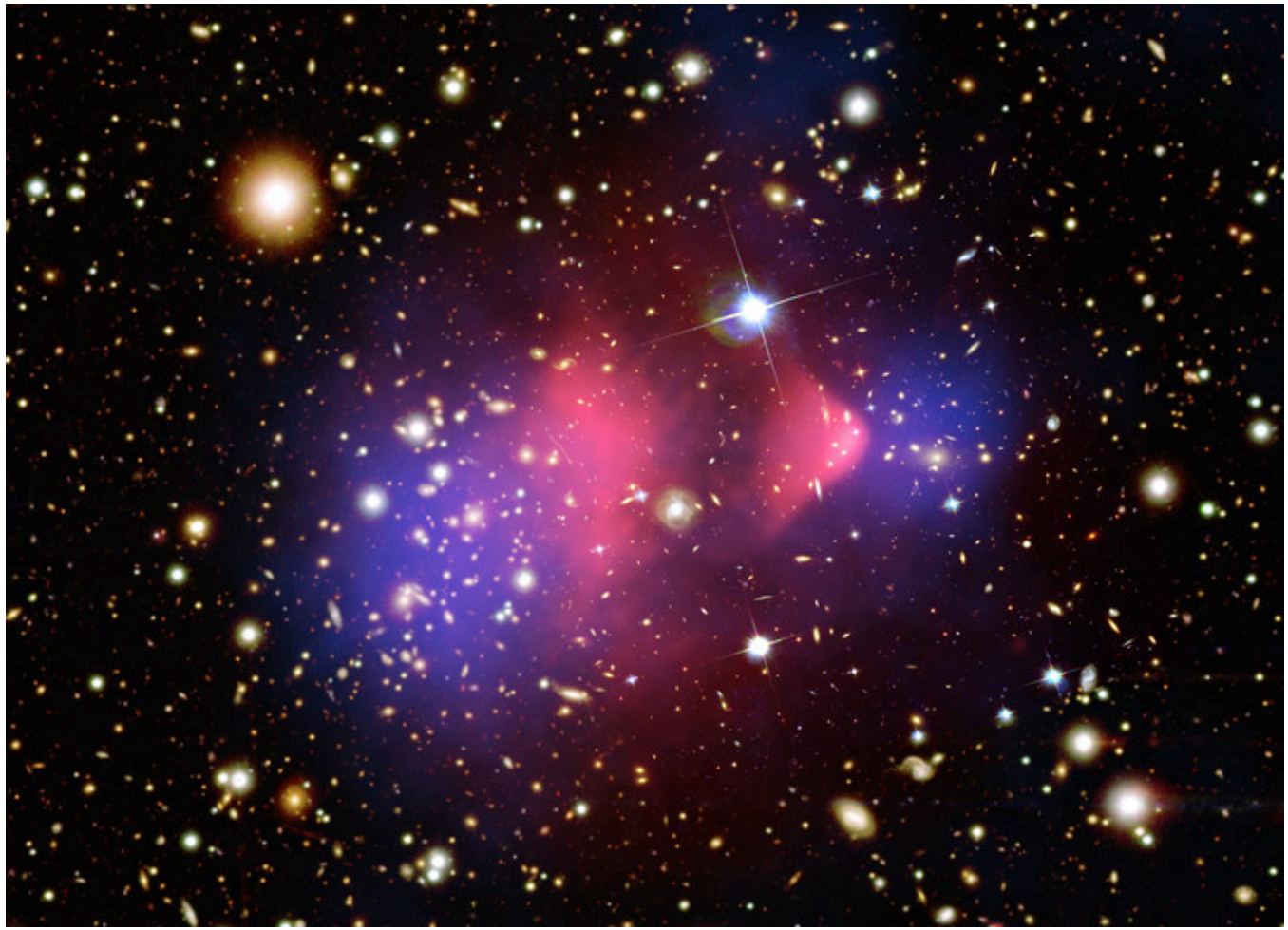




Galaxy Cluster Abell 1689
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin(STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA
STScI-PRC03-01a

Bullet Cluster: «прямое свидетельство» в пользу тёмной материи



Красным – наблюдения рентгеновского излучения горячего межгалактического газа; синим – рассчитанное распределение тёмной материи, сопутствующей галактикам.

Природа тёмной материи

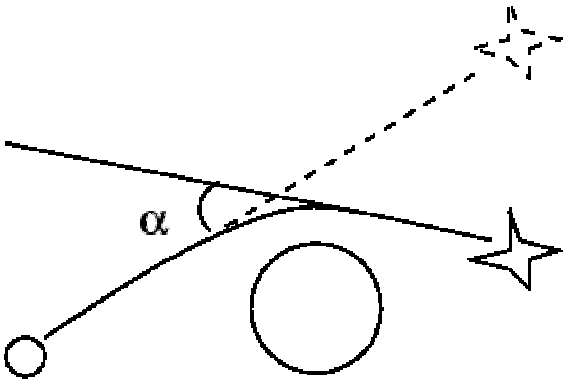
- Изменение Ньютоновского закона тяготения?
  MOND – MOdified Newton Dynamics (Milgrom 1981);
  TeVeS – Tensor/Vector/Scalar gravity (Bekenstein 2004):
  изменение закона гравитации в очень слабых полях.
- Межгалактический газ?
- Массивные компактные объекты в гало галактик?
- Новые, ещё не открытые элементарные частицы?

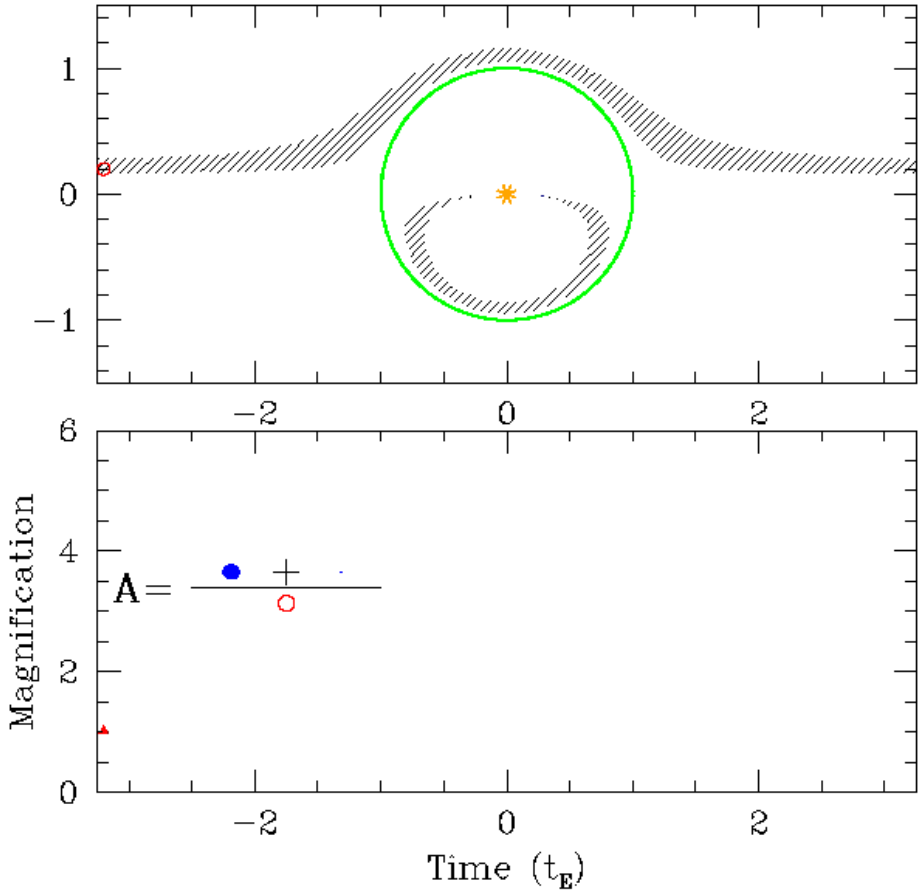
Массивные компактные объекты

MACHO – Massive Compact Halo Objects

- Карликовые звёзды
- Планеты типа Юпитера
- Нейтронные звёзды,
  первичные чёрные дыры и т.д.

Гравитационное микролинзирование:





Наблюдаемое количество компактных объектов слишком мало.

Новые элементарные частицы

- Не участвуют в электромагнитном взаимодействии
- Стабильны
- «Холодные» (нерелятивистские)

Наиболее вероятные кандидаты:

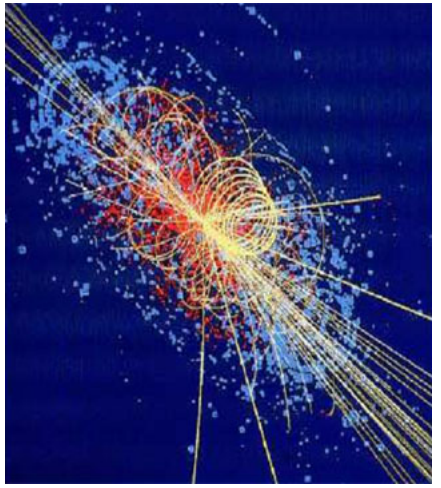
нейтралино – наиболее лёгкие стабильные частицы– суперсимметричные партнёры калибровочных и Хиггсовских бозонов

масса $M_\chi \sim 100 - 1000\ \mathrm{GeV}$

WIMP – Weakly Interacting Massive Particles

Способы детектирования тёмной материи

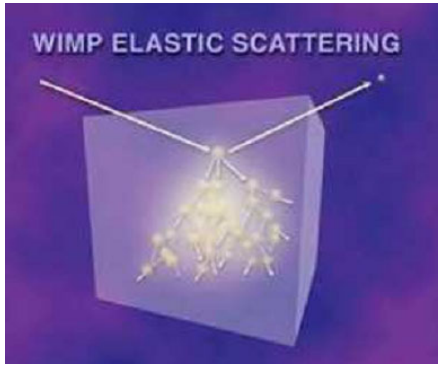
- Прямые поиски



➢ Ускорители (напр. LHC в CERN, Швейцария)

$$p + p \to \chi + \overline{\chi} + \dots \,, \qquad E = 7 + 7 \text{ ТэВ}$$

➢ Подземные детекторы (напр. Gran Sasso, Италия)



— рассеяние частиц в веществе детектора

Сложности:

малое сечение рассеяния

фон: естественная радиоактивность, космические лучи

Способы детектирования тёмной материи

- Косвенное обнаружение – продукты аннигиляции

$$\chi + \chi \to \cdots \to \gamma,\ \nu,\ \text{etc.}$$

Интенсивность сигнала $\propto \rho^2$

...

Детекторы γ-излучения

Нейтринные телескопы

Космические обсерватории

Наземные атмосферные черенковские телескопы

Баксанская обсерватория

Байкальский нейтринный телескоп

Ice Cube (Антарктида)

…

Тёмная материя vs. тёмная энергия

- Состоит из элементарных частиц
- Уравнение состояния: $P=0$
- Образует гравитационно связанные объекты
- Вероятно, будет экспериментально обнаружена в ближайшее время
- Похожа на барионную материю!

- Скалярное поле? Энергия вакуума?
- Уравнение состояния: $P=-E$
- Разлита однородно по пространству
- Нет сложившегося понимания, что это. Многочисленные теории. Эксперимент пока невозможен
- ?????

Нелинейная стадия коллапса – образование гало ТМ

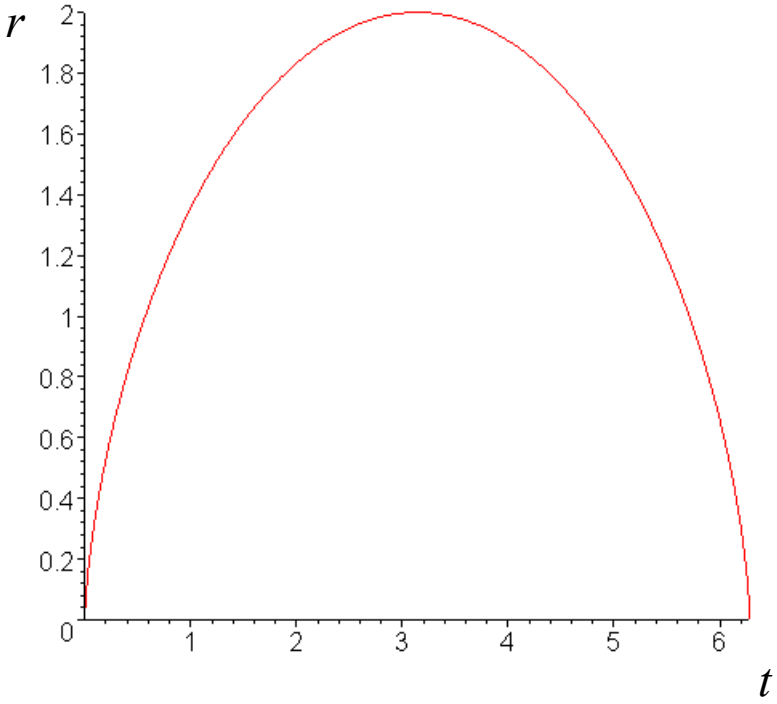
Модель сферического коллапса

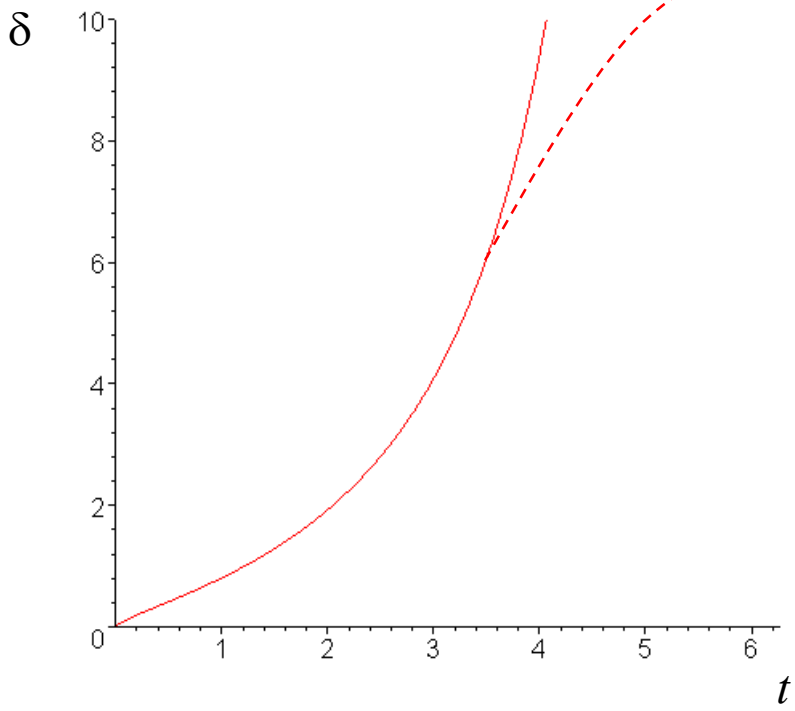
Эволюция радиуса сферической оболочки, содержащей массу M:

$$r = a(1-\cos\eta)\ , \quad t = \sqrt{a^3/GM}\,(\eta - \sin\eta)$$

$\eta = \pi, \quad r_{max} = 2a, \quad t_{max} = 1.1 t_i/\delta_i^{3/2}$ – turnaround radius/time.

overdensity: $\delta(t) = \frac{9}{2}\frac{(\eta-\sin\eta)^2}{(1-\cos\eta)^3} - 1.$





Нелинейная стадия коллапса – образование гало ТМ

Модель сферического коллапса

Вириализация: для однородной сферы при $t = t_{max}$
$W_{\Pi}(r_{max}) = -\frac{3}{5}GM^2/r_{max}\,, \quad W_{\rm K} = 0.$

После вириализации: $W_{\Pi} = -2W_{\rm K}\,;$ half-mass radius $r_h \simeq 0.375 r_{max};$
средний контраст плотности $\rho_h/\rho_{\rm bkg}(t{=}2t_{max}) \simeq 200.$

области с превышением средней плотности в 200 раз относительно общекосмологического среднего считаются принадлежащими гало

Модели гало тёмной материи

Navarro, Frenk, White (NFW): $\rho = \dfrac{\rho_0}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2};$

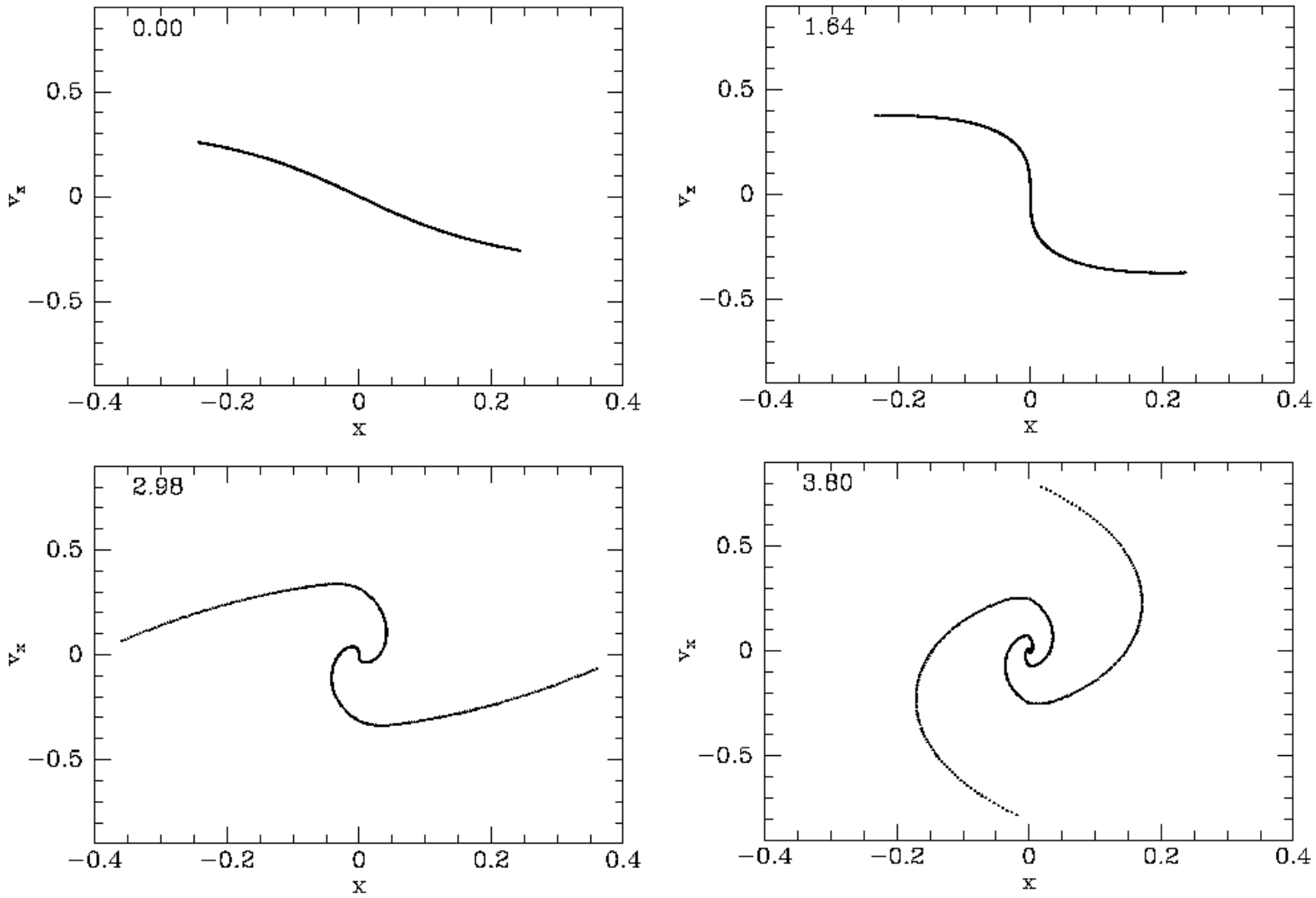
r_s – scale radius; $\dfrac{r_{vir}}{r_s} = c$ – concentration $(\sim 10$, уменьшается с ростом $M)$.

На малых радиусах $\rho \propto r^{-1}$ (или в общем случае $r^{-\gamma}$) – cusp.
При $r \gtrsim r_{vir}$ – приливное обрезание из-за взаимодействия с окружением.

Другие модели гало: Self-similar infall, модель Гуревича-Зыбина, etc.

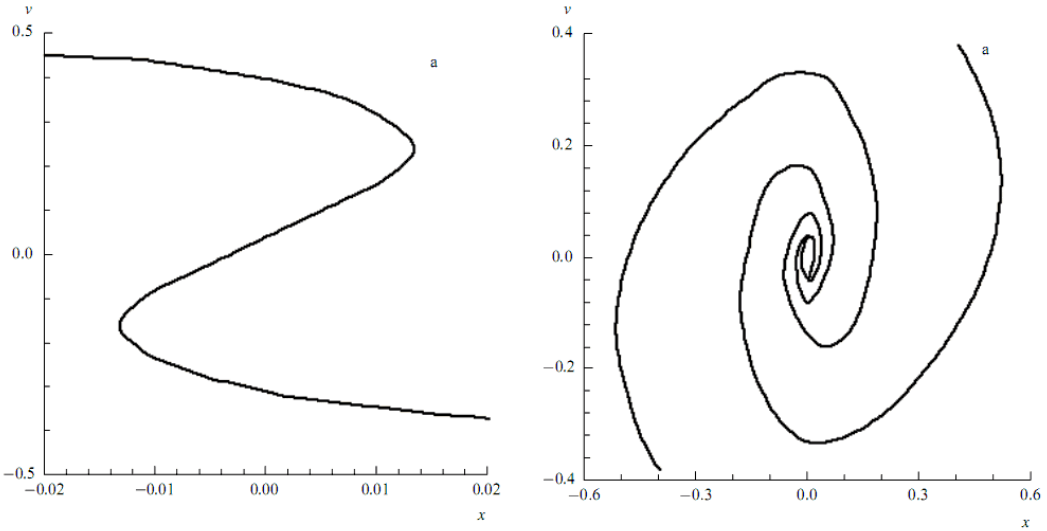
Нелинейная стадия коллапса – образование гало ТМ

Образование многопотоковых течений

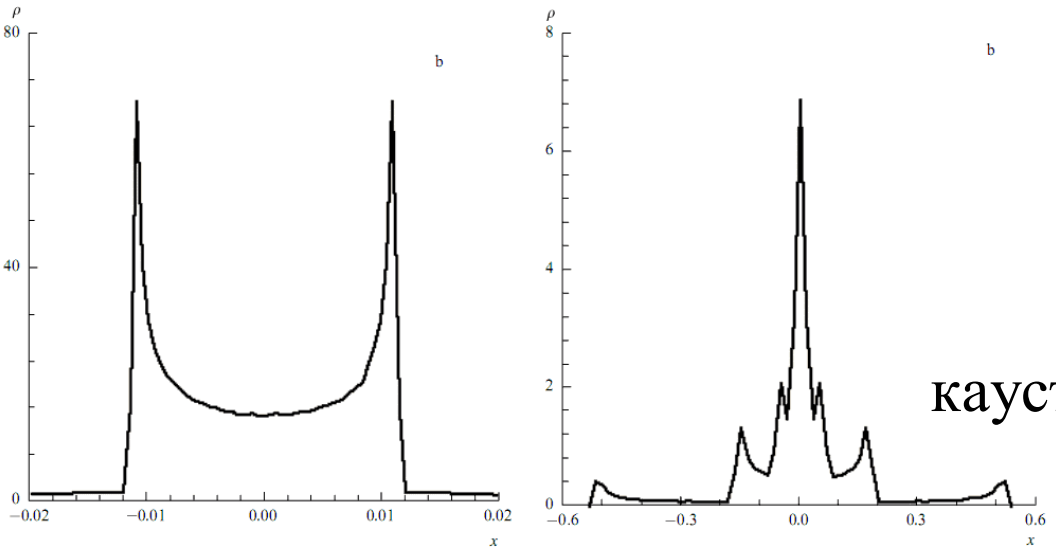


Нелинейная стадия коллапса – образование гало ТМ

Образование многопотоковых течений



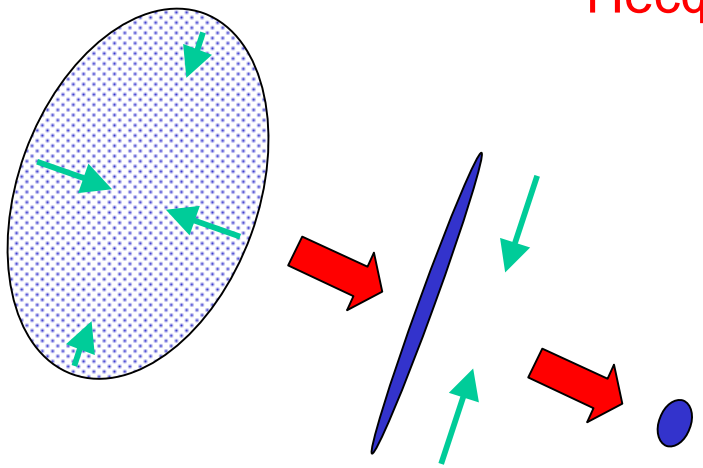
ρ



каустики

Образование крупномасштабной структуры

Несферический коллапс



…происходит быстрее всего вдоль направления наименьшего размера (плоские структуры – «блины Зельдовича»)

В пересечениях плоскостей образуются нити (филаменты), в узлах нитей – квазиточечные объекты (гало)

По-другому: области с меньшей плотностью (пустоты, voids) расширяются быстрее среднего; «сталкиваясь», они образуют более плотные стенки (sheets), в которых материя уже собирается в филаменты и гало.

Космическая паутина (Cosmic web)

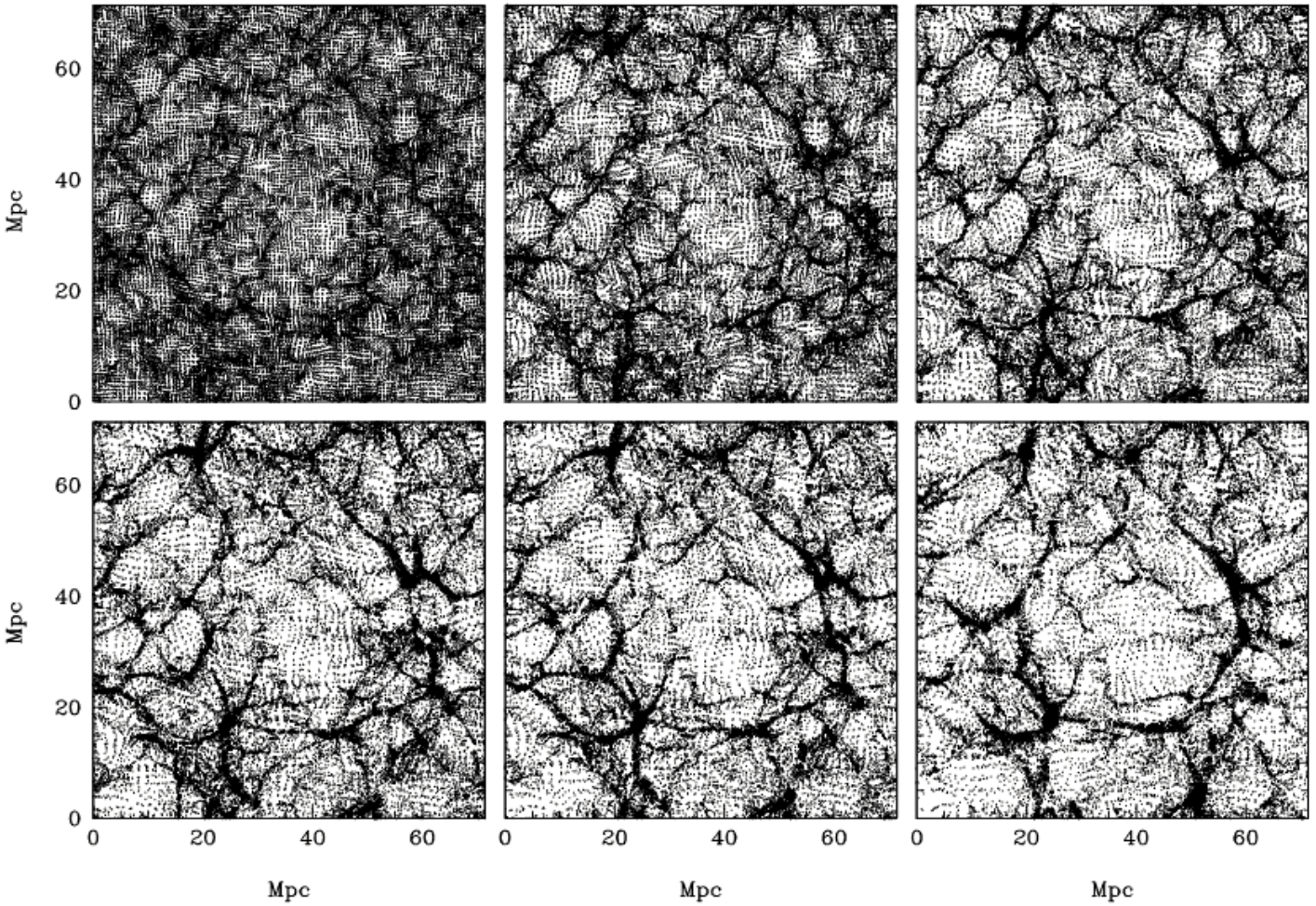
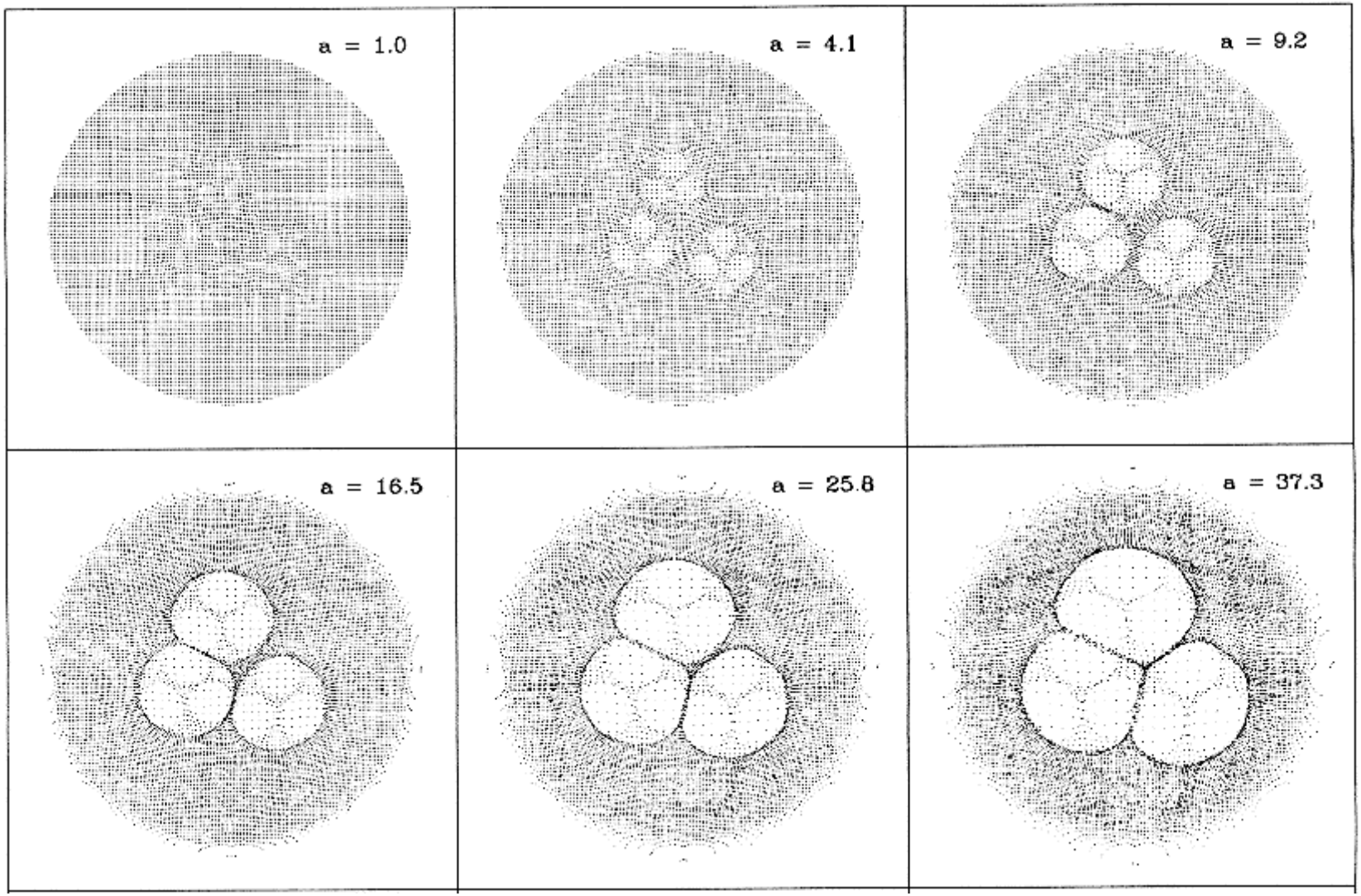


Figure 9.6 Six snapshots of the evolution of a region of a simulated universe: from top left to bottom right $a(t)/a(t_0) = 0.1$, 0.2, 0.3, 0.35, 0.4, and 0.5. In the earlier frames many small voids are visible. By the last frame many of these have been squashed into the wall that surrounds the central giant void. From Sheth & van de Weygaert (2004), by permission of the AAS.

Космическая паутина (Cosmic web)



материя концентрируется по границам пустот (voids)

Иерархическое образование структуры

«снизу вверх»

Первыми образуются объекты с наименьшими массами (минигало с $M \sim 10^{-6}\ M_{\odot}$); сливаясь, они образуют гало всё больших масс; субгало внутри «родительского» гало могут разрушаться приливным образом или же сохранять субструктуру.

При переходе к видимой материи объекты размеров более $10^6\ M_{\odot}$ соответствуют шаровым скоплениям и карликовым галактикам-спутникам; 10^9–$10^{13}\ M_{\odot}$ – обычным галактикам; $10^{15}\ M_{\odot}$ – скоплениям.

На бóльших масштабах нелинейная стадия ещё не наступила (а с учётом доминирования тёмной энергии – и не наступит).

Проблемы стандартной схемы:
а) слишком много объектов малой массы (наблюдается гораздо меньше; возможно или недооценен темп их разрушения, или они не светятся)
б) несогласие каспов с распределением масс в dark-matter dominated галактиках (LSB – low surface brightness)

Иерархическое образование структуры

«снизу вверх»

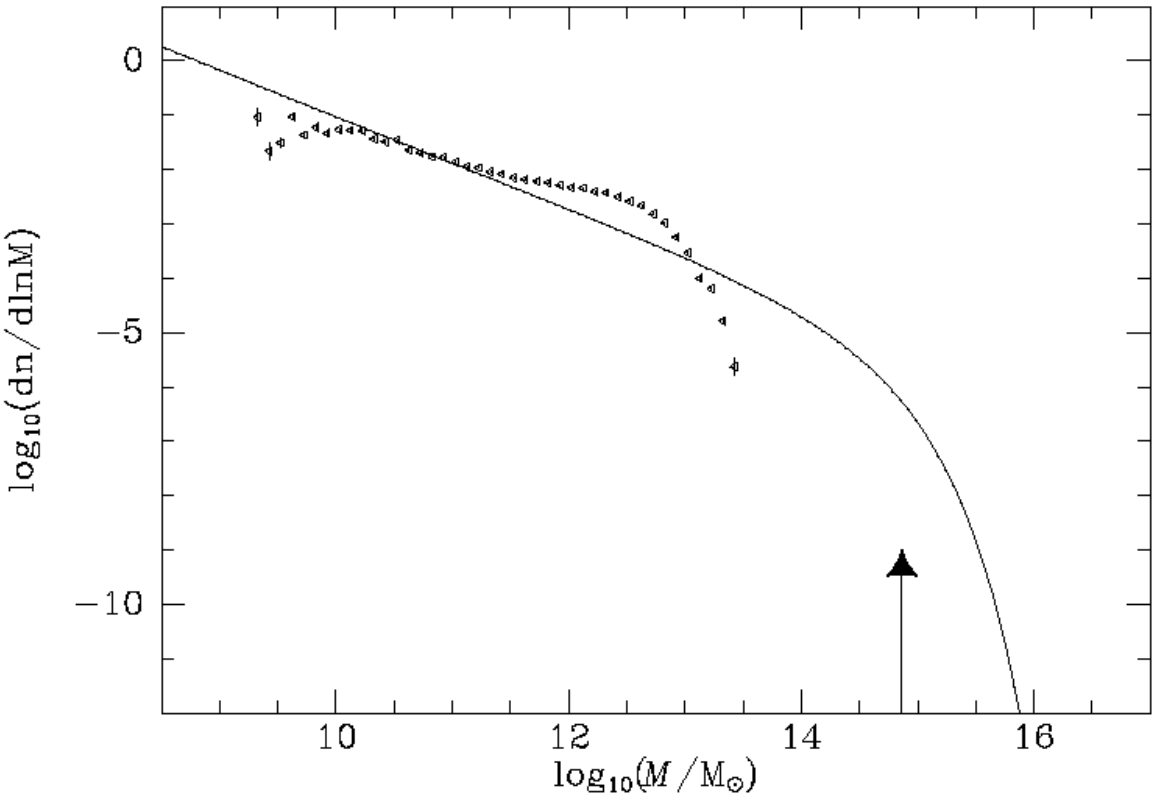


Figure 9.12 The mass function of halos in the standard standard ΛCDM model from equation (9.77) (curve) and the galaxy luminosity function (symbols) scaled to mass-to-light ratio $\Upsilon_R = 220\,\mathcal{M}_\odot/\,L_\odot$ (eq. 1.76). The luminosity function is taken from Blanton et al. (2005). The error bars on most points are too small to be seen. The vertical arrow marks the value of M_c.

Теория Пресса-Шехтера (Press-Schechter formalism)

предсказывает

- Функцию масс гало ТМ (долю гало с массой больше заданной)
- Темп слияния гало
- Эволюцию этих параметров во времени
- Время образования гало данной массы

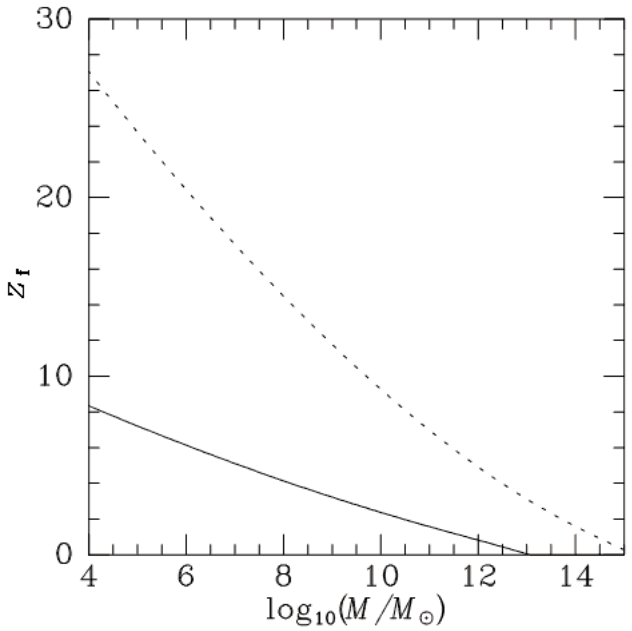


Figure 9.8 The full curve shows the redshift z_f at which a 1σ overdensity of mass M collapsed, while the dashed curve shows the collapse redshifts of 3σ overdensities as a function of mass. These predictions are based on the spherical-collapse model and the fluctuation spectrum plotted in Figure 9.3.

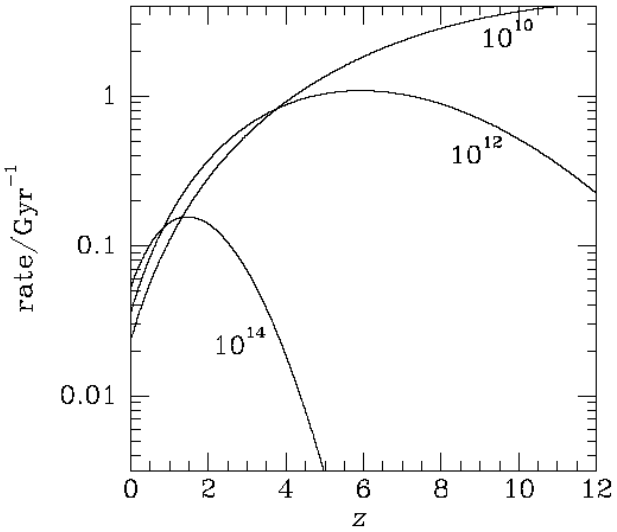
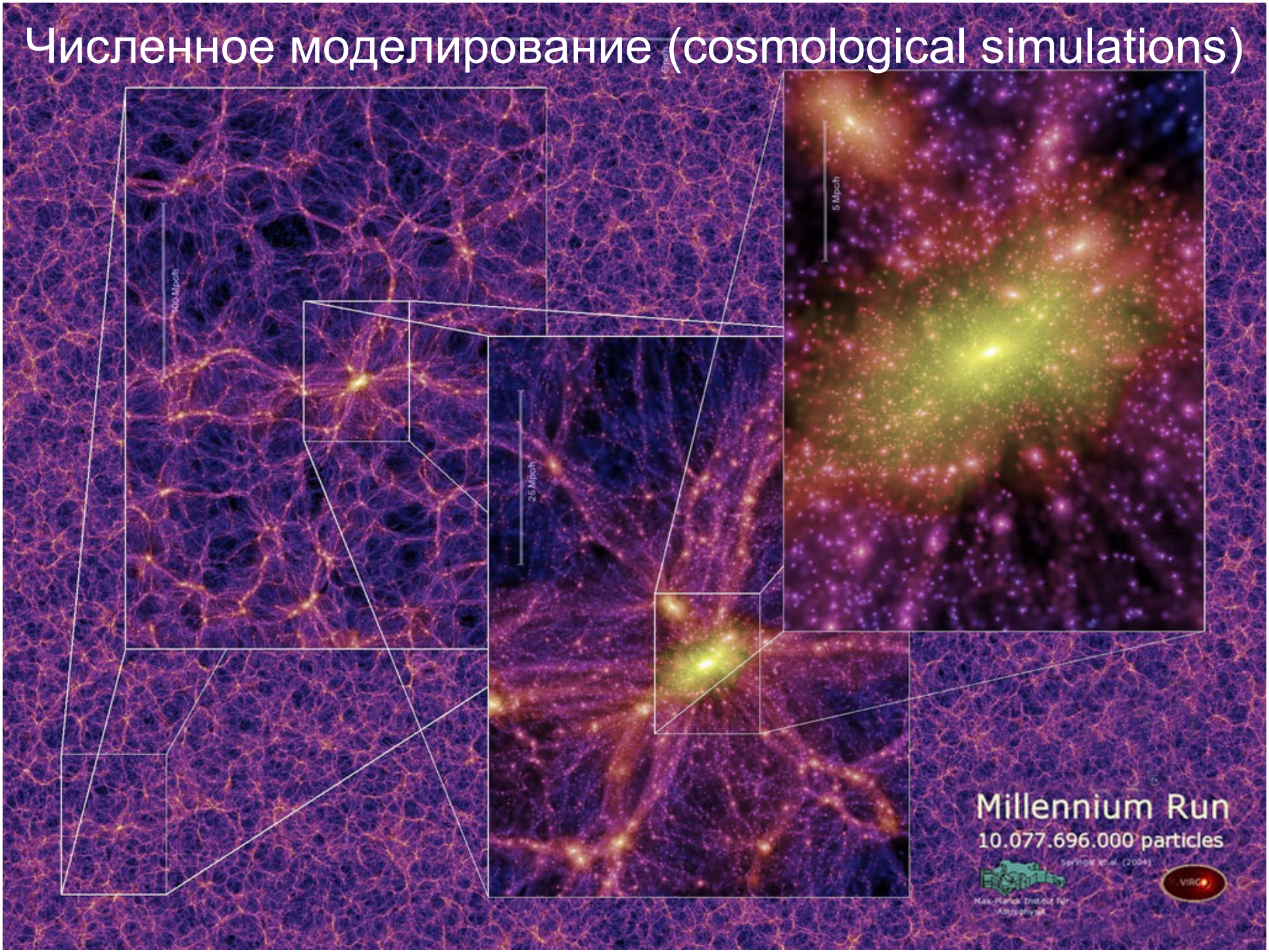
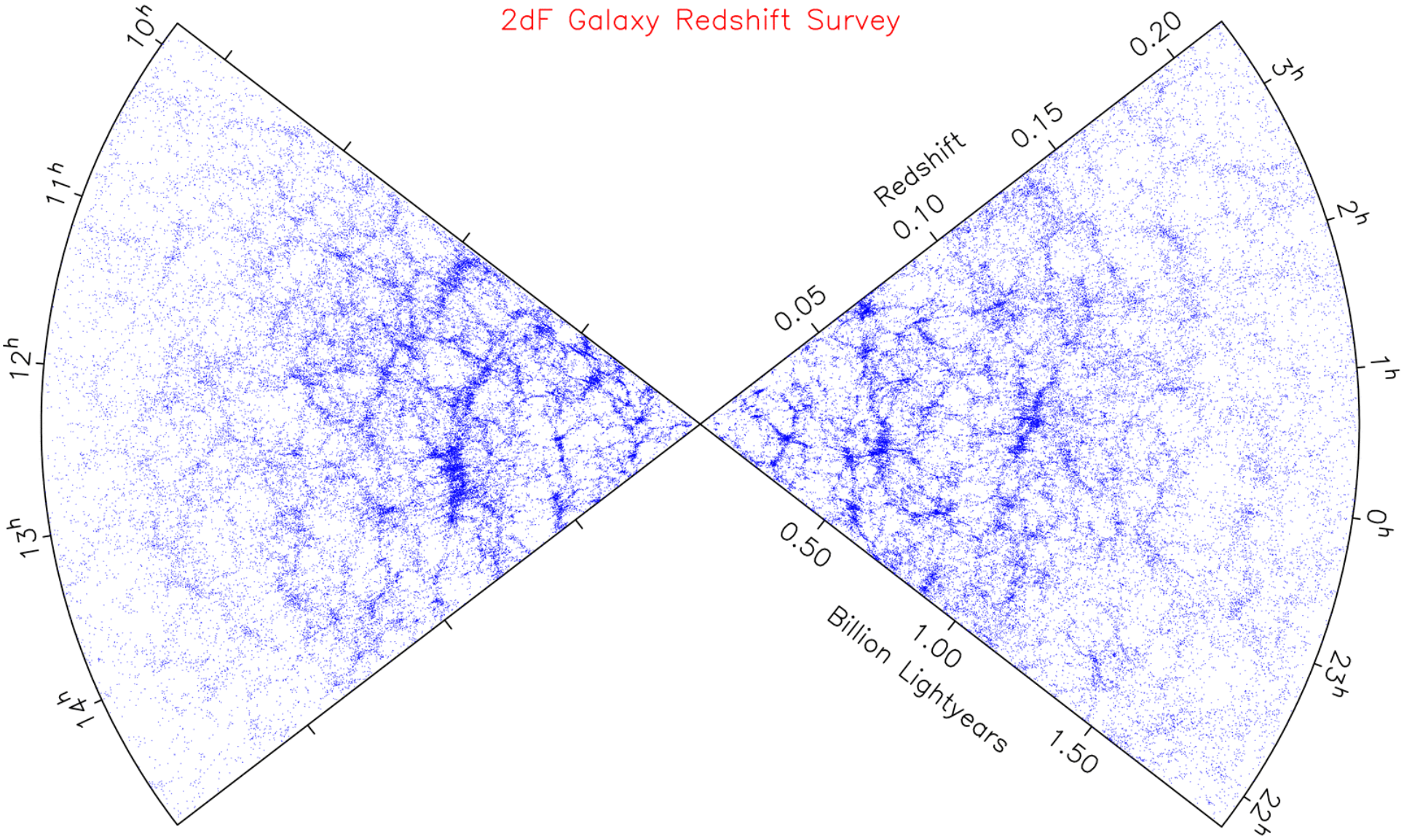
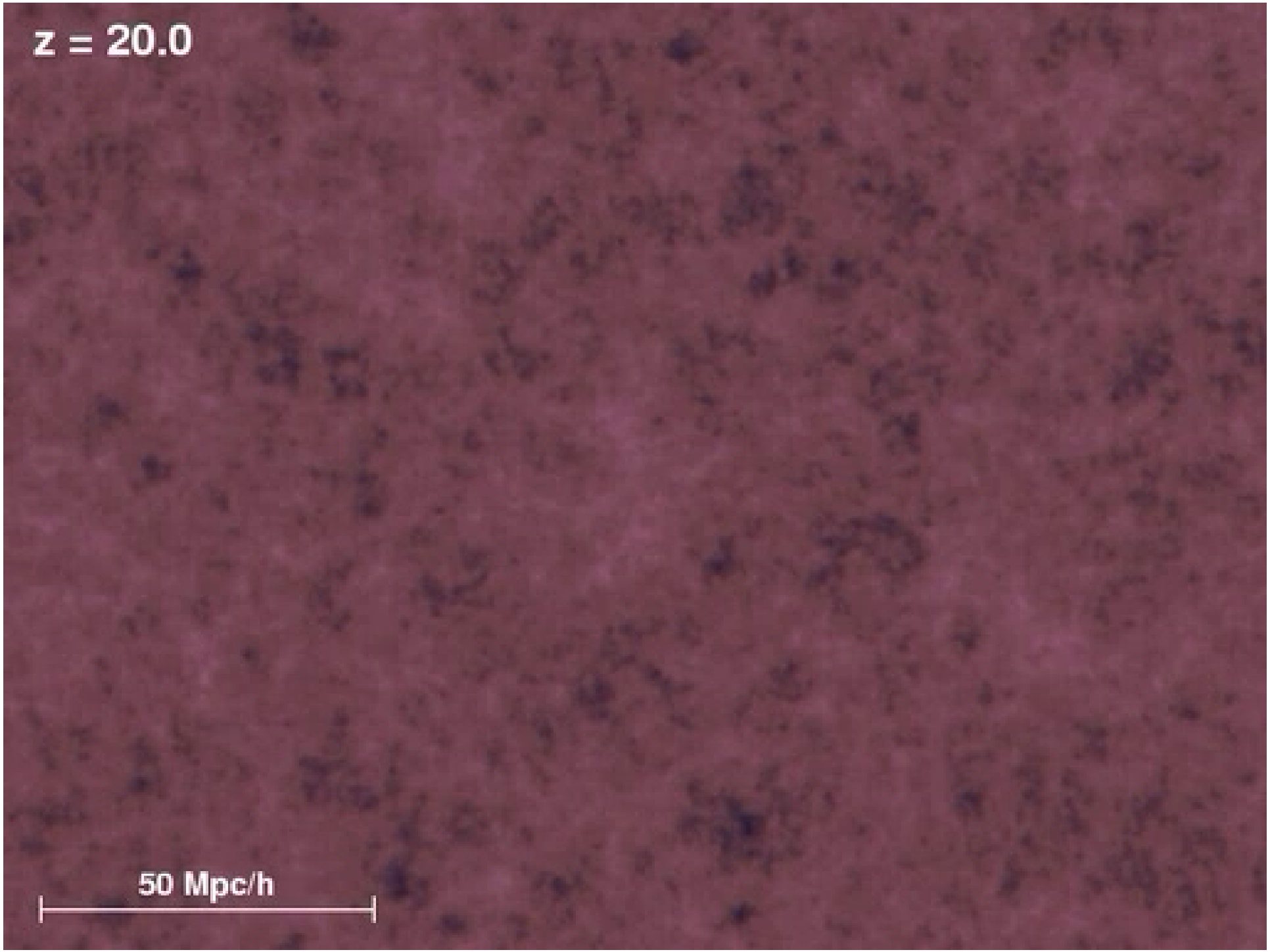


Figure 9.13 Merger rate as given by equation (9.82) for equal-mass mergers. The curves are labeled by the pre-merger mass M_1 in solar masses. The figure is for the standard ΛCDM model.

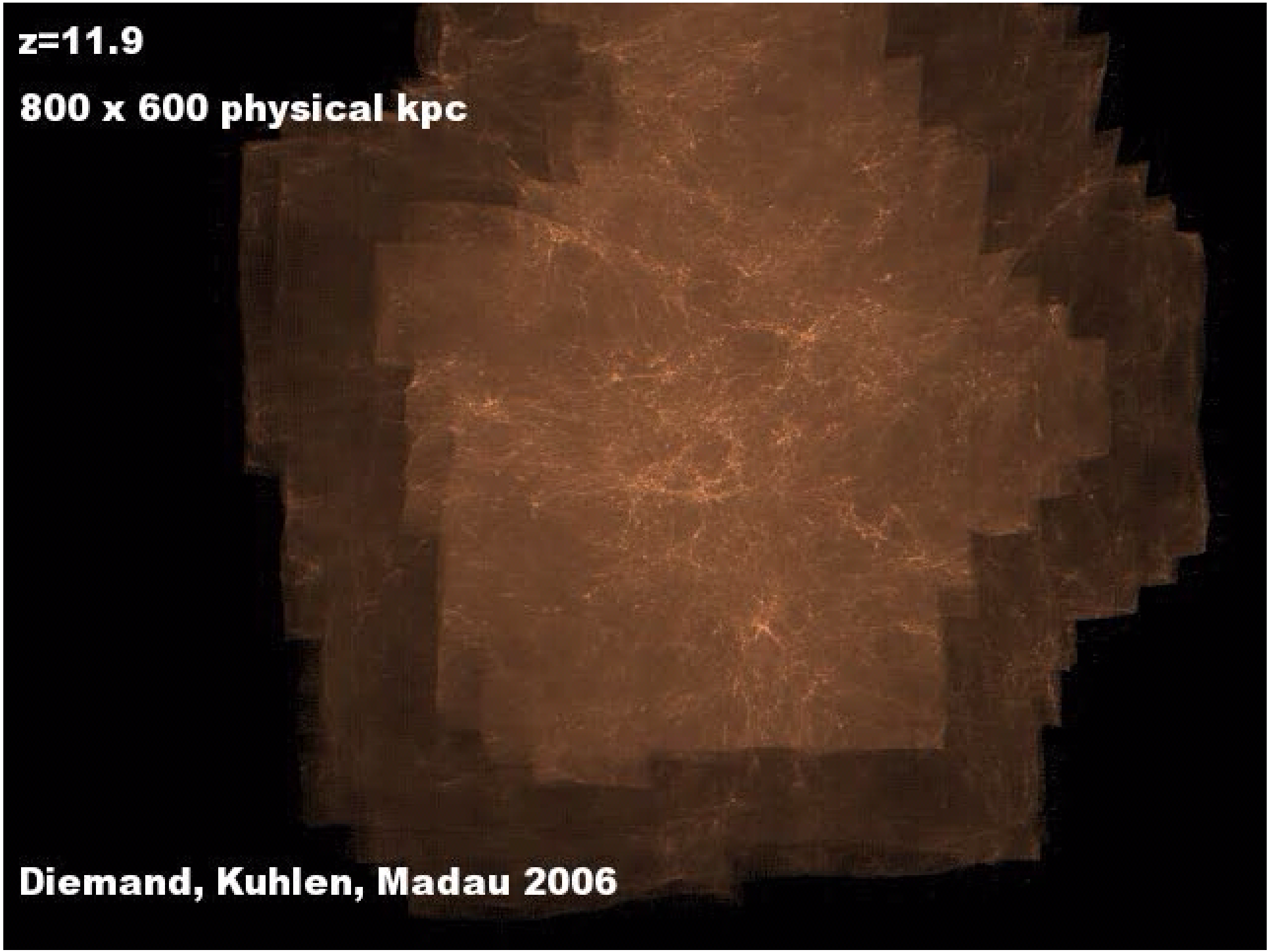
Численное моделирование (cosmological simulations)




2dF Galaxy Redshift Survey
10h
11h
12h
13h
14h
Redshift
0.05
0.10
0.15
0.20
3h
2h
1h
0h
23h
22h
0.50
1.00
1.50
Billion Lightyears


z = 20.0
50 Mpc/h

R = 6.0 Mpc
z = 10.155
a = 0.090
diemand 2003


z=11.9
800 x 600 physical kpc
Diemand, Kuhlen, Madau 2006

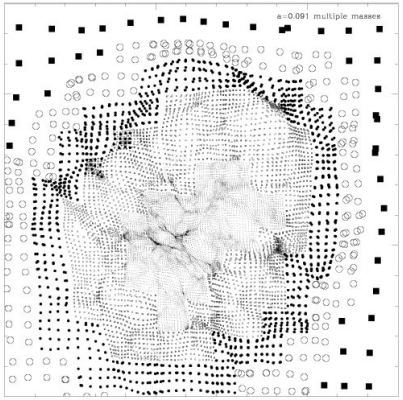
Методы численных космологических расчётов

«Задача N тел»: сложности

- Число операций растёт как N^2 (каждый объект чувствует потенциал всех остальных)
- Необходимо сглаживание сингулярного ньютоновского потенциала при $r \to 0$
- Масса «частицы» в типичных расчётах ~ 10^9 $M_{\odot}$

«Задача N тел»: методы

- Древовидный алгоритм (tree-code): частицы упорядочиваются в двоичное дерево по принципу удалённости, отдалённые ветви дерева аппроксимируются точками (точнее, мультипольным распределением массы)
- Particle-mesh (сеточные алгоритмы): частицы распределяются по ячейкам, уравнение Пуассона решается на сетке методом быстрого фурье-преобразования (FFT); потенциал ближайших частиц учитывается точно, далёких – через сетку
- Комбинированные методы (TreePM, +gasdynamics)
- Адаптивное улучшение (mesh/mass refinement)
- Параллельные расчёты
- Специализированные модули hardware (GRAPE – Gravitation Pipeline)



Образование галактик внутри гало ТМ

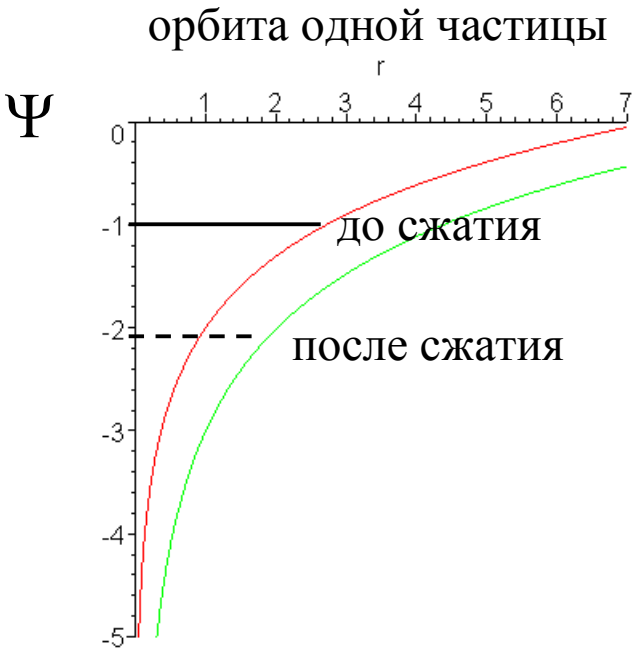
«Включение» барионов существенно усложняет физику процессов

- Первые звёзды (Population III stars), вероятно, реионизуют Вселенную к z~6
- Газ, нагретый до 10^4 К, может «оседать» только в гало ТМ тяжелее 10^8 $M_{\odot}$
- По мере увеличения плотности газ может охлаждаться и проваливаться глубже в гравитационный потенциал ТМ. В центрах гало ТМ начинают преобладать барионы, определяя потенциал и приводя к доп. сжатию гало
- Feedback: образование звёзд приводит к нагреву окружающей межзвёздной среды до T~10^6 K, возникновению «галактических ветров» v>~100 km/s
- При слияниях гало в газе возникают ударные волны, нагревая и сжимая его, что приводит к очередной вспышке звездообразования
- Квазары и АЯГ получают «питание» в процессах слияния галактик
- Приливные взаимодействия придают вращательный момент и создают спиральные галактики; слияния перемешивают звёзды и газ и образуют гигантские эллиптические галактики

Барионное сжатие

Радиальное действие $I_r = \frac{1}{2\pi}\oint v_r\,dr = \frac{1}{\pi}\int_{r_-}^{r_+}\sqrt{2(E-\Psi(r))-L^2/r^2}\,dr$ является адиабатическим вариантом при медленном изменении потенциала.

Энергия E меняется, I_r и момент импульса L – сохраняются.
«Углубление» потенциала приводит к сжатию.



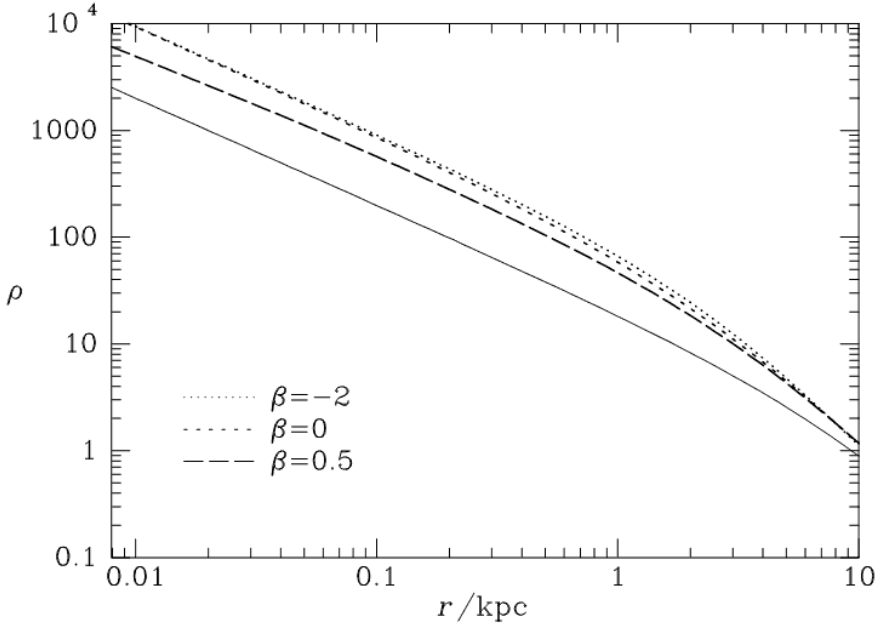
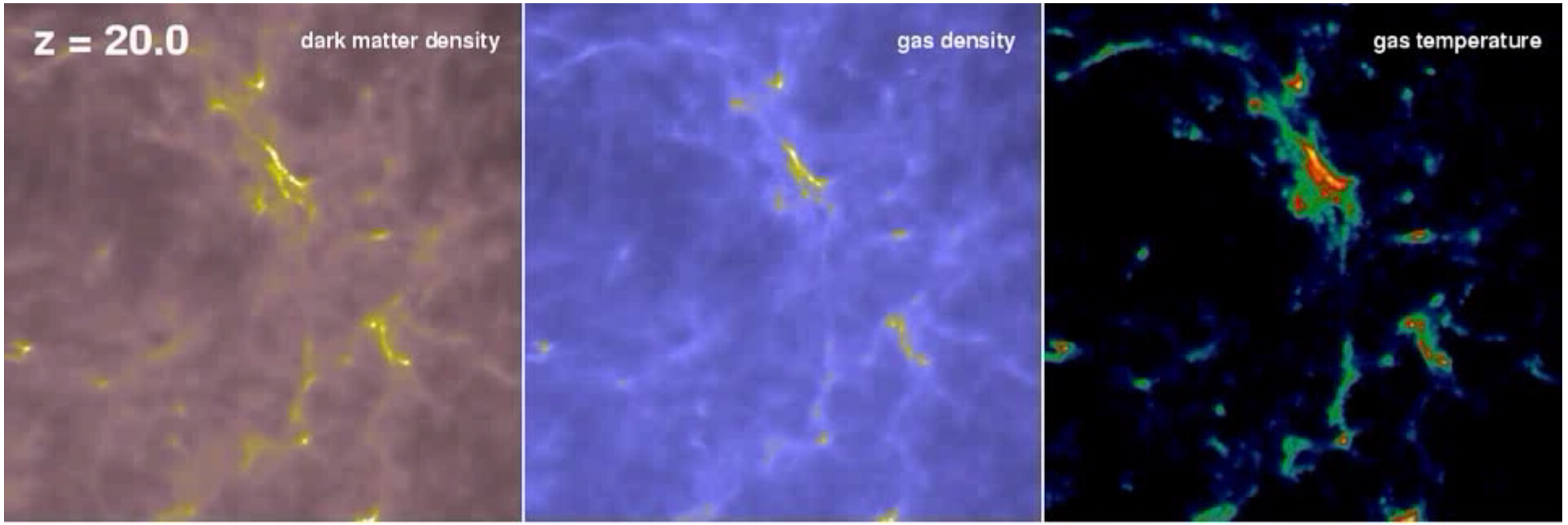
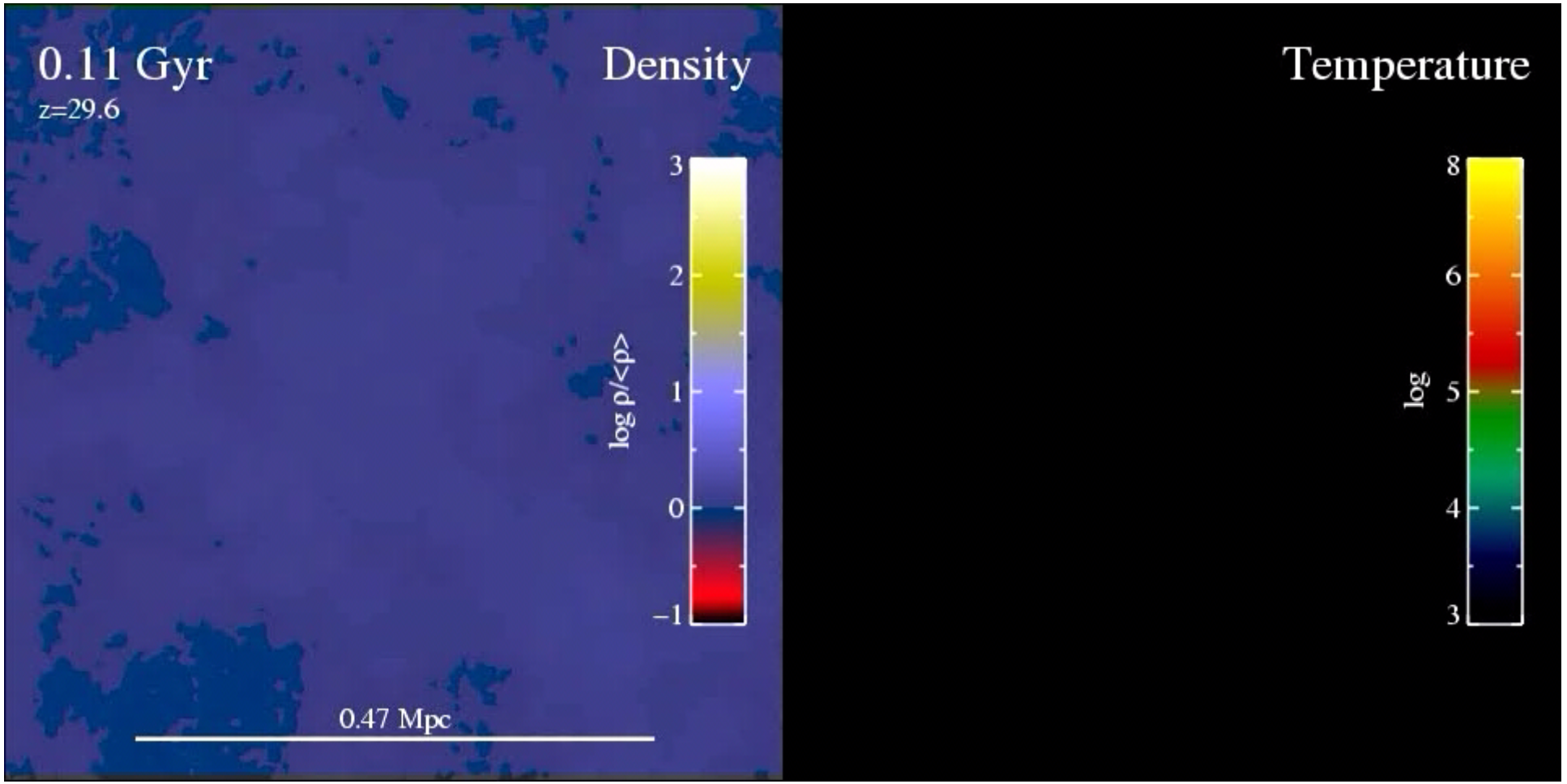


Figure 4.19 The full curve shows the original density profile of an NFW model with scale radius $a = 20$ kpc. The broken curves show the density profile of this system after a spherical representation of the Milky Way has grown slowly within it. The mass of this object is equal to the mass of the original NFW halo within 10 kpc. From data supplied by J. Magorrian.

Моделирование образования галактик



Моделирование образования галактик



Основные положения теории образования структуры

- Структура образуется благодаря тёмной материи
- Первоначальный рост возмущений плотности происходит линейным образом; $\delta \sim a(t) \sim t^{2/3}$
- На нелинейную стадию выходят первыми объекты самых малых масс
- Образование структуры происходит иерархически снизу вверх, от малых объектов к большим
- Барионы стекаются в потенциальные ямы, созданные ТМ; охлаждаясь и уплотняясь, они образуют галактики