

29-09-2010 ГАО

**Галактики:**  
**от рождения до наших дней**

**Н.Я.Сотникова**

# План

- 1. Физические основания для теорий образования галактик**
- 2. Модели формирования звездных дисков**
  - аналитические
  - полуаналитические (Semianalytical Models – SAMs)
  - численные (N-body + газодинамика)
- 3. Модельные популяции галактик (структура и кинематика): сравнение с наблюдениями**
- 4. До сих пор нерешенные проблемы**
- 5. Как динамика преобразовывает звездные диски на большой временной шкале**

# Монолитный коллапс (ELS-сценарий) (1)

## EVIDENCE FROM THE MOTIONS OF OLD STARS THAT THE GALAXY COLLAPSED

O. J. EGGEN, D. LYNDEN-BELL,\* AND A. R. SANDAGE

Mount Wilson and Palomar Observatories

Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

*Received May 17, 1962*

### ABSTRACT

The  $(U, V, W)$ -velocity vectors for 221 well-observed dwarf stars have been used to compute the eccentricities and angular momenta of the galactic orbits in a model galaxy. It is shown that the eccentricity and the observed ultraviolet excess are strongly correlated. The stars with the largest excess (i.e., lowest metal abundance) are invariably moving in highly elliptical orbits, whereas stars with little or no excess move in nearly circular orbits. Correlations also exist between the ultraviolet excess and the  $W$ -velocity. Finally, the excess and the angular momentum are correlated; stars with large ultraviolet excesses have small angular momenta.

These correlations are discussed in terms of the dynamics of a collapsing galaxy. The data require that the oldest stars were formed out of gas falling toward the galactic center in the radial direction and collapsing from the halo onto the plane. The collapse was very rapid and only a few times  $10^8$  years were required for the gas to attain circular orbits in equilibrium (i.e., gravitational attraction balanced by centrifugal acceleration). The scale of the collapse is tentatively estimated to be at least 10 in the radial direction and 25 in the  $Z$ -direction. The initial contraction must have begun near the time of formation of the first stars, some  $10^{10}$  years ago.

## Монолитный коллапс (ELS-сценарий)

- Этой работой было стимулировано обсуждение вопроса об образовании Галактики и ее подсистем, включая **звездный диск**
- Изучались орбиты **221** звезды в околосолнечной окрестности, для которых были определены пространственные скорости
- Был **переформулирован** классический результат *Паренаго (1950)* и *Roman'a (1955)*: звезды с большими скоростями – это низкометаллические звезды

# Монолитный коллапс (ELS-сценарий)

## Переформулировка

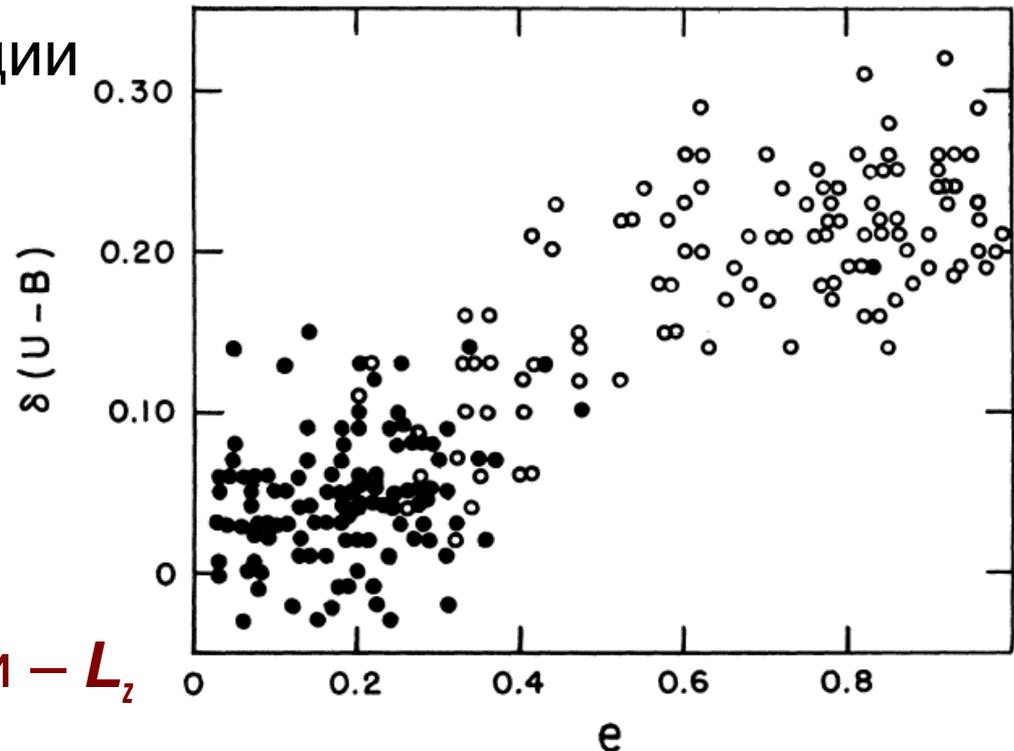
Были найдены корреляции  
между

ультрафиолетовыми  
избытками  $\delta(U-B)$  и

(1) эксцентриситетами  
орбит –  $e$

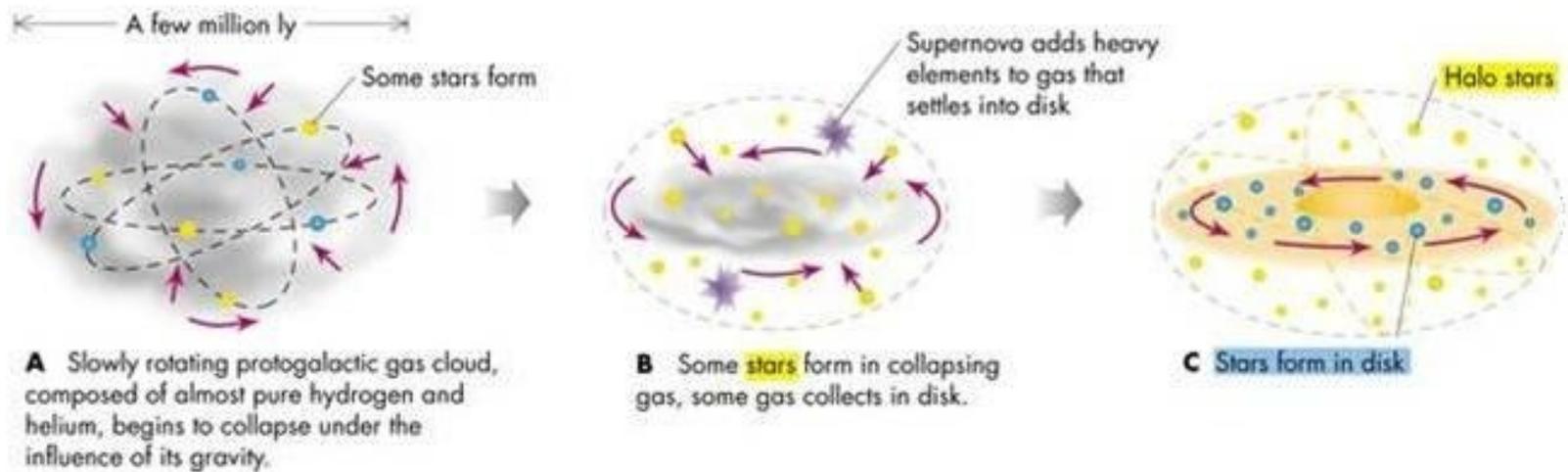
(2) угловыми моментами –  $L_z$

(3) скоростями в  
вертикальном  
направлении –  $W (v_z)$



# Монолитный коллапс (ELS-сценарий)

**Быстрый коллапс монолитного  
протогалактического газового облака  $\tau \sim 10^8$  yr**



**Изменение масштабов:**

**в 10 раз в радиальном направлении и**

**в 25 раз в вертикальном направлении**

## Монолитный коллапс (ELS-сценарий) - проблемы

- Некоторые звезды гало и ШС имеют контрвращение
- Разброс возрастов ШС – **несколько млрд.лет**
- Звезды гало низкометаллические, но вовсе не состоят только из H и He

# Внешняя эпизодическая аккреция (2)

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 225:357-379, 1978 October 15

© 1978. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

## COMPOSITIONS OF HALO CLUSTERS AND THE FORMATION OF THE GALACTIC HALO

LEONARD SEARLE AND ROBERT ZINN

Hale Observatories, Carnegie Institution of Washington, California Institute of Technology

*Received 1978 March 2; accepted 1978 April 21*

### ABSTRACT

A new method of abundance determination, based upon reddening-independent characteristics of low-resolution spectral scans, has been applied to 177 red giants in 19 globular clusters. Most of these clusters have galactocentric distances exceeding 8 kpc. We find that there is no radial abundance gradient in the cluster system of the outer halo. The distribution over abundance for these outer clusters appears to be independent of galactocentric distance and is nearly identical to that for halo subdwarfs in the solar neighborhood. This distribution is such that the density declines exponentially with increasing metal abundance. The clusters of the outer halo show a broad spread in the color distribution on the horizontal branch, and this property is uncorrelated with metal abundance. In contrast, more tightly bound clusters, in the same range of abundance, show very little dispersion in this property. These facts are all consistent with the hypothesis that the loosely bound clusters of the outer halo have a broader range of age than the more tightly bound clusters and originated in transient protogalactic fragments that continued to fall into dynamical equilibrium with the Galaxy for some time after the collapse of its central regions had been completed.

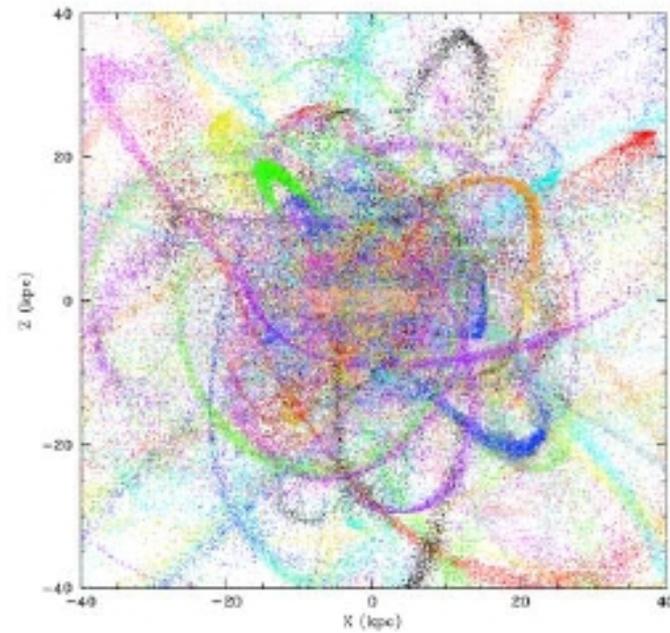
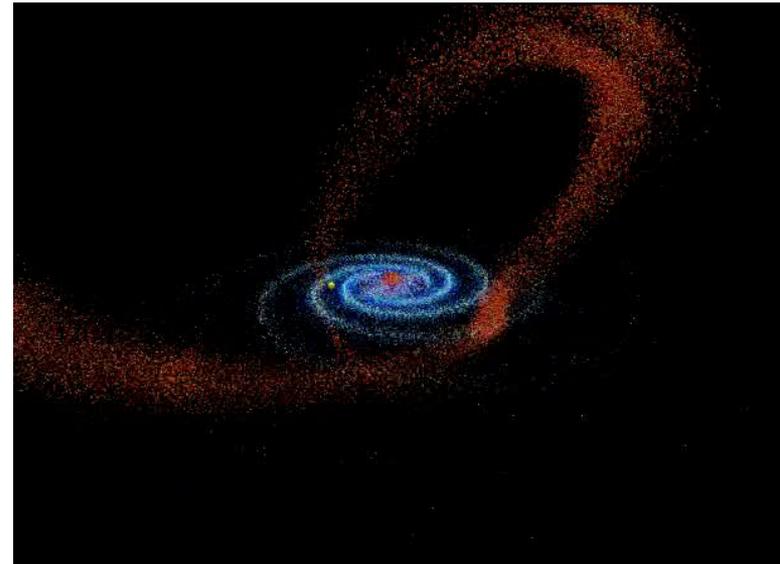
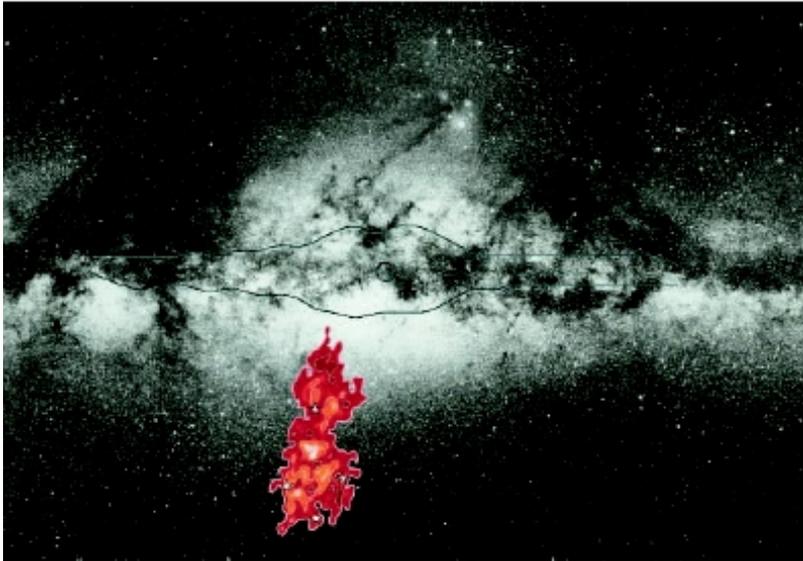
*Subject headings:* clusters: globular — galaxies: Milky Way — galaxies: structure — stars: abundances — stars: late-type

## Внешняя эпизодическая аккреция

- Распределение по показателям металличности у **внешних** ШС очень широкое и не зависит от положения ШС
- Это же касается распределения по цветам для звезд ГВ

**Продолжительная (!) аккреция  
протогалактических фрагментов,  
эволюционирующих независимо друг от  
друга**

# Внешняя эпизодическая аккреция



## Сценарий иерархического сгущения (3)

**CDM (или  $\Lambda$ CDM) модель формирования галактик -**

**иерархический сценарий:**

*White & Rees, 1978*

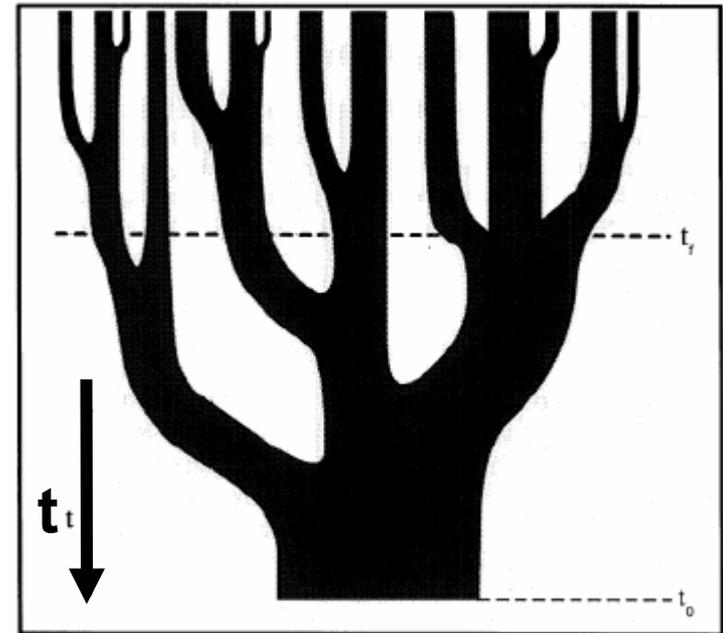
аккреция газа на иерархически сливающиеся темные гало

*Fall & Efstathiou, 1980*

– угловой момент – за счет **tidal torques**

– удельный угловой момент газа равен удельному угловому моменту гало

→  
кривая вращения диска – сравнение с наблюдениями



*Lacey & Cole, 1993*

# Сценарий иерархического сгущения - основания

## CDM (или $\Lambda$ CDM) модель формирования

В расширяющейся Вселенной структуры растут линейно

В сопутствующей системе координат в уравнении Пуассона вместо  $\rho$  должно стоять  $\delta\rho / \rho$

Начальные возмущения малы  $\delta\rho / \rho \ll 1$

Они растут как

$$\delta\rho / \rho = \delta \sim R(t) \sim (1 + z)$$

Рост барионных возмущений возможен только после эпохи рекомбинации, начиная с  $z \sim 1000$

Фактор роста не больше, чем  $10^3$

Этого недостаточно, так как начальная амплитуда флуктуаций несколько единиц на  $10^5$

Данные COBE, WMAP -  $\delta T / T \sim 10^{-5}$

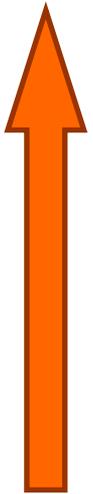
## CDM (или $\Lambda$ CDM) модель формирования

### Решение:

- Небарионное темное вещество, не связанное с излучением, которое может выделять структуры задолго до рекомбинации
- Укрупнение этих структур происходит за счет иерархических слияний
- Барионный газ “следует” за формирующимися и укрупняющимися гало, нагреваясь до вириальных температур, а затем, остывая, образует звездные подсистемы

## Модели формирования галактик (звездных дисков)

- аналитические
- полуаналитические (SemiAnalytical Models – SAMs)
- численные (N-body + газодинамика)



# $\Lambda$ CDM модели формирования галактик

## Критические тесты:

### модели должны воспроизводить

- крупномасштабную структуру
- функцию светимости галактик
- соотношение Талли-Фишера (скорость вращения  $V$  – светимость  $L$ )
- соотношение размер  $R$  – светимость  $L$
- морфологию и распределение звездной плотности
- историю звездообразования

## $\Lambda$ CDM + N-body + SPH

### Консорциум Virgo (1994):

<http://www.virgo.dur.ac.uk>

### Основные узлы:

- Institute for Computational Cosmology (Durham, UK)
- Max Planck Institute for Astrophysics (Garching, Germany)

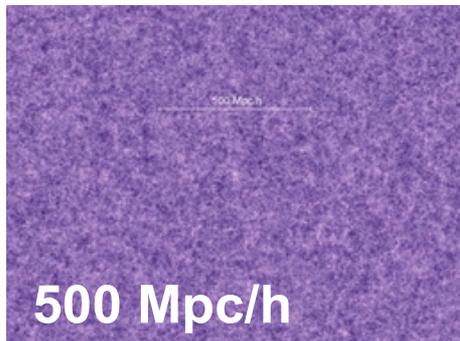
## Консорциум Virgo

### Основные проекты:

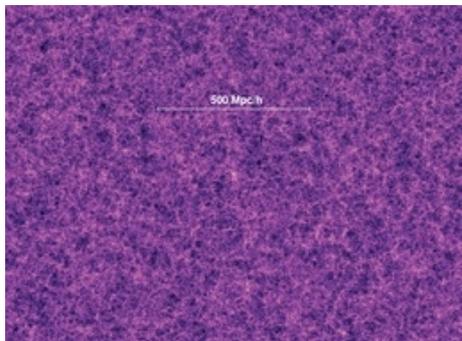
- **The Millennium Simulation**
- **Galaxy Simulations**
- **First Objects**
- **Dark Matter Halos (включая Aquarius Project)**
- **Intergalactic Medium**
- **Semi-Analytical Galaxy Formation (SAMs)**
- **Mock Catalogues (+ SAMs → 2dFGRS и SDSS)**
- **GIF Project (N-body + SAMs)**

# Численные модели. The Millennium Simulation

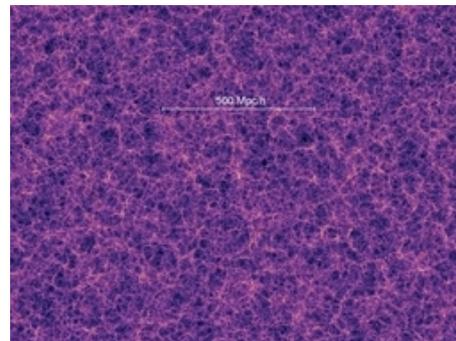
$z = 18.3$   
( $t = 0.21$  Gyr)



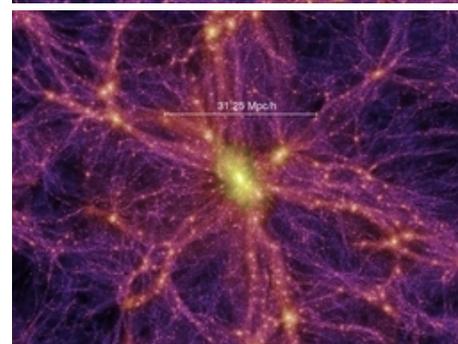
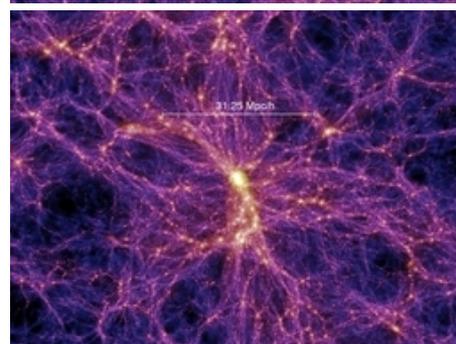
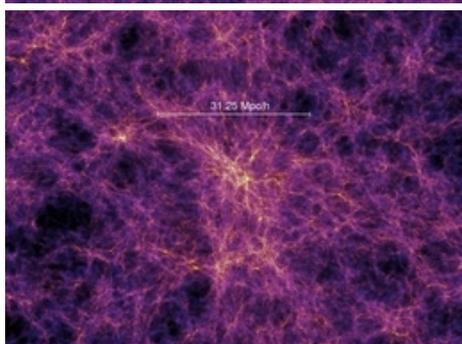
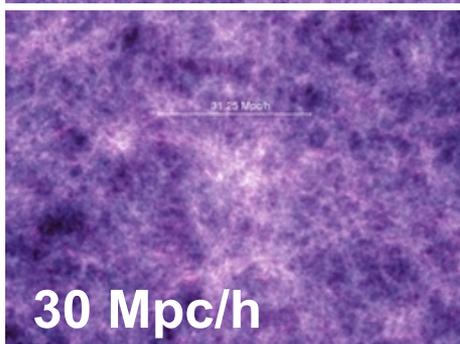
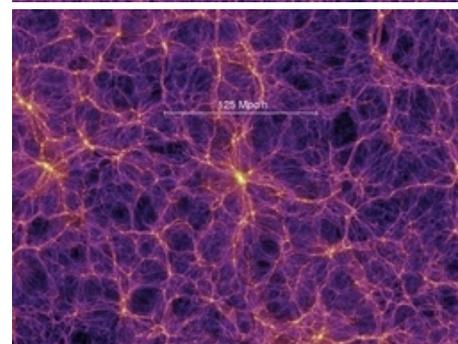
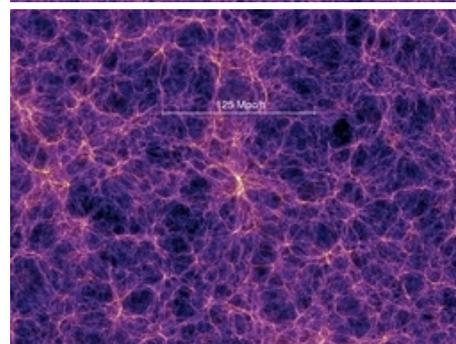
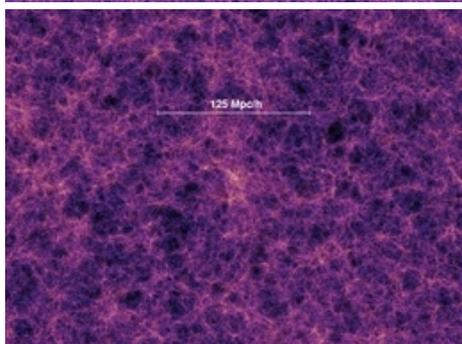
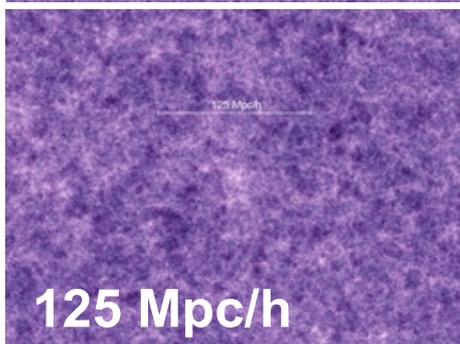
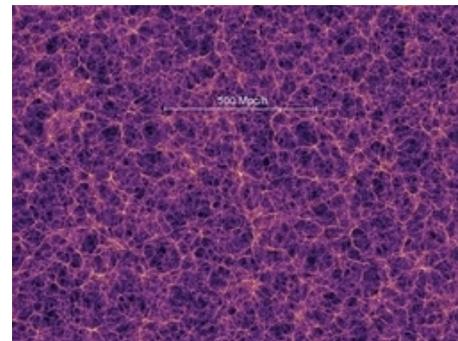
$z = 5.7$   
( $t = 1.0$  Gyr)



$z = 1.4$   
( $t = 4.7$  Gyr)



$z = 0.0$   
( $t = 13.6$  Gyr)



# Galaxy merger trees. The Millennium Simulation

Table : mpagalaxies..delucia2006a  
Galaxy ID = 415000584000000

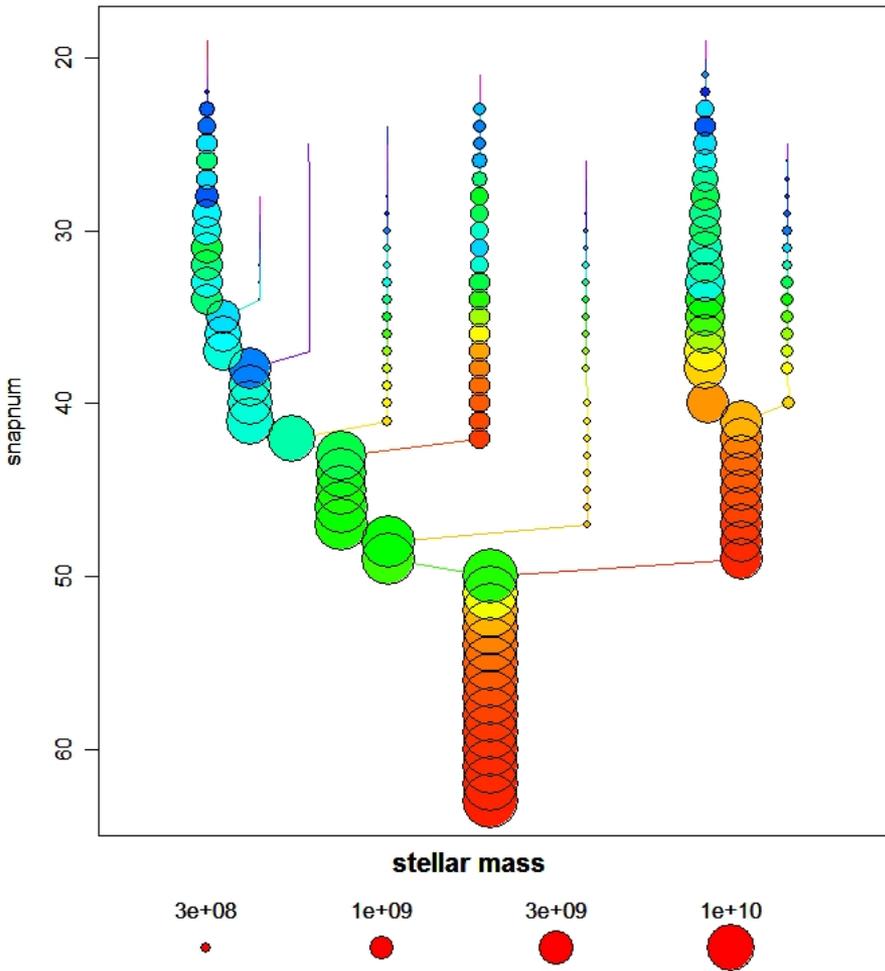


Table : mpagalaxies..delucia2006a  
Galaxy ID = 300004170000190

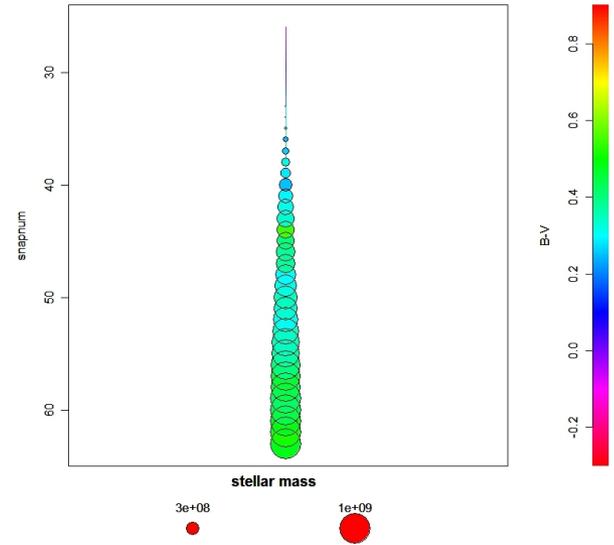
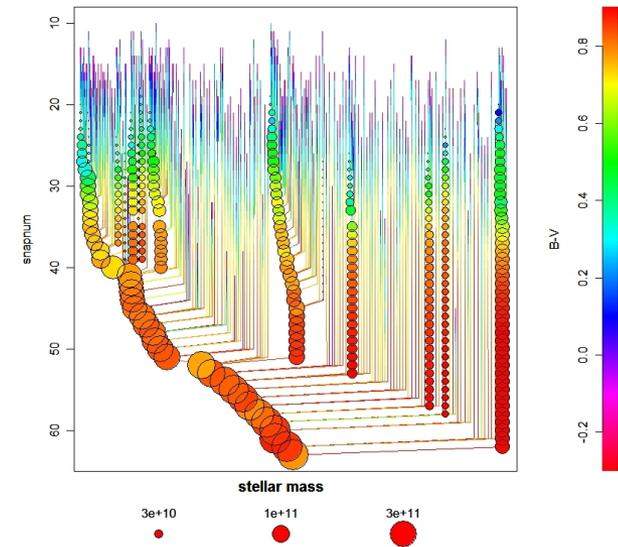


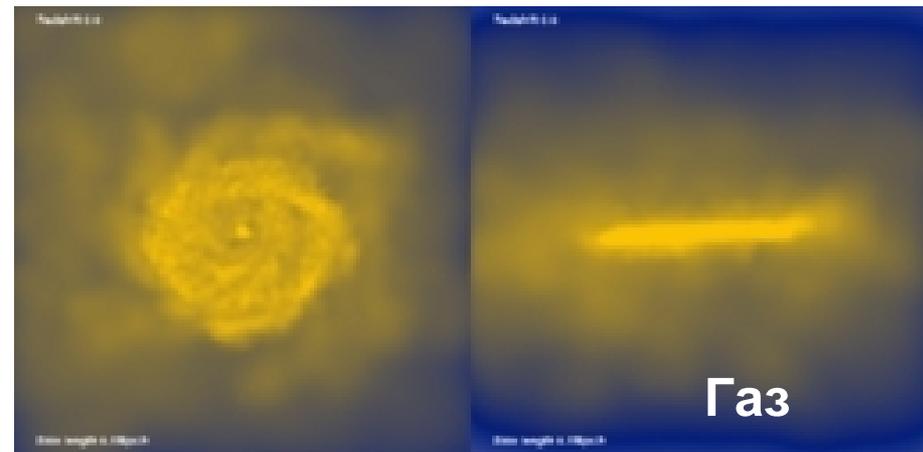
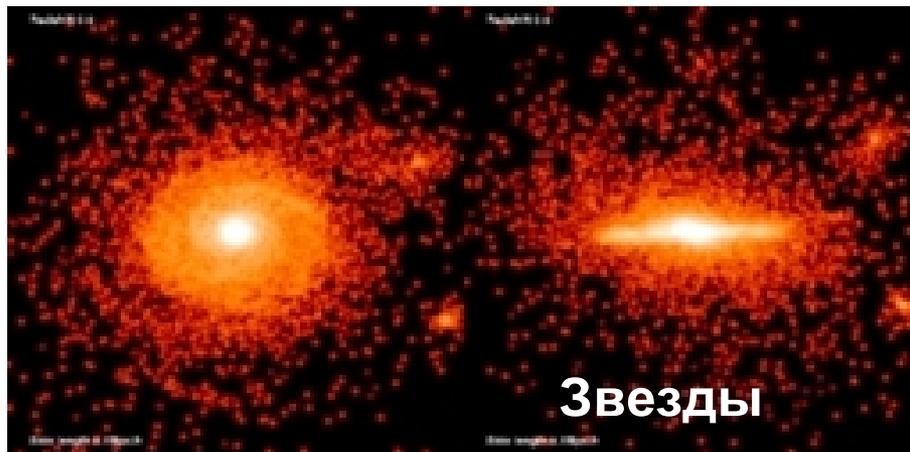
Table : mpagalaxies..delucia2006a  
Galaxy ID = 480000200000000



# Численные модели. Отдельные галактики ( $\Lambda$ CDM + N-body + SPH)

- **cosmologically motivated гало** (N-body, например, Tree method)
- **газ** (например, SPH)
- **физика**: гравитация, гидродинамика, нагрев+охлаждение, однородный UV фон
- **“описательная” физика**: звездообразование, feedback, обогащение химическими элементами

*Okamoto et al, 2005 (Virgo)*



# Аналитические модели

## Популяция дисковых галактик в $\Lambda$ CDM космологии

Mo, Mao, White, 1998

- Диски формируются из барионного вещества (газа) в сферически-симметричных темных гало с **NFW** профилями плотности

$$\rho_{\text{halo}}(r) = \frac{\rho_s}{x(1+x)^2}, \quad x = r/r_s,$$

$$M_{\text{halo}}(r) = 4\pi\rho_s r_s^3 f(x) \\ = M_{\text{vir}} f(x)/f(C),$$

$$f(x) = \ln(1+x) - \frac{x}{1+x},$$

$$C = r_{\text{vir}}/r_s,$$

$$M_{\text{vir}} = \frac{4\pi}{3} \rho_{\text{cr}} \Omega_0 \delta_{\text{th}} r_{\text{vir}}^3,$$

**NFW profiles may not be pretty....**



# Аналитические модели

## Популяция дисковых галактик в $\Lambda$ CDM космологии

*Mo, Mao, White, 1998*

- В процессе охлаждения газа (доля массы  $m_d$ ) образуется экспоненциальный диск, который находится в равновесии за счет центробежных сил
- Газ имеет такой же удельный угловой момент, что и темное вещество, и он сохраняется в процессе охлаждения

$$J = \lambda G^{1/2} M^{3/2} \left( \frac{2r_{200}}{f_c} \right)^{1/2} \quad J_d = j_d J$$

- Взаимодействие между барионным и темным веществом приводит к адиабатическому поджатию гало (*Blumenthal et al, 1986*)

## Популяция дисковых галактик в $\Lambda$ CDM космологии

*Дополнительно (другие авторы)*

- Звезды образуются в газовом диске при достижении порогового значения поверхностной плотности
- Feedback эффекты
- Описание балджа – через саморегулируемые механизмы, обеспечивающие устойчивость диска

## Что на выходе?

На уровне популяции дисковых галактик

$$\begin{array}{l} p(\lambda) \\ f(M_{200}) \\ f(c) \\ m_d, \dot{j}_d \end{array} + z \left\{ \begin{array}{l} f(L_I) \\ R_d \\ v_{2.2} (v_m) \end{array} \right\}$$

**функция светимости;  
масштабные  
соотношения**

# Что дают $\Lambda$ CDM модели?

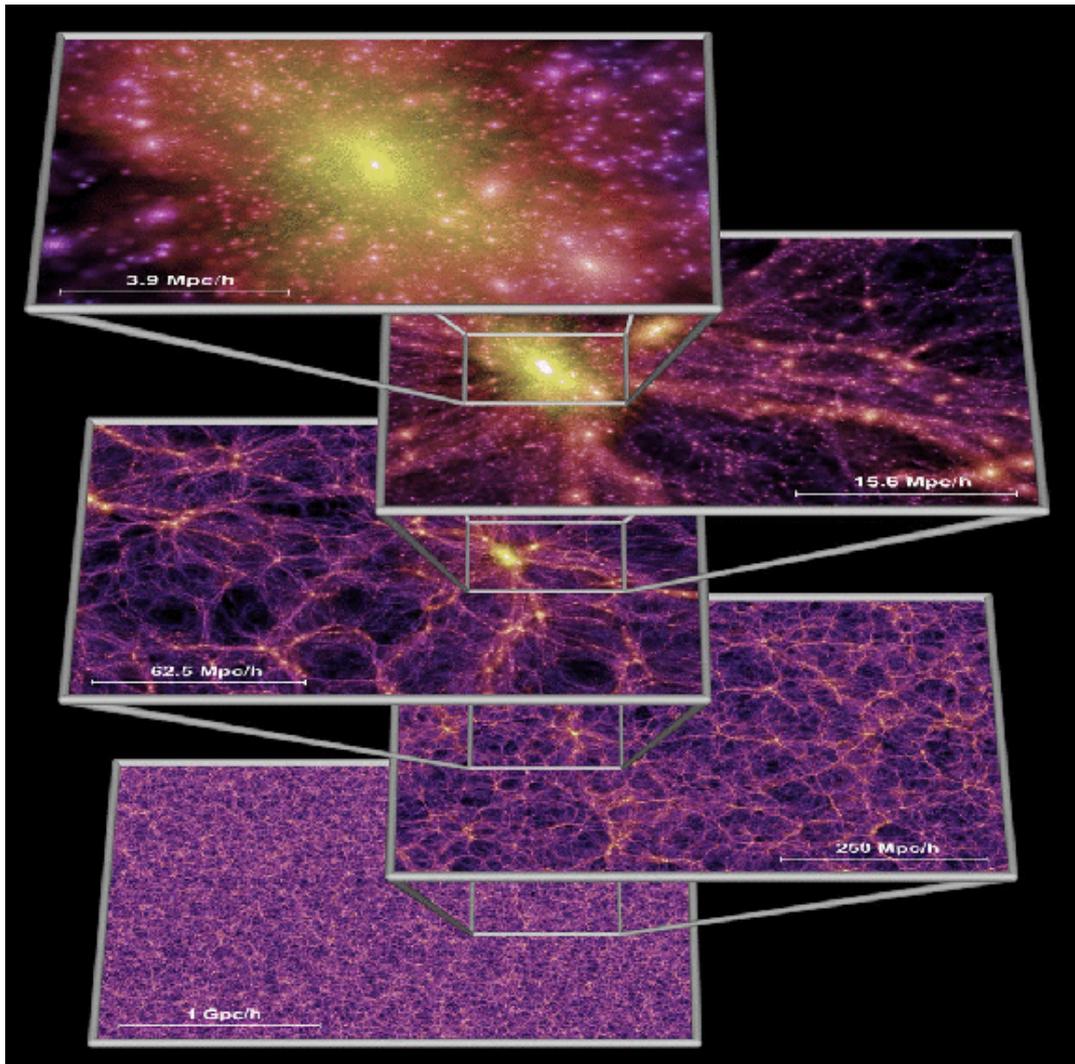
1. Крупномасштабное распределение галактик на различных  $z$
2. Характеристики популяции галактик на данную эпоху ( $z$ ); например,  $f(L)$ , масштабные соотношения
3. Структура и кинематика
  - $\rho(R, z), h, z_0$
  - $V_{\text{rot}}$
4. Возраста, хим. состав, история звездообразования
5. Окружение (спутники)

# Крупномасштабное распределение галактик

*Springel et al, 2005 –  
“Millenium Simulation”*

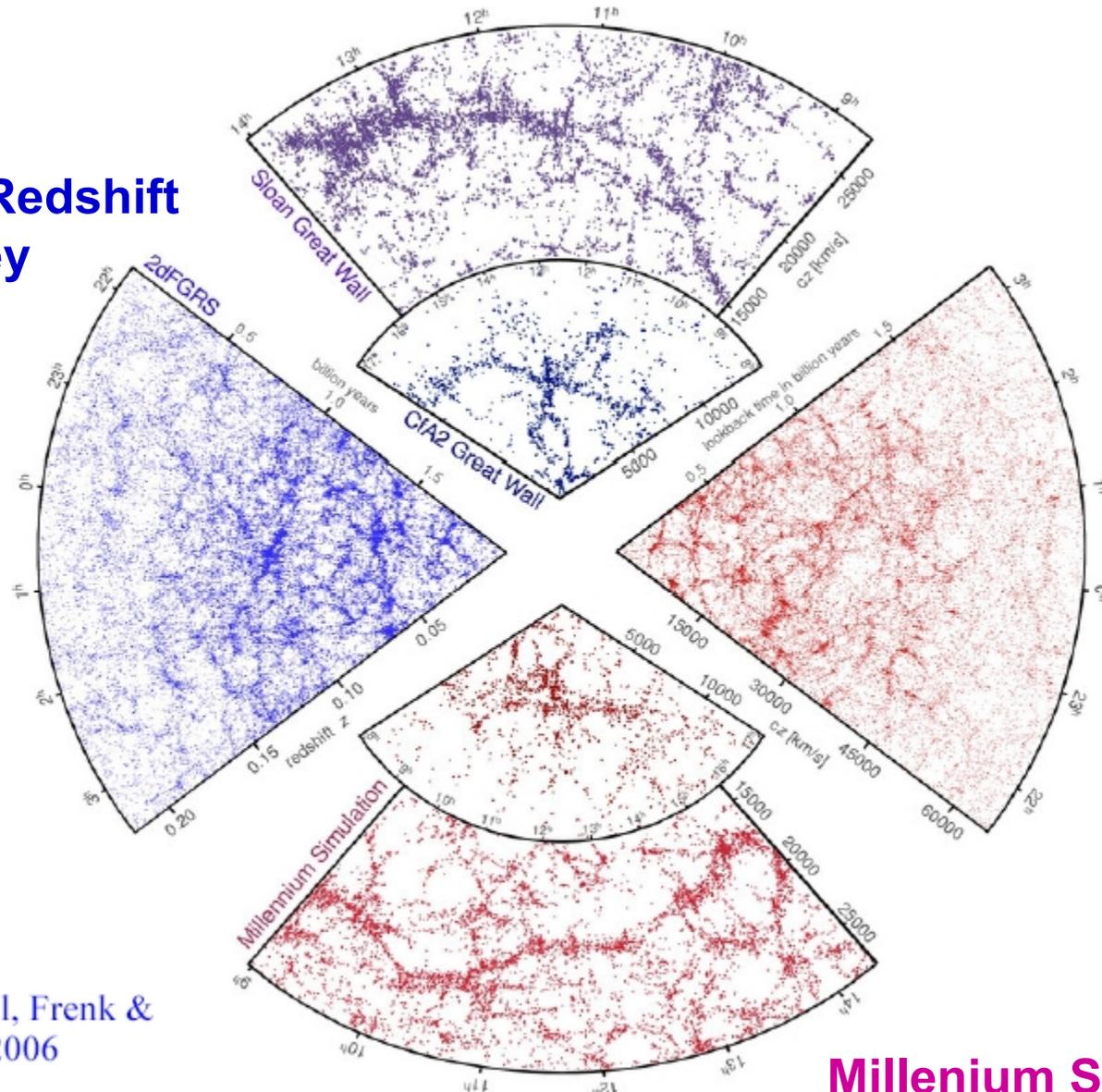
Эволюция кубической  
области размером 700 Мпк  
от  $z=127$  до  $z=0$

$\sim 10^{10}$  частиц!



# Крупномасштабное распределение галактик

## 2dF Galaxy Redshift Survey



Springel, Frenk &  
White 2006

Millenium Simulation

# Проблемы сценария иерархического сгущивания

- Предсказывает наличие **cusps** в центре галактик. По-видимому, эта особенность отсутствует в карликовых Irr, в которых, однако, темное вещество доминирует
- Предсказывает **большое число маленьких гало (спутников) вокруг больших галактик** (не наблюдается)
- **Низкий угловой момент барионов, а следовательно слишком маленькие размеры дисков**

# Высокая концентрация темного вещества в центре (cusps)

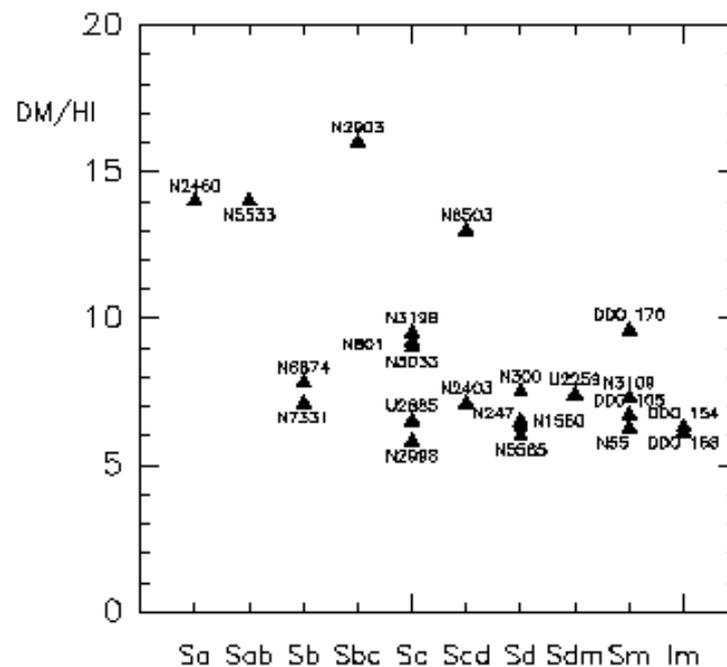
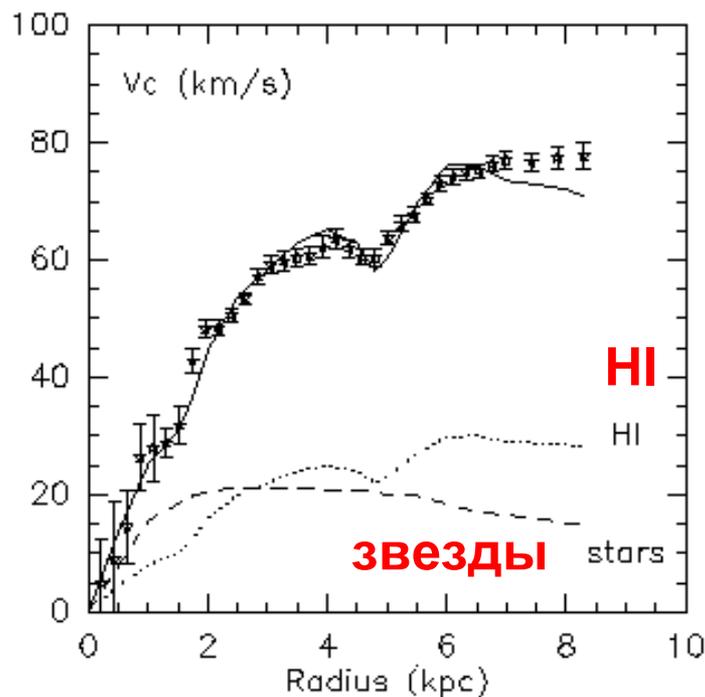
Распределение темной материи идентично распределению газа HI

Слабая зависимость отношения DM/HI ratio от типа галактики (в ранних больше)

**NGC1560**

**Sd**

**HI x 7.0**



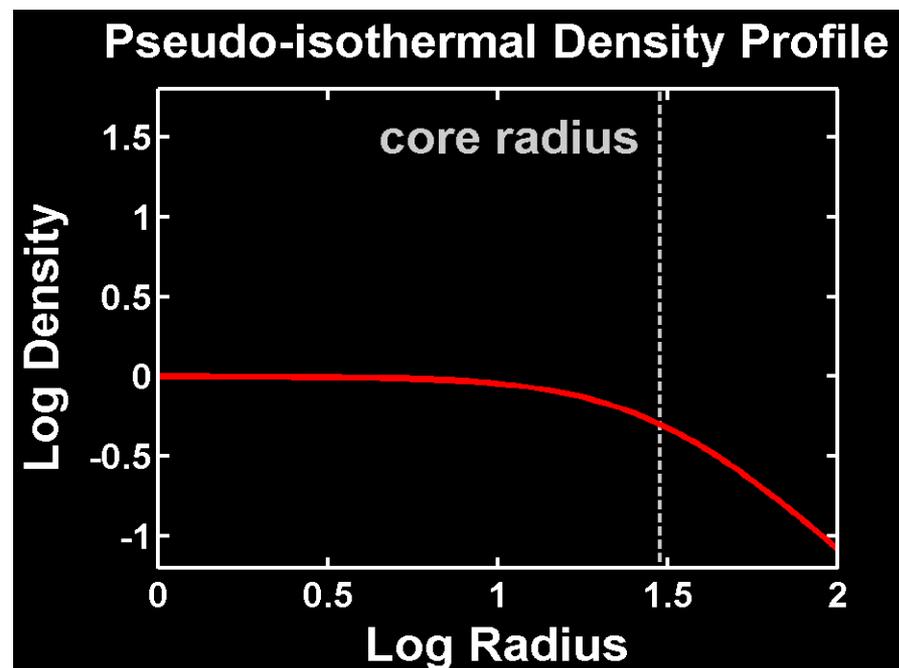
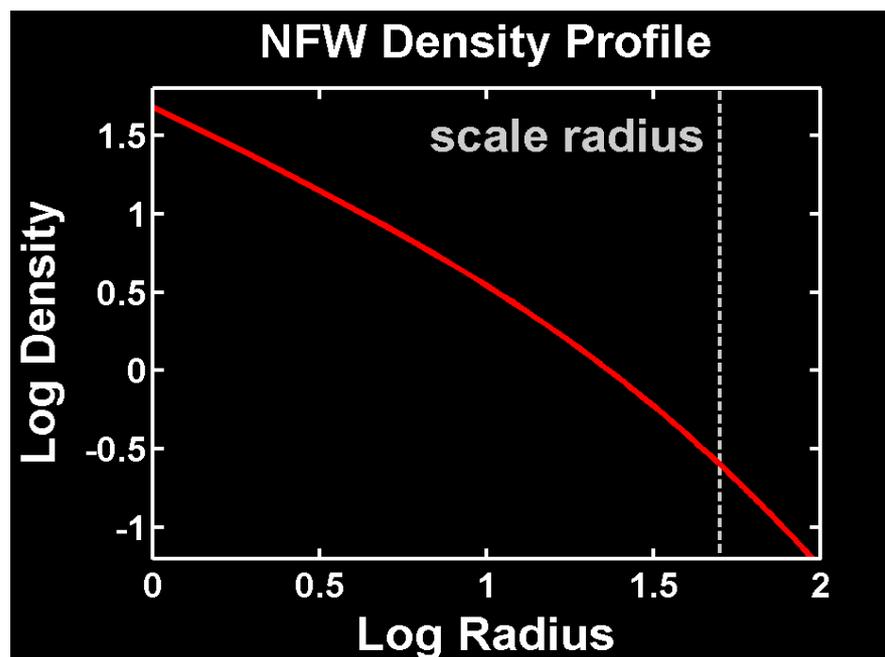
# Высокая концентрация темного вещества в центре (cusps)

Анализ  $H\alpha$  +  $H\text{I}$  кривых вращения

Распределение плотности – с ядром в центре (*de Blok et al, 2003; Swaters et al, 2003; Gentile et al, 2004, 2005; Shankar et al, 2006; Spano et al, 2008*)

$$\rho \sim r^{-\alpha}$$

Расчеты:  $\alpha \sim 1-1.5$ , наблюдения  $\alpha \sim 0-0.5$



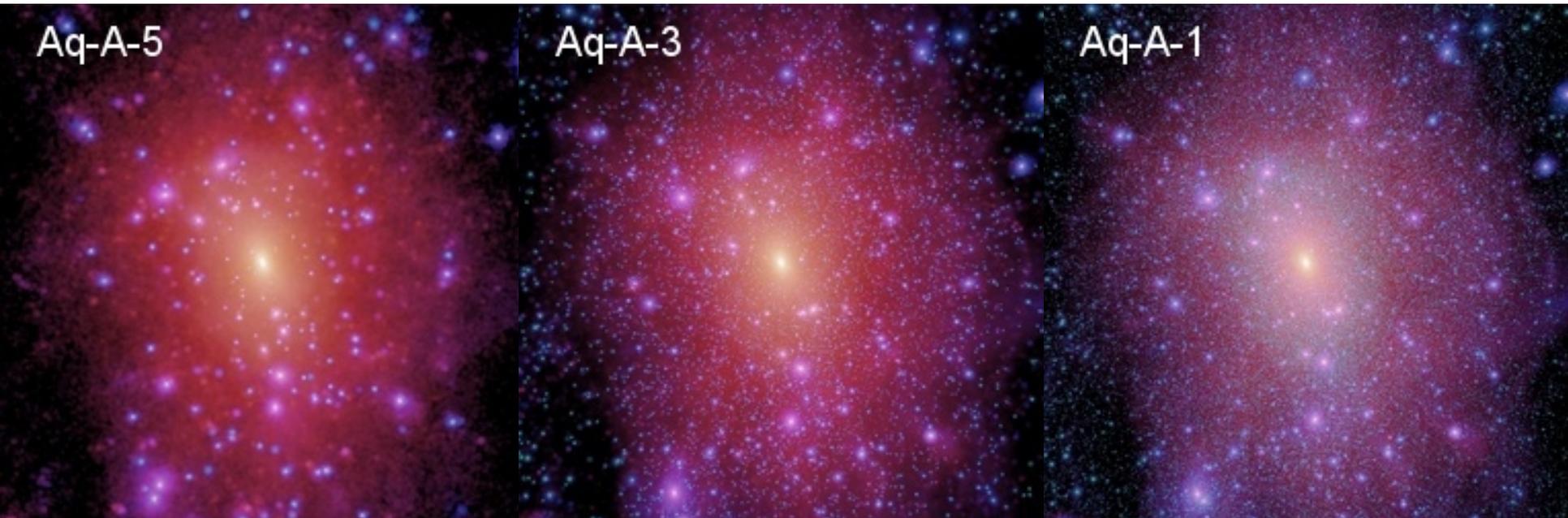
# Слишком много мелких структур (проблема спутников)

$\Lambda$ CDM расчеты предсказывают в 100 раз больше небольших гало вокруг галактик типа нашей Галактики, чем это наблюдается

## Проект Aquarius

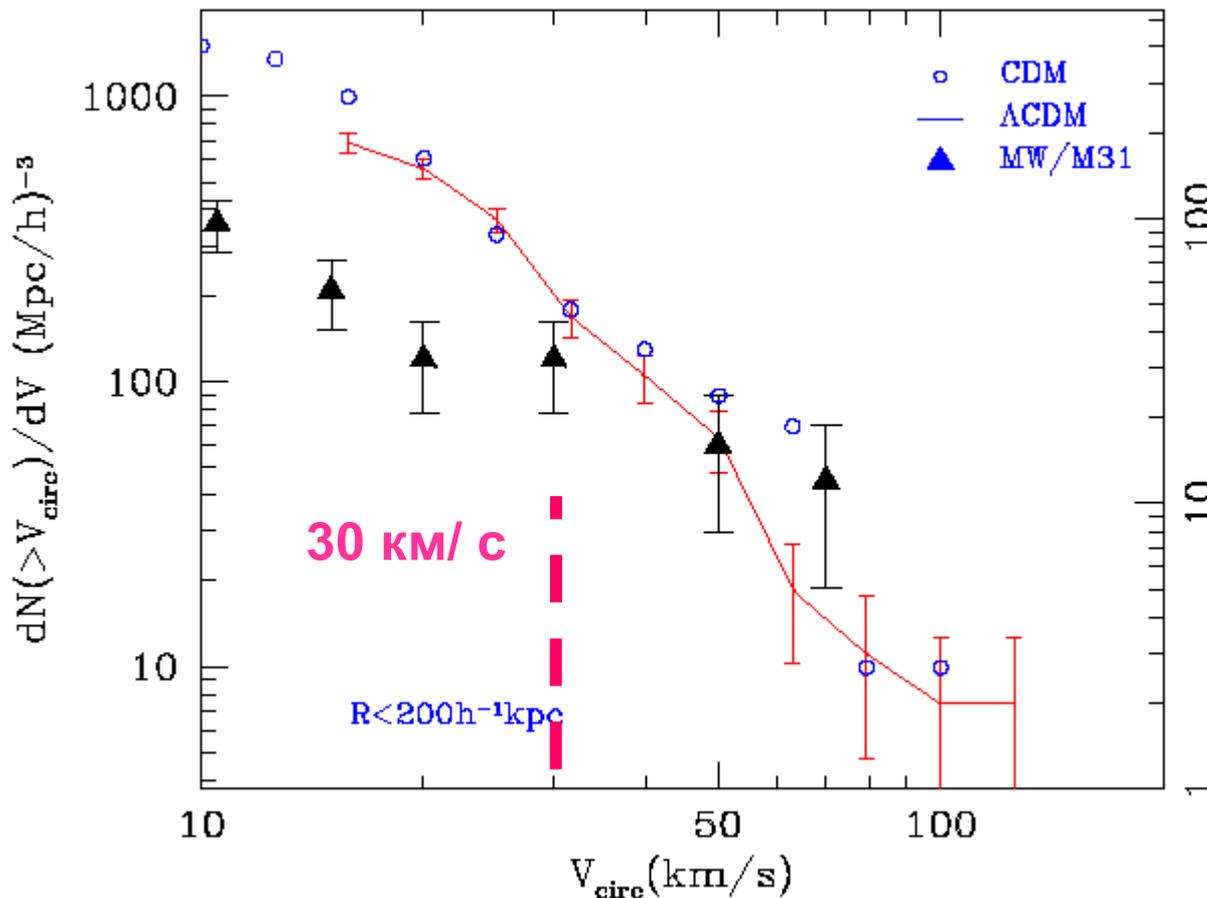
**N = 800 000**

**N = 1 500 000**



# Слишком много мелких структур (проблема спутников)

$\Lambda$ CDM расчеты предсказывают в **десятки** раз больше небольших гало вокруг галактик типа нашей Галактики, чем это наблюдается



$R < 200 h^{-1}$  кпк

Местная Группа

*Klypin et al, 1999*

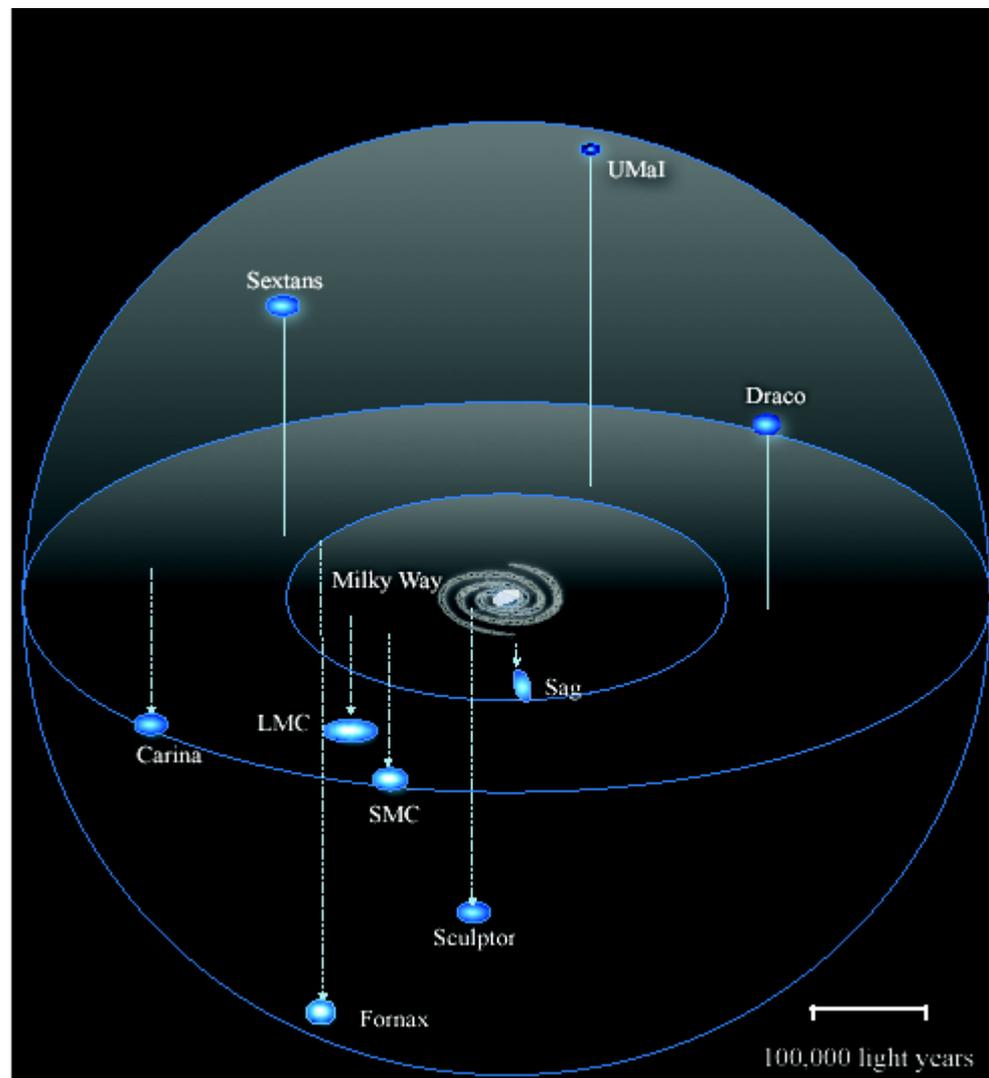
# Слишком много мелких структур (проблема спутников) (Joel Primack)

$\Lambda$ CDM расчеты предсказывают в 100 раз больше небольших гало вокруг галактик типа нашей Галактики, чем это наблюдается

**Конец 2004**

Name	Year Discovered
LMC	1519
SMC	1519
Sculptor	1937
Fornax	1938
Leo II	1950
Leo I	1950
Ursa Minor	1954
Draco	1954
Carina	1977
Sextans	1990
Sagittarius	1994

(11)

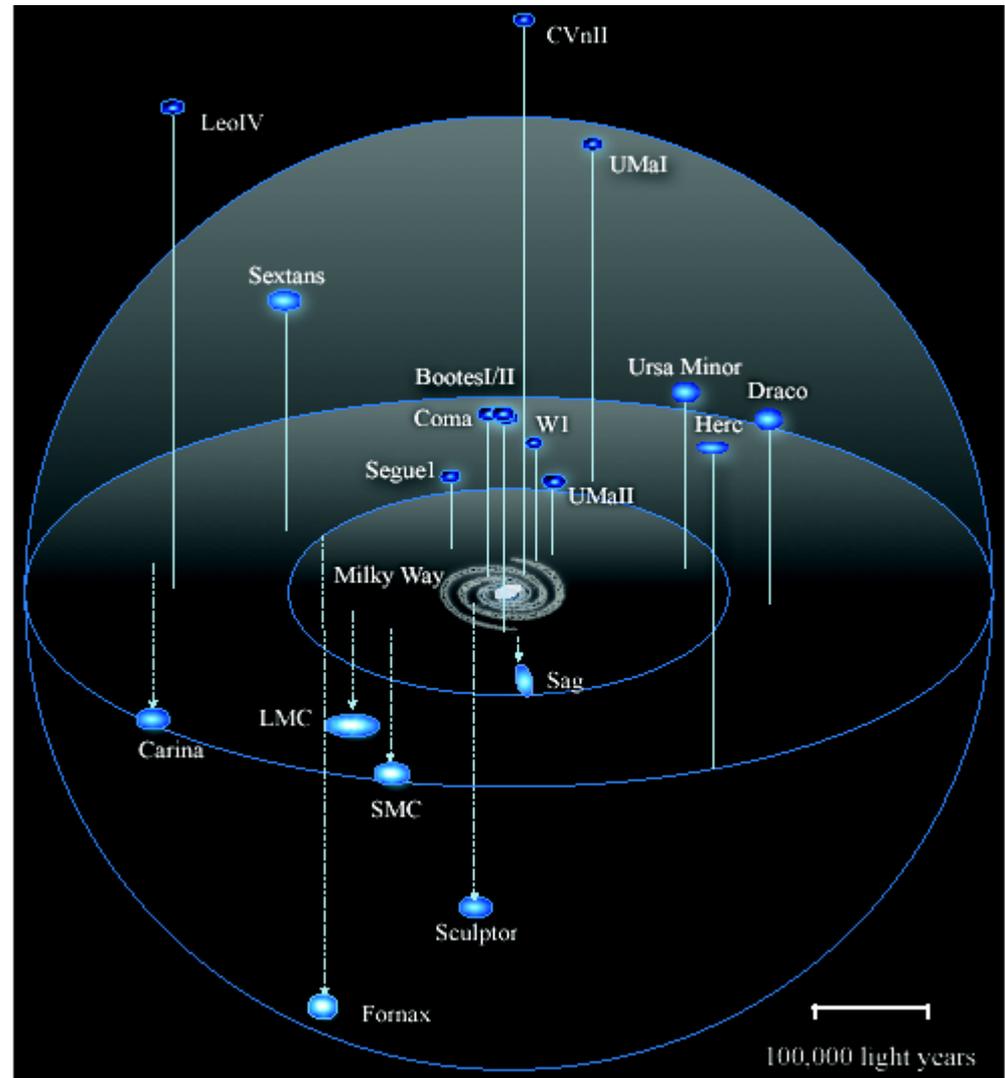


# Слишком много мелких структур (проблема спутников) (Joel Primack)

Начало 2008

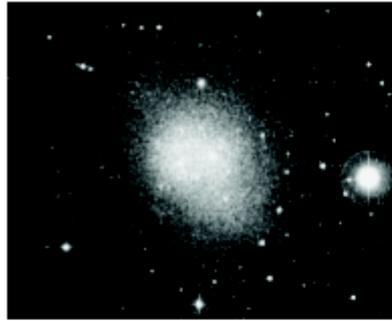
Name	Year Discovered
LMC	1519
SMC	1519
Sculptor	1937
Fornax	1938
Leo II	1950
Leo I	1950
Ursa Minor	1954
Draco	1954
Carina	1977
Sextans	1990
Sagittarius	1994
Ursa Major I	2005
Willman I	2005
Ursa Major II	2006
Bootes	2006
Canes Venatici I	2006
Canes Venatici II	2006
Coma	2006
Segue I	2006
Leo IV	2006
Hercules	2006
Leo T	2007
Bootes II	2007

23



# Слишком много мелких структур (проблема спутников) (Joel Primack)

Fornax



$L \sim 10^7 L_{\text{sun}}$

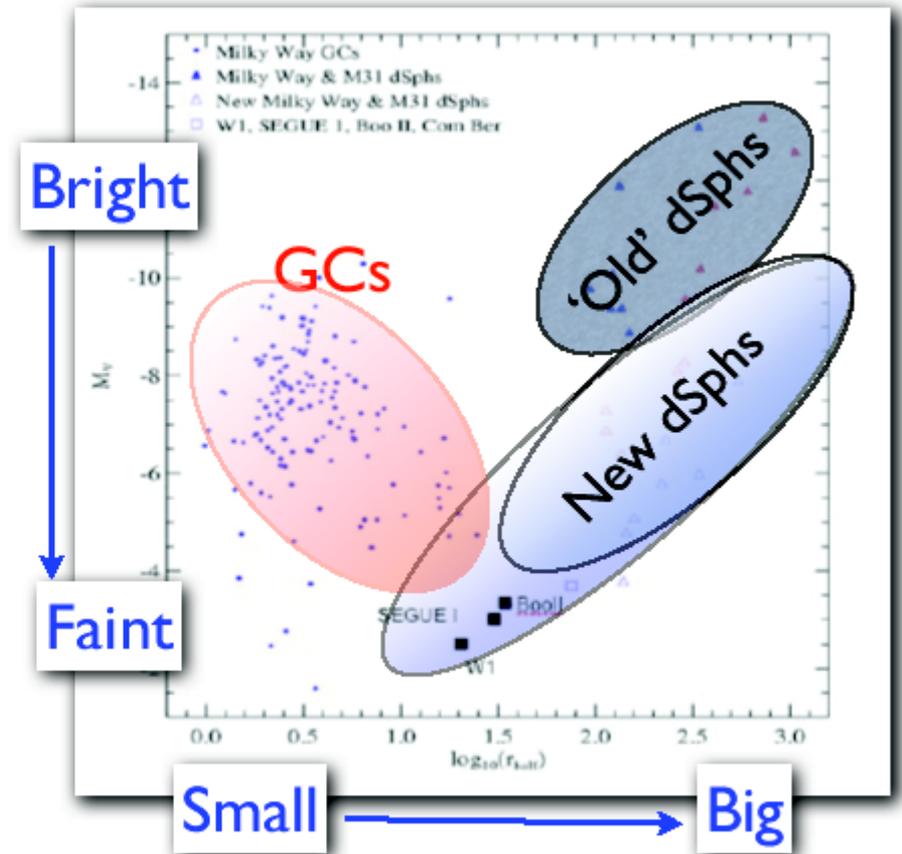
$\sim 3000 \text{ pc}$

Will I



$\sim 80 \text{ pc}$

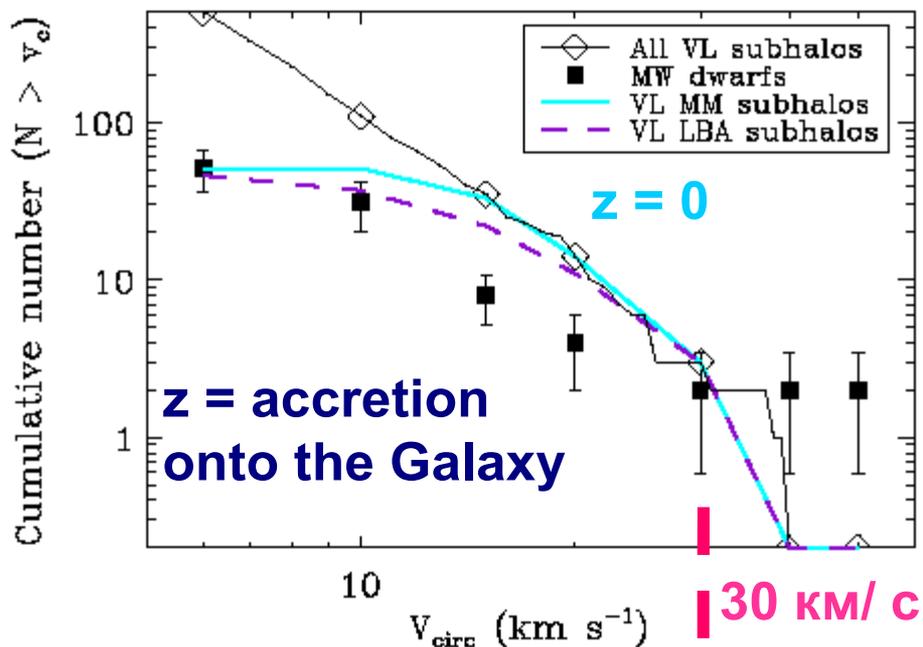
$L \sim 10^3 L_{\text{sun}}$



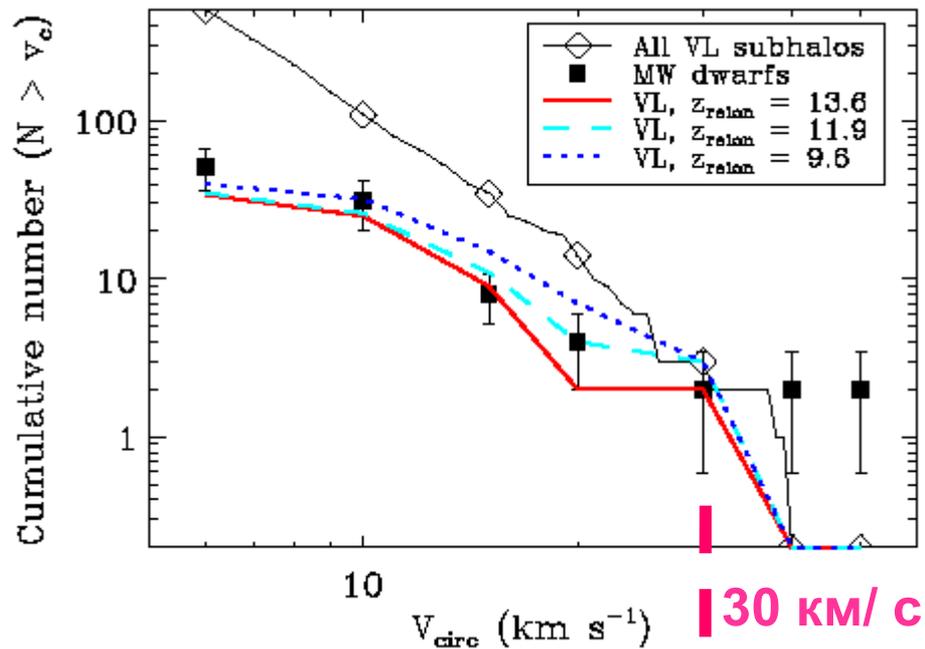
Compilation by Beth Willman.

# Слишком много мелких структур (проблема спутников)

“Проблема спутников” с динамической точки зрения – не проблема - ? (Simon & Geha, 2007)



Карликовые галактики образуются “внутри” наиболее массивных гало *Stoehr et al, 2002;*  
*Kravtsov et al. 2004*



После эпохи реионизации образование карликовых галактик подавлено

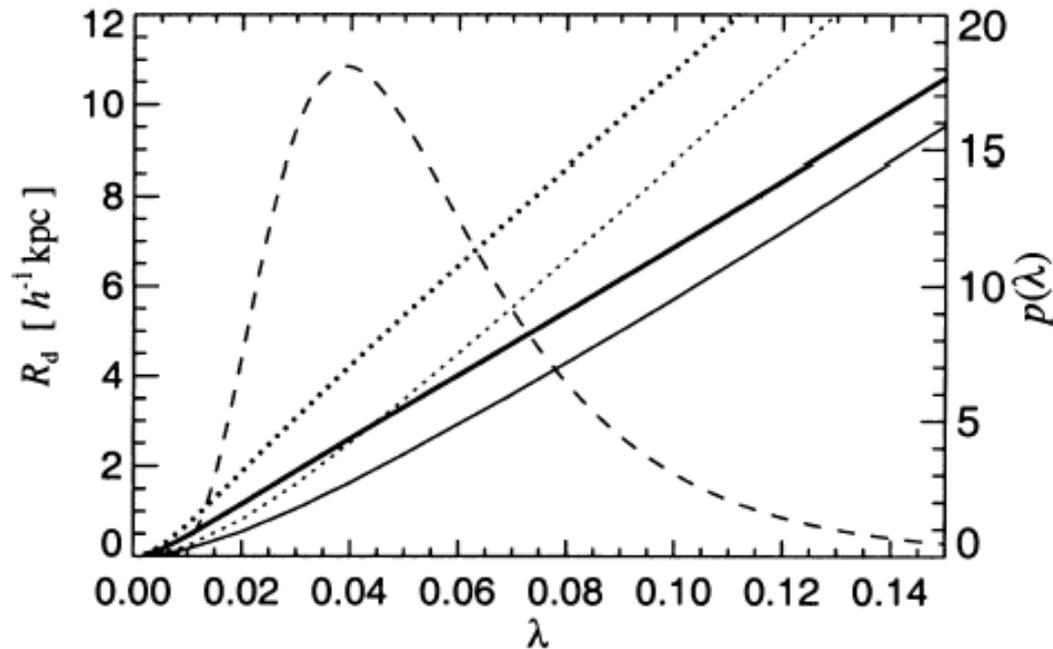
# Проблема углового момента

## Более серьезные проблемы (вытекающие из самой концепции иерархического скучивания)

- Маленькие галактики (маленькие гало) более старые объекты
- **Большие галактики с “упорядоченными” дисками должны иметь спокойную историю слияний, но темные гало без недавнего большого мерджинга имеют маленькие значения  $\lambda$  (*D’Onghia & Burkert, 2004*)**

# История слияний vs конечные свойства диска. Размеры

Почти линейная связь между  $\lambda$  и  $R_d$



## Воспроизведение

- функции светимости галактик
- соотношения размер  $R$  – светимость  $L$
- соотношения Талли-Фишера (скорость вращения  $V$  – светимость  $L$ )
- ...

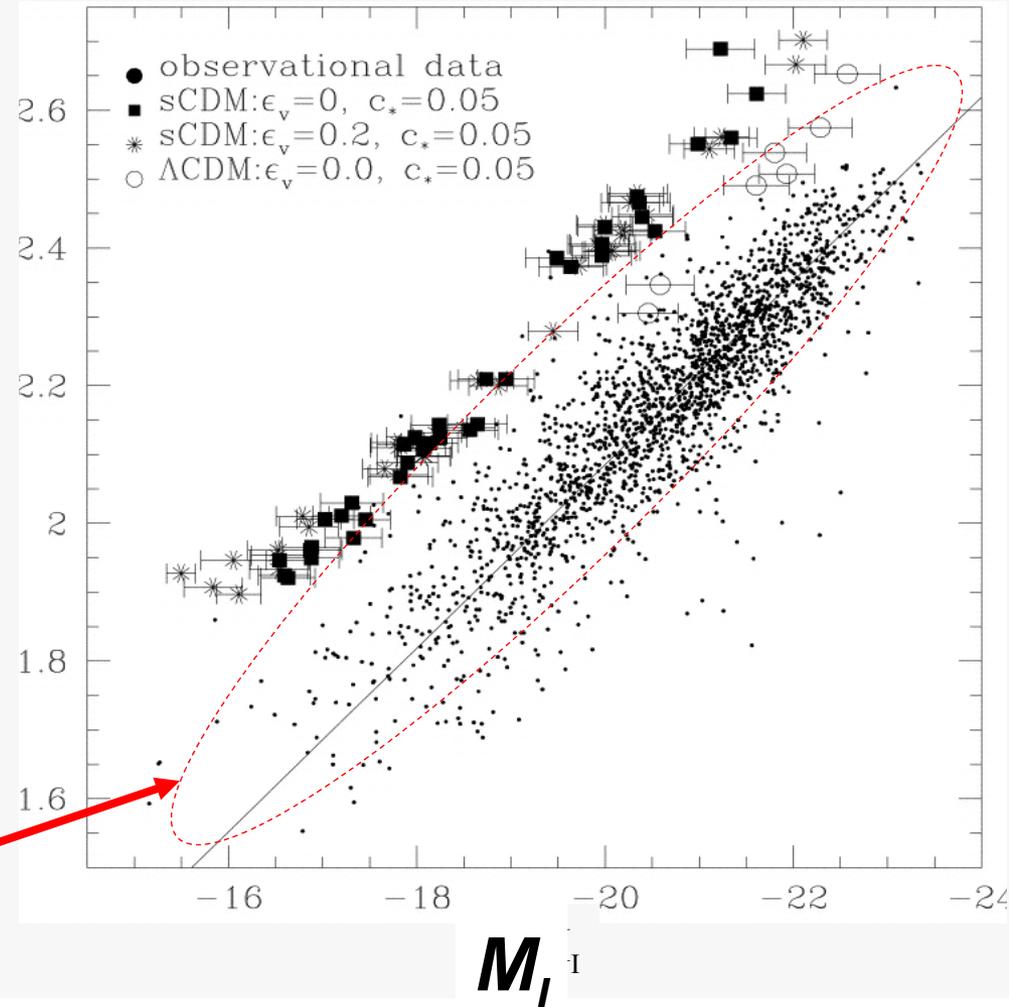
# История слияний vs конечные свойства диска. Максимальные скорости

Navarro & Steinmetz,  
2000

При данной  
светимости  
диски  
вращаются  
слишком  
быстро

$\log V_{\text{rot}}$

наблюдения



# История слияний vs конечные свойства диска

Решение проблемы “углового момента” (или нуля-пункта соотношения T-Ф)

**Разрешение численных расчетов** – пока слишком “толстые” фронты ударных волн, которые держат газ в области температур, где слишком эффективно охлаждение

**Более аккуратный “рецепт” feedback’a** – не только SN, но и образование ЧД и учет “впрыскивания” энергии от АЯГ

**Более аккуратное описание взаимодействия между гало и барионами** – облачная структура газа + постоянная аккреция холодного газа

# Проблема углового момента

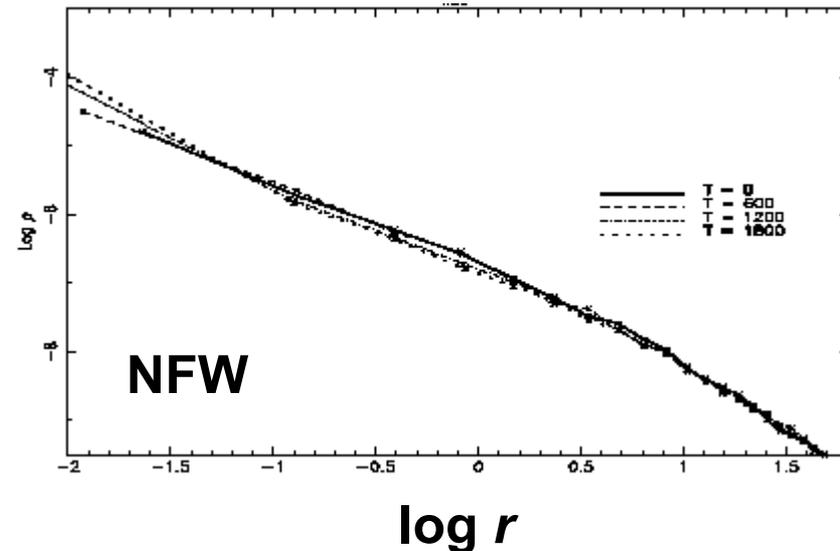
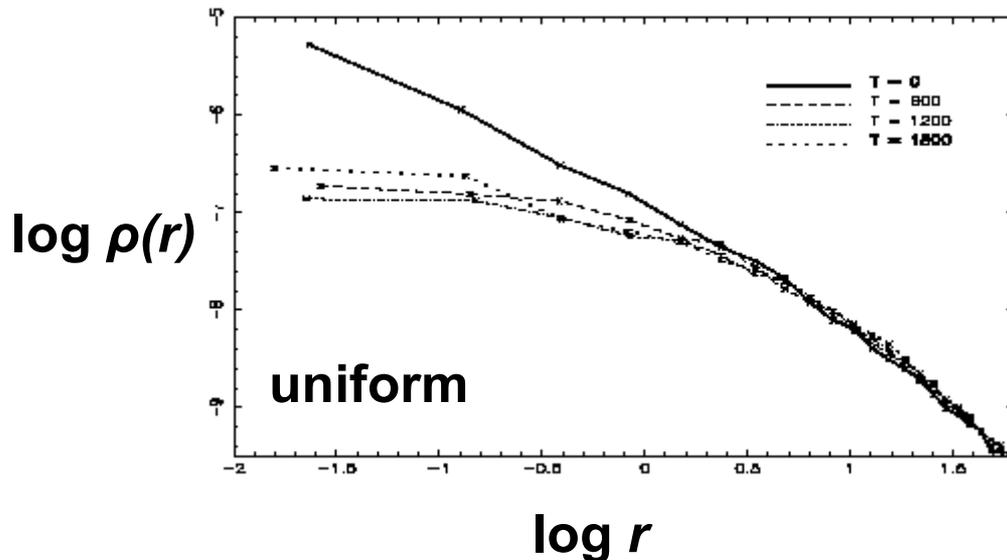
Расширение гало

Динамическое трение

Обмен угловым моментом

*El-Zant et al, 2001*

Взаимодействие гало с газовыми фрагментами



Карликовые галактики:  $10^5 - 10^6 M_{\odot}$  (размер облака)

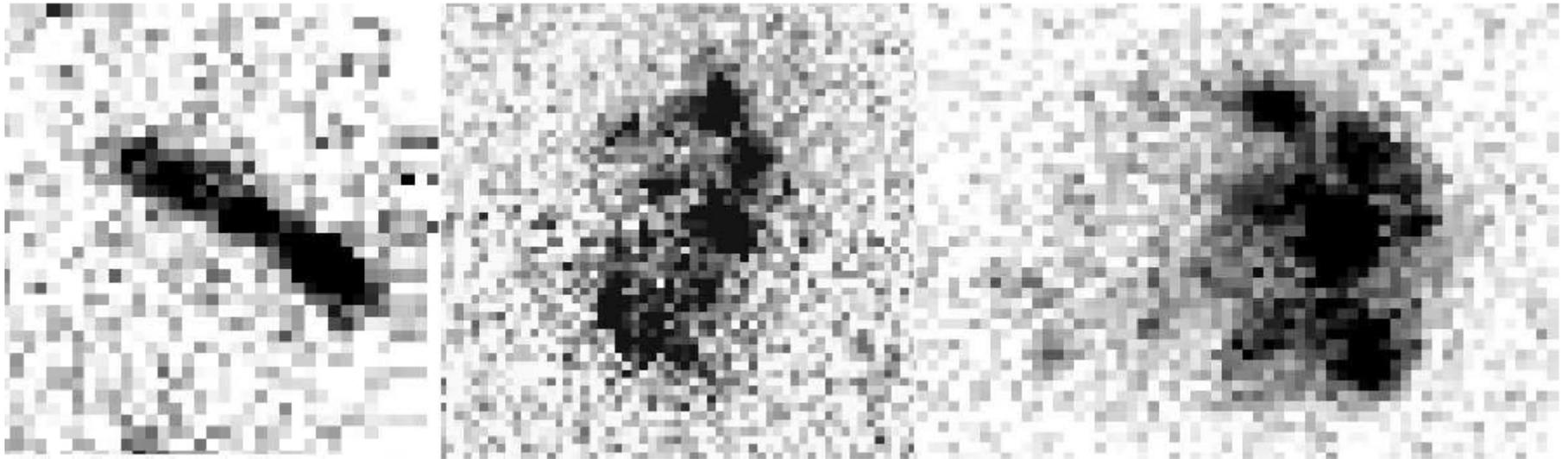
Большие галактики:  $10^8 - 10^9 M_{\odot}$  (размер облака)

# Проблема углового момента

*Elmegreen* (серия работ)

Анализ морфологии галактик на больших  $z$  (до 5)

**UDF, GEMS, GOODS fields**



**Фрагментированность**

**Масса фрагментов  $10^7 - 10^9 M_{\text{sun}}$**

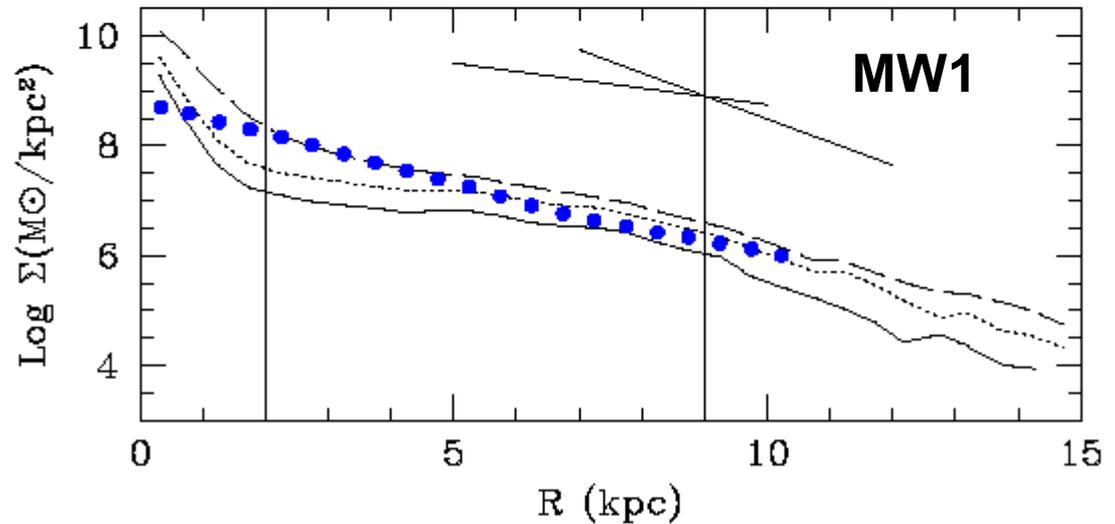
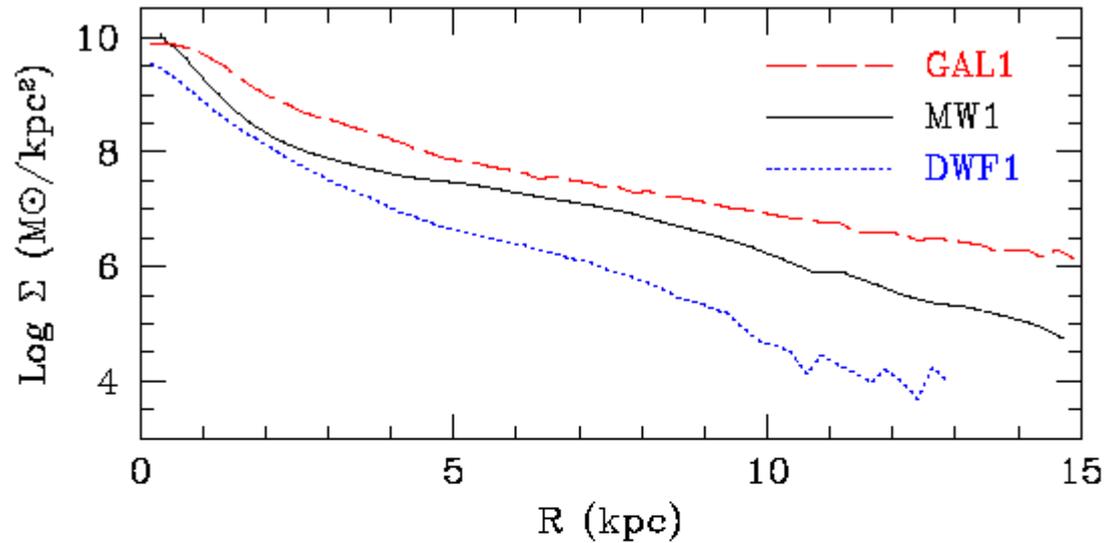
**Сборка галактики идет медленнее, чем при мерджинге уже готовых дисков внутри их гало**

# Экспоненциальные диски

*Governato et al, 2007*

Face-on профиль  
поверхностной  
плотности  
Возраст < 10 Gyrs  
(K band)

0-3 Gyrs ———  
0-4 Gyrs .....  
0-10 Gyrs - - - -  
 $z = 1.7$  ■■■■■

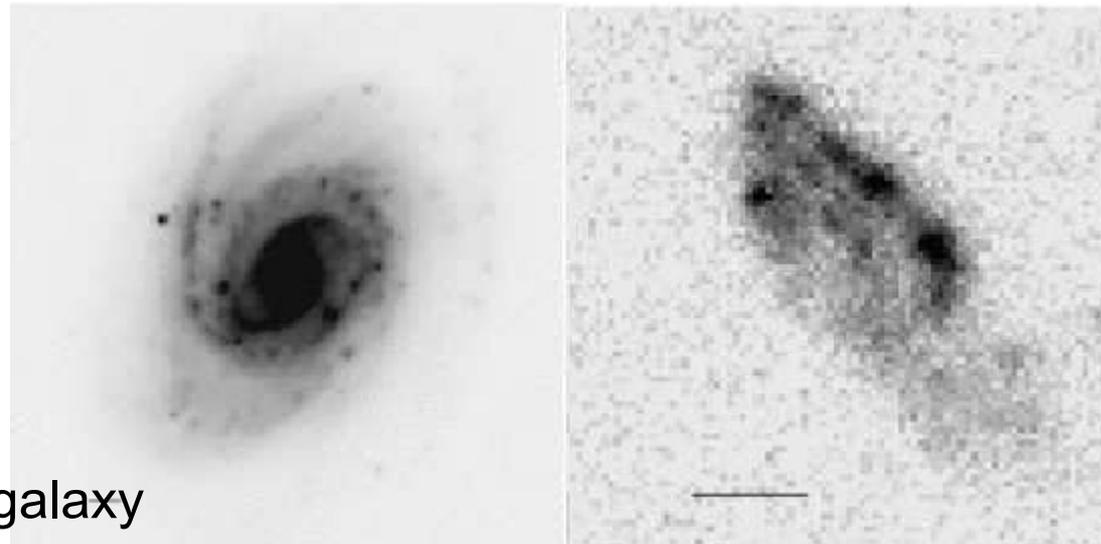
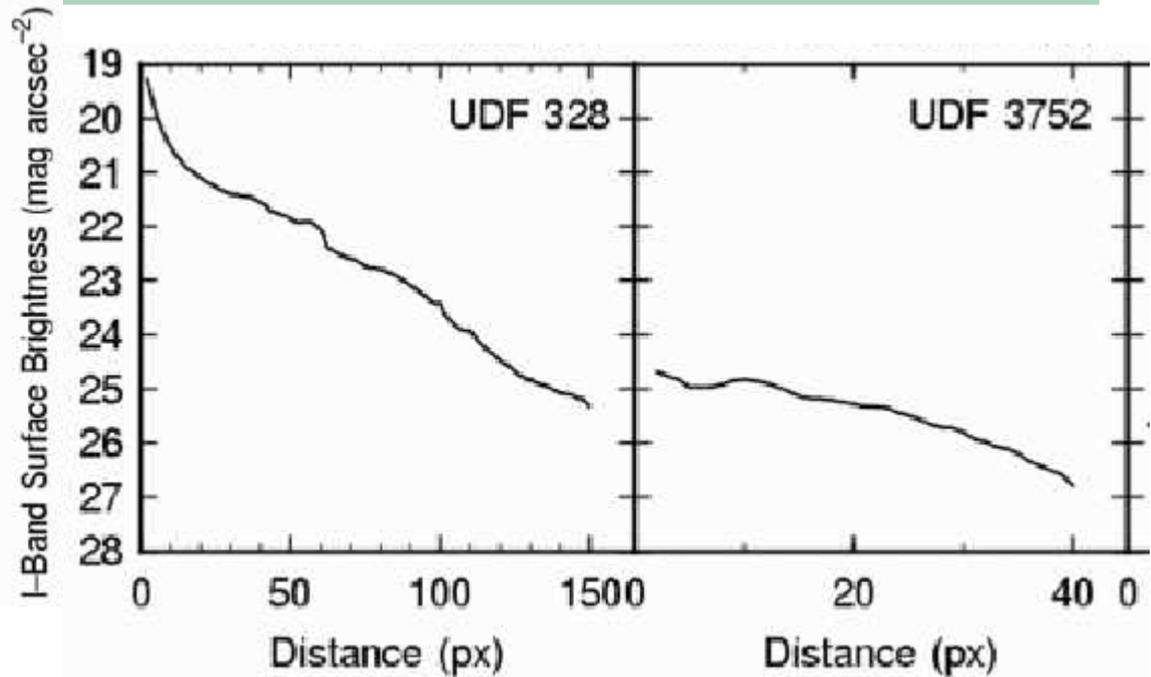


# Экспоненциальные диски

*Elmegreen et al, 2005*

## UDF clump cluster galaxies

Диск может эволюционировать к экспоненциальному по мере “диссолюции” облаков



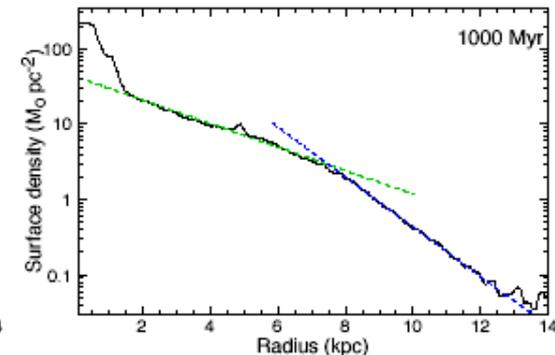
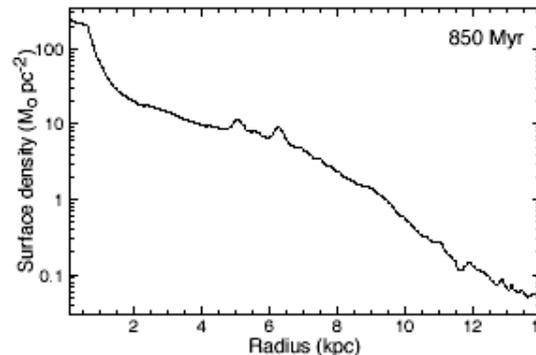
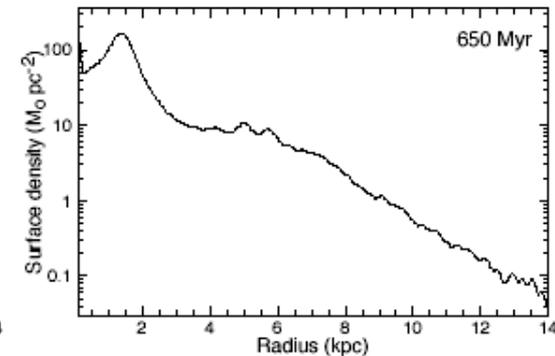
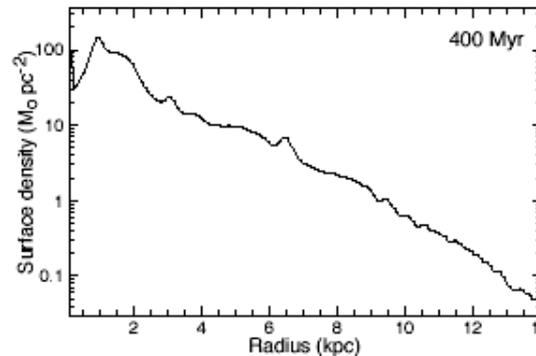
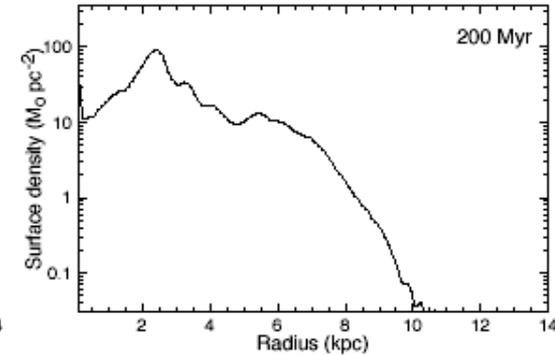
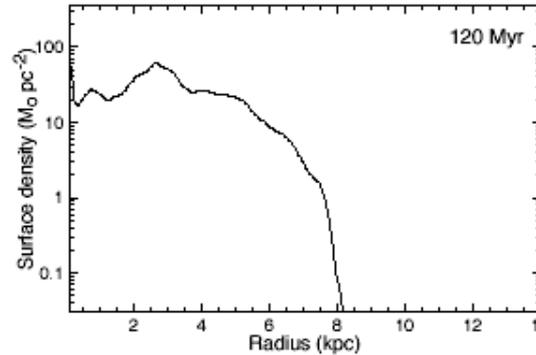
spiral galaxy

# Экспоненциальные диски

*Bournaud et al, 2008*

Гравитационно неустойчивый звездно-газовый диск с однородным распределением плотности и звездообразованием (по закону Шмидта), пройдя стадию неустойчивости, превращается в экспоненциальный

Если неустойчивость слабая, образуется спиральная галактика с профилем плотности, далеким от экспоненты



# Выводы

**$\Lambda$ CDM сценарий формирования галактик лучше других схем объясняет большую совокупность наблюдательных данных:**

- крупномасштабную структуру
- функцию светимости
- масштабные соотношения (функциональные зависимости)
- кривые вращения **во внешних областях звездных дисков**
- формирование спутников вокруг ярких галактик

**Нерешенные проблемы на галактических масштабах:**

- Слишком массивные темные гало с центральным  $cusp$ 'ом
- Предсказывается слишком большое число маломассивных гало
- Проблема углового момента

# Выводы

**Решение:** аккуратная физика барионного вещества, особенно газа

Газ не обязательно вириализован (может быть холодным)

Может находиться в далеких внешних областях галактики

Облачная структура (массивные облака)

Продолжающаяся (или поздняя) аккреция

**Динамическое трение, меньше потери углового момента, бОльшие по размеру диски, влияние на бар и гало**

**Разрушение спутников**

Feedback, включая АЯГ, с циклическим выметанием большей части газа

**Меньше потери углового момента, бОльшие по размеру диски, расширение гало**