

*XXV конференция «Актуальные проблемы
внегалактической астрономии», ПРАО 22 апреля 2008*

Проблемы темной материи и темной энергии во Вселенной

В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева

Астрокосмический Центр ФИАН

Образование Вселенной –
создание хаббловских потоков

$$v = Hr , \quad H = \dot{a} / a$$

$$H_0 = 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}, \quad H_0^{-1} = 14 \text{ млрд. лет}$$

однородность, изотропия

Образование структуры Вселенной –
разрушение хаббловских потоков

История Вселенной

- * за 14 млрд лет - две стадии инфляции
- * их могло быть больше, сходные причины
- * простейшая причина стадий инфляции --
сверхслабые массивные поля
- * инфляция создает и восстанавливает
хаббловские потоки
- * нерелятивистская темная материя
разрушает хаббловские потоки

**ТМ не взаимодействует со светом,
НО СВЕТ ТАМ, ГДЕ МАТЕРИЯ**



Где спрятана темная материя?

- * большая дисперсия скорости галактик в скоплениях (1930)
- * плоские кривые вращения спиральных галактик, стабилизация дисков (1970)
- * массы скоплений установлены (1980)
 - рентгеновский газ ($T \sim 1$ кэВ)
 - гравитационные линзы

Ответ: небарионная ТМ находится в гравитационно-связанных системах

**слабовзаимодействующие частицы,
не диссипируют как барионы**

Барионы радиационно остывают и оседают к центрам галактик, достигая вращательного равновесия

**Темная материя группируется вокруг светящегося вещества галактик в масштабе около 200 кпк
масса Местной Группы $2\div 4 \cdot 10^{12} M_{\odot}$, более половины -
в галактиках Млечный Путь и Туманность Андромеды**

Гипотезы небарионной ТМ

кандидат	масса
Гравитоны	10^{-21} эВ
Аксионы	10^{-5} эВ
Стерильные нейтрино	10 кэВ
Зеркальное вещество	1 ГэВ
Массивные частицы	100 ГэВ
Многомерие, браны	10^3 ГэВ
Сверхмассивные частицы	10^{13} ГэВ
Монополи, дефекты	10^{19} ГэВ
Первичные черные дыры	10^{-16} - 10^{-7} М

Структурный аргумент (КМС+РИ) - однозначное свидетельство ТЭ

$$\Omega_m = \rho_m / \rho_c < 0.3 \rightarrow \text{открытая модель}$$

Аргументы против – инфляция, возраст

Анизотропия РИ - плоская 3-геометрия

**Более 70% энергии Вселенной остается
нескученной $\rightarrow p \approx -p$ (темная энергия)**

**Другие аргументы - пекулярные скорости галактик,
линзирование, рентгеновский газ в скоплениях,
кривые вращений, сверхновые, интегральный SW**

Темная энергия – слабо взаимодействующая физическая субстанция, пронизывающая все пространство видимой Вселенной

ТЭ – главный элемент Стандартной Модели

Три гипотезы темной энергии : вакуум, сверхслабое поле, модификация гравитации

Если $\rho_{ТЭ} = E^4$, то $E_{ТЭ} \sim 10^{-3}$ эВ

Новый энергетический масштаб ?

Да - если вакуум

Нет - если сверхслабое поле или модификация гравитации

Проблема совпадений: $\rho_{ТЭ} \approx \rho_{ТМ} \approx \rho_b$

Масштабы фундаментальных взаимодействий

1 ГэВ

сильное

100 ГэВ

электрослабое

10^{19} ГэВ

гравитационное

Факт существования крупномасштабной структуры Вселенной является ключевым с точки зрения *проблемы совпадений*

$$\Omega_r \ll \Omega_m, \quad \Omega_{TЭ} \leq \Omega_m$$

- *окно гравитационной неустойчивости (+ начальная амплитуда возмущений)*

$$\Omega_r \ll \Omega_b \leq \Omega_{TM}$$

- *условие образования звезд*

TЭ прекращает генерацию структуры и восстанавливает хаббловские потоки

$$w \equiv \frac{\rho_{TЭ}}{\rho_{TЭ}} = -1 + c_0 + c_1\alpha + \frac{1}{2}c_2\alpha^2 + \dots$$

$$\alpha \equiv a - 1 = -\frac{z}{1+z}$$

c_n ($n = 0, 1, 2, \dots$) – физическая модель ТЭ

Как измерить коэффициенты c_n ?

Ключ к определению природы ТЭ
-точные статистические измерения
темпа генерации крупномасштабной
структуры видимой Вселенной

Неоднородная Вселенная

обобщенное уравнение Фридмана

$$\left(\frac{\dot{b}}{b} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \rho - \frac{K}{b^2}$$

$b = b(t, \mathbf{x})$ - фактор объемного расширения

$H_{\text{eff}}(t, \mathbf{x}) \equiv \frac{\dot{b}}{b}$ - эффективная функция Хаббла

$\rho = \frac{\rho_0}{b^3} + \rho_1$ - сопутствующая плотность материи
- плотность темной энергии

$K = K(\mathbf{x})$ **локальная кривизна пространства**
(произвольная малая функция \mathbf{x})

Геометрия неоднородной Вселенной

$$ds^2 = dt^2 - a^2 (\delta_{ik} - 2g \cdot q_{,ik}) dx^i dx^k$$

$\dot{a} = a(1 - q)$ - эффективный масштабный фактор

$q(x)$ - безразмерный гравитационный потенциал

$\kappa = \Delta q(x)$ - амплитуда скалярных возмущений

$$\delta V_i = \frac{\partial}{\partial t} \delta r_i = H_{ik} \delta r^k, \quad H_{ik} = H(\delta_{ik} - h \cdot q_{,ik})$$

Уравнение Фридмана в безразмерных переменных

$$\left(\frac{\dot{b}}{H_1} \right)^2 = \frac{c}{b} + b^2 - \kappa \equiv f^2(b) - \kappa(\vec{x}) \rightarrow$$

$$H_1 = H_0 \sqrt{\Omega_{TЭ}} \cong 2 \cdot 10^{-4} \text{ Мпк}^{-1}, \quad c \equiv \frac{\Omega_m}{\Omega_{TЭ}} \cong 0.39$$

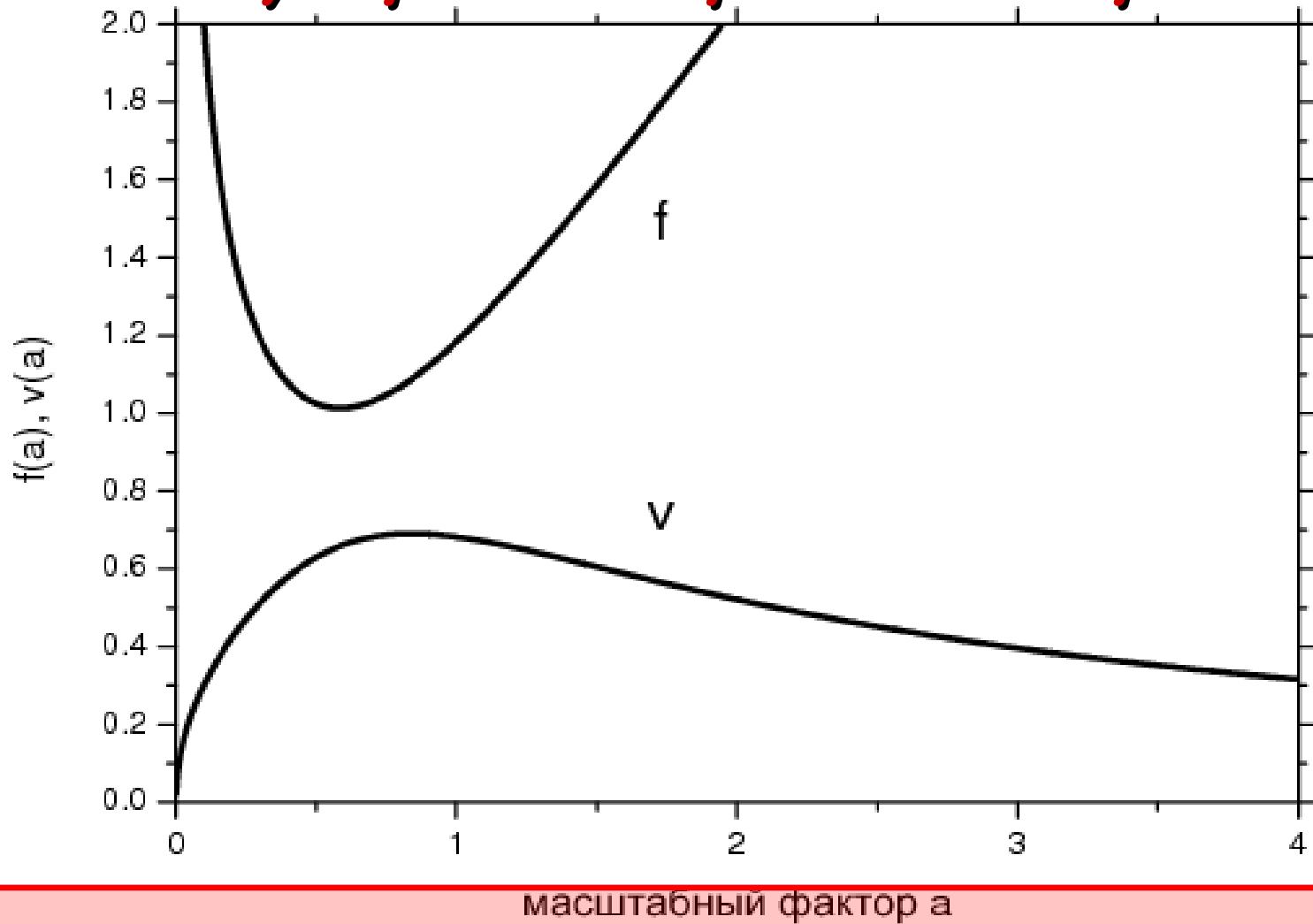
↑
константа
Хаббла TЭ

$$f(b) = \left(\frac{c}{b} + b^2 \right)^{1/2} \geq 1$$

минимум $f_{min} = 1$ достигается при $b_{min}^{-1} = 1.7$

Области пространства $\kappa(\vec{x}) < 1$ всегда расширяются

Динамика роста хаббловской и пекулярной скорости материи



$$V = V_H - v_{pec}, \quad V_H = f \cdot H_1 x, \quad v_{pec}^i = v \cdot H_1 q_i$$

Решение уравнения Фридмана

при $\kappa = 0$: $b = a(t) \equiv \frac{1}{1+z}$, $H \equiv \frac{\dot{a}}{a} = H_1 \frac{f(a)}{a}$

$f(a)$ - фактор роста хаббловских скоростей

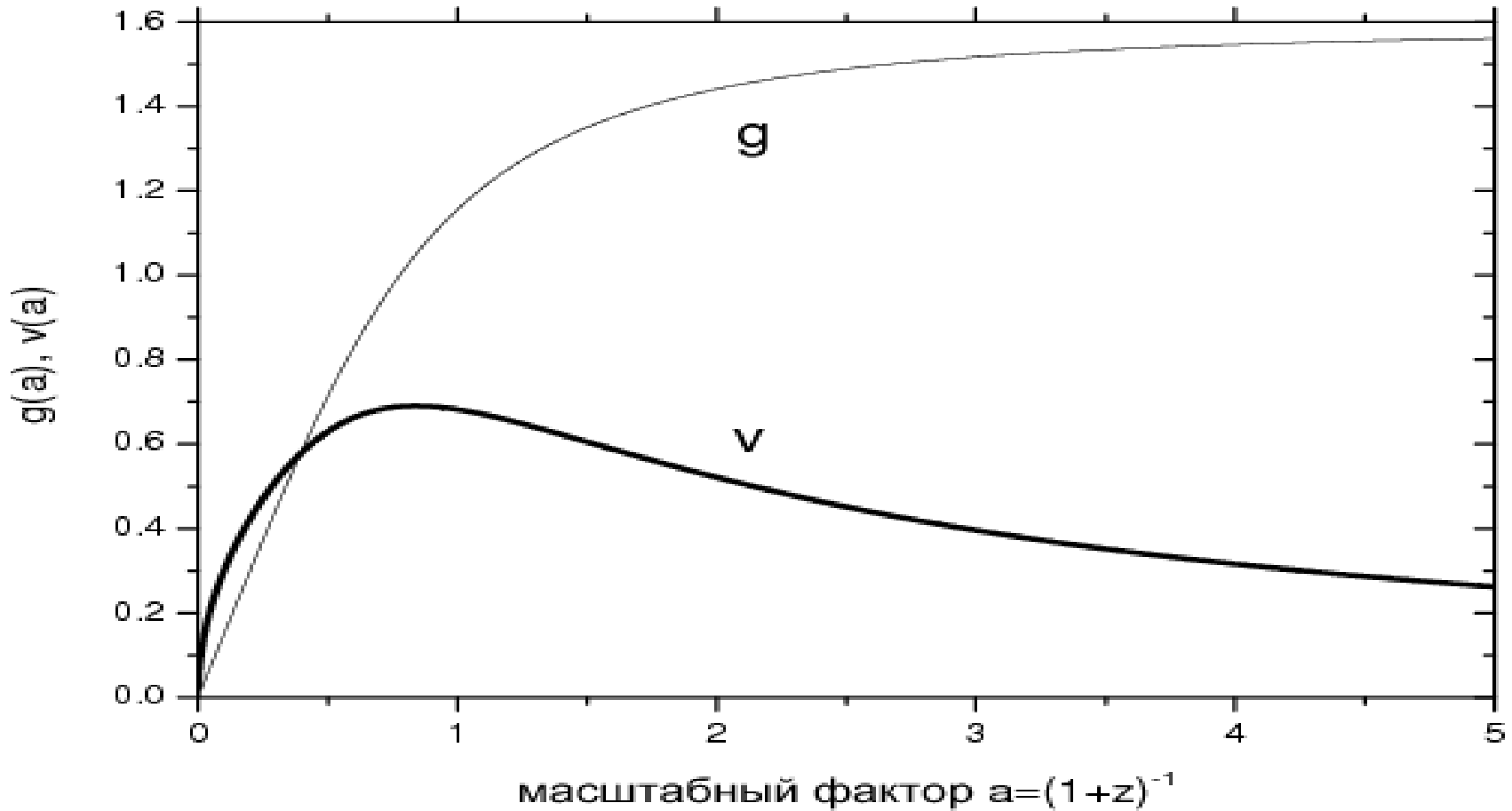
$$V = V_H - v_{\text{pec}}, \quad V_H = f \cdot H_1 x$$

при $\kappa \neq 0$: $b = a \left(1 - \frac{1}{3} \mathbf{g} \cdot \boldsymbol{\kappa}(\mathbf{x}) \right)$,

$$H_{\text{eff}} \equiv \frac{\dot{b}}{b} = H \left(1 - \frac{1}{3} \mathbf{h} \cdot \boldsymbol{\kappa}(\mathbf{x}) \right), \quad \mathbf{h} \equiv \frac{\mathbf{v}}{f} = \frac{\dot{\mathbf{g}}}{H}$$

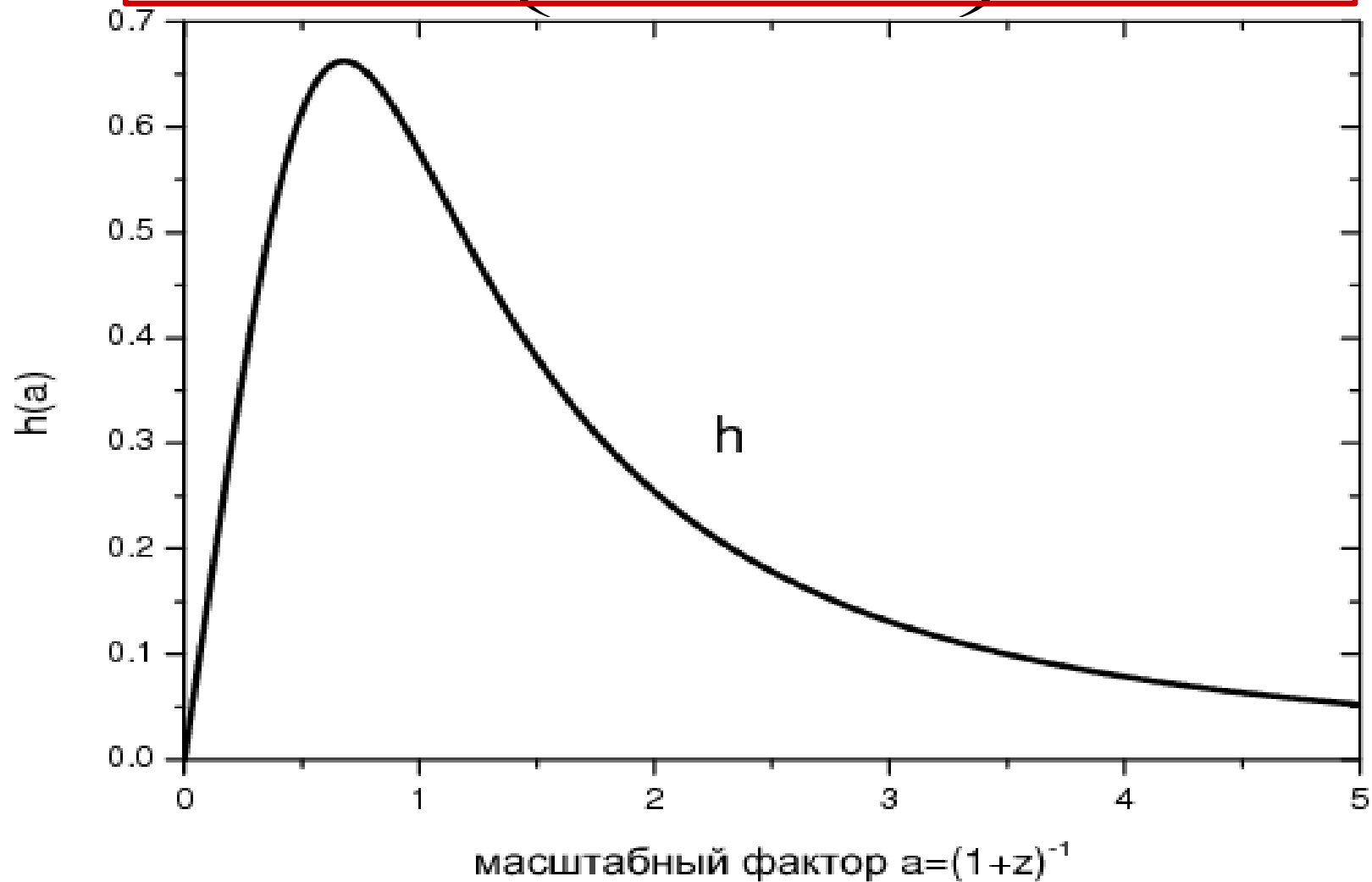
Возмущение плотности и пекулярная скорость

$$\delta_m = g \cdot \kappa(x) \quad , \quad v_{pec}^i = v \cdot H_1 q_{,i}$$



***Мы находимся в максимуме генерации структуры
Скорость упадет вдвое лишь через 20 млрд. лет***

$$H_{\text{eff}} = H \left(1 - \frac{1}{3} h \cdot \kappa(\vec{x}) \right), \quad h \equiv \frac{v}{f}$$



Период $h/h_{\text{max}} > 0.5$ длится от 0.6 до 22 млрд лет

Что же измерил Э. Хаббл ?

Парные скорости галактик поля в областях пространства $\kappa(x) < 1$ в масштабах < 15 Мпк (корреляционная длина пекулярной скорости)

– **регулярные анизотропные течения**

$$\delta V_i = \frac{\partial}{\partial t} \delta r_i = H_{ik} \delta r^k, \quad H_{ik} = H(\delta_{ik} - h \cdot q_{,ik})$$

Пекулярные скорости материи, а также случайные отклонения от регулярных и коррелированных средних скоростей, возрастают с масштабом и достигают максимальных значений при $r \sim 15-40$ Мпк

Где разрушаются хаббловские потоки?

**Нарушение однородности происходит
в разных местах в разное время**

Масштаб неоднородности сегодня 15 Мпк

**Предельный масштаб неоднородности 25 Мпк
(если ТЭ сохранит и в будущем свойства вакуума)**

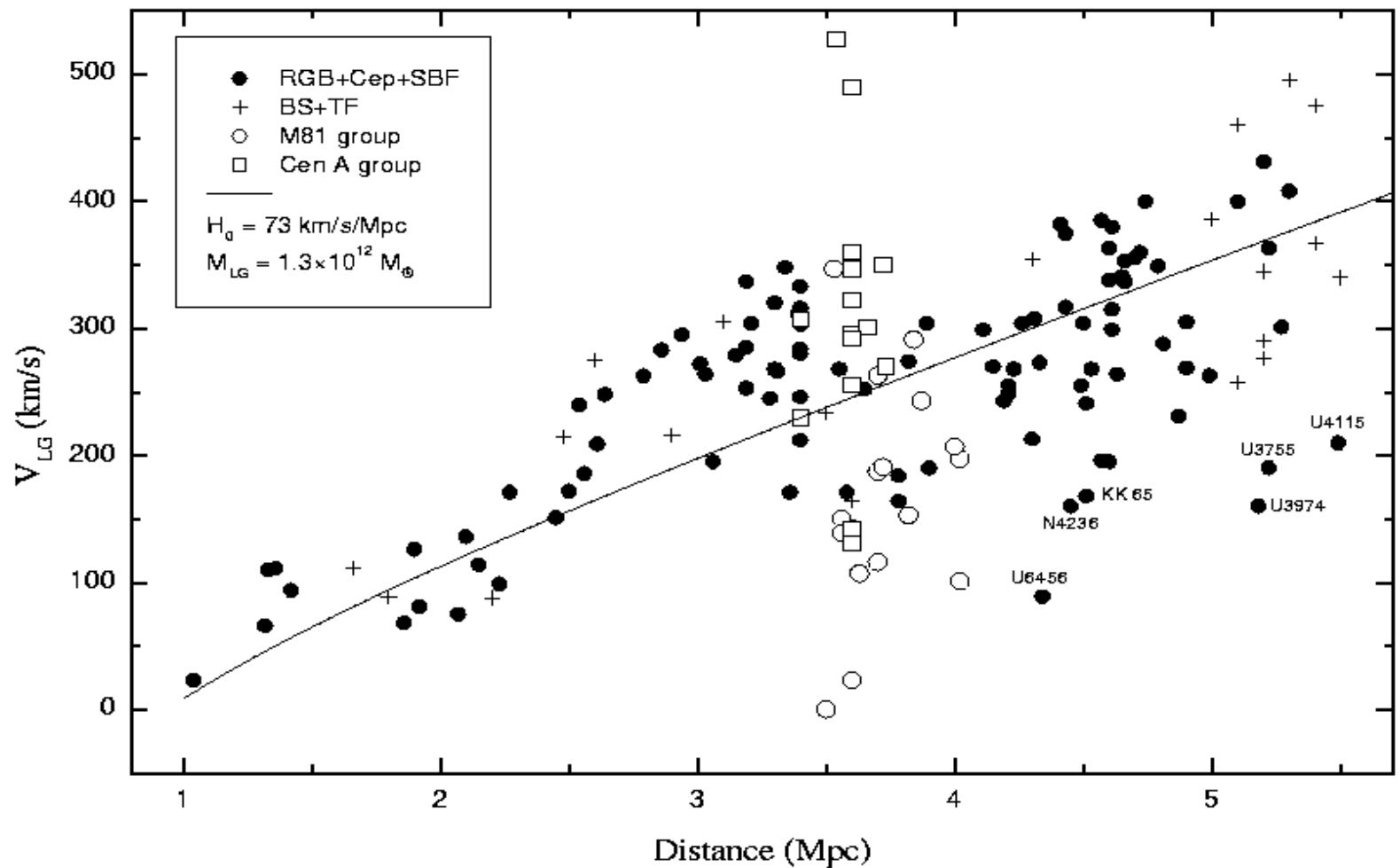
В районе Местной Группы м. неод. ~2(3) Мпк

**На расстоянии 3-4 Мпк от барицентра МГ
отклонения от средней скорости ~ 40 км/с**

Полная пекулярная скорость МГ = 600 км/с

156 ближайших галактик

радиальная скорость



Главные значения $H_{ik} = \text{diag} (81, 62, 48) \text{ км/с/Мпк}$

A deep space photograph of a galaxy cluster, likely the Coma Cluster, showing numerous galaxies of various shapes and sizes, including spiral and elliptical forms, set against a dark background filled with stars. The word 'ВЫВОДЫ' is overlaid in the lower center in a bold, yellow, sans-serif font.

ВЫВОДЫ

**Современная эпоха - это эра максимальных
пекулярных скоростей. Она будет длиться
еще космологическое время; скорости вдвое
упадут, когда Вселенной будет 35 млрд. лет**

**Мы находимся на стадии максимального
искажения хаббловского закона расширения
Восстановление хаббловских течений
произойдет через десяток миллиардов лет**

**ТЭ кардинально влияет на
динамику развития структуры**

**Крупномасштабная структура Вселенной
– ключ к определению свойств ТЭ**

Формирование крупномасштабной структуры в нашей Вселенной происходит от 1 до 22 миллиардов лет с момента Большого Взрыва

Мы находимся в периоде максимальной генерации структуры во Вселенной !

Грех не использовать такой шанс:

Мы можем измерить ТЭ, взвешивая количество структуры при разных z

***Определение параметров ТЭ –
это прецизионная космология***

Обзорные измерения структуры