Космологические ограничения на массу нейтрино

<u>А.М. Малиновский (АКЦ ФИАН)</u>

В.Н. Лукаш, Е.В. Михеева (АКЦ ФИАН),

А.А. Воеводкин, А.А. Вихлинин (ИКИ РАН)

Нейтрино в теории

- Предсказание – Паули, 1930.
- Три сорта нейтрино, соответствующие трем поколениям лептонов .
- Электронное, мюонное и тау-нейтрино.
- В рамках Стандартной Модели элементарных частиц массы не имеют.
- В случае наличия массы – возможность перехода нейтрино одного сорта в нейтрино другого сорта (Понтекорво, 1957 г.).

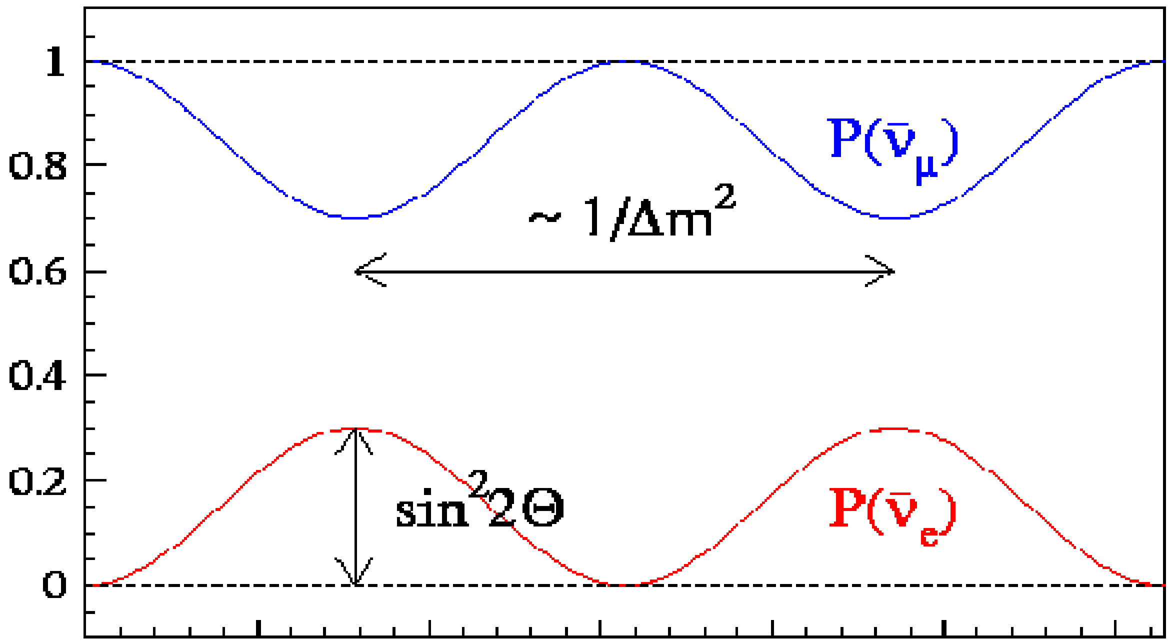
Нейтринные осцилляции

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

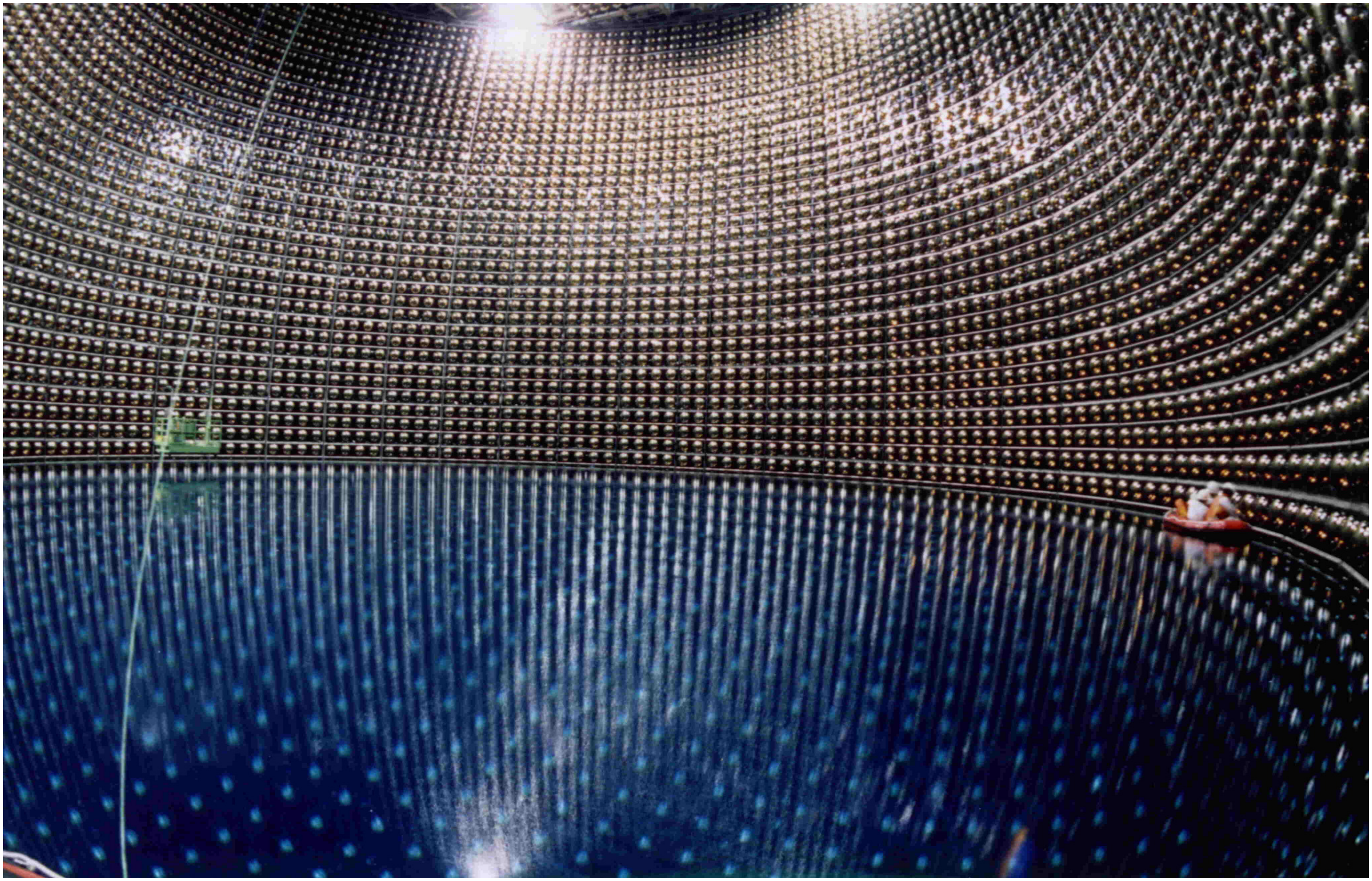
$$P_{\nu_e \nu_\mu}(x) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2\left(1.267 \frac{\Delta m^2}{E} \cdot x\right)$$

$$\Delta m^2 = |m_1^2 - m_2^2|$$

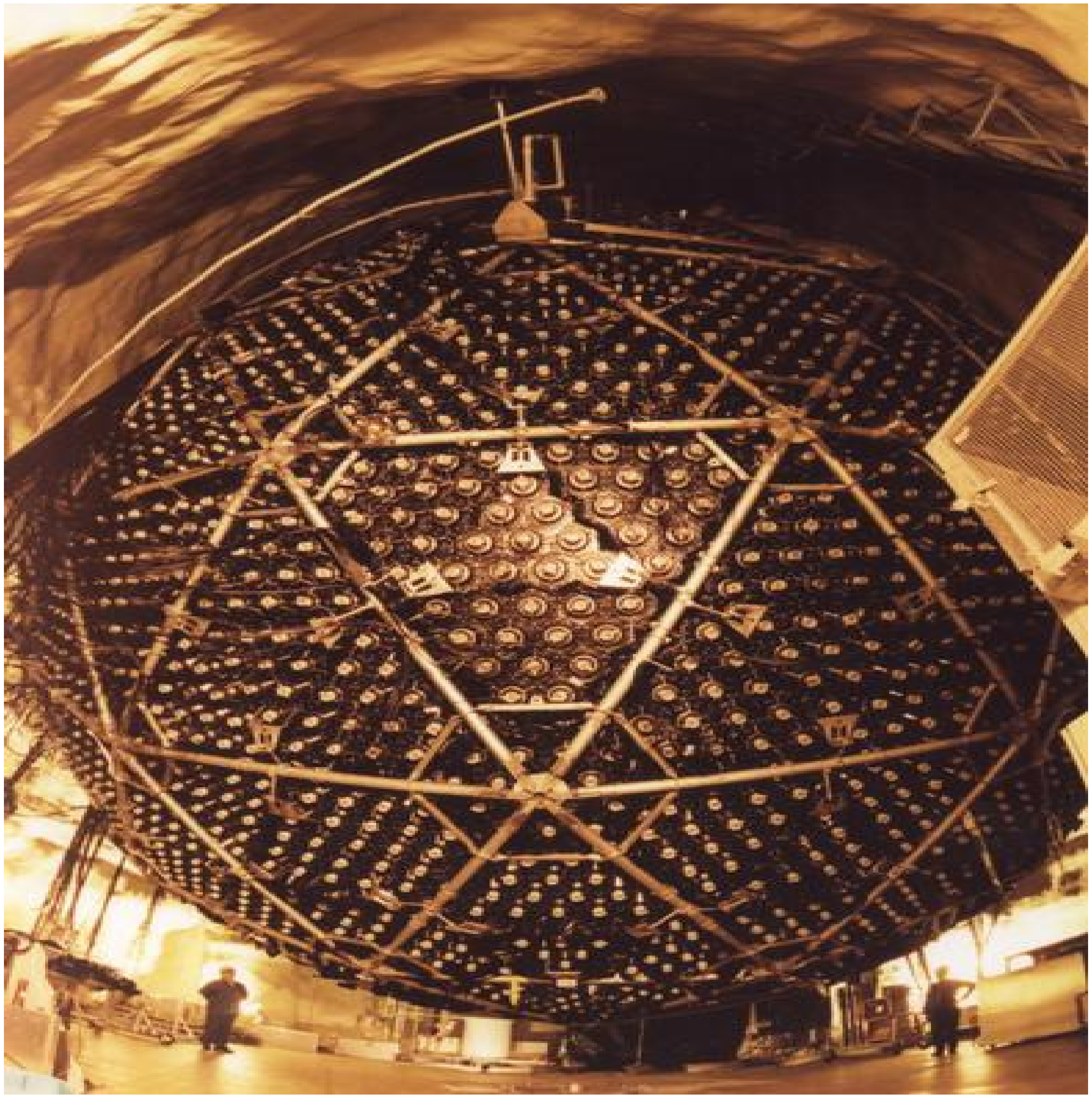
x – расстояние до источника, [м]
E – энергия нейтрино, [МэВ]



Супер-Камиоканде (Япония)



SNO (Содбери, Канада)



Проблема шкалы масс

- $(m_1{}^2, m_2{}^2, m_3{}^2) = m_0{}^2 + (-\delta m^2/2, +\delta m^2/2, \pm\Delta m^2)$
- По последним данным:

  $\delta m^2 = 7.65 \cdot 10^{-5}$ эВ^2

  $\Delta m^2 = 2.4 \cdot 10^{-3}$ эВ^2
- Знаки "+" и "-" определяют нормальную ($m_3 > m_2 > m_1$) и обратную ($m_2 > m_1 > m_3$) иерархию, соответственно
- Главное – неизвестна величина абсолютной массы m_0

Космологические нейтрино

Температура разделения: $T_{dec} \approx 1 МэВ$

Температура сегодня: $T_\nu = \left(\frac{4}{11}\right)^{1/3} T_\gamma \approx 1.945 K$

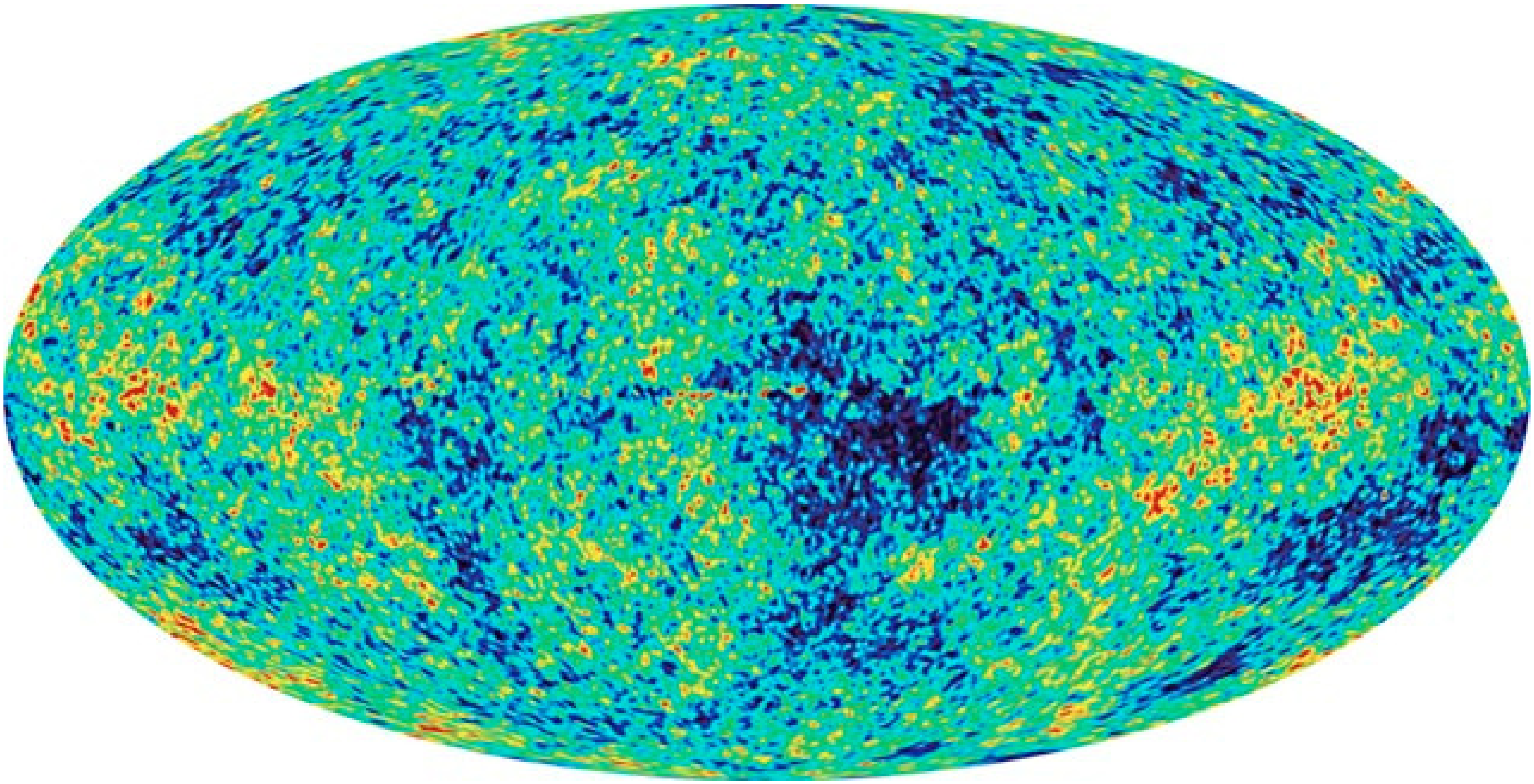
Плотность числа частиц :

$$n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = \frac{6}{11} \frac{\varsigma(3)}{\pi^2} T_\gamma^3 \approx 113\, см^{-3}$$

Вклад в общую плотность Вселенной:

$$\boxed{\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} = \frac{n_\nu m_\nu}{\rho_c} \quad \rightarrow \quad \Omega_\nu h^2 \cong \frac{\Sigma m_\nu}{94\ эВ}}$$

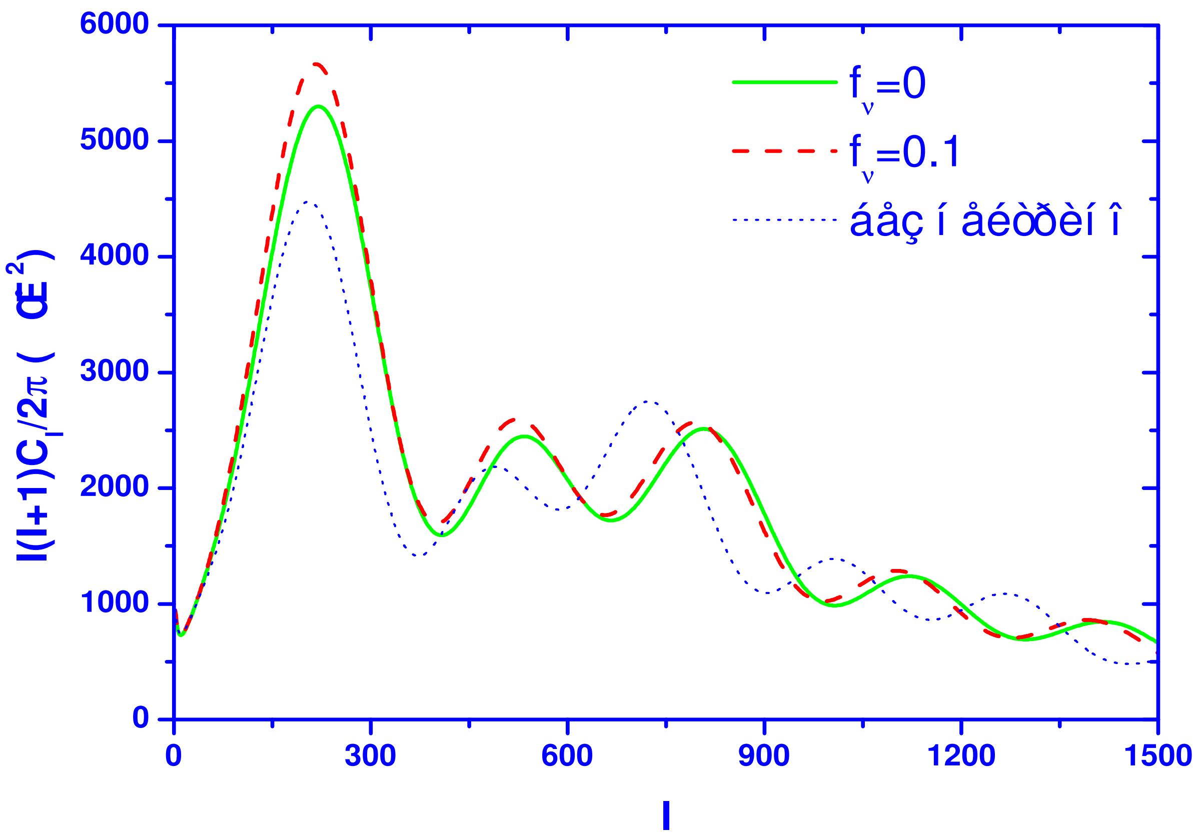
Реликтовое излучение



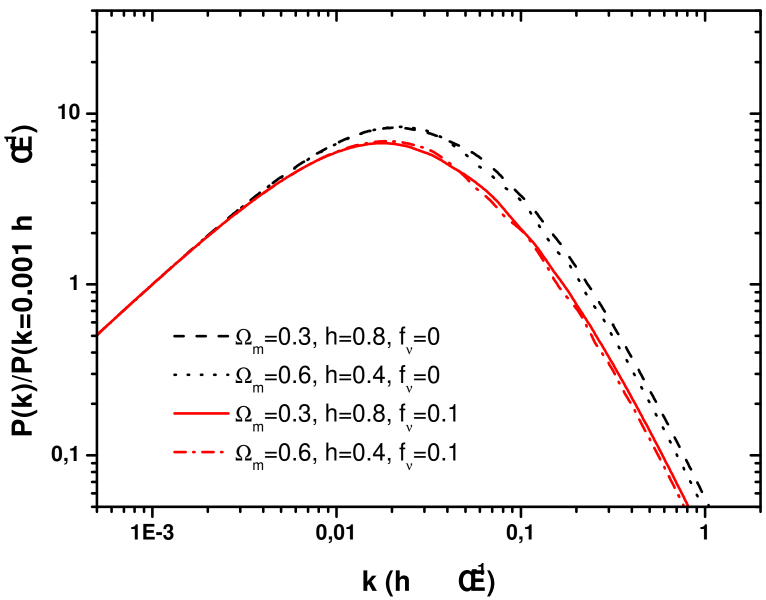
Влияние массивных нейтрино (реликтовое излучение)

- В случае нейтрино малой массы ($\sum m_\nu < 1.5$ эВ) – главным образом, на фоновую эволюцию
- Так, в случае фиксированной кривизны и постоянного вклада Λ–члена – запоздание момента перехода от радиационно-доминированной эры к стадии преобладания вещества
- Как следствие – рост высоты акустических пиков, особенно первого, и их сдвиг влево, в сторону меньших l

Влияние массивных нейтрино (реликтовое излучение)



Снятие вырождений



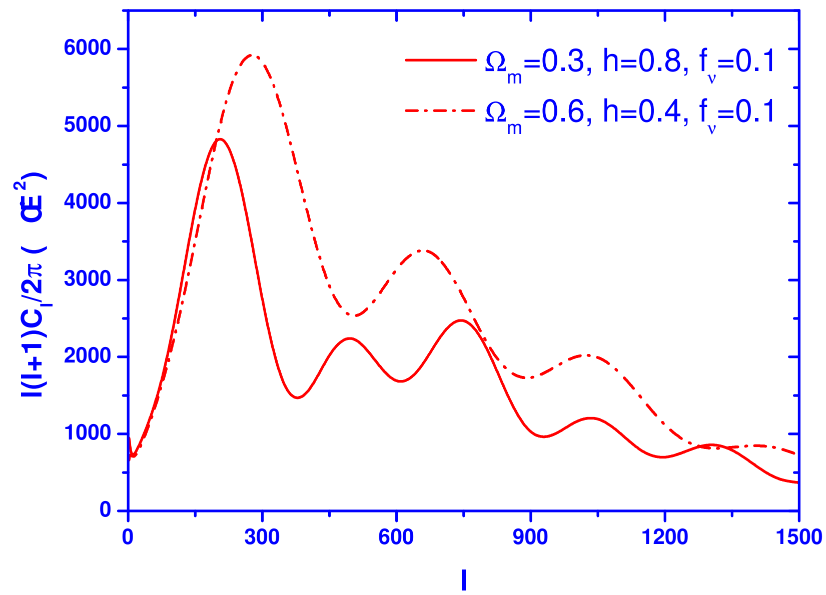
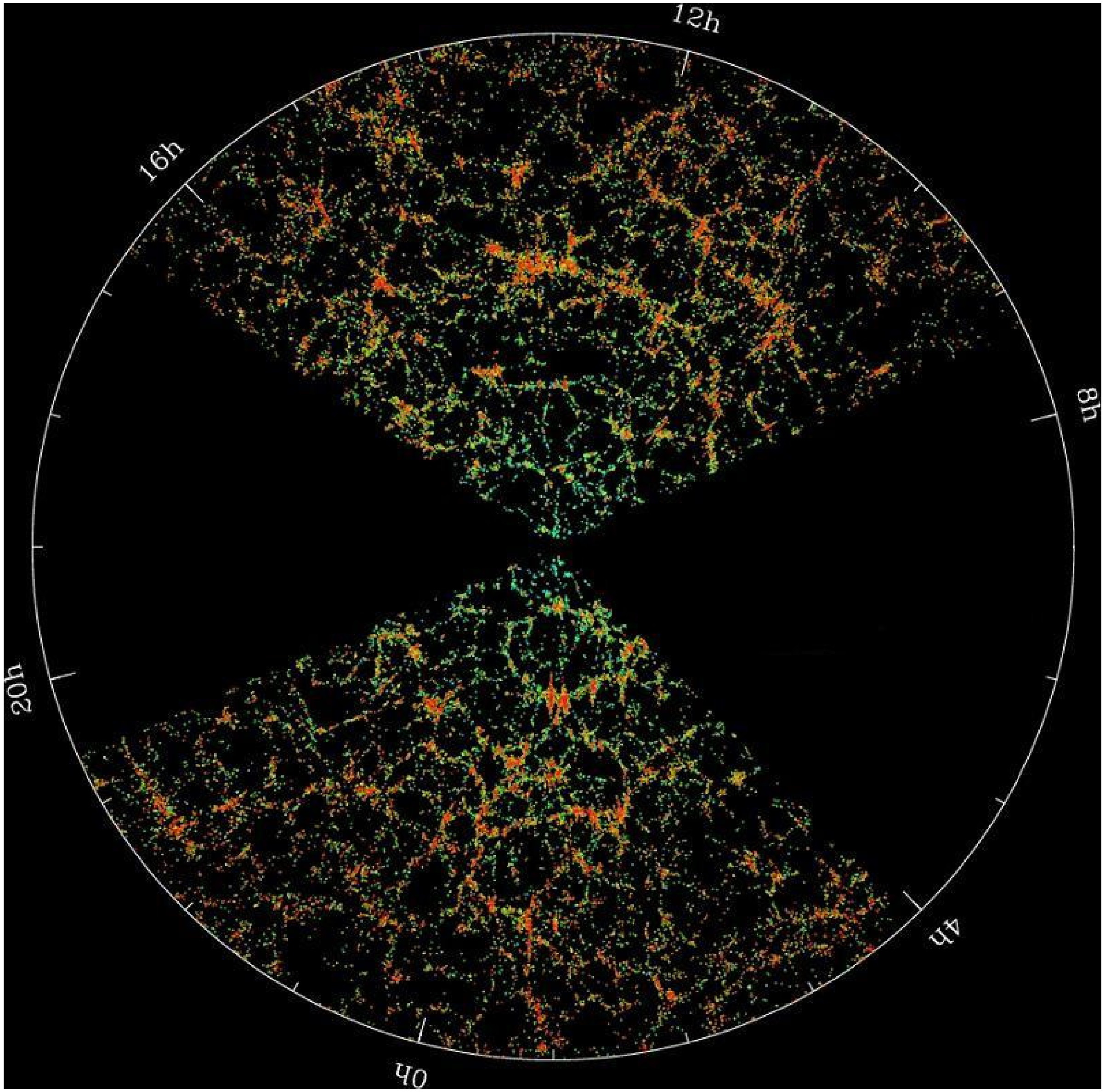


Рис 1. Спектр мощности возмущений плотности. Черные линии – модели без массивных нейтрино (**$\Omega_m = 0.3$, $h = 0.8$ и $\Omega_m = 0.6$, $h = 0.4$**), красные – аналогичные с массивными, **$f_\nu = 0.1$**.

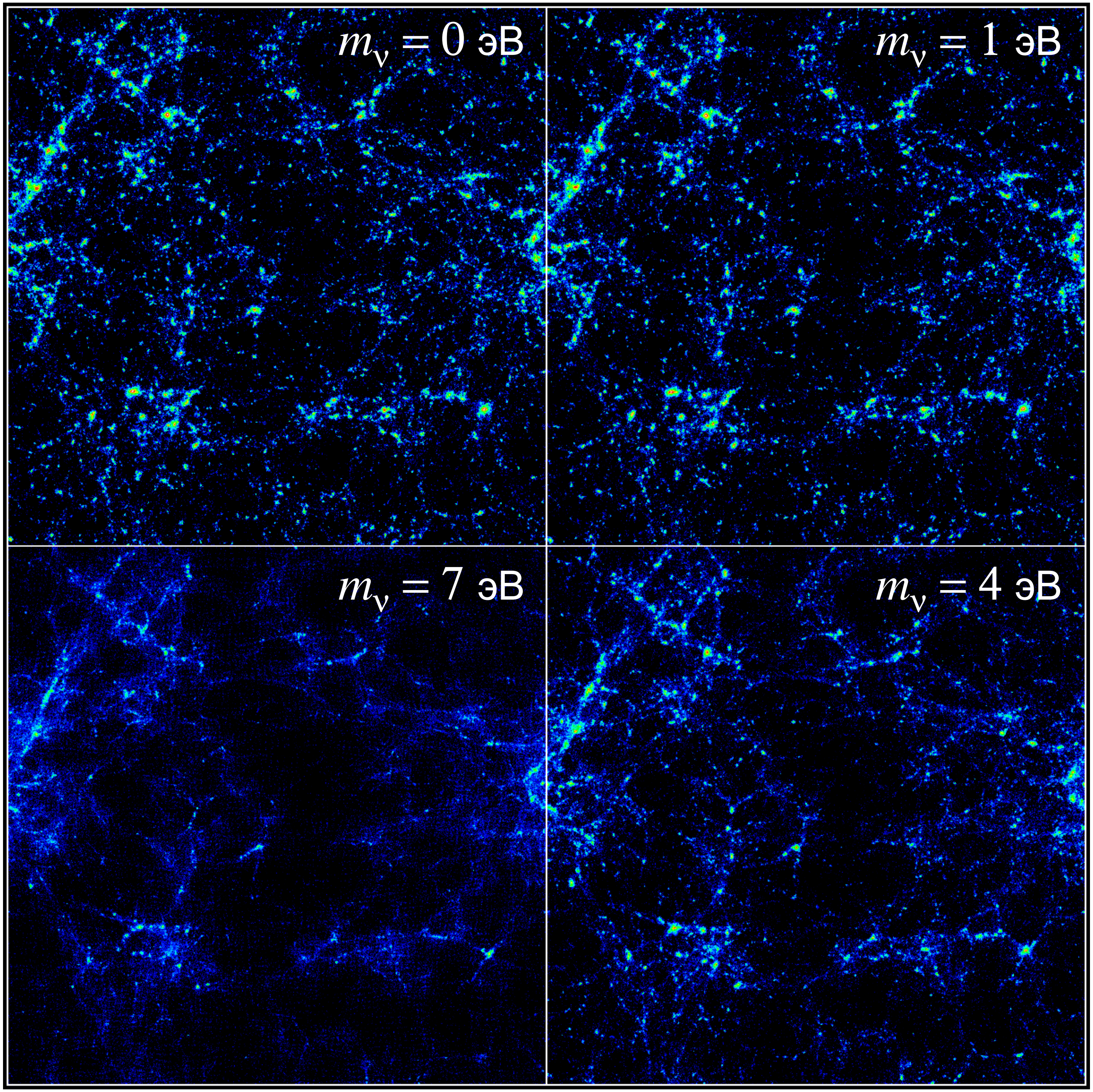
Рис 2. Спектр мощности реликтового излучения. Модели с массивными нейтрино, аналогичные приведенным на Рис 1. (**$\Omega_m = 0.30$, $h = 0.80$, $f_\nu = 0.1$** и **$\Omega_m = 0.6$, $h = 0.4$, $f_\nu = 0.1$**, соответственно).

Крупномасштабная структура



Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)

- Более поздний переход к материально-доминированной стадии несколько уменьшает рост возмущений на малых масштабах
- Существенным образом замедляется рост возмущений на масштабах, меньших длины свободного пробега нейтрино



Ma ’96

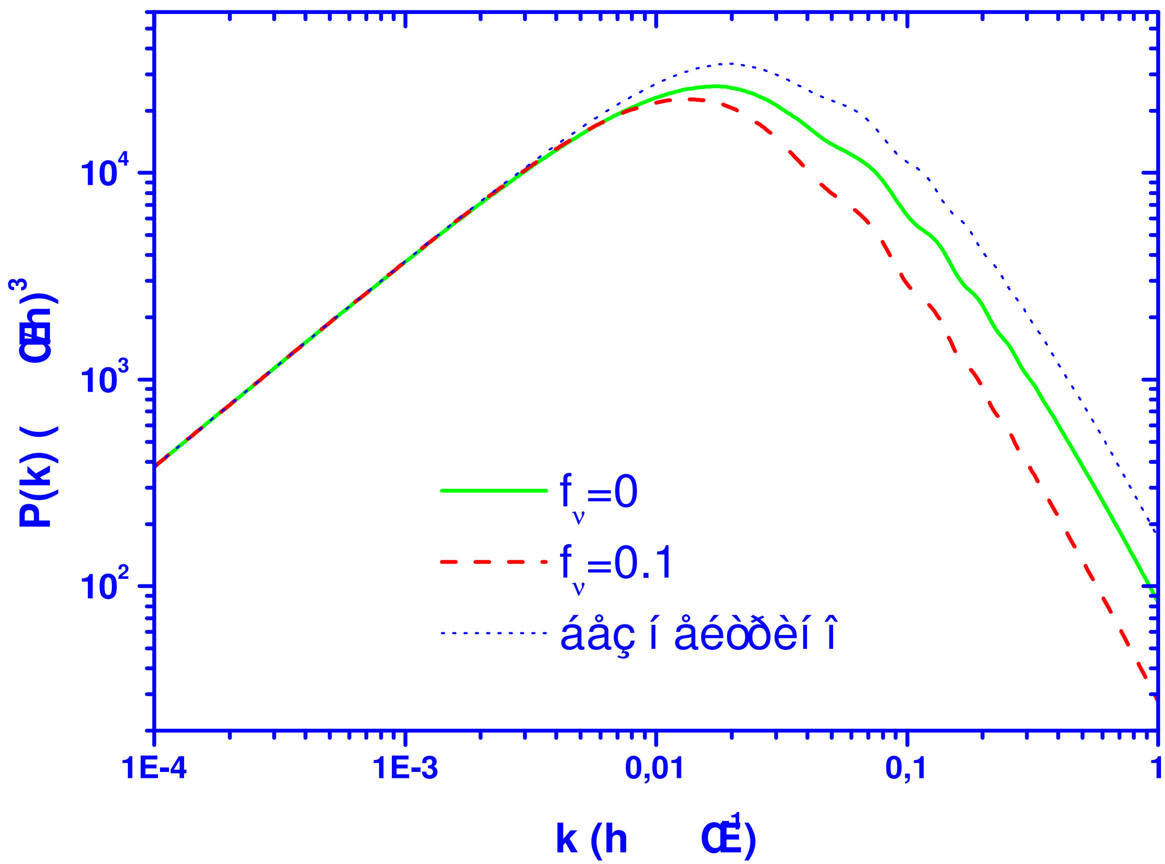
Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)

- Классический результат теории возмущений:

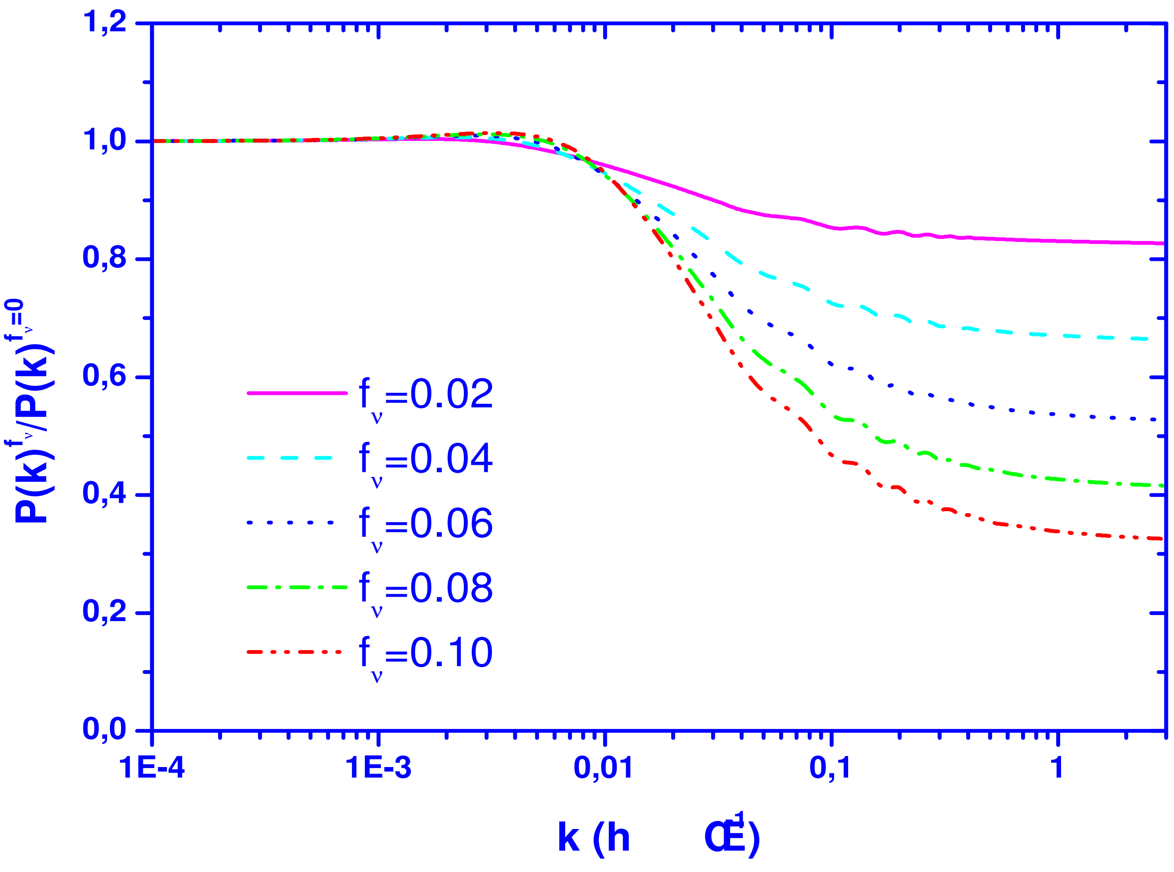
$$\delta \sim a^{p}$$

- В отсутствии нейтрино: $p = 1$
- При наличии нейтрино: $p = \dfrac{\sqrt{1 + 24(1 - f_\nu)} - 1}{4}$
- Влияние на спектр мощности: $\dfrac{\Delta P^{f_\nu}}{P^{f_\nu = 0}} \simeq -8 f_\nu$

Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)



Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)



Формализм Пресса-Шехтера

- Поле контраста плотности $\delta = \delta\rho/\rho$ в линейном приближении подчиняется гауссовой статистике
- Гравитационное сжатие обособившихся от хаббловского расширения уплотнений вещества может быть описано в сферически-симметричном приближении

Формализм Пресса-Шехтера

$$n(M,z)=\sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\rho_m}{M}\frac{\delta_c}{\sigma_R^2(z)}\left|\frac{\partial\sigma_R(z)}{\partial M}\right|\exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma_R^2(z)}\right)$$

$$R=\sqrt[3]{\frac{3M}{4\pi\rho_m}} \qquad \delta_c=f(\Omega_m,\Omega_\Lambda)$$

$$\sigma_R^2(z)=\frac{1}{2\pi^2}\int_0^\infty P(k)W^2(kR)k^2dk$$

Формализм Пресса-Шехтера

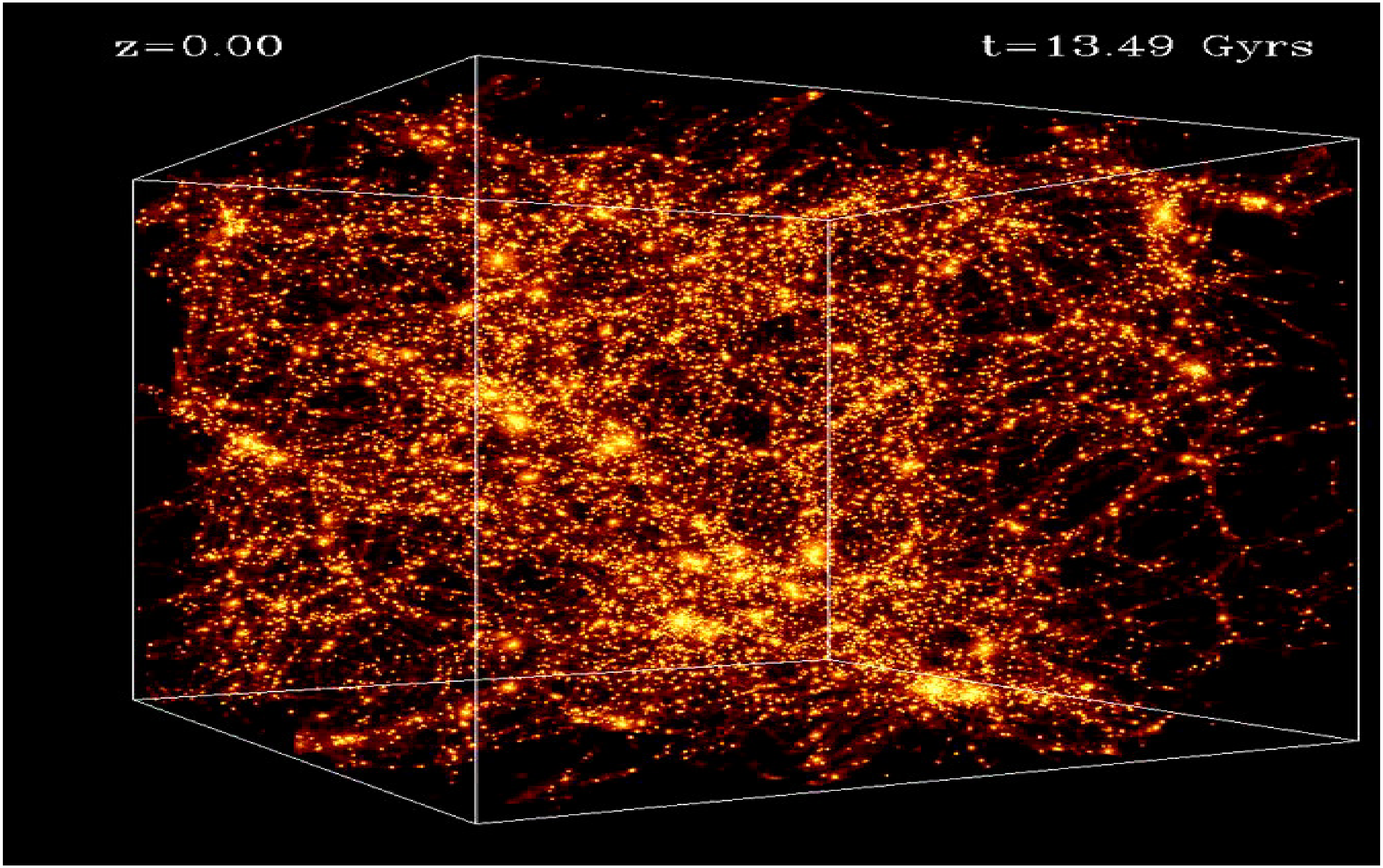
$$\sigma_R^2(z) = \frac{1}{2\pi^2}\int_0^\infty P(k)W^2(kR)k^2 dk$$

$$P(k) = Ak^n T^2(k,z) \qquad W(x) = \frac{3}{x^3}(\sin x - x\cos x)$$

$$\delta(\vec{\mathrm{x}}) = \frac{\delta\rho}{\rho}$$

$$\langle \delta(\vec{\mathrm{x}})\delta(0)\rangle = \xi(\mathrm{x}) = \int P(\mathrm{k})\, e^{i\vec{\mathrm{k}}\vec{\mathrm{x}}} d\vec{\mathrm{k}}$$

Моделирование структуры



Теоретические функции масс

$$\boxed{n(M,z) = -\frac{\rho_m}{M}\frac{\partial \ln \sigma}{\partial M} f(\sigma)}$$

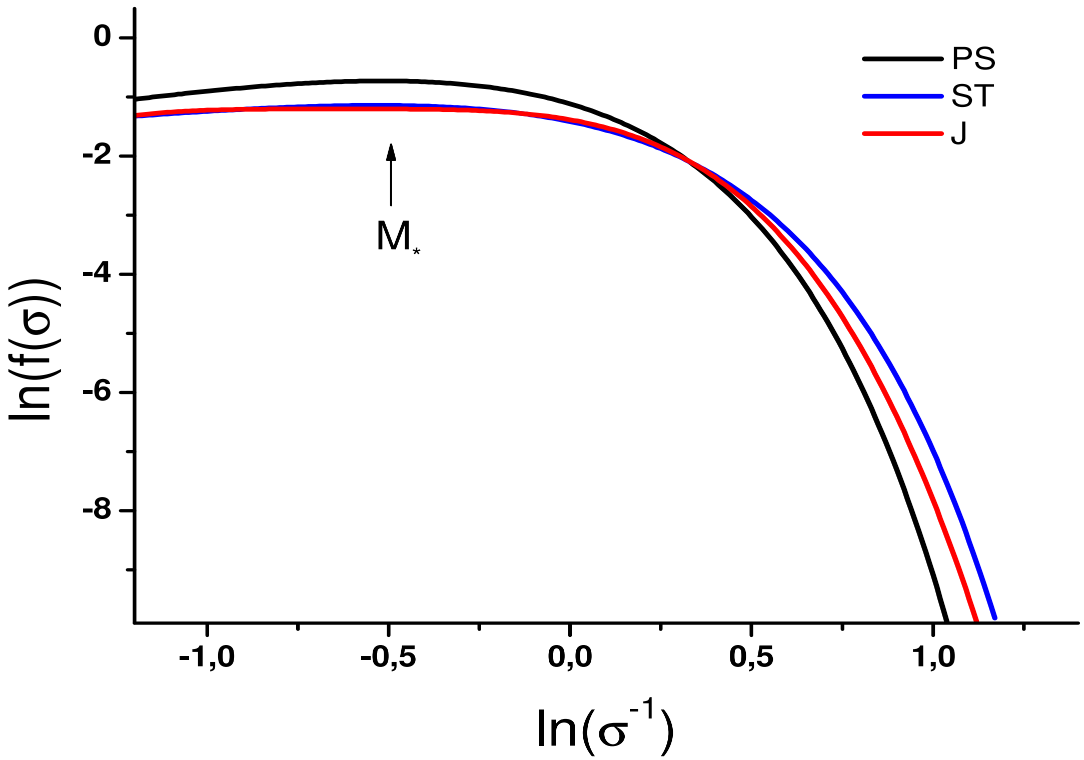
$$f(\sigma;PS) = \sqrt{\frac{2}{\pi}}\frac{\delta_c}{\sigma}\exp\left(-\frac{\delta_c^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$f(\sigma;J) = 0.301\exp\left(-\left|\ln\sigma^{-1} + 0.64\right|^{3.82}\right)$$

$$f(\sigma;ST) = A\sqrt{\frac{2a}{\pi}}\left[1+\left(\frac{\sigma^2}{a\delta_c^2}\right)^p\right]\frac{\delta_c}{\sigma}\exp\left(-\frac{a\delta_c^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$A = 0.3222, \qquad a = 0.707, \qquad p = 0.3$$

Теоретические функции масс



$$\sigma(M_*) = \delta_c(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$$

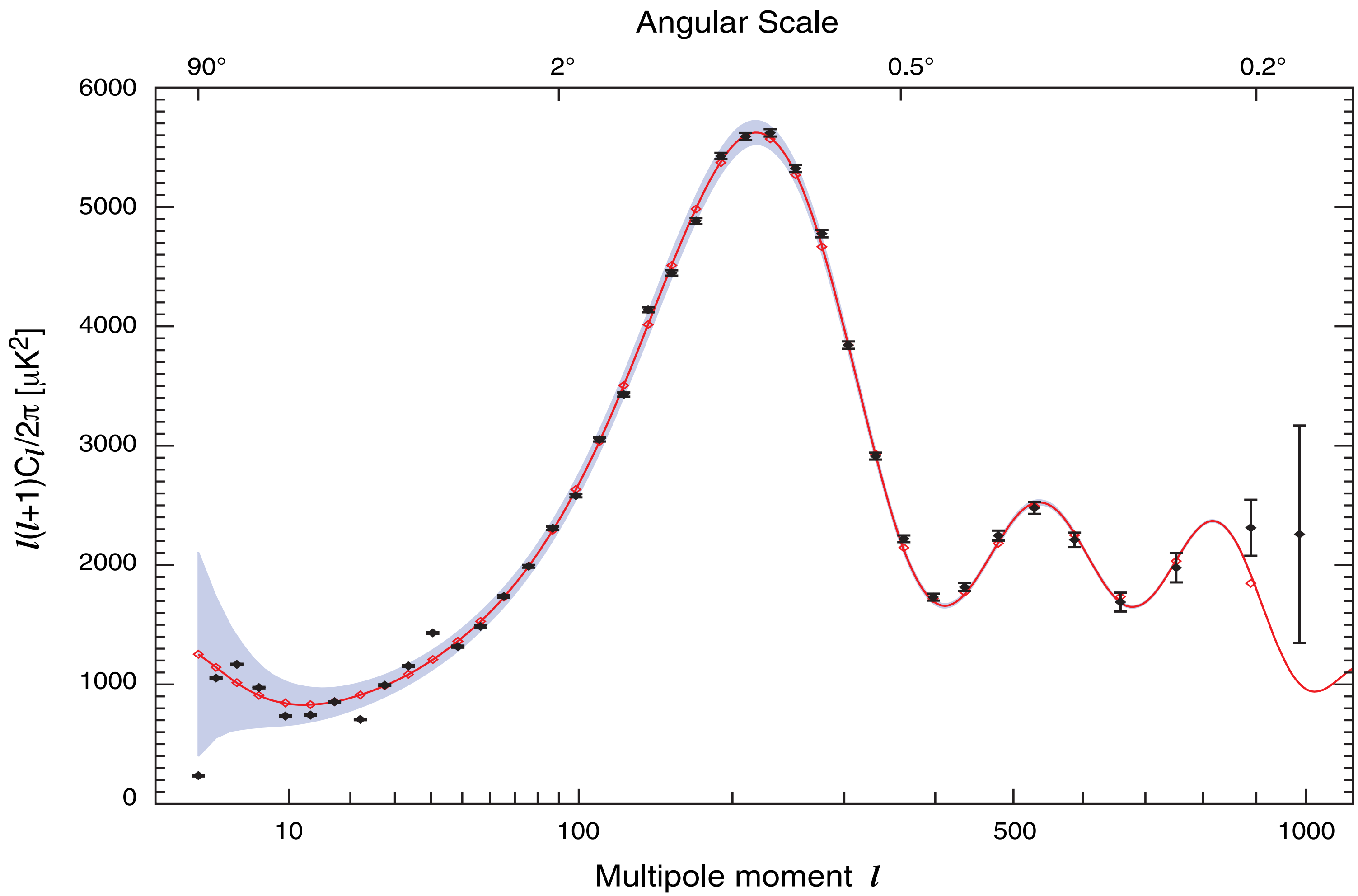
Масса скопления: способы ее определения

- Наблюдательная функция масс: масса, содержащаяся в сфере радиуса $1.5h^{-1}$ Мпк.
- Формализм Пресса-Шехтера: масса внутри вириального радиуса.
- Аппроксимации Шета-Тормена и Дженкинса: масса в сфере такого радиуса, что отношение средней плотности внутри нее к средней плотности Вселенной (контраст плотности) равно 180.

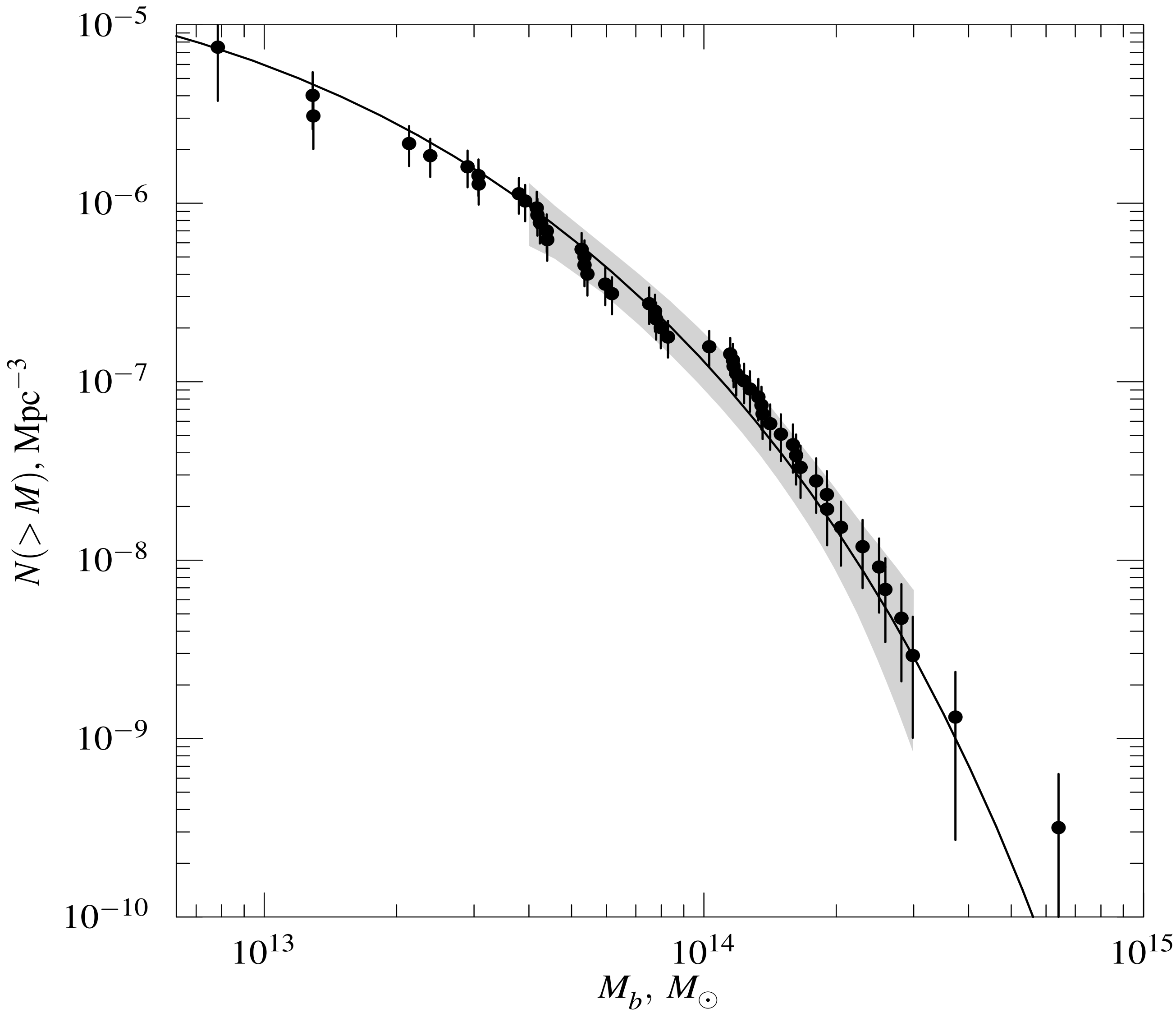
Наблюдательные данные

- Анизотропия реликтового излучения: данные миссии WMAP – температурный спектр для 2 < l < 1000 (999 точек).
- Крупномасштабная структура: интегральная функция масс скоплений галактик, построенная по 42 рентгеновским скоплениям из каталога ROSAT (42 точки).

Наблюдательные данные: CMB



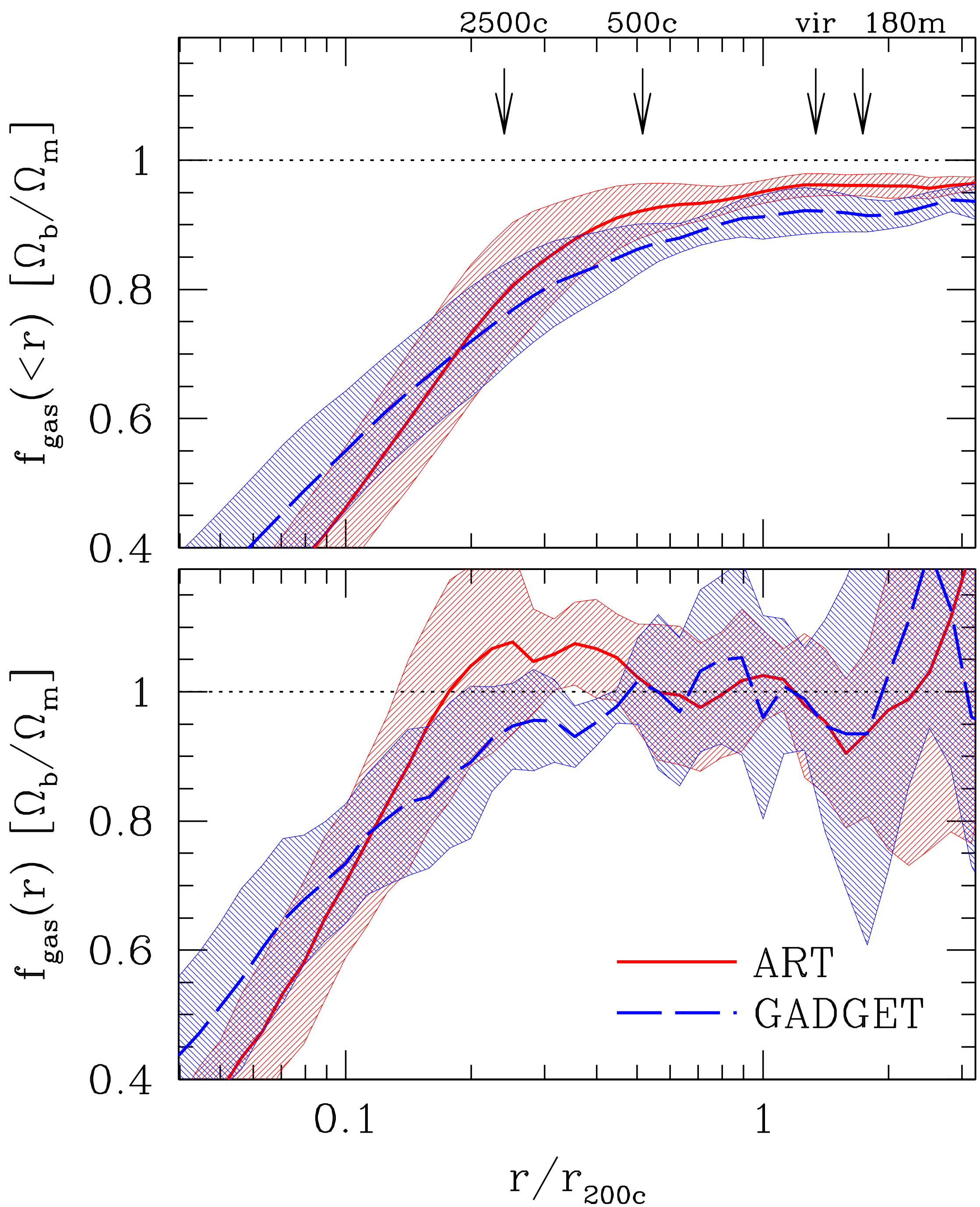
Наблюдательные данные: LSS



Метод определения полной массы скопления

- Основой метода определения полной массы скопления служило предположение об универсальности барионной фракции во Вселенной:

$$\boxed{\frac{M_b}{M_{tot}} = f_b \equiv \frac{\Omega_b}{\Omega_m}}$$



Kravtsov et al., 2005

Общие детали

- Для анализа использовалась плоская ($\Omega_{tot} = 1$) ΛCDM модель Вселенной с адиабатическими начальными условиями.
- Число массивных сортов нейтрино было принято равным 3, с одинаковыми массами.
- Для расчета теоретического спектра реликтового излучения, соответствующего данной конкретной модели, использовался код CAMB.
- Переходная функция для смешанной темной материи рассчитывалась как численным (с использованием CAMB), так и аналитическим (аппроксимация Hu & Eisenstain, 1999) способом.

Сетка моделей

- Параметр плотность материи: $\Omega_m = 0.2 - 0.36$, с шагом 0.01.
- Безразмерная постоянная Хаббла (нормированная на 100 км/сек/Мпк):

  $h = 0.65 - 0.85$, с шагом 0.01.
- Наклон спектра первичных возмущений плотности: $n = 0.96 - 1.02$, с шагом 0.01.
- Масса одного сорта нейтрино:

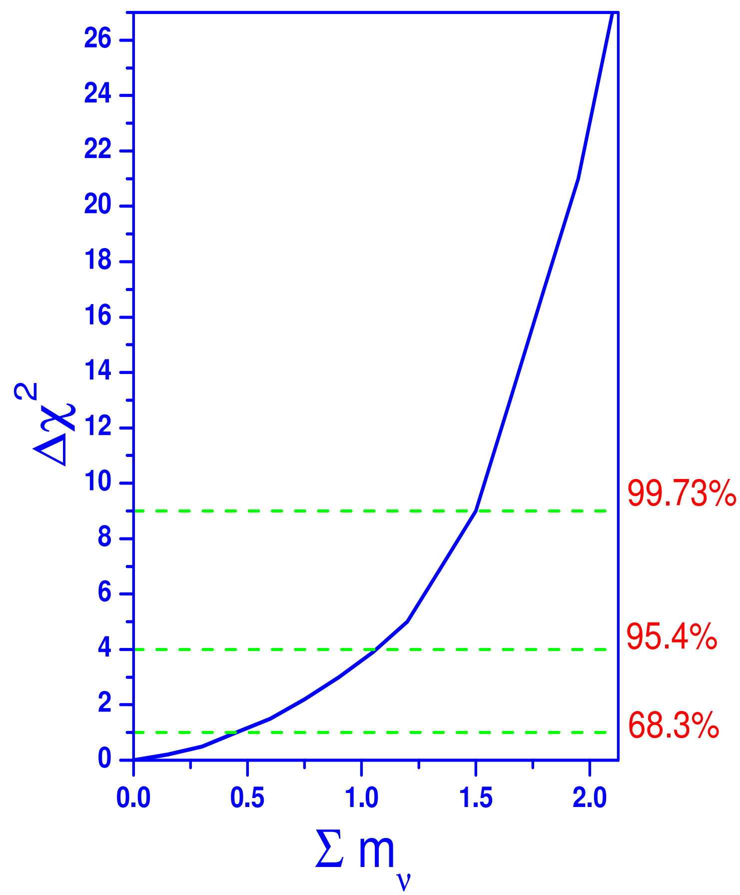
  $m_\nu = 0 - 0.7$ эВ, с шагом 0.05 эВ.
- Вклад барионов: $\Omega_b h^2 = 0.023$ (Spergel et al. 2007).

Всего, таким образом, 37485 моделей

Детали расчета

- Итоговая величина $\chi^2 = \chi^2_{cmb} + \chi^2_{cluster}$
- Ее распределение обладает 999 + 42 – - 4 = 1037 степенями свободы
- Минимальное $\chi^2_{min} = 1092$ - хорошее согласие моделей и наблюдательных данных
- Исследовалось поведение величины $\Delta\chi^2_\nu = \chi_\nu{}^2 - \chi_{min}{}^2$
- Распределено как χ^2 с одной степенью свободы

Результаты



$\Delta\chi^2$
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
0.0
0.5
1.0
1.5
2.0
$\Sigma\, m_\nu$
99.73%
95.4%
68.3%

Вывод

- Новое космологическое ограничение для суммы масс трех сортов активных нейтрино:

$$\sum m_\nu < 1.05 \text{ эВ}$$

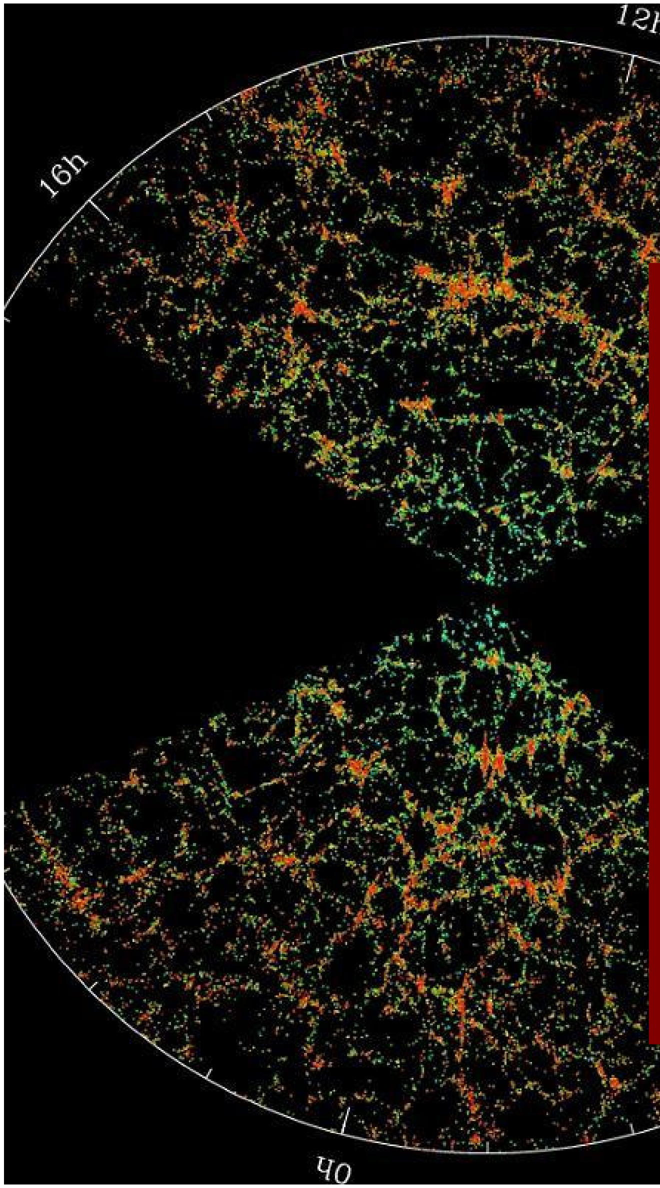
(уровень достоверности 95%)

- Таким образом, для максимальной массы нейтрино имеем:

$$0.05 < m_\nu < 0.35 \text{ эВ}$$

Результаты по ограничению массы

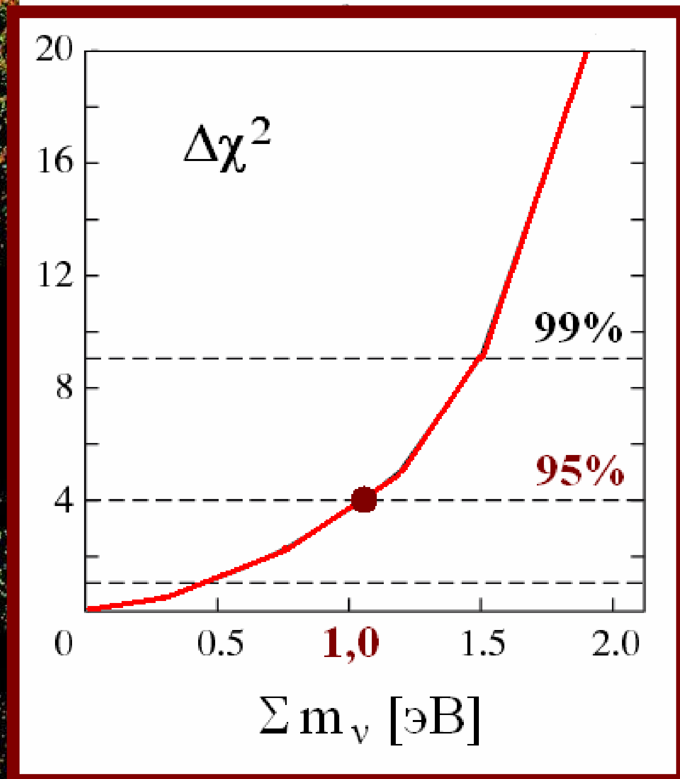
Данные	Авторы	$\sum m_\nu$
N(z)	Кахниашвили и др., 05	**< 2.4 эВ**
WMAP3	Kristiansen et al., 06	**< 1.57 эВ**
WMAP5	Dunkley et al, 08	**< 1.3 эВ**
WMAP3 + N	Малиновский и др., 08	**< 1.05 эВ**
WMAP3+SDSS	Tegmark et al., 06	**< 0.9 эВ**
WMAP5+SNIa + BAO	Komatsu et al., 08	**< 0.61 эВ**
WMAP5+N+N(z) + SNIa +BAO	Vikhlinin et al., 09	**< 0.33 эВ**
WMAP3+SNIa + SDSS+Lya+BAO	Seljak et al., 06	**< 0.17 эВ**

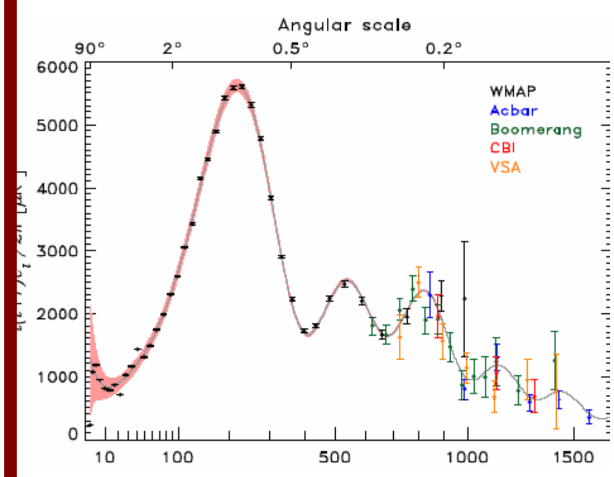


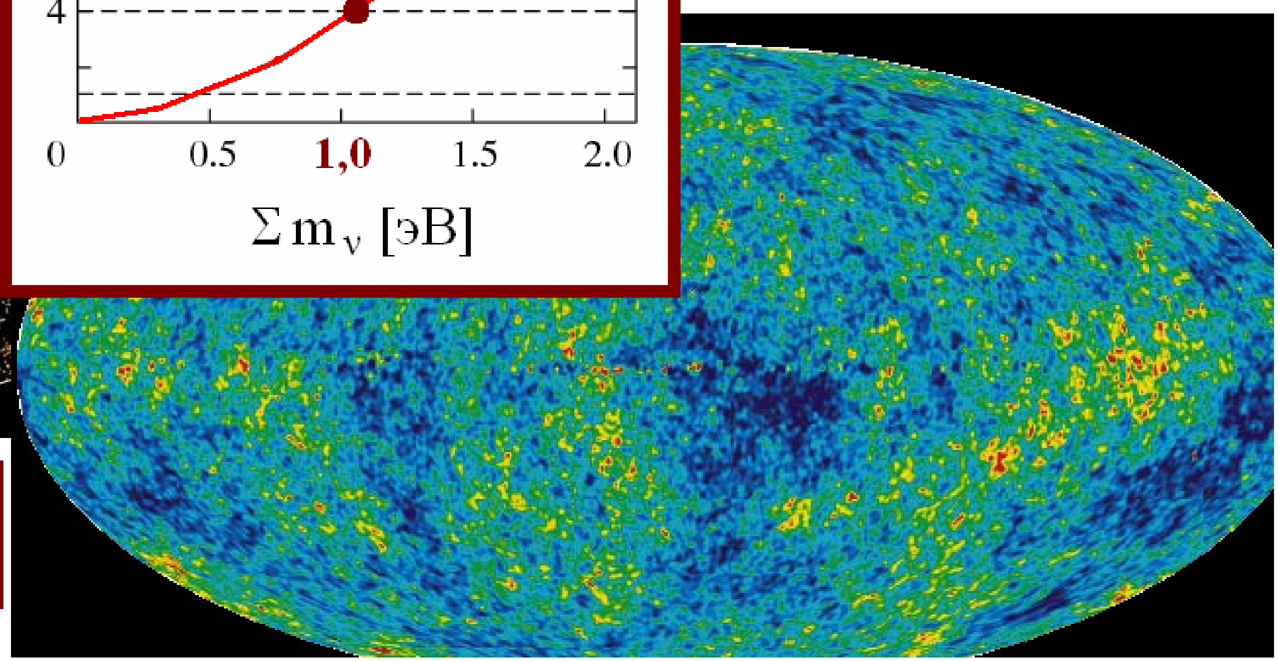
КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ НА МАССУ НЕЙТРИНО ПО АНИЗОТРОПИИ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И КРУПНОМАСШТАБНОЙ СТРУКТУРЕ ВСЕЛЕННОЙ

© 2008 г. А. М. Малиновский[1*], А. А. Воеводкин[2,3], В. Н. Лукаш[1], Е. В. Михеева[1], А. А. Вихлинин[2,4]

[1] *Астрокосмический центр физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва*







$$\Sigma m_\nu < 1{,}05 \text{ эВ}$$

Взаимосвязь между способами определения массы

$$M_\Delta \equiv \frac{4}{3}\pi r_\Delta^3 \rho_m \Delta = \int_0^{r_\Delta} 4\pi\rho(r)dr$$

$$\boxed{\rho(r) = \frac{\rho_s}{(r/r_s)(1+r/r_s)^2}}$$

NFW, 1997

$$M_\Delta = 4\pi\rho_s r_\Delta^3 y\left(\frac{r_s}{r_\Delta}\right) \qquad y(x) = x^3\left[\ln(1+x^{-1}) - \frac{1}{1+x}\right]$$

Взаимосвязь между способами определения массы

$$\frac{M_\Delta}{M_{vir}} = \frac{\Delta}{\Delta_{vir}}\left(\frac{r_\Delta}{r_{vir}}\right)^3 \equiv \left(\frac{r_\Delta}{r_{vir}}\right)^3 \frac{y(r_s / r_\Delta)}{y(r_s / r_{vir})}$$

$$\boxed{y\left(\frac{r_s}{r_\Delta}\right) = \frac{\Delta}{\Delta_{vir}} y\left(\frac{r_s}{r_{vir}}\right)}$$

$$c \equiv \frac{r_{vir}}{r_s} \qquad c(M_{vir}) = \frac{9}{1+z}\left(\frac{M_{vir}}{M_*}\right)^{-0.13}$$

Bullock et al., 2001

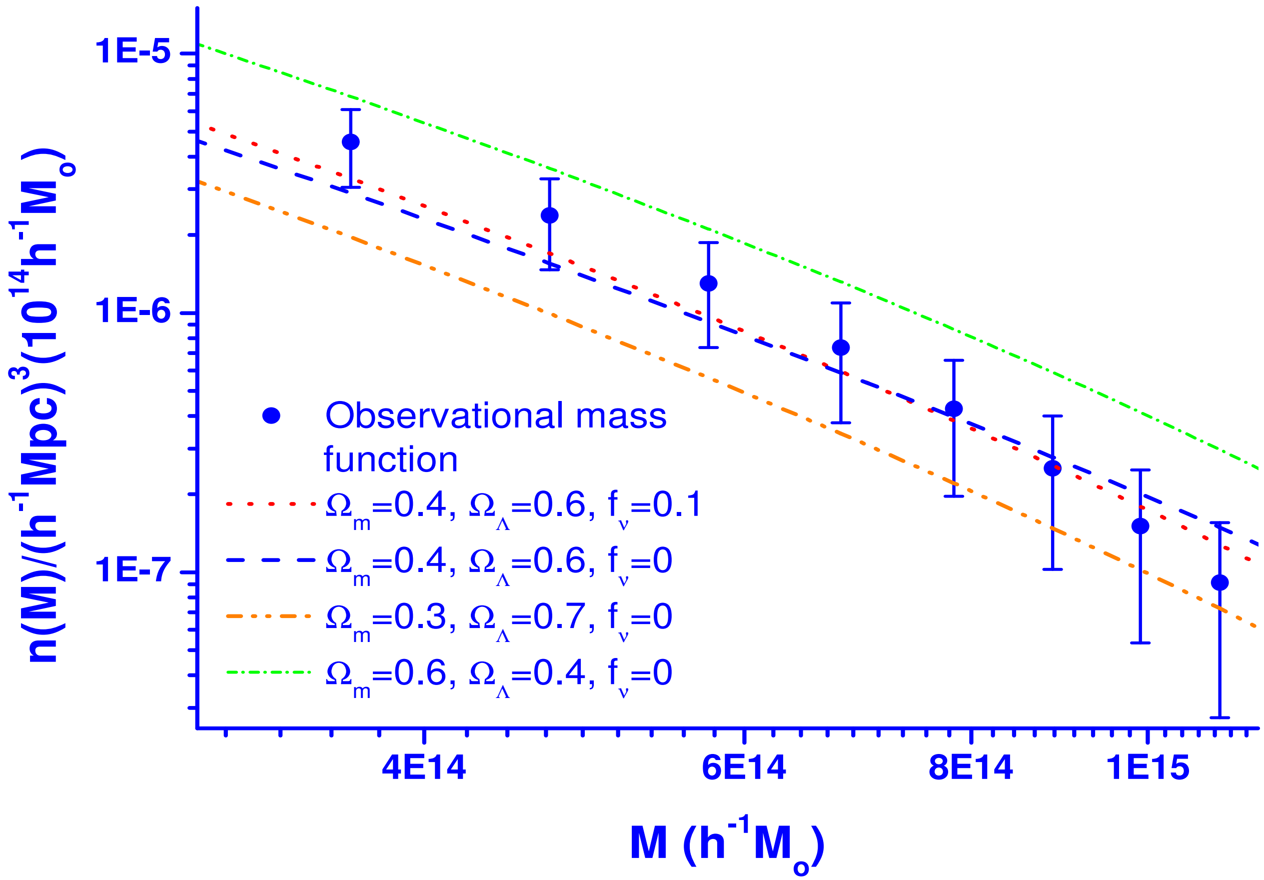
Взаимосвязь между способами определения массы

$$\frac{r_s}{r_\Delta} = f\left(\frac{\Delta}{\Delta_{vir}} y\left(\frac{1}{c}\right)\right)$$

$$\boxed{\frac{M_\Delta}{M_{vir}} = \frac{\Delta}{\Delta_{vir}}\left(\frac{r_\Delta}{r_s}\right)^3\left(\frac{r_s}{r_{vir}}\right)^3 \equiv \frac{\Delta}{\Delta_{vir}}\left(\frac{r_\Delta}{r_s}\right)^3 c^{-3}}$$

$$\Delta_{obs} = \frac{3M_{obs}}{4\pi r_0^3 \rho_m} \Longleftrightarrow r_0 = 1.5h^{-1}\text{Мпк}$$

Этапы работы:
1 этап

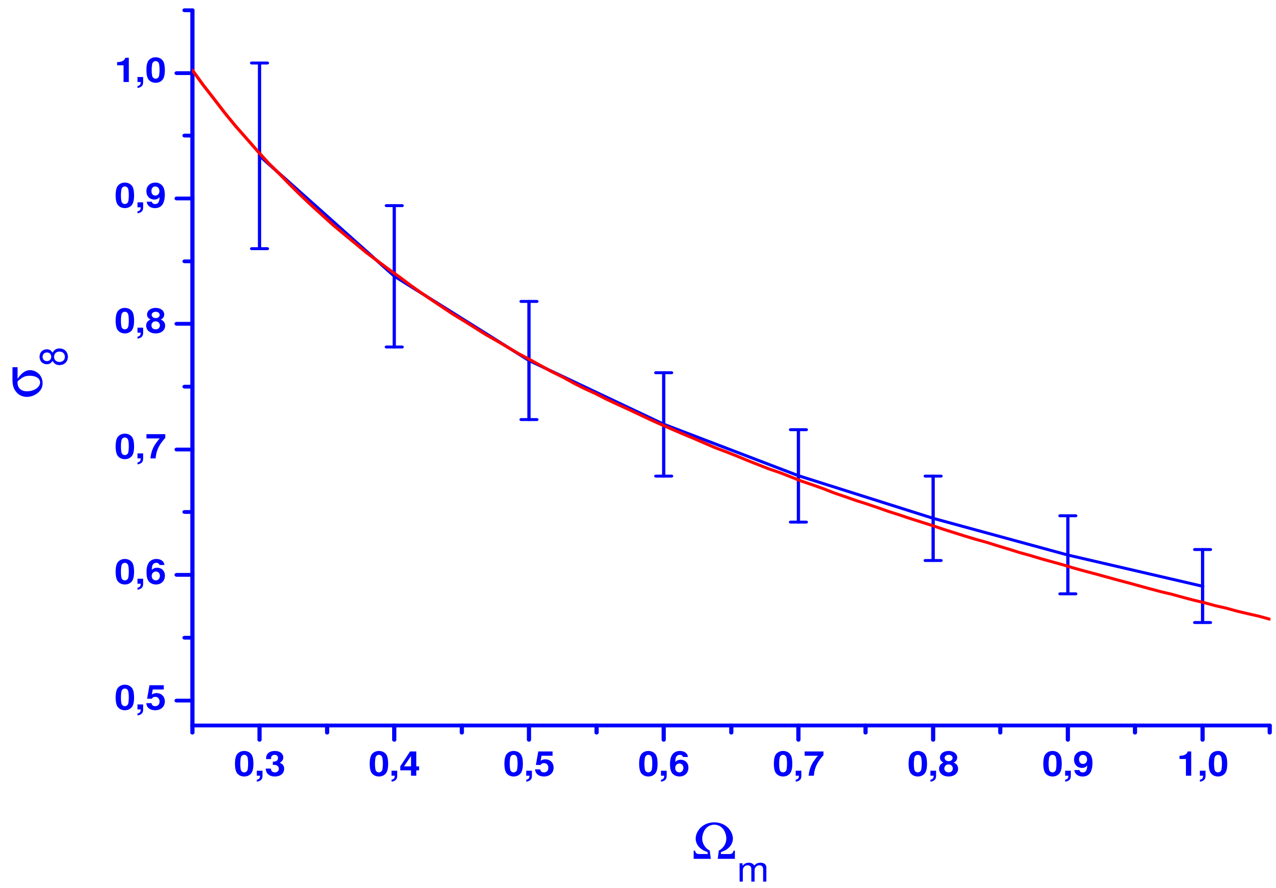


Этапы работы: второй этап

$$\boxed{\begin{aligned}\sigma_8 = \Omega_m^{\,A_1 + A_2\Omega_m + A_3\Omega_\Lambda}[A_4 + A_5(\Omega_m - A_6)\times \\ \times\{1 - A_7 h - A_8 n - A_9 f_\nu\}]\end{aligned}}$$

- Метод Левенберга-Марквардта минимизации χ^2
- Многомерное пространство моделей

Этапы работы: второй этап



Результат