

Международная научная школа по нейтрино
МГУ, 13 октября 2010

*Космологические ограничения
на массу нейтрино*

В.Н. Лукаш

А.М. Малиновский

Е.В. Михеева

Астрокосмический Центр ФИАН

Нейтрино в теории

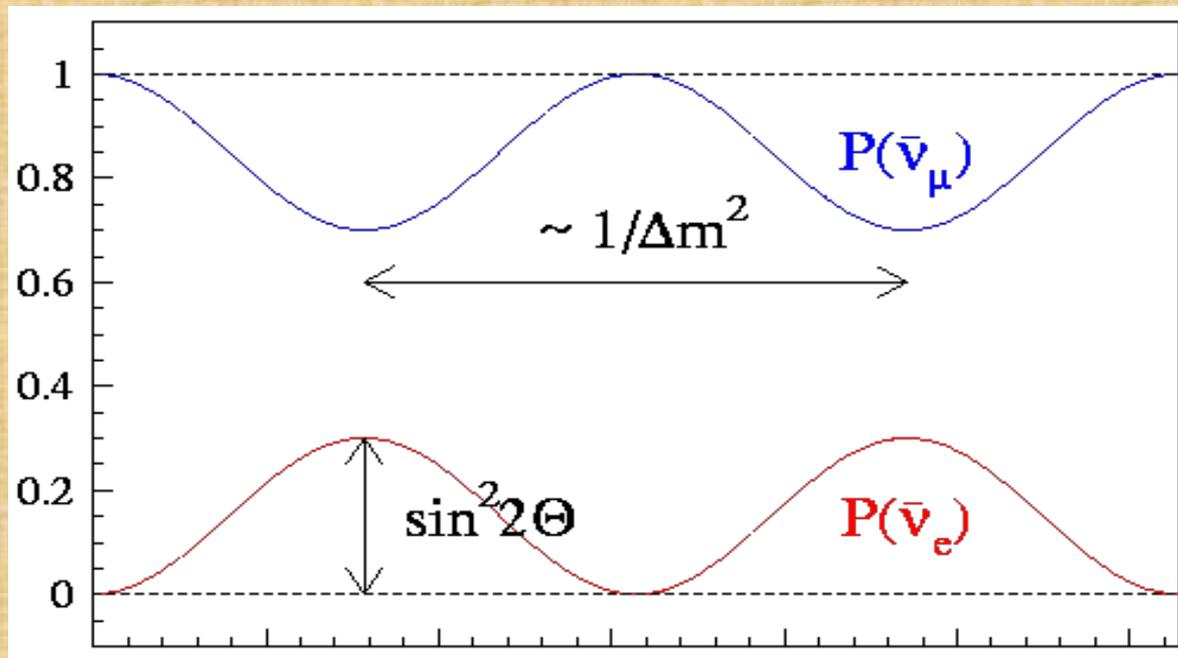
- Предсказание - Паули, 1930.
- Три сорта нейтрино, соответствующие трем поколениям лептонов .
- Электронное, мюонное и тау-нейтрино.
- В рамках Стандартной Модели элементарных частиц массы не имеют.
- В случае наличия массы - возможность перехода нейтрино одного сорта в нейтрино другого сорта (Понтекорво,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

Нейтринные осцилляции

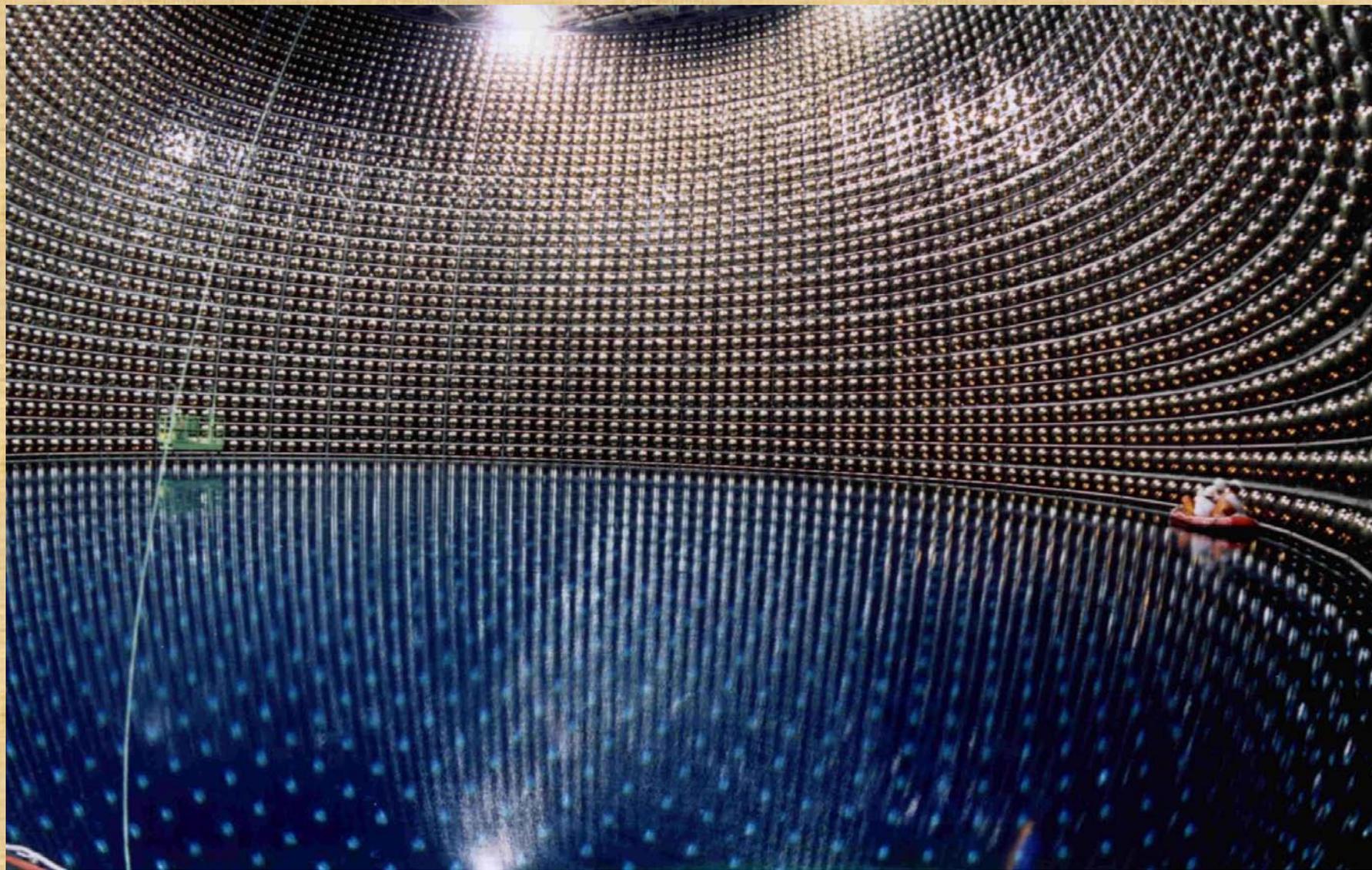
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \quad P_{\nu_e \nu_\mu}(x) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2 \left(1.267 \frac{\Delta m^2}{E} \cdot x \right)$$

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

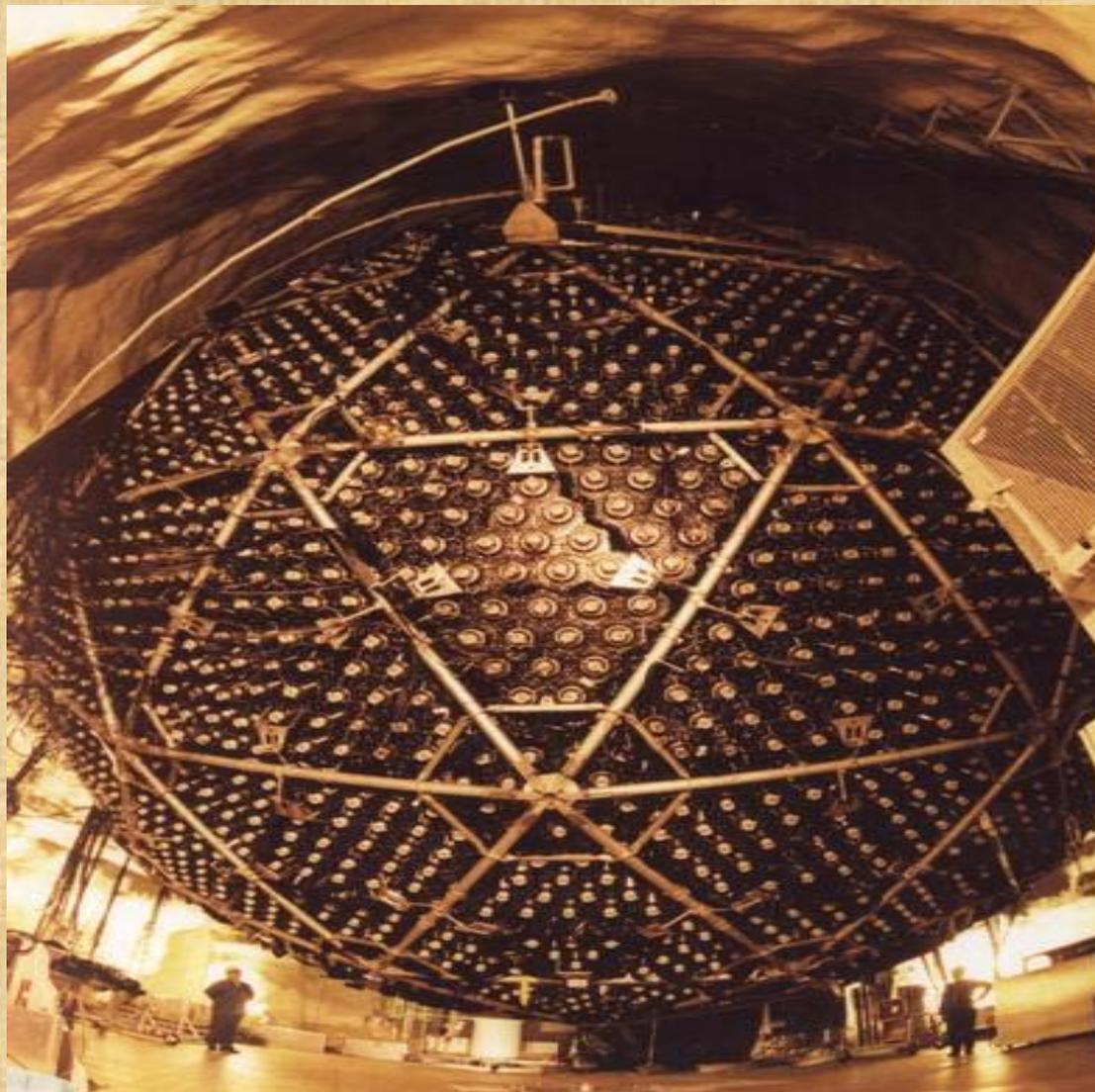
x - расстояние до источника, [м]
 E - энергия нейтрино, [МэВ]



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:
$$\delta m^2 = 7.6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ}^2$$
$$\Delta m^2 = 2.4 \cdot 10^{-3} \text{ эВ}^2$$
- 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

Ограничения массы нейтрино

- Лаборатория:
 - $m_e < 2 \text{ эВ}$
 - $m_m < 190 \text{ кэВ}$
 - $m_t < 15 \text{ МэВ}$

$$\sum m_n < 0.9 \text{ эВ} \\ (\text{ПИ} + \text{КМС})$$

- Космология:

$$\sum m_n < 0.3 \text{ эВ} \\ (+\text{Галактики, SN})$$

Нейтрино во Вселенной

- Только левые ν : $n_e = n_{\bar{\nu}_e} = n_{\nu_\mu} = n_{\bar{\nu}_\mu} = n_{\nu_\tau} = n_{\bar{\nu}_\tau} = 113 \text{ см}^{-3}$
- Масса: $W_m = W_M + W_b + W_n$, $f_n = W_n / W_m$

$$\Sigma m_\nu \lesssim 12 f_\nu$$

$$f_n < 0.1$$

- Масштаб равенства:

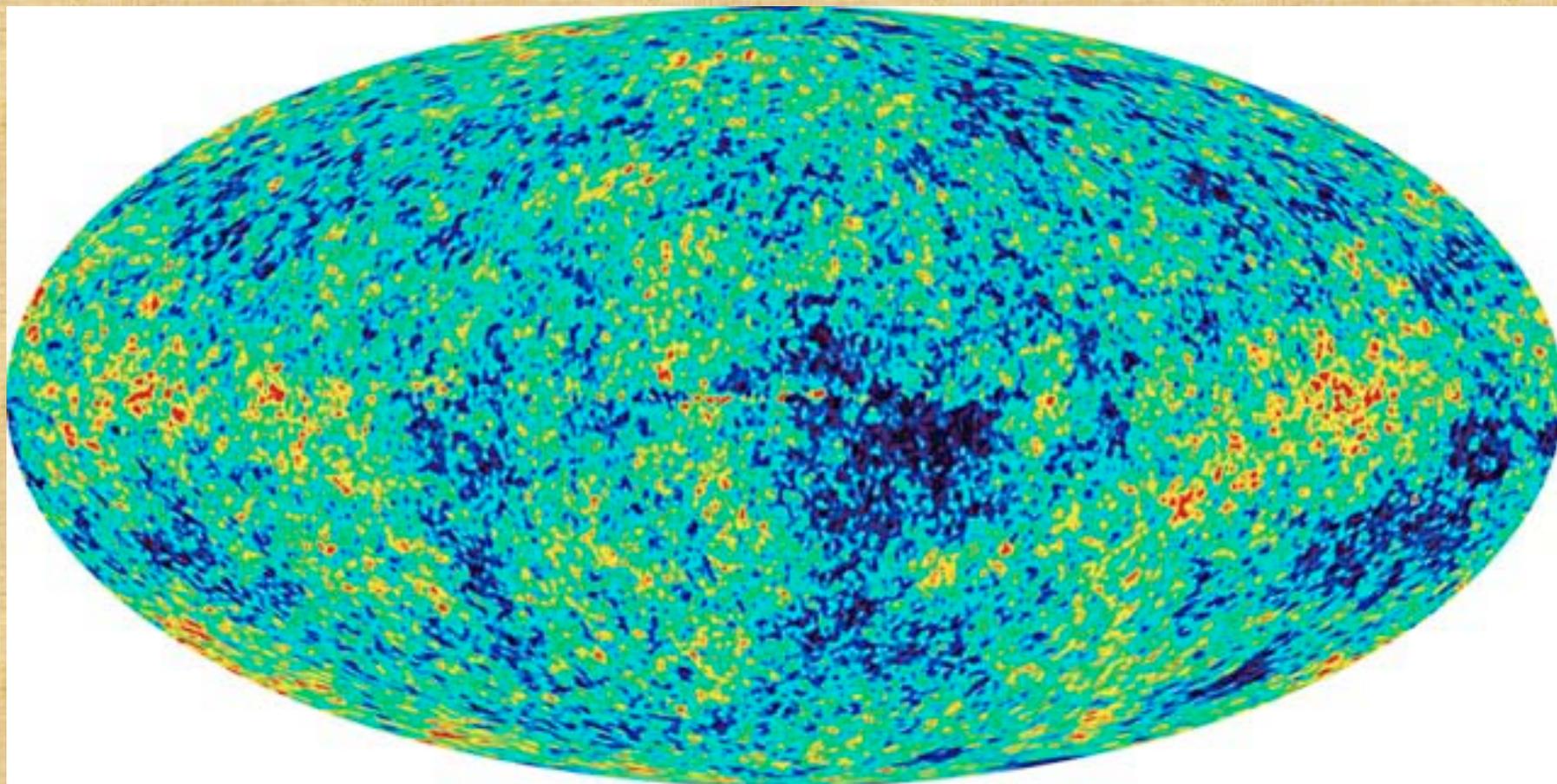
$$P(k) = A k^n T^2(k)$$

- Свободный пробег:

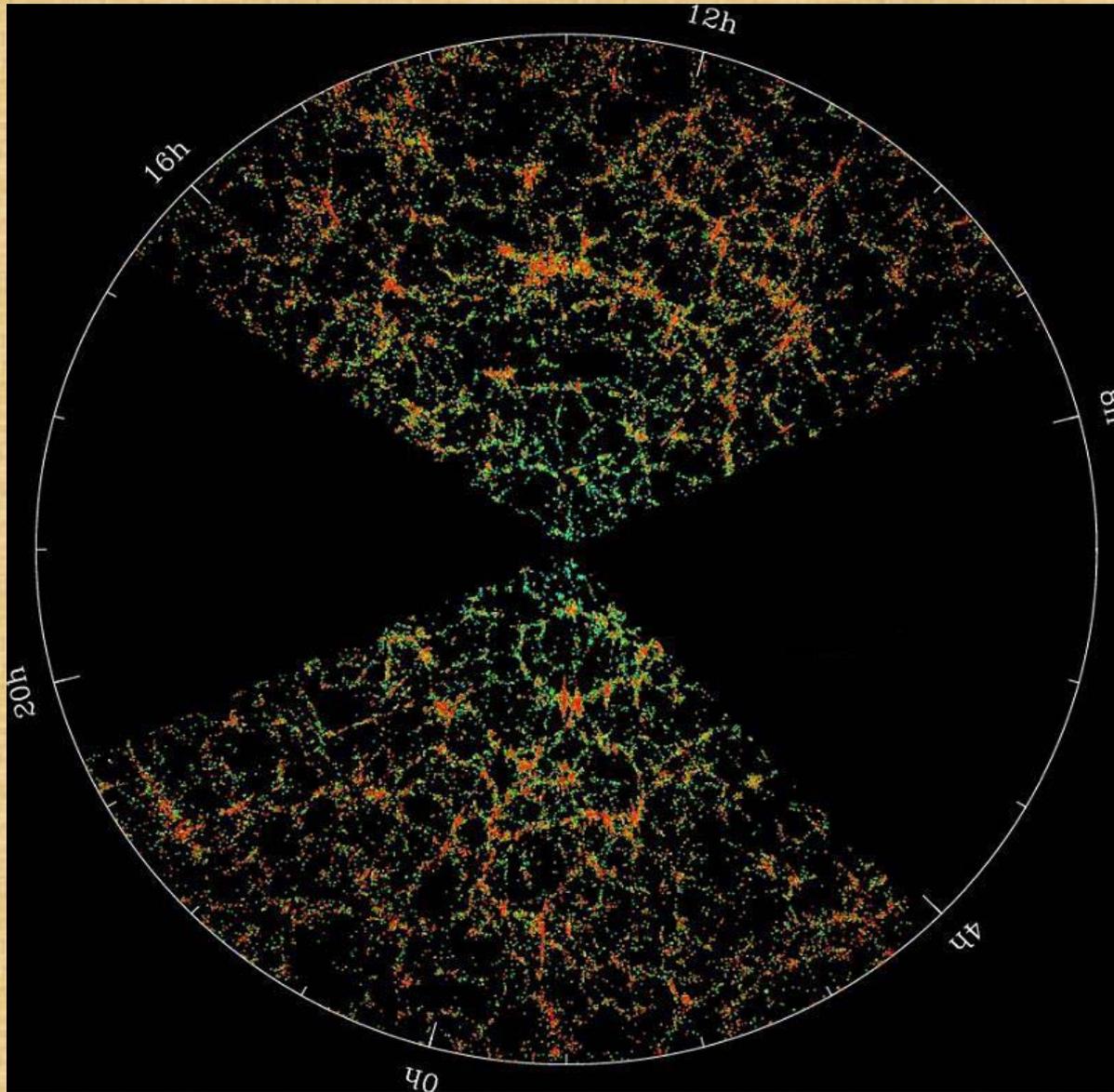
- Нейтрино в гало:

$$V_n = 450 \text{ км/сек}$$

Реликтовое излучение



Крупномасштабная структура



Космологические нейтрино

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

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

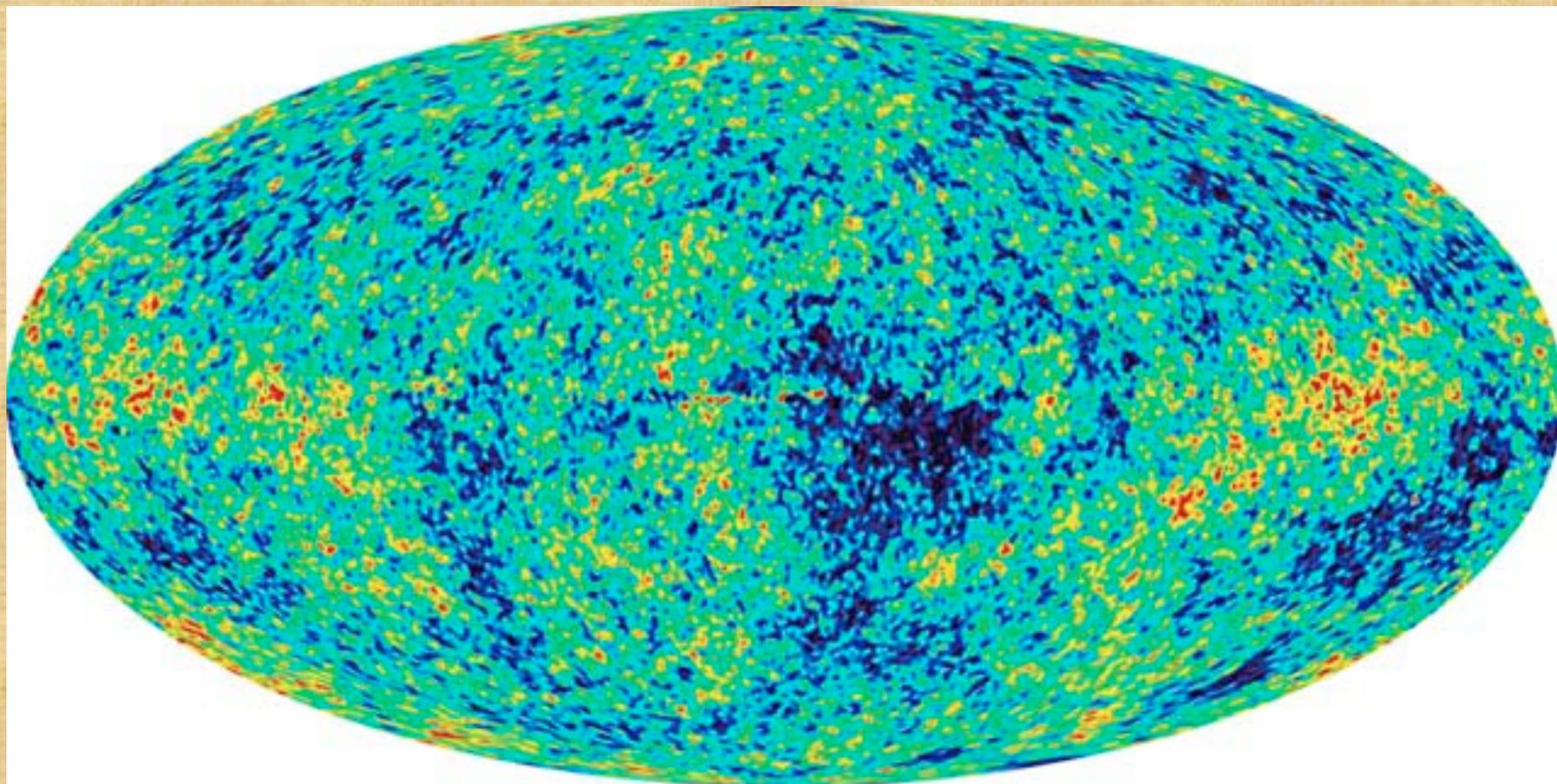
Плотность числа частиц :

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

Вклад в общую плотность Вселенной:

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

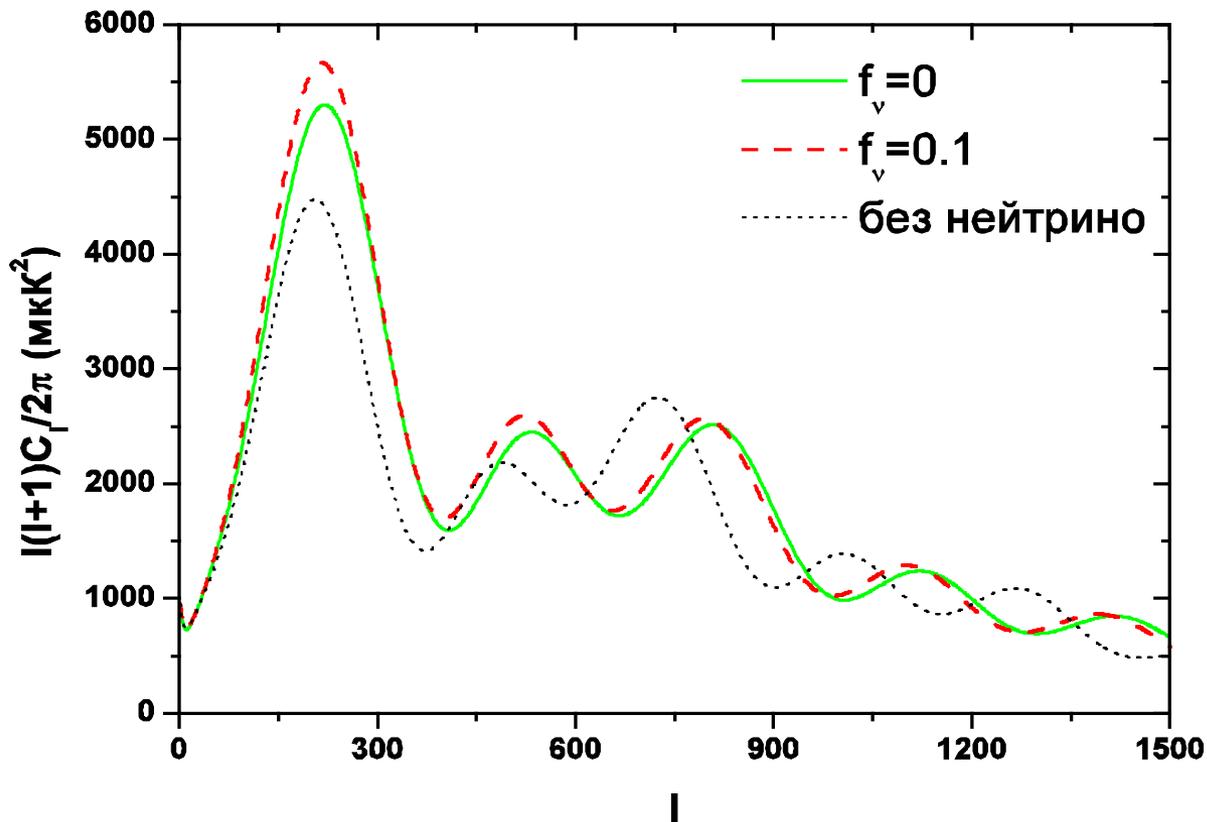
Реликтовое излучение



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

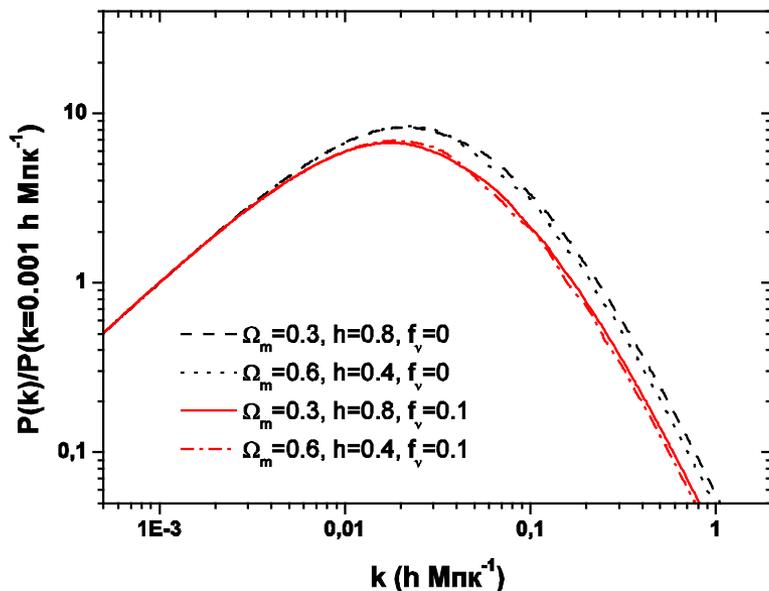


Рис 1. Спектр мощности возмущений плотности. Черные линии - модели без массивных нейтрино ($\Omega_m = 0.3$, $h = 0.8$ и $\Omega_m = 0.6$, $h = 0.4$), красные - аналогичные с массивными, $f_\nu = 0.1$.

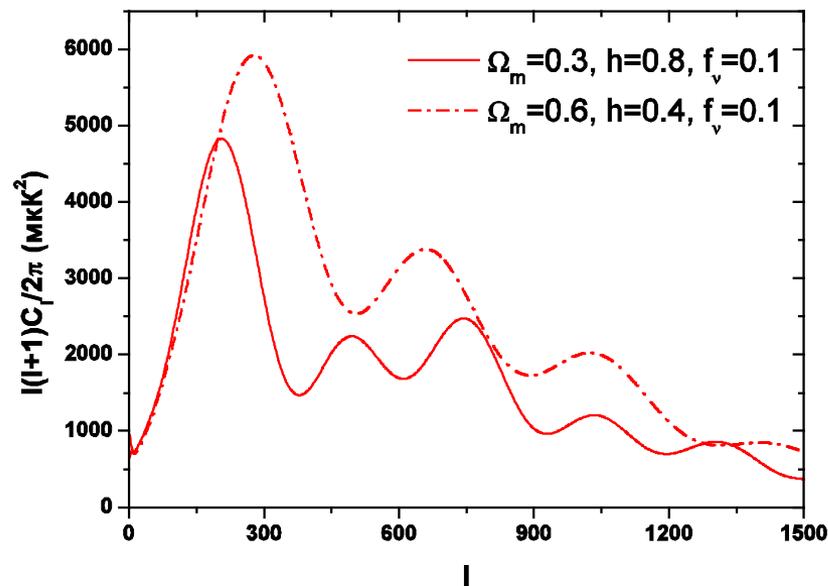
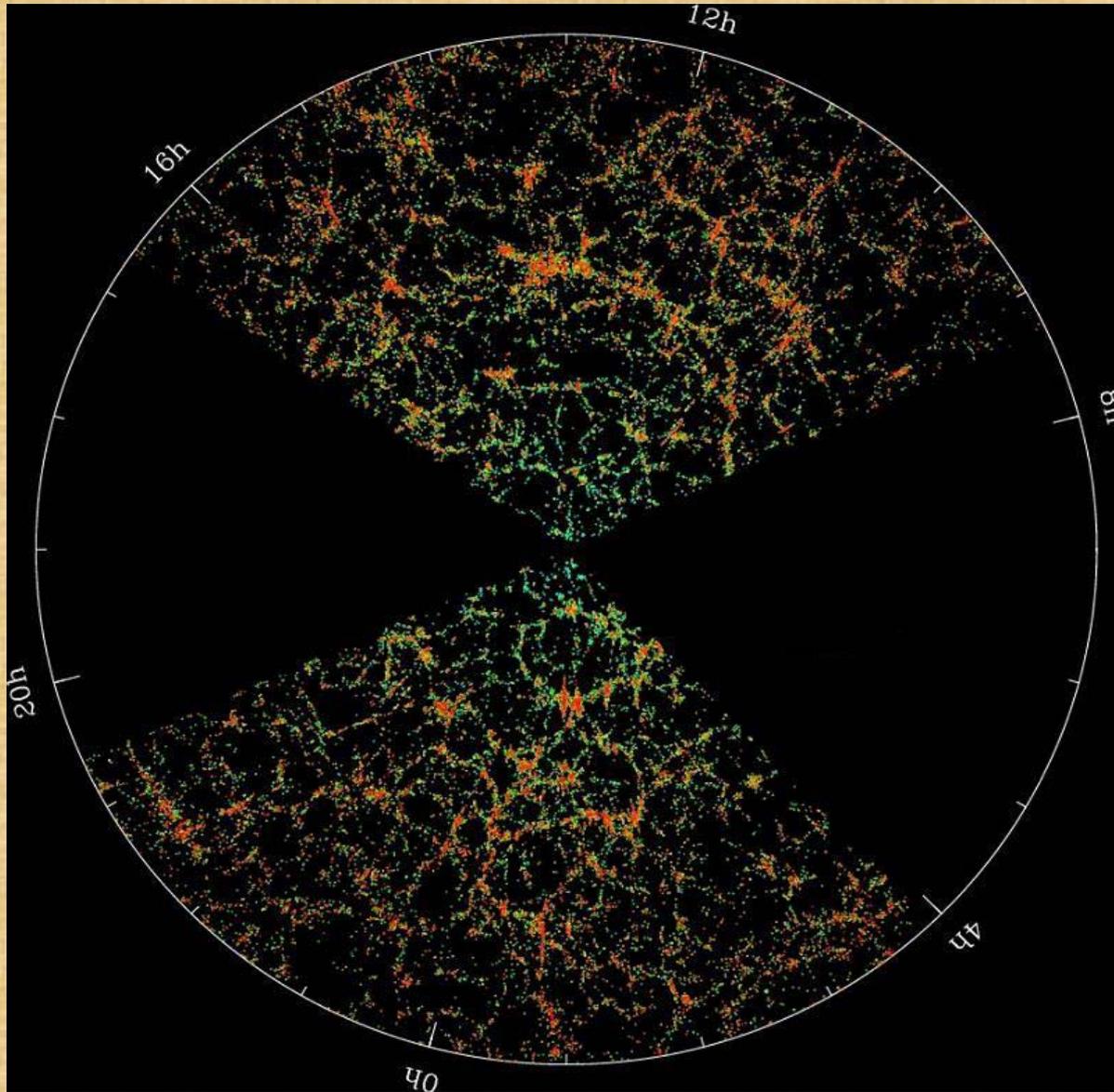
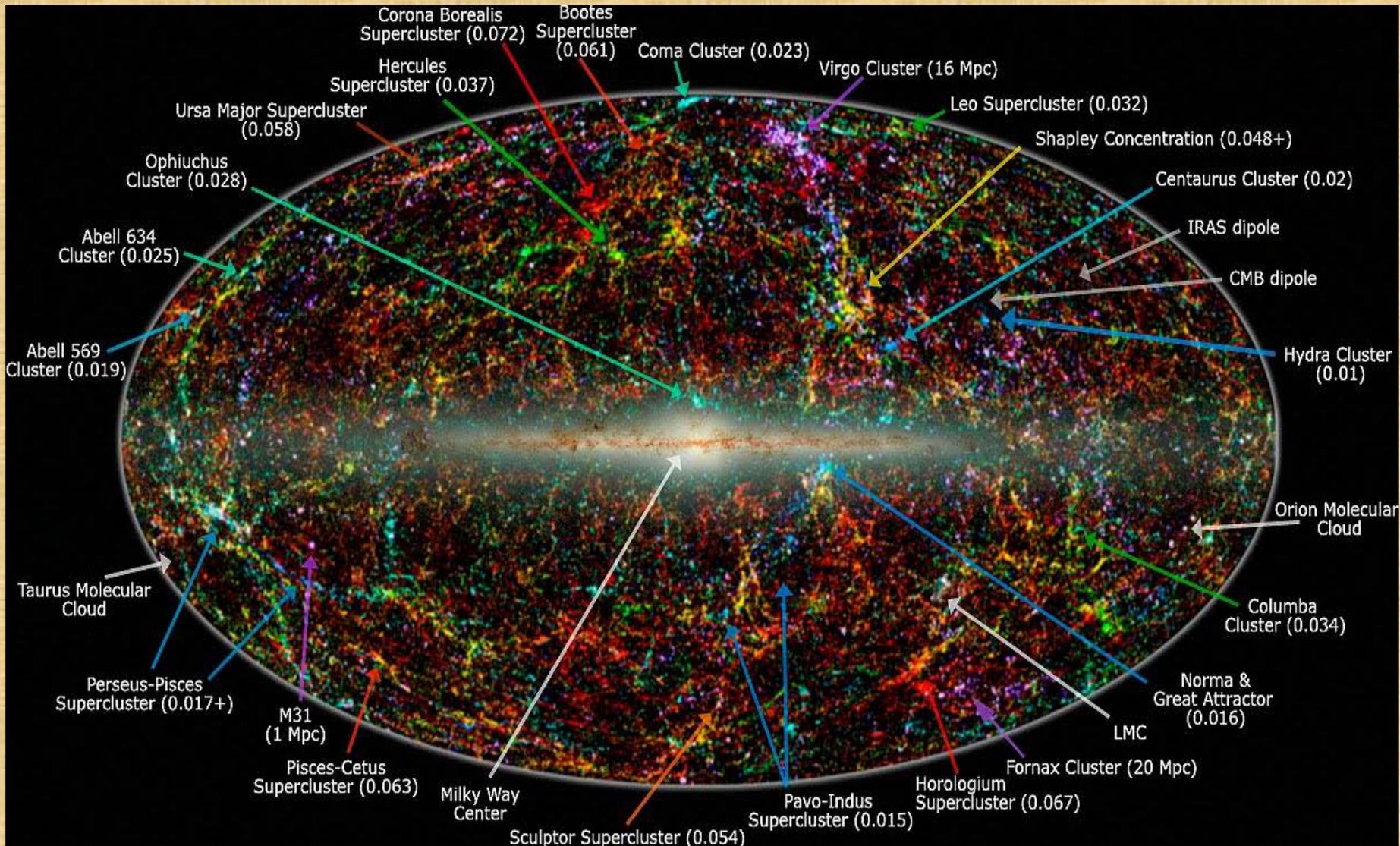


Рис 2. Спектр мощности реликтового излучения. Модели с массивными нейтрино, аналогичные приведенным на Рис 1. ($\Omega_m = 0.30$, $h = 0.80$, $f_\nu = 0.1$ и $\Omega_m = 0.6$, $h = 0.4$, $f_\nu = 0.1$, соответственно).

Крупномасштабная структура



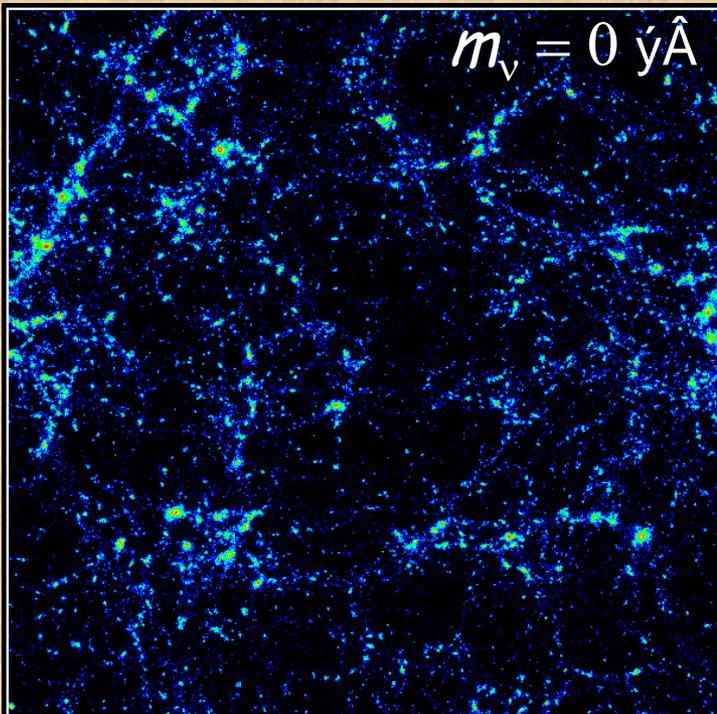
Крупномасштабная структура



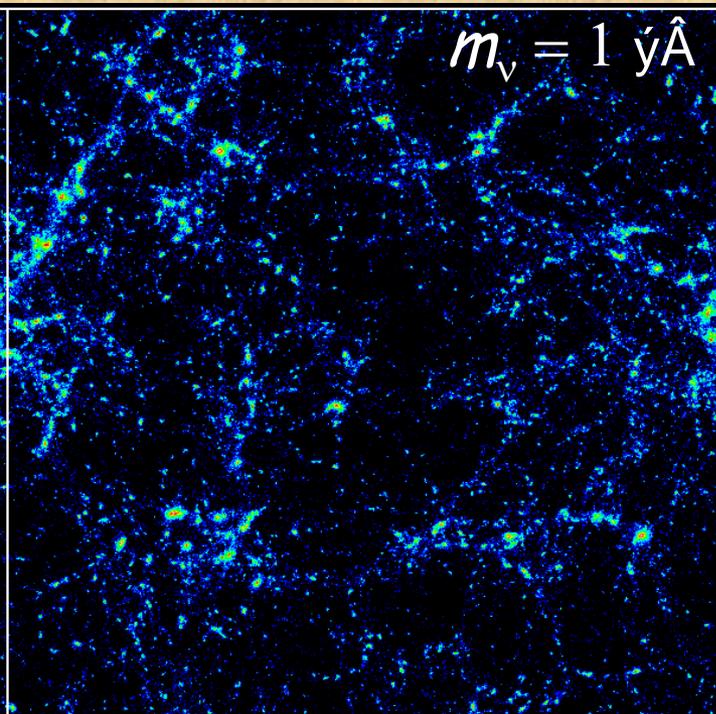
Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)

- 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

$m_\nu = 0 \hat{y}\hat{A}$

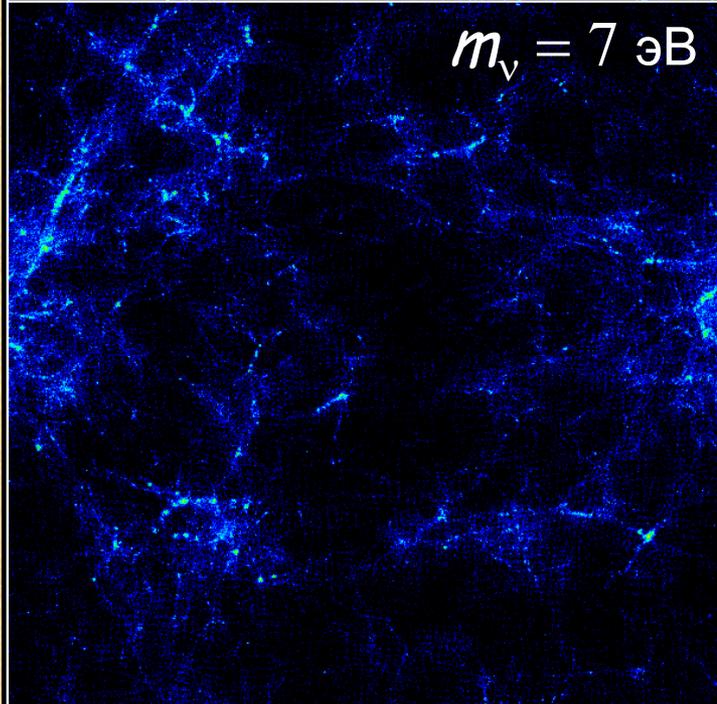


$m_\nu = 1 \hat{y}\hat{A}$

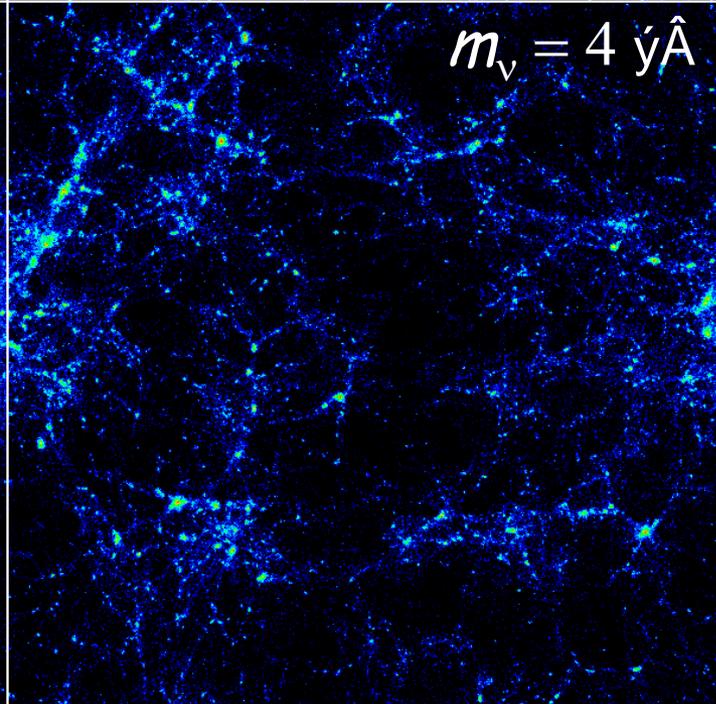


Ma '96

$m_\nu = 7 \text{ eB}$



$m_\nu = 4 \hat{y}\hat{A}$



Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)

- Классический результат теории возмущений:

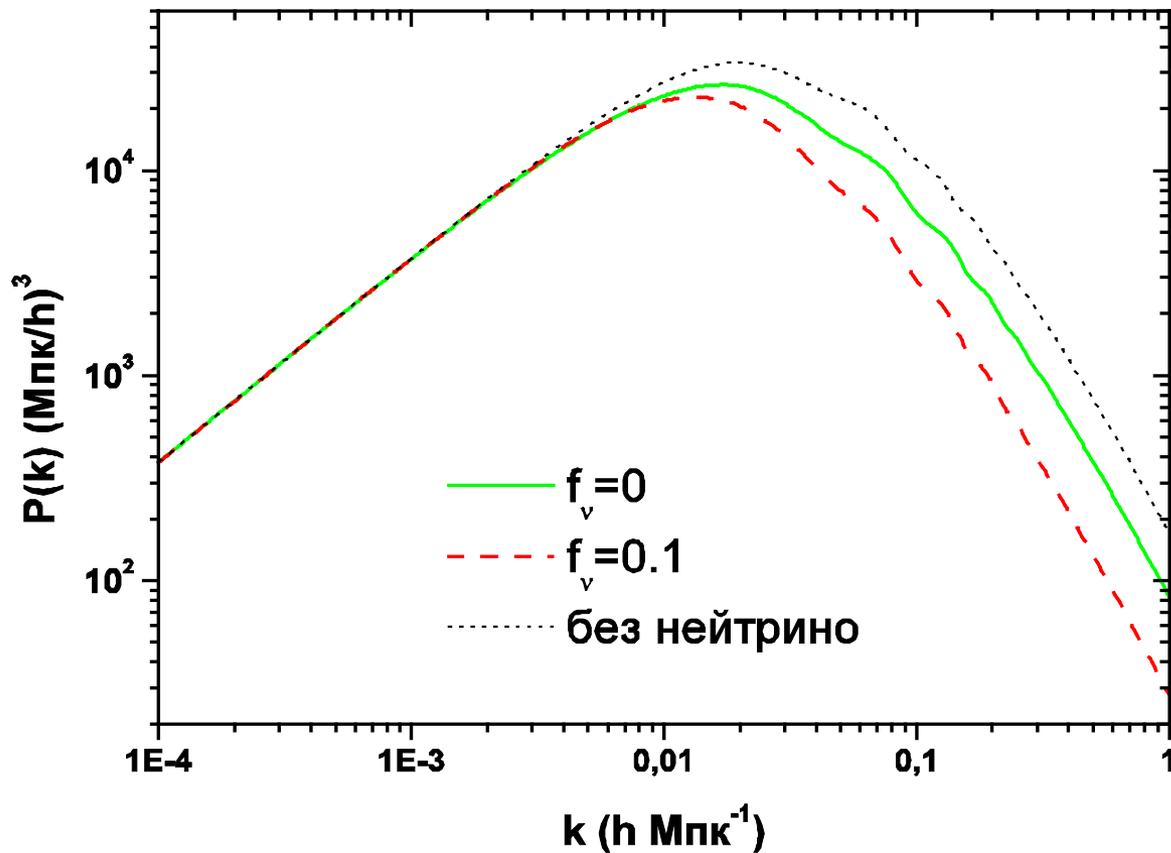
$$\delta \sim a^p$$

- В отсутствии нейтрино: $p = 1$

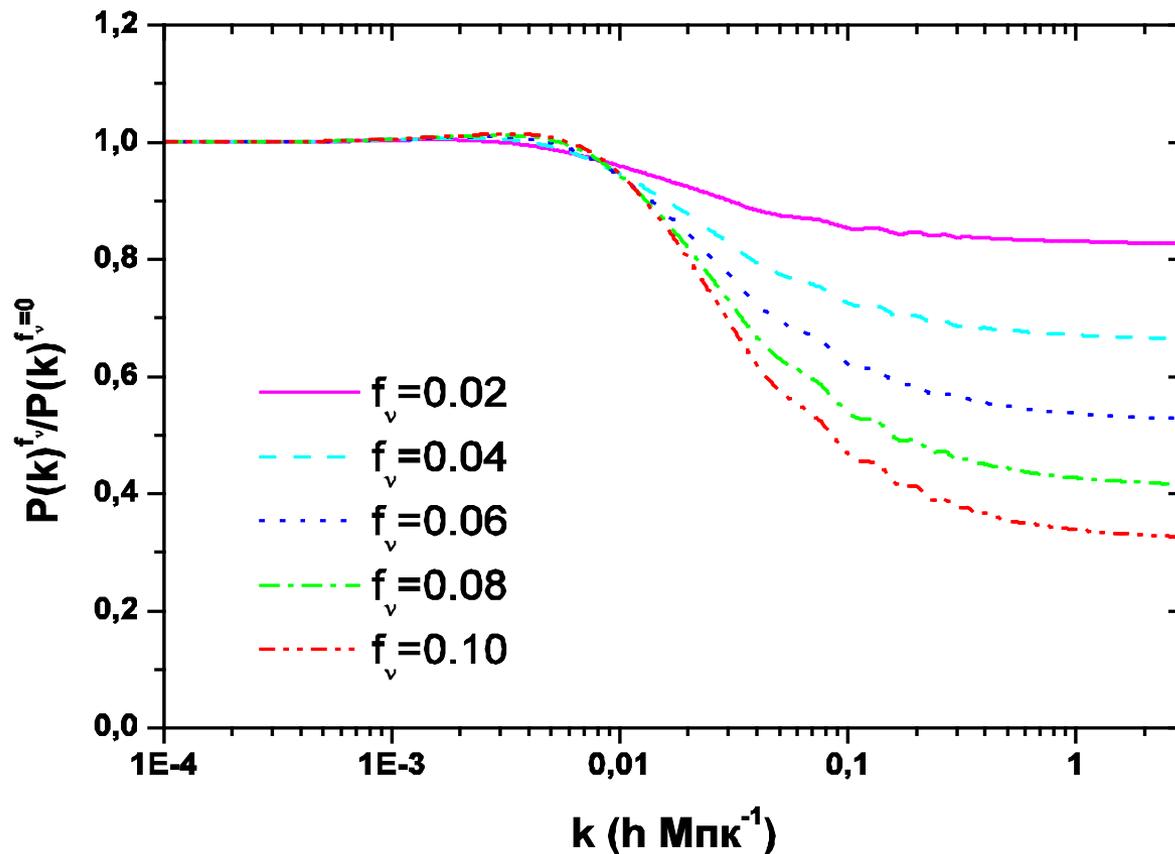
- При наличии нейтрино: $p = \frac{\sqrt{1 + 24(1 - f_\nu)} - 1}{4}$

- Влияние на спектр мощности: $\frac{\Delta P^{f_\nu}}{P^{f_\nu=0}} \square -8 f_\nu$

Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)



Влияние массивных нейтрино (крупномасштабная структура)



Формализм Пресса-Шехтера

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

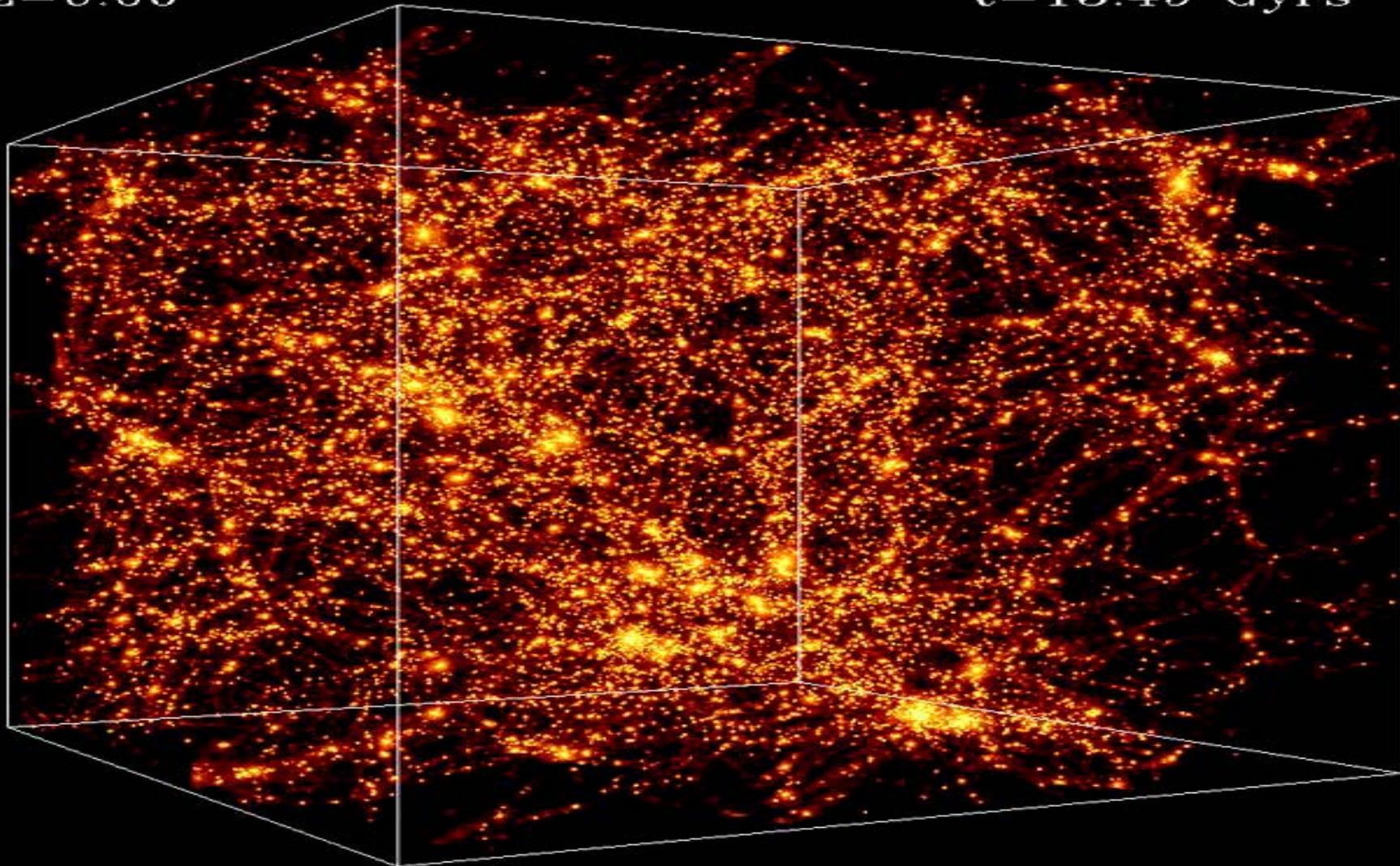


Получаем теоретическую функцию масс скоплений галактик $n(M)$

Моделирование структуры

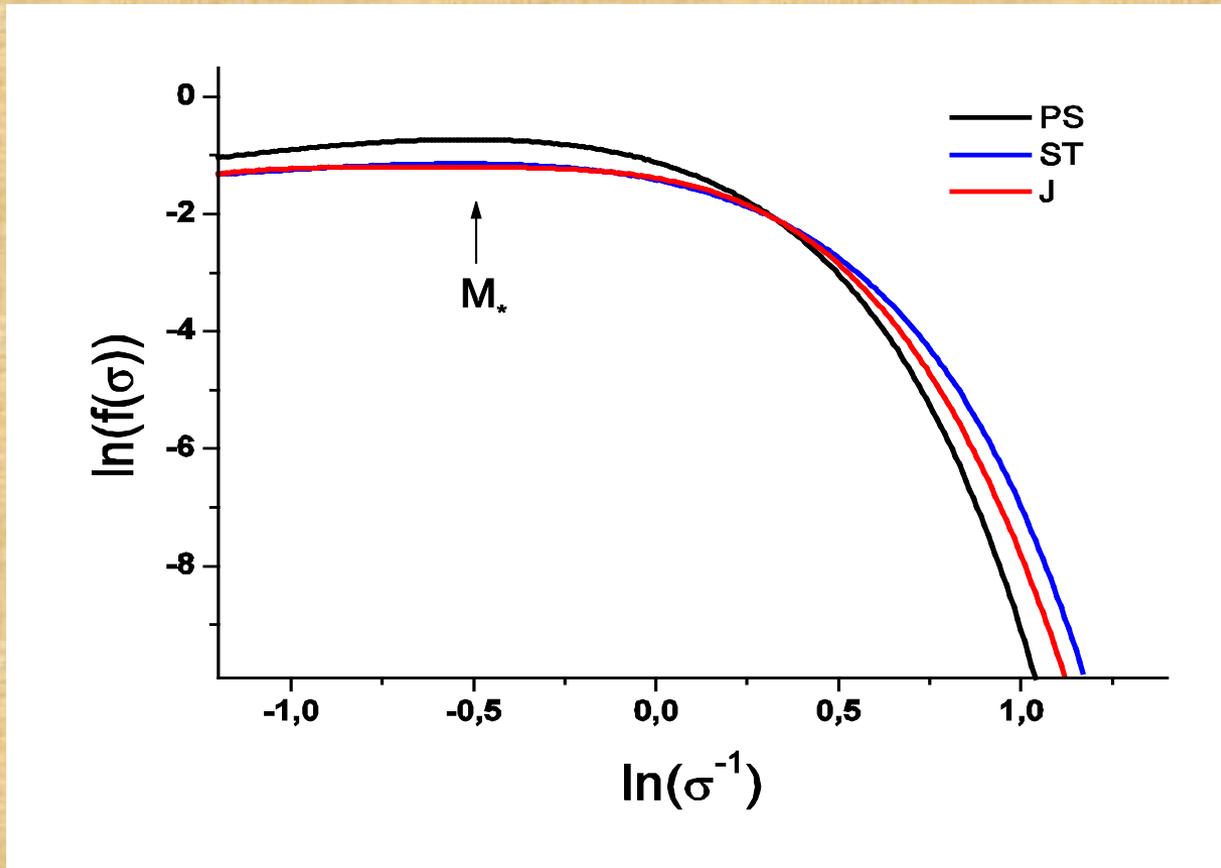
$z=0.00$

$t=13.49$ Gyrs



Теоретические функции

масс

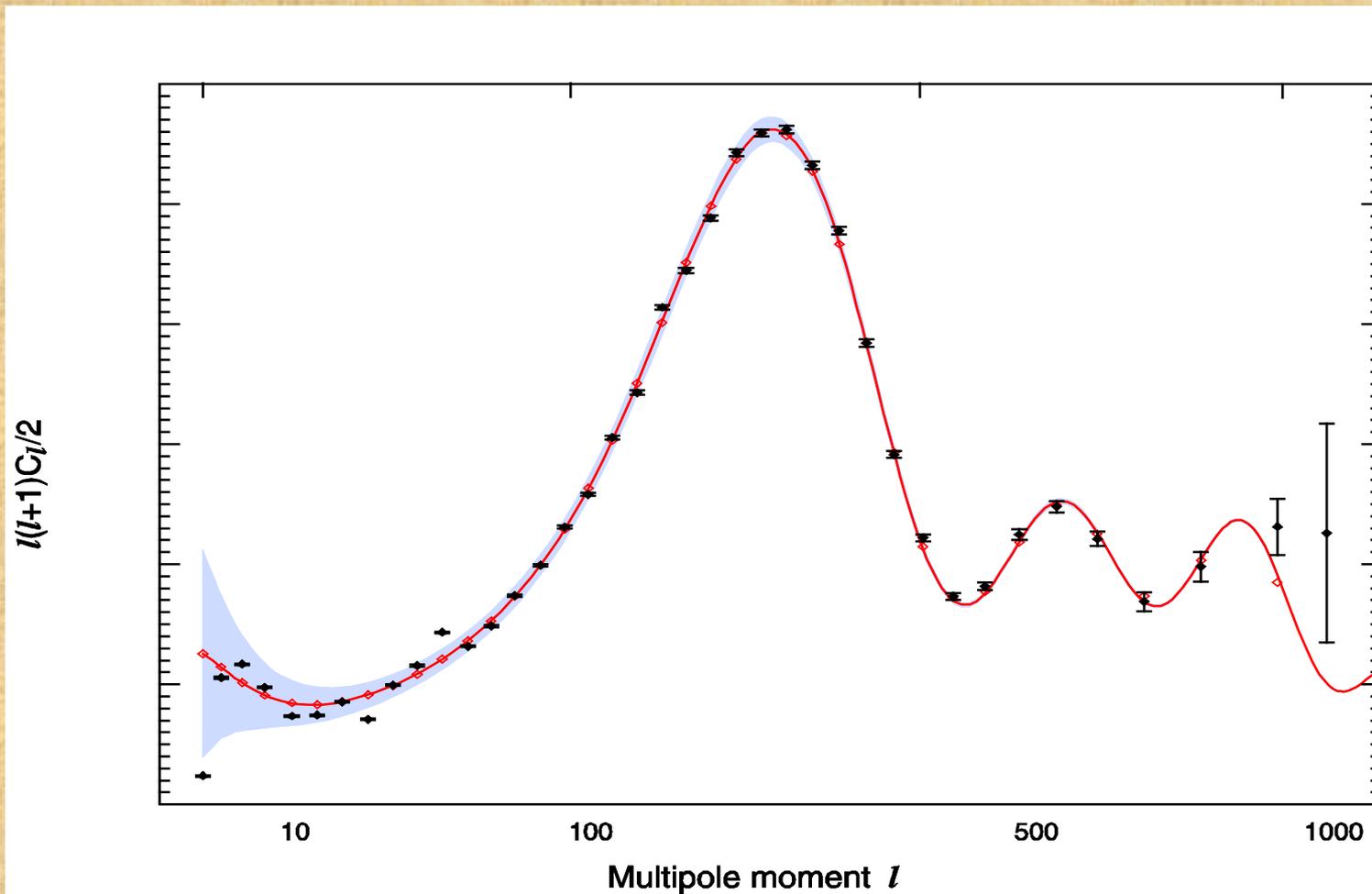


$$\sigma(M_*) = \delta_c(\Omega_m, \Omega_\Lambda)$$

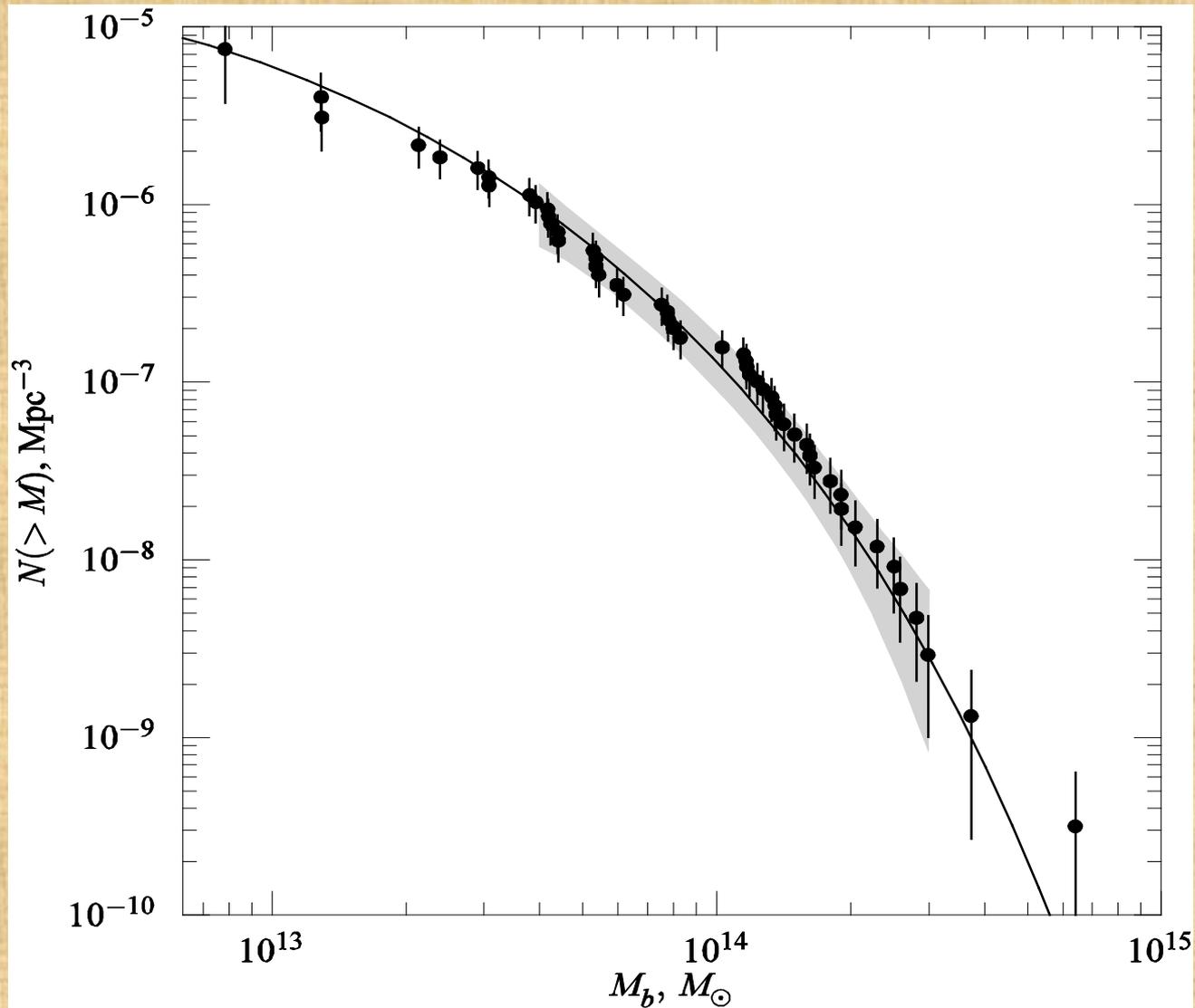
Наблюдательные данные

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

Наблюдательные данные: СМВ



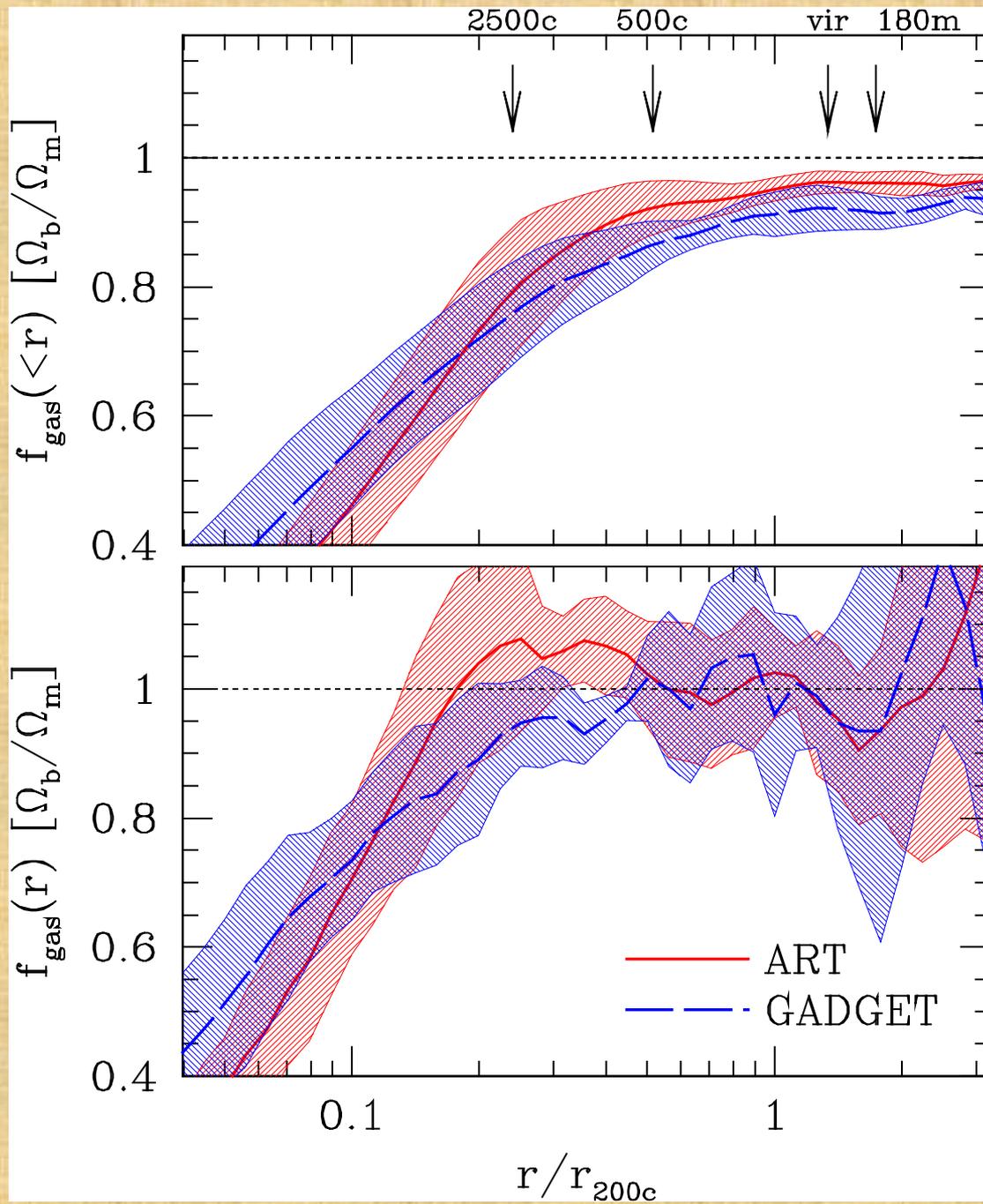
Наблюдательные данные: LSS



Метод определения полной массы скопления

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

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



Общие детали

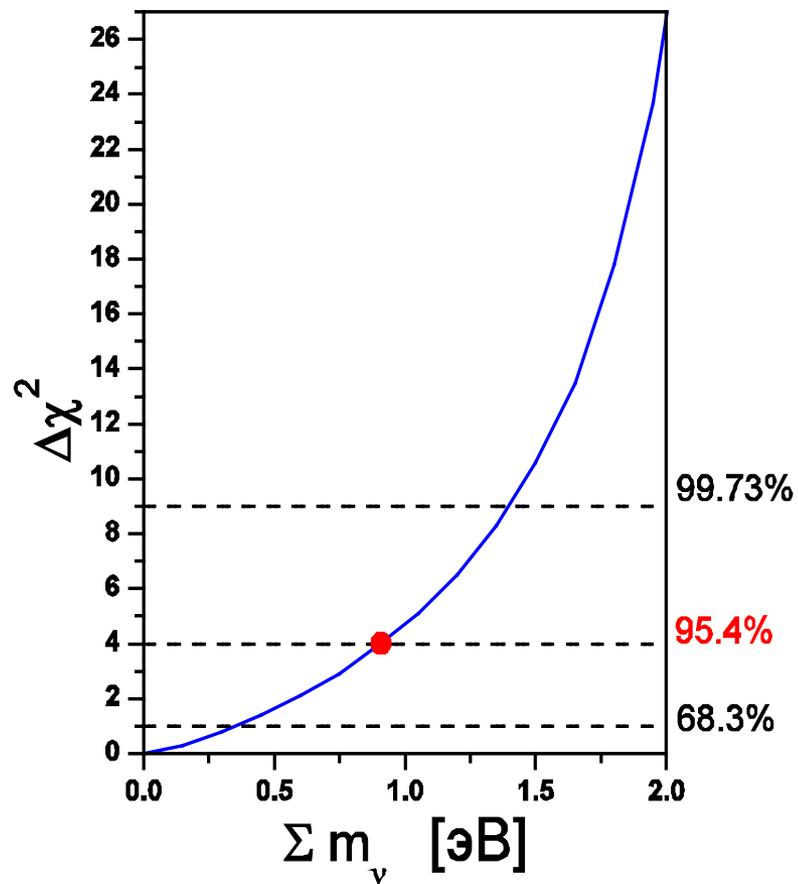
- Для анализа использовалась плоская ($\Omega_{\text{tot}} = 1$) Λ CDM модель Вселенной с адиабатическими начальными условиями.
- Число массивных сортов нейтрино было принято равным 3, с одинаковыми массами.

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: $\Omega_b h^2 = 0.0226$ (Larson et al. 2010).

Всего, таким образом, 37485 моделей

Результаты



Вывод

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

- $$\sum m_n < 0.9 \text{ эВ}$$

(уровень достоверности 95%)

- Таким образом, для максимальной массы нейтрино имеем:

- $$0.05 < m_n < 0.3 \text{ эВ}$$

Результаты по ограничению массы

Данные	Авторы	$S m_n$
$N(z)$	Кахниашвили и др., 05	$< 2.4 \text{ эВ}$
WMAP1	Ichikawa et al., 05	$< 2.1 \text{ эВ}$
WMAP7	Larson et al., 10	$< 1.3 \text{ эВ}$
WMAP7 + N	Малиновский и др., 10	$< 0.9 \text{ эВ}$
WMAP7+BAO+ H_0	Komatsu et al., 10	$< 0.58 \text{ эВ}$
WMAP5+N+N(z)+ SNIa+BAO	Vikhlinin et al., 09	$< 0.33 \text{ эВ}$
WMAP5+Galaxy+ BAO+SNIa+ H_0	Thomas et al., 10	$< 0.28 \text{ эВ}$
WMAP3+SNIa + SDSS+Ly α +BAO	Seljak et al., 06	$< 0.17 \text{ эВ}$