

Определение масс нейтрино с помощью глубоких обзоров неба «Евклид» и «Спектр-Рентген-Гамма»

Михаил Иванов, Антон Чудайкин, Zaldarriaga Matias, Simonović Marko

Институт Ядерных Исследований

chudy@ms2.inr.ac.ru

18 декабря 2018 г.

- 1 Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Теория возмущений на временных расслоениях (ТВВР)
- 3 Результаты

1 Крупномасштабная структура Вселенной

2 Теория возмущений на временных расслоениях (ТВВР)

3 Результаты

Прямые поиски

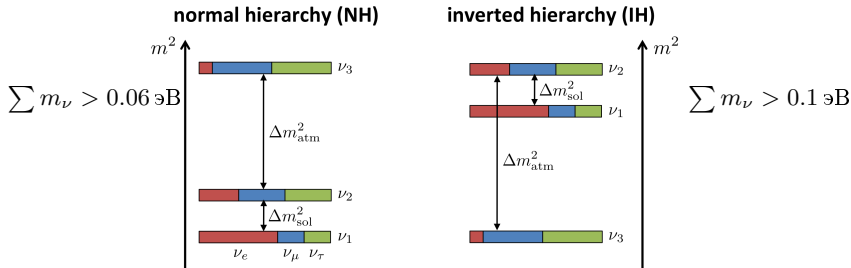
$$\sum m_\nu < 2 \text{ эВ} \quad (\text{Aseev et al., 1108.5034})$$

Ограничения из космологии

$$\sum m_\nu < 0.26 \text{ эВ} \quad \text{Planck2018 TT, TE, EE+lowTE}$$

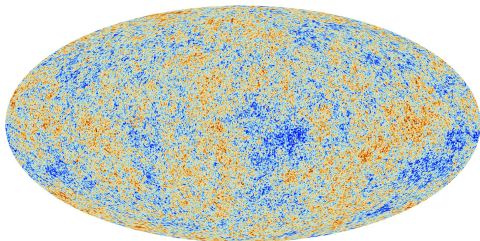
$$\sum m_\nu < 0.12 \text{ эВ} \quad \text{Planck2018 TT, TE, EE+lowTE+lensing+BAO}$$

$$\sum m_\nu < 0.12 \text{ эВ} \quad \text{Ly}\alpha$$

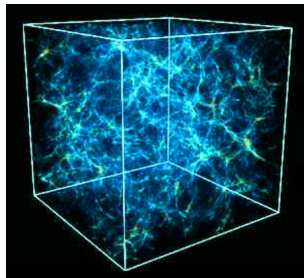


$$\sigma \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$$

$$N_{\text{CMB}} \sim l_{\text{max}}^2 \sim 10^7$$



$$N_{\text{LSS}} \sim \left(\frac{\lambda_{\text{max}}}{\lambda_{\text{min}}} \right)^3 \sim 10^9$$



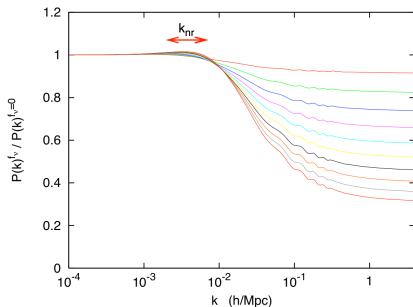
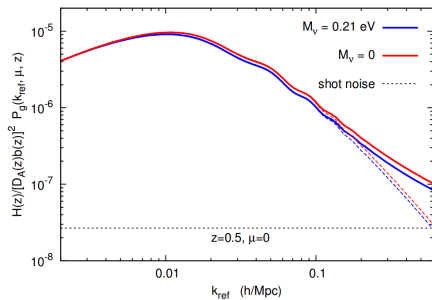
$$\rho_m(\vec{x}, t) = \bar{\rho}_m(t)(1 + \delta_m(\vec{x}, t))$$



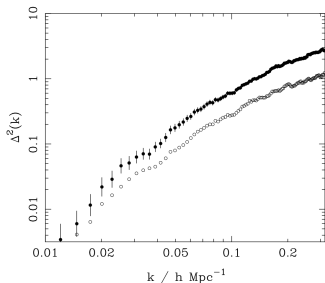
Одномоментные корреляционные функции

$$\langle \delta_{\mathbf{k}_1} \delta_{\mathbf{k}_2} \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) P(k)$$

$$\langle \delta_{\mathbf{k}_1} \delta_{\mathbf{k}_2} \delta_{\mathbf{k}_3} \rangle = (2\pi)^3 \delta(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3) B(\mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3)$$



$$\delta_g = b_1 \delta + \frac{b_2}{2} \delta^2 + b_{\mathcal{G}_2} \mathcal{G}_2 + b_{\Gamma_3} \Gamma_3$$



$$\mathcal{G}_2(\Phi) \equiv (\partial_i \partial_j \Phi)^2 - (\partial^2 \Phi)^2$$

$$\Gamma_3(\Phi_g, \phi_v) \equiv \mathcal{G}_2(\Phi_g) - \mathcal{G}_2(\Phi_v)$$

Спектр мощности галактик

$$P(k) \rightarrow P_g(k) = b_1^2 P(k) + b_1 b_2 \mathcal{I}_{\delta^2}(k) + 2b_1 b_{\mathcal{G}_2} \mathcal{I}_{\mathcal{G}_2}(k) +$$

$$(2b_1 b_{\mathcal{G}_2} + 0.8b_1 b_{\Gamma_3}) \mathcal{F}_{\mathcal{G}_2}(k) + 0.25b_2^2 \mathcal{I}_{\delta^2 \delta^2}(k) + b_{\mathcal{G}_2}^2 \mathcal{I}_{\mathcal{G}_2 \mathcal{G}_2}(k) +$$

$$0.5b_2 b_{\mathcal{G}_2} \mathcal{I}_{\delta^2 \mathcal{G}_2}(k)$$

Пространство красных смещений

$$\mathcal{H} = aH \quad f = \ln D_+ / \ln a \quad \delta_L = D_+ \delta_0 \quad \mu \equiv k_z / k$$



$$z = \mathcal{H}r + v_z$$

$$\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{s} + \hat{\mathbf{z}} \frac{v_z}{\mathcal{H}}$$

$$\delta_{\mathbf{k}} \rightarrow \delta_{\mathbf{k}}^{(s)} (1 + f\mu^2)$$

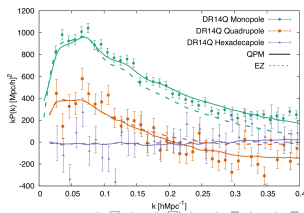
Формула Кайзера

$$P_g(k) \rightarrow P_g^{(s)}(k) = P_g(k) \left(1 + \frac{f}{b_1} \mu^2\right)^2 = \sum_{l=0}^{\infty} P_l(k) L_l(\mu)$$

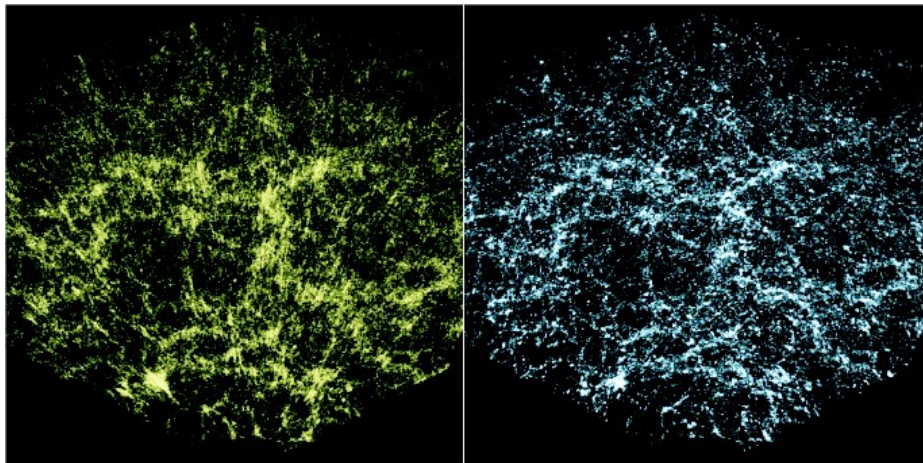
$$P_0(k) = \left[1 + \frac{2}{3} \frac{f}{b_1} + \frac{1}{5} \left(\frac{f}{b_1}\right)^2\right] P_g(k)$$

$$P_2(k) = \left[\frac{4}{3} \frac{f}{b_1} + \frac{4}{7} \left(\frac{f}{b_1}\right)^2\right] P_g(k)$$

$$P_4(k) = \left[\frac{8}{35} \left(\frac{f}{b_1}\right)^2\right] P_g(k)$$



Искажение пространства красных смещений



- 1 Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Теория возмущений на временных расслоениях (ТВВР)
- 3 Результаты

Эффект нелинейностей

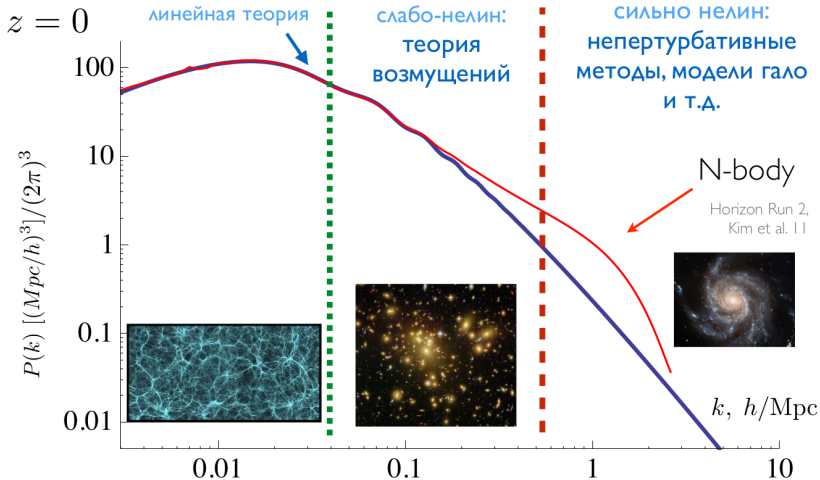
$$\Delta^2 = \frac{k^3}{2\pi^2} P(k)$$

$$P(k) = \langle \delta_{\mathbf{k}} \delta_{-\mathbf{k}} \rangle$$

$$\delta \ll 1$$

$$\delta \lesssim 1$$

$$\delta \gtrsim 1$$



$$\theta \equiv -\nabla \mathbf{v} / (f\mathcal{H})$$

$$\frac{\partial \delta}{\partial \tau} + \nabla[(1 + \delta)\mathbf{v}] = 0$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + \mathcal{H}\mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla)\mathbf{v} = -\nabla\Phi$$

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G a^2 \bar{\rho} \delta$$

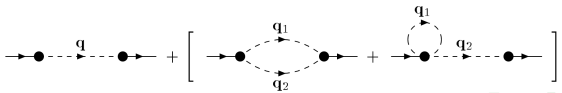
ЛО: $\theta = -f\delta$

Стандартная теория возмущений

$$\delta(\mathbf{q}) = \sum_n \int F_n(\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n) \delta_L(\mathbf{q}_1) \dots \delta_L(\mathbf{q}_n), \quad \theta(\mathbf{q}) = \sum_n \int G_n(\mathbf{q}_1, \dots, \mathbf{q}_n) \delta_L(\mathbf{q}_1) \dots \delta_L(\mathbf{q}_n)$$

$$Z[J] = \mathcal{N}^{-1} \int \mathcal{D}\delta_0 \exp \left\{ -\frac{\delta_0^2}{2P_0} + J \cdot \delta_t \right\} \quad \delta_0 \rightarrow \delta_{NL}, \mathbf{v}_{NL}$$

$$P_{1-loop} = P_L(k) + \int_0^\infty d^3 q_1 P_L(q_1, t) \int_0^\infty d^3 q_2 P_L(q_2, t) [2F_2^2(\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2) + 6F_3(\mathbf{q}_1, -\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2)] =$$



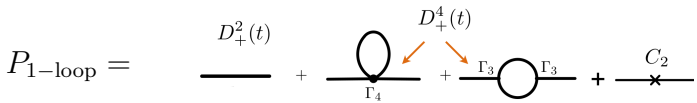
$$\partial_t \mathcal{P} + \frac{\partial}{\partial \delta} (\dot{\delta} \mathcal{P}) = 0$$

$$\mathcal{P}[\delta]|_{t=0} = \mathcal{N}^{-1} \exp \left[-\frac{1}{2} \int \frac{\delta_0(k) \delta_0(-k)}{P(k, t_0)} \right]$$

Теория возмущений на временных расслоениях

$$\mathcal{P}(\delta, t) = \mathcal{N}^{-1} \exp \left\{ -\sum_{n=1} \frac{1}{n!} \int [dq]^n \Gamma_n(t, \{q_j\}) \delta^n \right\}$$

$$Z[J] = \mathcal{N}^{-1} \int \mathcal{D}\delta_t \mathcal{P}[\delta_t] \exp \{ J \cdot \delta_t \} \quad \mathcal{P}[\delta_0] \rightarrow \mathcal{P}[\delta_{NL}, \mathbf{v}_{NL}, \dots]$$



- 1 Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Теория возмущений на временных расслоениях (ТВВР)
- 3 Результаты

Pozzetti et al., 2016 [arXiv:1603.01453]

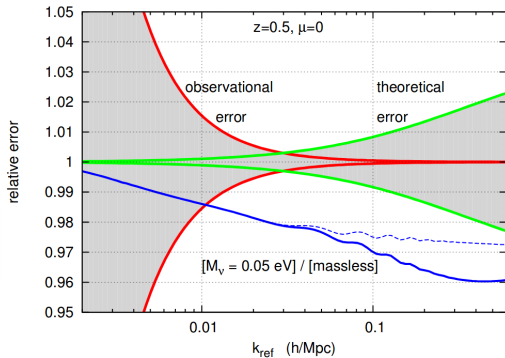
z_i	$V h^3, \text{Гпк}^3$	$n_g 10^3/h^3, \text{Мпк}^{-3}$
0.6	4.59	38.24
0.8	6.46	20.77
1.0	8.02	11.8
1.2	9.26	6.95
1.4	10.18	3.91
1.6	10.84	2.1
1.8	11.29	1.17
2.0	11.57	0.68

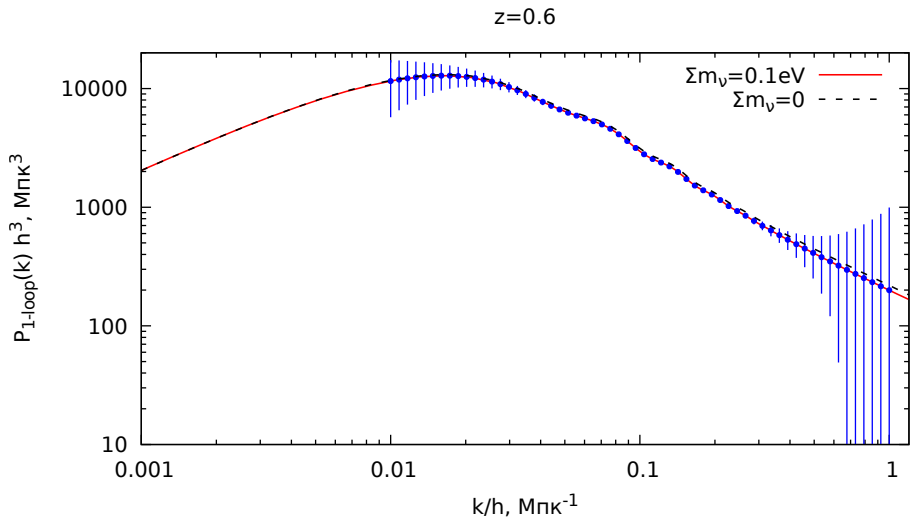
$$C_{kk'} = \frac{(2\pi)^3}{V(z_i)} \frac{1}{2\pi k^2 dk} \left(P_g(k, z_i) + \frac{1}{n_g(z_i)} \right)^2$$

$$E_i(z) = \left(\frac{D_+(z)}{D_+(0)} \right)^{2l} P_g(k_i, z) \begin{cases} \left(\frac{k_i/h}{0.31} \right)^{1.8} & l = 1 \text{ для } P_L \\ \left(\frac{k_i/h}{0.45} \right)^{3.3} & l = 2 \text{ для } P_{1\text{-loop}} \end{cases}$$

$$C_{ij} = E_i \rho_{ij} E_j$$

$$\rho_{ij} = \exp \left\{ - \frac{(k_i - k_j)^2}{2\Delta k} \right\}$$

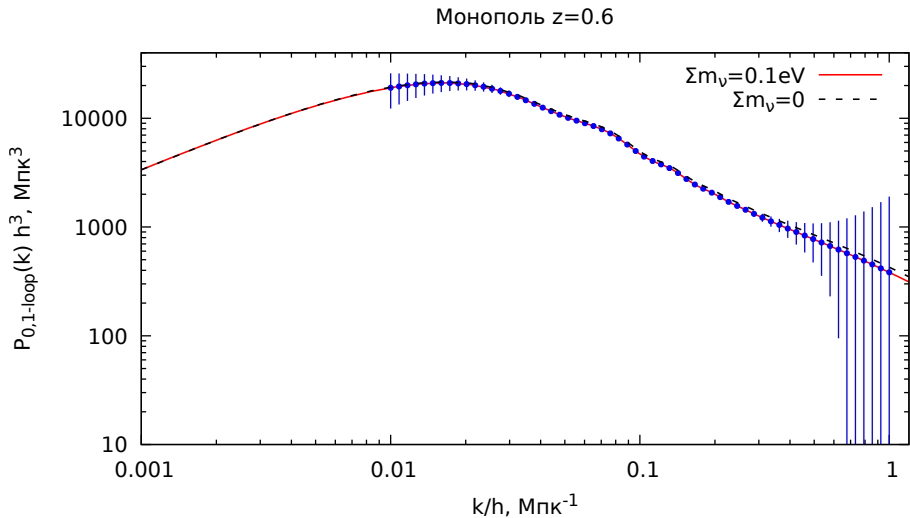


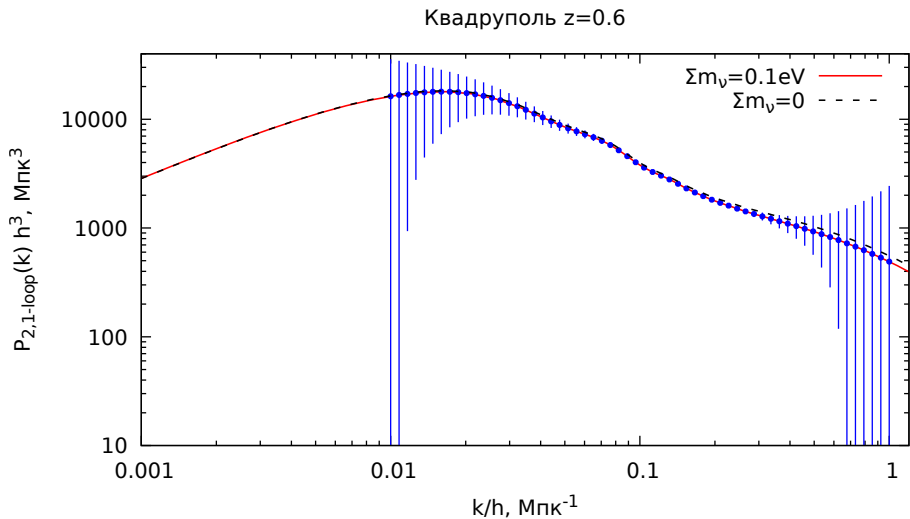


Нахождение апостериорного распределения методом МСМС

$$P_g(k, z) \rightarrow P_g(k, z) - 2c_s^2 k^2 P_g^2(k, z)$$

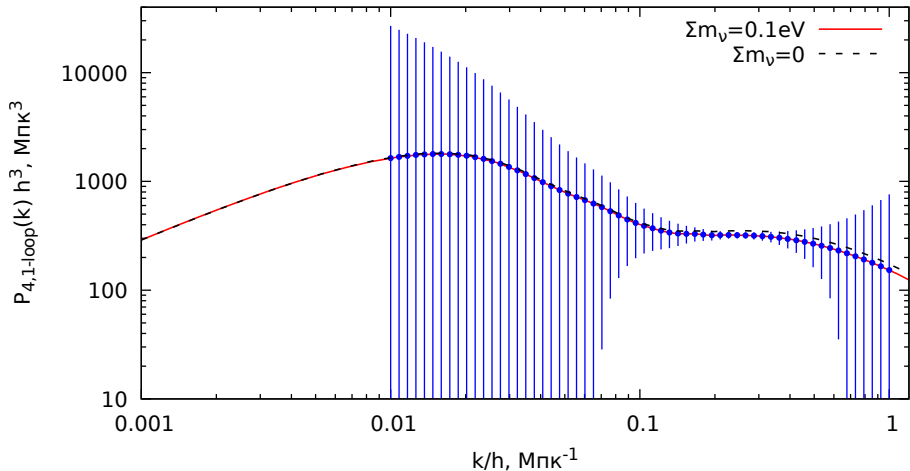
Свободный параметр	Описание
h	Постоянная Хаббла
$\Omega_b h^2$	Плотность барионной материи
$\Omega_c h^2$	Плотность холодной тёмной материи
n_s	Наклон спектра
A_s	Амплитуда спектра
$b_1(z_1), \dots, b_1(z_8)$	Линейное смещение
$b_2(z_1), \dots, b_2(z_8)$	Нелинейное смещение
$b_{G_2}(z_1), \dots, b_{G_2}(z_8)$	Приливное смещение
$b_{\Gamma_3}(z_1), \dots, b_{\Gamma_3}(z_8)$	Смещение Γ_3
$c_s^2(z_1), \dots, c_s^2(z_8)$	Отклик коротковолновых мод
$P_{\text{shot}}(z_1), \dots, P_{\text{shot}}(z_8)$	Статистический шум
Пространство красных смещений	
$c_{s,0}^2(z_1), \dots, c_{s,0}^2(z_8)$	Отклик коротковолновых мод (монополь)
$c_{s,2}^2(z_1), \dots, c_{s,2}^2(z_8)$	Отклик коротковолновых мод (квадруполь)
$c_{s,4}^2(z_1), \dots, c_{s,4}^2(z_8)$	Отклик коротковолновых мод (гексадекаполь)
Биспектр	
$P_{\text{shot,b}}(z_1), \dots, P_{\text{shot,b}}(z_8)$	Статистический шум (биспектр)



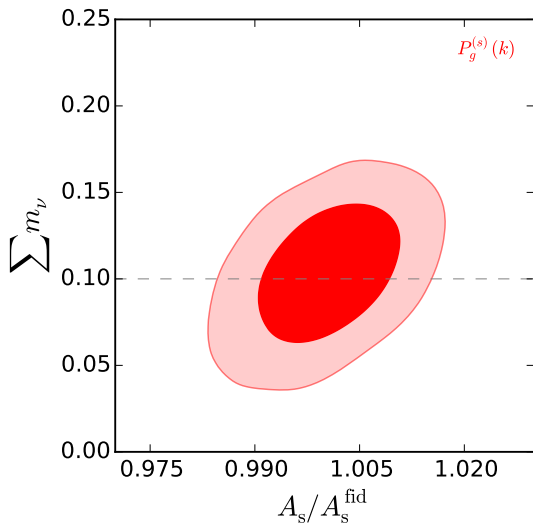


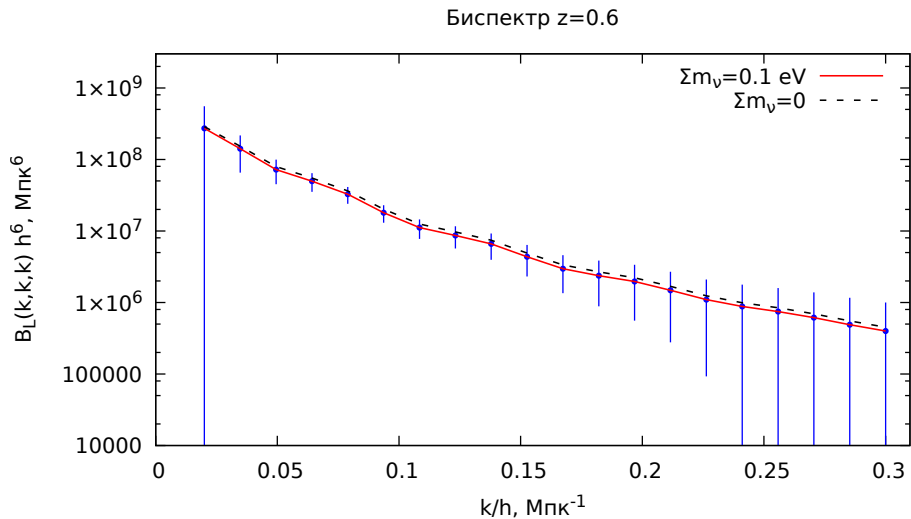
Пространство красных смещений: гексадекапольный спектр мощности

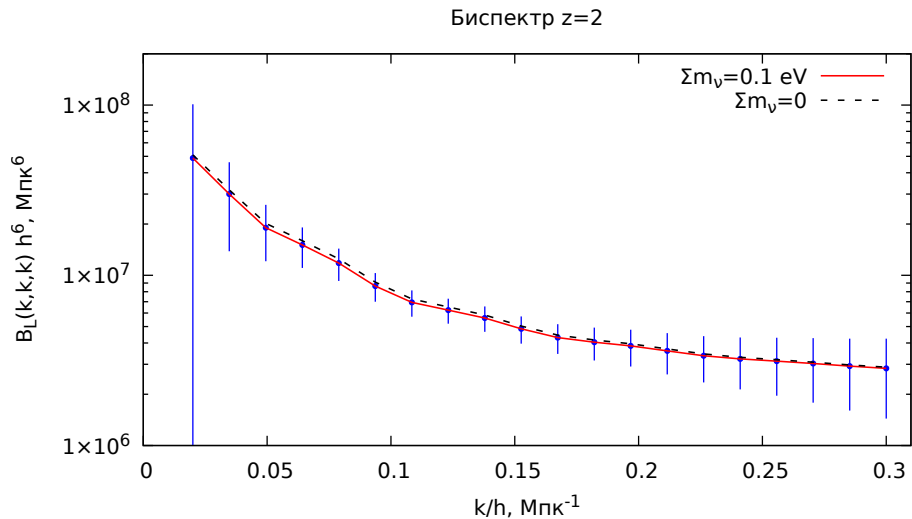
Гексадекаполь $z=0.6$



$$\sigma_{\sum m_\nu} = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

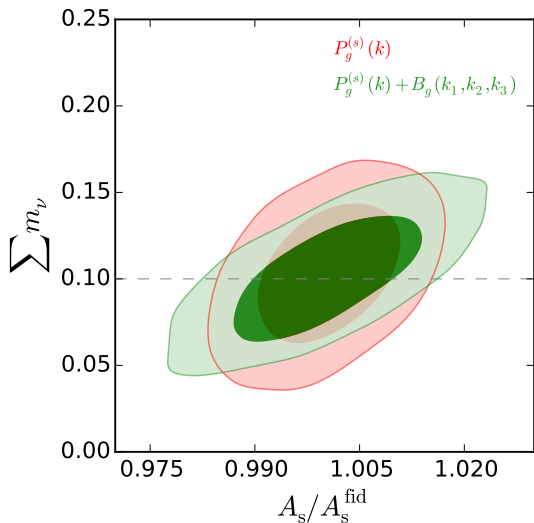






$$\sigma_{\sum m_\nu} = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

$$\sigma_{\sum m_\nu} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$



(Aghanim et al., 2018)

$$\left\langle \frac{\sigma_{A_s}}{A_s} \right\rangle_{\text{Planck}} = 1\%$$

(Vikhlinin et al., 2009)

$$\sigma_8 \left(\frac{\Omega_m}{0.3} \right)^{0.47} = 0.746 \pm 0.022(\text{sys}) \pm 0.012(\text{stat})$$

⇓

$$\left\langle \frac{\sigma_{A_s}}{A_s} \right\rangle_{\text{CPT}} = 6\%$$

$$\delta M/M = 0.09$$

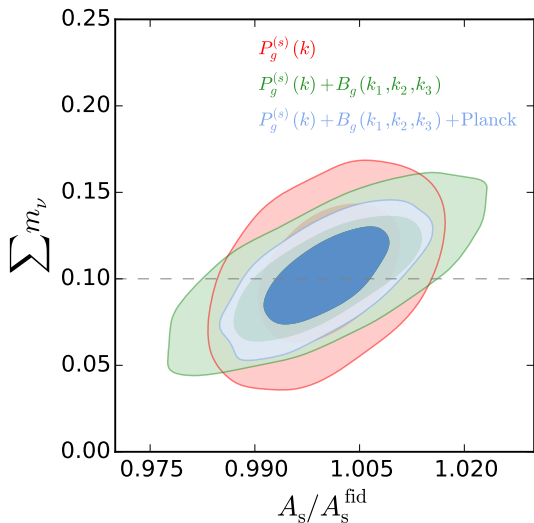
$$\left\langle \frac{\sigma_{A_s}}{A_s} \right\rangle_{\text{CPT}} = 2\%$$

$$\delta M/M = 0.03$$

$$\sigma_{\sum m_\nu} = 2.7 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

$$\sigma_{\sum m_\nu} = 2.4 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$

$$\sigma_{\sum m_\nu} = 1.9 \cdot 10^{-2} \text{ эВ}$$



- ТВВР позволяет эффективно совершать процедуру ИК-пересуммирования и обладает естественным формализмом для учета коротковолновой физики
- ТВВР позволяет вычислять одновременные корреляционных функции с точностью $\lesssim 1\%$ на масштабе $k/h = 0.1 \text{ Мпк}^{-1}$ что необходимо для анализа данных предстоящих глубоких обзоров неба

Открытие массы нейтрино $\sum m_\nu = 0.06 \text{ эВ}$ по $P_g^{(s)}$ на уровне достоверности 2σ ,
а по $P_g^{(s)} + B_g(k_1, k_2, k_3) + \text{Planck/CRP}$ с достоверностью 3σ

Планируется учесть однопетлевой вклад в биспектр, который позволит определить массу нейтрино с большей точностью

Спасибо за внимание