

# Модели многокомпонентной темной материи в космологии и астрофизике

Антон Чудайкин

01.04.02 - теоретическая физика

Научный руководитель:  
Дмитрий Горбунов

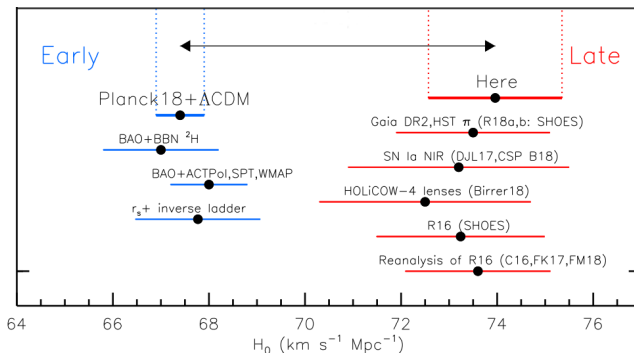
16 мая 2019 г.

- 1 Космологическая модель с распадающейся темной материей
  - Проблемы наблюдательной космологии
  - Гравитационное линзирование
  - Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Стерильные нейтрино как часть темной материи
  - Мотивация
  - Фазовый переход в скрытом секторе
- 3 Когерентно осциллирующее слабо взаимодействующее скалярное поле
  - Параметрический резонанс
  - Осцилляции нейтрино в режиме большого поля
  - Рождение внешним полем
- 4 Положения, выносимые на защиту

- 1 Космологическая модель с распадающейся темной материей
  - Проблемы наблюдательной космологии
  - Гравитационное линзирование
  - Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Стерильные нейтрино как часть темной материи
  - Мотивация
  - Фазовый переход в скрытом секторе
- 3 Когерентно осциллирующее слабо взаимодействующее скалярное поле
  - Параметрический резонанс
  - Осцилляции нейтрино в режиме большого поля
  - Рождение внешним полем
- 4 Положения, выносимые на защиту

| Сверхновые типа Ia                              | «Планк» TT+TE+EE+lowP                           |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $H_0 = 73.24 \pm 1.74$ A. G. Riess et. al, 2016 | $H_0 = 67.27 \pm 0.6$ P. A. R. Ade et al., 2015 |

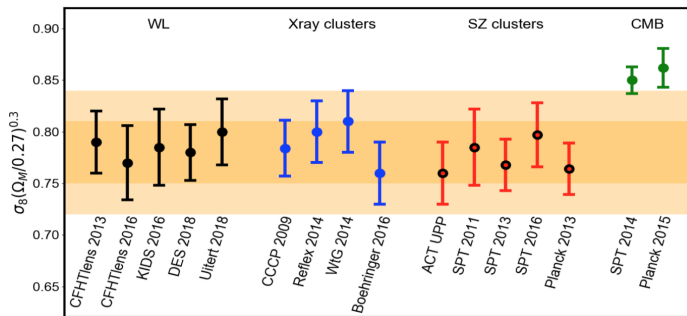
Единицы измерения км/с/Мпк, ошибка  $1\sigma$ .



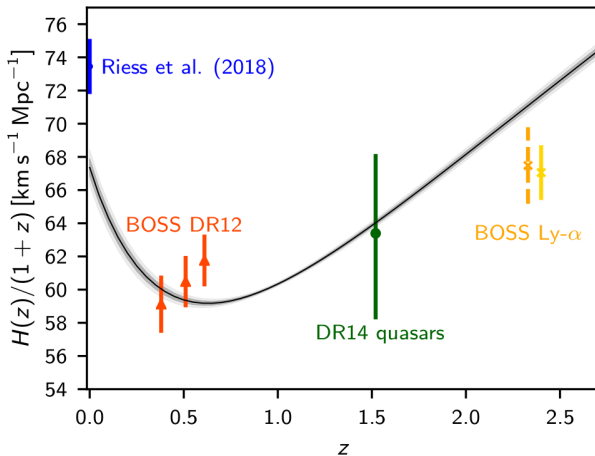
# Амплитуда линейных возмущений плотности материи

| Каталог скоплений галактик «Планк»                     | «Планк» TT+TE+EE+lowP                                  |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| $\sigma_8 = 0.782 \pm 0.010$ P. A. R. Ade et al., 2015 | $\sigma_8 = 0.831 \pm 0.013$ P. A. R. Ade et al., 2015 |

Ограничение по каталогу скоплений галактик «Планк» получено для  $\Omega_m = 0.27$ , ошибки  $1\sigma$ .



# Барионные акустические колебания в распределении облаков нейтрального водорода на $z_{\text{eff}} = 2.4$



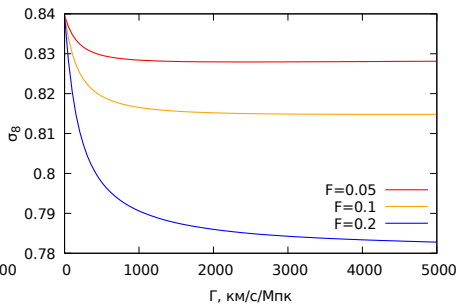
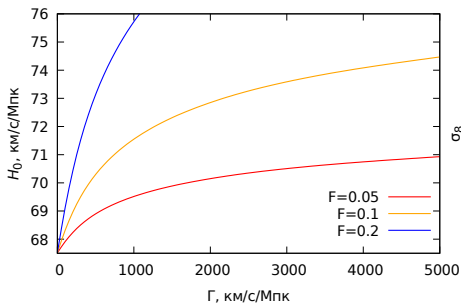
# Космологическая модель с распадающейся темной материей

$$F = \frac{\Omega_{\text{ddm}} h^2}{\Omega_{\text{sdm}} h^2 + \Omega_{\text{ddm}} h^2} - \text{доля нестабильной холодной темной материи}$$

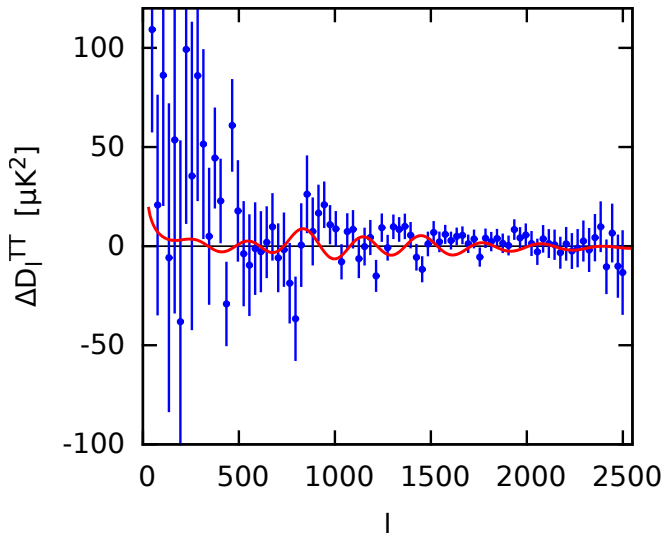
$\Gamma$  [км/с/Мпк] - ширина распада нестабильной частицы

$$\dot{\rho}_{\text{ddm}} + 3H\rho_{\text{ddm}} = -\Gamma\rho_{\text{ddm}}$$

$$\dot{\rho}_{\text{rd}} + 4H\rho_{\text{rd}} = \Gamma\rho_{\text{ddm}}$$



Chudaykin et. al, 2016



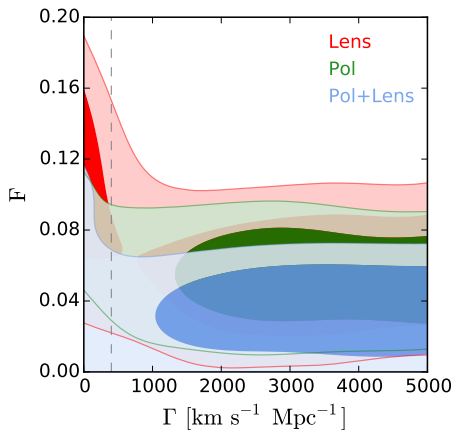
# Моделирование Монте-Карло марковских цепей

| Параметр                   | Описание                                              |
|----------------------------|-------------------------------------------------------|
| $\Omega_b h^2$             | Плотность барионной материи                           |
| $\Omega_c h^2$             | Плотность холодной темной материи                     |
| $100 \cdot \theta_*$       | Угловой размер звукового горизонта в момент $z = z_*$ |
| $\tau$                     | Оптическая толща реионизации                          |
| $n_s$                      | Наклон спектра начальных возмущений                   |
| $\ln(10^{10} A_s)$         | Амплитуда спектра начальных возмущений                |
| <b>F</b>                   | Доля нестабильной холодной темной материи             |
| <b><math>\Gamma</math></b> | Ширина соответствующего распада                       |

| Набор    | Описание                                                                                                                               |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| TT,TE,EE | TT, TE, EE спектры «Планк» на $l \geq 30$ , а также TT в области $l \leq 29$                                                           |
| lowP     | TE, EE спектры на $l \leq 29$                                                                                                          |
| lens     | Измерение $C_l^{\phi\phi}$ по картам «Планк» TTTT, TTTEE, ...                                                                          |
| $H_0$    | Измерение постоянной Хаббла $H_0 = 73.24 \pm 1.74$ по сверхновым типа Ia<br>A. G. Riess et. al, 2016                                   |
| CL       | Измерение $\sigma_8(\frac{\Omega_m}{0.27})^{0.3} = 0.782 \pm 0.01$ по каталогу скоплений галактик «Планк»<br>P. A. R. Ade et al., 2015 |

# Результат по данным «Планк» и сверхновым типа Ia

| Обозначение | Набор                                   | Улучшение    |
|-------------|-----------------------------------------|--------------|
| Pol         | (TT, TE, EE + $H_0$ + CL) + lowP        | $1.86\sigma$ |
| Lens        | (TT, TE, EE + $H_0$ + CL) + lens        | $2\sigma$    |
| Pol + Lens  | (TT, TE, EE + $H_0$ + CL) + lowP + lens | $1.17\sigma$ |



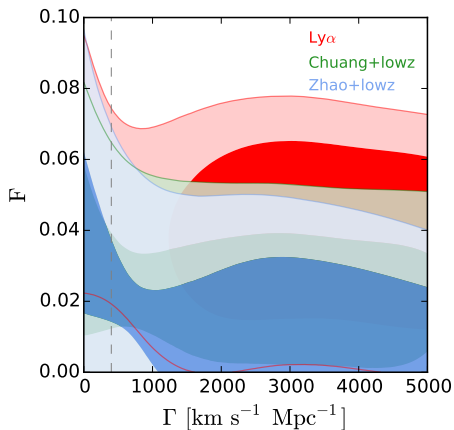
$$F \simeq 2 - 7\%$$

$$D_A(z) = (1+z)^{-1} \int_0^z dz' / H(z') \quad D_H(z) = 1/H(z) \quad f(z) = \frac{d \ln \delta}{d \ln a}$$

| Изотропные измерения $D_V/r_s \equiv D_A^{2/3} D_H^{1/3} / r_s$ : |              |                             |
|-------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------------------|
| $z = 0.106$                                                       | 6dFGS        | F. Beutler et. al, 2011     |
| $z = 0.15$                                                        | MGS          | A. J. Ross et. al, 2015     |
| Анизотропные измерения $D_A/r_s$ и $D_H/r_s$ на $0.2 < z < 0.75$  |              |                             |
| $P(\vec{k})$ на $(z_1, z_2, z_3)$                                 | Cuesta       | A. J. Cuesta et. al, 2016   |
| $\xi(\vec{s})$ на $(z_1, z_2, z_3)$                               | Gil-Marín(a) | H. Gil-Marín et. al, 2016   |
| $P(\vec{k}) + \xi(\vec{s})$ на $(z_1, z_2, z_3)$                  | Alarm        | S. Alam et. al, 2016        |
| $P(\vec{k})$ на $(z_1, \dots, z_9)$                               | Zhao         | G.-B. Zhao et. al, 2017     |
| $\xi(\vec{s})$ на $(z_1, \dots, z_9)$                             | Wang         | Y. Wang et. al, 2016        |
| Измерения $D_A/r_s$ , $D_H/r_s$ и $f\sigma_8$ на $0.2 < z < 0.75$ |              |                             |
| $\xi(\vec{s})$ на $(z_1, z_2)$                                    | Chuang(a)    | C.-H. Chuang et. al, 2016   |
| $\xi(\vec{s})$ на $(z_1, \dots, z_4)$                             | Chuang(b)    | C.-H. Chuang et. al, 2016   |
| $P(\vec{k})$ на $(z_1, z_2)$                                      | Gil-Marín(b) | H. Gil-Marín et. al, 2016   |
| $P(\vec{k}) + \xi(\vec{s})$ на $(z_1, z_2, z_3)$                  | Alarm        | S. Alam et. al, 2016        |
| Измерения $D_A/r_s$ и $D_H/r_s$ на $2 < z < 3.4$                  |              |                             |
| $\text{Ly}\alpha$ -quasar                                         | Bourboux     | H. M. Bourboux et. al, 2017 |
| $\text{Ly}\alpha$ - $\text{Ly}\alpha$                             | Bautista     | J. E. Bautista et. al, 2017 |

# Результат по данным «Планк», сверхновым Ia, 6dGS и SDSS BOSS DR12

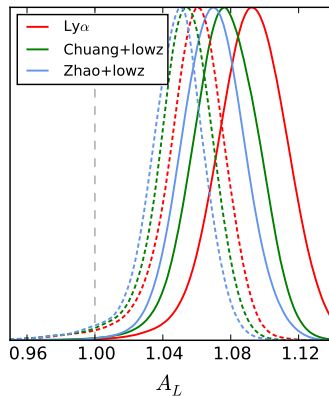
| Обозначение | Набор                                                       | Улучшение |
|-------------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| Zhao+lowz   | (TT, TE, EE+H <sub>0</sub> +CL)+lowP+lens+Zhao+6dFGS+MGS    | 0.14σ     |
| Chuang+lowz | (TT, TE, EE+H <sub>0</sub> +CL)+lowP+lens+Chuang+6dFGS+MGS  | 0.86σ     |
| Lyα         | (TT, TE, EE+H <sub>0</sub> +CL)+lowP+lens+Bourboux+Bautista | 1.48σ     |



$$F \simeq 2 - 5 \%$$

$$C_l^{\phi\phi} \rightarrow A_L C_l^{\phi\phi}$$

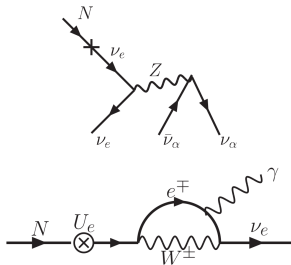
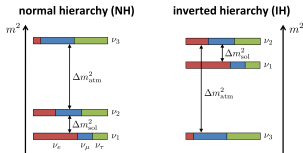
| Набор                       | Улучшение    |
|-----------------------------|--------------|
| Zhao+lowz                   | $0.14\sigma$ |
| Chuang+lowz                 | $0.86\sigma$ |
| Ly $\alpha$                 | $1.48\sigma$ |
| Zhao+lowz+A <sub>L</sub>    | $1.65\sigma$ |
| Chuang+lowz+A <sub>L</sub>  | $1.78\sigma$ |
| Ly $\alpha$ +A <sub>L</sub> | $3.26\sigma$ |



$$F \simeq 3 - 9\%$$

- 1 Космологическая модель с распадающейся темной материей
  - Проблемы наблюдательной космологии
  - Гравитационное линзирование
  - Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 **Стерильные нейтрино как часть темной материи**
  - Мотивация
  - Фазовый переход в скрытом секторе
- 3 Когерентно осциллирующее слабо взаимодействующее скалярное поле
  - Параметрический резонанс
  - Осцилляции нейтрино в режиме большого поля
  - Рождение внешним полем
- 4 Положения, выносимые на защиту

$$\mathcal{L}_N = i\bar{N}\partial N + \frac{M}{2}\bar{N}^c N + y_\alpha \bar{L}_\alpha N \tilde{\mathcal{H}} + \text{h.c.}$$



$$m_a \simeq \frac{m_D^2}{M} = \frac{(y_\alpha \langle \mathcal{H} \rangle)^2}{M} \sim \sqrt{\Delta m_{\text{sol}}^2}, \sqrt{\Delta m_{\text{atm}}^2}$$

$$\Gamma_{N \rightarrow 3\nu} = \frac{G_F^2 M^5}{96\pi^3} \sin^2 \theta < H_0$$

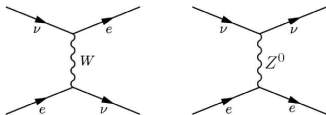
$$M < 50 \text{ кэВ} \left( \frac{1.1 \cdot 10^{-7}}{\theta^2} \right)^{1/5}$$

$$N \rightarrow \nu_e \gamma$$

$$M \stackrel{?}{=} 7.1 \text{ кэВ}$$

Проблемы холодной темной материи на малых масштабах

- недостаток галактик-спутников
- to-big-to-fail
- проблема сингулярного гало



$$\Gamma \approx 1.27 \cdot G_F^2 y T^5$$

$$V_{\text{eff}} \approx -\frac{14\pi}{45\alpha} G_F^2 y T^5 (2 + \cos^2 \theta_W) \sin^2 \theta_W$$

$$-HT \left. \frac{\partial f_N}{\partial T} \right|_{y=\text{const}} = \frac{\sin^2 2\theta}{\sin^2 2\theta + (\cos 2\theta - V_{\text{eff}} 2yT/M^2)^2} \frac{\Gamma}{4} f_A$$

Нерезонансное производство

$$\langle\langle p \rangle\rangle = 3.15T$$

$$\frac{f_N}{f_A} = \frac{2.9}{\sqrt{g_*}} \left( \frac{\theta^2}{10^{-6}} \right) \left( \frac{M}{1 \text{ кэВ}} \right) \frac{\pi}{4}$$

$$\Omega_N h^2 = \frac{M \cdot n_N}{\rho_{\text{crit}}/h^2} = \frac{1}{10.5} \left( \frac{M}{1 \text{ кэВ}} \right) \left( \frac{n_N}{1 \text{ см}^{-3}} \right)$$

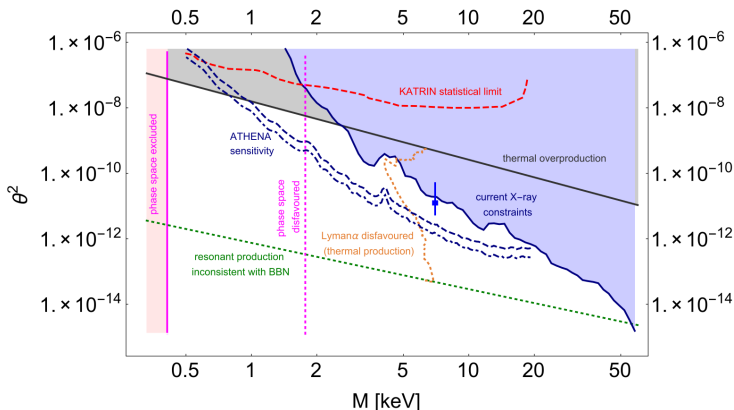
- Прямые поиски («Троицк ню-масс»)
- Плотность темной материи («Планк»)
- Ограничение на темп радиационных распадов
- Ограничение из структур ( $\text{Ly}\alpha$  лес Boyarsky et. al, 2009)

$$\theta^2 \lesssim 10^{-3}$$

$$\Omega_N < \Omega_{\text{DM}}$$

$$\Omega_N \sin^2 2\theta \lesssim 3 \cdot 10^{-5} \left( \frac{1 \text{ кэВ}}{M} \right)^5$$

$$M > 8 \text{ кэВ} \frac{\langle y \rangle}{3.15}$$



## Фазовый переход I рода в скрытом секторе

$$\mathcal{L} = i\bar{N}\hat{\partial}N + y_\alpha \bar{L}_\alpha N \tilde{\mathcal{H}} + \text{h.c.} + \mathcal{L}_{\phi N} + \mathcal{L}_\phi$$

$$\mathcal{L}_{\phi N} = \frac{f}{2} \phi \bar{N}^c N + \text{h.c.}$$

$$\begin{aligned} \langle\langle \phi \rangle\rangle|_{T > T_c} &= 0, & M &= 0 \\ \langle\langle \phi \rangle\rangle|_{T < T_c} &= v_\phi, & M &= f v_\phi \end{aligned}$$

Осцилляции при  $T \lesssim T_c \ll 100 \text{ МэВ}$

$$\langle\langle p \rangle\rangle = 4.1T$$

$$\frac{f_{N,\text{osc}}}{f_A} = 0.13 \times \theta^2 \left( \frac{10.75}{g_*} \right)^{1/2} \left( \frac{T_c}{\text{МэВ}} \right)^3 y$$

Примесь правокиральной компоненты  $N$  при  $T \gtrsim T_c$

$$\langle\langle p \rangle\rangle = 1.28T$$

$$\frac{f_{N,\text{in}}}{f_A} \simeq \frac{m_D^2}{4y^2 T_c^2} = \frac{0.25 \times 10^{-6} \theta^2}{y^2} \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)^2 \left( \frac{\text{МэВ}}{T_c} \right)^2$$

$$h^2 \Omega_{N,\text{osc}} \approx 4.3 \times \theta^2 \left( \frac{10.75}{g_*} \right)^{1/2} \left( \frac{T_c}{\text{МэВ}} \right)^3 \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)$$
$$h^2 \Omega_{N,\text{in}} \simeq 10^{-6} \theta^2 \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)^3 \left( \frac{\text{МэВ}}{T_c} \right)^2$$

$$T_{c,\text{min}} \simeq 0.05 \text{ МэВ} \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)^{2/5}$$

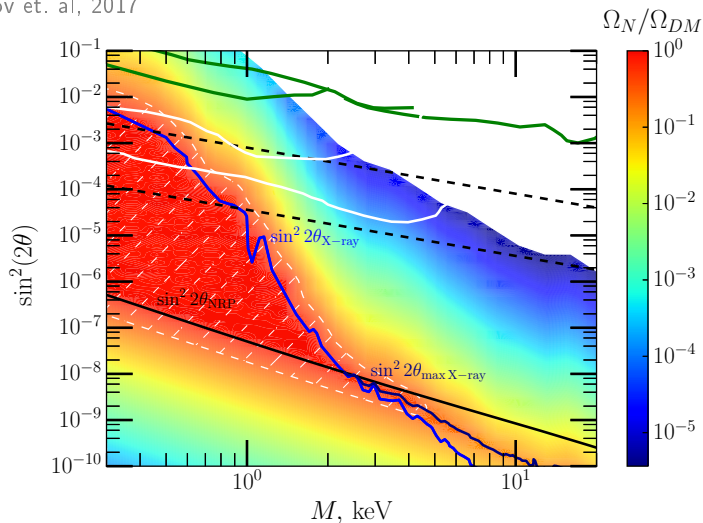
Минимальная доля стерильных нейтрино в общей плотности Вселенной

$$h^2 \Omega_{N,\text{min}} \simeq h^2 \Omega_{N,\text{osc}} + h^2 \Omega_{N,\text{in}} \simeq 0.9 \times 10^{-3} \theta^2 \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)^{11/5}$$

# Доля стерильных нейтрино $\Omega_N/\Omega_{DM}$

$$0.01 \text{ эВ} \approx \sqrt{\Delta m_{\text{sol}}^2} < m_a < \sum m_\nu \approx 0.2 \text{ эВ} \quad \text{Planck}$$

F. Bezrukov et. al, 2017



- 1 Космологическая модель с распадающейся темной материей
  - Проблемы наблюдательной космологии
  - Гравитационное линзирование
  - Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Стерильные нейтрино как часть темной материи
  - Мотивация
  - Фазовый переход в скрытом секторе
- 3 Когерентно осциллирующее слабо взаимодействующее скалярное поле
  - Параметрический резонанс
  - Осцилляции нейтрино в режиме большого поля
  - Рождение внешним полем
- 4 Положения, выносимые на защиту

$$\mathcal{L} = i\bar{N}\hat{\partial}N + \frac{M}{2}\bar{N}^c N + y_\alpha \bar{L}_\alpha N \tilde{\mathcal{H}} + \text{h.c.} + \mathcal{L}_{\phi N} + \mathcal{L}_\phi$$

$$\mathcal{L}_{\phi N} = \frac{f}{2}\phi\bar{N}^c N + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_\phi = \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{1}{2}m_\phi^2\phi^2$$

$$m_\phi < H$$

$$\phi_i \simeq \text{const}$$

$$M_{N,i} = f\phi_i$$

$$m_\phi > H$$

$$|\phi| \propto a^{-3/2}$$

$$M_N = M_A \sin m_\phi t$$

$$M_A = M_{N,i} \left( \frac{a_i}{a} \right)^{3/2}$$

- Приводит к эффективной массе стерильного нейтрино  $M \rightarrow M_{\text{eff}} \equiv M + M_N$
- Возможно квантовое рождение частиц внешним осциллирующим полем

# Уравнение Шредингера для двухуровневой системы во внешнем поле

$$M_{\text{eff}} \equiv M + M_A \sin m_\phi t$$

$$\frac{M}{M_A} \ll 1 \quad \frac{M_A^2}{4p} \geq m_\phi$$

$$\Delta m^2 = M_{\text{eff}} \sqrt{M_{\text{eff}}^2 + 4m_D^2} \quad \text{tg } \theta_{\text{eff}} = \frac{2m_D}{M_{\text{eff}} + \sqrt{M_{\text{eff}}^2 + 4m_D^2}}$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix} = \frac{\Delta m^2}{4p} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_{\text{eff}} & \sin 2\theta_{\text{eff}} \\ \sin 2\theta_{\text{eff}} & \cos 2\theta_{\text{eff}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_1 \\ \psi_2 \end{pmatrix}$$

$$y_1(t) = A_{\nu_a \rightarrow \nu_a} = \langle \psi_a | \psi(t) \rangle$$

$$y_2(t) = A_{\nu_a \rightarrow \nu_s} = \langle \psi_s | \psi(t) \rangle$$

$$y_1(0) = 1 \quad y_2(0) = 0$$

$$\begin{cases} \frac{\partial y_1(t)}{\partial t} = -i \frac{M_A^2}{2p} \frac{m_D}{M_A} \left( \frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t \right) e^{-i M_A^2 / (2p) \int_0^t (z + \sin m_\phi \zeta)^2 d\zeta} y_2(t) \\ \frac{\partial y_2(t)}{\partial t} = -i \frac{M_A^2}{2p} \frac{m_D}{M_A} \left( \frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t \right) e^{i M_A^2 / (2p) \int_0^t (z + \sin m_\phi \zeta)^2 d\zeta} y_1(t) \end{cases}$$

Адиабатичность изменения и малость угла смешивания

$$\left| \frac{\dot{\theta}_{\text{eff}}}{\Delta m^2 / 2p} \right| \ll 1 \quad \theta_{\text{eff}} \simeq \frac{m_D}{M_{\text{eff}}} \ll 1$$

# Метод стационарной фазы с $M_A^2/(2p m_\phi) > 1$

$$\frac{\partial^2 y_2}{\partial t^2} - \frac{\partial y_2}{\partial t} \left[ i \frac{M_A^2}{2p} \left( \frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t \right)^2 + \frac{m_\phi \cos m_\phi t}{\frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t} \right] + 4y_2 \left( \frac{M_A^2}{4p} \right)^2 \frac{m_D^2}{M_A^2} \left( \frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t \right)^2 = 0$$

$$y_2(t_1) \approx -i \frac{M_A^2}{2p} \frac{m_D}{M_A} \int_0^{t_1} \left( \frac{M}{M_A} + \sin m_\phi t \right) e^{i M_A^2/(2p) \cdot \int_0^t (\frac{M}{M_A} + \sin m_\phi \zeta)^2 d\zeta} dt$$

$$\int_{t_l - \delta}^{t_l + \delta} g(t) e^{i\beta h(t)} dt \sim i g'(t_l) \frac{\sqrt{3}}{3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \left( \frac{6}{\beta |h'''(t_l)|} \right)^{2/3} e^{i\beta h(t_l)}$$

$$\sum y_2|_l = \sum_{l=2k} y_2|_l + \sum_{l=2k+1} y_2|_l$$

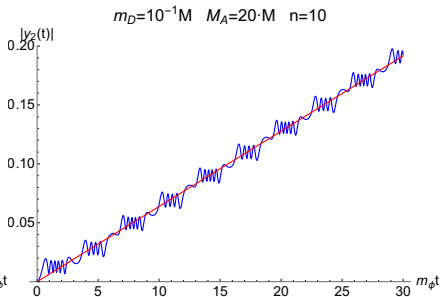
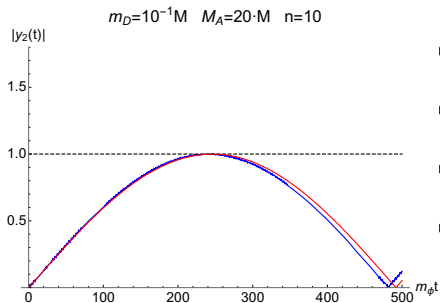
$$\sum_{l=2k} y_2|_l = 2 \frac{m_D}{M_A} \sqrt{3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \left( \frac{M_A^2}{48 p m_\phi} \right)^{1/3} \sum_{k=0}^{l_{\max}/2} \exp \left\{ i \frac{M_A^2}{2 p m_\phi} \pi k \left( 1 + 2 \frac{M^2}{M_A^2} \right) \right\}$$

$$\sum_{l=2k+1} y_2|_l = -2 \frac{m_D}{M_A} \sqrt{3} \Gamma\left(\frac{2}{3}\right) \left( \frac{M_A^2}{48 p m_\phi} \right)^{1/3} \sum_{k=0}^{l_{\max}/2} \exp \left\{ i \frac{M_A^2}{2 p m_\phi} \left[ \left( \pi k + \frac{1}{2} \right) \left( 1 + 2 \frac{M^2}{M_A^2} \right) + 4 \frac{M}{M_A} \right] \right\}$$

$$\frac{M_A^2 + 2M^2}{4p} = n m_\phi, \quad n \in \mathbb{N}$$

$$P_{N \rightarrow \nu_a} \simeq \sin^2(\omega_{\text{res}} t / 2)$$

$$\omega_{\text{res}} \approx 1.3 m_\phi \frac{m_D}{M_A} n^{1/3} \begin{cases} |\sin \frac{4M}{M_A} n| & \text{для четных } n \\ |\cos \frac{4M}{M_A} n| & \text{для нечетных } n \end{cases}$$



# Эффект декогеренции и расширения Вселенной

$$\Delta m^2 = M_{\text{eff}} \sqrt{M_{\text{eff}}^2 + 4m_D^2} \quad \text{tg } \theta_{\text{eff}} = \frac{2m_D}{M_{\text{eff}} + \sqrt{M_{\text{eff}}^2 + 4m_D^2}}$$

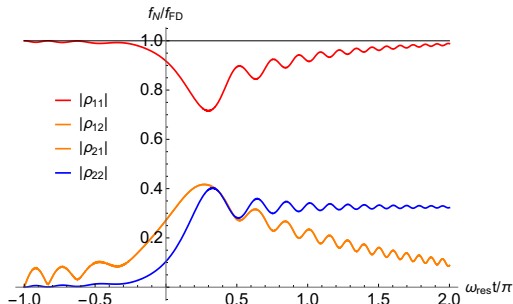
$$\mathcal{H} = \frac{\Delta m^2}{4p} \begin{pmatrix} -\cos 2\theta_{\text{eff}} & \sin 2\theta_{\text{eff}} \\ \sin 2\theta_{\text{eff}} & \cos 2\theta_{\text{eff}} \end{pmatrix} \quad \Gamma_A = \begin{pmatrix} \Gamma & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad \rho_{\text{eq}} = \begin{pmatrix} f_{\text{FD}} & 0 \\ 0 & f_{\text{FD}} \end{pmatrix}$$

$$i \frac{\partial}{\partial t} \rho = [\mathcal{H}, \rho] - \frac{i}{2} \{ \Gamma_A, \rho - \rho_{\text{eq}} \}$$

$$p = \tilde{p}(1 - Ht)$$

$$M_A = \tilde{M}_A(1 - \frac{3}{2}Ht)$$

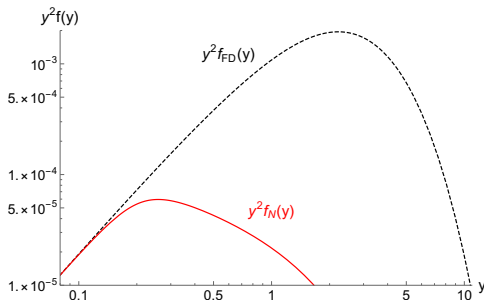
$$\frac{\sqrt{2}m_\phi H}{\omega_{\text{res}}^2} = 3 \quad \Gamma_A = 0.5\omega_{\text{res}}$$



$$f_N(y) = \frac{f_{FD}(y)}{\sqrt{1 + 0.8 \left( \frac{y}{y_s} \right)^5}}$$

$$y_s \simeq 0.2 \left( \frac{1 \text{ кэВ}}{M} \right)^{2/5}$$

$$\langle\langle p \rangle\rangle = T < 3.15T$$



$$\theta \sim 3.2 \times 10^{-6} \left( \frac{1 \text{ кэВ}}{M} \right)^3 \left( \frac{T_e}{11 \text{ МэВ}} \right)^{9/4} \left( \frac{m_\phi}{1 \text{ эВ}} \right)^{3/4}$$

$$\max/\min \theta (m_\phi, T_e)$$

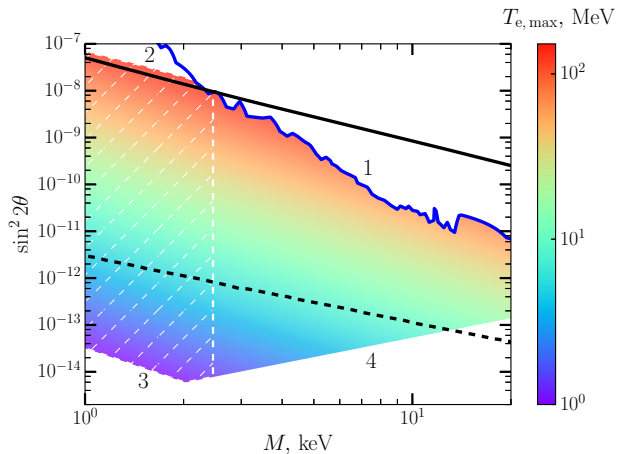
$$\Gamma < \omega_{\text{res}}$$

$$m_\phi < M$$

$$\theta < \theta_{\text{X-ray}}$$

$$1 \text{ МэВ} < T_e < T_s/3$$

$$\left. \frac{n_N \sigma_{\text{ann}}}{H} \right|_{\substack{T=M \\ f=f_{\text{min}}}} < 1$$



F. Bezrukov et. al, 2018

$$M > 2.5 \text{ кэВ}$$

$$f_{\text{min}}^2 = \frac{m_\phi^2 M^2}{2\Omega_{DM} \rho_{\text{crit}}} \frac{h_0 T_0^3}{h_e T_e^3}$$

$$T_s = 33 \text{ МэВ} \left( \frac{T_e}{11 \text{ МэВ}} \right)^{3/5} \times \left( \frac{m_\phi}{\text{эВ}} \right)^{1/5} \left( \frac{\theta}{3.2 \cdot 10^{-6}} \right)^{2/5}$$

$$\sigma_{\text{ann}} \sim 10^{-2} \frac{f^4}{M^2}$$

$$M_{\text{eff}} = M_A(z + \sin m_\phi t) \quad M_A = M \left( \frac{T}{T_e} \right)^{3/2} \quad \sin \theta_{\text{eff}} \approx \frac{m_D}{M_{\text{eff}}} \ll 1$$

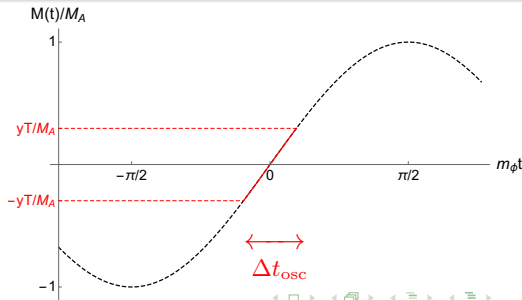
Режим большого поля:  $3T_e \ll M \Rightarrow p \sim 3T \ll M_A \quad \forall T > T_e$

$$z \equiv M/M_A \ll 1 \quad \bar{x} \equiv yT/M_A \ll 1 \quad \lambda \equiv 2m_\phi/\Gamma \quad A \equiv \sqrt{2yTV_{\text{eff}}}/M_A < \bar{x}$$

$$\langle \Delta_M \rangle = \frac{\langle M_{\text{eff}}^2 \rangle}{2yT} + V_{\text{eff}} \quad \langle \theta_M^2 \rangle = \theta^2 z^2 \frac{\langle M_{\text{eff}}^2 \rangle / M_A^2}{(A^2 + \langle M_{\text{eff}}^2 \rangle / M_A^2)^2}$$

$$\Delta t_{\text{osc}} = 2\bar{x}m_\phi^{-1}$$

$$\Delta t_{\text{coh}} = 2\Gamma^{-1}$$



# Осцилляции в режиме большого поля и рождение внешним полем

- $2\Gamma^{-1} \gg \Delta t_{\text{osc}}$

$$\langle \theta_M^2 \rangle \approx \langle \theta_M^2 \rangle_{\Delta t_{\text{osc}}} \frac{\Delta t_{\text{osc}}}{\pi m_\phi^{-1}} = \frac{3\theta^2 z^2}{\bar{x}^2} \frac{2\bar{x}}{\pi} \propto T^{-5/2}$$

- $2\Gamma^{-1} \ll \Delta t_{\text{osc}}$

$$\langle \theta_M^2 \rangle \approx \left[ \int_{-\bar{x}}^{\bar{x}} \langle \theta_M^2 \rangle_{2\Gamma^{-1}} \frac{d\varphi_0}{2\bar{x}} \right] \frac{\Delta t_{\text{osc}}}{\pi m^{-1}} = \frac{\theta^2 z^2}{\lambda} \frac{1+6A^2/\lambda^2}{(1+12A^2/\lambda^2)^{3/2}} 2\sqrt{3} \begin{cases} \propto T^2, & A \ll \lambda \\ \propto T^{-9/2}, & A \gg \lambda \end{cases}$$

$$\Omega_{N,\text{osc}} = 0.1 \times \theta^2 \sqrt{\frac{10.75}{g_*}} \left( \frac{10^{-10}}{f} \right)^{16/13} \left( \frac{m_\phi}{0.01 \text{ эВ}} \right) \left( \frac{M}{1 \text{ кэВ}} \right)^5$$

$$\frac{\Omega_{N,\text{osc}}}{\Omega_{\text{DW}}} = 1.4 \times 10^{-8} \left( \frac{10^{-10}}{f} \right)^{16/13} \left( \frac{m_\phi}{0.01 \text{ эВ}} \right) \left( \frac{M}{\text{кэВ}} \right)^3$$

Рождение внешним полем в  $M + f\phi(t) = 0$  при  $T \gtrsim T_e$

$$n_N \simeq \frac{2}{6\pi^2} (M m_\phi)^{3/2} \quad \rho_N(T_e) = \frac{M}{3\pi^2} (M m_\phi)^{3/2} \quad p_f \sim \sqrt{M m_\phi} \ll M$$

$$h^2 \Omega_N = \frac{\rho_N(T_e)}{\rho_{\text{crit}}/h^2} \left( \frac{T_0}{T_e} \right)^3 \simeq 0.2 \times \left( \frac{f}{0.1} \right)^2 \sqrt{\frac{M}{1 \text{ кэВ}}} \sqrt{\frac{0.01 \text{ эВ}}{m_\phi}} \times \Omega_{\text{DM}} h^2$$

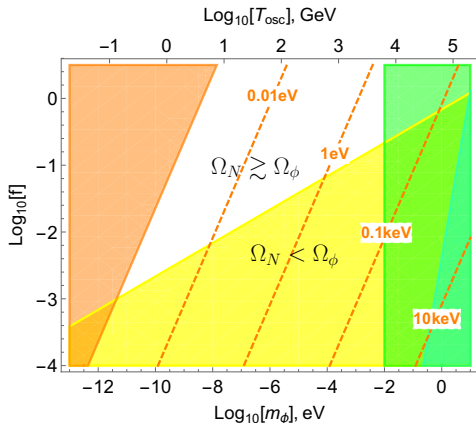
$$\Omega_N + \Omega_\phi = \Omega_{\text{DM}}$$

$$f\phi_0 > M$$

$$\begin{cases} m_\phi > 0.01 \text{ эВ} \\ \Gamma_{\phi \rightarrow \nu_a \nu_a} > H_0 \end{cases}$$

$$\Omega_{N,\text{res}} > \Omega_{\text{DM}}$$

F. Bezrukov et. al, 2018



$$\frac{T_e^3}{T_0^3} = \frac{m_\phi^2 M^2}{2\Omega_{\text{DM}} \rho_{\text{crit}}} \frac{1}{f^2}$$

$$T_{\text{osc}} = \frac{T_0}{\Omega_{\text{rad}}^{1/4}} \left( \frac{m_\phi}{H_0} \right)^{1/2}$$

$$M \gtrsim 1 \text{ кэВ} \left( \frac{Q}{5 \cdot 10^{-3} \frac{M_\odot / \text{пк}^3}{(\text{км/с})^3}} \right)^{1/4}$$

- 1 Космологическая модель с распадающейся темной материей
  - Проблемы наблюдательной космологии
  - Гравитационное линзирование
  - Крупномасштабная структура Вселенной
- 2 Стерильные нейтрино как часть темной материи
  - Мотивация
  - Фазовый переход в скрытом секторе
- 3 Когерентно осциллирующее слабо взаимодействующее скалярное поле
  - Параметрический резонанс
  - Осцилляции нейтрино в режиме большого поля
  - Рождение внешним полем
- 4 Положения, выносимые на защиту

- 1 Выяснено, что модель с относительной концентрацией распадающейся ТМ от 2 до 7% несколько лучше (на уровне  $1.2 - 2\sigma$ ) описывает совокупный набор космологических данных.
- 2 Показана совместность результатов последних измерений барионных акустических осцилляций и искажений пространства красных смещений в распределении галактик с предсказаниями стандартной космологической модели. Модель с относительной концентрацией распадающейся ТМ от 2 до 5% несколько лучше (на уровне  $1.5\sigma$ ) описывает распределение облаков нейтрального водорода во Вселенной по данным Слоановского цифрового обзора неба. При отсутствии информации об амплитуде спектра мощности линзирующего потенциала доля нестабильной ТМ достигает 3 – 9%, что соответствует лучшему (на уровне  $1.7 - 3.3\sigma$ ) описанию наблюдательных данных по сравнению со стандартной космологической моделью.

- 3 Построена модификация модели со стерильным нейтрино с фазовым переходом в скрытом секторе, в которой удастся сделать область относительно больших углов смешивания  $\theta^2 \lesssim 10^{-3}$  совместной с текущими космологическими и астрофизическими ограничениями. Открытая область пространства параметров «масса-угол смешивания», в которой стерильное состояние ответственно за формирование малой массы активных нейтрино, доступна для прямого исследования на перспективных экспериментальных установках «Троицк ню-масс» и KATRIN.
- 4 Предсказана возможность резонансного усиления осцилляций в присутствии когерентно осциллирующего скалярного поля, взаимодействующего со стерильным нейтрино. Показано, что данный механизм может быть ответственным за производство ТМ из стерильных нейтрино с очень малым углом смешивания  $\theta^2 \gtrsim 10^{-14}$ . Спектр образовавшихся в резонансе частиц позволяет ослабить традиционные для теплой ТМ ограничения из структур.
- 5 Предложен механизм рождения холодной ТМ из стерильных нейтрино внешним нестационарным полем. Показано, что стерильные нейтрино с массой 1 кэВ и выше могут составлять ТМ.

- 1 A. S. Chudaykin, D. S. Gorbunov and I. I. Tkachev. Dark matter component decaying after recombination: Lensing constraints with Planck data // Phys. Rev. D – 2016. – V. 94. – P. 023528.
- 2 A. S. Chudaykin, D. S. Gorbunov and I. I. Tkachev. Dark matter component decaying after recombination: Sensitivity to baryon acoustic oscillation and redshift space distortion probes // Phys. Rev. D – 2018. – V. 97. – No 08. – P. 083508.
- 3 F. L. Bezrukov, A. S. Chudaykin and D. S. Gorbunov. Hiding an elephant: heavy sterile neutrino with large mixing angle does not contradict cosmology // JCAP – 2017. – V. 1706. – No 06. – P. 051.
- 4 F. L. Bezrukov, A. S. Chudaykin and D. S. Gorbunov. Induced resonance makes light sterile neutrino Dark Matter cool // Phys. Rev. D – 2019. – V. 99. – P. 083507.

- 1 Международная конференция «39th International Conference on High Energy Physics» (ICHEP2018), Сеул, Корея, 4-11 июля 2018.
- 2 Международная конференция «20th International Seminar on High Energy Physics» (QUARKS-2018), Валдай, Россия, 27 мая - 2 июня 2018.
- 3 Международная конференция «6th International Conference on New Frontiers in Physics» (ICNFP2017), Колимбари, Крит, Греция, 17-29 августа 2017.
- 4 Всероссийская конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра» (HEA-2017), Москва, Россия, 24-30 августа 2017.
- 5 Зацепинские чтения, Москва, Россия, 24 и 26 мая 2017.
- 6 60-ая Всероссийская научная конференция МФТИ, Долгопрудный, Россия, 20-25 ноября 2017.
- 7 Международная конференция «19th International Seminar on High Energy Physics» (QUARKS-2016), Пушкин, Россия, 29 мая - 4 июня 2016.
- 8 Межинститутская молодежная конференция «Физика элементарных частиц и космология», Москва, Россия, 28-30 октября, 2015.

Спасибо за внимание

# Ограничения из прямых поисков: «Троицк нью-масс»

