

ПРИГЛАШЕНИЕ
ОРГКОМИТЕТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ
«XXIV ХАРИТОНОВСКИЕ ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ ПО
ПРОБЛЕМАМ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
И ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ»

Уважаемый Михаил Николаевич!

Оргкомитет сообщает, что Ваш доклад включен в научную программу международной конференции «XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий» и приглашает Вас принять участие в работе конференции, которая пройдет с 24 по 28 июля 2023 г. в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской области.

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

Секция 1. Перспективы развития исследований с применением обратного комптоновского излучения

Секция 2. Физика воздействия высоких плотностей энергий

Секция 3. Современные коллайдеры – фабрики частиц

Секция 4. Современные методы регистрации частиц

Секция 5. Физика тяжелых кварков и лептонов

Секция 6. Комптоновские источники рентгеновского и гамма-излучения

ОФОРМЛЕНИЕ ДОКЛАДА

Работа конференции будет проводиться в форме пленарных и устных докладов. По результатам работы конференции предполагается издание сборника трудов конференции (докладов).

До **24 июля 2023 года** необходимо:

✓ **представить текст доклада (в электронном и печатном виде) и презентацию с разрешением на открытое опубликование и разрешением авторов на копирование.**

✓ **оплатить оргвзнос.**

Порядок оформления договора на оплату оргвзноса и требования к оформлению доклада приведены на сайте ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», раздел «Научные мероприятия», далее «Харитоновские тематические научные чтения».

<http://www.vniief.ru/wps/wcm/connect/vniief/site/scienceevents/themeread/>

Следствия расширений стандартной модели тремя поколениями нейтральных тяжелых лептонов

ХЧ - 2023

М.Н. Дубинин, Д.М. Казаркин, Е.Ю. Федотова

НИИЯФ МГУ



- 1 Модель seesaw type I для трех поколений нейтрино
- 2 Общие космологические ограничения
- 3 Ограничения для минимального смешивания и за его пределами
- 4 Ограничения в секторе тяжелых стерильных нейтрино $N_2 - N_3$
- 5 Нарушение лептонной универсальности
- 6 Заключение

Расширение лептонного сектора

Тяжелые нейтральные лептоны (**HNL**, также стерильные нейтрино) - правые майорановские фермионы, синглеты относительно калибровочной группы СМ $SU(2)_L \times U(1)_Y$.
Лагранжиан расширения

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{\nu}_R \partial_\mu \gamma^\mu \nu_R - \left(F \bar{l}_L \nu_R \tilde{H} + \frac{M_M}{2} \overline{\nu^c}_R \nu_R + h.c. \right),$$

где $l_L = (\nu_L, e_L)^T$ - левый дублет СМ, ν_R - калибровочные состояния стерильных нейтрино (flavor states), H - хиггсовский дублет ($\tilde{H} = \epsilon_{ij} H^\dagger$), F - матрица юкавских констант, После спонтанного нарушения симметрии $M_D = F \langle H \rangle = F v$ ($v = 174$ ГэВ).

$$\frac{1}{2} (\bar{\nu}_L \overline{\nu^c}_R) \begin{pmatrix} 0 & M_D \\ M_D^T & M_M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^c \\ \nu_R \end{pmatrix} + h.c.,$$



Переход от калибровочных состояний (flavor states) к массовым состояниям

Полная массовая матрица $\mathcal{M} = \mathcal{U} \mathcal{D} \mathcal{U}^T$ (т.н. факторизация Такаги), где $\mathcal{U}$ - унитарная матрица, $\mathcal{D}$ - диагональная неотрицательная матрица. Связь между **массовым** и **калибровочным** базисом

$$\begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R^c \end{pmatrix} = \mathcal{U} P_L \begin{pmatrix} \nu \\ N \end{pmatrix}, \quad \mathcal{U} = \exp \begin{pmatrix} 0 & \theta \\ -\theta^\dagger & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_\nu & 0 \\ 0 & U_N^* \end{pmatrix}$$

$$\nu_L \simeq \left(1 - \frac{1}{2} \theta \theta^\dagger\right) U_\nu P_L \nu + \theta U_N^* P_L N,$$

$$\nu_R^c \simeq -\theta^\dagger U_\nu P_L \nu + \left(1 - \frac{1}{2} \theta^\dagger \theta\right) U_N^* P_L N.$$



Взаимодействия заряженных и нейтральных токов нейтрино с $W^\pm$ и Z бозонами

$$\mathcal{L}_{CC}^\nu = -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{l} \gamma_\mu U_{\text{PMNS}} \nu_{iL} W^\mu + h.c. \quad (1a)$$

$$\mathcal{L}_{NC}^\nu = \frac{g}{2c_W} \bar{\nu}_{iL} \gamma_\mu U_{\text{PMNS}}^\dagger U_{\text{PMNS}} \nu_{jL} Z^\mu + h.c. \quad (1b)$$

$$\mathcal{L}_{CC}^N = -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{l} \gamma_\mu \theta U_N^* N_{kL} W^\mu + h.c. \quad (1c)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{NC}^N = & -\frac{g}{2c_W} \bar{N}_{iL} \gamma_\mu U_N^T \theta^\dagger \theta U_N^* N_{jL} Z^\mu + \\ & + \left(-\frac{g}{2c_W} \bar{\nu}_{iL} \gamma_\mu U_{\text{PMNS}}^\dagger \left(I - \frac{1}{2} \theta^\dagger \theta \right) \theta U_N^* N_{jL} Z^\mu + h.c. \right) \end{aligned} \quad (1d)$$

Смешивание HNL и левых активных нейтрино характеризуется матрицей $\Theta \equiv \theta U_N^*$.

Переход к массовым состояниям неоднозначен

Разрешая уравнения диагонализации, получаем условие

$$I = \Omega^T \Omega = [-i\sqrt{\hat{m}^{-1}} U_\nu^\dagger M_D U_N^* \sqrt{\hat{M}^{-1}}]^T \cdot [-i\sqrt{\hat{m}^{-1}} U_\nu^\dagger M_D U_N^* \sqrt{\hat{M}^{-1}}],$$

в котором Ω – произвольная ортогональная матрица, которая может зависеть от дополнительных параметров, U_ν и U_N диагонализуют секторы $\nu_{e,\mu,\tau}$ и $N_{1,2,3}$. Матрица смешивания

$$\Theta = iU_\nu \sqrt{\hat{m}} \Omega \sqrt{\hat{M}^{-1}}, \text{ где } \hat{m} = \text{diag}(m_1, m_2, m_3), \hat{M} = \text{diag}(M_1, M_2, M_3)$$

Матрица PMNS неунитарна и связана с унитарной матрицей U_ν :

$$U_{\text{PMNS}} = \left(1 - \frac{1}{2}\theta^\dagger \theta + \mathcal{O}(\theta^4)\right) U_\nu$$



Общие космологические ограничения на стерильное нейтрино: время жизни

Стерильное нейтрино – кандидат на роль темной материи – не распадается на космологических временных масштабах

$\tau_{N_1} \geq H_0^{-1} \simeq 4 \times 10^{17}$ секунд. Однопетлевой распад $N \rightarrow \gamma, \nu$ может быть отличительным сигналом с энергией фотона $E_\gamma = M_1/2$, тогда ограничение на время жизни **усиливается данными гамма-астрономических наблюдений**, см. [1, 2, 3]. Мы используем оценку $\tau_{N_1} > 10^{25}$ секунд.

$$\Gamma(N_1 \rightarrow \gamma, \nu) = \frac{9\alpha_{EM} G_F^2 M_1^5}{256\pi^4} \sum_{\alpha} |\Theta_{\alpha 1}|^2. \quad (2)$$

$$\tau_{N_1} = 3 \times 10^{22} \left(\frac{M_1}{1 \text{ кэВ}} \right)^{-4} \left(\sum_{\alpha} \frac{(m_D)_{\alpha 1}}{1 \text{ эВ}} \right)^{-1} \text{ сек.} \quad (3)$$

$$(m_D)_{\alpha l} = \left| \sum_k \sqrt{m_k} U_{\alpha k} \Omega_{kl} \right|^2$$



Общие космологические ограничения на стерильное нейтрино: плотность темной материи

Смешивание активных и стерильных нейтрино Θ достаточно мало и HNL DM никогда не находилось в тепловом равновесии.

Доминирующий механизм образования стерильных нейтрино (*механизм Додельсона-Видроу*, [4]) – осцилляции активных и стерильных нейтрино. Доля энергии во Вселенной в случае нерезонансного рождения задается формулой

$$\Omega_N h^2 \simeq 0.1 \sum_{I=1}^3 \sum_{\alpha=e,\nu,\tau} \left(\frac{|\Theta_{\alpha I}|^2}{10^{-8}} \right) \left(\frac{M_I}{1 \text{ кэВ}} \right)^2. \quad (4)$$

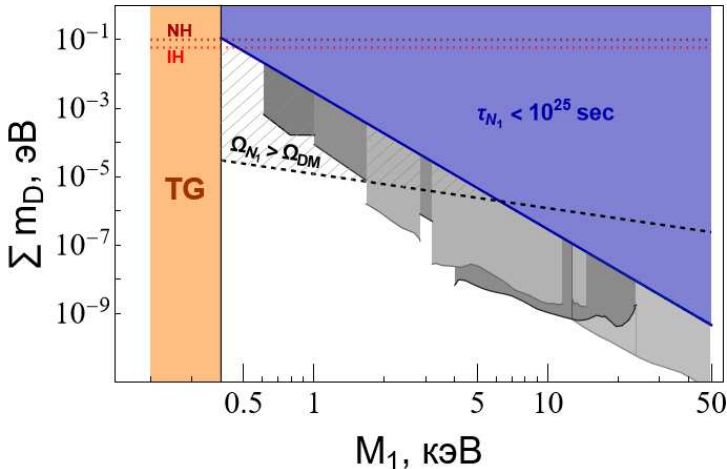
В частности, компонента плотности частиц N_1

$$\Omega_{N_1} h^2 \simeq \left(\frac{\sum_{\alpha} (m_D)_{\alpha 1}}{10^{-4} \text{ эВ}} \right) \left(\frac{M_1}{1 \text{ кэВ}} \right) \leq \Omega_{DM} h^2 = 0.12. \quad (5)$$

$$\sum_{\alpha} (m_D)_{\alpha 1} < \overline{(m_D)}_{DM} = 10^{-5} \left(\frac{M_1}{1 \text{ кэВ}} \right)^{-1} \text{ эВ}$$



Контуры исключения для N_1 , частицы DM



Космологические ограничения на параметр $(m_D)_{\alpha I} = \left| \sum_k \sqrt{m_k} U_{\alpha k} \Omega_{kI} \right|^2$ для N_1 - частицы темной материи, просуммированный по флэйворному индексу $\alpha = e, \mu, \tau$.



Сценарии с возможными видами матрицы Ω

- $\Omega = I$ для прямой иерархии масс активных нейтрино (NH) или антидиагональная ортогональная матрица Ω аналогичная выбору $\Omega = I$ но для обратной иерархии (IH);
- $\Omega \in SO(3, \mathbb{R})$ и параметризуется тремя вещественными углами Эйлера α_j

$$\Omega = \mathbf{X}_1 \mathbf{Z}_2 \mathbf{X}_3 = \begin{pmatrix} c_2 & -c_3 s_2 & s_2 c_3 \\ c_1 s_2 & c_1 c_2 c_3 - s_1 s_3 & -c_3 s_1 - c_1 c_2 s_3 \\ s_1 s_2 & c_1 s_3 + c_2 c_3 s_1 & c_1 c_3 - c_2 s_1 s_3 \end{pmatrix} \quad (6)$$

- $\Omega \in SO(3, \mathbb{C})$ с той же параметризацией (6), где аналогами углов Эйлера являются комплекснозначные параметры $\omega_j = \alpha_j + i\beta_j$.



Поверхности в пространстве параметров для вещественной матрицы поворота Ω .

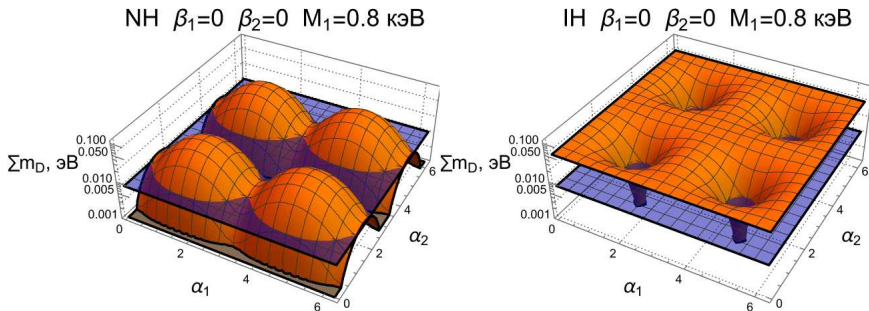


Рис.: Поверхности, иллюстрирующие масштаб величины $\sum_{\alpha}(m_D)_{\alpha 1}$ в зависимости от углов α_1 и α_2 для случаев прямой иерархии масс активных нейтрино (рисунок слева) и обратной (рисунок справа). Синяя плоскость - $(m_D)_{X-ray}$ при $M_1 = 0.8$ кэВ.

Контуры для углов Эйлера вещественной матрицы поворота Ω

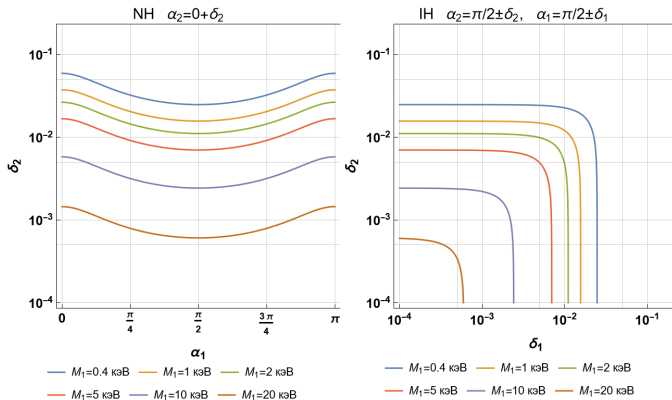


Рис.: Контуры исключения для углов Эйлера α_1 и α_2 при различных массах M_1 стерильного нейтрино темной материи, для комбинации τ_{N_1} и плотности энергии. Указаны соответствующие каждому контуру значения массы M_1 кэВ.

Контуры для комплекснозначной матрицы поворота

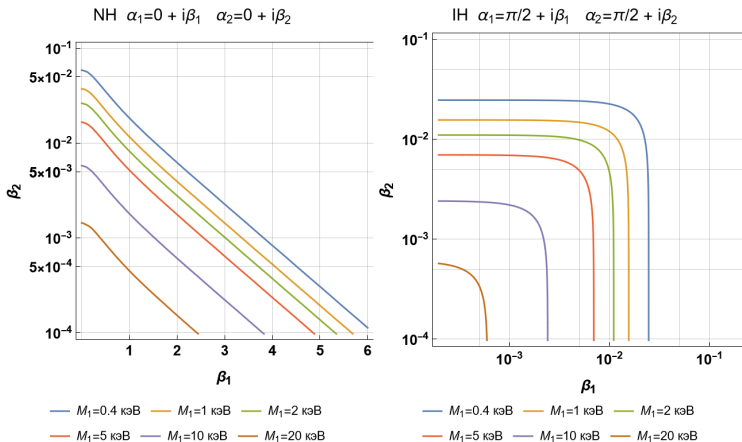


Рис.: Контуры исключения для мнимых частей β_1 и β_2 углов Эйлера ω_1 и ω_2 в параметризации комплексной ортогональной матрицы Ω при зафиксированных вещественных частях α_1 и α_2 (их значения приведены в подписях над графиками).

Сценарий «минимального смешивания»

Отдельно выделим сценарий "*минимального смешивания*", лишенный дополнительных неизвестных параметров и отражающий общие свойства ограничений в случае вещественнозначных матриц Ω .

$$\Theta_{\min}^{(\text{NH})} = \begin{pmatrix} iU_{e1}\sqrt{\frac{m_1}{M_1}} & iU_{e2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{e3}\sqrt{\frac{m_3}{M_3}} \\ iU_{\mu1}\sqrt{\frac{m_1}{M_1}} & iU_{\mu2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{\mu3}\sqrt{\frac{m_3}{M_3}} \\ iU_{\tau1}\sqrt{\frac{m_1}{M_1}} & iU_{\tau2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{\tau3}\sqrt{\frac{m_3}{M_3}} \end{pmatrix}, \quad \Omega_{\min}^{(\text{NH})} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Theta_{\min}^{(\text{IH})} = \begin{pmatrix} iU_{e3}\sqrt{\frac{m_3}{M_1}} & iU_{e2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{e1}\sqrt{\frac{m_1}{M_3}} \\ iU_{\mu3}\sqrt{\frac{m_3}{M_1}} & iU_{\mu2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{\mu1}\sqrt{\frac{m_1}{M_3}} \\ iU_{\tau3}\sqrt{\frac{m_3}{M_1}} & iU_{\tau2}\sqrt{\frac{m_2}{M_2}} & iU_{\tau1}\sqrt{\frac{m_1}{M_3}} \end{pmatrix}, \quad \Omega_{\min}^{(\text{IH})} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



Допустимые виды матрицы Ω . "Экспоненциальное смешивание"

Учёт космологических ограничений указывает на предпочтительный вид матрицы Ω и масштаб массы $M_1 \sim 1 - 10$ кэВ.

$$\Omega_{\text{NH}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \xi \sin(\omega) & \xi \cos(\omega) \end{pmatrix} \quad \Omega_{\text{IH}} = \begin{pmatrix} 0 & \cos(\omega) & -\sin(\omega) \\ 0 & \xi \sin(\omega) & \xi \cos(\omega) \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

где ω , вообще говоря, **комплексный** параметр. Сценарий имеет характерное увеличение значений смешивания из-за возникновения множителей $X_\omega = e^{Im(\omega)} \gg 1$ при $Im(\omega) > 1$. Этот сценарий смешивания будем называть "**экспоненциальным смешиванием**".

Помимо этого, в модели νMSM подразумевается, что массы двух оставшихся HNL $M_2 \simeq M_3 \gg M_1$, так как это условие квазивырожденности по массам необходимо для генерации **барионной асимметрии** во Вселенной, [5].

Имеющиеся ограничения для модели ν MSM: $N_2 - N_3$ сектор

- Ограничения из ускорительных экспериментов двух типов: эксперименты с определением *недостающей энергии* (PIENU, TRIUMPH, KEK, NA62, E949) и эксперименты по определению *смещенных вершин* (PS-191, CHARM, NuTeV, DELPHI). Совокупность этих ограничений дает верхние границы для

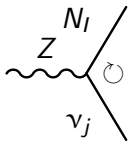
$$U_{\alpha}^2 = \sum_{I=1}^3 |\Theta_{\alpha I}|^2 = \begin{cases} \frac{m_1}{M_1} |U_{\alpha 1}|^2 + |\Theta_{\alpha 2}^{(NH)}|^2 + |\Theta_{\alpha 3}^{(NH)}|^2, & \text{NH} \\ \frac{m_3}{M_1} |U_{\alpha 3}|^2 + |\Theta_{\alpha 2}^{(IH)}|^2 + |\Theta_{\alpha 3}^{(IH)}|^2, & \text{IH} \end{cases}$$

- Неравенство для времени жизни N_2 и N_3 , $\tau_N < 0.02$ секунд, при которых не возникает перепроизводства легких элементов (^4He , ^2H) в первичной плазме, [6] (т.н. **первичный нуклеосинтез** или **Big Bang nucleosynthesis, BBN**). Дает ограничение снизу на параметры U_{α}^2 .

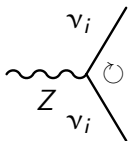


Распады HNL: правила Фейнмана

Ширина вычислена для случая, когда и активные, и стерильные нейтрино являются **майорановскими** фермионами.



$$-i \frac{g}{2 \cos \theta_W} \gamma^\mu \left[(U^\dagger \Theta)_{jl}^* P_L - (U^\dagger \Theta)_{jl} P_R \right]$$



$$-i \frac{g}{2 \cos \theta_W} \gamma^\mu (P_L - P_R) = i \frac{g}{2 \cos \theta_W} \gamma^\mu \gamma^5$$

Таблица: Правила Фейнмана для вершин с майорановскими нейтрино.

$$\Gamma_{N_{2,3}} = \Gamma(\rightarrow h^\pm + l^\mp) + \Gamma(\rightarrow h^0 + \nu) + \Gamma(\rightarrow l^+ l^- \nu), \quad \tau_{N_{2,3}} = \Gamma_{N_{2,3}}^{-1}$$

Парциальные ширины лептонных распадов

- $\Gamma(N_I \rightarrow \sum_i \nu_i, \nu_j, \nu_j) = \frac{G_F^2 M_I^5}{192\pi^3} \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} |\Theta_{\alpha I}|^2$
- $\Gamma(N_I \rightarrow \sum_{i=1,2,3} \nu_i \ l_{\alpha}^{+} l_{\alpha}^{-}) = \frac{G_F^2 M_I^5}{96\pi^3} \left(\left[(C_1^2 + C_2^2) \sum_{\beta} |\Theta_{\beta I}|^2 + (1 - 2C_1) |\Theta_{\alpha I}|^2 \right] \mathcal{F}_1(r) + \left[(2C_1 C_2) \sum_{\beta} |\Theta_{\beta I}|^2 - 2C_2^2 |\Theta_{\alpha I}|^2 \right] \mathcal{F}_2(r) \right)$, где $C_1 = s_W^2 - \frac{1}{2}$, $C_2 = s_W^2$, $r_{\alpha} = \frac{m_{\alpha}^2}{M_I^2}$,

$$\mathcal{F}_1(r) = (1 - 14r - 2r^2 - 12r^3) \sqrt{1-4r} + 12r^2(1-r^2) \ln\left(\frac{1-3r+(1-r)\sqrt{1-4r}}{r(1-\sqrt{1-4r})}\right),$$

$$\mathcal{F}_2(r) = (2r + 10r^2 - 12r^3) \sqrt{1-4r} - (6r^2 - 12r^3 + 12r^4) \ln\left(\frac{1-3r+(1-r)\sqrt{1-4r}}{r(1-\sqrt{1-4r})}\right).$$

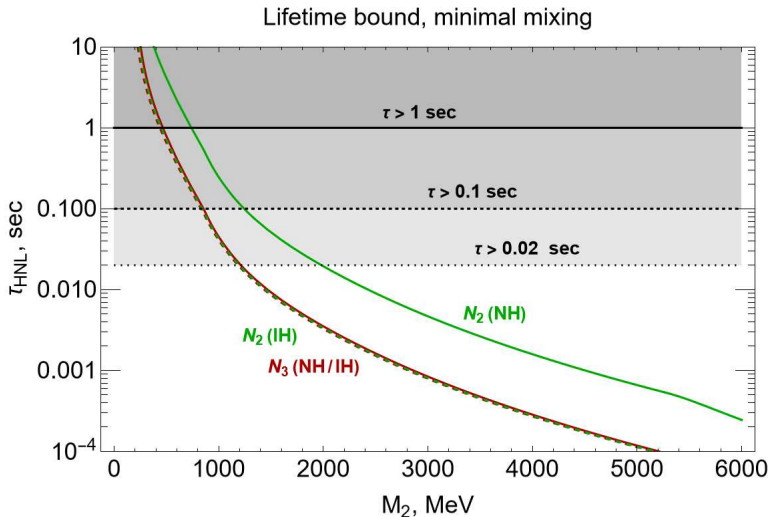
- $\Gamma(N_I \rightarrow \sum_{i=1,2,3} \nu_i \ l_{\alpha \neq \beta}^{+} l_{\beta}^{-}) = \frac{G_F^2 M_I^5}{192\pi^3} (|\Theta_{\alpha I}|^2 + |\Theta_{\beta I}|^2) \mathcal{G}(r_{\alpha}, r_{\beta}),$

$$\mathcal{G}(x, y) = (1 - 7x - 7x^2 + x^3 + 12xy - 7y - 7y^2 + y^3 - 7x^2y - 7xy^2)R +$$

$$+ 12(y^2 + x^2y^2 - 2x^2) \ln\left(\frac{1+x-y+R}{2}\right) + 12x^2(1-y^2) \ln\left(\frac{1}{x}\right) +$$

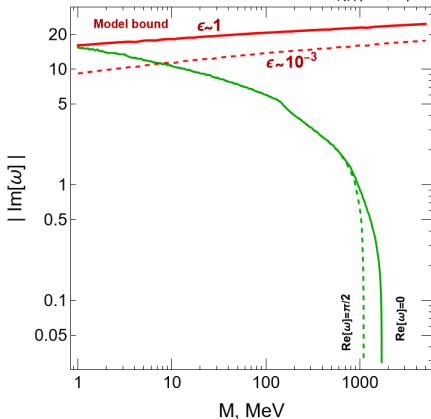
$$+ 12y^2(1-x^2) \ln\left(\frac{1-x-y+R}{1-x+y-R}\right), \quad R = \lambda^{1/2}(1, x, y)$$

BBN ограничения в сценарии "минимального смешивания"

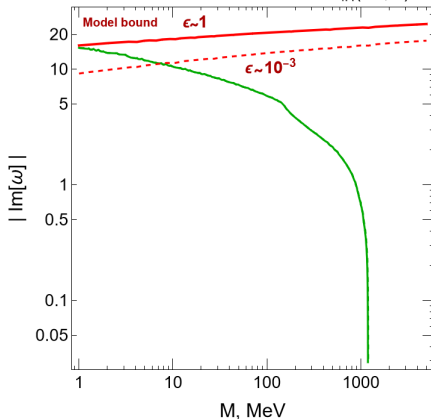


BBN ограничения для параметра ω матрицы Ω

Lifetime bound for case $\Omega=\Omega_{\text{NH}}(\pm 1, \omega)$

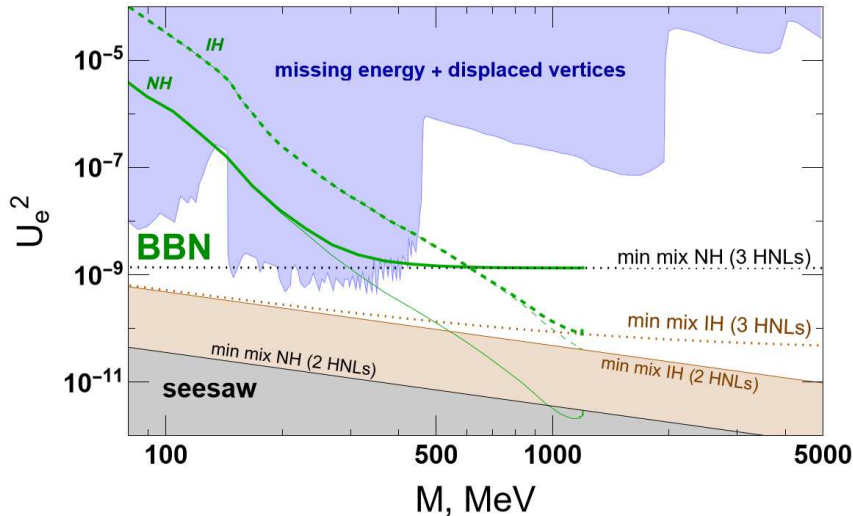


Lifetime bound for case $\Omega=\Omega_{\text{IH}}(\pm 1, \omega)$



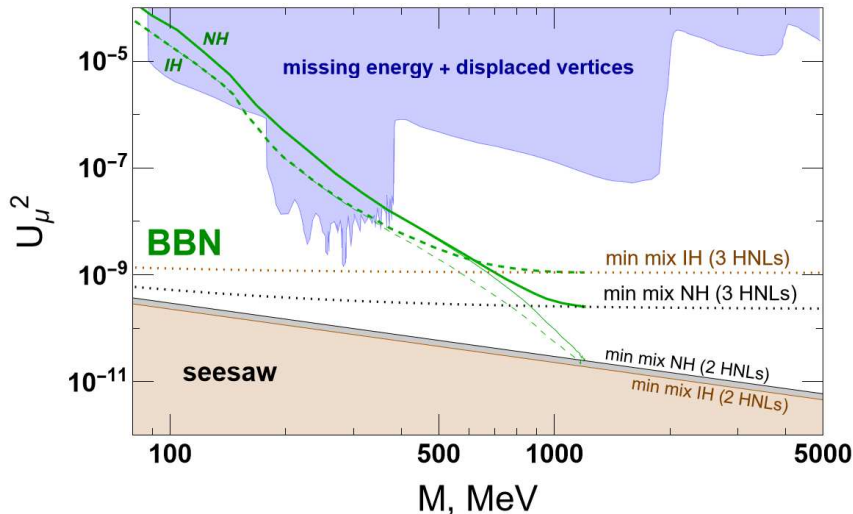
$$\Omega^{-1} = \Omega^T + \frac{1}{3} \hat{M}^{-1} (\Omega^{-1})^* \hat{m}, \quad (\text{диагонализация с точностью до } \mathcal{O}(M_D \theta))$$

Контуры исключения и ограничения для модели ν MSM: U_e^2



Контуры исключения и ограничения для модели ν MSM:

U_{μ}^2



Параметр нарушения лептонной универсальности

Величина **нарушения лептонной универсальности (LUV)** в распадах мезона $M = \pi^+, K^+$ определяется как

$$\Delta r_M = \frac{R_M}{R_M^{SM}} - 1, \quad \text{где} \quad R_M = \frac{\Gamma(M \rightarrow e\nu) + \Gamma(M \rightarrow eN)}{\Gamma(M \rightarrow \mu\nu) + \Gamma(M \rightarrow \mu N)}$$

а R_M^{SM} содержит ширины только с активными нейтрино ν в конечном состоянии.

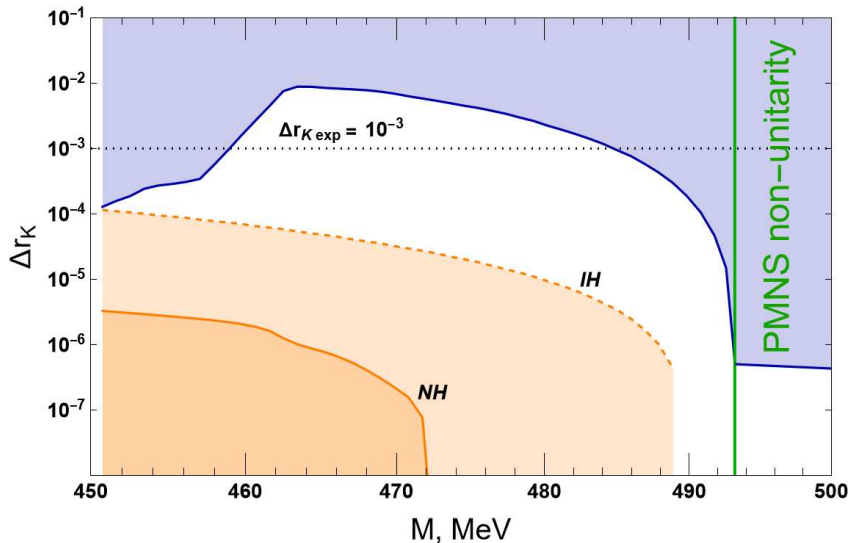
Условие унитарности 6×6 матрицы $\mathcal{U}$

$$\sum_{i=1}^3 |U_{\alpha i}|^2 + \sum_{l=1}^3 |\Theta_{\alpha l}|^2 = 1$$

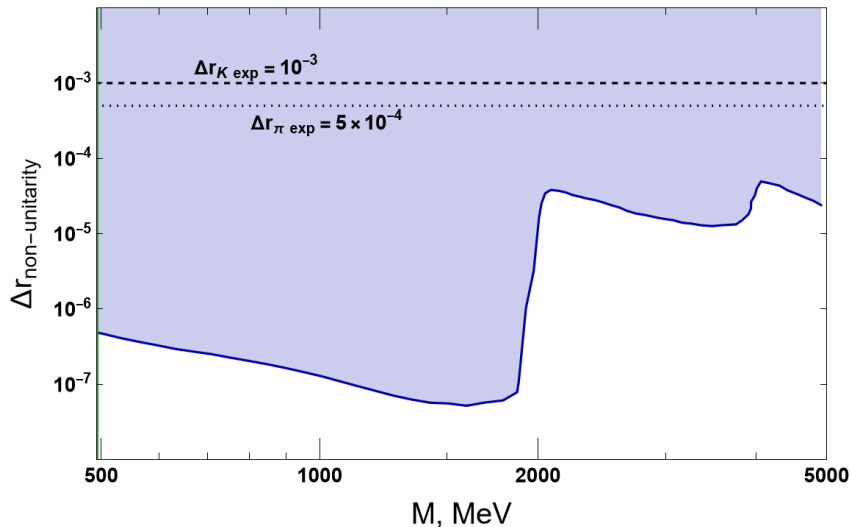
$$\Delta r_M = \frac{1 + \sum_l |\Theta_{el}|^2 (G_{el}^M - 1)}{1 + \sum_l |\Theta_{\mu l}|^2 (G_{\mu l}^M - 1)} - 1$$

$$G_{\alpha l}^M = \begin{cases} \frac{\lambda^{1/2}(1, r_l, r_\alpha) [r_l + r_\alpha - (r_\alpha - r_l)^2]}{r_\alpha (1 - r_\alpha)^2}, & M_l < m_M - m_\alpha \\ 0, & M_l > m_M - m_\alpha \end{cases}$$

Параметр нарушения лептонной универсальности в распадах каона



Параметр нарушения универсальности в кинематически закрытой области



Основные результаты (1)

- Ограничения на время жизни и плотность частиц легкого стерильного нейтрино (N_1) темной материи показывают, что его масса 0.4 - 40 кэВ, смешивание имеет характер "минимального", а существенные различия проявляются в секторе $N_2 - N_3$, а именно, в сценарии "экспоненциального смешивания" сигналы HNL могут усиливаться за счет экспоненциального множителя $e^{Im(\omega)}$.
- Рассмотрение сектора $N_2 - N_3$ для νMSM показало существенную зависимость от компоненты смешивания с легким стерильным нейтрино темной материи. Модель, учитывающая все три поколения, значительно поднимает нижнюю границу "seesaw" для параметров смешивания при массах $M_{2,3} > 0.5$ ГэВ.
- В модели с тремя поколениями HNL с массой легкого активного нейтрино $m_{1(3)} \sim 10^{-5}$ эВ и $M_1 \simeq 5$ кэВ, BBN граница массы HNL $M > 407$ МэВ (NH), вместо и $M > 340$ МэВ для модели с двумя HNL. Таким образом, учет допустимых ненулевых значений массы легкого активного нейтрино ощутимо смещает модельные BBN ограничения.
- Для LUV в распадах каонов было обнаружено "окно", в котором превышает экспериментальное значение $\Delta r_K = (4 \pm 4) \times 10^{-3}$.



Основные результаты (2)

- Тщательное вычисление времени жизни в совокупности с экспериментальными данными коллайдерных экспериментов дает следующие допустимые области параметров:

- 134 МэВ $< M < 144$ МэВ для NH – малое "окно" U_e^2 :
 $1.5 \cdot 10^{-7} < U_e^2 < 2.7 \cdot 10^{-7}$ (Требует более точного анализа экспериментальных данных);
- 155 МэВ $< M < 177$ МэВ для IH: $1, 2 \cdot 10^{-6} < U_\mu^2 < 3, 5 \cdot 10^{-7}$.
- Для более тяжелых HNL, не попадающих под вышеупомянутые диапазоны, из BBN появляются следующие границы:

$$\begin{aligned} M &> 407 \text{ MeV} \quad \text{для } U_e^2 \text{ с NH,} & M &> 452 \text{ MeV} \quad \text{для } U_e^2 \text{ с IH;} \\ M &> 370 \text{ MeV} \quad \text{для } U_\mu^2 \text{ с NH,} & M &> 340 \text{ MeV} \quad \text{для } U_\mu^2 \text{ с IH.} \end{aligned}$$

- Для «минимального смешивания» BBN-граница дает оценку минимальной массы HNL: $M > 1.2$ ГэВ для IH и $M > 2$ ГэВ для NH. Для этих масс LUV определяется только отклонением от унитарности и составляет ненаблюдаемую величину $\mathcal{O}(10^{-11})$.



Спасибо за внимание!





Alexey Boyarsky and Oleg Ruchayskiy.

Bounds on Light Dark Matter.

pages 31–34, 11 2008.



Alexey Boyarsky, A. Neronov, Oleg Ruchayskiy, and M. Shaposhnikov.

Constraints on sterile neutrino as a dark matter candidate from the diffuse x-ray background.

Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 370:213–218, 2006.



Alexey Boyarsky, A. Neronov, O. Ruchayskiy, M. Shaposhnikov, and I. Tkachev.

Where to find a dark matter sterile neutrino?

Phys. Rev. Lett., 97:261302, 2006.



Scott Dodelson and Lawrence M. Widrow.

Sterile-neutrinos as dark matter.

Phys. Rev. Lett., 72:17–20, 1994.



Takehiko Asaka and Mikhail Shaposhnikov.

The ν MSM, dark matter and baryon asymmetry of the universe.

Phys. Lett. B, 620:17–26, 2005.





Alexey Boyarsky, Maksym Ovchynnikov, Oleg Ruchayskiy, and Vsevolod Syvolap.

Improved big bang nucleosynthesis constraints on heavy neutral leptons.

Phys. Rev. D, 104(2):023517, 2021.



Mikhail Dubinin and Elena Fedotova.

Non-Minimal Approximation for the Type-I Seesaw Mechanism.

Symmetry, 15(3):679, 2023.

Программа проведения конференции

Понедельник - 24 июля

Время	Программа дня
08:30 – 09:15	Регистрация участников
09:15 – 09:35	Открытие международной конференции «XXIV Харитоновские тематические научные чтения по проблемам ускорительной техники и физики высоких энергий» и летней научной школы НЦФМ.
Пленарная секция.	
09:35 – 10:10	<i>Сергеев Александр Михайлович</i> «Национальный центр физики и математики: научная программа и трансфер технологий»
10:10 – 10:45	<i>Левичев Евгений Борисович</i> Статус и оптимизация светимости проекта Супер с-тау фабрики
10:45 – 11:00	Перерыв
11:00 – 11:30	<i>Логашенко Иван Борисович</i> Результаты с коллайдера ВЭПП-2000
11:30 – 12:00	<i>Гаранин Сергей Григорьевич</i> Развитие лазерных технологий во ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
12:00 – 12:15	<i>Возложение цветов. Общее фото</i>
12:15 - 13:30	Обед
СЕКЦИЯ №1. Перспективы развития исследований с применением обратного комптоновского излучения	
13:30 - 13:45	<i>Кузнецов А.А.</i> Исследования фотоядерных реакций на комптоновских источниках: современное состояние и перспективы
13:45 - 14:00	<i>Фурсова Н.Ю.</i> Фотоядерные реакции на мониторинговых мишенях ^{59}Co , $^{63,65}\text{Cu}$, ^{89}Y , ^{103}Rh , ^{181}Ta , ^{197}Au
14:00 – 14:15	<i>Кулевой Т.В.</i> Проект компактного источника нейтронов DARIA
14:15 - 14:30	<i>Джилавын Л.З.</i> Об активационных исследованиях фотоядерных реакций на гамма-пучках от обратного комптоновского рассеяния
14:30 – 14:45	<i>Джилавын Л.З.</i> О распределениях нейтронов из (гамма, n)-реакций по энергии и углам на гамма-пучках от обратного комптоновского рассеяния

14:45 – 15:00	<i>Мележик В.С.</i> Исследование ускорения и ионизации нейтральных атомов с помощью источника комптоновского излучения
15:00 - 15:15	Перерыв
СЕКЦИЯ №2. Физика воздействия высоких плотностей энергий	
15:15 - 15:30	<i>Михайлов Е.С.</i> О возможности инжекции двух сильноточных пучков в безжелезный линейный индукционный ускоритель электронов
15:30 – 15:45	<i>Гречушкин В.Б.</i> Мишенный узел с высоким выходом нейтронов перспективного комплекса, объединяющего сильноточный ускоритель электронов и аperiодический бустер-реактор
15:45 – 16:00	<i>Григорьев А.Н.</i> Электротехнический расчет токораспределения при электрическом взрыве фольги
16:00 - 16:15	<i>Гудаев Ш.Д.</i> Этапы и промежуточные итоги разработки программного обеспечения для моделирования процессов формирования и ускорения однократных сильноточных пучков электронов
16:15 - 16:30	<i>Балябин М.Г.</i> 1. Получение импульсов тормозного излучения с максимальной мощностью экспозиционной дозы на линейном индукционном ускорителе электронов ЛИУ-30
16:30 - 16:45	<i>Страбыкин К.В.</i> 2. Режимы работы мощной электрофизической установки “Гамма-4”
16:45 – 17:00	<i>Пучагин С.Ю.</i> Вариант схемы объединения ускорительных модулей установки ГАММА на общую нагрузку
17:00 -18:30	Фуршет

Вторник – 25 июля

Время	Программа дня
Пленарная секция	
09:00 – 09:40	<i>Dr. Haiping Peng</i> THE PROGRESS AND PROSPECTS OF STCF IN CHINA Статус проекта Супер тау-чарм фабрики
09:40 – 10:20	<i>Dr. Xiaorong Zhou</i> THE PHYSICS PROGRAM AND POTENTIAL AT STCF IN CHINA

	Физическая программа Супер тау- чарм фабрики
10:20 – 10:35	Перерыв
10:35 – 11:15	<i>Dr. Xiaorui Lyu</i> THE STATUS OF BEPCII/BESIII EXPERIMENT Результаты BEPCII/BESIII эксперимента
11:15 – 11:55	<i>Григоренко Леонид Валентинович</i> Статус НИР перспективного тяжелоионного ускорительно-накопительного комплекса
11:55 – 13:00	Обед
СЕКЦИЯ №3. Современные коллайдеры – фабрики частиц	
13:00 - 13:15	<i>Колесов Г.Н.</i> Динамика допредельного сильноточного релятивистского электронного пучка в камере дрейфа с неоднородным магнитным полем
13:15 - 13:30	<i>Черница А.О.</i> Исследование динамики электронного пучка в линейном индукционном ускорителе
13:30 - 13:45	<i>Колесников П.А.</i> Результаты исследований по диагностике фокусного пятна линейного индукционного ускорителя
13:45 - 14:00	<i>Воробьев С.О.</i> Рентгенографический ускоритель ИГУР-П
14:00 – 14:15	<i>Учаев А.Я.</i> О подобии критического поведения динамических систем
14:15 - 14:30	<i>Фролова Е.А.</i> Экспериментальное исследование влияния окисления поверхности металлических образцов на процессы диспергирования конструкционных материалов при ударно-волновом нагружении
14:30 – 14:45	<i>Тельнов А.В.</i> Состояние работ по созданию тяжело-ионного синхротронного комплекса для центра радиационных испытаний РФЯЦ-ВНИИЭФ
14:45 – 15:00	Перерыв
15:00 - 15:15	<i>Дюбков В.С.</i> Ускоритель протонов и легких ионов ЛУ1 инжектор для ионного синхротрона
15:15 - 15:30	<i>Кулевой Т.В.</i> Линейный ускоритель тяжелых ионов ЛУ2 для проекта СКИ

15:30 – 15:45	<i>Борисков А.С.</i> Оптическая структура бустерного синхротрона
15:45 – 16:00	<i>Поляков Л.Е.</i> Разработка и испытание прототипа ускоряющей структуры с пространственно-однородной квадрупольной фокусировкой на энергию протонов 1 МэВ
16:00 - 16:15	<i>Костюков И.Ю.</i> Лазерно-плазменные методы ускорения заряженных частиц: современное состояние и перспективы
16:15 - 16:30	<i>Трунцева Р.П.</i> Разработка системы формирования поля облучения синхротронного ускорителя тяжелых заряженных частиц
16:30	Экскурсионная программа для иногородних участников

26 июля – Среда

Время	Программа дня
Пленарная секция.	
09:00 – 09:40	<i>Григоренко Л.В.</i> Проект научной программы ИКИ НЦФМ
09:40 – 10:20	<i>Кулевой Т.В.</i> Линейные ускорители ионов
10:20 – 10:35	Перерыв
СЕКЦИЯ №3. Современные коллайдеры – фабрики частиц	
10:35 – 10:50	<i>Синяткин С.В.</i> Планы развития метода встречи CRAB WAIST в ИЯФ СО РАН
10:50 – 11:05	<i>Dr. Qin Luo</i> THE PROGRESS OF STCF DESIGN AND R&D IN CHINA
11:05 – 11:20	<i>Кооп И.А.</i> Опыт работы ВЭПП-2000 с круглыми встречными электрон-позитронными пучками
11:20 – 11:35	<i>Пиминов П.А.</i> Особенности работы коллайдера ВЭПП-4М на высокой энергии
11:50 – 13:00	Обед
13:00 - 13:15	<i>Петренко А.В.</i> Позитронные источники для физики высоких энергий
13:15 - 13:30	<i>Виноградов П.И.</i> Экспериментальные исследования транспортировки ионов по системе аксиальной инжекции и захвата ионов в ускорение

13:30 - 13:45	<i>Мозговой А.Г.</i> Коллайдер компактных торов
13:45 - 14:00	<i>Лукьянов А.А.</i> Получение высокоинтенсивных пучков ионов ^{48}Ca , ^{48}Ti и ^{54}Cr на циклотроне ДЦ-280
14:00 – 14:15	<i>Протасов А.А.</i> Циклотрон ДЦ-280 – базовая установка Фабрики сверхтяжелых элементов
14:15 - 14:30	<i>Шаров П.Г.</i> Эксперименты на пучках радиоактивных изотопов в ЛЯР ОИЯИ
14:30 – 14:45	<i>Яковлев Д.С.</i> Система экстракции циклотрона ДЦ-280
14:45 – 15:00	Перерыв
СЕКЦИЯ №4. Современные методы регистрации частиц	
15:00 - 15:15	<i>Полётова Т.И.</i> Состояние работ по разработке детекторов высокоинтенсивного тормозного излучения на основе широкозонных диэлектриков
15:15 - 15:30	<i>Чуйкина А.В.</i> Экспериментальные исследования сцинтилляционного детектора на основе кристалла эльпасолита с разными типами фотоумножителей
15:30 – 15:45	<i>Барняков А.Ю.</i> Развитие систем идентификации на основе аэрогеля в ИЯФ СО РАН
15:45 – 16:00	<i>Крылевский Е.Н.</i> Основные направления и перспективы развития методического обеспечения измерений ионизирующих излучений тяжело-ионного синхротронного комплекса РФЯЦ-ВНИИЭФ
16:00 - 16:15	<i>Орлов М.С.</i> Результаты модернизации детектирующей системы комплекса мониторинга изотопов ксенона МИКС в рамках подготовки международной сертификации
16:15 - 16:30	<i>Бублик М.А.</i> Измерительный канал регистрации ионизирующих излучений на основе алмазного сцинтиллятора и твердотельного ФЭУ
16:30	Экскурсионная программа

	для иногородних участников
--	----------------------------

Четверг – 27 июля

Время	Программа дня
СЕКЦИЯ №4. Современные методы регистрации частиц	
09:00 – 09:15	<i>Эльяш С.Л.</i> Регистрация импульсных характеристик детекторов при воздействии импульсов субнаносекундного ускорителя электронов
09:15 - 09:30	<i>Батова Е.Т.</i> Использование ЭПР-метода для измерений дозиметрических характеристик высокоинтенсивного тормозного излучения ускорителей электронов
09:30 - 09:45	<i>Карнов И.А.</i> Оценка возможности определения дейтерия на основе фотоядерной реакции $d(\gamma,n)p$
09:45 - 10:00	<i>Кыштымков Д.А.</i> Проект дрейфовой камеры детектора для Супер с-тау фабрики.
10:00 – 10:15	<i>Dr. Jianbei Liu</i> STCF DETECTOR DESIGN AND R&D PROGRESS Проект детектора для Супер тау-чарм фабрики
10:15 – 10:30	<i>Dr. Xingtao Huang</i> OFFLINE DATA PROCESSING SOFTWARE FOR THE STCF Программное обеспечение для обработки данных Супер тау-чарм фабрики
10:30 – 10:45	Перерыв
10:45 – 11:00	<i>Dr. Lei Zhao</i> THE PROGRESS OF ELECTRONICS DESIGN OF STCF Статус разработки электроники для Супер тау-чарм фабрики
11:00 – 11:15	<i>Тодышев К.Ю.</i> Результаты экспериментов с детектором КЕДР на коллайдере ВЭПП-4М
11:15 – 11:30	<i>Каминский В.В.</i> Лазерный поляриметр коллайдера ВЭПП-4М
СЕКЦИЯ №5. Физика тяжелых кварков и лептонов	
11:30 – 11:45	<i>Абасов Э.Э.</i>

	Методология поиска сигнала темной материи в процессах с топ кварком
11:45 - 12:00	Гаврилов П.М. Инерционно - гравитационная модель расширения вселенной
12:00 – 13:00	Обед
13:00 - 13:15	Шумаков А.А. Наблюдение $f_0(1710)$ в системе $\omega\phi$ в пион-ядерных взаимодействиях при $p=29$ ГэВ/с
13:15 - 13:30	Деркач Д.А. Анализ треугольника унитарности в схеме Кабиббо-Кобаяши-Маскава
13:30 - 13:45	Дубинин М.Н. Следствия расширений СМ тремя поколениями нейтральных тяжелых лептонов
СЕКЦИЯ №6. Комптоновские источники рентгеновского и гамма-излучения	
13:45 - 14:00	Бобровников В.С. Тестовые пучки электронов, гамма-квантов и быстрых нейтронов в ИЯФ СО РАН
14:00 – 14:15	Арсентьева М.В. Линейный ускоритель инжектора СКИФ
14:15 - 14:30	Каминский В.В. Проект источника комптоновских фотонов на СКИФ
14:30 – 14:45	Шемухин А.А. Концепция МГУ источника комптоновского излучения для исследований в области биологии, медицины, материаловедения, быстропротекающих процессов, ядерной физики
14:45 – 18:00	Экскурсионная программа для иногородних участников
18:00 – 20:00	Официальный приём в Доме учёных

Пятница - 28 июля

Время	Программа дня
6 секция. Комптоновские источники рентгеновского и гамма-излучения	
09:00 – 09:15	Снигирев А.А. (онлайн участие) Рентгеновская оптика для комптоновских источников
09:15 - 09:30	Дюбков В.С. Актуальные решения для проекта компактного

	рентгеновского источника на обратном комптоновском рассеянии в НИЯУ МИФИ
09:30 - 09:45	<i>Тиликин И.Н.</i> Исследование когерентного рентгеновского излучения в начальной стадии сильноточного поверхностного пробоя феррита
09:45 - 10:00	<i>Спирин И.А.</i> Возможные направления исследований быстропротекающих процессов на создаваемом в НЦФМ источнике прецизионного рентгеновского излучения
10:00 – 10:15	Перерыв
10:15 – 10:30	<i>Рыкованов С.Г.</i> Использование нелинейного эффекта Комптона в узкополосных источниках гамма-квантов
10:30 – 10:45	<i>Хрисанов И.А.</i> Лазерная система «ФОКУС» для лазерно-плазменного источника ионов
10:45 – 11:00	<i>Лосев А.А.</i> Первые эксперименты на лазерно-плазменном источнике ионов для линейного ускорителя
11:00 – 11:30	ЗАКРЫТИЕ КОНФЕРЕНЦИИ
11:30 – 12:30	Обед
12:30	Экскурсионная программа для иногородних участников