

Перспективы поиска новых легких частиц на проекте TiMoFeu

Дмитрий Горбунов¹, Александр Измайлов¹, Дмитрий Калашников¹,
Леонид Кравчук¹, Екатерина Крюкова¹, Юрий Куденко¹,
Никита Машин^{1,2}, Юрий Сеничев¹, Александр Фещенко¹,
[Сергей Демидов¹](#), [arXiv:2508.01968\[hep-ph\]](#)



¹ИЯИ РАН, ²ФИАН

Работа поддержана грантом РФФ 25-12-00309

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
“Физика фундаментальных взаимодействий”
11 марта, 2026

- Указания на существование новой физики: темная материя, барионная асимметрия Вселенной, ненулевые массы нейтрино
- Расширения Стандартной модели \rightarrow новые легкие (масса \sim ГэВ) очень слабо взаимодействующие частицы
- Множество моделей: темный фотон и другие калибровочные бозоны, темная материя, стерильные нейтрино, ALP, суперпартнеры
- Малые константы связи – нужна большая статистика
- Большая экспериментальная программа на многих установках в мире (T2K, NA64, FASER, SHiP, T2HK, DUNE, MATHUSLA, SND и другие)

TiMoFey – Troitsk Meson Factory

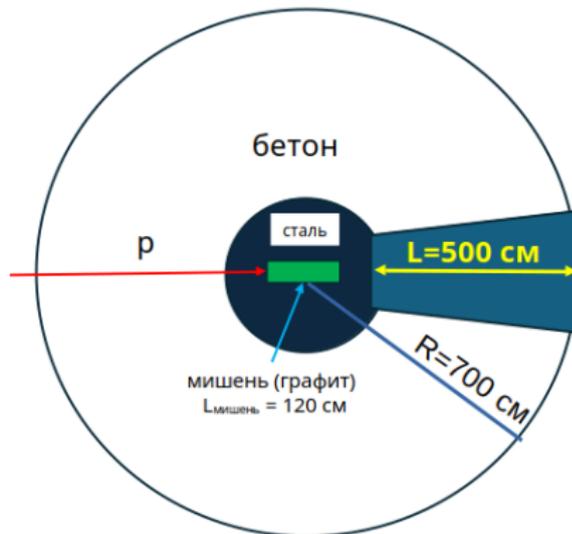
TiMoFey – проект ускорительного эксперимента с фиксированной мишенью на базе Комплекса сверхточного линейного ускорителя протонов и отрицательных ионов водорода ИЯИ РАН в рамках Программы “Фундаментальные свойства материи”



- Две стадии работы по 5 лет

Стадия	I	II
T_p , MeV	423	1300
I_p , мкА	300	100
$N_{РОТ}$	$1.8 \cdot 10^{22}$	$0.6 \cdot 10^{22}$

- Мишень – графит ($L_m = 1.2$ м)
- Защита – бетон ($R = 7$ м), сталь вокруг ($R_0 = 2$ м) и за мишенью ($L = 5$ м)



GEANT4 моделирование

- Пионы (модель QGSP_BERT)

$T_p, \text{МэВ}$	423	1300	$T_p, \text{МэВ}$	423	1300
$\langle T_{\pi^+} \rangle, \text{МэВ}$	63	330	$\langle T_{\pi^-} \rangle, \text{МэВ}$	60	266
n_0	$8.6 \cdot 10^{-3}$	0.35	f_0	0.28	0.35
n_+	$10 \cdot 10^{-3}$	0.54	f_+	0.28	0.33
n_-	$1.7 \cdot 10^{-3}$	0.14	f_-	0.25	0.29

n_i – число пионов, образующихся в мишени, на 1 протон

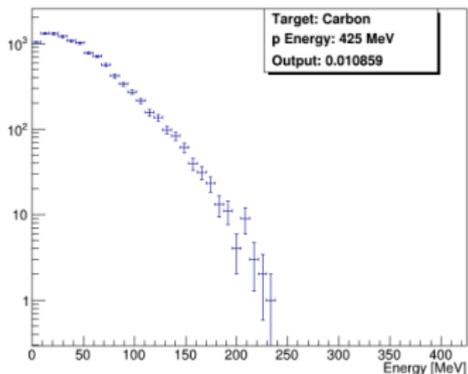
f_i – доля пионов, в направлении вдоль пучка $\cos\theta > 0.8$

- η -мезоны (для $T_p = 1300 \text{ МэВ}$, модель QGSP_INCLXX)

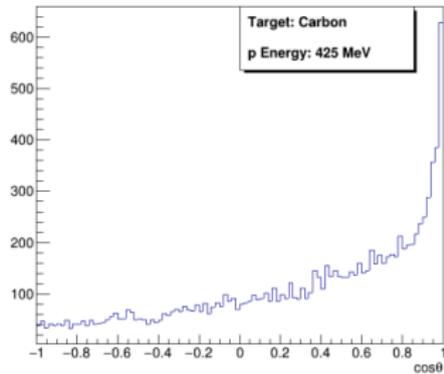
n_η	f_η	$\langle T_\eta \rangle, \text{МэВ}$
$0.8 \cdot 10^{-3}$	0.14	154

GEANT4 моделирование: 10^9 POT

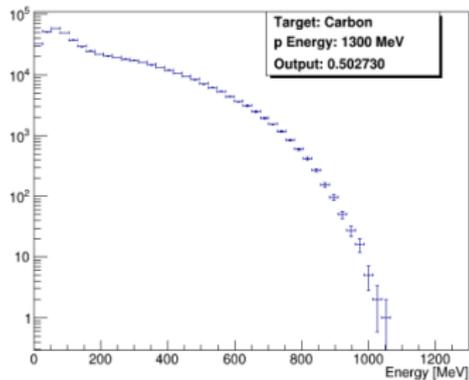
Energy distribution: π^+



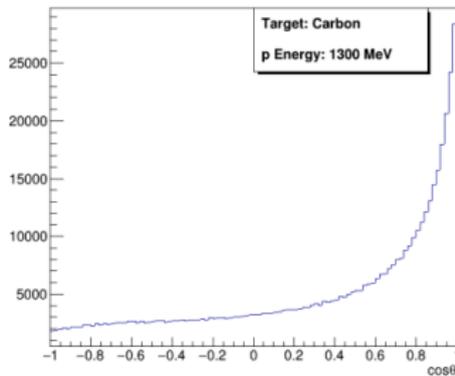
$\cos\theta$ distribution: π^+



Energy distribution: π^+



$\cos\theta$ distribution: π^+

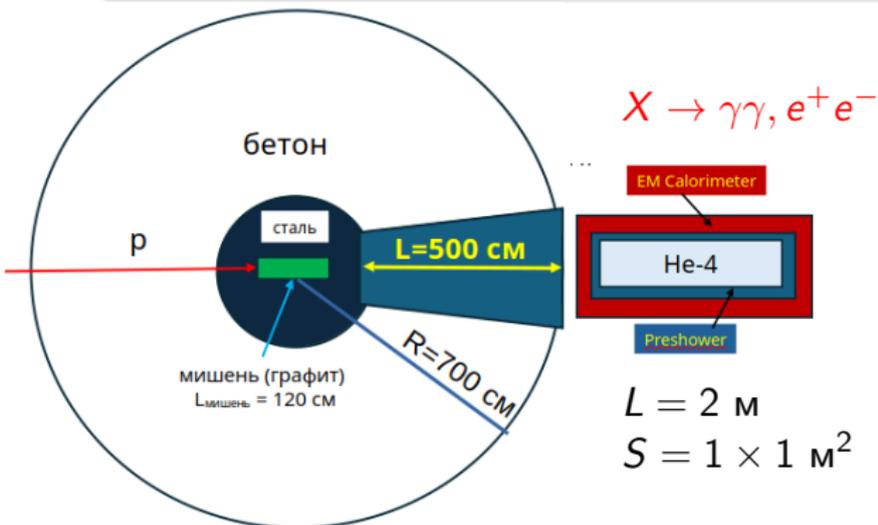


Физика на TiMoFeu (невысокие энергии, но большая статистика)

- Когерентное рассеяние нейтрино
- Поиск сигнала от новых легких частиц X

Варианты сигнала от X :

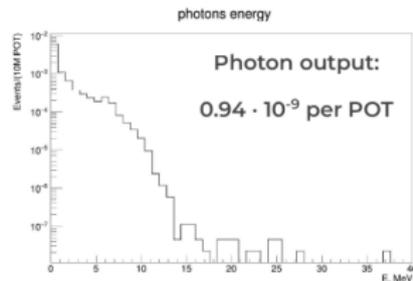
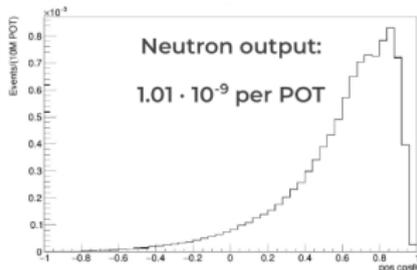
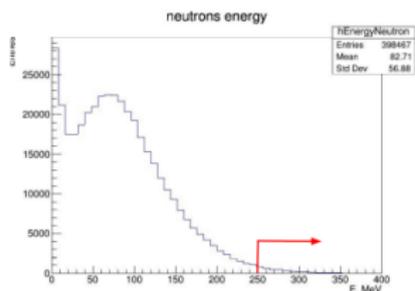
- Распады: $X \rightarrow \gamma\gamma$, $X \rightarrow e^+e^-$
- Взаимодействия в детекторе $X + SM \rightarrow \dots$



- EW Cal $15X_0$
- Preshower $2 - 3X_0$
- Энергетическое разрешение $8-9\%$ (при 100 МэВ)
- Угловое разрешение $3 - 5^\circ$
- Временное разрешение $1-2 \text{ нс}$

Ожидаемый фон

- Скважность (duty cycle) ускорителя вплоть до 10^{-5} – подавление фона, не связанного с пучком: от космических лучей и естественной радиоактивности
- Фон, связанный с пучком: n и γ после защиты (423 МэВ)



Порог рождения π^0

В детекторе $N_{\pi^0} = 3.5 \cdot 10^{-22}$ на протон
Восстановления направления – дополнительная возможность
подавления фона (фактор ~ 10)

Хорошие шансы на бесфоновый эксперимент по поиску легких экзотических частиц, распадающихся на $\gamma\gamma$ или e^+e^-

Модель с лептофобным B -бозоном

B -бозон – векторный бозон, взаимодействующий с барионным током $U(1)_B$.

- Лагранжиан взаимодействия

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \left(\frac{g_B}{3} + \epsilon Q_q e \right) \bar{q} \gamma^\mu q B_\mu - \epsilon e \bar{l} \gamma^\mu l B_\mu.$$

- Взаимодействия с лептонами возникают в петлевых процессах из-за $B \leftrightarrow \gamma$ смешивания, $\epsilon = e g_B / (4\pi)^2$
- Распад $B \rightarrow e^+ e^-$

$$\Gamma(B \rightarrow l^+ l^-) = \frac{\alpha_{\text{em}} \epsilon^2 m_B}{3} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_B^2} \right) \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_B^2}}$$

- Распад $B \rightarrow \pi^0 \gamma$

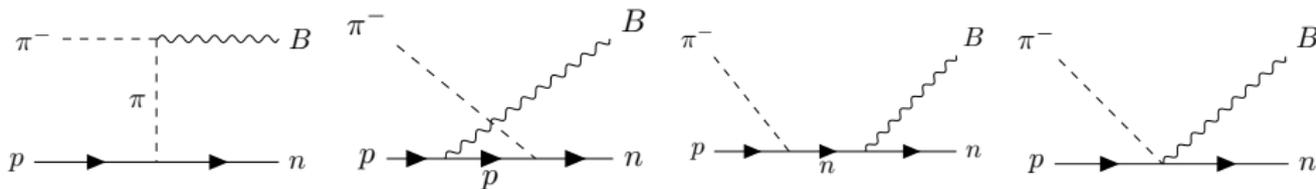
$$\Gamma(B \rightarrow \pi^0 \gamma) = \frac{\alpha_B \alpha_{\text{em}} m_B^3}{96\pi^3 f_\pi^2} \left(1 - \frac{m_\pi^2}{m_B^2} \right)^3 |F_\omega(m_B^2)|^2.$$

- Рождение B в распадах: $\pi^0 \rightarrow B\gamma$, $\eta \rightarrow B\gamma$

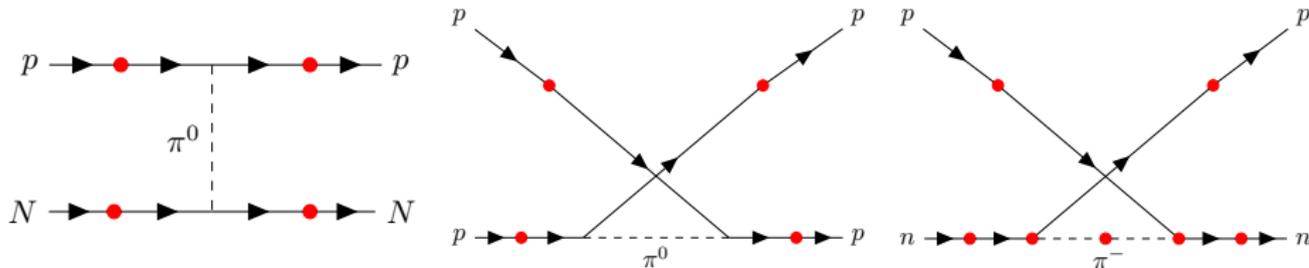
$$\text{Br}(\pi^0 \rightarrow B\gamma) \simeq \frac{2\alpha_B}{\alpha_{\text{em}}} \left(1 - \frac{m_B^2}{m_{\pi^0}^2}\right)^3 |F_\omega(m_B^2)|^2.$$

$$\frac{\text{Br}(\eta \rightarrow B\gamma)}{\text{Br}(\eta \rightarrow \gamma\gamma)} \simeq \frac{2\alpha_B}{\alpha_{\text{em}}} \left(1 - \frac{m_B^2}{m_\eta^2}\right)^3 |F_{\omega\phi}(m_B^2)|^2.$$

- Рождение B в пион-нуклонном рассеянии



- Рождение B в процессах тормозного излучения $pN \rightarrow BpN$



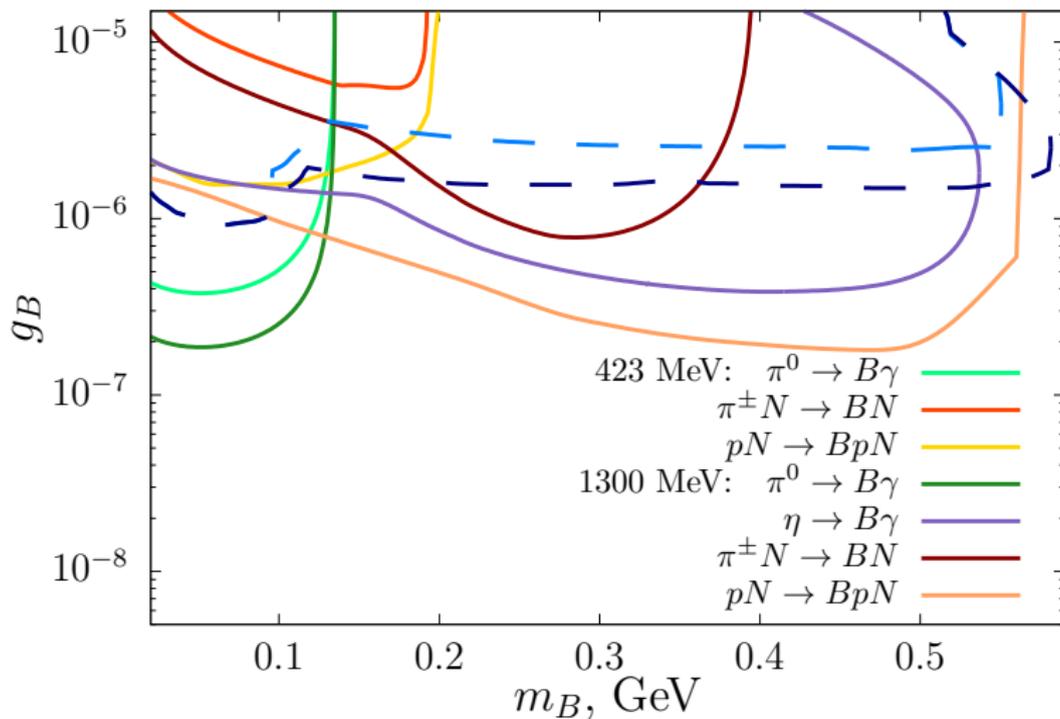
Сечения вычислялись в LO ChPT

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{int}} = & (g_B + \epsilon e) B_\mu \bar{p} \gamma^\mu p + g_B B_\mu \bar{n} \gamma^\mu n + i\epsilon e B_\mu (\pi^- \partial^\mu \pi^+ - \pi^+ \partial^\mu \pi^-) \\ & - \frac{g_A}{f_\pi \sqrt{2}} (\bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n (\partial^\mu - i\epsilon e B^\mu) \pi^+ + \bar{n} \gamma_\mu \gamma_5 p (\partial^\mu + i\epsilon e B^\mu) \pi^-) \\ & + \frac{g_A}{2F} (\bar{n} \gamma^\mu \gamma^5 n - \bar{p} \gamma^\mu \gamma^5 p) \partial_\mu \pi^0, \quad \text{где } g_A = 1.27 \end{aligned}$$

Полный сигнал:

- потери энергии π^\pm при распространении в веществе
- геометрический фактор
- вероятность \mathcal{P}_{det} долететь и распасться в детекторе

Чувствительность к В-бозону (95 % CL)



$B \rightarrow e^+e^-, \pi^0\gamma$, 5 лет работы

Модели с аксионо-подобными частицами (ALP)

a – псевдоскалярная частица, псевдоголдстоуновский бозон некоторой спонтанно нарушенной $U(1)$ -симметрии

- Лагранжиан взаимодействия

$$\mathcal{L}_{ALP} = \frac{1}{2}(\partial_\mu a)^2 - \frac{m_a^2}{2}a^2 + c_{GG} \frac{\alpha_s}{4\pi} \frac{a}{f} G_{\mu\nu} \tilde{G}^{\mu\nu} + c_{WW} \frac{\alpha_2}{4\pi} \frac{a}{f} W_{\mu\nu}^a \tilde{W}^{a\mu\nu} + c_{BB} \frac{\alpha_Y}{4\pi} \frac{a}{f} B_{\mu\nu} \tilde{B}^{\mu\nu}.$$

$f_a \equiv \frac{f}{2c_{GG}}$ — масштаб новой физики

- Взаимодействия с кварками:

$$q(x) \rightarrow \exp(-i\kappa_q \gamma^5 c_{GG} \frac{a(x)}{f}) q(x), \quad \kappa_u + \kappa_d + \kappa_s = 1$$

$$\mathcal{L}_{int} \sim \frac{\partial_\mu a}{f} \bar{q} \gamma^\mu \gamma^5 q$$

Приводит к смешиванию a с π^0, η, η'

Каналы рождения и распада ALP (на TiMoFeу)

- Рождение в смешивании с легкими нейтральными мезонами

$$\frac{d^2 N_a}{d\theta_a dE_a} = \sum_{P=\pi^0, \eta} |\theta_{aP}|^2 \frac{d^2 N_P}{d\theta_P dE_P} \Big|_{E_P=E_a, \theta_P=\theta_a},$$

$$\theta_{a\pi^0} = \frac{1}{2} \delta_I \frac{m_a^2}{m_a^2 - m_\pi^2} \frac{f_\pi}{f_a}, \quad \theta_{a\eta} = \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{m_a^2 - m_\pi^2/2}{m_a^2 - m_\eta^2} \frac{f_\pi}{f_a}, \quad \delta_I = \frac{m_d - m_u}{m_d + m_u} \approx \frac{1}{3}$$

- Доминантная мода распада ALP $a \rightarrow \gamma\gamma$ для $m_a < 3m_\pi$

$$\Gamma(a \rightarrow \gamma\gamma) = \frac{\alpha^2 m_a^3}{256\pi^3 f_a^2} |c_{\gamma\gamma}|^2,$$

$$c_{\gamma\gamma} \approx \frac{c_{WW} + c_{BB}}{c_{GG}} - 1.92 + \frac{1}{3} \frac{m_a^2}{m_a^2 - m_\pi^2} + \frac{4}{9} \frac{2m_a^2 - m_\pi^2}{m_a^2 - m_\eta^2} + \frac{7}{9} \frac{m_a^2 - 2m_\pi^2}{m_a^2 - m_\eta^2}$$

При $m_a > 3m_\pi$ есть другие распады: $a \rightarrow 3\pi$ and $a \rightarrow \gamma\pi\pi$

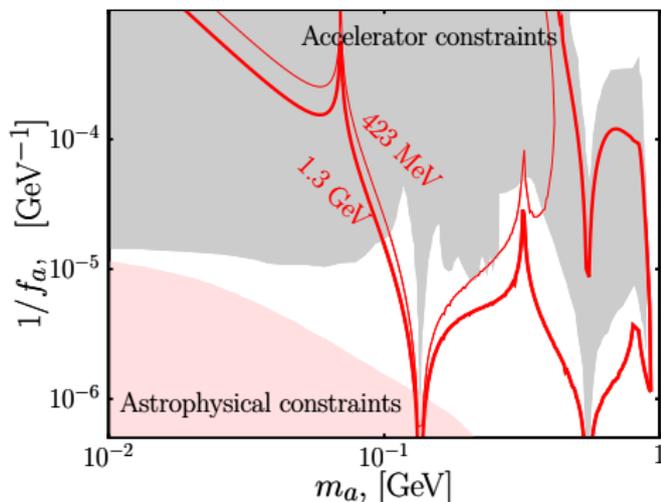
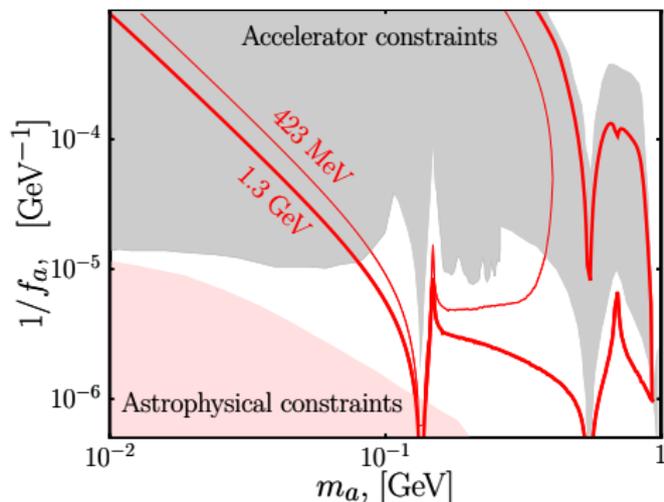
Ожидаемое число событий

$$N = N_{\text{РОТ}} \epsilon_{\text{det}} \int d\theta_a dE_a \frac{d^2 N_a}{d\theta_a dE_a} \mathcal{P}_{\text{det}} \text{Br}(a \rightarrow \gamma\gamma),$$

ALP на TiMoFeу: области чувствительности (95 % CL)

$$c_{WW} = c_{BB} = 0$$

$$c_{GG} = c_{WW} = c_{BB}$$



$a \rightarrow \gamma\gamma$, 5 лет работы

Работа продолжается:

- Продолжается моделирование ожидаемого фона
- Изучается чувствительность эксперимента к другим моделям (например, миллизаряженным частицам)
- Учет новых каналов рождения и распада

Выводы

- TiMoFeу – перспективный проект для поиска новых легких ($m \lesssim \text{ГэВ}$) частиц и, возможно, изучения физики нейтрино
- Проект способен исследовать феноменологически приемлимые области пространства параметров моделей с V -бозоном и аксионо-подобными частицами

Спасибо за внимание!

Работа поддержана грантом РФФ «Феноменология легких экзотических частиц» 25-12-00309