

# Сигнал от аксионо-подобных частиц образованных в атмосферных ливнях

Сергей Демидов



The XXV International Workshop-School  
High Energy Physics and Quantum Field Theory  
QFTHEP-270, 4 июля, 2025

- ▶ Расширения Стандартной модели → новые легкие (масса  $\sim$  ГэВ) очень слабо взаимодействующие частицы: темный фотон и другие калибровочные бозоны, стерильные нейтрино, ALP
- ▶ Доступны для поисков в коллайдерных экспериментах.
- ▶ Малые константы связи → малые вероятности рождения и распада
- ▶ Новые частицы могут быть долгоживущими!
- ▶ Естественный канал рождения – через взаимодействия с мезонами – на ускорителях и ... в атмосфере!
- ▶ ALP возникают во многих моделях новой физики

- ▶ Лагранжиан взаимодействия

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

- ▶ Предполагаем режим  $c_{GG}, c_{WW}, c_{BB} \neq 0$ .  $f_a = f/(2c_{GG})$ .
- ▶ Рассматриваемый диапазон масс  $m_a$  до  $\sim$  ГэВ
- ▶ Описание эффективного взаимодействия – киральная теория возмущений.

## Распад ALP на два фотона

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

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

$a \rightarrow \gamma\gamma$  — доминирует для  $m_a \lesssim 3m_\pi$ .

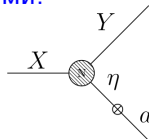
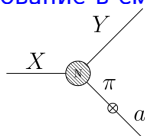
## Смешивание с псевдоскалярными мезонами

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

Возможности рождения ALP в адронных столкновениях:

- ▶ Прямое рождение в смешивании с мезонами
- ▶ Рождение в распадах мезонов

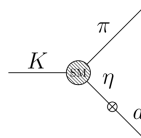
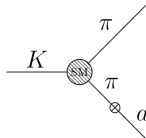
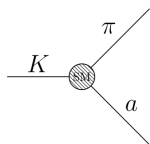
► Образование в смешивании с мезонами:



$$\frac{d^2\sigma_a}{d\theta_a dE_a} \approx \sum_{P=\pi^0, \eta} |\theta_{aP}|^2 \left. \frac{d^2\sigma_P}{d\theta_P dE_P} \right|_{E_P=E_a, \theta_P=\theta_a},$$

arXiv:2201.05170

Образование в распадах каонов:  $K^\pm \rightarrow \pi^\pm a$  ( $\Delta I = 1/2!$ )



$$\mathcal{A}(K^+ \rightarrow \pi^+ a) = \frac{2N_8}{f_a} \frac{(m_K^2 - m_\pi^2)(m_K^2 - m_a^2)}{4m_K^2 - 3m_a^2 - m_\pi^2}, \quad N_8 = -\sqrt{2}G_F V_{ud} V_{us}^* g_8 f_\pi^2$$

arXiv:2102.13112

# Спектр мезонов в атмосферных ливнях

Fedynitch et al.'12, '15, <https://mceq.readthedocs.io>

Используем пакет MCEq – Matrix Cascade Equations

$$\frac{d\Phi_M}{dX} = -\frac{\Phi_M}{\lambda_{int,M}} - \frac{\Phi_M}{\lambda_{dec,M}} + \sum_{M'} \int dE_{M'} \left[ \frac{\Phi_{M'}}{\lambda_{int,M'}} \frac{dN_M^{int}}{dE_M} + \frac{\Phi_{M'}}{\lambda_{dec,M'}} \frac{dN_M^{dec}}{dE_M} \right]$$

$X = \int dl \rho(h)$  – глубина;  $\rho(X)$  – плотность

$$h = \sqrt{R^2 + 2IR \cos \theta + I^2} - R$$

$\lambda_{int,M}$  и  $\lambda_{dec,M}$  – длины взаимодействия и распада адрона

$\frac{dN_M^{int}}{dE_M}$  и  $\frac{dN_M^{dec}}{dE_M}$  – спектры образования адрона  $M$

Модель космических лучей: Hillas-Gaisser

Модель атмосферы: NRLMSISE-00

Модели адронных взаимодействий: SYBILL-2.3c, QGSJET-II-04,  
DPMJET-III

# Рождение легких частиц в атмосферных ливнях

- ▶ Рождение ALP в распадах каонов  $K \rightarrow a + \pi$ ,

$$\left( \frac{d\Phi_a}{dE_a d\Omega dX} \right)_0 = \sum_{K^+, K^-} \int dE_K \frac{1}{\lambda_K} \frac{d\Phi_K}{dE_K d\Omega} \frac{dN_a^{dec}}{dE_a}$$

- ▶ Рождение ALP в смешивании (с  $\pi^0$  и  $\eta$ )

$$\left( \frac{d\Phi_a}{dE_a d\Omega dX} \right)_0 = \sum_M \int dE_M \frac{1}{\lambda_{int,M}} \frac{d\Phi_M}{dE_M d\Omega} \frac{dN_a^{mix}}{dE_a}$$

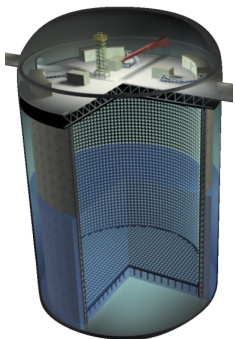
$\frac{dN_a^{dec,mix}}{dE_a}(E_M, E_a)$  – спектры образующихся ALP

Поток  $a$  в детекторе:

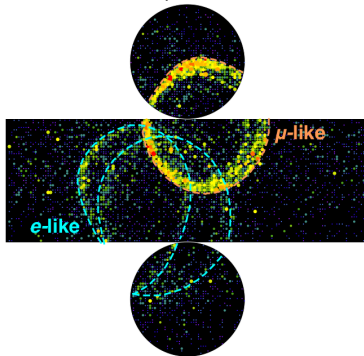
$$\frac{d\Phi_a}{dE_a d\cos\theta} = 2\pi \int dX e^{-l/\lambda_{dec,a}} \left( \frac{d\Phi_a}{dE_a d\Omega dX} \right)_0$$

# Сигнал в детекторах SK и HK

Вид детектора (Kajita et al., 2016)



Пример события (из arXiv:2311.05105)



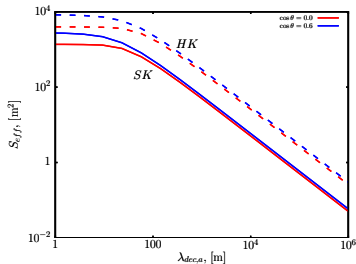
Электроны и фотоны  $\rightarrow$  э/м ливни  $\rightarrow$  размытые кольца  
Мюоны и заряженные пионы  $\rightarrow$  кольца с резкими краями

Гипер-Камиоканде (HK): большой размер и рабочий объем  
(фактор  $\approx 8.4$ )

# Сигнал в детекторах SK и HK

Эффективная площадь:

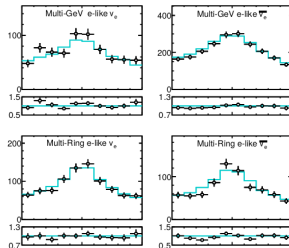
$$S_{eff}(\theta, E) = \int dS_{\perp} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta_{det}}{\lambda_{dec,S}}} \right)$$



10 бинов в интервале  $\cos \theta$   $[-1, 1]$   
 $1.3 \text{ ГэВ} \lesssim E_S \lesssim 90 \text{ ГэВ}$

Фон – атмосферные нейтрино

Используем результаты анализа SK осцилляций атмосферных нейтрино (PRD 97, 072001) - 5326 дней, включаем в анализ события “multi-GeV e-like”



# Схема получения ограничений

см, Argüelles, Coloma, Hernandez, Muñoz, '20

- ▶ Три свободных параметра:  $\tau_a$ ,  $m_a$  и  $f_a$ : фиксируем  $m_a$
- ▶ Ожидаемое число сигнальных событий в бине:

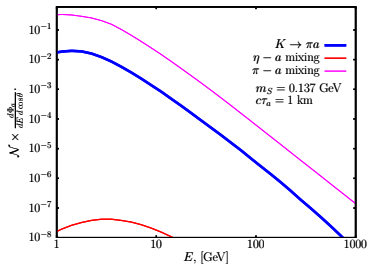
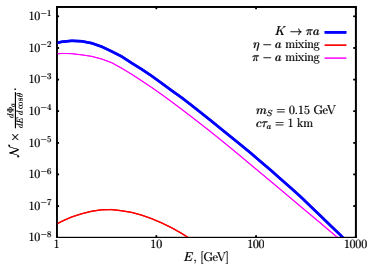
$$S_i = \epsilon T \int d \cos \theta dE_a S_{\text{eff}}(\theta, E_a) \frac{d\Phi_a}{dE_a d \cos \theta}$$

- ▶ Находим пределы на 90% у.д.

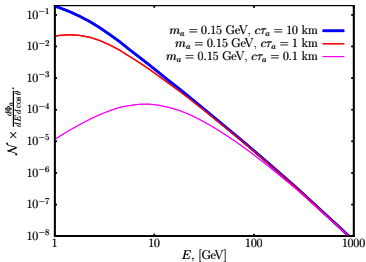
$$\chi^2 = 2 \sum_i \left( S_i + B_i - N_i \left( 1 - \log \frac{N_i}{S_i + B_i} \right) \right)$$

Чувствительность Гипер-Камиоканде за 20 лет работы

## Разные каналы рождения

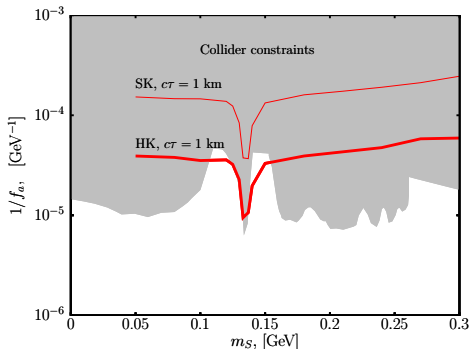
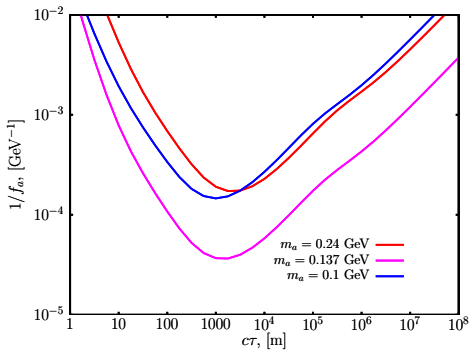


## Полный поток



# Пределы, чувствительности и сравнение с другими поисками

## Ограничения из данных SK:



Похожие результаты получены и в моделях с легкими скалярными частицами

см. S.D. 2503.18112 [hep-ph]

- ▶ Атмосфера как beam dump для космических лучей – интересный вариант поиска новой физики и, в частности, легких долгоживущих частиц
- ▶ Изучено рождение аксионо-подобных частиц в процессах смешивания с легкими мезонами и в распадах каонов в атмосфере
- ▶ Чувствительности нейтринных экспериментов сравнимы с ограничениями из прямых поисков
- ▶ Можно ли увеличить чувствительность отличая события конечного состояния  $\gamma\gamma$  от нейтринного фона?

Спасибо за внимание!