

Широкие атмосферные ливни как источник новых долгоживущих частиц

Сергей Демидов



Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвящённая 70-летию В.А. Рубакова
21 февраля, 2025

- Расширения Стандартной модели → новые легкие (масса \sim ГэВ) очень слабо взаимодействующие частицы: темный фотон и другие калибровочные бозоны, стерильные нейтрино, ALP, суперпартнеры
- Большая экспериментальная программа на многих установках.
- Очень слабые взаимодействия → маленькие вероятности рождения и распада
- Новые частицы могут быть долгоживущими!
- Естественный канал рождения – распады мезонов – на ускорителях и ... в атмосфере! как нейтрино

Модели с низким масштабом нарушения суперсимметрии

- Спонтанное нарушение суперсимметрии в скрытом секторе \rightarrow нарушение суперсимметрии в видимом секторе
- Передача нарушения суперсимметрии: несколько механизмов (гравитация, калибровочные взаимодействия)
- Спонтанное нарушение суперсимметрии: голдстино и его суперпартнеры

- $\Phi = \phi + \sqrt{2}\theta\psi + F_\phi\theta^2$, F_ϕ – вспомогательное поле
- Спонтанное нарушение SUSY $\rightarrow F \equiv \langle F_\phi \rangle \neq 0$
- \sqrt{F} – масштаб нарушения суперсимметрии
- $\sqrt{F} \gg M_{EW}$ – стандартная МССМ
- $\sqrt{F} \gtrsim M_{EW}$ – нужно учитывать S, P и ψ в низкоэнергетической теории — модели с низким масштабом нарушения суперсимметрии
- ψ – голдстоуновский фермион \rightarrow продольная компонента гравитино: $m_{3/2} = \sqrt{8\pi/3}F/M_{Pl}$
- Для $\sqrt{F} = 100$ ТэВ, $m_{3/2} \approx 2.4$ эВ – LSP!
- $\phi = (S + iP)/2$, где $S(P)$ – скалярное (псевдоскалярное) сголдстино

- Сектор голдстино легкий, суперпартнеры – тяжелые

$$\mathcal{L}_{gauge} = - \sum_{\alpha} \frac{M_{\alpha}}{2\sqrt{2}F} SF_{a\mu\nu}^{\alpha} F_a^{\alpha\mu\nu} - \sum_{\alpha} \frac{M_{\alpha}}{2\sqrt{2}F} PF_{a\mu\nu}^{\alpha} \tilde{F}_a^{\alpha\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_{fermions} = -\frac{A_{ab}^q v}{\sqrt{2}F} S \bar{q}_a q_b - i \frac{A_{ab}^q v}{\sqrt{2}F} P \bar{q}_a \gamma^5 q_b - \frac{A_{ab}^l v}{\sqrt{2}F} S \bar{l}_a l_b - i \frac{A_{ab}^l v}{\sqrt{2}F} P \bar{l}_a \gamma^5 l_b.$$

- Константы взаимодействия: $\sim \frac{M_{soft}}{F}$
- Эффективная теория: $E \lesssim \sqrt{F}$
- Режим слабой связи: $M_{soft} < \sqrt{F}$
- Предполагаем иерархию: $A_{aa}^{q,l} v = m_a^{q,l} A_0$

Распады легких сголдстино $m_{S,P} < 0.5$ ТэВ

$$S(P) \rightarrow \gamma\gamma: \quad \Gamma \sim \frac{M_{\gamma\gamma}^2 m_X^3}{F^2}$$

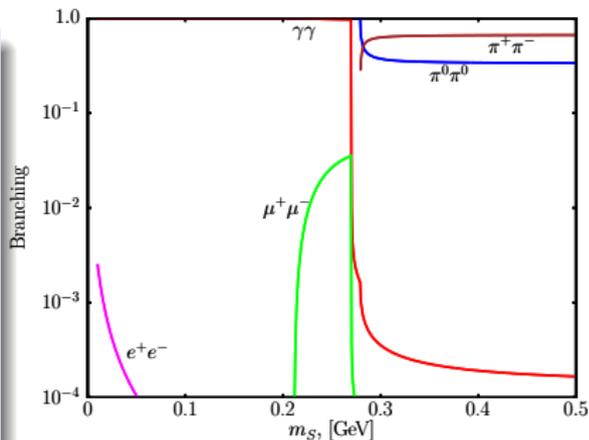
$$M_{\gamma\gamma} = M_1 \cos^2 \theta_W + M_2 \sin^2 \theta_W$$

$$S(P) \rightarrow f\bar{f}: \quad \Gamma \sim \frac{A_0^2 m_f^2 m_X}{F^2}$$

$$S \rightarrow \pi\pi: \quad \Gamma \sim \frac{M_3^2 m_S f(A/M_3)}{F^2}$$

$P \rightarrow \pi\pi$ – запрещён

$$M_{\gamma\gamma} = 2 \text{ TeV}, \quad M_3 = 4 \text{ TeV}, \quad A_0 = 2 \text{ TeV}$$

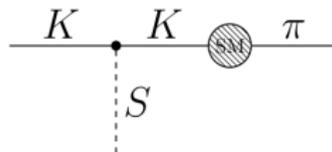
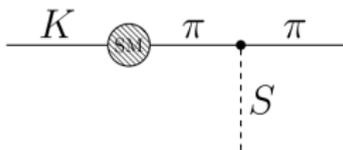
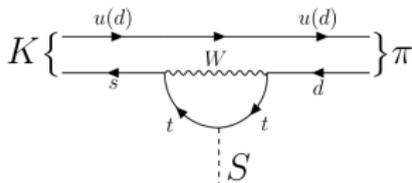


$S \rightarrow \gamma\gamma$ доминирует до масс $m_S = 2m_\pi$

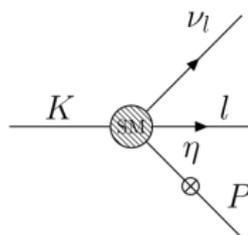
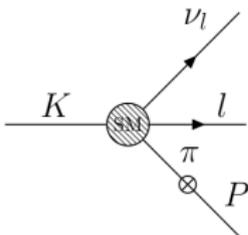
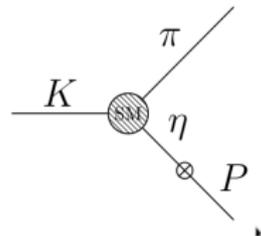
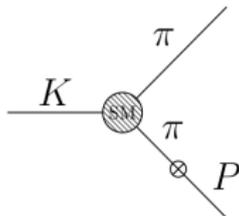
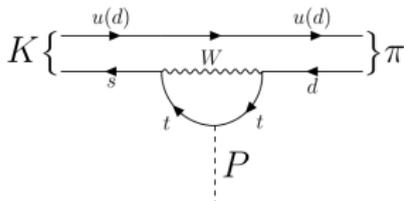
$P \rightarrow \gamma\gamma$ доминирует до масс $m_P = 3m_\pi$

Образование легких сголдстино в распадах каонов

- Скалярное сголдстино S : $K \rightarrow \pi S$



- Псевдоскалярное сголдстино P : $K \rightarrow P \pi$, $K \rightarrow P l \nu_l$



Параметры, определяющие вероятности распадов: $\frac{A_0}{F}$ и $\frac{M_3}{F}$.

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

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

Рождение S в распадах: $M \rightarrow S + \dots$, $S \rightarrow \gamma\gamma$

Поток S :
$$\left(\frac{d\Phi_S}{dE_S d\Omega dX} \right)_0 = \sum_M \int dE_M \frac{1}{\rho \lambda_M} \frac{d\Phi_M}{dE_M d\Omega} \frac{dN_S}{dE_S}$$

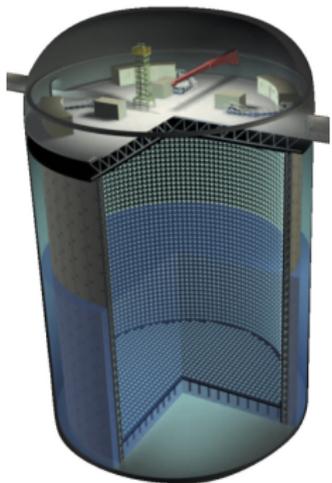
$\lambda_M(E_M)$ – распадная длина M

$\frac{dN_S}{dE_S}(E_M, E_S)$ – спектр S , образующихся в распаде M

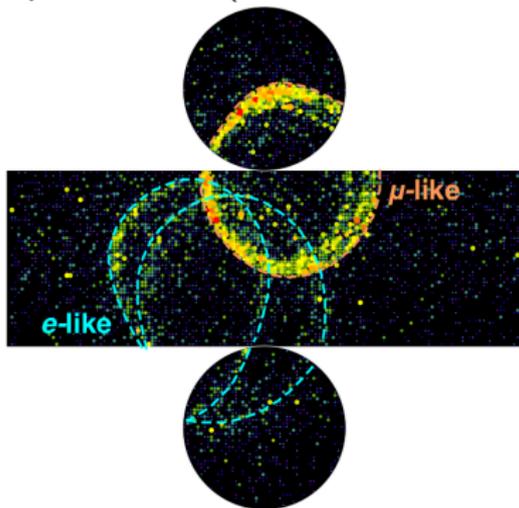
Поток S в детекторе:
$$\frac{d\Phi_S}{dE_S d\cos\theta} = 2\pi \int dX e^{-l/\lambda_{dec,S}} \left(\frac{d\Phi_S}{dE_S d\Omega dX} \right)_0$$

Сигнал в детекторе Супер-Камиоканде

Вид детектора (Kajita et al., 2016)



Пример события (из arXiv:2311.05105)

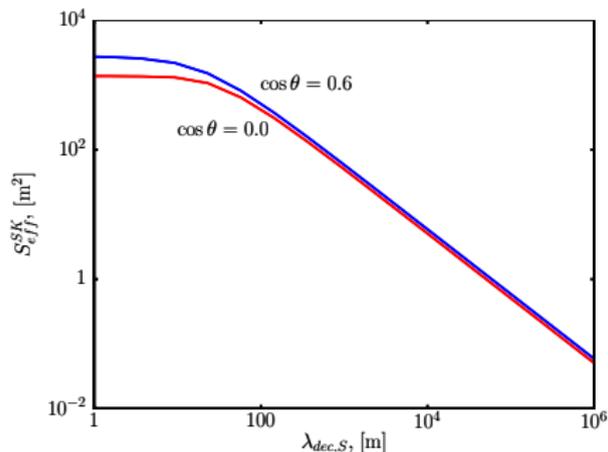


Электроны и фотоны \rightarrow э/м ливни \rightarrow размытые кольца
Мюоны и заряженные пионы \rightarrow кольца с резкими краями

Сигнал в детекторе Супер-Камиоканде

Эффективная площадь:

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



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”

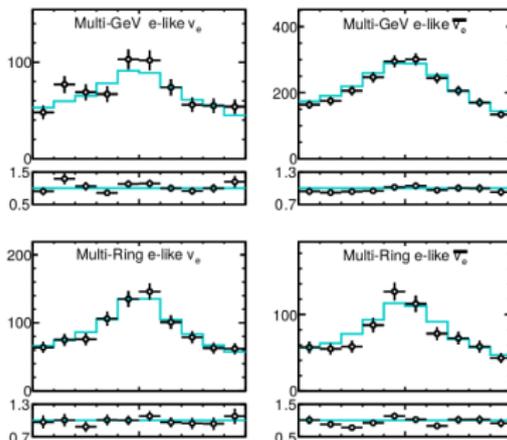


Схема получения ограничений

- Фиксируем m_S (или m_P) и доминирующий механизм распада (за счет константы M_3 или A_0)
- Два свободных параметра: $\tau_{S(P)}$ и $M_3(A_0)$
- Ожидаемое число сигнальных событий в бине:

$$S_i = \epsilon T \int d \cos \theta dE_S S_{eff}^{SK}(\theta, E_S) \frac{d\Phi_S}{dE_S d \cos \theta}$$

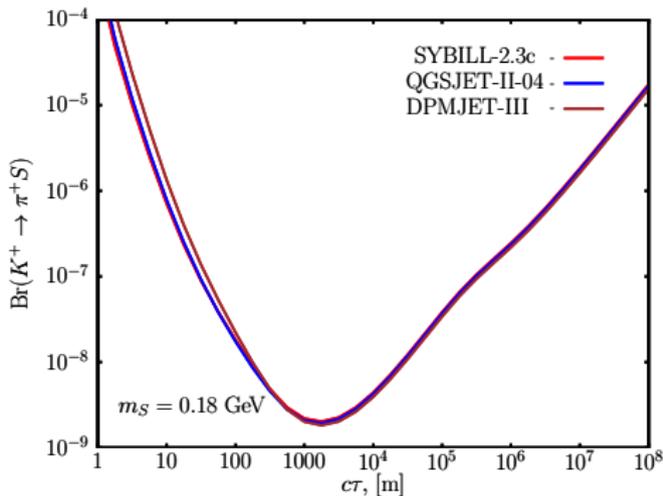
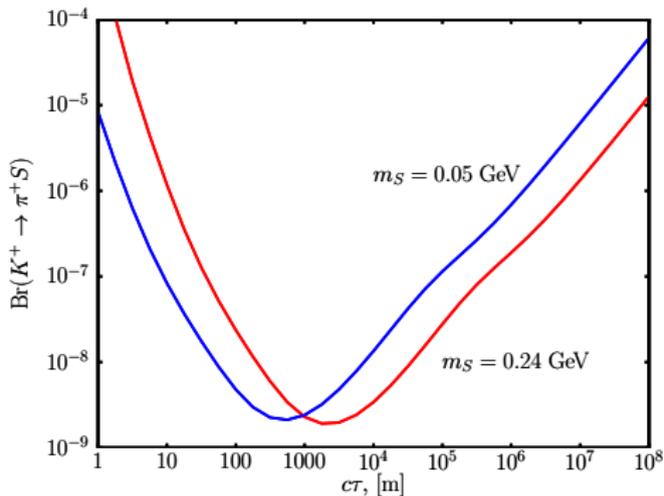
- Находим пределы на 90% у.д.

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

- Чувствительность Гипер-Камиоканде: большой размер и рабочий объем (фактор ≈ 8.4), 20 лет

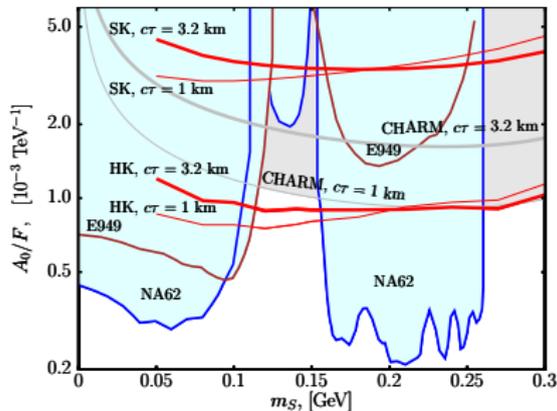
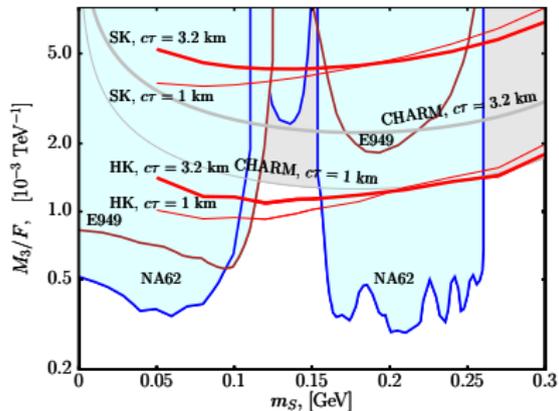
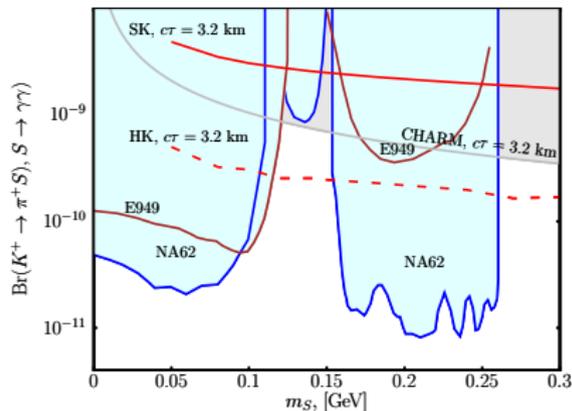
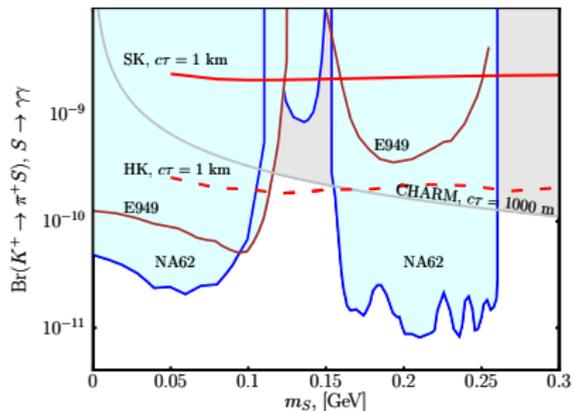
Скалярное сголдстино: $S \rightarrow \gamma\gamma$

Каналы рождения: $K^\pm \rightarrow \pi^\pm S$ и $K_L \rightarrow \pi^0 S$



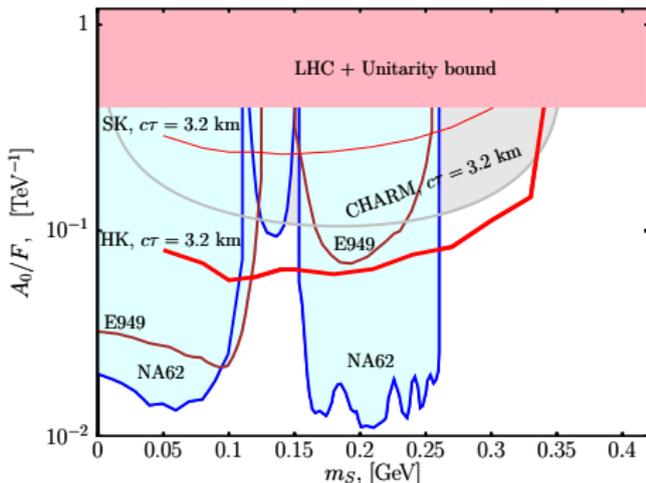
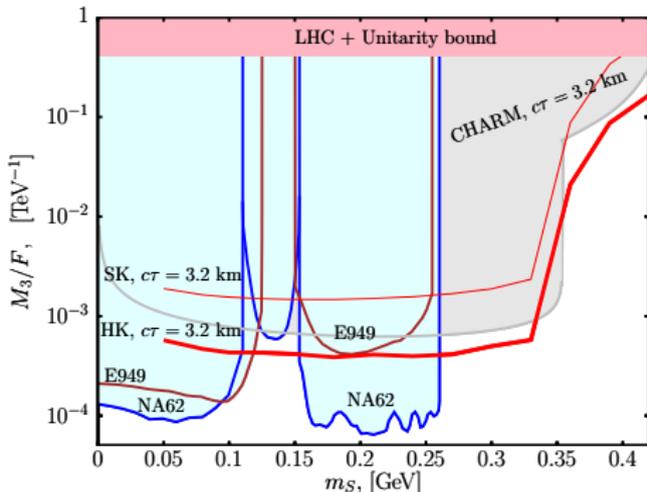
Наилучшая чувствительность к моделям с $ct_S \sim 10^2 - 10^4 \text{ м}$

Скалярное сголдстино $S \rightarrow \gamma\gamma$



Псевдоскалярное сголдстино $P \rightarrow \gamma\gamma$

Каналы рождения: $K^\pm \rightarrow \pi^\pm \pi^0$, $K^\pm \rightarrow Pe^\pm \nu_e$, $K^\pm \rightarrow P\mu^\pm \nu_\mu$



- Атмосфера как beam dump для космических лучей – интересный вариант поиска новой физики и, в частности, легких долгоживущих частиц
- Изучено рождение скалярного и псевдоскалярного σ бозона в распадах каонов в атмосфере
- Ограничения и чувствительности нейтринных экспериментов сравнимы с прямыми поисками

Спасибо за внимание!