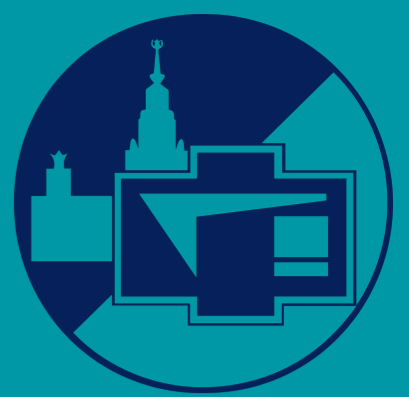




# Распад тёмного скаляра массой 1 ГэВ на пару пионов за счёт смешивания с бозоном Хиггса

Дмитрий Горбунов<sup>1,2</sup> Екатерина Крюкова<sup>1,3</sup> Олег Теряев<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Институт ядерных исследований РАН <sup>2</sup>Московский физико-технический институт  
<sup>3</sup>Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова  
<sup>4</sup>Объединённый институт ядерных исследований



## Тёмный скаляр

**Порталы** — 3 способа записать перенормируемые взаимодействия полей СМ с полями скрытого сектора

- **Скалярный:** тёмный скаляр  $S$ ,  
 $\mathcal{L} \supset (AS + \lambda S^2)H^\dagger H$
- **Векторный:** тёмный фотон  $A'_\mu$ ,  
 $\mathcal{L} \supset \frac{\epsilon}{2} F'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$
- **Фермионный:** тяжёлый нейтральный лептон  $N$ ,  $\mathcal{L} \supset Y_N L \tilde{H} N$

**Лагранжиан модели** со скрытым скаляром

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \frac{1}{2} \partial_\mu S \partial^\mu S + \mu S H^\dagger H + \lambda S^2 H^\dagger H$$

Смешивание с бозоном Хиггса

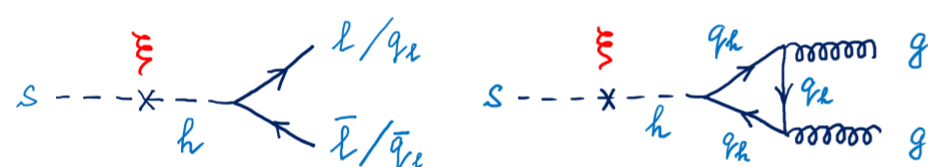
$$\mathcal{L}_s = \frac{1}{2} m_h^2 h^2 + \mu v S h + \frac{1}{2} M_S^2 S^2$$

**Параметры модели:** угол смешивания  $\xi \ll 1$ , масса скаляра  $M_S$ .

## Взаимодействия тёмного скаляра

$$\mathcal{L}_{int} = -\xi S \sum_l \frac{m_l}{v} \bar{l} l - \xi S \sum_q \frac{m_q}{v} \bar{q} q$$

Моды распада скаляра  $S$



Для  $M_S < 2m_c$  отынтегрируем  $N_h = 3$  тяжёлых кварка [4]

$$\mathcal{L}_{qq}^{eff} = -\xi S \sum_{u,d,s} \frac{m_q}{v} \bar{q} q + \xi S \frac{3\alpha_s}{12\pi v} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a}$$

След **тензора энергии-импульса**

$$\Theta_\mu^\mu = \sum_{u,d,s} m_q \bar{q} q - \frac{9\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^a G^{\mu\nu a} \quad \left(11 - \frac{2}{3} N_l = 9\right)$$

Взаимодействие скрытого скаляра **с кварками и следом ТЭИ**

$$\mathcal{L}_{q\Theta} = -\xi \frac{S}{v} \left( \frac{7}{9} \sum_{u,d,s} m_q \bar{q} q + \frac{2}{9} \Theta_\mu^\mu \right)$$

## Распад скрытого скаляра $S \rightarrow \pi\pi$

Формфакторы пиона

LO ChPT

$$\delta^{ab} \Gamma_\pi(s) \equiv \langle \pi^a(p) \pi^b(p') | \sum_{u,d} m_q \bar{q} q | 0 \rangle, \quad \Gamma_\pi(s) = m_\pi^2,$$

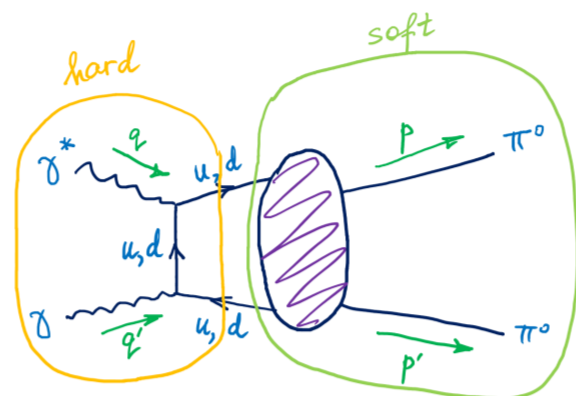
$$\delta^{ab} \Delta_\pi(s) \equiv \langle \pi^a(p) \pi^b(p') | m_s \bar{s} s | 0 \rangle, \quad \Delta_\pi(s) = 0,$$

$$\delta^{ab} \Theta_\pi(s) \equiv \langle \pi^a(p) \pi^b(p') | \Theta_\mu^\mu | 0 \rangle, \quad \Theta_\pi(s) = s + 2m_\pi^2$$

**Ширина распада** скаляра в пионы

$$\Gamma(S \rightarrow \pi\pi) = \frac{3\xi^2}{32\pi v^2 M_S} \sqrt{1 - \frac{4m_\pi^2}{M_S^2}} \left| \frac{7}{9} (\Gamma_\pi + \Delta_\pi) + \frac{2}{9} \Theta_\pi \right|^2$$

## Гравитационные формфакторы пиона из $\gamma^* \gamma \rightarrow \pi^0 \pi^0$



$$P \equiv p + p', \quad \Delta \equiv p' - p, \quad s \equiv P^2$$

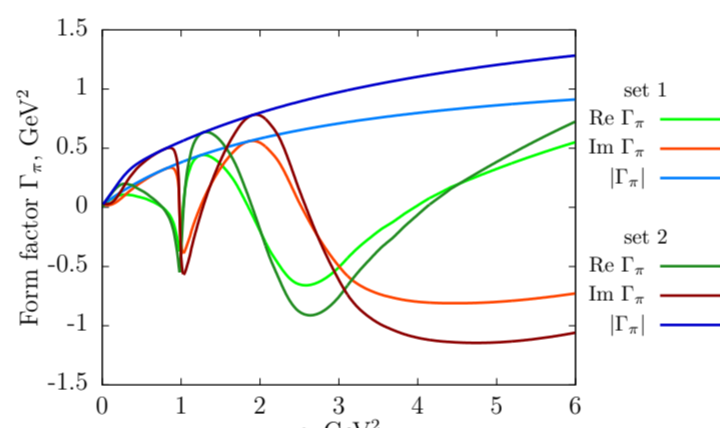
Мягкий и жесткий процессы **разделяются** при  $-q^2 \gg \Lambda_{QCD}^2$ ,  $-q^2 \gg s$  [3]

$$\langle \pi^a(p) \pi^b(p') | \Theta_q^{\mu\nu}(0) | 0 \rangle \equiv \frac{\delta^{ab}}{2} ((s \eta^{\mu\nu} - P^\mu P^\nu) \Theta_{1,q}(s) + \Delta^\mu \Delta^\nu \Theta_{2,q}(s))$$

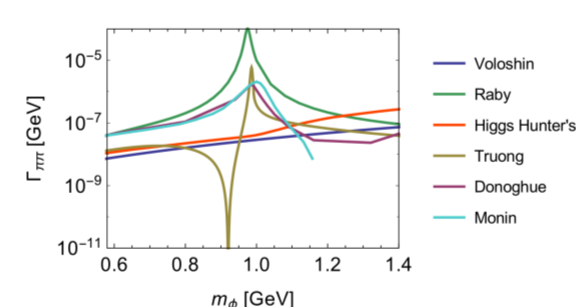
Связь с **формфактором**  $\Gamma_\pi$

$$\Gamma_\pi(s) = s \left( \frac{3}{2} \Theta_1(s) - \frac{1}{2} \Theta_2(s) \right) + 2m_\pi^2 \Theta_2(s)$$

Формфактор  $\Gamma_\pi$  из данных Belle по  $\gamma^* \gamma \rightarrow \pi^0 \pi^0$

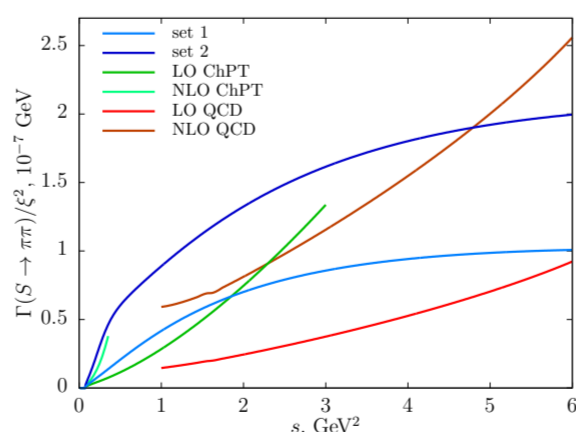


## Ранее известные результаты [5]

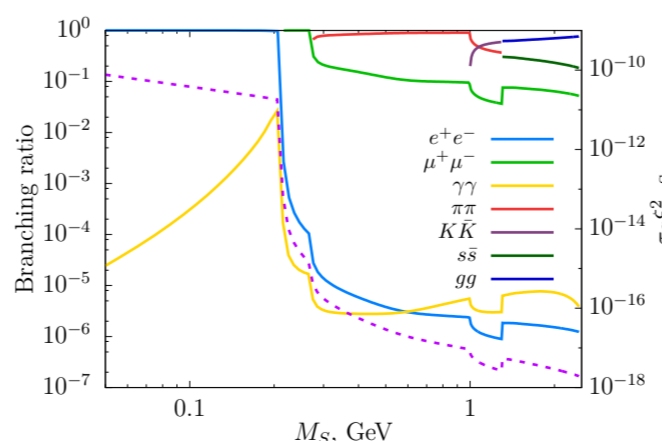


## Новая оценка для ширины распада скрытого скаляра

Ширина распада  $S$  в пионы

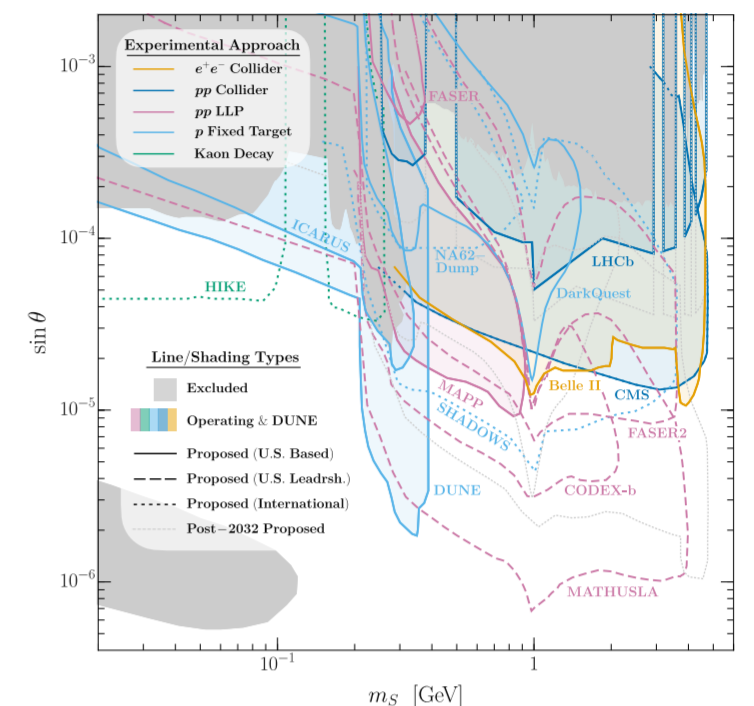


Парциальные ширины распада и время жизни

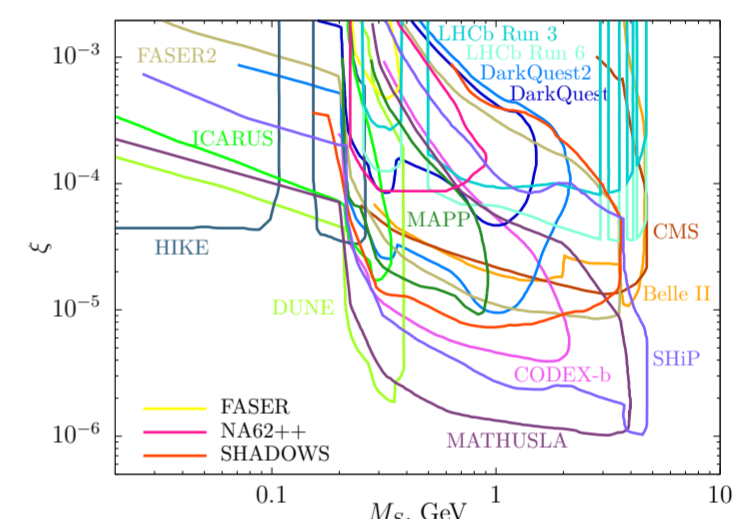


## Поиски скрытого скаляра

Кривые чувствительности планируемых и предложенных экспериментов [1]



Область пространства параметров, доступная для экспериментального изучения в случае **нерезонансного поведения**  $\Gamma(S \rightarrow \pi\pi)$



## Результаты и планы на будущее

1. Найденная ширина распада  $S \rightarrow \pi\pi$  при низких энергиях воспроизводит оценку по **ChPT**
2.  $\Gamma(S \rightarrow \pi\pi)$  не обладает резонансным пиком в районе 1 ГэВ
3. При  $M_S = 1.5 - 2$  ГэВ результат близок к ответу для  $\Gamma(S \rightarrow gg)$  в NLO по  $\alpha_s$  (т.е. **согласуется с КХД**)
4. Обновлены **кривые чувствительности** экспериментов по поиску темного скаляра

Чтобы улучшить оценку для  $\Gamma(S \rightarrow \pi\pi)$ ,  $\Gamma(S \rightarrow K\bar{K})$ , нужно

- извлечь другие формфакторы пиона  $\Theta_\pi$ ,  $\Delta_\pi$  из данных по распаду  $J/\psi \rightarrow \gamma + \pi\pi$  и др.
- получить аналогичные **формфакторы каона**  $\Gamma_K$ ,  $\Delta_K$ ,  $\Theta_K$  в процессах вида  $\gamma^* \gamma \rightarrow K\bar{K}$ ,  $\gamma^* \gamma \rightarrow \eta\eta$

## Список литературы

- [1] B. Batell, N. Blinov, C. Hearty, and R. McGehee. *Snowmass 2021*, 7 2022.
- [2] D. Gorbunov, E. Kriukova, and O. Teryaev. arXiv:2303.12847, 2023.
- [3] S. Kumano, Q.-T. Song, and O.V. Teryaev. *Phys. Rev. D*, 97(1):014020, 2018.
- [4] M.A. Shifman, A.I. Vainshtein, and V.I. Zakharov. *Phys. Lett. B*, 78:443-446, 1978.
- [5] M.W. Winkler. *Phys. Rev. D*, 99(1):015018, 2019.