

# Пион-протонные столкновения как источник тёмных фотонов

Екатерина Крюкова

Институт ядерных исследований РАН,  
МГУ им. М.В. Ломоносова

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

# Тёмные фотоны

## Формализм порталов

$$\mathcal{L}_{\text{portal}} = \sum \mathcal{O}_{\text{SM}} \mathcal{O}_{\text{DS}}$$

Порталы низшей размерности

- ▶ **Векторный:** тёмный фотон  $A'_\mu$ ,  $-\frac{\epsilon}{2 \cos \theta_W} \tilde{F}'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$
- ▶ **Скалярный:** тёмный скаляр  $S$ ,  $(\mu S + \lambda S^2) H^\dagger H$
- ▶ **Фермионный:** тяжелый нейтральный лептон  $N$ ,  $Y_N L \tilde{H} N$
- ▶ **Псевдоскалярный:** аксионоподобная частица  $a$ ,  $\frac{a}{f_a} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu}$

Лагранжиан **минимальной модели с тёмным фотоном**

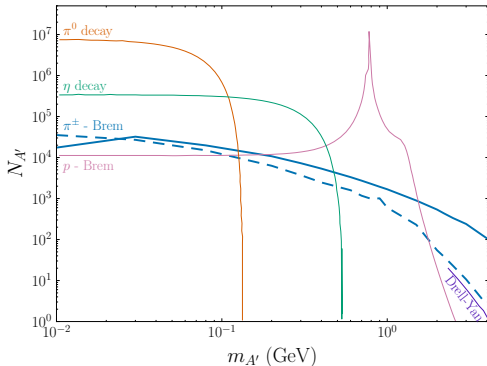
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} - \frac{1}{4} \tilde{F}'_{\mu\nu} \tilde{F}'^{\mu\nu} - \frac{\epsilon}{2 \cos \theta_W} \tilde{F}'_{\mu\nu} B^{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2} \tilde{A}'_\mu \tilde{A}'^\mu,$$

Одновременное вращение  $(W_\mu^3, B_\mu, \tilde{A}'_\mu) \rightarrow$  взаимодействие  
 $-\epsilon e J_{\text{em}}^\mu A'_\mu$

# Рождение $\gamma'$ в экспериментах с фиксированной мишенью

## Механизмы рождения

1. **распады мезонов**  
 $m \rightarrow \gamma' \gamma$  ( $m: \pi^0, \eta$ )
2. **тормозное излучение протона**  $pp \rightarrow \gamma' X$
3. **аналог процесса Дрелла-Яна**  $q\bar{q} \rightarrow \gamma'$
4. **NEW тормозное излучение пиона**  
 $\pi p \rightarrow \gamma' X$

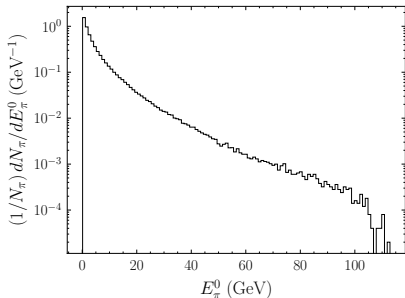


для  $P = 120$  ГэВ, SpinQuest, Fermilab  
D. Curtin, Y. Kahn, R. Nguyen Phys.Rev.D 108  
(2023) 9, 095039

# Тормозное излучение пиона

## Вторичные пионы в

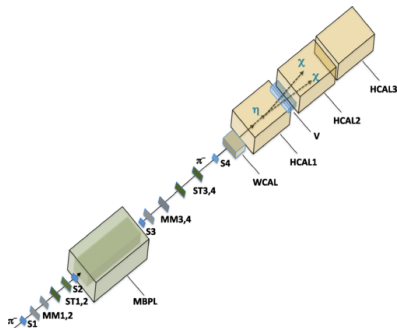
экспериментах с фиксированной мишенью и пучком  $p$ : T2K, DUNE, SHiP и др.



для  $P = 120$  ГэВ, SpinQuest, Fermilab

D. Curtin, Y. Kahn, R. Nguyen Phys.Rev.D 108 (2023) 9, 095039

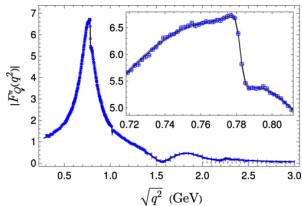
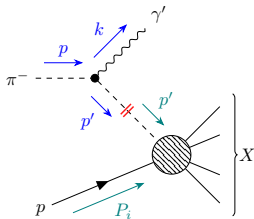
Эксперимент **NA64h**:  
подготовленный пучок  $\pi^-$  с  $P = 50$  ГэВ от CERN SPS.  
Планируются поиски  $\gamma'$  в распадах мезонов



NA64 Collaboration Phys.Rev.Lett. 133 (2024) 12, 121803,  
S. N. Gninenko, D. V. Kirpichnikov et al. Phys.Rev.D 109 (2024) 7, 075021

# Тормозное излучение пиона: э/м формфакторы

$F_{em}^\pi$  из данных BaBar по  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$



Когда оба пиона **на массовой поверхности**,

$$\langle \pi^-(p') | J_{em}^\mu(0) | \pi^-(p) \rangle = -e F_{em}^\pi((p' - p)^2)(p + p')^\mu \equiv -e \Gamma^\mu$$

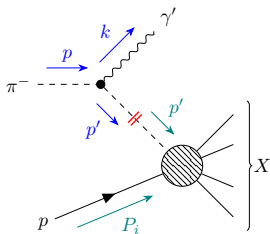
Вершинная функция для **half-on-shell** случая

$$\begin{aligned} \Gamma^\mu &= (p + p')^\mu F_1(-k^2, p'^2) - \\ &- k^\mu \frac{(p'^2 - m_\pi^2)}{k^2} (F_1(0, p'^2) - F_1(-k^2, p'^2)) \end{aligned}$$

Предполагаем

$$F_1(-k^2, p'^2) \simeq F_{em}^\pi((p' - p)^2) F_{virt}(z, k_\perp^2)$$

# Тормозное излучение пиона: функция расщепления



Импульсы частиц в л.с.о.

$$p = \{E_p, 0, 0, P\},$$

$$k = \{E_k, k_{\perp} \cos \varphi, k_{\perp} \sin \varphi, zP\}$$

Дифференциальное сечение **факторизуется** к виду

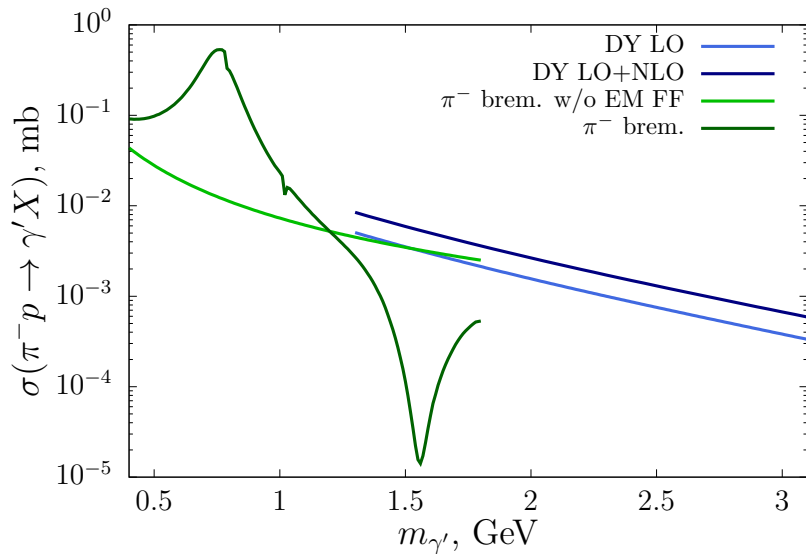
$$\frac{d^2\sigma_{\pi p \rightarrow \gamma' X}}{dz dk_{\perp}^2} = w_{\pi}(z, k_{\perp}^2) |F_{\text{em}}^{\pi}(m_{\gamma'}^2)|^2 F_{\text{virt}}^2(z, k_{\perp}^2) \sigma_{\pi p \rightarrow X}(\bar{s}),$$

где **функция расщепления**

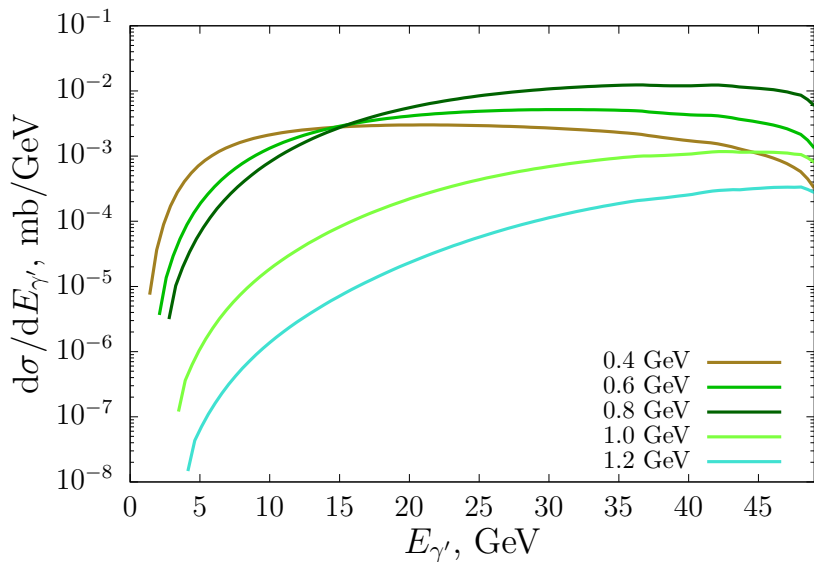
$$w_{\pi}(z, k_{\perp}^2) = \frac{\epsilon^2 \alpha_{\text{em}} (1-z)}{4\pi H_{\pi}} \left( \frac{H_{\pi}}{z m_{\gamma'}^2} + \frac{z}{H_{\pi}} (m_{\gamma'}^2 - 4m_{\pi}^2) + 2 \right),$$

$$H_{\pi} \equiv m_{\pi}^2 z^2 + m_{\gamma'}^2 (1-z) + k_{\perp}^2$$

# Полное сечение рождения тёмного фотона

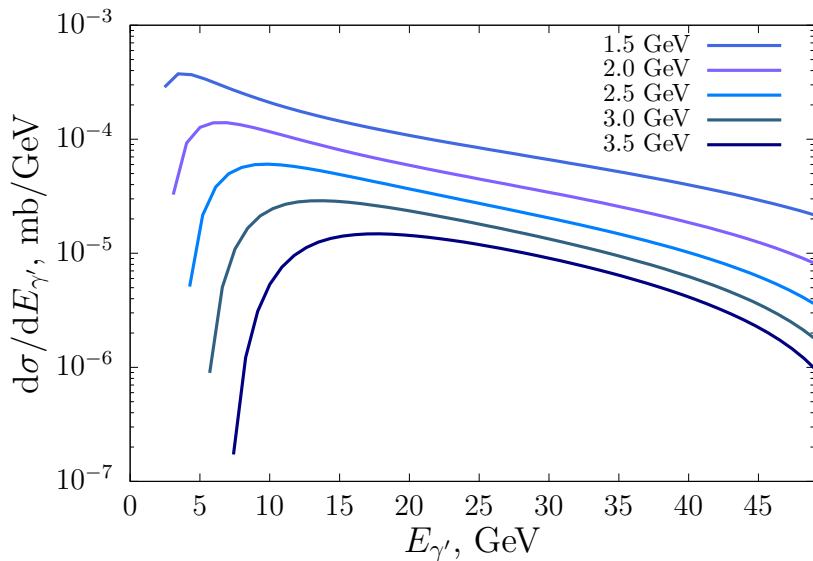


# Спектры тёмных фотонов от тормозного излучения $\pi^-$





# Спектры тёмных фотонов от процесса Дрелла-Яна (LO+NLO)



## Результаты и планы на будущее

- ▶ Найдена **новая функция расщепления** для тормозного излучения  $\pi^-$
- ▶ Получено предсказание для **полного сечения и спектры** рождаемых тёмных фотонов в диапазоне масс 0.4–3.5 ГэВ
- ▶ Для  $m_{\gamma'} = 0.4–1.3$  ГэВ тормозное излучение пиона **усилено** электромагнитным формфактором и даёт основной вклад
  
- ▶ Сравнить с результатами вычисления по **ChPT**
- ▶ Рассмотреть излучение **вторичных пионов** в экспериментах T2K, DUNE, SHiP