

# Рождение тёмных фотонов в неупругом тормозном излучении протона с учётом формфактора Паули

Екатерина Крюкова

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

Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН,  
5 апреля 2024

# Тёмные фотоны

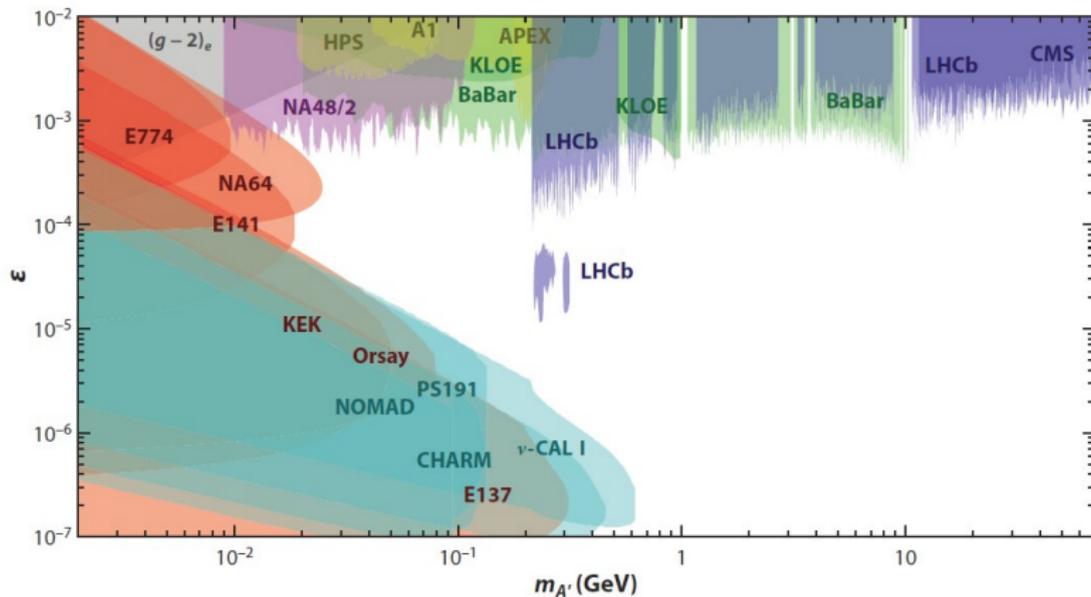
**Порталы** — способы записать перенормируемое взаимодействие полей СМ со скрытым сектором

- ▶ **Скалярный:** тёмные скаляры  $S$ ,  $\mathcal{L} \supset (AS + \lambda S^2)H^\dagger H$
- ▶ **Векторный:** тёмные фотоны  $A'_\mu$ ,  $\mathcal{L} \supset \frac{\epsilon}{2} F'_{\mu\nu} B^{\mu\nu}$
- ▶ **Фермионный:** тяжёлые нейтральные лептоны  $N$ ,  
 $\mathcal{L} \supset Y_N L \tilde{H} N$

Лагранжиан минимальной модели с тёмным фотоном

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

# Поиски $\gamma'$ в ускорительных экспериментах



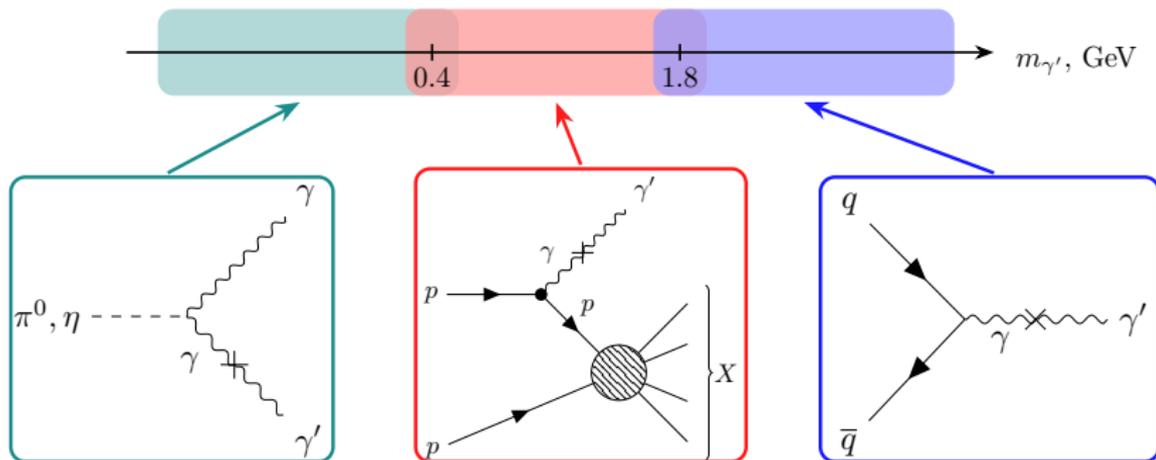
Для того, чтобы **оценить чувствительность** экспериментов DUNE, T2K и SHiP, нужно изучить феноменологию тёмного фотона массой  $\mathcal{O}(1)$  ГэВ, в частности, его **моды рождения**.

M. Graham, C. Hearty and M. Williams *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **71** (2021), 37-58

# Механизмы рождения $\gamma'$

Основной механизм определяется  $m_{\gamma'}$

1.  $m_{\gamma'} < 0.4$  ГэВ: **распады мезонов**  $m \rightarrow \gamma' \gamma$  ( $m: \pi^0, \eta$ ) за счёт смешивания с  $\gamma$  СМ.
2.  $0.4$  ГэВ  $< m_{\gamma'} < 1.8$  ГэВ: **тормозное излучение протона**.
3.  $m_{\gamma'} > 1.8$  ГэВ: **процесс Дрелла-Яна**  $q\bar{q} \rightarrow \gamma'$ .



# Электромагнитные формфакторы нуклонов

Матричный элемент э/м тока  $j_\mu^{em} \equiv \bar{q}Q\gamma_\mu q$

$$J_\mu \equiv \langle N(p_1)\bar{N}(p_2) | j_\mu^{em}(0) | 0 \rangle$$

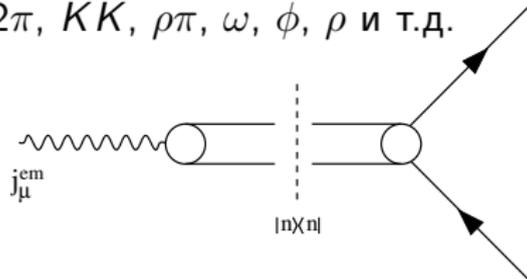
можно параметризовать, используя формфакторы

**Дирака**  $F_1^N(t)$  и **Паули**  $F_2^N(t)$ ,

$$J^\mu = \bar{u}(p_1) \left[ F_1^N(t)\gamma_\mu + i\frac{F_2^N(t)}{2m}\sigma_{\mu\nu}(p_1^\nu + p_2^\nu) \right] v(p_2), \quad t \equiv (p_1 + p_2)^2$$

и выразить через **промежуточные асимптотические состояния** с  $J^{PC} = 1^{--}$ , такие как  $2\pi$ ,  $K\bar{K}$ ,  $\rho\pi$ ,  $\omega$ ,  $\phi$ ,  $\rho$  и т.д.

$$\text{Im } J_\mu \propto \sum_n \langle N(p_1)\bar{N}(p_2) | n \rangle \times \\ \times \langle n | j_\mu^{em}(0) | 0 \rangle \delta^{(4)}(p_1 + p_2 - p_n)$$



Y. H. Lin, H. W. Hammer and U. G. Meißner, Phys. Rev. Lett. **128** (2022) no.5, 052002

# Измерение электромагнитных формфакторов нуклонов

## Пространственноподобная область

$$Q^2 \equiv -t > 0$$

рассеяние  $eN \rightarrow eN$

PRad, Jefferson Lab, MAMI

измеряют формфакторы Сакса

$$G_E(t) \equiv F_1(t) + \frac{t}{4M^2} F_2(t),$$

$$G_M(t) \equiv F_1(t) + F_2(t)$$

## Времениподобная область

$$q^2 \equiv t > 0$$

аннигиляция  $e^+e^- \rightarrow N\bar{N}$

**порог**  $t = (2M)^2$

BABAR, BESIII, CMD-3, SND

измеряют  $|G_E/G_M|$  и эфф.

формфакторы

$$|G_{\text{eff}}| \equiv \sqrt{\frac{|G_E|^2 + t/2M^2 |G_M|^2}{1 + t/2M^2}}$$

## Оценка spreselike формфакторов Дирака и Паули

Э/м формфакторы протона в области малых  $Q^2 \equiv -t > 0$  можно приближенно выразить через **дипольный формфактор**  $G_D(t)$

$$F_1(t) = \left(1 - \frac{t}{4M^2} \frac{\mu_p}{\mu_N}\right) \left(1 - \frac{t}{4M^2}\right)^{-1} G_D(t),$$

$$F_2(t) = \left(\frac{\mu_p}{\mu_N} - 1\right) \left(1 - \frac{t}{4M^2}\right)^{-1} G_D(t),$$

$$G_D(t) \equiv \left(1 - \frac{t}{m_D^2}\right)^{-2}, \quad m_D^2 = 0.71 \text{ ГэВ}^2.$$

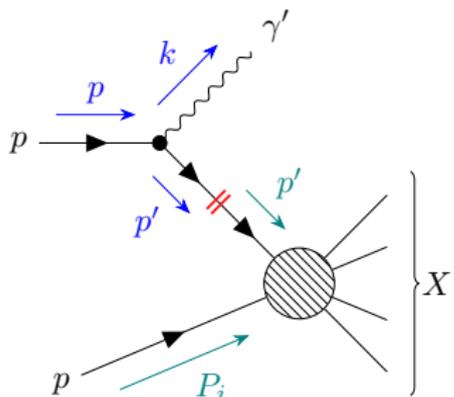
При  $t = 0$  эти формфакторы можно связать с **зарядом** и **аномальным магнитным моментом** протона, фиксируя

$$\mu_N = \frac{e}{2M}, \quad \frac{\mu_p}{\mu_N} = 2.79.$$

## Неупругое тормозное излучение протона: идея

Наша цель — **явно выделить** в неупругом сечении тормозного излучения вероятность испускания тёмного фотона

$$\frac{d^2\sigma(pp \rightarrow \gamma' X)}{dzdk_{\perp}^2} \simeq w(z, k_{\perp}^2)\sigma(pp \rightarrow X)$$



Числитель пропагатора → сумма по поляризациям

$$\hat{p} - \hat{k} + M = \sum_{r'} u^{r'}(p - k) \bar{u}^{r'}(p - k)$$

Введём **вершинные функции**

$$V_1^{r'r\lambda} \equiv \bar{u}^{r'}(p - k) (\widehat{\epsilon^\lambda})^* u^r(p),$$

$$V_2^{r'r\lambda} \equiv \frac{1}{2M} \bar{u}^{r'}(p - k) \frac{i}{2} \left[ (\widehat{\epsilon^\lambda})^*, \hat{k} \right] u^r(p)$$

Выделим вклад **подпроцесса** в амплитуду

$$\mathcal{M}_{pp \rightarrow \gamma' X}^{r\lambda} = \sum_{r'} \mathcal{M}_{pp \rightarrow X}^{r'} \frac{e e Z}{H} \left( -V_1^{r'r\lambda} F_1(m_{\gamma'}^2) + i V_2^{r'r\lambda} F_2(m_{\gamma'}^2) \right)$$

# Неупругое тормозное излучение протона: функции расщепления

Неупругое сечение тормозного излучения **факторизуется**

$$\frac{d^2\sigma(pp \rightarrow \gamma' X)}{dz dk_{\perp}^2} \simeq (w_{11}|F_1|^2 + w_{22}|F_2|^2 + w_{12}(F_1 F_2^* + F_2 F_1^*)) \sigma(pp \rightarrow X).$$

## Функции расщепления

$$w_{11}(z, k_{\perp}^2) \equiv \frac{\epsilon^2 \alpha_{em}}{2\pi H(z, k_{\perp}^2)} \left( z - \frac{z(1-z)}{H(z, k_{\perp}^2)} (2M^2 + m_{\gamma'}^2) + \frac{H(z, k_{\perp}^2)}{2zm_{\gamma'}^2} \right),$$

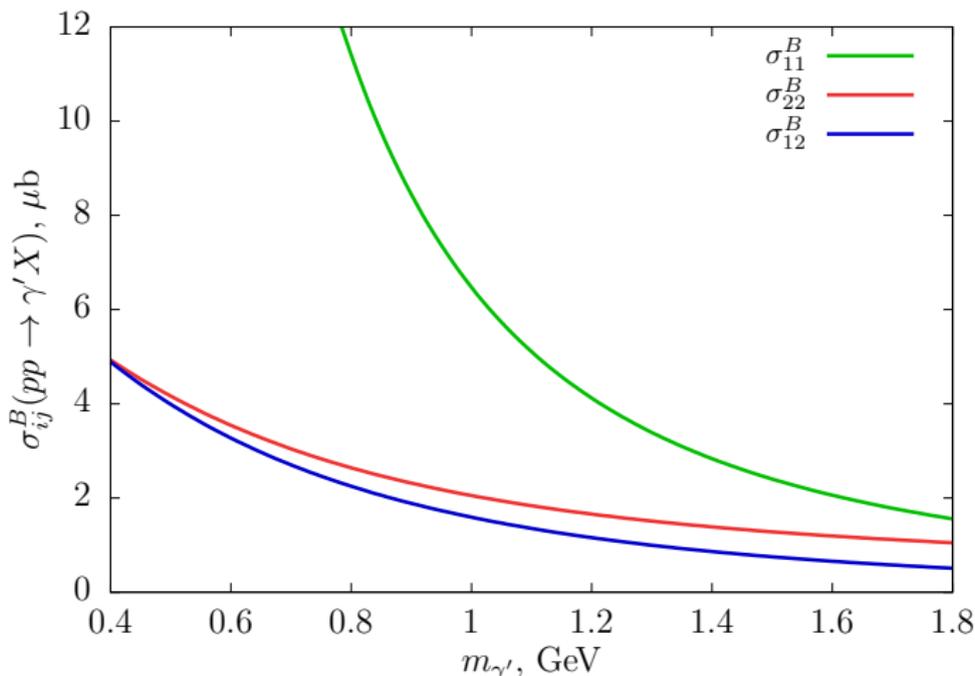
$$w_{22}(z, k_{\perp}^2) \equiv \frac{\epsilon^2 \alpha_{em}}{2\pi H} \frac{m_{\gamma'}^2}{8M^2} \left( z - \frac{z(1-z)}{H(z, k_{\perp}^2)} (8M^2 + m_{\gamma'}^2) + \frac{2H(z, k_{\perp}^2)}{zm_{\gamma'}^2} \right),$$

$$w_{12}(z, k_{\perp}^2) \equiv \frac{\epsilon^2 \alpha_{em}}{2\pi H(z, k_{\perp}^2)} \left( \frac{3z}{4} - \frac{3m_{\gamma'}^2 z(1-z)}{2H(z, k_{\perp}^2)} \right),$$

где  $H(z, k_{\perp}^2) \equiv k_{\perp}^2 + (1-z)m_{\gamma'}^2 + z^2 M^2$

## «Голые» сечения без э/м формфакторов

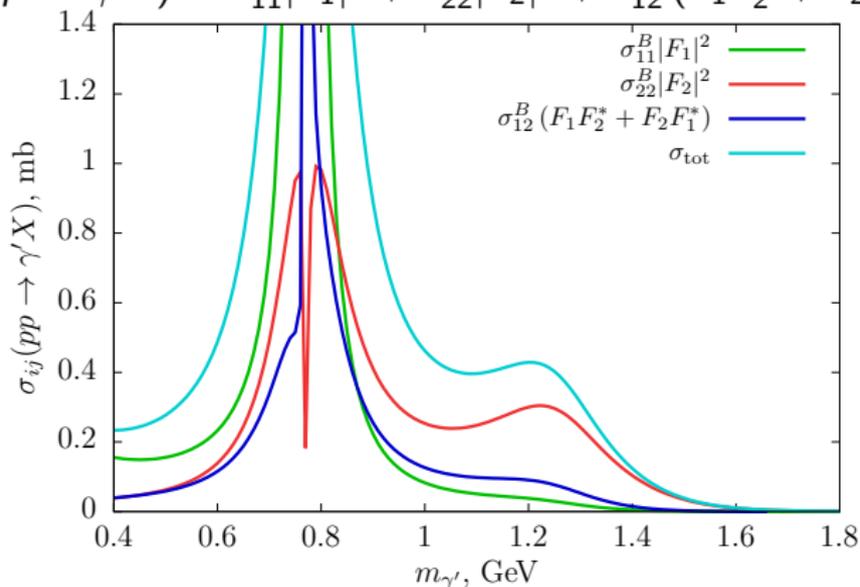
$$\sigma_{ij}^B(pp \rightarrow \gamma' X) \equiv \int w_{ij}(z, k_{\perp}^2) \sigma(pp \rightarrow X) dz dk_{\perp}^2$$



Поскольку  $\sigma_{11}^B > \sigma_{22}^B > \sigma_{12}^B$ , наивно можно подумать, что так же соотносятся по величине и слагаемые с формфакторами

# Итоговые вклады в сечение с э/м формфакторами

$$\sigma(pp \rightarrow \gamma' X) \simeq \sigma_{11}^B |F_1|^2 + \sigma_{22}^B |F_2|^2 + \sigma_{12}^B (F_1 F_2^* + F_2 F_1^*)$$

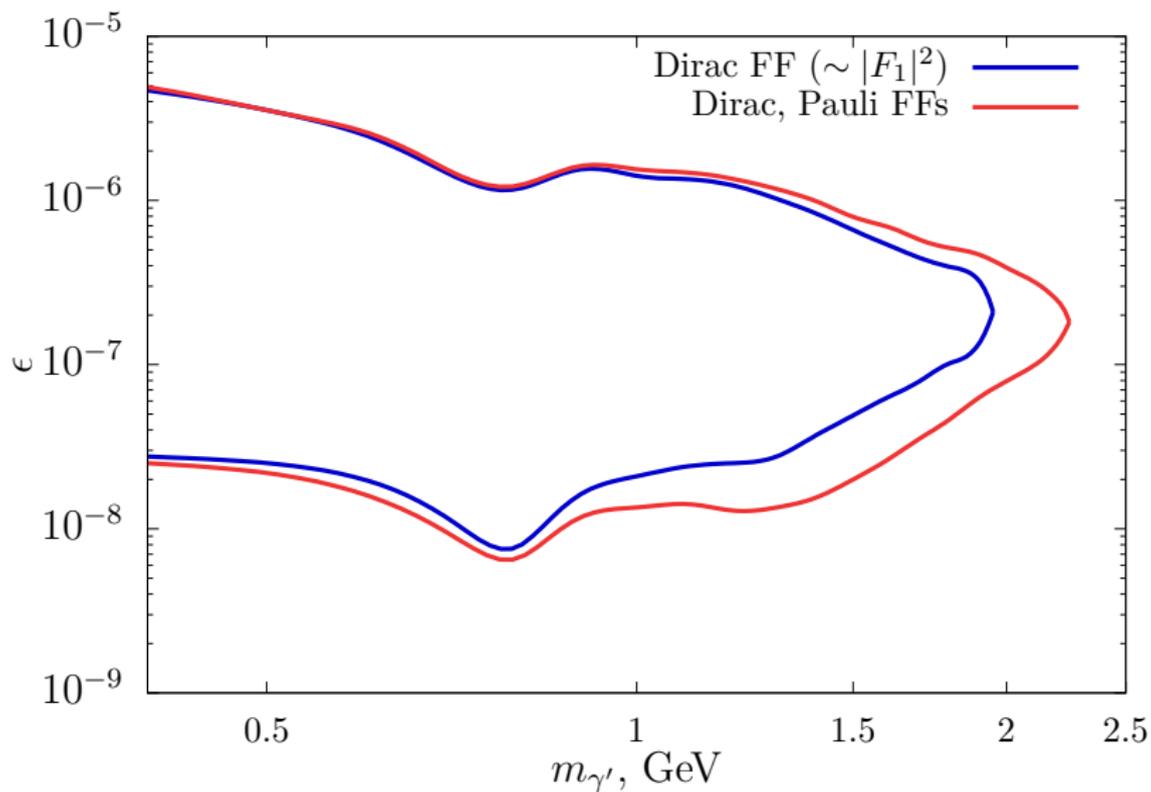


Напротив, в рассматриваемом интервале масс тёмного фотона также возможна иерархия

$$\sigma_{22}^B |F_2|^2 > \sigma_{12}^B (F_1 F_2^* + F_2 F_1^*) > \sigma_{11}^B |F_1|^2$$

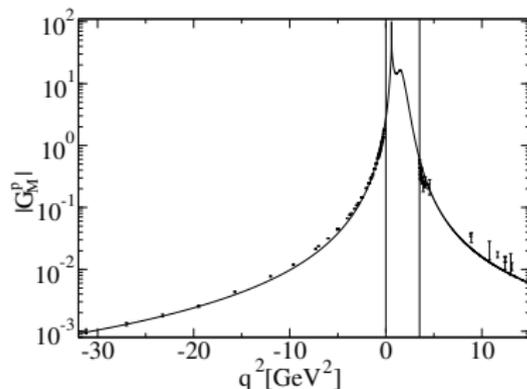
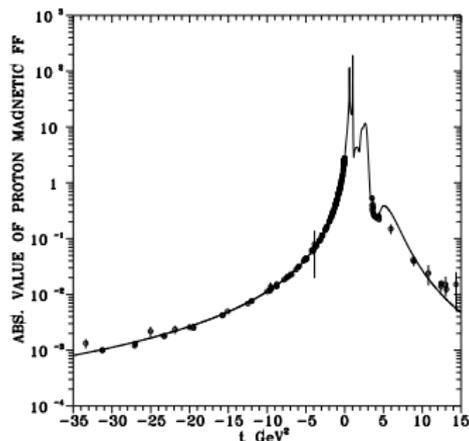
$F_1, F_2$  из A. Faessler, M. I. Krivoruchenko and B. V. Martemyanov, Phys. Rev. C **82** (2010), 038201

# Чувствительность эксперимента SHiP к тёмному фотону

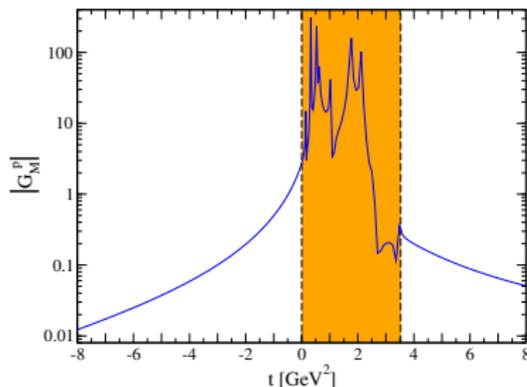


# Э/м формфакторы в нефизической области

$$G_M^P(t) = F_1^P(t) + F_2^P(t)$$



- [1] S. Dubnicka, A. Z. Dubnickova and P. Weisenpacher, J. Phys. G **29** (2003), 405-430
- [2] A. Faessler, M. I. Krivoruchenko and B. V. Martemyanov, Phys. Rev. C **82** (2010), 038201
- [3] H. W. Hammer, U. G. Meissner and D. Drechsel, Phys. Lett. B **385** (1996), 343-347



## Результаты и планы на будущее

- ▶ Найден **новый вклад** от формфактора Паули в неупругое сечение тормозного излучения протона
- ▶ Показано, что этим вкладом в полное сечение рождения **нельзя пренебречь**
  
- ▶ Обновить результат, используя **другие фиты** для  $\varepsilon/m$  формфакторов протона
- ▶ Получить **кривые чувствительности** для будущих поисков тёмного фотона на T2K и DUNE, учитывая вклады формфакторов Дирака  $F_1(m_{\gamma'}^2)$  и Паули  $F_2(m_{\gamma'}^2)$