



Поиск тёмных фотонов в ближнем детекторе эксперимента T2K

А. Горин

gorin@inr.ru

Институт Ядерных Исследований Российской Академии Наук

Летняя научная школа “Супер с-тау фабрика”, Саров, 2022

Теоретическая модель

Рассмотрим в качестве расширения Стандартной модели векторный портал — введём дополнительную $U'(1)$ симметрию, отвечающую массивному тёмному фотону с кинетическим смешиванием:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} - \frac{1}{4}F'^{\mu\nu}F'_{\mu\nu} + \frac{\varepsilon}{2}F^{\mu\nu}F'_{\mu\nu} + \frac{m_{\gamma'}^2}{2}A'_\mu A'^\mu,$$

где $m_{\gamma'}$ — масса γ' , ε — константа смешивания.

Мы можем диагонализировать $(A'^\mu A^\mu)^T$ поворотом на фиксированный угол:

$$\mathcal{L}'' = \left[\frac{e'}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} J'_\mu - \frac{e\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} J_\mu \right] A'^\mu + e J_\mu A^\mu.$$

При $\varepsilon \ll 1$ порталное взаимодействие может быть аппроксимировано $-\varepsilon e A'_\mu J_{QED}^\mu$.

α' обозначим суммарный брэнчинг распада тёмного фотона в частицы тёмного сектора.

Рождение и распад тёмных фотонов

- Поиск распадов γ' на частицы обычной материи отвечает $\alpha' \sim 0$.
- Поиск потерянной энергии отвечает случаю $\alpha' \sim 1$.

Приведённые далее результаты и ограничения нормированы на $\alpha' = 0$. За счёт смешивания с электромагнитным током тёмный фотон может участвовать в электромагнитных процессах.

Приведём брэнчинг рождения γ' в распадах нейтральных мезонов \mathbf{m} (π и η мезонов),

$$Br(\mathbf{m} \rightarrow \gamma\gamma') = Br(\mathbf{m} \rightarrow \gamma\gamma) \times 2 \cdot \varepsilon^2 \left(1 - \frac{m_{\gamma'}^2}{m_{\mathbf{m}}^2}\right)^3.$$

При распаде γ' на пару лептонов ширина даётся выражением:

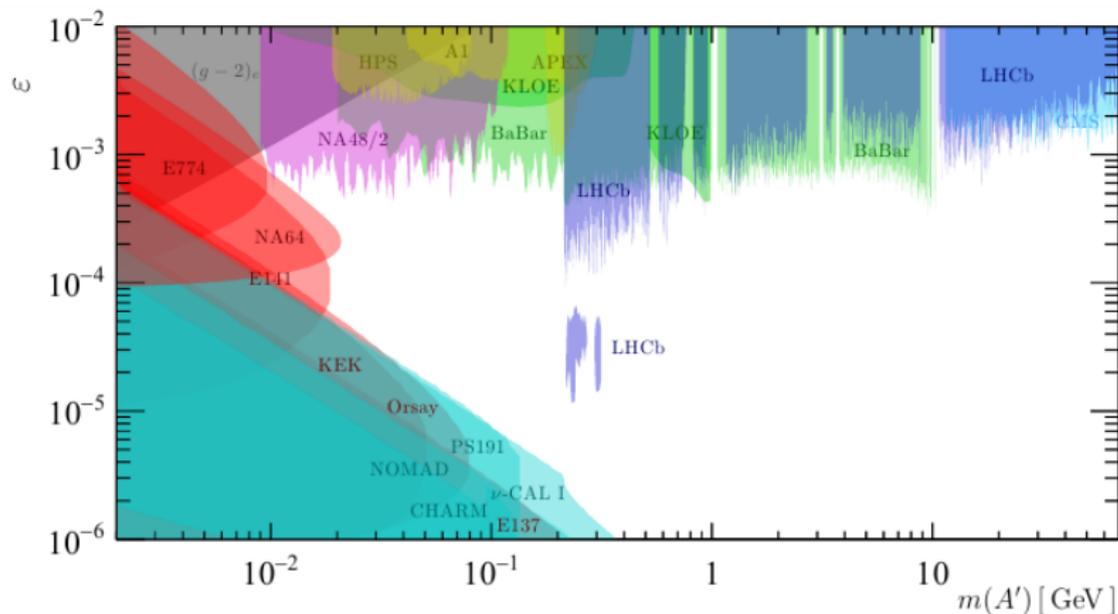
$$\Gamma_{\gamma' \rightarrow l+l^-} = \frac{1}{3} \alpha \varepsilon^2 m_{\gamma'} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_{\gamma'}^2}\right) \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_{\gamma'}^2}},$$

где $\alpha = \frac{e^2}{4\pi}$ — постоянная тонкой структуры, m_l — масса лептона.

Экспериментальные ограничения на видимые распады

γ'

Aaji et al. 2019 [1910.06926].

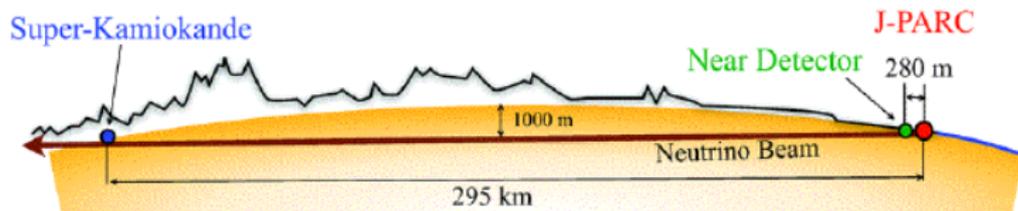


Эксперимент T2K

Эксперимент T2K — нейтринный off-axis эксперимент с длинной базой в Японии.

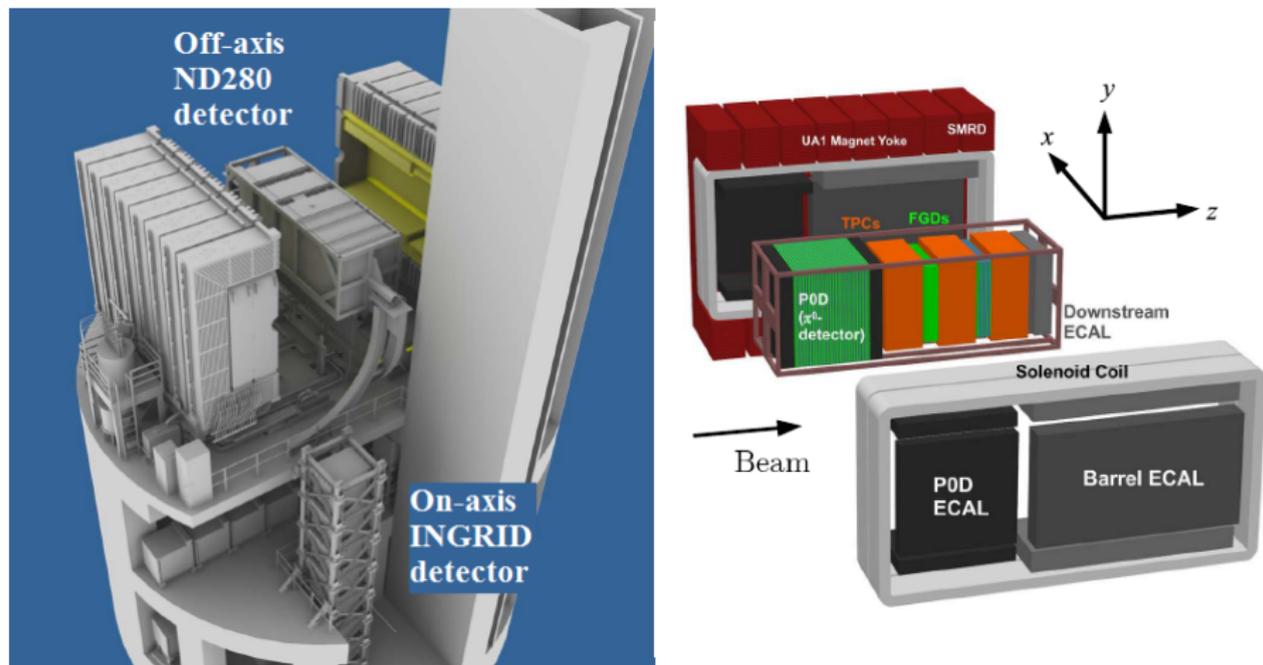
- Пучок ν_μ создаётся в J-PARC, Токай;
- Ближний детектор также расположен в J-PARC, в 280 метрах от мишени;
- Дальний детектор Супер-Камиоканде (SK) расположен на расстоянии 295 км в шахте Камиока;
- Off-axis нейтринный пучок настроен на первый осцилляционный максимум на 0.6 ГэВ.

Физические цели включают прецизионное измерение параметров осцилляций, CP-нарушения в лептонном секторе, сечения взаимодействия нейтрино с веществом.



Комплекс ближнего детектора

Детектор ND280 помещён в магнитное поле 0.2Т. Мы будем рассматривать поиск тёмных фотонов в его TPC.



Время-проекционные камеры (TPC) детектора ND280

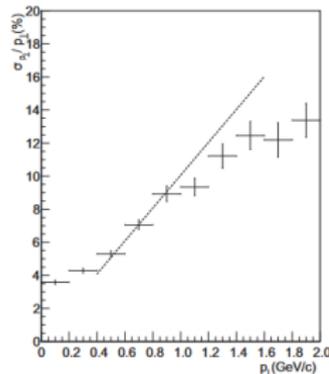
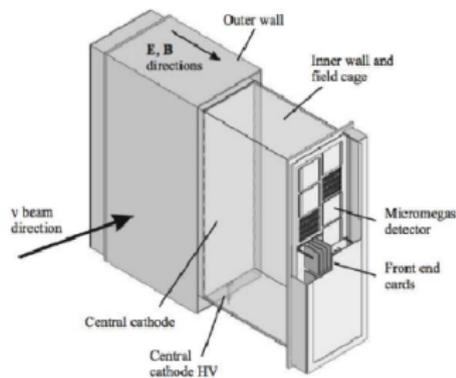
Мы будем искать распады

$$\gamma' \rightarrow e^+e^-$$

для масс $\sim 10 \div 100$ ГэВ.

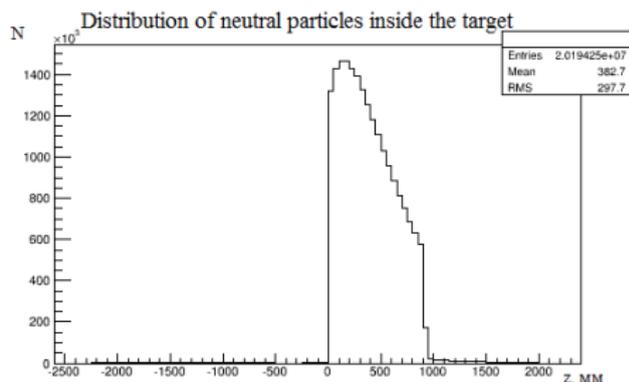
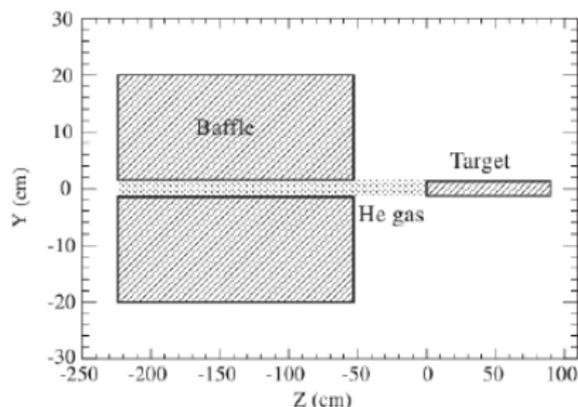
Поиск распадов производится в TPC — малая плотность газа в камерах позволяет существенно уменьшить нейтринный фон.

- TPC состоит из 12 модулей Micromegas.
- Два отдельных алгоритма поиска и фитирования треков.
- dE/dx PID позволяет отличать электроны от мюонов, пионов и протонов.
- Восстановление импульса: Abgrall et al. 2010 [1012.0865]



Выборка нейтральных частиц для моделирования сигнала

- Было разыграно $2 \cdot 10^6$ POT в GEANT4, QGSP_Bert physics list, спользовалась приведённая геометрия.
- Эта выборка использовалась для оценки количества тёмных фотонов и их параметров.
- Так был получен геометрический фактор камер ТРС.

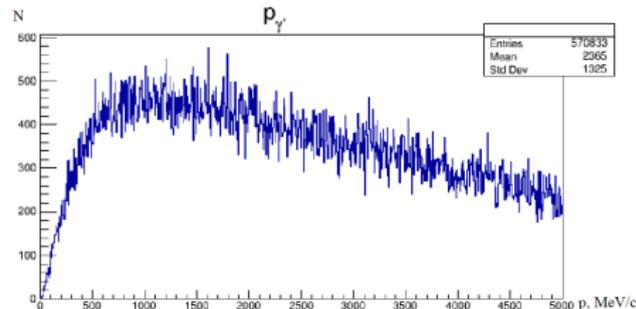
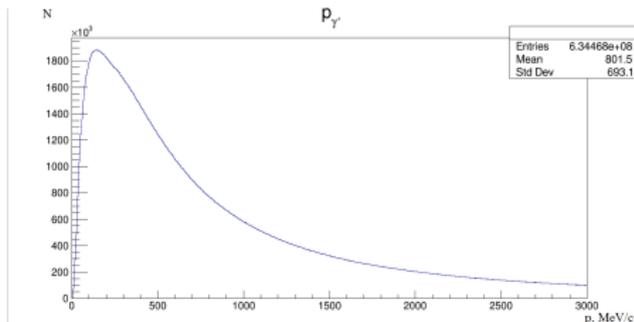


Вероятность распада тёмного фотона

Для времени движения тёмного фотона $t = \frac{L}{c\beta\gamma}$ вероятность распада в одном из трёх ТРС задаётся выражением

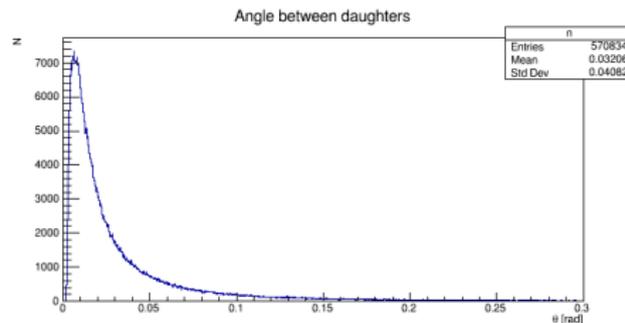
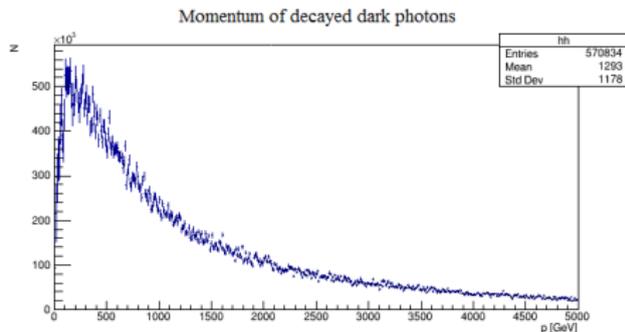
$$P = \exp\left(\frac{-L_{\text{to ТРС}}}{c\beta\gamma\tau}\right) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-L_{\text{ТРС}}}{c\beta\gamma\tau}\right)\right].$$

Длина ТРС ~ 1 м при длине активного объёма 650 мм.



Выборка e^+e^- от распадов тёмных фотонов

- Для тёмных фотонов, распавшихся в ТРС были смоделированы распады $\gamma' \rightarrow e^+e^-$.
- Возможность разделения треков определяет угол между дочерними частицами — в среднем он составил 1.8° .



Выборки тёмных фотонов

Были получены выборки для $m'_{\gamma} = 25, 50, 75, 100$ MeV. Для

$$m'_{\gamma} = 25 \text{ MeV}, \tau = 1.08 \cdot 10^{-7} \text{ s}$$

получены следующие результаты:

	Выборка	Примечание
РОТ	$2 \cdot 10^8$	
Количество пионов	$6.34 \cdot 10^8$	3.17 пионов на протон
Количество γ'	$3.53 \cdot 10^8$	$\text{Br}(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma') = 0.471$ for $\varepsilon^2 = 0.5$
γ' летящие в ТРС	$1.06 \cdot 10^5$	Геометрический фактор $\sim 3 \cdot 10^{-4}$
γ' выжившие до ТРС	$0.959 \cdot 10^5$	$\langle \text{survive} \rangle = 0.906$
γ' распавшиеся в ТРС	18.1	$\langle \text{decay} \rangle = 1.89 \cdot 10^{-4}$

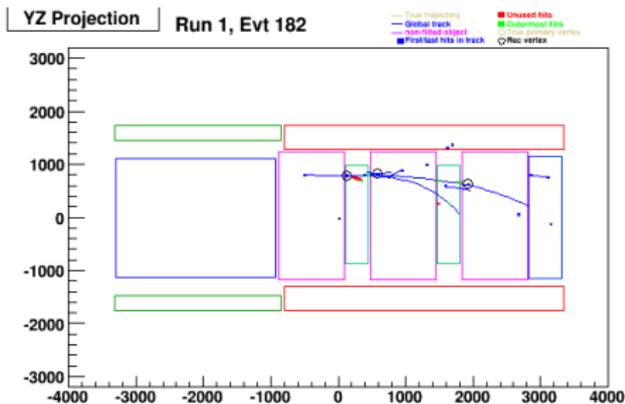
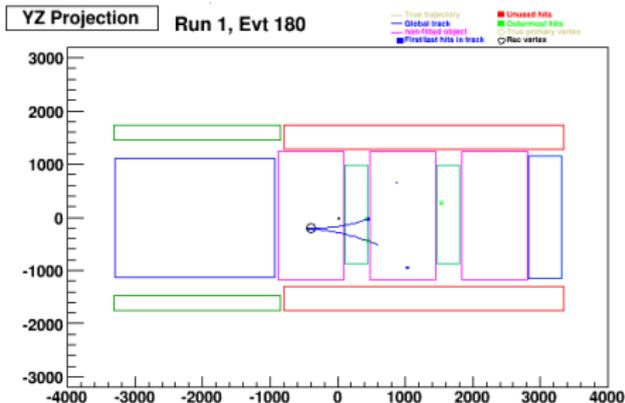
Стратегия анализа

Для выборки e^+e^- было выполнено полное моделирование ND280 — моделирование отклика детектора, электроники, калибровки и DAQ, восстановления треков.

Был выполнен анализ по нахождению двух e^+e^- треков и для восстановленной родительской частицы получены импульс и направление.

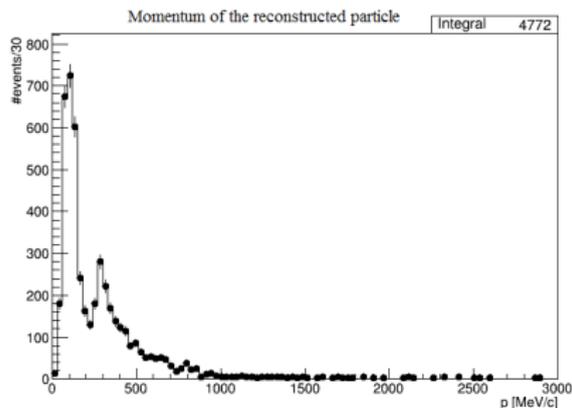
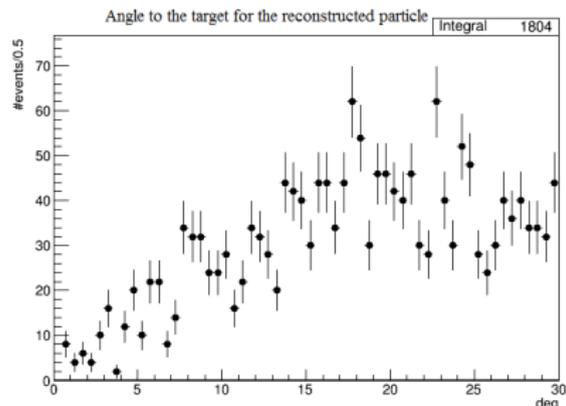
Предварительная эффективность:

Масса	Эффективность
25 MeV	2.6%
50 MeV	3.8%
75 MeV	4.6%
100 MeV	5.5%



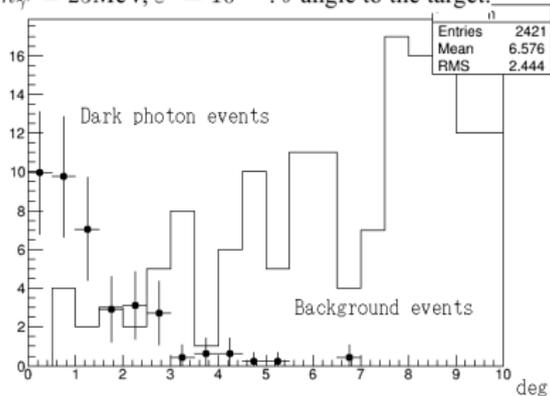
Оценка фона

- Для оценки фона использовалась выборка смоделированная в GEANT4-NEUT для $3 \cdot 10^{21}$ POT и такого же моделирования ND280 и анализа.
- Основной источник фона — реакции нейтрального тока в которых рождается π^0 и после реакции $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ один из гамма-квантов покидает TPC без взаимодействия, а второй регистрируется.

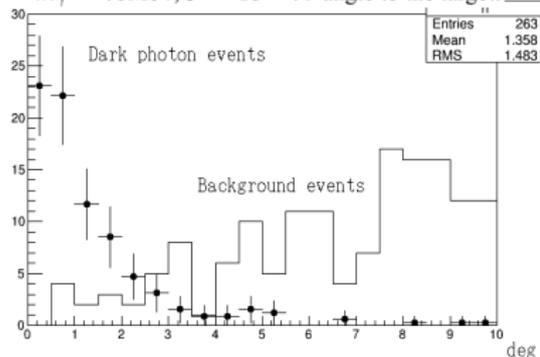


Предварительный анализ для статистики $3 \cdot 10^{21}$ POT

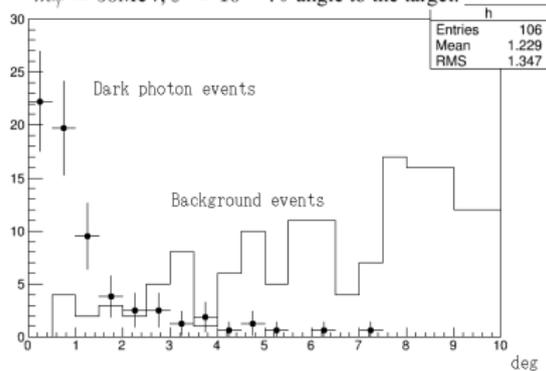
$m_{\gamma\prime} = 25\text{MeV}$, $\varepsilon^2 = 10^{-13}$. θ angle to the target.



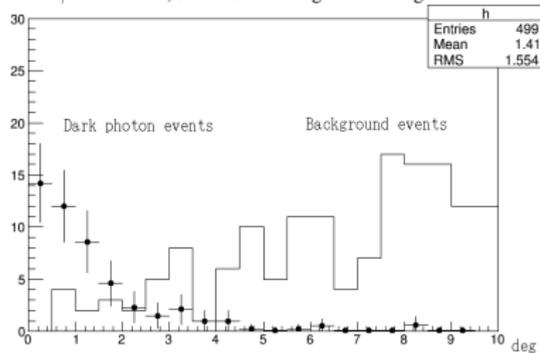
$m_{\gamma\prime} = 75\text{MeV}$, $\varepsilon^2 = 10^{-13}$. θ angle to the target.



$m_{\gamma\prime} = 50\text{MeV}$, $\varepsilon^2 = 10^{-13}$. θ angle to the target.

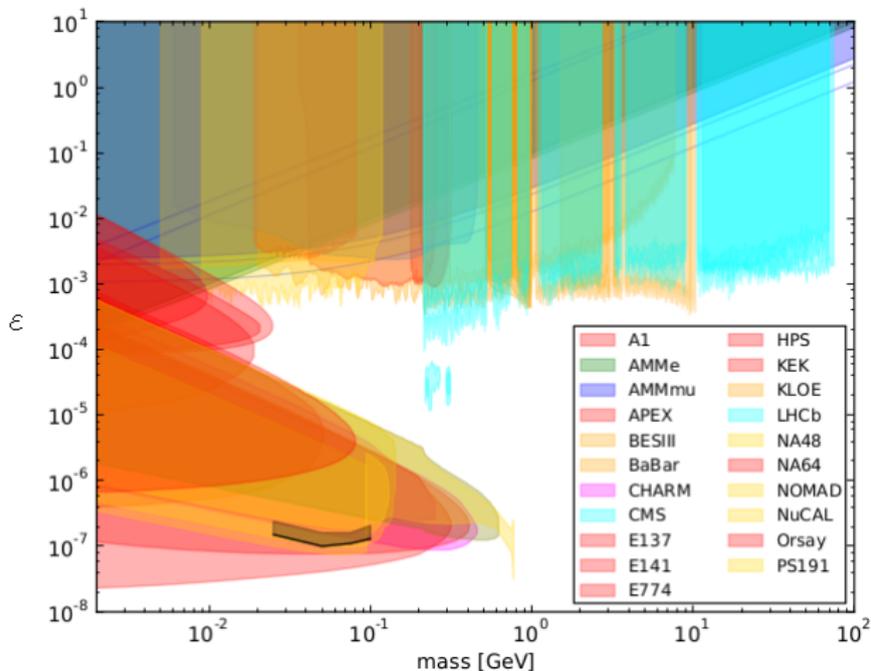


$m_{\gamma\prime} = 100\text{MeV}$, $\varepsilon^2 = 10^{-13}$. θ angle to the target.



Предварительная чувствительность к единичному событию $\gamma' \rightarrow e^+e^-$

Для 3×10^{21} POT и $m'_{\gamma} = 25, 50, 75, 100$ МэВ верхний предел:



Заключение и будущие планы

Были получены выборки тёмных фотонов для масс $m'_\gamma = 25, 50, 75, 100$ МэВ и соответствующие выборки e^+e^- .

Также была рассмотрена выборка нейтринных событий для статистики 3×10^{21} .

Для всех выборок был выполнен один и тот же анализ для $\varepsilon^2 = 10^{-13}$, угол восстановленной родительской частицы по отношению к мишени позволяет эффективно различать сигнал и фон.

- Также в настоящее время проводится масштабная модернизация ближнего детектора T2K, которая увеличит объём лёгкого материала в детекторе. Со временем также вырастет статистика эксперимента.
- Эффективность анализа может быть увеличена, рассматривая события со вторичными треками от взаимодействий электронов и позитронов.