

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»
Институт ядерной физики и технологий
Кафедра №40 «Физика элементарных частиц»

**Возможности поиска тёмных фотонов
в ближнем детекторе T2K**

Исполнитель: Горин А.С., студент группы М18-115
Руководитель: Куденко Ю.Г., д.ф.-м.н., профессор

Москва 2020



- Актуальность темы, описание теоретической модели
- Рождение и распад тёмных фотонов
- Современные ограничения на параметры тёмного фотона
- Описание эксперимента T2K и его время-проекционных камер
- Фоновые события, критерии отбора событий
- Моделирование распадов тёмных фотонов
- Оценка количества полезных событий
- Заключение

- Одной из нерешённых проблем современной физики является проблема скрытой массы.
- Возможность её решения исследуют путём модификации лагранжиана стандартной модели.
 - Предположим что частицы скрытой массы – синглеты относительно $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$.
 - Зададим некоторую модель для “тёмного сектора”.
 - Обеспечим взаимодействие двух частей новой теории через “портальные” операторы

$$\mathcal{L} \supset \frac{c_{ij} \mathcal{O}_{SM}^i \mathcal{O}_{DM}^j}{\lambda_{ij}}$$

где c – безразмерная константа, λ – размерный масштаб (степень массы)

\mathcal{O}_{SM}^i – синглетные комбинации полей стандартной модели.

Тогда можно ввести дополнительную $U(1)'$ -симметрию и рассмотреть лагранжиан вида

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

При переопределении фотона, кинетическое смешивание исчезает, появляется слагаемое взаимодействия тёмного фотона с электромагнитным током.

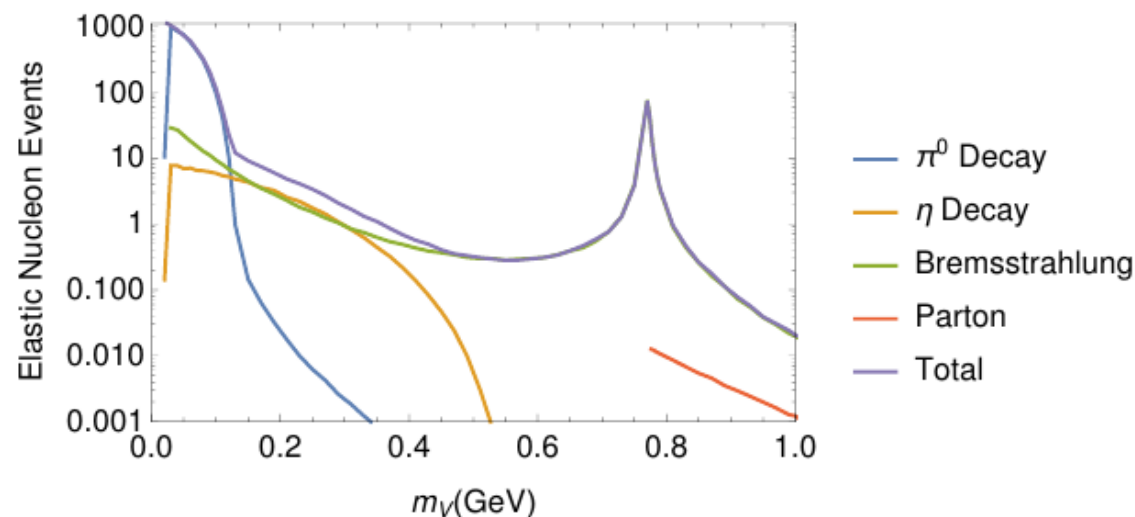
$$\mathcal{L}'' = \left[\frac{e'}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} J'_\mu - \frac{e\varepsilon}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} J_\mu \right] A'^\mu + e J_\mu A^\mu.$$

Параметрами данной модели будут масса тёмного фотона и константа смешивания.

Относительная вероятность процесса рождения тёмного фотона при распаде нейтральных мезонов

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

где \mathbf{m} — нейтральный мезон. В эксперименте T2K на один протон на мишени приходится в среднем три первично рождённых во взаимодействиях пиона, которые почти все распадаются в 2 гамма-кванта. Процессы, которые вносят вклад в рождение тёмного фотона в экспериментах с фиксированной мишенью [1]:



Распад тёмных фотонов.

Распад тёмных фотонов происходит преимущественно в лептоны и адроны. Ширина распада в два лептона

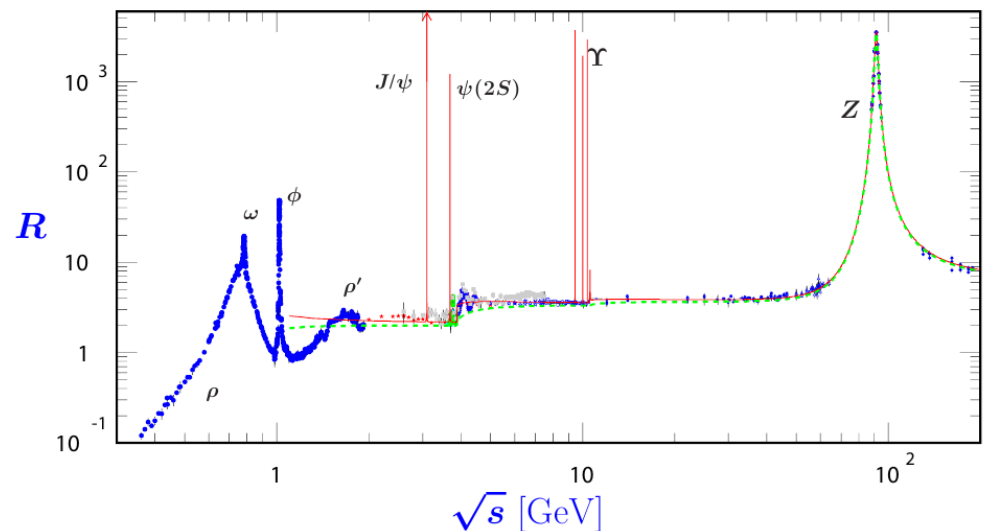
$$\Gamma_{\gamma' \rightarrow l+l^-} = \frac{1}{3} \alpha \varepsilon^2 m_{\gamma'} \left(1 + \frac{2m_l^2}{m_{\gamma'}^2} \right) \sqrt{1 - \frac{4m_l^2}{m_{\gamma'}^2}},$$

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

Ширина же распада на адроны

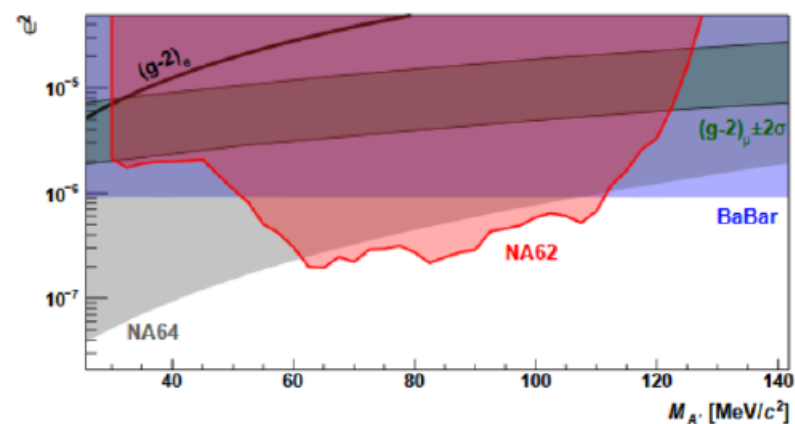
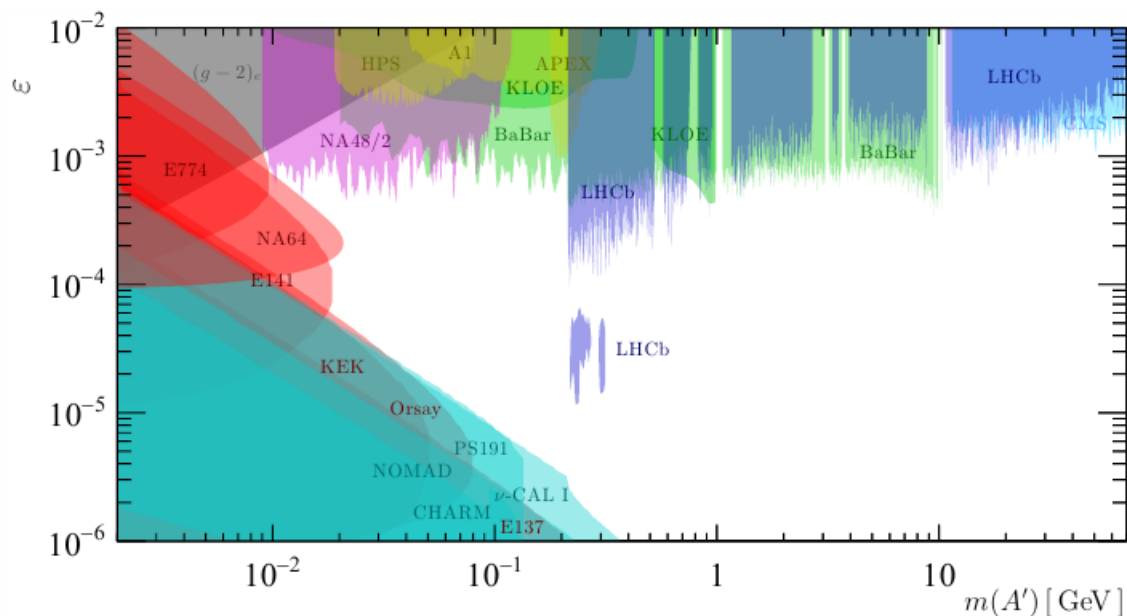
$$\Gamma_{\gamma' \rightarrow \text{hadrons}} = \Gamma_{\gamma' \rightarrow \mu^+ \mu^-} \times R(s).$$

$$R(s) = \frac{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \text{hadrons})}{\sigma(e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$$



Эксперименты по поиску тёмных фотонов

Приведём текущие ограничения на массу и константу смешивания [2,3].



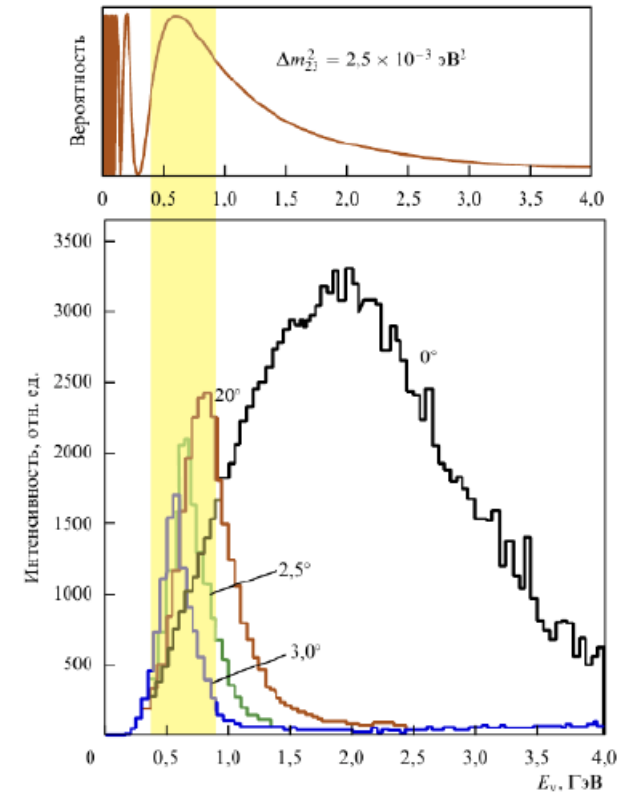
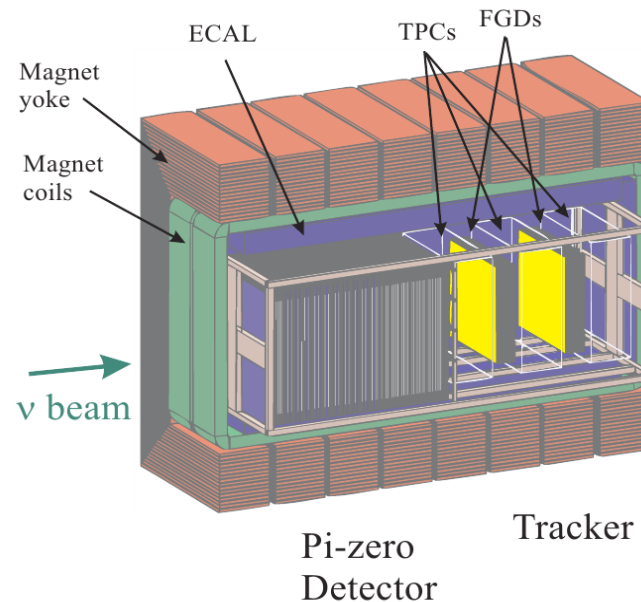
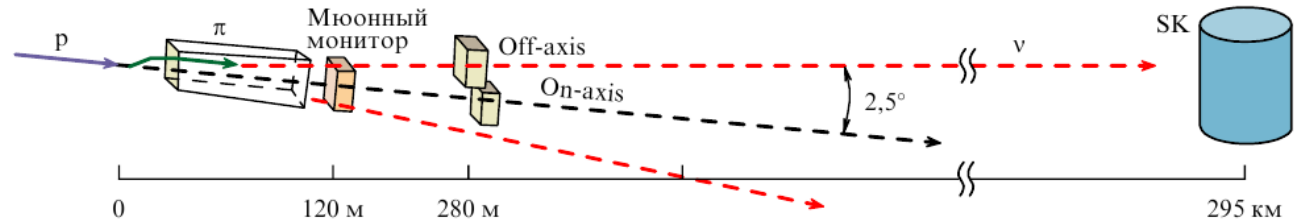
Можно ли в нейтринных экспериментах быть чувствительными к области параметров $\epsilon \sim 10^{-4}$ и массы $\sim 100 \text{ МэВ}$?

Тёмные фотоны активно ищут в ЦЕРН.

Эксперимент T2K. ND280.

Ищем тёмные фотоны во время-проекционных камерах ближнего детектора ND280 эксперимента T2K [4,5].

Будем искать два противоположно заряженных лептона, вылетевших из одной невидимой вершины.



Эксперимент T2K. TPC.

Активный объём камер TPC составляет $180 \times 200 \times 70$ см³. Камера помещена во внешний отсек, наполненный CO₂.

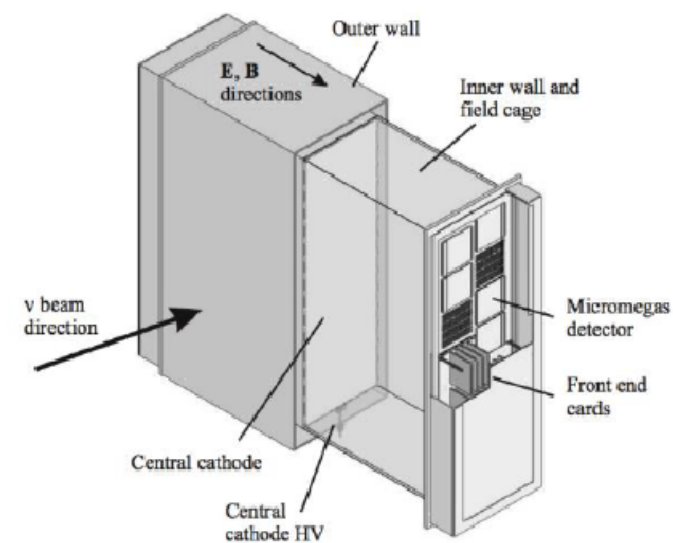
Основной компонент газовой смеси — аргон. Газ циклически обновляется.

TPC состоит из 12 модулей Micromegas.

Отдельно осуществляется поиск и фитирование треков.

Идентификация частиц происходит за счёт измерения ионизационных потерь в газе.

Импульс частицы восстанавливается с точностью $\sim 8\%$.



Электронные и мюонные фоновые события на статистике $6 \cdot 10^{20}$ POT

Преимущество поиска тёмных фотонов в TPC в том, что в газе фон от нейтринных событий значительно меньше.

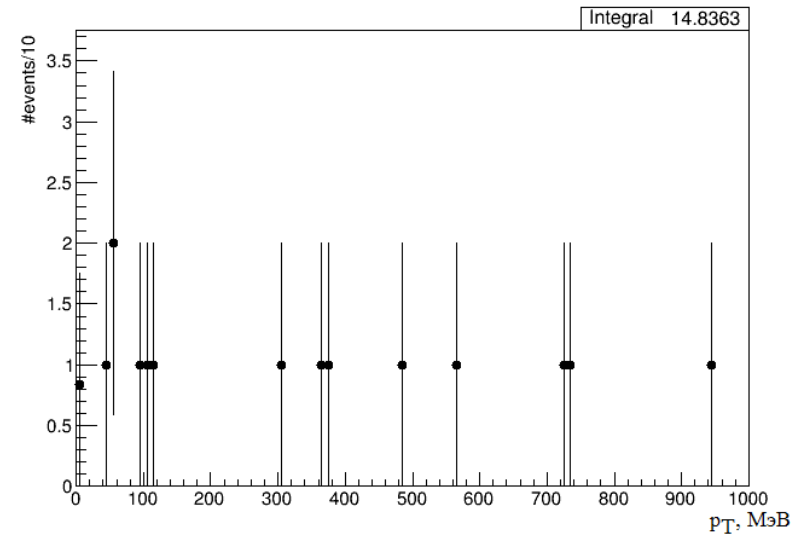
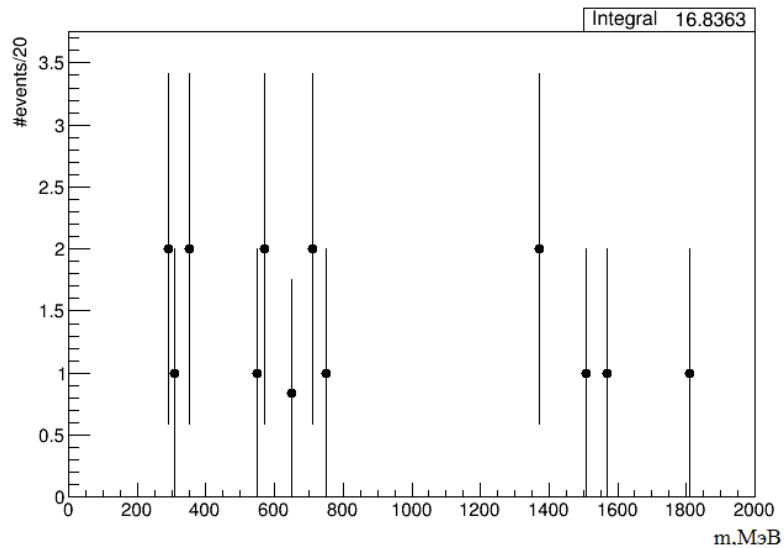
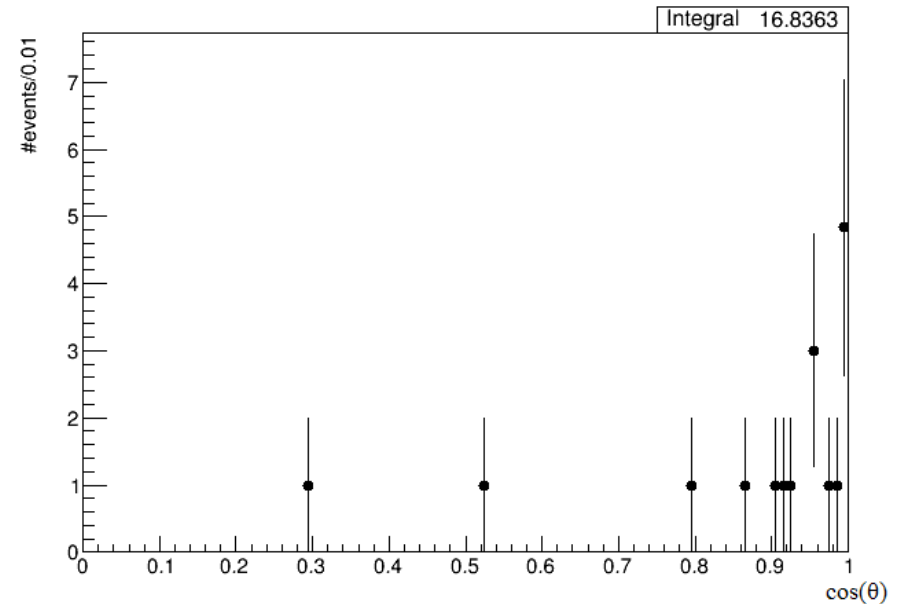
Основные источники фона — реакции $p + \nu \rightarrow \Delta + \dots \rightarrow \gamma + \dots$ и $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

Описание ката	e^+e^- события	$\mu^+\mu^-$ события
Все события в детекторе	16977932	
Отбор по качеству треков	15621933	
Треки в чувствительном объёме, вершина восстанавливается	532	
Вето активности в TPC и FGD	357	
Вершина в TPC	353	
Не более двух треков	209	
PID	30	38
Отбор мюонов в ECal	—	17

Первичный отбор событий осуществляем по восстановлению вершины и, соответственно, параметров родительской частицы.

- События должны быть хорошего качества (не менее 18 сработавших узлов в TPC),
- Треков должно быть всего два, вершина должна хорошо восстанавливаться,
- Не должно быть активности в P0D и FGD,
- Идентифицируем частицы по кривизне и ионизационным потерям

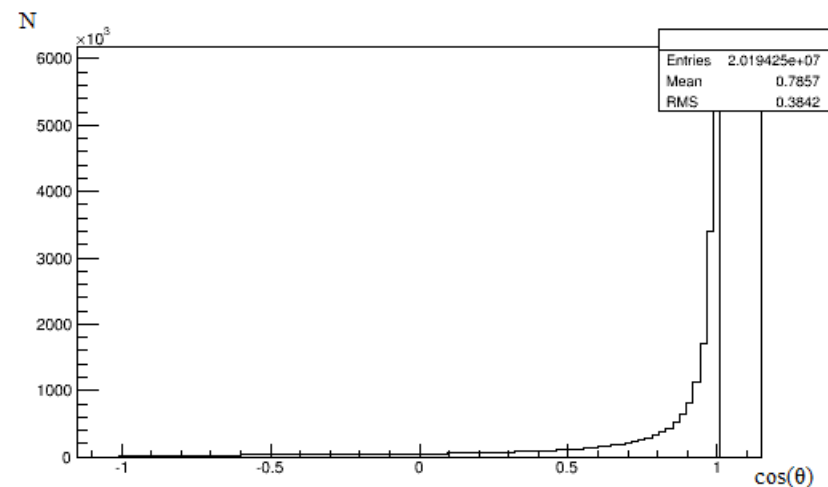
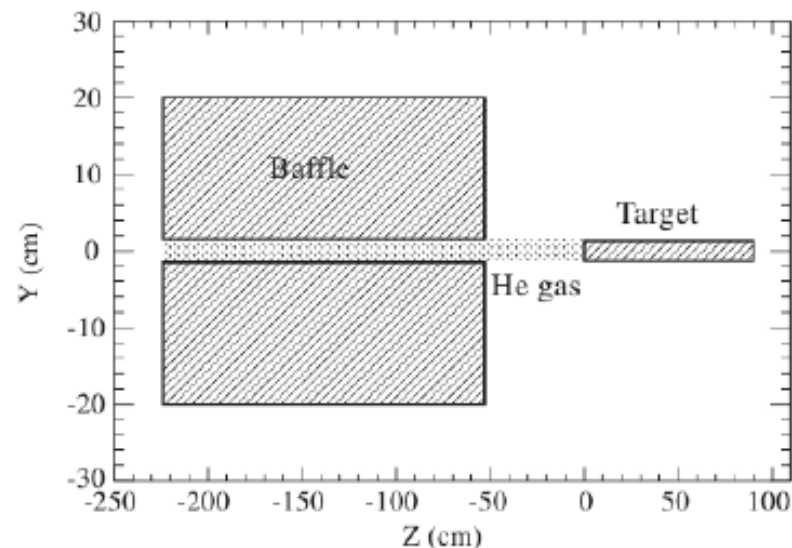
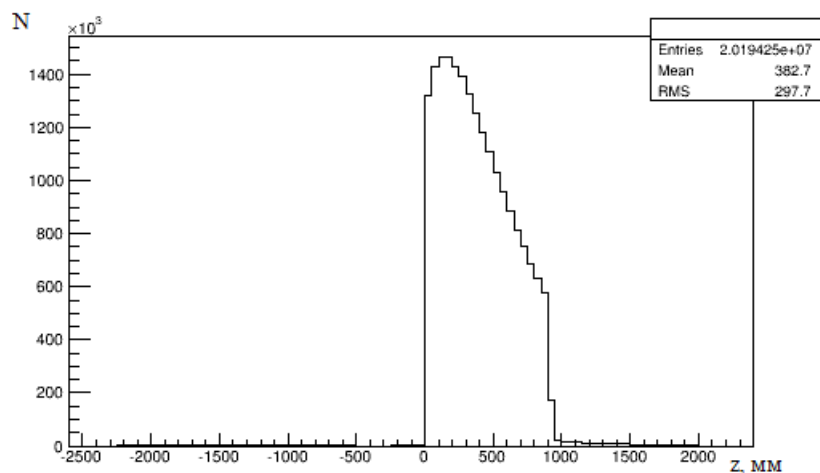
Приведём инвариантную массу, угол от оси пучка и поперечный импульс для мюонных событий на статистике $6.3 \cdot 10^{20}$ POT.



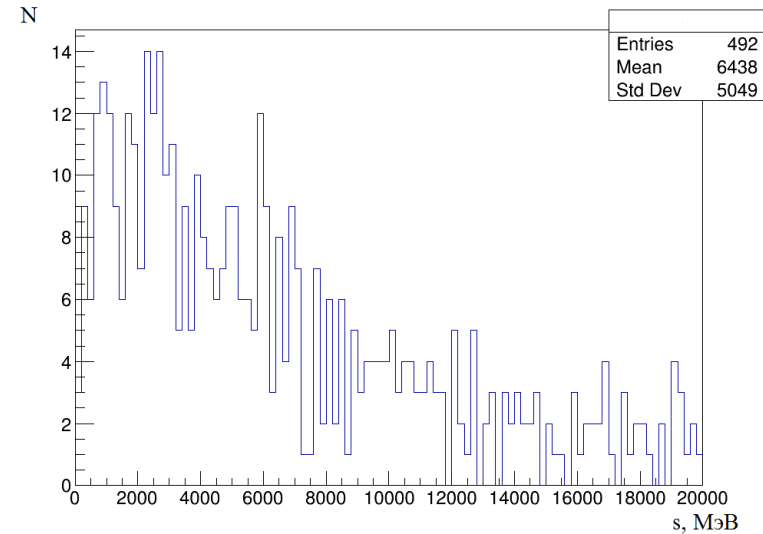
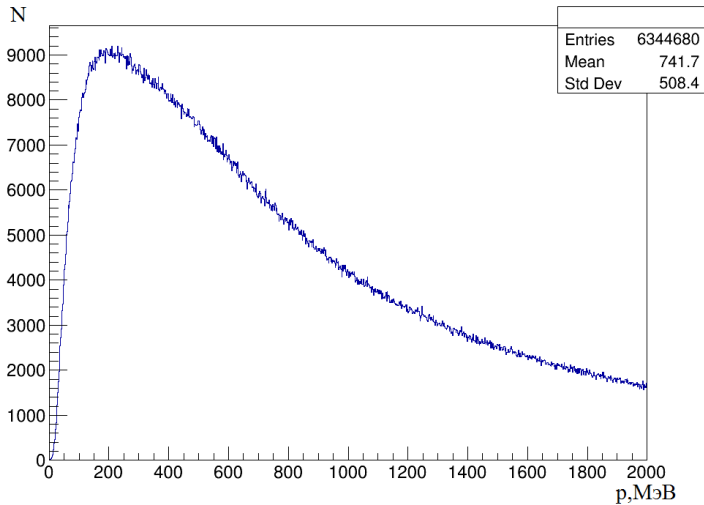
Полезные события.

Для моделирования сигнала использует простую MC-сгенерированную выборку для протонов на простой мишени, реализованную в пакете GEANT4 с помощью физических моделей из списка QGSP_Bert.

Тестовая выборка содержит 6 миллионов нейтральных пионов и отвечает двум миллионам РОТ



Приведём распределения родившихся тёмных фотонов по импульсам и распределение по энергии тёмных фотонов, попавших в ТРС1.



Строго, количество событий может быть описано формулой

$$\text{ROT} \cdot n(\pi^0) \cdot p(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma') \cdot f_{\text{геом}} \cdot p(p_{\pi^0} > 2m_{\gamma'}) \int_{m_{\gamma'}}^{\infty} \frac{\Gamma_i}{\Gamma_{\text{tot}}} p_{\gamma'}(s, m_{\gamma'}) p_{\text{ТРС}} ds,$$

Сделав разумные упрощения, получим оценку для данной статистики

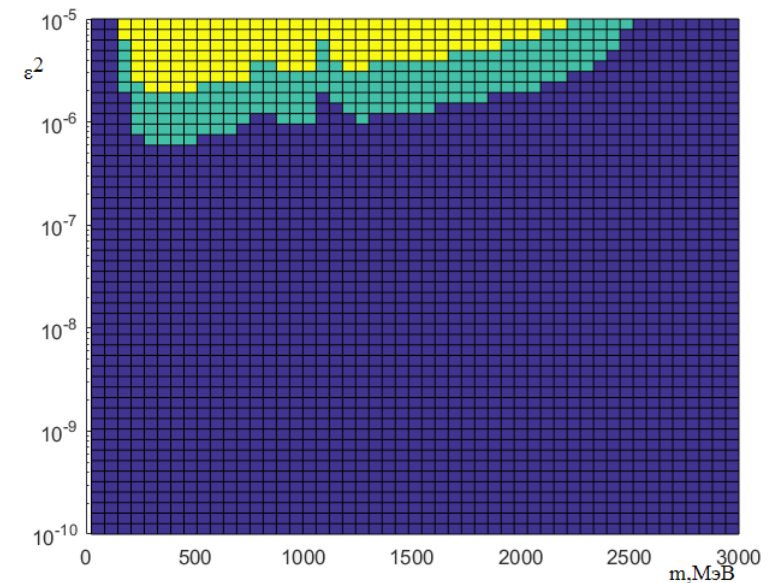
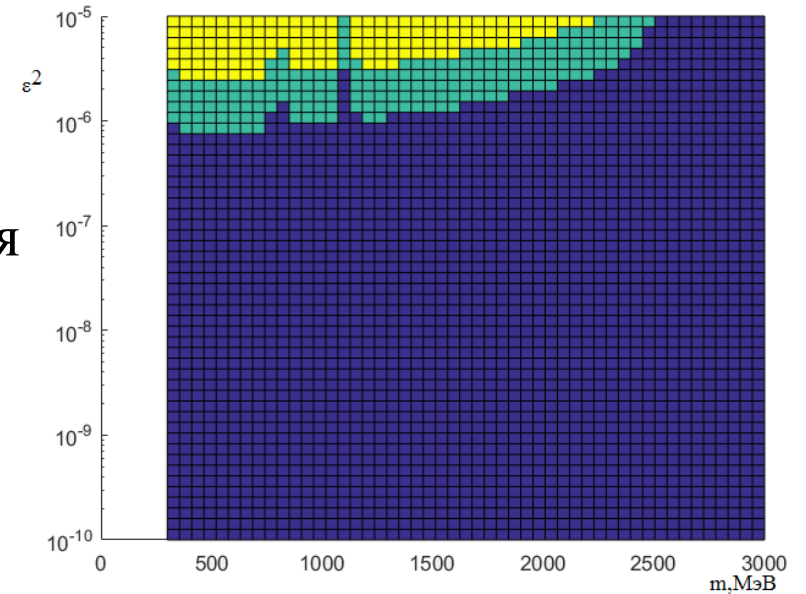
$$p_{\text{ТРС}} = e^{\frac{-\Gamma_i t_{\text{in}}}{2}} - e^{\frac{-\Gamma_i t_{\text{out}}}{2}}$$

Приведём получившиеся гистограммы, отмечая на них уровни в 5 и 50 событий для электронных и мюонных событий

Электронные и мюонные события для тёмного фотона массой 450

ГэВ на статистике $6 \cdot 10^{20}$ POT

ϵ^2	Среднее число событий		Среднее число регистрируемых событий		Среднее число фоновых событий	
	e^+e^-	$\mu^+\mu^-$	e^+e^-	$\mu^+\mu^-$	e^+e^-	$\mu^+\mu^-$
$7.5 \cdot 10^{-7}$	1.6	1.45	0.64	0.58	1	1
$1.2 \cdot 10^{-6}$	4.06	3.72	1.62	1.49	1	1
$1.9 \cdot 10^{-6}$	10.43	9.56	4.17	3.82	1	1
$3.1 \cdot 10^{-6}$	26.54	24.48	10.62	9.79	1	1
$4.9 \cdot 10^{-6}$	68.14	62.67	27.26	25.07	1	1



Заключение.

Исследовалась возможность поиска распадов тёмных фотонов на лептонные пары во время-проекционных камерах ближнего нейтринного детектора ND280 эксперимента T2K.

- Исследовались модели тёмного фотона с кинематическим смешиванием.
- На основе Монте-Карло данных разработаны и изучены критерии отбора полезных событий, выполнена оценка фоновых событий от различных источников. Эффективность регистрации двухлептонных событий в детекторе составляет ~ 0.35 .
- Для выбранных критериев отбора и числа протонов на мишени $6 \cdot 10^{20}$, число фоновых событий составило по 1 событию для e^+e^- и $\mu^+\mu^-$ мод. Основной вклад в фон дают события от взаимодействия мюонных нейтрино в газе время-проекционных камер.
- Для интегрального числа протонов на мишени $3 \cdot 10^{21}$ ожидаемая чувствительность к параметру смешивания $\varepsilon \sim 10^{-3}$ в интервале масс тёмного фотона от 300 МэВ до ~ 1 ГэВ.

1. arXiv:1609.01770v3
2. Search for $A' \rightarrow \mu^+\mu^-$ Decays / R. Aaij [et al.] // Physical Review Letters. — 2020. — Vol. 124, no. 4. — ISSN 10797114.
3. arXiv:1903.08767
4. arXiv:1106.1238
5. Куденко Ю. Г. Нейтринный эксперимент T2K: первые результаты // Усп. физ. наук. — 2011. — Т. 181, № 9. — С. 997—1004.