

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский физико-

технический институт (государственный университет)»

Факультет проблем физики и энергетики

Кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЕТО СИСТЕМЫ НЕЙТРИННОГО ДЕТЕКТОРА NuPRISM

Выпускная квалификационная работа

(бакалаврская работа)

(Специализация 03.03.01 «Прикладные математика и физика»)

Выполнил: студент 383 группы: Волков Вадим Вячеславович

Научный руководитель: д.ф.-м.н Куденко Юрий Григорьевич

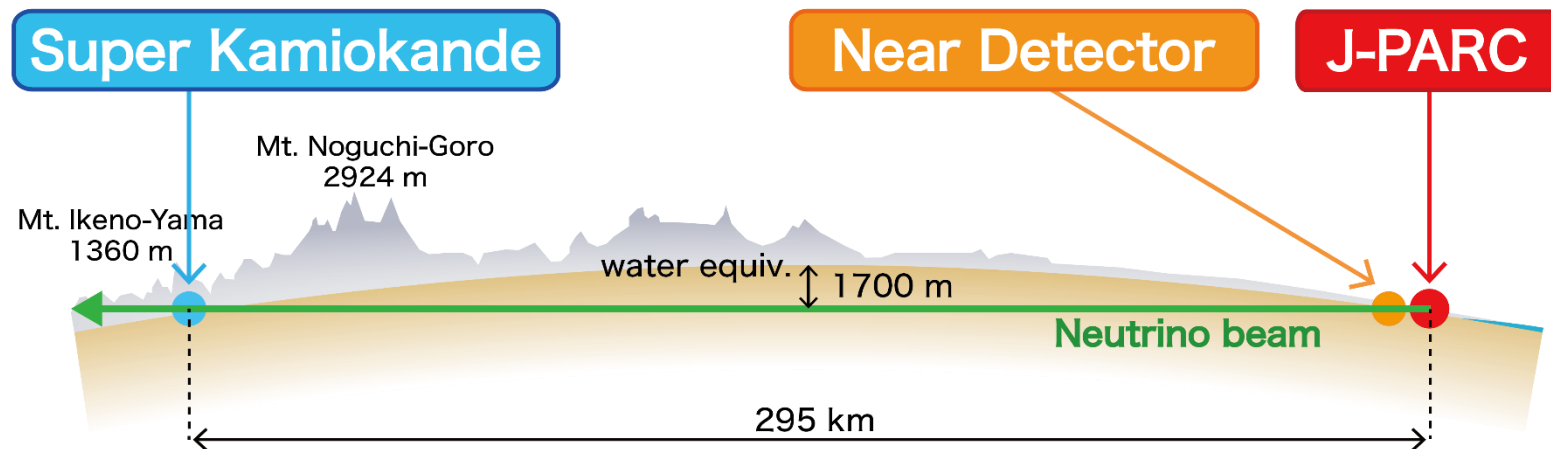
Москва

2017

План

- Эксперимент T2K
- Статистические ошибки эксперимента
- Источники погрешности
- NuPRISM
- Принципы работы и дизайн нового детектора
- Вето система
- Исследование вето системы
- Выводы

Эксперимент T2K



Общая схема эксперимента T2K.

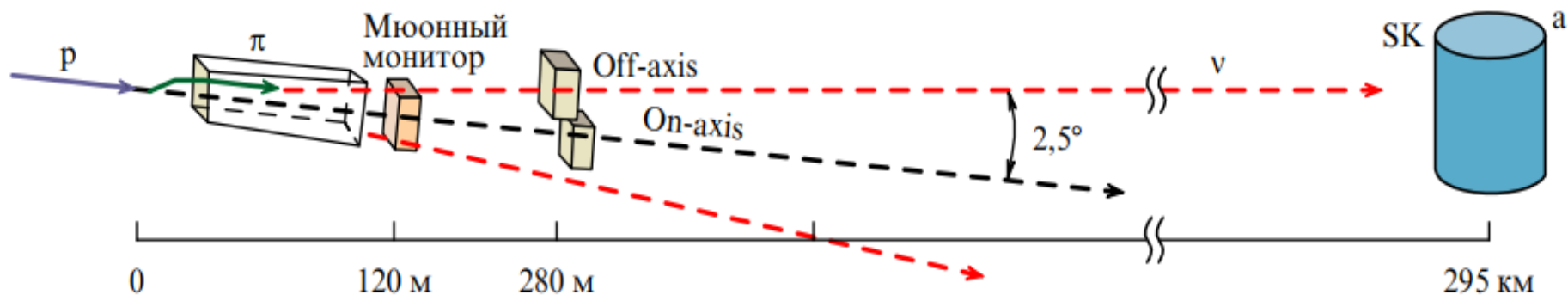
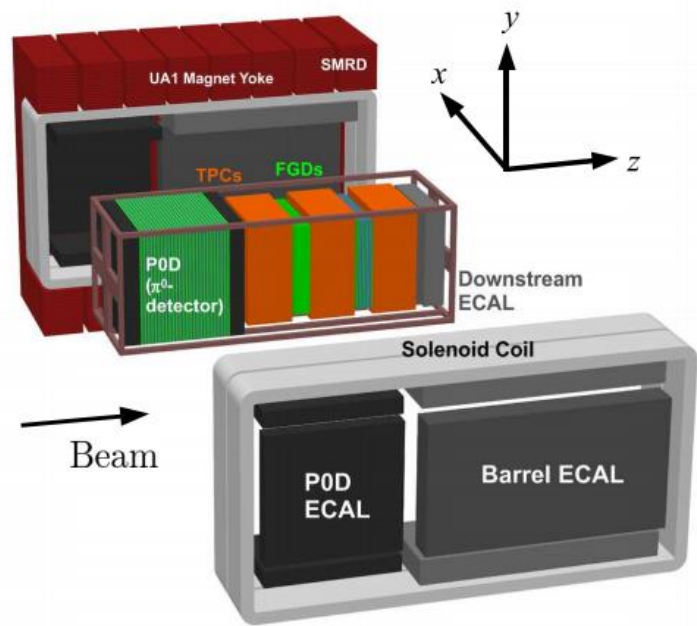
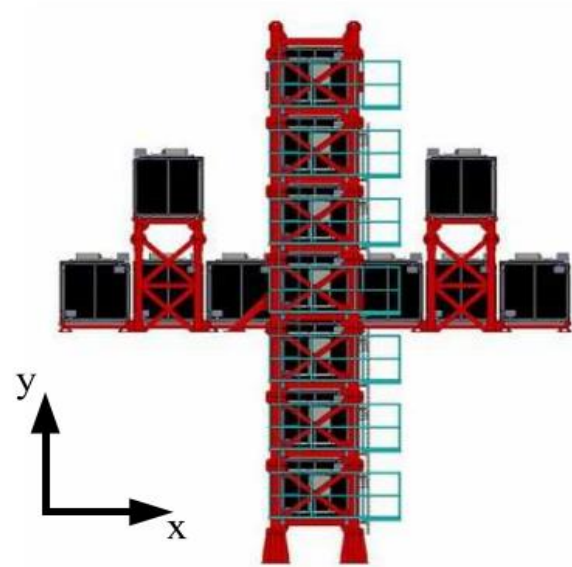


Схема эксперимента с общим расположением детекторов.

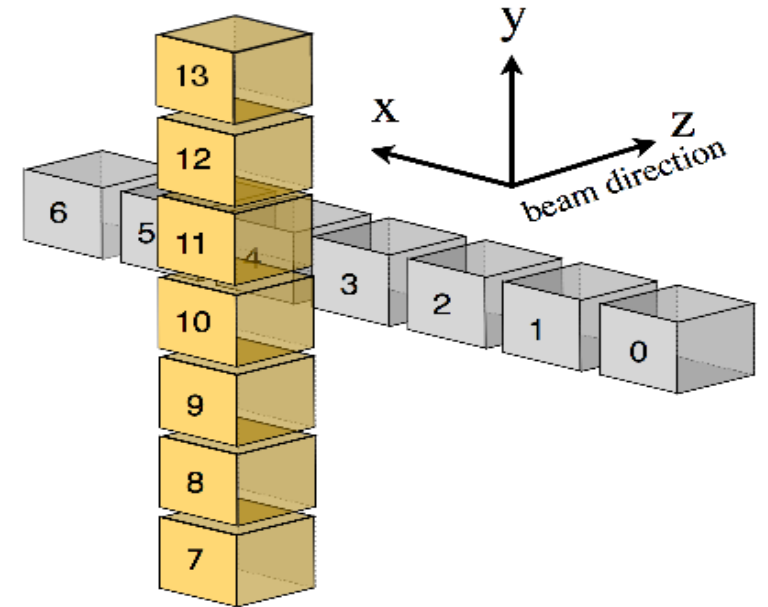
Ближний детектор



Детектор ND280



Детектор INGRID



Статистические ошибки в эксперименте T2K

Source of uncertainty		ν_μ sample	ν_e sample
Flux and common cross section	w/o ND measurement	21.7%	26.0%
	w/ ND measurement	2.7%	3.2%
Independent cross sections		5.0%	4.7%
Super-K detector		4.0%	2.7%
Final or Secondary Hadronic Interaction		3.0%	2.5%
Total	w/o ND measurement	23.5%	26.8%
	w/ ND measurement	7.7%	6.8%

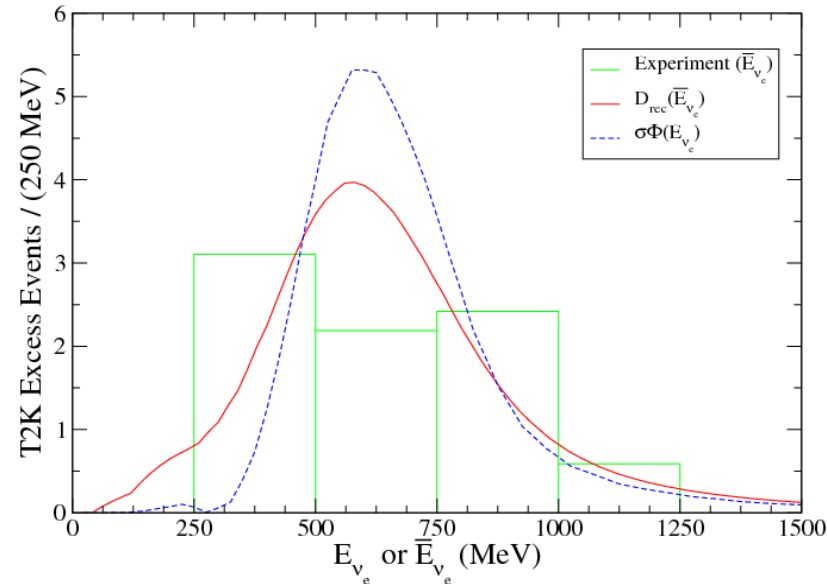
Таблица, показывающая источники и величину систематической погрешности на дальнем детекторе.

Будущие цели T2K

1. Δm_{32}^2
2. θ_{23}
3. δ_{CP}
4. Иерархия масс

Причины погрешностей

1. Моделирование ядерных эффектов взаимодействий нейтрино
2. Теоретические расчеты отношения сечений взаимодействия ν_μ и ν_e
3. Физика не из СМ, как, например стерильные нейтрино.



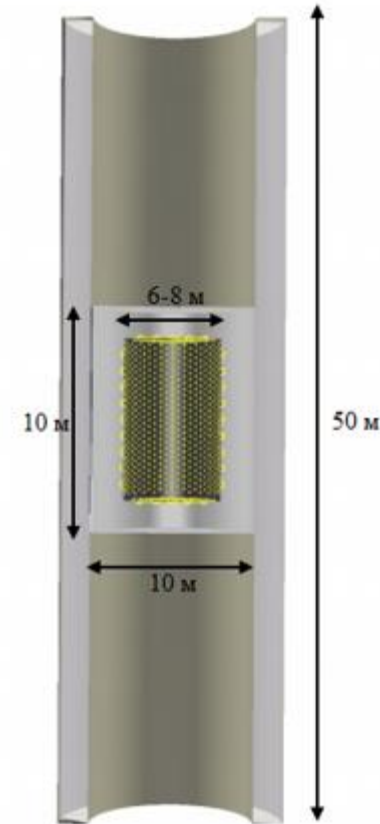
Распределение энергии ν_e событий до(пунктирная линия) и после (сплошная линия) применения метода из статьи [19]. Зеленым обозначена экспериментальная гистограмма.

Основная мотивация создания нового детектора

- Водная мишень
- Идентичный сигнал и фон взаимодействий с дальним детектором
- Аксептанс в 4π
- Меньшая ошибка экстраполяции потока нейтрино от ближнего детектора к дальнему

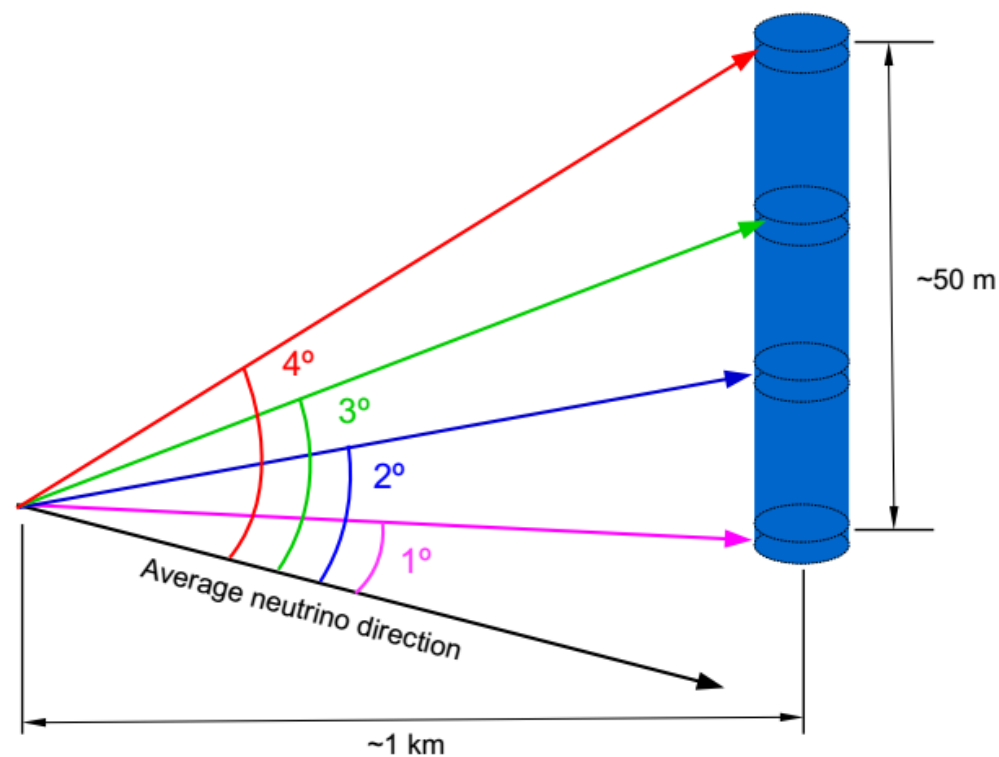
NuPRISM

- NuPRISM (Neutrino Precision Reaction Independent Spectrum Measurement) – предлагаемый новый детектор, который будет располагаться между ближним и дальним детекторами.
- Обеспечение ограничений нарушения $\delta_{\text{ср}}$, основанных на реальных данных об отношении сечений $\sigma(\nu_e)/\sigma(\nu_\mu)$.
- Поток мюонных нейтрино в NuPRISM может быть сопоставлен с потоком ν_e , чтобы убрать статистическую неопределённость, и достигнуть, благодаря размерам детектора точности в 2-3%.

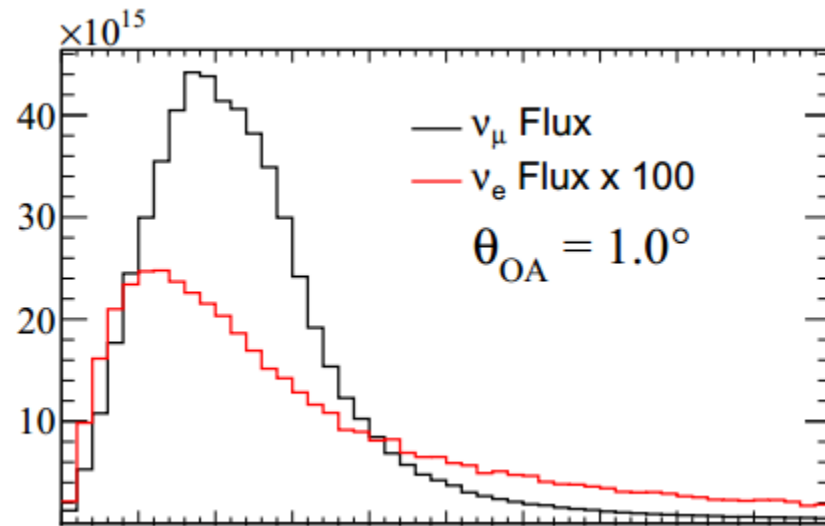


Концепция работы NuPRISM

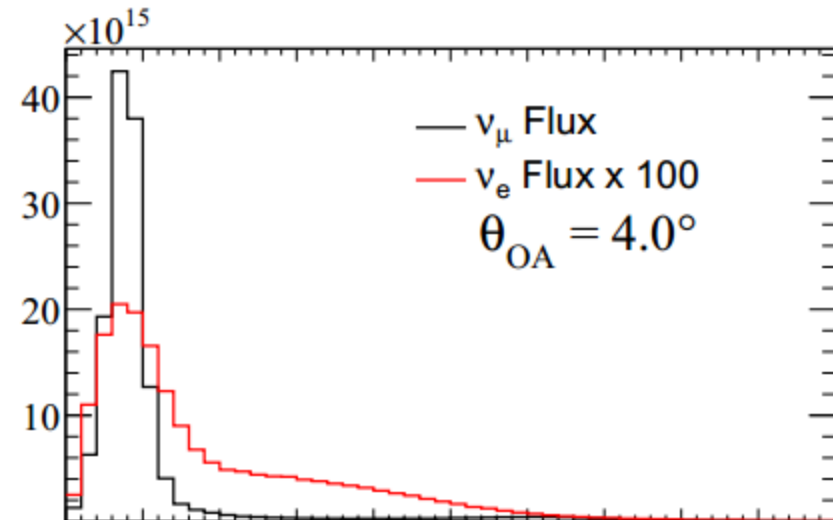
- В эксперименте нейтрино образуются в результате двухчастичных распадов заряженных пионов, например $\pi^+ \rightarrow \mu + \nu_\mu$. При удалении частицы от оси пучка наблюдаемый энергетический спектр нейтрино сужается и достигает пика при более низкой энергии – это называется «off-axis» эффектом



Спектр нейтрино при различных off-axis углах

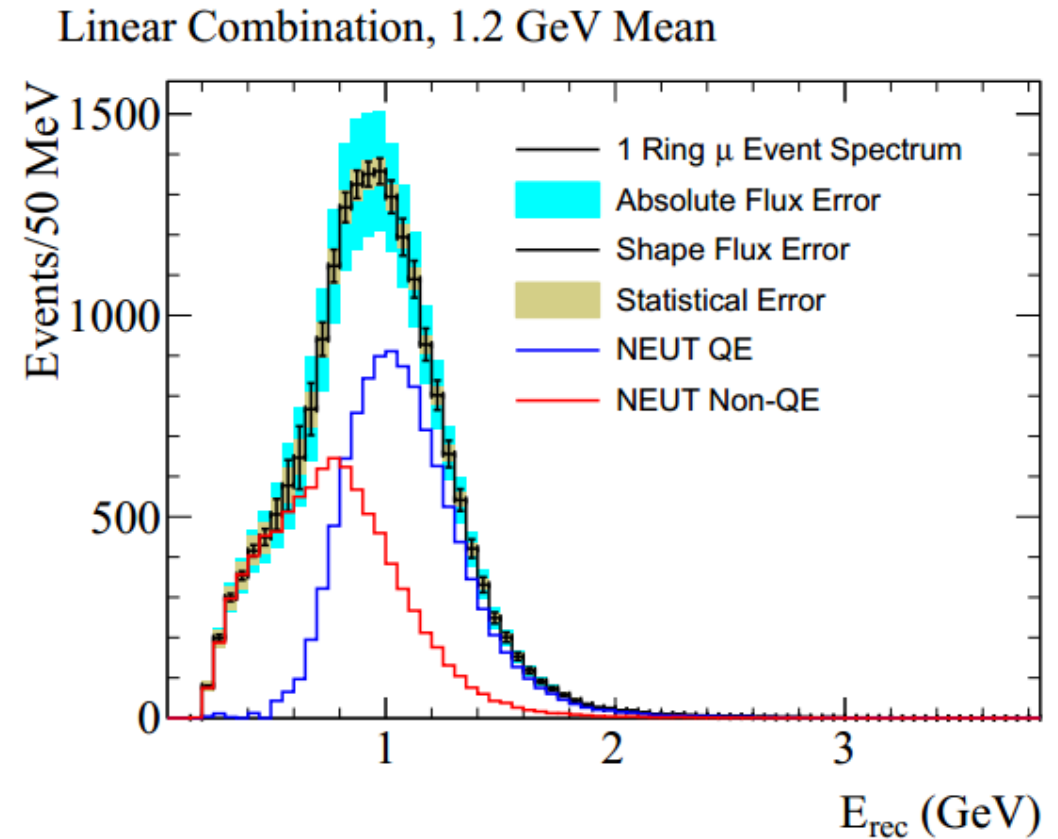
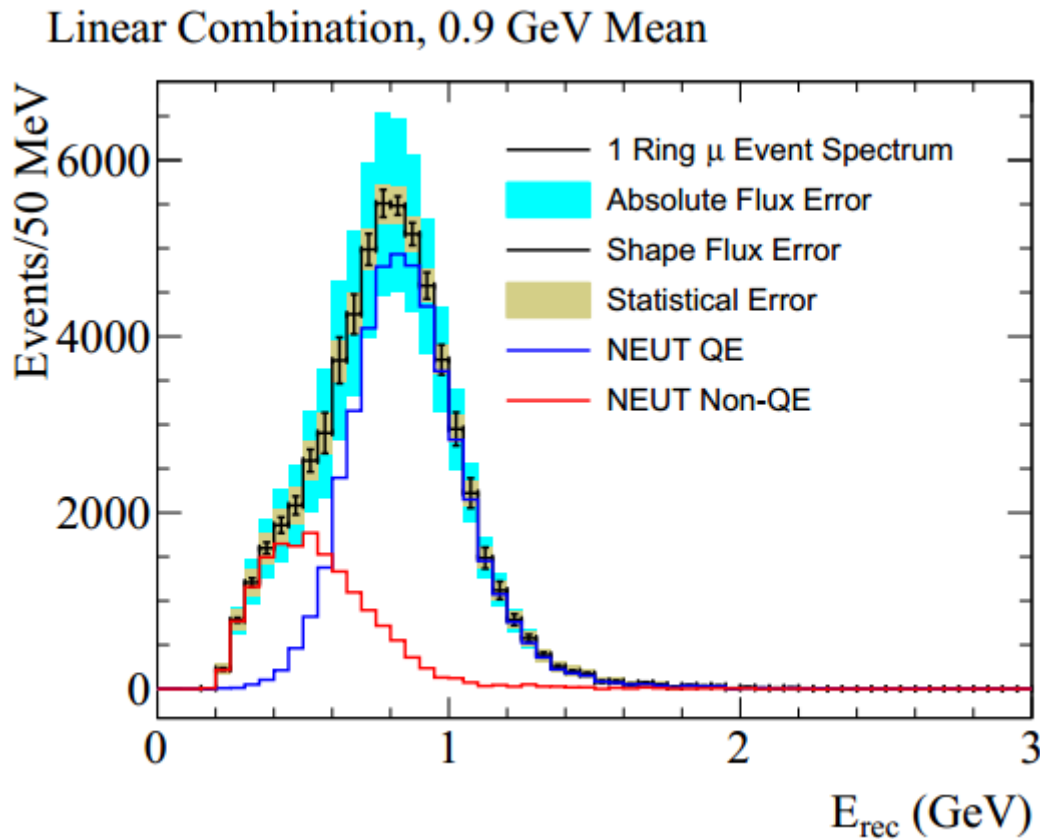


Спектр энергии нейтрино для потоков ν_μ и ν_e в пучке T2K для off-axis угла 1° .



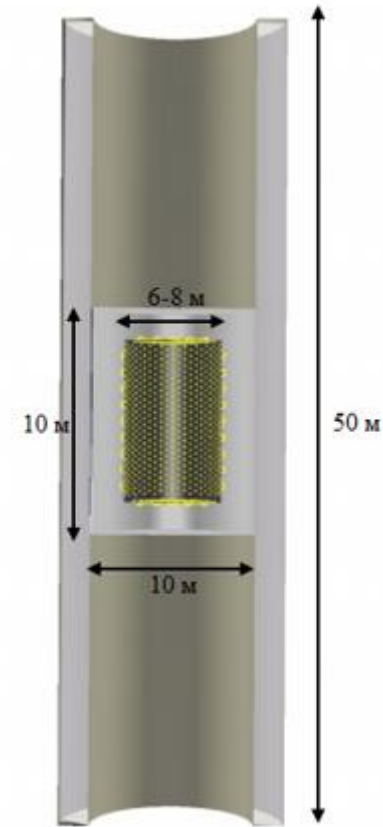
Спектр энергии нейтрино для потоков ν_μ и ν_e в пучке T2K для off-axis угла 4° .

Кинематика мюонов и лептонов будет измеряться напрямую, благодаря линейной комбинации данных с разных углов



Дизайн детектора

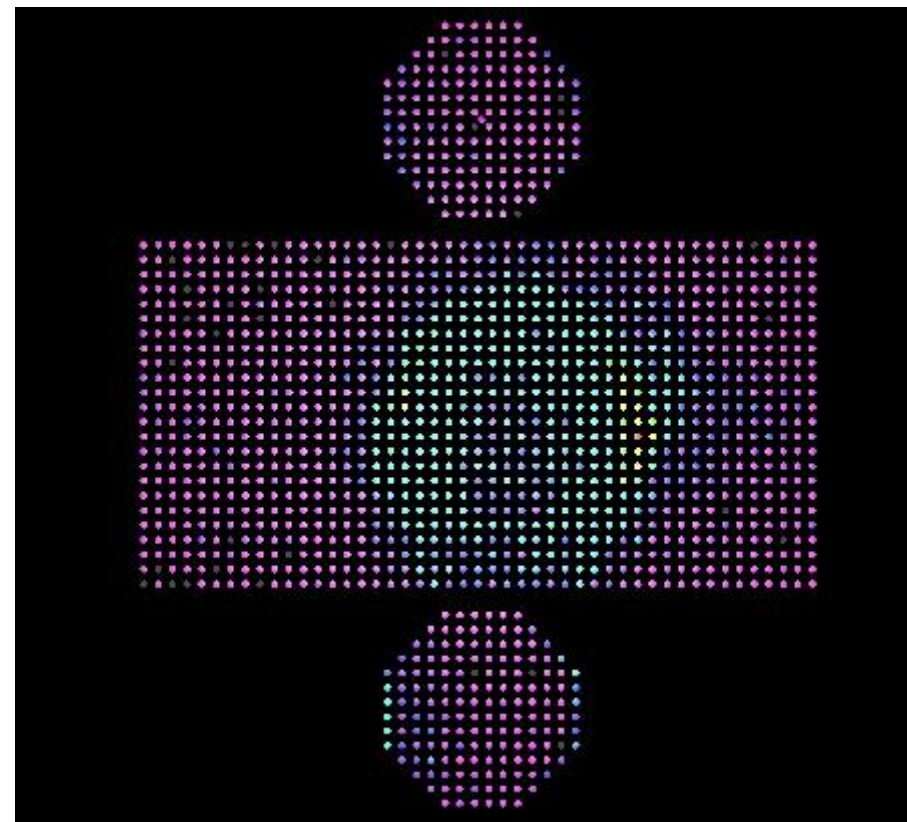
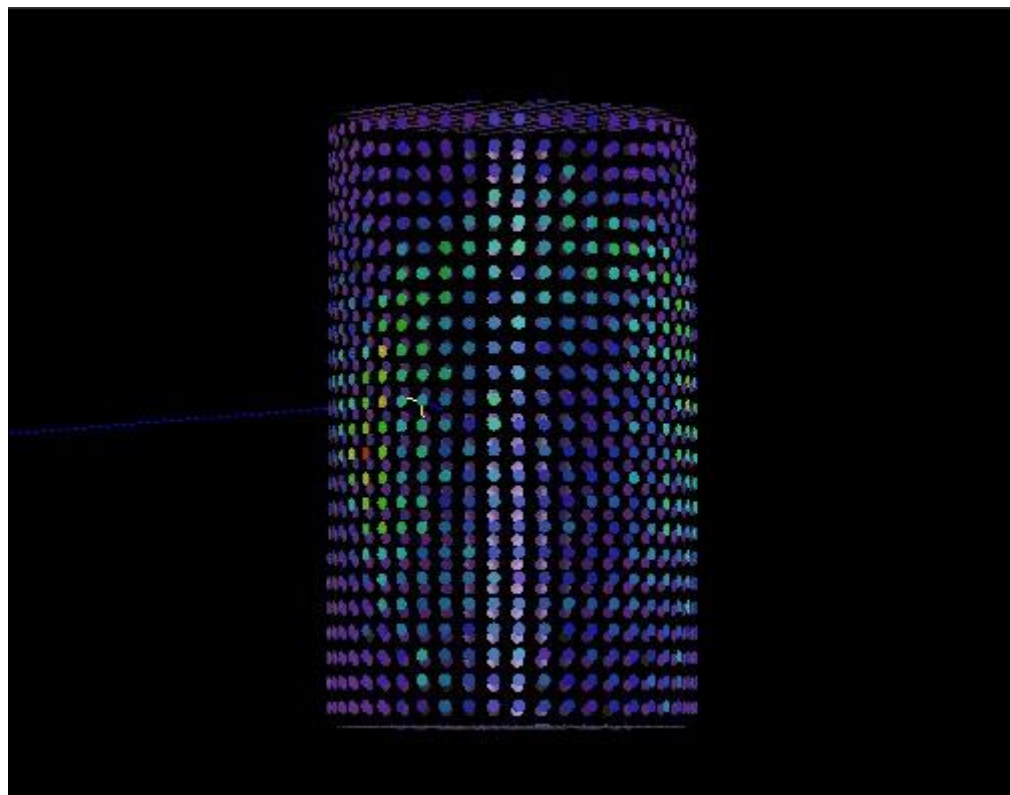
- 1 км от мишени
- 50м высотой
- 10м диаметр
- OD 10м
- ID 6м
- 5 или 8 дюймовые PMT



Программное обеспечение

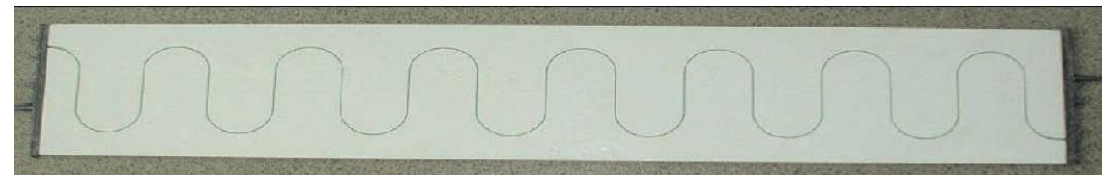
- **WCSim.** Предназначена для разработки и симуляции больших черенковских детекторов с фотоумножителями.
- **Temp_event_display.** Предназначен для визуализации работы WCSim, выводит трехмерное и двумерное изображение заданного детектора вместе с треками симулированных частиц и информацией по начальным частицам, и по частицам, образовавшимся в результате распада.
- **SandSim.** Генерирует поток нейтрино в окружающей среде и OD
- **NEUT.** Программа симулирует взаимодействие нейтрино с ядрами.

Примеры вывода симуляции



Вето система

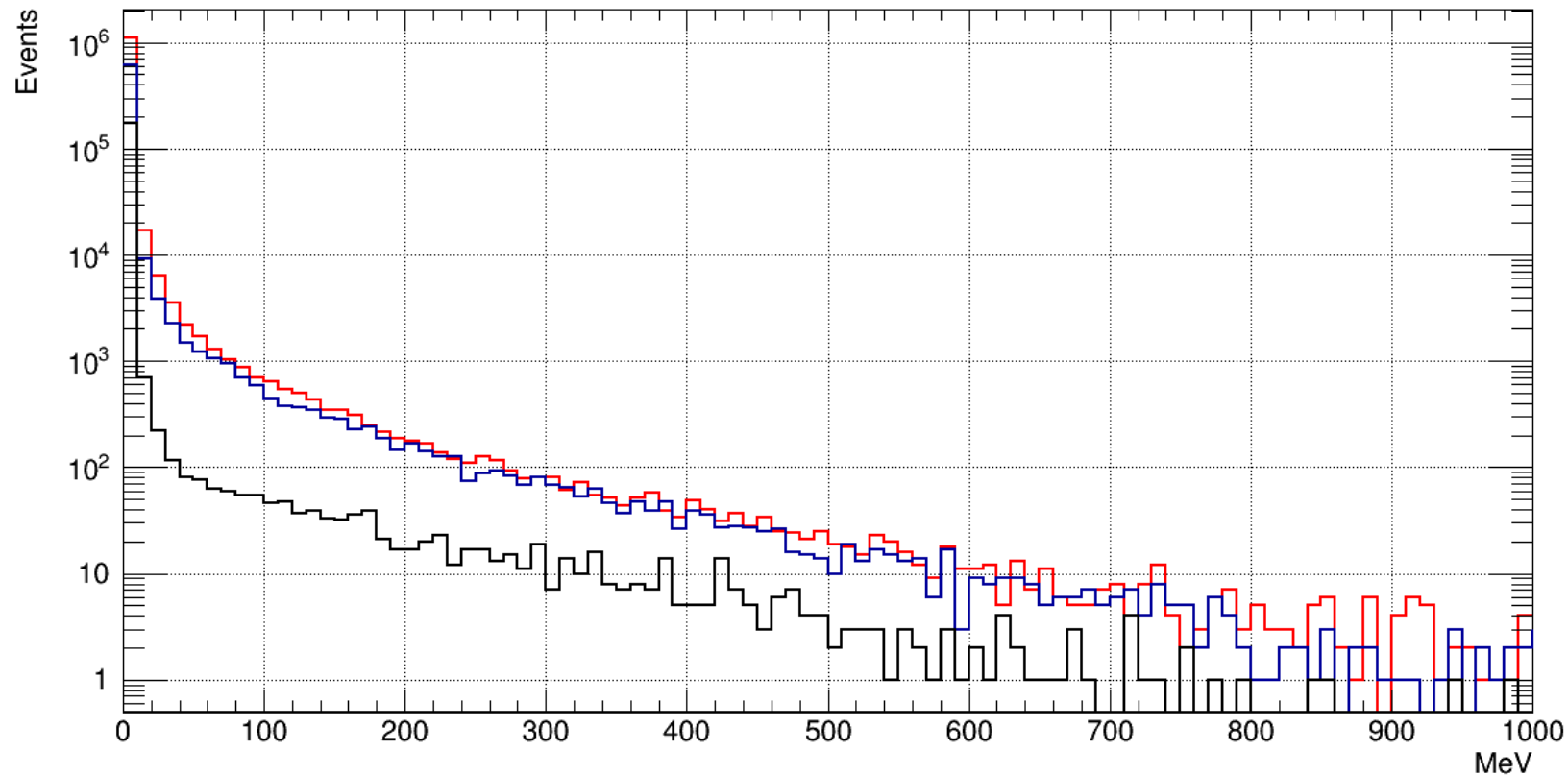
- Вето система может быть составлена из пластиковых сцинтилляторов, которые полностью окружают черенковский детектор. Основная задача вето системы распознавать фоновое излучение от процессов взаимодействия нейтрино в окружающей среде и собирать информацию о космическом излучении для последующей калибровки. В случае NuPRISM возможно применение той же модели как и в случае SMRD детектора.



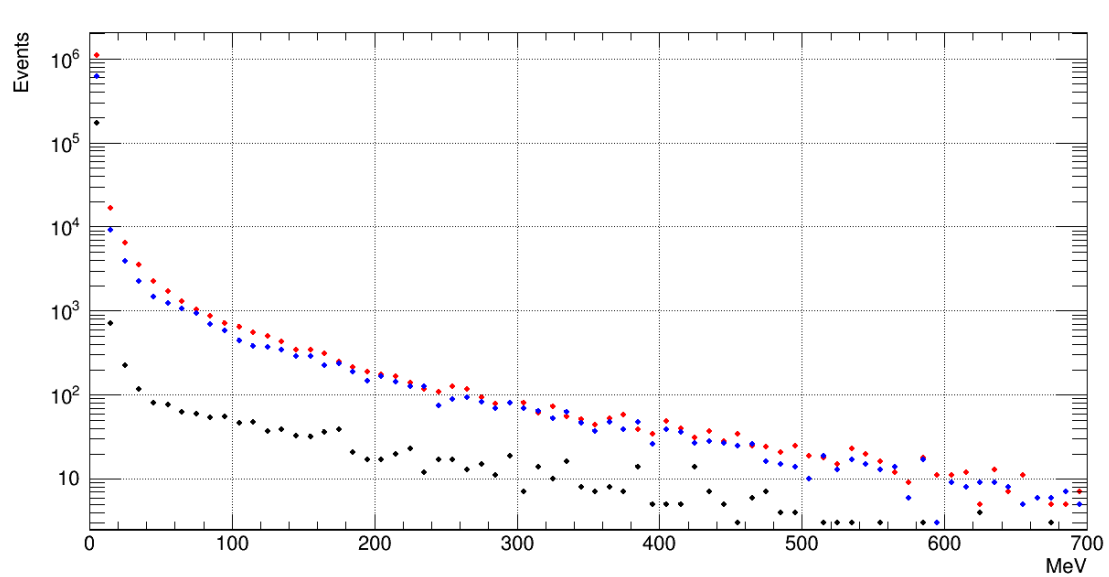
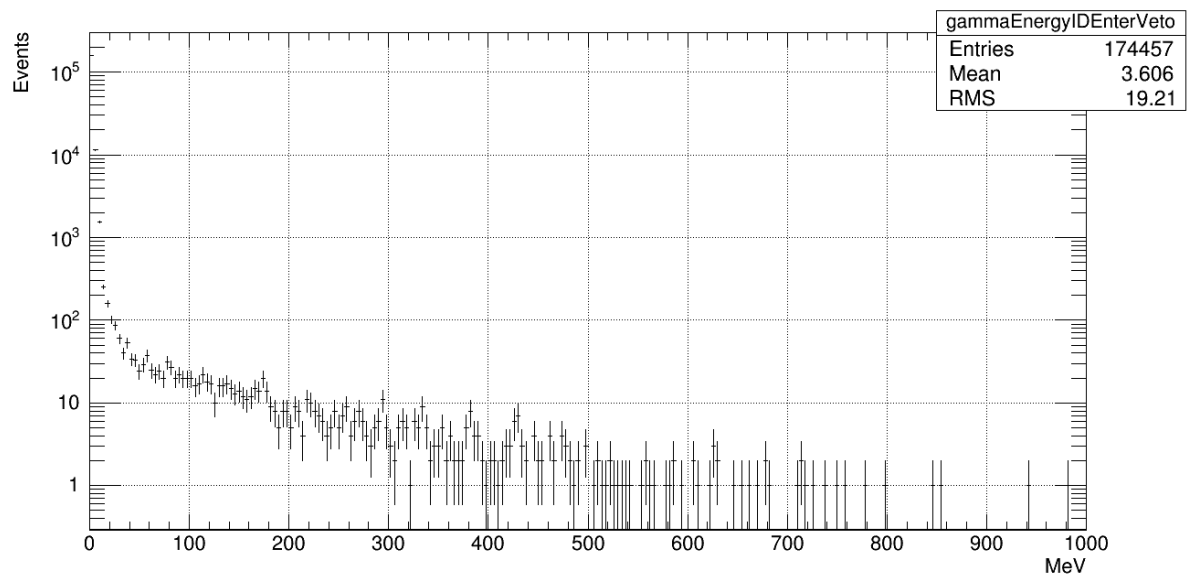
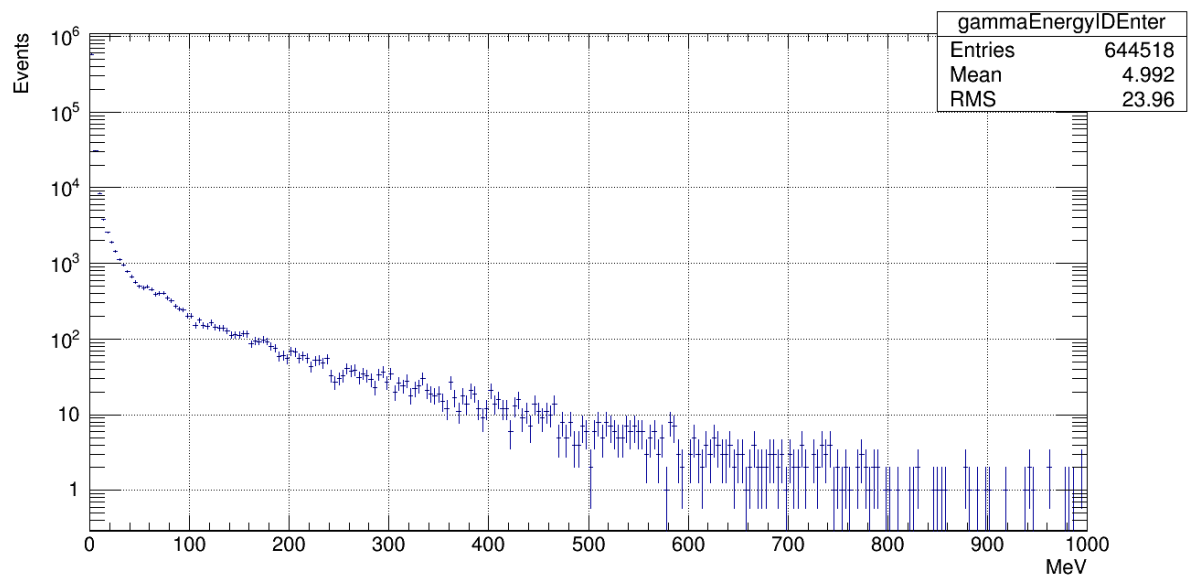
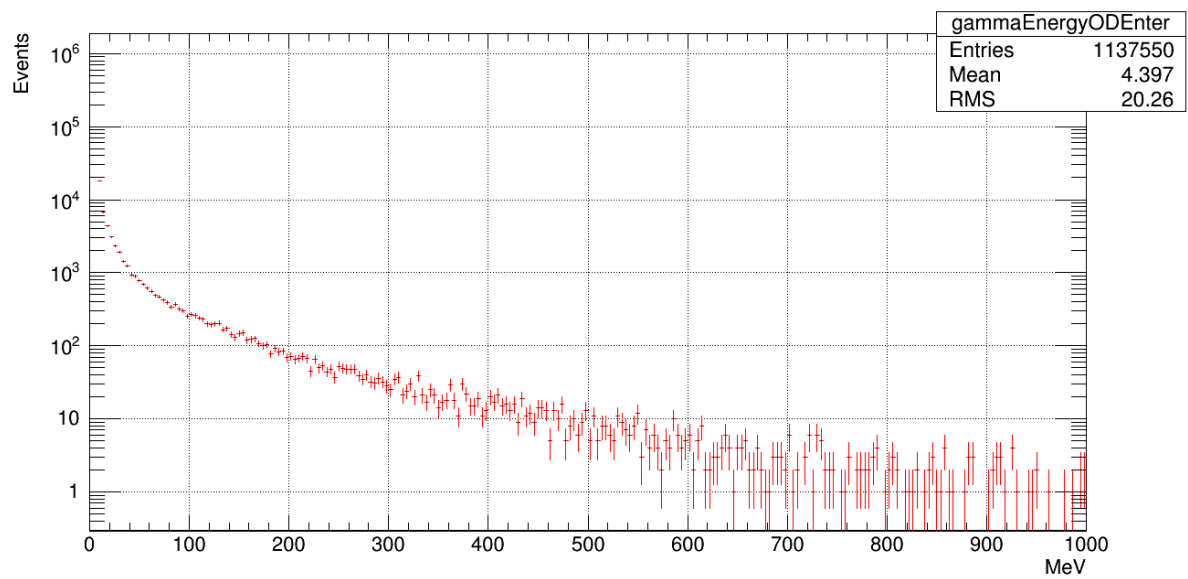
Исследование вето системы на входящее извне на гамма излучение

- Мы предполагаем, что вето внешнего детектора накладывается на любое событие, которое теряет по меньшей мере 50 МэВ энергии во внешнем детекторе, как определено черенковским порогом для разных частиц.
- Проведено исследование влияния вето системы между внешним и внутренним детекторами на входящий фон гамма-излучения. Это важная функция внешнего детектора, т.к. гамма может быть ограничивающим фактором для измерений сечения взаимодействия низкоэнергетичных нейтрино. Для проведенного исследования мы считали, что нет никакого в-ва между внешним и внутренним детекторами

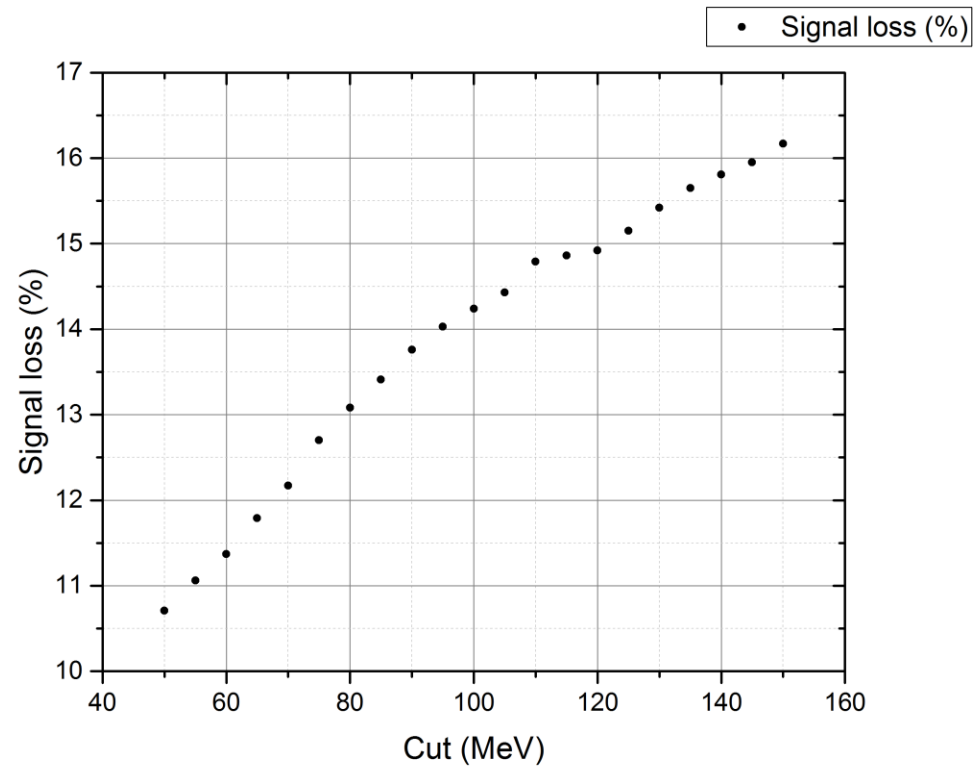
Результаты работы вето системы



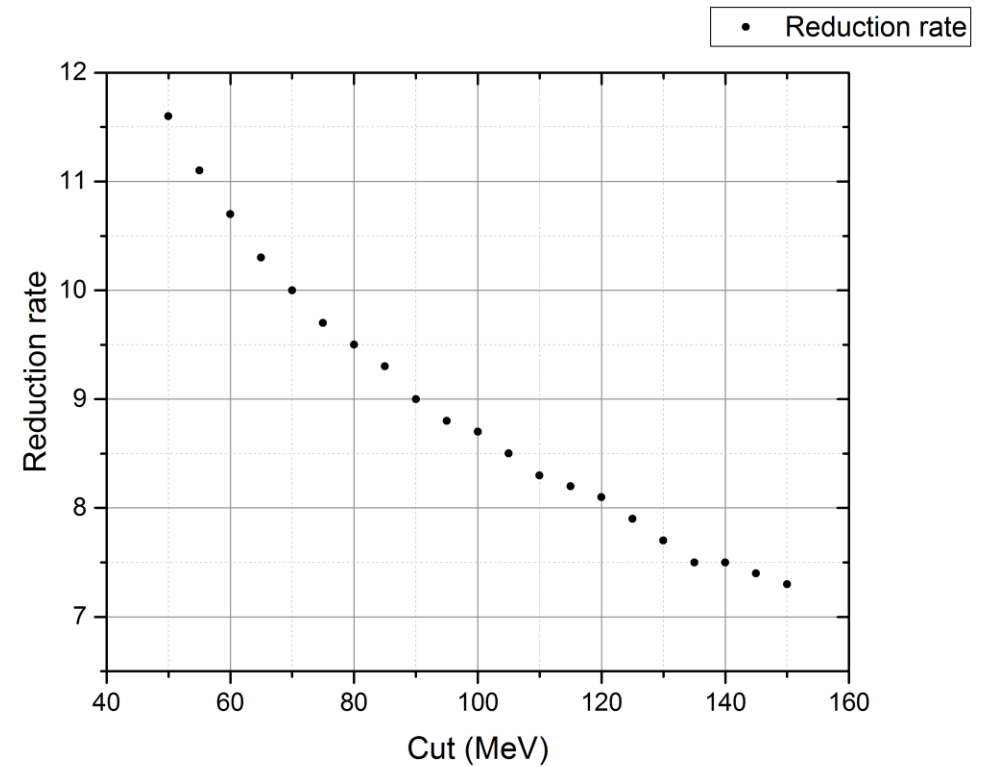
Отношения сигналов, зарегистрированных в детекторе, до и после применения вето системы. **Красным** – общее число гамма-квантов, входящих во внешний детектор. **Синим** – число событий, зарегистрированных во внутреннем детекторе. **Черным** – число событий во внутреннем детекторе, из тех, что были зарегистрированы во внешнем.



Работа вето системы для гамма

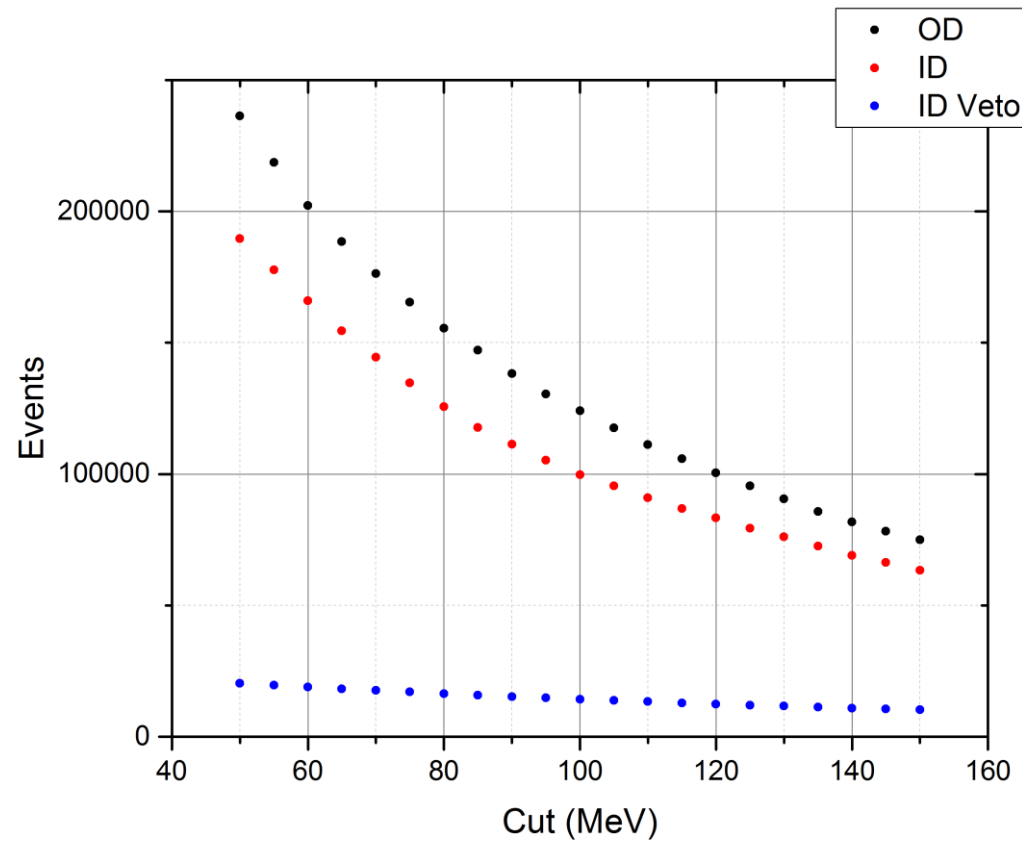


Распределение потерь сигнала по катам энергии на границе ID и OD для гамма квантов.



Зависимость уменьшения числа гамма квантов от кат по энергии.

Работа вето системы для гамма



Зависимость количества гамма от ката по энергии.

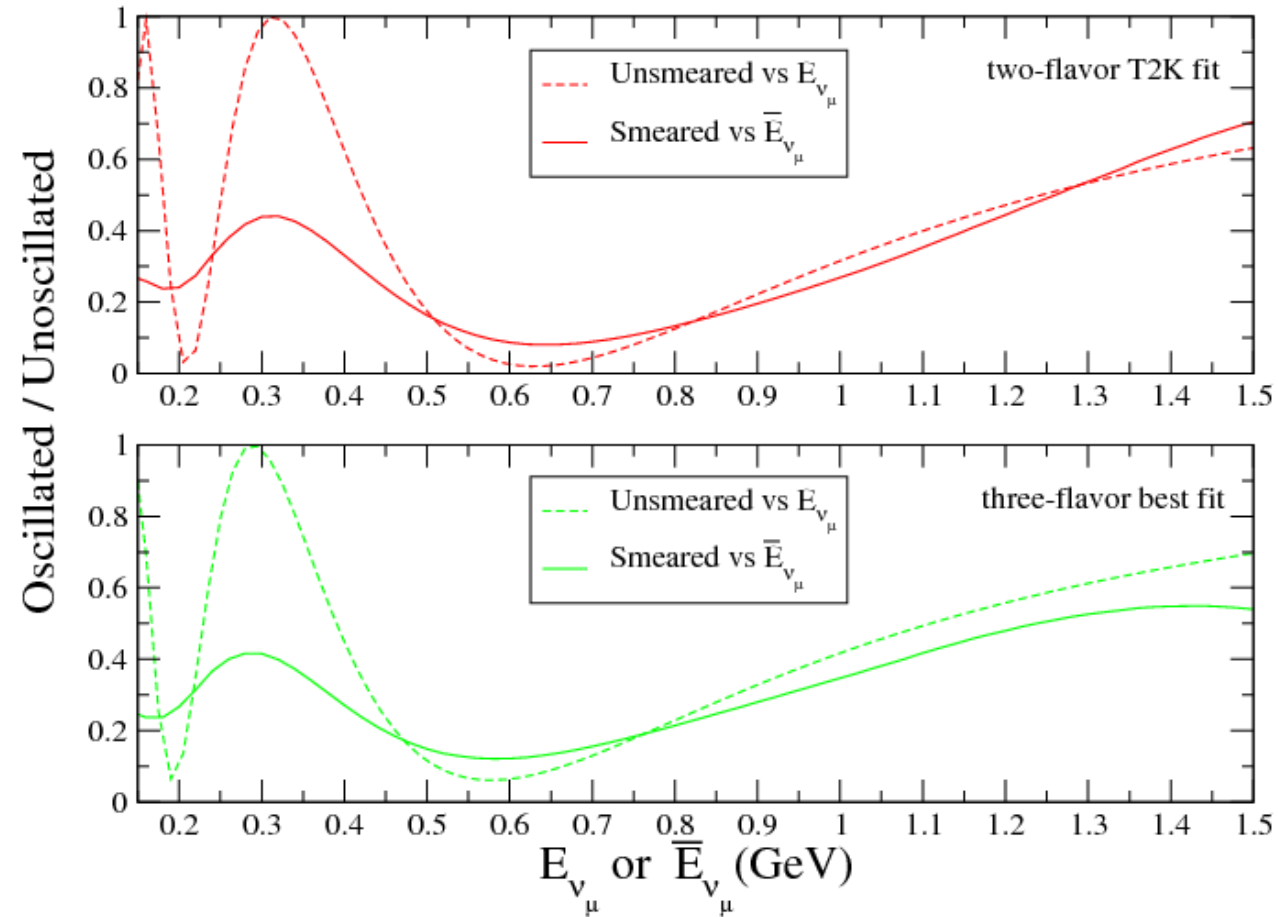
Численные результаты

Кат энергии (МэВ)	OD (шт.)	ID (шт.)	ID Veto (шт.)	Reduction rate	Signal loss (%)
50	236313	189627	20314	11.6	10.71
55	218607	177784	19667	11.1	11.06
60	202176	165902	18863	10.7	11.37
65	188451	154451	18216	10.3	11.79
70	176313	144470	17588	10	12.17
75	165451	134745	17118	9.7	12.7
80	155490	125608	16431	9.5	13.08
85	147137	117745	15784	9.3	13.41
90	138215	111333	15314	9	13.76
95	130510	105215	14765	8.8	14.03
100	124078	99804	14216	8.7	14.24
105	117529	95549	13784	8.5	14.43
110	111157	90941	13451	8.3	14.79
115	105823	86823	12902	8.2	14.86
120	100451	83294	12431	8.1	14.92
125	95549	79333	12020	7.9	15.15
130	90470	76039	11725	7.7	15.42
135	85706	72549	11353	7.5	15.65
140	81823	69098	10922	7.5	15.81
145	78216	66274	10569	7.4	15.95
150	74921	63412	10255	7.3	16.17

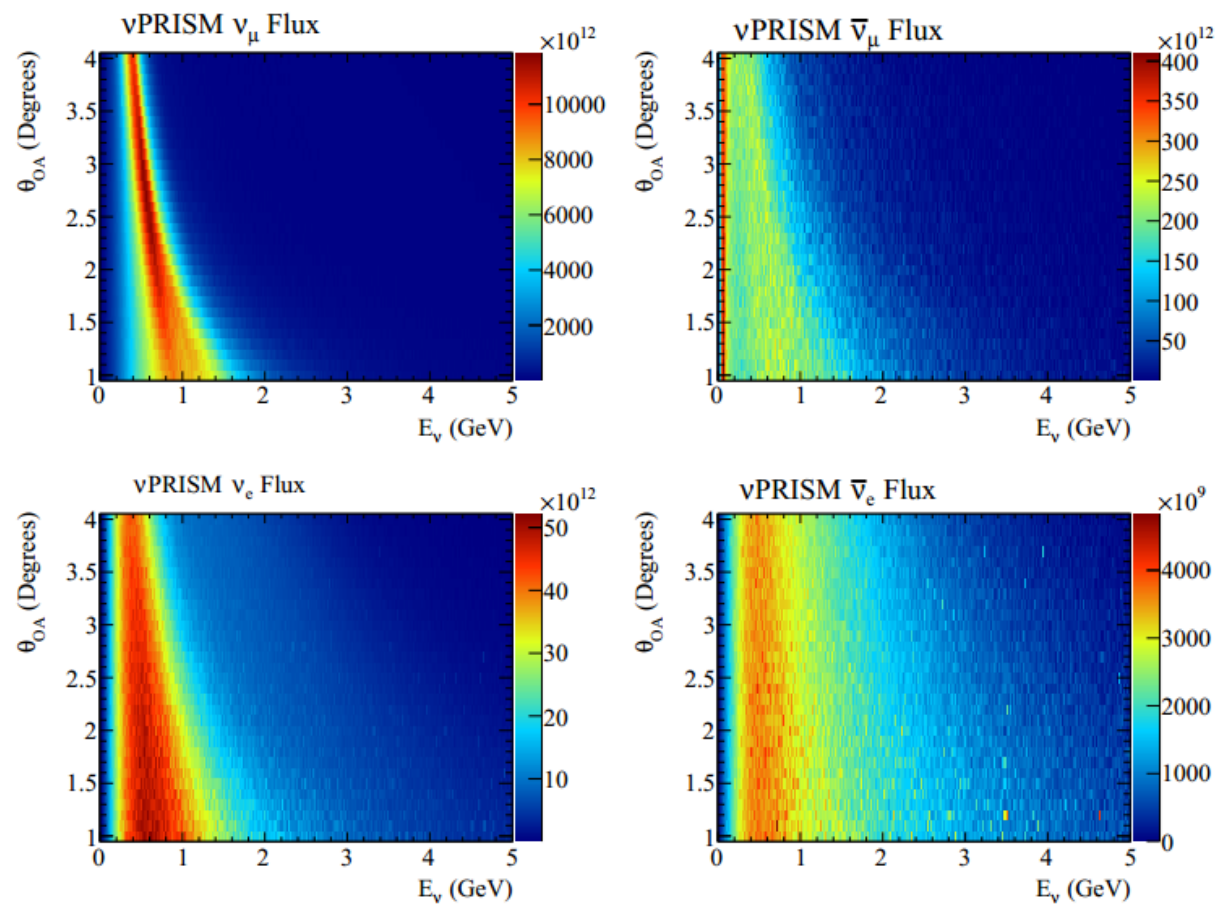
Выводы

- В результате проделанной работы становится очевидной эффективность применения вето системы между внешним и внутренним детекторами для уменьшения фона гамма излучения.
- Значение фактора уменьшения фона меняется от 11.6 для ката в 50 МэВ до 7.3 для ката в 150 МэВ, при потере сигнала в 11% и 16% соответственно, для статистика 5.1×10^{21} POT
- В дальнейшем планируется конкретная симуляция реальной или приближенной к таковой геометрии детектора и рассмотрение возможности и методов ее изменения в случае необходимости.

Вероятность исчезновения ν_μ с применением метода восстановления, разработанного в статье [19] (сплошная линия) и без него (пунктирная линия).



Поток нейтрино как функции off-axis угла и энергии для каждого флейвора.



Пробные частоты событий для одиночных e-like и μ -like колец, со статистикой $1e21$ протонов на мишень.

Off-axis Range	1 Ring Muon Candidates CC ν_μ Purity	1 Ring Electron Candidates CC ν_e Purity
1°-2°	7.8e5 97.3%	5.4e3 32.5%
2°-3°	4.3e5 97.7%	4.5e3 51.8%
3°-4°	1.9e5 97.2%	2.9e3 65.0%

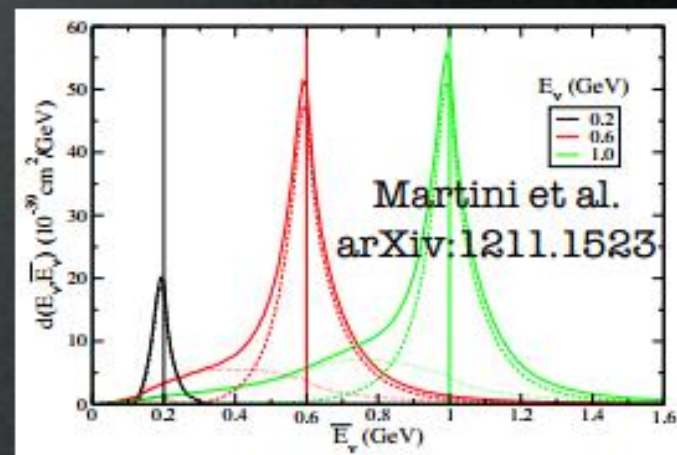
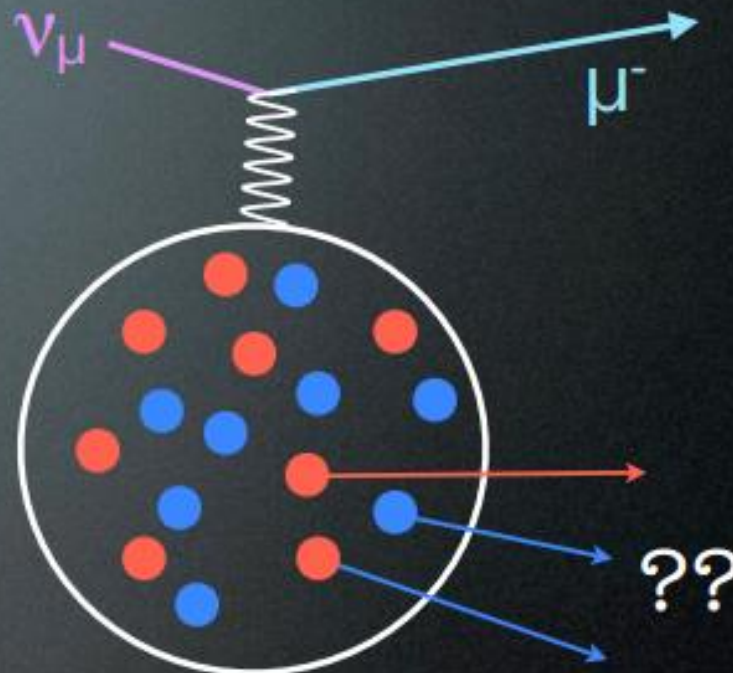
Backup 1

Заключение

1. В результате проделанной работы становится очевидной эффективность применения вето системы между внешним и внутренним детекторами для уменьшения фона гамма излучения.
2. Значение фактора уменьшения фона меняется от 11.6 для ката в 50 МэВ до 7.3 для ката в 150 МэВ, при потере сигнала в 11% и 16% соответственно, для статистика 5.1×10^{19} POT.
3. В дальнейшем планируется конкретная симуляция реальной или приближенной к таковой геометрии детектора и рассмотрение возможности и методов ее изменения в случае необходимости.

Nuclear Complications

- Unfortunately, neutrino-nucleus scattering is not as simple as single-nucleon knockout
 - Quite often (20-30%?), more than 1 nucleon is ejected from the nucleus
- This affects both the reconstructed energy and the total cross section of single-lepton events
 - In 2009, our neutrino interaction generators were unaware of this effect



Measuring E_ν

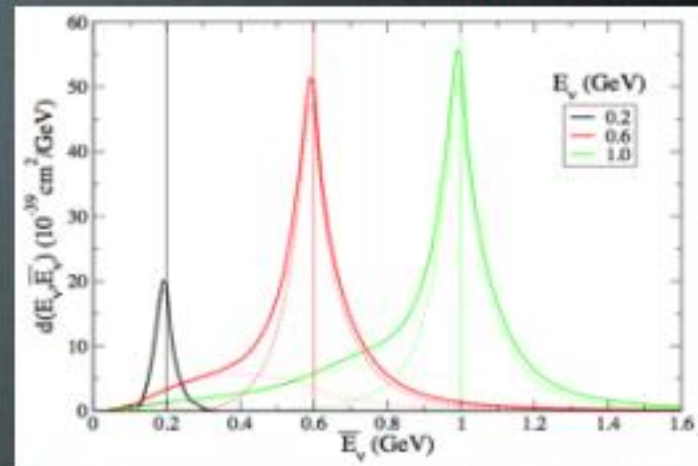
Martini et al. arXiv:
1211.1523

Lepton Only:



**Must assume
mass of
recoiling
hadron(s)**

**Problematic!
due to
Multi-nucleon
interactions**

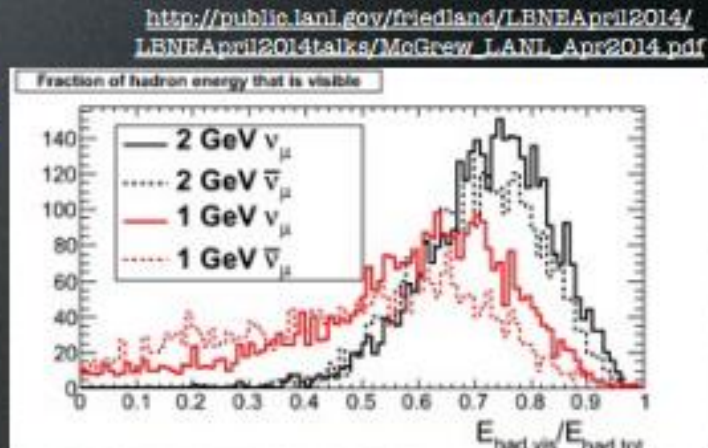


Lepton + Hadronic Energy:



**Neutrons cause
missing hadronic
energy**

**Energy loss
is different for
 ν and anti- ν**



- Both effects lead to underestimating the neutrino energy (feed down)
- Need to calibrate both leptonic (e & μ) & hadronic energy scales and energy tails (variance)

GEANT4 Simulation of a large LAr volume

(True deposited hadronic energy)/
(True initial hadronic energy)

How Well are Multi-nucleon ν Models Understood?

- It is very difficult to answer this question without a direct measurement
- However, the two most commonly used “new” models can be compared
 - J. Nieves, I. Ruiz Simo, and M. J. Vicente Vacas, PRC 83:045501 (2011)
 - M. Martini, M. Ericson, G. Chanfray, and J. Marteau, PRC 80:065501 (2009)
- Cross section differs by a factor of 2 to 3 over a large range of neutrino energies
- Which model is correct?
 - Is either model correct?
- 1 GeV is a particularly difficult regime for nuclear theory

