

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
МОСКОВСКИЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(государственный университет)

Кафедра физики элементарных частиц

Отчет по НИРС на тему:

Расчет энергетических спектров нейтрино в эксперименте на протонном ускорителе.

Место выполнения: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Научный руководитель

д.ф-м.н., проф.

_____ А. А. Соколов

Студент Б19-102

_____ Т. В. Махкамов

Москва 2022

Содержание

Введение	3
1 Физика процесса	3
1.1 Кинематика	3
2 Описание экспериментальной установки	6
3 Построение модели	7
3.1 Модель 1	7
3.2 Модель 2	8
4 Результаты моделирования	10
4.1 Модель распада пучка	10
4.2 Модель образования пучка	15
5 Заключение	16
6 Список литературы	17

Введение

Пучки нейтрино на ускорителях являются инструментом для лучшего понимания самого нейтрино, для использования нейтрино в качестве зонда, чтобы лучше понять слабое ядерное взаимодействие и его связь с электромагнитным взаимодействием, существования сильно связанных кварков внутри протона и нейтрона, а также, для в качестве доказательства недавних открытий о том, что нейтрино подвергаются квантово-механическим осциляциям между так называемыми "ароматами" что является убедительным признаком ненулевой массы.[45]

В настоящей статье рассматриваются так называемые обычные пучки нейтрино, в которых пучок протонов высокой энергии воздействует на ядерную мишень для получения пучка вторичных пионов и каонов, распады которых, в свою очередь, дают пучок нейтрино. Такие пучки были широко эксплуатированы в Брукхейвене, Церне, Фермилабе, КЕК, Лос-Аламосе и Серпухове, а также в настоящее время строятся новые установки в Фермилабе, J-PARC и ЦЕРНЕ. Цель состоит в том, чтобы обсудить некоторые из основных физических процессов при образовании мезонов в ядерной мишени, фокусировка вторичного пучка перед его распадом на нейтрино и измерения, которые могут подтвердить экспериментально контролируемый спектр. В частности, была воспроизведена модель эксперимента C-70 с построением двух различных моделей[148]. Данная модель была реализована с помощью программного пакета GEANT4, с применением библиотеки ROOT.

1 Физика процесса

1.1 Кинематика

В этом разделе будет воспроизведено несколько полезных кинематических формул, относящихся к распределению энергии и угла разлета дочерних ν , в результате распада π^\pm и K^\pm . Следует отметить, что основными рассматриваемыми распадами являются:

- $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ (BR $\approx 100\%$);
- $K^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu$ (BR $\approx 63,4\%$);
- $K_L \rightarrow \pi^0 + \nu_\mu + \mu$ (BR $\approx 27.2\%$);

они же дают основной вклад в разработку мюонно-нейтринных пучков. В то время как некоторые мюоны распадаются через $\mu \rightarrow e\nu_e\nu_\mu$ в дрейфовом объеме, приводя к образованию электронных нейтрино, длительное время жизни мюонов делает этот источник скорее помехой, чем источником, который следует использовать.

На рисунке 1 определены векторы импульса и направлений вылета для дочерних частиц от π или K распадов. Являясь распадами двух тел (на мюон и нейтрино), импульсы дочерних частиц p' в системе координат центра масс могут быть вычислены как:

$$p' = \frac{M}{2} \left(1 - \frac{m_\mu^2}{M^2} \right) \quad (1)$$

где M - масса родительского частицы π или K , а m_μ - масса мюона. Для дочерних частиц в π (K) распадах $p' = 29,8(235.6)$. Поскольку π/K имеет нулевой спин, угловое распределение продуктов распада изотропно в системе отсчета СЦМ,

$$\frac{dP}{d\Omega'} = \frac{1}{4\pi} \quad (2)$$

Преобразование импульсов продуктов распада в лабораторную систему выполняется с помощью преобразований Лоренца:

$$E = \gamma (E' + \beta p'_z) \quad (3)$$

$$p_z = \gamma (p'_z + \beta E') \quad (4)$$

$$p_T = p'_T \quad (5)$$

где $\gamma = E/M$, $\beta = (1 - 1/\gamma^2)^{1/2}$, и E и M это энергии родительского мезона в ЛСО и масса, соответственно. Тот факт, что $p_T'^2 + p_z'^2 = p'^2$ означает,

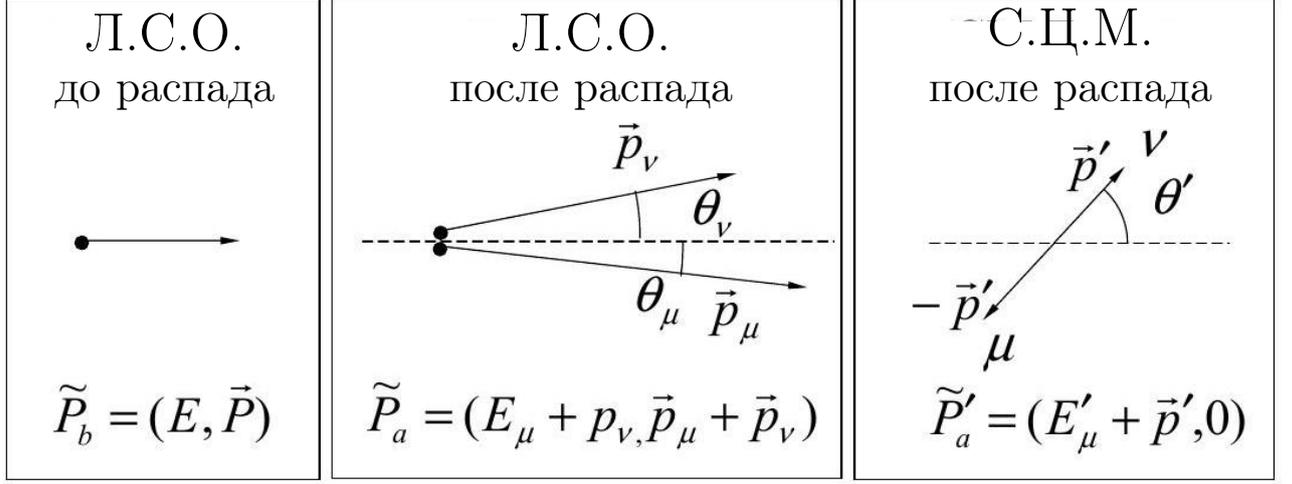


Рисунок 1 — Вид распада π или K мезона в лабораторной системе (ЛСО) и в системе центра масс (СЦМ), определяющей импульсы, энергии и углы родительской и дочерних частиц.

что трехмерные импульсы дочерних частиц лежат на окружности в СЦМ, а в лабораторной системе отсчета на эллипсе:

$$\frac{(p_z - \beta\gamma E')^2}{\gamma^2 p'^2} + \frac{p_T^2}{p'^2} = 1 \quad (6)$$

Как показано на рисунке 2 ??, эллипс импульса нейтрино в ЛСО приблизительно пересекает начало координат для очень релятивистских родительских частиц ($\beta \approx 1$), поскольку $E' = p'$ для нейтрино. Из-за большой энергии мюона $E'_\mu (= 109$ или 258 для распадов π и K , соответственно) эллипс для мюона смещен вправо. Как показано на рисунке 2??, импульс нейтрино в ЛСО колеблется от 0 до $p_\nu^{\max} = 2\gamma p' = \left(1 - \frac{m_\mu^2}{M^2}\right) E$ (при рассмотрении всех возможных углов распада), что составляет $0,43E$ для распадов $\pi \rightarrow \mu\nu$ и $0,96E$ для распадов $K \rightarrow \mu\nu$. Импульс мюона колеблется от $0,57E$ до E при распадах $\pi \rightarrow \mu\nu$ и от $0,04E$ до E при распадах $K \rightarrow \mu\nu$. Преобразования углов дочерних частиц можно получить из уравнений 4 and 5, то есть $p_T = p \sin \theta$, $p'_T = p' \sin \theta'$, $p'_z = p' \cos \theta'$, and $p_z = p \cos \theta$:

$$\gamma \tan \theta = \frac{\sin \theta'}{\cos \theta' + (\beta/\beta')} \quad (7)$$

В рамках СЦМ p' лежит на окружности, в то время как в лаборатории

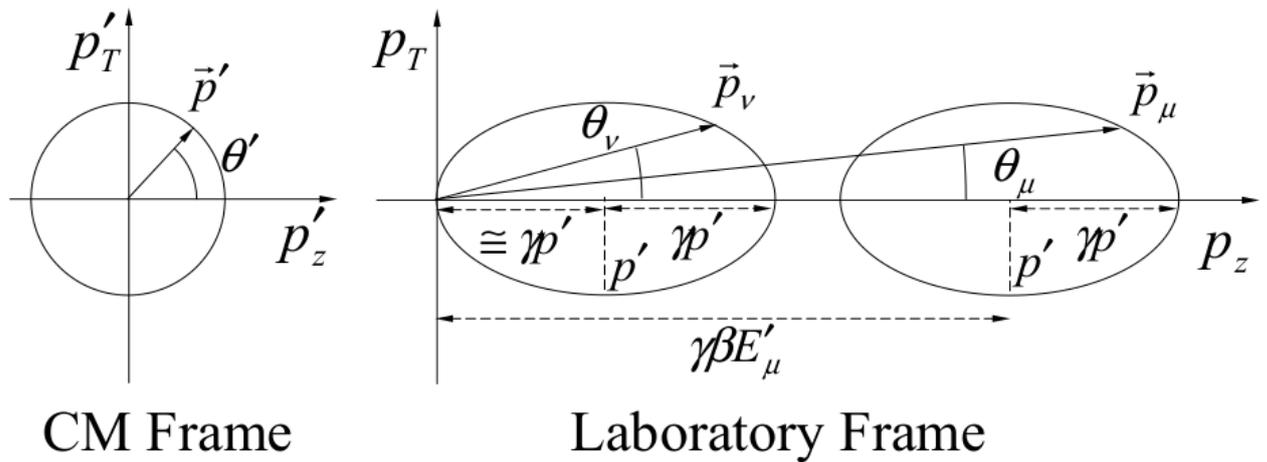


Рисунок 2 — Преобразование Лоренца 3-мерного импульсного p' из системы СЦМ в ЛСО.

требуется, чтобы он лежал на эллипсе. Для $\beta \approx 1$ родительской частицы, как показано выше, эллипс нейтрино приблизительно равен касательной к оси p_T , а эллипс мюона смещен вправо.

2 Описание экспериментальной установки

Для проведения тестового моделирования была написана программа, описывающая следующую установку:

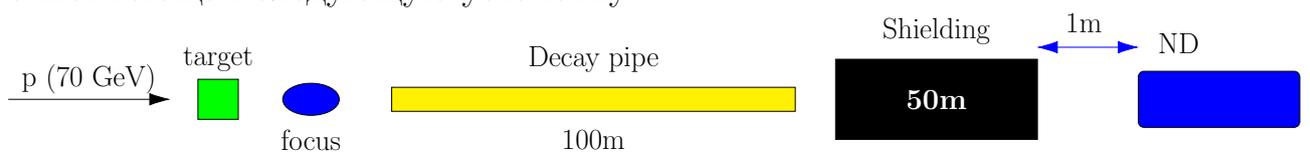


Рисунок 3 — Схема модулируемой установки

Как можно наблюдать на рисунке 3, существует 6 основных частей, с приведенными параметрами для удобства измерений:

- ParticleGun - генератор частиц, находящийся в начале координат, из которого вылетает пучок протон с энергией 70 ГэВ;
- Target - медная цилиндрическая мишень, на которую налетает пучок протонов, с длиной 50 см и радиусом 0.25 мм;

- focus - фокусирующая установка;
- Decay Pipe - вакуумная трубка в которой летит сгенерированная частица, длиной 100 м и радиусом 1 м;
- Shielding - бетонный слой, длиной 50 м;
- ND - детектор, для регистрации нейтрино, радиусом 1 м, и длиной 1 м, отстоящий на 1 метр от Shielding слоя;

3 Построение модели

Поскольку целью данной исследовательской работы было изучение образования, а также спектров нейтрино, то на практике, было реализовано две модели установки³, за счет исключения фокусирующей установки.

1. Модель 1 включает вылет пучка π^\pm и K^\pm мезонов с энергией в диапазоне 10-15 ГэВ, и образование нейтрино;
2. Модель 2 состоит из протона с энергией 70 ГэВ налетающего на мишень из меди, с образованием пучков частиц из Модели 1;

3.1 Модель 1

Целью данной модели является, построение энергетических спектров и угловых распределений нейтрино, как ν_μ так и ν_e . Данная модель состоит из:

- Particle Gun - источник π^\pm и K^\pm мезонов с энергией в диапазоне 10-15 ГэВ вылетающих вдоль оси z;
- Decay Tube - вакуумная трубка в которой летит сгенерированный пучок, длиной 100 м и радиусом 1 м;
- Muon Filter - бетонный слой длиной 50 м используется для фильтрации, нераспавшихся π^\pm и K^\pm мезонов, а также мюонов;

- Neutrino Detector - детектор, для регистрации нейтрино, радиусом 1 м, и длиной 1 м, отстоящий на 1 метр от Muon Filter слоя;

Графическое представление данной модели, приведено на рисунках 4 и 5.

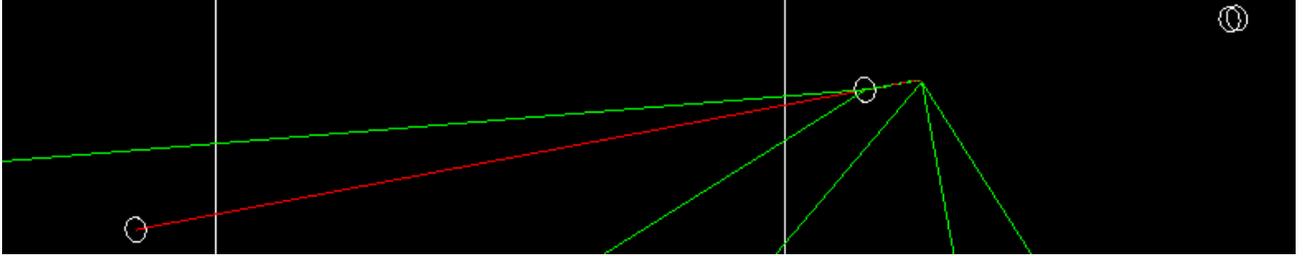


Рисунок 4 — Пи-мезон в отсутствии распада в камере распада

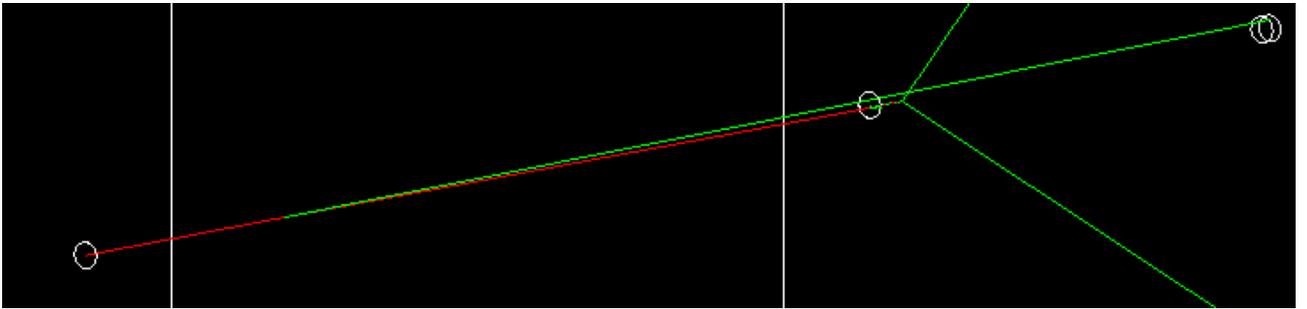


Рисунок 5 — Пи-мезон при распаде в камере распада

3.2 Модель 2

Целью построения данной модели, является изучение образования пучков π^\pm и K^\pm мезонов. Поскольку вылет продуктов распада является функцией $d^2N/dpd\Omega$, то в нейтринных экспериментах требуется информация об импульсе и угле вылета продуктов взаимодействия протона с областью мишени, как для дальнейшей фокусировки, так и для получения значений продуктов. Модель 2 состоит из:

- Particle Gun - источник протонов(p) с энергией равной 70 ГэВ вылетающих вдоль оси z;
- Target - медная цилиндрическая мишень, на которую налетает пучок протонов, с длиной 50 см и радиусом 0.25 мм;

Стоит отметить, что реализация медной мишени реализуется с помощью метода slices, который разбивает цилиндрическую область на отрезки длиной

1 мм для оптимизации программы за счет вычета частиц с длиной пробега меньше 1 мм. Графическое представление данной модели, приведено на рисунке 6

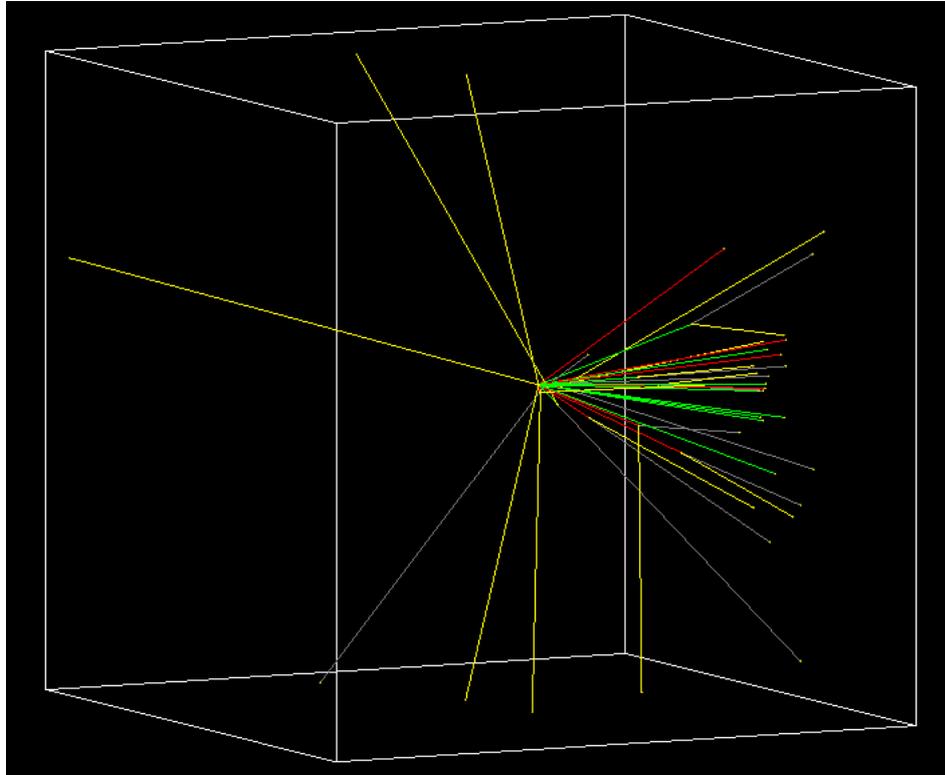


Рисунок 6 — Схема модулируемой установки на одном прогоне

Здесь π^+ , π^- , K^+ , K^- указаны зелёным, красным, розовым и синим цветами, соответственно. Все виды нейтрино (ν_μ , $\bar{\nu}_\mu$, ν_e , $\bar{\nu}_e$) указаны желтым цветом, а все остальные частицы серым цветом. Также, следует указать на наличие в исходной установке фокусирующего магнита расположенного после мишени, который в данной модели не реализован.

4 Результаты моделирования

4.1 Модель распада пучка

Исходя из табличных значений, масса и время жизни для пи-мезона(π^+), составляет:

$$\text{Mass } m = 139.57018 \pm 0.00035 \text{ MeV};$$

$$\text{Lifetime } \tau = 2.6033 \pm 0.0005 \times 10^{-8} \text{ s};$$

$$\text{Схема распада для } \pi^+: \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

Для К-мезона(K^+):

$$\text{Mass } m = 493.677 \pm 0.005 \text{ MeV};$$

$$\text{Lifetime } \tau = 1.2380 \pm 0.0020 \times 10^{-8} \text{ s};$$

$$\text{Из всех возможных распадов } K^+, 63\% \text{ составляет: } K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu.$$

В результате прогонки первой модели на пучке из 10^7 частиц, были получены спектры двух типов:

1. При исходной энергии пучка 10 ГэВ;
2. При исходной энергии пучка с случайной величиной в диапазоне от 10 до 15 ГэВ;

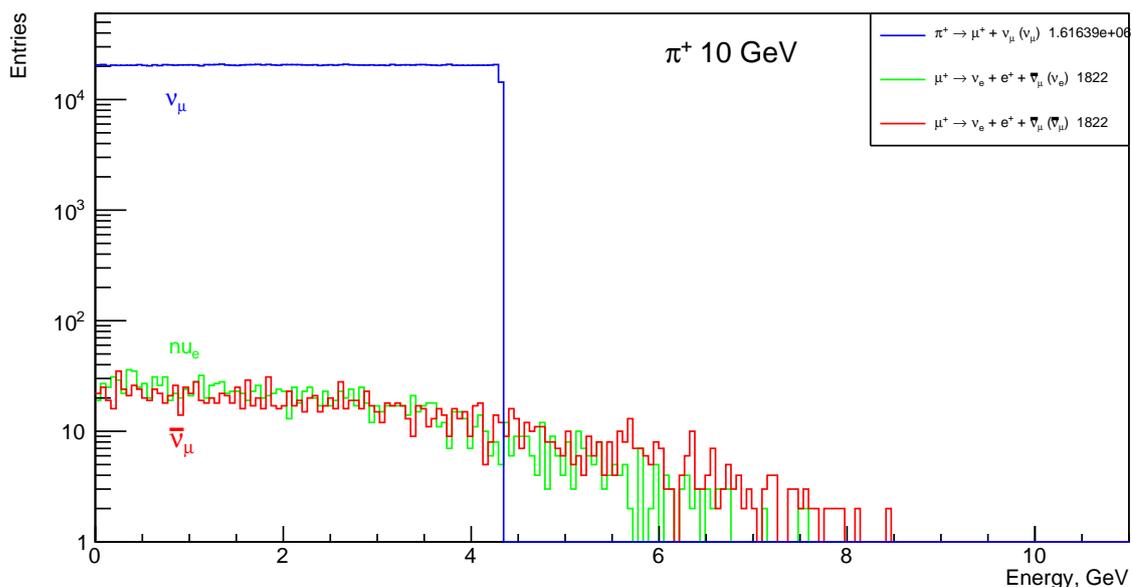
Следует отметить, что в случае двухчастичного распада с безмассовым продуктом, выражение для максимальной энергии(в данном случае нейтрино) имеет следующий вид:

$$E_\nu = \frac{m_{\pi(K)}^2 + m_\nu^2 - m_\mu^2}{2(E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)} \cos\theta)} \quad (8)$$

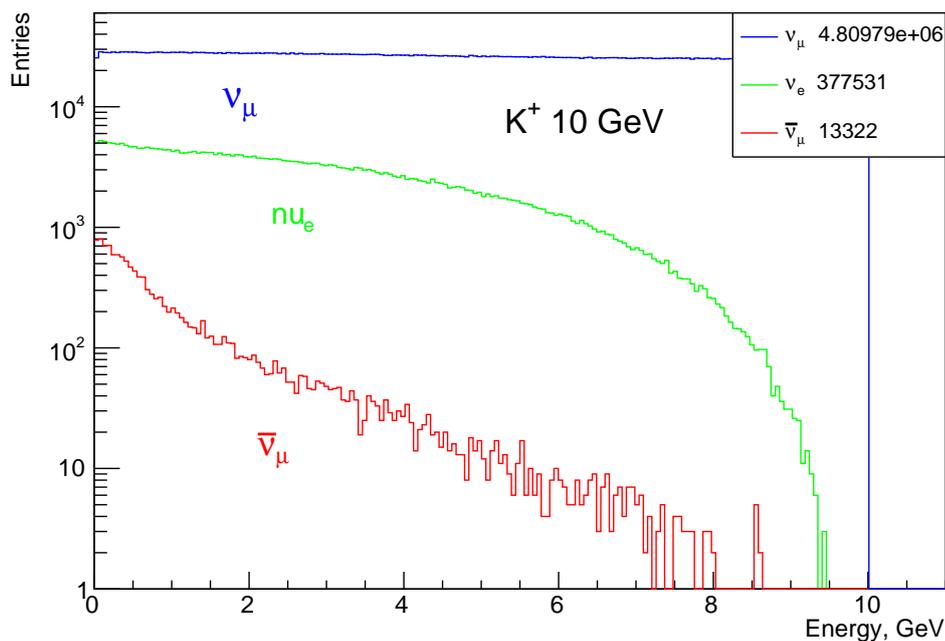
Пренебрегая массой m_ν^2 и принимая $\cos\theta = 1$, получаем:

$$E_\nu = \frac{m_{\pi(K)}^2 - m_\mu^2}{2(E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)})} \quad (9)$$

Примем $E_{\pi(K)} - p_{\pi(K)} = \frac{m^2}{2E}$ и получим выражения для максимальной энергии π и K мезонов.



(a)

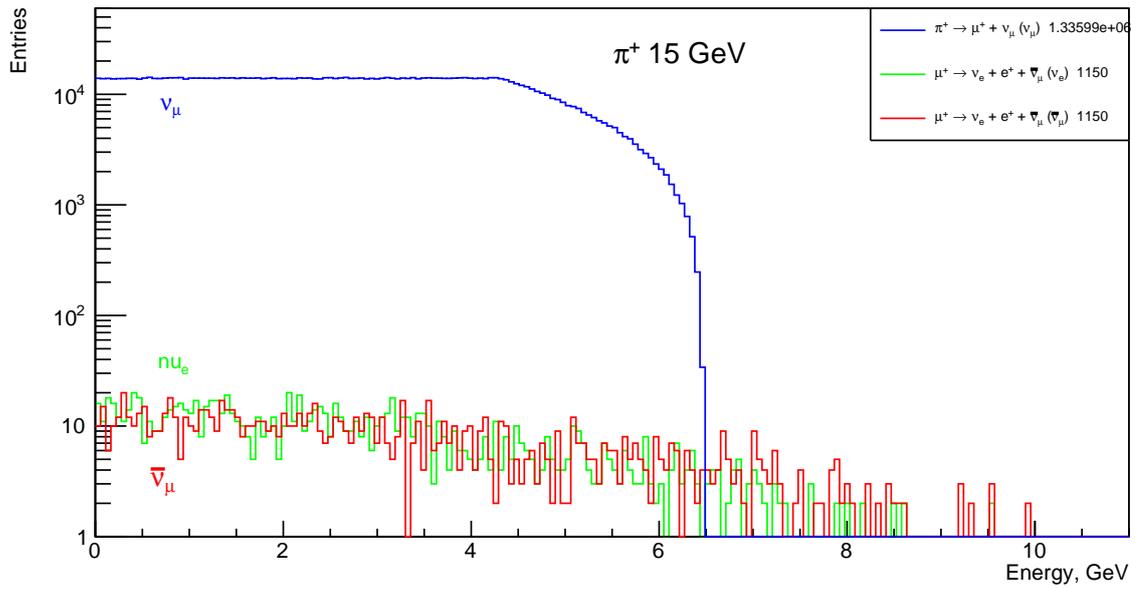


(b)

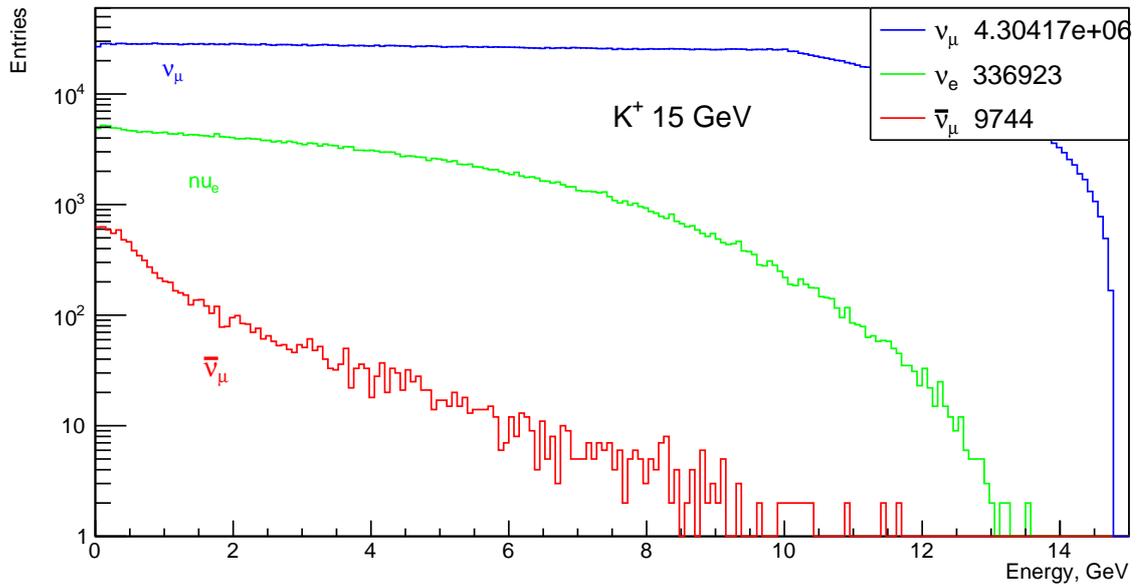
Рисунок 7 — Спектры нейтрино, образовавшихся в результате распада Пи-мезона(π^+)(a), К-мезона(K^+)(b) с исходной энергией 10 ГэВ

На рисунке 7(a) можно наблюдать обрыв энергии ν_μ в области ≈ 4.3 ГэВ, что является предельной из формулы (9). Такой же обрыв можно наблюдать при исходной энергии варьирующейся в диапазоне 10-15 ГэВ(а), при

значении ≈ 6.5 ГэВ.

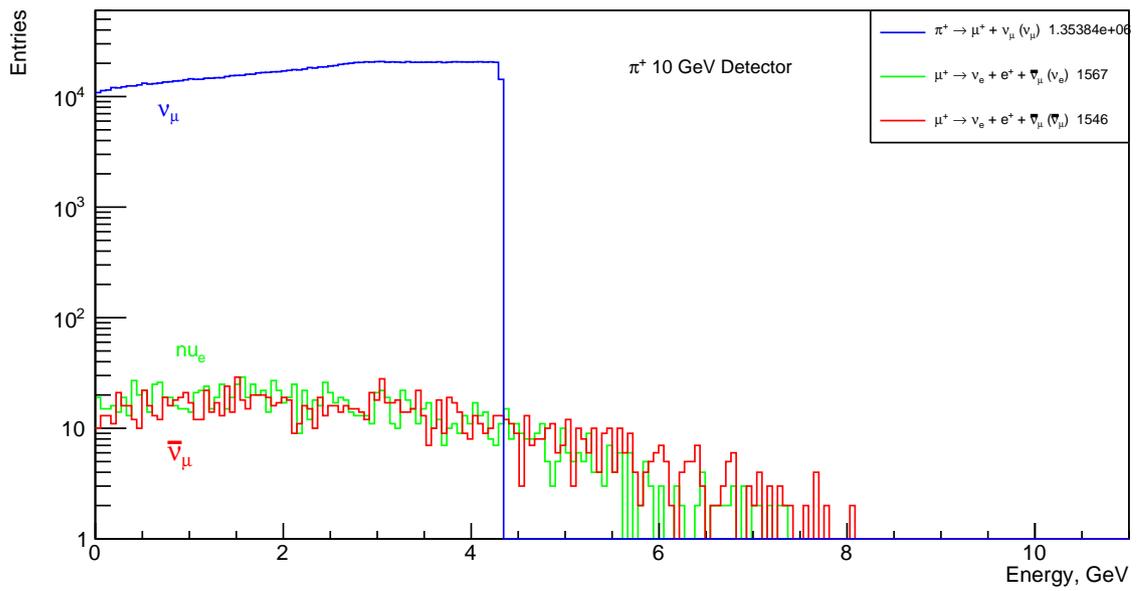


(a)

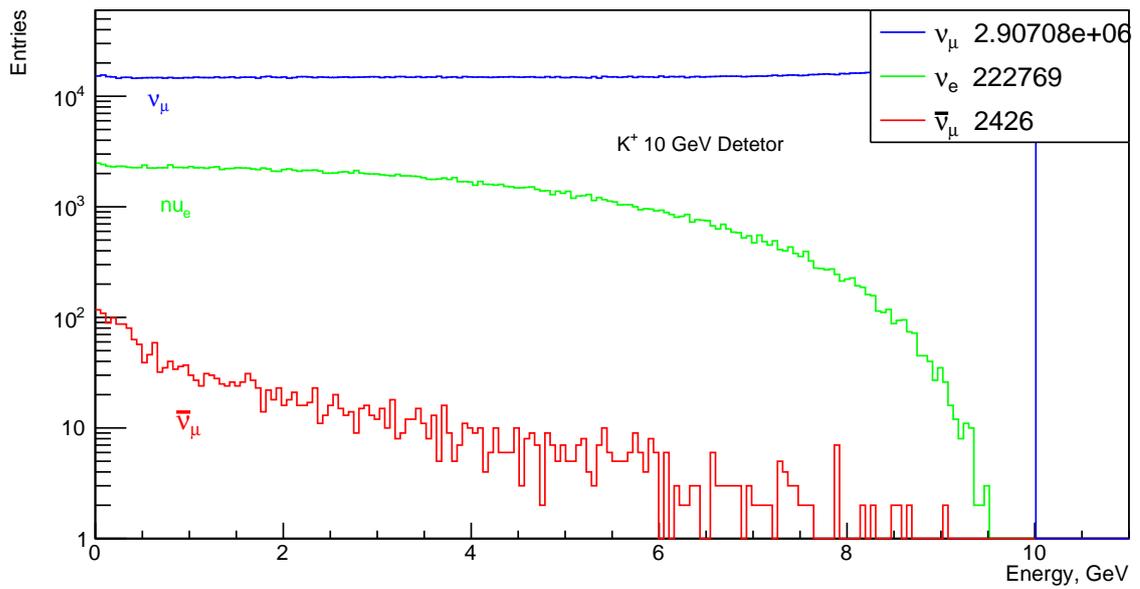


(b)

Рисунок 8 — Спектры нейтрино, образовавшихся в результате распада Пи-мезона(π^+)(a), К-мезона(K^+)(b) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ

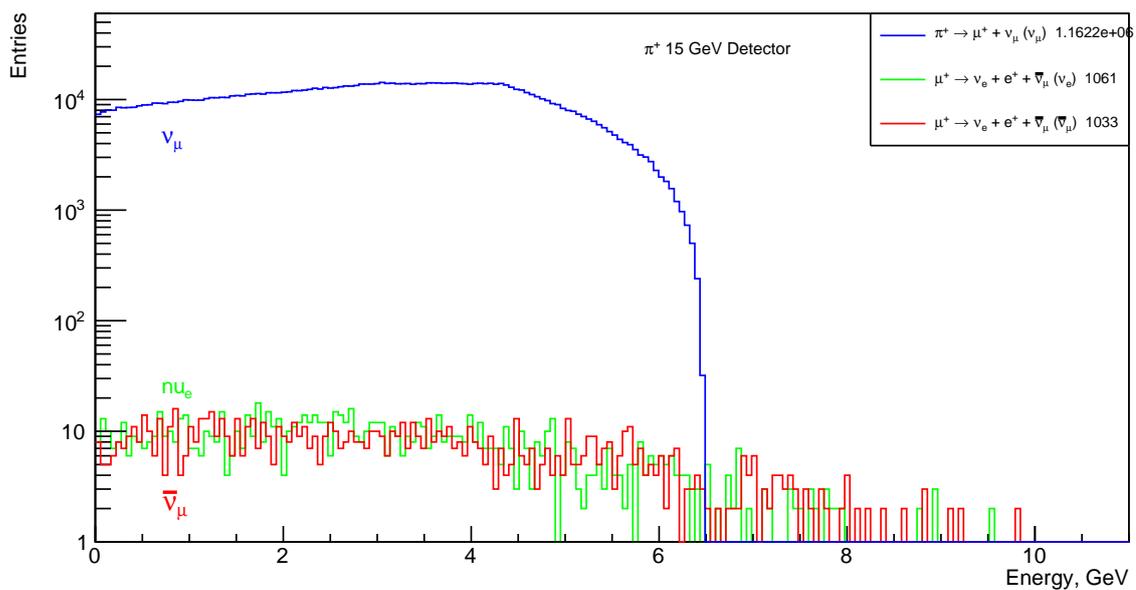


(a)

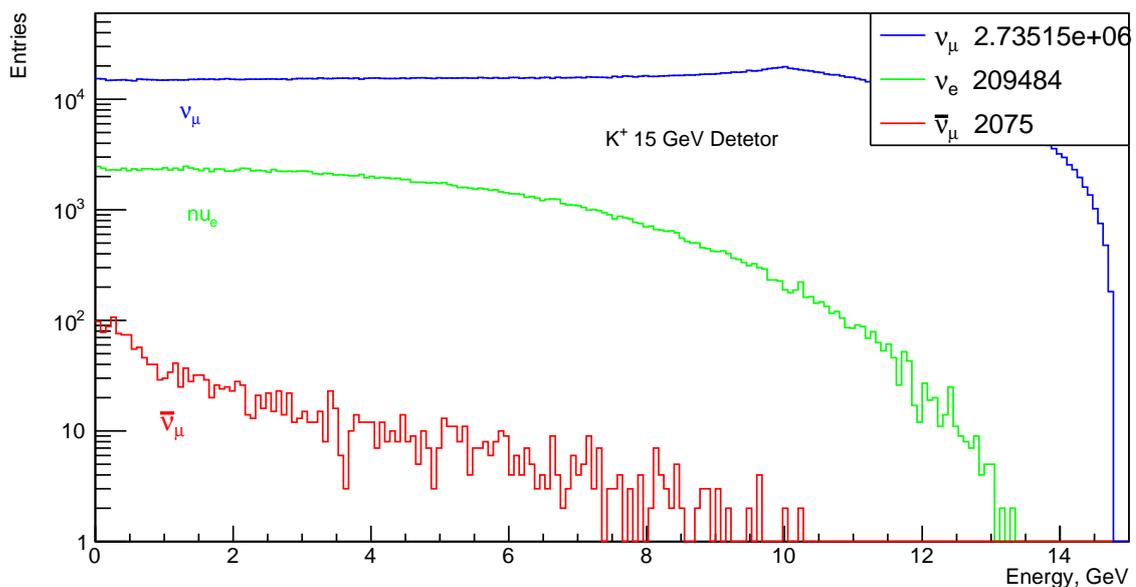


(b)

Рисунок 9 — Спектры нейтрино попавших в область детектора и образовавшихся в результате распада Пи-мезона(π^+)(a), К-мезона(K^+)(b) с исходной энергией 10 ГэВ



(a)



(b)

Рисунок 10 — Спектры нейтрино попавших в область детектора и образовавшихся в результате распада Пи-мезона(π^+)(a), К-мезона(K^+)(b) с исходной энергией от 10 до 15 ГэВ

Также, для К-мезона(K^+) предельной энергией вычисленной из формулы (9) являются, значения ≈ 9.8 ГэВ 7(a) и ≈ 14.8 ГэВ 7(a).

4.2 Модель образования пучка

В данной модели рассматривается прогонка протонов с пучком из 10^5 частиц, с исходной энергией в 70 ГэВ. Среднее число образовавшихся частиц на один протон, в результате взаимодействия протона с областью мишени показан на рисунке 11. На один протон в среднем приходится $15 \pi^\pm$ и $1.3 K^\pm$ мезона. Необходимо учесть, что в итоговом спектре нужно взять в расчёт, исключительно частицы вылетевшие за область мишени. На графике 12 можно наблюдать пики плотностей распределения π^+ и π^- мезонов в диапазоне 5-20 ГэВ и близком к нулю угле разлета.

```

=====
Beam particle                proton
Beam Energy(MeV)            70000
Number of events             1000
Average energy deposit (MeV) 3034   RMS(MeV) 2126
Average number of steps      5868
Average number of gamma      911.5
Average number of e-         648.9
Average number of e+         78.65
Average number of neutrons   31.16
Average number of protons    21.32
Average number of antiprotons 0.045
Average number of pi+ & pi- 15.21
Average number of pi0        8.579
Average number of kaons      1.396
Average number of muons      0.079
Average number of deuterons+tritons 8.129
Average number of He3+alpha  2.769
Average number of ions       6.479
Average number of forward neutrons 0.069
Average number of reflected neutrons 29.68
Average number of leaked neutrons 0.078
Average number of proton leak 9.442
Average number of pion leak  13.16
=====

```

Рисунок 11 — Среднее число образовавшихся частиц в результате взаимодействия

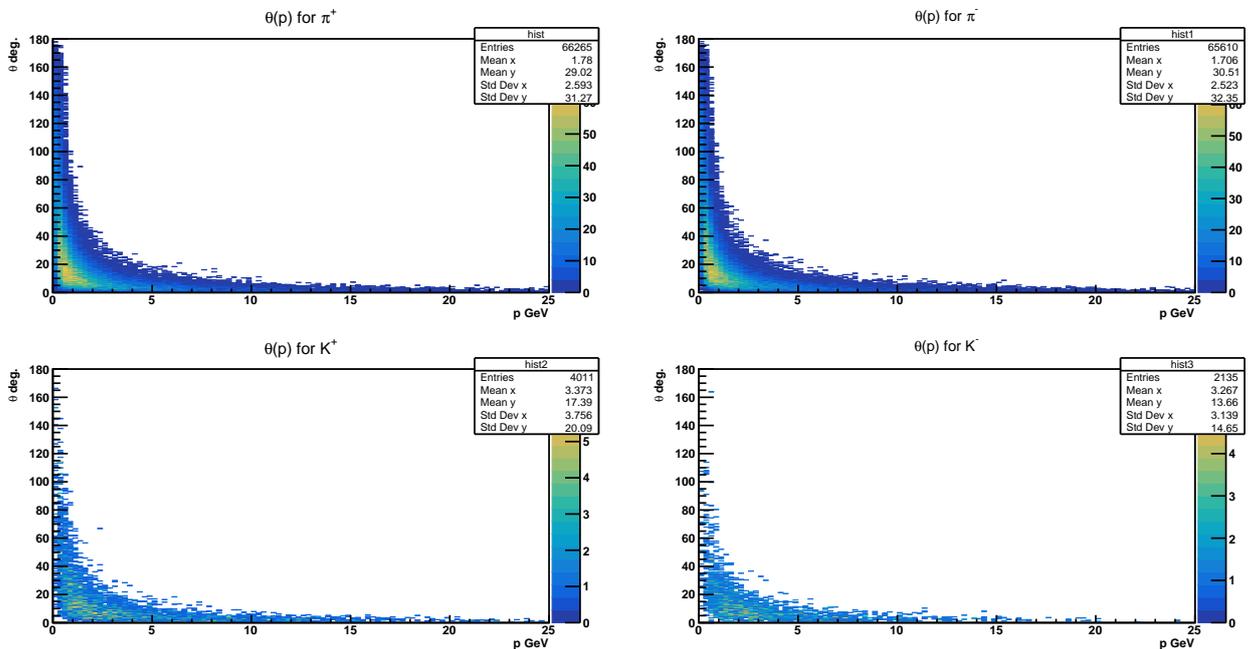


Рисунок 12 — Графики распределения импульса от угла разлета вылетевших π^\pm и K^\pm мезонов

5 Заключение

В рамках данной работы с помощью пакета программ для моделирования образования пучков частиц GEANT4 были построены две модели:

1. Модель 1 включающая вылет пучка π^\pm и K^\pm мезонов с энергией в диапазоне 10-15 ГэВ, и образование нейтрино;
2. Модель 2 состоящая из протона с энергией 70 ГэВ налетающего на мишень из меди, с образованием пучков частиц из Модели 1;

Была изучена кинематика процесса, также были получены спектры и угловые распределения нейтрино, для различных диапазонов энергий. В дальнейшем планируется построить и исследовать модель включающую магнитную фокусировку образовавшегося пучка, а также изучение меченных нейтрино.

6 Список литературы

1. Документация GEANT4: <https://apc.u-paris.fr/~franco/g4doxy/html/>
2. Примеры GEANT4: <https://gitlab.cern.ch/geant4/geant4/-/tree/master/examples>
3. Mathieu Perrin-Terrin. Neutrino Tagging: a new tool for accelerator based neutrino. - Eur. Phys. J. C manuscript No 23.12.2021
4. P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020) <https://pdg.lbl.gov/2020/listings/rpp2020-list-K-plus-minus.pdf>
5. K.A.Olive et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014) and 2015 update <https://pdg.lbl.gov/2015/tables/rpp2015-tab-mesons-light.pdf>