

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 77 с., 22 рис., 14 табл., 21 источник.

Ключевые слова: ФИЗИКА ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, КАЛОРИМЕТР, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ЛОРЕНЦА, МЕЗОНЫ, ГАМА-КВАНТЫ, РЕАКЦИЯ ПЕРЕЗАРЯДКИ.

Объектом исследования является распад нейтральных мезонов в два гамма-кванта.

Цель работы –Произвести моделирование процессов распада мезонов в два γ -кванта для отыскания оптимальных геометрических параметров в эксперименте по поиску невидимых распадов нейтральных мезонов.

В процессе исследования проводилась разработка программного кода в пакете ROOT и исследование реакции перезарядки отрицательного пиона.

В результате исследования получены распределения углов разлета гамма-квантов при распаде нейтральных мезонов.

Степень внедрения высокая, проект может использоваться в настоящее время и при продолжении дальнейших исследований.

Область применения: физика высоких энергий.

В будущем планируется разработка программного кода в пакете GEANT4 для полного моделирования эксперимента и сравнения результатов с экспериментальными данными.

Выпускная квалификационная работа выполнена с помощью текстового редактора Microsoft Office Word 2007, графики и диаграммы построены в Wolfram Mathematica 9, ROOT CERN.

Оглавление

РЕФЕРАТ	1
ВВЕДЕНИЕ	3
1. Литературный обзор	5
1.1 Эксперимент E949	5
1.2 Эксперимент BESIII	6
1.3 Эксперимент NA64 в CERN	8
1.3.1 Протонный суперсинхротрон	8
1.3.2 Детектирующая система	9
1.3.3 Электромагнитный калориметр	11
1.3.4 HSCAL	12
1.3.5 Методика проведения эксперимента	13
2 Практическая часть	15
2.1 Моделирование распадов π^0, η, η' мезонов в два γ -кванта	15
2.2 Моделирование реакции перезарядки	20
Заключение	24
Список использованных источников	27

ВВЕДЕНИЕ

В Стандартной модели, которая с большим успехом описывает мир элементарных частиц, нейтрино предполагались безмассовыми частицами. Это связано с тем, что их спиральность всегда отрицательная (-1) в слабых взаимодействиях. Поэтому распады π^0, η, η' мезонов в нейтрино-антинейтрино запрещены законом сохранения углового момента в случае безмассовых нейтрино.

Однако результаты экспериментов по нейтринным осцилляциям [1,2] предоставляют существенные доказательства наличия масс у нейтрино, что согласовывается с существованием положительной спиральности у нейтрино. Это объясняется тем, что частицы с конечной массой движутся медленнее скорости света и переверт спиральности возможен, когда частица обгоняет центр масс. Определение вероятности распадов в невидимые конечные состояния псевдо(скалярных) мезонов, таких как π^0, η, η' непосредственно связано с определением масс и типа нейтрино (Майорановская или Дирака). Вероятность таких распадов пропорциональна квадрату массы нейтрино и по теоретическим и космологическим оценкам равна [3]:

$$Br(M^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}) \sim \left(\frac{m_\nu}{m_{M^0}}\right)^2 \lesssim 10^{-16}$$

Эксперимент NA64, расположенный в ЦЕРНе, основной целью которого является поиск темного фотона, имеет дополнительную задачу по уточнению вероятностей распадов π^0, η, η' в экспериментально невидимое конечное состояние. Для проведения такого эксперимента требуется проверить возможность регистрации основного канала распада – в два гамма-кванта.

В первой главе работы представлено описание экспериментальной установки и методики поиска интересующих реакций. Рассмотрены схожие эксперименты, проводимые ранее, и указаны полученные результаты

Во второй главе представлены результаты моделирования распадов нейтральных мезонов в два гамма-кванта. Также произведено моделирование реакции перезарядки отрицательного пиона на водородной мишени по известным экспериментальным данным с целью определения вклада в угол рассеяния конечных продуктов распада нейтральных мезонов.

Цель работы: Произвести моделирование процессов распада мезонов в два γ -кванта для отыскания оптимальных геометрических параметров в эксперименте по поиску невидимых распадов нейтральных мезонов. Для выполнения сформулированной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести обзор и анализ литературы по данной тематике;
- провести моделирование распада мезонов в два гамма-кванта для определения возможности проведения эксперимента;
- провести моделирование реакции перезарядки для оценки вклада в угол рассеяния нейтрального мезона;
- сделать соответствующие выводы и заключение;

1. Литературный обзор

1.1 Эксперимент E949

В эксперименте протоны, ускоренные до 21,5 ГэВ/с на синхротроне AGS Брукхейвенской национальной лаборатории (BNL), ударяются в шести сантиметровую платиновую мишень, производя пучок K^+ мезонов.

Схема экспериментальной установки E949 представлена на рис. 1

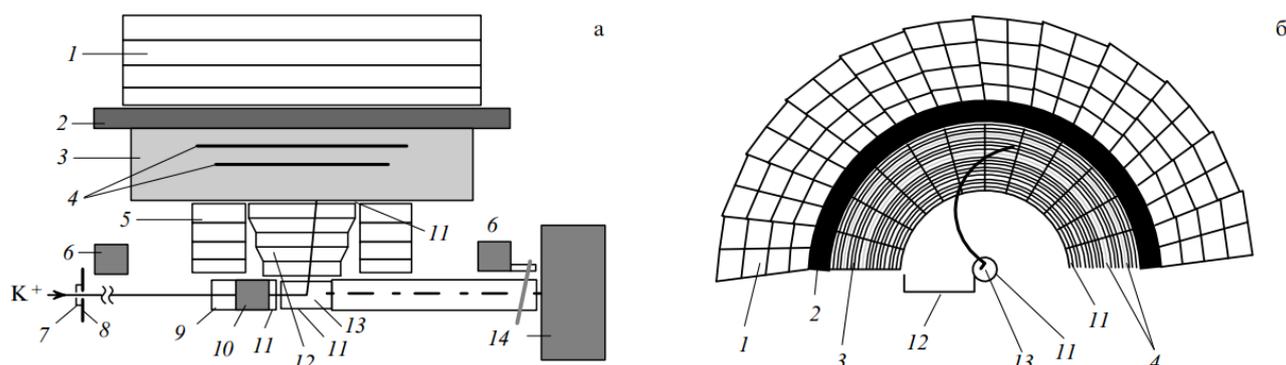


Рисунок 1 – Экспериментальная установка BNL E949: (а) вид сбоку, (б) вид сзади [4].

Эта установка является модернизированным вариантом установки BNL E787 и отличается от нее усиленной охранной системой и усовершенствованными триггерными системами и системой сбора данных. На рисунке показаны верхние половины установки. K^+ - пучок сепарированных каонов; 1 – боковая охранная система из многосекционных калориметров и сцинтилляционных счетчиков, прослоенных свинцом; 2, 6 – дополнительные детекторы охранной системы; 3 – пробежные сцинтилляционные счетчики; 4 – дрейфовые трубки; 5 – торцевая охранная система из спектрометров CsI; 7 – черенковский счетчик для идентификации K^+ -мезонов; 8 – передняя охранная система; 9 – замедлитель пучковых каонов из BeO; 10 – активный замедлитель каонов; 11 – сцинтилляционные счетчики; 12 – дрейфовая камера магнитного спектрометра; 13 – активная мишень из сцинтилляционных фиберных счетчиков; 14 – задняя охранная система.

Охранная система имеет практически 4π -геометрию и эффективно подавляет фон от фотонов и заряженных частиц. Измерение импульса и пробега π^+ -мезона в магнитном спектрометре и пробегных счетчиках позволяет идентифицировать π^+ -мезоны в рабочем диапазоне.

В распаде $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ для останавливающихся каонов «мечение» π^0 -мезона осуществлялось при регистрации π^+ -мезона с импульсом 205 МэВ/с. Для выделения распада $\pi^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$ требовалось, чтобы $K^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$ не сопровождался никакими другими сигналами в детекторе [5].

Несмотря на очень эффективную охранную систему установки E949, достигнутый предел для вероятности распада определяется фоном от незарегистрированных фотонов из распада $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$. Число фоновых событий составляло около 10^2 , что снижало чувствительность опытов по поискам распада $\pi^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$ на два порядка. Причина остаточной неэффективности охранной системы объяснялась флуктуациями развития фотонных ливней при энергии 20МэВ и фотоядерными реакциями с образованием нейтронов (т.е. недетектируемых частиц в охранной системе). Полученный верхний предел для вероятности $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ распада:

$$Br(\pi^0 \rightarrow invisible) < 2,7 * 10^{-7}$$

1.2 Эксперимент BESIII

Для выявления невидимых распадов η, η' мезонов использовались реакции: $J/\psi \rightarrow \phi\eta(\phi\eta')$, собранные на Пекинском электрон-позитронном коллайдре. В этом распаде ϕ кандидаты могут быть легко восстановлены по их распаду в K^+K^- . Восстановленные ϕ частицы были использованы для мечения η, η' -мезонов, что позволяет искать их невидимые распады. В дополнение, ϕ и η, η' получают сильный буст при распаде J/ψ , таким образом, направления распадов η, η' хорошо определены в лабораторной системе координат и продукты распада могут быть эффективно зарегистрированы в детекторе [6].

Требуется, чтобы события $\eta, \eta' \rightarrow invisible$ не имели заряженных треков, за исключением ливней от $\phi \rightarrow K^+ K^-$. В дополнение, число электромагнитных ливней от K_L или фотона требуется для определения эффективности каналов и изучения фона.

Многослойная дрейфовая камера (MDC) и времяпролетная система (TOF) используется для идентификации каонов. Электромагнитные ливни регистрируются в сцинтилляционном калориметре EMC (Рис. 2).

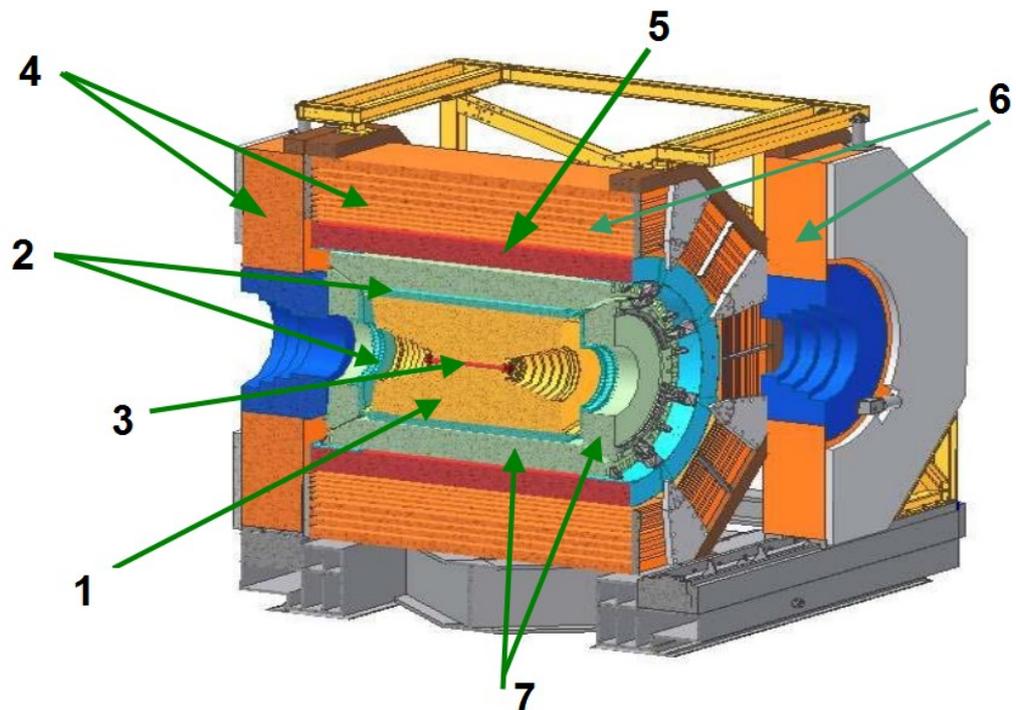


Рисунок 2 - Детектор BESIII. 1 – многослойная дрейфовая камера; 2 – времяпролетная система; 3 – пучок частиц; 4 – идентификатор мюонов; 5 – сверхпроводящий магнит; 6 – резистивный счетчик; 7 – CsI(Tl) калориметр.

Наличие невидимого распада $\eta, \eta' \rightarrow invisible$ определялось по отсутствию электромагнитных ливней в детекторе, за исключением ливней от $\phi \rightarrow K^+ K^-$. Полученные верхние пределы вероятности распадов:

$$Br(\eta \rightarrow invisible) < 1,0 * 10^{-4}$$

$$Br(\eta' \rightarrow invisible) < 5,2 * 10^{-4}$$

Вероятности $Br(\eta(\eta') \rightarrow \gamma\gamma)$ также определены в распаде $J/\psi \rightarrow \phi\eta(\phi\eta')$ для определения отношения $Br(\eta(\eta') \rightarrow invisible)$ к $Br(\eta(\eta') \rightarrow \gamma\gamma)$

$\gamma\gamma$). Польза в измерении $\frac{Br(\eta(\eta') \rightarrow invisible)}{Br(\eta(\eta') \rightarrow \gamma\gamma)}$ заключается в неопределенностях в полном значении J/ψ событий, эффективности регистрации и количестве заряженных треков [6].

1.3 Эксперимент NA64 в CERN

NA64 – эксперимент на фиксированной мишени, расположенный на одном из вторичных пучков протонного суперсинхротрона (SPS) в ЦЕРНе и комбинирующий техники активного сброса пучка и недостающей энергии для поиска редких событий. В эксперименте используется полностью герметичный детектор, основной целью которого является поиск легких темных бозонов (Z'). Также планируется поиск невидимых распадов π^0, η, η' мезонов. В рамках данной работы будет рассматриваться только дополнительная задача эксперимента.

1.3.1 Протонный суперсинхротрон

Протонный суперсинхротрон (SPS) – кольцевой ускоритель частиц ЦЕРН с длиной кольца 6,9 км, который используется в качестве заключительного предускорителя протонных пучков для Большого адронного коллайдера. Суперсинхротрон также позволяет вести и другие научные программы, в которых он используется как источник протонов с энергией до 400 ГэВ. Среди них преобладают эксперименты с фиксированной мишенью, например COMPASS, SHINE и NA64, расположенные в северной зоне (Рис. 3).

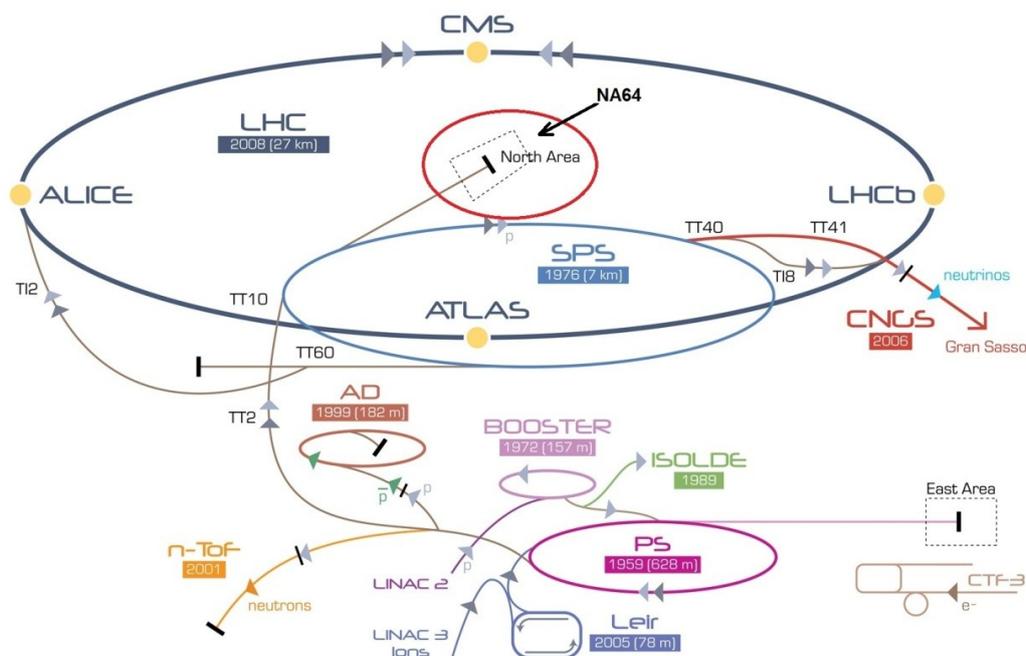


Рисунок 3 - Ускорительный комплекс CERN

Эксперимент использует адронный пучок (H4), который производится на мишени T2 SPS с энергиями 10-400 ГэВ . Характерная интенсивность пучка при 50-100 ГэВ составляет порядка $10^7 \pi^\pm$ и $10^6 K^\pm$ для одного промежутка с 10^{12} протонов. Операции на фиксированной мишени длятся 14,8 секунд, продолжительность промежутка – 4,8 секунд. Максимальное число циклов – 4 в минуту. Пучок имеет высокую чистоту: примеси других заряженных частиц меньше 10^{-2} . Пучок может быть сфокусирован в пятно, размерами порядка нескольких $см^2$ [7].

1.3.2. Детектирующая система

Схема детектирующей системы, которая будет использована для проведения эксперимента представлена на рис. 1.4.

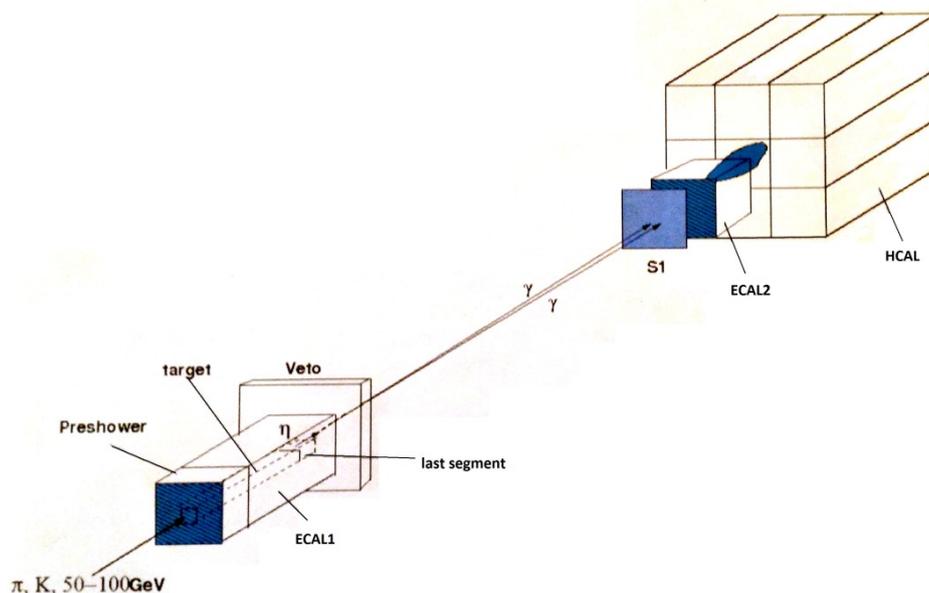


Рисунок 4 - Схема детекторной установки

Составные части детекторной системы и их назначение представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Составные части детекторной системы [8]

Части	Дизайн	Назначение
Электромагнитные калориметры ECAL1 и ECAL2	сэндвич (3,5 мм W + 3 мм сцинтиллятор) x 30 слоев	измерения энергии и профиля пучка
Адронный калориметр HCAL	сэндвич (16мм Pb + 3 мм сцинтиллятор) x 60 слоев, 4 модуля	детектирование π , p, n
Годоскоп S1	сцинтиллятор 1 мм	детектирование e^-e^+ пар и треков
Вето-счетчик VETO	пластиковый сцинтиллятор	детектирование низкоэнергетических заряженных частиц

1.3.3 Электромагнитный калориметр

Электромагнитный калориметр ECAL гетерогенный, типа "шашлык". В нем перемежаются сцинтиляционные (1,5 мм) и вольфрамовые (2,5 мм) пластинки. Один модуль - это 6x6 стопок из 150 сцинтилятор-свинец слоев. В стопках есть отверстия, через которые проходят спектросмещающие волокна. Каждый из двух модулей оборудован предливневым детектором (PreShower), состоящим из 16 слоев сцинтилятор/вольфрам [8].

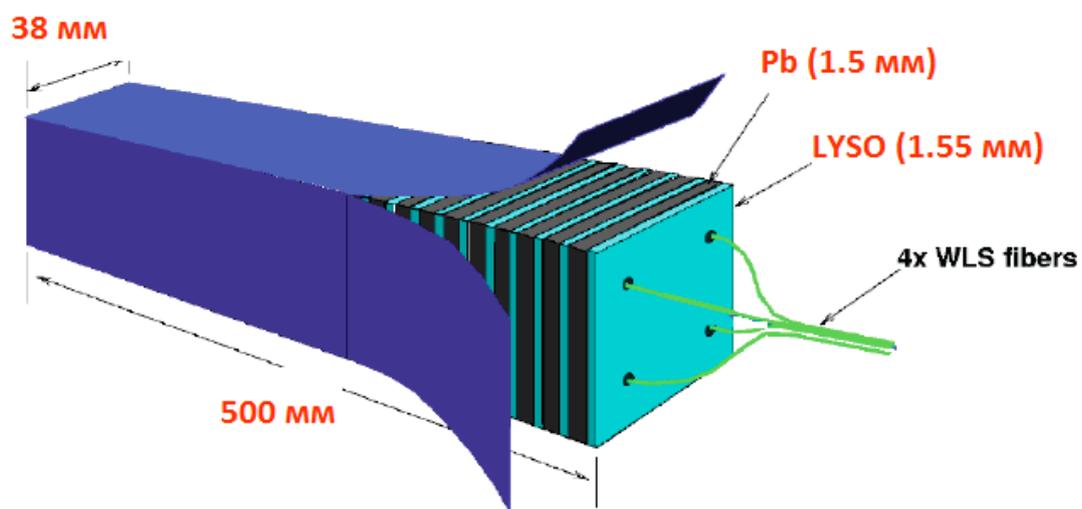


Рисунок 5 - Ячейка ECAL, выполненная по типу "шашлык"

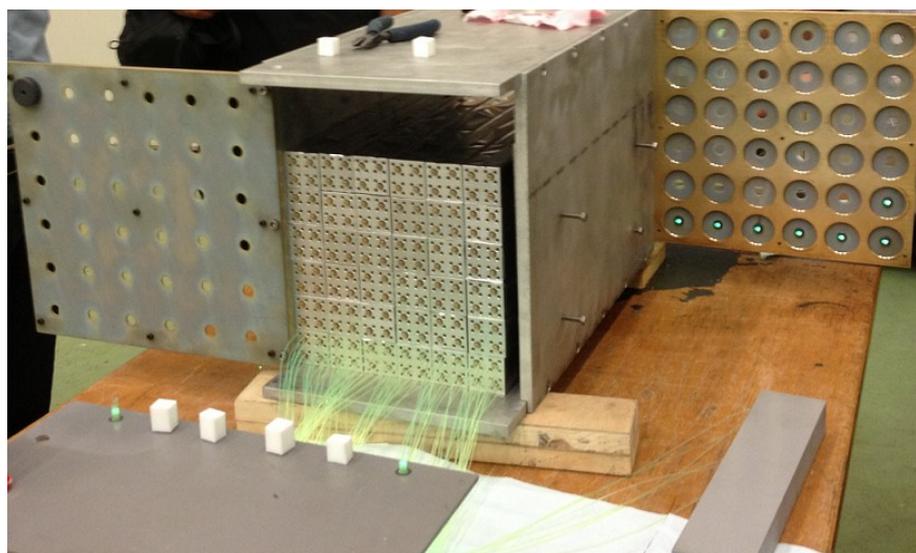


Рисунок 6 - Собранный модуль ECAL

1.3.4 HСAL

Адронный калориметр (НСАL) используется для повышения продольной герметичности чувствительного поиска невидимого распада. HСAL состоит из четырех модулей, которые состоят из 48 слоев свинца/сцинтиллятора толщиной 16 и 4 мм соответственно.

Таблица 2- Адронный калориметр (НСАL) [8]

Длина модуля	153,6 см
Поперечные размеры модуля	60x60 см ²
Количество модулей	4
Число слоев	48
Толщина свинца	16 мм
Толщина сцинтиллятора	4 мм
Размер ячейки	192x194 мм ²
Волновод	BCF91a, 1 мм диаметр
Считывание информации	ФЭУ-84-3



Рисунок 7 - Собранные модули HСAL

Каждый слой сцинтиллятора представляет из себя 9 пластинок. В каждой пластике имеется канавка, в которую помещается спектросмещающее волокно, подключаемое к ФЭУ [9]. Пластины обматываются майларовой фольгой и помещаются в коробку из стали толщиной 0,5 мм (Рис. 8).

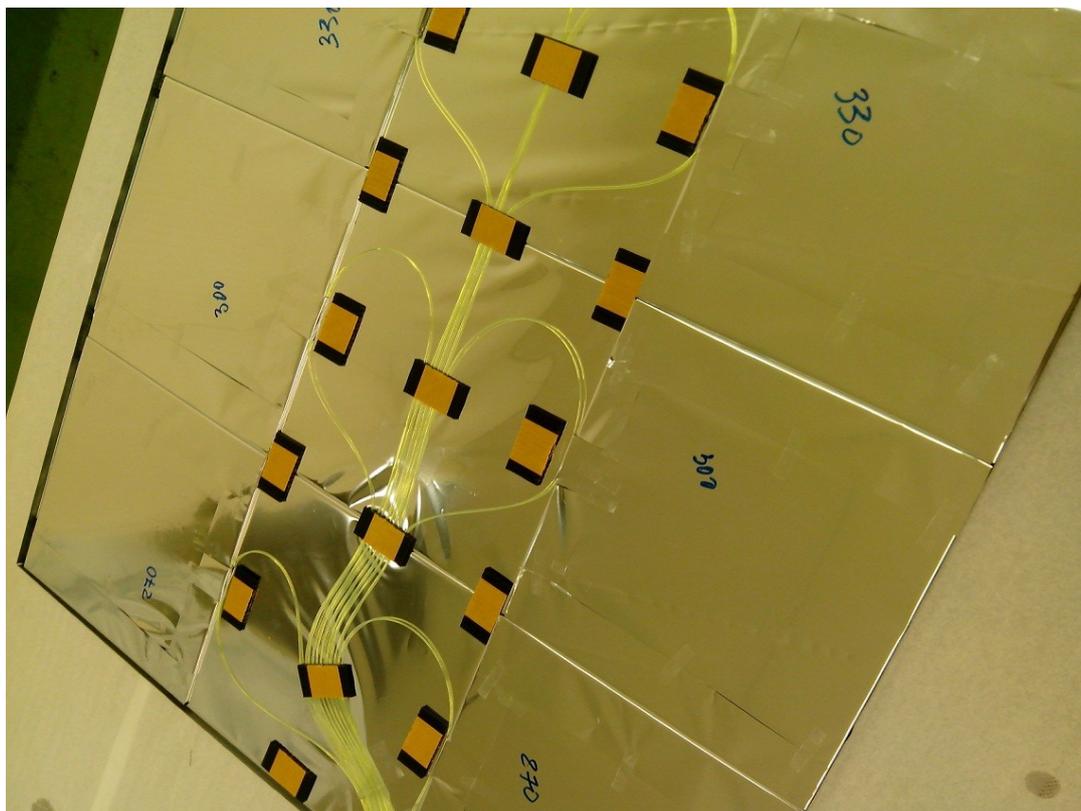
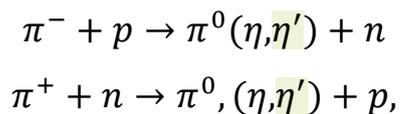


Рисунок 8 - Собранная коробка сцинтилляторов

1.3.5 Методика проведения эксперимента

Источник π^0 , η , η' мезонов – реакции перезарядки высокоэнергетических пионов на ядрах мишени:



где нейтральные мезоны в направлении импульса первичного пучка и уносят основную часть энергии. Мишень располагается в первом модуле электромагнитного калориметра ECAL1 и будет выполнена, предположительно, из водорода. Кандидатами на роль невидимого распада

будут считаться события, соответствующие полному отсутствию сигнала в ECAL2 и HCAL.

В случае обнаружения $M^0 \rightarrow invisible$ сигнала может быть использовано несколько методов сопоставления результата. Например, для проверки соответствия сигнала герметичности HCAL, измерения будут проводиться с разной толщиной HCAL, т.е. с одним, двумя, тремя, и четырьмя последовательными модулями HCAL. В этом случае ожидаемый уровень фона может быть получен экстраполированием результатов на бесконечную толщину ECAL. Расчет сигнала и фона может быть также определен из результатов измерений при различных энергиях пучка. Статистический предел эксперимента определяется, в основном, числом накопленных событий [10].

Выход π^0, η, η' мезонов в реакции перезарядки π^\pm на мишени определяется для оценки общего числа событий и определения вероятности невидимого распада. Для того, чтобы улучшить конечную идентификацию, используется электромагнитный калориметр, позволяющий восстанавливать два фотона из $\pi^0, \eta, \eta' \rightarrow \gamma\gamma$ распада. Выход π^0, η, η' мезонов может быть определен из невысоких фоновых пиков в спектре масс пары фотонов отнесенной к массам распавшихся мезонов.

Проведение подобного эксперимента может позволить уточнить существующие пределы вероятности невидимых распадов π^0, η, η' на несколько порядков. Такой результат может достигаться за счет высокой интенсивности пучка, эффективности вето-счетчиков, высокого уровня герметичности калориметров.

2 Практическая часть

2.1 Моделирование распадов π^0, η, η' мезонов в два γ -кванта

Проведение эксперимента по поиску невидимых распадов π^0, η, η' мезонов требует оценить возможность регистрации основного канала распада мезонов – в два γ -кванта. Для этого проведено предварительное моделирование возможных углов разлета γ -квантов с учетом заданной геометрии эксперимента при помощи пакета ROOT CERN.

Массы мезонов[11]:

$$m_{\pi^0} = 134,977 \text{ МэВ}/c^2$$

$$m_{\eta} = 547,853 \text{ МэВ}/c^2$$

$$m_{\eta'} = 957,66 \text{ МэВ}/c^2$$

Моделирование производилось для импульсов в 30 и 48 ГэВ/с.

Известно, что нейтральный мезон М в Ц-системе распадается на два γ -кванта, угол между которыми равен 180° (рис. 9). Необходимо получить изотропное распределение углов вылета γ -кванта и выделить события, которые могут быть зарегистрированы детектором.

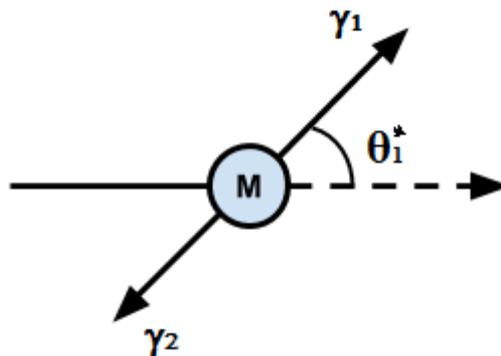


Рисунок 9 - Схема распада в Ц-системе

Для получения изотропного распределения, с помощью функции равномерного распределения генерировались косинус угла вылета одного γ -

кванта на интервале $[-1,1]$ в Ц-системе. Из полученных $\cos\theta_1^*$ находят θ_1^* и θ_2^* .

По полученным углам в Ц-системе, используя преобразования Лоренца, находят углы в лабораторной системе координат:

$$\theta_1 = \text{arctg} \frac{\sin\theta_1^*}{\gamma(\beta + \cos\theta_1^*)}$$

$$\theta_2 = \text{arctg} \frac{\sin\theta_2^*}{\gamma(\beta + \cos\theta_2^*)}$$

Полученные распределения представлены на диаграммах ниже:

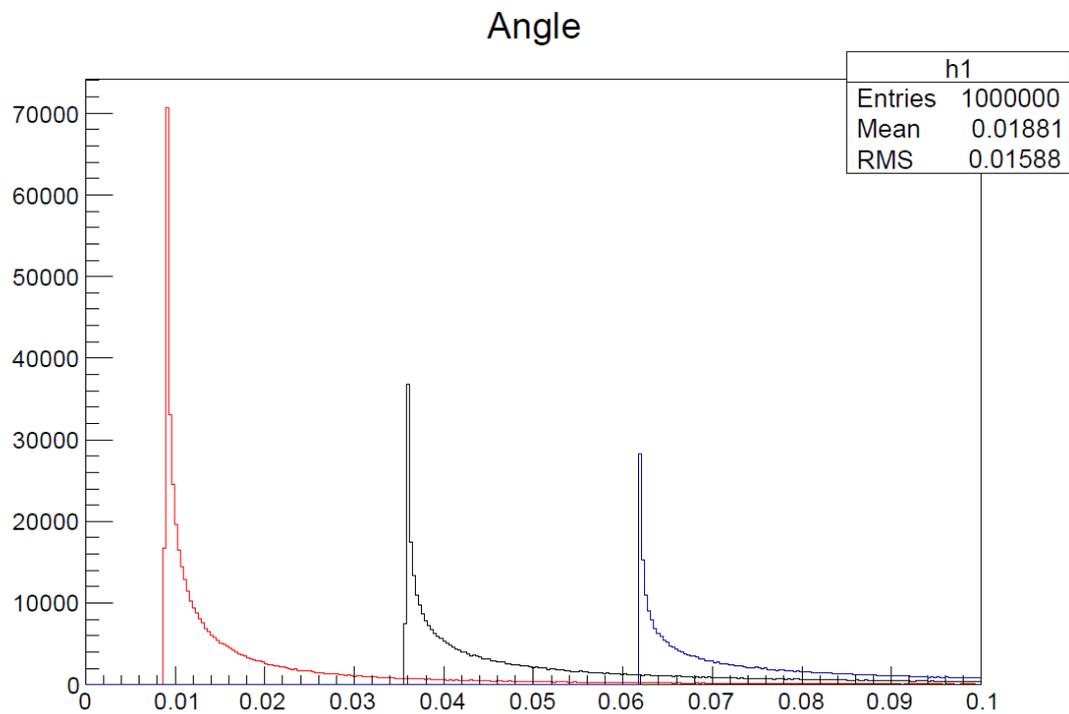


Рисунок 10 - Распределение по углам для 30 ГэВ/с²

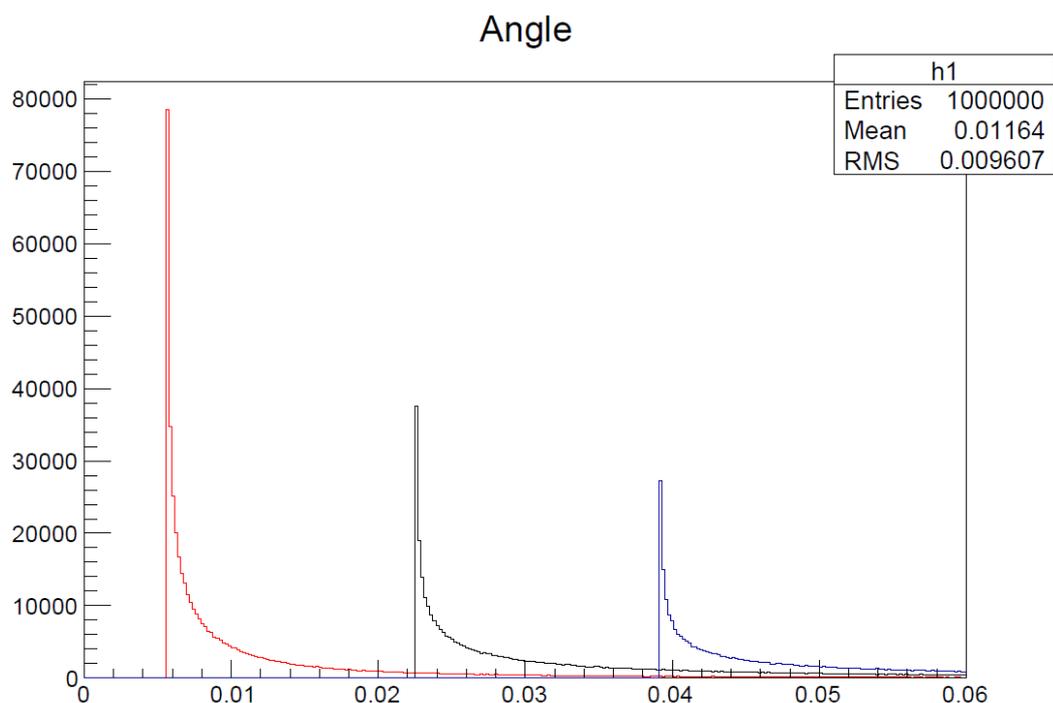


Рисунок 11 - Распределение по углам для 48 ГэВ/с²

Для оценки возможности регистрации реакций, необходимо выполнение следующих условий:

- 1) оба γ -кванта должны попадать на электромагнитный калориметр, причем расстояние между точками попадания должно быть больше диагонали одной ячейки ECAL ($d=4$ мм). (рис. 2)

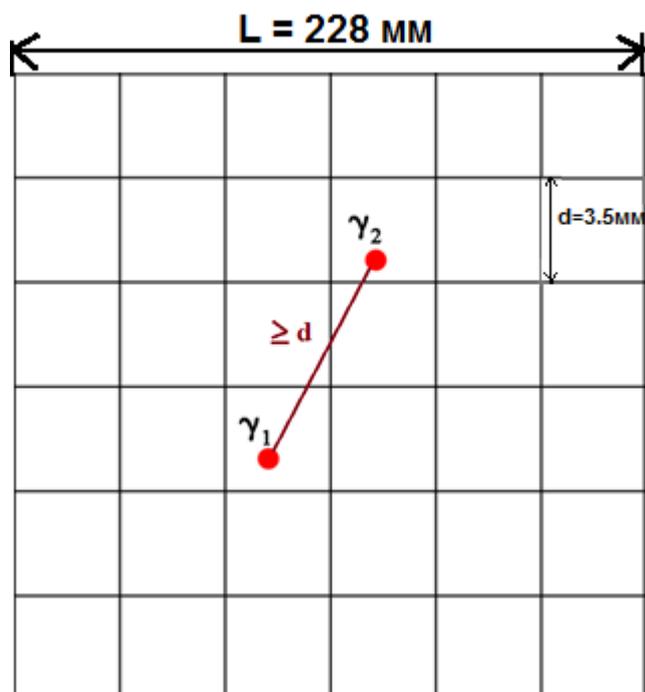


Рисунок 12 - Возможное расположение гамма-квантов на ECAL

2) энергия каждого γ -кванта больше 1 ГэВ. Данное условие обусловлено чувствительностью детектора.

3) Расстояние между мишенью и электромагнитным калориметром должно быть не больше 300 см. Это обусловлено невозможностью увеличить расстояние по причине геометрических особенностей и расположения детектирующей системы в ускорительном помещении.

Ниже приведены полученные с учетом всех условий гистограммы для энергий мезонов 30 и 48 ГэВ.

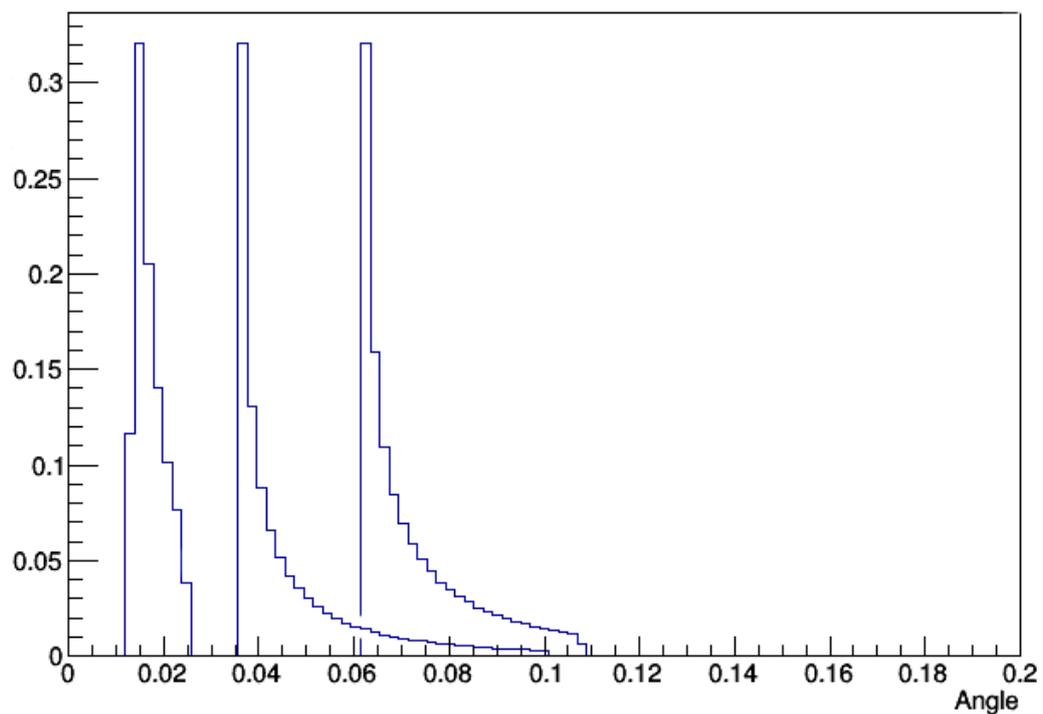


Рисунок 13 - Распределение по углам разлета гамма-квантов для 30 ГэВ/c²

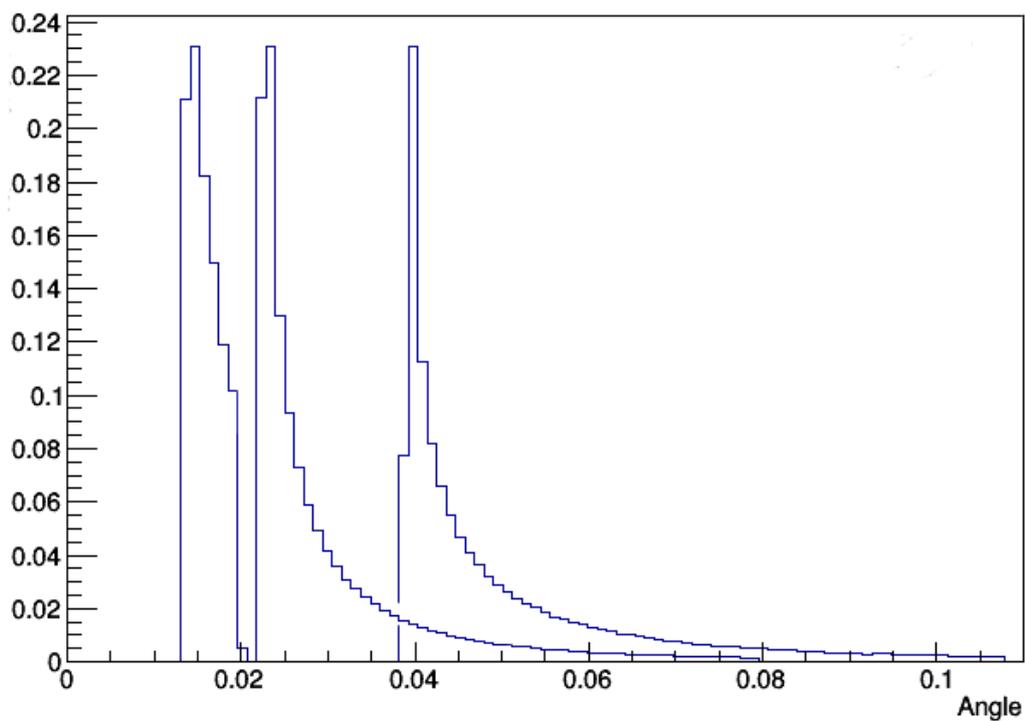


Рисунок 14 - Распределение по углам разлета гамма-квантов для 48 ГэВ/c²

Полученные гистограммы свидетельствуют о возможности регистрации распадов в два гамма-кванта и восстановлении инвариантной массы мезонов.

2.2 Моделирование реакции перезарядки

Для оценки вклада в угол рассеяния нейтральных мезонов использованы экспериментальные данные по зависимости дифференциального сечения от квадрата переданного импульса в реакции $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ на водородной мишени для 48 ГэВ π^- [12]. Найденные данные аппроксимированы кривой

$$y = e^{-14,3156x} (55,0439 + 1632,39x - 2083,2x^2)$$

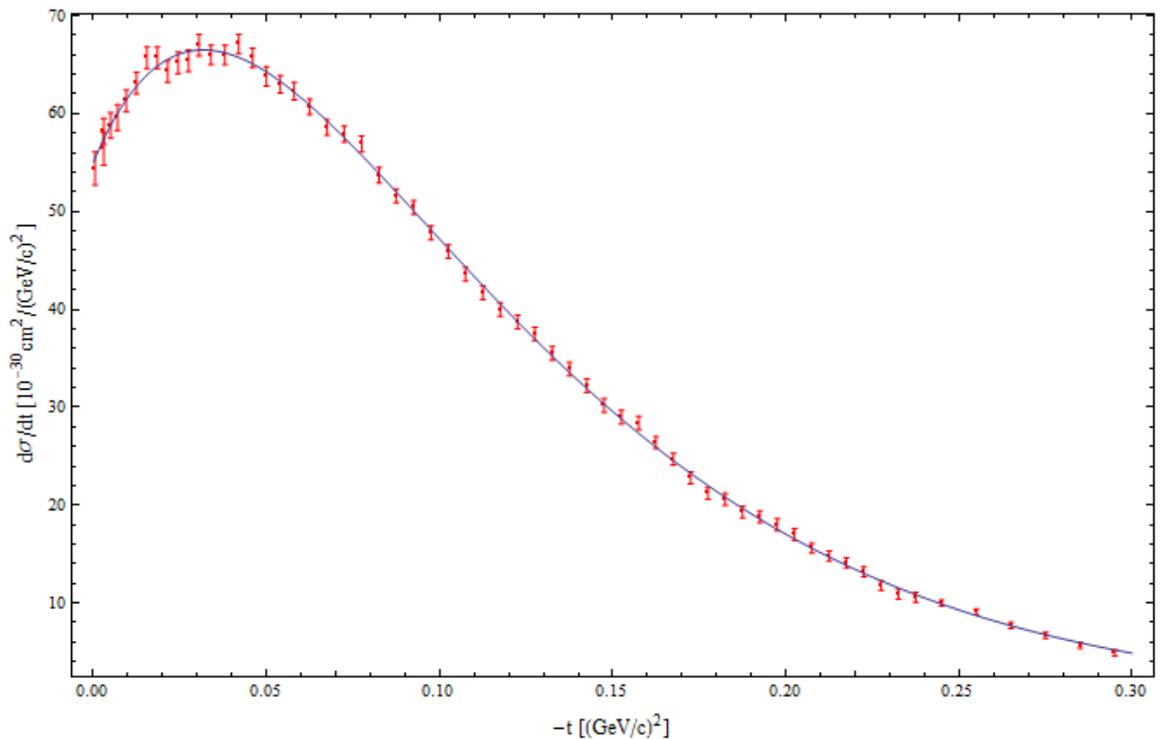


Рисунок 15 - Экспериментальные данные по реакции перезарядки

Полученная функция использована в качестве функции распределения для генерации событий методом Неймана [13].

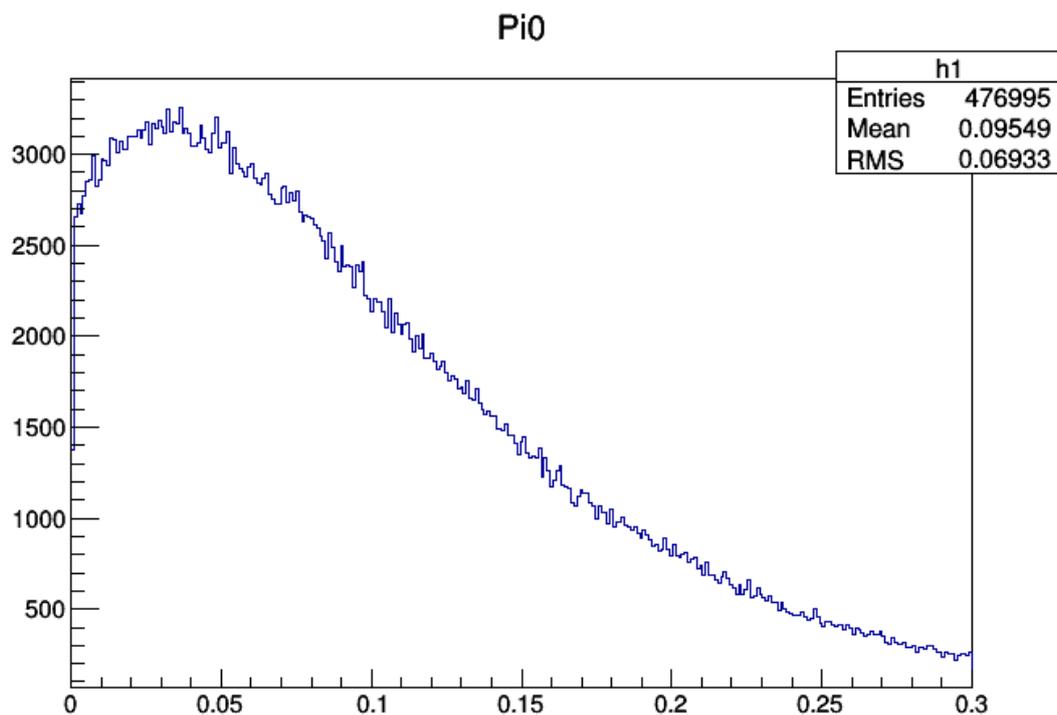


Рисунок 16 – Распределение, полученное методом Неймана

Схема реакции перезарядки представлены на рис .

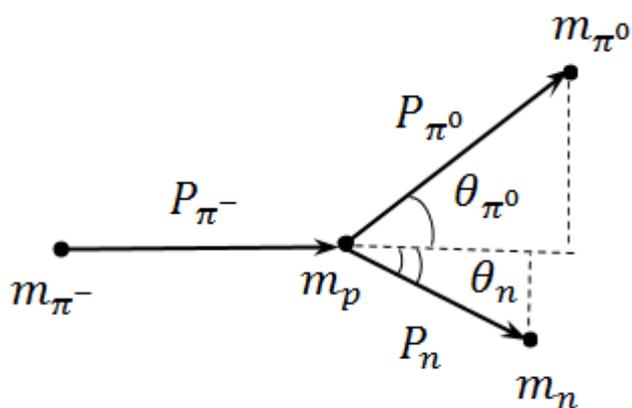


Рисунок 17 – Реакция перезарядки пиона

Зная начальный импульс в Л-системе и массы всех частиц можно вычислить $\cos\theta_3$ для каждого полученного значения t :

$$s = m_1^2 + m_2^2 + 2E_1 m_2;$$

$$u = m_1^2 + m_2^2 + m_3^2 + m_4^2 - t - s;$$

$$E_3 = \frac{m_2^2 + m_3^2 - u}{2m_2};$$

$$\cos\theta_3 = \frac{t - m_1^2 - m_3^2 + 2E_1E_3}{2p_1p_3}$$

где s, t, u – переменные Мандельштама[14].

Полученные значения углов представлены в виде диаграммы:

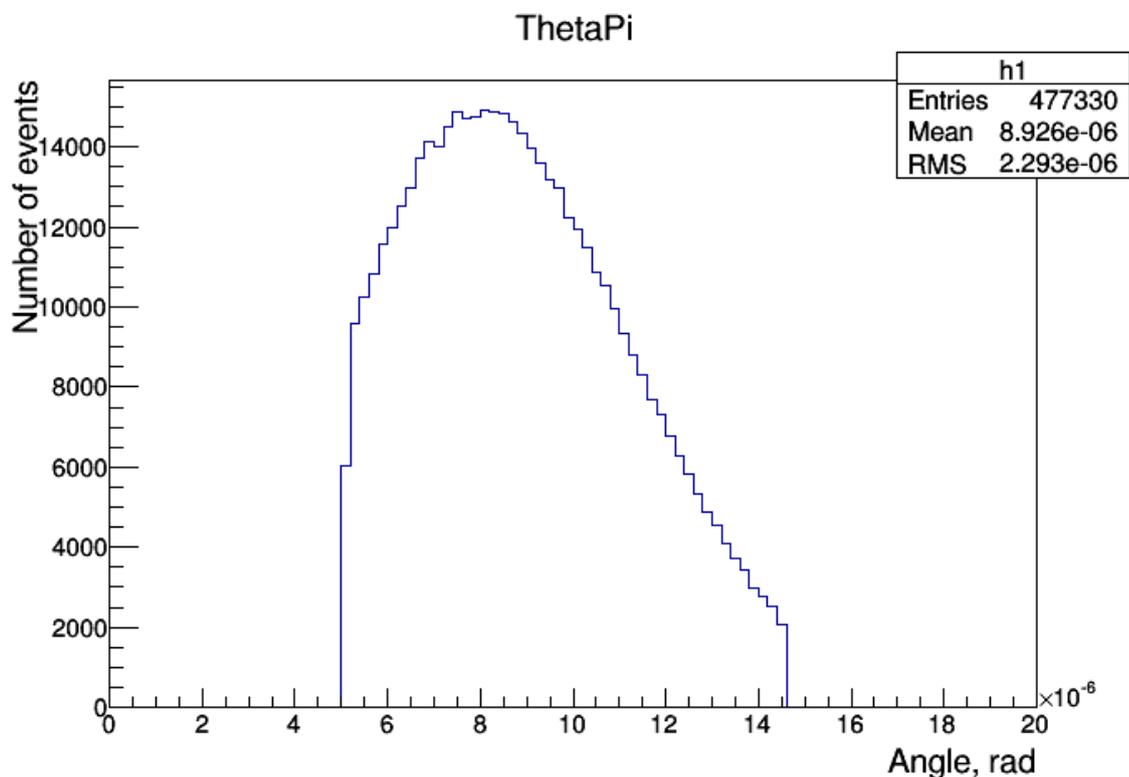


Рисунок 18 – Угол рассеяния нейтрального пиона

Полученные значения использованы в моделировании распада нейтрального пиона для определения оценки вклада в полученное ранее распределение углов разлета гамма-квантов (.

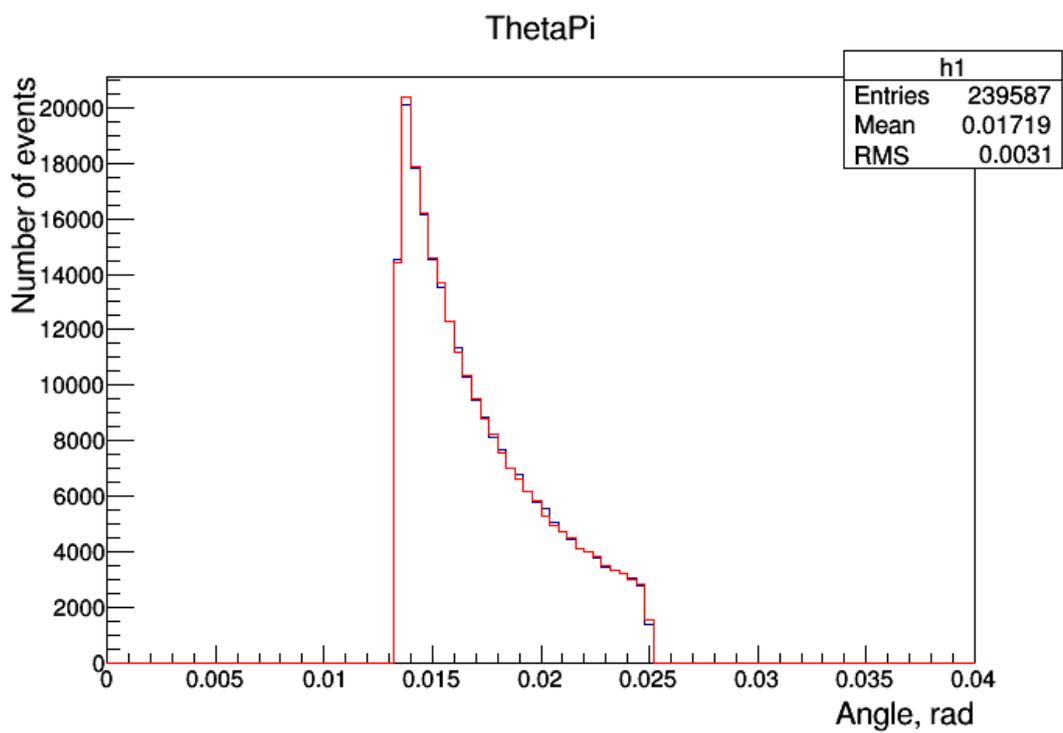


Рисунок 19 - Сомещенные диаграммы

Полученные диаграммы свидетельствуют о незначительной вкладе реакций перезарядки в конечный угол разлета гамма-квантов.

Заключение

Произведено моделирование процессов распада нейтральных мезонов в два гамма-кванта с целью определению оптимальных геометрических параметров мишени и выявления возможности проведения эксперимента по уточнению вероятностей распадов в невидимые состояния в эксперименте NA64 в ЦЕРНе.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности проведения эксперимента и могут быть использованы при разработке программного кода для полного моделирования эксперимента.

Также произведено моделирование реакций перезарядки, для чего по существующим экспериментальным данным был разработан программный код, позволяющий разыгрывать события методом Неймана. На основе полученных результатов сделан вывод о незначительности влияния реакции перезарядки на угол вылета нейтрального мезона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Y. Fukuda et al. (Super-Kamiokande Collaboration)// Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos// Phys. Rev. Lett. 81, 1562 (1998).
2. Q. R. Ahmad et al. (SNO Collaboration)// Measurement of Day and Night Neutrino Energy Spectra at SNO and Constraints on Neutrino Mixing Parameters// Phys. Rev. Lett. 89, 011302 (2002)
3. P Crivelli, A Belov, U Gendotti, S Gninenko, A. Rubbia// Positronium portal into hidden sector: a new experiment to search for mirror dark matter// Journal of Instrumentation, Volume 5, August 2010
4. V. Artamonov et al. (E949 Collaboration)// Upper limit on the branching ratio for the decay $\pi^0 \rightarrow \nu\nu$ // Phys. Rev. D 72, 091102(R) – Published 11 November 2005
5. Ландсберг Л. Г.//Поиски аномальных взаимодействий в редких каонных распадах// УФН 176 801–832 (2006)
6. M. Ablikim et al. (BESIII Collaboration)// Search for η and η' invisible decays in $J/\psi \rightarrow \phi\eta$ and $\phi\eta'$ // Phys. Rev. D 87, 012009 – 24 January 2013
7. Secondary beams and areas [Электронный ресурс]: Информационный ресурс. - Режим доступа: <http://sba.web.cern.ch/sba/>
8. Proposal for an Experiment to Search for Light Dark Matter at the SPS [Электронный ресурс]: Информационный ресурс. - Режим доступа: <http://arxiv.org/abs/1312.3309v1>
9. G.S. Atoyan, V.A. Gladyshev, S.N. Gninenko, V.V. Isakov, A.V. Kovzelev, E.A. Monich, A.A. Poblaguev, A.L. Proskuryakov, I.N. Semenyuk// Lead-scintillator electromagnetic calorimeter with wavelength shifting fiber readout// Phys. Res., Sect. A 320, 144 (1992)
10. S. N. Gninenko// Search for invisible decays of π^0, η, η', K_S , and K_L : A probe of new physics and tests using the Bell-Steinberger relation// Phys. Rev. D 91, 015004 –7 January 2015

11. K. Olive et al. (PDG)// Review of Particle Physics// Chin. Phys. C38, 090001 (2014)
12. V.N. Bolotov, V.V. Isakov, D.B. Kakauridze, V.A. Kachanov, V.M. Kutin, Yu.D. Prokoshkin, E.A. Razuvaev, V.K. Semenov// A Study on pi- Charge Exchange Reactions on Nuclei at 48-GeV/c// Nucl.Phys. B85 (1975) 158-164
13. А. Д. Букин, С. И. Эйдельман// ЭВМ в физическом эксперименте// Учебное пособие, Новосибирск, - 2007, 211с.
14. А. М. Балдин, В. И. Гольданский, В. М. Максименко, И. Л. Розенталь// Кинематика ядерных реакций// Учебное пособие, Атомиздат Москва. – 1968
15. Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» От 17.07.99 №181 – ФЗ.
16. Трудовой кодекс РФ (ТК РФ) от 30.12.2001 N 197-ФЗ, Раздел X, Охрана труда, статья 211 Государственные нормативные требования охраны труда.
17. Трудовой кодекс РФ (ТК РФ) от 30.12.2001 N 197-ФЗ, Раздел X, Охрана труда.
18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
19. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
20. ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
21. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.