

МОДЕЛИРОВАНИЕ КАНАЛА «МЕЧЕННЫХ» НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ P20

Руководитель НИР

д.ф.-м.н.,
ведущий научный сотрудник,
НИЦ “Курчатовский институт” - ИФВЭ
Соколов А.А.
Гавва О.Д.

Студент

Москва 2022

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью данной работы является моделирование канала «меченных» нейтрино в эксперименте P20.

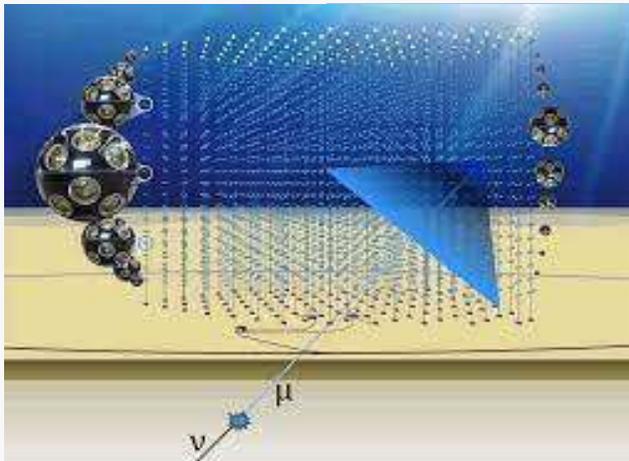
АКТУАЛЬНОСТЬ

На сегодняшний день одной из наиболее актуальных тем исследований в современной физике является изучение свойств нейтрино. Двумя ключевыми открытыми вопросами являются наличие нарушения зарядовой четности в лептонном секторе и относительным упорядочением трех собственных состояний массы нейтрино. На оба вопроса можно ответить, изучая осцилляции ГэВ-нейтрино в экспериментах с длинной базой ($\gg 100$ км). Эксперимент Protvino to ORCA (P20) может обеспечить базу для подобных исследований.

Базовая линия: 2588 км

Угол наклона линии пучка: 11.7°

При длительном воздействии (≈ 1500 кВт \times год) может быть достигнута чувствительность 2σ к лептонной CP-нарушающей дираковской фазе.



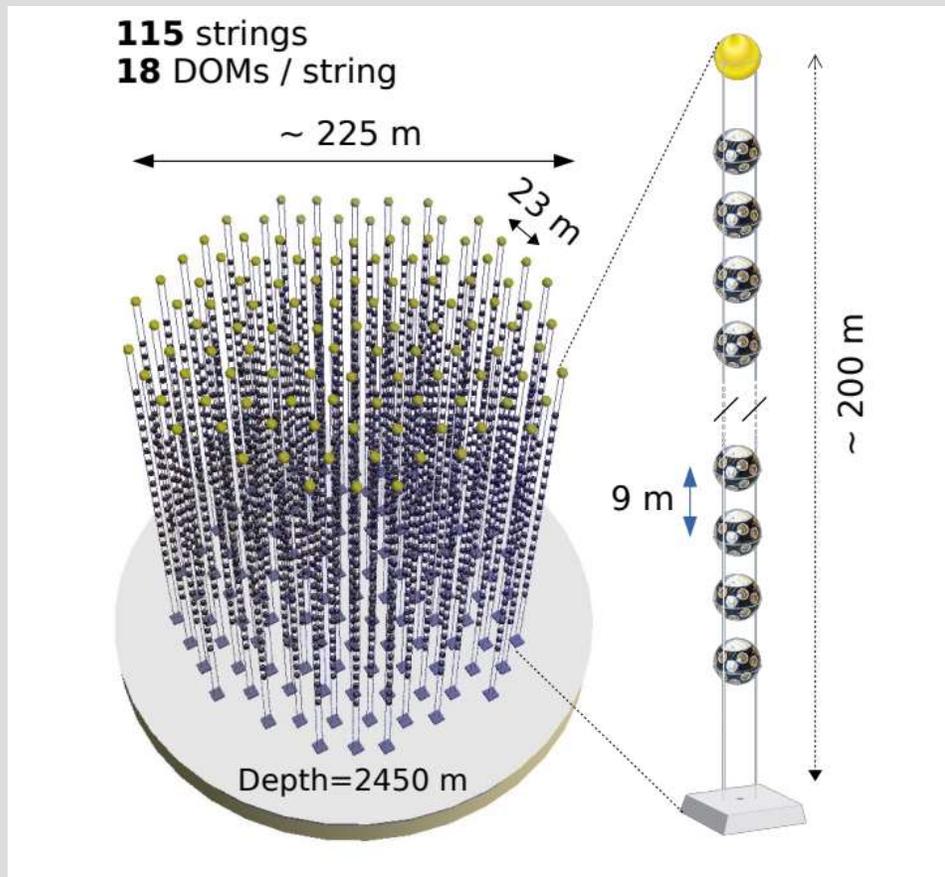
ORCA



PROTIVINO

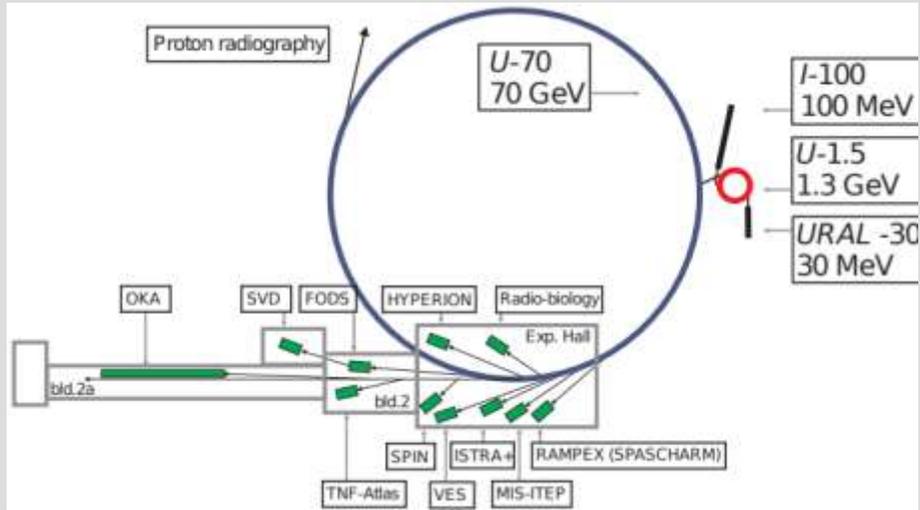


KM3Net/ORCA



- ОПТИМИЗАЦИЯ:
- 1. Исследование осцилляций атмосферных нейтрино в диапазоне энергий от 2 до 30 ГэВ.
- 2. Уточнены измерения параметров атмосферных нейтринных осцилляций Δm^2_{23} , θ_{23} .
- ПЛАНИРУЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:
- 1. Определение иерархии масс нейтрино
- 2. Исследование унитарности смешивания трех нейтрино путем измерения нормализации потока ν_τ .
- 3. Изучение нестандартных взаимодействий нейтрино, а также астрофизических источников нейтрино, темной материи и других физических явлений.

УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС В ПРОТВИНО



Его основным компонентом является синхротрон У-70 с окружностью 1.5 км, который ускоряет протоны до 70 ГэВ.

Цепь инжекции протонов включает источник ионов, линейный ускоритель на 30 МэВ и бустерный синхротрон на 1.5 ГэВ.

Синхротрон У-70 штатно работает при усредненной по времени мощности пучка до 15 кВт.

У-70 потенциально позволяет работать при мощности пучка до 450 кВт. Такой мощности пучка будет достаточно для прецизионных исследований СР-нарушения.

НЕЙТРИННЫЙ ПУЧОК



В Протвино необходимо будет построить новый нейтринный пучок, чтобы реализовать предлагаемую исследовательскую программу.

ЗАДАЧИ:

1. БОЛЕЕ ВЫСОКАЯ ИНТЕНСИВНОСТЬ ПУЧКА;
2. РАСПАДНЫЙ КАНАЛ ДОЛЖЕН БЫТЬ ПОСТРОЕН В НАКЛОННОМ ТУННЕЛЕ

Experiment	T2K		T2HK	NO ν A	DUNE	P2O	
Location	Japan		Japan	USA	USA	Russia/Europe	
Status	operating		proposed	operating	construction	proposed	
Accelerator facility	J-PARC		J-PARC	Fermilab	Fermilab	Protvino	
Baseline	295 km		295 km	810 km	1300 km	2595 km	
Off-axis angle	2.5°		2.5°	0.8°	0°	0°	
1-st max $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$	0.6 GeV		0.6 GeV	1.6 GeV	2.4 GeV	4 GeV	
Detector	SuperK		HyperK	NO ν A	DUNE	ORCA	Super-ORCA
Target material	pure water		pure water	LS	liquid Ar	sea water	
Detector technology	Cherenkov		Cherenkov	LS	TPC	Cherenkov	
Fiducial mass	22 kt		186 kt	14 kt	40 kt	8000 kt	4000 kt
Beam power	500 kW		1300 kW	700 kW	1070 kW	450 kW	450 kW
ν_e events per year (NO)	~ 20		230	~ 20	250	3500	3400
$\bar{\nu}_e$ events per year (IO)	~ 6		165	~ 7	110	1200	1100
NMO sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$)	-	-	4σ	1σ	7σ	8σ	$> 8\sigma$
CPV sensitivity ($\delta_{CP} = \pi/2$)	1.5σ	3σ	8σ	2σ	7σ	2σ	6σ
1σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = \pi/2$)			22°		16°	53°	16°
1σ error on δ_{CP} ($\delta_{CP} = 0$)			7°		8°	32°	10°
Year / data taking years	2018	2026	10 yr	2024	10 yr	3 yr	10 yr
Refs.	[27]	[29]	[2, 30]	[3, 31]	[4, 5]		

Таблица 1: Чувствительность нынешних и будущих нейтринных экспериментов на ускорителях с длинной базой к упорядочению массы нейтрино и лептонного CP-нарушению. Все чувствительности даны для случая нормального массового упорядочения. Дано ожидаемое количество событий ν_e ($\bar{\nu}_e$) в год.

- ПЛАНИРУЕМЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЭКСПЕРИМЕНТЕ P2O:
- 1. Измерения нейтринных осцилляций
- 2. Исследования фазы Дирака с CP-нарушением
- 3. Измерение эффекта резонанса материи
- 4. Другие эффекты в нейтринной физике

Метод «меченных» нейтрино

- Пучки нейтрино, производимые на ускорителях, в основном получают путем генерации интенсивного пучка пионов, которые распадаются в полете как $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \bar{\nu}_{\mu}$.
Непрерывный прогресс в кремниевых пиксельных детекторах позволяет работать с трекерами пучка при все более высоких скоростях частиц. Таким образом, становится возможной линия пучка нейтрино, оснащенная кремниевыми трекерами. Эти инструменты позволят восстановить все распады $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \bar{\nu}_{\mu}$ от следов входящего и исходящего распада заряженной частицы. Используя эту информацию, для каждого распада может образовываться “меченое” нейтрино со свойствами, которые мы можем определить:
 - - аромат начального нейтрино, чтобы соответствовать заряженному лептону,
 - – киральность, противоположная лептонной, или выведенная от электрического заряда пиона,
 - – направление и энергия нейтрино.
- На основании временного и углового совпадения каждое нейтрино, взаимодействующее в детекторе, может быть связано с одним “меченным” нейтрино.

Схема нейтринного канала

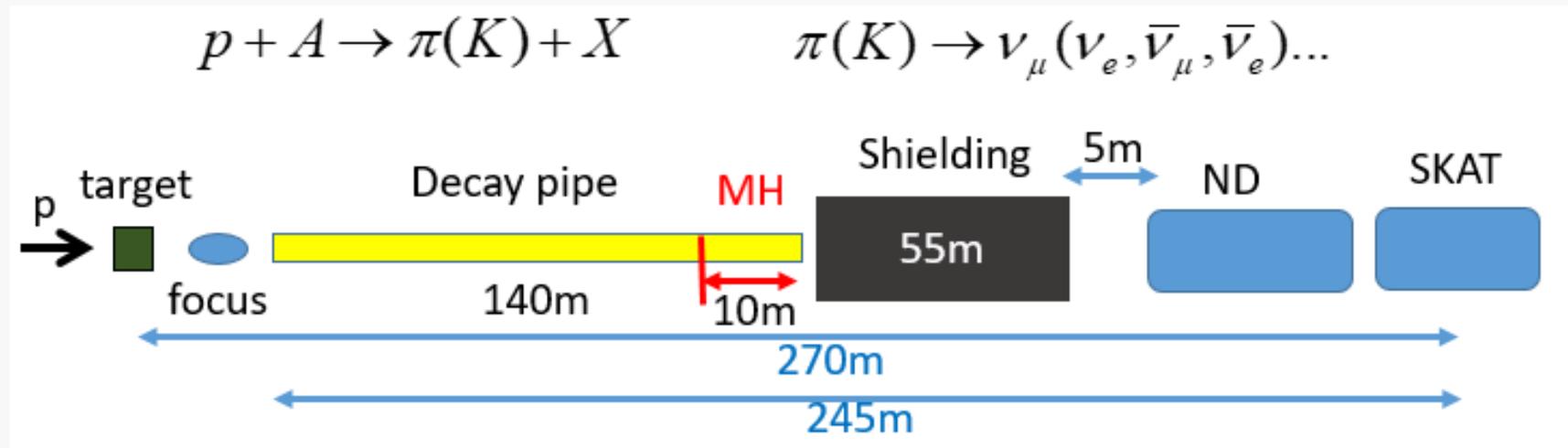


Схема возможного нейтринного канала, позволяющего формировать «меченные» нейтрино. Длина трубы распада 140 м, система мечения расположена на последних 10 метрах трубы распада. Для того чтобы в детектор попали только необходимые нам нейтрино, мы используем поглотитель, состоящий из стальных балок длиной 55 м.

Распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

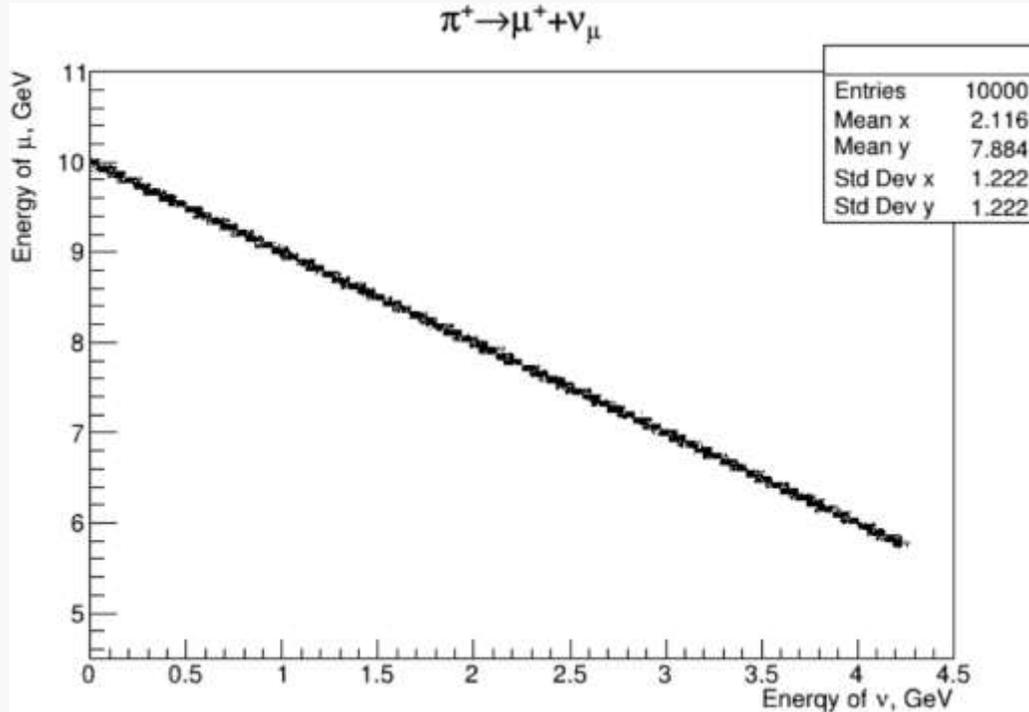


Рис.1. Двумерная гистограмма импульсов мюона и нейтрино от распада 10 ГэВ-ного π -мезона

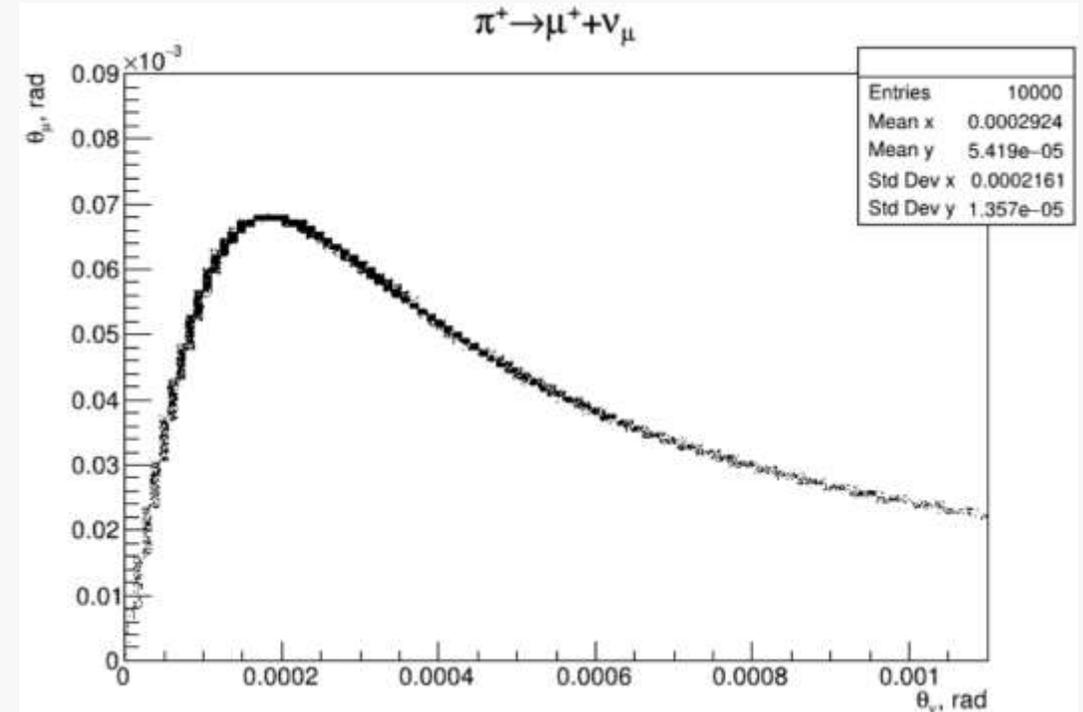


Рис.2. Двумерная гистограмма углов разлета мюона и нейтрино от распада 10 ГэВ-ного π -мезона

Распад $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$

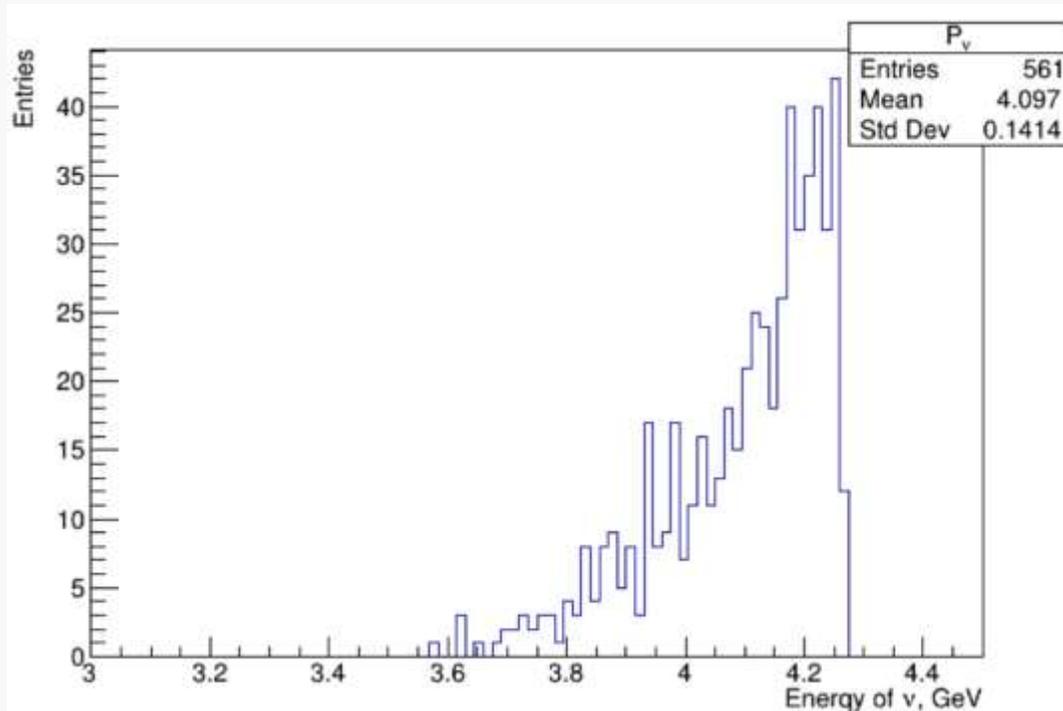


Рис.3. Импульс нейтрино попавших в детектор от распада 10 ГэВ-ного π -мезона

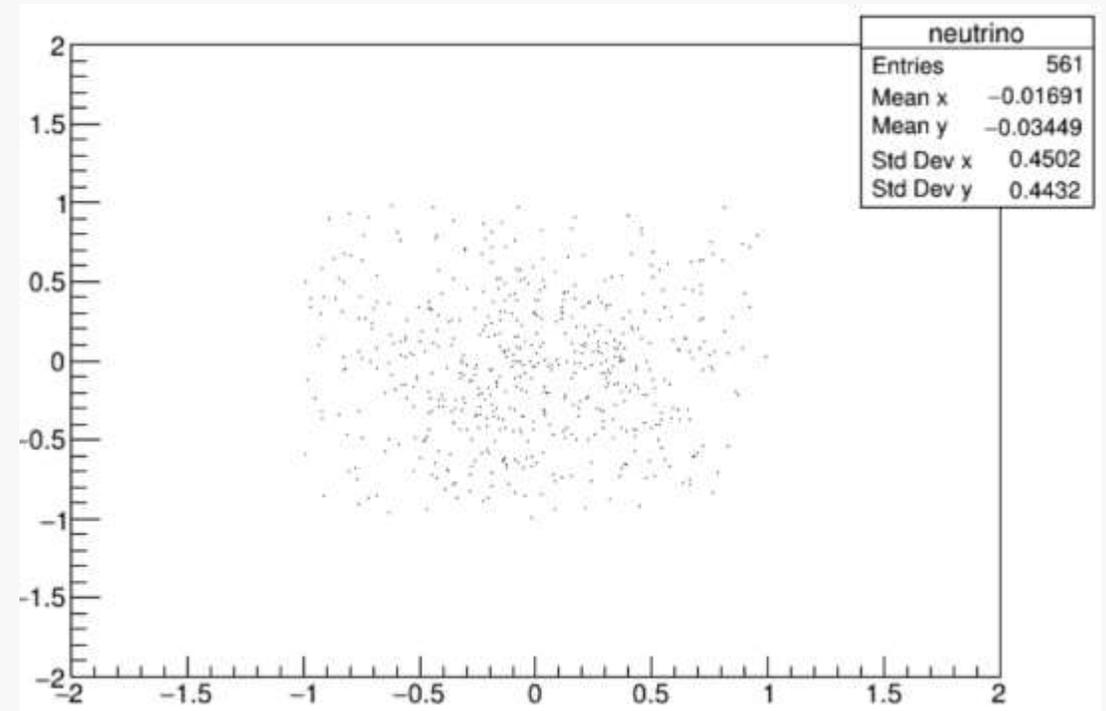


Рис.4. Доля нейтрино, попавших в детектор размером $2 \times 2 \text{ м}^2$ от распада 10 ГэВ-ного π -мезона (от 10тыс. событий, т.е. **примерно 5.6% нейтрино попали в детектор**)

Схема нейтринного канала

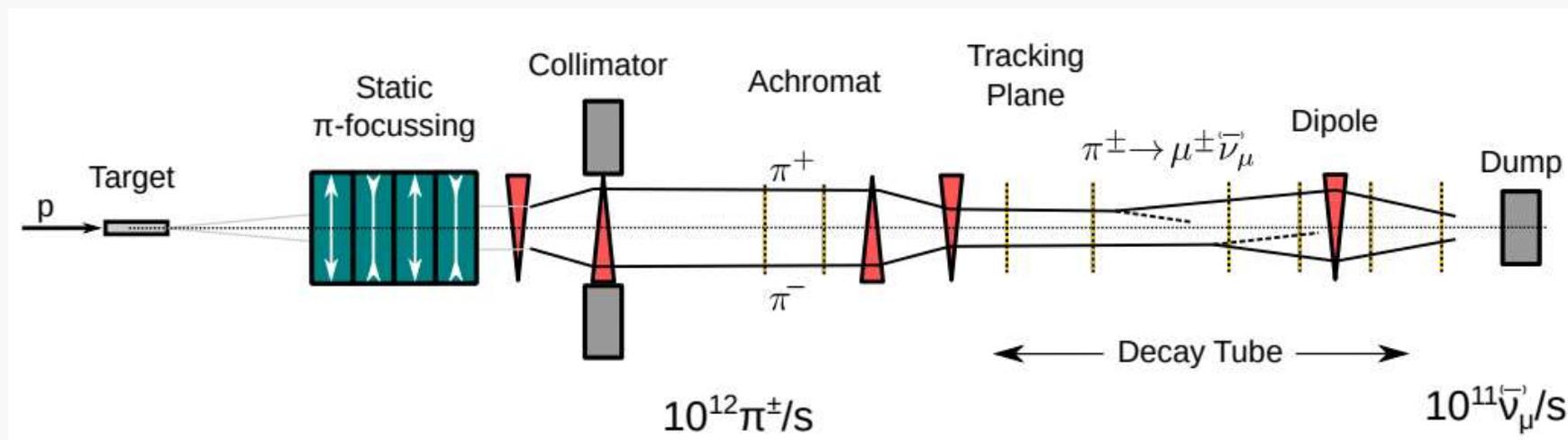
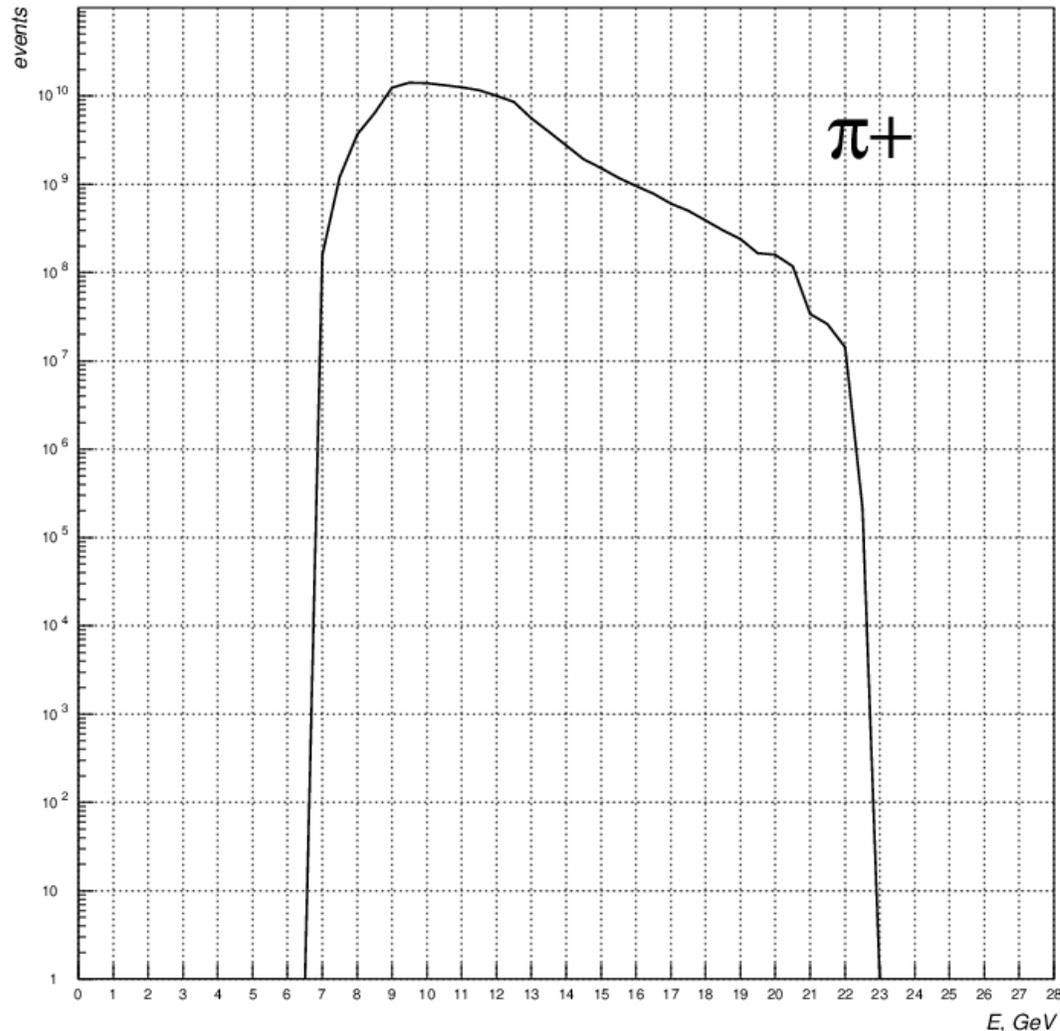


Схема возможного нейтринного канала, позволяющего формировать «меченные» нейтрино.

Синие прямоугольники представляют квадруполи, красные треугольники - диполи, а вертикальные пунктирные линии соответствуют плоскостям мечения. Их количество и расположение не оптимизированы.

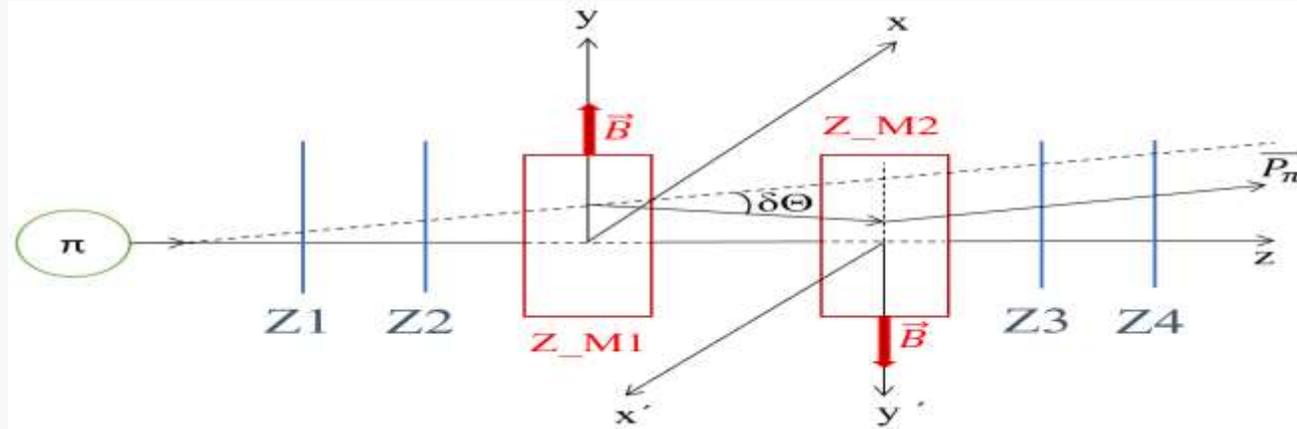
Канал «меченных» нейтрино



На данном графике показан спектр π -мезонов с различными энергиями в канале «меченных» нейтрино.

Для исследования с помощью станций мечения используем π -мезоны с энергией 10 ГэВ.

Формулы для вычисления угла $\delta\Theta$ и $P_{\pi_{xz}}$ с использованием станции мечения:



Формула для измерения угла $\Theta_{\pi_{xz}}$ в плоскости xz с использованием станции мечения:

$$\Theta_{\pi_{xz}} = \arctan \left(\frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} \right)$$

где x – x -координата π -мезона, z -координата π -мезона, индексы соответствуют номеру плоскости мечения.

Угол $\delta\Theta_{\pi_{xz}}$ может быть определен с помощью измерения смещения направления π -мезона:

$$\tan(\Theta_{\pi_{xz}} + \delta\Theta_{\pi_{xz}}) = \frac{\left(x_3 - \left(\frac{x_2 - x_1}{z_2 - z_1} \right) (z_3 - z_1) + x_1 \right)}{L_B} + \tan(\Theta_{\pi_{xz}})$$

При прохождении π -мезона через магнит его направление в плоскости xz отклоняется на угол:

$$\delta\Theta_{\pi_{xz}} = \frac{30 \vec{B} L_B}{P_{\pi_{xz}}}$$

где \vec{B} индукция магнитного поля в диполе, L_B расстояние между диполями.

Ошибка в измерении импульса π -мезона

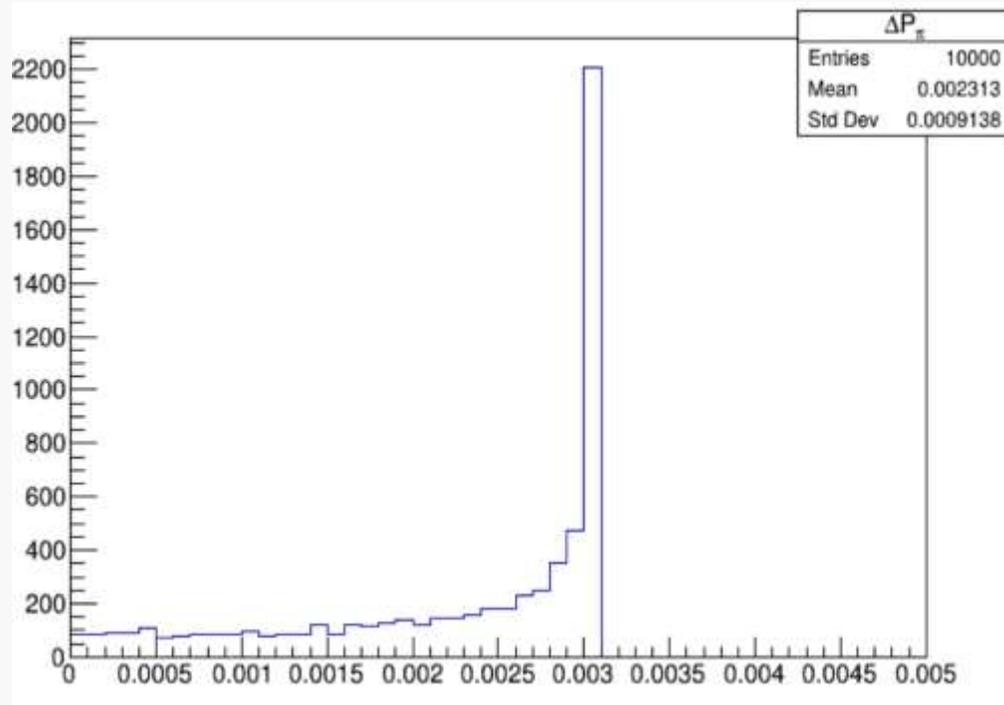


Рис.5. Гистограмма ΔP_π при $\theta_\pi = 1^\circ$.

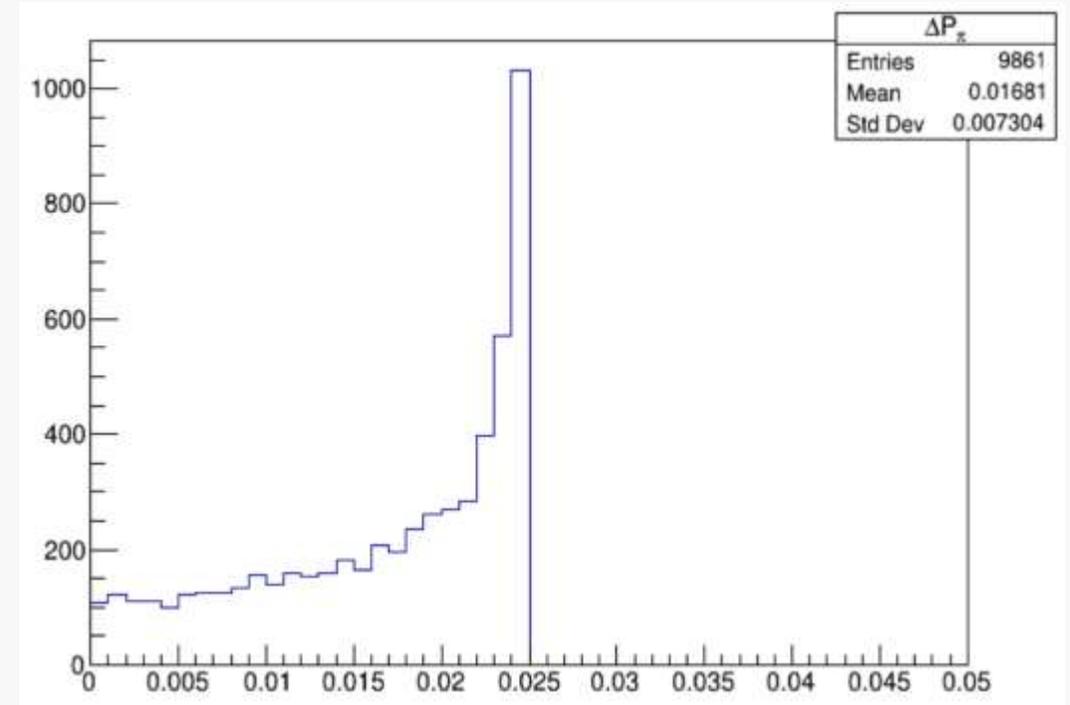


Рис.6. Гистограмма ΔP_π при $\theta_\pi = 2^\circ$.

По гистограммам видно, что с увеличением угла наклона пучка π -мезонов увеличивается ошибка измерения его импульса.

Ошибка в измерении импульса «меченных» нейтрино

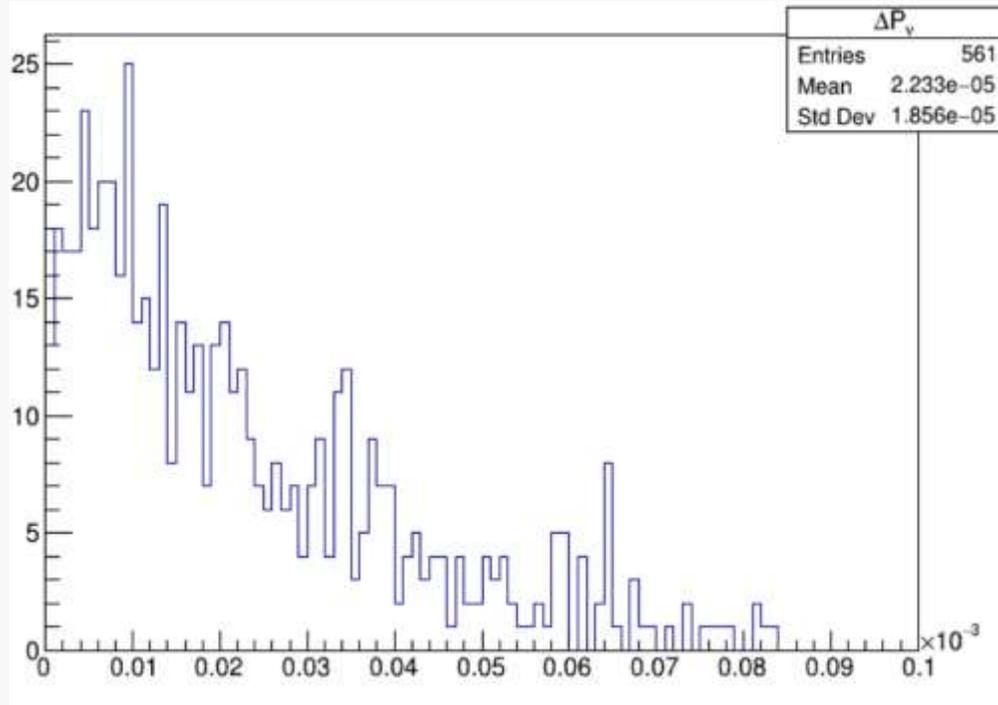


Рис.7. Гистограмма ΔP_ν при $\theta_\pi = 1^\circ$.

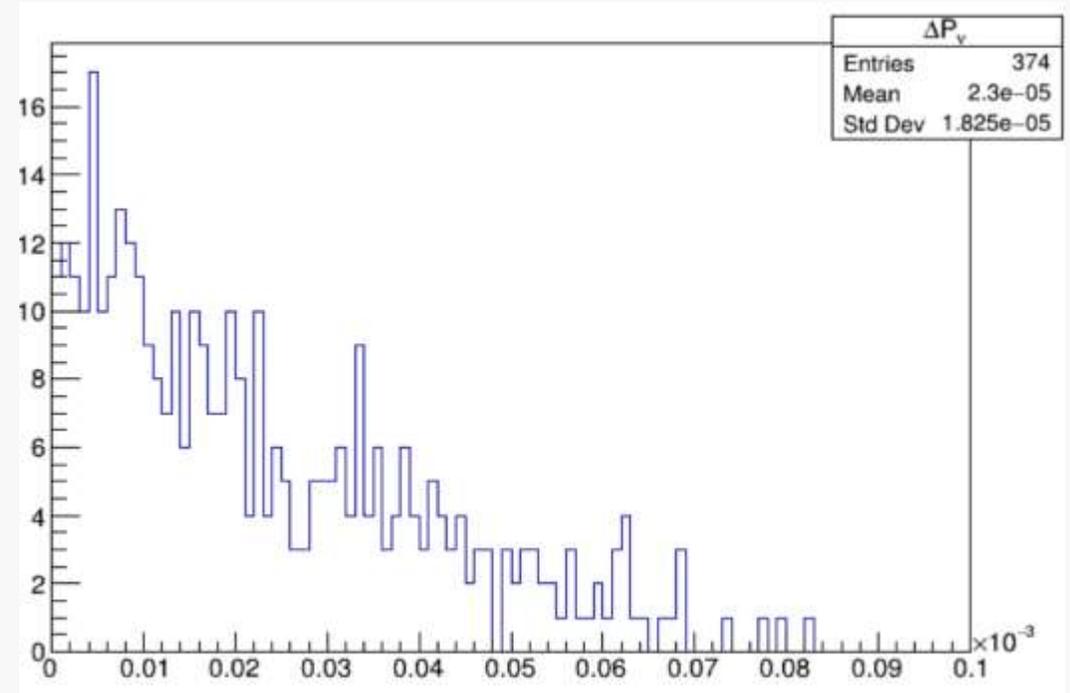
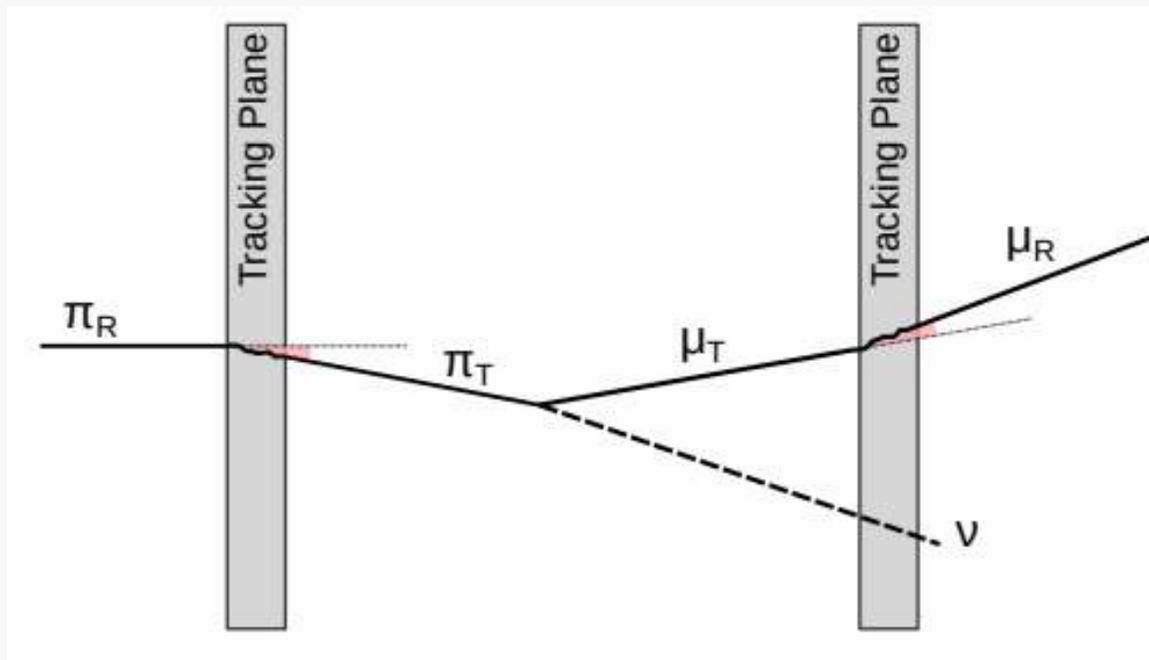


Рис.8. Гистограмма ΔP_ν при $\theta_\pi = 2^\circ$.

По гистограммам видно, что с увеличением угла наклона пучка π -мезонов увеличивается ошибка измерения импульсов «меченных» нейтрино и уменьшается доля «меченных» нейтрино, попавших в детектор.

Канал «меченных» нейтрино



Данная схема, описывает гипотезу, сделанную на достижимые разрешения по направлениям π^\pm и μ^\pm . В точке распада восстановленные направления π^\pm и μ^\pm , π_R и μ_R , отличаются от истинных, π_T и μ_T , поскольку π^\pm и μ^\pm подвергаются многократному кулоновскому рассеянию в последней и первой плоскости мечения, которые они пересекают соответственно.

На данный момент в работе мы не учитываем многократное кулоновское рассеяние в плоскостях мечения.

Заключение

В дальнейшем необходимо будет определить оптимальные параметры для станции мечения, добавить поправки на рассеяние π^\pm и μ^\pm для того, чтобы учесть ошибки измерения углов и координат, которые измеряются с помощью станции мечения, также планируется рассмотреть вопросы привязки нейтрино, помеченных в канале, к нейтрино, провзаимодействовавшим в детекторе.

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!