



# ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ РЕГИСТРАЦИИ СОБЫТИЙ АТМОСФЕРНЫХ НЕЙТРИНО В ЭКСПЕРИМЕНТЕ NOVA

**Победимов Андрей Константинович**  
Студент

Научный руководитель:  
д.ф.-м.н., проф. Ольшевский А. Г.

Научный консультант:  
Кандидат физ.-мат. наук, Самойлов О.Б.

МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет, кафедра ФЭЧ



## Постановка задачи

Для оценки возможностей детектора NOvA в области регистрации атмосферных нейтрино, необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить программное обеспечение NOvA, модифицировать программный модуль генератора GENIE для моделирования атмосферных нейтрино  $(\bar{\nu}_\mu)$  и  $(\nu_\mu)$ .
2. Написать собственный модуль для отбора и реконструкции сигнальных событий и анализа данных.
3. Построить энергетические спектры и угловые распределения атмосферных нейтрино.
4. Изучить сигнатуры событий в детекторе. Оценить эффективность реконструкции нейтринных событий в приложении к нейтринным осцилляциям.

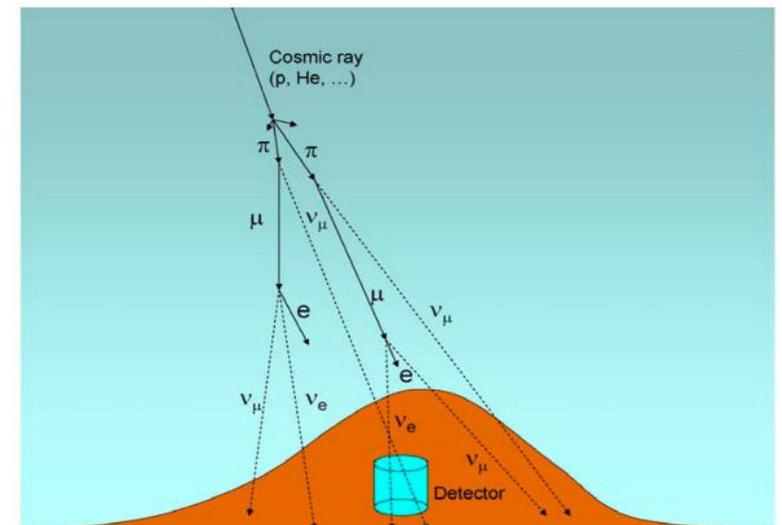
## Актуальность задачи

- Изучение возможности измерения потока атмосферных нейтрино в эксперименте NOvA.
- Изучение параметров нейтринных осцилляций на основе атмосферных нейтрино ( $\nu_e$  и  $\nu_\mu$ ). Потенциальный совместный анализ с ускорительными нейтрино в NOvA. Рассмотрение нестандартных нейтринных взаимодействий (NSI).
- Оценка сигнала, полученного в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Солнца и грунтом Луны.
- Использование потока атмосферных нейтрино, как фон для различных прикладных задач:
  - Изучение магнитного момента нейтрино.
  - Поиск Темной материи.
  - Изучение распада протона.
  - Изучение нейтрон-антинейтронных осцилляций ( $n-\bar{n}$ ).

# Атмосферные нейтрино

- Атмосферные нейтрино являются одним из основных экспериментально доступных источников нейтрино, наблюдаемых в широком диапазоне энергий области от 100 МэВ до шкалы ПэВ.
- Атмосферные нейтрино являются продуктами распада в адронных ливнях. Они образуются в основном за счёт цепочки распада заряженных пионов и каонов до мюонов и электронов.
- Мюонные нейтрино рождаются в основном при распаде пионов. Электронные – при распаде мюонов.
- В детекторах наблюдаются атмосферные нейтрино, приходящие со всех сторон, поскольку Земля в основном для них прозрачна.
- Спектр мюонных нейтрино в широком диапазоне энергий можно аппроксимировать следующим выражением (Volkova et al. Phys. Rev.31, 784, 1980.) :

$$\frac{dN_\nu}{dE_\nu} = 2,85 \cdot 10^{-2} E_\nu^{-2,7} \left( \frac{1}{1+6 \frac{E_\nu}{E_\pi^{kp}} \cos\theta} + \frac{0,21}{1+1,44 \frac{E_\nu}{E_\pi^{kp}} \cos\theta} + C_{pr} \right)$$



# Эксперимент NOvA

NOvA – два сцинтилляционных детектора, ближний (ND) и дальний (FD), расстояние между которыми 810 км.

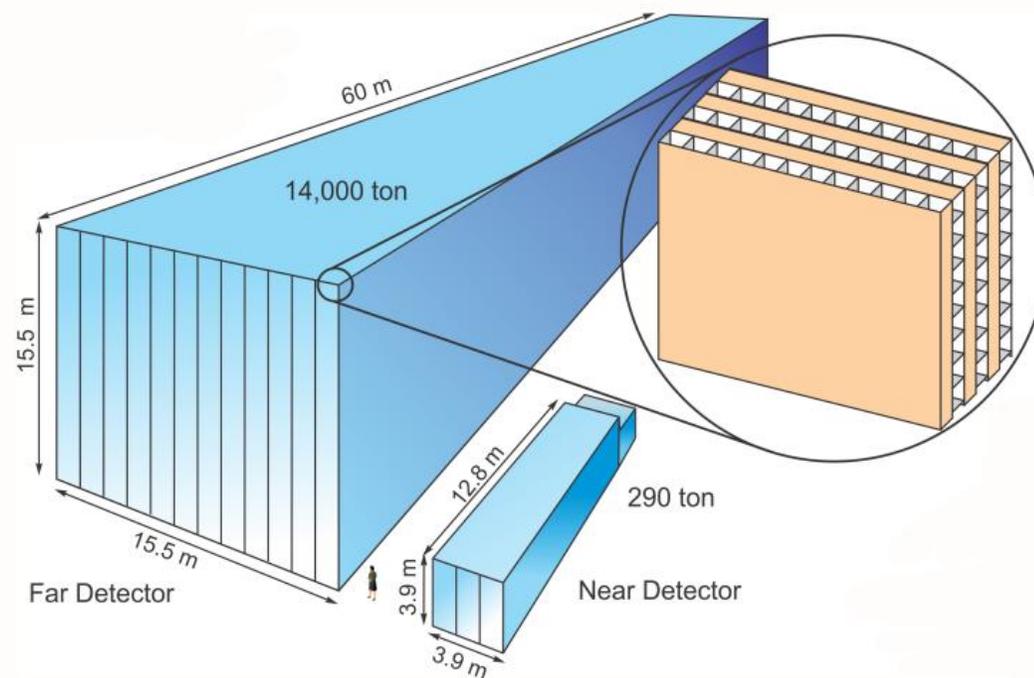
- Работа ведется с ускорительными нейтрино
- Поток нейтрино имеет узкий пик в районе 2 ГэВ

Задачи эксперимента – изучение:

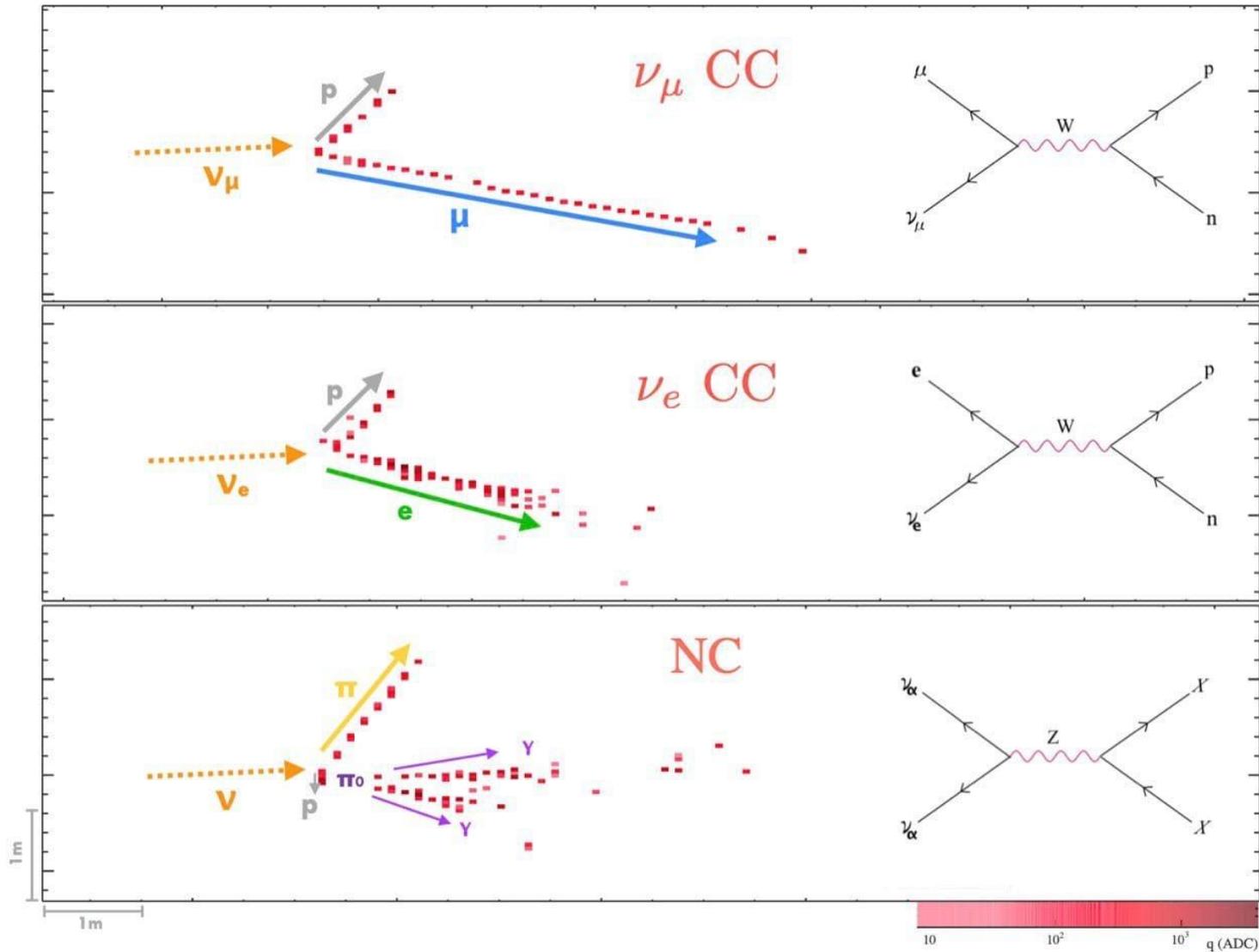
- Иерархии масс нейтрино
- Фазы нарушения
- Разности масс
- Угла смешивания

## Дальний детектор (FD)

|            |                |
|------------|----------------|
| масса      | 14 кт          |
| глубина    | на поверхности |
| расстояние | 810 км         |
| каналы     | ~344,000       |

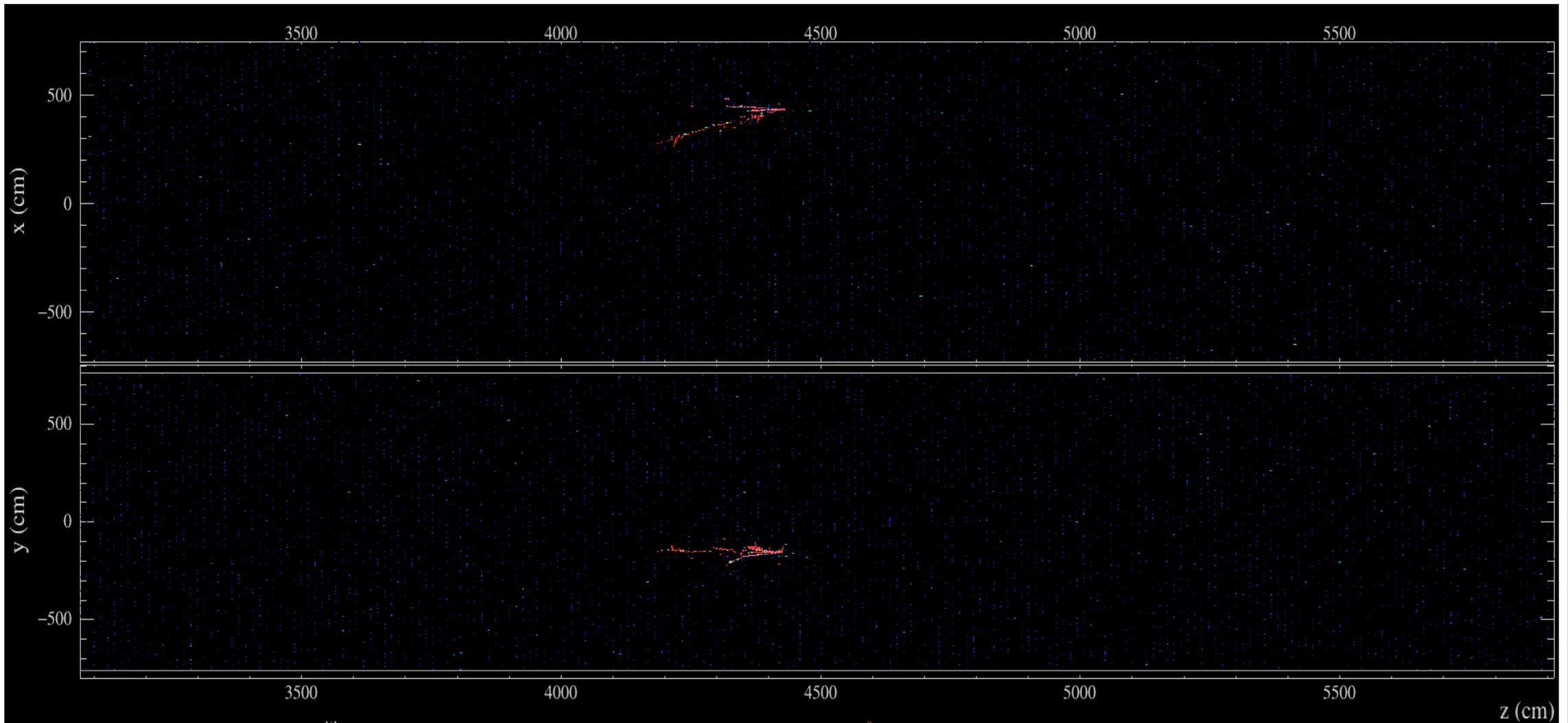


# Сигнатуры событий



Примеры событий, порожденных взаимодействием через заряженные и нейтральные токи в веществе дальнего детектора NOvA.

# Розыгрыш событий



NOVA - FNAL E929

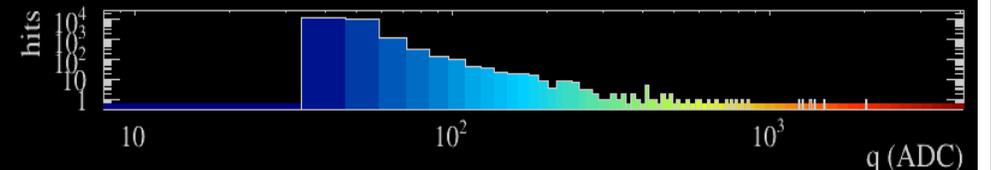
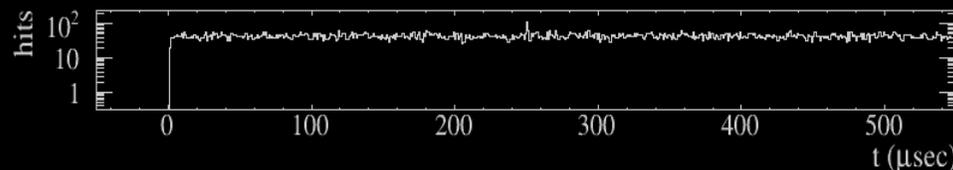
Run: 1000001 / 1

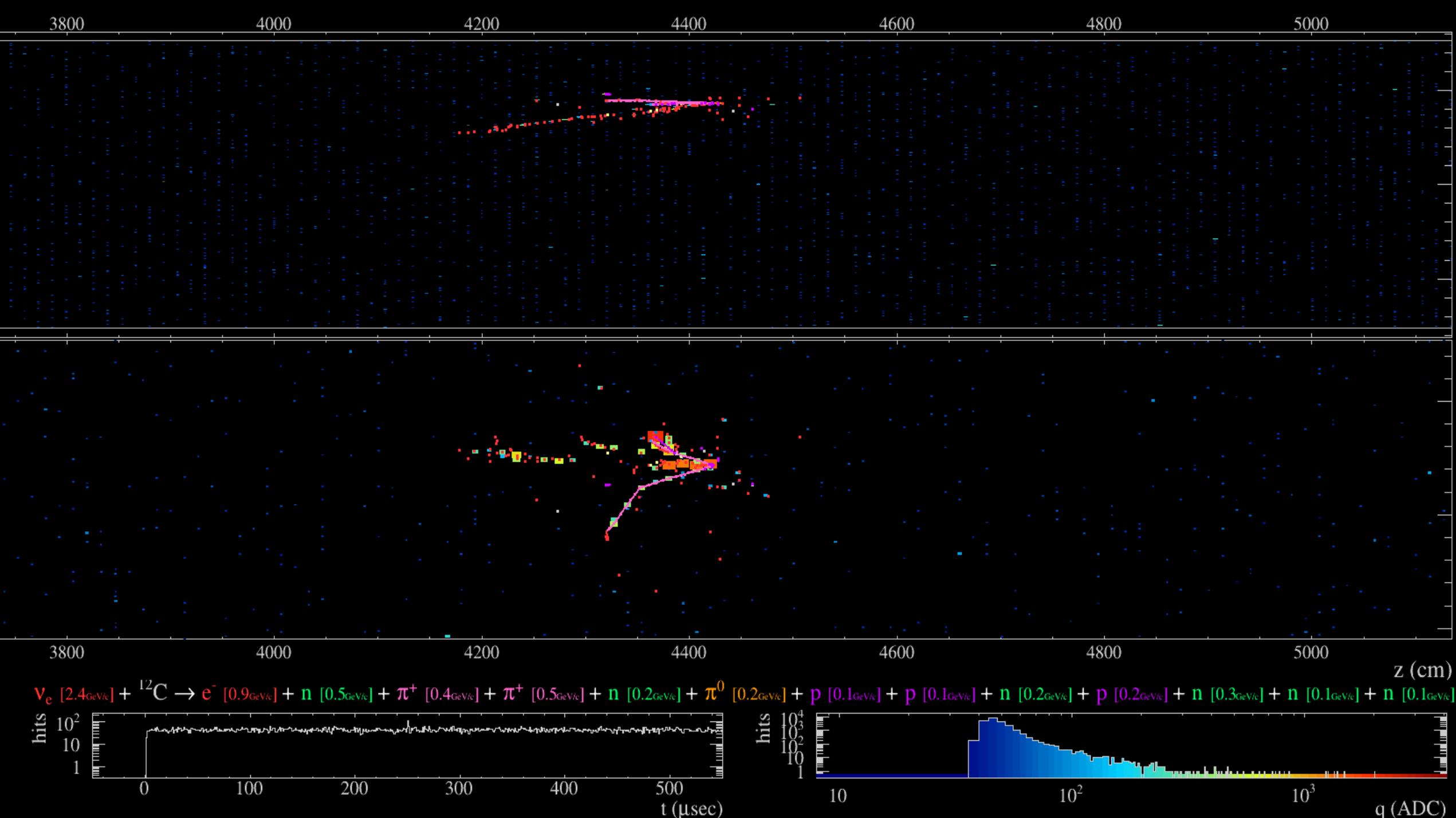
Event: 9 / --

UTC Thu Jan 1, 1970

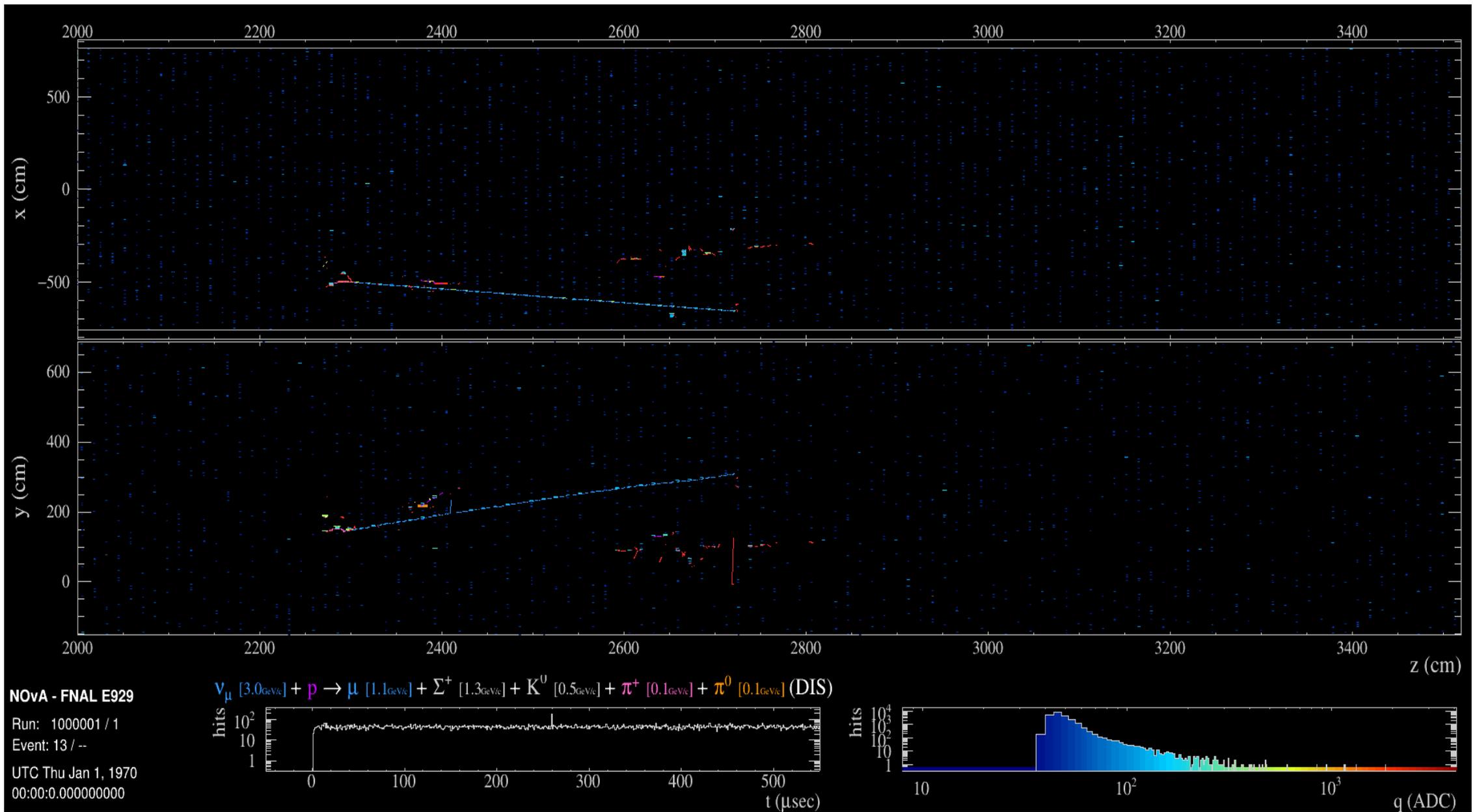
00:00:0.000000000

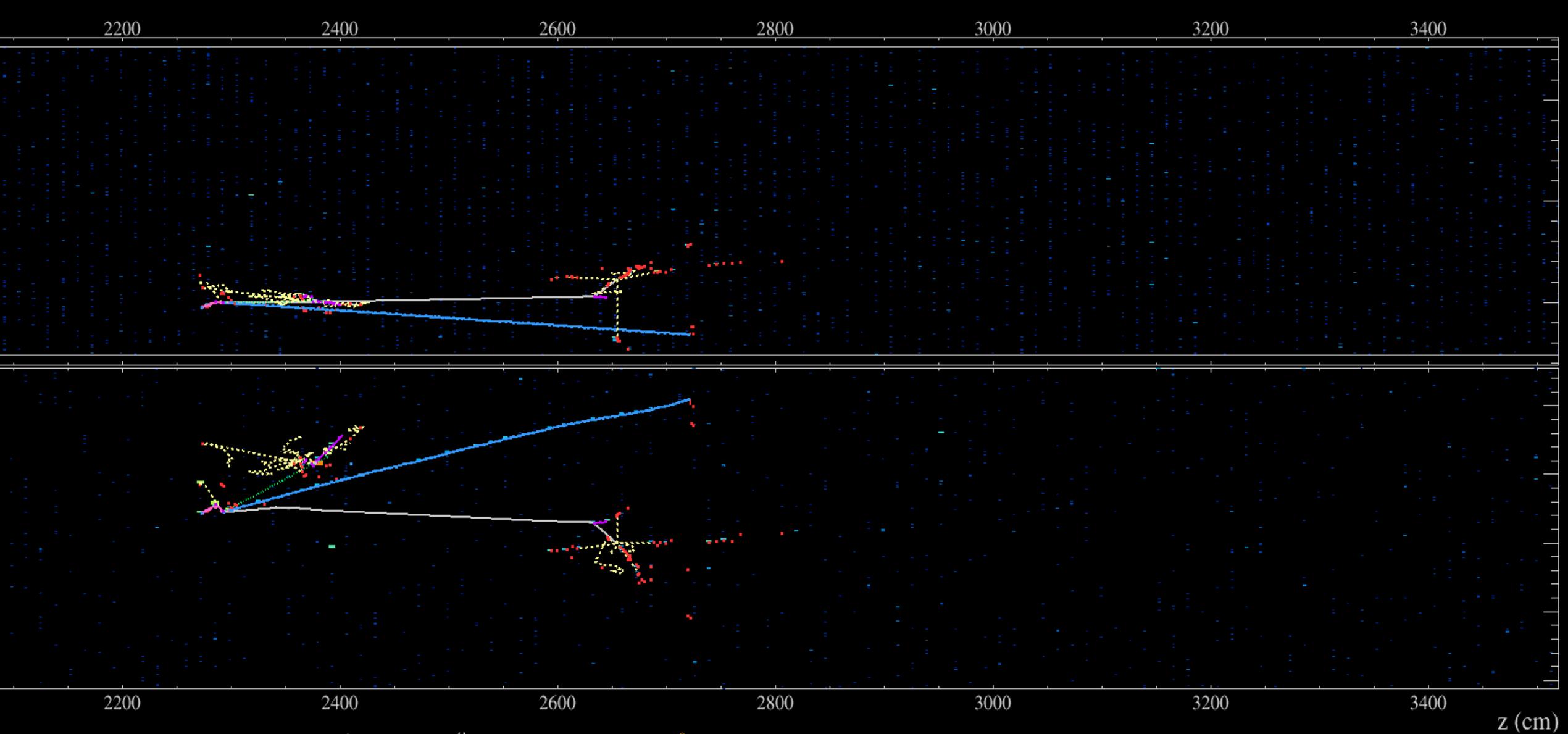
$\nu_e [2.4_{\text{GeV}/c}] + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- [0.9_{\text{GeV}/c}] + n [0.5_{\text{GeV}/c}] + \pi^+ [0.4_{\text{GeV}/c}] + \pi^+ [0.5_{\text{GeV}/c}] + n [0.2_{\text{GeV}/c}] + \pi^0 [0.2_{\text{GeV}/c}] + p [0.1_{\text{GeV}/c}] + p [0.1_{\text{GeV}/c}] + n [0.2_{\text{GeV}/c}] + p [0.2_{\text{GeV}/c}] + n [0.3_{\text{GeV}/c}] + n [0.1_{\text{GeV}/c}] + n [0.1_{\text{GeV}/c}]$



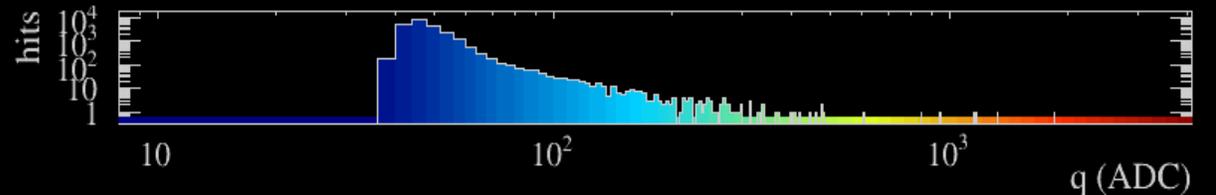
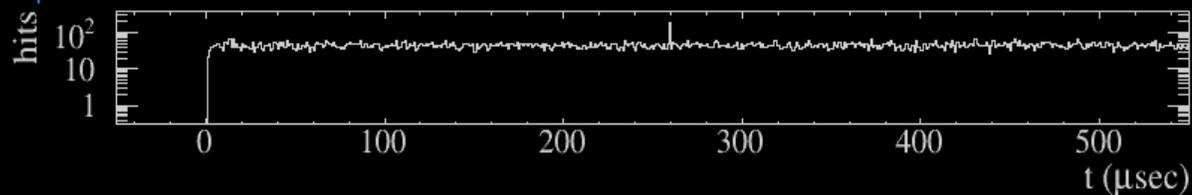


# Розыгрыш событий

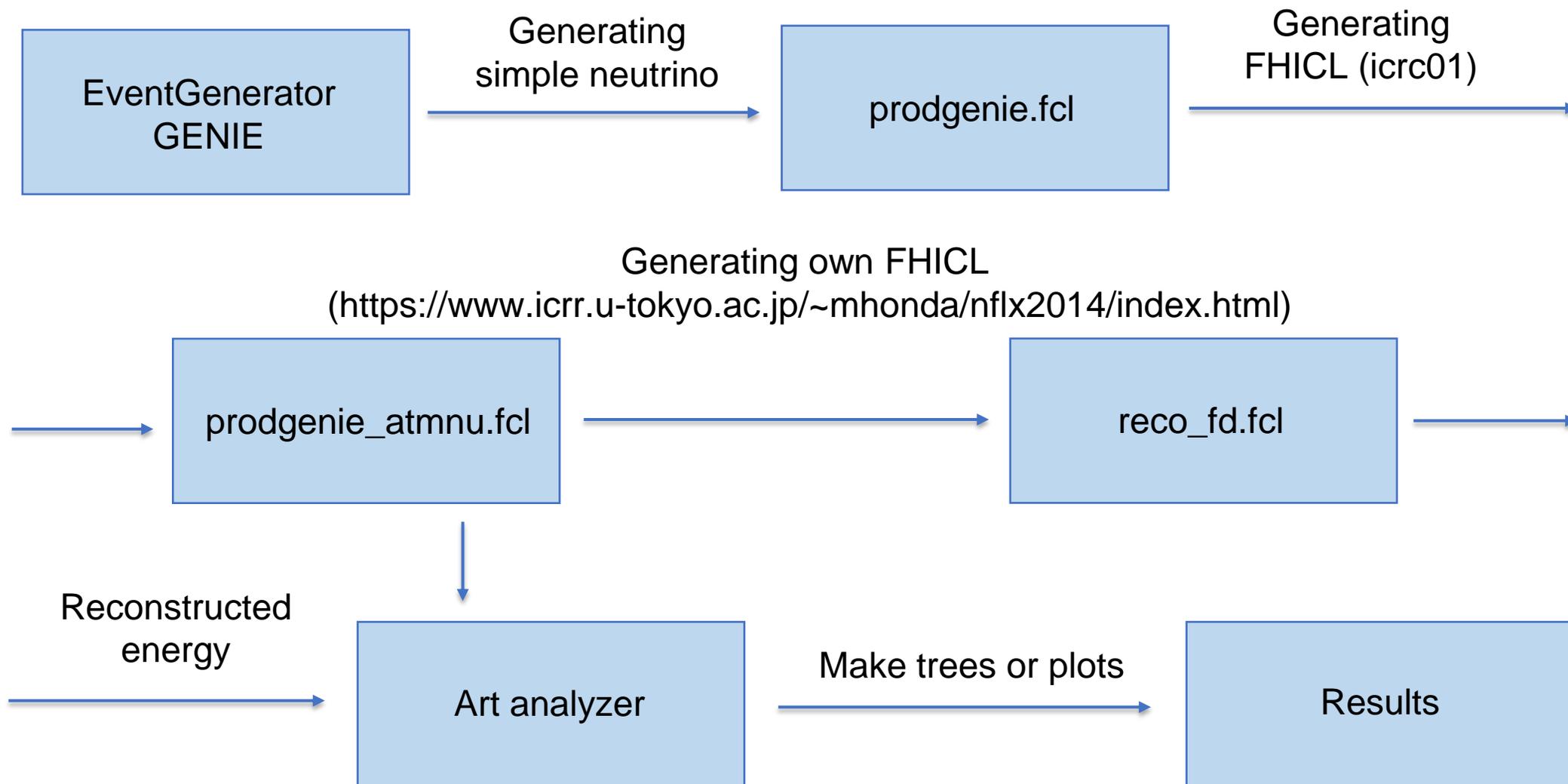




$\nu_{\mu} [3.0_{\text{GeV}/c}] + p \rightarrow \mu [1.1_{\text{GeV}/c}] + \Sigma^+ [1.3_{\text{GeV}/c}] + K^0 [0.5_{\text{GeV}/c}] + \pi^+ [0.1_{\text{GeV}/c}] + \pi^0 [0.1_{\text{GeV}/c}]$  (DIS)

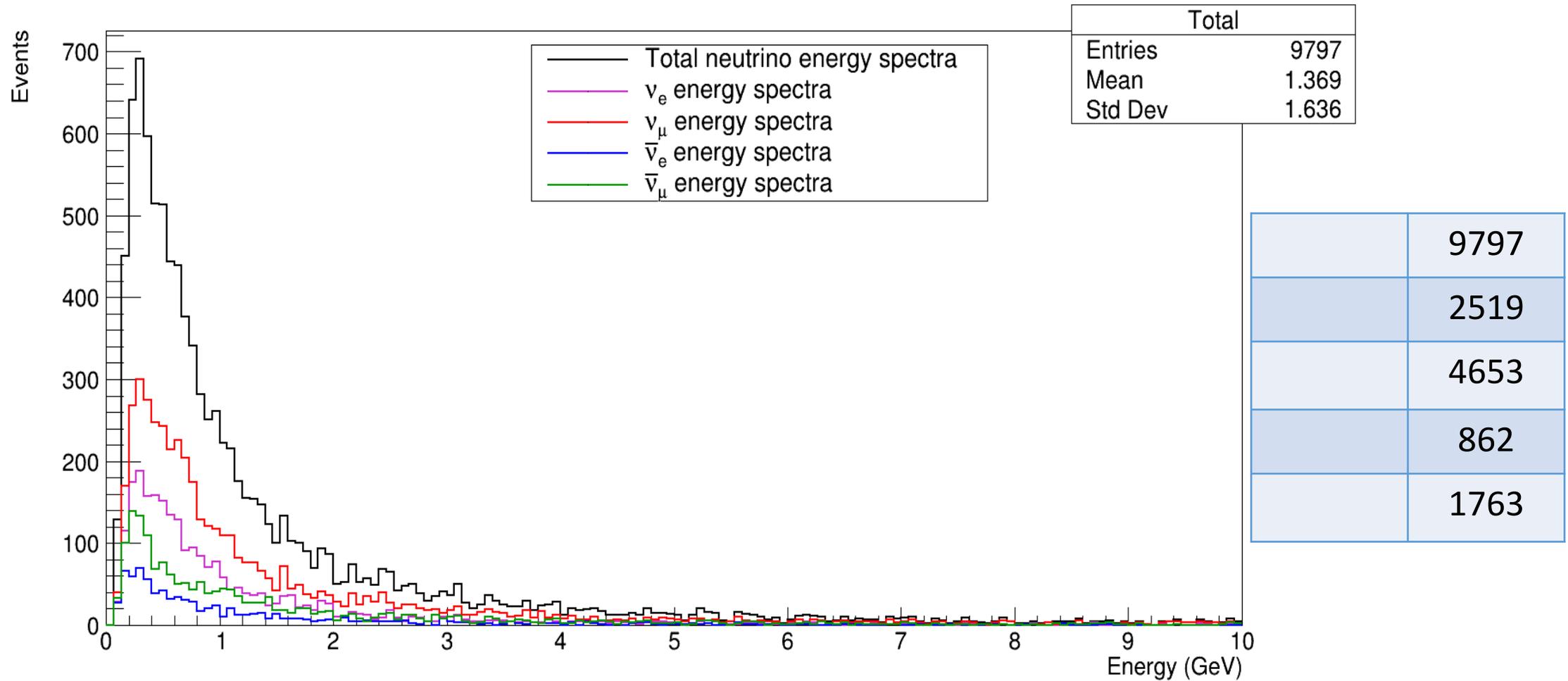


# Работа с NOvASoft



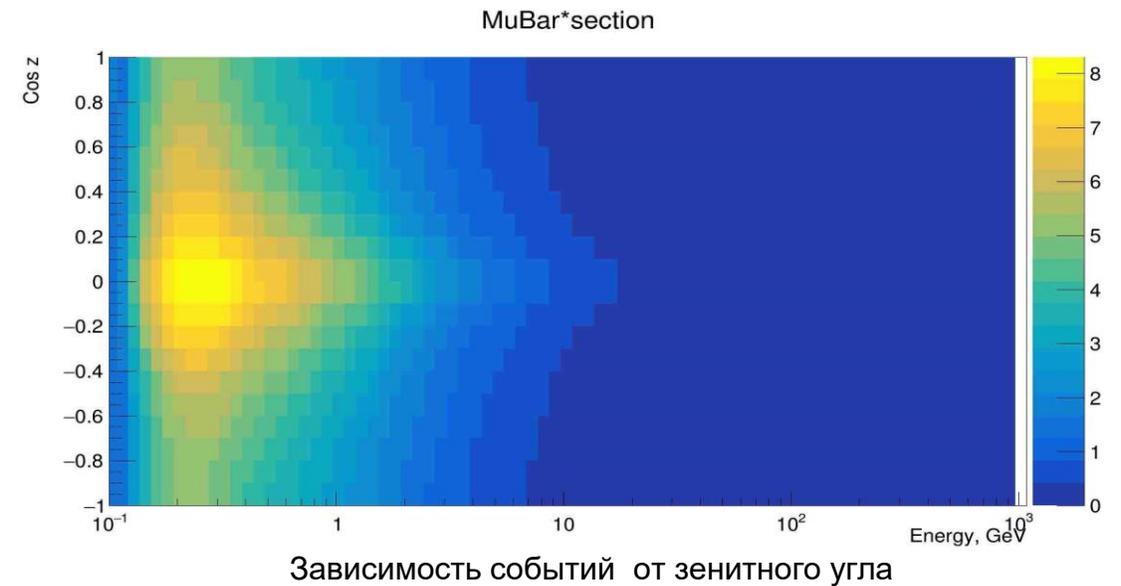
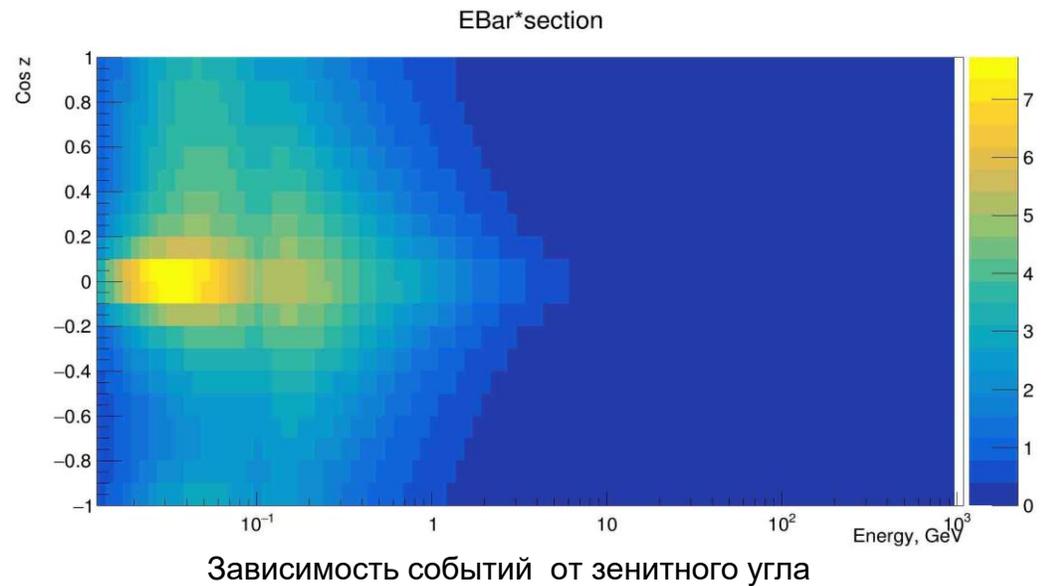
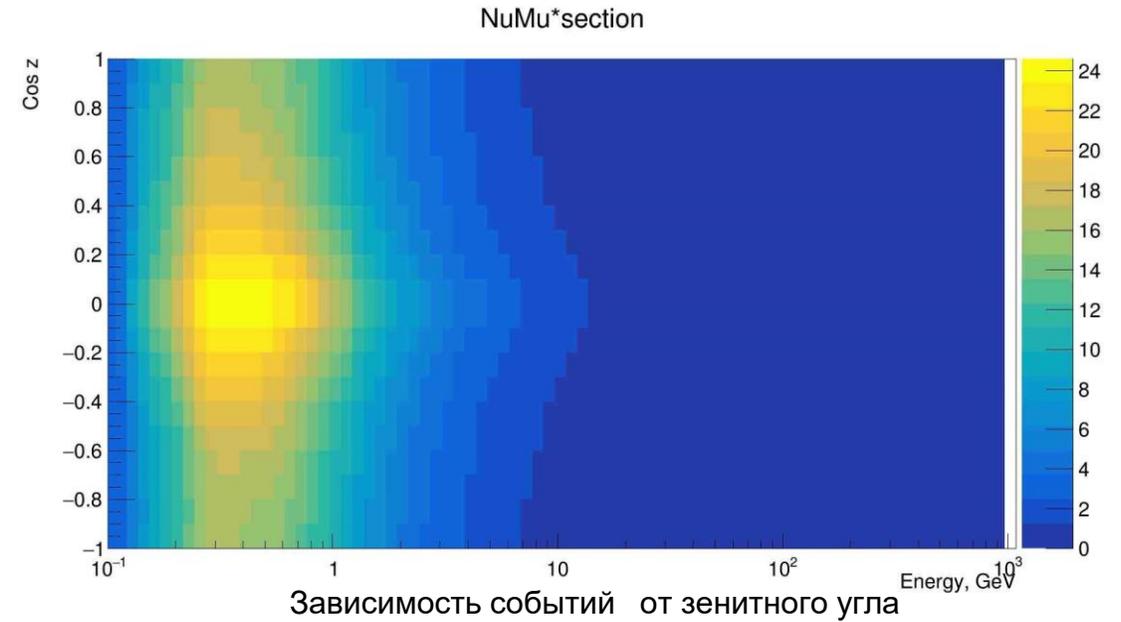
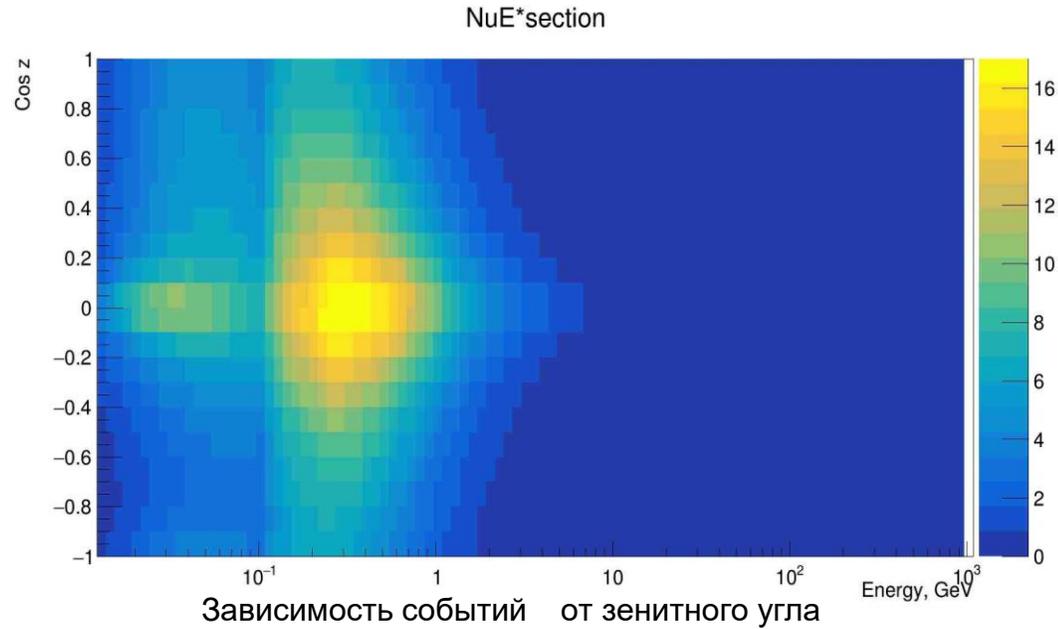
# Энергетический спектр нейтрино

## Total neutrino energy spectra

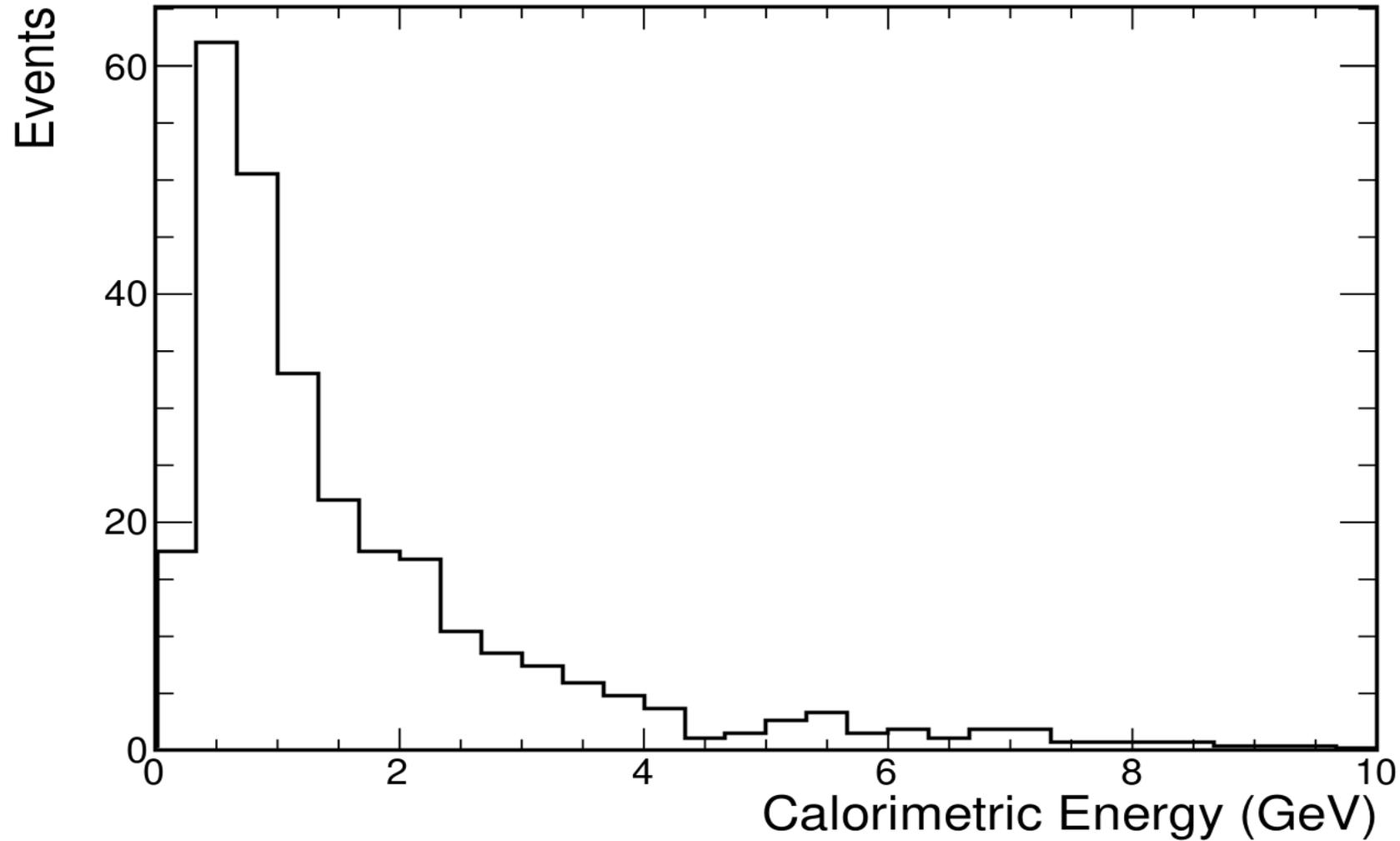


Зависимость событий атмосферных нейтрино и антинейтрино от энергии с учётом временем экспозиции детектора  $8.488957e+07$  с (2,7 года).

# Угловые распределения нейтрино

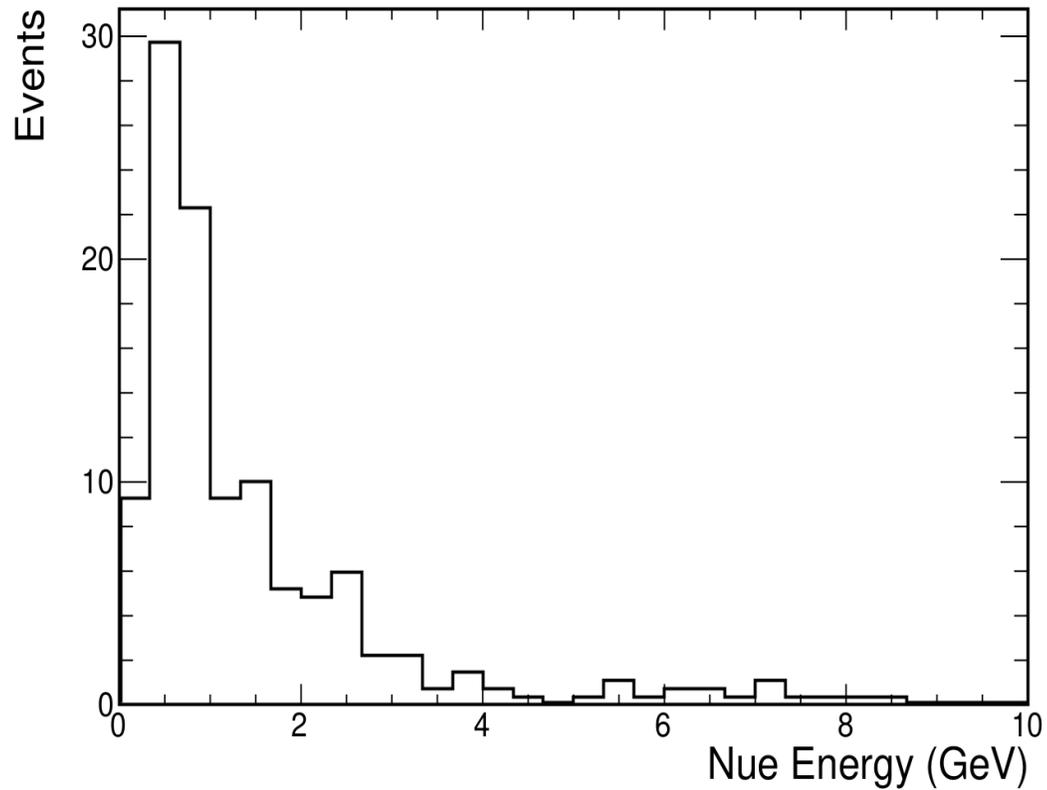


# Реконструкция событий

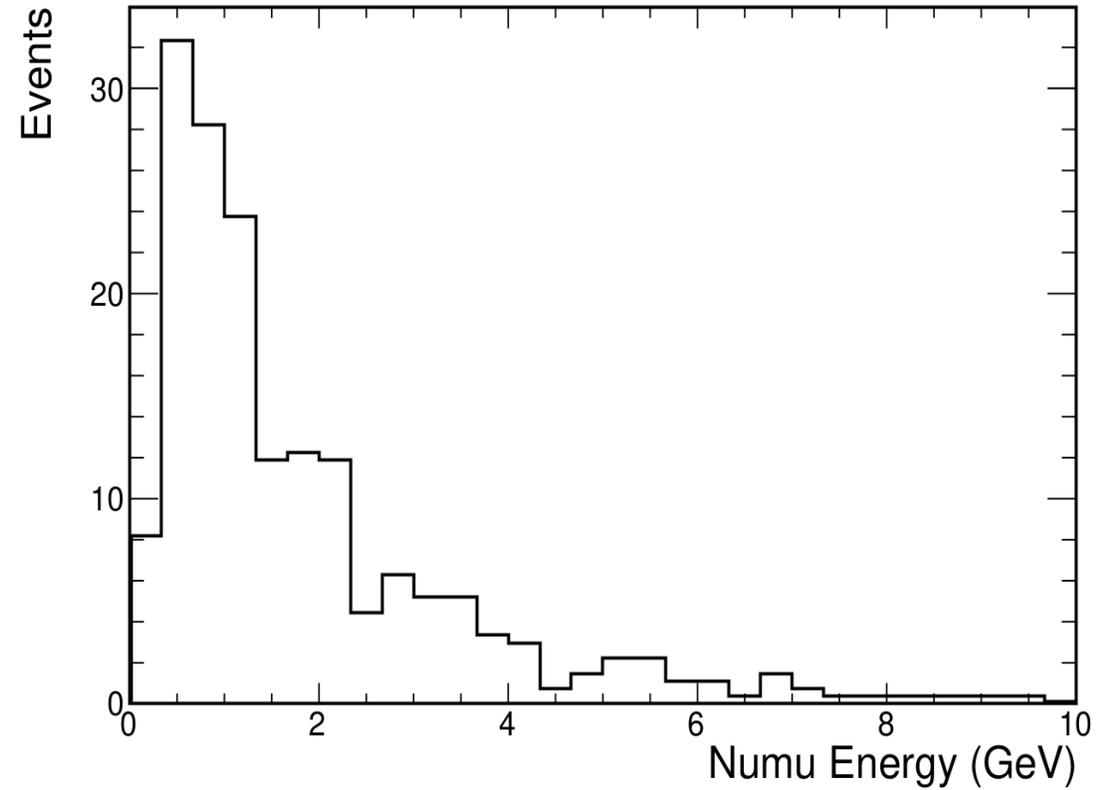


Зависимость реконструированных событий от энергии.

# Реконструкция событий

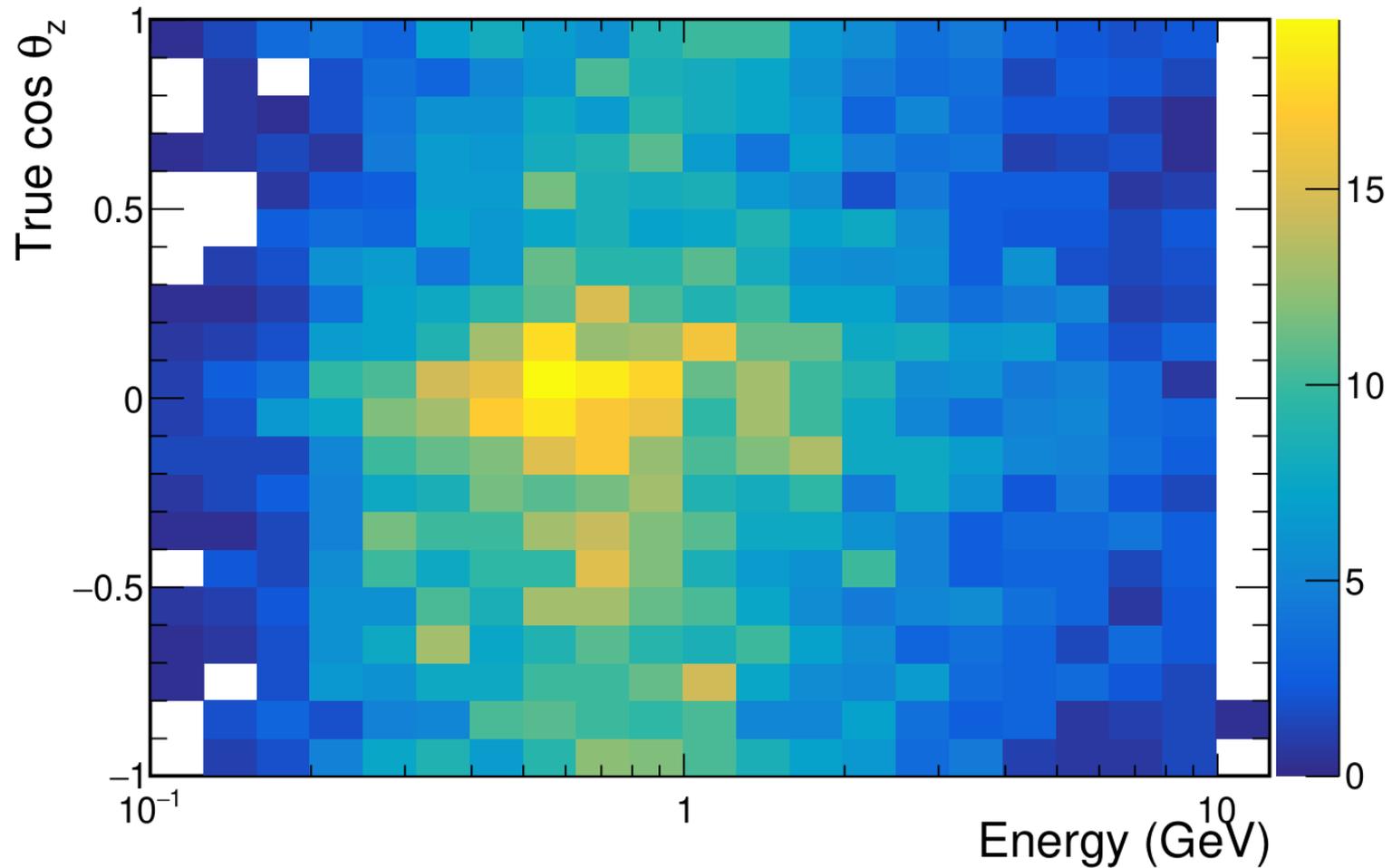


Зависимость реконструированных событий от энергии.



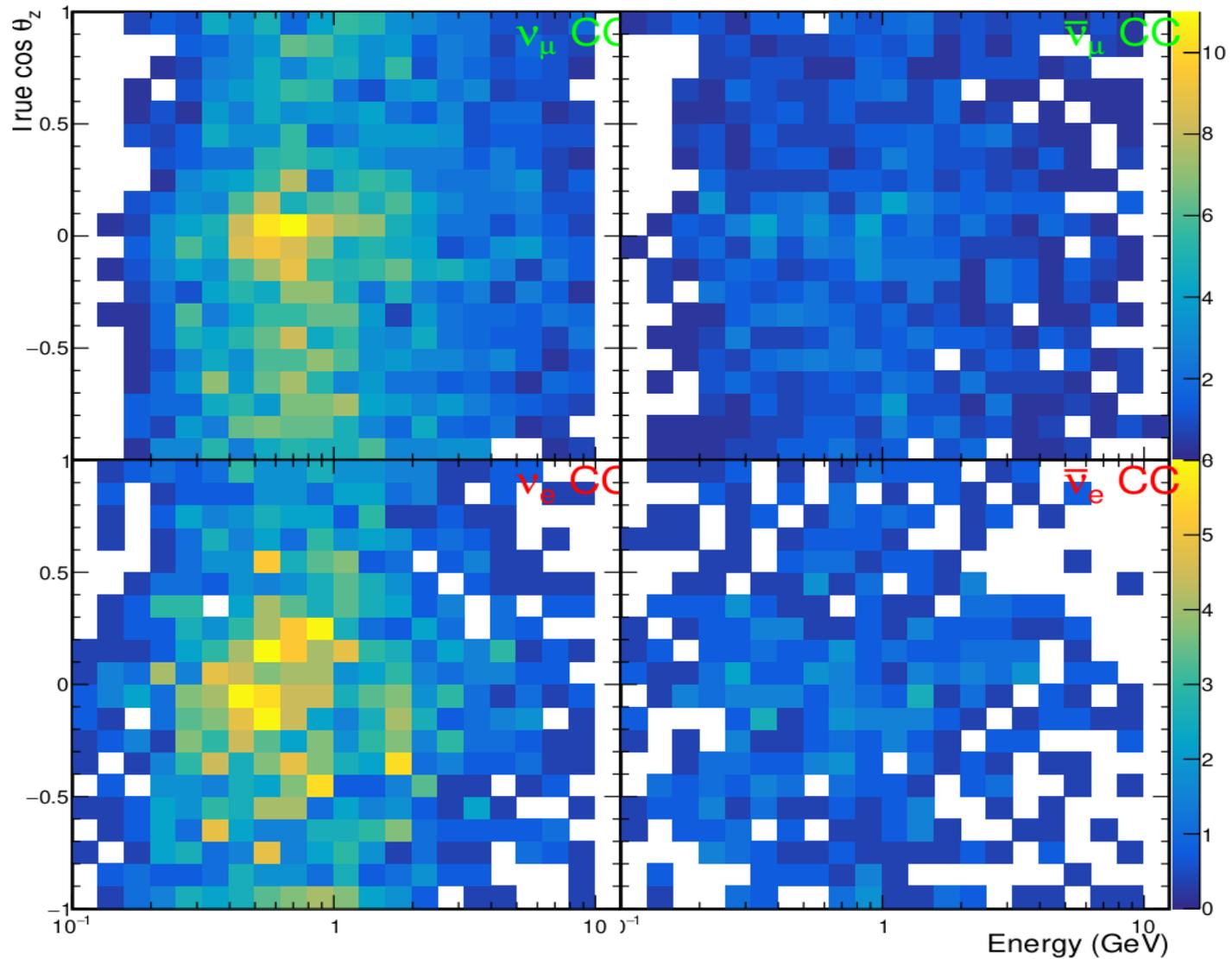
Зависимость реконструированных событий от энергии.

# Угловые распределения нейтрино



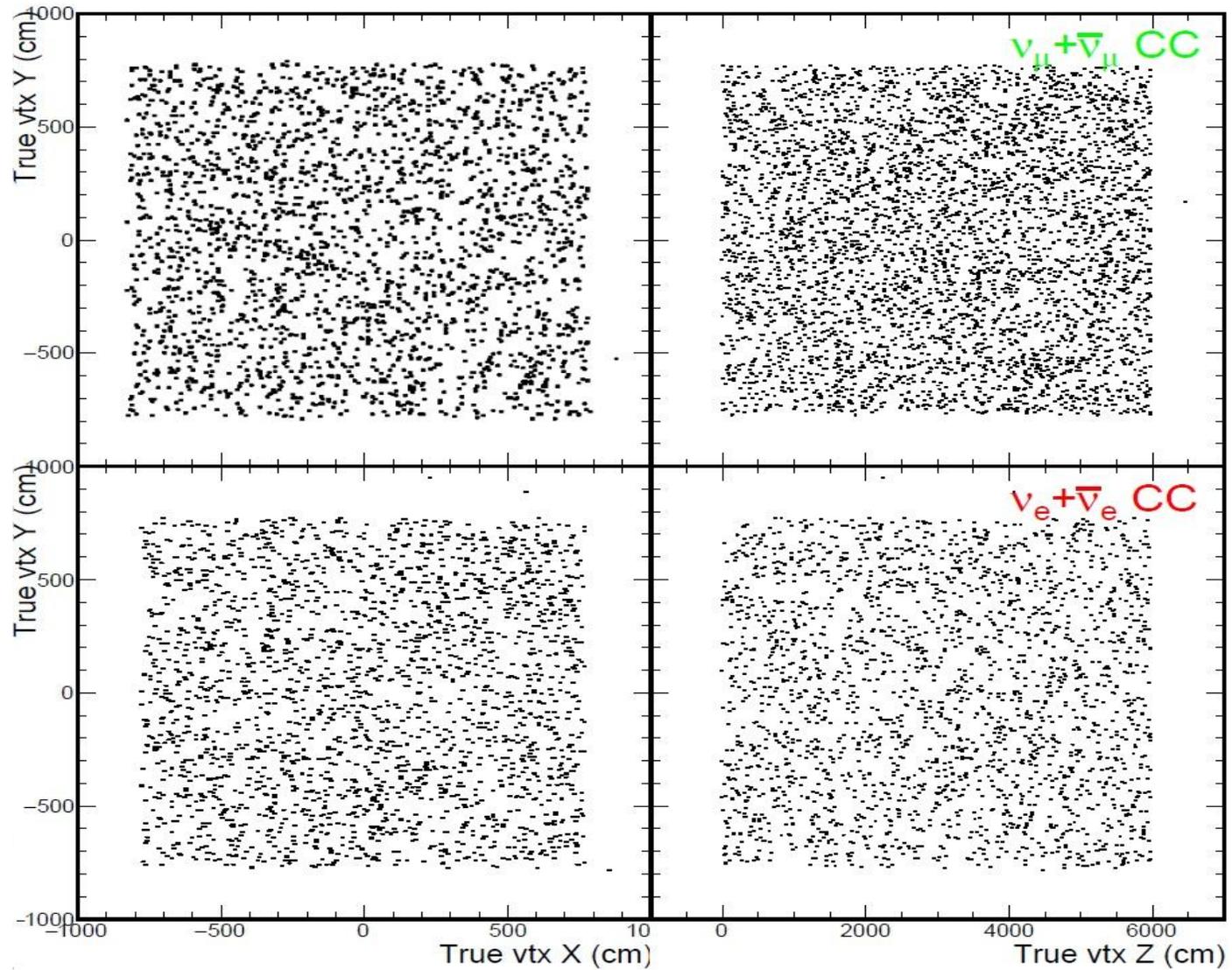
Зависимость реконструированных событий ( ) и ( ) от зенитного угла.

# Угловые распределения нейтрино



Зависимость реконструированных событий  $(\nu)$  CC и  $(\bar{\nu})$  CC от зенитного угла.

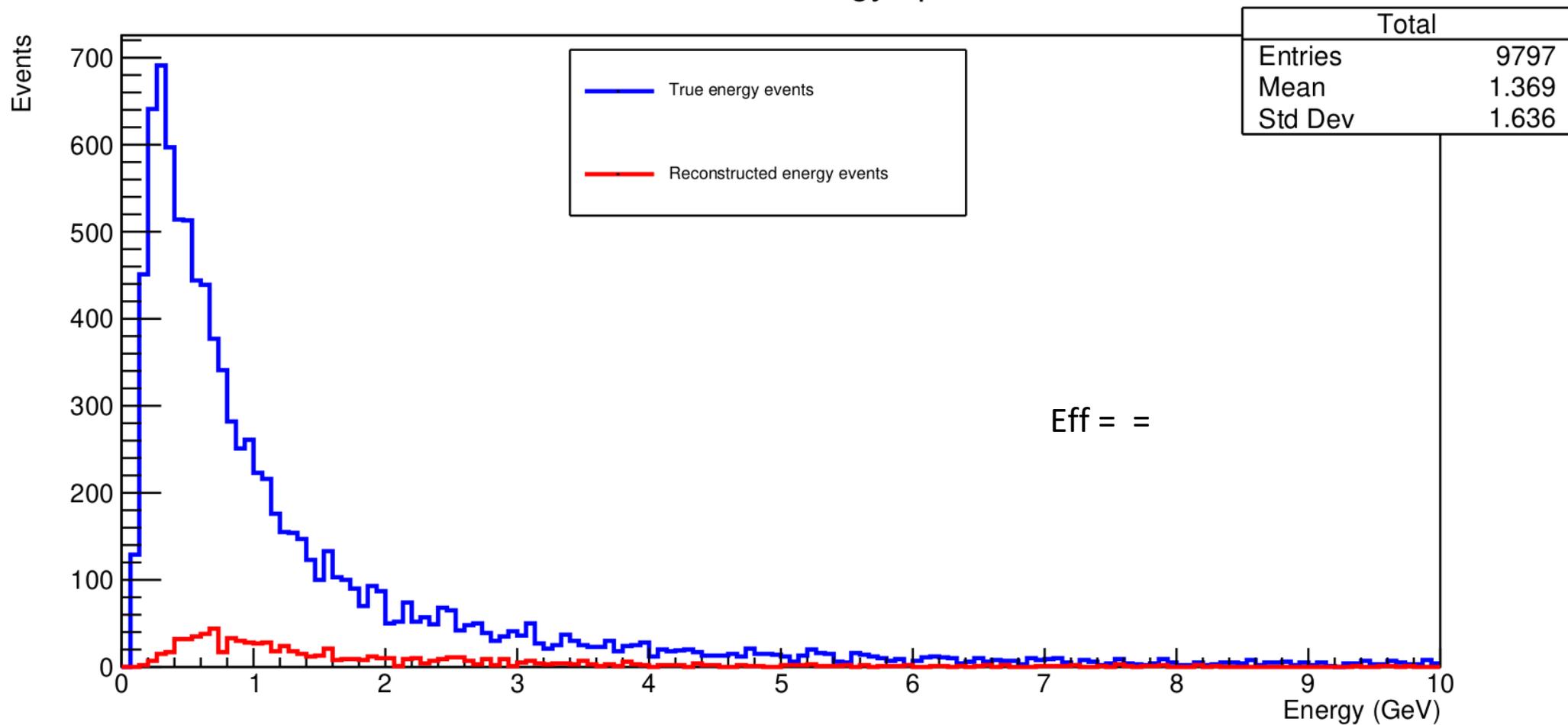
# События в объёме детектора



Набор событий в эффективном объёме дальнего детектора по оси XY и ZY.

# Оценка эффективности

## Total neutrino energy spectra



Зависимость симулированных и реконструированных событий от энергии.

# Выводы

Автором магистерской диссертации было выполнено исследование, ставящее своей целью расширение физической программы эксперимента NOvA, а именно, была проанализирована возможность детектирования событий атмосферных нейтрино. В результате работы было получено следующее:

- Рассчитаны энергетические спектры и угловые распределения атмосферных нейтрино в эксперименте NOvA.
- Произведено моделирование событий в дальнем детекторе NOvA.
- Получены и отобраны реконструированные события всех типов нейтрино.

Количество событий в дальнем детекторе от атмосферных нейтрино в год:

- - 627
- - 1133
- - 203
- - 396

Количество реконструированных событий в дальнем детекторе от атмосферных нейтрино в год:

- - 110
- - 170
- - 34
- - 57

# Выводы

- Рассчитана эффективность регистрации событий в дальнем детекторе NOvA, которая составляет 15,73 %.

Полученные результаты не улучшают данные, которые можно зарегистрировать за 10 лет в NOvA = 7251, по сравнению с Супер-Камиоканде = 30915, однако зарегистрированные события позволяют расширить работу эксперимента NOvA, а именно:

- Изучить возможность измерения потока атмосферных нейтрино в эксперименте NOvA.
- Изучить параметры нейтринных осцилляций на основе атмосферных нейтрино ( и ). Провести потенциальный совместный анализ с ускорительными нейтрино в NOvA. Рассмотреть нестандартные нейтринные взаимодействия (NSI).
- Оценить сигнал, полученный в результате взаимодействия космических лучей с атмосферой Солнца и грунтом Луны.
- Использовать поток атмосферных нейтрино, как фон для различных прикладных задач:
  - Изучение магнитного момента нейтрино.
  - Поиск Темной материи.
  - Изучение распада протона.
  - Изучение нейтрон-антинейтронных осцилляций ( ).

---

**Спасибо за внимание!**

---

# Прикладные задачи

## Поиск Темной материи.

Нейтрино теоретически может взаимодействовать с WIMP-ами. Например, аннигиляция внутри массивных небесных тел: звезд, планет и галактик. Согласно теории, WIMP-ы там теряют энергию в результате упругого рассеяния на ядрах и могут быть захвачены гравитацией. Затем накапливаются до необходимой концентрации и в итоге аннигилируют друг с другом (так как являются майорановскими, то есть частица тождественна античастице). В результате получаются частицы Стандартной Модели, которые, в свою очередь, распадаются с испусканием нейтрино.

Самым близким к нам массивным объектом является Солнце. Попробуем рассмотреть его как потенциальный источник нейтрино от взаимодействия частиц темной материи. Эти нейтрино будут заметно отличаться от продуктов обычных ядерных реакций, идущих в недрах звезды (солнечные нейтрино, полученные в последних, имеют значительно меньшую энергию). Для частиц темной материи в ядре Солнца возможны три процесса: аннигиляция, упругое рассеяние и неупругое с потерей энергии. В результате потери энергии WIMP накапливаются в ядре, что приводит к повышению вероятности аннигиляции.

Для регистрации потоков на Земле необходимо оценить эффективный объем детектора и выделить нужный сигнал из фона атмосферных нейтрино. Основным критерием в данном случае является направление: нейтрино от аннигиляции темной материи должны приходить из центра Солнца.

## Распад протона

Протон состоит из 3 кварков. Пи-мезон, состоящий из 2 кварков и с вероятностью 98% мгновенно распадающийся на два кванта гамма-излучения. Третий кварк, присутствовавший в протоне, улетает в виде лептона, таким лептоном должен быть позитрон, положительно заряженная античастица, зеркальная электрону. Таким образом, распад протона позволял бы получать заряженное антивещество, которое можно было бы удерживать магнитным полем и уберегать от неконтролируемой аннигиляции с обычным веществом.

