



ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. ЛОМОНОСОВА»
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ФИЗИКИ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ЧАСТИЦ

Определение времени и координат взаимодействий частиц с помощью оптической системы в ближнем жидкоаргоновом детекторе эксперимента DUNE

Выполнил студент 409 группы
Ленский Петр Игоревич
Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук
Наумов Дмитрий Вадимович
Научный консультант:
канд. физ.-мат. наук
Чуканов Артём Владиславович



Введение

- Изучение нейтринных осцилляций необходимо для определения параметров расширенной Стандартной модели физики элементарных частиц.
- Если нейтрино – частицы Дирака и существует только три аромата (флэйвора) нейтрино, вероятность нейтринных осцилляций определяется семью параметрами: тремя углами смешивания, фазой нарушения CP-инвариантности, расщеплениями и иерархией масс нейтрино.
- На сегодняшний день остаются неизвестными следующие параметры:
 - октант, в котором лежит угол θ_{23} ;
 - фаза нарушения CP-инвариантности δ_{CP} ;
 - иерархия масс нейтрино (знак Δm_{31}^2).
- Основными задачами эксперимента DUNE являются измерение неизвестных и уточнение измеренных параметров нейтринных осцилляций.



Цель и задачи работы

Цель работы — моделирование отклика оптической системы ближнего жидкоаргонового детектора эксперимента DUNE на прохождение мюонов через камеру детектора, определение координат проходящих через камеру мюонов с помощью данной системы.

Задачи работы:

- ознакомление с устройством эксперимента DUNE;
- обработка калибровочных данных для получения параметров сцинтилляции жидкого аргона;
- моделирование в Geant4 отклика оптической системы ближнего жидкоаргонового детектора на прохождение мюонов через модуль детектора;
- оценка эффективности регистрации фотонов оптической системой и определение пространственного разрешения данной системы.



Смешивание нейтрино и осцилляционные параметры

Связь флейворных и массовых состояний нейтрино: $|v_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i}^* |v_i\rangle$

Матрица смешивания:

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}}_{\text{Left}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}}_{\text{Middle}} \underbrace{\begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{\text{Right}}$$

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu, \nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

$$|\Delta m_{32}^2| = |m_3^2 - m_2^2|$$

Эксперименты
атмосферные и с
длинной базой

$$\nu_e \rightarrow \nu_e, \nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

$$\Delta m_{31}^2 \simeq \Delta m_{32}^2$$

Эксперименты
реакторные и с длинной
базой

$$\nu_e \rightarrow \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$$

$$|\Delta m_{21}^2| = |m_2^2 - m_1^2|$$

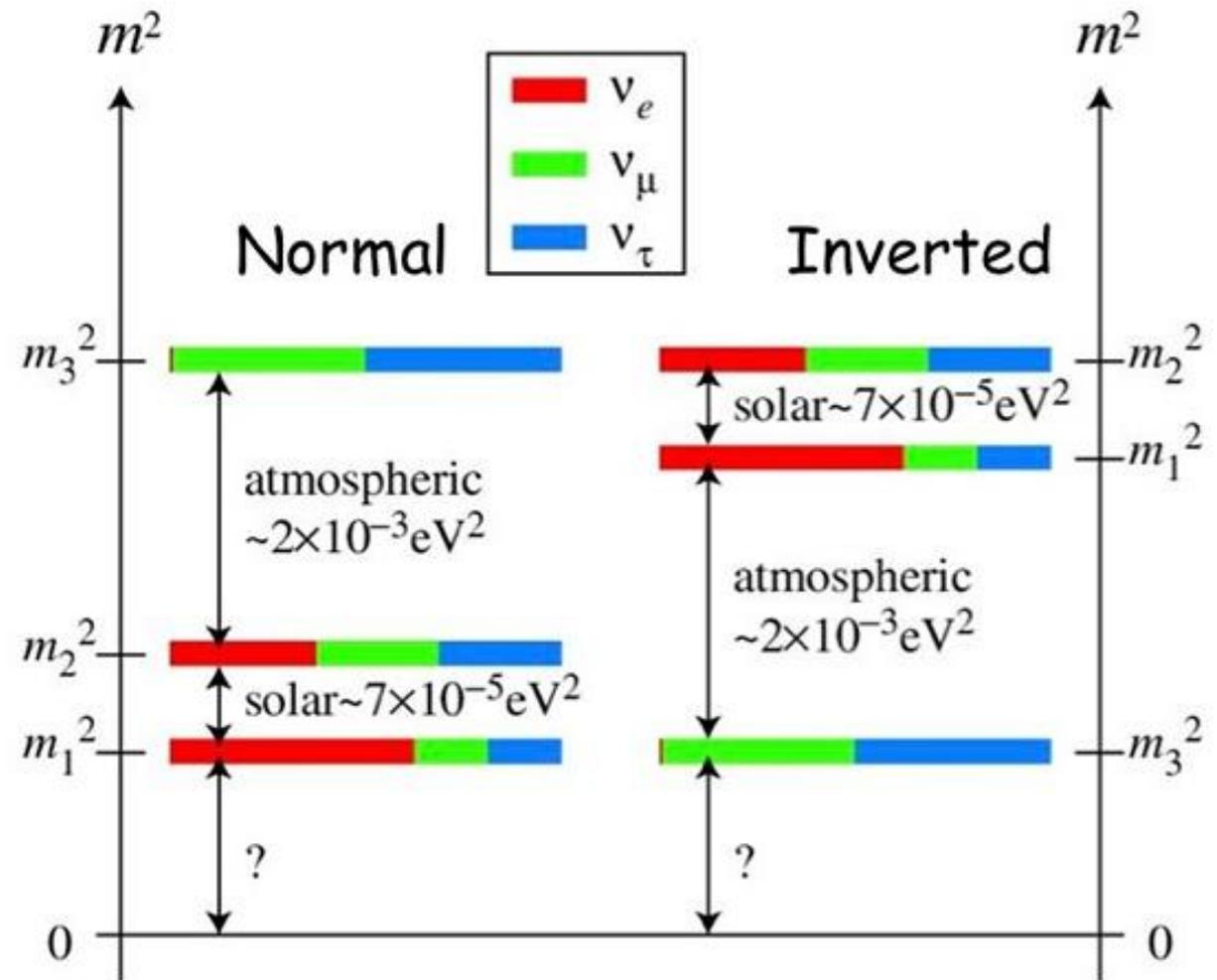
Эксперименты
реакторные и
солнечные





Иерархия масс нейтрино

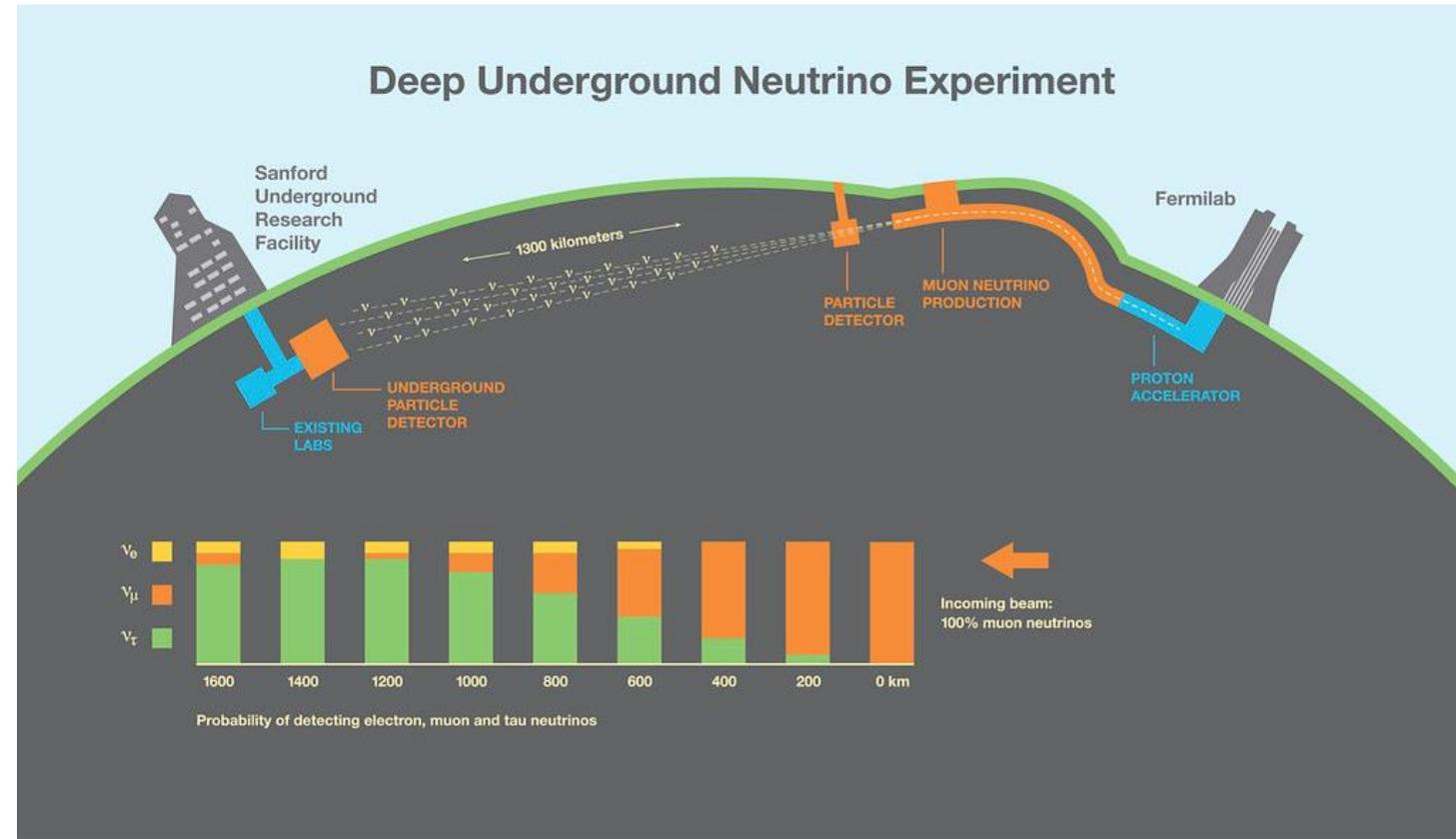
- Помимо абсолютных значений расщеплений масс нейтрино необходимо знать иерархию масс нейтрино, то есть знак Δm_{31}^2 .





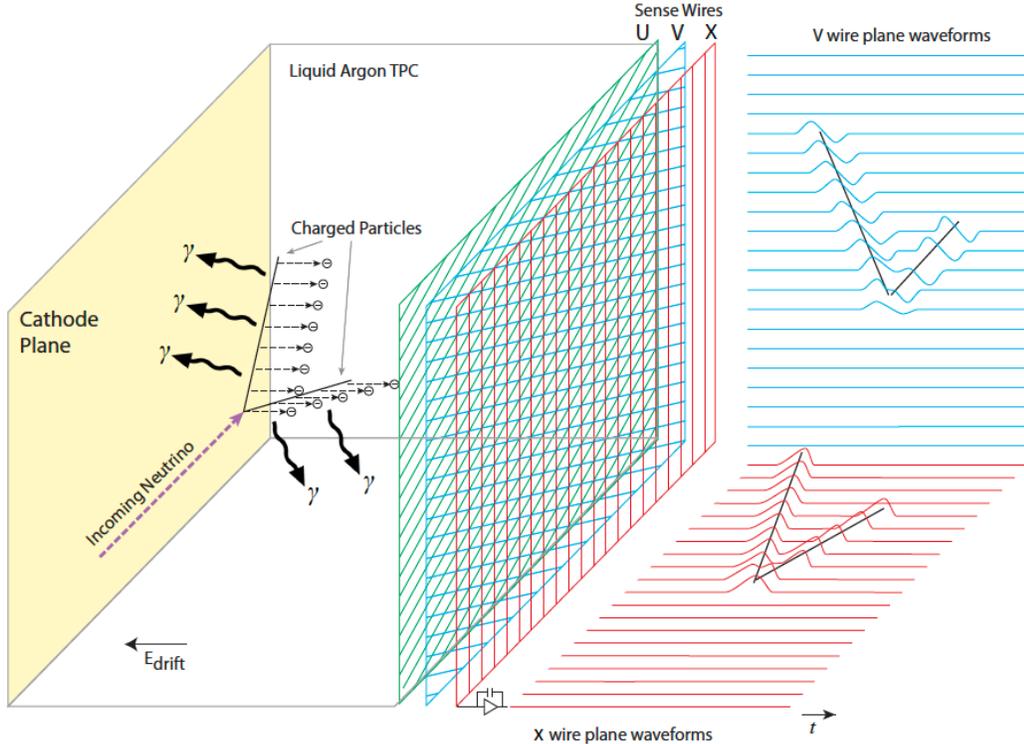
Эксперимент DUNE

- Длинная база осцилляций (1285 км).
- Большие объёмы рабочих областей детекторов. Дальний детектор будет содержать 40 кт ^{40}Ar .
- Широкий диапазон энергий нейтрино (0,5 – 8 ГэВ).

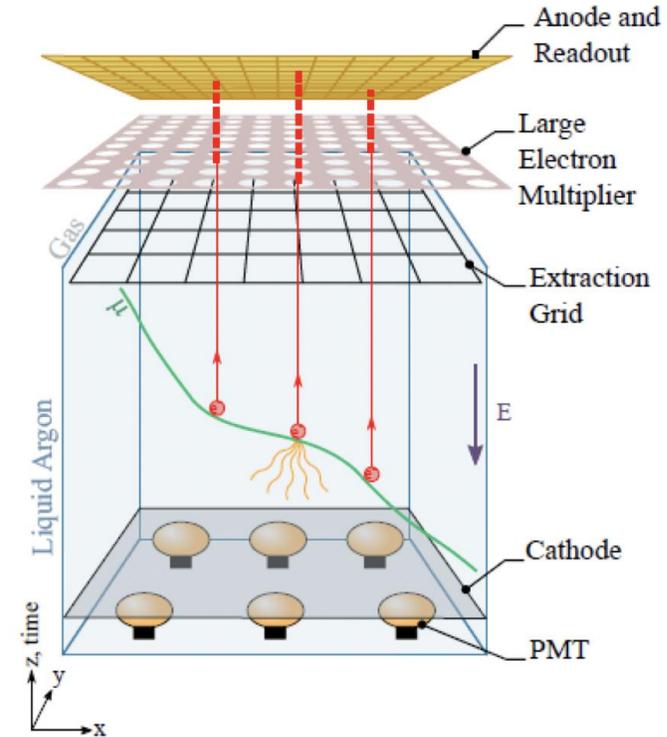


Дальний детекторный комплекс

Однофазная технология (только жидкий аргон)



Двухфазная технология (жидкий и газообразный аргон)



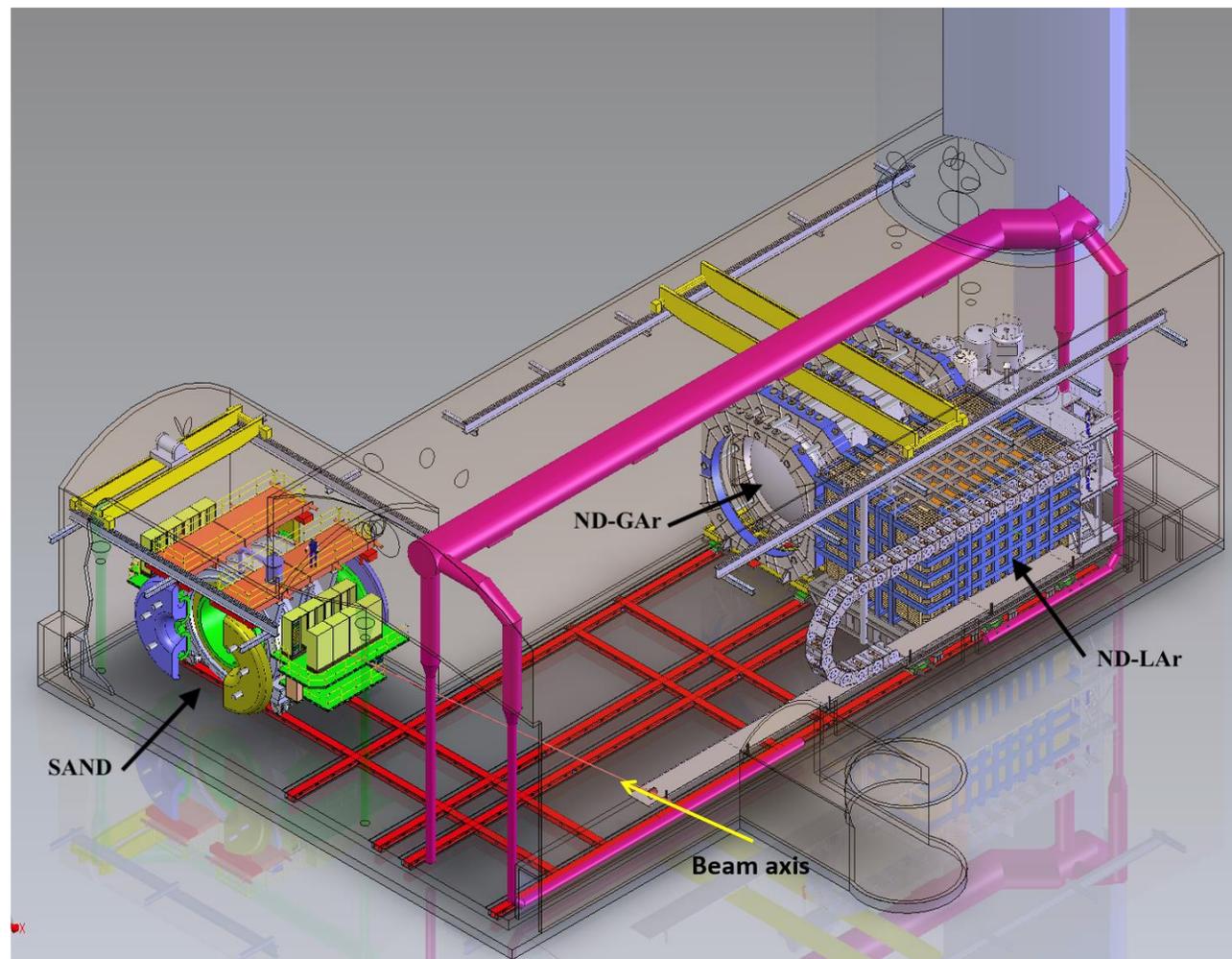


Ближний детекторный комплекс

Ближний комплекс состоит из трёх детекторов:

- ND-LAr – жидкоаргоновая ВПК;
- ND-GAr – аргоновый газовый детектор, измеряет импульс и знак заряда вылетающих из ND-LAr частиц;
- SAND – система мониторинга пучка на оси.

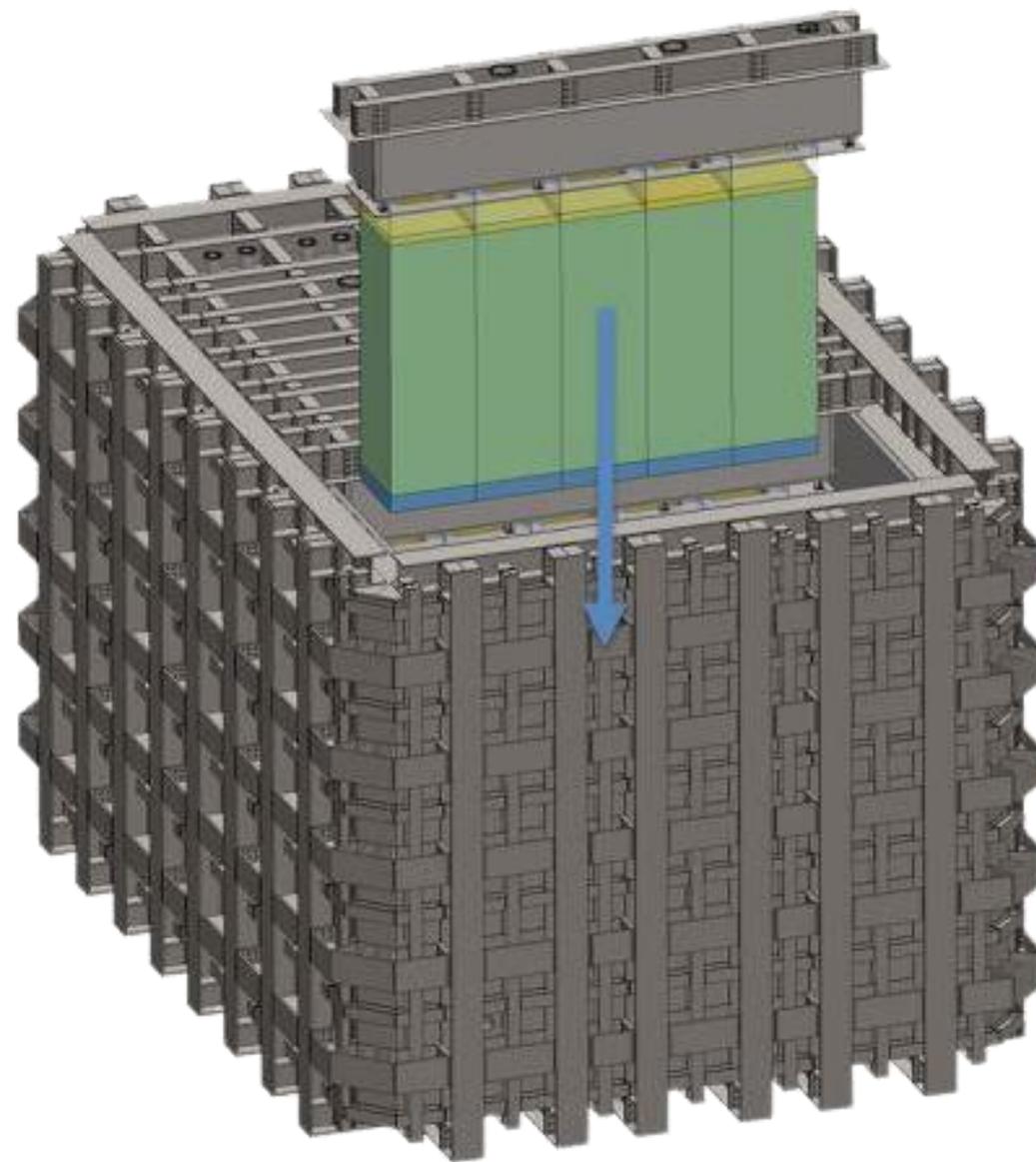
Первые два детектора образуют подвижный модуль DUNE-Prism и могут служить для внеосевых измерений для предсказания состава пучка в дальнем детекторе.



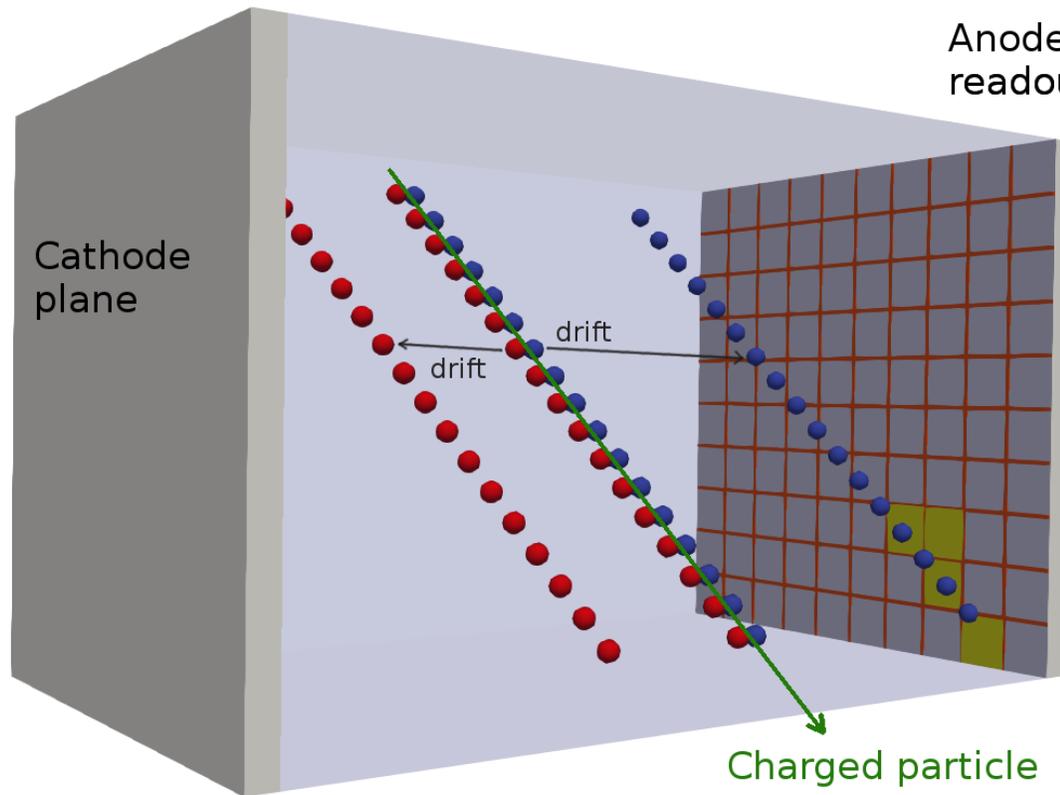


Ближний жидкоаргоновый детектор (ND-LAr)

- ND-LAr представляет собой массив из 35 модулей (5 в длину и 7 в ширину), каждый из которых разделён катодной плоскостью на две оптически изолированные ВПК.

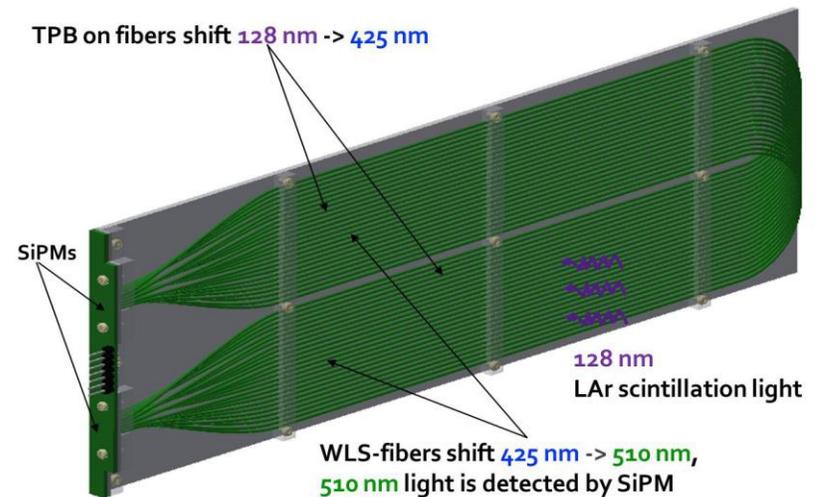
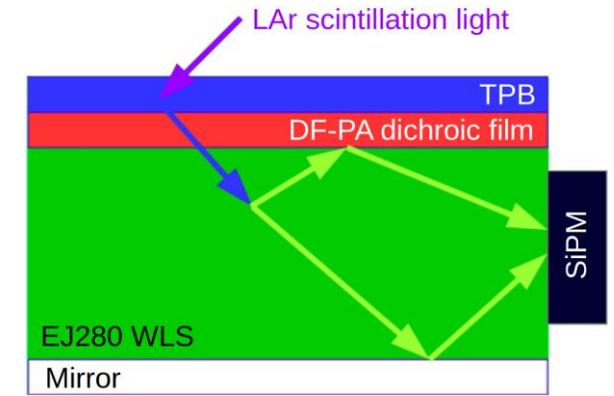


Ближний жидкоаргоновый детектор (ND-LAr)

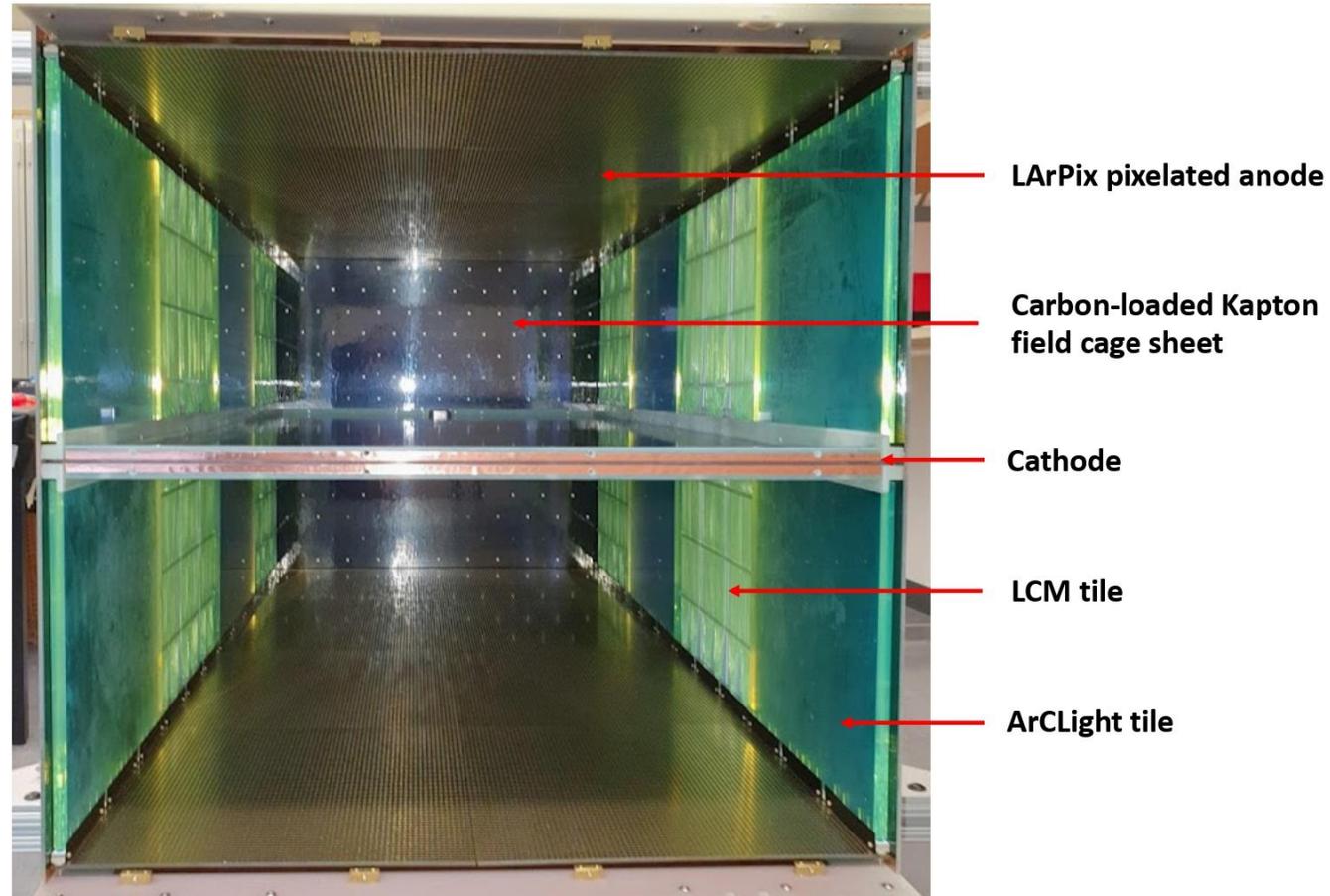


Anode- and charge readout plane

- Ionized atom
- Ionization electron



ND-LAr. Отдельный модуль





Задание параметров сцинтиллятора в Geant4

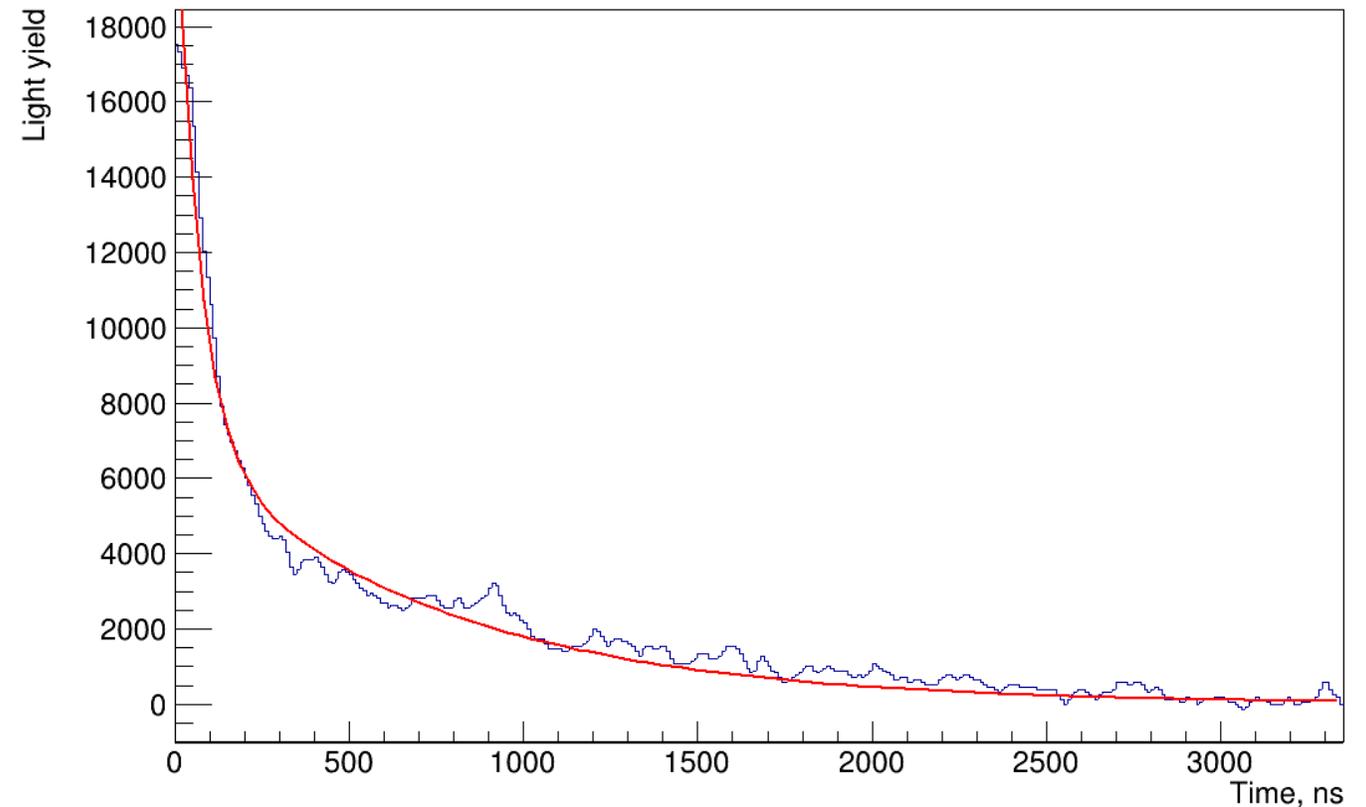
При обработке калибровочных данных были получены следующие параметры сцинтиллятора:

- времена высвечивания «быстрой» (66,4 нс) и «медленной» (735,8 нс) компонент;
- доля фотонов в «быстрой» компоненте (0,171).

Световой выход (число фотонов на 1 МэВ выделенной энергии) в жидком аргоне при величине поля 500 В/см составляет 24000 (arXiv: 2203.16134 [physics.ins-det]).

$$I = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_f}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_s}\right)$$

Waveform



Отклик оптической системы прототипа ND-LAr на пролетающий через камеру детектора мюон

Оценка эффективности регистрации фотонов оптической системой ND-LAr

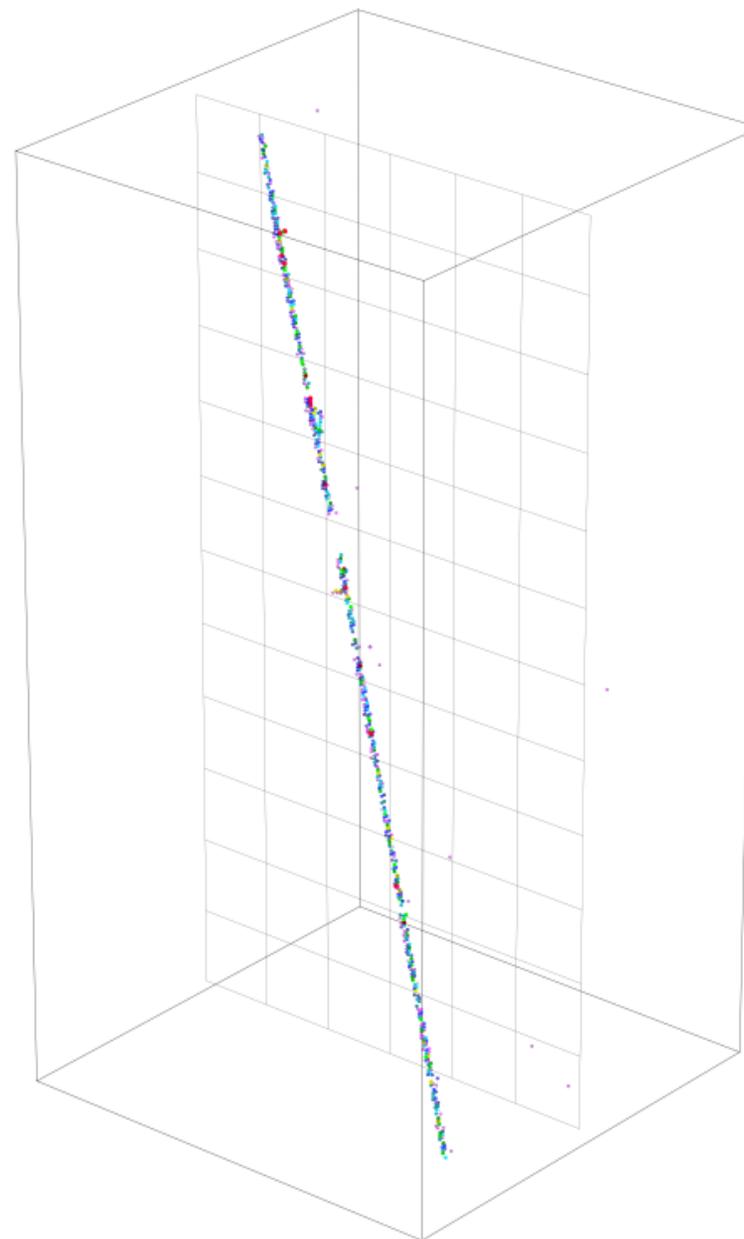
- Отбирались события в зарядовой системе прототипа ND-LAr “Module 0”;
- в Geant4 моделировались идентичные события в камере детектора;
- при моделировании подсчитывалось количество фотонов, попавших на поверхность каждого из детекторов оптической системы;
- эффективность каждого из детекторов оценивалась как отношение количества фотонов, зарегистрированных детектором оптической системы прототипа, к количеству фотонов, попавших на поверхность детектора при моделировании соответствующего события.





Отбор событий в зарядовой системе прототипа “Module 0”

- Отбирались одночастичные события с наиболее прямыми треками;
- для дальнейшего моделирования данные события, представляющие собой набор точек в трёхмерном пространстве, аппроксимировались прямой линией, откуда находилась начальная точка трека и его направляющий вектор.

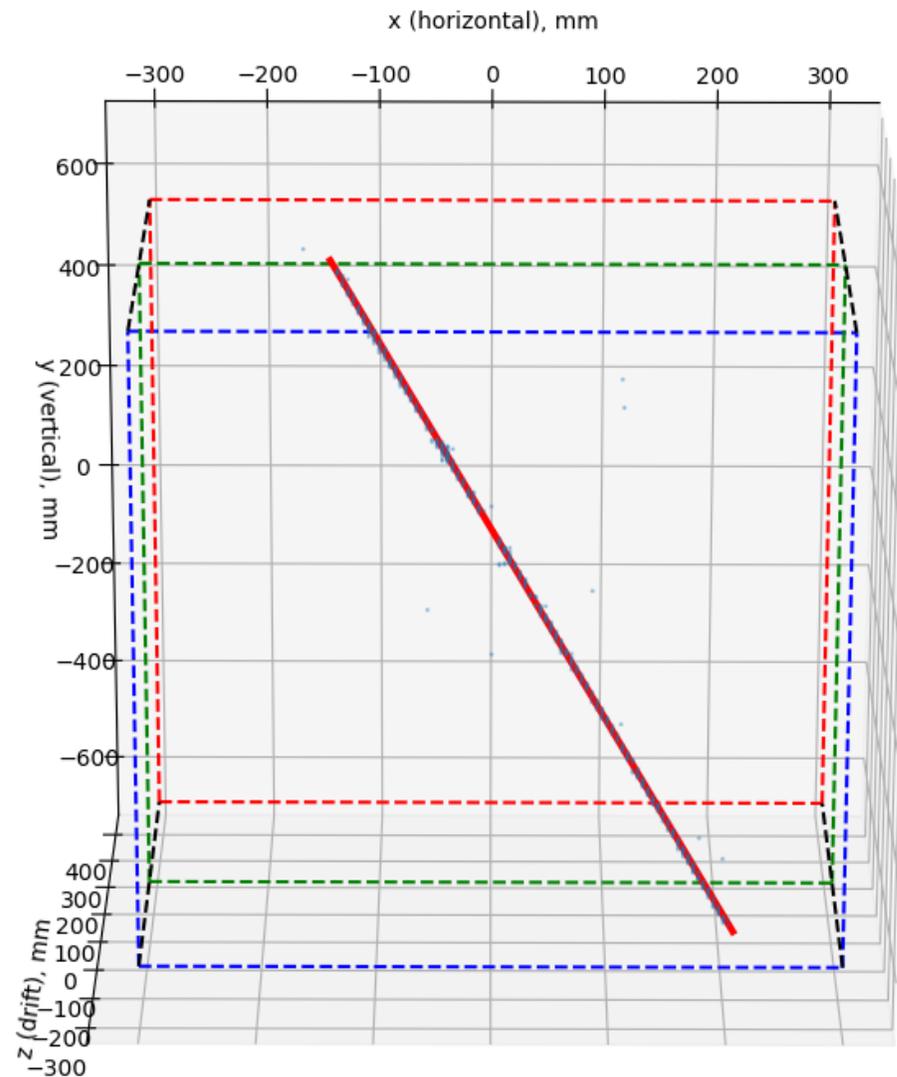


Пример отобранного события



Обработка отобранных событий

- Было отобрано и обработано около 100 событий в зарядовой системе прототипа детектора.
- Для каждого из них в Geant4 моделировались мюонные треки с такой же начальной точкой и направляющим вектором.

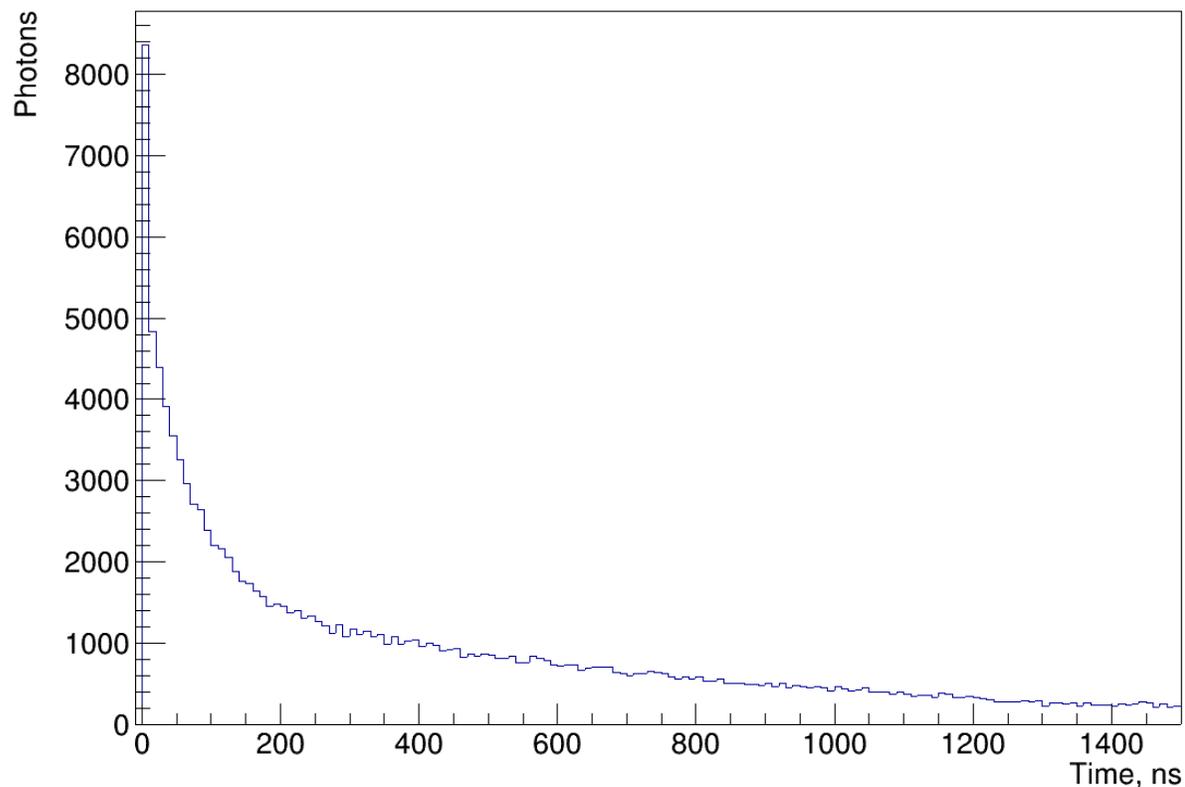


Отобранное событие, аппроксимированное прямой в пространстве

Определение эффективности регистрации фотонов

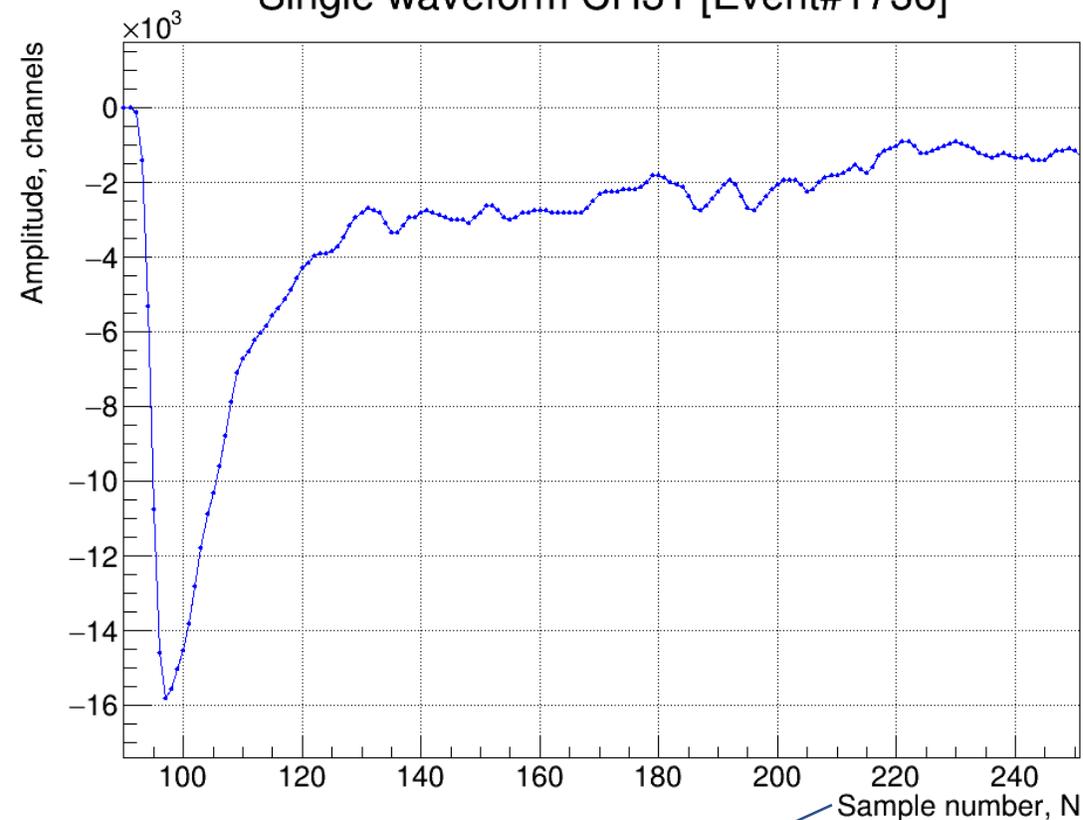
Распределение числа фотонов, попавших на поверхность одного из детекторов оптической системы

Light readout



Сигнал в канале АЦП, соответствующем этому детектору в камере прототипа

Single waveform CH31 [Event#1736]

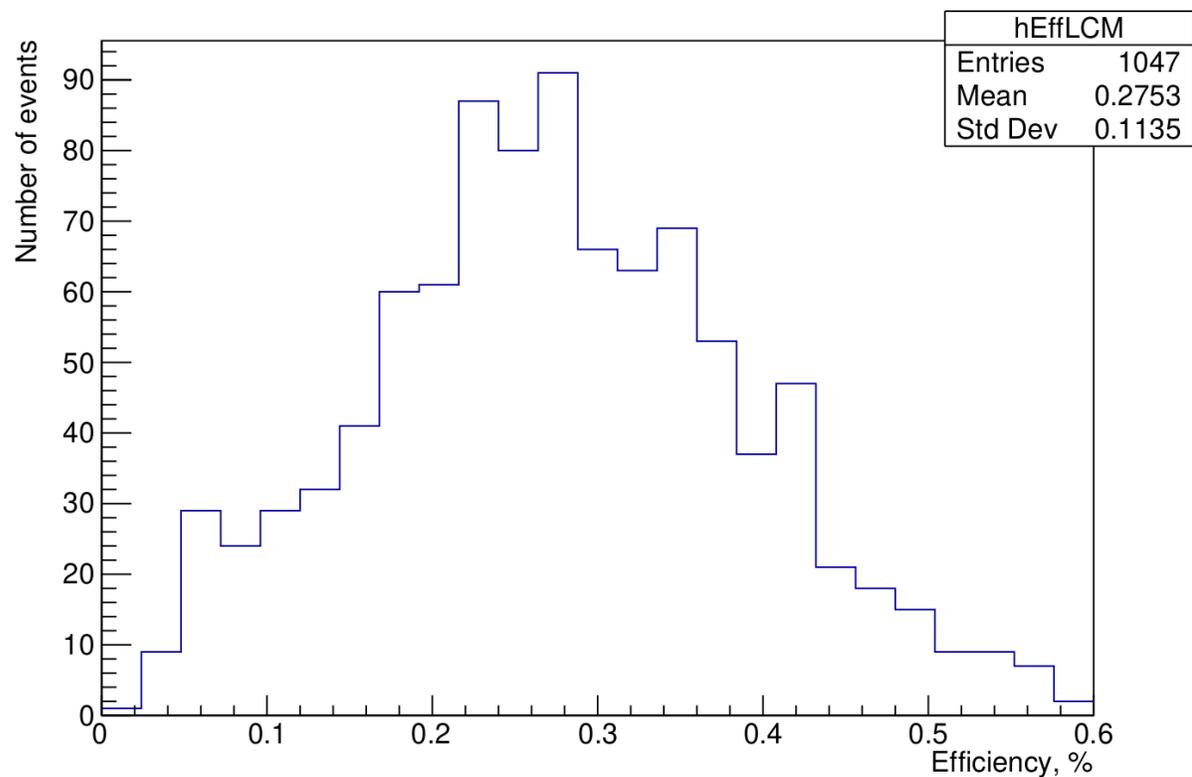


1 отсчёт = 10 нс

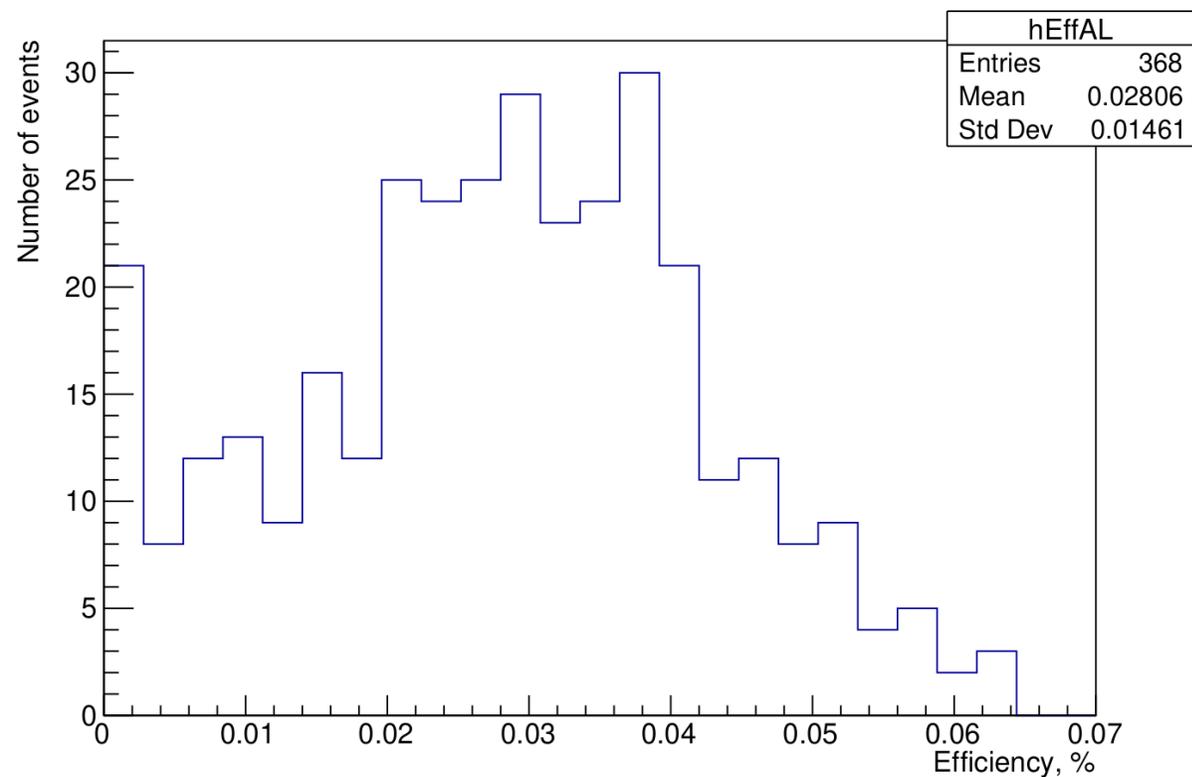


Эффективности регистрации фотонов детекторами оптической системы

LCM



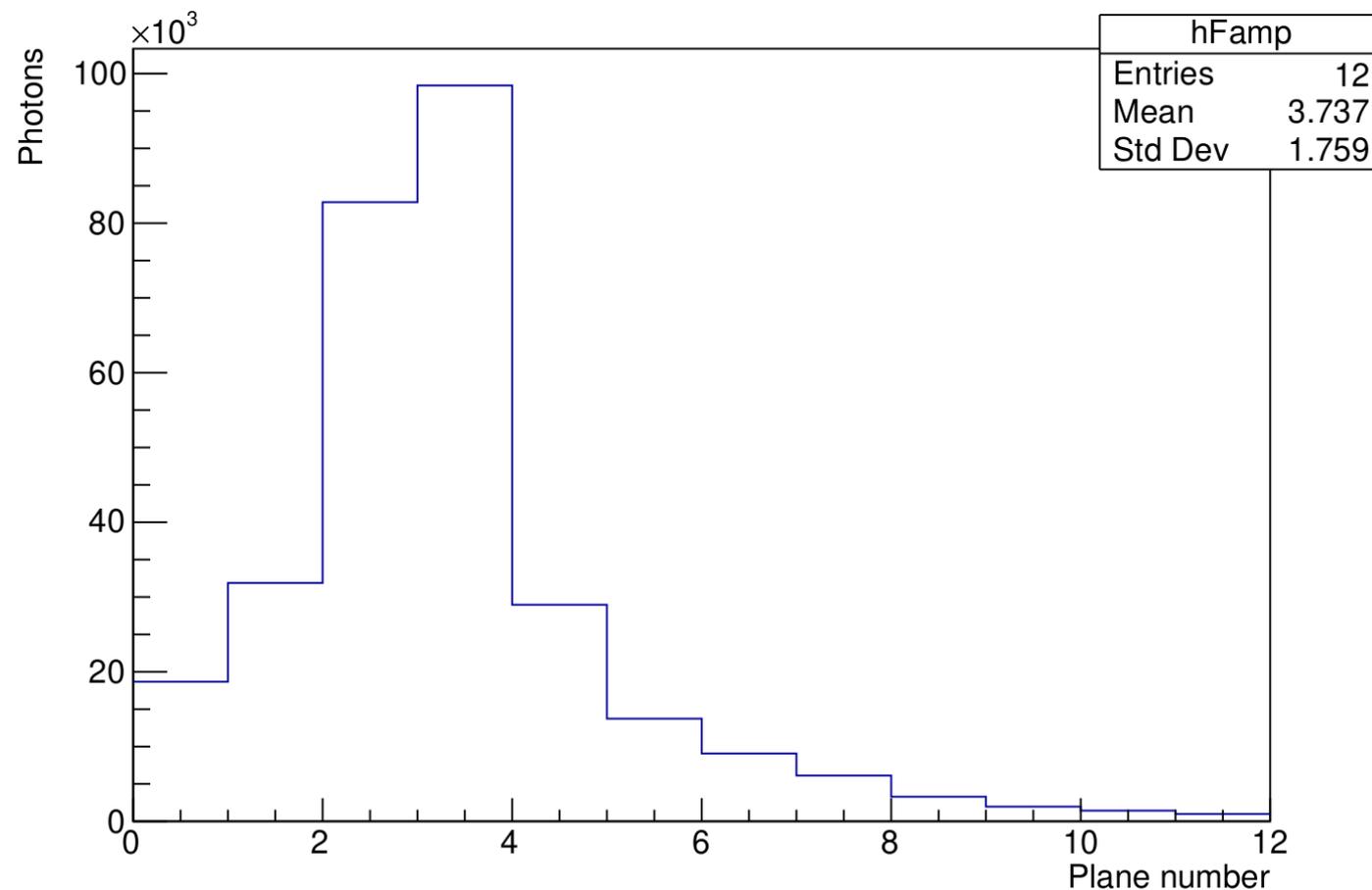
ArCLight





Определение координат мюонов с помощью оптической системы

- Моделировались мюонные треки, направленные под малыми углами к оси пучка.
- Строились распределения интегральных сигналов с детекторов оптической системы для ближней и дальней стенок камеры.
- Столбцу гистограммы с максимальной амплитудой сопоставлялась у-координата центра соответствующего ему детектора, после чего к ней вносилась поправка с учётом амплитуд в соседних столбцах.
- Полученная таким образом координата считалась координатой мюона, прошедшего через стенку детектора.



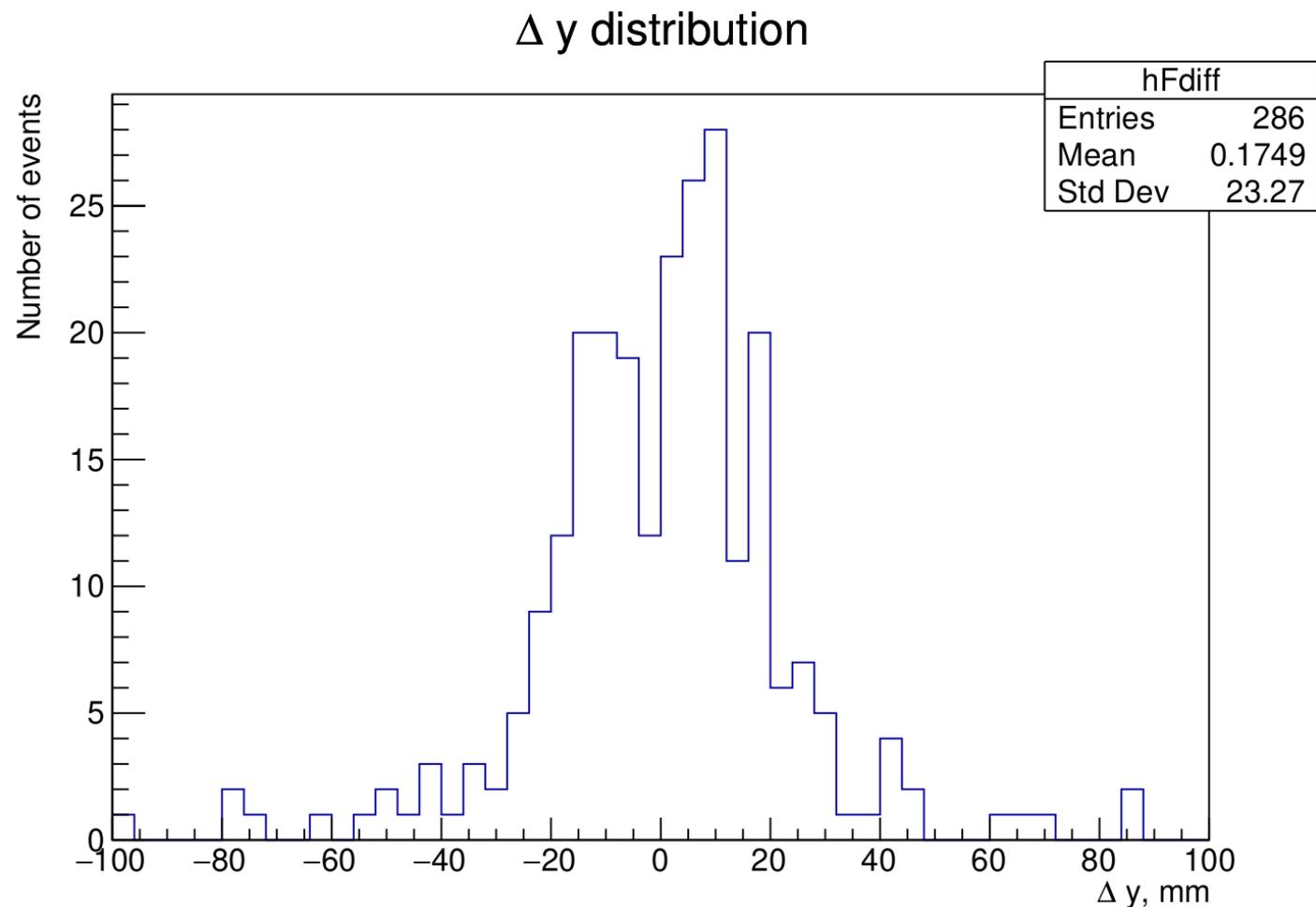
Пример распределения числа зарегистрированных фотонов в зависимости от номера детектора для дальней стенки камеры



Определение пространственного разрешения оптической системы

Для определения пространственного разрешения оптической системы ближнего жидкоаргонового детектора эксперимента DUNE было построено распределение числа событий в зависимости от разности зарегистрированной и фактической y -координат мюона.

Пространственное разрешение оптической системы составило $(23,3 \pm 1,4)$ мм.



Требования к пространственному разрешению оптической системы

- За один сброс пучка, длящийся около 9,6 мкс, ожидается около 80 событий в ближнем детекторе.
- Скорость дрейфа электронов в объёме ВПК равна 1,648 мм/мкс, а максимальная длина дрейфа – 300 мм, то есть события в зарядовой системе перекрываются. Так как оптическая система формирует триггеры для зарядовой, необходимо разделять события с её помощью.
- Ближний детектор в поперечном сечении разделён на 14 оптически изолированных ВПК размерами 0,3×1,2 м (по x и y соответственно).
- В предположении о равномерности распределения событий по площади поперечного сечения детектора, в каждой ВПК ожидается около 6 событий, то есть для их разделения необходимо разрешение оптической системы не хуже 200 мм по оси y.



Выводы

- В ходе работы с помощью программного пакета ROOT были обработаны калибровочные данные, полученные с прототипа жидкоаргоновой ВПК "Module 0", что позволило задать корректные параметры сцинтилляции жидкого аргона для моделирования отклика оптической системы детектора.
- Для оценки эффективности регистрации оптических фотонов детекторами оптической системы были отобраны и обработаны мюонные события, зарегистрированные прототипом детектора, после чего идентичные им события были смоделированы с помощью программного пакета Geant4. Сравнение модельных и реальных данных показало, что эффективности регистрации фотонов детекторами LCM и ArCLight составляют $(0,28 \pm 0,11)\%$ и $(0,028 \pm 0,015)\%$ соответственно.
- Для оценки пространственного разрешения системы были смоделированы и обработаны мюонные треки, пересекающие обе плоскости камеры детектора, на которых расположены детекторы оптической системы. При этом пространственное разрешение оптической системы составило $(23,3 \pm 1,4)$ мм, что позволяет разделять события в оптической системе и однозначно сопоставлять им события в зарядовой системе.



Заключение

- Эксперимент DUNE – крупный международный проект, задачами которого являются измерение иерархии масс нейтрино, фазы CP-нарушения в лептонном секторе на уровне значимости выше 5σ , а также уточнение значений остальных параметров нейтринных осцилляций.
- Немаловажную роль в данном проекте играет ОИЯИ, так как занимается производством детекторов LCM для оптической системы ближнего детектора.
- Данная работа может быть полезна при калибровке детекторов оптической системы и при оптимизации их конструкции.
- В дальнейшем в рамках данной темы планируется уточнение значения эффективностей детекторов LCM и ArCLight.



Спасибо за внимание!

