

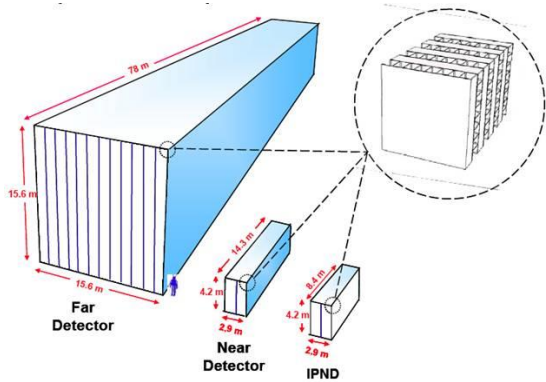
# Изучение вклада черенковского света в нелинейность отклика жидкого сцинтиллятора

Выполнил студент 409 группы Иванеев Ю.В.

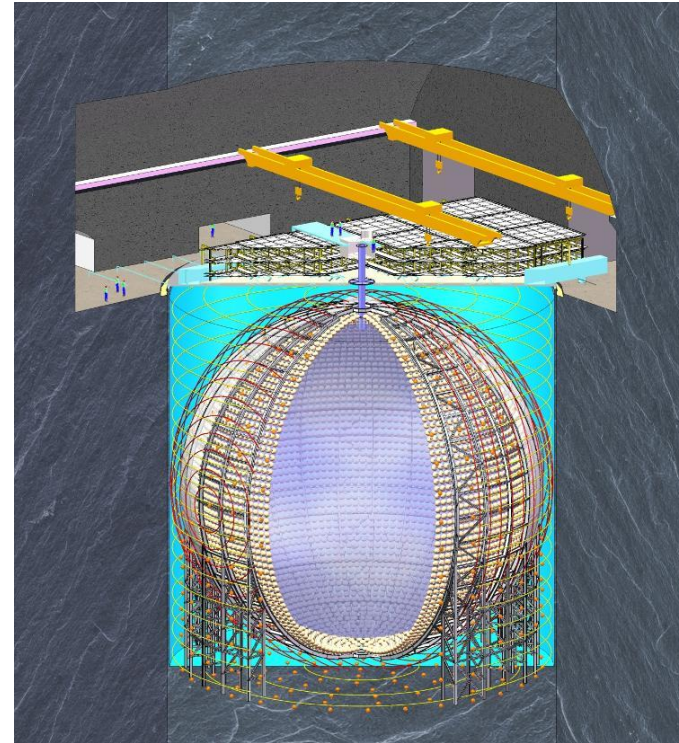
Научный руководитель: Ольшевский А.Г.

Научный консультант: Анфимов Н.В.

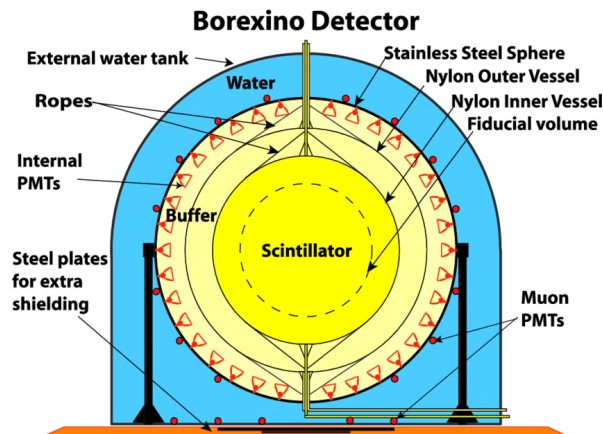
# Жидкий сцинтиллятор



Детектор NOvA



Детектор JUNO



Детектор Borexino

# Жидкий сцинтиллятор

Основные этапы детектирования ионизирующей частицы:

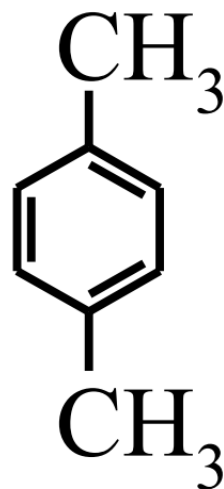
1. Возбуждение молекул
2. Передача возбуждения центрам флуоресценции
3. Смещение спектра излучения относительно спектра поглощения
4. Регистрация света фотодетектором
5. Образование сигнала

Особенности жидкого сцинтиллятора:

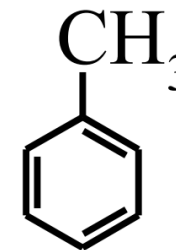
- Возможность изготовления больших размеров
- Может принимать любую форму
- Малое время затухания
- Световыход слабо зависит от температуры
- Относительно низкий световыход  $\epsilon_{sc} \approx 0.03$

# Жидкий сцинтиллятор

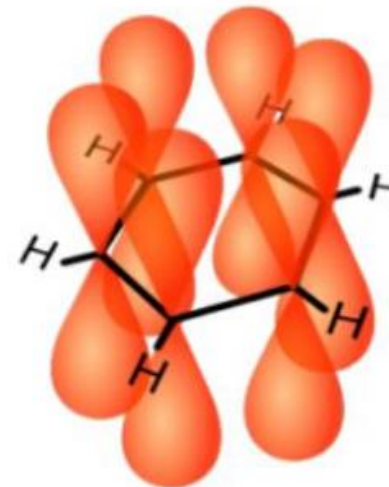
- Жидкий сцинтиллятор – композиция, состоящая из основного вещества и сцинтиллирующих добавок
- Основной материал – ароматические углеводороды
- Возможность для сцинтилляций открывают пи-электроны в бензольных кольцах



п-ксилол



толуол

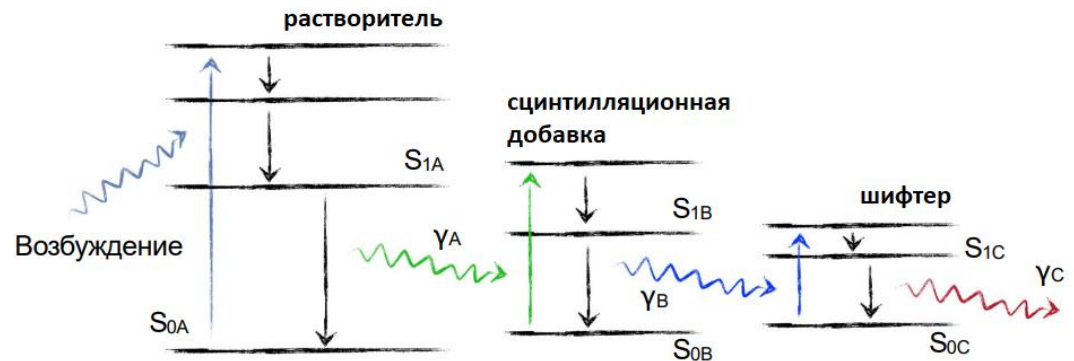
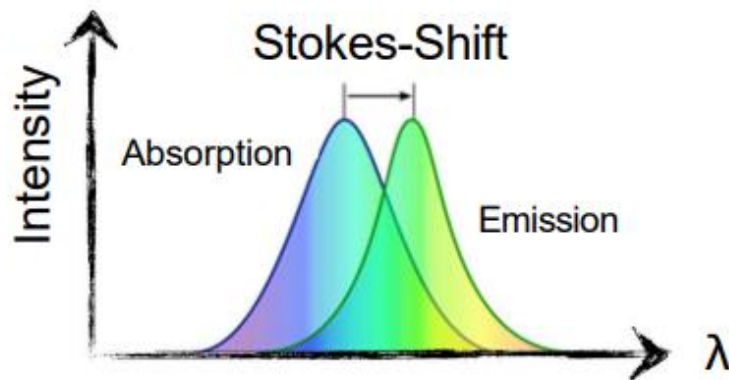
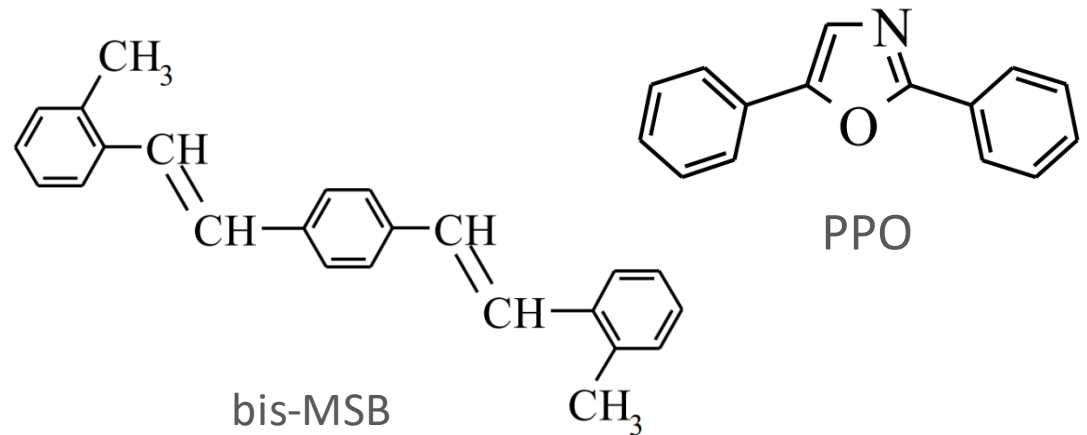


р-орбитали молекулы  
бензола ( $\text{C}_6\text{H}_6$ )

# Механизм сцинтилляций

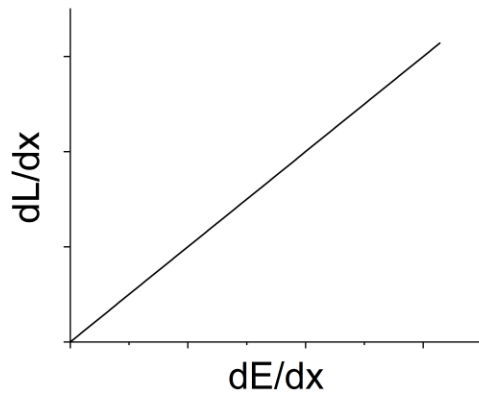
В сцинтилляторах используют добавки:

- Сцинтилляционные (центры флуоресценции)
- Спектрсмещающие (шифтеры) (смещают спектр излучения относительно спектра поглощения)



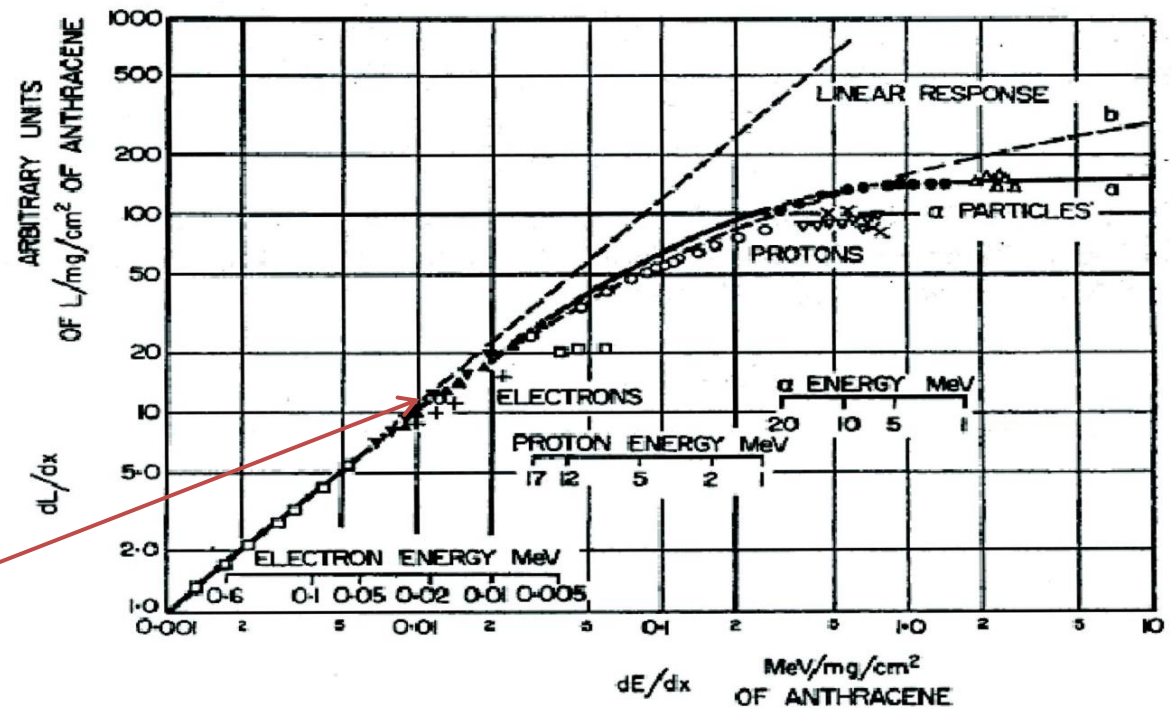
# Отклик жидкого сцинтиллятора

Идеальный сцинтиллятор:



Эффекты, создающие нелинейность:

- Гашение
- Черенковское излучение



Зависимость дифференциального световыхода от плотности ионизационных потерь с учетом гашений

# Закон Биркса

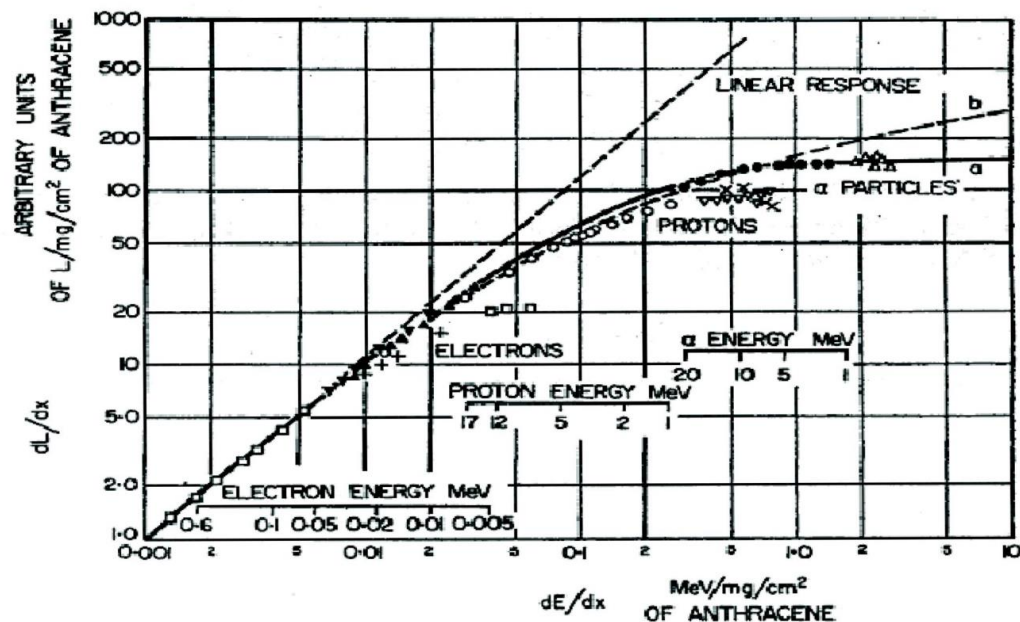
Предположения:

- плотность поврежденных молекул прямо пропорциональна плотности ионизации

- в отсутствие гашений отклик пропорционален плотности ионизации:

$$\frac{dL}{dx} = C_0 \frac{dE}{dx}$$

$$\frac{dL}{dx} = \frac{C_0 \frac{dE}{dx}}{1 + k_B \frac{dE}{dx}}$$

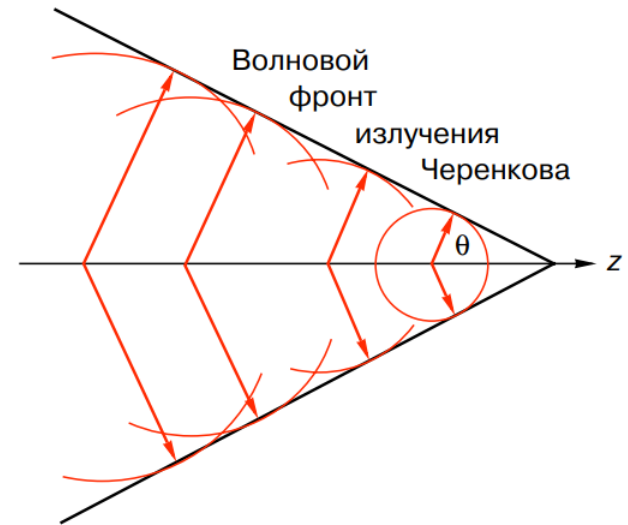




# Черенковское излучение

## В чем заключается проблема?

Вклад черенковского излучения в нелинейность отклика зависит не только от вещества сцинтиллятора, но и от типа частицы и геометрии детектора.



$$E_{thr} = m_e c^2 \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}} - 1 \right)$$



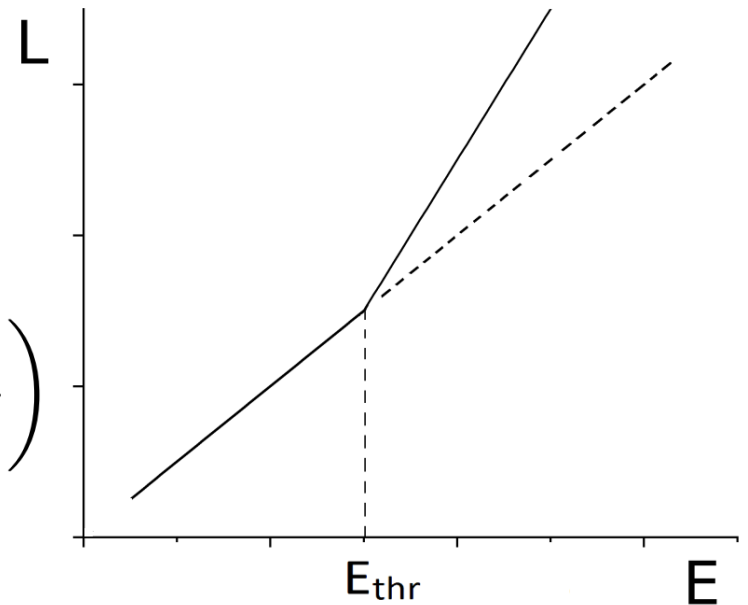
# Методика эксперимента

Необходимо:

1. Измерить отклик сцинтиллятора до и после порога
2. Корректировать на эффект Биркса:

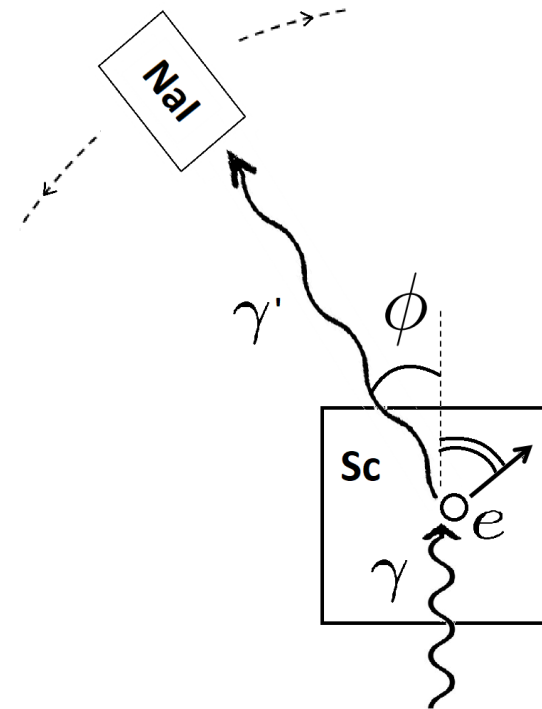
$$L = \frac{L_0}{1 + k_B \frac{E}{\rho}} \Rightarrow L_0 = L \left( 1 + k_B \frac{E}{\rho} \right)$$

3. Определить изменение наклона после порога



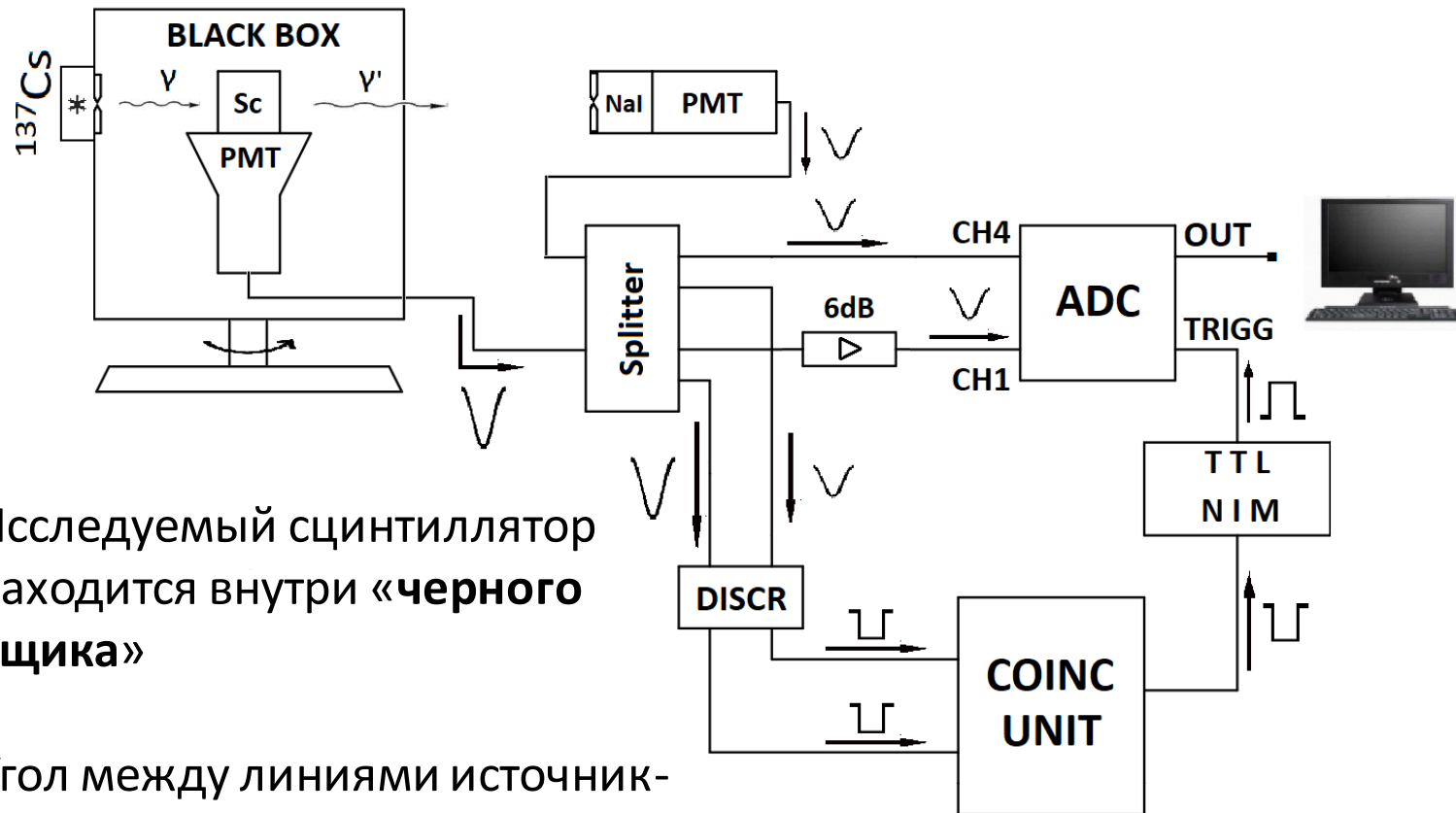
# Методика эксперимента

- Использовать множество источников – неэффективно
- Электрон определенной энергии можно получить посредством **комптоновского рассеяния**. Рассеянный гамма-квант регистрируется детектором **NaI**, спектр которого имеет **пик полного поглощения** (фотопик)
- Для идентификации сигнала от таких электронов используется **схема совпадений**



$$E_e = \frac{\frac{E_\gamma^2}{m_e c^2} (1 - \cos(\phi))}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos(\phi))}$$

# Эксперимент

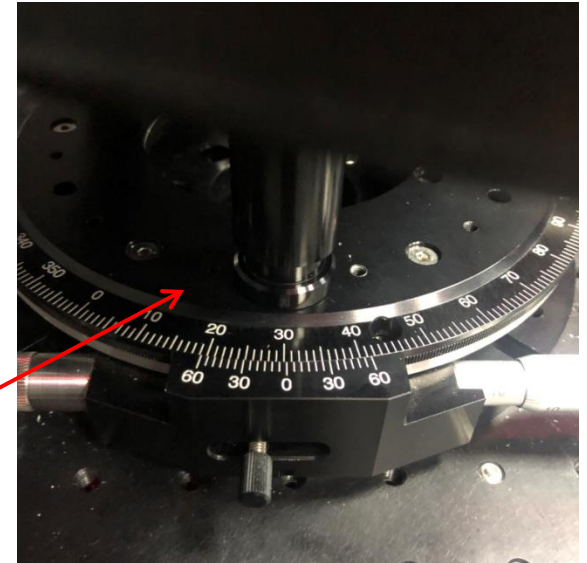


- Исследуемый сцинтиллятор находится внутри «**черного ящика**»
- Угол между линиями источник-сцинтиллятор и сцинтиллятор-NaI меняется путем вращения «**черного ящика**»

# Эксперимент

- Установка находится внутри «темной комнаты»
- Источник:  $^{137}\text{Cs}$
- АЦП: PSI DRS4
- Исследуемые сцинтилляторы: NOvA, LAB

Вращательная платформа



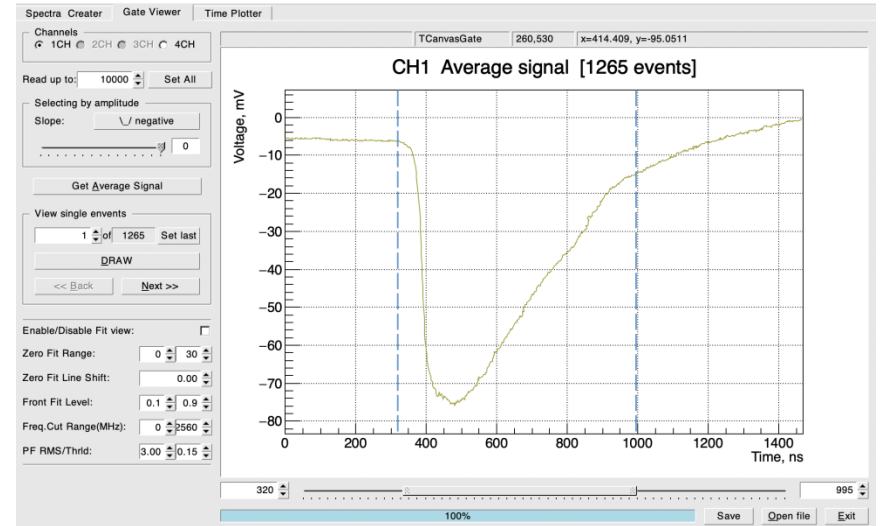
Сцинтиллятор наливается в цилиндрическую кювету



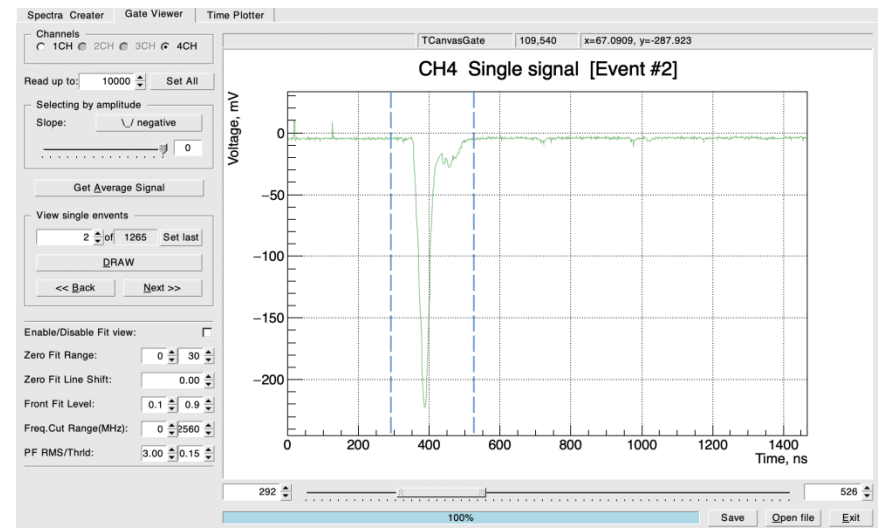
# Обработка

- Производится анализ спектров для каждого угла с помощью программы **DRSViewer**
- В спектре NaI фотопик аппроксимируется гауссовой кривой
- В спектре сцинтиллятора отбираются события, совпавшие с событиями, лежащими внутри  $2\sigma$ -диапазона фотопика

NaI

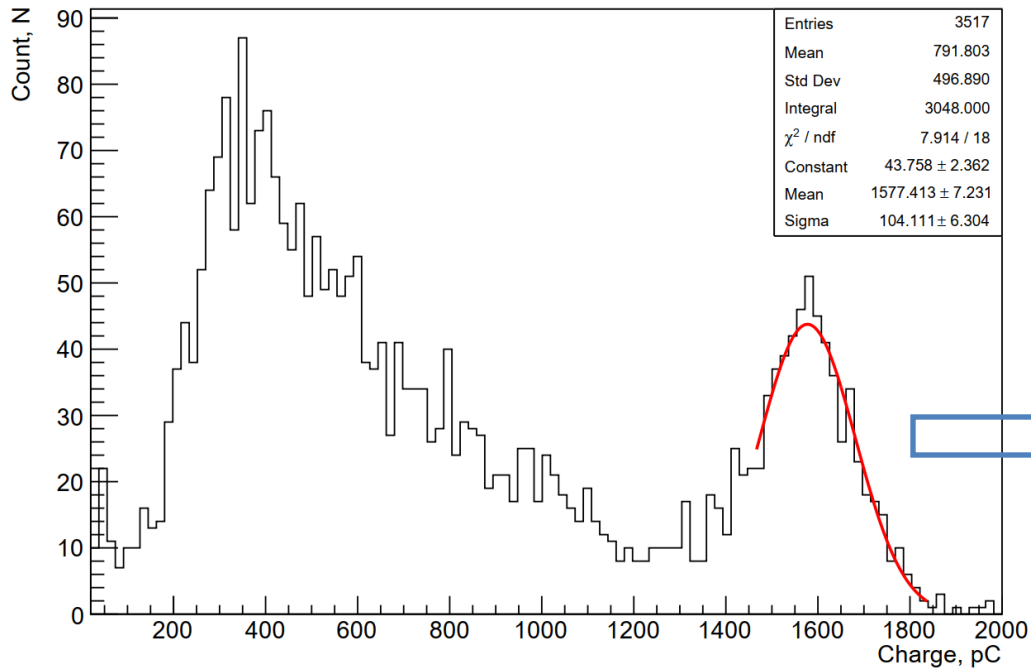


NOVA Sc



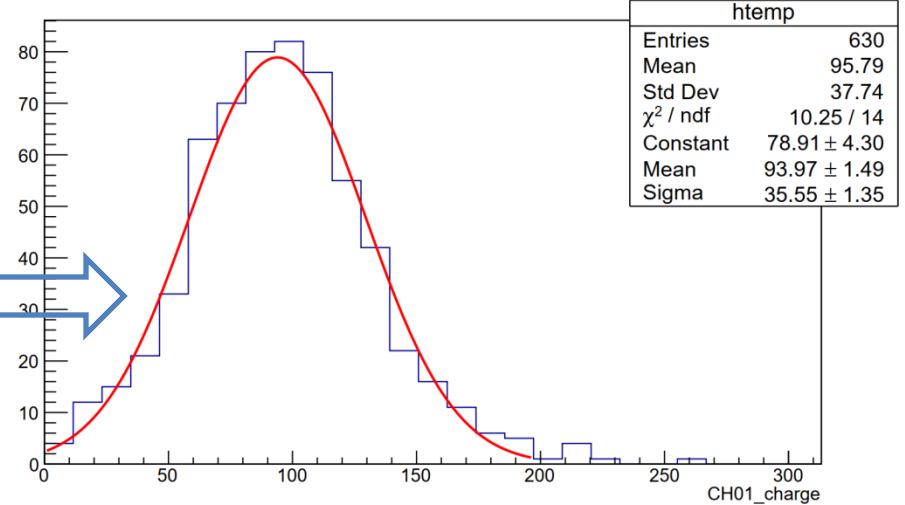
# Обработка

CH4 Charge spectrum [3589 events]



Спектр NaI при 30°

CH01\_charge {(CH04\_charge>1369) && (CH04\_charge<1789)}



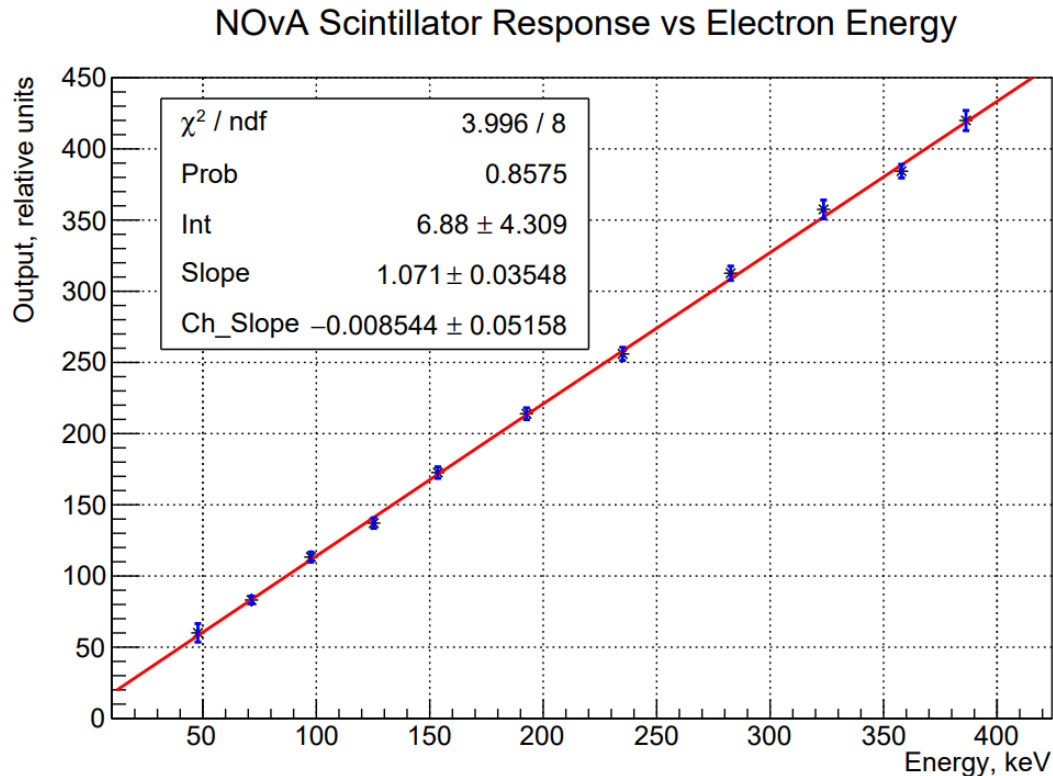
Отобранные события из спектра  
сцинтиллятора LAB при 30°

# Результаты

## NOvA Sc

$$\begin{cases} L = \text{Int} + \text{Slope} \cdot E, & E \leq E_{thr} \\ L = L_{thr} + \text{Slope} \cdot (1 + \text{Ch\_Slope}) \cdot (E - E_{thr}), & E > E_{thr} \end{cases}$$

где  $L_{thr} = \text{Int} + \text{Slope} \cdot E_{thr}$



$$k_B = 1.25 \cdot 10^{-2} \frac{g}{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}$$

$$E_{thr} \approx 190 \text{ KeV}$$

$$\text{Ch\_Slope} = -(0.9 \pm 5.2)\%$$



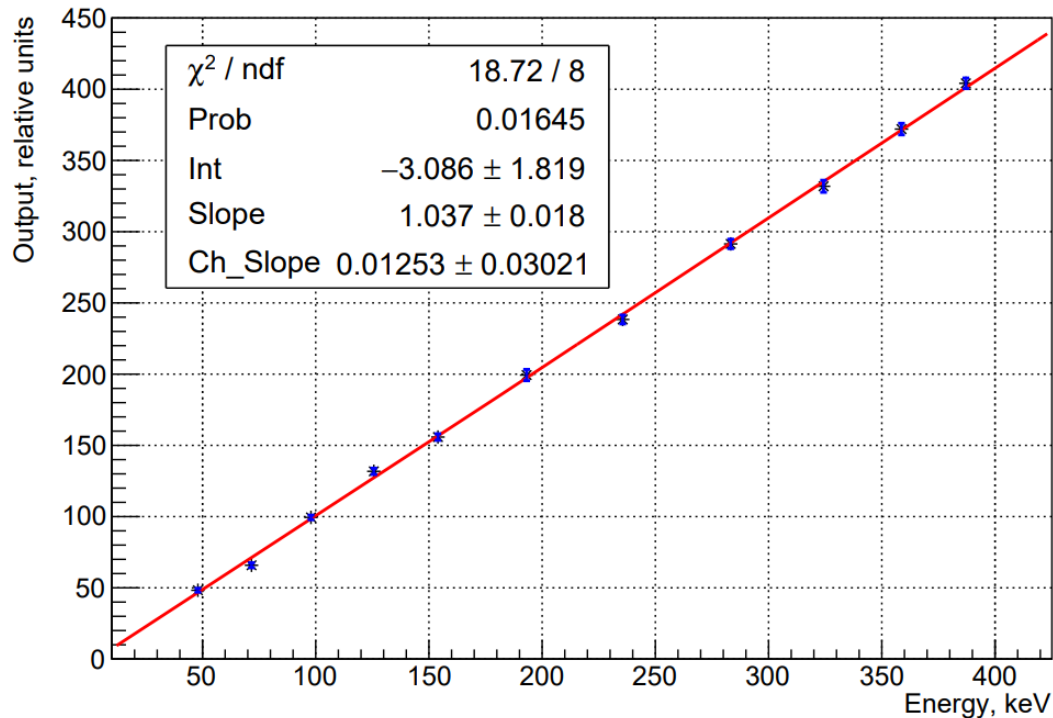
# Результаты

**LAB**

$$\begin{cases} L = \text{Int} + \text{Slope} \cdot E, & E \leq E_{thr} \\ L = L_{thr} + \text{Slope} \cdot (1 + \text{Ch\_Slope}) \cdot (E - E_{thr}), & E > E_{thr} \end{cases}$$

где  $L_{thr} = \text{Int} + \text{Slope} \cdot E_{thr}$

LAB Scintillator Response vs Electron Energy



$$k_B = 0.83 \cdot 10^{-2} \frac{g}{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}$$

$$E_{thr} \approx 180 \text{ KeV}$$

$$\text{Ch\_Slope} = (1.3 \pm 3.0)\%$$

# Результаты

Sc	Изменение наклона
NOvA	$-(0,9 \pm 5,2)\%$
LAB	$+(1,3 \pm 3,0)\%$

Планы для дальнейшего развития:

- Добавить точки от источников гамма-квантов более высоких энергий
- Изучить систематическую ошибку по установке угла детектирования рассеянных гамма-квантов.

Вклад составляет **не более  $\sim 4\%$  @ CL = 68%**

Возможные причины:

- Малые энергии
- Черенковский свет неэффективно переизлучается добавками
- Остальная часть черенковского излучения составляет малую долю

D. Adey, F.P. An *et al.* A high precision calibration of the nonlinear energy response at Daya Bay. Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 940 (2019) 230–242

Спасибо за внимание!