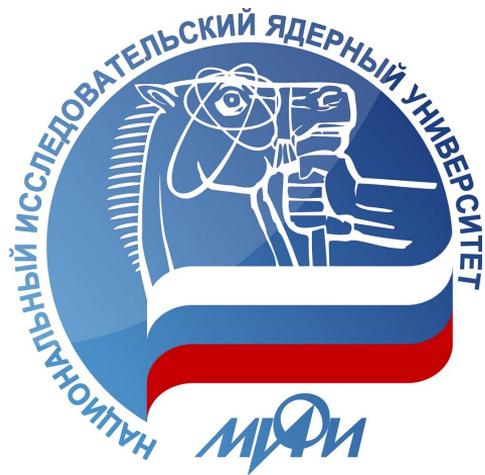




**“Анализ чувствительности  
осцилляционных реакторных  
экспериментов со средней базой к  
иерархии масс нейтрино”**



Научный руководитель: *Олег Титов*  
НИЦ КИ  
Студент: *Даниэль Попов*

# Мотивация

Решение проблемы иерархии масс важно для построения теоретических моделей масс и смешивания нейтрино, поиска CP-нарушения в лептонном секторе, более точного моделирования астрофизических процессов.

## Цель работы

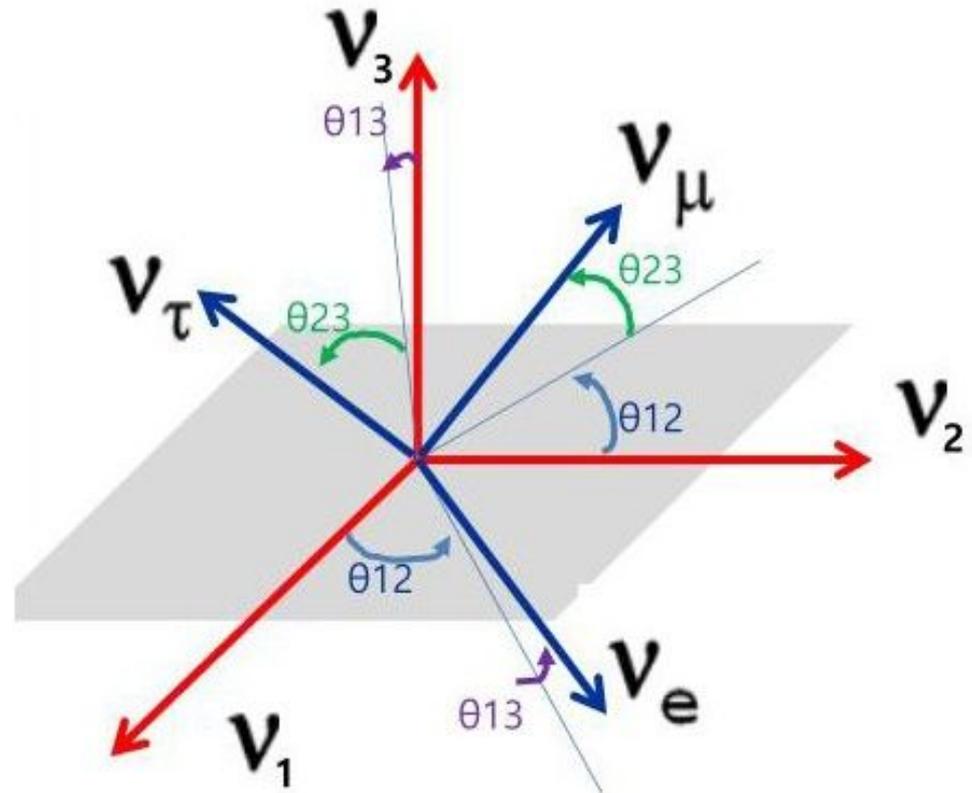
Провести дополнительный анализ чувствительности к энергетическому разрешению детектора и топливному составу реактора.

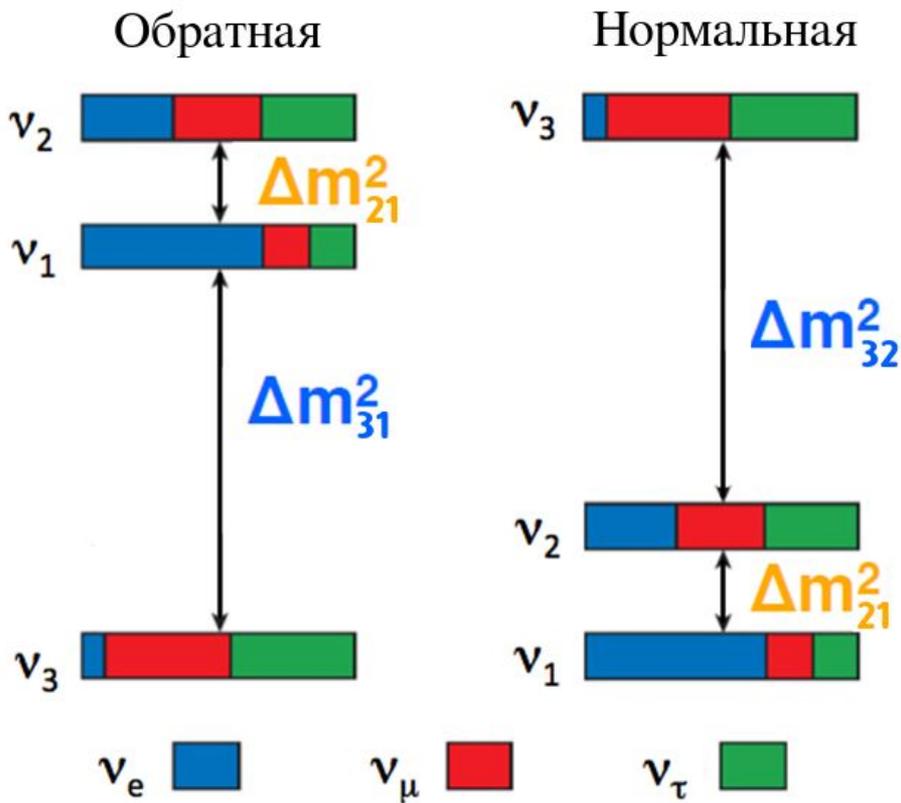
1. Теоретическое описание эффекта осцилляций и эксперимента JUNO
2. Теоретическое описание критерия иерархии Фурье и предложенного критерия иерархии Ломба-Скэргла
3. **Построение математической модели эксперимента**
4. **Статистическая проверка критерия Фурье**
5. Статистическая проверка критерия Ломба-Скэргла
6. Статистическое сравнение критериев

# Механизм смешивания

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$



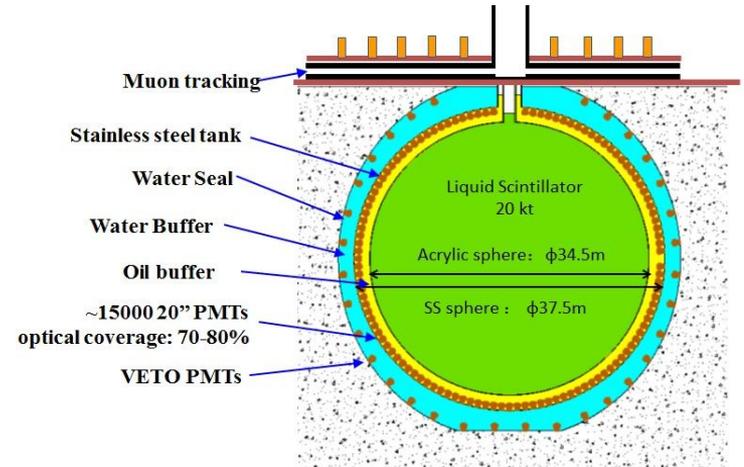
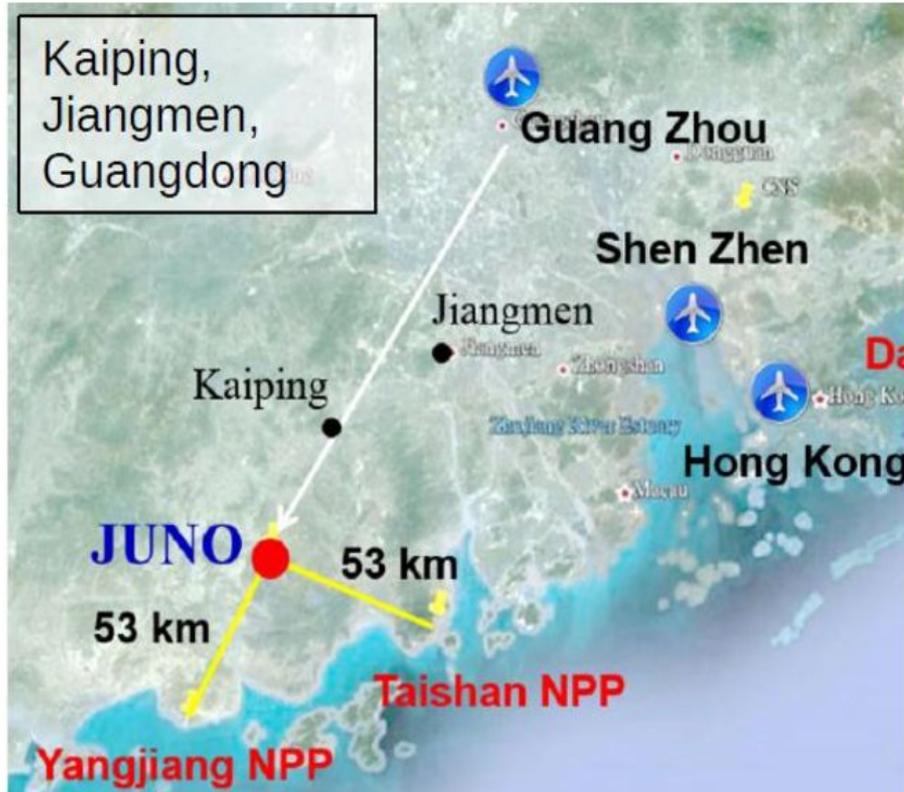


Измерены  $\Delta m_{21}^2$ , углы смешивания  $\theta_{ij}$  и  $|\Delta m_{32}^2|$ .

Неизвестно, какая иерархия реализуется в природе:

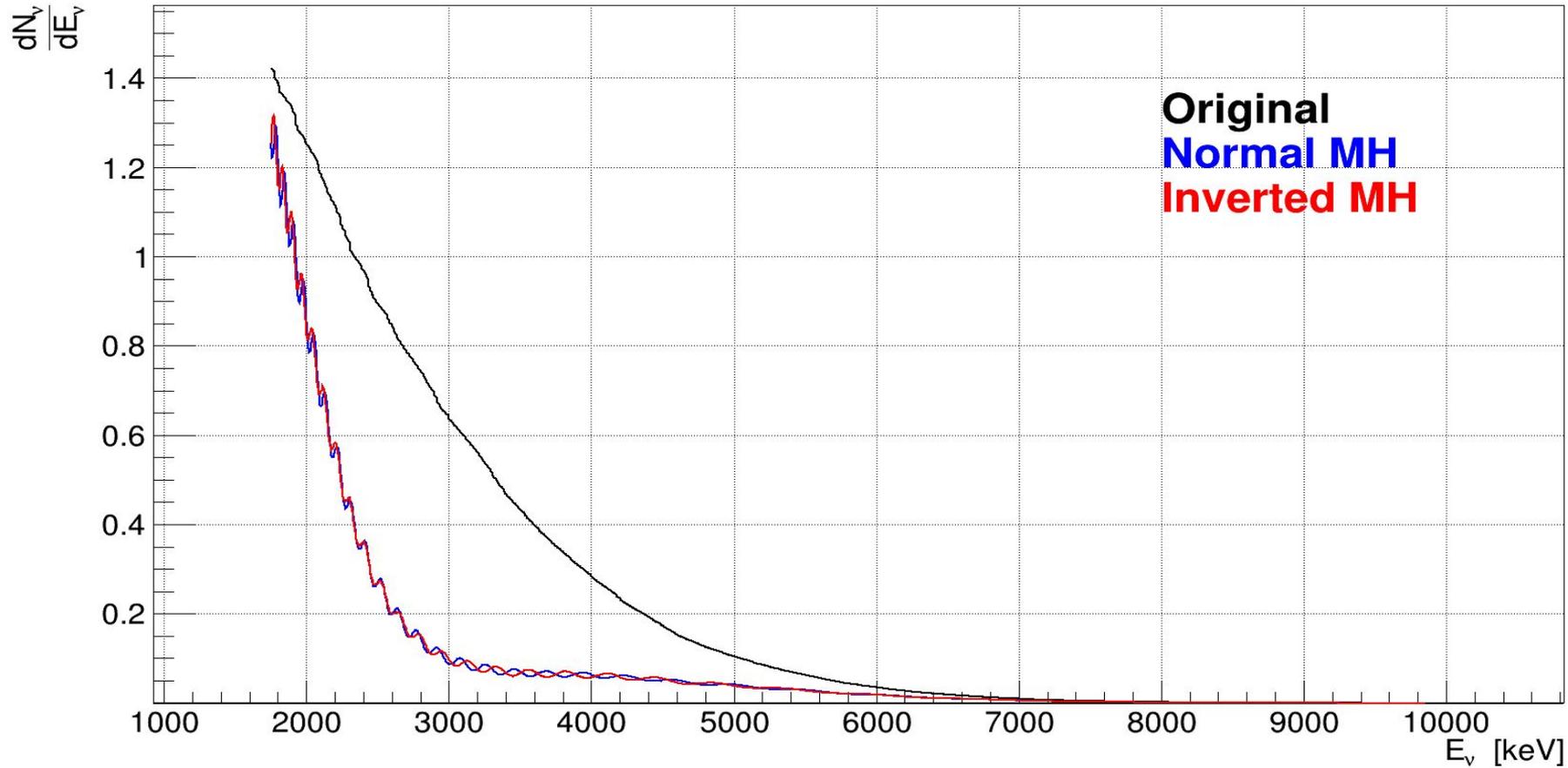
$m_3 > m_2$  или  $m_3 < m_2$  ?

# Эксперимент JUNO

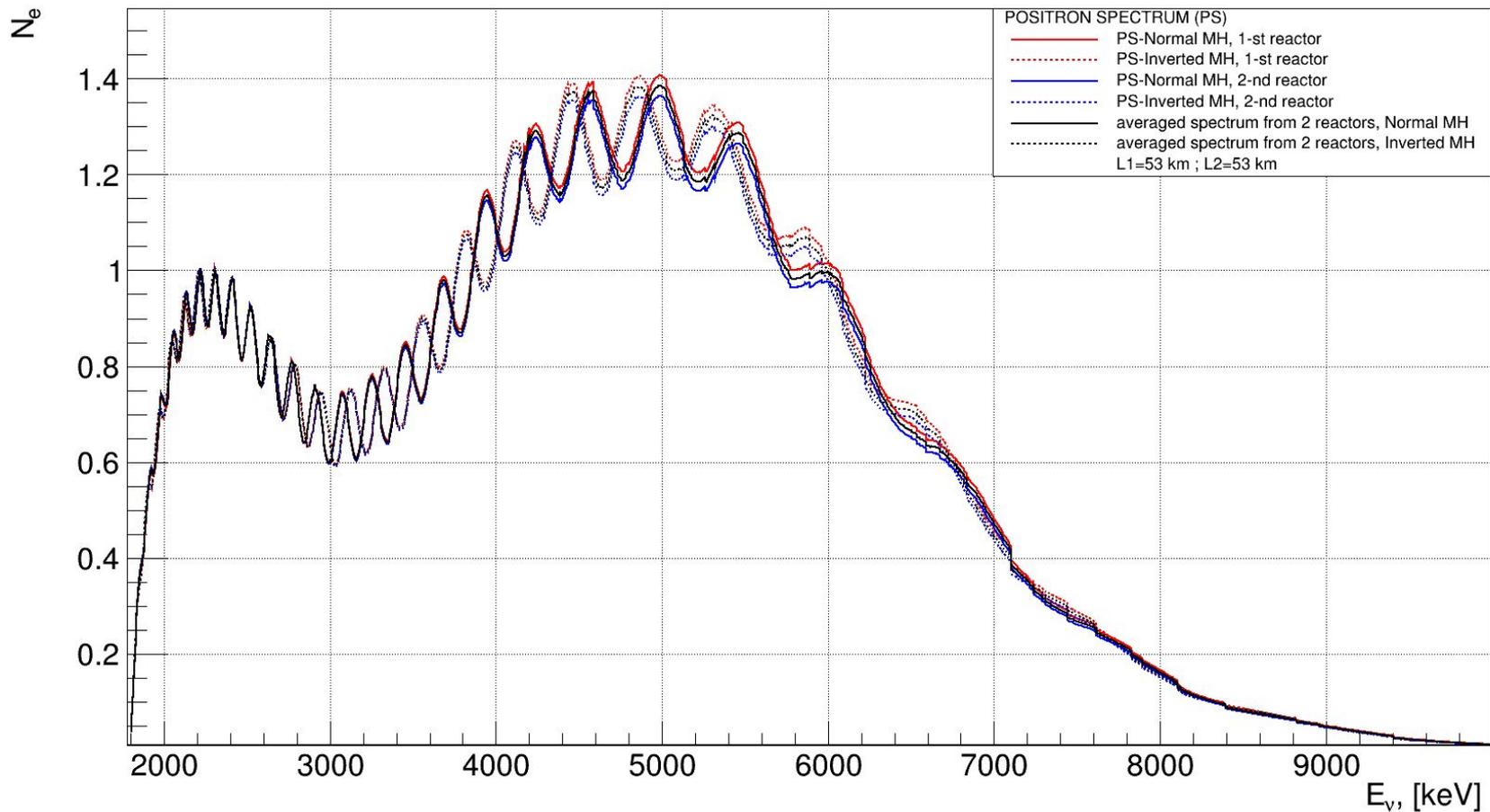


*Энергетическое разрешение - 3% для энергии 1 MeV.  
Определить иерархию планируется с достоверностью порядка  $3\sigma$*

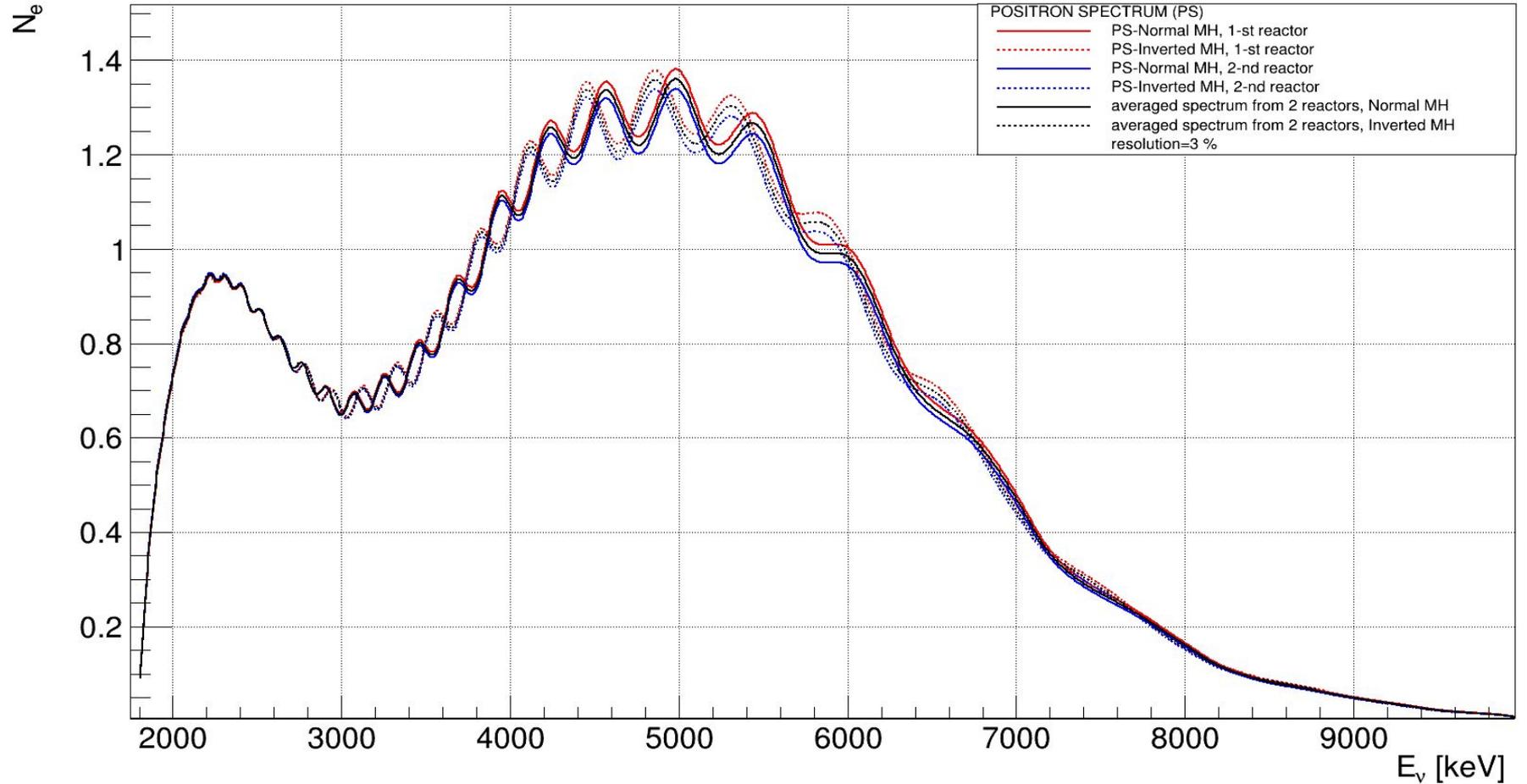
# Спектры реакторных антинейтрино



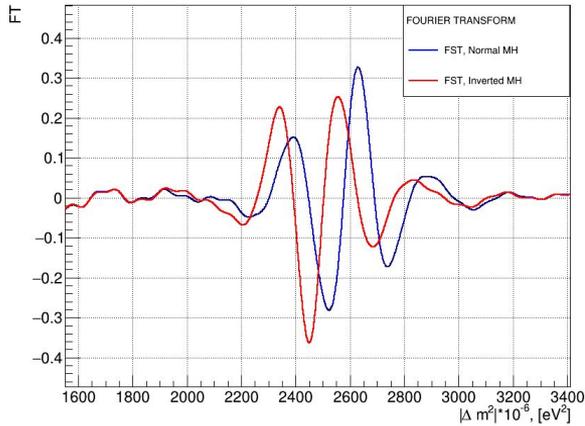
# Спектры ОБР



# Влияние энергетического разрешения



# Спектральный анализ: критерий Фурье

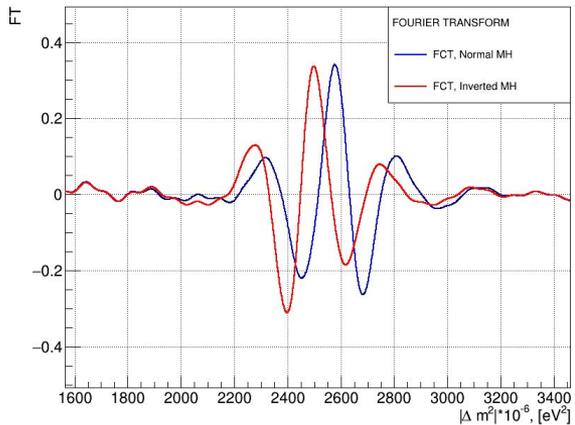


$$RL = \frac{RV - LV}{RV + LV}, \quad PV = \frac{P - V}{P + V}.$$

Знаки  $RL$  и  $PV$  определяют иерархию:

$RL > 0$  и  $PV > 0 \Rightarrow$  Нормальная иерархия,

$RL < 0$  и  $PV < 0 \Rightarrow$  Обратная иерархия.



$RV$  - амплитуда правой ямы FCT;

$LV$  - амплитуда левой ямы FCT;

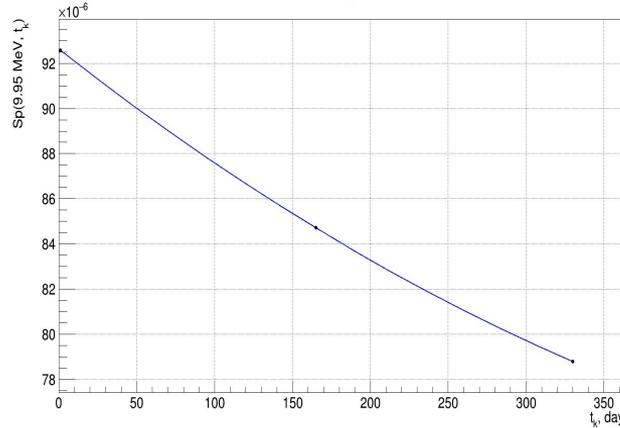
$P$  - амплитуда пика FST;

$V$  - амплитуда ямы FST;

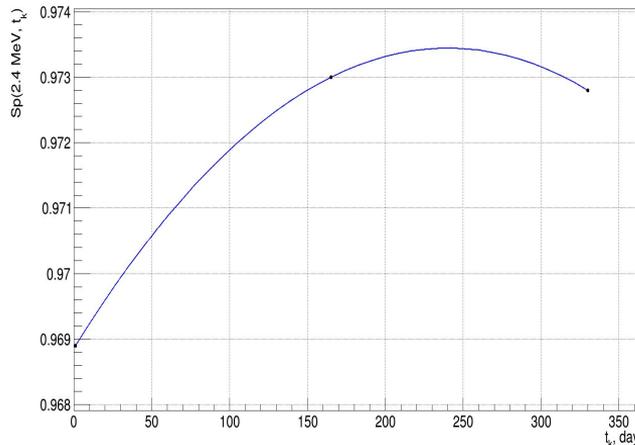
# ***Математическая модель эксперимента JUNO***

# Модель реакторных спектров

Time interpolation



Time interpolation



$$\widetilde{S}p_b(E_i, t) = \frac{A_i t^2 + B_i t + C_i}{A_i + B_i + C_i} \cdot b(E_i)$$

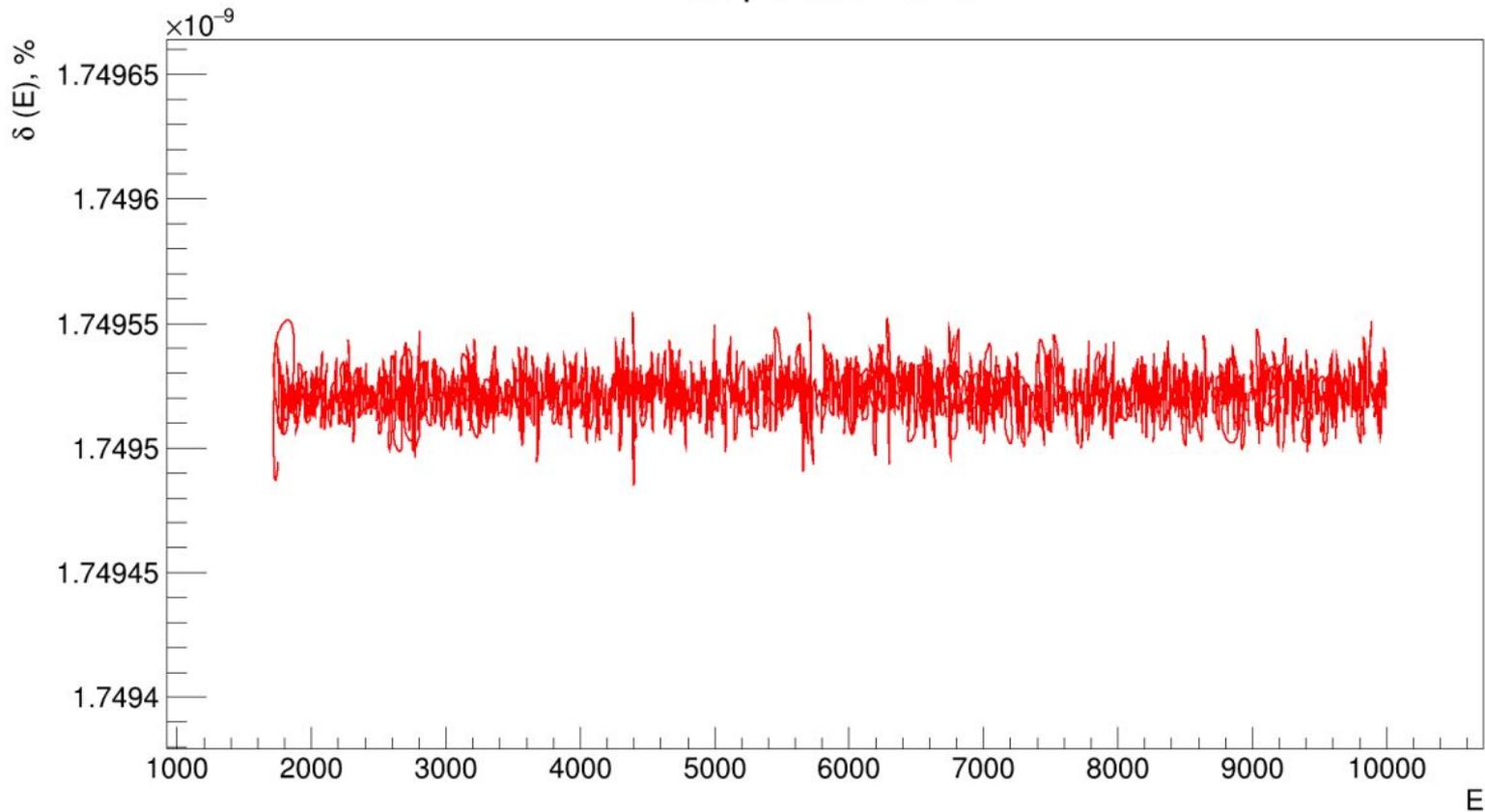
$$\widetilde{S}p_m(E_i, t) = \frac{A_i t^2 + B_i t + C_i}{A_i 165^2 + B_i 165 + C_i} \cdot m(E_i)$$

$$\widetilde{S}p_e(E_i, t) = \frac{A_i t^2 + B_i t + C_i}{A_i 330^2 + B_i 330 + C_i} \cdot e(E_i)$$

$$\widetilde{S}p(E_i, t_k) = \begin{cases} \widetilde{S}p_b(E_i, t_k), & t_k \in [1; 42] \\ \frac{1}{2} \left( \widetilde{S}p_b(E_i, t_k) + \widetilde{S}p_m(E_i, t_k) \right), & t_k \in [43; 124] \\ \widetilde{S}p_m(E_i, t_k), & t_k \in [125; 207] \\ \frac{1}{2} \left( \widetilde{S}p_m(E_i, t_k) + \widetilde{S}p_e(E_i, t_k) \right), & t_k \in [208; 289] \\ \widetilde{S}p_e(E_i, t_k), & t_k \in [290; 330] \end{cases}$$

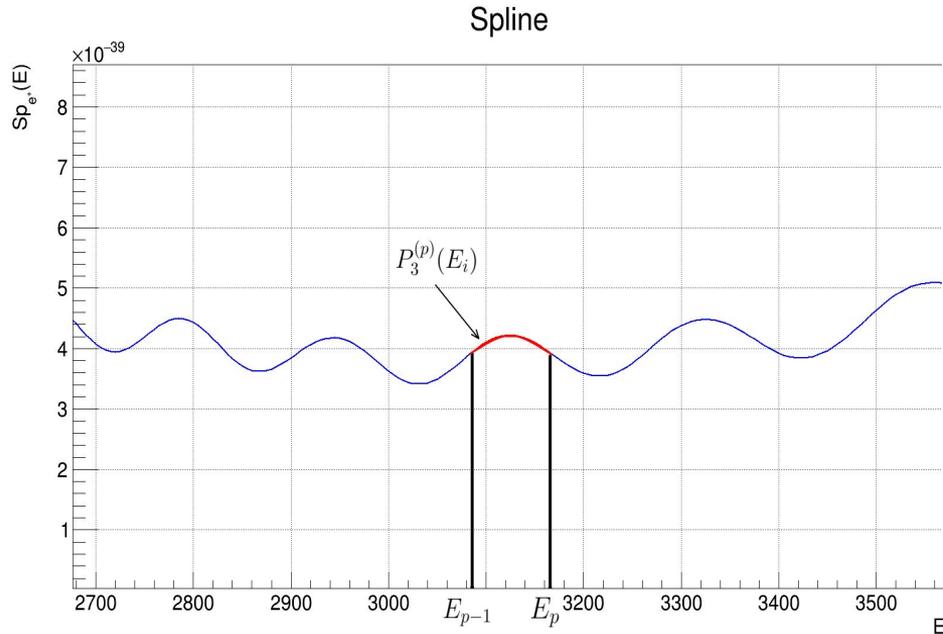
$$\delta(E_i) = \frac{|\text{Sp}(E_i, 330) - e(E_i)|}{e(E_i)} \cdot 100\%$$

Interpolation error



# Модель спектра ОБР

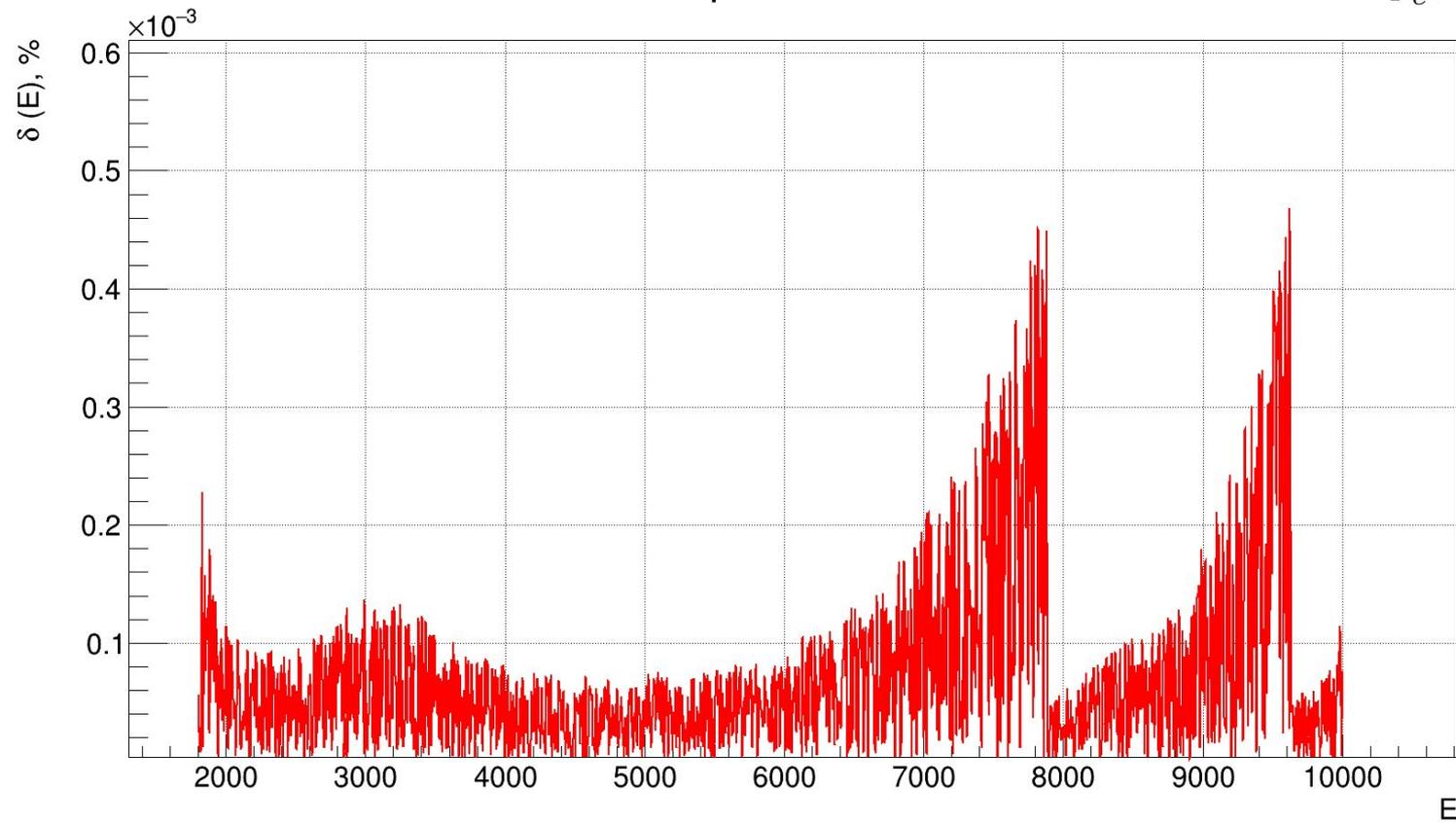
$$\widetilde{\text{Sp}}_{e^+}(E_i) = \text{Sp} \left( E_i + \frac{2E_i(E_i - \Delta) + \Delta^2 - m_e^2}{2m_p}, t_k \right) \cdot \sigma_0(E_i)$$



$$\text{Sp}_{e^+}(E_i) = \begin{cases} P_3^{(1)}(E_i), & E_i \in [E_{\min}; E_1] \\ P_3^{(2)}(E_i), & E_i \in [E_1; E_2] \\ \dots & \dots \\ P_3^{(p)}(E_i), & E_i \in [E_{p-1}; E_p] \\ \dots & \dots \\ P_3^{(n)}(E_i), & E_i \in [E_{n-1}; E_{\max}] \end{cases}$$

# Interpolation error

$$\delta(E_i) = \frac{|\text{Sp}_{e^+}(E_i) - \widetilde{\text{Sp}}_{e^+}(E_i)|}{\widetilde{\text{Sp}}_{e^+}(E_i)} \cdot 100\%$$



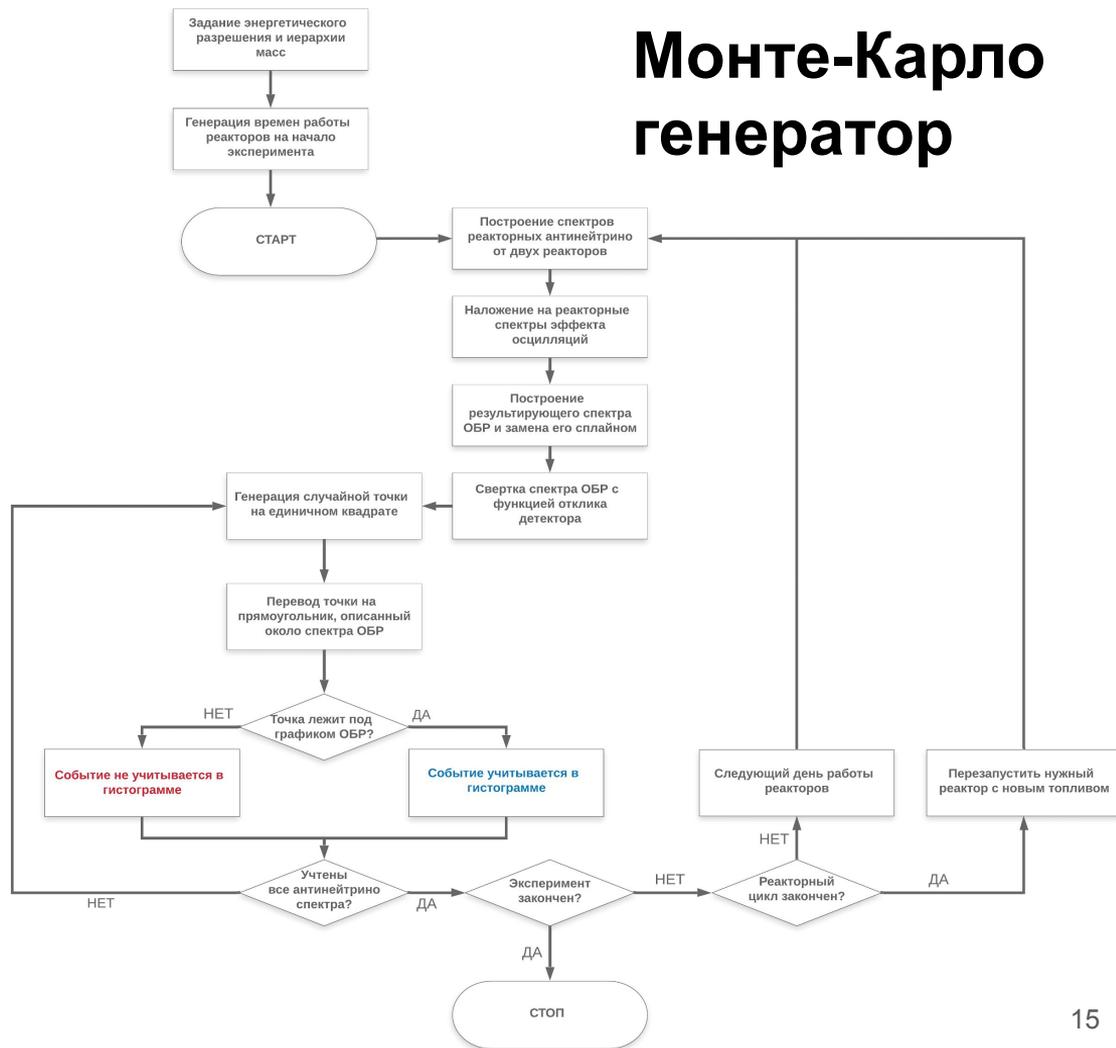
## Преимущества:

- 1) Относительная простота реализации
- 2) Учет энергетического разрешения при помощи функции отклика
- 3) Учет изменения топливного состава со временем (пересчет реакторных спектров антинейтрино на каждой итерации)

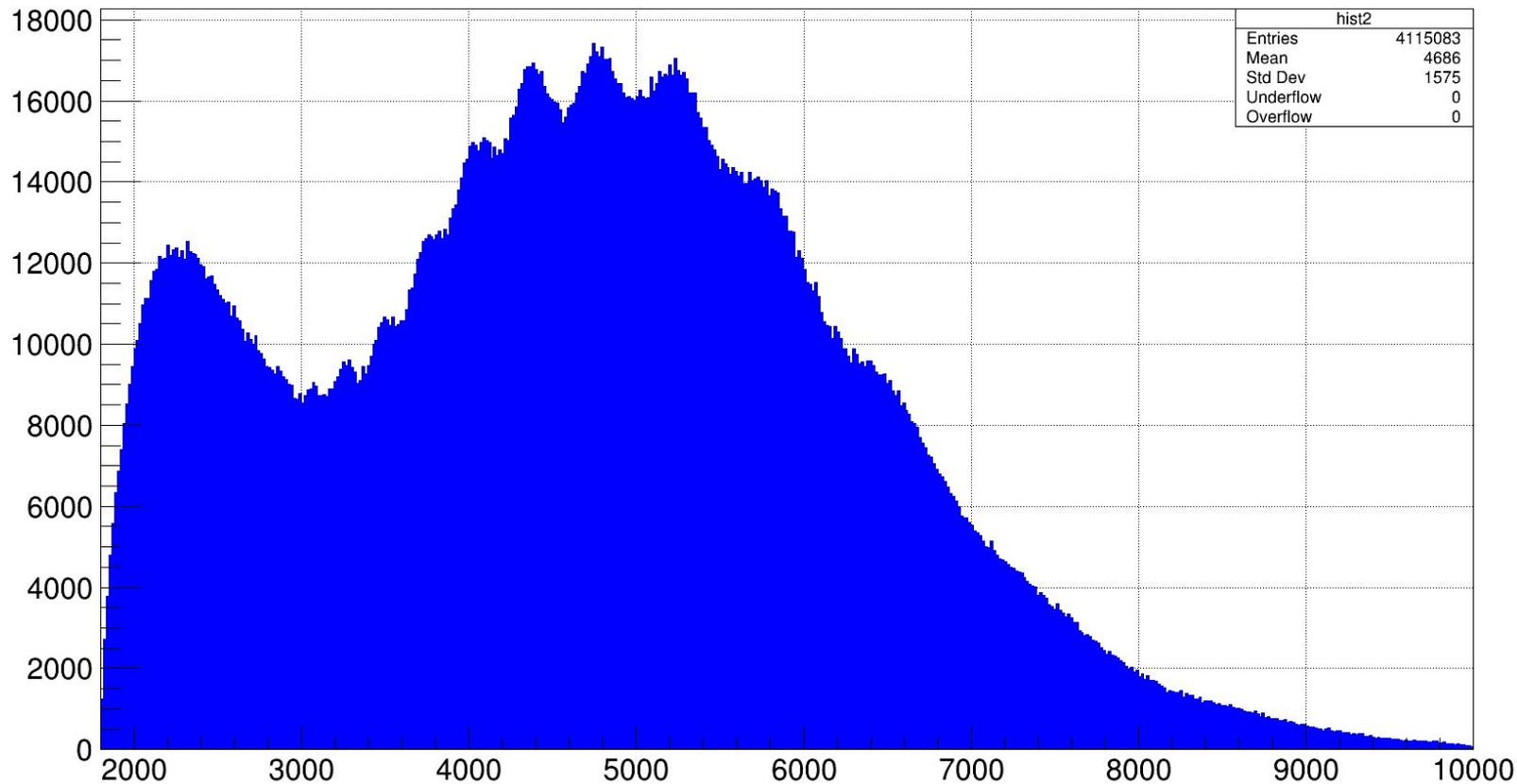
## Недостатки:

- 1) Не рассматривается геометрия детектора
- 2) Не рассматривается возможность вторичного взаимодействия антинейтрино с протоном рабочего вещества
- 3) Не учитываются возможные шумы

*Несмотря на вышеперечисленные недостатки, для статистического анализа критериев иерархии данная упрощенная модель подходит.*

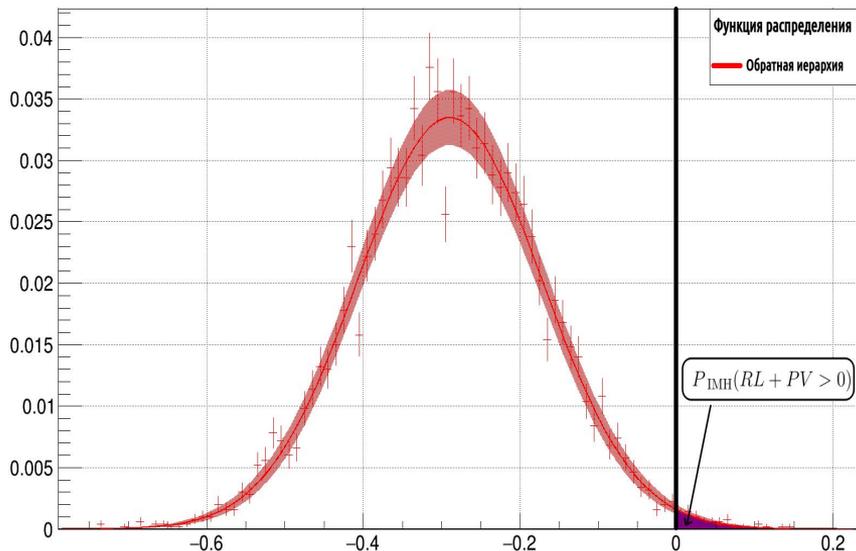


# Результаты МС-генерации



# Статистическая проверка критерия Фурье

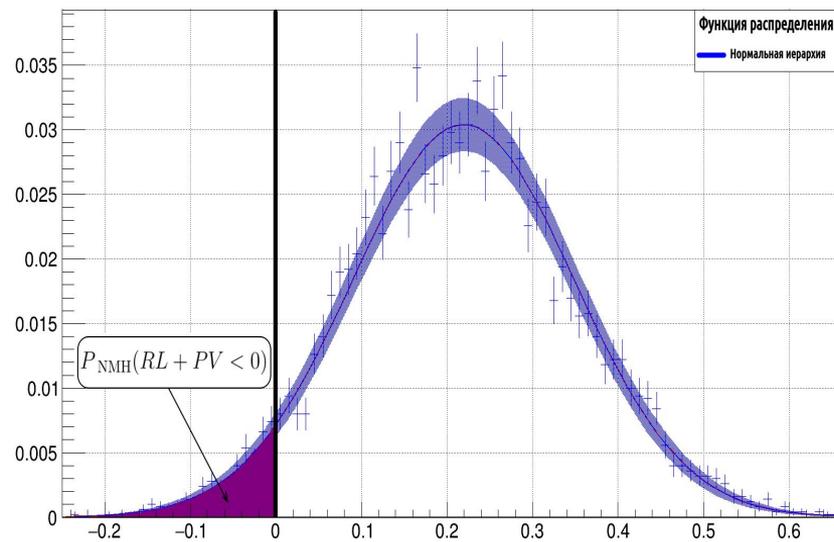
$n(RL+PV)$



$$P_{IMH}(RL + PV > 0) = 0.0067$$

$$P_{IMH}(RL + PV < 0) = 0.9933$$

$n(RL+PV)$



$$P_{NMH}(RL + PV < 0) = 0.044$$

$$P_{NMH}(RL + PV > 0) = 0.956$$

# Заключение

- Построена математическая модель (программа-генератор) реакторного эксперимента JUNO в простейшем приближении;
- Проверена эффективность критерия Фурье “RL-PV” для определения иерархии масс нейтрино;

Дальнейшая работа будет направлена на усовершенствование модели, а именно включение в рассмотрение геометрии детектора и его рабочего вещества, будет проведено сравнение критерия Фурье с периодограммным критерием Ломба-Скэргла.

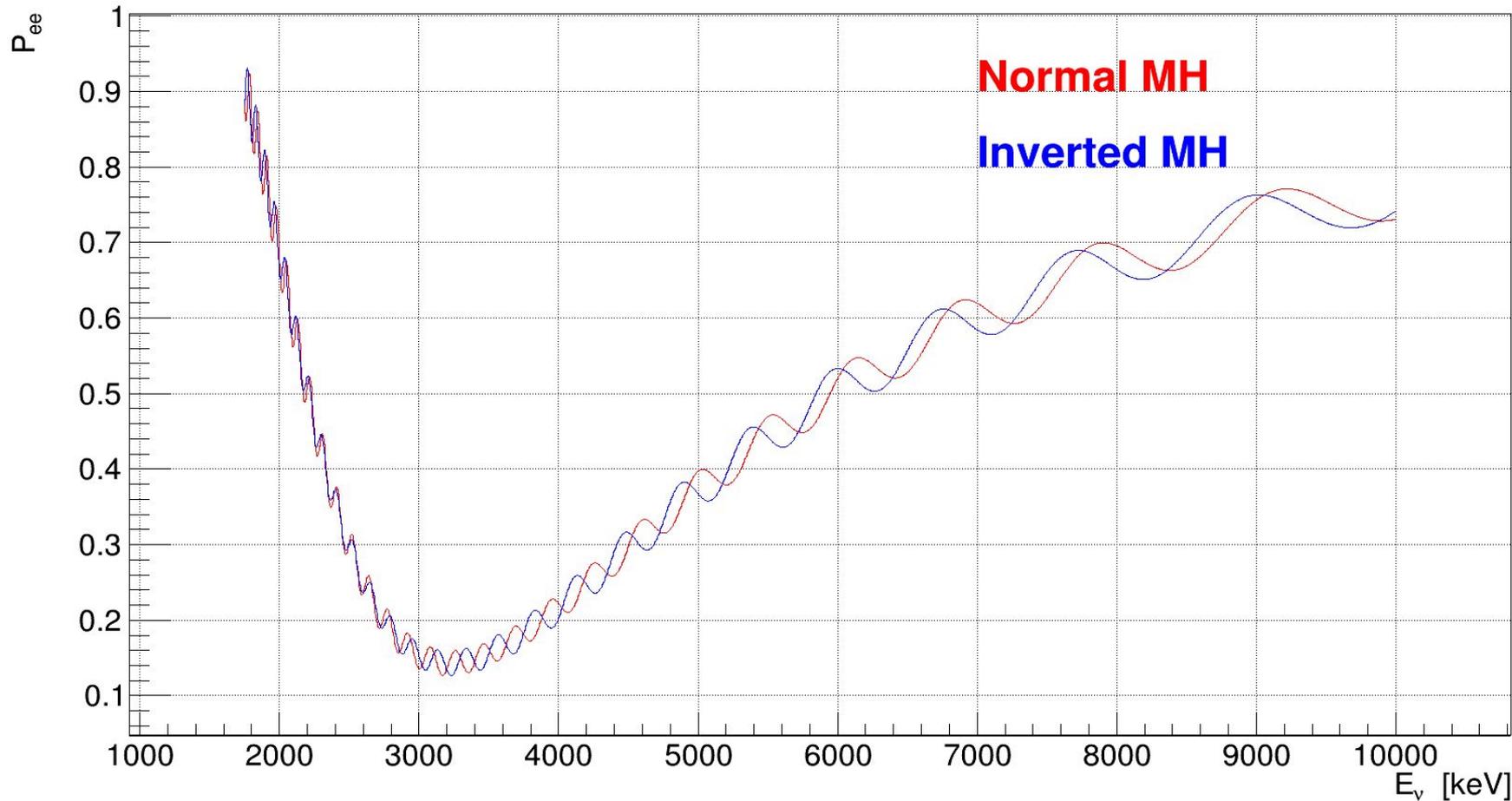
# СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!



Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences



# Вероятность выживания $P_{ee}$ , $L=53$ км



# Спектральный анализ: *периодограммы*

