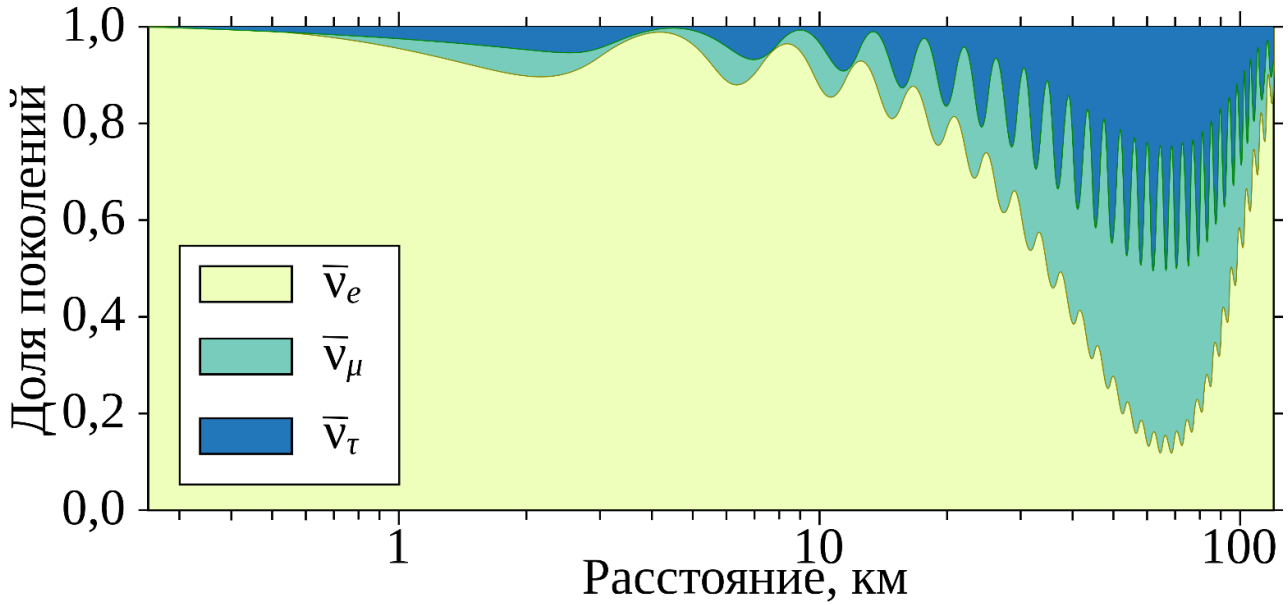
Изучение энергетического разрешения и эффективности восстановления событий с помощью Монте-Карло модели модернизированного эксперимента DANSS

ЮСКО ЕВГЕНИЙ, М24-114

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ — АЛЕКСЕЕВ И. Г.

Нейтрино и нейтринные осцилляции

- Стандартная модель содержит 3 аромата нейтрино: ν_e, ν_μ и ν_τ.
- Очень малые массы.
- Только слабое взаимодействие.
- Аромат может изменяться при движении (нейтринные осцилляции).
- Частота осцилляций зависит от разности квадратов масс:
  - $\Delta m^2_{21} = (7{,}53 \pm 0{,}18) \cdot 10^{-5}$ эВ^2,
  - $\left|\Delta m^2_{32}\right| = (2{,}15 \pm 0{,}05) \cdot 10^{-3}$ эВ^2.

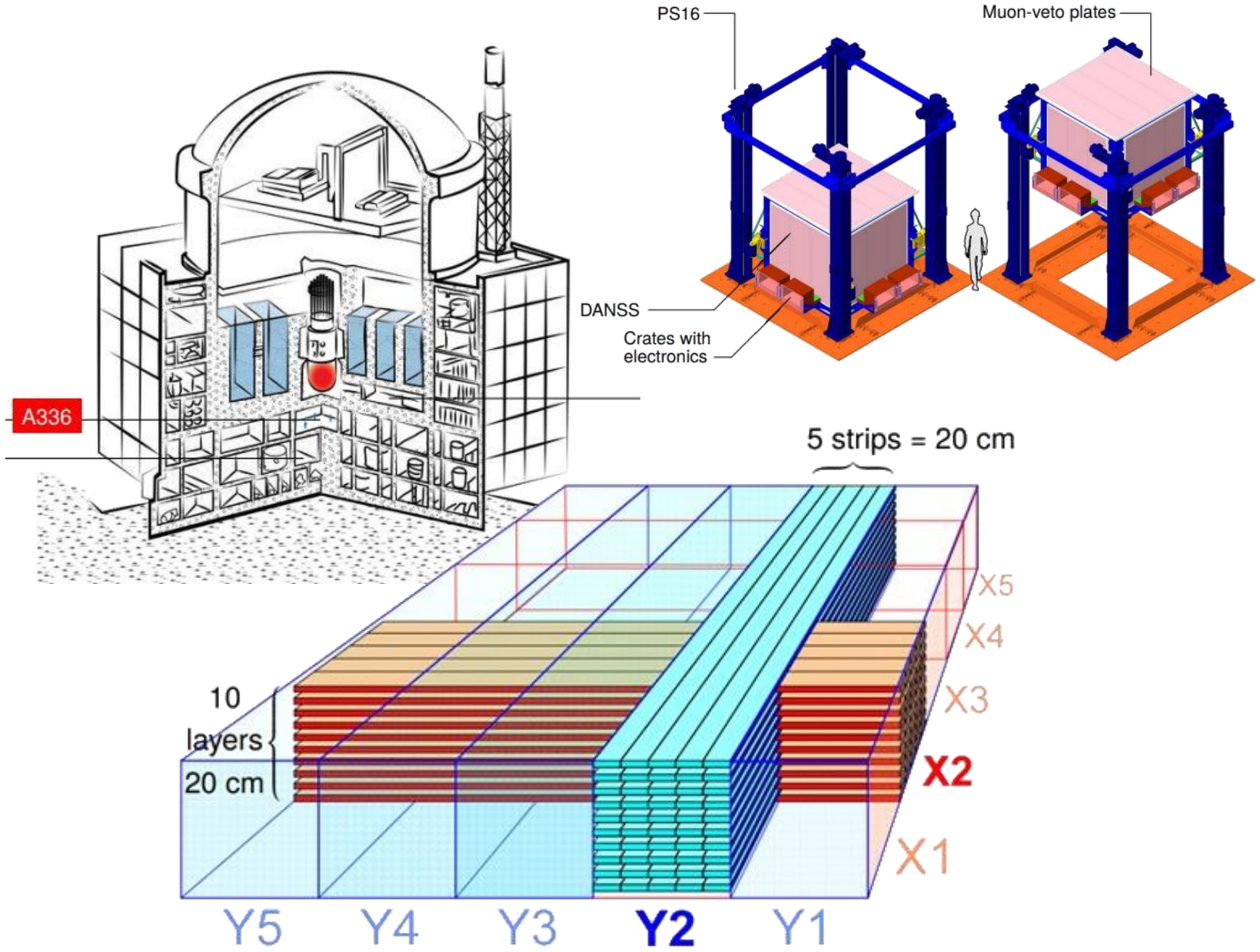


Стерильное нейтрино

- Гипотетический 4-й аромат.
- Не участвует даже в слабом взаимодействии.
- Принимает участие в осцилляциях.
- Предложен для объяснения аномальных результатов некоторых экспериментов.
  - *LSND, MiniBooNE, MicroBooNE*: появление $\bar{\nu}_e$ в пучках $\bar{\nu}_\mu$. Значимость — $3{,}8\sigma$, $4{,}8\sigma$ и $2{,}4\sigma$ соответственно.
  - *Галлиевая аномалия (GALLEX, SAGE и BEST)*: недостаток ν_e по сравнению с теоретическими предсказаниями. При объединении результатов значимость — $> 5\sigma$.
  - *Neutrino-4*: недостаток реакторных $\bar{\nu}_e$. Значимость — $< 3\sigma$.
- Следует отметить, что есть и множество экспериментов, не наблюдающих никаких аномалий в осцилляциях.

Эксперимент DANSS

- Размещён под одним из реакторов Калининской АЭС.
- Чувствительный объём $1 \times 1 \times 1$ м^3, составленный из 2500 стрипов из пластикового сцинтиллятора.
- Подвижная платформа позволяет изменять расстояние до реактора в пределах 10,9 ÷ 12,9 м.
- ФЭУ + КФУ

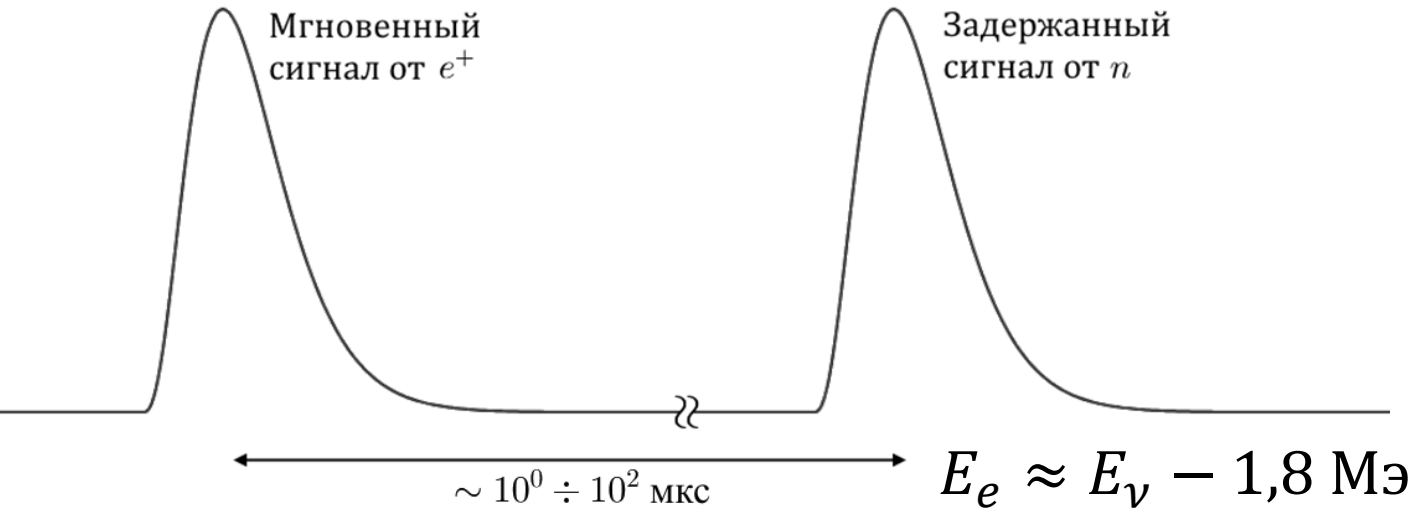


Получение и регистрация нейтрино

ПОЛУЧЕНИЕ

- Бета-распад в ядерном реакторе:

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



$$E_e \approx E_\nu - 1{,}8 \text{ МэВ}$$

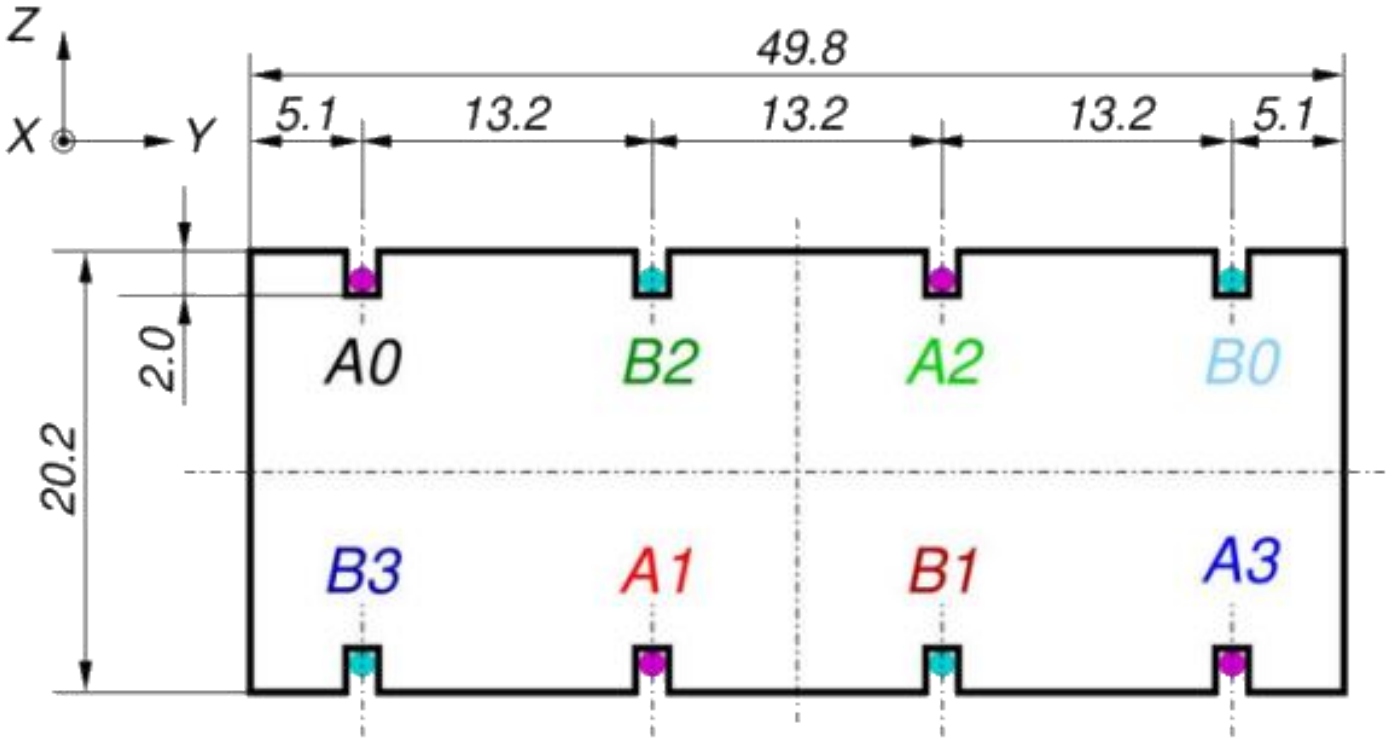
РЕГИСТРАЦИЯ

- Обратный бета-распад:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

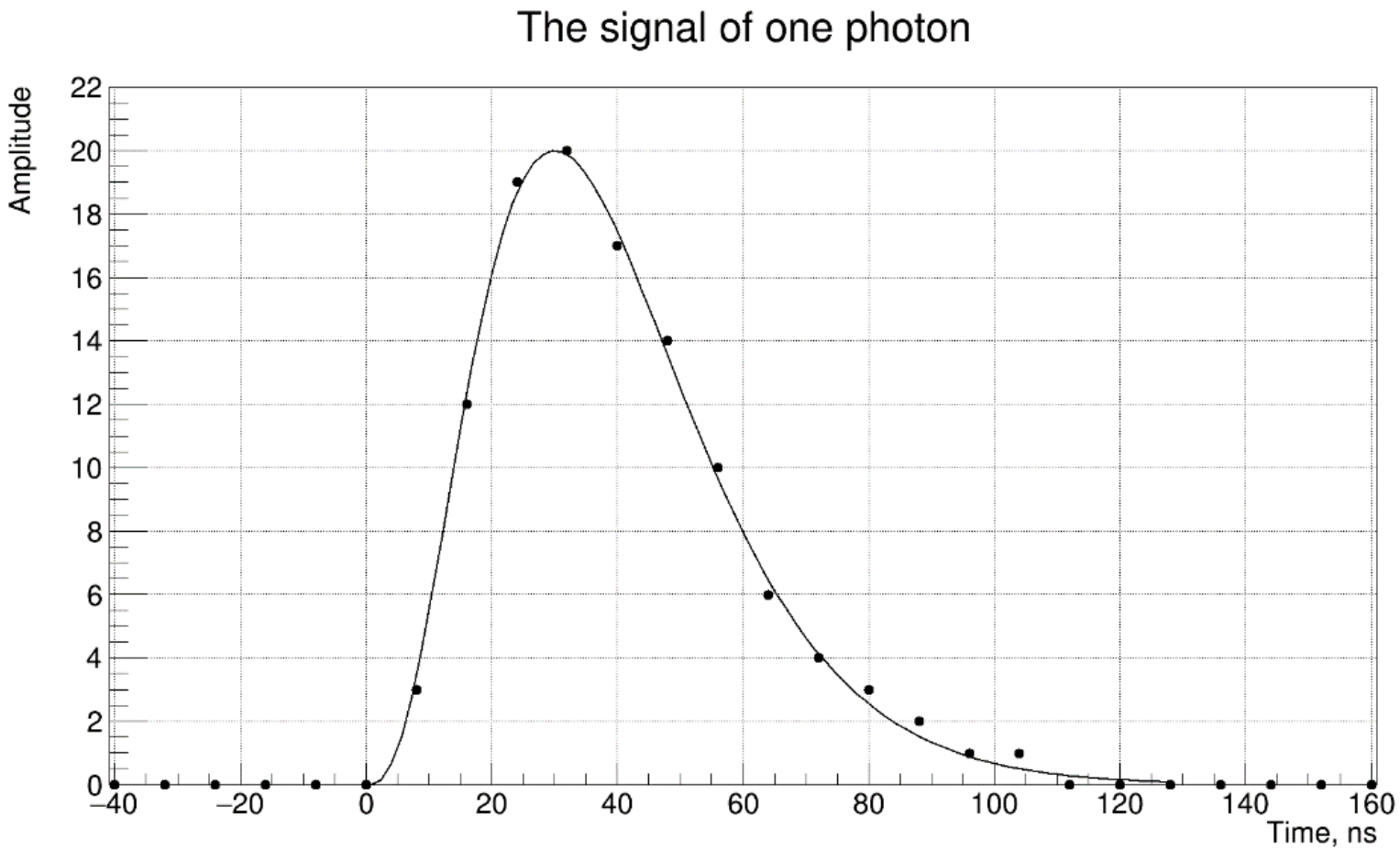
DANSS после модернизации

- В настоящее время идёт процесс модернизации детектора.



- Чувствительный объём — $1{,}2 \times 1{,}2 \times 1{,}2$ м^3.
- 60 слоёв по 24 стрипа размером $2 \times 5 \times 120$ см^3.
- Только КФУ.
- Просмотр стрипов с обеих сторон, что позволяет по разнице времён на двух концах определять продольную координату.

Монте-Карло → бинарный файл

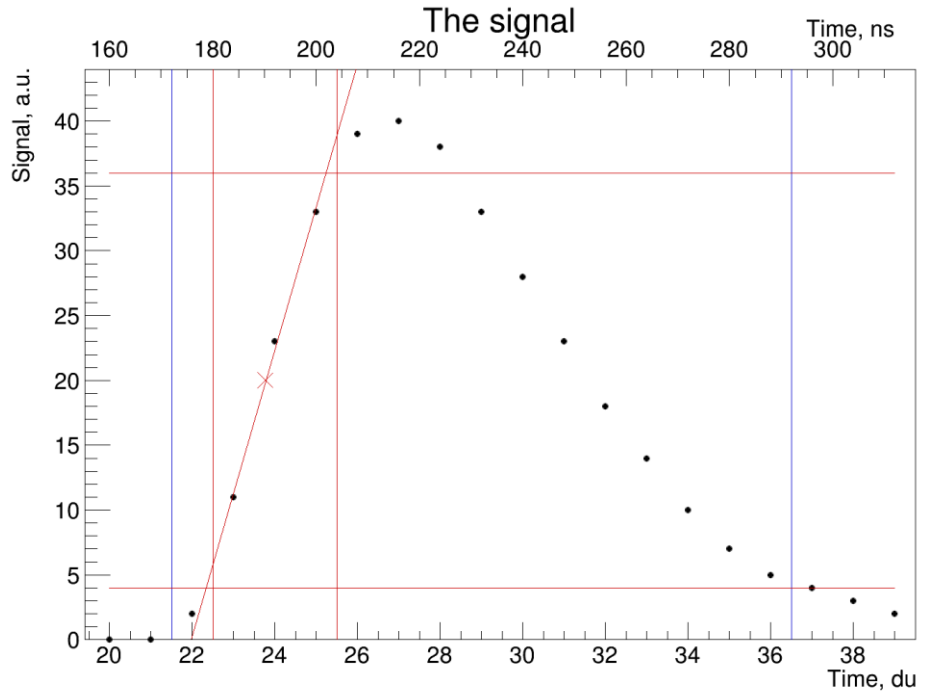


Бинарный файл состоит из отдельных записей, хранящих по 512 нс оцифрованного сигнала с обоих концов стрипа.

Анализ импульсов

Записи поочерёдно просматриваются, в них выделяются импульсы. Для каждого импульса определяются основные параметры:

- амплитуда;
- интеграл;
- время импульса (по пересечению фронта с половиной амплитуды);
- интеграл (энергия).



Event #106

Strip: col 8, row 8 (left)

Record start (du): 13250001533

Record start (ns): 106000012264

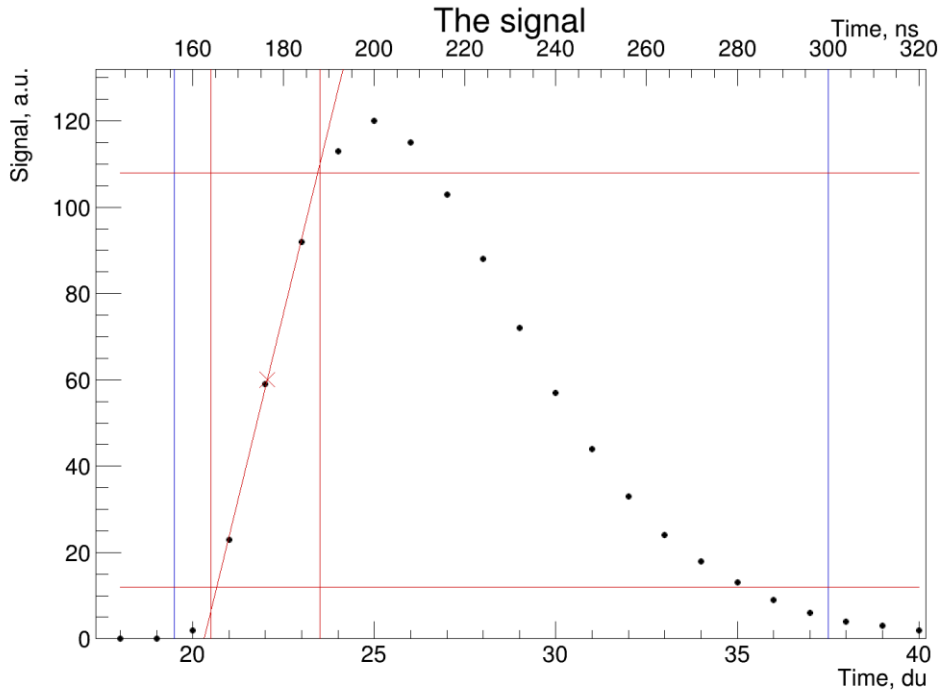
Data range (du): 22–37 (15)

Front range (du): 23–26 (3)

Front fit (du): t = 0.09y + 23.79

Rec. time (ns): 190.31

Integral: 324



Event #106

Strip: col 8, row 8 (right)

Record start (du): 13250001533

Record start (ns): 106000012264

Data range (du): 20–38 (18)

Front range (du): 21–24 (3)

Front fit (du): t = 0.03y + 22.06

Rec. time (ns): 176.46

Integral: 991

Выделение триггеров

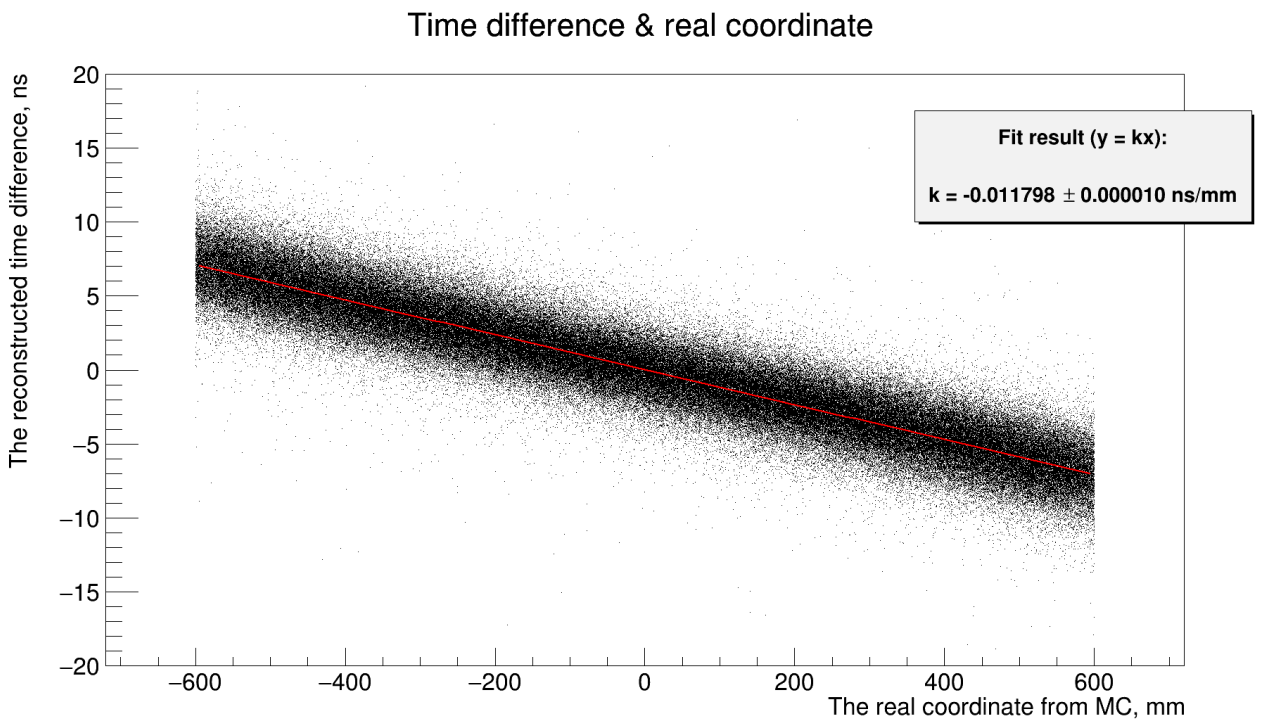
- Под триггером понимается группа близко лежащих импульсов.

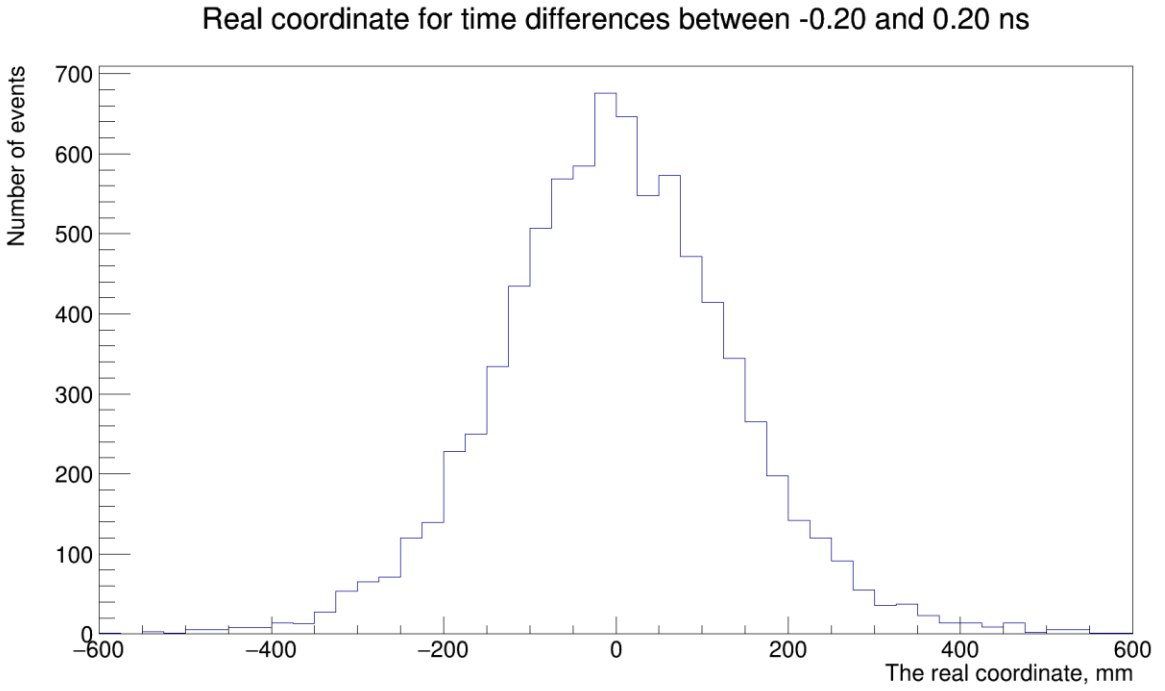
- Первый импульс создаёт первый триггер.
- В этот триггер включаются все импульсы, попадающие во временное окно триггера фиксированной ширины (300 нс), начинающееся с первым импульсом.
- Первый импульс, не попадающий в окно, создаёт следующий триггер.

- В идеальном случае каждому событию ОБР должны соответствовать два триггера: позитронный и нейтронный.

Затухание и продольная координата

- Для более точного восстановления энергии следует учитывать затухание.
- Поправка, связанная с затуханием, зависит от продольной координаты.
- Продольную координату можно определить по разности времён сигналов на двух концах стрипа.



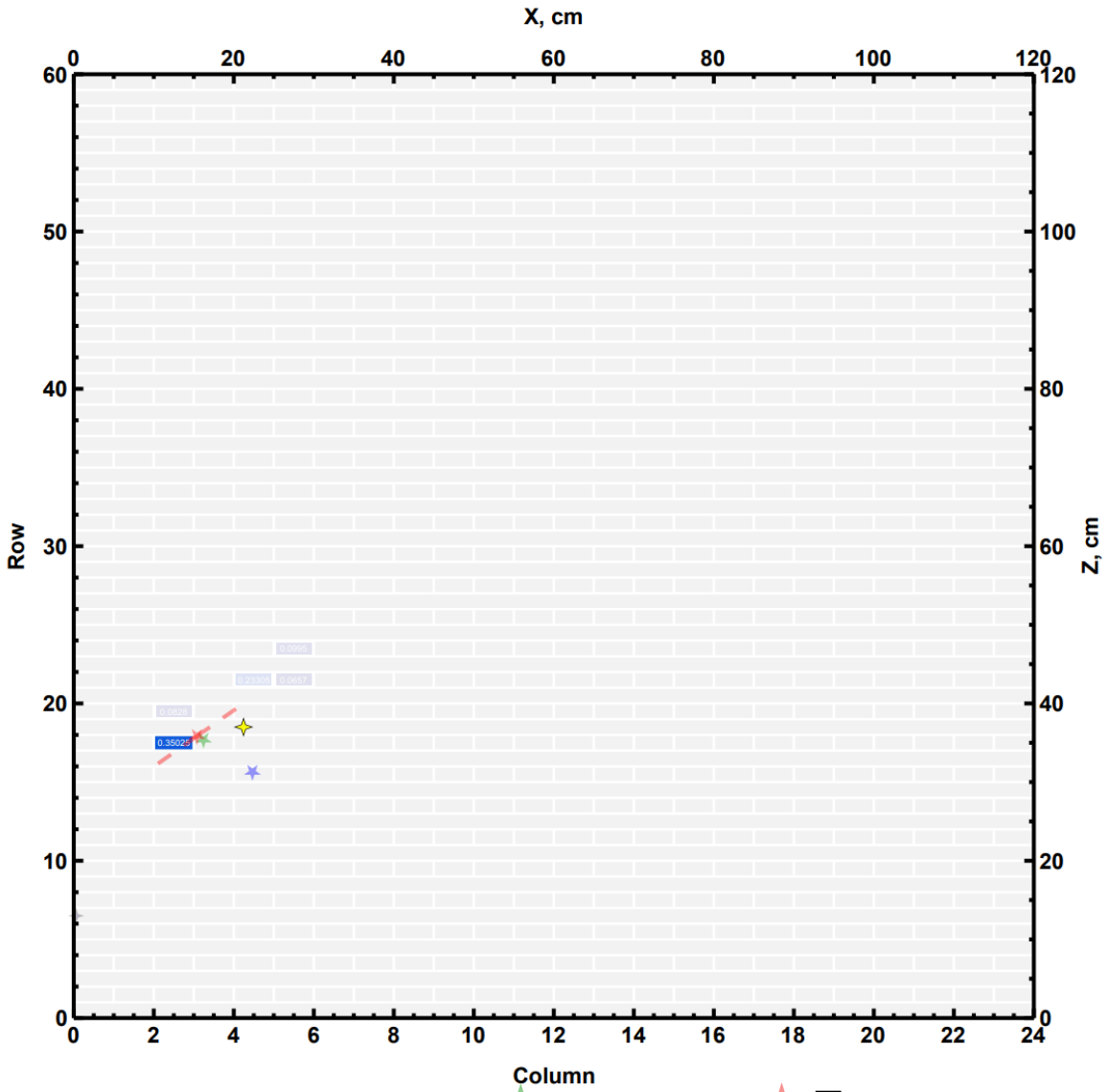


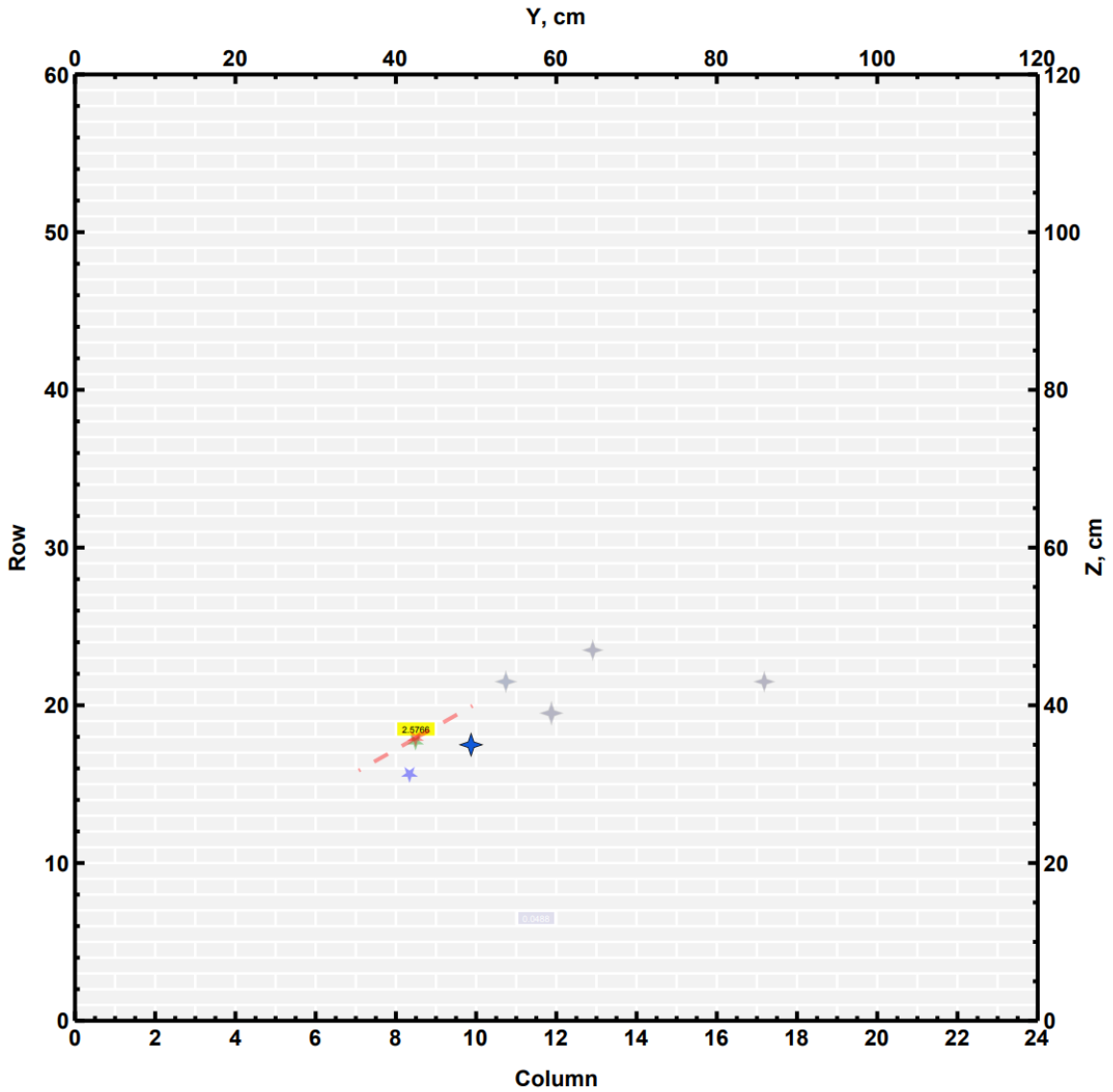
Выделение позитронного кластера

- В позитронный триггер входит не только сигнал от позитрона, но и сигналы от аннигиляционных гамма-квантов.

- Необходимо выделить часть сигнала, относящуюся к позитрону — позитронный кластер.
- Стрип с максимальным энерговыделением + ближайшие к нему стрипы.
- Между стрипами кластера не должно быть стрипов без энерговыделения.
- Сигналы в соседних стрипах должны быть достаточно близко друг к другу (с учётом продольной координаты).

Визуализация позитронного триггера одного из событий; выделенные стрипы — позитронный кластер, 4-конечные звёзды — продольные координаты.

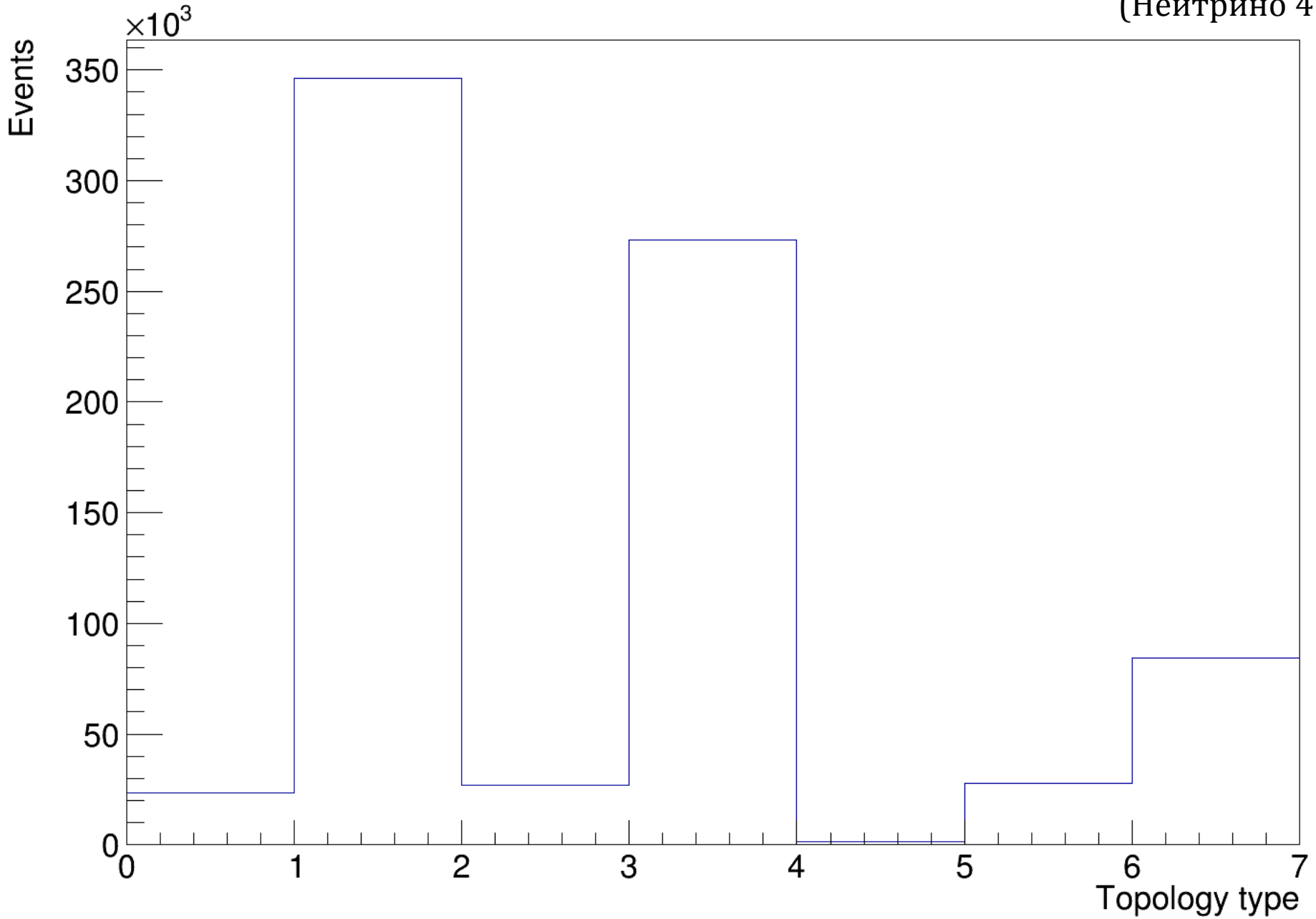




Данные Монте-Карло: ОБР Позитрон Нейтрон

The positron cluster topologies

(Нейтрино 4 МэВ)



Topologies:

0: Unknown

1: 1 (Single strip)

2: 2 (in the same layer)

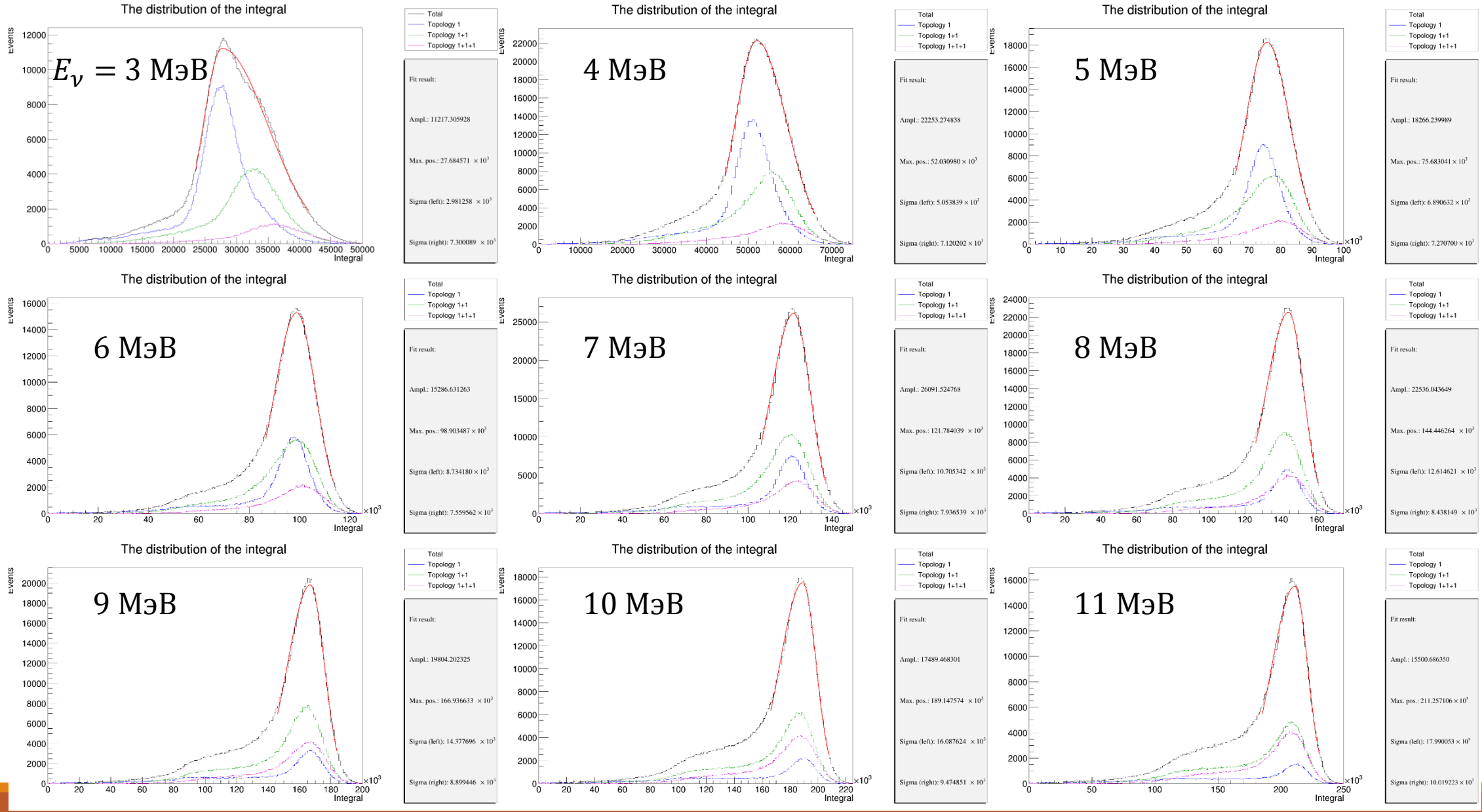
3: 1 + 1

4: 3

5: 2 + 1

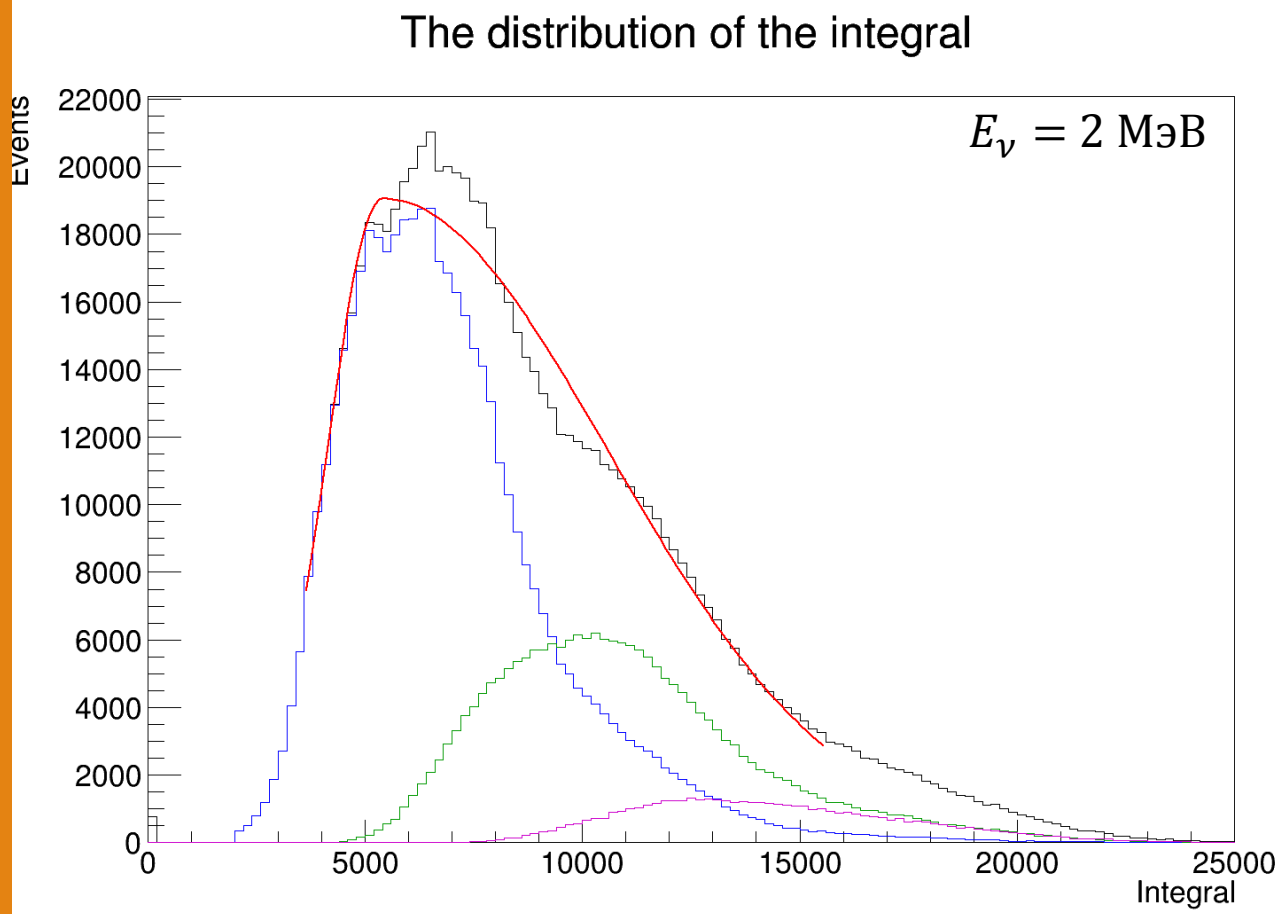
6: 1 + 1 + 1

Интеграл позитронного кластера (моноэнергетические нейтрино)



Интеграл позитронного кластера

- Различные распределения для разных топологий: вероятно, недостаточно эффективное разделение позитрона и гамма-квантов.

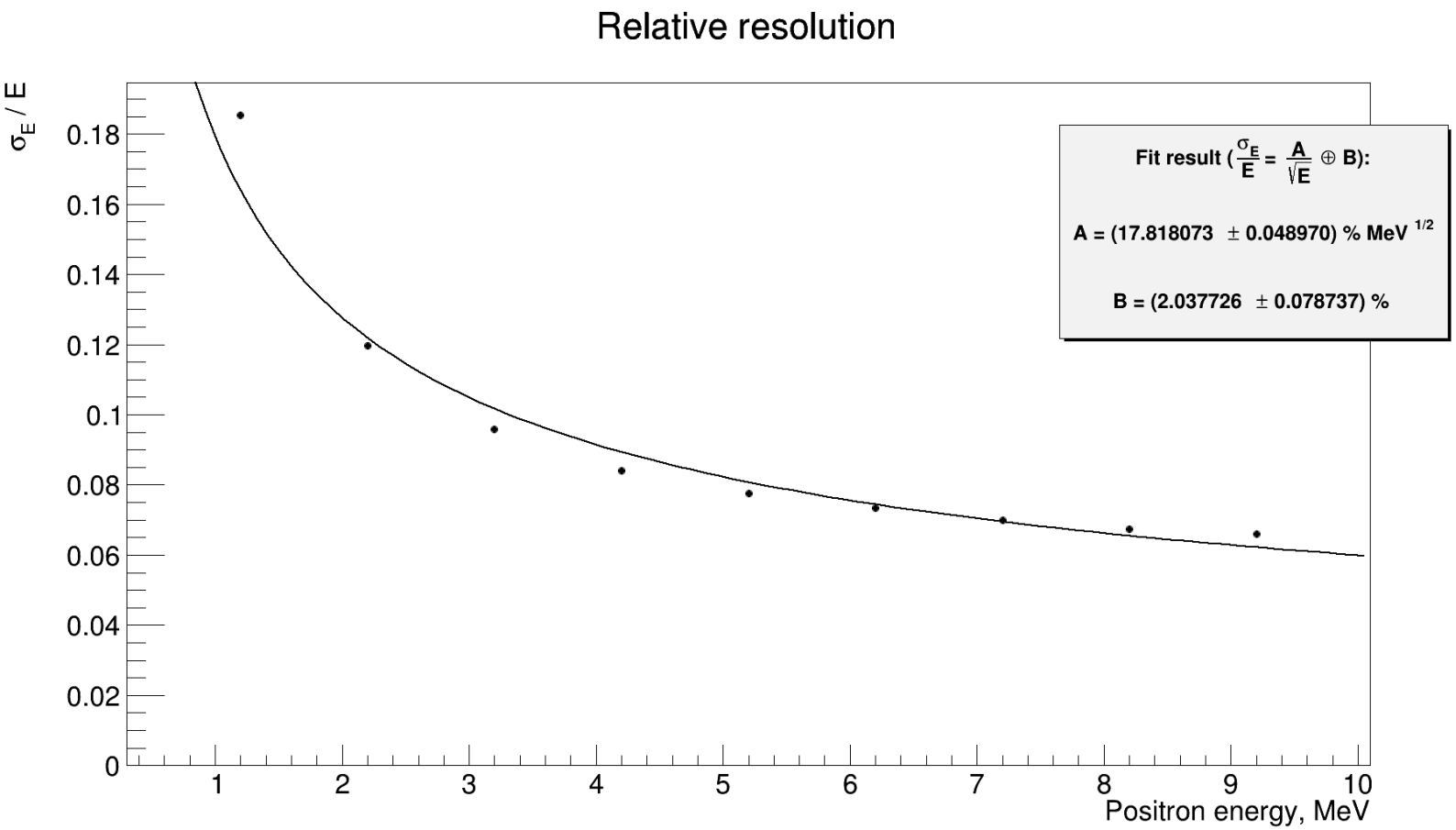


$$f(x; A, x_0, \sigma_1, \sigma_2) = \begin{cases} A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_1^2}\right), x < x_0, \\ A \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma_1^2}\right), x \geq x_0 \end{cases}$$

Энергетическое разрешение

- Распределения интегралов позитронных триггеров для моноэнергетических нейтрино от 3 до 11 МэВ аппроксимировались несимметричной функцией Гаусса.
- По результатам подгонки была получена грубая оценка энергетического разрешения детектора:

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{18\ \%}{\sqrt{E\ [\text{МэВ}]}} \oplus 2{,}0\ \%.$$



Заключение

- Была написана программа, которая на основе Монте-Карло создаёт модель сигнала детектора.
- Был разработан алгоритм для выделения среди сигналов позитронного кластера.
- По результатам анализа была получена грубая оценка энергетического разрешения детектора (по отношению к энергии позитрона):

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{18\ \%}{\sqrt{E\ [\text{МэВ}]}} \oplus 2{,}0\ \%.$$

- Анализ полученных данных указывает на недостаточно эффективное отделение позитрона и гамма-квантов. В дальнейшем планируется усовершенствование алгоритма.

Моделирование сигнала

Монте-Карло:

- № сработавшего фотоумножителя;
- величина зарегистрированного сигнала;
- момент времени.

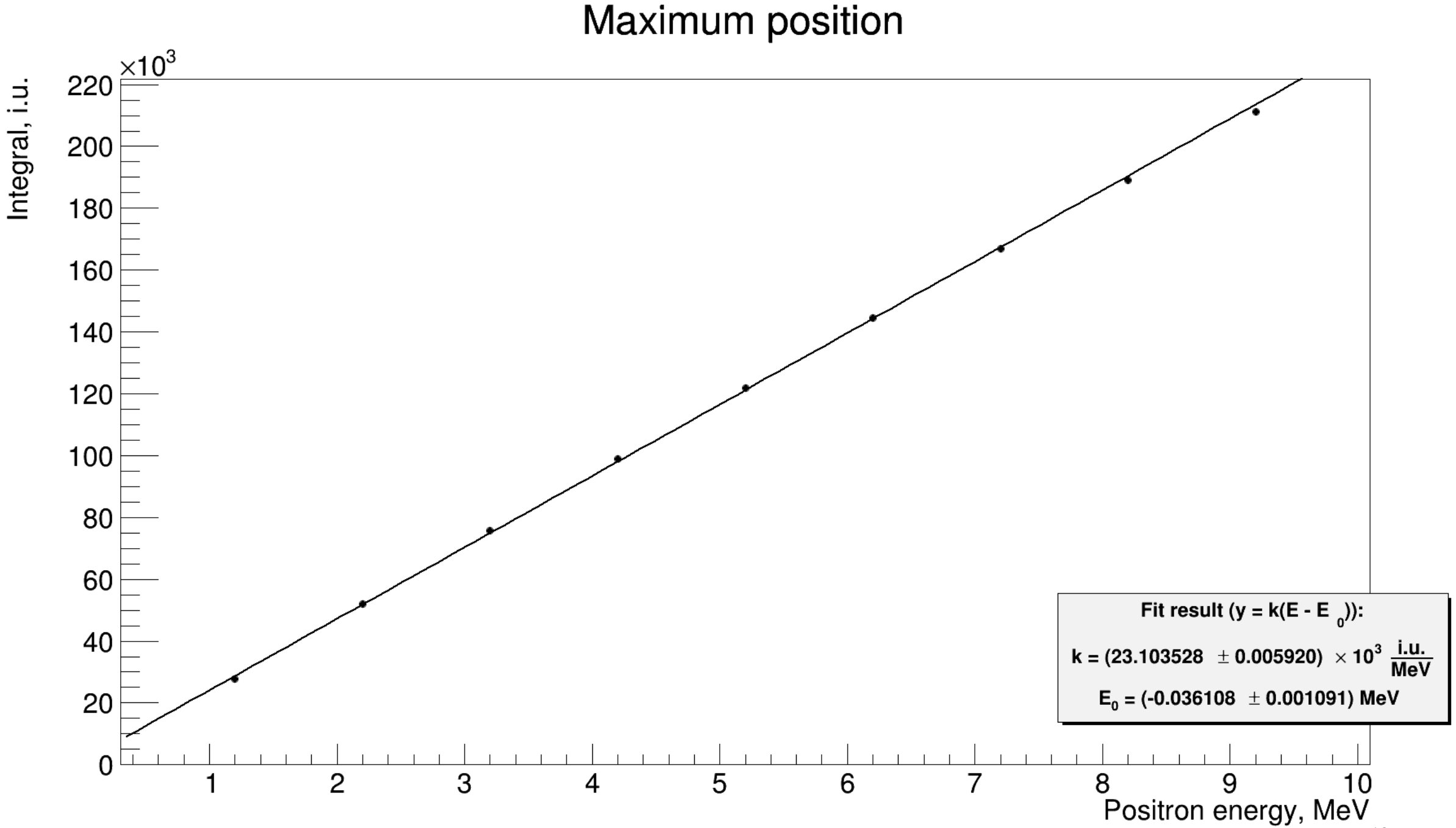
Бинарный файл:

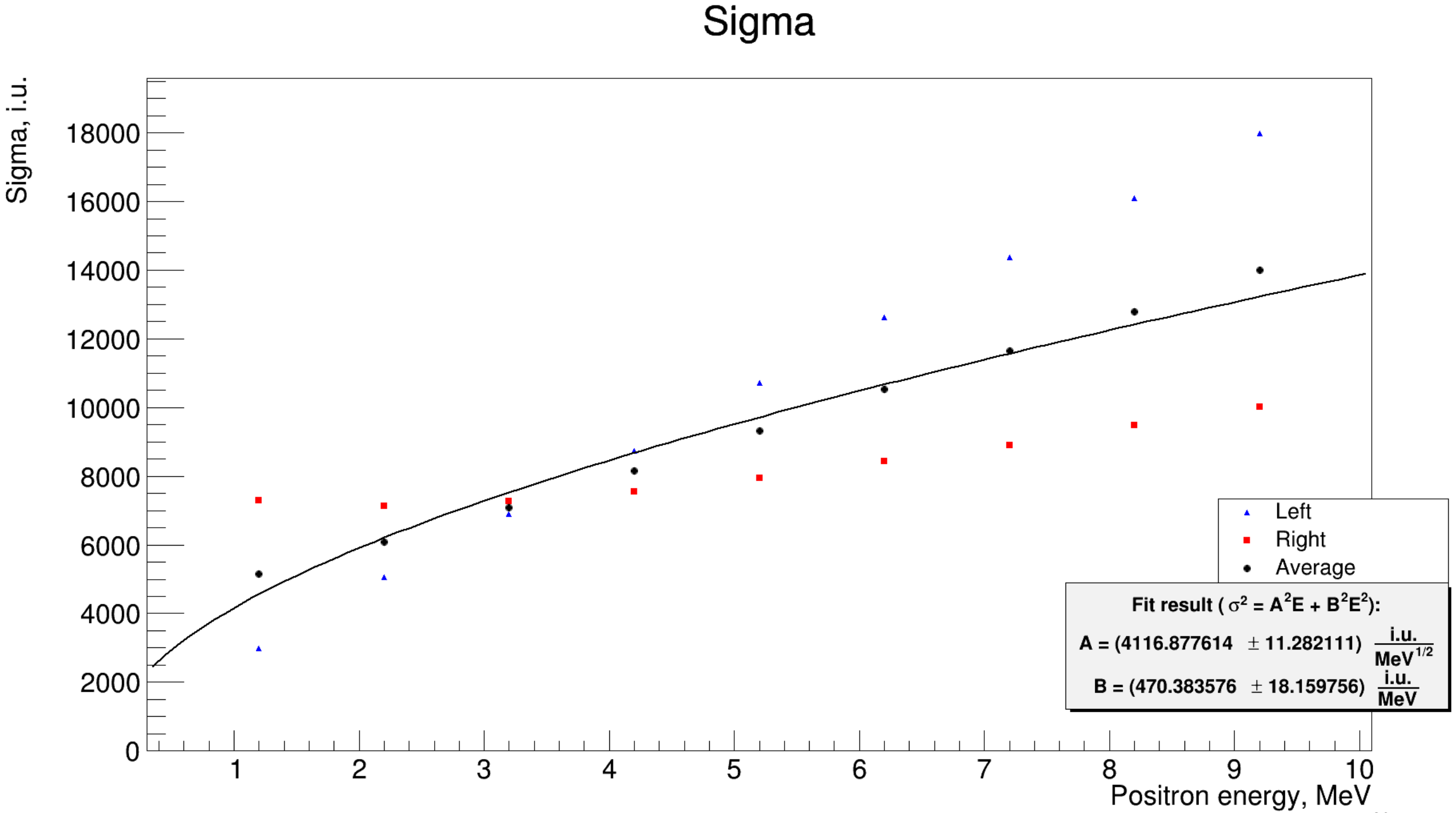
- Разделён на записи.
- Каждая запись хранит:
  - время начала записи;
  - № стрипа;
  - 2 оцифрованных сигнала с 2 концов стрипа.
- Частота оцифровки — 125 МГц.
- Длительность записи — 512 нс.

Каждый зарегистрированный фотон создаёт импульс, описывающийся выражением

$$f(t) = A_0 \exp\big(3(1 + \ln\xi - \xi)\big),$$

$$\xi = \frac{t - t_0}{3\tau},$$


Maximum position
Integral, i.u.
×10^3
220
200
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Positron energy, MeV
Fit result (y = k(E - E 0)):
k = (23.103528 ± 0.005920) × 10^3 i.u./MeV
E0 = (-0.036108 ± 0.001091) MeV


Sigma
Sigma, i.u.
18000
16000
14000
12000
10000
8000
6000
4000
2000
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Positron energy, MeV
Left
Right
Average
Fit result (σ² = A²E + B²E²):
A = (4116.877614 ± 11.282111) i.u. / MeV^1/2
B = (470.383576 ± 18.159756) i.u. / MeV