

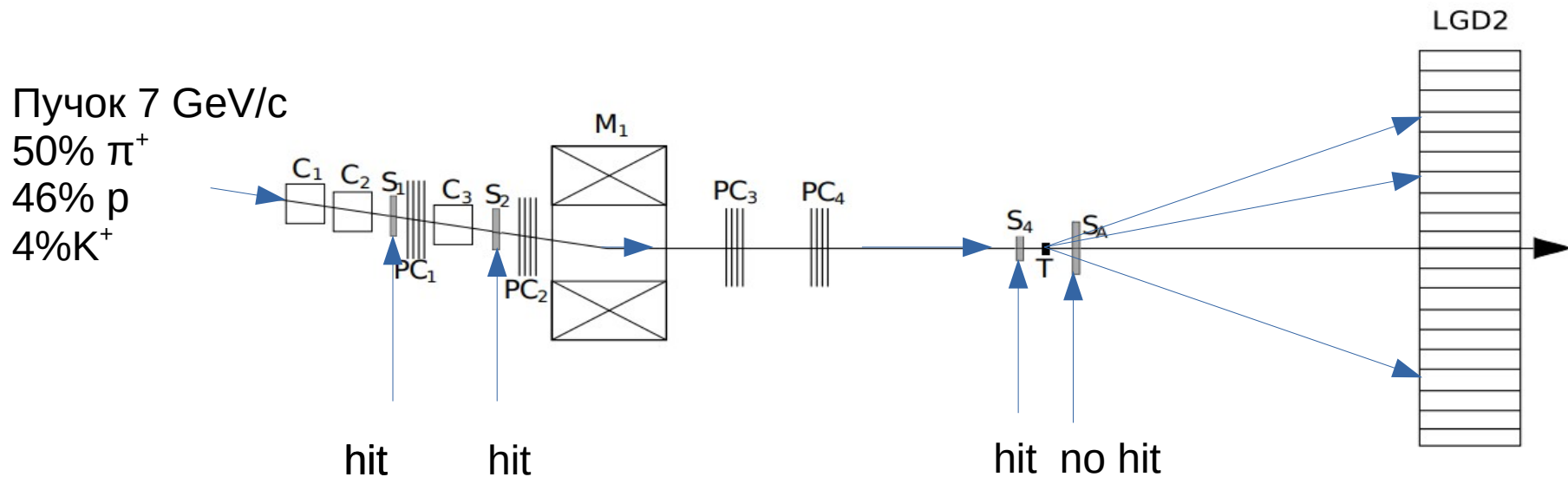
# Калибровка детектора гамма-ядерных переходов установки Гиперон+ с внешним триггером

А.М.Горин, С.В.Евдокимов, А.А.Зайцев\*, В.И.Изучеев,  
Д.С.Креницын, Б.В.Полищук, В.И.Рыкалин,  
С.А.Садовский, Ю.В.Харлов, А.А.Шангараев

НИЦ “Курчатовский институт – ИФВЭ”, Протвино  
\* ОИЯИ, Дубна

# Введение

- Гиперон-М – эксперимент по изучению нейтральных состояний, образующихся в адрон-ядерных взаимодействиях на канале 18 ускорителя У70 ИФВЭ, Протвино.



- Пучок взаимодействует с мишенью T (Be, C, Al, Cu, Sn, Pb), рождая вторичные частицы;
- Триггер на сцинтилляционных пучковых счетчиках  $S_1 * S_2 * S_4 * S_A$  выбирает события, в которых наблюдаются лишь нейтральные кластеры в э.м. калориметре LGD2 (Lead Glass Detector);
- Таким образом, в регистрируемых событиях возможно наблюдение нейтральных резонансов, распадающихся на фотоны в конечном состоянии;

## Введение (2)

- Гиперон-М закончен в 2022г;
- Выполненные исследования:
  - Поиск модификации параметров мезонов в холодной ядерной материи
    - Масса и ширина  $f_2(1270)$ -мезона: отсутствие зависимости от радиуса ядра-мишени, самое точное на данный момент измерение, включено в PDG.
    - Масса и ширина  $\omega(782)$ -мезона: отсутствие зависимости от радиуса ядра-мишени, точность сравнима с PDG.
      - *Ядерная физика т. 76 №11 (2013) 1-15*
      - *JETP Lett. 113 (2021) no.5, 289-296*
      - *Phys. At. Nucl. 84 (2021) No.9, 1647-1652.*
  - Поиск экзотики a la R(360) (см. *Kh.Abraamyan et al. Eur. Phys. J. A (2016) 52: 259*)
    - Предел сверху на сечение образования резонансно-подобных структур с массой 200 – 1000 МэВ/с<sup>2</sup> по отношению к  $\eta$ -мезону в двухфотонной моде в  $\pi A$ -взаимодействиях
      - *Письма в ЖЭТФ, том 118, вып. 9 (2023) с.629 – 636.*

# Эксперимент ГИПЕРОН+

- Эксперимент ГИПЕРОН+ – продолжение эксперимента ГИПЕРОН-М по изучению взаимодействий адронов с ядрами
  - Предложение эксперимента: *Известия РАН. Серия физическая, 2023, Т. 87, № 8, стр. 1109-1115;*
- Модернизация установки включает в себя создание детектора гамма-ядерных переходов GNT, который предназначен для детектирования фотонов МэВ-ных энергий;
- Благодаря GNT открываются следующие возможности физической программы эксперимента:
  - **Изучение конфигураций возбужденных состояний вторичных лёгких ядер**, образующихся в реакциях перезарядки в результате **различных реджеон-ядерных взаимодействий**
  - **Изучение процессов  $pA$ -рассеяния назад с перезарядкой** на различных лёгких ядрах (**барионный обмен в  $t$ -канале реакции**)
  - **Поиск и изучение экзотических ядер**, образующихся в  $pA$  и  $\pi^+A$  взаимодействиях на лёгких ядрах
  - **Поиск и изучение экзотических мезонных состояний**, образующихся в сильных взаимодействиях в поле атомных ядер

# Схема эксперимента ГИПЕРОН+

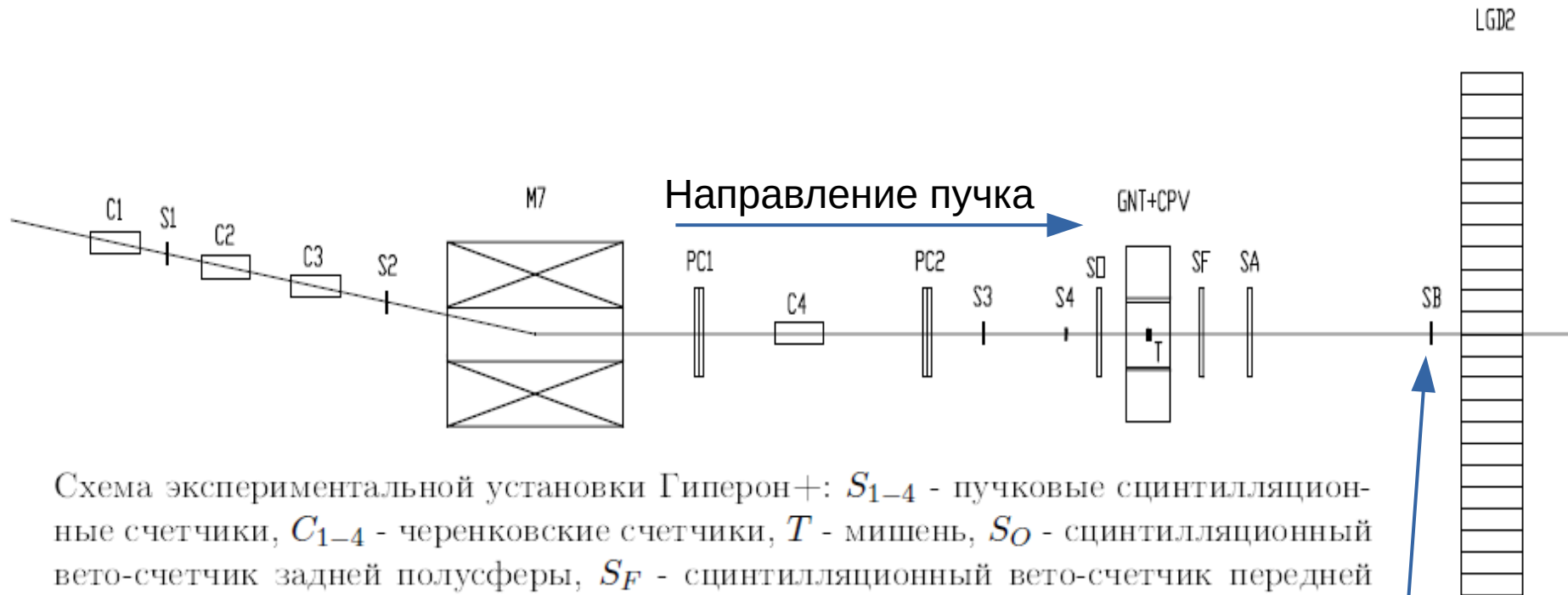


Схема экспериментальной установки Гиперон+:  $S_{1-4}$  - пучковые сцинтилляционные счетчики,  $C_{1-4}$  - черенковские счетчики,  $T$  - мишень,  $S_O$  - сцинтилляционный veto-счетчик задней полусферы,  $S_F$  - сцинтилляционный veto-счетчик передней полусферы,  $S_A$  - сцинтилляционный veto-счетчик,  $S_B$  - триггерный сцинтилляционный антисчетчик пучка,  $PC_{1-2}$  - две пучковые пропорциональные камеры,  $CPV$  - детектор заряженных частиц мишени,  $GNT$  - спектрометр гамма-ядерных переходов,  $LGD2$  - черенковский электромагнитный спектрометр с радиаторами из свинцового стекла.

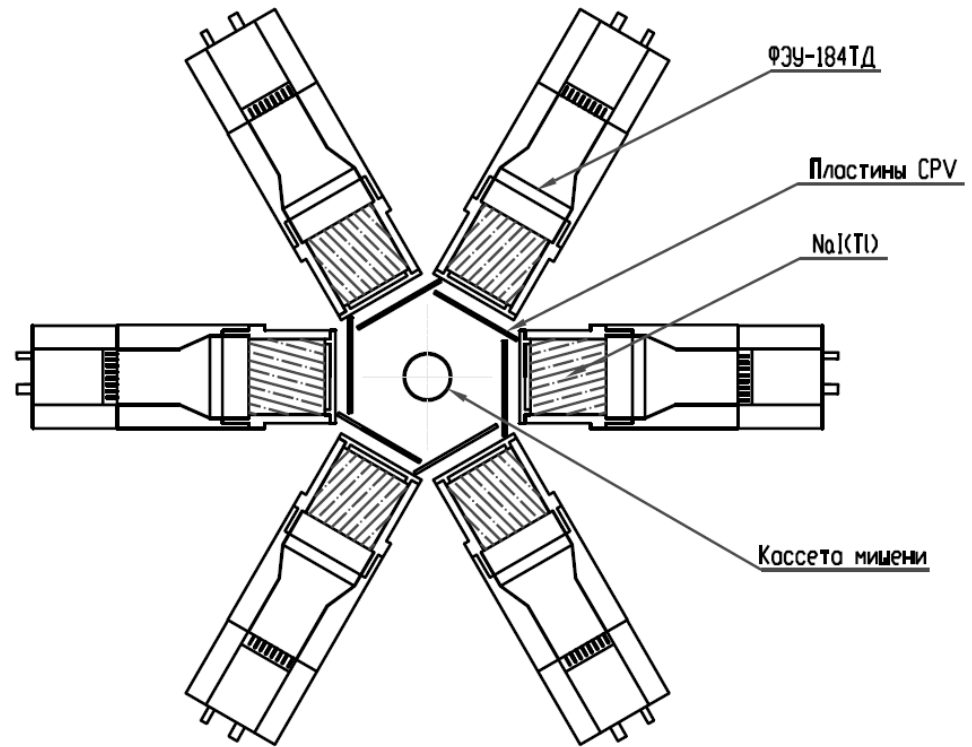
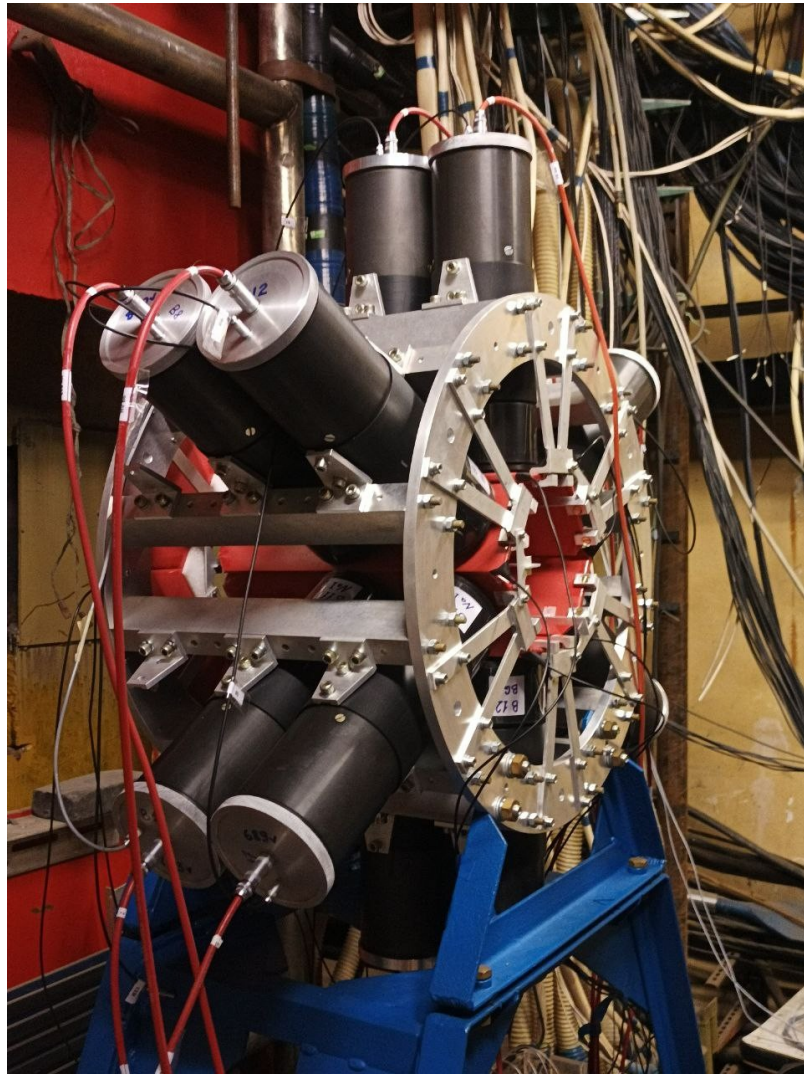
**Основной триггер – триггер на взаимодействие в мишени:**

$$Trig = S1 * S2 * S3 * S4 * \overline{SB}$$

Частица в пучке

Отсутствие сигнала в SB = триггер на взаимодействие

# Спектрометр гамма-ядерных переходов GNT

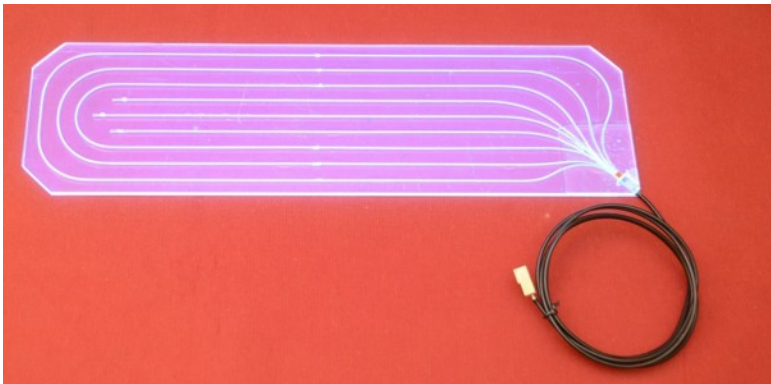


**Спектрометр GNT** (Gamma Nuclear Transition) состоит из трех колец кристаллов из NaI и BGO, каждое из которых включает в себя 6 кристаллов (3 кристалла NaI и 3 кристалла BGO) диаметром и длиной 6.3 см. Кристаллы просматриваются спектрометрическими фотоумножителями ФЭУ-184ТД. Сигналы с ФЭУ подаются на 12-бит АЦП в стандарте Евро-МИСС. В центре спектрометра расположена кассета, в которую вставляется ядерная мишень. Внутренний диаметр кассеты для позиционирования мишени равен 4.1 см.



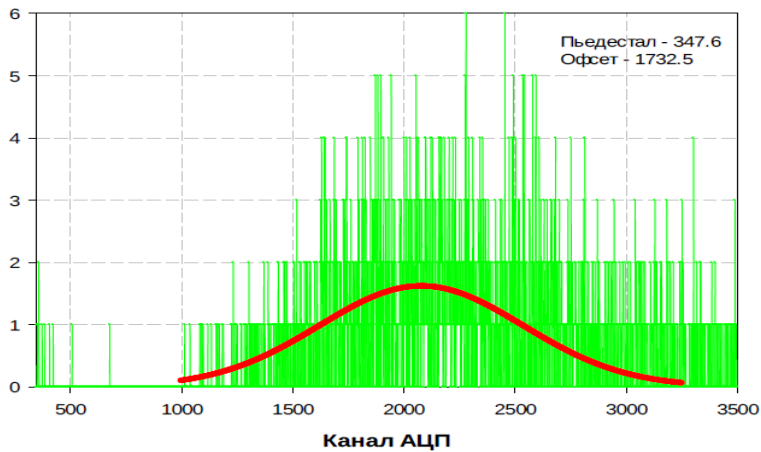
# Вето-детектор CPV и SO

Вето-детектор заряженных частиц (CPV) в мишенном узле установки Гиперон+.  
Сцинтилляционная пластина CPV без светоизоляции.

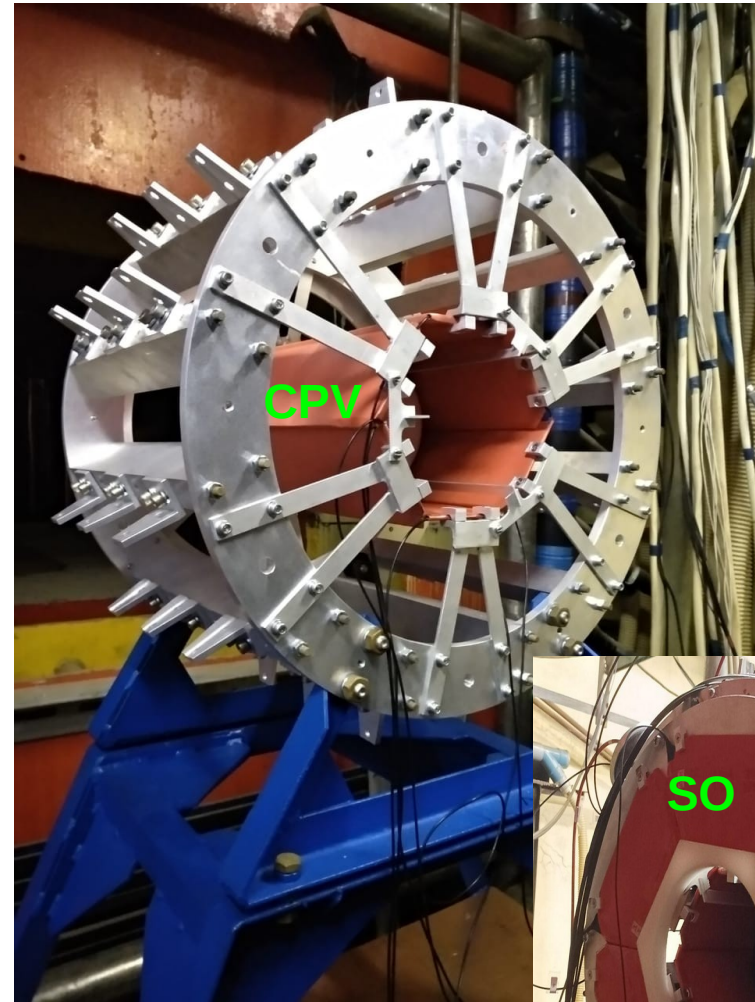


Пластина №1. 305×85×3.5 мм<sup>3</sup>

Внешний триггер 5×5 см<sup>2</sup>, время интегрирования – 100 нс, SiPM@30.0 В

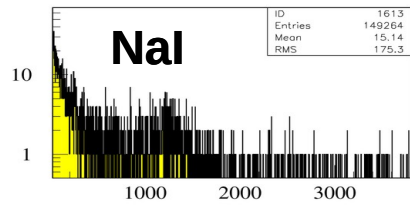
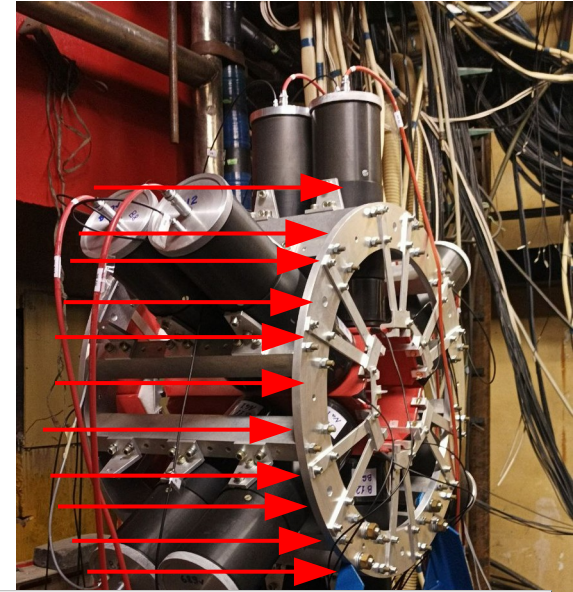


Амплитудный спектр, дальний конец, световыход – 57.2 фэ

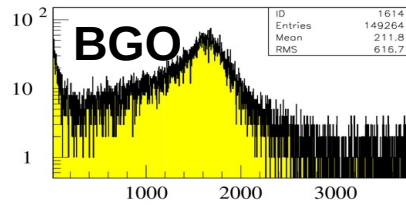


# Сигналы GNT от облучения мюонами

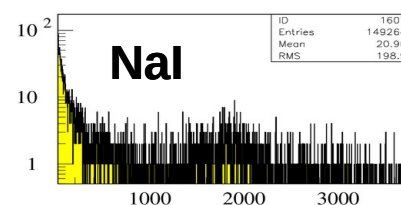
- Облучение мюонами проводилось при закрытом калиматоре.
- Мюоны облучали детекторы GNT, проходя их насквозь и формируя сигнал MIP.
- Триггер  $S1 \cdot S2 \cdot SO$ .
- Спектры амплитуд со счетчиков GNT в мюонном пучке без калибровки показаны ниже.



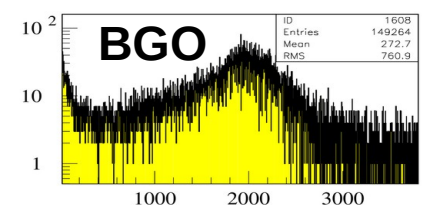
GNT+CPV ordered



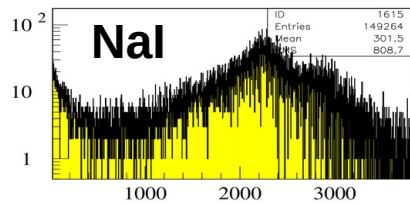
GNT+CPV ordered



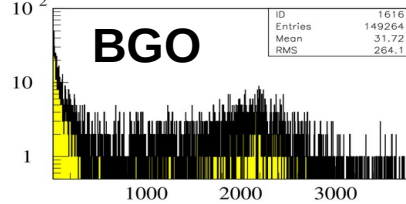
GNT+CPV ordered



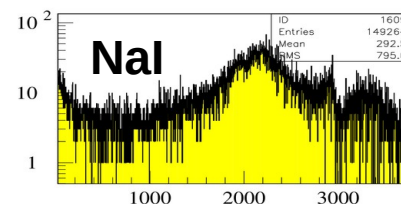
GNT+CPV ordered



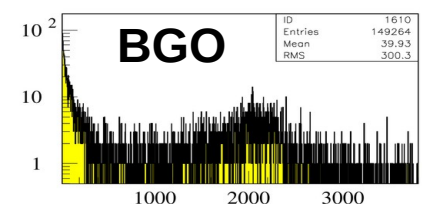
GNT+CPV ordered



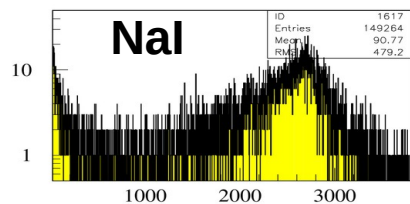
GNT+CPV ordered



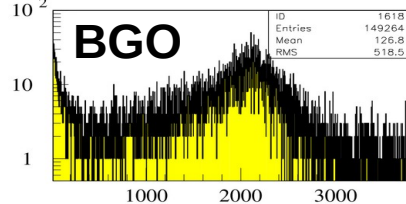
GNT+CPV ordered



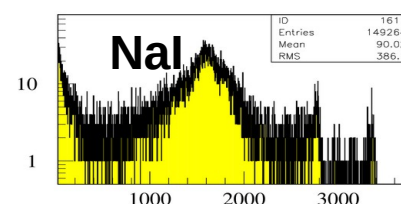
GNT+CPV ordered



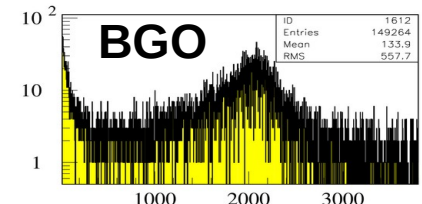
GNT+CPV ordered



GNT+CPV ordered



GNT+CPV ordered



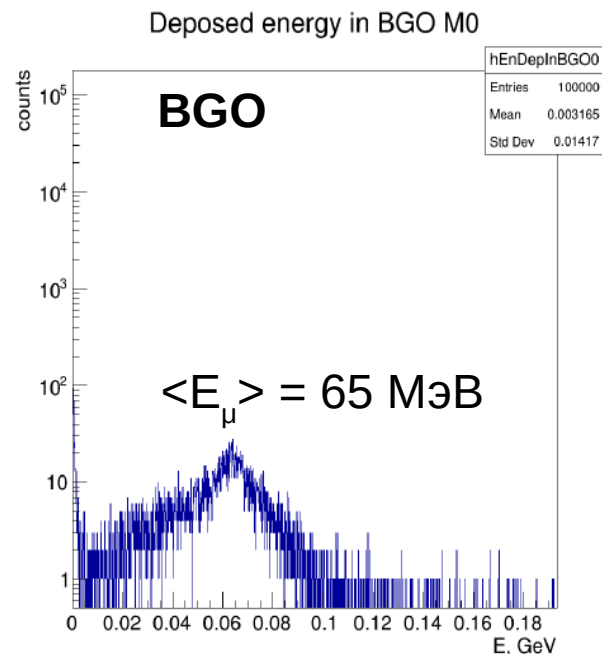
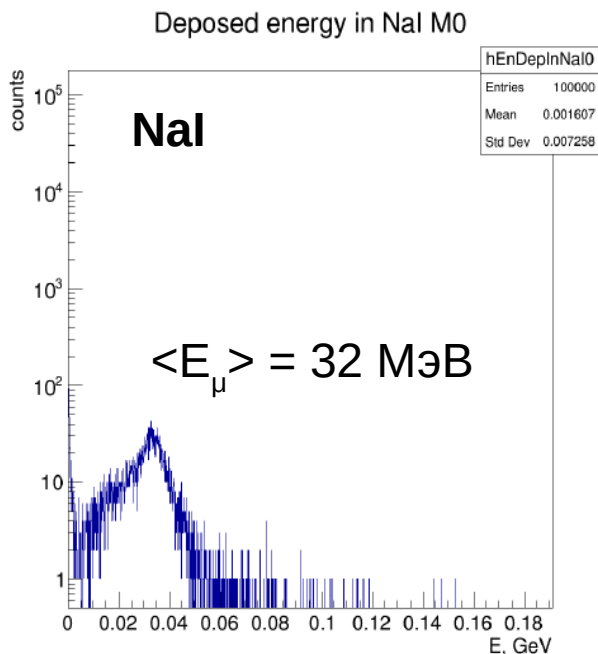
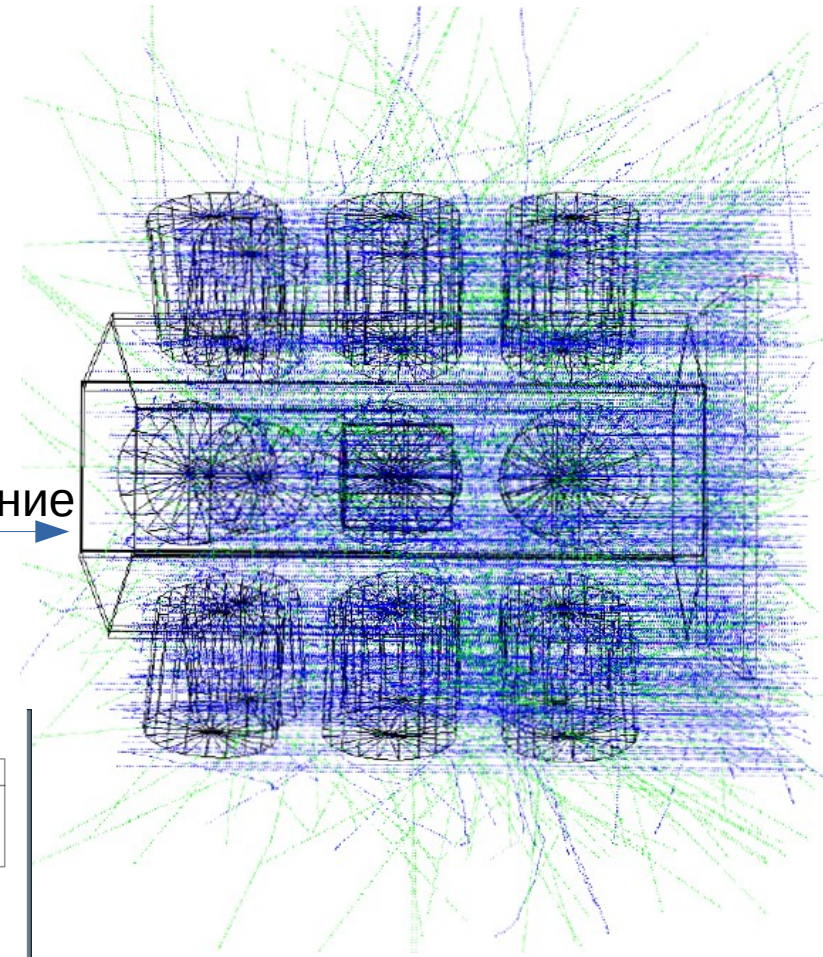
GNT+CPV ordered



# Мюоны в пучке: МК моделирование GEANT4

- Прохождение мюонов с импульсом 7 ГэВ/с
- Выделенная энергия в детекторах NaI и BGO представлена ниже.
- Пики на спектрах амплитуд, полученные в эксперименте, соответствуют MIP и могут быть использованы для выбора напряжений на ФЭУ.

Направление  
пучка →

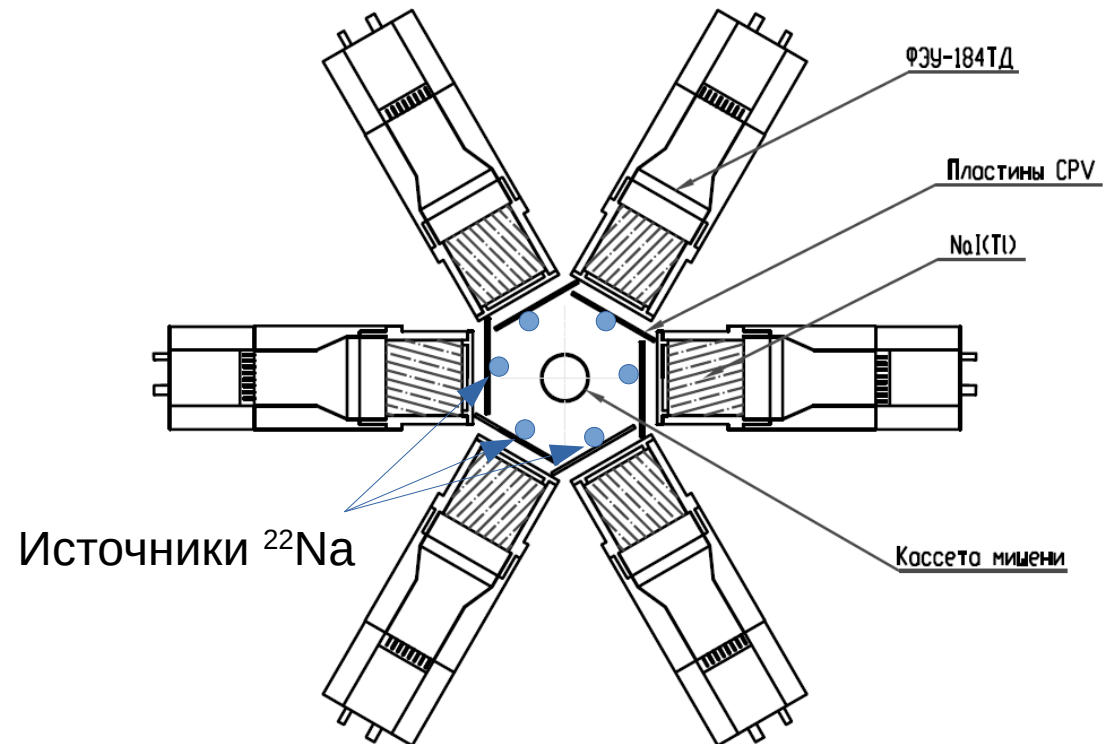
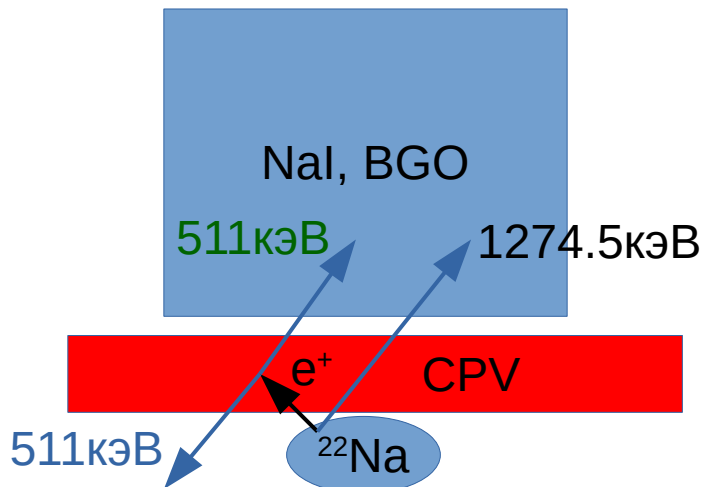


# Калибровка детекторов GNT

- Калибровка счетчиков детектора на пик МIP не может быть применена в силу того, что пик МIP (32 МэВ для NaI и 65 МэВ для BGO) лежит далеко за пределами области интереса энергий фотонов (до 10 МэВ).
- Поэтому калибровку было предложено осуществлять с помощью р/а источника  $^{22}\text{Na}$ 
  - $^{22}\text{Na} \rightarrow ^{22}\text{Ne}^* + e^+ + \nu_e$  (+2.8423 МэВ)
  - $^{22}\text{Ne}^* \rightarrow ^{22}\text{Ne} + \gamma$  (+1.2745 МэВ)
- Триггирование происходило по сигналу с пластины CPV при прохождении через нее позитрона.

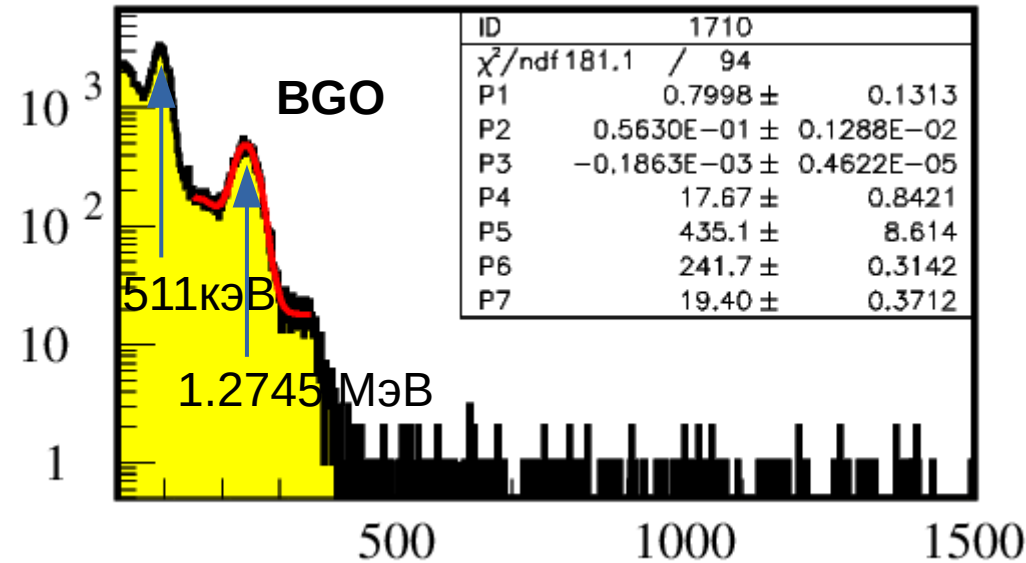
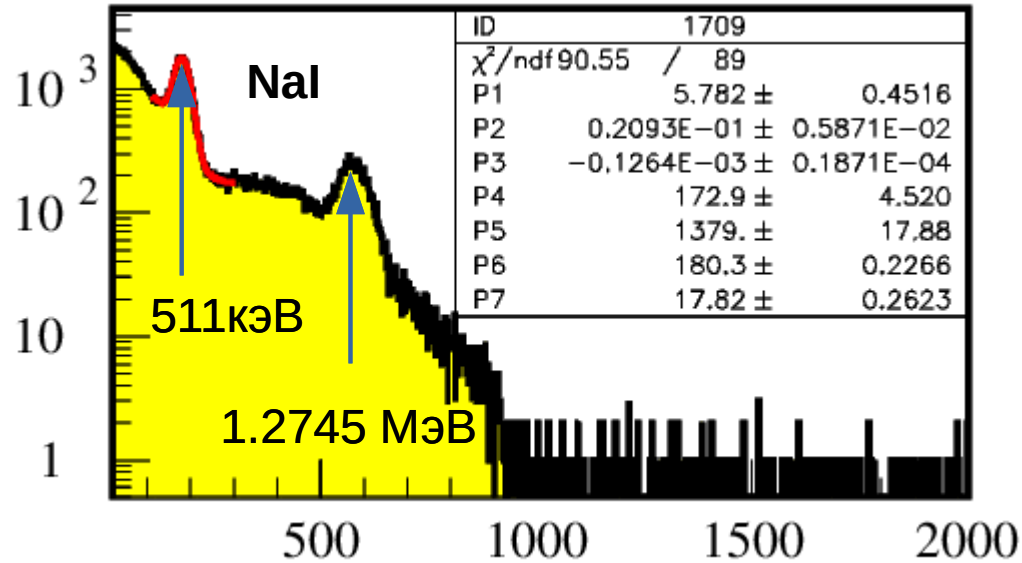
Ожидаются 2 пика:

- $e^+e^-$  – аннигиляция (511 кэВ)
- Фотон 1.2745 МэВ



# Амплитудные спектры GNT

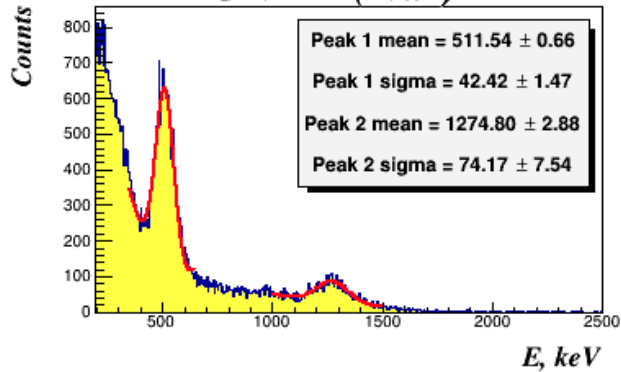
- Полученные амплитудные спектры содержат 2 пика, соответствующие 511 кэВ и 1.2745 МэВ, которые были использованы для калибровки энергетической шкалы счетчиков GNT



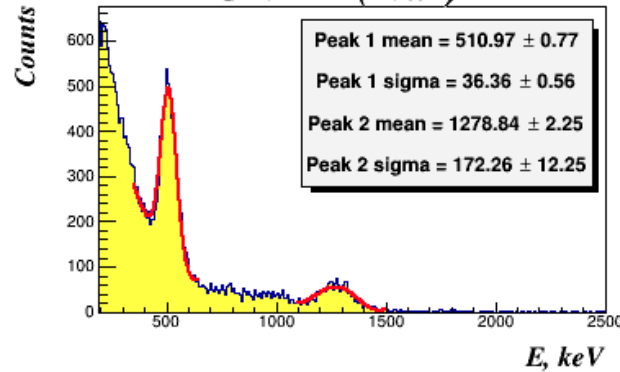
- Кристалл NaI имеет меньшую толщину в терминах  $X_0$ , чем BGO, поэтому он подходит для точной калориметрии в области до 5 МэВ;
- BGO имеет меньший световыход и подходит для регистрации фотонов с энергией до 25 МэВ.

# Энергетические спектры NaI

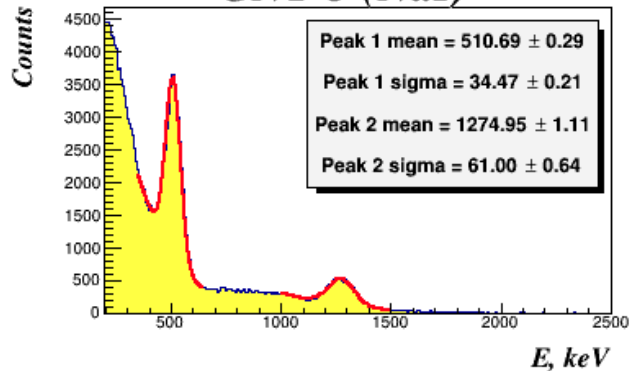
*GNT-1 (NaI)*



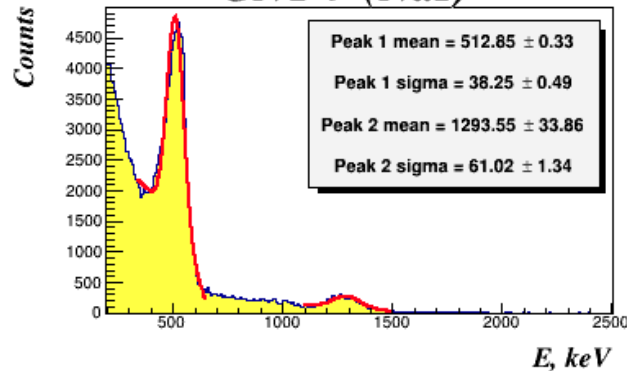
*GNT-7 (NaI)*



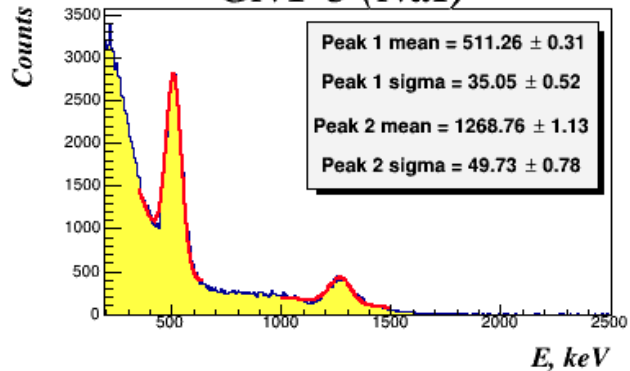
*GNT-3 (NaI)*



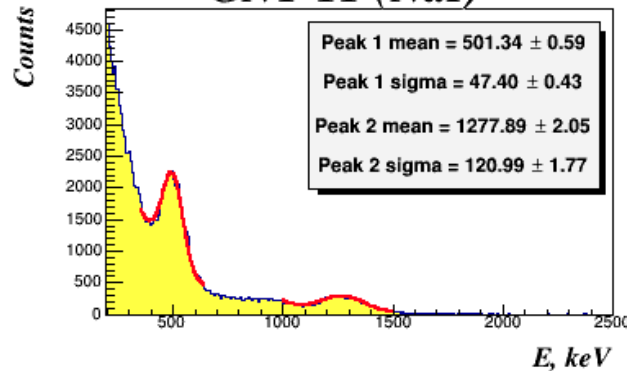
*GNT-9 (NaI)*



*GNT-5 (NaI)*



*GNT-11 (NaI)*

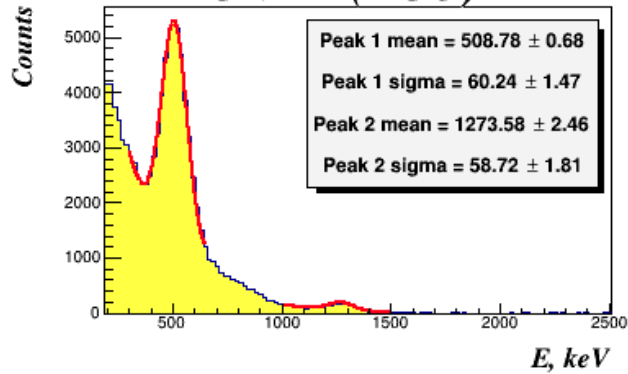


- Соотношение энергии  $E$  и амплитуды  $A$  от фотонов в GNT было выбрано в виде  $E = a_0 + a_1 * A$
- Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  были определены из фитирования амплитудных спектров.
- Приведены полученные после калибровки энергетические спектры.
- Положения пиков соответствуют истинным значениям 511 кэВ и 1.2745 МэВ в пределах ошибок.

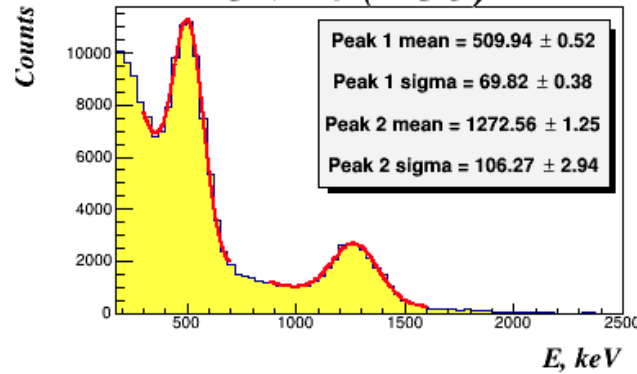


# Энергетические спектры BGO

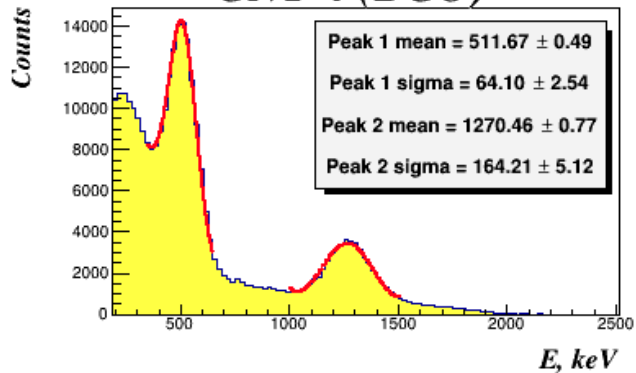
**GNT-2 (BGO)**



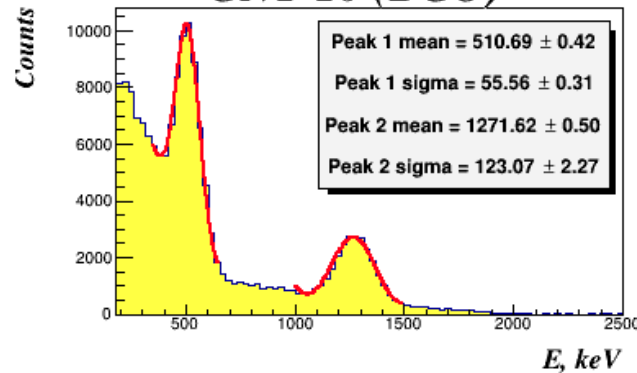
**GNT-8 (BGO)**



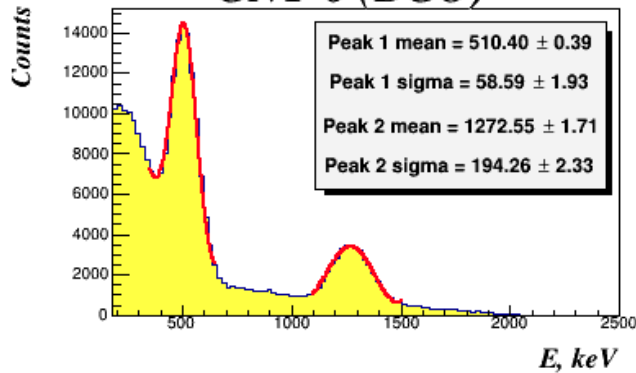
**GNT-4 (BGO)**



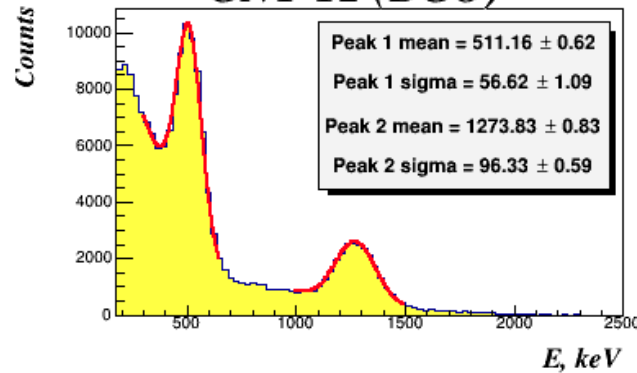
**GNT-10 (BGO)**



**GNT-6 (BGO)**



**GNT-12 (BGO)**



- Соотношение энергии  $E$  и амплитуды  $A$  от фотонов в GNT было выбрано в виде  $E = a_0 + a_1 * A$
- Коэффициенты  $a_0$  и  $a_1$  были определены из фитирования амплитудных спектров.
- Приведены полученные после калибровки энергетические спектры.
- Положения пиков соответствуют истинным значениям 511 кэВ и 1.2745 МэВ в пределах ошибок.

# Заключение

- Проведена калибровка детектора гамма-ядерных переходов GNT эксперимента ГИПЕРОН+ с помощью р/а источника  $^{22}\text{Na}$ ;
- В качестве внешнего триггера использовался сигнал с тонкой сцинтилляционной пластины при прохождении через нее позитрона от  $\beta^+$  распада ядра  $^{22}\text{Na}$ ;
- Два пика (аннигиляционный 511 кэВ и 1.2745 МэВ от  $\gamma$ -распада  $^{22}\text{Ne}^*$ ) были использованы для нахождения калибровочных коэффициентов счетчиков.
- Предложенная калибровка детектора возможна без пучка, поэтому не требует пучкового времени и может быть использована в течение сеанса для отслеживания изменения калибровочных коэффициентов со временем.

Данная работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 22-12-00095, <https://rscf.ru/project/22-12-00095/>