

«Угловые распределения и выходы гамма-квантов  
в реакциях под действием нейтронов с энергией  
14.1 МэВ (проект ТАНГРА)»

Н.А. Федоров

25.02.2021

# Проект «TANGRA» (TAGged Neutrons and Gamma RAys)

Для исследования нейтрон-ядерных реакций в ЛНФ ОИЯИ был создан проект «TANGRA» (TAGged Neutrons and Gamma RAys). Цели проекта следующие:

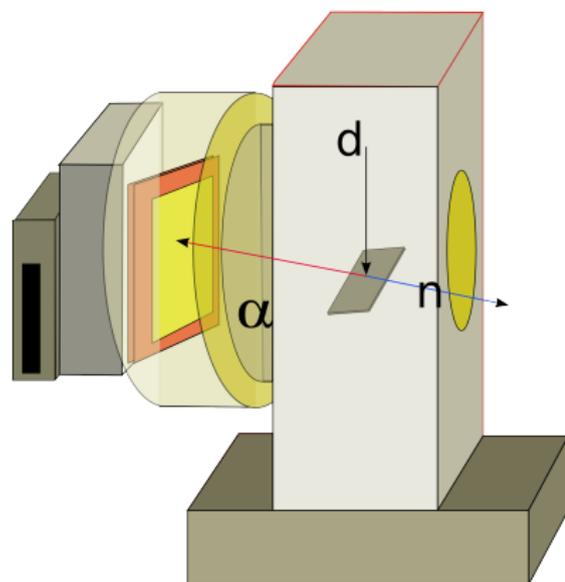
- Создание/развитие базы данных по сечениям реакций взаимодействия нейтронов с энергией 14.1 МэВ с ядрами различных элементов и характеристическим  $\gamma$ -линиям для расширения применимости метода ММН для идентификации широкого круга сложных химических веществ.
- Разработка методики на базе ММН для исследования элементного состава грунтов и минералов с целью определения содержания в них легких элементов и редкоземельных элементов.
- Исследование  $(n, x\gamma)$  и, впоследствии,  $(n, 2n)$  реакций с помощью метода меченых нейтронов.
- Разработка алгоритмов и программ для анализа экспериментальной информации, поступающей с детекторов нейтронного и  $\gamma$ -излучений
- Тестирование различных теоретических подходов, описывающих изучаемые процессы

- Начало исследования нейтрон-гамма корреляций на  $^{12}\text{C}$ ,  $^{56}\text{Fe}$  и других ядрах (1957)
- Появление теоретических подходов для расчета угловых распределений  $\gamma$ -квантов в реакциях неупругого рассеяния нейтронов (1958, Satchler)
- В. Валковичем и др. предложен метод ассоциированных частиц, заключающийся в регистрации заряженных частиц, рождающихся в реакциях синтеза совместно с нейтроном (1969).
- Начало разработки промышленных установок для быстрого элементного анализа, использующих нейтронные генераторы (1970)
- Начало проекта EURITRACK, в рамках которого разрабатываются устройства, использующие ММН для поиска опасных веществ в грузовиках (2004)
- Создание установки nELBE для исследования нейтрон-ядерных реакций с испусканием  $\gamma$ -квантов в широком диапазоне энергий налетающего нейтрона 0,1-10 МэВ (2006)
- Организация компании «Диамант», разрабатывающей методы быстрого элементного анализа с помощью метода меченых нейтронов (2014)
- Создание проекта TANGRA (2014)

Проект «TANGRA» реализуется уже на протяжении 6 лет. За это время

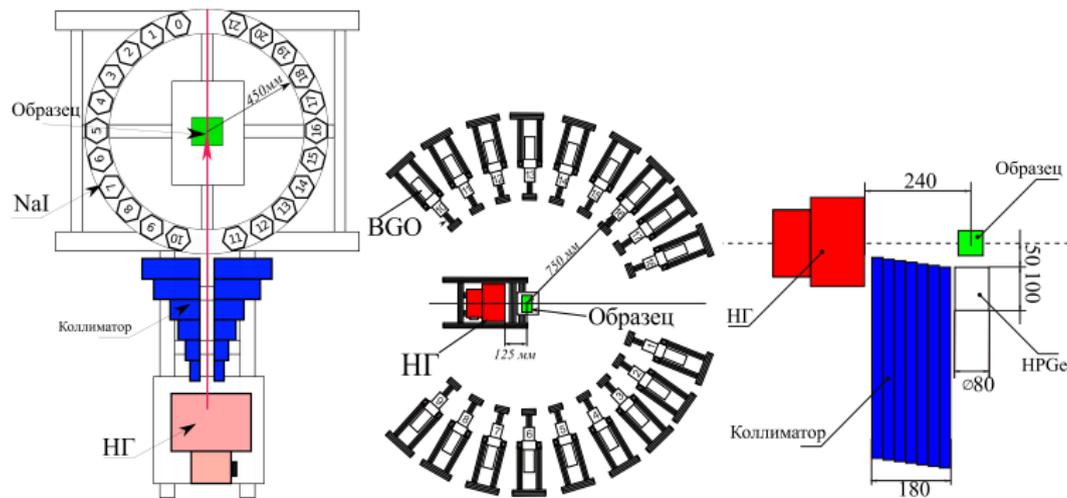
- протестированы 3 конфигурации экспериментальной установки с различными типами детекторов
- проведены измерения угловых распределений  $\gamma$ -квантов, испущенных в реакциях  $(n, x\gamma)$  на 13 элементах для наиболее интенсивных переходов.
- проведены эксперименты по измерению выходов  $\gamma$ -квантов с использованием HPGe детектора на 19 элементах, ведется работа по получению сечений.

# Метод меченых нейтронов



- $d + t \rightarrow \alpha + n + 17.6\text{МэВ}$
- В СЦМ нейтрон и альфа-частица разлетаются в противоположные стороны.
- Для регистрации  $\alpha$ -частиц с энергией 3.5 МэВ используется 64-х пиксельный кремниевый детектор с размером пикселя  $6 \times 6$  мм. Регистрация  $\alpha$ -частицы позволяет определить направление вылета нейтрона.

# Конфигурации экспериментальных установок



Протестированные конфигурации экспериментальных установок (слева направо: NaI(R=450мм), BGO(R=750мм), HPGe);

# Накопление данных

Все сигналы с детекторов оцифровываются и сохраняются на жестком диске для последующего анализа. Для оцифровки используются 2 типа АЦП:



## ADCM 32/64

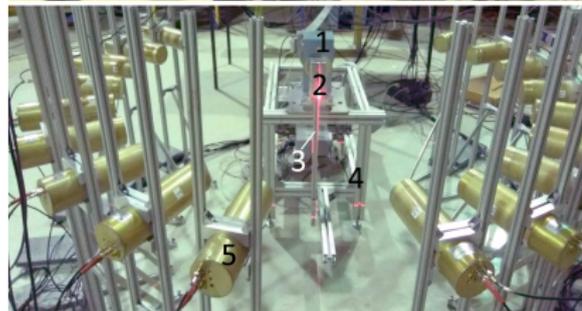
- частота дискретизации: 100МГц
- макс. скорость счета:  $< 10^5$  соб/с, *недостаточно для счета нейтронов*
- использовался с детекторами NaI и BGO



## ЦРС 6/32

- частота дискретизации: 200МГц
- макс. скорость счета:  $10^5$  соб/с, *позволяет подсчитывать нейтроны*
- использовался с детектором HPGe

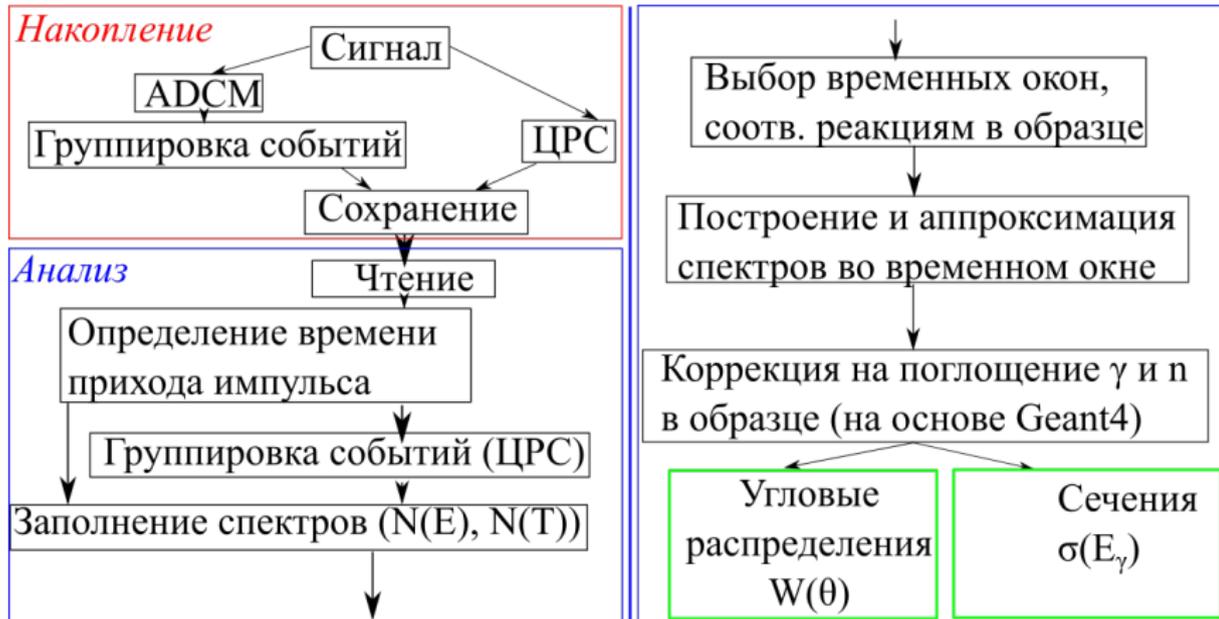
# Постановка эксперимента



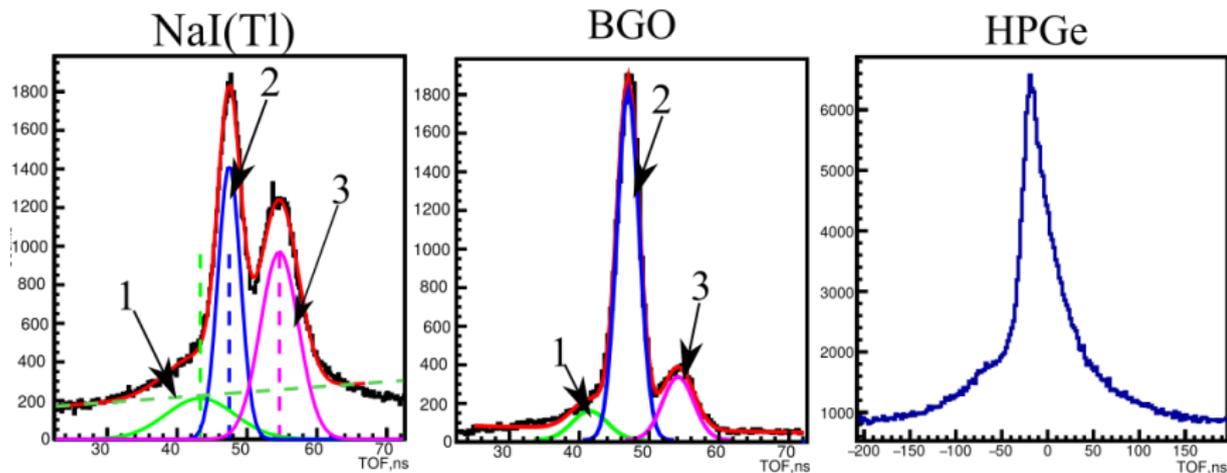
В качестве мишеней в экспериментах с «Ромашкой» использовались блоки размерами  $10 \times 10 \times 5 \text{ см}^3$ , в остальных экспериментах были использованы блоки из твердых веществ, либо коробочки из алюминиевой фольги, заполненные порошками. На фото:

1. нейтронный генератор
2. образец
3. держатель образца
4. держатель генератор
5. VGO детектор
6. HPGe детектор

# Обработка экспериментальных данных

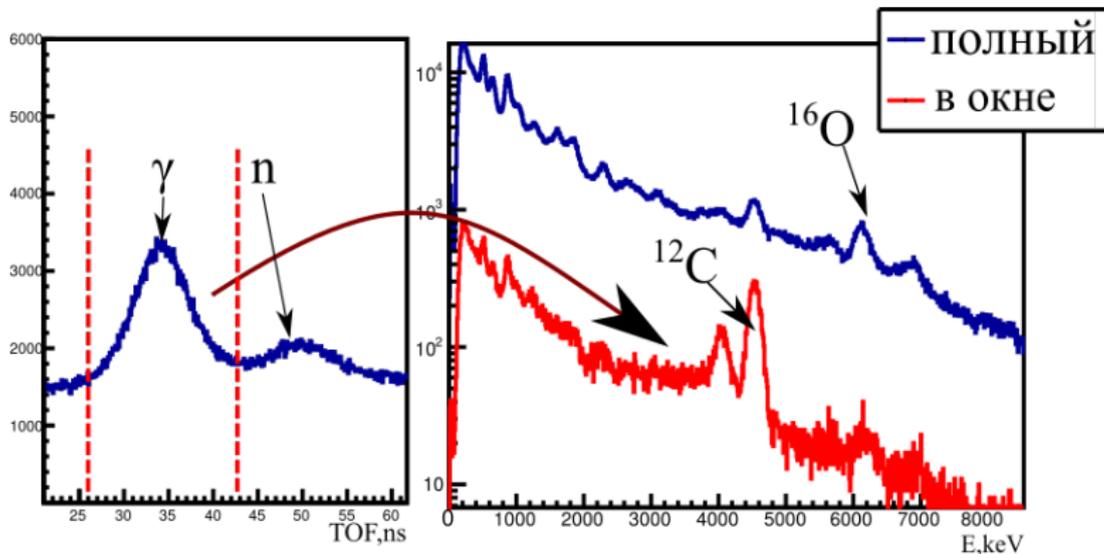


# Анализ временных спектров



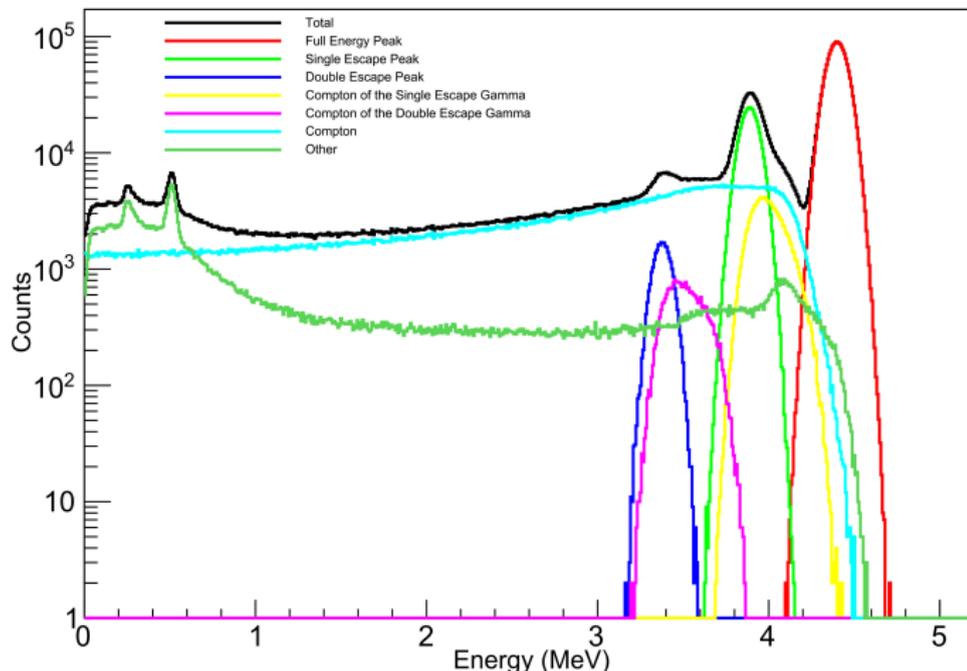
Сцинтилляторы обладают хорошим временным разрешением, поэтому возможно провести разделение событий, соответствующим реакциям в образце и вне его. **Пик 1** соответствует  $\gamma$ , родившимся в коллиматоре/корпусе и подставке генератора, **2- $\gamma$**  из образца, **3-нейтроны**, попавшие в детектор. Увеличенный  $R$  детекторной системы в случае BGO улучшает это разделение. Временное разрешение HPGe недостаточно для такого разделения, и процедура выделения событий из образца несколько отличается.

## Анализ временных спектров (Сцинтилляторы)



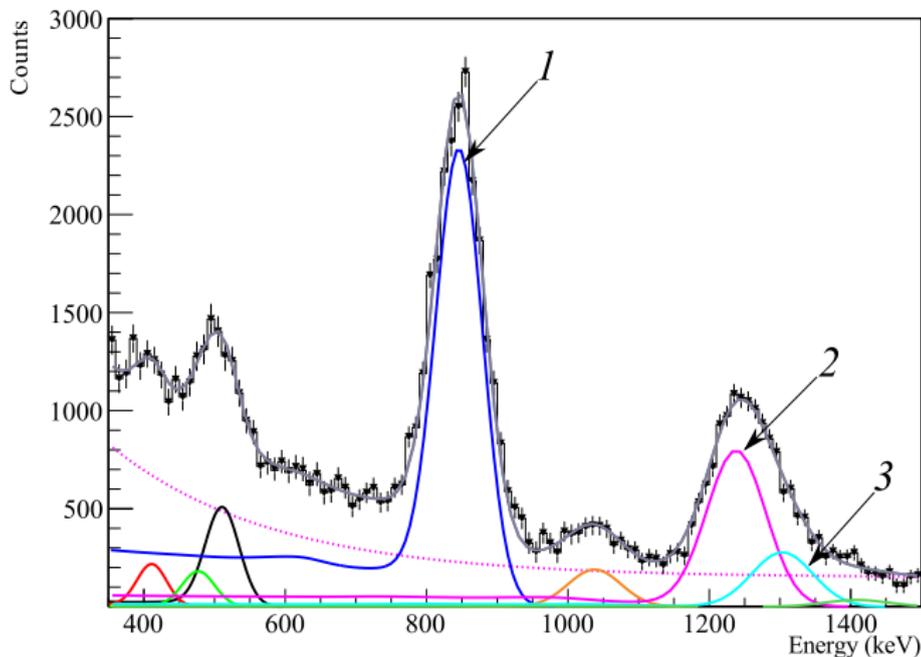
Выделение событий, соответствующим реакциям в образце, существенно уменьшает уровень фона, и, кроме того, удаляет фоновые пики. Полный спектр и спектр событий в окне показаны слева. Видно, что соотношение пик/подложка для <sup>12</sup>C существенно выше на спектре в окне. Также, в окне отсутствуют события от <sup>16</sup>O, вызываемые нейтронами, попавшими в детектор.

# Анализ энергетических спектров (Сцинтилляторы)



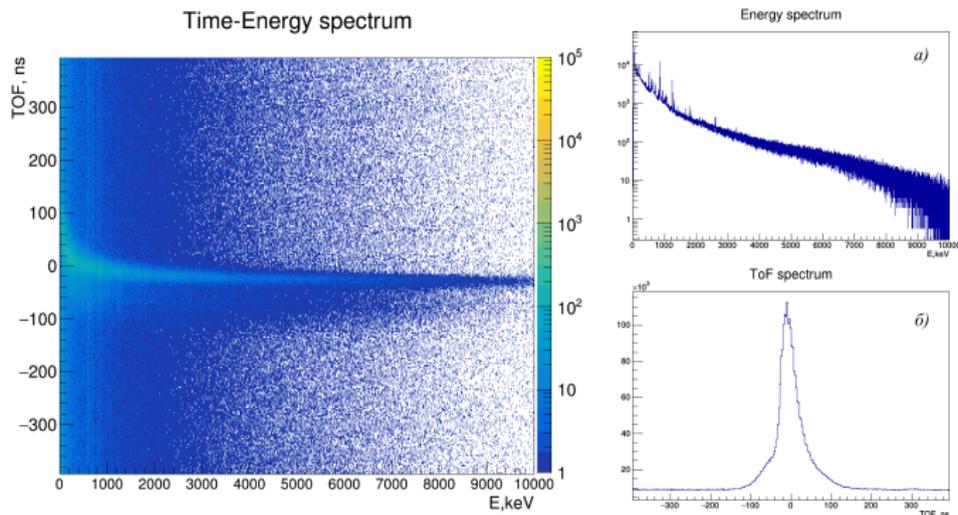
Для анализа спектров со сцинт. детекторов используется специализированная функция отклика (ФО), учитывающая физические процессы, происходящие в детекторе. В настоящее время используется ФО, состоящая из 7 компонент, из которых 6 зависит от самого сцинтиллятора, а седьмая (т.н. "внешний комптон") зависит от окружения.

# Анализ энергетических спектров (Сцинтилляторы)



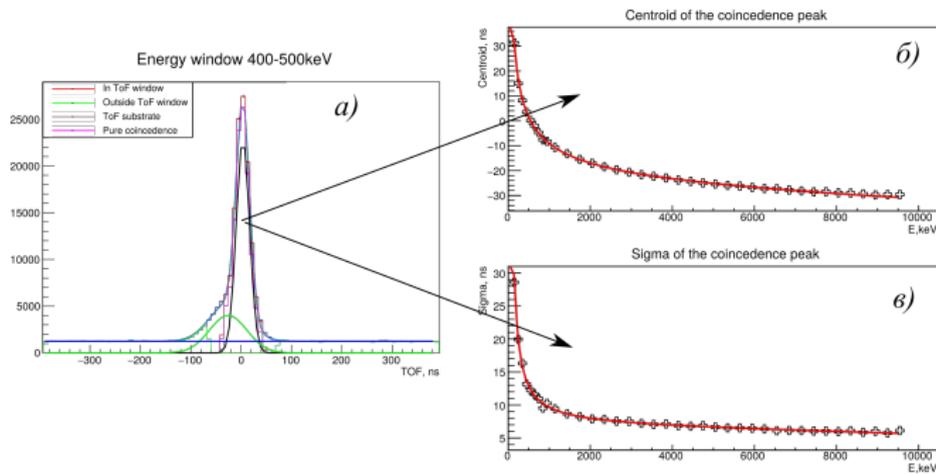
Пример применения ФО для анализа эксперимента на железе: пик 1 соответствует 846.8 кэВ, 2 - 1238.3, пик 3 сформирован тремя линиями: 1289.5, 1303.4, 1316.4 кэВ

# Анализ амплитудно-временных спектров (HPGe)



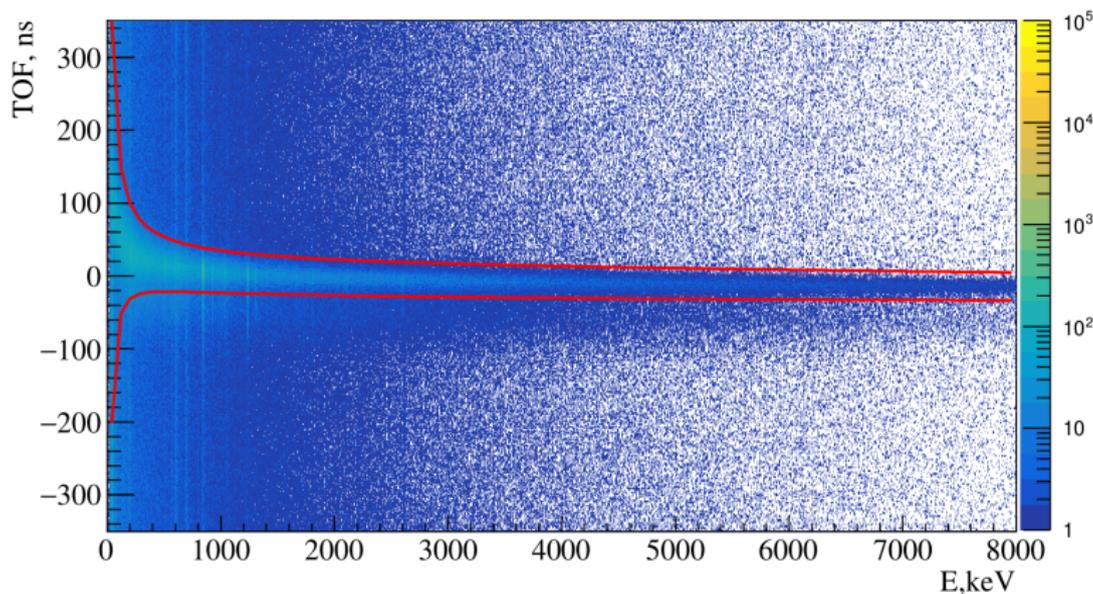
Хорошее энергетическое разрешение позволяет различать фоновые и полезные пики на спектрах по энергии и наблюдать значительно менее интенсивные  $\gamma$ -переходы *a)*; временное разрешение HPGe детектора существенно хуже, чем у сцинтилляторов, и разделение событий от  $n$  и  $\gamma$  по времени пролета становится невозможным (ToF спектр *b)*). Также остается возможность выделения событий, произошедших в окружающей среде, т.к. их временное распределение изотропно.

# Анализ амплитудно-временных спектров (HPGe)



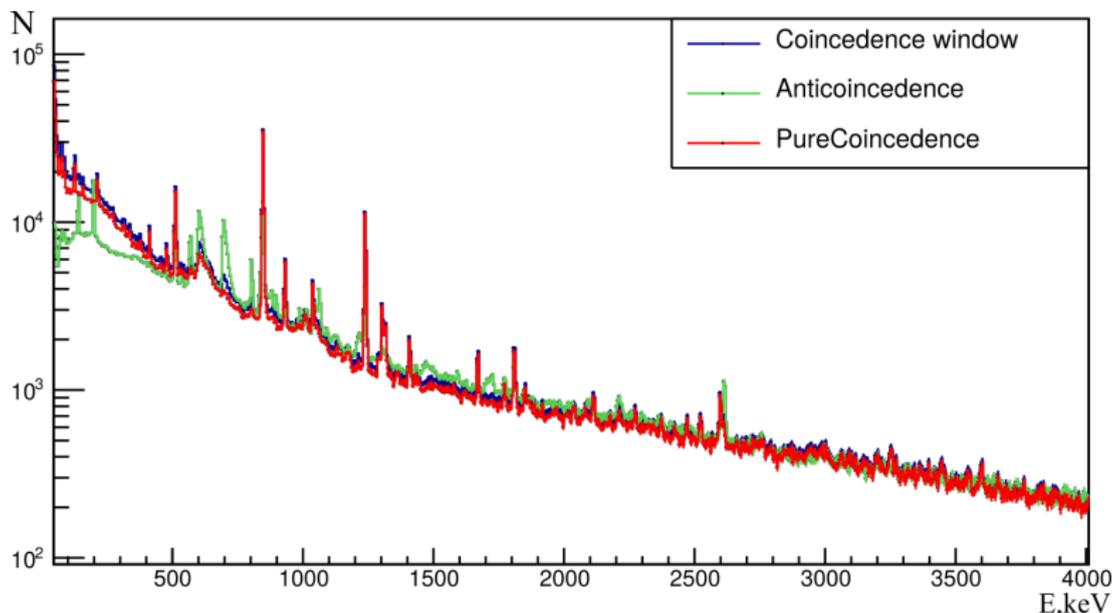
В силу особенностей сбора заряда в HPGe, временное разрешение и положение пика совпадений зависят от энергии регистрируемого  $\gamma$ -кванта, поэтому для построения спектров в окрестности пика совпадений выбирались энергетические окна а), внутри которых определялись положение б) и ширина пика совпадений в), которые затем аппроксимировались и использовались для построения спектров событий в образце.

# Анализ амплитудно-временных спектров (HPGe)



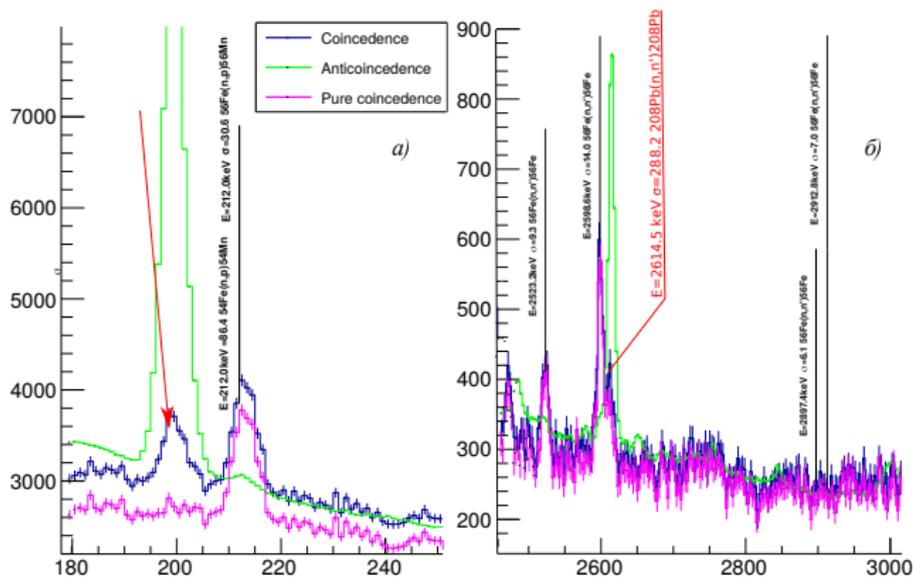
Линией показана граница выбранного временного окна. События внутри окна, в основном, соответствуют реакциям в образце, вне окна-реакциям в окружающих предметах.

# Анализ амплитудно-временных спектров (HPGe)



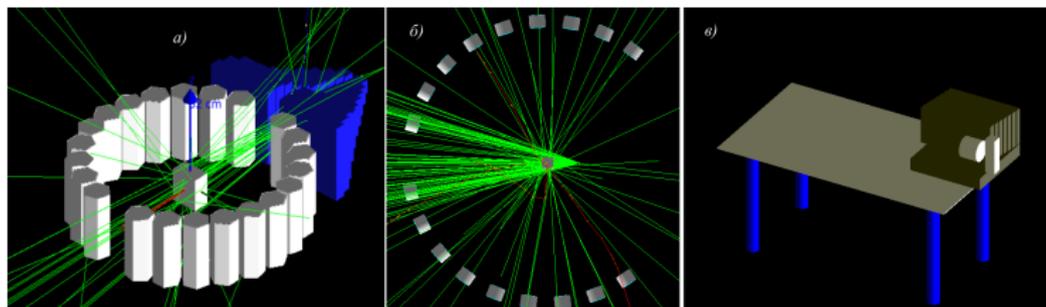
Использование временных окон позволяет отсеять значительное число фоновых  $\gamma$ -квантов, испущенных в нейтрон-ядерных реакциях в окружающей среде, тем не менее, внутри временного окна присутствуют следы фоновых пиков, которые необходимо учитывать при аппроксимации.

# Анализ амплитудно-временных спектров (HPGe)



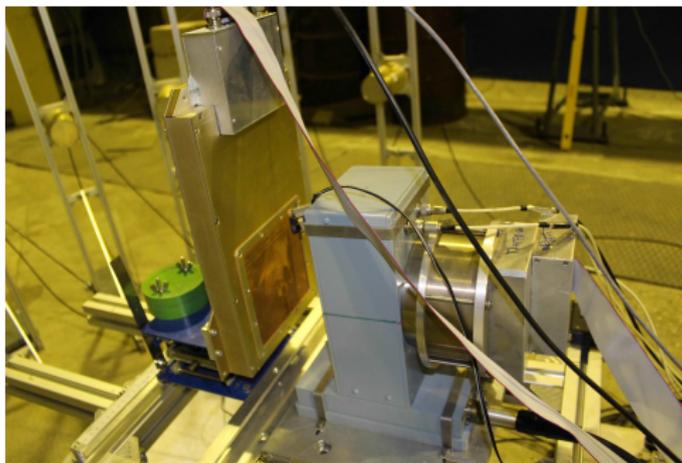
Пример успешного вычитания антисовпадений, при котором пропадает фонный пик *a)* (происхождение не установлено), и ситуация, когда фонный пик от реакции  $^{208}\text{Pb}(n, n')^{208}\text{Pb}$  не может быть вычтен полностью *б)*, из-за того, что он образуется частично при попадании упруго рассеянных нейтронов в свинцовый коллиматор. Чистый спектр антисовпадений (зеленый) приведен для сравнения.

# Коррекция получаемых данных



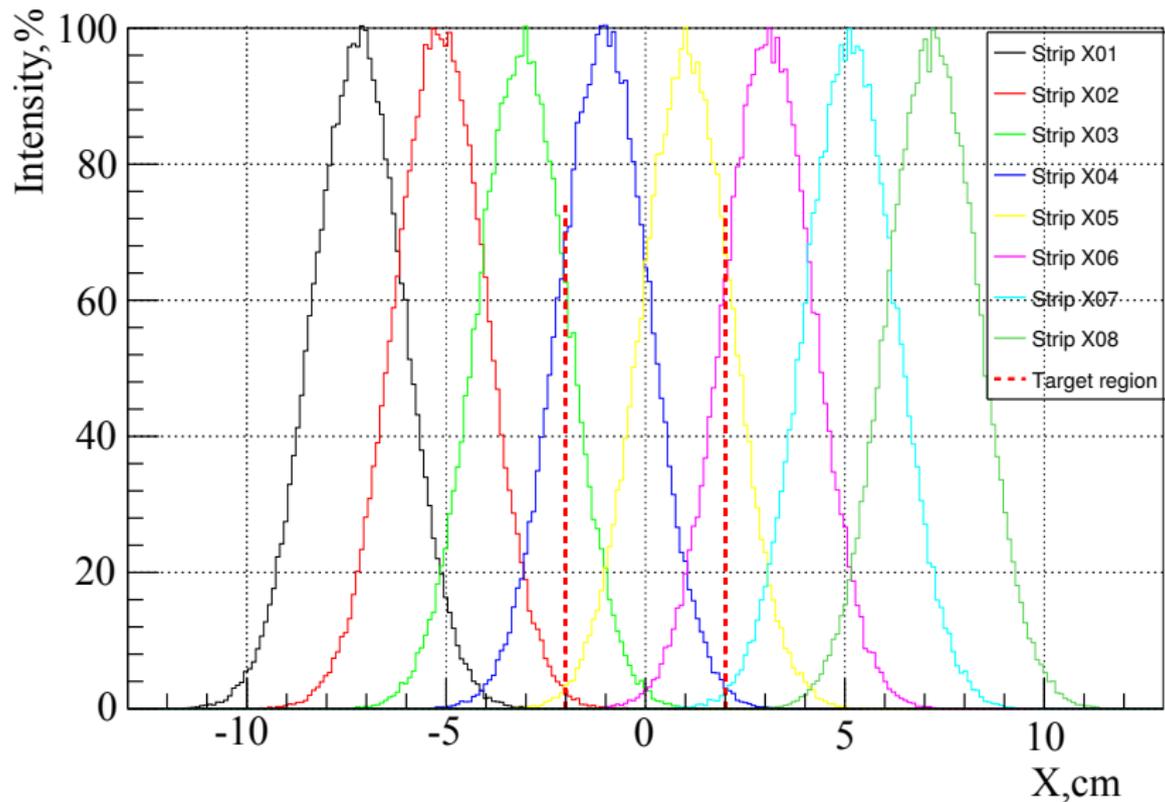
В нашем эксперименте использовались крупные образцы, поэтому коррекция на поглощение и рассеяние нейтронов необходима. Использование большого числа пучков сильно усложняет геометрию эксперимента и не позволяет рассчитать эти поправки аналитически, поэтому мы использовали Geant4 для проведения моделирования эксперимента. Кроме того, для проведения расчетов необходима информация о расположении меченых пучков, которая была получена с помощью отдельного эксперимента.

# Измерение профиля меченых пучков



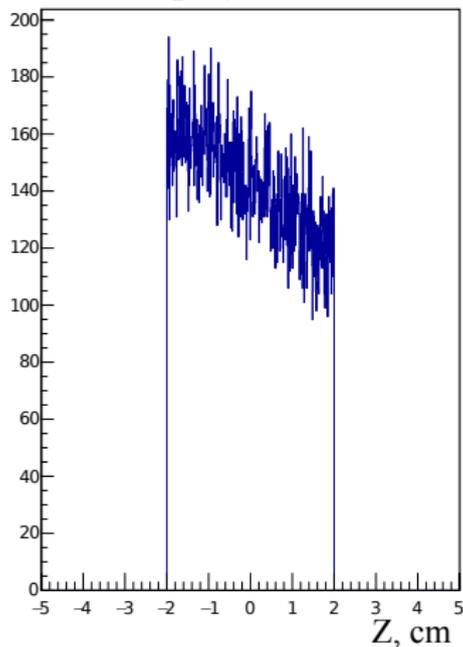
- Информация о пространственном распределении меченых пучков важна для корректной обработки экспериментальных данных.
- Для измерения профиля меченых пучков использовался кремниевый стриповый детектор заряженных частиц.
- Регистрация нейтронов производилась с помощью реакций  $^{28}\text{Si}(n, \alpha)$  и  $^{28}\text{Si}(n, p)$ .

# Профиль меченых пучков

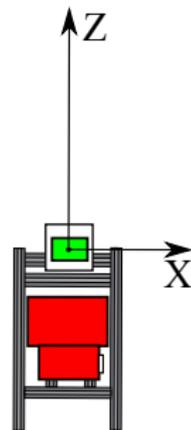
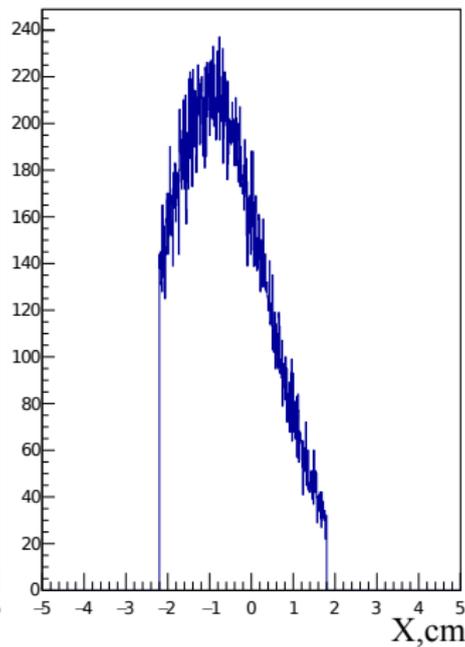


# Распределение количества реакций по образцу (проекции)

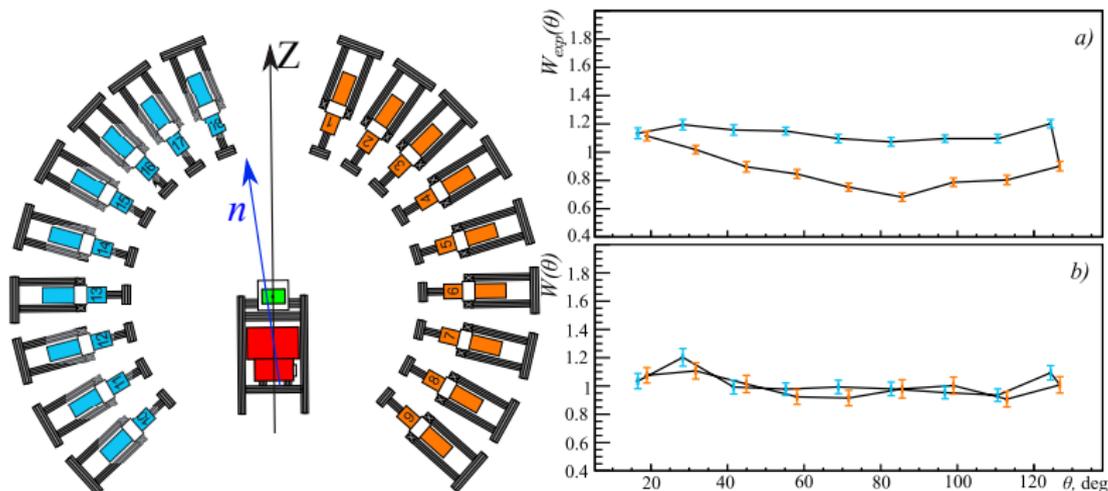
Z projection



X projection



# Коррекция угловых распределений



Коррекция угловых распределений проводилась следующим образом: в Geant4 проводилось моделирование эксперимента, в процессе которого угловое распределение  $\gamma$ -квантов устанавливалось изотропным, в результате чего расчетное угловое распределение определялось исключительно поглощением и рассеянием в образце. Результатами этого расчета были площади фотопиков  $A_{ij}$ . Расчетная анизотропия  $K_{ij} = \frac{A_{ij}}{\langle A_i \rangle}$  и есть искомая поправка, применяемая к экспериментальным данным (a)) как:  $W_{ij} = \frac{W_{ij}^e}{K_{ij}}$ , где  $W_{ij}$ -поправленная анизотропия (b))

# Учет поглощения $\gamma$ -квантов и рассеяния нейтронов в экспериментах с HPGe

В наших экспериментах с HPGe результатами являются выходы и сечения испускания  $\gamma$ -квантов. На измеряемые величины выходов влияют:

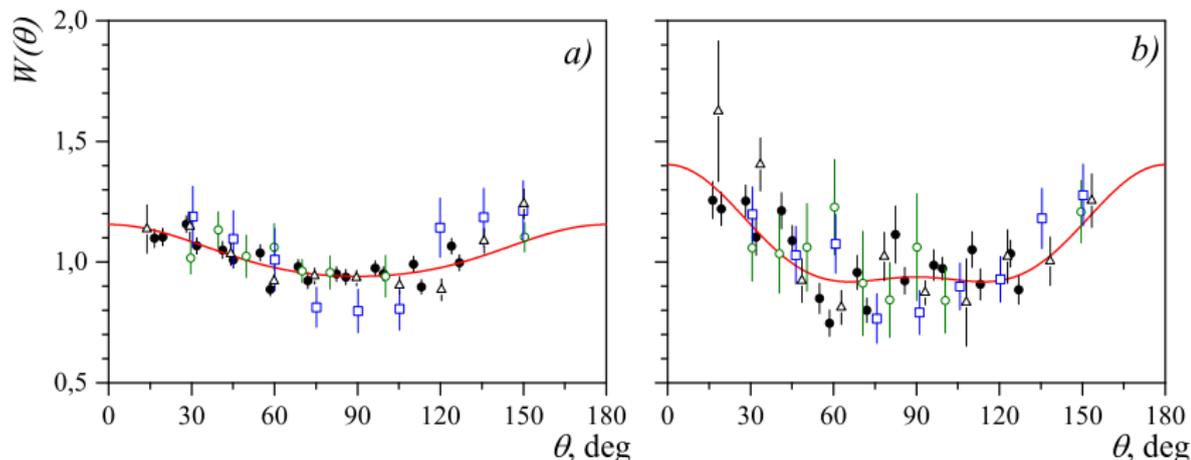
- Поглощение  $\gamma$ -квантов в веществе образца
- Распределение нейтронов, а следовательно, распределение точек излучения  $\gamma$ -квантов по образцу

Размер области, испускающей  $\gamma$ -кванты, соответствующей одному меченому пучку, составляет  $\approx 13 \times 140 \times l$  мм ( $l$ -толщина образца по направлению пучка), она имеет трапециидальную форму с гауссовым распределением интенсивности по ширине, что делает затруднительным расчет поправок на поглощение аналитически. Для коррекции получаемых данных мы вводим величину  $\epsilon$ :

$$\epsilon = \frac{A}{N_\gamma} \quad (1)$$

где  $A$ -расчетная площадь фотопика,  $N_\gamma$ -расчетное число испущенных  $\gamma$ -квантов, при этом получается, что в  $\epsilon$  учитываются совместно поглощение  $\gamma$ , нейтронов и эффективность детектора.

# Результаты для $^{56}\text{Fe}$ , угловое распределение



Измеренное угловое распределение для линии 846.8 кэВ a), 1238.3 кэВ b)

TANGRA-закрашенные точки

треугольники-А.Р. Dyagterev, Proceedings of the 4th All-Union Conference on Neutron Physics, Kiev 1977

квадраты-У. Abbondanno et al., J. Nucl. Energ. 27, 227 (1973)

выколотые точки-Ж. Lachkar et al., Nucl. Sci. Eng. 55, 168 (1974).

# Результаты для $^{56}\text{Fe}$ (выход > 5%)

| $E_\gamma$ , keV |              | Reaction   | Initial state<br>$J_i^P(E_i, \text{keV})$ | Final state<br>$J_f^P(E_f, \text{keV})$ | this work  | $Y_\gamma$ , % |            |            |
|------------------|--------------|--|---|---|------------|----------------|------------|------------|
| this work        | ENDF         |  |   |   |            | TALYS-1.9      | [1]        | [2]        |
| 123.5(4)*        | 123.5        | $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$   | $5^+$ (335.5)                             | $4^+$ (212.0)                           | 6(1)       | 5.8            |            |            |
| 126.0(4)*        | 126.0        | $^{56}\text{Fe}(n, d)^{55}\text{Mn}$   | $\frac{7}{2}^-$ (125.9)                   | $\frac{5}{2}^-$ (0)                     |            |                |            |            |
| 211.9(2)         | 212.0        | $^{54}\text{Fe}(n, p)^{54}\text{Mn}$   | $5^+$ (368.2)                             | $4^+$ (156.3)                           | 5.9(8)     | 4.81           |            |            |
|                  | 212.0        | $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$   | $4^+$ (212.2)                             | $0^+$ (0)                               |            |                |            |            |
| 411.2(2)         | 411.9        | $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$  | $\frac{1}{2}^-$ (411.4)                   | $\frac{3}{2}^-$ (0)                     | 5.3(7)     | 7.05           | 6.8(8)     |            |
| <b>846.86(2)</b> | <b>846.8</b> | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$<br>$^{57}\text{Fe}(n, 2n)^{56}\text{Fe}$ | <b><math>2^+</math> (846.8)</b>           | <b><math>0^+</math> (0)</b>             | <b>100</b> | <b>100</b>     | <b>100</b> | <b>100</b> |
| 931.4(1)         | 931.3        | $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$  | $\frac{5}{2}^-$ (931.3)                   | $\frac{3}{2}^-$ (0)                     | 12.0(8)    | 19.43          | 10.7(9)    | 15(5)      |
| 1038.1(2)        | 1037.8       | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$  | $4^+$ (3123.0)                            | $4^+$ (2085.1)                          | 8.2(8)     | 6.48           | 6.0(5)     | 10(2)      |
| 1238.53(4)*      | 1238.3       | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$<br>$^{57}\text{Fe}(n, 2n)^{56}\text{Fe}$ | $4^+$ (2085.1)                            | $2^+$ (846.8)                           | 43.8(1.1)  | 49.90          | 36(2)      | 46(5)      |
| 1304.0(1)*       | 1303.4       | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$<br>$^{57}\text{Fe}(n, 2n)^{56}\text{Fe}$ | $6^+$ (3388.6)                            | $4^+$ (2085.1)                          | 9.2(6)     | 9.89           | 9.3(6)     | 10.1(1.5)  |
| 1316.0(2)        | 1316.4       | $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$  | $\frac{7}{2}^-$ (1316.5)                  | $\frac{3}{2}^-$ (0)                     | 5.6(5)     | 8.65           | 6.8(8)     | 7.4(1.2)   |
| 1810.7(2)        | 1810.8       | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$<br>$^{57}\text{Fe}(n, 2n)^{56}\text{Fe}$ | $2^+$ (2657.6)                            | $2^+$ (846.8)                           | 6.7(5)     | 3.27           | 4.8(6)     | 7.7(1.2)   |

Table 1: Параметры измеренных  $\gamma$ -переходов. Неразрешенные переходы помечены ".\*". Все ошибки статистические. Красным помечены линии, измеренные впервые. Синим помечены линии с выходами, отличающимися от рассчитанных в TALYS более, чем на > 30%.

1: S. Simakov et al., INDC(CPP)-0413

2: R.O. Nelson et al., Report No.02-7167 (LA-UR-02-7167)

# Результаты для $^{56}\text{Fe}$ (выход < 5%)

| $E_\gamma$ keV         |        | Reaction                                  | Initial state<br>$J_i^P(E_i, \text{keV})$ | Final state<br>$J_f^P(E_f, \text{keV})$ | this work | $Y_\gamma, \%$ |        |          |
|------------------------|--------|---|---|---|-----------|----------------|--------|----------|
| this work              | ENDF   |   |   |   |           | TALYS-1.9      | [1]    | [2]      |
| 335.7(5)               | 335.5  | $^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$      | $3^+ (341.0)$                             | $2^+ (26.6)$                            | 2.2(8)    | 1.04           |        |          |
| 477.4(5)               | 477.2  | $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$     | $\frac{7}{2}^- (1408.5)$                  | $\frac{5}{2}^- (931.3)$                 | 4.6(7)    | 3.97           | 6.4(9) |          |
| 1289.7(5)              | 1289.6 | $^{56}\text{Fe}(n, \alpha)^{53}\text{Cr}$ | $\frac{7}{2}^- (1289.5)$                  | $\frac{3}{2}^- (0)$                     | 1.7(5)    | 1.68           |        |          |
| 1408.3(3) <sup>+</sup> | 1408.1 | $^{54}\text{Fe}(n, n')^{54}\text{Fe}$     | $2^+ (1408.2)$                            | $0^+ (0)$                               | 4.0(6)    | 6.50           | 3.0(6) | 5.7(1.2) |
|                        | 1408.5 | $^{56}\text{Fe}(n, 2n)^{55}\text{Fe}$     | $\frac{7}{2}^- (1408.5)$                  | $\frac{3}{2}^- (0)$                     |           |                |        |          |
| 1670.6(2)              | 1670.8 | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$     | $6^+ (3755.6)$                            | $4^+ (2085.1)$                          | 4.5(5)    | 5.1            | 6.9(7) | 6.3(1.2) |
| 2114.2(6)              | 2113.1 | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$     | $2^+ (2960.0)$                            | $2^+ (846.8)$                           | 2.5(7)    | 1.8            | 1.9(6) | 4.5(1.2) |
| 2524.2(8)              | 2523.1 | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$     | $2^+ (3370.0)$                            | $2^+ (846.8)$                           | 2.5(7)    | 1.37           | 2.7(6) |          |
| 2600.3(5)              | 2598.5 | $^{56}\text{Fe}(n, n')^{56}\text{Fe}$     | $3^+ (3445.3)$                            | $2^+ (846.8)$                           | 3.4(5)    | 2.07           | 4.5(6) |          |

*Table 2:* Параметры измеренных  $\gamma$ -переходов. Неразрешенные переходы помечены ”\*”. Все ошибки статистические. Красным помечены линии, измеренные впервые. Синим помечены линии с выходами, отличающимися от рассчитанных в TALYS более, чем на > 30%.

1: S. Simakov et al., INDC(CPP)-0413

2: R.O. Nelson et al., Report No.02-7167 (LA-UR-02-7167)

# Сравнение абсолютных сечений (Fe)

*Table 3:* Измеренные сечения излучения линии 846.86 кэВ, мб

| ${}^{\text{nat}}\text{Fe}(n, n' + 2n)$ | ${}^{56}\text{Fe}(n, n'){}^{56}\text{Fe}$ | Reference                |
|--|---|--------------------------|
| 785(48)                                | 621(29)                                   | [1](Compilation)         |
| <b>333(60)</b>                         | -   | [1,2]                    |
| 521(45)                                | -   | [1,3]                    |
| 535(10)                                | -   | TANGRA(Very preliminary) |
| 621.92                                 | 656.94                                    | TALYS-1.9                |
| 663(70)                                | -   | [4]                      |
| <b>1280(270)</b>                       | -   | [1,5]                    |

1: S. Simakov et al., INDC(CPP)-0413

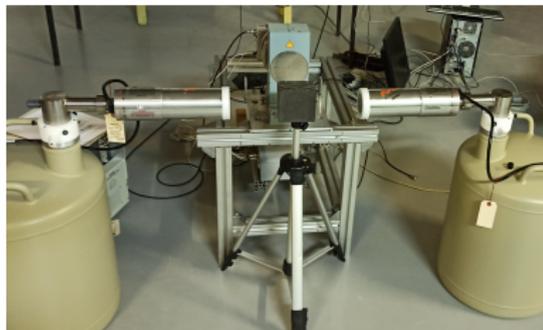
2: F. Voss et. al. Proc. Int. Conf., Knoxville, 1971, p. 218, cited from[1]

3: I. Murata et. al. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. (Mito,1988), p. 275, cited from[1]

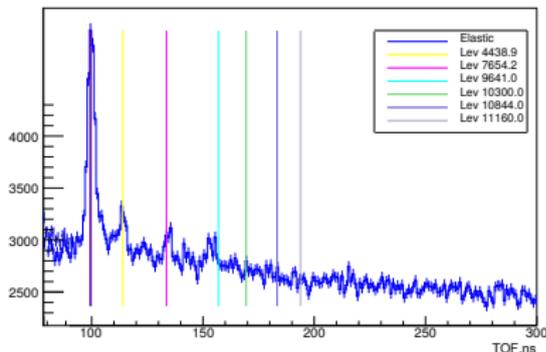
4: R.O. Nelson et al., Report No.02-7167 (LA-UR-02-7167)

5: D. O. Nellis et.al. Phys. Rev., 1970, v. 1, p. 8, cited from[1]

- На установке TANGRA с помощью ММН и детекторов различных типов возможно измерение выходов и угловых распределений  $\gamma$ -лучей, испускаемых в реакциях типа  $(n, x\gamma)$  с точностью, не хуже, чем в других экспериментах на специализированных установках.
- Использование большого количества меченых пучков, с одной стороны, существенно усложняет обработку данных, а, с другой, позволяет существенно увеличить количество точек, в которых измерено угловое распределение.
- Получаемые в наших экспериментах результаты, в целом, соотносятся с литературными данными. Следует отметить, что опубликованные результаты других экспериментов могут расходиться в 3 раза между собой.



TOF PFT14 px3 27.0° 3500.0,cm



- Создание установки для измерения сечений излучения  $\gamma$ -линий и быстрого элементного анализа с использованием новых HPGe детекторов
- Проведение экспериментов по измерению угловых распределений рассеянных нейтронов; исследование реакций ( $n$ ,  $2n$ )

**Спасибо за внимание!**

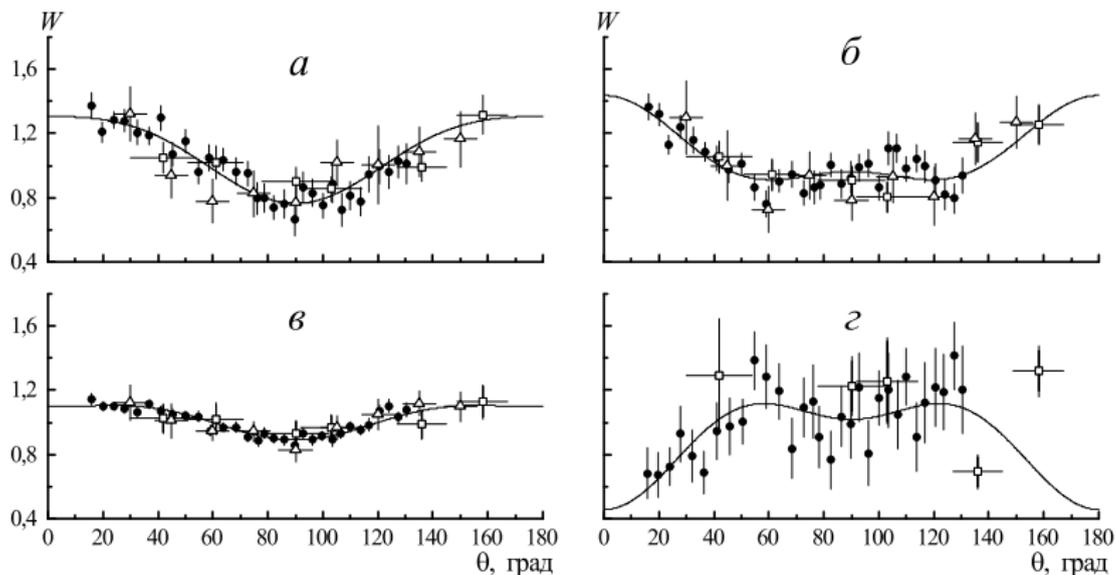
**Table 4.** Legendre polynomial approximation coefficients for the  $\gamma$ -quanta angular distributions obtained in this work in comparison with previous measurements.

| $E_\gamma$ keV | $a_2$   | $a_4$   | Reference |
|----------------|---------|---------|-----------|
| 846.8          | 0.13(2) | 0.02(2) | this work |
|                | 0.21(5) | 0.07(3) | [32]      |
|                | 0.36    | -0.38   | [33]      |
|                | 0.09    | -0.1    | [34]      |
| 1238.3         | 0.24(4) | 0.16(6) | this work |
|                | 0.32(8) | 0.16(8) | [32]      |
|                | 0.37    | -0.23   | [33]      |
|                | 0.14    | -0.1    | [34]      |

32. A.P. Dyagterev, Yu.E. Kozyr, G.A. Prokopec, Proceedings of the 4th All-Union Conference on Neutron Physics, Kiev, 1977, edited by L.N. Usachev, Vol. 2 (Atominform, Moscow, 1977). 33. U.

Abbondanno et al. J Nucl. Energ. 27 227 (1973). 34. I. Lachkar et al. Nucl. Sci. Eng. 55 168

# Результаты для $^{52}\text{Cr}$ , угловое распределение



Измеренное угловое распределение для линии  $E_\gamma = 935.5$  кэВ (а), 1333.7 кэВ (б), 1434.1 кэВ (в) и 1530.7 кэВ (г). Треугольники — данные из работы J. Nucl. Energy 27, 227 (1973), квадраты — Il Nuovo Cimento A 105, 965 (1992).

# Результаты для $^{52}\text{Cr}$

| $E_\gamma$ keV |                  | Reaction   | Initial state<br>$J_i^P(E_i, \text{keV})$ | Final state<br>$J_f^P(E_f, \text{keV})$    | this work | $Y_\gamma$ , % |           |
|----------------|------------------|--|---|--|-----------|----------------|-----------|
| this work      | ENDF             |  |   |  |           | this work      | TALYS-1.9 |
| 126(3)         | 124.45<br>125.08 | $^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$<br>$^{52}\text{Cr}(n, p)^{52}\text{V}$ | $1^+$ (141.61.2)<br>$4^+$ (147.84)        | $2^+, 3^+$ (17.155)<br>$4^+, 5^+$ (147.84) | 3.6(3)    | 2.89           | -         |
| 321(3)         | 320.1            | $^{52}\text{Cr}(n, d)^{51}\text{V}$  | $\frac{5}{2}^+$ (320.1)                   | $\frac{7}{2}^-$ (0)                        | 3.2(4)    | 1.35           |           |
| 648(3)         | 647.47           | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $4^+$ (3415.32)                           | $4^+$ (2767.77)                            | 9.8(4)    | 1.60           | 9.0(5)    |
| 747(3)         | 744.23           | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $6^+$ (3113.86)                           | $4^+$ (2369.63)                            | 11.7(4)   | 8.34           | 9.0(5)    |
|                | 749.07           | $^{52}\text{Cr}(n, 2n)^{52}\text{Cr}$                                      | $\frac{3}{2}^+$ (749.1)                   | $\frac{7}{2}^+$ (0)                        |           | 5.98           | 5.4(3)    |
| 937(3)         | 935.54           | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $4^+$ (2369.63)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 32.3(5)   | 31.11          | 30(1)     |
| 1249(3)        | 1246.28          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $5^+$ (3615.92)                           | $4^+$ (2369.63)                            | 5.9(4)    | 2.87           | 5.0(5)    |
| 1335(3)        | 1333.65          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $4^+$ (2767.77)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 25.5(5)   | 21.42          | 26(1)     |
| 1436(3)        | 1434.07          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $2^+$ (1434.09)                           | $0^+$ (0)                                  | 100       | 100            | 100       |
| 1533(3)        | 1530.67          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $2^+$ (2964.79)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 6.9(6)    | 4.32           | 5(4)      |
| 1728(3)        | 1727.53          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $2^+$ (3161.74)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 5.0(4)    | 2.48           | 3.3(1)    |
| 2040(5)        | 2038             | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $3^+$ (3472.25)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 2.3(4)    | 1.55           |           |
| 2339(5)        | 2337.44          | $^{52}\text{Cr}(n, n')^{52}\text{Cr}$                                      | $2^+$ (3472.25)                           | $2^+$ (1434.09)                            | 1.8(4)    | 2.64           |           |

Table 4: Параметры измеренных  $\gamma$ -переходов. Неразрешенные переходы помечены ”\*\*”. Все ошибки статистические. Красным помечены линии, измеренные впервые. Синим помечены линии с выходами, отличающимися от рассчитанных в TALYS более, чем на > 30%.

# Сравнение абсолютных сечений (Cr)

Table 5: Измеренные сечения излучения линии 1434.07 кэВ, мб

| $\sigma$ ,mb   | Reference        |
|----------------|------------------|
| 361(6)         | TANGRA           |
| 783(30)        | [1](Compilation) |
| <b>442(65)</b> | [1,2]            |
| 658(53)        | [1,3]            |
| 695(28)        | [1,4]            |
| 727(100)       | [1,5]            |
| <b>757(56)</b> | [1,6]            |

1: S. Simakov et al., INDC(CPP)-0413

2: I. Murata et. al. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Tech. (Mito,1988), p. 275, cited from[1]

3: G. Grenier "Neutron Physics" Obninsk, 1974, v. 3, p. 215 4: S. Hlavac et. al. Nucl. Sci. and Eng. 1997, v. 125, p. 196

5: W. Breunlich et. al. Nucl. Phys., 1972, v. A184, p. 253

6: U. Abbondano et. al. J. of Nucl. Ener., 1973, v. 27, p. 227

**Group**

|        |   |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|--------|---|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|---------|----------|----------|---------|---------|----------|----------|----------|
|        |   | 3<br>Li  |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 22<br>Ti  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        |   | 11<br>Na |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 26<br>Fe  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        |   |          |          | 40<br>Zr |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
| Period | 1 | 1<br>H   |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 2<br>He |          |          |         |         |          |          |          |
|        | 2 | 3<br>Li  | 4<br>Be  | 40<br>Zr |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          | 5<br>B   | 6<br>C  | 7<br>N  | 8<br>O   | 9<br>F   | 10<br>Ne |
|        | 3 | 11<br>Na | 12<br>Mg |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         | 13<br>Al | 14<br>Si | 15<br>P | 16<br>S | 17<br>Cl | 18<br>Ar |          |
|        | 4 | 19<br>K  | 20<br>Ca | 21<br>Sc | 22<br>Ti | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu  | 30<br>Zn  | 31<br>Ga  | 32<br>Ge  | 33<br>As  | 34<br>Se  | 35<br>Br  | 36<br>Kr  |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        | 5 | 37<br>Rb | 38<br>Sr | 39<br>Y  | 40<br>Zr | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag  | 48<br>Cd  | 49<br>In  | 50<br>Sn  | 51<br>Sb  | 52<br>Te  | 53<br>I   | 54<br>Xe  |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        | 6 | 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | 58-71    | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl  | 82<br>Pb  | 83<br>Bi  | 84<br>Po  | 85<br>At  | 86<br>Rn  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        | 7 | 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac | 90-103   | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Nh | 114<br>Fl | 115<br>Mc | 116<br>Lv | 117<br>Ts | 118<br>Og |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        |   |          | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm  | 62<br>Sm  | 63<br>Eu  | 64<br>Gd  | 65<br>Tb  | 66<br>Dy  | 67<br>Ho  | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |
|        |   | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U  | 93<br>Np | 94<br>Pu  | 95<br>Am  | 96<br>Cm  | 97<br>Bk  | 98<br>Cf  | 99<br>Es  | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr |           |           |           |           |           |  |  |  |  |  |  |  |  |  |         |          |          |         |         |          |          |          |

Измерено с HPGe

Измерено с BGO,HPGe,NaI

Измерено с BGO и HPGe

Опубликовано

Планируется