



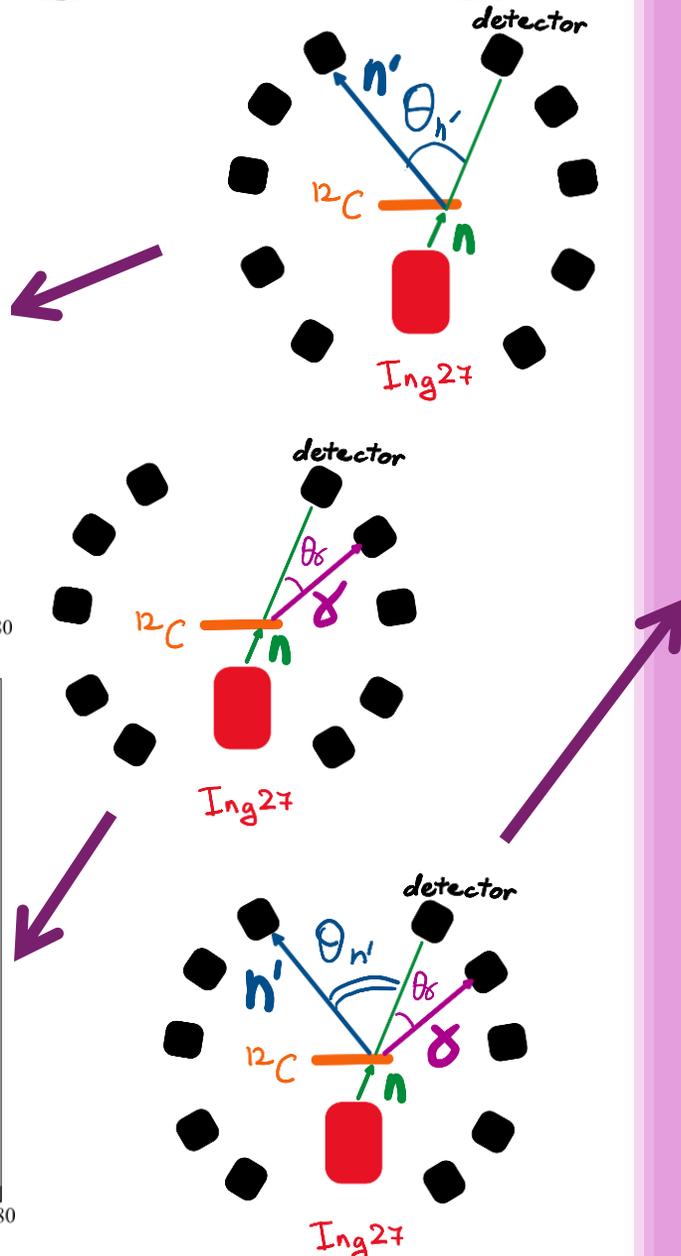
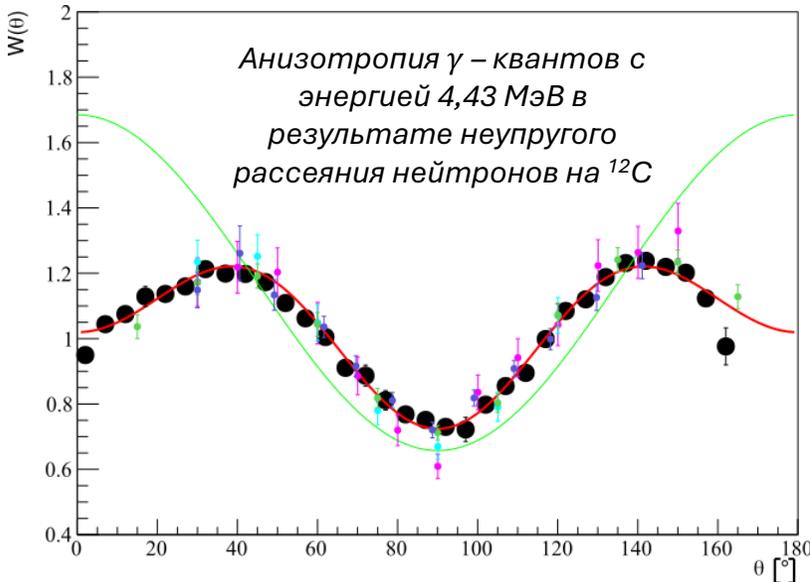
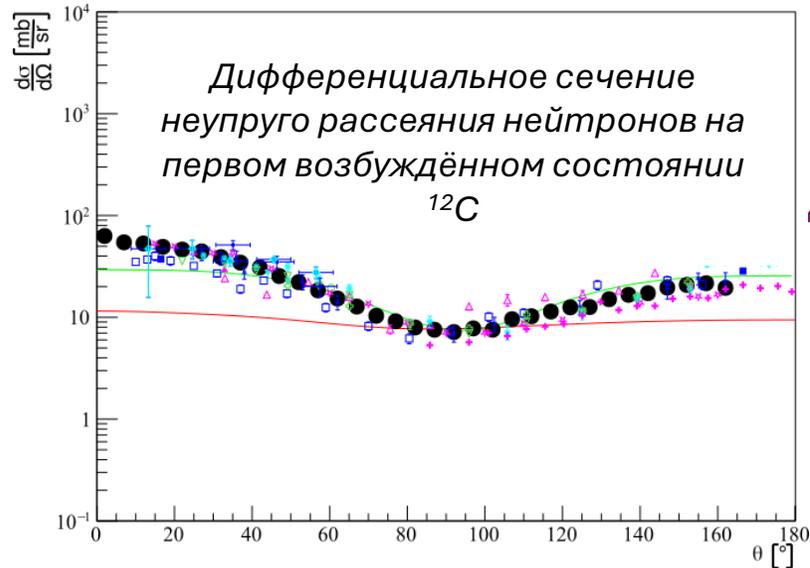
# Исследование угловых корреляций в реакциях неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14.1 МэВ на углероде

Полина Филончик  
и коллаборация ТАНГРА

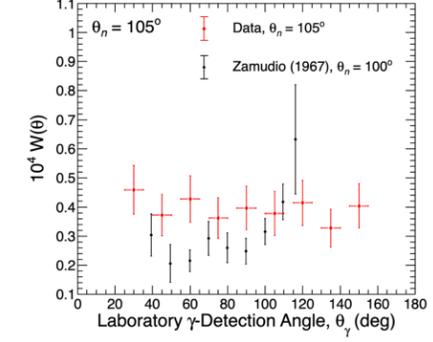
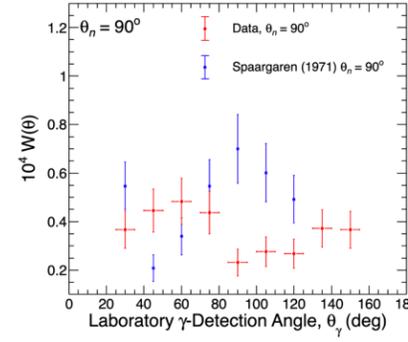
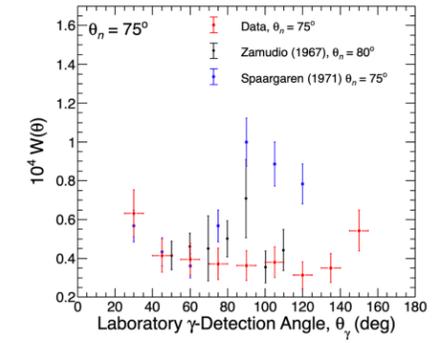
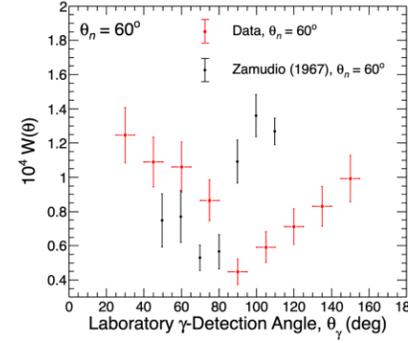
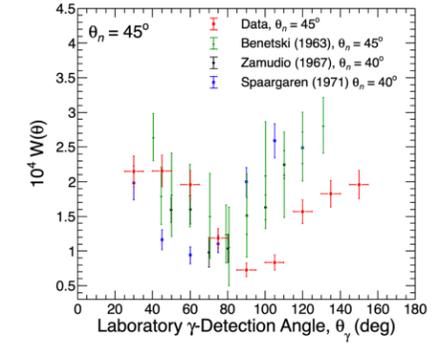
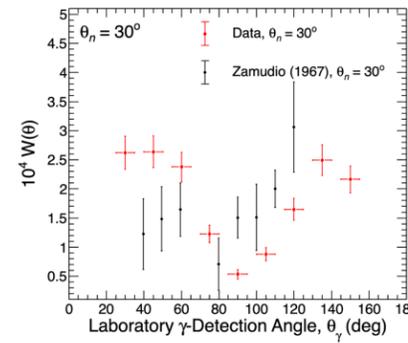


# Типы угловых корреляций

## Двойные корреляции



## Тройные корреляции



Kelly at al. 2021

$(n - n'\gamma)$  - корреляции

# Теоретическое описание угловых корреляций

Двойное дифференциальное сечение в зависимости от направления вылета нейтрона и  $\gamma$ -кванта

$$d^2\sigma(\vec{n}_\beta, \vec{n}_\gamma) = \frac{1}{16\pi k_\alpha^2} \sum_{Q=0,2,4,\dots} \sum_{\Lambda\Lambda'} D_{\Lambda'Q}^\Lambda \phi_{\Lambda'Q}^\Lambda(\vec{n}_k, \vec{n}_\beta, \vec{n}_\gamma) d\Omega_\beta d\Omega_\gamma$$

Инвариантные свёртки сферических гармоник

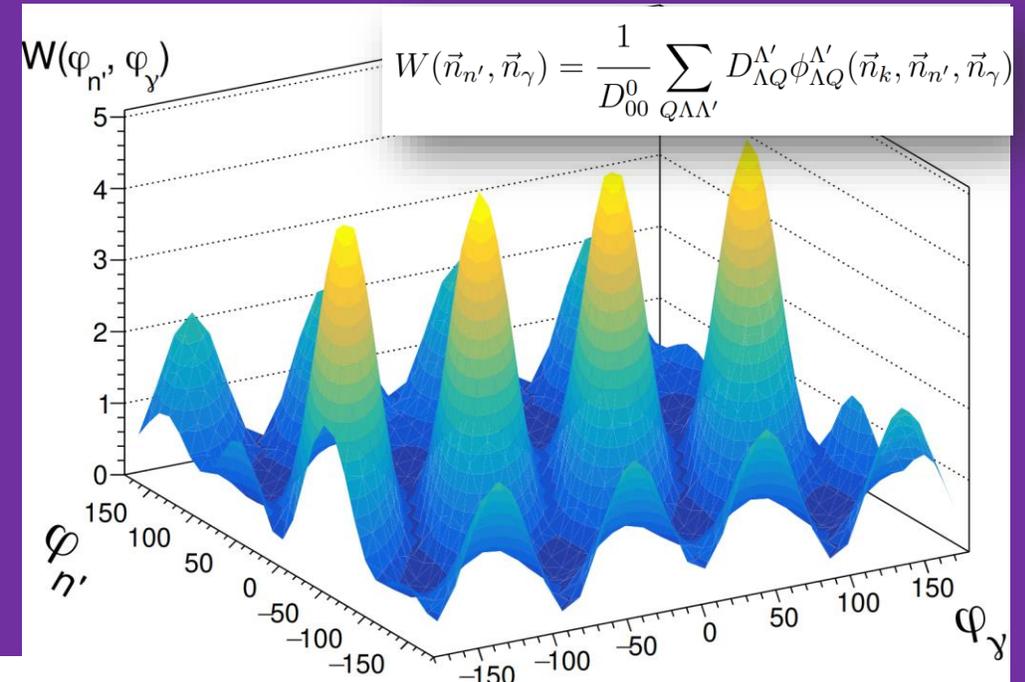
$$\phi_{\Lambda'Q}^\Lambda(\vec{n}_k, \vec{n}_\beta, \vec{n}_\gamma) = (4\pi)^{3/2} \sum_{\mu\nu q} C_{\Lambda'\nu Qq}^{\Lambda\mu} Y_{\Lambda\mu}^*(\vec{n}_k) \cdot Y_{\Lambda'\nu}(\vec{n}_\beta) \cdot Y_{Qq}(\vec{n}_\gamma)$$

$$D_{\Lambda'Q}^\Lambda = \sqrt{2Q+1} C_{L1Q0}^{L1} U(I_f I_i LQ, L I_i) \sqrt{(2I_i+1)(2\Lambda'+1)} \times$$

$$\sum_{JJ'} g_{J'} \sum_{l_\alpha l'_\alpha j_\alpha j'_\alpha l_\beta l'_\beta j_\beta j'_\beta} S_J(l_\alpha j_\alpha \rightarrow l_\beta j_\beta) S_{J'}^*(l'_\alpha j'_\alpha \rightarrow l'_\beta j'_\beta) \sqrt{(2J+1)(2j'_\beta+1)} \times$$

$$C_{l'_\alpha 0 \Lambda 0}^{l_\alpha 0} C_{l'_\beta 0 \Lambda' 0}^{l_\beta 0} U(s j'_\alpha l_\alpha \Lambda, l'_\alpha j_\alpha) U(I_\alpha J' j_\alpha \Lambda, j'_\alpha J) U(s j'_\beta l_\beta \Lambda', l'_\beta j_\beta) \left\{ \begin{matrix} J & j_\beta & I_i \\ J' & j'_\beta & I_i \\ \Lambda & \Lambda' & Q \end{matrix} \right\}$$

Совместно с Барабановым А.Л.

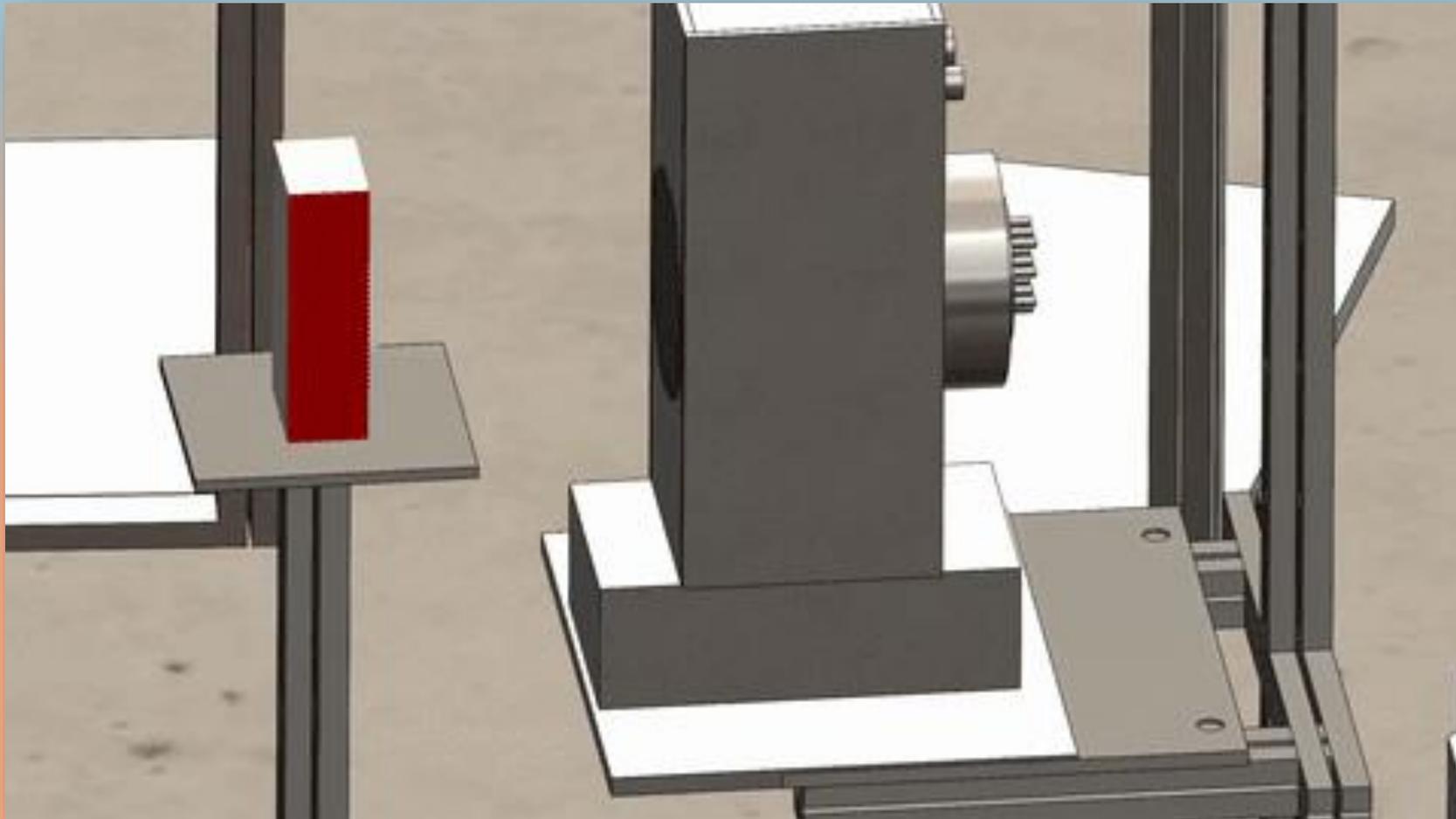


Элементы S-матрицы  
из расчётов программы TALYS.

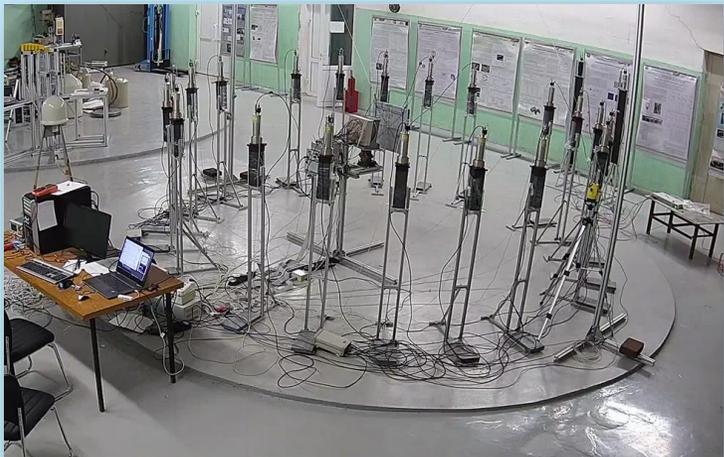
Оптимизация с помощью TalysLib

# TANGRA и метод меченых нейтронов (ММН)

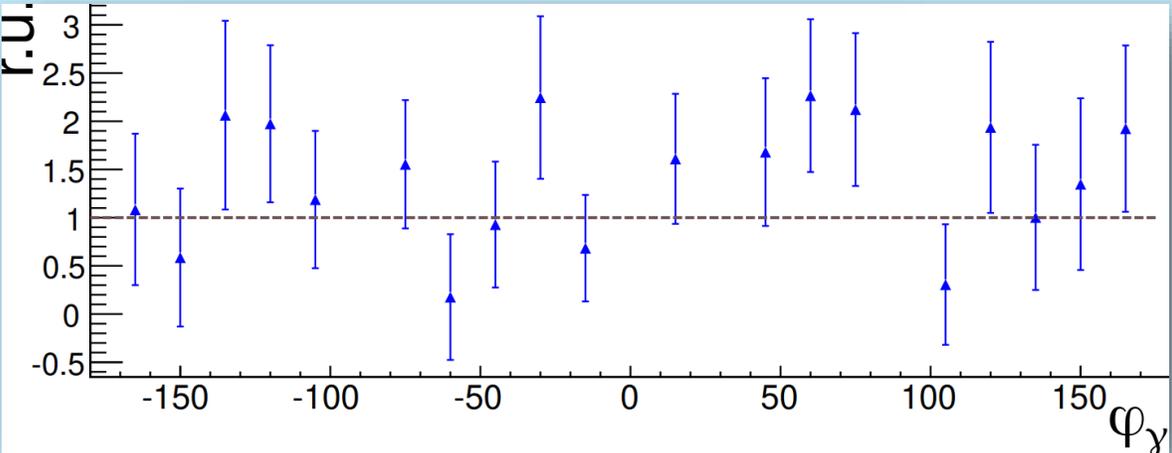
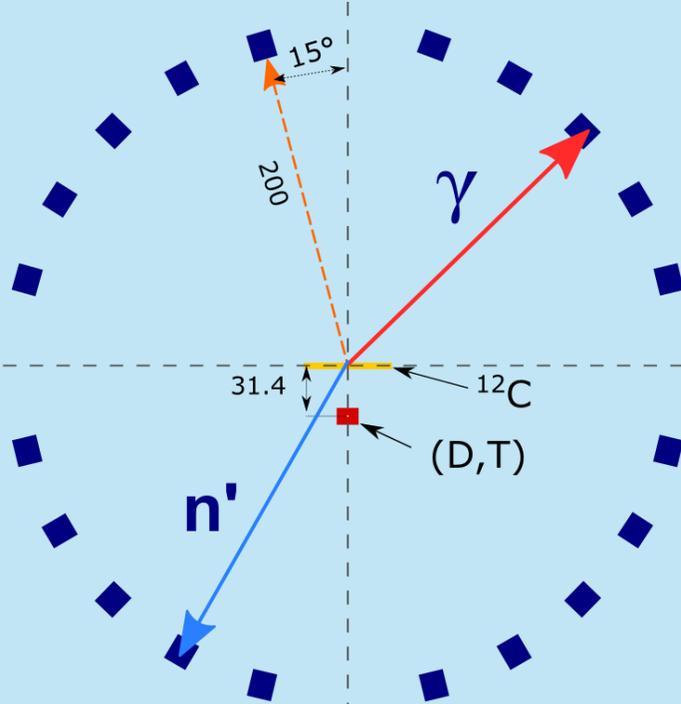
TAged Neutrons and Gamma RAys (TANGRA)



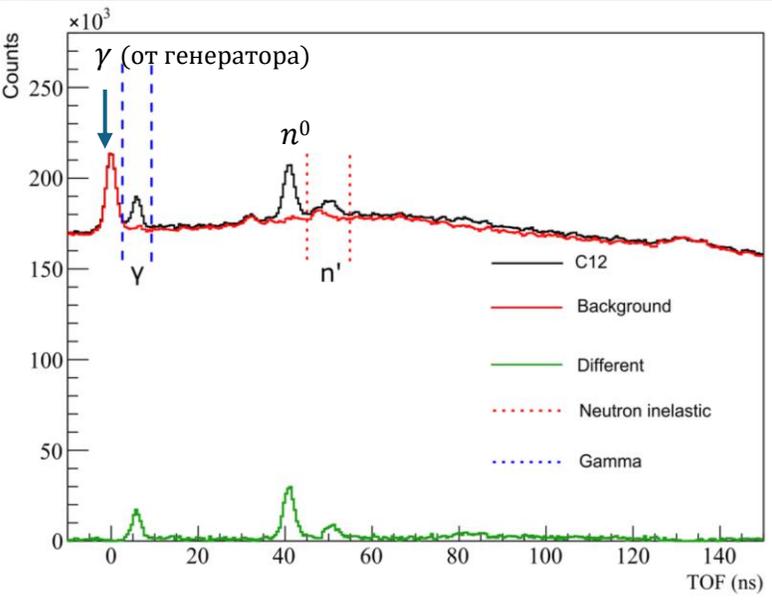
# Эксперимент 2022-23 года по исследованию неупругого рассеяния нейтронов на углероде



Геометрия установки



Угловые корреляции ( $n - n'\gamma$ )



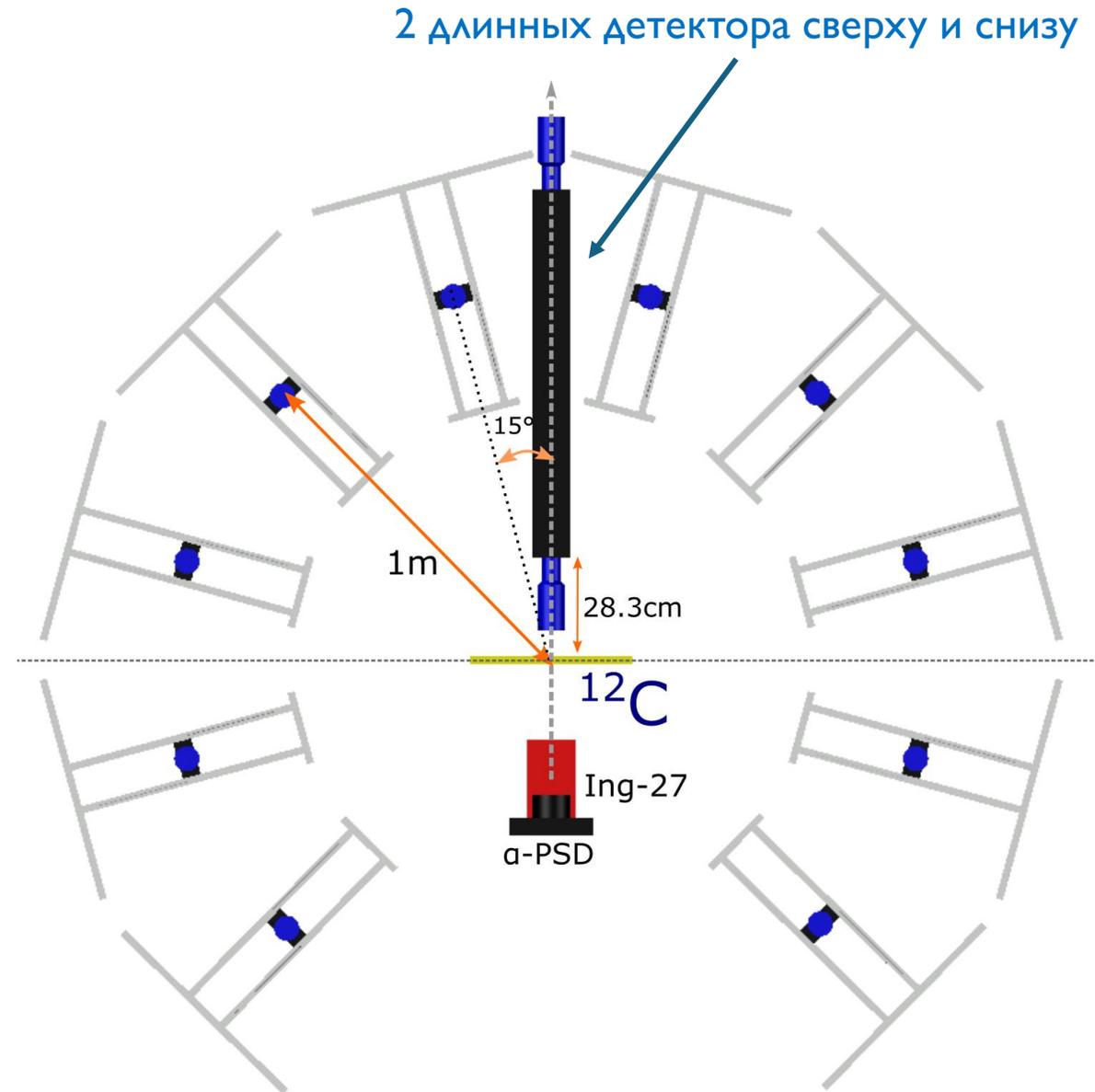
TOF

## Выводы из эксперимента 2023

- Недостаточно статистики для поиска угловых корреляций
- Нужен новый эксперимент с более компактной геометрией

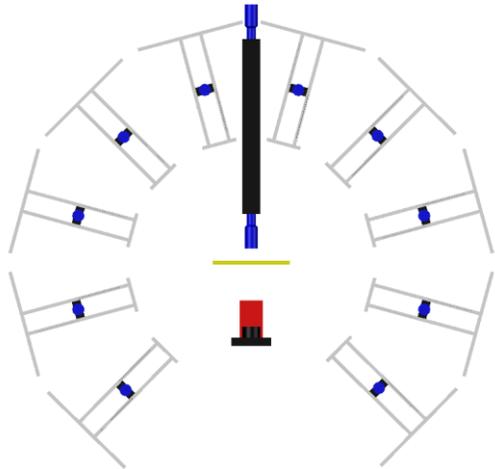
## Эксперимент 2024

- 10 длинных (1 м) пластиковых сцинтилляционных детекторов производством компании plastic EPIC CRYSTAL
- Детекторы расположены по углам от  $-135^\circ$  до  $135^\circ$
- 2 длинных детектора сверху и снизу

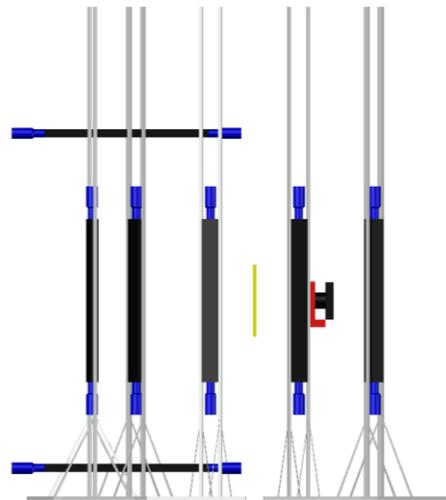


**Геометрия новой установки**  
(серое – стойки детекторов)

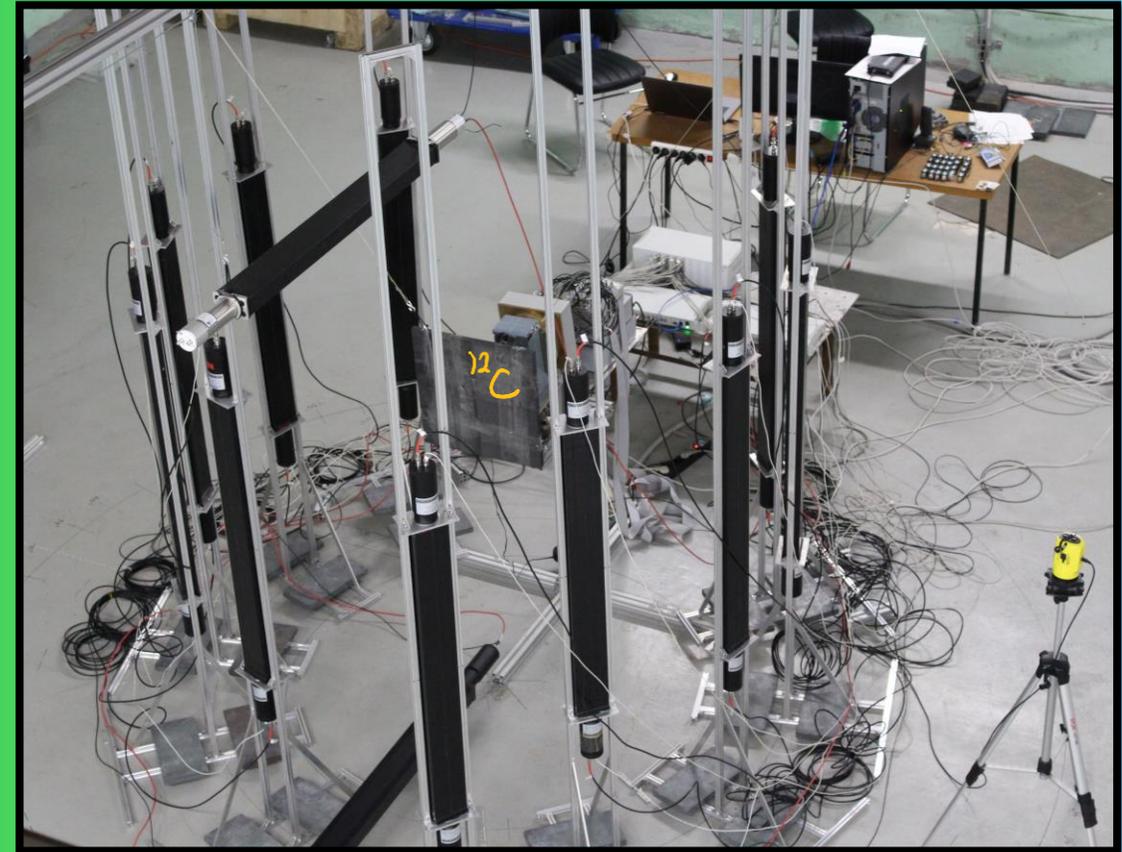
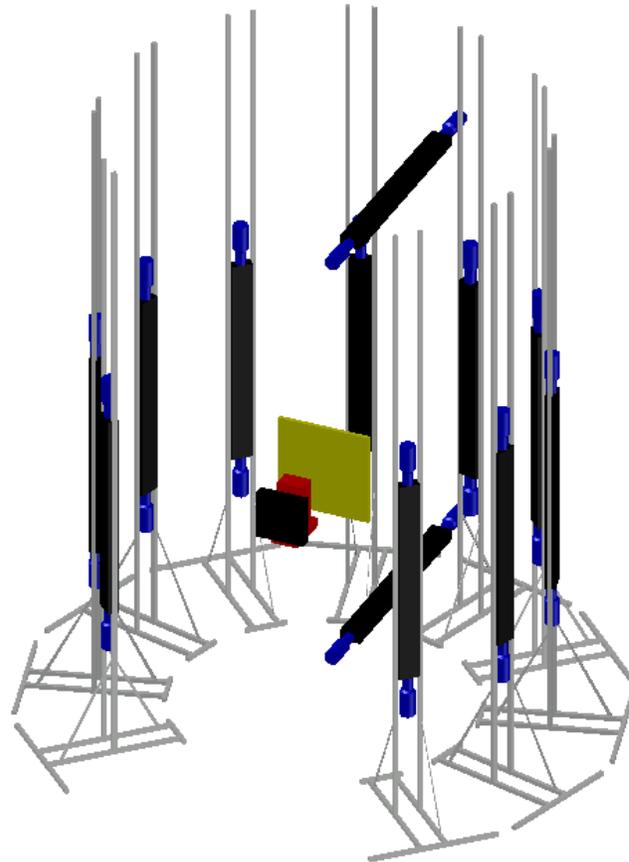
# Экспериментальная установка по поиску угловых корреляций



Вид сверху



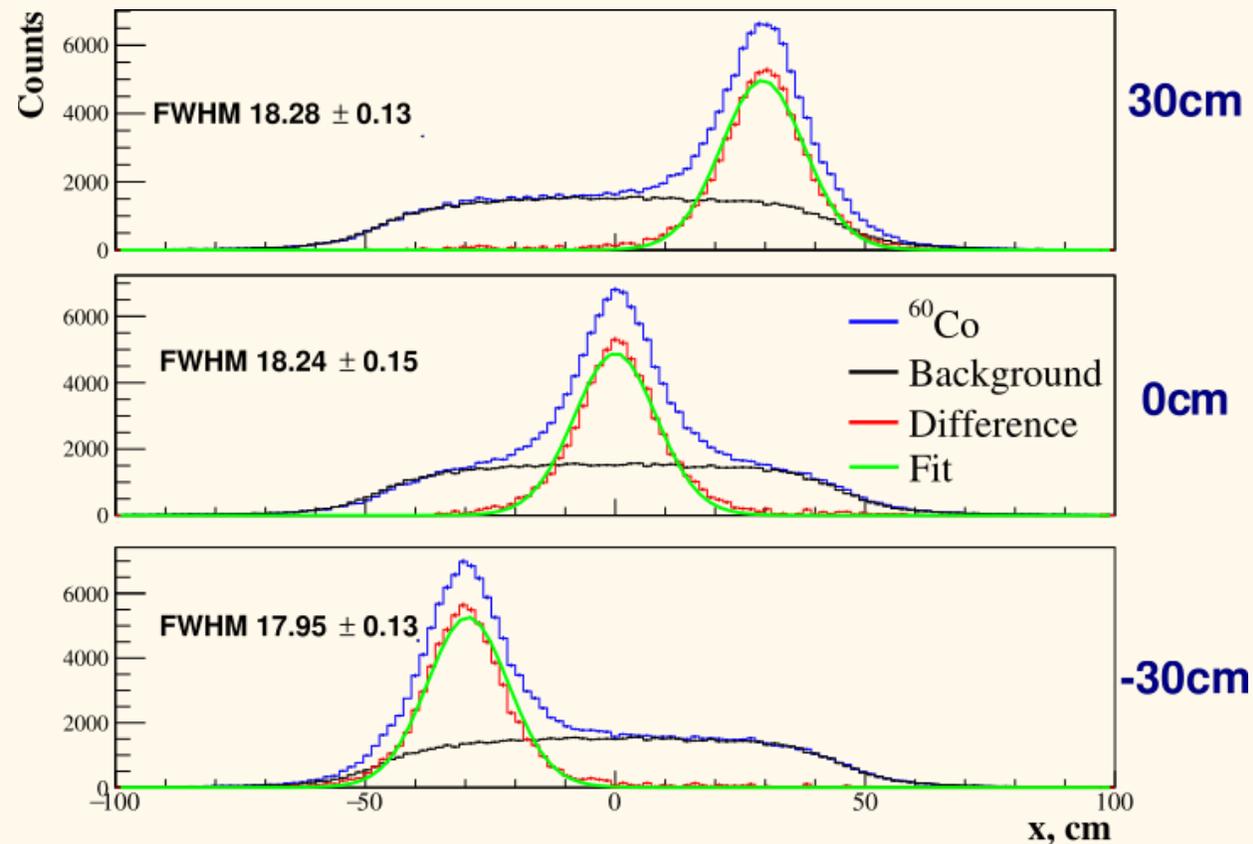
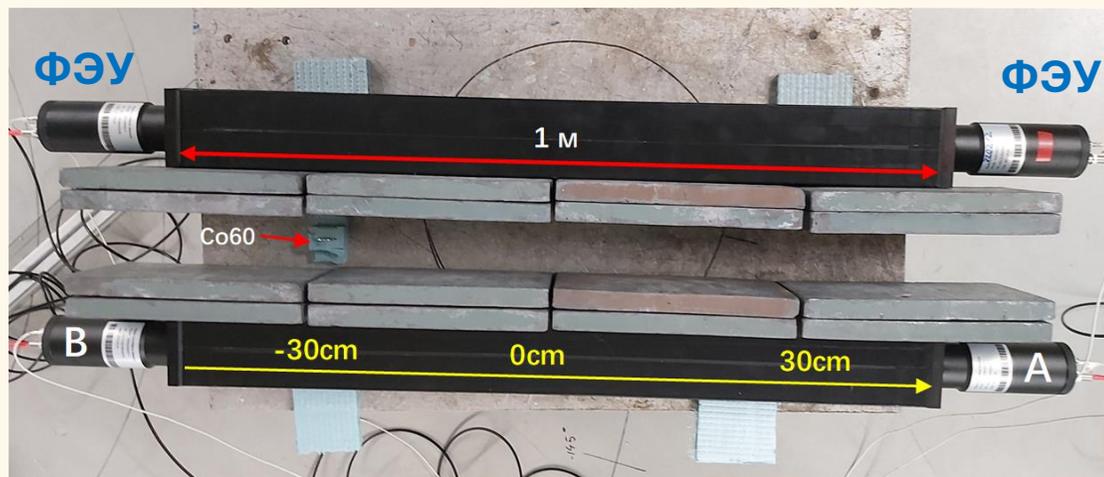
Вид сбоку



50 часов измерений

# Измерение характеристик детекторов

- Длинные пластиковые сцинтилляционные детекторы EPIC CRYSTAL
- $^{60}\text{Co}$  в качестве калибровочного источника  $\gamma$ -квантов

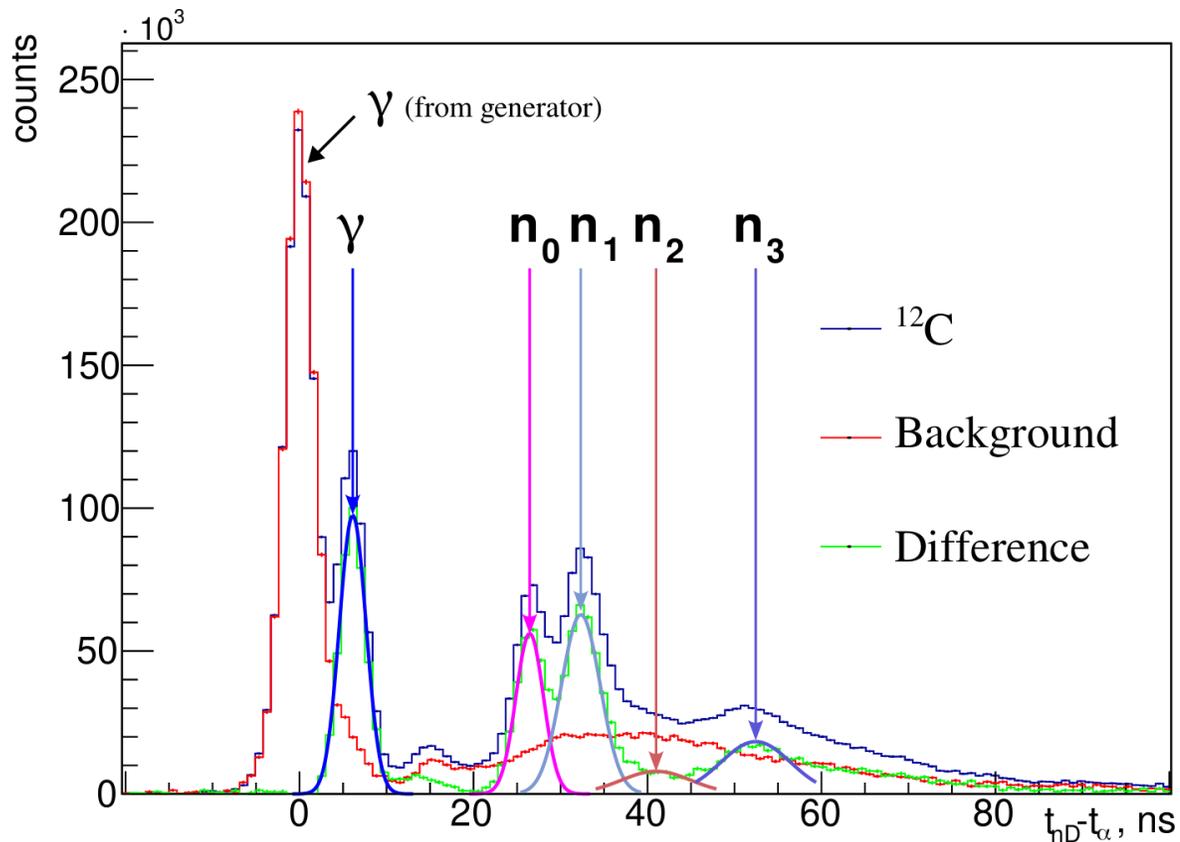


Пространственное разрешение – 18,2 см

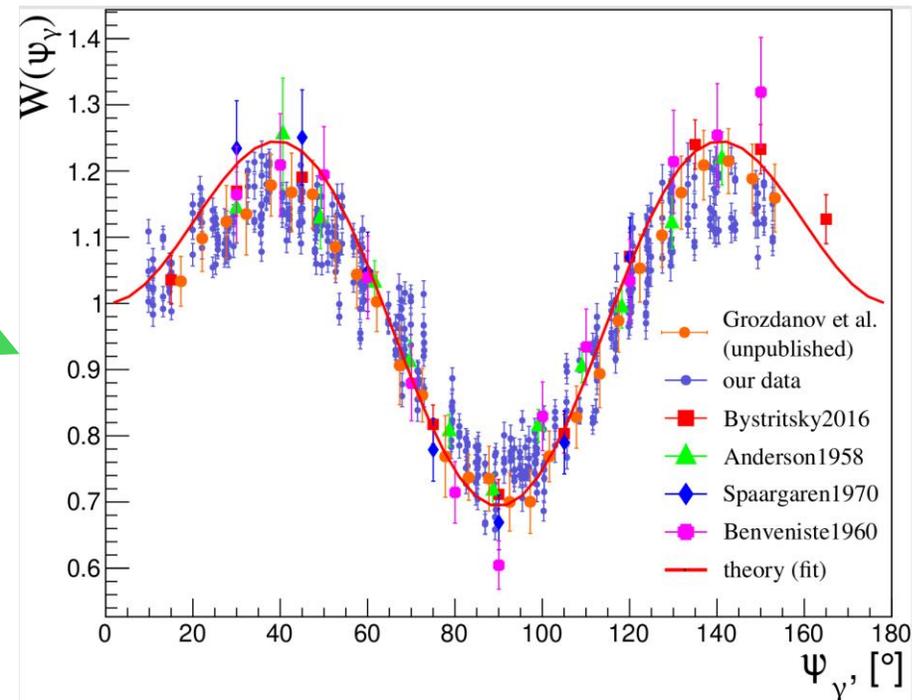
Ширина временного пика на полувысоты – 3,5 нс

Длина затухания света в сцинтилляторе 138,6 см

# Угловое распределение $\gamma$ -квантов



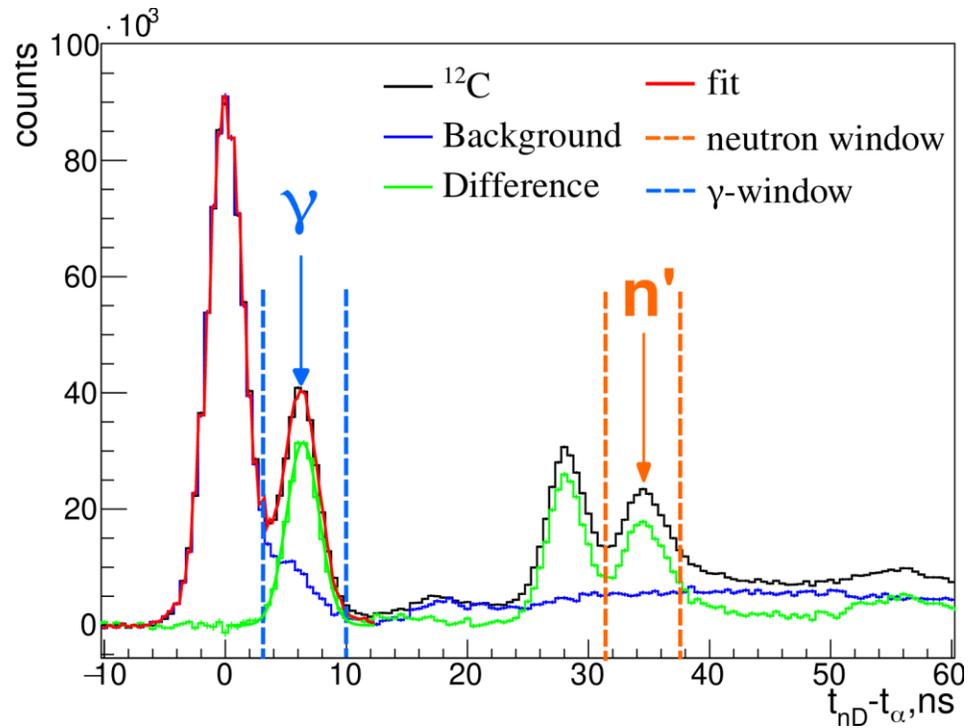
Кинематика реакции. Времяпролётный спектр



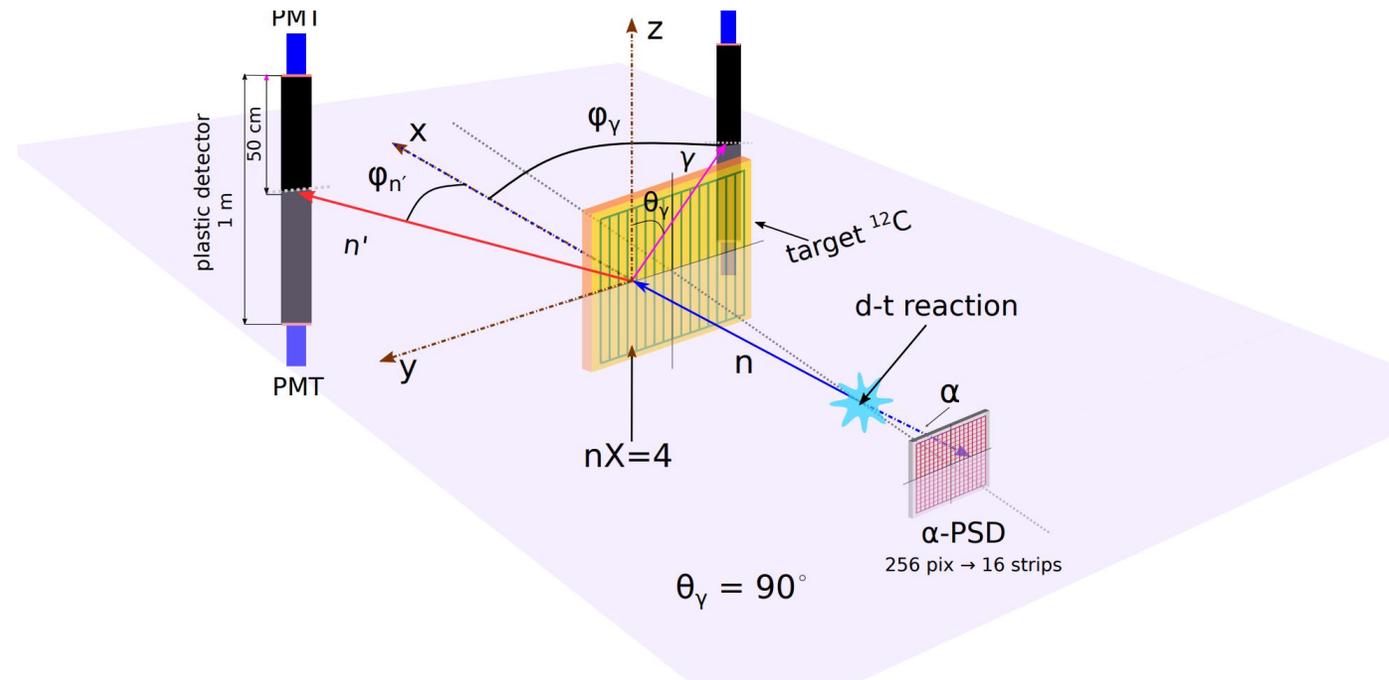
Work	$a_2$	$a_4$
Theory	0,35	-0,35
Bystritsky	$0,34 \pm 0,02$	$-0,33 \pm 0,02$
Anderson	$0,29 \pm 0,02$	$-0,28 \pm 0,02$
Benvensite	$0,37 \pm 0,05$	$-0,39 \pm 0,07$
Spaargaren	$0,39 \pm 0,01$	$-0,37 \pm 0,01$

$$W(\psi_{\gamma}) = 1 + \sum_{l=2,4}^{2J} a_l P_l(\cos \psi_{\gamma})$$

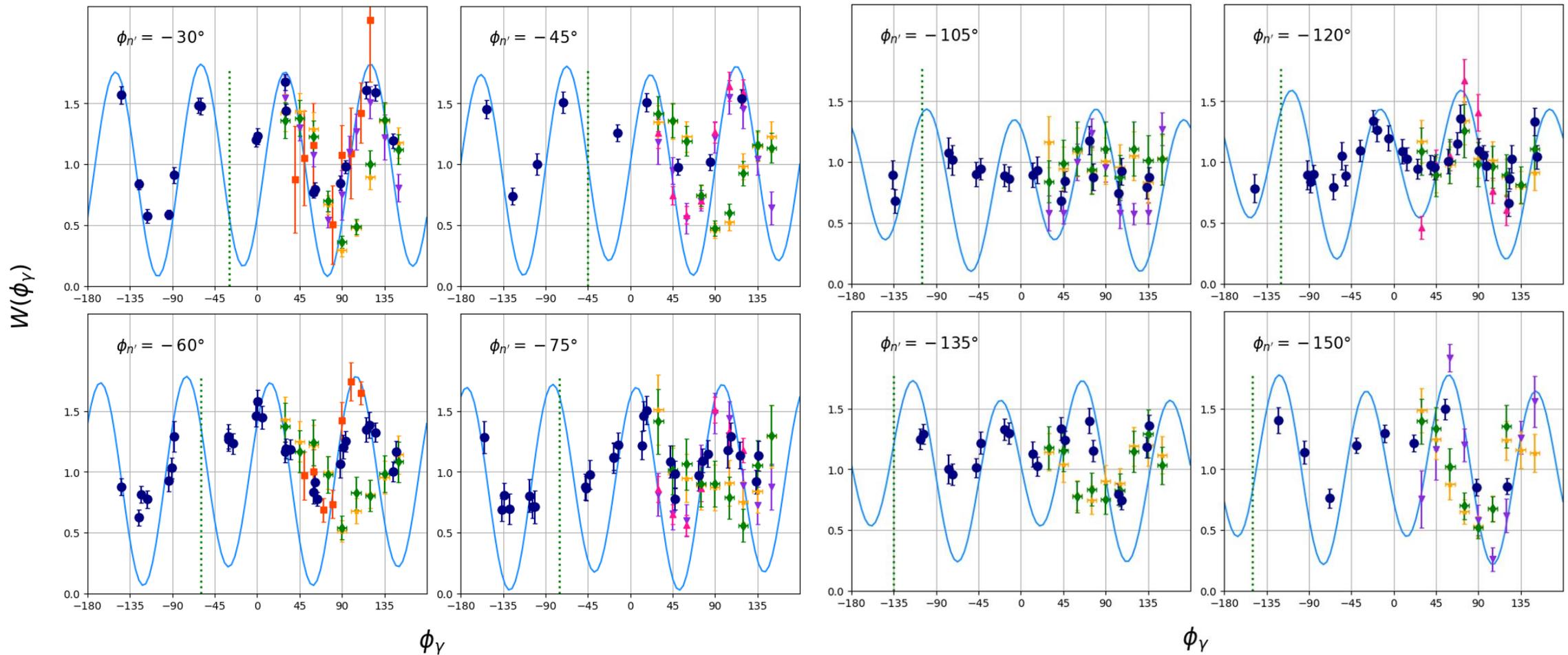
# $(n' - \gamma)$ - корреляции



Выбор окон на TOF-спектре



Плоскость реакции



- theory
- ⋯  $\phi_{n'}$
- + Zamudio et al. 1967
- + De Leo et al. 1973
- + Kelly et al. 2021,  $E = 13.8-14.13$  MeV
- + Kelly et al. 2021,  $E = 14.13-14.45$  MeV
- + our data
- + Spaargaren et al. 1971

Сравнение данных по угловым корреляциям

$$W(\vec{n}_{n'}, \vec{n}_\gamma) = \frac{1}{D_{00}^0} \sum_{Q\Lambda\Lambda'} D_{\Lambda Q}^{\Lambda'} \phi_{\Lambda Q}^{\Lambda'}(\vec{n}_k, \vec{n}_{n'}, \vec{n}_\gamma)$$

# Заключение

Разработан формализм с использованием  $S$ -матрицы и инвариантных свёрток сферических гармоник, описывающий угловые корреляции

Проведён эксперимент и получены экспериментальные данные по угловым корреляциям  $(n, n', \gamma)$ , которые согласуются с экспериментом и теорией в определённом диапазоне углов.

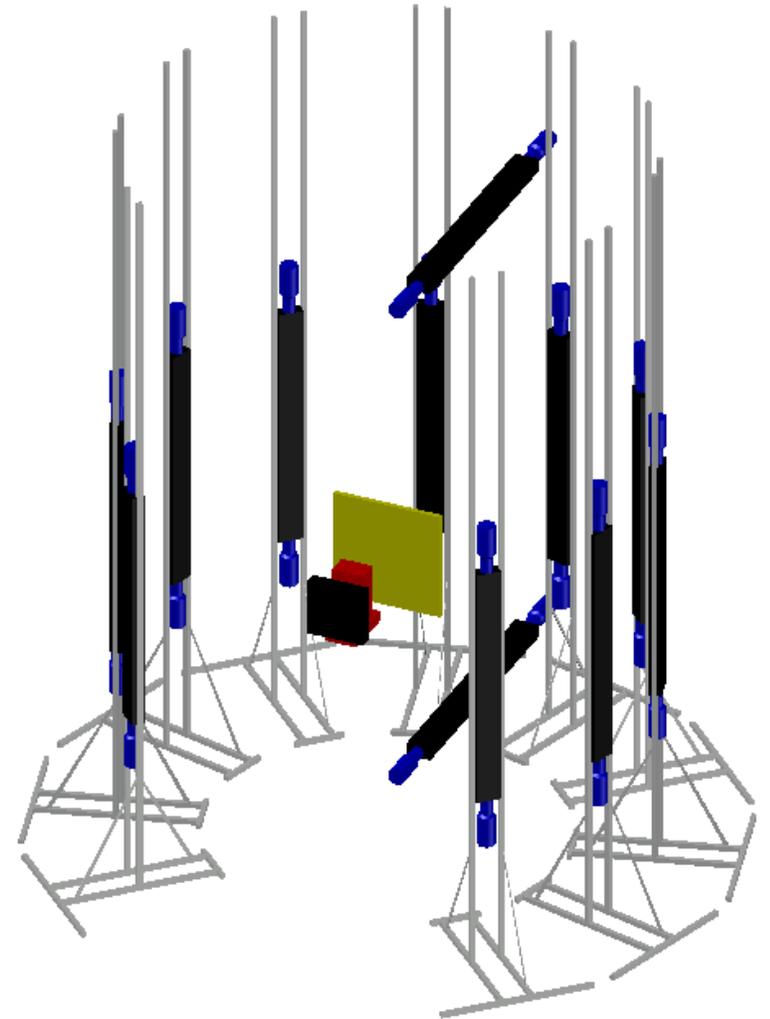
Проведён подбор параметров оптического потенциала с помощью библиотеки TalysLib для получения расчётов TALYS, которые согласуются с экспериментальными данными по неупругому рассеянию нейтрона на углероде.

## Планы на будущее

**Использовать позиционную чувствительность детекторов** для изучения угловых корреляций, рассмотреть корреляции вне плоскости реакции

**Провести дополнительные измерения** в такой же геометрии или в новой с уже большей статистикой

Исследовать физический смысл вклада определенных угловых функций в угловые корреляции





**Спасибо за внимание!**