



Московский Физико-Технический Институт (НИУ)

Институт Ядерных Исследований (ИЯИ РАН)



Экспериментальная установка по исследованию комптоновского рассеяния запутанных аннигиляционных фотонов

Выполнил:

студент гр. М02-011яф Мусин Султан Асхатович

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Ивашкин Александр Павлович

Москва, 2022

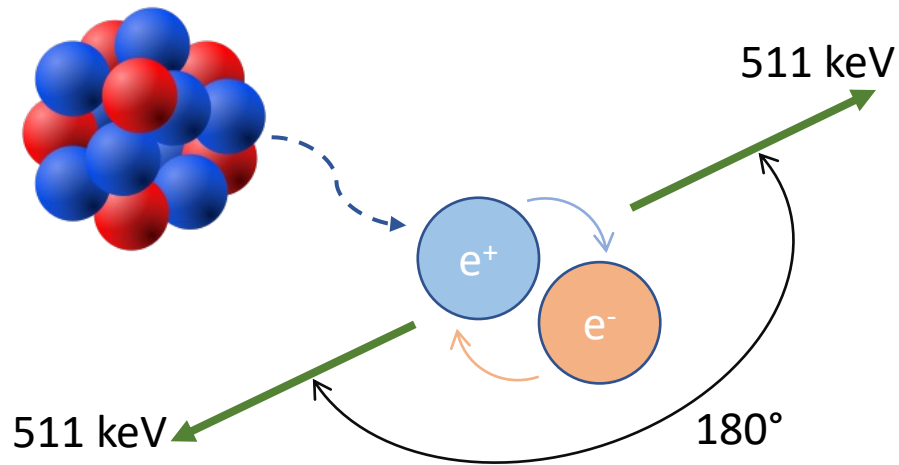
Цели исследования

- Прямое сравнение кинематики комптоновского рассеяния аннигиляционных гамма-квантов в запутанном и смешанном (декогерентном) состояниях.
- Экспериментальная проверка нарушения неравенств Белла для декогерентных гамма-квантов.
- Проверка математической модели, описывающей комптоновское рассеяние для запутанных пар фотонов, имплементированной в Geant4.

Актуальность исследования

- Комптоновское рассеяние запутанных и декогерентных фотонов было изучено недостаточно тщательно.
- Различия в комптоновском рассеянии запутанных и декогерентных фотонов планируется использовать в ПЭТ-томографах нового поколения.

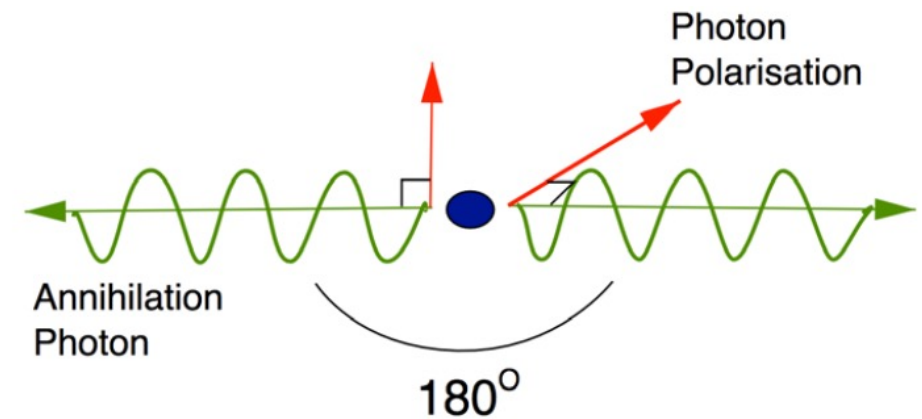
Электрон-позитронная аннигиляция



Электрон-позитронная аннигиляция с образованием двух гамма-квантов

Согласно сохранению углового момента и симметрии четности, вектор состояния аннигиляционной пары имеет вид:

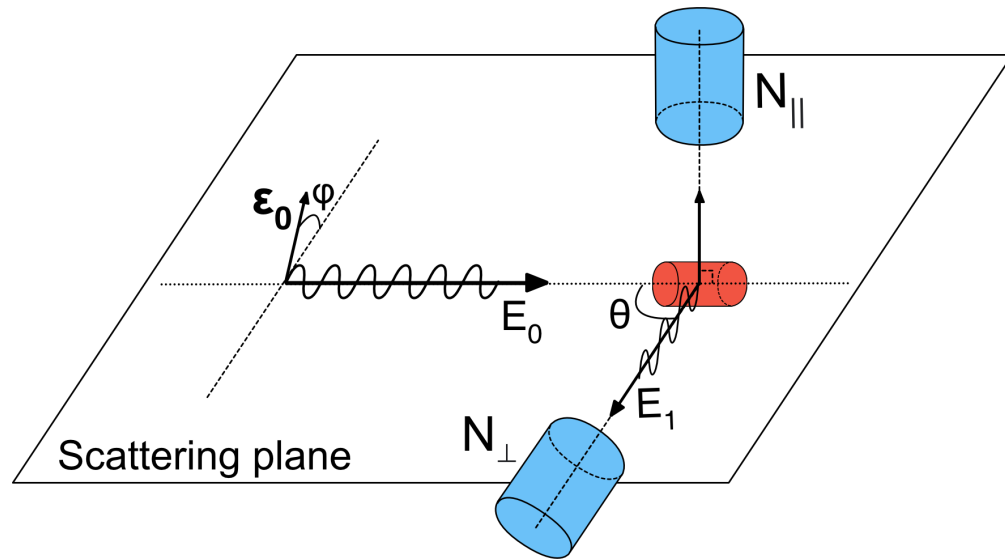
$$\Psi = |H\rangle_1 |V\rangle_2 + |V\rangle_1 |H\rangle_2$$



Каждый фотон в паре не имеет определенного поляризационного состояния, но направления поляризаций ортогональны для фотонов в паре.

Согласно теории, аннигиляционные фотоны находятся в максимально запутанном состоянии.

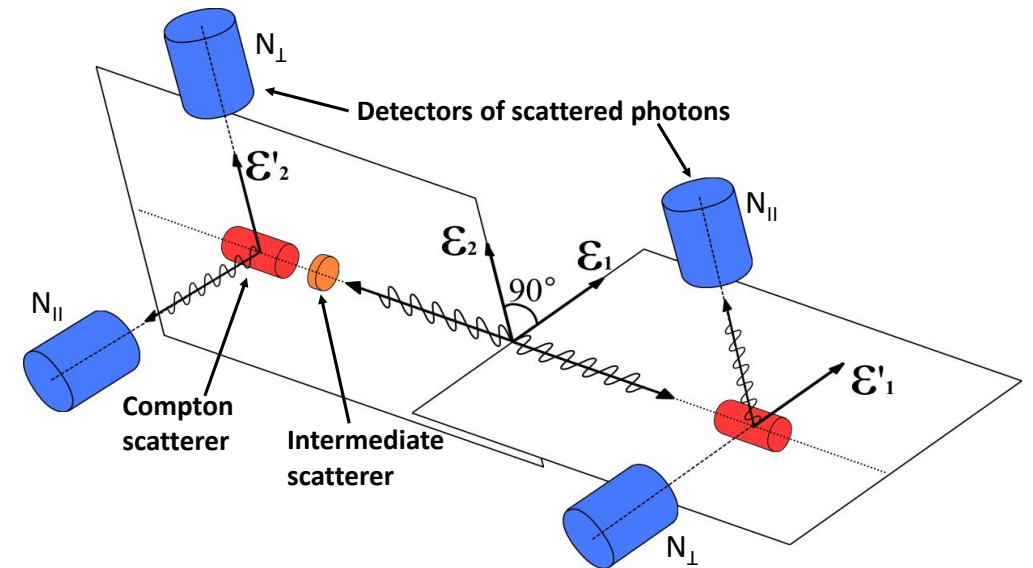
Комптовский поляриметр



$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \phi) = \frac{1}{2} \cdot \frac{e^2}{m_e c^2} \cdot \frac{E_{\gamma_1}^2}{E_{\gamma}^2} \cdot \left(\frac{E_{\gamma_1}}{E_{\gamma}} + \frac{E_{\gamma}}{E_{\gamma_1}} - 2 \sin^2 \theta \cos^2 \phi \right)$$

Формула Клейна-Нишины для
поляризованных фотонов

Сечение максимально для угла $\phi = \pi/2$



$$P_{12}(E_1, E_2, \phi) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1} \right)_{NP} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_2} \right)_{NP} [1 - \alpha(\theta_1)\alpha(\theta_2)\cos(2\phi)]$$

Snyder H S, Pasternack S and Hornbostel J, - 1948 Angular correlation of scattered annihilation radiation Phys. Rev. 73 440-8

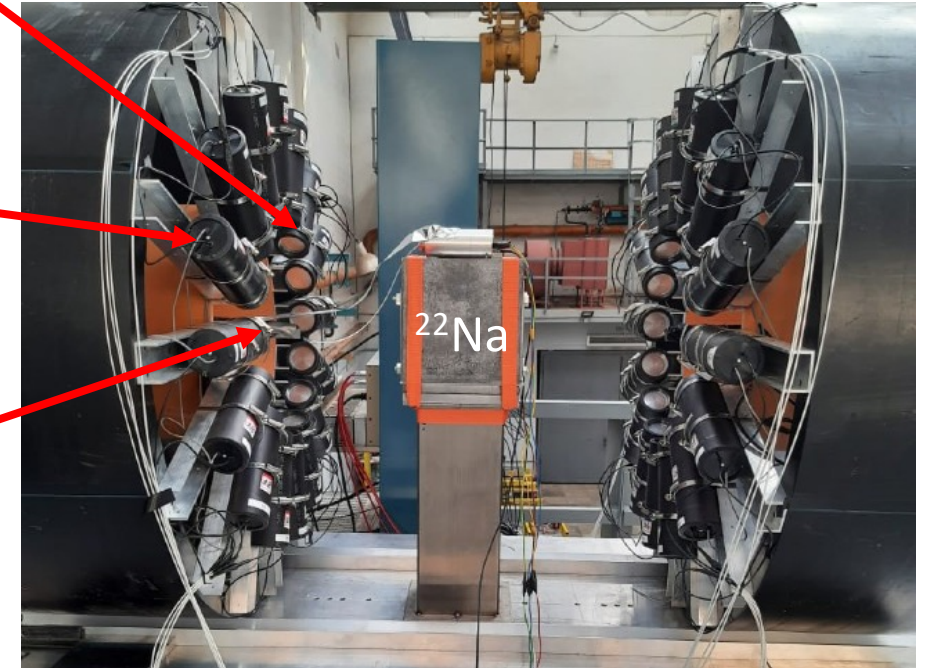
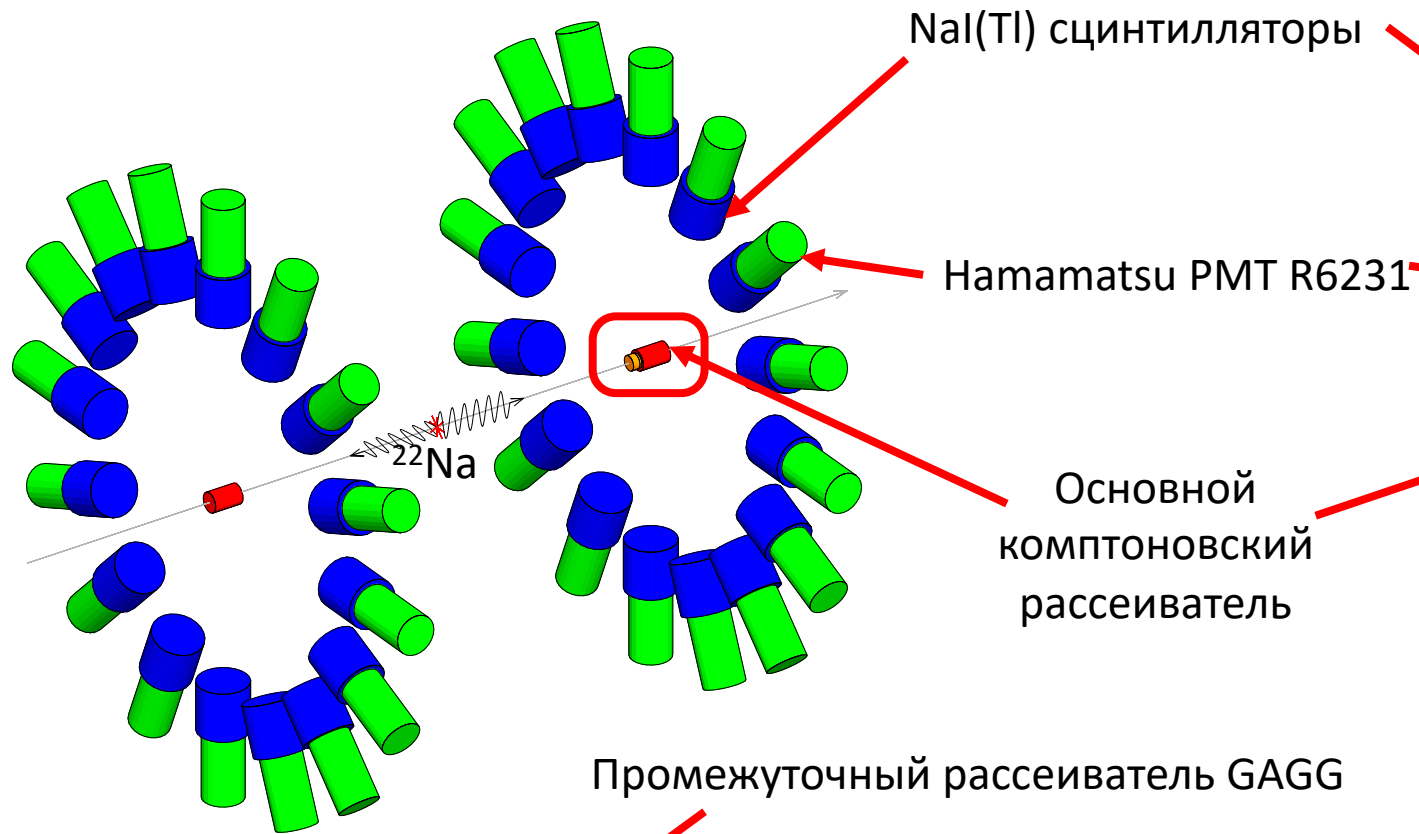
Отношение числа рассеянных фотонов:

$$R_{theory}(\theta) = \frac{N(\phi=\frac{\pi}{2})}{N(\phi=0)} = 1 + \frac{2\sin^4\theta}{\gamma^2 - 2\gamma \sin^2\theta}, \text{ где } \gamma = 2 - \cos\theta + (2 - \cos\theta)^{-1}$$

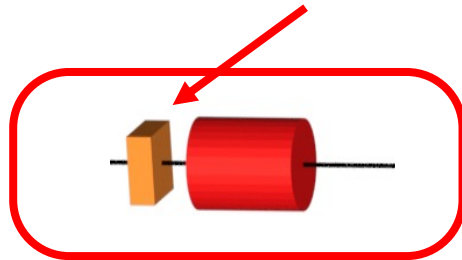
Согласно D. Bohm and Y. Aharonov (Phys. Rev. (1957) 108, 1070), измерения угловых корреляций обеспечивают экспериментальную проверку запутанности, если $R > 2$.

Для **декогерентных** фотонов $R=1$, для **незапутанных** фотонов $R < 2$.

Схема экспериментальной установки

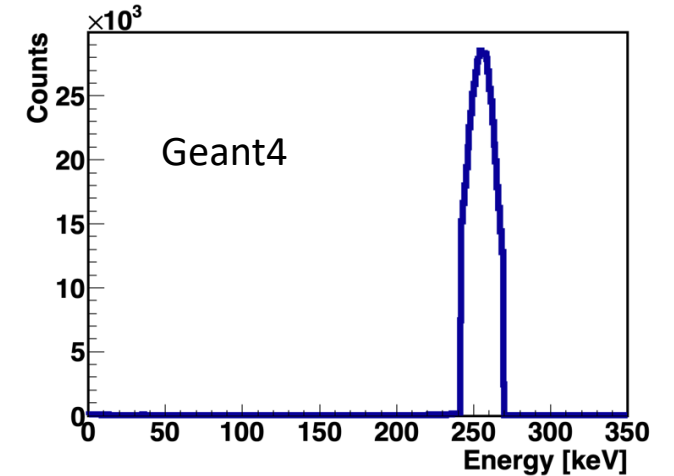
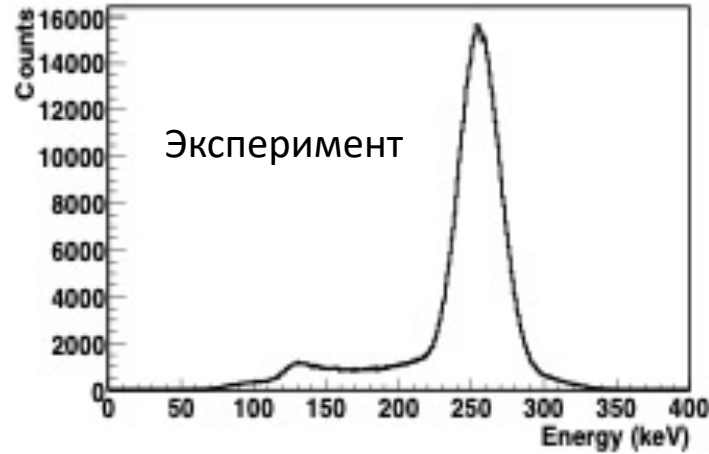
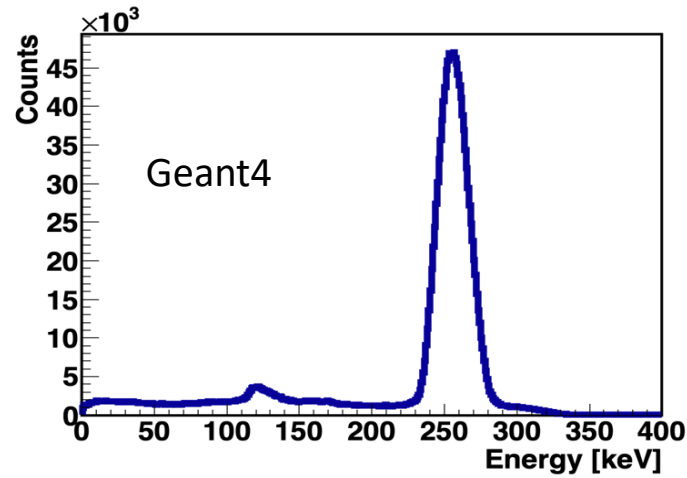


Экспериментальная установка в ИЯИ РАН



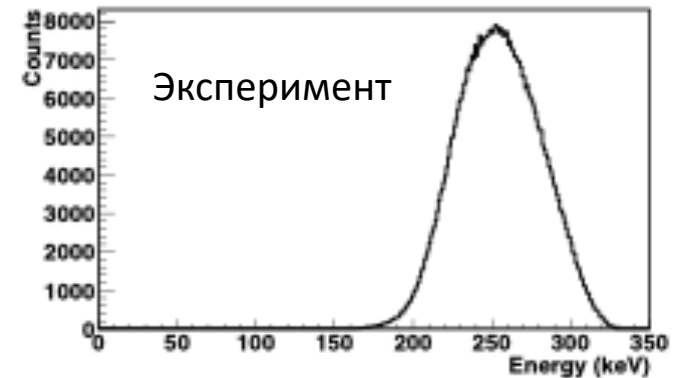
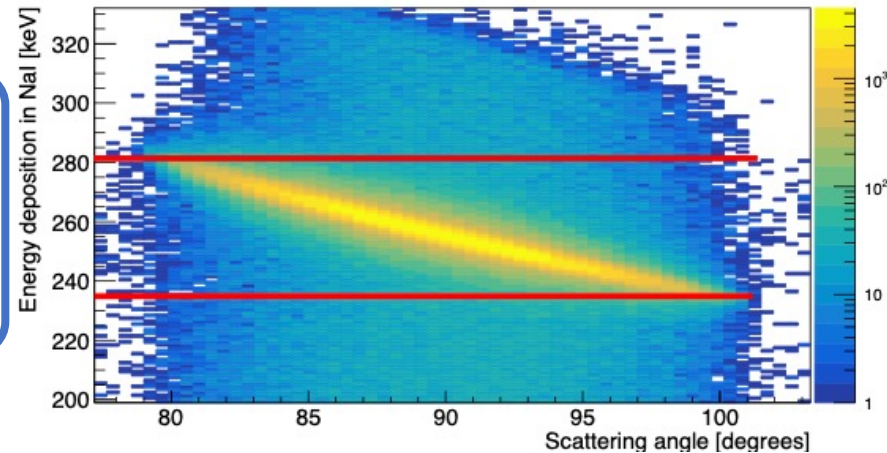
16 NaI(Tl) детекторов рассеянных фотонов формируют 16 независимых комптоновских поляриметров в каждом плече установки

Энергетические спектры без энерговыделения в GAGG



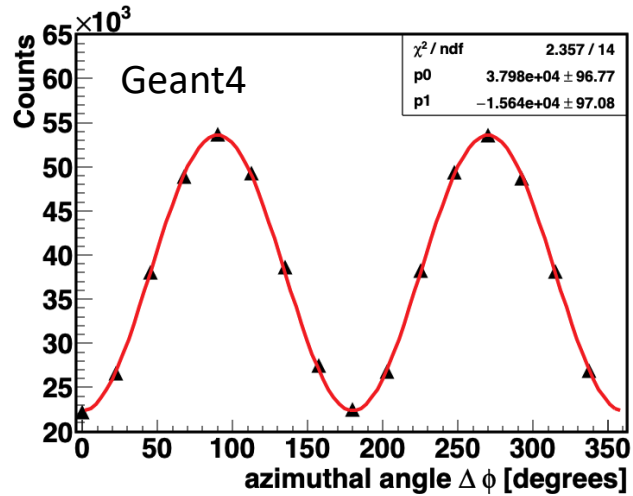
Энергетические спектры в основном комптоновском рассеивателе при условии попадания в NaI(Tl)

Ширина пика слабо зависит от энергетического разрешения детектора и определяется геометрией установки



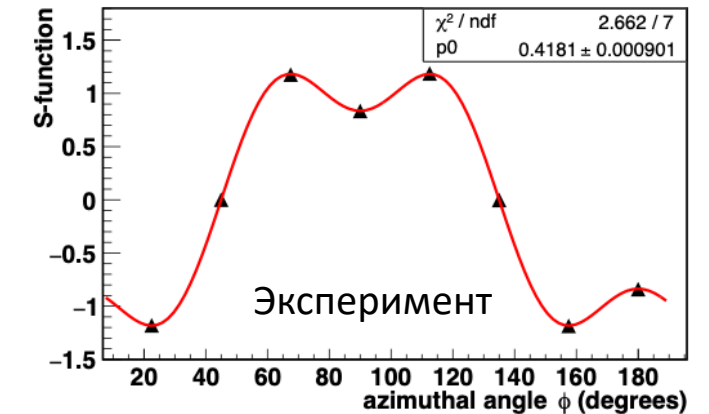
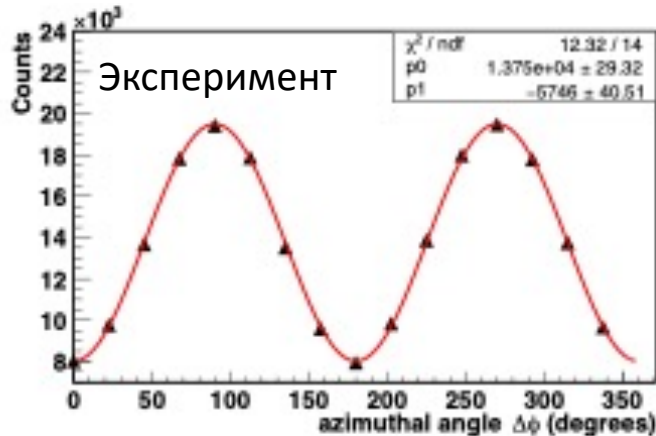
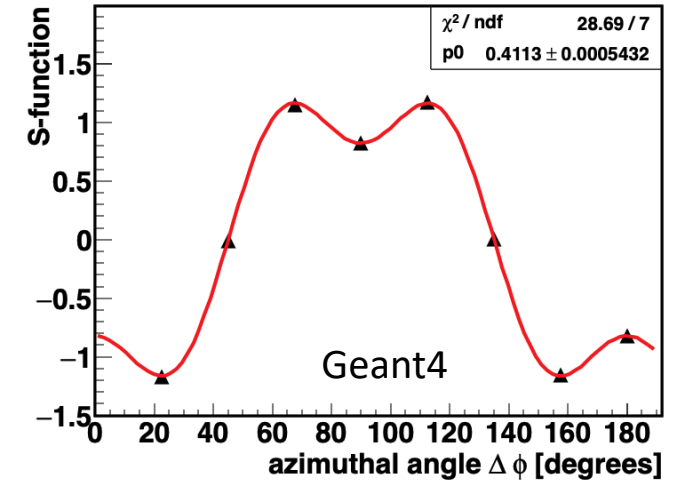
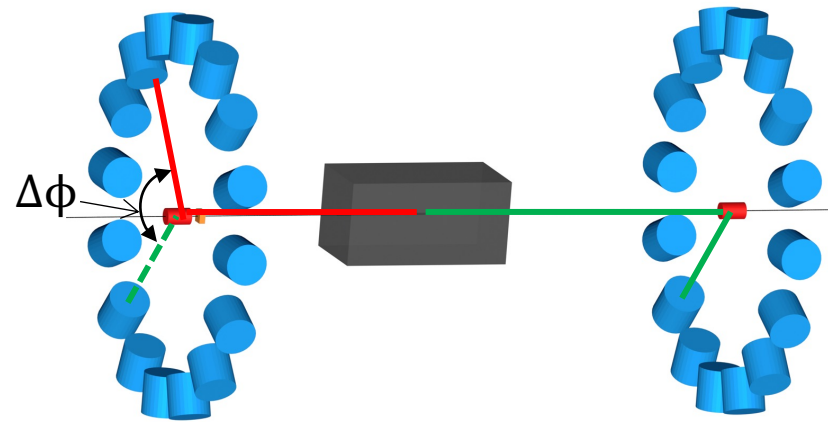
Зависимость энерговыделения в NaI(Tl) от угла рассеяния по данным моделирования

Угловые корреляции для запутанных фотонов



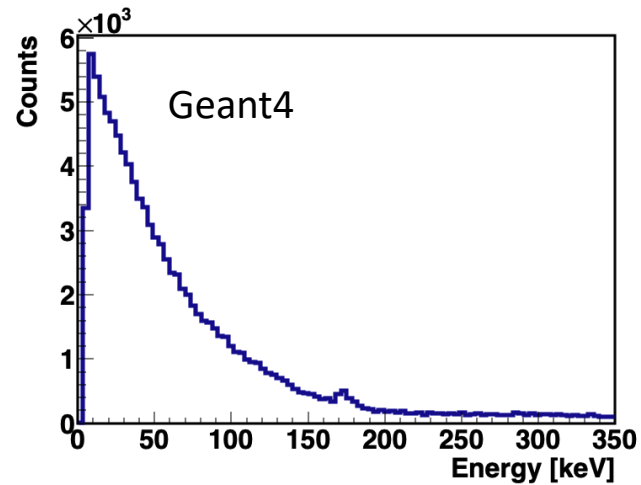
$$R_{MC} = 2.399 \pm 0.015$$

$$R_{EXP} = 2.43 \pm 0.02$$

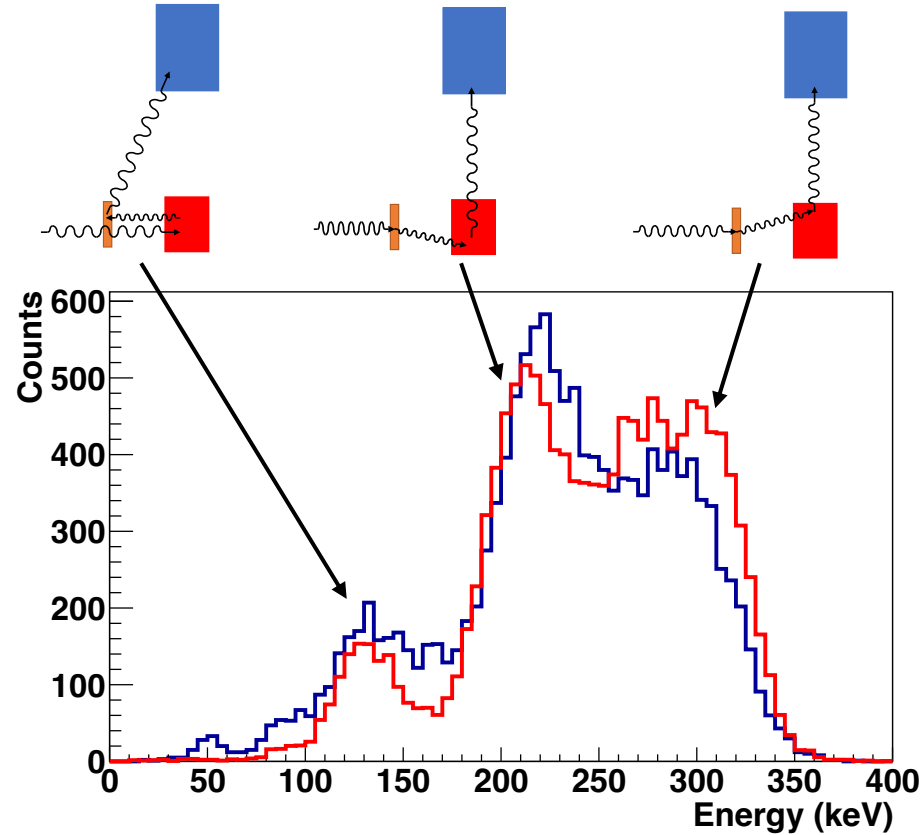
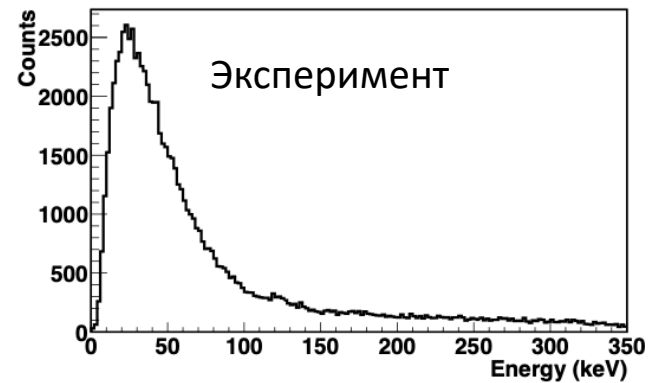


Расчетная модель Geant4 отлично описывает эксперимент в случае запутанных пар фотонов.

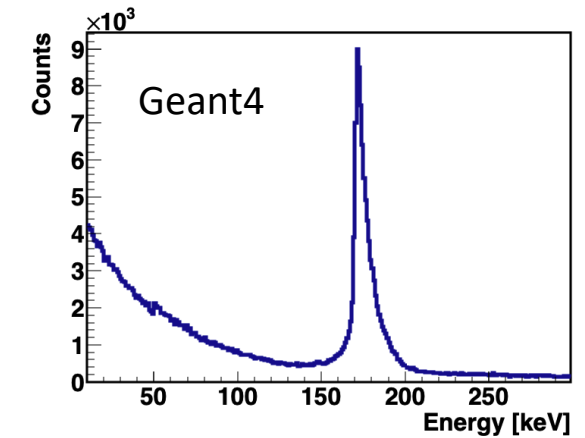
Энергетические спектры с энерговыделением в GAGG



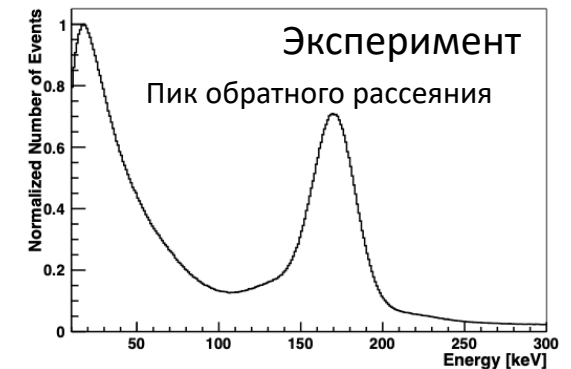
Энергетические спектры в GAGG
при условии попадания в NaI(Tl)



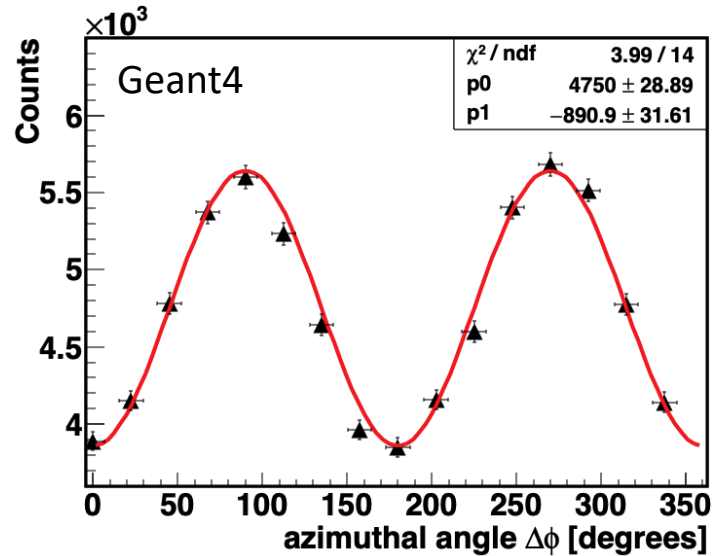
Энерговыделение в NaI(Tl) детекторах
при условии энерговыделения в GAGG
Красным – Монте-Карло моделирование
Синим – Экспериментальные данные



Энергетические спектры в GAGG
при условии рассеяния в
основном комптоновском
рассеивателе



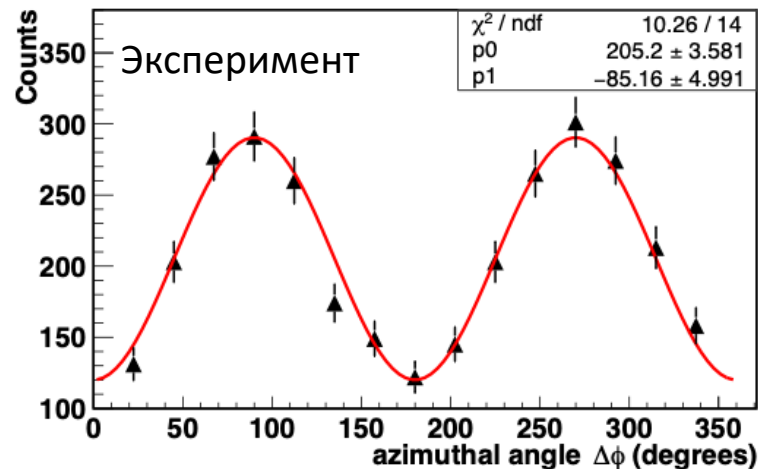
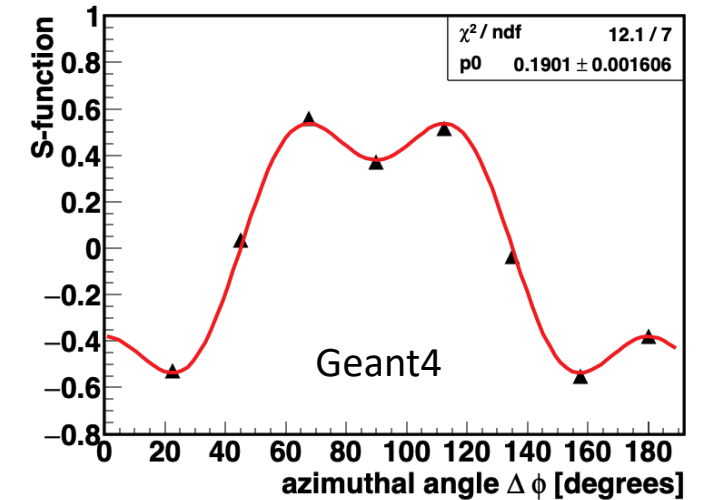
Угловые корреляции для декогерентных фотонов



$$R_{MC} = 1.46 \pm 0.02$$

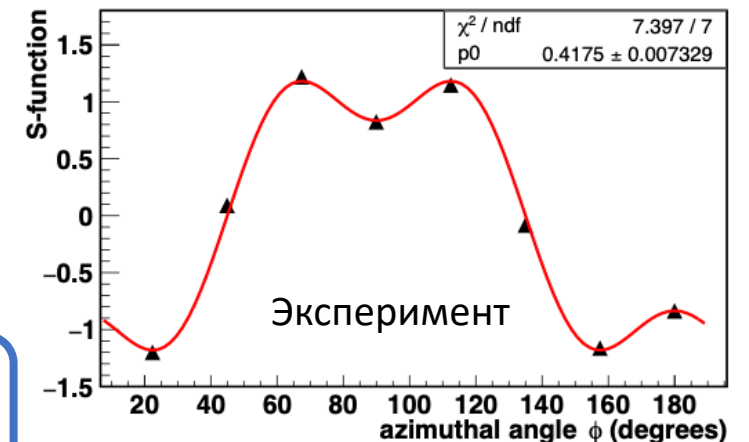
$$R_{EXP} = 2.4 \pm 0.1$$

Результаты моделирования соответствуют комптоновскому рассеянию гамма-квантов со взаимно-перпендикулярной поляризацией



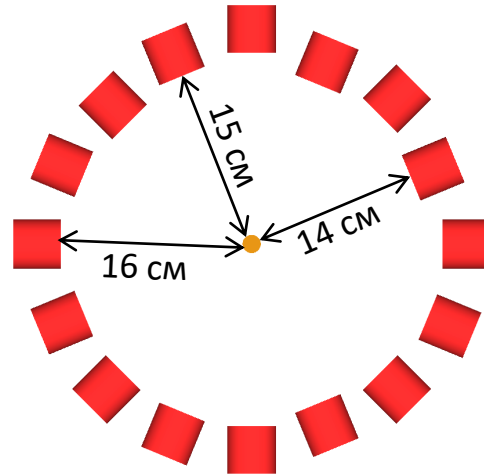
Результаты эксперимента не выявляют отличий от случая запутанных фотонов

Расчетная модель Geant4 не правильно описывает эксперимент в случае декогерентных пар фотонов.

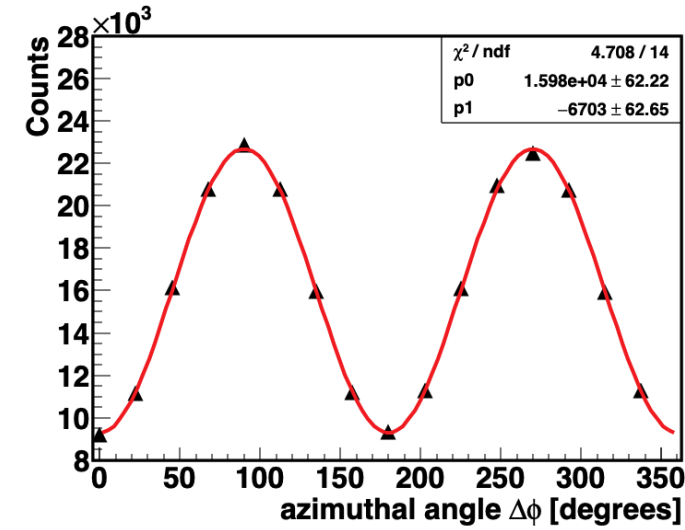
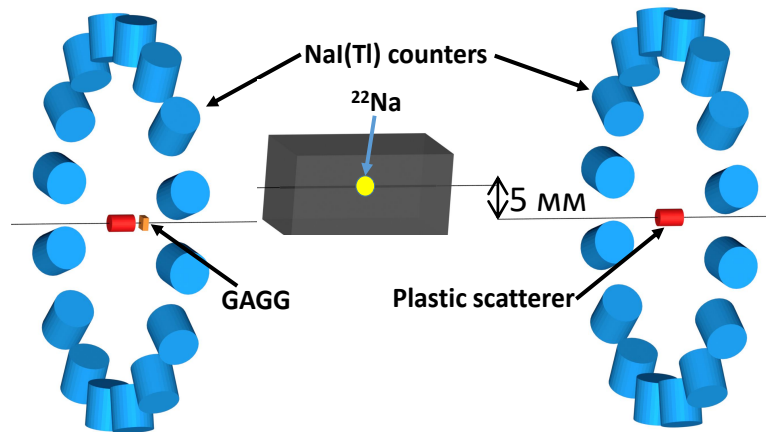


Изучение систематических ошибок

Случайное распределение расстояний от рассеивателя до NaI(Tl) детекторов



Сдвиг источника относительно оси установки

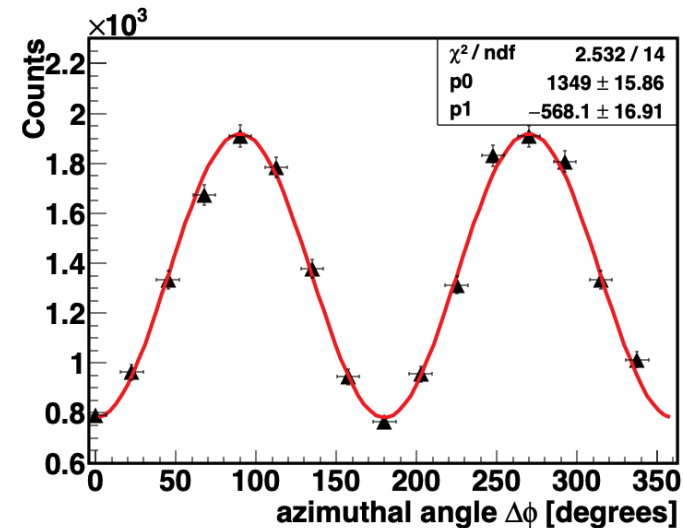


$$R = 2.445 \pm 0.025$$

$$R_{\text{normal}} = 2.399 \pm 0.015$$

С учетом того, что в эксперименте разброс радиусов $\sim 1\text{ мм}$, т.е. на 1 порядок меньше:

$$\Delta R \sim 5 \cdot 10^{-3}$$



$$R = 2.455 \pm 0.080$$

$$R_{\text{normal}} = 2.399 \pm 0.015$$

Учитывая, что точность позиционирования коллиматора выше на порядок:

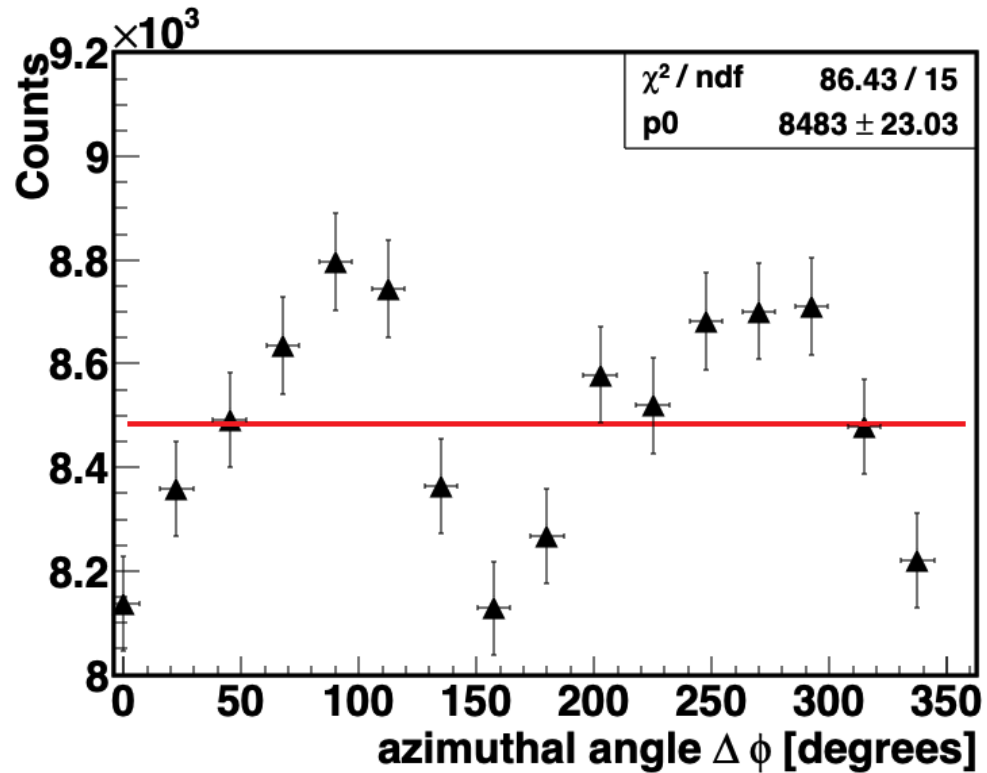
$$\Delta R \sim 6 \cdot 10^{-3}$$

Заключение

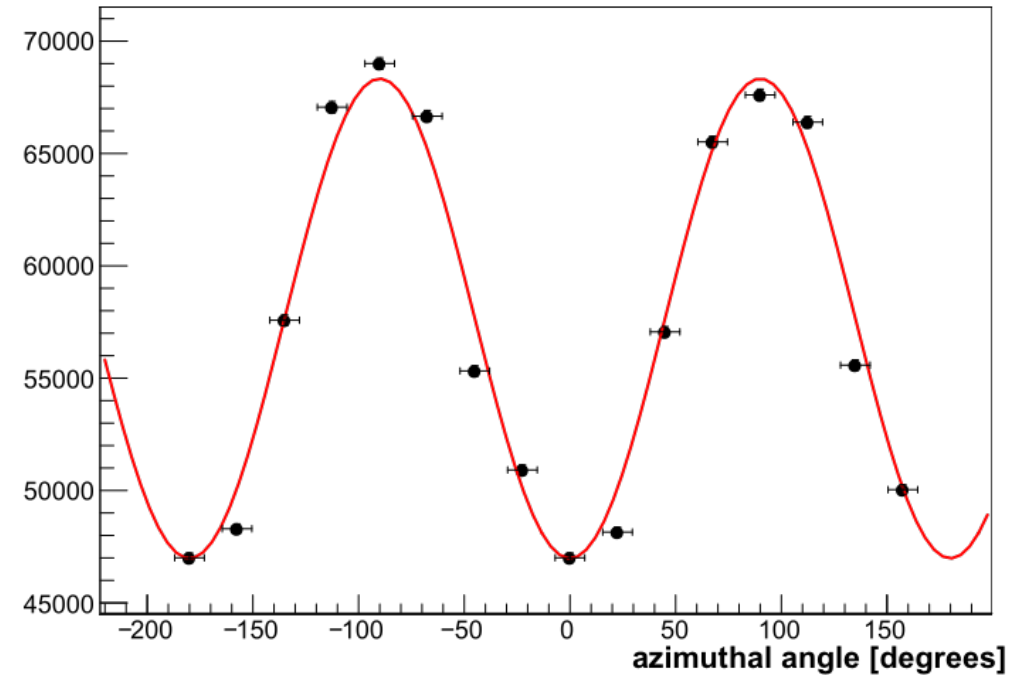
- Проведено сравнение спектров энергосвечения в основных детекторах установки по результатам моделирования и эксперимента.
- Изучено влияние энергетического разрешения детекторов на точность отбора событий.
- Проведено сравнение угловых корреляций по результатам моделирования и эксперимента, а также с предсказаниями различных теоретических моделей.
- Обнаружено противоречие между расчетами текущей модели Geant4, описывающей кинематику некогерентных фотонов, и экспериментальными данными.
- Изучен вклад систематических погрешностей в ошибку определения угловых корреляций.

Спасибо за внимание

Приложение

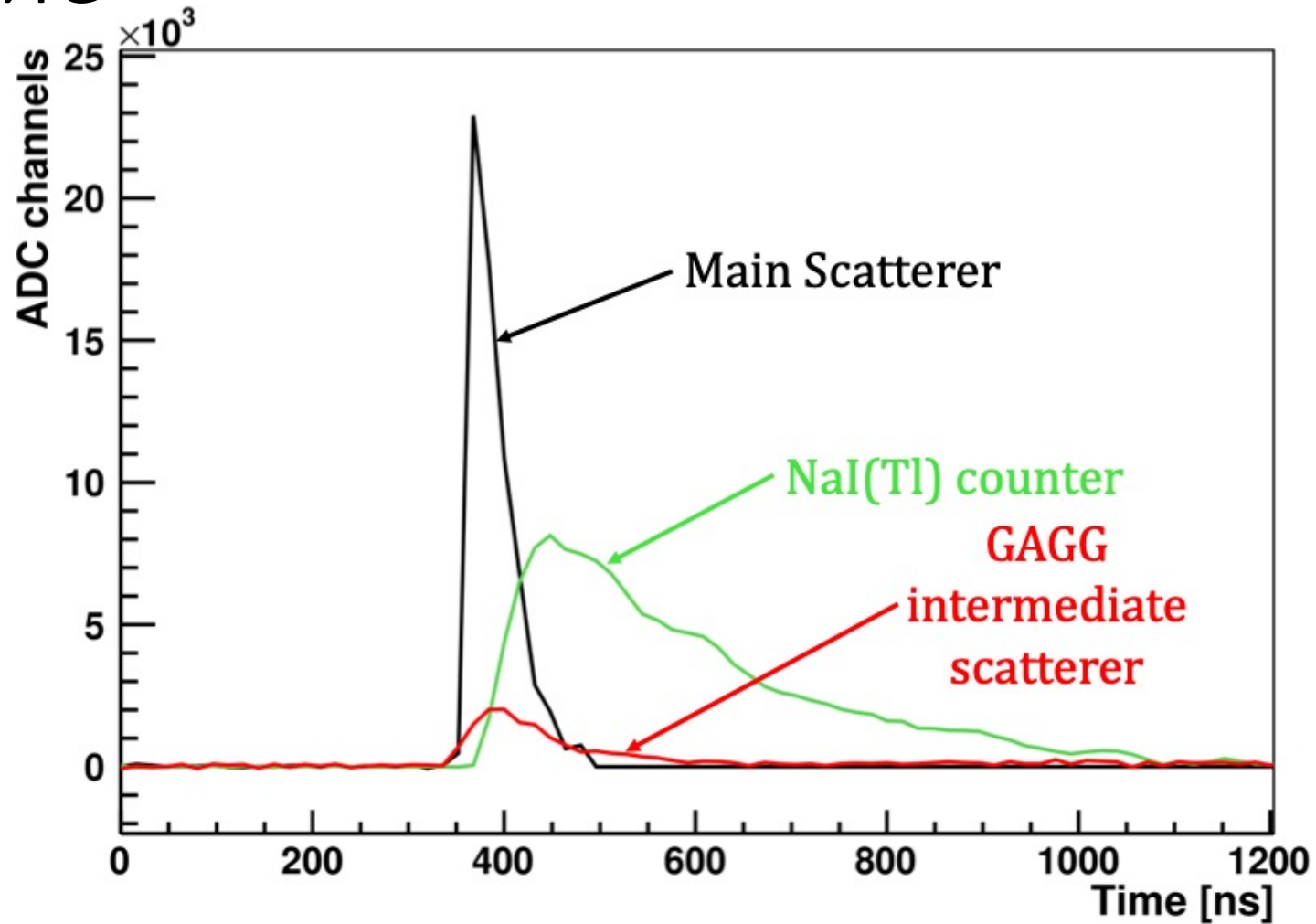


Угловые корреляции для двух фотонов со случайными направлениями поляризации



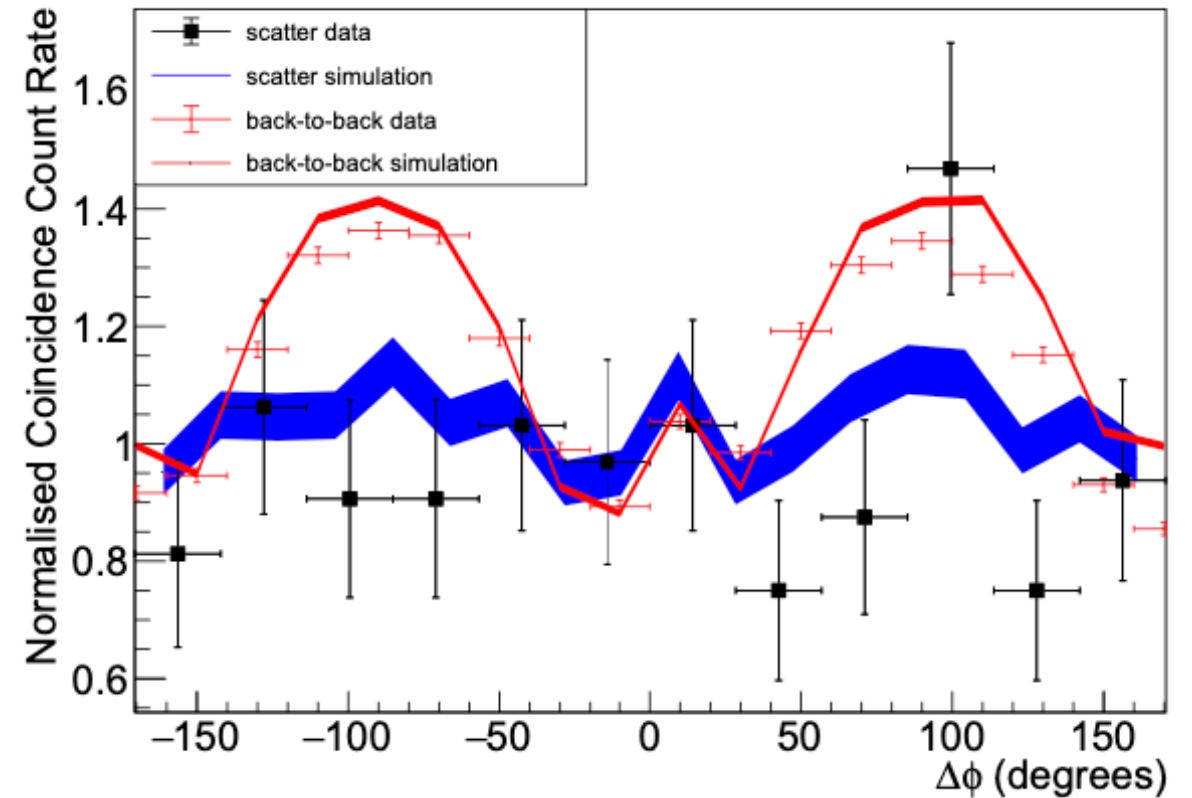
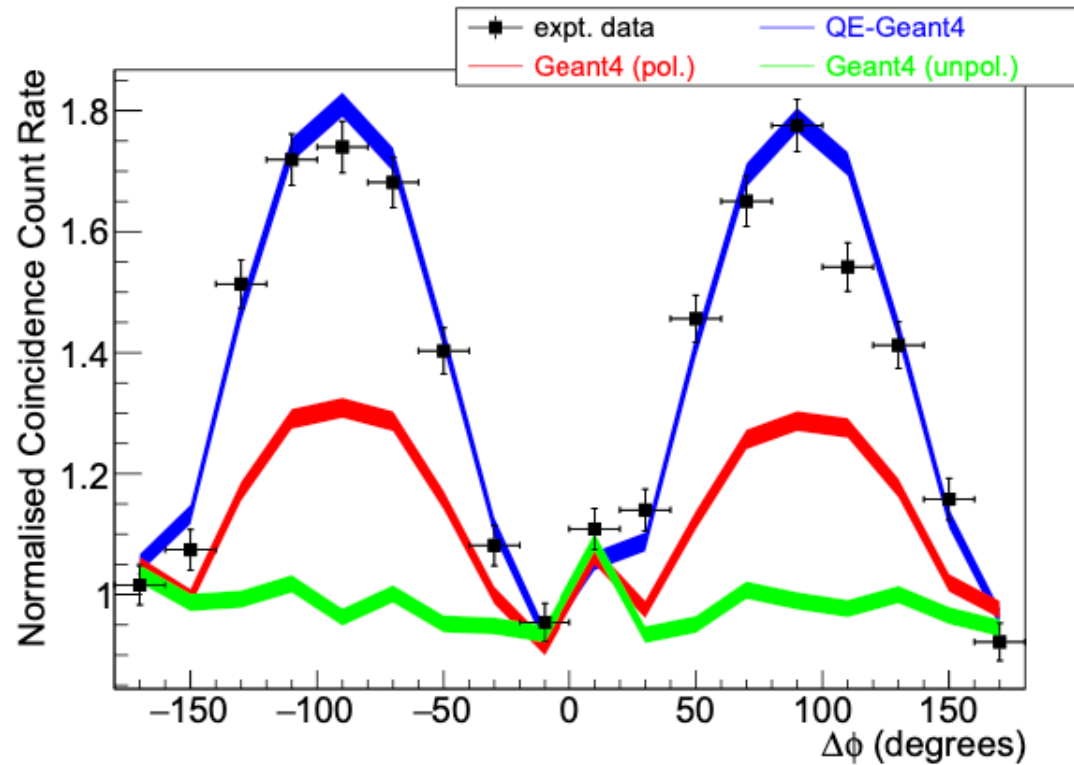
Угловые корреляции для двух фотонов со взаимно-перпендикулярными направлениями поляризации

Приложение



Типичные вейвформы сигналов с основного рассеивателя (черный), промежуточного рассеивателя (красный) и NaI(Tl) детектора рассеянных фотонов (зеленый)

Приложение



Угловые корреляции для запутанных (слева) и декогерентных (справа) пар гамма-квантов.

Watts D.P. et al. Photon quantum entanglement in the MeV regime and its application in PET imaging // Nature Communications. 2021. Vol. 12, № 1. P. 2646.