# Исследование комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов

А. Ивашкин ОЭФ, ИЯИ РАН ivashkin@inr.ru

### Задачи:

- Исследование кинематики комптоновского рассеяния запутанных фотонов;
- Сравнение кинематики и сечений рассеяния запутанных и декогерентных фотонов;

### Мотивация:

- Комптоновское рассеяние запутанных фотонов не было изучено детально;
- Запутанность аннигиляционных фотонов не была экспериментально доказана;
- Комптоновское рассеяние декогерентных фотонов не изучено совсем;
- Теоретические расчеты в сечениях рассеивания запутанных и декогерентных фотонов дают противоречивые результаты;
- Разница в сечениях рассеяния запутанных и декогерентных фотонов может привести к фундаментальным последствиям.
- Запутанность аннигиляционных фотонов предполагается использовать в позитронэмиссионных томографах (ПЭТ) нового поколения.

### Запутанные состояния

### $\succ$ Состояния 1 и 2 являются независимыми (сепарабельными), если $\ket{\Psi}=\ket{\psi}_1\otimes\ket{\phi}_2$

Состояния 1 и 2 называются чистыми, т.е. могут быть описаны волновыми функциями. В системе, состоящей из двух сепарабельных подсистем, действия, выполненные над подсистемой 1, не изменяют свойства подсистемы 2.

### Система, состоящая из двух подсистем 1 и 2, называется запутанной, если:

Подсистемы 1 и 2 называются зацепленными. Действия, выполненные над подсистемой 1, изменяют свойства подсистемы 2.

Обычно рассматривают запутанные состояния поляризаций двух частиц А и В:

$$|\psi^{+}\rangle = \frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}}$$
$$|\psi^{-}\rangle = \frac{|01\rangle - |10\rangle}{\sqrt{2}}$$
$$|\phi^{+}\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$
$$|\phi^{-}\rangle = \frac{|00\rangle - |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

 $\Psi = |H\rangle_{A}|V\rangle_{B} + |V\rangle_{A}|H\rangle_{B}$  W = Vertical Polarization H = Horizontal Polarization

 $|\Psi\rangle \neq |\psi\rangle_1 \otimes |\phi\rangle_2$ 

или
$$I = \begin{vmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{1} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{0} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{vmatrix}$$

Базис векторов двух максимально запутанных состояний. Состояния Белла (состояния двух кубитов).

Запутанные состояния являются уникальными особенностями квантовых систем и имеют большое фундаментальное и прикладное значение.

### Запутанность состояний и (не)локальность взаимодействий

Нерелятивисткая Квантовая Механика (НКМ) на микроуровне <u>нелокальна</u> по построению: Если системы А и В образуют запутанное состояние, то любое изменение системы А приводит к мгновенному изменению системы В (коллапс вектора состояния).

- Квантовая Теория Поля (КТП) <u>локальна</u> по построению: Если запутанные системы А и В разделены расстоянием L, то любое измерение в системе А ведет к изменению системы В только через время t>L/c (скорость передачи взаимодействия не превышает скорость света).
- Противоречие между НКМ и КТП?
- Экспериментально подтверждено, что в системе двух запутанных фотонов скорость квантовых корреляций (скорость передачи квантовой информации) по крайней мере на 5 порядков больше скорости света! См., например, статью в Nature 2008 г. "Testing the speed of 'spooky action at a distance'": <u>https://www.nature.com/articles/nature07121</u>

# Коллапс вектора состояния происходит со сверхсветовой (мгновенной?) скоростью! Эксперимент выбирает НКМ!

### Запутанность состояний и сверхсветовая коммуникация

(Более подробно см. лекции Н.В.Никитина, НИИЯФ МГУ. <u>http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/index.html</u>)

Локальность НКМ и КТП на уровне макроприборов обеспечивается теоремой Эберхарда (Eberhard, P.H., "Bell's theorem and the different concepts of nonlocality", Nuovo Cimento 46B, 392-419 (1978)): никакими изменениями состояния макроприбора, который связан только с измерениями в подсистеме "A", невозможно повлиять на результат измерения любых наблюдаемых, которые связаны только с подсистемой "B", если между макроприборами отсутствует классический канал связи.

Из теоремы Эберхарда следует, что локальность НКМ на макроуровне восстанавливается за счет принципиальной случайности результата каждого отдельного измерения наблюдаемой.

Но если мы интересуемся не результатом измерения системы A, а самим фактом измерения? Будем считать <u>информацией</u> не результат измерения , а <u>сам факт</u> измерения подсистемы A!

Если систему А не мерить, система В будет в запутанном состоянии. Если систему А померить, то система В будет в декогерентном состоянии. Если свойства системы В в запутанном и декогерентном состояниях разные, то <u>теорема Эберхарда не запрещает сверхсветовой передачи информации?!</u>

### Декогеренция квантовых состояний

Если нет взаимодействия между квантовой системой и прибором: (<u>независимые состояния</u>).

В результате взаимодействия квантовая система запутывается с прибором.



В результате взаимодействия с окружающей средой нарушается суперпозиция и отдельные состояния становятся более независимыми. Общее состояние системы <u>становится смешанным и описывается</u> <u>матрицей плотности</u>.



Декогеренция — процесс потери системой квантовых свойств и перехода из суперпозиционного квантового состояния в смешанное, который происходит в результате взаимодействия системы с окружающей средой.

Как в результате измерения происходит выбор только одного из возможных состояний – пока загадка. См. теорию квантового дарвинизма или много-мировую интерпретацию квантовой теории.

#### (двух-фотонная электрон-позитронная аннигиляция в покое)



Согласно законам сохранения углового момента и четности вектор состояния двух фотонов равен:



- Каждый фотон в паре не имеет определенного поляризационного состояния, но поляризации фотонов в паре перпендикулярны.
- Согласно КМ фотоны находятся в максимально запутанном состоянии.
- Квантовая запутанность таких фотонов не была экспериментально доказана (см.далее).
- Причина: низкая анализирующая способность комптоновских поляриметров.

### Особенности комптоновского рассеяния запутанных фотонов

- 1. Фотоны рассеивается на элементарных квантовых объектах (электронах).
- 2. В процессе рассеивания (измерения) фотон не уничтожается.

3. Поляризацию первичного фотона можно определить как по углу рассеяния фотона, так и по углу рассеяния электрона.

4. Вероятность рассеяния на электроне зависит от поляризационного состояния фотона.

5. Сечение рассеяния первого фотона в суперпозиции поляризационных состояний <u>может</u> <u>отличаться</u> от сечения рассеяния второго (уже декогерентного) фотона, который приобрел другое поляризационное состоянии.

6. Теоретические расчеты выполнены только для <u>одновременного рассеяния двух фотонов</u> на двух электронах. Хотя в реальности процесс имеет двухступенчатый характер.

7. Разница в сечениях рассеяния запутанного и декогерентного фотонов может привести к <u>фундаментальным следствиям (</u>см. слайд 5).

Recoiled Electron (Inoized Electron)

hv' Outgoing Photon

**Incident Photon** 

## Метод измерения поляризации фотонов высоких энергий

Только комптоновское рассеяние применимо для поляризационных измерений!



<u>Преимущественно</u> плоскость рассеивания перпендикуляра поляризации начального фотона. (Импульс рассеянного фотона перпендикулярен поляризации) Для поляризационных измерений используются комптоновские поляриметры.

### Комптоновские поляриметры

Поляризация начального фотона может быть определена по импульсу рассеянного фотона.



# Как доказать запутанность двух фотонов?

a b a' Ko b' N 22.5°

Оптимальные углы между комптоновскими поляриметрами

Традиционный способ: постройка корреляционных коэффициентов и функций, основанных на (CHSH-) неравенстве Белла :

Корреляционные коэффициенты:  $E(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{N(\overrightarrow{a_{||}}, \overrightarrow{b_{||}}) + N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{\perp}}) - N(\overrightarrow{a_{||}}, \overrightarrow{b_{\perp}}) - N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{||}})}{N(\overrightarrow{a_{||}}, \overrightarrow{b_{||}}) + N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{\perp}}) + N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{\perp}}) + N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{\perp}}) + N(\overrightarrow{a_{\perp}}, \overrightarrow{b_{\perp}})}$ 

N – количество совпадений между соответствующими счетчиками двух-канальных поляриметров

Корреляционная функция для идеального поляриметра(А=1):

$$S = E(\vec{a}, \vec{b}) - E(\vec{a}, \vec{b}) + E(\vec{a}, \vec{b}) + E(\vec{a}, \vec{b})$$

Согласно (CHSH-) неравенству Белла: - S<2 для независимых фотонов; - Максимум *S* = 2\sqrt{2} для запутанных фотонов.

Для неидеального поляриметра:  $S \Rightarrow S^{`} = S * A^{2} \Rightarrow S^{`} < 2$ для комптоновского поляриметра ( $A^{2} < 0.5$ )!

Запутанность аннигиляционных фотонов не может быть доказана прямо из неравенства Белла из-за низкой анализирующей стособности(А~0.7)

Для доказательства запутанности аннигиляционных фотонов использовалась азимутальная асимметрия в угловых распределениях рассеянных гамма-квантов (вместо неравенства Белла)

# История исследований аннигиляционных фотонов (теория)

**J. A. Wheeler, Polyelectrons, Annals of the New York Academy of Sciences, vol. 48, pp. 219-238, 1946** Аннигиляция связанной системы из электрона и позитрона (позитроний) приводит к рождению двух гамма-квантов со взаимно перпендикулярной ориентацией поляризаций. (О запутанности речи пока нет!)

Snyder H S, Pasternack S and Hornbostel J, - 1948 Angular correlation of scattered annihilation radiation Phys. Rev. 73 440-448Исходя из вида общей волновой функции двух фотонов и формулы Клейна-Нишины получены угловые азимутальные<br/>корреляциия рассеянных фотонов:(о запутанности речи пока нет!)

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

Зависимость отношения числа зарегистрированных фотонов от угла между фотонами:  $R_{theory}(\theta) = \frac{N(\phi = \frac{\pi}{2})}{N(\phi = 0)} = 1 + \frac{2\sin^4\theta}{\gamma^2 - 2\gamma\sin^2\theta};$   $\gamma = 2 - \cos\theta + (2 - \cos\theta)^{-1}$ R = 2.83 for  $\theta = 82^0$  or R = 2.6 for  $\theta = 90^0$ 



#### 1957 г. – год начала исследования запутанности квантовых состояний!

D. Bohm and Y. Aharonov, 1957, Phys. Rev. 108, 1070:

- Система двух аннигиляционных фотонов запутана и является примером ЕПР-пар.
- > Для запутанной волновой функции  $\Psi = |H\rangle_1 |V\rangle_2 + |V\rangle_1 |H\rangle_2$  R>2.
- ➤ Во всех остальных случаях R<2.</p>
- $\succ$  Для декогерентного (смешанного) состояния  $\rho = \frac{1}{2} |HV\rangle\langle HV| + \frac{1}{2} |VH\rangle\langle VH|$  **R=1**.

#### Неравенства Белла еще нет, но запутанность уже проверяется по величине угловых корреляций!

# История исследований аннигиляционных фотонов (эксперимент)

После теоретической работы (D. Bohm and Y. Aharonov) были проведены около десятка экспериментов по корреляций рассеянных фотонов. Внимание аннигиляционных было исследованию үгловых сконцентрировано на получение максимального *R* - зависимости отношения числа зарегистрированных фотонов от угла между фотонами.

Лучшие экспериментальные значения:

)  $R = 2.47 \pm 0.07$  gravity  $R = 2.33 \pm 0.10$ H. Langhof, Zeitschrift fur Physik 160, 186-193 (1960)  $R = 2.47 \pm 0.07$ L.Kasday, J.Ullman and C.Wu C1971–1996, Nuovo Cimento B 25 633-61 (1975)

В то время (около полувека назад!) авторы статей верили, что они экспериментально доказали запутанность аннигиляционных фотонов. Но многие физики считали, что авторы просто подтвердили теоретические расчеты КМ.

```
Доверие к работе (D. Bohm and Y. Aharonov) было настолько
велико, что никто не померил декогерентные фотоны.
```



Azimuthal angle between scattered photons

В настоящее время несколько экспериментальных групп работают над созданием электрон-позитронных томографов нового поколения, в которых предполагаемая разница в угловых корреляциях запутанных и декогерентных фотонов используется для подавления фона от паразитного комптоновского рассеяния.

После открытия спонтанного параметрического преобразования и простого способа получения запутанных оптических фотонов интерес к аннигиляционным фотонам был потерян на протяжении полувека!

### Современная ситуация с аннигиляционными фотонами

Hiesmayr B.C. and Moskal P. Witnessing entanglement in Compton scattering processes via mutually unbiased bases Sci. Rep.9 8166 (2019) Кинематика комптоновского рассеяния одна и та же для аннигиляционных фотонов в запутанном и смешанном состоянии. Запутанность фотонов экспериментально не доказана. Нужны новые наблюдаемые!

Peter Caradonna *et al.* Probing entanglement in Compton interactions *J. Phys. Commun.* **3** 105005 (2019)

Кинематика комптоновского рассеяния аннигиляционных фотонов в запутанном и смешанном состоянии принципиально разная. R=1 для декогерентных фотонов. Но, к сожалению, последний случай никто не померил.

Watts, D.P., Bordes, J., Brown, J.R. *et al.* Photon quantum entanglement in the MeV regime and its application in PET imaging. *Nature Communications* **12**, 2646 (2021)

Первые измерения декогерентных фотонов появились в этом году. Измерения сделаны с неприспособленным оборудованием (полупроводниковыми гамма-камерами), имеющим чрезвычайно низкую чувствительность. Статистическая точность не дает возможности сделать какие-либо выводы. Авторы предлагают сделать новый эксперимент, чтобы разрешить теоретическую загадку.



#### Оказалось, что такой эксперимент уже выполняется в ИЯИ РАН!

### Экспериментальная установка в ИЯИ РАН

Установка позволяет выполнить измерения (запутанных), начальных так как И декогерентных аннигиляционных фотонов.





- Установка состоит из двух плеч.

- В каждом плече – один комптоновский рассеиватель из

пластмассового сцинтиллятора.

- В каждом плече 16 NaI(Tl) детекторов расположенных под азимутальными углами  $\frac{\pi}{2}$ 

- Каждая пара перпендикулярно расположенных NaI(Tl) детекторов образует комптоновсий поляриметр (16 поляриметров в каждом плече).

# Компоненты экспериментальной установки





Scintillation detectors (Nal)





#### Characteristics of Hamamatsu PMT R6231:

- Operating voltage 1 kV
- Typical gain 2,7  $\cdot\,10^{5}$
- Dynamic region[300 nm,650nm] with sensitivity peak in 420 nm.

Scatterer

# Электроника и система сбора экспериментальных данных







**Триггер** – совпадение двух сигналов в основных рассеивателях противоположных плеч установки.

Электроника: усилители, дискриминаторы, схема совпадений, 4-х канальный блок питания высокого напряжения, разветвитель высокого напряжения. Система сбора на основе ADC64 (Дубна): 64 дифференциальных канала. В каждом канале встроен усилитель, преобразующий отрицательный сигнал с ФЭУ в дифференциальный сигнал.

### Принцип получения декогерентных пар

Декогеренция – переход от запутанного состояния в смешанное, как результат взаимодействия с окружением (дополнительным рассеивателем)

Дополнительный рассеиватель: scintillator GAGG



- Дополнительный рассеиватель расположен перед одним из основных рассеивателей.
   Если первое взаимодействие произощло в дополнительном рассеивателе, то основные рассеиватели детектируют уже декогерентные фотоны.
  - Факт взаимодействия в дополнительном рассеивателе определяется по энерговыделению и времени срабатывания в GAGG сцинтилляторе.

# Отбор событий по временным спектрам



Пик в спектре означает взаимодействие в дополнительном рассеивателе и декогеренцию изначально запутанной пары фотонов.

Для отбора событий использовались как временные, как и амплитудные спектры.

### Амплитудные спектры в Nal детекторах и рассеивателях



детекторе для фотонов, попавших в Nal.

### Угловые азимутальные корреляции рассеянных фотонов запутанной пары

#### Нет взаимодействия в дополнительном рассеивателе!

Теоретические предсказания:

$$P_{12}(E_1, E_2, \phi) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_1}\right)_{NP} \left(\frac{d\sigma}{d\Omega_2}\right)_{NP} \left[1 - \alpha(\theta_1)\alpha(\theta_2)\cos(2\phi)\right] \Rightarrow N(\phi) = A + B \cdot \cos(2\phi)$$
Экспериментальные результаты:



$$R_{theory}(\theta = 90^0) = 2,6$$

 $R_{exp}(\theta = 90^0 \pm 7^0) = 2,56 \pm 0,07$ 

# Отбор декогерентных пар фотонов



Корреляции энерговыделений в основном рассеивателе и NaI детекторах для декогерентных пар

#### Угловые азимутальные корреляции рассеянных фотонов для двух случаев



## Первые результаты доложены на конференциях:

 ✓ Technology and Instrumentation in Particle Physics (TIPP2021), Vancouver, Canada "Setup to study the Compton scattering of entangled annihilation photons" <u>https://indico.cern.ch/event/981823/contributions/4295434/</u>

✓ 10th International Conference on New Frontiers in Physics (ICNFP 2021), Kolymbari, Crete, Greece
 "Angular correlations in Compton scattering of entangled and decoherent annihilation photons"

- https://indico.cern.ch/event/1025480/contributions/4442686/

#### Будущие планы:

- Найти наблюдаемые, которые экспериментально подтвердят запутанность пар аннигиляционных фотонов;
- Сравнить сечения комптоновского рассеяния запутанного и декогерентного фотонов на неполяризованных электронах;

Сравнить сечения комптоновского рассеяния запутанного и декогерентного фотонов на поляризованных электронах;

### Заключение

- <u>Создана экспериментальная установка</u> по исследованию комптоновского рассеяния запутанных и декогерентных аннигиляционных фотонов;
- Измерены <u>угловые азимутальные корреляции</u>между рассеянными фотонами для двух состояний (запутанного и декогерентного) пар аннигиляционных фотонов;
- Угловые корреляции для запутанного состояния находится <u>в соответствии с</u> теоретическими расчетами;
- <u>Не наблюдается р</u>азницы в угловых корреляциях между рассеянными фотонами для запутанного и декогерентного состояний;
- Таким образом, наблюдаемые угловые корреляции <u>не могут</u>быть использованы для доказательства запутанности аннигиляционных фотонов;
- <u>Необходимы</u> новые методы для экспериментального доказательства запутанности состояния аннигиляционных фотонов.

# Спасибо за внимание

### Calibration of energy resolution of scintillation detectors (Nal)



*Peak position for all scintillation detectors of the setup (NaI)* 



### Запутанность состояний и скорость передачи информации

(См. лекции Н.В.Никитина, НИИЯФ МГУ. <u>http://nuclphys.sinp.msu.ru/nseminar/index.html</u>)

Возникает вопрос:

распространяется ли нелокальность НКМ, которая имеет место для микросистем, на результаты измерения при помощи макроприборов?

Иначе говоря:

можно ли в макромире при помощи квантовых объектов передать информацию быстрее скорости света от одного макроскопического наблюдателя другому?

Локальность НКМ и КТП на уровне макроприборов обеспечивается теоремой Эберхарда (Eberhard, P.H., "Bell's theorem and the different concepts of nonlocality", Nuovo Cimento 46B, 392-419 (1978)): никакими изменениями состояния макроприбора, который связан только с измерениями в подсистеме "B", невозможно повлиять на результат измерения любых наблюдаемых, которые связаны только с подсистемой "A", если между макроприборами отсутствует классический канал связи.

Из доказательства теоремы Эберхарда следует, что локальность НКМ на макроуровне восстанавливается за счет принципиальной случайности результата каждого отдельного измерения наблюдаемой.

<u>Теорема о невозможности клонирования произвольного чистого состояния (1982 г.)</u> закрывает все (?) остальные лазейки в попытке сверхсветовой передачи информации.