

## Как обмануть квантовую нелокальность?

Путенихин П.В.  
[m55@mail.ru](mailto:m55@mail.ru)

### Аннотация

Логический анализ явления запутанности с точки зрения квантовой теории приводит к выводу, что опережающее измерение запутанных фотонов в одном канале приводит к созданию во втором канале смеси двух плоскополяризованных потоков с взаимно перпендикулярными поляризациями.

**Ключевые слова:** нелокальность, запутанность, фотон, поляризатор

Рассмотрим простейшую схему эксперимента по проверке квантовой корреляции рис.1. Источник S испускает пару запутанных фотонов  $V_1$  и  $V_2$ , которые встречают на своем пути два поляризатора I и II, расположенные перпендикулярно, то есть с взаимным углом, равным  $\pi/2$ .

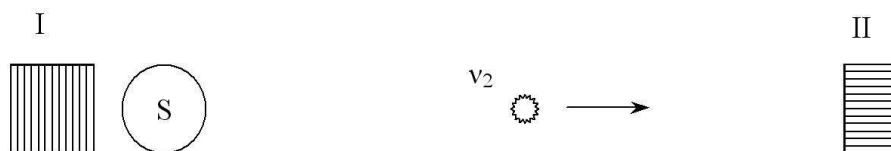


Рис.1 Схема эксперимента для исследования квантовой корреляции запутанных частиц. После коллапса первого фотона  $V_1$  (на рисунке не показан) на поляризаторе I второй фотон  $V_2$  приобретает одну из двух возможных поляризаций: параллельную или перпендикулярную к направлению поляризатора I.

Воспользуемся квантово-механической формулой, дающей вероятность прохождения фотона через поляризатор, если угол между поляризациями равен  $\theta$ :

$$P(\theta) = \cos^2(\theta) \quad (1)$$

Очевидно, в нашем случае **совместных** прохождений фотонов не будет:

$$P_{\perp}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (2)$$

Однако через каждый из поляризаторов некоторые фотоны пройдут. Наблюдатели, находящиеся рядом с поляризаторами, зафиксируют вероятность прохождения фотонов, равную  $1/2$ . Если источник испустит, например, 1000 фотонов, то через каждый из поляризаторов пройдут ровно половина – 500 фотонов. Но это будут не коррелированные фотоны: среди пар не будет ни одной, в которой один из фотонов прошел через поляризатор одновременно со вторым фотоном на другом поляризаторе.

Наоборот, если поляризаторы параллельны, то есть угол между ними равен нулю, то через поляризаторы будут проходить только парные фотоны: если пройдет первый фотон, то второй будет спроектирован в коллинеарную поляризацию и пройдет через свой поляризатор с вероятностью 1. Предположим, что первый поляризатор находится вплотную к источнику S, а второй – на некотором удалении. Поэтому фотоны в направлении 1 будут коллапсировать сразу же при вылете из источника. В этот же момент их парные фотоны будут приобретать поляризацию, параллельную первому поляризатору. Это означает, что выходной поток в сторону второго поляризатора будет состоять словно бы из двух фотонных потоков. Первый из этих потоков – это поток плоско поляризованных фотонов с известным направлением поляризации – параллельной первому поляризатору. Будет и второй поток – из фотонов, которые имеют другое направление поляризации. Попробуем выяснить, какое именно.

Установим на пути потока фотонов второй поляризатор II, параллельный первому. Очевидно, что известный нам поток из плоско поляризованных фотонов пройдет через поляризатор с достоверностью. Известно также, что это ровно  $1/2$  от общего числа всех фотонов, испущенных источников в данном направлении. Исследователь на этой стороне зафиксирует этот факт. Но он может не знать, что фотоны в потоке имеют определенные направления поляризации и скажет, что через поляризатор проходят  $1/2$  от **всех** фотонов в потоке. Он (исследователь) не разделяет этот поток на два и считает, что через поляризатор с вероятностью  $1/2$  проходит **любой** из прилетевших фотонов. Но мы знаем, что в общем потоке имеется известный нам подпоток, который пройдет через поляризатор с вероятностью 1, и их общее количество равно тому количеству, которое зафиксирует исследователь. Следовательно, остальные фотоны **не** пройдут через поляризатор, а будут задержаны с вероятностью 1. То есть из остальных фотонов через поляризатор не пройдет **ни один**. Это означает, что средняя вероятность фотонов в остальном потоке равна 0. Поэтому мы можем с уверенностью сказать, что этот поток **весь** состоит из плоско поляризованных фотонов с поляризацией, перпендикулярной направлению нашего поляризатора (и, соответственно, первого поляризатора), поскольку через поляризатор с достоверностью не проходят только перпендикулярно поляризованные фотоны.

Это обстоятельство не должно вызвать особых возражений и вполне объяснимо. Фотоны, которые не прошли через первый поляризатор, коллапсировали, очевидно, получив направление поляризации, перпендикулярное первому поляризатору и были им поглощены. Парный им фотон автоматически был спроектирован в такое же направление поляризации и тоже был поглощен вторым поляризатором.

Итак, мы можем с достаточной уверенностью заявить, что в рассматриваемой схеме эксперимента по второму направлению излучаются два потока плоско поляризованных фотонов: с вертикальной и с горизонтальной поляризацией (относительно первого поляризатора). Это обстоятельство не противоречит математике квантовой теории.

Повернем второй поляризатор, например, на угол 30 градусов. Фотоны вертикально поляризованного потока пройдут в меньшем количестве, добавятся фотоны из горизонтально поляризованного потока. В соответствие с формулой (1) мы зафиксируем совпадения на выходах двух поляризаторов:

$$P_{30}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (3)$$

Но что произойдет с общим числом фотонов, прошедших через поляризатор? Изменится ли оно? Формула (3) дает нам количество пар фотонов, прошедших через поляризатор и имеющих вертикальную поляризацию. Но есть второй поток фотонов – с горизонтальной поляризацией. Фотоны из этого потока имеют с поляризатором угол 60 градусов и пройдут через поляризатор с вероятностью:

$$P_{60}(\theta) = \cos^2\left(\frac{\pi}{3}\right) \quad (4)$$

Общее число фотонов для потока в N единиц составит:

$$N_{\text{вых}}(30) = \frac{1}{2}N \cos^2\left(\frac{\pi}{6}\right) + \frac{1}{2}N \cos^2\left(\frac{\pi}{3}\right) = \frac{1}{2}N \times \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 + \frac{1}{2}N \times \left(\frac{1}{2}\right)^2 = \frac{1}{2}N \times \left(\frac{3}{4} + \frac{1}{4}\right) = \frac{1}{2}N \quad (5)$$

Таким образом, даже зная, что на поляризатор поступают два плоско поляризованных потока, мы не можем измерить соотношение между ними. Это точно соответствует предсказанию квантовой теории. Заметим, что теория дополнительного параметра (теория локального реализма) утверждает, что во втором канале все фотоны имеют случайные направления поляризации.

Но может быть это связано только с рассмотренными углами наклона поляризатора? Проверим это для произвольного угла  $\theta$ . Принимая во внимание, что углы, образованные каждым потоком с поляризатором, в сумме равны  $\pi/2$ , находим:

$$N_{\text{вых}}(\theta) = \frac{1}{2} N \cos^2(\theta) + \frac{1}{2} N \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \frac{1}{2} N - \frac{1}{2} N \sin^2(\theta) + \frac{1}{2} N \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) \quad (6)$$

Используем уравнение для понижения степени тригонометрических функций:

$$\cos^2(\alpha) - \sin^2(\beta) = \cos(\alpha + \beta) \cos(\alpha - \beta) \quad (7)$$

С учетом (7) приводим (6) к виду:

$$\begin{aligned} N_{\text{вых}}(\theta) &= \frac{1}{2} N - \frac{1}{2} N \sin^2(\theta) + \frac{1}{2} N \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right) = \\ &= \frac{1}{2} N + \frac{1}{2} N \cos\left(\theta + \frac{\pi}{2} - \theta\right) \times \cos\left(\theta - \frac{\pi}{2} + \theta\right) \end{aligned} \quad (8)$$

Сокращаем однородные члены и видим, что второе слагаемое обращается в нуль, поскольку косинус прямого угла равен нулю:

$$N_{\text{вых}}(\theta) = \frac{1}{2} N + \frac{1}{2} N \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) \times \cos\left(2\theta - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{1}{2} N \quad (9)$$

В строгом соответствии с предсказанием квантовой теории **общий** выход фотонов не зависит от угла между поляризаторами.

## Выводы

1. Коллапс одного из пары запутанных фотонов проецирует второй фотон в одно из двух состояний: коллинеарное или ортогональное к направлению первого поляризатора. Вследствие этого на выходе второго поляризатора возникают два плоско поляризованных ортогональных потока.
2. В соответствии с формализмом квантовой теории можно предложить такую трактовку множителя  $1/2$  в уравнении  $P(\theta) = 1/2 \times \cos^2(\theta)$ . Прохождение фотонов через два поляризатора (правый и левый) определяется согласно классической теории вероятности как вероятность совместного наступления двух зависимых событий:
  - $1/2$  - вероятность прохождения первого (левого) фотона через свой поляризатор;
  - $\cos^2(\theta)$  - вероятность прохождения через свой поляризатор второго (правого) фотона при условии, что первый (левый) фотон тоже прошёл, где  $\theta$  - угол между поляризаторами.