Взаимные переходы состояний Белла

Путенихин П.В.
m55@mail.ru

Аннотация
Приведён анализ свойств запутанных частиц (состояний Белла). Показано, что после поворота гейтом Адамара белловских состояний два из них переходят друг в друга

Чистые запутанные состояния частиц описываются четырьмя состояниями Белла следующего вида:

$$\left|\phi^{\pm}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|00\right\rangle \pm \left|11\right\rangle\right)$$

$$\left|\psi^{\pm}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|01\right\rangle \pm \left|10\right\rangle\right)$$

Два из этих состояний в литературе имеют собственные названия. Одно из них:

$$\left|\psi^{-}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|01\right\rangle - \left|10\right\rangle\right)$$

Это ЭПР-состояние, название, возникшее исторически в связи с вопросом о полноте квантовой механики, поднятым Эйнштейном, Подольским и Розеном. Другое состояние, называемое в литературе «Состоянием шредингеровского кота» не имеет чёткого обоснования:

$$\left|\phi^{+}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|00\right\rangle + \left|11\right\rangle\right)$$

Оба эти состояния имеют отличительную особенность от двух других. Они сохраняют свои состояния, соответственно, ортогональности и коллинеарности при поворотах. То есть, вращение сдвоенных поляризаторов, измеряющих эти пары фотонов, всегда дают результат, показывающий, что эти пары частиц, соответственно, ортогональные или коллинеарные. В отличие от них, два других состояния Белла при таких измерениях переходят друг в друга. То есть при одном угле измерения пара частиц ведёт себя как коллинеарная, при других углах - как ортогональная.

Чтобы показать это, произведём вращение каждой из пар запутанных фотонов с помощью гейта Адамара:

$$\left|0\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle + \left|1\right\rangle\right)$$

$$\left|1\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle - \left|1\right\rangle\right)$$

Фотон, прошедший через гейт Адамара, изменяет направление своей поляризации таким образом, что она поворачивается в пространстве на угол 45°. Посмотрим, что происходит с запутанной парой, когда оба фотона проходят через такой гейт. Состояние «шредингеровского кота» использовал в своих экспериментах Ален Аспект, чтобы показать, что запутанные фотоны в строгом соответствии с математикой квантовой механики нарушают неравенства Белла даже в случае, если состояние поляризаторов изменяется «в полёте». Это состояние наиболее удобно для таких экспериментов, поскольку коллинеарная связь фотонов сохраняется для любых углов поляризаторов в пространстве. Оно имеет вид:

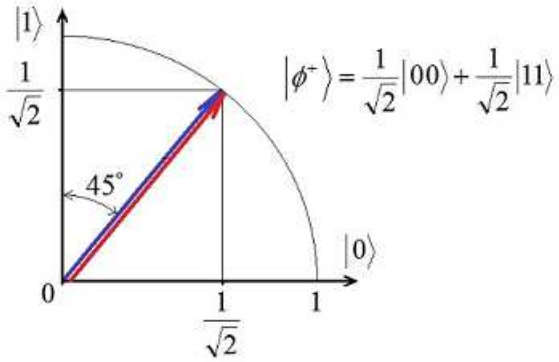
$$\left|\phi^{+}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|00\right\rangle + \left|11\right\rangle\right)$$

Пропустив оба фотона пары через соответствующие гейты Адамара, мы получим:

$$\left|\psi\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle + \left|1\right\rangle\right)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle + \left|1\right\rangle\right)\right) + \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle - \left|1\right\rangle\right)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|0\right\rangle - \left|1\right\rangle\right)\right)\right)$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\left(\left|00\right\rangle + \left|01\right\rangle + \left|10\right\rangle + \left|11\right\rangle\right) + \left(\left|00\right\rangle - \left|01\right\rangle - \left|10\right\rangle + \left|11\right\rangle\right)\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|00\right\rangle + \left|11\right\rangle\right) = \left|\phi^{+}\right\rangle$$

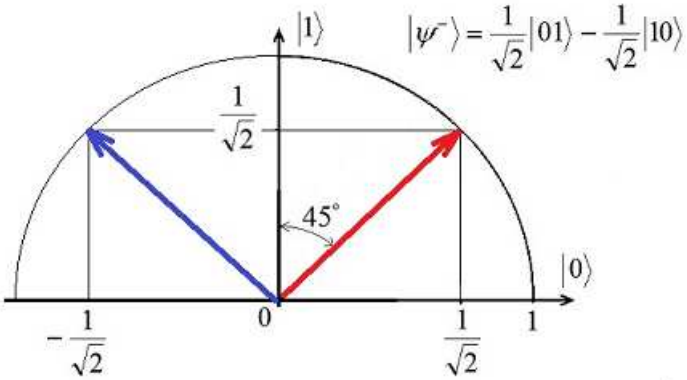
Как видим, при повороте фотонов, волновая функция, описывающая их состояние, не изменила своего вида. Крайне условно, лишь для ассоциаций можно изобразить это состояние и поворот следующим образом:



Один из фотонов пары изображен синим цветом, другой - красным. Понятно, что это условное изображение: запутанные фотоны не имеют определённой поляризации.
Точно такая же картина будет наблюдаться и для ЭПР-состояния:

$$|\psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|01\rangle - |10\rangle\right)$$

Как и в предыдущем случае изобразим его в крайне условном графическом виде:



Пропустив каждый из синглетных фотонов через свой гейт Адамара, мы получим:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle + |1\rangle\right)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle - |1\rangle\right)\right) - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle - |1\rangle\right)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|0\rangle + |1\rangle\right)\right)\right)$$

$$= \frac{1}{2\sqrt{2}}\left(\left(|00\rangle - |01\rangle + |10\rangle - |11\rangle\right) - \left(|00\rangle + |01\rangle - |10\rangle - |11\rangle\right)\right) = -\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|01\rangle - |10\rangle\right) = -|\psi^-\rangle$$

Знак минус перед волновой функцией является фазовым множителем и не влияет на результаты измерений. То есть, при повороте фотонов в ЭПР-состоянии мы получили то же самое ЭПР-состояние.

Совершенно иная картина будет наблюдаться при повороте двух оставшихся состояний Белла. Одно из них напоминает состояние «шредингеровского кота»:

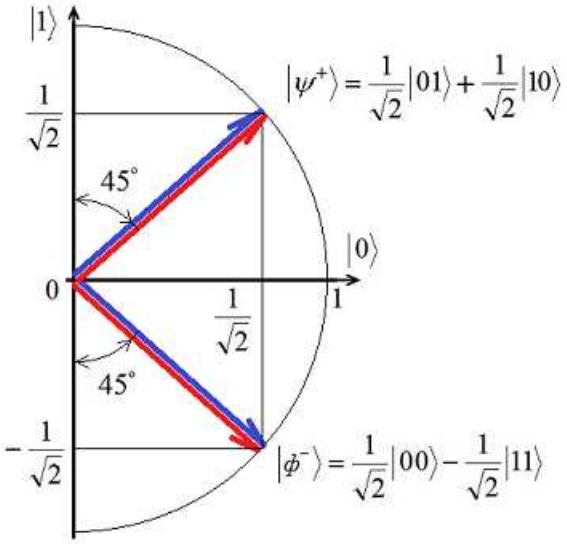
$$|\phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|00\rangle - |11\rangle\right)$$

Как и фотоны в состоянии шредингеровского котоа, фотоны в этом состоянии при измерении поляризаторами в измерительном базисе будут давать одинаковые результаты. Если один из фотонов каждой из пар будет зарегистрирован в состоянии |0>, то и второй также будет зарегистрирован в состоянии |0>. Если один из фотонов пар будет зарегистрирован в состоянии |1>, то и второй фотон пары тоже будет зарегистрирован в этом же состоянии. То есть базисные поляризаторы всегда будут давать коллинеарный результат измерений. Однако, если повернуть поляризаторы на 45° или, что то же самое, повернуть на этот угол оба фотона пары, мы получим иной результат. После поворота фотонов они будут описываться другой волновой функцией:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)\right)-\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)\right)\right)=$$

$$=\frac{1}{2\sqrt{2}}\left((|00\rangle+|01\rangle+|10\rangle+|11\rangle)-(|00\rangle-|01\rangle-|10\rangle+|11\rangle)\right)=\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle+|10\rangle)=\psi^{+}$$

Этот переход можно изобразить (опять же крайне условно) графически:



Как видим, эта волновая функция описывает синглетное состояние фотонов, то есть взаимно перпендикулярные направления поляризации. Если один из фотонов пары будет измерен поляризатором и обнаружен в состоянии |0>, то второй фотон пары обнаружен в состоянии |1>. И наоборот. Фотоны после поворота оказались в ортогональном состоянии запутанности.

Теперь посмотрим, что будет с этой запутанной парой, если её повернуть ещё на 45°. Это также означает: что будет с оставшимся состоянием Белла, если его повернуть на этот угол:

$$|\psi^{+}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle+|10\rangle)$$

После прохождения фотонов пары через гейт Адамара, они будут описываться новой волновой функцией (исходной, если считать, что это двойным поворотом пары):

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)\right)+\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle-|1\rangle)\right)\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle+|1\rangle)\right)\right)$$

$$=\frac{1}{2\sqrt{2}}\left((|00\rangle-|01\rangle+|10\rangle-|11\rangle)+(|00\rangle+|01\rangle-|10\rangle-|11\rangle)\right)=\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle-|11\rangle)=|\phi^{-}\rangle$$

Как видим, если до поворота запутанные фотоны находились в ортогональном (синглетном) состоянии запутанности, то после поворота они (вновь) оказались в коллинеарном состоянии. В первом случае измерение фотонов давало ортогональные поляризации фотонов, во втором (после поворота) - измерения будут давать коллинеарные результаты. Этот переход условно показан графически на том же последнем рисунке. Можно предположить, что существует промежуточное положение (угол поворота поляризаторов), в котором фотоны будут демонстрировать вообще отсутствие корреляции!

Полученный результат является весьма примечательным. Ортогонально-коллинеарное поведение запутанных фотонов является фундаментальной причиной невозможности передачи информации чисто математическими средствами: при любом измерении фотонов на одной стороне образуются два ортогональных потока на другой, причём любой дисбаланс одного из этих потоков всегда компенсируется вторым. То есть, уменьшение прохождения фотонов одного потока через данный поляризатор будет восполнено (компенсировано) увеличением прохождения через него же фотонов из ортогонального потока.

Квантовая механика только описывает, но не предлагает никакого объяснения явлению корреляции (нелокальности). Между запутанными частицами явно просматривается

информационная связь, которая *в принципе* не может существовать без физического носителя. Математическое описание этой связи верное, но ***никакая информация не может быть передана без физического носителя***, будь то частица, поле, волна или почтовые голуби. Только выявление этого носителя и создание способов его регистрации может позволить использовать запутанность для передачи информации.

14.10 - 02.11.2013

Адрес статьи в интернете:
http://samlib.ru/editors/p/putenihin_p_w/prevrash.shtml

Mutual transitions of quantum states Bell

Putenikhin PV
m55@mail.ru

Abstract

Here is shown analysis of the properties of entangled particles (Bell-states). It is shown that after rotation of qubits on gate Hadamard, two of Bell's states transformed into each other.