

**Методологическая база парадокса Эйнштейна – Подольского – Розена,
квантовой запутанности и телепортации.**

1. Квантово-механическое описание реальности является довольно сложным для понимания не только обывателю, но даже серьезным ученым. Даже понятие вероятности в квантовой теории определено не совсем в классическом смысле. Пожалуй, наиболее «опасные» моменты теории кроются фактически в самом ее основании: в истолковании смысла волновой функции системы, состояния системы и процесса измерения физических величин. Некорректное понимание этих моментов теории приводит к возникновению парадоксов. Так, в 1935 г. Эйнштейном совместно с Б.Подольским и Н.Розеном в статье «Можно ли считать квантово-механическое описание физической реальности полным?» был выдвинут тезис о неполноте квантовой механики на основании мысленного эксперимента, итогом которого (в контексте квантово-механического описания) стал противоречащий «здравому смыслу» вывод о (мгновенном) влиянии физически не взаимодействующих систем друг на друга. Критика Эйнштейна была развенчана Бором в его ответной статье с тем же названием. Спор между учеными не подорвал основ квантовой механики. Напротив, он подтолкнул исследователей к более тщательному изучению парадокса ЭПР и эффекта квантовой запутанности. В настоящий момент на основе запутанных пар частиц изучается феномен квантовой телепортации. Сообщается об успешном проведении масштабных экспериментов в этом направлении [3].

2. Парадокс ЭПР является следствием «обывательского» воззрения Эйнштейна и соавторов на понятие состояния квантовой системы [1]. Смысл его заключается в следующем.

Рассматривается распад частицы на пару более не взаимодействующих частиц. Постулируется, что в начальный момент времени (до распада) импульс и положение частицы известны сколь угодно точно. После распада одновременно определяется импульс первой частицы и положение второй частицы. Исходя из закона сохранения импульса это позволяет одновременно определить импульс второй и положение первой частицы, что противоречит соотношению неопределенностей Гейзенберга.

С другой стороны, если изначально воспользоваться квантово-механическим подходом, получим противоречие с базовыми принципами классической физики – нарушается принцип причинности. Пусть измеряется физическая величина A (которой сопоставлен эрмитов оператор \hat{A} с невырожденным спектром a_i) первой частицы, т.е. $\hat{A}\psi_i(x_1) = a_i\psi_i(x_1)$, где $\psi(x_1)$ – волновая функция первой частицы, x_1 – совокупность координат для описания первой частицы. Волновую функцию системы можно представить в виде разложения по ортогональному базису $\{\psi_i(x_1)\}$:

$$\Psi(x_1, x_2) = \sum \xi_i(x_2)\psi_i(x_1) \quad (1)$$

где $\xi(x_2)$ – волновая функция второй частицы. В момент измерения величины A с результатом измерения a_k происходит «редукция волнового пакета»: волновая функция системы коллапсирует до $\Psi(x_1, x_2) = \xi_k(x_2)\psi_k(x_1)$. Таким образом считается, что вторая частица переходит в состояние, определяемое волновой функцией $\xi_k(x_2)$, т. е. состояние обретенное становится «физически реальным». Таким образом, измерение, проведенное на первой частице, никак не связанной со второй частицей, влияет на

состояние второй частицы, причем мгновенно, что противоречит основам физического взаимодействия.

На самом же деле никакого парадокса нет. В первом случае измерение импульса первой частицы переводит обе частицы в состояние с известным импульсом и неопределенным положением, однако последующее измерение (одновременное измерение невозможно) координаты второй частицы снова переводит частицы в состояние с неопределенным импульсом (но определенным положением). Потому говорить об одновременном измерении координат и импульсов обеих частиц бессмысленно.

Во втором случае явно демонстрируется нелокальность квантовой механики – феномен запутанных частиц.

3. В настоящий момент активно изучается феномен квантовой запутанности двух (и более) частиц. Рассмотрим феномен запутанности на примере двух фотонов с суммарным нулевым спином [2]. Такая система описывается волновой функцией вида

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \quad (2)$$

где для краткости введено $|\uparrow\downarrow\rangle = |\uparrow\rangle_1 \otimes |\downarrow\rangle_2$. Несложно показать, что среднее значение произведения проекций обоих спинов на ось $i = \{x|y|z\}$ равна -1:

$$\langle\psi|\sigma_1^{(i)} \otimes \sigma_2^{(i)}|\psi\rangle = -1 \quad (3)$$

Это и выражает суть запутанности: если известен спин одной из частиц, спин второй частицы противоположен по знаку, дополняя суммарный спин до нуля.

Интересно, что феномен запутанности носит нелокальный характер. Иными словами, нет теоретических (и, как выясняется в экспериментах, практических) препятствий двум частицам оставаться запутанными, будучи разнесенными на (огромные) расстояния. Данный факт лег в основу идеи о квантовой телепортации.

4. Основной идеей квантовой телепортации является перенос квантового состояния одной частицы на другую запутанную с первой частицу. При этом для извлечения реальной пользы из этого явления кроме квантового канала (запутанной пары частиц) необходимо также иметь и классический канал связи для передачи сведений о полном состоянии системы.

Рассмотрим идею приложения квантовой телепортации к задаче передачи кубита данных на расстояние [4]. Пусть есть частица А, описываемая волновой функцией $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Ставится задача передать ее квантовое состояние от отправителя к получателю. Для этого отправитель и получатель заранее генерируют пару запутанных кубитов С и В соответственно. Затем совершается измерение над системой из частиц А и С, после чего они переходят в одно из четырех возможных состояний. Но частицы С и В запутаны. Потому в момент измерения В тоже переходит в некоторое определенное состояние. Восстановить состояние частицы А на частице В возможно, зная результаты совместного измерения А и С, для передачи которых и требуется классический канал передачи информации.

Возможность осуществления подобного рода манипуляций очень важна в области защиты данных – квантовой криптографии. Гарантируется, что «перехватить» передаваемую по квантовому каналу связи информацию, при этом не изменив собственно передаваемой информации, невозможно.

Литература

1. В.А.Фок, А.Эйнштейн, Б.Подольский и Н.Розен, Н.Бор. «Можно ли считать, что квантово-механическое описание физической реальности является полным?» // Успехи физических наук. – М.: 1936. – Т. XVII. – Вып. 4
2. И.В.Баргатин, Б.А.Гришанин, В.Н.Задков. «Запутанные квантовые состояния атомных систем» // Успехи физических наук. – М.: 2001. – Т. 171. – №. 6
3. Ализар А. «Китайцы впервые в мире телепортировали фотоны с Земли на орбиту (1400 км)». URL: <https://habr.com/post/373625/>
4. «Квантовая телепортация». URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Квантовая_телепортация
5. «Семинар «Квантовые компьютеры». №. 3. URL: <http://www.rec.vsu.ru/rus/ecourse/quantcomp/sem3.pdf>