

© М.Х. Шульман ([shulman@dol.ru](mailto:shulman@dol.ru))

## Измерения без взаимодействий или взаимодействия без потерь полной энергии?

(20.02.2011. Исправлено 30.01.2013)

Обсуждаются некоторые проблемы взаимодействия частиц в квантовых опытах при наличии интерференции.

### 1. “Корпускулярные” парадоксы в экспериментах с квантовыми частицами

Как известно, в квантовой механике могут быть реализованы так называемые измерения без взаимодействий (interaction-free measurement). Например (см. [DeWeerd, 2002]), при выполнении определенных условий, в известных экспериментах с интерферометром Маха-Цандера прошедшие через него фотоны всегда попадают только в один выходной детектор и никогда не попадают во второй. Однако если в нижнем плече интерферометра заменить зеркало абсолютно поглощающим предметом, то часть фотонов, “обошедшая” этот предмет, все же начнет попадать во второй детектор. Тем самым реализуется возможность выявить присутствие объекта без видимого взаимодействия, потому что свет никогда не попал бы во второй детектор, если бы поглощающий объект отсутствовал: хотя акт попадания фотона во второй детектор непосредственно удостоверяет наличие поглощающего объекта, сам фотон при этом не “встречается” с этим объектом.

### 2. “Волновая” интерпретация

Объяснение этим парадоксам дает, как известно, волновая интерпретация квантовых экспериментов. Ее обычное использование позволяет правильно предсказывать результаты опытов, но мне хотелось бы уточнить физический смысл происходящего. Трудности осознания волнового характера квантовых объектов возникают при переходе от больших ансамблей участвующих частиц к опытам с единичными частицами [Shulman, 2008]. Сохранение *отдельными* частицами “волновых” свойств неизбежно приводит к тому, что их поведение должно определяться *вероятностными*, а не детерминистическими законами, причем вероятность регистрации и нерегистрации частицы детектором неминуемо должна сводиться к  $\cos^2\alpha$  и  $\sin^2\alpha$  соответственно, где  $\alpha$  – угловой параметр, характеризующий ортогональность граничных состояний (при  $\alpha=0$  количество регистрируемых частиц равно количеству испущенных, т.е. максимально).

Поскольку  $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$ , полное число частиц, еще не достигших выходного детектора, на самом деле всегда *постоянно*. В рамках волновой модели это полное число частиц должно трактоваться как сумма двух компонент мощности сигнала – активной и реактивной (первая является действительным числом, вторая входит в сумму с множителем  $i$ , т.е. представлена мнимым числом). В конечном счете активная мощность регистрируется выходным детектором, т.е. безвозвратно поглощается им. Реактивная компонента мощности *не регистрируется* выходным детектором, источник и детектор периодически *обмениваются* ей между собой. Тем не менее, она всегда присутствует в канале передачи сигнала, и непоглощающие

фильтры изменяют только *фазу* волновой функции, обеспечивая *перераспределение относительного вклада* активной и реактивной компонент. На формальном языке это означает, что подобная эволюция волновой функции является *унитарной*.

### 3. Заключение

Учет реактивной компоненты волновой функции позволяет понять, что в действительности происходит в ходе так называемых квантовых “измерений без взаимодействия”. В классической механике взаимодействие частиц описывается на основе корпускулярной модели. Такое взаимодействие справедливо учитывает изменение лишь активной мощности (действительного числа), которая в общем случае не сохраняется для каждой из участвующих частиц по отдельности. Пренебрежение реактивной компонентой возможно в этом случае потому, что она по порядку величины намного меньше активной компоненты.

Напротив, в рассмотренных нами квантовых опытах эти компоненты вполне сравнимы. Поэтому полная выходная энергия должна представляться *комплексной* величиной. Ее активная компонента (отвечающая количеству частиц, *зарегистрированных* детектором), переносит энергию и информацию, заключенную в выходном сигнале и, в соответствии с запретом теории относительности, не может распространяться со *сверхсветовой* скоростью. Напротив, реактивная компонента не переносит в среднем никакой энергии, не связана с направленным сигналом и поэтому скорость ее распространения, по моему мнению, априори ничем не ограничена (это относится, в частности, и к ЭПР-опытам).

Сказанное можно сформулировать чуть по-иному. В квантовой области возможны процессы, связанные *только* с изменением *фазы* полной энергии, но не ее амплитуды. Как свидетельствует рассмотрение вышеприведенных опытов, такое *изменение фазы*, хотя и должно рассматриваться в качестве физического взаимодействия, не связано с изменением полной энергии “детектирующей” частицы<sup>1</sup>. В то же время, поскольку *среднеквадратическое* значение абсолютной величины реактивной компоненты энергии *больше* нуля, она вполне может обеспечивать *корреляцию* между граничными параметрами волны в области ее существования, в том числе тогда, когда протяженность этой области соответствует пространственно-подобному интервалу. Разумеется, это связано с нелокальностью, принципиально вытекающей из постулатов квантовой механики.

Подчеркнем, что волновое описание процессов в квантовой механике, гарантирующее их *нелокальность*, формально связано с использованием представления о *стационарных* (не переходных) колебаниях. Проверка того, так ли это на самом деле, сталкивается, кроме всего прочего, с методической трудностью: однократный опыт дает только вероятностный ответ, а повторение опытов, вообще говоря, затрудняет постановку вопроса о нестационарности процесса. Видимо, по этой причине по результатам экспериментальных работ в литературе делаются заключения о запутанности квантовых частиц во временной области (см. [Fedrizzi, 2010], [Wiegner et al., 2011]).

<sup>1</sup> В определенном смысле это похоже на отклонение траектории электрически заряженной частицы в магнитном поле (полное описание электромагнитного поля также является комплексно-значным).

**Ссылки:**

**[DeWeerd, 2002]** Alan J. DeWeerd. Interaction-free measurement. Am. J. Phys., Vol. 70, No. 3, March 2002, p.p. 272-275. <http://www.quantum3000.narod.ru/papers/edu/IFM-AJP.pdf> Русский перевод "Измерения без взаимодействия" доступен по ссылке [http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_translation/Interaction\\_free\\_meas.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_translation/Interaction_free_meas.pdf)

**[Fedrizzi, 2010]** Alessandro Fedrizzi, Marcelo P. Almeida, Matthew A. Broome, Andrew G. White and Marco Barbieri. Quantum correlations "now and then" are weirder than "here and there". ArXiv:1011.1304v1 [quant-ph] 5 Nov 2010. Русский перевод "Квантовые корреляции "сейчас и тогда " более причудливы, чем "здесь и там" доступен по ссылке [http://timeorigin21.narod.ru/rus\\_translation/quantum\\_korr\\_in\\_time.pdf](http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/quantum_korr_in_time.pdf)

**[Shulman, 2008]** М.Х.Шульман. Интерференция: моделирование единичных квантовых событий. [http://timeorigin21.narod.ru/rus\\_quantum/Interf\\_events\\_rus.pdf](http://timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/Interf_events_rus.pdf)

**[Wiegner et al., 2011]** R. Wiegner, C. Thiel, J. von Zanthier and G. S. Agarwal. Quantum interference and entanglement of photons which do not overlap in time. ArXiv:1102.1490v1 [quant-ph] 8 Feb 2011. Русский перевод "Квантовая интерференция и запутывание фотонов, не перекрывающихся во времени" доступен по ссылке: [http://timeorigin21.narod.ru/rus\\_translation/1102\\_1490v1\\_Entanglment\\_in\\_time.pdf](http://timeorigin21.narod.ru/rus_translation/1102_1490v1_Entanglment_in_time.pdf)