

СЪВРЕМЕННИ ЕКСПЕРИМЕНТИ С ДВОЙКА СВЪРЗАНИ ФОТОНИ И “КОЛАПС НА ВЪЛНОВАТА ФУНКЦИЯ”

Емил Вапирев*

“Всеки физик мисли, че знае какво е това фотон. Аз прекарах целия си живот да разбера какво е това фотон, и досега не съм разбрал.”

А. Айнщайн

В бр. 3 от 2000 г. на списание “Светът на физиката” бяха описани реализации на мисления експеримент на Айнщайн, Подолски и Розен (ЕПР) през 1981-1982 гг. от група изследователи, водени от А. Аспе [1, 2]. Основният резултат е, че измерването на поляризацията на единия от двойка фотони, излъчени от един атом и корелирани по поляризация, влияе на резултатите от измерването на втория фотон. Изводът е, че квантовомеханичното описание на двата фотона с една вълнова функция е верният подход и не може да се говори за две независими вероятности.

Вторият експеримент на А. Аспе е много впечатляващ: условията на измерване се изменят по време на полета на фотоните, и ако има някаква причинна връзка между тях, то скоростта на предаване на информация би трябвало да е значително по-голяма от скоростта на светлината. Квантовата механика “работи” и няма забрани да се зададе въпроса “как става това”.

В една своя лекция, публикувана в [3], Р. Файнман казва за последствията от тези експерименти за разбирането на квантовата механика:

“Ние винаги сме имали много затруднения в разбирането на описанието на света, представян от квантовата механика. Поне аз имам, защото съм достатъчно стар и не съм достигнал до състоянието тази материя да е очевидна за мен. Да, аз все още се чувствам неспокоен с нея ... Вие знаете как е, за всяка нова идея са нужни едно или две поколения, докато стане очевидно, че няма проблем. Все още не е станало очевидно за мен, че няма истински проблем. Не мога да определя истинския проблем, поради което

* проф. дфн, Физ. факултет на СУ “Св. Кл. Охридски”

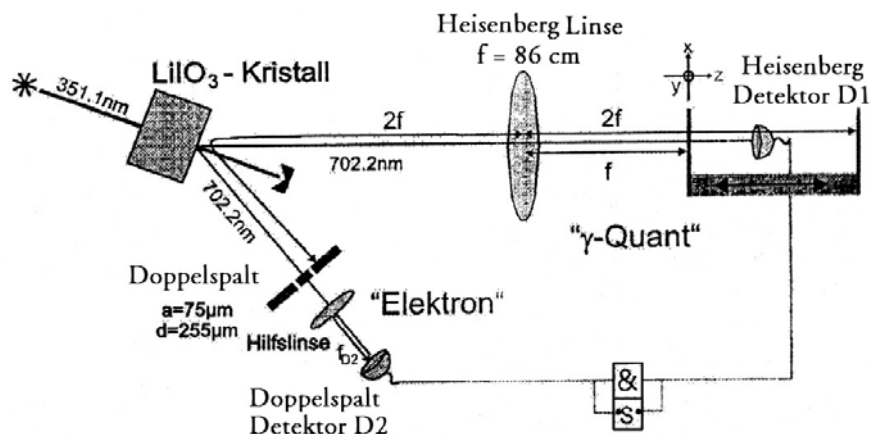
подозирам, че няма истински проблем, но аз не съм сигурен дали наистина няма проблем.”

По-късно, в края на 90-те години, няколко изследователи предложиха нов интензивен източник на двойка корелирани фотони с общ произход за реализация на съвременните версии на мисления експеримент на ЕПР. Предложението е да се използва явлението спонтанно параметрично разсейване или спонтанно параметрично намаляване на честотата (parametric down conversion). При попадане на фотон в нелинеен кристал с определена вероятност се излъчват два фотона, като сумата от енергиите е равна на енергията на първичния фотон. Двата фотона в зависимост от кристала и разсейването са с паралелни или перпендикулярни поляризации.

Първата публикация с предложение явлението спонтанно параметрично разсейване (СПР) да се използва за експерименти подобни на тези на А. Аспе е направено от Клишко [4]. Още тогава, “с върха на перото”, Клишко предсказва поведението на двойката корелирани фотони и въвежда един прост за запомняне подход за предсказване на резултатите от експерименти. Сега този подход се нарича “схемата на Клишко”.

След 1995 г. една група австрийски физици с ръководител Антон Цайлингер, занимаващи се с лазерна физика, започна публикуването на серия от експерименти основани на явлението СПР. Експериментите са един от друг по-впечатляващи. Ще опиша накратко два експеримента: докторските дисертации на Биргит Допфер от 1998 г. и на Грегор Вайтс от 1997 г. [6, 7].

Схемата на експеримента на Б. Допфер е показана на Фиг. 1. Ултравиолетови фотони с дължина на вълната 351,1 nm, излъчвани от лазер на Ar^+ , попада в нелинеен кристал $LiIO_3$ с дебелина около 1 mm. Основното количество фотони преминава през кристала и попада в уловка; около 1 фотон на 10 000 се “разцепва” на два фотона. При ъглите, които са подбрани за максимална интензивност на двойката фотони и при равенство на двата ъгъла спрямо първоначалната посока, се подбират двойки фотони с дължина на вълната 702,2 nm. Регистрацията се извършва чрез точкови лавинни диоди и импулсите се подават на схема за съвпадение.



Фиг. 1. Схема на експеримента на Б. Допфер. Фотоните от ултравиолетовия лазер с дължина на вълната 351 nm попадат върху нелинеен кристал. В малка част от случаите се раждат двойка корелирани по поляризация фотони с дължина на вълната 702,2 nm. Фотоните от единия лъч попадат върху преграда с два процепа (Doppelspalt), фотоните от другия лъч попадат върху една леща (Heisenberg linse). Регистрацията на фотоните се извършва от точкови лавинни диоди и импулсите се подават на схема на съвпадение. Детектор D2 сканира интензитета на светлината зад двата процепа чрез движение по права, перпендикулярна на разпространението на лъча в плоскостта на чертежа. Детектор D1 може да бъде фиксиран на две места: във фокуса или в два пъти фокусното разстояние на лещата. Сумата от разстоянието от лещата до кристала и от кристала до двата процепа е $2f$. Според първоначалната идея фотоните от долния лъч играят ролята на “електрони” от мисления експеримент на Хайзенберг за определяне на координата или импулс на електрони. Фотоните от горния лъч дават информация за мястото или импулса на “електроните”, от които са се разсеяли, поради което “Хайзенберговата леща” наблюдава двата процепа.

В направлението на единия лъч (на схемата - долния лъч) е поставена една пластина с два процепа за наблюдаване на интерференчна картина. В направлението на втория лъч е поставена леща, така че сумата от разстоянията от лещата до кристала и от кристала до двойния процеп е двойното фокусно разстояние, $2f$, или лещата “гледа” двата процепа, ако кристалът се приеме за огледало. Идеята на експеримента идва от мисления експеримент с микроскопа на Хайзенберг, за който по-подробно ще стане дума. Детекторът на фотони от горния лъч (D1) може да бъде поставен на две места: във фокусното или два пъти фокусното разстояние зад “Хайзенберговата” леща. Детекторът зад двата процепа на долния лъч (D2) регистрира фотони, които се концентрират от една помощна леща. Помощната леща не е от значение за експеримента.

Резултатите от експеримента – съвпадения на събития – са следните:

1. Детектор D1 е неподвижен във фокусното разстояние след “Хайзенберговата” леща; детектор D2 чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира интерференционни минимуми и максимуми зад двата процепа;
2. Детектор D1 е неподвижен в два пъти фокусното разстояние след “Хайзенберговата” леща; детектор D2 чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, НЕ регистрира интерференционни минимуми и максимуми зад двата процепа. Резултатът е един широк максимум, сума от интензитети.
3. Детектор D2 е неподвижен; детектор D1, на едно фокусно разстояние след “Хайзенберговата” леща чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира интерференционни минимуми и максимуми, въпреки че пред детектора липсва двоен процеп.
4. Детектор D2 е неподвижен; детектор D1, на две фокусни разстояния след “Хайзенберговата” леща чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира два пика.

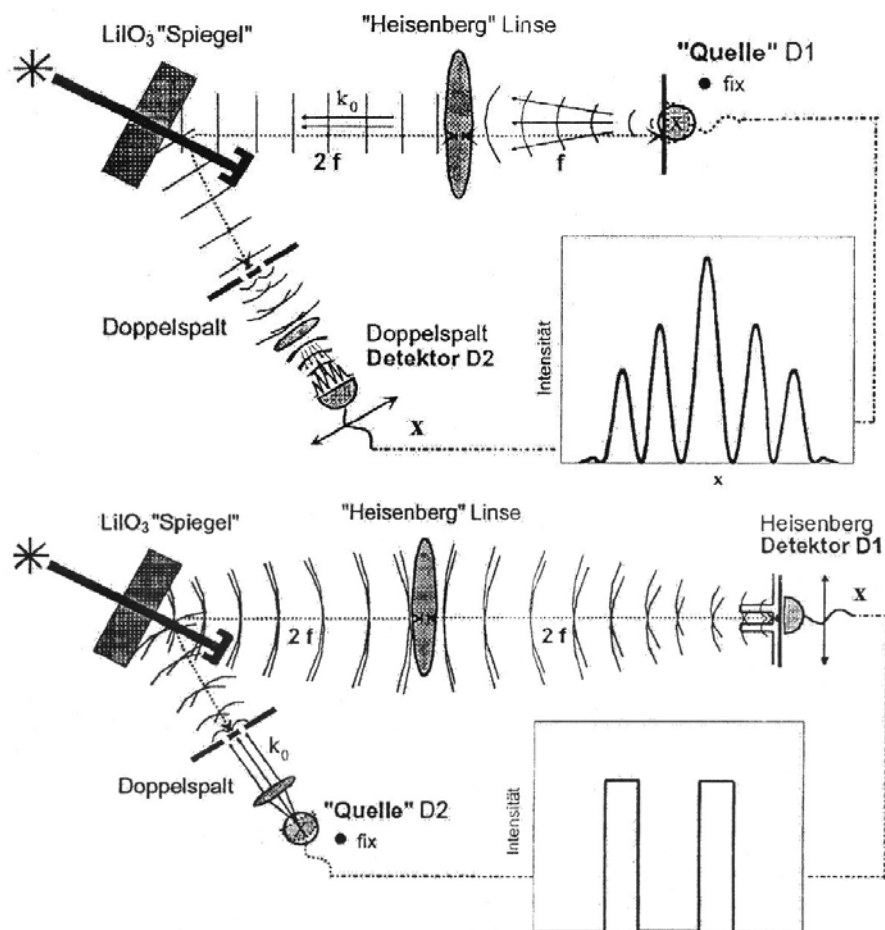
Резултатите наистина са впечатляващи. Какво свързва двата фотона освен миналото? За експериментите на А. Аспе може да се мисли, че двата фотона образуват една макросистема. За тези експерименти може всъщност да се твърди, че двата фотона и кристалът образуват една обща система. Ако има “общуване” между двата фотона, то те общуват чрез кристала, чрез своето минало. Втората възможност е силна корелация по ъгъл между двата фотона и отбор на събития.

Основание за това твърдение са т.н. “картини на Клишко” за предсказване на резултатите от експерименти от типа, описан по-горе. На Фиг. 2а и 2б са показани картините на Клишко за два от случаите: например за наблюдение на интерференционна картина от детектор D1 (случай 1) и наблюдение на два максимума от детектор D2 (случай 4). Идеята, която Клишко извлича от своите уравнения, е следната:

- Ако искаме да предскажем какво ще се наблюдава от детектор D2, формално се приема, че източник на светлина е детектор 1; светлината се “отразява” от кристала и полученият образ на мястото на детектор 2 е очакваният интензитет;

- За картината, получавана от детектор 1, се приема обратното: източник на светлина е детектор 2, светлината се “отразява” от кристала и полученият образ на мястото на детектор 1 е очакваният интензитет;

Идеята за експеримента първоначално е била да се наблюдават двата процепа чрез “лещата на Хайзенберг”. На Фиг. 3. е показана схема на опита за проследяване през кой процеп минава електрон чрез фотон, който се разсейва от минаващите през процепа електрони. Във фокуса на лещата от разсеяни фотони се получава информация за напречния импулс на електрона, но се губи информация от кой процеп е минал. На разстояние $2f$ се измерва процепът (мястото), откъдето е минал електронът, но се губи информацията за импулса. Единият фотон от двойката играе ролята на електрон и се регистрира от детектор D2; другият фотон “се разсейва” от електрона и се регистрира от детектор D1. Това е причината за разстоянието $2f$ между двата процепа и лещата на Хайзенберг през кристала – “огледалото”.



Фиг. 2а., 2б. Фигури на Клишко за случаи 1(а) и 4(б). Кристалът формално се приема за огледало ("Spiegel") ["Quelle" – източник] (Б. Допфер).

Формалното разбиране на резултатите от експериментите на Б. Допфер според А. Цайлингер е следното:

За случай 1: Детектор D1 във фокусното разстояние след "Хайзенберговата" леща дава информация за импулса на фотон 2 ("електрона"), но изтрива информацията за направлението на фотон 2 или през кой от двата процепа е минал "електрона", поради което

детектор D2 чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира интерференционни минимуми и максимуми зад двата процепа;

За случай 2: Детектор D1 в два пъти фокусното разстояние след “Хайзенберговата” леща дава информация за място или през кой процеп е минал “електронът”, поради което детектор D2 чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, НЕ регистрира интерференционни минимуми и максимуми зад двата процепа.

За тези два случая, когато се губи или “изтрива” информацията за място или за направление (импулс), дори е въведен терминът “квантова гума” (quantum eraser).

За случай 3: Детектор D2 е неподвижен и зад двата процепа се унищожава информацията за това през кой процеп е минал “електронът” и по симетрия детекторът D1 на едно фокусно разстояние след “Хайзенберговата” леща чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира интерференционни минимуми и максимуми, въпреки че пред детектора липсва двоен процеп.

За случай 4: Детектор D2 е неподвижен и зад двата процепа се унищожава информацията за това през кой процеп е минал “електронът” и по симетрия детекторът D1 на две фокусни разстояния след “Хайзенберговата” леща чрез придвижване по линия, перпендикулярна на посоката на разпространение на лъча, регистрира два триъгълни пика – образите на двата процепа.

Ако случаи 1 и 2 са трудни за разбиране с т.нар. “здрав разум”, трудността за разбирането на случаи 3 и 4 се повдига на квадрат. Въпреки обяснението, все пак как става това?

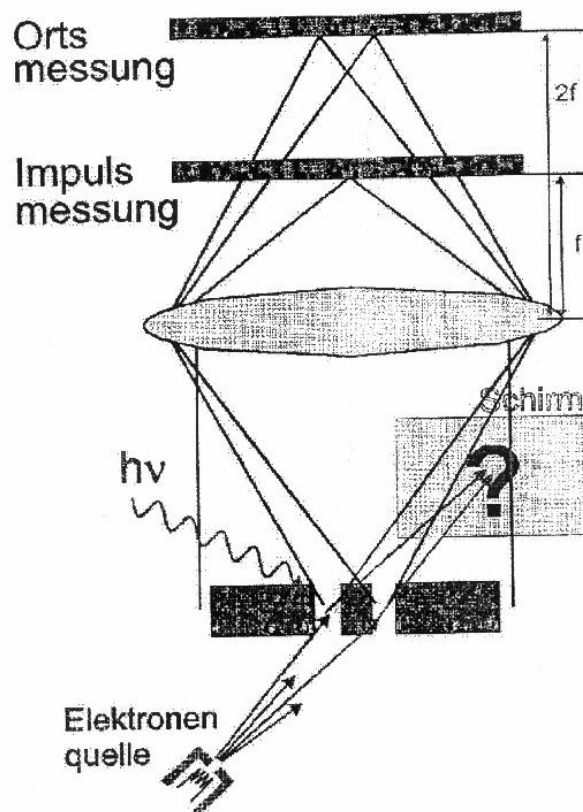
В статията на А. Цайлингер за същия експеримент има още едно много силно твърдение: *ако се работи без съвпадения, ако не ни интересува какво става с горния лъч*, а само с детектор D2 се сканира интензитетът на светлината зад двата процепа, *няма да има наблюдение на интерференция по долния лъч*. Обяснението е, че дори и да не регистрираме фотона от първия (горния) лъч, остава ни потенциалната възможност да възстановим с втори детектор през кой процеп е минал фотон. Същата ситуация съществува и при два

разлитащи се на 180° фотона, където всеки носи информация за посоката на другия. Според А. Цайлингер няма да има интерференция, ако поставим на пътя на единия фотон два процепа, защото от посоката на втория фотон имаме принципната възможност да узнаем през кой процеп е минал фотонът. Дори ако няма втори фотон, а само има откат на излъчващата система, пак според автора няма да има интерференция.

Подобен експеримент е проведен от Д. В. Стрекалов и сътрудници през 1995 г., където без съвпадения зад двойния процеп не се наблюдава интерференчна картина, което е обяснено от авторите с разходимия падащ лъч, който замазва картината [8]. Със съвпадения резултатите са подобни на Допфер. В статията появата на “призрачна” интерференция в лъча, където няма двоен процеп, се обяснява със силната корелация по ъгъл между двойката фотони и отбирането чрез съвпадения на събития. Такова обяснение премахва мистичната връзка чрез миналото.

Съвсем накратко за експеримента на Г. Вайтс [6]. Експериментът е пълно повторение на втория експеримент на А. Аспе (виж бр. 3/2000 на “Светът на физиката”) с малки, но съществени разлики:

- Вместо източник на корелирани по поляризация каскадни фотони се използва източник, основан на явлението СПР (както в експеримента на Б. Допфер);
- Двата корелирани фотона се фокусират с телескопни системи и се вкарват в два световода. Общата дължина на световодите е 1000 m или 2×500 m;
- Двете детекторни системи са на разстояние по права линия на около 400 m, а по световодите са на разстояние 1000 m. Деполяризацията по световодите е незначителна - около 1 %;
- Измерват се съвпадения между събития като функция на ъгъла между двата анализатора на изхода на двата световода. Ъглите между двата анализатора се изменят много бързо по случаен начин чрез един физически генератор на случайни числа.



Фиг. 3. Микроскоп на Хайзенберг за измерване през който минава електрон. С фотон, който се разсейва от електрона, се измерва или мястото (Orts messung) в два пъти фокусното разстояние или посоката (Impuls messung) във фокуса на лещата (Б. Допфер).

Оказва се, че както в експериментите на А. Аспе, неравенствата на Бел [виж напр. 7] се нарушават и двата фотона се държат като една квантова система. Ако има взаимодействие между двата фотона при “колапса на вълновата функция”, то оценената скорост на разпространение е повече от 10 пъти скоростта на светлината. Оценката се основава на времето на разпространение, времето за въртене на поляризацията и регистрацията на двата фотона.

На основата на предаване на фотони по световоди по-късно бяха направени експерименти по предаване на състояние на един атом на друг чрез втория фотон, без да има физическа връзка между двата края на оптическия кабел, освен чрез миналото, чрез нелинейния кристал.

До известна степен тези изследвания бяха дискредитирани от вестникарски шум около тях с твърдението, че е наблюдавана “квантова телепортация”. Според вестниците изглеждаше, че днес-утре ще започне телепортиране и на хора. Всъщност експериментите са безкрайно интересни и най-важното - за тях не са нужни ускорители, реактори или някаква друга свръхскъпа апаратура. Апаратурата не струва “гига” долари, нито “мега” долари - може би няколко “кило” долара. Това е по силите ни. Останалото – схеми на съвпадения и детектори го има в повечето лаборатории със средни експериментални възможности. Тъй като не съм лазерджия, за мен най-голям проблем е ултравиолетовият лазер.

Думите на А. Айнщайн, послужили за мотото на тази статия относно що е това фотон, заимствах от работата на Клишко от 1988 г. В края на статията Клишко сам си отговаря що е това фотон:

“Във всеки случай сега аз точно зная какво е фотон: това е нещото, което по-горе е означено със символите $E(x_2)$ и $|1\rangle$ и което може да се приготви в чист вид с помощта на спонтанно параметрично разсейване”.

Ясно ли е?

Всъщност в тези явления може би проблемът не е що е това фотон, а по-скоро как става така, че изглежда въздействието върху единия обект се предава със скорост по-голяма от скоростта на светлината върху втория обект, или в термини на квантовата механика, която още веднъж показва, че работи – какво е това “колапс на вълновата функция”.

Последствия за квантовата механика явно ще има, защото сега още по-остро се поставят въпросите защо и как. Или може би, както казва по-горе Р. Файнман, няма да минат още едно-две поколения физици и ще свикнем и няма да задаваме въпроси. В това не вярвам.

Последствия ще има още сега, най-малкото в теорията на относителността, тъй като, ако се потвърди наблюдението за въздействие със скорост по-голяма от скоростта на светлината, ще

започнат да “сверяват часовници” чрез “колапс на вълновата функция” на двойка свързани фотони.

Явно са нужни нови и по-чисти експерименти.

Литература:

1. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **47**, No. 7, (1981) 460.
2. A. Aspect, J. Dalibard, G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, No. 25, (1982) 1802.
3. R. P. Feynman, *Int. J. of Theoretical Physics*, **21**, No. 6/7 (1982) 477.
4. Д. Н. Клишко, *УФН*, **154**, вып. 1, (1988) 133.
5. B. Dopfer, PhD Thesis, Innsbruck, 1998, in A. Zeilinger, *Rev. of Mod. Phys.* **71**, No. 2 (1999) S288.
6. G. Weiths, T. Jennewein, C. Simon, H. Weinfurter, A. Zeilinger, *Phys. Rev. Letters*, **81**, No. 23 (1998) 5039.
7. J. F. Clauser, A. Shimony, *Rep. Progr. Phys.*, **41** (1978) 1881;
Оригиналната статия на J. Bell е в едно неизвестно списание, излизало кратко време: J. C. Bell, *Physics* (Long Island City, N.Y.), **I**, (1964) 195.
8. D. V. Strekalov, A. V. Sergienko, D. N. Klyshko, Y. N. Shih, *Phys. Rev. Lett.*, **74**, No. 18 (1995) 3600.

