

[http://www.timeorigin21.narod.ru/rus\\_quantum/On\\_photon\\_correlations\\_rus.pdf](http://www.timeorigin21.narod.ru/rus_quantum/On_photon_correlations_rus.pdf)

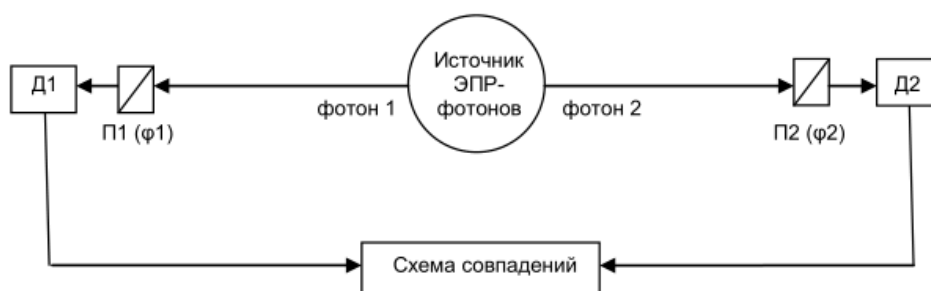
**Суть конфликта – “мгновенность” проявления корреляций в КМ и конечная скорость взаимодействия в теории относительности**

## Содержание доклада

- Нелокальность в квантовой механике. ЭПР-опыты
- “Галактический” парадокс Уилера и парадокс Тетроде
- Переосмысление причинно-следственных отношений
- Решение парадоксов Уилера и Тетроде
- “Отложенный” выбор поведения фотонов
- О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой
- Заключение

- 1 -

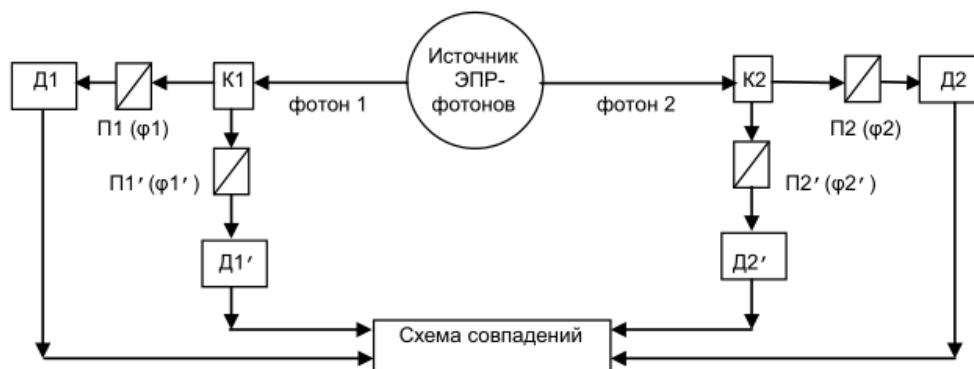
## Схема “статического” ЭПР-эксперимента



Вариант эксперимента, лежащего в основе ЭПР-парадокса: когда измеряется поляризация одного фотона, тем самым мгновенно предопределяется результат измерения поляризации другого фотона. Статистика зависит только от разности ( $\varphi_1 - \varphi_2$ ) и выявляется схемой совпадения отсчетов детекторов Д1 и Д2.

- 2 -

### Схема “динамического” ЭПР-эксперимента



Углы ориентации поляризаторов  $\Pi$  случайным образом с помощью коммутаторов  $K1$  и  $K2$  изменяются ( $\varphi_1 \leftrightarrow \varphi_1'$ ,  $\varphi_2 \leftrightarrow \varphi_2'$ ) через интервалы времени, малые по сравнению с  $L/c$ , где  $L$  – расстояние между поляризаторами, поэтому детектируемое событие с одной стороны и соответствующее изменение ориентации поляризаторов с другой стороны разделены пространственно-подобным интервалом. Все равно результат (статистика) зависит только от мгновенного значения разности углов.

- 3 -

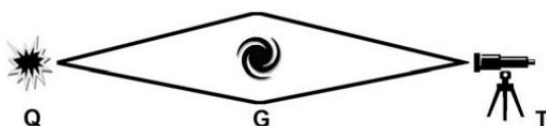
### Анализ ЭПР-экспериментов

В работе [D. Salart et al. Testing spooky action at a distance. *Arxiv:0808.3316v1*] приводится описание эксперимента, выполненного в Швейцарии. Там источник посылал пары фотонов из Женевы на две приемные станции через оптоволоконную сеть. Станции расположены в двух населенных пунктах в окрестностях Женевы, на расстоянии 8.2 и 10.7 км, соответственно. Прямое расстояние между ними равно 18.0 км. На каждой приемной станции фотоны проходили через идентичные несбалансированные интерферометры Майкельсона и регистрировались детектором одиночных фотонов. По оценке авторов работы, нижняя граница скорости “загадочного влияния на расстоянии” между детекторами (в лабораторной системе отсчета) превышает скорость света, по крайней мере, на 4 порядка.

- 4 -

### “Галактический” парадокс Уилера – 1

Уилер предложил такой мысленный эксперимент. Удаленный квазар Q испускает фотон, миллиарды лет летящий к Земле. По дороге этот фотон огибает огромную галактику G, которая и является причиной искривления пути фотона. В конечном счете свет попадает на вход установленного на Земле телескопа T, снабженного интерферометром Маха-Цендера.



На входе телескопа T помещают интерферометр, в который можно ввести (или не ввести) 50% светоделитель, в результате чего будет (или не будет) наблюдаться интерференция. Вводимый светоделитель играет роль “квантового ластика”, т.к. после его прохождения фотоном принципиально нет возможности определить путь, который фотон проделал до этого.

### “Галактический” парадокс Уилера – 2

- Если светоделитель введен, то нет способа выяснить, по какому именно пути прошел фотон огибая галактику, т.е. он поведет себя как волна. Интерференция на выходе имеет место.
- Если же светоделитель НЕ введен, то информация о выборе фотоном одной из возможных траекторий не пропадает, и он поведет себя как частица. Интерференция на выходе отсутствует.

Суть парадокса состоит в том, что выбор между волновым и корпускулярным поведением осуществляется в самое последнее мгновение, когда фотон уже пролетел отведенные ему миллиарды лет путешествия [Wheeler, J. A., 1984, in *Quantum Theory and Measurement*, ed. J. A. Wheeler and W. H. Zurek (Princeton University Press)]. Этот эффект также можно рассматривать как проявление нелокальности - как может излучаемый фотон заранее знать, будет ли введен светоделитель?

### Парадокс Тетроде

В статье [*H. Tetrode. Zeits. f. Physik 10, 317 (1922)*] приводится замечательная по глубине мысль Хьюго Тетроде - голландского физика (1895 - 1931), работавшего в области статистической физики и квантовой теории:

“Солнце не излучало бы, если бы где-либо не нашлось тела, способного поглотить это излучение ... Например, если я вчера наблюдал с помощью телескопа звезду, удаленную, скажем, на 100 световых лет, то не только я знаю, что испущенный ею 100 лет назад свет достиг моего глаза, но также и звезда или ее отдельные атомы уже 100 лет назад знали, что я, который даже еще не существовал тогда, вчера вечером увижу этот свет в такое-то время.”

Но как удаленная звезда может “знать”, где и когда в будущем будет зарегистрирован испущенный ею фотон? С нашей точки зрения, это яркий пример проявления нелокальности, очень близкий к вышеописанному “галактическому” парадоксу Уилера.

- 7 -

### Концепция прямого межчастичного взаимодействия

В статье [*Wheeler J.A., Feynman R.P. Interaction with the Absorber as the Mechanism of Radiation, Reviews of Modern Physics, 17, 156, (1945).*] Уилер и Фейнман предложили схему “мгновенного” взаимодействия электронов со всеми возможными будущими поглотителями испускаемого ими излучения. Эта идея, в частности, позволяет легко вывести т.н. “радиационное затухание” излучателя, но при этом использует довольно сложные представления о комбинации опережающих и запаздывающих волн (см., например, [*Ю.С. Владимиров, Ф.Ю. Турыгин. Теория прямого межчастичного взаимодействия. М.: “Энергоатомиздат”. 1986. 136 с.*]).

С нашей точки зрения, можно рассматривать прямое межчастичное взаимодействие (дальнодействие) как одно из проявлений эффекта нелокальности.

- 8 -

## Сокращение времен и расстояний в теории относительности - 1

Предположим временно, что от квазара или звезды до Земли летит не фотон, а ракета, скорость которой меньше скорости света. Пусть при наблюдении этого путешествия с Земли, т.е. в *лабораторной* системе отсчета, оно длится, скажем, 1 миллиард лет. Но в *сопутствующей* системе отсчета, связанной с ракетой, собственное время путешествия и пройденное расстояние уменьшается, как известно, в  $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$  раз, где  $v$  - скорость ракеты,  $c$  - скорость света. Чем быстрее летит ракета, тем сильнее эффект сокращения, однако причинно-следственная связь событий сохраняется: старт ракеты всегда *предшествует* финишу.

- 9 -

## Сокращение времен и расстояний в теории относительности – 2

Но что будет, если вместо ракеты или любого объекта, движущегося с досветовой скоростью, рассмотреть фотон, летящий со скоростью света?

С одной стороны, с фотоном, *строго говоря*, нельзя связать никакую сопутствующую систему отсчета. Однако можно говорить о том (по этому поводу разногласий нет), что случай фотона является предельным, и в этом пределе (так сказать, “с точки зрения фотона”) собственное время движения фотона и собственное пройденное им расстояние станут равны нулю, а старт и финиш окажутся *одновременными* и разделенными *нулевым* пространственным расстоянием.

- 10 -

## Переосмысление причинно-следственных отношений - 1

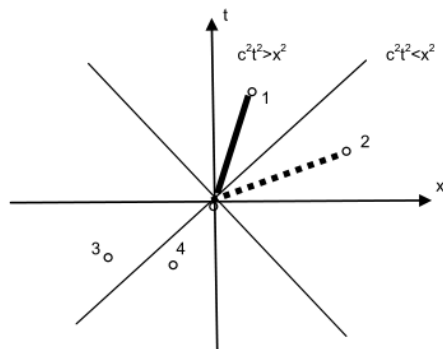
Таким образом, в отличие от ситуации с ракетой, для *фотона* (с его “точки зрения”) причинно-следственные отношения между событиями старта и финиша утрачивают смысл, становясь отношениями между *одновременными* событиями: ни одно из них не предшествует другому и не является следствием другого. Поместим теперь наблюдателя в начало системы координат Минковского и рассмотрим произвольное другое 4-событие.

- Если это другое 4-событие расположено *внутри* светового конуса, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *действительным*.
- Если это другое 4-событие *на самом* световом конусе, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *равным нулю*.
- Если это другое 4-событие расположено *вне* светового конуса, то 4-мерный интервал между этими событиями оказывается *мнимым*.

## Переосмысление причинно-следственных отношений - 2

В статье [А. В. Белинский, М. Х. Шульман. “Квантовые корреляции и сверхсветовое взаимодействие”. *Пространство, время и фундаментальные взаимодействия*, 2016, вып. 4] мы указывали, что переход от причинно-следственного взаимодействия между событиями внутри светового конуса (времениподобный 4-интервал) к некоторому взаимовлиянию между событиями, разделенными световым конусом (пространственноподобный 4-интервал) может описываться переходом от аperiodических процессов к *строго периодическим* процессам. При таком переходе исчезает *направленная* во времени передача информация и/или энергии взаимодействия, хотя среднеквадратичное значение этой энергии оказывается больше нуля, т.е. взаимовлияние двух событий имеет место, хотя ни одно из них не может быть ни причиной, ни следствием другого. При переходе через световой барьер (в частности, при падении в черную дыру) и возникают квантовые корреляции по обе стороны такого барьера [Leonhardt U. *Essential quantum optics. From quantum measurements to black holes*, Cambridge: Cambridge University Press, 2010, 301 p.]

### Переосмысление причинно-следственных отношений – 3



События 1 и 4 **МОГУТ** быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними может однонаправлено передаваться информация и/или энергия (апериодический процесс).  
\*\*\*

События 2 и 3 **НЕ МОГУТ** быть связаны с началом координат причинно-следственным взаимодействием, т.е. между ними, как обычно принято считать, **НЕ МОЖЕТ** однонаправлено передаваться информация и/или энергия. Но **взаимовлияние** может поддерживаться **СТРОГО ПЕРИОДИЧЕСКИМ**

процессом. В этом мы видим решение конфликта между КМ и ТО.

### Решение парадоксов Уилера и Тетроде

Ранее мы рассматривали парадокс Уилера в лабораторной системе отсчета, в которой время движения между стартом и финишем было действительным. Однако *собственное* время движения фотона равно нулю. Поэтому момент старта фотона, покидающего квазар, и момент финиша, когда он проходит или (не проходит) через светоделитель на входе телескопа - это *один и тот же момент* его собственного времени. И формально нет никакого противоречия в утверждении, что фотон “выбрал” - вести ли ему себя как частица или как волна - ровно в *тот же момент времени*, в который наличие или отсутствие светоделителя в телескопе заставило его сделать этот выбор. Согласно теории относительности подобный парадокс не только возможен, но и необходим.

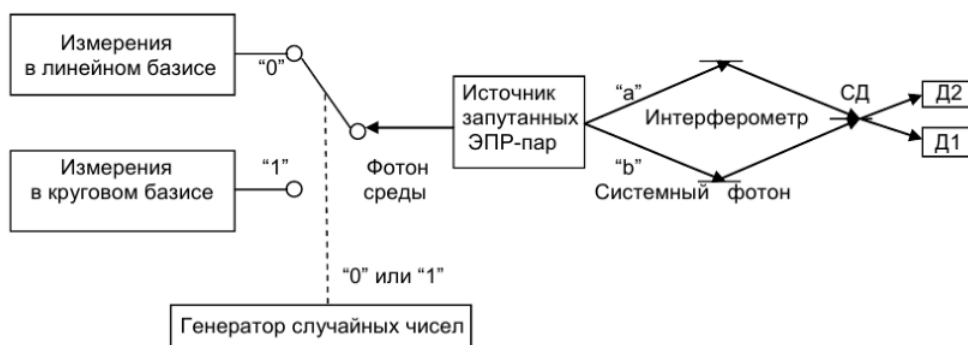
То же можно сказать и о парадоксе Тетроде. Фотон - всего лишь звено строго согласованного взаимодействия между двумя (хотя бы и взаимно удаленными) атомами. “Мгновенность” (в *собственном* времени) такого взаимодействия фотона вполне сочетается с точкой зрения *лабораторного* наблюдателя, что фотон вылетел в случайном направлении и через некоторое *конечное* время столкнулся со случайным поглотителем, хотя эта сочетаемость и кажется на первый взгляд парадоксальной.

### “Отложенный” выбор поведения фотонов - 1

В вышеописанной ситуации с фотоном проявилась идея Уилера об “отложенном выборе” - когда (в *лабораторной* системе отсчета) решение о той или иной конфигурации измерения принимается на заключительной (а не начальной) стадии процесса распространения фотона, или даже еще позже. В двух экспериментальных реализациях (Вена, 2007 и Канарские острова, 2008 - [*X. Ma et al. Quantum erasure with causality disconnected choice. Arxiv:1206.6578v2*]) источник запутанных фотонных ЭПР-пар испускал пару фотонов (“системный фотон” и “фотон среды”). Системный фотон распространялся через интерферометр в одну сторону, а фотон среды являлся объектом поляризационных измерений с другой стороны от источника. Выбор вида измерения, позволяющий либо задать информацию о выборе пути (“a” или “b”), либо получить интерференционную картину для системных фотонов, делались в условиях локальности по Эйнштейну, т.е. причинная связь (в *лабораторной* системе отсчета) между системным фотоном и фотоном среды заведомо отсутствовала.



### “Отложенный” выбор поведения фотонов – 2



Целью этого эксперимента являлась манипуляция типом поведения системного фотона с помощью измерительного воздействия на фотон среды. При измерении фотона среды в линейном базисе выявляется информация о выборе пути системным фотоном, при этом интерференция системного фотона наблюдаться не может (корпускулярное поведение); при измерении фотона среды в круговом базисе информация о выборе пути стирается, возникает интерференция системного фотона, которая зависит от сдвига фаз в плечах “а” и “б” (волновое поведение).

### “Отложенный” выбор поведения фотонов – 3

Если путь системного фотона (справа) до детектора *длиннее*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то парадокса нет – событие манипуляции фотоном среды происходит *раньше*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина, т.е. причина предшествует следствию. Однако в том случае, когда путь системного фотона (справа) до детектора делается *короче*, чем путь фотона среды (слева) до коммутатора, то в *лабораторной* системе отсчета возникает, как принято считать, парадокс – событие манипуляции фотоном среды происходит *позже*, чем на выходе интерферометра возникает или не возникает интерференционная картина, т.е. теперь причина наступает позже следствия! В указанной работе этот парадокс *экспериментально подтвержден*.

#### “Отложенный” выбор поведения фотонов - 4

Для прояснения происходящего рассмотрим известный парадокс близнецов в специально адаптированной версии для двух фотонов. Пусть у нас имеется источник  $S$  (запутанной) пары фотонов и два идеальных оптоволоконных кабеля, имеющих в общем случае две различные длины  $L_1$  и  $L_2$ , концы которых расположены достаточно близко между собой в точке  $D$  (регистратор фотонов). Для определенности будем считать  $L_2 > L_1$ .

Рассмотрим ситуацию в *лабораторной* системе отсчета. Пусть пара фотонов генерируется в момент  $T_0 = 0$ . Первый фотон достигнет детектора  $D$  в момент времени  $T_1 = L_1/c$ , а второй фотон достигнет детектора  $D$  в момент времени  $T_2 = L_2/c$ , где  $c$  - скорость света. Соответственно разность этих времен  $\Delta T$  в лабораторной системе отсчета составит

$$\Delta T = (L_2 - L_1)/c.$$

При этом по *собственному* времени для *каждого* из фотонов все путешествие является мгновенным, разность времен путешествия для них  $\Delta T' = 0$ . Т.е. если бы у фотонов были свои часы, и они были бы синхронизированы в момент излучения пары, то разность между их показаниями в момент прибытия была бы также равна нулю.

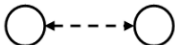
#### “Отложенный” выбор поведения фотонов – 5

Поэтому, с нашей точки зрения, парадокс устраняется так же, как и в предыдущем случае. Вся логика авторов эксперимента (как и в ЭПР-экспериментах) основывается на анализе в *лабораторной* системе отсчета; если же рассмотреть события, используя *собственное* время фотонов, то промежуток времени (и расстояние) между измерениями над системным фотоном и фотоном среды будет стремиться к *нулю*, поэтому никакой рассогласованности в том, что с ними происходит, просто не может быть. Выходной бит генератора случайных чисел в этот момент времени (и в собственном времени фотона) связан с воздействием на фотон среды ровно таким сигналом, какой и должен быть, поэтому вся триада оказывается скоррелированной.

## О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой - 1

Перейдем теперь от фотонов к квантовым частицам с *ненулевой массой покоя*. При анализе эффекта ЭПР можно рассмотреть две взаимно удаляющиеся частицы, у одной из которых измеряется координата, а у другой импульс. Если это запутанные между собой частицы, то сколь угодно точное измерение обеих величин при сохранении взаимной корреляции противоречило бы соотношению неопределенностей Гейзенберга в *лабораторной* системе отсчета. Однако прямой переход к *собственному* времени частиц здесь не решает парадокса, так как частицы движутся с *досветовыми* скоростями. Это верно, если частицы мыслятся идеальными “механическими шариками”.

Perfect mechanic balls  
  
Идеальные механические шарики

Real quantum particles  
  
Реальные квантовые частицы

## О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой - 2

Но в реальности квантовые частицы *нельзя* считать механическими шариками. Массивные квантовые частицы (в частности, электроны) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. Так, для электрона Дираком в 1928 г. было получено релятивистское описание волновой функции в виде системы четырех дифференциальных уравнений для четырех спинорных величин, где одна пара отвечает положительной, а вторая пара - отрицательной энергии электрона, и в каждой паре одна из величин отвечает одному направлению спина, а другая - противоположному. При этом операторы для составляющих скорости электрона не коммутируют между собой, а собственные значения каждого из них в результате измерения обязательно должны быть равны по абсолютной величине скорости света. Такой парадоксальный результат Шрёдингер в 1930 году объяснил наличием у электрона двух компонент скорости - обычной (медленной) и быстро *осциллирующей* с частотой, отвечающей периоду *волны де Бройля* для электрона.

### О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой - 3

В работе [С.В. Вонсовский, М.С. Свирский. // Проблемы теоретической физики. Сб. памяти И.Е. Тамма. М.: Наука, 1972. С. 389] еще более ясно сформулировано, что “дрожательному” движению соответствует представление стационарного состояния электрона в виде *суперпозиции* двух собственных состояний оператора скорости с собственными значениями  $+c$  и  $-c$ . В итоге “эффективная” скорость электрона равна

$$v_z = c^2 \frac{p_z}{E} + \frac{i\hbar c \dot{v}_{z0}}{2E} \exp(-2iEt / \hbar) = (v_z)_{\text{средн}} + (v_z)_{\text{осц}}$$

здесь  $p_z$  – проекция импульса,  $E$  – энергия частицы,  $\dot{v}_{z0}$  – значение  $\dot{v}_z$  при  $t=0$ . Именно *среднее* значение скорости  $(v_z)_{\text{средн}}$  определяется значением *реально измеряемого* импульса  $p_z$  частицы. Направления средней скорости и импульса совпадают только в стационарных состояниях с положительной энергией, тогда как в состояниях с отрицательной энергией они антипараллельны.

### О распространении гипотезы на частицы с ненулевой массой - 4

Аналогичные представления о *безмассовых* “zig” и “zag” компонентах реального электрона описаны в книге [Р. Пенроуз. *Путь к реальности, или законы, управляющие Вселенной. Полный путеводитель. Москва-Ижевск, РХД, 2007. 910 с.*]. При такой интерпретации частица “zig” выступает как источник для частицы “zag”, а частица “zag” — как источник в отношении частицы “zig”, *сила связи между ними определяется величиной массы покоя.*

Таким образом, при движении *одиночного* электрона возникает, с одной стороны, “мгновенное” взаимовлияние между начальной и конечной точкой, а с другой стороны – “*эффективное*” движение электрона с *досветовой средней скоростью*. Фактически это приводит к концепции волны-пилота де Бройля-Бома.

## Концепция де Бройля Бома – 1

В 1923 Луи де Бройль опубликовал гипотезу о том, что частицы с ненулевой массой покоя (например, электроны), как и фотоны, обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами. При этом движение частицы управляется некоей волной-пилотом. В 1952 г. Дэвид Бом, развивая его идеи, опубликовал две связанные общей концепцией статьи [*D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. I, Phys. Rev. 85, 166-179(1952); A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables. II, Phys. Rev. 85, 180-193 (1952)*], где предложил перейти от одного уравнения Шрёдингера для комплекснозначной волновой функции  $\Psi = \sqrt{\rho} \exp(iS/\hbar)$  с внешним потенциалом  $V$  :

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left( -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \Psi$$

к системе двух связанных уравнений для двух действительных величин – квадрата модуля амплитуды  $\rho$  и фазы  $S$  волновой функции:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left( \rho \frac{\nabla S}{m} \right) = 0, \quad \frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V + Q = 0.$$

## Концепция де Бройля Бома – 2

Здесь

$$Q \equiv \frac{\hbar^2}{4m} \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{\nabla \rho}{\rho} \right)^2 - \frac{\nabla^2 \rho}{\rho} \right]$$

есть так называемый *квантовый потенциал*. Первое уравнение представляет собой уравнение непрерывности для плотности вероятности  $\rho$ . Второе уравнение вместе с квантовым потенциалом описывают эволюцию поля фазы, управляющей движением квантовых частиц.

Фаза в уравнении Бома оказывается *нелокальным* параметром, ее динамика зависит от специфического квантового потенциала который, в свою очередь, зависит исключительно от *неравномерности* плотности распределения в пространстве. Наличие квантового потенциала отличает квантовое описание от классического, где *никакого аналога этому члену нет*. Квантовый потенциал обеспечивает в общем случае так называемую *запутанность* между частицами, т.е. тот факт, что отдельные траектории (которые в бомовской интерпретации имеют физический смысл) не независимы одна от другой и не описываются отдельными независимыми волновыми функциями.

- 24 -

## Концепция де Бройля Бома – 3

Бом утверждал, что фазу следует рассматривать как “скрытый параметр” в смысле фон Неймана. Джон Белл объяснил допустимость этого скрытого параметра – в противоречии с утверждением фон Неймана – тем, что фаза волновой функции *нелокальна*. Однако Леггет показал [A. J. Leggett. *Nonlocal Hidden-Variable Theories and Quantum Mechanics: An Incompatibility Theorem. Foundations of Physics, vol. 33, № 10, October 2003*], что и нелокальные теории скрытых параметров ограничены неравенствами, которые нарушаются квантово-механическими предсказаниями.

*С нашей точки зрения, справедливость концепции де Бройля-Бома теоретически вытекает как раз из предложенной нами модели, в которой, “с точки зрения фотона (или любой распространяющейся со скоростью света компоненты)”, проблема нелокальности просто отсутствует.*

- 25 -

## Концепция де Бройля Бома – 4

Между тем, специалисты, работающие в рамках этого подхода, получили ряд глубоких, важных и весьма общих результатов, рассчитав картины дифракции и интерференции для множества как стандартных, так и нетривиальных конфигураций, в частности – для задач физической химии

Так, в публикации [Michel Gondran, Alexandre Gondran. Measurement in the de Broglie-Bohm interpretation: Double-slit, Stern-Gerlach and EPRB. ArXiv: 1309.4757v1] а) представлены результаты численного моделирования для двухщелевого эксперимента с электронами, б) приводится аналитическое выражение для волновой функции в опыте Штерна – Герлаха, в) исследуется версия Бома эксперимента Эйнштейна-Подольского-Розена (ЭПРБ-эксперимент). Его теоретическое решение в пространстве и времени показывает, что когда каждый атом обладает координатой и спином, то существует причинная интерпретация.

Ниже приводятся результаты, полученные авторами цитируемой работы.

- 26 -

## Моделирование двухщелевого эксперимента

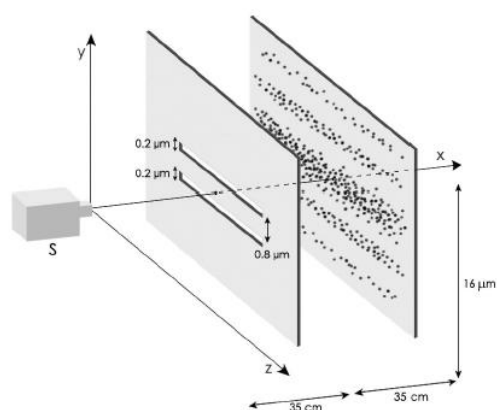
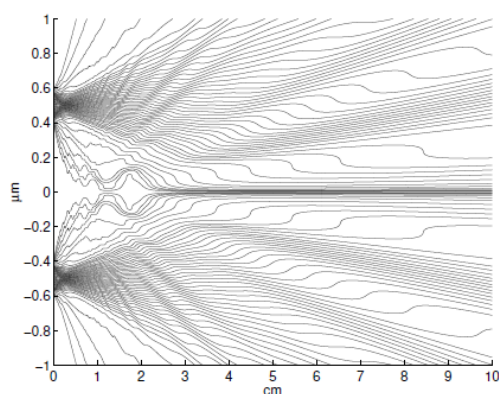


Диаграмма двухщелевого эксперимента с электронами.

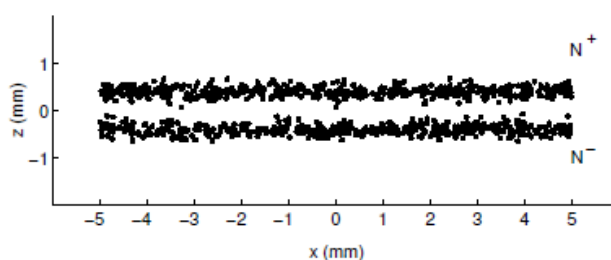


Расчетные траектории 100 электронов

- 27 -

## Моделирование опыта Штерна-Герлаха

Исторически эксперимент Штерна-Герлаха был первым, который помог установить квантование спина. *Учитывая пространственное разложение на две компоненты спина*, авторы цитируемой работы сумели объяснить декогеренцию и продемонстрировать три постулата измерения: квантование, статистическую интерпретацию Борна и редукцию волновой функции.



Расчетные следы 1000 атомов серебра на детекторе.

## Физическое объяснение нелокальности в ЭПРБ-эксперименте

Из волновой функции двух запутанных частиц авторы цитируемой статьи находят спины, траектории, а также волновую функцию каждой из двух частиц. В такой интерпретации квантовая частица имеет локальное положение подобно классической частице, но она обладает также нелокальным поведением, возникающим из волновой функции. Таким образом, именно волновая функция порождает неклассические свойства. Мы можем сохранить точку зрения на частицу, исходя из представлений о локальном реалистическом мире, но мы должны добавить нелокальное видение с помощью волновой функции. Нелокальные влияния в ЭПРБ-эксперименте распространяются только на ориентацию спина, но не на движение частиц как таковое. Действительно, в волновой функции запутанными являются только спины, но не положения или перемещения. Это ключевая точка в поиске физического объяснения нелокальных влияний.



## Концепция де Бройля – Бома и волновые процессы

Концепция де Бройля – Бома может быть применена не только к частицам с ненулевой массой, но и в физике электромагнитного излучения, физике других волновых процессов (например, акустических). Например, в [Angel S. Sanz. *Quantumness beyond quantum mechanics*. ArXiv:1202.5181v1] было рассмотрено прохождение светового импульса по волноводу. Предполагая, что электромагнитное поле, проходящее сквозь волновод, является гармоническим, оно может быть аппроксимировано плоской волной, модулированной некоторой комплекснозначной амплитудой  $\Psi(r) = |\Psi(r)| \exp(ik_z z)$ , где  $k_z = n_0 k$ ,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны в вакууме, и  $n_0$  – индекс преломления среды. После подстановки этого выражения в уравнение Гельмгольца и пренебрежения наивысшим порядком производной по  $z$  это уравнение, как можно показать, оказывается в действительности изоморфным уравнению Шрёдингера, причем параметр  $k_z = n_0 k$  играет роль “оптической массы”.

## Заключение

Итак, когда осуществляется некоторый опыт, рассматриваемый в различных системах отсчета, *и существенно различным течением времени в этих системах отсчета пренебрегать нельзя*, то совпадение результатов для одних и тех же 4-мерных событий должно иметь *объективный* характер, хотя при этом могут возникать кажущиеся парадоксальными ситуации.

Точно такая же ситуация имеет место и в квантовых экспериментах с нелокальной (в *лабораторной* системе отсчета) корреляцией между фотонами. Сопоставление результатов, полученных в разных системах отсчета, приводит к *кажущимся* парадоксам, которые, тем не менее, неизбежны и отражают различие свойств объектов в разных системах отсчета. Вероятно, “мгновенностью” взаимодействия с “точки зрения фотона” объясняется и сам факт влияния принципиального наличия *информации* о выборе пути на результат измерения: эта информация возникает ровно в тот же момент времени, когда и осуществляется результат.

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**