

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

Квантовый парадокс Вигнера в концепции слабых измерений

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 4 курса 4022 группы
направления 03.03.02 «Физика»
Института физики

Насановой Эльмиры Максимовны

Научный руководитель

доцент, к. ф.-м. н.

Заведующий кафедрой общей, теоретической и
компьютерной физики

профессор, д. ф.-м. н.

Д. В. Чурочкин

В. М. Аникин

Саратов 2023 год

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность Концепция слабых измерений является относительно новым способом получения информации о квантово-механической системе. В данной выпускной квалификационной работе исследуются разные модификации парадокса друга Вигнера, с учётом слабых измерений при которых внешние агенты могут неинвазивным образом тестировать динамику внутри лабораторий. Информация полученная на основе слабых измерений позволяет найти решение парадокса друга Вигнера.

Целью данной выпускной квалификационной работы (ВКР) является изучение одного из возможных разрешений парадокса друга Вигнера.

Для достижения этой цели решались следующие **задачи**:

- Анализ математического аппарата квантовой механики.
- Рассмотрение импульсной модели измерения фон Неймана.
- Рассмотрение концепции слабых измерений.
- Анализ классического парадокса друга Вигнера.
- Анализ парадокса друга Вигнера в концепции слабых измерений.

Краткая характеристика материалов исследования. Данная выпускная квалификационная работа посвящена теоретическому исследованию неклассических явлений.

Структура и объем ВКР. Выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа) включает: введение; пять основных разделов:

1. Постулаты квантовой механики
 2. Измерения в квантовой механике
 3. Установки друзей Вигнера.
 4. Мониторинг лабораторий с неинвазивными минимально возмущающими измерениями.
 5. Обсуждение.
- Заключение.

Список использованных источников (35 наименований). Материалы работы изложены на 47 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, определена цель работы.

В разделе 1 рассмотрен математический аппарат и основные постулаты квантовой физики.

Квантовая механика – это математическая конструкция для построения физических теорий. Сама по себе квантовая механика не сообщает, каким физическим законам подчинена та или иная физическая система, однако даёт математические конструкции и понятия для формулировки этих законов.

Постулаты квантовой механики [1]:

Постулат 1: с каждой изолированной физической системой связывается комплексное векторное пространство со скалярным произведением (т.е. гильбертово пространство), которое называется пространством состояний системы. Система полностью описывается вектором состояния, который представляет собой единичный вектор в пространстве состояний системы.

Постулат 2: эволюция замкнутой квантовой системы описывается унитарным преобразованием. То есть, состояние $|\psi\rangle$ системы в момент времени t_1 связано с ее состоянием $|\psi'\rangle$ в момент t_2 посредством унитарного оператора U , зависящего только от моментов времени t_1 и t_2 :

$$|\psi'\rangle = U|\psi\rangle$$

Связь с конкретной физической моделью, то есть гамильтонианом H определяется тем фактом, что эволюция состояния замкнутой квантовой системы во времени описывается уравнением Шредингера: $i\hbar \frac{d|\psi\rangle}{dt} = H|\psi\rangle$.

Постулат 3: квантовые измерения описываются набором $\{M_m\}$ операторов измерения. Это операторы, которые действуют в пространстве состояний системы, подлежащей измерению. Индекс обозначает результаты измерения, которые могут получиться в эксперименте. Если непосредственно перед этим квантовая система находилась в состоянии $|\psi\rangle$, то вероятность того, что в результате измерения будет получен результат m , задается выражением

$$p(m) = \langle \psi | M_m^+ M_m | \psi \rangle \quad (1)$$

а после измерения система будет находиться в состоянии:

$$\frac{M_m |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | M_m^+ M_m | \psi \rangle}} \quad (2)$$

Операторы измерения удовлетворяют условию полноты:

$$\sum_m M_m^+ M_m = I \quad (3)$$

Условие полноты означает, что сумма вероятностей различных исходов измерения равна единице:

$$1 = \sum_m p(m) = \sum_m \langle \psi | M_m^+ M_m | \psi \rangle. \quad (4)$$

Постулат 4: Пространство состояний составной системы представляет собой тензорное произведение пространств состояний входящих в нее систем.

В разделе 2 изложена концепция измерений по модели фон Неймана и концепция слабых (неинвазивных) измерений.

Гамильтониан связи имеет вид

$$H_{int} = g(t) \hat{A} \hat{P}, \quad (6)$$

где P импульс указателя, $g(t)$ представляет собой гладкую функцию, ненулевую только на отрезке $t_i < t < t_i + \tau$ и такую, что $g \equiv \int_{t_i}^{t_i+\tau} g(t) dt$ рассматривается, как эффективная константа связи. Если g достаточно велико, то можно пренебречь собственными гамильтонианами системы и указателя и считать, что эволюция общей системы в течение короткого промежутка времени определяется только Гамильтонианом взаимодействия и имеет вид

$$\begin{aligned} \psi(t) &= \exp(-ig\hat{A}\hat{P}/\hbar) \psi(t=0) \\ &= \sum_k c_k |a_k\rangle m(X - ga_k) \end{aligned} \quad (7)$$

Измерения называются сильными, если

$$g|a_i - a_k| \gg \sigma \quad (8)$$

В таком пределе, волновые функции указателя $m(X - ga_k)$ для разных собственных значений a_k практически ортогональны друг другу. Иными словами, различные результаты измерений величины A проектируются на различные состояния измерительного устройства.

Измерения называются слабыми, если

$$g|a_i - a_k| \ll \sigma \quad (9)$$

В этом случае происходит сильное перекрытие сдвинутых волновых функций измерителя $\varphi(x - ga_k, t_i)$, соответствующих разным собственным значениям наблюдаемой A , так что, по показаниям прибора невозможно однозначно идентифицировать собственное значение величины A .

Используемая в дальнейшем схема основана на слабых измерениях.

Идея состоит в том, чтобы извлечь информацию о заданном свойстве, представленном наблюдаемой \hat{A} в системе, которая эволюционирует от подготовленного начального состояния $|\zeta(t=0)\rangle$ к конечному собственному состоянию $|b_f\rangle$, полученному после измерения другой наблюдаемой \hat{B} .

Предположим, что результатом измерения \hat{B} в момент времени t_f является b_f и $|b_f\rangle$ обозначает соответствующее собственное состояние, что слабо-связанное пробное состояние после получения b_f равно:

$$|\varphi(t_f)\rangle = \langle b_f | \zeta(t_f) \rangle \exp(-iy A_f^\omega \hat{P}) |\varphi(t=0)\rangle, \quad (10)$$

где

$$A_f^\omega = \frac{\langle b_f | U(t_f, t_\omega) \hat{A} | \zeta(t_\omega) \rangle}{\langle b_f | \zeta(t_f) \rangle} \quad (11)$$

известно как слабое значение \hat{A} .

В разделе 3 рассмотрены парадоксы друзей Вигнера.

Вигнер предложил знаменитый мысленный эксперимент друг Вигнера, в котором представляет лабораторию L_1 , в которой его подруга проводит эксперимент Штерна-Герлаха на атомном спине, а агент W_1 находится вне изолированной лаборатории и в конечном итоге измеряет квантовое состояние лаборатории.

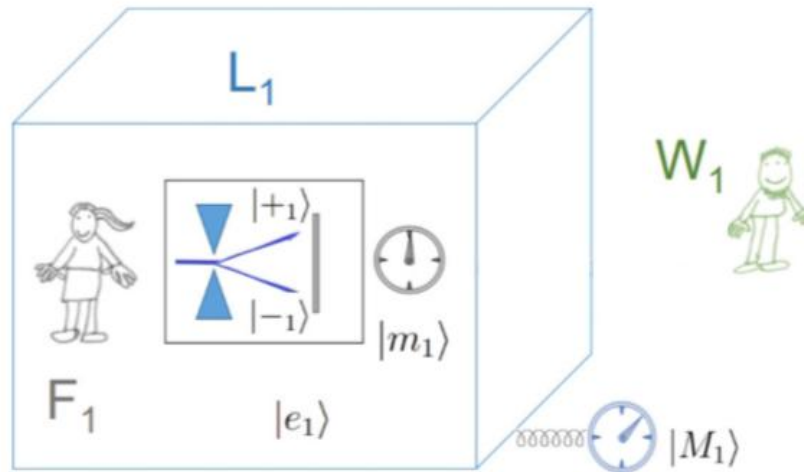


Рисунок 1– Парадокс друга Вигнера

На рисунке 1, подруга F_1 измеряет спин атома своим указателем в состоянии m_1 внутри закрытой лаборатории L_1 . Внешний агент W_1 измеряет L_1 своим указателем в состоянии M_1 .

Вигнер предположил, что L подготовлена в состоянии суперпозиции

$$|l\rangle_L = \sqrt{\frac{1}{2}} (|+\rangle_L + |-\rangle_L) \quad (12)$$

и что подруга измеряет её в базисе $\{|+\rangle_L, |-\rangle_L\}$. Тот же эксперимент теперь может быть описан с точки зрения внешнего агента (W), который будет рассматривать подругу (F) и измеряемую систему (L), а также всю

окружающую среду (e), как большую квантовую систему. Совместное состояние F , L и e после измерения будет иметь вид

$$\sqrt{\frac{1}{2}}(|+\rangle_L |подруга\ заключила\ a = +\rangle_F |env_+\rangle_e + |-\rangle_L |подруга\ заключила\ a = -\rangle_F |env_-\rangle_e) \quad (13)$$

Подруга играет здесь две разные роли. С одной стороны, она является агентом, который наблюдает за результатом измерения a . С другой стороны, она является частью большой квантовой системы, которая эволюционирует унитарно и может допускать состояние, подобное (13), в котором оба возможных значения для a появляются симметрично.

Этот мысленный эксперимент имеет много общего с мысленным экспериментом, предложенным Брукнером. Однако выводы, сделанные в результате двух мысленных экспериментов, довольно сильно различаются. Эксперимент Брукнера привел к важному усилению теоремы Белла. И наоборот, мысленный эксперимент Фраухигер-Реннера можно рассматривать как проверку того, способна ли квантовая теория последовательно описывать своих собственных пользователей.

В разделе 4 рассмотрены лаборатории с неинвазивными минимально возмущающими измерениями.

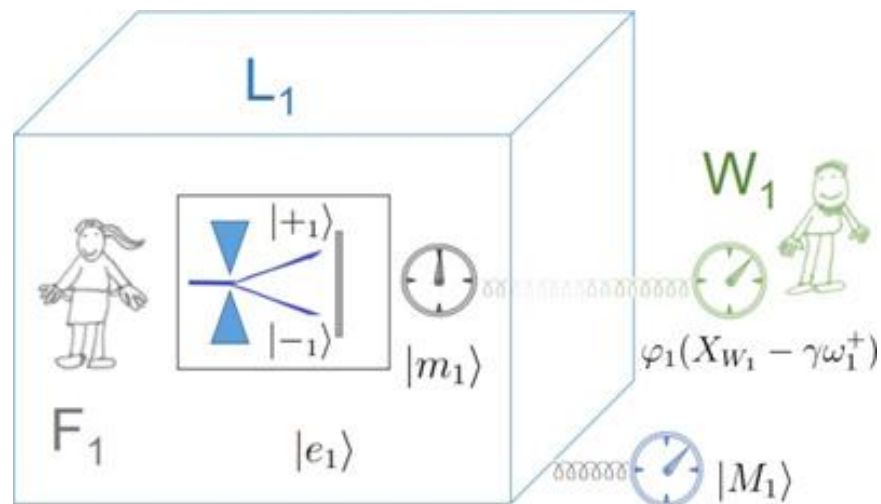


Рисунок 2 – Парадокс друга Вигнера с неинвазивным зондом

На рисунке 2, W_1 дополнительно имеет неинвазивный зонд (онлайн-цвет: тёмно-зелёный), соединённый здесь с указателем подруги $|m_1\rangle$. После того, как F_1 завершит свое измерение, зонд, первоначально находящийся в квантовом состоянии $\varphi_1(X_{W_1})$, переместится в $\varphi_1(X_{W_1} - \gamma\omega_1^-)$, где ω_1^- — так называемое слабое значение.

Если внешний агент W предполагает, что L эволюционирует унитарно, то квантовая теория предсказывает, что зонд укажет на суперпозицию спина

атома или состояний указателя: это несовместимо с F , получившей определенный результат. Вместо этого, если предполагается глобальный коллапс, квантовая теория предсказывает, что слабосвязанные зонды укажут результат, полученный F .

Опираясь на классическую версию парадокса друга Вигнера, предложенную Дойчем [2], Брукнером [3] и Фраухигером и Реннером [4], вводят расширенный парадокс [5], состоящий из двух наборов установок друзей Вигнера, имеющих общие спины $1/2$ в запутанном состоянии.

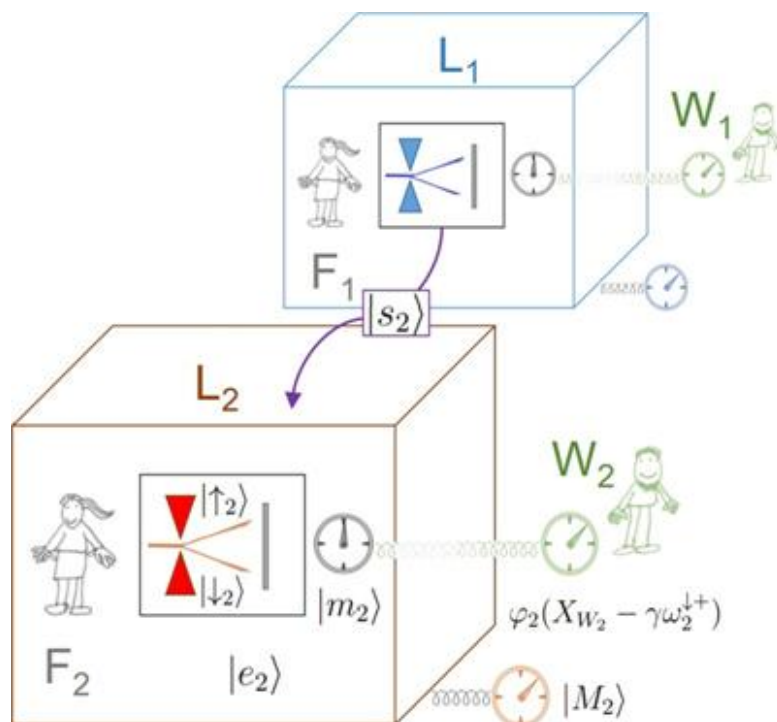


Рисунок 3 – Расширенный парадокс друга Вигнера с неинвазивным зондом

На рисунке 3, в дополнение к оригинальному парадоксу друга Вигнера, воспроизведенному здесь в верхней половине рисунка, подруга F_2 в лаборатории L_2 получает спин в состоянии $|s_2\rangle$, запутанный со спином в L_1 , когда происходит унитарная эволюция. У W_2 есть собственный неинвазивный зонд, подключенный к системам внутри L_2 .

В расширенном парадоксе друга Вигнера, предположение об унитарной эволюции приводит к запутанным зондам. Это признак того, что атомы или указатели, к которым были присоединены зонды, запутались. Но это было бы невозможным, так как F_1 и F_2 объявили о получении определенных результатов. Это несоответствие, когда предполагается унитарная эволюция, похоже на несоответствие для классического парадокса друга Вигнера, с суперпозицией в расширенной версии, принимающей специфическую форму запутанности. Это несоответствие аналогично противоречию, полученному Фраухигером и Реннером [4].

Таким образом, агенты W_i , получив свои исследования, пришли бы к выводу, что они были неправы, предполагая унитарную эволюцию, поскольку исследования согласуются с заявлениями друзей только в том случае, если предполагается глобальный коллапс.

В разделе 5 проведено квантово-механическое обсуждение и обобщение результатов работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной выпускной квалификационной работе в самодостаточном виде представлена аксиоматика квантовой механики. При этом особое внимание уделяется проблеме измерений. В частности, представлена в сжатом виде импульсная модель измерений фон Неймана. Был исследован парадокс друга Вигнера и расширенный парадокс друга Вигнера, в которых внешние агенты проводят неинвазивные измерения внутри закрытых лабораторий. В классическом парадоксе друга Вигнера внешний агент W , который хотел бы проверить унитарную эволюцию подружки, не смог бы сделать никаких выводов, напрямую измеряя квантовые состояния макроскопической лаборатории. С помощью неинвазивного зонда, слабо связанного с атомом или измерительным прибором подружки — со связью настолько слабой, что она не влияет на результаты или их вероятность внутри лаборатории — W сможет сделать вывод о состоянии лаборатории после измерения подружки. В пределах ограничений схемы, в которой лаборатория подружки не может быть названа идеально закрытой, унитарная эволюция может быть эмпирически проверена и, вероятно, признана недействительной, поскольку, если принять эту гипотезу, можно прийти к противоречию между тем, что подружка получила определенный результат, и состоянием зонда.

Для расширенной версии парадокса друга Вигнера, недавно представленной Брукнером [3] и Фраухигером и Реннером [4], было показано, что неинвазивные зонды, вводимые каждому внешнему агенту, были бы запутаны, если бы гипотеза подтвердилась. Но если друзья получили определенные результаты, то зонды не могут быть запутаны (это составляет основу неравенства типа Белла, которое приводит к противоречию, выдвинутому в [4]).

Таким образом парадокс друга Вигнера может быть разрешён при условии если предполагается глобальный коллапс, а это значит что система которая была рассмотрена не может рассматриваться как идеально замкнутая система.

Список цитируемых источников

1. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. М.: Мир, 2006. 824 с.
2. Deutsch D. Quantum theory as a universal physical theory // International Journal of Theoretical Physics. 1985. Vol.24, iss. 1 (January). P. 1–41. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00670071>
3. Brukner Časlav. A No-Go Theorem for Observer-Independent Facts // Entropy. 2018. Vol. 20, iss. 5. Article Number 350. DOI: <https://doi.org/10.3390/e20050350>
4. Frauchinger D., Renner R. Quantum theory cannot consistently describe the use of itself // Nature Communications. 2018. Vol. 9. Article Number 3711. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05739-8>
5. Matzkin A., Sokolovski D. Wigner-friend scenarios with noninvasive weak measurements // Physical Review A. 2020. Vol. 102, iss. 6 (December). Article Number 062204. DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.062204>