

# Проблема квантовых корреляций, нелокальности, несепарабельности и квантовая информация

Керим Гусейнов

Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова

28 января 2023 г.

# Интерпретации квантовой теории

Квантовая теория – довольно успешный математический аппарат описания определенных систем. Однако не существует единственной онтологической картины квантовой теории.

- Копенгагенская: мы можем быть уверены в реальности лишь конкретных результатов измерений. Некорректно задавать вопрос, например, о существовании электрона.
- Дж. Уилер: Вселенная обеспечивает свое существование посредством актов участия наблюдателя. Поведение микрообъекта определяется в момент измерения. Измерение доводит процесс до полноты.
- Множественность миров: каждая возможность реализуется в определенном мире. Количество альтернативных миров увеличивается с каждым измерением.

# Интерпретации квантовой теории

- Квантовологическая: парадоксы квантовой теории не являются проблемами физики, а возникают по вине устаревшей бинарной логики. Логика сознания строится как аппарат, позволяющий справляться с миром. Логика не априорна и должна измениться вместе с картиной мира (аналогично геометрии и СТО/ОТО).
- Неореалистская: квантовые эффекты в конечном итоге обусловлены классическими объектами, которые будут видны в более глубокой теории. По-видимому, опровергнуто экспериментами по неравенству Белла.
- Само сознание наблюдателя создает реальность, а не измерительный прибор без наблюдателя.
- Холистская: Вселенная является единственным целым, а ее части содержат отражение всего мира. Повсюду задан имплицитный порядок.

# Интерпретации квантовой теории

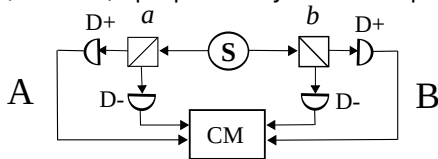
- Д.И. Блохинцев: центральным понятием является квантовомеханический ансамбль, подобный ансамблю Гиббса. Он образуется повторением ситуации, в которых одинаковая система ставится в одинаковую обстановку. Обстановка диктует состояние квантовой системы, но система объективна.
- Интеграл по траекториям Фейнмана говорит о необходимости учитывать все мыслимые траектории системы, соединяющие начальную и конечную точки.
- Гейзенберг: копенгагенская интерпретация с замечанием, что квантовые системы реальны и их природа такова, что нужно вернуться к двум модусам бытия: бытие в возможности и бытие действительного.

# Парадокс Эйнштейна-Подольского-Розена

- Мысленный эксперимент, демонстрирующий особенности квантовой теории в применении к составным системам (неполнота). Назван парадоксом, поскольку Эйнштейн считал полноту *критерием* физической реальности.
- Изначально сформулирован касательно координаты и импульса, но применим к любой паре некоммутирующих наблюдаемых.
- Пусть квантовая система состоит из двух частиц, вылетевших с одинаковыми импульсами из одной точки пространства. На пути одной из частиц поставлен прибор, измеряющий координату. На пути другой – импульс. Авторы утверждают, что при достаточном удалении частиц друг от друга можно (независимо) измерить координату одной и импульс другой, получив таким образом полную информацию, что противоречит принципу неопределенности Гейзенберга.

# Парадокс ЭПР – проверка

- Бом предложил провести аналогичный эксперимент со спинами.
- Белл затем вывел неравенство, однозначно демонстрирующее, зависимость (или независимость) измерений. Изначальная форма не так удобна на практике, но позднее были выведены формулы относительно корреляций измерений.
- В экспериментах определяется корреляция между поляризацией двух (спутанных) частиц при разных углах поляризаторов  $a$  и  $b$ .



- За проведенные эксперименты была выдана Нобелевская премия по физике в 2022 году Алену Аспе, Джону Клаузеру и Антону Цайлингеру.

# Парадокс ЭПР – возражения к экспериментам

- Если детектируются не все частицы, наблюдаемая статистика может не воспроизводить полную. Для полноценного запрета требуется достаточно высокая эффективность регистрации, что представляет проблему в экспериментах с фотонами.
- Для полноценного эксперимента измерения должны производиться на пространственноподобных интервалах. То есть приборы должны быть сильно разделены пространственно, а частицы должны долгое время лететь, будучи спутанными. Последнее является проблемой для заряженных частиц.
- Регистрируемые частицы могут на самом деле не быть спутанными. Требуется достаточно узкое окно регистрации и низкая частота испускания.

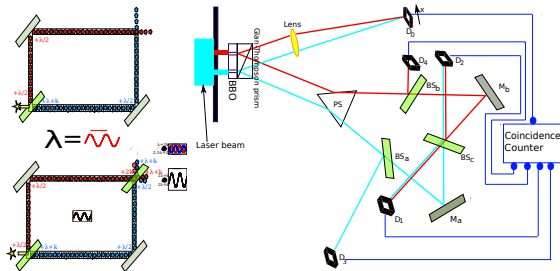
# Парадокс ЭПР – значение

- **Нелокальность.** Нет однозначного согласия на эту тему.  
Некоторые утверждают, что классическая локальность относится только к непрерывным переменным (координата и импульс) а спин может вести себя экзотично.  
Некоторые утверждают, что нелокальность требует отказаться от СТО/ОТО и теории пространства-времени Эйнштейна вообще.  
Тем не менее нелокальность, даже в полном смысле этого слова, не запрещает физическую реальность квантовой теории (хотя многие интерпретации на нее и не претендуют).
- **Несепарабельность (целостность).** Состояние системы невозможно описать измерениями ее частей, даже если включить информацию о всех корреляциях. Считается, что это – внутреннее свойство теории, обусловленное Гильбертовым пространством. Существенный конфликт с понятием объективности, которое требует существования объекта самого по себе.



# Еще одно подтверждение копенгагенской интерпретации

- Квантовый ластик с отложенным выбором. Вместо регистрации частицы сразу ей придается фаза или что-либо подобное, дающее при дальнейшем измерении возможность узнать, где частица прошла. На деле частица проходит сразу везде.
- Подтверждает, что система теряет когерентность из-за наличия информации после измерений.



# Квантовая информация

- Возможность сохранить информацию в состоянии квантовой системы аналогично традиционным битам. Принципиальные отличия: суперпозиция и спутанность.
- Наиболее развита квантовая криптография, позволяющая исключить подслушивание, поскольку перехват сигнала неизбежно приводит к искажению, которое было бы заметно отправителю при проверке.
- Квантовая телепортация (информации) не позволяет передавать данные быстрее скорости света, поскольку требует вспомогательных классических данных.  
Квантовая телепортация позволяет реконструировать зашифрованное состояние частицы на основе конкретного измерения, которое должно быть согласовано у отправителя и получателя.

- Квантовая физика предоставила серьезный вызов философии.
- Многочисленные интерпретации квантовой теории до сих пор соревнуются между собой.
- В большинстве интерпретаций можно выделить конструктивизм.
- Радикальные направления (конструктивизм, холизм) содержат противоречия и приняты наиболее узко.
- Копенгагенская интерпретация наиболее популярна, хоть на ней никто и не хочет останавливаться.
- Проблемы нелокальности и несепарабельности требуют глубокого анализа, как философского, так и физического.