

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?



# Квантовая запутанность в деле: прогулка с котом Шрёдингера до квантового ИИ

**Алексей Семихатов**

Отделение теоретической физики  
Физический институт им. Лебедева РАН



Необходимость **особых правил** “там внутри”

Необходимость **особых правил** “там внутри”

Привычный мир **заканчивается** при погружении вглубь

Необходимость **особых правил** “там внутри”

Привычный мир **заканчивается** при погружении вглубь

**Чуждые** нам правила/законы **поддерживают** наше существование

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

Атомы невозможны по обычным, классическим законам

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
  - Из-за ускорения он должен излучать электромагнитные волны
  - Излучая, он мгновенно отдал бы всю свою энергию и упал на ядро!
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам



# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
  - Из-за ускорения он должен излучать электромагнитные волны
  - Излучая, он мгновенно отдал бы всю свою энергию и упал на ядро!
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
  - Из-за ускорения он должен излучать электромагнитные волны
  - Излучая, он мгновенно отдал бы всю свою энергию и упал на ядро!
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
  - Из-за ускорения он должен излучать электромагнитные волны
  - Излучая, он мгновенно отдал бы всю свою энергию и упал на ядро!
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# Квантовые объекты — не “маленькие горошины”

## Там всё другое:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — не похоже ни на что из вашего непосредственного опыта. Они не ведут себя как волны, они не ведут себя как частицы; они не ведут себя ни как облака, ни как бильярдные шары, ни как грузики на пружинах — ни как что бы то ни было из того, что вам приходилось видеть.

Р. ФЕЙНМАН

## Атомы невозможны по обычным, классическим законам

- Если бы электрон летал вокруг ядра, он испытывал бы ускорение
  - Из-за ускорения он должен излучать электромагнитные волны
  - Излучая, он мгновенно отдал бы всю свою энергию и упал на ядро!
- Атом не может быть устроен как планетная система — электрон не может летать вокруг ядра

Все атомы одного элемента одинаковы благодаря квантовым правилам

# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

Энергия звезд — из слияния протонов

Но температура в центре Солнца недостаточно высока

Между протонами — стена электрического отталкивания

Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:

Это случайный процесс, с низкой вероятностью

# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
  - туннельный эффект
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью

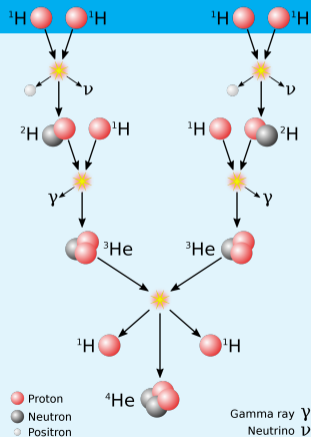
# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
- туннельному эффекту
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью
- это происходит постоянно



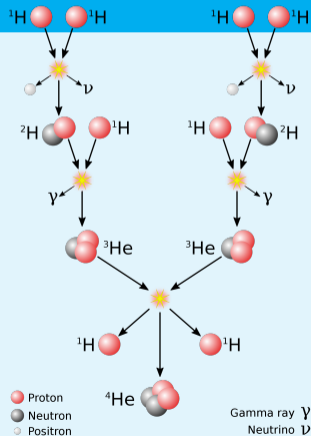
# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
- туннельный эффект
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью
- квантовое туннелирование





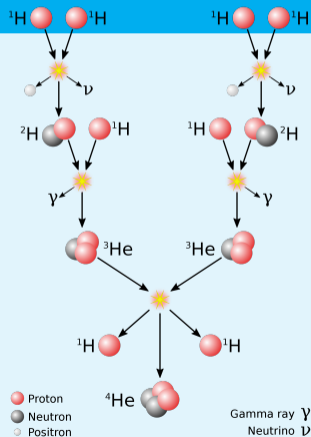
# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- **Между протонами — стена электрического отталкивания**
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью



# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
  - прохождению сквозь стену (туннелированию)
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью



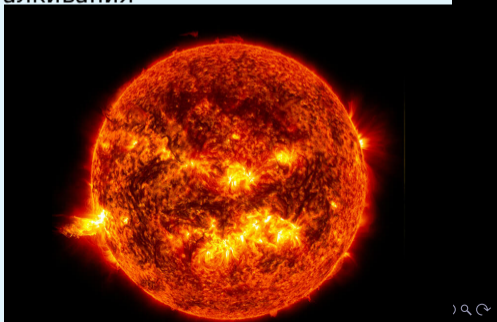
# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
  - прохождению сквозь стену (туннелированию)
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью



# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
  - прохождению сквозь стену (туннелированию)
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью
  - звезды горят квантово, но "квантово неохотно"



# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Солнце горит благодаря квантовым законам

- Энергия звезд — из слияния протонов
- Но температура в центре Солнца недостаточно высокая
- Между протонами — стена электрического отталкивания
- Но протоны могут соединяться благодаря квантовому эффекту:
  - прохождению сквозь стену (туннелированию)
- Это случайный процесс, с низкой вероятностью
  - **звезды горят квантово, но “квантово неохотно”**



# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Квантовая механика — количественная теория

- Самое точное совпадение теории и эксперимента:

связанную с электроном величину удалось точно измерить и точно вычислить:

вычислено = 1.001 159 652 181 61 (24)

измерено = 1.001 159 652 180 59 (13)

# В основе мира — особые квантовые законы

## Квантовые законы определяют природу окружающих явлений

ядра, атомы, молекулы; электроника, магнетизм, лазеры; взаимодействие света и вещества, ...

## Квантовая механика — количественная теория

- Самое точное совпадение теории и эксперимента:  
связанную с электроном величину удалось точно измерить и точно вычислить:

вычислено = 1.001 159 652 181 61 (24)

измерено = 1.001 159 652 180 59 (13)

Квантовый мир необычный

Квантовая механика странная



# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности

## 2. Несовместимость некоторых свойств

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности

## 2. Несовместимость некоторых свойств

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
    - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности

## 2. Несовместимость некоторых свойств

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности

## 2. Несовместимость некоторых свойств

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- **Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности**
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - **Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?**



## 2. Несовместимость некоторых свойств

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

- Имеются величины, которые попарно “враждуют” — не могут одновременно иметь точных значений

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

- Имеются величины, которые попарно “враждуют” — не могут одновременно иметь точных значений
  - например, положение в пространстве и скорость не прикрепляются к электрону одновременно
  - Поэтому электрон не движется ни по какой траектории

Как же описывать квантовые системы?



# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

- Имеются величины, которые попарно “враждуют” — не могут одновременно иметь точных значений
  - например, положение в пространстве и скорость не прикрепляются к электрону одновременно
  - Поэтому электрон не движется ни по какой траектории

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
  - Пример: радиоактивные атомы. Примерно известно, сколько ядер из 1 трлн распадутся за день, но ни про какой отдельный атом ничего сказать нельзя
  - На ядре нет отметки, говорящей о возрасте или о готовности распасться
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

- Имеются величины, которые попарно “враждуют” — не могут одновременно иметь точных значений
  - например, положение в пространстве и скорость не прикрепляются к электрону одновременно
  - Поэтому электрон не движется ни по какой траектории

Как же описывать квантовые системы?

# Необычность квантового мира

## 1. Беспричинный выбор исходов: индетерминизм

- При повторении одной и той же ситуации — различные исходы
- Различные исходы наступают случайно. Предсказывать можно только вероятности
  - Случайность — от незнания или фундаментальная, т.е. ни через что не объясняется?

## 2. Несовместимость некоторых свойств

- Имеются величины, которые попарно “враждуют” — не могут одновременно иметь точных значений
  - например, положение в пространстве и скорость не прикрепляются к электрону одновременно
  - Поэтому электрон не движется ни по какой траектории

## Как же описывать квантовые системы?

- В каких терминах описывать “жизнь” квантовых объектов?

# Как же описывать квантовые системы?

1925–1926:

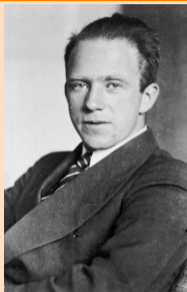
двумя независимыми способами придумали математическую схему

Шрёдингер:

# Как же описывать квантовые системы?

1925–1926:

двумя независимыми способами придумали математическую схему



Гайзенберг  
(1901–1976)



Шрёдингер  
(1887–1961)

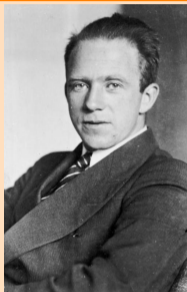
Шрёдингер:

- Главная идея — волновая функция

# Как же описывать квантовые системы?

1925–1926:

двумя независимыми способами придумали математическую схему



Гайзенберг  
(1901–1976)



Шрёдингер  
(1887–1961)



Борн  
(1882–1970)

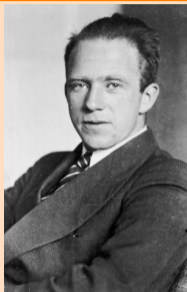
Шрёдингер:

- Главная идея — волновая функция

# Как же описывать квантовые системы?

1925–1926:

двумя независимыми способами придумали математическую схему



Гайзенберг  
(1901–1976)



Шрёдингер  
(1887–1961)



Борн  
(1882–1970)

Шрёдингер:

- Главная идея — волновая функция

Вместо координат и скоростей частиц — волновая функция  
 (“список возможностей”)



Вместо координат и скоростей частиц — волновая функция  
 (“список возможностей”)

Вместо уравнений Ньютона — уравнение Шрёдингера  
 (командует энергия)

Вместо координат и скоростей частиц — волновая функция  
 (“список возможностей”)

Вместо уравнений Ньютона — уравнение Шрёдингера  
 (командует энергия)

Уравнение Шрёдингера порождает запутанность

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте
- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени
- Волновая функция описывает состояние системы в определенный момент времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте



- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяется со временем, но не число  $\Psi$ , а форму

- Формой волновой функции

- Скорость изменения формы зависит от энергии системы

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте



- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
  - Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
  - Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

→ Волновая функция — это не просто набор чисел

→ Волновая функция — это информация

→ Волновая функция — это описание состояния системы

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте



- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте

$$\Psi = a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + e \left| \begin{array}{c} 9 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + f \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots$$

- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени



# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте

$$\Psi = a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + e \left| \begin{array}{c} 9 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + f \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots$$

- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа  $a, b, c, d, \dots$
- “Настоящая” волновая функция:  $\Psi = a|r_1\rangle + b|r_2\rangle + c|r_3\rangle + \dots$
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте

$$\Psi = a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + e \left| \begin{array}{c} 9 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + f \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots$$

- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа  $a, b, c, d, \dots$
- “Настоящая” волновая функция:  $\Psi = a|r_1\rangle + b|r_2\rangle + c|r_3\rangle + \dots$
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте

$$\Psi = a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + e \left| \begin{array}{c} 9 \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + f \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots$$

- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа  $a, b, c, d, \dots$
- “Настоящая” волновая функция:  $\Psi = a|r_1\rangle + b|r_2\rangle + c|r_3\rangle + \dots$
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте

$$\Psi = a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + e \left| \begin{array}{c} 9 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + f \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots$$

- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа  $a, b, c, d, \dots$
- “Настоящая” волновая функция:  $\Psi = a|r_1\rangle + b|r_2\rangle + c|r_3\rangle + \dots$
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

# Состояние квантовой системы — волновая функция

Волновая функция — “список всех возможностей сразу” (суперпозиция)

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прячутся в ОДНОЙ волшебной карте
- Это НЕ колода, а одна карта, у которой нет определенного значения
- Тройка и семерка НЕ складываются в десятку
- Различные значения сопровождаются числами!

Волновая функция  $\Psi$  изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа  $a, b, c, d, \dots$
- “Настоящая” волновая функция:  $\Psi = a|r_1\rangle + b|r_2\rangle + c|r_3\rangle + \dots$
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

- Уравнение Шрёдингера — фундаментальное уравнение квантовой механики

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕВНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕВНОЙ:  
У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.  
Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму
- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕВНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕВНОЙ:

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

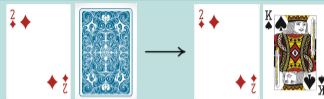
Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей



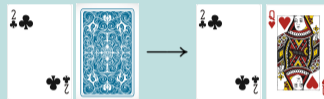
# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{Blue Back} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

У вас король относительно красной двойки и дама относительно черной двойки.

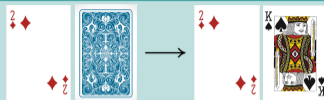
Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{Blue Back} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

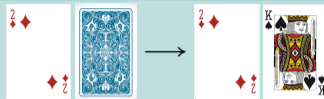
Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

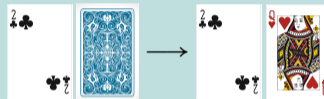
# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{Blue Back} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

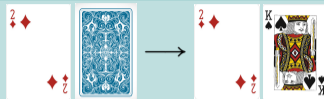
**Наши состояния запутаны**

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

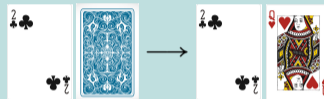
# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \\ \diamond \\ 2 \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \\ \clubsuit \\ 2 \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{Blue Back} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \diamond \\ \diamond \\ 2 \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \\ \heartsuit \\ K \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \\ \clubsuit \\ 2 \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ Q \end{array} \right\rangle$$

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \spadesuit \\ \vdots \\ 2 \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \heartsuit \\ \vdots \\ 2 \heartsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{Blue Pattern} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \spadesuit \\ \vdots \\ 2 \spadesuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{King of Spades} \\ \text{Queen of Hearts} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \heartsuit \\ \vdots \\ 2 \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{Queen of Spades} \\ \text{King of Hearts} \end{array} \right\rangle$$

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

## Пример: квантовый компьютер

- набор кубитов: квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны любые комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3,$  итд.
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left( \left| \begin{array}{c} 2 \heartsuit \\ \heartsuit 2 \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \clubsuit \\ \clubsuit 2 \end{array} \right\rangle \right) \left| \begin{array}{c} \text{blue pattern} \end{array} \right\rangle \xrightarrow{\text{уравнение Шрёдингера}} \left| \begin{array}{c} 2 \heartsuit \\ \heartsuit 2 \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{King of Spades} \\ \text{Queen of Hearts} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \clubsuit \\ \clubsuit 2 \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{Queen of Spades} \\ \text{King of Hearts} \end{array} \right\rangle$$

У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

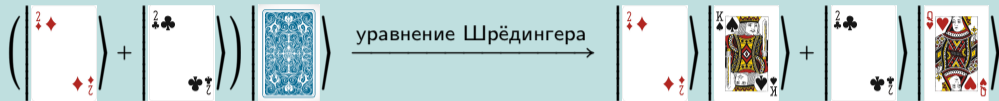
## Пример: квантовый компьютер

- набор кубитов: квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны любые комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3,$  итд.
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

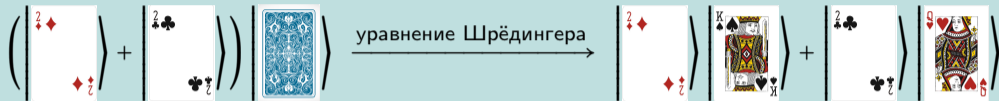
## Пример: квантовый компьютер

- набор кубитов: квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны любые комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3,$  итд.
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

## Пример: квантовый компьютер

- набор кубитов: квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны любые комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3,$  ИТД.

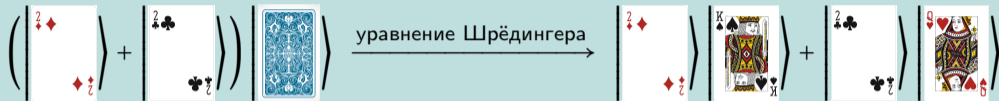
“Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера



# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

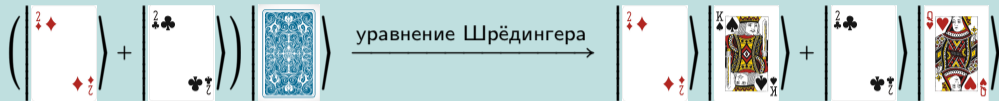
## Пример: квантовый компьютер

- набор кубитов: квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны любые комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3,$  итд.
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

## Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

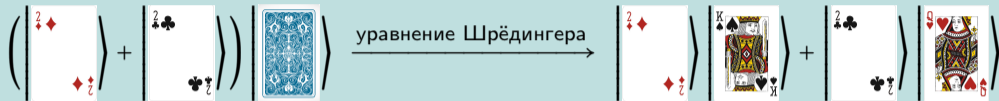
ЗАПУТАЕМ ПОВОЛЬШЕ:

- Два электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
- Три электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3$
- Пять электронов:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 |\uparrow\rangle_4 |\uparrow\rangle_5 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3 |\downarrow\rangle_4 |\downarrow\rangle_5$
- А если запутать все электроны в кошке? — кошка окажется в "неопределенном" состоянии

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

## Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

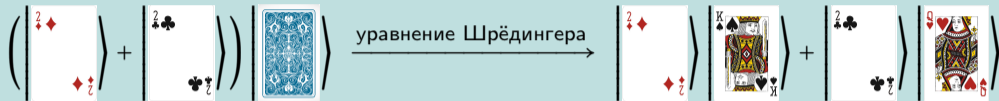
ЗАПУТАЕМ ПОВОЛЬШЕ:

- Два электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
- Три электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3$
- Пять электронов:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 |\uparrow\rangle_4 |\uparrow\rangle_5 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3 |\downarrow\rangle_4 |\downarrow\rangle_5$
- А если запутать все электроны в кошке? — кошка окажется в "неопределенном" состоянии

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

## Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

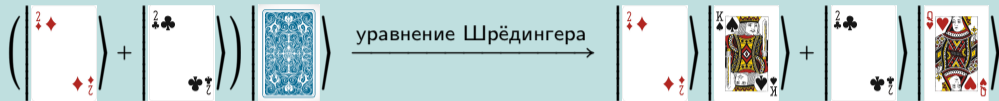
ЗАПУТАЕМ ПОВОЛЬШЕ:

- Два электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
- Три электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3$
- Пять электронов:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 |\uparrow\rangle_4 |\uparrow\rangle_5 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3 |\downarrow\rangle_4 |\downarrow\rangle_5$
- А если запутать все электроны в кошке? — кошка окажется в "неопределенном" состоянии

# Шрёдингер: взаимодействие рождает запутанность

## Имитация взаимодействия: простая игра для двоих

- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:



У вас король *относительно* красной двойки и дама *относительно* черной двойки.

Наши состояния запутаны

## Полностью определено состояние системы, но не отдельных частей

ЗАПУТАЕМ ПОВОЛЬШЕ:

- Два электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
- Три электрона:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3$
- Пять электронов:  $|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 |\uparrow\rangle_4 |\uparrow\rangle_5 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3 |\downarrow\rangle_4 |\downarrow\rangle_5$
- **А если запутать все электроны в кошке?** — кошка окажется в “неопределенном” состоянии

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$  измерение  
спина  $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \ll \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \ll \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$  измерение  
спина  $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \ll \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \ll \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$  измерение  
спина  $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \ll \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \ll \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \ll \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \ll \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!



# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$

- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в **ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ** — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

# Запутанные кошки

## Мысленный эксперимент: электрон + прибор + кошка

- электрон  $|\uparrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow \gg \rangle \longrightarrow |\uparrow\rangle | \llcorner \uparrow, \text{газ} \gg \rangle | \text{кошка спит} \rangle$
- электрон  $|\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow \gg \rangle \longrightarrow |\downarrow\rangle | \llcorner \downarrow, \text{еда} \gg \rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightsquigarrow$ 

измерение спина
--------------------

 $\xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}}$   $|\uparrow\rangle | \text{кошка спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{кошка ест} \rangle$
- Согласно уравнению Шрёдингера кошка вовлеклась в ЗАПУТАННОЕ СОСТОЯНИЕ — комбинацию (суперпозицию) коррелированных возможностей
- Нельзя сказать, каково состояние кошки самой по себе!

Но таких кошек **нет!**

# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \langle \text{готов} \rangle \rangle | \text{зевает} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle | \langle \uparrow \rangle \rangle | \text{спит} \rangle + |\downarrow\rangle | \langle \downarrow \rangle \rangle | \text{ест} \rangle$$

Почему же мы не видим таких кошек?!

Что-то подобное кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{спит} \rangle | \text{редит} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр}} |\uparrow\rangle | \text{мертва} \rangle | \langle \uparrow \rangle \rangle + |\downarrow\rangle | \text{жива} \rangle | \langle \downarrow \rangle \rangle$$

Вселенная делится на несколько, в каждой вселенной наблюдатель получает свой вариант одного результата

# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\llcorner\text{готов}\llcorner\rangle |\text{спит}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle |\llcorner\uparrow\llcorner\rangle |\text{мертва}\rangle + |\downarrow\rangle |\llcorner\downarrow\llcorner\rangle |\text{жива}\rangle$$

Почему же мы не видим таких кошек?!

Что вообще кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{спит}\rangle |\text{ждёт}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр}} |\uparrow\rangle |\text{мертва}\rangle |\text{ГЛАГОЛ}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{жива}\rangle |\text{ПАСЫД}\rangle$$

Вселенная делится на несколько, в каждой вселенной наблюдатель останется с каким-то одним результатом

# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\llcorner\text{готов}\llcorner\rangle |\text{спит}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle |\llcorner\uparrow\llcorner\rangle |\text{мертва}\rangle + |\downarrow\rangle |\llcorner\downarrow\llcorner\rangle |\text{жива}\rangle$$

## Почему же мы не видим таких кошек?!

- Потому что хозяйка кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{спит}\rangle |\text{ЖДЕТ}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\text{мертва}\rangle |\text{ГРУСТНАЯ}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{жива}\rangle |\text{ВЕСЕЛАЯ}\rangle$$

- Вселенная делится на несколько: в каждой вселенной наблюдатель остается с каким-то одним результатом



# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\llcorner\text{готов}\llcorner\rangle |\text{спит}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle |\llcorner\uparrow\llcorner\rangle |\text{мертва}\rangle + |\downarrow\rangle |\llcorner\downarrow\llcorner\rangle |\text{жива}\rangle$$

## Почему же мы не видим таких кошек?!

- Потому что хозяйка кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{спит}\rangle |\text{ЖДЕТ}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\text{мертва}\rangle |\text{ГРУСТНАЯ}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{жива}\rangle |\text{ВЕСЕЛАЯ}\rangle$$

- Вселенная делится на несколько: в каждой вселенной наблюдатель остается с каким-то одним результатом

# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

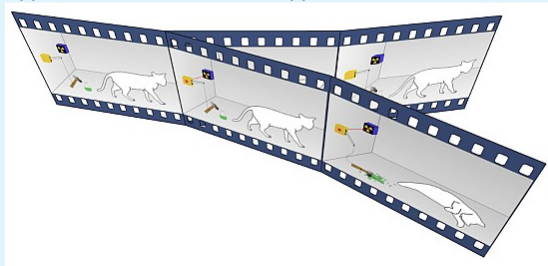
$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\langle\langle\text{готов}\rangle\rangle\rangle |\text{спит}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle |\langle\langle\uparrow\rangle\rangle\rangle |\text{мертва}\rangle + |\downarrow\rangle |\langle\langle\downarrow\rangle\rangle\rangle |\text{жива}\rangle$$

## Почему же мы не видим таких кошек?!

- Потому что хозяйка кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{спит}\rangle |\text{ЖДЕТ}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\text{мертва}\rangle |\text{ГРУСТНАЯ}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{жива}\rangle |\text{ВЕСЕЛАЯ}\rangle$$

- Вселенная делится на несколько: в каждой вселенной наблюдатель остается с каким-то одним результатом



# Почему мы не видим запутанных кошек?

## Добавим драматизма

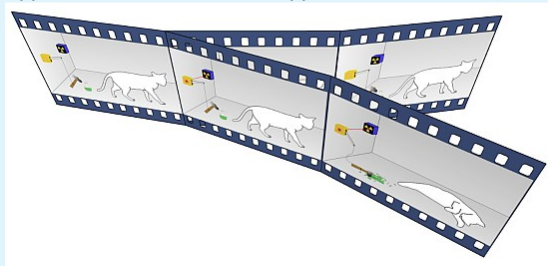
$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\langle\text{готов}\rangle\rangle |\text{спит}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шрёдингера}} |\uparrow\rangle |\langle\uparrow\rangle\rangle |\text{мертва}\rangle + |\downarrow\rangle |\langle\downarrow\rangle\rangle |\text{жива}\rangle$$

## Почему же мы не видим таких кошек?!

- **МОЖЕТ БЫТЬ** потому, что хозяйка кошки сама запутывается

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{спит}\rangle |\text{ЖДЕТ}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\text{мертва}\rangle |\text{ГРУСТНАЯ}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{жива}\rangle |\text{ВЕСЕЛАЯ}\rangle$$

- Вселенная делится на несколько: в каждой вселенной наблюдатель остается с каким-то одним результатом



Ветвящаяся вселенная — только одна из интерпретаций квантовой механики

Ветвящаяся вселенная — только **одна из**  
интерпретаций квантовой механики

Стандартная квантовая механика предлагает  
другое “решение”: **коллапс**

# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- Правило Борна определяет эти вероятности:

- 
- 
-

# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- Правило Борна определяет эти вероятности:







# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \text{ } \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \text{ } \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \text{ } \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \text{ } \spadesuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \\ \heartsuit \heartsuit \heartsuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \text{ } \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- **Правило Борна** определяет эти вероятности:

- $|a|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|b|^2$  — вероятность, что карта превратится в ,

- $|c|^2$  — вероятность, что карта превратится в и т.д.

# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- **Правило Борна** определяет эти вероятности:

- $|a|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|b|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|c|^2$  — вероятность, что карта превратится в и т.д.

# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- **Правило Борна** определяет эти вероятности:

- $|a|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|b|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|c|^2$  — вероятность, что карта превратится в



и т.д.

# Коллапс волновой функции

В волшебном казино карта “расколдовывается” при предъявлении!

- Казино предлагает предъявить карту

$$a \left| \begin{array}{c} 3 \text{ } \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + b \left| \begin{array}{c} 7 \text{ } \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \end{array} \right\rangle + c \left| \begin{array}{c} A \text{ } \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + d \left| \begin{array}{c} Q \text{ } \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \spadesuit \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \spadesuit \spadesuit \\ \spadesuit \spadesuit \spadesuit \spadesuit \end{array} \right\rangle + \dots \xrightarrow{\text{казино}} \left| \begin{array}{c} A \text{ } \spadesuit \\ \spadesuit \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle$$

- Каждый вариант расколдовывания случается с определенной вероятностью
- **Правило Борна** определяет эти вероятности:

- $|a|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|b|^2$  — вероятность, что карта превратится в



- $|c|^2$  — вероятность, что карта превратится в



и т.д.

Но в природе никакого “казино” нет!

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |r_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:

- 
- 
- 
- 

Измерительный прибор делает что-то особенное

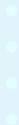
# Коллапс вызывается измерительным прибором

Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |\mathbf{r}_1\rangle + a_2 |\mathbf{r}_2\rangle + a_3 |\mathbf{r}_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |\mathbf{r}_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:



Измерительный прибор делает что-то особенное

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |\mathbf{r}_1\rangle + a_2 |\mathbf{r}_2\rangle + a_3 |\mathbf{r}_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |\mathbf{r}_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:

- $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_1$
- $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_2$
- $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_3$
- и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |r_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:

- $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_1$
- $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_2$
- $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_3$
- и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное



# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |r_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:
  - $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_1$
  - $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_2$
  - $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_3$
  - и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |\mathbf{r}_1\rangle + a_2 |\mathbf{r}_2\rangle + a_3 |\mathbf{r}_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |\mathbf{r}_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:
  - $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_1$
  - $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_2$
  - $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_3$
  - и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |\mathbf{r}_1\rangle + a_2 |\mathbf{r}_2\rangle + a_3 |\mathbf{r}_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |\mathbf{r}_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:
  - $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_1$
  - $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_2$
  - $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $\mathbf{r}_3$
  - и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное

# Коллапс вызывается измерительным прибором

## Волновая функция “схлопывается”/коллапсирует при измерении

- Волновая функция электрона теряет все возможности кроме одной, измеренной:

$$a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \xrightarrow{\text{коллапс}} |r_3\rangle$$

- Вместе с коллапсом действует правило Борна:
  - $|a_1|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_1$
  - $|a_2|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_2$
  - $|a_3|^2$  — вероятность, что обнаружим электрон в точке  $r_3$
  - и т. д.

Измерительный прибор делает что-то особенное

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - Почему же прибор не подвергается квантовой запутанности?
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться”/сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это случившиеся не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то куда же делись?
  - Куда что-то девается?

## Вопросы без ответов:

- Какие взаимодействия являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?
- Как измеряющий электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться”/сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$

Но это объяснение не может рассматриваться уравнением Шрёдингера

— А если уравнение Шрёдингера нарушается, то куда квант?

— На что это влияет?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются измерениями?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как измеряющий электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
    - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
  - Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться”/сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$

Почему взаимодействие прибора с объектом приводит к коллапсу волновой функции?

А если устройство Шрёдингера находится в состоянии коллапса?

А что оно измеряет?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются измерениями?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как измеряющий электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются измерениями?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как измеряющий электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами



# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются измерениями?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как измеряющий электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются измерительными?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как измерительный электрон узнает, что подстергается измерением? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия являются квантовыми?

Какие устройства являются измерительными приборами?

Как взаимодействующий электрон узнаёт, что посылается измерителем? — ведь он просто взаимодействует с другим элементом квантового мира.

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

Какие взаимодействия вызывают коллапс волновой функции?

Какие устройства являются принципиально классическими?

Какие взаимодействия являются принципиально квантовыми?

Какие устройства являются принципиально квантовыми?

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

- Какие взаимодействия являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

- **Какие взаимодействия являются измерениями?**
- Какие устройства являются измерительными приборами?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

- Какие взаимодействия являются измерениями?
- **Какие устройства являются измерительными приборами?**
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами

# Но коллапс волновой функции никак не объясняется

## Измерительный прибор делает что-то особенное

- Он не вовлекается в запутанные состояния
  - А значит, не подчиняется квантовой механике
  - Но прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему же он не квантовый?!
- Наоборот, прибор заставляет волновую функцию “схлопнуться” / сколлапсировать к одной из возможностей:  $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ 
  - Но это схлопывание не может описываться уравнением Шрёдингера
  - А если уравнение Шрёдингера нарушается, то когда именно?
  - На что оно заменяется?

## Вопросы без ответов:

- Какие взаимодействия являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами



Квантовая механика оставляет **недоговоренности**

- проблема измерения
- проблема коллапса

Квантовая механика оставляет **недоговоренности**

- проблема измерения
- проблема коллапса

Коллапс волновой функции **необходим** для привязки к реальности,  
но **необъясним** в рамках самой квантовой механики

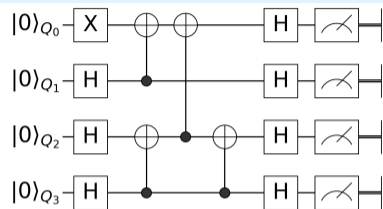
Кошки не запутываются, но электроны **запутываются**

Запутываются электроны, фотоны, ионы, фуллерены,  
мезоскопические сверхпроводящие образования, ...

# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ ,  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$ , итд.
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты



- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность

# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$

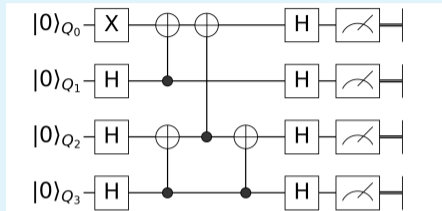
- возможны запутанные состояния

$$|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2,$$

$$|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3, \text{ итд.}$$

- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность



# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$

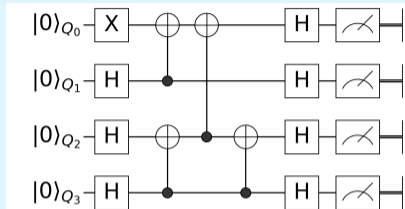
- возможны запутанные состояния

$$|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2,$$

$$|\uparrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2 |\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 |\downarrow\rangle_3, \text{ итд.}$$

- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

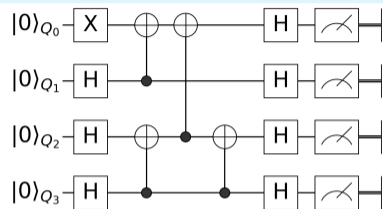
- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность



# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- **возможны запутанные состояния**  
 $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3,$  итд.



- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты
- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность

# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

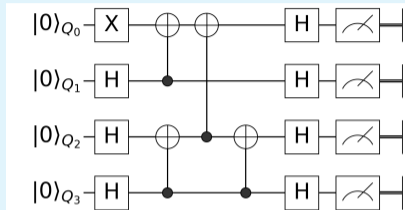
## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2,$   
 $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3,$  итд.

• **“Вычисление”** — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

• Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

• Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность





# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

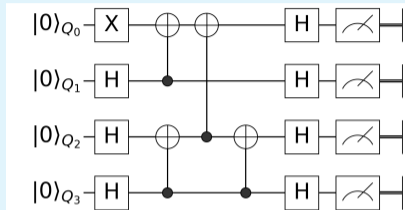
## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$
- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$
- возможны запутанные состояния  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ ,  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$ , итд.

- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

- Состояние:  $0.4|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.7|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$   
результат измерения:  $\uparrow\uparrow\uparrow = 000_2 = 0$  или  $\downarrow\downarrow\downarrow = 111_2 = 7$

- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность



# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя

опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$

- возможны запутанные состояния

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2,$

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3,$  итд.

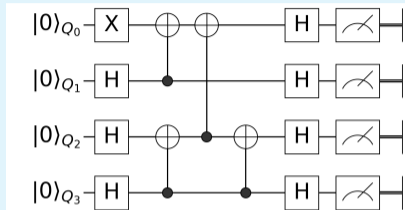
- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

- **Состояние:**  $0.4|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.7|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$

**результат измерения:**  $\uparrow\uparrow\uparrow = 000_2 = 0$  или  $\downarrow\downarrow\downarrow = 111_2 = 7$

- **Задача:** обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность



# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя

опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$

- возможны запутанные состояния

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2,$

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3,$  итд.

- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

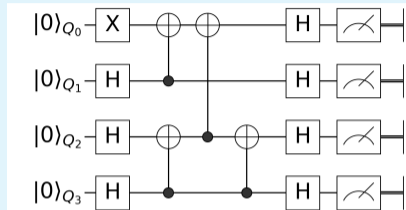
- Состояние:

$$0.4|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.7|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$$

результат измерения:  $\uparrow\uparrow\uparrow = 000_2 = 0$  или  $\downarrow\downarrow\downarrow = 111_2 = 7$

- **Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность**

- Если правильный ответ 111, то требуется “вырастить” волновую функцию типа  $0.95|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3 + 0.3|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.1|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + \dots$



# Квантовый компьютер: развитие запутанности и измерение

## Эволюция запутанности и смерть волновой функции от измерения/коллапса

- набор кубитов — квантовых систем с двумя

опорными состояниями  $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$

- возможны комбинации  $a|\uparrow\rangle + b|\downarrow\rangle$

- возможны запутанные состояния

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2,$

$|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3,$  итд.

- “Вычисление” — эволюция волновой функции согласно уравнению Шрёдингера

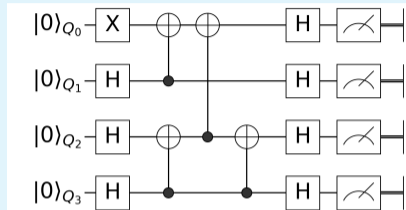
- Финальное измерение: коллапс волновой функции превращает кубиты в биты

- Состояние:  $0.4|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.7|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3$

результат измерения:  $\uparrow\uparrow\uparrow = 000_2 = 0$  или  $\downarrow\downarrow\downarrow = 111_2 = 7$

- Задача: обеспечить эволюцию волновой функции так, чтобы правильный ответ имел большую вероятность

- Если правильный ответ 111, то требуется “вырастить” волновую функцию типа  $0.95|\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2|\downarrow\rangle_3 + 0.3|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 - 0.1|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2|\uparrow\rangle_3 + \dots$



# Запутанность — средство изучения квантовой реальности

# Запутанность — средство изучения квантовой реальности

Обладают ли квантовые объекты свойствами независимо от измерений?

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- зап.с. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- 
- 

## То же вдоль любого направления!!

- Случайно выпадает  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
- Случайно выпадает  $|\uparrow\rangle_2|\downarrow\rangle_1 - |\downarrow\rangle_2|\uparrow\rangle_1$
- Случайно выпадает  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$  или  $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
- Случайно выпадает  $|\uparrow\rangle_2|\downarrow\rangle_1$  или  $|\downarrow\rangle_2|\uparrow\rangle_1$

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- 
- 

То же вдоль любого направления!!

Симметричная комбинация  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Симметричная комбинация  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 + |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$

Асимметричная комбинация  $|\uparrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$

Асимметричная комбинация  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$



# Измерения над запутанной парой: согласованные результаты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- 

- 

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

То же вдоль любого направления!!

Запутанная пара  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно измерить спин одного электрона в направлении  $\hat{n}$   $|\uparrow\rangle_{\hat{n}}|\downarrow\rangle_{\hat{n}} - |\downarrow\rangle_{\hat{n}}|\uparrow\rangle_{\hat{n}}$

или спин второго электрона в другом направлении

или спин одного электрона в новом направлении

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

То же вдоль любого направления!!

Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно математически точно переписать в виде  $|\leftarrow\rangle_1|\rightarrow\rangle_2 - |\rightarrow\rangle_1|\leftarrow\rangle_2$

используя значения спина вдоль другого направления

Измерив спин вдоль нового направления

# Измерения над запутанной парой: согласованные результаты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

То же вдоль любого направления!!

Запутанная пара  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно измерить спин одного электрона в направлении  $\hat{N}_1$  ( $|\uparrow\rangle_1, |\downarrow\rangle_1$ )

и получить согласованный спин вдоль другого направления

Измерить спин второго электрона

# Измерения над запутанной парой: согласованные результаты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то  $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то  $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

То же вдоль любого направления!!

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

То же вдоль любого направления!!

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

## То же вдоль любого направления!!

- Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно математически точно переписать в виде  $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 - |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ ,  
используя значения спина вдоль другого направления

- Измеряем спины вдоль нового направления:

# Измерения над запутанной парой: согласованные результаты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

## То же вдоль любого направления!!

- Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно математически точно переписать в виде  $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 - |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ ,  
используя значения спина вдоль другого направления

- Измеряем спины вдоль нового направления:

# Измерения над запутанной парой: согласованные результаты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

## То же вдоль любого направления!!

- Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно математически точно переписать в виде  $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 - |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ ,

используя значения спина вдоль другого направления

- Измеряем спины вдоль нового направления:

- если первый  $\swarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\nearrow$

- если первый  $\nearrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}}$   $|\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\swarrow$



# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

Нельзя сказать, каков спин первого электрона, и каков спин второго

- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$

- если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$

- если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$

- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

## То же вдоль любого направления!!

- Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

можно математически точно переписать в виде  $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 - |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ ,

используя значения спина вдоль другого направления

- Измеряем спины вдоль нового направления:

- если первый  $\swarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\nearrow$

- если первый  $\nearrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\swarrow$

# Измерения над запутанной парой: согласованные рез-ты

## Согласованные результаты измерений спина вдоль верт. направления

- ЗАП.С. =  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
- Измерение над первым: случайно выпадает  $\uparrow$  или  $\downarrow$ 
  - если  $\uparrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\downarrow$
  - если  $\downarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ , тогда второй электрон оказался  $\uparrow$
- Но два электрона могли разлететься далеко! Как они “договариваются”?

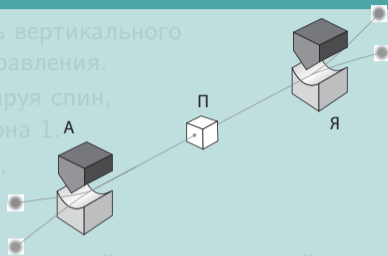
## То же вдоль любого направления!!

- Запутанное состояние  $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$   
можно математически точно переписать в виде  $|\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2 - |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ ,  
используя значения спина вдоль другого направления
- Измеряем спины вдоль нового направления:
  - если первый  $\swarrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\swarrow\rangle_1|\nearrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\nearrow$
  - если первый  $\nearrow$ , то ЗАП.С.  $\xrightarrow{\text{коллапс}} |\nearrow\rangle_1|\swarrow\rangle_2$ , второй электрон оказался  $\swarrow$

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



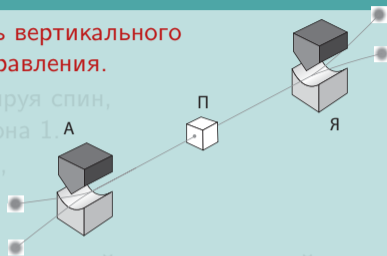
Но “знать оба ответа” запрещено!

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



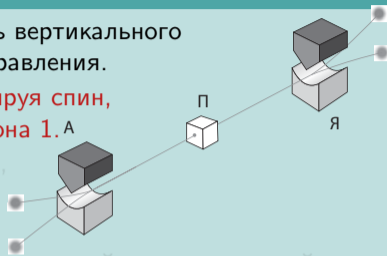
Но “знать оба ответа” запрещено!

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



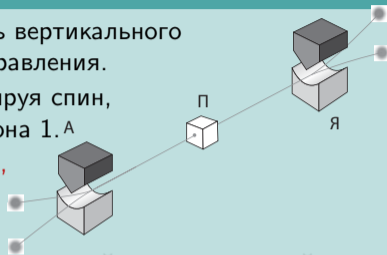
Но “знать оба ответа” запрещено!

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1. А
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



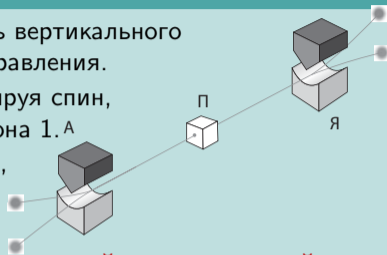
Но “знать оба ответа” запрещено!

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.  $A$
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



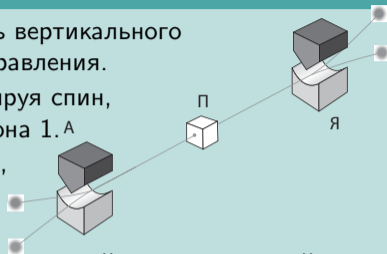
Но “знать оба ответа” запрещено!

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.  $A$
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



Но “знать оба ответа” запрещено!

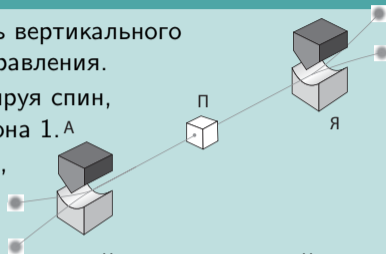
Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?



# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.  $A$
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



## Но “знать оба ответа” запрещено!

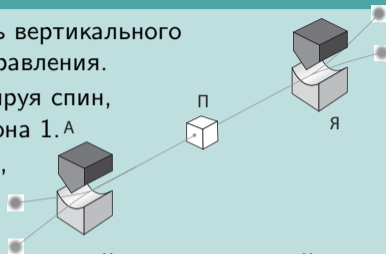
- Компоненты спина вдоль различных направлений враждуют друг с другом
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1.  $A$
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



## Но “знать оба ответа” запрещено!

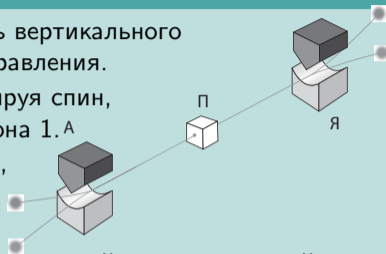
- Компоненты спина вдоль различных направлений враждуют друг с другом
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1. А
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



## Но “знать оба ответа” запрещено!

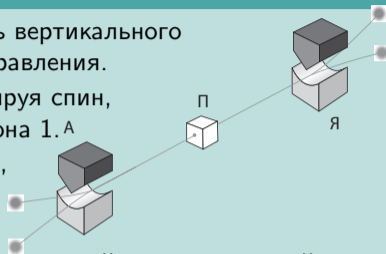
- Компоненты спина вдоль различных направлений враждуют друг с другом
- **КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений**

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Тайна “запутанных” свойств

## Словами Шрёдингера:

- Электрон 2 готов ответить или на вопрос о спине вдоль вертикального направления, или на вопрос о спине вдоль другого направления.
- На каждый вопрос он отвечает правильно — демонстрируя спин, противоположный тому, который обнаружили у электрона 1. А
- Но электрон 2, как ученик на экзамене, не может знать, какой из двух вопросов я собираюсь задать в первую очередь.
- Поэтому представляется, что наш ученик готов дать правильный ответ на первый вопрос, который ему зададут — неважно какой.
- Следовательно, он должен знать оба ответа.



## Но “знать оба ответа” запрещено!

- Компоненты спина вдоль различных направлений враждуют друг с другом
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Квантовая механика не полна!? Есть “шпрагалка” со скрытыми параметрами?

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: МОЖНО обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идеи рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями.

- Степень корреляции
- Формула Белла

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Измеряем направление. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями.

- Степень корреляции
- Формула Белла

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

**Белл: МОЖНО обнаружить шаргалку, ничего не зная о ее устройстве!**

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями

1. Два угла  $a$ , Два угла  $b$

2. Два угла  $a$ , Два угла  $b'$

3. Два угла  $a'$ , Два угла  $b$

4. Два угла  $a'$ , Два угла  $b'$

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$

- “Формула Белла” =

$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями

● Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$

● “Формула Белла” =

$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$



# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

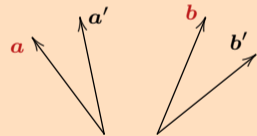
- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: МОЖНО обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.

- **Четыре серии опытов с разными рассогласованиями**

- Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
- Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
- Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
- Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$

- “Формула Белла” =

$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

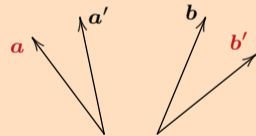
Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: МОЖНО обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями

- Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
- Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
- Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
- Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$
- “Формула Белла” =  
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

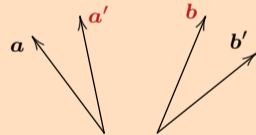
# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$
- “Формула Белла” =  
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

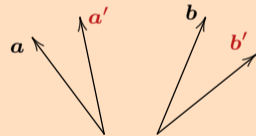
# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$
- “Формула Белла” =  
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

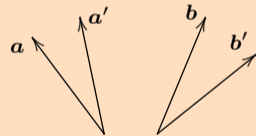
# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



A	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Я	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$
- “Формула Белла” =

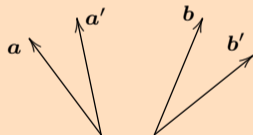
# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



A	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Я	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
x	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_B)$

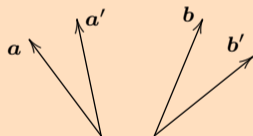
# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Нам не известны никакие подробности устройства “шпаргалки”

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна, применяемое к волновой функции

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



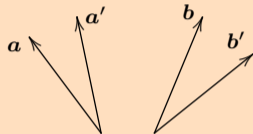
A	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Я	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
x	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$

# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



A	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Я	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
x	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$
- “Формула Белла” =  
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

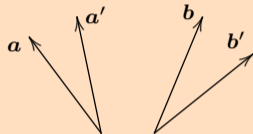
Теорема Белла: “Формула Белла”  $\leq 2$



# Ловушка Белла: существуют ли скрытые параметры?

Белл: Можно обнаружить шпаргалку, ничего не зная о ее устройстве!

- Идея: рассогласовать направления. Тогда корреляция не точная и зависит от степени рассогласования.
- Четыре серии опытов с разными рассогласованиями
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a$ , Яша вдоль  $b'$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b$
  - Аня вдоль  $a'$ , Яша вдоль  $b'$



A	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	+1	-1
Я	+1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1
x	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1

- Степень корреляции:  $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$
- “Формула Белла” =  
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

Теорема Белла: “Формула Белла”  $\leq 2$

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

Неравенство Белла нарушается: “формула Белла”  $\approx 2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами

Вместо двух значений один для значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$

(Опыты с электронами “чрезвычайно” поставили, но поздно)

Неравенство Белла нарушается, в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$

Не могут быть одновременно верны утверждения:

(локальный реализм)

каждый объект принадлежит только одному (“предпочитает”)  $A$

каждый объект существует независимо от наблюдения (“объективна”)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

Неравенство Белла нарушается: “формула Белла”  $\approx 2.7$

А что говорит природа? (Нобелевская 2022)

Опыт не с электронами, а (в основном) с фотонами

Вместо двух значений spins для каждого polarization,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$

(Опыт с электронами “черно” поставила, но продела)

Неравенство Белла нарушается, в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

каждый объект происходит из локального “предшественника”  $\&$

каждый объект существует независимо от наблюдения (“реальность”)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

Неравенство Белла нарушается в природе:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

Опыт не с электронами, а (в основном) с фотонами

Вместо двух значений — одно для каждого направления:  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$

(Опыт с электронами “через” поставила, но дважды)

Неравенство Белла нарушается в природе не  $2$ , а  $2\sqrt{2}$

Не могут быть одновременно верны утверждения:

(локальный реализм)

каждый объект обладает своими локальными (“скрытыми”)  $\lambda$

свойствами, которые существуют независимо от наблюдателя (“реальность”)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

Опыт не с электронами, а (в основном) с фотонами

Вместо двух значений — одно для значения корреляции:  $|W| |V| + |U| |X|$

(Опыт с электронами “чрезвычайно” поставлен, но редок)

Неравенство Белла нарушается в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$

Не могут быть одновременно верны утверждения:

(локальный реализм)

каждый объект имеет определенные свойства (например, цвет) и

каждый объект существует независимо от наблюдателя (объективизм)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

Опыт с запутанными электронами (в основном) с фотонами

Важно делать измерения в разные моменты времени:  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$

(Опыт с электронами “через” поставил, но не делал)

Неравенство Белла нарушается в природе не  $2$ , а  $2\sqrt{2}$

Не могут быть одновременно верны утверждения:

(локальный реализм)

Свойства объектов существуют независимо от наблюдателя

Свойства объектов существуют независимо друг от друга (локальность)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

Свойства объектов существуют независимо от наблюдателя

Свойства объектов существуют независимо друг от друга (локальность)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- **Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами**
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)



# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- **Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !**

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- Опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

- 1 настройка свойств происходит только локально (“при контакте”) И
- 2 свойства объектов существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

- 1 настройка свойств происходит только локально (“при контакте”) И
- 2 свойства объектов существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

# Ловушка Белла

Если электроны “договариваются” о свойствах (несут с собой шпаргалку), то

- Неравенство Белла: “формула Белла”  $\leq 2$
- Локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

Но по правилу Борна (квантовая механика “без пояснений”)

- максимальное значение “формулы Белла”:  $2\sqrt{2}$

А что говорит природа?

(Нобелевская 2022)

- опыты не с электронами, а (в основном) с фотонами
- Вместо двух значений спина два значения поляризации,  $|H\rangle|V\rangle + |V\rangle|H\rangle$   
(Опыты с электронами “нарочно” поставили, но позднее)
- Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а  $2\sqrt{2}$ !

Не могут быть одновременно верны утверждения: (локальный реализм)

- 1 настройка свойств происходит только локально (“при контакте”) И
- 2 свойства объектов существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
- но свойства квантовых систем *возникают* при наблюдении/взаимодействии

Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?



# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
  - но свойства квантовых систем *возникают* при наблюдении/взаимодействии

Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?





# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
- **но свойства квантовых систем возникают при наблюдении/взаимодействии**

Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?



# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
- но свойства квантовых систем *возникают* при наблюдении/взаимодействии

Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?

1. Одинакова ли она для всех?
2. Как из нее возникает единая классическая реальность?



# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
- но свойства квантовых систем *возникают* при наблюдении/взаимодействии

Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?

- 1 Одинакова ли она для всех?
- 2 Как из нее возникает единая классическая реальность?



# Запутанные объекты не несут свои свойства с собой

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?

- Не кошка и не Луну
- но свойства квантовых систем *возникают* при наблюдении/взаимодействии

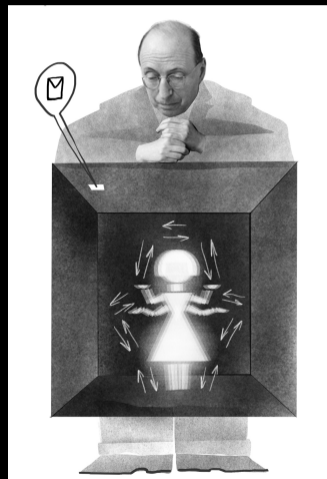
Что же такое квантовая реальность, где возможно существование без некоторых свойств?

- 1 Одинакова ли она для всех?
- 2 Как из нее возникает единая классическая реальность?



Проверка нарушения неравенств Белла — успех,  
но мысль идет дальше

# Проверка нарушения неравенств Белла — успех, но мысль идет дальше



Художник: Нюся Красовицкая



## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?



## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

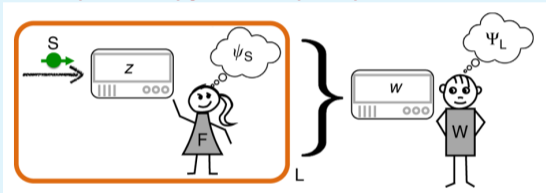
- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- **Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$**
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

# Логика квантовой механики и структура реальности

## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему



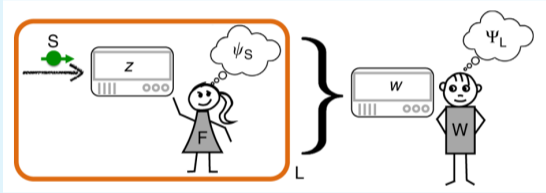
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

# Логика квантовой механики и структура реальности

## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему



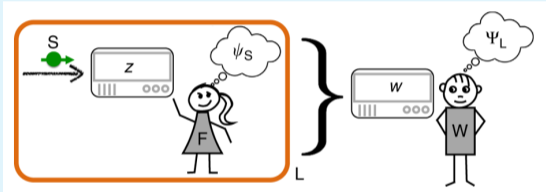
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

# Логика квантовой механики и структура реальности

## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему



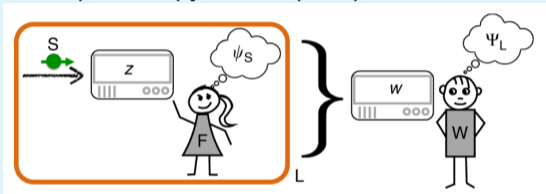
- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

# Логика квантовой механики и структура реальности

## Друзья и коллеги Вигнера: был коллапс или нет?

- Вигнер просит свою коллегу провести измерение спина в лаборатории
- Электрон в состоянии  $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$
- Вигнер изолирует лабораторию и описывает ее как квантовую систему



- С точки зрения Вигнера в 12:00 система находится в запутанном состоянии  $|\uparrow\rangle|\text{коллега видит спин вверх}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{коллега видит спин вниз}\rangle$ . Коллапса нет
- Но коллега скажет ему за ужином, что в 12:00 она наблюдала определенный результат (например, спин вниз). Коллапс случился

Факты — общие для всех или нет?

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: *Natározottan eredmény volt megfigyelhető*  
Я получила определенный результат
- Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера

## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)

Оказывается, что некоторые "классические" вещи не могут быть верны одновременно

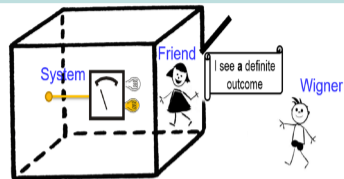
# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: **Határozottan eredmény volt megfigyelhető**

Я получила определенный результат

- Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера



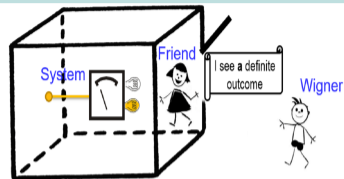
## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)

Оказывается, что некоторые "классические" вещи не могут быть выполнены одновременно.

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: Határozottan eredmény volt megfigyelhető  
Я получила определенный результат
- Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера



## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)

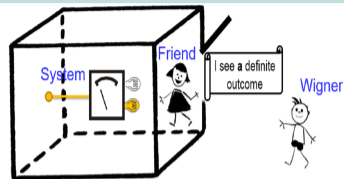
Оказывается, что некоторые "классические" вещи из мира Белла можно одновременно



# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: *Natározottan eredmény volt megfigyelhető*  
Я получила определенный результат
- **Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера**



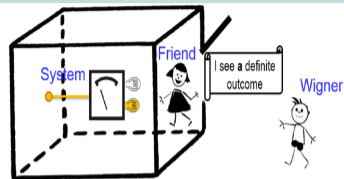
## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)

«Одновременно с тем, как коллега "замораживает" частицу из моего "Системного пространства»

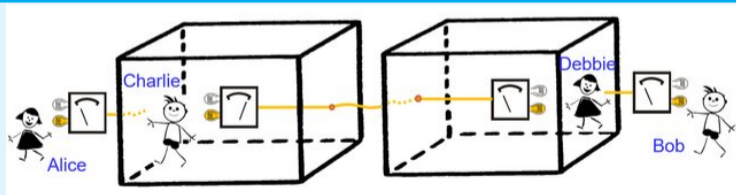
# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: Határozottan eredmény volt megfigyelhető  
Я получила определенный результат
- Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера



## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)

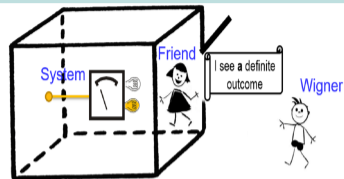


- Оказывается, что некоторые "очевидные" вещи не могут быть верны одновременно

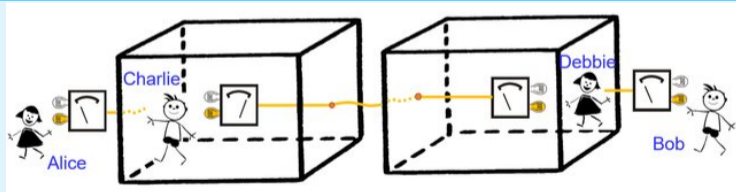
# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Новый поворот сюжета (Дойч, 1985): специальное окно из лаборатории

- Коллега: Határozottan eredmény volt megfigyelhető  
Я получила определенный результат
- Результат, наблюдаемый коллегой — скрытые параметры с точки зрения Вигнера

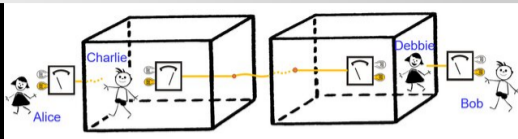


## Можно применить технику Белла (два вигнера, двое друзей/коллег)



- Оказывается, что некоторые “очевидные” вещи не могут быть верны одновременно

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



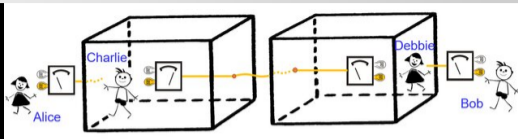
Не могут быть верны одновременно:

- 1 Универсальность квантовой теории: применима на всех масштабах
- 2 Локальность: выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 Свобода выбора: выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 Факты не зависят от наблюдателя: возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

Нужно создать "коллегу Белла" и потом ее распространить

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



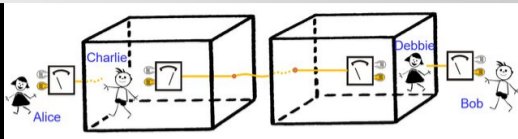
Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 Локальность: выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 Свобода выбора: выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 Факты не зависят от наблюдателя: возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

Нужно создать "коллегу Белла" и потом ее распространить

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



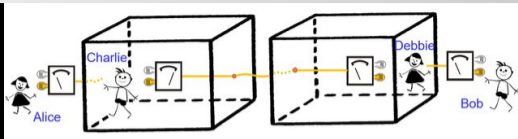
Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

Нужно создать "коллегу Белла" и потом ее распространить

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



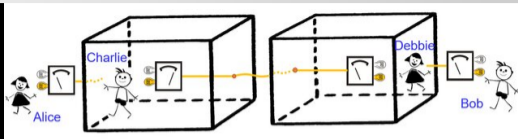
Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

Нужно создать "коллегу Белла" и потом ее распросить.

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



Не могут быть верны одновременно:

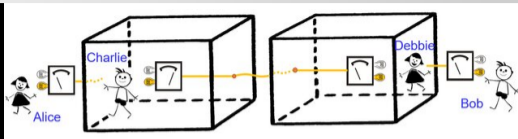
- 1 Универсальность квантовой теории: применима на всех масштабах
- 2 Локальность: выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 Свобода выбора: выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 Факты не зависят от наблюдателя: возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

См. также статью "Квантовый Белл" в разделе "Квантовая запутанность"



# Идеи Белла в действии для поиска реальности



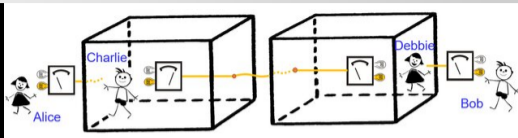
Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать "коллегу Вигнера" и потом ее расспросить

# Идеи Белла в действии для поиска реальности



Не могут быть верны одновременно:

- 1 Универсальность квантовой теории: применима на всех масштабах
- 2 Локальность: выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 Свобода выбора: выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 Факты не зависят от наблюдателя: возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

## Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

## Экспериментальная проверка?!

- **Проверено: неравенство нарушается. Но:**
  - Желаемая полная проверка:

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Не могут быть верны одновременно:

- 1 Универсальность квантовой теории: применима на всех масштабах
- 2 Локальность: выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 Свобода выбора: выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 Факты не зависят от наблюдателя: возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

## Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

## Экспериментальная проверка?!

- Проверено: неравенство нарушается. Но: *роль коллеги/друга исполнял фотон*
- Желаемая полная проверка:

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

## Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

## Экспериментальная проверка?!

- Проверено: неравенство нарушается. Но: *роль коллеги/друга исполнял фотон*
- **Желаемая полная проверка:**

*реализовать полноценного друга в квантовом компьютере  
в виде ИИ высокого уровня*

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

## Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

## Экспериментальная проверка?!

- Проверено: неравенство нарушается. Но: *роль коллеги/друга исполнял фотон*
- **Желаемая полная проверка:**  
*реализовать полноценного друга в квантовом компьютере*  
в виде ИИ высокого уровня

# Идеи Белла в действии для поиска реальности

## Не могут быть верны одновременно:

- 1 **Универсальность квантовой теории:** применима на всех масштабах
- 2 **Локальность:** выбор установок в приборе не влияет на результаты удаленных наблюдений/экспериментов
- 3 **Свобода выбора:** выбор установок в приборе статистически независим от всего остального в эксперименте
- 4 **Факты не зависят от наблюдателя:** возможно совместное присвоение значений true/false результатам наблюдений, сделанных различными наблюдателями

## Мы пока не знаем, что именно нарушается

- Нужно создать “коллегу Вигнера” и потом ее расспросить

## Экспериментальная проверка?!

- Проверено: неравенство нарушается. Но: *роль коллеги/друга исполнял фотон*
- Желаемая полная проверка:  
*реализовать полноценного друга в квантовом компьютере*  
**в виде ИИ высокого уровня**

Что расскажет искусственный интеллект высокого уровня о своем опыте существования в **нескольких вселенных** одновременно?



# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь корреляты в физическом мире
- 3 Эго-абсолютизм: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 **Friendliness**: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь корреляты в физическом мире
- 3 Эго-абсолютизм: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 Friendliness: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь **корреляты в физическом мире**
- 3 Эго-абсолютизм: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 **Friendliness**: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь **корреляты в физическом мире**
- 3 **Эго-абсолютизм**: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 **Friendliness**: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь **корреляты в физическом мире**
- 3 **Эго-абсолютизм**: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 **Friendliness**: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Что значит быть другом/коллегой/наблюдателем

## Кого мы вообще зачисляем в наблюдатели?

- 1 Локальность в пространстве и во времени: нет мгновенного влияния на расстоянии и влияния на прошлое
- 2 Впечатления наблюдателя должны иметь **корреляты в физическом мире**
- 3 **Эго-абсолютизм**: наличие *моих* мыслей безусловно, не зависит ни от каких условий и не требует указания каких-либо контекстов и т. п.
- 4 **Friendliness**: наблюдатель считает мысли других квалифицированных агентов столь же реальными, сколь свои собственные

Эти требования несовместны

(приводят к неравенствам, которые нарушаются квантовой механикой)

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

• Почему измерения не взаимодействуют?

• Почему измерения не взаимодействуют по-разному в разных экспериментах?

• Почему измерения не взаимодействуют по-разному в разных экспериментах в зависимости от того, что мы измеряем?

• Почему измерения не взаимодействуют по-разному в зависимости от того, что мы измеряем?

• Почему измерения не взаимодействуют?

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- **Элементы реальности загружаются в волновую функцию**
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

• Почему измерения возвращают классические значения?

• Почему измерения не возвращают суперпозиции классических значений?

• Почему измерения не возвращают суперпозиции классических значений и классических значений?

• Почему волновая функция коллапсирует в классическое значение при измерении?

• Почему измерения возвращают классические значения?

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает



# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- **Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения**

Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
→ волновая функция определена на другом, другом, другом физическом пространстве
- Квантовая механика ничего не сообщает о “локальных существовалках” в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
  - Волновая функция не определена на физическом пространстве
  - Волновая функция не имеет никакого отношения к физическому миру
- Квантовая механика ничего не сообщает о “локальных существовалках” в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
(она не похожа на магнитное или любое другое физическое поле)  
(это не "волна в пространстве")
- Квантовая механика ничего не сообщает о "локальных существовалках" в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
(она не похожа на магнитное или любое другое физическое поле)  
(это не "волна в пространстве")
- Квантовая механика ничего не сообщает о "локальных существовалках" в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
(она не похожа на магнитное или любое другое физическое поле)  
(это не “волна в пространстве”)
- Квантовая механика ничего не сообщает о “локальных существовалках” в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
(она не похожа на магнитное или любое другое физическое поле)  
(это не “волна в пространстве”)
- Квантовая механика ничего не сообщает о “локальных существовалках” в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает



# Заключение: квантовая механика как оракул

## QM делает предсказания:

- Элементы реальности загружаются в волновую функцию
- Волновая функция эволюционирует в математическом пространстве согласно уравнению Шрёдингера
- Правило Борна сообщает о вероятностях исходов измерения

## Но QM не поясняет, за счет чего предсказания сбываются

- Волновая функция ненаблюдаема
- Волновая функция не определена на физическом пространстве  
(она не похожа на магнитное или любое другое физическое поле)  
(это не “волна в пространстве”)
- Квантовая механика ничего не сообщает о “локальных существовалках” в физическом пространстве

Тем не менее, квантовая механика прекрасно работает

# Сто лет успеха и недосказанности

Квантовая механика — самое удивительное из всего,  
когда-либо изобретенного людьми

Это количественная теория, затрагивающая  
философские вопросы об устройстве мира

СПАСИБО!