

Создает ли кошка Луну тем, что на нее смотрит?



Квантовая революция: через неразбериху к триумфу

Алексей Семихатов

Отделение теоретической физики
Физический институт им. Лебедева РАН



Москва, апрель 2024

- Квантовый мир — особенный

- Квантовый мир — особенный
- Он существует **внутри** нашего, но по особым правилам

- Квантовый мир — **особенный**
- Он существует **внутри** нашего, но по особым правилам
- Он **поддерживает** существование нашего

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

Р. Фейнман:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — непохоже 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.

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

Р. Фейнман:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — непохоже 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.

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

Р. Фейнман:

На очень малом масштабе вещи ведут себя иначе — непохоже 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.

1925/26: Создание квантовой теории — упражнение по подавлению интуиции



Гайзенберг
(1901–1976)



Шрёдингер
(1887–1961)



Борн
(1882–1970)

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

1925/26: Создание квантовой теории — упражнение по подавлению интуиции



Гайзенберг
(1901–1976)



Шрёдингер
(1887–1961)



Борн
(1882–1970)

- **Результат: математическая схема, дающая лучшие предсказания**
 - 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)
- Но “события” развиваются в абстрактном математическом пространстве

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

1925/26: Создание квантовой теории — упражнение по подавлению интуиции



Гайзенберг
(1901–1976)



Шрёдингер
(1887–1961)



Борн
(1882–1970)

- Результат: математическая схема, дающая лучшие предсказания
 - 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)

● Но “события” развиваются в абстрактном математическом пространстве

Квантовая механика — работающая, но не наглядная схема

1925/26: Создание квантовой теории — упражнение по подавлению интуиции



Гайзенберг
(1901–1976)



Шрёдингер
(1887–1961)



Борн
(1882–1970)

- Результат: математическая схема, дающая лучшие предсказания
 - 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)
- Но “события” развиваются в абстрактном математическом пространстве

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

$$\lambda_1\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2}\right) = \lambda_2\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2}\right) = \lambda_3\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2}\right) = \lambda_4\left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2}\right)$$

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

→ 1905 Нобелевская премия за объяснение фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

→ Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

→ Квантование энергии (1922)

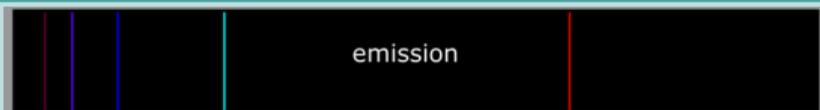
→ Не работает на предельном атоме водорода

→ Шредингер

→ Планк → Эйнштейн → Бора → Шредингер → Дирак

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа



$$\lambda_1 = 656,279 \text{ нм}, \lambda_2 = 486,135 \text{ нм}, \lambda_3 = 434,0472 \text{ нм}, \lambda_4 = 410,1734 \text{ нм}$$

$$\lambda_1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right) = \lambda_2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2} \right) = \lambda_3 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2} \right) = \lambda_4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2} \right)$$

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

Свет имеет корпускулярные свойства для объяснения фотоэффекта и фотоэмиссии

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

Дискретный набор колебаний

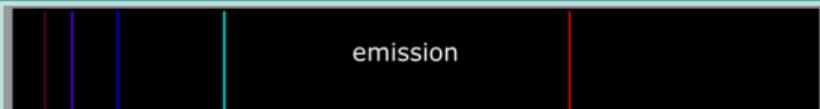
Планетарная модель атома Бора:

1913

Квантование энергии

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа



$$\lambda_1 = 656,279 \text{ нм}, \lambda_2 = 486,135 \text{ нм}, \lambda_3 = 434,0472 \text{ нм}, \lambda_4 = 410,1734 \text{ нм}$$

$$\lambda_1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right) = \lambda_2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2} \right) = \lambda_3 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2} \right) = \lambda_4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2} \right)$$

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

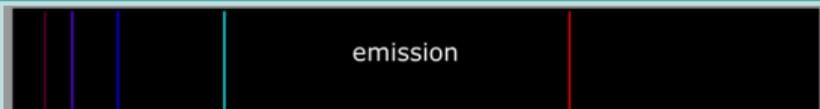
Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа



$$\lambda_1 = 656,279 \text{ нм}, \lambda_2 = 486,135 \text{ нм}, \lambda_3 = 434,0472 \text{ нм}, \lambda_4 = 410,1734 \text{ нм}$$

$$\lambda_1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right) = \lambda_2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2} \right) = \lambda_3 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2} \right) = \lambda_4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2} \right)$$

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

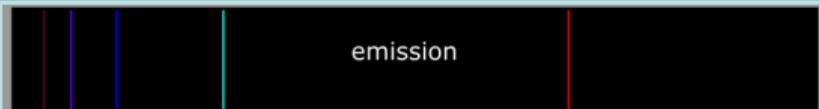
Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

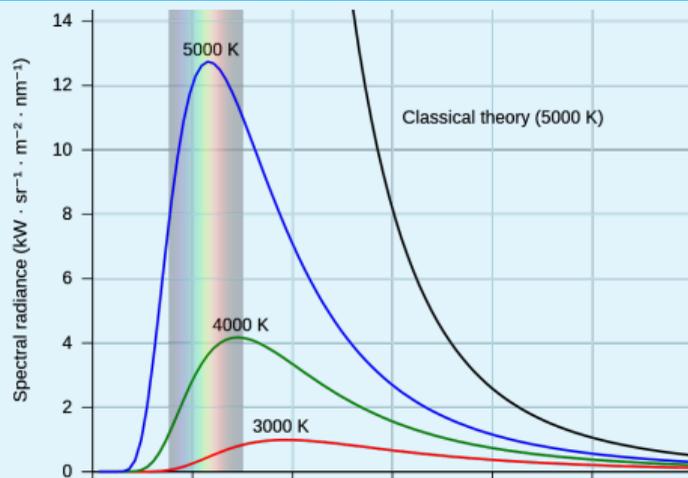


$$\lambda_1 = 656,279 \text{ нм}, \lambda_2 = 486,135 \text{ нм}, \lambda_3 = 434,0472 \text{ нм}, \lambda_4 = 410,1734 \text{ нм}$$
$$\lambda_1 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{3^2} \right) = \lambda_2 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{4^2} \right) = \lambda_3 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{5^2} \right) = \lambda_4 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{6^2} \right)$$

Закон излучения Планка

1900

- Гениальная подгонка, угадан необъяснимый комбинаторный смысл



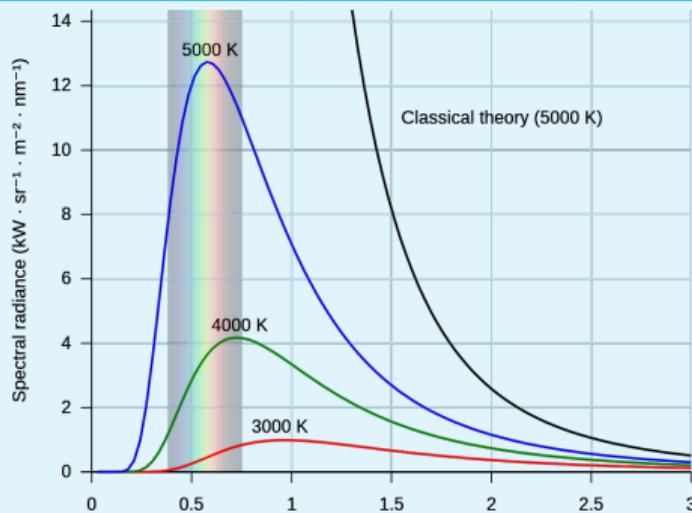
Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

- Гениальная подгонка, угадан необъяснимый комбинаторный смысл



Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

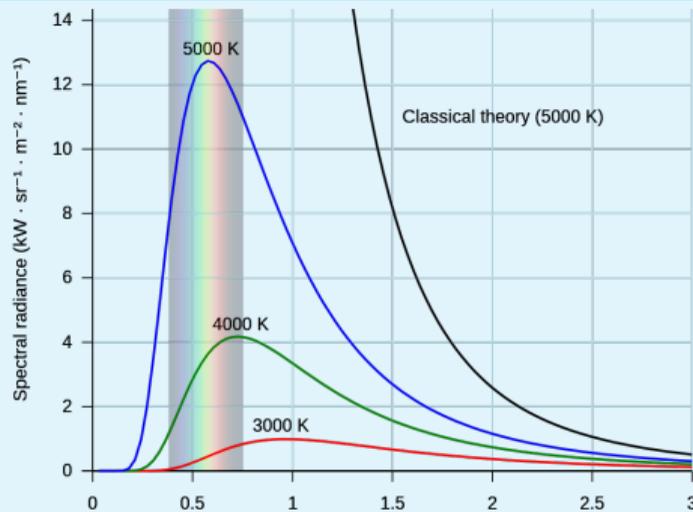
Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

- Гениальная подгонка, угадан необъяснимый комбинаторный смысл



Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Планетарная модель атома (1913)
- Не удалось объяснить спектры атомов
- Неясно
- Проблема: что надо сделать с h и ν ?

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- **Нобелевская премия (1922)**
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинация фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- **Неверная**
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинация фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

Необычная комбинация фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

- Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Намеки и предвестники

Свет из атомов скрывает целые числа

Закон излучения Планка

1900

Свет участвует в выбивании электронов порционно

1905

- ad hoc идея Эйнштейна для объяснения фотоэлектрического эффекта

Теплоемкость твердых тел:

Эйнштейн 1907, Дебай 1911

- Дискретный набор колебаний

Планетарная модель атома Бора:

1913

- Нобелевская премия (1922)
- Не работает за пределами атома водорода
- Неверная
- Показала, что надо мыслить out of the box

Статистика Бозе–Эйнштейна

1924

- Необычная комбинаторика фотонов (и атомов)

Встречаем квантовую механику!

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- **Вычислен спектр атома водорода**
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- **Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)**
- “Смысл” формул: Борн, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Борн, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Гайзенберг: операции с таблицами

Матричная механика:

Гайзенберг, июнь 1925

Операции с таблицами типа

$$\begin{pmatrix} 0 & \sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ \sqrt{1} & 0 & \sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & \sqrt{2} & 0 & \sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & \sqrt{3} & 0 & \sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} 0 & -i\sqrt{1} & 0 & 0 & 0 & \dots \\ i\sqrt{1} & 0 & -i\sqrt{2} & 0 & 0 & \dots \\ 0 & i\sqrt{2} & 0 & -i\sqrt{3} & 0 & \dots \\ 0 & 0 & i\sqrt{3} & 0 & -i\sqrt{4} & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix},$$

- Обычные величины заменяются бесконечными таблицами
- Они описывают возможные результаты измерений
- Вычислен спектр атома водорода
- Новый, необычный квантовый формализм (Борн, Гайзенберг, Йордан)
- “Смысл” формул: Бор, Гайзенберг
- Вне измерений про квантовую систему мало что можно сказать
- При измерениях система совершает скачки

Шрёдингер: состояние кв. системы — волновая функция

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

Метафора волновой функции: “волшебная карта”

- Несколько значений, которые прописаны в ОДНОЙ волшебной карте
- Это не карта, а одна карта, у которой нет определённого значения
- Точки и линии на карте складываются в рисунок
- Значения сопровождаются частями

Состояние/волновая функция Ψ изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа a, b, c, d, \dots
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера:

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени

- Это фундаментальное уравнение квантовой механики

Шрёдингер: состояние кв. 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
- Значения сопровождаются числами!

Состояние/волновая функция Ψ изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа a, b, c, d, \dots
- Закон изменения волновой функции — уравнение Шрёдингера:
$$E\Psi = \hat{H}\Psi$$

Энергия говорит волновой функции, как ей меняться во времени
- Это фундаментальное уравнение квантовой механики

Шрёдингер: состояние кв. 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
- Значения сопровождаются числами!

Состояние/волновая функция Ψ изменяется с течением времени

- Изменяются сопровождающие числа a, b, c, d, \dots
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера
- Энергия гравит. волновой функции не меняется со временем
- Эта функция — не физическая реальность

Шрёдингер: состояние кв. 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
 - Значения сопровождаются числами!

Состояние/волновая функция Ψ изменяется с течением времени

- Изменяется с течением времени число n , l , m , s
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера
- Энергия гравитационного поля не меняется со временем
- Эта функция — суперпозиция

Шрёдингер: состояние кв. 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**
- Значения сопровождаются числами!

Состояние/волновая функция Ψ изменяется с течением времени

- Изменяется с течением времени число n , l , m , s
- Закон эволюции волновой функции — уравнение Шрёдингера
- Энергия электрона волновой функции не меняется со временем

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень свирепые волновые функции возникают мало — всего лишь дискретно на число B
- Такие числа тоже называются
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

Никаких скачков!

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - Кинетическая — определяется положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень свирепые волновые функции возникают мало — всего лишь дискретно на число B
- Такие числа тоже называются квантами
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

Никаких скачков!

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень свирепые волновые функции возникают мало — всего лишь дискретно на число E
- Такие числа тоже особые
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких сканков!

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень свирепый преобразователь энергии превращает мало — много энергии
- Энергия — это число E
- Энергия — это число E
- Она определяет размер атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких сканков!

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень свирепый преобразователь энергии превращает мало — много энергии
- Энергия — это частота $E = h\nu$
- Энергия — это импульс $E = pc$
- Она определяет размер атома $r \sim \lambda$

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

- Никаких скачков! *Гайзенберг находил это отвратительным!*
- Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

Энергия определяет волновую функцию, а волновая функция — энергию

Энергия определяет положение

Положение определяет энергию

Они определяют друг друга

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких сканков!

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непрерывное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких сканков!

Гайзенберг находил это отвратительным!

Волновая функция — нечто непреклонное.

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких сканков!

Гайзенберг находил это отвратительным!

Волновая функция — нечто непреодолимое

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких скансах?

Гайзенберг находил это отвратительным

Волновая функция — нечто непреклонное

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

На каких скансах?

Гайзенберг находил это отвратительным!

Волновая функция — нечто непреклонное.

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

- Никаких скачков!
- Волновая функция — нечто непрерывное

Гайзенберг находил это отвратительным

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

- **Никаких скачков!**
- Волновая функция — нечто непрерывное

Гайзенберг находил это отвратительным

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

- Никаких скачков!
- Волновая функция — нечто непрерывное

Гайзенберг находил это отвратительным

Атом водорода из уравнения Шрёдингера

Энергия — свирепый преобразователь

- Энергия меняет волновую функцию
- Энергия состоит из двух частей:
 - определяемых положением и скоростью
- Но положение и скорость в квантовой механике математически “враждуют”
- Если одна часть энергии меняет волновую функцию слабо, то другая — сильно

Штучный товар — волновая функция, которая договаривается с энергией

- Очень специальные волновые функции меняются мало — всего лишь умножаются на число E
- Такие числа тоже особенные
- Они определяют спектр атома водорода

На основе уравнения Шрёдингера найден спектр атома водорода

- Никаких скачков!
- Волновая функция — нечто непрерывное

Гайзенберг находил это отвратительным

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не сводится к отдельному электрону

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не складывается из отдельных электронов

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не сводится до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

вариант: Алексей → Гондурас, Андрей → Таиланд, Анна → Швеция

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не существует для отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

вариант:  → Гондурас,  → Таиланд,  → Швеция

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция дискретна — не сводится до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

вариант:  → Гондурас,  → Таиланд,  → Швеция

вариант:  → Аргентина,  → Индия,  → Нидерланды

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не сводится до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

вариант:  → Гондурас,  → Таиланд,  → Швеция

вариант:  → Аргентина,  → Индия,  → Нидерланды

вариант:  → Ботсвана,  → Оман,  → Марокко

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция многомерна — не сводится до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

вариант:  → Гондурас,  → Таиланд,  → Швеция

вариант:  → Аргентина,  → Индия,  → Нидерланды

вариант:  → Ботсвана,  → Оман,  → Марокко

.....

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- Волновая функция нескольких электронов — не сводится до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

- Волновая функция:

$$\begin{aligned} \Psi = & -0.031 \left| \begin{array}{l} \text{[Алексей]} : \text{Гондурас,} \\ \text{[Андрей]} : \text{Таиланд,} \\ \text{[Анна]} : \text{Швеция} \end{array} \right\rangle \\ & + 0.24 \left| \begin{array}{l} \text{[Алексей]} : \text{Аргентина,} \\ \text{[Андрей]} : \text{Индия,} \\ \text{[Анна]} : \text{Нидерланды} \end{array} \right\rangle \\ & + 0.15 \left| \begin{array}{l} \text{[Алексей]} : \text{Ботсвана,} \\ \text{[Андрей]} : \text{Оман,} \\ \text{[Анна]} : \text{Марокко} \end{array} \right\rangle + \dots \end{aligned}$$

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

• Волновая функция нескольких электронов — не функция на физическом пространстве

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

- Волновая функция:

$$\Psi = -0.031 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Гондурас}, \\ \text{Андрей} : \text{Таиланд}, \\ \text{Анна} : \text{Швеция} \end{array} \right\rangle + 0.24 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Аргентина}, \\ \text{Андрей} : \text{Индия}, \\ \text{Анна} : \text{Нидерланды} \end{array} \right\rangle + 0.15 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Ботсвана}, \\ \text{Андрей} : \text{Оман}, \\ \text{Анна} : \text{Марокко} \end{array} \right\rangle + \dots$$

- На карту мира нельзя нанести “посещаемость” по странам

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

- Волновая функция:

$$\Psi = -0.031 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Гондурас}, \\ \text{Андрей} : \text{Таиланд}, \\ \text{Анна} : \text{Швеция} \end{array} \right\rangle + 0.24 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Аргентина}, \\ \text{Андрей} : \text{Индия}, \\ \text{Анна} : \text{Нидерланды} \end{array} \right\rangle + 0.15 \left| \begin{array}{l} \text{Алексей} : \text{Ботсвана}, \\ \text{Андрей} : \text{Оман}, \\ \text{Анна} : \text{Марокко} \end{array} \right\rangle + \dots$$

- На карту мира нельзя нанести “посещаемость” по странам
- **Участвуют только тройки стран**

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Квантовое турагентство планирует путешествия для Алексея, Андрея и Анны

- Волновая функция:

$$\Psi = -0.031 \left| \begin{array}{l} \text{Гондурас,} \\ \text{Таиланд,} \\ \text{Швеция} \end{array} \right\rangle + 0.24 \left| \begin{array}{l} \text{Аргентина,} \\ \text{Индия,} \\ \text{Нидерланды} \end{array} \right\rangle + 0.15 \left| \begin{array}{l} \text{Ботсвана,} \\ \text{Оман,} \\ \text{Марокко} \end{array} \right\rangle + \dots$$

- На карту мира нельзя нанести “посещаемость” по странам
- Участвуют только тройки стран

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- В действительности «еще хуже»: электроны *неразличимы*
- Волновая функция высокомерна — не снисходит до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- В действительности «еще хуже»: электроны *неразличимы*
(Алексей, Андрей и Анна становятся полностью взаимозаменяемы)
- Волновая функция высокомерна — не снисходит до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- В действительности «еще хуже»: электроны *неразличимы* (Алексей, Андрей и Анна становятся полностью взаимозаменяемы)
- И типичная волновая функция такова:

$$\begin{aligned} \Psi = & -0.031 \left| \boxed{A} : \text{Гондурас}, \boxed{A} : \text{Таиланд}, \boxed{A} : \text{Швеция} \right\rangle \\ & + 0.24 \left| \boxed{A} : \text{Аргентина}, \boxed{A} : \text{Индия}, \boxed{A} : \text{Нидерланды} \right\rangle \\ & + 0.15 \left| \boxed{A} : \text{Ботсвана}, \boxed{A} : \text{Оман}, \boxed{A} : \text{Марокко} \right\rangle + \dots \end{aligned}$$

- Волновая функция высокомерна — не спускается до отдельного электрона

Но волновая функция — не волна в пространстве

Неверно, что «в квантовой механике вместо частиц волны»

- Волновая функция вообще не описывает отдельный “электрон”

Волновая функция нескольких электронов не определена на физическом пространстве

- В действительности «еще хуже»: электроны *неразличимы* (Алексей, Андрей и Анна становятся полностью взаимозаменяемы)
- И типичная волновая функция такова:

$$\begin{aligned} \Psi = & -0.031 \left| \boxed{A} : \text{Гондурас}, \boxed{A} : \text{Таиланд}, \boxed{A} : \text{Швеция} \right\rangle \\ & + 0.24 \left| \boxed{A} : \text{Аргентина}, \boxed{A} : \text{Индия}, \boxed{A} : \text{Нидерланды} \right\rangle \\ & + 0.15 \left| \boxed{A} : \text{Ботсвана}, \boxed{A} : \text{Оман}, \boxed{A} : \text{Марокко} \right\rangle + \dots \end{aligned}$$

- Волновая функция высокомерна — не снисходит до отдельного электрона

Однако **отдельные** электроны существуют!

Можно ли их все-таки описывать с помощью **волновой функции**?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \rightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \rightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” распределяются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \rightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \rightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” распределяются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \rightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \rightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расплываются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” распределяются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

- Например, внутри квантового компьютера: мы там выращиваем волновую функцию, но как ею пользоваться?

Шрёдингер: специальное усреднение

Задача: построить локализованные “сгустки” из волновой функции

- Специальным образом усредняем по положению всех электронов, кроме одного
- $(r_1, r_2, r_3, \dots) \longrightarrow (r_1, \blacksquare, \blacksquare, \dots) \longrightarrow (r_1)$
- Если можно получить “скопление электрического заряда вблизи r_1 ”, то может быть это и есть электрон, построенный из волновой функции

Не работает!

- “Сгустки” расползаются с течением времени (согласно уравнению Шрёдингера!)
- Не могут быть электронами

Волновую функцию не удастся “высадить” на физическое пространство

Волновая функция ненаблюдаема

- Нет физической процедуры, позволяющей “измерить” волновую функцию

Как тогда волновая функция вообще связана с реальностью?

- Например, внутри квантового компьютера: мы там выращиваем волновую функцию, но как ею пользоваться?

Главный сюрприз:
правило Борна

Волшебная карта в казино расколдовывается

Заведение “внезапно” просит предъявить карту

- Волшебство исчезает: остается только одно из имевшихся значений
- Расколдовывание — КОЛЛАПС волновой функции:
В другой раз:
- Каждый вариант расколдовывания — со своей вероятностью!
- Управлять выбором нельзя

Волшебная карта в казино расколдовывается

Заведение “внезапно” просит предъявить карту

- Волшебство исчезает: остается только одно из имевшихся значений
- Расколдовывание — КОЛЛАПС волновой функции:
В другой раз:
- Каждый вариант расколдовывания — со своей вероятностью!
- Управлять выбором нельзя

Волшебная карта в казино расколдовывается

Заведение “внезапно” просит предъявить карту

- Волшебство исчезает: остается только одно из имевшихся значений
- Расколдовывание — КОЛЛАПС волновой функции:

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

В другой раз:

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

- Каждый вариант расколдовывания — со своей вероятностью!
- Управлять выбором нельзя

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает прямо противоположное.

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает прямо противоположное.

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

Прибор заставляет волновую функцию СКОЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает прямо противоположное.

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

Прибор заставляет волновую функцию СКОЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает прямо противоположное.

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

Прибор заставляет волновую функцию **СКОЛАПСИРОВАТЬСЯ** — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает одно продолжительное

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

Прибор заставляет волновую функцию СКОЛАПСИРОВАТЬСЯ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает одно предельно возможное

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предсказывает одно предельное поведение

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

• Уравнение Шрёдингера предсказывает одно предельное состояние

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

• Уравнение Шрёдингера предсказывает только вероятности

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предписывает прямо противоположное:

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2$, ...

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предписывает прямо противоположное:
 - не расколдовывание волновой функции,
 - а вовлечение самого прибора в волшебство

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2, \dots$

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предписывает прямо противоположное:
 - не расколдовывание волновой функции,
 - а вовлечение самого прибора в волшебство

Что и как расколдовывается в квантовой механике?

Коллапс настоящей волновой функции

- $a_1 |r_1\rangle + a_2 |r_2\rangle + a_3 |r_3\rangle + \dots \longrightarrow |r_3\rangle$ — никакого казино нет
- Мы “встретили” электрон в точке r_3 — ИЗМЕРЕНИЕ
- в точке r_1 — с вероятностью $|a_1|^2$,
- в точке r_2 — с вероятностью $|a_2|^2$,
- в точке r_3 — с вероятностью $|a_3|^2$, ...

Измерительный прибор выбирает одну из возможностей

- Прибор заставляет волновую функцию СКОЛЛАПСИРОВАТЬ — потерять все остальные возможности

Квантовая механика в действии: уравнение Шрёдингера и правило Борна

Но уравнение Шрёдингера и коллапс математически несовместимы

- Уравнение Шрёдингера предписывает прямо противоположное:
 - не расколдовывание волновой функции,
 - а вовлечение самого прибора в волшебство

Встречаем запутанность!

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля
- Моя черная карта превращает вашу карту в даму
- Моя ВОЛШЕВНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕВНОЙ:

Ваша карта:

● Если у вас красная карта, то красная дама

● Если у вас черная карта, то черная дама

- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму
- Моя ВОЛШЕВНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕВНОЙ:
Ваша карта:

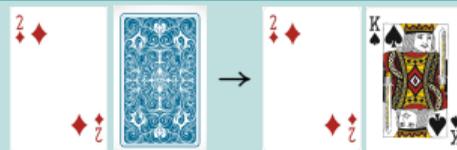
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕВНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕВНОЙ:

Ваша карта:

- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \spadesuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \clubsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{blue back} \right\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \spadesuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \text{King of spades} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \clubsuit \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \text{Queen of hearts} \right\rangle$$

Ваша карта:

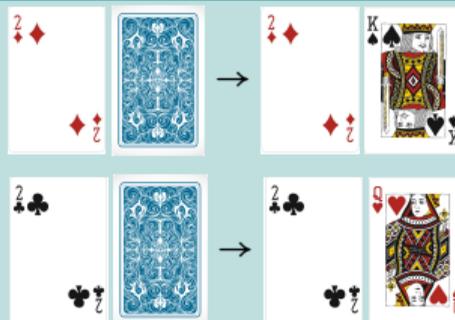
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

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



$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{Back} \right\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шпр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

Ваша карта:

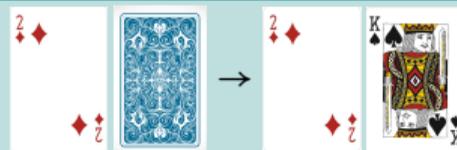
- король *относительно* красной двойки
- дама *относительно* черной двойки.
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

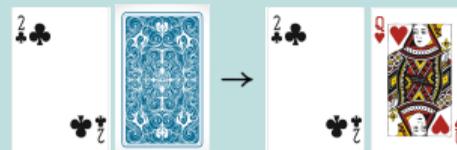
Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{Back} \right\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

Ваша карта:

— *король относительно красной двойки*

— *дама относительно черной двойки.*

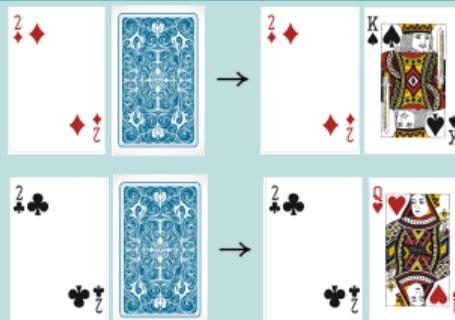
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

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



$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \text{♦} \\ \text{♦} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \text{♣} \\ \text{♣} \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{blue back} \right\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \text{♦} \\ \text{♦} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{К} \\ \text{♠} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \text{♣} \\ \text{♣} \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} \text{Q} \\ \text{♥} \end{array} \right\rangle$$

Ваша карта:

- *король относительно красной двойки*
- *дама относительно черной двойки.*
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

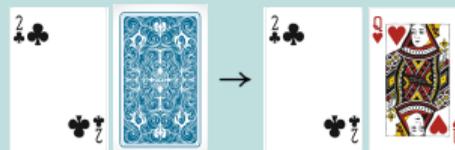
Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

- Моя красная карта превращает вашу карту в короля



- Моя черная карта превращает вашу карту в даму



- Моя ВОЛШЕБНАЯ карта делает и вашу карту ВОЛШЕБНОЙ:

$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{Back} \right\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} K \\ \spadesuit \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \\ \clubsuit \end{array} \right\rangle \left| \begin{array}{c} Q \\ \heartsuit \end{array} \right\rangle$$

Ваша карта:

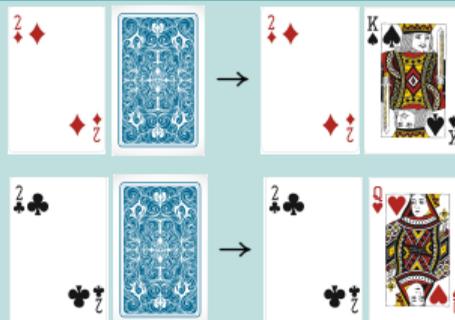
- король *относительно* красной двойки
- дама *относительно* черной двойки.
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Имитация взаимодействия: примитивная карточная игра

Квантовая игра в “пьяницу”

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



$$\left(\left| \begin{array}{c} 2 \text{ of } \heartsuit \\ \text{ } \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \text{ of } \clubsuit \\ \text{ } \end{array} \right\rangle \right) \left| \text{Back} \right\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шр.}} \left| \begin{array}{c} 2 \text{ of } \heartsuit \\ \text{ } \end{array} \right\rangle \left| \text{King of } \spadesuit \right\rangle + \left| \begin{array}{c} 2 \text{ of } \clubsuit \\ \text{ } \end{array} \right\rangle \left| \text{Queen of } \heartsuit \right\rangle$$

Ваша карта:

- король *относительно* красной двойки
- дама *относительно* черной двойки.
- Наши состояния запутаны

Полностью определено состояние системы, но не ее частей

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\llcorner\text{готов}\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\llcorner\text{вверх}\rangle + |\downarrow\rangle |\llcorner\text{вниз}\rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

$$\begin{aligned} |\uparrow\rangle |\llcorner\text{готов}\rangle &\rightarrow |\uparrow\rangle |\llcorner\text{вверх}\rangle + |\downarrow\rangle |\llcorner\text{вниз}\rangle \\ |\downarrow\rangle |\llcorner\text{готов}\rangle &\rightarrow |\downarrow\rangle |\llcorner\text{вверх}\rangle + |\uparrow\rangle |\llcorner\text{вниз}\rangle \end{aligned}$$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеренный электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами.
- Какие взаимодействия вообще являются измерительными?
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\langle\langle\text{готов}\rangle\rangle\rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\langle\langle\text{вверх}\rangle\rangle\rangle + |\downarrow\rangle |\langle\langle\text{вниз}\rangle\rangle\rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: или $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, или $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами.
- Какие взаимодействия между приборами являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) |\text{«готов»}\rangle \xrightarrow{\text{уп-е Шр.}} |\uparrow\rangle |\text{«вверх»}\rangle + |\downarrow\rangle |\text{«вниз»}\rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как коммерческий электрон узнает, что подвергается коммерции? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами.
- Какие взаимодействия при работе являются коммерческими?
- Какие устройства являются коммерческими приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{«готов»} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle | \text{«вверх»} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{«вниз»} \rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами
- Какие взаимодействия вообще являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{«готов»} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle | \text{«вверх»} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{«вниз»} \rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон узнает, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами
- Какие взаимодействия вообще являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{«готов»} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle | \text{«вверх»} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{«вниз»} \rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон *узнает*, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами
- Какие взаимодействия вообще являются измерениями?
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{«готов»} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle | \text{«вверх»} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{«вниз»} \rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон *узнает*, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами
- **Какие взаимодействия вообще являются измерениями?**
- Какие устройства являются измерительными приборами?

Измерения идут не по Шрёдингеру

Взаимодействие должно вовлекать и прибор в запутанность

$$(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle) | \text{«готов»} \rangle \xrightarrow{\text{ур-е Шр.}} |\uparrow\rangle | \text{«вверх»} \rangle + |\downarrow\rangle | \text{«вниз»} \rangle$$

Вместо этого происходит противоположное

прибор: ИЛИ результат «вверх», ИЛИ результат «вниз»
волновая функция: ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle$, ИЛИ $|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle$

Хотя нет оснований для прибора так себя вести

- Прибор состоит из электронов, протонов, и нейтронов — квантовых объектов. Почему он не квантовый — сам не вовлекается в запутанность?
- Как измеряемый электрон *узнает*, что подвергается измерению? — ведь он просто взаимодействует с другими электронами и протонами
- Какие взаимодействия вообще являются измерениями?
- **Какие устройства являются измерительными приборами?**

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Наука дает самые тонкие объяснения (непросто добиться успеха при таком количестве фактов и наблюдений)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Самая маленькая единица измерения (непросто добиться успеха при таком количестве попыток)
- Самая маленькая единица измерения (непросто добиться успеха при таком количестве попыток)
- Самая маленькая единица измерения (непросто добиться успеха при таком количестве попыток)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- **Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская**
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Самые дорогие материалы (алмазы, платина)
- Просто добывать углерод при таком количестве сырья (необходимо)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- **Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям**
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Самые дорогие самые точные эксперименты
- Просто добьются успеха при таком количестве
- Выдвигать сомнения!

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется:
коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - **Непонятна причина, вызывающая коллапс**
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
 - Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
 - Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Самая большая загадка — почему мы живем в классическом мире
- Просто добьются успеха при таком количестве попыток?
- Почему мы живем?

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - **Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера**
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется:
коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- **Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом**
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- **Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции**

Но все это работает!

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Схема дает самые точные предсказания (непросто добиться успеха при таком количестве дыр и противоречий)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- **Схема дает самые точные предсказания**
(непросто добиться успеха при таком количестве дыр и противоречий)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется: коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Схема дает самые точные предсказания
(непросто добиться успеха при таком количестве дыр и противоречий)

Промежуточные итоги

Детерминистское уравнение для индетерминистского мира

- Волновая функция определена не в физическом, а в абстрактном многомерном пространстве
- Волновая функция ненаблюдаема
- Фундаментальное уравнение детерминистское, но природа индетерминистская
- Фундаментальное уравнение, видимо, временами отменяется:
коллапс необходим для привязки теории к наблюдениям
 - Непонятна причина, вызывающая коллапс
 - Неизвестно, на что заменяется уравнение Шрёдингера
- Неизвестно, что стоит за случайностью/индетерминизмом
- Правило Борна извлекает вероятности из волновой функции

Но все это работает!

- Схема дает самые точные предсказания
(непросто добиться успеха при таком количестве дыр и противоречий)



Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

- “Мы должны считать, что физическая реальность существует независимо от нашего наблюдения.”
- (Грета Герони, 2013, рассмотрела альтернативы на основе теории)
- “Возможно, эти скрытые параметры действительно существуют.”

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- **Скрытые, неизвестные параметры?**
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

- “В природе не существует параметров, которые бы были неизвестны”
- (Грета Гершгорн, 1935, рассмотрела альтернативы на основе теории)
- “В природе не существуют параметры, которые бы были неизвестны”

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

«Всякая физическая теория должна быть построена на основе постулатов, которые не могут быть выведены из более фундаментальных принципов»
«Годовая теория» (1935) «основания квантовой механики» (1935)
«Скрытые параметры» (1951) «Бог играет в кости» (1952)

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

«Квантовая механика, как она сейчас выглядит, не является теорией скрытых параметров, а скорее теорией вероятностей, основанной на ударной теории»
«Скрытые параметры должны быть исключены»

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

«Скрытые параметры, которые привели бы к детерминированности, несовместимы с квантовой механикой»
«Детерминизм, если рассматривать взаимодействие на уровне теории»
«Скрытые параметры должны быть локальными»

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)



Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

“Скрытые параметры, которые могут быть добавлены к квантовой механике, не могут быть использованы для предсказания результатов отдельных измерений.”

“Детерминизм, который рассматривается как альтернатива квантовой теории.”

“Скрытые параметры, которые могут быть добавлены к квантовой механике, не могут быть использованы для предсказания результатов отдельных измерений.”

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

ТЕОРЕМА: “скрытых параметров быть не может”

- (Грета Херманн, 1933: посмотрим внимательнее на условия теоремы)
- ВСЕ усвоили, что скрытых параметров быть не может

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

ТЕОРЕМА: “скрытых параметров быть не может”

- (Грета Херманн, 1933: посмотрим внимательнее на условия теоремы)
- ВСЕ усвоили, что скрытых параметров быть не может

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

ТЕОРЕМА: “скрытых параметров быть не может”

- (Грета Херманн, 1933: посмотрим внимательнее на условия теоремы)
- ВСЕ усвоили, что скрытых параметров быть не может

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

ТЕОРЕМА: “скрытых параметров быть не может”

- (Грета Херманн, 1933: посмотрим внимательнее на условия теоремы)
- **ВСЕ усвоили, что скрытых параметров быть не может**

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

Квантовая случайность: фундаментальная или от незнания

Прячется ли в глубине природы “инкапсулированный детерминизм”?

- Скрытые, неизвестные параметры?
- Действуют детерминированно, но по неизвестным нам правилам?
- Кажущаяся случайность — проявление незнания?
- (выяснить экспериментально невозможно)

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

Эйнштейн: скрытые параметры “должны быть”!

- Квантовая механика неполна

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be

фон Нейман (1931): *Mathematische Grundlagen der Quantummechanik*

ТЕОРЕМА: “скрытых параметров быть не может”

- (Грета Херманн, 1933: посмотрим внимательнее на условия теоремы)
- ВСЕ усвоили, что скрытых параметров быть не может

Бом (1951): квантовая механика со скрытыми параметрами

— ?!

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц
- Траектории частиц — скрытые параметры

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- **Электрон — точечная частица, движется по траектории**
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц
- Траектории частиц — скрытые параметры

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- **Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции**
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц
- Траектории частиц — скрытые параметры

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц
- Траектории частиц — случайные параметры

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

● При одной и той же волновой функции
не точно определены положения частиц

● Траектории частиц — случайные блуждания

Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - $\psi(x)$ — амплитуда вероятности
 - $|\psi(x)|^2$ — вероятность обнаружить частицу в x
- Траектории частиц — скрытые параметры

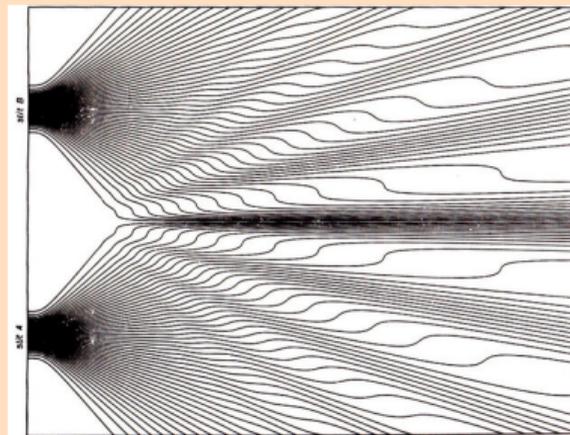
Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - начальные положения — случайны
 - дальнейшая эволюция — детерминистская
- Траектории частиц — скрытые параметры



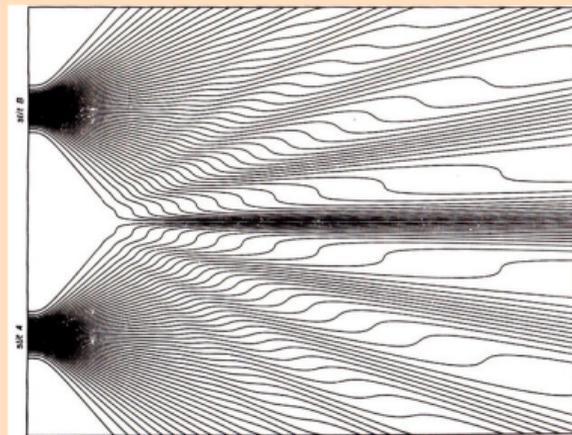
Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - начальные положения — случайны
 - дальнейшая эволюция — детерминистская
- Траектории частиц — скрытые параметры



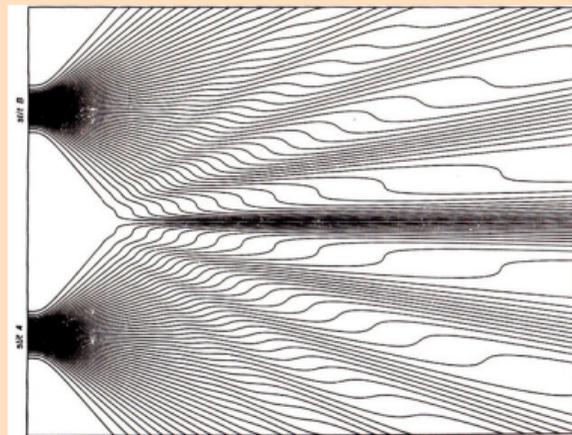
Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - начальные положения — случайны
 - дальнейшая эволюция — детерминистская
- Траектории частиц — скрытые параметры



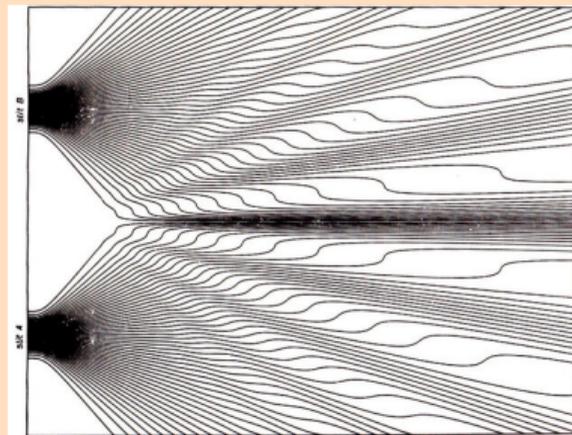
Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - начальные положения — случайны
 - дальнейшая эволюция — детерминистская
- Траектории частиц — скрытые параметры



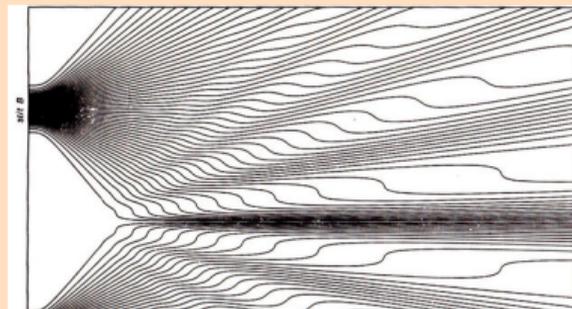
Квантовая механика Боба: волна-лоцман

Поселить в физическом пространстве точечные частицы!

- Электрон — точечная частица, движется по траектории
- Но!! под управлением не уравнений Ньютона, а волновой функции
- Волновая функция непосредственно наделяет электрон скоростью
- Сама волновая функция развивается во времени согласно уравнению Шрёдингера

Случайность — из-за неустранимого люфта в начальных условиях

- При одной и той же волновой функции не точно определены положения частиц:
 - начальные положения — случайны
 - дальнейшая эволюция — детерминистская
- Траектории частиц — скрытые параметры



Эта теория в физическом пространстве эквивалентна квантовой механике!

- Источник случайности — наше незнание начальных положений

Теория в физическом пространстве эквивалентна квантовой механике!

Она же объясняет случайность!

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно

Эйнштейн: “слишком легковесная”

И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

Белл (1964): одумайтесь!

• Теорема фон Неймана — хуже, чем неправдивая

• Почему все провалилось? Почему теория Белла? Она была не нужна

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно

Эйнштейн: “слишком легковесная”

И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

Белл (1964): одумайтесь!

• Теорема фон Неймана — хуже, чем неправдивая

• Почему все провалилось? Теорема Белла. Она была не нужна

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- **Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишней**

(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

Белл (1964): одумайтесь!

«Теорема фон Неймана — хуже, чем неправдивая»

«Поэтому мы должны рассмотреть теорию Белла. Она лучше, чем теория фон Неймана»

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно

(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

Белл (1964): одумайтесь!

• Теорема фон Неймана — хуже, чем неправдивая

• Почему она была названа “теорема фон Неймана”? Она была названа так

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем предполагалось

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц
(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем предполагалось

Семихатов, И. В. Квантовая реальность. М.: Физматлит, 2014. 208 с.

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишество
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц
(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

• Теорема фон Неймана — не доказана

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies неизящно

(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем неправильная

- Почему все проигнорировали теорию Бома?! Она избегает запрета

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишество
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц
(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем неправильная
 - Слишком ограничительные условия \implies запрет на скрытые параметры
 - “Все” напрасно сделали вывод, что скрытые параметры невозможны
- Почему все проигнорировали теорию Бома?! Она избегает запрета

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишество
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц
(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем неправильная
 - Слишком ограничительные условия \implies запрет на скрытые параметры
 - “Все” напрасно сделали вывод, что скрытые параметры невозможны
- Почему все проигнорировали теорию Бома?! Она избегает запрета

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишество
(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц
(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем неправильная
 - Слишком ограничительные условия \implies запрет на скрытые параметры
 - “Все” напрасно сделали вывод, что скрытые параметры невозможны
- Почему все проигнорировали теорию Бома?! Она избегает запрета

Никто не впечатлился

Паули, Гайзенберг, фон Нейман — “ненужная” теория

- Воспроизводит квантовую механику \implies лишнее построение
- Скрытые параметры — не в согласии с условиями теоремы фон Неймана \implies излишество

(но в согласии с условиями теоремы скрытые параметры невозможны!)

Эйнштейн: “слишком легковесная”

- И теория нелокальна: изменения волновой функции передаются мгновенно в изменения скорости далеких частиц

(однако передавать сверхсветовые СМС нельзя!)

Белл (1964): одумайтесь!

- Теорема фон Неймана — хуже, чем неправильная
 - Слишком ограничительные условия \implies запрет на скрытые параметры
 - “Все” напрасно сделали вывод, что скрытые параметры невозможны
- Почему все проигнорировали теорию Бома?! Она избегает запрета

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

— под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и рождение на нем квантовой механики (без частиц)
- “Дуальная волна-частица” (двойственность волна-частица)
- Коммутирующие операторы Бора
- Принцип дополнительности
- Принцип неопределенности Гейзенберга

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

— под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и рождение на нем квантовой механики (Сов. механика)
- “Дуализм волна-частица” (двуязычный перевод на русский язык)
- Коммутирующие операторы Бора
- Принцип дополнительности
- Принцип неопределенности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- **Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)**

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

... под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

• Уравнение Шрёдингера и рождение на нем квантовой механики (без частиц)

• Двойная волна-частица (квантовая механика + классическая)

• Коммутирующие операторы Бора

• Принцип дополнительности

• Принцип неопределенности Гейзенберга

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

... под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

• Уравнение Шрёдингера и рождение на нем квантовой механики (Сов. механика)

• Уравнение де Бройля для частиц (квантовой механики де Бройля)

• Квантовая механика де Бройля

• Квантовая механика де Бройля

• Квантовая механика де Бройля

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

• Уравнение Шрёдингера и его решения на нем являются основой современной квантовой механики

• Уравнение Воланда для частиц (и волн) в квантовой механике

• Уравнение Шрёдингера — уравнение Бора

• Уравнение Воланда — уравнение де Бройля

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- Реинкарнация — в теории Бома
которую проигнорировали
— среди прочего, из-за нелокальности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)
- !!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- Реинкарнация — в теории Бома
которую проигнорировали
— среди прочего, из-за нелокальности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- Реинкарнация — в теории Боба
которую проигнорировали
— среди прочего, из-за нелокальности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- **Реинкарнация — в теории Боба**

которую проигнорировали

— среди прочего, из-за нелокальности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- Реинкарнация — в теории Боба

которую проигнорировали

— среди прочего, из-за нелокальности

Отступление: дополнительная ирония

Теория де Бройля 1923–1927

- И частицы, и волны
- Есть уравнение для частиц (ими управляют волны)

!!! Но не было уравнения для волн!

Шрёдингер написал уравнение в развитие идей де Бройля

де Бройль отказался от своей идеи частиц

- под влиянием критики Паули, Гайзенберга, Бора, ...

Остатки разгромленной теории де Бройля:

- Уравнение Шрёдингера и основанная на нем квантовая механика (без частиц!)
- “Дуализм волна–частица” (в квантовой механике такого нет)
- Реинкарнация — в теории Боба
которую проигнорировали
— среди прочего, из-за нелокальности

Можно ли **поправить** нелокальность теории Бома?
— **локально раздать свойства** квантовым объектам?

Белл: **есть способ** это выяснить!

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов 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. = $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2$ (тогда второй электрон окажется \downarrow)
 - Если \downarrow , то зап.с. = $|\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ (тогда второй электрон окажется \uparrow)

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$ можно математически точно записать в виде $|\chi\rangle_1|\chi\rangle_2 - |\chi'\rangle_1|\chi'\rangle_2$, используя значения спина вдоль другого направления.
- Измерим спин вдоль нового направления:

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

• Создадим запутанное состояние двух электронов ЗАП.С. = $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$

• Измерение над первым: случайно выпадает \uparrow или \downarrow

•

•

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

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

можно математически точно записать в виде $|\chi\rangle_1|\chi\rangle_2 - |\chi'\rangle_1|\chi'\rangle_2$

используя значения спина вдоль другого направления

• Измерим спин вдоль нового направления:

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов 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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать в виде $|\uparrow\rangle_1|\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1|\uparrow\rangle_2$
используя значения спина вдоль другого направления
- Измеряем спины вдоль нового направления

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать в виде $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
используя значения спина вдоль другого направления
- Измеряем спины вдоль нового направления

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

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

можно математически точно записать в виде $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$

используя значения спина вдоль другого направления

Измеряем спины вдоль нового направления

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

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

нельзя локально точно узнать спин электрона $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$

используя измерения спина вдоль другого направления

Измеряем спин вдоль нового направления

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

Запутанное состояние $|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2)$

измеряем направление спина электрона в направлении \vec{K}_1 и \vec{K}_2 и получаем

коррелируемые значения спина вдоль другого направления

Измеряем спины вдоль нового направления

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать 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:

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать 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:

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать 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 $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\swarrow\rangle_1 |\nearrow\rangle_2$, второй электрон оказался \nearrow
 - если первый \nearrow , то $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\nearrow\rangle_1 |\swarrow\rangle_2$, второй электрон оказался \swarrow

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
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”?

Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать 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 $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\swarrow\rangle_1 |\nearrow\rangle_2$, второй электрон оказался \nearrow
 - если первый \nearrow , то $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\nearrow\rangle_1 |\swarrow\rangle_2$, второй электрон оказался \swarrow

Всегда ли можно локально обзавестись свойствами?

Измерения над запутанной парой электронов

- Создадим запутанное состояние двух электронов $\text{ЗАП.С.} = |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
- Измерение над первым: случайно выпадает \uparrow или \downarrow
 - если \uparrow , то $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2$, 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”?

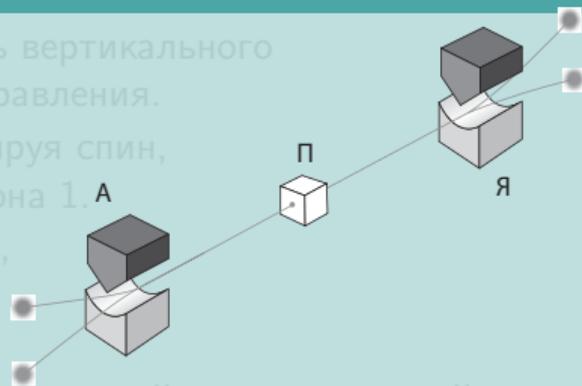
Запутанные партнеры показывают корреляцию для любого направления!

- Запутанное состояние $|\uparrow\rangle_1 |\downarrow\rangle_2 - |\downarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$
можно математически точно записать 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 $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\swarrow\rangle_1 |\nearrow\rangle_2$, второй электрон оказался \nearrow
 - если первый \nearrow , то $\text{ЗАП.С.} \xrightarrow{\text{коллапс}} |\nearrow\rangle_1 |\swarrow\rangle_2$, 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!

- Знание спина вдоль различных направлений одновременно не возможно (принцип неопределенности).
- Классическая механика (классическая информация) допускает существование информации о спине электрона вдоль различных направлений!

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

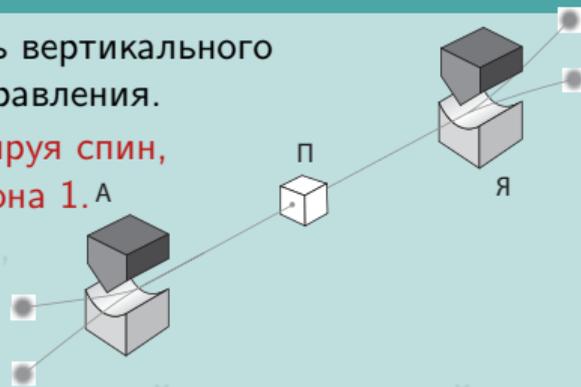
- Электрон 2 знает ответ только на один из вопросов — неважно какой.
- Классическая механика (классическая информация) должна уметь ответить на оба вопроса (различные направления).

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

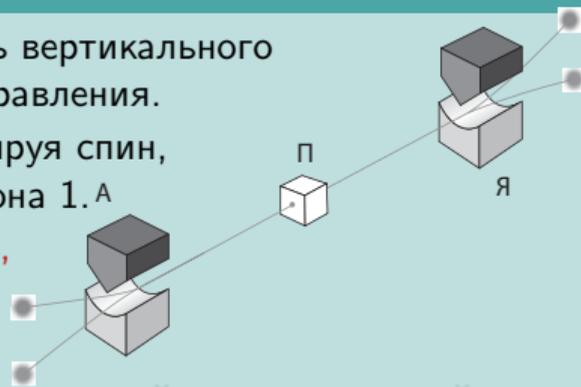
- Электрон 2 знает только один из возможных ответов на вопрос о спине.
- Классическая механика (классическая физика) предполагает существование одновременно двух возможных ответов.

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

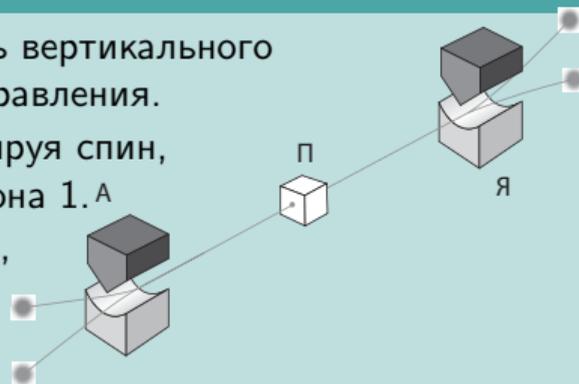
- Электрон 2 знает только один из возможных ответов на поставленный вопрос.
- Классическая механика (даже если допустить идеальную передачу информации) запрещает электрон 2 знать оба возможных ответа.

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

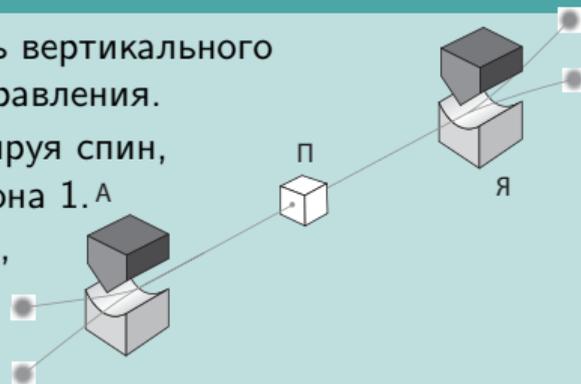
- Электрон 2 знает ответ на вопрос о спине вдоль вертикального направления, но не знает ответ на вопрос о спине вдоль другого направления.
- Электрон 2 знает ответ на вопрос о спине вдоль другого направления, но не знает ответ на вопрос о спине вдоль вертикального направления.

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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.



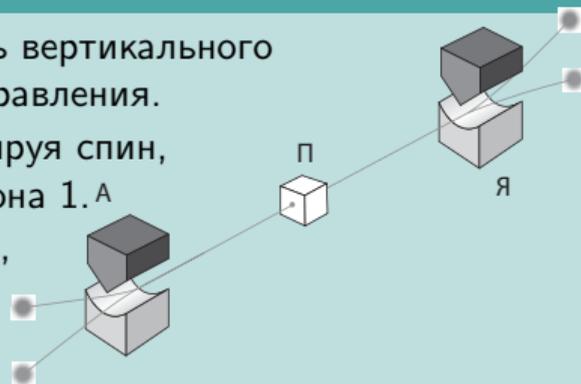
Но “знать оба ответа” запрещено!

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

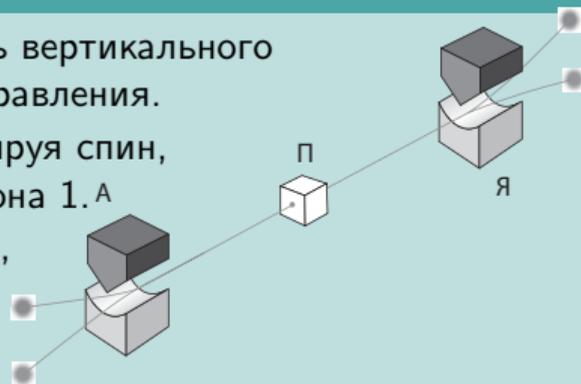
- Значения спина вдоль различных направлений математически несовместимы
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

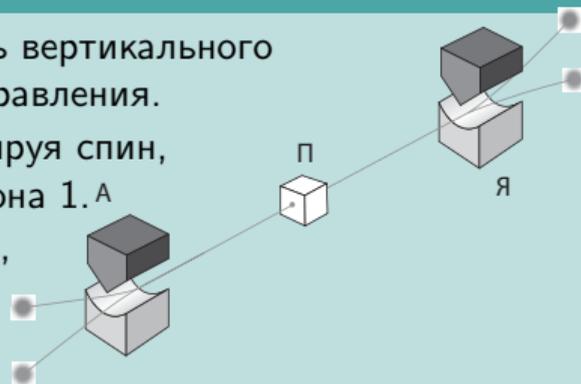
- Значения спина вдоль различных направлений математически несовместимы
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

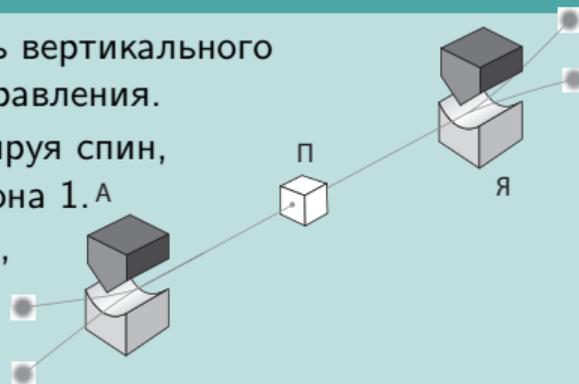
- Значения спина вдоль различных направлений математически несовместимы
- **КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений**

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

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!

- Значения спина вдоль различных направлений математически несовместимы
- КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА ЗАПРЕЩАЕТ одновременную информацию о спине вдоль различных направлений

Эйнштейн: следовательно, квантовая механика не полна!

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация "записана" в момент создания пары
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают "шпаргалки" в момент создания запутанной пары:
 - Каждый электрон несет с собой список ответов ("спин" или "назад") на вопрос о спине вдоль любого направления
- От "шпаргалки" требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - поэтому шпаргалка случайным образом выбирается от одной запутанной пары к другой
 - Это случайность, которую невозможно предсказать, даже зная все

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- **ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света**
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Это означает, что электроны обладают "скрытыми параметрами".
 - Следовательно, квантовая механика неполна.
- Если электроны получают "шпаргалки" в момент создания запутанной пары:
 - Каждый электрон несет с собой список ответов ("спин" или "назад") на вопросы о спине вдоль любого направления.
- От "шпаргалки" требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - поэтому шпаргалка случайным образом выбирается от одной запутанной пары в другой.
 - Это означает, что электроны не могут передать информацию быстрее скорости света.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - Каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - которую шпаргалка случайным образом выбирает от одной запутанной пары в другой.
 - Это означает, что информация о спинах электронов не может передаваться быстрее скорости света.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - каждая электрон несет с собой свой секрет
 - секрет или назид или против и спина вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - секрет не должен зависеть от выбора направления измерения
 - секрет не должен зависеть от выбора направления измерения

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 -
 -
 -
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 -
 -

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:

- каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - которую невозможно предсказать
 - пары электронов
 - функции

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - **каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления**
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
-
-

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not 'Complete'
Even Though 'Correct.'

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
'the Physical Reality' Can Be
Provided Eventually.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - поэтому шпаргалка случайным образом изменяется от одной запутанной пары к другой
 - Эта случайность управляется какими-то скрытыми параметрами

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - **поэтому шпаргалка случайным образом изменяется от одной запутанной пары к другой**
 - Эта случайность управляется какими-то скрытыми параметрами

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Несут ли запутанные электроны свои свойства с собой?

Эйнштейн, Подольский, Розен (1935):

- ИЛИ электроны передают сигналы быстрее света
- ИЛИ заранее известны спины вдоль всех направлений
 - Но эта информация “не помещается” в волновой функции
 - Следовательно, квантовая механика неполна
- Если электроны получают “шпаргалки” в момент создания запутанной пары:
 - каждый электрон несет с собой список ответов (“вперед” или “назад”) на вопрос о спине вдоль любого направления
- От “шпаргалки” требуется воспроизвести квантовую случайность,
 - поэтому шпаргалка случайным образом изменяется от одной запутанной пары к другой
 - Эта случайность управляется какими-то скрытыми параметрами

EINSTEIN ATTACKS QUANTUM THEORY

Scientist and Two Colleagues
Find It Is Not ‘Complete’
Even Though ‘Correct.’

SEE FULLER ONE POSSIBLE

Believe a Whole Description of
‘the Physical Reality’ Can Be
Provided Eventually.

Ловушка Белла

Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Алиса и Боб измеряют спины запутанных электронов
вдоль различных рассогласованных направлений?

- Степень корреляции $\langle AB \rangle = \langle AB \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle$ (считается по таблице)
- “Формула Белла” –
$$\langle AB \rangle - \langle A \rangle \langle B \rangle = \text{Среднее}[\alpha, \beta] + \text{Среднее}[\alpha, \beta'] + \text{Среднее}[\alpha', \beta] - \text{Среднее}[\alpha', \beta']$$

Теорема Белла: “Формула Белла” ≤ 2

Ловушка Белла

Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Алиса и Боб измеряют спины запутанных электронов
вдоль различных раскоординатных направлений

- Степень корреляции $\langle AB \rangle = \langle AB \rangle_{\text{классическая}} + \langle AB \rangle_{\text{квантовая}}$
- “Формула Белла” –
$$\langle AB \rangle = \text{Среднее}[a, b] + \text{Среднее}[a, b'] + \text{Среднее}[a', b] - \text{Среднее}[a', b']$$

Теорема Белла: “Формула Белла” ≤ 2

Ловушка Белла

Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов
вдоль *различных*, рассогласованных направлений

• 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: $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$

- “Формула Белла” =
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

Теорема Белла: “Формула Белла” ≤ 2

Ловушка Белла

Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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

Теорема Белла: “Формула Белла” ≤ 2

Ловушка Белла

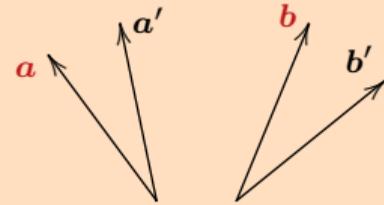
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

- 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	+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	-1	+1

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

Ловушка Белла

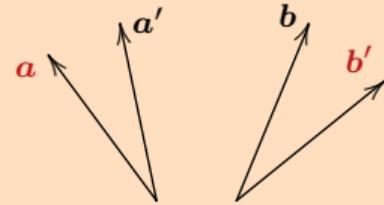
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



А	-1	+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: $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$
- “Формула Белла” =
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

Ловушка Белла

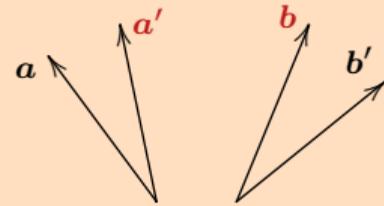
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



А	-1	+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: $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$
- "Формула Белла" =
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

Ловушка Белла

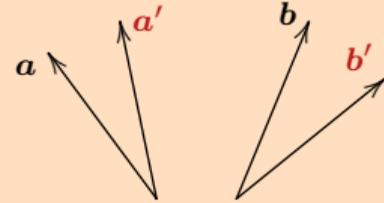
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



А	-1	+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: $\text{СРЕДНЕЕ}(\text{результат}_A \cdot \text{результат}_Я)$
- "Формула Белла" =
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

Ловушка Белла

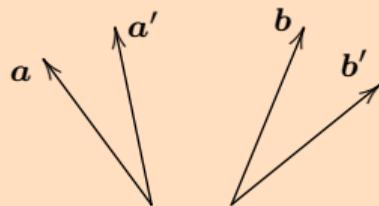
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



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

Ловушка Белла

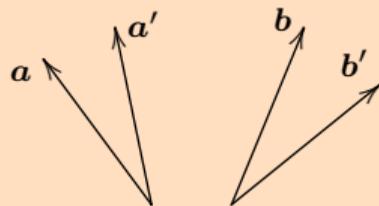
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



А	-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" =

Ловушка Белла

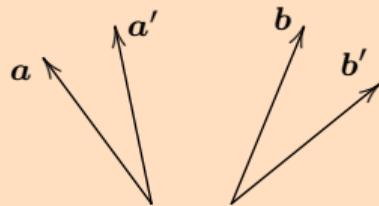
Нам не известны никакие подробности устройства шпаргалки

- НАВЕРНОЕ, она может быть такой, чтобы имитировать правило Борна

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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

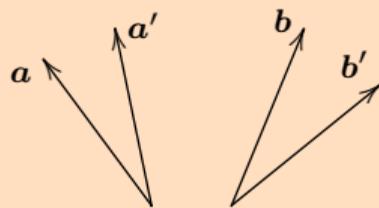
- "Формула Белла" =

Ловушка Белла

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

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



А	-1	+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	
×	-1	+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” =
$$= \text{СРЕДНЕЕ}[a, b] + \text{СРЕДНЕЕ}[a, b'] + \text{СРЕДНЕЕ}[a', b] - \text{СРЕДНЕЕ}[a', b']$$

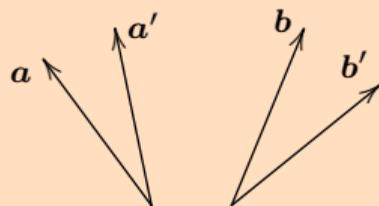
Теорема Белла: “Формула Белла” ≤ 2

Ловушка Белла

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

Идея: Аня и Яша измеряют спины запутанных электронов вдоль *различных*, рассогласованных направлений

- 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	-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” ≤ 2

Если бы Эйнштейн знал про “формулу Белла”, он полагал бы, что она ≤ 2
(скрытые параметры)

Если бы Эйнштейн знал про “формулу Белла”, он полагал бы, что она ≤ 2
(скрытые параметры)

Белл исходно был на стороне Эйнштейна

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: “формула Белла” ≤ 2
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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) каждая свойста происходит только локально (“при контакте”) И

2) свойства объекта существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: **“формула Белла” ≤ 2**

— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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) каждая свойста происходит только локально (“при контакте”) И

2) свойства объектов существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: “формула Белла” ≤ 2
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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) каждая свойста происходит только локально (“при контакте”) И

2) свойства объектов существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: “формула Белла” ≤ 2
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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) каждая вещь сама по себе существует только локально (“при контакте”) и

2) свойства объекта существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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 поздно)

Неравенства Белла нарушаются: в природе не 2, а $2\sqrt{2}$!

Не могут быть одновременно верны утверждения:

(локальный реализм)

1) каждая вещь сама по себе существует только локально (“здесь и сейчас”) и

2) свойства объекта существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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)

- каждая частица имеет свойства только локально (“приватно”)
- свойства объекта существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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)

Каждый объект взаимодействует только локально (“здесь и сейчас”) и
свойства объекта существуют независимо от наблюдения (“объективно”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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 (реализм) и

свойства объектов существуют независимо от наблюдателя (локализм)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: “формула Белла” ≤ 2
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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”)

Нарушение неравенств Белла

Если электроны несут с собой шпаргалку, то

- выполнено неравенство Белла: $\text{“формула Белла”} \leq 2$
— локальные скрытые параметры дают ограничения на степень корреляции

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

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

А что в природе?

(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
- Нельзя локально и заранее раздать все свойства

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
 - Нельзя локально и заранее раздать все свойства

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**
- Нельзя локально и заранее раздать все свойства

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
- **Нельзя локально и заранее раздать все свойства**

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
- Нельзя локально и заранее раздать все свойства

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
- Нельзя локально и заранее раздать все свойства

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



Белл: Мне жаль, что идея Эйнштейна не работает. Разумная вещь просто не работает

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

→ Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:

Невозможно назначить значения свойствам для независимых друг от друга величин, обладающих свойствами ψ -объекта.

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:

Невозможно назначить значения величине вне зависимости от других величин, измеряемых одновременно с ней!

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:

Невозможно назначить значения величине вне зависимости от других величин, измеряемых одновременно с ней!

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:
Невозможно назначить значения величине вне зависимости от других величин, измеряемых одновременно с ней!

Эти свойства неизбежны в любой теории, “дополняющей” квантовую механику

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:
Невозможно назначить значения величине вне зависимости от других величин, измеряемых одновременно с ней!

Эти свойства неизбежны в любой теории, “дополняющей” квантовую механику

У теории де Бройля–Бома — другие недостатки

- Она не согласуется со специальной теорией относительности

Уроки теории де Бройля–Бома

Нелокальность скрытых параметров — не баг, а необходимость

Нарушение условий теоремы фон Неймана — необходимость

- Нарушение условий теоремы фон Неймана — контекстуальность:
Невозможно назначить значения величине вне зависимости от других величин, измеряемых одновременно с ней!

Эти свойства неизбежны в любой теории, “дополняющей” квантовую механику

У теории де Бройля–Бома — другие недостатки

- Она не согласуется со специальной теорией относительности

- Мы не знаем, как строго “приземлить” схему квантовой механики в трехмерное физическое пространство

- Мы не знаем, как строго “приземлить” схему квантовой механики в трехмерное физическое пространство
- Мы не знаем, происходит в действительности или только кажется коллапс волновой функции

- Мы не знаем, как строго “приземлить” схему квантовой механики в трехмерное физическое пространство
- Мы не знаем, происходит в действительности или только кажется коллапс волновой функции
- Мы не знаем, есть ли что-то “за” квантовой механикой

- Мы не знаем, как строго “приземлить” схему квантовой механики в трехмерное физическое пространство
- Мы не знаем, происходит в действительности или только кажется коллапс волновой функции
- Мы не знаем, есть ли что-то “за” квантовой механикой
- Но квантовая механика работает!

- Мы не знаем, как строго “приземлить” схему квантовой механики в трехмерное физическое пространство
- Мы не знаем, происходит в действительности или только кажется коллапс волновой функции
- Мы не знаем, есть ли что-то “за” квантовой механикой
- Но квантовая механика работает!

Вполне возможно, что в один прекрасный день мы обнаружим расхождения квантовой теории с экспериментами. Однако данные на сегодняшний день подтверждают тот взгляд, что наша Вселенная является квантовой до самой сердцевины.

В. ЗУРЕК

Сто лет успеха и недосказанности

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!

Всё, что движется: Прогулки по беспокойной Вселенной

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ — доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник отделения теоретической физики Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, ведущий передачи «Вопрос науки» на телеканале «Наука», лектор и автор научно-популярных фильмов.

Название книги выглядит шероховатым: более естественным кажется «Обо всем, что движется». Однако выбранное название точно отражает суть книги — Семихатов не сторонний наблюдатель, а проводник читателя по круговороту Вселенной. Я не встречал книг, похожих на эту. В ней представлена картина мира, в которой, как я считал, обходиться без формул невозможно, однако автору удалось объяснить фундаментальные уравнения словами так, что некоторые явления повернулись новой для меня гранью.

Сергей Нечаев, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Национального центра научных исследований (CNRS), Франция

Квантовый мир — это самая большая загадка природы после загадки жизни. Тут нет ничего наглядного, тут не работает наше обычное сознание и интуиция. Как рассказать о нем так, чтобы дух захватывало, чтобы воображение зашкаливало? Перед вами, читатель, такая книга — книга о вечно движущейся Вселенной, в том числе квантовой, по которой вас приглашают на увлекательную прогулку.

Дмитрий Казаков, доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, директор лаборатории теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований

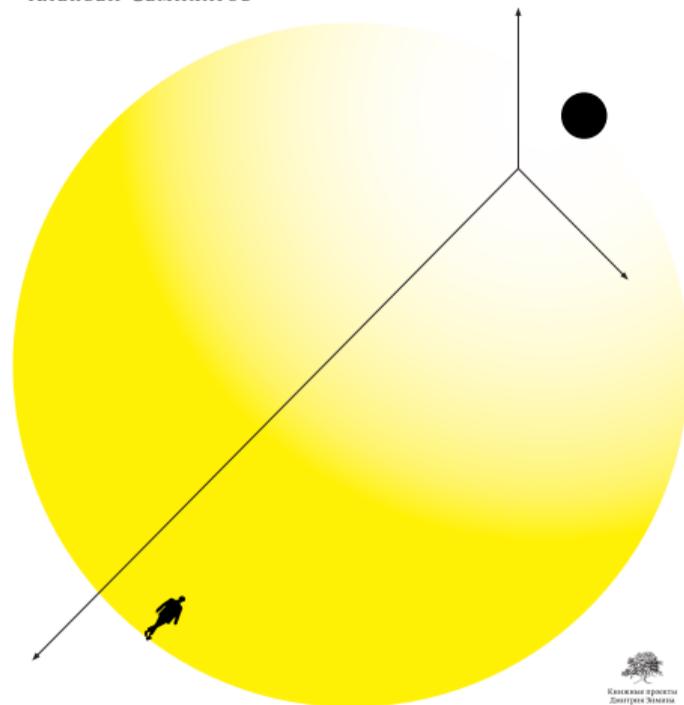
Прогулки по Вселенной — дело опасное, без проводника не обойтись. Многие останутся непонятными, если рядом нет знающего человека. К счастью, в этой книге у вас есть надежный и симпатичный проводник, опытный проводник по беспокойной Вселенной — Алексей Семихатов.

Владимир Сурдин, кандидат физико-математических наук, астроном, лауреат премии «Просветитель»

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ
ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ

ВСЁ, ЧТО ДВИЖЕТСЯ ПРОГУЛКИ ПО БЕСПОКОЙНОЙ ВСЕЛЕННОЙ

АЛЕКСЕЙ СЕМИХАТОВ



Думай по-своему

АНО

Книжные проекты
Дмитрия Зинина



Книжные проекты
Дмитрия Зинина



АНО

Семихатов

от космических орбит до квантовых полей

Квантовая реальность



Книжные проекты
Дмитрия Зинина

АНО

Книжные проекты
Дмитрия Зинина

JPoint

37 / 37