

# Квантовая физика

## Введение

Андрей Рабусов

27 декабря 2020

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# Содержание

Квантовая  
физика

А. Рабусов

## Квантовая механика

Введение

Статические постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

## Квантовая теория поля

Дискретные симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные установки

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

## Заключение

Заключение

## Поле комплексных чисел $\mathbb{C}$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  над полем комплексных чисел  $\mathbb{C}$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  над полем комплексных чисел  $\mathbb{C}$

Линейное векторное пространство



Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  над полем комплексных чисел  $\mathbb{C}$

Линейное векторное пространство

Определено скалярное произведение для любой пары векторов  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$ :

$$(\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{v}) \in \mathbb{C}, \mathbf{u}^\dagger = (\mathbf{u}^\top)^*$$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  над полем комплексных чисел  $\mathbb{C}$

Линейное векторное пространство

Определено скалярное произведение для любой пары векторов  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$ :

$$(\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{v}) \in \mathbb{C}, \mathbf{u}^\dagger = (\mathbf{u}^\top)^*$$

Скалярное произведение порождает норму, например

$$\|\mathbf{u}\|^2 = (\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{u})$$

Поле комплексных чисел  $\mathbb{C}$

$$i^2 = -1$$

$$z = x + i y, z^* = x - i y$$

$$e^{i\varphi} = \cos \varphi + i \sin \varphi$$

Гильбертово пространство  $\mathcal{H}$  над полем комплексных чисел  $\mathbb{C}$

Линейное векторное пространство

Определено скалярное произведение для любой пары векторов  $\mathbf{u}$  и  $\mathbf{v}$ :

$$(\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{v}) \in \mathbb{C}, \mathbf{u}^\dagger = (\mathbf{u}^\top)^*$$

Скалярное произведение порождает норму, например

$$\|\mathbf{u}\|^2 = (\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{u})$$

Обозначения Дирака:  $\langle u| = \mathbf{u}^\dagger, |u\rangle = \mathbf{u}$

$$\langle u|v\rangle = (\mathbf{u}^\dagger, \mathbf{v})$$

# Постулаты 1–2

**П1** Чистое состояние системы  $|\psi\rangle$  описывается вектором гильбертова пространства  $\mathcal{H}$  над  $\mathbb{C}$

# Постулаты 1–2

- П1 Чистое состояние системы  $|\psi\rangle$  описывается вектором гильбертова пространства  $\mathcal{H}$  над  $\mathbb{C}$
- П2 Чистое состояние  $|\psi\rangle$  задаётся только направлением вектора из  $\mathcal{H}$

# Постулаты 1–2

- П1** Чистое состояние системы  $|\psi\rangle$  описывается вектором гильбертова пространства  $\mathcal{H}$  над  $\mathbb{C}$
- П2** Чистое состояние  $|\psi\rangle$  задаётся только направлением вектора из  $\mathcal{H}$   
Можно выбрать любую ненулевую нормировку, например

$$\langle\psi|\psi\rangle = 1$$

# Постулаты 1–2

- П1** Чистое состояние системы  $|\psi\rangle$  описывается вектором гильбертова пространства  $\mathcal{H}$  над  $\mathbb{C}$
- П2** Чистое состояние  $|\psi\rangle$  задаётся только направлением вектора из  $\mathcal{H}$   
Можно выбрать любую ненулевую нормировку, например

$$\langle\psi|\psi\rangle = 1$$

Эволюция замкнутой системы унитарна

$$|\psi(t)\rangle = U(t, t_0) |\psi(t_0)\rangle$$

$$U^\dagger(t, t_0) U(t, t_0) = \hat{1}$$

# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$



# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$

После многократных измерений при помощи макроскопического прибора  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$

После многократных измерений при помощи макросприбора  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

$|\varphi_i\rangle$  различимы при помощи макросприбора, т. е.

$$\langle \varphi_i | \varphi_j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$

После многократных измерений при помощи макросприбора  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

$|\varphi_i\rangle$  различимы при помощи макросприбора, т. е.

$$\langle \varphi_i | \varphi_j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |\varphi_i\rangle, \quad c_i \in \mathbb{C}$$

# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$

После многократных измерений при помощи макropriбора  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$   
 $|\varphi_i\rangle$  различимы при помощи макropriбора, т. е.

$$\langle \varphi_i | \varphi_j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |\varphi_i\rangle, \quad c_i \in \mathbb{C}$$

$\hat{P}_{\varphi_i}$  Проекционный оператор  $\hat{P}_{\varphi_i} = |\phi_i\rangle \langle \phi_i|$

$$\hat{P}_{\varphi_i} |\psi\rangle = |\phi_i\rangle$$

# Принцип суперпозиции (постулат 3)

Положим, что квантовая система до измерения в состоянии  $|\psi\rangle$

После многократных измерений при помощи макropriбора  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$   
 $|\varphi_i\rangle$  различимы при помощи макropriбора, т. е.

$$\langle \varphi_i | \varphi_j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ 1 & \text{if } i = j \end{cases}$$

$$|\psi\rangle = \sum_i c_i |\varphi_i\rangle, \quad c_i \in \mathbb{C}$$

$\hat{P}_{\varphi_i}$  Проекционный оператор  $\hat{P}_{\varphi_i} = |\varphi_i\rangle \langle \varphi_i|$

$$\hat{P}_{\varphi_i} |\psi\rangle = |\varphi_i\rangle$$

$$\sum_i \hat{P}_{\varphi_i} = \hat{1}$$

# Постулаты 4–5

## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

**Статические  
постулаты**

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

Условная вероятность  $w_i$  обнаружить систему в состоянии  $i$ :

$$w_i = |c_i|^2 = \langle \psi | \varphi_i \rangle \langle \varphi_i | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{P}_\psi \hat{P}_{\varphi_i} \right\}$$



## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

Условная вероятность  $w_i$  обнаружить систему в состоянии  $i$ :

$$w_i = |c_i|^2 = \langle \psi | \varphi_i \rangle \langle \varphi_i | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{P}_\psi \hat{P}_{\varphi_i} \right\}$$

## П5 Среднее наблюдаемого

## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

Условная вероятность  $w_i$  обнаружить систему в состоянии  $i$ :

$$w_i = |c_i|^2 = \langle \psi | \varphi_i \rangle \langle \varphi_i | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{P}_\psi \hat{P}_{\varphi_i} \right\}$$

## П5 Среднее наблюдаемого

Набор наблюдаемых  $\{a_i\}$  (спектр,  $a_i \in \mathbb{R}$ )

### П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

Условная вероятность  $w_i$  обнаружить систему в состоянии  $i$ :

$$w_i = |c_i|^2 = \langle \psi | \varphi_i \rangle \langle \varphi_i | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{P}_\psi \hat{P}_{\varphi_i} \right\}$$

### П5 Среднее наблюдаемого

Набор наблюдаемых  $\{a_i\}$  (спектр,  $a_i \in \mathbb{R}$ )

$\hat{A} |a_i\rangle = a_i |a_i\rangle$ ,  $\hat{A}$  — эрмитовский оператор,  $|a_i\rangle$  — собственные состояния оператора  $\hat{A}$

## П4 Физический смысл $c_i$ (Макс Борн)

Пусть во время измерения  $|\psi\rangle \rightarrow |\varphi_i\rangle$

Условная вероятность  $w_i$  обнаружить систему в состоянии  $i$ :

$$w_i = |c_i|^2 = \langle \psi | \varphi_i \rangle \langle \varphi_i | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{P}_\psi \hat{P}_{\varphi_i} \right\}$$

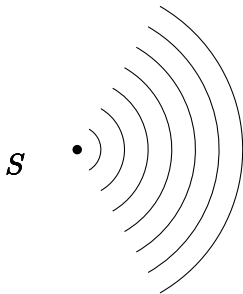
## П5 Среднее наблюдаемого

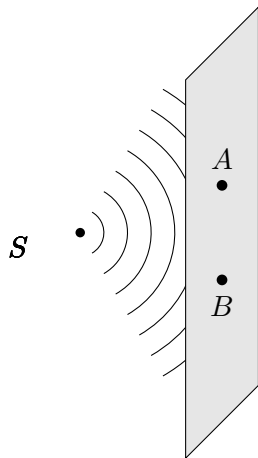
Набор наблюдаемых  $\{a_i\}$  (спектр,  $a_i \in \mathbb{R}$ )

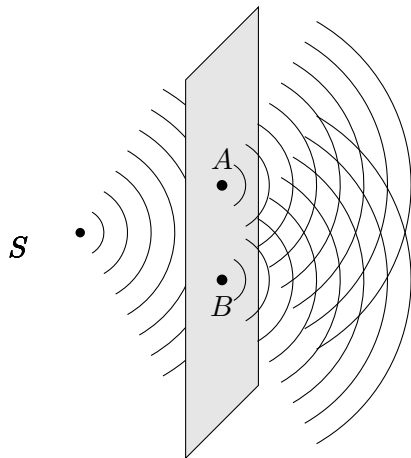
$\hat{A} |a_i\rangle = a_i |a_i\rangle$ ,  $\hat{A}$  — эрмитовский оператор,  $|a_i\rangle$  — собственные состояния оператора  $\hat{A}$

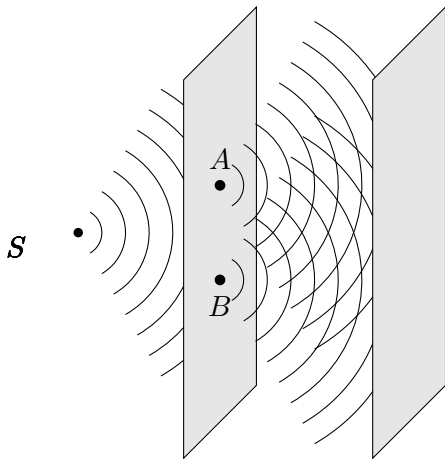
Среднее значение наблюдаемой  $a$  по состоянию  $|\psi\rangle$ :

$$\langle a \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle = \mathbb{P} \left\{ \hat{A} \hat{P}_\psi \right\}$$

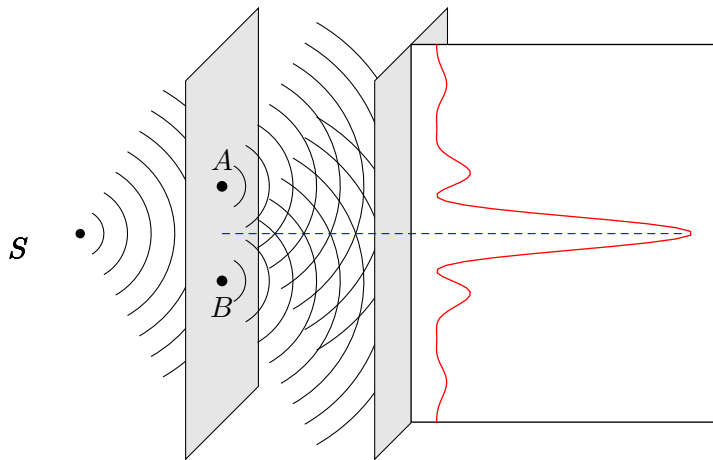












# Дополнительный детектор у щели $A$ — дифракция

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

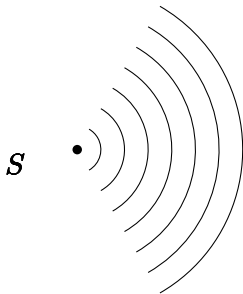
Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

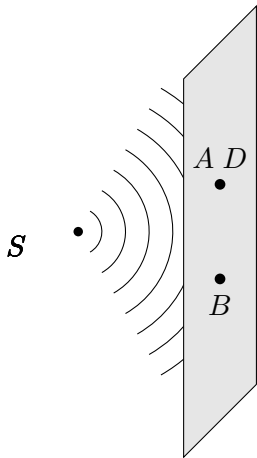
Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение



# Дополнительный детектор у щели $A$ — дифракция



Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

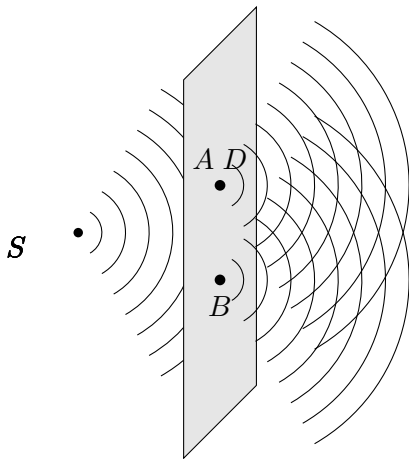
$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# Дополнительный детектор у щели $A$ — дифракция



Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Закключение

# Дополнительный детектор у щели $A$ — дифракция

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

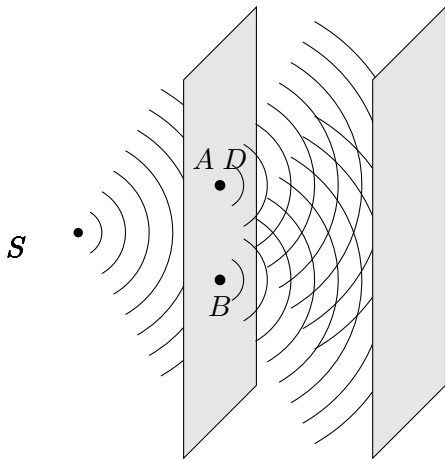
Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение



# Дополнительный детектор у щели $A$ — дифракция

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

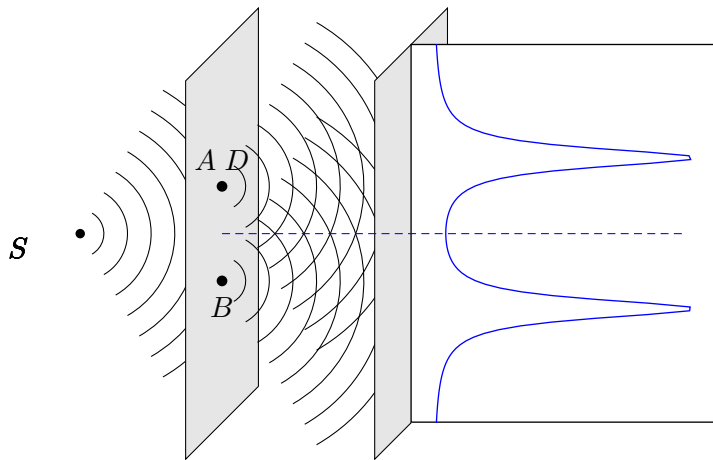
Дискретные  
симметрии

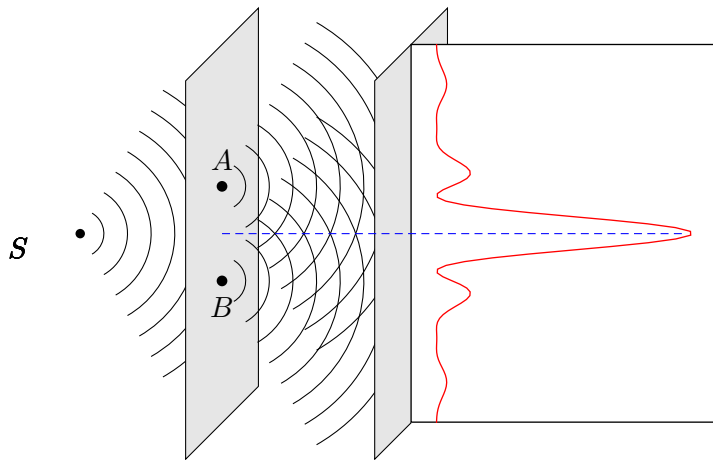
$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение





# Классическая логика

Классическое описание:

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение



# Классическая логика

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

**Двухщелевой опыт**

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Свойство операций «и», «или» в классической логике:

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} = w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Свойство операций «и», «или» в классической логике:

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} = w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$

Квантовое описание:

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Свойство операций «и», «или» в классической логике:

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} = w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$

Квантовое описание:

$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\}$  — интерференция

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Свойство операций «и», «или» в классической логике:

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} = w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$

Квантовое описание:

$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\}$  — интерференция

$w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$  — дифракция

Классическое описание:

Событие  $A$  — фотон прошёл через щель  $A$

Событие  $B$  — фотон прошёл через щель  $B$

Событие  $C(x)$  — фотон попал на фотопластину в точке  $x$

Свойство операций «и», «или» в классической логике:

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} = w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$

Квантовое описание:

$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\}$  — интерференция

$w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$  — дифракция

$$w \{C(x) \text{ и } [A \text{ или } B]\} \neq w \{ [C(x) \text{ и } A] \text{ или } [C(x) \text{ и } B] \}$$



# Содержание раздела

Квантовая механика

Квантовая теория поля

Дискретные симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные установки

Заключение

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

**Дискретные  
симметрии**

$\mathcal{CP}$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = \pm |\psi(\vec{x})\rangle$$

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = \pm |\psi(\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = \pm |\psi(t)\rangle$$



# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = \pm |\psi(\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = \pm |\psi(t)\rangle$$

$$\hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i = 0)\rangle = \pm |\psi\rangle$$

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = \pm |\psi(\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = \pm |\psi(t)\rangle$$

$$\hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i = 0)\rangle = \pm |\psi\rangle$$

$\mathcal{CPT}$ -теорема:

# $\mathcal{P}$ -, $\mathcal{T}$ -, и $\mathcal{C}$ - симметрии

Определение преобразований:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = |\psi(-\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = |\psi(-t)\rangle$$

$$q_i \text{ — набор зарядов, } \hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i)\rangle = |\psi(-q_i)\rangle$$

Собственные состояния:

$$\hat{\mathcal{P}} |\psi(\vec{x})\rangle = \pm |\psi(\vec{x})\rangle$$

$$\hat{\mathcal{T}} |\psi(t)\rangle = \pm |\psi(t)\rangle$$

$$\hat{\mathcal{C}} |\psi(q_i = 0)\rangle = \pm |\psi\rangle$$

$\mathcal{CPT}$ -теорема:

$$\mathcal{CPT} = 1$$

# Пи- и К- мезоны

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

**$CP$  симметрия**

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# Пи- и К- мезоны

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

**$CP$  симметрия**

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# Пи- и К- мезоны

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$



## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

# Пи- и К- мезоны

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\overline{K}^0 \neq K^0$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\bar{K}^0 \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \bar{K}^0 = K_S, K_L$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\overline{K^0} \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \overline{K^0} = K_S, K_L$

$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ,  $\mathcal{CP} = 1$ )

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\bar{K}^0 \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \bar{K}^0 = K_S, K_L$

$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ,  $CP = 1$ )

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  ( $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $CP = -1$ )



## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\bar{K}^0 \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \bar{K}^0 = K_S, K_L$

$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ,  $\mathcal{CP} = 1$ )

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  ( $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\mathcal{CP} = -1$ )

Осцилляции нейтральных каонов:  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\overline{K}^0 \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \overline{K}^0 = K_S, K_L$

$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ,  $\mathcal{CP} = 1$ )

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  ( $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\mathcal{CP} = -1$ )

Осцилляции нейтральных каонов:  $\overline{K}^0 \rightarrow K^0$

Регенерация  $K_S$  в веществе

## Пионы ( $\pi$ -мезоны)

$\pi^+$ ,  $\pi^0$ , и  $\pi^-$  — частицы-переносчики ядерного взаимодействия

Масса  $m(\pi) \approx 270 m(e)$

Время жизни  $\tau(\pi^\pm) \approx 2 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $\tau(\pi^0) \approx 10^{-16} \text{ с}$

$$\hat{P} |\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$\hat{P} |\pi^+\pi^-, l\rangle = (-1)^l |\pi^+\pi^-, l\rangle$$

## Каоны (К-мезоны)

Масса  $m(K) \approx 970 m(e)$

Время жизни  $\tau(K^\pm) \approx 10^{-8} \text{ с}$

Нейтральные каоны несут скрытый заряд, поэтому  $\overline{K^0} \neq K^0$

Собственные комбинации для операторов чётности:  $K^0 \pm \overline{K^0} = K_S, K_L$

$K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$  ( $\tau \approx 10^{-10} \text{ с}$ ,  $CP = 1$ )

$K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  ( $\tau \approx 5 \cdot 10^{-8} \text{ с}$ ,  $CP = -1$ )

Осцилляции нейтральных каонов:  $\overline{K^0} \rightarrow K^0$

Регенерация  $K_S$  в веществе

Нарушение  $CP$ -симметрии (а, следовательно, и нарушение  $T$ -симметрии)

# Элементарные частицы

QUARKS	mass → charge → spin →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>u</b> up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>c</b> charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ <b>t</b> top	0 0 1 <b>g</b> gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 <b>H</b> Higgs boson
		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>d</b> down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>s</b> strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ <b>b</b> bottom	0 0 1 <b><math>\gamma</math></b> photon	
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1/2$ <b><math>\tau</math></b> tau	0 0 1 <b>Z</b> Z boson	
		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1 <b>W</b> W boson	
LEPTONS					GAUGE BOSONS	

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

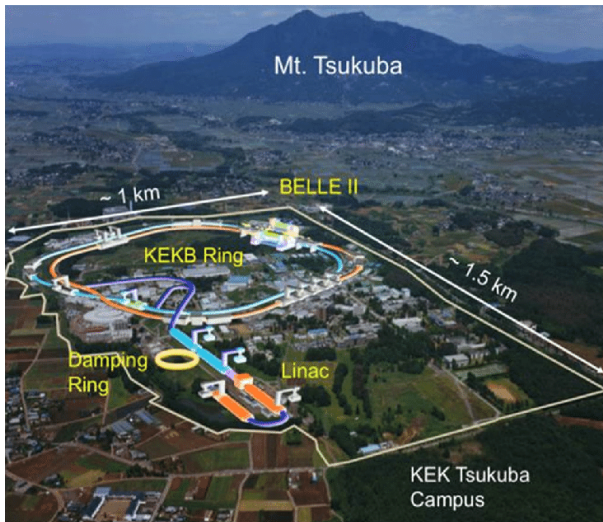
$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# $e^+e^-$ коллайдер KEKB



Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

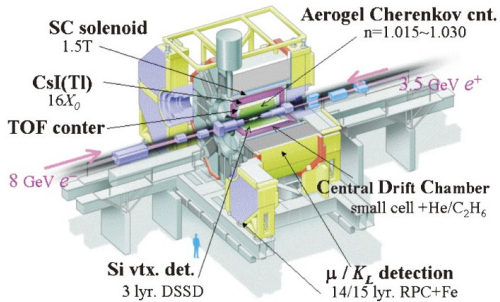
Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Заключение

# Детектор Белль

## Belle Detector



Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

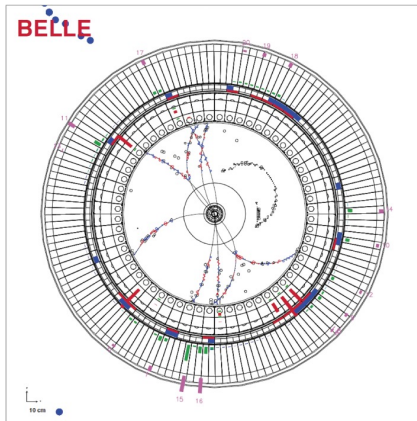
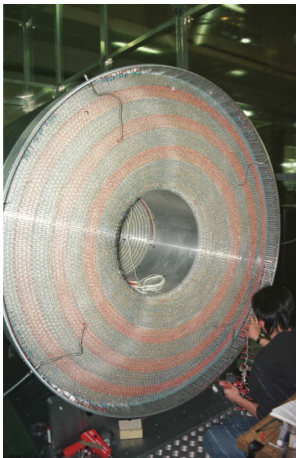
$CP$  симметрия

Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Закключение

# Дрейфовая камера



Event display

Квантовая  
физика

А. Рабусов

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

Стандартная модель

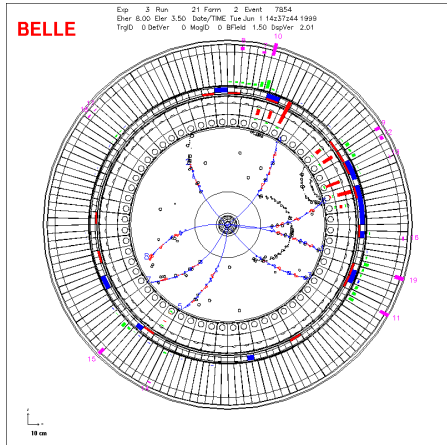
Экспериментальные  
установки

Закключение

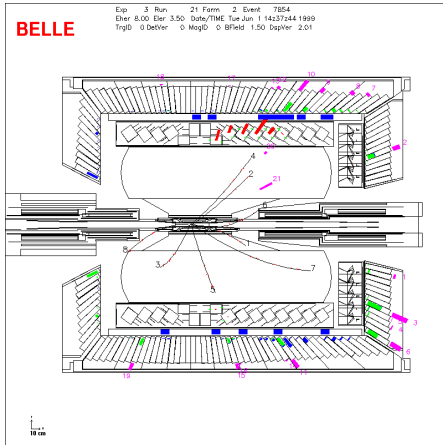
# Событие в детекторе

Квантовая  
физика

А. Рабусов



$X$  $Y$ -проекция



$Y$  $Z$ -проекция

Квантовая  
механика

Введение

Статические  
постулаты

Двухщелевой опыт

Квантовая  
теория поля

Дискретные  
симметрии

$CP$  симметрия

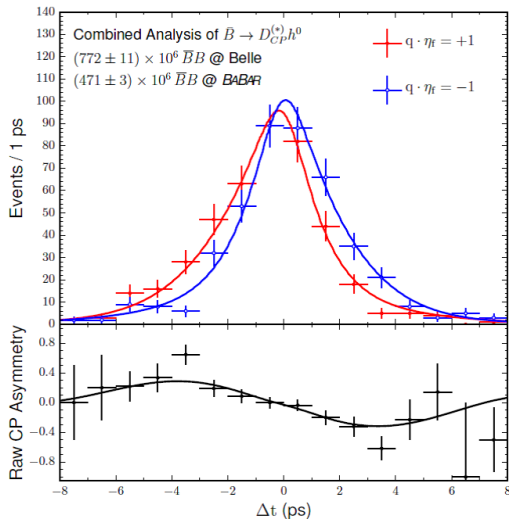
Стандартная модель

Экспериментальные  
установки

Закключение



# Нарушение $\mathcal{T}$ -симметрии



# Вместо выводов

Что ещё имеет смысл рассмотреть:

No-cloning theorem

Интерпретации квантовой механики

Квантовый осциллятор

Понятие орбитального момента и спина

Ссылки на источники:

Курс Н. Никитина на ФФ МГУ «Матрица плотности»

Коллаборация Белль

Fumihiko TAKASAKI “The discovery of CP violation in B-meson decays”