Элементарно, Хиггс!

Дмитрий Казаков

Лаборатория теоретической физики
Объединённый институт ядерных исследований (Дубна)

Московский физико-технический институт

Программа курса лекций

- Лекция I Физика элементарных частиц в предверии смены парадигм
- Лекция II Симметрии в физике элементарных частиц
- Лекция III Стандартная модель: сильные взаимодействия
- Лекция IV Стандартная модель: электрослабые взаимодействия
- Лекция V Физика за пределами Стандартной модели

Лекция II
Симметрии в физике элементарных частиц

- Симметрия как принцип построения теорий
- Лоренц-инвариантность
- Дискретные симметрии
- Непрерывные симметрии и калибровочная инвариантность
- Калибровочные поля
- Электродинамика как калибровочная теория

Симметрия

Симметрия - неизменность чего-либо при определённых преобразованиях

Преобразования

Дискретные

Непрерывные

- Отражение в пространстве P
- Отражение времени T
- Зарядое сопряжение C

- Вращение в пространстве-времени (Лоренц-инвариантность)
- Изменение фазы волновой функции
- Вращение в пространстве изоспина
- Вращение в пространстве цветов

Симметрия

Симметрия - неизменность чего-либо при определённых преобразованиях

Преобразования

Дискретные

Непрерывные

- Отражение в пространстве P
- Отражение времени T
- Зарядое сопряжение C

- Вращение в пространстве-времени (Лоренц-инвариантность)
- Изменение фазы волновой функции
- Вращение в пространстве изоспина
- Вращение в пространстве цветов

- Вращения в пространстве ароматов
- Суперсимметрия (ферми-бозе симметрия)
- Единая кварк-глюонная симметрия (теория Великого объединения)

Законы Сохранения

Каждой непрерывной симметрии соответствует сохраняющаяся величина
(Теорема Нётер)

Законы Сохранения

Каждой непрерывной симметрии соответствует сохраняющаяся величина (Теорема Нётер)

1. Симетрия относительно сдвигов в пространстве-времени
   -> закон сохранения энергии-импульса
2. Симметрия относительно вращений в пространстве-времени
   -> закон сохранения момента количества движения (углового момента)

Законы Сохранения

Каждой непрерывной симметрии соответствует сохраняющаяся величина (Теорема Нётер)

1. Симетрия относительно сдвигов в пространстве-времени
   -> закон сохранения энергии-импульса
2. Симметрия относительно вращений в пространстве-времени
   -> закон сохранения момента количества движения (углового момента)

1. Симметрия относительно сдвига фазы волновой функции частицы -> закон электрического заряда (Эл-Маг Вз) U(1)
2. Симметрия относительно вращений в пространстве «цветов» кварков -> закон сохранения «цветного» заряда (Сильн Вз) SU(3)
3. Симметрия относительно вращений в пространстве изоспина -> закон сохранения изоспина (Слаб Вз) SU(2)

Законы Сохранения

Каждой непрерывной симметрии соответствует сохраняющаяся величина (Теорема Нётер)

1. Симетрия относительно сдвигов в пространстве-времени -> закон сохранения энергии-импульса
2. Симметрия относительно вращений в пространстве-времени -> закон сохранения момента количества движения (углового момента)

1. Симметрия относительно сдвига фазы волновой функции частицы -> закон электрического заряда (Эл-Маг Вз) U(1)
2. Симметрия относительно вращений в пространстве «цветов» кварков -> закон сохранения «цветного» заряда (Сильн Вз) SU(3)
3. Симметрия относительно вращений в пространстве изоспина -> закон сохранения изоспина (Слаб Вз) SU(2)

Если симметрия глобальная, то заряд сохраняется глобально, если локальная - то заряд сохраняется в каждой точке пространства-времени

Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

1. Инвариантным относительно сдвигов в пространстве-времени
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

1. Инвариантным относительно сдвигов в ... стве-времени
2. Инвариантным относите... щений в пространстве-времени

Пространственные симметрии

Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

Пространственные симметрии

1. Инвариантным относительно сдвигов в [illegible]стве-времени
2. Инвариантным относите[illegible]щений в пространстве-времени

1. Инвариантным относительно сдвига фазы волновой функции частицы -> группа симметрии U(1)
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве «цветов» кварков -> группа симметрии SU(3)
3. Инвариантность относительно вращений в пространстве изоспина -> группа симметрии SU(2)

Симметрии

Согласно Специальной Теории Относительности (СТО) мы существуем в четырёх-мерном (3+1) пространстве-времени (плоском)

Описание физической реальности должно быть:

Пространственные симметрии

1. Инвариантным относительно сдвигов в ... стве-времени
2. Инвариантным относите... щений в пространстве-времени

Внутренние симметрии

1. Инвариантным относительно сдвига фазы волновой функции частицы -> группа симметрии U(1)
2. Инвариантным относительно вращений в п... тве «цветов» кварков -> группа симметрии SU(3)
3. Инвариантность относитель... ений в пространстве изоспина -> группа симметрии SU(2)

Дискретная Симметрия

$$\vec{x} \to -\vec{x}$$

$$t \to -t$$

$$Q \to -Q$$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

$$t \to -t$$

$$Q \to -Q$$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

$$t \to -t$$

$$Q \to -Q$$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

$$Q \to -Q$$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

$$Q \to -Q$$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Зарядое сопряжение C : замена частицы на античастицу $Q \to -Q$

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Зарядое сопряжение C : замена частицы на античастицу $Q \to -Q$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Зарядое сопряжение C : замена частицы на античастицу $Q \to -Q$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

НЕ Справедливо в слабых взаимодействиях !

Дискретная Симметрия

- Отражение в пространственных осей - чётность P $\vec{x} \to -\vec{x}$

Чётность сохраняется в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Обращение времени T $t \to -t$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

- Зарядое сопряжение C : замена частицы на античастицу $Q \to -Q$

Справедливо в сильных и электромагнитных взаимодействиях

НЕ Справедливо в слабых взаимодействиях !

<u>CPT-теорема:</u> любая лоренц-инвариантная локальная квантовая теория поля с эрмитовым гамильтонианом должна иметь CPT-симметрию.

Лоренц (Пуанкаре) -инвариантность

1. Инвариантность относительно сдвигов в пространстве-времени
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Лоренц (Пуанкаре) -инвариантность

1. Инвариантность относительно сдвигов в пространстве-времени

2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Все модели в физике элементарных частиц строятся на основе Лоренц-инвариантных Лагранжианов, соответственно все уравнения движения квантовых полей(частиц) явным образом Лоренц-инвариантны

Лоренц (Пуанкаре) -инвариантность

1. Инвариантность относительно сдвигов в пространстве-времени
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Все модели в физике элементарных частиц строятся на основе Лоренц-инвариантных Лагранжианов, соответственно все уравнения движения квантовых полей(частиц) явным образом Лоренц-инвариантны

Представления группы Лоренц-симметрии имеют определённый собственный угловой момент (спин). Отсюда классификация частиц по значению спина:

0, 1, 2 . . . -бозоны, 1/2, 3/2, 5/2… - фермионы

Лоренц (Пуанкаре) -инвариантность

1. Инвариантность относительно сдвигов в пространстве-времени
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Все модели в физике элементарных частиц строятся на основе Лоренц-инвариантных Лагранжианов, соответственно все уравнения движения квантовых полей(частиц) явным образом Лоренц-инвариантны

Представления группы Лоренц-симметрии имеют определённый собственный угловой момент (спин). Отсюда классификация частиц по значению спина:

0, 1, 2 . . . -бозоны, 1/2, 3/2, 5/2… - фермионы

Как следствие CPT теоремы все бозоны коммутируют друг с другом, а все фермионы - антикоммутируют

$$BB' = B'B; \quad FF' = -F'F$$

Лоренц (Пуанкаре) -инвариантность

1. Инвариантность относительно сдвигов в пространстве-времени
2. Инвариантным относительно вращений в пространстве-времени

Все модели в физике элементарных частиц строятся на основе Лоренц-инвариантных Лагранжианов, соответственно все уравнения движения квантовых полей(частиц) явным образом Лоренц-инвариантны

Представления группы Лоренц-симметрии имеют определённый собственный угловой момент (спин). Отсюда классификация частиц по значению спина:

0, 1, 2 . . . -бозоны, 1/2, 3/2, 5/2… - фермионы

Как следствие CPT теоремы все бозоны коммутируют друг с другом, а все фермионы - антикоммутируют

$$BB' = B'B; \quad FF' = -F'F$$

Алгебра Пуанкаре

$$[P_\mu, P\nu] = 0, \; [P_\mu, M_{\rho\sigma}] = i(g_{\mu\rho}P_\sigma - g_{\mu\sigma}P_\rho),$$

$$[M_{\mu\nu}, M_{\rho\sigma}] = i(g_{\nu\rho}M_{\mu\sigma} - g_{\nu\sigma}M_{\mu\rho} - g_{\mu\rho}M_{\nu\sigma} - g_{\mu\sigma}M_{\nu\rho})$$

Глобальная и Локальная Симметрия

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$$\alpha = const$$

Глобальное преобразование

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

$\bar{\psi}(x)\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\psi(x)$ Инвариантность

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(x)\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu}\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

$\bar{\psi}(x)\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\psi(x)$ Инвариантность

$$\bar{\psi}(x)\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu}\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^\mu \frac{\partial}{\partial x_\mu}\psi(x) + \bar{\psi}(x)\gamma^\mu \frac{\partial\alpha(x)}{\partial x_\mu}\psi(x)$$

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

$\bar{\psi}(x)\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\psi(x)$ Инвариантность

$$\bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) + \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\cancel{\frac{\partial\alpha(x)}{\partial x_{\mu}}}\psi(x)$$

Глобальная и Локальная Симметрия

Фазовое преобразование $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x)$ $x = (ct, \vec{x})$

$\alpha = const$ $\alpha = \alpha(x)$

Глобальное преобразование Локальное преобразование

Фазовая симметрия $\psi(x) \to e^{i\alpha}\psi(x), \bar{\psi}(x) \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}(x)$

Лагранжиан

$$\mathcal{L} = \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) - m\bar{\psi}(x)\psi(x)$$

$\bar{\psi}(x)\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\psi(x)$ Инвариантность

$$\bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial}{\partial x_{\mu}}\psi(x) + \cancel{\bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\frac{\partial \alpha(x)}{\partial x_{\mu}}\psi(x)}$$

$\alpha \to \alpha(x)$

Локальная (калибровочная) Симметрия

Локальная (калибровочная) Симметрия

- Как решить проблему локальной инвариантности?

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

$$A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$$

Калибровочное (компенсирующее) поле

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

$$A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$$

Калибровочное (компенсирующее) поле

$$\bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x)$$

Лоренц и фазовый инвариант

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

$$A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$$

Калибровочное (компенсирующее) поле

$$\bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x)$$

Лоренц и фазовый инвариант

$$[D_\mu, D_\nu] = e(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = eG_{\mu\nu}$$

Тензор напряжённости поля

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

$$A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$$

Калибровочное (компенсирующее) поле

$$\bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x)$$

Лоренц и фазовый инвариант

$$[D_\mu, D_\nu] = e(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = eG_{\mu\nu}$$

Тензор напряжённости поля

Лагранжиан (кинетическая энергия) калибровочного поля

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} G_{\mu\nu} G_{\mu\nu}$$

Лоренц и фазовый инвариант

Локальная (калибровочная) Симметрия

Как решить проблему локальной инвариантности?

$$\partial_\mu \to D_\mu = \partial_\mu + eA_\mu$$

Ковариантная производная

$$A_\mu(x) \to A_\mu(x) - \frac{1}{e}\partial_\mu \alpha(x)$$

Калибровочное (компенсирующее) поле

$$\bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x) \to \bar{\psi}(x)\gamma^\mu D_\mu \psi(x)$$

Лоренц и фазовый инвариант

$$[D_\mu, D_\nu] = e(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu) = eG_{\mu\nu}$$

Тензор напряжённости поля

Лагранжиан (кинетическая энергия)
калибровочного поля

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}G_{\mu\nu}$$

Лоренц и фазовый инвариант

Требование локальной инвариантности ведёт к появлению векторного калибровочного поля!

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$
$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$
$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$
$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$
$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$

$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$

$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$

$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Следуют из Лагранжиана

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$
$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$
$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$
$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$
$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Следуют из Лагранжиана

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Инвариантен относительно фазовых преобразований - группа инвариантности U(1)

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$
$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$
$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$
$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

$$E_i = F_{0i} \qquad B_i = \epsilon_{ijk} F_{jk}$$

A_μ $\mu = 0, 1, 2, 3$ вектор-потенциал

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$
$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Следуют из Лагранжиана

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Инвариантен относительно фазовых преобразований - группа инвариантности U(1)

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$
$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$
$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$
$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

$E_i = F_{0i} \qquad B_i = \epsilon_{ijk} F_{jk}$

$A_\mu \quad \mu = 0, 1, 2, 3$ вектор-потенциал

2 степени свободы

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$
$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$
$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Следуют из Лагранжиана

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Инвариантен относительно фазовых преобразований - группа инвариантности U(1)

Фотоны- калибровочные поля

Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Векторная запись

$$\partial_t \vec{E} - \vec{\nabla} \times \vec{B} = -\vec{j}$$

$$\vec{\nabla}\vec{E} = \rho$$

$$\partial_t \vec{B} + \vec{\nabla} \times \vec{E} = 0$$

$$\vec{\nabla}\vec{B} = 0$$

$$E_i = F_{0i} \qquad B_i = \epsilon_{ijk} F_{jk}$$

A_μ $\mu = 0, 1, 2, 3$ вектор-потенциал

2 степени свободы

Условие калибровки $\partial_\mu A_\mu = 0$

Лоренц-ковариантный вид

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} + j_\mu = 0$$

$$\partial_\mu \tilde{F}_{\mu\nu} = 0$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Следуют из Лагранжиана

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

Инвариантен относительно фазовых преобразований - группа инвариантности U(1)

Электродинамика как калибровочная теория

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан
$$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан $$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Уравнения движения

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Уравнения движения

$$\partial_{\mu}F_{\mu\nu} = -j_{\nu} \qquad j_{\nu} = \bar{\psi}\gamma_{\nu}\psi$$

Ур. Максвелла

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан
$$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \qquad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$ Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$ Ур. Дирака

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан $$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Уравнения движения

$$\partial_{\mu}F_{\mu\nu} = -j_{\nu} \qquad j_{\nu} = \bar{\psi}\gamma_{\nu}\psi$$ Ур. Максвелла

$$(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi = 0$$ Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан $$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_{\mu}A_{\nu} - \partial_{\nu}A_{\mu}$$

Уравнения движения

$$\partial_{\mu}F_{\mu\nu} = -j_{\nu} \qquad j_{\nu} = \bar{\psi}\gamma_{\nu}\psi$$ Ур. Максвелла

$$(\partial_{\mu} - m - eA_{\mu})\psi = 0$$ Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла
- Заряженные частицы (кварки и лепоты) описываются уравнением Дирака

Электродинамика как калибровочная теория

Группа инвариантности U(1)

Лагранжиан

$$\boxed{\mathcal{L}_{QED} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi}$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

Уравнения движения

$$\partial_\mu F_{\mu\nu} = -j_\nu \qquad j_\nu = \bar{\psi}\gamma_\nu\psi$$ Ур. Максвелла

$$(\partial_\mu - m - eA_\mu)\psi = 0$$ Ур. Дирака

- Электромагнитное поле описывается уравнением Максвелла
- Заряженные частицы (кварки и лепоты) описываются уравнением Дирака
- Взаимодействие осуществляются путём обмена квантом электромагнитного поля -фотоном

Quantum Numbers of Matter

- Quarks

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

- Leptons

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R \ ?$$

$$E_R = e_R$$

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Q_L	3	2	$1/3$
U_R	3	1	$4/3$
D_R	3	1	$-2/3$
L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

Quantum Numbers of Matter

triplets

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Quarks			
$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$	3	2	$1/3$
$U_R = up_R$	3	1	$4/3$
$D_R = down_R$	3	1	$-2/3$
Leptons			
$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$	1	2	-1
$N_R = \nu_R$?	1	1	0
$E_R = e_R$	1	1	-2

Quantum Numbers of Matter

triplets

doublets

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Quarks			
$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$	3	2	$1/3$
$U_R = up_R$	3	1	$4/3$
$D_R = down_R$	3	1	$-2/3$
Leptons			
$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$	1	2	-1
$N_R = \nu_R$?	1	1	0
$E_R = e_R$	1	1	-2

Quantum Numbers of Matter

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Quarks			
$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$	3	2	$1/3$
$U_R = up_R$	3	1	$4/3$
$D_R = down_R$	3	1	$-2/3$
Leptons			
$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$	1	2	-1
$N_R = \nu_R$?	1	1	0
$E_R = e_R$	1	1	-2

triplets

doublets

singlets

Quantum Numbers of Matter

- Quarks

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

- Leptons

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R \ ?$$

$$E_R = e_R$$

triplets

doublets

V-A currents in weak interactions

singlets

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Q_L	3	2	$1/3$
U_R	3	1	$4/3$
D_R	3	1	$-2/3$
L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

Quantum Numbers of Matter

- Quarks

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

- Leptons

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L$$

$$N_R = \nu_R \ ?$$

$$E_R = e_R$$

	SU(3)$_c$	SU(2)$_L$	U$_Y$(1)
Q_L	3	2	$1/3$
U_R	3	1	$4/3$
D_R	3	1	$-2/3$
L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

$\frac{1}{2}$, $-\frac{1}{2}$: T_3

0, 0 : T_3

triplets

doublets

singlets

V-A currents in weak interactions

Quantum Numbers of Matter

- Quarks

$$Q_L = \begin{pmatrix} up \\ down \end{pmatrix}_L$$

$$U_R = up_R$$

$$D_R = down_R$$

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
Q_L	3	2	$1/3$
U_R	3	1	$4/3$
D_R	3	1	$-2/3$

triplets

doublets

V-A currents in weak interactions

singlets

- Leptons

$$L_L = \begin{pmatrix} \nu \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{matrix} \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} \end{matrix} \; T_3$$

$$N_R = \nu_R \; ? \quad 0 \; T_3$$

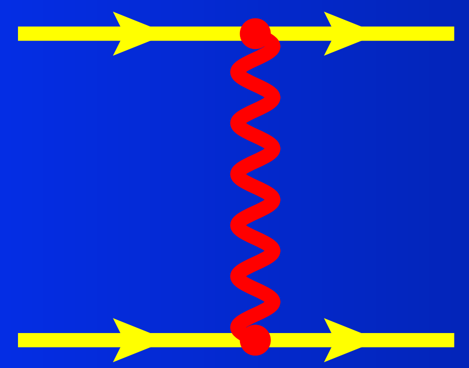
$$E_R = e_R \quad 0 \; T_3$$

	$SU(3)_c$	$SU(2)_L$	$U_Y(1)$
L_L	1	2	-1
N_R	1	1	0
E_R	1	1	-2

Electric charge

$$Q = T_3 + Y/2$$

Все взаимодействия как калибровочные теории



- Электромагнитное взаимодействие
  - группа инваринантности - U(1)
  - калибровочное поле - фотон

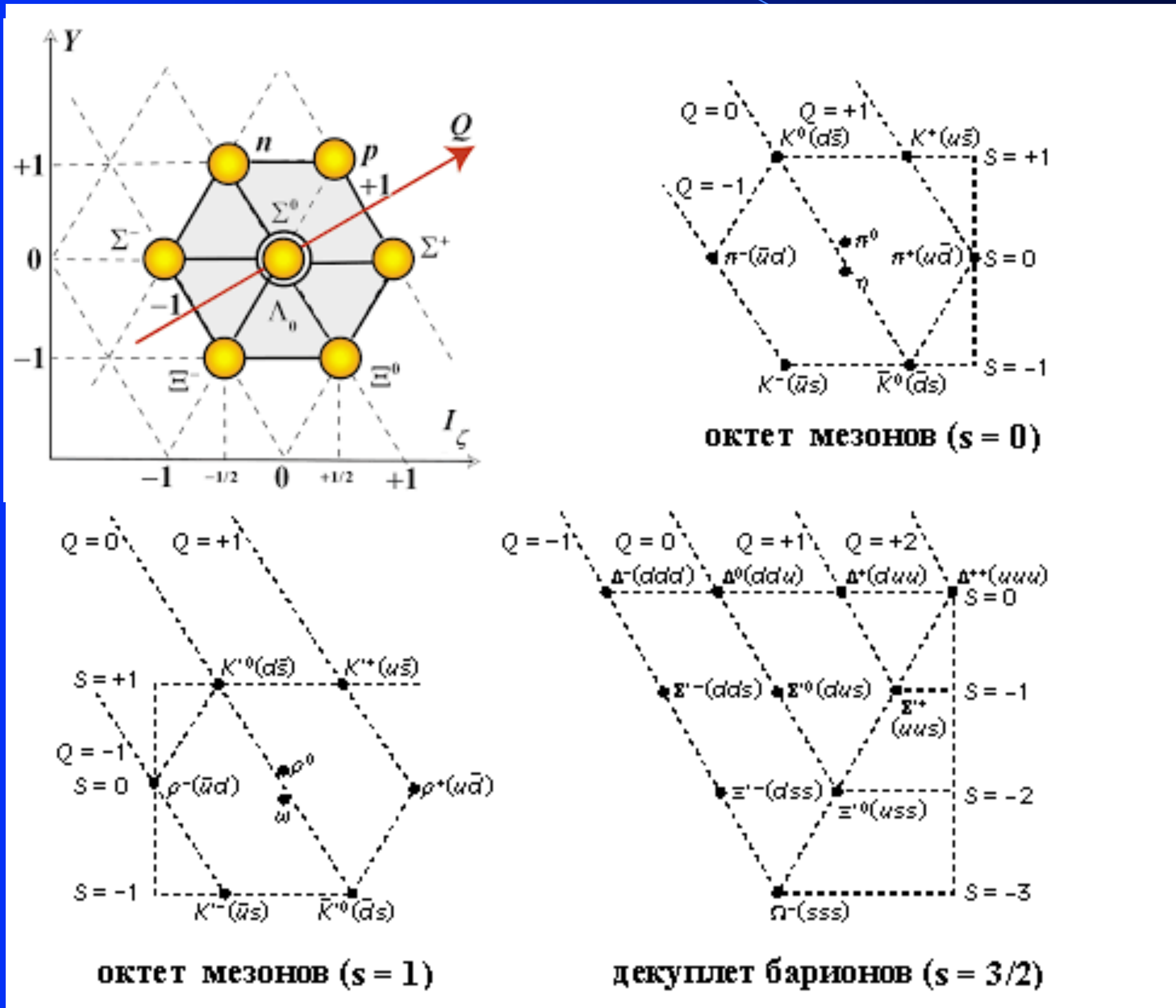
- Сильное взаимодействие
  - группа инваринантности - SU(3)
  - калибровочные поля - глюоны

- Слабое взаимодействие
  - группа инваринантности - SU(2)
  - калибровочные поля - W и Z бозоны

- Сохраняющиеся заряды:
  - электрический заряд
  - цветной заряд
  - изотопический спин

- Взаимодействие осуществляются путём обмена квантом калибровочного поля

Таблицы элементарных частиц



Было обнаружено, что по какой-то причине частицы группируются в 8 (октеты) и 10 (декуплеты)

Внутри этих семейств частицы ведут себя одинаково по отношению к сильным взаимодействиям