

Физика фундаментальных взаимодействий

51 час, VIII семестр, 2006 г

1. Развитие физики – как путь объединения взаимодействий. Классификация элементарных частиц и типов фундаментальных взаимодействий. Характеристики элементарных частиц. Лептоны, кварки, мезоны, барионы, промежуточные бозоны. Пространственно-временные и внутренние симметрии, релятивистская инвариантность, законы сохранения. P-, C-, T-инвариантность.
2. Основы лагранжевой теории классических полей, вариационный принцип. Лагранжианы и уравнения движения свободных полей. Гамильтонова формулировка теории поля. Теорема Нетер. Скалярные поля, уравнение Клейна-Гордона. Очерк идей квантовой теории поля.
3. Калибровочная инвариантность как динамический принцип построения теории взаимодействия частиц и полей. Глобальная и локальная U(1)-симметрия. Электродинамика как калибровочная теория, безмассовость фотона. Лагранжиан и уравнения классической электродинамики. Взаимодействие заряженных частиц с электромагнитным полем.
4. Релятивистская квантовая механика электрона. Уравнение Дирака, сохраняющийся векторный ток. Матрицы Дирака, свойства спиноров, спиральность и киральность полей. Уравнение Вейля, двухкомпонентное нейтрино. Нерелятивистский предел уравнения Дирака. Электрон в магнитном поле, спин электрона. Локальная калибровочная U(1)-инвариантность, лагранжиан спинорной электродинамики.
5. Феноменология слабых взаимодействий, теория Ферми. Несохранение P- и C-четности в слабых взаимодействиях. (V-A)-теория, структура слабых токов, слабый кварковый ток. Слабые распады лептонов и адронов. Несохранение странности в слабых распадах, гипотеза Кабиббо. Гипотеза существования четвертого кварка, механизм Глэшоу-Илиопулоса-Майани подавления слабых распадов каонов. Соответствие между кварками и лептонами, число поколений. Необходимость смешивания кварков, матрица Кабиббо-Кобаяши-Маскава. Нарушение CP-инвариантности в распадах нейтральных каонов. Унитарный предел, неперенормируемость слабого взаимодействия.
6. Локальная неабелева симметрия SU(2). Поля Янга-Миллса. Спонтанное нарушение симметрии. Механизм Хиггса возникновения массы частиц.
7. Стандартная модель (Глэшоу, Вайнберг, Салам) объединения слабых и электромагнитных взаимодействий на основе калибровочной симметрии SU(2)⊗U(1). Общая структура лагранжиана электрослабого взаимодействия, заряженные и нейтральные лептонные и кварковые токи.
8. Свойства калибровочных бозонов, соотношения между константами связи частиц. Экспериментальное открытие промежуточных бозонов. Хиггсовские бозоны. Возможные расширения стандартной модели. Физика нейтрино: массы, смешивание, осцилляции.
9. Современные представления о природе сильного взаимодействия. Глубоко-неупругое рассеяние лептонов на нуклоне, партонная модель. Квантовая хромодинамика как SU(3)_c-калибровочная теория сильных взаимодействий. Кварки и глюоны как цветные частицы, кварк-глюонные взаимодействия. Жесткие процессы и асимптотическая свобода. Мягкие процессы в адронной физике и проблема конфайнмента.

Вопросы и задачи

1. Используя законы сохранения, определите, какие из 12 реакций возможны:
1) $n \rightarrow \mu^+ + \mu^- + \gamma$, 2) $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$, 3) $p \rightarrow n + \mu^+ + \nu_\mu$. 4) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \gamma$,
5) $K^+ + n \rightarrow \Sigma^+ + \pi^0$, 6) $\Sigma^- \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$, 7) $\Sigma^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$
8) $\Sigma^+ \rightarrow \Lambda^0 + e^+ + \nu_e$ 9) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^- + K^+$, 10) $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^+ + K^-$
11) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$, 12) $\pi^+ \rightarrow \pi^0 + e^+ + \nu_e$.
2. К каким типам взаимодействий относятся реакции рождения дейтрона
 $p + p \rightarrow d + \pi^+$, $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$?
3. Какое расстояние в вакууме пролетят в среднем мюоны с энергией 1 ГэВ, 100 ГэВ, 1000 ГэВ, если время их жизни 2.197 микросекунды, а масса равна 105.658 МэВ?
4. Дайте сравнительную характеристику адронов и лептонов.
5. Докажите, что $\gamma_5 \psi_R = \psi_R$, $\gamma_5 \psi_L = -\psi_L$, где $\psi_R \equiv \frac{1}{2}(1 + \gamma_5)\psi$, $\psi_L \equiv \frac{1}{2}(1 - \gamma_5)\psi$
($\gamma_5 = i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3$, ψ - дираковский спинор).
6. Перечислите известные вам типы физических полей (с указанием лоренц-трансформационных свойств) и приведите примеры квантов этих полей.
7. Чем отличаются слабые распады от сильных? Приведите примеры процессов.
8. Приведите аргументы, из которых видно, что U(1)-локальная калибровочная инвариантность лагранжиана свободных спинорных заряженных полей требует введения их взаимодействия с безмассовым векторным (максвелловским) полем.
9. Покажите, что ковариантная производная $D_\mu \phi = (\partial_\mu + ieA_\mu)\phi$ преобразуется как само поле $\phi(x)$ при U(1)-калибровочном преобразовании ($\delta\phi(x) = i\alpha(x)\phi(x)$).
10. Что означает термин "спонтанное нарушение симметрии"? Приведите примеры физических систем со спонтанно нарушенной симметрией.
11. Что понимают под термином "механизм Хиггса генерации масс"?
12. Каким симметриям отвечает SU(2)_L⊗U(1)_Y-инвариантность лагранжиана электрослабого взаимодействия?
13. Какая симметрия остается в результате спонтанного нарушения SU(2)_L⊗U(1)_Y - инвариантности?
14. Перечислите все поля, входящие в лагранжиан Глэшоу-Вайнберга-Салама, и укажите характер их взаимодействий?
15. Какие массы приобретают промежуточные векторные бозоны в результате спонтанного нарушения симметрии SU(2)_L⊗U(1)_Y?
16. Перечислите все заряженные токи (CC) электрослабой теории; приведите пример физического процесса с участием CC.
17. Перечислите все нейтральные токи (NC) электрослабой теории; приведите пример физического процесса с участием NC.
18. К какому типу процессов (CC, NC) отнесете взаимодействия нейтрино
а) $\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-$; $\nu_e + d \rightarrow n + p + \nu_e$; $\nu_\mu + d \rightarrow p + n + \nu_\mu$?
б) $\nu_\mu + e^- \rightarrow \nu_\mu + e^-$; $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$?
19. Дайте сравнительную характеристику фотонов и глюонов. Чем принципиально отличаются глюоны от фотонов?

Литература

- Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля. М.: Наука, 1988.
Окунь Л.Б. Лептоны и кварки. М.: Наука, 1990.
Райдер Л. Элементарные частицы и симметрии. М.: Наука, 1983.
Волошин М.Б., Тер-Мартirosян К.А. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1984.
Хуанг. К. Кварки, лептоны и калибровочные поля. М. Мир, 1985.
Райдер Л. Квантовая теория поля. М.: Мир, 1987.
Пескин М.Е., Шредер Д.В. Введение в квантовую теорию поля. НИЦ "РХД", 2001
Окунь Л.Б. Физика элементарных частиц. М.: Наука, 1988.
Мухин К.Н., Тихонов В.Н. Старая и новая экзотика в мире элементарных частиц // УФН. 2001. Т. 171, № 11. С. 1201-1250.
Quigg С. Beyond the standard model in many directions, arXiv: hep-ph/0404228.

Составил С. Синеговский