



Кафедра Теоретической Физики БГУ  
и  
Кафедра Физики Высоких Энергий  
Московского Физико-Технического  
Института  
в ИФВЭ Курчатовский Центр



**КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ -**  
в применении  
**к ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ и**  
**РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ**  
(45 лекций, 90 часов)

September 2016 - May 2017



Вали А. ГУСЕЙНОВ,  
Рауф Г. ДЖАФАРОВ  
И  
Владимир Е. РОЧЕВ

РАБОЧИЕ ПРОГРАММЫ  
к курсам:  
Квантовая Теория Поля  
в применении к ФИЗИКЕ ЧАСТИЦ  
И  
РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

## СТРУКТУРА ЛЕКЦИЙ

i



### 1-я часть:

Квантовая теория поля в применении к физике частиц  
(30 лекций на 2 семестра, всего 60 часов).

**Рауф Г. ДЖАФАРОВ** и **Владимир Е. РОЧЕВ**

### 2-я часть:

Квантовая теория поля в применении к релятивистской  
ядерной физике  
(15 лекций на 1 семестр, всего 30 часов).

**Вали А. ГУСЕЙНОВ** и **Рауф Г. ДЖАФАРОВ**



Что включает в себя как предмет Квантовая Теория Поля?

и

какие задачи она решает?



1. Классические поля.
  - 1.1. Действие и лагранжиан.
  - 1.2. Уравнения движения (уравнения Эйлера – Лагранжа).
  - 1.3. Релятивистская инвариантность.
  - 1.4. Симметрии и законы сохранения: теорема Нётер и тензор энергии – импульса.



- 2. Квантование полей.
- 2.1. Представление чисел заполнения.
- 2.2. Каноническое квантование.



3. Матрица рассеяния ( $S$  – матрица).
- 3.1. Хронологическое упорядочивание ( $T$  – произведение).
- 3.2.  $S$  – матрица в представлении взаимодействия как  $T$  – экспонента.
- 3.3. Корреляционные функции (функции Грина).
- 3.4. Источники и функциональные производные.
- 3.5. Производящий функционал.



4. Функциональный интеграл в квантовой механике (интеграл по траекториям).
- 4.1. Амплитуда вероятности и ее представление в виде интеграла по траекториям.
- 4.2. Свойства интеграла по траекториям.



5. Представление функций Грина функциональными интегралами.
- 5.1. Вычисление гауссовых функциональных интегралов.
- 5.2. Производящий функционал свободных полей.
- 5.3. Пропагаторы.



- 6. Взаимодействующие поля.
- 6.1. Евклидов поворот и решеточная аппроксимация.
- 6.2. Термодинамический и континуальный пределы.
- 6.3. Взаимосвязь квантовой теории поля и статистической механики.



- 7. Теория возмущений.
- 7.1. Представление производящего функционала в виде ряда теории возмущений по константе связи.
- 7.2. Диаграммы Фейнмана.
- 7.3. Связные и несвязные функции.



8. Уравнения Швингера – Дайсона для производящего функционала.
  - 8.1. Система уравнений Швингера – Дайсона.
  - 8.2. Производящий функционал связанных функций. Теорема о связности логарифма.



- 9. Вычисление связанных функций по теории возмущений.
- 9.1. Массовый оператор.
- 9.2. Вершинные функции и амплитуды.



- 10. Одночастично – неприводимые функции.
- 10.1. Преобразование Лежандра и эффективное действие.
- 10.2. Вычисление эффективного действия по теории возмущений.



- 11. Ультрафиолетовые расходимости и регуляризация.
- 11.1. Регуляризация обрезанием и размерная регуляризация.
- 11.2. Дифференциальная регуляризация обобщенных функций со степенными особенностями и вычитания.



12. Перенормировки и контрчлены.

12.1. Перенормировка массы, заряда, полевых операторов и соответствующие контрчлены.

12.2. Перенормированные лагранжианы.



13. Вычисление перенормированных функций Грина.

13.1. Вычисление однопетлевых интегралов в размерной регуляризации.

13.2. Перенормированные амплитуды и массовые операторы.



14. Ренормализационная инвариантность физических амплитуд и функций Грина.

14.1. Уравнение ренормгруппы.

14.2. Вычисление ренормгрупповых коэффициентов по теории возмущений в схеме минимальных вычитаний.



15. Решение уравнения ренормгруппы.

15.1. Уравнение для бегущей константы связи (инвариантного заряда).

15.2 . Типы асимптотического поведения.



- 16. Эффективный потенциал и его физический смысл.
- 16.1. Понятие физического вакуума.
- 16.2. Квазиклассическое разложение и метод стационарной фазы для функциональных интегралов.
- 16.3. Эффективный потенциал в главном квазиклассическом (древесном) приближении.



- 17. Спонтанное нарушение симметрии.
- 17.1. Теорема Намбу – Голдстоуна – Боголюбова.
- 17.2. Голдстоуновские бозоны и бозон Хиггса.
- 17.3. Механизм Хиггса спонтанного нарушения калибровочной симметрии.



- 18. **Динамическое нарушение симметрии.**
- 18.1. **Ферромагнетик Гейзенберга.**
- 18.2. **Квазисредние Боголюбова и спонтанная намагниченность.**
- 18.3. **Динамическое нарушение симметрии в квантовой теории поля.**



19. Асимптотическое поведение.

19.1. Вычисление перенормированного эффективного потенциала в однопетлевом приближении.

19.2. Экранировка заряда и асимптотическая свобода.



20.  $1/N$  – разложение.

20.1. Введение вспомогательного поля в теории с четверным взаимодействием (преобразование Стратоновича).

20.2.  $1/N$  – разложение как квазиклассическое разложение для вспомогательного поля.



- 21. Многочастичные уравнения.
- 21.1. Высшие преобразования Лежандра.
- 21.2. Уравнение Бете – Солпитера.
- 21.3. Интегральное уравнение Бете-Солпитера с пертурбативным ядром (лестничное приближение) и его решение.



- 22. Квантовая электродинамика (КЭД).
- 22.1. Пропагатор фотона в ковариантной калибровке.
- 22.2. Лагранжиан Дирака и пропагатор электрона.



- 23. Калибровочная инвариантность и тождества Уорда.
- 23.1. Тождества Уорда и их следствия для пропагатора фотона и вершинной функции.
- 23.2. Тождества Уорда и перенормируемость.



24. Поляризационный оператор фотона.

24.1. Вычисление поляризационного оператора в модели Швингера и динамическая масса калибровочного поля.

24.2. Поправка Улинга и лэмбовский сдвиг уровней атома водорода.

24.3. Асимптотическое поведение в КЭД: большие логарифмы и их суммирование. Полюс Ландау и проблема тривиальности.



25. Неабелевы калибровочные поля и принцип локальной калибровочной инвариантности.
- 25.1. Лагранжиан квантовой хромодинамики (КХД).
- 25.2. Кварки и глюоны.



- 26. Симметрии лагранжиана КХД.
- 26.1. Глобальные симметрии и киральный предел.
- 26.2. Киральная симметрия сильных взаимодействий легких кварков и ее спонтанное нарушение.
- 26.3. Триплет пионов как квазиголдстоуновские бозоны.



- 27. **Динамическое нарушение киральной симметрии.**
- 27.1. **Кварковый киральный конденсат как мера спонтанного нарушения киральной симметрии.**
- 27.2. **Кварковая модель Намбу – Иона-Лазиньо.**



- 28. Сигма – модель как эффективная модель КХД.
- 28.1. Лагранжиан сигма – модели и его симметрии.
- 28.2. Спонтанное нарушение киральной симметрии в сигма – модели.
- 28.3. Частичное сохранение аксиального тока и соотношение Гольдбергера – Треймана.
- 28.4. Нелинейная сигма – модель и пион – пионное рассеяние.



29. Аксиальные аномалии.

29.1. Проблема кирального предела в распаде  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ .

29.2. Вычисление аномалии аксиального тока в модели Швингера.

29.3. Треугольная аномалия Адлера – Белла – Джекива.



- 30. Аномалии в калибровочных теориях.
- 30.1 Аксиальная аномалия в КХД и  $U(1)$  – проблема.
- 30.2. Сокращение аномалий и перенормируемость теории электрослабых взаимодействий.



1. Н.Н. Боголюбов, Д.В. Ширков. Квантовые поля, М.:И,1980
2. С. Вейнберг. Квантовая теория поля, т. 1, 2, М.:ФМЛ,2003
3. К. Ициксон, Ж.-Б. Зюбер. Квантовая теория поля, т.1,2,М.:М,1984
4. М.Е. Пескин, Д.В. Шрёдер: Введение в квантовую теорию поля,Ижевск,«Регулярная и хаотическая динамика»,2001
5. Л. Райдер. Квантовая теория поля,М.:М,1987
6. В.А. Рубаков. Класические калибровочные поля, М.:Эдиториал УРСС,1999
7. А.А. Славнов, Л.Д. Фаддеев. Введение в квантовую теорию калибровочных полей, М.:И,1988
8. Т.-П. Ченг, Л.-Ф. Ли. Калибровочные теории в физике элементарных частиц, М.:М,1987



## КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ ПОЛЯ В ПРИМЕНЕНИИ К РЕЛЯТИВИСТСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКЕ

15 лекций

1 семестр

Всего 30 часов

Вали А. ГУСЕЙНОВ и Рауф Г. ДЖАФАРОВ



1. Физика высоких энергий и взаимодействия с участием ядер.
2. Кумулятивный эффект. Процессы глубоконеупругого рассеяния на ядрах.
3. Ультррелятивистские столкновения тяжелых ионов. Коллайдеры.



4. Холодная и горячая кварк-глюонная плазма.
5. Специфика сильного взаимодействия. Мягкие и жесткие процессы.
6. Теория Редже-Грибова и партонная модель Фейнмана.



7. Модель цветного обмена. Дуальная партонная модель и модель кварк-глюонных струн.
8. Жесткие процессы с большой передачей поперечного импульса.
9. Пертурбативная квантовая хромодинамика (КХД). Факторизационная теорема.



- Кинематика. 1. Бьеркеновская скейлинговая переменная для процессов глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах.
2. Феймановская скейлинговая переменная для процессов взаимодействия адронов и ядер при высоких энергиях.



3. Переменные переднего и заднего светового конуса.
4. Быстрота и псевдобыстрота.



Кварк-партонная модель.

1. Партонные волновые функции адронов и ядер.



2. Фейнмановская диаграммная техника в переменных светового фронта.
3. Вычисление нормировочной диаграммы для формфактора адрона при нулевом переданном импульсе.



Глубоконеупругое рассеяния лептонов на ядрах.

1. Многокварковые кластеры в ядрах (флуктоны) и глубоконеупругое рассеяние на ядрах при значениях бьеркеновской скейлинговой переменной  $x_B > 1$ .
2. Вычисление диаграммы для глубоконеупругого рассеяния на ядрах в рамках пертурбативной КХД.



3. Вид глюонного пропагатора в светоподобной калибровке вблизи кинематической границы реакции.
4. Интегрирование по нулевым компонентам импульсов и связь с гайтлеровской теорией возмущений.



5. Правила кваркового счета.
6. Метод суммирования диаграмм вблизи кинематической границы реакции на основе рекуррентных соотношений.



Кумулятивные процессы при взаимодействии адронов и ядер.

1. Связь с процессами глубоконеупругого рассеяния лептонов на ядрах.
2. Прямой и спектаторный механизмы образования кумулятивных мезонов.



3. Учет интерференции.
4. Образование кумулятивных барионов на основе механизма коалесценции.



Корреляции вперед-назад в процессах взаимодействия адронов и ядер.

1. Корреляции между средней множественностью заряженных частиц вылетающих в заднюю и переднюю полусферы.
2. Экспериментально установленные закономерности.



Ближние и дальние корреляции.

4. Простая двустадийная модель для описания корреляций вперед-назад.
5. Использование техники производящих функций для нахождения распределений вероятности.
6. Влияние слияния кварк-глюонных струн на величину корреляций вперед-назад и на величину среднего поперечного импульса.



7. Численное монте-карловское моделирование корреляций вперед-назад в ядро-ядерных столкновениях при энергиях LHC (Large Hadron Collider) на основе генераторов событий (HIJING и т.п.).



1. М.Б.Волошин, К.А.Тер-Мартirosян. Теория калибровочных взаимодействий элементарных частиц. Энергоатомиздат, М., 1984.
2. Никитин Ю.П., Розенталь И.Л. Ядерная физика высоких энергий. Атомиздат, М., 1980.
3. Андреев И.В. Хромодинамика и жесткие процессы при высоких энергиях. М., Наука, 1981.
4. Р.Фейнман. Взаимодействие фотонов с адронами. Мир, М., 1975.
5. Cheuk-Yin Wong. Introduction to High-Energy Heavy Ion Collisions. World Scientific, Singapore, 1994.



6. Werner K. Strings, Pomerons and the VENUS model of hadronic interactions at ultrarelativistic energies. Phys.Rep. 232 (1993) 87-299.
7. Capella A. et al. Dual Parton Model. Phys.Rep. 236 (1994) 225-329.
8. Kaidalov A.B. The Quark-Gluon Structure of the Pomeron and the Rise of Inclusive spectra at High Energies. Phys.Lett. 116B (1982) 459-463.
9. Kaidalov A.B., Ter-Martirosyan. Pomeron as Quark-Gluon Strings and Multiple Hadron Production at SPS-Collider Energies. Phys.Lett. 117B (1982) 247-251.



10. Kogut J.B., Soper D.E. Phys. Rev. D1 (1970) 2901. Bjorken J.B., Kogut J.B., Soper D.E. Phys. Rev. D3 (1971) 1382. Brodsky S.J., Roskies R., Suaya R. Phys. Rev. D8 (1973) 4574.
11. Gunion J. Phys. Rev. D10 (1974) 242.
12. Lepage G.P., Brodsky S.J. Exclusive processes in perturbative quantum chromodynamics. Phys. Rev. D22 (1980) 614-640. Brodsky S.J., Lepage G.P. in Perturbative Quantum Chromodynamics, ed. by A.H.Mueller, World Scientific, Singapore, 1989.
13. Brodsky S.J., Hoyer P., Mueller A.H., W.-K. Tang. New QCD production mechanisms for hard processes at large  $x$ . Nucl. Phys. B369 (1992) 519-542.



14. Braun M.A., Vechernin V.V. Nuclear Structure Functions and Particle Production in the Cumulative Region in the Parton Model. Nucl. Phys. B427 (1994) 614-640.
15. Braun M.A., Vechernin V.V. Structure Functions and Particle Production in the Cumulative Region: two different exponentials. Ядерная физика 60 (1997) 506-512; hep-ph/9601315.
16. Braun M.A., Vechernin V.V. Transverse Momentum Dependence of Cumulative Pions. Ядерная физика 63 (2000) 1920-1923; hep-ph/9904466.
17. Braun M.A., Vechernin V.V. Cumulative phenomena in the QCD approach. Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 92 (2001) 156-161.



18. Amelin N.S., Armesto N., Braun M.A., Ferreiro E.G. and Pajares C. Long and short range correlations: a signature of string fusion. Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 2813-2816.
19. Braun M.A., Pajares C. and Vechernin V.V. On the forward-backward correlations in a two-stage scenario. Phys. Lett. B493 (2000) 54-64.
20. M.A.Braun and C.Pajares. Transverse Momentum Distributions and Their Forward-Backward Correlations in the Percolating Color String Approach. Phys. Rev. Lett. 85 (2000) 4864-4867.
21. M.A.Braun and C.Pajares. Implications of color-string percolation on multiplicities, correlations, and the transverse momentum. Eur. Phys. J. C16 (2000) 349-359.

# Дополнительные Глава 1

53



Инстантоны

## Дополнительные Глава 2

54



Солитоны



Монополи

# Acknowledgments

**Спасибо за обсуждение!**