

**ПРОГРАММА и ЛЕКЦИОННЫЙ ПЛАН КУРСА**  
**”КВАНТОВАЯ ТЕОРИЯ”**  
для 1-ого потока в 2011 г.

[http:// hep.phys.msu.ru](http://hep.phys.msu.ru)

**I семестр**

1. Комбинационный принцип и матричная механика Гейзенберга. Матрицы как линейные операторы. Физические величины как эрмитовы операторы в гильбертовом пространстве.
2. Динамическая схема квантовой механики. Ур-ния Гейзенберга. Принцип соответствия между классической и квантовой механиками. Каноническое квантование.
3. Спектр и средние значения физических величин в квантовой механике. Наблюдаемые с чисто дискретным невырожденным спектром и чистые состояния физической системы. Полный набор наблюдаемых.
4. Вероятностная интерпретация результатов измерения некоммутирующих величин. Соотношение ”неопределенностей” для дисперсий некоммутирующих величин. Простейшие ЭПР-”парадоксы” и их объяснение.
5. Совокупность чистых состояний квантовой системы как гильбертово пространство, его основные свойства. Принцип суперпозиции чистых состояний, его обоснование. Спектральное разложение эрмитовых операторов. Квантовомеханическая интерпретация дискретного и непрерывного спектров наблюдаемой величины.
6. Эквивалентность любого представления гильбертова пространства матричному. Переход от одного представления к другому как унитарное преобразование. Взаимосвязь унитарных и канонических преобразований.
7. Эволюция квантовой системы во времени. Представления Гейзенберга и Шредингера. Общий вид оператора эволюции при наличии явной зависимости гамильтониана от времени, его унитарность и групповые свойства.
8. Симметрии и интегралы движения в квантовой механике. Вырождение уровней энергии при наличии некоммутирующих интегралов движения.
9. Стационарные состояния, их основные свойства. Эволюция во времени состояний из дискретной и непрерывной частей энергетического спектра. Время жизни волнового пакета.
10. Матрицы плотности и смешанные состояния. Основные свойства матриц плотности. Средние значения физических величин в смешанном состоянии. Соотношение неопределенностей для некоммутирующих величин в смешанном состоянии.
11. Матрицы плотности подсистем. ЭПР- ”парадоксы” измерения некоммутирующих величин в составных системах, их объяснение.
12. Координатное и импульсное представления. Волновая функция, ее вероятностная интерпретация.
13. Общие свойства ур-ния Шредингера для нерелятивистской частицы в потенциальном поле. Уравнение непрерывности, его физический смысл. Вариационный принцип для стационарного уравнения Шредингера.

14. Квантовая механика частицы в потенциальном поле для одного пространственного измерения. Основные свойства дискретного спектра. Специфика одномерной потенциальной ямы с равновысокими стенками.
15. Одномерное рассеяние на потенциале с регулярными асимптотиками  $V(\pm\infty) = V_{\pm}$  в стационарной картине и через движение волновых пакетов.
16. Одномерное уравнение Шредингера с периодическим потенциалом. Теорема Флоке, функции Блоха, квазиимпульс и зоны Бриллюэна.
17. Квазиклассическое (ВКБ) приближение, условие применимости. Квазиклассические волновые функции, их продолжение через точки поворота. Правило квантования Бора-Зоммерфельда. Квазиклассическая оценка на число и плотность квантовых состояний через фазовый объем.
18. Туннельный эффект в ВКБ-приближении. Отражение от вертикальной потенциальной стенки. Волновые функции и разность энергий двух нижних уровней в потенциале вида "mexican hat". Молекула аммиака,  $K_0$ - и  $\bar{K}_0$ -мезоны, вакуумные пузырьки Шальникова в сверхтекучем  $He^4$ .
19. Частица в центрально-симметричном поле. Разделение переменных. Орбитальный момент, собственные функции и собственные значения  $l^2$  и  $l_z$ . Природа целочисленности орбитального момента. Конечный поворот как унитарное преобразование координатной волновой функции.
20. Радиальное уравнение Шредингера. Граничное условие при  $r = 0$ , его обоснование. Общие свойства энергетического спектра и волновых функций связанных состояний в центрально-симметричном поле. Падение на центр. Оценка Баргмана для числа связанных состояний с заданным  $l$ . ВКБ-приближение для радиального уравнения.
21. Угловой момент и конечные повороты в общем случае. Перестановочные соотношения для компонент момента. Спектр операторов  $J^2$ ,  $J_z$ . Матричные элементы компонент момента в базисе собственных векторов операторов  $J^2$ ,  $J_z$ . Операторы спина  $\vec{S}$  частицы, их матричные элементы при диагональном  $S_z$ . Спин  $1/2$ , основные свойства.
22. Сложение моментов. Коэффициенты векторного сложения, их основные свойства и физический смысл. Сложение двух спинов  $1/2$ , синглетные и триплетные спиновые волновые функции. Полный момент. Волновые функции частицы со спином  $1/2$  в состоянии с орбитальным моментом  $l$  и полным моментом  $j$ .
23. Группа вращений. Конечные повороты как унитарные преобразования. Неприводимые тензоры (скаляр и вектор), их коммутаторы с компонентами полного углового момента системы как следствие законов преобразования при конечных поворотах. Теорема Вигнера-Эккарта для матричных элементов скаляра и вектора. Метод эквивалентных операторов.
24. Пространственная инверсия в квантовой механике. Четность орбитального состояния. Тензоры и псевдотензоры (на примере скаляра и вектора). Правила отбора по четности.
25. Toy model (Alice, Bob, ancilla) квантовой телепортации как задача об измерении в системе трех спинов  $1/2$  физических величин совместно с фон Неймановской наблюдаемой (проектором на определенное состояние двух других спинов).

## II семестр

26. Стационарная теория возмущений для невырожденного и вырожденного дискретных уровней. Близкие уровни под влиянием возмущения.
27. Принцип неразличимости одинаковых по своим физическим характеристикам частиц в квантовой механике. Бозоны и фермионы. Числа заполнения. Волновая функция системы тождественных невзаимодействующих частиц. Возможность парастатистики в планарных системах.
28. Обменное взаимодействие. Эффективное спин-спиновое взаимодействие двух частиц со спином  $1/2$  как следствие обменных эффектов. Природа (анти)ферромагнетизма. Одномерный ферромагнетик Гейзенберга. Спиновая волна как элементарное возбуждение (квазичастица-магنون) в спиновой цепочке.
29. Многоэлектронный атом в приближении самосогласованного поля. Оболочки, термы, обоснование 1-ого и 2-ого правил Хунда.
30. Вариационные методы (Хартри и Хартри-Фока) для многоэлектронного атома (на примере ортогелия).
31. Разложение валентной оболочки на термы. Схемы Юнга. Построение волновых функций для термов через старшие вектора и определитель Слэтера.
32. Модель Томаса-Ферми. Поправка Амальди. Связь между орбитальным моментом валентной оболочки и порядковым номером элемента в рамках модели ТФ, ее проявление в "тонкой" структуре периодической системы элементов.
33. Тонкая структура термов валентной оболочки в многоэлектронном атоме. LS- и JJ-типы связи. Обоснование 3-его правила Хунда.
34. Взаимодействие атомов на больших расстояниях. Обменные эффекты. Метод адиабатического приближения для молекулярной связи, его обоснование. Молекула водорода в приближении Гайтлера-Лондона. Типы химической связи.
35. Общая постановка задачи для квантовых переходов. Нестационарная теория возмущений (Дирака). Поведение системы при мгновенном и адиабатическом изменении потенциала.
36. Золотое правило (Ферми) для скорости перехода в периодическом внешнем поле в первом порядке теории возмущений, область его применимости.
37. Прямые и последовательные переходы в непрерывном спектре для независящего от времени взаимодействия. Матрица реакций (Т-оператор) как сумма борновского ряда теории возмущений. Полная скорость перехода при несовпадающих начальном и конечном состояниях. Уравнения Липпмана-Швингера в операторной и векторной формах.
38. S-матричная формулировка задачи о переходах. Взаимосвязь между матричными элементами S- и T-матриц. Скорость перехода в общем случае. Оптическая теорема для переходов как следствие унитарности эволюции. Переходы в системах тождественных частиц, обменные эффекты.
39. Эволюция состояний, принадлежащих непрерывному энергетическому спектру. Закон распада и время жизни квазистационарного состояния. Форма и интенсивность линии. Соотношение между полушириной и временем жизни.
40. Обращение времени в квантовой механике. Теорема взаимности и принцип детального

равновесия для обращенных во времени переходов. Теорема Крамерса.

41. Потенциальное упругое рассеяние. Амплитуда и дифференциальное сечение рассеяния, их выражение через Т-матрицу. Уравнения Липпмана-Швингера и оптическая теорема для упругого рассеяния. Борновское приближение, область его применимости.
42. Парциальное разложение амплитуды и полного сечения упругого рассеяния для сферически-симметричного потенциала. Парциальные амплитуды и фазы рассеяния, методы их вычисления.
43. Низкоэнергетическое рассеяние на потенциале конечного радиуса действия. Резонансное низкоэнергетическое рассеяние на неглубоком дискретном уровне, формула Бете-Пайерлса.
44. Парциальная амплитуда рассеяния как функция комплексного волнового числа (энергии). Дискретные, виртуальные и метастабильные уровни как нули функции Йоста в комплексной плоскости, их связь с резонансами. Резонансное рассеяние на метастабильном состоянии, формулы Брейта-Вигнера.
45. Упругое потенциальное рассеяние при высоких энергиях. Приближение эйконала.
46. Неупругое рассеяние. Общий способ описания при сферически-симметричном взаимодействии, выражения для  $\sigma_r$  и  $\sigma_e$  через парциальные амплитуды. Брейт-вигнеровские резонансы в неупругом рассеянии. Случай полного поглощения, закон Бете.
47. Квантование электромагнитного поля (в кулоновской калибровке). Фотоны, их энергия-импульс, спин и спиральность. Когерентные состояния и классические э-м поля.
48. Взаимодействие электронов с фотонами. Теория возмущений. Э-м переходы в атомах. Однофотонные и многофотонные переходы. Угловая интенсивность однофотонного перехода в первом порядке теории возмущений. Скорость перехода в дипольном приближении.
49. Мультипольное разложение для однофотонного перехода. Угловая интенсивность и правила отбора для E1-, E2- и M1-переходов.
50. Релятивистская квантовая механика. Уравнение Дирака. Уравнение непрерывности, его ковариантная форма. Спин частицы Дирака. Решения ур. Дирака для свободной частицы. Интерпретация состояний с отрицательной энергией. Позитроны как дырки в море Дирака.
51. Уравнение Дирака во внешнем электромагнитном поле. Нерелятивистское приближение, уравнение Паули. Спиновый магнитный момент электрона.
52. Квазирелятивистское разложение уравнения Дирака для электрона в центральном поле. Спин-орбитальное взаимодействие и другие релятивистские поправки, их физический смысл.