

## «Квантовая механика»

### Содержание курса

#### **1. Дифракция микрочастиц. Волновая функция.**

Дифракция на диафрагме с одной щелью, непредсказуемость результатов измерений координат отдельных частиц. Зависимость дифракционной картины от ширины щели и скорости частиц. Дифракция на двух щелях. Вероятностный и волновой аспекты динамики микрочастиц. Аналогия между механикой микромира с электродинамикой. Волновая функция, ее аддитивность. Вероятностная интерпретация волновой функции, нормировка. Волновая функция как носитель полной информации о квантовомеханическом состоянии системы. Принцип суперпозиции состояний. Линейность квантовой механики как физической теории.

#### **2. Принцип неопределенности Гейзенберга.**

Рассеяние на диафрагме как измерение поперечной координаты частицы. Связь между шириной щели и поперечной компонентой скорости частицы за диафрагмой.

Соотношение неопределенности для координаты и импульса. Примеры соотношений неопределенности для других пар физических величин. Принцип неопределенности Гейзенберга. Аналогия между квантовой механикой и классической теорией колебаний: волновые пакеты, соотношение неопределенности для их координат и соответствующих проекций волнового вектора. Формула де Бройля. Отсутствие траекторий у микрочастиц. Роль измерения в физике микромира. Боровский принцип дополнительности. Соотношение неопределенности для энергии и времени.

#### **3. Волна де Бройля.**

Гипотеза де Бройля относительно вида волновой функции свободной частицы. Длина волны, соотношение неопределенности для координаты и импульса, дифракционная картина. Соотношение Эйнштейна. Групповая скорость волны де Бройля. Совпадение групповой скорости волны де Бройля с классической скоростью частицы. Принцип соответствия.

#### **4. Средние значения и квантовомеханические операторы.**

Средние значения физических величин (наблюдаемых) – важнейшие характеристики состояния квантовой системы. Выражения для средних значений координат и функций координат. Формула для среднего значения произвольной наблюдаемой, квантовомеханические операторы. Операторы координаты и потенциальной энергии. Операторы проекции импульса и вектора импульса. Соотношения между операторами различных физических величин как проявление боровского принципа соответствия. Оператор кинетической энергии. Гамильтониан. Операторы проекций углового момента и вектора момента.

#### **5. Линейные операторы, их собственные функции и собственные числа.**

Математический оператор: определение, примеры. Линейные операторы, их основные свойства. Сумма и произведение операторов; единичный и нулевой операторы.

Некоммутативность произведения операторов, примеры. Коммутатор и антикоммутатор двух операторов. Собственные функции и собственные значения (числа) линейных операторов, примеры. Спектры линейных операторов. Вырожденные собственные числа, кратность вырождения, примеры операторов с вырожденными спектрами.

## **6. Самосопряженные операторы, свойства их спектров и собственных функций.**

Сопряжение по Эрмиту, эрмитово сопряженный оператор, примеры. Самосопряженный (эрмитов) оператор. Оператор, сопряженный по Эрмиту к произведению двух операторов. Произведение двух самосопряженных операторов, условие его эрмитовости. Теоремы о вещественности собственных чисел эрмитовых операторов и ортогональности их собственных функций (с доказательством). Антиэрмитовы операторы.

## **7. Разложения по собственным функциям эрмитовых операторов.**

Система собственных функций эрмитового оператора как ортогональный базис в бесконечномерном векторном пространстве. Пространство Гильберта. Разложение произвольного вектора по базису в гильбертовом пространстве, формула для коэффициентов разложения. Сходимость разложения к исходной функции. Условие полноты. Пример: ряд Фурье как разложение по собственным функциям эрмитового оператора. Коммутативность операторов, имеющих общую систему собственных функций.

## **8. Матричное представление операторов.**

Волновая функция как вектор в гильбертовом пространстве, различные представления функции. Действие оператора на функцию, матрица оператора, формула для матричных элементов. Матрица произведения двух операторов. Свойства матриц эрмитовых операторов. Матрица оператора в его собственном представлении, вещественность собственных чисел эрмитовых матриц.

## **9. Распределения вероятностей результатов измерений физических величин.**

Волновая функция произвольного квантового состояния  $\psi$  в F-представлении. Среднее значение физической величины F в состоянии  $\psi$ . Условие нормировки волновой функции в F-представлении. Аналогия между выражением для среднего в F-представлении и соответствующей «экспериментальной» формулой (формулой теории вероятностей). Физический смысл собственных чисел оператора F и коэффициентов разложения  $\psi$  по его собственным функциям. Собственные функции оператора F как волновые функции квантовых состояний, в которых F имеет определенное значение. Примеры: волна де Бройля как собственная функция оператора импульса, волна де Бройля в импульсном представлении.

## **10. Уравнение Шредингера. Гамильтониан.**

Уравнение движения для волновой функции, естественные физические предположения о его возможной структуре. Уравнение Шредингера. Гамильтониан как фундаментальный оператор, определяющий динамику квантовой системы. Гамильтонианы одночастичной и двухчастичной систем. Гамильтониан системы многих частиц.

## **11. Стационарные состояния.**

Квантовые системы в статических внешних полях. Гамильтонианы, не зависящие от времени явно. Решение уравнения Шредингера методом разделения переменных. Уравнение для временной части волновой функции, его решение. Стационарное уравнение Шредингера (уравнение Шредингера без времени). Собственные функции гамильтониана как волновые функции стационарных состояний. Независимость средних от времени в этих состояниях. Стационарные состояния как состояния с определенными значениями полной энергии. Энергетический спектр квантовой системы. Разложения по собственным функциям гамильтониана.

## **12. Дифференцирование операторов по времени. Теоремы Эренфеста.**

Специфика дифференцирования наблюдаемых по времени в квантовой механике. Временные производные от средних значений. Оператор производной физической величины по времени. Квантовые скобки Пуассона. Операторы скорости и ускорения. Второй закон Ньютона в операторной форме. Теоремы Эренфеста. Сохраняющиеся величины (интегралы движения) в квантовой механике.

## **13. Соотношения неопределенностей для произвольных пар физических величин.**

Связь между одновременной измеримостью физических величин и коммутативностью их операторов. Среднеквадратичное отклонение от среднего как количественная характеристика неопределенности физической величины в данном квантовом состоянии. Коммутатор операторов двух наблюдаемых, его антиэрмитовость. Интеграл Вейля, условие его неотрицательности. Неравенства Гейзенберга для двух произвольных физических величин. Коммутатор как индикатор и мера гейзенберговской неопределенности.

## **14. Частица в одномерной прямоугольной потенциальной яме с бесконечно высокими стенками (семинар).**

Одномерные одночастичные системы. Частица в прямоугольной потенциальной яме – простейшая модель связанного состояния. Стационарное уравнение Шрёдингера, граничные условия в случае бесконечно высоких стенок. Квантование энергии. Связь между характером движения и типом энергетического спектра. Квантовые флуктуации как следствие соотношений неопределенности, отсутствие состояния покоя в микромире. Волновые функции стационарных состояний, их нормировка, квазиклассический предел. Средние значения координаты и импульса частицы в яме.

## **15. Частица в конечной одномерной потенциальной яме (семинар).**

Стационарное уравнение Шрёдингера. Граничные условия в случае конечных стенок. Уравнение для энергетического спектра, его анализ. Зависимость числа связанных состояний (уровней энергии) от глубины ямы. Наличие связанного состояния в сколь угодно мелкой и узкой одномерной потенциальной яме. Роль размерности пространства.

## **16. Одномерный гармонический осциллятор.**

Гармонический осциллятор – важнейшая физическая модель. Гамильтониан одномерного осциллятора. Стационарное уравнение Шрёдингера, безразмерные переменные. Решение уравнения Шрёдингера в инфракрасном пределе. Поиск точного решения в виде степенного ряда, рекуррентное соотношение для коэффициентов. Обеспечение корректной асимптотики волновых функций путем обрыва ряда. Квантование энергии гармонического осциллятора, особенности его энергетического спектра. Квантовые флуктуации (нулевые колебания). Волновые функции стационарных состояний, их четность. Полиномы Эрмита-Чебышева. Распределения вероятностей координаты в стационарных состояниях. Квазиклассический предел. Осциллирующий волновой пакет – нестационарное состояние с минимальным значением произведения  $\Delta x \Delta p$ .

## **17. Трехмерный осциллятор, особенности его спектра.**

Трехмерный гармонический осциллятор как система с разделяющимися декартовыми координатами. Волновые функции стационарных состояний и энергетический спектр трехмерного осциллятора. Вырождение энергетических уровней, его кратность. Физическая природа вырождения, вырождение как следствие симметрии системы.

### **18. Плотность потока вероятности.**

Частица в произвольном квантовом состоянии. Изменение со временем вероятности обнаружения частицы в конечном объеме. Вектор плотности потока вероятности  $\mathbf{j}$ , его физический смысл. Уравнение непрерывности для  $|\psi|^2$  и  $\mathbf{j}$  как закон сохранения числа частиц. Вектор плотности потока вероятности в случае свободной частицы. Вектор  $\mathbf{j}$  для состояний с вещественными волновыми функциями. Вектор  $\mathbf{j}$  для осциллирующего волнового пакета.

### **19. Туннельный эффект.**

Частица в поле одномерного прямоугольного потенциального барьера. Стационарное уравнение Шрёдингера, его решения в области барьера при  $U_0 > E$  и вне барьера. Способы нормировки волновой функции в случае инфинитного движения, нормировка на единичную амплитуду падающей волны. Амплитуда волновой функции за барьером. Туннельный эффект, вероятность туннелирования. Оценки туннельной прозрачности на микроскопических (атомных) масштабах и в макромире. Примеры проявлений и применений туннельного эффекта. Туннельный эффект и закон сохранения энергии. Плотность потока вероятности в области барьера, сохранение числа частиц при туннелировании.

### **20. Движение в центральном поле.**

Постановка задачи, гамильтониан в сферической системе координат. Радиальная и угловая части гамильтониана, выражение угловой части через оператор квадрата момента импульса. Сохранение модуля момента и его проекции. Стационарное уравнение Шрёдингера, разделение переменных в сферических координатах. Уравнения на радиальную и угловую части волновой функции.

### **21. Спектр и собственные функции оператора проекции момента импульса.**

Уравнение для собственных функций оператора квадрата момента, разделение переменных. Собственные функции оператора проекции момента. Граничное условие для циклической переменной  $\varphi$ . Спектр оператора проекции момента, магнитное квантовое число. Пространственное квантование. Поворот оси квантования, его следствия для наблюдаемых. Коммутаторы операторов проекций момента, соотношения неопределенности для  $L_x$ ,  $L_y$  и  $L_z$ . Связь между структурой коммутационных соотношений для операторов проекций и свойствами трехмерных вращений.

### **22. Квантование квадрата момента. Спектр и собственные функции оператора $L^2$ .**

Возможность нахождения спектра оператора квадрата момента алгебраическими методами. Коммутатор оператора квадрата момента и проекции момента импульса, одновременная измеримость этих наблюдаемых. Операторы  $L_+$  и  $L_-$ , их основные свойства. Соотношение между оператором квадрата момента и  $L_-L_+$ . Спектр оператора  $L^2$ , орбитальное (азимутальное) квантовое число. Собственные функции оператора квадрата момента (сферические гармоники, шаровые функции). Присоединенные полиномы Лежандра. Примеры угловых распределений для состояний с малыми  $l$ . Неравенство для модуля момента и максимального значения его проекций как следствие соотношений неопределенности для  $L_x$ ,  $L_y$ ,  $L_z$ .

### **23. Атом водорода: радиальные волновые функции.**

Задача о движении электрона в кулоновском поле ядра. Уравнение для радиальной части волновой функции. Безразмерные (атомные) переменные и параметры. Ультрафиолетовая и инфракрасная асимптотики решения радиального уравнения Шрёдингера. Поиск почного решения в виде степенного ряда, рекуррентные соотношения для коэффициентов.

Необходимость обрыва ряда в случае финитного движения (дискретного спектра). Формула Бора. Радиальные волновые функции и обобщенные полиномы Лагерра. Распределения вероятностей  $r$  для основного и первых возбужденных состояний. Первый боровский радиус. Картины распределения электронной плотности в основном и первых возбужденных состояниях атома водорода. Торообразные распределения как квантовые аналоги классических траекторий.

#### **24. Атом водорода: энергетический спектр, природа вырождения.**

Вырождение энергетического спектра атома водорода. Кратность вырождения  $n$ -го энергетического уровня. Вырождение по магнитному квантовому числу и изотропия (сферическая симметрия) системы. Вырождение по орбитальному квантовому числу («случайное») как следствие скрытой симметрии кулоновского поля. Проявление скрытой симметрии потенциала Ньютона-Кулона в классической задаче Кеплера. Нарушения скрытой симметрии в классической и квантовой механике, спектры многоэлектронных атомов. Первый боровский радиус и энергия ионизации атома водорода (постоянная Ридберга) – пространственный и энергетический масштабы атомного мира. Спектры многозарядных ионов, характерные электронные энергии при  $Z \gg 1$ . Ридберговские атомы.

#### **25. Стационарная теория возмущений.**

Задачи, близкие к точно решаемым: квантовая система в слабом внешнем поле, система со слабым взаимодействием и т. п. Невозмущенный гамильтониан и оператор энергии возмущения. Статические возмущения и возмущения, зависящие от времени. Постановка задачи в стационарной теории возмущений. Нахождение поправок первого приближения к энергетическим уровням и волновым функциям стационарных состояний в случае невырожденного спектра. Физический смысл выражения для  $E_n^{(1)}$ . Нормировка возмущенной волновой функции, ортогональность  $\varphi_n^{(1)}$  и  $\varphi_n^{(0)}$ . Условие применимости стационарной теории возмущений. Выражение для поправки второго приближения к энергии уровня.

Теория возмущений при наличии близких уровней. Нахождение волновых функций, отвечающих двум близким уровням, в нулевом приближении. Секулярное (вековое) уравнение, его решения. Энергетические уровни в случае слабой гибридизации, эффект расталкивания. Энергии близких уровней в пределе сильной гибридизации, расталкивание уровней и снятие вырождения. Волновые функции нулевого приближения, их вид в случаях слабой и сильной гибридизации. Отсутствие членов с малыми знаменателями в рядах теории возмущений, учитывающей сдвиги (расталкивание) близких уровней.

#### **26. Нарушение симметрии и снятие вырождения.**

Атом в магнитном поле. Магнитный момент, создаваемый электроном в орбитальном стационарном состоянии, магнетон Бора. Слабое магнитное поле как возмущение. Оператор энергии возмущения. Поправки первого приближения к боровским энергетическим уровням. Расщепление уровней под действием магнитного поля как проявление фундаментальной закономерности – снятия вырождения при нарушении симметрии. Почему вырождение снимается лишь частично. Два одинаковых связанных осциллятора. Взаимодействие как возмущение. Вырождение спектра невозмущенной задачи. Решение возмущенной задачи (диагонализация гамильтониана) методом перехода к нормальным координатам. Физический смысл нормальных координат. Энергетический спектр возмущенной задачи. Снятие вырождения под действием возмущения. «Скрытая» (аксиальная) симметрия системы двух одинаковых несвязанных осцилляторов, ее нарушение при включении взаимодействия.

### **27. Нестационарная теория возмущений (теория квантовых переходов)**

Уравнение Шрёдингера, оператор энергии возмущения  $V(t)$ . Поиск решения в виде ряда по волновым функциям невозмущенной задачи, зависящим от времени (метод Дирака, представление Дирака). Точная система уравнений для коэффициентов разложения. Конкретизация задачи – выбор времени включения возмущения ( $t = 0$ ) и начального состояния системы:  $\psi(\mathbf{r}, 0) = \psi_n^{(0)}$ . Приближенное решение системы в первом порядке по  $V(t)$ . Выражение для поправки первого приближения к коэффициенту разложения. Физический смысл квадратов модулей коэффициентов разложения. Квантовые переходы по Дираку, вероятности квантовых переходов.

### **28. Квантовые переходы под действием гармонического возмущения, «золотое правило Ферми».**

Внешние воздействия, гармонически зависящие от времени – важнейший тип возмущений. Вычисление коэффициентов разложения и вероятностей квантовых переходов. Резонансная зависимость вероятности перехода от частоты внешнего поля,  $\delta$ -функция как асимптотика резонансного фактора. Правило частот Бора и закон сохранения энергии. Выражение для вероятности перехода  $w_{nm}(t)$  – «золотое правило Ферми», его физическая трактовка. Пределы применимости «золотого правила»,  $\delta$ -функция и ограничение  $w_{nm}(t) \ll 1$ . Принцип (соотношение) детального баланса.

### **29. Элементы теории взаимодействия излучения с веществом.**

Полуклассическая теория взаимодействия излучения с веществом. Электрон в переменном электрическом поле, энергия взаимодействия с полем как энергия возмущения. Матричные элементы оператора дипольного момента. Правила отбора, разрешенные и запрещенные переходы. Запрещенные переходы и симметрия задачи. Примеры: электрон в одномерной потенциальной яме, электрон в атоме. Четность атомных орбиталей и правила отбора.

Элементы квантовой теории взаимодействия излучения с веществом.

Электромагнитное поле в резонаторе, нормальные моды, гамильтониан поля. Квантования поля, свет как поток фотонов. Вынужденное излучение и поглощение света. Квантовые флуктуации поля, спонтанное излучение. Время жизни атома в возбужденном состоянии, уширение спектральных линий. Метастабильные состояния.

### **30. Спин и спиноры.**

Опыт Штерна и Герлаха. Собственный магнитный момент электрона, его величина. Собственный механический (угловой) момент электрона. Спин – фундаментальное свойство частицы, невозможность его объяснения (трактовки) в рамках классических моделей. Гиромагнитное отношение для спина электрона, опыт Эйнштейна-де-Гааза. Спин в нерелятивистской квантовой механике, спиновые переменные.

Двухкомпонентная волновая функция частицы со спином  $\frac{1}{2}$  (спинор). Нормировка спинора. Трансформационные свойства спинора, его отличие от комплексного вектора.

### **31. Операторы проекций спина. Спин в магнитном поле.**

Проекция спина как динамические переменные. Спектр и собственные спиноры оператора  $s_z$ , явный вид этого оператора. Операторы  $s_x$  и  $s_y$ . Матрицы Паули, их основные свойства. Коммутационные соотношения между матрицами Паули. Состояния с определенными значениями  $s_x$  и  $s_y$ ). Вычисление средних значений физических величин для частиц со спином. Спин в магнитном поле, уравнение для спиновой волновой функции. Движение спина в постоянном поле. Стационарные состояния и энергетический спектр. Прецессия.

### **32. Уравнение Паули.**

Векторный потенциал, создаваемый бесконечно тонким и длинным соленоидом. Импульс, передаваемый заряженной частице при включении тока в соленоиде. Динамический (канонический) импульс частицы в магнитном поле, его отличие от кинематического импульса. Функция Гамильтона, уравнения Гамильтона и сила Лоренца. Гамильтониан заряженной частицы со спином  $1/2$ . Уравнение Паули.

### **33. Плотность потока вероятности и векторный потенциал.**

Плотность тока, динамический импульс и вектор-потенциал. Уравнение непрерывности для плотности вероятности. Вектор плотности потока вероятности при наличии векторного потенциала. Плотность тока, его диамагнитная составляющая. Векторный потенциал и фаза волновой функции. Эффект Ааронова-Бома.

### **34. Электрон в однородном постоянном магнитном поле.**

Уравнение Паули для заряженной частицы со спином  $1/2$ . Распределение вектор-потенциала, создающего однородное постоянное магнитное поле. Гамильтониан и интегралы движения. Структура волновых функций стационарных состояний. Сведение задачи к задаче о гармоническом осцилляторе. Квантование движения в плоскости, перпендикулярной  $\mathbf{B}$ . Уровни Ландау. Природа вырождения спектра электрона в магнитном поле.

### **35. Тожественность микрочастиц. Фермионы и бозоны.**

Неразличимость одинаковых микрочастиц, необходимость ее учета в математическом аппарате квантовой механики. Многочастичные волновые функции, их симметрия относительно перестановки частиц. Симметричные и антисимметричные состояния. Сохранение перестановочной симметрии при движении (изменении во времени состояния) квантовой системы. Фермионы и бозоны. Связь спина со статистикой. Симметризация многочастичных волновых функций. Волновая функция системы  $N$  одинаковых бозонов. Система  $N$  невзаимодействующих фермионов. Симметризация ее волновой функции, детерминанты Слэтера.

### **36. Синглетные и триплетные состояния.**

Системы с двумя электронами (атом гелия, молекула водорода, ионы  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Be}^{++}$  и т. п.). Гамильтониан двухэлектронной системы в пренебрежении спин-орбитальным взаимодействием. Разделение орбитальных и спиновых переменных, структура двухчастичной волновой функции. Состояния системы двух спинов, симметричные и антисимметричные спиновые функции. Классификация состояний двух частиц по величине суммарного спина. Связь между величиной полного спина и симметрией орбитальных и спиновых волновых функций. Синглетные и триплетные состояния.

### **37. Принцип Паули. Элементарная теория строения атома.**

Система одинаковых невзаимодействующих фермионов. Зануление ее волновой функции при попытке поместить два фермиона в одно и то же одночастичное состояние как проявление фундаментального физического закона – принципа запрета (принципа Паули). Ограниченность общепринятой формулировки принципа запрета идеальным ферми-газом. Характер заполнения состояний борковского спектра при учете принципа Паули. Строение атома и структура таблицы Менделеева. Электрон-электронное взаимодействие, оценка его величины для легких и тяжелых атомов.

### **38. Атом (ион) с двумя электронами.**

Гамильтониан двухэлектронного атома (иона). Электрон-электронное взаимодействие как возмущение. Спектр и волновые функции невозмущенной задачи. Энергия ионизации  $E_i$  в нулевом приближении, ее сравнение с экспериментальным значением для атома гелия. Невозмущенная волновая функция основного состояния. Вычисление первой поправки к энергии основного состояния путем разложения кулоновского потенциала по сферическим гармоникам. Значения  $E_1$  и  $E_i$  в первом порядке теории возмущений, их сравнение с экспериментом для атома гелия.

### **39. Атом с двумя электронами и вариационный метод.**

Деформация электронных волновых функций под действием электрон-электронного взаимодействия. Учет перестройки атомных орбиталей с помощью вариационного метода. Экранировка заряда ядра, выбор пробной волновой функции, отражающей этот эффект. Вариационный параметр (эффективный заряд ядра)  $\zeta$  как мера степени экранировки, предельные значения  $\zeta$ . Вычисление энергии основного состояния вариационным методом. Эффективный заряд ядра, энергия основного состояния и потенциал ионизации для атома гелия. Количественные результаты для ионов  $Li^+$  и  $Be^{++}$ , зависимость точности численных оценок от заряда ядра  $Z$ .

### **40. Обменное взаимодействие.**

Молекула водорода. Гамильтониан электронной подсистемы молекулы в пренебрежении спин-орбитальным взаимодействием. Возможные виды зависимости энергии основного состояния от расстояния между ядрами. Симметрия двухэлектронной волновой функции. Энергии синглетного и триплетного состояний. Обменный интеграл и обменное взаимодействие, их физическая трактовка. Природа ковалентной связи. Оценка величины обменного взаимодействия в пренебрежении межэлектронным кулоновским отталкиванием.

Обменное взаимодействие и ферромагнетизм. Виды магнитного упорядочения. Модели Изинга и Гейзенберга.

### **41. Многоэлектронные атомы. Метод Хартри-Фока.**

Кулоновское электрон-электронное взаимодействие, его роль в формировании структуры многоэлектронных атомов. Понятие эффективного (среднего) поля. Факторизация многоэлектронной волновой функции, эффективные одночастичные состояния. Система уравнений для эффективных одночастичных волновых функций, ее решение итерациями. Самосогласованное поле. Метод Хартри-Фока как метод самосогласованного поля, учитывающий симметрию многоэлектронной волновой функции. Численная эффективность метода Хартри-Фока на примере радиального распределения электронной плотности в атоме и энергии удаления электрона из разных квантовых состояний.

### **42. Теория рассеяния.**

Рассеяние микрочастиц, упругое рассеяние. Дифференциальное сечение рассеяния. Плотность потока и волновая функция рассеянных частиц. Амплитуда рассеяния. Полное сечение рассеяния. Стационарное уравнение Шредингера в теории рассеяния. Функция Грина и интегральная форма уравнения Шредингера. Волновые функции стационарных состояний в асимптотической области. Решение задачи рассеяния в рамках теории возмущений. Формула Борна. Физический смысл выражения для амплитуды рассеяния. Пределы применимости борновского приближения. Рассеяние быстрых заряженных частиц атомами. Рассеивающий потенциал и распределение заряда. Атомный форм-фактор.



Формула Резерфорда. Экранировка ядра электронами и подавление рассеяния на малые углы. Дифференциальное сечение рассеяния на атоме водорода.

#### **43. Матрица плотности.**

Чистые и смешанные состояния. Вероятности нахождения квантовой системы, взаимодействующей с другой системой, в том или ином чистом состоянии. Среднее значение физической величины  $F$  в смешанном состоянии. Матрица плотности (статистический оператор). Физический смысл диагональных элементов матрицы плотности, ее нормировка. Матрица плотности чистого состояния. Примеры чистого и смешанного состояний частицы со спином  $\frac{1}{2}$ . Временная эволюция матрицы плотности, квантовое уравнение Лиувилля. Матрица плотности в энергетическом представлении, физический смысл недиагональных элементов. Матрица плотности квантовой системы, взаимодействующей с другой системой (термостатом). Выражение для средних значений наблюдаемых, свертка по индексам термостата. Уравнение Лиувилля для матрицы плотности системы в термостате. Релаксация заселенностей и расфазировка (декогерентизация), их феноменологическое описание.