

КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА 2

(3-й курс, 6-й семестр, 2026 г.)

Грибанов Сергей Сергеевич

Программа курса лекций

1. Опыт Штерна-Герлаха. Спин. Волновые функции частиц спина $1/2$. Матрицы Паули. Преобразование спиноров при поворотах. Движение спина $1/2$ в магнитном поле. ЯМР и ЭПР.
2. Уравнение Шредингера в электромагнитном поле. Калибровочная инвариантность. Плотность тока. Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле, уровни Ландау. Уравнение Паули.
3. Сложение моментов. Коэффициенты Клебша-Гордана. Примеры: сложение двух спинов $1/2$ и сложение спина $1/2$ с орбитальным моментом.
4. Правила отбора для тензорных операторов. Векторная модель.
5. Тождественность частиц в квантовой механике. Волновые функции систем тождественных бозонов и фермионов. Принцип Паули.
6. Атом гелия. Оценка энергии связи по теории возмущений и вариационным методом. Обменное взаимодействие.
7. Приближение самосогласованного поля. Уравнение Хартри-Фока.
8. Приближение Томаса-Ферми.
9. Электронная конфигурация атома. Атомные термы.
10. Тонкая структура уровней. LS и JJ связь.
11. Таблица Менделеева. Правила Хунда.
12. Сверхтонкая структура уровней. Изотопический сдвиг.
13. Атом в постоянном внешнем поле. Эффект Штарка. Эффекты Зеемана и Папена-Бака.
14. Нестационарная теория возмущений. Адиабатическое и внезапное возмущения.
15. Периодическое возмущение. Золотое правило Ферми для переходов в состояния непрерывного спектра. Переходы в дискретном спектре. Фотоэффект.
16. Квантование электромагнитного поля. Эффект Казимира. Лэмбовский сдвиг.
17. Взаимодействие заряженной частицы с электромагнитным полем. Электродипольное, магнитодипольное и квадрупольное излучение. Правила отбора.
18. Естественная ширина линии. Вынужденное излучение и поглощение. Двухфотонное излучение.
19. Рассеяние света. Рэлеевское и томсоновское рассеяние. Резонансное рассеяние. Рассеяние на кристалле.
20. Трехмерное рассеяние. Постановка задачи. Борновское приближение. Критерий применимости. Резерфордское рассеяние. Кристаллический и атомный формфакторы.
21. Оптическая теорема. Фазовая теория рассеяния в центральном поле. Рассеяние медленных частиц.
22. Резонансное рассеяние. Формула Брейта-Вигнера.
23. Рассеяние быстрых частиц, приближение эйконала.
24. Рассеяние частиц со спином. Поляризация конечных частиц. Рассеяние тождественных частиц.
25. Структура молекул. Классификация термов двухатомных молекул. Движение ядер.

Задания

Задание № 1 (сдать до 31 марта)

1. Пучок нейтронов, движущийся вдоль оси x и поляризованный по направлению движения, переходит из области $x < 0$, где нет магнитного поля, в область $x > 0$ с постоянным и однородным магнитным полем \mathbf{B} , направленным по оси z . Найти зависимость от x средних значений проекций вектора спина на оси x , y и z при $x > 0$.
2. Ядро со спином $s = 1$ находится в состоянии с проекцией спина $s_z = +1$ на ось z . Найти вероятности проекций $+1, 0, -1$ на ось z' , направленную под углом α к оси z в плоскости xz . Сравнить с результатом задачи 5 из задания прошлого семестра.

Указание: задачу можно решать разными способами. Например, представить ядро, как состоящее из двух частиц со спином $1/2$, и использовать известный закон преобразования спиноров при поворотах. Или можно получить явный вид операторов спина для частицы со спином 1.

3. Построить волновые функции, возникающие при сложении моментов $j_1 = 1$ и $j_2 = 2$. Используя векторную модель, а также непосредственно используя полученные волновые функции, найти средние значения операторов \hat{j}_1 и \hat{j}_2 , например, в состоянии с полным моментом $J = 3$ и его проекцией $J_z = -1$.
4. Две частицы, взаимодействующие по закону $U = g\delta(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$, заключены в непроницаемый параллелепипед с ребрами $a > b > c$. Рассматривая указанное взаимодействие в качестве возмущения, найти поправку первого порядка к энергии основного и первого возбуждённого состояний системы, считая частицы:
 - (а) различными (рассмотреть случаи равных и неравных масс),
 - (б) тождественными со спином 0,
 - (в) тождественными со спином $1/2$.

В случае (в) определить вероятность того, что обе частицы находятся в правой половине объёма (по длинной стороне) при полном спине $S = 0, 1$.

Задание № 2 (сдать до 28 апреля)

5. Определить квантовые числа основных термов элементов C, N, O, F, Ne и Fe. Для атома кислорода в основном состоянии найти его средний магнитный момент. Парамагнитные или диамагнитные свойства проявляют в слабом магнитном поле атомы C и Ne в основных состояниях?
6. Как выглядит зеемановское расщепление уровней атома водорода с $n = 2$ в слабом и в сильном магнитном поле, то есть когда $\mu_B B$ мало по сравнению с интервалом тонкой структуры и когда велико?
7. Тяжёлая заряженная частица заряда $Z|e|$ пролетает мимо атома водорода, находящегося в основном состоянии ($n = 1$). Прицельный параметр ρ удовлетворяет условию $\rho \gg a_B$. Найти вероятность перехода атома водорода в состояние с $n = 2$. Движение налетающей частицы считать классическим со скоростью $v \gg \omega_{21}\rho$, где $\hbar\omega_{21} = E_2 - E_1$. Движением ядра атома и изменением траектории налетающей частицы под действием кулоновского взаимодействия пренебречь.
8. На атом водорода, находящийся при $t = 0$ в основном состоянии, действует однородное периодическое электрическое поле $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 \sin \omega t$. Определить минимальную частоту поля, необходимую для ионизации атома, и, пользуясь теорией возмущений, вычислить вероятность ионизации в единицу времени (электрон в конечном состоянии считать свободным).

Задание № 3 (сдать до 31 мая)

9. Определить мультипольности и оценить вероятности переходов между уровнями атома водорода с $n = 2$ и $n = 1$ с учётом их тонкой структуры и лэмбовского расщепления уровней $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$, которое составляет $4.4 \cdot 10^{-6}$ эВ. Объяснить большую величину времени жизни уровня $2s_{1/2}$ ($\tau = 0.12$ с), определяемую двухфотонным переходом $2s_{1/2} \rightarrow 1s_{1/2}$. Как изменится это время жизни при включении слабого электрического поля, перемешивающего состояния $2s_{1/2}$ и $2p_{1/2}$? Оценить величину поля, меняющую это время вдвое.
10. Найти сечение упругого рассеяния медленных частиц с массой m на потенциале $U(r) = -G\delta(r - a)$. Исследовать зависимость сечения от параметров потенциала, получить его значения при $mGa/\hbar^2 \ll 1$ (борновский

случай), при $mGa/\hbar^2 \gg 1$ (аналог случая непроницаемой сферы) и при $\Delta = 2mGa/\hbar^2 - 1 \ll 1$ (резонансный случай). Сравнить результаты с классическим сечением рассеяния на непроницаемой сфере. Установить связь между положением полюса амплитуды рассеяния в резонансном случае и энергией связанного состояния.

Список литературы

1. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, том III. Квантовая механика. — Москва: Наука, 1989.
2. Сербо В. Г., Хрипович И. Б. Лекции по квантовой механике. — Москва; Ижевск: ИКИ, 2023.
3. Мильштейн А. И., Резниченко А. В. Лекции по квантовой механике. — Новосибирск: НГУ, 2022.
4. Гинзбург И. Ф. Основы квантовой механики (нерелятивистская теория). — Москва; Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2018.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, том IV. Квантовая электродинамика. — Москва: Наука, 1989.
6. Мессиа А. Квантовая механика. Том I. — Москва: Наука, 1978.
7. Мессиа А. Квантовая механика. Том II. — Москва: Наука, 1979.
8. Зелевинский В. Г. Лекции по квантовой механике. — Новосибирск: СУИ, 2002.
9. Галицкий В., Карнаков Б., Коган В. Задачи по квантовой механике. Том I, II. — Едиториал УРСС, 2001.
10. Гольдман И. И., Кривченко В. Д. Сборник задач по квантовой механике. — Москва: ГИТТЛ, 1957.
11. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. Том I. — Москва: Мир, 1974.
12. С.) Ф. З. Задачи по квантовой механике, т. II. — Москва: Мир, 1974.
13. Борн М. Атомная физика. — Москва: Мир, 1970.
14. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Квантовая механика. Том 8. — Москва: Наука, 1966.
15. Greiner W., Bromley D. A. Quantum mechanics. An introduction. — Springer, 2000.
16. Greiner W., Bromley D. Quantum Mechanics: Special Chapters. — Springer, 2004.
17. Weinberg S. Lectures on Quantum Mechanics. — Cambridge University Press, 2012.
18. Sakurai J. J. Modern quantum mechanics. — Addison-Wesley Pub. Co, 1994.
19. Sakurai J. J. Advanced quantum mechanics. — Addison Wesley Pub. Co, 1967.