

Теоретический минимум курса физики для технических направлений подготовки

Раздел «Атомная физика»

Глоссарий

Основные определения

Кинематика

- (1) **Электромагнитное излучение** • Излучение, которое передается в виде электромагнитных волн. Примеры таких волн: радиоволны, микроволны, инфракрасное излучение, видимый свет, ультрафиолетовое излучение, рентгеновские лучи и гамма-излучение.
- (2) **Тепловое излучение** • Излучение, которое испускается телами при определенной температуре. Оно является формой электромагнитного излучения и имеет спектр, который зависит от температуры тела. Тепловое излучение может быть видимым (например, свечение нагретого металла) или невидимым (например, инфракрасное излучение). Оно играет важную роль в различных процессах, таких как нагревание и освещение..
- (3) **Элементарная частица** • Собирательный термин, относящийся к микрообъектам в субъядерном масштабе, которые на данный момент на практике невозможно расщепить на составные части.
- (4) **Частота** • Количество колебаний в единицу времени.
- (5) **Длина волны** • Расстояние между двумя последовательными самыми высокими или самыми низкими точками волны. Длина волны электромагнитного излучения определяет, к какой части электромагнитного спектра принадлежит данная волна.
- (6) **Энергия фотона** • Количество энергии, необходимое для высвобождения одного фотона из источника излучения.
- (7) **Интенсивность излучения** • Количество энергии, переносимое излучением через единицу площади в единицу времени.
- (8) **Постоянная Планка** • основная константа квантовой теории, коэффициент, связывающий величину энергии кванта электромагнитного излучения с его частотой, так же как и вообще величину кванта энергии любой линейной колебательной физической системы с её частотой. Связывает энергию и импульс с частотой и пространственной частотой, действие с фазой. Является квантом момента импульса. Обычное обозначение — латинское h . Иногда используется приведенная постоянная Планка $\hbar = h/2\pi$. Значение постоянной Планка считается зафиксированным и точно равным величине $h = 6.62607015 \cdot 10^{-34} \text{ кг} \cdot \text{ м}^2 \cdot \text{ с}^{-1}$.
- (9) **Наблюдаемая величина** • Относящаяся к системе или телу динамическая переменная, которая в принципе может быть измерена. Так, координата, импульс и кинетическая энергия электрона — это наблюдаемые величины.

- (10) **Основное состояние** • Самое низкое энергетическое состояние атома. Все другие состояния атома называются возбужденными. В атоме водорода, находящемся в самом низком энергетическом состоянии, электрон занимает самый низкий энергетический уровень. Если электрон занимает любой другой энергетический уровень, атом водорода находится в возбужденном состоянии.
- (11) **Принцип дополнительности** • Принцип, сформулированный и отстаиваемый Нильсом Бором, согласно которому корпускулярные и волновые свойства являются дополнительными, но взаимоисключающими. Дуальная природа света и материи похожа на две стороны одной монеты, которая может упасть на какую-то одну из сторон, но не обе одновременно. Например, можно поставить эксперимент, чтобы обнаружить волновые свойства либо корпускулярную природу объекта, но не их проявление одновременно.
- (12) **Принцип запрета** • Никакие два электрона не могут находиться в одном и том же квантовом состоянии, иначе говоря, иметь одинаковые наборы из четырех квантовых чисел.
- (13) **Белый свет** • Человеческий глаз воспринимает только малую часть всех электромагнитных волн. Это видимые длины волн электромагнитного спектра, находящиеся между 400 нм (фиолетовый) и 700 нм (красный). Белый свет — смесь красного, оранжевого, желтого, зеленого, голубого, синего и фиолетового. Когда пучок белого света проходит через стеклянную призму, он разделяется на разноцветные полосы, образуя след в виде радуги, называемый континуумом или непрерывным спектром.
- (14) **Угловой момент** • Свойство вращающегося тела, сходное с импульсом движущегося по прямой тела. Угловой момент тела зависит от его массы, размера и скорости вращения. Тело, совершающее орбитальное движение, тоже обладает угловым моментом, зависящим от его массы, радиуса орбиты и скорости. В мире атомов угловой момент квантуется. Он может меняться только на величину, равную целому числу постоянных Планка, деленному на 2π .
- (15) **Электронвольт** • Единица энергии, которая используется в атомной и ядерной физике, в физике элементарных частиц. 1 электронвольт — $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж).
- (16) **Атом** • Наименьшая, химически неделимая часть элемента, состоящая из положительно заряженного ядра, окруженного системой отрицательно заряженных электронов. Поскольку атом нейтрален, число положительно заряженных протонов в ядре равно числу электронов.
- (17) **Ядро** • Положительно заряженная масса в центре атома. Первоначально предполагалось, что ядро состоит только из протонов, но затем стало ясно, что в состав ядер входят и нейтроны. В ядре сосредоточена практически вся масса атома, но занимает оно только крошечную часть его объема. Ядра были открыты в 1911 году Эрнестом Резерфордом и его сотрудниками из Манчестерского университета.
- (18) **Суперпозиция** • Квантовое состояние, составленное из двух или большего числа других состояний. С определенной вероятностью в таком состоянии могут проявляться свойства тех состояний, из которых оно составлено.
- (19) **Волновая функция** • Математическая функция, описывающая волновые свойства системы частиц. Волновая функция определяет все, что можно знать о состоянии физической системы или частицы в квантовой механике. Например, с помощью волновой функции атома водорода можно вычислить вероятность обнаружить его электрон в определенной точке вблизи ядра..

(20) **Тепловое равновесное излучение** • Излучение, которое испускается телом при определенной температуре и находится в равновесии с окружающей средой. Это означает, что количество излучения, которое тело испускает, равно количеству излучения, которое оно поглощает от окружающих объектов. Такое равновесие достигается, когда температура тела становится постоянной и не меняется со временем. Тепловое равновесное излучение играет важную роль в термодинамике и является основой для законов теплового излучения.

(21) **Закон Вина** • устанавливает зависимость максимальной интенсивности излучения от температуры тела. Согласно этому закону, максимальная интенсивность излучения смещается к коротким длинам волн при повышении температуры: $\lambda_{max} = b/T$ [м], где $b = 2.897 \cdot 10^{-3}$ [м·К] — постоянная, T — температура тела в Кельвинах [К] .

(22) **Закон Стефана-Больцмана** • устанавливает зависимость общей энергии, которую тело излучает, от его температуры. Согласно этому закону, количество энергии, которое тело излучает, пропорционально четвертой степени его абсолютной температуры : $R = \sigma T^4$ [Вт/м²], где $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ [Вт/м²К⁴] — постоянная Стефана-Больцмана, T — температура тела в Кельвинах [К] .

(23) **Закон Планка** • устанавливает зависимость спектральной плотности излучения от длины волны и температуры тела. Согласно этому закону, спектральная плотность излучения достигает максимума при определенной длине волны, которая зависит от температуры тела: $B_\lambda(T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot 1/\exp\left(\frac{hc}{\lambda k_B T}\right) - 1$, λ — длина волны излучения, h — постоянная Планка, c — скорость света, k_B — постоянная Больцмана .

(24) **Закон излучения Кирхгофа** • Закон излучения Кирхгофа является одним из основных законов теплового излучения и не распространяется на другие виды излучения. Из закона следует — чем тело больше поглощает при температуре T на длине волны λ , тем оно больше излучает при данных температуре и длине волны. Таким образом, поверхности с высокой степенью черноты (коэффициентом излучения) хорошо поглощают падающее излучение и сами являются хорошими излучателями. Блестящие зеркальные поверхности с низким коэффициентом излучения мало излучают и плохо поглощают падающее на них излучение: $\frac{E(\lambda, T)}{A(\lambda, T) = \epsilon(\lambda, T)}$, Где $E(\lambda, T)$ — излучательная способность тела, $A(\lambda, T)$ - испускательная способность —тела.

(25) **Абсолютно черное тело** • Физическое тело, которое поглощает все падающие на него излучения во всех диапазонах и не отражает их.

(26) **Серое тело** • Физическое тело, которое поглощает часть падающего на него излучения и отражает другую часть. Отношение поглощенной энергии к падающей на тело энергии называется коэффициентом поглощения.

(27) **Спонтанное излучение** • процесс самопроизвольного испускания электромагнитного излучения квантовыми системами (атомами, молекулами) при их переходе из возбуждённого состояния в стабильное. Частота спонтанного электромагнитного излучения $h\nu_{ik} = E_i - E_k$ определяется разностью энергий i -го и k -го уровней системы. Если населённость уровня с энергией E_i равна N_i , то мощность спонтанного излучения равна: $I = N_i A_{ik} \cdot h\nu_{ik}$, где A_{ik} — вероятность перехода с i -го уровня на k -й..

(28) **Вынужденное излучение** • генерация нового фотона при переходе квантовой системы (атома, молекулы, ядра и т. д.) между двумя состояниями (с более высокого на более низкий энергетический уровень) под воздействием индуцирующего фотона,

энергия которого равна разности энергий этих состояний. Созданный фотон имеет ту же энергию, импульс, фазу, поляризацию, а также направление распространения, что и индуцирующий фотон (который при этом не поглощается). Оба фотона являются когерентными. На вынужденном излучении основан принцип работы квантовых усилителей, лазеров и мазеров. В рабочем теле лазера путём накачки создаётся избыточное (по сравнению с термодинамическим ожиданием) количество атомов в верхнем энергетическом состоянии. Рабочее тело газового лазера находится в резонаторе (в простейшем случае — пара зеркал), создающем условия для накопления фотонов с определённым направлением импульса. Первоначальные фотоны возникают за счёт спонтанного излучения. Затем, благодаря наличию положительной обратной связи, вынужденное излучение лавинообразно возрастает. Лазеры обычно используются для генерации излучения, тогда как мазеры, работающие в области радиочастот, применяются также и для усиления.

(29) **Внешний фотоэффект** • явление, при котором фотоны (кванты света) выбивают электроны из поверхности металла или другого материала. Это происходит при поглощении фотона электроном, который получает достаточную энергию для преодоления потенциального барьера (работы выхода) из материала. Этот эффект является основой работы фотоэлектрических приборов, таких как фотодиоды, фотоэлементы и солнечные батареи. Внешний фотоэффект был открыт Альбертом Эйнштейном в 1905 году и стал одним из ключевых экспериментов, подтвердивших корпускулярно-волновой дуализм света. Формула, описывающая фотоэффект: $h\nu = A_{ex} + E_{max}$, где h — постоянная Планка, ν — частота фотона, A_{ex} — работа выхода электрона из вещества, E_{max} — максимальная кинетическая энергия электрона, вырванного из вещества.

(30) **Первый закон Столетова** • Сила фототока насыщения I_n прямо пропорциональна интенсивности падающего излучения.

(31) **Второй закон Столетова** • Максимальная кинетическая энергия фотоэлектронов не зависит от интенсивности падающего излучения и линейно возрастает с увеличением частоты ν падающего излучения.

(32) **Третий закон Столетова** • Для каждого вещества существует граничная частота ν_{min} такая, что излучение меньшей частоты не может вырывать электроны из его поверхности (третий закон фотоэффекта). Эта минимальная частота $\nu_{min} = A_{ex}/h$ называется красной границей фотоэффекта. Такое название связано с тем, что минимальной частотой излучения в видимом диапазоне обладает излучение, соответствующее красной длине волны.

(33) **Эффект Комптона** • Явление рассеяния фотонов на свободных электронах, при котором происходит изменение длины волны и направления движения фотона. Когда фотон сталкивается с электроном, он передает ему часть своей энергии и меняет направление движения. При этом длина волны фотона увеличивается, а его энергия уменьшается. Эффект Комптона является одним из подтверждений корпускулярно-волновой дуализмы света и помогает понять природу электромагнитного излучения. Формула, описывающая эффект: $\lambda = \lambda_0 + \lambda_k \cdot (1 - \cos(\theta))$, где λ_0 — длина волны фотона до рассеяния, λ — длина волны фотона после рассеяния, $\lambda_k = h/(m_e c)$ — комptonовская длина волны электрона.

(34) **Модель Резерфорда** • В своей модели Резерфорд описывает строение атома состоящим из крохотного положительно заряженного ядра, в котором сосредоточена почти вся масса атома, вокруг которого вращаются электроны, — подобно тому, как планеты движутся вокруг Солнца. Планетарная модель атома соответствует совре-

менным представлениям о строении атома с уточнениями, что движение электронов не может быть описано законами классической механики и имеет квантовомеханическое описание. Недостатком планетарной модели являлась невозможность объяснения ею устойчивости атомов. Так как электроны движутся вокруг ядра, испытывая при этом центростремительное ускорение как планеты вокруг Солнца, то они по законам классической электродинамики должны излучать электромагнитные волны, теряя при этом на излучение кинетическую энергию орбитального движения и в результате «упасть» на ядро. Расчёты, выполненные с помощью методов классической электродинамики показывают, что электроны должны «упасть» на ядро за время порядка 10^{11} с. Это противоречие было снято последующим развитием планетарной модели в модели атома Бора.

(35) **Постулаты Бора** • Теория атома, разработанная датским физиком Нильсом Бором в 1913 году. Он предложил следующие постулаты: Электроны в атоме могут находиться только в определенных энергетических состояниях, называемых квантовыми уровнями, при переходе электрона с одного квантового уровня на другой происходит излучение или поглощение фотона света, частота излучаемого или поглощаемого фотона связана с разностью энергии между начальным и конечным квантовыми уровнями.

(36) **Формула Ридберга** • Выражение, связывающее энергию электрона в атоме с длиной волны спектральных линий. Она была получена шведским физиком Йоханом Ридбергом в 1890 году и имеет вид: $1/\lambda = RZ^2(1/n_1^2 - 1/n_2^2)$, где λ - длина волны спектральной линии, R - постоянная Ридберга, Z - заряд ядра водородоподобного атома, n_1 и n_2 - целые числа, определяющие начальный и конечный квантовые уровни электрона в атоме, $R = 109737,31568549 \text{ см}^{-1}$.

(37) **Условие частот Бора** • $\hbar\omega_{mn} = E_m - E_n$, где ω_{mn} - частота перехода с m на n уровень. E_n, E_m - энергии уровней с квантовыми числами m, n .

(38) **Условие квантования Бора-Зоммерфельда** • $L = \oint p_i dq_i = 2\pi n_i \hbar$, где p, q - обобщенные импульс и координата, интегрирование производится по периоду движения относительно обобщенной координаты. В случае круговых орбит $L = mvr = n\hbar$.

(39) **Спектральные серии атома водорода** • Согласно формуле Ридберга: $1/\lambda = R(1/n_1^2 - 1/n_2^2)$ возможны излучательные переходы с более возбужденного энергетического состояния в состояние с меньшей энергией. Такие переходы в атоме водорода ($Z = 1$) могут быть описаны сериями. Выделяют следующие серии, названные в честь открывателя: Серия Лаймана (переходы в состояние $n_1 = 1$), Бальмера (формула Бальмера - частный случай формулы Ридберга) ($n_1 = 2$), Пашена ($n_1 = 3$), Брэккета ($n_1 = 4$), Пфунда ($n_1 = 5$). Глазом можно обнаружить начало серии Бальмера (видимый диапазон).

(40) **Корпускулярно-волновой дуализм для света** • Концепция, которая утверждает, что свет может проявляться как волна и как частица (фотон) одновременно. Это означает, что свет имеет как волновые, так и корпускулярные свойства.

(41) **Гипотеза де Бройля** • Согласно гипотезе де Бройля каждая материальная частица обладает волновыми свойствами, причем соотношения, связывающие волновые и корпускулярные характеристики частицы остаются такими же, как и в случае электромагнитного излучения: $p = \hbar k$, $E = \hbar\omega$, т.е. длина волны де-Бройля $\lambda = h/p$, где p - импульс частицы (фотона), k - волновой вектор, λ - длина волны излучения, E - энергия фотона, соответствующая частоте электромагнитного излучения ω .

Для случая, когда скорость частицы сравнима со скоростью света в вакууме, связь между импульсом и кинетической энергией частицы определяется следующим соотношением

$$p = 1/c \sqrt{(E(E + 2m_0c^2))} = \sqrt{(2m_0E_k)} \sqrt{(1 + E_k/(2m_0c^2))}.$$

Тогда для длины волны де-Бройля справедливо следующее выражение:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{(2m_0E_k)} \sqrt{(1 + E_k/(2m_0c^2))}}$$

(42) **Волновая функция. Её физический смысл** • Состояние частицы в квантовой механике может быть математически описано волновой функцией. Такая функция Ψ , которая определена в бесконечномерном Гильбертовом пространстве, описывает вероятность нахождения частицы в определенном месте и времени в данном пространстве. Физический смысл волновой функции заключается в том, что она позволяет предсказать поведение квантовых систем, причем квадрат модуля волновой функции есть плотность вероятности. Так, например, для частицы, определенной в одномерной потенциальной яме шириной a , в основном состоянии вероятность обнаружить частицу внутри этой ямы:

$$P(0 < x < a) = \int_0^a \Psi^*(x)\Psi(x)dx = 1$$

Так же, например, она может использоваться для определения вероятности того, что частица находится в определенном энергетическом состоянии или имеет определенный импульс.

Требования к волновой функции: однозначность, непрерывность, конечность.

Для волновых функций справедлив принцип суперпозиции, заключающийся в том, что если система может пребывать в состояниях, описываемых волновыми функциями Ψ_1 и Ψ_2 , то при любых комплексных c_1 и c_2 ($c_1^2 + c_2^2 = 1$ для нормированных волновых функций), она может пребывать и в состоянии, описываемом волновой функцией

$$\Psi_{\Sigma} = c_1\Psi_1 + c_2\Psi_2$$

(43) **Волновой пакет** • Суперпозиция волн, обладающих разными частотами, которые распространяются в пространстве и занимают в каждый момент времени ограниченную область пространства. В квантовой механике описание частицы в виде волновых пакетов согласуется со статистической интерпретацией квадрата модуля волновой функции. Волновая функция, описывающая отдельную волну, имеет вид:

$$\Psi(r,t) = A \exp(-i(t - kr)) = A \exp(-i(Et - pr)/\hbar),$$

Где i - мнимая единица, E – энергия, переносимая волной, \hbar – приведенная постоянная Планка, p – импульс, переносимый волной (частицей), ω - её циклическая частота, k – волновое число. Такие волны, образуют волновой пакет для волн с волновыми векторами в диапазоне $(k_0 - \Delta k/2, k_0 + \Delta k/2)$:

$$\psi_{\Sigma}(r,t) = \frac{A}{\Delta k} \int_{k_0 - \Delta k/2}^{k_0 + \Delta k/2} \exp(-i(\omega t - kr)) dk$$

(44) **Фазовая скорость** • Каждая монохроматическая волна обладает фазовой скоростью, т.е. скоростью перемещения фазы гармонической волны: $V_{phase} = \omega/k$ — скорость по направлению волнового вектора совпадает со скоростью движения фазового фронта (поверхности постоянной фазы).

(45) **Групповая скорость** • Характеристика волнового пакета. $V_{group} = d\omega/dk$ — величина, характеризующая скорость распространения группы волн, т.е. скорость распространения максимума амплитудной огибающей квазимонохроматического волнового пакета. Групповая скорость — скорость переноса энергии и информации, поэтому не может быть больше скорости света (в отличии от групповой скорости)..

(46) **Дифракция частиц** • Опыты по дифракции нейтронов и молекул при отражении от кристаллов полностью подтвердили гипотезу де-Бройля в применении и к тяжелым частицам, доказав, что волновые свойства являются универсальным свойством всех частиц. Они не обусловлены какими-то особенностями внутреннего строения той или иной частицы, а отражают их общий закон движения. Длина волны де Бройля для частицы, например, электрона, который находится в ускоряющей разности потенциалов U :

$$\lambda_{дБ} = \frac{h}{\sqrt{(2m_e eU)}}$$

Где h — постоянная Планка, m_e — масса электрона, e — заряд электрона Дифракция на кристаллах возможна тогда, когда длина волны по порядку равна периоду кристаллической решетки (1 ангстрем), а дифрагировать на кристалле могут нерелятивистские электроны, обладающие энергиями порядка сотен электрон-вольт. Например, $U = 100$ В, тогда $\lambda_{дБ} = 0,12\text{нм} = 1,2$ ангстрем (1 ангстрем = 10^{-10} м) . Таким образом, длина волны свободного электрона соответствует длине волны рентгеновского излучения. Значит, когда наблюдается дифракция рентгеновских лучей, например, при их рассеянии на кристаллах, следует ожидать проявления волновых свойств и у электронов соответствующих энергий. Формула для дифракции частиц, соответствующее максимуму (т.е. направления наивероятнейшего отклонения частиц):

$$2d \cdot \sin \theta = m\lambda,$$

где d — межплоскостные расстояния в кристаллах, на которых возможна дифракция, m — порядок дифракции, θ — угловые направления наивероятнейшего отклонения частиц, λ — длина волны де Бройля частицы. .

(47) **Кот Шредингера** • Мысленный эксперимент, придуманный Эрвином Шредингером, суть которого состоит в том, что если справедливы положения квантовой механики, кот, до того как на него посмотрят, существует в суперпозиции состояний “мертвый” и “живой”.

(48) **Энергетический спектр частицы в одномерной и трехмерной яме** • Для частицы массой m , находящейся в одномерной потенциальной яме шириной равной с бесконечно высокими стенками ($U = \infty$) : $E = (\hbar^2 \pi^2 n^2)/(2ma^2)$, где n — квантовое число, определяемое номер энергетического состояния ($n = 1, 2, 3, \dots$). Для трехмерной ямы в декартовой системе координат (ящик со сторонами) : $E = (\hbar^2 \pi^2 (n_x^2 + n_y^2 + n_z^2))/(2ma^2)$.

(49) **Спектр одномерного квантового гармонического осциллятора** • Квантовой гармонический осциллятор — физическая модель в механике, представляющая собой

параболическую потенциальную яму для частицы массой m и являющаяся аналогом простого гармонического осциллятора. Для частицы, определённой в одномерном пространстве, движущейся в одномерном параболическом потенциале

$$U(x) = (m\omega^2 x^2)/2.$$

Гамильтониан квантового осциллятора массы m , собственная частота которого ω , выглядит так

$$\hat{H} = \hat{p}^2/2m + (m\omega^2 x^2)/2.$$

Энергетический спектр такой системы выглядит следующим образом: $E_n = \hbar\omega(n+1/2)$, где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Данный спектр значений E заслуживает внимания по двум причинам: во-первых, уровни энергии дискретны и равноотстоящие друг от друга (эквидистантны), то есть разница в энергии между двумя соседними уровнями постоянна и равна $\hbar\omega$; во-вторых, наименьшее значение энергии равно $\hbar\omega/2$. Этот уровень называют основным, вакуумом, или уровнем нулевых колебаний.

(50) Операторы физических величин • Оператор в квантовой механике – это линейное отображение, которое действует на волновую функцию, являющуюся комплекснозначной функцией, дающей наиболее полное описание состояния системы. Операторы обозначаются большими латинскими буквами с циркумфлексом наверху \hat{A}, \hat{B}, \dots . Оператор действует на функцию, которая стоит справа от него и приводит её в новое состояние: $\hat{A}\Psi_1 = \Psi_2$.

(51) Оператор координаты • $\hat{r} \rightarrow \vec{r}$, т.е. оператор действует на в.ф. $\hat{r}\psi(\vec{r}, t) = \vec{r}\psi(\vec{r}, t)$.

(52) Оператор импульса • $\hat{p} = -i\hbar\vec{\nabla}$, т.е. оператор действует на в.ф. $\hat{p}\psi(\vec{r}, t) = -i\hbar\vec{\nabla}\psi(\vec{r}, t)$.

(53) Оператор момента импульса • $\hat{L} = [\hat{r} \times \hat{p}] = -i\hbar[\hat{r} \times \vec{\nabla}]$.

(54) Оператор квадрата момента импульса • $\hat{L}^2 = \hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2 = -\hbar^2\nabla_{\theta\phi}^2$, где $\nabla_{\theta\phi}^2$ – угловая часть оператора Лапласа).

(55) Оператор проекции момента импульса на ось Z • $\hat{L}_z = -i\hbar\frac{\partial}{\partial\phi}$ (в сферической системе координат).

(56) Оператор кинетической энергии • $\hat{T} = \frac{\hat{p}^2}{2m} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2$.

(57) Оператор потенциальной энергии • $\hat{V}(\vec{r}, t) = V(\vec{r}, t)$.

(58) Соотношения неопределенности Гейзенберга • Фундаментальное соотношение, которое устанавливает предел точности одновременного определения пары характеризующих систему квантовых наблюдаемых величин, для которых коммутатор операторов этих физических величин не коммутирует (не равен нулю) (например, координата и импульс частицы, энергия состояния микрообъекта и время пребывания микрообъекта в нем и др.). Чем точнее измеряется одна из не коммутирующих величин, тем меньше точность измерения второй из физических величин, что является следствием принципа корпускулярно-волнового дуализма.

(59) Коммутатор двух операторов • Коммутатором двух операторов называют следующую операцию: $[\hat{A}, \hat{B}] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$. Так, например, коммутатор для координаты и импульса не коммутируют: $[\hat{x}, \hat{p}_x] = i\hbar$. Соотношение неопределенности для этих двух

величин равно: $\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \hbar/2$, А коммутатор для квадрата полного момента импульса и любой из его проекции для частицы $[\hat{L}^2, \hat{L}_i] = 0$, что означает, что эти две физические величины могут быть определены одновременно.

(60) **Уравнение Шредингера** • Линейное дифференциальное уравнение в частных производных, описывающее изменение системы в конфигурационном пространстве и во времени, которое может быть определено волновой функцией:

$$-i\hbar \frac{\partial \psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \hat{H} \psi(\vec{r}, t),$$

где \hat{H} – оператор гамильтониана системы. .

(61) **Стационарное уравнение Шредингера** • В случаях, когда временная часть волновой функции не зависит от координатной, а гамильтониан системы не зависит от времени, т.е. $\psi(\vec{r}, t) = \psi(t)\psi(\vec{r})$:

$$-i\hbar \frac{\partial \psi(t)}{\partial t} \psi(r) = \psi(t) \hat{H} \psi(r),$$

$$\frac{-i\hbar \partial \psi(t)}{\psi(t) \partial t} = \frac{1}{\psi(r)} \hat{H} \psi(r),$$

Выполнение последнего равенства возможно лишь в том случае, если левая и правая части уравнения равны постоянной величине, обозначим ее буквой E . Полученное уравнение называется стационарным уравнением Шредингера:

$$\hat{H} \psi(r) = E \psi(r)$$

(62) **Магнитные и механические моменты электрона. Гиромагнитное отношение. Магнетон Бора** • Электрон в атоме движется и движение электрона непрямолинейно, то есть электрон обладает моментом импульса $\vec{L} = [\vec{r} \times \vec{p}]$. Для микрочастиц данная формула не применима, так как радиус и скорость нельзя измерить одновременно. Согласно решению уравнения Шредингера для ротатора (микрочастице, вращающейся вокруг некоторой оси) модуль вектора орбитального момента может принимать дискретные значения: $|L| = \hbar \sqrt{l(l+1)}$, где l – орбитальное квантовое число (0, 1, 2, 3, ...). т.е. момент частицы (электрона) квантуется. Одновременно с полным моментом можно измерить только одну из проекций этого момента: $L_z = m\hbar$, Где m – магнитное квантовое число ($m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$). Электрон, движущийся вокруг ядра, представляет собой элементарный круговой электрический ток. Согласно классической теории электромагнитных явлений, замкнутый ток является источником магнетизма. Из опыта следует, что магнитное действие замкнутого тока (контура с током) определено, если известно произведение силы тока I на площадь контура S . Это произведение носит название **магнитного момента**. Обозначим его μ . $|\mu| = IS$. Связь магнитного момента с моментом импульса L . (В качестве примера рассматривается движение частицы с массой m и зарядом q по окружности радиуса r с частотой ν , скорость V):

$$\mu = IS = q\nu S = q \frac{V/2\pi r}{\pi} r^2 = q \frac{\nu r}{2} \frac{m}{m} = \frac{q}{2m} m V r = \frac{q}{2m} L.$$

Для микрочастиц квантовая теория приводит к той же связи между магнитным и механическим моментом для электрона, вращающегося вокруг ядра ($q = e$, $m = m_e$).

Величина $e/2m$ — называется **гиромагнитным отношением** (т.е. величина, показывающая отношение магнитного момента к механическому). Если учесть орбитальный момент электрона, то получаем:

$$\mu = \frac{e\hbar}{2m} \sqrt{l(l+1)}.$$

Величина $\frac{e\hbar}{2m} = \mu_B$ — является магнетоном Бора (элементарный магнитный момент электрона).

(63) **Опыты Штерна и Герлаха** • Опыт, экспериментально подтвердивший, что атомы обладают магнитным моментом, проекция которого на направление внешнего магнитного поля принимает лишь определённые значения (пространственно квантована). Осуществлен в 1922 О. Штерном и немецким физиком В. Герлахом (W. Gerlach), которые исследовали прохождение пучка атомов Ag (а затем и др. элементов) в сильно неоднородном магнитном поле с целью проверки теоретически полученной формулы пространственного квантования проекции μ_z на направление Z магнитного момента атома μ_o : $\mu_z = \mu_o m$ ($m = 0, \pm 1, \dots$).

(64) **Спиновый механический и спиновый магнитный моменты электрона** • Опытные данные (тонкое расщепление спектральных линий, результаты опыта Штерна и Герлаха - об этом позднее скажем) говорили о том, что электрон в состоянии $1s$ (орбитальное квантовое число $l = 0$, и, следовательно, $L = 0$) имеет ненулевой момент импульса S , не связанный с перемещением частицы как целого. Этот момент импульса назвали спиновым (спин, английское spin, вращение). При введении понятия "Спин" предполагалось, что электрон можно рассматривать как "вращающийся волчок а его Спин - как характеристику такого вращения. Для модуля спинового момента и его проекции справедливы выражения $|S| = \hbar\sqrt{s(s+1)}$, где s — спин ($1/2$ для электрона) т.е. момент частицы (электрона) квантуется. Одновременно с полным моментом можно измерить только одну из проекций этого момента:

$$s_z = s_z \hbar,$$

Где s_z — квантовое число проекции спина ($s_z = \pm 1/2$) . Тогда у электрона есть и магнитный момент, обусловленный наличием спинового момента:

$$\mu_s = \frac{e\hbar}{m} \sqrt{s(s+1)} = 2\mu_B \sqrt{s(s+1)}, \quad \mu_{sz} = \frac{e\hbar}{m} \cdot s_z = \pm \mu_B$$

Стоит отметить, что гиромагнитное отношение для спинового момента в два раза больше, чем для орбитального..

(65) **Квантовые числа, характеризующие состояние электронов в атоме.** • Решение стационарного уравнения Шредингера для электрона в атоме водорода в сферически симметричном потенциале $V(r)$

$$\hat{H}\Psi(r,\theta,\phi) = E\Psi(r,\theta,\phi)$$

Приводит к нахождению волновой функции электрона $\Psi_{nlm}(r,\theta,\phi) = \Psi_{nl}(r)Y_{lm}(\theta,\phi)$, которая зависит от трех квантовых чисел n, l, m , где n — главное квантовое число, характеризующее энергию электрона в атоме, l — орбитальное квантовое число, характеризующее орбитальный момент системы (орбиталь — пространство вокруг ядра,

в котором наиболее вероятно нахождение электрона) и m — магнитное квантовое число, характеризующее проекцию момента на некоторую ось (z). Квантовые числа: n, l — характеризуют размер и форму облака (орбиты), m — характеризует ориентацию электронного облака (орбиты) в пространстве. Каждому значению E_n соответствует несколько волновых функций $\Psi_n l m$, отличающихся значениями l и m . Т.е. атом, например, водорода может иметь одно и то же значение E_n , находясь в нескольких различных состояниях. Вырожденные состояния — состояния с одинаковой энергией. Кратность вырождения уровня — число различных состояний с каким-либо значением энергии. Каждому из n значений квантового числа l соответствует $2l + 1$ значений m . Следовательно, число различных состояний:

$$\sum (2l + 1) = n^2$$

Электроны с одинаковым l образуют подоболочку (орбиталь). $l = 0$ — s подоболочка, $l = 1$ — p, $l = 2$ — d, $l = 3$ — f.

(66) **Принцип Паули** • Для большого числа электронов в атоме справедлив принцип Паули: невозможно, чтобы два электрона (частицы с полуцелым спином) многоэлектронного атома имели бы одинаковые значения четырёх квантовых чисел n , (главное квантовое число), l (орбитальное квантовое число), m (магнитное квантовое число) и m_s , (квантовое число проекции спина). Например, если два электрона находятся на одной орбитали, то их значения для тройки квантовых чисел n, l, m — одинаковы, поэтому значения m_s должны различаться, и, таким образом, электроны должны иметь противоположные проекции спина $1/2$ и $1/2$ (в единицах \hbar).

(67) **LS связь в многоэлектронных атомах** • Если в атоме имеется несколько электронов, то общий, суммарный момент импульса (иногда его называют механическим моментом — не путать с моментом силы складывается из соответствующих моментов входящих в состав атома электронов. В зависимости от характера электронных взаимодействий существует два способа скомбинировать все механические моменты (орбитальные и спиновые) между собой в результирующий атомный момент. Если орбитальные моменты (и спиновые также) разных электронов атома взаимодействуют между собой сильнее, чем орбитальный и спиновый момент одного электрона, то реализуется так называемая связь Рассел — Саундерса (или L-S связь). Указанное взаимодействие осуществляется посредством создаваемого соответствующими моментами своего магнитного поля. Вследствие этого для получения суммарного момента импульса многоэлектронного атома надо сначала сложить все орбитальные моменты l_i всех электронов друг с другом и получить их общий момент L затем сложить все их спиновые моменты s_i в общий спиновый момент S и только потом объединить (также сложить) результаты такого сложения, получив полный механический момент атома $J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$ электрона. Эти полные квантовые числа (L, S, J) и определяют состояние многоэлектронной системы в целом. Так, например, для двух электронов с $l_1 = 2, s_1 = 1/2$ и $l_2 = 1, s_2 = -1/2$. При сложении моментов l_1 и l_2 абсолютная величина результирующего момента может принимать одно из значений: $L = l_1 + l_2, l_1 + l_2 - 1, \dots, |l_1 - l_2|$, а полный спиновый момент $S = s_1 + s_2, s_1 + s_2 - 1, \dots, |s_1 - s_2|$, тогда полный механический момент может принимать значения $J = L + S, L + S - 1, \dots, |L - S|$.

(68) **$j-j$ связь в многоэлектронных атомах** • Если орбитальные магнитные моменты отдельных электронов атома сильнее взаимодействуют между собой через создаваемое ими магнитное поле, чем со своими спиновыми магнитными моментами (рассмотренный в предыдущем пункте случай связи Рассел — Саундерса), то их сложение в

результатирующий магнитный момент (жестко связанный с моментом импульса атома) проводится по указанному выше правилу, но если это условие не соблюдается, т.е. взаимодействие внутри пары моментов одного электрона превышает их межэлектронное взаимодействие, получается другой тип связи (и векторного суммирования соответствующих моментов) — $j-j$ -связь. При ее реализации надо сначала сложить каждый орбитальный момент каждого электрона в атоме с его спиновым моментом (получив полный механический момент одного электрона и соответствующее квантовое число j), а затем объединить их в результирующий момент атома (сложить все квантовые числа j , получив полное внутреннее квантовое число J , характеризующее суммарный момент импульса атома). Так как энергия спин-орбитального взаимодействия пропорциональна Z^4 , такой тип связи реализуется преимущественно в тяжелых атомах.

(69) **Фермионы** • частица или квазичастица с полуцелым значением спина $(n+1/2)\hbar$. Примеры фермионов: кварки (они образуют протоны и нейтроны, которые также являются фермионами), лептоны (электроны, мюоны, тау-лептоны, нейтрино), дырки (квазичастицы в полупроводнике). Фермионы подчиняются принципу Паули, поэтому волновая функция системы тождественных фермионов меняет знак при перестановке любых двух частиц. Термодинамически равновесное состояние такой системы описывается статистикой Ферми — Дирака.

(70) **Бозоны** • частица или квазичастица с целым значением спина (собственного момента импульса) $n\hbar$. Бозоны, в отличие от фермионов, подчиняются статистике Бозе — Эйнштейна, которая допускает, чтобы в одном квантовом состоянии могло находиться неограниченное количество одинаковых частиц.

(71) **Поляризация фотона** • Поляризация фотона - это квантово-механическое описание классической поляризованной синусоидальной плоской электромагнитной волны. Отдельный фотон может быть описан как имеющий правую или левую круговую поляризацию или суперпозицию этих двух поляризаций. Эквивалентно фотон может быть описан как имеющий горизонтальную или вертикальную линейную поляризацию или их суперпозицию..

(72) **Эффект Штарка** • Расщепление спектральных линий атомов, молекул и др. квантовых систем в электрическом поле, что является результатом сдвига и расщепления на подуровни уровней энергии под действием электрического поля E . Атом (или др. квантовая система) в состоянии с определённой энергией E приобретает во внешнем электрическом поле $E_{эл}$ дополнительную энергию ΔE вследствие поляризуемости его электронной оболочки и возникновения индуцированного дипольного момента. Уровень энергии, которому соответствует одно возможное состояние атома (невырожденный уровень), в поле $E_{эл}$ будет иметь энергию $E + \Delta E$, т. е. сместится. Различные состояния вырожденного уровня энергии могут приобрести разные дополнительные энергии ΔE_α ($\alpha = 1, 2, \dots, g$ где g — степень вырождения уровня;). В результате вырожденный уровень расщепляется на штарковские подуровни, число которых равно числу различных значений ΔE_α . Так, уровень энергии атома с заданным значением момента количества движения $M = \hbar\sqrt{J(J+1)}$ (\hbar — постоянная Планка, $J = 0, 1, 2, \dots$, квантовое число полного момента количества движения) расщепляется в электрическом поле на подуровни, характеризующиеся различными значениями магнитного квантового числа m_J ; (определяющего величину проекции момента M на направление электрического поля), причём значениям $-m_J$ и $+m_J$ соответствует одинаковая дополнительная энергия ΔE , поэтому все штарковские подуровни (кроме подуровня с $m = 0$) оказываются дважды вырожденными (в отличие от расщепления

в магнитном поле, где все подуровни не вырождены; см. эффект Зеемана). Различают линейный эффект Штарка, когда ΔE пропорционально $E_{эл}$, и квадратичный эффект Штарка, когда ΔE пропорционально $E_{эл}^2$. В первом случае картина расщепления уровней энергии и получающихся при переходах между ними спектральных линий симметрична, во втором – несимметрична..

(73) **Эффект Зеемана** • расщепление линий атомных спектров в магнитном поле. Назван в честь Питера Зеемана, открывшего эффект в 1896 году. Эффект обусловлен тем, что в присутствии магнитного поля \vec{B} электрон, обладающий магнитным моментом $\vec{\mu}$ приобретает дополнительную энергию $\Delta E = -(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$. Приобретенная энергия приводит к снятию вырождения атомных состояний по полному квантовому числу m_j и расщеплению атомных спектральных линий. Различают простой и сложный эффект Зеемана. Для простого эффекта Зеемана характерно расщепление спектральных линий на три подуровня (для сложного больше чем 3). Наблюдается: при переходах между синглетными термами ($S = 0, J = L$), при переходах между уровнями $L = 0$ и $J = S$ и при переходах между уровнями с $J = 1$ и $J = 0$, поскольку уровень с нулевым полным моментом $J = 0$ не расщепляется, а $J = 1$ расщепляется на $N = 3$ подуровня ($N = 2J + 1$). .

(74) **Эффект Пашена-Бака** • наблюдается, когда зеемановское расщепление превышает расщепление тонкой структуры, то есть при $V_M \gg |E_i - E_k|$. В таких полях разрушается обычное спин-орбитальное взаимодействие. При этом сложное зеемановское расщепление переходит в простое, так что вырожденный энергетический уровень расщепляется на $2J + 1$ равноотстоящих зеемановских подуровней (где J — максимальное значение модуля магнитного квантового числа $m_l = j$)..

(75) **Модель Кронига-Пени** • Математическая модель, которая описывает поведение электронов в кристаллических твердых телах. Модель основывается на предположении, что электроны в кристалле движутся под действием периодического потенциала, создаваемого атомами в кристаллической решетке. В результате такого движения электроны обладают определенными энергетическими уровнями, которые называются зонами. Переход электрона из одной зоны в другую может сопровождаться поглощением или испусканием фотона..

(76) **Приближение сильной связи** • В рамках приближения сильной связи предполагают, что энергия взаимодействия электрона со своим атомом много больше, чем энергия взаимодействия с другими атомами. Иными словами, электроны сильно связаны со своим атомом, на который другие атомы оказывают малое влияние своими электромагнитными полями, лишь расщепляя их энергетические уровни. Подобным образом уровни атома расщепляются под воздействием внешнего магнитного поля (эффект Зеемана). В таком случае взаимодействие атомов друг с другом незначительно изменяет картину энергетических уровней электронов изолированного атома..

(77) **Приближение почти свободных электронов** • В рамках приближения почти свободных электронов считают, что электрон движется "почти свободно" в слабом потенциале ионных остовов, который рассматривают как малое возмущение. В таком случае кинетическая энергия электрона намного превосходит энергию взаимодействия этого электрона с ионами. В настоящее время это самый удачный подход, как с научной, так и с методической точки зрения, поскольку позволяет наглядно объяснить почти все важные для практики и наблюдаемые на опыте закономерности и эффекты..

Пример вопросов на комиссии

1. Атомная физика

- 1.1 Какие три вектора характеризуют плоскую монохроматическую ЭМВ?
- 1.2 Что значит плоская ЭМВ?
- 1.3 Сколько частотных мод может иметь монохроматическая ЭМВ?
- 1.4 Сколько проекций и какие проекции напряженности электрического поля в ЭМ волне циркулярной поляризации могут быть, если волна распространяется вдоль оси z ?
- 1.5 Связь между частотой, длиной волны, волновым вектором, импульсом и энергией фотона.
- 1.6 Какая частица переносит электромагнитное взаимодействие?
- 1.7 Какова природа и особенности теплового излучения?
- 1.8 Что такое спектральная плотность энергетической светимости?
- 1.9 Интегральная энергетическая светимость?
- 1.10 Что такое испускательная и поглощательная способности тел?
- 1.11 Что такое абсолютно черное тело? Серое тело?
- 1.12 Что называют ультрафиолетовой катастрофой?
- 1.13 Объясните результаты опыта Юнга с точки зрения корпускулярной точки зрения.
- 1.14 Назовите основные опытные законы излучения, объясните их.
- 1.15 В чем состоит явление фотоэффекта?
- 1.16 Какие формулы используют для расчета энергии, импульса?
- 1.17 Объясните физический смысл уравнения Эйнштейна для фотоэффекта.
- 1.18 Каковы основные законы фотоэффекта?
- 1.19 Что в экспериментах по фотоэффекту противоречит предсказаниям классической физики?
- 1.20 Что называют красной границей фотоэффекта?
- 1.21 Как связана максимальная кинетическая энергия электрона при выходе из металла при внешнем фотоэффекте со значением задерживающего напряжения.
- 1.22 Сформулировать постулаты Бора для атомных систем. Как с их помощью объясняется линейчатый характер спектра атома водорода?
- 1.23 Какие состояния атома называют стационарными?
- 1.24 Что понимают под основным и возбужденным состоянием?

- 1.25 Что называется спектральной серией? По какому принципу спектральные линии объединяются в серию?
- 1.26 Что называют эффектом Комптона?
- 1.27 Что такое квантовые числа, их физический смысл и применение для описания состояния водорода и водородоподобных атомов?
- 1.28 Опишите явление корпускулярно-волнового дуализма.
- 1.29 Сформулируйте гипотезу Луи де-Бройля. Запишите уравнение де-Бройля для релятивистской и нерелятивистской квантовых частиц. На основе какого опыта по наблюдению явления интерференции можно доказать волновую природу электронов?
- 1.30 Запишите формулу для фазовой скорости плоской ЭМ волны
- 1.31 Запишите формулу для групповой скорости плоской ЭМ волны
- 1.32 Что называют волновым пакетом? Получить волновой пакет для двух ЭМ монохроматических волн
- 1.33 Объяснить механизм расплывания волнового пакета.
- 1.34 Какой оператор нужно применить, чтобы из функции $f(x) = x$ получить функцию $i\hbar$, какой физической величине соответствует этот оператор?
- 1.35 Собственные функции и собственные значения оператора физической величины.
- 1.36 Запишите оператор полного импульса через оператор «набла» и в матричной форме, какая размерность у матрицы.
- 1.37 Соотношение неопределённостей Гейзенберга. Коммутатор двух физических величин. Какие физические величины совместно неизмеримы?
- 1.38 Квантование энергии электрона в водородоподобных системах
- 1.39 Уравнение Шредингера для водородоподобных систем. Волновые функции и вероятности.
- 1.40 Оболочная структура многоэлектронных атомов.
- 1.41 Полный момент атома (электронной оболочки).
- 1.42 Магнитный момент электронов в атоме.
- 1.43 Что такое собственные значения оператора, как выглядит уравнение на собственные значения?
- 1.44 Запишите рекуррентное соотношение для n -го энергетического уровня в потенциальной яме с бесконечными стенками шириной a для частицы массой m ?
- 1.45 В какой системе координат удобно записывать оператор момента импульса?
- 1.46 От каких координат зависит вид оператора проекции момента импульса на ось z
- 1.47 Запишите вид оператора проекции момента на ось z
- 1.48 Запишите собственные значения для оператора квадрата момента импульса.
- 1.49 Запишите собственные значения для оператора спина.

- 1.50 Запишите собственные значения для оператора проекции спина.
- 1.51 В чем заключается принцип запрета Паули? К каким частицам он применим?
- 1.52 Описание эффекта Штарка и отличительные особенности линейного и квадратичного эффектов Штарка.
- 1.53 Что называют нормальным и сложным эффектом Зеемана.
- 1.54 Как ведет себя электрон в одномерном периодическом потенциале с квантово-механической точки зрения? Влияние параметров потенциала на решения уравнения Шредингера. Модель Кронига-Пенни.
- 1.55 Привести пример реализации LS и jj связей в многоэлектронных системах
- 1.56 Какие явления в квантовой механике объясняются наличием фермионов и бозонов?
- 1.57 Что такое фермионы и бозоны, и как они отличаются друг от друга?
- 1.58 Что такое приближение сильной связи и как оно отличается от других методов расчета в квантовой механике?
- 1.59 Какие системы могут быть описаны с помощью приближения сильной связи?
- 1.60 Какие системы могут быть описаны с помощью приближения почти свободных электронов?
- 1.61 Какие свойства электронных уровней могут быть определены с помощью приближения почти свободных электронов?