

## 15. Основы дозиметрии (1 час).

### 2-я контрольная работа (2 часа).

#### Задачи к практическим занятиям

##### 1. Классические и квантовые модели атома

1. Согласно модели Томсона, найти радиус атома водорода и длину волны испускаемого им света, если его энергия ионизации равна 13,6 эВ.
2. Найти вероятность того, что  $\alpha$ -частица с энергией 3 МэВ при прохождении свинцовой фольги толщиной 1,5 мкм испытает рассеяние в интервале углов 59-61°.
3. Оценить время, за которое электрон, движущийся вокруг ядра водорода по орбите  $r=0.5A$ , упал бы на ядро, если бы он терял энергию на излучение в соответствии с классической теорией.
4. Частица массой  $m$  движется по круговой орбите в поле  $U=\chi r^2/2$ . Найти с помощью боровского условия квантования разрешенные уровни энергии и соответствующие радиусы орбит.
5. Пренебрегая спин-орбитальным взаимодействием для атомарного водорода вычислить:
  - а) в каких пределах должна лежать энергия бомбардирующих электронов, чтобы спектр излучения атома имел только три линии, указать их длины волн;
  - б) минимальную разрешающую способность спектрометра  $\lambda/\delta\lambda$ , при которой можно разрешить первые 20 линий серии Бальмера;
6. Вычислить для мезоатома водорода (масса мезона составляет 207 масс электрона):
  - а) радиус первой боровской орбиты;
  - б) длину волны резонансной линии;
  - в) энергии связи основных состояний, когда ядром является протон или дейтрон; сравнить изотопический сдвиг со сдвигом в атоме водорода.
7. Найти для позитрония:
  - а) радиус первой боровской орбиты;
  - б) потенциал ионизации;
  - в) постоянную Ридберга и длину волны резонансной линии.
8. Для атомарного водорода построить схему возможных переходов для головной линии серии Бальмера с учетом тонкой структуры. Определить интервал (в см<sup>-1</sup>) между крайними компонентами.
9. Оценить (в электронвольтах) расщепление 2P-состояния позитрония, вызванное взаимодействием спиновых магнитных моментов позитрона и электрона.
10. Оценить по порядку величины длину волны излучения межзвездного атомарного водорода в радиодиапазоне. Межзвездный водород находится в основном состоянии, и его излучение обусловлено переориентацией спина электрона.

##### 2. Водородоподобные атомы

1. Найти константу  $C_1$  дипольной составляющей потенциала атомного остова атома рубидия, если известно, что квантовый дефект  $\Delta=1.3$  при  $l=2$ .
2. Термы атомов и ионов с одним валентным электроном можно представить в виде  $T=R(Z-a)^2/n^2$ , где  $Z$  – заряд ядра (в  $e$ );  $a$  – поправка экранирования,  $n$  – главное квантовое число. Вычислить,  $a$  и  $n$  валентного электрона атома лития, если известно, что ионизационные потенциалы Li и Be<sup>+</sup> равны соответственно 5.39 и 17.0 эВ и поправка,  $a$  для них одинакова.
3. Определить по спектру излучения поправку Ридберга (квантовый дефект) для терма Na 5s <sup>2</sup>S<sub>1/2</sub>, и постоянную  $C_1$ , характеризующую величину дипольного момента.

4. Головная линия резкой серии цезия является дублетом с длинами волн 1469,5 и 1358,8 нм. Найти интервалы (в  $\text{см}^{-1}$ ) между компонентами следующих линий этой серии.

### 3. Многоэлектронные атомы

1. Рассмотреть гелиеподобный ион в основном состоянии в первом порядке теории возмущений, выбрав в качестве невозмущенных водородоподобные функции с эффективным зарядом.
2. На основе вариационного метода определить потенциал ионизации атома гелия и иона лития.
3. В рамках модели Томаса-Ферми определить полную энергию электронов атома, потенциальную энергию взаимодействия электронов с зарядом ядра, а также энергию межэлектронного взаимодействия.
4. Установить каким элементам принадлежат следующие  $K_\alpha$  линии рентгеновского излучения 1,935 Å; 1,787 Å.
5. Определить поправки экранирования Мозли для  $K_\alpha$ -линий атомов Sn, Cs и W, длины волн которых равны соответственно 0,492 Å, 0,402 Å, 0,210 Å.
6. Найти кинетическую энергию электронов, вырываемых с K-оболочки атомов молибдена  $K_\alpha$ -излучением серебра.

### 4. Энергия многоэлектронного атома. Атомные спектры.

1. Найти термы атомов, незаполненная электронная подоболочка которого –  $np^2$ . То же для  $nd^2$ .
2. Выписать возможные типы термов для электронной конфигурации:  $ns^1 n'p^2$ . То же для  $np^1 n'p^2$ .
3. Определить число электронов в единственной незаполненной подоболочке атома, основной терм которого:  $3F_2$ ;  $6S_{5/2}$ .
4. Определить спин ядра  $^{59}\text{Co}$ , основной терм атома которого содержит восемь компонент сверхтонкого расщепления.

### 5. Взаимодействие атомов.

1. Выразить квадрупольный момент электрона с орбитальным моментом  $l$  через средний квадрат его расстояния до центра.
2. Определить дальнедействующую часть потенциала взаимодействия иона с атомом.
3. Найти потенциал дальнедействующего взаимодействия двух атомов, если орбитальный момент одного из них равен нулю.
4. Определить поляризуемость атома водорода в основном состоянии.
5. Определить дальнедействующую часть потенциала взаимодействия дипольной молекулы и атома с нулевым моментом.

### 6. Химическая связь.

1. Произвести разделение переменных в уравнении Шредингера для электронных термов иона молекулярного водорода, воспользовавшись эллиптическими координатами.
2. Записать обозначения возможных термов молекул  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ , которые могут получиться при соединении атомов в нормальных состояниях.
3. То же для молекул  $\text{HCl}$  и  $\text{CO}$ .
4. Определить электронные термы молекулярного иона  $\text{H}_2^+$ , получающегося при соединении атома H в нормальном состоянии с ионом  $\text{H}^+$ , при расстояниях между ядрами, превышающих боровский радиус.

Разбор 1-й контрольной работы.

### 7. Структура молекул.

1. Определить валентность атома I в основном состоянии, атома кислорода в состоянии  $2p^2 3s^1 p^1$ . Какова валентность азота в азотной кислоте?
2. Записать выражение для внешней электронной конфигурации молекулы CO и молекулярного иона  $CO^+$ . Сколько связей имеется в каждом случае, и какова их природа? Энергия связи какой молекулы сильнее? То же для молекул NO,  $NO^+$ .
3. Напишите выражение для внешних электронных конфигураций  $F_2$ ,  $F_2^+$ , и  $F_2^-$  и определите в каждом случае число получающихся связей. Какие из конфигураций имеют наивысшую и наименьшую энергии связи?
5. Построить корреляционные диаграммы для молекул  $B_2$  и  $BH$ .
6. Нарисовать конфигурацию электронных облаков гексафторида серы, углекислого газа, воды. Определить степень гибридизации.

#### 8. Энергетические уровни молекул. Молекулярные спектры.

1. Найти соотношение между характерными временами столкновения двухатомных молекул и характерными временами колебательного и вращательного движений.
2. Соответствующая переходу  $J=0 \rightarrow J=1$  линия поглощения вращательного спектра наблюдается у  $^{12}C\ ^{16}O$  при  $1,153 \cdot 10^{11}$  Гц и при  $1,102 \cdot 10^{11}$  Гц у молекулы  $^{13}C\ ^{16}O$ . Найти массовое число изотопа углерода.
3. Предположите, что молекула водорода ведет себя в точности как гармонический осциллятор с коэффициентом жесткости 516 Н/м. Вычислите колебательное квантовое число, соответствующее энергии диссоциации молекулы 4,5 эВ. Определите разность энергий диссоциации молекул  $D_2$  и  $H_2$ .
4. Найти энергию, необходимую для возбуждения молекулы  $H_2$  из основного состояния на первый колебательный уровень ( $v=1$ ). Во сколько раз эта энергия больше энергии возбуждения данной молекулы на первый вращательный уровень ( $J=1$ ). ( $d=0,741 \cdot 10^{-8}$  см $^{-1}$ ;  $\nu=4395,2$  см $^{-1}$ ;  $\chi=28,5 \cdot 10^{-3}$ ).
5. Определить максимально возможное колебательное квантовое число, соответствующую колебательную энергию и энергию диссоциации двухатомной молекулы, собственная частота которой  $\omega$  и коэффициент ангармоничности  $\chi$ . Вычислить эти величины для  $H_2$  ( $\nu=4395,2$  см $^{-1}$ ;  $\chi \nu=125$  см $^{-1}$ ).
6. Найти момент инерции молекулы CH и расстояние между ее ядрами, если интервалы между соседними линиями чисто вращательного спектра этой молекулы  $\Delta\nu=29,0$  см $^{-1}$ .
7. Определить наиболее вероятную угловую скорость вращения молекулы кислорода при  $T=300^\circ K$ . Межъядерное расстояние  $1,21 \cdot 10^{-8}$  см.
8. Найти относительный изотопический сдвиг  $\Delta\lambda/\lambda$  линий чисто колебательного и чисто вращательного спектров смеси молекул  $H^{35}Cl$  и  $H^{37}Cl$ .

#### 9. Интенсивность спектральных линий.

1. Объем газообразного лития, содержащий  $N=3,0 \cdot 10^{16}$  атомов при  $T=1500K$ , излучает резонансную линию ( $\lambda = 670,8$  нм;  $2P \rightarrow 2S$ ) мощностью  $I=0,25$  Вт. Найти среднее время жизни  $L_i$  в  $2P$ -состоянии.
2. Атомарный водород находится в термодинамическом равновесии со своим излучением. Вычислить:
  - а) отношение вероятностей индуцированного и спонтанного излучений атомов с уровня  $2P$  при  $T=3000K$ ;
  - б) температуру, при которой эти вероятности одинаковы.
3. Найти характер углового распределения интенсивности излучения при переходе между уровнями  $2P$  ( $m=0$ ) и  $1S$  в атоме водорода. То же для  $m=\pm 1$ .
4. Спектральная линия  $\lambda=532,0$  нм возникает в результате перехода между двумя возбужденными состояниями атома, средние времена жизни которых равны 12 и 20 нс. Оценить естественную ширину этой линии  $\Delta\lambda$ .

5. В атоме Na для оптического перехода  $3p\ ^2P_{3/2} \rightarrow 2s\ ^2S_{1/2}$  сила осциллятора равна 0.76. Вычислить время жизни уровня  $3p\ ^2P_{3/2}$ .
  6. Определить давление газа, находящегося при  $T=1000^\circ\text{K}$ , при котором ударное уширение спектральной линии  $\lambda = 570\text{ нм}$  окажется равным доплеровской ширине. Газокинетический диаметр атомов  $5 \cdot 10^{-8}\text{см}$ .
  7. Определить относительные интенсивности компонент тонкой структуры спектральных линий атомов щелочных металлов.
  8. Найти вероятность перехода между компонентами сверхтонкой структуры атома водорода для уровня  $1s\ ^2S_{1/2}$ .
10. Атомы и молекулы во внешних электрических и магнитных полях.
1. При известных L и S определить с помощью закона косинусов g-фактор Ланде.
  2. Вычислить g-фактор для атомов:
    - а) с одним валентным электроном в состояниях S, P и D;
    - б) в состоянии  $^3P$ ;
    - в) в S-состояниях;
    - г) в синглетных состояниях.
  3. Максимальное значение проекции магнитного момента атома, находящегося в  $D_2$ -состоянии, равно четырем магнетонам Бора. Определить мультиплетность этого термина.
  4. Возможно ли, чтобы фактор Ланде был больше 2, меньше 1, меньше нуля? Приведите примеры.
  5. При какой индукции магнитного поля интервал между зеемановскими компонентами термов  $3^2P_{1/2}$  и  $3^2P_{3/2}$  атома Na будет равен 0,1 тонкого расщепления  $3^2P$ -состояния, если длины волн желтого дублета натрия равны  $\lambda_1=589,593$  и  $\lambda_2=588,996\text{ нм}$ .
  6. Какой эффект Зеемана (простой, сложный) будет наблюдаться в слабом магнитном поле для переходов:  $^1P \rightarrow ^1S$ ,  $^2D_{5/2} \rightarrow ^2P_{3/2}$ ,  $^3D_1 \rightarrow ^3P_0$ ,  $^5I_5 \rightarrow ^5H_4$ ?
  7. Найти штарковское расщепление уровней водорода в случае, когда расщепление мало по сравнению с интервалами тонкой структуры (но велико по сравнению с лэмбовским сдвигом).
11. Рассеяние света на атомах и молекулах.
1. Вычислить сечение рассеяния фотона малой частоты на атоме водорода в основном состоянии.
  2. Найти сечение рассеяния электромагнитной волны на многоэлектронном атоме в классическом приближении, при условии, что длина волны больше размера атома.
  3. Определить частоту колебаний  $\omega$  молекулы HF, если в спектре рамановского рассеяния волны с  $\lambda = 435,0\text{ нм}$  разность между ближайшей стоксовой и антистоксовой компонентой равна  $\Delta\lambda=154,0\text{ нм}$ . Ангармонизм молекулы  $\chi=0,0218$ .
  4. Водород при температуре 1500K и давлении 1 атм облучается излучением одинаковой интенсивности на двух длинах волн: головной линии серии Бальмера и  $656,3\text{ нм}$ . Найти отношение интенсивностей рассеянных сигналов.
  5. Найти отношение интенсивностей фиолетового и красного спутников, ближайших к несмещенной линии, в спектре рамановского рассеяния света на молекулах  $\text{Cl}_2$  при  $T=300\text{K}$ . Во сколько раз изменится это соотношение при увеличении температуры вдвое?
  6. Ближайшие сателлиты спектра рамановского рассеяния излучения с  $\lambda = 546,1\text{ нм}$  на молекулярном азоте отстоят на  $\Delta\lambda = 0,72\text{ нм}$ . Найти вращательную постоянную B,  $\text{см}^{-1}$ , и момент инерции молекулы  $\text{N}_2$ .
12. Движение атомов в резонансных световых полях

1. Определить скорость, которую приобрел покоящийся атом водорода в результате излучения фотона при переходе из первого возбужденного состояния в основное. На сколько процентов отличается энергия испущенного фотона от энергии данного перехода.
  2. Оценить вероятность спонтанного излучения молекулы  $\omega_{\text{сп}}$  при переходе с возбужденного уровня  $E_m$  на уровень  $E_n$  в случае, когда молекула помещена внутрь объемного резонатора, настроенного на частоту  $\omega = (E_m - E_n)/\hbar$ . Соответствующая вероятность спонтанного излучения в свободном пространстве равна  $\omega_{\text{сп}}^0$ . Объем резонатора –  $V$ , его добротность –  $Q$ . Считать, что ширина молекулярных уровней  $\Gamma$  все время остается меньше ширины линии резонатора:  $\Gamma < \omega/Q$ .
13. Взаимодействие атомов и молекул при столкновениях
1. Вычислить сечение захвата иона одного газа атомом другого газа вследствие поляризационного взаимодействия.
14. Обменные процессы при столкновениях.
1. Определить сечение резонансной перезарядки высоковозбужденного атома на ионе в пределе малых скоростей столкновения.
  2. Определить сечение передачи возбуждения от дипольной молекулы (возбужден первый колебательный уровень) к такой же молекуле в основном состоянии.
  3. Найти связь между сечением фотораспада атома и сечением фотоприлипания к нему.

Разбор 2-й контрольной работы.

15. Основы дозиметрии.
1. Ионизационная камера наполненная воздухом ( $V=5\text{л}$ ,  $p=250\text{ кПа}$ ,  $T=300\text{К}$ ) помещена в однородное поле  $\gamma$ -излучения. Ток насыщения  $I=0,32\text{мкА}$ . Определить мощность экспозиционной дозы.
  2. Найти в воздухе и воде в точках, где плотность потока  $\gamma$ -фотонов с энергией  $E=2,00\text{ МэВ}$  составляет  $J=1,30 \cdot 10^4\text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$  мощности поглощенной и экспозиционной доз.
  3. На поверхности кожи площадью  $S=2,0\text{ см}^2$  падает нормально  $N=3,2 \cdot 10^4$   $\alpha$ -частиц с  $E=5,1\text{ МэВ}$ . Найти средние значения поглощенной и эквивалентной доз, мГр и мЗв, в слое, равном глубине проникновения  $\alpha$ -частиц в биологическую ткань. *Справка:* пробег  $\alpha$ -частиц в биологической ткани в 815 раз меньше пробега в воздухе; коэффициент качества для указанных  $\alpha$ -частиц  $K=20$ .

**Самостоятельная работа студентов (74 часа)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Подготовка к практическим занятиям, решение задач	52
Подготовка к контрольным работам	4
Подготовка к экзамену	18

**5. Перечень учебной литературы.**

**5.1. Основная литература**

1. Бурмасов В.С., Оришич А.М. Физика и химия атомов и молекул. Учеб. пос. Новосибирск. НГУ, 2006.
2. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика: [учеб. пособие для физ. спец. ун-тов: в 10 т.] Т.3: Квантовая механика. Нерелятивистская теория. – Изд. 4-е, испр. – Москва: Наука, 1989. – 767 с.