

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Физический факультет

Кафедра общей физики

ФИЗИКА И ХИМИЯ АТОМОВ И МОЛЕКУЛ

(Программа курса)

Новосибирск

2011

Учебный курс «Физика и химия атомов и молекул» является частью математического и естественнонаучного цикла подготовки бакалавра физики. Настоящая программа подготовлена в соответствии с требованиями федерального образовательного стандарта третьего поколения. Дисциплина ориентирована на студентов четвертого курса физического факультета, освоивших базовый уровень общефизической подготовки.

Цели курса – дать целостное представление о строении и взаимодействии атомов и молекул при образовании химических связей, научить студентов анализировать и решать задачи атомной и молекулярной физики, сформировать общекультурные и профессиональные навыки физика-исследователя.

Читаемый курс «Физика и химия атомов и молекул» состоит из лекционных и практических (семинарских) занятий, сопровождаемых персональным диалогом преподавателей со студентами на семинарах и в процессе сдачи семестровых домашних заданий. Самостоятельная работа студентов является обязательной при изучении настоящей дисциплины. Самостоятельная работа обеспечена подробным пособием и рекомендованной литературой в бумажном и электронном виде, имеющейся в библиотеке университета и на сайте физического факультета.

Текущий уровень освоения курса определяется преподавателями по результатам двух контрольных работ, семестровых заданий и решению задач на семинарах. Итоговая оценка уровня освоения курса определяется на экзамене.

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы: 108 академических часов (из них 72 аудиторных). Программой дисциплины предусмотрены 32 часа лекционных и 32 часа практических занятий, а также 36 часа самостоятельной работы. Остальное время – контрольные работы, прием семестровых заданий, допуск к экзамену и экзамен.

Авторы

докт. физ.-мат. наук, проф. А. М. Оришич,
канд. физ.-мат. наук, доцент В.С. Бурмасов

Программа учебного курса подготовлена в рамках реализации Программы развития
НИУ-НГУ на 2009–2018 г. г.

© Новосибирский государственный
университет, 2011

Примерная программа учебного курса (учебной дисциплины)

Программа курса «Физика и химия атомов и молекул» составлена в соответствии с требованиями к обязательному минимуму содержания и уровню подготовки дипломированного специалиста бакалавра по профессиональному циклу дисциплин (Б.3) по направлению «011200 Физика», а также задачами, стоящими перед Новосибирским государственным университетом по реализации Программы развития НГУ.

Автор (авторы):

Оришич Анатолий Митрофанович, доктор физико-математических наук, профессор,
Бурмасов Владимир Степанович, кандидат физико-математических наук, доцент
Факультет: **физический**
Кафедра: **теоретической физики**

1. Цели освоения дисциплины (курса)

Учебный курс «Физика и химия атомов и молекул» направлен на обучения студентов-физиков, получивших базовую подготовку по общефизическим дисциплинам, основной из которых является квантовая механика. Дать базисные представления о физике образования существующих и искусственно создаваемых веществ. Рассматриваемые вопросы призваны расширить естественнонаучный кругозор физика вплоть до актуальнейшей дисциплины современности квантовой химии.

Основной особенностью данного курса является создание у студентов целостной картины строения атомов и молекул и их взаимодействий между собой и с различными видами излучений. При этом учитывается, что студентам уже известны принципиальные моменты теории, полученные ими при изучении других общефизических дисциплин, основной из которых является квантовая механика. Это позволяет в коротком 32-х лекционном курсе охватить широкий круг вопросов: от теории многоатомного атома и физики образования химической связи до взаимодействия атомов и молекул с ионизирующим излучением.

Любой рассматриваемый вопрос связывается с известными наблюдаемыми явлениями, в том числе явлениями обыденной жизни. Теоретические выводы обязательно сопровождается объяснением, как они проявляются экспериментально. Широко отмечается вклад ученых Сибирского отделения Российской академии в развитии теории. Ярчайшим примером такого вклада является открытие сибирскими учеными светоиндуцированной диффузии атомов.

Настоящая дисциплина призвана дать четкие ориентиры физико-исследователю в обширном информационном потоке современности о многообразных создаваемых веществах.

2. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Курс «Физика и химия атомов и молекул» читается в осеннем семестре 4 курса параллельно со второй частью квантовой механики и после практикума по атомной физики и спектроскопии, который студенты проходят на 3 курсе. В настоящей программе учтено, что многие вопросы атомной физики студенты осваивают при выполнении лабораторных и курсовых работ на практикуме. Так, например, поведение атомов и молекул в электрических и магнитных полях в настоящем курсе лекций не излагается. Считается, что теорию вопроса студенты освоили при выполнении лабораторных работ.

Для успешного освоения курса студенты должны знать основы классической и квантовой механики, электродинамики с элементами по физической оптике, базисные знания по квантовой электродинамике. На общеобразовательном уровне студенты должны имеет элементарные знания по химии.

По математическим дисциплинам: знание основ линейной алгебры и математического анализа, умение решать простые дифференциальные уравнения, знание основных положений и принципов квантовой механики, умение применять эти знания при решении задач.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины «Физика и химия атомов и молекул»

- общекультурные компетенции: ОК-1, ОК-5, ОК-17, ОК-18, ОК-20, ОК-21;
- профессиональные компетенции: ПК-1 –ПК-4 , ПК-5, ПК-10.

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

- **Знать:** (i) основы квантовой механики: волновую функцию, гамильтониан системы, уравнение Шредингера и его решение для атома водорода, теорию возмущений, матрицу плотности, квантование момента импульса, правило сложения моментов, приближение LS- и jj- связей, правила Хунда и правила отбора, квантование гармонического осциллятора, обменное взаимодействие и спин; (ii) основы электродинамики: уравнения Максвелла, мультиплетные моменты системы зарядов, дипольное и другие типы излучений системы зарядов, тормозное излучение, излучение классического осциллятора, (iii) распределения Максвелла и Больцмана, понятие о сечениях взаимодействий; (iv) основы химии: валентность, химическая связь.
- **Уметь:** рассчитывать вероятности переходов, находить сечение рассеяния в простых центральных полях, включая рассеяния в кулоновском поле (формула Резерфорда); находить нормальные колебания сложных молекул
- **Владеть:** техникой вычисления средних значений физических величин по теории возмущений; техникой решения уравнений Гамильтона для движения частицы в полях, обладающих свойствами симметрии.

4. Структура и содержание дисциплины курса «Физика и химия атомов и молекул»

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 часов.

№ п/п	Раздел дисциплины	Семестр	Неделя семестра	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости (по неделям семестра) Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
				Лекции,	Практические занятия,	Самостоятельная работа студентов (в т.ч. время, предусмотрен-	
1	Одно- и многоэлектронные атомы. Электронные оболочки. Энергия стационарных состояний сложных ато-	7-й	1-я	Лекции, 2 часа	Практические занятия, 2 часа	Самостоятельная работа студентов (в т.ч. время, предусмотрен-	В начале каждого очередного занятия проверка задач, заданных на дом.

	мов. Атомы с одним и двумя валентными электронами.					ное на сдачу семестровых домашних заданий), 2 часа	
2	Приближенные методы расчета энергии атомов со многими электронами (метод Слетера, вариационный, Хартри-Фока, Томаса-Ферми) Связь между моментами. Возмущения в сериях. Последовательность заполнения электронных оболочек. Периодическая таблица.		2-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	
3	Термы атомов. Одно- и двухэлектронные спектры. Рентгеновские спектры.		3-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	
4	Потенциалы взаимодействия атомных частиц. Мультипольное и обменное, короткоживущее и дальнедействующее взаимодействие.		4-я	2 часа лекций	2 часа семинаров.	2 часа	
5	Образование молекул. Ковалентная и ионная связь. Расчет энергии состояний. Ион H_2^+ и молекула водорода. Молекулярные орбитали. Квантовые числа и электронные конфигурации двухатомных молекул.		5-я	2 часа лекций	3 часа семинаров	2 часа	Сдача семестровых заданий (2 часа)
6	Структура многоатомных молекул. Гибридизация. Симметрия молекул и её влияние на их		6-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	1-я контрольная работа (2 часа).

	свойства. Фуллерены.						
7	Молекулярные спектры. Молекула, как сферический, симметричный или ассиметричный волчок. Вращательные, колебательные и электронные состояния молекул.		7-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	Разбор контрольной работы.
8	Время жизни электронно-возбужденных состояний атомов и молекул. Уширение спектральных линий: естественное, столкновительное (штарковское) и доплеровское. Эффект Дике сужения линий.		8-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	
9	Атом и молекула в постоянных электрических и магнитных полях. Дипольный и квадрупольный моменты, поляризуемость. Спектры атомов в слабом и сильном магнитном поле. Эффекты Зеемана и Штарка.		9-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	Сдача семестровых заданий (2 часа)
10	Усиление и поглощение света. Оптическая накачка и просветление линий. Лазеры. Пленение и диффузия излучения. Сверхизлучение.		10-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	
11	Рассеяние света на атомах и молекулах. Резонансная флуоресценция и упругое рассеяние. Нелинейная оптика. Многофотонное взаимодействие. Рамоновское рас-		11-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	

	сеяние.						
12	Движение атомов в резонансных световых полях. Давление света на атомы, светоиндуцированный дрейф в газе и ток в плазме. Оптогальванический эффект.		12-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	
13	Определение характеристик частиц (потенциала взаимодействия) по кинематике парных столкновений (упругое рассеяние, ионизация, возбуждение).		13-я	2 часов лекций	2 часа семинаров	2 часа	Сдача семестровых заданий (2 часа)
14	Обменные процессы при столкновении частиц. Передача возбуждения, перезарядка, рекомбинация, прилипание.		14-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	2-я контрольная работа (2 часа).
15	Распространение быстрых заряженных частиц через вещество. Ионизационные и радиационные потери. Излучение Вавилова-Черенкова.		15-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	Разбор контрольной работы. Допуск к экзамену
16	Основные особенности и эффекты распространения γ -квантов в веществе. Фотоэффект, комптон-эффект. Образование электрон-позитронных пар. Основы дозиметрии.		16-я	2 часа лекций	2 часа семинаров	2 часа	Экзамен (2 часа).
Итого				32 часа	32 часа	32 часа	12 часов

Экзамен проводится только после полной сдачи заданий.

Вопросы к экзамену по курсу «Физика и химия атомов и молекул»

- Энергия стационарных состояний сложных атомов. Приближенные методы расчета энергии атомов со многими электронами. Термы атомов.
- Атомы с одним валентным электроном.. Одноэлектронные термы и спектры.
- Атомы с двумя валентными электронами. Двухэлектронные термы и спектры.
- Связь между моментами. Возмущения в сериях. Последовательность заполнения электронных оболочек. Периодическая таблица.
- Рентгеновские спектры атомов.
- Образование молекул. Ковалентная и ионная связь. Молекулярные орбитали. Квантовые числа и электронные конфигурации двухатомных молекул.
- Расчет энергии состояний молекул. Ион H_2^+
- Расчет энергетических состояний молекулы водорода.
- Структура многоатомных молекул. Гибридизация.
- Молекулярные спектры. Молекула, как сферический, симметричный или ассиметричный волчок. Вращательные, колебательные и электронные состояния молекул.
- Время жизни электронно-возбужденных состояний атомов и молекул. Вероятность перехода и естественное уширение спектральных линий:
- Уширение спектральных линий: столкновительное и доплеровское.
- Эффект Дике: сужения линий.
- Сечение усиления и поглощения света.
- Рассеяние света на атомах и молекулах. Индуцированная резонансная флуоресценция и упругое рассеяние.
- Нелинейная оптика. Многофотонное взаимодействие. Комбинационное рассеяние.
- Движение атомов в резонансных световых полях. Давление света на атомы.
- Светоиндуцированный дрейф в газе и ток в плазме.
- Обменные процессы при столкновении частиц. Передача возбуждения, перезарядка.
- Обменные процессы при столкновении частиц. Рекомбинация.
- Распространение быстрых заряженных частиц через вещество. Ионизационные и радиационные потери. Излучение Вавилова-Черенкова.
- Основные особенности и эффекты распространения γ -квантов в веществе. Фотоэффект, комптон-эффект. Образование электрон-позитронных пар.

Примерный план тем семинарских занятий

(все ссылки даются из списка литературы, см. раздел 7 настоящей Программы)

В программе практических (семинарских) занятий указаны основная тема и конкретные вопросы, затем приведена соответствующая литература, необходимая при подготовке к семинару, пособие [1] является основным источником к каждому семинару; задачи и семестровые задания приведены ниже в отдельном списке.

1. Классические и квантовые модели атома (2 часа).

Модель Томсона. Планетарная модель Резерфорда. Атом Бора.

Атом водорода (квантовая теория). Схема решения уравнения Шредингера. Квантовые числа. Кулоновское (случайное) вырождение. Атомные орбитали. Спектр атома водорода: правила отбора, тонкая и сверхтонкая структура.

[4] гл.5 и 9; [6] §13.

2. Водородоподобные атомы (2 часа).

Атомы щелочных металлов. Поправка Ридберга. Снятие случайного вырождения. Серийные закономерности. Дублетное расщепление. Спин электрона.

[2] §68, [8] §33.

3. Многоэлектронные атомы (2 часа).

Приближение центрально-симметричного самосогласованного поля. Модель Томаса-Ферми. Электронные оболочки и слои. Принцип Паули. Правило Хунда по заполнению электронной оболочки. Таблица Менделеева. Рентгеновские спектры.

[2] §73; [4] §§10.1-10.6.

4. Энергия многоэлектронного атома. Атомные спектры (4 часа).

Спин-орбитальное, спин-спиновое электронное и электрон-ядерное взаимодействия. Несохранение моментов. Квантовые числа L , S и J . Приближение LS- и jj-связи. Определение энергетического состояния (термов) многоэлектронного атома внутри электронной конфигурации. Правила Хунда, определяющие относительную энергию термов. Диаграммы Гроттриана.

[3] §84 [4] §§10.7-10.9; [7] §§5, 6.

5. Взаимодействие атомов (2 часа).

Обменное (короткодействующее) взаимодействие. Ван-дер-Ваальсовское (дальнодействующее) взаимодействие.

[2] §§75, 89; [6] §52.

1-я контрольная работа.

6. Химическая связь (2 часа).

Образование молекул. Ковалентная и ионная связи. Валентность. Схема решения уравнения Шредингера для иона водорода. Метод линейной комбинации атомных орбиталей. Молекула водорода.

[4] гл.12; [2] §81.

7. Структура молекул (2 часа).

Молекулярные орбитали. Корреляционные диаграммы. Гибридизация. Симметрия молекул.

[4] гл.13.

8. Энергетические уровни молекул. Молекулярные спектры (2 часа).

Разделение энергии молекулы на электронную, колебательную и вращательную. Вращательные уровни молекул двух типов: симметричных и несимметричных волчков. Молекулярные термы двухатомных молекул. Принцип Франка-Кондона.

[2] §103; [5] §§17.1-17.5, §§19.3-19.6; [4] гл.14.

9. Интенсивность спектральных линий (2 часа).

Время жизни возбужденных состояний. Дипольное излучение. Матричные элементы, правила отбора. Коэффициенты Эйнштейна. Силы осцилляторов. Интенсивность спектральных линий. Однородное и неоднородное уширение контура. Эффект Дике. Усиление и поглощение света.

[5] §§4.1 – 4.3, 4.5, - 4.8, 5.6; [10] §§70,71,74.

10. Атомы и молекулы во внешних электрических и магнитных полях (2 часа).

Магнитный момент атома. Множитель Ланде (g -фактор) Простой и сложный эффект Зеемана. Явление Пашена-Бака. Магнитный резонанс: спиновой и ядерный. Эффект Штарка.

[10] §§62, 63, 65; [2] §§76,77.

11. Рассеяние света на атомах и молекулах (2 часа).

Резонансная флуоресценция и упругое рассеяние. Нелинейная оптика. Многофотонное взаимодействие. Эффект Рамана.

[9] гл.11, 12.

12. Движение атомов в резонансных световых полях (2 часа).

Давление света на атомы, светоиндуцированный дрейф в газе и ток в плазме. Оптогальванический эффект.

[1]

13. Взаимодействие атомов и молекул при столкновениях (2 часа).

Упругое рассеяние, ионизация, возбуждение.

[1]

14. Обменные процессы при столкновениях (2 часа).

Передача возбуждения, перезарядка, рекомбинация, прилипание.

[1]

2-я контрольная работа.

15. Основы дозиметрии (2 часа).

[1]

Задачи к семинарским занятиям

1-й семинар

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 α -частица с энергией 3 МэВ при прохождении свинцовой фольги толщиной 1,5 мкм испытает рассеяние в интервале углов $59-61^\circ$.
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^{-1}) 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-й семинар

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^+ равны соответственно 5.39 и 17.0 эВ и поправка a для них одинакова.
3. Определить по спектру излучения поправку Ридберга (квантовый дефект) для термина $Na\ 5s\ ^2S_{1/2}$, 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 cm^{-1}) между компонентами следующих линий этой серии.

3-й семинар

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_α линии рентгеновского излучения 1,935 Å; 1,787 Å.
5. Определить поправки экранирования Мозли для K_α -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_α -излучением серебра.

4-й семинар

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}Co , основной терм атома которого содержит восемь компонент сверхтонкого расщепления.

5-й семинар

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-й семинар

1. Произвести разделение переменных в уравнении Шредингера для электронных термов иона молекулярного водорода, воспользовавшись эллиптическими координатами.
2. Записать обозначения возможных термов молекул H_2 , N_2 , O_2 , Cl_2 , которые могут получиться при соединении атомов в нормальных состояниях.
3. То же для молекул HCl и CO .
4. Определить электронные термы молекулярного иона H_2^+ , получающегося при соединении атома H в нормальном состоянии с ионом H^+ , при расстояниях между ядрами, превышающих боровский радиус.

7-й семинар

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.
- Разбор 1-й контрольной работы.

8-й семинар

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 ω и коэффициент ангармоничности χ . 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-й семинар

1. Объем газообразного лития, содержащий $N=3.0 \cdot 10^{16}$ атомов при $T=1500\text{K}$, излучает резонансную линию ($\lambda = 670,8 \text{ нм}$; $2P \rightarrow 2S$) мощностью $I=0,25 \text{ Вт}$. 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 $T=3000\text{K}$;
 - б) температуру, при которой эти вероятности одинаковы.
3. Найти характер углового распределения интенсивности излучения при переходе между уровнями $2P$ ($m_l=0$) и $1S$ в атоме водорода. То же для $m_l=\pm 1$.
4. Спектральная линия $\lambda=532,0 \text{ нм}$ 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.
Указание: воспользоваться соотношениями § 49 [3].
8. Найти вероятность перехода между компонентами сверхтонкой структуры атома водорода для уровня $1s \ ^2S_{1/2}$.

10-й семинар

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-й семинар

1. Вычислить сечение рассеяния фотона малой частоты на атоме водорода в основном состоянии.

- Указание:* воспользоваться соотношениями § 60 (задача 4) [3].
2. Найти сечение рассеяния электромагнитной волны на многоэлектронном атоме в классическом приближении, при условии, что длина волны больше размера атома.
Указание: воспользоваться соотношениями § 80 [Ландау, Теория поля].
 3. Определить частоту колебаний ω молекулы HF, если в спектре рамановского рассеяния волны с $\lambda = 435,0$ нм разность между ближайшей стоксовой и антистоксовой компонентой равна $\Delta\lambda = 154,0$ нм. Ангармонизм молекулы $\chi = 0,0218$.
 4. Водород при температуре 1500К и давлении 1 атм облучается излучением одинаковой интенсивности на двух длинах волн: головной линии серии Бальмера и 588,9950 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 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 $\lambda = 546,1$ нм на молекулярном азоте отстоят на $\Delta\lambda = 0,72$ нм. Найти вращательную постоянную B , см^{-1} , и момент инерции молекулы N_2 .

12 семинар

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 Γ все время остается меньше ширины линии резонатора: $\Gamma < \omega/Q$.

13-й и 14 семинары

1. Определить сечение резонансной перезарядки высоковозбужденного атома на ионе в пределе малых скоростей столкновения.
2. Вычислить сечение захвата иона одного газа атомом другого газа вследствие поляризационного взаимодействия.
3. Определить сечение передачи возбуждения от дипольной молекулы (возбужден первый колебательный уровень) к такой же молекуле в основном состоянии.
4. Найти связь между сечением фотораспада атома и сечением фотоприлипания к нему.

Разбор 2-й контрольной работы.

15-й семинар

1. Ионизационная камера наполненная воздухом ($V = 5\text{л}$, $p = 250$ кПа, $T = 300\text{K}$) помещена в однородное поле γ -излучения. Ток насыщения $I = 0,32\text{мкА}$. Определить мощность экспозиционной дозы.
2. Найти в воздухе и воде в точках, где плотность потока γ -фотонов с энергией $E = 2,00$ 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 $N = 3,2 \cdot 10^4$ α -частиц с $E = 5,1$ МэВ. Найти средние значения поглощенной и эквивалентной доз, мГр и мЗв, в

слое, равном глубине проникновения α -частиц в биологическую ткань. *Справка:* пробег α -частиц в биологической ткани в 815 раз меньше пробега в воздухе; коэффициент качества для указанных α -частиц $K=20$.

5. Образовательные технологии

Материал лекционного курса и семинаров постоянно сопровождается сообщением о современном состоянии исследований в области физики и химии атомов и молекул, а также в смежных областях науки вплоть до экспериментов на адронном коллайдере ЛНС. Изложение сложных для первого восприятия вопросов (например, оператора рождения и уничтожения электромагнитного поля или силы осциллятора) всегда сопровождается понятными модельными представлениями. Там, где есть возможность достаточно просто провести аналогии или сопоставления с электродинамикой, квантовой механикой, статистической механикой, это делается.

В теории многоатомного атома особое внимание уделяется методу самосогласованного поля, являющегося основным моментом квантово-механического сложных атомов и молекул. При изложении материала по многоатомным молекулам всегда делается акцент на то, что для решения таких задач широко используются методы теории симметрии и что к в силу ограниченности времени излагать подобные вопросы в данном курсе не представляется возможным.

Большое внимание в курсе уделяется рассмотрению физике валентности химических элементов, в частности теории бывшего профессора НГУ Ю.Б. Румера. Практикуется приглашать для лекций ведущих ученых Сибирского отделения Российской академии наук. Для проведения практических занятий привлекаются ученые, исследовательская работа которых связана с атомной физикой. Семинарские занятия проводятся в интерактивной форме. Кроме семинаров каждый студент должен самостоятельно решить (или разобрать решения сложных) 14-ти задач. Задание сдается в форме беседы с преподавателем в специально отведенное время (прием заданий).

6. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов

Домашние семестровые задания курсу «Физика и химия атомов и молекул»

Задание № 1 (задачи №№ 1-5 из прилагаемого списка). Сдать в течение второй недели октября.

Задание № 2 (задачи №№ 6-10 из прилагаемого списка). Сдать в течение третьей недели ноября.

Задание № 3 (задачи №№ 11-14 из прилагаемого списка). Сдать в течение третьей недели декабря.

Задачи семестровых заданий

1. Определить дальнедействующую часть потенциала взаимодействия иона с атомом.
2. Найти потенциал взаимодействия двух атомов, орбитальный момент одного из них равен нулю.
3. Определить поляризуемость отрицательного иона в состоянии $s^2 \ ^1S$ в приближении потенциала нулевого радиуса.
4. Определить поляризуемость атома водорода в основном состоянии.

5. Определить дальнедействующую часть потенциала взаимодействия дипольной молекулы и атома с нулевым моментом.
6. Определить расщепление уровня энергии иона инертного газа, который взаимодействует с атомом инертного газа.
7. Определить дальнедействующий потенциал взаимодействия двух атомов с ненулевым моментом.
8. Определить сечение резонансной перезарядки сильно возбужденного атома на ионе в пределе малых скоростей.
9. Найти соотношение между характерными временами столкновения двухатомных молекул и характерными временами колебательного и вращательного движений.
10. Молекулярный ион с сильно возбужденной вращательной энергией движется в атомном газе с поляризуемостью R и температурой T , По какому закону изменяется средняя вращательная энергия? Указание: использовать классическую теорию.
11. Определить сечение передачи возбуждения от дипольной молекулы (возбужден первый колебательный уровень) к такой же молекуле в основном состоянии.
12. Определить сечение возбуждения колебательного уровня дипольной молекулы столкновением с заряженной частицей.
13. Найти сечение фоторазрушения атомной системы.
14. Найти связь между сечением фотораспада атома и сечением фотоприлипания к нему.

1-я контрольная работа по «Физике и химии атомов и молекул»
(первые две задачи имеют 14 вариантов)

1 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома урана.
2. Найти термы соответствующие конфигурации s^2 .

2 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома нептуния.
2. Найти термы соответствующие конфигурации p^2 .

3 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома скандия.
2. Найти термы соответствующие конфигурации p^4 .

4 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома титана.
2. Найти термы соответствующие конфигурации d^2 .

5 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома железа
2. Найти термы соответствующие конфигурации d^8 .

6 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома хрома
 2. Найти термы соответствующие конфигурации $np\ n^2p$.

7 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома иттрия
 2. Найти термы соответствующие конфигурации $np\ n^2p\ n^2s$.

8 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома неодима
 2. Найти термы соответствующие конфигурации np^5 .

9 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома лантана.
 2. Найти термы соответствующие конфигурации np^3 .

10 вариант.

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома вольфрама
 2. Найти термы соответствующие конфигурации nd^9 .

11 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома платины.
 2. Найти термы соответствующие конфигурации nf^{13} .

12 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома никеля.
 2. Найти термы соответствующие конфигурации $nf\ n^2s$.

13 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома молибдена.
 2. Найти термы соответствующие конфигурации $ns2n^2p$.

14 вариант

1. Пользуясь правилами Хунда, определить значения L, S, J основного состояния атома гадолиния.
 2. Найти термы соответствующие конфигурации $ns\ n^2d$.

3я задача

а) Активным веществом твердотельного лазера на неодимовом стекле (длина волны генерации 1,064 мкм, из которой нелинейным преобразованием получают 2ю, 3ю, 4ю гармоники, типичный коэффициент преобразования в одном кристалле $\sim 30-40\%$) служит ион Nd^{3+} , электронная конфигурация которого $4f^3$.

Найдите терм основного состояния иона в приближении LS -связи, укажите кратность его вырождения. Постройте схему уровней, возникающих из терма основного состояния при наложении спин-орбитального взаимодействия с константой $|\lambda|$.

Известно, что оптическая генерация в таком лазере возникает на переходе с ${}^4F_{3/2}$ на один из термов мультиплета основного состояния – разрешен или запрещен такой переход?

б) Электронная конфигурация атома железа $3d^64s^2$.

В приближении LS -связи найдите все порождаемые ею термы и укажите терм основного состояния с учетом заметного для железа спин-орбитального взаимодействия с константой $|\lambda|$.

Из эксперимента известно, что для иона Fe^+ основным термом является ${}^6D_{9/2}$. Какой из валентных электронов атома железа (d или s) удаляется при такой ионизации?

4я задача

Для элементов конца периодической системы поправка в законе Мозли значительно отличается от единицы. Убедитесь в этом на примере олова, цезия и вольфрама, длины волн K_α -линий которых равны соответственно 49,2, 40,2, 21,0 нм.

5я задача

Найти смещение уровня энергии основного состояния атома водорода под влиянием конечных размеров ядра. Ядро считать равномерно заряженным по объему шаром радиуса r_0 .

6я задача

Определить относительный вклад в сверхтонкое расщепление магнитного и кулоновского взаимодействия электрона с ядром.

2-я контрольная работа по «Физике и химии атомов и молекул»

(первая задача имеет 14 вариантов)

1. Определить нормальный терм молекулы KCl , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
2. Определить нормальный терм молекулы Li_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
3. Определить нормальный терм молекулы KF_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
4. Определить нормальный терм молекулы N_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
5. Определить нормальный терм молекулы NaN , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
6. Определить нормальный терм молекулы F_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
7. Определить нормальный терм молекулы NaF , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
8. Определить нормальный терм молекулы CuO , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
9. Определить нормальный терм молекулы NH , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях

10. Определить нормальный терм молекулы P_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
11. Определить нормальный терм молекулы Na_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
12. Определить нормальный терм молекулы NCl , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
13. Определить нормальный терм молекулы I_2 , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях
14. Определить нормальный терм молекулы KI , образовавшейся в результате соединения атомов в нормальных состояниях

2я задача

В кювете с буферным газом ($T = 1000$ К, $P = 10$ атм) находятся пары Na. Газокинетическое сечение столкновения натрия с газом, приводящее к тушению возбужденного $3p$ -состояния, $\sigma_{ст} = 5 \cdot 10^{-15}$ см², энергия ионизации натрия $E_i = 5.139$ эВ, естественное, т.е. радиационное, время жизни состояния $3p^2P_{3/2}$ составляет 10^{-8} сек. Кювета облучается лазерным излучением, длина волны λ которого соответствует центру линии перехода натрия из нормального состояния на $3p^2P_{3/2}$ уровень. Определить отношение сечений поглощения и рассеяния излучения на частоте перехода Na.

3я задача

The electronic energy of a diatomic molecule can be approximated by the Morse function: $U(R) = D \cdot (1 - e^{-\beta(R - R_e)})^2$. R_e is the equilibrium internuclear separation while D and β are constants. (i) Find the dissociation energy D_e . (ii) Sketch the Morse function, labelling D_e and R_e . (iii) Expand the Morse function up to terms quadratic in $(R - R_e)$. Show that this approximates a harmonic oscillator potential and identify the force constant k .

4я задача

Оценить, какую величину магнитного поля звезды типа Солнца (период вращения $\tau = 10^6$ сек, радиус $R = 10^{10}$ см, температура поверхности $T = 6 \cdot 10^3$ К) можно обнаружить в оптической области спектра (характерные частоты $\omega_0 = 10^{15}$ с⁻¹) на основании измерения эффекта Зеемана.

5я задача

На поверхность кожи $S = 2,0$ см² падает нормально $N = 3,2 \cdot 10^4$ α - частиц с энергией $E = 5,1$ МэВ. Найти среднее значение поглощенной и эквивалентной дозы в слое равной глубине проникновения α - частиц в биологической ткани, которая в 815 раз меньше ее пробега в воздухе. Коэффициент качества для данных α - частиц $K = 20$.

Задачи к экзамену по курсу «Физика и химия атомов и молекул»

1. Выписать спектральные обозначения термов электрона в атоме водорода для $n=3$. Сколько компонент тонкой структуры имеет уровень атома водорода с главным квантовым числом n .
2. Какому водородоподобному иону принадлежит дублет головной линии серии Лаймана, разность волновых чисел которого составляет $29,6$ см⁻¹.
3. Выписать возможные термы атомов, содержащих кроме заполненных оболочек два электрона, p и d .

4. Найти возможные типы термов атома, электронная конфигурация незаполненной подоболочки которого - np^2 .
5. Найти возможные типы термов атома, электронная конфигурация незаполненной подоболочки которого - nd^2 .
6. Выписать возможные типы термов для электронных конфигураций: $ns^1, n'p^2$. Здесь $n' \neq n$.
7. Выписать возможные типы термов для электронных конфигураций: $np^1, n'p^2$. Здесь $n' \neq n$.
8. При каких условиях возможно усиление электромагнитного излучения, проходящего через вещество? Найти отношение заселенности уровней 1D_2 и 1P_1 ($E_D > E_P$) атомов газа, при котором пучок монохроматического излучения с частотой, равной частоте перехода между этими уровнями, будет проходить через газ, не ослабляясь.
9. При какой температуре доплеровское уширение каждой компоненты дублета спектральной линии $2^2P - 1^2S$ атомарного водорода равно интервалу между этими компонентами?
10. С какой минимальной скоростью должен двигаться атом водорода, чтобы в результате неупругого лобового столкновения с другим, покоящимся, атомом водорода один из них испустил фотон? До соударения оба атома находились в основном состоянии.
11. 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?
12. Максимальное значение проекции магнитного момента атома, находящегося в состоянии D_2 , равно четырем магнетонам Бора. Определить мультиплетность этого терма.
13. Вычислить магнитный момент атома водорода в основном состоянии.
14. Спектральная линия $\lambda = 0,612$ мкм обусловлена переходом между двумя синглетными состояниями атома. Определить интервал $\Delta\lambda$ между крайними компонентами этой линии в магнитном поле $B=10,0$ кГс.
15. Термы атомов и ионов с одним валентным электроном можно представить в виде $T = R(Z - a)^2 / n^2$, где Z - заряд ядра (в единицах e); a - поправка экранирования; n - главное квантовое число валентного электрона. Вычислить с помощью этой формулы поправку a и квантовое число n валентного электрона в основном состоянии атома Li, если известно, что ионизационные потенциалы Li и Be^+ равны соответственно 5,39 и 17,0 В и поправка a для них одинакова.
16. Найти энергию, необходимую для возбуждения молекулы H_2 из основного состояния на первый колебательный уровень ($\nu=1$). Во сколько раз эта энергия больше энергии возбуждения данной молекулы на первый вращательный уровень ($J=1$)?
17. Определить максимально возможное колебательное квантовое число, соответствующую колебательную энергию и энергию диссоциации двухатомной молекулы, собственная частота колебаний которой ω и коэффициент ангармоничности x . Вычислить эти величины для молекулы H_2 .
18. Найти момент инерции молекулы CN и расстояние между ее ядрами, если интервалы между соседними линиями чисто вращательного спектра этих молекул $\Delta\nu=29,0$ см $^{-1}$.
19. Найти относительный изотопический сдвиг $\Delta\lambda / \lambda$ линий чисто вращательного спектра смеси молекул $H^{35}Cl$ и $H^{37}Cl$.
20. Длина волны резонансной линии ртути $\lambda=253,65$ нм. Среднее время жизни соответствующего резонансного уровня $\tau=0,15$ мкс. Оценить отношение доплеровского уширения этой линии при $T=300$ К к ее естественной ширине.
21. При какой температуре доплеровское уширение каждой компоненты дублета спектральной линии $2^2P - 1^2S$ атомарного водорода равно интервалу между этими компонентами?

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. **Бурмасов В.С., Оришич А.М.** Физика и химия атомов и молекул. Учеб. пос. Новосибирск. НГУ, 2007.
2. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Квантовая механика. М.:Наука, 1989.
3. **Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П.** Квантовая электродинамика. М.:Наука, 1989.
4. **Бейзер А.** Основные представления современной физики. М.: Атомиздат, 1973.
5. **Ельяшевич М.А.** Атомная и молекулярная спектроскопия. М.: Физ.-мат. лит. 1962.
6. **Сивухин Д.В.** Атомная и ядерная физика, часть I. М.: Физ.- мат. лит.,1986.
7. **Собельман И.И.** Введение в теорию атомных спектров. М.: Физ.-мат. лит., 1963.
8. **Матвеев А.И.** Атомная физика. М.: Высш. шк., 1989.
9. **Лоудон Р.** Квантовая теория света. М.: Мир, 1976.
10. **Фриш С.Э.** Оптические спектры атомов. М.:Физ.-мат.гиз., 1963.
11. **Никитин Е.Е., Б.М. Смирнов.** Атомно-молекулярные процессы в задачах с решениями. М.: Наука, 1988.
12. **Иродов И.Е.** Сборник задач по атомной и ядерной физике. М.: Энергоатомиздат, 1984

б) дополнительная литература:

1. **Зелевинский В.Г.** Конспект лекций по квантовой механике. Новосибирск, НГУ, 1970.
2. **Герцберг Г.** Спектры и строение двухатомных молекул. М.: Иностран.лит., 1949.
3. **Миногоин В.Г., Летохов В.С.** Давление лазерного излучения на атомы. М.: Наука, 1986.

в) программное обеспечение и Интернет-ресурсы:

1. Современный курс аналитической механики Кембриджского университета --- D. Tong "Classical Dynamics" (доступна по адресу в Интернете <http://www.damtp.cam.ac.uk/user/tong/dynamics/>).
2. Интерактивные физические симуляции: <http://phet.colorado.edu/en/simulations/category/chemistry>

8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Требуется возможность демонстрировать графики и рисунки, взятые из переносного компьютера, на экран с помощью мультимедийного проектора.

Рецензент (ы) _____

Программа одобрена на заседании _____

(Наименование уполномоченного органа вуза (УМК, НМС, Ученый совет)

от _____ года.