

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»
Физический факультет

УТВЕРЖДАЮ
И.о. декана физического факультета МГУ,
профессор, д.ф.-м.н.



/ В.В. Белокуров /

« 21 » марта 2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)

Атомная и молекулярная физика

Atomic and molecular physics

Программа (программы) подготовки
научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ
(103-01-00-1316-фмн)

Москва 2024

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с Приказом по МГУ от 24 ноября 2021 года № 1216 «Об утверждении Требований к основным программам подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре, самостоятельно устанавливаемых Московским государственным университетом имени М.В.Ломоносова».

1. Краткая аннотация:

Название дисциплины: Атомная и молекулярная физика.

В основу настоящей программы положено рассмотрение атомной и молекулярной физики в квантовомеханическом представлении. Подробно рассматриваются модели одно- и многоэлектронных атомов, двухатомных молекул, а также их взаимодействие с классическим и квантовым излучением. Помимо этого, предполагается изучение основ связанных дисциплин: классическая и квантовая оптика, спектроскопия, лазерная физика, статистика, физическая кинетика, электродинамика сплошных сред, физика низкотемпературной плазмы, физика твердого тела, квантовая электродинамика. На этой основе строится последовательное изложение материала, входящего в современную программу экзамена кандидатского минимума по специальности Атомная и молекулярная физика.

Цель изучения дисциплины – систематизация знаний о современном состоянии и тенденциях развития в области атомной и молекулярной физики.

2. Уровень высшего образования – подготовка кадров высшей квалификации.

3. Научная специальность: 1.3.16. Атомная и молекулярная физика; область науки: естественные науки.

4. Место дисциплины (модуля) в структуре Программы аспирантуры: дисциплины (модули), направленные на подготовку к кандидатским экзаменам - Дисциплина, совпадающая с наименованием научной специальности.

5. Объем дисциплины (модуля) в зачетных единицах с указанием количества академических или астрономических часов, выделенных на контактную работу обучающихся с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу обучающихся:

Объем дисциплины (модуля) составляет 3 зачетных единицы, всего 108 часов, из которых 54 часа составляет контактная работа аспиранта с преподавателем (50 часов занятия лекционного типа, 4 часа мероприятия текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации), 54 часа составляет самостоятельная работа учащегося.

6. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия. Необходимы знания высшей математики и общей физики в объеме курсов, преподаваемых на физических специальностях классических университетов, полученных на предыдущих уровнях высшего образования.

7. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины (модуля), форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Всего (часы)	В том числе								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них					Самостоятельная работа обучающегося, часы из них			
		Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа	Групповые консультации	Индивидуальные консультации	Учебные занятия, направленные на проведение текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации	Всего	Выполнение домашних заданий	Подготовка к коллоквиумам	Всего
Тема 1. История развития квантовых представлений	6	3					3	3		3
Тема 1.1 Равновесное электромагнитное излучение в полости. Гипотеза Планка. Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Законы Релея-Джинса и Вина. Закон смещения Вина.	2	1					1	1		1
Тема 1.2 Корпускулярные свойства излучения. Фотоэффект, закон Эйнштейна. Эффект Комптона. Тормозное рентгеновское излучение. Давление света.	2	1					1	1		1
Тема 1.3 Развитие моделей атомов.	2	1					1	1		1

Модели атомов Томпсона и Резерфорда. Модель атома водорода Бора. Спектр излучения, спектральные серии, формула Бальмера-Ритца. Изотопический сдвиг, релятивистские поправки.										
Тема 2. Основы квантового формализма	30	14					14	16		16
Тема 2.1 Уравнение Шредингера. Стационарные и нестационарные состояния. Операторы физических величин. Собственные значения и собственные функции операторов. Среднее значение и дисперсия физической величины. Коммутатор. Соотношения неопределенностей. Определение энергетического спектра системы как задача на собственные значения оператора Гамильтона. Волновой пакет как суперпозиция стационарных состояний, эволюция плотности вероятности и квантовых средних. Теорема Эренфеста. Переход к классической механике. Симметрия волновой функции системы частиц относительно перестановки их местами. Тожественность микрочастиц. Бозоны и фермионы. Принцип Паули. Системы ферми- и бозе-частиц.	10	4					4	6		6
Тема 2.2 Туннельный эффект. Туннельный микроскоп.	4	2					2	2		2

Квазистационарное состояние. Ширина уровня и время распада. Электрон в периодическом потенциале. Понятие об энергетических зонах. Теорема Блоха.										
Тема 2.3 Гармонический осциллятор. Стационарное, когерентное и сжатое состояния осциллятора. Сравнение с классическим решением. Суперпозиция стационарных состояний ангармонического потенциала. Случай слабого ангармонизма. Время "классичности" и характерное время квантового возрождения пакета. Специфика случая сильного ангармонизма. Трёхмерный гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения. Возбуждения как частицы.	6	3					3	3		3
Тема 2.4 Уравнение Шредингера с центрально-симметричным потенциалом. Операторы L^2 , L_z , их собственные значения и функции. Атом водорода. Уровни энергии и волновые функции стационарных состояний. Их свойства. Вырождение уровней по орбитальному моменту. Орбитальный механический и магнитный моменты электрона. Магнетон Бора. Опыт Штерна и Герлаха. Спин электрона. Спин-орбитальное взаимодействие. Тонкая	6	3					3	3		3

структура спектра атома водорода.										
Тема 2.5 Многочастичные системы. Понятие матрицы плотности. Чистые и смешанные состояния. Перепутанные состояния. Фазовое пространство. Распределение квазивероятности, функция Вигнера.	4	2					2	2		2
Тема 3. Общие принципы описания многоэлектронного атома Вариационный метод. Приближение самосогласованного поля. Одноэлектронное состояние. Заполнение атомных состояний электронами. Атомные оболочки и подоболочки. Электронная конфигурация. Терм. Атомы щелочных металлов. Атом гелия. Симметрия волновой функции относительно перестановки электронов. Синглетные и триплетные состояния. Обменное взаимодействие. Периодическая система элементов. Правило Хунда. Основные термы атомов. Различные типы связи моментов в многоэлектронном атоме. Тонкая структура терма, состояния. Сверхтонкая структура спектров многоэлектронных атомов. Понятие об автоионизационных состояниях и теоретическом описании процесса автоионизации. Магнитный момент электрона. Атомные пучки в магнитном поле. Опыты Штерна-	8	4					4	4		4

Герлаха. Электронный парамагнитный резонанс, ядерный парамагнитный резонанс.									
Тема 4. Строение молекул. Адиабатическое приближение. Молекулярный ион водорода. Молекула водорода. Теория Гайтлера-Лондона. Термы двухатомной молекулы. Насыщение химических связей. Валентность. Метод линейной комбинации атомных орбиталей (ЛКАО). Ковалентная и ионная связи. Общие представления о колебательном и вращательном движении ядер в молекулах. Спектры двухатомных молекул. Специфика вращательного спектра молекул. Свободная вращательная молекулярная динамика. Основы систематики состояний двухатомной молекулы. Изотопические эффекты в молекулах.	6	3					3	3	3
Тема 5. Квантовая система в поле электромагнитной волны.	32	14					14	16	16
Тема 5.1 Полуклассическая теория взаимодействия света и вещества. Электрическое дипольное приближение. Оператор взаимодействия квантовой системы с электромагнитным полем, dE- и pA-калибровки, эквивалентность калибровок. Нестационарная теория	7	3					3	4	4

<p>возмущений. Первый порядок теории возмущений. Переходы в дискретном спектре и фотоионизация. Вероятность перехода. Золотое правило Ферми. Двухуровневая система и гармонический осциллятор в поле электромагнитной волны. Свободный электрон в электромагнитном поле. Классическое и квантовое описания. Волковские состояния.</p>										
<p>Тема 5.2 Электромагнитные переходы в атомах и молекулах. Понятие о правилах отбора. Разрешенные и запрещенные переходы. Спектральные серии (атомы водорода, гелия, щелочных металлов). Общие представления об электромагнитных переходах в многоэлектронном атоме. Правило Лапорта. Эффекты Зеемана и Штарка. Переходы внутренних электронов в атомах. Характеристическое рентгеновское излучение. Эффект Оже. Электромагнитные переходы в двухатомных молекулах. Колебательно-вращательный переход. Принцип Франка - Кондона.</p>	7	3					3	4		4
<p>Тема 5.3 Физика многофотонных процессов. Второй порядок теории возмущений. Двухфотонные процессы. Рамановские переходы V- и Λ-типа. Динамический штарковский</p>	6	3					3	3		3

сдвиг уровней. Высшие порядки теории возмущений. Многофотонные процессы. Переходы в дискретном спектре и многофотонная ионизация. Понятие о диаграммах Фейнмана.										
Тема 5.4 Переходы в состояния континуума и между ними. Многофотонный вынужденный тормозной эффект. Теория Бункина-Федорова. Одноквантовый и многоквантовый фотоэффекты. Теория фотоионизации Келдыша. Туннельный и многоквантовый пределы. Дальнейшая модификация подхода Келдыша. Надпороговая ионизация атомов. Особенности спектров фотоэлектронов в сильных полях, их перестройка в зависимости от амплитуды поля. Генерация гармоник высокого порядка. Генерация ультракоротких аттосекундных импульсов.	6	3					3	3		3
Тема 5.5 Представление о квантовом электромагнитном поле. Электромагнитный вакуум. Фотоны. Спонтанные переходы. Естественная ширина спектральной линии. Лэмбовский сдвиг. Стационарный и нестационарный эффекты Казимира. Квантовая электродинамика в микрополости.	4	2					2	2		2
Тема 6. Основы физики плазмы	16	8					8	8		8

Тема 6.1 Понятие плазмы. Квазинейтральность, микрополя, дебаевский радиус, идеальная и неидеальная плазма. Вырожденная плазма. Столкновения заряженных частиц, упругие и неупругие столкновения электронов с атомами. Дрейф и диффузия электронов в плазме. Амбиполярная диффузия.	4	2					2	2		2
Тема 6.2 Плазма в электромагнитном поле. Плазменная частота. Диэлектрическая проницаемость и проводимость плазмы. Распространение электромагнитных волн в плазме. Длина волны, затухание волны. Скин-эффект. Продольные и поперечные волны в плазме. Энергия электромагнитного поля в плазме. Вектор Пойнтинга. Поверхностные электромагнитные волны. Условия существования и способы возбуждения.	4	2					2	2		2
Тема 6.3 Плазма металлов и полупроводников. Теория Друде. Кинетические явления в полупроводниках.	4	2					2	2		2
Тема 6.4 Кинетическая теория плазмы. Функция распределения. Диэлектрическая проницаемость и проводимость плазмы в кинетической теории. Решение кинетического уравнения. Распределения Максвелла	4	2					2	2		2

Маргенау и Дрювейстейна. Затухание Ландау. Элементарная и кинетическая теория оптического пробоя газов. Уравнение Больцмана для функции распределения электронов по энергиям. Неупругие столкновения. Квантовое кинетическое уравнение.										
Тема 7. Основы нелинейной оптики Уравнения Максвелла в нелинейной среде. Приближение медленно меняющихся амплитуд. Самофокусировка и самодефокусировка в нелинейной среде. Генерация оптических гармоник. Параметрическое преобразование частоты. Спонтанное и вынужденное комбинационное рассеяние света.	4	2					2	2		2
Тема 8. Основы лазерной физики Спонтанные и вынужденные переходы. Сечение фотопоглощения. Излучение в двухуровневой среде. Самоиндуцированная прозрачность. Трех- и четырехуровневые схемы накачки. Динамика лазерной генерации в приближении скоростных уравнений. Стационарный и нестационарные режимы работы. Режим модуляции добротности. Генерация фемто- и аттосекундных импульсов.	4	2					2	2		2
Промежуточная аттестация: допуск к	4					4	4			

<i>кандидатскому экзамену</i>										
Итого	108	50				4	54	54		54

8. Образовательные технологии

Используемые формы и методы обучения: лекции и семинарские занятия, самостоятельная работа аспирантов.

В процессе преподавания дисциплины преподаватель использует как классические формы и методы обучения (лекции и семинарские занятия), так и активные методы обучения.

При проведении лекционных занятий преподаватель использует при необходимости аудиовизуальные, компьютерные и мультимедийные средства обучения, а также демонстрационные и наглядно-иллюстрационные (в том числе раздаточные) материалы.

9. Учебно-методические материалы для самостоятельной работы по дисциплине (модулю): аспирантам предоставляется программа курса, план занятий и задания для самостоятельной работы, презентации к лекционным занятиям.

10. Ресурсное обеспечение:

Основная литература:

1. Попов А.М., Тихонова О.В. Атомная физика, М.: Физфак МГУ, 2019.
2. Кленов Н.В., Красильников С.С., Попов А.М., Тихонова О.В. Сборник задач по атомной физике, М. 2014.
3. Богацкая А.В., Попов А.М. Основы атомной физики и теории взаимодействия света и вещества, М. Ай Пи Эр Медиа, 2023.
4. Шпольский Э.В. Атомная физика, т.1,2. М.: Наука, 1974.
5. Матвеев А.Н. Атомная физика, М.: Высшая школа, 1989.
6. Гольдин Л.Л., Новикова Г.И. Введение в квантовую физику, М.: Наука, 1988.
7. Вихман Э., Квантовая физика, М.: Наука, 1974.
8. Сивухин Д.В. Курс общей физики, т.5, ч.1, М.: Наука, 1988.
9. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика, М.: МГУ, 1998
10. Елютин П.В., Кривченков В.Д. Квантовая механика, М.: Наука, 1976
11. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, М.: Наука, 1989
12. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Основы нелинейной оптики атомарных газов, М.: Наука, 1986
13. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Атом в сильном световом поле, М.: Энергоатомиздат, 1984
14. Федоров М.В., Электрон в сильном световом поле, М.: Наука, 1991
15. Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В., Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, М.: МГУ, 1989
16. М.А. Lieberman, A.J. Lichtenberg, Plasma discharges and material processing. 2005.
17. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Ч. I-IV/ Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
18. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. М.: Наука. Т. 3: Квантовая механика Т. 5: Статистическая физика. Т.7: Электродинамика сплошных сред. Т. 10: Физическая кинетика.
19. Смирнов Б.М. Физика слабоионизированного газа. М.: Наука, 1972.
20. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
21. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
22. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.
23. П. Солимар, Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение, М. Мир, 1974.

24. Б.М. Смирнов, «Моделирование газоразрядной плазмы», УФН, 179, вып.6, 591-604 (2009).
25. F. Krausz, M. Ivanov Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163–234 (2009).
26. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев «Горизонты петаваттных лазерных комплексов» УФН, 181 9–32 (2011).

Дополнительная литература:

1. В.Е.Фортон и др. «Пылевая плазма» УФН, 175, 495-541 (2004).
2. Делоне Н.Б., В.П.Крайнов «Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением», Москва, Физматлит, 2001.
3. А.М.Дыхне, В.П.Крайнов «Быстрые и медленные подсистемы в атомной физике», М.: МФТИ, 2002.
4. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
5. Мотт Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.
6. Л.Д. Цендин «Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме», УФН, 180, вып. 2, 139-164 (2010).
7. J. Levesque, & P.V. Corkum «Attosecond science and technology». Can. J. Phys. 84, 1–18 (2006).
8. F.Krausz, M. Ivanov Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163–234 (2009).
9. I.A. Burenkov, A.M. Popov, O.V. Tikhonova, and E.A. Volkova «New features of interaction of atomic and molecular systems with intense ultrashort laser pulses» Laser Phys. Lett. 7, No. 6, 409–434 (2010).
10. А.М. Желтиков «Комбинационное рассеяние света в фемто- и аттосекундной физике» УФН, 181 33–58 (2011).
11. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
12. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
13. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгрена. М.: Мир, 1971.
14. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
15. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике, т.3,8,9 М.: Мир, 1967.
16. Флюгге З. Задачи по квантовой механике, т.1,2. М.: Мир, 1974.

11. Язык преподавания – русский.

12. Преподаватели:

1. Доктор физико-математических наук, профессор Воронина Екатерина Николаевна, e-mail: voroninaen@nsrd.sinp.msu.ru, тел. +7 (495) 939-14-90;
2. Доктор технических наук, профессор Кленов Николай Викторович, e-mail: nvklenov@mail.ru;
3. Доктор физико-математических наук, профессор Попов Александр Михайлович, e-mail: alexander.m.popov@gmail.com, тел. +7(495) 939-49-54;
4. Доктор физико-математических наук, профессор Тихонова Ольга Владимировна, e-mail: ovtikhonova@mail.ru, тел. +7 (495) 939-13-04.

Фонды оценочных средств, необходимые для оценки результатов обучения

Образцы домашних заданий:

1. Оценить скорость (вероятность в единицу времени) туннелирования электрона из потенциальной ямы конечной глубины при помещении системы в слабое однородное постоянное электрическое поле с напряженностью E .
2. Определить электростатический потенциал, создаваемый в пространстве атомом водорода в состоянии $1s$.
3. В рамках приближения Хартри получить систему уравнений для волновой функции, описывающей $1s2p$ конфигурацию атома гелия.
4. Показать, что для произвольной квантовой системы с центрально-симметричным потенциалом квадратичная восприимчивость, определяющая отклик системы на удвоенной частоте воздействующего поля, равна нулю.
5. В дипольном приближении определить вероятности спонтанных переходов между стационарными состояниями частицы с зарядом e в гармоническом потенциале.
6. Определить время спонтанного перехода $2p \rightarrow 1s$ в водородоподобном ионе с зарядом ядра Z . Как время жизни зависит от заряда ядра?
7. Оценить поправку к энергиям $2s$ и $2p$ состояний водородоподобного иона с зарядом Z , связанную с конечным размером атомного ядра. Считать, что заряд по ядру распределен равномерно.
8. Среди первых двадцати элементов таблицы Менделеева выделите элементы, у которых основной терм является синглетом. Запишите соответствующие электронные конфигурации.
9. Спин ядра атома иода ^{131}I равен $7/2$. Определить количество компонент тонкой и сверхтонкой структуры основного терма. Картину расщепления изобразить графически.
10. Нарисовать картину зеемановского расщепления между нижними термами электронных конфигураций $1s2p$ и $1s2s$ атома гелия в слабом магнитном поле. Сколько линий будет наблюдаться на указанных переходах? Определить величину расщепления.
11. Найдите отношение колебательных частот молекул водорода H_2 , дейтерия D_2 и трития T_2 (изотопический сдвиг).
12. В атоме натрия электрон находится в одном из состояний $5s$, $5p$, $5d$, $5f$. Какие спектральные линии и каких серий могут возникнуть при спонтанных переходах в каждом из этих случаев? Тонкую структуру не учитывать. Схему уровней и возможных переходов изобразить графически.
13. Определите частоту колебаний молекулы кислорода, если при температуре $T = 400 \text{ K}$ отношение интенсивностей фиолетового и красного спутников в спектре комбинационного рассеяния равно $\eta = 0.004$.
14. Найти волновую функцию, описывающую эволюцию двух взаимодействующих друг с другом электронов, находящихся в сильном лазерном поле.
15. Для трехуровневого атома, взаимодействующего с двумя резонансными классическими электромагнитными полями, найти квазиэнергетические состояния (состояния, «одетые полем») и продемонстрировать эффект «когерентного пленения населенностей».
16. В рамках модели Джейнса-Каммингса найти инверсную заселенность атомной системы как функцию времени, если первоначально атом находился в основном состоянии, а поле характеризовалось распределением Пуассона по числу фотонов со средним числом квантов N и отстройкой от резонанса с атомным переходом Δ . Нарисовать ход временной зависимости. Найти среднюю энергию атома в зависимости от времени.

Вопросы для промежуточной аттестации – зачета:

1. Нестационарные и стационарные состояния. Возможные значения различных физических величин в произвольном состоянии и вероятности их измерения. Квантовые средние.
2. Волновая функция и проблема полноты квантовомеханического описания.
3. Проблема измерений в квантовой механике.
4. Корпускулярно-волновой дуализм для фотонов и электронов.
5. Иерархия взаимодействий в многоэлектронном атоме. Электронная конфигурация, терм, состояние.
6. Матрица плотности. Чистые и смешанные состояния.
7. Атом гелия. Теория возмущений и вариационный метод.
8. Атом гелия. Теория самосогласованного поля.
9. Возбужденные состояния атома гелия. Триплетные и синглетные термы. Кулоновская и обменная поправки к энергии состояния.
10. Автоионизационные состояния на примерах гелия и отрицательно заряженного иона водорода.
11. Нестационарная теория возмущений. Вероятности вынужденных и спонтанных переходов.
12. Вероятность спонтанного перехода $2P-1S$ в атоме водорода.
13. Гамильтониан двухатомной молекулы в системе центра инерции. Отделение трансляционного движения. Разделение электронного и ядерного движения.
14. Собственные функции и собственные значения оператора Гамильтона. Операторы физических величин.
15. Когерентные и «сжатые» состояния электромагнитного поля.
16. Корпускулярные свойства излучения. Эффект Комптона. Рассеяние мягких квантов на пучках релятивистских электронов.
17. Двухъямный потенциал и двухуровневые системы.
18. Электромагнитные переходы и правила отбора в многоэлектронных атомах.
19. Правила отбора для электромагнитных переходов в двухатомных молекулах.
20. Поглощение электромагнитного излучения в плазме при упругом рассеянии электрона на атомах или молекулах (обратный тормозной эффект).

Методические материалы для проведения процедур оценивания результатов обучения

Зачет проходит по билетам, каждый из которых включает 2 вопроса. Уровень знаний аспиранта по каждому вопросу на «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно». В случае, если на все вопросы был дан ответ, оцененный не ниже чем «удовлетворительно», аспирант получает общую оценку «зачтено».

Шкала оценивания знаний, умений и навыков

Результат освоения дисциплины	Критерии оценивания знаний, умений и навыков			
	2/ не зачтено	3/ зачтено	4/ зачтено	5/ зачтено
Знания	Отсутствие знаний основных законов атомной и молекулярной физики	В целом успешные, но не систематические знания основных	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы знания основных	Успешные и систематические знания основных законов атомной и

		законов атомной и молекулярной физики	законов атомной и молекулярной физики	молекулярной физики
Умения	Отсутствие умения применять знания основных законов атомной и молекулярной физики для решения научных задач	В целом успешное, но не систематическое применять знания основных законов атомной и молекулярной физики для решения научных задач	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение применять знания основных законов атомной и молекулярной физики для решения научных задач	Успешное и систематическое умение применять знания основных законов атомной и молекулярной физики для решения научных задач
Навыки	Отсутствие/фрагментарное владение навыками решения научных задач в области атомной и молекулярной физики	В целом успешное, но не систематическое владение навыками решения научных задач в области атомной и молекулярной физики	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками решения научных задач в области атомной и молекулярной физики	Успешное и систематическое владение навыками решения научных задач в области атомной и молекулярной физики