

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

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана физического
факультета МГУ



/ В.В. Белокуров /

«21» марта 2024 г.

**ПРОГРАММА-МИНИМУМ
КАНДИДАТСКОГО ЭКЗАМЕНА ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

1.3.16 Атомная и молекулярная физика

Шифр и наименование области науки

1. Естественные науки

Наименование отраслей науки, по которым присуждаются ученые степени

Физико-математические науки

Москва 2024

I. Описание программы

Программа-минимум кандидатского экзамена, разработана Физическим факультетом Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова на основе паспорта научной специальности, утвержденного Высшей аттестационной комиссией при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, и учебного плана программы подготовки научных и научно-педагогических кадров в аспирантуре по специальности 1.3.16 Атомная и молекулярная физика, в отрасли физико-математических наук.

II. Основные разделы и вопросы к экзамену

Тема 1. История развития квантовых представлений

Равновесное электромагнитное излучение в полости. Гипотеза Планка. Формула Планка. Закон Стефана-Больцмана. Законы Релея-Джинса и Вина. Закон смещения Вина.

Корпускулярные свойства излучения. Фотоэффект, закон Эйнштейна. Эффект Комптона. Тормозное рентгеновское излучение. Давление света.

Развитие моделей атомов. 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

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. Тождественность микрочастиц. Бозоны и фермионы. Принцип Паули. Системы ферми- и бозе-частиц.

Туннельный эффект. Туннельный микроскоп. Квазистационарное состояние. Ширина уровня и время распада. Электрон в периодическом потенциале. Понятие об энергетических зонах. Теорема Блоха.

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. Трехмерный гармонический осциллятор. Операторы рождения и уничтожения. Возбуждения как частицы.

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 структура спектра атома водорода.

Многочастичные системы. Понятие матрицы плотности. Чистые и смешанные состояния. Перепутанные состояния. Фазовое пространство. Распределение квазивероятности, функция Вигнера.

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-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.

Тема 5. Квантовая система в поле электро-магнитной волны.

Полуклассическая теория взаимодействия света и вещества. Электрическое дипольное приближение. Оператор взаимодействия квантовой системы с электромагнитным полем, dE - и pA -калибровки, эквивалентность калибровок. Нестационарная теория 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.

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.

Физика многофотонных процессов. Второй порядок теории возмущений. Двухфотонные процессы. Рамановские переходы V- и Λ-типа. Динамический штарковский сдвиг уровней. Высшие порядки теории возмущений. Многофотонные процессы. Переходы в дискретном спектре и многофотонная ионизация. Понятие о диаграммах Фейнмана.

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.

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.

Тема 6. Основы физики плазмы

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.

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.

Плазма металлов и полупроводников. Теория Друде. Кинетические явления в полупроводниках.

Кинетическая теория плазмы. Функция распределения. Диэлектрическая проницаемость и проводимость плазмы в кинетической теории. Решение кинетического уравнения. Распределения Максвелла, Маргенау и Дрюейстейна. 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.

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.

III. Критерии оценивания

Критерии и показатели оценивания ответа на экзамене			
Неудовлетворительно	Удовлетворительно	Хорошо	Отлично
Фрагментарные знания в области атомной и молекулярной физики	Неполные знания в области атомной и молекулярной физики	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания в области атомной и молекулярной физики	Сформированные и систематические знания в области атомной и молекулярной физики

IV. Рекомендуемая 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. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике, т.3,8,9 М.: Мир, 1967.
10. Флюгге З. Задачи по квантовой механике, т.1,2. М.: Мир, 1974.
11. Ахманов С.А., Никитин С.Ю. Физическая оптика, М.: МГУ, 1998
12. Елютин П.В., Кривченков В.Д. Квантовая механика, М.: Наука, 1976
13. Делоне Н.Б. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, М.: Наука, 1989
14. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Основы нелинейной оптики атомарных газов, М.: Наука, 1986
15. Делоне Н.Б., Крайнов В.П. Атом в сильном световом поле, М.: Энергоатомиздат, 1984
16. Федоров М.В., Электрон в сильном световом поле, М.: Наука, 1991
17. Ильинский Ю.А., Келдыш Л.В., Взаимодействие электромагнитного излучения с веществом, М.: МГУ, 1989
18. М.А. Lieberman, A.J. Lichtenberg, Plasma discharges and material processing. 2005.

19. Энциклопедия низкотемпературной плазмы. Вводный том. Ч. I-IV/ Под ред. В.Е. Фортова. М.: Наука, 2000.
20. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987.
21. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Наука, 1966.
22. 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.
23. Методы исследования плазмы / Под ред. В. Лохте-Хольгрёвена. М.: Мир, 1971.
24. Диагностика плазмы / Под ред. Р. Хаддлстоуна, С. Леонарда. М.: Мир, 1967.
25. Смирнов Б.М. Физика слабоионизированного газа. М.: Наука, 1972.
26. Русанов В.Д., Фридман А.А. Физика химически активной плазмы. М.: Наука, 1984.
27. Животов В.К., Русанов В.Д., Фридман А.А. Диагностика неравновесной химически активной плазмы. М.: Энергоатомиздат, 1985.
28. Биберман Л.М., Воробьев В.С., Якубов И.Т. Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы. М.: Наука, 1982.
29. П. Солимар, Туннельный эффект в сверхпроводниках и его применение, М. Мир, 1974.

V. Рекомендуемая дополнительная литература

1. В.Е.Фортов и др. «Пылевая плазма» УФН, 175, 495-541 (2004).
2. А.В. Коржиманов, А.А. Гоносков, Е.А. Хазанов, А.М. Сергеев «Горизонты петаваттных лазерных комплексов» УФН, 181 9–32 (2011).
3. Делоне Н.Б., В.П.Крайнов «Нелинейная ионизация атомов лазерным излучением», Москва, Физматлит, 2001.
4. А.М.Дыхне, В.П.Крайнов «Быстрые и медленные подсистемы в атомной физике», М.: МФТИ, 2002.
5. Мотт Н., Мотт Э. Электронные процессы в некристаллических веществах. М.: Мир, 1974.
6. Мотт Ю.И. Оптические свойства полупроводников. М.: Наука, 1977.
7. Л.Д. Цендин «Нелокальная кинетика электронов в газоразрядной плазме», УФН, 180, вып. 2, 139-164 (2010).
8. Б.М. Смирнов, «Моделирование газоразрядной плазмы», УФН, 179, вып.6, 591-604 (2009).
9. F. Krausz, M. Ivanov Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163–234 (2009).
10. J. Levesque, & P.B. Corkum «Attosecond science and technology». Can. J. Phys. 84, 1–18 (2006).
11. F.Krausz, M. Ivanov Attosecond physics, Rev. Mod. Phys. 81, 163–234 (2009).
12. 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).
13. А.М. Желтиков, «Комбинационное рассеяние света в фемто- и аттосекундной физике» УФН, 181 33–58 (2011).