

**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе
Российской академии наук**

УТВЕРЖДАЮ

Зам. директора Института по научной работе



_____ П.Н. Брунков
" 09 " _____ 2020 г.

**Рабочая программа обязательной дисциплины
ФИЗИКА АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ**
основной образовательной программы подготовки научно-педагогических
кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия

профиль 01.04.05 Оптика

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Принято Ученым советом
Протокол № 4 от 29.03.2019г.

Санкт-Петербург
2020

Рабочая программа составлена на основании федеральных государственных образовательных стандартов основных образовательных программ высшего образования подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре по направлению 03.06.01 Физика и астрономия, профиль 01.04.05 Оптика.

1. ЦЕЛИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина "Физика атомных столкновений" является дисциплиной по выбору и входит в ООП по направлению 03.06.01 Физика и астрономия в курсе обучения аспирантов, проходящих подготовку по специальности 01.04.05 Оптика. Ее изучение направлено на более глубокую теоретическую и практическую подготовку аспирантов в части физики явлений, сопровождающих атомные и молекулярные процессы в различных средах, умения применять эти знания для создания и исследования новых приборов и материалов, перспективных в плане практического применения.

Данная дисциплина выбирается по согласованию с научным руководителем в случае соответствия тематике будущей научной работе аспиранта.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП

При ее изучении используются знания и навыки, полученные аспирантами при изучении курсов общей и теоретической физики, атомной физики и квантовой механики и предшествующих курсов специальных дисциплин по профилю Оптика.

Актуальность изучения дисциплины определяется важной ролью физики атомных столкновений в астрофизике и физике плазмы, физике поверхности, вакуумной электронике и в других разделах современной науки и техники. Тематика курса соответствует приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации: «Индустрия наносистем и материалов», «Информационно-телекоммуникационные системы».

Курс читается для аспирантов на 2-м году их пребывания в аспирантуре. Обучение ведется в форме аудиторных занятий и самостоятельной подготовки.

В результате прохождения курса обучения по данной программе, аспирант должен освоить базовые принципы физики твердого тела в русле проблематики лаборатории (группы), где работает его научный руководитель, и где будет проходить самостоятельная научная работа аспиранта. Изучение данной дисциплины и специфика подачи отдельных вопросов может варьироваться в зависимости от индивидуального плана работы аспиранта, согла-

сованного с его научным руководителем в целях оптимального соответствия решаемым задачам.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Процесс изучения дисциплины «Физика атомных столкновений» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ООП по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия:

3.1. Универсальные компетенции:

- способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях (УК-1);

3.2. Общепрофессиональные компетенции:

- способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в соответствующей профессиональной области с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий (ОПК-1).

3.3. Профессиональные компетенции:

- способность формулировать задачи экспериментальных исследований, планировать и реализовывать постановку экспериментов, направленных на решение поставленных задач (ПК-1);

- способность проводить самостоятельные исследования, владеть современными методами оптической спектроскопии (ПК-2).

- способность принимать участие в разработке новых методов и методических подходов в научных исследованиях в области оптики (ПК-3).

По окончании изучения дисциплины аспиранты должны будут

знать:

- основные методы физики атомных столкновений для исследований элементарных процессов соударения частиц;

- основы атомной физики и квантовой механики, необходимые для понимания процессов взаимодействия частиц при их соударениях,

- основные закономерности процессов возбуждения, ионизации и изменения заряда атомов, ионов и молекул при столкновениях с фотонами, электронами и ионами,

- основные принципы применения методов физики атомных столкновений для диагностики поверхности и процессов в плазме;

уметь:

- определять основные характеристики процессов явлений, сопровождающихся соударениями атомных частиц,
- феноменологически описывать процессы ионизации, возбуждения, потерь энергии частицей при взаимодействии фотонов, электронов и ионов с газами, плазмой и поверхностью твердого тела;

владеть опытом:

- самостоятельного изучения и анализа специальной научной и методической литературы, связанной с проблемами физики поверхности и физики плазмы;
- экспериментальных исследований процессов атомных столкновений, свойств поверхности твердых тел, взаимодействия плазма-стенка на современном инновационном оборудовании.

4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Структура и содержание дисциплины «Физика атомных столкновений» общая трудоемкость дисциплины составляет 4 зачетные единицы (144 часа).

4.1. Объем дисциплины и количество учебных часов:

Вид учебной работы	Трудоемкость (в часах)
Аудиторные занятия	54
Лекции	54
Семинары	-
Лабораторные занятия	-
Другие виды учебной работы (зачет по темам курса)	
Внеаудиторные занятия	94
Самостоятельная работа аспиранта	94
ИТОГО	144
Вид итогового контроля	зачет

4.2. Структура дисциплины

№ п/п	Тема	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу, и трудоемкость (в часах)			
		Лек.	Сем.	Лаб.	СР
1	Введение, основные понятия	4			7
2	Межатомные потенциалы взаимодействия. Рассеяние атомов при столкновениях.	5			8
3	Ионизация и перезарядка при высоких энергиях	5			8

4	Теория медленных атомных столкновений.	5			8
5	Процессы во внутренних оболочках	5			8
6	Столкновения возбужденных атомов	5			8
7	Электронно-атомные столкновения	5			8
8	Взаимодействие атомов и молекул с излучением.	5			8
9	Экспериментальные методы, применяемые в физике электронных и атомных столкновений.	5			9
10	Столкновения ионов в твердых телах	5			9
11	Приложения физики атомных столкновений	5			9
	ИТОГО	54			90

4.3. Содержание разделов и тем

1. Введение, основные понятия

Области использования атомных столкновений.

Характеристики парного столкновения.

Классификация элементарных процессов.

Измеряемые величины.

Экспериментальные методы (общая характеристика).

Задачи теории.

Теоретические методы (общая характеристика).

2. Межатомные потенциалы взаимодействия. Рассеяние.

Упругое рассеяние.

"Радужное" рассеяние и сияние.

Квантовые явления при рассеянии.

Модели межатомных потенциалов.

Обратная задача рассеяния.

3. Ионизация и перезарядка при высоких энергиях.

Борновское приближение.

Импульсное приближение.

Кулоновская ионизация.

4. Теория медленных атомных столкновений.

Адиабатическое приближение.

Полуклассическое приближение.

Электронные состояния квазимолекулы:

а) структура свободного атома

б) квантовые числа и волновые функции двухатомных систем

в) правило непересечения и корреляционные диаграммы.

Метод молекулярных орбиталей. Диаграммы МО.

Приближение двух состояний.

Неадиабатическая связь. Правила отбора.

Линейная модель Ландау-Зинера.

Нелинейные модели неадиабатической связи.

Резонансная перезарядка.

Нерезонансная перезарядка.

Возбуждение и ионизация.

5. Процессы во внутренних оболочках.

Кулоновская ионизация.

Ионизация вследствие неадиабатических переходов.

Распад вакансий:

- а) радиационные переходы
- б) Оже переходы

6. Столкновения возбужденных атомов.

Передача возбуждения и ионизация.

Столкновения многозарядных ионов.

Расчет полных и парциальных сечений.

Исследование захвата в различные состояния.

7. Электронно-атомные столкновения.

Упругое рассеяние электрона на атоме.

Неупругое столкновение электрона с атомом:

- а) общая теория столкновения
- б) возбуждение атома
- в) ионизация атома
- г) разрушение отрицательного иона.

Электрон-ионная рекомбинация.

8. Взаимодействие атомов и молекул с излучением.

Систематика спектров многоэлектронных атомов. Тонкая и сверхтонкая структура атомных спектров. Вращательные, колебательные и электронные состояния двухатомных молекул. Угловые моменты в атомах и молекулах. Электрическое дипольное излучение: правила отбора, поляризация. Многофотонные радиационные переходы в атомах и молекулах. Ширины и профили спектральных линий. Лазеры, как источники света для спектроскопии. Лазерная спектроскопия атомов и молекул: спектроскопия поглощения, лазерно-индуцированная флуоресценция, ионизационная спектроскопия.

9. Экспериментальные методы, применяемые в физике электронных и атомных столкновений.

- а) Ионные источники

Источники с электронным ударом.

Дуговые источники.

Высокочастотные источники.

Источники с поверхностной ионизацией.

Источники многозарядных ионов:

- 1) с электронным пучком
- 2) с электронно-циклотронным резонансом
- 3) с лазерной плазмой

- б) Методы анализа ионов и электронов

Магнитные и электростатические спектрометры.

Динамические спектрометры.

- в) Методы анализа электромагнитного излучения

Спектрометры видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучения.

10. Столкновения ионов в твердых телах

Основные процессы при соударении ионов в твердых телах.
 Распыление. Эмиссия возбужденных частиц.
 Рассеяние ионов на поверхности, обратное Резерфордское рассеяние.
 Потери энергии при прохождении ионов в твердом теле.
 Пробеги. Ионная имплантация

11. Приложения физики атомных столкновений

Процессы в термоядерной плазме.
 Диагностика термоядерной плазмы.
 Методы анализа вещества.
 Ионные и плазменные технологии.

5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Технология процесса обучения по дисциплине «Физика атомных столкновений» включает в себя следующие образовательные мероприятия:

- а) аудиторные занятия (лекционно-семинарская форма обучения);
- б) самостоятельная работа студентов;
- г) контрольные мероприятия в процессе обучения и по его окончанию;

В учебном процессе используются как активные, так и интерактивные формы проведения занятий: дискуссия, метод поиска быстрых решений в группе, мозговой штурм.

Аудиторные занятия проводятся в интерактивной форме с использованием мультимедийного обеспечения (ноутбук, проектор) и технологии проблемного обучения.

Электронная презентация позволяет отобразить процессы в динамике, что позволяет улучшить восприятие материала и четко структурировать материал занятия.

Самостоятельная работа организована в соответствии с технологией проблемного обучения и предполагает следующие формы активности:

- самостоятельная проработка учебно-проблемных задач, выполняемая с привлечением основной и дополнительной литературы;
- поиск научно-технической информации в открытых источниках с целью анализа и выявления ключевых особенностей.

Основные аспекты применяемой технологии проблемного обучения:

- обучение способности быстро сориентироваться в физике протекающих процессов атомных столкновений при изучении конкретного явления, самостоятельно изучить литературу по изучаемому вопросу и составить план исследований;
- решаемые проблемные задачи стимулируют познавательную деятельность и научно-исследовательскую активность аспирантов.

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ

Цель контроля - получение информации о результатах обучения и степени их соответствия результатам обучения.

Комплект оценочных средств для текущего контроля

Текущий контроль успеваемости, т.е. проверка усвоения учебного материала, регулярно осуществляемая на протяжении семестра. Текущий контроль знаний аспирантов реализуется в виде выступлений на семинарах по индивидуальным домашним заданиям, ответам на тестовые вопросники, проведением теоретических зачетов.

Перечень контрольных вопросов, позволяющих оценить качество усвоения учебного материала:

1. Понятие сечения и элементарные процессы при атомных столкновениях. Области использования атомных столкновений.
2. Теоретические модели межатомных потенциалов.
3. Квантовые эффекты при рассеянии атомов и ионов.
4. Обратная задача рассеяния. Метод Фирсова.
5. Борновское приближение.
6. Импульсное приближение.
7. Кулоновская ионизация.
8. Адиабатическое приближение.
9. Электронные состояния квазимолекулы:
10. Метод молекулярных орбиталей. Диаграммы МО.
11. Приближение двух состояний. Неадиабатическая связь. Правила отбора.
12. Линейная модель Ландау-Зинера.
13. Нелинейные модели неадиабатической связи.
14. Резонансная перезарядка.
15. Нерезонансная перезарядка.
16. Возбуждение и ионизация при атомных столкновениях.
17. Образование вакансий во внутренних оболочках.
18. Каналы распада вакансий.
19. Коррелированные переходы.
20. Распад вакансий в квазимолекуле.
21. Передача возбуждения и ионизация пары столкновениях возбужденных атомов.
22. Столкновения многозарядных ионов с атомами.
23. Упругое рассеяние электрона на атоме.
24. Неупругое столкновение электрона с атомом:
25. Разрушение отрицательного иона.
26. Электрон-ионная рекомбинация.
27. Систематика спектров многоэлектронных атомов.
28. Вращательные, колебательные и электронные состояния двухатомных молекул.
29. Электрическое дипольное излучение: правила отбора, поляризация.
30. Многофотонные радиационные переходы в атомах и молекулах.
31. Лазерная спектроскопия атомов и молекул: спектроскопия поглощения, лазерно-индуцированная флуоресценция, ионизационная спектроскопия.

32. Источники ионов с электронным ударом, дуговые, высокочастотные, с поверхностной ионизацией. Особенности их применения.
33. Источники многозарядных ионов:
 - а) с электронным пучком
 - б) с электронно-циклотронным резонансом
 - в) с лазерной плазмой
34. Методы анализа ионов и электронов
Магнитные и электростатические спектрометры.
Динамические спектрометры.
35. Методы анализа электромагнитного излучения
Спектрометры видимого, ультрафиолетового и рентгеновского излучения.
36. Основные процессы при соударении ионов в твердых телах.
Распыление. Эмиссия возбужденных частиц. Рассеяние.
37. Рассеяние ионов на поверхности, обратное резерфордовское рассеяние.
38. Потери энергии при прохождении ионов в твердом теле.
Пробеги. Ионная имплантация
39. Основные элементарные процессы в плазме.
40. Основные методы диагностики термоядерной плазмы.
41. Методы анализа вещества.
42. Ионные и плазменные технологии.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1. Основная литература

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. (Нерелятивистская теория), Физ.мат.гиз., М., 1963.
2. Дж.Хастед. Физика атомных столкновений. Мир, М., 1965.
3. И.Мак-Даниель. Процессы столкновений в ионизированных газах. Мир, М., 1967.
4. Н.Мотт, Г.Месси. Теория атомных столкновений. Мир, М., 1969.
5. Е.Е.Никитин. Теория элементарных атомно-молекулярных процессов в газах. Химия, М., 1970.
6. Р.Мак-Мики, Б.Сатилиф. Квантовая механика молекул. Мир. М., 1972.
7. Б.М.Смирнов. Асимптотические методы в теории атомных столкновений. М. Атомиздат, 1973.
8. Распыление твёрдых тел ионной бомбардировкой. Ред. Бериша, М., Мир, т.1, 1984, т.2, 1986.
9. Методы анализа поверхности. – Ред. Зандера, М., Мир, 1979.
10. Векслер В.И. Вторичная ионная эмиссия металлов. М., Наука, 1978.
11. Применение электронной спектроскопии для анализа поверхности. Под ред. Х.Ибаха, пер. с англ. Зинатне, Рига, 1980.
12. Анализ поверхности методами Оже- и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Под ред. Д.Бриггса и М.П.Сиха; пер с англ. М., Мир, 1987.
13. Л.А.Вайнштейн, И.И.Собельман, Е.А.Юков. Возбуждение атомов и уширение спектральных линий. М., 1979.
14. Л.А.Вайнштейн, В.П.Шевелько. Структура и характеристики ионов в горячей плазме. М., 1986.
15. И.И. Собельман. Введение в теорию атомных спектров. М. Наука, 1977.
16. В.Демтрёдер. Лазерная спектроскопия, М. Наука, 1985
17. Р.Зар. Теория углового момента. М. Мир, 1993

18. М.А.Ельяшевич. Атомная и молекулярная спектроскопия. М. Наука, 1962.
19. Э.Зандерна Физика поверхности: Пер. с англ. / Э. Зенгуил. Москва : Мир, 1990. 536 с.
20. К. Оура [и др.] Введение в физику поверхности; Российская академия наук, Дальневосточное отделение, Институт автоматики и процессов управления.— М. : Наука, 2006. 490 с.
21. А.М. Шикин. Взаимодействие фотонов и электронов с твердым телом. СПб, ВВМ, 2008, - 294 с.

7.2. Интернет-ресурсы

Отечественные журналы:

1. Известия вузов. Материалы электронной техники (<http://met.misis.ru/index.php/jour> ; доступ с 2012 по текущий год)
2. Квантовая электроника (<http://www.quantum-electron.ru/pa.phtml?page=onlcont>; доступ с 1971 по 2012)
3. Микроэлектроника (http://elibrary.ru/title_about.asp?id=7900; доступ с 2007 по текущий год) Отечественные журналы в переводе:
 1. Quantum Electronics (<http://iopscience.iop.org/1063-7818/>; доступ с 1971 по текущий год)
 2. Russian Microelectronics (<http://link.springer.com/journal/11180> ; доступ с 2009 по текущий год)

Иностранные журналы:

Advanced Electronic Materials

(<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%292199-160X> ; доступ с 2015 года)

1. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering (<http://onlinelibrary.wiley.com/journal/10.1002/%28ISSN%291931-4981> ; доступ с 2006 по текущий год)
2. Journal of Electronic Materials (<http://link.springer.com/journal/11664>; доступ с 1972 по текущий год)
3. Microelectronic Engineering (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01679317>; доступ с 2006 по текущий год)
4. Microelectronics Journal (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00262692>; доступ с 2006 по текущий год)
5. Microwave Journal (<http://www.microwavejournal.com/publications/> ; доступ с 2002 по текущий год)
6. Nature Photonics (<http://www.nature.com/nphoton/index.html>; доступ с 2007 по текущий год)
7. Opto-Electronics Review (<http://link.springer.com/journal/11772>; доступ с 2006 по 2014)
8. Progress in Quantum Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00796727> ; доступ с 2006 по текущий год)
9. Solid-State Electronics (<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00381101>; доступ с 2006 по текущий год)

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

1. Лекционная аудитория
2. Мультимедийный проектор
3. Персональный компьютер
4. Компьютерный класс
5. Учебно-научная лаборатория, оборудованная установкой дифракции медленных электронов.
6. Учебно-научная лаборатория, оборудованная аппаратурой для анализа поверхности методом электронной оже-спектроскопии.
7. Лаборатория физики атомных столкновений в твердых телах с установкой для комплексного неразрушающего исследования состава и структуры приповерхностных слоев и пленок нанометровых толщин по рассеянию ионов средних энергий —РИСЭ и установкой для фотоэлектронной спектроскопии.