

ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО НТС ЛАПЛАЗ

Протокол № 3

от 30.08.2021 г.

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

**КВАНТОВО-СТАТИСТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ПЛОТНОЙ ГОРЯЧЕЙ ПЛАЗМЫ**

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 16.04.02 Высокотехнологические плазменные и  
энергетические установки

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
3	3	108	8	24	0	40	0	Э
Итого	3	108	8	24	0	40	0	

## АННОТАЦИЯ

Рассмотрены широко применяемые в настоящее время квантово-статистические модели высокотемпературной плазмы – модели Томаса-Ферми, Хартри-Фока и Хартри-Фока-Слэтера, обобщенные на произвольные температуры и плотности в приближении среднего атома. Изложение начинается с достаточно простой и в то же время универсальной обобщенной модели Томаса – Ферми для вещества с заданной температурой и плотностью. Затем изучаются методы получения уровней энергии и волновых функций, сечений элементарных процессов в плазме. Получение более совершенных моделей проводится на основе единого вариационного принципа, что позволяет увидеть иерархию моделей и проследить пределы применимости различных приближений.

Решение систем нелинейных уравнений, возникающих при построении моделей самосогласованного поля, требует разработки специальных итерационных методов, в которых широко используются различные физические приближения. Особое внимание уделяется узким местам, требующим больших затрат машинного времени, что позволяет построить эффективные и надежные алгоритмы.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Цель курса – показать, как на основе модели высокотемпературной плазмы – модели Томаса-Ферми, Хартри-Фока и Хартри-Фока-Слэтера, обобщенные на произвольные температуры и плотности в приближении среднего атома, вычислять спектральные коэффициенты поглощения фотонов, росселандовы пробеги и уравнения состояния. Основная задача курса — обучить студентов применению этих методов для проведения расчетов, описывающих гидродинамические процессы с переносом излучения в высокотемпературной плазме, например, при воздействии мощного лазерного излучения на вещество.

### 2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Предлагаемый учебно-методический комплекс предназначен для студентов Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ. Курс односеместровый.

Знания, полученные при изучении курса «Квантово-статистические модели горячей плазмы», требуются для обучения современным методам моделирования неравновесных процессов в плазме, и требуются для успешного усвоения курсов Кинетические модели плазмы, Математические модели современной астрофизики, Общей теории относительности. Предполагается знакомство студентов с курсами статистической физики, квантовой механики, кинетики и гидродинамики.

### 3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

Код и наименование компетенции	Код и наименование индикатора достижения компетенции
--------------------------------	--

Профессиональные компетенции в соответствии с задачами и объектами (областями знаний) профессиональной деятельности:

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
Обработка и обобщение результатов исследований математическими методами	Результаты исследований, математические методы обработки экспериментальных данных	ПК-2 [1] - Способен использовать математические методы обработки результатов исследований и их обобщения  <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 25.033	3-ПК-2[1] - Знать основные законы высшей математики, необходимые для математической обработки результатов исследований; основные законы теоретической физики, необходимые для обобщения и интерпретации результатов исследований; ; У-ПК-2[1] - Уметь: применять законы высшей математики и физики к обобщению и интерпретации исследований; проводить критический анализ результатов;; В-ПК-2[1] - Владеть: методами создания и анализа математических моделей; методами обработки экспериментальных данных
Создание теоретических и математических моделей, описывающих основные процессы в плазме и плазменных установках	Теоретические и математические модели, описывающие основные процессы в плазме и плазменных установках	ПК-3.1 [1] - Способен к созданию теоретических и математических моделей, описывающих основные процессы в плазме и плазменных установках, под конкретную научно-исследовательскую задачу	3-ПК-3.1[1] - Знать основы теоретических и математических моделей, описывающих основные процессы в плазме и плазменных установках; У-ПК-3.1[1] - Уметь создавать теоретические и математические модели, описывающие основные процессы в плазме и плазменных

		<i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	установках; В-ПК-3.1[1] - Владеть навыком создания теоретических и математических моделей, описывающих основные процессы в плазме и плазменных установках
--	--	--	--

#### 4. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Разделы учебной дисциплины, их объем, сроки изучения и формы контроля:

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>3 Семестр</i>						
1	Часть 1	1-8	8/8/0		25	КИ-8	З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, З-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1
2	Часть 2	9-16	0/16/0		25	КИ-16	З-ПК-2, У-ПК-2, В-ПК-2, З-ПК-3.1, У-ПК-3.1, В-ПК-3.1
	<i>Итого за 3 Семестр</i>		8/24/0		50		
	<b>Контрольные</b>				50	Э	З-ПК-

	мероприятия за 3 Семестр						2, У- ПК-2, В- ПК-2, 3-ПК- 3.1, У- ПК- 3.1, В- ПК- 3.1
--	--------------------------	--	--	--	--	--	--

\* – сокращенное наименование формы контроля

\*\* – сумма максимальных баллов должна быть равна 100 за семестр, включая зачет и (или) экзамен

Сокращение наименований форм текущего контроля и аттестации разделов:

Обозначение	Полное наименование
КИ	Контроль по итогам
Э	Экзамен

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>3 Семестр</i>	8	24	0
<b>1-8</b>	<b>Часть 1</b>	8	8	0
1 - 2	<b>Обобщенная модель Томаса-Ферми для вещества с заданной температурой и плотностью. Основные свойства потенциала Томаса – Ферми.</b> О статистике Ферми -Дирака для системы взаимодействующих частиц. Вывод уравнения Пуассона-Ферми-Дирака для атомного потенциала. Постановка краевой задачи. Потенциал Томаса – Ферми как решение уравнения Пуассона, зависящее только от двух переменных. Основные свойства функций Ферми – Дирака. Модель постоянной плотности свободных электронов при высоких температурах. Модель Томаса – Ферми для температуры равной нулю.	Всего аудиторных часов		
		2	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
3 - 5	<b>Методы численного интегрирования уравнения для потенциала Томаса – Ферми. Модель Томаса – Ферми для смеси веществ. Использование модели Томаса-Ферми для описания вещества.</b> Метод <<стрельбы>>. Графики Лэттера.	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0

	<p>Линеаризация уравнения. Разностная схема. &lt;&lt;Прогонка&gt;&gt; с итерациями.</p> <p>Постановка задачи. Условия термодинамического равновесия.</p> <p>Линеаризация системы уравнений.</p> <p>Итерационная схема и метод прогонки.</p> <p>Обсуждение результатов расчетов.</p> <p>Средняя степень ионизации вещества по модели Томаса – Ферми.</p> <p>О поправках к модели Томаса – Ферми.</p>			
6 - 8	<p><b>Описание состояний электронов в сферической атомной ячейке. Методы вычисления волновых функций электронов.</b></p> <p>Модель атома со средними числами заполнения.</p> <p>Получение выражения для плотности электронов с помощью квазиклассического приближения для волновых функций.</p> <p>Численные и приближенные методы решения уравнения Шрёдингера.</p> <p>Вариационный метод и метод пробного потенциала.</p> <p>Квазиклассическое приближение.</p>	Всего аудиторных часов		
		3	3	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-16	<b>Часть 2</b>	0	16	0
9	<p><b>Волновые функции дискретного спектра. Волновые функции непрерывного спектра.</b></p> <p>Фазовый метод определения собственных значений энергии и волновых функций для уравнений Шрёдингера и Дирака.</p> <p>Водородоподобные и квазиклассические волновые функции.</p> <p>Релятивистские волновые функции.</p> <p>Использование квазиклассики для нормировки решений уравнения Шрёдингера.</p> <p>Нормировка релятивистских функций непрерывного спектра.</p>	Всего аудиторных часов		
		0	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
10 - 12	<p><b>Квантовомеханическое уточнение обобщенной модели Томаса – Ферми. Метод самосогласованного поля Хартри – Фока для вещества с заданной. Модель Хартри – Фока – Слэтера.</b></p> <p>Самосогласованное поле Хартри для среднего атома.</p> <p>Вычислительный алгоритм.</p> <p>Анализ результатов расчетов для железа.</p> <p>Вариационный принцип, основанный на требовании минимума большого термодинамического потенциала.</p> <p>Уравнения самосогласованного поля в приближении Хартри – Фока.</p> <p>Квазиклассическое приближение для обменного взаимодействия.</p>	Всего аудиторных часов		
		0	6	0
		Онлайн		
		0	0	0

	Уравнения модели Хартри – Фока – Слэтера.			
13 - 14	<b>Модифицированная модель Хартри – Фока – Слэтера. Система уравнений Хартри – Фока – Слэтера в сферической атомной ячейке.</b> Уравнения модели Хартри – Фока – Слэтера с квазиклассическим приближением для электронов непрерывного спектра . Условие термодинамической согласованности. Периодические граничные условия в приближении усредненных сферических ячеек. Электронная плотность и атомный потенциал в модели Хартри – Фока – Слэтера с учетом зон.	Всего аудиторных часов		
		0	4	0
		Онлайн		
		0	0	0
15 - 16	<b>Итерационный метод решения системы уравнений Хартри – Фока – Слэтера. Учет индивидуальных состояний ионов.</b> Основы алгоритма. Расчет зонной структуры спектра электронов. Приближение постоянной плотности для свободных электронов в случае разреженной плазмы. Функционал плотности системы электронов с учетом индивидуальных состояний ионов. Уравнения ионного метода Хартри – Фока – Слэтера в ячеечном и плазменном приближениях. Волновые функции и уровни энергии ионов в плазме.	Всего аудиторных часов		
		0	4	0
		Онлайн		
		0	0	0

Сокращенные наименования онлайн опций:

Обозначение	Полное наименование
ЭК	Электронный курс
ПМ	Полнотекстовый материал
ПЛ	Полнотекстовые лекции
ВМ	Видео-материалы
АМ	Аудио-материалы
Прз	Презентации
Т	Тесты
ЭСМ	Электронные справочные материалы
ИС	Интерактивный сайт

## 5. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В курсе используются традиционные и современные образовательные технологии, включая лекции с разбором задач и примеров, компьютерные технологии.

## 6. ФОНД ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ

Фонд оценочных средств по дисциплине обеспечивает проверку освоения планируемых результатов обучения (компетенций и их индикаторов) посредством мероприятий текущего, рубежного и промежуточного контроля по дисциплине.

Связь между формируемыми компетенциями и формами контроля их освоения представлена в следующей таблице:

Компетенция	Индикаторы освоения	Аттестационное мероприятие (КП 1)
ПК-2	З-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-2	Э, КИ-8, КИ-16
ПК-3.1	З-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-16
	У-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-16
	В-ПК-3.1	Э, КИ-8, КИ-16

### Шкалы оценки образовательных достижений

Шкала каждого контрольного мероприятия лежит в пределах от 0 до установленного максимального балла включительно. Итоговая аттестация по дисциплине оценивается по 100-балльной шкале и представляет собой сумму баллов, заработанных студентом при выполнении заданий в рамках текущего и промежуточного контроля.

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

Сумма баллов	Оценка по 4-ех балльной шкале	Оценка ECTS	Требования к уровню освоению учебной дисциплины
90-100	5 – <i>«отлично»</i>	A	Оценка «отлично» выставляется студенту, если он глубоко и прочно усвоил программный материал, исчерпывающе, последовательно, четко и логически стройно его излагает, умеет тесно увязывать теорию с практикой, использует в ответе материал монографической литературы.
85-89	4 – <i>«хорошо»</i>	B	Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, не допуская существенных неточностей в ответе на вопрос.
75-84		C	
70-74		D	
65-69	3 – <i>«удовлетворительно»</i>	E	Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он имеет знания только основного материала, но не усвоил его деталей, допускает неточности, недостаточно правильные формулировки, нарушения логической последовательности в изложении программного материала.
60-64			
Ниже 60	2 – <i>«неудовлетворительно»</i>	F	Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает

			существенные ошибки. Как правило, оценка «неудовлетворительно» ставится студентам, которые не могут продолжить обучение без дополнительных занятий по соответствующей дисциплине.
--	--	--	---

## **7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 538.9 Ф80 Лекции по физике экстремальных состояний вещества : , Москва: Издательский дом МЭИ, 2013

### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 530 К43 Полевые методы теории многих частиц : , Москва: Либроком, 2010

2. 534 З-50 Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений : , Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер, Москва: Физматлит, 2008

### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

<https://online.mephi.ru/>

<http://library.mephi.ru/>

## **8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

## **9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ СТУДЕНТОВ**

Методические рекомендации по освоению теоретического материала.

Для успешного изучения курса необходимо придерживаться определенной методики занятий. Основное условие успеха — систематические занятия.

Для успешного освоения теоретической части курса необходимо регулярно посещать лекции и вести конспект. После каждой лекции следует внимательно разбирать лекционный материал, причём при необходимости следует проделывать некоторые дополнительные выкладки, если такие были оставлены лектором для самостоятельной работы. Перед началом каждой лекции имеет смысл просмотреть конспект, чтобы усвоение нового материала

проходило лучше, так как в большинстве случаев изложение опирается на материал, прочитанный на предыдущих занятиях.

Для полного освоения курса недостаточно изучать лишь лекционный материал. В ходе освоения курса следует читать книги, предложенные в списке литературы по курсу. Настоятельно рекомендуется также использовать литературу, обозначенную как «дополнительная», а также самостоятельно или с помощью преподавателя искать и другие источники. При работе с литературой почти бесполезно только читать предложенный материал. Следует продельвать все или хотя бы основные выкладки. Важно осознавать, что только самостоятельно сделанные выкладки приводят к пониманию материала. Все, что осталось непонятым, следует спросить у преподавателя на ближайшем занятии. Если даже целый раздел остался неясным, это не показатель ваших способностей; скорее всего вы еще не начали задавать вопросы себе и другим. А изучить теоретическую физику без вопросов: зачем?, почему?, откуда? — невозможно. То же касается и разбора лекционного материала.

Методические рекомендации для подготовки к семинарским занятиям и решению задач.

Программа курса и семестровый календарный план составлены так, что темы семинарских занятий следуют за темами лекций. И программа курса, и семестровый календарный план доступны каждому студенту на сайте учебного управления университета. Под-готовиться к очередному семинарскому занятию - это, прежде всего, проработать лекционный материал, согласно методическим рекомендациям, данным выше. Все невыясненные вопросы теории можно (и нужно) задать преподавателю в начале семинарского занятия. На семинаре, как правило, разбираются вопросы и качественные задачи, дающие возможность более глубоко постичь изучаемый раздел курса. Кроме того, на семинаре учат пра-вильно ставить и решать задачи, анализировать решение задач. По пройденной на семинаре теме даются задачи для самостоятельного (домашнего) решения. Усвоение курса во многом зависит от осмысленного выполнения домашнего задания, вдумчивого решения большого количества задач.

При решении задач целесообразно руководствоваться следующими правилами.

Прежде всего нужно хорошо вникнуть в условие задачи, записать кратко ее усло-вие.

Следует прикинуть, какие основные законы и уравнения и в каких приближениях следует использовать и записать их, после чего попытаться решить.

Задача должна быть сначала решена в максимально общем виде.

Получив решение в общем виде, нужно проверить, правильную ли оно имеет раз-мерность.

Если это возможно, исследовать поведение решения в предельных случаях и изобразить характер изучаемой зависимости графически.

Если возможно, при получении того или иного результата, следует указать границы его применимости.

Решение задач принесет наибольшую пользу только в том случае, если вы решаете задачи самостоятельно. Решить задачу без помощи, без подсказки часто бывает нелегко и не всегда удается. Но даже не увенчавшиеся успехом попытки найти решение, если они предпринимались достаточно настойчиво, приносят ощутимую пользу, так как развивают мышление и укрепляют волю. Не следует бояться непривычно длинных математических выкладок, т.к. подобные «длинные» задачи приближены к реальным задачам, с которыми вы можете столкнуться в будущем в научной или другой работе.

Методические рекомендации для подготовки к контрольным и проверочным работам.

Контрольные работы проводятся для проверки качества усвоения материала и выполнения домашних заданий студентами. Они основываются строго на пройденном материале и не выходят за рамки излагаемого курса. Своевременное изучение лекционных материалов и выполнение домашних заданий гарантирует успешное выполнение контрольных и проверочных работ. При подготовке следует руководствоваться общепринятыми установками, т.е. повторить изученный материал, запомнить основные идеи, принципы и результаты курса. Не следует пытаться «вызубрить» материал, достаточно понять и запомнить логику вывода тех или иных результатов и решения задач и осознать их физический и математический смысл. При выполнении контрольной или проверочной работы необходимо записывать все основные шаги при решении задачи, не «перескакивая» к какому-то промежуточному или окончательному результату без каких-либо на то физических или математических обоснований.

Никаких особых требований к оформлению работ нет. Работа должна быть записана так, чтобы была понятна логика решения задач. Окончательный ответ необходимо выделить каким-либо способом так, чтобы проверяющему было понятно, что это и есть ответ к задаче.

## **10. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ**

Проведение практических занятий и выполнение самостоятельных работ

Студенты должны, используя прослушанный на лекциях материал, научиться решать задачи по курсу. Следует использовать различные приемы вовлечения студентов в творческий процесс освоения учебного материала: опрос студентов по содержанию прочитанных лекций, вызов студентов к доске для решения текущих задач, самостоятельное решение задачи со сверкой промежуточных и конечного результатов решения, показ преподавателем на доске решения типовых задач, самостоятельные работы.

Организация контроля

Контроль знаний осуществляется и путем проведения контрольных или самостоятельных работ с последующей проверкой.

На основании этих результатов выставляется внутрисеместровый зачет/экзамен.

Проведение зачетов и экзаменов

Для допуска к аттестации необходимо иметь положительные оценки по каждой теме. Во время аттестации студент получает индивидуальный билет и готовит ответы на вопросы по курсу.

Автор(ы):

Новиков Владимир Григорьевич, д.ф.-м.н.,  
профессор

Рецензент(ы):  
С.В. Попруженко