

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ  
КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ЛАПЛАЗ

Протокол № 1/08-577

от 29.08.2024 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ  
ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ

Направление подготовки  
(специальность)

[1] 16.03.02 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, экз./зач./КР/КП
8	1	36	12	12	0		12	0	3
Итого	1	36	12	12	0	0	12	0	

## АННОТАЦИЯ

В первой части курса изучаются процессы взаимодействия излучений ядерного диапазона энергий с веществом, принципы формирования сигнала в различных типах детекторов излучений, применение детекторов в современных диагностических комплексах.

Во второй части курса изучаются принципы построения диагностик систем с инерциальным удержанием плазмы, поведение детекторов в экстремальных условиях высоких нагрузок, диагностика термоядерных ионов и нейтронов.

### 1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения учебной дисциплины являются углубленное изучение физических принципов, заложенных в основу диагностики плотной горячей термоядерной плазмы.

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

Дисциплина является продолжением курсов по физике плазмы, ядерно-физическим методам.

### 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
расчетно-экспериментальный с элементами научно-исследовательского			
Использование основных законов физики плазмы и ее взаимодействия с веществом для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов	Основные законы физики плазмы и ее взаимодействия с веществом для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов	ПК-2.3 [1] - Способен использовать основные законы физики плазмы и ее взаимодействия с веществом для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов  <i>Основание:</i>	З-ПК-2.3[1] - Знать основные понятия и законы физики плазмы и ее взаимодействия с веществом, основные понятия, законы и модели, используемые для описания, изучения и оценки параметров и характеристик исследуемых

		Профессиональный стандарт: 40.011	физических объектов ; У-ПК-2.3[1] - Уметь использовать основные законы физики плазмы и ее взаимодействия с веществом для описания и оценок параметров и характеристик исследуемых физических объектов; В-ПК-2.3[1] - Владеть методами получения, анализа и описания параметров и характеристик исследуемых физических объектов на основе законов физики плазмы и ее взаимодействия с веществом
--	--	-----------------------------------	--

#### 4. ВОСПИТАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ ДИСЦИПЛИНЫ

Направления/цели воспитания	Задачи воспитания (код)	Воспитательный потенциал дисциплин
-----------------------------	-------------------------	------------------------------------

#### 5. СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

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

№ п.п	Наименование раздела учебной дисциплины	Недели	Лекции/ Практи. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>8 Семестр</i>						
1	Раздел 1	1-8	8/8/0		25	КИ-8	3-ПК-2.3, У-ПК-2.3, В-ПК-2.3
2	Раздел 2	9-12	4/4/0		25	КИ-12	3-ПК-2.3, У-ПК-2.3, В-ПК-2.3
	<i>Итого за 8 Семестр</i>		12/12/0		50		

	<b>Контрольные мероприятия за 8 Семестр</b>				50	3	3-ПК-2.3, У-ПК-2.3, В-ПК-2.3
--	---	--	--	--	----	---	------------------------------------

\* – 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
З	Зачет

### КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>8 Семестр</i>	12	12	0
<b>1-8</b>	<b>Раздел 1</b>	8	8	0
1	<b>Основы спектрометрии</b> Основы спектрометрии импульсного рентгеновского излучения. Понятия импульсного излучения, стационарного излучения. Длительность излучения в системах с магнитным удержанием и в инерциальном синтезе. Механизм генерации и спектр рентгеновского излучения в плазме. Классические методы измерения спектра, температуры, выхода излучения. Численные оценки.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	<b>Метод фильтров.</b> Метод фильтров. Многодетекторные системы для измерения импульсных излучений. Физические основы метода пассивных фильтров. Соотношения между показаниями детекторов и характеристиками излучения, уравнение Фредгольма. Восстановление спектра излучения. Метод эффективных энергий. Метод краевых фильтров, метод фильтров Росса, метод флуоресцентных эмиттеров. Характеристики и особенности. Применение в диагностике горячей плазмы.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	<b>Детекторы и высокое энерговыделение</b> Поведение детекторов импульсного рентгеновского излучения в условиях высоких энерговыделений. Сравнение с условиями классической ядерной физики. Физические процессы в детекторах при больших плотностях энергии.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	<b>Камера обскура. Пластины Френеля</b> Камера-обскура, физические принципы, основные характеристики. Уравнение, связывающее параметры изображения с пространственными характеристиками плазмы (уравнение Абеля). Особенности абелизации. Пространственное разрешение и светосила. Зонные	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0

	пластинки Френеля. Принцип действия и основные характеристики.			
5	<b>Фотоэмульсионный метод. МКП</b> Классический фотоэмульсионный метод. Элементарные физические процессы в детекторе. Способы получения информации. Микроканальные пластины (МКП), устройство, принцип действия, основные характеристики. Шевронная сборка МКП. Эффективность регистрации различных видов излучений. Временные свойства, пространственное разрешение. Регистрация изображения с временным разрешением.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
6	<b>ПЗС матрицы</b> ПЗС-линейки, ПЗС-матрицы. Принцип действия, основные характеристики. Сравнение различных методов и их применение в современных диагностиках. Понятие функции рассеяния, контраста, модельного источника. Частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), определение, основные свойства. Примеры расчета ЧКХ для простейших случаев. Флуктуационные свойства изображений. Качество изображений слабых источников.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
7	<b>Механизмы генерации спектров</b> Механизмы генерации и спектры быстрых ионов и нейтронов в плазме. Термоядерные реакции в плазме, сечения, энергии заряженных и нейтральных продуктов. Понятие скорости реакции. Скорости основных реакций..	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	<b>Критерии и параметры поведения плазмы. Термоядерные реакции.</b> Критерий Лоусона, критерий ро-R. Время термоядерного горения. Параметры плазмы в современных экспериментах. Первичные и вторичные термоядерные реакции. Взаимодействие нейтронов с плотной горячей плазмой. Прохождение термоядерных ионов через плазму. Пробеги заряженных продуктов при различных параметрах плазмы.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
9-12	<b>Раздел 2</b>	4	4	0
9	<b>Энергетические спектры.</b> Начальные спектры первичных термоядерных частиц. Ширины энергетических распределений, их связь с температурой. Деформация спектров при прохождении частиц через плазму. Спектры и выходы вторичных термоядерных частиц.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
10	<b>Время-пролетный метод</b> Времяпролетный метод измерения продуктов реакций. Основные уравнения, связывающие показания детекторов со спектром частиц. Временная структура выходного импульса. Требования к временному разрешению детектора.	Всего аудиторных часов		
		1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
11	<b>Детекторы для диагностики</b>	Всего аудиторных часов		

	Основные физические свойства и характеристики детекторов для нейтронной и ионной диагностики. Методы получения изображения сжатого ядра мишени с помощью продуктов реакций.	1	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
12	<b>Измерение нейтронного выхода</b> Измерение нейтронного выхода. Детекторы для измерения нейтронов. Активационные методы диагностики. Определение температуры плазмы по отношению выходовервичных и вторичных частиц. Диагностические комплексы современных термоядерных установок.	Всего аудиторных часов		
		1	1	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

## 6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

В процессе освоения курса на лекционных занятиях используются:

- разбор решений наиболее интересных практических задач, встречающихся в диагностике плазмы.
- обсуждение современной научной периодики по проблемам диагностики плазмы.
- самостоятельная работа студентов.

## 7. 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-2.3	З-ПК-2.3	3, КИ-8, КИ-12
	У-ПК-2.3	3, КИ-8, КИ-12
	В-ПК-2.3	3, КИ-8, КИ-12

## 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		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	3 – <i>«удовлетворительно»</i>		
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.

## 8. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

### ОСНОВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ М80 Введение в теорию горячей плазмы Ч.2 , Морозов Д.Х., Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
2. 539.1 Г83 Газоразрядные детекторы элементарных частиц : учебное пособие для вузов, Григорьев В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. 681.5 К68 Датчики и детекторы физико-энергетических установок : учебное пособие для вузов, Королев С.А., Михеев В.П., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011

4. 539.1 Г95 Телескопические полупроводниковые детекторы для ускорительных экспериментов : учебное пособие для вузов, Гуров Ю.Б., Чернышев Б.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. ЭИ М80 Введение в теорию горячей плазмы Ч.1 , Морозов Д.Х., Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
2. ЭИ Г83 Газоразрядные детекторы элементарных частиц : учебное пособие для вузов, Григорьев В.А., Москва: НИЯУ МИФИ, 2012
3. Отч. Г59 Годовой отчет по НИР кафедры физики плазмы за 2012 г. Вып.20 , , Москва: НИЯУ МИФИ, 2013
4. 621.38 К78 Новая физика на большом адронном коллайдере : , Красников Н.В., Матвеев В.А., Москва: КРАСАНД, 2011
5. 533 П49 Полвека с плазмой : кафедра физики плазмы, , Москва: НИЯУ МИФИ, 2011
6. 621.3 Г16 Процессы плазменного травления в микро- и нанотехнологиях : учебное пособие для вузов, Данилкин Е.В., Мочалов А.И., Галперин В.А., Москва: Бином. Лаборатория знаний, 2018
7. 539.1 А39 Фотонные методы регистрации излучений : , Акимов Ю.К., Дубна: ОИЯИ, 2014

#### ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ:

Специальное программное обеспечение не требуется

#### LMS И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ:

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

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

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

Специальное материально-техническое обеспечение не требуется

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

Общие указания: При изучении курса следует:

- Регулярно посещать лекции.
- Проявлять активность при изучении курса.
- Использовать полученные ранее знания по смежным курсам.
- Принимать участие в обсуждении сформулированных лектором вопросов

Указания по изучению курса:

При рассмотрении темы Введение- вспомнить основные понятия и определения, изучаемые ранее в смежных курсах.

При рассмотрении темы Взаимодействие заряженных частиц с веществом - обратить внимание на пределы применимости формулы Бете – Блоха и понимать объяснение причинам отклонения кривой от расчета в области малых энергий.

При рассмотрении темы Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом - понимать качественно принципиальное отличие во взаимодействии нейтральных и заряженных частиц с веществом.

При рассмотрении темы Взаимодействие нейтронов с веществом- обратить внимание на классификацию нейтронов по их кинетической энергии.

При рассмотрении темы Преобразование энергии излучения в веществе - использовать условную схему преобразования энергии излучения в веществе, разделяющую канал ионизации и канал возбуждения как форму изучения и изложения материала.

При рассмотрении темы Статистические характеристики взаимодействия - наибольшее внимание обратить на понятие предельного энергетического разрешения.

При рассмотрении темы Газовые ионизационные детекторы - акцентировать внимание вопросам съема сигнала с детектора излучения и формированию импульса напряжения.

При рассмотрении темы Твердотельные ионизационные детекторы - выделить физические принципы работы ППД как основной материал в данной теме.

При рассмотрении темы Сцинтилляционные детекторы - обратить внимание на различие сцинтилляционного процесса в неорганических и органических сцинтилляторах.

При рассмотрении темы Основы спектрометрических измерений - особое внимание уделить аппаратной форме линии детекторов и понятию энергетического разрешения.

При рассмотрении темы Основы спектрометрии импульсного рентгеновского излучения - рассмотрение материала следует начинать с четкого определения в понятиях стационарного и импульсного излучения.

При рассмотрении темы Метод фильтров - полезно сравнить метод фильтров с классическими методами спектрометрии стационарных потоков излучений .

При рассмотрении темы Элементы рентгеновской оптики - обратить внимание на соотношение, связывающее показание детекторов с интенсивностью исследуемого источника излучения.

При рассмотрении темы Регистрация изображений плазмы в рентгеновском диапазоне - необходимо понимать различие в рассматриваемых методах и уметь сравнивать их достоинства и недостатки.

При рассмотрении темы Механизмы генерации и спектры быстрых ионов и нейтронов в термоядерной плазме - основное внимание уделить физическим процессам формирования параметров в условиях, приближенным к термоядерным.

При рассмотрении темы Методы ионной и нейтронной диагностики- знать особенности использования различных детекторов для диагностики термоядерной плазмы.

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

При рассмотрении темы Введение - подчеркнуть связь данного курса с другими дисциплинами, изучаемыми студентами как на профилирующей кафедре, так и на смежных кафедрах.

При рассмотрении темы Взаимодействие заряженных частиц с веществом - указать пределы применимости формулы Бете – Блоха и дать объяснение причинам отклонения кривой от расчета в области малых энергий.

При рассмотрении темы Взаимодействие рентгеновского излучения с веществом - акцентировать внимание студентов на отличие во взаимодействии нейтральных и заряженных частиц с веществом.

При рассмотрении темы Взаимодействие нейтронов с веществом - дать сравнение сечений взаимодействия тепловых нейтронов в упругих рассеяниях и в ядерных реакциях.

При рассмотрении темы Преобразование энергии излучения в веществе - использовать условную схему преобразования энергии излучения в веществе, разделяющую канал ионизации и канал возбуждения.

При рассмотрении темы Статистические характеристики взаимодействия - акцентировать внимание на понятие предельного энергетического разрешения.

При рассмотрении темы Газовые ионизационные детекторы - уделить особое внимание вопросам съема сигнала с детектора излучения и формированию импульса напряжения.

При рассмотрении темы Твердотельные ионизационные детекторы - основную долю лекционного материала посвятить физическим принципам работы ППД.

При рассмотрении темы Сцинтилляционные детекторы- подчеркнуть различие сцинтилляционного процесса в неорганических и органических сцинтилляторах.

При рассмотрении темы Основы спектрометрических измерений- особое внимание уделить аппаратурной форме линии детекторов и понятию энергетического разрешения.

При рассмотрении темы Основы спектрометрии импульсного рентгеновского излучения - дать четкое определение и различие в понятиях стационарного и импульсного излучения. Проиллюстрировать эти понятия примерами из современного эксперимента по термоядерным исследованиям.

При рассмотрении темы Метод фильтров- указать ограниченность в применении того или иного метода по диапазону энергий, точности и т.д.

При рассмотрении темы Элементы рентгеновской оптики - подчеркнуть отличие классической оптики от рентгеновской.

При рассмотрении темы Регистрация изображений плазмы в рентгеновском диапазоне - дать сравнение различных методов и подчеркнуть их достоинства и недостатки.

При рассмотрении темы Механизмы генерации и спектры быстрых ионов и нейтронов в термоядерной плазме - основное внимание уделить физическим процессам формирования параметров в условиях, приближенных к термоядерным.

При рассмотрении темы Методы ионной и нейтронной диагностики - подчеркнуть особенности использования различных детекторов для диагностики термоядерной плазмы.

Автор(ы):

Кушин Владимир Васильевич, к.ф.-м.н., доцент

Рецензент(ы):

Салахутдинов Г.Х.