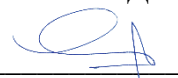


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова  
Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова  
в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



\_\_\_\_\_  
Директор филиала МГУ в г.Сарове  
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины:**

ОСНОВЫ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

---

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

Экстремальные электромагнитные поля, релятивистская плазма  
и аттосекундная физика

---

Квалификация «Магистр»

**Форма обучения:** Очная

---

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

**Авторы–составители:**

д.ф.-м.н. С.А.Бельков, РФЯЦ-ВНИИЭФ

## **Аннотация к рабочей программе дисциплины**

### **«Основы лазерного термоядерного синтеза»**

---

В ходе изучения курса студентам рассказывается об основных направлениях исследований по управляемому термоядерному (ТЯ) синтезу, характеристиках термоядерных реакций, их роли в энергетике будущего. Рассматривается место лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) в общей концепции инерционного синтеза, особенности использования лазера для зажигания ТЯ реакций, типы мишеней для ЛТС. Описываются основные физические процессы, происходящие в мишенях для ЛТС: поглощение лазерного излучения, передача тепла от внешних слоев мишени к внутренним в результате электронной и ионной теплопроводности, перенос рентгеновского излучения в плазме, ионизация, развитие газодинамических неустойчивостей. Обсуждаются общие свойства плазмы и способы описания ее свойств, основные типы плазменных волн в однородной изотропной плазме. Даются понятия термодинамически равновесной плазмы, локального термодинамического равновесия, принципа детального равновесия, вывод уравнения Саха. Рассматривается роль неравновесности в определении характеристик лазерной плазмы и методы описания неравновесной плазмы. Достаточно подробно рассматриваются вопросы поглощения лазерного излучения в однородной и неоднородной плазме, модели описания переноса излучения: спектральное кинетическое уравнение, диффузионное приближение, лучистая теплопроводность. Обсуждаются требования на параметры лазерных установок, системы фокусировки лазерного излучения на термоядерную мишень, критерии выбора основных параметров для построения эффективной лазерной установки для термоядерного синтеза. Дается обзор истории ЛТС и описание современного состояния проблемы как в России, так и в мире.

## 1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «**Основы лазерного термоядерного синтеза**» реализуется на 2-ом курсе в 4-ом семестре и относится к обязательной части программы обучения.

В результате освоения дисциплины «**Основы лазерного термоядерного синтеза**» обучающийся кроме знаний предмета получает навыки применения ранее полученных знаний для решения новых научных и практических задач.

## 2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия

Освоение дисциплин «Электromагнетизм», «Электродинамика», «Оптика», «Математический анализ», «Квантовая механика», «Дифференциальные уравнения», «Теория колебаний», «Теория волн».

## 3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные законы и направления современных научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> на основе фундаментальных знаний в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b> необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> используя знания в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики проводить научные исследования.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b> навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области экстремальных</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b> основные направления инновационного развития в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b> проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в</p>

<p>электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики (СПК-3).</p>	<p>области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.  <b>ВЛАДЕТЬ</b>  методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области экстремальных электромагнитных полей, релятивистской плазмы и аттосекундной физики.</p>
--	--

4. **Форма обучения:** очная

5. **Язык обучения:** русский

6. **Содержание дисциплины:**

### **Раздел 1. Термоядерные реакции**

Области применения управляемого термоядерного синтеза. Источники электроэнергии, базовые источники, коэффициент готовности, высоко- и низкоконтрированные источники. Энергия связи нуклонов в ядре, формула масс Вайцеккера, дефект массы, упаковочный множитель. Термоядерные реакции в звездах, протон-протонный цикл, проблема солнечных нейтрино. Термоядерные реакции в лаборатории.

Сечение и скорость реакций. Скорость термоядерных реакций в термодинамически равновесной плазме. Критерий Лоусона.

### **Раздел 2. Удержание плазмы**

Сила Лоренца и пинч-эффект. Линейные и тороидальные системы с магнитным удержанием плазмы: Z-пинч, тета-пинч, пробкотрон, тороидальный пинч, стелларатор, токамак. Принцип работы систем инерциального термоядерного синтеза. Критерий  $\rho R$ . Драйверы для инерциального синтеза: пучки электронов и ионов, лазеры. Требования к мишени и драйверу для инерциального синтеза. Конструкции мишеней.

### **Раздел 3. Кинетика плазмы**

Кинетические уравнения для плазмы: уравнение Больцмана, уравнение Лиувилля, уравнение Власова. Уравнения переноса массы, импульса и энергии для равновесной плазмы. Интеграл столкновений в форме Ландау. Двухтемпературное приближение, время температурной релаксации. Одножидкостное приближение, дебаевский радиус. Интеграл столкновений в форме Батнагара-Гросса-Крука. Электрический ток в неоднородной плазме: проводимость, термоэлектрический коэффициент. Спитцеровская теплопроводность.

### **Раздел 4. Термодинамика плазмы**

Микроканоническое распределение. Энтропия. Термодинамические потенциалы: внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия Гиббса, свободная энергия Гельмгольца. Системы с переменным числом частиц, химический потенциал. Каноническое распределение. Больцмановский газ, газ с постоянной теплоемкостью. Химическая модель, ионизационное равновесие и формула Саха.

### **Раздел 5. Волны в плазме**

Волновое уравнение для электромагнитных колебаний. Диэлектрическая проницаемость, дисперсионное уравнение. Продольная и поперечная проницаемость. Электрон в поле плоской волны, высокочастотная проницаемость. Электростатические электронные волны, плазменная частота. Электромагнитные электронные волны, нормальное и наклонное падение электромагнитной волны на неоднородную плазму, s- и р-поляризованные волны. Электростатические ионные волны. Нелинейные эффекты, параметрические неустойчивости: параметрический и двухплазмонный распад, бриллюэновское и рамановское рассеяние.

### **Раздел 6. Рентгеновское излучение**

Фотометрия. Равновесное излучение, распределение Планка, закон смещения Вина. Уравнение переноса излучения, коэффициенты испускания и поглощения излучения, закон

Кирхгофа. Полное и локальное термодинамическое равновесие. Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности. Коэффициенты поглощения излучения. **Раздел 7. Гидродинамическое сжатие мишеней**

Звуковые волны, адиабата Пуассона. Ударные волны, соотношения Рэнкина-Гюгонио, адиабата Гюгонио, квазиизоэнтропическое сжатие. Неустойчивости Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, формула Такабе. Оболочечные мишени.

## 7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоемкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в ак. часах					Самостоя тельная работа студентов
		Общая трудоемко сть	в том числе				
			ауд. занятий				
		ауд	итог озна комле ния	Лек ций	Се мина ров		
<b>Основы лазерного термоядерного синтеза</b>	2	72	36	18	18	36	

## 8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий

Изучение курса «**Основы лазерного термоядерного синтеза**» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса, обсуждение вопросов, обозначенных в темах дисциплины; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным и семинарским занятиям. Темы, рассматриваемые на лекциях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации. Темы, рассматриваемые на лекциях и изучаемые самостоятельно, закрепляются на семинарских занятиях, по вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоемкость, часы	Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации

		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Раздел 1. Термоядерные реакции	10	3		3	4	Собеседование, опрос
2	Раздел 2. Удержание плазмы	10	3	-	3	4	
3	Раздел 3. Кинетика плазмы	10	2	-	2	5	
4	Раздел 4. Термодинамика плазмы	10	2		2	5	
5	Раздел 5. Волны в плазме	10	3		3	5	
6	Раздел 6. Рентгеновское излучение	10	3		3	5	
7	Раздел 7. Гидродинамическое сжатие мишеней	8	2		2	4	
	Промежуточная аттестация	4				4	экзамен в устной форме
<b>ИТОГО:</b>		<b>72</b>	<b>18</b>	<b>-</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	

### 9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «**Основы лазерного термоядерного синтеза**» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности слушателей, качества ответов на вопросы лектора, аргументированности позиции студента, оценивается широта используемых им теоретических знаний. В семестре в конце некоторых лекций проводятся несколько коротких контрольных работ (10 – 15 минут).

Промежуточная аттестация по дисциплине «**Основы лазерного термоядерного синтеза**» проводится в форме зачета. Результаты сдачи экзамена оцениваются по шкале «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо», «отлично». Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации.

### 10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

**Требования к структуре и содержанию фонда оценочных средств текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

Перечень оценочных средств, применяемых на каждом этапе проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине, представлены в таблице

Наименование оценочного средства	Краткая характеристика оценочного средства	Представление оценочного средства в фонде
<b>Оценочные средства текущего контроля</b>		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как короткий письменный ответ на поставленный вопрос по тематике предыдущей или текущей лекции, рассчитанное на выяснение объема и качества знаний, усвоенных обучающимися по определенному разделу, теме, проблеме.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
Собеседование (в форме беседы, дискуссии по теме)	Средство контроля, организованное как свободная беседа, дискуссия по тематике изучаемой дисциплины, рассчитанное на выяснение объема знаний обучающегося по всем изученным разделам, темам; свободного использования терминологии для аргументированного выражения собственной позиции.	Перечень тем, изучаемых в рамках дисциплины
<b>Оценочные средства промежуточной аттестации</b>		
Короткая письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к зачету

## 11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
<b>ЗНАТЬ:</b> принципы лазерного термоядерного синтеза ОПК-3.Б 3-6	Отсутствие знаний о лазерном термоядерном синтезе	В целом успешные, но не систематические знания лазерного термоядерного синтеза	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы знания лазерного термоядерного синтеза	Успешные и систематические знания лазерного термоядерного синтеза
<b>УМЕТЬ:</b> Проводить расчет лазерного термоядерного синтеза ОПК-3.Б У-6	Отсутствие умения проводить расчет лазерного термоядерного синтеза	В целом успешное, но не систематическое умение проводить расчет лазерного	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы проводить расчет	Успешное и систематическое умение проводить расчет лазерного термоядерного синтеза



		термоядерного синтеза	лазерного термоядерного синтеза	
ВЛАДЕТЬ: методами описания и расчета лазерного термоядерного синтеза ОПК-3.Б В-6	Отсутствие/фрагментарное владение методами описания и расчета лазерного термоядерного синтеза	В целом успешное, но не систематическое владение методами описания и расчета лазерного термоядерного синтеза	В целом успешно, но содержащее отдельные пробелы владение методами описания и расчета лазерного термоядерного синтеза	Успешное и систематическое владение методами описания и расчета лазерного термоядерного синтеза

## 12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.

### Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся:

#### Пример:

Используя метод регуляризации, изложенный в лекциях при выводе дифференциального уравнения для комплексной функции отражения  $V_s$  s-поляризованной электромагнитной волны в сферически симметричной неоднородной плазме, получить аналогичное уравнение для функции отражения  $V_p$  p-поляризованной волны. В итоге должна

$$\frac{dV_s}{dR} = 2ik_0 \left( \varepsilon - \frac{p^2}{R^2} \right)^{1/2} V_s + \left( \frac{d\varepsilon}{dR} + 2 \frac{p^2}{R^3} \right) \frac{1 - V_s^2}{4 \left( \varepsilon - \frac{p^2}{R^2} \right)}$$

$$\frac{dV_p}{dR} = 2ik_0 \left( \varepsilon - \frac{p^2}{R^2} \right)^{1/2} V_p - \left( \frac{d\varepsilon}{dR} \frac{\varepsilon - 2 \frac{p^2}{R^2}}{\varepsilon} - 2 \frac{p^2}{R^3} \right) \frac{1 - V_p^2}{4 \left( \varepsilon - \frac{p^2}{R^2} \right)}$$

получиться система комплексных дифференциальных уравнений первого порядка:

где  $p$  - прицельный параметр луча, падающего на плазменный шар;

$k_0$  - волновое число электромагнитной волны в вакууме;

$$\varepsilon = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_0^2} + i \frac{V_{\sigma} \omega_{pe}^2}{\omega_0^2}$$

$\varepsilon$  - диалектическая проницаемость плазмы

$\omega_0$  - частота электромагнитной волны;

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m_e}}$$

$\omega_{pe}$  - плазменная частота

$$v_{ei} = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2\pi}{m_e} \frac{Z^2 e^4 n_e}{Z T_e^{3/2}}} L$$

$v_{ei}$  - частота электрон-ионных столкновений

$L$  - кулоновский логарифм;

$n_e$  - концентрация электронов (является заданной функцией радиуса);

$Z$  - заряд плазмы.

$$V_s(0) = 0$$

$$V_p(0) = 0$$

Система уравнений интегрируется с начальным условием

В точке  $R$ , где плотность плазмы обращается в ноль, величина  $A = 1 - |V|^2$  определяет полный коэффициент поглощения электромагнитной волны заданного типа на сферически симметричной плазме с заданным профилем электронной концентрации как функции прицельного параметра.

Для численного интегрирования полученной системы уравнений необходимо написать программу на языках FORTRAN или C++ (по выбору студента), реализующую схему Рунге-Кутты с контролем точности на шаге интегрирования. Порядок схемы и метод контроля точности также выбирается студентом самостоятельно. Программа должна быть отлажена и оттестирована на уравнениях, имеющих аналитическое решение. Студент должен продемонстрировать точность и сходимость численного решения к известному аналитическому решению, которое он также должен выбрать самостоятельно. После завершения отладки необходимо рассчитать коэффициент поглощения s- и p-

$$\frac{n_e(R)}{n_{cr}} = \begin{cases} 1 + \frac{R_{cr} - R}{L_{cor}}, & R < R_{cr} + L_{cor} \\ 0, & R \geq R_{cr} + L_{cor} \end{cases}$$

поляризованных волн на линейном профиле плотности, заданном формулой

$$\omega_{pe}(n_{cr}) = \omega_0$$

где  $n_{cr}$  - критическая плотность плазмы

Длина волны лазерного излучения, падающего на сферическую мишень - 1,06 мкм. Плазма образована из полностью ионизованного стеклянного шарика (SiO<sub>2</sub>), температура электронов  $T_e$  равна 1 кэВ,  $R_{cr}$  - 100 мкм,  $L_{cor}$  - 100 мкм,  $Z$  - 10,  $L$  - 5. Необходимо построить график коэффициента поглощения для заданных параметров плазмы как функции прицельного параметра  $p$ . Для значения прицельного параметра, равного нулю, вычислить коэффициент поглощения аналитически и сравнить с полученным численным решением.

### **13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.**

1. Области применения управляемого термоядерного синтеза. Источники электроэнергии, базовые источники, коэффициент готовности, высоко- и низкоконтрированные источники.
2. Энергия связи нуклонов в ядре, формула масс Вайцеккера, дефект массы, упаковочный множитель.
3. Термоядерные реакции в звездах, протон-протонный цикл, проблема солнечных нейтрино. Термоядерные реакции в лаборатории
4. Сечение и скорость реакций. Скорость термоядерных реакций в термодинамически равновесной плазме.
5. Сила Лоренца и пинч-эффект. Линейные и тороидальные системы с магнитным удержанием плазмы: Z-пинч, тета-пинч, пробкотрон, тороидальный пинч, стелларатор, токамак.
6. Принцип работы систем инерциального термоядерного синтеза. Драйверы для инерциального синтеза: пучки электронов и ионов, лазеры.
7. Критерии зажигания: критерий Лоусона, критерий  $\rho R$ .
8. Требования к мишени и драйверу для инерциального синтеза. Конструкции мишеней.
9. Кинетические уравнения для плазмы: уравнение Больцмана, уравнение Лиувилля, уравнение Власова.
10. Первые моменты уравнения Власова. Уравнения переноса массы, импульса и энергии для равновесной плазмы.
11. Интеграл столкновений в форме Ландау.
12. Двухтемпературное приближение, время температурной релаксации. Одножидкостное приближение, дебаевский радиус.
13. Интеграл столкновений в форме Батнагара-Гросса-Крука. Электрический ток в неоднородной плазме: проводимость, термоэлектрический коэффициент. Спитцеровская теплопроводность.
14. Электрон в поле плоской волны, высокочастотная проникаемость. Электростатические электронные волны, плазменная частота.
15. Электромагнитные электронные волны в плазме, нормальное и наклонное падение электромагнитной волны на неоднородную плазму, s- и p-поляризованные волны.
16. Волновое уравнение для электромагнитных колебаний. Диэлектрическая проникаемость, дисперсионное уравнение. Продольная и поперечная проникаемость.
17. Нелинейные эффекты при взаимодействии волн в плазме, параметрические неустойчивости: параметрический и двухплазменный распад, бриллюэновское и рамановское рассеяние.
18. Фотометрия. Равновесное излучение, распределение Планка, закон смещения Вина.
19. Уравнение переноса излучения, коэффициенты испускания и поглощения излучения, закон Кирхгофа. Полное и локальное термодинамическое равновесие. Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности.
20. Звуковые волны, адиабата Пуассона.
21. Ударные волны, соотношения Рэнкина-Гюгонио, адиабата Гюгонио, квазиизэнтропическое сжатие.
22. Гидродинамические неустойчивости: неустойчивость Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, формула Такабе. Оболочечные мишени.

#### ***Материалы промежуточного контроля успеваемости обучающихся в форме зачета:***

23. Области применения управляемого термоядерного синтеза. Источники электроэнергии, базовые источники, коэффициент готовности, высоко- и низкоконтрированные источники.

24. Энергия связи нуклонов в ядре, формула масс Вайцзеккера, дефект массы, упаковочный множитель.
25. Термоядерные реакции в звездах, протон-протонный цикл, проблема солнечных нейтрино. Термоядерные реакции в лаборатории
26. Сечение и скорость реакций. Скорость термоядерных реакций в термодинамически равновесной плазме.
27. Сила Лоренца и пинч-эффект. Линейные и тороидальные системы с магнитным удержанием плазмы: Z-пинч, тета-пинч, пробкотрон, тороидальный пинч, стелларатор, токамак.
28. Принцип работы систем инерциального термоядерного синтеза. Драйверы для инерциального синтеза: пучки электронов и ионов, лазеры.
29. Критерии зажигания: критерий Лоусона, критерий  $\rho R$ .
30. Требования к мишени и драйверу для инерциального синтеза. Конструкции мишеней.
31. Кинетические уравнения для плазмы: уравнение Больцмана, уравнение Лиувилля, уравнение Власова.
32. Первые моменты уравнения Власова. Уравнения переноса массы, импульса и энергии для равновесной плазмы.
33. Интеграл столкновений в форме Ландау.
34. Двухтемпературное приближение, время температурной релаксации. Одножидкостное приближение, дебаевский радиус.
35. Интеграл столкновений в форме Батнагара-Гросса-Крука. Электрический ток в неоднородной плазме: проводимость, термоэлектрический коэффициент. Спитцеровская теплопроводность.
36. Электрон в поле плоской волны, высокочастотная проницаемость. Электростатические электронные волны, плазменная частота.
37. Электромагнитные электронные волны в плазме, нормальное и наклонное падение электромагнитной волны на неоднородную плазму, s- и p-поляризованные волны.
38. Волновое уравнение для электромагнитных колебаний. Диэлектрическая проницаемость, дисперсионное уравнение. Продольная и поперечная проницаемость.
39. Нелинейные эффекты при взаимодействии волн в плазме, параметрические неустойчивости: параметрический и двухплазмонный распад, бриллюэновское и рамановское рассеяние.
40. Фотометрия. Равновесное излучение, распределение Планка, закон смещения Вина.
41. Уравнение переноса излучения, коэффициенты испускания и поглощения излучения, закон Кирхгофа. Полное и локальное термодинамическое равновесие. Диффузионное приближение и приближение лучистой теплопроводности.
42. Звуковые волны, адиабата Пуассона.
43. Ударные волны, соотношения Рэнкина-Гюгонио, адиабата Гюгонио, квазиизоэнтропическое сжатие.
44. Гидродинамические неустойчивости: неустойчивость Рэлея-Тейлора и Кельвина-Гельмгольца, формула Такабе. Оболочечные мишени.

#### **14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

1. Дж. Дюдерштадт, Г. Мозес, «Инерциальный термоядерный синтез», М.: Энергоатомиздат, 1984.
2. S. Pfalzner, "An Introduction to Inertial Confinement Fusion", Boca Raton, FL: CRC Press, 2006.

3. S. Atzeni, J. Meyer-ter-Vehn, "Inertial Fusion. Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter", Oxford: Clarendon Press, 2004.
4. Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер, «Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений», М.: Наука, 1966.
5. "Physics of Laser Plasma", ed. by A. Rubenchik, S. Witkowski, Amsterdam: Elsevier, 1991.

#### Дополнительная литература.

1. С.Н. Абрамович, «Физика атомного ядра», Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005.
2. С.А. Бельков, «Основы физики плазмы», Учебное пособие, Саров: ИПК ВНИИЭФ, 2002.
3. В.Л. Гинзбург «Распространение электромагнитных волн в плазме», М.: Наука, 1960.
4. С.Ю. Гуськов, «Быстрое зажигание мишеней инерциального синтеза», Физика плазмы, т. 39, №1, с. 3-59, 2013.
5. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Статистическая физика. Часть 1», М.: Наука, 1976.
6. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц, «Гидродинамика», М.: Наука, 1986.
7. Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский, «Физическая кинетика», М.: Наука, 1979.
8. А.А. Мак, Н.А. Соловьев, «Введение в физику высокотемпературной лазерной плазмы», Ленинград: Ленинградский Университет, 1991.
9. S.A. Belkov, L.S. Mkhitarian, O.A. Vinokurov, et al., "Simulation of instability growth rates on the front and back of the laser accelerated planar targets", Physics of Plasmas, Vol. 5, No. 8, 2988, 1998.
10. J.D. Lindl, "Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain", Physics of Plasmas, Vol. 2, No. 11, 3933, 1995.
11. J.D. Lindl, P. Amendt, R.L. Berger, et al. "The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility", Physics of Plasmas, Vol. 11, No. 2, 339, 2004.
12. M.J. Edwards, P.K. Patel, J.D. Lindl, et al. "Progress towards ignition on the National Ignition Facility", Physics of Plasmas, 20, 070501, 2013.
13. S.E. Bodner, D.G. Colombant, J.H. Gardner, et al. "Direct-drive laser fusion: status and prospects", LLNL Report UCRL-ID-129418, 1998.
- R.L. McCrory, D.D. Meyerhofer, R. Betti, et al. "Progress in direct-drive inertial confinement fusion", Physics of Plasmas 15, 055503, 2008

#### Интернет-ресурсы.

1. Федеральный портал «Российское образование» (<http://www.edu.ru>)
2. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам» (<http://window.edu.ru>)
3. Сайт СарФТИ НИЯУ МИФИ (<http://sarfti.ru>), раздел «Учебно-методические пособия»
4. Научно-образовательный портал «Вся физика» (<http://sfiz.ru>), раздел «Учебные материалы»
5. Библиотека по естественным наукам Российской академии наук (<http://benran.ru>)
6. Единый портал Интернет-тестирования в сфере образования (<http://www.i-exam.ru>)

#### Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика».

Для лекционной части курса требуется аудитория, оборудованная мультимедийным проектором, управляющим компьютером, экраном и обычной учебной доской.