

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:

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ГЛАВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ СПЛОШНЫХ СРЕД

Уровень высшего образования:

Магистратура

Направление подготовки:

03.04.02 Физика

Направленность (профиль) ОПОП:

Теоретическая 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 рабочей программы дисциплины:

д.ф.-м.н., профессор Д.О. Еременко, кафедра физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета МГУ,

д.ф.-м.н., профессор С.Ю. Платонов, кафедра физики атомного ядра и квантовой теории столкновений физического факультета МГУ,

к.ф.-м.н., доцент А.А. Кузнецов, кафедра общей ядерной физики физического факультета МГУ

Аннотация к рабочей программе дисциплины «Ядерная астрофизика»

Дисциплина «Ядерная астрофизика» является обязательным курсом второго семестра первого курса.

В курсе излагаются основные понятия ядерной астрофизики. Ядерная астрофизика рассматривает проблемы, связанные с исследованием ядерных источников энергии в космосе, с происхождением химических элементов и их изотопов, как на ранних стадиях эволюции Вселенной, так и при формировании и последующей эволюции одиночных звезд и двойных звездных систем. Важной составляющей ядерной астрофизики является изучение влияния свойств ядерной материи на наблюдаемые характеристики различных космических объектов. В рамках лекционного курса рассматриваются современные, важные для астрофизических исследований, представления о структуре атомных ядер и механизмах ядерных реакций. Рассматриваются процессы формирования, особенности строения и эволюции звезд. При этом особое внимание уделяется ядерным процессам, обеспечивающим формирование химических элементов. Обсуждаются элементы нейтринной астрофизики, направленной на изучение процессов выделения и поглощения нейтрино при взрыве сверхновых и гравитационном коллапсе звездных систем. Представлены также элементы астрофизики космических лучей. Рассматриваются современное состояние дел в ядерной космохронологии. В курсе большое внимание уделяется анализу астрономических наблюдений, которые позволяют накладывать определенные ограничения на многие параметры взаимодействия элементарных частиц и ядер с точностью, достичь которую невозможно при лабораторных экспериментах.

Разделы рабочей программы

1. Место дисциплины в структуре основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО).
2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (при наличии)
3. Результаты обучения по дисциплине (модулю), соотнесенные с формируемыми компетенциями
4. Форма обучения.
5. Язык обучения.
6. Содержание дисциплины.
7. Объем дисциплины
8. Структурированное по темам (разделам) содержание дисциплины (модуля) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий
9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.
10. Фонд оценочных средств (ФОС) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).
11. Шкала оценивания.
12. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости.
13. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации.
14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы

1. Место дисциплины в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Ядерная астрофизика» реализуется на 1-ом курсе в 1-ом семестре и является курсом по выбору

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

Освоение следующих дисциплин: «Теоретическая космология», «Теоретическая ядерная физика».

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

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

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

<ul style="list-style-type: none"> Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области теоретической физики (СПК-3). 	<p>ЗНАТЬ</p> <p>основные направления инновационного развития в области теоретической физики.</p> <p>УМЕТЬ</p> <p>проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p>ВЛАДЕТЬ</p> <p>методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>
---	---

4. **Форма обучения:** очная.

5. **Язык обучения:** русский.

6. **Содержание дисциплины**

Тема 1. Эволюция Вселенной и звезд.

Основы современных представлений об эволюции Вселенной. Модель расширяющейся Вселенной: экспериментальные факты. Теория Большого взрыва. Инфляционная стадия. Кварк-адронный переход. Образование и основные этапы эволюции звезд, их зависимость от массы звезды эволюция звезд. Диаграмма Герцшпрунга-Рассела.

Тема 2. Распространенность химических элементов.

Основные закономерности распространенности химических элементов во Вселенной. Методики получения экспериментальной информации.

Тема 3. Основы современных представлений о структуре атомных ядер.

Современные модели атомных ядер. Основы модели жидкой капли, оболочечной модели, обобщенной модели ядра. Кластерные явления в физике атомного ядра. Ядерные распады: α -распад, электромагнитные и слабые распады.

Тема 4. Основы современных представлений о механизмах ядерных реакций.

Сечение ядерной реакции. Классификация механизмов ядерных реакций. Модель составного ядра. Прямые ядерные реакции. Предравновесные ядерные реакции. Основы статистической теории ядерных реакций. Особенности взаимодействия тяжелых ионов. Термоядерные реакции.

Тема 5. Первичный нуклеосинтез.

Первичный (дозвездный) нуклеосинтез. Основные процессы. Характерная временная шкала. Наблюдаемое соотношение распространенностей водорода и гелия во Вселенной.

Тема 6. Звездный нуклеосинтез, Часть 1.

Синтез ядер в звездах и при взрывах звезд (звездный нуклеосинтез). Астрофизический S-фактор и пик Гамова. Протон-протонный цикл. Ядерное горение дейтерия. CNO-цикл. Ядерное

горение лития. Тройной альфа-процесс.

Тема 7. Звездный нуклеосинтез, Часть 2.

Образование элементов тяжелее углерода. Горение углерода. Горение кислорода. Горение неона. Горение кремния. Альфа-процесс. Равновесный процесс (е-процесс).

Тема 8. Звездный нуклеосинтез, Часть 3.

Образование элементов тяжелее железа. Нейтронный захват: быстрый (r-процесс) и медленный (s-процесс). Протонный захват: гр-процесс. Фоторасщепление: р-процесс и х-процесс.

Тема 9. Нуклеосинтез под действием космических лучей.

Х-процесс. Возникновение лёгких ядер, «обойдённых» процессами первичного и звёздного нуклеосинтеза.

Тема 10. Синтез тяжелых ядер при слиянии нейтронных звезд и черных дыр.

Образование тяжелых элементов в коллапсарах. Взрывы гиперновых звезд. Различные механизмы обогащения пространства тяжелыми элементами.

Тема 11. Нуклеосинтез в современную эпоху.

Экспериментальные факты: синтез ядер ^{26}Al , наблюдение остатков сверхновых в оптическом диапазоне, обнаружение в спектрах звезд линии технеция ($Z = 43$), содержание межзвездного углерода и кислорода.

Тема 12. Нейтронные звезды.

Способы образования нейтронных звезд и их классификация. Методы обнаружения. Предел Толмена-Волкова-Оппенгеймера. Уравнение состояния для нейтронной звезды. Внутренняя структура нейтронных звезд. Гипотезы о составе внутреннего ядра нейтронных звезд.

Тема 13. Нейтринная астрофизика.

История открытия нейтрино. Основные способы регистрации. Источники космических нейтрино. Расхождения между наблюдениями нейтринного потока и предсказаниями «стандартной» модели Солнца.

Тема 14. Астрофизика космических лучей.

Происхождение космических лучей и процессы их распространения до Земли. Ядерный состав космического излучения. Природа степенного спектра космических лучей. Прикладное значение космических лучей.

Тема 15. Ядерная космохронология

Уран-свинцовый, рубидий-стронциевый и калий-аргоновый методы ядерной геохронологии. Рений-осмиевый метод космохронологии. Относительно короткоживущие хронометры нуклеосинтеза - ^{129}I и ^{244}Pu . Хронологические модели галактического нуклеосинтеза.

Тема 16. Экзотические ядра в астрофизике

Методы изучения астрофизически важных реакций с использованием радиоактивных пучков. Изучение свойств тяжелых нейтронноизбыточных ядер с помощью реакций многонуклонных передач. Поиск экзотических сверхтяжелых ядер в природных объектах и в космических лучах. Роль экзотических ядер в процессе нуклеосинтеза.

Тема 17. Перспективы развития ядерной астрофизики

7. Объем дисциплины

НАЗВАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ	Трудоёмкость в зачетных единицах	объем учебной нагрузки в акад. часах				
		Общая трудоёмкость	в том числе ауд. занятий			Самостоятельная работа студентов
			Общая аудиторная нагрузка	Лекций	Семинаров	
Ядерная астрофизика	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 «Ядерная астрофизика» включает в себя лекции, на которых рассматривается теоретическое содержание курса; самостоятельную работу, заключающуюся в подготовке к лекционным занятиям. По вопросам, вызывающим затруднения, проводятся консультации.

№ темы	Наименование раздела дисциплины	Виды учебной нагрузки и их трудоёмкость, часы					Форма текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации
		Всего часов	Лекции	Научно-практические занятия	Семинары	Самостоятельная работа	
1	Эволюция Вселенной и звезд	4	1	-	1	2	Собеседование, опрос
2	Распространенность химических элементов	4	1	-	1	2	
3	Основы современных представлений о структуре атомных ядер	4	1	-	1	2	
4	Основы современных представлений о механизмах ядерных реакций	4	1	-	1	2	
5	Первичный нуклеосинтез.	4	1	-	1	2	
6	Звездный нуклеосинтез, Часть 1.	4	1	-	1	2	
7	Звездный нуклеосинтез, Часть 2.	4	1	-	1	2	

8	Звездный нуклеосинтез, Часть 3.	4	1	-	1	2	
9	Нуклеосинтез под действием космических лучей	4	1	-	1	2	
10	Синтез тяжелых ядер при слиянии нейтронных звезд и черных дыр	8	2	-	2	2	
11	Нуклеосинтез в современную эпоху	4	1	-	1	2	
12	Нейтронные звезды	4	1		1	2	
13	Нейтринная астрофизика	4	1		1	2	
14	Астрофизика космических лучей	3	1		1	2	
15	Ядерная космохронология	3	1		1	2	
16	Экзотические ядра в астрофизике	3	1		1	1	
17	Перспективы развития ядерной астрофизики	3	1	-	1	1	
	Промежуточная аттестация	4	-	-	-	4	Зачет в форме письменной работы, экзамен в форме письменной работы с последующим собеседованием
ИТОГО:		72	18		18	36	

9. Текущий контроль и промежуточная аттестация.

Текущий контроль по дисциплине «Ядерная астрофизика» осуществляется на лекциях и заключается в оценке активности и качества участия в опросах и собеседованиях по проблемам, изучаемых в рамках тем лекционных занятий, аргументированности позиции; оценивается широта используемых теоретических знаний.

Промежуточные аттестации по дисциплине «Ядерная астрофизика» проводится во втором семестре в форме зачёта и экзамена. Зачет в форме письменной работы, экзамен в форме письменной работы с последующим собеседованием по программе.

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
Оценочные средства текущего контроля		
Тематический опрос (в форме ответов на вопросы)	Средство контроля, организованное как специальная беседа по тематике предыдущей лекции и 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
Тестирование	Средство контроля, позволяющее получить оценку уровня фактических знаний студента по изученной теме.	Образцы тестов
Оценочные средства промежуточной аттестации		
Письменная работа	Средство, позволяющее оценить сформированность систематических представлений о методах научно-исследовательской деятельности.	Перечень вопросов к экзамену
Собеседование	Средство, позволяющее получить экспертную оценку знаний, умений и навыков для оценивания и анализа различных фактов и явлений в своей профессиональной области.	Требования к порядку проведения собеседования

11. Шкала оценивания.

Планируемые результаты обучения	Критерии оценивания результатов обучения			
	2	3	4	5
ЗНАТЬ: основные понятия	Отсутствие знаний основных понятий ядерной астрофизики.	В целом успешные, но не	В целом успешное, но	Успешные и систематические знания

ядерной астрофизики. ОПК-2.Б 3-4		систематическое знание основных понятий ядерной астрофизики.	содержащее отдельные пробелы знания основных понятий ядерной астрофизики.	основных понятий ядерной астрофизики.
УМЕТЬ: выполнять основные физические оценки параметров процессов, относящейся к области ядерной астрофизики. ОПК-2.Б У-4	Отсутствие умения выполнять основные физические оценки параметров процессов, относящейся к области ядерной астрофизики.	В целом успешное, но не систематическое умение выполнять основные физические оценки параметров процессов, относящейся к области ядерной астрофизики.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы умение выполнять основные физические оценки параметров процессов, относящейся к области ядерной астрофизики.	Успешное и систематическое умение выполнять основные физические оценки параметров процессов, относящейся к области ядерной астрофизики.
ВЛАДЕТЬ: навыками работы с научной литературой, относящейся к области ядерной астрофизики. ОПК-2.Б В-4	Отсутствие/фрагментарное владение навыками работы с научной литературой, относящейся к области ядерной астрофизики.	В целом успешное, но не систематическое владение навыками работы с научной литературой, относящейся к области ядерной астрофизики.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы владение навыками работы с научной литературой, относящейся к области ядерной астрофизики.	Успешное и систематическое владение навыками работы с научной литературой, относящейся к области ядерной астрофизики.

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

Материалы текущего контроля успеваемости обучающихся

Примеры задач и теоретических вопросов:

1. Оценить поток солнечных нейтрино на поверхности Земли.
2. Почему реакции синтеза ядер в звездах начинаются с реакции $p + p \rightarrow d + \nu_e$, идущей за счет слабого взаимодействия, а не с реакции $p + p \rightarrow d + \gamma$, идущей за счет электромагнитного взаимодействия, или других реакций, идущих в результате сильного взаимодействия?
3. Удельная мощность падающего на Землю солнечного излучения составляет $w_{\text{уд}} = 0.14 \text{ Вт/см}^2$. С какой скоростью Солнце теряет свою массу? Если эта скорость сохранится и в будущем, то сколько времени еще будет существовать Солнце?
4. Определить, какую часть своей массы δM потеряло Солнце за последние $t = 10^6$ лет (светимость Солнца $W = 4 \cdot 10^{33} \text{ эрг/с}$, масса Солнца $M = 2 \cdot 10^{33} \text{ г}$).
5. Гравитационный радиус объекта, имеющего массу M , определяется соотношением $r_G = 2GM/c^2$, где G – гравитационная постоянная. Определить величину гравитационных радиусов Земли, Солнца.
6. Рассчитайте энергию, выделяющуюся в p-p-цепочке.
7. Наряду с CNO-циклом в массивных звездах горение водорода происходит в цикле реакции, исходным ядром которого является ^{24}Mg . Постройте соответствующую цепочку реакции (Mg-Al цикл).
8. Наряду с CNO-циклом в массивных звездах горение водорода происходит в цикле реакции, исходным ядром которого является ^{20}Ne . Постройте соответствующую цепочку реакции (Ne-цикл).
9. Рассчитайте энергию $E(\text{CNO})$, выделяющуюся в углеродно-азотном цикле Бете:

$$^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{13}\text{N} + \gamma$$

$$^{13}\text{N} \rightarrow ^{13}\text{C} + e^+ + \nu_e$$

$$^{13}\text{C} + p \rightarrow ^{14}\text{N} + \gamma$$

$$^{14}\text{N} + p \rightarrow ^{15}\text{O} + \gamma$$

$$^{15}\text{O} \rightarrow ^{15}\text{N} + e^+ + \nu_e$$

$$^{15}\text{N} + p \rightarrow ^{12}\text{C} + ^4\text{He}$$
10. Какие элементы могли образовываться на дозвездной стадии эволюции Вселенной?
11. В каких реакциях на дозвездной стадии эволюции Вселенной могли образовываться изотопы He?
12. Какие особенности имеет распространенность элементов во Вселенной? Какие механизмы образования элементов ответственны за эти особенности?

Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

В результате освоения дисциплины обучающийся должен знать основы ядерной астрофизики; уметь использовать основные методы решения задач курса «Ядерная астрофизика».

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

Примеры задач и теоретических вопросов:

1. Почему в распространенности элементов наблюдаются максимумы для α -частичных ядер?
 2. В результате каких процессов образуются ядра тяжелее железа?
 3. При какой температуре T возможно слияние ядер дейтерия?
 4. Рассчитайте энергию, выделяющуюся в реакциях 1) $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$, 2) $d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$, 3) $d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$, 4) $d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$.
 5. Основным источником солнечных нейтрино является реакция $p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$. Рассчитайте максимальную энергию электронных нейтрино, образующихся в этой реакции.
 6. Солнечные нейтрино образуются в реакции $e^- + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$. Рассчитайте энергию нейтрино и ядер ${}^7\text{Li}$ в данной реакции.
 7. Какие ядерные реакции являются источниками нейтронов в r - и s -процессах?
 8. Происходит ли образование химических элементов в современную эпоху? Поясните свой ответ наблюдательными фактами.
 9. Объясните, почему распространенность нейтронно-избыточных ядер превышает распространенность нейтронно-дефицитных ядер.
 10. В результате каких реакций образуются нейтронно-дефицитные изотопы ${}^{74}\text{Se}$, ${}^{92}\text{Mo}$?
 11. Напишите ядерные реакции, в которых образуются изотопы бериллия ${}^7\text{Be}$, ${}^{10}\text{Be}$.
 12. Оцените величину запаса ядерной энергии звезды, имеющей массу Солнца.
 13. В течении какого времени на Солнце будет выделяться энергия в результате p - p -цепочки, если сохранится современная светимость Солнца?
 14. Определите энергию Q , выделяющуюся в следующих реакциях термоядерного синтеза: 1) $d + {}^6\text{Li} \rightarrow 2\alpha$, 2) $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$.
 15. Какая максимальная энергия выделяется в реакции ${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$?
- 14. Материально-техническая база, информационные технологии, программное обеспечение и информационные справочные системы**

Основная литература.

1. К.А. Постнов, А.В. Засов. Курс общей астрофизики М.: Физический факультет МГУ, 2005, 192 с., <https://phys.msu.ru/upload/iblock/aae/2005-postnov-zasov.pdf>
2. Д. А. Франк-Каменецкий. Ядерная астрофизика. — М.: Физматлит, 1967.
3. Р.Дж. Тейлер. Происхождение химических элементов, пер. с англ., М.: Атомиздат, 1975
4. В.С. Мурзин, Астрофизика космических лучей. - М.: Логос, 2007. - 733 с.
5. Б.С. Ишханов, И.М. Капитонов, И.М. Тутынь. Нуклеосинтез во Вселенной — М.: Изд-во Московского университета.— 1998.

6. C.Iliadis. Nuclear physics of stars. — WILEY-VCH Verlag GmbH&Co.KGAA, Weinheim, 2007.
7. T. Rauscher. Essentials of Nucleosynthesis and Theoretical Nuclear Astrophysics. IOP Publishing Ltd 2020 (<https://iopscience.iop.org/book/978-0-7503-1149-6>).
8. W.J.Maciel, Introduction to Stellar Structure. Springer 2016. (<https://www.springer.com/gp/book/9783319161419>)
9. M. Beech, Introducing the Stars. Formation, Structure and Evolution. Springer 2019. (<https://www.springer.com/gp/book/9783030117030>)

Дополнительная литература.

1. Ю.Э. Пенионжкевич, Ядерная астрофизика, Соросовский Образовательный журнал, 1998, № 10, с. 68, <https://www.lib.tpu.ru/fulltext/m/2010/m2/downloads/docs/nuclear-astrophysics.pdf>
2. Clayton, Donald D. Handbook of Isotopes in the Cosmos. — Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
3. В.М. Липунов. Астрофизика нейтронных звёзд. — М.: Наука, 1987, 90 с.
4. Imre Bartos, Szabolcs Marka. A nearby neutron-star merger explains the actinide abundances in the early Solar System // *Nature*. 2019. V. 569. P. 85–88.
5. Daniel M. Siegel, Jennifer Barnes & Brian D. Metzger. Collapsars as a major source of r-process elements // *Nature*. 2019. V. 569. P. 241–244.
6. Bertulani C.A., Gade A., Nuclear astrophysics with radioactive beams // *Physical Reports*. 2010. V. 485. PP. 195-259.
7. J.J.Cowan, Ch. Sneden, J.E.Lawer et al., Origin of the heaviest elements: The rapid neutron-capture process. *Rev. Mod. Phys.* 93 (2021) 015992. (<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.015002>)

Интернет-ресурсы:

- 1) <http://nrv.jinr.ru/nrv/>
- 2) <http://nuclphys.sinp.msu.ru/>
- 3) <http://np-chair.sinp.msu.ru>

Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL

9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrains PyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrains CLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продукт Haskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия
25. Программный продукт Microsoft Visio Professional 2013 академическая лицензия
26. Программный продукт Microsoft Visual Studio Professional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям

Материально-техническое обеспечение

В соответствии с требованиями п.5.3. образовательного стандарта МГУ по направлению подготовки «Физика». Занятия проводятся в лекционных аудиториях, оборудованных компьютерами и мультимедиа-проекторами.