

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**и.о. директора физтех-школы  
физики и исследований им.  
Ландау**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Астрофизический нуклеосинтез
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 90 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 60 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 60 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 180, всего зач. ед.: 4

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: И.В. Панов, д-р физ.-мат. наук

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической астрофизики и квантовой теории поля 21.05.2020

## Аннотация

Большинство астрофизических задач можно разделить всего на 2 темы – генерацию энергии и образование новых элементов. Поэтому понятно, что курс Астрофизический нуклеосинтез затрагивает многие задачи из этих двух тем и основывается на многих знаниях, полученных в бакалавриате.

Почему видимое вещество вселенной состоит в основном из водорода и гелия, как зависит работа термоядерного реактора в недрах звезд от массы звезды? Какая связь между распространенностью тяжелых элементов, таких как кадмий, редкие земли, платина и оболочечной структурой атомных ядер? И почему пики на кривой распространенности элементов двугорбы? Какой вклад в астрофизический нуклеосинтез вносят белые карлики, красные гиганты и нейтронные звезды? И при чем тут актиниды и трансаактиниды?

Ответ на эти и многие другие вопросы образования химических элементов в природе дает курс Астрофизический Нуклеосинтез.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами фундаментальных знаний в области нуклеосинтеза тяжелых ядер, изучение методов исследования нуклеосинтеза в различных сценариях, численных схем моделирования нуклеосинтеза, а также областей практического применения полученных результатов;
- формирование качественной картины образования химических элементов и классификации основных процессов нуклеосинтеза в природе;
- формирование исследовательских навыков и способности применять знания на практике.

### Задачи дисциплины

- формирование базовых знаний в области ядерной астрофизики как дисциплины, интегрирующей общезначимую и общетеоретическую подготовку физиков и обеспечивающей математические основы современных инновационных сфер деятельности;
- обучение студентов принципам создания моделей нуклеосинтеза, применения их к существующим и развивающимся сценариям эволюции космологических объектов, выявления характеристик и каналов реакций, наиболее важных для их решения;
- формирование методических приемов для выполнения исследований студентами в области ядерной астрофизики в рамках выпускных работ на степень магистра.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов

УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук
	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения

ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- ☐ место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- ☐ принципы симметрии и законы сохранения;
- ☐ новейшие открытия естествознания;
- ☐ способы расчета сечений и скоростей реакций различных термоядерных реакций;
- ☐ характеристики различных астрофизических процессов, и возможности развития различных сценариев образования химических элементов.

уметь:

- ☐ эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- ☐ работать на современной вычислительной технике;
- ☐ абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ планировать оптимальное проведение работы;
- ☐ оценивать и рассчитывать скорости термоядерных реакций;
- ☐ развивать сценарии нуклеосинтеза, адекватные физическим условиям;
- ☐ реализовывать сценарии с помощью математических моделей;
- ☐ решать описывающие нуклеосинтез уравнения и системы уравнений.

владеть:

- ☐ планированием, постановкой и обработкой результатов физических задач;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории
- ☐ математическим моделированием физических задач.
- ☐ различными методами вычислительной математики и ядерной физики, позволяющими решать задачи астрофизического нуклеосинтеза.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Ядерная астрофизика и нуклеосинтез. 4 Ядерные эпохи: от Большого Взрыва до наших дней; основные характеристики Солнца	2	4		4
2	Нуклеосинтез во Вселенной и распространенность элементов в природе	2	4		4
3	Механизмы образования новых элементов, термоядерные реакции	2	4		4
4	Термоядерные реакции и генерация энергии	2	4		4
5	Скорости реакции	2	4		4
6	Реакции распада и деления	2	4		4
7	Горение гелия, CNO-цикл. Горение углерода и кислорода; горение кремния	2	4		4
8	Реакции под действием нейтронов	2	4		4
9	S-процесс	2	4		4
10	r-процесс – взрывное образование тяжелых элементов	2	4		4
11	Классические модели нуклеосинтеза	2	4		4
12	Динамические модели нуклеосинтеза	2	4		4
13	Сценарии r-процесса	2	4		4
14	Основной и дополнительный r-процесс	2	4		4
15	Галактический нуклеосинтез и возраст Вселенной	2	4		4
Итого часов		30	60		60
Подготовка к экзамену		30 час.			
Общая трудоёмкость		180 час., 4 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 2 (Весенний)

1. Ядерная астрофизика и нуклеосинтез. 4 Ядерные эпохи: от Большого Взрыва до наших дней; основные характеристики Солнца

Основные тенденции развития ядерной астрофизики. Основные понятия и величины. Механизм выработки энергии в звездах. Основные характеристики звезд. Рождение звезды, химический состав звезд.

## 2. Нуклеосинтез во Вселенной и распространенность элементов в природе

Классификация фундаментальных процессов нуклеосинтеза легких и тяжелых элементов. Обойденные изотопы. Распространенность элементов: а) схема кругооборота вещества во вселенной; б) нуклеосинтез в звезде; в) выброс вещества межзвездную среду в конце эволюции звезды; г) изменение химического состава среды во Вселенной. Классификация процессов нуклеосинтеза: кривая распространенности и карта ядер.

## 3. Механизмы образования новых элементов, термоядерные реакции

Ядерные реакции, в т.числе при низких энергиях; эксперимент, теория; ядерные реакции и нуклеосинтез при низких энергиях; составное ядро, ядерные ширины, сечение реакции; нерезонансное сечение захвата нейтрона; нерезонансное сечение взаимодействия заряженных частиц; резонансные сечения, формула Брейта-Вигнера; Астрофизический фактор, скорости прямых и обратных реакций, пороговые реакции.

## 4. Термоядерные реакции и генерация энергии

Кинематика ядерных реакций; энергия связи атомных ядер - описание, теории, расчеты; массовые формулы и модели; энергия связи и оболочечная модель ядра.

## 5. Скорости реакции

Роль массовых моделей в расчете скоростей ядерных реакций. Термоядерные реакции: общий формализм расчета скоростей реакций, усредненных по максвелловскому спектру; понятие о теории Хаузера-Фешбаха; скорости прямых и обратных реакций; аналитические формулы для термоядерных реакций. Таблицы и базы данных.

## 6. Реакции распада и деления

Радиоактивный распад, альфа –распад, бета-распад и слабые взаимодействия, бета-спектры, влияние кулоновского поля; силовая функция бета-распада, запаздывающие процессы, фотореакции и деление ядер; спонтанное, вынужденное и запаздывающее деление; распределение ядер – продуктов деления; барьеры деления и параметр делимости; радиоактивные ряды и синтез трансуранов.

## 7. Горение гелия, CNO-цикл. Горение углерода и кислорода; горение кремния

Термоядерное горение, циклы.

Горение водорода. Протон-протонная цепочка, ветвление, энерговыделение.

Горение гелия. CNO-цикл, Ne-цикл и Mg-Al-цикл. Горение углерода и кислорода. Горение кремния.

Равновесные процессы и процессы взрывного горения.

## 8. Реакции под действием нейтронов

Образование химических элементов за FE-пиком.

Реакции под действием нейтронов: условия протекания, предельные случаи.

Связь оболочечной модели и распространенности элементов в природе.

s, r- процессы; “чистые” r- и s- элементы, экранировка.

## 9. S-процесс

Образование элементов тяжелее железа; медленный S-процесс.

Условия протекания и обогащения межзвездной среды; схема образования элементов; теория, модели, точное решение уравнений s-процесса; источники нейтронов; зависимость  $p$  от массового числа  $A$ .

#### 10. r-процесс – взрывное образование тяжелых элементов

Принципиальные отличия от s-процесса, сходство; источники нейтронов при быстром нуклеосинтезе; 3-альфа реакция; Связь энтропии и зародышевых ядер; механизмы обогащения тяжелыми элементами межзвездной среды.

Точное решение уравнений r-процесса; объяснение наблюдаемых распространенностей.

#### 11. Классические модели нуклеосинтеза

Статические модели, понятие траекторий; проблема зародышевых ядер и источник нейтронов; модели: стационарный ток ядер, суперпозиция траекторий; Две стадии быстрого нуклеосинтеза.

#### 12. Динамические модели нуклеосинтеза

Кинетическая модель – полная сетка ядерных реакций; переходные процессы; проблема зародышевых ядер и источник нейтронов; Численное решение уравнений нуклеосинтеза; путь r-процесса и формирование пиков на кривой распространенности.

#### 13. Сценарии r-процесса

Основная компонента R-процесса; нуклеосинтез при больших значениях энтропии; Килоновая, слияние нейтронных звезд в тесных двойных системах; джеты; роль деления; сверхтяжелые элементы.

#### 14. Основной и дополнительный r-процесс

Слабая компонента R-процесса; горячий ветер над поверхностью нейтронных звезд; взрывы сверхновых: SN1a, коллапсирующие сверхновые и нейтринный нуклеосинтез: роль нейтрино в образовании тяжелых элементов.

#### 15. Галактический нуклеосинтез и возраст Вселенной

Галактический нуклеосинтез по Фаулеру. Экспоненциальный и равномерный нуклеосинтез. Влияние всплеск сверхновых. Пары космохронометров и возраст Вселенной.

### 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

Учебная аудитория, оснащенная мультимедиапроектором и экраном.

### 6. Перечень рекомендуемой литературы

#### Основная литература

1. Общий курс физики [Текст] : в 5 т. Т. 5 : Атомная и ядерная физика / Д. В. Сивухин - МФизматлит : МФТИ, 2002, 2006, 2008
2. Ядерная физика [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Широков, Н. П. Юдин .— 2-е изд., перераб. — М. : Наука, 1980 .— 727 с.
3. Синтез элементов во Вселенной [Текст]/Я. М. Крамаровский, В. А. Чечев, -М., Наука, 1987
4. Астрофизические формулы. Руководство для физиков и астрофизиков [Текст]. Ч. 1/К. Ленг , -М., Мир, 1978

5. Ишханов, Б.С., Капитонов И.М., Тутынь И.А.. Нуклеосинтез во Вселенной. – М., МГУ, 1999.
6. Лучков, Июдин - конспект лекций МИФИ: ядерная астрофизика
7. Ядерная астрофизика. - сборник статей под ред. Барнса.

#### Дополнительная литература

1. Первые три минуты : Современный взгляд на происхождение Вселенной [Текст]/С. Вайнберг , -М., Энергоиздат, 1981
2. Ядерная физика [Текст] / И. В. Ракобольская ; под ред. В. А. Петухова - М.Изд-во Моск. ун-та,1981
3. Окунь Л.Б.Современное состояние физики элементарных частиц. Успехи физических наук. 1998 г. Том 168. № 6. С. 625-628. (электр. версия: <http://www.ufn.ru>).
4. Гинзбург В.Л. Астрофизика космических лучей (история и общий обзор). Успехи физических наук. 1996 г. Том 166, № 2. С. 169-183. (электр. версия: <http://www.ufn.ru>)
5. Первые три минуты : Современный взгляд на происхождение Вселенной [Текст] / С. Вайнберг ; пер. с англ. А. В. Беркова ; под ред. Я. Б. Зельдовича .— [Научное изд.] .— М. : Энергоиздат, 1981.
6. Бор, Моттelson т.1 Структура атомного. ядра
7. В.Гольданский и др. Основы ядерной физики и техники. МИФИ 1974
8. Кривохатский, Романов. Получение трансурановых элементов.
9. Рубаков В.А.Физика частиц и космологии: состояние и надежды. Успехи физических наук. 1999 г. Том 169. № 12. С. 1299-1309. ( <http://www.ufn.ru>).
10. Фаулер, У. УФН - 1985, т. 145
11. Имшенник, Надёжин, УФН - 1988 т. 156
12. Arnould, Takahashi. Nuclear Astrophysics, 1999 Rep.Prog.Phys. 62
13. Чечев, Крамаровский. УФН - 1981 , т. 134
14. Fowler, W. Royal Astronomical Society, Quarterly Journal, vol. 28, 1987, p. 87-108.

#### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

<http://www.ufn.ru>

Л.И.МАШОНКИНА <http://www.astronet.ru/db/msg/1171220>

В.Н.РЫЖОВ <http://www.astronet.ru/db/msg/1168075>

Ю.Э.ПЕНИОНЖКЕВИЧ <http://www.astronet.ru/db/msg/1168026>

<http://www.astronet.ru/db/msg/1202873>

<http://nucastro.org/tables.html>

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/fission/index.html>

<http://nuclphys.sinp.msu.ru/nuclsynt/>

<http://www.scientific.ru>

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>

<http://www.nucastrodata.org/datasets.html>

<http://www.astro.ulb.ac.be/>

#### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

zoom – инструмент проведения семинаров.

#### **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студент, изучающий курс астрофизического нуклеосинтеза, должен с одной стороны, овладеть общим понятийным аппаратом, а с другой стороны, должен научиться применять теоретические знания на практике.



В результате изучения дисциплины студент должен знать основные понятия нуклеосинтеза; типы ядерных реакций, условия, определяющие возможность нуклеосинтеза, основные астрофизические сценарии, в которых образуются новые химические элементы; уметь применять численные методы для моделирования процессов, применять полученные знания для решения различных астрофизических задач.

Основными методами астрофизического нуклеосинтеза являются математическое моделирование и численное решение систем нелинейных уравнений, описывающих нуклеосинтез.

Успешное освоение курса требует напряжённой самостоятельной работы студента. В программе курса приведено минимально необходимое время для работы студента над темой. Самостоятельная работа включает в себя:

- чтение и конспектирование рекомендованной литературы,
- проработку учебного материала (по конспектам лекций, учебной и научной литературе), подготовку ответов на вопросы, предназначенных для самостоятельного изучения, доказательство отдельных утверждений, свойств;
- решение задач, предлагаемых студентам на лекциях и практических занятиях,
- подготовку к коллоквиумам, экзамену.

Руководство и контроль за самостоятельной работой студента осуществляется в форме индивидуальных консультаций.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова кафедра теоретической астрофизики и квантовой теории поля
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 2 (весенний) - Экзамен	
<b>Разработчик:</b>	И.В. Панов, д-р физ.-мат. наук

# 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
УК-2 Способен управлять проектом на всех этапах его реализации	УК-2.1 Формулирует в рамках обозначенной проблемы, цель, задачи, актуальность, значимость (научную, практическую, методическую и иную в зависимости от типа проекта), ожидаемые результаты и возможные сферы их применения
	УК-2.2 Способен прогнозировать результат деятельности и планировать последовательность шагов для достижения данного результата. Формирует план-график реализации проекта в целом и план контроля его выполнения
	УК-2.3 Способен организовать и координировать работу участников проекта, обеспечивать работу команды необходимыми ресурсами
	УК-2.4 Представляет публично результаты проекта (или отдельных его этапов) в форме отчетов, статей, выступлений на научно-практических конференциях, семинарах и т.п.
УК-3 Способен организовывать и руководить работой команды, вырабатывая командную стратегию для достижения поставленной задачи	УК-3.1 Организует и координирует работу участников проекта, способствует конструктивному преодолению возникающих разногласий и конфликтов
	УК-3.2 Учитывает в своей социальной и профессиональной деятельности интересы, особенности поведения и мнения (включая критические) людей, с которыми работает/взаимодействует, в том числе посредством корректировки своих действий
	УК-3.3 Способен предвидеть результаты (последствия) как личных, так и коллективных действий
	УК-3.4 Способен планировать командную работу, распределять поручения членам команды, организовать обсуждение разных идей и мнений
УК-4 Способен применять современные коммуникативные технологии, в том числе на иностранном(ых) языке(ах), для академического и профессионального взаимодействия	УК-4.1 Способен вести обмен деловой информацией в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и не менее чем на одном иностранном языке
	УК-4.2 Владеет навыками, необходимыми для написания, письменного перевода и редактирования различных академических текстов (рефератов, эссе, обзоров, статей и т.д.)
	УК-4.3 Способен представлять результаты академической и профессиональной деятельности на различных научных мероприятиях, включая международные
	УК-4.4 Способен использовать современные средства информационно-коммуникационных технологий для академического и профессионального взаимодействия
УК-6 Способен определять и реализовывать приоритеты собственной деятельности и способы ее совершенствования на основе самооценки	УК-6.1 Умеет решать задачи собственного личностного и профессионального развития, определять и реализовывать приоритеты совершенствования собственной деятельности
	УК-6.2 Оценивает свою деятельность, соотносит цели, способы и средства выполнения деятельности с её результатами
	ОПК-1.1 Знает и способен использовать в профессиональной деятельности фундаментальные научные знания в области физико-математических наук

ОПК-1 Владеет системой фундаментальных научных знаний в области физико-математических наук	ОПК-1.2 Способен обобщать и критически оценивать опыт и результаты научных исследований в области профессиональной деятельности
	ОПК-1.3 Понимает междисциплинарные связи в области математики и физики и способен их применять при решении задач профессиональной деятельности
ОПК-2 Имеет представление об актуальных проблемах науки и техники в области своей профессиональной деятельности, способен на научном языке формулировать профессиональные задачи	ОПК-2.1 Имеет представление о современном состоянии исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ОПК-2.2 Способен оценивать актуальность исследований в области своей профессиональной деятельности и их практическую значимость
	ОПК-2.3 Владеет профессиональной терминологией, используемой в современной научно-технической литературе, обладает навыками устного и письменного изложения результатов научной деятельности в рамках профессиональной коммуникации
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области профессиональной деятельности, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.1 Способен анализировать задачу, планировать пути решения, предлагать и комбинировать способы решения
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области физико-математических наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знания в области физико-математических наук для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
	ОПК-4.3 Способен аргументировано выбирать способ проведения научного исследования
ОПК-5 Способен и готов к повышению квалификации, профессиональному росту и руководству коллективом в сфере своей профессиональной деятельности, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия	ОПК-5.1 Способен работать в коллективе, толерантно воспринимая социальные, этнические, конфессиональные и культурные различия
	ОПК-5.3 Стремится к получению новых знаний, профессиональному и личностному росту
ПК-1 Способен ставить, формализовывать и решать задачи, в том числе разрабатывать и исследовать математические модели изучаемых явлений и процессов, системно анализировать научные проблемы, получать новые научные результаты	ПК-1.1 Способен находить, анализировать и обобщать информацию об актуальных результатах исследований в рамках тематической области своей профессиональной деятельности
	ПК-1.2 Способен выдвигать гипотезы, строить математические модели для описания изучаемых явлений и процессов, оценивать качество разработанной модели
ПК-2 Способен самостоятельно или в качестве члена (руководителя) малого коллектива организовывать и проводить научные исследования и их апробацию	ПК-2.1 Способен планировать и проводить научные исследования самостоятельно или в составе научного коллектива
	ПК-2.2 Способен проводить апробацию результатов научно-исследовательской работы посредством публикации научных статей и участия в конференциях
ПК-3 Способен профессионально работать с исследовательским и испытательным оборудованием (приборами и установками, специализированными пакетами прикладных программ) в избранной предметной области	ПК-3.1 Понимает принципы работы используемого оборудования (специализированных пакетов прикладных программ)
	ПК-3.2 Способен проводить эксперимент (моделирование) с использованием исследовательского оборудования (пакетов прикладных программ)
	ПК-3.3 Способен оценивать точность полученных экспериментальных (численных) результатов

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Астрофизический нуклеосинтез» обучающийся должен:

**знать:**

- ☐ место и роль общих вопросов науки в научных исследованиях;
- ☐ современные проблемы физики, химии, математики;
- ☐ теоретические модели фундаментальных процессов и явлений в физике и ее приложениях;
- ☐ принципы симметрии и законы сохранения;
- ☐ новейшие открытия естествознания;
- ☐ способы расчета сечений и скоростей реакций различных термоядерных реакций;
- ☐ характеристики различных астрофизических процессов, и возможности развития различных сценариев образования химических элементов.

**уметь:**

- ☐ эффективно использовать на практике теоретические компоненты науки: понятия, суждения, умозаключения, законы;
- ☐ работать на современной вычислительной технике;
- ☐ абстрагироваться от несущественных влияний при моделировании реальных физических ситуаций;
- ☐ планировать оптимальное проведение работы;
- ☐ оценивать и рассчитывать скорости термоядерных реакций;
- ☐ развивать сценарии нуклеосинтеза, адекватные физическим условиям;
- ☐ реализовывать сценарии с помощью математических моделей;
- ☐ решать описывающие нуклеосинтез уравнения и системы уравнений.

**владеть:**

- ☐ планированием, постановкой и обработкой результатов физических задач;
- ☐ навыками самостоятельной работы в лаборатории
- ☐ математическим моделированием физических задач.
- ☐ различными методами вычислительной математики и ядерной физики, позволяющими решать задачи астрофизического нуклеосинтеза.

**3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

Темы рефератов, курсовых, докладов на семинаре:

1. Термоядерные реакции, определения, расчеты.
2. Происхождение химических элементов.
3. источники энергии звезд.
4. Термоядерный реакции в недрах Солнца.
5. Классификация процессов нуклеосинтеза и их связь с астрофизическими объектами
6. Образование элементов тяжелее железа.
7. Сценарии r-процесса.

**4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Перечень контрольных вопросов:

1. Астрофизический фактор
2. Скорости термоядерных реакций. Усреднение по максвелловскому спектру.
3. Энергия связи атомного ядра.
4. Характеристики нестабильных ядер
5. Радиоактивный распад, время жизни относительно бета и альфа-распада
6. Деление, основные характеристики
7. Бета-распад и запаздывающие процессы
8. Классификация типов нуклеосинтеза в природе
9. P-процесс и обойденные изотопы
10. Нейтрино и образование новых элементов в природе
11. роль энергии связи, избытка масс и барьеров деления в нуклеосинтезе.

12. Взрывные Сценарии в конце эволюции тесной двойной системы.
13. Энтропия и начальные условия  $\gamma$ -процесса
14. Как происходит нуклеосинтез тяжелых ядер
15. Ядра-космохронометры и метод изотопных отношений

Примеры контрольных заданий:

- 1) Используя формулу для энергии связи, определить связь между  $Z$  и  $A$  для ядер на линии стабильности
- 2) Написать уравнение образования элемента  $(Z, A)$  в  $\gamma$ -процессе
- 3) Пользуясь таблицами, определить с помощью капельной модели энергию связи ядра  $^{105}\text{Kr}$
- 4) Определить путь  $\gamma$ -процесса на основе классической модели и принципа Саха.
- 5) Используя формулу для энергии связи, определить связь между  $Z$  и  $A$  для ядер на границе нейтронной устойчивости.
- 6) Сравнить скорость образования гелия в  $pp$  и  $CNO$  циклах.

Примеры экзаменационных билетов

#### Билет 1

1. Бета-распад, энергия связи
2. Ядерные реакции при низких энергиях, формула Гамова
3. БВ: хим. состав вещества в первые 3 минуты и его зависимость от времени

#### Билет 2

1. Боровская теория яд. реакций
2.  $pp$ -цикл, эффективность  $pp$ - и  $CNO$ -циклов.
3. Нуклеосинтез тяжелых элементов под действием нейтронов

#### Билет 3

1. Законы радиоактивного распада
2. Равновесный нуклеосинтез в недрах звезд.
3. Астрофизический фактор

#### Билет 4

1. Ядерные силы
2. Скорость ядерных реакций
- 3  $\gamma$ -процесс, классическая модель

#### Билет 5

1. Запаздывающие процессы и их роль в астрофизике
2. Горение гелия,  $CNO$ -цикл,  $C$ -,  $O$ -вспышки
3. Сценарии образования тяжелых элементов

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении устного экзамена обучающемуся предоставляется 30 минут на подготовку. Опрос обучающегося по билету на устном экзамене не должен превышать одного астрономического часа.