

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ

КАФЕДРА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ И КОСМОФИЗИКИ

ОДОБРЕНО УМС ИЯФИТ

Протокол № 01/423-573.1

от 20.04.2023 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА

Направление подготовки
(специальность)

[1] 14.03.02 Ядерные физика и технологии

Семестр	Трудоемкость, кред.	Общий объем курса, час.	Лекции, час.	Практич. занятия, час.	Лаборат. работы, час.	В форме практической подготовки/В	СРС, час.	КСР, час.	Форма(ы) контроля, экс./зач./КР/КП
7	4	144	32	16	0		52	8	Э
Итого	4	144	32	16	0	8	52	8	

АННОТАЦИЯ

Изучаются классификация и свойства элементарных частиц и ядер, типы взаимодействий в природе и их проявление в ядерных процессах. Рассматриваются основные характеристики и свойства процессов множественного рождения вторичных частиц при высоких энергиях. Изучаются методы исследования структуры ядра в экспериментах по рассеянию электронов и нейтрино на ядрах, а также основные положения партонной модели, созданной в результате этих экспериментов.

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ОСВОЕНИЯ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ

Целями освоения данной учебной дисциплины являются:

1. Изучение:

- свойств элементарных частиц, а также свойств и проявлений сильных, слабых и электромагнитных взаимодействий в микромире;
- элементов теории взаимодействия адронов и лептонов с ядрами;
- основных законов ядерной физики, в т.ч. механизмов множественного рождения вторичных частиц в адрон-ядерных соударениях при высоких энергиях;
- свойств и структуры ядер в экспериментах по рассеянию нейтрино и лептонов на ядрах;
- основных положений партонной модели.

2. Выработка умений и навыков:

- рассчитывать закономерности взаимодействия ядерных излучений с веществом;
- рассчитывать основные характеристики ядер, проводить оценку вероятности их взаимодействий, распада, синтеза или деления;
- работы со спектрометрической аппаратурой;
- экспериментальных измерений характеристик элементарных частиц и ядер;
- работы со специальной научной литературой.

2. МЕСТО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВО

Для изучения дисциплины студент должен обладать знаниями, полученными при изучении курсов общей физики, в том числе, раздела «Атомная физика», а также обладать базовыми знаниями курса «Квантовая механика».

Знания, полученные студентами в рамках дисциплины, составят базовый материал для изучения многих разделов дисциплин, а также будут необходимы для выполнения научно-исследовательской работы.

3. ФОРМИРУЕМЫЕ КОМПЕТЕНЦИИ И ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ

Универсальные и(или) общепрофессиональные компетенции:

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

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

Задача профессиональной деятельности (ЗПД)	Объект или область знания	Код и наименование профессиональной компетенции; Основание (профессиональный стандарт-ПС, анализ опыта)	Код и наименование индикатора достижения профессиональной компетенции
научно-исследовательский			
проведение экспериментов по заданной методике, составление описания проводимых исследований и анализ результатов	атомное ядро, элементарные частицы и плазма, конденсированное состояние вещества, лазеры и их применения, ядерные реакторы, материалы ядерных реакторов, ядерные материалы и системы обеспечения их безопасности, ускорители заряженных частиц, современная электронная схемотехника, электронные системы ядерных и физических установок, системы автоматизированного управления ядерно-физическими установками	ПК-15.2 [1] - Способен обрабатывать, интегрировать и представлять результаты научно-исследовательских работ под контролем руководителя <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-15.2[1] - методы обработки, интегрирования и представления результатов научно-исследовательских работ ; У-ПК-15.2[1] - обрабатывать, интегрировать и представлять результаты научно-исследовательских работ ; В-ПК-15.2[1] - методами обработки, интегрирования и представления результатов научно-исследовательских работ
проведение экспериментов по заданной методике, составление описания проводимых исследований и анализ результатов	атомное ядро, элементарные частицы и плазма, конденсированное состояние вещества, лазеры и их применения, ядерные реакторы, материалы ядерных реакторов, ядерные материалы и системы обеспечения их безопасности, ускорители заряженных частиц, современная электронная схемотехника, электронные системы	ПК-15.3 [1] - Способен к участию в научных исследованиях в области физики ядра и частиц, космофизике и космологии, к самостоятельному определению необходимых средств и к их использованию для решения поставленных задач <i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011	З-ПК-15.3[1] - методы осуществления научных исследований в области физики ядра и частиц, космофизике и космологии, методы определения необходимых средств и их использования для решения поставленных задач; У-ПК-15.3[1] - выполнять научные исследования в области физики ядра

	<p>ядерных и физических установок, системы автоматизированного управления ядерно-физическими установками</p>		<p>и частиц, космофизике и космологии, самостоятельно определять необходимые средства и использовать их для решения поставленных задач; В-ПК-15.3[1] - методами осуществления научных исследованиях в области физики ядра и частиц, космофизике и космологии, методами определения необходимых средств и их использования для решения поставленных задач</p>
<p>изучение и анализ научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования</p>	<p>атомное ядро, элементарные частицы и плазма, конденсированное состояние вещества, лазеры и их применения, ядерные реакторы, материалы ядерных реакторов, ядерные материалы и системы обеспечения их безопасности, ускорители заряженных частиц, современная электронная схемотехника, электронные системы ядерных и физических установок, системы автоматизированного управления ядерно-физическими установками</p>	<p>ПК-15.5 [1] - Способен к общему физическому анализу процессов взаимодействия элементарных частиц, их эффектов в космическом пространстве и/или во Вселенной в целом</p> <p><i>Основание:</i> Профессиональный стандарт: 40.011</p>	<p>З-ПК-15.5[1] - методы физического анализа процессов взаимодействия элементарных частиц, их эффектов в космическом пространстве и/или во Вселенной в целом ; У-ПК-15.5[1] - осуществлять физический анализ процессов взаимодействия элементарных частиц, их эффектов в космическом пространстве и/или во Вселенной в целом ; В-ПК-15.5[1] - методами физического анализа процессов взаимодействия элементарных</p>

		частиц, их эффектов в космическом пространстве и/или во Вселенной в целом
--	--	---

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/ Практик. (семинары) / Лабораторные работы, час.	Обязат. текущий контроль (форма*, неделя)	Максимальный балл за раздел**	Аттестация раздела (форма*, неделя)	Индикаторы освоения компетенции
	<i>7 Семестр</i>						
1	Рассеяние адронов на ядрах при высоких энергиях	1-8	16/8/0		25	Т-8	3-ПК-15.2, У-ПК-15.2, В-ПК-15.2, 3-ПК-15.3, У-ПК-15.3, В-ПК-15.3, 3-ПК-15.5, У-ПК-15.5, В-ПК-15.5
2	Партонная модель	9-16	16/8/0		25	Т-16	3-ПК-

							15.2, У- ПК- 15.2, В- ПК- 15.2, 3-ПК- 15.3, У- ПК- 15.3, В- ПК- 15.3, 3-ПК- 15.5, У- ПК- 15.5, В- ПК- 15.5
	<i>Итого за 7 Семестр</i>		32/16/0		50		
	Контрольные мероприятия за 7 Семестр				50	Э	3-ПК- 15.2, У- ПК- 15.2, В- ПК- 15.2, 3-ПК- 15.3, У- ПК- 15.3, В- ПК- 15.3, 3-ПК- 15.5, У- ПК- 15.5, В- ПК- 15.5

* – 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
Т	Тестирование
Э	Экзамен

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

Недели	Темы занятий / Содержание	Лек., час.	Пр./сем., час.	Лаб., час.
	<i>7 Семестр</i>	32	16	0
1-8	Рассеяние адронов на ядрах при высоких энергиях	16	8	0
1	1. Кинематика столкновений при высоких энергиях. Быстрота и псевдобыстрота, мандельштамовские переменные, эффективная и недостающая массы, скейлинговые переменные частиц в экспериментах на коллайдерах. Импульсная диаграмма для релятивистского случая. Углы разлёта и вылета в двухчастичных распадах	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
2	2. Диаграммы Фейнмана. Правила составления графов. Диаграммы Фейнмана в первом порядке теории возмущений для ионизационных потерь, многократного рассеяния, тормозного излучения, комптоновского рассеяния, e^+e^- -аннигиляции. Оценка зависимости сечений этих процессов от заряда, массы взаимодействующих частиц и постоянной тонкой структуры.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
3	3. Оптическое приближение для описания рассеяния частиц. Оптическая теорема. Ограничения на поперечные сечения, возникающие из условия унитарности. Резонансная ф-ла Брейта-Вигнера. Нуклонные резонансы	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
4	4. Рассеяние адронов и нуклонов при высоких энергиях. Теорема Померанчука. Рассеяние адронов и нуклонов при высоких энергиях. Теорема Померанчука.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
5	5. Теория Глаубера-Ситенко многократного рассеяния нуклона на ядре. Представление прицельного параметра. Функция ядерной толщины. Среднее число неупругих столкновений в протон-ядерных взаимодействиях.	Всего аудиторных часов		
		2	1	0
		Онлайн		
		0	0	0
6 - 7	6. Процессы множественного рождения вторичных частиц при высоких энергиях. Средняя множественность вторичных частиц в процессах множественного рождения. Топологическое сечения. Фейнмановский скейлинг. Масштабная инвариантность. КНО-скейлинг. Статистические, гидродинамические и мультипериферические модели.	Всего аудиторных часов		
		4	2	0
		Онлайн		
		0	0	0
8	7. Дифракционные процессы множественного рождения Дифракционные процессы множественного рождения и их	Всего аудиторных часов		
		2	1	0

	основные характеристики: средняя множественность, дифференциальное сечение, масса дифракционной системы.	Онлайн	0	0	0
9-16	Партонная модель	16	8	0	
9	8. Упругое рассеяние электрона на протоне в приближении однофотонного обмена. Формула Розенблюта. Распределение зарядовой плотности в ядрах. Электрический и магнитный формфакторы ядра, метод их измерения в эксперименте.	Всего аудиторных часов	2	1	0
		Онлайн	0	0	0
10	9. Неупругое рассеяние электрона на протоне. Структурные функции нуклона. Бьёркеновский скейлинг. Соотношение Калана-Гросса.	Всего аудиторных часов	2	1	0
		Онлайн	0	0	0
11	10. Партонная модель. Импульсные распределения валентных и морских кварков, а так же глюонов в нуклоне. EMC-эффект. Ядерное экранирование.	Всего аудиторных часов	2	1	0
		Онлайн	0	0	0
12	11. Глубоконеупругое рассеяние нейтрино на ядрах. Зависимость сечения от энергии. Структурные функции рассеяние нейтрино на нуклонах. Определение числа кварков в нуклоне. Правило сумм Гросса — Ллевелин-Смита. Определение зарядов кварков в экспериментах по $\nu(\bar{\nu})N$ -рассеянию	Всего аудиторных часов	2	1	0
		Онлайн	0	0	0
13 - 14	12. Струйное рождение адронов в $e+e-$—аннигиляции Асимметрия «вперед-назад». Определение числа ароматов кварков из отношения $\sigma(e+e- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e+e- \rightarrow \mu+\mu-)$. Экспериментальное определение зарядов кварков. Экспериментальное определение спинов глюонов. Алгоритмы реконструкции струй, переменные характеризующие форму события. Экспериментальные результаты исследования двухструйных событий на LHC	Всего аудиторных часов	4	2	0
		Онлайн	0	0	0
15	13. Сечение рождение мюонной пары при соударении адронов (процесс Дрелла—Яна) Определение структурных функций в процессах Дрелла—Яна, их масштабная инвариантность . Экспериментальные результаты измерения сечения процессов Дрелла—Яна на LHC	Всего аудиторных часов	2	1	0
		Онлайн	0	0	0
16	14. Цветовое взаимодействие между кварками. Сечение рождения двух струй. КХД потенциал. Модель струны. Эффекты кварковых взаимодействий в глубоконеупругом лептон-нуклонном рассеянии. Бегущая константа связи КХД. Эволюция структурных функций.	Всего аудиторных часов	2	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

ТЕМЫ СЕМИНАРОВ

Недели	Темы занятий / Содержание
	<i>7 Семестр</i>
1	1. Кинематика столкновений при высоких энергиях. Быстрота и псевдобыстрота, мандельштамовские переменные, эффективная и недостающая массы, скейлинговые переменные частиц в экспериментах на коллайдерах. Импульсная диаграмма для релятивистского случая. Углы разлёта и вылета в двухчастичных распадах
2	2. Понятие о диаграммах Фейнмана Правила составления графов. Диаграммы Фейнмана в первом порядке теории возмущений для ионизационных потерь, многократного рассеяния, тормозного излучения, комптоновского рассеяния, e^+e^- -аннигиляции. Оценка зависимости сечений этих процессов от заряда, массы взаимодействующих частиц и постоянной тонкой структуры.
3	3. Оптическое приближение для описания рассеяния частиц. Оптическая теорема. Ограничения на поперечные сечения, возникающие из условия унитарности. Резонансная f -ла Брейта-Вигнера. Нуклонные резонансы
4	4. Рассеяние адронов и нуклонов при высоких энергиях. Теорема Померанчука. Рассеяние адронов и нуклонов при высоких энергиях. Теорема Померанчука.
5	5. Теория Глаубера-Ситенко многократного рассеяния нуклона на ядре. Представление прицельного параметра. Функция ядерной толщины. Среднее число неупругих столкновений в протон-ядерных взаимодействиях.
6 - 7	6. Процессы множественного рождения вторичных частиц при высоких энергиях. Средняя множественность вторичных частиц в процессах множественного рождения. Топологическое сечения. Фейнмановский скейлинг. Масштабная инвариантность. КНО-скейлинг. Статистические, гидродинамические и мультипириферические модели.
8	7. Дифракционные процессы множественного рождения Дифракционные процессы множественного рождения и их основные характеристики: средняя множественность, дифференциальное сечение, масса дифракционной системы.
9	8. Упругое рассеяние электрона на протоне в

	приближении однофотонного обмена. Формула Розенблюта. Распределение зарядовой плотности в ядрах. Электрический и магнитный формфакторы ядра, метод их измерения в эксперименте.
10	9. Неупругое рассеяние электрона на протоне. Структурные функции нуклона. Бьёркеновский скейлинг. Соотношение Калана-Гросса.
11	10. Партоновая модель. Импульсные распределения валентных и морских кварков, а так же глюонов в нуклоне. EMC-эффект. Ядерное экранирование.
12	11. Глубоконеупругое рассеяние нейтрино на ядрах Зависимость сечения от энергии. Структурные функции рассеяние нейтрино на нуклонах. Определение числа кварков в нуклоне. Правило сумм Гросса — Ллевелин-Смита. Определение зарядов кварков в экспериментах по $\nu(\bar{\nu})N$ -рассеянию
13 - 14	12. Струйное рождение адронов в e^+e^-—аннигиляции. Асимметрия «вперед-назад». Определение числа ароматов кварков из отношения $\sigma(e^+e^- \rightarrow \text{адроны})/\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)$. Экспериментальное определение зарядов кварков. Экспериментальное определение спинов глюонов. Алгоритмы реконструкции струй, переменные характеризующие форму события. Экспериментальные результаты исследования двухструйных событий на LHC
15	13. Сечение рождение мюонной пары при соударении адронов (процесс Дрелла—Яна) Определение структурных функций в процессах Дрелла—Яна, их масштабная инвариантность . Экспериментальные результаты измерения сечения процессов Дрелла—Яна на LHC
16	14. Цветовое взаимодействие между кварками. Сечение рождения двух струй. КХД потенциал. Модель струны. Эффекты кварковых взаимодействий в глубоконеупругом лептон-нуклонном рассеянии. Бегущая константа связи КХД. Эволюция структурных функций.

6. ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Курс состоит из двух форм обучения: лекции и семинары. Лекции проводятся с использованием современных технологий, в т. ч. мультимедийных. На семинарских занятиях студенты решают типичные задачи по ядерной физике, проводится разбор практических задач. Предусмотрено обучение в сотрудничестве и групповая работа студентов, а также семинары-практикумы, индивидуальные и групповые консультации.

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-15.2	З-ПК-15.2	Э, Т-8, Т-16
	У-ПК-15.2	Э, Т-8, Т-16
	В-ПК-15.2	Э, Т-8, Т-16
ПК-15.3	З-ПК-15.3	Э, Т-8, Т-16
	У-ПК-15.3	Э, Т-8, Т-16
	В-ПК-15.3	Э, Т-8, Т-16
ПК-15.5	З-ПК-15.5	Э, Т-8, Т-16
	У-ПК-15.5	Э, Т-8, Т-16
	В-ПК-15.5	Э, Т-8, Т-16

Шкалы оценки образовательных достижений

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

Итоговая оценка выставляется в соответствии со следующей шкалой:

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

	«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 Т16 Fundamentals of Nuclear Physics : , Tokyo: Springer Japan, 2017
2. ЭИ Б 18 Квантовая механика : учебное пособие, Москва: Лаборатория знаний, 2020
3. 539.1 С23 Сборник задач по курсу "Ядерная физика" : учебное пособие, Москва: НИЯУ МИФИ, 2019
4. ЭИ Ф 80 Физика высоких плотностей энергии : учебное пособие, Москва: Физматлит, 2013

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

1. 53 J22 Statistical methods in experimental physics : , New Jersey [and oth.]: World scientific, 2012

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

1. Обратить внимание на представления и теоретические результаты, рассмотренные в курсе квантовой механики, лежащие в основе рассматриваемых явлений и моделей ядерной физики.

2. Понимать, какими взаимодействиями обусловлены рассматриваемые конкретные процессы.

3. Понимать, в каких типах взаимодействий могут участвовать различные частицы, представлять приблизительное соотношение между интенсивностями различных видов взаимодействий.

4. Обратит внимание на поведение сечений взаимодействия частиц при низких энергиях в зависимости от типа взаимодействия и энергетического баланса.

5. Знать экспериментальные основания использования коллективных и моделей ядер и главные предсказания, следующие из них. Обратит внимание на способы измерения статических свойств ядер.

6. Уделить особое внимание на зависимость характера прохождения частиц через вещество от типа частиц, ее энергии и от параметров вещества, имея в виду, что понимание этих процессов лежит в основе многих аспектов регистрации частиц и их воздействия на среду.

11. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ

1. Обратит внимание на представления и теоретические результаты, рассмотренные. Акцентировать внимание студентов на связи модельных описаний статических и динамических ядерных процессов с основными представлениями квантовой механики.

2. При изложении курса приводить примеры практического применения ядерно-физических процессов и методик исследования.

3. Акцентировать внимание на действия законов сохранения (как классических, так и ядерно-физических) при рассмотрении ядерных реакций и процессов.

4. Уделить внимание ядерно-физическим, экологическим и гуманистическим проблемам использования процессов деления и синтеза элементов для получения энергии.

5. Обратит внимание на основополагающую роль ядерно-физических процессов в прикладных исследованиях, а также в космогонии и астрофизике (радиоизотопные источники и маркеры, экологические аспекты, использование анализа по космогенным изотомам для определения возраста изделий и пород, происхождение элементов, горение и взрывы звезд, нейтронные звезды).

Автор(ы):

Булеков Олег Владимирович, к.ф.-м.н., доцент