



**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

**«ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ФГБОУ ВО «ИГУ»

Кафедра общей и космической физики



**УТВЕРЖДАЮ**

**Декан физического факультета**

**Физический факультет** / Н.М. Буднев

2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**

**Наименование дисциплины (модуля):** Б1.В.07 Экспериментальные методы в ядерной физике

**Направление подготовки:** 03.04.02 Физика

**Направленность (профиль) подготовки:** Астрофизика высоких энергий

**Квалификация выпускника:** магистр

**Форма обучения:** очная

Согласовано с УМК:  
физического факультета  
Протокол № 33 от «31» марта 2022 г.

**Председатель:** д.ф.-м.н., профессор  
Н.М. Буднев

**Рекомендовано кафедрой:**  
общей и космической физики  
**Протокол №** 8  
от «14» марта 2022 г.  
**Зав.кафедрой** д.ф.-м.н., профессор  
Паперный В.Л.

Иркутск 2022 г.

## Содержание

<b>I. Цели и задачи дисциплины (модуля)</b> .....	3
<b>II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО</b> .....	3
<b>III. Требования к результатам освоения дисциплины</b> .....	3
<b>IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)</b> .....	4
4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов .....	5
4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине .....	6
4.3. Содержание учебного материала .....	7
4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ .....	8
4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС) .....	9
4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов .....	9
4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии) .....	9
<b>V. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)</b> .....	10
а) <i>перечень литературы</i> .....	10
б) <i>периодические издания</i> .....	10
в) <i>список авторских методических разработок</i> .....	10
г) <i>базы данных, информационно-справочные и поисковые системы</i> .....	10
<b>VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)</b> .....	11
6.1. Учебно-лабораторное оборудование: .....	11
6.2. Программное обеспечение: .....	11
6.3. Технические и электронные средства: .....	11
<b>VII. Образовательные технологии</b> .....	11
<b>VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации</b> .....	11
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ: Фонд оценочных средств</b> .....	13

## I. Цели и задачи дисциплины (модуля)

Программа курса «**Экспериментальные методы в ядерной физике**» составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки **03.04.02 Физика**).

**Цель программы** - познакомить студентов с основными процессами, происходящими при взаимодействии элементарных частиц и гамма-квантов с веществом, а также с экспериментальными методиками использующие данные процессы для регистрации частиц, применяемыми в ядерной физике и физике элементарных частиц. Значительное внимание уделено особенностям взаимодействия заряженных и нейтральных частиц с веществом, описанию основных характеристик детекторов физики частиц, а также различным методикам идентификации.

## II. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО

Дисциплина «Экспериментальные методы в ядерной физике» входит в часть, формируемую участниками образовательных соотношений, блока Б1 ОПОП по направлению 03.04.02 Физика. Она является основой таких научных дисциплин как «Нейтронная астрофизика», «Экспериментальные методы в астрофизике высоких энергий» и т.п. Курс перебрасывает мост от таких общеобразовательных предметов как квантовая механика и квантовая электродинамика к спецкурсам по указанным выше дисциплинам.

Изучение данной дисциплины опирается на знания, полученные при изучении дисциплин бакалавриата: «Высшая математика», «Атомная физика», «Теоретическая физика», «Ядерная физика» и «Взаимодействие излучений с веществом».

Программа курса ориентирована на тематику научных исследований, развиваемых кафедрами физического факультета.

## III. Требования к результатам освоения дисциплины

Процесс изучения дисциплины (модуля) направлен на формирование следующих компетенций:

- Способен использовать астрофизические методы в научных исследованиях (ПК-1);

### Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю), соотнесенных с индикаторами достижения компетенций

Компетенция	Индикаторы компетенций	Результаты обучения
ПК-1	ИДК ПК.1.1 Способен использовать астрофизические методы для описания процессов в астрофизических исследованиях	<b>Знать:</b> основные понятия экспериментальных методов ядерной физики, большинство из которых применяется в физике элементарных частиц: потери энергии частиц при прохождении через вещество, многократное рассеяние, тормозное излучение, фотоэффект, Комптоновское рассеяние, рождение пар и т.д. А также знать основные детекторные методики, их параметры и особенности применения. <b>Уметь:</b> оценивать характерные физические величины детекторов элементарных частиц: точность измерения ионизационных потерь, точность

		<p>измерения времени пролета сцинтилляционным счетчиком, энергетическое разрешение калориметры и д.р.. Уметь решать задачи, связанные с разработкой новых систем регистрации частиц.</p> <p><b>Владеть:</b> простейшими методами оценки процессов, происходящих при прохождении (регистрации) частиц в детекторах элементарных частиц</p>
--	--	---

#### IV. Содержание и структура дисциплины (модуля)

Объем дисциплины составляет 2 зачетных единицы, 72 часов,

в том числе 47 часов контактной работы.

Занятия проводятся только в очной форме обучения с применением дистанционного контроля самостоятельной работы студентов. Электронной и дистанционной форм обучения не предусматривается.

На практическую подготовку отводится 18 аудиторных часов (во время практических занятий).

Форма промежуточной аттестации: зачёт.

**4.1. Содержание дисциплины, структурированное по темам, с указанием видов учебных занятий и отведенного на них количества академических часов**

№ п/п	Раздел дисциплины/тема	Семестр	Всего часов	Из них практическая подготовка обучающихся	Виды учебной работы, включая самостоятельную работу обучающихся, практическую подготовку и трудоемкость (в часах)				Формы текущего контроля успеваемости; Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
					Контактная работа преподавателя с обучающимися			Самостоятельная работа	
					Лекции	Семинарские/практические/лабораторные занятия	Консультации		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	<i>Раздел 1. Прохождение тяжелых частиц через вещество.</i>	1	8.1	4	2	2	0,1	4	Опрос, решение задач на практическом занятии
2	<i>Раздел 2. Прохождение электронов через вещество.</i>	1	8.2	4	2	2	0,2	4	
3	<i>Раздел 3. Прохождение <math>\gamma</math>-квантов через вещество.</i>	1	8.2	2	2	2	0,1	4	
4	<i>Раздел 4. Электромагнитные ливни</i>	1	6.1	2	2	2	0,1	2	
5	<i>Раздел 5. Прохождение адронов через вещество</i>	1	7.1	2	2	2	0,1	2	
6	<i>Раздел 6. Широкие атмосферные ливни</i>	1	8.1	2	2	2	0,1	4	
7	<i>Раздел 7. Методы регистрации частиц и приборы</i>	1	12.2	2	4	4	0,2	4	
8	<i>Раздел 8. Радиация, радиоактивность и защита от радиации</i>	1	5,1	2	2	2	0,1	1	
	Зачёт		4						
	КСР		6						
	КОНтроль		4						
	<b><u>Итого часов</u></b>		<b>72</b>		<b>18</b>	<b>18</b>	<b>1</b>	<b>25</b>	

#### 4.2. План внеаудиторной самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

Семестр	Название раздела, темы	Самостоятельная работа обучающихся			Оценочное средство	Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы
		Вид самостоятельной работы	Сроки выполнения	Трудоемкость (час.)		
1	Все разделы	Решение задач	В течение семестра	20	Готовое решение задачи в письменном виде	[1-2]
1	Подготовка к дискуссии на практических занятиях	Работа с учебной литературой	В течение семестра	5	Дискуссия	[1-2]
Общий объем самостоятельной работы по дисциплине (час)				<b>25</b>		

### 4.3. Содержание учебного материала

#### *Раздел 1. Прохождение тяжелых частиц через вещество.*

1. Ионизационные потери, формула Бете-Блоха, Эффект плотности, Плато Ферми,  $dE/dt \text{ min.}$
2.  $\delta$ -электроны. Первичная и полная ионизация . Число  $\delta$ -электронов. Формула Резерфорда.
3. Флуктуации ионизационных потерь. Флуктуации Гаусса. Флуктуации Ландау. Флуктуации для сверхтонких слоев.
4. Связь пробег-энергия. Разброс пробегов .
5. Многократное рассеяние. Среднеквадратичное значение угла. Формула Росси. Область применимости формулы Росси. Теория Мольера
6. Функции распределения по углу. Поперечное смещение.

#### *Раздел 2. Прохождение электронов через вещество.*

1. Особенности ионизационных потерь, многократного рассеяния, пробега.
2. Тормозное излучение электронов. Теория Бете–Гайтлера. Спектр излучения Потери энергии на излучение. Критическая энергия. Радиационная единица .
3. Угловое распределение  $\gamma$ -квантов. Флуктуации потерь энергии на излучение.

#### *Раздел 3. Прохождение $\gamma$ -квантов через вещество.*

1. Особенности прохождения нейтральных частиц через вещество. Коэфф. поглощения. Длина поглощения.
2. Фотоэффект. Сечение. Зависимость от энергии. Угловое распределение электронов.
3. Эффект Комптона. Полное сечение. Энергетическое и угловое распределение рассеянных  $\gamma$ -квантов Энергетическое и угловое распределение электронов.
4. Рождение пар. Порог реакции. Коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов в процессе рождения пар. Распределение энергии между электроном и позитроном. Угловое распределение электронов.
5. Суммарный коэффициент поглощения  $\gamma$ -квантов.

#### *Раздел 4. Электромагнитные ливни*

1. Качественная картина. Максимум энергосодержания. Продольный профиль ливня. Размер ливня в тяжелых и легких веществах. Ливни от электронов и  $\gamma$ -квантов. Поперечный размер ливня.

#### *Раздел 5. Прохождение адронов через вещество*

1. Протон. Ядерный пробег.
2.  $\pi$ -мезон. Ядерный пробег
3. Адронные ливни в плотном веществе.

#### *Раздел 6. Широкие атмосферные ливни*

1. Особенности адронных и электромагнитных ливней в атмосфере.

#### *Раздел 7. Методы регистрации частиц и приборы.*

1. Назначение и основные параметры детекторов элементарных частиц. Наблюдаемые частицы (заряженные, нейтральные). Принцип идентификации заряженных частиц.
2. Методы регистрации частиц. Обоснование необходимости усиления сигнала. Основные детекторные технологии, их параметры, преимущества и недостатки.
3. Сцинтилляторы. Типы сцинтилляторов. Механизмы сцинтилляций. Конверсионная эффективность. Отношение  $\alpha/\beta$ . Время высвечивания.
4. Основные методы регистрации света. ФЭУ. Типы фотокатодов. Квантовая эффективность, спектральная чувствительность, интегральная чувствительность.
5. Коэффициент вторичной эмиссии. Основные виды ФЭУ, типы динодов. Требование к стабильности напряжения питания ФЭУ.
6. Шумы Фотоумножителей. ФЭУ в магнитном поле.
7. Амплитудное разрешение . Флуктуации каскадных процессов. Флуктуации в случае да-

- нет. Флуктуация числа фотоэлектронов. Флуктуации коэффициента усиления. Энергетическое разрешение ФЭУ.
8. Форма импульса напряжения на выходе с ФЭУ. Выбор оптимальной RC-цепочки для наилучшего амплитудного разрешения.
  9. Временное разрешение сцинтилляционного счетчика. Конечное время высвечивания сцинтиллятора. Конечное время сбора света. ФЭУ. Разброс времени прохождения лавины усиления.
  10. Черенковские детекторы. Открытие явления. Качественная природа явления. Основные свойства черенковского излучения. Черенковский угол. Интенсивность черенковского излучения. Поляризация.
  11. Пороговые счетчики. Основные материалы радиаторов излучения. Основные источники допороговых срабатываний.
  12. Счетчики с использованием черенковского угла. Дифференциальные счетчики. Счетчик Фитча. RICH. DIRC. Фокусирующий RICH.
  13. Регистрация черенковского света широких атмосферных ливней. Разделение адронных и электромагнитных ливней в черенковских телескопах.
  14. Скорость дрейфа ионов и электронов в газе. Рекомбинация. Требование на сродство к электрону для газов, используемых в детекторах.
  15. Механизм газового усиления. Коэффициент газового усиления. Первый и второй коэффициенты Таунсенда. Требование к рабочему газу. Пространственное разрешение. Кластерный эффект. Амплитудное разрешение пропорциональной камеры.
  16. Счетчик полного поглощения (калориметры). Зависимость энергетического разрешения от энергии. Основные виды калориметров. Точность измерения координаты гамма-кванта.
  17. Полупроводниковые детекторы. Кремниевые ФЭУ (SiPM).

*Раздел 8. Радиация, радиоактивность и защита от радиации.*

1. Основные определения. Активность радионуклидов. Поглощенная доза. Экспозиционная доза. Доза в органе или ткани. Эквивалентная доза. Эффективная доза.
2. Воздействие ионизирующего излучения на ткани и организмы.
3. Источники радиации. Естественная радиоактивность. Искусственные источники. Сопоставление доз. Оценка доз от потока минимально ионизирующих частиц и от гамма-квантов.
4. Нормы облучения. Возможные последствия. Сравнение радиационных рисков с другими источниками опасности.

**4.3.1. Перечень семинарских, практических занятий и лабораторных работ**

№ п/п	№ раздела и темы дисциплины (модуля)	Наименование семинаров, практических и лабораторных работ	Трудоемкость (часы)	Оценочные средства	Формируемые компетенции
1	2	3	4	5	6
1.	Тема 1	Прохождение тяжелых частиц через вещество	2	Решение задач	ПК-1
2.	Тема 2	Прохождение электронов через вещество	2	Решение задач	
3.	Тема 3	Прохождение $\gamma$ -квантов через вещество	2	Решение задач	
4.	Тема 4	Электромагнитные ливни	2	Решение задач	
5.	Тема 5	Прохождение адронов через вещество	2	Решение задач	



6.	Тема 6	Широкие атмосферные ливни	2	Решение задач
7.	Тема 7	Методы регистрации частиц и приборы	4	Решение задач
8.	Тема 8	Радиация, радиоактивность и защита от радиации	2	Решение задач

#### 4.3.2. Перечень тем (вопросов), выносимых на самостоятельное изучение студентами в рамках самостоятельной работы (СРС)

№ нед.	Тема	Вид самостоятельной работы	Задание	Рекомендуемая литература	Количество часов
1.	Все темы	- решение задач	- решить задачу - вывести формулу	Вся рекомендуемая литература	60
2.	Все темы	Подготовка к зачёту		Вся рекомендуемая литература	3
3.	Текущие консультации				4

#### 4.4. Методические указания по организации самостоятельной работы студентов

Самостоятельная работа реализуется:

- 1) Непосредственно в процессе аудиторных занятий, при решении задач.
- 2) В контакте с преподавателем вне рамок расписания - на консультациях по учебным вопросам, в ходе творческих контактов, при ликвидации задолженностей, при выполнении индивидуальных заданий и т.д.
- 3) В библиотеке, дома, в общежитии, на кафедре при выполнении студентом учебных и творческих задач.

#### 4.5. Примерная тематика курсовых работ (проектов) (при наличии)

Курсовые работы не планируются.

## Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины (модуля)

### а) перечень литературы

#### основная литература

1. Экспериментальная ядерная физика [Электронный ресурс] : учебник : в 3 т. - Электрон. текстовые дан. – ЭБС "Лань". – неогранич. доступ. – Т. 1 : Физика атомного ядра / К. Н. Мухин. – Москва : Лань, 2009. – 336 с.
2. Онучин, А. П. Экспериментальные методы ядерной физики [Электронный ресурс] : учебник / А. П. Онучин. - Электрон. текстовые дан. - Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2010. – 221 с. ; нет. - ЭБС "Рукопт". – неогранич. доступ. – ISBN 978-5-7782-1232-9

#### дополнительная литература

1. Бузулуцков, Алексей Федорович. Современные экспериментальные методики в физике высоких энергий: учебно-методическое пособие по курсу лекций для магистрантов / А.Ф. Бузулуцков. – Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2009. – 30 с. – <https://hepdep.inp.nsk.su/docs-open/Lectures.pdf> (1)
2. Tanabashi et al. M. Passage of Particles Through Matter (review) / ParticleDataGroup // Phys. Rev. D, 2018. – V.98. – 030001. – <http://pdg.lbl.gov/2018/reviews/rpp2018-rev-passageparticles-matter.pdf>
3. Grupen, C. PARTICLE DETECTORS / C. Grupen and B. A. Shwartz. – New York: Cambridge University Press, 2008. – 651p. – [http://kaf07.mephi.ru/eduroom/Books/Particle\\_Detectors\\_Grupen.pdf](http://kaf07.mephi.ru/eduroom/Books/Particle_Detectors_Grupen.pdf)

### б) периодические издания

- нет необходимости.

### в) список авторских методических разработок

1. В системе образовательного портала ИГУ (<http://educa.isu.ru/>) размещены методические материалы и задания по данному курсу.

### г) базы данных, информационно-справочные и поисковые системы

- 1) <http://library.isu.ru/ru>
- 2) ЭЧЗ «Библиотех» <https://isu.bibliotech.ru/>
- 3) ЭБС «Лань» <http://e.lanbook.com/>
- 4) ЭБС «Рукопт» <http://rucont.ru>
- 5) ЭБС «Айбукс» <http://ibooks.ru>
- 6) Веб-страница Particle Data Group <http://pdg.lbl.gov/>

## VI. Материально-техническое обеспечение дисциплины (модуля)

### 6.1. Учебно-лабораторное оборудование:

Учебная аудитория для проведения занятий. Использование глобальной компьютерной сети позволяет обеспечить доступность Интернет-ресурсов и реализовать самостоятельную работу студентов. На лекциях могут использоваться мультимедийные средства: проектор, переносной экран, ноутбук. Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется

Материалы: научные статьи и монографии из рецензируемых журналов, рассматривающие современные подходы и исследования в физике.

### 6.2. Программное обеспечение:

Стандартные сервисы глобальной сети Интернет, стандартные программы для показа презентаций и документов в формате pdf.

### 6.3. Технические и электронные средства:

Во время лекционных занятий студентам демонстрируются на экране материалы курса в виде презентаций.

## VII. Образовательные технологии

Задачи изложения и изучения дисциплины реализуются в следующих формах деятельности:

- **лекции**, нацеленные на получение необходимой информации, и ее использование при решении практических задач;
- **практические занятия**, направленные на активизацию познавательной деятельности студентов и приобретения ими навыков решения практических и проблемных задач;
- **консультации** – еженедельно для всех желающих студентов;
- **самостоятельная внеаудиторная работа** направлена на приобретение навыков самостоятельного решения задач по дисциплине;
- **текущий контроль** за деятельностью студентов осуществляется на лекционных и практических занятиях в виде самостоятельных работ

## VIII. Оценочные материалы для текущего контроля и промежуточной аттестации

Фонд оценочных средств (ФОС) представлен в приложении.

### 8.1.1. Оценочные средства для входного контроля

Для изучения данного курса студент должен знать основы физики и информатики, уметь пользоваться стандартными поисковыми сервисами сети Интернет. Входной контроль знаний не проводится.

### 8.1.2. Оценочные средства текущего контроля

В течение семестра, после окончания первой части данного курса проводится контрольная работа: после окончания каждой темы проводится дискуссия, в которой участвуют все студенты (обсуждаются особенности теоретических моделей, сравниваются различные экспериментальные методы, анализируются возможные ошибки в экспериментах и т.д.). Участие в дискуссиях является обязательным для всех студентов.

**Пример заданий контрольной работы:**

1.  $\alpha$ -частица с кинетической энергией 40 МэВ проходит 1 см в воздухе при нормальных условиях. Оценить ионизационные потери.
2. Пороговый черенковский счетчик детектора КЕДР использует аэрогель с показателем преломления  $n=1.05$  (плотность  $0.234 \text{ г/см}^3$ ), толщина аэрогеля в счетчике 7 см. Оценить допороговую эффективность для каонов с энергией 1500 МэВ за счет образования  $\delta$ -электронов в аэрогеле.
3. Пион с кинетической энергией 1 ГэВ проходит 1 см воды. Найти относительные флуктуации ионизационных потерь.
4. Найти пробег пиона с энергией 10 МэВ в воздухе, зная, что для нерелятивистской  $\alpha$ -частицы пробег в воздухе дается следующей формулой:  $R\alpha = 0.3T^{3/2}$ , где  $R$  измеряется в см, а  $T$  – в МэВ.
5. Пучок электронов с импульсом 1 ГэВ/с пролетает через магнитный спектрометр (дипольный магнит) состоящий из магнита длиной 1 метр и полем 1 Тл. Угол влета частиц постоянный. Оценить поперечное отклонение в магнитном поле на выходе из магнита, сравнить данное отклонение с характерным сдвигом за счет эффекта многократного рассеяния в воздухе.
6. Электрон с энергией 3 ГэВ пролетает через стальную мишень и излучает тормозные  $\gamma$  – кванты. Оценить толщину мишени, при которой средний угол многократного рассеяния электрона в мишени сравнится с характерным углом тормозного излучения.
7. Оценить поглощенную дозу в течении года от потока космических мюонов ( $10^{-2} \text{ см}^2 \cdot \text{с}$ ). Считать мюоны минимально ионизирующими частицами

**11.3. Оценочные средства для промежуточной аттестации**

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на зачете. Зачет проводится в конце семестра в зачетную неделю по билетам в устной форме. Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем.

**Пример билетов к зачёту (всего 20 билетов):****Билет 1.**

1. Ионизационные потери, формула Бете-Блоха, Эффект плотности, Плато Ферми,  $dE/dt \text{ min}$ .
2. Скорость дрейфа ионов и электронов в газе. Рекомбинация. Требование на сродство к электрону для газов, используемых в детекторах.

**Билет 2.**

1.  $\delta$ -электроны. Первичная и полная ионизация. Число  $\delta$ -электронов. Формула Резерфорда.
2. Счетчики с использованием черенковского угла. Дифференциальные счётчики. Счетчик Фитча. RICH. DIRC. Фокусирующий RICH.

**Билет 3.**

1. Флуктуации ионизационных потерь. Флуктуации Гаусса. Флуктуации Ландау. Флуктуации для сверхтонких слоев.
2. Пороговые счетчики. Основные материалы радиаторов излучения. Основные источники до пороговых срабатываний

**Билет 4.**

1. Многократное рассеяние. Среднеквадратичное значение угла. Формула Росси. Область применимости формулы Росси. Теория Мольера.
2. Черенковские детекторы. Открытие явления. Качественная природа явления. Основные свойства черенковского излучения. Черенковский угол. Интенсивность черенковского излучения. Поляризация.

**Билет 5.**


1. Функции распределения по углу при многократном рассеянии. Поперечное смещение.
2. Временное разрешение сцинтилляционного счетчика. Конечное время высвечивания сцинтиллятора. Конечное время сбора света. ФЭУ. Разброс времени прохождения лавины усиления.

**Разработчики:**

Кандидат физико-математических наук Е.А. Кравченко

Программа рассмотрена на заседании кафедры общей и космической физики ИГУ

« 14 » марта 2022 г.

Протокол № 8, зав. кафедрой  В.Л. Паперный

**Настоящая программа не может быть воспроизведена ни в какой форме без предварительного письменного разрешения кафедры-разработчика программы.**