

---

Белорусский государственный университет

УТВЕРЖДАЮ  
Проректор по учебной работе  
А.Л. Колстик

« 08 »



Регистрационный № УД- 4473 /уч.

## СОВРЕМЕННЫЙ ФИЗИЧЕСКИЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

Учебная программа учреждения высшего образования  
по учебной дисциплине для специальности  
1-31 04 06 Ядерные физика и технологии

Минск 2017

Учебная программа составлена на основе образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013), введенном с 1 сентября 2013 г., и учебного плана специальности 1-31 04 06 «Ядерные физика и технологии», утвержденном 30 мая 2013 г., регистрационный номер УП G31-142/уч.

#### **СОСТАВИТЕЛИ:**

**А.С. Лобко**, заместитель директора по научной работе НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета, доктор физико-математических наук, доцент;

**Г.Ю. Дробышев**, инженер ООО «ДМТ Трейдинг», кандидат физико-математических наук;

**В.А. Мечинский**, старший научный сотрудник НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

#### **РЕКОМЕНДОВАНА К УТВЕРЖДЕНИЮ:**

Кафедрой ядерной физики физического факультета Белорусского государственного университета  
(протокол № 12 от 28 мая 2017 г.);

Советом физического факультета  
(протокол №11 от 8 июня 2017 г.)

## ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

Программа дисциплины «Современный физический эксперимент» разработана для специализации 1-31 04 06 01 «Ядерная физика и электроника» специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» первой ступени высшего образования. Она предназначена для обучения студентов основам экспериментальной физики высоких энергий, изучения методов экспериментальных исследований, принципов построения сложных детектирующих систем и ознакомление со всем спектром экспериментально-измерительных устройств, применяющихся в физике ядра и элементарных частиц. Настоящая программа является оригинальной и разработана с учетом соответствующих требований образовательного стандарта специальности 1-31 04 06 «Ядерная физика и технологии» (ОСВО 1-31 04 06-2013).

В настоящее время экспериментальная физика высоких энергий переживает новый период подъема, связанный с работой ряда современных ускорительных комплексов (CERN в Швейцарии, FermiLab в США, NICA в России, DESY в Германии, ...), и, в первую очередь, с работой ускорительно-накопительного комплекса (УНК) на встречных пучках протонов «Большой адронный коллайдер» (LHC) в международной лаборатории физики частиц CERN. В настоящее время, на базе этого УНК проводится ряд уникальных экспериментальных исследований. Полный цикл экспериментального исследования и последующего анализа полученных результатов в подобных экспериментах составляет порядка 15-20 лет и требует участия больших коллективов ученых-физиков. Кроме того, активно рассматриваются сейчас и будущие перспективные проекты, например комплекс FCC (Будущие кольцевые коллайдеры) и ILC (Международный линейный коллайдер). С другой стороны, научно-технические наработки, созданные в ходе подготовки экспериментов на УНК LHC, стимулировали бурное развитие физики и техники детекторов для прикладных приложений, в первую очередь, для медицинской диагностики. Глубокое понимание принципов создания современной экспериментальной установки для физики высоких энергий, включающей в себя десятки тысяч взаимосвязанных детекторов различной конструкции и назначения, равно как и многодетекторной системы для медицины и медико-биологических исследований, является важной составляющей подготовки специалиста в области ядерной физики.

Курс основывается на дисциплине «Физика ядра и элементарных частиц», завершающей общий курс физики, и на дисциплинах специальности «Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом» и «Методы и устройства регистрации излучений».

*Цель учебной дисциплины* – сформировать у студентов-физиков систематические знания по методам и аппаратуре для измерения физических характеристик элементарных частиц и взаимодействий.

*Задачи учебной дисциплины:*

- сформировать у студентов представление о физических принципах, лежащих в основе детектирования корпускулярных излучений;

- привить и закрепить базовые навыки Монте-Карло моделирования ядерно-физического эксперимента с использованием пакета библиотек GEANT4.

*Учебный материал дисциплины основан на базовых знаниях и представлениях, заложенных в дисциплинах цикла общенаучных и общепрофессиональных дисциплин «Физика атома и атомных явлений», «Физика ядра и элементарных частиц», «Электродинамика», «Квантовая механика», в дисциплинах специальности «Физика ускорителей», «Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом», «Методы и устройства регистрации излучений».*

*Учебный материал дисциплины будет использован при выполнении курсовых и дипломных работ.*

Перед преподавателем данной дисциплины ставятся следующие задачи:

- ознакомить студентов с физическими принципами детектирования элементарных частиц;

- систематически изложить основные сведения по регистрации элементарных частиц, их идентификации, измерении массы, энергии, импульса и других параметров;

- ознакомить обучающихся с основными подходами, применяемыми при проектировании комплексных многодетекторных экспериментальных установок и этапами современного масштабного эксперимента: научного обоснования, моделирования, разработки, эксплуатации и обработки экспериментальных данных;

- способствовать развитию научного мировоззрения обучающихся.

Из множества эффективных педагогических методик и технологий, которые способствуют вовлечению обучающихся в поиск и управление знаниями, приобретению опыта самостоятельного решения разнообразных задач, следует выделить:

- технологии проблемно-модульного обучения;

- технологии научно-исследовательской деятельности;

- проблемно-ориентированный междисциплинарный подход;

- интенсивное обучение;

- моделирование проблемных ситуаций и их решение.

Для формирования современных социально-профессиональных компетенций выпускника вуза в практику проведения занятий целесообразно внедрять методики активного обучения и дискуссионные формы. В результате усвоения дисциплины обучающийся должен

**знать:**

- особенности методов регистрации ионизирующих излучений применительно к экспериментальной физике высоких энергий;

- практическое применение технологий и методов экспериментальной физики высоких энергий в медицине, геологоразведке и системах неразрушающего контроля;

- принципы пространственных и временных измерений, идентификации элементарных частиц;

***уметь:***

- учитывать принципиальные физические ограничения на параметры детекторов элементарных частиц;

- подбирать тип и характеристики детекторов для решения конкретных практических задач;

***владеть:***

- методами компьютерного моделирования энергетических и временных спектров частиц в детекторах.

В результате изучения учебной дисциплины «Современный физический эксперимент» у обучающегося должны быть сформированы следующие ***компетенции:***

- уметь применять базовые научно-теоретические знания для решения теоретических и практических задач;

- владеть системным и сравнительным анализом;

- владеть исследовательскими навыками;

- уметь работать самостоятельно;

- иметь навыки, связанные с использованием технических устройств, управлением информацией и работой с компьютером;

- иметь лингвистические навыки (устная и письменная коммуникация);

- обладать качествами гражданственности;

- быть способным к социальному взаимодействию;

- обладать способностью к межличностным коммуникациям;

- владеть навыками здорового образа жизни;

- применять знания теоретических и экспериментальных основ ядерной физики и ядерных технологий, ядерно-физических методов исследования, методов измерения физических величин, методов автоматизации эксперимента, методов планирования, организации и ведения научно-производственной, научно-педагогической, производственно-технической, опытно-конструкторской работы в области ядерно-физических технологий и атомной энергетики;

- применять полученные знания фундаментальных положений физики, экспериментальных, теоретических и компьютерных методов исследования, планирования, организации и ведения научно-технической работы;

- вести переговоры, разрабатывать планы сотрудничества с другими организациями;

- пользоваться глобальными информационными ресурсами;

- пользоваться государственными языками Республики Беларусь и иностранными языками как средством делового общения;

- реализовывать методы защиты производственного персонала и населения в условиях возникновения аварий, катастроф, стихийных бедствий и обеспечения радиационной безопасности при осуществлении научной, производственной и педагогической деятельности;

- осуществлять поиск, систематизацию и анализ информации по перспективным направлениям развития отрасли, инновационным технологиям, проектам и решениям;

- определять цели инноваций и способы их реализации;

- оценивать конкурентоспособность и экономическую эффективность разрабатываемых технологий;

- применять методы анализа и организации внедрения инноваций в научно-производственной, научно-педагогической и научно-технической деятельности.

Форма получения высшего образования — очная, дневная.

Общее количество часов – 46, количество аудиторных часов – 28.

Аудиторные занятия проводятся в виде лекций и управляемой самостоятельной работы (УСР). На проведение лекционных занятий отводится 24 часа, на УСР — 4 часа.

Занятия проводятся на 5-м курсе в 9-м семестре.

Формы текущей аттестации по учебной дисциплине – зачёт (9 семестр).

## СОДЕРЖАНИЕ УЧЕБНОГО МАТЕРИАЛА

1. **Введение.** Предмет экспериментальной физики высоких энергий. Особенности проведения экспериментов в физике высоких энергий. Физические основы регистрации жестких излучений.

2. **Методы ядерно-физического эксперимента в физике высоких энергий.** Взаимодействия и поля в физике высоких энергий. Неустойчивая физика высоких энергий. Космические лучи. Ускорители заряженных частиц. Детекторы для экспериментальной физики высоких энергий, их классификация, принципы конструкции и основные характеристики. Основные принципы и последовательность планирования эксперимента и проектирования физической установки. Анализ физической задачи. Выбор параметров и определение требуемой точности их измерения. Выбор метода измерений и состава аппаратуры.

3. **Пространственные измерения характеристик частиц.** Детекторы для ионизационных и трековых измерений. Регистрация частиц в жидкостях. Ядерные фотоэмульсии. Сравнение детекторов для ионизационных и трековых измерений. Проволочные камеры. Эффекты старения в проволочных камерах. Выделение пространственной информации в позиционно-чувствительном детекторе.

4. **Временные измерения.** Детекторы для временных измерений. Определение момента регистрации частицы в детекторе. Методы временной селекции. Методы формирования временной отметки. Методы совпадений и антисовпадений. Годоскопы.

5. **Измерение импульса.** Магнитные спектрометры для экспериментов с фиксированной мишенью. Магнитные спектрометры для специальных приложений.

6. **Идентификация частиц.** Выделение информации об энергии, потерянной частицей в детекторе. Выделение информации о типе заряженной частицы по форме импульса детектора. Идентификация нейтрино. Идентификация нейтронов.

7. **Калориметрия.** Электромагнитный ливень – формирование и характеристики. Электромагнитные калориметры. Измерение энергии. Виды и типы калориметров. Гомогенные и негомогенные калориметры. Оптимизация светосбора из сцинтилляционных ячеек электромагнитного калориметра. Адронные калориметры. Компенсация адронного калориметра. Идентификация частиц в калориметрах. Энергетический отклик и энергетическое разрешение калориметра. Пространственное и угловое разрешение калориметра.

8. **Многодетекторные системы.** Многодетекторные системы. Детекторы коллайдеров. Детекторы с фиксированной мишенью. Обзор наиболее крупных современных экспериментов по физике высоких энергий (CMS, ATLAS, ALICE и др.). Особенности организации измерений в многодетекторных системах. Методы стабилизации экспериментальных установок. Калибровка и мониторинг. Особенности электронных методов измерения и отбора в задачах физики высоких энергий.

9. **Обработка и анализ экспериментальных данных.** Обработка сигнала. Тракт регистрации. Виртуальный эксперимент – математическое моделирование процессов взаимодействия частиц высоких энергий с веществом. Пакеты GEANT4, FLUKA. Методы и средства обработки и анализа экспериментальных данных в физике высоких энергий. Пакет анализа ROOT.

10. **Практическое применение технологий, методов и результатов экспериментальной физики высоких энергий.** Ядерная медицина, методы обнаружения делящихся материалов и взрывчатых веществ, применение электронных ускорителей в комплексах неразрушающего контроля, геофизика, космические исследования.

11. **Заключение.** Некоторые направления исследований и перспективные разработки.



## УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКАЯ КАРТА ДИСЦИПЛИНЫ

	Название раздела, темы, занятия; перечень изучаемых вопросов	Количество аудиторных часов					Литература	Формы контроля знаний
		Лекции	Практические занятия	Семинарские занятия	Лабораторные занятия	Контролируемая (управляемая) самостоятельная работа студента		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>1</b>	<b>Введение</b>	<b>2</b>						
	Предмет экспериментальной физики высоких энергий. Особенности проведения экспериментов в физике высоких энергий. Физические основы регистрации жестких излучений.	2					О[1,2,7-9] Д[1, 4]	1
<b>2</b>	<b>Методы ядерно-физического эксперимента в физике высоких энергий</b>	<b>2</b>						
	Взаимодействия и поля в физике высоких энергий. Неустойчивая физика высоких энергий. Космические лучи. Ускорители заряженных частиц. Детекторы для экспериментальной физики высоких энергий, их классификация, принципы конструкции и основные характеристики. Основные принципы и последовательность планирования эксперимента и проектирования физической установки. Анализ физической задачи. Выбор параметров и определение требуемой точности их измерения. Выбор метода измерений и состава аппаратуры.	2					О[1,4,6] Д[4,7]	1
<b>3</b>	<b>Пространственные измерения характеристик частиц</b>	<b>2</b>				1		
	Детекторы для ионизационных и трековых измерений. Регистрация частиц в жидкостях. Ядерные фотоэмульсии.	2				1	О[1,2,6] Д[4,9]	2

	Сравнение детекторов для ионизационных и трековых измерений. Проволочные камеры. Эффекты старения в проволочных камерах. Выделение пространственной информации в позиционно-чувствительном детекторе.						
<b>4</b>	<b>Временные измерения</b>	<b>2</b>					
	Детекторы для временных измерений. Определение момента регистрации частицы в детекторе. Методы временной селекции. Методы формирования временной отметки. Методы совпадений и антисовпадений. Годоскопы.	2				O[1,2,6] Д[4]	1
<b>5</b>	<b>Измерение импульса</b>	<b>2</b>					
	Магнитные спектрометры для экспериментов с фиксированной мишенью. Магнитные спектрометры для специальных приложений.	2				O[1,2,6] Д[4]	1
<b>6</b>	<b>Идентификация частиц</b>	<b>2</b>					
	Выделение информации об энергии, потерянной частицей в детекторе. Выделение информации о типе заряженной частицы по форме импульса детектора. Идентификация нейтрино. Идентификация нейтронов	2				O[1,2,6] Д[4]	1
<b>7</b>	<b>Калориметрия</b>	<b>4</b>					
	Электромагнитный ливень – формирование и характеристики. Электромагнитные калориметры. Измерение энергии. Виды и типы калориметров. Гомогенные и негомогенные калориметры. Оптимизация светосбора из сцинтилляционных ячеек электромагнитного калориметра. Адронные калориметры. Компенсация адронного калориметра. Идентификация частиц в калориметрах. Энергетический отклик и энергетическое разрешение калориметра. Пространственное и угловое разрешение калориметра.	4				1 O[1,2,6] Д[2-4]	2
<b>8</b>	<b>Многодетекторные системы</b>	<b>2</b>					
	Многодетекторные системы. Детекторы коллайдеров. Детекторы с фиксированной мишенью. Обзор наиболее крупных современных экспериментов по физике высоких энер-	2				1 O[1,2,6] Д[4,9]	2

	гий (CMS, ATLAS, ALICE и др.). Особенности организации измерений в многодетекторных системах. Методы стабилизации экспериментальных установок. Калибровка и мониторинг. Особенности электронных методов измерения и отбора в задачах физики высоких энергий.						
<b>9</b>	<b>Обработка и анализ экспериментальных данных</b>	<b>2</b>					
	Обработка сигнала. Тракт регистрации. Виртуальный эксперимент – математическое моделирование процессов взаимодействия частиц высоких энергий с веществом. Пакеты GEANT4, FLUKA. Методы и средства обработки и анализа экспериментальных данных в физике высоких энергий. Пакет анализа ROOT.	2				О[1,2,5,6] Д[4,9] Л[1]	1
<b>10</b>	<b>Практическое применение технологий, методов и результатов экспериментальной физики высоких энергий</b>	<b>2</b>			1		
	Ядерная медицина, методы обнаружения делящихся материалов и взрывчатых веществ, применение электронных ускорителей в комплексах неразрушающего контроля, геофизика, космические исследования.	2			1	О[1,2,6] Д[4,8]	2
<b>11</b>	<b>Заключение</b>	<b>2</b>					
	Некоторые направления исследований и перспективные разработки.	2				О[1,2,4,6] Д[4]	1
		<b>24</b>			<b>4</b>		<b>Зачёт</b>

## ИНФОРМАЦИОННО-МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

### *Методические указания к лабораторным работам*

1. А.Е. Корнеев, В.А. Мечинский Практикум по компьютерному моделированию ядерных процессов с использованием библиотеки GEANT4

### *Примерный перечень лабораторных работ*

1. Ознакомление со средой моделирования GEANT4.
2. Моделирование энергетических спектров частиц.
3. Моделирование временных спектров частиц. Сцинтилляционные детекторы.
4. Моделирование спектров немонотонного источника детекторами с оптическим съемом информации в магнитном поле.
5. Моделирование установок с регулярными элементами. Калориметры типа «шашлык».
6. Моделирование установок с регулярными элементами. Калориметры типа «спагетти».
7. Моделирование сложных геометрий: повороты, перенос, вычитание и объединение объемов.
8. Моделирование систем со сложным источником ионизирующих частиц. Библиотека GPS.

### **Рекомендуемая литература**

#### *Основная*

1. Handbook of Particle Detection and Imaging. Claus Grupen and Irene Buvat (Eds.). Springer. - 2012, 1251 p.
2. К. Группен. Детекторы элементарных частиц. - Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. - 408 с.
3. C. Grupen, B. Shwartz. Particle detectors - Cambridge University Press. - 2008, 651 p.
4. Ю.К. Акимов. Фотонные методы регистрации излучений. – Дубна: ОИЯИ, 2014.- 323 с.
5. В.А. Григорьев, А.А. Колюбин, В.А. Логинов. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. М., Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
6. К. Клайнкнехт. Детекторы корпускулярных излучений. М.: Мир. 1990. – 224 с.
7. А. Любимов, Д. Киш. Введение в экспериментальную физику частиц. М.: Физматлит, 2001. – 272 с.
8. А.П. Черняев. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. – М.: Физматлит, 2004. – 152 с.

9. М.А. Батурицкий, И.Я. Дубовская. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом. Минск: РИВШ, 2010. – 220 с.

### *Дополнительная*

1. Д. Перкинс. Введение в физику высоких энергий. М., Энергоатомиздат, 1991. – 429 с.
2. R. Wigmans. Calorimetry // Scientifica Acta 2, No. 1 (2008) 18–55 pp.
3. С.W. Fabjan, F. Gianotti. Calorimetry for Particle Physics // CERN-EP/2003-075, 96 p.
4. С. Leroy, P.-G. Rancoita. Principles of radiation interaction in matter and detection, World Scientific Publ. – 2009, 951 p.
5. Ю.А. Цирлин, М.Е. Глобус, Е.П. Сысоева. Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами. М: Энергоатомиздат, 1991. – 152 с.
6. А.И. Абрамов, Ю.А. Казанский, Е.С. Матусевич. Основы экспериментальных методов ядерной физики. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 488 с.
7. Л.Л. Гольдин. Физика ускорителей. М.: Наука", Глав. ред. физико-математической литературы, 1983 – 144 с.
8. Неразрушающий контроль с источниками высоких энергий / В.В. Клюев и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. -176 с.
9. Ионизационные измерения в физике высоких энергий / Ю.А. Будагов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 224 с.

### **Перечень используемых средств диагностики результатов учебной деятельности**

В качестве средств диагностики и контроля знаний рекомендуется использовать:

1. Выборочный контроль на лекциях;
2. Презентация и обсуждение рефератов;
3. Проведение зачёта по дисциплине.

### **Примерный перечень мероприятий для контроля качества усвоения знаний по учебной дисциплине**

#### *Темы реферативных работ*

1. Космические лучи и их детектирование.
2. Аналоговая обработка сигналов детекторов излучений.
3. Методы съёма сигналов с детекторов излучений.

4. Оптимизация энергетического и временного разрешения детекторов с помощью электроники обработки сигналов.
5. Детекторы нейтрино.
6. Анализ данных и реконструкция событий.
7. Радиационная деградация детекторов.
8. Энергетический отклик и энергетическое разрешение калориметров.
9. Пространственное и угловое разрешение калориметров.
10. Виртуальный эксперимент – математическое моделирование процессов взаимодействия частиц высоких энергий с веществом. Обзор основных пакетов моделирования.
11. Практическое применение технологий и методов экспериментальной физики высоких энергий в медицине.
12. Практическое применение технологий и методов экспериментальной физики высоких энергий геологоразведке.
13. Практическое применение технологий и методов экспериментальной физики высоких энергий для обеспечения безопасности (поиск ВВ, радиоактивных и ядерных материалов).

#### **Рекомендации по контролю качества усвоения знаний и проведению аттестации**

Текущий контроль знаний в семестре проводится как управляемая самостоятельная работа (УСР) на лекциях и осуществляется в форме устного опроса, подготовке, презентации и обсуждении реферативных работ. Форма текущей аттестации – зачёт в 9 семестре. Система оценивания – рейтинговая.

Текущая аттестация по учебной дисциплине проводится в форме зачёта.

**ПРОТОКОЛ СОГЛАСОВАНИЯ УЧЕБНОЙ ПРОГРАММЫ  
ПО ИЗУЧАЕМОЙ УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ  
С ДРУГИМИ ДИСЦИПЛИНАМИ СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

Название дисциплины, с которой требуется согласование	Название кафедры	Предложения об изменениях в содержании учебной программы по изучаемой учебной дисциплине	Решение, принятое кафедрой, разработавшей учебную программу (с указанием даты и номера протокола)
«Спектрометрия и радиометрия ионизирующих излучений»	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 28 мая 2017.
«Ускорители заряженных частиц в ядерной технике и технологиях»	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 28 мая 2017.
«Действие излучений на материалы ядерной техники»	Кафедра ядерной физики	Оставить содержание учебной дисциплины без изменения	Рекомендовать к утверждению учебную программу в представленном варианте Протокол № 12 от 28 мая 2017.

