

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Новосибирский национальный исследовательский государственный университет»**

**Физический факультет  
Кафедра физики элементарных частиц**



**Рабочая программа дисциплины  
СОВРЕМЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДИКИ В ФВЭ**

Направление подготовки: **03.04.02 Физика**  
направленность (профиль): **Общая и фундаментальная физика**

Форма обучения  
Очная

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы, из них: - контактная работа 36 часов										
Компетенции : ПК-1										

Руководитель программы  
д.ф.-м.н.

И. Б. Логашенко

Новосибирск, 2022

## Оглавление

1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы. ....	3
2. Место дисциплины в структуре магистерской программы.....	4
3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу. ....	4
4. Содержание дисциплины, структурированное по темам (разделам) с указанием отведённого на них количества академических часов и видов учебных занятий.....	5
5. Перечень учебной литературы. ....	10
6. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы студентов.....	10
7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины. ....	13
8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине. ....	13
9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине. ....	13
10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.....	14

## 1. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы.

Дисциплина «Современные экспериментальные методики в ФВЭ» предназначена для детального обучения студентов-физиков современным экспериментальным методам физики высоких энергий, предварительные представления о которых они получают при ранее изучаемых курсах (введение в физику высоких энергий, экспериментальная ядерная физика).

Основной целью освоения дисциплины является ознакомление с физикой детектирования ионизирующих излучений и с наиболее распространенными типами детекторов элементарных частиц и светового излучения. Для достижения поставленной цели выделяются задачи курса:

1. Изучение взаимодействия излучения с веществом.
2. Изучение физических процессов, происходящих в детекторах элементарных частиц при регистрации ионизирующих излучений.
3. Изучение наиболее распространенных типов детекторов элементарных частиц (современных и прошлого столетия).

Дисциплина нацелена на формирование у обучающегося профессиональной компетенции:

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
<p><b>ПК-1</b> Способен использовать специализированные знания в области физики при решении поставленных задач в научно-исследовательской деятельности в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p> <p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Знать</b> теоретические и экспериментальные методы, применяемые в современных экспериментальных методиках в ФВЭ, основные концепции, лежащие в основе построения данных методик, современную литературу по тематике курса; основные типы детекторов элементарных частиц (современных и прошлого столетия) и принципы их действия.</p> <p><b>Уметь</b> самостоятельно решать простейшие задачи и проводить оценки для современных экспериментальных методик в ФВЭ; разобраться при постановке физического эксперимента, какие детекторы необходимы для получения данного физического результата, уметь разработать данные детекторы и уметь работать с ними.</p> <p><b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики</p>

Результаты освоения образовательной программы (компетенции)	Индикаторы	Результаты обучения по дисциплине
		современных экспериментальных методик в ФВЭ; основными методами научных исследований, навыками использования базовых разделов общей физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области современных экспериментальных методик в ФВЭ.

## 2. Место дисциплины в структуре магистерской программы

Дисциплина «Современные экспериментальные методики в ФВЭ» является одной из дисциплин по выбору по направлению подготовки 03.04.02 Физика (профиль подготовки «Общая и фундаментальная физика»). Студенты, приступающие к изучению дисциплины, должны иметь общую базовую подготовку в рамках программы первых четырех лет обучения в ВУЗе, в том числе:

- иметь общее представление о физике элементарных частиц,
- обладать опытом решения задач физики элементарных частиц,
- знать основы схемотехники, электроники и электротехники,
- иметь практический опыт лабораторных измерений.

Дисциплина должна предшествовать выполнению магистерской диссертации, т.к. дает магистранту необходимые знания, навыки и предоставляет инструменты для выполнения исследований в области физики элементарных частиц в рамках подготовки его квалификационной работы.

## 3. Трудоёмкость дисциплины в зачётных единицах с указанием количества академических часов, выделенных на контактную работу обучающегося с преподавателем (по видам учебных занятий) и на самостоятельную работу.

Семестр	Общий объем	Виды учебных занятий (в часах)				Промежуточная аттестация (в часах)				
		Контактная работа обучающихся с преподавателем			Самостоятельная работа, не включая период сессии	Самостоятельная подготовка к промежуточной аттестации	Контактная работа обучающихся с преподавателем			
		Лекции	Практические занятия	Лабораторные занятия			Консультации	Зачет	Дифференцированный зачет	Экзамен
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	72	32			18	18	2			2
Всего 72 часа / 2 зачетные единицы, из них:										
- контактная работа 36 часов										
Компетенции: ПК-1										

Реализация дисциплины предусматривает практическую подготовку при проведении следующих видов занятий, предусматривающих участие обучающихся в выполнении отдельных элементов работ, связанных с будущей профессиональной деятельностью: лекции, консультации, самостоятельная работа студента и ее контроль преподавателем с помощью заданий, экзамен.

Программой дисциплины предусмотрены следующие виды контроля:

Текущий контроль: решение задач из задания для самостоятельного решения.

Промежуточная аттестация: экзамен

Общая трудоемкость рабочей программы дисциплины составляет 2 зачетные единицы.

- занятия лекционного типа – 32 час;
- самостоятельная работа в течение семестра, не включая период сессии – 18 часов;
- промежуточная аттестация (подготовка к сдаче экзамена, консультации и экзамен) – 22 часа.

Объём контактной работы обучающегося с преподавателем (занятия лекционного типа, групповые консультации, экзамен) составляет 36 часов.

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

Дисциплина «Современные экспериментальные методики в ФВЭ» представляет собой полугодовой курс, читаемый в магистратуре физического факультета НГУ в 1-ом семестре. Общая трудоемкость дисциплины составляет 2 зачетные единицы, 72 часа.

№ п/п	Раздел дисциплины	Неделя семестра	Всего	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов и трудоемкость (в часах)			Промежуточная аттестация (в часах)
				Аудиторные часы		Сам. работа в течение семестра (не включая период сессии)	
				Лекции	Лабораторные работы		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Классификация детекторов элементарных частиц	1	4	2		2	
2	Взаимодействие излучения с веществом	2-3	6	4		2	
3	Физические процессы в газовых детекторах	4-5	6	4		2	
4	Трековые детекторы	6-7	6	4		2	
5	Излучение и регистрация световых сигналов	8-9	6	4		2	
6	Идентификация частиц	10-11	6	4		2	

7	Детекторы для низкофоновых и астрофизических экспериментов	12-13	6	4		2	
8	Калориметры	14-15	6	4		2	
9	Детекторы излучений двадцатого столетия	16	4	2		2	
10	Групповая консультация		2				2
11	Самостоятельная подготовка обучающегося к экзамену		18				18
12	Экзамен		2				2
	<b>Всего</b>		<b>72</b>	<b>32</b>		<b>18</b>	<b>22</b>

## Программа лекций

### I. Классификация детекторов элементарных частиц (2 часа)

### II. Взаимодействие излучения с веществом (4 часа)

1. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом.  
Ионизационные потери. Формула Бете-Блоха. Пробег тяжелых заряженных частиц. Многократное (кулоновское) рассеяние.  $\delta$ - электроны.
2. Прохождение электронов через вещество.  
Тормозное излучение. Критическая энергия. Пробег электронов.
3. Взаимодействие фотонов с веществом.  
Фотоэффект. Комптоновское рассеяние. Рождение пар. Фотоэлектронная эмиссия из твердых тел. ESCA спектроскопия.
4. Флюктуации ионизационных потерь.
5. Связь между потерей энергии и ионизацией.  
Первичная и полная ионизация. Фактор Фано. Характеристики газов.

### III. Физические процессы в газовых детекторах (4 часа)

1. Перенос зарядов в газах.  
Диффузия ионов и электронов в отсутствии поля. Дрейф ионов в электрическом поле. Подвижность ионов. Перезарядка ионов. Диффузия ионов.  
Дрейф электронов в электрическом поле. Дрейфовые скорости.  
Характеристическая энергия. Диффузия электронов. Дрейф в магнитном поле. Эффект электроотрицательных газов.
2. Регистрация ионизации в газе.  
Возбужденные молекулы в сильных электрических полях. Возбуждение молекул электронным ударом. Молекулярные ионы в инертных газах. Эффект Пеннинга.  
Резонансное излучение. Фотопоглощение и фотоионизация.  
Газовое усиление в сильных электрических полях. Ионизация молекул электронным ударом. Коэффициент ионизации Таунсенда. Ассоциативная ионизация.
3. Пропорциональные счетчики.  
Режимы работы. Коэффициент усиления. Развитие сигнала во времени.  
Флюктуации газового усиления. Эффективность ионизации. Распределение Пойя. Насыщение лавины. Ограничение пропорциональности. Эффект пространственного положительного заряда. Вторичная ионизация. Фотонные обратные связи. Ионные обратные связи. Ион-электронная эмиссия. Гашение разряда. Эффекты старения в проволочных детекторах.

#### **IV. Трековые детекторы (4 часа)**

##### **1. Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК).**

Электростатические и механические характеристики. Емкость проволочки. Конфигурация поля. Влияние механических точностей. Влияние электростатических сил. Особенности конструкции. Рамки. Линии поддержки и спейсеры.

Считывание сигнала. Дискретные системы. Линии задержки. Метод деления зарядов. Катодный съем. Характеристики МПК. Эффективность. Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность.

##### **2. Дрейфовые камеры (ДК).**

Плоские ДК. Принципы работы и типы дрейфовых ячеек. Предельное пространственное разрешение. Решение лево-право неопределенности. Работа в СГС режиме. Цилиндрические ДК.

##### **3. Времпоекционные камеры (ВПК).**

Принцип действия. Дрейфовый объем и торцевой детектор. Калибровка ВПК. Лазерная калибровка. Физические процессы в ВПК. Дрейф электронов в магнитном и электрическом полях. Диффузия электронов в присутствии магнитного поля. Управляемый режим работы. Считывание на пэды.

##### **4. Микроструктурные газовые детекторы (МСГД).**

Микростриповые газовые камеры. Конфигурация поля. Усиление и пространственное разрешение. Загрузочная способность и старение. Пробои под воздействием сильноионизирующих частиц. Полупроводящие покрытия и пассивация катодов.

Другие МСГД. Micro-Gap, Micro-Dot, Micro-Pin, MicroMegas, Micro-CAT, Well, Micro-Groove, Micro-Wire.

##### **5. Газовые электронные умножители (ГЭУ).**

Принцип работы и геометрия. Конфигурация поля. Усиление. Эффект диаметра дырок. Каскадные ГЭУ.

Физические процессы в ГЭУ. Фотонные обратные связи. Ионные обратные связи. Эффекты развития лавины в дырке. Эффекты зарядки ионами. Работа в чистых благородных газах и при высоких давлениях.

Пробои под воздействием сильноионизирующих частиц. Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность и старение.

##### **6. Полупроводниковые детекторы (ППД).**

Элементы физики полупроводников. Принципы работы ППД. Кристаллические счетчики.

Детекторы с p-n переходом. Обедненная область. Поле и емкость p-n перехода. Технология изготовления.

Поверхностно-барьерные детекторы. Диффузионно-дрейфовые детекторы.

Микростриповые детекторы. Координатное разрешение и шумы. Последние достижения. Двухкоординатные детекторы. Детекторы с двойным металлическим слоем.

Детекторы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Кремниевые дрейфовые детекторы. Детекторы на основе материалов с большим Z (Ge, GaAs и др.).

Эффекты облучения ППД.

#### **V. Излучение и регистрация световых сигналов (4 часа)**

##### **1. Вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ).**

Принцип работы. Фотоэмиссионные материалы. Сурьмяно-щелочные фотокатоды. Фотокатоды с отрицательным сродством к электрону. Ультрафиолетовые фотокатоды. Динодные структуры. Технология изготовления.

Энергетическое разрешение. Excess Noise Factor. Однофотоэлектронные спектры и темновой ток. Эффект сильного электрического поля.

- ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП). Гибридные ФЭУ.
2. Газовые ФЭУ.  
Фотоэмиссия в газ. Обратное рассеяние фотоэлектронов. Газовые ФЭУ на основе ГЭУ. Композиционные пленочные фотокатоды. Защита фотокатодов.
  3. Полупроводниковые приборы.  
Фотодиоды. Лавинные фотодиоды. Светодиоды.
  4. Органические сцинтилляторы.  
Механизм сцинтилляций. Зависимость световыхода от плотности ионизации. Формула Биркса. Однокомпонентные сцинтилляторы. Многокомпонентные сцинтилляторы (пластики).
  5. Сцинтилляционные счетчики.  
Оптика сцинтилляторов. Световоды. Оптические волокна. Методы светосбора. Временное разрешение.
  6. Кристаллические неорганические сцинтилляторы.  
Механизм сцинтилляций. Щелочно-галогидные сцинтилляторы. Быстрые сцинтилляторы. Кросс-люминисценция. Радиационные повреждения в кристаллических сцинтилляторах.
  7. Сцинтилляции в газах.  
Благородные газы. Механизм сцинтилляций. Спектр излучения и временные свойства. Пропорциональные сцинтилляции в электрическом поле. Другие газы (CF<sub>4</sub>, TEA, TMAE).

## **VI. Идентификация частиц (4 часа)**

1. Черенковские счетчики.  
Черенковское излучение. Основные свойства. Излучение в различных областях спектра. Первые черенковские счетчики. Радиаторы.  
Газовые черенковские счетчики. Зависимость показателя преломления от давления. Дифференциальные счетчики. Пороговые счетчики. Пороговая кривая и разрешение счетчика.  
Аэрогельные счетчики.
2. Детекторы колец черенковского излучения (RICH).  
Оптические схемы. Зеркала. Детекторы фотонов. Детекторы фотонов на основе вакуумных фотоприемников. Детекторы фотонов на основе CsI фотокатода. Детекторы фотонов на основе паров TEA и TMAE. Многоступенчатые лавинные камеры. ВПК.
3. Счетчики времени пролета (TOF).  
Принцип работы. TOF на основе сцинтилляционных счетчиков. TOF на основе плоских камер с резистивными электродами (RPC).
4. Детекторы ионизационных потерь.  
Зависимость разрешения от параметров детектора. Метод счета кластеров ионизации.
5. Детекторы переходного излучения (TRD).  
Свойства переходного излучения. Методы регистрации в TRD. Сравнение различных методов идентификации частиц.
6. Мюонные детекторы.
7. Нейтронные детекторы.  
Реакции конверсии нейтронов. Сцинтилляционные детекторы нейтронов. Газовые детекторы нейтронов на основе <sup>3</sup>He и BF<sub>3</sub>.

## **VII. Детекторы для низкофоновых и астрофизических экспериментов (4 часа)**

1. Детекторы нейтрино. Детекторы солнечных нейтрино. Детекторы космических нейтрино. Детекторы реакторных нейтрино.



2. Детекторы темной материи. Сцинтилляционные кристаллические детекторы. Криогенные твердотельные детекторы. Криогенные двухфазные детекторы. ТРС на отрицательных ионах. Пузырьковая камера.
3. Детекторы космических лучей. Детекторы двойного бета-распада. Детекторы аксионов.

### **VIII. Калориметры (4 часа)**

1. Электромагнитные ливни.  
Критическая энергия, радиационная длина, полная длина треков. Продольное развитие ливня. Максимум ливня. Поперечное развитие ливня. Мольеровский радиус. Флюктуации ливня. Предельное энергетическое разрешение. Флюктуации ливня в сэмплинг калориметрах. Утечки ливня.
2. Адронные ливни.  
Особенности адронного ливня. Невидимая энергия. Продольное и поперечное развитие ливня. Флюктуации ливня. Отношение  $e/h$  и энергетическое разрешение. Компенсация калориметров.
3. Однородные твердотельные калориметры.  
Черенковские калориметры.  
Сцинтилляционные кристаллические калориметры. Энергетическое и пространственное разрешение. Примеры калориметров в физике высоких энергий. Pile-up эффект.
4. Сэмплинг калориметры.  
Сцинтилляционные сэмплинг калориметры. Сэндвич калориметры. Калориметры на сцинтиллирующих волокнах. Spaghetti калориметры. Tile калориметры.  
Газовые сэмплинг калориметры: на пропорциональных камерах и стримерных трубках, на сжатых газах. Кремниевые сэмплинг калориметры.  
Возможности разделения электронов и адронов.
5. Жидкостные калориметры.  
Криогенные жидкостные калориметры. Жидкоаргоновые калориметры.  
Калориметры на жидком криптоне и ксеноне. Калориметры на теплых органических жидкостях.
6. Калибровка калориметров.

### **IX. Экспериментальные методики двадцатого столетия (2 часа)**

1. Искровые и стримерные камеры.  
Механизм пробоя. Структура и яркость следов частиц. Параметры высоковольтного импульса. Конструкция. Считывание.
2. Конденсационные камеры: Вильсона и диффузионные.  
Образование капель в пересыщенном паре. Нейтральные и заряженные капли. Рост капель. Ионные капли в инертных газах. Конструкция камер.
3. Пузырьковые камеры.  
Образование пузырьков в перегретой жидкости. Тепловая и ионная теории. Принцип работы и конструкция. Рабочие жидкости.
4. Ядерные эмульсии.  
Состав эмульсий. Фотографический процесс. Теория фотографического процесса. Проявление. Характеристики следов частиц.

### **Самостоятельная работа студентов (36 часов)**

Перечень занятий на СРС	Объем, час
Изучение материала лекций, подготовка к опросам	16
Изучение теоретического материала, не освещаемого на лекциях	2

**5. Перечень учебной литературы.**

1. К. Клайнкнехт, Детекторы корпускулярных излучений, Мир, Москва, 1990., ISBN 5-03-001873-5 (1 экз.)
2. Ю. В. Заневский, Проволочные детекторы элементарных частиц, Атомиздат, Москва, 1978. (1 экз.)
3. Ю. А. Будагов, Г. И. Мерзон, Б. Ситар, В. А. Чечин, Ионизационные измерения в физике высоких энергий, Энергоатомиздат, Москва, 1988., ISBN 5-283-03896-3 (1 экз.)
4. В. П. Зрелов, Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий, т. 1,2, Атомиздат, Москва, 1968. (Т1-2 экз., Т2-1 экз)

**6. Перечень учебно-методических материалов по самостоятельной работе обучающихся**

Самостоятельная работа студентов обеспечивается учебно-методической литературой, имеющейся в библиотеке ИЯФ СО РАН.

Все типы детекторов

1. Бузулуцков А.Ф. Современные экспериментальные методики в физике высоких энергий. Электронный лекционный курс. Новосибирск: НГУ, 2018. <https://hepdep.inp.nsk.su/114.shtml>
2. К. Группен, Детекторы элементарных частиц, Сибирский хронограф, Новосибирск, 1999.
3. Experimental Techniques in High Energy Physics, T. Ferbel (ed.), World Scientific, Singapore, 1991.
4. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.
5. Ю. В. Меликов, Экспериментальная техника в ядерной физике, МГУ, Москва, 1973.
6. Э. Фюнфер, Г. Нейерт, Счетчики излучений, Гос. изд. лит. в области атомной науки и техники, Москва, 1961.
7. Review of Particle Physics, The European Physical Journal C, v.15, 2000.

Физические процессы в газовых детекторах

1. Ю. А. Будагов, Г. И. Мерзон, Б. Ситар, В. А. Чечин, Ионизационные измерения в физике высоких энергий, Энергоатомиздат, Москва, 1988.
2. B. Sitar, G. I. Merson, V. A. Chechin, Yu. A. Budagov, Ionization Measurements in High Energy Physics, Springer, Berlin, 1993.
3. Ю. П. Райзер. Физика газового разряда, Москва, 1980.
4. F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, preprint CERN 77-09, 1977.

Пропорциональные и дрейфовые камеры

1. F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chambers, preprint CERN 77-09, 1977.
2. Г. Д. Алексеев, В. В. Круглов, Д. М. Хазинс, Самогасящийся стримерный режим, Физика элементарных частиц и атомного ядра 13 (1982) 703.

Время-проекционные камеры

1. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.

#### Микроструктурные газовые детекторы

1. М. Д. Шафранов, Микроструктурные газовые координатные детекторы, Физика элементарных частиц и атомного ядра 33 (2002) 1204.
2. L. Shekhtman, Micro-Pattern Gaseous Detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 128.

#### Газовые электронные умножители

1. A. Buzulutskov, Physics of multi-GEM structures, E-print physics/0206082 at [www.arxiv.gov](http://www.arxiv.gov), Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 148.
2. L. Shekhtman, Micro-Pattern Gaseous Detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 128.

#### Полупроводниковые детекторы

1. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.
2. H. Dijkstra, Overview of Silicon Detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 478 (2002) 37.
3. Ю. К. Акимов, Полупроводниковые детекторы в экспериментальной физике, Энергоатомиздат, Москва, 1989.

#### Вакуумные фотоприемники

1. Photomultiplier Handbook, Burle Inc.
2. Photomultiplier tubes. Principles and applications, Philips Photonics, 1994
3. K. Arisaka, New Trends in Vacuum-Based Photon Detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 442 (2000) 80.
4. А. Г. Берковкий, В. А. Гаванин, И. Н. Зайдель, Вакуумные фотоэлектронные приборы, Радио и связь, Москва, 1988.
5. A. H. Sommer, Photoemissive materials, Krager, Huntigton, NY, 1980.

#### Органические сцинтилляторы. Сцинтилляционные счетчики

1. Ю. В. Меликов, Экспериментальная техника в ядерной физике, МГУ, Москва, 1973.
2. Принципы и методы регистрации элементарных частиц, В. Цзянь-Сюн и Л. К. Юан (ред.), Изд. иностр. лит., Москва, 1963.
3. J. V. Birks, The theory and practice of scintillation counters, Pergamon, Oxford, 1964.
4. Б. Б. Говорков, В. С. Чукин, Сцинтилляционные счетчики больших площадей, Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра 2 (1972) 763.
5. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.
6. К. Клайнкнехт, Детекторы корпускулярных излучений, Мир, Москва, 1990.
7. Review of Particle Physics, The European Physical Journal C, v.15, 2000.
8. Д. Ритсон, Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, Москва, 1964.

#### Кристаллические неорганические сцинтилляторы

1. Ю. А. Цирлин, М. Е. Глобус, Оптимизация детектирования гамма-излучения сцинтилляционными кристаллами, Энергоатомиздат, Москва, 1991.
2. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.

#### Сцинтилляции в благородных газах

1. А. С. Барабаш, А. И. Болоздыня, Жидкостные ионизационные детекторы, Энергоатомиздат, Москва, 1993.

#### Черенковское излучение. Черенковские счетчики

1. Дж. Джелли, Черенковское излучение и его применения, Изд. иностр. лит., Москва, 1960.
2. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике, А. М. Балдин (ред.), Наука, Москва, 1990.

#### RICH детекторы

1. Черенковские детекторы и их применение в науке и технике, А. М. Балдин (ред.), Наука, Москва, 1990.

2. Proceedings of the 1<sup>st</sup> and 3<sup>rd</sup> International Workshop on Ring Imaging Cherenkov Detectors, Nucl. Instr. and Meth. A 343 (1994), A 443 (1999).

#### Счетчики времени пролета

1. W. Klempt, Review of particle identification by time of flight techniques, Nucl. Instr. and Meth. A 433 (1999) 542.
2. Yu. N. Pestov, Review on counters with localized discharge, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 447.

#### Детекторы ионизационных потерь

1. Ю. А. Будагов, Г. И. Мерзон, Б. Ситар, В. А. Чечин, Ионизационные измерения в физике высоких энергий, Энергоатомиздат, Москва, 1988.
2. B. Sitar, G. I. Merson, V. A. Chechin, Yu. A. Budagov, Ionization Measurements in High Energy Physics, Springer, Berlin, 1993.

#### Детекторы переходного излучения

1. B. Dolgoshein, Complementary particle ID: transition radiation and dE/dx relativistic rise, Nucl. Instr. and Meth. A 433 (1999) 533.
2. К. Клайнкнехт, Детекторы корпускулярных излучений, Мир, Москва, 1990.

#### Мюонные детекторы

1. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.

#### Нейтронные детекторы

1. C. V. E. van Eijk, Neutron PSDs for the next generation of spallation neutron sources, Nucl. Instr. and Meth. A 477 (2002) 383.
2. Ю. В. Меликов, Экспериментальная техника в ядерной физике, МГУ, Москва, 1973.
3. Э. Фюнфер, Г. Нейерт, Счетчики излучений, Гос. изд. лит. в области атомной науки и техники, Москва, 1961.

#### Калориметры

1. Instrumentation in High Energy Physics, F. Sauli (ed.), World Scientific, Singapore, 1993.
2. R. Wigmans, Calorimetry, Clarendon, Oxford, 2000.
3. В. А. Шварц, Crystal Calorimeters, Nucl. Instr. and Meth. A 494 (2002) 288.
4. А. С. Барабаш, А. И. Болоздыня, Жидкостные ионизационные детекторы, Энергоатомиздат, Москва, 1993.

#### Искровые и стримерные камеры

1. Ю. А. Будагов, Г. И. Мерзон, Б. Ситар, В. А. Чечин, Ионизационные измерения в физике высоких энергий, Энергоатомиздат, Москва, 1988.
2. Ю. В. Заневский, Проволочные детекторы элементарных частиц, Атомиздат, Москва, 1978.

#### Камера Вильсона и диффузионная камера

1. Н. Д. Гупта, С. Гош, Камера Вильсона и ее применение в физике, Гос. изд. иностр. лит., Москва, 1947.
2. Д. Вильсон, Камера Вильсона, Изд. иностранной литературы, Москва, 1954.
3. Принципы и методы регистрации элементарных частиц, В. Цзянь-Сюн и Л. К. Юан (ред.), Изд. иностр. лит., Москва, 1963.
4. Д. Ритсон, Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, Москва, 1964.

#### Пузырьковые камеры

1. Д. Ритсон, Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, Москва, 1964.
2. Ю. А. Александров и др., Пузырьковые камеры, Госатомиздат, Москва, 1963.
3. Ю. В. Меликов, Экспериментальная техника в ядерной физике, МГУ, Москва, 1973.

#### Ядерные эмульсии

1. Д. Ритсон, Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, Москва, 1964.
2. Принципы и методы регистрации элементарных частиц, В. Цзянь-Сюн и Л. К. Юан (ред.), Изд. иностр. лит., Москва, 1963.

#### Мишени

1. Л. Б. Голованов, Водородные мишени в физике частиц, Проблемы физики элементарных частиц и атомного ядра 2 (1972) 717.
2. Д. Ритсон, Экспериментальные методы в физике высоких энергий, Наука, Москва, 1964.

#### Детекторы астрочастиц и темной материи

1. Г. В. Клапдор-Клайнгротхаус, К. Цюрбер, Астрофизика элементарных частиц, Ред. журнала «Успехи физических наук», Москва, 2000.
2. Д. Ю. Акимов, Экспериментальные методы детектирования корпускулярной Темной Материи, Приб. Тех. Экспер. N5 (2001) 6.

### **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины.**

Для освоения дисциплины используются следующие ресурсы:

- электронная информационно-образовательная среда НГУ (ЭИОС);
- образовательные интернет-порталы;
- информационно-телекоммуникационная сеть Интернет.

### **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине.**

Для обеспечения реализации дисциплины используется стандартный комплект программного обеспечения (ПО), включающий регулярно обновляемое лицензионное ПО Windows.

Использование специализированного программного обеспечения для изучения дисциплины не требуется.

### **9. Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине.**

Для реализации дисциплины используются специальные помещения:

1. Учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, курсового проектирования (выполнения курсовых работ), групповых и индивидуальных консультаций, текущего контроля, промежуточной и итоговой аттестации.

2. Помещения для самостоятельной работы обучающихся.

Учебные аудитории укомплектованы специализированной мебелью и техническими средствами обучения, служащими для представления учебной информации большой аудитории.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети "Интернет" и обеспечением доступа в электронную информационно-образовательную среду НГУ.

Для проведения занятий лекционного типа предлагаются следующие наборы демонстрационного оборудования и учебно-наглядных пособий:

- комплект лекций-презентаций по темам дисциплины.

Материально-техническое обеспечение образовательного процесса по дисциплине для обучающихся из числа лиц с ограниченными возможностями здоровья осуществляется согласно «Порядку организации и осуществления образовательной деятельности по образовательным программам для инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья в Новосибирском государственном университете».

## **10. Оценочные средства для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.**

### **10.1 Порядок проведения текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине**

#### ***Текущий контроль***

Текущий контроль осуществляется в ходе семестра путем проверки решений задач студентами из заданий для самостоятельного решения.

#### ***Промежуточная аттестация***

Освоение компетенций оценивается согласно шкале оценки уровня сформированности компетенции. Положительная оценка по дисциплине выставляется в том случае, если заявленная компетенция ПК-1 сформирована не ниже порогового уровня.

Окончательная оценка работы студента в течение семестра происходит на экзамене. Экзамен проводится в конце семестра в экзаменационную сессию по билетам в устной форме. Вопросы билета подбираются таким образом, чтобы проверить уровень сформированности компетенции ПК-1.

Вывод об уровне сформированности компетенций принимается преподавателем. Каждый вопрос билета оценивается от 0 до 5 баллов. Положительная оценка ставится, когда все компетенции освоены не ниже порогового уровня. Оценки «отлично», «хорошо», «удовлетворительно» означают успешное прохождение промежуточной аттестации. Критерии и шкалы оценивания индикаторов достижения результатов обучения отражены в Таблице 10.2.

### **Соответствие индикаторов и результатов освоения дисциплины**

Таблица 10.1

<b>Индикатор</b>	<b>Результат обучения по дисциплине</b>	<b>Оценочные средства</b>
<b>ПК 1.1</b> Применяет специализированные знания в области физики при решении конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.	<b>Знать</b> теоретические и экспериментальные методы, применяемые в современных экспериментальных методиках в ФВЭ, основные концепции, лежащие в основе построения данных методик, современную литературу по тематике курса; основные типы детекторов элементарных частиц (современных и прошлого столетия) и принципы их действия.	Решение задач, экзамен

<p><b>ПК 1.2</b> Выбирает наиболее эффективные методы решения конкретных задач в области научных исследований в соответствии с профилем подготовки в зависимости от специфики объекта исследования.</p>	<p><b>Уметь</b> самостоятельно решать простейшие задачи и проводить оценки для современных экспериментальных методик в ФВЭ; разобраться при постановке физического эксперимента, какие детекторы необходимы для получения данного физического результата, уметь разработать данные детекторы и уметь работать с ними.</p> <p><b>Владеть</b> навыками постановки и решения задач научных исследований в области физики современных экспериментальных методик в ФВЭ; основными методами научных исследований, навыками использования базовых разделов общей физики при решении научно-инновационных задач; знаниями на уровне, позволяющем проводить эффективный анализ научной и технической информации в области современных экспериментальных методик в ФВЭ.</p>	<p>Решение задач, экзамен</p>
---	---	-------------------------------

**10.2 Описание критериев и шкал оценивания индикаторов достижения результатов обучения по дисциплине «Современные экспериментальные методики в ФВЭ».**

**Таблица 10.2**

Критерии оценивания результатов обучения	Планируемые результаты обучения (показатели достижения заданного уровня освоения компетенций)	Уровень освоения компетенции			
		Не сформирован (0 баллов)	Пороговый уровень (3 балла)	Базовый уровень (4 балла)	Продвинутый уровень (5 баллов)
1	2	3	4	5	6
Полнота знаний	ПК 1.1	Уровень знаний ниже минимальных требований. Имеют место грубые ошибки.	Демонстрирует общие знания базовых понятий по темам/разделам дисциплины. Допускается значительное количество негрубых ошибок.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Допускается несколько негрубых/несущественных ошибок. Не отвечает на дополнительные вопросы.	Уровень знаний соответствует программе подготовки по темам/разделам дисциплины. Свободно и аргументированно отвечает на дополнительные вопросы.

Наличие умений	ПК 1.2	Отсутствие минимальных умений. Не умеет решать стандартные задачи. Имеют место грубые ошибки.	Продемонстрированы частично основные умения. Решены типовые задачи. Допущены негрубые ошибки.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания с негрубыми ошибками или с недочетами.	Продемонстрированы все основные умения. Решены все основные задания в полном объеме без недочетов и ошибок.
Наличие навыков (владение опытом)	ПК 1.2	Отсутствие владения материалом по темам/разделам дисциплины. Нет навыков в решении стандартных задач. Наличие грубых ошибок.	Имеется минимальный набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач с некоторыми недочетами.	Имеется базовый набор навыков при решении стандартных задач без ошибок и недочетов. Продемонстрированы знания по решению нестандартных задач.

### 10.3 Типовые контрольные задания и материалы, необходимые для оценки результатов обучения

#### Задания для самостоятельного решения

1. Найти пробег в воздухе К-мезонов с энергией 10 МэВ.
2. Сколько времени должен работать ВЭПП-2М, чтобы определить массу  $\omega$ -мезона с точностью 0.01 МэВ? Сечение рождения –  $10^{-30} \text{ см}^2$ , полная ширина – 8 МэВ, эффективность регистрации – 0.5.
3. Найти пробег электронов с энергией 60 КэВ в дрейфовой камере, заполненной аргоном.
4. Оценить точность измерения эффективной массы  $\eta$ -мезона с массой 550 МэВ в реакции  $e^+e^- \rightarrow \eta\gamma$  в колориметре детектора СНД. Энергия пучков  $2 \times 510$  МэВ.
5. Посчитать пробег  $\mu$ -мезонов с энергией 500 МэВ с свинце.
6. Оценить светимость  $\phi$ -фабрики, исходя из следующих параметров пучков: токи пучков – 0.3 А, пучки круглые,  $\sigma_x \sim \sigma_z \sim 0.1$  мм, частота обращения – 20 МГц, число банчей -5.
7. Посчитать ослабление интенсивность пучка высокоэнергичных протонов в слое бетона 1 м за счет ядерного поглощения.
8. Оценить точность измерения массы  $\pi^0$ -мезона с энергией 300 МэВ в калориметре детектора КМД-2.
9. Оценить ослабление интенсивность пучка  $K_L$ -мезонов за счет ядерного взаимодействия в колориметре детектора СНД толщиной 35 см NaI(Tl).
10. С какой вероятностью происходит излучение  $\gamma$ -кванта однократного тормозного излучения на ВЭПП-4 за одно столкновение? Сечение процесса  $2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ , частота обращения – 0.8 МГц, светимость  $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .
11. Посчитать ионизационные потери в тонком слое сцинтилляционной пластмассы 5 мм для электронов,  $\mu$ -мезонов и К-мезонов с полной энергией 510 МэВ.
12. Оценить вероятность попадания с счетчик двух  $\gamma$ -квантов однократного тормозного излучения за одно столкновение в ВЭПП-4. Сечение процесса  $2 \cdot 10^{-25} \text{ см}^2$ , частота обращения – 0.8 МГц, светимость  $5 \cdot 10^{30} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .



13. Оценить вероятность регистрации  $\gamma$ -кванта с энергией 100 МэВ в кристалле NaI(Tl) толщиной 5 см.
14. Сцинтилляционный телескоп состоит из двух пластмассовых счетчиков размерами 1х1 кв.м каждый на расстоянии 1 м. Оценить скорость счета космических частиц в телескопе.
15.  $\gamma$ -квант с энергией 5 ГэВ входит в слой железа. Найти соотношение энерговыделений на толщине 5 и 10 см.
16. Найти годовое энерговыделение космических частиц с стакане воды. Сравнить с энергией, необходимой для нагрева воды на 1°.
17. Посчитать амплитуду импульса на выходе ФЭУ с пластмассовым сцинтиллятором толщиной 1 см от космических частиц.
18.  $\gamma$ -источник  $\text{Co}^{60}$  активностью 1 мКи излучает одновременно два  $\gamma$ -кванта с энергией 1.18 и 1.33 МэВ. Источник помещен между двумя кристаллами NaI(Tl) размерами 5х5х5 см<sup>3</sup> на расстоянии 10 см. Найти скорость счета совпадений двух счетчиков.
19. Посчитать средний пробег в вакууме  $K_S$ -мезона, рожденного в реакции  $e^+e^- \rightarrow K_S K_L$  при энергии  $2E = 3$  ГэВ. Воспользоваться табличными данными.
20. Рассчитать энергетическое разрешение сцинтилляционного счетчика с кристаллом БГО (световыход 10% от NaI) от  $\gamma$ -квантов с энергией 1.12 МэВ.
21. Рассчитать ослабление интенсивности солнечных нейтрино в толще Земли. Энергия 1 МэВ, сечение – около  $10^{-44}$  см<sup>2</sup>.
22. Загрузка каждой проволочки дрейфовой камеры детектора СНД составляет 1 МГц. Для запуска первичного триггера требуется срабатывание трех проволочек на одной прямой. Рассчитать скорость счета случайных запусков, если часта обращения пучков 16 МГц.
23. Исходя из соотношения неопределенностей оценить, на каком расстоянии происходят ( $e^+e^-$ )-столкновения, в которых рождаются В-мезоны при энергии  $2E = 10$  ГэВ.

### Вопросы к экзамену

1. Взаимодействие тяжелых заряженных частиц с веществом. Ионизационные потери. Формула Бете-Блоха. Пробег тяжелых заряженных частиц. Многократное (кулоновское) рассеяние. d- электроны. Флуктуации ионизационных потерь. Связь между потерей энергии и ионизацией. Первичная и полная ионизация. Статистика рождения пар. Фактор Фано.
2. Взаимодействие электронов и фотонов с веществом. Тормозное излучение. Критическая энергия. Пробег электронов. Фотоэффект. Комптоновское рассеяние. Спектр электронов отдачи. Рождение пар. Типы электронной эмиссии.
3. Перенос зарядов в газах. Диффузия ионов и электронов в отсутствии поля. Дрейф ионов в электрическом поле. Подвижность ионов. Перезарядка ионов. Диффузия ионов. Дрейф электронов в электрическом поле. Дрейфовые скорости. Характеристическая энергия. Диффузия электронов. Холодные и горячие газы. Дрейф в магнитном поле. Эффект электроотрицательных газов.
4. Регистрация ионизации в газе. Возбужденные молекулы в сильных электрических полях. Возбуждение молекул электронным ударом. Молекулярные ионы в инертных газах. Эффект Пеннинга. Резонансное излучение. Газовое усиление в сильных электрических полях. Ионизация молекул электронным ударом. Коэффициент ионизации Таунсенда. Ассоциативная ионизация. Ионизационная камера. Сетка Фриша.

5. Пропорциональные счетчики. Режимы работы. Емкость цилиндрического счетчика. Коэффициент усиления. Развитие сигнала во времени. Флюктуации газового усиления. Насыщение лавины, эффект пространственного положительного заряда и ограничение пропорциональности. Вторичная ионизация. Фотонные обратные связи. Ионные обратные связи. Ион-электронная эмиссия. Гашение разряда. Эффекты старения в проволочных детекторах.

6. Многопроволочные пропорциональные камеры (МПК). Электростатические и механические характеристики. Емкость проволочки. Конфигурация поля. Влияние механических точностей и электростатических сил. Особенности конструкции. Рамки. Линии поддержки и спейсеры. Считывание сигнала. Дискретные системы. Метод деления зарядов. Катодный съём. Характеристики МПК. Эффективность. Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность.

7. Дрейфовые камеры (ДК). Времяпроекционные камеры (ТРС). Плоские ДК. Принципы работы и типы дрейфовых ячеек. Предельное пространственное разрешение. Решение лево-право неопределенности. Линии задержки. Работа в СГС режиме. Цилиндрические ДК. Принцип действия ТРС. Дрейфовый объем и торцевой детектор. Диффузия электронов в присутствии магнитного поля. Управляемый режим работы. Считывание на пэды.

8. Микроструктурные газовые детекторы (МСГД). Микростриповые газовые камеры. Конфигурация поля. Усиление и пространственное разрешение. Загрузочная способность и старение. Пробой под воздействием сильноионизирующих частиц. Полупроводящие покрытия и пассивация катодов. Другие типы МСГД.

9. Газовые электронные умножители (ГЭУ). Принцип работы и геометрия. Конфигурация поля. Усиление. Эффект диаметра отверстий. Каскадные ГЭУ. Физические процессы в ГЭУ. Фотонные и ионные обратные связи. Работа в чистых благородных газах. Пробой под воздействием сильноионизирующих частиц. Пространственное и временное разрешение. Загрузочная способность и старение.

10. Полупроводниковые трековые детекторы (ППД) на основе р-п перехода. Элементы физики полупроводников. Принципы работы ППД. Детекторы с р-п переходом. Обедненная область. Поле и емкость р-п перехода. Технология изготовления. Микростриповые детекторы. Координатное разрешение и шумы. Двухкоординатные детекторы. Пиксельные детекторы. Эффекты облучения ППД.

11. Другие типы полупроводниковых трековых детекторов. Поверхностно-барьерные детекторы. Диффузионно-дрейфовые детекторы. Детекторы на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Кремниевые дрейфовые детекторы. Детекторы на основе материалов с большим  $Z$  (Ge, GaAs и др.).

12. Вакуумные фотоэлектронные умножители (ФЭУ). Принцип работы. Фотоэмиссионные материалы. Сурьмяно-щелочные фотокатоды. Фотокатоды с отрицательным сродством к электрону. Ультрафиолетовые фотокатоды. Динодные структуры. Технология изготовления. Энергетическое разрешение. Excess Noise Factor. Однофотоэлектронные спектры и темновой ток.

13. Другие типы фотоприемников. ФЭУ на микроканальных пластинах (МКП). Гибридные ФЭУ. Кремниевые фотодиоды. Лавинные фотодиоды. Кремниевые ФЭУ (SiPM).

14. Органические сцинтилляторы. Механизм сцинтилляций. Зависимость световыхода от плотности ионизации. Формула Биркса. Однокомпонентные сцинтилляторы. Многокомпонентные сцинтилляторы (пластики). Сцинтилляционные счетчики. Оптика сцинтилляторов. Световоды. Оптические волокна. Методы светосбора. Временное разрешение.

15. Неорганические кристаллические сцинтилляторы. Кристаллические неорганические сцинтилляторы. Механизм сцинтилляций. Щелочно-галогидные сцинтилляторы. Быстрые сцинтилляторы. Кросс-люминисценция. Позитронная эмиссионная томография на основе кристаллических сцинтилляторов. Радиационные повреждения в кристаллических сцинтилляторах.

16. Сцинтилляции в неорганических газах и жидкостях. Благородные газы. Механизмы сцинтилляций. Эксимерный механизм сцинтилляций в ВУФ. Сцинтилляции в видимой и инфракрасной области. Спектр излучения и временные свойства. Пропорциональные сцинтилляции в электрическом поле. Другие газовые сцинтилляторы.

17. Черенковские счетчики. Черенковское излучение. Основные свойства. Излучение в различных областях спектра. Первые черенковские счетчики. Радиаторы и добротность счетчика. Газовые черенковские счетчики. Зависимость показателя преломления от давления. Дифференциальные счетчики. Пороговые счетчики. Пороговая кривая и разрешение счетчика. Многоканальные счетчики. Аэрогельные счетчики.

18. Детекторы колец черенковского излучения (RICH). Оптические схемы. Зеркала. Детекторы фотонов. Первая поколение RICH. Детекторы фотонов на основе паров ТЕА и ТМАЕ. Многоступенчатые лавинные камеры и ТРС. Детекторы фотонов на основе ФЭУ. Второе поколение RICH. Детекторы фотонов на основе CsI фотокатода и гибридных ФЭУ. Аэрогельные RICH.

19. Другие методы идентификации частиц. Счетчики времени пролета (TOF). Принцип работы. TOF на основе сцинтилляционных счетчиков. TOF на основе плоских камер с резистивными электродами (RPC). Счетчики Пестова. Детекторы ионизационных потерь. Метод счета кластеров ионизации. Детекторы переходного излучения (TRD). Методы регистрации в TRD. Сравнение различных методов идентификации частиц.

20. Детекторы мюонов и нейтронов. Типы мюонных детекторов. Реакции конверсии нейтронов. Регистрация тепловых и эпи-тепловых нейтронов. Сцинтилляционные детекторы нейтронов. Газовые детекторы нейтронов. Регистрация быстрых нейтронов. Вето-детекторы нейтронов в низкофоновых экспериментах.

21. Детекторы темной материи и когерентно рассеянных нейтрино. Принципы регистрации ядер отдачи. Криогенные двухфазные детекторы. Криогенные твердотельные детекторы. Сцинтилляционные кристаллические детекторы. ТРС на отрицательных ионах. Пузырьковая камера. Энергетическая калибровка детекторов методом рассеяния нейтронов. Факторы гашения. Эксперименты по когерентному рассеянию нейтрино на ядрах.

22. Другие детекторы для низкофоновых экспериментов. Детекторы астрофизических, ускорительных и реакторных нейтрино. Детекторы нейтрино от сверхновых. Детекторы солнечных нейтрино. Детекторы реакторных нейтрино. Детекторы космических лучей. Детекторы гравитационных волн. Детекторы двойного бета-распада, аксионов,  $m$ - $e$ - $\gamma$  процесса и других редких процессов.

23. Электромагнитные ливни. Критическая энергия, радиационная длина, полная длина треков. Продольное развитие ливня. Максимум ливня. Поперечное развитие ливня. Мольеровский радиус. Флюктуации ливня. Флюктуации ливня в сэмплинг калориметрах. Утечки ливня.

24. Адронные ливни. Особенности адронного ливня. Невидимая энергия. Продольное и поперечное развитие ливня. Флюктуации ливня. Отношение  $e/h$  и энергетическое разрешение. Компенсация калориметров.

25. Типы калориметров. Однородные твердотельные калориметры. Черенковские калориметры. Сцинтилляционные кристаллические калориметры. Сэмплинг калориметры. Сцинтилляционные сэмплинг калориметры. Сэндвич калориметры. Калориметры на сцинтиллирующих волокнах (spaghetti, tile, shashlik). Газовые сэмплинг калориметры. Криогенные жидкостные калориметры. Калориметры на жидком аргоне. Калориметры на жидком криптоне и ксеноне.

26. Детекторы 20-го столетия. Конденсационные камеры: Вильсона и диффузионные. Образование капель в пересыщенном паре. Нейтральные и заряженные капли. Рост капель. Ионные капли в инертных газах. Конструкция камер.

27. Детекторы 20-го столетия. Пузырьковые камеры. Образование пузырьков в перегретой жидкости. Тепловая и ионная теории. Принцип работы и конструкция. Рабочие жидкости.

28. Другие детекторы 20-го столетия. Ядерные эмульсии. Состав эмульсий. Фотографический процесс. Теория фотографического процесса. Проявление. Характеристики следов частиц. Искровые и стримерные камеры. Механизм пробоя. Структура и яркость следов частиц. Параметры высоковольтного импульса. Конструкция. Считывание.

### **Пример билета на экзамен**

1) Пояснить принципы работы и устройства следующих приборов: Дрейфовые камеры (ДК). Времяпроекционные камеры (ТРС). Плоские ДК. Принципы работы и типы дрейфовых ячеек. Предельное пространственное разрешение. Решение лево-право неопределенности.

2) Привести и пояснить формулу Биркса. Пределы применимости.

Оценочные материалы по промежуточной аттестации, предназначенные для проверки соответствия уровня подготовки по дисциплине требованиям СУОС, хранятся на кафедре-разработчике РПД в печатном и электронном виде.

