

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Университет «Дубна»  
(государственный университет «Дубна»)

Филиал «Протвино»  
Кафедра «Техническая Физика»

УТВЕРЖДАЮ  
Директор

\_\_\_\_\_ /Евсиков А.А./  
*подпись* *Фамилия И.О.*

« 30 » июня 2023 г.

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

**Детекторы излучений**

*наименование дисциплины (модуля)*

Направление подготовки (специальность)

**03.03.02 Физика**

*код и наименование направления подготовки (специальности)*

Уровень высшего образования

**бакалавриат**

*бакалавриат, магистратура, специалитет*

Направленность (профиль) программы (специализация)

**«Медицинская физика»**

Форма обучения

**очная**

*очная, очно-заочная, заочная*

Протвино, 2023

Преподаватель:

Хохлов Ю.А., к.ф.-м.н., доцент, кафедра технической физики

---

*Фамилия И.О., должность, ученая степень, ученое звание, кафедра; подпись*

Рабочая программа разработана в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки (специальности) высшего образования

03.03.02 Физика

---

*(код и наименование направления подготовки (специальности))*

Программа рассмотрена на заседании кафедры «Техническая Физика»

*(название кафедры)*

Протокол заседания №7 от « 28 » июня 2023 г.

И.о. заведующего кафедрой, профессор \_\_\_\_\_ Ющенко О.П.

*(Фамилия И.О., подпись)*

Эксперт (рецензент):

---

*(Ф.И.О., ученая степень, ученое звание, место работы, должность; если текст рецензии не прикладывается – подпись эксперта (рецензента), заверенная по месту работы)*

## Оглавление

1 Цели и задачи освоения дисциплины.....	4
2 Место дисциплины в структуре ОПОП.....	4
3 Планируемые результаты обучения по дисциплине .....	5
4 Объем дисциплины .....	5
5 Содержание дисциплины.....	5
6 Перечень учебно-методического обеспечения по дисциплине .....	8
7 Фонды оценочных средств по дисциплине .....	8
8 Ресурсное обеспечение .....	8
Приложение к рабочей программе дисциплины	

## 1 Цели и задачи освоения дисциплины (модуля)

Цель дисциплины «Детекторы излучений» -- сформировать у обучающихся профессиональные компетенции ПК-1 в соответствии с требованиями ФГОС ВО по направлению подготовки бакалавров 03.03.02 Физика с учетом направленности бакалаврской программы – «Медицинская физика».

Учебные задачи дисциплины:

- знание физических основ детектирования излучений;
- знание основных физических процессов взаимодействия излучения с веществом;
- знание основных физических процессов в основных типах детекторов излучений и принципов их устройства.

Областями профессиональной деятельности в рамках изучаемой дисциплины являются:

- атомная промышленность (в сфере обеспечения жизненного цикла (исследование, проектирование и разработка современного уникального оборудования, производство, наладка, эксплуатация) оборудования ускорительных комплексов как медицинского назначения, так и используемых для проведения исследований в области физики высоких энергий, физических установок, в том числе, медицинского назначения для обеспечения эффективного и безопасного развития атомной отрасли);

- сквозные виды профессиональной деятельности в промышленности (в сферах проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по тематике организации, управления результатами научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ с целью производства современного оборудования, обеспечивающего совершенствование ядерно-энергетических технологий).

Объектами профессиональной деятельности в рамках изучаемой дисциплины (модуля) являются физические установки и технологии с применением детекторов излучений.

## 2 Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП

Дисциплина «Детекторы излучений» относится к части образовательной программы, формируемой участниками образовательных отношений, является обязательной дисциплиной, модуль «Общий физический практикум», Б1.В.08. Изучается в 7-м семестре, на 4-м курсе.

Дисциплина опирается на знания и навыки, полученные студентами при изучении предметов и дисциплин:

- все разделы общей физики, в т.ч.: «Электродинамика», «Атомная физика», «Теория относительности», «Квантовая физика»;

- основные разделы высшей математики, в т.ч. «Математический анализ», «Уравнения математической физики», «Теория вероятностей и математическая статистика».

Дисциплина изучается параллельно с дисциплинами:

- Ускорители заряженных частиц
- Ядерная медицина

### 3 Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)

Формируемые компетенции (код и наименование)	Индикаторы достижения компетенций (код и формулировка)	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)
ПК-1 Способен использовать базовые знания при построении физических и математических моделей в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований	ПК-1.1. Выявляет перспективные проблемы и формулирует принципы решения актуальных научно-исследовательских задач в области медицинской физики	Понимает физические основы процессов; знает определяющие численные величины; владеет методами решения задач. Подготовлен к чтению оригинальной научной и инженерно-технической литературы по специальности
	ПК-1.3. Владеть методами научного прогнозирования, методами работы на современных физических установках и навыками работы с пакетами прикладных программ физико-технических систем.	Владеет основами анализа измерений; критически интерпретирует результаты

Результат обучения сформулирован с учетом следующих профессиональных стандартов:

- Профессиональный стандарт 40.011 «Специалист по научно-исследовательским и опытно-конструкторским разработкам», утвержден приказом Министерством труда и социальной защиты Российской Федерации от 04 марта 2014 г. № 121н.

—

#### 4 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет 4 зачетных единицы, всего 144 часов

#### 5 Содержание дисциплины (модуля)

\_\_\_\_\_ очная \_\_\_\_\_ форма обучения

Наименование и краткое содержание разделов и тем дисциплины	Всего (часы)	В том числе:								
		Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем), часы из них						Всего	Самостоятельная работа обучающегося,	
		Лекционные занятия	Семинарские занятия	Практические занятия	Лабораторные занятия	...				
<b>7 семестр</b>										
1. Введение. Специальные единицы измерения. Фундаментальные постоянные.		2		1					2	1
2. Ионизационные потери.		2		1					2	2
3. Флуктуации ионизационных потерь.		2		1					2	2
4. Многократное рассеяние.		2		1					2	2
5. Тормозное излучение в поле ядра.		2		1					2	2
6. Рождение электрон-позитронных пар. Электромагнитный каскад.		2		1					2	2
7. Черенковское излучение.		2		1					2	2
8. Синхротронное излучение.		2		1					2	2
9. Поглощение гамма-квантов веществом.		2		1	12				2	2
10. Основные процессы в газах		2		1					2	2
11. Ионизационная камера		2		1					2	2
12. Пропорциональные счетчик, камера.		2		1	10				2	2
13. Сцинтилляторы. Фотоприемники.		2		1	12				2	2
14. Полупроводниковый детектор		2		1					2	2
15. Электромагнитные калориметры		2		1					2	2
16. Взаимодействие адронов с веществом.		2		1					2	2
17. Адронный калориметр.		2		1					2	1
Промежуточная аттестация <u>экзамен</u>	27									
<b>Итого</b>	<b>144</b>	34		17	34				85	32

#### Тема 1. Ионизационные потери.

Ионизационные потери как основной механизм детектирования частиц.

Модель Ферми для кулоновского взаимодействия заряженной частицы с атомными электронами. Спектр электронов отдачи.

Формула Бете-Блоха. Понятие MIP. Границы применимости.

Эффект плотности. Плато Ферми. Ограниченные потери.

Флуктуации потерь. Распределение Ландау.

#### Тема 2. Многократное рассеяние

Формула Резерфорда. Многократное рассеяние. Радиационная длина

Тема 3. Тормозное излучение в поле ядра. Рождение электрон-позитронных пар гамма-квантом в поле ядра.

Формула Бете-Гайтлера для ТИ. Длина экранировки. Критическая энергия. Радиационная длина – 2. ЛПМ- эффект . Связь рождения пар с ТИ. Ф.-ла Бете-Гайтлера для рождения пар.

#### Тема 4. Электромагнитный каскад.

Модель каскада в приближении Росси. Продольная форма каскада.

Радиус Мольер.

#### Тема 5. Черенковское излучение.

ЧИ как часть ионизационных потерь.

Геометрическая и кинематическая интерпретации ЧИ. Пороговый характер ЧИ.

Спектр и угловое распределение ЧИ.

Идентификация частиц посредством регистрации ЧИ.

#### Тема 6. Поглощение низкоэнергичных гамма-квантов веществом

Комптоновское рассеяние. Фотоэффект.

#### Тема 7. Синхротронное излучение

СИ в циклическом ускорителе. Сходство и различия с ТИ.

#### Тема 8. Газовые детекторы

Физические процессы в газе детектора : первичная и полная ионизация ; дрейф и диффузия заряженных частиц ; газовое усиление; пробой; фотоионизация и фотопоглощение.

Ионизационная камера. Форма сигнала. Индукционный эффект.

Цилиндрический пропорциональный счетчик. Многопроволочная пропорциональная камера.

#### Тема 9. Сцинтилляционные детекторы

Виды сцинтилляторов и механизмы сцинтилляции. Свойства сцинтилляторов : временные, световой выход, стойкость, практическая применимость. Эффект Биркса.

ФЭУ. Процессы в ФЭУ и его характеристики . Фото- и термо- эмиссия из полупроводникового фотокатода; вторичная эмиссия ; оптическая и ионная обратная связь, объемный заряд.

Шумы ФЭУ. Виды ФЭУ. Амплитудное разрешение и временные характеристики.

#### Тема 10. Полупроводниковые детекторы

Зонная структура полупроводника и физические процессы : собственная и примесная проводимость; ионизация; термализация; дрейф; рекомбинация.

Шумы в п/проводнике. Необходимость обеднения. Емкость перехода. PIN-детектор.

#### Тема 11. Электромагнитные калориметры

Виды калориметров: однородные и разнородные; сплошные и ячеистые; газовые, жидкостные, сцинтилляционные, полупроводниковые, черенковские.

Факторы разрешения: флуктуации сбора «заряда» и выборки, утечки, шумы.

Тема 12. Взаимодействие адронов с веществом. Адронные калориметры

Общие характеристики адронного взаимодействия : сечение, множественность, средний поперечный импульс, распады продуктов.

Ядерный каскад . Сравнение с ЭМ- калориметрией: дополнительные факторы энергетического (и пространственного) разрешения.

## **6 Перечень учебно-методического обеспечения по дисциплине**

Для обеспечения реализации программы дисциплины разработаны:

- методические материалы (конспекты) к лекционным занятиям.
- методические материалы (список задач) к практическим занятиям.
- методические материалы (описание работ) к лабораторным работам

Методические материалы по дисциплине и образовательной программе в целом представлены на официальном сайте образовательной организации (раздел «Сведения об образовательной организации» – Образование – Образовательные программы).

## **7 Фонд оценочных средств для промежуточной аттестации по дисциплине**

Для аттестации обучающихся на соответствие их персональных достижений поэтапным требованиям образовательной программы по дисциплине (модулю) разработаны фонды оценочных средств, позволяющие оценить результаты обучения (знания, умения, навыки) и сформированные (формируемые) компетенции.

Эти фонды включают теоретические вопросы, практические задания и домашние задания, используемые при проведении процедур текущего контроля успеваемости и промежуточной аттестации.

При необходимости обучающиеся с ограниченными возможностями здоровья и инвалиды обеспечиваются оценочными материалами в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

Для лиц с нарушениями зрения:

- в печатной форме увеличенным шрифтом,
- в форме электронного документа,

Для лиц с нарушениями слуха:

- в печатной форме,
- в форме электронного документа.

Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в печатной форме,
- в форме электронного документа,

## **8 Ресурсное обеспечение**

- **Перечень литературы**

## Основная литература

1. Болоздыня А.И. Детекторы ионизирующих частиц и излучений. Принципы и применения : Учебное пособие / А. И. Болоздыня, И. М. Ободовский. - Долгопрудный : Интеллект, 2012. - 208с. : ил. - ISBN 978-5-91559-105-8.
2. Кузнецов, С. И. Физика. Волновая оптика. Квантовая природа излучения. Элементы атомной и ядерной физики : учебное пособие / С. И. Кузнецов, А. М. Лидер. — 3-е изд., перераб. и доп. — Москва : Вузовский учебник : ИНФРА-М, 2019. — 212 с. - ISBN 978-5-9558-0350-0. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/1002478> (дата обращения: 14.04.2022). – Режим доступа: по подписке.
3. Мелешко, Е. А. Быстродействующая импульсная электроника / Е. А. Мелешко. – Москва : Физматлит, 2007. – 316 с. – Режим доступа: по подписке. –

## Дополнительная литература

4. Подлесный, С. А. Устройства приема и обработки сигналов : учебное пособие / С. А. Подлесный, Ф. В. Зандер. - Красноярск : Сиб. федер. ун-т, 2011. - 352 с. - ISBN 978-5-7638-2263-2. - Текст : электронный. - URL: <https://znanium.com/catalog/product/441113> (дата обращения: 17.04.2022). – Режим доступа: по подписке.
5. Кондратенко, С. Г. Физические основы измерений характеристик ионизирующих излучений: конспект лекций / С. Г. Кондратенко. – 3-е изд., перераб.
6. Датчики: Справочное пособие / В. М. Шарапов, Е. С. Полищук, Н. Д. Кошевой [и др.] ; ред. В. Шарапов, Е. Полищук. – Москва : РИЦ Техносфера, 2012. – 624 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=214292> (дата обращения: 17.04.2022). – ISBN 978-5-94836-316-5. – Текст: электронный.

### • Периодические издания

1. Журнал экспериментальной и теоретической физики / Учредитель: РАН, Институт физических проблем им. П.Л. Капицы РАН. Гл. ред. академик Андреев А.Ф., ИФП РАН. М.: Академиздатцентр «Наука». - Журнал основан в 1873 году. Полные тексты статей доступны по подписке на сайте научной электронной библиотеки «eLIBRARY.RU»: [http://elibrary.ru/title\\_about.asp?id=8682](http://elibrary.ru/title_about.asp?id=8682) и на сайте журнала <http://www.jetp.ac.ru/>
2. Ядерная физика / Учредитель: РАН, Издательство «Наука», Гл. ред.: Ю.Г. Абов. – М.: Академиздатцентр «Наука».- Журнал основан в 1965 году. Полные тексты статей доступны по подписке на сайте научной электронной библиотеки «eLIBRARY.RU»: <http://elibrary.ru/contents.asp?issueid=1549086>
3. Медицинская физика: научно-техническое издание / Учредитель: Ассоциация медицинских физиков России; гл. ред. Наркевич Б.Я, д.т.н., проф., в.н.с. – М.: Ассоциация медицинских физиков России. – журнал выходит 2 раза в полуг. - Основан в 1995 году. – ISSN: 1810-200X. - Текст : непосредственный

### • Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

Электронно-библиотечные системы и информационные базы данных

1. ЭБС «Znanium.com»: <https://znanium.com/>
2. ЭБС «Лань»: <https://e.lanbook.com/>
3. ЭБС «Юрайт»: <https://urait.ru/>
4. ЭБС «Университетская библиотека онлайн»: <https://biblioclub.ru/>
5. Научная электронная библиотека (РУНЭБ) «eLIBRARY.RU»: <http://elibrary.ru>

6. Национальная электронная библиотека (НЭБ): <http://нэб.рф/>
  7. Базы данных российских журналов компании «East View»: <https://dlib.eastview.com/>
  8. ArXiv.org - научно-поисковая система, специализируется в областях: компьютерных наук, астрофизики, физики, математики, квантовой биологии. <http://arxiv.org/>
  9. Google Scholar - поисковая система по научной литературе. Включает статьи крупных научных издательств, архивы препринтов, публикации на сайтах университетов, научных обществ и других научных организаций. <https://scholar.google.ru/>
  10. SciGuide - навигатор по зарубежным научным электронным ресурсам открытого доступа. <http://www.prometeus.nsc.ru/sciguide/page0601.ssi>
- Федеральная информационная система «Единое окно доступа к информационным ресурсам»: <http://window.edu.ru/>.

### ***Профессиональные ресурсы сети «Интернет»***

1. Федеральная информационная система «Единое окно доступа к информационным ресурсам»: <http://window.edu.ru/>
2. Образовательный математический сайт [EXponenta.ru](http://exponenta.ru/default.asp) <http://exponenta.ru/default.asp>
3. Математический сайт [Math.ru](http://math.ru/lib/) <http://math.ru/lib/>

- **Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса, включая программное обеспечение, информационные справочные системы**

Для проведения лекционных и практических занятий могут использоваться мультимедиа-материалы (презентации, слайды), в связи с чем требуется оборудование учебной аудитории видеопроектором, компьютером или ноутбуком.

Для выполнения заданий самостоятельной подготовки обучающиеся обеспечиваются литературой, а также в определенном порядке могут получать доступ к информационным ресурсам Интернета.

В филиале «Протвино» государственного университета «Дубна» созданы условия для обучения людей с ограниченными возможностями: использование специальных образовательных программ и методов обучения, специальных учебников, учебных пособий и дидактических материалов, специальных технических средств обучения коллективного и индивидуального пользования, предоставление услуг ассистента (помощника), оказывающим обучающимся необходимую техническую помощь, обеспечение доступа в здания организации.

Имеется универсальное средство для подъема и перемещения инвалидных колясок – пандус-платформа складной.

Компьютерные классы оборудованы столами для инвалидов с ДЦП, также здесь оборудованы рабочие места для лиц с ОВЗ: установлены специальный программно-технологический комплекс позволяющий работать на них студентам с нарушением опорно-двигательного аппарата, слабовидящим и слабослышащим. Имеются гарнитуры компактные, беспроводная клавиатура с большими кнопками, беспроводной компьютерный джостик с двумя выносными кнопками, беспроводной ресивер, беспроводная выносная большая кнопка, портативное устройство для чтения печатных материалов.

Специальные учебники, учебные пособия и дидактические материалы, в том числе в формате печатных материалов (крупный шрифт или аудиофайлы) имеются в ЭБС, на которые подписан филиал.

Наличие на сайте справочной информации о расписании учебных занятий в адаптированной форме доступной для обучающихся с ограниченными возможностями здоровья, являющихся слепыми или слабовидящими.

## 1. Описание материально-технической базы

Компьютерный класс (15 ПК) (оборудование в собственности).

Обучающиеся из числа инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья могут использовать специализированное программное и материально-техническое обеспечение:

- обучающиеся с нарушениями опорно-двигательного аппарата при необходимости могут использовать адаптивные технические средства: специально оборудованные джойстики, увеличенные выносные кнопки, клавиатуры с большими клавишами.
- обучающиеся с ограничениями по зрению могут прослушать доступный аудиоматериал или прочитать тексты, увеличив шрифт на экране монитора компьютера. Рекомендуется использовать экранную лупу и другие визуальные вспомогательные средства, чтобы изменить шрифт текста, межстрочный интервал, синхронизацию с речью и т.д., программы экранного доступа (скринридеры для прочтения текстовой информации через синтезированную речь) и/или включить функцию «экранного диктора» на персональном компьютере с операционной системой Windows 7, 8, 10.
- обучающиеся с ограничениями по слуху могут воспользоваться компьютерной аудиогарнитурой при прослушивании необходимой информации и портативной индукционной системой серии «ИСТОК».

При необходимости обучающиеся с ограниченными возможностями здоровья и инвалиды обеспечиваются печатными и (или) электронными образовательными ресурсами (образовательная программа, учебные пособия и др.) в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

Для лиц с нарушениями зрения:

- в печатной форме увеличенным шрифтом,
- в форме электронного документа,
- в форме аудиофайла.

Для лиц с нарушениями слуха:

- в печатной форме,
- в форме электронного документа.

Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в печатной форме,
- в форме электронного документа,
- в форме аудиофайла.

## Фонды оценочных средств

В результате освоения дисциплины «Детекторы излучений» программы бакалавров по направлению подготовки 03.03.02 «Физика» с учетом направленности бакалаврской программы – «Медицинская физика» выпускник должен обладать следующими компетенциями:

ПК-1 Способен использовать базовые знания при построении физических и математических моделей в избранной области экспериментальных и (или) теоретических физических исследований

ИНДИКАТОР ДОСТИЖЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИИ (код и наименование)	КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ РЕЗУЛЬТАТА ОБУЧЕНИЯ по практике ШКАЛА оценивания				
	1	2	3	4	5
ПК-1.1. Выявляет перспективные проблемы и формулирует принципы решения актуальных научно-исследовательских задач в области медицинской физики	Отсутствие знания	Фрагментарные знания основных процессов в детекторах  Допускает множественные грубые ошибки.	Неполные знания об основных процессах в детекторах  Допускает достаточно серьезные ошибки.	Сформированные, но содержащие отдельные пробелы знания основных процессов в детекторах  Допускает отдельные негрубые ошибки.	Демонстрирует свободное и уверенное знание основных процессов в детекторах  Не допускает ошибок.
ПК-1.3. Владеть методами научного прогнозирования, методами работы на современных физических установках и навыками работы с пакетами прикладных программ физико-технических систем.	Отсутствие владения	Фрагментарное применение навыков разработки технического задания на систему контроля детекторов в составе физической установки  Допускает множественные грубые ошибки	В целом успешное, но не систематическое применение навыков разработки технического задания на систему контроля детекторов в составе физической установки  Допускает достаточно серьезные ошибки.	В целом успешное, но содержащее отдельные пробелы применение навыков разработки технического задания на систему контроля детекторов в составе физической установки  Допускает отдельные негрубые ошибки.	Успешное и систематическое применение навыков разработки технического задания на систему контроля детекторов в составе физической установки  Не допускает ошибок.

При балльно-рейтинговой системе все знания, умения и навыки, приобретаемые студентами в результате изучения дисциплины, оцениваются в баллах.

Оценка качества работы в рейтинговой системе является накопительной и используется для оценивания системной работы студентов в течение всего периода обучения.

По итогам работы в семестре студент может получить максимально **70** баллов. Итоговой формой контроля в VII семестре является экзамен. На экзамене студент может набрать максимально **30** баллов.

В течение семестра студент может заработать баллы за следующие виды работ:

№	Вид работы	Сумма баллов
1	Аудиторные занятия (посещение)	20
2	Работа на практических занятиях	20
3	Сдача задач	30
	Итого:	70

Если к моменту окончания семестра студент набирает от **51** до **70** баллов, то он получает допуск к экзамену.

Если студент к моменту окончания семестра набирает от **61** до **70** баллов, то он может получить автоматическую оценку «удовлетворительно». При желании повысить свою оценку, студент имеет право отказаться от автоматической оценки и сдать экзамен.

Если студент не набрал минимального числа баллов (**51** балл), то он не получает допуск к экзамену.

### Соответствие рейтинговых баллов и академических оценок экзамена

Общая сумма баллов за семестр	Итоговая оценка
86-100	Отлично
71-85	Хорошо
51-70	Допуск к экзамену
в том числе: 61-70	Возможность получения автоматической оценки «удовлетворительно»
51-60	Только допуск к экзамену
0-50 *	Неудовлетворительно (студент не допущен к экзамену)

Процедура промежуточной аттестации проходит в соответствии с «Положением балльно-рейтинговой системе оценки и текущем контроле успеваемости студентов», а также «Положением о промежуточной аттестации» университета «Дубна».

#### Задачи для практических занятий и самостоятельного решения.

1. Найти максимально возможную передачу энергии при столкновении релятивистской частицы (масса  $M$ , импульс  $p$ ) с покоящейся частицей массы  $m$ . В предположении  $M \gg m$  рассмотреть предельные случаи а)  $M \ll p \ll M^2/m$ ; б)  $p \gg M^2/m$ .
2. Оценить  $\gamma$  - фактор начала плато Ферми из-за эффекта плотности в Ag при н.у.
3. Найти среднее кол.-во  $\delta$  - электронов с практическим пробегом  $>1.5$  мм в слое 1 см Ag (при н.у.) при его пересечении  $m.i.p.$
4. Найти предельную эффективность газового счетчика (Ag при н.у.) толщиной 1 мм при детектировании  $m.i.p.$
5. Найти предельное относительное энергетическое разрешение при детектировании электронов с энергией 5.9 кэВ ионизационной камерой (Ag при н.у.). Фактор Фано = 0.25.
6. Найти пороговое давление для черенковского излучения пионом 28 ГэВ в воздухе (преломление в воздухе при н.у.  $n_{\text{атм-1}} = 290 \cdot 10^{-6}$ ).
7. При каком импульсе  $p$  частиц определенной массы интенсивность черенк. излучения достигает 90% от (асимптотического) максимума, если их пороговый импульс в данном в.-ве  $p_{\text{порог}}$ ? Считать частицы ультрарелятивистскими.
8. Исследуется реакция  $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$  при 40 ГэВ в длинной (50 см) жидководородной мишени. Продольная (вдоль пучка) координата точки взаимодействия измеряется по интенсивности черенковского излучения, регистрируемого в полосе 350 – 450 нм. Считая фотоприемник идеальным (100% эффективным), оценить точность измерения. Считать для LiqH  $n = 1.112$ . N.B. Статистика черенковских фотонов – пуассоновская.
9. Вычислить значение радиационной длины в свинце.
10. Найти граничную энергию гамма-квантов за счет ЛПМ- эффекта для 25-и-ГэВ-ных электронов в свинце.

11. Оценить (в приближении Росси) количество электронов в максимуме ливня от 10-ГэВ-ного гамма-кванта в железе.
12. Вычислить сечение рождения пар в свинце гамма-квантами при 1 ГэВ
13. Край фотопоглощения К – серии в свинце составляет около 90 кэВ. Вычислить сечение фотоэффекта при энергии 200 кэВ.
14. Найти минимальную энергию гамма-квантов, регистрируемых по черенковскому излучению комптоновских электронов в воде ( $n=1.41$ ).
15. Найти потерю энергии на излучение протоном 3.5 ТэВ за один оборот в кольце ЛНС (длина окружности 28 км).
16. Синхротрон НИЦ КИ Сибирь-2 с длиной орбиты 124 м ускоряет электроны до 2.5 ГэВ. Найти критическую энергию фотонов СИ а) от основного кольца (паразитное СИ) б) формируемого на поворотном магните с полем 1.7Т (выводной канал СИ).
17. Импульс мюона измеряется по повороту его траектории при прохождении однородно намагниченного (поле 1.5 Т перпендикулярно к направлению падения) железного фильтра толщиной 2 м. С какой точностью будет измеряться импульс в такой установке? Считать, что трековые детекторы перед фильтром и после него имеют неограниченно хорошее угловое и координатное разрешение.
18. Найти групповую скорость электромагнитных волн в среде в «плазменном» приближении диэлектрической проницаемости
19. Выполнить модельную оценку параметров радиатора переходного излучения на основе фольг из бериллия в области  $\gamma = 10^4$
20. Плоскопараллельный дрейфовый зазор в 1 см под напряжением 1 кВ заполнен  $\text{CO}_2$  при н.у. Считая, что газ является «холодным» («тепловой предел», для  $\text{CO}_2$  выполняется в широком диапазоне параметров), оценить снизу среднеквадратичный диффузионный разброс электронов, образованных вблизи катода.
21. Оценить световыход типичного пластического сцинтиллятора при регистрации  $\alpha$  – частицы с энергией 6 МэВ. Энергетическая эффективность сцинтиллятора к m.i.p. – 3%. Постоянная Биркса –  $0.01 \text{ г} / (\text{МэВ} \cdot \text{см}^2)$ .
22. Найти напряжение смещения в кремниевом p+ n детекторе с концентрацией донорных атомов  $3 \cdot 10^{11} / \text{см}^3$  для обеднения зоны 300 мкм при  $T=300 \text{ К}$
23. Найти максимально достижимую толщину обедненной зоны в кремниевом p+ n детекторе с удельным сопротивлением  $\rho_p = 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ . Пробивное значение поля 20 кВ/см.
24. Найти критическое натяжение анодной проволоки для МПК с параметрами: длина  $L=1 \text{ м}$ , зазор анод-катод  $l=4 \text{ мм}$ , шаг проволок  $s=2 \text{ мм}$ , их диаметр  $2a = 20 \text{ мкм}$ . Рабочее напряжение камеры  $V=3 \text{ кВ}$ .

### Список вопросов к экзамену

1. Модель Ферми для ионизационных потерь энергии заряженной частицей.
2. Формула Бете-Блоха. Понятие  $m.i.p.$  Релятивистский рост потерь. Ограниченные потери. Эффект плотности. Плато Ферми.
3. Спектр  $\delta$  - электронов. Флуктуации ионизационных потерь. Распределение Ландау.
4. Первичная и вторичная ионизация. Фактор Фано.
5. Многократное рассеяние. Среднеквадратичный угол и распределение. Радиационная длина.
6. Тормозное излучение и рождение электрон-позитронных пар  $\gamma$ -квантом в поле ядра. Параметр экранировки. Характеристики. Формулы Бете-Гайтлера, графическое представление.
7. Электромагнитный каскад. Модель (приближение) Росси. Критическая энергия. Радиус Мольера.
8. Поглощение низкоэнергичных  $\gamma$ -квантов веществом. Комптоновское рассеяние. Фотоэффект.
9. Черенковское излучение. Кинематическая интерпретация ЧИ. ЧИ как часть ионизационных потерь. Спектр ЧИ.
10. Синхротронное излучение. Спектр СИ, критическая энергия.
11. Физические процессы в газе применительно к детектированию частиц.
12. Ионизационная камера. Индукционный эффект.
13. Цилиндрический пропорциональный счетчик.
14. Трековые детекторы : МПК, ДК, ДТ.
15. Виды сцинтилляторов и механизмы сцинтилляции.
16. Свойства сцинтилляторов. Эффект Биркса.
17. Процессы в ФЭУ и его характеристики.
18. Зонная структура полупроводника и физические процессы.
19. П/п – детектор, его характеристики.
20. Черенковский счетчик.
21. Электромагнитный калориметр.
22. Пуассоновский процесс. Мертвое время детектирования.