

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор института нано-, био-,  
информационных, когнитивных  
и социогуманитарных наук и  
технологий**

**П.А. Форш**

**Рабочая программа дисциплины (модуля)**

|                            |   |
|----------------------------|---|
| <b>по дисциплине:</b>      | Теория поля   |
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика  |
| <b>профиль подготовки:</b> | Термоядерная энергетика и плазменные технологии<br>Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В.<br>Курчатова<br>кафедра физики и физического материаловедения |
| <b>курс:</b>               | 3   |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр  |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Экзамен

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 45 час.

Подготовка к экзамену: 30 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составили:

С.В. Толоконников, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры физики и физического материаловедения 20.03.2020

## Аннотация

В курсе рассматриваются основы специальной теории относительности и теории электромагнитных полей в свободном пространстве. В первой части курса дается аксиоматика теории относительности, откуда выводятся основные следствия: релятивистское сокращение длины, замедление времени, относительность одновременности, абберация света. Излагаются основы теории тензоров, необходимые для четырехмерного описания релятивистских явлений. Далее рассматривается релятивистская частица в свободном пространстве и в электромагнитном поле. Формулируется теория электромагнитного поля, из действия выводятся уравнения Максвелла как трехмерном, так и в четырехмерном виде. Решается ряд принципиальных задач теории поля: распространение плоских волн, мультипольное разложение в электростатике и магнитостатике, излучение электромагнитных волн в дипольном приближении и релятивистскими зарядами, рассеяние электромагнитных волн.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

- освоение студентами теории электромагнитного поля, математических методов общего описания классических полей, освоение основ специальной теории относительности.

### Задачи дисциплины

- знакомство с базовыми экспериментальными фактами в области теории электромагнитного поля;
- усвоение основных концепций, выдвинутых для описания классических полей и, в частности, классического электромагнитного поля;
- овладение математическими методами, позволяющими решать задачи по теории поля;
- решение задач, охватывающих основные приложения теории электромагнитного поля.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)  | ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения                         |
|  | ОПК-3.2 Владеет на практике методологией составления научно-технических отчетов (проектов)  |
|  | ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций |
| ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре | ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок   |
|  | ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников   |
|  | ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры                         |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в  | ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования   |
|  | ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений                                |

**3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)**

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы и основные результаты специальной теории относительности;
- методы описания взаимодействий классических систем заряженных частиц с полями между собой;
- методы описания классического электромагнитного поля;
- описание электромагнитного поля, создаваемого системами зарядов;
- излучение электромагнитного поля;
- особенности излучения релятивистских частиц (синхротронное излучение, ондуляторы).

уметь:

- решать кинематические задачи о движении релятивистских объектов;
- решать задачи о движении заряженных частиц в электромагнитном поле;
- определять взаимодействие систем зарядов с внешними полями;
- мультипольные моменты;
- определять состояния системы зарядов, при которых наблюдается излучение электромагнитного поля, и находить интенсивность излучения.

владеть:

- методами описания классического электромагнитного поля;
- основными методами решения задач о движении заряженных частиц, в том числе релятивистских, в различных электромагнитных полях;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных с взаимодействием заряженных частиц и электромагнитного поля.

**4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий****4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий**

| №                     | Тема (раздел) дисциплины   | Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час. |          |                 |                |
|-----------------------|--|---|----------|-----------------|----------------|
|                       |  | Лекции  | Семинары | Лаборат. работы | Самост. работа |
| 1                     | Излучение электромагнитных волн.   | 8   | 8        |                 | 8              |
| 2                     | Инвариантность и ковариантность уравнений электродинамики и релятивистской механики. | 6   | 6        |                 | 15             |
| 3                     | Уравнения Максвелла. Электростатика. Магнитостатика.                                 | 8   | 8        |                 | 14             |
| 4                     | Электромагнитные волны. Принцип относительности и преобразования Лоренца.            | 8   | 8        |                 | 8              |
| Итого часов           |  | 30  | 30       |                 | 45             |
| Подготовка к экзамену |  | 30 час.   |          |                 |                |
| Общая трудоёмкость    |  | 135 час., 3 зач.ед.   |          |                 |                |

**4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)**

1. Излучение электромагнитных волн.

Запаздывающий и опережающий потенциалы. Излучение электромагнитных волн медленно движущимися (нерелятивистскими) зарядами. Дипольное приближение.

Магнитодипольное и квадрупольное приближения в теории излучения электромагнитных волн медленно движущимися зарядами. Излучение быстро движущейся (релятивистской) частицы. Рассеяние электромагнитных волн на свободном заряде. Радиационное трение.

2. Инвариантность и ковариантность уравнений электродинамики и релятивистской механики.

Контравариантные и ковариантные 4-векторы и 4-тензоры в специальной теории относительности. Инвариантность и ковариантность уравнений электродинамики и релятивистской механики. Действие и функция лагранжа для свободной частицы и частицы в электромагнитном поле. Движение релятивистской частицы в постоянных и однородных электрическом и магнитном полях. Преобразование полей. Инварианты поля. Эффект Доплера и абберация света для релятивистских источников.

3. Уравнения Максвелла. Электростатика. Магнитостатика.

Уравнения Максвелла для напряжённостей электрического и магнитного полей как результат обобщения опытных фактов. Электрическое поле неподвижных зарядов. Мультипольное разложение потенциала. Магнитное поле системы стационарных электрических токов. Магнитный дипольный момент.

4. Электромагнитные волны. Принцип относительности и преобразования Лоренца.

Электромагнитные волны в вакууме. Принцип относительности и преобразования Лоренца.

**5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

учебная аудитория, оснащенная мультимедиа проектором и экраном.

**6.Перечень рекомендуемой литературы**

Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 2 : Теория поля : учеб. пособие для вузов / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под. ред. Л. П. Питаевского .— 8-е изд., стереотип. — М. : Физматлит, 2001, 2003, 2006, 2012, 2014 .— 536 с.
2. Современная электродинамика [Текст] : [в 2 ч.]. Ч. 1 : Микроскопическая теория : учеб. пособие для вузов / В. В. Батыгин, И. Н. Топтыгин .— М. ; Ижевск : Ин-т компьютерных исследований, 2003 .— 736 с.

Фонд литературы кафедры

Дополнительная литература

Фонд литературы кафедры

1. Джексон Дж. Классическая электродинамика. - М.: Мир, 1965.
2. Гинзбург В.Л. Теоретическая физика и астрофизика, 3-е изд. - М.: Наука, 1987.
3. Белоусов Ю.М., Кузнецов В.П., Смилга В.П. Практическая математика. Руководство по математике для начинающих изучать теоретическую физику. - М.: МФТИ, 2005; Долгопрудный, Издательский дом "Интеллект", 2009

**7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

1. <http://lib.mipt.ru>– электронная библиотека Физтеха.
2. <http://www.Sci-lib.com> – Большая научная библиотека.

**8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

На лекционных занятиях демонстрируются презентации с помощью мультимедийных технологий.

В процессе самостоятельной работы обучающиеся могут использовать программные средства MATLAB, Mathcad, WolframMathematica.

**9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Для успешного освоения курса, помимо посещения лекций и семинаров, от студентов требуется самостоятельная работа. В основном, это время отводится на самостоятельное решение задач, входящих в два задания. Самостоятельные занятия включают в себя также повторение материала лекций, семинарских занятий и подготовку к промежуточным тестированиям, которые проводятся для текущего контроля за усвоением материала. Всего предполагается провести за семестр 4 теста, выполнить итоговую контрольную работу по решению задач в конце семестра и защитить каждое из двух самостоятельно выполненных заданий. Студенты, успешно прошедшие все формы промежуточного контроля, допускаются к сдаче экзамена по дисциплине.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)

|                            |  |
|----------------------------|--|
| <b>по направлению:</b>     | Прикладные математика и физика   |
| <b>профиль подготовки:</b> | Термоядерная энергетика и плазменные технологии<br>Физтех-школа природоподобных, плазменных и ядерных технологий им. И.В. Курчатова<br>кафедра физики и физического материаловедения |
| <b>курс:</b>               | 3  |
| <b>квалификация:</b>       | бакалавр   |

Семестр, формы промежуточной аттестации: 5 (осенний) - Экзамен

#### Разработчики:

С.В. Толоконников, канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент

А.Л. Барабанов, д-р физ.-мат. наук, доцент, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

| Код и наименование компетенции   | Индикаторы достижения компетенции   |
|--|---|
| ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)  | ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения                         |
|  | ОПК-3.2 Владеет на практике методологией составления научно-технических отчетов (проектов)  |
|  | ОПК-3.3 Владеет методами визуального и графического представления результатов научной (научно-технической, инновационной технологической) деятельности в виде отчетов, научных публикаций |
| ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре | ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок   |
|  | ОПК-5.2 Обладает способностью к освоению новых знаний на основе изучения литературы, научных статей и других источников   |
|  | ОПК-5.3 Способен к профессиональной эксплуатации современной экспериментальной научно-исследовательской (измерительно-аналитической и технологической) аппаратуры                         |
| ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области   | ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования   |
|  | ПК-3.2 Знает области и критерии применимости используемых теоретических подходов и умение оценивать точность приближенных аналитических методов вычислений                                |
|  | ПК-3.3 Умеет производить оценку точности численных методов, используемых на ЭВМ, вычислительной сложности используемых алгоритмов и объема требуемых вычислительных ресурсов              |

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Теория поля» обучающийся должен:

### знать:

- принципы и основные результаты специальной теории относительности;
- методы описания взаимодействий классических систем заряженных частиц с полями между собой;
- методы описания классического электромагнитного поля;
- описание электромагнитного поля, создаваемого системами зарядов;
- излучение электромагнитного поля;
- особенности излучения релятивистских частиц (синхротронное излучение, ондуляторы).

### уметь:

- решать кинематические задачи о движении релятивистских объектов;
- решать задачи о движении заряженных частиц в электромагнитном поле;
- определять взаимодействие систем зарядов с внешними полями;
- мультипольные моменты;
- определять состояния системы зарядов, при которых наблюдается излучение электромагнитного поля, и находить интенсивность излучения.

### владеть:

- методами описания классического электромагнитного поля;
- основными методами решения задач о движении заряженных частиц, в том числе релятивистских, в различных электромагнитных полях;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных с взаимодействием заряженных частиц и электромагнитного поля.

### 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

В целях текущего контроля успеваемости предусмотрен краткий опрос по темам предыдущих занятий по теме прошлой лекции или в конце занятия по пройденной теме.

### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

Примерный перечень вопросов:

1. Написать преобразование Лоренца.
2. Дать определение интервала в пространстве Минковского.
3. Дать определение собственного времени частицы.
4. Написать формулы для сложения скоростей.
5. Дать определение 4-координаты, 4-скорости, 4-ускорения .
6. Дать общее определение 4-вектора (Лоренц-вектора).
7. Метрический тензор пространства Минковского. Сигнатура.
8. Дать определение скалярного произведения двух 4-векторов.
9. Дать определение 4-импульса частицы. Чему равен квадрат 4-импульса?
10. Действие для свободной частицы --- функционал ее мировой линии.
11. Написать функцию Лагранжа свободной частицы.
12. Написать функция Гамильтона.
13. Эффект Доплера.
14. Написать формулу абберации света.
15. Написать выражение для силы Лоренца.
16. Дать определение 4-потенциала электромагнитного поля.
17. Функция Гамильтона частицы во внешнем электромагнитном поле.
18. Написать ковариантное уравнение движения заряда во внешнем электромагнитном поле.
19. Определить тензор напряженности электромагнитного поля .
20. Написать тензор поля в матричном представлении.
21. Определить дуальный тензор поля.
22. Написать инварианты электромагнитного поля.
23. Сформулировать теорему об изменении энергии заряженной частицы в электромагнитном поле.
24. Написать формулы для угловой частоты и радиус кривизны траектории заряда во внешнем магнитном поле.
25. Привести оценку характерного времени движения заряда во внешнем электрическом поле.
26. Написать первую пару уравнений Максвелла в ковариантном (тензорном) представлении.
27. Первая пара уравнений Максвелла в векторном представлении.
28. Дать определение микроскопической плотности электрического заряда.
29. Дать определение микроскопической плотности электрического тока.
30. Определить 4-вектор плотности электрического тока. Написать уравнение непрерывности электрического заряда
31. Вторая пара уравнений Максвелла в ковариантном (тензорном) представлении.
32. Вторая пара уравнений Максвелла в векторном представлении.
33. Определить плотность энергии электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.
34. Сформулировать теорема об изменении плотности энергии электромагнитного поля.
35. Дать определение калибровочных преобразований потенциалов. Сформулировать калибровочную инвариантность классической электродинамики.
36. Написать выражение для потенциал статической системы зарядов.



37. Чему равна энергия взаимодействия системы неподвижных зарядов?
38. Классический радиус электрона.
39. Дать определение дипольного момента системы зарядов. Написать выражение для электрического поля неподвижного диполя.
40. Дать определение квадрупольного момента системы зарядов. Написать формулу для энергии квадрупольного поля во внешнем слабо-неоднородном электрическом поле.
41. Написать условие калибровки Лоренца.
42. Написать уравнение для потенциалов. (Волновое уравнение с источником).
43. Дать определение преобразования Фурье (координата-время). Написать выражение для обратного преобразования.
44. Написать выражение для функции Грина волнового уравнения.
45. Написать выражения для запаздывающих потенциалов.
46. Сформулировать условия применимости дипольного приближения
47. Написать выражение для потенциалов в дипольном приближении.
48. Написать выражение для углового распределения излучения диполя.
49. Написать формулу для интенсивности излучения диполя.
50. Написать формулу для интенсивности излучения квадрупольного и магнитного диполя.

#### Критерии оценивания

##### Оценка

отлично 10 оценка «отлично (10)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений

отлично 9 оценка «отлично (9)» выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений

отлично 8 оценка «отлично (8)» выставляется студенту, показавшему всесторонние систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение применять их на практике при решении конкретных задач, и правильное обоснование принятых решений

хорошо 7 оценка «хорошо (7)» выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

хорошо 6 оценка «хорошо (6)» выставляется студенту, если он знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

хорошо 5 оценка «хорошо (5)» выставляется студенту, если он знает материал, и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности;

удовлетворительно 4 оценка «удовлетворительно (4)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

удовлетворительно 3 оценка «удовлетворительно (3)» выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он владеет фрагментарно основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации;

неудовлетворительно 2 оценка «неудовлетворительно (2)» выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных понятий дисциплины и не умеет использовать полученные знания при решении типовых практических задач

неудовлетворительно 1.

## **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не должен превышать двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор должен выставить обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями.

### **3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков**

Промежуточная аттестация по дисциплине «Теория поля» осуществляется в форме экзамена. Экзамен проводится в устной форме.

#### **Примерный перечень вопросов в тестах**

1. Написать преобразование Лоренца.
2. Дать определение интервала в пространстве Минковского.
3. Дать определение собственного времени частицы.
4. Написать формулы для сложения скоростей.
5. Дать определение 4-координаты, 4-скорости, 4-ускорения.
6. Дать общее определение 4-вектора (Лоренц-вектора).
7. Метрический тензор пространства Минковского. Сигнатура.
8. Дать определение скалярного произведения двух 4-векторов.
9. Дать определение 4-импульса частицы. Чему равен квадрат 4-импульса?
10. Действие для свободной частицы --- функционал ее мировой линии.
11. Написать функцию Лагранжа свободной частицы.
12. Написать функция Гамильтона.
13. Эффект Доплера.
14. Написать формулу абберации света.
15. Написать выражение для силы Лоренца.
16. Дать определение 4-потенциала электромагнитного поля.
17. Функция Гамильтона частицы во внешнем электромагнитном поле.
18. Написать ковариантное уравнение движения заряда во внешнем электромагнитном поле.
19. Определить тензор напряженности электромагнитного поля.
20. Написать тензор поля в матричном представлении.
21. Определить дуальный тензор поля.
22. Написать инварианты электромагнитного поля.
23. Сформулировать теорему об изменении энергии заряженной частицы в электромагнитном поле.
24. Написать формулы для угловой частоты и радиус кривизны траектории заряда во внешнем магнитном поле.
25. Привести оценку характерного времени движения заряда во внешнем электрическом поле.
26. Написать первую пару уравнений Максвелла в ковариантном (тензорном) представлении.
27. Первая пара уравнений Максвелла в векторном представлении.
28. Дать определение микроскопической плотности электрического заряда.
29. Дать определение микроскопической плотности электрического тока.
30. Определить 4-вектор плотности электрического тока. Написать уравнение непрерывности электрического заряда
31. Вторая пара уравнений Максвелла в ковариантном (тензорном) представлении.
32. Вторая пара уравнений Максвелла в векторном представлении.
33. Определить плотность энергии электромагнитного поля. Вектор Пойнтинга.
34. Сформулировать теорема об изменении плотности энергии электромагнитного поля.
35. Дать определение калибровочных преобразований потенциалов. Сформулировать калибровочную инвариантность классической электродинамики.
36. Написать выражение для потенциал статической системы зарядов.
37. Чему равна энергия взаимодействия системы неподвижных зарядов?
38. Классический радиус электрона.

39. Дать определение дипольного момента системы зарядов. Написать выражение для электрического поля неподвижного диполя.
40. Дать определение квадрупольного момента системы зарядов. Написать формулу для энергии квадрупольного момента во внешнем слабо-неоднородном электрическом поле.
41. Написать условие калибровки Лоренца.
42. Написать уравнение для потенциалов. (Волновое уравнение с источником).
43. Дать определение преобразования Фурье (координата-время). Написать выражение для обратного преобразования.
44. Написать выражение для функции Грина волнового уравнения.
45. Написать выражения для запаздывающих потенциалов.
46. Сформулировать условия применимости дипольного приближения
47. Написать выражение для потенциалов в дипольном приближении.
48. Написать выражение для углового распределения излучения диполя.
49. Написать формулу для интенсивности излучения диполя.
50. Написать формулу для интенсивности излучения квадрупольного и магнитного диполя.

### **Примерный перечень контрольных вопросов в билетах.**

- 1) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Покажите, как из этих уравнений выводятся "теорема Гаусса" для стационарного электрического поля, "теорема о циркуляции" стационарного магнитного поля и закон электромагнитной индукции Фарадея.
- 2) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Выведите из этих уравнений закон сохранения электрического заряда в дифференциальной и интегральной формах. Напишите явные выражения для плотностей заряда и тока точечных частиц, движущихся по известным траекториям. Покажите, что эти выражения согласуются с законом сохранения электрического заряда в дифференциальной форме.
- 3) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Что называют скалярным и векторным потенциалами электромагнитного поля? Выведите уравнения для этих потенциалов. Что называют калибровочной (градиентной) инвариантностью уравнений электродинамики? Что называют калибровочными условиями для потенциалов? Как выглядят уравнения для потенциалов в кулоновской и лоренцевской калибровках?
- 4) Напишите (без вывода) дифференциальные уравнения для поля  $\vec{E}$ , создаваемого неподвижными зарядами. Выведите из этих уравнений "теорему Гаусса" и получите поле точечного заряда. Выведите из тех же уравнений для  $\vec{E}$  уравнение Пуассона для скалярного потенциала. Получите явное выражение для функции Грина уравнения Пуассона, основываясь на знании поля точечного заряда. Напишите формальное решение уравнения Пуассона, выраженное через функцию Грина.
- 5) Напишите (без вывода) явное выражение для энергии поля  $\vec{E}$ , создаваемого неподвижными зарядами, в виде интеграла от плотности энергии. Выразите эту энергию, а также энергии взаимодействия отдельных подсистем зарядов друг с другом через потенциалы  $\varphi$  и плотности заряда  $\rho$ . Получите явные выражения для энергии системы зарядов в постоянном слабо неоднородном электрическом поле, а также для силы и момента сил, действующих на эту систему, ограничиваясь монопольным и дипольным слагаемыми.

6) Напишите (без вывода) дифференциальные уравнения для поля  $\vec{H}$ , создаваемого стационарными токами. Выведите уравнение Пуассона для векторного потенциала и напишите формальное решение этого уравнения, выраженное через функцию Грина. Получите закон Био и Савара для поля  $\vec{H}$ , создаваемого токами, распределёнными по объёму, а также токами, текущими по тонким проводам.

7) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Что называют скалярным и векторным потенциалами электромагнитного поля? Выведите уравнения для потенциалов электромагнитного поля в вакууме в кулоновской калибровке. Получите явные выражения для потенциалов и напряжённостей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитного поля плоской монохроматической линейно поляризованной волны, распространяющейся в произвольном направлении (вдоль единичного вектора  $\vec{n}$ ).

8) Напишите (без вывода) явные выражения для напряжённостей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  электромагнитного поля плоской монохроматической линейно поляризованной волны, распространяющейся в вакууме в произвольном направлении, и покажите, что эти выражения удовлетворяют уравнениям Максвелла. Объясните, что называют эллиптически поляризованной волной и комплексным единичным вектором поляризации. Что называют волновым 4-вектором (в связи с инвариантностью фазы волны)?

9) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Объясните, каким образом предположение о справедливости этих уравнений во всех инерциальных системах отсчёта ведёт к утверждению о справедливости преобразований Лоренца для временных и пространственных координат событий при переходах из одних инерциальных систем в другие. Выведите преобразования Лоренца.

10) Что называют принципом относительности и принципом постоянства скорости света? Чем подтверждается справедливость этих принципов? Объясните, каким образом из этих принципов следует утверждение о справедливости преобразований Лоренца для временных и пространственных координат событий при переходах из одних инерциальных систем в другие. Выведите преобразования Лоренца.

11) Что называют контравариантными и ковариантными 4-тензорами (4-векторами)? Напишите законы преобразования составляющих 4-тензоров при переходах из одних инерциальных систем в другие. Объясните, что называют сложением, внешним умножением и свёрткой 4-тензоров. Докажите, что свёртки 4-тензоров ведут к инвариантам или новым 4-тензорам. Приведите примеры 4-векторов и 4-тензоров, их сложения, внешнего умножения и свёрток (в частности, обсудите 4-градиент).

12) Что называют контравариантными и ковариантными 4-тензорами (4-векторами)? Напишите законы преобразования составляющих 4-тензоров при переходах из одних инерциальных систем в другие. Докажите, что свёртки 4-тензоров ведут к инвариантам или новым 4-тензорам. Что называют фундаментальным тензором? Какие есть ещё численно инвариантные 4-тензоры? Приведите примеры 4-векторов и 4-тензоров (обсудите, в частности, 4-градиент).

13) Объясните, в чём состоит связь между принципом относительности и ковариантностью физических законов. Что называют ковариантной записью уравнений, выражающих физические законы? Напишите (без вывода) волновые уравнения для скалярного и векторного потенциалов электромагнитного поля в вакууме и калибровочное условие, которому при этом удовлетворяют потенциалы. Объясните, как записать эти уравнения и условие в ковариантной форме.

14) Объясните, в чём состоит связь между принципом относительности и ковариантностью физических законов. Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , выведите из этих уравнений закон сохранения электрического заряда и объясните, как записать этот закон в ковариантной форме. Объясните, как преобразуются плотность заряда и плотность тока при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую.

15) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Что называют скалярным  $\varphi$  и векторным  $\vec{A}$  потенциалами электромагнитного поля? Выведите из уравнений Максвелла уравнения для  $\varphi$  и  $\vec{A}$  и объясните, как записать эти уравнения в ковариантной форме, в частности, с помощью тензора электромагнитного поля. Получите явные выражения для составляющих этого тензора.

16) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для полей  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ . Что называют скалярным  $\varphi$  и векторным  $\vec{A}$  потенциалами электромагнитного поля? Что называют калибровочными условиями? Выведите из уравнений Максвелла уравнения для  $\varphi$  и  $\vec{A}$  в лоренцевской калибровке и объясните, как записать эти уравнения и соответствующее им калибровочное условие Лоренца в ковариантной форме. Объясните, как преобразуются скалярный и векторный потенциалы при переходе из одной инерциальной системы отсчёта в другую.

17) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла - как в "обычной" форме через поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , так и в ковариантной форме через тензор электромагнитного поля. Объясните, как связаны скалярный и векторный потенциалы с полями  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , с одной стороны, и с тензором электромагнитного поля, с другой стороны. Получите явные выражения для составляющих этого тензора и выведите формулы, описывающие преобразования этих составляющих при переходе из одной инерциальной системы в другую.

18) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла - как в "обычной" форме через поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , так и в ковариантной форме через тензор электромагнитного поля. Объясните, как связаны скалярный и векторный потенциалы с полями  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$ , с одной стороны, и с тензором электромагнитного поля, с другой стороны. Получите явные выражения для составляющих этого тензора, а также для инвариантов электромагнитного поля. Обсудите следствия существования этих инвариантов.

19) Объясните, воспользовавшись лагранжевым формализмом, в чём состоит связь законов сохранения импульса и энергии с однородностью пространства и времени. Объясните, как выглядит действие для свободной релятивистской частицы, выведите явные выражения для импульса и энергии этой частицы и установите связь с составляющими 4-скорости частицы. Как преобразуются энергия и импульс частицы при переходе из одной инерциальной системы в другую?

20) Напишите (без вывода) явное выражение для полной интенсивности дипольного излучения и укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. Что называют силой радиационного трения? Получите явное выражение для силы радиационного трения и объясните на каком-нибудь конкретном примере, при каких условиях полученное выражение может считаться верным (обсудите пределы применимости классической электродинамики).

21) Объясните, что называют явлением рассеяния электромагнитной волны (света) на системе зарядов. Что называют дифференциальным и полным сечениями рассеяния?

Найдите полное сечение рассеяния плоской монохроматической волны на свободном заряде (томсоновское сечение). Что (и почему) называют классическим радиусом заряженной частицы?

22) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённости электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Выведите из этих уравнений закон сохранения энергии электромагнитного поля в дифференциальной и интегральной формах. Объясните, что называют вектором Пойнтинга.

23) Напишите (без вывода) уравнение Пуассона для скалярного потенциала, создаваемого неподвижными зарядами, и его формальное решение, выраженное через функцию Грина. Выведите явное выражение для потенциала системы неподвижных зарядов на расстояниях  $r$ , много больших размера системы  $a$ , в виде ряда по параметру  $a/r$ , ограничиваясь монопольным, дипольным и квадрупольным слагаемыми. Что называют дипольным и квадрупольным моментами системы зарядов?

24) Напишите (без вывода) уравнение Пуассона для векторного потенциала, создаваемого стационарными токами, калибровочное условие для потенциала и формальное решение уравнения, выраженное через функцию Грина. Выведите явное выражение для векторного потенциала стационарных токов на большом расстоянии от них, ограничиваясь дипольным слагаемым. Что называют магнитным моментом системы токов? Каков магнитный момент плоского контура с током?

25) Система точечных зарядов, движущихся в ограниченной области, находится в постоянном слабо неоднородном магнитном поле. Что называют магнитным моментом такой системы зарядов? Выразите силу и момент сил, действующих на эту систему, через магнитный момент движущихся зарядов. Какой энергией обладает магнитный диполь во внешнем магнитном поле?

26) Объясните вкратце, что называют лагранжевым формализмом: принципом наименьшего действия, функцией Лагранжа, связью законов сохранения импульса и энергии с однородностью пространства и времени. Объясните, как записывается действие для релятивистской частицы в поле и как согласуется вид этого действия с калибровочной инвариантностью уравнений электродинамики. Выведите явные выражения для обобщённого импульса, энергии и функции Гамильтона частицы в поле.

27) Объясните вкратце, что называют лагранжевым формализмом: принципом наименьшего действия, функцией Лагранжа, уравнениями Лагранжа. Объясните, как записывается действие для релятивистской частицы в поле, как согласуется вид этого действия с калибровочной инвариантностью уравнений электродинамики и как выглядит функция Лагранжа. Получите из уравнений Лагранжа уравнения движения релятивистской частицы в электромагнитном поле.

28) Объясните, в чём состоит связь между принципом относительности и ковариантностью физических законов и что называют принципом наименьшего действия. Объясните, как записывается действие для релятивистской частицы в поле. Выведите уравнения движения частицы в электромагнитном поле в ковариантной форме. Покажите, что "пространственные" составляющие этих уравнений эквивалентны ньютоновским уравнениям движения, и объясните смысл "временной" составляющей.

29) Напишите (без вывода) уравнения, описывающие динамику полного 4-импульса системы частиц, движущихся в электромагнитном поле в некоторой инерциальной системе отсчёта. Выразите правые части этих уравнений через пространственные

интегралы от составляющих 4-дивергенции тензора энергии-импульса электромагнитного поля. Объясните смысл составляющих этого тензора. Что называют дифференциальной формой записи закона сохранения энергии и импульса поля в отсутствие частиц?

30) Напишите (без вывода) уравнения Максвелла в ковариантной форме и выведите уравнения (уравнения Даламбера), определяющие потенциалы поля, создаваемые движущимися зарядами. Получите явное выражение для запаздывающей функции Грина уравнения Даламбера, основываясь на знании функции Грина уравнения Пуассона. Напишите формальные решения для потенциалов, создаваемых движущимися зарядами, выраженные через функцию Грина.

31) Напишите (без вывода) уравнения и калибровочные условия для потенциалов, создаваемых системой движущихся зарядов, и их формальные решения, выраженные через запаздывающую функцию Грина. Объясните, почему для описания излучения этой системы на больших расстояниях от неё в потенциалах достаточно оставить только наиболее медленно убывающие слагаемые. Получите явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении и объясните, при каких условиях это приближение является справедливым.

32) Напишите (без вывода) запаздывающие потенциалы, создаваемые движущимися зарядами, и явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении. Укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. В том же дипольном приближении получите явное выражение для скалярного потенциала и найдите поля  $\vec{E}$  и  $\vec{H}$  в волновой зоне. Объясните, что называют ближней и волновой зонами.

33) Напишите (без вывода) запаздывающие потенциалы, создаваемые движущимися зарядами, и явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении. Укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. В том же дипольном приближении получите явное выражение для магнитного поля  $\vec{H}$ . Объясните, что называют ближней и волновой зонами и как меняется поле  $\vec{H}$  при переходе из одной зоны в другую.

34) Напишите (без вывода) запаздывающие потенциалы, создаваемые движущимися зарядами, и явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении. Укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. В том же дипольном приближении получите явное выражение для магнитного поля  $\vec{H}$  в волновой зоне. Найдите явное выражение для полной интенсивности дипольного излучения.

35) Напишите (без вывода) запаздывающий векторный потенциал, создаваемый движущимися зарядами. Выведите явное выражение для векторного потенциала, описывающего излучение, в виде ряда по параметру  $v/c$ , где  $v$  - характерная скорость зарядов, ограничиваясь дипольным, магнитодипольным и квадрупольными слагаемыми. Считая дипольный и квадрупольный вклады равными нулю, найдите полную интенсивность магнитодипольного излучения. Приведите пример магнитодипольного излучателя.

36) Напишите (без вывода) запаздывающий векторный потенциал, создаваемый движущимися зарядами. Выведите явное выражение для векторного потенциала, описывающего излучение, в виде ряда по параметру  $v/c$ , где  $v$  - характерная скорость зарядов, ограничиваясь дипольным, магнитодипольным и квадрупольными слагаемыми.



Считая дипольный и магнито-дипольный вклады равными нулю, найдите полную интенсивность квадрупольного излучения. Приведите пример квадрупольного излучателя.

37) Напишите (без вывода) явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении и укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. В том же дипольном приближении получите магнитное поле  $\vec{H}$  в волновой зоне. Найдите явное выражение для углового распределения усреднённой (по времени) интенсивности дипольного излучения в случае, когда излучает заряд, совершающий гармонические колебания вдоль оси  $z$ .

38) Напишите (без вывода) явное выражение для векторного потенциала в дипольном приближении и укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. В том же дипольном приближении получите магнитное поле  $\vec{H}$  в волновой зоне. Найдите явное выражение для углового распределения усреднённой (по времени) интенсивности дипольного излучения в случае, когда излучает заряд, совершающий равномерное движение по окружности вокруг оси  $z$ .

39) Напишите (без вывода) явное выражение для полной интенсивности дипольного излучения и укажите, при каких условиях это приближение является справедливым. Что называют спектральной плотностью излучения? Получите явное выражение для спектральной плотности дипольного излучения.

40) Напишите (без вывода) запаздывающие потенциалы, создаваемые зарядом, движущимся по известной траектории. Приведите эти запаздывающие потенциалы к виду Лиенара-Вихерта. Объясните (качественно) особенности углового распределения излучения быстро движущегося заряда. Приведите пример излучающей системы, для которой эти особенности обнаруживают себя явным образом.

41) Заряженная частица (вообще говоря, релятивистская) движется по окружности в постоянном и однородном магнитном поле. Найдите полную интенсивность излучения и выразите её через радиус орбиты, энергию и скорость частицы. Обсудите изменение интенсивности излучения при переходе от нерелятивистского режима движения к релятивистскому. Объясните (качественно) особенности углового распределения излучения релятивистской частицы.

42) Релятивистская заряженная частица движется по окружности с постоянной угловой скоростью. Объясните (качественно) особенности углового распределения излучения этой частицы. Оцените (качественно) ширину спектра излучения в направлении максимальной интенсивности излучения.

### Примерный перечень задач в контрольных заданиях.

#### Задание № 1.

1. Начало координат системы  $K'$  движется со скоростью  $\mathbf{v} = v\mathbf{e}_x$  относительно системы  $K$ , а оси координат составляют со скоростью  $\mathbf{v}$  те же самые углы, что и оси системы  $K$ . Записать матрицу преобразований Лоренца из системы  $K$  в систему  $K'$  (а также матрицу обратного преобразования). Определить положение осей  $x'$  и  $y'$  в системе  $K$  в момент времени  $t=0$  по часам системы  $K$ .

Указание: представить радиус-вектор  $\mathbf{r}$  в виде суммы параллельного и перпендикулярного скорости  $\mathbf{v}$  векторов:  $\mathbf{r} = \mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2$ , где  $\mathbf{r}_1 = (\mathbf{r}\mathbf{v})\mathbf{v}/v^2$ ,  $\mathbf{r}_2 = \mathbf{r} - (\mathbf{r}\mathbf{v})\mathbf{v}/v^2$ .

2. Определить относительную скорость сталкивающихся протонов в ускорителе со встречными пучками, если энергия протонов в каждом пучке 5000 ГэВ. Какова должна быть энергия налетающих протонов, чтобы столкновение с покоящимся протоном происходило с той же относительной скоростью?

3. Тонкий стержень, запущенный со скоростью  $v$  относительно системы  $K$ , виден в ней вертикальным. Показать, что в сопутствующей стержню системе  $K'$  (см. задачу №1) он будет повернут относительно вертикали на угол  $q$  такой, что

$$\operatorname{tg}(q+j)=g \operatorname{tg} j, \operatorname{tg} j=\frac{v}{c}, g=1 / \sqrt{1-(v / c)^2},$$

откуда

$$\operatorname{tg} q=(g-1) \operatorname{tg} j /(1+g \operatorname{tg} j).$$

4. На частицу, движущуюся со скоростью  $v$ , действует сила, сообщаящая ей ускорение  $w$ . Определить, с какой угловой скоростью будет поворачиваться спин частицы относительно лабораторной системы отсчета, если сила, действующая на частицу, не действует на ее спин (прецессия Томаса).

Ответ:

$$w=g^2/(g+1)[w, v] / c^2.$$

Указание: использовать результат задачи № 3.

5. Доказать, что трехмерные тензоры  $d$  и  $\epsilon$  являются инвариантными тензорами.

Вычислить свертки

а)

$$d^{\beta \gamma} d_{\gamma \mu} d^{\mu \alpha};$$

$$b) \epsilon^{\alpha \beta \gamma} \epsilon_{\alpha \beta \gamma}, \epsilon^{\alpha \beta \gamma} \epsilon_{\alpha \gamma \beta}, \epsilon^{\alpha \beta \gamma} \epsilon_{\gamma \alpha \beta};$$

покоординатно проверить, что  $c=[a, b]$  эквивалентно

$$c^{\alpha}=\epsilon^{\alpha \beta \gamma} a_{\beta} b_{\gamma}$$

6. Раскрыть в тензорных обозначениях выражения:

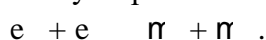
$$\operatorname{rot} \mathbf{A}, \operatorname{rot}[\mathbf{a}, \mathbf{b}], \operatorname{rot}(f \mathbf{A}), \operatorname{div}(f \mathbf{A}), \operatorname{div}[\mathbf{a}, \mathbf{b}], \operatorname{grad}(\mathbf{a}, \mathbf{b}).$$

Вычислить: а)  $\operatorname{rot}[\mathbf{w}, \mathbf{r}]$ ,  $\operatorname{grad}(\mathbf{a}, \mathbf{r})$ , где  $\mathbf{w}, \mathbf{a}$  – постоянные векторы;

$$b) \operatorname{grad} r, \operatorname{div} \mathbf{r}, (\mathbf{a} \cdot \mathbf{r}) \operatorname{grad} f(r), \operatorname{rot} \mathbf{a}(r), \operatorname{div} \mathbf{a}(r), (r=|\mathbf{r}|).$$

7. Для получения  $g$ -квантов высокой энергии навстречу пучку электронов с энергией  $E=200$  ГэВ выстреливает лазер с энергией фотонов  $\epsilon=2$  эВ. Какую энергию будут иметь фотоны, рассеянные назад? Найти зависимость энергии фотонов от угла рассеяния.

8. В ускорителе на встречных пучках идет реакция



Зная энергию каждого из пучков  $e^{-}$  и  $e^{-}$ , найти энергию и импульсы  $\pi^{+}$  и  $\pi^{-}$ . Каков энергетический порог этой реакции? Сравнить с порогом в случае, когда ускоренные позитроны падают на неподвижные электроны.

9. Для нейтрино, образующихся при распаде

$\rho$ -мезонов с энергией 6 ГэВ (масса  $\rho$ -мезона 140 МэВ, масса  $\pi$ -мезона 105 МэВ), определить энергетический спектр, их максимальную и среднюю энергии и угловое

распределение, если известно, что в системе покоя  $p$ -мезона распад  $p \rightarrow m + n$  происходит изотропно.

10 Плоское зеркало движется со скоростью  $v$  в направлении своей нормали. На зеркало падает монохроматическая волна частотой  $\omega$  под углом  $\varphi$  к нормали. Определить направление и частоту отраженной волны, считая, что для покоящегося зеркала справедлив обычный закон отражения.

11. Показать, что однородное магнитное поле  $\mathbf{H}$ , направленное по оси  $Oz$ , может быть описано векторным потенциалом  $\mathbf{A} = (0, Hx, 0)$ .

Градиентным преобразованием перейти к потенциалу  $A = 1/2[\mathbf{H}, \mathbf{r}]$ .

12. Магнитное поле, направленное по оси  $Oz$  вдоль этой оси, убывает с постоянным градиентом

Может ли поле во всем пространстве оставаться параллельным оси  $Oz$ ? Найти радиальные компоненты поля вне оси  $Oz$ . Представить картину силовых линий.

13. Найти движение релятивистской частицы массы  $m$  и заряда  $e$  в перпендикулярных электрическом и магнитном полях  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$ .

14. Частица с массой  $m$  и зарядом  $e$  движется в магнитном поле в плоскости, перпендикулярной направлению поля. Определить изменение энергии частицы за один оборот в случае, когда магнитное поле медленно меняется со временем (так, что изменение поля за период движения мало по сравнению с самим значением поля). Доказать, что величина  $r^2/H$  остается постоянной (т.е. является адиабатическим инвариантом). Вычислить изменение радиуса орбиты и энергии частицы, если поле изменилось от значения  $H_1$  до  $H_2$ .

15. Получить формулу  $\mathbf{F} = (\nabla \cdot \mathbf{H}) \mathbf{H}$  для силы, действующей на магнитный диполь в неоднородном поле и найти в нерелятивистском случае уравнение движения ведущего центра орбиты заряженной частицы. (Поле мало меняется на расстояниях порядка радиуса орбиты.)

## Задание № 2

16. Определить потенциальную энергию взаимодействия двух диполей с моментами  $\mathbf{d}_1$  и  $\mathbf{d}_2$ .

17. Заряд электрона распределен в основном состоянии атома водорода с плотностью электронного облака

заряд электрона, боровский радиус ( см). Найти энергию взаимодействия электронного облака с ядром:

а) считая ядро точечным зарядом;

б) считая ядро сферически-симметричным заряженным шаром радиуса см, получить ответ для частного случая равномерно заряженного шара.

18. Найти тензор квадрупольного момента равномерно заряженного эллипсоида вращения относительно его центра. Найти электрическое поле на больших расстояниях.

19. Вычислить средние значения произведений единичных векторов:

Усреднение ведется по единичной сфере .

20. Определить электрическое и магнитное поле гармонически колеблющегося диполя на расстояниях, много больших размеров диполя (но необязательно больших длины волны).

21. Два заряда ( ) благодаря кулоновским силам обращаются один вокруг другого по круговой орбите радиуса  $R$ . Определить энергию, теряемую на излучение за один оборот. Найти зависимость расстояния между зарядами от времени. Определить время, за которое один заряд упадет на другой.

22. Два одноименных заряда ( ) испытывают лобовое столкновение. Определить излученную энергию, если задана их относительная скорость на бесконечности . Рассмотреть случай  $v_1/m_1 = v_2/m_2$ .

23. Найти энергию излучения релятивистского электрона в однородном магнитном поле за один оборот. Найти полную мощность (в мегаваттах) синхротронного излучения в электрон-позитронном ускорителе на встречных пучках с энергией 100 ГэВ.

Длина окружности ускорителя 30 км, число ускоряемых частиц в кольце -  $5 \cdot 10^{12}$ . Оценить характерную длину волны излучения.

24. Пучок релятивистских электронов пролетает через плоский конденсатор, к которому приложено переменное электрическое поле с частотой . Найти частоту излучения электронов в зависимости от угла  $\varphi$  между наблюдателем и направлением движения пучка.

25. Найти дифференциальное и полное сечения рассеяния естественного света (а также линейно поляризованного) с частотой  $\omega$  осциллятором с затуханием.

### Примеры экзаменационных билетов:

#### Билет №1

Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Покажите, как из этих уравнений выводятся "теорема Гаусса" для стационарного электрического поля, "теорема о циркуляции" стационарного магнитного поля и закон электромагнитной индукции Фарадея.

#### Билет №2

Напишите (без вывода) уравнения Максвелла для напряжённостей электрического  $\vec{E}$  и магнитного  $\vec{H}$  полей. Что называют скалярным и векторным потенциалами электромагнитного поля? Выведите уравнения для этих потенциалов. Что называют калибровочной (градиентной) инвариантностью уравнений электродинамики? Что

называют калибровочными условиями для потенциалов? Как выглядят уравнения для потенциалов в кулоновской и лоренцевской калибровках?

#### 4. Критерии оценивания

| Оценка            | Баллы | Критерии  |
|-------------------|-------|---|
| отлично           | 10    | Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений. |
|                   | 9     | Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.  |
|                   | 8     | Выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочетами.   |
| хорошо            | 7     | Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.  |
|                   | 6     | Выставляется студенту, если он твердо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.   |
|                   | 5     | Выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.  |
| удовлетворительно | 4     | Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для   |

|                     |   |   |
|---------------------|---|---|
|                     |   | дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.  |
|                     | 3 | Выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации. |
| неудовлетворительно | 2 | Выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.  |
|                     | 1 | Выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.  |

### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности.**

При проведении экзамена обучающемуся предоставляется не менее 40 минут на подготовку. Опрос по билету и ответы на дополнительные вопросы не должен превышать двух астрономических часов. По завершении отведенного на опрос времени, экзаменатор должен выставить обучающемуся оценку в соответствии с вышеприведенными критериями.