

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет



УТВЕРЖДАЮ:
Декан физического факультета

С.Н. Филимонов

«15» апреля 2021 г.

Рабочая программа дисциплины

Классическая электродинамика

по направлению подготовки

03.03.02 Физика

Направленность (профиль) подготовки:
«Фундаментальная физика»

Форма обучения
Очная

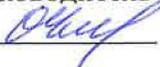
Квалификация
Бакалавр

Год приема
2021

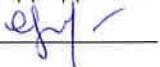
Код дисциплины в учебном плане: Б1.О.06.04

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ОП

 О.Н. Чайковская

Председатель УМК

 О.М. Сюсина

1. Цель и планируемые результаты освоения дисциплины (модуля)

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

– ОПК 1 – Способен применять базовые знания в области физико-математических и (или) естественных наук в сфере своей профессиональной деятельности.

– ОПК 2 – Способен проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК 1.1 – Знает основные законы, модели и методы исследования физических процессов и явлений

ИОПК 2.1 – Выбирает адекватные методы решения научно-исследовательских задач в выбранной области, планирует проведение научных исследований

ИПК 1.1 – Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования

2. Задачи освоения дисциплины

– Освоить понятийный аппарат и теоретические методы классической электродинамики и специальной теории относительности.

– Научиться применять понятийный аппарат и теоретические методы классической электродинамики для решения практических задач профессиональной деятельности.

3. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина относится к обязательной части образовательной программы.

4. Семестр(ы) освоения и форма(ы) промежуточной аттестации по дисциплине

Семестр 5, зачет.

Семестр 6, экзамен

5. Входные требования для освоения дисциплины

Для успешного освоения дисциплины требуются компетенции, сформированные в ходе освоения образовательных программ предшествующего уровня образования.

Для успешного освоения дисциплины требуются результаты обучения по следующим дисциплинам: Общая физика, Классическая механика, Математический анализ, Линейная алгебра и аналитическая геометрия, Дифференциальные уравнения, Методы математической физики.

6. Язык реализации

Русский

7. Объем дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины составляет 7 з.е., 252 часа, из которых:

– лекции: 64 ч.;

–практические занятия: 32 ч.;

– в том числе практическая подготовка:32 ч.

Объем самостоятельной работы студента определен учебным планом.

8. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам

Тема 1. Специальная теория относительности.

Постулаты специальной теории относительности. Инвариантность интервала. Три типа интервалов. Принцип причинности. Классификация преобразований Лоренца.

Следствия преобразований Лоренца: замедление времени, собственное время, сокращение размеров движущихся тел, закон сложения скоростей, абберация света, инвариантность фазы, преобразование параметров плоской волны, эффект Доплера. Лоренц-ковариантный формализм: лоренцевские тензоры и тензорные поля, примеры лоренцевских векторов и лоренцевских тензорных полей, лоренц-инвариантные тензоры, тензорная алгебра, дифференцирование лоренцевских тензорных полей. Мировые линии частиц. Репараметризационная инвариантность. 4-скорость и 4-ускорение. Модель массивной свободной релятивистской частицы: функционал действия, анализ модели в параметризации лабораторным временем, анализ модели в репараметризационно инвариантной форме.

Тема 2. Точечный заряд во внешнем электромагнитном поле

Постановка задачи. Функция Лагранжа. Уравнения движения.

Тема 3. Ковариантная форма уравнений Максвелла.

Тензор электромагнитного поля. Инварианты поля. Первая пара уравнений Максвелла. 4-вектор тока. Закон сохранения электрического заряда. Вторая пара уравнений Максвелла. Калибровочная инвариантность. Функционал действия: постановка задачи, поле как система с бесконечным числом степеней свободы, вариационный принцип для полевой системы. Функционал действия свободного электромагнитного поля. Функционал действия классической электродинамики. Теорема Нетер. Тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Тензор энергии-импульса замкнутой системы зарядов.

Тема 4. Решения уравнений Максвелла.

Электростатические поля. Магнитостатические поля. Общие свойства решений уравнений Максвелла. Свободное электромагнитное поле. Запаздывающая функция Грина. Ковариантные запаздывающие переменные. Потенциалы Льенара-Вихерта. Поле движущегося заряда.

Тема 5. Электромагнитное излучение.

Излучение движущегося заряда. Баланс энергии-импульса. Уравнение Абрагама-Лоренца-Дирака. Уравнение Ландау-Лифшица. Нерелятивистское излучение заряда: поле излучения, угловое распределение и мощность излучения, поляризация излучения, спектральный состав и мощность излучения. Особенности релятивистского излучения.

Тема 6. Границы классической электродинамики.

Нерелятивистский предел. Предел нейтральных частиц. Классическая электродинамика и другие модели: общая теория относительности, квантовая механика, релятивистская квантовая механика, квантовая электродинамика.

9. Текущий контроль по дисциплине

Текущий контроль по дисциплине проводится путем контроля посещаемости, контроля решения задач практических занятий, проведения контрольных работ и фиксируется в форме контрольной точки не менее одного раза в семестр.

10. Порядок проведения и критерии оценивания промежуточной аттестации

Зачет в 5 семестре проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Билет содержит теоретический вопрос, проверяющий компетенции ИОПК 1.1 и две задачи, при решении которых студент демонстрирует компетенции ИОПК 2.1 и ИПК 1.1. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы из открытого перечня вопросов экзаменационных билетов и открытого перечня задач, направленные на проверку достижения ИОПК 1.1 и ИПК 1.1.

Примерный перечень теоретических вопросов

Вопрос 1. Относительность одновременности. Замедление времени. Собственное время.

Примеры задач:

Задача 1. а) Докажите, что преобразование, обратное к ортохронному преобразованию Лоренца является ортохронным преобразованием Лоренца.

б) Докажите, что композиция ортохронных преобразований Лоренца является ортохронным преобразованием Лоренца.

в) Докажите аналоги утверждений а), б) для преобразований Пуанкаре.

Задача 2. Получить уравнения Гамильтона для релятивистской частицы во внешнем электромагнитном поле.

Если по результатам текущего контроля студент имеет оценки за контрольные работы не ниже «хорошо», то компетенции ИОПК 1.1 и ИПК 1.1 на зачете не проверяются и студент отвечает только на теоретический вопрос билета и дополнительные вопросы.

Отметка «Зачтено» ставится студенту при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

Экзамен в 6 семестре проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющих компетенции ИОПК 1.1 и две задачи, при решении которых студент демонстрирует компетенции ИОПК 2.1 и ИПК 1.1. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные вопросы из открытого перечня вопросов экзаменационных билетов и открытого перечня задач, направленные на проверку достижения ИОПК 1.1 и ИПК 1.1.

Примерный перечень теоретических вопросов

Вопрос 1. Вывод ковариантных уравнения движения релятивистской частицы во внешнем электро-магнитном поле. Физический смысл уравнений движения. Сила Лоренца. Второй закон Ньютона в релятивистской форме. Сила Минковского.

Вопрос 2. 4-вектор плотности тока. Закон сохранения заряда.

Задача 1. Найти выражения для 4-скорости v^μ и 4-ускорения a^μ , а также для скаляров $v^\mu v_\mu$, $a^2 = a^\mu a_\mu$ через лабораторные скорость \mathbf{u} и ускорение \mathbf{a} частицы. Используя полученные выражения, непосредственно убедиться, что $v^\mu a_\mu = 0$. Найти компоненты v^μ и a^μ для частицы в мгновенно сопутствующей инерциальной системе отсчета..

Задача 2. Решить уравнения движения и найти траекторию заряженной частицы, движущейся в однородном магнитном поле, в однородном электрическом поле, в однородных и взаимно перпендикулярных полях \mathbf{E} и \mathbf{H} .

Если по результатам текущего контроля студент имеет оценки за контрольные работы не ниже «хорошо», то компетенции ИОПК 1.1 и ИПК 1.1 на экзамене не проверяются и студент отвечает только на теоретические вопросы билета и дополнительные вопросы.

Результаты экзамена определяются оценками «отлично», «хорошо», «удовлетворительно», «неудовлетворительно».

Оценка «отлично» ставится при правильном ответе не менее чем на 90% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «хорошо» ставится при правильном ответе не менее чем на 75% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «удовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов. Оценка «неудовлетворительно» ставится при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

11. Учебно-методическое обеспечение

а) Электронный учебный курс по дисциплине в электронном университете «Moodle» - <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21888>,
<https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=21890>

б) Оценочные материалы текущего контроля и промежуточной аттестации по дисциплине.

Открытый перечень вопросов, выносимых на зачет.

1. Постулаты специальной теории относительности. Интервал. Инвариантность изотропного интервала. Лоренцевы координаты и лоренцева метрика. Линейность преобразований из одной инерциальной системы отсчета в другую.
2. Теорема об инвариантности интервала. Пространство Минковского. Преобразования Пуанкаре, преобразования Лоренца, трансляции.
3. Три типа интервалов. Свойства пар событий, разделенных интервалом разного типа, их иллюстрация с помощью светового конуса.
4. Принцип причинности. Критерий выполнения принципа причинности. Ортохронные преобразования Лоренца и Пуанкаре.
5. Собственные и несобственные преобразования Лоренца. Вращения в пространстве Минковского.
6. Лоренцевские бусты. Структура произвольного собственного преобразования Лоренца.
7. Относительность одновременности. Замедление времени. Собственное время.
8. Сокращение размеров движущихся тел.
9. Закон сложения скоростей. Аберрация света.
10. Инвариантность фазы, преобразование параметров плоской волны. Эффект Доплера.
11. Лоренцевский тензор. Лоренцевское тензорное поле. Примеры лоренцевских векторов и лоренцевских тензорных полей.
12. Лоренц-инвариантные тензоры.
13. Тензорная алгебра в пространстве Минковского.
14. Дифференцирование лоренцевских тензорных полей.
15. Мировые линии частиц. Условия причинности. Принцип репараметризационной инвариантности мировых линий.
16. Типы параметризаций мировых линий. Параметризации лабораторным и собственным временем. 4-скорость и 4-ускорение релятивистской частицы.
17. Действие свободной релятивистской частицы. Репараметризационная инвариантность.
18. Анализ модели свободной релятивистской частицы в параметризации лабораторным временем.
19. Анализ модели свободной релятивистской частицы в репараметризационно инвариантной форме.
20. Вектор энергии-импульса и 4-тензор момента импульса свободной релятивистской частицы как нетеровские интегралы движения.
21. Модель релятивистской частицы во внешнем электромагнитном поле: действие, репараметризационная инвариантность, канонический и кинетический импульсы, функция Гамильтона.
22. Вывод ковариантных уравнения движения релятивистской частицы во внешнем электромагнитном поле. Физический смысл уравнений движения. Сила Лоренца. Второй закон Ньютона в релятивистской форме. Сила Минковского.

Открытый перечень вопросов, выносимых на экзамен.

1. Постулаты специальной теории относительности. Интервал. Инвариантность изотропного интервала. Лоренцевы координаты и лоренцева метрика. Линейность преобразований из одной инерциальной системы отсчета в другую.
2. Теорема об инвариантности интервала. Пространство Минковского. Преобразования

Пуанкаре, преобразования Лоренца, трансляции.

3. Три типа интервалов. Свойства пар событий, разделенных интервалом разного типа, их иллюстрация с помощью светового конуса.

4. Принцип причинности. Критерий выполнения принципа причинности. Ортохронные преобразования Лоренца и Пуанкаре.

5. Собственные и несобственные преобразования Лоренца. Вращения в пространстве Минковского.

6. Лоренцевские бусты. Структура произвольного собственного преобразования Лоренца.

7. Относительность одновременности. Замедление времени. Собственное время.

8. Сокращение размеров движущихся тел.

9. Закон сложения скоростей. Аберрация света.

10. Инвариантность фазы, преобразование параметров плоской волны. Эффект Доплера.

11. Лоренцевский тензор. Лоренцевское тензорное поле. Примеры лоренцевских векторов и лоренцевских тензорных полей.

12. Лоренц-инвариантные тензоры.

13. Тензорная алгебра в пространстве Минковского.

14. Дифференцирование лоренцевских тензорных полей.

15. Мировые линии частиц. Условия причинности. Принцип репараметризационной инвариантности мировых линий.

16. Типы параметризаций мировых линий. Параметризации лабораторным и собственным временем. 4-скорость и 4-ускорение релятивистской частицы.

17. Действие свободной релятивистской частицы. Репараметризационная инвариантность.

18. Анализ модели свободной релятивистской частицы в параметризации лабораторным временем.

19. Анализ модели свободной релятивистской частицы в репараметризационно инвариантной форме.

20. Вектор энергии-импульса и 4-тензор момента импульса свободной релятивистской частицы как нетеровские интегралы движения.

21. Модель релятивистской частицы во внешнем электромагнитном поле: действие, репараметризационная инвариантность, канонический и кинетический импульсы, функция Гамильтона.

22. Вывод ковариантных уравнения движения релятивистской частицы во внешнем электромагнитном поле. Физический смысл уравнений движения. Сила Лоренца. Второй закон Ньютона в релятивистской форме. Сила Минковского.

23. Первая пара уравнений Максвелла в дифференциальной форме.

24. Вариационный принцип Гамильтона в теории поля.

25. Вторая пара уравнений Максвелла в дифференциальной форме для чистого поля.

26. Вторая пара уравнений Максвелла в дифференциальной форме при наличии зарядов и токов.

27. Первая пара уравнений Максвелла в интегральной форме.

28. Вторая пара уравнений Максвелла в интегральной форме.

29. Четырехмерный вектор плотности тока.

30. Четырехмерный вектор плотности силы.

31. Тензор плотности энергии-импульса частиц.

32. Тензор плотности энергии-импульса электромагнитного поля.

33. Вектор Пойнтинга.

34. Тензор натяжений Максвелла и пондеромоторные силы.

35. Теорема Ирншоу.

36. Собственная масса замкнутой системы частиц и полей.

37. Происхождение электростатических полей.

А). Кулоновское поле.

Б). Поле электрического диполя.

- Г). Поле квадруполь.
38. Система зарядов в постоянном и неоднородном внешнем электрическом поле.
39. Происхождение магнитостатических полей.
- А). Поля, создаваемые постоянным электрическим током.
- Б). Поле магнитного диполя.
40. Система зарядов в постоянном и неоднородном внешнем магнитном поле.
41. Приложения теории взаимодействия магнитного момента с внешним магнитным полем.
- А). Диамагнетизм электронной плазмы.
- Б). Прецессия Лармора.
- В). Эффект «гроба Магомета».
- Г). Магнитный левитрон.
42. Волновое уравнение.
43. Плоские электромагнитные волны.
44. Плоская монохроматическая волна.
- А). Потенциалы и напряженности полей.
- Б). Эффект Доплера.
- В). Линейная поляризация.
- Г). Эллиптическая и круговая поляризации.
45. Неоднородное уравнение Даламбера. Запаздывающие и опережающие потенциалы.
46. Потенциалы и поля произвольно движущегося заряда.
- А). Вывод с помощью запаздывающих потенциалов.
- Б). Метод преобразований Лоренца для потенциалов.
- В). Метод преобразований Лоренца для напряженностей полей.
- Г). Напряженности полей равномерно и прямолинейно движущегося заряда.
47. Тензор электромагнитного поля произвольно движущегося заряда.
48. Волновая зона излучения и напряженности полей в нерелятивистском приближении.
49. Нерелятивистское дипольное излучение.
- А). Излучения линейного осциллятора.
- Б). Излучение заряда, движущегося по окружности.

Открытый перечень задач.

Задача 1. Для любого векторного поля \mathbf{E} доказать тождество

$$\text{rot rot } \mathbf{E} = \text{grad div } \mathbf{E} - \Delta \mathbf{E},$$

С его помощью получить следствия уравнений Максвелла:

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \Delta \mathbf{E} = -\frac{4\pi}{c} \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + c \text{grad } \rho \right),$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} - \Delta \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \text{rot } \mathbf{j}.$$

Задача 2. а) Докажите, что преобразования Лоренца и трансляции, вообще говоря, не коммутируют: $(\mathbf{1}, a)(\Lambda, 0) \neq (\Lambda, 0)(\mathbf{1}, a)$.

б) Докажите, что композиция преобразований Лоренца с матрицами Λ_1, Λ_2 является преобразованием Лоренца с матрицей $\Lambda_2 \Lambda_1$. В том числе проверьте, что если $\Lambda_1^T \eta \Lambda_1 = \eta$ и $\Lambda_2^T \eta \Lambda_2 = \eta$, то $(\Lambda_2 \Lambda_1)^T \eta (\Lambda_2 \Lambda_1) = \eta$.

в) Докажите, что для матрицы преобразования Лоренца $|\det \Lambda| = 1$.

г) Докажите, что композиция двух преобразований Пуанкаре (Λ_1, a_1) и (Λ_2, a_2) является преобразованием Пуанкаре и справедлив закон композиции

$$(\Lambda_2, a_2) \cdot (\Lambda_1, a_1) = (\Lambda_2 \Lambda_1, \Lambda_2 a_1 + a_2). \quad (1)$$

Задача 3. а) Докажите, что преобразование, обратное к ортохронному преобразованию Лоренца является ортохронным преобразованием Лоренца.

б) Докажите, что композиция ортохронных преобразований Лоренца является ортохронным преобразованием Лоренца.

в) Докажите аналоги утверждений а), б) для преобразований Пуанкаре.

Задача 4. Докажите, что вращение вокруг оси с единичным направляющим вектором $\mathbf{n} = (n^1, n^2, n^3)$ на угол φ задается формулами

$$t' = t, \quad \mathbf{r}' = (\mathbf{r}, \mathbf{n})\mathbf{n} + \cos \varphi (\mathbf{r} - (\mathbf{r}, \mathbf{n})\mathbf{n}) + \sin \varphi [\mathbf{r}, \mathbf{n}].$$

Задача 5. Докажите, что лоренцевский буст вдоль направления, заданного единичным вектором $\mathbf{n} = (n^1, n^2, n^3)$ на угол φ задается формулами

$$x'^0 = x^0 \varphi + (\mathbf{r}, \mathbf{n})\varphi, \quad \mathbf{r}' = \mathbf{r} - (\mathbf{r}, \mathbf{n})\mathbf{n} + \mathbf{n}(x^0 \varphi + (\mathbf{r}, \mathbf{n})\varphi). \quad (2)$$

Задача 6. Докажите, что формулы (2) описывают переход в систему отсчета, движущуюся равномерно и прямолинейно со скоростью

$$\mathbf{v} = -v\mathbf{n}, \quad \phi\varphi\chi v = c\varphi$$

и могут быть переписаны в виде

$$t' = \gamma \left(t - \frac{(\mathbf{r}, \mathbf{v})}{c^2} \right), \quad \mathbf{r}' = \mathbf{r} - \gamma \mathbf{v} t + (\gamma - 1) \frac{(\mathbf{r}, \mathbf{v})\mathbf{v}}{v^2}.$$

Докажите, что в нерелятивистском пределе эти формулы переходят в преобразования Галилея (конечно, без вращения и сдвига в пространстве-времени).

Задача 7. Докажите, что произвольное собственное преобразование Лоренца зависит от *шести* независимых параметров.

Задача 8. В лекциях приведено эвристическое доказательство, что каждое собственное преобразование Лоренца является композицией вращений и лоренцевских бустов. В чем слабое место этого доказательства?

Задача 9. Две инерциальные системы отсчета K и K' связаны собственным преобразованием Лоренца. Докажите, что скорость \mathbf{v} начала декартовой системы координат K' относительно K имеет компоненты

$$\mathbf{v} = -c(\Lambda^0_0)^{-1}(\Lambda^0_1, \Lambda^0_2, \Lambda^0_3).$$

Докажите, что скорость \mathbf{v}' начала декартовой системы координат K относительно K' имеет компоненты

$$\mathbf{v}' = c(\Lambda^0_0)^{-1}(\Lambda^1_0, \Lambda^2_0, \Lambda^3_0).$$

Докажите, что $|\mathbf{v}| = |\mathbf{v}'| = c|\varphi|$, где $\varphi = \Lambda^0_0$. Обратите внимание, что, вообще говоря $\mathbf{v} \neq -\mathbf{v}'$. Нет ли здесь противоречия?

Задача 10. Докажите, что если интервал между A и B времениподобный, существует система отсчета, в которой эти события происходят в одной точке трехмерного пространства ($\Delta \mathbf{r}' = 0$).

Задача 11. Рассмотрим собственное время как функционал траектории частицы

$$\tau[\mathbf{r}(t)] = \int_{t_1}^{t_2} \sqrt{1 - \frac{|\dot{\mathbf{r}}(t)|^2}{c^2}} dt \quad (3)$$

с закрепленными концами, $\mathbf{r}(t_1) = \mathbf{r}_1$, $\mathbf{r}(t_2) = \mathbf{r}_2$.

а) Докажите, что прямолинейные траектории являются экстремалими функционала (3).

б) Докажите, что на найденных экстремалих функционал (3) достигает *максимума*.

Задача 12. а) Покажите, что в нерелятивистском пределе $|\mathbf{u}| \ll c$, $|\mathbf{v}| \ll c$ формула

$$\mathbf{u}' = \frac{\mathbf{u} - \mathbf{v} + (1 - \gamma^{-1}) \left(\frac{(\mathbf{u}, \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2} - \mathbf{u} \right)}{1 - \frac{(\mathbf{u}, \mathbf{v})}{c^2}}, \quad (4)$$

полученная в лекциях, переходит в классический закон сложения скоростей $\mathbf{u}' = \mathbf{u} - \mathbf{v}$.

б) Выведите из (4) формулу обратного преобразования:

$$\mathbf{u} = \frac{\mathbf{u}' + \mathbf{v} + (1 - \gamma^{-1}) \left(\frac{(\mathbf{u}', \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2} - \mathbf{u}' \right)}{1 + \frac{(\mathbf{u}', \mathbf{v})}{c^2}}.$$

в) Пусть относительное движение систем отсчета происходит вдоль оси $x^1 \equiv x$, так что $\mathbf{v} = (v, 0, 0)$. Проверьте, что в этом случае формулы (4) принимают вид:

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}, \quad u'_y = \frac{u_y \gamma^{-1}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}, \quad u'_z = \frac{u_z \gamma^{-1}}{1 - \frac{u_x v}{c^2}}. \quad (5)$$

Задача 13. а) Получить из (4) закон преобразования квадрата скорости при лоренцевском бусте:

$$\mathbf{u}'^2 = \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{v})^2 - \frac{[\mathbf{u}, \mathbf{v}]^2}{c^2}}{\left(1 - \frac{(\mathbf{u}, \mathbf{v})}{c^2} \right)^2}. \quad (6)$$

б) Докажите, что из неравенств $|\mathbf{u}| < c$ и $|\mathbf{v}| < c$ следует $|\mathbf{u}'| < c$.

в) Докажите, что если $|\mathbf{u}| = c$, то $|\mathbf{u}'| = c$

Задача 14. 1) Из инвариантности фазы получить формулы преобразования параметров (частоты, направления вектора нормали и фазовой скорости) плоской волны:

$$\omega' = \omega \gamma (1 - v \cos \alpha / u_\phi), \quad \alpha' = \frac{\gamma^{-1} \sin \alpha}{\cos \alpha - v u_\phi / c^2},$$

$$u'_\phi = \frac{u_\phi - v \cos \alpha}{\sqrt{\gamma^{-2} \sin^2 \alpha + (\cos \alpha - v u_\phi / c^2)^2}}.$$

2) Докажите, что если $u_\phi = c$, то $u'_\phi = c$;

3) Проверьте, что величина $\omega^2 (1 - c^2 / u_\phi^2)$ — лоренц-инвариант.

4) Проверьте, что если положить $u = c^2 / u_\phi$, то формулы для преобразования угла нормали и фазовой скорости плоской волны совпадут с формулами для изменения направления и модуля скорости частицы.

5)** Объясните результат пункта 4).

Задача 14. Пусть a^μ и b^μ — два ненулевых ортогональных лоренцевских вектора. Докажите, что:

а) если a^μ — времениподобный, то b^μ — пространственноподобный;

б) если a^μ и b^μ — изотропные векторы, то они пропорциональны.

Задача 15. Доказать тождества для тензора Леви-Чивиты в пространстве Минковского:

$$\varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma}\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} = -\begin{vmatrix} \delta_{\mu}^{\alpha} & \delta_{\mu}^{\beta} & \delta_{\mu}^{\gamma} & \delta_{\mu}^{\delta} \\ \delta_{\nu}^{\alpha} & \delta_{\nu}^{\beta} & \delta_{\nu}^{\gamma} & \delta_{\nu}^{\delta} \\ \delta_{\rho}^{\alpha} & \delta_{\rho}^{\beta} & \delta_{\rho}^{\gamma} & \delta_{\rho}^{\delta} \\ \delta_{\sigma}^{\alpha} & \delta_{\sigma}^{\beta} & \delta_{\sigma}^{\gamma} & \delta_{\sigma}^{\delta} \end{vmatrix}, \quad \varepsilon_{\mu\nu\rho\delta}\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta} = -\begin{vmatrix} \delta_{\mu}^{\alpha} & \delta_{\mu}^{\beta} & \delta_{\mu}^{\gamma} \\ \delta_{\nu}^{\alpha} & \delta_{\nu}^{\beta} & \delta_{\nu}^{\gamma} \\ \delta_{\rho}^{\alpha} & \delta_{\rho}^{\beta} & \delta_{\rho}^{\gamma} \end{vmatrix},$$

$$\varepsilon_{\mu\nu\rho\delta}\varepsilon^{\alpha\beta\rho\delta} = -2(\delta_{\mu}^{\alpha}\delta_{\nu}^{\beta} - \delta_{\nu}^{\alpha}\delta_{\mu}^{\beta}), \quad \varepsilon_{\mu\nu\rho\delta}\varepsilon^{\alpha\nu\rho\delta} = -6\delta_{\mu}^{\alpha}, \quad \varepsilon_{\mu\nu\rho\delta}\varepsilon^{\mu\nu\rho\delta} = -24.$$

Задача 16. Используя тождества для тензора Леви-Чивиты, докажите, что для антисимметричных тензоров $f_{\mu\nu}$ и $\tilde{f}^{\mu\nu}$

$$\tilde{f}^{\alpha\beta} = \frac{1}{2}\varepsilon^{\alpha\beta\mu\nu}f_{\mu\nu} \Leftrightarrow f_{\alpha\beta} = -\frac{1}{2}\varepsilon_{\alpha\beta\mu\nu}\tilde{f}^{\mu\nu}.$$

Задача 17. Пусть матрица антисимметричного тензора $f_{\mu\nu}$ имеет вид

$$(f_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 0 & e_1 & e_2 & e_3 \\ -e_1 & 0 & -b_3 & b_2 \\ -e_2 & b_3 & 0 & -b_1 \\ -e_3 & -b_2 & b_1 & 0 \end{pmatrix} \equiv (\mathbf{e}, \mathbf{b})$$

Найдите матрицу соответствующего контравариантного тензора $f^{\mu\nu}$ и матрицы дуального тензора $\tilde{f}^{\mu\nu}$ и $\tilde{f}_{\mu\nu}$. Найдите инварианты

$$\frac{1}{4}f_{\mu\nu}f^{\mu\nu}, \quad \frac{1}{4}\tilde{f}_{\mu\nu}\tilde{f}^{\mu\nu}, \quad \frac{1}{4}f_{\mu\nu}\tilde{f}^{\mu\nu}.$$

Используя тождества для тензора Леви-Чивиты, докажите, что для лоренцевского вектора a^{μ} и антисимметричного тензора третьего ранга $a_{\mu\nu\rho}$

$$a_{\alpha\beta\gamma} = \varepsilon_{\alpha\beta\gamma\mu}a^{\mu} \Leftrightarrow a^{\mu} = -\frac{1}{6}\varepsilon^{\mu\alpha\beta\gamma}a_{\alpha\beta\gamma}.$$

Выпишите компоненты вектора a^{μ} через компоненты антисимметричного тензора $a_{\alpha\beta\gamma}$ явно.

Задача 18. Докажите, что произвольный антисимметричный лоренцевский тензор четвертого ранга $t^{\alpha\beta\gamma\delta} = t^{[\alpha\beta\gamma\delta]}$ пропорционален тензору Леви-Чивиты,

$$t^{\alpha\beta\gamma\delta} = t\varepsilon^{\alpha\beta\gamma\delta}, \quad \phi\varphi\chi t = -\frac{1}{24}\varepsilon_{\alpha\beta\gamma\delta}t^{\alpha\beta\gamma\delta} = t^{0123}.$$

Задача 19. Доказать тождества для тензора Леви-Чивиты в трехмерном евклидовом пространстве:

$$\varepsilon_{ijk}\varepsilon^{lmn} = \begin{vmatrix} \delta_i^l & \delta_i^m & \delta_i^n \\ \delta_j^l & \delta_j^m & \delta_j^n \\ \delta_k^l & \delta_k^m & \delta_k^n \end{vmatrix}, \quad \varepsilon_{ijk}\varepsilon^{lmk} = \begin{vmatrix} \delta_i^l & \delta_i^m \\ \delta_j^l & \delta_j^m \end{vmatrix} = \delta_i^l\delta_j^m - \delta_j^l\delta_i^m, \quad \varepsilon_{ijk}\varepsilon^{ljk} = 2\delta_i^l, \quad \varepsilon_{ijk}\varepsilon^{ijk} = 6.$$

Задача 20. Докажите что для евклидова вектора a^i и антисимметричного тензора a^{ij}

$$a_{ij} = \varepsilon_{ijk}a^k \Leftrightarrow a_i = \frac{1}{2}\varepsilon_{ijk}a^{jk}.$$

Явно выпишите компоненты a_{ij} через компоненты a^i . Докажите, что произвольный антисимметричный евклидов тензор третьего ранга $t^{ijk} = t^{[ijk]}$ пропорционален тензору Леви-Чивиты,

$$t^{ijk} = t \varepsilon^{ijk}, \quad \phi \eta \zeta t = \frac{1}{6} \varepsilon_{ijk} t^{ijk} = t^{123}.$$

Задача 21. Пусть $\mathbf{a} = (a^i)$ и $\mathbf{b} = (b^i)$ — два евклидовых вектора, компоненты которых вычислены в некотором ортонормированном базисе. Докажите, что вектор с компонентами $\varepsilon_{ijk} a^j b^k$ является векторным произведением \mathbf{a} и \mathbf{b} .

Задача 22. Пусть $\mathbf{A}(\mathbf{r}) = (A^1, A^2, A^3)$ — евклидово векторное поле, компоненты которого вычисляются в ортонормированном базисе. Докажите, что компоненты $\text{rot} \mathbf{A}$ равны $(\text{rot} \mathbf{A})^i = \varepsilon^{ijk} \partial_j A_k$.

Задача 23. Выписать явно закон преобразования компонент лоренцевского ковекторного поля при вращениях

$$\Lambda[A] = (\Lambda^\mu{}_\nu) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a^1_1 & a^1_2 & a^1_3 \\ 0 & a^2_1 & a^2_2 & a^2_3 \\ 0 & a^3_1 & a^3_2 & a^3_3 \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix},$$

и при пространственном отражении P . Убедитесь, что при таких преобразованиях A_0 преобразуется как скалярное поле, а (A_1, A_2, A_3) преобразуются как компоненты евклидова векторного поля.

Задача 24. Показать, что полученные в лекциях формулы преобразования компонент антисимметричного тензорного поля второго ранга

$$(F_{\mu\nu}(x)) = \begin{pmatrix} 0 & E_1(x) & E_2(x) & E_3(x) \\ -E_1(x) & 0 & -B_3(x) & B_2(x) \\ -E_2(x) & B_3(x) & 0 & -B_1(x) \\ -E_3(x) & -B_2(x) & B_1(x) & 0 \end{pmatrix} \equiv (\mathbf{E}(x), \mathbf{B}(x)),$$

$$E'_1 = E_1, \quad E'_2 = \gamma(E_2 - \beta B_3), \quad E'_3 = (E_1 + \beta B_2), \\ B'_1 = B_1, \quad B'_2 = \gamma(B_2 + \beta E_1), \quad B'_3 = \gamma(B_3 - \beta E_2).$$

при лоренцевском бусте, могут быть записаны в три-векторной форме:

$$\mathbf{E}' = \gamma \left(\mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{B}] \right) + (1 - \gamma) \frac{(\mathbf{E}, \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2}, \quad \mathbf{B}' = \gamma \left(\mathbf{B} - \frac{1}{c} [\mathbf{v}, \mathbf{E}] \right) + (1 - \gamma) \frac{(\mathbf{B}, \mathbf{v}) \mathbf{v}}{v^2}.$$

Задача 25. Явно выписать закон преобразования компонент $(F_{\mu\nu}) = (\mathbf{E}, \mathbf{B})$ при вращениях $\Lambda[A]$ и при пространственном отражении P . Убедиться, что при этих преобразованиях \mathbf{E} преобразуется как евклидово векторное поле, а \mathbf{B} — как евклидово псевдовекторное поле. Задача 26. Выписать в явном виде закон преобразования компонент симметричного тензорного поля второго ранга при лоренцевских бустах.

Задача 27. При изучении динамики частицы мы используем обозначения

$$\beta = \frac{|\mathbf{u}|}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}},$$

где \mathbf{u} — скорость частицы, а при изучении преобразований Лоренца использовали *другие* определения для β и γ , а именно $\beta = v/c$, $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$, где v — модуль относительной

Задача 38. С помощью второй пары уравнений Максвелла в интегральной форме вычислить потенциал и напряженность электрического поля однородно заряженного шарика внутри и вне его поверхности. Показать, что вне поверхности шарика эти величины совпадают с потенциалом и напряженностью точечного заряда.

Задача 39. Тоже проделать для напряженности магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током (ср. Упр.1.11). Показать, что вне проводника в системе СИ будем иметь $H = I/2\pi R$ (A/m).

Задача 40. Показать, что в практической системе единиц количество тепла, выделяемого в проводнике с током, определяется выражением

$$Q = 0,24 I(A)U(V)t(\text{сек}).$$

Задача 40. Какой энергией обладает 1л магнитного поля с напряженностью 10Тл ?

Задача 41. Вывести закон Джоуля-Ленца для мощности электрического тока $N=I^2 R$, где R – сопротивление проводника с силой тока I , помощью вектора Пойнтинга.

Задача 42. Найти напряженность магнитного поля в фокусе луча Nd лазера тераваттной мощности.

Задача 43. Оценить минимальные магнитные поля и токи, при которых будут «течь» медь и сталь, если известно, что это явление наступает при давлениях на поверхность проводника при $4 \cdot 10^7$ Па для меди и $5 \cdot 10^8$ Па для стали.

Задача 44. Вычислить «классический» радиус электрона $r_0 = e^2/2m_0 c^2$. Полученный результат сравнить с комптоновским радиусом электрона в квантовой теории $r_0 = \lambda_K/2 = \pi\hbar/m_0 c$.

Задача 45. Показать, что кулоновский потенциал $\varphi = q/r$ для точечного заряда удовлетворяет уравнению Пуассона $\Delta\varphi = -4\pi e\delta(r)$.

Задача 46. Найти уравнение линий напряженности электрического поля точечного диполя $r = R \sin^2 \vartheta$.

Задача 47. Вычислить потенциалы электрического поля $\varphi_n = v_{2^n} P_n(\cos \vartheta)/n!$ для мультипольных моментов v_{2^n} , где P_n - полиномы Лежандра с индексом n .

Задача 48. С помощью формулы Био-Савара-Лапласа $\mathbf{H} = I/c \int [d\mathbf{r}]/r^3$, вывести формулу для напряженности магнитного поля бесконечно длинного прямолинейного проводника с током (ср. Упр.1.11 и 3.56).

Задача 49. Вычислить магнитный момент равномерно вращающегося с круговой частотой ω заряженного шарика $\mu = q\omega R^2/5$.

Задача 50. Определить магнитный момент кругового тока $\mu = IS/c$, где S – площадь витка с током.

Задача 51. Рассчитать подъёмную силу точечного магнита над сверхпроводящей

поверхностью $\mathbf{F} = -\nabla U = -\frac{3}{16} \frac{\mu^2}{h^4} \mathbf{n}$, где h – высота подъёма.

Задача 52. Рассмотреть свойства δ -функции: чётность, $\delta(cx) = 1/c \delta(x)$. «Размазанная» δ -функция.

Задача 53. Рассмотреть спектральные разложения полей: прямоугольного импульса, Цуга прямоугольных импульсов, колокольного импульса, монохроматического цуга волн.

Задача 54. Показать, что в представлении Фурье связь потенциалов и напряженностей полей сохраняет свой вид, например, $\mathbf{H}_\omega = \text{rot} \mathbf{A}_\omega$

Задача 55. Показать, что в общем случае траектория конца вектора напряженности электрического поля плоской монохроматической волны является эллипсом. Определить тангенс угла наклона большой полуоси этого эллипса

Задача 56. Прямой подстановкой в волновое уравнение $\square\varphi(\xi, \tilde{\mathbf{t}}) = 0$

Задача 57. Вывести потенциалы Лиенара-Вихерта для произвольно движущегося заряда

$$\mathbf{A}^\mu(\mathbf{R}, \tilde{\mathbf{t}}) = -e v^\mu / \tilde{r}_\rho v^\rho$$

с помощью преобразований Лоренца (см. Упр.1.2).

Задача 58. Проверить выполнение условия Лоренца с учётом запаздывания излучения ($\partial^\mu + \tilde{r}^\mu / \tilde{r}_\rho v^\rho \frac{d}{d\tau}$) $\mathbf{A}_\mu = \mathbf{0}$ для потенциалов Лиенара-Вихерта.

Задача 58. Вывести напряженности полей в конвективной зоне

$$\mathbf{E} = \frac{e(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta})}{\gamma^2 \tilde{r} [1 - (\mathbf{n}\boldsymbol{\beta})]^3}, \quad \mathbf{H} = -[\boldsymbol{\beta}\mathbf{E}] \neq [\mathbf{n}\mathbf{E}]$$

с помощью произвольных преобразований Лоренца для антисимметричного тензора второго ранга (см. Упр.1.9).

Задача 59. Исследовать угловую зависимость напряженностей электрического и магнитного полей равномерно и прямолинейно движущегося заряда, полученных выше.

Задача 60. Методом ковариантного дифференцирования запаздывающих во времени потенциалов Лиенара-Вихерта получить компоненты тензора напряженностей полей в конвективной зоне и в волновой зоне излучения

$$\mathbf{E} = \frac{e[\mathbf{n}[(\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta})\mathbf{a}]]}{c^2 \tilde{r} [1 - (\mathbf{n}\boldsymbol{\beta})]^3}, \quad \mathbf{H} = [\mathbf{n}\mathbf{E}]$$

Задача 61. Найти мощность и угловое распределение излучения для нерелятивистского заряда, вращающегося с постоянной скоростью в плоскости XY.

Задача 61б. То же для электрического диполя, вращающегося в плоскости XY.

Задача 61в. Исследовать спектральный состав излучения, рассмотренного в предыдущих пунктах.

Задача 62. Получить условие малости силы радиационного трения $\mathbf{H} \ll \mathbf{H}^* / \alpha \gamma^2$, где $\mathbf{H}^* = m_0^2 c^3 / e \hbar$ - критическое магнитное поле, α - постоянная тонкой структуры.

в) План практических занятий по дисциплине

1. Свойства преобразований Лоренца и Пуанкаре.
2. Классификация преобразований Лоренца. Вращения и бусты.
3. Собственное время. Релятивистский закон сложения скоростей. Эффект Доплера.
4. Дуальные тензоры в пространстве Минковского.
5. Дуальные тензоры в трехмерном пространстве.
6. Законы преобразования лоренцевских тензорных полей.
7. Релятивистская механика свободной частицы.
8. Контрольная работа.
8. Движение релятивистской частицы в однородном внешнем поле.
9. Движение релятивистской частицы в поле плоской волны.
10. Электростатические поля.
11. Магнитостатические поля.
12. Свободное электромагнитное поле.
13. Тензор энергии-импульса. Законы сохранения.
14. Запаздывающие переменные потенциалы Лиенара-Вихерта.
15. Поля излучения.
16. Контрольная работа.

г) Методические указания по организации самостоятельной работы студентов.

Тема 1. Парадоксы специальной теории относительности. 2. Вариационные принципы релятивистской механики.

Литература.

1. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теория поля. — Издание 8-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2006. — 534 с.
2. Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. Москва-Ижевск: НИЦ Динамика. 2001, 512 с.
3. Дуков В.М. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1975, 248 с.
4. Сазанов А.А.. Четырехмерный мир Минковского. М.: Наука, 1988, 224 с.
5. Богуш А. Очерки по истории физики микромира. М.: УРСС, 298 с.

Тема 2. Вариационные принципы релятивистской механики.

Литература.

1. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теория поля. — Издание 8-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2006. — 534 с.
2. Зильберман Г.С. Электричество и магнетизм. Учебное пособие.. 2-е изд. — Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». — 2008. — 376с.
2. Ленерт. Б. Динамика заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1967, 352 с.
3. Дягилев Ф.М. Из истории физики и жизни её творцов. М.: Просвещение, 1986, 256 с.
4. Карцев В. Приключения великих уравнений. М.: Изд. «Знание», 1986, 288с.

Тема 3. Проблема устойчивости замкнутой системы заряженных частиц. 2. Релятивистские эффекты в ускорителях элементарных частиц.

Литература.

1. Зильберман Г.С. Электричество и магнетизм. Учебное пособие.. 2-е изд. — Долгопрудный: Изд. Дом «Интеллект». — 2008. — 376с.
2. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965, 702 с.
3. Терлецкий Я.П. Электродинамика. М.: Высшая школа, 1980, 335 с.
4. Липсон Г. Великие эксперименты в физике. М.: Мир, 1972, 214 с.
5. Буравихин В.А., Егоров В.А. Биография электрона. М.: Изд. «Знание», 1985, 136 с.

Тема 4. Релятивистские эффекты в ускорителях элементарных частиц.

Литература.

1. Ландау, Л. Д., Лифшиц, Е. М. Теория поля. — Издание 8-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2006. — 534 с.
2. Бордовицын В.А. Динамика релятивистских частиц. Томск: ТГПИ, 1976, 88с.
3. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972, 224 с.

12. Перечень учебной литературы и ресурсов сети Интернет

а) основная литература:

1. Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. Теоретическая физика. Т. II. Теория поля. — Издание 8-е, стереотипное. — М.: Физматлит, 2006. — 534 с.
2. J.D. Jackson. Classical Electrodynamics. — Third Edition. — USA, Jhon Willey & Sons. 1999. — xxi+808 p.; Имеется перевод первого издания: Дж. Джексон. Классическая электродинамика. — М.: Мир, 1965, 702 с.
3. Я.П. Терлецкий, Ю.П. Рыбаков. Электродинамика. — 2-е изд. перераб. — М.: Высшая школа, 1990, 352 с.
4. К. М_еллер. Теория относительности. — Второе издание. — М.: Атомидат. 1975. — 400 с.
5. В. Паули. Теория относительности. — М.: Наука. Физ.-мат. лит. 1983. — 356 с.

6. Л.И. Мандельштам. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. – М.: Наука. 1972. – 440 с.
7. F. Rohrlich. Classical charged particles. – Third Edition. – Word Scienti_c. 2007. – xiii+305 p.
8. Б.П. Косяков. Введение в классическую теорию частиц и полей. – М., Ижевск. РХД. 2017. – 656 с.
9. М.Г. Иванов. Механика и теория поля. – <https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/biblio/mekhanika-i-teoriya-polya.php> – Электронный ресурс. Дата обращения 31.07.2021. – 420 с.
10. А. Лайтман, В. Пресс, Р. Прайс, С. Тюкольски. Сборник задач по теории относительности и гравитации. – М. Мир. 1979 – 536 с.

б) дополнительная литература:

1. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Фейнмановские лекции по физике. Т.6. Электродинамика. М.:Мир,1966.343с.
2. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Современная электродинамика. Часть 1. Микроскопическая теория. Москва – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003,736 с.
3. Новожилов Ю.В., Яппа Ю.А. Электродинамика. М.: Наука, 1978, 352 с.
4. Бредов М.М., Румянцев В.В., Топтыгин И.Н. Классическая электродинамика. Санкт-Петербург _ Москва _ Краснодар: Лань, 2003, 400с.
5. Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике и специальной теории относительности. – СПб: Лань.- 2016.- 480с.
6. Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М. Задачи и упражнения с ответами и решениями. М.: Мир,1969, 624 с.
7. Векштейн Е.Г. Сборник задач по электродинамике. М.: Изд. Высшая школа, 1966, 288 с.
8. Алексеев А.И..Сборник задач по классической электродинамике. М.: Наука, 1977, 318 с.
9. Гречко Л.Г., Сугаков В.И., Томасевич О.Ф., Федорченко А.М. Сборник задач по теоретической физике. М.: Высшая школа, 385 с.
10. Пановский В., Филипс М. Классическая электродинамика. М.: ГИТТЛ,1963, 432 с.
11. Ленерт Б. Динамика заряженных частиц. М.: Атомиздат, 1967, 352 с.
12. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1972, 224 с.
13. С.Р.де Гроот, Сатторп Л.Г. Электродинамика. М.: Наука, 1982,560 с.
14. Мешков И.Н., Чириков Б.В. Электромагнитное поле.Части 1,2. М.: Наука, 1987, 272 и 252 с.
15. Иродов И.Е. Основные законы электромагнетизма. М.: Высшая школа,1983,280 с.
16. Бордовицын В.А. Динамика релятивистских частиц. Томск: ТГПИ, 1976, 88с.

в) ресурсы сети Интернет:

М.Г. Иванов. Механика и теория поля. –

<https://mipt.ru/students/organization/mezhpr/biblio/mekhanika-i-teoriya-polya.php>

О.В. Жиров Классическая электродинамика

<https://www.inp.nsk.su/~zhirov/em-lect.pdf>

В.И. Денисов Лекции по электродинамике

<https://studizba.com/files/show/djvu/2872-1-v-i-denisov--lekcii-po-elektrodinamike.html>

Классическая электродинамика: 11 книг

<http://bookash.pro/ru/s/%D0%9A%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%81%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F+%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1>

13. Перечень информационных технологий

а) лицензионное и свободно распространяемое программное обеспечение:

– Microsoft Office Standart 2013 Russian: пакет программ. Включает приложения: MS Office Word, MS Office Excel, MS Office PowerPoint, MS Office On-eNote, MS Office Publisher, MS Outlook, MS Office Web Apps (Word Excel MS PowerPoint Outlook); системы компьютерной вёрстки LaTeX;

– публично доступные облачные технологии (Google Docs, Яндекс диск и т.п.).

б) информационные справочные системы:

– Электронный каталог Научной библиотеки ТГУ – <http://chamo.lib.tsu.ru/search/query?locale=ru&theme=system>

– Электронная библиотека (репозиторий) ТГУ – <http://vital.lib.tsu.ru/vital/access/manager/Index>

– ЭБС Лань – <http://e.lanbook.com/>

– ЭБС Консультант студента – <http://www.studentlibrary.ru/>

– Образовательная платформа Юрайт – <https://urait.ru/>

– ЭБС ZNANIUM.com – <https://znanium.com/>

– ЭБС IPRbooks – <http://www.iprbookshop.ru/>

14. Материально-техническое обеспечение

Аудитории для проведения занятий лекционного типа.

Аудитории для проведения практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации.

Помещения для самостоятельной работы, оснащенные компьютерной техникой и доступом к сети Интернет, в электронную информационно-образовательную среду и к информационным справочным системам.

Аудитории для проведения занятий лекционного типа, практических занятий, индивидуальных и групповых консультаций, текущего контроля и промежуточной аттестации в смешенном формате, оснащенные системой («Актру»).

15. Информация о разработчиках

Горбунов Иван Владиславович, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедры теоретической физики физического факультета ТГУ, доцент.