

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

Филиал Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова в городе Сарове

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор филиала МГУ в г.Сарове  
Член-корреспондент РАН В.В. Воеводин

### **РАБОЧАЯ ПРОГРАММА ДИСЦИПЛИНЫ (МОДУЛЯ)**

**Наименование дисциплины:**

---

Дополнительные главы электродинамики и квантовой механики

**Уровень высшего образования:**

Магистратура

---

**Направление подготовки:**

03.04.02 Физика

---

**Направленность (профиль) ОПОП:**

**Теоретическая физика**

Квалификация «Магистр»

**Форма обучения:** Очная

Саров 2021 г.

Рабочая программа дисциплины разработана в соответствии с самостоятельно установленным МГУ образовательным стандартом (ОС МГУ) для реализуемых основных профессиональных образовательных программ высшего образования по направлению подготовки 03.04.02 Физика в редакции приказа по МГУ от 30 декабря 2020 г. №1366.

Разработчик (разработчики) программы.

1. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Квантовой теории и физики высоких энергий физического факультета МГУ,  
Денисов Виктор Иванович.
2. Доктор физико-математических наук, профессор кафедры Квантовой теории и физики высоких энергий физического факультета МГУ,  
Силаев Петр Константинович.
3. Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры Квантовой теории и физики высоких энергий  
физического факультета МГУ,  
Соколов Владимир Андреевич.

**1. Место дисциплины (модуля) в структуре ОПОП ВО:**

Дисциплина «Дополнительные главы электродинамики и квантовой механики» реализуется в 1-ом семестре 1-го курса магистратуры и является частью общенаучного блока обязательной части.

---

**2. Входные требования для освоения дисциплины (модуля), предварительные условия (если есть):**

Успешное освоение курсов: «математический анализ», «линейная алгебра», «теория функций комплексного переменного», «теоретическая механика».

**3. Результаты обучения по дисциплине (модулю):**

В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы:

<b>Формируемые компетенции (код компетенции)</b>	<b>Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю)</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>Способность использовать знания современных проблем и новейших достижений в области теоретической физики в своей научно-исследовательской деятельности (СПК-1).</li></ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b></p> <p>основные законы и направления современных научных исследований в области теоретической физики</p> <p>·</p> <p><b>УМЕТЬ</b></p> <p>на основе фундаментальных знаний в области теоретической физики, определять возможные направления научных исследований.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b></p> <p>необходимой информацией из современных отечественных и зарубежных источников по тематике избранного направления исследования области</p>

	теоретической физики.
<ul style="list-style-type: none"> <li>Способность организовать и планировать физические исследования, ставить конкретные задачи научных исследований в области теоретической физики и решать их с помощью современной аппаратуры, оборудования и информационных технологий (СПК-2).</li> </ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b></p> <p>базовые принципы организации научных исследований с использованием информационных технологий, основные методики работы на современном научном оборудовании.</p> <p><b>УМЕТЬ</b></p> <p>используя знания в области теоретической физики проводить научные исследования.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b></p> <p>навыками планирования научного исследования, анализа получаемых результатов, обобщения, оформления и публичного представления полученных результатов.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Способность определять основные направления внедрения научных результатов в области теоретической физики (СПК-3).</li> </ul>	<p><b>ЗНАТЬ</b></p> <p>основные направления инновационного развития в области теоретической физики.</p> <p><b>УМЕТЬ</b></p> <p>проводить необходимый анализ современных тенденций научных инноваций в области теоретической физики для подготовки предложений по внедрению полученных научных результатов.</p> <p><b>ВЛАДЕТЬ</b></p> <p>методами обоснования возможного применения полученных научных результатов с учетом современных достижений в области теоретической физики.</p>

4. Объем дисциплины (модуля) составляет \_2\_ з.е.

5. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий:

5.1. Структура дисциплины (модуля) по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и виды учебных занятий (в строгом соответствии с учебным планом)

Наименование разделов и тем дисциплины (модуля),  Форма промежуточной аттестации по дисциплине (модулю)	Номинальные трудозатраты обучающегося			Всего академических часов	Форма текущего контроля успеваемости* (наименование)
	Контактная работа (работа во взаимодействии с преподавателем) Виды контактной работы, академические часы		Самостоятельная работа обучающегося, академические часы		
	Занятия лекционного типа	Занятия семинарского типа			
Тема 1.	1	1	1	3	опрос
Тема 2.	1	1	1	3	опрос
Тема 3.	1	1	2	4	опрос
Тема 4.	1	1	2	4	опрос
Тема 5.	1	1	2	4	опрос
Тема 6.	1	1	2	4	опрос
Тема 7.	1	1	2	4	опрос
Тема 8.	1	1	2	4	опрос
Тема 9.	1	1	2	4	опрос
Тема 10.	1	1	2	4	опрос
Тема 11.	1	1	2	4	опрос

Тема 12.	1	1	2	4	опрос
Тема 13.	1	1	2	4	опрос
Тема 14.	1	1	2	4	опрос
Тема 15.	1	1	2	4	опрос
Тема 16.	1	1	2	4	опрос
Тема 17.	2	2	2	6	опрос
Промежуточная аттестация			4	4	Зачет с оценкой контрольная работа
<b>Итого</b>	<b>18</b>	<b>18</b>	<b>36</b>	<b>72</b>	

## 5.2. Содержание разделов (тем) дисциплины

№ п/п	Наименование разделов (тем) дисциплины	Содержание разделов (тем) дисциплин
1.	Тема 1.	Уравнения электромагнитного поля в вакууме. Потенциалы электромагнитного поля. Калибровочная инвариантность. Уравнения для потенциалов при калибровках Лоренца и Кулона.
2.	Тема 2.	Преобразования Лоренца для координат и времени. Интервал. Релятивистская кинематика. Четырехмерный формализм Минковского. Ковариантная запись закона сохранения заряда. Ковариантная запись калибровочного условия Лоренца и уравнений для потенциалов.
3.	Тема 3.	Решение уравнений для потенциалов электромагнитного поля. Функция Грина. Опережающие и запаздывающие потенциалы.
4.	Тема 4.	Тензор электромагнитного поля. Ковариантная запись уравнений Максвелла. Закон преобразования векторов напряженности электромагнитного поля при преобразованиях Лоренца. Тензорные инварианты электромагнитного поля.

5.	Тема 5.	Принцип стационарного действия. Лагранжиан заряженной частицы в заданном электромагнитном поле. Уравнения движения релятивистской заряженной частицы.
6.	Тема 6.	Лагранжев формализм в классической теории поля. Лагранжиан электродинамики Максвелла и динамические уравнения электромагнитного поля при заданных источниках. Альтернативные модели электродинамики: модели Прока, Борна-Инфельда, Боппа-Подольского.
7.	Тема 7.	Тензор энергии-импульса электромагнитного поля. Законы сохранения.
8.	Тема 8.	Собственные колебания электромагнитного поля. Канонические переменные. Гамильтониан свободного электромагнитного поля.
9.	Тема 9.	Гильбертово пространство. Базис. Эрмитовы операторы. Их физический смысл. Теоремы о коммутаторах эрмитовых операторов и их собственных векторах. Определение функций от операторов, их свойства.
10.	Тема 10.	Результаты измерения наблюдаемой. Индетерминизм квантовой механики. Описание чистого состояния с помощью вектора гильбертова пространства. Принцип суперпозиции, его обоснование. Совместимые и несовместимые наблюдаемые. Полный набор наблюдаемых. Соотношение неопределенностей.
11.	Тема 11.	Представления Гайзенберга и Шредингера, связь между ними, формальные решения уравнений Гайзенберга и Шредингера. Стационарные состояния. Симметрии и интегралы движения.
12.	Тема 12.	Координатное и импульсное представление. Их связь. Операторы трансляции в координатном и импульсном

		пространстве. Общие свойства спектра при одномерном движении. Дискретный спектр, непрерывный спектр, кратность вырождения. Осцилляционная теорема. Четный потенциал.
13.	Тема 13.	Координатное и импульсное представление в трехмерном случае. Поток вероятности, уравнение непрерывности. Центрально-симметричное поле. Орбитальный момент. Радиальное уравнение Шредингера.
14.	Тема 14.	Стационарная теория возмущений, случай невырожденного уровня. Условия применимости. Стационарная теория возмущений, случай вырожденного уровня.
15.	Тема 15.	Тождественные частицы. Принцип неразличимости. Бозоны и фермионы. Базис в пространстве состояний тождественных частиц. Операторы в пространстве состояний тождественных частиц. Принцип Паули.
16.	Тема 16.	Упругое потенциальное рассеяние. Постановка задачи. Уравнение Липпмана-Швингера. Борновский ряд, условие применимости 1-го борновского приближения. Парциальное разложение. Условие унитарности для парциальных амплитуд рассеяния, фаза рассеяния. Оптическая теорема, ее физический смысл.
17.	Тема 17.	Представление Дирака. Нестационарная теория возмущений. Переходы мгновенные и адиабатические. Переходы под действием периодического возмущения. Золотое правило Ферми.
18.	Промежуточная аттестация	Промежуточная аттестация. Контрольная работа.



6. Фонд оценочных средств (ФОС, оценочные и методические материалы) для оценивания результатов обучения по дисциплине (модулю).

6.1. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения текущего контроля успеваемости, критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

1. Запишите уравнения магнитостатики  $\operatorname{div} \mathbf{H} = 0$ ,  $\operatorname{rot} \mathbf{H} = 4\pi\mathbf{j}/c$ , в сферической системе координат.
2. Какое число степеней свободы имеет свободное безмассовое векторное поле? Обоснуйте ответ на примере электромагнитного поля.
3. Следствием какой глобальной симметрии уравнений электромагнитного поля является закон сохранения электрического заряда?
4. Запишите формулы для преобразования радиуса-вектора  $\mathbf{r}$  и времени  $t$  при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую инерциальную систему отсчета, имеющую относительно первой произвольно направленную скорость  $\mathbf{V}$ . Оси координат обеих систем отсчета параллельны.
5. В лабораторной системе отсчета  $|\mathbf{E}| = n|\mathbf{H}|$  и  $\mathbf{E} \perp \mathbf{H}$ ; найдите скорость системы отсчета, движущейся инерциально относительно лабораторной, в которой напряженности поля будут связаны соотношениями  $\mathbf{E}' = n\mathbf{E}/m$  и  $\mathbf{H}' = \mathbf{H}/m$ , где  $m$  и  $n$  – произвольные числовые постоянные.
6. Выполните преобразование компонент тензора электромагнитного поля в пространстве Минковского при переходе от декартовых координат к изотропным координатам  $x'^0 = x^0 + x^1$ ,  $x'^1 = x^0 - x^1$ ,  $x'^2 = x^2$ ,  $x'^3 = x^3$ .
7. Запишите уравнения для четырехмерного вектора-потенциала электромагнитного поля в пространстве Минковского используя изотропные координаты  $x'^0 = x^0 + x^1$ ,  $x'^1 = x^0 - x^1$ ,  $x'^2 = x^2$ ,  $x'^3 = x^3$ .
8. Вычислите след тензора энергии-импульса электромагнитного поля  $T_{ik}$ . Как преобразуется след этого тензора и определитель матрицы  $\det\|T_{ik}\|$  при произвольных преобразованиях координат?
9. Укажите две основные причины, по которым наблюдаемым сопоставляются именно эрмитовы операторы.

10. Какие эксперименты доказывают справедливость принципа суперпозиции?
11. При каких условиях можно выписывать формальные решения уравнений Гайзенберга и Шредингера?
12. Укажите условия применимости стационарной теории возмущений. Откуда они следуют?
13. Каковы условия применимости 1-го борновского приближения?
14. Можно ли применять золотое правило Ферми для перехода, в котором конечное состояние принадлежит дискретному спектру? Обоснуйте свой ответ.

6.2. Типовые контрольные задания или иные материалы для проведения промежуточной аттестации по дисциплине (модулю), критерии и шкалы оценивания (в отсутствие утвержденных соответствующих локальных нормативных актов на факультете)

1. В лабораторной системе отсчета угол между векторами напряженности поля  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  равен  $\phi$ . Найдите систему отсчета, в которой эти векторы будут параллельны. Всегда ли задача имеет решение? Единственно ли оно?
2. Найти скалярный и векторный потенциалы и векторы напряженности поля для точечного заряда  $q$ , движущегося равномерно со скоростью  $\mathbf{V}$ .
3. Пусть векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{H}$  являются решениями уравнений Максвелла в вакууме в области вне источников. Докажите, что векторы  $\mathbf{E}' = E \cos \theta - \mathbf{H} \sin \theta$ , и  $\mathbf{H}' = \mathbf{H} \cos \theta + E \sin \theta$  также являются решениями уравнений Максвелла в этой области.
4. Найдите закон преобразования компонент тензора электромагнитного поля при:
  - a) P – пространственной инверсии  $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = -\mathbf{r}, t \rightarrow t' = t$ ,
  - b) T – инверсии времени  $\mathbf{r} \rightarrow \mathbf{r}' = \mathbf{r}, t \rightarrow t' = -t$ ,
  - c) C – зарядовом сопряжении ("замене" знака заряда источников на противоположный).
5. Ненулевые компоненты тензора  $T_{ik}$  в лабораторной системе отсчета имеют вид:  $T_{00} = -T_{11} = -T_{22} = -T_{33}$ . Найдите компоненты этого тензора в системе отсчета, движущейся равномерно и прямолинейно вдоль оси X со скоростью  $V$ .

6. Вычислите компоненты тензора энергии-импульса для плоской эллиптически поляризованной электромагнитной волны с частотой  $\omega$ , распространяющейся в положительном направлении оси  $Z$ .
7. Волновая функция спина  $1/2$  равна . Чему равно среднее значение проекции спина на ось  $\vec{n}(\theta, \varphi)$ ? При каких  $\theta, \varphi$  это среднее достигает максимума? Чему равно это максимальное среднее?
8. Одномерный гармонический осциллятор. Вычислить матричные элементы  $\langle n | \hat{x}^4 | n \rangle, \langle n | \hat{x}^3 | m \rangle$ .
9. Найти зависимость времени жизни  $\alpha$ -активного ядра от энергии вылетающей  $\alpha$ -частицы.
10. Найти уровни энергии для сферической оболочки  $V(r) = -V_0 \delta(r - a)$ , при  $l = 0$ .
11. Заряженный двумерный симметричный гармонический осциллятор помещен в слабое однородное магнитное поле, ориентированное по оси  $z$ . В первом порядке теории возмущений найти поправки к энергии первого возбужденного уровня  $E^{(0)} = 2\hbar\omega$  и соответствующие волновые функции.
12. Одномерный гармонический осциллятор. Найти поправки к энергии  $n$ -го уровня, вызванные возмущением  $H_I = \alpha x^3$ .
13. Вычислить парциальное сечение рассеяния  $s$ -волны на потенциальной яме  $V(r < a) = -V_0, V(r > a) = 0$ . Указать условие резонанса.
14. Гармонический осциллятор в начальный момент времени находится в основном состоянии. При  $t > 0$  он подвергается действию возмущения  $H_I = \alpha x^2 \exp(-t/\tau)$ . Какова вероятность найти его на уровне  $|2\rangle$  в момент времени  $t$ ?

## 7. Ресурсное обеспечение:

### 7.1. Перечень основной и дополнительной литературы

#### Основная литература

1. Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. Издательство "Лань", Год 2021 (в электронном виде, интернет ресурс <http://e.lanbook.com>).
2. Иродов И. Е. Задачи по квантовой физике. Издательство "Лаборатория знаний", Год 2021 (в электронном виде, интернет ресурс <http://e.lanbook.com>).
3. Ландау Л. Д., Лифшиц Е, М, Теория поля. Год 2018 (в электронном виде, интернет ресурс <https://znanium.com/>).

4. Алексеев А. И. Сборник задач по классической электродинамике. Издательство "Лань" 2021. (в электронном виде, интернет ресурс <http://e.lanbook.com>).
5. Бредов М. М., Румянцев В. В., Топтыгин И. Н. Классическая электродинамика. Издательство "Лань", 2021 (в электронном виде, интернет ресурс <http://e.lanbook.com>).
6. Батыгин В.П., Топтыгин И.Н. Современная электродинамика., НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2003.
7. Денисов В.И. Лекции по электродинамике. М.: УНЦ ДО, 2007.
8. J. Schwinger, L. L. De Raad, Jr, K. A. Milton and Wu-yang, Classical Electrodynamics, Tsai Perseus Books, 1998.
9. Степаньянц К.В. Классическая теория поля, М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.
10. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. М.: Физматгиз, 1974.
11. Соколов А.А., Лоскутов Ю.М., Тернов Ю.М. Квантовая механика. М.: Просвещение, 1965.

#### Дополнительная литература

1. Денисова И.П. Введение в тензорное исчисление и его приложения. М.: УНЦ ДО, 2003.
2. Пановский В., Филлипс М. Классическая электродинамика. М.: Физматгиз, 1963.
3. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике. М.: Наука, 1972.
4. Фок В.А. Начала квантовой механики. М.: Наука, 1976.
5. Флюгге З. Задачи по квантовой механике. тт. 1, 2. Мир.: 1974.
6. Галицкий В.М., Карнаков Б.М., Коган В.И. Задачи по квантовой механике. М.: Наука. 1992.
7. Гольдман И.И., Кривченков В.Д., Сборник задач по квантовой механике М.: ГИТТЛ. 1957.
8. Дирак П.А. Принципы квантовой механики. М.: Физматгиз, 1960.
9. Мессиа А. Квантовая механика., тт.1,2., М.: Наука, 1978.
10. Давыдов А.С., Квантовая механика, М.: Наука,1973.

7.2. Перечень лицензионного программного обеспечения, в том числе отечественного производства

При реализации дисциплины может быть использовано следующее программное обеспечение:

1. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Compute Node for Power, LE, Self-support 4 шт. №5540331
2. Программный продукт Red Hat Enterprise Linux Server for HPC Head Node for Power, LE, Standard 1 шт. №5540332
3. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 11 SP4 for x86\_64 16 шт.
4. Операционная система Red Hat Enterprise Linux Server 5.0 for x86\_64 14шт.
5. Операционная система SUSE Linux Enterprise Server 10 SP3 for ppc64 7 шт.
6. Операционная система Ubuntu 18.04.
7. Программное обеспечение для виртуализации Oracle VM VirtualBox
8. Операционная система ALTLinuxMATEStarterkit 9 лицензияGPL
9. Программный продукт JetBrains IntelliJ IDEA Community Edition Free Educational Licenses
10. Программный продукт JetBrains PyCharm Community Edition Free Educational Licenses
11. Программный продукт JetBrains CLion Community Edition Free Educational Licenses
12. Программный продукт UPPAAL (<http://www.uppaal.org/>) академическая лицензия
13. Программный продукт Java 8 (64-bit) Oracle Corporation
14. Программный продукт Java SE Development Kit 8(64-bit) Oracle Corporation
15. Программный продукт NetBeans IDE 8.2 NetBeans.org
16. Программный продукт Dev-C++ Bloodshed Software
17. Программный продукт CodeBlocks The Code::Blocks Team
18. Программный продукт Free Pascal 3.0.0 Free Pascal Team
19. Программный продукт Python 3.5.1 (64-bit) Python Software Foundation
20. Программный продукт R for Windows 3.2.2 R Core Team
21. Программный продукт Haskell Platform 7.10.3 Haskell.org
22. Операционная система Microsoft Windows 7 корпоративная академическая лицензия
23. Операционная система Microsoft Windows 10 Education академическая лицензия
24. Программный продукт Microsoft Project Professional 2013 академическая лицензия

25. Программный продукт Microsoft VisioProfessional 2013 академическая лицензия
26. Программный продукт Microsoft VisualStudioProfessional 2013 - RUS [Русский (Россия)] академическая лицензия

Перечень профессиональных баз данных и информационных справочных систем

1. <http://www.edu.ru> – портал Министерства образования и науки РФ
  2. <http://www.ict.edu.ru> – система федеральных образовательных порталов «ИКТ в образовании»
  3. <http://www.openet.ru> - Российский портал открытого образования
  4. <http://www.mon.gov.ru> - Министерство образования и науки Российской Федерации
  5. <http://www.fasi.gov.ru> - Федеральное агентство по науке и инновациям
- 7.4. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»
1. <https://nbmgu.ru/> (Научная библиотека МГУ)
  2. <https://arxiv.org/>
  3. <https://zoom.us> (в случае проведения занятий в дистанционной форме требуется предоставление доступа к платформе Zoom с тарифным планом соответствующем числу слушателей).
- 7.5. Описание материально-технического обеспечения.
- Помещение, оборудованное для проведения занятий (аудитория на 15 мест), доска для мела или маркерная доска с площадью области для письма не менее 1.5x2.5 метра (ВxШ), мел или маркеры для письма на доске, средства для удаления записей с доски, проектор, проекционный экран, ноутбук с интерфейсом для подключения к проектору и возможностью подключения к сети «Интернет» (в случае проведения дистанционных занятий).
8. Соответствие результатов обучения по данному элементу ОПОП результатам освоения ОПОП указано в Общей характеристике ОПОП.