

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова**

Кафедра теоретической физики

УТВЕРЖДАЮ

Декан физического факультета  
  
И.С. Огнев  
(подпись)

« 17 » мая 2022 г.

**Рабочая программа дисциплины**  
**«Квантовые процессы во внешней активной среде»**

Направление подготовки  
03.04.02 Физика

Направленность (профиль)  
«Теоретическая физика»

Форма обучения  
очная

Программа одобрена  
на заседании кафедры  
от «18» апреля 2022 года, протокол № 8

Программа одобрена НМК  
физического факультета  
протокол № 5 от « 11 » мая 2022 года

Ярославль

## 1. Цели освоения дисциплины

Целью освоения дисциплины «Квантовые процессы во внешней активной среде» является приобретение студентами знаний и умений по исследованию процессов с участием элементарных частиц в условиях активной астрофизической среды – в электромагнитном поле и плазме.

## 2. Место дисциплины в структуре ОП магистратуры

Дисциплина «Квантовые процессы во внешней активной среде» является дисциплиной Блока 1, части, формируемой участниками образовательных отношений, позиция Б1.В.07.

Дисциплина «Квантовые процессы во внешней активной среде» является завершающей в построении теории взаимодействующих полей, находится на переднем крае фундаментальных научных исследований в теории элементарных частиц и открывает широкие возможности в приложении физики частиц к астрофизике и космологии.

Для овладения данной дисциплиной студенты должны знать основы дисциплин цикла «Теоретическая физика», дисциплины «Методы математической физики», «Дополнительные главы математической физики», «Квантовая электродинамика», «Радиационные поправки и теория перенормировок».

## 3. Планируемые результаты обучения по дисциплине, соотнесенные с планируемыми результатами освоения ОП магистратуры

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих элементов компетенций в соответствии с ФГОС ВО, ОП ВО и приобретения следующих знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности:

Формируемая компетенция (код и формулировка)	Индикатор достижения компетенции (код и формулировка)	Перечень планируемых результатов обучения
<b>Профессиональные компетенции</b>		
<b>ПК-1</b> Способен осуществлять научно-исследовательскую деятельность по решению комплексных фундаментальных задач физики	<b>ИД-ПК-1_1</b> Знает теоретические методы проведения и анализа научных исследований	<b>Знать</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• обобщение уравнения Дирака для волновой функции и для пропагатора заряженного фермиона, с включением внешнего электромагнитного поля.</li></ul> <b>Уметь</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• получать волновые функции, описывающие электрон в магнитном и скрещенном полях, получать выражение для пропагатора электрона в магнитном поле несколькими методами.</li></ul> <b>Владеть навыками</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• нахождения решений уравнения Дирака для волновой функции и для пропагатора заряженного фермиона, с включением внешнего электромагнитного поля.</li></ul>

#### 4. Объем, структура и содержание дисциплины

Общая трудоемкость дисциплины составляет 3 зачетные единицы, 108 акад. часов.

№ п/п	Темы (разделы) дисциплины, их содержание	С е м е с т р	Виды учебных занятий, включая самостоятельную работу студентов, и их трудоемкость (в академических часах)						Формы текущего контроля успеваемости  Форма промежуточной аттестации (по семестрам)
			Контактная работа						
			лекции	практические занятия	лабораторные работы	консультации	аттестация	самостоятельная работа	
1	Решение уравнения Дирака во внешнем магнитном поле	4	6	6		1		12	Задания для самостоятельной работы
2	Пропагатор электрона во внешнем магнитном поле	4	14	14		2		28	Задания для самостоятельной работы
3	Решение уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны	4	4	4		1		8	Задания для самостоятельной работы
		4					0,3	7,7	Зачет
	Всего за 4 семестр		24	24		4	0,3	55,7	
	<b>Всего</b>		<b>24</b>	<b>24</b>		<b>4</b>	<b>0,3</b>	<b>55,7</b>	

#### Содержание разделов дисциплины:

##### 1. Решение уравнения Дирака во внешнем магнитном поле

- 1.1. Уравнение Дирака для электрона в постоянном однородном магнитном поле в форме уравнения Шрёдингера.
- 1.2. Оператор обобщенной спираальности, его коммутатор с гамильтонианом уравнения Дирака.
- 1.3. Оператор обобщенного магнитного момента, его коммутатор с гамильтонианом уравнения Дирака.
- 1.4. Вычисление собственных значений и собственных функций оператора обобщенной спираальности для электрона в постоянном однородном магнитном поле: решения с положительной и отрицательной энергией.
- 1.5. Построение нормированных решений уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента, на основе собственных функций оператора обобщенной спираальности: решения с положительной и отрицательной энергией.
- 1.6. Доказательство ортогональности различных решений уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственных функций оператора

обобщенного магнитного момента: решения с положительной и отрицательной энергией.

## **2. Пропагатор электрона во внешнем магнитном поле**

- 2.1. Построение пропагатора электрона во внешнем магнитном поле на основе решений уравнения Дирака, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента.
- 2.2. Вычисление фурье-образа пропагатора электрона во внешнем магнитном поле на основе швингеровского выражения.
- 2.3. Анализ различных представлений неинвариантной фазы пропагатора заряженной частицы во внешнем магнитном поле.
- 2.4. Вычисление суммарной фазы для трехвершинной и четырехвершинной петли во внешнем магнитном поле.
- 2.5. Построение пропагатора заряженной массивной скалярной частицы во внешнем магнитном поле операторным методом.
- 2.6. Построение пропагатора электрона во внешнем магнитном поле операторным методом.

## **3. Решение уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны**

- 3.1. Получение решения уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны (решения Волкова), проверка его правильности прямой подстановкой в уравнение.
- 3.2. Получение решения уравнения Дирака для электрона в постоянном однородном скрещенном поле и в поле линейно и циркулярно поляризованной монохроматической волны на основе решения в поле плоской электромагнитной волны.

## **5. Образовательные технологии, в том числе технологии электронного обучения и дистанционные образовательные технологии, используемые при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе обучения используются следующие образовательные технологии:

**Вводная лекция** – дает первое целостное представление о дисциплине и ориентирует студента в системе изучения данной дисциплины. Студенты знакомятся с назначением и задачами курса, его ролью и местом в системе учебных дисциплин и в системе подготовки в целом. Дается краткий обзор курса, история развития науки и практики, достижения в этой сфере, имена известных ученых, излагаются перспективные направления исследований. На этой лекции высказываются методические и организационные особенности работы в рамках данной дисциплины, а также дается анализ рекомендуемой учебно-методической литературы.

**Академическая лекция с элементами лекции-беседы** – последовательное изложение материала, осуществляемое преимущественно в виде монолога преподавателя. Элементы лекции-беседы обеспечивают контакт преподавателя с аудиторией, что позволяет привлекать внимание студентов к наиболее важным темам дисциплины, активно вовлекать их в учебный процесс, контролировать темп изложения учебного материала в зависимости от уровня его восприятия.

**Практическое занятие** – занятие, посвященное освоению конкретных умений и навыков по закреплению полученных на лекции знаний.

**Консультации** – вид учебных занятий, являющийся одной из форм контроля самостоятельной работы студентов. На консультациях по просьбе студентов

рассматриваются наиболее сложные моменты при освоении материала дисциплины, преподаватель отвечает на вопросы студентов, которые возникают у них в процессе самостоятельной работы.

#### **6. Перечень лицензионного и (или) свободно распространяемого программного обеспечения, используемого при осуществлении образовательного процесса по дисциплине**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

для формирования материалов для текущего контроля успеваемости и проведения промежуточной аттестации, для формирования методических материалов по дисциплине:

- программы Microsoft Office;
- издательская система LaTeX;
- Adobe Acrobat Reader.

#### **7. Перечень современных профессиональных баз данных и информационных справочных систем, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (при необходимости)**

В процессе осуществления образовательного процесса по дисциплине используются:

1. Автоматизированная библиотечно-информационная система «БУКИ-NEXT»  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_find.php](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_find.php)
2. Научная библиотека на сайте [www.poiskknig.ru](http://www.poiskknig.ru)
3. Научная энциклопедия на сайте <http://elementy.ru/physics>
4. Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU на сайте <http://elibrary.ru/>

#### **8. Перечень основной и дополнительной учебной литературы, ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины**

##### **а) основная литература**

1. Кузнецов А.В., Михеев Н.В. Электрослабые процессы во внешней активной среде: монография. Ярославль: ЯрГУ, 2010.  
<http://www.lib.uniyar.ac.ru/edocs/iuni/20100730.pdf>
2. Кузнецов А.В., Яблоков С.Н. Пропагаторы заряженных частиц во внешнем магнитном поле: учеб.-метод. пособие. Ярославль: ЯрГУ, 2021.  
<https://portal.uniyar.ac.ru/upload/publications/11323.pdf>

##### **б) дополнительная литература**

1. Берестецкий В. Б., Лифшиц Е. М., Питаевский Л. П. Теоретическая физика: учебное пособие. В 10 т. Т. 4. Квантовая электродинамика. М.: Физматлит, 2006. 716 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=914351&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=914351&cat_cd=YARSU)
2. Боголюбов Н. Н., Ширков Д. В. Введение в теорию квантованных полей. М.: Наука, 1984. 600 с.  
[http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk\\_cat\\_card.php?rec\\_id=299849&cat\\_cd=YARSU](http://www.lib.uniyar.ac.ru/opac/bk_cat_card.php?rec_id=299849&cat_cd=YARSU)

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

Материально-техническая база, необходимая для осуществления образовательного процесса по дисциплине включает в свой состав специальные помещения:

- учебные аудитории для проведения занятий лекционного типа;

- учебные аудитории для проведения практических занятий (семинаров);
- учебные аудитории для проведения групповых и индивидуальных консультаций;
- учебные аудитории для проведения текущего контроля и промежуточной аттестации;
- помещения для самостоятельной работы;
- помещения для хранения и профилактического обслуживания технических средств обучения.

Помещения для самостоятельной работы обучающихся оснащены компьютерной техникой с возможностью подключения к сети «Интернет» и обеспечением доступа к электронной информационно-образовательной среде ЯрГУ.

Автор:

Профессор кафедры  
теоретической физики, д.ф.-м.н.

А.В. Кузнецов

---

**Приложение №1 к рабочей программе дисциплины  
«Квантовые процессы во внешней активной среде»**

**Фонд оценочных средств  
для проведения текущего контроля успеваемости  
и промежуточной аттестации студентов  
по дисциплине**

**1. Типовые контрольные задания и иные материалы,  
используемые в процессе текущего контроля успеваемости**

**Задания для самостоятельной работы**

*(данные задания выполняются студентом самостоятельно  
и преподавателем в обязательном порядке не проверяются)*

**Задания для самостоятельной работы № 1**

1. Доказать, что оператор обобщенной спиральности коммутирует с гамильтонианом уравнения Дирака для электрона в постоянном однородном магнитном поле.
2. Доказать, что оператор обобщенного магнитного момента коммутирует с гамильтонианом уравнения Дирака для электрона в постоянном однородном магнитном поле.
3. Найти собственные значения и собственные функции оператора обобщенной спиральности для электрона в постоянном однородном магнитном поле.
4. На основе собственных функций оператора обобщенной спиральности построить нормированные решения уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственные функции оператора обобщенного магнитного момента.

**Задания для самостоятельной работы № 2**

1. Построить пропагатор электрона во внешнем магнитном поле на основе решений уравнения Дирака, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента.
2. Вычислить Фурье-образ трансляционно и калибровочно инвариантной части пропагатора электрона в постоянном однородном магнитном поле в формализме собственного времени Фока—Швингера.
3. Преобразовать пропагатор электрона во внешнем магнитном поле из формализма собственного времени Фока—Швингера в формализм разложения по уровням Ландау.
4. Преобразовать пропагатор электрона во внешнем магнитном поле, в формализме собственного времени Фока—Швингера, к пределу скрещенного поля.
5. Вычислить Фурье-образ пропагатора электрона в скрещенном поле.
6. Проанализировать различные представления неинвариантной фазы пропагатора заряженной частицы во внешнем магнитном поле, вычислить суммарную фазу для трехвершинной петли во внешнем магнитном поле.
7. Проанализировать различные представления неинвариантной фазы пропагатора заряженной частицы во внешнем магнитном поле, вычислить суммарную фазу для четырехвершинной петли во внешнем магнитном поле.
8. Построить пропагатор заряженной массивной скалярной частицы во внешнем магнитном поле операторным методом.
9. Построить пропагатор электрона во внешнем магнитном поле операторным методом.

### **Задания для самостоятельной работы № 3**

1. Найти решение уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны (решение Волкова), проверить его правильность прямой подстановкой в уравнение.
2. На основе решения уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны построить решения в постоянном однородном скрещенном поле, в поле линейно и циркулярно поляризованной монохроматической волны.

### **2. Список вопросов и (или) заданий для проведения промежуточной аттестации**

#### **Список вопросов к зачету**

1. Доказать, что оператор обобщенной спиральности коммутирует с гамильтонианом уравнения Дирака для электрона в постоянном однородном магнитном поле.
2. Доказать, что оператор обобщенного магнитного момента коммутирует с гамильтонианом уравнения Дирака для электрона в постоянном однородном магнитном поле.
3. Найти собственные значения и собственные функции оператора обобщенной спиральности для электрона в постоянном однородном магнитном поле: решения с положительной энергией.
4. Найти собственные значения и собственные функции оператора обобщенной спиральности для электрона в постоянном однородном магнитном поле: решения с отрицательной энергией.
5. На основе собственных функций оператора обобщенной спиральности построить нормированные решения уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственные функции оператора обобщенного магнитного момента: решения с положительной энергией.
6. На основе собственных функций оператора обобщенной спиральности построить нормированные решения уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственные функции оператора обобщенного магнитного момента: решения с отрицательной энергией.
7. Доказать ортогональность различных решений уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента: решения с положительной энергией.
8. Доказать ортогональность различных решений уравнения Дирака для электрона во внешнем магнитном поле, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента: решения с отрицательной энергией.
9. Построить пропагатор электрона во внешнем магнитном поле на основе решений уравнения Дирака, как собственных функций оператора обобщенного магнитного момента.
10. На основе швингеровского выражения для пропагатора электрона во внешнем магнитном поле вычислить его фурье-образ.
11. Проанализировать различные представления неинвариантной фазы пропагатора заряженной частицы во внешнем магнитном поле, вычислить суммарную фазу для трехвершинной петли во внешнем магнитном поле.
12. Проанализировать различные представления неинвариантной фазы пропагатора заряженной частицы во внешнем магнитном поле, вычислить суммарную фазу для четырехвершинной петли во внешнем магнитном поле.
13. Построить пропагатор заряженной массивной скалярной частицы во внешнем магнитном поле операторным методом.
14. Построить пропагатор электрона во внешнем магнитном поле операторным



методом.

15. Найти решение уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны (решение Волкова), проверить его правильность прямой подстановкой в уравнение.
16. На основе решения уравнения Дирака для электрона в поле плоской электромагнитной волны построить решения в постоянном однородном скрещенном поле, в поле линейно и циркулярно поляризованной монохроматической волны.

### **Описание процедуры выставления оценки**

Оценка «зачтено» выставляется студенту, проявившему на мероприятии промежуточной аттестации следующие умения и навыки:

- Студент правильно формулирует постановку задачи, определяет метод ее решения, проводит простейший анализ полученного результата, в том числе, определяет границы его применимости;

- Студент владеет навыками проведения сложных вычислений под руководством преподавателя, может объяснить проведенные вычисления, может самостоятельно выполнить простейшие вычисления, используя аппарат математической и теоретической физики;

- Студент может делать ошибки, но должен их исправлять самостоятельно после дополнительных (наводящих) вопросов преподавателя.

Оценка «не зачтено» выставляется студенту, проявившему на мероприятии промежуточной аттестации умения и навыки следующего уровня:

- Студент не может выполнить постановку задачи, не может определить метод ее решения и провести даже простейший анализ полученного результата.
- Студент не может провести самостоятельно даже базовые вычисления с использованием аппарата математической и теоретической физики, не может пояснить вычисления, проведенные на практических занятиях под руководством преподавателя.

## **Приложение №2 к рабочей программе дисциплины «Квантовые процессы во внешней активной среде»**

### **Методические указания для студентов по освоению дисциплины**

Базовой формой учебного процесса по дисциплине «Квантовые процессы во внешней активной среде» являются практические занятия, которые предваряются сопутствующими лекционными занятиями. Это связано с необходимостью формирования навыков самостоятельных вычислений в квантовой теории поля при наличии внешней активной среды.

Для успешного освоения дисциплины очень важно решение достаточно большого количества задач, как в аудитории, так и самостоятельно в качестве домашних заданий. Примеры решения задач разбираются на лекциях и практических занятиях, при необходимости по наиболее трудным темам проводятся дополнительные консультации. Основная цель решения задач – помочь усвоить методы квантовой теории поля при наличии внешней активной среды. Для решения всех задач необходимо знать и понимать лекционный материал. Поэтому в процессе изучения дисциплины рекомендуется регулярное повторение пройденного лекционного материала. Материал, законспектированный на лекциях, необходимо дома еще раз прорабатывать и при необходимости дополнять информацией, полученной на консультациях, практических занятиях или из учебной литературы.

Большое внимание должно быть уделено выполнению домашней работы. В качестве заданий для самостоятельной работы дома студентам предлагаются задачи, аналогичные разобранным на лекциях и практических занятиях или немного более сложные, которые являются результатом объединения нескольких базовых задач.

Для проверки и контроля усвоения теоретического материала, приобретенных практических навыков работы с квантовополевым аппаратом во внешней активной среде в течение обучения проводятся консультации (при необходимости) по разбору заданий для самостоятельной работы, которые вызвали затруднения.

В конце изучения дисциплины студенты сдают зачет. Самостоятельная подготовка к зачету проводится в последнюю неделю семестра и, по необходимости, возможна групповая консультация.

Освоить вопросы, излагаемые в процессе изучения дисциплины «Квантовые процессы во внешней активной среде» самостоятельно студенту крайне сложно. Это связано со сложностью изучаемого материала и большим объемом курса. Поэтому посещение всех аудиторных занятий является совершенно необходимым. Без упорных и регулярных занятий в течение семестра сдать зачет по итогам изучения дисциплины студенту практически невозможно.