

Правительство Российской Федерации

**Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский университет
"Высшая школа экономики"”**

**Программа дисциплины
«Нелинейные динамические процессы в квантовых системах с
взаимодействием»**

для направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Теоретическая физика»
подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

Авторы программы: А.С.Иоселевич, д.ф.-м.н., e-mail: asioselevich@hse.ru

Одобрена на заседании Академического совета аспирантской школы по физике

Москва - 2016

Настоящая программа не может быть использована другими подразделениями университета и другими вузами без разрешения разработчика программы.

1. Область применения и нормативные ссылки

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям аспиранта по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия» профиля «Теоретическая физика» и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для преподавателей, ведущих данную дисциплину, и аспирантов направления 03.06.01 Физика и астрономия, профиль «Теоретическая физика».

Программа разработана в соответствии с:

Образовательным стандартом НИУ ВШЭ по направлению подготовки 03.06.01 «Физика и астрономия»;

Образовательной программой «Физика и астрономия» подготовки аспиранта.

Учебным планом подготовки аспирантов по направлению 03.06.01 «Физика и астрономия», профиль «Теоретическая физика», утвержденным в 2016.

2. Цели освоения дисциплины:

Этот курс лекций посвящен непертурбативному описанию переходов в различных взаимодействующих квантовых системах. Рассмотренные в курсе задачи объединены тем, что процесс перехода в них удобно рассматривать, как “инстантон”: классическое решение нелинейных нестационарных уравнений движения системы на комплексном (Келдышевском) временном контуре. Такой подход позволяет единым образом рассматривать переходы с учетом как тепловых, так и квантовых флуктуаций системы. Инстантонный метод оказывается эффективным в тех случаях, когда вероятность изучаемого перехода экспоненциально подавлена и не может быть определена с помощью стандартной теории возмущений. В зависимости от параметров, переход может быть обусловлен либо в основном за счет активации (взаимодействие с термостатом), либо в основном за счет туннелирования, возможного и при нулевой температуре. Курс рассчитан на аспирантов и старшекурсников физических специальностей (преимущественно теоретиков, но и экспериментаторов тоже). В идеале, от слушателей ожидается свободное владение квантовой механикой и статистической физикой, а также математическим аппаратом теоретической физики. Вместе с тем, результатам вычислений во всех случаях дается подробная физическая интерпретация, позволяющая понимать материал и для тех слушателей, которые не заинтересованы в математических деталях.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- Физические системы (относящиеся к области физики конденсированного состояния) в которых наблюдаются туннельные и/или активационные явления, допускающие описание с помощью инстантонов
- Существующие теоретические подходы к изучению непертурбативных эффектов в физике конденсированного состояния
- Перспективные направления и методы в теории инстантонов

Уметь:

- ориентироваться в современных исследованиях непертурбативных явлений в физике конденсированного состояния
- пользоваться математическим инструментарием теории инстантонов
- формулировать и решать задачи в этой области физики

Иметь навыки (приобрести опыт):

- теоретического решения задач на непертурбативные явления в твердотельных системах

В результате освоения дисциплины аспирант осваивает следующие компетенции:

Компетенция (указываются в соответствии с ОС НИУ ВШЭ)	Код по ОС НИУ ВШЭ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	УК-1	Демонстрирует способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	УК-3	Демонстрирует готовность участвовать в работе российских и международных исследовательских коллективов по решению научных и научно-образовательных задач.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	УК-4	Демонстрирует готовность использовать современные методы и технологии научной коммуникации на государственном и иностранном языках.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики конденсированного состояния.	ПК-1	Демонстрирует способность выполнять теоретические и экспериментальные исследования в области физики конденсированного состояния.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.
Способность самостоятельно осуществлять научно-исследователь-	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и

скую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.		исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	источников.
Способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	ОПК-2	Демонстрирует способность к разработке новых методов исследования и их применению в самостоятельной профессиональной научно-исследовательской деятельности.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и источников.

4. Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина относится к дисциплинам вариативной части, обязательной для профиля «Теоретическая физика».

Изучение данной дисциплины базируется на следующих базовых дисциплинах:

- Физика
- Математика
- Иностранный язык

Для освоения учебной дисциплины, аспиранты должны владеть следующими знаниями и компетенциями:

- способность планировать и решать задачи собственного профессионального и личностного развития (УК-6).

5. Тематический план учебной дисциплины

№	Название темы	Всего часов	Аудиторные часы	Самостоятельная работа
			Лекция	
1	Многофотонные переходы под действием сильного низкочастотного поля лазера	12	6	16
2	Захват частицы в нестационарное связанное состояние	12	4	14
3	Образование поляронов и автолокализованных состояний	6	6	16
4	Длинноволновый хвост оптического поглощения в диэлектриках	18	6	16
5	Кулоновская блокада – за	18	6	16

	рамками нульмерного приближения			
6	Пример некогерентного процесса: захват электрона на заряженную примесь в полупроводнике.	12	4	14
7	Туннельные переходы квазиклассических спинов	12	6	16
	Итого	144	38	106

Аудиторные часы включают 8 часов контрольных работ.

6. Содержание дисциплины

1 Многофотонные переходы под действием сильного низкочастотного поля лазера

- Вероятности переходов под действием сильного низкочастотного поля. “Задача Келдыша”: ионизация атомов лазерным полем (за рамками обычной теории возмущений)
- Квазиклассическое описание процесса во мнимом времени. Уравнения движения и их общее решение.
- Квазистатический случай (отвечающий туннелированию в постоянном поле) и динамический случай (отвечающий теории возмущений в высоком порядке)

Литература

1. Л. В. Келдыш, “Ионизация в поле сильной электромагнитной волны”, ЖЭТФ 47, 1945 (1964).
2. N. В. Delone and V. P. Krainov, Multiphoton Processes, Springer-Verlag, New York (1985).
3. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М., Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике, 2-изд. Наука, 1971.

2 Захват частицы в нестационарное связанное состояние

- Вычисление вероятностей для процессов распада, захвата и перезарядки в некоторых задачах атомной физики и физики твердого тела.
- Метод потенциалов нулевого радиуса. Описание процесса в терминах движения по комплексному временному контуру. Двухлистная Риманова поверхность, реальные и виртуальные состояния.
- Вероятность захвата квантовой частицы в локализованное состояние, образующееся при медленном увеличении силы короткодействующего притягивающего потенциала. Зависимость от начальной энергии частицы.

Литература

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, “Квантовая механика. Нерелятивистская теория”
2. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М., Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике, 2-изд. Наука, 1971.
3. Ю. Н. Демков, В. Н. Островский, “Метод потенциалов нулевого радиуса в атомной физике”, Ленинград : Изд-во Ленингр. ун-та, 1975

3 Образование поляронов и автолокализованных состояний

- Сильное электрон-фононное взаимодействие и поляроны.
- Различные типы поляронов. Устойчивость “голового” и “одетого” электронных состояний; барьерное и безбарьерное образование поляронов.

- □ “Нормальные центры”: переходы между деформированным и недеформированным состояниями.
- Последовательное некогерентное излучение фононов – простой механизм безбарьерного образования поляронов.
- □ Принцип Франка-Кондона (адиабатическое приближение), функциональный интеграл и Келдышевские контуры – необходимые ингредиенты для описания барьерного образования полярона. Переход, как квазиклассическое движение многомодовой системы на келдышевском контуре: туннельные, активационные и смешанные (термоактивированное туннелирование) сценарии перехода.
- □ Описание перехода в терминах волновой функции, изменяющейся в мнимом времени; нелинейный функционал действия, нелинейное нестационарное уравнение Шредингера.
- □ Решение уравнений для конкретных задач: оптические и акустические фононы, деформационное электрон-фононное взаимодействие. Экситон Ванье-Мотта, поляризационные оптические фононы.
- □ Предэкспоненциальный множитель: нулевые моды.
- □ Автолокализация “горячих” частиц.

Литература

1. E.I.Rashba, “Self-trapping of excitons”, in: “Excitons”, eds E.I.Rashba, M.D.Sturge, North-Holland, Amsterdam, (1982).
2. A.S.Ioselevich, E.I.Rashba, “Theory of Nonradiative Trapping in Crystals”, in: “Quantum Tunneling in Condensed Media”, eds Yu.Kagan, A.J.Leggett, North-Holland, Amsterdam, (1992), Chapter 7, p.347-425.
3. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, “Квантовая механика. Нерелятивистская теория”
4. Базь А.И., Зельдович Я.Б., Переломов А.М., Рассеяние, реакции и распады в нерелятивистской квантовой механике, 2-изд. Наука, 1971.
5. A.Kamenev, A.Levchenko, “Keldysh technique and non-linear sigma-model: basic principles and applications”, arXiv:0901.3586
6. Вайнштейн А И, Захаров В И, Новиков В А, Шифман М А “Инстантонная азбука”, УФН 136 553–591 (1982)
7. Р.Раджараман, “Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля”, М., Мир, 1985
8. А.С. Иоселевич, Э.И. Рашба, Теория скорости автолокализации, ЖЭТФ, 88 (5), 1873-1897 (1985)
9. A.S.Ioselevich, E.I.Rashba, Self-Trapping of Hot Particles. Sol.State Communs, 55 , (N8), (1985), 705-708.
10. K.Huang, A.Rhys, Proc. R. Soc., A204 , 406 (1950)

4 Длинноволновый хвост оптического поглощения в диэлектриках:

- □ Межзонное поглощение света в диэлектриках и полупроводниках. Экспериментальная ситуация. Длинноволновой хвост: правило Урбаха.
- □ Модель: процессы с участием одного фотона и большого числа фононов. Квазиклассическое описание движения решеточных степеней свободы во мнимом времени
- □ Применение функционала действия для электрон-фононной системы, выведенного в предыдущем разделе. Исследование общих свойств инстантонных решений нелинейного нестационарного уравнения Шредингера.
- □ Квазистатические решения (короткий инстантон, отвечающий статической оптимальной флуктуации) и динамические решения (длинный инстантон, отвечающий теории возмущений в высоком порядке). Физический смысл условия квазистатичности.

- □ Случай деформационного электрон-фононного взаимодействия: дополнительное туннельное решение.
- □ Случай поляризационного электрон-фононного взаимодействия. Флуктуационная “перезкранировка” кулоновского взаимодействия
- □ Двухчастичные (экситонные) эффекты

Литература

1. A.S.Ioselevich, E.I.Rashba, “Theory of Nonradiative Trapping in Crystals”, in: “Quantum Tunneling in Condensed Media”, eds Yu.Kagan, A.J.Leggett, North-Holland, Amsterdam, (1992), Chapter 7, p.347-425.
2. А.С. Иоселевич, Э.И. Рашба, Теория скорости автолокализации, ЖЭТФ, 88 (5), 1873-1897 (1985)
3. А.С. Иоселевич, Хвост оптического поглощения в полярных кристаллах и правило Урбаха, ЖЭТФ, 81 (4), 1508-1527 (1981)
4. А.С. Иоселевич, Многофононные процессы при поглощении света в гомеоплярных кристаллах. Автолокализация и классические решения, ЖЭТФ, 83 (2), 743-755 (1982)
5. А.С. Иоселевич, Правило Урбаха и экситонные эффекты, ЖЭТФ, 82 (2), 601-612 (1982)

5 Кулоновская блокада – за рамками нульмерного приближения

- □ Туннелирование и котуннелирование через нульмерный (маленький) объект.
- □ Туннелирование и котуннелирование через протяженный объект – квазиодномерную проволочку. Эволюция пространственного распределения заряда на стадии классически разрешенного движения и на стадии туннелирования.

Литература

1. Nazarov Y.V., Blanter Y.M. “Quantum Transport: Introduction to Nanoscience”, Cambridge University Press, 2009.
2. “Single Electron Tunnelling”, edited by H. Grabert and M. H. Devoret, (Plenum Press, New York and London, 1992).
3. L. S. Levitov and A. V. Shytov, JETP Letters 66, 214 (1997) and condmat/9607136.
4. M.V. Feigel'man, A.S. Ioselevich, Coulomb blockade for tunneling through a long island, Phys. Rev. B 90, 115108 (2014),
5. M.V. Feigel'man, A.S. Ioselevich, “Inelastic cotunneling through a long diffusive wire”, Письма в ЖЭТФ, 88 (11), 882-886 (2008)

6 Пример некогерентного процесса: захват электрона на заряженную примесь в полупроводнике.

- □ Захват электрона на связанное состояние, сопровождающийся излучением одного или нескольких фононов.
- □ Специфика кулоновской примеси: миграция электрона по высоко возбужденным кулоновским состояниям, сопровождающаяся постепенным понижением энергии за счет излучения каскада фононов.

Литература

1. Абакумов В.Н., Перель В.И., Ясиевич И.Н. Безызлучательная рекомбинация в полупроводниках. СПб. ПИЯФ им. Б.П.Константинова. 1997
2. M.Lax, Phys. Rev. 119, 1502 (1960)
3. Абакумов В.Н., Ясиевич И.Н., Сечение рекомбинации электронов на положительно заряженных центрах в полупроводниках, ЖЭТФ 71, 657, (1976)

7 Туннельные переходы квазиклассических спинов

- □ Магнитная примесь с большим спином при наличии магнитной анизотропии типа “легкая ось”. Скорость релаксации системы из парамагнитного в ферромагнитное состояние при включении продольного магнитного поля, нарушающего симметрию между двумя минимумами. Другая система: перемагничивание однодоменной

магнитной частицы.

- □ Лагранжево описание динамики спина. Уравнения движения в мнимом времени.
- □ Туннельный переход анизотропного квазиклассического спина между двумя эквивалентными минимумами под действием поперечного магнитного поля эквивалентность теории возмущений в высоком порядке.
- □ Переходы за счет взаимодействия спина с фононами. Температурная и полевая зависимости. Случаи оптических и акустических фононов.

Литература

1. Косевич А.М., Иванов Б.А., Ковалев А.С. Нелинейные волны намагниченности. Динамические и топологические солитоны, Киев, “Наукова думка”, 1983.
2. А.С. Иоселевич, Низкотемпературная релаксация анизотропного квазиклассического спина: туннельный переворот, Письма в ЖЭТФ, 45 (9), 445-448 (1987)
3. E.M.Chudnovsky, J.Tejada “Macroscopic Quantum Tunneling of the Magnetic Moment” (Cambridge Studies in Magnetism), Cambridge, 2005

7.Формы контроля знаний аспирантов

Тип контроля	Форма контроля	Параметры
Текущий	<i>Домашнее задание</i>	Задачи, выдаваемые студентам на дом.
Текущий	<i>Контрольные работы</i>	Задачи по темам курса.
Итоговый по дисциплине	<i>Экзамен</i>	Экзамен состоит из нескольких задач с разным весом. Аспиранты самостоятельно решают задачи, затем представляют свои решения в процессе устной беседы.

8. Критерии оценки знаний, навыков

Текущий контроль знаний по дисциплине «Нелинейные динамические процессы в квантовых системах с взаимодействием» осуществляется путем оценки усвоения материала при выполнении домашних заданий и контрольных работ. Каждое домашнее задание состоит из набора задач разной сложности. Решение части задач впоследствии обсуждается на занятиях.

Примеры задач из домашних заданий и контрольных работ:

1. Глубина прямоугольной потенциальной ямы $U(t)$ медленно растет, увеличиваясь за время T от нуля до величины U_0 , после чего плавно выходит на насыщение. Найдите вероятность того, что частица, первоначально находившаяся в свободном состоянии с энергией E , в конце процесса окажется захваченной на связанное состояние.

2. Исследуйте термоактивированное туннелирование в одномодовой модели нормального центра (“серповидный” адиабатический потенциал). Найдите поправку к закону Аррениуса при высоких температурах.

3. Найдите низкотемпературную поправку к вероятности автолокализации, если в системе имеются только оптические фононы.

4. То же при наличии акустических фононов. Почему эта поправка универсальна?

5. Какие типы спин-фононного взаимодействия допускаются симметрией? Какая физика стоит за различными допустимыми видами взаимодействия? Какие законы сохранения следуют из аксиальной симметрии задачи (если она присутствует) и как они влияют на температурную зависимость вероятности переворота большого спина фононами?

9. Порядок формирования оценок по дисциплине

Оценка определяется выполнением домашних заданий, контрольных работ и результатами итогового экзамена.