

Правительство Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
“Национальный исследовательский университет
“Высшая школа экономики””

Программа дисциплины
«Топологический порядок в физике твердого тела»

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

Авторы программы: П.А.Иоселевич, к.ф.-м.н., e-mail: pioselevich@hse.ru

Одобрена на заседании Академического совета аспирантской школы по физике

Москва - 2017

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: знакомство с современным состоянием теоретической и экспериментальной физики топологических материалов; освоение теоретических методов, используемых в этой науке.

3. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины аспирант должен:

Знать:

- методы теоретического описания и исследования систем с нетривиальными топологическими свойствами
- существующие экспериментальные подходы к изучению топологических явлений в физике конденсированного состояния
- перспективные направления в науке о топологических материалах

Уметь:

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

Иметь навыки (приобрести опыт):

- теоретического решения задач на топологические 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-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	ОПК-1	Демонстрирует способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической и прикладной физики с использованием современных физических методов исследования и информационно-коммуникационных технологий.	Лекционные занятия. Самостоятельная работа по изучению литературы и 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	Топологические фазы одномерных систем	12	4	8
2	Адиабатика и фаза Берри	12	4	8
3	Холловская проводимость	6	2	4
4	Топологические изоляторы в двумерии	18	6	12
5	Топологические изоляторы в трехмерии	18	6	12
6	Соответствие объем-граница и краевые моды	12	4	8
7	Топологические сверхпроводники и майорановские фермионы	12	4	8
8	Классификация топологических материалов и фаз	12	4	8
9	Топологические фазы в системах с межчастичным взаимодействием	8	2	4
	Итого	108	36	72

Аудиторные часы включают 6 часов контрольных работ.

6. Содержание дисциплины

1. Топологические фазы одномерных систем

Одномерная цепочка с прыжками между ближайшими соседями (tight-binding model). Киральная симметрия. Модель SSH (Su-Schrieffer-Heeger), ее топологические фазы и краевые состояния. Одномерный p-волновой сверхпроводник и китаевская цепочка.

2. Адиабатика и фаза Берри

Адиабатическая теория возмущений и фаза Берри. Кривизна Берри и теорема Стокса в параметрическом пространстве. Неабелева фаза Берри для вырожденных состояний.

Калибровочные свойства кривизны и фазы Берри.

3. Холловская проводимость

Эффект Холла в магнитном поле и аномальный эффект Холла. Роль нарушения Т-инвариантности. Связь холловской проводимости с кривизной Берри, число Черна. Эффект Холла на решетке в магнитном поле. Спиновый эффект Холла.

4. Топологические изоляторы в двумерии

Графен и модель Халдейна (Haldane). Т-инвариантность и топологический индекс в двумерии. Поляризация обращения времени (time-reversal polarisation). HgTe-CdTe — сэндвичи и инверсия щели в спектре.

5. Топологические изоляторы в трехмерии

Сильные и слабые топологические изоляторы, Z_2 -топологический индекс. Поверхностные состояния трехмерного ТИ, топологическая защита, антилокализация. Bi₂Sb₃, Bi₂Te₃ и другие экспериментальные реализации.

6. Соответствие объем-граница и краевые моды

Аргумент Лафлина и накачка заряда/спина/фермионной четности. Топологический фазовый переход и проникновение краевых мод в объем. Рассеяние краевых мод, туннелирование Клейна.

7. Топологические сверхпроводники и майорановские фермионы

Симметрия частица-дырка в сверхпроводнике и майорановские операторы. Локализованные майорановские моды. Фермионная четность и 4π -периодический джозефсоновский ток. Майорановское состояние в коре вихря. Неабелева статистика и квантовые вычисления на базе майорановских мод.

8. Классификация топологических материалов и фаз

Классы симметрий, периодическая таблица топологических изоляторов и сверхпроводников. Периодичность Ботта. Симметрические пространства гамильтониана, матрицы рассеяния и сигма-модели.

9. Топологические фазы в системах с межчастичным взаимодействием

Топология на языке функций Грина, классификация взаимодействующих систем, майорановская цепочка с взаимодействием.

7. Формы контроля знаний аспирантов

Тип контроля	Форма контроля	Параметры
Текущий	<i>Домашнее задание</i>	Письменные задания, выдаваемых 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 «Топологический порядок в физике твердого тела» 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. Квадратная двумерная решетка с прыжками между соседними узлами помещена в магнитное поле, соответствующее одной трети кванта потока на элементарную ячейку. Покажите, что спектр электронов на такой решетке состоит из трех зон. Вычислите холловскую проводимость системы, если химический потенциал находится в щели между зонами.

2. Имеется китаевская цепочка длины N в топологически нетривиальной сверхпроводящей фазе. Найдите энергию гибридизации майорановских мод, локализованных на ее концах. Получите пространственную зависимость зарядовой плотности полученного гибридизованного состояния.

3. Вычислите кривизну Берри для спина $3/2$ в магнитном поле как функцию этого поля.

9. Порядок формирования оценок по дисциплине

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

10. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Основная литература

1. B. Andrei Bernevig with Taylor L. Hughes, Topological Insulators and Topological Superconductors, Princeton University Press, 2013
2. Shun-Qing Shen, Topological Insulators – Dirac Equation in Condensed Matters, Springer, 2012.

Дополнительная литература:

1. János K. Asbóth, László Oroszlány, András Pályi, A Short Course on Topological Insulators – Band Structure and Edge States in One and Two Dimensions, Springer, 2016
2. M. Z. Hasan and C. L. Kane, Rev. Mod. Phys. **82**, 3045 – Published 8 November 2010
3. Xiao-Liang Qi and Shou-Cheng Zhang, Rev. Mod. Phys. **83**, 1057 – Published 14 October 2011