

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

Московский институт электроники и математики
Департамент прикладной математики
Кафедра прикладной математики

**Рабочая программа дисциплины «Физика конденсированной материи:
Основные идеи и современные вызовы»**

для любого уровня подготовки

Разработчик программы:

А.А. Соколик, к. ф.-м. н., aasokolik@yandex.ru, asokolik@hse.ru

Одобрена к реализации на заседании комиссии

«__» _____ 2015 г.

Утверждена «__» _____ 2015 г.

Руководитель Методического центра ДООП

«__» _____ 2015 г.

А.В. Серова _____

Москва, 2015

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



1 Область применения и нормативные ссылки

Настоящая программа учебной дисциплины устанавливает минимальные требования к знаниям и умениям студента и определяет содержание и виды учебных занятий и отчетности.

Программа предназначена для ведущих данную дисциплину преподавателей, учебных ассистентов, а также для изучающих дисциплину студентов и аспирантов.

2 Цели освоения дисциплины

Целями освоения дисциплины «Физика конденсированной материи: Основные идеи и современные вызовы» являются:

- освоение основных понятий физики конденсированного состояния материи;
- формирование у учащихся общей картины состояния дел в современной физике конденсированной материи.

3 Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

В результате освоения дисциплины студент должен:

Знать:

- основные типы конденсированной материи и их отличительные свойства;
- базовые закономерности квантового поведения одиночных частиц и систем многих частиц;
- каким образом основные свойства твердых тел связаны с характером квантовых состояний электронов в этих телах;
- основные проявления и микроскопические механизмы возникновения таких коллективных явлений, как сверхпроводимость, бозе-конденсация, сверхтекучесть, формирование сильно-коррелированных и тяжелофермионных систем;
- основные разновидности и свойства наноструктур;
- базовые закономерности поведения мягкой материи.

Уметь:

- ориентироваться в научной и научно-популярной литературе по физике конденсированной материи;
- понимать смысл научных новостей из области физики конденсированной материи.

Иметь навыки:

- поиска научной информации в области физики конденсированной материи в общедоступных источниках и ее интерпретации.

В результате освоения дисциплины студент осваивает следующие компетенции:

Компетенция	Код по ФГОС/ НИУ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
Способен учиться, приобретать новые знания, умения, в том числе в области, отличной от профессиональной	УК-1	Владеет основными понятиями физики конденсированной материи. Осваивает на основе полученных знаний новую информацию по тематике физики конденсированной материи.	Посещение лекций и семинаров, работа на семинарах, самостоятельная работа с материалами лекций
Способен работать с различными источни-	ПК-16	Находит и распознает релевантные источники информа-	Самостоятельная работа студента с дополнитель-



Компетенция	Код по ФГОС/НИУ	Дескрипторы – основные признаки освоения (показатели достижения результата)	Формы и методы обучения, способствующие формированию и развитию компетенции
ками информации, способен фильтровать и сужать массив знаний под задачу.		ции по тематике физики конденсированной материи. Работает с материалами, находя требуемую информацию и давая ей оценку и интерпретацию.	ными учебными материалами

4 Место дисциплины в структуре образовательной программы

Настоящая дисциплина является общеуниверситетским факультативом. Для освоения учебной дисциплины от студентов не требуется специальных знаний, за исключением владения английским языком на уровне, как минимум, чтения со словарем.

Знания и навыки, полученные учащимися в результате изучения данной дисциплины, могут быть использованы в дальнейшем при изучении дисциплин, касающихся электроники, физики наноструктур и математического моделирования физических процессов.

5 Тематический план учебной дисциплины

№	Название раздела	Всего часов	Аудиторные часы		Самостоятельная работа
			Лекции	Семинары	
1	Разновидности конденсированной материи	15	2	4	9
2	Особенности квантового движения частиц	31	4	8	19
3	Обычные и необычные твердые тела	31	4	8	19
4	Коллективные явления в конденсированной материи	31	4	8	19
	Наноструктуры	27	3	6	18
5	Физика мягкой материи	21	3	6	12
	Итого:	156	20	40	96

6 Формы контроля знаний студентов

Тип контроля	Форма контроля	3	4	Параметры **
Текущий	Самостоятельная работа	2-8 неделя	9-16 неделя	Письменная работа длительностью 5 минут в начале каждого занятия (за исключением первого) на понимание материалов, изученных на предыдущем занятии.
Итоговый	Экзамен		*	Устный экзамен с выделением 90 минут на подготовку. Задание включает два вопроса, случайно



				выбираемых студентом из списка теоретических вопросов по всем темам курса.
--	--	--	--	--

7 6.1. Критерии оценки знаний, навыков

При промежуточном контроле (самостоятельной работе) студент должен продемонстрировать усвоение основных понятий, изложенных на предыдущем занятии.

При итоговом контроле (экзамен) студент должен продемонстрировать знание основных понятий и навыки использования этих знаний для ответа на дополнительные вопросы преподавателя.

Оценки по всем формам текущего контроля выставляются по 10-ти балльной шкале.

8 Содержание дисциплины

Раздел 1. Разновидности конденсированной материи.

Что такое конденсированная материя и чем она интересна. Виды конденсированной материи: кристаллы, жидкости, аморфные вещества, стекла, квантовые жидкости и квантовые газы. «Жесткая» и «мягкая» конденсированная материя. Концепция симметрии и ее спонтанного нарушения. Кристаллы и их поверхность. Квазикристаллы: новая парадигма в кристаллографии. От «макро-» к «нано-»: системы пониженной размерности. Упорядоченные и неупорядоченные среды.

Раздел 2. Особенности квантового движения частиц. Классические и квантовые волны. Квантовомеханическая фаза, понятие когерентности. Принцип суперпозиции в квантовой механике. Корпускулярно-волновой дуализм, соотношение неопределенностей Гейзенберга. Парадоксы и интерпретации квантовой механики. Декогерентность и квантовый дарвинизм. Системы многих частиц в квантовой механике: сложности описания и способы их преодоления. Бозоны и фермионы. Энионы – частицы с дробной статистикой. Принцип Паули, электроны и дырки. Квантование полей, фотоны и фононы. Диаграммы Фейнмана и виртуальные частицы. Концепция эмерджентности: возникновение квазичастиц и коллективных возбуждений.

Раздел 3. Обычные и необычные твердые тела.

Распространение электронной волны в кристалле. Объяснение электрических, оптических и магнитных свойств твердых тел на языке квантовых состояний электронов. Неупорядоченные системы: масштабные преобразования, локализация, перколяция и мультифрактальность. Материалы с необычными электронными свойствами. Безмассовые электроны в графене, топологических изоляторах, дираковских и вейлевских полуметаллах. Тривиальная и нетривиальная топология квантовых состояний электронов. «Квантовая электродинамика на лабораторном столе»: проявления парадоксов и аномалий квантовой теории поля в графене и вейлевских полуметаллах.

Раздел 4. Коллективные явления в конденсированной материи.

Сверхпроводимость: наблюдаемые эффекты и современные применения. Механизм сверхпроводимости: объединение электронов в куперовские пары. Бозе-конденсация и сверхтекучесть, ультрахолодные квантовые газы и «волны материи». Сверхпроводящая электроника, гибридные системы и кубиты для квантовых вычислений. Сильно коррелированные системы: слом парадигмы одноэлектронной физики. Перестройка системы за счет сильных взаимодействий, спиновые жидкости. Высокотемпературные сверхпроводники и псевдощель в энергетическом спектре. Системы с тяжелыми фермионами. Нерешенные проблемы теории и эксперимента.



Раздел 5. Наноструктуры.

Как изготавливают наноструктуры. Специфика наноструктур: удержание электронов и квантовые когерентные явления. Миниатюризация и наноэлектронные устройства. Углеродные наноструктуры: графен, нанотрубки, наноленты, фуллерены. Оптика и плазмоника на наномасштабах. Современная физика наноструктур. Баллистический транспорт – «Святой Грааль» для электроники. Квантовый эффект Холла и его топологический характер. Магнитные краевые каналы. Квантовые точки, одноэлектронный транзистор. Квантовый хаос и его проявления в наноструктурах.

Раздел 6. Физика мягкой материи.

Тепловое движение частиц. Статистическое описание материи. Фазовые переходы: описание на языке параметра порядка. Универсальность и ренорм-группа в физике фазовых переходов. Мембраны в плоском и смятом состояниях. Жидкие и кристаллические мембраны. Полимеры. Жидкие кристаллы. Дефекты кристаллов, плавление. Особое положение двумерных систем.

9 Образовательные технологии

Лекции проходят в аудитории, оборудованной проектором, при помощи которого учащимся демонстрируются иллюстративные материалы (фотографии, микрофотографии, рисунки, графики, диаграммы). После проведения письменной самостоятельной работы в начале занятия будет проводиться разбор задач из этой работы в форме диалога учащихся с преподавателем. После занятий преподаватель рассылает в электронном виде дополнительные материалы по теме прошедшей лекции, которые студенты должны разбирать самостоятельно для хорошего усвоения учебного курса.

10 Оценочные средства для текущего контроля и аттестации студента

10.1 Тематика заданий текущего контроля

Примерные вопросы для самостоятельной работы:

1. Какие основные проявления сверхпроводимости наблюдаются в экспериментах?
2. Каковы преимущества сверхпроводящих магнитов над обычными электромагнитами?
3. В чем заключается эффект Мейснера?

10.2 Вопросы для оценки качества освоения дисциплины

1. Разновидности конденсированной материи. Кристаллы, жидкости, аморфные вещества, стекла, квантовые жидкости и квантовые газы, их отличительные свойства. «Жесткая» и «мягкая» конденсированная материя.
2. Концепция симметрии и ее спонтанного нарушения. Кристаллы и их поверхность. Квазикристаллы, особенности их структуры и электронных свойств. Системы пониженной размерности, примеры. Упорядоченные и неупорядоченные среды.
3. Особенности квантового движения частиц. Корпускулярно-волновой дуализм, соотношение де Бройля. Векторы состояния и принцип суперпозиции в квантовой механике. Квантовомеханическая фаза, понятие когерентности. Соотношение неопределенностей Гейзенберга.
4. Системы многих частиц в квантовой механике. Тождественность частиц, бозоны и фермионы. Частицы с дробной статистикой. Принцип Паули, заполнение электронами квантовых состояний. Электроны и дырки.



5. Квантованные поля. Фотоны и фононы. Взаимодействие фотонов и фононов с электронами. Изображение процессов распространения и взаимодействия частиц в виде диаграммы Фейнмана. Виртуальные частицы.
6. Электронные свойства кристаллов. Квантовые состояния электронов в кристалле, энергетические зоны. Связь электрических и оптических свойств кристаллов с характером электронных состояний. Магнетизм и его микроскопический механизм.
7. Неупорядоченные системы. Энергетические зоны в неупорядоченных веществах, локализация и порог подвижности. Поведение проводимости при масштабных преобразованиях. Применение теории перколяции к задачам о прыжковой проводимости.
8. Топологические материалы. Топологические и тривиальные изоляторы. Двухзонная модель, топологический инвариант и его геометрическая интерпретация. Классификация топологических изоляторов. Топологический магнитоэлектрический эффект.
9. Дираковские и вейлевские полуметаллы. Дираковские и вейлевские точки в электронной дисперсии, их устойчивость. Аксиальная аномалия в квантовой теории поля, ее физическое объяснение и проявления в вейлевских полуметаллах.
10. Сверхпроводимость. Основные экспериментальные проявления и технические применения. Куперовские пары, механизм их формирования. Эффект Джозефсона. Сверхпроводящие кубиты и гибридные системы.
11. Бозе-конденсация и сверхтекучесть. Условия для формирования бозе-конденсата. Сверхтекучесть: критерий Ландау и экспериментальные проявления. Ультрахолодные атомные газы: методы охлаждения. Газы в оптических решетках.
12. Сильно коррелированные системы. Переход Мотта-Хаббарда и формирование антиферромагнитной фазы. Сверхпроводящие купраты, сверхпроводящая щель и псевдощель. Тяжелофермионные системы – механизм формирования.
13. Наноструктуры. Методы изготовления наноструктур. Электронный конфайнмент и размерное квантование в наноструктурах различной размерности. Эффект электрического поля, принцип действия полевого транзистора.
14. Квантовый когерентный транспорт. Типы электронного транспорта: диффузионный, баллистический, фазово-когерентный. Слабая локализация и антилокализация. Эффект Ааронова-Бома. Квантование проводимости в одномерных каналах.
15. Квантовый эффект Холла. Уровни Ландау электронов в магнитном поле. Квантование холловской удельной проводимости. Топологический характер квантового эффекта Холла. Магнитные краевые каналы. Дробный квантовый эффект Холла.
16. Квантовые точки. Применения квантовых точек для генерации света и создания спазеров. Кулоновская блокада и одноэлектронный транзистор. Интегрируемые и хаотические бильярды, статистика их энергетических уровней.
17. Углеродные наноструктуры. Графен, электронная дисперсия в графене, допирование графена. Киральность электронов, клейновское туннелирование, квантовый эффект Холла в графене. Разновидности нанотрубок и их электронные свойства. Фуллерены.
18. Статистическая механика мягкой материи. Тепловое движение частиц и его статистическое описание. Распределение Гиббса, средние значения и флуктуации физических величин. Модель Изинга, модель ХУ, модель Поттса.
19. Фазовые переходы. Параметр порядка, модель Ландау для фазовых переходов второго рода. Характеристики фазовых переходов, критические индексы. Универсальность фазовых переходов. Ренорм-групповые преобразования и диаграммы.
20. Мембраны. Жидкие мембраны, средняя и гауссова кривизна. Кристаллические мембраны, плоская и смятая фазы. Анизотропные мембраны, трубчатая фаза. Дислокации, плавление мембран, гексатическая фаза.



11 Порядок формирования оценок по дисциплине

Текущий контроль осуществляется в виде письменных самостоятельных работ в начале каждого занятия кроме первого, всего 19 работ. Оценка за каждую самостоятельную работу O_n , где n -номер работы, вычисляется как 10, умноженное на долю правильных ответов.

Накопленная оценка вычисляется как среднее арифметическое оценок за все самостоятельные работы:

$$O_{\text{накопл}} = (O_1 + O_2 + \dots + O_{15})/19.$$

Итоговая оценка за дисциплину вычисляется как полусумма

$$O_{\text{итог}} = 0,5 O_{\text{накопл}} + 0,5 O_{\text{экзамен}}$$

накопленной оценки $O_{\text{накопл}}$ и оценки за экзамен $O_{\text{экзамен}}$.

Все оценки являются 10-балльными и округляются до целого числа баллов. Оценки округляются вверх. Перевод в 5-балльную шкалу осуществляется по правилу:

- $0 \leq O \leq 3$ - неудовлетворительно,
- $4 \leq O \leq 5$ - удовлетворительно,
- $6 \leq O \leq 7$ - хорошо,
- $8 \leq O \leq 10$ -отлично.

12 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Литература по разделу № 1 «Разновидности конденсированной материи»:

1. W. Kohn, An essay on condensed matter physics in the twentieth century, Rev. Mod. Phys. 71, S59 (1999).
2. N.C. Yeh, A perspective of frontiers in modern condensed matter physics, AAPS Bull. 18, No. 2 (2008).
3. В.И. Зиненко, Б.П. Сорокин, П.П. Турчин, Основы физики твердого тела, Физматлит, Москва, 2001.
4. T. Fujiwara, Y. Ishii, Quasicrystals, Elsevier, 2007.
5. F. Duan, J. Guojun, Introduction to condensed matter physics. Volume 1, World Scientific, 2005.

Литература по разделу № 2 «Особенности квантового движения частиц»:

1. А.Н. Матвеев, Атомная физика, Высшая школа, Москва, 1989.
2. A.I.M. Rae, Quantum mechanics, IOP Publishing, 2002.
3. М.Г. Иванов, Как понимать квантовую механику, РХД, Москва, 2012.
4. Р. Маттук, Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел, Мир, Москва, 1969.
5. Р. Хакен, Квантовополевая теория твердого тела, Наука, Москва, 1980.

Литература по разделу № 3 «Обычные и необычные твердые тела»:

1. Дж. Займан, Принципы теории твердого тела, Мир, Москва, 1974.
2. J. Patterson, B. Bailey, Solid-state physics, Springer, 2010.
3. Н.Н. Дегтяренко, Введение в физику неупорядоченных конденсированных систем, МИФИ, Москва, 2011.
4. Y. Ando, Topological insulator materials, arXiv:1304.5693v3.
5. T.O. Wehling, A.M. Black-Schaffer, A.V. Balatsky, Dirac materials, Adv. Phys. 76, 1 (2014).

Литература по разделу № 4 «Коллективные явления в конденсированной материи»:

1. Д.Р. Тилли, Дж. Тилли, Сверхтекучесть и сверхпроводимость, Мир, Москва, 1977.
2. W. Buckel, R. Kleiner, Superconductivity, Wiley, 2004.



3. C.J. Pethick, H. Smith, Bose-Einstein condensation in dilute gases, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2002.
4. P.A. Lee, Dopig a Mott insulator: Physics of high-temperature superconductivity, Rev. Mod. Phys. 78, 17 (2006).
5. P. Coleman, Heavy fermions: Electron at the edge of magnetism, arXiv:0612006v3.

Литература по разделу № 5 «Наноструктуры»:

1. А.Я. Шик, Л.Г. Бакуева, С.Ф. Мусихин, С.А. Рыков, Физика низкоразмерных систем, Наука, Санкт-Петербург, 2001.
2. T. Heinzel, Mesoscopic electronics in solid state nanostructures, Wiley, 2007.
3. A.K. Geim, K.S. Novoselov, The rise of graphene, Nature Mater. 6, 183 (2007).
4. M.S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, Ph. Avouris, Carbon nanotubes, Springer, 2000.
5. J.E. Avron, D. Osadchy, R. Seiler, A topological look at the quantum Hall effect, Phys. Today, aug. 2003, 38.

Литература по разделу № 6 « Физика мягкой материи »:

1. Е.И. Кац, В.В. Лебедев, Физика мягкой материи, Учебное пособие, МФТИ, 2013.
2. J.M. Yeomans, Statistical physics of phase transitions, Clarendon Press, Oxford, 1992.
3. P.M. Chaikin, T.C. Lubensky, Principles of condensed matter physics, Cambridge Univ. Press, 1995.
4. К. Вильсон, Дж. Когут, Ренормализационная группа и эpsilon-разложение, Мир, Москва, 1975.
5. M.J. Bowick, A. Travasset, The statistical mechanics of membranes, arXiv:0002038v1.

13 Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для проведения лекций используется проектор.