

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (НИ ТГУ)

Физический факультет

УТВЕРЖДЕНО:  
Декан физического факультета  
С.Н. Филимонов

Оценочные материалы по дисциплине

**Физика низкоразмерных структур**

по направлению подготовки  
**03.03.02 Физика**

Направленность (профиль) подготовки:  
**«Фундаментальная и прикладная физика»**

Форма обучения  
**Очная**

Квалификация  
**Бакалавр**

Год приема  
**2025**

СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОП  
С.Н. Филимонов

Председатель УМК  
О.М. Сюсина

Томск – 2025

## **1. Компетенции и индикаторы их достижения, проверяемые данными оценочными материалами**

Целью освоения дисциплины является формирование следующих компетенций:

- ОПК-2 – способность проводить научные исследования физических объектов, систем и процессов, обрабатывать и представлять экспериментальные данные;
- ПК-1 Способен проводить научные исследования в выбранной области с использованием современных экспериментальных и теоретических методов, а также информационных технологий.

Результатами освоения дисциплины являются следующие индикаторы достижения компетенций:

ИОПК-2.2 Анализирует и интерпретирует экспериментальные и теоретические данные, полученные в ходе научного исследования, обобщает полученные результаты, формулирует научно обоснованные выводы по результатам исследования;

ИПК-1.1 Собирает и анализирует научно-техническую информацию по теме исследования, обобщает научные данные в соответствии с задачами исследования.

## **2. Оценочные материалы текущего контроля и критерии оценивания**

Элементы текущего контроля.

I. По дисциплине «Физика низкоразмерных систем» предусмотрены тесты по разделам: Темы 1-4 (ИПК 1.1, ИОПК 2.1). Тесты размещены в системе LMS Moodle ТГУ (Learning Management System Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) по ссылке: <https://moodle.tsu.ru/course/view.php?id=32993>

Тесты по курсу составлены на основе банка вопросов в курсе Moodle.

Пример теста к вводу разделу курса.

Вопрос: В чем отличие уравнения Дирака для графена от релятивистского уравнения Дирака? Допускается несколько ответов.

Ключи: 1) Отличается размерностью пространства-времени, 2) Отличие в максимальной скорости распространения.

Критерии оценивания: Прохождение теста при правильном ответе (100%) оценивается в 5 баллов. Максимальная оценка 100%; выбор ответа 1) оценивается в 60%; выбор ответа 2) оценивается в 40%, выбор остальных ответов 0%. Набранные баллы вычисляются системой.

II. По Темам 1-4 в курсе предусмотрены Задания (ИПК 1.1, ИОПК 2.1).

Пример Задания по Теме 1.

### **Задание по теме Уравнение Дирака для графена**

Дать ответы (в виде файла или текста) на контрольные вопросы по теме.

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте основную идею метода сильной связи.
2. Найдите закон дисперсии квазичастиц в графене.
3. Каким условиям должно удовлетворять внешнее электромагнитное поле, для того чтобы оно могло быть учтено в модели Дирака для графена?
4. Сколько существует неэквивалентных точек Дирака?

Студенты выполняют задание в форме эссе.

Критерии оценивания: Представленный файл эссе оценивается по форме элемента Задание системы Moodle: «простое непосредственное оценивание» по шкале в форме Pass/Fail (зачтено/не зачтено).

III. Контрольная работа по курсу проводится в виде решения 2х задач из банка задач (ИПК 1.1, ИОПК 2.2). Примеры задач из контрольных работ.

Задача 1. Покажите, что в точках Дирака энергия квазичастиц в графене минимальна.

Задача 2. Найти решение уравнения Дирака для графена в отсутствие внешних полей. Чему равна энергия квазичастиц?

Ключ:  $E = \pm v_F |p|$ .

Критерии оценивания: результаты контрольной работы определяются оценками «зачтено» и «не зачтено». Оценка «зачтено» выставляется, если студент предъявляет правильные письменные решения двух задач, то есть для каждой задачи способен обосновать метод решения, понимает используемые термины и формулы и получил правильный ответ. При невыполнении указанных критериев оценки «зачтено» выставляется оценка «не зачтено».

IV. Для углубленного изучения курса по основным разделам курса студентам предлагаются темы для рефератов (ОПК-2, ПК-1).

**Темы для рефератов** и учебно-методическая литература для самостоятельной работы по разделам дисциплины «Физика низкоразмерных систем»:

Тема 1. Четырехмерное уравнение Дирака для графена.

Задача реферата – вывести четырехмерное уравнение Дирака для графена в присутствии внешнего плавно меняющегося на масштабе постоянной решетки электромагнитного поля.

Литература:

1. Wong, H-S. Philip, and Deji Akinwande. Carbon nanotube and graphene device physics. Cambridge University Press, 2011.
2. Atienza, Pablo Buset. Superconductivity in Graphene and Carbon Nanotubes: Proximity effect and nonlocal transport. Springer Science & Business Media, 2013.

Тема 2. Самосопряженные расширения оператора Дирака в присутствии кулоновской примеси.

Найти все самосопряженные расширения оператора Дирака для графена в кулоновском поле кулоновской примеси.

Литература:

1. Gitman D. M., Tyutin I. V., Voronov B. L. Self-adjoint extensions in quantum mechanics: general theory and applications to Schrödinger and Dirac equations with singular potentials. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 62.
2. Бреев А. И. и др. Спектры электронных возбуждений в графене в окрестности кулоновских примесей //Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2020. – Т. 157. – №. 5. – С. 847-876.

Тема 3. Электронные свойства углеродных нанотрубок.

Литература:

- 1) Углеродные нанотрубки, А. В. Елецкий, УФН, сентябрь 1997 г., т. 167, № 9, ст. 955
- 2) Углеродные нанотрубки и их эмиссионные свойства, А. В. Елецкий, УФН, апрель 2002 г., т. 172, № 4, ст. 408

Тема 4. Симметрии уравнения Дирака для графена.

Литература:

- 1) В.Л. Березинский, Низкотемпературные свойства двумерных систем с непрерывной группой симметрии, Москва, Физматлит, 2007
- 2) Ю.Е. Лозовик, С.П. Меркулова, А.А. Соколик. Коллективные электронные явления в графене // УФН 178, No. 7, сс. 757–776 (2008).

### **3. Оценочные материалы итогового контроля (промежуточной аттестации) и критерии оценивания**

**Зачет в 8 семестре** проводится в устной форме по экзаменационным билетам.

Билет содержит два теоретических вопроса, проверяющие компетенции ИПК 1.1, ИОПК 2.2. После ответа на билет студент отвечает на уточняющие и дополнительные

вопросы из открытого перечня вопросов экзаменационных билетов, открытого банка задач, тестов (п. 2), направленные на проверку достижения ИПК 1.1 и ИОПК 2.2.

Примерный перечень теоретических вопросов.

Вопрос 1. Объясните отсутствие лоренц-инвариантности в уравнении Дирака для графена.

Вопрос 2. В чем заключается квантовый эффект Холла в графене.

Примеры задач.

Задача 1. Найдите кратность вырождения уровней Ландау в графене.

Задача 2. Получите уравнение описывающее закон дисперсии в графене.

Отметка «Зачтено» ставится студенту при правильном ответе не менее чем на 60% вопросов билета и дополнительных вопросов.

**Открытый перечень вопросов, выносимых на зачет.**

Перечень выносимых на зачет вопросов по темам 1-4.

1. Электронные свойства графена.
2. Суть приближения сильной связи.
3. Низкоэнергетическое приближение. Вывод закона дисперсии.
4. Зонная структура графена.
5. Вывод уравнения Дирака для графена.
6. Свойства уравнения Дирака для графена.
7. Четырехмерное уравнение Дирака для графена.
8. Графен в постоянном однородном магнитном поле.
9. Квантовый эффект Холла в полупроводниках.
10. Квантовый эффект Холла в графене
11. Уровни Ландау для графена в однородном постоянном магнитном поле.
12. Парадокс Клейна в графене для ступеньки Клейна.
13. Парадокс Клейна в графене для потенциального барьера конечной ширины.
14. Роль киральности в парадоксе Клейна.
15. Клейновское туннелирование в монослое графена.
16. Клейновское туннелирование и проводимость квазичастиц в графене.
17. Рассеяние дираковских квазичастиц на точечных кулоновских примесях.
18. Квазилокальные состояния в окрестности кулоновской примеси.
19. Сверхкритические заряды.
20. Нелинейное экранирование на кулоновских примесях.
21. Электрон-электронное кулоновское взаимодействие и перенормировка скорости Ферми.
22. Самосопряженные расширения уравнения Дирака для графена в присутствии кулоновской примеси: массивный и безмассовый случай.

Критерии оценивания.

В курсе «Физика низкоразмерных систем» используется балльно-рейтинговая система оценки знаний. Максимальная сумма баллов по дисциплине составляет 100 баллов и формируется следующим образом: 60 баллов по результатам текущей аттестации и 40 баллов по результатам промежуточной аттестации (зачет). Итоговая оценка по дисциплине складывается из суммы баллов, полученной по итогам текущего контроля и промежуточной аттестации (устного зачета).

Текущая аттестация включает:

- активность студента на практических занятиях (0-15 баллов); весь семестр разбит на 3 этапа по четыре недели, баллы выставляются в конце каждого этап (0-5 баллов).
- результаты выполнения контрольных работ (0-15 баллов),
- реферат (0-20 баллов), при невыполнении срока сдачи реферата за каждую

просроченную неделю снимается 5 баллов.

- Промежуточная аттестация подразумевает проведение теоретического зачета в устной форме, который предусматривает дифференцированное оценивание ответа (0-40 баллов). К зачету допускаются только студенты, успешно прошедшие текущую аттестацию и выполнившие все практические задания. Каждый билет состоит из двух теоретических вопросов.

#### **4. Оценочные материалы для проверки остаточных знаний (сформированности компетенций)**

Тест (ИОПК-2.2.).

1. Сколько существует неэквивалентных точек Дирака?

а) 1.

б) 2.

в) 6.

Ключи: б).

Задачи (ИПК-1.1).

Задача 1. Объясните проблему описания квазичастиц в графене в окрестности одиночной точечной кулоновской примеси.

Ответ. Проблема состоит в сингулярности кулоновского потенциала, что приводит к необходимости выбора оператора Дирака из множества самосопряженных расширений начального оператора Дирака.

Задача 2. Вычислите степень вырождения нулевого уровня Ландау в графене в присутствии внешнего однородного постоянного магнитного поля.

Ответ. Степень вырождения равна  $2eHL_xL_y/(2\pi\hbar c)$ .

Теоретические вопросы (ИПК 1.1, ИОПК 2.2):

1. Какие особенности имеет зонная структура графена?
2. В чем заключается суть приближения сильной связи?
3. Объясните, когда справедливо низкоэнергетическое приближение при описании квазичастиц в графене?
4. Получите закон дисперсии квазичастиц в графене.
5. Какие свойства уравнения Дирака для графена отличаются от обычного лоренц-инвариантного уравнения Дирака?
6. Объясните парадокс Клейна в графене. Какова роль киральности в парадоксе Клейна?
7. Как связана проводимость квазичастиц в графене с клейновским туннелированием?
8. Какие заряды кулоновской примеси называются сверхкритическими?
9. Опишите процесс нелинейного экранирования на кулоновских примесях в графене.
10. Какие дефекты в монослое графена могут быть описаны при помощи модели Дирака введением эффективного калибровочного поля?

#### **Информация о разработчиках**

Бреев Александр Игоревич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической физики ФФ НИ ТГУ.