

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**  
**Проректор по учебной работе**

**А.А. Воронов**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Физика конденсированного состояния
<b>по направлению:</b>	Прикладные математика и физика
<b>профиль подготовки:</b>	Общая и прикладная физика Физтех-школа физики и исследований им. Ландау кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау
<b>курс:</b>	4
<b>квалификация:</b>	бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 75 час.

Всего часов: 135, всего зач. ед.: 3

Программу составил: А.В. Михеенков, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической физики им. Л.Д. Ландау 28.05.2021

## Аннотация

Курс "Физика конденсированного состояния" посвящен изучению ряда современных разделов физики конденсированного состояния, которые, с одной стороны, интенсивно развиваются, а с другой – практически не затрагиваются в стандартном учебном плане МФТИ. Некоторые из этих разделов существуют давно, но остаются актуальными (пример – сильные корреляции), некоторые возникли недавно (квантовый симулятор). Кроме чисто теоретических вопросов, будут рассматриваться и темы с большим упором на эксперимент. Это, например, металлический водород, где пока эксперимент заведомо важнее теории, или ВТСП, где теории слишком много, и нужен обзор опорных положений эксперимента. Будут представлены основные теоретические и численные подходы в каждой из затрагиваемых областей.

Предполагается обратить особое внимание на единство современной физики (в частности, физики конденсированного состояния), связи различных ее разделов между собой и, что не менее важно, на их происхождение из базовых (изучаемых в МФТИ) положений квантовой механики, статистической физики, кинетики... Планируется знакомство не только с учебной литературой, но и с ключевыми текущими публикациями, в также отсылка к читаемым на кафедре теоретической физики специализированным курсам по выбору.

## 1. Цели и задачи

### Цель дисциплины

Дать студентам базовые знания, необходимые для понимания ряда современных разделов физики конденсированного состояния, которые, с одной стороны, интенсивно развиваются, а с другой – практически не затрагиваются в стандартном учебном плане МФТИ. Некоторые из этих разделов существуют давно, но остаются актуальными (пример – сильные корреляции), некоторые возникли недавно (квантовый симулятор). Кроме чисто теоретических вопросов, будут рассматриваться и темы с большим упором на эксперимент. Это, например, металлический водород, где пока эксперимент заведомо важнее теории, или ВТСП, где теории слишком много, и нужен обзор опорных положений эксперимента. Предполагается обратить особое внимание на единство современной физики, связи различных ее областей между собой и, что не менее важно, на их происхождение из базовых (изучаемых в МФТИ) положений квантовой механики, статистической физики, кинетики... Планируется знакомство не только с учебной литературой, но и с ключевыми текущими публикациями, в также отсылка к читаемым на кафедре теоретической физики специализированным курсам по выбору.

### Задачи дисциплины

- Изучение современного состояния некоторых актуальных разделов физики конденсированного состояния;
- знакомство с не представленными в курсе теорфизики МФТИ методами теории конденсированного состояния;
- получение студентами представления о связи современных разделов между собой и с каноническим корпусом теорфизики.

## 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности

ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- Постулаты и принципы квантовой механики, квантовой и классической статистической физики, и физической кинетики, основы физики конденсированного состояния и основные методы описания электронного транспорта;
- основные идеи и методы современной теории конденсированного состояния;
- основные классы задач по упомянутым в курсе темам и их взаимные связи;
- основные аналитические и численные методы исследования упомянутых в курсе задач.

уметь:

- Определять, какая из изученных теоретических моделей адекватна конкретной экспериментальной ситуации;
- подбирать адекватный конкретной задаче аналитический и/или численный метод;
- выявлять аналогии и связи между различными областями современной физики конденсированного состояния;
- находить наиболее важные публикации в бесконечном объеме литературы.

владеть:

- Основными методами математического аппарата физики твердого тела, квантовой механики, квантовой статистической механики, физической кинетики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных с сильно коррелированными и другими затронутыми в курсе системами.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Сильные корреляции.	5	5		10
2	ВТСП и родственные вопросы.	5	5		11
3	Квантовая запутанность и т.п.	5	5		12
4	Искусственные и новые материалы .	5	5		12
5	Из топологии.	5	5		12
6	Квантовые фазовые переходы.	5	5		18
Итого часов		30	30		75
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		135 час., 3 зач.ед.			

##### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 8 (Весенний)

###### 1. Сильные корреляции.

Переход Мотта, модель Хаббарда, алгебра операторов Хаббарда, s-d модель. Электронные переходы, дробная валентность, модель Фаликова-Кимпбэлла, регулярная модель Андерсона. Тяжелые фермионы, резонанс Абрикосова-Сула-Нагаоки.

###### 2. ВТСП и родственные вопросы.

Высокотемпературная сверхпроводимость в купратах, пниктидах и гидридах. Альтернативные механизмы спаривания. Проблема основного состояния антиферромагнетика, фрустрация разных видов, низкоразмерный магнетизм, RVB. Спин-орбитальная модель Кугеля-Хомского, мультиферройки.

###### 3. Квантовая запутанность и т.п.

Квантовые – запутанность, информация, память, компьютер. ЭПР пара – синглет, неравенства Белла. Запутанность в твердом теле. Квантовые симуляторы (в том числе квантовые точки), холодные атомы в ловушках и искусственных решетках, модель Бозе-Хаббарда и другие порождаемые холодными атомами модели.

###### 4. Искусственные и новые материалы .

Фотонные кристаллы. Углеродные нанотрубки, фуллерены и т.п. Графен, задача Слончевского-Вейсса, связь с уравнением Дирака. Идеи альтернативной электроники. Металлический водород: Эксперимент и теория.

###### 5. Из топологии.

Топологический диэлектрик, топологически защищенные состояния, киральность, майорановские состояния в твердом теле, анионы, семионы, алгебра кос. Нормальный, аномальный и квантовый эффекты Холла.

6. Квантовые фазовые переходы.

Фракталы, береговая линия, множество Мандельброта, фрактальная (промежуточная) размерность, нечеткие множества, логика Заде.

## **5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)**

- а) Необходимое оборудование для лекций и практических занятий: доска, мел, тряпка, мультимедийное оборудование (проектор).
- б) Необходимое программное обеспечение: стандартная счетная программа (Matlab или Wolfram Mathematica), стандартная возможность воспроизведения форматов ppt и pdf.
- в) Обеспечение самостоятельной работы: наличие учебников по курсу и доступ в интернет.

## **6. Перечень рекомендуемой литературы**

### **Основная литература**

- 1. Матрица плотности. Представления и применение в статистической механике [Текст] : учеб. пособие для вузов. Ч. 1 / Ю. М. Белоусов, В. И. Манько ; Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— М. : МФТИ, 2004 .— 176 с.

### **Дополнительная литература**

- 1. Лекции по статистической физике [Текст] : учеб. пособие для вузов / Л. А. Максимов, А. В. Михеенков, И. Я. Полищук ; М-во образования и науки РФ, Моск. физ.-техн. ин-т (гос. ун-т) .— 2-е изд., испр. — М. : МФТИ, 2015 .— 320 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

Не используются

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

не предусмотрено программой

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

Студентам за семестр будут предложены 10 тестов. Кроме того, на дом будут предложены две контрольные работы. Контрольные работы содержат три уровня сложности. Типовые задачи будут рассмотрены на лекциях. Аналогичные задачи студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Будут отмечены задачи «верхней» сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Во время проведения дифференцированного зачета студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий, а также учебной, учебно-методической и справочной литературой. Перед началом зачетной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи дифференцированного зачета.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

**по направлению:** Прикладные математика и физика  
**профиль подготовки:** Общая и прикладная физика  
Физтех-школа физики и исследований им. Ландау  
кафедра теоретической физики им. Л.Д. Ландау  
**курс:** 4  
**квалификация:** бакалавр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 8 (весенний) - Дифференцированный зачет

**Разработчик:** А.В. Михеенков, д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-1 Способен применять фундаментальные знания, полученные в области физико-математических и (или) естественных наук, и использовать их в профессиональной деятельности	ОПК-1.1 Способен анализировать поставленную задачу, намечать пути ее решения
	ОПК-1.3 Способен определять границы применимости полученных результатов
ОПК-2 Способен использовать современные информационные технологии и программные средства при решении задач профессиональной деятельности, соблюдая требования информационной безопасности	ОПК-2.1 Способен применять современные вычислительную технику и сервисы сети Интернет в области (сфере) профессиональной деятельности
ОПК-3 Способен составлять и оформлять научные и (или) технические (технологические, инновационные) отчеты (публикации, проекты)	ОПК-3.1 Знает основные правила оформления научных публикаций и научно-технической документации, в том числе с использованием прикладного программного обеспечения
ОПК-4 Способен осуществлять сбор и обработку научно-технической и (или) технологической информации для решения фундаментальных и прикладных задач	ОПК-4.1 Владеет методами научного поиска и интеллектуального анализа информации при решении задач профессиональной деятельности
	ОПК-4.2 Знает основные источники научно-технической и (или) технологической информации в области профессиональной деятельности
ОПК-5 Способен участвовать в проведении фундаментальных и прикладных исследований и разработок, самостоятельно осваивать новые теоретические, в том числе, математические методы исследований, и работать на современной экспериментальной научно-исследовательской, измерительно-аналитической и технологической аппаратуре	ОПК-5.1 Способен решать поставленные задачи в области теоретических и экспериментальных исследований и разработок
ПК-1 Способен планировать и проводить научные эксперименты (в избранной предметной области) и (или) теоретические (аналитические и имитационные) исследования	ПК-1.1 Владеет фундаментальными понятиями, законами и теориями современной физики
ПК-2 Способен анализировать полученные в ходе научно-исследовательской работы данные и делать научные выводы (заключения)	ПК-2.1 Владеет методами статистической обработки и анализа научных данных
ПК-3 Способен выбирать и применять подходящее оборудование, инструменты и методы исследований для решения задач в избранной предметной области	ПК-3.1 Знает принципы работы и диапазоны рабочих параметров используемого научного оборудования
ПК-4 Способен критически оценивать применимость используемых методик и методов	ПК-4.1 Знает численные порядки величин, характерных для соответствующей профессиональной области

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Физика конденсированного состояния» обучающийся должен:

**знать:**

- Постулаты и принципы квантовой механики, квантовой и классической статистической физики, и физической кинетики, основы физики конденсированного состояния и основные методы описания электронного транспорта;
- основные идеи и методы современной теории конденсированного состояния;
- основные классы задач по упомянутым в курсе темам и их взаимные связи;
- основные аналитические и численные методы исследования упомянутых в курсе задач.

#### **уметь:**

- Определять, какая из изученных теоретических моделей адекватна конкретной экспериментальной ситуации;
- подбирать адекватный конкретной задаче аналитический и/или численный метод;
- выявлять аналогии и связи между различными областями современной физики конденсированного состояния;
- находить наиболее важные публикации в бесконечном объеме литературы.

#### **владеть:**

- Основными методами математического аппарата физики твердого тела, квантовой механики, квантовой статистической механики, физической кинетики;
- навыками теоретического анализа реальных задач, связанных с сильно коррелированными и другими затронутыми в курсе системами.

### **3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю**

1. Состояние трёхмерной частицы описывается нормированной волновой функцией  $\psi(x,y,z)$ . Какова вероятность того, что частица находится в интервале  $z_1 < z < z_2$ , а её импульс при этом — в интервале  $p_1 < p_y < p_2$ ?
2. Определите коэффициенты прохождения и отражения от потенциала  $U(x) = U_0 \tanh(x/a)$ .
3. Частица с массой  $M$  и зарядом  $e$  движения на кольце радиуса  $R$ . К системе прикладывается слабое электрическое поле  $E$  параллельно плоскости кольца. Определите поляризуемости всех уровней энергии.
4. Определите вероятность ионизации частицы, находящейся в связанном состоянии одномерной дельта-ямы, переменным электрическим полем с частотой  $\omega$  в двухфотонном приближении, при частотах  $E_0/2 < \omega < E_0$ , где  $E_0$  — энергия связанного состояния.
5. Спин-1/2 находится в магнитном поле, которое медленно вращается в плоскости  $yz$  по следующему закону:  $B(t) = B^*(0, 1/\cosh(\omega t), -\tanh(\omega t))$ .  
В начальный момент времени спин и магнитное поле направлены по оси  $z$ . Найдите в первом не исчезающем порядке вероятность того, что спин останется направленным по оси  $z$  после завершения вращения.
6. В одномерный ящик ширины  $L$  помещены три частицы, две из которых имеют массу  $m$ , а третья находится строго между ними и имеет массу  $M \gg m$ . Частицы взаимодействуют точечным образом так, что они оказываются непроницаемы друг для друга. Определите низколежащие уровни энергии такой системы.

### **4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся**

Примеры контрольных вопросов:

1. Переход Мотта.
2. Модель Хаббарда, алгебра операторов Хаббарда, s-d модель.
3. Электронные переходы, дробная валентность.
4. Модель Фаликова-Кимпэлла.
5. Регулярная модель Андерсона.
6. Резонанс Абрикосова-Сула-Нагаоки.
7. Высокотемпературная сверхпроводимость в купратах.
8. Высокотемпературная сверхпроводимость в пниктидах.
9. Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах.
10. Проблема основного состояния антиферромагнетика, фрустрация разных видов.
11. Низкоразмерный магнетизм.
12. Спин-орбитальная модель Кугеля-Хомского.



13. ЭПР пара – синглет, неравенства Белла.
14. Запутанность в твердом теле.
15. Квантовые точки.
16. Модель Бозе-Хаббарда.

Примеры экзаменационных билетов:

Билет 1.

1. Квазиклассические волновые функции в области свободного движения и под барьером.
2. Две задачи.

Билет 2.

1. Поправка к уровням энергии во втором порядке вырожденной теории возмущений.
2. Две задачи.

#### Критерии оценивания

Оценка "отлично" (10 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины, проявляющему интерес к данной предметной области, продемонстрировавшему умение уверенно и творчески применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (9 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, свободное и правильное обоснование принятых решений.

Оценка "отлично" (8 баллов) выставляется студенту, показавшему всесторонние, систематизированные, глубокие знания учебной программы дисциплины и умение уверенно применять их на практике при решении конкретных задач, правильное обоснование принятых решений, с некоторыми недочётами.

Оценка "хорошо" (7 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но недостаточно грамотно обосновывает полученные результаты.

Оценка "хорошо" (6 баллов) выставляется студенту, если он твёрдо знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач некоторые неточности.

Оценка "хорошо" (5 баллов) выставляется студенту, если он в основном знает материал, грамотно и по существу излагает его, умеет применять полученные знания на практике, но допускает в ответе или в решении задач достаточно большое количество неточностей.

Оценка "удовлетворительно" (4 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, недостаточно правильные формулировки базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, но при этом он освоил основные разделы учебной программы, необходимые для дальнейшего обучения, и может применять полученные знания по образцу в стандартной ситуации.

Оценка "удовлетворительно" (3 балла) выставляется студенту, показавшему фрагментарный, разрозненный характер знаний, допускающему ошибки в формулировках базовых понятий, нарушения логической последовательности в изложении программного материала, слабо владеет основными разделами учебной программы, необходимыми для дальнейшего обучения и с трудом применяет полученные знания даже в стандартной ситуации.

Оценка "неудовлетворительно" (2 балла) выставляется студенту, который не знает большей части основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубые ошибки в формулировках основных принципов и не умеет использовать полученные знания при решении типовых задач.

Оценка "неудовлетворительно" (1 балл) выставляется студенту, который не знает основного содержания учебной программы дисциплины, допускает грубейшие ошибки в формулировках базовых понятий дисциплины и вообще не имеет навыков решения типовых практических задач.

#### **5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности**

Дифференцированный зачет проводится в письменной форме по билетам. В каждом билете представлен теоретический вопрос и несколько задач.

При проведении дифференцированного зачета обучающемуся предоставляется 2 часа на подготовку. Опрос обучающегося не должен превышать одного астрономического часа.

### 3. Перечень типовых контрольных заданий, используемых для оценки знаний, умений, навыков (осенний семестр)

Аттестация по дисциплине Физика конденсированного состояния осуществляется в форме дифференцированного зачета после первого семестра изучения.

Дифференцированный зачет проводится по итогам работы студента в семестре в случае успешного освоения дисциплины. В случае, если студент не усвоил дисциплину и результаты его работы в семестре оказались неудовлетворительными, проводится дополнительный письменный опрос, а при необходимости и устный, на предмет выявления знаний. Дополнительный письменный опрос проводится в виде тестов, содержание которых полностью соответствует содержанию тестовых опросов студентов в течение семестра.

Умения и навыки студентов определяются по итогам сдачи тестов и контрольных работ. Всего студентам за семестр будут предложены 10 тестов. Кроме того, на дом будут предложены две контрольные работы. Контрольные работы содержат три уровня сложности. Типовые задачи будут рассмотрены на лекциях. Аналогичные задачи студенты должны решить самостоятельно, используя рекомендованную литературу. Будут отмечены задачи «верхней» сложности. Решение таких задач требует от студента навыков и представляет собой оценку навыков решения задач повышенной сложности.

Каждый вопрос задания оценен в определенную сумму баллов в зависимости от сложности и уровня (знания, умения и навыки). Полная сумма баллов примера контрольной работы равна 50.

Конкретные условия набора баллов за работу в семестре определяются лектором. Общим остается следующее правило. В течение семестра студент набирает сумму баллов по результатам тестовых опросов (например, 50 баллов), по результатам сдачи двух заданий (например, 80 баллов) и по результатам двух контрольных (например, 100 баллов). Кроме того, за решение задач повышенной сложности домашнего задания студент может набрать премиальные (бонусные) баллы по двум заданиям (например, 30 баллов). Полный балл оценивается в данном случае суммой 230 баллов. По результатам итогового рейтинга студент может набрать некоторую сумму, которая оценивается в % относительно полного балла.

Итоговая оценка дифференцированного зачета выставляется в соответствии со схемой, приведенной в следующем разделе.

#### Промежуточная аттестаци в виде тестов и контрольных работ

*Примеры вопросов в тестах:*

1. Перечислите основные модели сильно коррелированных систем, опишите их особенности и укажите области применения.
2. Укажите основные виды фрустрации в спиновых системах
3. Запишите неравенство Белла в случае синглетной ЭПР пары.
4. Запишите гамильтониан в модели Бозе-Хаббарда.
5. Запишите уравнение Дирака для электрона в графене.
6. Дайте определение майорановского фермиона в физике твердого тела.
7. Опишите физическую причину возникновения дробного квантового эффекта Холла.

*Примеры задач в контрольных работах:*

1. Вычислить энергию основного состояния модели Хаббарда в пределе сильной корреляции (по теории возмущений).
2. Вычислить энергию основного состояния модели Хаббарда в случае точного решения для двух узлов.
3. Построить основное состояние для  $S=1/2$  модели Гейзенберга на треугольнике, найти его связь с классической 120-градусной структурой.

#### Перечень вопросов для дифференцированного зачета

1. Переход Мотта.
2. Модель Хаббарда, алгебра операторов Хаббарда, s-d модель.
3. Электронные переходы, дробная валентность.
4. Модель Фаликова-Кимпзалла.
5. Регулярная модель Андерсона.
6. Резонанс Абрикосова-Сула-Нагаоки.
7. Высокотемпературная сверхпроводимость в купратах.
8. Высокотемпературная сверхпроводимость в пниктидах.
9. Высокотемпературная сверхпроводимость в гидридах.
10. Проблема основного состояния антиферромагнетика, фрустрация разных видов.
11. Низкоразмерный магнетизм.
12. Спин-орбитальная модель Кугеля-Хомского.
13. ЭПР пара – синглет, неравенства Белла.
14. Запутанность в твердом теле.
15. Квантовые точки.
16. Модель Бозе-Хаббарда.

17. Фотонные кристаллы.
18. Углеродные нанотрубки, фуллерены.
19. Графен, задача Слончевского-Вейсса, связь с уравнением Дирака.
20. Металлический водород: Эксперимент и теория.
21. Топологический диэлектрик, топологически защищенные состояния.
22. Киральность, майорановские состояния в твердом теле.
23. Анионы, семионы.
24. Нормальный, аномальный и квантовый эффекты Холла.
25. Фракталы, множество Мандельброта, фрактальная (промежуточная) размерность.
26. Квантовые фазовые переходы.

#### 4. Критерии оценивания (дифференцированный зачет)

Оценка	Набранные баллы
отлично (10)	более 90%
отлично (9)	от 80% до 90% включительно
хорошо (8)	от 70% до 80% включительно
хорошо (7)	от 60% до 70% включительно
хорошо (6)	от 50% до 60% включительно
удовлетворительно (5)	от 40% до 50% включительно
удовлетворительно (4)	от 30% до 40% включительно
удовлетворительно (3)	Требуется дополнительное тестирование по проблемным вопросам (темам)
неудовлетворительно (2)	Не получена удовлетворительная оценка в период зачетной сессии.

#### 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Во время проведения зачета студенты могут пользоваться программой дисциплины и сборниками домашних заданий, а также учебной, учебно-методической и справочной литературой. Перед началом зачетной сессии студенты получают перечень вопросов, ответы на которые необходимо знать для успешной сдачи зачета.