


**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ им. Л. Д. Ландау
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН)**

ПРИНЯТО
Ученым советом
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН
(протокол от 10 сентября 2021г. № _24_)

УТВЕРЖДАЮ
Директор ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н., И. В. Колоколов
«10» сентября 2021г.



**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
ОБЯЗАТЕЛЬНОЙ ДИСЦИПЛИНЫ Б1.В.ОД.1
«Теоретическая физика»**

По направлению подготовки: 03.06.01 Физика и астрономия

По направленности подготовки: 01.04.02 теоретическая физика
(1.3.3. Теоретическая физика)

Уровень образования: Подготовка кадров высшей квалификации

Квалификация: Исследователь. Преподаватель-исследователь

Форма обучения – очная

Рабочая программа обязательной дисциплины «Теоретическая физика» (Б1.В.ОД.1) для основной профессиональной образовательной программы высшего образования (ОПОП ВО) подготовки кадров высшей квалификации по направлению подготовки 03.06.01 Физика и астрономия по направленности подготовки 01.04.02 теоретическая физика (1.3.3. Теоретическая физика) составлена в соответствии с требованиями следующих нормативных документов:

1. Федеральный государственный образовательный стандарт высшего образования «Подготовка кадров высшей квалификации» по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ (ФГОС ВО), утверждённого приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 30.07.2014 №867 с изменениями и дополнениями от 30.04.2015 г.
2. Паспорт научной специальности 01.04.02 Теоретическая физика разработанный экспертами ВАК Минобрнауки РФ в рамках Номенклатуры специальностей научных работников, утвержденной приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 25.02.2009 г. № 59
3. Программа-минимум кандидатских экзаменов по специальностям 01.04.02 теоретическая физика и 01.04.07 физика конденсированного состояния с учетом особенностей сложившейся в ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН научной школы
4. Приказ Минобрнауки России от 04.02.2021 № 118 "Об утверждении номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученые степени, и внесении изменения в Положение о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, утвержденное приказом министерства образования и науки Российской Федерации от 10 ноября 2017 г. № 1093
5. Письмо ВАК от 13.05.2021 № 382-02 ВАК о Применении новой номенклатуры НС
6. Приказ Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561 о «О советах по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание учёной степени докторов наук»

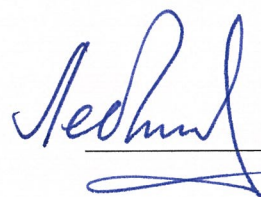
Автор/составитель ФОС по дисциплине:

д.ф.-м.н., доцент
10 сентября 2021 г.

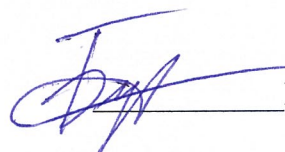
 М. А. Скворцов

«Согласовано»:


Г.н.с. ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН
Член-корр. РАН, д.ф.-м.н.


В.В. Лебедев

Зам. Директора по научной работе
ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН
д.ф.-м.н.


И.С. Бурмистров

Декан, профессор Факультета физики НИУ ВШЭ
д.ф.-м.н.


М.Р. Трунин

1. Паспорт научной специальности 01.04.02 теоретическая физика (1.3.3. Теоретическая физика)

Шифр специальности:

01.04.02 теоретическая физика (1.3.3. Теоретическая физика)

Формула специальности:

Теоретическая физика – область физики, занимающаяся математической формулировкой закономерностей физических явлений, наблюдаемых экспериментально. Теоретическая физика является единой наукой, внутренние связи в которой устанавливаются путем аналитических вычислений или численных расчетов и сравнением с экспериментальными данными. Ее фактическое содержание связано со всем историческим развитием физики. Целью исследований в области теоретической физики является наиболее полное описание фундаментальных физических законов.

Области исследований:

1. Теория конденсированного состояния классических и квантовых, макроскопических и микроскопических систем. Изучение различных состояний вещества и физических явлений в них. Статистическая физика и кинетическая теория равновесных и неравновесных систем.
2. Общая теория относительности и релятивистская астрофизика. Физические свойства материи и пространства-времени во Вселенной. Классическая и квантовая космология и гравитация.
3. Теория фундаментальных взаимодействий и квантовая теория поля. Изучение явлений на малых масштабах и при больших энергиях. Разработка математических методов теории поля.
4. Общие вопросы квантовой механики: основы, теория измерений, общая теория рассеяния. Квантовая теория физических явлений в ядрах, атомах и молекулах.
5. Разработка теории мезоскопических систем. Квантовая теория информации и квантовые вычисления.
6. Развитие теории и исследования общих свойств и закономерностей нелинейной динамики сильно неравновесных систем. Разработка теории хаоса и турбулентности.

Отрасль наук:

физико-математические науки (за исследования, поименованные в пунктах 1-6)

2. Цель и задачи освоения дисциплины

Целью изучения настоящей дисциплины является подготовка квалифицированных научных кадров в области теоретической физики, способных вести научно-исследовательскую работу, самостоятельно ставить и решать актуальные научные и практические задачи.

Задачи дисциплины включают формирование у аспирантов системы знаний и основных понятий по современной теории калибровочных полей и развитие способности к научно-исследовательской работе и выработку потребности к самостоятельному приобретению знаний по теоретической физике.

3 Место дисциплины в структуре ОПОП ВО по направлению подготовки кадров высшей квалификации 03.06.01 ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

Обязательная дисциплина (Б1.В.ОД.1) **Теоретическая физика** относится к обязательным дисциплинам вариативной части Блока 1 «Дисциплины» основной профессиональной образовательной программы аспирантуры по направленности подготовки 03.06.01 физика и астрономия.

Программа обязательной дисциплины (Б1.В.ОД.1) **Теоретическая физика** состоит из двух частей. Первая часть имеет цель познакомить аспирантов с рядом областей физики конденсированного состояния, активно исследуемых в настоящее время, и простейших идей и методов, лежащих в основе теоретического описания соответствующих явлений. Вторая часть курса содержит последовательное изложение метода суперсимметричной сигма-модели в применении к неупорядоченным металлам. Подробно рассматривается процедура вывода сигма-модели для различных классов симметрии и ее пертурбативный анализ. Непертурбативные эффекты изучаются на примере пре локализованных состояний и точного решения квазиодномерной локализации. В заключительной части курса кратко излагается келдышевская техника для неравновесных систем и основанный на ней сигма-модельный подход.

4. Компетенции обучающегося, формируемые в результате освоения дисциплины

Общепрофессиональные компетенции:	
ОПК-1	способность самостоятельно осуществлять научно-исследовательскую деятельность в области теоретической физики с использованием современных методов исследования и информационно-коммуникационных технологий
Универсальные компетенции:	
УК-1	способность к критическому анализу и оценке современных научных достижений, генерированию новых идей при решении исследовательских и практических задач, в том числе в междисциплинарных областях
Профессиональные компетенции	

ПК-А	способностью самостоятельно выделять различные физические механизмы в физическом феномене, подбирать адекватные модели для описания этих механизмов (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-В	способностью применять на практике базовые общепрофессиональные знания теории и методов теоретической физики, в том числе микроскопическое и феноменологическое описание, теорию возмущений и диаграммный методы (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Г	способностью применять различные математические методы, такие как ТФКП, решение дифференциальных уравнений, применение теории групп, диаграммная техника, при исследовании математических уравнений
ПК-Д	готовность сотрудничать с экспериментальными группами по планированию физических экспериментов и анализу полученных экспериментальных данных, способностью выделять в экспериментальной ситуации отдельные физические феномены и составлять адекватную математическую модель, описывающую эти феномены (в соответствии с профилем подготовки)
ПК-Е	готовность к дальнейшему самообразованию и расширению компетенции, способностью локализовать общие принципы теоретической физики для нового физического феномена (в соответствии с профилем подготовки)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- фундаментальные законы и теории классической и современной физики;
- математические модели, используемые в теоретической физики;
- методы физического и математического моделирования различных процессов;

уметь:

- использовать свои знания для решения фундаментальных и прикладных задач;
- делать корректные выводы из сопоставления теоретических и экспериментальных результатов;
- выделять минимально достаточную систему определяющих параметров при моделировании реальных физических процессов;
- делать качественные выводы при анализе асимптотических режимов в изучаемых проблемах;
- осваивать новые предметные области и теоретические модели;
- пользоваться адекватным математическим аппаратом при решении практических задач;
- эффективно использовать IT-технологии и компьютерную технику;
- стремиться к построению фундаментальных физических теорий, способных объяснять и предсказывать качественно новые физические явления.

владеть:

- навыками построения минимальной модели, которая описывает все интересующие аспекты изучаемого физического феномена;
- навыками использования двух подходов: феноменологического, основывающегося на симметричных свойствах физического объекта, и микроскопического, основывающегося на свойствах и уравнениях движения микрочастиц, составляющих систему;
- навыками численного исследования модели, которое в случае достаточной полноты модели является численным экспериментом.

5. Объем дисциплины, виды учебной работы и форма отчетности

Вид учебной работы	Часов	ЗЕТ
Общая трудоемкость дисциплины	144	4
Аудиторные занятия:	56	1.55
лекции	56	1.55
Самостоятельная работа	78	2.17
Контроль	10	0.28

Форма отчетности: экзамен

6. Содержание и структура дисциплины

6.1. Учебный план по дисциплине

№	Название тем	Количество часов				Всего
		лек.	семинары	СР	К	
1.	Концепции современной теоретической физики	24	-	38	5	67
2.	Функциональные методы в теории твердого тела	32	-	40	5	77
	Итого часов:	56	-	78	10	144

6.2. Содержание лекционного курса

Часть 1. Концепции современной теоретической физики

1. Квазичастицы.

50 лет тому назад: теория Ландау для Ферми-жидкости (металлы и гелий-3), Бозе-жидкости (гелий-4) и фазовых переходов (например, сверхпроводящего или ферромагнитного). Все это основано на идее «квазичастиц» - слабо взаимодействующих «комбинаций» исходных частиц, которые взаимодействуют сильно. Задача похожа, на выбор правильных (разделяющихся) переменных для уравнения в частных производных. Здесь все эти переменные — волновые: квазичастицы имеют определенный волновой вектор (или импульс). Что будет, если система слишком «грязная» или если взаимодействие слишком сильное?

2. Спиновые стекла, модели памяти и задачи оптимизации: задачи о сложном порядке.

Спиновое стекло — это случайная смесь ферро- и анти-ферро магнетиков, перемешанных на межатомном масштабе, например, сплавы $\text{Cu}_{1-x}\text{Mn}_x$ или $\text{Au}_{1-x}\text{Fe}_x$ при $x \approx 0,01$. Прямых технологических применений не имеет. Модельная система для исследования всего очень сильно неупорядоченного. Теория спиновых стекол создается уже 35 лет и все еще далека от завершения. Но уже дала важнейший толчок исследованию «ассоциативной» (похожей на биологическую) памяти и созданию принципиально новых алгоритмов для решения сложных задач оптимизации.

3. Локализация волн беспорядком: электроны, фотоны, фононы.

Распространение волн в случайных средах: рассеяние, диффузия и локализация. Как остановить бегущую волну, не имея «стенок», но лишь точечные примеси? Сходства и различия световых и электронных волн. Размерность среды ($d=1,2,3$) и почему она важна.

4. Квантовые фазовые переходы: как один порядок сменяет другой.

Волны становятся частицами: кристаллизация сверхтекучего гелия давлением. Затвердевание электронной жидкости: переход типа «металл-изолятор» по Мотту. Как сверхпроводник превращается в изолятор, и почему такой изолятор «чувствует» магнитное поле.

5. Нанопизика и квантовый транспорт: электронов уже очень много, но для выполнения законов макромира - недостаточно.

Кулоновская блокада: как и где ловятся отдельные электроны? Измерение тока поштучным подсчетом электронов. Можно ли различить свойства системы из 1000000000 и 1000000001 электронов? Как заметить сдвиг всего одной примеси в тонкой проволоке? Какая польза физике от совершенно случайных матриц? Закон Ома навыворот: деление сопротивлений в последовательной цепи.

6. Как из квантовой механики возникает термодинамика? Превращение квантовой системы в классическую, «стрела времени» и перенос тепла.

Почему частота переходов инверсии в аммиаке NH_3 зависит от изотопического состава по водороду? Почему таких переходов в PF_3 никто не видел? Как ввести трение в квантовую механику? Квантовая система и «тепловой резервуар». Как трение подавляет квантовые процессы и откуда берется необратимость процессов во времени? Как «тепловой резервуар» возникает из набора от-

дельных частиц?

7. Графен и топологические изоляторы: причуды зонных структур и релятивистская физика на столе.

Как из прыжков по гексагональной решетке возникают электронные возбуждения с линейным спектром (вроде нейтрино). Почему электрон в графене очень трудно остановить. Как необычная топология зонной структуры изолятора «создает» проводящие состояния на его поверхности.

8. Квантовые магнетики и спиновые жидкости: задачи о скрытом порядке.

Теорема Нернста (она же - 3-е начало термодинамики) сообщает, что энтропия большой системы в расчете на одну частицу должна быть равна нулю при температуре, стремящейся к абсолютному нулю. Если это система локализованных магнитных моментов (спинов) то обычно при низких температурах они выстраиваются упорядоченно: все параллельно (ферромагнетик) или антипараллельно через один (антиферромагнетик). Однако иногда никакого столь наглядного упорядочения не наблюдается до самых низких достигнутых температур. Такие состояния вещества обобщенно называются «спиновая жидкость». Их теория еще не создана, но кое-что — что удалось уже понять — будет рассказано на этой лекции.

9. Квантовый эффект Холла и его «родственники».

Целочисленный и дробный эффекты Холла. Что такое квант сопротивления и как его измерить. Как измерить рациональные дроби при помощи вольтметра. Спиновый аналог эффекта Холла. Топологические фазы вещества. Возбуждения с дробным зарядом $e/3$ и $e/5$, и как их смогли «увидеть».

10. «Сильные корреляции»: как теряются и находятся квантовые числа. Объединение и «дробление» частиц.

Сверхпроводимость: электроны ходят парами. Эффект Кондо: электронная шуба скрывает спин. Магнитный монополю как возбуждение в «спиновом льде». Одномерные проводящие полимеры и квазичастицы с зарядом $e/2$. Высокотемпературная сверхпроводимость и распад электрона на «спинон» (спин без заряда) и «холон» (заряд без спина).

11. Сверхпроводниковые квантовые биты: как построить квантовый компьютер.

Квантовые вычисления: чем квантовый компьютер отличается от обычного, почему и когда он быстрее. Кубиты: из чего состоит квантовый компьютер. Кубиты из сверхпроводниковых контактов, квантовые операции и алгоритмы. Квантовое измерение: как «измерить волновую функцию» квантового бита.

Часть 2. Функциональные методы в теории твердого тела

12. Теория случайных матриц. Взгляд математика. Отталкивание уровней. Совместная функция распределения собственных значений. Метод ортогональных полиномов. Распределение ближайших соседей. Флуктуации числа уровней в полосе. Нестандартные ансамбли случайных матриц.

13. Грассмановы переменные. Основы суперсимметричного подхода.

14. Плотность состояний для GUE. Усреднение одной функции Грина; вигнеровский полукруг; роль различных седел.

15. Суперсимметричная сигма-модель для GUE. Вывод сигма-модели для парного коррелятора; интегрирование по седловому многообразию.

16. Суперсимметричная сигма-модель для неупорядоченного металла. Вывод сигма-модели; учет магнитного поля. Диффузоны и купероны.

17. Теория возмущений в суперсимметричной сигма-модели. Ренормгруппа для двумерного металла. Нульмерный предел и теория случайных матриц. Роль «южного полюса» фермионной сферы. Поправки к парному коррелятору за счет пространственных мод.

18. Аномально локализованные состояния. Инстантоны в сигма-модели.

19. Квазиодномерная локализация. Решение с помощью метода трансфер-матрицы. Плотность состояний на нижнем уровне Ландау в присутствии беспорядка.

20. Кинетическое уравнение для электронов в грязном металле. Техника Келдыша: общие замечания. Техника Келдыша: функциональное представление. Экранированный кулоновский потенциал. Собственно-энергетическая часть в первом порядке по экранированному взаимодействию. Кинетическое уравнение. Время электрон-электронных столкновений.

21. Поглощение энергии для зависящих от времени случайных матриц. Параметрическая статистика уровней. Два режима поглощения. Адиабатический предел. Формула Кубо.

22. Келдышевская техника для неравновесных систем. Квантовая поправка к омической диссипации.

23. Статистика уровней из Келдышевской сигма-модели.

24. Время сбоя фазы в системе взаимодействующих электронов. Теория Альтшулера-Аронова-Хмельницкого.

25. Усреднение по беспорядку в помощью метода реплик. Вывод функционала Гинзбурга-Ландау для грязных сверхпроводников.

26. Репличная сигма-модель для двумерного металла. Уравнения ренормгруппы.

27. Пространственные флуктуации в сверхпроводящих системах. Метод реплик. Репличная структура инстантонов. Плотность подщелевых состояний.

7. Самостоятельная работа аспирантов

Используются виды самостоятельной работы аспиранта: в читальном зале библиотеки, в учебных кабинетах, на рабочих местах с доступом к ресурсам Интернет и в домашних условиях. Порядок выполнения самостоятельной работы соответствует программе курса и контролируется собеседованием. Самостоятельная работа подкрепляется учебно-методическим и информационным обеспечением, включающим рекомендованные учебники и учебно-методические пособия, а также конспекты лекций.

8. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины и учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы аспирантов

Контрольные вопросы для проведения для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения дисциплины совпадают с пунктами содержания лекционного курса.

8.1. Пример экзаменационного билета

1. Как из квантовой механики возникает термодинамика? Превращение квантовой системы в классическую, «стрела времени» и перенос тепла.
2. Усреднение по беспорядку в помощью метода реплик. Вывод функционала Гинзбурга-Ландау для грязных сверхпроводников.

После окончания курса аспирантам дается набор экзаменационных вопросов.

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины.

9.1. Перечень литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

- [1] К.В.Efetov, "Supersymmetry in Disorder and Chaos", Cambridge University Press, New York, 1997.
- [2] M.L.Mehta, "Random Matrices", Academic Press, Boston, 1991.
- [3] A.D.Mirlin, "Proceedings of the International School of Physics 'Enrico Fermi'. Course CXLIII", eds. G.Casati, I.Guarneri and U.Smilansky, IOS Press, Amsterdam, 2000, pp.223-298 [[cond-mat/0006421](#)].
- [4] A.D.Mirlin, Phys. Rep. **326**, 259 (2000) [[cond-mat/9907126](#)].
- [5] T.Guhr, A.Mueller-Groeling, H.A.Weidenmueller, Phys. Rep. **299**, 189 (1998) [[cond-mat/9707301](#)].
- [6] Б.Л.Альтшулер, Б.И.Шкловский, ЖЭТФ **91**, 220 (1986).
- [7] A.V.Andreev and B.L.Altshuler, Phys. Rev. Lett. **75**, 902 (1995); A.V.Andreev, B.D.Simons, and B.L.Altshuler, J. Math. Phys. **37**, 4968 (1996).
- [8] В.А.Музыкantskii and D.Е.Khmelnitskii, Phys. Rev. B **51**, 5480 (1995).
- [9] Е.М.Лифшиц, Л.П.Питаевский, "Физическая кинетика", М., Физматлит, 2002.
- [10] J.Rammer, H.Smith, Rev. Mod. Phys. **58**, 323 (1986).
- [11] A.Kamenev and A.Andreev, Phys. Rev. B **60**, 2218 (1999).
- [12] М.А.Skvortsov, Phys. Rev. B **68**, 041306(R) (2003); D.M.Basko, М.А.Skvortsov, and

V.E.Kravtsov, Phys. Rev. Lett. **90**, 096801 (2003).

9.2. Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине (модулю)

См. список литературы

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

On-line доступ к журналам «Журнал экспериментальной и теоретической физики», «Письма в ЖЭТФ», к журналам: Physical Review Journals Published by the American Physical Society, к публикациям издательств Elsevier, Springer/Nature Publishing Group.

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

На лекционных занятиях используются мультимедийные технологии, включая демонстрацию презентаций.

10. Материально-техническое обеспечение дисциплины

аудиторный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН;
ноутбук, мультимедиа-проектор, экран;
рабочее место с выходом в Интернет;
библиотечный фонд ИТФ им. Л. Д. Ландау РАН