
ЭТЮДЫ ОБ УЧЁНЫХ

ОТ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ К КВАНТОВОМУ МЕТОДУ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ

К 90-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ АКАДЕМИКА Л.Д. ФАДДЕЕВА

© 2024 г. М.А. Семёнов-Тян-Шанский^{a,b,*}

^aСанкт-Петербургское отделение Математического института
имени В.А. Стеклова РАН, Санкт-Петербург, Россия

^bБургундский университет, Дижон, Франция

*E-mail: semenov@pdmi.ras.ru

Поступила в редакцию 04.03.2024 г.

После доработки 06.03.2024 г.

Принята к публикации 13.04.2024 г.

В статье рассказывается о жизни и творчестве физика-теоретика и математика, действительного члена АН СССР и РАН Л.Д. Фаддеева (1934–2017), становлении его научной школы. Работы Фаддеева по теории рассеяния, квантовой теории поля, классической и квантовой теории интегрируемых систем вошли в золотой фонд мировой науки и во многом определили лицо современной математической физики. Автор статьи — сотрудник созданной Л.Д. Фаддеевым лаборатории математических проблем физики Санкт-Петербургского отделения Математического института им. В.А. Стеклова РАН с момента её основания.

Ключевые слова: Л.Д. Фаддеев, теория рассеяния, квантовая проблема трёх тел, калибровочные поля, теория Янга–Миллса, теория интегрируемых систем, квантовые солитоны, классический и квантовый метод обратной задачи.

DOI: 10.31857/S0869587324040066, **EDN:** GENQBY

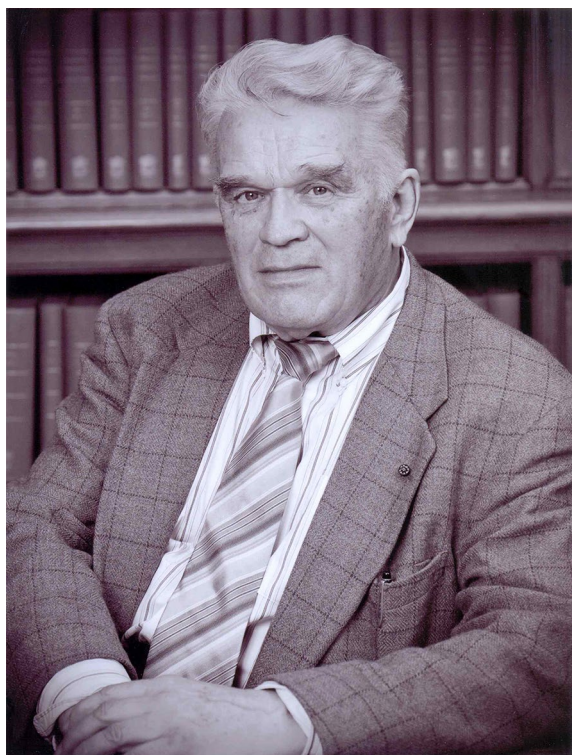
23 марта 2024 г. академику Людвигу Дмитриевичу Фаддееву исполнилось бы 90 лет. Время стремительно отодвигает от нас прошедшую эпоху, отмеченную блистательным расцветом в нашей стране математики и математической физики. За последние годы кроме Фаддеева ушли из жизни В.И. Арнольд, Ю.И. Манин, А.Б. Шабат, В.П. Маслов, В.Е. Захаров. Круг учеников и сотрудников Л.Д.¹ тоже поредел ещё с середины 1990-х годов.

Людвиг Дмитриевич был не только учёным первого ряда, он был замечательным учителем, воспитавшим несколько поколений учеников — старшие

из них были почти его ровесниками, а последние, которым пришлось защищать диссертации уже после его смерти, были моложе его на 60 лет. А ещё он выдающийся организатор науки, на протяжении четверти века был директором Ленинградского (затем Петербургского) отделения Математического института имени В.А. Стеклова АН СССР/РАН, организовал и долгие годы возглавлял Международный математический институт имени Леонарда Эйлера, многие годы возглавлял Отделение математических наук РАН. В советское время был одним из очень редких академиков и директоров институтов, никогда не вступавших в партию. В 1983–1990 годах он был вице-президентом, затем президентом Международного математического союза. История его многолетней борьбы за сохранение фундаменталь-

¹ Акроним “Л.Д.” постоянно использовался в разговорах сотрудников Фаддеева. В статье я называю его так же. Редкое имя Людвиг (в честь Бетховена) было дано ему отцом — Дмитрием Константиновичем — не только замечательным математиком, но и почти профессиональным пианистом. Родители хотели видеть сына музыкантом, но из-за войны эта мечта не реализовалась. Тем не менее музыка всегда играла в жизни Людвигу Дмитриевичу огромную роль; к своим любимым композиторам он относил Берлиоза и Рихарда Штрауса.

СЕМЁНОВ-ТЯН-ШАНСКИЙ Михаил Арсеньевич — доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией математических проблем физики ПОМИ РАН, почётный профессор Бургундского университета (Франция).



Людвиг Дмитриевич Фаддеев.
Фото с личного сайта Л.Д. Фаддеева

ной науки в России, его противостояния советской и российской бюрократии заслуживает отдельного рассказа, но здесь я не стану об этом писать — прежде всего потому, что эта борьба фактически окончилась поражением, и это уже совсем другая история. По случаю юбилея правильнее говорить о том, что, собственно, и составляло главное дело жизни Людвиг Дмитриевича — о его вкладе в развитие науки.

В 1993 г. старый друг Фаддеева и один из крупнейших физиков-теоретиков лауреат Нобелевской премии профессор Ч. Янг пригласил его прочесть именную лекцию в американском Университете Стони-Брук, учреждённую международным фондом Шао (спустя ещё 15 лет Л.Д. вместе с В.И. Арнольдом был удостоен премии Шао за “всеобъемлющие и важнейшие достижения в математической физике”). Каждый выступающий с такой лекцией получает специальный сувенир — маленькую кофейную чашку, на которой перечислены его главные научные достижения. Список Фаддеева включал следующие шесть пунктов:

1. Квантовая проблема трёх тел.
2. Квантование поля Янга—Миллса.
3. Трёхмерная обратная задача теории рассеяния.
4. Алгебраический анзац Бете.
5. Квантование систем с аномалиями.
6. Ленинградская—Петербургская школа современной математической физики.

Получается, что создание нашей лаборатории математических проблем физики оценивалось мировым научным сообществом в одном ряду с важнейшими научными работами учёного.

Теперь уже трудно представить, как давно это было — молодёжному фаддеевскому семинару, с участия в котором началось наше посвящение в науку, исполнилось 56 лет. В 1969 г., когда я впервые пришёл на семинар Фаддеева (по рекомендации нашего университетского профессора Б.С. Павлова), группа математических проблем физики, ещё не отделившаяся от лаборатории математической физики (её возглавляла О.А. Ладыженская), занимала в Ленинградском отделении математического института (ЛОМИ) маленькую комнату, выгороженную перегородками из залы во флигеле старого особняка на Фонтанке. В ней едва помещались три стола и доска, покрытая коричневым линолеумом, на котором мел часто отказывался писать. Семинары начинались с довольно сложной процедуры плотной упаковки участников. Из других комнат приносили стулья и втискивали их между столами, участники семинара оказывались зажаты на своих местах без малейшей возможности пошевелиться. Большая часть присутствовавших — чуть старше 20, только В.Н. Попов и В.С. Буслаев были старше 30, далее шли несколько аспирантов из ЛОМИ и из университета (П.П. Кулиш, В.Б. Матвеев), с ними теснились совсем молодые студенты физфака и матмеха.

В то время Людвиг Дмитриевич читал лекции на матмехе и его курс квантовой механики вызывал некоторый ужас у студентов—математиков, уже впитавших язык и традиции школы Бурбаки, но, разумеется, из этого правила были и счастливые исключения. Основную часть участников составляли студенты физфака; все мы были тогда очень молоды и неопытны, но преисполнены энтузиазма и чувства, что в науке вот-вот произойдут важнейшие события. И это предчувствие вполне оправдалось: на протяжении пяти наших университетских лет появилась квантовая теория калибровочных полей, ставшая основой современной теории элементарных частиц, одновременно был разработан метод обратной задачи рассеяния в теории нелинейных дифференциальных уравнений. Для нас время это было совершенно волшебное. Можно сказать, целый мир открывался перед нами. Очень многие вещи, необходимые для работы с Л.Д., не входили в программу университета. Правда, базисная математика, связанная с квантовой механикой, на физфаке всегда преподавалась прекрасно — это была заслуга академика В.И. Смирнова, который разработал курс математики, специально ориентированный на квантовую физику; Л.Д. сам прошёл эту школу в 1950-е годы. Но теперь потребовалось выучить современную дифференциальную геометрию, группы и алгебры Ли, позже к ним добавилась алгебраическая топология, алгебраическая геометрия. Самым главным было ощущение связи фундаментальной физики и красивой математики.

То, что для нас было инициацией, первым знакомством с современной фундаментальной наукой, для самого Фаддеева было продолжением реализации той программы, которую он наметил для себя ещё в студенческие годы. Как он рассказывал, в школьные годы он не был особенно увлечён математикой и физикой. Он много читал, проштудировал всю средневековую историю Англии, в том числе по хроникам Шекспира. На первом курсе университета любовь к чтению его чуть не подвела: Л.Д. упомянул в каком-то разговоре, что ему особенно нравится Кнут Гамсун. Книги Гамсуна после войны находились под запретом, последовал донос, и студента-первокурсника вызвали для объяснений в комитет комсомола. Чтение “некоего Кнута” могло обернуться серьёзными неприятностями, но, к счастью для Л.Д., это произошло как раз незадолго до смерти Сталина.

Как рассказывал Людвиг Дмитриевич, университет по сравнению со школой поразил его атмосферой необычной свободы. Выбирая факультет, он решил поступать не на матмех, деканом которого в то время был его отец, замечательный алгебраист Д.К. Фаддеев, а на физфак — в этом сказались независимость и нонконформизм, которые отличали Л.Д. на протяжении всей жизни. Тем не менее на физическом факультете он выбрал в качестве специализации

именно математику, а не физику. Нужно сказать, что курс общей физики, который обычно читают на первых курсах физического факультета, традиционно получается не слишком удачным, я сам с этим столкнулся в следующем поколении, спустя 15 лет. А математика на физическом факультете читалась всегда блестяще. С первого курса лекционный курс математики оказывался самым интересным и глубоким из всех. К 3-му курсу, когда студенты начинали слушать курс квантовой механики, они уже владели необходимым математическим аппаратом, включая теорию дифференциальных уравнений, линейную алгебру и начала функционального анализа. При этом вплоть до начала 1950-х годов кафедра математики на физфаке имела статус вспомогательной, и студенты-физики не имели возможности писать дипломную работу по математике. Положение изменилось, когда на курсе, где учился Л.Д., проходило распределение студентов по кафедрам, и таким образом, он оказался в первой группе математической физики на физическом факультете.

Все основные спецкурсы по математике читала в то время Ольга Александровна Ладыженская. Ольга Александровна безусловно принадлежит к числу лучших математиков за всю историю Ленинградского университета. В центре её научных интересов были тогда дифференциальные уравне-



Л.Д. Фаддеев, Янг Чжэньнин и Р. Бакстер. Сеул, 1997

ния в частных производных, составляющие основу математического аппарата как квантовой механики, так и большинства разделов классической математической физики. Но для студенческого семинара она выбрала разбор привезённой кем-то в Ленинград книги “Математические проблемы квантовой теории поля” К. Фридрихса, ученика Р. Куранта и Д. Гильберта. (Интересно, что этот семинар упомянут в биографии Фридрихса на сайте Американской академии наук.) Изучение работ Фридрихса по квантовой теории поля и по теории рассеяния сыграло большую роль в научной биографии Фаддеева, способствовало овладению техническим арсеналом, которым он воспользовался в будущей работе.

В семинаре, организованном Ольгой Александровной, Л.Д. был основным докладчиком; как он вспоминал, каждый семинар начинался её словами: “Прежде всего, Людвиг, напомним нам определение операторов рождения—уничтожения”. Основы математического формализма квантовой теории поля с его весьма необычными для традиционного функционального анализа несамосопряжёнными операторами рождения—уничтожения были заложены ещё в 1920-е годы, в частности, в работах В.А. Фока, но его осмысление потребовало немалых усилий на протяжении не одного десятилетия. В 1950-е годы квантовая теория поля, да и сама квантовая механика были ещё очень молоды, и не только формализм теории поля, но и простейшие задачи потенциального рассеяния для оператора Шредингера оставались неизученными. Любую статью физиков можно было читать как сборник нерешённых задач по функциональному анализу. Сами физики, разработавшие к тому времени (без всякого обоснования!) глубокие и тонкие методы, прекрасно подтверждавшиеся в экспериментах, относились к математикам с некоторым высокомерием. Именно в 1950–1960-е годы получила хождение шутка о браке физики и математики, закончившемся разводом. Должно было пройти около двух десятилетий, прежде чем в фундаментальной физике оказались востребованы математические результаты “переднего края”.

Академик В.А. Фок, один из создателей в 1920–1930-е годы математического формализма квантовой теории поля, в 1950-е и позже, когда я учился на ленинградском физфаке, был как бы живой легендой. Он уже не занимался тогда квантовой теорией поля; на курсе Л.Д. он прочёл только несколько лекций по общей теории относительности. Тем не менее он обратил внимание на талантливого студента и через его мать Веру Николаевну Фаддееву², с которой он был знаком ещё с 30-х го-

дов, передал ему свою старую книгу по квантовой механике, ставшую библиографической редкостью.

Первая студенческая работа Фаддеева была связана с доказательством теоремы разложения по собственным функциям непрерывного спектра для оператора Шрёдингера, что усиливало более ранний результат А.Я. Повзнера; другая работа, опубликованная в “Журнале экспериментальной и теоретической физики”, содержала короткий и изящный вывод дисперсионного соотношения для амплитуды рассеяния на нулевой угол (рассеяния вперёд) в потенциальном рассеянии. Этот результат удостоился упоминания в вышедшем спустя несколько лет новом издании знаменитого курса квантовой механики Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица (Л.Д. вспоминал позднее, что с Ландау так и не встретился, — доказательство дисперсионного соотношения он рассказывал Лифшицу). Для аспирантского экзамена в ЛОМИ он подготовил подробный обзор результатов об обратной задаче рассеяния для радиального уравнения Шрёдингера. (Стоит заметить, что интерес Л.Д. к обратной задаче также начался с его доклада в студенческом семинаре О.А. Ладыженской.) К этому времени обратной задаче рассеяния был посвящён ряд фундаментальных работ М.Г. Крейна, Б.М. Левитана, В.А. Марченко, И.М. Гельфанда. По приглашению академика Н.Н. Боголюбова в 1958 г. Л.Д. выступил с докладом об обратной задаче для радиального уравнения Шрёдингера на конференции, организованной лабораторией теоретической физики в Дубне, в присутствии всех классиков изучения обратной задачи. Переработанный доклад был опубликован как обзор в “Успехах математических наук” (позже мы и ещё несколько поколений молодых математиков учили по нему формализм обратной задачи).

Для своей кандидатской диссертации Фаддеев выбрал обратную задачу рассеяния для одномерного оператора Шрёдингера на всей оси (этот случай более сложен, чем радиальное уравнение Шрёдингера из-за наличия двукратного непрерывного спектра). В начале 1970-х годов эта работа неожиданно оказалась в центре всеобщего интереса: она послужила технической основой метода обратной задачи рассеяния — революционного нового метода решения нелинейных уравнений. Опубликована она была только спустя несколько лет, уже после знаменитой работы Л.Д. о квантовой проблеме трёх тел. В то время отношение к публикации результатов сильно отличалось от нынешнего — публиковать незавершённую работу или промежуточные результаты считалось неприличным. Людвиг Дмитриевич говорил: рассказывать нужно примерно треть того, что знаешь, тогда можно чувствовать себя уверенно и не бояться агрессивных вопросов. Разумеется, этот совет относился прежде всего к большим семинарам, где агрессивное отношение к докладчику

² В.Н. Фаддеева с 1942 г и до конца жизни была сотрудником ЛОМИ. В 1981 г. совместно с Д.К. Фаддеевым удостоена Государственной премии СССР за цикл работ по вычислительным методам линейной алгебры, опубликованных в 1950–1977 гг.



Фотография О.А. Ладыженской всегда стояла в кабинете Л.Д. Фаддеева на его рабочем столе

часто считалось нормой (в Ленинграде таким был знаменитый теоретический семинар Физтеха, перенявший традицию, восходившую к Ландау и через него к Паули). Другой причиной отсрочки стала работа о трёхчастичном рассеянии, которой Фаддеев занялся сразу после защиты кандидатской. По его словам, прежде чем обратиться к квантовой теории поля, для него было очень важно решить какую-нибудь технически сложную задачу. Одна из таких — трёхмерная обратная задача для оператора Шрёдингера; она оказалась очень трудной, Л.Д. удалось её решить только через несколько лет.

Квантовая задача трёх тел послужила другим серьёзным вызовом. Как говорил Л.Д., в её решении большую роль сыграл опыт работы с моделью Фридрихса; некоторые ключевые идеи возникли при изучении одной простой модели квантовой теории поля, интенсивно обсуждавшейся на рубеже 1960-х годов, — модели Тирринга. Центральная идея, способствовавшая успеху в задаче трёх тел, — удачная перестройка интегральных уравнений теории рассеяния, приводящая к новой системе уравнений с вполне непрерывными ядрами (они получили название уравнений Фаддеева). Докторскую диссертацию на основе этой работы Л.Д. защитил в учёном совете МИАНа в Москве. Л.Д. вспоминал о неожиданном появлении на заседании учёного совета В.А. Фока. Председательствовал на заседании академик И.М. Виноградов — он сидел в своём

глубоком кресле спиной к доске, зорко наблюдая за академическим синклитом, разместившимся в задних рядах зала. Фок пришёл уже после начала заседания. Он сел в первом ряду напротив Виноградова и через некоторое время обратился к нему со своим характерным высоким голосом: “Иван Матвеевич, вам не интересно, что рассказывает Людвиг? Вам не видно доску!”

Вышедшая в год защиты монография “Математические вопросы квантовой теории рассеяния для системы трёх частиц” (1963) сразу стала классической, в переводе на английский её издала спустя два года. 50-летие публикации этого перевода было отмечено в 2016 г. учреждением специальной медали имени Л.Д. Фаддеева, присуждаемой за работы по многочастичному рассеянию. Учреждение именной почётной медали при жизни учёного — редкий случай. Можно вспомнить медаль имени Макса Планка, учреждённую в 1929 г. по случаю его 70-летия, причём первые две медали вручили самому М. Планку и А. Эйнштейну. Кстати, Л.Д. тоже получил медаль Макса Планка — он был третьим российским учёным, удостоившимся этой награды (вслед за Л.Д. Ландау и Н.Н. Боголюбовым). Появление медали имени Фаддеева, к сожалению, немного запоздало, Л.Д. в это время был уже тяжело болен. Тем не менее он приехал в Орхус (Дания) и присутствовал на официальной церемонии.

Сам он эту свою знаменитую работу о задаче трёх тел с самого начала рассматривал как пройденный этап, после публикации монографии он решительно перешёл к другим задачам и больше ничего не писал на эту тему. Это была его знаменитая формула — “если вы чувствуете, что вы готовы начать писать серийные статьи, нужно сменить тематику”.

Рубеж 1960-х годов был важен и для Л.Д., и для других математиков его поколения как время первых контактов с зарубежными коллегами, практически прекратившихся с начала холодной войны. В 1962 г. Л.Д. впервые участвовал в работе Международного математического конгресса в Стокгольме. (К сожалению, одним из итогов поездки на конгресс советской делегации стал донос о несанкционированных контактах с иностранцами, в результате О.А. Ладыженская, например, не имела возможности выезда за границу в течение 20 последующих лет.) В 1963 г. Фаддеев в составе делегации молодых ленинградских математиков участвовал в советско-американском симпозиуме в Новосибирске. Американскую делегацию тогда возглавлял знаменитый Рихард Курант, а среди её участников был ещё молодой Питер Лакс, ставший затем одним из друзей Л.Д., — он встречался с ним и в Ленинграде, и в Нью-Йорке, где Лакс позже много лет был директором Математического института им. Куранта.

Работы Фаддеева о теории поля Янга–Миллса — по-видимому, самые известные и важные из его работ 1960-х годов. Однако с ними связана и дра-

матическая история, которую сам Л.Д. очень живо описал в выступлении на Общем собрании РАН в 2013 г. по случаю вручения ему Большой золотой медали имени М.В. Ломоносова РАН [2]. Дело в том, что с середины 1950-х годов квантовая теория поля переживала трудное время и надолго вышла из моды. За блестящими успехами квантовой электродинамики последовало десятилетие безуспешных попыток применить теорию поля для расчёта внутриядерных сил. Но жесточайший удар ей нанесло открытие Л.Д. Ландау и И.Я. Померанчуком так называемого парадокса нуль-заряда — обращения в нуль перенормированной константы связи в результате учёта множественного рождения частиц. Этот парадокс относился к квантовой электродинамике, которая, в отличие от мезонной теории ядерных сил, прекрасно работала и позволяла рассчитывать тонкие эффекты с беспрецедентной точностью. Тем не менее результат тонкого (и правильного!) вычисления Ландау и Померанчука указывал, как считалось, на прямое логическое противоречие в её основах.

Хотя вывод Ландау основывался на теории возмущений, его физическая убедительность, связанная с картиной “экранировки” заряда в результате рождения виртуальных электронно-позитронных пар, была весьма велика. Именно эффект экранировки определяет знак коэффициента β , играющий критическую роль во всём рассуждении³. В своей последней короткой статье “Фундаментальные проблемы”, написанной незадолго до трагической автомобильной катастрофы, оборвавшей его научную карьеру, Л.Д. Ландау написал, со ссылкой на парадокс нуль-заряда, что гамильтонов метод в теории поля полностью мёртв и должен быть похоронен (“со всеми почестями, которых он заслуживает”). “Ввиду краткости жизни, — заключал Ландау, — мы не можем позволить себе заниматься задачами, не ведущими к новым результатам”. Слова Ландау воспринимались его учениками в начале 1960-х годов как заветные учителя, и когда в 1966 г. Л.Д. Фаддеев с В.Н. Поповым получили решающее продвижение в квантовой теории Янга—Миллса (именно на основе традиционного гамильтонова подхода), их статью не приняли к печати ни в одном из ведущих физических журналов в СССР, не опубликовали и за рубежом (для этого требовалось положительное заключение Отделения ядерной физики АН СССР). В результате с годичной задержкой появилось короткое сообщение об этой работе в “Physics Letters”, а полный текст был издан только в виде препринта Институтом теоретической физики АН УССР. Препринт был переведён на английский и опубликован в “Fermilab” лишь в 1973 г., уже в разгар бума, вызванного появлением последовательной теории

квантовых калибровочных полей. Л.Д. позже говорил с сожалением, что, если бы Ландау был здоров, он мог бы ему всё объяснить, а разговор с эпигонами Ландау оказался невозможен.

Геометрическая красота теории калибровочных полей Янга—Миллса стала понятна не сразу; первоначально Л.Д. хотел заниматься квантовой гравитацией, поля Янга—Миллса казались, скорее, более простым модельным примером. Теперь мы знаем, что этот пример оказался исключительно удачным — он позволил обобщить квантовую электродинамику, объединив её со слабыми взаимодействиями, и впервые построить последовательную теорию сильных взаимодействий. Геометрически теория Янга—Миллса — это, по существу, общая теория относительности в зарядовом пространстве и в этом смысле очень близка по духу к теории тяготения Эйнштейна. Идея о связи принципа общей ковариантности, составляющего основу общей теории относительности, и калибровочной инвариантности в электродинамике восходит ещё к работам Г. Вейля. Само название калибровочных преобразований связано с поучительной ошибкой Вейля: в своей работе 1918 г. он предложил геометрическую трактовку электромагнитного поля как связности с одномерной абелевой структурной группой, но поскольку квантовая механика с её комплексными волновыми функциями ещё не была создана, единственной возможной группой казались масштабные преобразования. Вейль предположил, что при параллельном переносе в электромагнитном поле меняется длина, и именно отсюда возник артиллерийский термин “калибровка”, продолживший уже существовавшую артиллерийскую метафору к электродинамике, начавшуюся с введения “зарядов”. Гипотеза Вейля об изменении масштабов в электромагнитном поле была полностью неверна, но после появления квантовой механики он исправил свою ошибку: “правильная” структурная группа — это группа вращений, действующая на фазу волновой функции заряженной частицы. В 1928 г. Вейль и независимо В.А. Фок вывели уравнение Дирака, описывающее заряженный электрон в электромагнитном поле на фоне произвольной метрики в пространстве—времени; полученные ими формулы фактически содержали многие элементы будущей неабелевой калибровочной теории.

Следующий важный шаг был сделан В. Гейзенбергом, который ввёл в теорию поля неабелеву группу изотопических преобразований, перемещающих волновые функции протона и нейтрона. Идея обобщить глобальные изотопические преобразования и перейти таким образом к неабелевой калибровочной теории была впервые высказана О. Клейном в неопубликованном докладе, сделанном за несколько недель до начала Второй мировой войны. В 1953 г. неабелева калибровочная теория была вновь независимо предложена Янгом и Мил-

³ В первоначальном вычислении Ландау ошибся в знаке; правильный знак был получен А.Д. Галаниным и Б.Л. Иоффе, и Ландау позже говорил, что они спасли его честь.

лсом и тогда же подвергнута почти уничтожающей критике В. Паули: в её наивной форме эта теория предсказывает существование целого мультиплета безмассовых заряженных частиц, которые в природе не наблюдаются. В 1950-е годы теория Янга—Миллса, несмотря на её геометрическую естественность и красоту, оставалась малоизвестной и малоизученной, а задача её квантования не была решена.

Первую и не вполне удачную попытку построить квантовую теорию Янга—Миллса предпринял в начале 1960-х годов Р. Фейнман. Как и Фаддеев несколькими годами позднее, Фейнман хотел применить технику квантовой теории поля в общей теории относительности, но из-за громоздкости вычислений решил, по предложению М. Гелл-Манна, начать с технически более простой теории Янга—Миллса. Применяя к ней обычные правила вычисления теории возмущений, известные из квантовой электродинамики, Фейнман обнаружил, что наивный диаграммный подход даёт в однопетлевом приближении неунитарный ответ. Поправку, восстанавливающую унитарность, можно было интерпретировать как вклад дополнительной скалярной частицы. При этом эта фиктивная частица ведёт себя как фермион (в нарушение обычной связи между спином и статистикой).

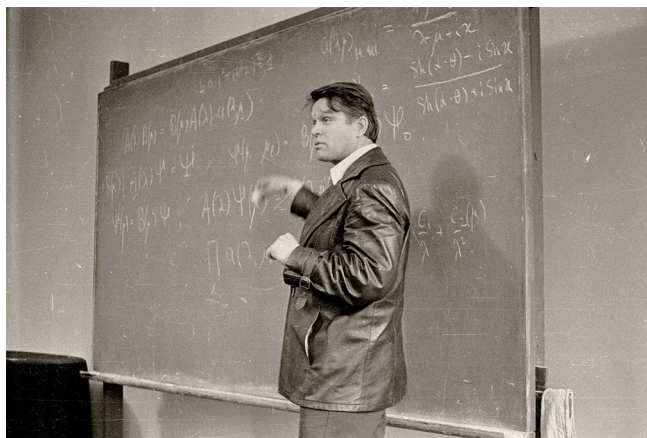
Результаты Фейнмана стали известны Фаддееву по записи его доклада на конференции по проблемам гравитации в Варшаве (её опубликовал польский журнал “Acta Physica Polonica”). Возникла задача объяснить эти результаты вне рамок теории возмущений и вычислить поправки к наивной теории за пределами однопетлевого приближения. Тогда же в магазине технической книги на Литейном Фаддеев увидел уценённую книгу французского математика А. Лихнеровича “Теория связностей в целом и группы голономий”, вышедшую в русском переводе несколькими годами ранее. Сходство формул для связностей в расслоениях и для полей Янга—Миллса оказалось поразительным; стало ясно, что теория Янга—Миллса так же красива и геометрически естественна, как и общая теория относительности.

Чтобы понять и обобщить вычисления Фейнмана, Фаддеев вместе со своим учеником В.Н. Поповым исходил из предложенной когда-то самим Фейнманом техники континуального интеграла. Виктор Николаевич Попов был одним из редких в то время экспертов по функциональным интегралам. Удивительным образом сам Фейнман, предложивший метод функциональных интегралов в конце 1940-х годов, не воспользовался им в задачах квантовой теории поля. В теории Янга—Миллса этот метод даёт простое и красивое решение проблемы унитарности, с которой столкнулся Фейнман. Л.Д. говорил позднее, что они с В.Н. Поповым переиграли Фейнмана на его собственном поле. Ключевой момент состоял при этом в построении правильной меры интегрирования, то есть в вычислении

некоторого определителя. Первый вариант этого вычисления (так называемый трюк Фаддеева—Попова) был предложен Поповым, а затем Л.Д. нашёл его очень красивое геометрическое обоснование. Знаменитая статья Фаддеева с изложением этого метода открывала первый номер журнала “Теоретическая и математическая физика”, основанного в 1969 г. (В 1970-х и 1980-х годах эта статья стала стандартным тестом при отборе студентов и аспирантов в лабораторию Л.Д. — статью полагалось понимать.) Вычисление функционального интеграла по теории возмущений приводит к диаграммной технике (когда-то именно изобретение этой техники “фейнмановских диаграмм”, описывающих распространение и взаимодействие квантовых частиц, сыграло революционную роль в физике — с их появлением квантовая теория поля обрела наглядный и адекватный язык); поправка, связанная с учётом детерминанта, эквивалентна добавлению к этим диаграммам ещё одной “фиктивной” частицы. Эти частицы — знаменитые “духи Фаддеева—Попова” — стали своего рода визитной карточкой нового метода, о них слышали и те, кто не знает теории поля и вообще физики.

Людвиг Дмитриевич всегда относился к Р. Фейнману с огромным уважением и считал его одним из своих духовных учителей, наряду с П. Дираком и Г. Вейлем. Уже после смерти Фейнмана, посетив его рабочий кабинет в Пасадене, Л.Д. заметил его записку на аспидной доске — в числе того, что Фейнман хотел выучить, фигурировал и алгебраический анзац Бете, который был как раз в это время придуман в нашей лаборатории самим Фаддеевым и его учениками. Л.Д. рассказывал об этой находке с большой гордостью. Фейнман правильно понял, что алгебраический анзац Бете, связанный с обобщением одномерных спиновых цепочек, позволит продвинуться в изучении высокоэнергетического рассеяния в квантовой теории поля, но не успел реализовать эту программу — это было независимо сделано через несколько лет в Петербургском институте ядерной физики им. Б.П. Константинова Л.Н. Липатовым и затем развито — на основе разработанного Л.Д. и его учениками формализма квантового метода обратной задачи — в совместной работе Г.П. Корчемского и самого Фаддеева.

Работа Фаддеева и Попова, в которой им впервые удалось получить корректное квантование теории Янга—Миллса, послужила базой для настоящей революции в физике. Разумеется, как и в квантовой электродинамике, получение диаграммного разложения — только первый этап построения корректной теории. Второй и не менее важный этап — перенормировка константы связи и построение перенормированного ряда теории возмущений. Так как теория Янга—Миллса нелинейна, вопрос о её перенормируемости значительно более сложен, чем в электродинамике, но по-прежнему критически зависит от явного учёта её калибровочной инвариантности.



На конференции в ЛОМИ. Октябрь 1978 г.
Фото А. Будагова

В работе А.А. Славнова перенормируемость теории Янга–Миллса была доказана для безмассовой теории. Однако для приложений ещё более важным оказалась возможность соединить программу перенормировки с механизмом спонтанного нарушения симметрии (“механизм Хиггса”, предложенный независимо П. Хиггсом и Р. Браутом и Ф. Энглером в 1964 г.), в результате которого часть квантов поля Янга–Миллса приобретает массу.

Основанная на механизме Хиггса калибровочная модель электромагнитных и слабых взаимодействий, предложенная в 1967 г. С. Вайнбергом, полностью изменила отношение теоретиков к калибровочным теориям. В результате появившаяся в том же году (с годичной задержкой) работа Фаддеева и Попова немедленно оказалась в центре взрывного развития калибровочной теории и послужила базой дальнейших исследований. Перенормируемость теории Янга–Миллса со спонтанным нарушением калибровочной симметрии была доказана в работах Г. ’т Хоофта и М. Вельмана. Ключевое открытие начала 1970-х годов состояло в том, что калибровочная симметрия свободна от парадокса нуля-заряда (так как кванты поля Янга–Миллса заряженные, механизм “экранировки” заряда сменяется на “антиэкранировку” — другими словами, взаимодействие становится слабым на малых расстояниях). Технически этот результат связан с изменением знака константы β , что позволило распространить калибровочную теорию на сильные взаимодействия. Результатом этого беспрецедентного развития стало построение “стандартной модели” в физике элементарных частиц, отмеченное несколькими Нобелевскими премиями. К сожалению, Л.Д. не попал в число лауреатов. Не только мы, его ученики, считаем, что это явная несправедливость. Старый друг Л.Д. и создатель теории Янга–Миллса выдающийся физик Янг Чженьнин написал по этому поводу: “Многие, включая меня, считали, что Фаддеев должен был разделить Нобе-

левскую премию 1999 г. с ’т Хоофтом и Вельманом. Среди физиков-теоретиков в XX в. существовало странное отношение к математике. В XIX в. работы Максвелла, Больцмана, Гиббса, Кельвина, Лоренца свидетельствовали о противоположном отношении к роли математики в физике. Кажется, что с некоторой заносчивости молодых Паули и Гейзенберга берёт своё начало представление, что математика только вредит оригинальности в физике. Свидетельство тому — страдания и горечь Макса Борна или Вигнера. Хотя Гейзенберг в поздние годы изменил свои взгляды на математику, в американской физике это высокомерное пренебрежение математикой надолго укоренилось. Я думаю, что это одна из причин, почему Фаддеев не был включён в число лауреатов 1999 г.” Относительная изоляция, в которой в 1960-е годы и позже находились наши учёные, безусловно, тоже сыграла свою роль — так же, как и блокирующая научная “цензура”, которая воспрепятствовала своевременной публикации его замечательного результата.

Молодёжный фаддеевский семинар и сложившаяся вокруг него группа математических проблем физики начали свою работу как раз в это время, вскоре после публикации знаменитых работ Л.Д. по квантованию поля Янга–Миллса. Выбор тематики семинара в значительной степени определялся этими работами, в дополнение к классическому функциональному анализу, который мы изучали в университете, нужна была современная геометрия, группы Ли, гамильтонова механика... Монографии и учебники, по которым училось следующее поколение математиков и теоретиков, ещё не были написаны, так что нам приходилось начинать своё образование почти с нуля и разбирать оригинальные работы.

Ключевым словом семинара было “квантование”. Мы разбирали основные технические средства квантовой теории поля — континуальные интегралы, перенормировки, размерную регуляризацию. Другой важный сюжет — геометрическое квантование (знаменитый “метод орбит”, предложенный А.А. Кирилловым и Б. Костантом). Многие результаты в это время оставались неопубликованными, и их приходилось восстанавливать по коротким анонсам, при этом руководством к действию для нас служили слова Л.Д.: “Квазиклассика должна быть точна для систем с большой группой симметрии”. Граница между известным и неизвестным проходила очень близко, и многие из нас предприняли первые попытки продвинуться самостоятельно. Очень важна была возможность обсуждать у доски с самим Л.Д. ещё очень туманные идеи. Чаще всего его предложения оказывались правильными, но даже в тех редких случаях, когда он оказывался неправ, было необычайно поучительно разобраться в его предложениях и понять, как их поправить.

Другим важным принципом, который Л.Д. любил повторять, было его убеждение, что квантовая механика должна давать ключ к задачам чистой математики. Ещё в начале 1960-х годов И.М. Гельфанд предложил ему разобрать с помощью техники квантовой теории рассеяния знаменитую формулу следа Сельберга. Результат А. Сельберга находится на стыке аналитической теории чисел, теории представлений групп Ли и спектральной теории операторов, доказательство самого Сельберга в то время оставалось неопубликованным. С первым вопросом Гельфанда — спектральной теоремой для автоморфного оператора Лапласа на плоскости Лобачевского — Л.Д. справился за две недели, а неарифметическое доказательство формулы Сельберга он получил несколько лет спустя вместе со своими аспирантами А.Б. Венковым и В.Л. Калининским. Одновременно вместе с Б.С. Павловым Л.Д. предложил в терминах теории рассеяния очень интересную и романтическую переформулировку центральной проблемы аналитической теории чисел — гипотезы Римана.

Начиная с 1971 г. в тематику семинара вошла новые сюжеты, которые его совершенно преобразили. На проходившей в Новосибирске международной конференции по обратным задачам Л.Д. представил свои результаты по трёхмерной обратной задаче теории рассеяния. Главным событием конференции стали доклады о новом революционном методе решения нелинейных эволюционных уравнений в частных производных. Первая работа на эту тему — знаменитая статья К. Гарднера, Дж. Грина, М. Крускала и Р. Миуры об уравнении Кортевега—де Фриза — появилась ещё в 1967 г., но некоторое время ассоциировалась с каким-то непонятным трюком. Результат Крускала был значительно прояснён спустя несколько лет П. Лаксом, а затем А.Б. Шабат и В.Е. Захаров обнаружили целый класс новых примеров, в частности, знаменитое нелинейное уравнение Шрёдингера; стало ясно, что речь идёт не о трюке, а о поразительном новом методе с широким спектром применений.

Обратная задача для одномерного уравнения Шрёдингера (или для близкого уравнения Дирака) на всей оси, которой была посвящена кандидатская диссертация Фаддеева, стала ключом для решения нелинейных уравнений. Ещё одним важным техническим средством оказались спектральные тождества следов для дифференциальных операторов, которыми Л.Д. занимался вместе с В.С. Буслаевым в начале 1960-х годов: они позволяют выразить гамма-функции и другие интегралы движения через данные рассеяния. Результатом дискуссий на новосибирской конференции стала знаменитая работа Захарова и Фаддеева “Уравнение Кортевега—де Фриза — вполне интегрируемая гамма-функция система”. Понятие полной интегрируемости возникло в аналитической механике в XIX в.; в середине 1960-х годов В.И. Арнольд привлёк к нему внима-

ние, предложив для него красивую геометрическую формулировку (это знаменитая теперь теорема Лиувилля—Арнольда). Математики XIX в. придумали довольно много тонких примеров интегрируемых систем, для их решения использовались специальные замены переменных. Эти сюжеты какое-то время считались вершиной математического анализа и входили в программы университетских экзаменов, но постепенно стало понятно, что “общие” механические системы очень далеки от интегрируемости. После работ Пуанкаре интерес сместился в сторону доказательства неинтегрируемости, изучения хаоса и др., и интегрируемые системы надолго вышли из моды. Ни одного нетривиального примера бесконечномерной интегрируемой систем, то есть систем полевого типа, не было известно. Хотя в работе Захарова и Фаддеева, по существу, переформулировались уже известные факты, её идеологическое значение было огромным: выяснилось, что бесконечномерные интегрируемые системы существуют, они интересны и нетривиальны. Особенно интересным оказалось явное описание фазового пространства уравнения Кортевега—де Фриза в терминах “данных рассеяния”, в нём выделился вклад знаменитых солитонных решений (уединённых волн), причём они вели себя как настоящие частицы. Произошла, как любил позже говорить Захаров, смена парадигмы.

Солидная подготовка по теории рассеяния всегда служила частью преподавания квантовой механики и функционального анализа на физическом факультете, так что участники нашего семинара могли немедленно включиться в новую работу. Поиск новых “лаксонных пар” и связанных с ними нелинейных уравнений напоминал на этом этапе увлекательную охоту. С самого начала интерес Л.Д. к интегрируемым уравнениям был связан с надеждой применить новую технику в квантовой теории поля. Конечно, уравнение Кортевега—де Фриза с его нерелятивистской кинематикой — не слишком удачный пример для квантовой теории, но новый метод исследования нелинейных уравнений позволял надеяться, что можно построить и примеры релятивистских интегрируемых уравнений. И такой пример вскоре появился — знаменитое уравнение sine-Gordon , о котором Фаддеев впервые узнал от американского физика Дж. Клаудера во время своей поездки в США в 1972 г. Вскоре после возвращения Л.Д. вместе со своим новым молодым сотрудником Л.А. Тахтаджяном нашёл для этого уравнения лаксову пару. Чуть позже к Тахтаджяну и Фаддееву присоединился Захаров; результатом этой работы стало полное описание решений и, самое главное, красивые и прозрачные формулы для энергии и импульса поля синус-Гордона; в элементарной линейной теории аналогичные формулы служат основой для интерпретации решений полевых уравнений в терминах частиц (знаменитый “корпускулярно-волновой дуализм”). В новой модели, кроме частиц, связанных с исходным полем, возникал вклад, свя-

занный с частицами нового типа — солитонами и их связанными состояниями. Идея связать солитонные решения с новыми частицами (отсутствующими при “наивном” квантовании модели) и сама возможность разрушить старую парадигму квантовой теории поля “одно поле — один тип частиц” — поражали воображение.

Первоначальное отношение теоретиков к квантовым солитонам было резко скептическим: они считали, что интегрируемость, высшие законы сохранения и солитонные решения неизбежно разрушатся при переходе к квантовой модели. Доклад Л.Д. на знаменитом теоретическом семинаре В.Н. Грибова в дни зимней школы Ленинградского института ядерной физики 1974 г., посвящённый квазиклассическому квантованию модели синус-Гордона, закончился поражением — после четырёх часов у доски Людвиг Дмитриевич сорвал голос и вынужден был уйти, сопровождаемый ироническими замечаниями о попытках воскресить “мечту Эйнштейна”. После этой неудачи Л.Д. у Грибова больше не выступал — защита точки зрения нашей лаборатории была поручена его молодым ученикам. Ключевое вычисление по теории возмущений, подтверждавшее устойчивость солитонов при квантовании, провели И.А. Арефьева и В.Е. Корепин. Володя Корепин, в то время аспирант первого года, прошёл на физфаке серьёзную школу по квантовой теории поля и мог говорить с участниками грибовского семинара на их языке. В итоге его боевое крещение прошло успешно — теоретики наконец признали нашу правоту. А спустя несколько лет удалось достигнуть и настоящего прорыва — вместо приближённого квазиклассического решения построить точное.

Исходным пунктом нового прорывного развития послужил доклад Л.Д. на семинаре нашей лаборатории в мае 1978 г. Новый метод получил название “квантовый метод обратной задачи рассеяния”. Он объединил несколько идей, которые казались совершенно не связанными друг с другом: от старых классических работ Г. Бете о спиновых цепочках и более недавних результатов Р. Бакстера по квантовой статистической физике до классического метода обратной задачи и техники построения лаксовых пар. Основой нового метода стала красивая алгебра, связанная с понятием “квантовой R-матрицы”. Один из первых примеров квантовой R-матрицы извлекался из старой работы Янга, поэтому для ключевого тождества в новой теории Фаддеев предложил название “тождество Янга–Бакстера”, под этим именем оно и получило широкую известность. В разгар работы по построению теории квантовых интегрируемых систем, осенью того же 1978 г., в ЛОМИ состоялась первая конференция по квантовой теории солитонов. В ней участвовали и классики предыдущего этапа развития физики — А.Б. Мигдал и В.Н. Грибов, и лучшие эксперты по классическим интегрируемым системам — В.Е. За-



Л.Д. Фаддеев. Университет Орхуса, Дания, 2010.

Фото М.А. Семёнова-Тян-Шанского

харов и С.П. Новиков со своими учениками, и молодые теоретики — А.М. Поляков, А.А. Белавин, А.Б. Замолодчиков. Эта конференция вспоминается сейчас как момент удивительного единства науки.

С самого начала работа над новым методом шла коллективно, силами всей лаборатории. Представляя несколькими годами ранее нашу группу П. Лаксу, Л.Д. сказал, что для самого себя он выбрал роль играющего тренера. Особенно важный вклад внесли работы Е.К. Складина и Л.А. Тахтаджяна. В работах А.Г. Изергина и В.Е. Корепина, Ф.А. Смирнова была развита эффективная техника, позволившая вычислять основные физические характеристики квантовых интегрируемых моделей — их корреляционные функции, формфакторы и пр. Наконец, Ф.А. Смирнов получил решение квантовой обратной задачи, то есть задачи восстановления “локальных” наблюдаемых квантовой интегрируемой системы по спектральным данным.

При своём возникновении квантовый метод обратной задачи казался многим несколько академическим изобретением в силу того, что его применения ограничивались моделями теории поля в двумерном пространстве — времени и квантовой статистической физики на одномерных решётках. Потенциал нового метода стал понятен лишь по прошествии лет — постепенно. В 1990-х годах оказалось, что варианты интегрируемых спиновых моделей описывают высокоэнергетическую асимптотику в теории Янга–Миллса. Тот факт, что описание высокоэнергетической асимптотики приводит к эффективно двумерным теориям, был известен давно, но оказалось, что эти теории — к тому же интегрируемые, и для их явного решения применим немного обобщённый квантовый метод

обратной задачи (работы Л.Н. Липатова и Л.Д. с Г.П. Корчемским). Это ещё один случай, когда фаддеевская математика пересеклась с техникой и задачами школы Ландау.

Одним из важнейших побочных продуктов нового метода стала теория “квантовых групп”. Первый пример квантовой группы построили П.П. Кулиш и Н.Ю. Решетихин в начале 1980-х годов, а затем В.Г. Дринфельд предложил общую аксиоматику и глубокое обобщение этого примера. Открытие квантовых групп стало, пожалуй, самым важным событием в некоммутативной алгебре после изобретения в конце XIX в. групп и алгебр Ли. Значительный вклад в их изучение был внесён в нашей лаборатории Н.Ю. Решетихиным, Л.А. Тахтаджяном и самим Л.Д. Параллельно под влиянием этих результатов удалось прояснить и геометрию классических интегрируемых систем, связанных с методом обратной задачи: удачный синтез позволил связать “метод одевания”, изобретённый ещё в начале 1970-х годов Захаровым и Шабатом, новую концепцию классических g -матриц, появившихся в работах Склянина как квазиклассический вариант квантовых R -матриц, и метод орбит Кириллова—Костанта (этим сюжетом мы занимались вдвоём с А.Г. Рейманом).

Эти работы привели к глубокому изменению всего ландшафта мировой математической физики. Именно тогда наша группа получила международное признание.

Прошло 40 лет. “Иных уж нет, а те далече...” Сотрудники лаборатории Фаддеева оказались рассеяны по четырём континентам. Сам Л.Д. проводил за границей немало времени, но Петербург, Комарово всегда оставались его домом. Он потратил много сил на создание в Петербурге Международного математического института им. Леонарда Эйлера. В 1990-е годы это стоило ему инфаркта и принесло немало трудностей и фрустраций. Математический институт им. В.А. Стеклова РАН, в котором Л.Д. проработал всю жизнь, превратился в ФГБУН “Математический институт им. В.А. Стеклова” (в кавычках). Новое сокращение, которое я не берусь выговорить, стало знаком отношения власти к фундаментальной науке в современной России. Юбилейные конференции в честь Л.Д. Фаддеева и с его участием проходили в Вене, Женеве, Петербурге. Последняя маленькая конференция, собравшая его учеников, прошла в 2015 г. в Шамони, у подножья Монблана. Все эти годы Л.Д. продолжал работать с прежним азартом и технической силой. От коллективного стиля работы 1970–1980-х годов он в значительной степени вернулся к более индивидуальному стилю своей молодости. Его работы 1990–2010-х годов охватывают почти все области исследований, о которых рассказано выше, как и многое из того, о чём написать не удалось. Многие из этих работ остаются вызовом для будущих исследователей.

Награды Л.Д. Фаддеева включают премию Д. Хайнемана в области математической физики (1974), медаль Дирака (1990), медаль им. Макса Планка (1996), премию им. И.Я. Померанчука (2002), премию А. Пуанкаре (2006), премию Шао (2008, совместно с В.И. Арнольдом), Государственную премию СССР (1971), Государственные премии Российской Федерации (1995, совместно с А.А. Славновым; 2005), Демидовскую премию (2002), медаль им. Л. Эйлера (2002), Большую золотую медаль имени М.В. Ломоносова РАН (2013)⁴. Он был иностранным членом ряда академий и научных обществ, в том числе Парижской академии наук (с 2002 г.), Лондонского Королевского общества (с 2010 г.) и Национальной академии наук США (с 1990 г.). В разные годы Л.Д. сам обращался к своей математической биографии и посвятил ей несколько статей [1–3]. Подробный обзор его математических работ опубликован в большой статье его учеников [4].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Фаддеев Л.Д.* 30 лет в математической физике // Математическая физика и комплексный анализ. Сб. обзорных статей. Труды МИАН СССР. Т. 176. М.: Наука, 1987. С. 4–29.
Faddeev L.D. 30 years in mathematical physics // Mathematical physics and complex analysis. Collection of review articles. Proceedings of the MIAN USSR. V. 176. M.: Nauka, 1987. P. 4–29. (In Russ.)
2. *Фаддеев Л.Д.* Моя жизнь среди квантовых полей // Вестник РАН. 2014. № 9. С. 797–804.
Faddeev L.D. My life among quantum fields // Herald of the RAS. 2014. № 9. P. 797–804. (In Russ.)
3. *Фаддеев Л.Д.* Новая жизнь полной интегрируемости // УФН. 2013. Т. 183. № 5. С. 487–495.
Faddeev L.D. A new life of complete integrability // Physics—Uspekhi. 2013. V. 56. № 5. P. 465–472.
4. *Тахтаджян Л.А., Алексеев А.Ю., Арефьева И.Я. и др.* Научное наследие Л.Д. Фаддеева. Обзор работ // УМН. 2017. Т. 72. Вып. 6(438). С. 3–112. <https://doi.org/10.4213/rm9799>
Takhtajan L.A., Alekseev A.Yu., Aref'eva I.Ya. et al. Scientific heritage of L. D. Faddeev. Survey of papers // Russian Mathematical Surveys. 2017. V. 72. Is. 6. P. 977–1081.
5. *Semenov-Tian-Shansky M.* Some personal historic notes on our seminar. L.D. Faddeev's Seminar on

⁴ В списке отсутствует Ленинская премия, на которую Л.Д. номинировался несколько раз. Один из этих случаев особенно характерен. В начале 1980-х годов на премию были выдвинуты работы В.Е. Захарова, Л.Д. Фаддеева и А.Б. Шабата по классическому методу обратной задачи. Комитет по Ленинским премиям поддержал эту номинацию, но исключил из числа кандидатов А.Б. Шабата, после чего В.Е. Захаров и Л.Д. Фаддеев сняли свои кандидатуры.

- Mathematical Physics // Advances in Math. Sciences. V. 49 / M. Semenov-Tian-Shansky, ed. American Mathematical Society Translations. Ser. 2. V. 201. AMS, Providence, R.I., 2000. P. 1–8.
6. Interview with Professor L.D. Faddeev conducted by M. Semenov-Tian-Shansky // EMS Newsl. 2007. V. 64. P. 31–37.
7. *Aref'eva I, Semenov-Tian-Shansky M.A., Takhtajan L.A. Ludwig Faddeev (1934–2017) – His Work and Legacy // EMS Newsl. 2017. V. 104. P. 35–40.*
8. *Семёнов-Тян-Шанский М.А. О нашем учителе // Природа. 2017. № 5. С. 77–85.*
Semenov-Tian-Shansky M.A. About our teacher // Priroda. 2017. № 5. P. 77–85. (In Russ.)

FROM QUANTUM FIELD THEORY TO THE QUANTUM METHOD THE INVERSE PROBLEM

*ON THE 90TH ANNIVERSARY OF THE BIRTH OF ACADEMICIAN
L.D. FADDEEV*

M.A. Semenov-Tyan-Shanskiy^{a,b,*}

*^aSankt-St. Petersburg Department of the Mathematical Institute V.A. Steklov Russian Academy of Sciences,
St. Petersburg, Russia*

^bUniversity of Burgundy, Dijon, France

**E-mail: semenov@pdmi.ras.ru*

The article is dedicated to the life and work of a theoretical physicist and mathematician, a full member of the USSR Academy of Sciences and RAS L.D. Faddeev (1934–2017), the formation of his scientific school. Faddeev's works on scattering theory, quantum field theory, classical and quantum theory of integrable systems were included in the golden fund of world science and largely determined the face of modern mathematical physics. The author of the article is an employee of the Laboratory of Mathematical Problems of Physics created by L.D. Faddeev at the St. Petersburg Department of the V.A. Steklov Mathematical Institute of the Russian Academy of Sciences since its foundation.

Keywords: L.D. Faddeev, scattering theory, quantum three-body problem, gauge fields, Yang-Miller theory, theory of integrable systems, quantum solitons, classical and quantum inverse problem method.