

УДК 51(09)

100-летию Ричарда Фейнмана и Джулиана Швингера  
и 110-летию Льва Давидовича Ландау

## Ричард Фейнман и Джулиан Швингер и физика конденсированных сред в Советском Союзе

*Р. Р. Мухин*

Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова,  
филиал Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»  
309516 Старый Оскол, Белгородской обл., мкр. Макаренко, 42  
E-mail: mukhiny@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2018; принята к публикации 14.09.2018

**Цель.** Целью работы является изучение воздействия трудов Р. Фейнмана и Дж. Швингера на развитие физики конденсированных сред в Советском Союзе в конце 1940 – начале 1960-х годов. **Метод.** Исследование основано на анализе оригинальных работ с привлечением имеющейся литературы, касающейся рассматриваемого вопроса. **Результаты.** Перенос методов квантовой теории поля на проблему многих тел явилась очень сложной и нетривиальной задачей. Основной вклад в ее решение внесли физики из окружения Л.Д. Ландау. Созданный аппарат обладает большой степенью наглядности и обеспечивает автоматизм вычислений. С его помощью в большом количестве были решены самые разные задачи, недоступные при других подходах. Труды советских физиков, в свою очередь, оказали воздействие на творчество Р. Фейнмана и Дж. Швингера в таких областях, как теория сверхтекучести, проблема полярона, эффект Казимира. **Обсуждение.** Созданная квантово-полевая теория многих тел решающим образом способствовала бурному развитию физики конденсированных сред в последующие десятилетия, и до настоящего времени остается наиболее мощным и результативным инструментом теоретических исследований в этой области. Вклад советских физиков здесь трудно переоценить.

**Ключевые слова:** квантовая теория поля, проблема многих тел, функция Грина, диаграмма Фейнмана, ферми- и бозе-системы, конденсация Бозе–Эйнштейна, сверхпроводимость, сверхтекучесть.

<https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141>

**Образец цитирования:** Мухин Р.Р. Ричард Фейнман и Джулиан Швингер и физика конденсированных сред в Советском Союзе // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2018. Т. 26, № 5. С. 113–141. <https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141>

# Richard Feynman and Julian Schwinger and condensed matter physics in the Soviet Union

*R. R. Mukhin*

Sary Oskol Technological Institute named after A.A. Ugarov,  
the Branch of the National Research Technological University «MISiS»  
42, mkr. Makarenko, 309516 Sary Oskol, Belgorod region, Russia  
E-mail: mukhiny@mail.ru

*Received 29.05.2018; accepted for publication 14.09.2018*

**Aim.** The aim of the paper is to study the impact of the works of R. Feynman and J. Schwinger on the development of condensed matter physics in the Soviet Union in the end 1940s and early 1960s. **Method.** The research is based on the analysis of original works with the use of available literature concerning the issue under consideration. **Results.** The transfer of the methods of quantum field theory to the many-body problem was a very complex and nontrivial task. The main contribution to its solution was made by physicists from the environment of L.D. Landau. The created apparatus has a great degree of visibility and provides method of calculations brought to automatism. With its help in a large number were solved a variety of problems that are not available with other approaches. The works of Soviet physicists, in turn, had an impact on the work of R. Feynman and J. Schwinger in such areas as the theory of superfluidity, the polaron problem, the Casimir effect. **Discussion.** The quantum-field theory of many bodies that has been created has decisively contributed to the rapid development of the physics of condensed matter in the next decades, and until now remains the most powerful and effective tool for theoretical research in this field. Here the contribution of Soviet physicists can not be overestimated.

*Key words:* quantum field theory, many-body problem, Green's function, Feynman diagram, Fermi and Bose systems, Bose–Einstein condensation, superconductivity, superfluidity.

[https://doi.org/ 10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141](https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141)

*Reference:* Mukhin R.R. Richard Feynman and Julian Schwinger and condensed matter physics in the Soviet Union. *Izvestiya VUZ, Applied Nonlinear Dynamics*, 2018, vol. 26, no. 5, pp. 113–141. [https://doi.org/ 10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141](https://doi.org/10.18500/0869-6632-2018-26-5-113-141)

One cannot escape the feeling that these mathematical formulas have an independent existence and an intelligence of their own, that they are wiser than we are, wiser even than their discoverers, that we get more out of them than was originally put into them.

*Heinrich Hertz* [1, p. 16]

## Введение

В этом году исполняется 100 лет со дня рождения Ричарда Фейнмана и Джулиана Швингера – двух крупнейших физиков XX века, чьи идеи и созданные ими методы в значительной степени определяют лицо современной физической науки. Их личности неизменно привлекают внимание, им посвящена огромная литература. Данная работа касается менее затронутого аспекта творчества двух выдающихся физиков – воздействия их трудов на советскую физику конденсированных сред. В литературе до настоящего времени отсутствует целостное рассмотрение этого вопроса,

имеется лишь небольшое число работ, которые касаются только его отдельных сторон [2–8], а основная часть информации погребена в недрах физической и физико-мемуарной литературы. Между тем, именно в этой области советская теоретическая физика внесла свой главный вклад в мировую науку. Конечно, сама проблема является столь многосторонней, что в небольшой статье возможно наметить лишь основные моменты. Выбранный временной отрезок (конец 1940-х – начало 1960-х) относится к «золотым годам» советской науки, когда научные исследования развернулись в невиданных ранее масштабах.

Немного о том, как новые методы квантовой теории поля (КТП) проникли в среду советских физиков. Несмотря на начавшуюся «холодную войну» и почти полное прекращение в конце 1940-х всех личных контактов с западными физиками, информация о новейших достижениях продолжала поступать через научную периодику. Хотя квантовая теория поля не входила в то время в число приоритетных направлений развития физики в Советском Союзе, начавшаяся реализация атомной проблемы давала сильный импульс для исследований физики ядра и элементарных частиц. Круг физиков в Советском Союзе, интересовавшихся тогда КТП, был довольно узок. Видимо, в числе первых, кто ознакомился с новыми методами КТП, были теоретики Института физических проблем (ИФП), Курчатовского института (Лаборатория № 2) и Института теоретической и экспериментальной физики (Лаборатория № 3, ИТЭФ), группировавшиеся вокруг Л.Д. Ландау: Я.И. Померанчук, Я.А. Смородинский, А.А. Абрикосов, И.М. Халатников, А.Д. Галанин, В.Б. Берестецкий, Б.Л. Иоффе, А.П. Рудик, наезжавший из Харькова А.И. Ахиезер, позднее к ним присоединились А.Б. Мигдал, Л.П. Горьков, И.Е. Дзялошинский, С.Т. Беляев, В.М. Галицкий. Померанчук раньше других осознал, что наступила новая эра в КТП, что процедура перенормировок не «заметание пыли под ковер», а очень важный и конструктивный шаг вперед. Он внимательно следил за литературой, не расставался с журналами и читал их при любом удобном случае [9, с. 126]. Осенью 1951 года Я.И. Померанчук организовал свой семинар по квантовой теории поля и теории элементарных частиц. Вследствие режимного характера ИТЭФ, в котором Померанчук возглавлял теоретический отдел, семинар проходил в конференц-зале Института физических проблем по четвергам перед семинаром Л.Д. Ландау. В 1950 году сотрудники Померанчука В.Б. Берестецкий, А.Д. Галанин, Б.Л. Иоффе, А.П. Рудик приступили к интенсивному изучению работ Фейнмана, Швингера, Дайсона и других, выступали с докладами. Сам Померанчук непосредственно обратился к новым методам КТП лишь в следующем году, после возвращения из длительной командировки в Арзамас-16, где его привлекли к работам над проектом термоядерного оружия [10, с. 91; 11, с. 70; 12, с. 41, 43]. Как вспоминает Абрикосов, его первое знакомство с новыми методами КТП произошло на семинаре Ландау, на котором Смородинский рассказал о фейнмановских диаграммах [13]. По всей видимости, речь идет о докладе Смородинского, ставшего основой его обзора в УФН в ноябре 1949 года [14] по лэмбовскому сдвигу и аномальному магнитному моменту электрона. Если это так, то в утверждении Абрикосова имеется неточность, в обзоре [14] обсуждается другая работа Фейнмана [15], а диаграммная техника была им развита в статье, которая появилась в «Phys. Rev.» лишь в сентябрьском выпуске 1949 года [16]. Так или иначе, новые квантово-полевые методы увлекли Абрикосова и Халатникова, и они приступили к их детальному изучению [13]. Уже в 1952 году вышел обзор Берестецкого по релятивистской теории возмущений в КТП [17]. По словам Дзялошинского [2],

кроме статей в «Phys. Rev.», именно этот обзор Берестецкого сыграл значительную роль в овладении новыми методами. Но первое применение этих методов касалось военной тематики. На рубеже 1950–1951 годов группа Померанчука была привлечена к выполнению расчетов по проекту термоядерного оружия, который называли «Труба». Главная проблема заключалась в установлении баланса энергии между уносимыми квантами тормозного излучения с энергией первоначального излучения. От этого зависела принципиальная возможность осуществления самоподдерживающейся реакции. Вычисления продолжались около года. Сначала был проверен сделанный ранее расчет группой Ландау, в которой оказалась ошибка в вычислении сечения комптоновского рассеяния на электроны в плазме. Иоффе и Рудик с самого начала работали в ковариантной технике и вычислили сечение на движущемся электроны. Было установлено, что баланс энергии отрицателен. Стало ясно, что бомбу по такой схеме нельзя сделать принципиально [18, с. 71–72].

Первой работой, посвященной собственно физической задаче и выполненной в новой технике КТП, стала статья А.Д. Галанина [19] по радиационным поправкам. Ландау, в отличие от Померанчука, к появившимся в 1940-е годы методам КТП отнесся весьма прохладно, предлагаемые методы не выглядели для него убедительными. Померанчук неоднократно пытался привлечь внимание Ландау к новым методам, утверждая, что имеется целый ряд достойных его задач. На это Ландау отвечал, что задача устранения бесконечностей в КТП превышает его возможности. Дважды на семинаре Ландау попытки изложить работы Фейнмана окончились неудачей, докладчикам не дали возможности закончить свои выступления. Лишь на третий раз доклад был доведен до конца [20, р. 17; 21. р. 10]. В своем скепсисе Ландау был не одинок, критически-недоверчивое отношение к предложенным решениям проблемы устранения бесконечностей в КТП было характерно для многих физиков старшего поколения. Их отношение выражено в уничижительной оценке Паули: «вычитательная физика» [22, с. 76]. Представление о царивших умонастроениях дает конференция, проходившая весной 1948 года в Поконо (недалеко от Филадельфии), где присутствовали крупнейшие физики и на которой Фейнман и Швингер пытались изложить свои идеи. Фейнман вспоминал об этой конференции: Бете советовал ему сделать акцент на математическом формализме, но когда Фейнман пытался показать, как этот формализм работает и позволяет получать правильные результаты, Дирак перескочил к вопросу об унитарности, Бор пытался разъяснить принцип неопределенности, Теллер находил ошибки. В целом, старшее поколение не восприняло новых идей [23, р. 1051, 1055–1057].

Постепенно позиция Ландау менялась, чему способствовало воздействие его учеников и регулярное общение с другими теоретиками [20, 21]. Тогда он уже оценил мощь аппарата функций Грина и диаграммной техники как очень общего, систематического и логически обоснованного инструмента, прекрасно приспособленного для описания реальных физических явлений и процессов [4, р. 5]. Позднее, в 1959–1960-м учебном году, Ландау уже прочел в МГУ курс квантовой электродинамики с учетом всех новых достижений. К середине 1950-х в школе Ландау глубоко овладели квантово-полевыми методами, что имело огромное значение в описываемой истории. Заметим, что диссертации Абрикосова и Горькова были посвящены квантовой теории поля, хотя их главные достижения относятся к теории сверхпроводимости.

Ландау полагал, что, несмотря на все успехи в устранении бесконечностей в КТП, метод перенормировок носит рецептурный характер, в существующем виде препятствующий дальнейшему развитию теории. Внутренним стимулом для Ландау был поиск обоснования, он не мог работать вне атмосферы идейной ясности [24, с. 441]. Отметим, что и сам Фейнман не относился к процедуре перенормировок как к фундаменту теории, а скорее считал эффективным инструментом [25, р. 7]. Поиски обоснования привели к появлению четырех статей Л.Д. Ландау, А.А. Абрикосова и И.М. Халатникова [26–29]. Как вспоминал Халатников, он вместе с Абрикосовым по молодости лет пытался решить задачу точно и постоянно обсуждал ее с Ландау [30, с. 72].

Надо сказать, что конец 1940-х–1950-е годы было временем наивысшего взлета школы Ландау. По словам Дзялошинского, «Учебные приемы Ландау были суровы, порой даже жестоки. Столь же сурова и безжалостна была, как всем известно, и его научная критика. Однако, вспоминая годы, проведенные в его отделе в Институте физических проблем, каждый раз заново переживаешь ощущение уникальной полноты и интенсивности существования» [31, с. 117].

Для преодоления возникших трудностей Ландау предложил отбирать наиболее важные диаграммы и постепенно сам включился в работу. Как говорил Померанчук, «наконец-то мэтр взялся за достойную его задачу» [10, с. 93]. Было введено понятие об эффективной, зависящей от расстояния, константы взаимодействия, получены общие интегральные уравнения нулевого приближения и асимптотические выражения основных функций. Однако анализ результатов, проведенный Ландау и Померанчуком, привел к обескураживающему выводу: квантовая электродинамика оказывалась внутренне противоречивой на малых расстояниях вследствие обращения в нуль физического заряда электрона [32]. Такой же результат в то же время был получен в ФИАНе и Е.С. Фрадкиным [33]. Дальнейшее развитие показало, что возникшие трудности преодолеваются на другом пути. Квантовая электродинамика не является замкнутой теорией, электромагнитные взаимодействия должны быть объединены со слабыми и сильными взаимодействиями. Для сильных взаимодействий неабелевы калибровочные поля не подчиняются теореме о нуль-заряде, а обладают, в некотором смысле, противоположным свойством, получившим название «асимптотической свободы» [24]. Но результаты [26–29] не пропали даром, они вошли в квантово-полевую теорию многих частиц.

## **1. Методы квантовой теории поля в теории конденсированных сред**

В квантовой электродинамике до настоящего времени не решены некоторые принципиальные вопросы, но к началу 1950-х годов она сложилась как физическая теория, описывающая в замечательном согласии с экспериментом обширную область явлений, охватывающую, по крайней мере, 24 порядка – от субъядерных размеров до предельной комптоновской длины волны фотона, примерно  $5.5 \cdot 10^{10}$  см [34, с. 60]. Приведенные в эпиграфе слова Г. Герца были сказаны по поводу уравнений Максвелла, но их можно с полным основанием отнести и к творению Фейнмана и Швингера. Созданный ими математический аппарат имеет общезначимое значение и выходит далеко за рамки первоначальных целей. Довольно быстро было осознано,

что методы КТП можно успешно применять в проблеме многих тел. Уже в начале 1950-х эта идея носилась в воздухе. Вполне определенно по этому вопросу говорит Швингер: насколько он помнит, первую попытку применить методы КТП к проблеме многих тел предпринял около 1950 года его студент Р. Аронсон, но время тогда еще не пришло, и она была неудачной [35, р. 330]. Идеи о распространении методов квантовой теории поля на проблему многих тел попали на хорошо подготовленную почву, и в этой области особенно велик вклад советских физиков.

Центральное место и в квантовой теории поля, и в применении этих методов в теории конденсированных сред занимают функции Грина. Они проходят и через все научное творчество Швингера. Функции Грина очень информативны, с помощью одно- и двухчастичной функции Грина можно получить ответ практически на все вопросы системы многих тел. Происхождение термина и место функций Грина в научной жизни Швингера разъяснил он сам в лекции «The Greening of quantum field theory: George and I», прочитанной им в университете Ноттингема в 1993 году [35, р. 298]. В этой лекции Швингер вспомнил о Джордже Грине, мельнике из Ноттингема, который много занимался самообразованием, позднее окончил Кембриджский университет и стал основателем Кембриджской школы математической физики. Грин ввел в физику понятие потенциала и развил его теорию (1828 год) [36] и на этой основе решил многие задачи электростатики, получив целый ряд красивых и интересных результатов. В своем замечательном труде о распространении света в кристаллах (1839 год) Грин рассмотрел теперь повсеместно используемую и названную его именем динамическую функцию четырех переменных [37].

*Швингер:* «To continue the saga of George Green and me – my next step was to trace the influences of George Green on my own work. Here I spent no time over ancient documents. I went directly to a known source: THE WAR. Through those years in Cambridge (Massachusetts, that is) I gave a series of lectures of microwave propagation. The word *propagation* will have alerted you to the presence of George Green. ...Here I was mainly interested in the properties of the radiation emitted by an accelerated relativistic electron. I used the four-dimensional invariant proper time formulation of action. It included the electromagnetic self-action of the charge, which is to say that it employed a four-dimensional covariant Green's function. ...The temporal development of quantized fields, in its particle aspect, is described by propagation functions, or Green's functions» [35, р. 300, 302].

*Перевод:* «Чтобы продолжить сагу о Джордже Грине и обо мне, мой следующий шаг состоял в том, чтобы проследить влияние Джорджа Грина на мою собственную работу. Я не стал тратить времени на старые источники. Я прямо пошел к известному источнику: ВОЙНА. В те годы в Кембридже (штат Массачусетс) я прочел курс лекций по распространению микроволнового излучения. Слово *распространение* должно предупредить вас о присутствии Джорджа Грина. ...Меня в основном интересовали свойства излучения, испускаемого ускоренным релятивистским электроном. Я использовал четырехмерную инвариантную временную формулировку действия. Она включает электромагнитную реакцию излучения заряда, то есть используется четырехмерная ковариантная функция Грина. ...Временное развитие квантованных полей, в аспекте движения частицы, описывается функциями распространения или функциями Грина».

Следующим шагом Швингера явилось обобщение функций Грина в квантовой электродинамике [38–40].

Фейнман независимо ввел в квантовую электродинамику функции Грина, которые он назвал пропагаторами [16, 41]. В КТП функция Грина имеет иной смысл,

чем в теории дифференциальных уравнений. Функции Грина удовлетворяют уравнению, в правой части которого стоит  $\delta$ -функция, но в общем случае это уравнение нелинейное. Лишь функции Грина свободных частиц являются функциями Грина линейных уравнений для гейзенберговских операторов поля, но впоследствии были распространены на случай любой взаимодействующей системы. Функции Грина являются обобщением понятия свертки операторов – среднее по вакууму от хронологического произведения операторов полей, амплитуда перехода из состояния  $(\mathbf{r}', t')$  в состояние  $(\mathbf{r}, t)$  [8, с. 75].

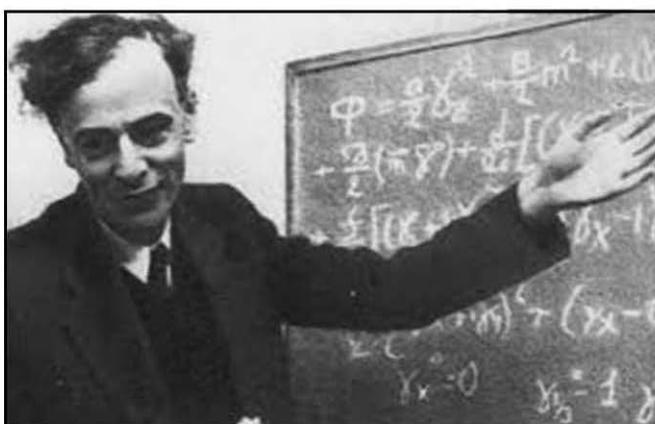
Проблема многих тел сводится к решению многочастичного уравнения Шредингера, которое не распадается на уравнения для одной частицы. Вследствие взаимодействия между частицами теряет смысл понятие о состоянии отдельной частицы, можно говорить лишь о состоянии системы в целом. Поэтому решение проблемы многих тел принципиально носит приближенный характер. Пожалуй, лучше всего о новых подходах к сложным многочастичным задачам сказано в предисловии монографии А.А. Абрикосова, Л.П. Горькова и И.Е. Дзялошинского.

«За последнее время в статистической физике были достигнуты значительные успехи благодаря широкому использованию методов, заимствованных из квантовой теории поля. Плодотворность этих методов связана с новой формулировкой теории возмущений и в первую очередь с широким использованием так называемых диаграмм Фейнмана [так в оригинале, – *Р.М.*]. Основное преимущество диаграммной техники состоит в ее наглядности: оперируя понятиями одночастичной задачи, эта техника позволяет установить структуру любого приближения и с помощью правил соответствия написать нужные выражения. Новые методы позволили решить большое количество вопросов, к которым нельзя было подступиться при старой формулировке теории, а также получить целый ряд новых общих соотношений. В настоящее время эти методы являются наиболее мощными и результативными в квантовой статистике» [8, с. 7].

Автоматический перенос методов КТП на проблему многих тел невозможен вследствие кардинальных различий этих двух областей физики. Требовалось проанализировать физические положения и характер системы, к которой будут применяться квантово-полевые методы, что являлось очень сложной и совершенно нетривиальной задачей. Применение аппарата КТП к проблеме многих тел впервые было сделано по предложению Н.Н. Боголюбова в 1954 году в работе В.Л. Бонч-Бруевича, опубликованной в следующем году [42]. В ней рассматривалась концепция функций Грина в основном состоянии и, в частности, был получен через функции Грина закон дисперсии квазичастиц. Главными действующими лицами в дальнейшей истории являются Ландау и физики из его окружения. Прежде всего следует назвать А.Б. Мигдала вместе с его учениками В.М. Галицким и С.Т. Беляевым. Мигдалу принадлежит одно из первых применений метода функций Грина в физике конденсированного состояния – в задаче влияния электрон-фононного взаимодействия на электронный спектр нормального металла (1958 год) [43]. Заметим, что Дж. Бардин в своей Нобелевской лекции [44] неоднократно ссылается на эту работу. Еще в начале 1950-х годов Мигдал, заинтересовавшийся явлением сверхпроводимости, еще до появления работы Г. Фрелиха [45] понял ключевое значение электрон-фононного взаимодействия и пришел к выводу, что в спектре одночастичных возбуждений должна быть щель. Эти идеи послужили толчком к изучению спектра возбуждений с помощью функций Грина, поскольку обычная теория возмущений не приводила к цели.



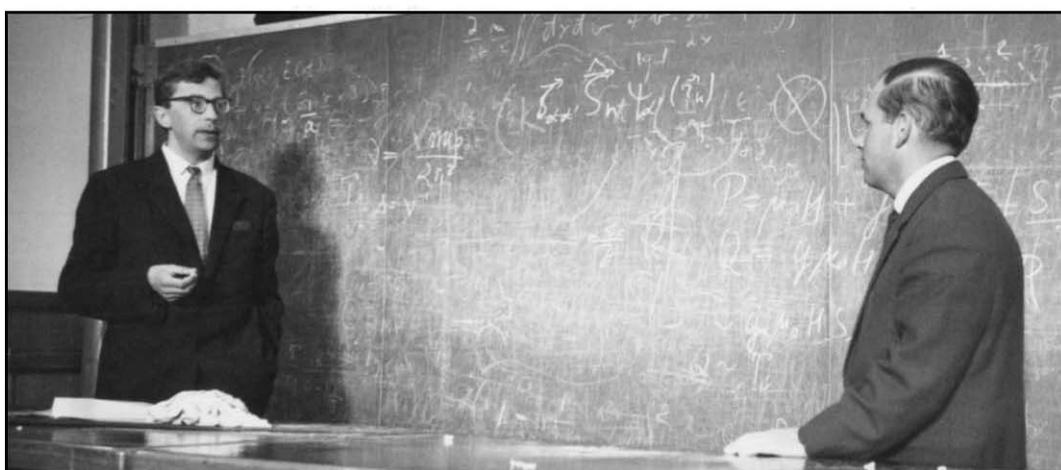
Shelter Island conference, 1947. Р. Фейнман (сидит, в центре),  
Дж. Швингер (стоит, второй справа)



Л.Д.Ландау



В.М.Галицкий



Л.П.Горьков и А.А.Абрикосов



И.Е.Дзялошинский



Л.В.Келдыш



С.Т.Беляев и А.Б.Мигдал

К сожалению, все эти идеи не были вовремя реализованы, работы Мигдала по теории конденсированного состояния были написаны с большим опозданием и опубликованы уже после появления теории БКШ [46, с. 8]. Нередко у Мигдала готовый результат с год отлеживался, лишь затем он его отправлял в печать.

Соответствующий формализм был создан в ставших классическими работах Мигдала, Галицкого и Беляева [47–50]. В работе Галицкого и Мигдала [47], посвященной систематическому применению метода функций Грина для ферми-систем при  $T = 0$ , были не только изучены аналитические свойства функций Грина, получены для них спектральные разложения, дисперсионные соотношения и энергетический спектр, но самое главное, на примере ферми-систем были изложены общие принципы построения соответствующего математического аппарата.

Для бозе-систем положение осложнялось из-за конденсации Бозе–Эйнштейна, когда макроскопически большое число частиц оказывается в состоянии с нулевым импульсом. Поэтому распространение методов КТП на бозе-системы вызвало большие трудности. Построение соответствующего формализма Беляевым [49] явилось очень значительным достижением. Принципиальный момент заключался в выделении с самого начала в операторах поля частей, соответствующих рождению и уничтожению частиц с нулевым импульсом. Тогда и функция Грина разделяется на функцию Грина «надконденсатных» частиц и функцию Грина конденсата. Затем Беляевым были изучены аналитические свойства функций Грина, дано спектральное разложение, построена диаграммная техника. Подобный формализм для построения теории сверхпроводимости был независимо также развит Горьковым [51]. Важное место занимает работа Ландау [52], которая ему самому очень нравилась и где он изучил аналитические свойства функций Грина на комплексной плоскости. Полученное при этом спектральное представление имеет самый общий характер.

В 1957 году в ЖЭТФ появилась короткая, но очень важная статья Мигдала [53]. В этой работе он рассмотрел систему из большого числа взаимодействующих ферми-частиц с произвольной величиной константы взаимодействия. Оказалось, что вопреки представлениям о размытии распределения по импульсам (при  $T = 0$ ) при сколь угодно слабом взаимодействии у этого распределения имеется скачок, который сохраняется при произвольной величине взаимодействия. Полученный результат находился в русле идей теории ферми-жидкости Ландау. Для взаимодействующих ферми-частиц обычно использовалась модель ферми-газа. Ландау указывал, что «остается неясным, какие свойства газовой модели отвечают действительности, а какие присущи только газу». Он исходил из того, «что по мере постепенного “включения” взаимодействия между атомами, то есть при переходе от газа к жидкости классификация уровней остается неизменной» [54]. Результат Мигдала [53] дал Ландау толчок к микроскопическому обоснованию основных положений его теории ферми-жидкости, которое он провел с помощью диаграммной техники [55].

Следующий шаг заключался в переходе к теории неидеального ферми- и бозе-газа, что было сделано Галицким [48] и Беляевым [50]. Традиционно ферми- и бозе-системы с взаимодействием изучались на основе теории возмущений, что вынуждало ограничиться рассмотрением самых простых ситуаций. Результаты, полученные в [48, 50], позволили перейти к задачам при значительно более общих условиях, взаимодействие учитывалось точно, пренебрегалось только многократными соударениями. Были установлены энергетические спектры ферми- и бозе-газов, звуковые возбуждения и т.д.

Проблема многих тел значительно усложняется для ненулевых температур. При вычислении термодинамических величин обычно использовали термодинамическую теорию возмущений [56]. Однако уже вычисление с точностью до третьего порядка представляет весьма сложную задачу, а суммирование бесконечной последовательности совершенно безнадежно. Поэтому очень привлекательно использование диаграммной техники, которая позволяет наглядно представить структуру и характер любого приближения. Квантово-полевые методы, развитые для  $T = 0$ , не допускают прямого обобщения для  $T \neq 0$ . Важный шаг был сделан японским физиком Т. Мацубарой, который изменил определение функции Грина и развил соответствующий математический аппарат, позволяющий найти различные термодинамические

величины макроскопической системы [57]. Ключевой момент в рассмотрении Мацубары – введение мнимого времени  $i\tau$ , меняющегося в интервале от  $-i/T$  до 0. Справедливости ради надо указать, что идея введения мнимого времени принадлежит Р. Кубо, а его ученик Мацубара лишь реализовал ее [58, р. 234]. Богатство приложений квантово-полевых методов, автоматизм вычислений для случая нулевой температуры в значительной степени стал возможен благодаря разложению в интеграл Фурье по всем четырем пространственно-временным координатам. Спектральное представление функции Грина является принципиальным моментом в обосновании концепции квазичастиц. Фурье-образ функции Грина позволяет найти спектр элементарных возбуждений системы, закон дисперсии и затухание, удобно использование диаграммной техники. Но в методе Мацубары из-за конечного интервала изменения  $\tau$  разложение в интеграл Фурье по  $\tau$  становится невозможным и многие преимущества аппарата функций Грина исчезают. Эту трудность удалось преодолеть благодаря простому и элегантному приему, предложенному независимо в работах А.А. Абрикосова, Л.П. Горькова, И.Е. Дзялошинского [59], Е.С. Фрадкина [60] и теперь вошедшему во все учебники. Ими было показано, что при разложении величин, зависящих от  $\tau$ , в ряд Фурье для температурных функций Грина  $G_T$  можно использовать уже ставшую привычной диаграммную технику, развитую для нулевой температуры. В 1959 году в работе Н.Н. Боголюбова и его ученика С.В. Тябликова [61] были введены запаздывающие  $G_r(t, t')$  и опережающие функции Грина  $G_a(t, t')$ . Они отличаются от рассматривавшихся до этого заимствованных из КТП причинных функций Грина  $G_c(t, t')$  тем, что в них не проводится хронологическое упорядочение операторов, а присутствует разрывный множитель  $\theta(t)$ , определяющий, когда эти функции отличны от нуля. Каждый из этих типов функций Грина имеет свои преимущества. Запаздывающая и опережающая функции Грина обладают более простыми аналитическими свойствами, чем причинная функция  $G_c(t, t')$ , но для них, в отличие от  $G_c(t, t')$ , не удастся развить диаграммную технику. Трудности с температурной функцией Грина приводят к задаче построения по известной  $G_T$  от мнимого времени функции  $G_r$  в реальном времени. Эта задача была решена с помощью аналитического продолжения  $G_T$  с дискретного множества точек на верхнюю полуплоскость [59, 60]. При этом никак не используется конкретный вид функций Грина, а лишь их аналитические свойства, поэтому полученные результаты имеют такой же общий характер, как, скажем, дисперсионные соотношения для комплексного показателя преломления. Таким образом, аналитическое продолжение диаграмм с мнимых на действительные частоты позволяет использовать всю мощь диаграммной техники для многих задач, в частности, для нахождения кинетических характеристик.

К числу важнейших работ по теории сверхпроводимости относятся две статьи Л.П. Горькова [51, 62], опубликованные в 1958–1959 годах. Об истории создания этих работ рассказал сам Горьков [63].

«Sometime in October 1957 it got abroad that N.N. Bogolyubov had finished the paper on the theory of superconductivity. He was invited to give a talk at the Landau Seminar in the Kapitza Institute. The seminar started with somewhat heated debates. Bogolyubov focused on the formal part, i.e. on the details of his method of the canonical transformation, Landau, as usual, preferred to first hear the physics behind it. It was difficult for him to get through the formal Bogolyubov's 'principle of compensation of "most dangerous" diagrams'. Indeed,

as we have seen it above, the “principle” itself was not very transparent, to say the least! Landau wanted to know the nature of the new vacuum. Here I need to explain that neither the Cooper paper [64] published in 1956, nor the short BCS letter [65] had attracted the attention of anyone in the Landau group. After the seminar break, N.N. Bogolyubov finally resorted to mentioning Cooper’s result. He repeated the calculations by Cooper on the blackboard. Its transparent physics had the immediate effect of pacifying Landau. As I was listening, it crossed my mind that the instability of the Fermi sea in the presence of a weak attraction between electrons that results in the spontaneous formation of pairs, also involves the emergence of a bosonic degree of freedom, and I decided to play with the idea» [63, p. 114].

*Перевод:* «В октябре 1957 года стало известно, что Н. Н. Боголюбов закончил свою работу по теории сверхпроводимости. Его пригласили выступить на семинаре Ландау в Институте Капицы. Семинар начался с жарких дебатов. Боголюбов сосредоточился на формальной части, на деталях примененного им своего метода канонического преобразования, Ландау, как обычно, предпочел выяснить с самого начала какая физика стоит за этим. Ему было трудно принять формальный принцип Боголюбова компенсации «наиболее опасных» диаграмм. Действительно, как мы видели, сам «принцип» был, мягко говоря, не очень ясным! Ландау хотел узнать природу нового вакуумного состояния. Здесь нужно сказать, что ни статья Купера [64], опубликованная в 1956 году, ни короткая заметка БКШ [65] не привлекали внимания никого из группы Ландау. После перерыва в работе семинара Н.Н. Боголюбов, наконец, изложил упомянутый результат Купера. Он повторил расчеты Купера на доске. Эта ясная физика сразу же умиротворила Ландау. При изложении этого результата мне пришло в голову, что нестабильность фермиевского распределения при наличии слабого притяжения между электронами приводит к спонтанному образованию пар, что связано с возникновением бозонной степени свободы, и я решил развивать эту идею».

Надо заметить, что отличительной чертой Боголюбова являлась быстрая и точная оценка чужих результатов. Так, он сразу понял и оценил ключевое значение работы Купера [64]. К сожалению, в окружении Ландау эта работа Купера не привлекла внимания. Вот что говорит об этом Беляев.

«Помню, на семинаре в институте Физпроблем, где обсуждалась новая теория сверхпроводимости БКШ, в перерыве Ландау упрекнул меня и Галицкого:

– Знаю, что АБ [А.Б. Мигдал, – *Р.М.*] за журнальными публикациями не следит, но почему вы не указали ему на заметку Купера. Ведь после этого для АБ ничего не стоило сделать все остальное. У него все было готово.

Ландау мы ничего не возразили, но потом Галицкий мне сказал:

– Говорил я АБ об этой работе, он ее не воспринял» [66, с. 15–16].

Горьков в своей работе [51] использовал тот же 4-фермионный гамильтониан, что и в теории БКШ и сам Боголюбов. В основу была положена идея, что переход в сверхпроводящее состояние можно рассматривать как своего рода бозе-эйнштейновскую конденсацию куперовских пар, число которых представляет новую динамическую переменную. Вследствие образования конденсата Горьков ввел аномальные функции Грина, которые отличны от нуля только для сверхпроводящего состояния. Аномальная функция Грина с точностью до множителя является волновой функцией пары. Система уравнений Горькова сходна с уравнениями Беляева для бозе-систем [49]. Полюсы функции Грина определяют спектр возбуждений, который в данном случае имеет щель. Уравнения Горькова являются градиентно инвариант-

ными, что сразу снимает трудность теории БКШ о поведении сверхпроводников в магнитном поле. Работа Горькова [51] была выполнена очень быстро, в середине ноября она уже поступила в редакцию «ЖЭТФ» и оказалась настолько законченной, что формализм Горькова стал основным методом в теории сверхпроводимости. В другой работе [62] Горьков дал из своей теории микроскопический вывод уравнений Гинзбурга–Ландау, которым удовлетворяет параметр порядка вблизи температуры перехода  $T_c$ , при этом заряд электрона  $e$  нужно заменить на заряд пары  $2e$ . На Западе часто используется термин «Nambu–Gor’kov formalism» – подобный формализм позже Горькова, но почему-то без ссылки на него, был также развит Й. Намбу [67].

Эти достижения советских физиков по применению квантово-полевых методов были быстро оценены по достоинству. С середины 1950-х годов ряд ведущих советских научных журналов стал регулярно переводиться в США, что значительно ускорило обмен научной информацией. В широко известной статье П. Мартина и Дж. Швингера [68] авторы развили общие методы исследования проблемы многих тел с позиций КТП, исходя из функциональных дифференциальных уравнений. Туда вошли и результаты Мигдала, Галицкого, Беляева, Горькова [47–51, 53]. Только работа Мигдала [53] была опубликована в 1957 году, все остальные вышли в следующем году, статья же Мартина и Швингера [68] появилась в «Phys. Rev.» в середине сентября 1959 года. Учитывая разницу во времени между выходом «ЖЭТФ» у нас и переводом его в США, можно оценить, как быстро были восприняты работы советских физиков. Репринты работ Галицкого и Мигдала [47] и Беляева [49, 50] включены в качестве приложения в монографию Д. Пайнса (1961) [69], написанную по материалам лекций, прочитанных автором в различных университетах и лабораториях. Р. Шриффер одним из первых оценил достоинства квантово-полевых методов в теории сверхпроводимости. В своей монографии [70], на основе лекций в Пенсильванском университете осенью 1962 года, он использует формализм Горькова (или Намбу–Горькова).

Назрела пора последовательного и систематического изложения используемого аппарата. Сначала появились обзоры, самый первый принадлежит ученику Боголюбова – Д.Н. Зубареву (1960 год) [71]. Этот обзор посвящен, главным образом, запаздывающим и опережающим функциям Грина. Вскоре, в начале следующего года был опубликован обзор А.И. Алексеева [72]. До появления монографической литературы разными авторами составлялись курсы лекций по проблеме многих тел. Таким был курс Д.А. Киржница, прочитанный им по инициативе И.Е. Тамма и В.Л. Гинзбурга в 1960–1961 годах для сотрудников ФИАНа и Физико-энергетического института в Обнинске. На основе этого курса впоследствии была написана монография [7]. В 1961 году появилась монография В.Л. Бонч-Бруевича и С.В. Тябликова «Метод функций Грина в статистической механике» [73]. Эта монография и уже упомянутая книга Д. Пайнса «The many-body problem» [69] явились первыми изданиями в мировой литературе по данному вопросу.

Необходимость монографии по квантово-полевым методам обсуждалась и в окружении Ландау. Как вспоминает С.Т. Беляев:

«В конце 50-х АБ [А.Б. Мигдал, – Р.М.] предложил Галицкому и мне написать книгу о квантовой теории многих тел. Договорились отключиться от всего, уединившись зимой на даче его приятеля-художника. В результате мы славно провели время, но дальше пары страниц общего плана дело не пошло» [66, с. 15].

Такая книга все же была написана, но другими авторами. Речь идет об уже упоминавшейся монографии А.А. Абрикосова, Л.П. Горькова, И.Е. Дзялошинского «Методы квантовой теории поля в статистической физике» [8], вышедшей из печати в 1962 году. Авторы сами активно работали в данной области. Работа шла очень быстро, свою часть Дзялошинский написал за две недели, не требовалось никаких консультаций [2]. То, что удалось сделать, вошло в классику научной литературы. Монография написана в традициях «Курса теоретической физики» Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица. Не случайно эта книга явилась основой IX тома «Курса». Уже на следующий 1963 год вышло английское издание [74], за период 1963–2012 годов монография была переиздана 63 раза на четырех языках. Она стала настольной книгой для всех, кто интересуется вопросами статистической физики и физики конденсированного состояния. Про нее сказано «evergreen book by Abrikosov, Gor'kov and Dzyaloshinsky» [75], она во многом способствовала революции в квантовой физике многих тел в 1960–1970-е годы [58]. Несмотря на десятки, а может, и сотни книг, написанных на разных языках и в разных странах, монография [8] остается основной и самой цитируемой по квантовой теории многих тел.

Логика развития требовала перехода к неравновесным системам, и первые шаги уже были сделаны. Формализм Р. Кубо (1957 год) давал возможность изучить линейную реакцию статистической системы на переменное внешнее воздействие. При этом кинетические коэффициенты выражались через равновесные временные корреляционные функции [76, 77]. Другой подход, относящийся к слабо неравновесным состояниям, связан с использованием температурных функций Грина, что позволяет рассматривать кинетические явления [8, 3].

К началу 1960-х наметились квантово-полевые подходы к системам в произвольном неравновесном состоянии. Это работы Дж. Швингера [78], Л. Каданова и Г. Бейма [79], О.В. Константинова и В.И. Переля [80]. Но главная заслуга создания диаграммной техники для систем в произвольном неравновесном и нестационарном состоянии, формулировка простых правил, обеспечивающих автоматизм вычислений, принадлежит Л.В. Келдышу [81]. Техника Келдыша сохраняет все преимущества обычной диаграммной техники, позволяя проводить суммирование диаграмм «блоками» [81, 3].

Л.В. Келдыш вырос в семье, относящейся к научной элите. Его отчим, П.С. Новиков, является основателем советской школы математической логики. Дядя со стороны матери, М.В. Келдыш, был одной из главных фигур советской космической программы, в 1961–1975 годах являлся президентом Академии Наук СССР. Сводный брат, С.П. Новиков, принадлежит к числу крупнейших топологов XX века, он первым из советских математиков был награжден медалью Филдса. По словам самого Л.В. Келдыша [4], некоторые его друзья были из окружения Ландау (как, например, Дзялошинский), что оказывало влияние на его взгляды и предпочтения. Как и его учитель В.Л. Гинзбург, Келдыш регулярно участвовал в работе семинара Ландау.

*Л.В. Келдыш:* «My interest in the NGFs problem started in the very beginning of 1964 and was motivated purely aesthetically. The Feynman graph technique seemed to me so natural and logical that it was hard to believe that its applicability is restricted to an important but very special class of states – ground state or thermodynamic equilibrium. So the program was most simple and straightforward: to follow step by step the original Feynman-Dyson derivation, checking at what step it becomes invalid for an arbitrary state and then trying to overcome the arising difficulties, staying as close as possible to the original formulation» [4, p. 7].

*Перевод:* «Мой интерес к проблеме НФГ [неравновесных функций Грина, – Р.М.] возник в самом начале 1964 года и мотивация была чисто эстетической. Метод фейнмановских диаграмм казался мне настолько естественным и логичным, что было трудно поверить, что его применимость ограничена важными, но весьма специальными состояниями – основным состоянием или термодинамическим равновесием. Таким образом, программа была простой и ясной: последовательно шаг за шагом следовать исходному выводу Фейнмана–Дайсона, проверяя, на каком этапе он становится неприменимым для произвольного состояния, а затем пытаться преодолеть возникающие трудности, оставаясь как можно ближе к исходной формулировке».

Не так уж часто побудительными причинами научных исследований являются столь явно выраженные эстетические факторы. Тут можно вспомнить Дирака, с его стремлением к математической красоте физической теории.

Теперь о другой стороне излагаемой истории, когда главные действующие лица поменялись ролями, – о воздействии работ советских физиков на творчество самих Фейнмана и Швингера. Фейнман узнал о работах Ландау по сверхтекучести, еще работая в Корнеллском университете (1945–1950 годы), и уже тогда стал задумываться о природе перехода в сверхтекучее состояние [82, р. 350]. Непосредственно к проблеме сверхтекучести Фейнман обратился в начале 1950-х годов, работая уже в Калифорнийском технологическом институте (Калтех). В 1953–1957 годах появились его работы по сверхтекучести [83–87], и он занял лидирующее положение в этой области.

Ландау долго не воспринимал восходящей к Ф. Лондону идеи о бозе–эйнштейновской конденсации при переходе в сверхтекучее состояние [88] и построил свою теорию на полуфеноменологической основе. Здесь надо обратить внимание на один фактор, имеющий не последнее значение в описываемой истории. Некоторые черты личности Ландау оборачивались против него самого, не позволив ему воспринять ряд идей, реализация которых привела к работам нобелевского уровня. Это не только касается бозе–эйнштейновской конденсации, которой Фейнман придавал центральное значение в явлении сверхтекучести. Сказанное относится и к экспериментам Андроникашвили в 1948 году по вращению жидкого гелия. Скепсис Ландау к этим экспериментам преодолеть не удалось [88, с. 167–169]. Андроникашвили не опубликовал свои результаты, внося их только в свою диссертацию. Через четыре года один из экспериментов Андроникашвили повторил в Кембридже Д. Осборн, придя к таким же результатам [89], которые сразу стали широко известны, но и это не переубедило Ландау. Лишь позднее Ландау изменил свое мнение и вместе с Е.М. Лифшицем построил (1955) теорию вращения жидкого  $^4\text{He}$  на основе экспериментов Андроникашвили [90; 88, с. 168]. Но в том же 1955 году появилась работа Фейнмана [91], в которой была построена теория квантованных вихрей в сверхтекучем  $^4\text{He}$ , являющихся фундаментальным свойством, обеспечивающим незатухающий характер сверхтекучего движения. Такая же идея ранее была выдвинута Л. Онзагером (не опубликовано, см. [92, р. 151]). Свою работу [90] Ландау и Лифшиц посчитали ошибочной, она даже не включена в собрание трудов Ландау 1969 года [93]. Однако их оценка оказалась слишком поспешной. Отметим, что в американском издании трудов Ландау 1965 года [94], появившемся на четыре года раньше советского, эта статья [90] имеется. Американские редакторы оказались более дальновидными, и они сочли, что эта работа достойна внимания. Дальше события развертывались весьма интересно. По теории Ландау и Лифшица [90], безвихревое круговое течение

жидкого гелия сосредоточено между вихревыми листами, имеющими нетривиальную топологию и на которых происходит тангенциальный разрыв скорости. Ландау и Лифшиц получили уравнение, связывающее расстояние между вихревыми листами с угловой скоростью вращения. Все это через четыре десятилетия получило экспериментальное подтверждение в сверхтекучих квантовых жидкостях с многокомпонентным параметром порядка, к которым относится жидкий  $^3\text{He}$  [95]. Здесь еще надо заметить, что с начала 1950-х годов Ландау стал отходить от проблематики сверхтекучести. Возможно, на смещение его интересов в определенной степени повлияла смена руководства ИФП, когда в 1946 году Капица попал в опалу, был снят со всех постов и был вынужден покинуть институт. С его уходом физика низких температур перестала быть основным направлением исследований ИФП.

Но история со сверхтекучестью на этом не заканчивается, она связана с А.А. Абрикосовым – одним из самых ярких представителей школы Ландау. Изучая вопрос о магнитных свойствах сверхпроводников второго рода, Абрикосов теоретически предсказал существование в них решетки квантованных вихрей в 1957 году [96], это стало его нобелевской работой. Абрикосов вспоминал, что главные результаты он получил еще в 1953 году. Он тогда надолго заболел и однажды его навещил Ландау. Абрикосов рассказал о вихревой решетке, но Ландау не воспринял идеи и обещал вернуться к ней после выздоровления. Но и позже Ландау не изменил своей позиции. Абрикосову пришлось убрать листы со своими расчетами в ящик стола до лучших времен. Когда в 1955-м году были опубликованы результаты Фейнмана о квантованных вихрях [91], Абрикосов спросил Ландау, почему он принимает результаты Фейнмана и отвергает ту же идею у него. На возражение Ландау, что у Абрикосова совершенно иное, он показал свои выкладки. На этот раз у Ландау не было возражений [5, р. 57–58].

Вышесказанное может создать впечатление о крайнем консерватизме Ландау, его невосприимчивости к новым идеям. Такое утверждение было бы поспешным. Его опровергают многие ученики и люди, близко знавшие Ландау, в том числе и Абрикосов (см., например, [31, 97–99]). Только одно свидетельство.

*Е.Л. Фейнберг:* «Нечего соваться к нему с недоделанным, не понятным, насколько ты способен, до конца, с тем, что ты сам не можешь отстаивать столь же аргументированно, сколь он критикует. ...Он всегда разговаривал "на равных". Он всегда как бы предполагал, что его собеседник – "взрослый человек", он должен иметь свое мнение и отвечать за свои слова. Авторитет Дау был чрезвычайно высок, и, может быть, ему следовало почаще вспоминать, осторожнее обращаться с этим опасным оружием, помнить, что разговор, как правило, все-таки происходит на самом деле отнюдь не "на равных"» [100, с. 258–259].

В истории с Абрикосовым неизвестно, в какой степени готовности в 1953 году была его работа [96]. Она поступила в редакцию «ЖЭТФ» 15 ноября 1956 года. Если даже принять, что сборник [91] с работой Фейнмана стал известен у нас в самом конце 1955 года, Абрикосову понадобился не один месяц, чтобы завершить свою работу.

Другая точка пересечения Фейнмана и советских физиков – теория поляронов, ставшая уже классической областью физики твердого тела.

Электрон в полярном кристалле воздействием своего поля деформирует (поляризует) ионную решетку. Эта идея об автолокализации электрона была высказана Ландау еще в 1933 году [101]. Вскоре в работе Я.И. Френкеля [102] было показа-

но, что локальная деформация может перемещаться вместе с электроном. Эта идея была последовательно реализована С.И. Пекаром в 1946 году [103]. Так зародилась концепция полярона – составной квазичастицы, представляющей собой электрон, окруженный облаком фононов. Несмотря на интенсивные исследования поляронов вот уже более полувека, в этой области остается много нерешенных вопросов. Для поляронов сильной связи важное значение имеет полученное Ландау и Пекаром выражение для эффективной массы [104]. Все полученные к 1950 году результаты суммированы в монографии Пекара [105].

По словам Фейнмана, он в конце октября 1954 года, сидя в библиотеке, случайно натолкнулся на статью Г. Фрелиха [106] о поляронах в кристаллах галогенидов. При этом Фрелих указывал, что решение проблемы поляронов сможет подсказать путь к разгадке проблемы сверхпроводимости, что заинтриговало Фейнмана, ведь эта нерешенная загадка тогда будоражила научное сообщество. Фейнман увидел аналогию между электроном в поле фононов и частицей, взаимодействующей с полем мезонов, и что здесь можно будет использовать развитую технику континуального интегрирования [82, р. 404]. Для оценки континуальных интегралов Фейнман разработал вариационный принцип и применил его для вычисления энергетического спектра и эффективной массы полярона, отметим, при произвольной величине константы электрон-фононного взаимодействия [107]. Формализм Фейнмана имел определяющее значение для другой важной задачи – подвижности поляронов, которая была решена через несколько лет Фейнманом с соавторами в 1962 году [108].

Еще об одном пересечении советских и американских физиков. В 1975 году Швингер обратился к эффекту Казимира, являющемуся фундаментальным аспектом КТП и заключающемуся в поляризации вакуума вследствие изменения спектра вакуумных колебаний при ограничении объема квантования или при отличии топологии пространства от евклидовой [109]. Е.М. Лифшиц пришел к другой интерпретации этого эффекта – как сил Ван-дер-Ваальса между молекулами, и построил общую теорию взаимодействия между произвольными телами, сближенными до малых, но макроскопических расстояний [110, 111]. Эти работы Лифшица получили широкое признание в научном мире. Между Лифшицем и Швингером по данному вопросу завязалась переписка [35, р. 533].

## **2. Личные контакты: Состоявшиеся и которые могли состояться**

Швингер несколько раз посещал Советский Союз и встречался с нашими физиками, но эти встречи не оставили заметного следа. Причина, возможно, заключается в особенностях самого Швингера, изложение им своих идей было очень трудным для восприятия. С Фейнманом ситуация иная, определяющее значение имели его личные качества. Он был знаком с рядом советских физиков, среди которых И.Е. Тамм, В.Л. Гинзбург, Э.Л. Андроникашвили, А.Б. Мигдал. Особое значение имеет линия Фейнман–Ландау. Сами они никогда не встречались, между тем непосредственные контакты имели бы огромное значение. Как известно, Ландау не читал физическую литературу, а всю информацию воспринимал из общения с другими физиками. Ландау был приглашен, но не имел возможности поехать на упомянутую выше конференцию в Поконо в 1948 году, где присутствовали крупнейшие физики. К началу 1960-х годов у Ландау происходила внутренняя переориентация к

теории элементарных частиц и КТП. Он мог сделать намного больше [112, с. 126; 113, с. 134]. Контакты с Фейнманом, непосредственное общение могли способствовать обращению Ландау в «новую веру». Фейнман и Ландау проявляли живой интерес друг к другу, это были родственные души, между ними была глубокая взаимная симпатия.

Фейнману так и не удалось посетить Советский Союз, и препятствиями явились причины политического характера. Здесь хочется затронуть его последнюю попытку. Фейнман был человеком широких интересов и увлекался всем новым и необычным. К числу его последних увлечений относится Тува с ее обнаруженной в последние десятилетия уникальной цивилизацией. Об этом подробно писал Р. Лейтон [114, 115]. Интерес Фейнмана к Туве усилился после того, как он познакомился с книгой крупнейшего специалиста по этнографии Тувы Севьяна Вайнштейна [116]. В своем интервью В. Тишкову Вайнштейн рассказал, как он оказался вовлеченным в интерес Фейнмана к Туве. Поскольку физики обычно не читают такие журналы, как «Этнографическое обозрение», где опубликовано интервью Вайнштейна [117], приведем его соответствующую часть.

«В.Т.: А теперь меня интересует история с Фейнманом: на мой взгляд, это какая-то романтическая драма.

С.В.: В Англии вышел дополненный перевод моей книги «Историческая этнография тувинцев» [116]. И через какое-то время, где-то в начале 1980-х годов, я получаю письмо от неизвестного мне человека. Подпись: Ричард Фейнман. Он пишет: «Я познакомился с Вашей книгой. Она мне показалась чрезвычайно интересной, и теперь у меня непреодолимое желание побывать в Туве. Я обратился во все туристические фирмы. Во-первых, никто не организует поездки в Туву, во-вторых, до меня дошло, что вообще туда закрыт въезд для иностранцев. Но я надеюсь, что Ваш авторитет в науке позволит все-таки помочь мне добраться до Тувы. Я этого очень хочу. Знаю, что Тува чрезвычайно интересна. Я очень прошу Вас меня поддержать».

Я думаю: кто это? Он не написал о себе ни слова. Письмо на бланке Калифорнийского технологического института. Я подумал-подумал: что я могу написать? Позвонил, узнал. Говорят: «Нет, в Туву въезд для иностранцев пока закрыт». И я решил не писать вообще. Вдруг раздается телефонный звонок.

– Севьян Израилевич?

– Да.

– С Вами говорит академик Гинзбург. Знаете, у меня было чрезвычайно сложное положение. Я был на приеме у президента Рейгана. Он ученых принимал, в том числе нашу делегацию. И ко мне подошел знаменитый Ричард Фейнман и сказал: «Я послал письмо профессору Вайнштейну в Москву. Узнал его адрес через соответствующие каналы. И он письмо мое не получил». Я говорю: «Не может этого быть» – «Не получил. Если бы получил, дал бы ответ».

В.Л. Гинзбург спрашивает меня: «Вы знаете, кто такой Фейнман?» И начал рассказывать мне, что это великий ученый, крупнейший физик. Он сделал величайшее открытие XX в. после теории относительности Эйнштейна, получил Нобелевскую премию. Все физики во всем мире изучают его книги. Лекции Фейнмана всемирно известны. Это человек, который украшает нашу планету. «Я, – говорит, – обещал ему позвонить Вам и все выяснить».

«Да, – отвечаю, – я получил письмо, но, опасаясь, что не могу дать положительного ответа, вообще не написал ничего». Он говорит: «Зря. А как Вы сейчас на это смотрите, после того как я с Вами побеседовал?»

– Я готов ему не только послать письмо, но и книгу.

– Прекрасно. Завтра в девять утра у Вас будет курьер, которого я пошлю. Он

у Вас возьмет письмо, а я послезавтра лечу в Америку. У нас совместный проект по изучению планетарной гравитации, в котором задействованы Фейнман, я, наш институт.

Я подарил Фейнману книгу “Искусство Тувы”. Она очень хорошо издана, с цветными иллюстрациями. И отправил письмо, в котором писал, что приложу все силы, чтобы его пригласить. После этого я собрался идти к Е.П. Велихову. И предварительно спросил Гинзбурга: “Вы с Велиховым контакт имеете?”

– Конечно.

– А Вы не можете помочь мне с ним встретиться?

– Пожалуйста. Назначьте, когда Вы хотите. Хоть завтра, хоть послезавтра. Вам позвонят из Президиума. Мне позвонили, сказали: “Велихов ждет Вас в такое-то время”. Я к нему пришел, а он говорит: “Знаете, есть одна маленькая возможность его пригласить. Если он согласится прочитать курс публичных лекций в Москве, а за это время, может быть, мы что-то сделаем, чтобы он мог поехать в Туву”. К сожалению, эта поездка не состоялась.

Фейнман пригласил меня в Америку. Но я все тянул с этой поездкой. Потом все-таки поехал. Пришел на квартиру к Фейнману, и мне его жена поведала очень печальную историю. Что за несколько месяцев до этого ему поставили диагноз рак поджелудочной железы, что это мучительная и сложная болезнь, которая трудно лечится. Там была возможность эвтаназии. Он пригласил нотариуса, врача, психиатра, в общем, целую комиссию. Ему сделали укол, и он добровольно ушел из жизни.

Фейнман оставил кассету с кратким обращением ко мне, что он приносит свои извинения, что мы не увидимся, что он уходит из этого мира. И что среди очень ярких и теплых воспоминаний о прошедшей жизни – переписка со мной. Об этом в Америке опубликована книга “Tuva or Bust!” (“Тува, во что бы то ни стало!”)» [115].

Вот такая очень грустная история.

*Основные положения статьи были изложены в докладе на XXIV ежегодной конференции Института истории естествознания и техники РАН (2018). Приношу благодарность всем принимавшим участие в обсуждении доклада и А.Ю. Захарову, предоставившему некоторые материалы.*

## **Библиографический список**

1. *Bell E.T.* Men of Mathematics. Vol. 1. London: Penguin books, 1953. 323 p.
2. Interview with Igor E. Dzyloshinskii // Physics of Scale Activities, 14–15 December, 2001. Irvine, California. Pp. 1–41.
3. *Арсеев П.И.* О диаграммной технике для неравновесных систем: Вывод, некоторые особенности и некоторые применения // УФН. 2015. Т. 185, № 12. С. 1271–1321.
4. *Keldysh L.V.* Real-time nonequilibrium Green’s functions // Proc. of conf. «Progress in Nonequilibrium Green’s Functions», Dresden, Germany, 19–22, August 2002. Pp. 4–17.
5. *Abrikosov A.A.* My years with Landau // Physics today. 1973. January. Pp. 55–60.
6. *Гинзбург В.Л.* О науке, о себе и о других. М.: Физматлит, 2001. 496 с.
7. *Киржниц Д.А.* Полевые методы теории многих частиц. М.: Госатомиздат, 1963. 344 с.
8. *Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е.* Методы квантовой теории поля в статистической физике. М.: Физматлит, 1962. 443 с.
9. *Окунь Л.Б. И.Я. Померанчук – каким я знал его // Воспоминания о И.Я. Померанчуке.* М.: Наука, 1988. С. 125–131.

10. *Иоффе Б.Л.* Первые годы общения с И.Я. Померанчуком // Воспоминания о И.Я. Померанчуке. М.: Наука, 1988. С. 88–94.
11. *Галанин А.Д.* О первых годах работы в ИТЭФ с И.Я. Померанчуком // Воспоминания о И.Я. Померанчуке. М.: Наука, 1988. С. 69–70.
12. *Иоффе Б.Л.* Без ретуши. Портреты физиков на фоне эпохи. М.: Фазис, 2004. 160 с.
13. *Abrikosov A.A.* Story about the temperature technique // Proc. of conf. «Progress in Nonequilibrium Green's Functions», Dresden, Germany, 19–22 August 2002. Pp. 2–3.
14. *Сморodinский Я.А.* Смещение термов водородоподобных атомов и аномальный магнитный момент электрона // УФН. 1949. Т. 39, вып. 3. С. 325–358.
15. *Feynman R.P.* Relativistic cut-off for quantum electrodynamics // Phys. Rev. 1948. Vol. 74, No. 10. Pp. 1430–1438.
16. *Feynman R.P.* Space-time approach to quantum electrodynamics // Phys. Rev. 1949. Vol. 76, No. 6. Pp. 769–789.
17. *Берестецкий В.Б.* Теория возмущений в квантовой электродинамике // УФН. 1952. Т. 46, вып. 2. С. 231–278.
18. *Иоффе Б.Л.* Кое-что из истории атомного проекта в СССР // Сибирский физический журнал. 1995. № 2. С. 67–87.
19. *Галанин А.Д.* Радиационные поправки в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1951. Т. 79. С. 229–232.
20. *Ioffe B.L.* The first dozen years of the history of ITEP Theoretical Physics Laboratory. arXiv: 1208.1386v1[physics.hist-ph] 7 Aug 2012.
21. *Ioffe B.L.* Landau's theoretical minimum, Landau's seminar, ITEP in the beginning of the 1950's. arXiv: hep-ph/0204295v1 25 Apr 2002.
22. *Вентцель Г.* Квантовая теория полей (до 1947 г.) // Сб. ст. Теоретическая физика XX века / Ред. Я.А. Смородинский. М.: Изд-во иностр. литературы, 1962. С. 60–93.
23. *Mehra J., Rechenberg H.* The historical development of quantum theory. Vol. 6. Part 2. New York: Springer-Verlag, 2001. Pp. 671–1612.
24. *Берестецкий В.Б.* Нуль-заряд и асимптотическая свобода // УФН. 1976. Т. 120, вып. 3. С. 439–454.
25. The letters of Richard Feynman. New York: Basic books, 2005. 486 p.
26. *Абрикосов А.А., Ландау Л.Д., Халатников И.М.* Об устранении бесконечностей в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1954. Т. 95. С. 497–501.
27. *Абрикосов А.А., Ландау Л.Д., Халатников И.М.* Асимптотическое выражение для гриновской функции электрона в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1954. Т. 95. С. 773–778.
28. *Абрикосов А.А., Ландау Л.Д., Халатников И.М.* Асимптотическое выражение для гриновской функции фотона в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1954. Т. 95. С. 1177–1182.
29. *Абрикосов А.А., Ландау Л.Д., Халатников И.М.* Масса электрона в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1954. Т. 96. С. 261–266.
30. *Халатников И.М.* Дау, Кентавр и другие. М.: Физматлит, 2008. 192 с.
31. *Дзялошинский И.Е.* Ландау глазами ученика // Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988. С. 116–124.
32. *Ландау Л.Д., Померанчук И.Я.* О точечном взаимодействии в квантовой электродинамике // ДАН СССР. 1955. Т. 102. С. 489–493.

33. *Фрадкин Е.С.* Асимптотика функций Грина в квантовой электродинамике // ЖЭТФ. 1955. Т. 28. В. 3. С. 750–752.
34. *Бродский С., Дрелл С.* Современный статус квантовой электродинамики // УФН. 1972. Т. 107. В. 1. С. 57–98.
35. *Mehra J., Milton K.A.* Climbing the Mountain. Oxford: Oxford Univ. Press, 2000. 695 p.
36. *Green G.* An essay on the application of mathematical analyzes to the theories of electricity and magnetism // Mathematical Papers of the Late George Green. London: Macmillan and CO., 1871. Pp. 1–82.
37. *Green G.* On the propagation of light in crystallized media // Mathematical Papers of the Late George Green. London: Macmillan and CO., 1871. Pp. 291–311.
38. *Schwinger J.* On gauge invariance and vacuum polarization // Phys. Rev. 1951. Vol. 82. Pp. 664–679.
39. *Schwinger J.* The theory of quantized fields. I // Phys. Rev. 1951. Vol. 82. Pp. 914–927.
40. *Schwinger J.* On the Green's functions on quantized fields. I, II // Proc. Nat. Acad. Sci. (USA). 1951. Vol. 37. Pp. 452–455, 455–459.
41. *Feynman R.P.* The theory of positrons // Phys. Rev. 1949. Vol. 76, no. 6. Pp. 749–759.
42. *Бонч-Бруевич В.Л.* Ферми-распределение при абсолютном нуле с учетом взаимодействия электронов с нулевыми колебаниями решетки // ЖЭТФ. 1955. Т. 28, в. 1. С. 121–122.
43. *Мигдал А.Б.* Взаимодействие электронов с колебаниями решетки в нормальном металле // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, в. 6. С. 1438–1446.
44. *Bardeen J.* Electron-phonon interaction and superconductivity // Physics 1971–1980. Singapore: World Scientific Publishing Co., 1992. Pp. 56–69.
45. *Frölich H.* Interaction of electrons with lattice vibrations // Proc. Roy. Soc (London). 1952. Vol. A215. Pp. 291–298.
46. Воспоминания об академике А.Б. Мигдале. М.: Физматлит, 2003. 256 с.
47. *Галицкий В.М., Мигдал А.Б.* Применение методов квантовой теории поля к задаче многих тел // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 1. С. 139–150.
48. *Галицкий В.М.* Энергетический спектр неидеального ферми-газа // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 1. С. 151–162.
49. *Беляев С.Т.* Применение методов квантовой теории поля к системе бозе-частиц // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 2. С. 417–432.
50. *Беляев С.Т.* Энергетический спектр неидеального бозе-газа // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 2. С. 433–446.
51. *Горьков Л.П.* Об энергетическом спектре сверхпроводников // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 3. С. 735–739.
52. *Ландау Л.Д.* Свойства гриновской функции частиц в статистике // ЖЭТФ. 1958. Т. 34, вып. 1. С. 262–264.
53. *Мигдал А.Б.* О распределении взаимодействующих ферми-частиц по импульсам // ЖЭТФ. 1957. Т. 32, вып. 2. С. 399–400.
54. *Ландау Л.Д.* Теория ферми-жидкости // ЖЭТФ. 1956. Т. 30, вып. 6. С. 1058–1064.
55. *Ландау Л.Д.* К теории ферми-жидкости // ЖЭТФ. 1958. Т. 35, вып. 1. С. 97–103.
56. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 568 с.
57. *Matsubara T.* A new approach to quantum-statistical mechanics // Progr. Theor. Phys. 1955. Vol. 14, no. 4. Pp. 351–378.

58. *Coleman P.* Introduction to Many-Body Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2015. 798 p.
59. *Абрикосов А.А., Горьков Л.П., Дзялошинский И.Е.* О приложении методов квантовой теории поля к проблемам квантовой статистики при конечных температурах // ЖЭТФ. 1959. Т. 36, вып. 3. С. 900–908.
60. *Фрадкин Е.С.* Метод функций Грина в квантовой статистике // ЖЭТФ. 1959. Т. 36, вып. 4. С. 1286–1298.
61. *Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В.* Опережающие и запаздывающие функции Грина в статистической физике // ДАН СССР. 1959. Т. 126, № 1. С. 53–56
62. *Горьков Л.П.* Микроскопический вывод уравнений Гинзбурга–Ландау в теории сверхпроводимости // ЖЭТФ. 1959. Т. 36, вып. 6. С. 1918–1923.
63. *Gor'kov L.P.* Developing BCS ideas in the former Soviet Union // BCS: 50 years / Ed. L. Cooper and D. Feldman. Singapore: World Sci., 2011. Pp. 107–126.
64. *Cooper L.* Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas // Phys. Rev. 1956. Vol. 104, No. 4. Pp. 1189–1190.
65. *Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R.* Microscopic theory of superconductivity // Phys. Rev. 1957. Vol. 106. Pp. 162–164.
66. *Беляев С.Т.* Вспоминая АБ // Воспоминания об академике А.Б. Мигдале. М.: Физматлит, 2003. С. 14–18.
67. *Nambu Y.* Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity // Phys. Rev. 1960. Vol. 117, no. 3. Pp. 648–663.
68. *Martin P.C., Schwinger J.* Theory of many-particle systems // Phys. Rev. 1959. Vol. 115. Pp. 1342–1373.
69. *Pines D.* The Many-Body Problem. New York: W.A. Benjamin. Inc., 1961. 456 p.
70. *Schrieffer R.* Theory of Superconductivity. New York: W.A. Benjamin, Inc., 1964. 332 p.
71. *Зубарев Д.Н.* Двухвременные функции Грина в статистической физике // УФН. 1960. Т. 71, вып. 1. С. 71–116.
72. *Алексеев А.И.* Применение методов квантовой теории поля в статистической физике // УФН. 1961. Т. 73, вып. 1. С. 41–88.
73. *Бонч-Бруевич В.Л., Тябликов С.В.* Метод функций Грина в статистической механике. М.: Физматлит, 1961. 312 с.
74. *Abrikosov A.A., Gor'kov L.P., Dzyaloshinskii I.E.* Quantum Field Theory in Statistical Physics. Oxford: Pergamon Press, 1963. 366 p.
75. *Tsvetlik A.M.* Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1995. 360 p.
76. *Kubo R.* Statistical-mechanical theory of irreversible processes // J. Phys. Soc. Jpn. 1957. Vol. 12. Pp. 570–586.
77. *Зубарев Д.Н.* Неравновесная статистическая термодинамика. М.: Наука, 1965. 417 с.
78. *Schwinger J.* Brownian motion of a quantum oscillator // J. Math. Phys. 1961. Vol. 2, no. 3. Pp. 407–432.
79. *Kadanov L.P., Baym G.* Quantum Statistical Mechanics. N.Y.: W.A. Benjamin. Inc., 1962. 203 p.
80. *Константинов О.В., Перель В.И.* Графическая техника для вычисления кинетических коэффициентов // ЖЭТФ. 1960. Т. 39, вып. 1. С. 197–208.

81. *Келдыш Л.В.* Диаграммная техника для неравновесных процессов // ЖЭТФ. 1964. Т. 47, вып. 4. С. 1515–1527.
82. *Mehra J.* The Beat of a Different Drum. Oxford: Clarendon Press, 1994. 637 p.
83. *Feynman R.P.* Atomic theory of the  $\lambda$  transition in liquid helium // Phys. Rev. 1953. Vol. 91, no. 6. Pp. 1291–1301.
84. *Feynman R.P.* Atomic theory of liquid helium near absolute zero // Phys. Rev. 1953. Vol. 91, no. 6. Pp. 1301–1308.
85. *Feynman R.P.* Atomic theory of the two-fluid model of liquid helium // Phys. Rev. 1954. Vol. 94, no. 2. Pp. 262–277.
86. *Feynman R.P., Cohen M.* Energy spectrum of the excitations in liquid helium // Phys. Rev. 1956. Vol. 102, no. 5. Pp. 1189–1204.
87. *Cohen M., Feynman R.P.* Theory of inelastic scattering of cold neutrons from liquid helium // Phys. Rev. 1957. Vol. 107, no. 1. Pp. 14–24.
88. *Андроникашвили Э.Л.* Воспоминания о жидком гелии. Тбилиси: Издательство «Ганат леба», 1980. 335 с.
89. *Osborn D.V.* The rotation of liquid helium II // Proc. Phys. Soc. 1950. Sec. A. Vol. 63, no. 8. Pp. 909–912.
90. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* О вращении жидкого гелия // ДАН СССР. 1955. Т. 100. С. 669–672.
91. *Feynman R.P.* Application of quantum mechanics to liquid helium // Progr. in Low Temp. Phys. 1955. Vol. 1. Pp. 17–53.
92. *London F.* Superfluids. V. II. New York: Dover Publications, Inc., 1964. 217 p.
93. *Ландау Л.Д.* Собрание трудов Т. 2. М.: Наука, 1969. 451 с.
94. *Collected Papers of L.D. Landau.* New York: Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965. 836 p.
95. *Воловик Г.Е.* Сверхтекучие жидкости во вращении. Вихревые листы Ландау–Лифшица и вихри Онзагера–Фейнмана // УФН. 2015. Т. 185, № 9. С. 970–979.
96. *Абрикосов А.А.* О магнитных свойствах сверхпроводников второй группы // ЖЭТФ. 1957. Т. 32, вып. 6. С. 1442–1452.
97. *Гинзбург В.Л.* Замечательный физик // Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988. С. 73–94.
98. *Румер Ю.Б.* Странички воспоминаний о Л.Д. Ландау // Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988. С. 202–209.
99. *Абрикосов А.А.* О Л.Д. Ландау // Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988. С. 32–39.
100. *Фейнберг Е.Б.* Ландау и другие // Воспоминания о Л.Д. Ландау. М.: Наука, 1988. С. 253–267.
101. *Ландау Л.Д.* О движении электронов в кристаллической решетке // Phys. Ztschr. Sow. 1933. Bd. 3. S. 664–665.
102. *Френкель Я.И.* О поглощении света и прилипании электронов и положительных дырок в кристаллических диэлектриках // ЖЭТФ. 1936. Т. 6, № 5. С. 647–655.
103. *Пекар С.И.* Локализованные квантовые состояния электрона в идеальном ионном кристалле // ЖЭТФ. 1946. Т. 16, вып. 4. С. 341–348.
104. *Ландау Л.Д., Пекар С.И.* Эффективная масса полярона // ЖЭТФ. 1948. Т. 18, № 5. С. 419–423.

105. Пекар С.И. Исследования по электронной теории кристаллов. М.; Л.: ГИТТЛ, 1951. 257 с.
106. Frölich H. Electrons in lattice fields // *Adv. Phys.* 1954. Vol. 3, no. 11. Pp. 325–361.
107. Feynman R.P. Slow electrons in a polar crystal // *Phys. Rev.* 1955. Vol. 97, no. 3. Pp. 660–665.
108. Feynman R.P., Hellerwarth R.W., Iddings C.K., Platzman P.M. Mobility of slow electrons in a polar crystal // *Phys. Rev.* 1962. Vol. 127, no. 4. Pp. 1004–1017.
109. Мостепаненко В.М., Трунов Н.Я. Эффект Казимира и его приложения // *УФН.* 1988. Т. 156, вып. 3. С. 385–426.
110. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между конденсированными телами // *ДАН СССР.* 1954. Т. 97, № 4. С. 643–647.
111. Лифшиц Е.М. Теория молекулярных сил притяжения между твердыми телами // *ЖЭТФ.* 1956. Т. 29, вып. 1. С. 94–110.
112. Зельдович Я.Б. Воспоминания об Учителе // *Воспоминания о Л.Д. Ландау.* М.: Наука, 1988. С. 124–130.
113. Иоффе Б.Л. Если бы Ландау жил сейчас // *Воспоминания о Л.Д. Ландау.* М.: Наука, 1988. С. 130–135.
114. Leighton R. Forty-five Snowy I // *Engineering and Science.* Summer 1991. Pp. 31–39.
115. Leighton R. Tuva or Bust! New York: W.W. Norton and Co., 2000. 262 p.
116. Vainstein S. Nomads of South Siberia: The Pastoral Economies of Tuva. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1980. 290 p.
117. Тишков В.А. Размышления об итогах жизни: Беседа с Севьяном Израилевичем Вайнштейном // *Этнограф. обозрение.* 2008. № 2. С. 70–86.

## References

1. Bell E.T. Men of Mathematics. Vol. 1. London, Penguin books, 1953, 323 p.
2. Interview with Igor E. Dzyloshinskii. Physics of Scale Activities, 14–15 December, 2001, Irvine, California. pp. 1–41.
3. Arseev P.I. On the nonequilibrium diagram technique: Derivation, some features and applications. *Phys. Usp.*, 2015, Vol. 58, no. 12, pp. 1159–1205.
4. Keldysh L.V. Real-time nonequilibrium Green's functions. Proc. of conf. «Progress in Nonequilibrium Green's Functions», Dresden, Germany, 19–22 August 2002, pp. 4–17.
5. Abrikosov A.A. My years with Landau. *Physics Today*, 1973, January, pp. 55–60.
6. Ginzburg V.L. About Science, Myself and Others. Bristol, IOP Publishing Ltd., 2005, 360 p.
7. Kirzhnits D.A. Field Methods of the Theory of Many Particles. Moscow, State Atom, 1963, 344 p. (In Russian).
8. Abrikosov A.A., Gor'kov L.P., Dzyaloshinskii I.E. Quantum Field Theory in Statistical Physics. Moscow, Fizmatlit, 1962, 443 p. (in Russian).
9. Okun' L.B. I.Ya. Pomeranchuk – how I knew him. In: Recollections about I.Ya. Pomeranchuk, Moscow, Nauka, 1988, pp. 125–131 (in Russian).
10. Ioffe B.L. The first years of communication with I.Ya. Pomeranchuk. In: Recollections about I.Ya. Pomeranchuk. Moscow, Nauka, 1988, pp. 88–94 (in Russian).
11. Galanin A.D. About the first years of work in the ITEP with I.Ya. Pomeranchuk. In;

- Recollections about I.Ya. Pomeranchuk. Moscow, Nauka, 1988, pp. 69–70 (in Russian).
12. Ioffe B.L. Without Retouching: Portraits of Physicists on the Background of the Era, Moscow, Fazis, 2004, 160 p. (in Russian).
  13. Abrikosov A.A. Story about the temperature technique. *Proc. of conf. «Progress in Non-equilibrium Green's Functions»*, Dresden, Germany, 19–22 August 2002, pp. 2–3.
  14. Smorodinsky Ya.A. The displacement of terms of hydrogen-like atoms and the anomalous magnetic moment of an electron. *Phys. Usp.*, 1949, vol. 39, no. 3, pp. 325–358 (in Russian).
  15. Feynman R.P. Relativistic cut-off for quantum electrodynamics. *Phys. Rev.*, 1948, vol. 74, no. 10, pp. 1430–1438.
  16. Feynman R.P. Space-time approach to quantum electrodynamics. *Phys. Rev.*, 1949, vol. 76, no. 6, pp. 769–789.
  17. Berestetskii V.B. Perturbation theory in quantum electrodynamics. *Phys. Usp.*, 1952, vol. 46, no. 2, pp. 231–278 (in Russian).
  18. Ioffe B.L. Something from the history of the atomic project in the USSR. *Siberian Physical Journal*, 1995, no. 2, pp. 67–87 (in Russian).
  19. Galanin A.D. Radiative corrections in quantum electrodynamics. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1951, vol. 79, pp. 229–232 (in Russian).
  20. Ioffe B.L. The first dozen years of the history of ITEP Theoretical Physics Laboratory. arXiv: 1208.1386v1[physics.hist-ph] 7 Aug 2012.
  21. Ioffe B.L. Landau's theoretical minimum, Landau's seminar, ITEP in the beginning of the 1950's. arXiv: hep-ph/0204295v1 25 Apr 2002.
  22. Wentzel G. Quantum Theory of Fields (until 1947). *Theoretical Physics in the Twentieth Century*. New York: Interscience Publishers, 1960. Pp. 48–77.
  23. Mehra J., Rechenberg H. *The Historical Development of Quantum Theory*. Vol. 6. Part 2. New York: Springer-Verlag, 2001. Pp. 671–1612.
  24. Berestetskii V.B. Zero-charge and asymptotic freedom. *Phys. Usp.*, 1976, vol. 19, no. 3, pp. 934–943.
  25. *The Letters of Richard Feynman*. New York, Basic books, 2005, 486 p.
  26. Abrikosov A.A., Landau L.D., Khalatnikov I.M. The removal of infinities in quantum electrodynamics. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 607–620.
  27. Abrikosov A.A., Landau L.D., Khalatnikov I.M. An asymptotic expression for the electron Green function in quantum electrodynamics. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 611–615.
  28. Abrikosov A.A., Landau L.D., Khalatnikov I.M. An asymptotic expression for the photon Green's function in quantum electrodynamics. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 616–620.
  29. Abrikosov A.A., Landau L.D., Khalatnikov I.M. The electron mass in quantum electrodynamics. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 621–625.
  30. Khalatnikov I.M. *Dau, Centaur and Others*. Moscow, Fizmatlit, 2008, 192 p. (in Russian).
  31. Dzyaloshinskii I.E. Landau through a pupil's eyes. In: *LANDAU, The Physicist and the Man*, Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 89–96.
  32. Landau L.D., Pomeranchuk I.Ya. *On Point Interaction in Quantum Electrodynamics*.

- In: Coll. Papers of L.D. Landau, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 654–658.
33. Fradkin E.S. The asymptote of Green's function in quantum electrodynamics. *JETP*, 1955, vol. 1, no. 3, pp. 604–606.
  34. Brodsky S., Drell S.D. The present status of quantum electrodynamics. *Annual Rev. of Nuclear Sc.*, 1970, vol. 20, Palo Alto, California, pp. 147–194.
  35. Mehra J., Milton K.A. *Climbing the Mountain*. Oxford Univ. Press, 2000, 695 p.
  36. Green G. An essay on the application of mathematical analyses to the theories of electricity and magnetism. In: *Mathematical Papers of the Late George Green*, London, Macmillan and Co., 1871, pp. 1–82.
  37. Green G. On the propagation of light in crystallized media. In: *Mathematical Papers of the Late George Green*, London, Macmillan and Co., 1871, pp. 291–311.
  38. Schwinger J. On gauge invariance and vacuum polarization. *Phys. Rev.*, 1951, vol. 82, pp. 664–679.
  39. Schwinger J. The theory of quantized fields. I. *Phys. Rev.*, 1951, vol. 82, pp. 914–927.
  40. Schwinger J. On the Green's functions on quantized fields. I, II. *Proc. Nat. Acad. Sci. (USA)*, 1951, vol. 37, pp. 452–455, 455–459.
  41. Feynman R.P. The theory of positrons. *Phys. Rev.*, 1949, vol. 76, no. 6, pp. 749–759.
  42. Bonch-Bruevich V.L. The Fermi distribution at absolute zero, taking into account the inter-action of electrons with zero point vibrations of the lattice. *JETP*, 1955, vol. 1, no. 1 pp. 169–170.
  43. Migdal A.B. Interaction between electrons and lattice vibrations in a normal metal. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 6, pp. 996–1001.
  44. Bardeen J. *Electron-Phonon Interaction and Superconductivity*. Physics 1971–1980. Singapore, World Scientific Publishing Co., 1992, pp. 56–69.
  45. Frölich H. Interaction of electrons with lattice vibrations. *Proc. Roy. Soc (London)*, 1952, vol. A215, pp. 291–298.
  46. Recollections about Academician A.B. Migdal. Moscow, Fizmatlit, 2003, 256 pp. (in Russian).
  47. Galitskii V.M., Migdal A.B. Application quantum field theory methods to the many body problem. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 1, pp. 96–104.
  48. Galitskii V.M. The energy spectrum of a non-ideal Fermi gas. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 1, pp. 104–112.
  49. Beliaev S.T. Application of the methods of quantum field theory to a system of bosons. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 2, pp. 289–298.
  50. Beliaev S.T. Energy spectrum of a non-ideal Bose gas. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 2, pp. 299–307.
  51. Gor'kov L.P. On the energy spectrum of superconductors. *JETP*, 1958, vol. 7, no. 3, pp. 505–508.
  52. Landau L.D. The properties of the Green function for particles in statistics. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 749–751.
  53. Migdal A.B. The momentum distribution of interacting Fermi particles. *JETP*, 1957, vol. 5, no. 2, pp. 333–334.
  54. Landau L.D. The theory of the Fermi liquid. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 723–730.
  55. Landau L.D. The theory of the Fermi liquid. In: *Coll. Papers of L.D. Landau*, New

- York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 752–760.
56. Landau L.D. Statistical Physics. Oxford, Pergamon Press, 1980, 562 p.
  57. Matsubara T. A new approach to quantum-statistical mechanics. *Progr. Theor. Phys.*, 1955, vol. 14, no. 4, pp. 351–378.
  58. Coleman P. Introduction to Many-Body Physics. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 2015, 798 p.
  59. Abrikosov A.A., Gor'kov L.P., Dzyaloshinskii I.E. On the application of quantum-field-theory methods to problems of quantum statistics at finite temperatures. *JETP*, 1959, vol. 9, no. 3, pp. 636–641.
  60. Fradkin E.S. The Green's functions methods in quantum statistics. *JETP*, 1959, vol. 9, no. 4, pp. 912–919.
  61. Bogolyubov N.N, Tyablikov S.V. Leading and retarded Green functions in statistical physics. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*, 1959, vol. 126, no. 1, pp. 53–56 (in Russian).
  62. Gor'kov L.P. Microscopic derivation of the Ginzburg–Landau equations in the theory of superconductivity. *JETP*, 1959, vol. 9, no. 6, pp. 1364–1367.
  63. Gor'kov L.P. Developing BCS ideas in the former Soviet Union. BCS: 50 Years, ed. L. Cooper and D. Feldman, Singapore, World Sci., 2011, pp. 107–126.
  64. Cooper L. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas. *Phys. Rev.*, 1956, vol. 104, no. 4, pp. 1189–1190.
  65. Bardeen J., Cooper L.N., Schrieffer J.R. Microscopic theory of superconductivity. *Phys. Rev.*, 1957, vol. 106, pp. 162–164.
  66. Beliaev S.T. Remembering AB. In: *Recollections about Academician A.B. Migdal*. Moscow, Fizmatlit, 2003, pp. 14–18 (in Russian).
  67. Nambu Y. Quasi-particles and gauge invariance in the theory of superconductivity. *Phys. Rev.*, 1960, vol. 117, no. 3, pp. 648–663.
  68. Martin P.C., Schwinger J. Theory of many-particle systems. *Phys. Rev.*, 1959, vol. 115, pp. 1342–1373.
  69. Pines D. The Many-Body Problem. New York, W.A. Benjamin, Inc., 1961, 456 p.
  70. Schrieffer R. Theory of Superconductivity. New York, W.A. Benjamin, Inc., 1964, 332 p.
  71. Zubarev D.N. Double-time Green functions in statistical physics. *Phys. Usp.*, 1960, vol. 3, pp. 320–345.
  72. Alekseev A.I. The application of the methods of quantum field theory in statistical physics. *Phys. Usp.*, 1961, vol. 4, pp. 23–50.
  73. Bonch-Bruевич V.L., Tyablikov S.V. The Green Function Method in Statistical Mechanics. Amsterdam, North-Holland, 1962, 251 p.
  74. Abrikosov A.A., Gor'kov L.P., Dzyaloshinskii I.E. Quantum Field Theory in Statistical Physics. Oxford, Pergamon Press, 1963, 366 p.
  75. Tsvetlik A.M. Quantum Field Theory in Condensed Matter Physics. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1995, 360 p.
  76. Kubo R. Statistical-mechanical theory of irreversible processes. *J. Phys. Soc. Jpn.*, 1957, vol. 12, pp. 570–586.
  77. Zubarev D.N. Nonequilibrium Statistical Thermodynamics. New York, Springer, 1995, 489 p.
  78. Schwinger J. Brownian motion of a quantum oscillator. *Math. Phys.*, 1961, vol. 2, no. 3, pp. 407–432.

79. Kadanov L.P., Baym G. Quantum Statistical Mechanics. New York, W.A. Benjamin, Inc., 1962, 203 p.
80. Konstantinov O.V., Perel V.I. A diagram technique for evaluating transport quantities. *JETP*, 1961, vol. 12, no. 1, pp. 142–149.
81. Keldysh L.V. Diagram technique for nonequilibrium processes. *JETP*, 1965, vol. 20, no. 4, pp. 1018–1026.
82. Mehra J. The Beat of a Different Drum. Oxford, Clarendon Press, 1994, 637 p.
83. Feynman R.P. Atomic theory of the  $\lambda$  transition in liquid helium. *Phys. Rev.*, 1953, vol. 91, no. 6, pp. 1291–1301.
84. Feynman R.P. Atomic theory of liquid helium near absolute zero. *Phys. Rev.*, 1953, vol. 91, no. 6, pp. 1301–1308.
85. Feynman R.P. Atomic theory of the two-fluid model of liquid helium. *Phys. Rev.*, 1954, vol. 94, no. 2, pp. 262–277.
86. Feynman R.P., Cohen M. Energy spectrum of the excitations in liquid helium. *Phys. Rev.*, 1956, vol. 102, no. 5, pp. 1189–1204.
87. Cohen M., Feynman R.P. Theory of inelastic scattering of cold neutrons from liquid helium. *Phys. Rev.*, 1957, vol. 107, no. 1, pp. 14–24.
88. Andronikashvili E.L. Reflections on Liquid Helium. New York, Amer. Inst. of Physics, 1990. 328 p.
89. Osborn D.V. The rotation of liquid helium II. *Proc. Phys. Soc.*, 1950, sec. A, vol. 63, no. 8, pp. 909–912.
90. Landau L.D., Lifshitz E.M. On the Rotation of Liquid Helium. In: Coll. Papers of L.D. Landau, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 650–653.
91. Feynman R.P. Application of quantum mechanics to liquid helium. *Progr. in Low Temp. Phys.*, 1955, vol. 1, pp. 17–53.
92. London F. Superfluids. Vol. II. New York, Dover Publications, Inc., 1964, 217 p.
93. Landau L.D. Collected Papers. Vol. 2. Moscow, Nauka, 1969, 451 p. (in Russian).
94. Collected Papers of L.D. Landau. New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, 836 p.
95. Volovik G.E. Superfluids in rotation: Landau–Lifshitz vortex sheets vs Onsager–Feynman vortices. *Phys. Usp.*, 2015, vol. 58, no. 9, pp. 970–979
96. Abrikosov A.A. On the magnetic properties of superconductors of the second group. *JETP*, 1957, vol. 5, no. 6, pp. 1174–1182.
97. Ginzburg V.L. A Remarkable Physicist. Further thoughts. In: LANDAU, The Physicist and the Man, Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 117–135.
98. Rumer Yu.B. A Page or Two of Reminiscences about L.D. Landau. In: LANDAU, The Physicist and the Man. Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 208–213.
99. Abrikosov A.A. Recollections of L.D. Landau. In: LANDAU, The Physicist and the Man, Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 29–35.
100. Feinberg E.B. Landau and others. In: LANDAU, The Physicist and the Man, Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 105–116.
101. Landau L.D. Electron Motion in the Crystal Lattices. In: Coll. Papers of L.D. Landau, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 67–68.
102. Frenkel Ya.I. On the absorption of light and the trapping of electrons and positive holes in crystalline dielectrics. *Phys. Zeitschrift der Sowjet Union*, 1936, vol. 9, pp. 158–186.

103. Pekar S.I. Localized quantum states of an electron in an ideal ion crystal. *JETP*, 1946, vol. 16, no. 4, pp. 341–348 (in Russian).
104. Landau L.D., Pekar S.I. The Effective Mass of the Polaron. In: Coll. Papers of L.D. Landau, New York, Gordon and Breach, Sci. Publishers, 1965, pp. 478–483.
105. Pekar S.I. Untersuchungen über die Elektronentheorie der Kristalle. Berlin, Akademie-Verlag, 1954, 184 s.
106. Frölich H. Electrons in lattice fields. *Adv. Phys.*, 1954, vol. 3, no. 11, pp. 325–361.
107. Feynman R.P. Slow electrons in a polar crystal. *Phys. Rev.*, 1955, vol. 97, no. 3, pp. 660–665.
108. Feynman R.P., Hellerwarth R.W., Iddings C.K., Platzman P.M. Mobility of slow electrons in a polar crystal. *Phys. Rev.*, 1962, vol. 127, no. 4, pp. 1004–1017.
109. Mostepanenko V.M., Trunov N.Ya. The Casimir effect and its applications. *Phys. Usp.*, 1988, vol. 31, pp. 965–987.
110. Lifshitz E.M. Theory of Molecular Attraction Forces between Condensed Bodies. Perspectives in Theoretical Physics: The Collected Papers of E.M. Lifshitz. Oxford, Pergamon Press, 1992, pp. 313–317.
111. Lifshitz E.M. The Theory of Molecular Attractive Forces between Solids. Perspectives in Theoretical Physics: The Collected Papers of E.M. Lifshitz. Oxford, Pergamon Press, 1992, pp. 329–349.
112. Zeldovich Ya.B. Recollections of the Teacher. In: LANDAU, The Physicist and the Man. Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 257–262.
113. Ioffe B.L. If Landau were Alive Now. In: LANDAU, The Physicist and the Man. Oxford, Pergamon Press, 1989, pp. 153–156.
114. Leighton R. Forty-five Snowy I. Engineering and Science. Summer, 1991, pp. 31–39.
115. Leighton R. Tuva or Bust! New York, W.W. Norton and Co., 2000, 262 p.
116. Vainstein S. Nomads of South Siberia: The Pastoral Economies of Tuva. Cambridge, Cambridge Univ. Press, 1980, 290 p.
117. Tishkov V.A. Reflections on the results of life: A conversation with Sevyan Izrailevich Weinstein. *Ethnographic Review*, 2008, № 2, pp. 70–86 (in Russian).



*Мухин Равиль Рафкатович* – родился в Челябинской области (1947), окончил Московский инженерно-физический институт (1976). Защитил кандидатскую диссертацию по химической физике (1991, Институт органического синтеза и углекислотной химии АН Казахстана) и докторскую диссертацию по истории динамического хаоса (2011, ИИЕТ РАН). Автор монографии «Очерки по истории динамического хаоса» (2007, 2012). Область научных интересов: история физико-математических наук. В настоящее время профессор Старооскольского технологического института (НИТУ МИСиС).

309516 Белгородская обл., Старый Оскол, мкр-н Макаренко, 42  
 Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова, филиал  
 Национального исследовательского технологического университета  
 «Московский институт стали и сплавов»  
 E-mail: mukhiny@mail.ru