

## М. А. Иванов

В своих воспоминаниях о Гarii Владимировиче Ефимове мне хотелось бы прежде всего коснуться моментов его яркой научной жизни. В особенности тех, которые запомнились мне как его непосредственному ученику.

Я пришел к нему будучи студентом 4-го курса физфака МГУ с просьбой стать моим научным руководителем. К тому времени, а это был 1973 год, Г. В. был уже известным ученым, создавшим свое оригинальное направление в теоретической физике. Известность принесли ему работы по построению конечной квантовой теории с неполиномиальными лагранжианами взаимодействия. В 1963 г. им и независимо Е. С. Фрадкиным был предложен функциональный метод, позволяющий построить  $S$ -матрицу с неполиномиальными лагранжианами взаимодействия в любом порядке теории возмущений. Метод основан на интегральном представлении дифференциального оператора хронологического упорядочения в виде операторов сдвига в комплексной плоскости. Данный метод вошел в научную литературу как метод Ефимова–Фрадкина.



Слева направо: М. А. Иванов, Г. В. Ефимов, Г. Ганболд, С. Н. Неделько

В последующие годы Г. В. интенсивно развивал идею построения квантовой теории поля без ультрафиолетовых расходимостей, ныне известной как нелокальная теория Ефимова. Идея заключалась в самосогласованном введении релятивистских формфакторов в пропагаторы бозонных полей. Данные формфакторы выбирались в виде целых функций, убывающих достаточно быстро в евклидовом направлении. К тому времени вокруг Г. В. образовалось достаточно много молодых людей, которых я бы назвал учениками первой волны. Среди них мне запомнились Валерий Алебастров, Хавгайн Намсрай, Миша Рутенберг, Валя Охлопкова, Олег Могилевский и Володя Малышкин. С последними двумя мне посчастливилось вместе поработать еще в студенческие и аспирантские годы.

Самой значительной вехой в развитии нелокальной теории Г. В. считал доказательство причинности и унитарности, выполненное им совместно с Валерием Алебастровым. Параллельно развивались приложения нелокальной теории к слабым и электромагнитным взаимодействиям. Совместно с Олегом Могилевским была построена нелокальная электродинамика частиц произвольного спина. Одним из интересных следствий данной электродинамики является задача о собственной энергии электрона в классическом пределе, когда постоянная Планка стремится к нулю. Если выполнить данный предел в низшем (однопетлевом) порядке теории возмущений математически аккуратно, то можно в точности воспроизвести закон Кулона, где роль радиуса электрона играет размерный параметр, неизбежно возникающий при введении формфактора в теорию. В этом случае встает вопрос: а что происходит в высших порядках теории возмущений по постоянной тонкой структуры, которая содержит постоянную Планка в знаменателе?

Олег Могилевский обратил внимание на работу П. И. Фомина, в которой было сделано утверждение (как позже выяснилось, ошибочное), что классический предел не может быть выполнен в теории возмущений и нужно выходить за ее рамки. Гарий Владимирович весьма загорелся этой проблемой и поручил мне и Олегу провести соответствующие расчеты в следующем, двухпетлевом порядке теории возмущений. Оказалось, что в сумме всех диаграмм первые три сингулярных члена разложения алгебраически равны нулю, а первый регулярный член и все последующие исчезают при стремлении постоянной Планка к нулю. Но Г. В. не был вполне удовлетворен этим результатом и предложил провести расчеты в трехпетлевом порядке теории возмущений. Надо сказать, что это была весьма трудоемкая задача, которая потребовала целого года работы. Результат оказался ожидаемым: сингулярные члены сокращались в сумме всех многочис-

ленных диаграмм, а регулярные члены исчезали в классическом пределе. Работа была послана в журнал «Annals of Physics» и почти сразу принята к печати. По прошествии некоторого времени стало ясно, что полученный результат носит общий характер и верен для любых формфакторов, а не только тех, которые принадлежат классу целых функций. На основе результатов исследований по построению неполиномиальных и нелокальных теорий Г. В. опубликовал монографию «Нелокальные взаимодействия квантованных полей» в издательстве «Наука» в 1977 г.

Построенная нелокальная теория с формфакторами в виде целых функций приводила к росту физических амплитуд в каждом порядке теории возмущений с ростом энергии. Поэтому актуальным являлся вопрос выхода за рамки теории возмущений. Г. В. потратил достаточно много времени и усилий на исследование этой проблемы. Им было изобретено несколько довольно эффективных методов как суммирования рядов теории возмущений, так и математических оценок функциональных интегралов, представляющих собой компактную запись теории возмущений. Поскольку функциональные интегралы удается математически аккуратно определить лишь в евклидовом пространстве, то разработанные им методы аналитических оценок нашли широкое применение в статистической физике и квантовой механике.

Мне довелось работать с Г. В. в этой области, когда он пытался получить верхние и нижние оценки для энергии вакуума в модели Юкавы. Сходимость ряда теории возмущений для вакуумной  $S$ -матрицы нелокальной модели Юкавы доказывается достаточно тривиально с помощью использования неравенства Адамара для фермионных детерминантов. Однако оценка энергии вакуума, которая определяется предельным переходом величины логарифма вакуумной  $S$ -матрицы, деленной на объем, при объеме, стремящемся к бесконечности, является достаточно сложной задачей. Эта задача была решена А. Г. Басуевым с помощью нетривиальных оценок связной части фермионного детерминанта. Однако доказательство, опубликованное им в журнале «Теоретическая и математическая физика», было изложено настолько запутанным языком, что понять его было практически невозможно. Тогда Г. В. откомандировал меня в тогдашний Ленинград к Басуеву, где Саша и объяснил мне суть доказательства в течение одного вечера. Более понятное и наглядное доказательство сходимости энергии вакуума нелокальной модели Юкавы было изложено во второй монографии Г. В. «Проблемы квантовой теории нелокальных взаимодействий», выпущенной в издательстве «Наука» в 1985 г.

В 1975 г. Г. В. пришла идея использовать целые функции в качестве пропагаторов кварков, чтобы гарантировать отсутствие кварков в свободном состоянии, как говорят, конфайнмент кварков. Он поделился этой идеей со мной во время защиты дипломной работы. Так получилось, что я присоединился к реализации этой идеи лишь два года спустя. Первоначальные шаги в использовании пропагаторов кварков как целых функций для описания свойств адронов были очень просты. Строился лагранжиан взаимодействия адронов с соответствующим кварковым током, по нему строилась  $S$ -матрица, в результате матричные элементы физических процессов описывались фейнмановскими диаграммами с пропагаторами кварков в виде целых функций. Вычисление петлевых интегралов проводилось с помощью разложения по внешним импульсам. Однако в таком подходе, названном нелокальной моделью кварков, имелось достаточно много свободных параметров (константы связи в лагранжиане взаимодействия, параметры, характеризующие кварковые пропагаторы, и т. д.). Для их фиксации приходилось рассчитывать огромное число физических наблюдаемых. Отсюда большое количество оппонентов и, как следствие, трудности при публикации результатов.

Поворотным моментом в развитии нелокальной модели кварков стало условие связности, на существование которого обратил наше внимание Серго Герасимов. Данное условие, предложенное в 1960-е гг. Вайнбергом и, независимо, Саламом, позволяет вводить связанные состояния в квантовую теорию поля. Вначале поля, соответствующие связанным состояниям, вводятся в лагранжиан взаимодействия как обычные элементарные поля. Затем пишется эффективный лагранжиан взаимодействия данного поля с его конститuentами. В результате взаимодействия происходит перенормировка поля и, если положить константу перенормировки равной нулю, элементарное поле исчезает из лагранжиана. Использование этого условия в нелокальной модели кварков позволило выразить эффективную константу взаимодействия как функцию остальных параметров модели и, тем самым, существенно уменьшить число свободных параметров и увеличить предсказательную силу модели. Кроме того, в модели стало возможным описывать не только простейшие кварк-антикварковые состояния, но и более сложные структуры, например, барионы как связанные состояния трех кварков.

Надо сказать, что к этому времени появилось достаточно много молодых людей, принимавших участие в применении модели к конкретным физическим процессам, а также в дальнейшем ее развитии. Среди них я бы отметил Женю Ноговицына, Зузану Дубничкову, Минала Динейхана, Валеру Любовицкого, Олега Хомутенко, Игоря Аникина,



М. А. Иванов, М. Динейхан, Е. А. Ноговицын, В. Е. Любовицкий,  
А. Г. Русецкий

Сергея и Лену Авакян и еще многих других. Результаты исследований в данном направлении легли в основу третьей монографии Г. В., где и я был соавтором, — «The quark confinement model of hadrons» (Bristol and Philadelphia, IOP, 1993).

Последняя, четвертая монография Гаря Владимировича была посвящена осцилляторному представлению в квантовой физике и опубликована в 1995 г. в издательстве Springer совместно с М. Динейханом, Г. Ганболдом и С. Неделько.

В последние годы Г. В. интенсивно преподавал в университете «Дубна» и опубликовал два методических пособия: «Метод функционального интегрирования» и «Квантовая механика (избранные главы)». В общей сложности под его руководством была защищена 21 кандидатская диссертация. Семь его учеников защитили докторские диссертации, один — Х. Намсрай — стал академиком Монгольской академии наук.

Вспоминая многие годы совместной работы, я бы отметил исключительную преданность Гария Владимировича науке и его необыкновенную трудоспособность. Я не помню ни одного дня в ЛТФ, чтобы он не делал выкладки либо на бумаге, либо на доске. Он всегда считал долгом провести семинары по своей деятельности в ЛТФ, ФИАН и МИАН. Это лишь наиболее яркие эпизоды, которые отложились у меня в памяти. И, несомненно, необходимо еще некоторое время, чтобы систематизировать и по достоинству оценить вклад Г. В. в теоретическую физику.