

## Моему Учителю

(к 90-летию со дня рождения Роальда Зиннуровича Сагдеева)

В.Е. Захаров

PACS numbers: **01.60. + q**, **01.65. + g**

26 декабря 2022 г. исполняется 90 лет выдающемуся физико-теоретику, учёному с мировым именем, действительному члену Российской академии наук с 1968 г., иностранному члену многочисленных зарубежных национальных академий, общественному деятелю Роальду Зиннуровичу Сагдееву. От себя ещё лично добавлю — моему Учителю.

Роальду Зиннуровичу принадлежит ряд основополагающих открытий в области физики плазмы и в теории динамических систем. Среди них обнаружение важнейшего физического феномена — бесстолкновительных ударных волн в плазме. В 1962 г. он с блеском защитил докторскую диссертацию на данную тему в Новосибирске; одним из его оппонентов был академик Яков Борисович Зельдович. Открытие бесстолкновительных ударных волн в плазме было подлинным прорывом в так называемой космофизике. Оно позволило построить физическую модель той области околоземного пространства, где исходящий от Солнца поток заряженных частиц сталкивается с магнитосферой Земли. Там образуются уединенные волны магнитного поля — солитоны. В настоящее время структура этих волн детально изучена экспериментально при помощи спутников. Кроме того, пионерская работа Роальда Сагдеева имела огромное концептуальное значение для всего комплекса физико-математических наук. Она пробудила интерес к теории солитонов и породила бурное развитие научных направлений и в физике, и в математике.

Само слово "солитон" появилось в лексиконе тогда же, в начале 1960-х гг. Ранее подобные объекты назывались "уединённые волны" и были известны в гидродинамике и в теории волн на поверхности жидкости конечной глубины. Роальд Зиннурович был первым, кто обнаружил солитоны в плазме, как изотропной, так и погружённой в магнитное поле. Более того, оказалось, что в



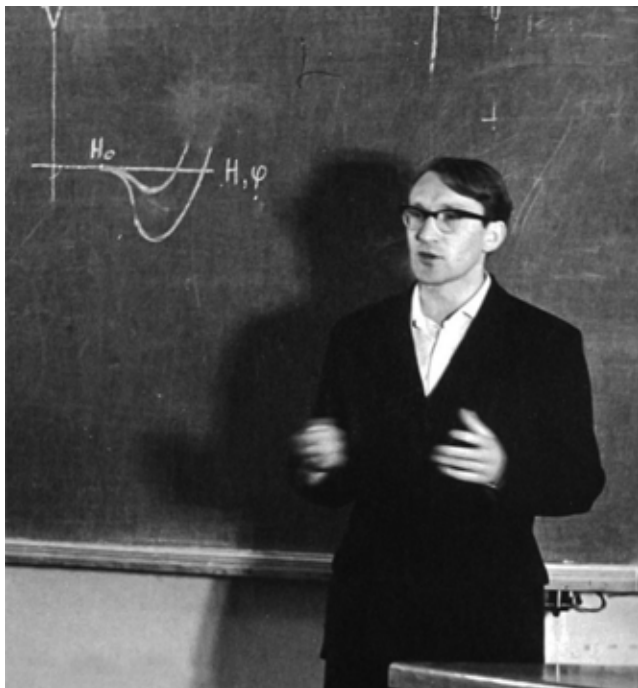
Роальд Зиннурович Сагдеев.  
Размышления у камина.

**В.Е. Захаров**

Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау РАН,  
ул. Косыгина 2, 119334 Москва, Российская Федерация  
E-mail: zakharov@itp.ac.ru

Статья поступила 8 ноября 2022 г.

плазме могут существовать несколько разных типов солитонов. Поразительно, но все они с хорошей точностью описываются одной и той же математической моделью — уравнением Кортевега–де Фриза. Это лишний раз доказывает справедливость знаменитого тезиса Юджина Вигнера о "непостижимой эффективности математики".



Потенциал Сагдеева. Новосибирск, 1961 г.

Роальд Сагдеев сразу же оценил огромный потенциал уравнения Кортевега–де Фриза. Вспоминаю август 1961 г., комнату номер 217 в теоротделе Института ядерной физики новосибирского Академгородка. Входит Роальд и пишет мелом на доске две проблемы, которыми мы, аспиранты, будем заниматься. Одна из них — построение решений уравнения КдФ, о второй



Семинар в ИКИ. А.А. Галеев и Р.З. Сагдеев.

напишу ниже. В тот день, кроме моего, в этой комнате было ещё два стола. За одним из них сидел Алик Галеев, за вторым — другой Алик, Алексей Максимович Фридман. Позднее в комнате появился четвёртый стол. За ним обосновался приехавший из Москвы Дима Рютов. В настоящее время Дмитрий Дмитриевич работает в США, в Ливерморской лаборатории. Есть ли ещё такая комната в каком-нибудь академическом институте, где в одно и то же время работали четыре молодых человека, впоследствии ставших полными академиками РАН? Все четверо были учениками одного и того же человека — Роальда Зиннуровича Сагдеева!

Во второй задаче, поставленной Роальдом Зиннуровичем в 1961 г., речь шла о построении статистической теории слаболинейных волн, т.е. теории волновой турбулентности. Мы различаем слабую и сильную волновую



Ректор И.Н. Векуа (1) и декан физфака Р.З. Сагдеев (2) среди первых выпускников Новосибирского Госуниверситета: Ф. Баимбеков (3), В. Захаров (4), С. Машков (5), В. Портнов (6), Е. Мамонтов (7), Ю. Ершов (8), В. Штерн (9), М. Дошанова (10). (Новосибирск, 1963 г.)



Снова за Круглым столом ИЯФ. Слева направо: Ю.М. Шатунов, Э.П. Кругляков, Р.З. Сагдеев и Г.Н. Кулипанов, Новосибирск.

турбулентность; ситуация с первой наиболее прозрачна. В начале 1960-х гг. было осознано, что статистическое описание слабонелинейных волн в средах с дисперсией естественным образом осуществляется кинетическими уравнениями для частиц, подчиняющихся статистике Бозе–Эйнштейна. В бозонном случае квантовые уравнения имеют два совершенно разных классических предела. Первый — в предположении, малости чисел заполнения, — ведёт к классическому уравнению Больцмана, лежащему в основе кинетической теории газов. В данном случае разница между бозонами и фермионами стирается. Но в бозонном случае существует и "второй классический предел" — предел очень больших чисел заполнения. В этом пределе возникают волновые кинетические уравнения, которые и составляют основу теории слабой волновой турбулентности.

Роальд Сагдеев был одним из первых физиков в мире, осознавших факт, что волновые кинетические уравнения — совершенно новый для теоретической физики объект. Он настойчиво рекомендовал мне заняться их изучением. Слаботурбулентная теория поверхностных волн составила вторую половину моей кандидатской диссертации. Роальд Зиннурович не только сформулировал проблему и внимательно следил за работой. Он первым догадался, что точное решение выведенного кинетического уравнения для волн на поверхности океана есть аналог знаменитого спектра Колмогорова в турбулентности. Тем не менее он отказался быть соавтором статей. Это был его характерный стиль во взаимоотношениях с учениками — необычайная щедрость на идеи в постановке задач и великодушная помощь в решении проблем! Несмотря на то что мой дальнейший творческий путь в значительной степени определился задачами, поставленными передо мной Роальдом Зиннуровичем, среди моих более чем трёхсот работ почти нет совместных с ним статей.

Каждый человек, оглядываясь на прожитое, осознаёт, что траектория его жизни была создана встречами с конечным числом "особенных" людей, оказавших на его

судьбу решающее влияние. Большинство таких встреч происходит в молодости. Для человека, выбирающего творческую профессию, особое значение имеет встреча с Учителем, человеком, который добровольно и с энтузиазмом берётся быть его наставником. Я считаю, мне в жизни очень повезло. У меня были прекрасные учителя. И на первое место среди них я ставлю Роальда Зиннуровича Сагдеева.

Жизнь иногда устроена причудливо, и так получилось, что с Роальдом Зиннуровичем я знаком с детства, лет примерно с восьми. Мой старший брат Юрий учился с ним в одном классе, в школе № 19 города Казани. Роальд, которого тогда звали просто Ролик, дружил с Юрой и часто бывал у нас дома. Он прекрасно играл в шахматы и меня учил играть. Как настоящие шахматисты, он свободно играл вслепую, без доски. Хорошо помню момент, когда Роальд, обернувшись ко мне, сказал: "Вот сейчас тебе должен быть мат". И действительно, на доске стоял мат!

В 1950 г. старшие мальчики закончили школу, оба с медалями, и поехали учиться в Москву. Юра поступил в Бауманский, а Роальд — на физический факультет МГУ. Прошло шесть лет, окончил школу и я и тоже поехал в Москву. Хотя меня тянуло в физику и математику, мой брат Юра, да и мои родители настойчиво уговаривали меня поступать в технический ВУЗ. Так я оказался в МЭИ, на радиотехническом факультете, в специальной группе радиофизиков, которым преподавали математику и физику в увеличенном объёме. Математике нас учил выдающийся учёный, Марк Иосифович Вишик, и учил очень хорошо. А вот уровнем преподавания физики мы не были удовлетворены. Я стал изучать расписание занятий, чтобы узнать, кто преподаёт физику на других факультетах, и вдруг наткнулся на фамилию Сагдеева. Он вёл семинары по физике.

Я подстерёг Роальда у дверей аудитории, где он вёл семинар. Он узнал меня и обрадовался. Когда я рассказал ему, что несколько членов моей группы очень хотели



Голосование в Верховном Совете народных депутатов СССР.

бы заниматься теоретической физикой, но не знают, как это сделать, Роальд немедленно предложил организовать еженедельный семинар под его руководством. Семинар был организован, мы готовили и обсуждали доклады, осуществляя то, что по-английски называется "teach-in". О семинаре прослышали, на него стали приходить студенты и с других факультетов. Вскоре к семинару добавились лекции, Роальд взялся читать нам курс физики плазмы. Тогда, в 1959 г., такая наука только зарождалась. Про лекции узнали в других институтах Москвы, число слушателей увеличилось, а один из них на основании своих конспектов воспроизводил лекции Роальда в ФИАНе.

Роальд Сагдеев стал очень известным в России физиком, едва защитив кандидатскую диссертацию. Он работал тогда в Институте атомной энергии, с 1960 г. носящем имя И.В. Курчатова. В недрах упомянутого института уже существовал Институт ядерной физики (ИЯФ) Сибирского отделения Академии. В Новосибирске было построено его здание и монтировались первые экспериментальные установки, но большая часть сотрудников ещё работала на территории "Курчатника". Будущие знаменитые институты новосибирского Академгородка зарождались, как правило, в Москве внутри уже давно существовавших московских институтов. Директором ИЯФа был Герш Ицкович Будкер, совершенно выдающийся человек.

Когда в мае 1960 г., по причине избытка темперамента, я оказался замешан в конфликте, произошедшем в студенческом общежитии, и вынужден был покинуть МЭИ, Роальд принял самое горячее участие в моей судьбе и представил меня Будкеру. Герш Ицкович взял меня на работу лаборантом пятого разряда, что было очень неплохо. Моя зарплата была сравнима с зарплатой

моего отца, главного инженера небольшого треста в Смоленске. Я без проблем снял комнату в подмосковной Опалихе и нередко ужинал в ресторанах. При приёме на работу Будкер предложил мне выбор: стать лаборантом у теоретиков или у экспериментаторов. "Если ты пойдёшь к теоретикам, — сказал он, — то будешь заниматься квантовой электродинамикой, вычислять длинные интегралы и мало чему новому научишься. Вычислять интегралы ты и так хорошо умеешь. А если пойдёшь к экспериментаторам, научишься настоящей физике".

Раз в неделю я встречал Роальда на семинаре академика М.А. Леонтовича в Отделе плазменных исследований. Кроме того, часто бывал у него дома, мы обсуждали все проблемы на свете, и главное, он учил меня важнейшему умению учёного: делать оценки по "порядку величины" и рассуждать, как говорят, "на пальцах". Как из "физических соображений" оценить размер атома водорода? Это довольно простой вопрос, требуется только знание констант — массы и заряда электрона — и знание принципа неопределённостей Гейзенберга. Здесь уместно сказать, что Роальд Зиннурович владеет искусством делать оценки из "физических соображений" просто виртуозно! Я таким его искусством всегда восхищался и восхищаться продолжаю.

Будкер предложил Роальду Зиннуровичу стать ведущим теоретическим отделом в Институте ядерной физики, и Роальд согласился. Летом 1961 г. мы оба переехали в Сибирь; я — лаборантом. Для меня началось счастливое время! Досдав кое-что за третий курс, я был зачислен на четвёртый курс физического факультета недавно организованного Новосибирского университета. В университете, несмотря на его молодость, были прекрасные профессора. Например, уравнения в частных производных нам читал сам академик Сергей Львович Соболев.

Мы были не одни в мире, кто тогда интересовался солитонами и уравнением КдФ. Данными проблемами занимались и по другую сторону океана. Наступала "эпоха разрядки", и естественной областью сотрудничества была "мирная" наука. Одним из частых мест зарубежных поездок Роальда Зиннуровича стал Принстонский университет, где с начала 1950-х годов функционировала лаборатория физики плазмы. В 1960-е годы в этой лаборатории работал выдающийся учёный Мартин Крускал (1925–2011). С ним и с его ближайшим сотрудником Норманом Забуски (1929–2018) Роальд Зиннурович установил дружеские отношения, и они стали регулярно приезжать в Академгородок и делать доклады на нашем семинаре. Кстати, Крускал тоже был очень хорошим шахматистом, и они с Роальдом часто играли без доски и даже на расстоянии, по телефону.

В 1965 г. произошло знаменательное событие: Мартин Крускал, в очередной раз приехавший в Академгородок, доложил, что уравнение КдФ имеет дополнительные интегралы движения. Сначала было найдено восемь интегралов, потом их число увеличилось до шестнадцати. Возникла естественная гипотеза — интегралов бесконечно много. Первые "лишние" интегралы были найдены путём прямых, хотя и головоломных, вычислений. Надобность в таких вычислениях вскоре отпала: осенью 1967 г. была опубликована статья Гарднера, Грина, Крускала и Миуры, в которой был открыт метод обратной задачи рассеяния (МОЗР). Статья была тщательно разобрана на нашем семинаре, и в последующие



Встреча с Папой Римским Ионом-Павлом II, Ватикан, 7 ноября 1986 г.

десятилетия МОЗР получил мощное развитие. Но те, кто сегодня им занимаются, часто забывают о том, что именно Роальд Сагдеев стоял у его истоков. Впрочем, в науке это вполне обычное дело. Так, лет 15 назад, были заново переоткрыты бесстолкновительные ударные волны, только уже не в плазме, а в нелинейной оптике. Теперь их называют "дисперсионные ударные волны" и на пионерские работы Роальда Сагдеева ссылаются очень скупно.

Если говорить о вкладе Роальда Зиннуровича в динамическую теорию нелинейных волн, то следует упомянуть ещё одно, очень важное достижение — открытие распадной неустойчивости волн конечной амплитуды в нелинейных средах. Он обнаружил неустойчивость магнитозвуковых нелинейных волн в плазме, "распадную неустойчивость первого порядка". Работа эта произвела на меня очень большое впечатление и, развивая высказанные в ней идеи, в 1965 г. я построил теорию "распадной неустойчивости второго порядка" и установил неустойчивость волн Стокса на поверхности глубокой жидкости. Сегодня такую неустойчивость называют модуляционной.

В 1973 г. Роальд Зиннурович стал директором Института космических исследований, которым руководил до 1988 г., когда передал директорство А.А. Галееву. В конце 1973 г. я тоже уехал из Академгородка и перебрался в Черногоровку, где стал заведовать сектором теории плазмы в институте Ландау. Я взял с собой трёх,

уже своих, учеников, среди них Женю Кузнецова. Мы никогда не прерывали тесного контакта с Роальдом Зиннуровичем, и в начале 1980-х годов выполнили несколько совместных работ по численному моделированию ленгмюровского коллапса. Когда в 1984 г. меня выбрали членом-корреспондентом АН СССР на собрании Отделения общей физики и астрономии, он произнёс яркую речь о моих научных достижениях и особый упор сделал на открытие мною явления коллапса ленгмюровских волн в плазме.

В заключение хочу сказать, что судьба даровала мне замечательного Учителя — мудрого, внимательного и очень деликатного. Научные идеи, которые он в меня вложил в годы моей научной молодости, оказались исключительно глубокими и плодотворными. Я вместе с моими учениками продолжаю развивать их до сих пор. Разумеется, у Роальда Зиннуровича есть много других важнейших результатов, не укладывающихся в эти идеи: например, открытие универсальной неустойчивости неоднородной плазмы, открытие "неоклассической диффузии", работы по проблеме управляемого ядерного синтеза и др.

Роальду Зиннуровичу исполняется девяносто лет. И радостно видеть, что его творческая и социальная активность не иссякают. Ведь он не только физик, но и человек широкой гуманитарной культуры, глубоко интересующийся историей цивилизации и перспективами будущего, стоящими перед человечеством.