

PERSONALIA**Роальд Зиннурович Сагдеев**

(к 90-летию со дня рождения)

PACS number: 01.60.+q

DOI: <https://doi.org/10.3367/UFNr.2021.12.039126>

26 декабря 2022 г. исполняется 90 лет выдающемуся физику, академику Российской академии наук Роальду Зиннуровичу Сагдееву.

Р.З. Сагдеев родился в Москве, где тогда учился его отец. В 1937 г. семья Сагдеевых переехала в Казань. После окончания там средней школы РЗ<sup>1</sup> поступил в 1950 г. на физический факультет Московского государственного университета (МГУ) и окончил его в 1955 г. Уже в студенческие годы РЗ привлек внимание Л.Д. Ландау, который вскоре принял большое участие в его судьбе.

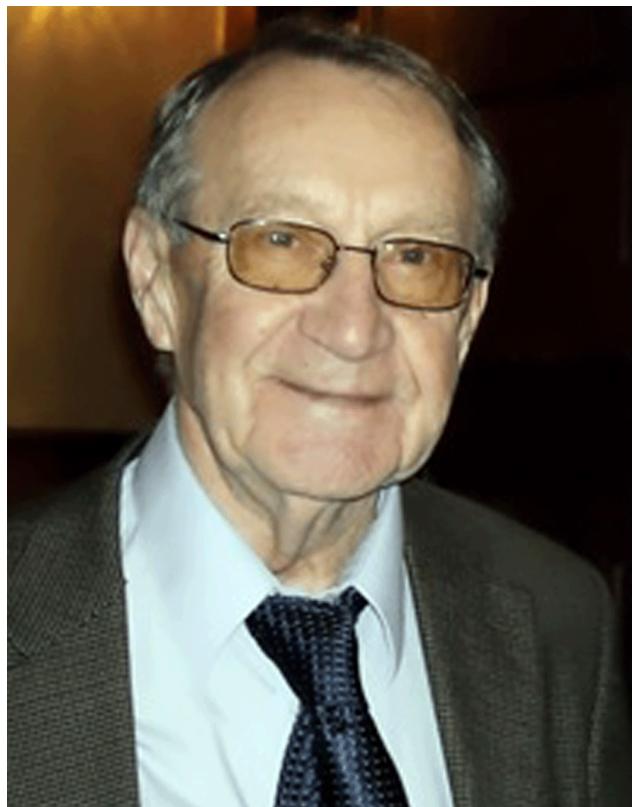
В те годы имелся большой "спрос" на выпускников физических факультетов со стороны центров разработки ядерного оружия, и РЗ был направлен выполнять дипломную работу в ведущий центр (Арзамас-16), ныне известный как Саров, а после окончания МГУ — во вновь создаваемый центр (ныне Снежинск). Это, казалось бы, предопределяло его судьбу, но РЗ видел своё будущее в занятиях "открытой" наукой и мечтал о работе под руководством Л.Д. Ландау.

РЗ обратился к Ландау за помощью, и тот связался с И.В. Курчатовым. В результате усилий Курчатова назначение в Снежинск было отменено, и РЗ был направлен в Институт атомной энергии (ИАЭ, ныне "Курчатовский институт"), тогда носящий название Лаборатории измерительных приборов АН СССР и находившийся в Москве. Такое решение позволило РЗ продолжить регулярное участие в семинарах Ландау, хотя он не мог быть официально зачислен в аспирантуру Института физических проблем (ИФП).

В ИАЭ Сагдеев вошёл в состав научной группы М.А. Леонтovichа, занимавшейся теорией горячей плазмы — совершенно нового состояния вещества с большим числом коллективных степеней свободы, склонного к возбуждению многочисленных ветвей колебаний и переходу в режим хаотических турбулентных движений. Интерес к данной области физики был связан с идеей управляемого термоядерного синтеза (УТС): для достижения цели требовалось надёжное удержание плазмы в магнитном поле, а плазма всегда (в те годы) быстро ускользала из магнитных ловушек. Существовала точка зрения, что диффузия плазмы поперёк магнитного поля следует модели Д. Бома и для реально достижимых магнитных полей происходит так быстро, что осуществление УТС становилось невозможным.

Одна из первых публикаций РЗ наметила путь к пониманию указанной проблемы. В статье 1959 г. им (совместно с Л.И. Рудаковым) было показано, что градиенты плотности и температуры плазмы, неизбежно присутствующие в любой схеме магнитного удержания, вызывают развитие значительных флуктуаций плотности и температуры, связанных с дрейфовым движением частиц; подобные флуктуации и вызывают аномально большую (или просто аномальную) диффузию плазмы. Это был настоящий прорыв в понимании проблем удержания плазмы. Стало также ясным, что аномальная диффузия вовсе не обязательно достигает бомовского уровня, так что магнитное удержание плазмы имеет шансы на успех. К настоящему времени достигнуто хорошее понимание аномальных механизмов диффузии плазмы в токамаках, стеллараторах и других системах удержания плазмы.

В те же годы РЗ заложил основы ещё двух научных направлений: физики уединённых волн (солитонов) и физики ударных волн в так называемой бесстолкновительной плазме, т.е. плазме с пренебрежимо редкими столкновениями между частицами — в результате исследования им различных форм макроскопических движений плазмы в магнитном поле. В 1958 г. он установил, что нелинейные возмущения, распространяющиеся поперёк магнитного поля, могут принимать форму солитонов, и исследовал их возможные параметры. Работы по физике солитонов начали бурно развиваться, и вот уже более полувека являются объектом активных исследований как в области применений,



Роальд Зиннурович Сагдеев

так и в области математических особенностей подобных структур, в частности, их связи с методом обратной задачи рассеяния.

В настоящее время это целое научное направление, широко представленное практически во всех областях современной физики. Большой и широко признанный вклад в развитие физики солитонов внесли и продолжают вносить ученики РЗ.

Бесстолкновительные ударные волны (БУВ) были открыты Р.З. Сагдеевым в результате анализа процесса "опрокидывания" римановских решений в течениях плазмы поперёк магнитного поля. Оказалось, что при наличии дисперсии волны в плазме переход из исходного в конечное состояние может происходить в форме затухающих осцилляций, даже в случае очень редких столкновений. Другой механизм, особенно эффективный в случае сильных ударных волн, связан с развитием турбулентных электромагнитных флуктуаций во взаимопроникающих потоках в зоне опрокидывания; рассеяние частиц плазмы на этих флуктуациях имитирует диссипацию на фронте обычной, столкновительной УВ. Теоретическое предсказание существования БУВ привело "взрыву" исследований таких волн во всём мире. В астрофизических журналах появляются десятки публикаций, в которых объясняются с помощью БУВ наблюдаемые явления как в ближнем, так и в дальнем космосе. Эксперименты по физике БУВ проводятся на крупнейших импульсных лазерах и других установках.

Упомянутые работы по нелинейным волнам в бесстолкновительной плазме послужили основой кандидатской диссертации, защищённой РЗ в 1961 г. в ИФП. На защите П.Л. Капица сделал шутливое замечание о том, что соискатель немного поторопился: если

<sup>1</sup> Так Роальда Зиннуровича часто называют в кругу учеников и друзей; мы следуем этой традиции.

бы он поработал над вопросами, освещёнными в диссертации, ещё три месяца, то диссертацию нужно было бы защищать как докторскую и не нужно было бы созывать Учёный совет ещё раз. Ландау тоже сделал лестные замечания и о работе, и о соискателе.

В начале 1960-х гг. Р3 совместно с А.А. Веденовым и Е.П. Велиховым разработали квазилинейную теорию плазмы. Данная модель стала первым шагом к построению более полной теории, в рамках которой многочисленные ветви плазменных колебаний рассматривались как квазичастицы, способные распадаться, сливаться и рассеиваться, а также излучаться и поглощаться частицами плазмы. Указанная теория получила название теории слаботурбулентной плазмы.

В 1961 г. Р3 был приглашён Г.И. Будкером в Институт ядерной физики (ИЯФ, ныне им. Г.И. Будкера) только что созданного Сибирского отделения Академии наук в Новосибирске. "Команда" Р3 включала его первых учеников, А.А. Галеева, В.Е. Захарова и А.М. Фридмана, а также Г.М. Заславского, В.И. Карпмана, С.С. Моисеева и В.Н. Ораевского. Р3 широко делился своими идеями. Все, кто близко сотрудничал с ним, помнят его умение заинтересовать, увлечь, зажечь занимавшей его задачей, а потом помогать на каждом шаге её исследования. Неудивительно, что почти все публикации Р3 имеют соавторов. Причём по имевшейся тогда традиции список авторов был алфавитным, и Р3 редко оказывался в нём первым. Производительность группы Сагдеева в ИЯФ поразительна: она внесла широко признанный вклад в физику плазменной турбулентности, бесстолкновительных ударных волн, процессов переноса в термоядерных установках и в другие области физики плазмы и гидродинамики.

В 1963 г. Р3 защищает в ИЯФ докторскую диссертацию; оппонентами на защите были Я.Б. Зельдович, И.Е. Тамм и Б.В. Войцеховский. В 1964 г. его избирают членом-корреспондентом Академии наук СССР.

Во второй половине 1960-х гг. группа Р3 существенно продвинула теорию аномальной диффузии, обнаружив дополнительные ветви неустойчивости и средства их стабилизации в некоторых магнитных конфигурациях (последние — совместно с М.Н. Розенблотом и Б. Коппи). Применение квазилинейной теории позволило решить важную задачу об аномально высоком электрическом сопротивлении плазмы.

В совместных работах с А.А. Галеевым были указаны новые механизмы диффузии плазмы в токамаках и стеллараторах, связанные со специфической, похожей на бананы, формой траекторий заряженных частиц в этих установках. При этом пересек частицы с одной орбиты на другую происходит из-за столкновений между частицами, как в классической газовой диффузии. Отсюда название нового механизма диффузии: неоклассическая. В наше время данный механизм с необходимостью учитывается при проектировании всех новых установок для УТС.

Другие важные достижения группы включали, в числе прочего, теорию спектров звуковой турбулентности, возникновение хаотического магнитного поля, свойства хаоса в турбулентной среде.

Р.З. Сагдеев оказал сильное влияние на преподавание физики в Новосибирском государственном университете, первые выпускники которого до сих пор помнят его лекции, его юмор и его доступность.

В 1968 г. Р.З. Сагдеев был избран действительным членом Академии наук СССР. В то время его интересы стали смещаться в сторону физики космической плазмы. В начале 1971 г. Р3 переезжает в Москву, где в 1973 г. назначается директором Института космических исследований (ИКИ) АН СССР. Такое назначение было естественным следствием возникшего тогда понимания, что плазменные процессы играют определяющую роль для множества объектов во Вселенной.

Пятнадцать лет директорства Р3 стали годами "бури и натиска" в советских исследованиях космоса. Космические исследования в СССР (как и в США) всегда оставались закрытой сферой деятельности, но в эти годы ИКИ фактически стал мировым лидером международного сотрудничества.

В конце 1970-х гг. Р3 стимулировал проведение активных экспериментов в космосе (советско-французский проект АРАКС). Эффекты, вызванные электронным пучком с французской ракеты АРИАН, стартовавшей с острова Кергелен в Южном полушарии, регистрировались в магнитно-сопряжённой точке в Костромской области.

В начале 1980-х гг. Р3 стал "мозгом и сердцем" проекта ВЕГА. Два аппарата, ВЕГА-1 и ВЕГА-2, должны были впервые в истории провести *in situ* измерения свойств кометы в Солнечной системе. В качестве объекта исследования была выбрана комета Галлея. При проведении гравитационного манёвра при пролёте аппаратов вблизи планеты Венера (отсюда и название проекта: ВЕнеры + ГАллей) предполагалось доставить в атмосферу этой планеты два аэростат-

ных зонда для регистрации атмосферных процессов, в частности, атмосферной циркуляции. Проект ВЕГА стал подлинным триумфом отечественной науки, одновременно открывшим уникальные возможности, которые может дать международное сотрудничество: научная аппаратура ВЕГИ создавалась в широкой международной кооперации, а в 14 научных экспериментах участвовали учёные из девяти стран.

В зоне наибольшего сближения ВЕГИ и ядра кометы удалось получить массовые спектры ионов кометной плазмы. Наиболее неожиданным явилось обнаружение ионов железа, не наблюдавшихся по оптическим спектрам. Само ядро оказалось вытянутым, неправильной формы телом с размерами около  $15 \times 7 \times 7$  км. В период проведения измерений комета Галлея теряла около 40 тонн воды в секунду. Расчёты показали, что такое может быть только в случае испарения ледяного тела. Действительно, по наблюдениям, ионы группы воды составили 70–80 %. Далее, на расстоянии около 160 тыс. км была обнаружена не предсказанная теоретически "кометопауза", разделяющая область с разной концентрацией кометных ионов.

ВЕГА была первой у кометы Галлея (6 марта 1986 г.) среди флотилии других аппаратов, направленных к комете, в том числе аппарата Европейского космического агентства GIOTTO.

Во время встречи ВЕГИ 1 и ВЕГИ 2 с кометой впервые в мире был проведен эксперимент PATHFINDER (Лоцман): ВЕГИ оперативно передали на Землю информацию, которая позволила уточнить положение ядра кометы, с 1500 до 40 км. Благодаря этому европейский аппарат GIOTTO смог приблизиться к ядру на расстояние 600 км; измерения, выполненные GIOTTO, полностью подтвердили основные характеристики ядра кометы по данным космических аппаратов ВЕГА.

Уникальную информацию дала и планетная часть программы ВЕГА — аэростатные измерения метеорологических параметров, проведённые в Венерианской атмосфере на высотах 53–55 км. Данные измерения внесли большой вклад в понимание атмосферных процессов на Венере.

Р3 был одним из инициаторов развития работ по рентгеновской астрономии в СССР. Благодаря ему в ИКИ возникло международное сотрудничество в области рентгеновской астрономии: четыре орбитальные обсерватории с результатами, известными теперь всему миру.

В те же 1980-е гг. Р3 возвратился к задачам о соотношении хаоса и регулярных структур в турбулентности, интересовавшим его со времён новосибирского периода. Появилась серия публикаций (в соавторстве с Г.М. Заславским и другими), в которых была развита концепция "стochasticской паутины" и регулярных структур. Характерно название одной из статей: "Хаос — насколько регулярным он может быть?" Указанный цикл работ содержит существенное развитие нашего понимания хаоса.

Во время Перестройки Р3 входил в круг советников Горбачёва и был избран в Верховный совет СССР. Однако нежелание Р3 строго следовать указаниям партийных органов привело к прекращению этих отношений.

С 1990 г. Р.З. Сагдеев является профессором Мэрилендского университета в городе Колледж Парк (США). В эти годы он исследовал взаимодействие бесстолкновительных ударных волн с космическими лучами (совместно с М.А. Мальковым и др.). С 2015 г. Р3 — профессор-emeritus Мэрилендского университета. Руководит международным зум-семинаром, охватывающим широкий круг вопросов, от физики до эпидемиологии, от литературы до истории науки.

В 1986 г. академику Р.З. Сагдееву было присвоено звание Героя социалистического труда. Р3 получил множество других советских и российских наград и премий, а также премий международных научных сообществ. Состоит членом Академии наук США, Швеции, Венгрии, Общества Макса Планка (ФРГ), Папской академии наук.

Р3 — разносторонний человек с широким кругом интересов. Он превосходно знает художественную и историческую литературу, понимает и любит живопись, его интересует история религий и их роль в современном обществе. Р3 всегда занимает активную позицию по остройм вопросам научной политики, общественным проблемам, проблемам контроля над ядерным оружием. Он умеет смело выразить своё мнение и обосновать его.

От имени учеников, коллег и друзей поздравляем Роальда Зиннуровича с замечательным юбилеем и желаем ему здоровья и творческой активности.

*А.Г. Аганбегян, А.И. Вайнштейн, Г.И. Дудникова,  
В.Е. Захаров, Л.М. Зелёный, Е.А. Кузнецов,  
А.Г. Литвак, Р.И. Нигматуллин, Д.Д. Рюотов,  
А.Н. Скринский, Р.А. Слоняев, М.П. Федорук*