

## Георгий Моисеевич Заславский

1935 - 2008



Георгий Моисеевич родился 31 мая 1935 г. в Одессе. В 1957 г. он окончил Одесский университет. После того как в 1957 г. было принято решение о создании Сибирского отделения Академии Наук с центром в Новосибирске, туда отправилось много сотрудников из научных институтов Москвы, Ленинграда и других городов, а также выпускников различных вузов страны. Среди них был и Г.М. Заславский. Он начал работать инженером в одном из НИИ Новосибирска, затем старшим лаборантом Новосибирского электротехнического института. В 1959 г. Г.М. Заславский стал преподавать в еще только создававшемся Новосибирском университете, сначала ассистентом, а в 1963 г. стал доцентом. В только что организованный под руководством А.М. Будкера Институт ядерной физики (ИЯФ) из московского Института атомной энергии (ИАЭ) пришли С.Т. Беляев, В.М. Галицкий, Б.В. Чириков, Р.З. Сагдеев и др. Приоритетными направлениями в ИЯФ стали исследования по созданию ускорителей на основе новых принципов ускорения и физика плазмы. Физика плазмы в то время была еще очень молодой областью и с нее только что была снята завеса секретности. Р.З. Сагдеев возглавил одну из лабораторий ИЯФ, которая сосредоточилась на плазменной тематике. Находящаяся на взлете научной карьеры фигура Р.З. Сагдеева была очень привлекательной для молодых физиков. Среди его первых аспирантов были А.А. Галеев, В.Е. Захаров, А.М. Фридман, С.С. Моисеев, Г.М. Заславский. Все они стали крупными физиками.

Кандидатская диссертация Г.М. Заславского, которую он защитил в 1964 г., была посвящена релятивистской гидродинамике. Создание новых ускорителей и открытых систем магнитного удержания плазмы требовали обстоятельного изучения многомерных нелинейных колебаний консервативной системы в целом, то есть на неограниченном интервале времени и при произвольных начальных условиях. Поставленные задачи явились мощным стимулом для прогресса нелинейной физики, которая в настоящее время бурно развивается. Для ускорителей с жесткой фокусировкой, идея которых тогда широко обсуждалась, А.М. Будкер полагал, что вследствие «забывания» начальной фазы колебания должны диффузионно расти и это

приведет к выходу частиц из режима ускорения и быстрой гибели частиц. Вычислительные эксперименты, проведенные в ЦЕРН, подтвердили предсказание А.М. Будкера. Было показано, что диффузия возникает даже при очень слабой нелинейности. Однако механизм диффузии был совершенно неясен. Здесь проявились какие-то новые явления, для которых требовались новые подходы. Такого рода задачи привели Б.В. Чирикова к изучению явления хаоса. На основе перекрытия нелинейных резонансов им впервые был введен критерий появления хаотических колебаний в нелинейных гамильтоновых системах (критерий Чирикова, 1959) [1].

Б.В. Чириков и Р.З. Сагдеев определили интерес Г.М. Заславского к проблематике хаоса, которая стала предметом всех его последующих исследований. Напомним, что в 1949 г. Э. Ферми предложил механизм происхождения космических лучей (ускорение Ферми) [2]. К задаче об ускорении Ферми обратились Б.В. Чириков и Г.М. Заславский, и в предложенной ими простой модели был детально изучен его механизм [3]. Два главных результата работы [3] заключаются в следующем: 1) было показано, что существует область неустойчивости, движение в которой является хаотическим; 2) был получен эквивалентный критерию Чирикова другой критерий возникновения хаотичности, основанный на расцеплении фазовых корреляций. Оба критерия стали широко использоваться в дальнейшем при решении многочисленных физических задач.

Одним из поворотных пунктов в развитии нелинейной динамики явилась проблема Ферми–Паста–Улама (ФПУ, 1955) [4], затронувшая фундаментальные вопросы физики. ФПУ-проблема в сильнейшей степени определила интерес Г.М. Заславского к нелинейным задачам. Формированию представлений о хаосе способствовала также важная задача плазменной физики о существовании и устойчивости магнитных поверхностей (Г.М. Заславский, Р.З. Сагдеев, Н.Н. Филоненко и др., 1966–1968), включенная в программу исследований ИЯФ. Выяснилось, что под действием возмущения происходит разрушение магнитных поверхностей и возникает хаос [5]. Зарождение хаоса происходит в окрестности сепаратрисы, где образуется стохастический слой – важнейшее понятие теории хаоса. Р.З. Сагдеев предположил универсальность этого явления вблизи сепаратрисы. Вскоре это было подтверждено в работе [6], где была дана первая оценка ширины стохастического слоя и получен положительный показатель Ляпунова, свидетельствующий о локальной неустойчивости. Затем Г.М. Заславский и Н.Н. Филоненко [7] провели подробное изучение стохастического слоя с помощью полученного в [6] сепаратрисного отображения, ставшего универсальным инструментом в математическом аппарате теории хаоса.

Концептуальное значение в понимании феномена хаоса имело установление его неоднородности, когда области хаоса весьма сложным образом переплетены с областями регулярности – системы с разделяющимся фазовым пространством (Г.М. Заславский, Б.В. Чириков) [3, 8]. Полученные результаты нашли применение при решении многочисленных и разнообразных физических задач: о движении заряженных частиц во внешних полях, неустойчивости плазмы, нелинейных волнах, турбулентности в средах с дисперсией и др.

Результаты, полученные при изучении ускорения Ферми и проблемы разрушения магнитных поверхностей, вышли далеко за рамки первоначально поставленных задач. В этих результатах проявились типичные черты возникновения хаоса в гамильтоновых системах. С хаосом связан тип сложных движений динамических систем, принципиально отличных от известных простых движений, таких как периодические и квазипериодические движения. Понятие сложности обычно ассоциировалось со сложным устройством системы, с большим числом степеней свободы.

Существовал глубокий разрыв, с одной стороны, между интегрируемыми системами классической динамики, а с другой – системами статистической механики. Данный разрыв свидетельствовал о наличии фундаментальной нерешенной проблемы классической физики. Открытие хаоса в нелинейных динамических системах способствовало значительному прогрессу в разрешении этих трудностей и углубленному пониманию динамического и статистического описания этих систем. Оказалось, что область проявления статистических законов намного шире, чем это традиционно предполагалось. Хаотическим поведением могут обладать просто устроенные системы, всего с несколькими степенями свободы. Было показано, что динамическое и статистическое описание являются не двумя противоположностями, принципиально отличающимися между собой, а они сосуществуют, дополняют друг друга, характеризуют разные стороны одного и того же объекта. В настоящее время стало ясным, что хаос представляет собой типичное свойство динамических систем. Он весьма распространен и проявляется практически во всех областях современной физики. Можно даже сказать, что системы, демонстрирующие только регулярное поведение, являются редкими. Все это оказало глубокое воздействие на наши представления о физическом мире. Исследования хаоса по-новому осветили целый ряд проблем, имеющих как общефизическое, так и общенаучное значение, и дали новые импульсы к их изучению.

Лежащая в основе механистической картины мира динамическая модель обусловила преобладание динамического описания. Динамический и статистический способы описания породили глубинные вопросы о существовании законов, лежащих в основе физического мира, соотношении динамического и статистического, что является фундаментальным, первичным, а что производным, вторичным? Проблема приобрела другое освещение, и наметились новые подходы к имеющему многовековую историю вопросу о природе случайности, вероятности.

Картина мира, основанная на строгом детерминизме, оказалась неполной. Определены ограничения на возможности предсказуемости, на соотношение детерминизма – индетерминизма. Исследования хаоса привели к новому взгляду на вопросы устойчивости – неустойчивости, локального описания – глобального подхода, хаотичности – упорядоченности.

Открытие хаоса относительно независимо было сделано для двух классов динамических систем: гамильтоновых и диссипативных. Соответственно этому имелись две линии развития. Исследование хаоса имеет длинную историю, которая для диссипативных систем на завершающем этапе в 1960-е – начале 1970-х гг. связана с именами Э. Лоренца, С. Смейла, Д. Рюэля, Ф. Такенса. Часто, говоря об открытии хаоса, только этим и ограничиваются. Но имеется другая линия развития, которая идет через небесную механику и эргодическую теорию и восходит к Л. Больцману, А. Пуанкаре, Дж. Биркгофу, Э. Хопфу, Н.С. Крылову, А.Н. Колмогорову, Я.Г. Синаю. Эта линия в те же 1960-е гг. привела к открытию хаоса в гамильтоновых системах, где работы Б.В. Чирикова, Г.М. Заславского и их сотрудников имели первостепенное значение.

Полученные в 1960-е гг. результаты были изложены в монографии Г.М. Заславского «Статистическая необратимость в нелинейных системах» [9], опубликованной в 1970 г. Вместе с диссертацией Б.В. Чирикова [8], вышедшей годом раньше, эта монография явилась в мировой литературе первым систематическим изложением теории хаоса. Однако труднодоступность работы Б.В. Чирикова затруднила ознакомление с ней широкого круга физиков, а монография Г.М. Заславского в очень значительной степени способствовала распространению идеи хаоса.

В Академгородке, как и в других новых научных центрах, концентрировались талантливая и активная молодежь и опытные, зрелые ученые, чьи возможности в полной мере не использовались в Москве и других сложившихся центрах науки [10]. Ученым институтов Академгородка самим в определенной степени разрешалось разрабатывать перспективные направления в аспекте формирования мировой фундаментальной науки. Возможно, такие послабления объяснялись высоким авторитетом руководства нового Сибирского отделения и собранием блестящих талантов в научных институтах.

В кругах исследователей, в первую очередь молодых, складывались самосознание и умонастроения, которые соответствовали общечеловеческим, а не официальным стандартам. Большую популярность приобрели неформальные дискуссии между крупными учеными и студентами на различных семинарах и встречах. Кроме того, одной из самых сильных сторон молодого Новосибирского университета было то, что там работал целый ряд ученых с мировой известностью. Молодые люди, которые только вступали в науку, имели возможность получить новейшую информацию из первых рук, от людей, непосредственно «делавших» науку.

В 1971 г. Г.М. Заславский был приглашен на должность старшего научного сотрудника в Институт физики им. Л.В. Киренского СО АН СССР (г. Красноярск) в теоретический отдел, который возглавлял его друг и сокурсник по Одесскому университету В.А. Игнатченко. Здесь Г.М. Заславскому были предоставлены все условия для развития его тематики и формирования соответствующей группы сотрудников. На основе этой группы, после защиты Г.М. Заславским докторской диссертации, в 1973 г. был открыт сектор теории нелинейных процессов, который он возглавил.

В этот период Г.М. Заславский приступил к изучению квантового хаоса. Отправным пунктом многих исследований квантового хаоса в 1970-е гг. явилась работа А. Эйнштейна 1917 г. [11], в которой были обобщены правила квантования Бора–Зоммерфельда. При исследовании хаоса в квантовом случае обращаются к тем особенностям квантовых систем, которые в классическом пределе проявляют хаотические свойства. Вследствие этого усилился интерес к изучению квантовых систем в квазиклассическом случае и влияния квантовых эффектов на свойства динамического хаоса. В классических системах при возникновении хаотического движения происходит «разрушение» интегралов движения. Эйнштейн указал на неприменимость предложенных им обобщенных правил квантования в случае неинтегрируемых систем.

Вопрос о квазиклассических правилах квантования в случае неустойчивых классических траекторий нашел отражение в двух работах Г.М. Заславского [12, 13]. Первоначально работа [12] была отвергнута редколлегией ЖЭТФ. В то время (статья [12] поступила в редакцию 15 января 1973 г.) затронутые в ней вопросы не казались актуальными, проблемами хаоса занималось не так много физиков. Время, когда нелинейная динамика стала общепризнанной областью, еще не пришло. Лишь после вмешательства И.М. Лифшица, убедившего Е.М. Лифшица, который был членом редколлегии журнала, в высоком уровне этой работы и принципиальной важности поднятых в ней проблем, она была принята в печать.

Исследование квантовых систем в квазиклассической области параметров имеет непосредственное отношение к фундаментальному вопросу – о связи классической и квантовой механики. Важные результаты здесь получил Г.М. Заславский совместно с Г.П. Берманом [14], который сначала делал дипломную работу у Г.М. Заславского (1970), а затем был его аспирантом. Позднее к исследованиям подключились А.М. Иомин и А.Р. Коловский – еще два аспиранта Георгия Моисеевича.

φωτο

фото

В работе [14] был введен важный временной масштаб  $t_E$ , названный позднее время Эренфеста. Этот масштаб характеризует время расплывания волнового пакета, он ограничивает тот промежуток времени, в течение которого волновой пакет может быть сопоставлен классической частице. Поэтому на временах  $t > t_E$  становится существенным влияние квантовых эффектов. В работе Г.П. Бермана и Г.М. Заславского [15] было введено понятие квантового нелинейного резонанса. Результаты развития идей по квантовому хаосу, в частности, обобщение понятия квантового нелинейного резонанса и взаимодействия между квантовыми нелинейными резонансами изложены в работах [16–19]. Квантовые нелинейные резонансы и их взаимодействие нашли широкие применения в дальнейших интенсивно проводимых исследованиях квантового хаоса [20]. Фундаментальная величина – время Эренфеста – оставалась малоизученной в течение многих лет в силу своей логарифмической малости. С развитием компьютерной и экспериментальной техники было обнаружено численно и экспериментально, что время Эренфеста играет принципиально важную роль в квантовом транспорте в мезоскопических системах и в исследовании устойчивости волновых функций. Позднее, в 1980-е гг., в ИЯФ стал интенсивно изучаться квантовый хаос в ядерных системах (В.В. Соколов, В.Г. Зелевинский и др.).

Статья 1976 г. [21] о хаотическом характере взаимодействия атомов с собственным полем излучения в резонаторе породила поток работ по атомному хаосу в лазерных полях. В этой работе впервые было показано, что при определенных условиях в полуклассическом пределе в фундаментальной модели взаимодействия излучения с веществом возможно возникновение гамильтонова хаоса по стандартному сценарию с образованием стохастического слоя в окрестности сепаратрисы. Сейчас это новое направление в современной квантовой физике с развитой теорией и множеством экспериментов.

Глубокие связи с квантовым хаосом возникли в весьма далекой от квантовой физики области – в акустике океана. Из совместных с С.С. Абдуллаевым, а затем с А.Л. Вировлянским статей конца 1980-х – начала 1990-х гг. [22] родилось направление в подводной акустике, называемое сейчас лучевым и волновым хаосом в подводном звуковом канале в океане [23–25]. В конце сороковых годов прошлого века акустики обнаружили возможность распространения звука в океане на тысячи километров. Эффект обусловлен минимумом скорости звука на определенной глубине, благодаря чему часть звуковой энергии оказывается захваченной подводным волноводом. В лучевом приближении волновое уравнение сводится к гамильтоновым уравнениям для траектории лучей. Внутренние волны в океане приводят к горизонтальной модуляции скорости звука и при определенных условиях порождают хаотическую диффузию лучей и особенности волнового поля. Волновой хаос имеет много общего с квантовым хаосом. Многочисленные натурные эксперименты в океане по дальнему распространению звуковых сигналов подтверждают эти теоретические предсказания [26, 27]. Результаты этого направления более чем двадцатилетней работы Георгия Моисеевича изложены в его последней монографии, которая выходит уже после его смерти [28].

Изучение странных аттракторов возродили в 1970–1980-е гг. надежды на решение давно поставленной фундаментальной проблемы – возникновения турбулентности. В этой связи Г.М. Заславский предложил простейшую модель странного аттрактора [29]. При этом было получено отображение, названное им самим стандартным диссипативным отображением. Однако в литературе это отображение общепринято называть отображением Заславского. В отсутствие диссипации оно переходит в стандартное отображение Чирикова. Отображение Заславского вошло в число клас-

сических моделей диссипативного хаоса. Оно в простейшей форме устанавливает в явном виде связь между двумя типами хаотического движения, дает возможность отчетливо проследить, как при изменении параметров гамильтонов хаос переходит в диссипативный хаос.

Последовательное изложение идей хаоса, математического аппарата и применение развитых методов к многочисленным физическим задачам Г.М. Заславский изложил в своей монографии «Стохастичность динамических систем» [30]. Она была издана в 1984 г. и стала заметным явлением в физической литературе. В ней рассматриваются как гамильтоновы, так и диссипативные системы с упором на гамильтонов хаос. Кроме того, приведены ранние результаты исследований квантового хаоса.

Группа Р.З. Сагдеева в 1970 г. покинула ИЯФ. Он сам вместе с А.А. Галеевым уехал в Москву. Через несколько лет Р.З. Сагдеев стал директором недавно организованного Института космических исследований (ИКИ), куда в 1984 г. пригласил Г.М. Заславского. Здесь Г.М. Заславский создал лабораторию, в которой велись исследования динамического хаоса и нелинейной динамики, а также их приложений в физике лабораторной и космической плазмы и в гидродинамике. В ИКИ он воспитал многих учеников, которые продолжили развитие теории хаоса в процессах взаимодействия электромагнитных волн с заряженными частицами, анализе лучевых траекторий в неоднородных средах и волноводах и др. Необходимо отметить, что результаты Г.М. Заславского и его учеников по возникновению хаоса в динамических системах, перекрытию резонансов, явлениям в окрестности сепаратрисы и др. широко используются в космических исследованиях, например, при анализе механизмов ускорения частиц, исследовании сложной динамики магнитных полей, генерации плазменной турбулентности в земной магнитосфере, при интерпретации результатов наблюдений электромагнитного излучения в околоземном пространстве и т.д. (см., в частности, [31]).

Во многих задачах физики и механики теория Колмогорова–Арнольда–Мозера (КАМ) становится неприменимой вследствие нарушения условий невырожденности. Рассмотрение в ряде физических задач вырожденных систем или систем, близких к вырождению, привело к открытию совершенно новых явлений и к существенному расширению представлений о зарождении хаоса.

Указанное направление развилось из нелинейных задач плазменной физики и главные заслуги принадлежат Г.М. Заславскому с сотрудниками. Одной из таких задач, очень важной для физических приложений, является задача о взаимодействии частицы с волновым пакетом в поперечном магнитном поле [32, 33], в частности, при серфотронном ускорении частиц возможна генерация космических лучей с ультррелятивистскими энергиями. Указанная система имеет полторы степени свободы. То, что хаос в гамильтоновых системах может возникнуть уже в случае полутора степеней свободы, было хорошо известно. В качестве примера можно назвать одномерный нелинейный осциллятор, находящийся под действием зависящей от времени периодической внешней силы (трехмерное фазовое пространство). В задаче о частице в волновом пакете фазовая плоскость покрывается сеткой конечной толщины, внутри которой движение будет хаотическим, а в ее ячейках – регулярным. Происходит образование структуры, получившей название стохастической паутины, или паутины Заславского. Такая стохастическая диффузия аналогична диффузии Арнольда. Совершенно новый момент заключается в том, что образование стохастической паутины происходит при числе степеней свободы  $N = 1.5$  (диффузия Арнольда становится возможной при  $N > 2$ ), что очень важно для многих задач физики плаз-



мы, физики ускорителей, астрофизики. Скорость диффузии по паутине Заславского значительно превышает скорость диффузии Арнольда. Здесь мы сталкиваемся с качественно новым проявлением хаоса. Диффузия по паутине Заславского происходит не только в рассмотренной системе, а имеет универсальный характер.

Другое принципиальное отличие паутины Заславского от диффузии Арнольда связано с геометрией паутины. Паутина Заславского обладает той особенностью, что в ряде случаев покрытие ею фазовой плоскости имеет замечательно симметричную форму. Симметрия динамических задач приводит к симметрии пространственных структур. Сепаратрисная сетка может обладать «простыми» симметриями 2-го, 3-го, 4-го и 6-го порядков. Однако при определенных значениях параметров возникает нетривиальная ситуация, когда стохастическая паутина обладает симметрией квазикристаллического типа, например, с запрещенной в кристаллах симметрией 5-го и 7-го порядков. Имеет место неожиданная связь между совершенно разнородными явлениями, когда хаос формирует упорядоченность. В настоящее время само понятие упорядоченности претерпевает глубокие изменения. Не последнее место в этом занимают исследования по нелинейной динамике. Одна и та же система в зависимости от значений параметров может демонстрировать как регулярное, так и хаотическое движение. Паутина Заславского дает необычный пример связи хаоса и порядка. Само появление динамических структур обусловлено существованием особых точек и особых траекторий в фазовом пространстве, что своеобразным путем проявляется посредством случайных блужданий.

В 1991 г. Г.М. Заславский уехал из России в США и стал работать сначала в Калифорнийском университете Санта-Барбары. Затем в 1992 г. он стал профессором физики и математики на физическом факультете Нью-Йоркского университета и в Институте математических наук им. Р. Куранта при этом университете, где и проработал 17 лет. Основные работы Г.М. Заславского в этот период были посвящены исследованиям динамического хаоса и связанным с ним дробной динамикой и аномальной кинетикой, применениям дробного интегро-дифференцирования к описанию физических процессов различной природы. Среди первых результатов по дробной кинетике можно отметить получение обобщенных уравнений Фоккера–Планка в 1994 г. [34] и решений дробных кинетических уравнений в 1997 г. [35]. Тогда же Г.М. Заславский вернулся к интенсивным исследованиям квантового хаоса. Это было связано с существенным прогрессом в исследовании дробного транспорта в динамических системах, что стало возможным с развитием компьютерной техники.

Дробный математический анализ является теорией интегрирования и дифференцирования произвольного порядка. Эта теория имеет длинную историю, начиная с XVII в. Производная порядка  $1/2$  была описана В. Лейбницем 30 сентября 1695 г. Дробное дифференцирование и дробное интегрирование восходит к исследованиям большого числа крупных математиков, таких как В. Лейбниц, Ж. Лиувилль, Г. Грюнвальд, А.В. Летников, Б. Риман, Н. Абель, Ф. Рисс, Г. Вейль. Интегралы и производные нецелого порядка и дробные интегро-дифференциальные уравнения находят множество применений в современных исследованиях в теоретической физике, механике и прикладной математике. Динамика частиц при дробном транспорте соответствует процессам типа полетов Леви, что приводит к супердиффузии, как, например, ускоряющие моды в стохастической паутине или хаотическом ротаторе. Оказалось, что подобные явления супердиффузии могут реализоваться также и в квантовом случае, что подтверждено экспериментально [36].

Исследования стохастических квантовых систем составляет область квантового хаоса. Существуют принципиальные различия между классической и квантовой

хаотической динамикой. Это прежде всего связано с тем, что локальная неустойчивость траекторий является необходимым условием хаоса. Однако в квантовом случае теряют смысл многие понятия классической механики, которые существенно используются в классической теории хаоса. Следовательно, требуется пересмотреть целый ряд понятий классической теории хаоса и выяснить трудности, возникающие при попытках перенесения этих понятий в квантовую теорию. Противоречие квазиклассического перехода разрешается на временном масштабе порядка времени Эренфеста [14, 16]. Для гиперболических систем  $t_E$  ведет себя как логарифмическая функция от постоянной Планка. Однако типичная динамическая система не является однородной даже в условиях сильного хаоса, в ней имеются островки устойчивости. Благодаря островкам устойчивости типа ускоряющая мода имеет место явление супердиффузии. Это принципиальным образом влияет на время Эренфеста. Оно становится степенной функцией от постоянной Планка и показателем степени является величина, называемая транспортной экспонентой, которая определяет супердиффузию [37, 38].

Ряд исследований Г.М. Заславского посвящен принципиальным вопросам хаотической динамики, среди которых отличие статистических свойств систем с очень большим числом степеней свободы и систем небольшой размерности [39]. Было изучено распределение времени возвращения Пуанкаре для систем небольшой размерности с сильно выраженным хаотическим поведением и показано, что асимптотика имеет степенную зависимость. Вследствие отсутствия термодинамического предела системы небольшой размерности не обладают универсальностью в поведении.

Результаты своих исследований и работ других ученых по взаимосвязи динамического хаоса и дробной кинетики были обобщены в научном обзоре, опубликованном в 2002 г. [40]. Первой книгой, посвященной применению дробного математического анализа к описанию динамического хаоса, является книга Г.М. Заславского [41], опубликованная на английском языке в 2005 г. В 2009 г. будет издан перевод этой книги на русский язык.

Интересы Г.М. Заславского не ограничивались одной наукой, он увлекался музыкой, театром и особенно живописью. Интенсивно общаясь с французскими коллегами, он часто бывал на юге Франции и его завораживали природа и архитектура Прованса и Гаскони. Свои впечатления Георгий Моисеевич постарался запечатлеть в своих рисунках пастелью. В 2007 г. во Франции была устроена выставка его работ, значительная часть пастелей включена в альбом, который только что вышел из печати.

Многие работы Г.М. Заславского были выполнены совместно с другими учеными, среди которых Садрилла Абдуллаев, Валентин Афраимович, Геннадий Берман, Харольд Вейтзнер, Анатолий Вировлянский, Александр Иомин, Николай Ласкин, Ксавьер Леончини, Леонид Кузнецов, Сергей Пранц, Александр Станиславский, Василий Тарасов, Наталья Филоненко, Александр Черников, Майкл Шлезингер, Марк Эдельман и др. Г.М. Заславский был приглашенным профессором во многих университетах мира, приглашенным докладчиком на крупнейших международных конференциях. В заключение отметим, что история исследований динамического хаоса в Советском Союзе и огромная роль Г.М. Заславского в них описана в книге [42].

Многие работы Г.М. Заславского стали классическими и дали жизнь целым направлениям физики, они активно развиваются в различных странах мира. Вклад Георгия Моисеевича в создание теории хаоса невозможно переоценить, его достижения во многом определяют современный облик этой области знания.

## Библиографический список

1. *Чириков Б.В.* Резонансные процессы в магнитных ловушках // Атомн. энергия. 1959. Т. 6, вып. 6. С. 630.
2. *Fermi E.* On the origin of cosmic radiation // Phys. Rev. 1949. Vol. 75. P. 1169 / Рус. пер.: Э.Ферми. Научн. тр. Т. 2. М.: Наука, 1972. С. 439.
3. *Заславский Г.М., Чириков Б.В.* О механизме ускорения Ферми в одномерном случае // ДАН СССР. 1964. Т. 159, № 2. С. 306.
4. *Fermi E., Pasta J., Ulam S.* Study of nonlinear problems // Studies of Nonlinear Problems. I. Los Alamos Report. LA, 1940. 1955 / Рус. пер.: Э.Ферми. Научн. тр. Т. 2. М.: Наука, 1972. С. 647.
5. *Rosenbluth M.N., Sagdeev R.Z., Taylor J.B., Zaslavsky G.M.* Destruction of magnetic surfaces by magnetic field irregularities // Nucl. Fusion. 1966. Vol. 6. P. 297.
6. *Filonenko N.N., Sagdeev R.Z., Zaslavsky G.M.* Destruction of magnetic surfaces by magnetic field irregularities. Part II // Nucl. Fusion. 1967. Vol. 7. P. 253.
7. *Заславский Г.М., Филоненко Н.Н.* Стохастическая неустойчивость захваченных частиц и условия применимости квазилинейного приближения // ЖЭТФ. 1968. Т. 54, вып. 5. С. 1590.
8. *Чириков Б.В.* Исследования по теории нелинейного резонанса и стохастичности. Препринт 267. Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1969. 314 с.
9. *Заславский Г.М.* Статистическая необратимость в нелинейных системах. М.: Наука, 1970. 144 с.
10. *Бурштейн А.И.* Возвращение «Интеграла» // Научное сообщество физиков СССР. 1950-1960-е годы. Под ред. В.П. Визгина и А.В. Кесениха. Предисловие редакторов. Вып. 1. СПб.: Изд-во РХГА, 2005. С. 569.
11. *Эйнштейн А.* К квантовому условию Зоммерфельда и Эпштейна // А. Эйнштейн. Собр. науч. тр. Т. 3. М.: Наука, 1966. С. 407.
12. *Заславский Г.М., Филоненко Н.Н.* Статистические свойства энергетического спектра «скользящих» электронов с перемешивающимися классическими траекториями // ЖЭТФ. 1973. Т. 65, вып. 2. С. 6436.
13. *Заславский Г.М.* Статистика энергетических уровней при разрушении интегралов движения // ЖЭТФ. 1977. Т. 73. В. 6. С. 2089.
14. *Berman G.P., Zaslavsky G.M.* Condition of stochasticity in quantum nonlinear systems. I, II // Physica A. 1978. Vol. 91. P. 450; 1979. Vol. 97. P. 367.
15. *Berman G.P., Zaslavsky G.M.* Theory of quantum nonlinear resonance // Phys. Lett. 1977. Vol. 61. P. 295.
16. *Zaslavsky G.M.* Stochasticity in quantum systems // Phys. Rep. 1981. Vol. 80. P. 157.
17. *Berman G.P., Iomin A.M., Zaslavsky G.M.* Method of quasiclassical approximation for c-number projection in coherent states basis // Physica 4D. 1981. P. 113.
18. *Берман Г.П., Заславский Г.М., Коловский А.Р.* Взаимодействие между квантовыми нелинейными резонансами // ЖЭТФ. 1981. Т. 81. С. 272.
19. *Berman G.P., Zaslavsky G.M., Kolovsky A.R.* On the spectrum of the system of interacting quantum nonlinear resonances // Phys. Lett. A. 1982. Vol. 87. P. 152.
20. *Reichl L.E.* The transition to chaos in conservative classical systems: quantum manifestations. Springer-Verlag, 1992. 551 p.

21. *Белобров П.И., Заславский Г.М., Тартаковский Г.Х.* Стохастическое разрушение связанных состояний в системе атомов, взаимодействующих с полем излучения // ЖЭТФ. 1976. Т. 71, вып. 5(11). С. 1799.
22. *Абдуллаев С.С., Заславский Г.М.* Классическая нелинейная динамика и хаос лучей в задачах распространения волн в неоднородных средах // УФН. 1991. Т. 161, № 1. С. 1.
23. *Smith K.B., Brown M.G., Tapper F.D.* Ray chaos in underwater acoustics // J. Acoust. Soc. Am. 1992. Vol. 91. P. 19399.
24. *Zaslavsky G.M., Abdullaev S.S.* Chaotic transmission of waves and «cooling» of signals // Chaos. 1997. Vol. 7. P. 182.
25. *Smirnov I.P., Virovlyansky A.L., Zaslavsky G.M.* Theory and applications of ray chaos to underwater acoustics // Phys. Rev. E. 2001. Vol. 64. P. 036221.
26. *Beron-Vera F.J., Brown M.G., Colosi J.A., Tomsovic S., Virovlyansky A.L., Wolfson M.A., Zaslavsky G.M.* Ray dynamics in a long-range acoustic propagation experiment // J. Acoust. Soc. Am. 2003. Vol. 114, issue 3. P. 1226.
27. *Worcester P.F., Cornuelle B.D., Dzieciuch M.A., Munk W.H., Howe M., Mercer A., Spindel R.C., Colosi J.A., Metzger K., Birdsall T., Baggeroer A.B.* A test of basin-scale acoustic thermometry using a large-aperture vertical array at 3250-km range in the eastern north Pacific Ocean // J. Acoust. Soc. Am. 1999. Vol. 105. P. 3185.
28. *Makarov D., Prants S., Virovlyansky A., Zaslavsky G.* Ray and wave chaos in ocean acoustics. World Scientific, Singapore, 2009 (In press).
29. *Zaslavsky G.M.* The simplest case of a strange attractor // Phys. Lett. 1978. Vol. 69A, № 3. P. 145.
30. *Заславский Г.М.* Стохастичность динамических систем. М.: Наука, 1984. 272 с.
31. Плазменная гелиофизика / Под ред. Л.М. Зеленого, И.С. Веселовского. В 2 т. М.: Физматлит, 2008. Т. 1. 670 с.; Т. 2. 559 с.
32. *Заславский Г.М., Захаров М.Ю., Сагдеев Р.З., Усиков Д.А., Черников А.А.* Генерация упорядоченных структур с осью симметрии из гамильтоновой динамики // Письма в ЖЭТФ. 1986. Т. 144, вып. 7. С. 349.
33. *Заславский Г.М., Захаров М.Ю., Сагдеев Р.З., Усиков Д.А., Черников А.А.* Стохастическая паутина и диффузия частиц в магнитном поле // ЖЭТФ. 1986. Т. 91, вып. 5. С. 500.
34. *Zaslavsky G.M.* Fractional kinetic equation for Hamiltonian chaos // Physica D 76. 1994. P. 110.
35. *Saichev A.I., Zaslavsky G.M.* Fractional kinetic equations: Solutions and applications // Chaos. 1997. Vol. 7, № 4. P. 753.
36. *Klappauf B.G., Oskay W.H., Steck D.A., Raizen M.G.* Experimental study of quantum dynamics in a regime of classical anomalous diffusion // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 81. P. 4044.
37. *Sundaram B., Zaslavsky G.M.* Anomalous transport and quantum-classical correspondence // Phys. Rev. E. 1999. Vol. 59. P. 7231.
38. *Iomin A., Zaslavsky G.M.* Hierarchical structures in the phase space and fractional kinetics: II. Immense delocalization in quantized systems // Chaos. 2000. Vol. 10, № 1. P. 147.
39. *Zaslavsky G.M.* Chaotic dynamics and the origin of statistical laws // Physics Today. 1999. Vol. 52. P. 39.

40. *Zaslavsky G.M.* Chaos, fractional kinetics, and anomalous transport // *Phys. Rep.* 2002. Vol. 371. P. 461.
41. *Zaslavsky G.M.* Hamiltonian Chaos and Fractional Dynamics. Oxford University Press, Oxford, 2005. 421 p.
42. *Мухин Р.Р.* Очерки по истории динамического хаоса (исследования в СССР в 1950–1980-е годы). М.: ВЕСТ- КОНСАЛТИНГ, 2007. 390 с.

*Dr. Berman G.P.*, Technical Staff Member Theoretical Division, MS-B213 Los Alamos National Laboratory, USA; *Васильев А.А.*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института космических исследований РАН; *Ерохин Н.С.*, д.ф.-м.н., профессор, зав.отделом Института космических исследований РАН; *Зеленый Л.М.*, д.ф.-м.н., академик РАН, директор Института космических исследований РАН; *Игнатченко В.А.*, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН; *Iomin A.*, Senior Reseacher (SNS), Department of Physics, Technion, Haifa, Israel; *Коган Е.Я.*, д.ф.-м.н., научный руководитель Самарского Федерального института развития образования; *Коловский А.Р.*, д.ф.-м.н., профессор, ведущий научный сотрудник Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН; *Мухин Р.Р.*,\* к.ф.-м.н., доцент Старооскольского технологического института Московского института стали и сплавов; *Нейштадт А.И.*, д.ф.-м.н., заведующий лабораторией Института космических исследований РАН; *Пранц С.В.*, д.ф.-м.н., профессор, заведующий отделом Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН; *Тарасов В.Е.*, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Научно-исследовательского института ядерной физики МГУ; *Фридман А.М.*, д.ф.-м.н., академик РАН, заведующий отделом Института астрономии РАН

3.03.2009

---

\*E-mail: mukhiny@mail.ru; 309516 Белгородская обл., г. Старый Оскол, м-н Макаренко, 42.