

тельского института «Атолл», электровакуумного завода в поселке Запрудня Московской области, фабрики по производству средств защиты и деревообрабатывающего комбината в городе Кимры Тверской области и многих других объектов Московской области и города Москвы.

После выхода на пенсию я занимался общественной работой в обществе «Чернобыль», вхожу в состав его совета. Общество по мере возможности защищает права специалистов, подвергшихся радиационному воздействию в результате аварий на п/о «Маяк» в 1957 г., на Чернобыльской АЭС в 1986 г., и участников хранения, испытания и эксплуатации ядерного оружия в различные годы. При активном участии членов совета вышла книга «Опаленные атомом» – о вкладе дубнинцев в развитие атомной энергетики.

«Мучили ли их угрозы сости при создании столь смертоносного оружия?», – с таким вопросом обратился во время интервью, состоявшегося 3 июля 1991 г., журналист А. Артизов к Е. П. Славскому, в прошлом министру среднего машиностроения, трижды Герою Социалистического Труда. Е. П. Славский ответил на этот вопрос так: «Я что-то не замечал подобных настроений. Если бы такие мотивы присутствовали, мы наверняка не смогли бы в сжатые сроки одолеть огромную бездну проблем и создать ядерное оружие. Ученые работали не за страх, а за совесть, целиком отдавая себя делу. Советских ученых не надо было уговаривать или запугивать, они понимали, как нужен стране ядерный щит». С таким же настроением работали тогда и большинство инженеров, техников, рабочих и служащих, принимавших участие в решении этой задачи.

И у меня как участника строительства объектов атомной отрасли есть свое мнение по этому вопросу. Меня не мучают угрозы сости, потому что большая часть моей трудовой деятельности проходила в экстремальных условиях. Строители вокруг атомных центров создавали современные народно-хозяйственные объекты, совхозы, существенно улучшая электроснабжение, водоснабжение и транспортное сообщение прилегающих обширных территорий. От развития атомной отрасли человеку, видимо, было не уйти: человек стремится познавать тайны природы, и в этом заключается смысл его жизни. Но тайны природы человек должен использовать разумно, осмысленно. Аварий подобных уральской и чернобыльской не должно быть. Но коль они произошли, политики должны были сообщить нам о них, чтобы мы знали правду и своевременно предприняли бы меры для ликвидации их последствий. Территория Южного Урала и богатые водоемы до сих пор не реабилитированы, а население до сих пор не отселено из многих зараженных мест. Не лучше положение и в зоне Чернобыльской АЭС. Ответственность за всех пострадавших во время этих катастроф лежит не только на ученых и инженерно-технических работниках, она в равной степени ложится и на тех, кто принимает политические решения, и на тех, кто считает себя и вовсе не причастным к этой истории. Она лежит на нас на всех.

**«ДЛЯ ПОНИМАНИЯ ПРИРОДЫ И СТРУКТУРЫ КОЛЕЦ СТАРЫЕ
МЕТОДЫ НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКИ ОКАЗАЛИСЬ
НЕПРИМЕНИМЫМИ»**

(беседа Р. Р. Мухина с А. М. Фридманом)

Небесная механика традиционно рассматривалась как образец совершенства научной теории, выводы которой отличались большой точностью и предсказательной силой. Кульминационным моментом стало предсказание У. Леверье и Дж. Адамса планеты Нептун. Это открытие произвело огромное впечатление на современников. Знаменитая задача трех тел имела исключительное значение не только для небесной механики, но и для развития математики и физики в целом. На ее решение были направлены усилия многих крупнейших математиков. На этом пути А. Пуанкаре заложил основы теории динамических систем, которая послужила одним из источников возникновения современной нелинейной динамики.

Нелинейная динамика междисциплинарна: ее идеи и методы проникают не только в естественные науки, но и в гуманитарные области. Небесная механика не исключение: в ней также используются методы нелинейной динамики. Одно из направлений современного развития небесной механики мы обсудили в этой беседе.

Традиционная небесная механика не исчерпала своих возможностей и своей предсказательной силы. Ее применимость не ограничивается изучением движения больших и малых тел Солнечной системы. С помощью ее методов успешно решаются задачи галактической астрономии¹.

Однако новые задачи потребовали изменений установившихся подходов. В Солнечной системе давно известен объект, поведение которого не укладывалось в рамки традиционной небесной механики, это – кольца Сатурна. Кольца Сатурна – одни из самых удивительных образований, неизменно поражающих воображение. Они замечательны не только по своему эмоциональному воздействию. С самого открытия кольца возбуждали острый интерес своей необычностью среди других астрономических объектов, а в последние десятилетия в свете новых наблюдательных данных выяснилась их принципиальная важность для понимания возникновения Солнечной системы. Наш собеседник – Алексей Максимович Фридман, действительный член РАН, заведующий отделом физики звездных и планетных систем Института астрономии РАН, лауреат Государственной премии СССР (1989 г.) – один из тех, кто внес решающий вклад в развитие этого направления современной небесной механики.

¹ Удачные примеры использования методов небесной механики для решения задач галактической астрономии см.: Идлис Г. М. Динамика Магеллановых Облаков и их происхождение из Галактики как вероятный результат ее столкновения с внегалактической туманностью NGC 55 // Астрономический журнал. 1959. Т. 21. Вып. 4. С. 700–718; Идлис Г. М. Подтверждение гипотезы о происхождении Магеллановых Облаков из Галактики в результате ее столкновения с внегалактической туманностью NGC 55 // Астрономический журнал. 1961. Т. 38. Вып. 1. С. 182–183.

– *Алексей Максимович, расскажите, пожалуйста, как вы начали свой путь в науке, как пришли к задачам, которыми занимаетесь большую часть жизни?*

– С конца 60-х гг. я занимаюсь физической гравитирующими систем, в этих системах следует учитывать не только взаимодействие по закону всемирного тяготения, но также согласованное коллективное движение всех «частиц». Сначала была развита линейная теория устойчивости фигур равновесия. Ее мы применили для рассмотрения устойчивости колец Сатурна. Все эти результаты мы вместе с В. Л. Поляченко изложили в нашей монографии².

Если взять более ранний период, то меня вдохновляла одна задача, которой интенсивно занимался А. Эйнштейн во второй половине своей жизни. Речь идет о связи гравитационного и электромагнитного полей. В 1960 г. в Казанском университете А. З. Петров создал единственную в стране кафедру теории относительности и гравитации. Я решил, что лучше всего можно освоить теорию гравитации, учась в Казани. Поэтому я поехал туда и проучился до третьего курса.

– *Поскольку речь зашла о гравитации, скажите, пожалуйста, Александр Александрович Фридман имеет к вам какое-либо отношение?*

– Он мой троюродный брат. Наши деды были сыновьями купца первой гильдии Ивана Мартыновича Фридмана. Вы знаете, что значит купец первой гильдии? Их на всю Россию было сравнительно немного. У моего прадеда было девять детей. Самый старший сын, Александр Иванович, дед ученого А. А. Фридмана, и самый младший сын, Ефим Иванович, мой дед, – были медиками. Эту же профессию выбрал мой

отец, Максим Ефимович, который работал в Центральном институте усовершенствования врачей (ЦИУВ), в Боткинской больнице и консультировал в кремлевской клинике. В начале 50-х гг. он был арестован по «делу врачей», его пытали, но он, один из немногих, ничего не подписал. До конца жизни на его груди так и остались следы пыток. Такова вкратце моя родословная.

– *Что было после Казанского университета?*

– В конце 50-х гг. началось создание новосибирского Академгородка. В 1959 г. вместе с академическими институтами был основан Новосибирский университет (НГУ). Сначала набор студентов проводили не на первый курс, а на второй из разных вузов страны. Из Казани я уехал в Новосибирск, одновременно учился в НГУ и работал лаборантом в секторе Р. З. Сагдеева в Институте ядерной физики (ИЯФ). Чтобы попасть в ИЯФ, надо было сдать Г. М. Будкеру, директору института, что-то вроде экзамена. Он давал восемь задач, совершенно нестандартных, на сообразительность, на каждую из них отводилось примерно по пять минут. Для решения почти всех задач достаточно было школьных знаний. Например, вот такая задача: «У вас есть два друга, которые живут на одной ветке метро, но на противоположных конечных станциях. Вы работаете где-то на промежуточной станции той же ветки и кончаете работу в любое время суток. Вы садитесь в тот поезд, который раньше подойдет. Считая, что поезда в одном направлении идут друг за другом с одинаковыми интервалами, можете ли вы попадать к одному другу за большой промежуток времени, скажем, за 10 лет, в два раза чаще, чем к другому?» Ответ утвердительный, да, можете.

– *Как вы преодолели экзаменационный барьер?*

– Кажется, я решил семь задач из восьми, меня приняли лаборантом 4-го

² Поляченко В. Л., Фридман А. М. Равновесие и устойчивость гравитирующих систем. М.: Наука, 1976.

разряда, и я, числясь у Сагдеева, вместе с другими стал также заниматься и экспериментальной работой у Ю. Е. Нестерина.

– Вы же хотели заниматься теорией?

– Всем, стремящимся в теоретическую группу, Будкер говорил следующее: «Самый низкий уровень теоретика – у меня. Считаете ли свой уровень более высоким? Если нет, занимайтесь экспериментом». Свободное от экспериментальной работы время (оно, кстати, было) можно было уделить теоретической физике.

– Какие остались впечатления о студенческих годах?

– Здания университета еще не было, занятия проходили в помещении школы. Первый набор составил так называемый «нулевой выпуск», 24 студента на отделении физики, столько же математиков и механиков. Среди нынешних членов Академии наук немало моих сокурсников. Следующий «первый выпуск» уже состоял из студентов, набранных на первый курс. Обучение продолжалось шесть с половиной лет, у нас было на семь спецкурсов больше, чем в Московском физтехе. Академик М. А. Лаврентьев читал нам гидродинамику, академик С. Л. Соболев – уравнения математической физики, академик А. И. Мальцев – алгебру, член-корреспондент Академии наук В. М. Галицкий – квантовую механику, академик С. Т. Беляев – ядерную физику, академик Р. З. Сагдеев – физику плазмы, академик Д. В. Ширков – квантовую теорию поля, академик Б. В. Чириков – общую физику и т.д. Правда, в то время некоторые из перечисленных лекторов не имели еще академических званий. Как правило, сдача экзаменов и зачетов происходила у наших профессоров дома, где нас приглашали обедать, обсуждали наши первые работы. Университет я окончил в 1963 г.

– Затем аспирантура?

– Да, у Р. З. Сагдеева. Нас было трое, кроме меня – еще В. Е. Захаров и А. А. Галеев. Их Сагдеев приметил в МЭИ, где он читал курс теории поля, затем они перевелись в Новосибирский университет. Первым, в 1965 г., защитил кандидатскую диссертацию Галеев. Потом в следующем году в один день защитились мы с Захаровым.

– Работа, наверно, была по плазме? Как вы пришли к астрофизическим задачам?

– Моя кандидатская диссертация большей частью касалась плазмы, но в ней также рассматривалась устойчивость гравитационного диска. Переход от плазменных задач к коллективной гравифизике был совершенно естественным. В большинстве задач физики высокотемпературной плазмы можно пренебречь столкновениями, и в этом случае применимо уравнение Власова с самосогласованным полем. Для большинства задач звездной динамики также справедливо бесстолкновительное уравнение Власова. И еще: плазма широко распространена в Метагалактике. Неудивительно, что многие специалисты по плазме, в том числе и Сагдеев, заинтересовались астрофизическими проблемами. Сагдеев способствовал моему интересу к этим задачам. В докторской диссертации уже две трети ее были отведены устойчивости гравитирующих систем. В начальный период моей работы в ИЯФ, когда я занимался вопросами устойчивости плазмы, я обнаружил новый вид плазменной неустойчивости, получившей название антитрейфовой неустойчивости. В этом случае коэффициент диффузии плазмы не обратно пропорционален, а прямо пропорционален магнитному полю. Это была моя дипломная работа, представленная в «Доклады Академии Наук» руководителем термоядерной программы СССР академиком Л. А. Арцимовичем. С увеличением параметра β

(отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) плазма оказывается более устойчивой. Динамика плазмы с $\beta \leq 1$ рассмотрена в моей кандидатской диссертации, с $\beta \gg 1$ – в докторской. Тогда М. А. Леонтович сказал мне, что такой плазмы не бывает. Я ответил, что такая плазма практически везде имеется в космосе. Леонтович руководил теоретическими работами по термоядерной плазме, где $\beta \ll 1$, и его реакция была совершенно естественной. Наверно, Будкер первым почувствовал, что плазма с $\beta \sim 1$ будет более устойчивой, чем с $\beta \ll 1$, и он предложил ее использовать в управляемом термоядерном синтезе. К такой плазме возник повышенный интерес, и, когда обратились к космосу, оказалось, что она там действительно существует.

– Такая плазма изучается в термоядерных исследованиях?

– Сейчас стараются получить плазму как можно больше по β , приближаясь к $\beta \sim 1$, понимая, что такая плазма более устойчива.

– Изменил ли свое мнение Леонтович?

– Через какое-то время он согласился со мной и предложил защищать докторскую. Защита состоялась в январе 1972 г., и после этого я вплотную занялся астрофизическими задачами.

– В то же самое время в ИЯФ Б. В. Чириков и Г. М. Заславский решали вопросы возникновения хаотического движения в динамических системах. Оказало ли это влияние на ваши астрофизические работы?

– Заславский стал работать преподавателем в НГУ после окончания Одесского университета. В 1965 г. он защитил кандидатскую диссертацию по релятивистской гидродинамике. Руководителем у него был Сагдеев. Заславский сейчас работает в Институте им. Р. Куранта в Нью-Йорке, он по праву считается одним из ведущих в мире специалистов по хаосу.

– Наряду с Чириковым?

– Да, Чириков, ученик Будкера, относится к основоположникам теории хаоса, и его роль общепризнанна. Он – учитель Заславского по хаосу. Чириков не любит писать книги, в отличие от Заславского, который написал десяток книг. Мы с Чириковым одно время работали вместе, у нас осталась целая папка неопубликованного материала. Что касается существенной роли стохастической динамики в астрофизике, то тогда мы ее в полной мере еще не осознавали. Сейчас – другое дело. Например, в 2000 г. вместе с А. М. Черепашуком мы организовали в Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ) первую в своем роде международную конференцию «Наблюдательные проявления хаоса в астрофизических объектах», на которой присутствовали известные в мире эксперты в этой области. Другими словами, происходит стремительное проникновение методов нелинейной динамики в астрономию. В широком классе астрономических объектов обнаружено, с одной стороны, проявление эффектов самоорганизации, с другой – наоборот, наблюдается хаотическое, сложное поведение в простых динамических системах.

– Алексей Максимович, а ведь жизнь в Академгородке не ограничивалась только наукой, в определенные периоды там происходили очень бурные события?

– Да, это так. Можно вспомнить фестиваль авторской песни, когда зал хором повторял вслед за Галичем:

... Если все шагают в ногу, мост разрушивается,

Потому что есть в природе колебательный закон!

Или, если помните, письмо с протестом против сфальсифицированного

процесса Гинзбурга-Галанскова³. По началу его подписали примерно 500 человек. Но затем каждого вызывал директор института и говорил, что с ним будет, если он оставит свою подпись. После оказанного давления осталось 46 подписей. Нас с Захаровым вызвал Будкер и сказал: «Один из вас сейчас оформляет документы во Францию, другой – в Японию. Так знайте, что, если вы не снимете свою подпись, то никуда не поедете. И никогда никуда не будете ездить». Так оно и получилось, мы стали «невыездными».

– *Будкер придерживался позиции властей?*

– Нет, но надо понимать, в каком он находился положении. Он боялся за судьбу одного из лучших в стране институтов, который он создал.

– *Через некоторое время вы уехали из Новосибирска?*

– Обстоятельства сложились так, что группа Сагдеева покинула институт. Первым уехал Захаров, который по приглашению Л. П. Горькова перешел в Институт теоретической физики им. Л. Д. Ландау в Черноголовке. В 1970 г. Сагдеев вместе с Галеевым уехал в Москву, в Институт высоких температур. Через несколько лет Сагдеев стал директором Института космических исследований (ИКИ), после его отъезда в США место директора занял Галеев. Заславский уехал в Красноярск, в Институт физики, затем в ИКИ. Я в 1971 г. оказался в Иркутске, в институте, представлявшем сибирский вариант Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН). В Иркутске меня уговорили стать заместителем дирек-

тора, но вскоре я понял, что для меня невозможно сочетать науку с административной работой, надо было выбирать. Я выбрал науку. В 1979 г. я покинул Иркутск и начал работать в Астро совете (сейчас Институт астрономии РАН), расположенном в бывшем особняке купца второй гильдии.

– *Цикл ваших известных работ по планетным кольцам выполнен вместе с Н. Н. Горькавым. Он, наверно, был вашим студентом в МГУ или в МФТИ?*

– Нет, он окончил Челябинский университет. Университет там был создан где-то в 1975 г., так Горькавый – из первого или одного из первых выпусков. Горькавый делал у меня дипломную работу по планетным кольцам. Затем я его взял к себе в аспирантуру. Его кандидатская диссертация посвящена кольцам Сатурна, а докторская – кольцам и спутникам Урана. Одно время в 90-е гг. Горькавый работал в Симеизской обсерватории в Крыму. Там ему пришлось очень нелегко, закончилось тем, что он уехал в США. Сейчас Горькавый работает в Вашингтоне, в фирме, обслуживающей НАСА, занимается прикладными задачами и, наверно, уже не вернется. Вот так и теряем научные кадры.

– *В XVII в. после открытия колец Сатурна их изучение было связано с именами многих выдающихся исследователей, таких, как Джованни-Доменико (Жана-Доминика) и Жака Кассини, отца и сына, и И. Канта. Д. Кассини открыл деление между двумя главными кольцами Сатурна (1675). Ж. Кассини выдвинул гипотезу, что кольца состоят из скопления мелких спутников, вращающихся в одной плоскости вокруг планеты (1715). Канту принадлежит замечательное предсказание тонкой структуры колец. Вследствие того, что кольца вращаются дифференциально, а не как твердое тело, происходит их рас-*

³ Речь идет об одном из самых громких политических процессов в СССР, состоявшемся в январе 1968 г. А. Гинзбург, Ю. Галансков, А. Добровольский и В. Лашкова обвинялись в «антисоветской агитации и пропаганде».

слоение на тонкие колечки («Всеобщая естественная история и теория неба», 1755). После наблюдательного подтверждения многочастичного строения колец (1895)⁴, в XX в. кольца оставались одной из тех проблем астрономии, где ничто не предвещало каких-либо значительных изменений. Новый этап изучения колец начался 10 марта 1977 г., когда была открыта кольцевая структура Урана. В этот день при подготовке к работе телескопа, размещенного на "Боинге" – летающей обсерватории, были зафиксированы затмения звезды до и после ее покрытия диском планеты. К кардинальным изменениям представлений о кольцах привели полеты американских космических аппаратов «Пионер-11», «Вояджер-1» и «Вояджер-2». 4 марта 1979 г. по телесъемкам «Вояджера-1» открыты кольца Юпитера. Кольцевые структуры оказались характерными для всех планет-гигантов. У Нептуна также обнаружены кольца. Больше всего информации было получено о кольцах Сатурна, которые оказались расслоенными на узкие колечки (вспомним предсказание Канта). Данные космических аппаратов ясно показали, насколько ограниченными были наблюдения с Земли. Так, разрешение возросло в 10 тысяч раз, стали возможны наблюдения под углами, недостижимыми с Земли и т.д. Полученные результаты опубликованы в книгах серии «Space Science Series». После этих открытий интерес к планетным кольцам резко усилился. Если до 1977 г. число исследователей колец во всем мире было не более десятка чело-

век, то затем за короткое время оно возросло до нескольких сотен. Почему же эти открытия не просто дополнили наши представления о кольцах, а явились началом принципиально нового этапа в этой области?

– За все 300-летнее изучение колец Сатурна в основе лежала традиционная небесная механика, которая рассматривала задачи нескольких взаимодействующих по закону всемирного тяготения точек, чаще всего трех, таких, как Солнце – планета – астероид или планета – спутник – спутник. Для решения этой задачи были разработаны достигшие высокого совершенства математические методы. На этом пути достигнуты огромные успехи и сложилась парадигма N тел. Обратной стороной такого положения явилось то, что в рамках этой парадигмы стали решать все задачи. Кольца Сатурна рассматривали как пассивное плоское облако мелких спутников, для описания которых достаточно изучить динамику отдельных спутников в поле планеты. Отсюда следует лишь медленное расплывание колец по радиусу.

– Новые данные о планетных кольцах заставили пересмотреть сложившиеся представления?

– Именно так. До открытия колец у других планет-гигантов кольца Сатурна были единственным объектом в Солнечной системе, плохо описываемом моделью нескольких гравитирующих материальных точек. А с обнаружением колец у других планет по-иному предстала вся физика планет. Для понимания природы и структуры колец старые методы небесной механики оказались неприменимыми.

– Чем же вызван столь острый интерес к планетным кольцам, что можно было даже говорить о «кольцевом буме»? Если я правильно понимаю, кольцо астероидов – также родственный объект, только это уже

⁴ Бобров М. С. Кольца Сатурна. М.: Наука, 1970. Надо сказать, что эта книга первая в мировой литературе, посвященная планетным кольцам. В ней собрана вся имевшаяся в то время информация по данному вопросу.

кольцо не вокруг планеты, а вокруг Солнца.

– Совершенно верно. Кольцевые структуры являются не только обязательным и закономерным элементом в спутниковых системах планет-гигантов, но они оказались весьма распространенным объектом как в Солнечной системе, так и за ее пределами. Можно назвать протопланетные облака вокруг звезд, аккреционные диски в системе двойных звезд, галактические и протогалактические диски. Ясно, что столь интенсивное изучение планетных колец в последние десятилетия объясняется не только интересом к новым астрономическим объектам. Сейчас мы видим, что планетные кольца выявили существование совершенно новых физических механизмов, действующих в Солнечной системе. Кольца представляют собой единственные доступные для детального изучения дифференциально-вращающиеся диски неупругих частиц, они принципиально важны для космогонии, поскольку на протостадии это наиболее распространенный тип динамической системы (протопланетное облако, протоспутниковые диски, протокольца планет). Кольца планет – уникальный источник важнейшей информации о стадии образования планет и спутников Солнечной системы. Они, пожалуй, – единственные объекты в дальнем космосе, о которых мы знаем много больше, чем их понимаем. Наблюдательная информация о газовых галактических дисках несравненно беднее. Я думаю, что теория планетных колец станет основой небесной коллективной механики, и это позволит под несколько иным углом зрения посмотреть на эволюцию Солнечной системы и других дисковых систем.

– Основные вопросы физики планетных колец состояли в следующем. Почему вообще существуют кольца, а не только системы спутников? Откуда берется источник вещества ко-

лец и почему они не слипаются в спутники? Чем определяется внешняя граница колец? Если кольца Сатурна изучались уже более 300 лет и многие наблюдаемые особенности получили объяснение, то недавно обнаруженные кольца Урана таили много загадок. Что собрало околопланетное вещество в узкие, далеко отстоящие друг от друга эллиптические кольца? Почему эти кольца устойчивы?

В первых гипотезах рассматривались резонансные воздействия от известных спутников Урана. На каждой резонансной орбите периоды обращения спутника и частиц колец относятся как небольшие целые числа.

– Классическая парадигма резонансного взаимодействия в кольцах планет, из-за чего образовалась, например, знаменитая щель Кассини, состояла в следующем. Частица находится ближе к самой планете, чем спутник. При одном обороте спутника частица за это время может совершить 2, 3, 4 и т.д. оборота, в зависимости от того, какого рода резонанс – 1:2, 1:3, 1:4 и т.д., связывает частицу со спутником. Следовательно, в резонансной области частота вращения спутника, Ω , и частота вращения частицы, Ω_0 , относятся как целые числа: $\Omega/\Omega_0 = n/m$. На резонансных орбитах максимальное сближение выбранной частицы со спутником происходит в одной и той же точке. Частица начинает колебаться с возрастающей амплитудой, и она как бы уходит из той области пространства, где находилась. Так по классической парадигме возникли пустые места, щель Кассини, Энке и т.д. Сказанное справедливо, когда столкновения частиц упругие. Реальные столкновения очень часто неупругие, и в этом случае все происходит иначе. В резонансной области столкновения совершаются более часто. При каждом из неупругих столкновений теряется кинетическая энергия, уменьшается скорость, накапливаются частицы.

Таким образом, вместо щели образуется плотное кольцо, в противоположность классической парадигме, которая не учитывает неупругие столкновения частиц.

Для объяснения образования колец Урана было выдвинуто три гипотезы. Первая из них относится к 1977 г., когда было открыто 5 колец Урана. Была высказана идея сопоставить положения этих 5 колец с так называемыми трехчастотными резонансами от двух спутников: $p\Omega_r + q\Omega_1 + s\Omega_2 = 0$, где Ω_r , Ω_1 , Ω_2 – частоты обращения кольца и двух спутников, p , q , s – целые числа. Однако после открытия еще четырех колец Урана выполнение резонансных соотношений для всех девяти колец стало затруднительным. И гипотезы о трехчастотных резонансах были отвергнуты. Следующая гипотеза предполагала наличие неоткрытых спутников в самих кольцах. В каждом кольце расположено по спутнику, и образование колец происходит двумя путями: спутники бомбардируются метеорами, в результате их ударов, как дым от сигареты, за спутником следует шлейф частиц – кольцо образуется таким образом как продукт жизнедеятельности спутника. Во втором случае вокруг спутника возникают скопления частиц на сложных бананоподобных орбитах, и частицы на таких орбитах образуют кольцо вокруг спутника. И, наконец, третья гипотеза – гипотеза о спутниках-«пастухах» получила наибольшее распространение для объяснения динамики колец Урана. Авторы этой гипотезы Голдрайх и Тримейн предположили существование с обеих сторон каждого кольца двух спутников-«пастухов». Согласно законам небесной механики с ростом радиуса орбиты частицы, вращающейся вокруг массивного тела, ее скорость уменьшается. Следовательно, «внутренний» ближний спутник-«пастух» обгоняет частицы кольца, а «внешний» спутник отстает от них. За счет гравита-

ционного притяжения к внутреннему спутнику частицы приобретают дополнительную скорость, что приводит к увеличению центробежной силы, которая отбрасывает частицы к средней линии кольца. Внешний спутник, наоборот, замедляет частицы, и за счет уменьшения центробежной силы они также приближаются к средней линии. Таким образом, оба спутника, подобно двум пастухам, оберегают «стадо» частиц от «разбегания» – диффузии.

Модели спутников-«пастухов» исходили из старых представлений о кольцах как об образовании из пассивных частиц, из традиционной парадигмы N частиц без учета создаваемого этими частицами гравитационного поля. Гипотеза о спутниках-«пастухах», «активно воздействующих на кольцо "кнутом" гравитационного поля», сильно укрепились после открытия в ноябре 1980 г. «Вояджером-1» у узкого, эллиптического кольца F Сатурна двух спутников-«пастухов» (Пандора и Прометей). Кольцо F отстоит на расстоянии 3000 км от внешнего края активных колец A, B и C, оно более чем на два порядка уже каждого из них (ширина кольца F составляет около 70 км).

– Интересно отметить эмоциональный фон того времени, который прекрасно передают ваши слова: «...Чем меньше информации об объекте, тем вольготнее жизнь теоретиков и тем больше различных и взаимопротиворечивых теорий могут благополучно пастись на поле скудных наблюдательных данных. Полученный за последние 10–12 лет колоссальный объем информации о четырех системах планетных колец, с одной стороны, стимулирует чрезвычайное любопытство ученых, с другой – предъявляет весьма жесткие требования к теоретическим конструкциям. [...] Десятки теоретиков из США, Франции, Англии, Германии, Финляндии и СССР устремились во

всеоружии собственных идей, но очень часто элегантные и изящные теории, сталкиваясь с хитроумной реальностью, довольно быстро разваливались. [...] Полет "Вояджера-2" превратил планетологов в ипподромных фанатиков, только пари заключалось не на скорость, а на зрелище — что увидят телекамеры "Вояджера" возле очередной планеты. За пролетами 1986 и 1989 годов астрономы наблюдали, затаив дыхание»⁵. Такой жесткий естественный отбор выделял теоретические построения, позволяющие описать весь комплекс проблем, связанных с планетными кольцами. Эти построения составили основу новой физики планетных колец. Решающая роль здесь принадлежит вам с Н. Н. Горькавым. Ваша модель принципиально отличается от модели пассивных частиц: в ее основе концепция активных, самоорганизующихся колец, где ключевую роль играют коллективные, столкновительные и резонансные эффекты реальных (обычно неупругих) частиц.

— С самого начала мы говорили о том, что структура колец Сатурна в принципе не может объясняться взаимодействиями со спутниками. При таком взаимодействии речь идет о каком-либо резонансе, так вот этот резонанс имеет очень узкую ширину действия. Поэтому он может объяснить существование лишь самых узких колец. У Урана кольца имеют 1 км в ширину — это уже на пределе. Для его кольца с шириной 20 км в перигее и 96 км в апогее мы с Горькавым предположили существование двух спутников-«пастухов», иначе никак не объяснишь. Для оставшихся 8, очень узких, колец Урана спутников-«пастухов» совершенно не нужно. Эти кольца внутренние, тогда как кольцо ϵ является самым внеш-

ним. У каждой планеты есть две зоны — зона колец и зона спутников. В зоне колец, из-за кеплеровского закона движения около гравитирующего центра, при приближении к планете скорость частиц возрастает. При столкновениях частиц с большой скоростью они не могут образовывать спутники, они не могут слипаться, они могут только разрушаться. А вот дальше от планеты, когда скорость частиц падает, они могут слипаться, образуя спутники. Поэтому мы считали, что в зоне колец не может быть спутников-«пастухов», это зона разрушения. В системе Сатурна кольцо F образовалось за зоной колец, на расстоянии 3000 км от внешнего края кольца A. Зона колец простирается вплоть до 137 тыс. км, кольцо F находится на расстоянии 140 тыс. км от Сатурна, и здесь могут образоваться маленькие спутники. Такие спутники и имеются по обе стороны от кольца F — Пандора и Прометей.

Системы Сатурна и Урана сильно различаются. В основе широких колец Сатурна лежит иерархическое строение. Каждое из колец A, B и C имеет в среднем ширину 17 тыс. км. Кольца расслоены на более мелкие колечки шириной до 800 км, те, в свою очередь — на 100-километровые, затем — 10-километровые и т.д., вплоть до 150 м, это фактически предел разрешения приборов «Вояджера». Чем определяется весь этот набор масштабов? В системе колец имеется целый букет неустойчивостей, и каждая неустойчивость ответственна за образование системы колец со своим характерным масштабом их ширины. Так аккреционная неустойчивость, которую открыли мы с Горькавым, приводит к возникновению структур с размерами до 1000 км. Как в окрестности любой стройки, после «строительства» Солнечной системы остался космический мусор. Этот мусор сталкивается с частицами солнечного ветра, столкновения неупру-

⁵ Горькавый Н. Н., Фридман А. М. Физика планетных колец. 1994. С. 19.

гие, частицы теряют угловой момент и энергию, так называемый эффект Пойнтинга-Робертсона. Движущийся к планете поток частиц «застревает» во флуктуациях с большей плотностью — образуется самая крупномасштабная структура. Родственное явление — образование барханов в пустыне. Другая неустойчивость — неустойчивость отрицательной диффузии приводит к мелко-масштабному расслоению колец с характерными размерами в сотни метров. Само явление отрицательной диффузии довольно простое. Представьте, что толпа людей хочет как можно быстрее проскочить через одну дверь. Они будут друг другу мешать, возникнет затор. Вот вам модель отрицательной диффузии: чем больше плотность людей у прохода, тем меньше его пропускная способность. В случае обычной диффузии ситуация обратная. Я здесь перечислил далеко не все неустойчивости, они оказываются весьма разнообразными, и все они играют важную роль в динамике колец.

— *Вы с Горькавым предположили существование за зоной колец серии неоткрытых спутников в области от 50 до 82,5 тыс. км. Максимальное число орбит, на которых могли располагаться спутники, взаимодействующие с кольцами с помощью низших линдбладовских резонансов 2:1, 3:2, 4:3, было 27. Под воздействием резонанса от спутников формируются кольца. Вам пришлось преодолеть очень большие трудности при определении орбит гипотетических спутников. Вы с Горькавым проанализировали расположение резонансных орбит для известных 9 колец Урана и столкнулись с удивительным фактом: некоторые из резонансных орбит, их число было пять, совпадали. Отсюда следовало, что спутники на таких орбитах определяли расположение сразу двух колец. Здесь был ключ для построения модели расположения спутни-*

ков Урана и предсказания пяти спутников, каждый из которых определял положение двух колец сразу и еще одного спутника-«пастуха» для объяснения особенностей внешнего кольца. В статье «О возможности обнаружения неоткрытых спутников Урана наземными телескопами»⁶ вы вместе с коллегами привели приблизительные диаметры предсказанных спутников.

— У нас было предположение, что новые спутники должны находиться в том месте, где имеются низшие линдбладовские резонансы, первые три из них 2:1, 3:2, 4:3. В этом месте на протяжении от 50 до 82,5 тыс. км имеется 27 таких «резонансных» орбит спутников.

Необязательно на всех 27 орбитах должны находиться спутники, поскольку нужно было объяснить образование всего 9 наблюдаемых колец. Тут мы столкнулись с проблемой, какие из 27 орбит следует выбрать? Природа устроена так, что все создается с большим запасом прочности, с превышением. Здесь мы обратили внимание на то, что среди этих 27 орбит имеются «выделенные». Спутник на такой «выделенной» орбите может образовывать сразу 2 кольца. Считать, что случайно образовалось несколько пар «резонансных» колец (где кольца находятся в резонансе друг с другом), было бы наивно: очевидно, что каждую резонансную пару образовал всего лишь один спутник. Мы предположили, что из этих 27 орбит вероятность обнаружения спутников на орбитах, резонансно взаимодействующих сразу с двумя кольцами, является преобладающей. Примерно так оно и оказалось.

⁶ Афанасьев В. Л., Горькавый Н. Н., Смирнов М. А., Фридман А. М. О возможности обнаружения неоткрытых спутников Урана наземными телескопами // Астрономический циркуляр. 1985. № 1391. С. 3–4.

– Можно сказать, что вам удалось выдвинуть гипотезу о резонансной природе колец Урана, позволившую сделать предсказание о его новых спутниках. Вы предложили модель расположения спутников, согласно которой спутники не образуются внутри зоны колец, а находятся за его внешней границей. Пять предсказанных спутников определяют положение двух колец сразу, особенности внешнего кольца объясняются наличием спутника-«пастуха». Были предсказаны резонансы, определяющие положение колец, и диаметры спутников (~100 км). Ваши предсказания довольно хорошо совпали с результатами наблюдений: девять из десяти новых спутников Урана находятся за внешней границей колец; восемь из них имеют резонансы указанного вами типа; четыре из пяти предсказанных спутников определяют положение двух спутников сразу, кольцо ε – единственное, возле которого открыты спутники-«пастухи»; средний размер спутников ≈ 70 км. Проведенный детальный анализ полученных данных полностью подтвердил резонансное происхождение колец Урана. Но в системе планетных колец, наверно, самой загадочной выглядит система Нептуна, впервые открытая с летящей на «Боинге» лаборатории.

– Кольца Нептуна казались незамкнутыми в виде дуг или арок. Для объяснения динамики таких паталогических образований рядом авторов, в частности, уже знакомыми Голдрайхом и Тримейном, опять была привлечена концепция спутников-«пастухов». Мы с Горькавым высказали совершенно

иную идею: на самом деле кольца непрерывные, а арки являются их плотными частями. Затем Горькавый рассмотрел более детальную модель, в которой арки представляют собой набор эллиптических вихрей, нанизанных на пылевое кольцо. Такое кольцо прозрачно и невидимо с Земли. Как показали расчеты, кольцо стабилизирует орбиты вихрей, и из-за возмущений собственным гравитационным полем вихри сближаются, и образуется арка. А что же показал «Вояджер»? При пролете в августе 1989 г. были сделаны фотографии с наибольшим разрешением и обнаружена регулярная система колец и спутников. Но стандартная модель «пастухов» здесь не работает, ибо она не способна объяснить стабильность арок. Обнаруженная «Вояджером» регулярная цепь сгущений подтвердила гипотезу, что арки являются уплотнениями на непрерывном кольце.

Надо сказать, не все результаты расчетов Горькавого, основанных на гипотезе о вихревой природе арок, подтвердились, поскольку они полностью зависели от данных земных наблюдений (которые были неточны). Однако основные положения нашей гипотезы – кольца – непрерывные и арки являются их уплотнением – оказались верными. Примечательна в динамике колец роль пыли, которую обычно считают несущественным фактором. Между тем пыль – переносчик массы в кольцах Сатурна, из-за чего образуется самое крупномасштабное расслоение. Пыль переносит угловой момент в кольцах Урана, прежде всего от самого массивного кольца ε. Наконец, пыль стабилизирует кольца Нептуна.

Горькавому и Фридману удалось построить нетривиальную теорию, не только описывающую наблюдаемые свойства колец, но и обладающую предсказательной силой. Подход, основанный на традиционной небесной механике, не принес успеха, хотя его придерживалось подавляющее большинство специалистов. Именно этот подход лег в основу наблюдательной программы «Вояджера-2». Казалось само собой разумеющимся, что все многообразие движений больших и малых небесных тел может быть описано, по крайней мере в принципе, исходя из одного фундаментального закона – закона всемирного тяготения. Очень часто научное общественное мнение бывает ограничено кругом идей, унаследованных от предыдущего этапа развития. Нужна определенная внутренняя свобода и независимость, чтобы выйти из этого круга, правильно оценить факты и предложить принципиально иную теорию для их объяснения. Можно задать вопрос, не будь пролета «Вояджера-2» вблизи системы Урана в январе 1986 г., как долго бы продолжалось пребывание в плену старой идейной схемы?

О впечатлении, произведенном в научном мире обнаружением предсказанных спутников, свидетельствуют слова Б. Б. Кадомцева, редактора книги Горькавого и Фридмана «Физика планетных колец», увидевшей свет в 1994 г.: «...Предсказание орбит новых небесных тел на основании теоретических расчетов напоминает известный в истории астрономии случай, когда после вычислений 140 лет назад Леверье и Адамсом орбиты неизвестной планеты, она действительно была открыта затем в 1846 г. Галле и названа Нептуном». О реакции за рубежом лучше всего скажут слова самого А. М. Фридмана: «Реакции российских и европейских ученых, с одной стороны, и американских, с другой, – разные. В Европе отзывы примерно такие же, как и в России. Однако американцы молчат, поскольку их выдающиеся теоретики Голдрайх и Тримейн оказались неправыми с предсказаниями спутников-"пастухов" в кольцах Урана. "Вояджер-2" внутри колец их не обнаружил (за исключением предсказанных нами "пастухов" у кольца ϵ), а обнаружил спутники, предсказанные российскими учеными. Более того, в начале 1985 г. редакция журнала "Nature" отвергла нашу статью с таблицей радиусов орбит неоткрытых спутников Урана по причине "противоречия с признанной теорией американских теоретиков Голдрайха и Тримейна"».

Наверно, такова судьба всех первопроходцев. Можно согласиться с мнением одного из основателей современной нелинейной динамики Г. Хакена: «Я считаю, что существует ярко выраженный уклон Восток-Запад в распределении научного внимания. В таких странах, как Россия и Япония, замечаются и используются не только собственные результаты, но также и все те, которые получены западнее этих стран, т. е. в Европе и США. В Европе воспринимаются и используются, надо сказать, к сожалению, только те результаты, которые достигнуты в США, частично также в Европе. И, наконец, ученые в США принимают во внимание только свои собственные результаты. Можно встретить и в США обвинения в адрес ученых, живущих на Западном побережье [...], что они используют только свои собственные результаты»⁷.

Построенная Горькавым и Фридманом замкнутая теория столкновительных, коллективных и резонансных процессов в кольцах планет значительно опередила мировой уровень в данной области и является выдающимся достижением отечественной науки.

*Беседа состоялась в Москве 17 октября и 25–26 ноября 2002 г.
Предисловие и заключение Р. Р. Мухина*

⁷ Синергетике – 30 лет. Интервью с профессором Г. Хакеном // Вопросы философии. 2000. № 3. С. 53–61.

150

лет со дня рождения П.-Э. Аппеля (27.IX.1855 – 24.X.1930), французского математика и механика, члена Парижской АН (1892). Род. в Страсбурге. Окончил Высшую нормальную школу в Париже (1876). С 1885 – профессор механики в Парижском ун-те, в 1903–1920 – декан ф-та наук там же, в 1920–1925 – ректор Парижского ун-та.

Основные научные интересы Аппеля лежали в области теории аналитических функций и механики. Он занимался изучением гипергеометрических и эллиптических функций двух и более переменных, теорией алгебраических функций и теорией потенциала, ввел полиномы, названные его именем, вывел дифференциальные уравнения, описывающие движение как голономных, так и неголономных систем, также носящие его имя. Основной труд – «Трактат рациональной механики» (т. 1–5, 1893–1896).

125

лет со дня рождения Б. Е. Райкова (8(20).IX.1880–1.VIII.1966), крупного отечественного педагога-методиста и историка естествознания, действительного члена АПН РСФСР (1945). Род. в Москве. Окончил естественное отделение физико-математического факультета Петербургского университета (1905). После окончания ун-та работал в средней школе, далее – в Психоневрологическом ин-те (1913–1920) и Педагогическом ин-те им. А. И. Герцена (1922–1930 и 1945–1948). В 1945 был приглашен в качестве старшего научного сотрудника в Ленинградское отделение Института истории естество-

вознания и техники АН СССР, где проработал до конца жизни. Райков был одним из создателей отечественной методики преподавания биологии и автором и издателем множества методических и историко-научных трудов («Общая методика естествознания» (1947), «Пути и методы натуралистического просвещения» (1960), «Русские биологи-эволюционисты до Дарвина» (т. 1–4, 1947–1959), «Автобиография» К. М. Бэра и др.

125

лет со дня рождения А. Ф. Иоффе (17(29).X.1880–14.X.1960), советского физика, академика АН СССР (1920). Род. в г. Ромны Полтавской губ. Окончил Петербургский технологический ин-т, в 1903–1906 работал в лаборатории В. Рентгена в Мюнхене. С 1906 начал работать в Петербургском (позднее Ленинградском) политехническом ин-те (в 1913–1948 – профессор). В 1918 Иоффе возглавил организованный по его инициативе физико-технический отдел Государственного рентгенологического и радиологического ин-та в Петрограде, а затем до 1951 был директором Физико-технического ин-та АН СССР, созданного в 1923 на основе этого отдела. С 1952 – директор Лаборатории полупроводников, с 1955 – Ин-та полупроводников АН СССР. Кроме того, в 1932–1960 он возглавлял Агрофизический ин-т, также организованный по его инициативе.

Работы Иоффе касались, главным образом, физики твердого тела и общей физики, особенно физики и техники полупроводников. Он обнаружил, что на электрические свойства полупроводников сильно влияют