

БИБЛИОГРАФИЯ

Физика планетных колец

Д. тер Хаар

PACS numbers: 01.30.Vv, 96.35.-j

Fridman A.M., Gor'kavyi N.N. *Physics of Planetary Rings — Celestial Mechanics of Continuous Media* (New York: Springer, 1999)

"...кольца — они, знаешь ли, волшебные, со всякими подвохами и неожиданностями"

Дж.Р.Р. Толкиен "Властелин колец"

(Перевод с английского

В. Муравьева и А. Кистяковского)

Книга Фридмана и Горькавого, о которой пойдет речь в этой рецензии, представляет собой англоязычное издание русской монографии, написанной теми же авторами и увидевшей свет в 1994 г. Ввиду того, что английское издание оказалось процентов на тридцать длиннее русского оригинала и многие главы при его подготовке были целиком переписаны, назвать его переводом значило бы покривить душой. Виной тому отчасти настоящий взрыв в области наблюдательных данных, произведенный программой "Вояджера", отчасти же — дальнейшее развитие пионерских теорий этих двух авторов. И здесь, вместо краткой описи разнообразных тем, которым посвящены отдельные главы, мы проведем обзор некоторых аспектов физики планетных колец, в книге обсуждаемых намного подробнее. По сути, мы будем довольно близко следовать курсу авторского изложения, затрагивая в том же порядке те же вопросы и не приводя точных ссылок на соответствующие места в книге. Мы надеемся, что таким образом читатель этой заметки сможет получить хорошее представление о содержании тома и почувствовать вкус исследования, которое, с точки зрения рецензента, дает ясную и увлекательную картину всего того, что на сегодняшний день нам известно о прекрасном мире планетных колец.

1. Краткий исторический обзор

Пока, в начале XVII века, Липперши не изобрел телескоп, известны были всего четыре планеты — Марс, Венера, Юпитер, Сатурн и один спутник — наша собственная Луна. Эта ситуация, однако, вскоре драматически изменилась: в 1610 г. Галилей (с помощью телескопа, который он сам же и сконструировал) открыл четыре больших спутника Юпитера, а также кольца Сатурна или, скорее, признаки, указывавшие на их наличие. Обнаружить, что "дети" Сатурна на деле составляют систему колец, досталось уже Гюйгенсу. Гюйгенс открыл также самый большой спутник Сатурна. В последующие четыре столетия было обнаружено еще немного планет и несколько спутников, так что в 1946 г., когда пишущий эти строки сидел над докторской диссертацией о происхождении Солнечной системы [1], число известных планет достигло девяти, спутников же было 29 — наша

собственная Луна, один-единственный спутник Нептуна, четыре спутника Урана, девять спутников Сатурна и одиннадцать спутников Юпитера. И была известна только одна кольцевая система — кольца Сатурна. Ситуация резко изменилась в конце семидесятых: прежде всего в 1977 г. несколько групп [2–4] наблюдали затмение звезды SAO 156687 кольцами Урана; за ним последовало затмение звезды кольцами Нептуна в 1978 г. и прямое наблюдение (по телесъемкам "Вояджера-1") колец Юпитера в 1979 г. Открытие колец Юпитера — лишь одно из множества данных, собранных тогда Вояджером. Наблюдение их не только привело к открытию многих спутников, но и дало подробную информацию о структурах различных кольцевых систем. Когда английское издание книги Фридмана и Горькавого было послано в печать в 1999 г., мы знали о существовании 67 спутников: кроме нашей собственной Луны, двух спутников Марса и одного спутника Плутона на счету имелось 16 спутников Юпитера, 22 спутника Сатурна (четыре прибавилось с тех пор, как в 1994 г. русское издание книги было послано в типографию), 17 спутников Урана (на два больше, чем в 1994 г.) и 8 спутников Нептуна. Обилие подробной информации о системах спутников и колец четырех больших планет накладывает значительные ограничения на фантазию теоретиков, которые захотели бы объяснить эти данные. Книга Фридмана и Горькавого представляет нам не только великолепный обзор наблюдательных данных, но и подробный анализ, а во многих случаях и объяснение их, с особым акцентом на системах Урана и Нептуна. С этой целью авторы сочетают классическую механику в форме, часто называемой небесной механикой, с современными представлениями о коллективных явлениях; отсюда подзаголовок: небесная механика сплошных сред.

2. Введение

Отметим вкратце те аспекты результатов наблюдения, которые нуждаются в объяснении и имеют отношение к дальнейшему. Первый вопрос в этом списке — почему вообще существуют кольца, а не только системы спутников? Эта проблема изучалась почти три сотни лет и ответить здесь предстоит, по большому счету, на три вопроса: 1) что является источником вещества, из которого формируются кольца? 2) почему кольца не слипаются в спутники? 3) чем определяется внешняя граница колец? В следующем разделе мы дадим ответ на эти вопросы. Как только они будут разрешены, на очереди станет целое семейство вопросов о структуре колец, например: почему в кольцах есть щели? как строение кольца связано с многочисленными спутниками материнской планеты? В настоящей рецензии большая часть обсуждения будет посвящена рассмотрению ответов, данных Фридманом и Горькавым на вопросы такого рода.

Во Вселенной, помимо планетных колец, существует много других кольцевых систем, таких как протоспутниковые и протопланетные диски, аккреционные диски и галактические (газовые и звездные) диски. Однако планетные кольца — это особый пример. Они не только изучены лучше других (космический корабль "Вояджер" произвел тысячи снимков колец Юпитера, Сатурна, Урана и Нептуна с разрешением в несколько километров, а ведь есть также наблюдения земных и спутниковых обсерваторий, результаты радиоисследований и данные по звездным затмениям), но если посмотреть на отношение толщины планетных систем к их радиусу, видно, что они и самые плоские: в их случае это отношение равно 10^{-6} ; сравним, например, с 10^{-4} для бумажной страницы. Если оценить их возраст в терминах периода вращения, оказывается, что они самые выдающиеся долгожители. Впрочем, настоящими долгожителями являются лишь так называемые первичные кольца, т.е. плотные кольца, состоящие из довольно больших частиц (с характерным размером от микрон до 10–20 м). Из числа планетных колец классические кольца А, В и С Сатурна, девять плотных колец Урана, основные кольца Нептуна и основное кольцо Юпитера принадлежат, безусловно, к классу первичных колец, в то время как кольца Сатурна Е и G, пылевые кольца Урана и разреженные кольца Юпитера принадлежат к классу вторичных. Внешний радиус первичных колец строго ограничен и равняется примерно двум радиусам материнской планеты. Как правило, область спутников начинается снаружи от внешней границы первичных колец. Вторичные кольца, которые могут возникнуть на любом расстоянии от планеты, это разреженные газопылевые кольца, которые нуждаются в постоянном притоке вещества для поддержки своего существования; частицы этих колец имеют характерный размер порядка микрона и меньше.

3. Почему существуют кольца?

Вернемся к трем вопросам, с которых мы начинали предыдущий раздел. Прежде всего предположим, что исходная ситуация, при развитии которой возникнут кольца (и спутники) — это диск из газа и пыли, окружающий планету. Это сразу же дает ответ на первый вопрос. Чтобы ответить на второй, мы должны взглянуть на баланс сил, действующих на частицы, особенно, когда они уже выросли до определенных размеров. Динамические силы, действующие на частицу, — это центробежная сила, сила прилива, т.е. гравитационное притяжение планеты и сила самогравитации. Сила прилива уменьшается с увеличением расстояния от планеты, в то время как центробежная сила возрастает, и это означает, что вблизи от планеты силы прилива будут разрушать растущую частицу, но уже на достаточном расстоянии от планеты этого не случится. Этот аргумент был предложен Роше в 1848 г., и соответствующая граница получила название границы Роше. Однако, почти век спустя, Джеффрис [5] указал на то обстоятельство, что межмолекулярное притяжение для мелких частиц важнее самогравитации. Если принять это во внимание, оказывается, что центробежная сила разрушает только частицы с характерным размером не менее километра, а таких частиц в кольцах не обнаружено. Для частиц размерами вплоть до 10 м, т.е. как раз таких, какие находят в планетных кольцах, центробежных сил недостаточно, чтобы преодолеть сопротивление разрыву внутри частиц, и нужно искать другое решение. Его нашли Горькавый и Фридман [6, 7], изучавшие распад частиц кольца. Они предположили, что при столкновении от частиц откалываются небольшие кусочки, которые в зоне вблизи от планеты не возвращаются к материнским частицам, в то время как в удаленной области отколотые кусочки воссоединяются с исходными частицами. Граница между зонами

близка к границе Роше, что и неудивительно: ведь здесь тоже самогравитация — в данном случае, фактически, сила притяжения к материнской частице — соперничает с гравитационной силой, исходящей от планеты; имеет значение не центробежная сила, а "шир" скорости, т.е. разница в скоростях вращения между частицами, находящимися на орбитах со слегка различными радиусами. Подробный анализ, выполненный Горькавым и Тайдаковой [8], при котором изучалась проблема четырех тел — движение отколовшегося кусочка частицы в гравитационном поле двух сталкивающихся частиц и планеты — позволил не только найти граничный радиус зоны, в которой расположены первичные кольца, но и определить распределение частиц по размерам. Последнее согласуется со спектром масс, полученным из профилей радиопрояснения колец. Так что, похоже, на три вопроса, поставленных в начале предыдущего раздела, Фридман и Горькавый действительно сумели ответить.

4. Коллективные эффекты в планетных кольцах

Найдя ответ на первые три вопроса из раздела 2, мы примем теперь за остальные вопросы из того же раздела. Есть два вида эффектов, играющих важную роль в определении структуры и различных особенностей планетных колец. Это, с одной стороны, резонансные эффекты, порождаемые присутствием спутников. Важнейшие и наиболее впечатляющие достижения теорий, развитых Фридманом и Горькавым, связаны с этими эффектами, и мы обсудим их в последующих разделах. С другой стороны, есть и различные коллективные эффекты; их-то мы и рассмотрим здесь.

Если мы интересуемся процессами, чьи пространственные и временные характеристики велики по сравнению со средней длиной свободного пробега и средним временем между столкновениями для частиц кольца, мы можем рассматривать кольцо как непрерывную систему — сплошную среду, так что можно говорить о справедливом для колец гидродинамическом приближении. Первая задача — вывести адекватные уравнения для глобальных свойств системы. Они выводятся так же, как уравнение Навье–Стокса или магнитодинамические уравнения: исходя из кинетического уравнения для функции распределения и должным образом усредняя ее моменты. Кинетическое уравнение функции распределения частиц $f(r, v, t)$ имеет вид:

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \left(\mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} \right) + \left(\frac{d\mathbf{v}}{dt} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \right) = C(f), \quad (1)$$

где $C(f)$ — столкновительный член, описывающий эволюцию функции распределения вследствие столкновений, которые в случае частиц диска в основном являются неупругими. Уравнение движения частицы в диске, однородно вращающемся с постоянной скоростью Ω , имеет вид:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = 2[\mathbf{v} \times \Omega] + [\Omega \times [\mathbf{r} \times \Omega]] - \frac{\partial \Psi_G}{\partial \mathbf{r}}, \quad (2)$$

где \mathbf{v} — скорость частицы и \mathbf{r} — ее радиус-вектор. Если задать величину \mathbf{W} соотношением $\mathbf{W} \equiv [\Omega \times \mathbf{r}]$, мы сможем переписать уравнение (2) в виде

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla \left(\Psi_G - \frac{1}{2} \mathbf{W}^2 \right) + [\mathbf{v} \times \text{rot } \mathbf{W}]. \quad (3)$$

Если определить теперь \mathbf{E} и \mathbf{H} посредством соотношений $\mathbf{E} \equiv -\nabla[\Psi_G - (1/2)\mathbf{W}^2]$ и $\mathbf{H} \equiv \text{rot } \mathbf{W}$, уравнение (3) превращается в

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{E} + [\mathbf{v} \times \mathbf{H}]. \quad (4)$$

Мы видим, что уравнение движения получилось такое же, как у заряженной частицы в электромагнитном поле, в системе единиц, где заряд частицы e , ее масса m и скорость света в

вакууме c равны единице: $e = m = c = 1$. Это значит, что гидродинамические уравнения, описывающие коллективные свойства планетных колец, будут иметь тот же вид, что и уравнения, описывающие плазму, или уравнения магнитной гидродинамики, в связи с чем мы можем использовать результаты из физики плазмы для описания свойств планетных колец. Следует, однако, соблюдать осторожность: до сих пор мы успели рассмотреть только случай однородно вращающегося диска, в то время как планетные диски демонстрируют дифференциальность вращения. Гидродинамические уравнения — это уравнения для гидродинамической скорости V , плотности n и температуры T . Интегрируя по координате вдоль оси вращения, мы можем свести проблему к двумерной, где переменными, описывающими состояние среды, будут уже поверхностная плотность σ , радиальная скорость V_r , тангенциальная скорость V_ϕ и температура T .

Мы будем действовать следующим образом. Прежде всего найдем стационарные решения для нашей системы уравнений: σ_0 , $V_{r0}(=0)$, $V_{\phi0}(=\Omega r)$ и T_0 , где Ω будет функцией r . Вначале ограничимся рассмотрением ситуации, когда существенно влияние на кольцо только материнской планеты, а возмущения стационарного решения можно считать осесимметричными. Подставляем в уравнения выражения

$$\begin{aligned} \sigma &= \sigma_0 + \sigma_1 \exp(\gamma t + ikr), & V_r &= V_{r1} \exp(\gamma t + ikr), \\ V_\phi &= \Omega r + V_{\phi1} \exp(\gamma t + ikr), & T &= T_0 + T_1 \exp(\gamma t + ikr). \end{aligned} \quad (5)$$

Результирующие уравнения с формальной точки зрения выглядят так же, как те, что изучал Брагинский [9], когда рассматривал процессы переноса в плазме. Линеаризуя эти уравнения по отношению к отклонениям от стационарного решения, мы получаем серию однородных линейных алгебраических уравнений для σ_1 , V_{r1} , $V_{\phi1}$ и T_1 и, следовательно, дисперсионное уравнение для определения γ как функции от k . Нас интересуют неустойчивости, т.е. решения дисперсионного уравнения с вещественным положительным γ . Имеются две неустойчивости: гравитационная, или джинсовская, неустойчивость и диффузионная неустойчивость, которая появляется, когда скорость частицы возрастает при уменьшении поверхностной плотности. Хотя эти неустойчивости и могут объяснить определенные свойства колец, все же они порождают лишь структуры с линейными масштабами порядка нескольких километров и меньше.

Конечно, предыдущий анализ также не приводит к неаксиально-симметричным неустойчивостям — таким, которые могли бы породить эксцентричную структуру, демонстрируемую, например, некоторыми узкими кольцами Сатурна. В поисках таких неустойчивостей нам следовало бы принять более общую форму отклонений от стационарного решения и допустить возмущения с азимутальной модой $m = 1$. Интересно отметить, что Максвелл [10] рассматривал как раз такой тип неустойчивости в своих исследованиях по устойчивости колец Сатурна. Хотя Максвелл использовал нереальное (для колец Сатурна) приближение абсолютно твердого тела, что привело его к ошибочному заключению о коллапсе непрерывного ледяного кольца на планету [11], он сделал правильный вывод о метеорной структуре колец Сатурна. Фридман и др. [11] показали, что сплошное кольцо, состоящее из водяного льда, не падает на планету, а разрушается мелкомасштабной неустойчивостью на отдельные куски — метеоры. Позднее Фридман и Горькавый [12] нашли другую неустойчивость, назвав ее "эллипс-неустойчивостью", которая деформирует реальное круговое кольцо в эллиптическое в ситуации, когда частицы кольца замедляют (ускоряют) частицы при их приближении (удалении от) к планете. Попутно заметим, что исходно осесимметричное кольцо с так называемой эллиптической неустойчи-

востью — пример самопроизвольного нарушения симметрии.

Есть еще несколько структурных особенностей, пока что не получивших объяснения здесь. В основном они обусловлены присутствием спутников, но одну такую особенность — крупномасштабные структуры с характерным размером в 1000 км — можно объяснить без привлечения спутников. Фридман и Горькавый показывают, что эти структуры могут быть обязаны своим происхождением неустойчивости, которую они называют аккреционной. Эта неустойчивость появляется, когда, кроме диска колец и самой планеты, есть еще поток частиц, т.е. она возникает на ранних стадиях эволюции кольцевой системы. Это происходит потому, что "ветер частиц" будет скорее задерживаться в тех областях, где возмущенная плотность выше, т.е. выше задерживающая сила. Возникающие флуктуации плотности обязательно должны иметь большие масштабы, так как при более мелких флуктуациях образующиеся структуры сгладит диффузия.

5. Резонансные эффекты в планетных кольцах

Посмотрим теперь, как спутники влияют на структуру колец. Делают они это с помощью своего гравитационного поля: траектории частиц в присутствии спутника будут меняться. Можно было бы ожидать, что этот эффект будет особенно значительным в непосредственной близости от спутника и что с удалением от последнего воздействие будет ослабляться. Однако есть определенные области, где в игру вступают резонансные эффекты и воздействие спутника снова усиливается. Это те области, в которых орбитальная частота частицы, Ω , и орбитальная частота спутника, Ω_0 , соотносятся как целые числа: $\Omega_0/\Omega = n/m$. Особо выделяются те области, в которых $n = m + 1$ (внешний линдбладовский резонанс), либо $n = m - 1$ (внутренний линдбладовский резонанс). Если такая область совпадает с краем кольца, то можно ожидать колебаний этого края с модой m . В самом деле, обнаружено, что внешний край кольца В Сатурна колеблется с модой $m = 2$, из-за 2 : 1 резонанса с Мимасом, а внешний край кольца А Сатурна колеблется с модой $m = 7$ благодаря 7 : 6 резонансу с Янусом. Если же, с другой стороны, резонанс имеет место внутри непрерывного кольца, он образует спиральную волну плотности с тем же азимутальным числом. Каков будет эффект от этой волны, зависит от таких параметров, как давление и вязкость. Так, например, в диске Сатурна резонанс 1 : 2 с Мимасом в промежутке между кольцами А и В вызвал поток вещества, приведший к образованию протяженной щели — щели Кассини, как показано Фридманом, Хоружим и Горькавым [13]. С другой стороны, внутри самих колец А и В резонансы с Янусом, Прометеем и Пандорой привели к возникновению наблюдаемых волн плотности.

В то время как система колец Сатурна была известна и наблюдалась с давних пор, система Урана была открыта лишь в 1777 г., и если в случае Сатурна теоретики сумели объяснить многие из наблюдаемых особенностей строения, то в случае Урана открытие системы колец дало возможность использовать последние наблюдения для предсказания дальнейших. Эта возможность была блистательно реализована Фридманом и Горькавым [7]. Они предположили, что снаружи от внешней границы колец Урана должен находиться ряд еще неоткрытых спутников, что положения их будут определяться 1 : 2, 2 : 3 и 3 : 4 линдбладовскими резонансами с кольцами. Были предсказаны орбиты тех спутников, которые определяют с помощью линдбладовских резонансов положения двух колец одновременно. Несколько месяцев спустя после публикации результатов, которые следуют из этих гипотез, "Вояджер-2" обнаружил четыре из пяти предсказанных спутников с радиусами орбит в

пределах 1 % от предсказанных величин и пятый в пределах 3 %. В.Л. Гинзбург сравнил это замечательное предсказание с предсказанием Леверье и Адамсом существования Нептуна, а В.И. Арнольд — с предсказанием атомных свойств на основе периодической системы элементов Менделеева.

6. Происхождение системы колец Урана

Сейчас скопилось уже так много наблюдательных данных о системе колец Урана, и различные процессы, которые могут проистекать в подобной системе на всевозможных этапах ее развития, изучены так подробно, что стало возможным в деталях рассказать о том, как возникла эта система в том виде, в каком мы ее знаем, начиная с тех дней, когда Уран был окружен протяженным диском из газа и пыли. В этом разделе мы кратко обрисуем, как протодиск развивался в систему, которую мы наблюдаем сегодня. За дальнейшими подробностями мы отсылаем читателя к книге Фридмана и Горькавого.

Мы уже видели раньше, что в газовом диске, окружающем планету, различаются две зоны: первая, ближайшая к планете, в которой частицы разрушаются столкновениями, и вторая, удаленная, в которой они будут, скорее, слипаться. Первая зона, которая в случае Урана простирается на 50 тыс км от планеты, станет зоной колец, а вторая — зоной спутников. Теперь мы хотим разделить спутники на две категории, в зависимости от того, будут ли они резонансно взаимодействовать с кольцами. Внутренние линдбладовские резонансы спутника будут осуществляться самое большое на расстоянии двух третей орбитального радиуса R этого спутника от планеты: резонанс 1 : 2 возникает на расстоянии $0,63R$, и остальные будут наблюдаться ближе к спутнику. Поскольку зона колец простирается на 50 тыс км от планеты, мы можем разделить спутники на те, которые могут резонансно взаимодействовать с кольцами, т.е. отстоящими от Урана не далее, чем на $50/0,63 (\approx 80)$ тыс км — мы будем называть их близкими спутниками — и те, которые отстоят слишком далеко для резонансных взаимодействий; их будем называть далекими.

Посмотрим теперь, как развивался протодиск вокруг Урана. Заметим прежде всего, что в дифференциально вращающемся, турбулентном, вязком газовом диске с пылью должны быть дрейфовые движения. На самых ранних стадиях его развития мог иметь место аэродинамический положительный дрейф, т.е. движение газа от планеты. Это могло привести к формированию газово-пылевого диска с радиусом около 1 млн км и поверхностной плотностью, которая в месте теперешнего расположения Оберона достигала около 400 г/см^2 , имела максимум приблизительно 1000 г/см^2 в области нынешнего Ариэля и спадала вплоть до значений $10\text{--}100 \text{ г/см}^2$ в области внутренних спутников.

Следующая стадия — образование некоторых спутников. Можно было бы ожидать, что скорость роста спутников была тем больше, чем дальше от Урана они возникали (из-за преобладания процессов разрушения над процессами слипания вблизи от планеты), а также скорость роста спутников была тем больше, чем выше была исходная плотность диска. В самом деле, первыми образовались далекие спутники Ариэль, Умбриэль, Миранда, Титания и Оберон вместе с близкими спутниками (где была повышенная плотность диска) Порцией, Крессидой и Дездемоной. Другие спутники: Пак, Розалинда, Бианка, Белида, Корделия и Офелия возникли позже.

Едва только сформировались какие-либо из близких спутников, становятся ощутимыми резонансные эффекты, так как эти спутники будут иметь линдбладовские резонансы внутри кольцевой зоны. Однако речь идет только о низких линдбладовских резонансах, т.е. резонансах с $n = 1, 2$ или 3, которые в основном и важны, так как большие n

резонансы в основном выпадают из кольцевой зоны. Мы видели в предыдущем разделе, что газ вытекает из точек резонанса. Этот отрицательный дрейф возмещается положительным дрейфом, который мы обсуждали чуть выше, и кольцо образуется на небольшом расстоянии от резонанса. Как только кольца сформировались, начинается другой положительный дрейф — вследствие обмена угловыми моментами газа в кольце и вещества, прибывающего из внекольцевой зоны. Это так называемый баллистический дрейф, который, как правило, сильнее аэродинамического.

Теперь можно набросать последовательность событий в системе Урана. Близкий спутник, которому суждено сформироваться первым — это Порция, и она начинает формировать кольцо 4 своим 1 : 2 резонансом, и кольцо ϵ своим 2 : 3 резонансом. Последний резонанс, будучи ближе к Порции, оказывается сильнее, и кольцо ϵ становится массивным. Второй близкий спутник, Джульетта, также формирует кольцо в положении своего 2 : 3 резонанса, который, располагаясь на краю кольцевой зоны, много позже конденсируется в Корделию. Смещаясь "наружу", кольцо ϵ частично конденсируется в два спутника, Дездемону и Крессиду, которые, в свою очередь, своими 2 : 3 и 3 : 4 резонансами создают η , α и δ кольца, а также кольцо 1986U1R, и укрепляют кольцо ϵ . Кольца α и β формируются позже, в области 1 : 2 резонанса Розалинды и 2 : 3 резонанса Бианки — двух спутников, образовавшихся заметно позже Порции, Джульетты, Дездемоны и Крессиды.

Постольку, поскольку кольца уже образовались, их положение стабилизируется балансом между положительными и отрицательными дрейфами, возникающими отчасти за счет сил в газе и отчасти благодаря резонансам со спутниками.

7. Заключение

Мы попытались дать читателю некоторое представление о богатстве физических проблем, связанных с кольцевыми системами гигантских планет, и о тех решениях, которые найдены в последние годы. Книга Фридмана и Горькавого содержит детальные обсуждения не только затронутых здесь, но и многих других, смежных тем, и она может быть настоятельно рекомендована любому, кто хочет ознакомиться с этой интереснейшей областью знаний, находящейся между физикой и астрономией.

Перевела с англ. Т.Н. Осипова

Список литературы

1. ter Haar D *Proc. Roy. Acad. Sci.* **25** (3) (1948)
2. Bhattacharyya J C, Kuppuswamy K *Nature* **267** 331 (1977)
3. Elliot J L, Dunham E W, Mink D J *Nature* **267** 328 (1977)
4. Millis R L, Wasserman L H, Birch P V *Nature* **267** 330 (1977)
5. Jeffreys H *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **107** 260 (1947)
6. Горькавый Н Н, Фридман А М *Письма в Астрон. журн.* **11** 628 (1985)
7. Горькавый Н Н, Фридман А М *Письма в Астрон. журн.* **11** 717 (1985); *Астрон. Циркуляр* No. 1391, с. 1
8. Горькавый Н Н, Тайдакова Т А *Письма в Астрон. журн.* **15** 534 (1989)
9. Braginskii S I, in *Rev. Plasma Phys.* Vol. 1 (New York: Plenum Press, 1965) p. 205
10. Maxwell J C *Sci. Papers* **1** 287 (1859)
11. Fridman A M, Morozov A I, Polyachenko V L *Astrophys. Space Sci.* **103** 137 (1984)
12. Fridman A M, Gor'kavyi N N, in *Chaos, Resonance, and Collective Dynamical Phenomena in the Solar System* (Ed. S Ferraz-Mello) (Dordrecht: Kluwer Acad. Publ., 1992) p. 75
13. Fridman A M, Khoruzhii O V, Gor'kavyi N N *Chaos* **6** 334 (1996)