

DUST COMPLEXES
NEAR PLANETS

K. V. KHOLSHEVNIKOV

Saturn Ring remained for a long time a unique known Dust Complex in the Solar system. Later the other complex were added including the Minor Planets Belt, Zodiacal Light, rings of all giant planets, and hypothetical swarm of particles around orbits of Martian moons. The avalanche of observation data from ground-based and space devices makes it possible (at least partially) to comprehend the structure, origin and life of above complexes.

Единственным известным пылевым комплексом в Солнечной системе долго оставалось кольцо Сатурна. Позднее к нему был добавлен пояс малых планет, зодиакальный свет, кольца всех планет-гигантов, гипотетический рой частиц вокруг орбит спутников Марса. Лавина наблюдательных данных, полученных земными обсерваториями и космическими аппаратами, позволяет, по крайней мере частично, понять строение, происхождение и жизнь комплексов, о чем и идет речь в статье.

© Холшевников К.В., 1998

ПЫЛЕВЫЕ ОКОЛОПЛАНЕТНЫЕ КОМПЛЕКСЫ

К. В. ХОЛШЕВНИКОВ

Астрономический институт
Санкт-Петербургского государственного университета

ВВЕДЕНИЕ

Во времена И. Ньютона Солнечная система представлялась совершенной пустотой, в безбрежных просторах которой плавали планеты с их немногочисленными спутниками. Уникальным и странным образованием на краю системы маячил Сатурн с его кольцом непонятной природы. Позднее математики (среди них такие корифеи, как П. Лаплас, Дж. Максвелл, С.В. Ковалевская, П.Г. Боль) доказали, что сплошным твердым телом кольцо быть не может. Если даже оно сделано из идеального сверхпрочного материала, выдерживающего приливные и центробежные нагрузки, из-за неустойчивости своего движения оно должно за короткое время врезаться в центральную планету. В действительности же оно должно рассыпаться на множество осколков. Теперь известно, что кольцо Сатурна представляет собой практически плоский рой частиц — от пылинок до дециметровых глыб. Первое экспериментальное подтверждение этого факта принадлежит пулковскому астроному А.А. Белопольскому, определившему по доплеровскому смещению спектральных линий лучевые скорости частиц. Оказалось, что угловая скорость тем выше, чем ближе частица к планете в согласии со вторым законом Кеплера.

В системе Сатурна благодаря его большой сплюснутости выделенное положение занимает экваториальная плоскость. Теоретики быстро выяснили, что плотный рой частиц вблизи сжатой планеты просто обязан быть плоским экваториальным. Частые неупругие столкновения гасят поперечные и радиальные колебания и выравнивают трансверсальные скорости в соответствии с законом площадей, так что частицы, первоначально заполнявшие торообразную область, быстро переходят на круговые орбиты в экваториальной плоскости.

Возвращаясь в прошлое, отметим, что кольцо Сатурна стало первым известным в Солнечной системе *пылевым комплексом* — так будем называть собрание твердых частиц размерами от микрометра до километра. Позднее выяснилось, что в известном смысле вся Солнечная система представляет собой подобный комплекс. В поясе малых планет из-за постоянных столкновений образуется множество все более мелких частиц. К такому же результату приводит дезинтеграция комет. Указанные частицы мы регистрируем как метеоры и метеориты. Мелкая фракция проявляет себя как Зодиакальный свет,

перемещаясь к Солнцу благодаря эффекту Пойнтинга–Робертсона. Последний означает торможение солнечным излучением: даже падающие перпендикулярно траектории солнечные фотоны имеют относительно движущейся частицы компоненту скорости, направленную против движения, то есть тормозящую, подобно тому как вертикально идущий в безветренную погоду дождь бьет бегущему всегда в лицо. Гелиоцентрические пылевые пояса обладают интереснейшими свойствами, но нельзя объять необъятное, и дальше мы будем говорить лишь о планетоцентрических комплексах, упомянув об околосолнечном лишь ради общей картины.

Вплоть до недавнего времени кольцо Сатурна считалось уникальным, не имеющим аналогов и потому с величайшим трудом подающимся исследователям. Даже два основных вопроса оставались без ответа. Во-первых, откуда кольцо взялось? Во-вторых, почему оно не исчезло? Обсуждалась гипотеза образования кольца разрушением спутника приливными силами. Но обоснованность гипотезы едва превышала уровень знаменитого, *а почему бы и нет!* С ответом на второй вопрос было еще хуже. Кольцо из камушков и песчинок несравненно устойчивее сплошного. Но и оно за миллиарды лет существования Солнечной системы должно было по существовавшим в небесной механике представлениям разрушиться. Время от времени столкновения частиц друг с другом все же происходят. Орбитальная энергия в результате этих процессов перераспределяется и в среднем уменьшается. Небольшая часть метеороидов кольца покидает систему Сатурна, большая выпадает на его поверхность. За космогоническое время кольцо должно если не исчезнуть, то истончиться и перестать быть видимым с Земли даже в крупные телескопы. Логика подсказывает три возможных решения парадокса видимости мощного кольца.

1. Существуют процессы, синхронизирующие движения частиц (исключающие столкновения или поддерживающие околосредовые траектории несмотря на столкновения). Кольцо в целом устойчиво. Сегодня его вид несильно отличается от того, который возник к концу эпохи формирования системы Сатурна.

2. Нам просто повезло – кольцо образовалось сравнительно недавно, при саблезубых тиграх. Когда его заметят с галактики Сомбреро, наши потомки застанут лишь жалкие остатки украшения Сатурна.

3. Существует источник пополнения частиц, как в случае водопада. Мы видим стационарную картину потому, что упавшие частицы воды все время замещаются новыми. Разница лишь в скорости замещения – миллионы лет и секунды соответственно.

КОЛЬЦО САТУРНА ТЕРЯЕТ УНИКАЛЬНОСТЬ

Разрешить проблему для уникального объекта необычайно трудно. Помощь пришла неожиданно. В 1977 году произошло покрытие Ураном слабой звезды SAO 158687. Регистрация события дает важную информацию об орбите Урана и свойствах его атмосферы, и потому наблюдения велись на нескольких обсерваториях. Измерялась яркость звезды. Ожидался такой вид фотометрической кривой: горизонтальная прямая, дифракционные колебания, нулевой уровень и симметричное повторение явления. Вместо этого до покрытия блеск звезды снижался несколько раз, и симметричная картина повторилась после покрытия. Был сделан вывод, впоследствии полностью подтвердившийся: Уран обладает системой колец, как и Сатурн. Только кольца Урана несравненно менее мощные, к тому же они состоят из очень черных частиц в отличие от покрытых белым инеем метеороидов вокруг Сатурна. В 1979 году тонкие кольца были открыты у Юпитера космическим аппаратом (КА) “Вояджер-1”. Вскоре они были вновь сфотографированы “Вояджером-2”. Эти два космических разведчика принесли феноменальную информацию о планетах-гигантах. “Вояджер-2” в 1989 году открыл кольца Нептуна.

Уместно заметить, что еще в 1960 году С.К. Всехсвятский предсказал существование колец Юпитера: некоторые полосы в экваториальной зоне планеты киевский астроном интерпретировал как тень от тонкого кольца, расположенного в экваториальной плоскости. Поскольку наклон последней к орбитальной плоскости всего 3° в отличие от 26° для Сатурна, то тень чрезвычайно узка. Так как столь узкая полоска на грани или даже за гранью ошибок наблюдений, то выводы Всехсвятского не были признаны астрономическим сообществом.

Кольца далеких планет обладают общими чертами: чрезвычайно плоские, разделенные несколькими промежутками. Есть, разумеется, и большие различия: лишь у Сатурна система столь мощна, что колечки для земного наблюдателя сливаются в сплошные кольца с шириной, сравнимой с диаметром центральной планеты. С борта КА видна их тонкая структура грампластины. Есть и множество других удивительных деталей (см. первоисточники Н.Н. Горькавого и А.М. Фридмана [1], а также красочную [2]). Мы приводим четыре из многих тысяч фотографий колец (рис. 1–4).

Перечислим самые интересные свойства колец Сатурна.

- Они расслаиваются на отдельные колечки шириной вплоть до долей километра.
- Присутствуют и никак не ожидавшиеся радиальные структуры – спицы, живущие несколько часов.
- Существует несколько устойчивых некруговых эллиптических колечек.

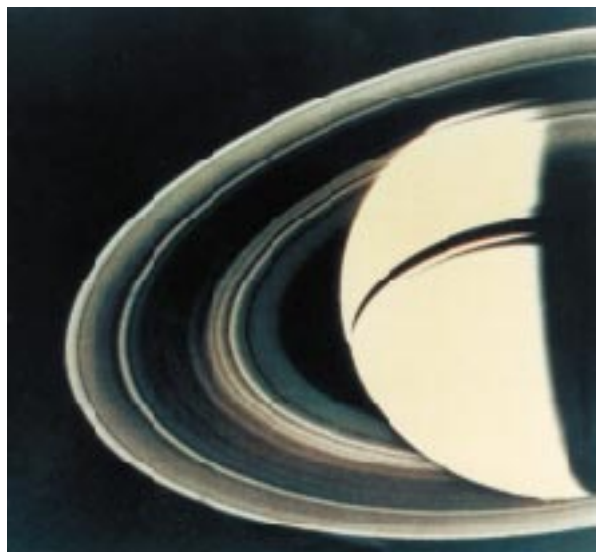


Рис. 1. Кольца Сатурна. Снимок получен с КА «Вояджер-2» 29. VIII 1981 года (JPL/NASA). Сфотографирована ночная сторона колец, поэтому самое плотное кольцо В получилось самым темным, как на негативе фотографий, сделанных на наземных обсерваториях

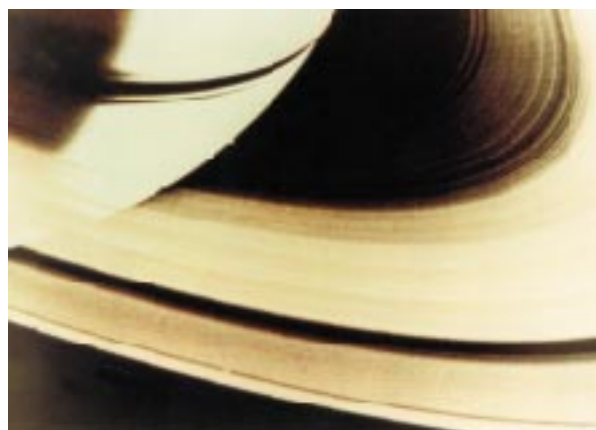


Рис. 2. Кольца Сатурна. Снимок получен с КА «Вояджер-1» 13. XI 1980 года (JPL/NASA). Видна тонкая структура колец, тень от них на дневной стороне планеты и слабое освещение на ночной, как от полной Луны на Земле

- По мощным кольцам регулярно прокатываются спиральные волны плотности и изгибные волны.
- Спектр масс частиц простирается от микрометровых пылинок до декаметровых глыб. Стометровые практически отсутствуют.
- В частицах метрового размера заключена основная масса кольца. Поражает ничтожная толщина кольца – от 5 до 30 м! Лишь внешние, чрезвычайно

разреженные кольца G и E имеют заметную толщину в сотни (G) и десятки тысяч (E) километров.

- Сатурн обладает обширной системой из 18 спутников размерами от 20 до 5000 км, часть из которых движется в щелях между кольцами. Внутри же внешнего пылевого кольца E движутся сразу семь спутников.

Кольца остальных планет-гигантов содержат гораздо меньше материи. У Юпитера кольца сплошные, широкие, круговые. На краю Главного кольца движутся два из 16 спутников планеты, внутри Паутинного кольца – еще два. Самое внутреннее кольцо погружено в гало заметной толщины.

Уран обладает десятком узких плотных колечек с эксцентриситетами до 0,01 и наклонами к плоскости экватора до 0,06°. Эксцентричные колечки имеют переменную ширину – наименьшую в перигентре и наибольшую в апоцентре. Промежутки между кольцами заполнены мелкой пылью. Пыль во внутренней области быстро оседает на планету, тормозясь ее обширной атмосферой.

В системе Нептуна два ярких узких колечка и два широких разреженных. Ярчайшее кольцо имеет три значительных уплотнения, которые только и можно наблюдать с Земли. Поэтому первоначально говорили об арках или разорванных кольцах Нептуна. Из восьми спутников Нептуна четыре находятся на краю или между кольцами.



Рис. 3. Кольца Урана. Снимок получен с КА «Вояджер-2» 24. I 1986 года (JPL/NASA)



Рис. 4. Кольца Нептуна. Снимок получен с КА «Вояджер-2» 25. VIII 1989 года (JPL/NASA)

КА “Вояджеры” открыли еще одно интересное для нас образование — плазменный тор вокруг орбиты первого галилеева спутника Юпитера Ио. Рой этот состоит не из пылинок, а из ионизованных атомов и молекул серы с примесью других веществ. Он не уплощен: меридиональное сечение тора напоминает эллипс со сравнимыми полуосями.

В результате описанной лавины открытий кольцо Сатурна потеряло уникальность. Вопрос: *Откуда у Сатурна кольцо?* — дополнился другим: *Почему у планет земной группы нет колец?* Мы можем хотя бы частично ответить на оба взаимосвязанных вопроса. Частично потому, что детальная информация с борта КА охватывает для каждой планеты лишь период порядка суток — практически мгновенная фотография (для Юпитера и Сатурна — четыре такие фотографии по числу космических аппаратов). И все же полученные данные достаточно полны. По-видимому, открыты все спутники планет диаметром более 20 км и все сколько-нибудь плотные кольца.

ЖИЗНЬ КОЛЕЦ

Анализ динамики спутников и частиц кольца показывает неразрывную связь последнего с обширной системой спутников. Прежде всего это синхронизация периодов обращения частиц, вызванная резонансами с периодами обращения спутников. В небесной механике хорошо известно, что резонансы вызывают сильные возмущения в кеплеровском движении частиц, приводящие в разных случаях либо к выметанию частиц из зоны резонанса (щель Кассини между основными кольцами Сатурна — резонанс с движением Мимаса), либо к повышению устойчивости орбиты. Тонкая структура колец — результат игры резонансов. Спиральные волны, спицы — все это тоже обязано взаимодействию ансамбля частиц со спутниками. Таким образом, спутники создают динамическую картину колец и стабилизируют ее.

Но роль спутников этим не исчерпывается. Действует следующий многоступенчатый механизм. Раз в несколько сот миллионов лет достаточно большие тела размером в несколько километров сталкиваются с крупными спутниками, например Сатурна. Удар с космической скоростью приводит к откалыванию нескольких тел размером в десятки и сотни километров. Гораздо чаще более мелкие пришельцы, а также взаимные столкновения приводят к дальнейшему дроблению вплоть до песчинок и пылинок. Пылевой комплекс возникает как результат динамического равновесия. Частицы его выпадают обратно на спутники, оседают на планету, а взамен их поступают новые. Равновесие это отнюдь не абсолютное. После крупного столкновения в систему впрыскивается огромное количество материала, а в промежутках между катастрофами пояса истончаются.

Раскрывается удивительная картина. Похоже, все три приведенные выше причины, решающие загадку колец, действуют! Но по порядку.

Представляется несомненным, что первичные кольца возникли на поздней стадии формирования Солнечной системы. В близкой к планете зоне приливные силы препятствовали возникновению спутников и материя осталась собранной в тела размерами до десяти — максимум ста метров. Дальше гравитационное взаимодействие кольца — спутники привело к структурированию колец и сообщило им динамическую устойчивость.

Столкновительный механизм, созидающий и разрушающий кольца, безусловно, также действует. Так, в системе Урана лишь внешнее колечко находится вне аэродинамической опасности. Частицы остальных должны были бы выпасть на планету из-за сопротивления протяженной атмосферы. Снимки с “Вояджера-2” показывают шлейф мелкой пыли от ϵ вниз. Таким образом, все внутренние кольца Урана — это просто зоны, где пыль задерживается на некоторое время, прежде чем выпасть на планету. Кольцо E Сатурна также результат динамического равновесия вещества, поступающего от метеоритных ударов об Энцелад и другие спутники и выпадающего из системы. Вообще большинство колец, как и мы с вами, живет за счет постоянного обновления материи, из которой они состоят. Роль столкновительного механизма пока неясна лишь для главных, наиболее плотных и устойчивых колец из крупных частиц. Часть ученых считают, что главные кольца — реликтовые образования, содержащие частицы многомиллиардолетнего возраста. Другая часть склоняется к тому, что продленный спутниками период полураспада кольца менее миллиарда лет, и мы наблюдаем пылевые комплексы, частицы которых значительно моложе планет и спутников. Кольца Юпитера, Урана, Нептуна — относительно старые равновесные образования: кольцо Сатурна относительно молодо и теряет вещества больше, чем получает извне.

Для решения вопроса желательны и новые экспериментальные данные, и усилия теоретиков. Нужно рассчитать поведение комплекса на 5 млрд лет. Это гораздо труднее, чем на относительно короткий срок, так как, казалось бы, пренебрежимо малые силы могут изменить поведение системы. Вот простой пример. За тысячу лет из-за эффектов теории относительности перигелий Меркурия смещается на 7', то есть всего на четверть видимого с Земли диаметра Луны. Но за миллиард лет перигелий совершит 332 лишних оборота вокруг Солнца! Будем надеяться, что в ближайшие 10 лет возраст колец будет надежно установлен.

ГДЕ КОЛЬЦА ВНУТРЕННИХ ПЛАНЕТ?

Теперь ясна и ситуация с внутренними планетами. Меркурий и Венера лишены спутников и могли

бы иметь лишь первичные кольца — механизм пополнения отсутствует. Но физические условия во внутренней области Солнечной системы гораздо менее благоприятны для выживания колец. Кольца из льда и инея (как у Сатурна) просто бы испарились. Силикатные или угольные частицы (как у Урана) вплоть до метровых размеров за миллиард лет упали бы на Венеру (на Меркурий гораздо раньше) под действием эффекта Пойнтинга—Робертсона.

Около Земли эффект Пойнтинга—Робертсона действует лишь в два раза слабее, чем у Венеры, и тоже должен разрушить гипотетическое первичное кольцо. Кроме того, сильным разрушителем в первый миллиард лет существования Земли была тяжелая Луна, находившаяся тогда в несколько раз ближе к Земле [3]. Массивность Луны лишает нас и обновляющегося кольца. Как известно из опытов со сверхскоростными столкновениями, падение метеорита на поверхность небесного тела вызывает выброс огромных масс вещества — в 1000 и даже в 10 000 раз больше массы ударника. В соответствии с законом сохранения энергии скорость вылетающих осколков раз в сто ниже. Поскольку вторая космическая скорость на поверхности Луны достаточно велика (2,4 км/с), то выброшенное вещество падает обратно на Луну и космос остается чистым. В действительности ситуация несколько сложнее. Осколки вылетают с разными скоростями, и ничтожная их часть все же попадает на геоцентрические орбиты. Поэтому плотность материи в околоземном пространстве чуть выше, чем в межпланетном. И на Земле в коллекциях метеоритов присутствует более десятка лунных осколков. Все же настоящего пылевого комплекса вокруг Земли быть не может, по крайней мере пока в Луну не врежется малая планета в десятки километров диаметром. Подобные события случаются раз в сотни миллионов лет, если не реже.

Обратимся к четвертой планете — Марсу. У него два крохотных спутника — Фобос и Деймос. Это, конечно, немного по сравнению с обширными семействами планет-гигантов. И все же описанный механизм запыления околомарсианского пространства должен действовать. По нашим расчетам [4], вокруг орбит Фобоса и Деймоса должны существовать торообразные рои мелких частиц. Плотность материи в них значительно ниже, чем в кольцах Сатурна, но все же в 10^4 – 10^6 раз выше плотности межпланетной среды. Марсианские пылевые комплексы объемны: концентрация к экваториальной плоскости существует, но выражена нерезко. Мы надеемся, что в ближайшем будущем экспедиции к красной планете обнаружат предсказанные рои метеороидов, связанные с Фобосом и Деймосом, и исследуют их свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Роль метеоритной бомбардировки в жизни пылевых комплексов планет-гигантов и, возможно,

Марса можно считать достоверно установленной. Петербургский физик Э.М. Дробышевский предложил гипотезу действия и другого механизма поступления вещества в окрестности планет-гигантов. Их крупные спутники богаты водяным льдом. Под действием космических лучей, солнечного ветра, ультрафиолетового излучения молекулы воды диссоциируют на водород и кислород. За миллионы лет ледяная кора насыщается гремучим газом, который пузырьками остается вкрапленным в лед. Падение метеорита или кометы вызывает химический взрыв, энергия которого выбрасывает в космос тонкую верхнюю оболочку спутника. В результате получается плотный тор, быстро эволюционирующий в кольцо. С течением времени кольцо деградирует — до следующего взрыва, возможно на другом спутнике. По Дробышевскому, последний взрыв в системе Сатурна произошел сравнительно недавно, тогда как в системах Юпитера, Урана и Нептуна — достаточно давно.

Заметим, что гипотеза химического взрыва пока не может считаться окончательной. Расчеты же по ударной модели содержат большие неопределенности: плохо известны распределения метеороидов по массам, расстояниям и скоростям. Поэтому необходимы дальнейшие наблюдения с земных обсерваторий и космических аппаратов, чтобы выяснить детали строения и эволюции пылевых околопланетных комплексов — специфических членов семьи Солнца.

ЛИТЕРАТУРА

1. Горькавый Н.Н., Фридман А.М. Физика планетных колец. М.: Наука, 1994.
2. Миттон С., Миттон Ж. Астрономия. (Оксфордская библиотека). М.: Росмэн, 1995.
3. Рускол Е.Л. Происхождение Луны. М.: Наука, 1975.
4. Кривов А.В., Соколов Л.Л., Холшевников К.В., Шор В.А. О существовании роя частиц в окрестности орбиты Фобоса // Астрон. вестн. 1991. Т. 25, № 3. С. 317.

* * *

Константин Владиславович Холшевников, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой небесной механики математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, член-корреспондент Российской академии естественных наук и Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского. Область научных интересов: небесная механика, потенциал тяготения и фигуры равновесия небесных тел. Автор и соавтор четырех монографий и более 100 статей. Имя Kholshchevnikov носит малая планета № 3504.