



Окольцованные планеты

К. В. Холшевников

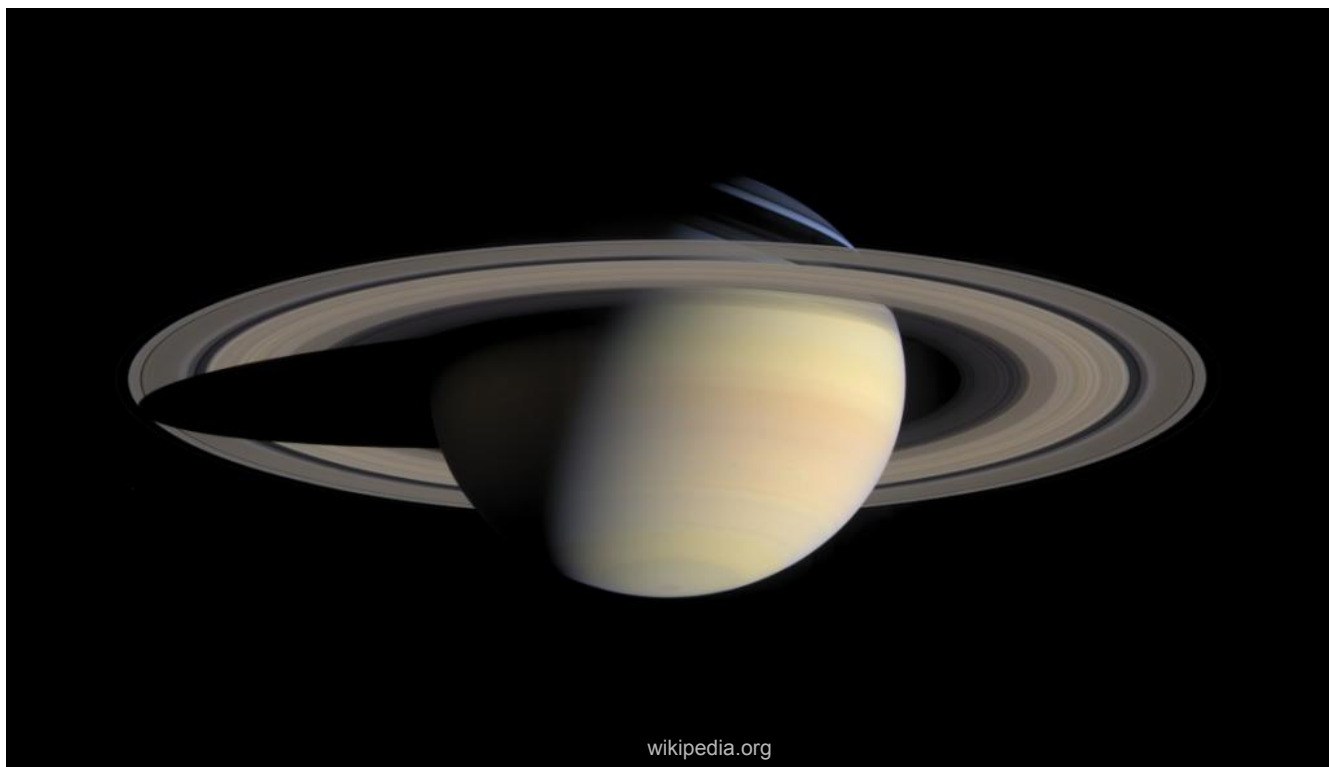


Вплоть до недавнего времени кольцо Сатурна считалось уникальным, не имеющим аналогов и потому с величайшим трудом поддающимся исследователям.

Загадочные кольца

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 доказали, что сплошным твердым телом кольцо быть не может. Ведь если даже оно сделано из идеального сверхпрочного материала, выдерживающего приливные и центробежные нагрузки, то из-за неустойчивости своего движения оно должно за короткое время врезаться в планету. Теперь известно, что кольцо Сатурна представляет собой практически плоский рой частиц - от пылинок до многометровых глыб.

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.

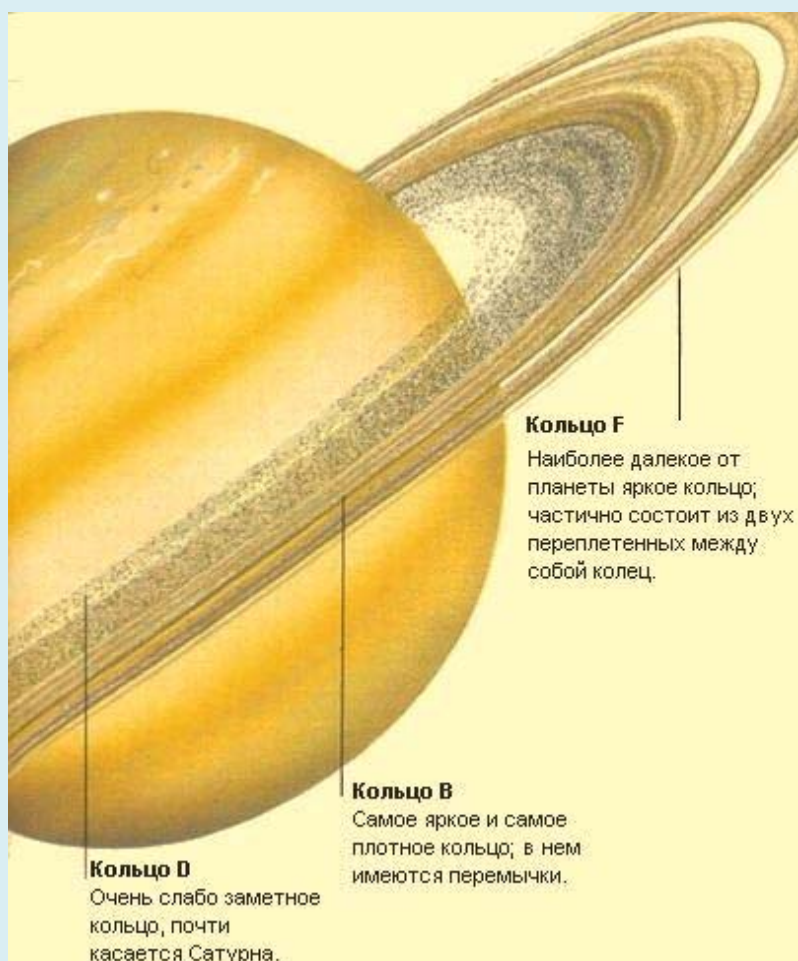
Вплоть до недавнего времени кольцо Сатурна считалось уникальным, не имеющим аналогов и потому с величайшим трудом поддающимся исследователям. Даже два основных вопроса оставались без ответа. Во-первых, откуда кольцо взялось? Во-вторых, почему оно не исчезло? Обсуждалась гипотеза образования кольца разрушением спутника приливными силами. Но обоснованность гипотезы едва превышала уровень знаменитого, а почему бы и нет! С ответом на второй 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.

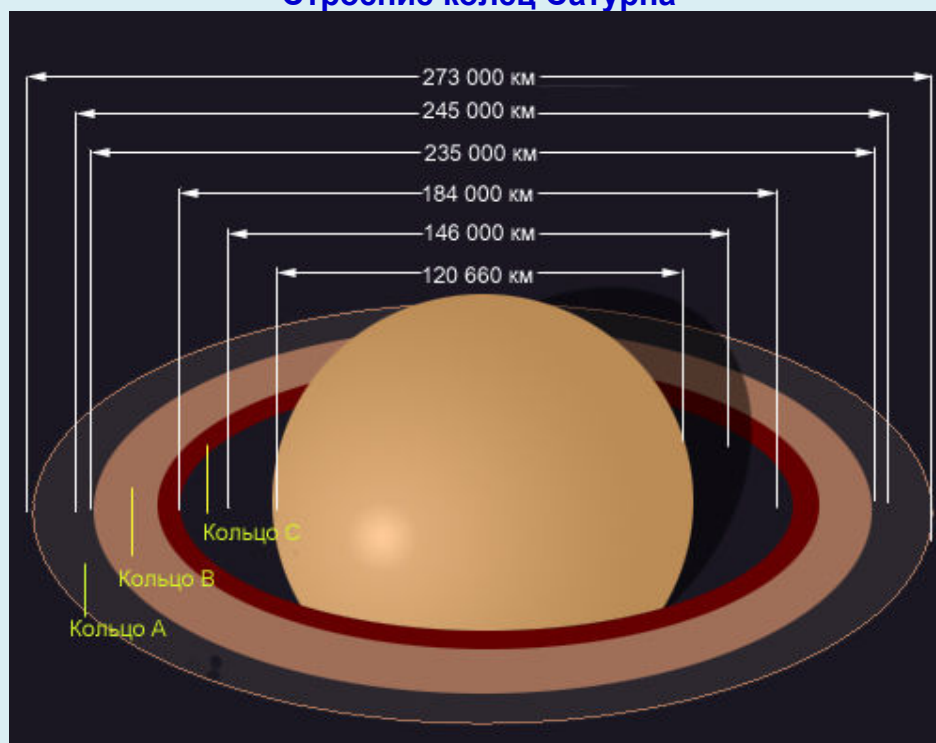
1. Существуют процессы, синхронизирующие движения частиц (исключающие столкновения или поддерживающие околокруговые траектории несмотря на столкновения). Кольцо в целом устойчиво. Сегодня его вид несильно отличается от того, который возник к концу эпохи формирования системы Сатурна.

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.

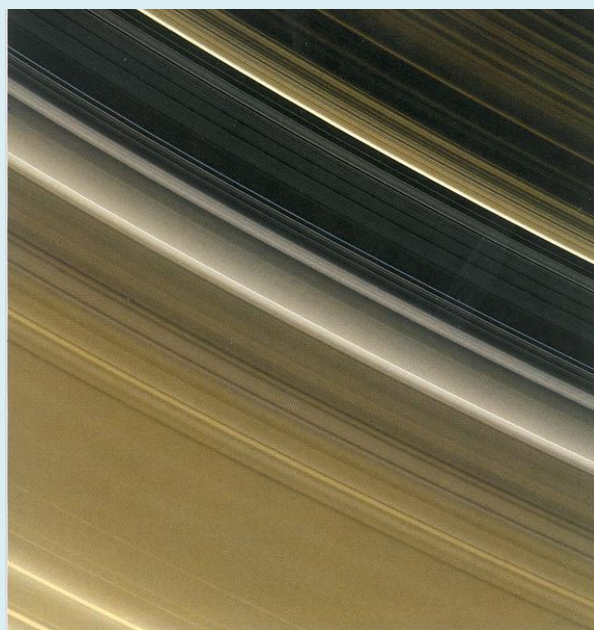
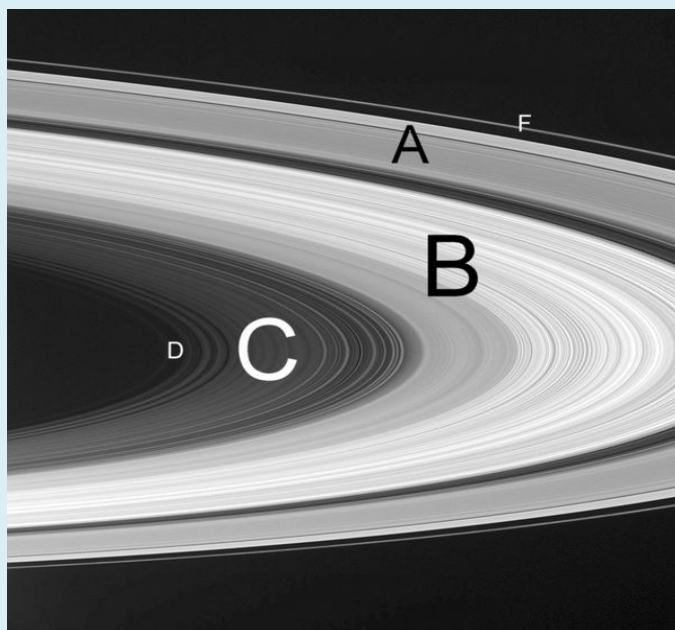
3. Существует источник пополнения частиц, как в случае водопада. Мы видим



Строение колец Сатурна



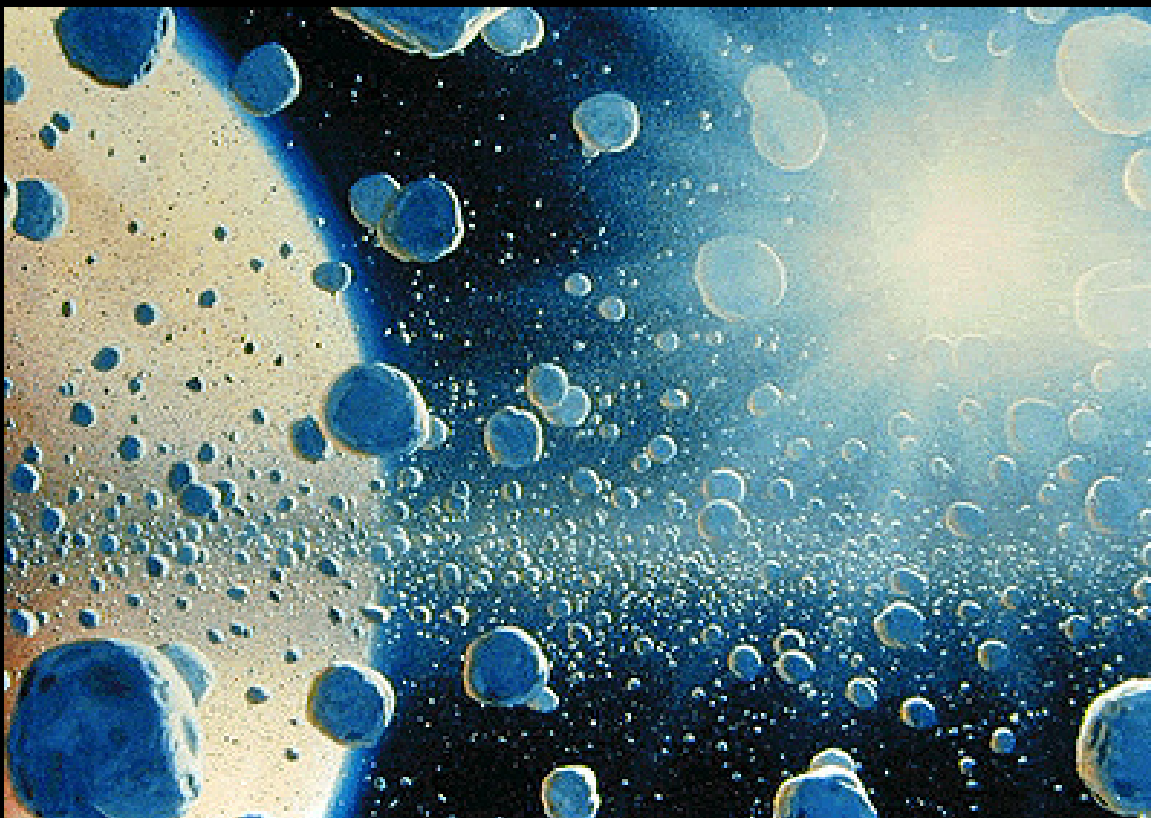
astronom-nti.narod.ru, astrolab.ru



Кольца Сатурна. Правое верхнее фото сделано с расстояния 1,8 млн км
(межпланетная станция Кассини, 2006 год)



nasa.gov



Так представляет себе кольца Сатурна изнутри художник Уильям Хартманн

стационарную картину потому, что упавшие частицы воды все время замещаются новыми. Разница лишь в скорости замещения - миллионы лет и секунды соответственно.

Потеря уникальности

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. Неожиданно были обнаружены колебания светимости нехарактерные для таких процессов. В результате был сделан вывод, впоследствии полностью подтвердившийся: Уран, как и Сатурн, обладает системой колец. 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 "Вояджер-1". Вскоре они были вновь сфотографированы "Вояджером-2". Эти два космических разведчика принесли феноменальную информацию о планетах-гигантах. А "Вояджер-2", к тому же, в 1989 году открыл кольца у Нептуна.

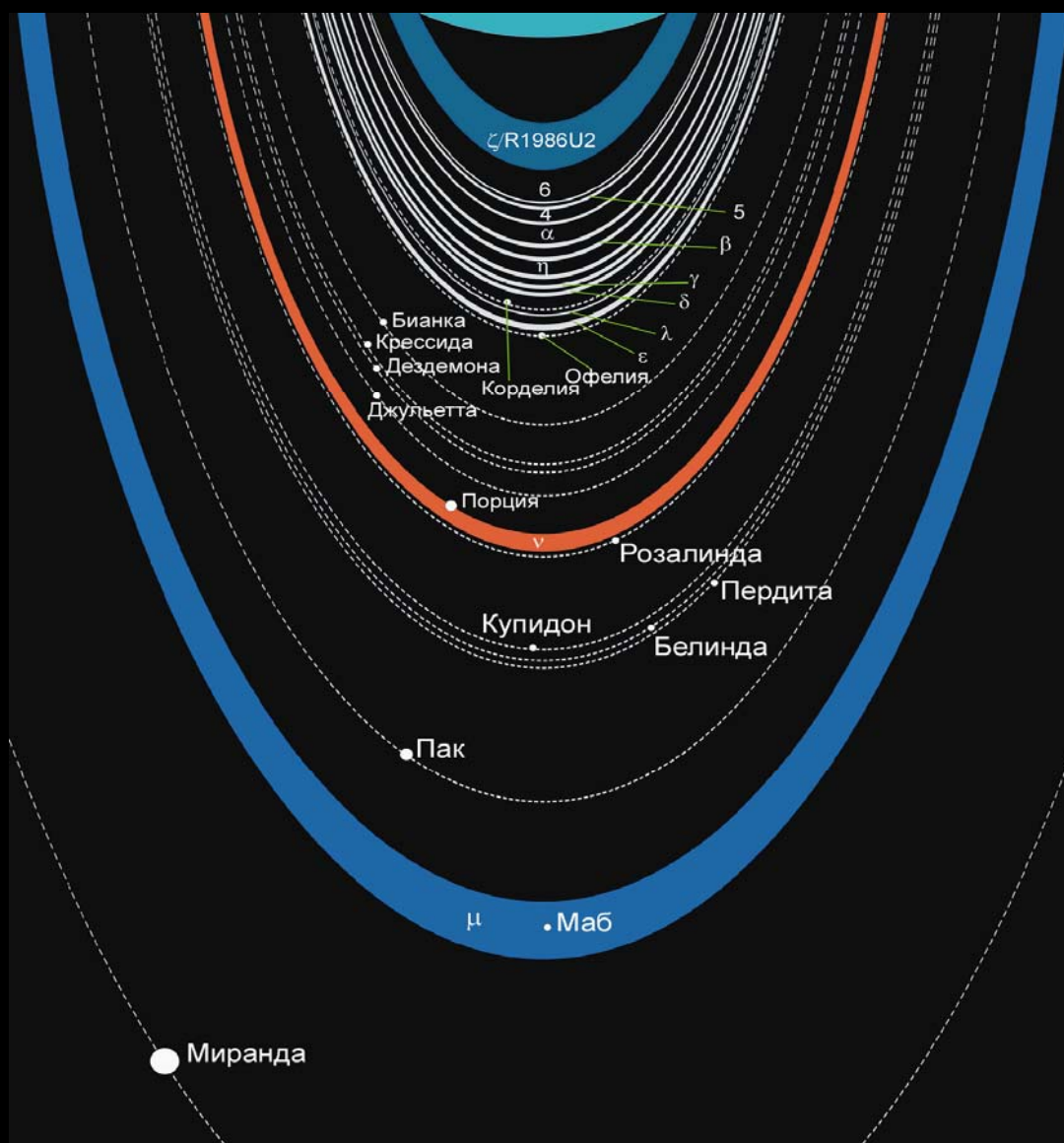
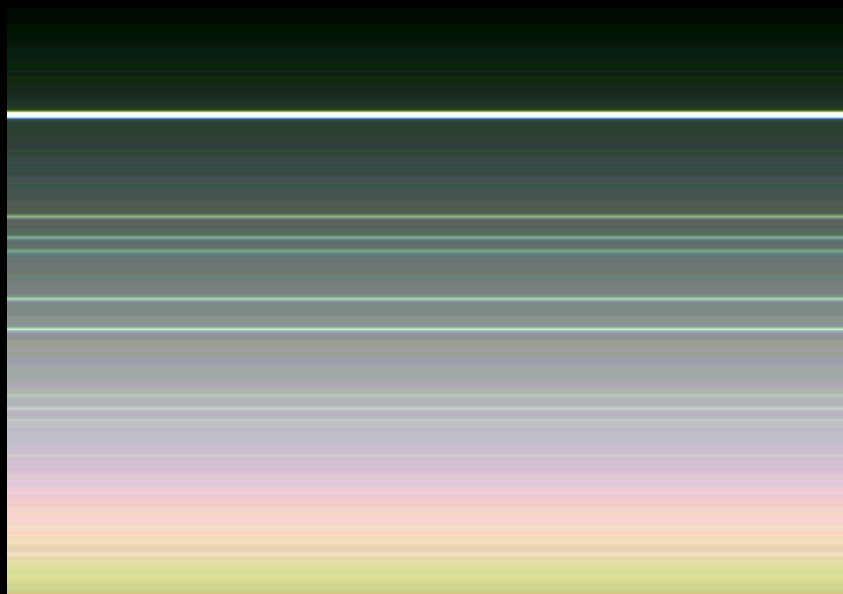
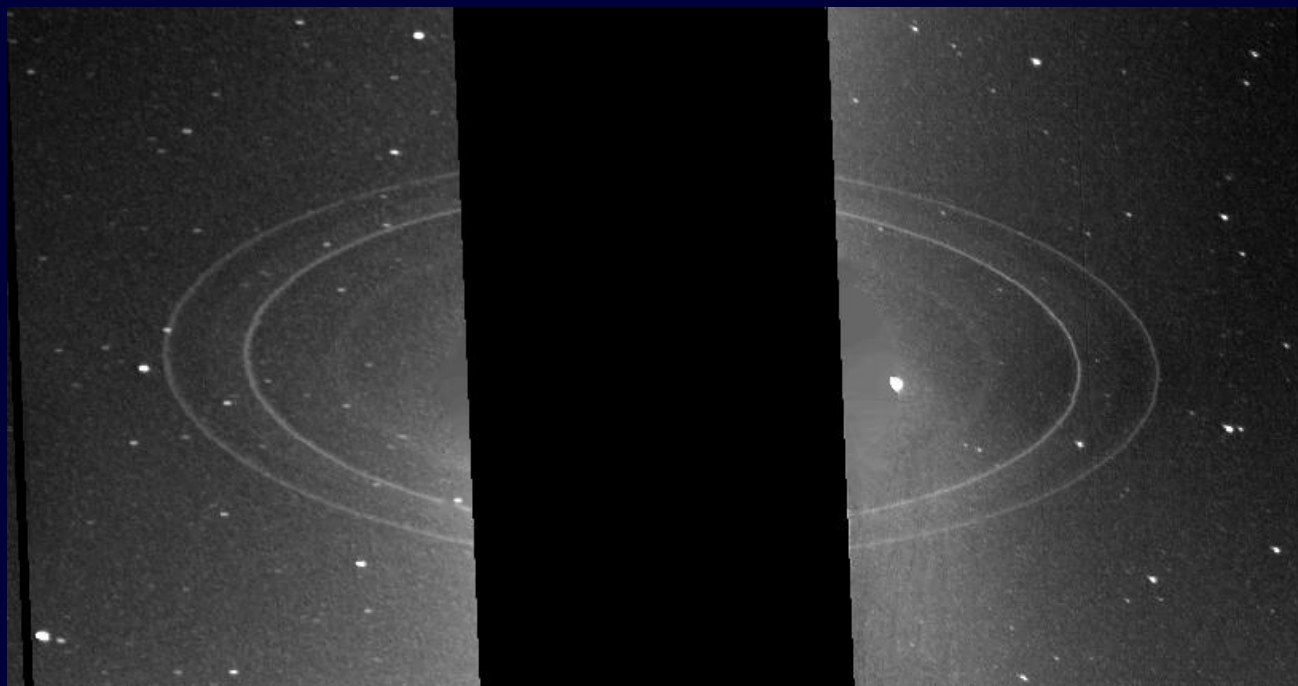
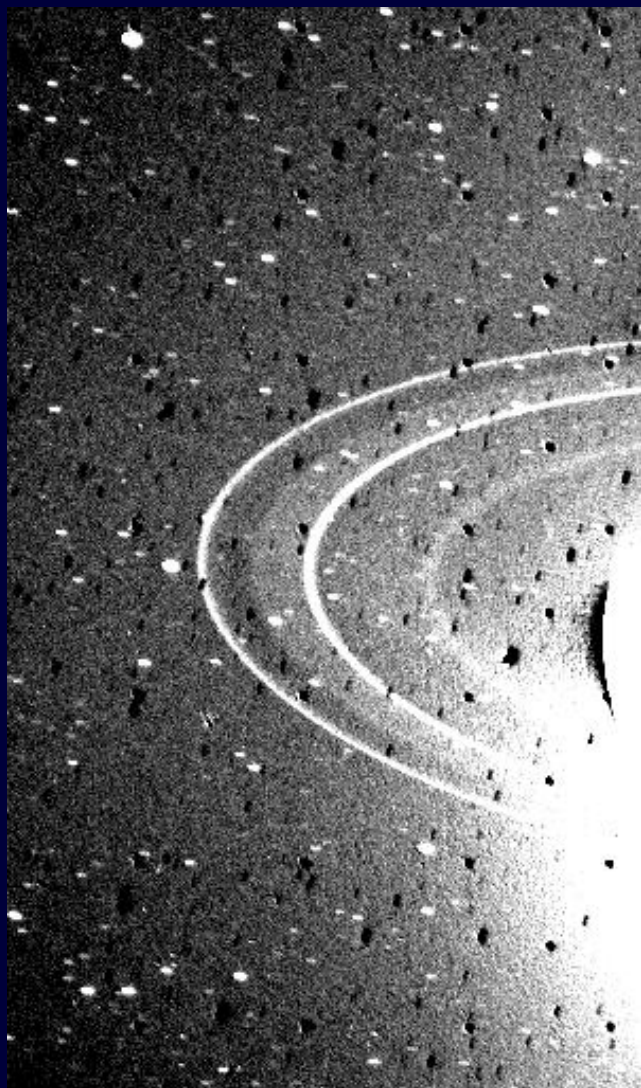


Схема спутников и колец Урана wikipedia.org



nasa.gov

Изображение колец Урана, составленное по данным с Вояджера-2



Кольца Нептуна nasa.gov

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 космических аппаратов видна их тонкая структура граммофонной пластинки. Есть и множество других удивительных деталей.

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.
- * По мощным кольцам регулярно прокатываются спиральные волны плотности и изгибные волны.

* Спектр масс частиц простирается от микрометровых пылинок до глыб размером в десятки метров. Сометровые 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 и плотных колечек. 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.

* "Вояджеры" открыли еще одно интересное 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?

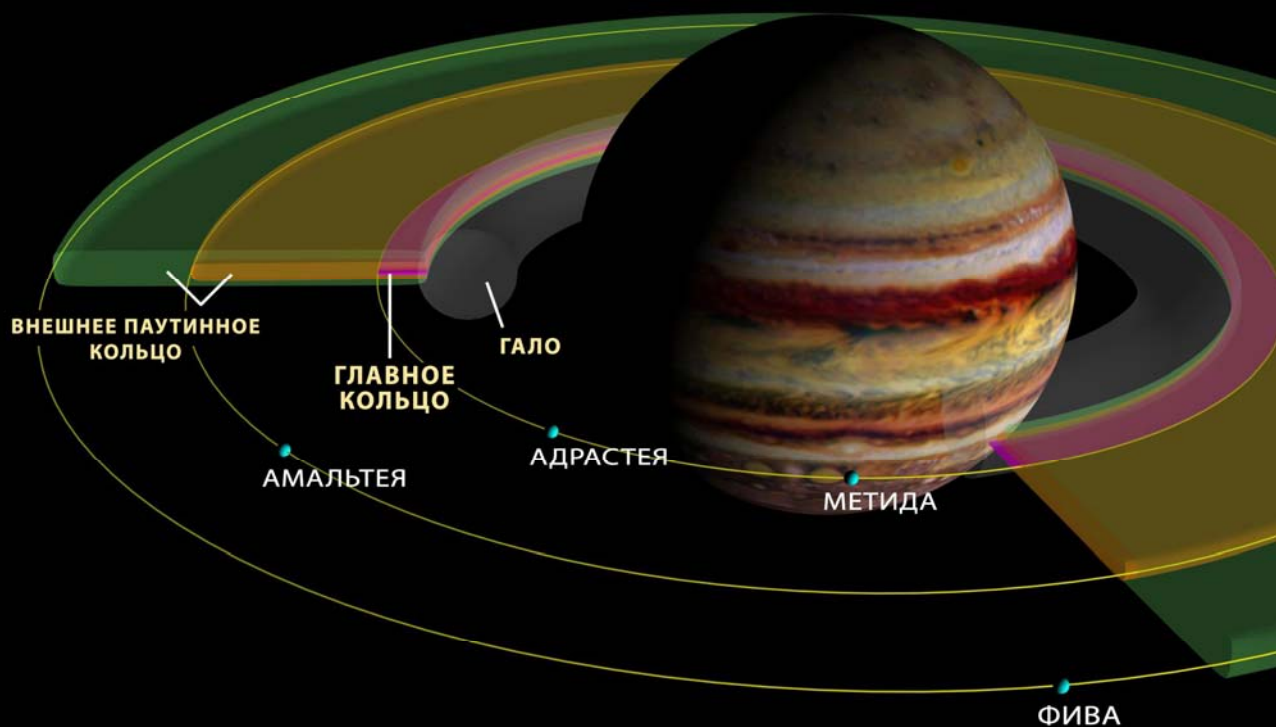
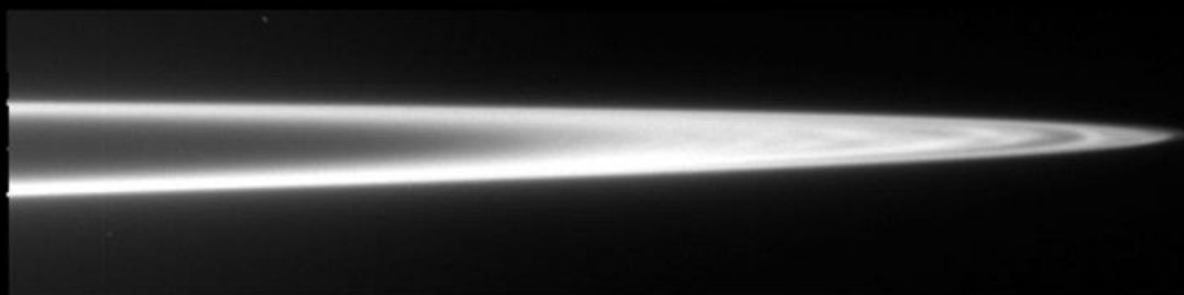
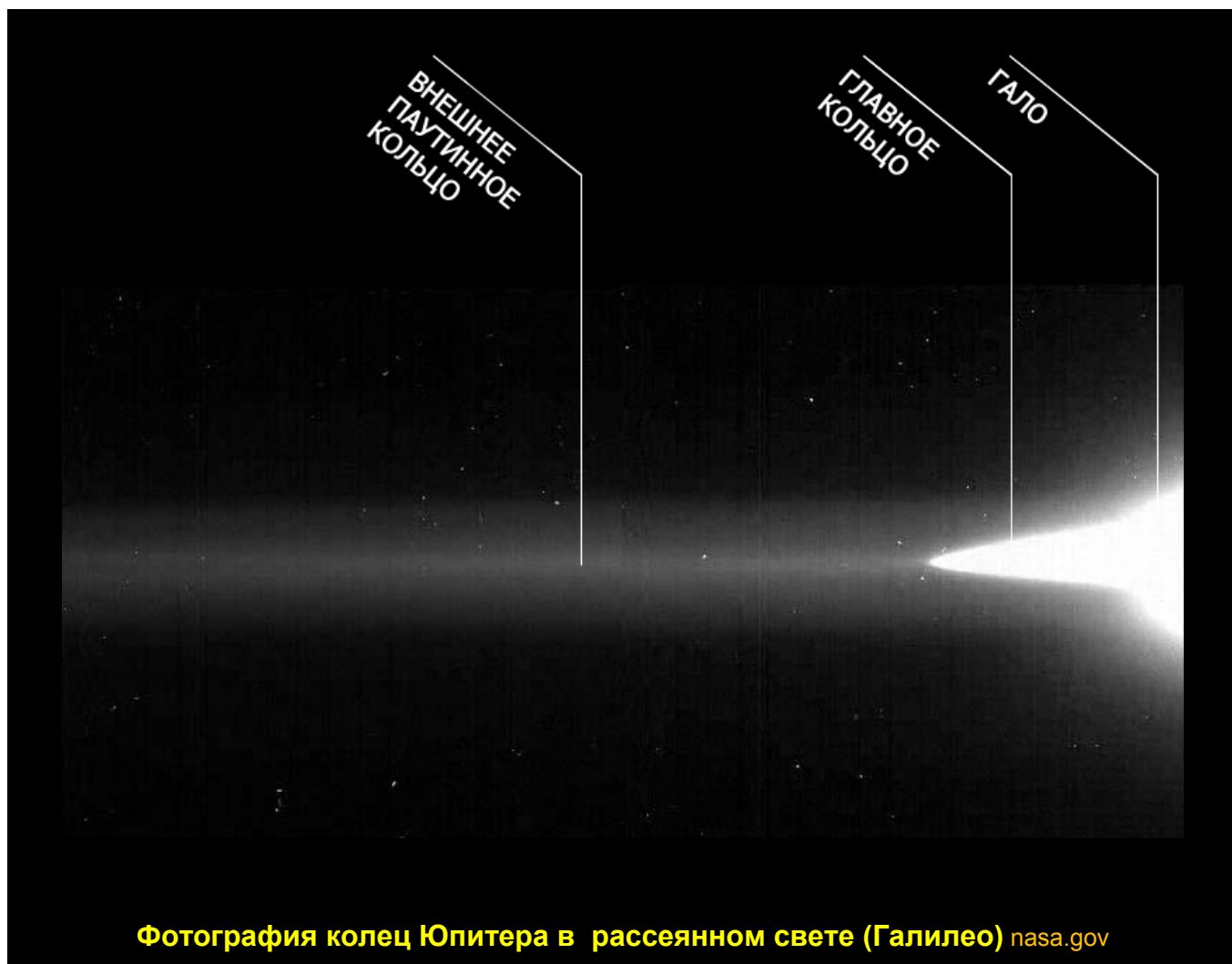


Схема системы колец Юпитера



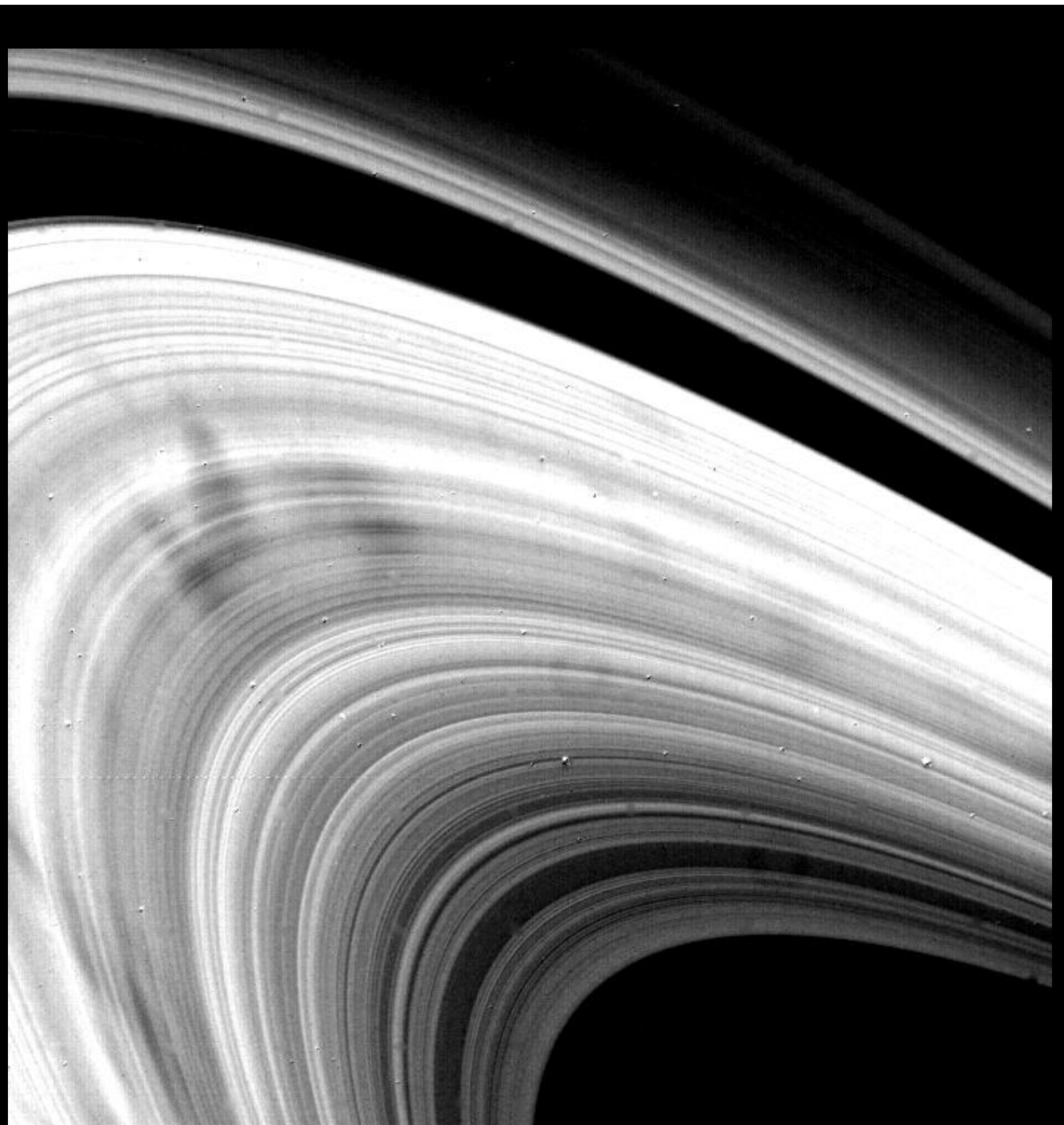
Главное кольцо Юпитера (сфотографировано аппаратом Галилео)



Жизнь колец

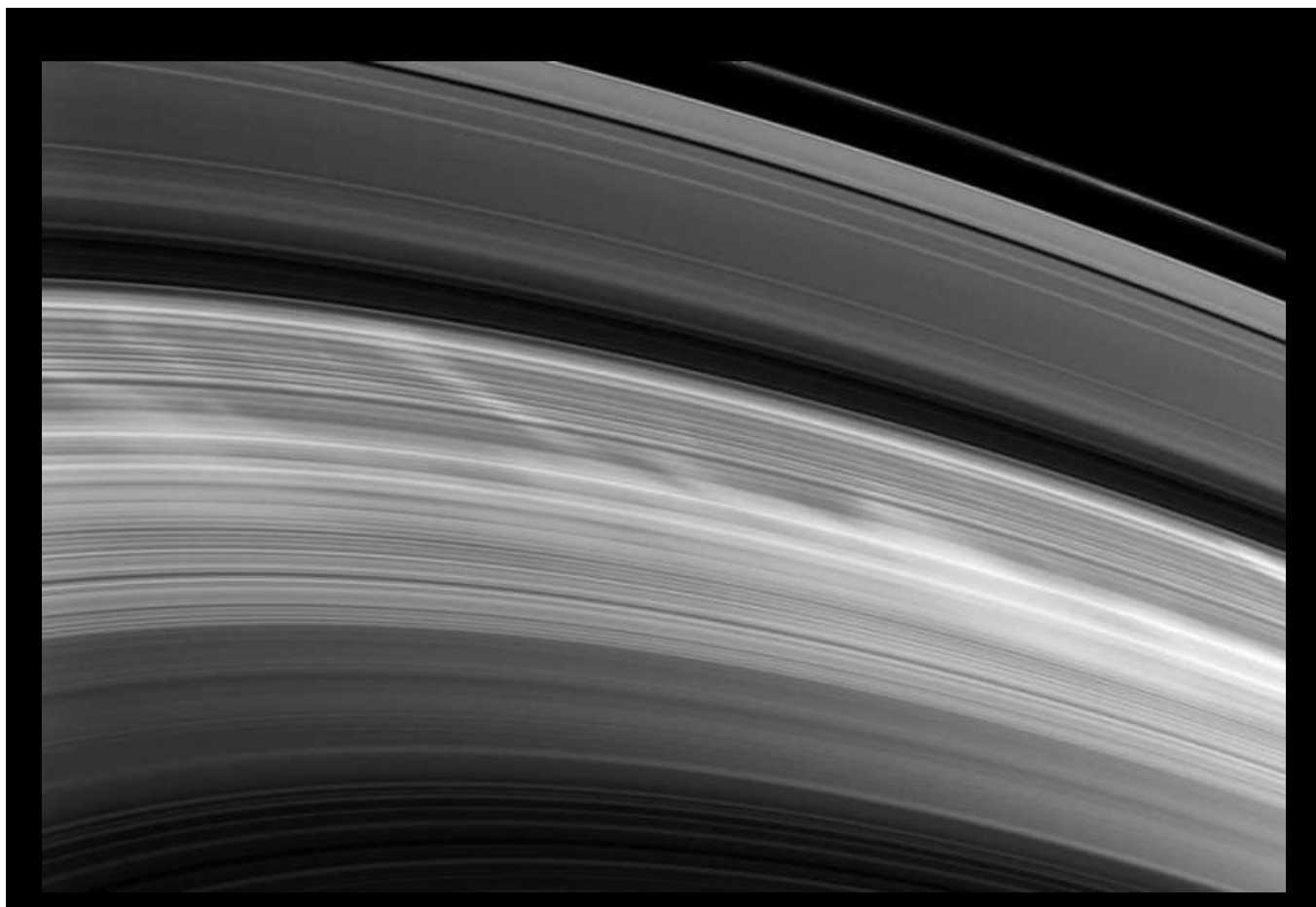
Анализ динамики спутников и частиц кольца показывает неразрывную связь последнего с обширной системой спутников. Прежде всего это синхронизация периодов обращения частиц, вызванная резонансами с периодами обращения спутников. В небесной механике хорошо известно, что резонансы вызывают сильные возмущения 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,



«Спицы» в кольцах Сатурна. Эти загадочные структуры могут появляться и исчезать всего за несколько часов. Впервые «спицы» в кольцах Сатурна были обнаружены Вояджером. На первых снимках с МАС Кассини «спицы» явно отсутствовали, но в дальнейшем они неоднократно наблюдались.

Природа «спиц» окончательно не установлена nasa.gov



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.

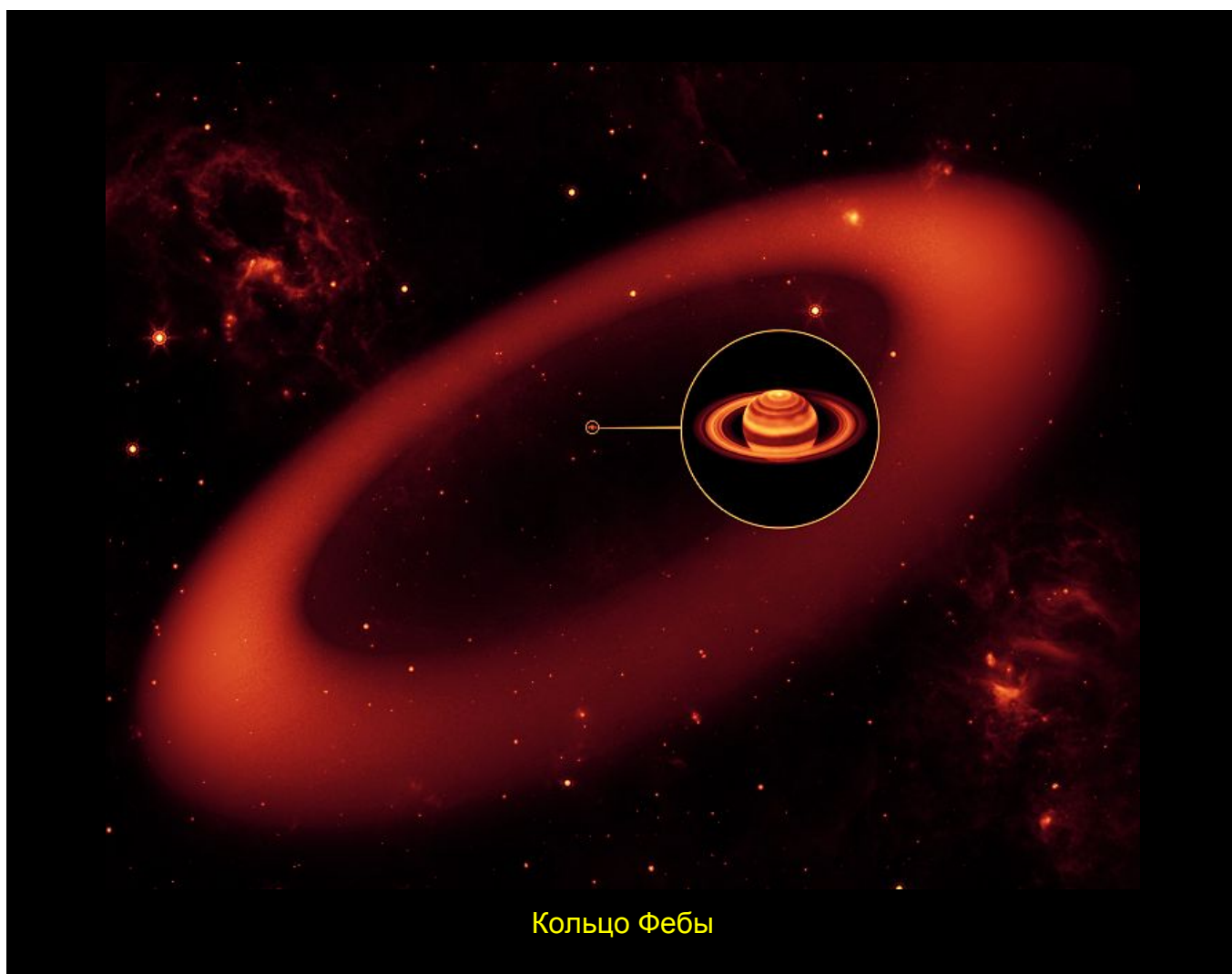
Раскрывается удивительная картина. Похоже, все три приведенные выше причины, решающие загадку колец, действуют! Но по порядку.

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.

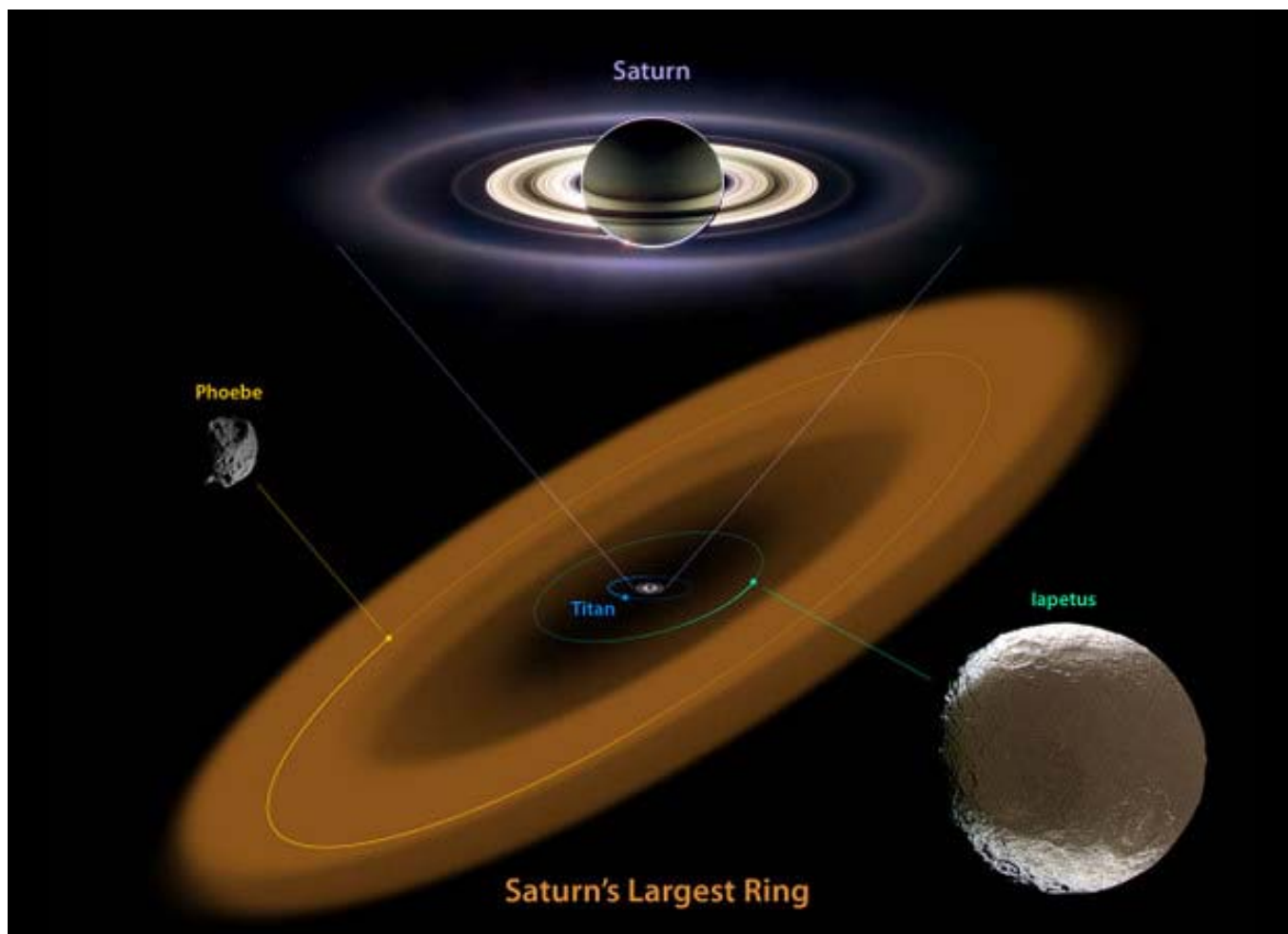
Столкновительный механизм, созидающий и разрушающий кольца, безусловно, также действует. Так, в системе Урана лишь внешнее колечко **е** находится вне аэродинамической опасности. Частицы остальных должны были бы выпасть на

планету из-за сопротивления протяженной атмосферы. Снимки с "Вояджера-2" показывают шлейф мелкой пыли от **е** вниз. Таким образом, все внутренние кольца Урана - это просто зоны, где пыль задерживается на некоторое время, прежде чем выпасть на планету. Кольцо Е Сатурна также результат динамического равновесия вещества, поступающего от метеоритных ударов об Энцелад и другие спутники и выпадающего из системы.

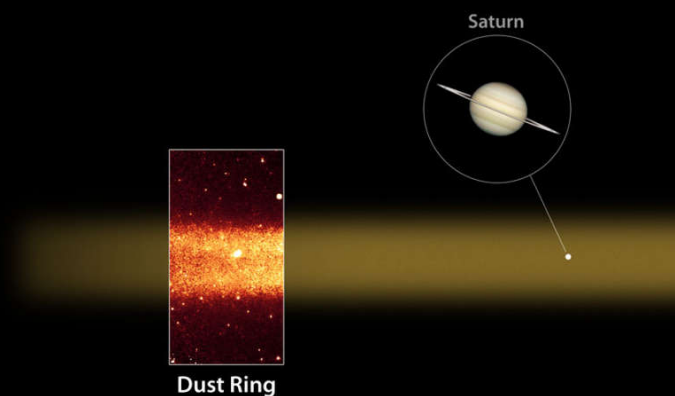
Вообще большинство колец, как и мы с вами, живет за счет постоянного обновления материи, из которой они состоят. Роль столкновительного механизма пока неясна лишь для главных, наиболее плотных и устойчивых колец из крупных частиц. Часть ученых считают, что главные кольца - реликтовые образования, содержащие частицы многомиллиардного 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.



Кольцо Фебы



Недавно у Сатурна было найдено пылевое кольцо — самое большое из известных. Его радиус составляет более 200 радиусов самого Сатурна и более 50 радиусов самого далекого кольца Е. Кольцо было замечено в инфракрасном свете камерами телескопа Спизера, который находится на околоземной орбите. Согласно главной гипотезе, кольцо образовалось из частиц, отлетевших от спутника Феба, орбита которого пролегает прямо посередине пылевого кольца. По другому мнению, пылевое кольцо состоит из загадочного вещества, покрывающего часть спутника Япет, орбита которого пролегает у внутреннего края пылевого кольца astronet.ru



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 всей системы.

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.

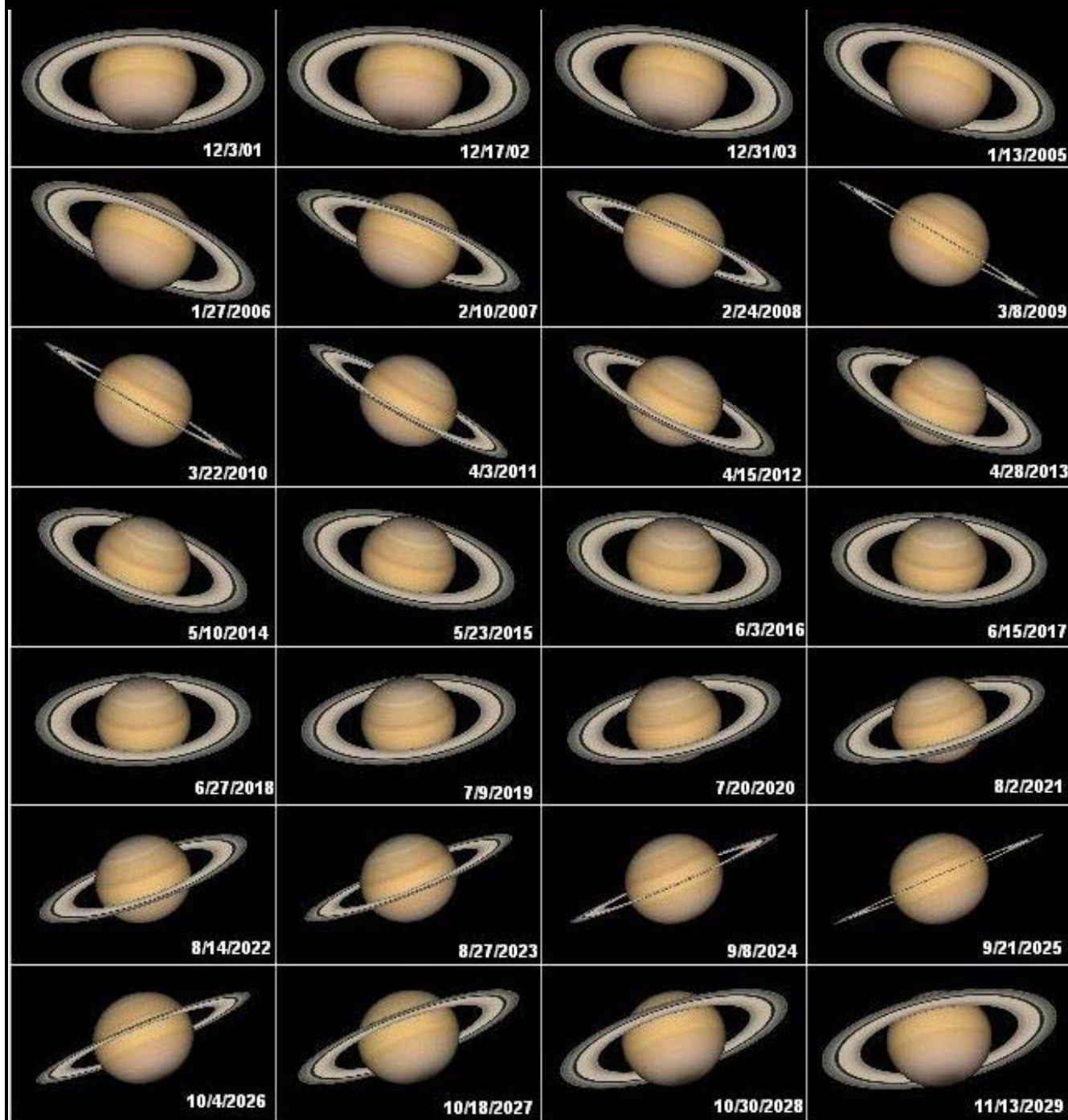
Около Земли эффект Пойнтинга-Робертсона действует лишь в два раза слабее, чем у Венеры, и тоже должен разрушить гипотетическое первичное кольцо. Кроме того, сильным разрушителем в первый миллиард лет существования Земли была тяжелая Луна. Ее массивность лишает нас и обновляющегося кольца.

Как известно из опытов со сверхскоростными столкновениями, падение метеорита на поверхность небесного тела вызывает выброс огромных масс вещества - в 1000 и даже в 10000 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 практически все выброшенное вещество падает обратно на Луну и космос остается чистым.

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, 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 не резко. Мы надеемся, что в ближайшем будущем экспедиции к красной планете обнаружат предсказанные рои метеороидов, связанные с Фобосом и Деймосом, и исследуют их свойства.

Открытия и гипотезы

Вид Сатурна с Земли 2001-2029 гг.



Изображения получены с помощью компьютерного моделирования
(автор Tom Ruen)