

ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

Разрушение ядер комет

Л.В. Ксанфомалити

Распад комет на части с отдельными хвостами неоднократно наблюдали астрономы прошлого. Явление резко противоречило представлениям о вечной незыблемости небосвода и немало способствовало мистическим предсказаниям грядущих несчастий, особенно когда хвост кометы охватывал полнеба. Но увидеть ядра комет стало возможным только в наши дни с помощью средств космических исследований, а наблюдать кометные ядра в стадии разрушения впервые позволила маленькая комета Хартли-2 в 2010 г. Среди обширного семейства кометных ядер и прочих тел Солнечной системы есть и другие объекты, предстоящее разрушение которых также можно заподозрить.

PACS numbers: 96.25. – f, 96.30.Cw, 96.30.Ys

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201202c.0147

Содержание

1. Введение (147).
 2. Начало исследований кометных ядер (148).
 3. Катастрофические кометные события (148).
 4. Комета Хартли-2 (150).
 5. Что удаётся рассчитать (153).
 6. О дальнейшей эволюции ядра кометы Хартли-2 (154).
 7. Шейка астероида Итокава (154).
 8. Заключение (155).
- Список литературы (156).

1. Введение

С появлением космических аппаратов кометы, хвосты которых иногда растягиваются в космосе на межпланетные расстояния, украшая небо Земли, потеряли былую славу небесных предвестников земных неприятностей. Космические аппараты проникают в эфемерные атмосферы (комы) комет и исследуют их ядра, обладающие размерами от нескольких долей километра до нескольких десятков километров. По форме ядра комет не отличаются от небольших астероидов, хотя принято считать, что их происхождение различно. Однако часть астероидов, около 6 %, составляют так называемые вымершие кометы, и, вообще, граница между ними всё больше размывается, хотя только кометные ядра могут на 80 % состоять из водяного льда.

Главные видимые отличия комет — сильно вытянутые орбиты и, конечно, протяжённые хвосты. С прибли-

жением к Солнцу (в перигелии) ядра комет разогреваются, становятся активными и выбрасывают огромные массы летучих: водяного пара, углекислого газа и других газообразных веществ, а также мелкие и крупные пылинки. В сближении с Солнцем многие кометы часто оказываются внутри орбиты Земли, а некоторые настолько близко подходят к Солнцу, что уже не возвращаются из перигелия. Орбиты короткопериодических комет в наибольшем удалении от Солнца (в афелии) уходят за орбиты Юпитера и Нептуна.

Короткопериодическими называют кометы, период повторных появлений которых менее 200 лет. В их названии после номера присутствует индекс Р. Большая группа комет связана с Юпитером, который своей гравитацией иногда значительно изменяет их орбиты. Влияние Юпитера привело к катастрофическим событиям 1994 г., в которых при столкновении фрагментов кометы SL-9 с Юпитером выделилась гигантская энергия — $2,5 \times 10^{22}$ Дж.

В ноябре 2010 г. аппарат Deep Impact ("Глубокий удар"), проект EPOXI (Extrasolar Planet Observation and deep impact eXtended Investigation) Национального аэрокосмического агентства (NASA) США, сблизился с ядром кометы 103P/Хартли-2 (103P/Hartley-2) и передал снимки этого небольшого небесного тела, имеющего форму гантели с гладкой шейкой. Поскольку вращение ядра приводит к возникновению центробежных сил, было высказано предположение, что шейка гантели возникла под их действием и что происходит медленное, но непрерывное удлинение шейки, которое должно завершиться разделением ядра на фрагменты.

Предлагаемая статья посвящена разрушению кометных ядер, в частности динамической эволюции ядра кометы Хартли-2. Результаты расчёта показывают, что в узкой части ядра центробежные силы превосходят гравитационные и ядро действительно находится в состоянии приближающегося разрыва и разделения его на две части. Ядро кометы Хартли-2 представляет собой пример наблюдаемого разрушения небесного тела. При

Л.В. Ксанфомалити. Институт космических исследований РАН,
ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация
Тел. (495) 333-23-22
E-mail: ksanf@iki.rssi.ru

Статья поступила 9 февраля 2011 г.,
после доработки 10 мая 2011 г.

отсутствии внешних возмущений обе части небесного тела разойдутся на расстояние менее 1 км.

2. Начало исследований кометных ядер

Даже на лучших наземных снимках в коме ("голове" кометы) видно лишь небольшое туманное пятно, не позволяющее различить само ядро кометы. Начало исследований кометных ядер с помощью космических аппаратов положили советская миссия "Вега" и миссия "Джотто" Европейского космического агентства (ESA). В 1986 г., 6 и 9 марта, аппараты "Вега-1" и "Вега-2", а 14 марта аппарат "Джотто" сблизилась с ядром кометы Галлея, одной из наиболее крупных короткопериодических комет [1–4]. На большем расстоянии 8 марта прошёл аппарат "Планета-А" (Planet-A) японского космического агентства [5].

Обычно плоскость орбит таких комет расположена близко к эклиптике (плоскости орбиты Земли), но орбиты некоторых из них наклонены к ней очень значительно. Таковы комета Свифта–Туттля (Swift–Tuttle), продукты разрушения которой известны как "звёздный дождь", выпадающий ежегодно в августе, и комета Галлея, одна из наиболее интересных комет. Она движется по очень вытянутой эллиптической орбите и возвращается к Солнцу один раз в 76 лет (поэтому считается, что только долготель может увидеть её дважды).

Сближение космических аппаратов с кометой Галлея происходило на встречных курсах, поэтому скорость сближения была огромной, около 75 км с^{-1} . Любая крупинка пыли представляла большую опасность для аппаратов. Каждая единица массы несла кинетическую энергию, в 5600 раз превосходящую ту, которую имеет тело, движущееся со скоростью 1000 м с^{-1} , например зенитный артиллерийский снаряд. Но предусмотренная защита аппаратов позволила им пересечь пылевую оболочку, войти в голову кометы и сблизиться с её ядром. Аппараты провели съёмку и подробные исследования выбрасываемых кометой пыли и газа, а также окружающей комету плазмы. Исследовались и физические характеристики ядра. Ядро, состоящее из водяного льда с примесями других веществ, оказалось значительно большим по размерам, чем ожидалось.

С расстояния около 8000 км от ядра аппараты "Вега" передали изображения, на которых из освещённой и нагретой Солнцем поверхности ядра в космос вырываются газовые струи (рис. 1а). "Джотто" подошёл к ядру ещё ближе, на 610 км, но это вызвало нарушение в работе его систем. Один из снимков "Джотто", сделанный с большего расстояния через 5 дней после снимков "Веги", приведён на рис. 1б.

Ядро кометы представляет собой в основном ледяную глыбу неправильной формы, покрытую чёрной твёрдой коркой. Длина большой оси ядра около 15 км, а длины малых осей — по 7–8 км. Масса ядра близка к $6 \times 10^{14} \text{ кг}$. Ядро медленно вращается, примерно вокруг оси, проходящей сквозь большую часть на рис. 1а, совершая один оборот за 53 ч.

Поверхность ядра очень тёмная, альbedo около 4 %, темнее асфальта. Температура поверхности на расстоянии 0,8 а.е. от Солнца близка к 360 К. Тёмная поверхность и высокая температура, на первый взгляд, несовместимы с ледяной природой ядра. Однако оказалось, что тёмный слой на поверхности — это корка своеобразной

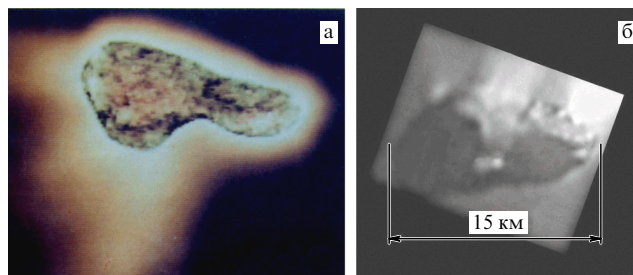


Рис. 1. (а) Обработанный снимок ядра кометы Галлея с усиленной резкостью затуманенного ядра, наложенный на первичное изображение выбрасываемых ядром газовых струй (снимок аппарата "Вега"). (б) Вид ядра кометы Галлея с другой стороны (снимок аппарата "Джотто"). Недостаточная чёткость снимков объясняется именно условиями работы аппаратов, компромиссом между чёткостью снимков и вероятной потерей аппарата при его опасном сближении с ядром.

теплоизоляции, закрывающей твёрдый или крупчатый лёд. Там, где корка разрушена, лёд тает, газовые струи вырываются из-под корки, как можно видеть на снимках. Помимо водяного пара, в струях выбрасываются и другие газы, прежде всего углекислый, а также пыль. В максимальной фазе комета теряет около 45 т газообразных веществ и 5–8 т пыли каждую секунду [6, 7]. Но это происходит лишь вблизи перигелия. Запасов вещества комете Галлея хватит, вероятно, ещё примерно на 100 тыс. лет, после чего она пополнит число вымерших комет. Возможно, значительно раньше может произойти разделение её ядра на части.

3. Катастрофические кометные события

Космические аппараты стали мощным средством исследований комет. Наряду с использованием космических аппаратов, совершенствование наземной астрономической техники позволило провести такие наблюдения, объекты которых ещё недавно казались крайне маловероятными.

Классификация явлений и событий относится к основным задачам науки. Но иногда чёткость дефиниций исчезает при ближайшем рассмотрении предмета. Это происходит с такими, казалось бы, устойчивыми астрономическими понятиями, как спутники, астероиды, кометы и даже кольца планет. Границы, их разделяющие, становятся расплывчатыми. Спутник Марса Фобос, по видимому, ничем не отличается от астероидов определённого класса. В свою очередь, некоторые астероиды могут быть "вымершими" кометами — телами, растерявшими запасы летучих. К спутникам Юпитера фактически относятся "троянки" — группа астероидов, орбиты которых связаны с Юпитером. Существует новая гипотеза об относительной недолговечности колец, которые рождаются (или обновляются) в разрушительных столкновениях спутников. Первоначальные процессы образования Солнечной системы были общими для всех её тел [8]. Критики "объединительной" гипотезы приводят примерно такое возражение: почему мы не видим самих соударений, столкновений и других катастроф? И наконец астрономы их увидели.

В начале 1993 г. была открыта странная комета, получившая по именам открывших её астрономов (супругов Ю. и К. Шумейкеров и Д. Леви), название "комета

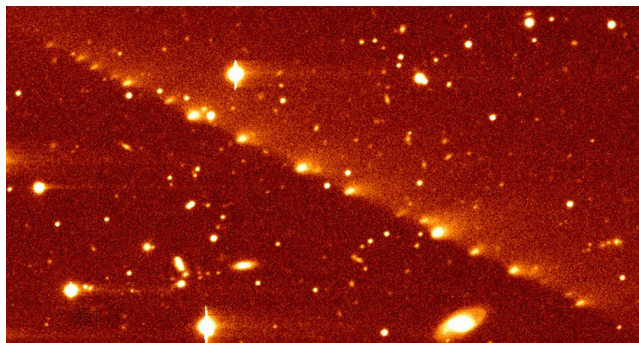


Рис. 2. Комета SL-9, распавшаяся в 1992 г. на 21 обломок после прохождения полости Роша вблизи Юпитера. Крупные кометные тела растянулись цепью на 200 тыс. км вблизи орбиты Юпитера, а в июле 1994 г. они поочерёдно столкнулись с планетой. Остальные объекты на снимке — звёзды и далёкие галактики. (Снимок Космического телескопа им. Хаббла.)

Шумейкеров – Леви-9", или SL-9. Комета, по выражению её первооткрывателей, выглядела "раздавленной": более 20 отдельных крупных кометных тел вытянулось цепочкой вблизи орбиты Юпитера (рис. 2).

Орбита кометы SL-9, как показал анализ, восходила к группе спутников-тройнецов; это мог быть как ушедший с далёкой орбиты небольшой спутник, богатый конденсатами летучих веществ, так и захваченная Юпитером комета. Распад кометы на фрагменты определился произошедшим в июле 1992 г. (за год до открытия кометы) её тесным сближением с Юпитером, когда комета оказалась внутри предела Роша. Это расстояние, на котором приливные воздействия разрывают приблизившееся небесное тело; и если тело не обладает какой-то прочностью или его части слабо связаны между собой, то оно разрушается. Вблизи Юпитера с его огромной массой такие эффекты очень сильны. Но тело могло разрушиться также из-за сопротивления самых верхних слоёв атмосферы Юпитера, через которые оно могло пройти в своём орбитальном движении, даже в отсутствие эффекта Роша.

Дальнейшая судьба кометы SL-9 была предсказана сразу (хотя были и скептические оценки [9]): вскоре астрономы станут свидетелями небесной катастрофы масштабов, намного больших, чем та, которая произошла 65 млн лет назад на Земле, когда погибли около 80 % всех видов животных, населявших Землю. Раньше вероятность такого события представлялась настолько малой, что его обычно воспринимали как исторический факт. Но результаты расчётов [10] уверенно показывали: в 1994 г., с 15 по 22 июля, обломки кометы размером от 1 до 10 км врежутся в Юпитер со скоростью 64 км с⁻¹. Столкновение произойдёт в южном полушарии планеты и будет сопровождаться выделением гигантской энергии.

Огромная кинетическая энергия тела, движущегося с космическими скоростями, при его внезапной остановке выделяется в виде тепла. Продукты мгновенного испарения как самого тела, так и препятствия создают гигантские взрывные давления. Предполагалось, что возможно даже появление на Юпитере нового Большого Красного Пятна или чего-то подобного. В ожидании столкновения были организованы специальные службы астрономических наблюдений. Большие надежды возлагались на орбитальную обсерваторию Космический телескоп



Рис. 3. Вид Юпитера 22 июля 1994 г. в инфракрасном диапазоне. Следы ударов кометы SL-9 в южном полушарии планеты (фрагментов кометы G, D, S, R и менее крупных тел).

им. Хаббла, с помощью которой с земной орбиты можно сделать подробные снимки Юпитера. Но положение осложнялось тем, что столкновение должно было произойти на стороне планеты, не видимой с Земли. Ночную сторону можно было бы наблюдать с приближавшегося тогда к Юпитеру аппарата "Галилей", но он был ещё слишком далеко, в 238 млн км, от планеты. С другой стороны, быстрое вращение Юпитера позволяло надеяться, что на появляющихся из-за лимба районах столкновения какие-то следы всё же будут видны.

Фрагменты кометы взрывались с 16 по 22 июля 1994 г. На снимках, полученных в инфракрасных лучах (рис. 3), вспышки с температурой до 24000 К затмевали всю планету. Энергия, выделившаяся при ударе крупнейшего фрагмента G, была оценена как $2,5 \times 10^{22}$ Дж (6 млн водородных бомб, по 1 Мт в тротиловом эквиваленте каждая). На рисунках 3 и 4 можно видеть следы этих взрывов. Снимки получены с помощью телескопа им. Хаббла. Следы взрыва более тёмные, чем окружающий фон облаков.

Тонкое кольцо вокруг центра взрыва фрагмента G (третий снимок сверху на рис. 4) имеет размеры Земного шара. Фрагмент G входил с юга под углом 45°. Широкая тёмная дуга справа образована, по-видимому, продуктами выбросов, направленных в сторону удара. На снимках виден также след, оставленный фрагментом D, — тёмная точка слева от кольца. Другие фрагменты кометы также оставили цепь подобных, но меньшего размера следов на облачной поверхности Юпитера. По оценкам, взрывы происходили достаточно глубоко в атмосфере. Продукты взрыва в виде полусферы поднялись над лимбом планеты на высоту 3000 км и примерно через 20 мин превратились в полосу над горизонтом.

С помощью методов спектроскопии было установлено присутствие в продуктах взрыва большого количества серосодержащих соединений (например, дисульфида углерода, аллотропа S₂), в то время как в обычных наблюдениях сера на Юпитере не обнаруживается.

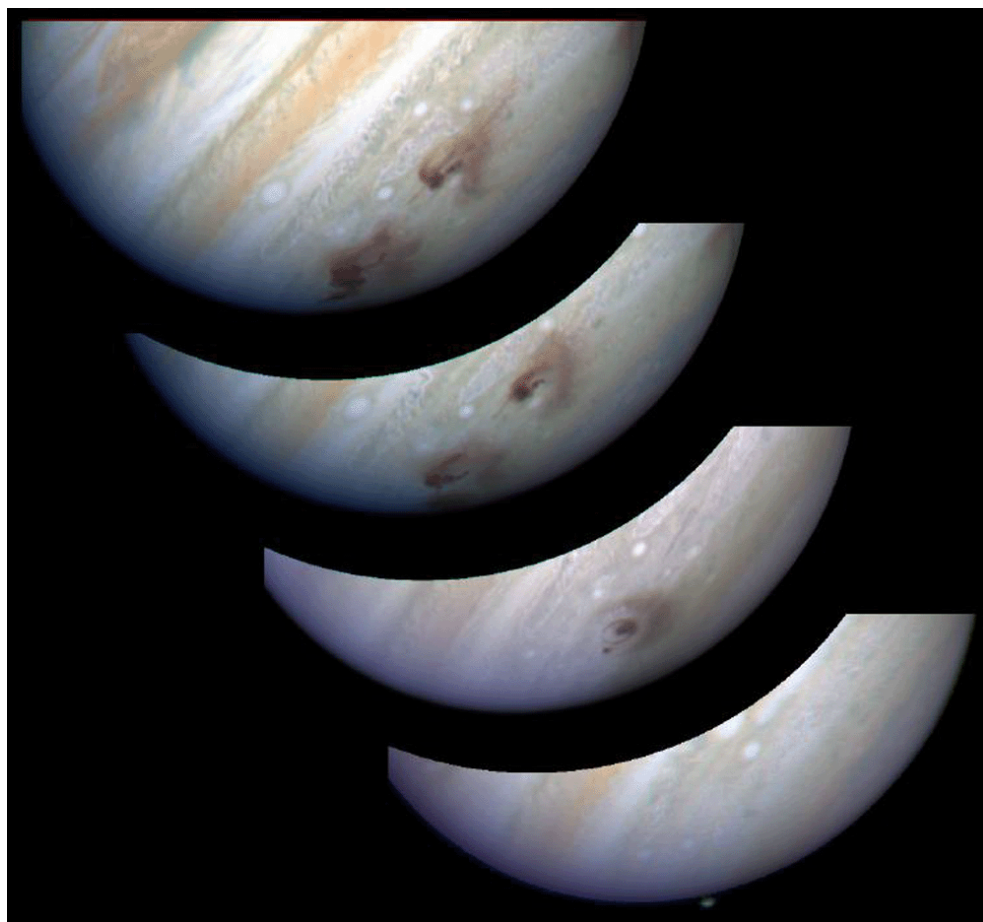


Рис. 4. Тёмные следы взрывов фрагментов кометы SL-9 на облачной поверхности Юпитера. (Снимки Института космического телескопа и NASA.)

Статьи о столкновении кометы SL-9 с Юпитером [11 – 13] останутся уникальным материалом надолго, возможно даже на века.

Но есть ещё одна сторона подобных событий: их вполне реальная опасность для Земли (хотя проблема опасности комет для Земли здесь специально не рассматривается). Именно столкновение сравнительно небольшой кометы с Землёй представляло собой широко известное событие "Тунгуска" (1908 г.) с энергией около $1,5 \times 10^{16}$ Дж [14]. Одна из гипотез [15] предполагает, что этим телом мог быть отколовшийся фрагмент крупной кометы Энке.

4. Комета Хартли-2

За прошедшие 17 лет после столкновения кометы SL-9 с Юпитером космические аппараты посетили пять ядер различных комет (рис. 5) и позволили исследовать многие происходящие на них явления. В полёте находится ещё несколько аппаратов для исследования комет, в частности аппарат "Розетта" [16] Европейского космического агентства с очень сложной программой предстоящего посещения крупной кометы Чурюмова – Герасименко в 2014 г.

Неправильная форма ядра присуща всем исследованным кометам. Сферическая форма может возникнуть, только когда масса небесного тела велика, а масса всех известных кометных ядер незначительна. Их форму ил-

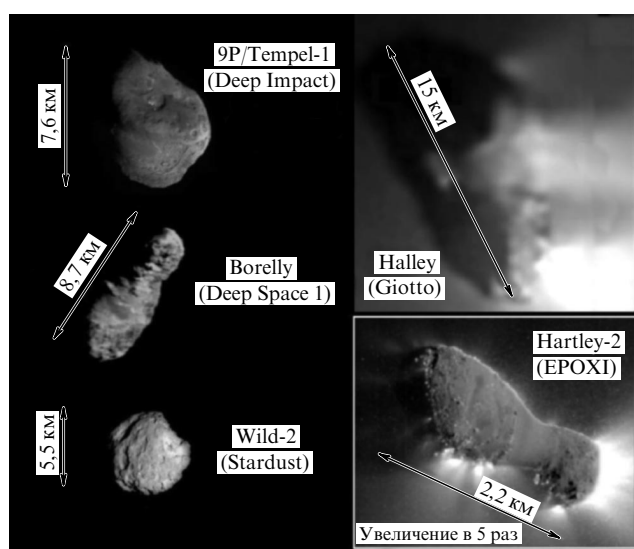


Рис. 5. Ядра исследованных комет: Темпель-1 (9P/Tempel-1), Борели (Borrelly), Вилд-2 (Wild-2), Галлея (Halley) и Хартли-2 (Hartley-2), приведённые в одинаковом масштабе (за исключением Хартли-2). На снимках в скобках указаны названия космических аппаратов, исследовавших эти кометы. (Снимки NASA и ESA.)

люстрирует рис. 5, на котором представлены все исследованные ядра. Аппараты застали их в разных фазах активности (на разном удалении от Солнца). Несмотря

на различие размеров, два ядра, Борели и Хартли-2, похожи друг на друга своей вытянутой формой. Ядра обычно покрыты очень тёмной коркой, которая остаётся после испарения летучих веществ. У кометы Хартли-2, например, поверхность отражает менее 3 % падающих на неё солнечных лучей [17], поэтому поверхность сильно нагревается и тепло проникает внутрь тела, что усиливает выброс летучих в местах разрушения корки. Ядро этой кометы намного меньше ядер ранее исследованных кометных тел — его максимальный размер всего 2,2 км [18].

Хартли-2 — это вторая комета, с которой встретился аппарат Deep Impact. Шесть лет назад, в июле 2005 г., Deep Impact исследовал ядро кометы Темпель-1 — другой кометы группы Юпитера, гораздо большей, чем Хартли-2. Для исследований был выбран метод сильного удара [19]. На ядро была направлена массивная (372 кг) медная болванка, движущаяся с большой скоростью, $10,2 \text{ км с}^{-1}$. Выделившаяся энергия составила 2×10^{10} Дж. При ударе образовался кратер диаметром 100 м и глубиной 20–30 м. Продукты удара исследовались дистанционно [20, 21]. Было установлено, что они включают в себя пылинки микрометровых размеров: смектиты; силикаты; карбонаты (в том числе ароматические полициклические гидрокарбонаты); сульфиды металлов и аморфный углерод. Средняя плотность ядра кометы Темпель-1 оказалась необычно низкой, меньше плотности воды. В оценках указывались следующие значения плотности: от $0,2$ до 1 г см^{-3} [22] и $(0,45 \pm 0,25) \text{ г см}^{-3}$ [23]. В работе [24] приводится значение $0,62 \text{ г см}^{-3}$.

Ядро кометы космическими средствами исследовалось дважды. Через шесть лет после миссии Deep Impact, 15 февраля 2011 г., новые исследования ядра кометы Темпель-1 были выполнены с помощью аппарата Stardust ("Звёздная пыль"; новое имя аппарата — NeXT (New Exploration of Tempel — "Новые исследования Темпеля")). Получены подробные снимки кратера, созданного ударником; уточнённое значение диаметра кратера составило 150 м.

С завершением своей миссии в 2005 г. аппарат Deep Impact оставался работоспособным. Было решено использовать его в рамках программы поиска экзопланет, и он был переименован в EPOCh (Extrasolar Planet Observation and Characterization — "Наблюдения и исследования внесолнечных планет"). Миссия к комете Хартли-2 была продолжением миссии DIXI (Deep Impact eXtended Investigation — "Исследования в продолжённом проекте Deep Impact") [25], что отразилось в ещё одном объединяющем переименовании аппарата в EPOXI.

Сближение оказалось успешным и позволило получить важные научные результаты. На рисунке 6 ядра комет Темпель-1 и Хартли-2 показаны в одинаковом масштабе. Ядро кометы Хартли-2 значительно меньше, но активность её намного выше. В ноябре 2010 г. аппарат Deep Impact/EPOXI сближился с ядром кометы Хартли-2 и передал снимки этого небольшого небесного тела, имеющего форму гантели с гладкой шейкой (рис. 7). При сближении аппарата Deep Impact с ядром кометы минимальное расстояние между ними составило 640 км.

Необычная форма ядра привлекла внимание многих исследователей. Автор настоящей статьи высказал предположение, что гладкая шейка образовалась под действием центробежных сил, к возникновению которых

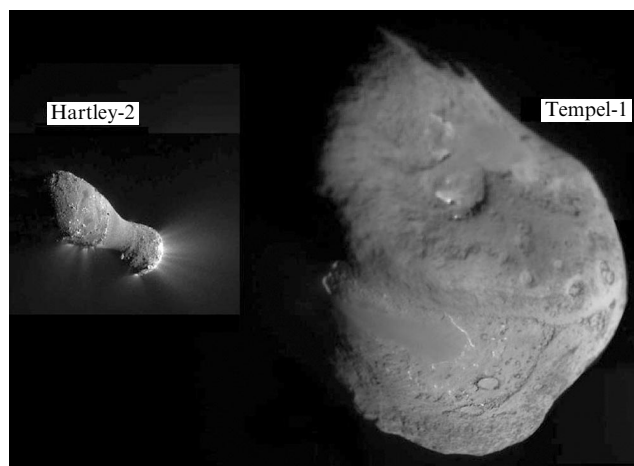


Рис. 6. Сравнение размеров ядер комет Хартли-2 и Темпель-1, которые исследовались аппаратом Deep Impact соответственно в 2010 и 2005 гг. (Снимки NASA.)

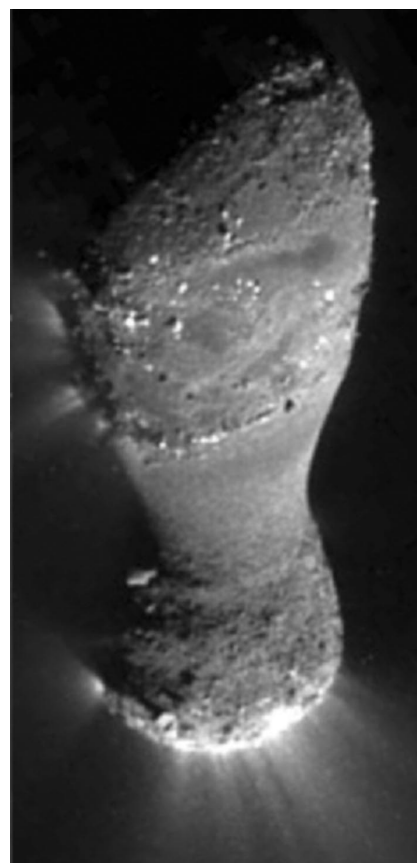


Рис. 7. Комета Хартли-2 (103P/Hartley-2), семейство Юпитера. Размер 2,2 км. Орбита: перигелий 1,08 а.е., афелий 5,6 а.е., период 6,4 года. Период вращения 18,1 ч. Оценка массы 3×10^{11} кг. 20 октября 2010 г. комета находилась на расстоянии 18 млн км от Земли. Ядро кометы выбрасывает струи водяного пара, других газообразных, пыль, снежинки и льдинки, которые образуют хвост кометы. Ось вращения, которая направлена примерно на читателя, проходит сквозь верхнюю часть, немного ниже её центра. Вращение создаёт центробежные силы, которые сформировали удлинённую шейку и стремятся разорвать ядро. Центробежным силам противостоят силы трения и гравитационные силы (взаимное притяжение крупных частей ядра). Силы невелики, но время их действия неограниченно. (Снимок NASA.)

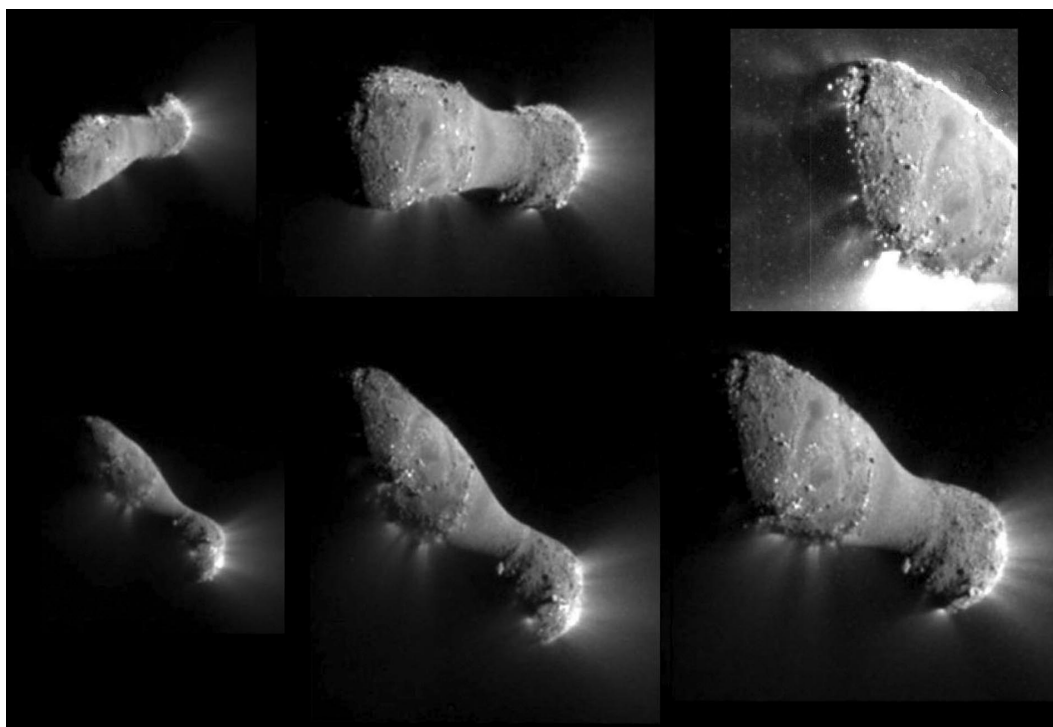


Рис. 8. Изображения ядра кометы Хартли-2 в разных положениях относительно аппарата показывают его более или менее симметричную форму, что облегчает расчёты. На правом верхнем снимке затенённая часть поверхности проступает на фоне газовых выбросов. (Снимки NASA.)

приводит вращение ядра. Были проведены расчёты, которые должны были показать, происходит ли медленное удлинение шейки гантели и возможно ли разделение ядра кометы на части.

Ядро кометы Хартли-2 намного меньше ранее исследованных кометных тел — его максимальный размер всего 2,2 км. Юпитер влияет на период обращения кометы Хартли-2, и уже несколько раз отмечалось изменение её периода, сейчас он составляет 6,46 года. Ядро кометы Хартли-2, в отличие от ядер других комет, обладает сравнительно правильной формой типа гантели с двумя неодинаковыми головками. Детали затенённой поверхности той части, которая расположена в верхней половине рис. 7, приведены на правом верхнем фрагменте рис. 8. В узкой части вытянутой фигуры находится сравнительно гладкий участок, пояс, резко отличающийся от других частей этого небесного тела (см. рис. 7, 8) мелкой структурой покрывающего материала. Узкая часть — шейка — почти не несёт на своей поверхности следов ударных событий, что можно рассматривать как свидетельство её относительной "молодости".

При сближении аппарата EROXI 4 ноября 2010 г. с Хартли-2 удалось получить 199 снимков разного качества, на которых ядро этой кометы можно видеть в разных положениях (см. рис. 8). Протяжённость шейки около 400 м. Понятие молодости или обновления поверхности кометных ядер, конечно, условно. Но на поверхности шейки не заметны ударные кратеры, появление которых за длительное время неизбежно и которые всегда видны на подобных небесных телах. А здесь их практически нет. Между тем кратеры диаметром до 100–200 м и другие неровности в сферических частях гантели хорошо видны. С другой стороны, при высокой актив-

ности кометы Хартли-2 за каждый её орбитальный период (перигелий на уровне орбиты Земли) с её поверхности испаряется слой, составляющий несколько дециметров, что должно как-то выравнивать поверхность.

В ноябре 2010 г. в сближении EROXI получены указания на значительные потери вещества маленьким ядром: оно выбрасывает столько же воды (в виде водяного пара), сколько и в 10 раз большая поверхность ядра кометы Темпель-1, и в несколько раз больше газа и пыли. На снимках с высоким разрешением видны многочисленные снежинки и льдинки, покидающие ядро кометы, а в наземных наблюдениях было зарегистрировано резкое увеличение выбросов цианидов (производных синильной кислоты). Косвенно на интенсивные потери летучих в истории кометы указывает уже упоминавшаяся чрезвычайно низкая отражательная способность поверхности.

Важно проследить, как связаны геометрические характеристики и форма ядра с его динамической эволюцией. Как отмечалось, отличие поверхности сравнительно гладкой шейки от поверхностей остальных частей ядра позволяет высказать гипотезу о том, что форма ядра кометы Хартли-2 указывает на происходящее в наши дни разрушение этого небесного тела. Ядро вращается вокруг оси, проходящей через центр масс. Вращение приводит к возникновению центробежных сил. Можно предположить, что под действием центробежных сил происходит медленное, но непрерывное удлинение шейки, которое должно завершиться разделением ядра. Этому препятствует притяжение (гравитация) между частями ядра и постепенное замедление его вращения из-за удлинения тела и потерь на трение в материале шейки.

Поскольку размеры ядра и некоторые другие характеристики измерены, можно провести необходимые

расчёты, подтверждающие или опровергающие эту гипотезу. На основе полученных результатов и расчёта момента инерции ядра, обладающего сложной формой, удаётся даже предсказать вероятное развитие дальнейших событий.

5. Что удаётся рассчитать

Даже такое небольшое тело, как ядро кометы Хартли-2, обладает огромной кинетической энергией орбитального движения. Другое дело — его вращение вокруг оси. Запас энергии вращающегося тела определяется его моментом инерции (который для такого малого небесного тела невелик) и квадратом скорости вращения. Ядро вращается медленно, период 18,1 ч. Энергия вращения ядра мала, всего $4,8 \times 10^8$ Дж (эквивалент 25 л автомобильного бензина). Но именно запас энергии вращения определяет, как показано ниже, будущую эволюцию ядра.

В расчёте определялись также центробежные и гравитационные усилия в шейке и соответственно напряжения растяжения и сжатия, объём ядра и его средняя плотность, положение барицентра и центра вращения. Ядро кометы по форме близко к телу вращения с осью z , направленной вдоль его большой оси. Разумеется, это геометрическая ось, а не ось вращения.

Вычисления объёма ядра и других его характеристик получаются более наглядными, если ядро разбить на несколько связанных частей (рис. 9). Фрагмент 1 представляет собой усечённый эллипсоид вращения, фрагмент 2 — часть эллипсоида, отделённая плоскостью, в которой находятся центр масс всего ядра и пересекающая этот центр ось вращения ядра. Насколько можно судить по последовательности опубликованных снимков, ось вращения примерно перпендикулярна оси z , проходит через центр масс, но не обязательно полностью совпадает с направлением x , как показано на рис. 9. Фрагмент 3 — это два примыкающих друг к другу усечённых конуса с переменной плотностью, фрагмент 4 — усечённая сфера. Считается, что каждый фрагмент образован телом вращения относительно оси z , что

удобно для интегрирования. Как видно из рис. 9, такая схема неплохо накладывается на изображение ядра.

Сведений о распределении плотности материала нет. Произвольно было принято, что плотность во всех фрагментах, кроме шейки, одинакова, а в шейке она линейно уменьшается до 0,6 от принятого значения. Размеры, которые определялись по снимкам, составили: размер эллипсоида вращения 1360×990 м; диаметр усечённой сферы 720 м; радиус в переходе к усечённому конусу 305 м; диаметр в узком сечении 3 шейки 450 м; диаметр в сечении, проходящем через вычисленное ниже положение общего центра масс, 880 м.

Результаты расчётов оказались следующими. Суммарный объём ядра составляет около 1 млрд кубометров, точнее $0,94 \times 10^9$ м³. В работе [17] была определена масса ядра кометы Хартли-2 — 3×10^{11} кг. Средняя плотность материала ядра при найденном объёме $0,94 \times 10^9$ м³ равняется всего 320 кг м⁻³ ($0,32$ г см⁻³).

Разброс значений средней плотности ядер комет (и астероидов) очень велик. Базой для сравнения в какой-то мере могут быть плотности астероидов, к которым относятся и вымершие кометы. Для исследованных тел более или менее типичной является плотность $1,8$ – 2 г см⁻³, как для спутника Марса Фобоса или астероида Итокава. Известны как значительно большие, так и меньшие плотности кометных ядер и астероидов. Так, 10 июля 2010 г. состоялось сближение аппарата "Розетта" со 100-километровым астероидом Лютеция и было установлено [26], что средняя плотность этого астероида достигает $3,2$ г см⁻³ (что превышает плотность гранита $2,5$ – $2,8$ г см⁻³). В то же время ядро кометы Темпель-1 имеет плотность всего $0,62$ г см⁻³. Но значение плотности $0,32$ г см⁻³ для ядра кометы Хартли-2 всё же представляется необычайно низким. Можно заподозрить, что это значение ошибочно (такое предположение рассматривается ниже). Вычисленное положение общего центра масс (см. рис. 9), как и ожидалось, смещено от центра эллипсоида и удалено на 955 м от точки 0.

Расчёты были построены так, чтобы их результаты не зависели от принятого значения плотности. Однако плотность становится определяющей, если требуется найти силы и напряжения в материале разных частей ядра. Центробежные силы растягивают ядро. При средней плотности 320 кг м⁻³ суммарные центробежные силы растяжения в сечении через общий центр масс при периоде вращения ядра 18,1 ч составляют $1,23 \times 10^6$ Н, а соответствующие напряжения — $2,0$ Н м⁻². В наиболее узком сечении шейки центробежные силы почти такие же, $1,15 \times 10^6$ Н, но напряжения в узком сечении намного выше — $7,2$ Н м⁻². Центробежные силы тем больше, чем выше плотность материала, и они зависят от квадрата скорости вращения (около 10^{-5} с⁻¹).

Растяжению препятствуют усилия сжатия, которые определяются суммарным притяжением фрагментов. В сечении, проходящем через общий центр масс, силы сжатия составляют $3,0 \times 10^6$ Н, а в наиболее узком сечении шейки — $1,0 \times 10^6$ Н. В первом случае усилия в три раза больше из-за близкого положения притягивающихся масс. Соответствующие напряжения сжатия в сечении через общий центр масс составляют примерно 5 Н м⁻², а в узком сечении — около 6 Н м⁻². В отличие от сил растяжения, силы сжатия зависят от квадрата плотности материала. (Более подробно результаты анализа состояния ядра кометы Хартли-2 представлены в работе [27].)

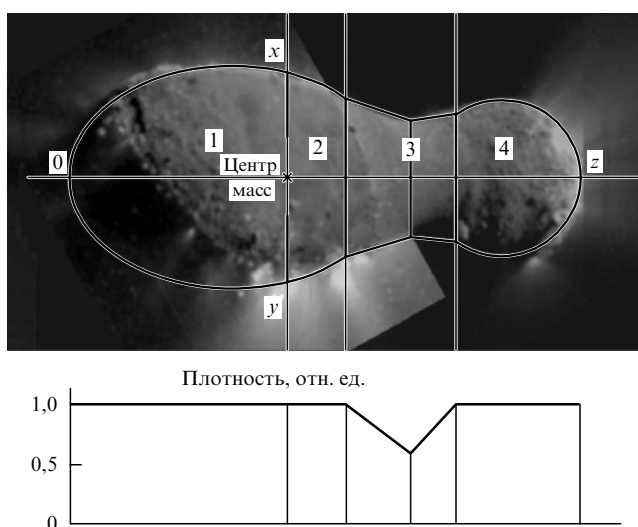


Рис. 9. Для расчётов ядро кометы Хартли-2, имеющее сравнительно симметричную форму, было разбито на фрагменты 1–4, что делает результаты более наглядными.

В неплотной среде даже столь малые напряжения за длительное время в состоянии вызвать постепенное удлинение шейки и в конце концов её разрыв. Материал шейки точно не известен, но так как плотность его мала и установлено, что ядро выбрасывает много водяного пара, можно предположить, что здесь пар частично конденсируется в иней или рыхлый снег.

6. О дальнейшей эволюции ядра кометы Хартли-2

Сравнение полученных значений характеристик ядра кометы Хартли-2 приводит к парадоксальному результату: если в шейке преобладают напряжения растяжения, то в сечении через общий центр масс, наоборот — напряжения сжатия, причём в первом случае превышение напряжений растяжения составляет 10 %, а во втором случае напряжения сжатия преобладают в 2,4 раза. Таким образом, вытянутая форма шейки действительно образовалась не случайно. Правая часть шейки и фрагмент 4 (см. рис. 8) удерживаются только небольшими силами трения в шейке. Без них фрагмент 4 должен был бы отделиться и отойти. Можно даже рассчитать, насколько далеко. На его удаление в гравитационном поле ядра будет израсходована основная часть энергии вращения ядра, которая приводилась выше: $4,8 \times 10^8$ Дж. Какая-то её часть уйдёт на преодоление сил трения в материале шейки. Эта величина неизвестна; но если потери на трение составят 10 %, то энергия вращения ядра будет полностью израсходована, когда фрагмент 4 удалится на расстояние 760 м, при потерях 50 % — на расстояние 316 м. Без потерь на трение он может удалиться на 920 м.

Предсказать, когда произойдёт разрыв, трудно, поскольку механические свойства шейки ядра неизвестны. Как отмечалось, процесс разрушения сопровождается замедлением вращения ядра. Поэтому точные измерения замедления вращения позволили бы предсказать вероятные временные рамки предстоящих событий. Но задача невыполнима, и не только потому, что малые размеры ядра кометы Хартли-2 не позволяют провести подобные измерения дистанционно. (В 2010 г. максимальный угол, под которым ядро было видно с Земли, составил всего 0,02 угловых секунды. Это практически предел даже для космической обсерватории. В следующем прохождении перигелия, которое должно произойти 20 апреля 2017 г., комета снова пройдёт далеко от Земли.) Главное заключается в том, что многочисленные газовые и пылевые выбросы беспорядочно влияют на период вращения, сокращая или удлиняя его. Нельзя не упомянуть также о том, что и орбитальный период кометы Хартли-2 не остаётся постоянным, так как на него влияют сближения с Юпитером. В 1971 г. комета прошла на расстоянии 0,085 а.е. от Юпитера, в результате чего её орбитальный период тогда уменьшился от 7,92 до 6,12 лет. Более перспективным в предсказании разрыва могло бы быть измерение продолжающегося удлинения ядра кометы.

Выше отмечалось, что очень низкая величина плотности ядра кометы Хартли-2 (320 кг м^{-3}) позволяет предположить, что плотность определена ошибочно и её значение должно быть больше. Чтобы рассмотреть такую возможность, примем, например, что средняя плотность составляет 10^3 кг м^{-3} . Тогда масса ядра

увеличится до $9,4 \times 10^{11} \text{ кг}$, но главное состоит в том, что соотношение между усилиями растяжения и сжатия сменится обратным. Напряжения значительно возрастают, а сжатие теперь превосходит растяжение в семь раз. Для того чтобы восстановилось их примерное равенство и образовалась шейка, гипотетическую угловую скорость вращения ядра необходимо увеличить в 2,6 раза, а период вращения ядра должен составлять менее 7 ч. Этот вывод настораживает, так как столь короткий период соответствует ранней эпохе так называемого изохронизма тел Солнечной системы [28]. Искать причину в катастрофических событиях также не приходится; потерянная за всё время существования энергия вращения несопоставимо мала по сравнению с потерями при соударениях тел подобной массы. Что касается изохронизма, то его эпоха относится к ранним стадиям эволюции Солнечной системы. Однако шейка отличается относительной "молодостью", поскольку на ней почти отсутствуют метеоритные кратеры. Невероятно, чтобы эта поверхность могла столь долго оставаться гладкой, без следов метеоритных соударений, которыми отличаются остальные части ядра.

Разрешение этого противоречия заключается именно в плотности материала. Дело в том, что усилия растяжения пропорциональны плотности, а силы сжатия, определяемые гравитацией, пропорциональны квадрату плотности, поскольку в произведении масс в законе тяготения плотность входит дважды. Поэтому гипотеза о плотности в 10^3 кг м^{-3} приводит к преобладанию сжатия, что противоречит наблюдаемому образованию шейки. Средняя плотность ядра кометы Хартли-2 действительно должна быть близка к $300-320 \text{ кг м}^{-3}$, а ядро кометы сегодня находится в стадии разрушения и, по видимому, удерживается только силами трения в узкой части шейки.

7. Шейка астероида Итокава

Ядро кометы Борели (см. рис. 5) похоже своей вытянутостью на ядро Хартли-2, но оно в четыре раза длиннее. Однако снимок сделан с большего расстояния, и различить на нём подробности, а затем провести расчёт не удаётся. Зато участок, напоминающий шейку кометы Хартли-2, можно видеть на астероиде Итокава — небесном теле другого класса. Следует ли ожидать разрыва этого астероида?

Орбиты астероидов занимают в Солнечной системе пояс, удалённый от Солнца на расстояния, в 2–4 большие, чем орбита Земли. Мелких астероидов несколько сотен тысяч. 10 ноября 2005 г. аппарат "Хаябуса", первенец японских космических миссий к астероидам, приблизился к маленькому астероиду Итокава (названному в честь Хидео Итокавы, одного из основателей японских исследований космоса) и даже коснулся его поверхности [29, 30]. К сожалению, одну из главных задач миссии — захватить грунт и доставить его Землю — выполнить не удалось. Когда 13 июля 2010 г. ловушку для грунта возвратили на Землю, она оказалась пустой. Но это была первая такая миссия, и не только японская. Удалось получить много интересных научных результатов.

Астероид Итокава имеет неправильную форму (рис. 10), для которой трудно подобрать простые геометрические аналоги, и его размеры всего $535 \times 294 \times 209 \text{ м}$. По длине астероид настолько мал, что его



Рис. 10. Астероид Итокава, исследованный в 2005 г. японским космическим аппаратом "Хаябуса". Наиболее широкая часть астероида на этом снимке около 300 м. (Снимок Японского аэрокосмического агентства (JAXA)).

можно было бы, например, поместить на Красную площадь (расстояние Исторический музей – собор Василия Блаженного равно 695 м). В отличие от плотности Хартли-2, средняя плотность Итокавы составляет почти $2 \times 10^3 \text{ кг м}^{-3}$, а поверхность его в 20 раз светлее. В перигелии астероид оказывается внутри земной орбиты, а в афелии уходит на 100 млн км за орбиту Марса.

Область перетяжки, напоминающая шейку кометы Хартли-2, видна в середине астероида (рис. 11). Интересно было провести расчёт напряжений, как в случае ядра кометы, и определить, насколько астероид устойчив к центробежным силам, тем более что его период вращения в 1,5 раза меньше, а центробежные силы при тех же условиях в 2,2 раза больше. Но значительно большими должны быть силы гравитации, так как его плотность в 6 раз выше.

Упрощённую геометрию частей астероида (с теми же объёмами, массами и их расположением) всё же удалось подобрать. Расчётная схема получается сложной и включает в себя небольшую среднюю часть (3) и два трёхосных эллипсоида (1, 2) (рис. 12). Главные оси эллипсоидов составляют угол 62° .

Полная масса астероида, несмотря на его небольшой объём, довольно велика, $3,51 \times 10^{10} \text{ кг}$ (1/3 массы ядра Хартли-2), и она распределена между большими его частями в отношении 3:1. Результаты расчёта показали, что состояние астероида устойчиво. Силы сжатия от суммарного гравитационного взаимодействия всех фрагментов, отнесённого к сечению xu , составляют $3,4 \times 10^5 \text{ Н}$, а напряжения — 20 Н м^{-2} . Центробежные силы растяжения в сечении xu равны $6 \times 10^5 \text{ Н}$, а напряжения — $3,5 \text{ Н м}^{-2}$, примерно в пять раз меньше сжатия. Из-за угла, под которым наклонены оси, наибольшие напряжения растяжения в сечении xu несколько выше, но не намного.

Иными словами, эволюция астероида Итокава не приведёт к катастрофе, если, конечно, не произойдут какие-нибудь столкновения. Стоит упомянуть, что суммарный момент инерции Итокавы из-за его малых размеров примерно в тысячу раз меньше, чем у кометы

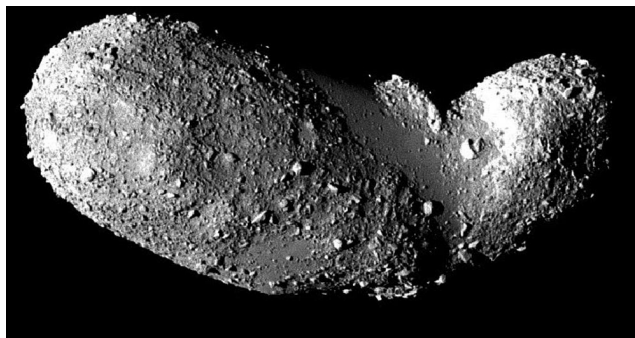


Рис. 11. Вид астероида с другой стороны (снимок JAXA). В центральной части астероида виден гладкий участок, напоминающий шейку ядра кометы Хартли-2.

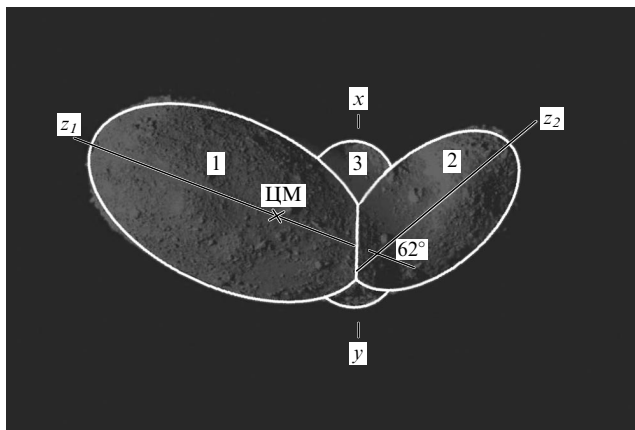


Рис. 12. Сложная форма астероида Итокава затрудняет вычисления, но выполнение расчётов всё-таки возможно на основе упрощённой схемы. Напряжения от центробежных сил в сечении xu в пять раз меньше напряжений сжатия. Итокава не разрушается.

Хартли-2. Энергия, запасённая во вращении астероида, не достигает и 10 млн Дж.

8. Заключение

Кометы и астероиды представляют собой чрезвычайно важный объект исследований, поскольку они сохранили характеристики, свойственные времени формирования Солнечной системы, а затем продолжали агрегацию пыли и газа из межпланетной среды. Механизмы образования Солнечной системы из газопылевых комплексов и возникновения её тел чрезвычайно сложны. Ядра комет сохраняют следы первичных процессов формирования Солнечной системы и в своём составе в значительной мере содержат исходные материалы, которые затем вошли в состав всех планет и малых тел Солнечной системы.

Физические свойства ядер комет как объектов исследований [31] лишь недавно стали доступны астрономам. Ядра по-своему эволюционируют, причём происходит это сейчас, здесь и вообще во всей нашей планетной системе. Что касается устойчивости их форм и целостности, то кометные ядра или астероиды разрушаются тем легче, чем меньше их средняя плотность, которая играет большую роль, чем их размеры. Таковы результаты непосредственных исследований небесных тел, развития теоретических представлений об их формировании и

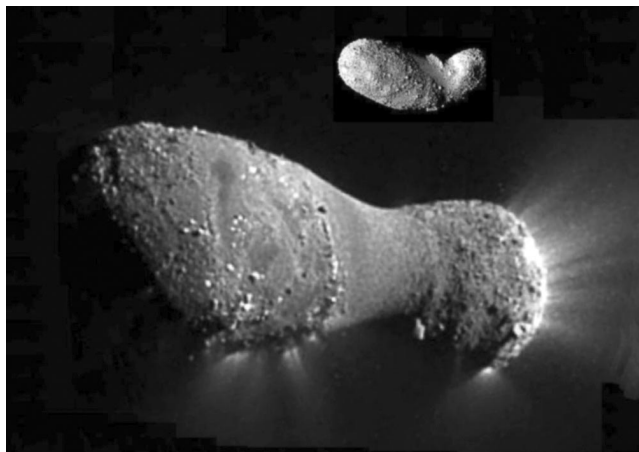


Рис. 13. Ядро кометы Хартгли-2 и астероид Итокава в одинаковом масштабе. (Снимки NASA и JAXA.)

результаты анализа новых, всё время пополняемых, данных об их наблюдениях.

Вычурные формы малых небесных тел (рис. 13) — астероидов и ядер комет — объясняются чрезвычайно сложной историей их образования. Запутанная повесть о возникновении Солнечной системы в наши дни раскрывает удивительные подробности [8].

Список литературы

1. Sagdeev R Z et al. *Nature* **321** 259 (1986)
2. Reinhard R *Nature* **321** 313 (1986)
3. Sagdeev R Z et al. *Nature* **321** 262 (1986)
4. Keller H U et al. *Nature* **321** 320 (1986)
5. Hirao K, Itoh T *Nature* **321** 294 (1986)
6. Simpson J A et al. *Nature* **321** 278 (1986)
7. Симпсон Дж А и др. *Астрон. вестн.* **27** 45 (1993) [Simpson J A et al. *Solar Syst. Res.* **27** 35 (1993)]
8. Зеленый Л М, Захаров А В, Ксанфомалити Л В *УФН* **179** 1118 (2009) [Zelenyi L M, Zakharov A V, Ksanfomaliti L V *Phys. Usp.* **52** 1056 (2009)]
9. Weissman P *Nature* **370** 94 (1994)
10. Клумов Б А и др. *УФН* **164** 617 (1994) [Klumov B A et al. *Phys. Usp.* **37** 577 (1994)]
11. Фортгов В Е и др. *УФН* **166** 391 (1996) [Fortov V E et al. *Phys. Usp.* **39** 363 (1996)]
12. Noll K S, Weaver H A, Feldman P D (Eds) *The Collision of Comet Shoemaker–Levy 9 and Jupiter: IAU Colloquium 156, Proc. of the Space Telescope Science Institute Workshop, Baltimore, May 9–12, 1995* (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2006)
13. West R, Bönnhardt H (Eds) *European SL-9/Jupiter Workshop, February 13–15, 1995, Garching bei München, Germany: Proc. (ESO Conf. and Workshop Proc., No. 52) (Garching bei München: European Southern Observatory, 1995)*
14. Герелс Т, Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **34** 41 (2000) [Gehrels T, Ksanfomaliti L *Solar Syst. Res.* **34** 37 (2000)]
15. Kresk L *Bull. Astron. Instit. Czech.* **29** 129 (1978)
16. Шульц Р *Астрон. вестн.* **43** 357 (2009) [Schulz R *Solar Syst. Res.* **43** 343 (2009)]
17. Lisse C M et al., Am. Astron. Soc., DPS Meeting, 41, 20.08, 121968 (2009)
18. NASA Press Release, November 4, 2010, <http://www.nasa.gov/audience/formedia/archives/2010-all-archives.html>
19. Клумов Б А и др. *УФН* **175** 767 (2005) [Klumov B A et al. *Phys. Usp.* **48** 733 (2005)]
20. A'Hearn M F et al. *Science* **310** 258 (2005)
21. A'Hearn M F, Combi M R *Icarus* **187** 1 (2007)
22. Richardson J E et al. *Icarus* **190** 357 (2007)
23. Davidsson B J R, Gutiérrez P J, Rickman H *Icarus* **187** 306 (2007)
24. Britt D T, Consolmagno G J, Merline W J, in *37th Annual Lunar and Planetary Science Conf., March 13–17, 2006, League City, Texas, USA*, Abstract No. 2214
25. Snodgrass C, Meech K, Hainaut O *Astron. Astrophys.* **516** L9 (2010)
26. Amos J "Asteroid Lutetia has thick blanket of debris", <http://www.bbc.co.uk/news/science-environment-11470851> (4 October 2010), BBC News
27. Ксанфомалити Л В *Астрон. вестн.* **45** 518 (2011)
28. Шор В А, в кн. *Малые планеты* (Под ред. Н С Самойловой-Яхонтовой) (М.: Наука, 1973) с. 283
29. Michel P et al. *Icarus* **200** 503 (2009)
30. Mahaney W C, Kapran B *Geomorphology* **108** 321 (2009)
31. Слюта Е Н *Астрон. вестн.* **43** 459 (2009) [Slyuta E N *Solar Syst. Res.* **43** 443 (2009)]

Disintegration of comet nuclei

L.V. Ksanfomaliti

Space Research Institute, Russian Academy of Sciences,
ul. Profsoyuznaya 84/32, 117997 Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (495) 333 23 22
E-mail: ksanf@iki.rssi.ru

The breaking up of comets into separate pieces each with its own tail was seen many times by the astronomers of the past. The phenomenon was in sharp contrast to the idea of the eternal and unchangeable celestial firmament and was commonly believed to be an omen of impending disaster, especially for comets with a tail stretching across half the sky. It is only currently that we have efficient enough space exploration tools to see comet nuclei and even — for the particular case of the small comet Hartley 2 in 2010 — to watch their disintegration stage. There are also other suspected candidates for disintegration in the vast family of comet nuclei and other Solar system bodies.

PACS numbers: **96.25**–f, 96.30.Cw, 96.30.Ys

DOI: 10.3367/UFNr.0182.201202c.0147

Bibliography — 31 references

Received 9 February 2011, revised 10 May 2011

Uspekhi Fizicheskikh Nauk **182** (2) 147–156 (2012)

Physics – Uspekhi **55** (2) (2012)