



РАЗРУШЕНИЕ НЕБЕСНЫХ АЙСБЕРГОВ

**Доктор физико-математических наук Леонид КСАНФОМАЛИТИ,
Институт космических исследований РАН.**

Кометы, хвосты которых иногда тянутся на невообразимые расстояния и украшают небо Земли, потеряли былую славу небесных вестников земных неприятностей. Космические аппараты проникают в их эфемерные атмосферы (комы) и исследуют ядра, обладающие размерами от долей километра до десятков километров.

Ядра комет по форме не отличаются от небольших астероидов, хотя принято считать, что их происхождение различно. Однако часть астероидов составляют так называемые вымершие кометы. И, вообще, граница между ними всё сильнее размывается, несмотря на то что только кометные ядра могут на 80% состоять из водяного льда — именно это позволяет называть их небесными айсбергами. Главные видимые отличия комет — сильно вытянутые орбиты и, конечно, их эффектные хвосты. С приближением к Солнцу (в перигелии) ядра комет разогреваются, становятся активными и выбрасывают массу водяного пара, углекислого газа и других летучих веществ, а также мелкие и крупные пылинки. В сближении с Солнцем многие кометы часто оказываются внутри орбиты Земли, а некоторые настолько близко к Солнцу, что из перигелия они уже не возвращаются. Орбиты короткопериодических комет в наибольшем удалении от Солнца (в афелии) уходят за орбиты Юпитера и Нептуна. Короткопериодическими называют кометы, период повторных

появлений которых меньше 200 лет. В их названии после номера присутствует буква Р. Большой группой комет «руководит» Юпитер, который своим тяготением иногда изменяет их орбиты.

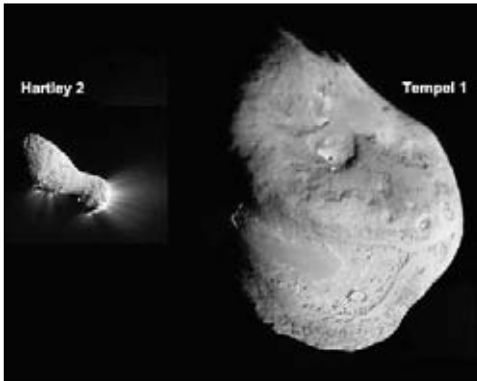
ИССЛЕДОВАНИЕ КОМЕТНЫХ ЯДЕР

К группе Юпитера относится и маленькая комета 103P/Хартли-2. В ноябре 2010 года аппарат Deep Impact («Глубокий удар», проект EPOXI, NASA) сблизился с ядром кометы Хартли-2 и передал снимки этого небольшого небесного тела, имеющего форму гантели с гладкой шейкой. При сближении аппарата Deep Impact с ядром кометы минимальное расстояние между ними составило 640 км. Необычная форма ядра привлекла внимание многих исследователей.

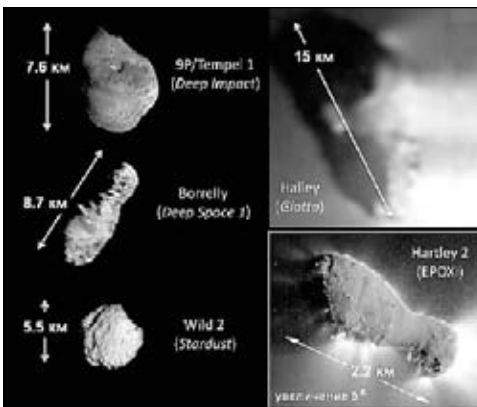
Подробное исследование кометных ядер с помощью космических аппаратов началось в 1986 году советской миссией ВЕГА. С тех пор аппараты посетили уже пять комет. Хартли-2 — вторая комета, с которой встретился



Ядро кометы 103P/Хартли-2 в действии. Ядро выбрасывает струи водяного пара, других газов, пыль, снежинки и льдинки, которые образуют хвост кометы. Ось вращения направлена примерно на читателя и проходит сквозь верхнюю часть, немного ниже её центра. Вращение создаёт центробежные силы, которые сформировали удлинённую шейку и неторопливо стремятся разорвать ядро. Центробежным противостоят силы трения и гравитационные силы (взаимное притяжение крупных частей ядра). Силы невелики, но времени для их действия сколько угодно. Фото NASA.



Сравнение размеров ядер комет Хартли-2 (слева) и Темпель-1, которые исследовал аппарат Deep Impact соответственно в 2010 и 2005 годах. Фото NASA.



аппарат Deep Impact: шесть лет назад, в июле 2005 года, он исследовал ядро кометы Темпель-1, другой кометы группы Юпитера, гораздо большей по размерам. Для исследований выбрали метод сильного удара. С большой скоростью на ядро направили массивную (372 кг) медную болванку (см. «Наука и жизнь» № 9, 2005 г.). При ударе образовался 100-метровый кратер глубиной 30 м. Выброшенные продукты столкновения исследовали дистанционно, с помощью приборов аппарата. Было установлено, что они включают пылинки микронных размеров, смектиты (слоистые силикаты, включающие молекулы воды), силикаты, карбонаты (в том числе ароматические полициклические гидрокарбонаты), сульфиды металлов и аморфный углерод. Средняя плотность ядра кометы Темпель-1 оказалась очень низкой, всего $0,62 \text{ г-см}^{-3}$, меньше плотности воды. Совсем недавно, 15 февраля этого года, через шесть лет после миссии Deep Impact, новые исследования ядра кометы Темпель-1 выполнили с помощью аппарата Stardust («Звёздная пыль»), который получил новое имя NeXT, New Exploration of Tempel, — «Новые исследования Темпеля».

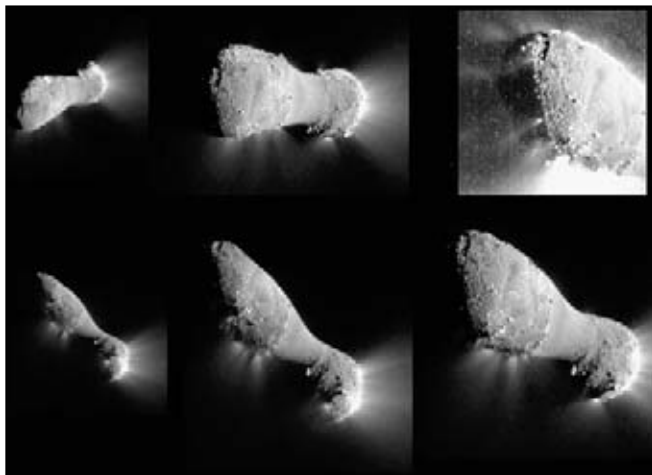
С завершением своей миссии в 2005 году аппарат Deep Impact остался работоспособным. Решили использовать его в рамках программы поиска экзопланет, переименовав в EPOCh (Extrasolar Planet Observation and Characterization — «Наблюдения и исследование внесолнечных планет»). Миссия к комете Хартли-2 была продолжением миссии DIXI (Deep Impact eXtended Investigation — «Исследования в продлённом проекте Deep Impact»), что отразилось в ещё одном переименовании аппарата в объединяющее название EPOXI. Сближение прошло успешно и дало интересные результаты.

АНАТОМИЯ КОМЕТНЫХ ЯДЕР

Неправильная форма ядра присуща всем исследованным кометам. Сферическая форма может возникнуть, только когда масса небесного тела велика, а до этого ядрам всех комет далеко. Аппараты застали их в разных фазах активности (на разных удалениях от Солнца). Несмотря на разницу в размерах, два из исследованных ядер похожи вытянутой формой. Ядра обычно покрыты очень тёмной коркой, оставшейся после испарения летучих веществ. Корка сильно нагревается Солнцем, тепло проникает внутрь, усиливая выброс летучих веществ в местах

Ядра исследованных комет: Темпель-1, Борелли, Вилд-2, Галлей и Хартли-2. Все, кроме Хартли-2, в одинаковом масштабе. В скобках указаны названия исследовавших их аппаратов. Ядро кометы Борелли по форме похоже на ядро Хартли-2, но в четыре раза длиннее. Снимок сделан с большего расстояния, и различить подробности на нём не удаётся. Фото NASA и ЕКА.

разрушения корки. У кометы Хартли-2 поверхность отражает меньше 3% падающих на неё солнечных лучей. Её ядро 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 его изменение; ныне период составляет 6,46 года. В отличие от остальных, её ядро обладает довольно правильной формой типа гантели с двумя неодинаковыми головками. В узкой части вытянутой фигуры находится сравнительно гладкий участок, пояс, резко отличающийся мелкой структурой покрывающего материала от других частей этого небесного тела. Автор настоящей статьи предположил, что гладкая шейка образовалась под действием центробежных сил, возникших из-за вращения ядра.



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. Фото NASA.

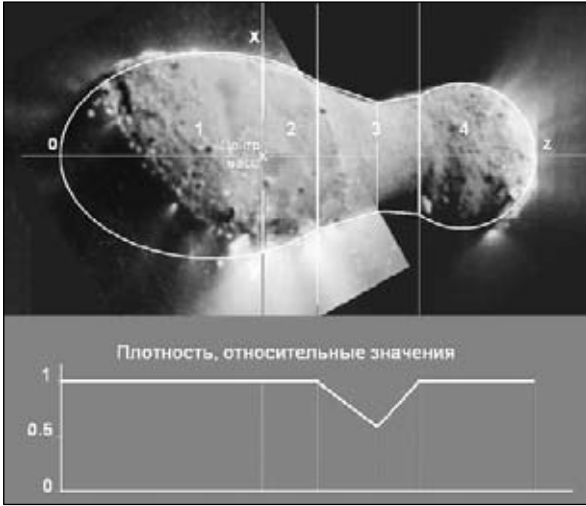
Узкая часть, перетяжка, или шейка, почти не несёт на своей поверхности следов ударов, что можно рассматривать как указание на её относительно «молодость». В сближении аппарата EPOXI 4 ноября 2010 года удалось получить 199 снимков разного качества, на которых ядро кометы Хартли-2 можно видеть в разных положениях. 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 таких небесных телах. В сферических частях гантели кратеры диаметром до 100—200 м и другие неровности хорошо видны. С другой стороны, при высокой активности кометы Хартли-2 за каждый орбитальный период (перигелий на уровне орбиты Земли — 1,08 а.е., афелий — 5,6 а.е.) с её поверхности испаряется слой толщиной несколько дециметров, что должно способствовать выравниванию.

В ноябре 2010 года EPOXI обнаружил значительные потери её вещества: маленькое ядро выбрасывает столько же воды (в виде пара), сколько 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, а наземные наблюдения зарегистрировали резкое увеличение выбросов цианидов (производных синильной кислоты). Косвенно на интенсивные потери летучих соединений в истории кометы указывает уже упоминавшаяся чрезвычайно низкая отражательная способность поверхности.

Интересно проследить, как связаны геометрические характеристики и форма ядра с его динамической эволюцией. Как уже отмечалось, различие поверхности сравнительно гладкой шейки и остальных частей ядра позволяет высказать гипотезу, 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 их действием происходит медленное, но непрерывное удлинение шейки, которое должно завершиться разделением фрагментов 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 и известны, удаётся провести расчёты, подтверждающие или отвергающие эту гипотезу. На основе полученных результатов и расчёта момента инерции ядра, обладающего сложной формой, можно даже предсказать вероятное развитие дальнейших событий.

ЧТО МОЖНО РАССЧИТАТЬ

Даже такое небольшое тело, как ядро кометы Хартли-2, обладает огромной кинетической энергией орбитального движения. Другое дело — «кувыркание», вращение вокруг оси. Запас энергии вращающегося тела определяется его моментом инерции (который для такого



Для расчётов ядро кометы Хартли-2, имеющее сравнительно симметричную форму, представили фрагментами 1—4, что делает результаты более наглядными. Считается, что плотность материала плавно уменьшается к узкой части шейки, но постоянна в других фрагментах.

небольшого небесного тела невелик) и квадратом скорости вращения. Вращается ядро медленно, один оборот за 18,1 часа. Запас энергии вращения определяет, как показано ниже, будущую эволюцию ядра. Из расчёта следует, что энергия вращения ядра составляет 480 млн джоулей. Цифра впечатляет, но это немного: столько же энергии содержится всего в 25 литрах автомобильного бензина!

Путём расчётов нашли также величины центробежных и гравитационных сил («усилия», в терминах сопромата и теормеха) в шейке и соответственно напряжения растяжения и сжатия, объём ядра и среднюю его плотность, положения барицентра и центра вращения. Форма ядра кометы близка к телу вращения с осью Z, направленной вдоль его большой оси. Разумеется, это просто геометрическая ось, а не ось вращения. Насколько можно судить по последовательности опубликованных снимков, ось вращения примерно перпендикулярна оси Z, проходит через центр масс, но не обязательно полностью совпадает с направлением XY. Вычисления объёма ядра и других его характеристик получают более наглядными, если ядро разбить на несколько связанных частей. Фрагмент 1 представляет собой усечённый эллипсоид вращения, фрагмент 2 — часть эллипсоида, отделённая плоскостью, на которой лежат центр масс всего ядра и пересекающая центр ось его вращения. Фрагмент 3 — это два сложенных усечённых конуса с переменной плотностью, фрагмент 4 — усечённая сфера.

Для удобства интегрирования считается, что каждый фрагмент образован телом вращения относительно оси Z. Как можно видеть, такая схема неплохо ложится на изображение ядра. Сведений о распределении плотности материала нет. Произвольно приняли, что плотность материала всех фрагментов, кроме шейки, одинакова, а в шейке она линейно уменьшается до 0,6 от принятого значения. Размеры эллипсоида вращения 1360×990 м, диаметр усечённой сферы 720 м, радиус в переходе к усечённому конусу 305 м, диаметр в самом узком сечении шейки 450 м, диаметр в сечении, проходящем через вычисленное ниже положение общего центра масс, 879 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ПРЕДСКАЗАНИЕ СУДЬБЫ КОМЕТЫ ХАРТЛИ-2

После завершения всей арифметики выяснились интересные подробности. Суммарный объём ядра составляет миллиард кубометров, точнее $0,94 \cdot 10^9 \text{ м}^3$. В ранее опубликованной работе была определена масса ядра кометы Хартли-2 — $3 \cdot 10^{11} \text{ кг}$. Средняя плотность материала ядра при найденном объёме равна всего $320 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ ($0,32 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Это ещё в два раза меньше весьма низкой плотности ядра кометы Темпель-1. Разброс значений средней плотности ядер комет (и астероидов) очень велик. Плотности астероидов, к которым относятся и так называемые вымершие кометы, в какой-то мере действительно могут служить основой для сравнения. Среди исследованных тел более или менее типична плотность $1,8\text{--}2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$, как для спутника Марса — Фобоса или астероида Итокава. Известны как значительно большие, так и меньшие плотности кометных ядер и астероидов. Так, 10 июля 2010 года состоялось сближение аппарата «Розетта» с астероидом Лютеция. Было установлено, что его средняя плотность достигает $3,2 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ (что превышает даже плотность гранита — $2,5\text{--}2,8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$). Вместе с тем плотность ядра кометы Темпель-1 всего $0,62 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$. Но величина $0,32 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ для ядра кометы Хартли-2 всё же представляется рекордной, удивительно низкой. Можно заподозрить, что она ошибочна; такое предположение рассмотрено ниже. Вычисленное положение общего центра масс, как и ожидалось, смещено от центра эллипсоида и лежит на расстоянии 955 м от точки O.

Расчёты были построены так, что их результаты не зависят от принятой плотности. Однако плотность становится определяющей, если требуется найти силы и напряжения в материале разных частей ядра.

Центробежные силы растягивают ядро. Оказалось, что при средней плотности $320 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ суммарные центробежные силы растяжения в сечении через общий центр масс при периоде вращения ядра 18,1 часа составляют $1,23 \cdot 10^6 \text{ Н}$, а соответствующие напряжения — $2,0 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$. В наиболее узком сечении шейки центробежные силы почти такие же — $1,15 \cdot 10^6 \text{ Н}$, но напряжения из-за меньшего диаметра намного выше — $7,2 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$. Центробежные силы пропорциональны плотности материала, а от скорости вращения (около 10^{-5} с^{-1}) зависят в квадрате.

Растяжению препятствуют усилия сжатия, которые определяются взаимным притяжением фрагментов. В сечении, проходящем через общий центр масс, силы сжатия составляют $3,0 \cdot 10^6 \text{ Н}$, а в наиболее узком сечении шейки — $1,0 \cdot 10^6 \text{ Н}$. В первом случае усилия в три раза больше из-за близкого положения притягивающихся масс. Соответствующие напряжения сжатия в сечении через общий центр масс равны $4,9 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$, а в узком сечении — $6,5 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$. В отличие от сил растяжения силы сжатия зависят от квадрата плотности материала.

Сравнение полученных значений указывает на парадоксальный результат: 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 — напряжений сжатия в 2,4 раза. Вывод: правая часть шейки и фрагмент 4 удержи-

ваются 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, значение которой приводилось выше: $4,8 \cdot 10^8 \text{ Дж}$. Какая-то её часть уйдёт на преодоление сил трения в материале шейки. Эта величина неизвестна; но если потери на трение составят 10%, энергия вращения ядра будет полностью израсходована, когда фрагмент 4 остановится на расстоянии 760 м; при потерях 50% — на расстоянии 316 м. Без потерь на трение он может отойти на 920 м.

НЕТ ЛИ ОШИБКИ В ОПРЕДЕЛЕНИИ ПЛОТНОСТИ?

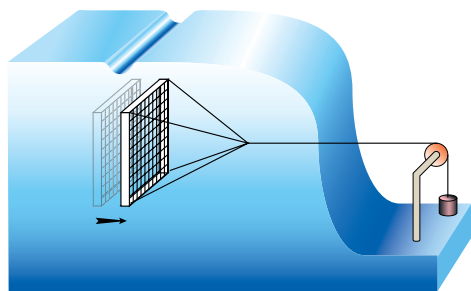
Таким образом, расчёт показывает, что ядро находится в состоянии приближающегося разрыва узкой части шейки и разделения на две части. Подобные динамические явления были известны, например разрыв ядра кометы Шумейкеров—Леви-9 и столкновение его обломков с Юпитером в 1994 году (см. «Наука и жизнь» № 11, 1994 г.). Но непосредственно наблюдать процесс разрушения ядра в спокойных условиях удалось впервые. Есть все основания поздравить группу М. А'Херна (Michael A' Hearn) из университета Мэриленда и администрацию NASA (США) с прекрасным результатом проекта EPOXI.

Предсказать, когда произойдёт разрыв, трудно, поскольку механические свойства

● ФИЗПРАКТИКУМ

СНЕГ КОМЕТНЫЙ И ЗЕМНОЙ

Прежде чем оценить усилия сжатия, интересно выяснить, могут ли столь малые напряжения за длительное время вызвать постепенное удлинение шейки и в конечном счёте 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 конденсируется в иней или рыхлый снег. Не претендуя на строгость результата, был поставлен эксперимент: в декабре в свежавывающий пушистый сухой снег поместили вертикальную сетку размером $10 \times 10 \text{ см}$ с крупными ячейками. К сетке прикрепили нить, прилагавшую к ней горизонтальное усилие $0,3 \text{ Н}$ (груз массой 30 г был при-



вязан к нити, перекинутой через блок), что раза в три больше полученных выше напряжений. Через два дня на поверхности снега над сеткой едва наметилось небольшое продольное углубление. К сожалению, на третий день температура повысилась (от минус 10 — 13°C до 0) и снег стал влажным, непригодным для дальнейших наблюдений. Можно, однако, предположить, что даже такие небольшие усилия за достаточно длительное время могут вызывать смещение сухой, рыхлой, пористой среды.

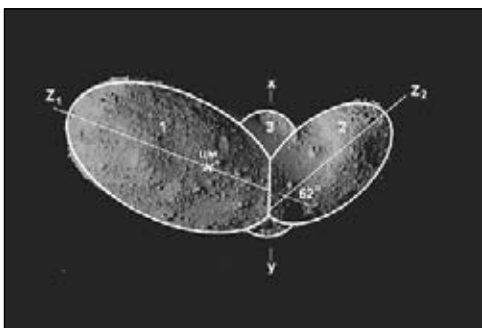


Астероид Итокава, исследованный в 2005 году японским космическим аппаратом Хаябуса. Наиболее широкая часть астероида на этом снимке около 300 м. Фото японского космического агентства JAXA.



Вид астероида Итокава с другой стороны. Размеры астероида Итокава настолько малы (535 × 294 × 209 м), что называть его небесным телом как-то не по чинцу. В центральной части астероида виден гладкий участок, напоминающий шейку ядра кометы Хартли-2. Фото JAXA.

Сложная форма астероида Итокава затрудняет вычисления, но выполнить расчёты всё-таки можно на основе упрощённой схемы. Напряжения от центробежных сил в сечении ХУ в пять раз меньше напряжений сжатия. Итокава не разрушается.



шейки ядра неизвестны. Как уже 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 выполнить подобные измерения дистанционно. В 2010 году максимальный угол, под которым ядро было видно с Земли, составил всего 0,02 угловой секунды. Это практически предел даже для космической обсерватории. В следующем прохождении перигелия, которое должно произойти 20 апреля 2017 года, комета снова пройдёт далеко от Земли. Но гораздо важнее, что многочисленные газовые и пылевые выбросы беспорядочно влияют на период, сокращая его или удлиняя. Нельзя не напомнить также, что и орбитальный период кометы Хартли-2 не остаётся постоянным, так как на него влияют сближения с Юпитером. В 1971 году комета прошла на расстоянии 0,085 а.е. от Юпитера, в результате чего её орбитальный период тогда уменьшился с 7,92 до 6,12 года. Более перспективным могло бы быть измерение продолжающегося удлинения ядра кометы.

Выше отмечалось: очень низкая плотность ядра кометы Хартли-2 ($0,32 \text{ г-см}^{-3}$) позволяет предположить, что плотность определена ошибочно и должна быть увеличена. Чтобы рассмотреть такую возможность, примем, например, что средняя плотность составляет 1 г-см^{-3} . Тогда масса ядра увеличится до $9,4 \cdot 10^{11} \text{ кг}$, но главное — соотношение между усилиями растяжения и сжатия изменится на обратное. Напряжения значительно возрастут, а сжатие превзойдёт растяжение в семь раз. Чтобы их примерное равенство восстановилось и образовалась шейка, гипотетическую угловую скорость вращения ядра необходимо увеличить в 2,6 раза, а период вращения ядра должен составлять менее семи часов. Такой вывод настораживает, так как столь короткий период соответствует эпохе так называемого изохронизма тел Солнечной системы, когда на ранних стадиях её существования период вращения всех планет был одинаков: 8—10 часов. Однако шейка отличается относительной «молодостью», поскольку на ней почти отсутствуют метеоритные кратеры. Искать причину в катастрофических событиях тоже не приходится; потерянная за всё время существования кометы энергия вращения составляет величину, несопоставимо малую по сравнению с потерями при соударениях тел подобной массы. Невероятно, чтобы эта поверхность могла столь долго оставаться гладкой, без следов метеоритных соударений, которыми отличаются остальные части ядра. Решение этого противоречия заключается именно в плотности материала. Дело в том, что усилия растяжения пропорциональны плотности,

Ядро кометы Хартли-2 (внизу) и астероид Итокава в одинаковом масштабе. Фото NASA и JAXA.

а силы сжатия, определяемые гравитацией, пропорциональны её квадрату, поскольку в произведение масс в законе тяготения плотность входит дважды. Поэтому гипотеза о плотности в $10^3 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ приводит к преобладанию сжатия, что противоречит образованию шейки. Средняя плотность ядра кометы Хартли-2 действительно должна быть близка к $300\text{—}320 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, а ядро кометы находится в стадии разрушения и, по-видимому, удерживается только силами трения в узкой части шейки.

ПРИЧУДЛИВЫЕ ФОРМЫ ИТОКАВЫ

Участок, напоминающий шейку кометы Хартли-2, можно видеть на астероиде Итокава — небесном теле другого класса. Орбиты астероидов занимают в Солнечной системе пояс, удалённый от Солнца на расстоянии в два-четыре раза больше, чем орбита Земли. Мелких астероидов сотни тысяч. В 2005 году, 10 ноября, аппарат Хаябуса, первенец японских космических путешествий к астероидам, отважно приблизился к маленькому астероиду Итокава и даже коснулся его поверхности. К сожалению, одну из главных задач миссии — захватить грунт и доставить на Землю — выполнить не удалось. Когда 13 июля 2010 года ловушку для грунта возвратили на Землю, она оказалась пустой. Но это первая в мире миссия такого рода, не только японская. Астероид назван в честь Хидео Итокавы, одного из основателей японских исследований космоса.

Астероид Итокава имеет неправильную форму, подобрать для которой простые геометрические подобию затруднительно. Размеры небесного тела всего $535 \times 294 \times 209 \text{ м}$. По длине астероид можно было бы уложить на Красную площадь (её длина от Исторического музея до собора Василия Блаженного 695 м). В отличие от Хартли-2, средняя плотность Итокавы почти $2 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, а поверхность в 20 раз светлее. В перигелии астероид оказывается внутри земной орбиты, а в афелии уходит на 100 млн км за орбиту Марса.

Район перетяжки, напоминающий шейку кометы Хартли-2, виден в середине астероида. 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 короче, а центробежные силы при тех же условиях в 2,2 раза больше. Но значительно большими (относительно, конечно) должны быть силы гравитации, так как его плотность в шесть раз выше.

Упрощённую геометрию частей астероида (с теми же объёмами, массами и их располо-



жением) всё же удалось подобрать. Расчётная схема получилась сложной и включила небольшую среднюю часть 3 и два трёхосных эллипсоида 1, 2. Угол между главными осями эллипсоидов составляет 62° . Несмотря на небольшой объём, полная масса астероида довольно велика — $3,51 \cdot 10^{10} \text{ кг}$ и делится 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 XY, составляют $3,4 \cdot 10^5 \text{ Н}$, а напряжения — $20 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$. Центробежные силы растяжения в сечении XY равны $6 \cdot 10^5 \text{ Н}$, а напряжения — $3,5 \text{ Н}\cdot\text{м}^{-2}$, то есть в пять раз меньше сжатия. Из-за угла, под которым оси наклонены, наибольшие напряжения растяжения в сечении XY несколько больше, но незначительно. Иными словами, судьба астероида Итокава беспокоества не вызывает, 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 Хартли-2. Энергия, запасённая во вращении астероида, не достигает и 10 млн Дж — меньше, чем в 1 л автомобильного бензина.

Выводы хотя и не очевидны, но тривиальны. Небесные тела, вроде кометных ядер или астероидов, разрушаются тем легче, чем меньше их средняя плотность, которая играет большую роль, чем их размеры.

Вычурные формы малых небесных тел, астероидов и ядер комет объясняются чрезвычайно сложной историей их образования. Запутанная повесть о возникновении Солнечной системы в наши дни раскрывает удивительные подробности. Таковы результаты непосредственных исследований небесных тел, развития теоретических представлений об их формировании и потока открытий всё новых и новых внесолнечных планет.