

Как долго живет комета?

С.ВАРЛАМОВ

ПЛАНЕТЫ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ обычно разделяют на две большие группы. Ближайшие к Солнцу планеты Меркурий, Венера, Земля и Марс образуют земную группу, химический состав поверхности этих планет примерно одинаков. Планеты-гиганты Юпитер, Сатурн, Нептун и Уран, по наблюдениям издалека, имеют в составе своей «поверхности» много водорода и гелия. Существует также большое количество малых планет (астероидов), которые по своему химическому составу не сильно отличаются от планет земной группы. Иногда в окрестность Солнца, занятую планетами земной группы, залетают кометы, их состав во многом отличается как от планет-гигантов, так и от планет земной группы. Существует гипотеза, согласно которой за пределами орбиты Плутона в Солнечной системе находится

огромное количество малых небесных тел – так называемое облако Оорта. Тела вращаются там вместе с пылью и газом, как правило, в том же направлении вокруг Солнца, что и большие планеты. Они движутся очень медленно, но иногда, пролетая мимо друг друга на небольшом расстоянии, могут значительно изменить свою скорость по направлению. Если одно из тел в результате такой встречи передаст другому значительную часть своего момента импульса относительно Солнца, то само оно попадет на другую орбиту, которая проходит вблизи Солнца. Такое тело, как говорят, сваливается из облака Оорта в окрестность Солнца. В зависимости от величины своей скорости на большом расстоянии от Солнца, тело может стать «одноразовой» или длиннопериодической кометой. Пролетая вблизи какой-нибудь из боль-

ших планет, такое тело может снова изменить свою скорость (совершить гравитационный маневр) и стать кометой со сравнительно небольшим периодом, например как у кометы Галлея.

Астрономические наблюдения спектров излучения хвостов комет дают основания считать, что ядра комет составлены из летучих веществ, например воды, метана, аммиака. Самостоятельным и весьма интересным является вопрос о природе существенных различий в химическом составе планет-гигантов, планет земной группы и комет. Однако оставим его на будущее. А пока попытаемся найти ответ на другой вопрос: как долго живет ледяное ядро кометы? Велико или мало время его жизни по сравнению со временем существования Солнечной системы?

Представим себе, что на круговой орбите с радиусом, равным половине расстояния от Земли до Солнца (0,5 а.е.), появилась ледяная комета, имеющая форму шара с начальной температурой 0 К и начальным радиусом 1 км. Пусть наша комета достаточно быстро вращается вокруг оси, перпендикулярной плоскости орбиты. Будем считать, что большая часть (75%) солнечной радиации отражается от поверхности кометы. Оценим время жизни такой кометы, если никаких катастрофических столкновений с ней не произойдет.

Молекулы воды, оторвавшиеся от поверхности льда, могут удерживаться собственным гравитационным полем кометы только в том случае, если скорость их теплового движения во много раз меньше второй космической скорости $v_{II} = \sqrt{2GM/R}$. Для кометы выбранных нами размеров эта скорость равна примерно 0,7 м/с, поэтому ясно, что гравитационное притяжение кометы не смо-



Комета Хейла–Боппа с очень мощными хвостами: пылевым (розовый) и газовым (голубой)

жет удерживать молекулы воды, оторвавшиеся от ее поверхности. Иными словами, атмосферы вокруг кометы не будет. Покинувшие поверхность кометы молекулы практически никогда не возвращаются обратно.

Ясно, что наибольший поток солнечной радиации будет приходиться на единицу поверхности кометы вблизи ее экватора. Так называемая солнечная постоянная, т.е. мощность солнечного излучения, падающего перпендикулярно на площадку в 1 м^2 на Земле, равна $W = 1,36 \text{ кВт}$. Такая же мощность будет поглощаться каждым квадратным метром льда вблизи экватора кометы. Дело в том, что за счет приближения кометы к Солнцу поток излучения увеличивается в 4 раза, но 75% этого потока отражается поверхностью.

Средняя мощность, приходящаяся на 1 м^2 поверхности вблизи экватора кометы и усредненная за большое время, будет равна $W/\pi = 433 \text{ Вт}$. Обоснование такой оценки довольно простое: выберем полосу шириной $h = 1 \text{ м}$, проходящую по всему экватору. Эта полоса соби-

рает солнечный свет с площади $h \cdot 2R$, а полная площадь этой полосы равна $h \cdot 2\pi R$.

Рассмотрим следующую ситуацию. Как только комета появляется на орбите, она освещается Солнцем, и температура ее поверхности начинает повышаться. Внешние слои льда, постепенно прогреваясь, передают тепло и внутренним слоям. По мере разогрева поверхности все большую роль начинает играть рассеяние тепла в окружающее пространство. Расход тепла льдом, нагретым на поверхности кометы, происходит по нескольким причинам. Первая из них – испарение льда, вторая – тепловое излучение, третья – прогрев внутренних областей (тепло, полученное внутренними областями кометы, в конце концов будет потрачено на то, чтобы испарять лед с ее поверхности или на тепловое излучение).

Оценим среднюю температуру, которая может установиться на поверхности кометы через некоторое достаточно большое время после ее появления на орбите. Ориентироваться будем на среднюю температуру поверхности Земли, равную примерно 290 К. Земля теряет энергию в основном за счет теплового излучения. Поверхность Земли больше чем на 70% покрыта водой, и поглощает Земля на единицу площади в среднем столько же, сколько наша комета, поэтому ясно, что выше 290 К средняя температура поверхности кометы быть не может.

Лед обладает плохой теплопроводностью, поэтому поверхность кометы вблизи экватора быстро прогревается. Коэффициент теплопроводности льда равен $2,2 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$. Для того чтобы отводить все тепло, выделяющееся на поверхности кометы вблизи экватора, нужно, чтобы скорость изменения температуры с глубиной (градиент темпера-

туры) равнялась $200 \text{ К}/\text{м}$. Предположим, что прогревается только слой льда толщиной $290/200 \text{ м} \sim 1,5 \text{ м}$. Оценим время, за которое этот слой льда может прогреться до температуры $290/2 \text{ К}$. При заданном градиенте температур ($200 \text{ К}/\text{м}$) в куб изо льда с ребром $A = 1,5 \text{ м}$ перпендикулярно одной из его граней поступает мощность излучения, равная приблизительно $A^2 \cdot 430 \text{ Вт}$. На нагрев этого куба требуется количество теплоты $Q = c\Delta TM$. Из справочных данных теплоемкость льда $c = 2100 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, разность температур (средняя от 0 до 290 К) $\Delta T \approx 150 \text{ К}$, а масса куба $M \approx 3000 \text{ кг}$. Время, необходимое для прогрева такого куба, составляет около 10^6 с , что чуть больше 10 суток. За это время градиент температуры существенно уменьшится, и поток тепла внутрь кометы перестанет компенсировать поступление тепла на его поверхность. Известно, что время жизни кометы гораздо больше 10 суток, поэтому при оценке температуры ее поверхности можно не учитывать поток тепла внутрь кометы.

Мощность теплового излучения с поверхности площадью S равна $\alpha S\sigma T^4$. Здесь

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$$

– постоянная Стефана–Больцмана, T – температура поверхности, а символом α обозначен коэффициент, характеризующий отличие излучающего тела от абсолютно черного тела. Для нашего случая этот коэффициент оказывается порядка 1: дело в том, что комета поглощает излучение Солнца в видимом диапазоне, а излучает в диапазоне инфракрасных волн. Отсюда следует, что температура была бы как раз равна 290 К!

Однако мы совсем не учли потери тепла, связанные с испарением молекул с поверхности. Количество молекул, испаряющихся с единицы поверхности за единицу времени, можно оценить, зная давление насыщенного пара данного вещества при выбранной температуре: $p = nkT$. Количество молекул, покидающих поверхность тела, граничащую с насыщенным паром, по порядку величины равно числу ударов молекул пара о поверхность. Представим себе, что каждая ударившаяся о поверхность молекула



Изображение ядра кометы Галлея, полученное 14 марта 1986 года европейским межпланетным зондом «Джотто» с расстояния 6500 км за 95 с до момента наибольшего сближения на расстоянии 596 км. Ядро кометы имеет неправильную форму, его поверхность очень темная: она отражает всего 3% падающего на нее света. Хорошо видно, что в двух местах поверхность взломана давлением испаряющегося вещества и с нее уходят мощные газовые потоки

прилипает к ней. Тогда ровно такое же количество молекул должно отрываться от поверхности и покидать ее за то же время (на самом деле количество покидающих поверхность молекул в несколько раз меньше, это связано с тем, что не все молекулы сразу после удара прилипают к поверхности – большинство упруго отскакивают от поверхности). Каждая испарившаяся с поверхности нашей кометы молекула уносит с собой энергию, которая потребовалась ей для отрыва от соседок, и вдобавок среднюю тепловую энергию, соответствующую данной температуре поверхности. Над поверхностью кометы нет атмосферы, поэтому пар не совершает работы по расширению в атмосфере. С единицы поверхности кометы каждую секунду уносится количество теплоты

$$W = \left(\frac{\beta}{N_A} \right) \frac{p}{kT} \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \frac{p\beta\sqrt{3}}{\sqrt{RTM}} \approx$$

$$\approx 1,6 \cdot 10^5 \frac{p}{\sqrt{T}} \quad (\text{в единицах СИ}),$$

где N_A – постоянная Авогадро, $\beta = 3,6 \cdot 10^4$ Дж/моль – молярная теплота парообразования воды (и льда тоже), M – ее молярная масса.

Воспользуемся экспериментальными

T, K	143	152	161	171	183	197
$\lg(p/p_{\text{атм}})$	-11	-10	-9	-8	-7	-6
T, K	212	231	253	281	319	373
$\lg(p/p_{\text{атм}})$	-5	-4	-3	-2	-1	0

ми данными о зависимости давления насыщенного пара от температуры:

T, K	143	152	161	171
$W, \text{Вт/м}^2$	0,013	0,13	1,3	12,3
T, K	183	197	212	
$W, \text{Вт/м}^2$	120	1150	11000	

и проведем расчет зависимости потерь тепла, связанных с испарением воды, от температуры:

Оценки показывают, что на поверхности кометы вблизи ее экватора должна установиться температура между 183 и 197 К (интересен воп-

рос: как будет изменяться температура поверхности от времени «суток» на комете?). При таких температурах потери на излучение с 1 м^2 составляют от 70 Вт при 183 К до 92 Вт при 197 К. Поэтому необходимо признать, что главным механизмом расхода тепла с поверхности кометы будет испарение. Оно обеспечивает, как видно, около 80% всех потерь.

Оценим время жизни ледяной кометы, если потери тепла обусловлены только испарением с ее поверхности. Очевидно, что испарение в экваториальной зоне идет значительно быстрее, чем на полюсах кометы. В результате такого неравномерного испарения она приобретает вытянутую вдоль оси вращения форму. Скорость уменьшения размеров кометы на экваторе не зависит от размеров кометы, а определяется балансом энергии, полученной от Солнца и потерянной за счет испарения, и равна

$$WM/(\pi\beta r) \approx 2 \cdot 10^{-7} \text{ м/с.}$$

Это означает, что радиус экваториальной зоны кометы уменьшается (в среднем) на $2 \cdot 10^{-7}$ м за каждую секунду. Чтобы комета полностью испарилась, требуется около $2,5 \cdot 10^9$ с. Таким образом, наша комета может прожить около 80 лет! По меркам Солнечной системы это совсем немного.

Реально существующие ледяные кометы, конечно же, не попадают на круговую орбиту вокруг Солнца. Периодические кометы большую часть времени проводят на значительном удалении от нашего светила. Однако именно в то время, когда они находятся на сравнительно небольших расстояниях от Солнца, они сильно теряют в массе. Если бы комета Галлея имела ледяное ядро диаметром около 10 км и из своего 80-летнего периода находилась на расстоянии 0,5 а.е. от Солнца лишь 0,3 года, то для полного ее испарения потребовалось бы только 1300 оборотов – всего-то каких-то 100 тысяч лет, что в масштабах времени



Астероид Гаспра. Вероятно, так выглядят ядра комет после испарения из них летучих веществ

жизни Солнечной системы (5 миллиардов лет) ничтожно мало. Поэтому кометы и не появляются на небе каждую ночь (они не могут накопиться в большом количестве).

Появление кометы с периодом, сравнимым с периодами обращения больших планет вокруг Солнца, редкое событие, потому что требуется благоприятное стечение обстоятельств, при которых тело, пролетая в окрестности Солнца, должно испытать сильное воздействие одной из больших планет. Планета должна так изменить траекторию движения тела, чтобы из длиннопериодической или одноразовой кометы получилась короткопериодическая. Какова вероятность такого события? Это отдельный интересный вопрос.

Если бы сейчас на небе появлялась в среднем за десять лет одна комета, похожая по характеристикам на комету Галлея, это означало бы, что одновременно существуют около десятка тел, которые периодически появляются вблизи Солнца и видны как кометы. Поскольку время жизни одной такой кометы порядка 100 тысяч лет, отсюда следует вывод, что частота появления таких комет из облака Оорта примерно одна за десять тысяч лет и что за время существования Земли появилось и успело испариться около Солнца примерно полмиллиона комет типа кометы Галлея.

Иллюстрации к статье и подписи к ним предоставлены В.Сурдиным