

УДК 523.64

С. В. Харчук¹, П. П. Корсун¹, Г. Микуш²

¹Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27

²Обсерватория Крни Врх, Словения

Модельный анализ пылевого хвоста кометы Хейла—Боппа

Представлены результаты динамического моделирования процесса формирования пылевого хвоста кометы C/1995 01 (Хейла—Боппа). Для построения модели пылевого хвоста были прослежены траектории $2 \cdot 10^6$ пылевых частиц. Их размеры, направления вылета, моменты вылета и начальные скорости задавались с помощью алгоритма Монте-Карло. Полученный трехмерный модельный хвост был спроецирован на небесную сферу для сравнения с данными наблюдений. Было воспроизведено распределение яркости в пылевом хвосте кометы для трех разных дат с близкими по значению модельными параметрами. Согласно нашим модельным исследованиям наблюдаемые хвосты могли быть сформированы частицами размерами от 0.3 до 8.0 мкм, скорости вылета которых составляли от 0.155 до 0.670 км/с с экспоненциальным распределением по размерам с показателем степени -3.6...-3.7. Показано, что учет процесса фрагментации частиц приводит к заметному улучшению результатов моделирования.

МОДЕЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПИЛОВОГО ХВОСТА КОМЕТИ ХЕЙЛА—БОППА, Харчук С. В., Корсун П. П., Микуш Г. — Представлено результати динамічного моделювання процесу формування пилового хвоста комети C/1995 01 (Хейла—Боппа). Для побудови моделі пилового хвоста були простежені траєкторії $2 \cdot 10^6$ пилових частинок. їхні розміри, напрями, моменти вильоту та початкові швидкості були задані за допомогою алгоритму Монте-Карло. Отриманий тривимірний модельний хвіст був спроектований на небесну сферу для порівняння з даними спостережень. Згідно з нашими модельними дослідженнями спостережувані хвосты могли бути сформовані частинками розмірами від 0.3 до 8.0 мкм, швидкості вильоту яких становили від 0.155 до 0.670 км/с з

експоненціальним розподілом по розмірах з показником степеня -3.6...-3.7. Показано, що врахування процесу фрагментації частинок призводить до помітного покращення результатів моделювання.

MODEL ANALYSIS OF THE DUST TAIL OF THE COMET HALE—BOPP, by Kharchuk S. V., Korsun P. P., Mikuz H. — Our results of dynamic simulation for the dust tail formation of the comet C/1995 O1 (Hale—Bopp) are presented. To simulate the dust tail, the trajectories of $2 \cdot 10^6$ dust particles were traced. The sizes, ejection moments, outflow directions and velocities of the dust particles were defined by the Monte Carlo algorithm. The obtained three-dimensional tail was projected on the sky plane to compare it with the observed images. The brightness distribution in the comet tail was fitted to similar model parameters for three different dates. According to our model experiments the observed tails could be formed by particles with sizes from 0.3 to 8.0 μm , ejection velocities from 0.155 to 0.670 km/s and power index of the exponential size distribution from -3.6 to -3.7. It is shown that taking into account fragmentation processes of the particles results in a noticeable improvement of the simulation results.

ВВЕДЕНИЕ

Комета Хейла—Боппа была открыта Аланом Хейлом и Томасом Боппом 23 июля 1995 г. Значительная активность кометы способствовала ее открытию на расстоянии 7.1 а. е. от Солнца и долгосрочному мониторингу после прохождения перигелия вплоть до сегодняшних дней. Вне сомнений, эта комета является одной из самых изученных долгопериодических комет.

Отношение массы пыли к массе газа приблизительно равно пяти [8, 11]. Согласно различным источникам скорости пылинок составляли 0.40—0.67 км/с. Так, в работе [3] по изучению изображений дуговых образований в атмосфере кометы, охватывающих расстояния от Солнца 4.12—0.9 а. е., получено значение 0.67 ± 0.07 км/с. Набор светофильтров охватывал диапазон ближнего ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного излучения. В работе [6] приведено значение скорости пыли 0.41 ± 0.05 км/с, найденное по расширяющимся дуговым образованиям на изображениях, полученных поляризационным методом. Использовались светофильтры в видимом диапазоне; комета находилась на расстояниях 4.1—1.0 а. е. от Солнца. В работе [9] приведена оценка 0.45—0.60 км/с; изучались ПЗС-изображения, полученные с использованием светофильтров в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне, когда комета находилась около перигелия. Наконец, в работе [11] получено значение для скорости расширяющейся пыли, равное 0.4 км/с. Исследовались дугообразные структуры в комете по инфракрасным и оптическим изображениям 1996 и 1997 гг.

Наибольший вклад в пылевой хвост кометы дают аморфный углерод, оливин и пироксен, а также сульфид железа [12]. На основании косвенных признаков можно сделать также заключение, что комета Хейла—Боппа имеет значительное содержание частиц малых размеров, которые в начале своего движения были включены в большие, сильно пористые агрегаты [6]. В работе Мина и др. [12] на основании спектроскопических наблюдений кометы, находящейся на расстоянии 2.8 а. е. от Солнца, оценены значения эффективного радиуса пылинок $r_{эф} = 1.0$ мкм и индекса закона распределения частиц по размерам $a = -3.0$. Согласно данным Баумана и др. [2] радиусы пылевых частиц в хвосте кометы изменяются в пределах 0.01—10 мкм при $a = -2.8$ (для расстояний от Солнца 2.8—3.0 а. е.). Эти данные основаны на анализе спектра кометы Хейла—Боппа, полученного Инфракрасной космической обсерваторией. В работе Морено и др. [13] значения радиусов частиц лежат в пределах 0.1—5 мкм при $a = -3.6$ (для расстояния от Солнца 2.8 а. е.). Анализировался инфракрасный спектр кометы, полученный Инфракрасной космической обсерваторией.

Даная работа посвящена исследованию физических свойств пыли в хвосте кометы Хейла—Боппа на основе динамического моделирования его формирования.

НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения проводились на обсерватории Крни Врх, Словения, Германом Микушом с помощью камеры Бейкера—Шмидта, диаметр объектива 180 мм, светосила $f/2.8$. Использовался ПЗС-детектор ST-6 размером 578x385 пкл. Так как размер пикселя равен 25.2"x25.2", то поле зрения составляет 3.8°x2.5°. Изображения получены с помощью специализированного кометного фильтра, который пропускает только излучение света, рассеянного на пылинках. Максимум его полосы пропускания находится на длине волны $\lambda = 647$ нм с полушириной 10 нм. Время экспозиции для всех трех снимков составляет 5 мин. Для полученных изображений был вычтен байес, компенсирован темновой ток, а также проведена коррекция за плоское поле. В табл. 1 перечислены орбитальные параметры кометы Хейла—Боппа для трех моментов наблюдений, а также размер пикселя в километрах.

Таблица 1. Параметры кометы на моменты наблюдений

Дата начала наблюдения, 1997	V	Расстояние от Солнца, а. е.	Расстояние от Земли, а. е.	Позиционный угол хвоста	Размер пикселя, 10^3 км
Февраль 08.199	1.7 ^m	1.28	1.86	326.1°	34.0x34.0
Февраль 18.169	1.0	1.16	1.65	325.3	30.2x30.2
Март 07.166	0.1	1.02	1.41	335.0	25.8x25.8

МОДЕЛЬ

Для моделирования пылевого хвоста кометы Хейла—Боппа была применена модель, разработанная П. П. Корсуном [10], которая служит для исследования отдаленных комет. Для построения пылевого окружения кометы в этой модели прослеживаются траектории каждой отдельной частицы от зоны столкновений вокруг ядра и до момента наблюдения. Для этого по алгоритму Монте-Карло задаются время и направление вылета частицы, а также модельные параметры: радиус и скорость вылета из зоны столкновений. Далее для каждой частицы развязывается система уравнений движения под действием двух сил: солнечной гравитации и давления солнечного излучения. Результатом решения системы уравнений есть координаты одной частицы на момент наблюдения, а их совокупность дает модельный пылевой хвост кометы. Наконец, полученные кометоцентрические координаты частиц проектируются на картинную плоскость для сравнения с реальными наблюдениями.

В модели П. П. Корсуна рассматривается движение больших частиц, в которых пыль вморожена в лед, и которые изменяются по массе в связи с постепенным таянием. При построении модели близкой к Солнцу кометы Хейла—Боппа мы вынуждены были учитывать новые обстоятельства: ледяная составляющая частиц полностью испарилась, и появилась необходимость рассматривать движения сильно пористых частиц из тугоплавкого вещества с большой вероятностью распада. Поэтому очень важным является учет процесса фрагментации, что подчеркивалось многими исследователями [4, 7].

Фрагментация. Если предположить, что фрагментация в основном происходит в зоне столкновений кометы, то в некотором приближении можно рассматривать одновременный вылет из зоны столкновений фрагментов распавшейся родительской частицы. Как известно из модельных расчетов, частички разных размеров, которые покинули ядро кометы в один и тот самый момент времени, будут находиться на одной линии в хвосте кометы, формируя синхроны.

Как предельные условия для такой линии мы должны рассмотреть положения нефрагментированной частички и наименьшего вероятного фрагмента. Также для дальнейших расчетов необходимы массы этих двух частичек с указанными выше предельными условиями. Известно, что кометные пылевые частички очень пористые, а между радиусом частички и ее плотностью есть определенная зависимость. Такую зависимость изучали многие исследователи. Здесь будет использована эмпирическая формула Комбози [4]:

$$\rho = 22 - 1.4r/(r + 2),$$

где плотность ρ выражена в г/см^3 , а радиус частицы r — в микронах. Далее по известной формуле может быть получена масса частицы:

$$m = 4\pi\rho(r/10000)^3/3.$$

Единственным ограничением для количества образованных фрагментов служит закон сохранения массы, который контролируется параметром остаточной массы m_r .

Положение фрагмента радиуса r_f на линии синхрон определяется из предположения, что местонахождение частички пропорционально ее радиусу. Тогда

где r_f — радиус фрагмента, r_m — радиус минимально возможного фрагмента.

Если масса фрагмента m_f окажется больше, чем остаточная масса, то генерируется новое случайное число R_i и находится новое значение m_f . В другом случае находится новое значение остаточной массы: $m_r = m_r - m_f$. Координаты данного фрагмента находятся по формулам

где R_f , R_m , R_u — координаты данного фрагмента, минимально возможного фрагмента и нефрагментированной частички соответственно.

Цикл фрагментации считается завершенным, если остаточная масса оказывается меньшей, чем минимальная.

ПРОЦЕСС МОДЕЛИРОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Компьютерная программа была написана на алгоритмическом языке Фортран; интерфейс запуска и контроля полученных вычислений был реализован с помощью пакета программ IDL, ориентированного на анализ изображений. В качестве критерия согласованности наблюдаемых и модельных данных мы выбрали степень совпадения наборов изофот.

В качестве модельных параметров были взяты следующие величины: максимальный возраст частиц, которые вносят вклад в формирование хвоста; минимальный и максимальный радиусы частиц; степень закона распределения по радиусам частиц в предположении экспоненциального распределения; начальные значения скоростей пылинок и доля (вероятность) фрагментации. Модельный параметр β , который определяется соотношением сил давления солнечного излучения и солнечной гравитацией, задавался формулой [5]

где a — радиус частицы в мкм, ρ — плотность частицы в г/см³, Q_{pr} — фактор эффективности давления излучения. Эта формула справедлива для частиц радиуса $a > 0.2$ мкм, при этом величина Q_{pr} является константой, а β — обратно пропорциональна радиусу. Количество частиц, покидающих зону столкновений, для всех дат равно $2 \cdot 10^6$.

Скорости вылета частиц находилась по эмпирической формуле, предложенной Секаниной [14]:

Здесь V — скорость выбрасываемых частиц; A , B — числовые параметры; r_d — гелиоцентрическое расстояние пылинки; β — отношение силы солнечного давления к силе притяжения Солнца.

В табл. 2 приведены численные значения модельных параметров, с помощью которых удалось достигнуть наилучших результатов в воспроизведении распределения яркости. Следует отметить, что наборы параметров для трех различных дат отличаются несущественно. На рис. 1 показаны результаты моделирования пылевого хвоста кометы Хейла—Боппа для двух дат: 8 и 18 февраля 1997 г. Изображение, полученное 7 марта 1997 г., значительно отличается от остальных двух — в это время комета была практически в перигелии. Как видно из табл. 2, количество пылинок малых размеров для 7 марта 1997 г. также несколько больше, о чем свидетельствуют значения показателя степенного распределения по радиусам (-3.7 против -3.6 для других дат), доли фрагментации (0.2 против 0.1) и размера максимальной частицы (7.0 против 8.0).

Как можно видеть из рис. 2, нам не удалось получить часть пылевой комы в окрестностях ядра кометы Хейла—Боппа. Это

Таблица 2. Оптимальные параметры моделей для разных изображений

Дата, 1997	Возраст частиц, сут	г, мкм		V , м/с	Доля фрагментации
8 февраля	56	0.3—8.0	-3.6	168—721	0.1
18 февраля	66	0.3—8.0	-3.6	143—640	0.1
7 марта	59	0.3—7.0	-3.7	155—650	0.2

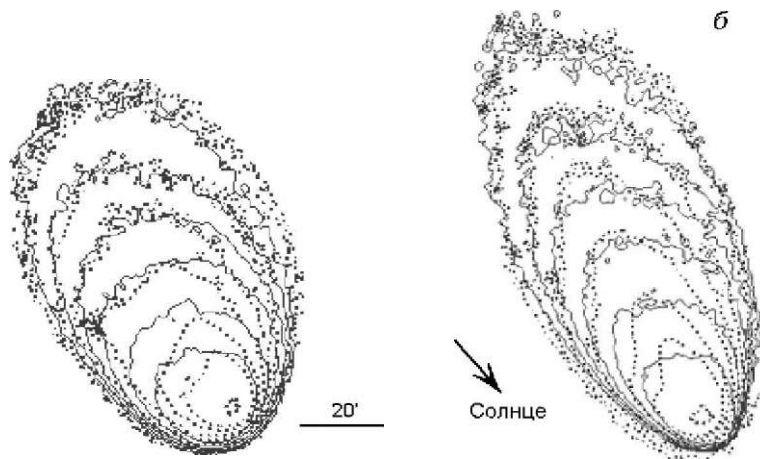


Рис. 1. Результаты моделирования кометы Хейла—Боппа для двух дат наблюдения: 8 февраля (а) и 18 февраля 1997 г. (б). Сплошные линии — смоделированные изофоты, точечные линии — изофоты, полученные из наблюдений



Рис. 2. Результаты моделирования кометы Хейла—Боппа для даты наблюдения 7 марта 1997 г. Сплошные линии — смоделированные изофоты, точечные линии — изофоты, полученные из наблюдений

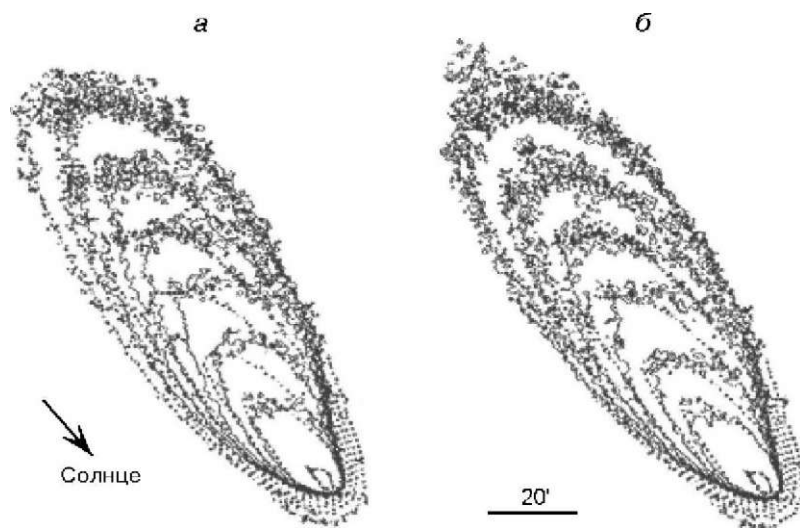


Рис. 3. Результаты моделирования без учета фрагментации (а) и с учетом процесса фрагментации (б). Моделирование осуществлено для кометы Хейла—Боппа, дата наблюдения — 7 марта 1997 г. Сплошные линии — смоделированные изофоты, точечные линии — изофоты, полученные из наблюдений

связано с растеканием заряда на ПЗС-приемнике ввиду большой яркости в околоядерной области кометы.

Также следует отметить, что учет фрагментации частиц заметно улучшает результаты моделирования. На рис. 3, а показаны модельные изофоты кометы Хейла—Боппа, полученные без учета фрагментации, а на рис. 3, б — изофоты, рассчитанные для доли фрагментации, равной 0.2. Остальные модельные параметры соответствуют оптимальным, перечисленным в табл. 2.

Полученные нами значения конечной скорости пылевых частиц в целом соответствуют данным [3, 6, 9, 11]. Таким образом, наши данные динамического моделирования формирования кометных хвостов согласуются с данными, полученными другими методами. В то же время значения показателя распределения по размерам (табл. 2) несколько выше, чем полученные в работах [2, 12], и соответствуют значению, полученному в работе [13]. Эти различия можно объяснить тем, что наши наблюдения были проведены на более близких расстояниях к Солнцу, где ожидается наличие более мелких частиц в пылевом хвосте кометы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Три изображения кометы Хейла—Боппа были получены Г. Микушом с помощью специального фильтра, который пропускает свет, рассеянный кометными пылевыми частичками. Нам удалось успешно воссоздать распределение яркости в пылевом хвосте кометы Хейла—Боппа с помощью моделирования методом Монте-Карло для трех разных дат с близкими по значению модельными параметрами. Получены оценки максимального возраста частиц, которые формируют хвост (56—66 сут), начальных скоростей их вылета (140—720 м/с), их характерного размера (0.3—8 мкм) и показателя степенного распределения по размерам ($a = -3.6 \dots -3.7$). Проведенные нами модельные исследования показали, что учет процесса фрагментации пылевых частиц в хвосте кометы значительно улучшает результаты моделирования.

1. Bonev T., Jockers K., Karpov N. A dynamical model with a new inversion technique applied to observations of Comet C/2000 WM1 (LINEAR) // *Icarus*.—2008.—**197**, N 1.—P. 183—202.
2. Bouwman J., de Koter A., Dominik C., Waters L. B. F. M. The origin of crystalline silicates in the Herbig Be star HD100546 and in comet Hale—Bopp // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**401**.—P. 577—592.
3. Braunstein M., Womack M., Deglman F., et al. A CCD image archive of comet C/1995O1 (Hale—Bopp): Dust expansion velocities // *Earth, Moon and Planets*.—1997.—**78**, N 1/3.—P. 219—227.
4. Combsi M. R. The fragmentation of dust in the innermost comae of comets: possible evidence from ground-based images // *Astron. J.*—1994.—**108**, N 1.—P. 304—312.
5. Fernandes J. A., Jockers K. Nature and origin of comets // *Repts Progr. Phys.*—1983.—**46**.—P. 665—772.
6. Hadamcik E., Levasseur-Regourd A. C. Dust evolution of comet C/1995O1 (Hale—Bopp) by imaging polarimetric observations // *Astron. and Astrophys.*—2003.—**403**.—P. 757—768.
7. Hayward T. L., Hanner M. S., Sekanina Z. Thermal infrared imaging and spectroscopy of comet Hale—Bopp (C/1995 O1) // *Astrophys. J.*—2000.—**538**.—P. 428—455.
8. Jewitt D., Matthews H. Particulate mass loss from comet Hale—Bopp // *Astron. J.*—1999.—**117**, N 2.—P. 1056—1062.

С. В. ХАРЧУК И ДР.

9. *Jorda L., Rembor K., et al.* The rotational parameters of Hale—Bopp (C/1995O1) from Observations of the Dust Jets at Pic Du Midi Observatory // *Earth, Moon and Planets.*—1999.—**77**.—P. 167—180.
10. *Korsun P. P.* Distant activity of comet C/2001 K5 (Linear) // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Suppl. Ser.* —2005.—N 5.—P. 465—471.
11. *Lisse C. M., Fernandez Y. R., A'Hearn M. F., et al.* Infrared observations of dust emission from comet Hale—Bopp // *Earth, Moon and Planets.*—1997.—**78**.—P. 251—257.
12. *Min M., Hovenier J. W., de Koter A., et al.* The composition and size distribution of the dust in the coma of comet Hale—Bopp // *Icarus.*—2005.—**179**, N 1.—P. 158—173.
13. *Moreno F., Munoz O., Vilaplana R., Molina A.* Irregular particles in comet C/1995 O1 Hale—Bopp inferred from its mid-infrared spectrum // *Astrophys. J.*— 2003.—**595**, N 1.—P. 522—530.
14. *Sekanina Z.* Computer simulation of the evolution of dust coma morphology in an outburst: P Schwassmann—Wachmann 1 // *Workshop on the Activity of Distant Comets / Eds W. F. Huebner, H. U. Keller, D. Jewitt, et al.*— 1992.—P. 166—181.

Поступила в редакцию 26.09.08