

УДК 523.64-35

Ю. В. Сизоненко, П. П. Корсун

Главная астрономическая обсерватория Национальной академии наук Украины
03680 Киев, ул. Академика Заболотного 27
sizon@mao.kiev.ua

Физические характеристики плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN)

Получены панорамные снимки хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN) с интерференционными фильтрами, выделяющими излучение иона CO⁺ и континуума. Найдено распределение яркости плазменного хвоста 26 октября 2006 года, вскоре после вспышки блеска кометы. Рассчитано модельное распределение яркости и найдены параметры диффузионной модели плазменного хвоста кометы. Для даты наблюдений найдены оценки индукции магнитного поля в хвосте кометы, а также оценки времени жизни светящихся частиц, коэффициентов продольной и поперечной диффузии ионов. Обсуждается возможная связь изменения структуры хвоста с изменениями физических параметров вдоль плазменного хвоста кометы.

ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМОВОГО ХВОСТА КОМЕТИ C/2006 M4 (SWAN), Сизоненко Ю. В., Корсун П. П. — Отримано панорамні знімки хвоста комети C/2006 M4 (SWAN) з інтерференційними фільтрами, які виділяють випромінювання іона CO⁺ та континууму. Знайдено розподіл яскравості плазмового хвоста 26 жовтня 2006 р., незабаром після спалаху комети. Розраховано модельний розподіл яскравості і знайдено параметри дифузійної моделі плазмового хвоста комети. Для дати спостережень знайдено оцінки індукції магнітного поля у хвості комети, а також оцінки часу життя світних частинок, коефіцієнтів поздовжньої та поперечної дифузії іонів. Дискутується можливий зв'язок зміни структури хвоста із змінами фізичних параметрів вздовж плазмового хвоста комети.

PHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE PLASMA TAIL OF COMET C/2006 M4 (SWAN), by Sizonenko Yu. V., Korsun P. P. — The wide-angle frames of comet C/2006 M4 (SWAN) through narrow-band CO⁺ and continuum filters were obtained. The brightness distribution in the plasma tail was derived shortly after the outburst of the comet on 26 October 2006.

©Ю. В. СИЗОНЕНКО, П. П. КОРСУН, 2009

The photometric profiles were compared with the brightness distribution calculated on the basis of the diffusion model of the plasma tail. The parameters of the diffusion model were calculated to fit the distribution. The lifetime of the ions, the magnetic field induction and the coefficients of diffusion of the ions were estimated. The possible association between the change of physical characteristics of the plasma tail and the change of DE-like structures in the tail is discussed.

ВВЕДЕНИЕ

Комета C/2006 M4 (SWAN) открыта «охотниками за кометами» Р. Д. Гедсоном и М. Матиасо на изображениях, полученных инструментом SWAN, установленном на борту Солнечной и Гелиосферной Обсерватории (SOHO) в конце июня 2006 г. Двигаясь по гиперболической орбите, комета обогнула Солнце и стала доступной для наблюдений с Земли в середине июля этого же года. Максимальное сближение кометы с Землей состоялось 26 октября 2006 г., а за два дня до этого комета испытала вспышку блеска примерно на две звездные величины. Вероятно, вспышка блеска сопровождалась резким увеличением испарения летучего вещества, так как вскоре кома и плазменный хвост кометы стали заметно ярче, а структура хвоста кометы усложнилась. В течение последующих двух месяцев комета оставалась относительно яркой, продолжительное время у нее наблюдались плазменный и пылевой хвосты. В течение октября 2006 г. гелиоцентрическая эклиптическая широта кометы изменялась от 49 до 68°. Следовательно, комета находилась в области полярного солнечного ветра, сведения о котором еще недостаточны. Поэтому наблюдения структуры плазменного хвоста кометы представляют особенный интерес.

Для лучшего понимания взаимодействия плазменного хвоста кометы с солнечным ветром исследование распределения яркости в плазменном хвосте кометы до и после вспышки блеска так же желательно, как и изучение структуры хвоста. В этой работе мы исследуем распределение яркости плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN), полученное по снимкам кометы с короткофокусным объективом 26 октября 2006 г. Применение короткофокусного объектива совместно с высокочувствительным приемником света позволило получить распределение яркости в плазменном хвосте на расстоянии до 9 млн км от ядра кометы.

НАБЛЮДЕНИЯ

Снимки кометы C/2006 M4 (SWAN) получены 26.67 октября 2006 г. в ГАО НАН Украины с объективом «Калейнар-3В» (светосила 1:2.8, $F = 150$ мм) и ПЗС-камерой SBIG STL-1001E [<http://www.sbig.com/>]

sbwhtmls/online.htm]. Линейный размер элемента (одного пикселя) изображения кометы на картинной плоскости, который обеспечивала комбинация камеры и объектива, для момента наблюдения равен $2.39 \cdot 10^9$ см. В качестве гидирующего устройства использован телескоп ДША. Наблюдательный материал получен двумя сериями по 10 снимков с экспозицией 120 секунд/снимок с использованием двух интерференционных фильтров. Один из фильтров, «CO⁺», выделял излучение полосы A² – X² иона CO⁺ вместе с подстилающим континуумом, а другой, «cont» — излучение близлежащего континуума. Применение интерференционных фильтров совместно с объективом такой большой светосилы может вызвать смещение максимума пропускания и падение пропускной способности фильтров. Указанные эффекты происходят из-за работы интерференционных фильтров в наклонных пучках света. Мы выполнили специальное исследование кривых пропускания фильтров для примененной схемы наблюдений. Рассмотрим наиболее простой случай формирования изображения в геометрическом центре матрицы ПЗС. Тогда максимальный угол падения луча света на переднюю плоскость, найденный из соотношения $\text{tg} \theta = D/(2F)$, составляет $\theta_{\text{max}} = 10.1^\circ$. На самом деле этот угол будет несколько больше для лучей, попадающих на край матрицы. Исходя из размера используемой части матрицы, мы приняли значение $\theta_{\text{max}} = 12^\circ$. С помощью атомно-асорбционного спектрометра С-302 получен ряд кривых пропускания фильтра для пучков света, падающих с наклоном от 0 до 12° . После суммирования и нормировки отсчетов спектрофотометра по углам наклона лучей мы получили пропускание фильтра для проходящего через него полного потока света в измеренных длинах волн. Оказалось, что полоса пропускания фильтра «CO⁺» по сравнению с данными [7] сместилась на $\Delta\lambda = 0.5$ нм в коротковолновую сторону спектра и составляет $\lambda = 422.1 \dots 429.2$ нм. Для фильтра «cont» соответствующие величины составляют $\Delta\lambda = 0.7$ нм и $\lambda = 440.9 \dots 447.0$ нм. Значительно уменьшился коэффициент пропускания для обоих фильтров. Для фильтра «CO⁺» он уменьшился на $k = 16\%$ в максимуме пропускания и составляет $k_{\text{max}} = 64\%$ для $\lambda = 425.0$ нм. Соответствующие величины для фильтра «cont» $k = 10\%$ и $k_{\text{max}} = 41\%$ для $\lambda = 444.0$ нм. Очевидно, что смещение полосы пропускания фильтров не может существенно повлиять на выделение излучений полосы A² – X² иона CO⁺ ($\lambda = 425.1 \dots 427.4$ нм) и континуума у $\lambda = 444.0$ нм. Отметим, что в найденные полосы пропускания фильтров не попадают дополнительные эмиссии других составляющих кометной атмосферы. Полученные кривые пропускания использованы для калибровки отсчетов ПЗС в дальнейшей обработке наблюдений.

Мы выполнили обычные для обработки ПЗС-изображений редукации: вычитание байаса и темнового тока, а также деление на плоское поле. Затем снимки каждой серии были суммированы с при-

менением медианной фильтрации результата. Это позволило избавиться от отсчетов матрицы, «выбитых» космическими частицами. Пользуясь методикой, описанной в работе [8], мы вычли результат суммирования «cont»-изображений из результата суммирования «CO⁺»-изображений. В результате было получено изображение кометы в полосе иона CO⁺. Это изображение мы подвергли стандартным фотометрическим редуцициям: были учтены неравномерность фона неба и дифференциальная экстинкция вдоль хвоста кометы. Учет светораспределения в фокальной плоскости объектива не потребовался, так как он был уже выполнен при делении на плоское поле. Для абсолютной калибровки фотометрических отсчетов матрицы использованы изображения звезд α_1 и α_2 Her, полученные в полосе иона CO⁺ на одном кадре вместе с кометой. Из-за аббераций оптики и атмосферных флуктуаций изображения звезд на поверхности ПЗС-приемника не являются точечными. Мы приняли за диаметр изображения звезды эквивалентную полуширину гауссианы, огибающей усредненный фотометрический разрез звезды. Тогда средний отсчет пикселей ПЗС внутри круга с этим диаметром будет соответствовать энергетическому потоку от звезды внутри телесного угла, определяемого диаметром изображения звезды, т. е. яркости звезды. Приняв в расчет кривую пропускания фильтра, определенную выше, и монохроматическую прозрачность атмосферы в ГАО НАН Украины (Голосиив) [1], проинтегрируем на спектральном интервале пропускания фильтра произведение этих величин и монохроматической освещенности от калибровочной звезды [5]. В результате получим освещенность от звезды для данного спектрального интервала, а затем и значение яркости звезды. Считая, что выполненные редукции снимка позволяют сравнивать яркости звезд и кометы на одном кадре с необходимой для наших целей точностью, мы построили калибровочную прямую для пересчета отсчетов матрицы в яркости плазменного хвоста кометы. На рис. 1 приведена система изофот, выделяющих участки хвоста кометы с заданными уровнями яркости как результат обработки полученных изображений. Пунктирными прямыми показаны направления продольного и поперечных разрезов, полученных из карты распределения яркости. В дальнейшем эти разрезы были сопоставлены с профилями яркости, рассчитанными с помощью диффузионной модели плазменного хвоста кометы.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЯРКОСТИ

Основные положения диффузионной модели плазменного хвоста комет изложены в работе [2], а ее модернизированный вариант — в работе [6]. Модель успешно применялась для интерпретации распределения яркости в плазменных хвостах многих комет [3, 4]. Поэтому здесь на описании модели мы останавливаться не будем, а перейдем к изложению результатов сопоставления наблюдаемых и

модельных распределений яркости. Для обеспечения одинаковых единиц измерения при сопоставлении наблюдаемые распределения яркости были переведены из энергетических единиц в относительные (зв. вел./сд²). При этом использовалась формула Погсона $m - m_0 = 2.5 \lg E / E_0$, определение яркости $B = Ew$ и константа «звездная величина 1 люкса»: $m_0 = 13.75^m - 0.03^m$. Результирующая формула связи относительной и энергетической шкалы яркости имеет вид

$$m \text{ [зв. вел./сд}^2] = A - 2.5 \lg B \text{ [эрг см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}],$$

где $A = 27.7^m$ для фильтра «CO⁺». Величина A изменяется с длиной волны.

Для сопоставления с модельным распределением яркости мы получили один продольный разрез и одиннадцать поперечных, располагающихся вдоль всего хвоста с равными интервалами. Направления некоторых из этих разрезов показаны на рис. 1. Модельное распределение яркости можно представить в виде

$$2.5 \lg I = \text{const} - 2.5 \lg (X, Y, \dots)$$

где $\dots = a \sqrt{{}^3 D_l^{-1} \cos \dots}$ — безразмерный параметр, связывающий физические характеристики плазменного хвоста, X и Y — безразмерные координаты точки разреза, связанные с координатами, измеренными в плоскости снимка, соотношением

$$X = x / L_l, \quad Y = y / L_{tg}.$$

Изменяя значения модельных параметров \dots, L_l, L_{tg} , мы добились наилучшего совпадения модельного профиля с разрезом, полученным из измеренного распределения яркости. Процесс подбора параметров считается законченным, когда достигнута минимальная сумма квадратичных отклонений модельных значений яркости от наблюдаемых. Подбор модельных параметров выполняется в два этапа: сначала с использованием продольного разреза хвоста подбираются параметры \dots и L_l , затем по поперечным разрезам хвоста при фиксированных значениях этих параметров определяется среднее значение параметра L_{tg} . На рис. 2 показаны продольный и некоторые поперечные фотометрические профили плазменного хвоста, полученные из наблюдений, а также соответствующие модельные профили яркости.

В результате моделирования распределений яркости плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN) были получены следующие значения параметров:

$$\dots = 9.7, \quad L_l = 13.14 \cdot 10^{10} \text{ см},$$

и

$$\begin{aligned} L_{tg} &= (3.79 - 0.03) \cdot 10^{10} \text{ см} && \text{(для разрезов №№ 1—4),} \\ L_{tg} &= (6.51 - 0.07) \cdot 10^{10} \text{ см} && \text{(для разрезов №№ 5—7),} \\ L_{tg} &= (12.03 - 0.19) \cdot 10^{10} \text{ см} && \text{(для разрезов №№ 8—11).} \end{aligned}$$

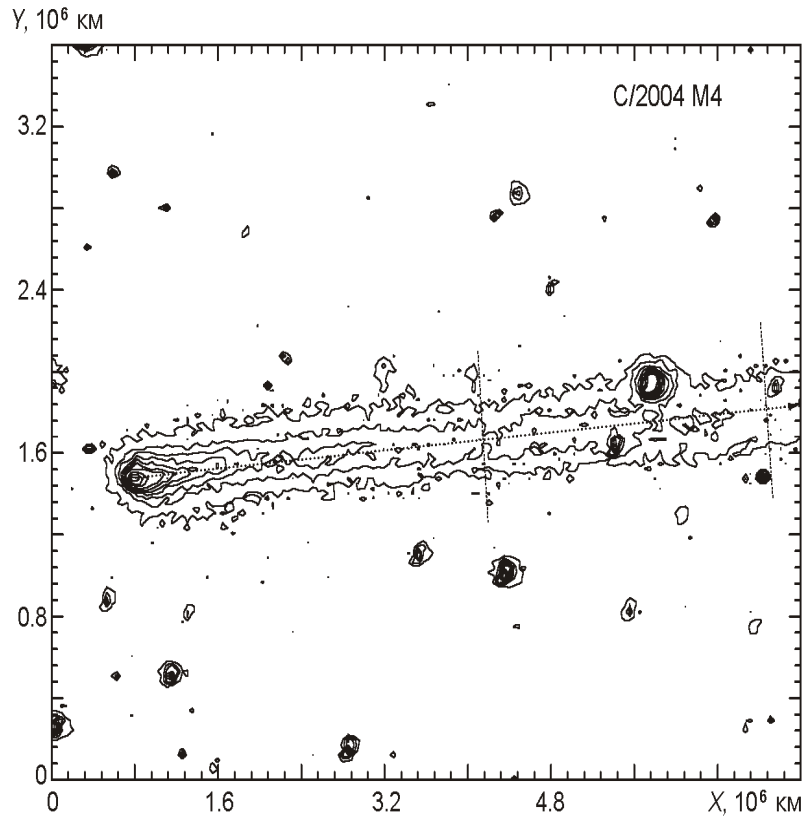


Рис. 1. Распределение яркости в хвосте кометы SWAN 26.6747 октября 2006 г. (изофоты 1.5, 1.8, 2.8, 3.7, 4.9, 6.1, 7.4, 8.6, 9.8, 11.0 $\cdot 10^{-5}$ эрг $\text{см}^{-2}\text{с}^{-1}\text{стер}^{-1}$)

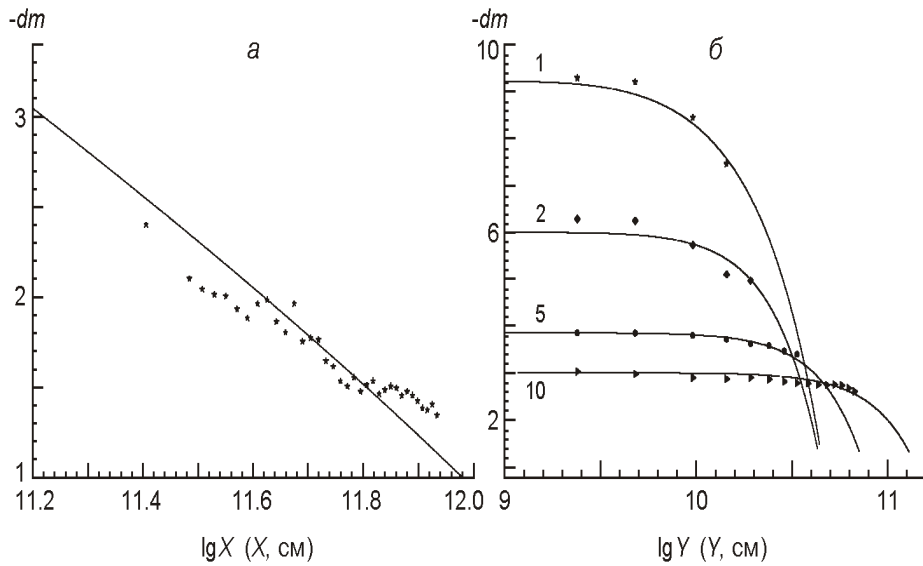


Рис. 2. Наблюдаемые (точки) и теоретические (линии) профили яркости для плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN): *a* — продольный профиль, *б* — поперечные профили (разрез № 1 — на расстоянии $0.19 \cdot 10^{11}$ см, № 2 — на расстоянии $1.03 \cdot 10^{11}$ см, № 5 — на расстоянии $3.55 \cdot 10^{11}$ см, № 10 — на расстоянии $7.75 \cdot 10^{11}$ см)

Фактически было получено три значения поперечного масштабного множителя L_{tg} для поперечных разрезов №№ 1—4, 5—7, 8—11. Хорошая сходимость внутри групп значений L_{tg} позволила нам предположить, что мы имеем дело не с погрешностями, возникшими из-за ошибок фотометрии или моделирования, а с реальными отличиями физических характеристик вдоль хвоста кометы. Показанные на рис. 1 поперечные разрезы как раз и находятся на границах трех частей плазменного хвоста кометы с разными физическими характеристиками. Мы использовали все три значения поперечного масштабного множителя, для того чтобы найти физические характеристики плазменного хвоста.

Согласно методике [2, 3, 6] для оценки физических характеристик плазменного хвоста кометы необходимо знать эффективное ускорение частиц хвоста и температуру T_i кометных ионов. Значение получено нами из определения скорости движения облачных образований вдоль хвоста. Два таких облака заметны на всех наших снимках. Определив кометоцентрические координаты центров этих облаков, мы вычислили их скорости, а затем и ускорения, предположив равноускоренное движение облаков совместно с потоком кометных ионов. Оценки температуры кометных ионов мы взяли из работы [9], излагающей результаты измерений космического аппарата в плазменном хвосте кометы, а также из [10], где температура была получена из спектральных наблюдений кометных ионов. На основе полученных значений $\beta = 97$, $T_i^{\max} = 80000$ К, $T_i^{\min} = 20000$ К были определены физические характеристики хвоста. В таблице

Физические характеристики фрагментов хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN)

Номер фрагмента	$\tau, 10^5$ с	$D_l, 10^{16}$ см ² с ⁻¹	$D_{tg}, 10^{16}$ см ² с ⁻¹	B_{\max} , нТл	B_{\min} , нТл
1	1.077	5.59	0.33	1.19	0.30
2	1.088	5.26	0.97	0.73	0.18
3	1.088	4.25	3.32	0.49	0.12

приведены: время жизни кометных ионов, значения продольного и поперечного коэффициентов диффузии ионов (D_l и D_{tg}), а также верхняя и нижняя оценки индукции магнитного поля (B_{\max} и B_{\min}) для трех фрагментов плазменного хвоста кометы C/2006 M4 (SWAN). Фрагменты 1—3 плазменного хвоста находятся на расстояниях от ядра (0.1—2.7), (3.5—5.2) и (6.1—8.6) 10^{11} см соответственно.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ данных таблицы показывает резкое (в 10 раз) увеличение поперечного коэффициента диффузии ионов с возрастанием расстояния от ядра кометы. В тоже время индукция магнитного поля уменьшается в три раза при удалении в хвост, при крайне малых абсолютных ее значениях. Просматривая ряд известных изображений кометы, мы обнаружили нарушения структуры хвоста кометы 26 октября 2006 г., похожие на явление отрыва хвоста. Полученные нами физические характеристики соответствуют ожидаемой картине явления при отрыве хвоста, когда дальняя часть хвоста при падении напряженности межпланетного магнитного поля теряет упорядоченную структуру, и поток ионов расплывается, а часть хвоста в более сильном магнитном поле вновь обретает упорядоченную структуру.

В работе [2] указывается, что диффузионная модель плазменного хвоста применима к стационарному потоку ионов, истечение которых началось бесконечно давно. Для более точного описания наблюдаемых явлений в хвосте кометы необходимо расширение модели плазменного хвоста кометы на случай нестационарного истечения ионов.

Отметим, что выполненная нами работа является иллюстрацией возможности использования наблюдений с короткофокусными объективами для исследования распределения яркости в хвостах комет и структуры хвостов комет.

Наблюдения кометы C/2006 M4 (SWAN), использованные в этой работе, были выполнены с ПЗС-камерой SBIG STL-1001E, приобретенной благодаря гранту Регионального отделения по науке и технологии в Европе (ROSTE) ЮНЕСКО.

Авторы статьи благодарят В. П. Лапчука за помощь в измерениях.

1. Аврамчук В. В., Семенюк Т. П. Определение спектрального пропускания земной атмосферы на пике Терскол в октябре—ноябре 1973 года // Астрометрия и астрофизика.—1973.—Вып. 26.—С. 113—116.
2. Назарчук Г. К. Анализ распределения поверхностной яркости в хвосте кометы 1956 h // Астрометрия и астрофизика.—1969.—Вып. 4.—С. 77—99.
3. Сизоненко Ю. В. Физические характеристики плазменного хвоста кометы 1P/Галлея // Кинематика и физика небес. тел.—2005.—21, № 4.—С. 304—311.
4. Сизоненко Ю. В., Шабас Н. Л. Моделирование распределения яркости плазменного хвоста кометы C/1976 R1 (Веста) // Кинематика и физика небес. тел.—2002.—18, № 2.—С. 128—135.
5. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Н. Н. Сводный спектрофотометрический каталог звезд. — Алма-Ата: Наука, 1978.—198 с.
6. Чурюмов К. И., Шабас Н. Л. Физические условия в плазменном хвосте кометы Галлея в период ее отрыва 6—8 января 1986 г. // Астрон. вестник.—1998.—32, № 3.—С. 43—50.

7. *Farnham T. L., Schleicher D. G., A'Hearn M. F.* The narrowband comet filters: standard stars and calibrations // *Icarus*.—2000.—**147**, N 1.—P. 180—204.
8. *Jokers K., Bonev T.* H₂O⁺, CO⁺ and dust in comet P/Swift—Tuttle // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**319**.—P. 617—629.
9. *Slavin J. A., Smith E. J., Tsurutani B. T., et al.* Giacobini—Zinner magnetotail — ICE magnetic field observation // *Geophys. Res. Lett.*—1986.—**13**.—P. 283—286.
10. *Spinrad H., Brown M. E., Johns C. M.* Kinematics of the ion tail of comet P/Swift — Tuttle // *Astron. J.*—1994.—**108**, N 4.—P. 1420—1462.

Поступила в редакцию 31.10.08