

**ASTRONOMICAL
OBSERVATIONS
OF THE COMET
OF CENTURY: NEW,
UNEXPECTED RESULTS**

Yu. N. GNEDIN

The results of observations of the remarkable Hale–Bopp comet are presented. This comet is named “The Comet of Century”, or “The Great Comet”. A number of scientific results were obtained by observatories in Russia and in the CIS. A historical review of “Great Comets” is also presented.

Излагаются результаты наблюдений кометы Хейлла–Боппа, получившей название кометы века или великой кометы, в том числе результаты наблюдений, выполненных в России и странах СНГ. В начале статьи дан исторический очерк о великих кометах в прошлом.

АСТРОНОМИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ КОМЕТЫ ВЕКА: НОВЫЕ, НЕОЖИДАННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Ю. Н. ГНЕДИН

Санкт-Петербургский государственный
технический университет

ВВЕДЕНИЕ

Трудно найти другой такой астрономический объект, как комета, который вызвал бы всеобщий неподдельный интерес. Вид кометы, особенно в телескоп или бинокль, представляет собой удивительное по красоте и в то же время пугающее зрелище. С самых древних времен в астрономии утвердились и стали профессиональными такие термины, как “голова” и “хвост” кометы. Комета обычно появляется в виде слабого туманного пятна, которое и принято называть кометной головой. Иногда в центре такого пятна видно центральное звездообразное сгущение, которое называют фотометрическим ядром или центром. Хвост кометы берет начало в голове или ядре и простирается в сторону, противоположную Солнцу.

23 июля 1995 года американские любители астрономии А. Хейл и Т. Бопп независимо друг от друга обнаружили на небе довольно яркий диффузный объект, который оказался кометой. В момент открытия она находилась на большом расстоянии от Солнца в 7 а.е. (астрономических единиц). Напомним, что 1 а.е. = 150 млн км и представляет собой среднее расстояние от Земли до Солнца. Расстояние от кометы до Земли в момент открытия составляло 6,3 а.е. Удивительным было то, что комета имела ярчайший для такого положения блеск — 10-ю звездную величину. Именно это привело астрономов к выводу, что, когда эта комета приблизится к Солнцу, она станет самой яркой кометой за всю историю астрономии. Поэтому она и получила название кометы века.

Рисунок 1 показывает видимую траекторию кометы по небесной сфере. Числа на рис. 1 показывают в приведенные моменты времени звездную величину кометы, характеризующую ее яркость. Как это принято в астрономии, уменьшение видимой звездной величины соответствует возрастанию яркости небесного объекта. Рисунок 1 сделан на основе расчетов, выполненных в Институте теоретической астрономии (ИТА РАН), в Санкт-Петербурге. Помимо необычной яркости комету характеризует ее необычная орбита. Орбита кометы представляет собой очень вытянутый эллипс (эксцентриситет $e = 0,996$),

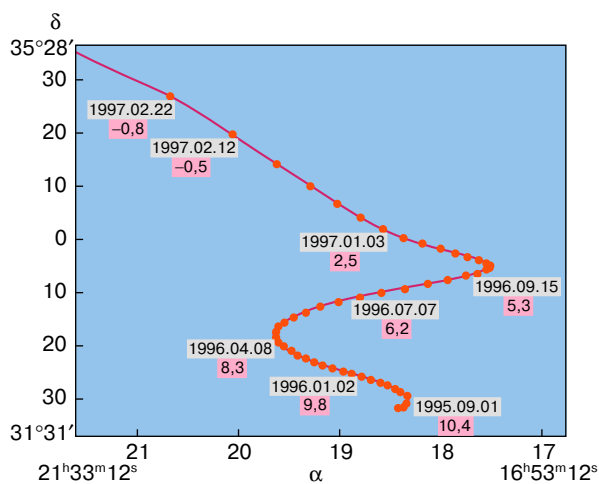


Рис. 1. Видимое положение и яркость кометы Хейла–Боппа

который обладает большим наклоном к плоскости эклиптики, равным $89^{\circ}4$.

Все это позволяет отнести комету Хейла–Боппа к числу так называемых великих комет. Как правило, блеск великих комет сравним или даже превосходит яркость Юпитера или Венеры, не говоря уже о звездах. Однако яркость не единственная особенность великой кометы. Другая ее характерная черта — это длина и яркость кометного хвоста. На рис. 2 представлена фотография головы и двух хвостов кометы, выполненная В.П. Романенко в Специальной астрофизической обсерватории (САО) РАН во время астрономических наблюдений этой кометы,



Рис. 2. Фотография кометы Хейла–Боппа. Видны голова и два хвоста (В.П. Романенко, 1-метровый телескоп САО РАН, 30.03.97 г.)

в которых участвовала группа астрономов из САО РАН и Пулковской обсерватории. Голубым выглядит плазменный хвост кометы.

Три фактора могут определять появление великой кометы, то есть кометы века: а) сравнительно небольшое расстояние в перигелии, по крайней мере меньшее чем 1 а.е.; б) высокая собственная яркость; в) благоприятная геометрия по отношению к Земле. Первый из этих факторов целиком определяется орбитой кометы. Известно, что ни одна из считающихся великими комет не имела расстояния в перигелии более чем 1,3 а.е. Чем ближе проходит комета к Солнцу, тем больше интегральная яркость кометы, поскольку эта средняя интегральная яркость увеличивается с уменьшением расстояния до Солнца по закону $1/r^3$.

Высокая собственная яркость кометы тоже благоприятствует появлению кометы века. Яркость средней кометы на расстоянии от Земли и Солнца в 1 а.е. составляет 6,5 звездной величины. К великим кометам, как правило, относили кометы, яркости которых в 10, 20 и даже в 100 раз превосходили яркость средней кометы. Комета Хейла–Боппа в перигелии имела видимую яркость примерно -1 , что означает, что ее яркость почти в 1000 раз (!) больше, чем яркость средней кометы. Что касается благоприятной геометрии, то худший случай — это когда комета движется со стороны Солнца и ее блеск теряется на фоне солнечной освещенности. Замечательным и довольно редким свойством орбитального движения нашей кометы является то, что она движется почти перпендикулярно плоскости эклиптики. Угол наклона кометной орбиты, по данным ученых из ИТА РАН, составляет $89^{\circ}4$. Напомним, что плоскостью эклиптики называют плоскость, в которой лежит орбита Земли. По всем этим характеристикам комета Хейла–Боппа, несомненно, является кометой века.

ВЕЛИКИЕ КОМЕТЫ ПРОШЛОГО

Начиная с 1801 года примерно двадцать из многих сотен комет получили название великих или комет века. Я назову лишь некоторые из них.

Первой, конечно, следует упомянуть комету 1811 года, о которой писал Лев Толстой в знаменитой эпопее “Война и мир” и появление которой на небе предшествовало началу вторжения Наполеона в Россию. Когда эта комета достигла перигелия (~ 1 а.е.), она находилась в околополюсной зоне и была видна от сумерек до рассвета. В течение сентября и октября блеск кометы был сравним с яркостью звезд нулевой и первой величины. В то время комета двигалась по дуге от созвездия Большой Медведицы к созвездию Геркулеса. Комета имела два ярких хвоста: один прямой, а другой сильно изогнутый. Длина хвостов составляла 25° , а ширина изогнутого пылевого хвоста составляла 7° . Комета

была видна невооруженным глазом почти девять месяцев.

Другой великой была комета, получившая название Великой кометы марта 1843 года (Great March Comet of 1843). Ее особенность состояла в том, что она прошла буквально по солнечной поверхности, на расстоянии в 120 000 км, что составляет примерно одну десятую диаметра Солнца. Вследствие возбуждения под действием излучения Солнца и отражения солнечного света комета в течение нескольких часов 28 февраля 1843 года была ярче любой кометы, появлявшейся в течение предшествующих семи столетий. Ее яркость в тот момент была более чем в 60 раз больше яркости полной Луны. История свидетельствует, что так близко к Солнцу комета проходила только в 1106 году после Рождества Христова.

К числу других великих комет XIX века относят также комету Донати (C/1858VI) 1858 года, комету 1861 года и комету 1882 года, которая была открыта только вблизи своего перигелия и проникла в глубь солнечной короны на расстояние 430 000 км от солнечной поверхности.

Список великих комет XX века открывает комета 1910 года (но не комета Галлея!), которая была хорошо видна при своем обнаружении на раннем рассвете (ее звездная величина в тот момент составляла -2). Именно поэтому в ее названии сохраняется определение “видимая при дневном свете” – Daylight Comet of 1910. Интересно, что она была открыта независимо многими наблюдателями, поэтому никому персонально нельзя приписать честь ее открытия. История астрономии сохранила свидетельство, что первыми увидели эту комету шахтеры, работавшие в алмазной шахте в Южной Африке. Первым же астрономом, зафиксировавшим ее появление 17 января 1910 года, был Роберт Иннес из Капской обсерватории Южно-Африканской Республики. В тот момент она находилась на расстоянии в 18 млн км от Солнца. Многие наблюдатели полагали, что эта комета была ярче, чем Венера, то есть имела блеск по крайней мере -5 . Комета появилась на южном небе и только впоследствии, когда яркость ее упала, переместилась в северное полушарие. Комета Галлея, появившаяся несколько месяцев спустя, хотя и более известна мировой общественности, не входит в список великих комет.

В XX веке в этот список вошли такие кометы, как Шеллерупа–Маристани (C/1927XI), кометы C/1948VI, Аренда–Ролланда (C/1956R1), Икеи–Секи (C/1965S1), Беннета (C/1969Y1), Веста (C/1975VI), Хаякутаке (C/1996B2) и, наконец, Хейла–Боппа (C/1995O1). Нет возможности останавливаться на каждой из этих комет. Следует только отметить, что комета Икеи–Секи была одной из самых ярких в XX столетии. Она была видна невооруженным глазом при полном дневном свете, ее яркость в 60 раз больше, чем яркость полной Лу-

ны. Она также прошла вблизи Солнца (21 октября 1965 года) на расстоянии 450 000 км выше солнечной фотосферы.

Хорошим подарком для любителей астрономии явилось появление яркой кометы Хаякутаке в 1996 году. Когда она впервые была обнаружена как объект 10-й звездной величины, никто и не подозревал, что она станет одной из самых ярких комет столетия. Расчет ее орбиты показал, что она должна была подойти очень близко к Земле – на расстояние всего в 15 млн км. С 24 по 26 марта комета двигалась вблизи ручки Ковша (Большой Медведицы) и яркость ее достигла нулевой звездной величины. Характерной особенностью этой кометы было наличие огромного протяженного хвоста. Он занимал на небе угловое пространство протяженностью в 75° . Некоторые наблюдатели считают, что протяженность хвоста составляла все 100° .

КОМЕТА ХЕЙЛА–БОППА: НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ИНСТРУМЕНТЫ И ТЕЛЕСКОПЫ

Начав с 10-й звездной величины, комета Хейла–Боппа в середине марта 1997 года пересекла нулевую отметку. В тот момент было очень трудно подобрать соответствующую звезду сравнения. Среди хорошо известных небесных тел в конце марта – начале апреля Юпитер имел звездную величину -2 , Сириус $-1,5$, Марс $-1,2$ и Меркурий от $-0,3$ до $0,0$. Первого апреля яркость кометы достигла звездной величины $-0,8$. Тогда комета находилась в перигелии, на расстоянии $0,914$ а.е. от Солнца.

В течение многих лет астрономы рассматривали исследование комет как не очень значимую область астрономии. Поэтому кометы наблюдали в основном лишь любители, а из профессиональных астрономов лишь те, кто использовал небольшие телескопы. Однако за последние годы отношение к кометам резко изменилось. Для наблюдений комет Хаякутаке и Хейла–Боппа был мобилизован весь мощный аппарат наземной наблюдательной аппаратуры, включая 10-метровый Кек телескоп на Гавайских островах и огромный американский радиотелескоп (так называемый Very Large Array – VLA). Спектроскопические наблюдения были проведены с небывалым в физике комет спектральным разрешением $\lambda/\Delta\lambda = 180\,000$.

Список телескопов, на которых осуществлялись наблюдения кометы Хейла–Боппа, включает такие знаменитые телескопы, как 5-метровый телескоп Паломарской обсерватории; 4-метровый телескоп Межамериканской обсерватории в Серро-Тололо (Чили); 3,8-метровый телескоп в Мауна-Ки (Гавайские острова); 3,6-метровый Канадско-французский телескоп (Гавайские острова); 3-метровый инфракрасный телескоп НАСА; 2,5-метровый телескоп им. Исаака Ньютона (Канарские острова, Испания) и др. Успешные наблюдения кометы века были выполнены на Космическом телескопе им. Хаббла

(HST). В странах СНГ наблюдения кометы велись на 6-метровом телескопе (БТА) и 1-метровом телескопе Специальной астрофизической обсерватории (по программе, предложенной астрономами Главной (Пулковской) астрономической обсерватории и при их непосредственном участии), на 1,25-метровом телескопе Крымской астрофизической обсерватории, на 70-сантиметровом телескопе астрономической обсерватории Харьковского университета, на 26-дюймовом рефракторе и нормальном астрографе Пулковской обсерватории непосредственно в Санкт-Петербурге.

АКТИВНОСТЬ КОМЕТЫ, ЕЕ ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

Характерной особенностью кометы Хейла–Боппа была ее необычайная активность. Начиная с момента обнаружения астрономы регистрировали непрерывно извергающиеся из ее ядра газовые и пылевые струи (джеты), а также сферические и конические выбросы и оболочки, арочные структуры и другие образования, состоящие из газовых молекул и пылевых частиц. Иногда отмечалось существование четырех и более оболочек газовой и пылевой материи. Все эти структуры видны как на фотографиях, так и на изображениях кометной головы и хвоста, полученных с помощью новейших твердотельных приемников излучения, так называемых ПЗС-детекторов (ПЗС – прибор с зарядовой связью). Рисунок 3 представляет собой фотографию головы кометы, полученную на 26-дюймовом рефракторе Пулковской обсерватории группой сотрудников под руководством Т.П. Киселевой; видны пылевые оболочки, выброшенные из ядра кометы.

Следует отметить, что выбросы вещества из ядер комет не такая уж редкость и не раз регистрировались наблюдателями. Все дело в том, что ни у какой другой кометы они не наблюдались так часто и на

таком далеком расстоянии, а также не имели такой причудливой формы (рис. 4).

Самым замечательным открытием явилось обнаружение в голове кометы большого количества новых молекул, которые ранее не были обнаружены в других кометах. Это произошло благодаря спектрам высокого разрешения, полученным наблюдателями на больших телескопах. В табл. 1 представлен список всех молекул, обнаруженных в голове кометы Хейла–Боппа; подчеркнуты те молекулы, которые обнаружены в кометах впервые. Анализ молекулярного состава головы кометы позволяет сделать вывод, что в нем представлены практически все молекулы, входящие в состав больших молекулярных облаков нашей Галактики, в которых по настоящим представлениям, и происходит интенсивное рождение звезд. Это подтверждает точку зрения большинства астрономов, для которой долгое время не было необходимых экспериментальных данных, что кометы – это остатки того околозвездного вещества, из которого рождались наше Солнце и все планеты.

Другая характерная особенность кометы Хейла–Боппа – это необыкновенно высокая производительность молекул в голове кометы, то есть количество молекул, которые улетучиваются с поверхности ядра в одну секунду. Можно сказать, что даже на больших расстояниях от Солнца (≤ 7 а.е.) производительность основных кометных молекул (H_2O , OH , CH_4 , CO_2 , NH_3 , CN , C_2) в голове кометы Хейла–Боппа была значительно выше, чем у любой кометы на любом расстоянии за последние 20 лет, когда начали проводиться интенсивные фотометрические и спектроскопические наблюдения комет. В табл. 2 представлены значения производительности основных молекул в голове кометы Хейла–Боппа на различных расстояниях от Солнца.

Наконец, третья особенность нашей кометы века – это ее удивительно сильная запыленность.

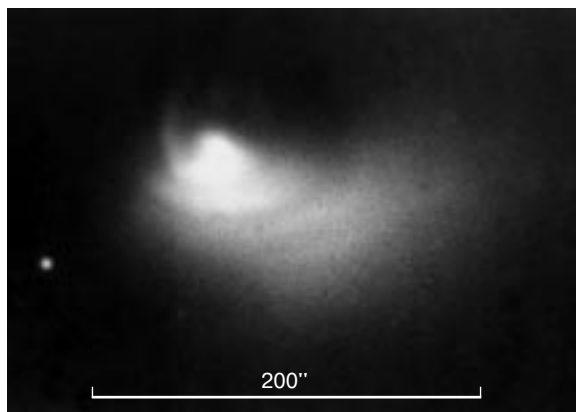


Рис. 3. Фотография головы кометы Хейла–Боппа. Видны пылевые оболочки, выброшенные из ядра (группа Т.П. Киселевой, 26" рефрактор ГАО РАН)

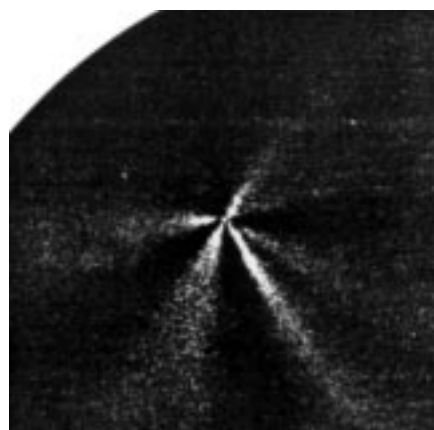


Рис. 4. Выбросы вещества из головы кометы Хейла–Боппа

Таблица 1. Молекулы, обнаруженные в голове кометы Хейла–Боппа

Формула	Название	Формула	Название
H ₂ O	Вода	<u>HC₂O</u>	
<u>HDO</u>	Тяжелая вода	HCOOH	Муравьиная кислота
OH	Гидроксил	CH ₃ OH	Метиловый спирт
H ₂ O ⁺	Ион воды	HCN	Цианид водорода
<u>H₃O⁺</u>		<u>DCN</u>	
CO	Оксид углерода	CH ₃ CN	Метиловый цианид
CO ₂	Двуокись углерода	HNC	Изоцианид водорода
CO ⁺	Ион окиси углерода	<u>H¹³NC</u>	Изотоп изоцианида водорода
HCO ⁺	Формилон	HC ₃ N	Циановый ацетилен
C ₂	Двухатомный углерод	HNCO	Изоциановая кислота
C ₃	Трехатомный углерод	CN	Циан
Na	Натрий	NH	
<u>K</u>	Калий	NH ₂	
H ₂ S	Сульфид водорода	NH ₃	Аммоний
<u>SO</u>	Оксид серы	<u>NH₂CHO</u>	Формамид
SO ₂	Двуокись серы	CH ₄	Метан
<u>H₂CS</u>	Тиформальдегид	C ₂ H ₂	Ацетилен
OCS	Сульфид карбоната	C ₂ H ₆	Этан
CS	Моносουλфид углерода	<u>Mg₂SiO₄</u>	Фостерит
H ₂ CO	Формальдегид	Fe ₂ SiO ₃	
		<u>CH₃OCHO</u>	

Примечание. Подчеркнуты химические формулы молекул, впервые обнаруженные в кометах.

Таблица 2. Молекулярная производительность Q ядра кометы Хейла–Боппа

Молекула	Q , молекул/с	R , а.е.
H ₂ O	$5 \cdot 10^{30}$	1,050–0,914
OH	$5 \cdot 10^{30}$	1,01
CN	$1,5 \cdot 10^{28}$	1,01
C ₂	$2 \cdot 10^{28}$	1,01
CO	$3 \cdot 10^{29}$	1,04
C ₂ H ₆	$7 \cdot 10^{27}$	~1,0
OCS	$1,5 \cdot 10^{28}$	~1,0
HCNC ₂ H ₂	$7 \cdot 10^{27}$	~1,0
CH ₃ OH	$1,1 \cdot 10^{28}$	3,6
H ₂ S	$8 \cdot 10^{27}$	3,6
CS	$3 \cdot 10^{26}$	3,6
H ₂ CO	$1,5 \cdot 10^{26}$	3,6
CH ₃ CN	$1,1 \cdot 10^{26}$	3,6
SO ₂	$6 \cdot 10^{27}$	0,95
HDO	$4 \cdot 10^{26}$	0,914
CH ₃ OCHO	$6 \cdot 10^{27}$	0,92
Пыль	$3,2 \cdot 10^5$ кг/с	1,144

Если массовая производительность воды (молекул H₂O) оценивается как 130 т/с, то соответствующую производительность пылевых частиц следует оценить как 1000 т/с. Это значительно выше, чем у любой кометы по крайней мере за последние 80 лет наблюдений и представляет в настоящее время рекорд.

Что касается химического состава пылевого компонента кометы, то новый интересный результат состоит в обнаружении большого количества разнообразных сочетаний металлов с силикатами, то есть соединений типа Fe_{*n*}SiO₄ и Mg_{*n*}SiO₄. Замечательным открытием явилось обнаружение фостерита Mg₂SiO₄. Именно это соединение наиболее часто встречается у молодых звезд с околозвездными дисками, в которых происходит формирование планет. В табл. 3 представлены отношения количеств разных молекул для кометы Хейла–Боппа и средней кометы. Наиболее существен результат в последней колонке, где показано отношение количества молекулярного газа CN к количеству пыли в комете века. Именно этот результат и свидетельствует о сильной запыленности кометы Хейла–Боппа, поскольку это отношение значительно меньше той величины, которая характерна для средней кометы.

Таблица 3. Отношение количества молекул CN к количеству других компонентов для кометы Хейла–Боппа и средней кометы

	Комета Хейла–Боппа	Средняя комета
CN/OH	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,75 \cdot 10^{-3}$
CN/NH	≥ 1	0,65
CN/C ₃	9,5	20,69
CN/C ₂	0,75	1,64
CN/пыль	0,65	91,72

ИЗОТОПНЫЙ СОСТАВ МОЛЕКУЛ В ГОЛОВЕ КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА

Важнейший ключ к пониманию природы и происхождения небесных объектов — это изотопный состав составляющих их атомов и молекул. Здесь ведущая роль принадлежит радиоастрономии, поскольку количественные оценки распространения изотопов определяются по очень тонкому эффекту — изотопному сдвигу атомных и молекулярных линий, который более эффективно обнаруживается радиоастрономическими методами. Наблюдения кометы Хейла–Боппа осуществлялись с помощью таких радиоинструментов, как радиоинтерферометры IRAM, VLA, радиотелескоп им. Джеймса Кларка Максвелла (Гавайские острова), инструменты субмиллиметровой обсерватории в Калтехе (США) и других, антенны которых достигают десятков и сотен метров в диаметре.

Впервые в кометах с помощью телескопа Дж.К. Максвелла (JCMT) помимо тяжелой воды были обнаружены цианистые соединения, содержащие тяжелый водород, — DCN. Также впервые для комет было определено отношение изотопов азота $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$.

В результате радиоастрономических наблюдений получены следующие изотопные соотношения:

$$\frac{\text{H}^{12}\text{CN}}{\text{H}^{13}\text{CN}} = 90 \pm 15, \quad \frac{\text{HC}^{14}\text{N}}{\text{HC}^{15}\text{N}} = 299 \pm 30,$$

$$\frac{\text{C}^{32}\text{S}}{\text{C}^{34}\text{S}} = 27 \pm 3, \quad \frac{\text{DCN}}{\text{HCN}} = 10^{-3}.$$

Любопытно сравнить эти значения с соответствующими величинами изотопных соотношений для Земли:

$$\frac{^{12}\text{C}}{^{13}\text{C}} = 89, \quad \frac{^{14}\text{N}}{^{15}\text{N}} = 270, \quad \frac{^{32}\text{S}}{^{34}\text{S}} = 24.$$

Сравнение дает удивительный результат: изотопный состав кометы Хейла–Боппа оказывается таким же, как у Земли. Любопытно, что совсем недавно ученые детально изучили химический и изотопный состав метеорита, который упал на Землю в Австралии вблизи городка Мерчен в 1969 году. Его химический состав также оказался чрезвычайно схож с составом земного грунта.

Другой интересный результат был получен из анализа зависимости изотопного отношения D/H от температуры. Кинетическая температура, соответствующая месту определения соотношения D/H, оказалась в интервале $25 \leq T \leq 45$ К, что значительно выше, чем типичная температура большого галактического молекулярного облака.

ПЕРЕМЕННОСТЬ ИЗЛУЧЕНИЯ КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА

Центральная задача в определении характера переменности — установить, вращается ли кометное ядро и как оно вращается. Результаты многочисленных наблюдений показали, что ядро кометы действительно вращается и период его вращения близок к 12 часам. Данные наблюдений в различные моменты времени дают следующие три значения периода вращения ядра кометы:

$$P_{\text{вр}} = 11^{\text{h}}20^{\text{m}} \pm 0^{\text{h}}10^{\text{m}}, \quad P_{\text{вр}} = 11^{\text{h}}65^{\text{m}} \pm 0^{\text{h}}10^{\text{m}},$$

$$P_{\text{вр}} = 11^{\text{h}}47^{\text{m}} \pm 0^{\text{h}}05^{\text{m}}.$$

В то же время серия выброшенных из ядра пылевых оболочек позволяет определить другое характерное время переменности. Это характерное время активности ядра (суперпериод) по отношению к выбросам пылевых частиц составляет

$$P_{\text{суп}} = 22^{\text{d}} \pm 2^{\text{d}}.$$

Такое же значение суперпериода было получено по данным наблюдений астрономов в Пулковской обсерватории.

В марте 1997 года испанские астрономы обнаружили другие характерные периоды переменности, используя фотометрические наблюдения кометы. Их результат дает

$$P_{\text{вр}} = 5,5^{\text{h}}, \quad P_{\text{суп}} = 7,19^{\text{d}}.$$

Однако следует заметить, что эти периоды кратны 12^{h} и 22^{d} . Проблема пока окончательно не решена.

Пожалуй, самый неожиданный результат, также полученный в марте, состоит в том, что астрономы обнаружили внезапное изменение направления вращения. В феврале наблюдения показывали, что ядро кометы вращалось по часовой стрелке. А в марте направление вращения сменилось на противоположное. Ученые обнаружили и более быструю переменность. Так, наблюдения показали, что эмиссионные линии иона CO^+ меняли интенсивность в течение 30 мин. И даже за более короткое время порядка нескольких минут.

Еще более впечатляющий результат получили пулковский астроном Т.М. Нацвлишвили и астрономы САО РАН. Они наблюдали поляризованное излучение кометы на 1-метровом телескопе САО РАН и обнаружили очень быстрые (в течение нескольких минут) изменения поляризации излучения кометы. Любопытно, что такие же быстрые изменения степени поляризации были обнаружены прямым экспериментальным методом во время запуска космического аппарата “Джогто” в голову кометы Шеллурупа–Кригга в июле 1992 года. Такие быстрые изменения обусловлены действием направленных струй газовой и пылевой материи, внезапно выброшенных из ядра кометы.

РАЗМЕРЫ ЯДРА КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА

Необыкновенное поведение кометы Хейла–Боппа заставило астрономов считать, что она имеет ядро очень больших размеров. Уже первые предварительные оценки показали, что его размер должен превышать несколько десятков километров. Радиоастрономические наблюдения собственного теплового излучения нагретой пыли вблизи ядра кометы позволили оценить радиус ядра в 45 км. Это означает, что комета Хейла–Боппа занимает по размерам своего ядра второе место в списке комет (табл. 4) после знаменитого космического тела Хирон, о котором астрономы сейчас спорят, является оно кометой или астероидом. Но это предмет особого разговора.

Таблица 4. Радиусы ядер основных комет

Название кометы	Расстояние в перигелии, а.е.	Радиус ядра кометы, км
Аренда–Риго	1,385	5,2
Борелли	1,365	
Хирона	8,454	90 ± 7
Арреста	1,346	2,68
Энке	0,331	3,1
Файе	1,665	2,7
Джикобини–Зиннера	1,035	3,0
Кригга–Шеллурупа	0,997	2,9
Хейла–Боппа	0,914	45
Галлея	0,596	5,5
Хонда–Мркоса	0,532	0,35
Хаякутаке	0,230	$2,4 \pm 0,5$
Айрес–Араки–Алкока	0,991	3,5
Копфа	1,579	$2,8 \times 1,8$
Леви Р/1991 L3	0,983	$< 8,2$
Ньюмена 1	1,549	10,4
Свифта–Таттла	0,962	11,8
Фаэтон	0,139	$2,6 \pm 0,7$
Темпла-2	1,482	$5,9 \pm 0,5$
Виртанена	1,064	1,0

НЕКОТОРЫЕ ДРУГИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА

Пожалуй, необычным в области физики комет явилось открытие рентгеновского излучения от некоторых из них. С помощью ультрафиолетового спутника EUVE американские ученые обнаружили мягкое рентгеновское излучение в области энергий 70–100 эВ у четырех комет, которые находились на различных гелиоцентрических расстояниях. В их числе кометы Хаякутаке и Хейла–Боппа. Комета Хаякутаке 22 марта 1996 года находилась на расстоянии 1,07 а.е. от Солнца, и полный поток рентгеновского излучения в тот момент составлял $F_x = 7,5 \cdot 10^{24}$ фот/с. Рентгеновское излучение кометы

Хейла–Боппа было зарегистрировано 14 сентября 1996 года, когда комета находилась далеко от Солнца – на расстоянии 3,07 а.е. Однако тогда ее рентгеновский поток был тоже $F_x = 8 \cdot 10^{24}$ фот/с. Ученым пока неясна природа этого рентгеновского излучения. Хотя преобладает мнение, что оно возникает в результате взаимодействия протонов солнечного ветра с энергией в несколько килоэлектронвольт с пылинками в голове кометы.

Другим замечательным событием в исследовании комет явилось открытие третьего хвоста кометы Хейла–Боппа, целиком состоявшего из атомов натрия. Это первая комета, у которой был обнаружен третий хвост. Дон Поллакко из обсерватории, расположенной в Ла-Пальме на Канарских островах, обнаружил его на снимках, полученных с помощью широкоугольной ПЗС-камеры. Это открытие состоялось потому, что Дон Поллакко работал с довольно узким фильтром, который выделял именно натриевую эмиссию. Это открытие произошло в середине апреля. К удивлению астрономов, излучающая натриевая область занимала огромное пространство, охватывая голову кометы и уходя далеко в хвост. Протяженность хвоста составляла 6° , или почти 50 млн км. Впоследствии группа астрономов из Университета Бостона обнаружила натриевый хвост на снимках Обсерватории Макдональдса, полученных еще в марте. Анализ наблюдательного материала показал, что атомы натрия не появляются непосредственно с поверхности ядра, а возникают из какого-то другого источника. Возможно, это пылинки в голове кометы, которые уносятся в хвост световым давлением. Однако отдельное положение натриевого хвоста, которое не совпадает с положением обычного пылевого хвоста, сильно противоречит этому предположению. В Пулковской обсерватории разрабатывается другая идея. Источником натрия являются крупные макромолекулярные соединения типа $[\text{Na}(\text{NaCN})_n]$ или $[(\text{NaCN})_n(\text{CN})_n]$, где n может принимать значения, лежащие в интервале от 0 до 37 (наподобие знаменитых фуллеренов). Такие молекулярные кластеры, открытые недавно в химических лабораториях, очень устойчивы по отношению, например, к фотоионизации. Если они образуются в кометах, то могут уходить на большие расстояния от ядра и лишь там, подвергаясь бомбардировке со стороны протонов солнечного ветра, освободят атомы натрия, образуя уже совершенно отдельный хвост.

Наконец, третья характерная особенность кометы – это необычное поведение ее поляризованного излучения. Сильная линейная поляризация излучения этой кометы была открыта астрономами Т.М. Нацвлишвили (ГАО РАН), В.Д. Бычковым и В.П. Романенко (САО РАН), а также Н.Н. Киселевым (АО ХГУ Украины). Поляризованное излучение возникает в результате рассеяния солнечного света на кометных молекулах и пылинках. Впервые обнаружена круговая поляризация излучения

(В.К. Розенбуш и Н.М. Шаховской), а это свидетельствует, что в кометах действует механизм ориентации пылевых частиц.

НАБЛЮДЕНИЯ ПОКРЫТИЯ КОМЕТОЙ ЗВЕЗД И РАДИОИСТОЧНИКОВ

Хорошо известно, что кометы можно использовать как экспериментальные зонды для исследования околосолнечного пространства на больших расстояниях от плоскости эклиптики, а также наблюдать покрытия ими ярких звезд и радиоисточников. Так, радиоастрономы наблюдали и исследовали покрытия хвостом кометы Аренда–Роланда некоторых радиоисточников.

Естественно, что яркая и необычная комета Хейла–Боппа также использовалась для этих целей. В Национальной радиоастрономической обсерватории США наблюдали покрытия трех компактных радиоисточников головой кометы Хейла–Боппа с целью измерения концентрации ОН в комете. Были определены профили линий ОН на частотах 1667 и 1665 МГц.

Астрономы наблюдали также покрытия кометой ярких звезд. В Обсерватории Ловелла 5 октября 1996 года наблюдалось покрытие звезды 9-й звездной величины. Аналогичные работы были выполнены Н.М. Шаховским и В.К. Розенбуш в Крымской астрофизической обсерватории. Обнаружено заметное поглощение света звезды, свидетельствующее, что внутренняя часть головы кометы является оптически толстой.

БУДУЩЕЕ КОМЕТЫ ХЕЙЛА–БОППА

В заключение несколько слов о том, что ждет комету Хейла–Боппа в будущем. 30 сентября 1997 года

комета находилась на расстояниях 2,8 а.е. от Солнца и 3,09 а.е. от Земли. По отношению к Солнцу ее скорость составляла 20,4 км/с, а относительно Земли 6,07 км/с. 17 ноября 2017 года комета будет находиться на расстоянии 40 а.е. от Солнца и двигаться со скоростью 6 км/с. 14 ноября 2050 года комета будет находиться на расстоянии 75 а.е. от Солнца и двигаться со скоростью 4,3 км/с. Наконец 8 августа 2080 года она уйдет на расстояние в 100 а.е. и будет двигаться со скоростью 3,6 км/с. Вернется ли эта комета к нам? Законы небесной механики дают возможность ответить на этот вопрос: она вернется через 2712,1 лет. Таков орбитальный период этой замечательной кометы. Комета движется по сильно вытянутому эллипсу с эксцентриситетом, равным 0,99; расстояние орбиты в перигелии составляет 0,91 а.е., а самая удаленная точка на орбите (афелий) располагается на расстоянии в 388 а.е., то есть далеко за пределами Солнечной системы. Такова судьба этой замечательной кометы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Добровольский О.В. Кометы. М.: Наука, 1966.
2. Bortle J.E. Great Comets in History // Sky and Telescope. 1997. Vol. 93, № 1. P. 44.

* * *

Юрий Николаевич Гнедин, доктор физико-математических наук, профессор кафедры “Космические исследования” Санкт-Петербургского технического университета, зам. директора Главной (Пулковской) астрономической обсерватории РАН. Область научных интересов – астрофизика, физика плазмы. Автор более 150 научных работ.