

УДК 523.6

Ш.Ш.Шоёкубов, Ш.Шоёкубов, А.А.Ибрагимов

ДИНАМИКА И СКОРОСТЬ ОБАЗОВАНИЯ СЛОЖНЫХ ИОНОВ В КОМЕТАХ*Институт астрофизики АН Республики Таджикистан**(Представлено членом-корреспондентом АН Республики Таджикистан Х.И.Ибодиновым 10.12.2013 г.)*

В работе путём лабораторного моделирования кометного явления методом масс-спектрального анализа исследованы динамика и скорость образования сложных ионов при бомбардировке кометного материала из смеси H_2O и CO_2 в твёрдой фазе положительными ионами ^{133}Cs энергией 1.5 КэВ. При вычислении использованы масс-спектральные результаты лабораторного моделирования кометных явлений и метод пропорциональности коэффициентов эмиссии.

Ключевые слова: *сложные ионы – скорость образования – двухзаряженные ионы – положительные ионы – кометный лед.*

Многие наблюдаемые в кометах явления не только качественно, но и количественно остаются до конца не объяснёнными. К их числу, в частности, относятся природа и скорость формирования различных кометных молекул, радикалов и их ионов.

Измерения с помощью космических аппаратов "Вега-2" и "Джотто" обнаружили наличие таких сложных молекул, как C_2 , C_3 и их ионов вблизи ядра кометы Галлея [1,2].

Объём, где идёт регистрация ионов, которые образовались в результате воздействия корпускулярного потока солнечного ветра на кометы и кометные вещества, на несколько порядков больше, чем объём самой кометы. Чем больше расстояние космического аппарата от кометы, тем больше объём, где наблюдается наличие этих ионов. Также под воздействием силовых линий магнитного поля эти ионы распределены неравномерно. Плюс к этому, отрицательные ионы легко разрушаются солнечным излучением, хотя эффективный механизм такого явления до сих пор не известен [3].

Имеется много опубликованных экспериментальных работ по исследованию сложных молекул, в том числе органических, которые формируются в результате воздействия корпускулярных частиц на кометные льды. Например, в работе S.R.Ponciano et al. [4] рассмотрен ряд положительных и отрицательных ионов, которые образовались в результате бомбардировки льда из смеси H_2O и CO_2 ($T=80-90$ К) ионами $^{14}N_2$ в области МэВ энергии и нейтронами ^{252}Cf [4].

В работе [5] рассмотрены возможности образования некоторых сложных молекул в случае бомбардировки льда из смеси H_2O , CO , CH_4 , N_2 при $T=12$ К ионами He^+ энергией 30 КэВ и двухзаряженными ионами Ag^{++} энергией 60 КэВ. Во многих других подобных работах рассматриваются возможные механизмы формирования сложных ионов в результате воздействия ионов с высокой энергией на льды в Солнечной системе. Результаты таких работ нельзя использовать для количественной оценки и анализа динамики этих процессов, так как энергетический диапазон воздействующих час-

Адрес для корреспонденции: Шоёкубов Шоаюб Шосиддиқович. 7340042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Бухоро, 22, Институт астрофизики АН РТ. E-mail: shoayub@shohrukh.com

тиц и их плотность очень далеки от реальных физических условий комет. Если с ростом плотности заряженных частиц почти линейно растёт количество вторичных ионов во вторичном потоке, то с увеличением энергии бомбардирующих частиц наблюдается резкое изменение соотношения спектральных линий во вторичных ионах, а также наблюдается появление и рост количества двух- и более зарядных ионов [6].

Наземным наблюдателям не удаётся делать количественные оценки ионов в кометах. Динамику и численные данные образующихся ионов на поверхности ядра кометы, таких как скорость образования, плотность, скорость накопления, скорость рекомбинации и т.п., можно получить путём посадки космического аппарата непосредственно на поверхность исследуемого объекта или измерения этих ионов вблизи этой поверхности. Так как при зондировании кометы на расстоянии космический аппарат начинает регистрировать ионы, которые образовались в результате распыления поверхности головы кометы корпускулярными частицами солнечного ветра, и ионы, которые образовались в результате столкновения с ледяными зёрнами и пылевыми частицами в атмосфере кометы. Также эти данные можно определить лабораторно-аналитическим методом. Первый метод не всегда доступен из-за большой себестоимости таких экспериментов. Даже при наличии такой возможности для разработки измерительных бортовых космических приборов заранее потребуются данные о величинах и диапазонах измеряемых параметров, таких как скорость образования, поток и диапазон масс этих ионов. Количественные данные можно получить методом лабораторного моделирования при строгом соблюдении условий, близким к кометным.

В данной работе путём лабораторного моделирования кометного явления методом масс-спектрального анализа исследованы временные характеристики и динамика, в том числе скорость образования сложных ионов путём бомбардировки кометного материала из смеси H_2O и CO_2 в твёрдой фазе положительными ионами ^{133}Cs . Используя масс-спектральные результаты лабораторного моделирования кометных явлений методом пропорциональности коэффициентов эмиссии, вычислена скорость образования сложных ионов.

Плётка льда из смеси $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$, напылённая на поверхность металлической подложки, охлаждённая жидким азотом до температуры 80 К, бомбардировалась положительными ионами. Ионная составляющая продуктов распыления вытягивалась электрическим полем и анализировалась лабораторным магнитным масс-спектрометром. Масс-спектр записывался с помощью двухкоординатного потенциометра, горизонтальная развёртка которого производилась током питания электромагнита масс-анализатора, а вертикальная развёртка - ионным током масс-анализатора.

При исследовании динамики изменения интенсивности отдельных ионов в случае бомбардировки ледяной модели кометы, для повышения точности измерения использовали метод двойной модуляции [7].

В табл. 1 приведён масс-спектр положительных ионов, распылённых с поверхности свежена-несённой и ранее не подвергавшейся бомбардировке плётки льда, состоящего из смеси CO_2 и H_2O , при бомбардировке её ионами $^{133}\text{Cs}^+$ с энергией 1.5 КэВ. Тяжёлые ионы цезия применялись в работе для того, чтобы исключить из спектра масс в рассматриваемой области от 10 до 60 а.е.м. бомбардирующие ионы и их соединения.

Таблица 1

Масс-спектр положительных ионов, распылённых с поверхности свеженанесённой плёнки льда, состоящего из смеси $H_2O + CO_2$ при бомбардировке ионами Cs^+

Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, %	Скорость ионов, N (ион $m^{-2}c^{-1}$)	Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, %	Скорость ионов, N (ион $m^{-2}c^{-1}$)
12	C^+	21.6	1.63×10^{10}	28	CO^+	10.2	7.71×10^9
16	O^+	12.3	9.29×10^{10}	32	O_2^+	2.1	1.58×10^9
17	OH^+	4.8	3.62×10^9	44	CO_2^+	44.3	3.34×10^{10}
27	?	3.7	3.78×10^9				

Данные табл. 1 показывают, что масс-спектр распылённых с поверхности ранее не подвергавшейся облучению плёнки льда состоит из ионов замороженных молекул CO_2 , H_2O и ионов-продуктов их распада, а также эти линии качественно совпадают с линиями спектра смеси, состоящего из CO_2 и H_2O в газовой фазе [8].

Результаты продолжительной бомбардировки показали, что в масс-спектре плёнки льда из смеси $CO_2 + H_2O$ появляются и со временем растут интенсивности новых пиков. Рост интенсивности новых, более сложных ионов коррелируется с ростом дозы облучения, получаемого замороженной плёнкой. В таблицах вопросительными знаками отмечены масс-спектральные линии, которые не удалось отождествить.

В табл. 2 и 3 приведены масс-спектры, соответственно, положительных и отрицательных ионов, распылённых с поверхности замороженной плёнки, состоящей из смеси CO_2 и H_2O после ионного облучения плёнки в течение 10 часов (доза облучения 5×10^{14} ион m^{-2}).

Приведённые масс-спектры показывают, что новые виды ионов (например, CH^+ , C_2^+ , C_2H^+ , C_3^+ , C_4^+ , $C_2H_2^+$), интенсивность которых зависит от дозы полученного облучения, не являются фрагментами распада бомбардируемых веществ (H_2O , CO_2), а являются более сложными образованиями.

Таблица 2

Масс-спектр положительных ионов, распылённых с поверхности плёнки льда $H_2O + CO_2$ ионами Cs^+ в течение 10 часов

Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, (%)	Скорость ионов, N (ион $m^{-2}c^{-1}$)	Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, %	Скорость ионов, N (ион $m^{-2}c^{-1}$)
12	C^+	22.1	1.67×10^{10}	27	?	6.2	4.68×10^9
13	CH^+	3.8	1.87×10^9	28	CO^+	7.0	5.29×10^9
16	O^+	1.0	7.58×10^8	32	O_2^+	7.2	5.44×10^9
17	OH^+	1.9	1.43×10^9	36	C_3^+	2.1	1.58×10^9 [9]
24	C_2^+	3.6	2.78×10^9 [9]	44	CO_2^+	32.6	2.46×10^{10}
25	C_2H	5.6	4.23×10^9	48	C_4^+	1.0	7.58×10^9 [9]
26	C_2H_2	5.8	4.38×10^9				

Если же замороженную плёнку льда из смеси CO_2 и H_2O продолжительное время держать без облучения, в начальный момент ионного облучения молекулярные ионы углерода не наблюдаются. Всё это свидетельствует о том, что источником молекулярных ионов углерода и углеводородов являются более сложные тугоплавкие вещества, образовавшиеся в результате ионно-молекулярных (а

не простых химических) реакций из замороженного CO_2 , H_2O и продуктов их распада. Наблюдаемые в данном эксперименте ионы молекулярного углерода и углеводородов происходят из этих тугоплавких образований в результате их распыления при последующей ионной бомбардировке.

Данные табл. 3 показывают, что при ионной бомбардировке плёнок льда $\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ наряду с положительными ионами наблюдается целый ряд молекул и радикалов в виде отрицательных ионов.

Таблица 3

Масс-спектр отрицательных ионов, распылённых с поверхности плёнки льда $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ ионами Cs^+ в течение 10 часов

Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, %	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)	Масса ионов, m (а.е.м.)	Ионы	Содержание, %	Скорость ионов, N (ион $\text{м}^{-2}\text{с}^{-1}$)
12	C^-	12.1	9.14×10^9	25	C_2H^-	11.8	8.92×10^9
13	CH^-	11.5	8.69×10^9	26	?	5.9	4.46×10^9
14	?	1.0	7.58×10^8	32	O_2^-	1.6	1.20×10^9
16	O^-	24.2	1.82×10^{10}	36	C_3^-	4.4	3.32×10^9 [10]
17	OH^-	8.3	6.27×10^9	39	C_3H_3^-	2.6	1.96×10^9
18	?	0.6	4.53×10^8	44	CO_2^-	1.0	7.58×10^8
24	C_2^-	13.5	1.02×10^{10} [10]	48	C_4^-	1.4	1.05×10^9 [10]

На рисунке показана зависимость скорости формирования сложных положительных ионов от продолжительности бомбардировки плёнки льда из смеси $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$ положительными ионами Cs^+ энергией 1.5 КэВ. Если скорость формирования сложных ионов, распылённых с поверхности свеженанесённой плёнки льда, в начальный момент бомбардировки равна нулю, то после 10 часов бомбардировки, доходя до максимума своего значения, наблюдается стабилизация динамики этой скорости.

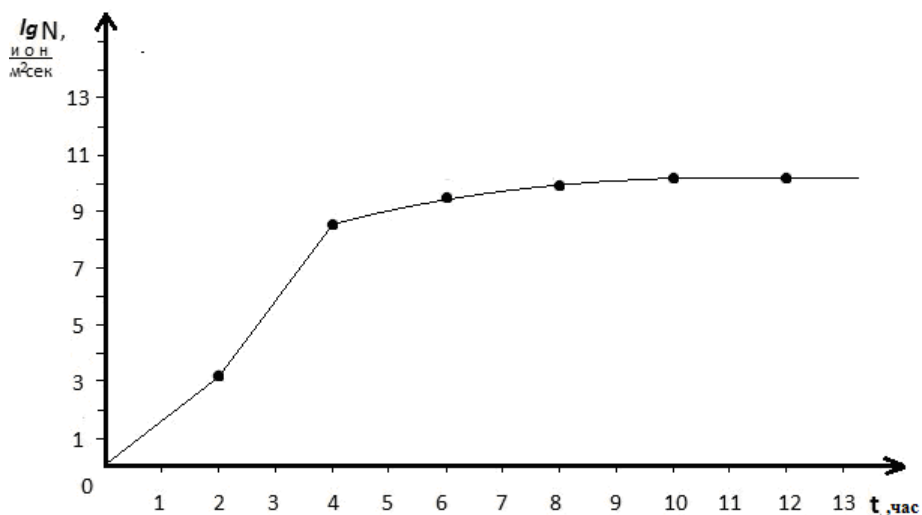


Рис. Динамика формирования сложных положительных ионов с поверхности льда $\text{H}_2\text{O}+\text{CO}_2$ при бомбардировке положительными ионами $^{133}\text{Cs}^+$, энергией 1.5 КэВ.

Скорее всего, родительские молекулы для положительных одноимённых и отрицательных ионов одни и те же. Зарядовое состояние эмитирующей частицы зависит от потенциала ионизации, электронного сходства эмитирующейся частицы и физических характеристик эмитирующей поверхности [11]. Сопоставление данных табл. 2 и 3 показывают, что скорости формирования отрицательно-

ионной эмиссии CN^+ , O^+ , OH^+ , C_2^+ , C_3^+ в общей эмиссии отрицательных ионов больше, чем для положительных одноимённых ионов.

Полученные результаты показывают, что во всех рассмотренных моделях в результате взаимодействия заряженных частиц с молекулами рассмотренных вероятных кометных веществ в начале бомбардировки свеженанесённого моделируемого кометного вещества наблюдаются в основном ионы, представляющие собой продукты распада этих веществ. Если взять те же вещества или их смеси в конденсированном замороженном состоянии, то под действием потока энергичных ионов, при взаимодействии определённой дозы бомбардирующих ионов возникают новые, более сложные вещества, интенсивность которых растёт с дозой предварительного облучения.

Общее сходство спектров (см. табл. 2,3) показывает, что многие наблюдаемые сложные молекулы (в том числе и органические) могут иметь различное происхождение, но возникают только после поглощения определённой дозы облучения, то есть в результате ионно-молекулярных взаимодействий. Следовательно, новые образования возникают, преимущественно, в результате вторичных реакций между продуктами распада первоначально взятых веществ в первых актах взаимодействия бомбардирующих энергичных частиц с этими молекулами. Во всех случаях, при продолжительном облучении плёнки льда, на поверхности подложки образуется тёмная тугоплавкая плёнка, которая не испаряется даже при температуре 1273 К.

Из данных, приведённых в табл. 3, следует, что с поверхности пылевых и ледяных зёрен в кометах может имитироваться ряд сложных молекул и радикалов в виде отрицательных ионов. Скорость формирования этих сложных ионов, которые не являются продуктами распада этих веществ, по сравнению с положительными ионами всегда больше.

Поступило 25.12.2013 г.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Krasnopolsky V.A., Gogoshev M., Moreels G. et al. – Nature, 1986, v. 321, pp. 269-270.
2. Krankovsky D., Lammerzahl P., Herrwerth I. et al. – Nature, 1986, v. 321, pp. 326-329.
3. Chaizy P., Reme H., Sauvaud J.A., et al. - Nature, 1991, v. 349, pp. 393-396.
4. Ponciano C.R., Farenzena L.S. et al. - International Journal of Mass Spektrometri, 15 June 2005, v. 244, pp. 41-49.
5. Baratta G.A., Brunetto R., Leto G., Palumbo M.E., Spinella F., Strazzulla G. - Mem. S.A.It. Suppl., 2004, v. 5, p. 33.
6. Хашимов Н.М., Ибадинов Х.И., Шоёкубов Ш.Ш. Лабораторное исследование образования возможности тугоплавких веществ в кометах. - ДАН РТ, 1994, т. 37, № 1, с.16-19.
7. Арифов У. А. Взаимодействие атомных частиц с поверхностью твёрдого тела. - М: Наука, 1968, 370 с.
8. Хашимов Н.М, Ибадинов Х.И., Шоёкубов Ш.Ш. Масс-спектральное исследование ионного распыления ледяных моделей кометных ядер. -Кометы и метеоры, 1989, №39, с. 29-30.
9. Шоёкубов Ш.Ш. Хашимов Н.М. О скорости образования углерода в кометах. - ДАН РТ, 2008, т. 51, № 1, с. 24-27
10. Шоёкубов Ш.Ш. Скорость образования отрицательных ионов углерода в кометах. - ДАН РТ, 2010, т.53, № 10, с.770-774

11. Хашимов Н.М. – Изв. АН СССР, 1974, сер. физ., №2, с.331.

Ш.Ш.Шоёқубов, Ш.Шоёқубов, А.А.Иброхимов

ДИНАМИКА ВА СУРЪАТИ БА ВУЧУДОИИ ИОНҲОИ МУРАККАБ ДАР КОМЕТАҲО

Институти астрофизикаи Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон

Дар мақола бо усули лабораторӣ ва таҳлили масс-спектралӣ, динамика ва суръати ба вучудоии ионҳои мураккабе, ки дар натиҷаи бомбабороншавии яхи омехтаи H_2O ва CO_2 бо ионҳои мусбати Cs^+ дорои энергияи 1.5 КэВ буда, ҳисоб карда шудааст. Дар ҳисобкунӣ натиҷаҳои масс-спектралӣ ва усули мутаносибии зариви афканишот истифода шудааст.

Калимаҳои калидӣ: молекулаҳои мураккаб – суръати ба вучудой – ионҳои дукарат заряднокишуда – ионҳои мусбӣ – яхи комета.

Sh.Sh.Shoyoqubov, Sh.Shoyoqubov, A.A.Ibrohimov

DYNAMICS AND SPEED OF COMPLEX IONS FORMATION IN COMETS

Institute of Astrophysics, Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan

The purpose of this research is to create a laboratory model of comet phenomenon and perform mass spectral analysis of the dynamics and speed of formation of complex ions by bombarding the solid mixture of H_2O and CO_2 with positive Cs ions with energy of 1.5KeV. Results of previous mass spectral studies of laboratory modeled comet phenomena and emission coefficient proportionality method were used in calculations.

Key words: complex ions – speed of formation – twice charged ions – positive ions – cometary ice.