

УДК 523.6

## Солітонна модель утворення сферичних хмар у плазмових хвостах комет

К.І. Чурюмов, Ю.Г. Рапопорт

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

На прикладі фотографічних зображень комети Галлея, отриманих К.І.Чурюмовим в 1985–1986 р., запропоновано солітонну модель сферичних і нерегулярних згущень, що спостерігаються в комах і плазмових хвостах комет. Розраховано параметри солітону (сферичної хмари), що спостерігалася в плазмовому хвості комети 1P/Галлея 12 грудня 1985 р.

СОЛИТОННАЯ МОДЕЛЬ ОБРАЗОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКИХ ОБЛАКОВ В ПЛАЗМЕННЫХ ХВОСТАХ КОМЕТ, Чурюмов К.И., Рапопорт Ю.Г. — На примере фотографических изображений кометы Галлея, полученных К.И.Чурюмовым в 1985–1986 г., предложена солитонная модель сферических и нерегулярных сгущений, которые наблюдаются в комах и плазменных хвостах комет. Рассчитаны параметры солитона (сферического облака), который наблюдался в плазменном хвосте кометы 1P/Галлея 12 декабря 1985 г.

SOLITON MODEL OF FORMATION OF SPHERICAL CLOUDS IN THE COMETARY PLASMA TAIL, Churyumov K.I., Rapoport Yu.G. — On the basis of photographic images of comet Halley, obtained by K.I.Churyumov in 1985–1986, soliton model of spherical and nonregular condensations in cometary plasma tails, is proposed. Parameters of the soliton (spherical cloud), which observed in the plasma tail of comet 1P/Halley, is calculated.

**Ключевые слова:** хвосты комет; солитонные решения .

**Key words:** cometary tails; soliton solutions.

Плазмові структури, а саме сферичні і нерегулярні згушення, часто спостерігаються в головах і хвостах багатьох яскравих комет (див. огляд W.-H. Ip і W.I.Axford [1]). Типові просторові масштаби цих плазмових хмар складають близько  $10^3$ – $10^4$  км. Середня тривалість життя згушень — близько одного дня. Згушення рухаються з прискоренням в плазмових хвостах комет вздовж напрямку радіус-вектору, тобто від Сонця. Співвідношення антисонячних відштовхувальних сил до гравітаційного притягання Сонця в них  $1-\mu$  досягає значень близько 100–1000.

Хоча згушення в яскравих кометах візуально спостерігалися ще в давні часи [2], їхні перші фотографічні зображення були отримані 13 липня 1893 р. Хюссеем для комети Рордама–Кеніссе (1893 II). Аналізуючи рух згушень в цій кометі, Ф.А.Бредіхін визначив значення відштовхувальної сили  $1-\mu \cong 36$ . Значення  $1-\mu \approx 2000$  отримав Н.Т.Бобровніков для комети Галлея (1910 II), в якій було відомо приблизно 30 згушень [3].

Численні згушення спостерігалися у комети Галлея протягом її останньої появи (1982–1994) [4, 5]. Низку великомасштабних зображень отримав К.І.Чурюмов за допомогою 1-метрового рефлектора Цейсса Астрофізичного Інституту імені Василя Фесенкова Академії наук Казахстану в грудні 1985 р., січні і травні 1986 р. [4]. Наприклад, згушення як в голові комети, так і в хвості, спостерігалися на негативах, отриманих у грудні 12.64, 16.63 і 17.62 UT, 1985 року. В той же час велике число спостерігачів у Європі, Австралії, США, Японії та деяких інших країн, відзначили появу яскравих світлих плям в голові комети і конденсацій, які швидко рухалися в хвості першого бредихинського типу, тобто в плазмовому хвості. Спектральні спостереження згушень показали, що вони світяться в емісійних лініях іонів  $\text{CO}^+$  чадного газу та молекул азоту  $\text{N}_2^+$ , що свідчило про плазмову природу цих яскравих хмар в комі і хвості.

Ми припускаємо, що вони є стійкими щільними структурами, викликаними нелінійними поодинокими альвеновськими хвилями і відгалуженнями магнітоакустичних хвиль, які грають важливу роль для космічних плазмових об'єктів [6]. Високий рівень спектральної густини цих хвиль у кометній плазмі є підтвердженням нашого припущення. Для того, щоб вивчати можливість солітонного механізму утворення згушень, розглядається нелінійна динаміка магнітоакустичних хвиль.

Вивчення здійснюється в термінах набору МГД-рівнянь для іонів і електронів кометної плазми. Ми вивчаємо одновимірне поширення хвилі уздовж осі абсцис з кутом  $\theta$  до зовнішнього магнітного поля. Використовується спрощений метод збурення для слабо розсіюючих та слабо нелінійних хвиль. Солітон KDV утворюється за певних умов для  $\theta$  і для хвильового числа основної магнітоакустичної хвилі.

Просторовий розмір магнітоакустичного солітону, що рухається уздовж хвоста з альвенівською швидкістю  $V_A$ , визначається за формулою

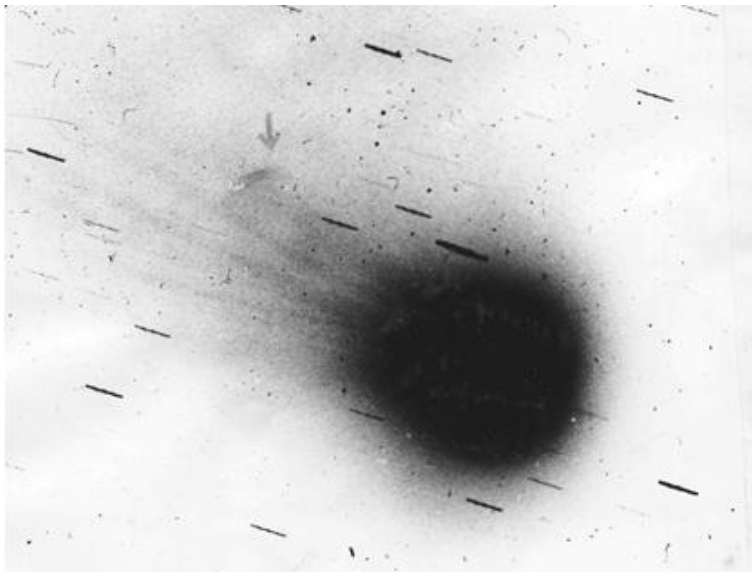
$$l \cong \frac{V_A}{\omega_{\text{Hi}} \cdot \varepsilon^{1/2} \operatorname{tg} \theta},$$

де  $\omega_{\text{Hi}}$  — гірочастота іонів комети, а  $\varepsilon \leq 1$  — збурення густини плазми. Підраховано для поширення окремої хвилі з  $\theta = 15^\circ$  у зовнішньому магнітному полі 10 нТ, що  $l \geq 750$  км, і це значення узгоджується зі спостережуваними даними.

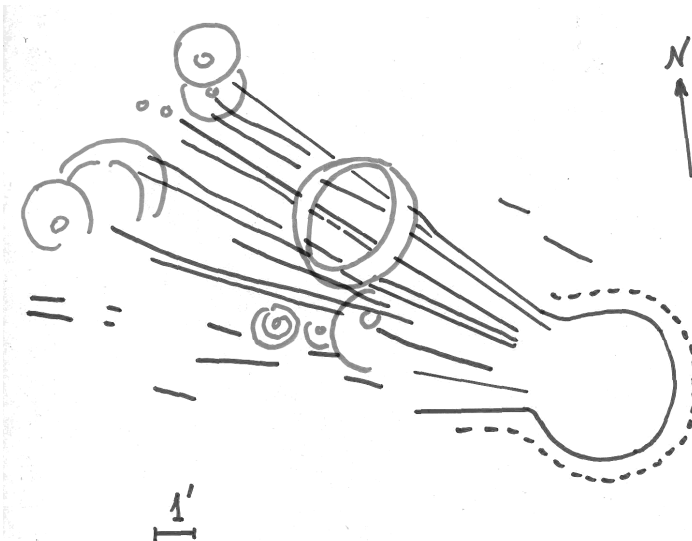
Розглянемо двовимірну модель для поширення згущень, спираючись на рівняння Кадомцева–Петвіашвілі для окремих магнітоакустичних хвиль у теплій плазмі [8]. Ми вводимо змінні  $\xi \sim (x \sim V_{\text{ph}} t)$ ,  $\eta \sim z$ ,  $\tau \sim t$ . Стандартна форма цих рівнянь у безрозмірних змінних має вигляд:

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{\partial \psi}{\partial \tau} + 6\psi \frac{\partial \psi}{\partial \xi} + \frac{\partial^3 \psi}{\partial \xi^3} \right) + 3\sigma^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial \eta^2} = 0,$$

де  $\psi$  — стандартна густина плазми, а  $\sigma^2 = \pm 1$ . Рациональні розв'язки чи сукупність розв'язків у свернутому вигляді для повільних хвиль є сталими [8]. Для цього випадку  $\sigma^2 = -1$ . Ми розглядаємо лише



**Рис. 1.** Фотографічне зображення комети 1P/Галлея (з кільцевою конденсацією) одержане К.І.Чурюмовим 12.64 UT грудня 1985 р. за допомогою 1-метрового Цейсівського рефлектору в заповіднику Асси-Тургень (Казахстан).



**Рис. 2.** Сферичні хмари (конденсації) в плазмовому хвості комети 1P/Галлея 12.64 UT грудня 1985 р. Структурний малюнок зроблено на основі фотографії комети 1P/Галлея, отриманої К.І.Чурюмовим за допомогою 1-метрового Цейсівського рефлектору на високогірній станції Астрофізичного інституту імені Василя Фесенкова в заповіднику Асси-Тургень (Казахстан).

**Таблиця 1.** Параметри солітону в плазмовому хвості комети 1P/Галлея

$\theta$	$l$ , км		
	$\psi_0 = 1.1$	$\psi_0 = 3$	$\psi_0 = 10$
$15^\circ$	12.7	4.7	1.4
$5^\circ$	36.4	13.3	4
$0.5^\circ$	364	133	40
$0.1^\circ$	1820	670	200
$0.05^\circ$	3730	1370	410
$0.01^\circ$	18550	6800	2040

повільну хвилю. Стандартне рівняння дисперсії набуває вигляду:

$$\lambda^2 = \frac{1}{2} \left( 1 + \beta - \sqrt{1 + \beta^2 - 4\beta \cos^2 \theta} \right),$$

Цей розв'язок справедливий для  $0 < \theta < \frac{\pi}{2}$ , де  $\theta$  — кут між магнітними силовими лініями поля та віссю абсцис. Ширина результуючого солітону вздовж напрямків  $\xi$  та  $\eta$  є різною. Більш того, ми розглядаємо майже “коловий” рух солітона вздовж осі абсцис. Для  $V_A = 10$  км/с та  $C_s = 12$  км/с ми отримуємо, що  $\lambda \approx 1$  і  $\beta \approx 1.44$ . Ширина солітона у напрямі  $\eta$  може бути оцінена як:

$$l \cong \frac{0.32V_A}{\psi_0 \sin \theta},$$

де  $\psi_0$  дорівнює співвідношенню максимальної плазмової густини в солітоні до густини вихідної плазми. Деякі оцінки наведені в табл. 1. Для  $\psi \gg 1$  вказані числові розрахунки.

Підсумовуючи дослідження, ми припускаємо, що згущення можуть бути нелінійними МГД-хвилями у кометній іоносфері. Приведені оцінки добре узгоджуються з нижньою границею оцінок спостережуваних просторових масштабів згущень.

1. *Ip W.-H., Axford W.I.* // In Comets, (L.L.Wilkening ed.), Arizona Univ. Press, 1982, 588.
2. *Yeomanse D.K.* Comets. — Willey Science Editions, USA, 1991.
3. *Bobrovnikoff N.T.* // Publ. Lick. Obs. — 1931. — **17**. — P.309.
4. *Churyumov K.I.* // In Comets in Post-Halley Era, Bamberg, April 24–28, 1989. — P.196.
5. *Belyaev N.A., Churyumov K.I.* Comet Halley and its observations. — Moscow: Nauka Publ. House, 1985.
6. *Karpman V.I.* // Nonlinear waves in a dispersive medium. — Pergamon, Oxford, 1975.
7. *Kakutani T.* // Suppl. Progress of Theor. Phys. — 1974. — № 55. — P.97.
8. *Janaki M.S., Som B.K., Dasgupta B., Gupta M.R.* Burgers equation for the decay of solitary magnetosonic waves propagating obliquely in a warm collisional plasma // Journ. Phys. Soc. Japan. — 1991. — **60**, № 9. — P.2977.
9. *Mjølhus E., Wyller J.* // Physica scripta. — 1986. — **33**. — P.442.

Надійшла до редакції 8.10.2013