

Статистична ентропія чорної діри. Як і площа, кутовий момент L_z є адиабатичним інваріантом. Відповідно до правила квантування адиабатичного інваріанта Бора-Зоммерфельда

$$\oint L_z d\omega = 2\pi\hbar \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (15)$$

Цей інтеграл визначає площу, яку охоплює фазова траєкторія чорної діри. Розбиваючи її на комірки площею $2\pi\hbar$ ми отримуємо m комірок. Це число є число мікростанів системи [7]. Отже, m у виразах (12) і (13) є число мікростанів чорної діри, $W = m$. Більш загально можна сказати, що енергія чорної діри не залежить від того, де кутовий момент \hat{L}_z визначений на поверхні горизонту. Оскільки точність, з якою визначається \hat{L}_z дорівнює кванту площі поверхні горизонту подій, то число мікростанів чорної діри є дійсно m . Таким чином, поверхня горизонту подій чорної діри є ніщо інше, як фазовий простір, або краще сказати, фазова поверхня чорної діри, а квантування площі поверхні чорної діри є, відповідно, квантування цієї фазової поверхні. З (2) і (13) випливає, що ентропія чорної діри також квантується

$$S_{BH} = 2\pi \cdot m, \quad m = 0, 1, 2, \dots \quad (16)$$

з квантом ентропії $\Delta S = 2\pi$. Оскільки m - число мікростанів чорної діри, то ентропія чорної діри не є логарифмом числа мікростанів, як для звичайних систем (3), а пропорційна цьому числу

$$S_{BH} = 2\pi \cdot W. \quad (17)$$

Зауважимо, що якщо ми б спробували відповідно до стандартної формули (3) взяти логарифм m , то другий узагальнений закон термодинаміки був би порушений [8].

Узагальнення. Представлений у доповіді підхід до квантування площі горизонту подій чорної діри і визначення статистичної ентропії чорної діри поширений автором на загальний випадок чорної діри Керра-Н'юмена [9]. Крім того, значимо, що Medved [2] поширив підхід автора на квантування площі горизонту чорних дір в узагальнених теоріях гравітації, а Jia, Mao і Ren [10] – на квантування площі космологічного горизонту простору де Сіттера.

1. Bekenstein J. D. Black holes and entropy // Phys. Rev.– 1973. – D 7. – P. 2333–2346. 2. Medved A.J.M. On the "Universal" Quantum Area Spectrum // Mod. Phys. Lett. – 2009. – A 24. – P. 2601–2609. 3. Frolov V. and Novikov I. Black Hole Physics: Basic Concepts and New Developments. – Dordrecht: Kluwer Academic, 1998. 4. Townsend P.K. Black holes // arXiv:gr-qc/9707012v1. 5. Ropotenko K. Quantization of the black hole area as quantization of the angular momentum component // Phys. Rev. – 2009.– D 80. – P. 044022(4). 6. Carlip S. and Teitelboim C. The off-shell black hole // Class.Quant.Grav. – 1995. – Vol. 12. – P. 1699. 7. Ландау Л.Д. Лифшиц Е.М. Квантовая механика. – М.: Наука, 1978. 8. Ropotenko K. Quantum of area $\Delta A = 8\pi l^2$ and a statistical interpretation of black hole entropy // Phys. Rev. – 2010.– D 82. – P. 044037(12). 9. Ropotenko K. Rotational terms and quantum degeneracy in black holes // arXiv:1105.2023v1. 10. Jia L.Y., Mao P.J. and Ren J.R. A note on the area spectrum of d -dimensional pure de Sitter Space-time // Eur. Phys.– 2011. – C 71. – P. 1518.

Надійшла до редколегії 30.06.11

УДК 521.852

К. Чурюмов, д-р фіз.-мат. наук, проф., В. Клецонок, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук співроб., О. Баранський, канд. фіз.-мат. наук, В. Пономаренко, асп.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПИЛОВИХ ДЖЕТІВ В КОМЕТІ 81P/ВІЛЬД

На основі власних спостережень 27–28.03.2010 р. структури коми в кометі 81P/Вільд виявлені дві активних ділянки на поверхні ядра. Вісь обертання ядра комети на момент спостережень мала позиційний кут в картинній площині $\approx 127 \pm 5^\circ$. Порівняння з даними спостережень комети 81P/Вільд за попередні роки вказує на тривалий час існування активних ділянок на поверхні ядра.

The two active areas had been disclosed on the nuclear surface of the 81P/Wild comet from the observations of its coma structure during 27–28.03.2010 performed by authors. During the observations the comet's rotation axis had the positional angle in the picture plane $\approx 127 \pm 5^\circ$. Comparison with the former observational data on the 81P/Wild comet show that the lifetime of the active areas on the nuclear surface is quite long.

Вступ. Окремо пилові і газові джети вперше було винайдено в кометі 1P/Галлей [1]. Потім подібні структури також спостерігалися в кометах C/1996 B2 Хякутаке, C/1995 O1 Гейла-Боппа, 109P/Свіфт-Туттль (найдені в довго-щільних спектрах), C/2004 Q2 (Мейчхоульц), 19P/Бореллі і 81P/Вільд з борту космічних апаратів Діп Спейс в 2001 р. і Стардаст в 2004 р., в кометі C/2005E2(Макнот) в 2009 р. [2]. Висококоліміровані джети спостерігалися у комети 81P/Вільд (20 джетів) і у кометі 103P/(Хартлі) декілька десятків тонких джетів, як з світлих, так і з темних ділянок і, навіть з термінатора. Джети комети Хартлі склалися з вуглекислого газу (CO₂) потужні потоки якого тягнули за собою пил і інші більш тугоплавкі заморожені гази, в тому числі і H₂O. Виявлення подібних джетів свідчить про наявність на поверхні кометного ядра дуже активних ділянок, темп викиду речовини із який значно перевищує аналогічні показники із сусідніх неактивних областей. Такі явища дуже цікаві для вивчення, оскільки вони дають часто єдино доступну інформацію про параметри обертання кометного ядра. Крім того вони потребують детального теоретичного пояснення, яким чином вони утворюються і зберігають активність на протязі тривалого періоду.

Зображення комети з вузькополосними фільтрами. Дослідження комети проводилося в рамках міжнародної програми наземної підтримки космічної місії Стардаст. Місія пролітала біля комети 81P/Вільд 2 січня 2004 р. і захо-

пила численні зразки кометної і міжзоряної пилової речовини, які були доставлені на Землю 15 січня 2006 р. Співробітниками відділу астрометрії і малих тіл (Баранським і Пономаренко) були проведені спостереження цієї комети 81P/Вільд 28 березня і 4 квітня березня 2010 р. на високогірській спостережній базі ГАО НАНУ і ІНАСАН (РФ, пік.Терскол) за допомогою рефлектора Цейс-600 з вузькосмуговими кометними фільтрами. Було отримано ряд кадрів з експозиціями 180 сек. Обробка отриманих зображень включала віднімання темного кадру і ділення на нормований кадр плоского поля. Для збільшення відношення сигнал/шум кометних зображень були додані всі кадри, які отримані з однаковим фільтром, з врахуванням переміщення комети. Потім від яскравості комети віднімався рівень фону, який визначався за сусідніми вільними ділянками зображення.

На рис. 1 показано зображення комети у фільтрі C2, яке отримано за описаною процедурою. Поверхнева яскравість на рисунку приведена у відносних одиницях, а просторові координати у пікселях. На дату спостережень комети 1 рх відповідав 630 км відстані в картинній площині. Напрямок осі X практично співпадає з антисонячним напрямком.

На подібних таких зображеннях комети у основних кометних емісіях C2 і CN джетів не відмічається. Зображення виглядають доволі симетричними. Ізофоти зображення комети витягнуті в напрямку від Сонця. В фільтрі кометного континууму комета була дуже слабою, і ці кадри не аналізувалися.

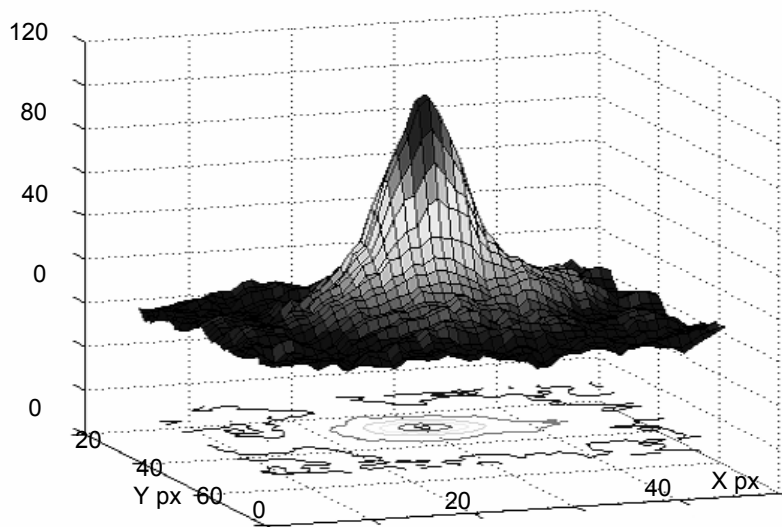


Рис. 1. Сумарне зображення комети 81P/Вілда 2 28.03.2011 у фільтрі C2.

Опрацювання зображень в інтегральному світлі. В період 27–28 березня 2010 р. проводилися також спектральні спостереження комети 81P/Вілда на 2-м телескопі. Паралельно були отримані зображення комети без фільтру за допомогою камери SBIG ST-402 на гіді телескопа з експозицією 60 сек. Масштаб отриманих зображень – 2.48"/рх. На цей час геліоцентрична відстань комети складала $r=1.63$ а.е., геоцентрична відстань – $\Delta = 0.68$ а.е., позиційний кут радіус-вектора 277° , фазовий кут 16.3° , інтегральна зоряна величина комети ~ 11 mag.

Для покращення якості зображення перед обробкою проводилося додавання кількох кадрів. Комета після додавання 10 послідовних кадрів, з яких попередньо був віднятий темновий кадр, мала вигляд (рис. 2). Стрілкою позначено напрямок від Сонця.

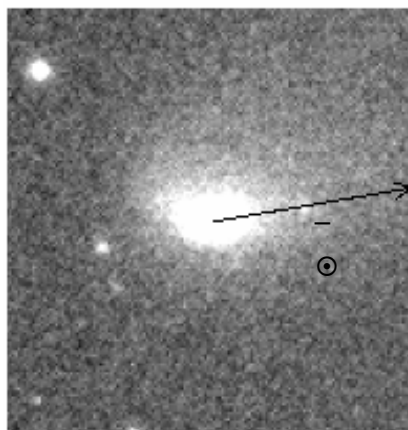


Рис. 2. Комета 81P/Вілда 2 27.03.2011 в інтегральному світлі.

Для отриманих таким чином кадрів зображення були застосовані цифрові методи обробки для виділення деталей у внутрішніх ділянках коми. Було використано кілька алгоритмів цифрової обробки. Якщо поверхневу яскравість комети позначити як $V(r, \alpha)$, то можна записати алгоритми опрацювання за допомогою виразів:

а) $V(r,\alpha)-V(r,-\alpha)$ – віднімання дзеркального зображення. Кут α вимірюється відносно напрямку радіус-вектора комети. Така операція підкреслює асиметричність яскравості коми комети (рис.3)

В даному випадку стає помітною різка асиметрія по відношенню до радіус-вектора: верхня (південна) ділянка коми показує значно більшу яскравість викидів. Характер асиметрії залишається однаковим для двох дат спостережень. Ми вважаємо, що не існує різкої відмінності між південною і північною півкулями ядра комети. В протилежному випадку ми мали б суттєву відмінність між зображеннями комети за різні дати внаслідок обертання ядра. Існує ще дві можливі причини появи значної асиметрії кометної коми. В першому випадку асиметрія залежить від напрямку обертання ядра. При цьому ділянки ядра, які довгий час опромінювалися Сонцем, повинні бути сильніше нагрітими і більше виділяти пилу і газу, що і може привести до різниці в яскравості. Друга причина пов'язана з розташуванням полюсу обертання ядра. Коли полюс розташований на південній півкулі таким чином, що значна ділянка поверхні ядра постійно опромінюється Сонцем, зрозуміло, що вона може прогріватися значно сильніше. В такому випадку природно очікувати більше викидів пилу і газу в напрямку південної півсфери. Якщо зважити на те, що асиметрія досить значна, спостерігається переважно в невеликому секторі коми, і фазовий кут комети досить малий, то другий варіант пояснення асиметрії вважається більш імовірним.

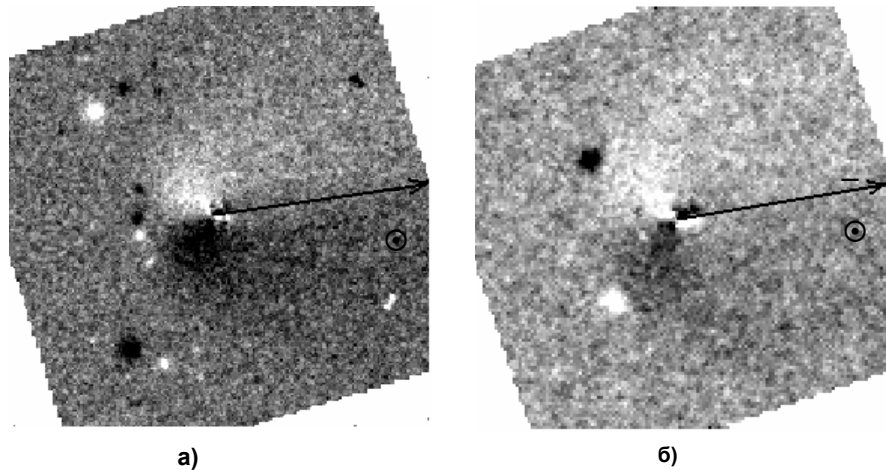


Рис. 3. Зображення комети 81P/Вілда 2 27.03 (а) та 28.03.2011 (б) після застосування цифрового фільтру для виділення асиметрії коми.

б) $V(r,\alpha+\Delta\alpha)-V(r,\alpha-\Delta\alpha)$ – простий цифровий фільтр для виділення кутових градієнтів, який підкреслює радіальні джекти. Ця методика опрацювання зображень комети запропонована Ларсоном и Секанином [3]. Застосування цього цифрового фільтру дозволило виявити дві особливості в розподілі поверхневої яскравості (рис. 4).

Для двох дат спостерігаються малоконтрастні утворення у вигляді широкого струменя викиду вниз (північ) і більш вузького струменя викиду вгору (південь). Їх параметри наведені в табл.

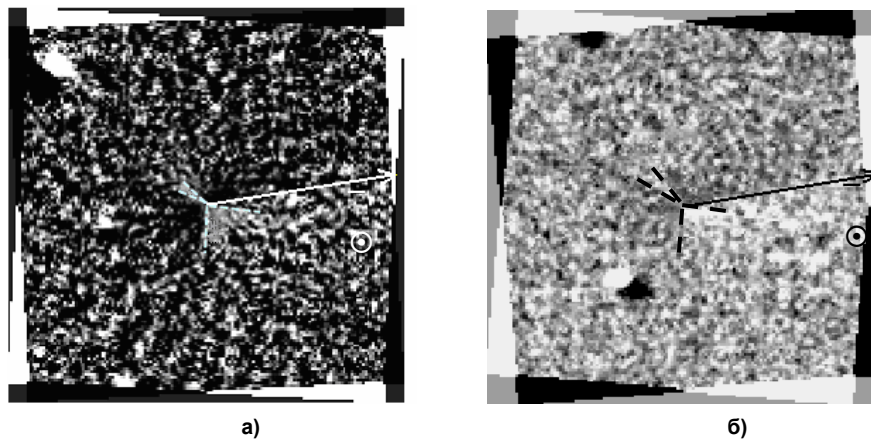


Рис. 4. Зображення комети 81P/Вілда 2 27.03 (а) та 28.03.2011 (б) після застосування цифрового фільтру для виділення радіальних джетів.

Таблиця

Параметри джетів в навколядерних ділянках комети комети 81P/Вілда 2.

№	Дата	Позиційний кут, град	Ширина, град.	Довжина, км
1	27.03.2011	125	18	$3.0 \cdot 10^4$
2	27.03.2011	320	84	$4.3 \cdot 10^4$
1	28.03.2011	130	20	$3.9 \cdot 10^4$
2	28.03.2011	316	69	$4.7 \cdot 10^4$

З таблиці видно, що положення джетів на різні дати майже не змінилося. Таку поведінку джетів в комі підтверджує припущення про підвищення газо- і пило виділення з приполярної ділянки кометного ядра. В такому випадку позиційний кут в картинній площині осі обертання $\epsilon \approx 127^\circ \pm 5^\circ$. Враховуючи, що південний джет значно вужчий, то скоріше за все він формується однією активною ділянкою в безпосередній близькості до полюсу (рис. 5). Протилежний північний джет має велику ширину. Космічні зйомки показують, що типові джети мають невелику ширину, тому, можливо, він формується з кількох окремих струменів, які неможливо розділити. На рис. 5 кружечками показано можливе розташування активних областей на кометному ядрі.

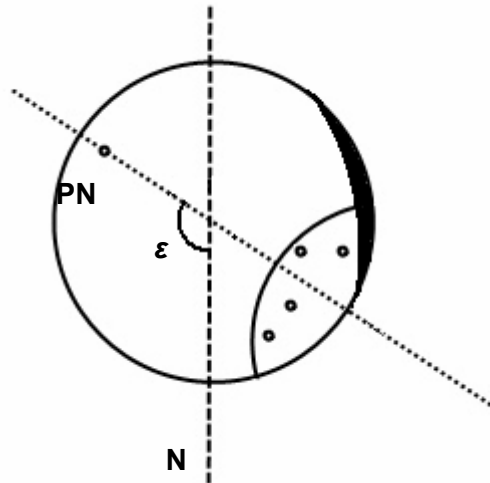


Рис. 5. Можлива інтерпретація розташування активних ділянок на ядрі комети 81P/Вільд 2 27–28.03.2010 р.

Цікаво, що в попередні появи (1997 р) цієї комети спостерігалася подібна картина. Так Вашусундра і Чакраборті [4] за моделюванням зображень комети знайшли координати полюса обертання ядра $\alpha_p = 297^\circ \pm 5^\circ$ та $\delta_p = -10^\circ \pm 5^\circ$. На момент наших спостережень комети для полюсу з вказаними координатами вісь обертання мала б позиційний кут в картинній площині $\epsilon \approx 105^\circ$. Це значення не суттєво відрізняється від наших оцінок, враховуючи невеликий інтервал часу спостережень та різницю оцінок за іншими авторами. До того ж положення осі обертання може змінюватися під дією реактивних сил при випаровуванні газів. За їхніми даними викиди пилу формуються двома джетами: більш вузьким біляполярним з широтою $+80^\circ$ і широким протилежним джетом, який знаходився на широті -25° .

Така картина дуже нагадує нашу інтерпретацію розташування активних ділянок на поверхні кометного ядра і доводить тривалість періоду існування активних ділянок ядра, які формують видимі джети.

Висновки.

1. Вісь обертання ядра комети на момент спостережень 27–28.03.2010 р. мала позиційний кут в картинній площині $\epsilon \approx 127^\circ \pm 5^\circ$.
2. Основні викиди пилу формуються двома активними ділянками: біляполюсною – з шириною викидів $20^\circ \pm 5^\circ$ і протилежною – з шириною викидів $77^\circ \pm 15^\circ$.
3. Активні ділянки кометного ядра комети 81P/Вілда 2 можуть існувати на протязі більше 10 років.

1. M. A'Hearn, S. Hoban et al. Cyanogen jets in comet Halley // Nature, 1986. – V. 324. – P. 649–651. 2. E. Picazzio, K. Churyumov et al. // Abstract book. IAU XXVII General Assembly. 3-14 Aug. 2009. – P.62. 3. S. Larson and Z. Sekanina Coma morphology and dust-emission pattern of periodic Comet Halley. I - High-resolution images taken at Mount Wilson in 1910 // Astron. J. 1984. – V. 89. – P. 571–578. 4. R. Vasundhara and P. Chakraborty Investigations of the rotation pole from the morphology of dust fans of comet 81P/wild 2 // Astroph. J., 2004. – V. 616. – P. 1278–1283.