Выводы. В рамках одной гидродинамической модели нам удалось объединить явления и процессы, которые другими исследователями изучались как независимые и чаще всего связывались с проявлением действия глобального магнитного поля на солнечную плазму, т.е. рассматривались в рамках магнитной гидродинамики. Это, прежде всего, касается временных вариаций скорости меридиональной циркуляции и торсионных колебаний Солнца, которые в нашей модели являются полоидальной и тороидальной компонентами одного трехмерного гидродинамического течения и определяются скалярной функцией тока.

1. *Komm R.W., Howard R.F., Harvey J.W.* Meridional flow of small photospheric magnetic features //Solar Phys. – 1993. – V.147. – P.207–223. 2. *Nesme-Ribes E., Meunier N., Vince I.* Solar dynamics over cycle 19 using sunspots as tracers// Astronomy and Astrophysics. – 1997. – V.321. – P.323–329. 3. *Snodgrass H.B., Dailey S.B.* Meridional motions of magnetic features in the solar photosphere//Solar Phys. – 1996. – V.163. – P.21–42. 4. *Hathaway D.H.* Doppler measurements of the Sun's meridional flow// Astrophys. Journal. – 1996. – V.460. – P.1027–1037. 5. *Hathaway D.H. Gilman P., Harvey J. W. et al.* GONG observations of solar surface flows // Science. – 1996. – V, 272. – P. 1306–1309. 6. *Giles P.M., Duval T.L Jr., Scherrer P.H., Bogart R.S.* A subphotospheric flow of material from the Sun's equator to its poles// Nature (London). – 1997. – V. 390. – P. 52–54. 7. *Braun D. C., Birc A. C.* Prospects for the detection of the deep solar meridional circulation// Astrophys. Journal. Letters – 2008. – V.689. – P.L161–L165. 8. *González Hernández I., Howe R., Komm R., Hil F.* Meridional circulation during the extended solar minimum: another component of the torsional oscillation?// Astrophys. Journal. Letters – 2010. – V.713. – P.L16–L20. 9. *Charbonneau P.* Dynamo models of the solar cycle//Living Rev. Solar Phys. – 2010. –V.7, No.3. – P.1–91. *[Online Article]: http:/www.livingreviews.ord/lrsp -2010–3.* 10. *Miesch M.S.* Large-scale dynamics of the convection zone and tachocline //Living Rev. Solar Phys. – 2005. – V. 2, No.1. – P.1–139. *[Online Article]: http:/www.livingreviews.ord/lrsp-2005–1.* 11. *Логинов А.А., Сальников Н.Н., Черемных О.К., Зелык Я.И., Маслова Н.В.* О гидродинамическом механизме генерации глобального полоидального течения Солнца// Кинематика и физика небес. тел. – 2011. – V.27, № 5. – С.3–11. 12. *Логинов А.А., Сальников Н.Н., Черемных О.К., Криводубский В.Н., Маслова Н.В.* Гидродинамическая модель генерации глобального полоидального течения Солнца// Космічна наука і технологія. – 2011. – V.17, № 1. – С.29–35. 13. *Tompson M.J., Christensen-Dalsgaard J., Miesch M.S., Toomre J.* The internal rotation of the Sun// Annu. Rev. Astron. and Astrophys. – 2003. – V.41. – P.599–643. 14. *Кичатинов Л.Л.* Дифференциальное вращение звезд// Успехи физ. наук. – 2005. – Т.175, № 5. – С.475–494. 15. *Basu S., Antia H.M.* Characteristics of solar meridional flows during solar cycle 23// Astrophys. Journal. – 2010. – V.717. – P.488–495. 16. *Howard R., LaBonte B.J.* The Sun is observed to be a torsional oscillations with a period of 11 years//Astrophys. Journ. – 1980. – V. 239. – P.L33–L36. 17. *Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R., Larsen R. M., Schou J., Thompson M., Toomre J.*. Dynamic variations at the base of the solar convection zone// Science. – 2000 –V. 287. – P. 2456 – 2460. 18. *Vorontsov S.V., Christensen-Dalsgaard J., Schou J., Starkov V.N., Thompson M.J.* Helioseismic measurements of solar torsional oscillations //Science. – 2002. – V. 296. – P.101–103. 19. *Howe R., Christensen-Dalsgaard J., Hill F., Komm R., Schou J, Thompson M. J, Toomre J.* Temporal variations in solar rotation at the bottom of the convection zone: The current status// Advances in Space Research. – 2007. – V. 40. – P. 915– 918.

Надійшла до редколегії 17.06.11

УДК 524.354

К. Ропотенко, гол. спеціаліст

КВАНТ ПЛОЩІ ТА ЕНТРОПІЯ ЧОРНОЇ ДІРИ

Показано, що квантування площі чорної діри є ніщо інше, як квантування компоненти внутрішнього кутового моменту чорної діри. Знайдено квант площі чорної діри. Визначено число мікростанів доступних чорній дірі. Знайдено статистичну ентропію чорної діри: вона не є логарифмом числа мікростанів, як для звичайних систем, але пропорційна цьому числу .

It is shown that quantization of the black hole area is nothing but quantization of the angular momentum component. The quantum of area is found. The number of microstates accessible to a black hole is determined. A statistical entropy of a black hole is found; it is not the logarithm of the number of microstates, as for the conventional systems, but is proportional to this number.

Вступ. Є дві важливі проблеми в фізиці чорних дір. Бекенштейн показав [1], що площа поверхні горизонту подій чорної діри є адіабатичним інваріантом. На цій підставі він припустив, що спектр площі чорної діри повинен мати вигляд

$$A_n = \Delta A \cdot n, \qquad n = 0,1,2,..., \tag{1}$$

де ΔA - квант площі чорної діри. Проблема полягає в обчисленні величини ΔA [2]. Другою проблемою є обчислення термодинамічної ентропії Бекенштейна - Хокінга чорної діри

$$S_{BH} = \frac{A}{4\pi l_P^2}, \tag{2}$$

де l_P – довжина Планка, $l_P^2 \sim G$, через логарифм числа мікростанів чорної діри W, як це має місце для звичайних систем [3],

$$S_{BH} = \ln W. \tag{3}$$

У цій доповіді ми покажемо, що ці дві проблеми тісно пов'язані. Ми аргументуємо, що квантування площі поверхні горизонту подій чорної діри є ніщо інше, як квантування компоненти внутрішнього кутового моменту чорної діри, і знайдемо величину кванту площі ΔA. Звідси ми визначимо число мікростанів доступних чорній дірі і покажемо, що ентропія чорної діри не є логарифмом числа мікростанів, як для звичайних систем (3), а пропорційна цьому числу. Наш підхід базується на добре відомих правилах комутації квантової механіки для динамічних величин чорної діри і використовує фундаментальні властивості евклідового простору Шварцшильда, який лежить в основі термодинаміки чорних дір.

Квантування площі чорної діри Шварцшильда. *Евклідів простір Ріндлера.* Як відомо, є декілька способів визначення температури чорної діри Шварцшильда. Одним з них є аналітичне продовження метрики Шварцшильда до уявних значень часу [4]. Після того, як усі обчислення в евклідовому просторі завершено, отримані результати продовжуються назад до лоренцевих значень параметрів чорної діри. Метрика Шварцшильда для незарядженої чорної діри з масою M, яка не обертається, має вигляд

$$ds^2_{Sch} = -\left(1-\frac{2GM}{r}\right)dt^2 + \left(1-\frac{2GM}{r}\right)^{-1}dr^2 + r^2 d\Omega^2, \tag{4}$$

де всі величини мають загальноприйняте значення. Згідно з [4] продовжимо час до уявних значень $t \to it$, введемо нову координату x, що визначається виразом $r = 2GM + x^2/8GM$ і, після розкладу метрики в околі точки $x = 0$ ($r = 2GM$), отримаємо евклідову метрику Ріндлера

$$ds^2_R = (kx)^2 dt^2 + dx^2 + (2GM)^2 d\Omega^2, \tag{5}$$

де $k = 1/4GM$ - поверхнева гравітація. Необхідність метрики Ріндлера пояснюється тим, що $t-r$ частина метрики Шварцшильда апроксимується біля горизонту плоским простором, де всі фізичні величини є добре визначені. Однак, ця метрика має сингулярність в точці $x = 0$. Щоб її усунути, інтерпретуємо kt як кутову координату двовимірної полярної системи координат $\phi - t$

$$\phi \equiv kt = \frac{t}{4GM} \tag{6}$$

з періодом 2π. Тоді t набуває періодичності $8\pi GM$, яка, коли її покласти рівною $\hbar/T_H$, і визначає температуру чорної діри, або температуру Хокінга, $T_H = 1/8\pi GM$.

Спектр площі чорної діри. Однак, відповідно до квантової механіки повинна існувати спряжена для кута ω компонента кутового моменту - скажімо, z - компонента, $\hat{L}_z$. Цей кутовий момент є генератором обертань навколо осі z (ця вісь відповідає геометричному місцю точок $r = 2GM$). В представленні кутового моменту існує комутатор [5]

$$\left[L_z, \hat{\omega}\right] = i\hbar, \tag{7}$$

де L_z є власне значення оператора $\hat{L}_z$. Користуючись (6) ми можемо записати

$$\left[L_z, \frac{\hat{t}}{4GM}\right] = i\hbar, \tag{8}$$

або

$$\left[L_z, t\right] = i\hbar 4GM. \tag{9}$$

Добре відомо, що M і t є спряженими величинами $\left[M, \hat{t}\right] = i\hbar$ [6]. Тоді, оскільки $\hat{t} \equiv -i\hbar\partial/\partial M$, ми отримуємо

$$\frac{\partial L_z}{\partial M} = 4GM. \tag{10}$$

Розв'язуючи це рівняння з природними граничними умовами $L_z = 0$ при $M = 0$, знаходимо

$$L_z = \frac{A}{8\pi G}. \tag{11}$$

Відповідно до правила квантування компоненти кутового моменту

$$\frac{A}{8\pi G} = m \cdot \hbar \qquad m = 0,1,2,... \tag{12}$$

Але це не що інше, як правило квантування площі поверхні горизонту подій чорної діри,

$$A_m = 8\pi l_P^2 \cdot m. \tag{13}$$

Звідси знаходимо квант площі

$$\Delta A = 8\pi l_P^2. \tag{14}$$

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

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

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 кантується

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

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

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

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, зазначимо, 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. Клещонок, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., О. Баранський, канд. фіз.-мат. наук, В. Пономаренко, асп.

СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПИЛОВИХ ДЖЕТІВ В КОМЕТІ 81Р/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 ≈127±5°. 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 comma 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 ≈127±5°. 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 1Р/Галлей [1]. Потім подібні структури також спостерігалися в кометах C/1996 B2 Хякутаке, C/1995 O1 Гейла-Боппа, 109P/Свіфт-Туттль (найдені в довго-щілинних спектрах), C/2004 Q2 (Мейчхоулц), 19Р/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]. Висококолімiровані джети спостерігалися у комети 81P/Вільд (20 джетів) і у комети 103P/(Хартлі) декілька десятків тонких джетів, як з світлих, так і з темних ділянок і, навіть з термінатора. Джети комети Хартлі складалися з вуглекислого газу (CO_2) потужні потоки якого тягнули за собою пил і інші більш тугоплавкі заморожені гази, в тому числі і H_2O. 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-