

3. Для слабких зір імовірність реєстрації сильно залежить від частки в яскравості зорі другого компонента. Вона різко зменшується зі зменшенням такої долі. При однаковому блиску компонент імовірність реєстрації зберігається на прийнятному рівні 0.8 навіть для гранично слабких зір.

1. F. Mignard and S. Roeser Space Astrometry Missions GAIA: A European Space Project // O. Bienaymé and C. Turon (eds). EAS Publications Series, Vol. 2, 2002. – P. 69–90. 2. V.V. Kleshchonok The "Spalakh" astronomical television system // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement. 2005. – №5. – P.409–412. 3. V.V. Kleshchonok, M.I. Buromsky. Observations of stars occultations by the Moon with the "Spalakh" television system // Kinematics and Physics of Celestial Bodies. Supplement. №5, 2005. P.405–408. 4. A. Richichi Model-independent retrieval of brightness profiles from lunar occultation lightcurves in the near infrared domain // Astron. and Astrophys. – 1989. – V. 266. – P. 366–372. 5. В.В.Клещонок Учет дифракционных явлений при обработке телевизионных наблюдений покрытий звезд Луной // Кинем. и физика небесн. тел. 2008. – Т.27, №1. – С. 71–80.

Надійшла до редколегії 24.06.11

УДК. 523.98

А. Логинов, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., В. Криводубский, д-р фіз.-мат. наук, ст. наук. співроб., Н. Сальников, канд. тех. наук, ст. наук. співроб., О. Черемных, д-р фіз.-мат. наук, проф.

## О ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ СТРУКТУРЕ ГЛОБАЛЬНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА СОЛНЦЕ

*В рамках раніше запропонованої авторами гідродинамічної моделі вдалося об'єднати явища і процеси, які іншими дослідниками вивчалися як незалежні і найчастіше пов'язувались з проявом дії глобального магнітного поля на сонячну плазму. З'ясувалося, що в рамках нашої моделі часові варіації швидкості меридіональної циркуляції і торсійних коливань Сонця є полоїдальними і тороїдальними компонентами однієї тривимірної гідродинамічної течії.*

*In the framework of the hydrodynamic model previously proposed by the authors, the phenomena and processes that have been studied by other researchers as independent, and often were associated with the action of the global magnetic field on the solar plasma, are shown to be connected. It turned out that in our model the time variations of the speed of the meridional circulation and torsional oscillations of the Sun are the poloidal and toroidal components of a particular three-dimensional hydrodynamic flow.*

**Вступление.** Меридиональные течения в солнечных глубинах в последнее время оказались в центре внимания наблюдателей и теоретиков. До появления гелиосейсмологических методов исследования солнечных недр наблюдение меридиональной циркуляции вещества ограничивалось поверхностными слоями, где она определялась путем отслеживания движений магнитных элементов [1–3] или прямыми спектральными измерениями доплеровских скоростей [4, 5]. Это поверхностное течение плазмы направлено от экватора к полюсам в обоих полушариях, при этом амплитуда его скорости достигает порядка нескольких десятков метров в секунду. Впервые в подповерхностных слоях до глубин около 30 тыс. км направленное к полюсу течение вещества было определено с помощью методов локальной гелиосейсмологии [6]. Условие сохранения массы вещества налагает требование существования в более глубоких слоях противоположно направленного глобального течения. В этом случае для замыкания меридиональной циркуляции вещество возле полюсов должно опускаться вниз, тогда как вблизи экватора – подниматься к поверхности. Однако для описания амплитуды и структуры глубинного течения в настоящее время нет "належного" физического механизма. Поэтому при построении картины глобальной циркуляции в солнечной конвективной зоне (СКЗ) особые надежды возлагаются на методы численного моделирования течений с привлечением методик локальной гелиосейсмологии [7, 8]. Физический механизм глобальной циркуляции имеет фундаментальное значение, поскольку она играет важную роль во многих современных теориях магнитогидродинамических процессов в недрах Солнца. В частности, она важна в динамо-процессах, ответственных за солнечный магнитный цикл [9, 10].

Моделирование полоидального и тороидального глобальных течений. Вопросы разработки моделей глобального течения Солнца посвящены наши последние исследования [11, 12]. В работе [11] был предложен и обоснован физический механизм возникновения полоидального (меридионального) течения вещества в виде вихрей Тейлора из-за потери устойчивости дифференциального вращения Солнца, сведения о котором брались из гелиосейсмических экспериментов [13]. Простая математическая модель [12] реализации предложенного гидродинамического механизма позволяет рассчитывать пространственный вид и эволюцию во времени возбуждаемого полоидального течения. Настоящая работа посвящена изучению структуры гидродинамических течений и их сравнению с данными гелиосейсмических экспериментов о глубинных течениях Солнца. Нами было проведено моделирование трехмерного течения вещества в СКЗ. Основное внимание при моделировании уделялось временному и пространственному поведению полоидальной и тороидальной компонент течения. В результате расчетов было получено численное решение в виде 18 линейно независимых пространственных мод, каждая из которых имеет свой характер временного развития. Полученные решения можно разбить на две группы: антисимметричные и симметричные моды относительно плоскости экватора. В свою очередь, каждую из групп можно разделить на две подгруппы мод: постоянно растущие и колебательные с нарастающей по времени амплитудой.

На рис. 1 и 2 приведена, как пример, одна из антисимметричных постоянно нарастающих мод – полоидальная и тороидальная компоненты глобального поля скоростей. Проанализируем вначале полоидальную компоненту (рис. 1). Ввиду линейности рассматриваемой модели мы можем говорить только о частотах колебаний и времени нарастания для каждой моды, зависимости относительной амплитуды скорости от полярного угла  $\theta$  (в сферической системе координат) и относительного радиуса  $R/R_{\odot}$  ( $R_{\odot}$  – радиус Солнца) в СКЗ. В результате моделирования было найдено, что в каждом полушарии для рассматриваемой полоидальной компоненты существует три области меридиональных течений (вихревых движений) (рис. 1а). При этом первые два от поверхности вихря имеют по две оси, вокруг которых происходят локальные циркуляции. В верхней вихревой области течение вещества в поверхностных слоях направлено от экватора к полюсу, возле которого вещество опускается, тогда как в нижней ее части вещество возвращается к экватору и поднимается вверх. Стрелками показано направление течения. Видно, что в полярном домене (лежащем в угловом интервале  $0 - 45^{\circ}$ ) течением охвачены солнечные слои до глубин около 140 тыс. км, при этом направленное к полюсу течение прости-

рается до глубин  $\approx 70$  тыс. км. В более глубоких слоях (от 70 до 140 тыс. км) течение меняет свое направление на противоположное – к экватору. В приэкваториальном домене (в интервале  $45 - 90^\circ$ ) радиальная протяженность верхней вихревой области сужается до глубины  $\approx 70$  тыс. км, а направленное к полюсу течение простирается до меньшей глубины:  $\approx 35$  тыс. км. Таким образом, рассчитанное нами меридиональное течение в подповерхностных слоях согласуется с данными гелиосейсмологии о направлении течения от экватора к полюсам до глубин  $\approx 30$  тыс. км [6, 13, 14]. На рис.1б приведено трехмерное распределение относительной амплитуды скалярной функции тока. Напомним, что течение вещества происходит вдоль линий уровня (линий постоянного значения) функции тока (замкнутые линии на рис. 1 а и 3 а), а величина скорости течения и его направление (направление стрелок на рис. 1 а и 3 а) определяется направлением и модулем градиента функции тока. Относительная амплитуда скорости поверхностного полоидального течения имеет волнообразную зависимость от полярного угла (рис. 1 в). При этом в северном и южном полушариях течения направлены в противоположные стороны.

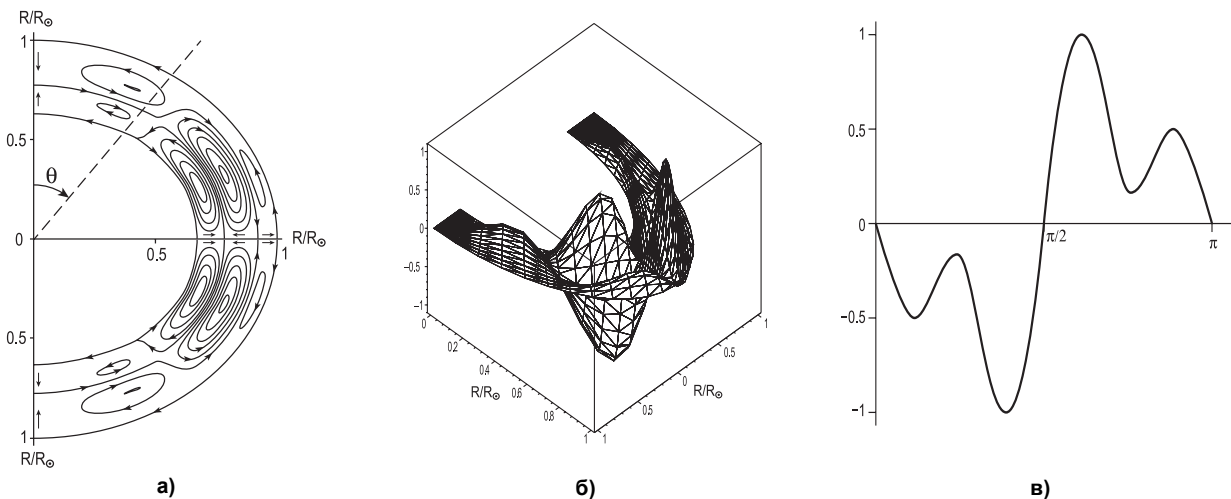


Рис. 1. Полоидальная компонента постоянно нарастающей антисимметричной моды: а) линии тока; б) трехмерное изображение относительной амплитуды скалярной функции тока; в) зависимость относительной амплитуды скорости полоидального течения на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$ .

Рассмотрим теперь тороидальную компоненту антисимметричной моды глобального течения – скорость  $v_\phi$  (рис. 2). Видно, что структура течений тороидальной компоненты симметрична относительно экватора. Скорость  $v_\phi$  на поверхности (рис. 2 в) описывает тонкую структуру поверхностного азимутального (тороидального) вращения – его "полосатость", которая для этой моды вряд ли может быть обнаружена из наблюдений на фоне основного течения Солнца.

Перейдем к анализу симметричной колебательной моды с нарастающей во времени амплитудой (рис. 3 и 4), период колебаний которой, согласно нашим расчетам, составляет около 20 лет. Полоидальная компонента симметричной моды демонстрирует неожиданный эффект поведения, а именно, меридиональные потоки в подповерхностных слоях экваториального домена (в широтном интервале  $\pm 20^\circ$ ) при переходе из южного полушария в северное на экваторе *не спадают до нуля*. На поверхности поток через экватор сохраняет направление к северному полюсу, тогда как на глубине около 50 тыс. км он меняет направление в противоположную сторону – к южному полюсу (рис. 3 а). Подобный эффект меридионального течения был обнаружен раньше наблюдателями [6, 15]. В работе [6] показано, что рассчитанное методом гелиосейсмической томографии меридиональное поле скоростей во внешних подфотосферных слоях совпадает с наблюдаемой картиной этого течения на солнечной поверхности. При этом был выявлен эффект меридионального течения через экватор. Позже [15] в результате обработки данных спектроскопических наблюдений (полученных с помощью прибора Michelson Doppler Imager, установленного на борту космической станции SOHO) было подтверждено наличие в подповерхностных слоях отличного от нуля меридионального потока, пересекающего экватор. Однако авторы цитируемых работ подвергли сомнению свой неожиданный результат, сославшись на то, что он может быть артефактом ошибок измерительной аппаратуры при разных позиционных углах наблюдений. Мы же считаем, что полученная нами путем численного моделирования картина глобального течения, в которой при переходе из южного полушария в северное скорость меридиональной циркуляции в подповерхностных слоях отлична от нуля, служит аргументом в пользу цитируемых наблюдательных данных [15], выведенных из прямых спектроскопических наблюдений.

Тороидальная компонента этой моды (рис. 4) вносит временные вариации угловой скорости по широте, что проявляется на поверхности Солнца как чередующиеся полосы, со слегка замедляющимся и ускоряющимся по отношению к основному движению течением. По-видимому, она описывает торсионные колебания с периодом около 22 лет, вначале открытые прямыми спектроскопическими наблюдениями поля скоростей на солнечной поверхности (вариации зональных поверхностных течений со скоростью до 6 м/с) [16], а затем с достаточной точностью прослежены в гелиосейсмических экспериментах до глубин  $\approx 70$  тыс. км [17]. Более того, согласно недавним гелиосейсмическим измерениям вариации вращения охватывают полностью всю СКЗ [18] и даже проникают в тахоклин [19]. Дополнительные расчеты, выходящие за рамки этой работы, показывают, что "полосы" с максимальной амплитудой течения со временем смещаются к экватору.

Поскольку наша модель линейна, то оба класса решений (антисимметричные и симметричные относительно солнечного экватора), полученных нами, со своими относительными коэффициентами одновременно участвуют в формировании течения Солнца.

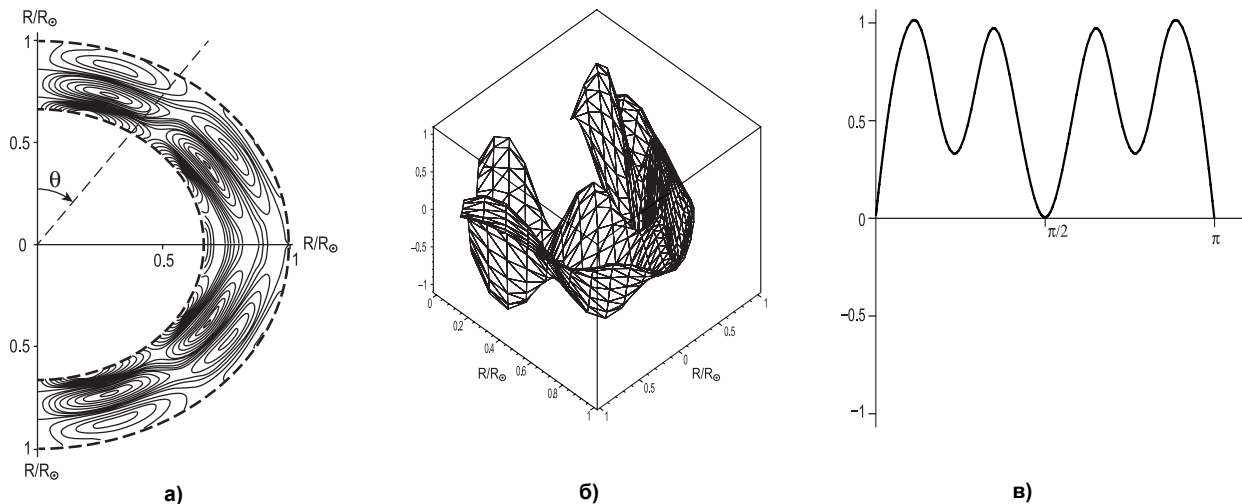


Рис. 2. Торидальная компонента постоянно нарастающей антисимметричной моды:  
 а) линии уровня относительной амплитуды торидальной скорости  $v_\phi$  в конвективной зоне;  
 б) трехмерное изображение относительной амплитуды скорости  $v_\phi$  в конвективной зоне;  
 в) зависимость относительной амплитуды скорости  $v_\phi$  на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$ .

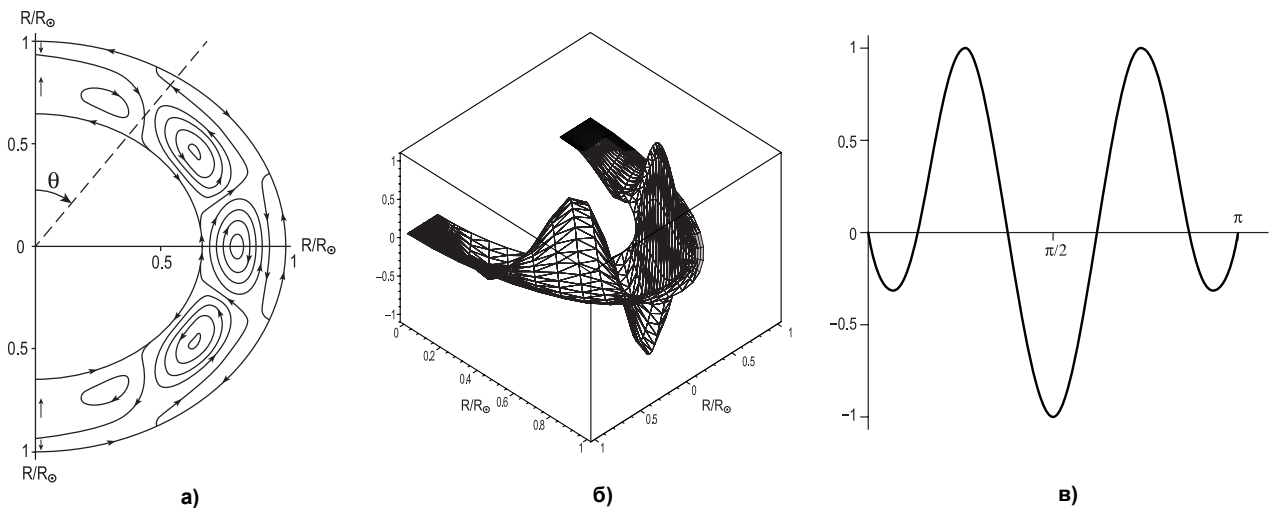


Рис. 3. Полоидальная компонента симметричной колебательной моды с нарастающей во времени амплитудой:  
 а) линии тока; б) трехмерное изображение относительной амплитуды скалярной функции тока; в) зависимость относительной амплитуды скорости полоидального течения на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$ .

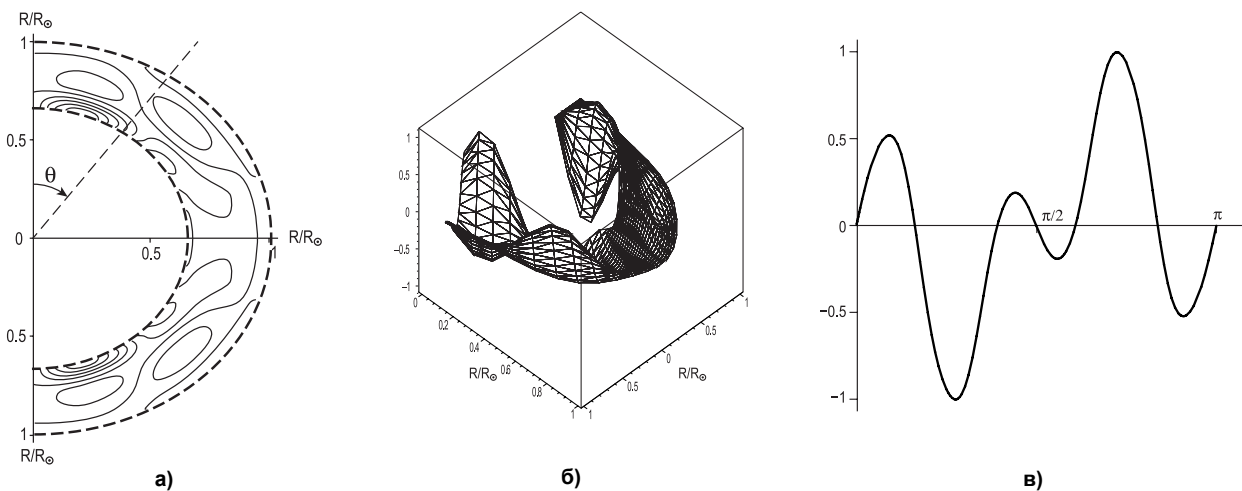


Рис. 4. Торидальная компонента симметричной колебательной моды с нарастающей во времени амплитудой:  
 а) линии уровня относительной амплитуды торидальной скорости  $v_\phi$  в конвективной зоне; б) трехмерное изображение относительной амплитуды скорости  $v_\phi$  в конвективной зоне; в) зависимость относительной амплитуды скорости  $v_\phi$  на поверхности Солнца от полярного угла  $\theta$ .

**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., Hill 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.org/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.org/lrsp-2005-1>. 11. Логинов А.А., Сальников Н.Н., Черемных О.К., Зельк 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 адиабатичним інваріантом. На цій підставі він припустив, що спектр площі чорної діри повинен мати вигляд

$$A_n = \Delta A \cdot n, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (1)$$

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

$$S_{BH} = \frac{A}{4\pi l_P^2}, \quad (2)$$

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],

$$S_{BH} = \ln W. \quad (3)$$

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  $\Delta A$ . 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