

19. Komatsu E., Dunkley J., Nolte M. R. et al. Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Cosmological Interpretation // *Astrophys. J. Supplement*. – 2009. – Vol. 180, No. 2. – P. 330–376.
20. Krauss L. M. The End of the Age Problem, and the Case for a Cosmological Constant Revisited // *Astrophys. J.* – 1998. – Vol. 501, No. 2. – P. 461–466.
21. Melchiorri A., Bode P., Bahcall N. A., Silk J. Cosmological Constraints from a Combined Analysis of the Cluster Mass Function and Microwave Background Anisotropies // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 586, No. 1. – P. L1–L4.
22. Mitchell, J. L., Keeton, C. R., Frieman, J. A., Sheth, R. K. Improved Cosmological Constraints from Gravitational Lens Statistics // *Astrophys. J.* – 2005. – Vol. 622, No. 1. – P. 81–98.
23. Myungshin I., Griffiths R. E., Ratnatunga K. U. A Measurement of the Cosmological Constant Using Elliptical Galaxies as Strong Gravitational Lenses // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 475, No. 2. – P. 457–462.
24. Nolte M. R., Wright E. L., Page L. et al. First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe Observations: Dark Energy Induced Correlation with Radio Sources // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 608, No. 1. – P. 10–15.
25. Perlmutter S., Gabi S., Goldhaber G. et al. Measurements of the Cosmological Parameters  $\Omega$  and  $\Lambda$  from the First Seven Supernovae at  $z \geq 0.35$  // *Astrophys. J.* – 1997. – Vol. 483, No. 2. – P. 565–581.
26. Perlmutter S., Aldering G., Goldhaber G. et al. Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae // *Astrophys. J.* – 1999. – Vol. 517, No. 2. – P. 565–586.
27. Riess A. G., Filippenko A. V., Challis P. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant // *Astron. J.* – 1998. – Vol. 116, No. 3. – P. 1009–1038.
28. Riess A. G., Strolger L.-G., Tonry J. et al. Type Ia Supernova Discoveries at  $z > 1$  from the Hubble Space Telescope: Evidence for Past Deceleration and Constraints on Dark Energy Evolution // *Astrophys. J.* – 2004. – Vol. 607, No. 2. – P. 665–687.
29. Riess A. G., Strolger L.-G., Caserteno S. et al. New Hubble Space Telescope Discoveries of Type Ia Supernovae at  $z \geq 1$ : Narrowing Constraints on the Early Behavior of Dark Energy // *Astroph. J.* – 2007. – Vol. 659, No. 1. – P. 98–121.
30. Tonry J. L., Schmidt B. P., Barris B. et al. Cosmological Results from High- $z$  Supernovae // *Astrophys. J.* – 2003. – Vol. 594, No. 1. – P. 1–24.

Надійшла до редколегії 13.04.09

УДК 524.7

Б. Гнатик

## ДОСЛІДЖЕННЯ З АСТРОФІЗИКИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ В АСТРОНОМІЧНІЙ ОБСЕРВАТОРІЇ КИЇВСЬКОГО УНІВЕРСИТЕТУ

*Проведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які здійснювались останнім часом в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Розглянуто результати дослідження спектру та поширення космічних променів надвисоких енергій в міжгалактичному та галактичному магнітних полях, астрофізичні прояви космічних струн, еволюцію та жорстке рентгенівське та гама-випромінювання залишків Наднових зір, релятивістські ударні хвилі в оболонках Гіпернових зір. Дослідження проводяться в рамках програми «Космомікрофізика» з використанням спостережних даних відкритої в 2006 р. віртуальної рентгенівської та гама-обсерваторії (проект VIRGO).*

*We review investigations in field of high energy astrophysics which have been made recently at the Astronomical Observatory of Taras Shevchenko Kiev National University. We consider results of investigations of ultra high energy cosmic ray spectrum and their propagation in intergalactic and galactic magnetic fields, astrophysical signatures of cosmic strings, evolution and hard X-ray and gamma-ray radiation from Supernova remnants, relativistic shock waves in envelopes of Hypernova stars. Researches are carried out within the frame of the program "Kosmomikrofizyka" ("Astroparticle physics") with use of the observational data of the Virtual Roentgen- and Gamma-ray Observatory (project VIRGO) opened in 2006.*

**1. Вступ.** Останніми десятиліттями помітно зросла доля астрономічних досліджень в області астрофізики високих енергій. Ранні етапи еволюції Всесвіту, фізичні процеси в околі релятивістських об'єктів, прискорення та нетеплове випромінювання релятивістських частинок (космічних променів) в астрофізичних умовах, природа та астрофізичні прояви темної матерії та темної енергії – неповний перелік проблем, на вирішення яких направлені значні експериментальні (космічні місії рентгенівської та гама-астрономії XMM Newton, Chandra, INTEGRAL, FERMI, наземні черенковські телескопи Тевного діапазону H.E.S.S., VERITAS, MAGIC, детектори гравітаційних хвиль VIRGO, LISA, космічних променів AGASA, HIRES, AUGER, нейтрино IceCube та багато інших) та теоретичні зусилля. В Україні ці дослідження проводяться відповідно до Міжгалузевого координаційного плану фундаментальних досліджень у галузі космології, релятивістської астрофізики і гравітації «Космомікрофізика», затвердженого НАН України, МОН України та Київським національним університетом імені Тараса Шевченка в 2005 р. та Цільової комплексної програми «Космомікрофізика» НАН України (2007–2009 рр.)

Суттєвому підвищенню рівня досліджень в галузі астрофізики високих енергій та залученню до них студентів сприяло відкриття на фізичному факультеті Київського національного університету імені Тараса Шевченка в 2006 р. Віртуальної рентгенівської та гамма-обсерваторії (VIRGO)- наукового комп'ютерного центру астрофізики високих енергій для підтримки досліджень в області космомікрофізики та використання даних космічних місій в рентгенівському та гама-діапазонах, зокрема, місії INTEGRAL (обладнання закуплено на кошти гранту Женевської обсерваторії та Центру даних місії INTEGRAL) [18]. VIRGO служить експериментальною базою досліджень з космомікрофізики, забезпечуючи науковців даними спостережень, тобто, є сучасним варіантом вирішення проблеми доступу астрономів до даних спостережень вже відпрацьованих та діючих космічних місій. В нашій роботі приведено огляд досліджень в галузі астрофізики високих енергій, які проводяться в Астрономічній обсерваторії Київського національного університету імені Тараса Шевченка.

**2. Дослідження космічних променів надвисоких енергій.** Однією з актуальних проблем астрофізики високих енергій залишається пояснення природи, механізмів прискорення та джерел космічних променів [12]. Спостережуваний енергетичний спектр космічних променів близький до степеневого і простягається до енергій понад  $10^{20}$  eV,

виявляючи ряд особливостей – укучення спектру на енергіях  $10^{15.5}$  eV та  $10^{17.8}$  (т. зв. перше та друге коліно “knee”), виположування на енергії біля  $10^{19}$  eV ( т.зв. щиколотка “ankle”) та достатньо різкий обрив на енергії  $10^{19.6}$  eV. Коли високоенергетичний обрив спектру космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) природно пояснюється т.зв. обрізанням Грейзена-Зацепіна-Кузьміна (ГЗК-обрізання) внаслідок взаємодії КПНВЕ з фотонами мікрохвильового випромінювання при досягненні порогу піонного народження, то прогин (“dip”) в області щиколотки не має однозначного пояснення. В наших роботах [11, 13, 14] прогин пояснено взаємодією протонного компонента КПНВЕ з мікрохвильовим випромінюванням вище енергії народження електрон-позитронних пар. В такій інтерпретації протони повинні доминувати в загальному потоці КПНВЕ і положення щиколотки (максимуму прогину) в спектрі визначається тільки перетином протон-фотонної взаємодії, який для розсіяння на фотонах мікрохвильового (реліктового) випромінювання досягає максимуму саме біля  $10^{19}$  eV Цей факт ми використали для калібрування спектрів КПНВЕ, отриманих на різних детекторах і показали, що форми цих спектрів подібні між собою і відповідають енергетичній залежності перетину протон-фотонної взаємодії, а існуючі зараз розбіжності в амплітудах спектрів детекторів AGASA, Yakutsk, HiRes та AUGER пояснюються систематичними похибками цих детекторів у вимірюванні енергії КПНВЕ.

Обґрунтування протонної моделі КПНВЕ дозволило вирішити ще одну проблему фізики космічних променів – встановити область переходу від галактичного до позагалактичного компонента в загальному потоці КПНВЕ [13, 14]. В нашій моделі це відбувається в області енергій  $10^{17.7}$  eV, де падаючий галактичний потік із домінуванням ядер заліза (про це свідчать дані установки KASCADE) зрівнюється з наростаючим потоком позагалактичних протонів.

На траєкторії та час руху КПНВЕ в міжгалактичному та міжзоряному середовищі нашої Галактики, а, тим самим, і на спостережуваний спектр КПНВЕ суттєво впливають магнітні поля [17]. В наших роботах [1, 6, 7] на основі чисельного моделювання поширення космічних променів (протонів та ядер) в галактичному і міжгалактичному магнітних полях досліджено вплив міжгалактичного та галактичного магнітних полів на очікувану анізотропію КПНВЕ, оцінено кореляцію напрямків приходу КПНВЕ з різними класами астрофізичних об'єктів: активних ядер галактик, надсвітних інфрачервоних галактик тощо, відмічені ймовірні джерела КПНВЕ серед близьких активних ядер галактик та надсвітних інфрачервоних галактик.

**3. Космічні струни.** Фазові переходи в ранньому Всесвіті можуть супроводжуватись виникненням т.зв. топологічних дефектів – монополів, доменних стінок, космічних струн [19]. Топологічні дефекти, зокрема, космічні струни можуть мати широкий спектр астрофізичних проявів. Перш за все, космічні струни та їх петлі можуть проявитись шляхом гравітаційного лінзування. Зокрема, в роботі [20] аномальні синхронні коливання блиску двох гравітаційно-лінзованих зображень квазара Q0957+561 A,B пояснені прольотом біля осі квазар-спостерігач осцилюючої петлі космічної струни. Періодичні зміни гравітаційного поля петлі викликають синхронні зміни із цим же періодом в блиску зображень, на відміну від несинхронних неперіодичних розділених часом затримки змін блиску зображень внаслідок змінності самого квазара. Тому дослідження ефектів гравітаційного лінзування є одними з найперспективніших щодо експериментального виявлення космічних струн.

Астрофізичні прояви надпровідних космічних струн проаналізовані в [8, 9, 15, 16]. Внаслідок осциляцій в міжгалактичних магнітних полях в надпровідних петлях виникають сильні електричні струми, які породжують потужні імпульси колімованого електромагнітного випромінювання від прикаспових областей, які, в свою чергу, породжують в міжгалактичному середовищі релятивістські струмені плазми з параметрами, близькими до очікуваних в джерелах космологічних гама-спалахів. Крім гама-спалахів, в таких струменях створюються умови для прискорення КПНВЕ [15, 16].

Магнітне поле космічної струни із струмом створює циліндричний аналог магнітосфери Землі, і при русі струни в міжгалактичній плазмі із субрелятивістською швидкістю виникає головна ударна хвиля навколо магнітосфери струни, на фронті якої прискорюються заряджені частинки (космічні промені). Нетеплове випромінювання прискорених частинок – ще один астрофізичний прояв космічних струн, розрахований нами в [8,9]. Таке випромінювання (головним чином, синхротронне, обернене комптонівське на зовнішніх – реліктових, інфрачервоних та ін. фотонах, а також синхротронне само-компонівське) має широкий спектральний інтервал – від радіо- до ТеВ-ного гама-випромінювання. Особливо потужним воно очікується від прикаспових областей, що відкриває можливості його реєстрації сучасними детекторами.

**4. Залишки Наднових та галактичні космічні промені.** Космічні промені з енергіями до  $10^{17}$ – $10^{18}$  eV, як вважається, прискорюються в нашій Галактиці [18]. Найбільш ймовірними їх джерелами вважаються залишки Наднових зір. Повна енергетика та частота вибухів Наднових, наявність в залишках Наднових ударних хвиль та магнітних полів потрібної величини відповідають вимогам до джерел галактичних космічних променів. Більше того, широкосмугові ( від радіо- до ТеВного діапазону) спостереження нетеплового (синхротронного та оберненого комптонівського) випромінювання залишків підтверджують наявність в них релятивістських електронів із степеневим спектром та максимальними енергіями понад 10 TeV. Однак переконливих доказів присутності релятивістського протонного компонента в залишках Наднових з максимальними енергіями понад 1 PeV ( $10^{15}$  eV), тобто, доказів того, що саме залишки Наднових є «космічними ПеВатронами», досі немає. Синхротронне випромінювання релятивістських протонів незначне, а зафіксоване від деяких залишків ТеВне гама-випромінювання, яке могло б свідчити про непружні протон-протонні зіткнення з народженням і подальшим розпадом нейтральних піонів, можна інтерпретувати і як обернене комптонівське випромінювання релятивістських електронів. Тільки більш детальні моделі залишків та додаткові спостереження в ГеВному діапазоні (що зараз здійснює місія FERMI) дозволять встановити ефективність прискорення адронного компонента космічних променів в залишках Наднових. В наших роботах [3–5, 21] проведено гідродинамічне моделювання еволюції залишків Наднових в неоднорідному міжзоряному середовищі і показано, що між класичними адіабатичною та радіаційною стадіями еволюції немає швидкого переходу, а, насправді, виділяється нова достатньо тривала – порядку тривалості адіабатичної стадії – перехідна стадія, під час якої суттєва частина гарячого газу в прифронтній області залишку охолоджується і приєднується до холодної оболонки, утвореної з нагребеного газу. Внаслідок цього тиск плазми за фронтом ударної хвилі падає і швидкість хвилі на початку перехідної стадії

спочатку різко зменшується приблизно вдвічі, а надалі залишається приблизно постійною, оскільки зворотна ударна хвиля всередині залишку підтримує приблизно постійний тиск охолодженого газу. Це триває до завершення перехідної стадії, тобто, до моменту припинення швидкого охолодження плазми за фронтом зворотної ударної хвилі. Надалі холодна оболонка збільшує свою масу тільки за рахунок згрібання зовнішнього до фронту міжзоряного газу і її динаміка описується рівняннями класичної радіаційної стадії.

Фізичні процеси формування холодної оболонки на перехідній стадії суттєво впливають на генеруванняTeVного гама-випромінювання залишку. Разом з початково гарячим газом в новоствореній холодній оболонці опиняється і зв'язана з ним доля космічних променів. Зростання концентрації частинок-мішеней в оболонці в десятки чи навіть сотні разів приводить до пропорційного зростання частоти протон-протонних зіткнень і, тим самим, до багатократно-го підсиленняTeVного гама-випромінювання залишків Наднових на перехідній стадії. Додатковим фактором підсилення гама-випромінювання служить зростання енергії космічних променів внаслідок бетатронного механізму при зростанні густини і, відповідно, напруженості магнітного поля в плазмі, що охолоджується. Нами розраховані потоки та спектриTeVного гама-випромінювання залишків Наднових на перехідній стадії та показано, що спостерігається значне підсилення гамма-випромінювання, яке досягає максимуму на завершених перехідній стадії. Тому «космічні Певатрони» можуть бути виявлені і серед залишків на перехідній стадії [4, 21], а не тільки на початку адиабатичної, як вважалося раніше.

**5. Гіперонові зорі.** Спостереження останніх років показали, що деякі особливо потужні спалахи наднових, класифіковані як Гіперонові, супроводжуються формуванням двох вузько колімованих релятивістських струменів, відповідальних за довготривалі гама-спалахи. В той же час збільшена енергетика вибуху ( $E > 10^{52}$  ерг) приводить до того, що сферично-симетрична ударна хвиля, яка зумовлює скинення оболонки зорі, при виході на поверхню зорі-попередника Гіпернової досягає помірно релятивістських швидкостей [22]. В наших роботах [2, 10] показано, що у випадку достатньо компактною переднадковою (з достатньо швидким падінням густоти в зовнішніх шарах зорі) частинки плазми прискорених релятивістською ударною хвилею зовнішніх шарів зорі набувають релятивістських швидкостей з Лоренц-факторами до тисяч і більше. Непружні зіткнення цих релятивістських частинок (протонів та ядер) із частинками-мішенями навколосоряного середовища приводитимуть до генерування короткотривалого адронного (внаслідок розпаду нейтральних піонів) спалаху гама-випромінювання в GeV – TeV діапазоні, який супроводжуватиме початковий розвиток спалаху Гіпернової в оптичному, ультрафіолетовому та рентгеновському діапазонах. Передбачений нами спалах, на відміну від класичних колімованих гама-спалахів, породжених релятивістськими струменями, не буде колімованим, тому реєстрація таких спалахів суттєво полегшується і, в разі виявлення, допоможе уточнити природу Гіпернових та частоту пов'язаних з ними довготривалих гама-спалахів.

Робота частково підтримана програмою НАН України "Дослідження структури та складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії" (Космомікрофізика).

1. Гнатик Б.І., Єлієв А.А. Відхилення космічних променів надвисоких енергій у магнітному полі галактики // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 3. – С. 204–207.
2. Гнатик Б.І., Марченко В.В. Гідродинамічна колімація релятивістських струменів при спалахах Гіпернових зір // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2005. – Вип. 41. – С. 21–24.
3. Гнатик Б.І., Петрук О.Л., Тележинський І.О. Перехід залишків Наднових з адиабатичної до радіаційної стадії еволюції. Аналітичний опис // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 4. – С. 195–206.
4. Гнатик Б., Тележинський І. Гама-випромінювання постадиабатичних залишків Наднових // Журн. фізичних досліджень. – 2007. – Т. 11, № 3. – С. 343–349.
5. Гнатик Б.І., Тележинський І.О. Несферичні радіаційні Залишки спалахів Наднових // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 6. – С. 367–380.
6. Єлієв А.А., Гнатик Б.І. Кореляція космічних променів надвисоких енергій з різними класами позагалактичних об'єктів: внесок найближчих та найяскравіших членів вибірок // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 4. – С. 297–307.
7. Єлієв А.А., Гнатик Б.І. Формування спектру космічних променів в області високих енергій: вплив міжгалактичних магнітних полів та очікуваний вклад окремих джерел // Кинематика и физика небес. тел. – 2007. – Т. 23, № 2. – С. 83–94.
8. Задорожна Л., Гнатик Б., Нетеплове випромінювання надпровідних космічних струн в замагніченому міжгалактичному середовищі // Вісн. Київ. ун-ту. Астрономія. – 2006. – Вип. 42. – С. 15–20.
9. Задорожна Л.В., Гнатик Б.І. Електромагнітне випромінювання космічних струн // Український фізичний журн. – 2009. – Т. 54. – № 9. – С. 1044–1052.
10. Марченко В.В., Гнатик Б.І. Спостережні прояви виходу релятивістської ударної хвилі на поверхню Гіпернової зорі // Кинематика и физика небес. тел. – 2006. – Т. 22, № 2. – С. 125–137.
11. Aloisio R., Berezhinsky V., Blasi P., Gazizov A., Grigorieva S., Hnatyk B. A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays // Astroparticle Physics. – 2007. – Vol. 27, N 1. – P. 76–91.
12. Berezhinsky V. Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays // Adv.Space Res. – Vol. 41. – N 12. – P. 2071-2078.
13. Berezhinsky V. S., Grigorieva S., Hnatyk B.I. Extragalactic UHE proton spectrum and prediction for iron-nuclei flux at  $10^8 - 10^9$  GeV // Astroparticle Phys. – 2004. – Vol. 21, N 6. – P. 617–625.
14. Berezhinsky V.S., Grigorieva S.I., Hnatyk B.I. Extragalactic UHE proton spectrum and prediction of flux of iron-nuclei at  $10^8 - 10^9$  GeV // Nuclear Phys. B. Proceed. Suppl. – 2006. – Vol. 151, N 1. – P. 497–500.
15. Berezhinsky V., Hnatyk B., Vilenkin A. Gamma ray bursts from super conducting cosmic strings // Phys. Rev. D. – 2001. – Vol. D64. – N 4. – P. 043004-043016.
16. Berezhinsky V.S., Hnatyk B.I., Vilenkin A. Superconducting Cosmic Strings as Gamma Ray Burst Engines // Baltic Astronomy. – 2004. – Vol. 13. – P. 289–292.
17. Das S., Kang H., Ryu D., Cho J. Propagation of Ultra-High-Energy Protons through the Magnetized Cosmic Web // Astrophys. J. – 2008. – Vol. 682. – N 1. – P. 29-38.
18. Hillas A. M. Cosmic Rays: Recent Progress and some Current Questions // eprint arXiv:astro-ph/0607109.-2006
19. Sakellariadou M. Cosmic Strings and Cosmic Superstrings // Nuclear Physics B Proceedings Supplements. – 2009. - Vol. 192. - P. 68-90.
20. Schild R., Masnyak I. S., Hnatyk B., Zhdanov V. Anomalous fluctuations in observations of Q0957+561 A,B: Smoking gun of a cosmic string? // Astronomy and Astrophysics. – 2004. – Vol. 422. – P. 477–482.
21. Telezhinsky I., Hnatyk B. High Energy Signatures of Post-Adiabatic Supernova Remnants // Mod. Phys. Lett. A. – 2007. – Vol. 22, №35. – P. 2617–2629.
22. Wang X.-Y., Razzaque S., Mészáros P.; Dai Z.-G. High-energy cosmic rays and neutrinos from semirelativistic hypervolcanoes // Phys. Rev. D. – 2007. – Vol. 76. – N 8. – P. 083009
23. <http://www.virgo.bitp.kiev.ua>