



ISSN 1607–2855

Том 4 · № 2 · 2003 С. 112–116

УДК 524.1, 524.7

Пошуки джерел космічних променів надвисоких енергій

Б.І. Гнатик¹, А.А. Елійв²

¹Астрономічна обсерваторія Київського національного університету ім. Т.Г.Шевченка

²Фізичний факультет Львівського національного університету ім. І.Я.Франка

Досліджена можливість генерування космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ) різними класами астрофізичних об'єктів, зокрема, радіогалактиками та лацертидами. Виявлено помітну кореляцію між напрямками приходу КПНВЕ і розподілом найяскравіших радіогалактик та відсутність значимої кореляції для лацертид.

ПОИСКИ ИСТОЧНИКОВ КОСМИЧЕСКИХ ЛУЧЕЙ СВЕРХВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ, Гнатик Б.И., Елийв А.А. — Исследована возможность генерации космических лучей сверхвысоких энергий (КЛСВЭ) различными классами астрофизических объектов, в частности, радиогалактиками и лацертидами. Обнаружено заметную корреляцию между направлениями прихода КЛСВЭ и распределением ярчайших радиогалактик и отсутствием значимой корреляции для лацертид.

SEARCH FOR SOURCES OF ULTRA HIGH ENERGY COSMIC RAYS, by Hnatyk B., Elyiv A. — Possibility of generation of ultra high energy cosmic rays (UHECRs) by different classes of astrophysical objects, especially by radio galaxies and BL Lacertae (BL Lacs), is investigated. Noticeable correlation between arrival directions of UHECRs and distribution of brightest radiogalaxies is revealed. Meantime, a significant correlation is absent for BL Lacs.

1. ВСТУП

Реєстрація космічних променів з енергіями понад 10^{18} еВ (так званих космічних променів надвисоких енергій (КПНВЕ)), особливо, подій з енергіями до $(2-3) \cdot 10^{20}$ еВ [4, 8] стала серйозним викликом для сучасних теорій походження космічних променів (КП).

Першою проблемою стала сама можливість прискорення заряджених частинок до таких енергій, адже навіть найбільш перспективне прискорення КП механізмом Фермі [5] першого роду на фронтах ударних хвиль в різних астрофізичних об'єктах зазвичай обмежується енергіями $(1-3) \cdot 10^{19}$ еВ [11]. Ряд інших, менш детально розроблених, астрофізичних механізмів також не можуть перевершити межу в 10^{20} еВ [1].

В принципі, спостережувані КПНВЕ могли б виникнути не в результаті прискорення початково низькоенергійних частинок ("висхідний" чи "bottom-up" сценарій) а в результаті розпаду топологічних дефектів [10] чи надмасивних частинок — реліктів раннього Всесвіту — з періодом піврозпаду, співмірним з віком Всесвіту ("низхідний" чи "top-down" сценарій) [3]. Однак і цей сценарій стикається з рядом труднощів [2].

Загадкою залишається ще й те, чому ми взагалі спостерігаємо КПНВЕ. Адже, навіть якщо КВНВЕ і можуть прискорюватись в екстремальних умовах ядер активних галактик чи генеруватись топологічними дефектами, відстані до джерел повинні бути космологічними. Однак, протони (найбільш ймовірні кандидати в КПНВЕ) з енергією $E > 3 \cdot 10^{19}$ еВ зазнають значних енергетичних втрат при взаємодії з космічним мікрохвильовим (реліктовим) випромінюванням, що повинно приводити до т.зв. обрізання Грайзена-Зацепіна-Кузьміна (ГЗК-границі) [7, 16] енергетичного спектру КПНВЕ.

Причиною обривання є обмеження відстаней, з яких можливі джерела дають вклад в високоенергетичну частину спектру. Так, протон з енергією 10^{20} eV може досягти Землі лише з відстані, меншої ніж 50 Мпс, гранична відстань є ще меншою для ядер і гамма-променів [2]. Тому очікуваний енергетичний спектр у випадку рівномірно розподілених джерел із степеневим спектром генерації повинен мати характерний обрив із 50-відсотковим зниженням інтенсивності при енергії $E_{1/2} \approx 6 \cdot 10^{19}$ eV [1]. Однак спостережуваний спектр містить суттєве число подій з енергіями, що значно перевищують ГЗК-граніцю (рис. 1).

Розв'язати проблему походження КПНВЕ допомогло б ототожнення хоча б однієї чи декількох подій реєстрації КПНВЕ з відповідним астрофізичним джерелом - пульсаром, квазаром тощо. Най-

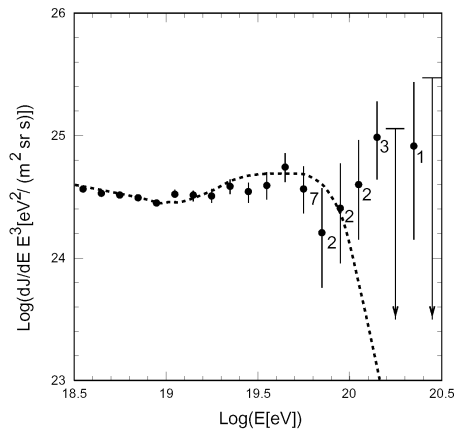


Рис. 1. Енергетичний спектр космічних променів надвисоких енергій [13]. Штрихована лінія — теоретичне передбачення, точки — експериментальні дані (цифри біля точок вказують кількість зареєстрованих подій)

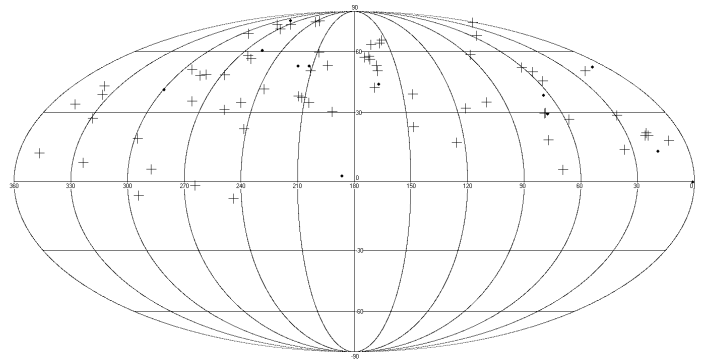


Рис. 2. Взаємне положення радіогалактик (кружки) та космічних променів (хрестики) на небесній сфері

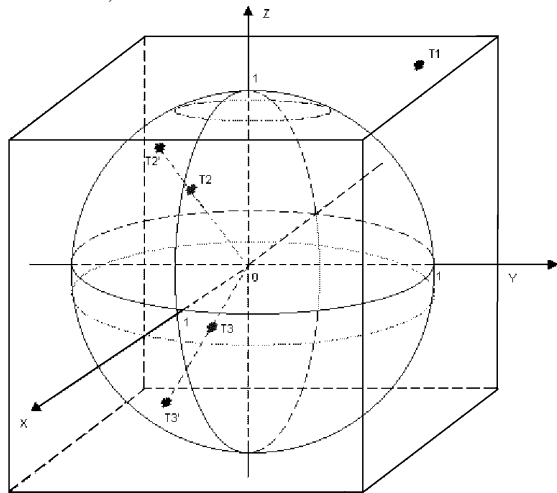


Рис. 3. Генерування випадкового розподілу об'єктів на сфері методом Монте-Карло



Рис. 4. Залежність кількості пар радіогалактика – космічний промінь від розміру пар

більший інтерес в цьому відношенні представляють ядра активних галактик, зокрема, лацертиди — підклас активних ядер галактик з прототипом BL Lac, однак питання про існування зв'язку КПНВЕ з лацертидами остаточно не з'ясоване (пор. [14] та [12]). Тому в нашій роботі проведено дослідження зв'язку напрямків приходу КПНВЕ з енергіями $E > 4 \cdot 10^{19}$ еВ, зареєстрованих установкою AGASA (67 подій), з двома класами ядер активних галактик: з найяскравішими радіогалактиками та з найяскравішими лацертидами.

2. ПОШУКИ КОРЕЛЯЦІЙ ДЖЕРЕЛ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ З РАДІОГАЛАКТИКАМИ ТА ЛАЦЕРТИДАМИ

Дослідження КПНВЕ розпочалися в кінці 50-х років минулого століття. Найбільш відомими установками стали AGASA (Akeno Giant Air Shower Array) в Японії, Haverah Park в Великобританії, Якутськ в Росії, Volcano Ranch в Сполучених Штатах. В наших дослідженнях ми використали результати 67 подій приходу космічних променів з енергіями понад $4 \cdot 10^{19}$ еВ, зареєстрованих AGASA [9, 13]. Конструкція установки дозволяє впевнено реєструвати характеристики космічних променів на зенітних віддалях, менших за 45° , а оскільки AGASA знаходиться на 35° північної

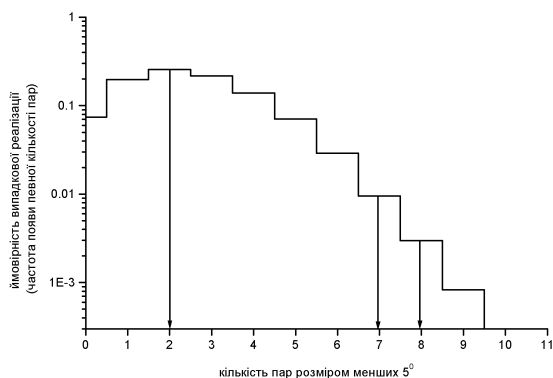


Рис. 5. Частота випадкової реалізації пар розміром менших 5° для радіогалактик



Рис. 6. Залежність ймовірності випадкової реалізації спостережуваної кількості пар від їх розміру для радіогалактик

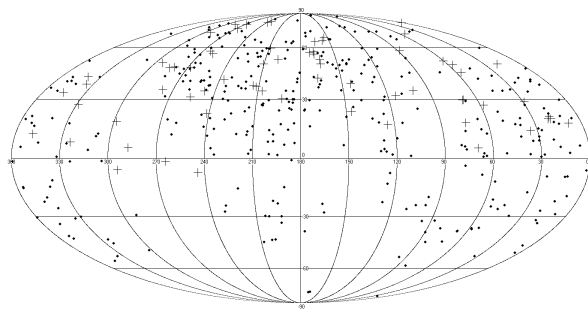


Рис. 7. Взаємне розміщення лацертид і космічних променів на небесній сфері

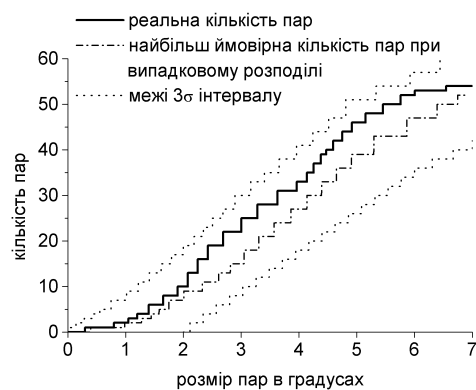


Рис. 8. Залежність кількості пар лацертид — космічний промінь від їх розмірів

широти, то всі зареєстровані промені належать поясу неба між -10° і $+80^\circ$ по схиленню. Точність, з якою визначається напрям прибуття, складає біля 3° .

Проілюструємо процедуру пошуку кореляцій між напрямками приходу космічних променів і положеннями їх можливих джерел на прикладі радіогалактик. Вибрано 12 найяскравіших радіогалактик в поясі неба між -10° і $+80^\circ$ по схиленню [6], чорними кружками вони зображені на карті рис. 2 (хрестиками позначені космічні промені).

Навколо кожної радіогалактики утворюємо коло деякого радіуса R (в градусній мірі) і підраховуємо кількість пар космічний промінь–радіогалактика, за розміром менших за R . Зрозуміло, що кількість пар є функцією їхнього розміру (чим більший розмір пар, тим їх більше), цю залежність для радіогалактик зображено на рис. 4 товстою лінією.

Визначимо ймовірність випадкової реалізації такої кількості пар. Для цього необхідно на сфері між схиленнями -10° та $+80^\circ$ випадковим чином розкинути 67 променів і 12 радіогалактик. Утворимо в просторі куб ребром в 2 одиниці з гранями, перпендикулярними до координатних осей, центр куба сумістимо з початком координат, в куб впишемо сферу одиничного радіуса з центром в початку координат (рис. 3). Всередині куба випадковим чином помістимо точку, згенерувавши генератором випадкових чисел три координати в межах від -1 до $+1$. Якщо точка лежить всередині сфери, тобто довжина її радіус-вектора менша 1, то ця точка записується в первинний масив даних, якщо поза сферою, то вона до уваги не береться. Далі для точки, яка попала всередину сфери, обчислимо сферичні координати (з напрямком осі Z на північний полюс), і якщо точка попадає в пояс від -10° до $+80^\circ$, то вона записується в остаточний масив даних, всі інші точки відсіюються.

Генерування випадкових точок здійснюється доти, доки їх в поясі видимості установки не стане 67. Наприклад, на рис. 3 зображена точка $T1$ міститься поза сферою, її з розгляду вилучаємо, точка $T3$ хоча й міститься всередині сфери, але її проекція $T3'$ на сфері далеко на півдні, поза поясом видимості, її також вилучаємо. А ось точка $T2$ міститься всередині сфери, а її проекція $T2'$ в поясі. Процедуру повторюємо доти, доки не набереться 67 таких точок. Вони будуть випадково розташовані на сфері в межах схилень від -10° до $+80^\circ$. Таким самим способом розкидаємо випадковим чином на небесній сфері 12 радіогалактик.

Отже, ми отримали одну випадкову реалізацію з положень променів і радіогалактик. Зафіксуємо деякий кут R , і визначимо скільки існує пар, розміром менших за R . Всю цю процедуру повторюємо 100000 разів. На основі цих даних можна знайти частоту випадкової реалізації даної кількості пар.

На рис. 5 для $R = 5^\circ$ по осі X зображено кількість пар, а по осі Y — частоту їх випадкової

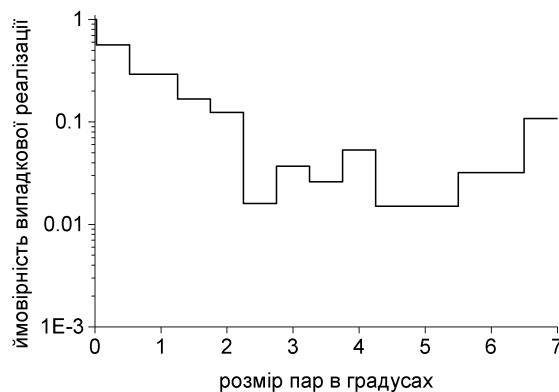


Рис. 9. Залежність ймовірності випадкової реалізації спостережуваної кількості пар від їх розміру для лацертид

появи. З графіка можна знайти найбільш ймовірну кількість пар (2 пари), інтервал, еквівалентний 3 сигма (99.8% всіх подій) (8 пар), та ймовірність випадкової реалізації реальної кількості пар (7 пар) рівну 0,01. Все це, повторене для різних кутів R , зображено на рис. 4 та рис. 6. Видно, що при $R = 3^\circ$ крива реальної кількості пар майже дотикається до межі 3 сигма інтервалу. Враховуючи, що точність у визначенні напрямку прибуття також 3° , то можна констатувати той факт що для 5 променів (на рис. 2 обведені колами) існують ймовірні джерела у вигляді 4 радіогалактик. З рис. 6 видно що ймовірність випадкової реалізації 5 пар розміром меншим 3° є близькою до 0,001.

Для перевірки достовірності методу цю процедуру пророблено для різних некорельованих з космічними променями систем, наприклад, із зорями. З графіків видно, що криві добре накладаються на криву кількості пар, які мають найбільшу ймовірність зреалізуватися при випадковому розподілі. З рис. 6 можна побачити, наскільки сильно різняться положення кривих для спостережуваного розташування і випадкового.

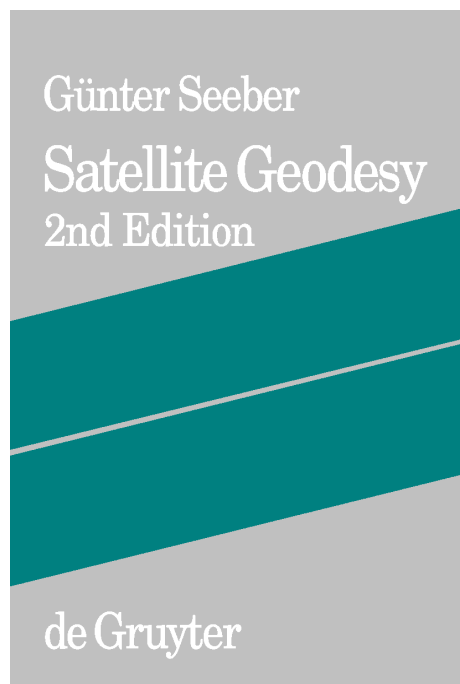
Аналогічну процедуру повторюємо і для лацертід. Вибрано 150 найяскравіших лацертід [15]. Їхні положення на небесній сфері приведені на рис. 7. Як видно з графіка (рис. 8), спостережувана крива ніде не доторкається до межі інтервалу в 3 сигма і ймовірність випадкової реалізації не падає нижче 0,01 (рис. 9). Тому можна констатувати що лацертиди не виявляють кореляції з джерелами КПНВЕ.

3. ВИСНОВКИ

Виконане нами статистичне дослідження кореляцій напрямків приходу КПНВЕ з розподілом на небі їх можливих джерел (радіогалактик та лацертід) вказує на можливий зв'язок КПНВЕ з потужними радіогалактиками. В той же час помітна кореляція КПНВЕ з лацертидами відсутня.

1. *Berezinskiy V.S., Буланов С.В., Гинзбург В.Л. и др.* Астрофизика космических лучей. — М.: Наука, 1990. — 528 с.
2. *Berezinsky V.S.* // Nuclear Physics B (Proc. Suppl.). — 1999. — **70**. — P. 419–430.
3. *Berezinsky V., Kachelriess M., Vilenkin A.* // Phys. Rev. Lett. — 1997. — **79**. — P. 4302–4305.
4. *Bird D.J., Corbat S.C., Dai D.H., et al.* // Phys. Rev. Lett. — 1993. — **71**. — P. 3401–3404.
5. *Fermi E.* // Phys. Rev. — 1949. — **75**. — P. 1169–1174.
6. *Gopal-Krishna, Subramanian P., Wiita P.J., Becker P.A.* // astro-ph/0108144. — 2001.
7. *Greisen K.* // Phys. Rev. Lett. — 1966. — **16**. — P. 748–750.
8. *Hayashida N., Honda K., Honda M., et al.* // Phys. Rev. Lett. — 1994. — **73**. — P. 3491–3494.
9. *Hayashida N., Honda K., Inoue N., et al.* // astro-ph/0008102. — 2000.
10. *Hill C.T., Schramm D.N., Walker T.P.* // Phys. Rev. — 1987. — **D36**. — P. 1007–1016.
11. *Norman C.A., Melrose D.B., Ashterberg A.* // Astrophys. J. — 1995. — **454**. — P. 60–75.
12. *Sigl G., Torres D., Anchordoqui L., Romero G.* // Phys. Rev. — 2001. — **D63**. — P. 1302.
13. *Takeda M., Hayashida N., Honda K., et al.* // Astrophys. J. — 1999. — **522**. — P. 225–237.
14. *Tinyakov P.G., Tkachev I.I.* // Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 2001. — **74**. — P. 499.
15. *Veron-Cetty M.P., Veron P.* // Quasars and Active Galactic Nuclei, ESO Scientific Report, 9th Ed. — 2000. (See also <ftp://cdsarc.u-strasbg.fr/pub/cats/VII/224>).
16. *Zatsepin G.T., Kuzmin V.A.* // JETP Lett. — 1966. — **4**. — P. 78.

Надійшла до редакції 23.06.2003



Автор: Gunter Seeber
Название: Satellite Geodesy, 2nd edition
Издательство: Walter de Gruyter — Berlin/New York
ISBN: 3-11-017549-5
Год издания: 2003

Второе издание книги профессора Гюнтера Зебера «Спутниковая геодезия» представляет собой существенно переработанное и расширенное ее первое издание (G. Seeber, Satellitengeodasie, 1989), которое составляет теперь 589 страниц текста и включает в себя 281 рисунок, 64 таблицы, а также список литературы, достигающий 760 наименований. Книга состоит из следующих двенадцати глав:

1. Введение (9 стр.);
2. Основы (52 стр.);
3. Орбитальное движение спутника (73 стр.);
4. Основные концепции наблюдений и использование спутников в геодезии (26 стр.);
5. Оптические методы определения направлений (20 стр.);
6. Доплеровские методы (30 стр.);
7. Глобальная позиционная система (193 стр.);
8. Лазерная локация (41 стр.);
9. Спутниковая альтиметрия (27 стр.);
10. Спутниковые миссии определения гравитационного поля (16 стр.);
11. Другие космические методы (21 стр.);
12. Обзор и приложения (32 стр.).

Во введении автор ставит следующие три основные задачи современной спутниковой геодезии:

- 1) высокоточное определение местоположений пунктов (их трехмерных координат) в глобальном, региональном и локальном масштабах;
- 2) определение гравитационного поля Земли, а также линейных функций этого поля;
- 3) измерение и моделирование геодинамических явлений, решение которых и охватывает, фактически, последующие разделы книги.

Вторая глава посвящена описанию основных систем координат, шкал времени и основ теории распространения сигнала между спутником и наземной станцией. В третьей главе дана теория движения искусственного спутника Земли (ИСЗ). В четвертой главе рассмотрена общая обратная задача оценивания параметров по результатам измерений и дан краткий обзор известных мето-

дов наблюдений ИСЗ. Сохранив в пятой главе (для целостности исторической картины развития спутниковой геодезии) оптические методы определения направлений, в шестой главе автор останавливается на таких технологиях, которые основаны на эффекте Доплера и соответствующих навигационных системах, предшествующих современным GPS и GLONASS. В наиболее обширной седьмой главе основное внимание уделено сравнительной характеристике глобальных позиционных систем GPS, GLONASS и будущей GALILEO, а также их современному применению в практике геодезических работ, включая такие подходы, как DGPS и разнообразное использование GPS-сетей в режиме реального времени (RTK, VRS и др.). Главы 8, 9 и 10 посвящены, соответственно, методам лазерной локации, спутниковой альтиметрии и новым спутниковым миссиям по определению и уточнению гравитационного поля Земли: CHAMP, GRACE и будущей GOCE. В главе 11 рассмотрен, главным образом, VLBI-метод, находящий в настоящее время широкое применение в глобальной геодинاميке. Если главы 5–11 были посвящены детальному анализу отдельных видов наблюдений и соответствующих методов и задач, то в заключительной 12 главе автор дает общий взгляд на возможную комбинацию разных видов наблюдений и, фактически, подводит итог состояния современных возможностей спутниковой геодезии.

В заключение отметим, что автору удалось сохранить достаточно удачный баланс между общим объемом материала и описанием рассматриваемых задач, за счет чего читатель, по-видимому, согласится с собственным замечанием Г.Зебера о стиле изложения книги как о нечто среднем между учебником и руководством. Отмеченный факт, собственно, и делает обсуждаемую книгу особенно полезной не только для геодезистов, картографов и фотограмметристов, но и для достаточно широкого круга специалистов смежных специальностей, интересующихся приложениями спутниковой геодезии в навигации, гидрографии, GIS-технологиях, географии, геологии, геофизике и океанографии. Книга является легко читаемой, ее структура построения — логичной, содержание — исчерпывающим. Несомненно ценным для заинтересованного читателя может оказаться и наличие в ней необходимой информации о различного рода международных службах, связанных с обработкой наблюдений спутников разных типов. Более подробно с детальным содержанием обсуждаемой книги можно ознакомиться по адресу: http://www.ife.uni-hannover.de/mitarbeiter/seeber/sat_geodesy.html, включающем также и «Предисловие», и первую главу — «Введение».

Д.ф.-м.н., проф. А.Н.Марченко