

КОСМІЧНІ ПРОМЕНІ НАДВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ



Андрій Еліїв
канд. фіз.-мат. наук,
наук. співробітник
Головної астрономічної
обсерваторії НАН України,
м. Київ

Стипендіат
Президента України
2010-2012 рр.

Космічні промені — це потоки заряджених елементарних частинок в космічному просторі (в основному — протонів, — частинок, електронів і фотонів), які безперервно "бомбардують" Землю. Вони були відкриті в 1912 році австрійським фізиком *Віктором Гессом* за допомогою йонізаційної камери на повітряній кулі. На початку XX ст. при дослідженні провідності газів спостерігався деякий надлишковий електричний струм в йонізаційних камерах. Він не пропадав навіть після повної ізоляції приладів від йонізуючих факторів. Його, також, не можна було пояснити природною радіоактивністю Землі. Гесс провів ряд експериментів: він піднімав камери на повітряних кулях і виявив, що струм, а значить, і всепроникаюче випромінювання ростуть з висотою, в той час як йонізація, викликана радіоактивністю Землі, повинна спадати з висотою. Так було доведено космічне походження випромінювання, що йонізувало газ в трубках. Згодом це випромінювання було назване американським фізиком *Міліке-ном* космічними променями.

Енергії частинок космічних променів, виражені в електронвольтах¹ коливаються від 10^6 до 10^{20} еВ. Частинка найвищої енергії, зареєстрована земними детекторами на сьогоднішній час, має енергію біля $3 \cdot 10^{20}$ еВ, що складає 50 Дж. Це макроскопічна енергія — з енергіями такого порядку ми стикаємося в повсякденному житті. Наприклад, це потенціальна енергія тіла масою 1 кг, піднятого на висоту 5 м над поверхністю Землі або кінетична енергія стандартної кулі масою 8 г, яка летить із швидкістю 110 м/с, чи тенісного м'яча, що має швидкість 42 м/с. Зрозуміло, що елементарні частинки таких кінетичних енергій можуть становити небезпеку для космічних польотів.

У земних лабораторіях вдалося максимально розігнати частинку до енергії лише приблизно 10^{13} еВ (у ЦЕРНі на Великому Адронному Коллайдері). А досягти енергії в 10^{20} еВ у земних умовах взагалі неможливо. Тому космічні промені дають унікальну можливість вивчити поведінку матерії при надвисоких енергіях. Відкриття таких енергійних частинок відразу поставило питання: звідки вони беруться та яким є механізм їхнього прискорення? Вивчення подібних частинок допомогло б фізикам зрозуміти найпотужніші та найзагадковіші процеси, що відбуваються у Всесвіті.

Влітаючи у верхні шари атмосфери Землі, первинні космічні промені на висотах приблизно 20 км руйнують ядра найбільш поширених в атмосфері елементів — азоту і кисню. Частинки, що утворюються після цього мають достатню енергію, щоб далі взаємодіяти з атомами атмосфери і, у такий спосіб, породжують широкую атмосферну зливу, в якій беруть участь всі відомі в наш час елементарні частинки (рис. 1). Тобто безпосередньо первинні космічні промені до поверхні Землі не доходять і не становлять для нас небезпеки. Вторинні частинки рухаються зі швидкістю, що перевищує швидкість світла в повітрі, завдяки чому виникає черенковське свічення, що може буди зареєстроване детекторами. Іншим способом їхнього детектування є реєстрація йонізаційних ефектів, спричинених вторинними космічними променями біля поверхні Землі. Спостерігати широкую атмосферну зливу від космічних променів можна і без спеціальних пристроїв. У верхній тропосфері вторинні частинки можуть виступати центрами конденсації атмосферної вологи на ілюмінаторах літаків у вигляді крижаних ліній (рис. 2). На фотографії видно, що деякі лінії мають кривизну,

¹Один електронвольт рівний енергії, яку набирає електрон в електростатичному полі між точками з різницею потенціалів в 1 Вольт, $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж.

котра є проявом відхилення заряджених частинок атмосферної зливи в магнітному полі Землі.

Детектори космічних променів надвисоких енергій

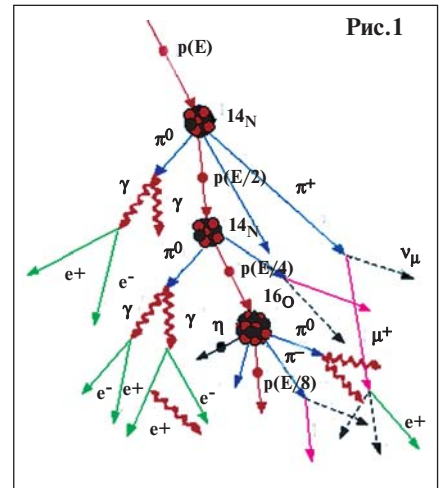
Потік КПНВЕ є надзвичайно малим — одна частинка в рік на один кілометр квадратний. Тому для їх реєстрації будують спеціальні обсерваторії, що являють собою обширні масиви наземних детекторів, такі як AGASA в Японії, Naverah Park у Великобританії, Якутськ в Росії, SUGAR в Австралії, та комбінованих з флуоресцентними телескопами — HiRes в США, AUGER в Аргентині, в майбутньому планується і космічна місія по детектуванню КПНВЕ — Extreme Universe Space Observatory (EUSO).

Одним з найважливіших експериментів по детектуванню КПНВЕ був AGASA. Ця установка, з ефективною площею біля 100 км², працювала 12 років і закінчила свою роботу в 2004 році. Вона являла собою систему з 111 сцинтиляторних детекторів для реєстрації електронного компоненту широких атмосферних злив, а також 27 мюонних детекторів. Установка була здатна надійно реєструвати лише ті космічні промені, що прийшли із зенітної відстані меншої ніж 45°. Тому зона видимості установки являла собою пояс небесної сфери між прямими схиленнями від -10° до $+80^\circ$. Точність визначення енергії складала 30%, а напрямку прибуття — біля 1.6°. За час експлуатації на установці зареєстровано 886 подій, енергія яких більше 10^{19} еВ, та 72 події з енергією, що перевищує $4 \cdot 10^{19}$ еВ, а також 11 подій з енергією вище 10^{20} еВ [1, 2].

Американська обсерваторія HiRes по вивченню КПНВЕ розташована в регіоні з відмінним кліматом для спостереження флуоресценції атмосфери. Установка представляє собою дві

станції, які рознесені на відстань 12.6 км. Кожна зі станцій являє собою систему з кількох десятків дзеркал діаметрами по 1.5 м, поля зору дзеркал частково перекриваються. Для реєстрації фотонів у фокальних площинах дзеркал розміщено фотоелектронні помножувачі. Така система нагадує мозаїчну структуру ока мухи. Злива від космічного променя на своєму шляху збуджує молекули атмосферного азоту. Переходячи в стаціонарний стан молекули азоту випромінюють фотони в ультрафіолетовій області спектру, які реєструються фотоелектронні помножувачі тих дзеркал, поля зору яких охоплюють дану ділянку неба. Таким чином, отримується інформація про проекцію зливи на небесну сферу. Якщо слід від зливи реєструється одночасно двома станціями, то внаслідок паралактичного зміщення можна отримати дві проекції і значно підвищити точність визначення напрямку прибуття первинного КП та його енергію [3].

Нові дані про КПНВЕ з південної півкулі надає установка AUGER, яка введена в дію у західній Аргентині. Вона доповнює спостереження AGASA, що вже проведені в північній півкулі. Це дасть змогу отримати повну картину напрямків приходу КПНВЕ по всій небесній сфері. Нова установка характеризується величезною ефективною площею в порівнянні з попередніми експериментами. Площа AUGER сягає 3000 км², то тільки за рік вона реєструє біля 30 подій КПНВЕ. Проект запропонований в 1992 році, є спільним проектом 19 країн світу. Установка складається з більше ніж тисячі наземних детекторів, що охоплюють площу 40 км², збудовано 3 флуоресцентні станції з 6 телескопами кожна. Наземні детектори являють собою бочки з 12 т чистої води кожна, всередині яких міститься по 3 фотопомно-

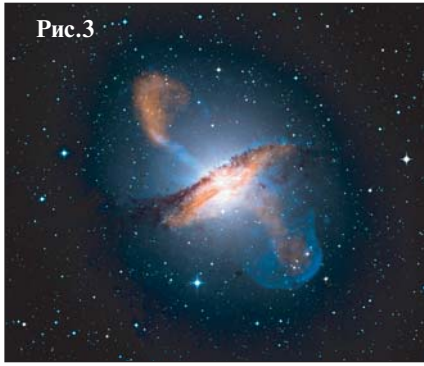


жувачі, котрі реєструють черенковське випромінювання від частинок. Точні визначення часу реєстрації зливи певним детектором дає змогу визначити напрям та енергію первинного КПНВЕ. Середня відстань між наземними детекторами черенковського свічення складає 1.5 км. Вночі прослідкувати треки злив зможуть флуоресцентні детектори, які розміщено на відстані 15 км один від одного по всій території установки AUGER. Флуоресцентні станції збудовано за типом мозаїки ока мухи, що мають дзеркала діаметром 3.4 м та фокусують ультрафіолетове світло від атмосферної зливи та передають його на масив з 440 фотопомножувачів. Таким чином, кожне дзеркало проглядає ділянку неба розміром 30° на 30° . Початкова енергія КПНВЕ визначається із сумарної енергії флуоресцентного потоку від зливи, оскільки на іонізаційні втрати в атмосфері витрачається біля 90 % початкової енергії. Комбінація двох типів детекторів дасть змогу надійніше визначити тип первинної частинки (протон, важке ядро чи фотон) шляхом порівняння даних. Крім того, зменшується систематична похибка у визначенні енергії та напрямку прибуття первинної частинки до 0.6° . Одна з особливостей проекту — можливість спостерігати КП з досить великими зенітними кутами, аж до 60° [4]. Планується будівництво установки такого типу і в північній півкулі.

В найближчому майбутньому Європейським Союзом, Бразилією, Японією та США планується запустити першу космічну місію EUSO по реєстрації КПНВЕ та космічних нейтрино з енергією вище $5 \cdot 10^{19}$ еВ, яка використовуватиме атмосферу в якості гігантського детектору. Реєстрація побудована на основі процесу взаємодії КП з верхніми шарами атмосфери Землі під час якого відбувається вимушена флуорисцентція атомів азоту. Телескоп на супутнику зможе прогляда-



Рис.2



ти земну атмосферу з висоти 400 км в тілесному куті розміром 60° на 60° . Отже, ефективна площа буде на два порядки вища, ніж в експерименті AGASA. Труднощі в реєстрації атмосферних злив полягають у проблемі відокремлення їх свічень від сторонніх сигналів (метеори, грозова активність, спалахи пов'язані з техногенною діяльністю людства) [5].

Походження космічних променів

Основними джерелами КП порівняно низьких енергій (до 1010 eV) є активні області сонячної атмосфери, в яких відбувається прискорення заряджених частинок. Їх потік досить потужний: від Сонця прилітає одна частинка в секунду на квадратний метр. Більш енергійні космічні промені приходять з міжзоряного простору. Їх швидкості дуже близькі до швидкості світла. Через дію міжзоряного магнітного поля вони рухаються не прямолінійно, а по заплутаних траєкторіях, і тому приходять на Землю однаково часто з усіх боків. Їх потік в середньому складає одну частинку в рік на квадратний метр. Основними джерелами міжзоряних космічних променів є залишки вибухів Наднових у Галактиці, а також деякі тісні подвійні зоряні системи.

Походження космічних променів надвисоких енергій, з енергією вище 10^{18} eV менш вивчено, їх потік дуже малий — одна частинка в рік на один кілометр квадратний. Зазвичай, перш ніж досягти Землі, частинки пролітають величезні відстані, де міжгалактичні магнітні поля відхиляють їх від первинного напрямку руху. Тому важко пов'язати частинки, що приходять, з їх джерелом. Проте для частинок з найвищими енергіями таке відхилення повинне бути невелике — чим більше енергія частинки, тим менше вплив магнітного поля на траєкторію, тому з деякою достовірністю можна обчислити їх джерело. Подібна методика дозволила астрономам визначити, що космічні промені не приходять рівно-

мірно зі всіх напрямів. Переважно вони летять з галактик з активними ядрами [6]. За останніми даними обсерваторії AUGER було встановлено, що напрямки прильоту космічних променів надвисоких енергій співпадають з відомими близькими активними ядрами галактик (до 75 Мпс) [7].

В традиційному підході до виникнення КП розглядають сценарій прискорення заряджених частинок в нестационарних магнітних полях. Основною проблемою при такому підході є утримання достатньо довгий час в замагніченій області заряджених частинок для того, щоб вони могли прискоритися до високих енергій. Коли енергія частинки досягне певного значення, при якому її ларморовський радіус² в даному магнітному полі стане перевищувати масштаб замагніченої області, тоді частинка залишить об'єм прискорення. Отже, основне обмеження на максимальну енергію прискорення накладають геометричні розміри області прискорення та характерна величина індукції магнітного поля. Тобто чим сильніше магнітне поле і чим більша область зайнята ним, тим до вищої енергії може прискоритися космічний промінь (так званий критерій Гіласа). Тільки невелика частина астрофізичних об'єктів може потенційно бути джерелами частинок з енергіями біля 10^{20} eV.

Найпопулярнішими класичними теоріями прискорення в магнітній плазмі є механізми Фермі першого та другого роду. Італійський фізик *Енріко Фермі* запропонував розглядати прискорення заряджених частинок на відбиванні від магнітних дзеркал (галактичних масивних замагнічених хмар) [8]. Розрахунки показують, що зіткнення частинки при зустрічному русі хмар призводить до збільшення енергії частинки на деяку величину. В той же час частинка втрачає енергію при зіткненні, коли вона наздоганяє хмару. Оскільки ймовірність зустрічного зіткнення більша, то середній приріст енергії позитивний. Даний механізм Фермі другого порядку пояснює ступеневий спектр КП, але має ряд труднощів в своїй реалізації. По-перше, швидкості хмар в Галактиці не достатні для ефективного прискорення частинок. А по-друге, прискоренню КП низьких енергій перешкоджають йонізаційні втрати.

Набагато ефективнішим і швидшим буде ріст енергії, коли відбуватимуться лише зустрічні зіткнення. Так званий механізм Фермі першого роду передбачає приріст енергії при одному

контакті. Такий варіант реалізується при прискоренні заряджених релятивістських частинок на фронтах сильних ударних хвиль, що поширюються в міжзоряне середовище під час вибухів Наднових. Частина газу космічних променів, розсіюючись на неоднорідностях, циклічно перетинає фронт ударної хвилі і, таким чином, отримує високі енергії. Основна проблема даного механізму полягає в його неспроможності забезпечити найвищі спостережувані енергії КП ($> 10^{20}$ eV).

Проблема одержання високої ефективності прискорення КПНВЕ полягає в тому, що в певний момент заряд "заважає" прискоренню зарядженої частинки. Ефективність механізму прискорення значно зростає, якщо на деякий час частинка перетворюється в нейтральну. Тому автори нового методу в роботі [9] і пропонують розглядати процеси із перезарядкою, в яких заряджена частинка перетворюється в нейтральну і навпаки. Наприклад, протон надвисокої енергії, взаємодіючи з фоновим фотоном, перетворюється на нейтрон, а той, також у результаті взаємодії — знову в протон. Таким чином вдається вирішити проблеми ефективності прискорення й одержати заряджені частинки надвисоких енергій ($E > 10^{20}$ eV). Такий механізм може працювати в активних ядрах галактик (АЯГ) і в джерелах космічних гамма-спалахів.

Активні ядра галактик та лацертиди розглядають як найможливіші позагалактичні прискорювачі космічних променів. Згідно уніфікованої моделі квазарів, всі АЯГ мають подібну структуру — в центрі галактики розміщена надмасивна чорна діра, навколо неї акреційний диск. На деякій відстані від центру розташовано тор з пилу та молекулярного газу, а перпендикулярно до акреційного диску — два протилежно напрямлених струмені релятивістського газу. Гігантські радіогалактики, особливо типу FR II теж можуть бути можливими прискорювачами космічних променів. Вважається, що на кінцях струменів, де відбувається їх зіткнення з міжгалактичним середовищем (так звані гарячі плями), можуть існувати сприятливі умови для прискорення космічних променів до надвисоких енергій. Найближчі гігантські радіогалактики — Центавр А (рис. 3.) та Діва А — розглядаються як ймовірні джерела КПНВЕ.

Взаємодіючи галактики з магнітними полями порядку 20 мкГс та з ударними хвилями є досить поширеними у Всесвіті. Згідно критерію *Гіласа* вони

²Радіус колової орбіти зарядженої частинки в однорідному магнітному полі

також попадають в категорію потенційних джерел КПНВЕ. Скупчення галактик з магнітними полями порядку 1 мкГс та довжиною когерентності поля до 500 кпк теж можуть виступати у якості прискорювачів космічних променів до енергій 10^{20} еВ [10].

Існує також так званний низхідний сценарій, в якому космічні промені є продуктами розпаду залишків раннього Всесвіту — важких частинок, солітонів, мікроскопічних фундаментальних струн, космологічних дефектів тощо. Необхідною умовою для таких екзотичних кандидатів у джерела космічних променів є достатньо великий час їхнього піврозпаду, який повинен бути співмірним з віком Всесвіту. Це і є головним недоліком низхідного сценарію, адже важкі релікти, сформовані наприкінці інфляційної стадії мають мікроскопічний час життя — не більше 10^{-28} с. Маса цих реліктів повинна бути не меншою за $2 \cdot 10^{-16}$ кг, що відповідає енергії КПНВЕ. Цілком можливо, що надмасивні частинки є стабільними, а під час зіткнень вони анігілюють, випускаючи КПНВЕ. Такі частинки могли б становити принаймні частину темної матерії [11].

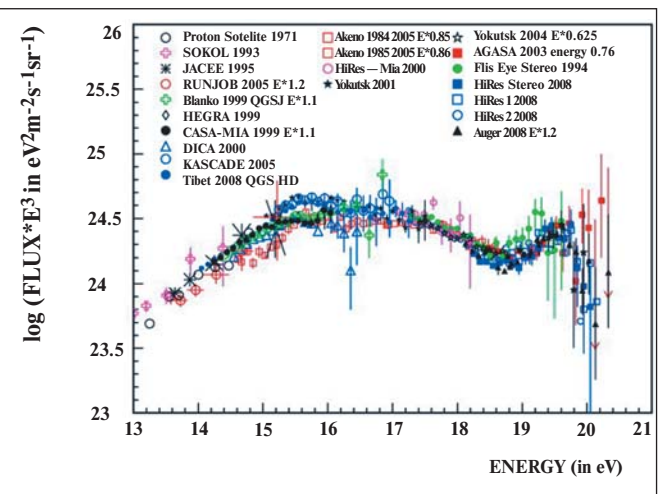
Спектр космічних променів в області високих енергій

У випадку, коли КПНВЕ є зарядженими частинками, то основну роль в їх поширенні в міжгалактичному просторі від джерела до детектора грає взаємодія з мікрохвильовим фоном, що призводить до втрат енергії частинками і відповідає за формування спектру в області надвисоких енергій з $E > 10^{19}$ еВ. Насамперед, космічні промені незалежно від сорту та енергій зазнають адиабатичних втрат внаслідок розширення Всесвіту. В енергетичному інтервалі від $3 \cdot 10^{18}$ еВ до $4 \cdot 10^{19}$ еВ переважають втрати на утворення електрон-позитронних пар при взаємодії з реліктовими фотонами. Для вищих енергій домінуючими є втрати при фотопіонних реакціях. Якщо космічними променями є важкі ядра, то крім втрат на утворення електрон-позитронних пар при $E > 10^{20}$ еВ, важливе значення має фотодисоціація ядер. Різка збільшення енергетичних втрат при $E = 3 \cdot 10^{19}$ еВ відбивається на спектрі позагалактичних протонів у вигляді так званого Грайзена-Зацепіна-Кузміна (ГЗК) обривання енергетичного спектру. Положення енергії ГЗК-обривання для протонів відображає перехід від втрат на утворення електрон-позитронних пар до фотопіонних реакцій, а у випадку ядер заліза — від адиабатичних втрат до втрат на утворення пар та фотодисоціацію ядер, які розпочинаються майже при однакових енергіях [12].

Взаємодія КПНВЕ з мікрохвильовим фоном та відповідні втрати енергії накладають жорсткі обмеження на максимальну відстань до джерел з яких ми можемо зареєструвати космічні промені певних енергій. Енергія ГЗК-обривання сильно залежить від віку космічного променя. Так, для протонів, джерело яких розташовано на відстані 15 Мпк від детектора, ГЗК-обривання спектру має місце при енергії $2 \cdot 10^{20}$ еВ і є слабо вираженим. Якщо ж джерело розташовано на 100 Мпк, то спостерігається різке зменшення потоку при енергії 10^{20} еВ, а для 500 Мпк — при $6 \cdot 10^{19}$ еВ. Найявніше чітко вираженого ГЗК-обривання в спектрі говорить про космологічне походження КПНВЕ.

Найбільше неузгодження між різними експериментальними установками спостерігається саме в області високих енергій (рис. 4). Якщо флуоресцентний детектор HiRes спостерігає ГЗК-обривання в спектрі, як це і передбачає теорія, то спектр установки AGASA продовжується вище 10^{20} еВ без особливих змін. В цьому полягає парадокс КПНВЕ: звідки беруться космічні промені такої високої енергії і як вони можуть дійти до нас крізь мікрохвильовий фон. З іншого боку проблема може бути в систематичних помилках вимірювання енергії та потоку установки AGASA. Нова установка AUGER показала добре узгодження з теорією та підтвердила існування ГЗК-обривання в енергетичному спектрі. Але значні невизначеності в інтерпретації результатів ще залишаються, і необхідним є продовження досліджень.

В 2010 році кінцеві результати опублікували співробітники американської обсерваторії HiRes. Вони підтвердили свої попередні результати в існуванні ГЗК-обривання спектру та показали узгодження з AUGER даними. Вирішальні відкриття ще попереду.



Література

- Hayashida N., Honda K., Inoue N. et al. Updated AGASA event list above $4 \cdot 10^{19}$ eV // Astron. J.— 2000.— Vol. 120, № 5. — P. 2190-2196.
- Cronin J. The highest-energy cosmic rays // E-print Astro-ph 0402487. — 2004. (<http://arxiv.org/abs/astro-ph/0402487>).
- Vogt S. An Overview of Science Results from HIREs: the First 6 Years // Astronomical Instrumentation and Astrophysics. ASP Conf. Proceedings. San Francisco (USA), 2002. — Vol. 270. — P. 5-7.
- Fick B. Hybrid Performance of the Pierre Auger Observatory and Reconstruction of Hybrid Events // Proc. of the 28th International Cosmic Ray Conference. Trukuba (Japan), 2003. — P. 449-453.
- Gorodetzky P. EUSO In September 2004 // Nucl. Phys. B Proceedings Supplements. — 2006. — Vol. 151, № 1. — P. 401-406.
- Еліїв А.А., Пнатик Б.І. Кореляція космічних променів надвисоких енергій з різними класами позагалактичних об'єктів: внесок найближчих та найяскравіших членів вибірок // Кин. физ. неб. тел. — 2006. — Т.22, №4. — С. 297-307.

- The Pierre Auger Collaboration. Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects // Science. — Vol. 318, № 5852. — P. 938-943.
- Fermi E. On the Origin of the Cosmic Radiation // Phys. Rev. 1949 Vol. 75. P. 1169-1174.
- Derishev E., Aharonian F., Kocharovsky V. Particle Acceleration through Multiple Conversions from Charged into Neutral State and Back // Phys. Rev. D. — 2003. — Vol. 68, № 4. — P. 430-440.
- Kang H., Ryu D., Jones T. Cluster Accretion Shocks as Possible Acceleration Sites for Ultra-High-Energy Protons below the Greisen Cutoff // Astrophys. J. — 1996. — Vol. 456. — P. 422-427.
- Dicus D., Repko W. Modeling dark energy with a top-down approach // E-print Astro-ph 0605537 (електронна адреса <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0605537>).
- Zatsepin G., Kuzmin V. On cosmic - ray interactions with photons // Can. J. Phys. — 1967. — Vol. 46. — P. 617-625.
- Nagano M. Search for the end of the energy spectrum of primary cosmic rays // New J. Phys. — 2009. — Vol. 11.