

УДК 524.1+524.7

Р. Гнатик, асп.
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЛАСТІ ПЕРЕХОДУ ВІД ГАЛАКТИЧНИХ ДО ПОЗАГАЛАКТИЧНИХ КОСМІЧНИХ ПРОМЕНІВ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЕКСПЕРИМЕНТУ KASCADE-GRANDE

В роботі досліджується область енергетичного спектру сумарного (галактичного та позагалактичного) потоку космічних променів, яка відповідає переходу від домінування галактичного компонента на низьких енергіях до позагалактичного компонента на високих енергіях. Для цього ми використовуємо найновіші дані експерименту KASCADE-Grande щодо долі легких та важких ядер в загальному потоці космічних променів на різних енергіях. Виявлені в експерименті дані щодо неочікуваної зміни нахилу спектру легкого компонента від $\gamma=3.2$ до $\gamma=2.6$ в області енергій 10^{17} еВ ми інтерпретуємо як прояв позагалактичного компонента потоку космічних променів в діапазоні енергій $\lg E(\text{GeV})=8.1-9.0$. На підтвердження цієї інтерпретації ми показуємо, що екстраполяція цього потоку на вищі енергії в рамках протонної моделі космічних променів найвищих енергій (КПНВЕ) узгоджується із даними експериментів AUGER та Telescope Array. Показано, що показник спектру $\gamma=2.6$ для протонної моделі КПНВЕ найкраще описує дані сучасних експериментів.

Ключові слова: космічні промені, KASCADE-Grande.

1. Вступ. Проблеми походження та прискорення космічних променів найвищих енергій досі залишаються відкритими. Вважається що космічні промені з енергіями до 10^{18} еВ прискорюються в нашій Галактиці в залишках Наднових на фронтах ударних хвиль, тоді як космічні промені вищих енергій мають позагалактичне походження [6]. Питання про хімічний вміст космічних променів найвищих (КПНВЕ) енергій також залишається дискусійним, незважаючи на велику кількість даних експериментів, таких як AUGER, Telescope Array, HiRes, які досліджують цей діапазон енергій [1,7]. На даний момент обговорюються дві теоретичні моделі КПНВЕ: протонна модель та модель суміші ядер – від протонів до заліза. В протонній моделі вважається що основним компонентом КПНВЕ є протони, особливості спектру: провал в області енергій $10^{18} - 10^{19}$ еВ (dip) та обрізання спектру на енергіях понад $5 \cdot 10^{19}$ еВ (ГЗК-обрізання, GZK-cutoff) пояснюються взаємодією космічних променів – протонів – з реліктовим випромінюванням [3,5]. Ця модель добре узгоджується з даними експериментів HiRes, TA по формі спектру і хімічному вмісту, але не узгоджується з даними AUGER щодо хімічного вмісту. Однією з проблем цієї моделі є відсутність характерної особливості у спектрі (зміна показника спектру) в області переходу в діапазоні енергій $10^{17}-10^{18}$ еВ. Модель суміші ядер передбачає перехід до позагалактичних космічних променів на енергії $5 \cdot 10^{18}$ еВ, де спостерігається зміна показника спектру $\gamma=3.2$ до $\gamma=2.6$ (щиколотка, ankle), і домінування важких ядер на найвищих енергіях [2]. Ця модель узгоджується з даними експерименту AUGER (хоча суперечить даним інших експериментів – TA, HiRes) щодо збільшення долі важких ядер із зростанням енергії КПНВЕ, проте проблемою залишається прискорення галактичних космічних променів до енергій 10^{19} еВ, яка є практично недосяжною для галактичних джерел [6]. Відповіді на питання про природу КПНВЕ може дати дослідження області переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів. Зокрема, в нашій роботі ми аналізуємо нові результати експерименту KASCADE-Grande та показуємо, що вони підтверджують протонну модель.

2. Сучасні дані експерименту KASCADE-Grande. KASCADE-Grande – це експеримент з реєстрації злив вторинних частинок в атмосфері Землі, призначений для дослідження первинного складу космічних променів та адронних взаємодій в діапазоні енергій $10^{16}-10^{18}$ еВ [4]. Експеримент розташований на місці колишнього Forschungszentrum Karlsruhe (Дослідницький центр Карлсруе, Німеччина). Детектори одночасно вимірюють електромагнітні, електронні, мюонні та адронні компоненти широких атмосферних злив космічних променів. KASCADE-Grande являє собою розширення експерименту KASCADE і успішно працює з 1996 року. Він був побудований з використанням 37 станцій колишнього експерименту EAS-TOP. Також до його складу входять 252 наземні детектори розташовані на відстані 13 м один від одного які покривають площу 200x200 метрів. У жовтні 2011 року були опубліковані дані експерименту KASCADE-Grande щодо спектру та хімічного вмісту космічних променів в області енергій $10^{16} - 10^{18}$ еВ [4]. В протонній моделі цей енергетичний діапазон відповідає переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів. Дані експерименту приведені на рис. 1 (трикутники – загальний спектр, кружки – важкий компонент, квадрати – легкий компонент).

Проаналізувавши ці дані можна відмітити певні особливості в спектрі: на $\lg E(\text{eV})=16.92$ спостерігається злам в спектрі (друге коліно), домінування важкого (відповідні зливи бідні на електрони: electron-poor – ядра групи заліза) компонента, виположення спектру легкого компонента (відповідні зливи багаті електронами: electron-rich – протони, He, CNO) на $\lg E(\text{eV})=17.0$, потоки важкого та легкого компонента зрівнюються на $\lg E(\text{eV})=17.7$. В нашій роботі ми інтерпретуємо ці дані наступним чином: загальний спектр легкого компонента складається з галактичного та позагалактичного компонента. Виположення в спектрі легких ядер (в діапазоні енергій $\lg E(\text{eV})=17.1-18.0$) відповідає низькоенергетичній частині позагалактичного спектру космічних променів ($J(E) = k \cdot E^{-\gamma}$ з $\gamma=2.6-2.7$), в якому домінують протони (протонна модель). На рис. 1 зображено розбиття потоку легких ядер на дві складові – галактичний потік CNO-ядер та позагалактичний потік протонів.

Галактичну частину спектру легкого компонента ми апроксимували степеневим законом з експоненційним обрізанням, який гарно описує дані в діапазоні енергій $\lg E(\text{eV})=16.3-17.0$. Зі збільшенням енергії в загальному спектрі починає домінувати позагалактичний компонент $\lg E(\text{eV}) > 17.3$. На цих енергіях присутні великі похибки експериментальних значень тому ми представили позагалактичну частину спектру у вигляді смуги допустимих значень. В подальшому всі розрахунки будуть проводитися для двох випадків: #1 – для верхньої межі смуги допустимих значень, #2 – для нижньої. Таким чином ми зможемо краще порівняти дані експериментів з теоретичними розрахунками, взявши до уваги похибки вимірювання.

3. Дослідження області переходу від галактичних до позагалактичних космічних променів. В протонній моделі КПНВЕ [3] енергетичний спектр позагалактичних протонів описується степеневим спектром з показником спектру $\gamma=2.6-2.7$, причому взаємодія космічних променів з реліктовим випромінювання враховується введенням

модифікаційного фактора [3]. Також ми взяли до уваги обрізання спектру в області низьких енергій (нижче 10^{18} eV) міжгалактичним магнітним полем, яке описується параметром $G(E)$ [8]. Початково степеневий енергетичний спектр КПНВЕ, прискорених в однорідно розподілених позагалактичних джерелах, при їх поширенні в міжгалактичному середовищі буде модифікований взаємодією з реліктом та з магнітним полем та матиме вигляд:

$$J(E) = J_0(E) \cdot \eta(E) \cdot G(E)$$

де $J(E)$ – інтенсивність космічних променів, зареєстрованих детектором, $J_0(E)$ – інтенсивність космічних променів без врахування взаємодії з реліктом та з магнітним полем, $\eta(E)$ – модифікаційний фактор, який відображає взаємодію космічних променів з реліктом, $G(E)$ – магнітний фактор, який відповідає за взаємодію з міжгалактичним магнітним полем.

Вклади важкого (Fe) та легкого (CNO) галактичних компонентів були апроксимовані наступним законом:

$$J_{Fe(CNO)} = k_{Fe(CNO)} \cdot E^{-\gamma} \exp(-E/E_{max,Fe(CNO)})$$

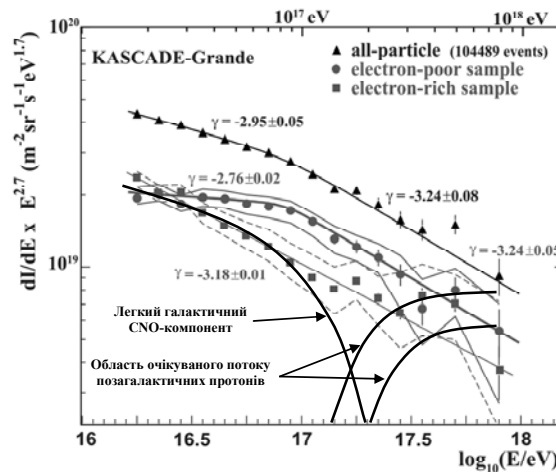


Рис. 1. Дані експерименту KASCADE-Grande [4] та наша інтерпретація спектру легкого компонента як суми галактичних CNO-ядер та позагалактичних протонів

На рис. 2 зображено спектри КПНВЕ отриманих в експериментах AUGER, TA, KASCADE-Grande [7] і результат екстраполяції спектру легкого позагалактичного компонента на найвищі енергії для трьох показників спектру $\gamma = \{2.60, 2.65, 2.70\}$. На графіку лінії позначено наступним чином: 1 – апроксимація легкого галактичного компонента; 2 – апроксимація важкого галактичного компонента; 3 – сумарний спектр галактичних та позагалактичних космічних променів без врахування важкого галактичного компонента; 4 – позагалактичні космічні промені; 5 – сумарний спектр космічних променів.

Хороше узгодження теоретичних та експериментальних спектрів підтверджує нашу інтерпретацію спектру легкого компонента в області 10^{17} - 10^{18} eV як низько енергетичної частини спектру позагалактичних протонів як основного компонента КПНВЕ. Таким чином, сучасні дані експерименту KASCADE-Grande підтверджують протонну модель КПНВЕ та перехід від галактичного до позагалактичного компонента в загальному спостережуваному потоці космічних променів в області енергій $5 \cdot 10^{17}$ eV.

Таблиця 1. Значення параметрів апроксимації для легкого та важкого галактичних компонентів

| Параметри | Важкий компонент (Fe) | Легкий компонент (CNO) |
|---|-----------------------|------------------------|
| γ | 2.76 | 2.76 |
| $k, \text{m}^{-2}\text{s}^{-1}\text{ster}^{-1}\text{GeV}^{-1.76}$ | $2.98 \cdot 10^4$ | $3.33 \cdot 10^4$ |
| E_{max}, GeV | $4.11 \cdot 10^8$ | $1.11 \cdot 10^8$ |

4. Висновки. На основі аналізу даних щодо спектру та хімічного вмісту космічних променів в області енергій 10^{17} – 10^{18} eV, отриманих в експерименті KASCADE-Grande, показано, що виявлений в експерименті потік легких ядер є сумою потоків галактичних ядер CNO-групи, що домінують на низьких енергіях (до $2 \cdot 10^{17}$ eV), та позагалактичних протонів, що домінують на енергіях вище $2 \cdot 10^{17}$ eV. Потік позагалактичних протонів добре узгоджується із очікуваним потоком, передбаченим в протонній моделі КПНВЕ, якщо врахувати модифікацію протонного спектру КПНВЕ внаслідок взаємодії з реліктовим випромінюванням та з міжгалактичним магнітним полем. При цьому, отриманий показник енергетичного спектру протонів КПНВЕ $\gamma = 2.6$ раніше був обґрунтований в протонній моделі на основі спостережень в області енергій понад 10^{18} eV. Таким чином, сучасні дані експерименту KASCADE-Grande підтверджують протонну модель КПНВЕ та перехід від галактичного до позагалактичного компонента в загальному спостережуваному потоці космічних променів в області енергій $5 \cdot 10^{17}$ eV.

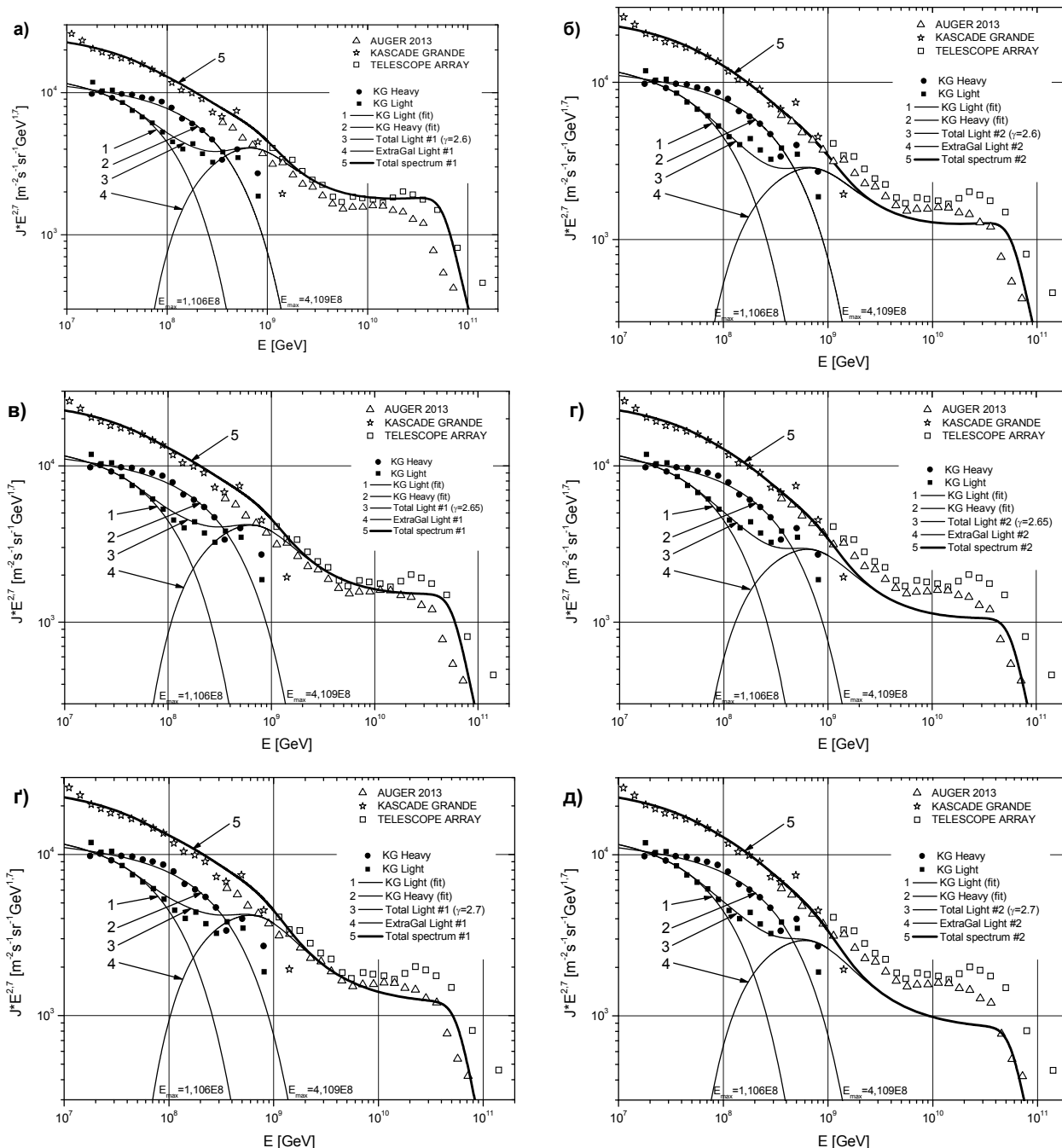


Рис. 2. Результати екстраполяції легкого компонента на найвищі енергії для трьох різних показників спектру $\gamma=2.6$ (а,б), 2.65 (в,г), 2.7(г,д) і порівняння з даними сучасних експериментів. Графіки ліворуч відповідають випадку #1, а праворуч – випадку #2

Список використаних джерел:

1. Abbasi, R. U., Abu-Zayyad, T., Al-Seady, M., et al. Measurement of the flux of ultra high energy cosmic rays by the stereo technique // *Astropart. Phys.* 32 (2009) 53-60.
2. Allard, D., Busca, N. G., Decerprit, G., et al. Implications of the cosmic ray spectrum for the mass composition at the highest energies // *J. of Cosmol. and Astropart. Phys.* 10 (2008) 033.
3. Aloisio, R., Berezhinsky, V., Blasi, P., et al. A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays // *Astropart. Phys.* 27 (2007) 76-91.
4. Apel, W. D., Arteaga-Velazquez, J. C., Bekk, K., et al. A knee-like structure in the spectrum of the heavy component of cosmic rays observed with KASCADE-Grande // *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 171104.
5. Berezhinsky, V. Propagation and origin of ultra high-energy cosmic rays // *Advances in Space Research* 41 (2008) 2071-2078.
6. Drury, L. O'C. Origin of cosmic rays // *Astropart. Phys.* 39 (2012) 52-60.
7. Letessier-Selvon, A. for the Pierre Auger Collaboration Highlights from the Pierre Auger Observatory // arXiv:1310.4620 [astro-ph.HE] 17 Oct 2013.
8. Mollerach, S.; Roulet, E. Magnetic diffusion effects on the Ultra-High Energy Cosmic Ray spectrum and composition // *J. of Cosmol. and Astropart. Phys.* 10 (2013) 013.

Р. Гнатик, асп.
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

ИССЛЕДОВАНИЯ ОБЛАСТИ ПЕРЕХОДА ОТ ГАЛАКТИЧЕСКИХ К ВНЕГАЛАКТИЧЕСКИМ КОСМИЧЕСКИМ ЛУЧАМ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТА KASCADE-GRANDE

В работе исследуется область энергетического спектра суммарного (галактического и внегалактического) потока космических лучей, которая соответствует переходу от доминирования галактического компонента на низких энергиях в внегалактического компонента на высоких энергиях. Для этого мы используем новейшие данные эксперимента KASCADE-Grande относительно судьбы легких и тяжелых ядер в общем потоке космических лучей на различных энергиях. Обнаруженные в эксперименте данные по неожиданному изменению наклона спектра легкого компонента от $\gamma = 3.2$ до $\gamma = 2.6$ в области энергий 1017 эВ мы интерпретируем как проявление внегалактического компонента потока космических лучей в диапазоне энергий $\lg E$ (GeV)=8.1-9.0. В подтверждение этой интерпретации мы показываем, что экстраполяция этого потока на более высокие энергии в рамках протонной модели космических лучей высоких энергий (КПНБЕ) согласуется с данными экспериментов AUGER и Telescope Array. Показано, что показатель спектра $\gamma=2.6$ для протонной модели КПНБЕ лучше описывает данные современных экспериментов.

Ключевые слова: космические лучи, KASCADE-Grande.

R. Gnatyk, postgrad. stud.
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

INVESTIGATION OF THE TRANSITION REGION FROM GALACTIC TO EXTRAGALACTIC COSMIC RAYS USING THE DATA OF KASCADE-GRANDE EXPERIMENT

In this paper we explore the region of the total (Galactic and extragalactic) energy spectrum of cosmic rays, where the transition from Galactic (at low energies) to extragalactic (at high energies) cosmic rays is expected. For this purpose, we use the recent data of the KASCADE-Grande experiment concerning the relative abundances of light and heavy nuclei in the total flux of cosmic rays at different energies. These data show an unexpected hardening of light component's spectrum from $\gamma=3.2$ to $\gamma=2.6$ in the energy region 1017 eV. We explain this hardening as a signature of extragalactic component of cosmic ray flux in the energy range $\lg E$ (GeV)=8.1-9.0 and show that an extrapolation of this flux to the higher energies in the frame of the proton model of the ultra high energy cosmic rays (UHECRs) agrees with AUGER and Telescope Array data. We find that the best value of the spectral index γ is equal to $\gamma = 2.6$ in the frame of proton model of UHECRs for the explanation of modern experimental data.

Key words: cosmic rays, KASCADE-Grande.

УДК 524.7

Ю. Кудря, канд. фіз.-мат. наук
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

КВАДРАТИЧНІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІ ЗАЛЕЖНОСТІ ТАЛЛІ-ФІШЕРА ДЛЯ ГАЛАКТИК КАТАЛОГУ 2MFGC

Досліджені квадратичні узагальнення залежності Таллі-Фішера (ЗТФ) для вибірки 2724 галактик каталогу 2MFGC. Окрім основних регресорів ЗТФ – логарифма ширини радіолінії 21 см та вільного члена – у залежності використані 2MASS-характеристики – середня поверхнева яскравість, індекс концентрації, показник кольору, а також логарифм відношення оптичних діаметрів. Узагальнення обумовлене формою корекції зоряних величин та ширин, а також залежністю коефіцієнтів звичайної ЗТФ від ряду характеристик галактик. Проведено аналіз значущості регресорів загальної 21-параметричної квадратичної регресії та побудована "оптимальна" 6-параметрична квадратична регресія. Виявилось, що врахування квадратичних регресорів зменшує на 2% розкид залежності у порівнянні з лінійною 6-параметричною регресією, що досягається з використанням меншої кількості характеристик галактик (без індексу концентрації). Зменшення розкиду у порівнянні з традиційним методом корекції зоряних величин та ширин лінії 21 см. Визначення колективної дипольної швидкості з використанням "оптимальної" квадратичної регресії підтвердило наші більш ранні оцінки на основі лінійних багатопараметричних регресій.

Ключові слова: залежності Таллі-Фішера, каталог 2MFGC.

1. Вступ. Для дослідження великомасштабних потоків та просторових розподілів галактик Караченцев [15] запропонував використовувати дискові галактики пізніх типів, що спостерігаються з ребра. Для таких галактик виконується залежність Таллі-Фішера (ЗТФ) [37], яка дає можливість незалежним від червоного зміщення способом визначити індивідуальні відстані до галактик та, отже, пекулярні швидкості, додаткові до швидкості однорідного Габблівського розширення Всесвіту. Масиви пекулярних швидкостей визначають поле густини матерії у спостережній області.

З метою проведення таких досліджень був створений каталог FGC (Flat Galaxy Catalog) [18] та його оновлена версія RFGC (Revised FGC) [16]. На основі вибірок галактик з FGC та RFGC з використанням багатопараметричних узагальнень ЗТФ у формі з оптичними діаметрами були обчислені параметри великомасштабних рухів в дипольному [19, 17, 1], а також в квадрупольному та октупольному наближеннях [4, 5, 26]. В роботі [6] здійснена спроба відновити поле густини матерії.

Створення фотометрично однорідного та великого огляду 2MASS (The Two Micron All Sky Survey) [34] в J , H і K_s смугах та каталогу протяжних джерел 2MASS XSC (Extended Source Catalog) [13] дало можливість використати переваги ЗТФ з інфрачервоними (ІЧ) величинами (див. огляд [36]) та стало новим поштовхом для досліджень на основі вибірок плоских галактик. Використання даних 2MASS-фотометрії в ЗТФ для вибірок галактик з RFGC дало результати, які узгоджуються з попередніми визначеннями колективної швидкості на основі оптичних даних [21]. Тому з метою збільшення об'єму вибірок був створений каталог 2MFGC (2MASS selected Flat Galaxy Catalog) [25] шляхом автоматичного відбору плоских систем з XSC. 2MFGC є ІЧ-аналогом "оптичного" каталогу RFGC, але він містить в чотири рази більше об'єктів, має значно більшу глибину та краще заповнення в області Молочного шляху. Обчислення параметрів великомасштабних потоків на основі вибірок 2MFGC-галактик показало [3, 2, 22] їх близькість визначенням на основі каталогу RFGC.

В роботах [19, 17, 1, 4, 21, 3, 2, 22] були використані різні варіанти багатопараметричних узагальнень ЗТФ. Узагальнені залежності використовують для того, щоби шляхом введення додаткових регресорів врахувати можливі причини