

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

розкиду звичайних двопараметричних ЗТФ. Такими причинами можуть бути неадекватні корекції спостережних даних та залежність коефіцієнтів ЗТФ від характеристик галактик. Зокрема, в роботах [2, 22] використовувалася лінійна 6-параметрична регресія, в якій за додаткові регресори приймалися 2MASS-характеристики: поверхнева яскравість, показник кольору, індекс концентрації, а також логарифм відношення оптичних діаметрів галактики. Вибір лінійних регресорів був прийнятий лише з міркувань простоти узагальнення. Однак, як буде показано, з необхідності врахування причин розкиду залежності впливає принаймні квадратичність регресорів за вибраними параметрами. В даній роботі для вибірки спіральних галактик з каталогу 2MFGC вивчаються можливості зменшення розсіяння ЗТФ шляхом введення додаткових квадратичних регресорів с теми саме параметрами, які були використані в роботах [2, 22]. Метою даної роботи є: 1) обґрунтування нелінійних багатопараметричних узагальнень ЗТФ; 2) визначення, наскільки покращуються апроксимації ЗТФ квадратичними багатопараметричними регресіями у порівнянні з лінійними та як змінюються оцінки дипольної колективної швидкості галактик при переході до квадратичних регресій.

2. Обґрунтування нелінійних узагальнень ЗТФ. Емпіричну ЗТФ звичайно подають лінійним зв'язком між абсолютною зоряною величиною M та логарифмом ширини W радіолінії 21 см:

$$M = c_1 + c_2 \log W . \tag{1}$$

Якщо відомі коефіцієнти c_1, c_2 , тобто залежність попередньо відкалібрована на деякій "еталонній" вибірці, то за спостережною шириною W оцінюють абсолютну величину M галактики. Тоді, знаючи її видиму величину m , з формули

$$M = m - 25 - 5 \log d \tag{2}$$

визначають фотометричну відстань d (в Мпк). Пекулярну швидкість у найпростішому випадку близьких галактик визначають за відстанню та червоному зміщенню z у певній системі відліку:

$$V_{pec} = cz - H_0 d \tag{3}$$

де H_0 – стала Габбла, c – швидкість світла. Якщо ЗТФ попередньо не відкалібрована, то коефіцієнти c_1, c_2 можна визначити на вибірці тих саме галактик, для яких визначаються відстані та пекулярні швидкості. В цьому випадку, приймаючи гіпотезу про розподіл нев'язок

$$c_1 + c_2 \log W - m + 25 + 5 \log \left\{ (cz - V_{pec}) / H_0 \right\} = \Delta \tag{4}$$

між (1) та (2), можна (наприклад, методом найменших квадратів) відкалібрувати ЗТФ. При цьому, пекулярна швидкість, що входить в (4), має апіорний смисл: її задають на основі наявної інформації (падіння на скупчення в Діві, на Великий атрактор тощо), або (у найпростішому випадку) вважають нулевою. Після калібрування ЗТФ за формулами (1) – (3) визначають відстані та уточнені пекулярні швидкості.

Ця проста схема знаходження відстаней та пекулярних швидкостей спіральних галактик на практиці ускладнюється необхідністю введення корекцій спостережних даних та залежністю параметрів (1) від характеристик галактик. Корекції за невеликим виключенням є емпіричними; вони визначаються на спостережному матеріалі для вибірок галактик з певними властивостями (морфологічний склад, частина карликових систем, галактики поля чи скупчень тощо). Використання таких корекцій для інших вибірок може привести до систематичних похибок у відстанях. Але неадекватні для певної вибірки адитивні корекції величини та мультиплікативні корекції ширини, як видно з (4), можна розглядати як додаткові регресори в (1) з параметрами, які належить визначити для даної вибірки разом з c_1, c_2 . Розглянемо найпоширеніші корекції.

Видимі зоряні величини галактик звичайно коригують так:

$$m^c = m - A^G - A^{in} - K - E , \tag{5}$$

де A^G – поглинання в Галактиці, A^{in} – внутрішнє поглинання, K, E – K - та еволюційна поправки, що залежать від морфологічного типу та червоного зміщення.

Для обчислення A^G використовують карти розподілу пилу у Молочному шляху [32]. Ця поправка не залежить від властивостей вибірки, її точність визначається методами розрахунку поглинання в положенні галактики на небі. Вона не дає вказівок щодо введення додаткових регресорів.

Найбільш явно необхідність нелінійних багатопараметричних ЗТФ впливає з наявності різних варіантів поправки за внутрішнє поглинання в галактиках. Ця поправка приводить зоряну величину до її значення в положенні "пласом" (face-on); її традиційно приймають у вигляді:

$$A^{in} = \gamma \cdot \log(a / b) , \tag{6}$$

де a та b – великий та малий кутові діаметри. Коефіцієнт γ залежить від кольорової смуги та від властивостей галактик, зокрема від числового коду T морфологічного типу [41, 14, 7]. Оскільки тип корелює зі світністю, то можна розглядати залежність γ від абсолютної величини, $\gamma = \gamma(M)$ [11, 35]. Абсолютна величина в свою чергу добре корелює з шириною лінії 21 см (ЗТФ), тому в [39] було запропоновано замінити $\gamma = \gamma(M)$ лінійними функціями логарифма ширини, $\gamma = \gamma(\log W)$. Для 14032 пізніх спіралей з SDSS (Слоунівського цифрового огляду неба) знайдена квадратична залежність коефіцієнту γ не тільки від K -світностей для u - і g -смуг SDSS, але й від індексу концентрації [8]. В роботі [23] показана необхідність розгляду нелінійної за $\log(a / b)$ поправки за внутрішнє поглинання у трьох смугах огляду 2MASS. До аналогічних висновків прийшли автори [40], аналізуючи вибірку 78230 галактик з SDSS, для яких можна прийняти експоненціальний профіль поверхневої яскравості.

Перелічені результати підказують, що в регресію (1) доцільно додати регресори, що є добутком $\log(a / b)$ з лінійними та квадратичними комбінаціями морфологічного типу T , основного регресора $\log W$, індексу концентрації, а також ввести регресор з $[\log(a / b)]^2$. Замість типу може бути використана будь-яка скорельована з ним характеристика галактик (наприклад, поверхнева яскравість).

K- та еволюційна поправки є достатньо невизначеними. Складність їх обчислення полягає у виборі адекватної моделі випромінювання галактик в залежності від морфологічного типу та червоного зміщення. За приклад неузгодженості результатів обчислень різних авторів укажемо, що суми K- і E-поправок у B- та V- фільтрах відрізняються для Sc-галактик за версіями [27] та [28] на величину порядку z при значеннях суми $(2 \div 3)z$. Це дає підставу мати сумнів щодо адекватності поправок, що приймаються згідно певного джерела. Перевагою використання ІЧ J, H, K_s-величин є малі значення поправок та слабка їх залежність від типу. Можливо, що в багатопараметричних регресіях регресори з типом або зі скорельованими з ним характеристиками галактик можуть, принаймні частково, замінити K- та E-корекції видимих величин.

Ширини лінії 21 см після врахування нахилу галактики до променя зору звичайно коригують за космологічне розширення та турбулентні (хаотичні) рухи. Перша корекція однозначна, ширина приводиться до моменту випромінювання: $W \rightarrow W / (1+z)$. Поправка за турбулентність, що вперше запропонована у [38], є нелінійною та має два або три параметри, які можуть варіювати від вибірки до вибірки. Така корекція підказує доцільність введення в ЗТФ регресорів, нелінійних за логарифмом ширини.

Другий аргумент (крім вказаних вище корекцій величин та ширин) за введення в ЗТФ додаткових нелінійних регресорів випливає з властивостей її коефіцієнтів. Відомий ряд характеристик галактик (морфологічний тип, поверхнева яскравість, клас світності, колір тощо), від яких залежать коефіцієнти c_1, c_2 . Про це звичайно кажуть як про причини розсіяння на ЗТФ. Починаючи з піонерських робіт [29, 30] цьому присвячено багато робіт. Звичайний шлях врахування цих ефектів полягає у введенні додаткових корекцій зоряної величини за тип, за клас світності тощо (див., наприклад, [10, 31]). Але з іншого боку, подаючи залежність нахилу c_2 розкладом у ряди за цими величинами, ми приходимо до багатопараметричних ЗТФ з нелінійними регресорами $T \cdot \log W$, $(\log W)^2$ тощо.

Багатьма авторами відзначалося, що ЗТФ має злам або плавну зміну нахилу в тому місці, де відбувається перехід до карликових систем (див., наприклад, [24]). Причину зламу вбачають в тому, що карлики містять велику порцію газу. Якщо врахувати масу газу, то ЗТФ переформулюється як залежність повної баріонної маси (зір плюс газу) від швидкості обертання. Однак, можна сподіватися, що нелінійна залежність від логарифма ширини також буде відслідковувати перехід до карликових систем.

Зі сказаного вище випливає, що багатопараметричні ЗТФ з регресорами, нелінійними за спостережними характеристиками, можуть мати менший розкид у порівнянні зі ЗТФ з лінійними регресорами, і тим більше зі звичайними ЗТФ вигляду (1).

3. Вибірка галактик з 2MFGC та спостережні дані. Ми використовуємо вибірку 3074 галактик з каталогу 2MFGC, для яких відомі ширини лінії 21 см та променеві швидкості, а також 2MASS-величини та додаткові характеристики (див. далі). У роботі [2] шляхом перебору ряду варіантів було прийняте таке лінійне узагальнення ЗТФ:

$$M_J = c_1 + c_2 \cdot \log W_{50}^C + c_3 \cdot jhl + c_4 \cdot Jcdex + c_5 \cdot col + c_6 \cdot \log(a/b) . \quad (7)$$

Ширина лінії W_{50} (на рівні 50% від пікового значення) коригувалася лише за космологічне розширення, $W_{50}^C = W_{50} / (1+z)$. За додаткові регресори приймалися 2MASS-характеристики з [13]: jhl – ефективна поверхнева яскравість у J-смузі; $Jcdex$ – індекс концентрації – відношення радіусів, в межах яких зосереджено 3/4 та 1/4 світла галактики у J-смузі; $col \equiv J_{fe}^C - K_{fe}^C$ – показник кольору, J_{fe}^C, K_{fe}^C – видимі Кронівські "довірчі" (fiducial) еліптичні величини, скориговані лише за поглинання у Галактиці згідно [32]; a, b – видимі оптичні (у смузі B) великий та малий діаметри галактик. Абсолютна величина M_J оцінювалася у відповідності до (2) за видимою величиною J_{fe}^C та відстанню за законом Габбла в системі мікрохвильового випромінювання з $H_0 = 75$ км/с/Мпк (таке значення H_0 приймалося в наших більш ранніх роботах [2, 22]).

За формальним критерієм перевищення відхилення більш ніж на $3\sigma_{TF}$ від залежності (7) та/або перевищення значення 3000 км/с модулем пекулярної швидкості були відкинуті 350 об'єктів. Для галактик отриманої таким чином вибірки $N=2724$ були обчислені відстані та пекулярні швидкості [2]. Саме цю вибірку ми використовуємо в даній роботі. В Табл. 1 наведені середні значення і стандартні відхилення від середніх значень для регресорів в (7) та числового коду T морфологічного типу для вибірки $N=2724$.

Середнє значення типу ~ 4.5 знаходиться між Sbc та Sc галактиками. З морфологічним типом найбільш скорельована ефективна поверхнева яскравість ($\rho = 0.51$), найменш – колір ($\rho = -0.03$). Коефіцієнти кореляції між типом з одного боку та основним регресором $\log W_{50}^C$, індексом концентрації, логарифмом відношення осей з іншого боку незначні, вони знаходяться в межах 0.2 – 0.4. Основний регресор $\log W_{50}^C$ найбільш скорельований з поверхневою яскравістю ($\rho = -0.60$) та кольором ($\rho = 0.49$).

Таблиця 1. Середні значення (m) та стандартні відхилення від середніх (σ) для регресорів в (7) та коду морфологічного типу

m/σ	$\log W_{50}^C$	jhl	$Jcdex$	col	$\log(a/b)$	T
m	2.501	18.71	3.885	1.032	0.699	4.48
σ	0.155	0.76	1.114	0.155	0.182	1.59

Як йшлося вище, лінійне узагальнення (7) ЗТФ не впливає з форми корекцій спостережних величин, воно прийняте лише з міркувань простоти лінійної залежності від додаткових параметрів. Далі ми розглянемо нелінійні узагальнення ЗТФ.

4. Квадратичні регресії. В даній роботі ми обмежуємося лінійними та квадратичними комбінаціями за характеристиками галактик, що входять в (7). За лінійні регресори приймаємо центровані величини (крім x_1):

$$x_1 = 1, x_2 = \lg W_{50}^c - \langle \lg W_{50}^c \rangle, x_3 = jhl - \langle jhl \rangle, x_4 = Jcdex - \langle Jcdex \rangle, x_5 = col - \langle col \rangle, x_6 = \log(a/b) - \langle \log(a/b) \rangle. \quad (8)$$

Тут кутові дужки означають середні значення, які наведені в Табл.1. Зоряні величини та ширини коригувалися, як показано в попередньому розділі: величини – за поглинання в Галактиці, ширини – за космологічне розширення.

На першому етапі дослідження ми додавали у ЗТФ до регресорів (8) всі можливі їх квадратичні комбінації, нумеруючи їх таким чином:

$$x_7 = (x_2)^2, x_8 = x_2 \cdot x_3, \dots, x_{12} = (x_3)^2, x_{13} = x_3 \cdot x_4, \dots, x_{21} = (x_6)^2. \quad (9)$$

Усього, разом з лінійними, ми маємо 21 регресор; загальна регресія має вигляд: $M = \sum_{i=1}^{21} c_i x_i$. Розрахунки показали, що більшість регресорів можна відкинути за критерієм значущості Фішера без суттєвого погіршення якості апроксимації. Перебиранням різних варіантів ми прийняли чотириступеневу процедуру послідовного відкидання регресорів зі значущістю за Фішером, меншою за 3, 10, 30 та 50. Така процедура привела до кінцевої ("оптимальної") регресії з 6-а регресорами:

$$M_J = c_1 + c_2 x_2 + c_3 x_3 + c_6 x_6 + c_{11} x_2 x_6 + c_{19} (x_5)^2, \quad (10)$$

де $c_1 = -21.865 \pm 0.010 (4.35 \cdot 10^6)$, $c_2 = -6.883 \pm 0.077 (8050)$, $c_3 = 0.218 \pm 0.015 (206)$, $c_6 = 0.915 \pm 0.052 (311)$, $c_{11} = -2.55 \pm 0.25 (103)$, $c_{19} = 2.26 \pm 0.24 (92)$. (У дужках вказана значущість регресора за критерієм Фішера).

В Табл.2 наведені результати обчислень основних характеристик регресій та параметри дипольної колективної швидкості для вихідної (рядок 1), трьох проміжних (рядки 2-4) та кінцевої (рядок 5) квадратичних регресій. Тут n_{reg} – кількість регресорів, σ_{TF} – стандартне відхилення від багатопараметричної ЗТФ, σ_V – середньоквадратична похибка швидкості (після віднімання дипольної складової), V_B – модуль та l_B, b_B – галактичні координати апокективної (bulk) дипольної швидкості відносно мікрохвильового космічного фону (про спосіб обчислення похибок V_B, l_B, b_B див. в [2]), F_V – значущість за Фішером вектора дипольної швидкості (F_V порівнювати з $F_{\infty,3} = 2.6$ для 95%-го рівня значущості). У останньому стовпчику наводиться кількість та перелік (у дужках) регресорів, які виявилися малозначущими за прийнятим критерієм.

Таблиця 2. Результати обчислення дипольної складової колективної швидкості 2MFGC-галактик

n	n_{reg}	σ_{TF}	$\sigma_V, \text{км/с}$	V_B	l_B	b_B	F_V	Малозначущі регресори
1	21	0.451	980	236±36	303±9	-10±7	14.8	7 (13,14,16,17,18,20,21,27), F<3
2	14	0.451	984	238±36	303±9	-10±7	14.9	5 (5, 9, 10, 12, 15), F<10
3	9	0.454	999	233±37	300±9	-12±7	13.7	1(4), F<30
4	8	0.455	1000	215±37	301±10	-12±8	11.7	2(7,8), F<50
5	6	0.462	1008	178±37	306±12	-6±9	8.1	-
6	6 (п)	0.471	1018	199±37	304±11	-8±8	9.8	
7	2	0.545	1163	358±43	307±7	-26±5	23.1	
8	2(с)	0.525	1101	341±41	304±7	-24±5	23.3	

Для порівняння у рядку 6 Табл. 2 наводяться результати для 6-параметричної лінійної регресії вигляду $M = \sum_{i=1}^6 c_i x_i$, яка еквівалентна регресії (7). Також для порівняння у двох останніх рядках наводяться результати для двох варіантів двопараметричних регресій вигляду (1). Перший з них (рядок 7), отриманий з врахуванням "твердих" корекцій, які використовувалися і при розгляді лінійної регресії (7) у роботах [2, 22]: видимої величини – за поглинання в Галактиці, ширини – за космологічну корекцію. У другому варіанті (рядок 8), додатково прийняті корекції величини: 1) за внутрішнє поглинання вигляду (6) с коефіцієнтом $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 \log W$ для В-смуги згідно [41], факторизованим значенням 0.207 для приведення до J-смуги згідно [32]; 2) K- та E-поправки, $K + E = -(0.7z + 1.2z) = -1.9z$, прийняті згідно [28] як для Sc-галактик. Для ширини проведена корекція за турбулентність згідно [38] (без розгляду особливого випадку карликів). З поправок величини домінує поправка за самопоглинання (в середньому ~0.2 J-mag); K+E-поправка складає декілька сотих зоряної величини. Таким чином, відмінність величин в 2-параметричних регресіях двох варіантів визначається головним чином внутрішнім поглинанням. Поправка за турбулентність зменшує $\log W$ в середньому на декілька сотих.

Відзначимо, що в оціночних обчисленнях ми використовували нецентровані лінійні регресори та дещо інші способи відкидання малозначущих регресорів. Однак при цьому часто виявлялося, що основні регресори $\{1, \log W_{50}^c\}$ ставали малозначущими; значущість перебирали на себе квадрат $\log W_{50}^c$ та добутки $\log W_{50}^c$ з іншими характеристиками. Відкидання лінійного за $\log W_{50}^c$ регресора приводить до квадратичних регресій, які не можна вважати узагальненнями звичайної 2-параметричної ЗТФ вигляду (1), обумовленими малими корекціями даних та малим розкидом від залежності. В цьому ми бачимо певний недолік регресій. Вибраний нами шлях "оптимізації" регресій та використання центрованих лінійних регресорів (8) цього недоліку не має.

5. Властивості квадратичних регресій. З поданих у Табл.2 та формулі (10) результатів обчислень видно такі властивості квадратичних регресій.

- Найбільш загальна квадратична регресія $M = \sum_{i=1}^{21} c_i x_i$ дає зменшення σ_{TF} приблизно на 4% у порівнянні з лінійною регресією (7). Приблизно на тому ж рівні лишається покращення σ_{TF} для регресій, отриманих виключен-

ням регресорів на рівні значущості $F < 3$ та $F < 10$. "Оптимальна" регресія, для коефіцієнтів якої $F > 50$, дає покращення приблизно на 2%.

- Значущість основних регресорів $\{1, x_2\}$ є суттєво вищою, ніж додаткових (статистика $F \approx 8000$ для x_2 проти $F \approx 300$ для максимально значущого додаткового регресора x_6).

- В результаті "оптимальну" регресію логарифм відношення діаметрів $\log(a/b)$ входить як у лінійний член $c_6 x_6$, так і в квадратичний $c_{11} x_2 x_6$, у відповідності з формою (6) корекції за внутрішнє поглинання, запропонованої у [39].

- Лінійний регресор з показником кольору та його добутки з іншими характеристиками виявилися малозначущими ($F < 10$), але суттєво значущим ($F > 50$) виявився квадрат показника кольору.

- Всі регресори з індексом концентрації виявилися малозначущими на рівні $F < 30$, причому всі квадратичні – на рівні $F < 10$. "Оптимальна" регресія (10) має менший розкид, ніж лінійна регресія (7), причому при однаковій кількості регресорів це досягається з використанням меншої кількості характеристик – без індексу концентрації.

- Лінійний регресор з поверхневою яскравістю виявився значущим ($F > 50$) в кінцевій "оптимальній" регресії. Це підтверджує концепцію "фундаментальної площини" для спіралей, де поверхнева яскравість є третім параметром (див., наприклад, [33]). При послабленні вимог значущості до $F > 30$ отримуємо 8-параметричну регресію (рядок 4 Табл.2), у якій додатково є квадрат основного регресора та добуток основного регресора на поверхневу яскравість – "викривлену фундаментальну площину".

- Додаткові корекції величин (за самопоглинання, K- та E-поправки) та ширин (за турбулентність) (рядок 8 в Табл.2) зменшує σ_{TF} на 4%. Однак вже застосування лінійної багатопараметричної регресії (рядок 6) замість цих додаткових корекцій дає суттєво кращий результат – зменшення σ_{TF} на 14%. Застосування квадратичної "оптимальної" регресії (10) (рядок 5) додатково зменшує розкид на 2%, що дає 15% у порівнянні з двопараметричною регресією (рядок 7). Таким чином, на даному прикладі ми показали більшу ефективність використання багатопараметричних регресій у порівнянні з методикою корекцій величин та ширин.

Аналогічні дослідження значущості регресорів ми провели, додаючи до 21-параметричної регресії додатково лінійний та квадратичні регресори з центрованим морфологічним типом; максимальна регресія мала 28 регресорів. При цьому виявилось, що всі регресори з типом виявилися малозначущими, $F < 10$. Відзначимо, що аналогічна ситуація має місце і для лінійної регресії: доданий до регресії (7) сьомий регресор з морфологічним типом виявився малозначущим.

Ми також розглянули множину регресій вигляду $M = Q^{(1)} + Q^{(2)} x_6$, де $Q^{(1)}, Q^{(2)}$ - квадратичні комбінації регресорів x_1, x_2, \dots, x_5 . Така форма узагальнює різні пропозиції щодо поправок за внутрішнє поглинання і є частинним випадком кубічних регресій. Виявилось, що квадратичні доданки у $Q^{(2)}$ є малозначущими у нашій процедурі приведення регресії до "оптимальної" форми, тобто малозначущими виявилися всі кубічні доданки. Зокрема, це не підтверджує на нашому матеріалі квадратичну залежність $Q^{(2)}$ від індексу концентрації, що отримано в [8].

6. Варіації дипольної колективної швидкості. Послідовне відкидання малозначущих регресорів в квадратичних регресіях приводить до зменшення модуля дипольної швидкості V_B . "Оптимальна регресія" (рядок 5 Табл. 2) дає найменше значення $V_B = 178 \pm 37$ км/с, на $(1 \div 1.5) \Delta V_B$ менше, ніж при застосуванні повної квадратичної регресії (рядок 1 Табл. 2).

Наше основне визначення параметрів дипольної колективної швидкості, що отримане в [2] на основі лінійної багатопараметричної регресії (7) та підтверджує більш ранні визначення [21, 3], приведені в рядку 6 Табл. 2. Видно, що перехід від загальної квадратичної регресії до "оптимальної" практично не змінює координати апекса та приблизно на $0.5 \Delta V_B$ зменшує модуль колективної швидкості.

Визначення модуля колективної швидкості на основі багатопараметричних регресій (рядки 1-6 Табл.2) знаходяться в діапазоні 180 – 240 км/с та узгоджуються з передбаченням космологічної Λ CDM - моделі при глибині вибірки ~ 6000 км/с [42]. Двовимірні регресії дають більші в $1.5 \div 2$ рази значення, ніж багатопараметричні, які важче узгодити з передбаченнями Λ CDM - моделі. Двовимірні регресії приводять також до значного зміщення у південну Галактичну півкулю апекса колективної швидкості, що не узгоджується з визначеннями інших авторів. При цьому довготні коливання апекса при варіюванні формою регресії знаходяться в межах похибок.

Для "оптимальної" квадратичної регресії точність обчислення модуля і координат апекса дипольної колективної швидкості приблизно така саме, як для лінійної регресії (7), але з використанням меншої кількості характеристик галактик – без даних про індекс концентрації.

7. Висновки. В даній роботі досліджені узагальнення лінійної багатопараметричної ЗТФ вигляду (7), використаної в роботах [2, 22] для обчислення пекулярних швидкостей 2724 галактик каталогу 2MFGC. В лінійній залежності, крім основних регресорів – логарифма ширини лінії 21 см та вільного члена – були використані 2MASS-характеристики – середня поверхнева яскравість, індекс концентрації, показник кольору, а також логарифм відношення оптичних діаметрів. Узагальнення такої регресії полягало у додаванні всіх можливих квадратичних комбінацій лінійних регресорів, що дало 21-параметричну регресію. Квадратична форма регресії диктується загально прийнятими корекціями видимих величин та ширин лінії 21 см, а також залежністю коефіцієнтів ЗТФ від певних характеристик галактик. Відкидання малозначущих регресорів привело до "оптимальної" нелінійної регресії (10), регресори якої мають високу значущість за критерієм Фішера ($F > 50$). Кількість регресорів в "оптимальній" регресії дорівнює шести, як і для лінійної регресії (7). Зменшення розкиду ЗТФ складає 2% у порівнянні з лінійною регресією (7), середньоквадратична пекулярна швидкість зменшується на 4%, і досягається це з використанням меншої кількості характеристик галактик (без індекса концентрації). Зменшення розкиду від "оптимальної" регресії у порівнянні з двопараметричною складає 15%.

Застосування багатопараметричних регресій виявилось на нашому статистичному матеріалі більш ефективним методом врахування причин розкиду ЗТФ у порівнянні з традиційним методом корекцій зоряних величин та шириною лінії 21 см. При цьому за додаткові регресори ми використали ті характеристики галактик, які входять у вирази для корекцій та визначають розкид ЗТФ.

Визначення колективної дипольної швидкості зі застосуванням "оптимальної" квадратичної регресії підтвердило наші більш ранні оцінки на основі лінійних багатопараметричних регресій [21, 3, 2, 22]. При використанні багатопараметричних ЗТФ модуль колективної швидкості краще узгоджується з передбаченнями космологічної Λ CDM - моделі (~200 км/с для ефективної глибини вибірки ~6000 км/с), ніж при використанні звичайних двовимірних ЗТФ.

Автор вдячний В.Ю.Караченцевій за цінні поради щодо структури роботи.

Список використаних джерел:

1. Караченцев И.Д., Караченцева В.Е., Кудря Ю.Н., Парновский С.Л. Коллективные движения галактик из каталога FGC на масштабах 100 Мпк // *Астрон. журн.* – 2000. – Т.77, №3. – С.175-187.
2. Караченцев И.Д., Кудря Ю.Н., Караченцева В.Е., Митронова С.Н. Пекулярные скорости 3000 спиральных галактик из каталога 2MFGC // *Астрофизика.* – 2006. – Т. 49, №4. – С. 527-540.
3. Кудря Ю.Н., Караченцева В.Е., Караченцев И.Д. и др. Коллективные движения спиральных галактик в объеме $z=0.03$ // *Письма в Астрон. журн.* – 2006. – Т.32, №2. – С.83-94.
4. Парновский С.Л., Кудря Ю.Н., Караченцев И.Д., Караченцева В.Е. Коллективные движения плоских галактик на масштабах 100 Мпк в квадрупольном и оккупольном приближениях // *Письма в Астрон. журн.* – 2001. – Т.27, №12. – С.890-900.
5. Парновский С.Л., Тугай А.В. Коллективные движения плоских галактик на масштабе 100 Мпк с использованием новых данных // *Письма в Астрон. журн.* – 2004. – Т. 30, №5. – С.1-11.
6. Шаров П.Ю., Парновский С.Л. Распределение плотности материи на масштабах 75 Мпк, полученное методом POTENT по коллективным движениям RFGC галактик // *Письма в Астрон. журн.* – 2006. – Т.32, №5. – С.323-332.
7. Boselli A., Gavazzi G. Multifrequency windows on spiral galaxies. III. Internal extinction at optical and near infrared wavelength // *Astron. Astroph.* – 1994. – V. 283. –P. 12-20.
8. Cho J., Park C. Internal extension in the SDSS late-type galaxies // *Astroph. J.* – 2009. – V.693. – P.1045-1055.
9. Cutri R.M., Skrutski M.F. Two Micron All Sky Survey Status Report // *BAAS.* – 1998. – Vol. 30. – P.1374-1392.
10. Giovanelli R., Haynes M.P., Herter T. et al. The I-band Tully-Fisher relation for cluster galaxies: A template relations, its scatter and bias corrections // *Astron. J.* – 1997. – V.113. – P.53-79.
11. Giovanelli R., Haynes M.P., Salzer J. et al. Extinction in Sc galaxies // *Astron. J.* – 1994. – V.107. – P.2036 – 2054.
12. Giovanelli R., Haynes M.P., Salzer J.J. et al. Dependence on luminosity of photometric properties of disk galaxies: surface brightness, size, and internal extinction // *Astron. J.* – 1995. – V. 110. – P. 1059-1070.
13. Jarrett T.H., Chester T., Cutri R et al. 2MASS Extended Source Catalog: Overview and Algorithms // *Astron. J.* – 2000. – Vol. 119. – P. 2408-2531.
14. Han M. The internal extinction in spiral galaxies // *Astroph. J.* – 1992. – V. 391. P. 617-622.
15. Karachentsev I.D. Thin edge-on galaxies as a tool for the investigation of large-scale streaming motions in the Universe // *Astron. J.* – 1989. – V. 97. – P. 1566-1575.
16. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Yu.N. et al. The Revised Flat Galaxy Catalogue // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* – 1999. – V.47. – P.5-185.
17. Karachentsev I.D., Karachentseva V.E., Kudrya Yu.N. et al. A list of peculiar velocities of galaxies from RFGC catalogue // *Bull. Spec. Astroph. Obs.* – 2000. – V.50. – P.5-38.
18. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovskij S. L. Flat Galaxy Catalog // *Astron. Nachrichten* – 1993. – V. 314, N. 3. – P. 97-222.
19. Karachentsev I. D., Karachentseva V. E., Parnovskij S. L. Kudrya Yu.N. Large-scale streaming of flat galaxies // *Astron. Nachrichten.* – 1995. –V.316, N6. – P.369-380.
20. Karachentsev I.D., Mitronova S.N., Karachentseva V.E. et al. The 2MASS Tully-Fisher relation for flat edge-on galaxies // *Astron. Astroph.* – 2002. – Vol. 396. – P. 431-438.
21. Kudrya Yu. N., Karachentseva V. E., Karachentsev I. D. et al. The bulk motion of flat edge-on galaxies based on 2MASS photometry // *Astron. and Astroph.* – 2003. – V.407. – P.889-898.
22. Kudrya Yu.N., Karachentseva V.E., Karachentsev I.D. et al. Distances and peculiar velocities of spiral galaxies in the 2MFGC and SFI++ samples // *Astrophysics.* – 2009. – V.52. – P.367-382.
23. Masters K.L., Giovanelli R., Haynes M.P. Internal extinction in spiral galaxies in the near infrared // *Astron. J.* – 2003. – V. 126. – P. 158-174 (Erratum: *Astron. J.* – 2004. – V.127. – P.1257).
24. McGaugh S.S., Schombert J.M., Bothun G.D., de Blok W.J.G. The baryonic Tully-Fisher relation // *Astroph. J.* – 2000. – V.533, Is.2. – P.L99-L102.
25. Mitronova S.N., Karachentsev I.D., Karachentseva V.E. et al. The 2MASS-selected Flat Galaxy Catalog // *Bull. Spec. Astrophys. Obs.* – 2004. – V.57, N5. – P. 5-165.
26. Parnovsky S.L., Parnowski A.S. Large-scale collective motion of RFGC galaxies // *Astroph. & Sp. Sci.* – 2010. – Vol.325. – P.163-175.
27. Pence W. K-corrections for galaxies of different morphological types // *Astroph. J.* – 1976. – V. 203. – P.39-51.
28. Poggianti B.M. K and evolutionary corrections from UV to IR // *Astron. Astroph. Suppl. Ser.* – 1997. – V.122. – P. 399-407.
29. Roberts M.S. Twenty-one centimeter line widths of galaxies // *Astron. J.* – 1978. – V.83. – P. 1026-1035.
30. Rubin V.C., Burstein D., Ford W.K., Jr., Thonnard N. Rotational velocities of 16 Sa galaxies and a comparison of Sa, Sb and Sc rotation properties // *Astroph. J.* – 1985. – V. 289. – P. 81-104.
31. Sandage A. Bias properties distance indicators. VII. Correlation of absolute luminosity and rotational velocity for Sc galaxies over the range of luminosity class from I to III-IV // *Astron. J.* – 1999. – V.117. – P.157-166.
32. Schlegel D. J., Finkbeiner D. P., Davis M. Maps of dust infrared emission for use in estimation of reddening and cosmic microwave background radiation foregrounds // *Astrophys. J.* – 1998. – V. 500. – P. 525 – 553.
33. Shen S., Mo H.J., Shu Ch. The fundamental plane of spiral galaxies: theoretical expectations // *MNRAS.* – 2002. – V.331. – P.259-272.
34. Skrutskie M.F., Schneider S.E., Steining R. et al. In: *The Impact of Large Scale Near-IR Sky Surveys*, ed. F.Garzon et al. (Netherlands: Kluwer) // *ASSL.* – 1997. – V. 210. – P. 25.
35. Springob C.M., Masters K.L., Haynes M.P. et al. SFI++: A new I-band Tully-Fisher catalog, derivation of peculiar velocities and dataset properties // *ApJSS.* – 2007. – V. 172 – P.599-614.
36. Straus M., Willick J.A. The density and peculiar velocity fields of nearby galaxies // *Phys. Reports.* – 1995. – V. 261. – P. 271-431.
37. Tully R.B., Fisher R. A new method of determining distances to galaxies // *Astron. and Astroph.* – 1977. – V 54. – P.661 – 673.
38. Tully R.B., Fouque P. The extragalactic distance scale. I. Corrections and fundamental observables // *ApJSS.* – 1985. – V.58. – P.67-80.
39. Tully R.B., Pierce M.J., Huang J.-S. et al. Global extinction in spiral galaxies // *Astron. J.* – 1998. – V. 115. – P. 2264-2274.
40. Unterborn C.T., Ryden B.S. Inclination-dependent extinction effects in disk galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astroph. J.* – 2008. – V. 687. – P. 976-985.
41. de Vaucouleurs G., de Vaucouleurs A., Corwin H.G. et al. Third reference catalogue of bright galaxies (RC3) // Springer-Verlag, N.Y., 1991.
42. Zaroubi S. Cosmic flows: review of recent development // *astro-ph/0206052*

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

КВАДРАТИЧНІ МНОГОПАРАМЕТРИЧНІ ЗАВИСИМОСТІ ТАЛЛІ-ФІШЕРА ДЛЯ ГАЛАКТИК КАТАЛОГА 2MFGC

Исследованы квадратичные обобщения зависимости Талли-Фишера (ВТФ) для выборки 2724 галактик каталога 2MFGC. Кроме основных регрессоров ВТФ – логарифма ширины радиолинии 21 см и свободного члена – в зависимости использованы 2MASS-характеристики – средняя поверхностная яркость, индекс концентрации, показатель цвета, а также логарифм отношения оптических диаметров. Обобщение обусловлено формой коррекций звездных величин и ширин, а также зависимостью коэффициентов обычной ВТФ от ряда характеристик галактик. Проведен анализ значимости регрессоров общей 21-параметрической квадратичной регрессии и построена "оптимальная" 6-параметрическая квадратичная регрессия. Оказалось, что учет квадратичных регрессоров уменьшает на 2% разброс зависимости по сравнению с линейной 6-параметрической регрессией, что достигается с использованием меньшего количества характеристик галактик (без индекса концентрации). Уменьшение разброса по сравнению с обычными двухпараметрическими регрессиями составляет 15%. Применение на нашем наблюдательном материале линейных и нелинейных многопараметрических регрессий оказалось более эффективным методом учета причин разброса ВТФ по сравнению с традиционным методом коррекций звездных величин и ширин линии 21 см. Определение коллективной дипольной скорости с использованием "оптимальной" квадратичной регрессии подтвердило наши более ранние оценки на основе линейных многопараметрических регрессий.

Ключевые слова: зависимости Талли-Фишера, каталог 2MFGC.

Yu. Kudrya, Ph.D. in Phys. and Math. Sciences
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

QUADRATIC MULTIPARAMETER OF TULLY-FISHER RELATION (TFR) FOR THE CATALOG 2MFGC

Quadratic generalizations of Tully-Fisher relation (TFR) for the sample 2724 2MFGC galaxies are investigated. The 2MASS characteristics (mean surface brightness, concentration index, and color index) and logarithm of the optical diameters ratio are used in addition to the main TFR regressors – logarithm of linewidth and free term. The generalization is motivated by the corrections form of magnitudes and widths, as well as by the dependence of usual TFR parameters on several galaxy characteristics. The significance analysis of the regressors of general 21-parametric quadratic regression is conducted, and "optimal" 6-parametric quadratic regression is built. It was found that incorporation of the quadratic regressors reduces the TFR scatter by 2% compared with linear 6-parametric regression that is achieved using fewer characteristics of galaxies (without concentration index). The reducing of the scatter compared with usual two-parameter regression is 15%. It is shown the use of multiparameter regression for our observational data is more effective method of the TFR scatter accounting than the traditional method of magnitude and linewidth corrections. Bulk dipole velocity determination using the "optimal" quadratic regression confirmed our earlier estimates based on the linear multiparameter regressions.

Key words: Tully-Fisher relation (TFR), catalog 2MFGC.

УДК 524.7

С. Парновський, д-р фіз.-мат. наук, проф., І. Ізотова, канд. фіз.-мат. наук
КНУ імені Тараса Шевченка, Київ

ВІДНОШЕННЯ СВІТНОСТІ ДО МАСИ МОЛОДОГО ЗОРЯНОГО НАСЕЛЕННЯ У ЯСКРАВИХ КОМПАКТНИХ ГАЛАКТИКАХ ЯК ФУНКЦІЯ ЇХ МЕТАЛІЧНОСТІ ТА ВІКУ СПАЛАХУ ЗОРЕУТВОРЕННЯ

Для вибірки близько 800 яскравих компактних галактик розглянуто залежність, яка описує оптимальну апроксимацію відношення світності до маси молодого зоряного населення галактик в залежності від їх металічності та віку спалаху зореутворення. Показано, що всі якісні висновки, зроблені при аналізі залежності, що апроксимує не відношення, а лише світність, залишаються чинними.

Ключові слова: світність, металічність, віку спалаху, зореутворення.

Вступ. Вперше увагу до нового класу компактних галактик великої світності на червоних зміщеннях $z = 0.112 - 0.360$ було привернуто у роботі [3]. У подальшому цей тип галактик отримав назву "green peas" через свою компактну структуру та зелений колір на оглядових картах цифрового огляду неба Sloan Digital Sky Survey (SDSS). У роботі [3] було досліджено вибірку з 251 галактик, відібраних з SDSS на основі кольору. Було встановлено, що "green peas" галактики характеризуються низьким вмістом важких елементів, масами зір $M_* \sim 10^{8.5} - 10^{10} M_{\odot}$, високою швидкістю зореутворення $SFR \sim 10 M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$, високою питомою швидкістю зореутворення $SSFR \sim 10^{-8} \text{ рік}^{-1}$. За цими властивостями "green peas" галактики позиціонуються між близькими блакитними компактними карликовими галактиками (BCDGs) та віддаленими (червоні зміщення $z \geq 2 - 3$) Ly-break (LBG) галактиками великої світності в ультрафіолетовому діапазоні. У роботі [3] висунуто припущення, що "green peas" галактики – це та мода (стадія, фаза) зореутворення, яка була переважно поширеною у молодому Всесвіті. Тому дослідження "green peas" галактик створює можливість зрозуміти у деталях процеси зореутворення при фізичних умовах, які мали місце на великих червоних зміщеннях.

Дуже низький вміст важких елементів у галактик даного типу було виявлено також у роботі [2] – лише 20 % від сонячного. У [2] також було зазначено, що основні властивості "green peas" галактик не є притаманними для ближнього Всесвіту і, очевидно, є короткою і екстремальною фазою у еволюції галактик.

Детальне дослідження великої вибірки 803 компактних галактик великої світності (LCGs) з активним зореутворенням було проведено у роботі [5]. Вибірка галактик на $z = 0.02 - 0.63$ була отримана шляхом селекції з SDSS Data Release 7 (DR7) [1] на основі спектральних та фотометричних даних. Принцип селекції дав можливість у ~ 10 разів збільшити розмір вибірки, та у ~ 2 рази її розкид за червоними зміщеннями, якщо порівнювати з [3]. У роботі [5] було показано, що галактики вибірки мають ті ж основні властивості, що і "green peas" галактики [3]. На діагностичній діаграмі залежності $[O III]\lambda 5007/H\beta$ від $[N II]\lambda 6583/H\alpha$ [6] вони займають зону високоіонізованих галактик з активним зореутворенням. У досліджуваних галактик було встановлено низький вміст важких елементів $12 + \log O/H \sim 7.6 - 8.4$ (з медіанним значенням 8.11). Встановлено, що швидкість зореутворення у LCGs галактик у ~ 3 рази нижча, чим у LBGs, а $SSFR$ – дуже висока і складає $10^{-7} - 10^{-9} \text{ рік}^{-1}$. Визначені властивості вказують на те, що близькі LCGs галактики є можливими аналогами LBGs галактик, які розміщені на великих червоних зміщеннях.