

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

КВАДРАТИЧНІ МНОГОПАРАМЕТРИЧНІ ЗАВИСМОСТІ 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.

Подальше дослідження вибірки галактик роботи [5] було проведено у [8]. За трьома індексами зореутворення – випромінюванням у лінії H α іонізованого водню, далекому (FUV) та близькому (NUV) УФ діапазонах – були визначені швидкості зореутворення галактик $SFR(H\alpha)$, $SFR(FUV)$ та $SFR(NUV)$. Для повної вибірки та створених підвибірок досліджено та описано регресійні зв'язки швидкостей зореутворення SFR та параметрів галактик, визначених у роботі [5], – маси m молодого зоряного населення і віку T спалаху зореутворення. Для трьох індексів зореутворення отримано функції $f(T)$, які описують варіації SFR/m в залежності від віку спалаху (з врахуванням металічності) і показано, що світності (або SFR) в H α та FUV стрімко падають, коли $T \geq 3.2$ млн років.

Результати роботи [8], зокрема встановлена функція $f(T)$, на думку авторів, відкривають перспективу з певною точністю оцінити масу m молодого зоряного населення галактики даного типу без проведення моделювання процесів зореутворення на основі спектрального розподілу енергії галактик. У зв'язку з цим проводиться дослідження стабільності якісних властивостей встановлених залежностей [8].

Дані спостережень та обчислення. Детальний опис критеріїв відбору галактик, які досліджувались у роботі [8], наведено у [5]. Галактики були відібрані на основі як спектральних так і фотометричних даних огляду Sloan Digital Sky Survey (SDSS) [1]. До вибірки галактик увійшли компактні галактики з активним зореутворенням; високою світністю H β емісійної лінії ($L(H\beta) \geq 3 \times 10^{40}$ ерг s^{-1}); великою еквівалентною шириною H β емісійної лінії ($EW(H\beta) \geq 50$ Å, $EW(H\beta) \geq 100$ Å), що є свідченням молодого спалаху зореутворення та надійно зареєстрованою лінією [O III] $\lambda 4363$ Å, що дає можливість точного визначення вмісту важких елементів (кисню). Вибірка була ототожнена з даними спостережень супутника GALEX у далекому (FUV, ефективна довжина хвилі $\lambda_{eff} = 1528$ Å) та близькому (NUV, $\lambda_{eff} = 2271$ Å) ультрафіолетовому континуумі. Проведено належну корекцію за екстинкцію випромінювання та за апертуру спостережень (у лінії H α іонізованого водню), які докладно описано в [8, 9]. Розраховані за трьома індексами (лінії H α та FUV і NUV континуумі) світності були перераховані в пропорційні їм величини, а саме в оцінки швидкості зореутворення (SFR , star formation rate, у одиницях $M_{\odot} \text{ рік}^{-1}$) за формулою $SFR = k \times L$ згідно [7]. Тут L – світність у відповідному діапазоні, а коефіцієнт k для лінії H α дорівнює 7.9×10^{-42} , де світність вимірюється в ерг $\times s^{-1}$. Для FUV і NUV світність – в ерг $\times (с \times Гц)^{-1}$, а коефіцієнт $k = 1.4 \times 10^{-28}$.

В роботі [8] на основі статистичного аналізу встановлено залежність SFR галактик від маси m молодого (молодше 10 млн. років) зоряного населення, металічності галактики та часу T після спалаху зореутворення (вік спалаху зореутворення), визначених у роботі [5] шляхом аналізу спектрів випромінювання із застосуванням моделювання процесів зореутворення. Остаточна регресійна залежність, що апроксимує величини SFR , або світності L галактик вибірки найкраще, має вигляд [8]

$$SFR = m(C_1 f(T) + C_2 ([O] - \langle [O] \rangle)), \quad f(T) = \begin{cases} 1 & (T < T_0) \\ \exp(-p(T - T_0)) & (T > T_0) \end{cases} \quad (1)$$

Тут m – маса молодого зоряного населення у M_{\odot} , T – вік спалаху зореутворення у млн. років, $T_0 = 3.2$ млн. років; $\langle [O] \rangle$ – середня металічність (вміст важких елементів) галактик вибірки. В роботі [8] встановлено значення та похибки коефіцієнтів, що входять до регресії (1), а також параметри F , що характеризують статистичну значущість окремих лінійних регресорів за критерієм Фішера [4]. Статистичним достовірностям 90, 95, 97.5, 99, 99.5, 99.9 та 99.95% відповідають значення параметру F , що дорівнюють 2.71, 3.84, 5.02, 6.64, 7.88, 10.83 та 12.10 відповідно. Параметри

визначалися за методом найменших квадратів шляхом мінімізації величини $\sum_{i=1}^N (SFR_i - m_i(C_1 f(T_i) + C_2 ([O]_i - \langle [O] \rangle)))^2$.

При цьому ми отримали найкраще наближення для величин SFR на основі регресії (1). Але цей вираз можна переписати у іншому вигляді:

$$\frac{SFR}{m} = C_1 f(T) + C_2 ([O] - \langle [O] \rangle) \quad (2)$$

з іншим набором коефіцієнтів, які дають кращу апроксимацію відношення SFR/m , а не SFR . Нові коефіцієнти ми отримаємо при мінімізації величини $\sum_{i=1}^N (SFR_i/m_i - C_1 f(T_i) - C_2 ([O]_i - \langle [O] \rangle))^2$. Легко побачити, що перехід від регресії

(1) до регресії (2) є еквівалентним введенню статистичних ваг для галактик каталогу, котрі є обернено пропорційними квадратам мас молодого зоряного населення окремих галактик m_i . Таким чином при апроксимації регресії (2) збільшено вплив найменших галактик та галактик з меншою активністю зореутворення.

Цікаво не тільки порівняти коефіцієнти двох апроксимацій, але і перевірити, чи виконуються ті якісні висновки, що були отримані при використанні не тільки регресії (1), але й її узагальнень. Це дасть змогу перевірити, що вони виконуються для галактик довільної маси молодого зоряного населення, а не тільки для галактик з великими подібними масами. Результати розрахунків для різних вибірок наведено у Таблиці.

Є три підвибірки галактик, для яких відомі потоки у лінії H α та FUV і NUV діапазонах. Крім того, в кожній підвибірці виділено по дві підвибірки: "іррегулярні" (назва умовна) галактики, що мають дещо спотворену морфологію або спектральні властивості та "регулярні", що не мають подібних ознак. Для кожної підвибірки наведено її об'єм, середньоквадратичне відхилення, значення коефіцієнта p , при якому досягається мінімум суми, значення та похибки коефіцієнтів C_1 та C_2 , відповідні значення за критерієм Фішера F та середні металічності у вибірках. З таблиці видно, що розкид даних по потоку в лінії H α набагато менший за розкид для FUV та особливо NUV континууму, як це і було раніше встановлено при використанні апроксимації (1) [8]. Статистична значущість першого члена з коефіцієнтом C_1 є дуже великою, її ймовірність значно більше 99.99% для всіх підвибірок. Натомість значущість другого члена з коефіцієнтом C_2 значно впала з переходом від апроксимації (1) до (2). При збереженні від'ємного знаку цього коефіцієнту його можна вважати статистично достовірним тільки для частини підвибірок, в той час як при апроксимації (1) величини F для нього лежали в інтервалі від 21 до 83. При використанні апроксимації (2) для спостережень у NUV діапазоні можна відкинути другий доданок. Тоді залежність світності від металічності відбувається непрямым чином через зміну маси молодого зоряного населення з металічністю. Дещо змінилися й величини p . Для всіх підвибірок

вони збільшилися, особливо для підвибірки галактик з даними спостережень у NUV. Також можна побачити, що ці величини для "іррегулярних" галактик більше, ніж для "регулярних".

Таблиця 1. Параметри регресії (2) для різних підвбірок яскравих компактних галактик з активним зореутворенням

Вибірка	N	$\sigma \times 10^8$	$\rho, (10^8 \text{ рік})^{-1}$	$C_1 \times 10^7 (F)$	$C_2 \times 10^8 (F)$	$\langle [O] \rangle$	F_3
Ha, "регулярні"	276	5.5	0.59	$2.14 \pm 0.04(2658)$	$-4.5 \pm 2.2(4.3)$	8.05	5.6
Ha, "іррегулярні"	519	5.9	0.71	$2.12 \pm 0.03(3919)$	$-4.2 \pm 1.8(5.4)$	8.13	4.0
Ha, всі	795	5.7	0.67	$2.13 \pm 0.03(6515)$	$-4.8 \pm 1.3(12.6)$	8.10	8.7
FUV, "регулярні"	213	7.1	0.36	$1.27 \pm 0.06(490)$	$-8.5 \pm 3.1(7.5)$	8.05	0.09
FUV, "іррегулярні"	418	8.3	0.67	$1.39 \pm 0.05(670)$	$-10.9 \pm 2.9(14.4)$	8.13	0.04
FUV, всі	631	8.0	0.56	$1.34 \pm 0.04(1088)$	$-9.8 \pm 2.1(21.7)$	8.10	0.04
NUV, "регулярні"	233	9.2	0.31	$1.59 \pm 0.07(507)$	$-9.8 \pm 3.9(6.4)$	8.05	0.05
NUV, "іррегулярні"	435	13.5	0.62	$1.98 \pm 0.08(553)$	$-4.1 \pm 4.6(0.8)$	8.13	0.5
NUV, всі	668	12.3	0.50	$1.83 \pm 0.06(947)$	$-5.7 \pm 3.1(3.3)$	8.10	0.26

Розглянемо можливі нелінійності у залежності SFR від m . Після переходу до форми (2) нелінійний член, що має коефіцієнт C_3 , входить у вираз наступним чином:

$$\frac{SFR}{m} = C_1 f(T) + C_2 ([O] - \langle [O] \rangle) + C_3 m. \quad (3)$$

Ми розрахували значення коефіцієнта Фішера F_3 для нелінійного члена, яке наведено в останній колонці Таблиці. Видно, що для підвбірок з даними УФ випромінювання немає сенсу розглядати подібний доданок через малу статистичну значущість останнього. Тільки для галактик з випромінюванням у лінії Ha іонізованого водню цей доданок можна приймати до уваги. Значення F_3 є більшими за значущість, що отримано для узагальнення апроксимації (1). Для жодної з підвбірок "регулярних" та "іррегулярних" галактик не отримано свідчень про існування нелінійності. Тільки для всієї вибірки вцілому отримано значення $F_3 = 8.7$. Це є аргументом, але не є переконливим доказом, на користь можливого існування нелінійності.

Таким чином ми встановили, що всі якісні висновки, зроблені в статті [8] з використанням регресії (1), оптимальної при апроксимації SFR , є стабільними і не змінюються при використанні регресії (2), оптимальної при апроксимації відношення SFR/m або L/m .

Розглянемо можливі нелінійності у залежності SFR від m . Після переходу до форми (2) нелінійний член, що має коефіцієнт C_3 , входить у вираз наступним чином:

$$\frac{SFR}{m} = C_1 f(T) + C_2 ([O] - \langle [O] \rangle) + C_3 m. \quad (3)$$

Ми розрахували значення коефіцієнта Фішера F_3 для нелінійного члена, яке наведено в останній колонці Таблиці. Видно, що для підвбірок з даними УФ випромінювання немає сенсу розглядати подібний доданок через малу статистичну значущість останнього. Тільки для галактик з випромінюванням у лінії Ha іонізованого водню цей доданок можна приймати до уваги. Значення F_3 є більшими за значущість, що отримано для узагальнення апроксимації (1). Для жодної з підвбірок "регулярних" та "іррегулярних" галактик не отримано свідчень про існування нелінійності. Тільки для всієї вибірки вцілому отримано значення $F_3 = 8.7$. Це є аргументом, але не є переконливим доказом, на користь можливого існування нелінійності.

Висновки. Показано, що всі якісні висновки, зроблені в статті [8] з використанням регресії (1), оптимальної при апроксимації SFR , є стабільними і не змінюються при використанні регресії (2), оптимальної при апроксимації відношення SFR/m або L/m .

Список використаних джерел:

1. Abazajian, K.N., Adelman-McCarthy J. K., Agüeros M. A. et al. The Seventh Data Release of the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* – 2009. – V. 182. – P. 543–558.
2. Amorín R., Pérez-Montero E., Vilchez J.M., Papaderos P. The Star Formation History and Metal Content of the Green Peas. New Detailed GTC-OSIRIS Spectrophotometry of Three Galaxies // *Astrophys. J.* – 2012. – V. 749. – P. 185–202.
3. Cardamone C., Schawinski K., Sarzi M. et al. Galaxy Zoo Green Peas: discovery of a class of compact extremely star-forming galaxies // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2009. – V. 399. – P. 1191–1205.
4. Fisher R.A. Statistical methods for research workers [Текст] / R. A. Fisher R.A. – London: Oliver and Boyd, 1950. – 80 P.
5. Izotov Y. I., Guseva N.G., Thuan T.X. Green Pea Galaxies and Cohorts: Luminous Compact Emission-line Galaxies in the Sloan Digital Sky Survey // *Astrophys. J.* – 2011. – V. 728 – P. 161–177.
6. Kauffmann G., Heckman T. M., Tremonti C. et al. The host galaxies of active galactic nuclei // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* – 2003. – V. 346. – P. 1055–1077.
7. Kennicutt R. C., Jr. Star Formation in Galaxies along the Hubble Sequence // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* – 1998. – V. 36. – P. 189–232.
8. Parnovsky S.L., Izotova I.Yu., Izotov Y.I. H α and UV luminosities and star formation rates of large sample of luminous compact galaxies // *Astrophysics and Space Science*. 2012. DOI: 1007/S 10509-012-1253-
9. Ізотова І.Ю., Парновський С.Л. Швидкості зореутворення вибірки компактних емісійних галактик за даними GALEX // *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Астрономія.* – 2012. – вип. 49. – С. 4 – 6.

Надійшла до редколегії 29.11.12

С. Парновский, д-р физ.-мат. наук, проф., И. Изотова, канд. физ.-мат. наук
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев

ОТНОШЕНИЕ СВЕТНОСТИ К МАССЕ МОЛОДОГО ЗВЕЗДНОГО НАСЕЛЕНИЯ В ЯРКИХ КОМПАКТНЫХ ГАЛАКТИКАХ КАК ФУНКЦИЯ ИХ МЕТАЛЛИЧНОСТИ И ВОЗРАСТА ВСПЫШКИ ЗВЕЗДООБРАЗОВАНИЯ

Для выборки около 800 ярких компактных галактик рассмотрены зависимость, которая описывает оптимальную аппроксимацию отношения светимости к массе молодого звездного населения галактик в зависимости от их металличности и возраста вспышки звездообразования. Показано, что все качественные выводы, сделанные при анализе зависимости, аппроксимирующей не соотношение, а только светимость, остаются в силе.

Ключевые слова: светимость, металличность, возраст вспышки, звездообразования.

S. Parnovsky, Dr. Phys. and Math. Sciences, Prof., I. Izotova, Ph.D. in Phys. and Math. Sciences
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv

DEPENDENCE OF THE RATIO OF LUMINOSITY TO MASS OF YOUNG STELLAR POPULATION ON THEIR METALLICITY AND STAR BURST AGE FOR LUMINOUS COMPACT GALAXIES

For the sample of about 800 luminous compact galaxies we consider the optimal approximation of the ratio of the luminosity to the mass of the young stellar population as a function of their oxygen abundance and starburst age. It is shown that all qualitative conclusions obtained by approximation of luminosities only are valid in this case as well.

Key words: luminosity, metallicity, age outbreak, starburst.

УДК 523.98

В. Криводубский, д-р физ.-мат. наук
КНУ имени Тараса Шевченко, Киев

О САМООРГАНИЗАЦИИ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОЛНЕЧНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ПЛАЗМЕ

Проанализировано роль отрицательной турбулентной диффузии в образовании дискретных магнитных полей в солнечной конвективной зоне (СКЗ). Подчеркнуто, что спиральные движения во вращающейся конвективной турбулентности способствуют возникновению обратного каскада переноса энергии от мелкомасштабных к крупномасштабным пульсациям (мелкомасштабный α^2 -эффект Крайчана). Последний эффект вызывает уменьшение суммарного коэффициента турбулентной магнитной диффузии. При специально подобранных характеристиках спиральности это может привести к отрицательной суммарной турбулентной диффузии, которая вызывает "стягивание" однородного магнитного поля в изолированные структуры. Проведенные нами расчеты для двух моделей СКЗ показали, что в глубинных слоях существуют благоприятные условия для возбуждения эффекта спиральной отрицательной турбулентной диффузии. Это должно в значительной степени содействовать самоорганизации изначально слабых непрерывных магнитных полей в тонкие изолированные магнитные силовые трубки.

Ключевые слова: магнитные поля, солнечная конвективная зона.

Введение. Общепринято считать, что наблюдаемые на солнечной поверхности изолированные магнитные силовые трубки (МСТ) являются результатом магнитного всплывания из солнечных глубин на поверхность сильных полей. Поэтому необходимо исследовать физические процессы в различных солнечных слоях, приводящие к дискретной структуре магнитных полей на Солнце. Особую актуальность в связи с этим приобретает вопрос о роли турбулентных эффектов в перестройке солнечного магнетизма [22], поскольку наблюдаемые движения на солнечной поверхности и конвекция в подфотосферных слоях соответствуют признакам развитой турбулентности. В нашей недавней работе [15] в рамках макроскопической МГД [14] было показано, что существенную роль в обеспечении длительной стабильности равновесного состояния всплывших на солнечную поверхность вертикальных МСТ играет эффект макроскопического турбулентного диамагнетизма, открытый академиком Зельдовичем Я.Б. [4]. Однако остается не до конца выясненным вопрос о причинах начальной стадии фрагментации (концентрации) магнитного поля в изолированные МСТ. В связи с этим мы полагаем, что важную роль в решении этого вопроса может сыграть эффект отрицательной турбулентной диффузии [20]. Именно этой проблеме посвящена наша работа.

Роль спирального поля скоростей в возбуждении отрицательной турбулентной магнитной диффузии. В течение длительного времени у исследователей бытовало порожденное наблюдениями убеждение, что турбулентность в природных средах всегда разрушает структуры всех видов. Однако со временем наступило понимание, что при определенных условиях мелкомасштабная турбулентность может порождать макроскопические структуры [2, 6, 7]. Оказалось, что турбулентность не обязательно приводит к сглаживанию магнитных неоднородностей. Наоборот, в случае спирального характера движений она может создавать магнитные неоднородности. Спиральность является абсолютно природным явлением, с необходимостью возникающим в гравитационном поле в охваченных турбулентностью вращающихся системах. Во вращающихся космических объектах гидродинамическая спиральность поля скоростей ($\mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u}$) связана с кориолисовой силой $2[\mathbf{u} \Omega]$ (\mathbf{u} – скорость турбулентных движений, Ω – угловая скорость). Отличительная особенность проблемы состоит в том, что в спиральной турбулентности *энтрофия* – квадрат вихря скорости ($\text{rot } \mathbf{u}^2$) – переносится вдоль пространственного спектра от крупномасштабных к мелкомасштабным движениям, однако *энергия* турбулентных скоростей – величина, пропорциональная квадрату скорости (u^2) – может переноситься в противоположном направлении – от мелких масштабов к крупным. Последнее приводит к появлению энергоемких макромасштабных вихревых гидродинамических и магнитных структур. В научной литературе этот феномен получил название обратного (инверсного) каскада энергии турбулентных движений (см., например, работы [2, 10-13]). Ключевую роль в возникновении инверсного каскада энергии играют устойчивые (долгоживущие) усредненные мелкомасштабные спиральные движения $\langle \mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u} \rangle$ ($\langle \rangle$ – операция усреднения по пространственным L или временным T масштабам, превышающим характерные размеры l или времена корреляции τ мелкомасштабных турбулентных пульсаций ($L \gg l$, $T \gg \tau$) [14]). Усредненная спиральность порождает тенденцию к слиянию мелких вихрей [12, 13], поэтому этот процесс соответствует свойствам отрицательной диффузии, суть которой состоит в поддержании или даже возрастании разности скоростей турбулентного течения [20].

Остановимся несколько подробнее на природе отрицательной турбулентной магнитной диффузии, открытой Крайчаном [11-13] в результате численных экспериментов. Эффект возникает в сильно завихренной турбулентной высокопроводящей жидкости, находящейся в неоднородном крупномасштабном магнитном поле \mathbf{B} . Важной характеристикой нового явления служит время существования τ_2 усредненных спиральных вихрей $\langle \mathbf{u} \cdot \text{rot } \mathbf{u} \rangle$ (здесь и далее мы используем обозначения характерных времен различных турбулизованных структур согласно статьям Крайчана [12, 13]). Каждый вихрь с большой собственной спиральностью Крайчаном моделировался дрейфующим