

УДК 524.7

DOI: 10.15587/2313-8416.2019.186487

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВТОРЮВАНОГО СПАЛАХУ FRB 121102 ЯК ВИПРОМІНЮВАННЯ ВІД КАСПУ НА НАДПРОВІДНІЙ КОСМІЧНІЙ СТРУНІ

Л. В. Задорожна, О. М. Теслик

Космічні струни – топологічні дефекти, релікти раннього Всесвіту, які могли формуватися під час фазових переходів полів зі спонтанно порушеною симетрією. Було показано, що позагалактичні швидкі радіоспалахи можна пояснити як випромінювання від надпровідних космічних струн. У рамках нашої моделі було досліджено FRB 121102 – вперше зареєстрований повторюваний швидкий радіоспалах. Для кількох груп подій спалаху був отриманий параметр, який характеризує можливе джерело випромінювання – петлю космічної струни, а саме енергетичний масштаб фазового переходу, під час якого дана струна утворилась

Ключові слова: космічні струни, фазовий перехід у ранньому Всесвіті, ультрарелятивістська плазма, швидкі радіоспалахи, FRB 121102

Copyright © 2019, L. Zadorozhna, O. Teslyk.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).

1. Вступ

Протягом останнього десятиліття, новий клас об'єктів, що отримали назву швидкі радіоспалахи (від англ. fast radio bursts – FRBs), були відкриті за допомогою радіотелескопу Паркс, обсерваторії Аресібо, АСКАП, Радіотелескопу Грін-Бенк, Радіоінтерферометру СНІМЕ та Пушчинської радіоастрономічної обсерваторії [1–3]. Перший мілісекундний позагалактичний радіоспалах було виявлено групою вчених на чолі з Лорімером у 2007 році, під час обробки архівних даних, отриманих при спостереженні Магеланових Хмар на частоті 1.4 ГГц з допомогою 64-метрового радіотелескопа Паркс в Австралії. Спалах було помічено в даних від 24 липня 2001 року за Всесвітнім координованим часом і він знаходився приблизно на три градуси південніше Малої Магеланової Хмари [4]. Потік від радіоспалаху $F = 30 \text{ Ян}$, тривалість $\tau < 5 \text{ мс}$. Властивості спалаху не дозволяють асоціювати його з фізичними явищами, що могли б відбутися в нашій Галактиці чи Малій Магелановій Хмарі. Сучасні моделі для вільних електронів космічної плазми дають можливість розрахувати, що спалах відбувся на відстані $r \sim 1 \text{ Гпк}$, що відповідає червоному зміщенню $z \sim 0.3$.

2. Літературний огляд

На сьогодні задетектовано 92 швидких радіоспалахи. Всі вони мають подібні характеристики: частоти детектування 1.3 ГГц, 1.4 ГГц, 843 МГц, 700–900 МГц, 5–8 ГГц, 111 МГц; тривалість близько декількох мілісекунд, а пік спостережуваного потоку становить близько кількох Ян. Існують кілька теорій, що намагаються пояснити дане явище. Так як існує цілий набір швидких радіоспалахів із подібними характеристиками, це дозволяє зробити припущення про їх однакову природу. Пропонується кілька пояснень космологічних швидких радіоспалахів, такі як: вибухи наднових, випромінювання чорних дірок, бліцари, спалахи від магнетарів чи злиття релятивістських об'єктів – чорних дірок або нейтронних зірок. В нашій моделі запропоновано пояснення FRBs як випромінювання від каспів на надпровідних космічних струнах, що рухаються з великими Лоренц-факторами у магнітному полі, в замороженому в космічну плазму. Спостережувана тривалість, потік та частота подій добре узгоджуються із запропонованою моделлю [5].

Особливої уваги заслуговують повторювані швидкі радіоспалахи, на даний момент було лише чо-

тири повідомлення про детектування таких спалахів – FRB 121102, від якого задетектовано 110 спалахів, FRB 180814, відкриття якого було анонсовано 9 січня 2019 року і від котрого задетектовано 6 спалахів Радіоінтерферометром CHIME [2] та 2 спалахи FRB 151125, відкритого 28 червня 2019 року в архівних даних, отриманих з допомогою радіотелескопу Пушинської радіоастрономічної обсерваторії [3], 9 серпня 2019 повідомлено про відкриття ще восьми повторюваних спалахів Радіоінтерферометром CHIME, більшість із котрих мають 2 спалахи, лише один FRB 180916.J0158+65 має 10 спалахів [6].

Спалах FRB 121102 був відкритий у 2014 році [7], а на даний момент є широковідомим та досліджуваним як повторюваний, загальна кількість отриманих спалахів з даного місця спостереження становить 110 шт. FRB 121102 є першим швидким радіоспалахом, що повторюється, і для котрого відомо положення з субарксекундною точністю [8–10], що значно полегшує подальші спостереження. Незважаючи на те, що активність джерела нерегулярна, існують проміжки, в яких джерело виявляється більш активним і реєструються множинні спалахи. Наприклад, автори [11] повідомили про 6 спалахів протягом 10-хвилинного інтервалу, в той час як кілька інших тривалих сеансів спостереження спалахів не виявили [12]. Дані спалахи були виявлені в інтервалах 1 ГГц – 5.2 ГГц [11], [13–15] та 4 ГГц – 8 ГГц [9, 16]. Крім того, в роботі [14] повідомили про невиявлення спалахів на частотах 70 МГц, 4,5 ГГц і 15 ГГц, протягом проміжків часу, в яких спалахи були виявлені на 1.4 ГГц і 3 ГГц, це вказує на те, що деякі спалахи, імовірно, не були ширококутовими. Спалахи від FRB 121102 мають ізотропну енергію випромінювання в радіодіапазоні, що рівна 10^{40} ерг [9]. Це на кілька порядків вище, ніж для будь-якого іншого радіоджерела мілісекундного масштабу [9, 14]. Існують різні теорії, що намагаються пояснити явище швидких радіоспалахів, приписують їм як Галактичну, так і позагалактичну природу, а повторювані спалахи ініціювали нові чисельні гіпотези свого походження [9, 13, 16–18]. Проте, загальноприйнятої теорії швидких радіоспалахів наразі не існує.

3. Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – пояснити швидкі позагалактичні радіоспалахи, природа котрих досі не встановлена, зокрема, природу повторюваного радіоспалаха FRB 121102.

Для досягнення мети були поставлені такі задачі:

1. Розглянути швидкі радіоспалахи як електромагнітне випромінювання від каспів на надпровідних космічних струнах. Знайти тривалість, потік і частоту спалахів, порівняти модель зі спостережуваними даними.

2. Дослідити перший відкритий повторюваний швидкий радіоспалах FRB 121102 в рамках моделі випромінювання від космічних струн.

2.1. Отримати енергетичний параметр α , який характеризує джерело випромінювання – петлю кос-

мічної струни і пов'язаний з енергетичним масштабом порушення симетрії.

2.2. Для варіанту, що здається найбільш реалістичним – магнітного поля, в якому рухається надпровідна космічна струна, $B = 10^{-10}$ Г, отримати порядок енергетичного масштабу фазового переходу η під час якого струна утворилась.

4. Космічні струни та їх рух в космічній плазмі

Космічні струни – топологічні дефекти у вакуумі, які могли утворюватися під час фазових переходів полів зі спонтанним порушенням симетрії у ранньому остигаючому Всесвіті. Прикладом такого фазового переходу є фазовий перехід теорії Великого Об'єднання (ТВО) – відділення сильної взаємодії від електрослабкої, що відбувся за 10^{-35} с з моменту Великого вибуху. Космічні струни – квазіоднорічні (з товщиною порядку $d_{GUT} \sim \eta_{GUT}^{-1} \sim 10^{-30}$ см, де η – енергетичний масштаб фазового переходу, рівний у випадку ТВО $\eta = \eta_{GUT} \sim 10^{16}$ GeV) безконечні (в межах нашого космологічного горизонту) чи замкнуті в петлі масивні (маса (натяг) одиниці довжини $\mu_{GUT} \propto \eta_{GUT}^2 \sim 10^{22}$ г/см для ТВО-струн) структури, які можуть відігравати важливу роль як в космологічному аспекті, так і в різноманітних астрофізичних проявах. Космічні струни формують заплутані сітки у Всесвіті, що еволюціонують масштабно-інваріантно. Існують дві топологічно-стабільні конфігурації космічних струн – нескінченні струни, чий кінці замикаються десь за горизонтом подій і набір замкнених петель. В об'ємі Хаббла міститься декілька нескінченних сегментів струн і набір петель, концентрація яких змінюється з часом як $n = 1/(\alpha(ct)^3)$. Середня довжина петель $l \approx \alpha ct$, де t – космологічний момент часу. Для аналітичності розрахунків і так як ми оперуємо малими червоними зміщеннями, використовуватимемо космологічну модель Фрідмана з критичною густиною матерії (без Λ -члену), візьмемо постійну Хаббла рівною $H_0 = 72$ км·с / Мпк, і космологічний момент часу $t = t_0(1+z)^{-3/2}$, де $t_0 = 2/3H_0^{-1}$ – час існування Всесвіту, z – червоне зміщення. Параметр α визначає втрату енергії струною на гравітаційне випромінювання:

$$\alpha = \frac{\Gamma G \mu}{c^2}, \quad (1)$$

та залежить від енергетичного масштабу фазового переходу $\eta = (\mu \hbar c^3)^{1/2}$, під час якого струна утворилась, де $\Gamma \sim 50$ – безрозмірний параметр [19, 20], G – гравітаційна стала, c – швидкість світла, μ – маса на одиницю довжини струни.

Надпровідні космічні струни містять безмасові носії заряду, що можуть рухатись вздовж струни без опору, створюючи струм вздовж неї. Петлі осцилюють періодично, різні сегменти струни рухаються з різними релятивістськими швидкостями, тож каспи –

негладкі, типу зламу ділянки струни, вершина котрих одномоментно досягає швидкості, близької швидкості світла, виникають кожного періоду. Ділянка прикаспової області на характерній власній (в нерухомому стані) відстані Δl від вершини каспу при осциляційних формуваннях каспу прискорюватиметься до Лоренц-фактору $\gamma_s \sim l/\Delta l$, в системі відліку струни прикаспова ділянка з Лоренц-фактором γ_s матиме довжину

$$\Delta l = \frac{l}{\gamma_s}, \quad (2)$$

причому, $\gamma_s = 1/\sqrt{1-\beta^2}$, $\beta = v_s/c$, де v_s – швидкість каспу. Звичайно, зв'язок розміру та швидкості прикаспової ділянки струни залежить від конкретної динаміки петлі та може бути встановлений чисельним моделюванням, для аналітичного наближення тут розглянуто більш консервативний випадок обернено квадратичної залежності.

Розглянемо рух сегмента петлі в космічній плазмі з вмероженим магнітним полем $B_{IGM} = B_0(1+z)^2$. Осциляції петлі в міжгалактичному магнітному полі супроводжуються генерацією електричного струму з певним усередненим по довжині петлі значенням [21]:

$$I = \frac{e^2 B_{IGM} l}{\hbar}, \quad (3)$$

де e – заряд електрона, \hbar – стала Планка. Під час формування каспу, струм в прикасповій області зростає завдяки стиску (редукції сегмента довжини) до величини $I_s = I\gamma_s = e^2 B_{IGM} l \gamma_s / \hbar$. Максимум Лоренц-фактора каспу визначається зворотною реакцією зростаючого струму в прикасповій ділянці. Критичне значення струму досягається, коли енергія носіїв заряду стає порівняною з внутрішньою енергією струни – її натягом $I_{max} = e\eta/\hbar$. Максимум Лоренц-фактора

$$\gamma_{s,max} = \frac{I_{max}}{I} = \frac{1}{e B_{IGM} l} \left(\frac{\alpha \hbar c^5}{GG} \right)^{1/2}. \quad (4)$$

Так, каспова область струни буде рухатись з дуже великим Лоренц-фактором.

4.1. Електромагнітне випромінювання від каспу на космічній струні

Електромагнітне випромінювання від петлі надпровідної струни розглядатимемо як випромінювання від періодичного джерела. Повну потужність представимо як суму потужностей випромінювання на певних гармоніках:

$$P = \sum_n P_n, \quad (5)$$

частота випромінювання на певній гармоніці $\nu_n = n/T$, де $T = l/2c$ – період коливання петлі. Потужність випромінювання на n -ій гармоніці рівна $P_n \approx kI^2 n^{-2/3}/c$, k – постійний коефіцієнт, що чисельно порохований для деяких простих конфігурацій петель і має значення $k \sim 10$. Просумувавши по n , знайдемо повну потужність випромінювання

$$P = \frac{3kI^2 n_*^{1/3}}{c}, \quad (6)$$

n_* – максимальний номер гармоніки, який повинен не перевищувати величину $n_{em} \sim (\mu l^2)^{3/2}$, що визначається порівнянням максимального струму у касповій ділянці струни та маси на одиницю довжини (натягу) струни μ . Отже,

$$n_*^{1/3} < \frac{\mu^{1/2} c^2}{3I}. \quad (7)$$

Потік електромагнітного випромінювання від каспу на струні, зареєстрований земним спостерігачем

$$F^{obs} = \frac{P\tau_c(1+z)\gamma_s^2}{d_L^2}, \quad (8)$$

де d_L – фотометрична відстань. В моделі Фрідмана без Λ -члену, фотометрична відстань $d_L = 3t_0(1+z)^{1/2}[(1+z)^{1/2} - 1]$.

Спостережувана частота електромагнітного спалаху обернено пропорційна тривалості спалаху чи часу життя каспового явища $\nu^{obs} = 1/\tau_c$. Тривалість каспового явища на струні для земного спостерігача $\tau_c = \alpha t_0 \gamma_s^{-3} (1+z)^{-1/2} / 2$. Можемо звідси виразити

$$\gamma_s = \left(\alpha t_0 (1+z)^{-1/2} \nu^{obs} / 2 \right)^{1/3}. \quad (9)$$

Ми виходимо з припущення, що електромагнітне випромінювання від прикаспової області поширюється у вакуумі, проте спостережувана тривалість радіовипромінювання $\tau^{obs} \gg \tau_c$ може бути значно змінена завдяки розсіянню на турбулентному магнітному полі та тому, що існує часова роздільна здатність телескопа.

Енергія випромінюється струною з області, що рівна $\Delta\zeta \sim n_*^{-1/3} l$, з іншого боку, ділянка струни розміру l/γ_s під час формування каспу в системі відліку струни стискається в γ_s , тому $\Delta\zeta \sim n_*^{-1/3} l = l/\gamma_s^2$. Випромінювання для зовнішнього спостерігача скон-

центровано у вузькому пучку між напрямком руху каспу і напрямком джерело-спостерігач $\theta \sim 1/\gamma_s$. Густина потоку випромінювання рівна $S = F^{obs} \tau^{obs}$.

Спектральний потік електромагнітного випромінювання від прикаспової області струни для зовнішнього спостерігача, якщо випромінювання поширюється в космічній плазмі, рівний

$$F^{obs} = \frac{e^4 k B_0^2 t_0}{3\pi c \hbar^2} \frac{1}{\tau^{obs}} \alpha^4 \frac{(1+z)^{-1}}{\left[(1+z)^{1/2} - 1 \right]^2}, \quad (10)$$

спектральний потік для зовнішнього спостерігача не залежить від спостережуваної частоти.

Виходячи із спостережуваних даних для космологічних швидких радіоспалахів, можливо знайти характеристики струн, що могли б їх випромінити [5].

4.2. Спалахи FRB 121102 як електромагнітне випромінювання від каспів на петлі надпровідної космічної струни

FRB 121102 був відкритий як перший швидкий радіоспалах з географічного розташування, іншого, ніж детектував радіотелескоп Паркс [6]. FRB 121102 був знайдений в Галактичному антицентрі на частоті 1.4 ГГц в огляді Pulsar ALFA обсерваторії Аресібо з шириною імпульсу 3 ± 0.5 мс. Яскравість, тривалість і частота FRB 121102 відповідають властивостям попередньо виявлених спалахів з допомогою Паркс. У 2015 році група вчених, що відкрила оригінальний FRB 121102, знайшла 11 неперіодично повторюваних швидких радіоімпульсів на частоті 1.4 ГГц з допомогою Аресібо та 5 з телескопом Грін-Бенк на частоті 2 ГГц [13]. Спалахи 2 ГГц мають високоваріювані спектри, такі ж, як 1.4 ГГц. Це вказує, що структура частот, видимих через окремі смуги пропускання 1.4 ГГц і 2 ГГц, є частиною широкосмугового процесу. 17 спалахів мають міри дисперсії та локації на небі, які відповідають оригінальному FRB 121102, виявленому в 2012 році [11]. 26 серпня 2017 року ще 15 додаткових повторюваних спалахів на місці FRB 121102 були виявлені телескопом Грін-Бенк протягом 24-хвилинного інтервалу з частотами від 5 ГГц до 8 ГГц [14]. В квітні 2018 року ця ж група вчених озвучила повідомлення про детектування 21 спалаху протягом першої години спостереження в даних із 6-годинного спостереження за 26 серпня 2017 року на радіотелескопі Грін-Бенк [9]. У вересні 2018 року знову виявили 72 нових імпульси від FRB 121102 в спостереженнях С-діапазону (4–8 ГГц) на телескопі Грін-Бенк. Нові імпульси були знайдені за допомогою нейронної мережі також із даних, отриманих 26 серпня 2017 р [16]. Разом з 21-м раніше зареєстрованим імпульсом, це спостереження виявляє найбільшу кількість імпульсів FRB 121102 з одного спостереження, загальним обсягом 93 імпульсів протягом п'яти годин, у тому числі 45 імпульсів протягом перших 30 хвилин.

Зважаючи на велику кількість даних, отриманих від FRB 121102, а також факт надходження сигналів з одного й того ж місця спостереження, напро-

шується висновок про єдиність джерела спалахів і деяку його періодичність. Крім того, було відкрито ще три періодичних джерела і швидко зростаючий набір одиночних подій, що говорить про розподіл джерел швидких радіоспалахів однієї природи у Всесвіті. Такі спалахи пропонується пояснити як випромінювання від періодично виникаючих каспів на осцилюючих надпровідних космічних струнах, що рухаються з релятивістською швидкістю в космічній плазмі. Отримана тривалість, потік та частота подій добре узгоджуються із запропонованою моделлю [5].

5. Результати дослідження

Джерелом випромінювання FRB 121102 може бути надпровідна космічна струна, що рухається і осцилює в космічній плазмі з усередненим вимороженим магнітним полем $B_0 = 10^{-10} \text{ Г}$, червоне зміщення візьмемо рівним $z = 0.26$, як в статті про відкриття першого спалаху FRB 121102 [6].

Використовуючи спостережені космологічні дані для FRB 121102 [6, 11, 13, 14]: піковий потік випромінювання F^{obs} , спостережувану тривалість радіовипромінювання τ^{obs} , густину потоку S , використовуючи формулу (10) ми можемо знайти характеристики джерела-струни – параметр α (табл. 1,2), а отже, енергію фазового переходу η , під час якого струна утворилась.

Величини параметру α є дуже близькими для кожної події (див. Табл.1, Табл. 2). Середнє значення рівно $\alpha = 5.1 \cdot 10^{-11}$, а порядок величини $\alpha \sim 10^{-10}$. Для надпровідної петлі струни з $\alpha = 10^{-10}$, маса на одиницю довжини струни

$$\mu = \alpha c^2 / G = 2.7 \cdot 10^{16} \alpha_{-10} \text{ г/см},$$

енергія фазового переходу

$$\eta = (\mu \hbar c^3)^{1/2} = 2.8 \cdot 10^{10} \alpha_{-10}^{1/2} \text{ ерг} = 1.75 \cdot 10^{13} \alpha_{-10}^{1/2} \text{ ГеВ},$$

для порівняння, енергетичний масштаб фазового переходу Теорії Великого Об'єднання $\eta_{GUT} \sim 10^{16} \text{ ГеВ}$.

(Тут і далі використано позначення $\alpha_{-10} = \alpha / 10^{-10}$).

Струм в петлі струни

$$I = I_{max} / \gamma_{s,max} = e^2 \eta t_0 B_0 \alpha^{1/2} (G / \hbar^3 c^3)^{1/2} (1+z)^{1/2} = 1.1 \cdot 10^5 \alpha_{-10} \text{ А},$$

період коливання петлі

$$T = l / 2c = \alpha t_0 (1+z)^{-3/2} / 2 = 1.6 \cdot 10^7 \alpha_{-10} \text{ с} = 180 \alpha_{-10} \text{ діб}.$$

Таблиця 1

Властивості детектованих на Аресібо спалахів FRB 121102 та α , пораховані для цих спостережуваних параметрів

N	Аресібо			
	$F^{obs}, Ян$	$\tau^{obs}, мс$	$S, Ян \cdot мс$	α
1	0.04	3.3	0.1	$5.3 \cdot 10^{-11}$
2	0.03	3.8	0.1	$5.1 \cdot 10^{-11}$
3	0.03	3.3	0.1	$4.9 \cdot 10^{-11}$
4	0.04	4.6	0.2	$5.7 \cdot 10^{-11}$
5	0.02	8.7	0.09	$5.6 \cdot 10^{-11}$
6	0.02	2.8	0.06	$4.2 \cdot 10^{-11}$
7	0.02	6.1	0.06	$5.2 \cdot 10^{-11}$
8	0.14	6.6	0.9	$8.6 \cdot 10^{-11}$
9	0.05	6.0	0.3	$6.5 \cdot 10^{-11}$
10	0.05	8.0	0.2	$6.9 \cdot 10^{-11}$
11	0.31	3.06	1.0	$8.6 \cdot 10^{-11}$
17	0.03	–	0.09	$4.8 \cdot 10^{-11}$

Таблиця 2

Властивості детектованих на телескопі Грін-Бенк спалахів FRB 121102 та α , пораховані для цих спостережуваних параметрів

N	Телескоп Грін-Бенк	
	$S, Ян \cdot мс$	α
12	200	$5.8 \cdot 10^{-11}$
13	400	$6.9 \cdot 10^{-11}$
14	200	$5.8 \cdot 10^{-11}$
15	80	$4.6 \cdot 10^{-11}$
16	600	$7.7 \cdot 10^{-11}$
18	144.5	$5.4 \cdot 10^{-11}$
19	114.2	$5.1 \cdot 10^{-11}$
20	112.5	$5.1 \cdot 10^{-11}$
21	61.0	$4.3 \cdot 10^{-11}$
22	58.7	$4.3 \cdot 10^{-11}$
23	50.5	$4.1 \cdot 10^{-11}$
24	49.6	$4.1 \cdot 10^{-11}$
25	49.4	$4.1 \cdot 10^{-11}$
26	32.4	$3.7 \cdot 10^{-11}$
27	29.3	$3.6 \cdot 10^{-11}$
28	27.7	$3.6 \cdot 10^{-11}$
29	26.5	$3.5 \cdot 10^{-11}$
30	25.7	$3.5 \cdot 10^{-11}$
31	25.3	$3.5 \cdot 10^{-11}$
32	24.8	$3.5 \cdot 10^{-11}$

6. Висновки

1. В роботі було розглянуто швидкі радіоспалахи як електромагнітне випромінювання від капсів на надпровідних космічних струнах, що рухаються з великим Лоренц-фактором в магнітному полі, вмероженому в космічну плазму. Спостережувана тривалість, потік і частота спалахів добре узгоджуються із запропонованою моделлю.

2. Було досліджено перший відкритий повторюваний швидкий радіоспалах FRB 121102.

2.1. Для 12 подій, задетектованих Аресібо і 20 подій, задетектованих Грін-Бенк, отриманий енергетичний параметр α , який характеризує джерело випромінювання – петлю космічної струни. Значення цього параметра, враховуючи малість похибки спостереження, дуже близькі для кожної події.

2.2. Для варіанту, що здається найбільш реалістичним – магнітного поля, в якому рухається надпровідна космічна струна, $B=10^{-10}$ Г,

отримали порядок енергетичного масштабу фазового переходу $\eta \sim 10^{13}$ ГеВ, під час якого струна утворилась.

Література

1. Thornton, D., Stappers, B., Bailes, M., Barsdell, B., Bates, S., Bhat, N. D. R. et. al. (2013). A Population of Fast Radio Bursts at Cosmological Distances. *Science*, 341 (6141), 53–56. doi: <http://doi.org/10.1126/science.1236789>
2. Amiri, M., Bandura, K., Bhardwaj, M. et. al. (2019). A second source of repeating fast radio bursts. *Nature*, 566 (7743), 235–238. doi: <http://doi.org/10.1038/s41586-018-0864-x>
3. Fedorova, V. A., Rodin, A. E. (2019). Detection of nine new Fast Radio Bursts in the direction of the galaxy M31 and M33 at the frequency 111 MHz at the radio telescope BSA LPI. ATel, 12899. Available at: <http://www.astronomerstelegram.org/?read=12899>
4. Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., Narkevic, D. J., Crawford, F. (2007). A Bright Millisecond Radio Burst of Extragalactic Origin. *Science*, 318 (5851), 777–780. doi: <http://doi.org/10.1126/science.1147532>
5. Zadorozhna, L. (2015). Fast radio bursts as electromagnetic radiation from cusps on superconducting cosmic strings. *Advances in Astronomy and Space Physics*, 5 (1), 43–50. doi: <http://doi.org/10.17721/2227-1481.5.43-50>
6. Spitler, L. G., Cordes, J. M., Hessels, J. W. T., Lorimer, D. R., McLaughlin, M. A., Chatterjee, S. et. al. (2014). Fast radio burst discovered in the arecibo pulsar ALFA survey. *The Astrophysical Journal*, 790 (2), 101–119. doi: <http://doi.org/10.1088/0004-637x/790/2/101>
7. Andersen, B. C., Bandura, K., Bhardwaj, M., Boubel, P. et. al. (2019). CHIME/FRB Detection of Eight New Repeating Fast Radio Burst Sources. *The Astrophysical Journal*, 885 (1), 24–64. doi: <http://doi.org/10.3847/2041-8213/ab4a80>
8. Marcote, B., Paragi, Z., Hessels, J. W. T., Keimpema, A., Langevelde, H. J. van, Huang, Y. et. al. (2017). The Repeating Fast Radio Burst FRB 121102 as Seen on Milliarcsecond Angular Scales. *The Astrophysical Journal*, 834 (2), 8–17. doi: <http://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/18>
9. Gajjar, V., Siemion, A. P. V., Price, D. C., Law, C. J., Michilli, D., Hessels, J. W. T. et. al. (2018). Highest Frequency Detection of FRB 121102 at 4–8 GHz Using the Breakthrough Listen Digital Backend at the Green Bank Telescope. *The Astrophysical Journal*, 863 (1), 2–9. doi: <http://doi.org/10.3847/1538-4357/aad005>
10. Chatterjee, S., Law, C. J., Wharton, R. S., Burke-Spolaor, S., Hessels, J. W. T., Bower, G. C. et. al. (2017). A direct localization of a fast radio burst and its host. *Nature*, 541 (7635), 58–61. doi: <http://doi.org/10.1038/nature20797>
11. Scholz, P., Spitler, L. G., Hessels, J. W. T., Chatterjee, S., Cordes, J. M., Kaspi, V. M. et. al. (2016). The repeating Fast Radio Burst FRB 121102: Multi-wavelength observations and additional bursts. *The Astrophysical Journal*, 833 (2), 177–194. doi: <http://doi.org/10.3847/1538-4357/833/2/177>
12. Price, D. C., Gajjar, V., Rosenthal, L., Hallinan, G., Croft, S., DeBoer, D. et. al. (2018). No Bursts Detected from FRB121102 in Two 5 hr Observing Campaigns with the Robert C. Byrd Green Bank Telescope. *Research Notes of the AAS*, 2 (1), 30. doi: <http://doi.org/10.3847/2515-5172/aaaf69>
13. Spitler, L. G., Scholz, P., Hessels, J. W. T., Bogdanov, S., Brazier, A., Camilo, F. et. al. (2016). A repeating fast radio burst. *Nature*, 531 (7593), 202–205. doi: <http://doi.org/10.1038/nature17168>
14. Law, C. J., Abruzzo, M. W., Bassa, C. G., Bower, G. C., Burke-Spolaor, S., Butler, B. J. et. al. (2017). A Multi-telescope Campaign on FRB 121102: Implications for the FRB Population. *The Astrophysical Journal*, 850 (1), 76. doi: <http://doi.org/10.3847/1538-4357/aa9700>
15. Michilli, D., Seymour, A., Hessels, J. W. T., Spitler, L. G., Gajjar, V., Archibald, A. M. et. al. (2018). An extreme magneto-ionic environment associated with the fast radio burst source FRB 121102. *Nature*, 553 (7687), 182–185. doi: <http://doi.org/10.1038/nature25149>
16. Zhang, Y. G., Gajjar, V., Foster, G., Siemion, A., Cordes, J., Law, C., Wang, Y. (2018). Fast Radio Burst 121102 Pulse Detection and Periodicity: A Machine Learning Approach. *The Astrophysical Journal*, 866 (2), 149. doi: <http://doi.org/10.3847/1538-4357/aadf31>
17. Tendulkar, S. P., Bassa, C. G., Cordes, J. M., Bower, G. C., Law, C. J., Chatterjee, S. et. al. (2017). The Host Galaxy and Redshift of the Repeating Fast Radio Burst FRB 121102. *The Astrophysical Journal*, 834 (2), 7. doi: <http://doi.org/10.3847/2041-8213/834/2/7>
18. Vachaspati, T. (2008). Cosmic Sparks from Superconducting Strings. *Physical Review Letters*, 101 (14), 1301–1305. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevlett.101.141301>
19. Siemens, X., Creighton, J., Maor, I., Majumder, S. R., Cannon, K., Read, J. (2006). Gravitational wave bursts from cosmic (super)strings: Quantitative analysis and constraints. *Physical Review D*, 73 (10), 5001–5018. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevd.73.105001>
20. Ringeval, C., Sakellariadou, M., Bouchet, F. R. (2007). Cosmological evolution of cosmic string loops. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 2007 (2), 23–35. doi: <http://doi.org/10.1088/1475-7516/2007/02/023>
21. Berezhinsky, V., Hnatyk, B., Vilenkin, A. (2001). Gamma ray bursts from superconducting cosmic strings. *Physical Review D*, 64 (4), 3004–3030. doi: <http://doi.org/10.1103/physrevd.64.043004>

Received date 04.10.2019

Accepted date 30.10.2019

Published date 30.11.2019

Задорожна Лідія Володимирівна, кандидат фізико-математичних наук, кафедра квантової теорії поля Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033
E-mail: Zadorozhna_Lida@ukr.net

Теслик Олена Миколаївна, кандидат фізико-математичних наук, кафедра квантової теорії поля, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 60, м. Київ, Україна, 01033
E-mail: ten@univ.kiev.ua