

Л.В. ЗАДОРОЖНА,¹ Б.І. ГНАТИК,² Ю.О. СИТЕНКО³

¹ Київський національний університет імені Тараса Шевченка, фізичний факультет
(Просп. Академіка Глушкова, 2, Київ 03680; e-mail: Zadorozhna_Lida@ukr.net)

² Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Астрономічна обсерваторія
(Вул. Обсерваторна, 3, Київ 04053; e-mail: hmatyk@observ.univ.kiev.ua)

³ Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголобова НАН України
(Вул. Метрологічна, 14b, Київ 03143; e-mail: yusitenko@bitp.kiev.ua)

МАГНІТНЕ ПОЛЕ КОСМІЧНИХ СТРУН У РАНЬОМУ ВСЕСВІТІ

УДК 524.7

Космічні струни – топологічні дефекти, що могли утворюватися під час фазових переходів зі спонтанно порушеною симетрією у ранньому Всесвіті. В роботі розглянута можливість утворення магнітного поля навколо струни енергетичного масштабу Великого Об'єднання в умовах раннього Всесвіту, одразу після фазового переходу деконфайнмент–конфайнмент. Навколо космічної струни у вакуумі псевдоскалярної матерії, що складається із заряджених піонів, індуються коловий струм та магнітне поле, напрямлене вздовж струни. В роботі досліджено взаємодію магнітної силової трубки, що оточує струну – магнітосфери струни – з космічною плазмою в ранньому Всесвіті. Проаналізовано можливість замагнічення оточуючої струну плазми внаслідок її взаємодії з магнітним полем струни.

Ключові слова: космічні струни, фазовий перехід, вакуумний поляризаційний ефект, ультрарелятивістська плазма, вакуум псевдоскалярної матерії із заряджених піонів, ударна хвиля обтікання, магнітна трубка.

1. Вступ

Згідно зі стандартною космологічною моделлю, Всесвіт, починаючи з моменту Великого Вибуху, розширюється та охолоджується, залишаючись в цілому однорідним та ізотропним. Є підстави вважати, що в процесі охолодження Всесвіт проходить через ланцюжок фазових переходів [1, 2]. Фазовий перехід, пов'язаний з відділенням сильної взаємодії від електрослабкої – кінець епохи Великого об'єднання взаємодій (GUT) відбувся через 10^{-35} с після моменту Великого Вибуху при температурі $2 \cdot 10^{16}$ GeV. Такий фазовий перехід супроводжується порушенням симетрії з вищої, яка властива єдиній взаємодії, до симетрій, які властиві компонентам при низьких температурах [3]. Розширення по-

чатково причинно-незв'язаних областей нової фази із різними вакуумними станами, зумовленими спонтанним порушенням симетрії, може привести до виникнення на границях контакту цих областей топологічних дефектів. Космічні струни є одним з типів топологічних дефектів, які можуть формуватись в результаті фазового переходу зі спонтанним порушенням симетрії в ранньому Всесвіті [4–6].

Через 10^{-10} с після Великого Вибуху відбувається розділення електрослабкої взаємодії. Коли температура падає нижче 124 GeV, починається фаза з порушеною електрослабкою симетрією з ненульовим хіггсівським конденсатом та масивними W^{\pm} , Z бозонами. Перехід деконфайнмент–конфайнмент, тобто від кварк-глюонної плазми до адронів, відбувся при охолодженні матерії до температури нижче 200 MeV через 10^{-5} с після моменту Великого Вибуху [7, 8].

© Л.В. ЗАДОРОЖНА, Б.І. ГНАТИК,
Ю.О. СИТЕНКО, 2013

ISSN 0372-400X. Укр. фіз. журн. 2013. Т. 58, № 4

Лінійні дефекти – космічні струни – формуються в переважній більшості теоретичних моделей раннього Всесвіту [2]. Топологічно стабільні струни не мають кінців, вони можуть бути нескінченними або формувати замкнуті петлі. Маса на одиницю довжини струни та натяг струни (у фундаментальній системі одиниць $\hbar = c = k_B = 1$) є порядку $\mu \sim \eta^2$, де η – енергетичний масштаб порушення симетрії. Він визначається температурою фазового переходу у Всесвіті та, в свою чергу, визначає масу поля Хіггса m_H : $\eta \sim m_H$.

Для струн масштабу Великого об'єднання маса одиниці довжини становить 10^{22} г/см, поперечний радіус струни r_0 визначається зі співвідношення $r_0 m_H \sim 1$, для GUT-струн $r_0 \sim 10^{-30}$ см, внаслідок суттєвого натягу сегменти струни рухаються зі швидкостями $V_s = \beta_s c$, близькими до швидкості світла c , середнє значення швидкості в межах кореляційної довжини наближено становить $\langle V \rangle \sim 0,15c$, середньоквадратична швидкість руху струни в радіаційно-домінуючу епоху $V_{rms} \sim 0,62c$ [5].

2. Магнітне поле навколо GUT-струни

В присутності зарядженого поля всередині, струни можуть поводити себе як надпровідники [9], тому при русі надпровідної струни, наприклад, у міжгалактичному магнітному полі в ній генеруватиметься струм, що тече вздовж струни, а навколо струни існуватиме магнітосфера із власного магнітного поля струни. При релятивістському русі такої надпровідної струни в космічній плазмі, взаємодія магнітного поля струни з космічною плазмою буде призводити до генерації ударної хвилі навколо струни [10]. На фронті ударної хвилі частинки космічної плазми прискорюватимуться до високих енергій і випромінюватимуть електромагнітні хвилі в широкому діапазоні енергій. В роботах [11, 12] детально описано генерацію нетеплового випромінювання при взаємодії надпровідної струни з космічною плазмою.

У роботі [13] (див. також [14, 15]) показано, що магнітне поле може генеруватись біля поверхні навіть звичайної (не надпровідної) струни, внаслідок ефектів поляризації вакууму квантованого поля зарядженої матерії навколо струни. А саме, локальна космічна струна, що характеризується натягом $\mu \sim m_H^2$ та потоком Φ калібрувального по-

ля всередині струни, індукує у вакуумі струм j , що циркулює навколо струни, та магнітне поле B , що направлене вздовж струни. Обидві величини спадають експоненційно на великих відстанях від струни і пов'язані співвідношенням

$$B(r) = \int_r^\infty dr \frac{\nu}{r} e j(r), \quad (1)$$

де $\nu = (1 - 4G\mu)^{-1}$ і e – електричний заряд квантованого поля матерії. У випадку поля з масою m та нульовим спіном повний потік індукованого магнітного поля є

$$\Phi_B = \frac{e}{6\pi} \left(F - \frac{1}{2}\right) F(1 - F) \nu^2 \ln \frac{m_H}{m}, \quad (2)$$

де $F = e\Phi(2\pi\hbar c)^{-1} - \llbracket e\Phi(2\pi\hbar c)^{-1} \rrbracket$, а $\llbracket u \rrbracket$ позначає цілу частину величини u [13].

Розглянемо космічну струну масштабу Великого об'єднання взаємодій (GUT-струну) та її вплив на вакуум псевдоскалярної матерії, що складається із заряджених піонів. Така матерія виникає на ранній стадії еволюції Всесвіту одразу після фазового переходу деконфайнмент–конфайнмент у результаті зв'язування кварків u (\bar{u}) та \bar{d} (d) в π^\pm -мезони [16]. У вакуумі навколо струни індукується магнітне поле, яке згідно з [13] задається таким виразом:

$$B(r) \approx \frac{e [F \sin((1 - F)\pi) - (1 - F) \sin(F\pi)]}{2(4\pi)^2} \frac{\hbar c}{E_{\pi^\pm}} \times e^{-2 \frac{E_{\pi^\pm}}{\hbar c} r} r^{-3}, \quad (3)$$

де $E_{\pi^\pm} = m_{\pi^\pm} c^2$, m_{π^\pm} – маса зарядженого піонного поля, також враховано, що $\nu_{GUT} \approx 1$. Для значень F , що відповідають максимальному значенню Φ_B ($F_1 \approx 0,8$, $F_2 \approx 0,2$), отримаємо

$$B(r) = B_0 \frac{e^{-2r/r_B}}{(r/r_B)^3} \approx 2,7 \cdot 10^{13} \frac{e^{-2r/r_B}}{(r/r_B)^3} \text{ (Гс)}, \quad (4)$$

враховуючи те, що для магнітного поля можна ввести характерний масштабний фактор $r_B = \hbar c / E_{\pi^\pm} = 1,4 \cdot 10^{-13}$ см.

3. Характеристики плазми навколо GUT-струни

На ранній стадії еволюції Всесвіту, що розглядається, магнітне поле струни буде взаємодіяти з

оточуючою космічною плазмою. При високих температурах, якими характеризується ранній Всесвіт, швидкість реакцій між частинками вище характерного часу – темпу розширення Всесвіту, космічна плазма знаходиться в тепловій рівновазі з електромагнітним випромінюванням. Основний внесок у густину енергії Всесвіту дають ультрарелятивістські частинки, для яких за даних умов $m_i c^2 \ll k_B T(t)$, $\mu_i = 0$, де $T(t)$ – рівноважна температура на момент космологічного часу t , m_i – маса i -го типу частинок, μ_i – хімічний потенціал [17]. Тоді густина енергії може бути апроксимована таким чином [16]:

$$e_{\text{th}} = \left(\sum_{\text{b}} N_{\text{b}} + \frac{7}{8} \sum_{\text{f}} N_{\text{f}} \right) \frac{\pi^2 k_{\text{B}}^4 T^4}{30 \hbar^3 c^3} = \frac{\pi^2}{30} N(T) \frac{k_{\text{B}}^4 T^4}{\hbar^3 c^3}, \quad (5)$$

де N_{b} , N_{f} – число спіральних станів (проекцій спіна на напрямок руху) кожного бозона та ферміона відповідно. Підсумовування здійснюється за всіма бозонними та ферміонними станами, $N(T)$ – ефективна кількість ступенів вільності. Кількість ступенів вільності залежить від складу Всесвіту, тому змінюється залежно від температури. Так, $N(m_{\pi^\pm} c^2 < k_B T < k_B T_c) = 69/4$, де $k_B T_c = 200$ МеВ – температура фазового переходу деконфайнмент–конфайнмент. Відзначимо, що густина енергії за даної температури $e_{\text{th}} = 1,9 \cdot 10^{36}$ ерг/см³.

Залежність між температурою T у Всесвіті і часом з моменту Великого Вибуху t в радіаційно-домінуючу епоху виражається простим співвідношенням $t T_{\text{MeV}}^2 = 2,4 [N(T)]^{-1/2}$, де t вимірюється в секундах, а T_{MeV} у МеВ [16]. Час, що відповідає переходу деконфайнмент–конфайнмент $t_c = 1,4 \cdot 10^{-5}$ с.

З виразу для концентрації ультрарелятивістських частинок [17]:

$$n = \left(\sum_{\text{b}} N_{\text{b}} + \frac{3}{4} \sum_{\text{f}} N_{\text{f}} \right) \frac{\zeta(3) k_{\text{B}}^3 T^3}{\pi^2 \hbar^3 c^3}, \quad (6)$$

де значення дзета-функції $\zeta(3) = 1,2$, можна оцінити концентрацію заряджених частинок (при температурі $m_{\pi^\pm} c^2 < k_B T < k_B T_c$ ці частинки e^\pm , μ^\pm , π^\pm): $n_{\text{ch}} = 1,0 \cdot 10^{39}$ см⁻³ та середню відстань

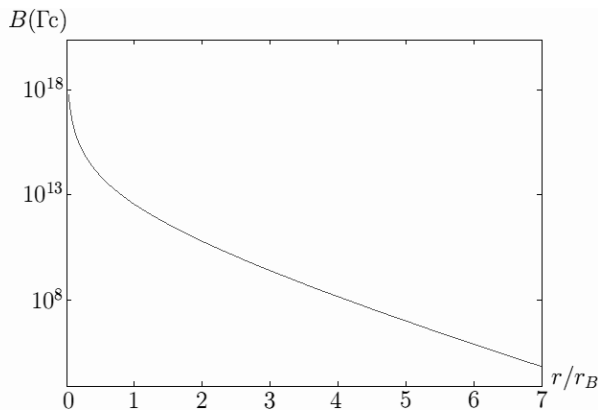
між частинками $d_{\text{ch}} = n_{\text{ch}}^{-1/3}$, звідки знаходимо $d_{\text{ch}} = 9,9 \cdot 10^{-14}$ см при $T = T_c$. Характерний масштаб магнітного поля r_{B} виявляється близьким до середньої відстані між зарядженими частинками: $r_{\text{B}} \sim d_{\text{ch}}$.

Оцінимо також довжину вільного пробігу зарядженої частинки за даної температури. Енергія ультрарелятивістської частинки задається співвідношенням $E \approx cp = 3k_B T$, де p – імпульс. Довжина вільного пробігу $\lambda \sim 1/(\sum_i \sigma_i n_i)$, де n_i – концентрація частинок i -го сорту, σ_i – переріз розсіяння на частинці i -го сорту. Враховуючи те, що всі перерізи розсіяння для електромагнітної взаємодії $\sigma_i \sim e^4/E^2$, де e – заряд електрона, при $T = T_c$ довжина вільного пробігу є порядку $\lambda \sim 10^{-8}$ см.

При $T \sim 100$ МеВ у космічній плазмі концентрація нерелятивістських частинок мала в порівнянні з концентрацією фотонів. Баріони є нерелятивістськими і їх загальна концентрація $n_{\text{bar}} \sim 10^{-9} n_\gamma \sim 10^{29}$ см⁻³, де n_γ – концентрація фотонів [17], тобто відношення числа баріонів до числа фотонів по порядку величини збігається з величиною баріонної асиметрії у Всесвіті.

4. Магнітосфера струни та передача магнітного поля в космічну плазму

Оточена оболонкоподібним магнітним полем (магнітною силовою трубкою) струна рухається з типово релятивістською швидкістю крізь космічну плазму густини ρ (зі швидкістю, загалом, вищою від швидкості звуку в плазмі ультрарелятивістських частинок $a_s = c/\sqrt{3}$), тому, в рамках гідродинамічного наближення, обтікання струни релятивістським потоком плазми (в системі відліку струни), аналогічно до нерелятивістського випадку обтікання надзвуковим сонячним вітром земної магнітосфери, приводить до виникнення ударної хвилі в набігаючій плазмі та контактного розриву між післяударною плазмою та магнітосферою струни [10, 11]. Радіус ударної хвилі R_{sh} в напрямку руху струни визначається рівністю тиску набігаючої плазми $P = P_{\text{th}} + P_{\text{dyn}}$, де P_{th} – тепловий тиск ультрарелятивістського газу, $P_{\text{dyn}} = \gamma_s^2 \rho c^2$ – динамічний тиск, та тиску магнітного поля $P_{\text{B}} = B^2(R_{\text{sh}})/8\pi \approx B_0^2 r_{\text{B}}^6 / (8\pi r_{\text{sh}}^6)$ в деформованій потоком плазми магнітосфері, де γ_s – лоренц-фактор струни і магнітосфери відносно плазми ($\gamma_s^2 \geq 1,5$).



Зміна магнітного поля B з відстанню від струни r

У такій гідродинамічній картині обтікання магнітосфери струни космічною плазмою можливі два канали появи магнітного поля в плазмі. Один з них пов'язаний із виникненням нестійкостей контактної розриву на межі магнітосфера-післяударний потік, внаслідок чого частина потоку плазми стане замагніченою з подальшим посиленням поля в турбулентному потоці до характерних для релятивістських потоків значень $e_B = \epsilon_B e_{th}$, тобто густина енергії турбулентного магнітного поля стає співмірною ($\epsilon_B \sim 0,01-0,1$) з густиною теплової енергії плазми e_{th} .

Інший канал пов'язаний із виникненням магнітного поля в околі ударної хвилі в немагнітній плазмі. Це поле зноситиметься в післяударну область, величина його залежатиме від співвідношення дисипативних та посилюючих поле процесів.

Однак в ситуації, що нами розглядається, взаємодії магнітного поля струни з космічною плазмою застосування гідродинамічного наближення є проблематичним. Прирівнюючи тиск налітаючої плазми $P = P_{th} + P_{dyn}$ та тиск магнітного поля $P_B(R_{sh})$, можемо розрахувати в гідродинамічному наближенні радіус ударної хвилі:

$$R_{sh} \approx r_B \left(\frac{B_0}{\sqrt{8\pi P}} \right)^{1/3} = 2,4 \cdot 10^{-15} \text{ см.} \quad (7)$$

Для застосовності гідродинамічного наближення розміри ударної хвилі та контактної розриву повинні суттєво перевищувати довжину вільного пробігу частинок плазми. В нашому ж випадку умова гідродинамічного наближення не виконува-

тиметься, взаємодія струна – частинки плазми зводиться до окремих актів розсіяння (відхилення траєкторії) заряджених частинок у магнітному полі струни. Передача магнітного поля в плазму в цьому випадку вимагає окремого розгляду. На якісному рівні можемо вважати, що при обтіканні магнітної трубки струни набігаючою плазмою остання захоплює частину магнітного потоку, який формується силовими лініями, що знаходяться на відстані від струни, більшій, ніж середня відстань між частинками d_{ch} . Оскільки на хаблівський об'єм $\sim r_h^3 \sim (ct)^3$ припадає $\sim r_h \sim ct$ довжини струни, за одиницю часу плазма зносить магнітне поле з потоком $d\Phi_{cap}/dt \sim V_s d_{ch} B(d_{ch})$ та енергією $dW_{cap}/dt = V_s r_h d_{ch} (B^2(d_{ch})/8\pi)$. Внаслідок швидкого спадання магнітного поля з відстанню від струни ефективний час передачі енергії магнітного поля в плазму дорівнює $\Delta t \sim t_c$, а передана енергія в хаблівському об'ємі $\Delta W_{cap} \sim (dW_{cap}/dt) \Delta t \sim \beta_s r_h^2(t_c) d_{ch} e_B(d_{ch})$, становить дуже незначну долю $\sim (d_{ch}/r_h(t_c)) (e_B(d_{ch})/e_{th}(t_c)) \sim 10^{-18} \cdot 10^{-11} \sim 10^{-29}$ теплової енергії. Подальше протиборство процесів дисипації та посилення магнітного поля динамопроцесами визначатиме кінцевий внесок космічних струн у генерацію спостережуваного космологічного магнітного поля [18].

5. Обговорення та висновки

У роботі розглянуто генерацію магнітного поля навколо космічної струни енергетичного масштабу Великого Об'єднання в ранньому Всесвіті після фазового переходу деконфайнмент-конфайнмент. Навколо космічної струни у вакуумі псевдоскалярної матерії, що складається із заряджених піонів, індукується магнітне поле, направлене вздовж струни. На рисунку зображена зміна магнітного поля з відстанню від струни. Ми дослідили взаємодію магнітного поля навколо струни з ультрарелятивістською космічною плазмою. Зокрема, визначено характеристики магнітного поля та термодинамічні характеристики плазми у ранньому Всесвіті після фазового переходу деконфайнмент-конфайнмент. Показано, що характерний масштаб сформованої силової трубки магнітного поля співмірний з середньою відстанню між зарядженими частинками плазми та менший від середньої довжини їхнього вільного пробігу, тому при характерних релятивістських швидкостях струни в ко-

смічній плазмі остання обдиратиме магнітне поле тільки на відносно великих відстанях від струни – порядку відстані між частинками плазми, де магнітне поле вже суттєво подавлене. В результаті в плазму передаються малі значення потоку та енергії магнітного поля. Однак результуюче значення переданого в плазму поля залежатиме також від подальшої його еволюції, зумовленої як дисипативними, так і підсилюючими (динамо) процесами.

1. B. Kampfer, *Ann. Phys. (Leipzig)* **9**, 605, (2000).
2. J. Rocher, R. Jeannerot, and M. Sakellariadou, in *Proceedings of the 39-th Rencontres de Moriond (La Thuile, 2004)*, p. XXX.
3. S. Weinberg, *Phys. Rev. D* **9**, 3357 (1974).
4. T.W.B. Kibble, *J. Phys. A* **9**, 1387 (1976).
5. A. Vilenkin and E.P.S. Shellard, *Cosmic Strings and Other Topological Defects* (Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1994).
6. A. Vilenkin, in *Inflating Horizons of Particle Astrophysics and Cosmology*, edited by H. Suzuki, J. Yokoyama, Y. Suto, and K. Sato (Universal Academy Press, Tokyo, 2006), p. XXX.
7. S. Schettler, T. Boeckel, and J. Schaffner-Bielich, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **66**, 266 (2011).
8. W.-Y.P. Hwang and S.P. Kim, arXiv:astro-ph/1110.1448v1.
9. J.P. Ostriker, C. Thompson, and E. Witten, *Phys. Lett.* **180**, 231 (1986).
10. E. Chudnovsky, G. Field, D. Spergel, and A. Vilenkin, *Phys. Rev. D* **34**, 4944, (1986).
11. L.V. Zadorozhna and B.I. Hnatyk, *Ukr. J. Phys.* **54**, 1044 (2009).
12. L.V. Zadorozhna and B.I. Hnatyk, *Ukr. J. Phys.* **54**, 1149 (2009).
13. Yu.A. Sitenko and N.D. Vlasii, *Classical Quant. Grav.* **26**, 195009 (2009).
14. Yu.A. Sitenko and A.Yu. Babansky, *Mod. Phys. Lett. A* **13**, 379 (1998).
15. Ю.А. Ситенко, А.Ю. Бабанский, *ЯФ* **61**, 1706 (1998).
16. K. Nakamura *et al.*, *Particle Physics Booklet* (2010) [<http://pdg.lbl.gov/>].
17. Д.С. Горбунов, В.А. Рубаков, *Введение в теорию ранней Вселенной. Теория горячего Большого взрыва* (Москва, 2006).

18. A. Kandus, K.E. Kunze, and Ch.G. Tsagas, *Phys. Rep.* **505**, 1 (2011).

Одержано 05.11.12

Л.В. Задорожна, Б.И. Гнатюк, Ю.А. Ситенко

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ КОСМИЧЕСКИХ СТРУН В РАННЕЙ ВСЕЛЕННОЙ

Резюме

Космические струны – топологические дефекты, которые могли образовываться во время фазовых переходов со спонтанным нарушением симметрии в ранней Вселенной. В работе рассмотрена возможность генерации магнитного поля вокруг космической струны энергетического масштаба Большого Объединения в условиях ранней Вселенной после фазового перехода деконфайнмент–конфайнмент. Вокруг космической струны в вакууме псевдоскалярной материи, состоящей из заряженных пионов, индуцируется круговой ток и магнитное поле, направленное вдоль струны. В работе исследуется взаимодействие магнитной силовой трубки, которая окружает струну – магнитосферы струны – с космической плазмой в ранней Вселенной. Анализируется возможность замагничивания окружающей струну плазмы в результате её взаимодействия с магнитным полем струны.

L.V. Zadorozhna, B.I. Hnatyk, Yu.A. Sitenko

MAGNETIC FIELD OF COSMIC STRINGS IN THE EARLY UNIVERSE

Summary

Cosmic strings are topological defects which can be formed as a result of phase transitions with a spontaneous symmetry breaking in the early Universe. The possibility of the generation of a magnetic field around a cosmic string on the Grand Unification energy scale (GUT scale) in the early Universe immediately after the termination of the deconfinement-confinement phase transition has been studied. It is found that a circular current and a magnetic field directed along the string are induced around the string in the vacuum of a pseudoscalar matter consisting of charged pions. We also studied the interaction between the magnetic flux tube surrounding the string (the string magnetosphere) and the cosmic plasma in the early Universe. A possibility of magnetization of the cosmic plasma surrounding the string owing to its interaction with the string magnetic field has been analyzed.