

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧНОЇ ФІЗИКИ ІМ. М.М.БОГОЛЮБОВА

Задорожна Лідія Володимирівна

УДК 524.7

**ЕЛЕКТРОДИНАМІЧНІ ТА ГРАВІТАЦІЙНІ ПРОЯВИ
КОСМІЧНИХ СТРУН**

01.04.02 – Теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ - 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі квантової теорії поля фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Гнатик Богдан Іванович,
Астрономічна обсерваторія Київського національного
університету імені Тараса Шевченка,
провідний науковий співробітник

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Заславський Олег Борисович,
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
провідний науковий співробітник

кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Штанов Юрій Володимирович,
Інститут теоретичної фізики імені М.М. Боголюбова
НАН України,
старший науковий співробітник

Захист відбудеться «__» _____ 2011 р. об __ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 в Інституті теоретичної фізики НАН України за адресою:
ІТФ НАН України, вул. Метрологічна, 14-Б, м. Київ, 03680 МСП.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці ІТФ НАНУ за адресою:
ІТФ НАН України, вул. Метрологічна, 14-Б, м. Київ, 03680 МСП.

Автореферат розіслано «__» _____ 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
доктор фізико-математичних наук

Кузьмичев В. Є.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підтвердження сучасних фундаментальних фізичних теорій потребують енергій, що є практично недосяжними на колайдерах елементарних частинок, проте були досяжними на ранній стадії еволюції Всесвіту. Існування топологічних дефектів – космічних струн, як і суперструн космологічних масштабів дасть змогу підтвердити чи спростувати деякі з цих теорій. Тому пошук, реєстрація та розробка нових методів спостереження космічних струн є однією з найбільш актуальних проблем астрофізики високих енергій та космології, що потребує вирішення. Космічні струни представляють собою один із видів топологічних дефектів, які можуть формуватися при фазових переходах у ранньому Всесвіті. Останніми роками великої популярності набули макроскопічні фундаментальні суперструни, що мають властивості, близькі до топологічних дефектів, і можуть, наприклад, формуватися як залишки анігіляції бран в моделях бранної інфляції. У багатьох моделях фізики елементарних частинок космічні струни формуються після інфляції, що приводить до їх впливу на формування великомасштабної структури Всесвіту, повного спектру флуктуацій густини та флуктуацій космічного мікрохвильового випромінювання.

Важливим напрямком дослідження є гравітаційно-лінзові прояви струн, зокрема, випромінювання гравітаційних хвиль та лінзування на нескінченних космічних струнах. Лінзи-петлі струн можуть викликати досить сильне підвищення яскравості фонових зір і бути спостереженими завдяки даному явищу. На сьогодні існує кілька повідомлень про можливе експериментальне виявлення космічних струн.

Ще одним напрямком дослідження є розгляд надпровідних космічних струн, всередині яких знаходяться і рухаються без опору безмасові носії заряду (нульові моди). В присутності струму вздовж струни, ці об'єкти стають джерелом електромагнітного випромінювання. При цьому, важливу роль відіграє випромінювання так званих "каспів" на струні. Каспи – періодично виникаючі негладкі (типу зламу) області струни, вершини яких одномоментно майже досягають швидкості світла. Каспи породжують напрямлені вздовж їх руху спалахи електромагнітного випромінювання.

Зазначені вище фактори вплинули на вибір тематики дослідження. Дисертаційна робота присвячена дослідженню ефекту гравітаційного лінзування деякими конфігураціями петель космічних (супер)струн. Вперше розглянуто взаємодію релятивістських надпровідних струн з космічною плазмою, розраховані повні потоки нетеплового випромінювання частинок космічної плазми, прискорених на фронті ударної хвилі навколо струн різних натягів, досліджено вплив релятивістських ефектів на випромінювання прикаспових областей струн.

Зв'язок з науковими програмами, планами та темами. Дослідження виконані на кафедрі квантової теорії поля фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках теми № 06БФ051-06 (номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ – 0106U006394), а також програми НАН України "Дослідження структури і складу Всесвіту, прихованої маси і темної енергії" (номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ – 0109U004217, шифр "Космомікрофізика").

Мета і задачі дослідження. Мета роботи полягає у встановленні спостережуваних характеристик гравітаційної та електромагнітної дії космічних струн. Для її досягнення було поставлено наступні задачі:

- дослідження проявів гравітаційного лінзування зір локального Всесвіту на петлях космічних струн;
- розрахунок характеристик нетеплового випромінювання ударних хвиль навколо магнітосфери надпровідних космічних струн;
- розрахунок впливу релятивістських ефектів на випромінювання прикаспових областей струн.

Об'єктами дослідження є космічні струни, суперструни та їх петлі.

Предметами дослідження є гравітаційне лінзування на петлях, електромагнітне випромінювання космічних струн.

В дисертації було використано *методи* аналітичного обрахунку, порівняльні *методи*, комп'ютерна обробка результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. Вперше детально досліджено аналітичний розв'язок для ефекту гравітаційного лінзування на сильноеліптичній конфігурації петлі, зокрема, показано, що при такому лінзуванні буде виникати як ефект подвійного зображення (аналогічно до лінзування на нескінченній струні), так і значного підсилення. Також оцінено можливість спостереження гравітаційного лінзування петлями зі значним підсиленням блиску зір нашої Галактики та галактики Андромеди та встановлено можливі обмеження на параметри петель.

Вперше розроблено модель генерації релятивістської ударної хвилі внаслідок взаємодії надпровідної космічної струни з міжгалактичною плазмою.

Вперше розраховано нетеплове випромінювання релятивістських електронів, прискорених на фронті релятивістської ударної хвилі навколо струни.

Вперше досліджено вплив релятивістських ефектів на випромінювання ультрарелятивістських ударних хвиль навколо прикаспових областей надпровідних космічних струн. Вперше оцінено можливості спостереження досліджуваного випромінювання існуючими детекторами.

Практичне значення отриманих результатів. Отримані аналітичні розв'язки гравітаційного лінзування петлями можуть бути застосовані для інтерпретації спостережуваних даних.

Отримані характеристики нетеплового випромінювання релятивістських ударних хвиль будуть мати важливе значення для інтерпретації даних спостережень астрофізичних об'єктів з ударними хвилями (гама-спалахів, пульсарних вітрів, релятивістських джетів в активних ядрах галактик, тощо).

Особистий внесок здобувача. Результати дисертації опубліковано в роботах [1–4]. В роботі [2] здобувачу належить аналіз розв'язків та оцінка можливості спостереження значного підсилення, що має місце при лінзуванні на легких петлях при астрономічних спостереженнях нашої Галактики і галактики Андромеди, оцінка можливості їх детектування, розрахунок параметрів лінзування. В роботах [1], [3] автор самостійно виконувала аналітичні та чисельні обрахунки потоків та частот нетеплового (синхротронного, синхротронного само-комптонівського та оберненого комптонівського) випромінювання частинок космічної плазми, прискорених на фронті ударної хвилі, при русі надпровідних космічних струн (чи петель як цілого) з помірно-релятивістським Лоренц-фактором. У роботі [4] автор дослідила вплив релятивістських ефектів на випромінювання прикаспових областей надпровідних струн, розрахувала потоки для двох можливих режимів охолодження плазми – швидкого та повільного, в залежності від Лоренц-фактору прикаспової області та оцінила можливості спостереження досліджуваного випромінювання існуючими детекторами.

Апробація результатів дисертації. Результати доповідалися і обговорювалися на таких конференціях:

- VII Міжнародна конференція „Релятивістська астрофізика, гравітація і космологія”, 23–25 травня 2007 р., Київ, Україна;
- Всеросійська конференція „Астрофізика високих енергій сьогодні и завтра”, 24–26 грудня 2007 р., Москва, Росія;
- Міжнародна школа „Introductory school on gauge theory/gravity correspondence”, 19–30 травня 2008 р., Трієст, Італія;
- XVI Міжнародна конференція молодих вчених „Астрономія і фізика космосу”, 27 квітня–2 травня 2009 р., Київ, Україна;
- IX Міжнародна конференція „Релятивістська астрофізика, гравітація і космологія”, 27–29 травня 2009 р., Київ, Україна.

Результати також доповідались на Об'єднаному астрофізичному семінарі АО КНУ, ГАО, ІТФ та астрофізичному семінарі АО КНУ.

Публікації. Результати дисертації опубліковано у 4 статтях у фахових журналах ([2–4] в Українському Фізичному Журналі та [1] у Віснику Київського національного університету імені Тараса Шевченка (Астрономія)) та у 4 тезах конференцій [5–9].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 173 найменувань. Повний обсяг дисертації становить 154 сторінки тексту, у т. ч. 29 рисунків та 11 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** сформульовано актуальність, мету та основні задачі роботи, відзначено наукову новизну отриманих результатів.

У **першому розділі** „Космічні струни: теоретичні моделі та спостережувані прояви (літературний огляд)” подано огляд публікацій, де висвітлено основні сучасні теоретичні концепції, що стосуються космічних струн і суперструн, наведено основні властивості даних об’єктів. Особлива увага приділяється їх астрофізичним проявам, можливостям пошуку та спостереження.

Оригінальні результати подано в розділах 2–4.

У **другому розділі** „Гравітаційне лінзування петлями космічних (супер)струн” розраховано загальні характеристики петель та досліджено їх характеристики як гравітаційних лінз.

В залежності від енергетичного масштабу, космічні (супер)струни характеризуються безрозмірним параметром – лінійною густиною струни $\mu \sim (\eta/\eta_{pl})^2$, де η – енергетичний масштаб утворення струни, η_{pl} – планківський масштаб енергії. Довжина петлі визначається співвідношенням $l = \alpha ct$, де t – час життя Всесвіту, $\alpha = \left(\frac{\Gamma G \mu}{c^2}\right)^n$, $\Gamma \approx 50$ – безрозмірний параметр, тут $n \geq 1$ – параметр, який має відношення до спектру збурень, що присутні на нескінченних струнах,

G – гравітаційна стала, c – швидкість світла. Маса струни $M = \mu l$, функція розподілу концентрації таких петель за даного α має вигляд $n = \frac{P^{-1}}{\alpha(ct)^3}$, де P ($1 \geq P \geq 10^{-3}$) – ймовірність відчеплення петлі при самоперетині, що не залежить від параметрів петлі. Середня відстань, на якій зустрічається така петля або середня відстань між петлями $d_s = n^{-1/3} = \alpha^{1/3} P^{1/3} ct$, середній кут, під яким петлю з середньої відстані буде видно для земного спостерігача $\theta = l/d_s = \alpha^{2/3} P^{-1/3}$, кут залежить лише від енергетичного масштабу струни.

Розглянемо 3 типи петель, що мають енергетичні масштаби між масштабом Великого Об’єднання та масштабом електрослабкого об’єднання (див. Табл.1):

Характеристики петель.

Енерг. масштаб	Параметри петель			
	l , пк	M , в масах Сонця	d_s , пк	θ
$\frac{GG\mu}{c^2}$				
10^{-6}	4.3	$1.8 \cdot 10^6$	$4.3 \cdot 10^5$	$2.1''$
10^{-8}	$4.3 \cdot 10^{-3}$	17.5	$4.3 \cdot 10^4$	$0.021''$
10^{-11}	$1.4 \cdot 10^{-7}$	$5.5 \cdot 10^{-7}$	$1.4 \cdot 10^3$	$0.000021''$

Особливістю гравітаційного лінзування на петлях є те, що кут відхилення променів у гравітаційному полі, для петлі, що лежить у площині, перпендикулярній до оптичної вісі, залежить лише від тієї конфігурації петлі, яку вона має на момент проходження незбуреного променя через площину лінзи. Це дає змогу розглядати одномоментно певну "заморожену" конфігурацію петлі, що значно спрощує аналітичний обрахунок лінзування.

При лінзуванні на паличкоподібній петлі можливе виникнення ефекту подвійного зображення і значного підсилення. Критична крива такої лінзи (див. Рис.1) лежить в площині зрізу, в області обмеженій двома зображеними лініями.

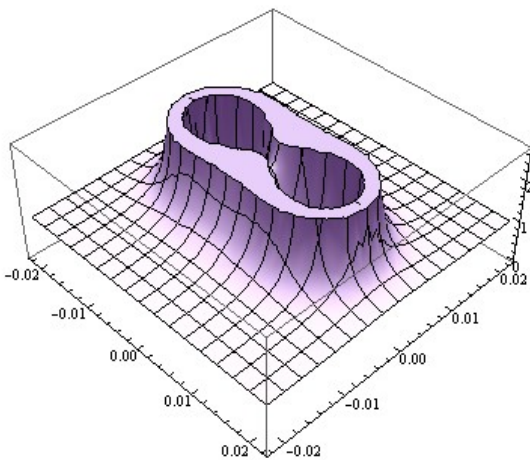


Рис.1. Вигляд критичної кривої еліптичної з великим ексцентриситетом (паличкоподібної) петлі-лінзи для випадку, коли радіус Ейнштейна петлі співрозмірний з розмірами системи. Переріз малюнку – площина лінзи, по перпендикулярній вісі відкладається підсилення.

У другому розділі були отримані аналітичні формули підсилення блиску фонових зір на двох конфігураціях петлі – еліптичної з великим ексцентриситетом (паличкоподібної) та симетричної колової петлі. Отримано вигляд критичних кривих таких об'єктів. Для порівняння розглянуто, як граничний перехід, випадки точкової лінзи та нескінченної прямої струни. Показана можливість значного підсилення інтенсивності джерела при лінзуванні на петлях. Чисельно отримані та детально досліджені залежності підсилення блиску фонові зорі від часу для сильноеліптичної петлі при різних взаємних розміщеннях петлі та зорі. Розраховано очікувані частоти спостереження гравітаційно-лінзових ефектів на петлях для нашої Галактики та на фоні галактики Андромеди. Оцінено можливості детектування цих об'єктів.

Результати даного розділу опубліковані у працях [2], [5].

У **третьому розділі** „Електромагнітне випромінювання космічних струн” проаналізовано прояв надпровідних космічних струн внаслідок нетеплового випромінювання електронів космічної плазми, прискорених на фронті ударної хвилі навколо магнітосфери струни.

У даному розділі розглядається рух надпровідної космічної петлі струни довжиною l в космічній плазмі з характерними параметрами: концентрація протонів і електронів $n_e \approx n_p = n_1 = 10^{-7} \text{ см}^{-3}$, $B_1 = B_{IGM} = 10^{-7} \text{ Гс}$ – магнітне поле, заморожене в міжгалактичну плазму. Під час коливань петлі в міжгалактичному магнітному полі в ній генерується електричний струм, який породжує навколо струни власне магнітне поле. Іонізована космічна плазма не може проникнути в область сильного магнітного поля біля струни B_2 , тому при обтіканні струни на деякій відстані r_s від неї формується ударна хвиля, що рухається з Лоренц-фактором γ_{sh} , який залежить від Лоренц-фактора петлі. За фронтом ударної хвилі потік міжгалактичної плазми в системі відліку струни гальмується і обтікає "магнітосферу" струни – область високого тиску магнітного поля, який зрівноважує динамічний тиск на неї плазми післяударної області.

Основний внесок в густину енергії e_2 за фронтом ударної хвилі дають релятивістські протони, проте МГД процеси за фронтом приводять до передачі деякої частини теплової енергії протонів до електронів (так що $e_e = \epsilon_e e_2$) та до генерації турбулентного магнітного поля ($e_B = \epsilon_B e_2$).

Аналіз релятивістських ударних хвиль в гама-спалахах показує, що розподіл релятивістських електронів в післяударній області є степеневим: $N(\gamma_e) = K' \gamma_e^{-p}$, де γ_e – Лоренц-фактор електронів, K' – постійна. Покладаємо $p > 2$ ($p \approx 2.25$ для гама-спалахів). Ці електрони будуть проявлятися внаслідок нетеплового випромінювання з післяударної області. Таке випромінювання – один з основних проявів надпровідних космічних струн в міжгалактичній плазмі.

Рухаючись в магнітному полі за фронтом ударної хвилі, електрони випромінюватимуть синхротронні фотони. Синхротронне випромінювання від степеневого розподілу можна апроксимувати ламаним енергетичним спектром з характерними частотами (див. Рис.2): ν_a – частота самопоглинання, ν_m та ν_c – характерні частоти випромінювання електронів з $\gamma_{e,\min}$ – мінімальним Лоренц-фактором та γ_c – критичним Лоренц-фактором, який визначає режим охолодження, відповідно. В нашому випадку реалізується режим повільного охолодження, коли основна частина електронів не встигає випромінити фотони за гідродинамічний час системи.

Максимум потоку випромінювання (тут і далі використовуємо позначення $\alpha_{-8} = \alpha/10^{-8}$, $B_{-7} = B/10^{-7}$, $n_{-7} = n/10^{-7}$ та ін.):

$$F_{V,\max} = \frac{V_{em}}{4\pi d_s} AK' v_m^{-(p-1)/2} = 2.1 \cdot 10^{-31} \gamma_2^{3.2} \gamma_{sh}^{-2} k_j^2 B_{-7}^2 \alpha_{-8}^{7/3} n_{-7}^{1/2} \epsilon_{B,-1}^{1/2} \epsilon_{e,-1}^{1.2} e p \epsilon / (cm^2 \cdot \Gamma \mu \cdot c),$$

$V_{em} = \frac{3}{2} \pi r_s^2 l \approx 2 \cdot 10^{-4} \gamma_{sh}^{-2} k_j^2 B_{-7}^2 \alpha_{-8}^3 n_{-7}^{-1} n \kappa^3$ – об'єм випромінюючої області, d_s – середня відстань

від земного спостерігача до струни, A – числовий коефіцієнт, $\gamma_2 \approx \sqrt{(\gamma_{sh}^2 + 1)/2}$ – Лоренц-фактор плазми за фронтом в лабораторній системі відліку, $k_j \approx 1$ – коефіцієнт. Максимум

потужності випромінювання припадає на частоту $\nu_m = \frac{q_e B_2}{4\pi m_e c} \gamma_{e,\min}^2 = 5.3 \cdot 10^4 \gamma_2^3 n_{-7}^{1/2} \epsilon_{B,-1}^{1/2} \epsilon_{e,-1}^2 \Gamma \mu$,

де $-q_e$ – заряд електрона.

Новонароджені синхротронні фотони можуть розсіюватись на релятивістських електронах за фронтом ударної хвилі. Зважаючи на те, що електрони ультрарелятивістські, при розсіянні матиме місце обернений ефект Комптона – електрони віддаватимуть енергію фотонам. Обернене комптонівське розсіяння "на власних" синхротронних фотонах має назву синхротронного само-компонівського випромінювання.

Інтегруючи спектр синхротронного випромінювання по розподілу електронів, отримується спектр само-компонівського випромінювання (див. Рис.2).

Максимум потоку випромінювання:

$$F_{V,\max}^{SSC} \approx 4x_0 \sigma_T n_2 r_s \frac{(p-1)(p+1/3)}{(p-1/3)(p+1)^2} F_V(2\nu_m) = 3.7 \cdot 10^{-47} \gamma_2^{4.2} \gamma_{sh}^{-3} k_j^3 B_{-7}^3 \alpha_{-8}^{10/3} n_{-7} \epsilon_{B,-1}^{1/2} \epsilon_{e,-1}^{1.2} e p \epsilon / (cm^2 \cdot \Gamma \mu \cdot c),$$

на частоті випромінювання $\nu_m^{SSC} = 4\gamma_{e,\min}^2 \nu_m = 2.1 \cdot 10^8 \gamma_2^5 n_{-7}^{1/2} \epsilon_{B,-1}^{1/2} \epsilon_{e,-1}^4 \Gamma \mu$, де $n_2 \approx 4\gamma_2 n_1$ –

концентрація частинок за фронтом, $x_0 \approx 0.5$ – числовий коефіцієнт, σ_T – томсонівський переріз.

Високоенергетичні електрони космічної плазми можуть також розсіювати фотони космічного мікрохвильового випромінювання, надаючи їм частину своєї енергії, відбувається обернений ефект Комптона. Спектральний потік має вигляд, аналогічний до синхротронного, лише зі своїми переломними частотами (Рис.2). Максимум спектрального потоку комптонівських фотонів при розсіянні релятивістських електронів на чорнотільному випромінюванні з температурою $T = 2.7K$ (на фотонах космічного мікрохвильового випромінювання):

$$F_{V,\max}^{IC} = \frac{V_{em}}{4\pi d_s} K' \frac{8\pi^2 r_e^2}{h^2 c^2} (kT)^{(p+5)/2} F(p) (h\nu_m^{IC})^{-(p-1)/2} = 1.1 \cdot 10^{-44} \gamma_2 \gamma_{sh}^{-2} k_j^2 B_{-7}^2 \alpha_{-8}^{7/3} e p \epsilon / (cm^2 \cdot \Gamma \mu \cdot c), r_e = q_e^2 / m_e c^2$$

– класичний радіус електрона, k – постійна Больцмана, $h = 2\pi \hbar$ – постійна Планка, $F(p)$

– враховує залежність від p . Максимум потужності на частоті

$$\nu_m^{IC} \approx \frac{3kT}{2h} \gamma_{e,\min}^2 = 8.1 \cdot 10^{13} \gamma_2^2 \epsilon_{e,-1}^2 \Gamma \mu.$$

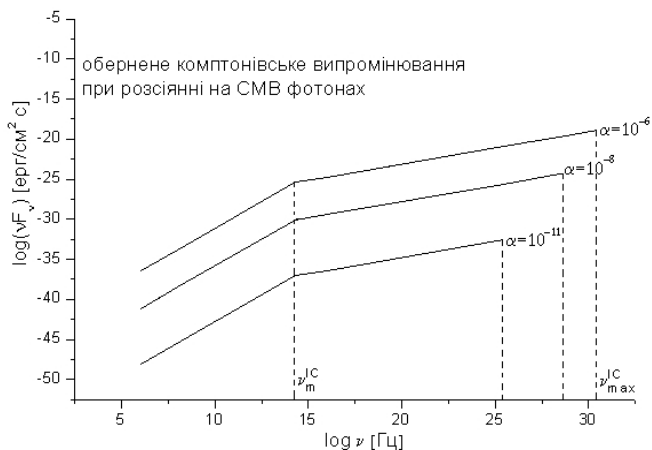
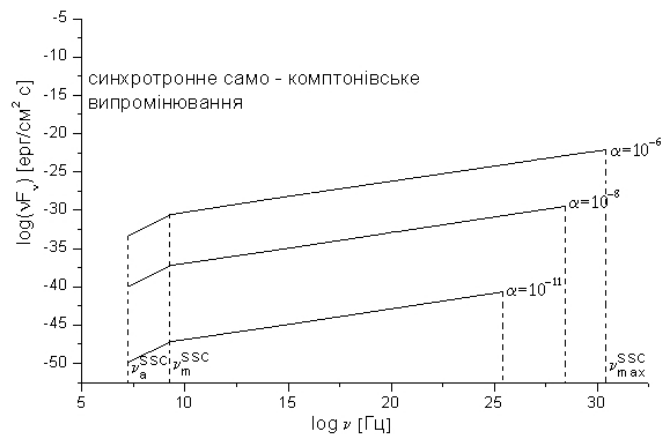
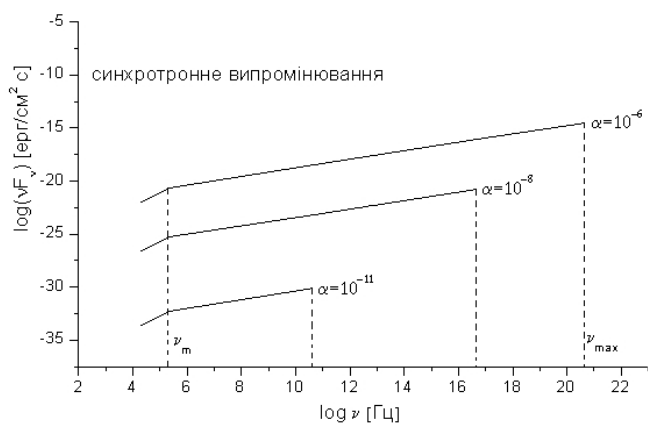


Рис.2. Очікуваний потік синхротронного, синхротронного само – комптонівського і оберненого комптон – випромінювання для петель різного натягу (лінійної густини) на середній відстані від земного спостерігача (при $n_1 = 10^{-7} \text{ см}^{-3}$, $B_1 = 10^{-7} \text{ Гс}$, $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.1$, $\gamma_{sh} = 2$).

Таким чином, в третьому розділі показано, що надпровідні струни в замагніченому міжгалактичному середовищі можуть бути потужними джерелами нетеплового випромінювання. Розраховано потоки та спектри синхротронного, синхротронного само-компонівського та оберненого комптонівського на реліктових фотонах випромінювання релятивістських електронів. Сучасними рентгеніськими та гама-телескопами можна виявити такі петлі на відносно близькій відстані до Землі – біля 0.1 Мпк.

Більше того, від прикаспових областей можуть очікуватися більш потужні, проте суттєво колімовані імпульси. Вони досліджуються в наступному розділі.

Результати даного розділу опубліковані у працях [1], [3], [6], [7].

У **четвертому розділі** „Спалахи електромагнітного випромінювання від прикаспових областей надпровідних космічних струн” розраховано характеристики нетеплового випромінювання від прикаспових областей надпровідних струн з врахуванням всіх важливих каналів випромінювання.

Зокрема, у даному розділі розглядається рух прикаспової ділянки петлі надпровідної струни у космічній плазмі з характеристиками: $n_e \approx n_p = n_1 = 10^{-7} (1+z)^3 \text{ см}^{-3}$, $B_1 = B_{IGM} = 10^{-7} (1+z)^2 \text{ Гс}$, де z – космологічне червоне зміщення. В системі відліку струни прикаспова ділянка з Лоренц-фактором γ_s матиме довжину $\Delta l' = l / \gamma_s^2$. Максимальне значення Лоренц-фактора прикаспової області визначається зворотною реакцією

зростаючого струму в прикасповій області

$$\gamma_{s,\max} = \frac{1}{k_j q_e B_{IGM} l} \left(\frac{\alpha \Gamma c^5}{\Gamma G} \right)^{1/2} = 7 \cdot 10^7 (1+z)^{-1/2} k_j^{-1} B_{-7}^{-1} \alpha_{-8}^{1/2}.$$

Розглядаємо ультрарелятивістську ударну хвилю навколо прикаспової області петлі. Розподіл електронів у післяударній області, аналогічно до попереднього розділу, вважаємо степеневим. Прискорені електрони, рухаючись в магнітному полі післяударної області, випромінюватимуть фотони в широкому інтервалі енергій. Механізм випромінювання – синхротронний, синхротронний само-комптонівський та обернений комптонівський на реліктових фотонах (див. Табл.2, Табл.3).

Для віддаленого спостерігача випромінювання від прикаспової області на струні концентруватиметься у вузькому пучку з кутом $\theta_s \sim 1/\gamma_s$, з максимальною концентрацією енергії в куті $\theta_{s,\min} \sim 1/\gamma_{s,\max}$. При переході до системи відліку зовнішнього спостерігача, частота випромінювання зсуватиметься на Доплер-фактор δ . Для $\theta_s \leq 1/\gamma_s$, $\delta \approx \gamma_s$.

Нетеплове випромінювання степеневого розподілу електронів апроксимується ламаним спектром (див. Рис.3, Рис.4). Порівнянням мінімального і критичного Лоренц-факторів електронів встановлюється їх режим охолодження – швидкий чи повільний. Режим повільного охолодження реалізується, коли основна частина електронів не встигає випромінити свою енергію за гідродинамічний час системи. Режим швидкого охолодження – основна частина електронів за гідродинамічний час системи втрачає енергію на випромінювання.

Таким чином, у четвертому розділі показано, що внаслідок релятивістської колімації потоку випромінювання та доплерівського зміщення його частоти, випромінювання космічних струн можна зареєструвати із космологічних відстаней. Потоки випромінювання періодичні, вузьконапрямлені та мають характер спалахів. Наведені дані щодо очікуваних характеристик імпульсів випромінювання для типових значень Лоренц-факторів прикаспової області для двох режимів охолодження – швидкого та повільного. Синхротронний спектр має максимум в жорсткому рентгені, а комптонівський тягнеться аж до ТеВ-ного діапазону. Очікувані потоки $\nu F_\nu \sim 10^{-12} - 10^{-14} \text{ erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$, зокрема, для струн масштабу Великого Об'єднання, можуть бути зареєстрованими за допомогою сучасних космічних рентгенівських та наземних черенковських телескопів (Chandra, XMM Newton, FERMI, H.E.S.S. тощо).

Таблиця 2

Оцінка потоку в одиничному логарифмічному інтервалі частот $\nu_c^{obs} F_{\nu,\max}^{obs}$, $\nu_c^{obs,SSC} F_{\nu,\max}^{obs,SSC}$, $\nu_c^{obs,IC} F_{\nu,\max}^{obs,IC}$ для режиму швидкого охолодження на середній відстані від земного спостерігача (при $n_1 = 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$, $B_1 = 10^{-7} \text{ Гс}$, $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.1$, $\gamma_s = 10^4$, $z = 2$).

Енерг. масштаб струни	Потоки, ($\text{erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{c})$)			
	α	$v_c^{obs} F_{v,max}^{obs}$	$v_c^{obs,SSC} F_{v,max}^{obs,SSC}$	$v_c^{obs,IC} F_{v,max}^{obs,IC}$
10^{-6}		$7.5 \cdot 10^{-9}$	$1.1 \cdot 10^{-18}$	$2.7 \cdot 10^{-13}$
10^{-8}		$8.4 \cdot 10^{-11}$	$1.3 \cdot 10^{-18}$	$2.6 \cdot 10^{-15}$

Таблиця 3

Оцінка потоку в одиничному логарифмічному інтервалі частот $v_m^{obs} F_{v,max}^{obs}$, $v_m^{obs,SSC} F_{v,max}^{obs,SSC}$, $v_m^{obs,IC} F_{v,max}^{obs,IC}$ для режиму повільного охолодження на середній відстані від земного спостерігача (при $n_1 = 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$, $B_1 = 10^{-7} \text{ Гс}$, $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.1$, $\gamma_s = 10^2$, $z = 2$).

Енерг. масштаб струни	Потоки, ($\text{erg}/(\text{cm}^2 \cdot \text{c})$)			
	α	$v_m^{obs} F_{v,max}^{obs}$	$v_m^{obs,SSC} F_{v,max}^{obs,SSC}$	$v_m^{obs,IC} F_{v,max}^{obs,IC}$
10^{-6}		$4.3 \cdot 10^{-12}$	$2.6 \cdot 10^{-17}$	$1.5 \cdot 10^{-17}$
10^{-8}		$4.3 \cdot 10^{-18}$	$2.6 \cdot 10^{-25}$	$1.5 \cdot 10^{-23}$
10^{-11}		$4.3 \cdot 10^{-27}$	$2.6 \cdot 10^{-37}$	$1.5 \cdot 10^{-32}$

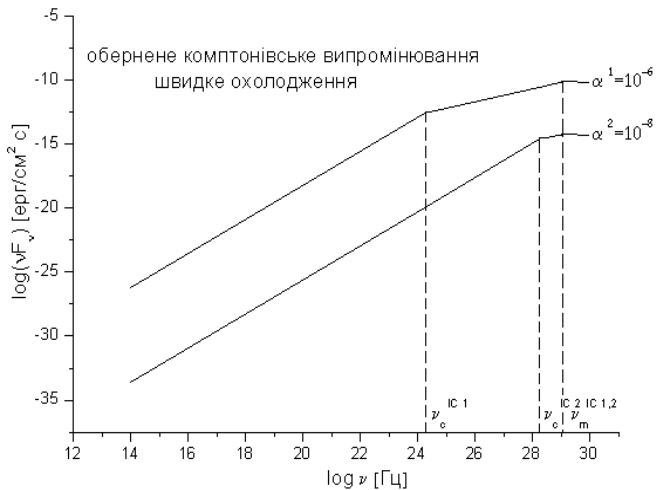
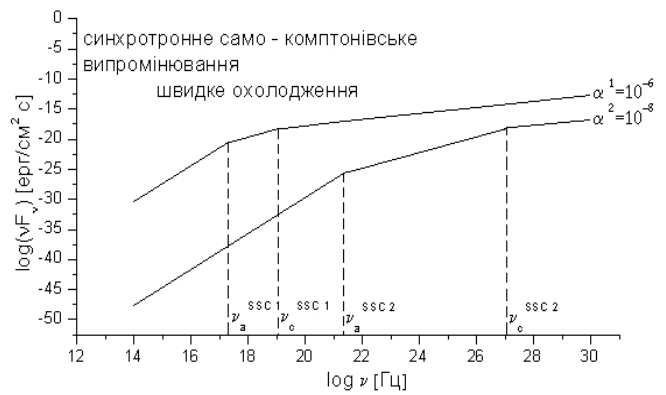
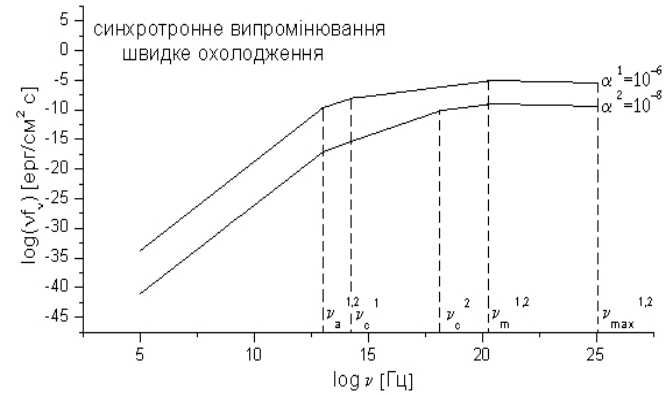


Рис.3. Спостережуваний потік синхротронного, синхротронного само-комптонівського і оберненого комптон-випромінювання при швидкому охолодженні для прикаспових областей петель різного натягу (при $n_1 = 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$, $B_1 = 10^{-7} \text{ Гс}$, $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.1$, $\gamma_s = 10^4$, $z = 2$).

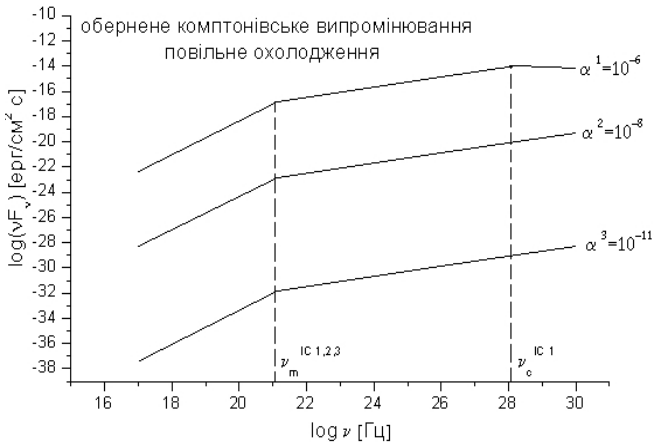
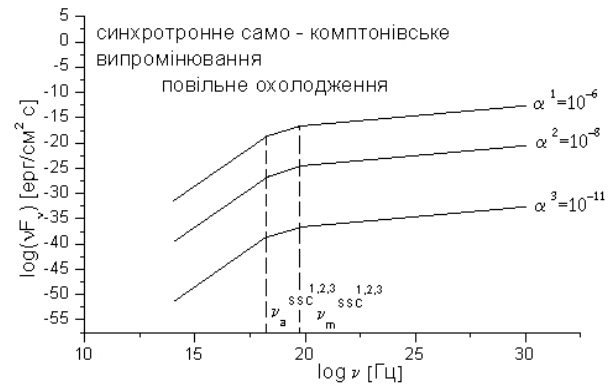
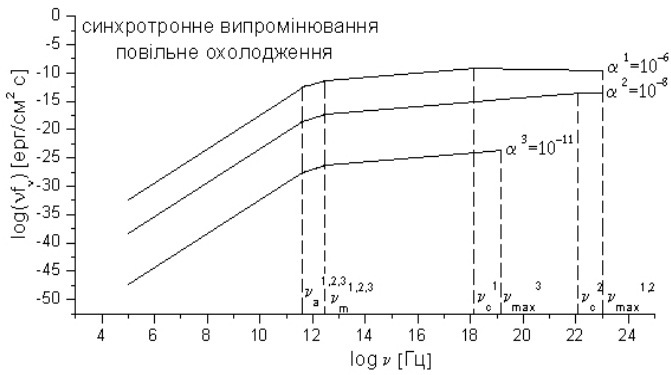


Рис.4. Спостережуваний потік синхротронного, синхротронного само-комптонівського і оберненого комптонівського випромінювання при повільному охолодженні для прикаспових областей петель різного натягу (при $n_1 = 10^{-7} \text{ см}^{-3}$, $B_1 = 10^{-7} \text{ Гс}$, $\epsilon_e = 0.1$, $\epsilon_B = 0.1$, $\gamma_s = 10^2$, $z = 2$).

Результати даного розділу опубліковані у працях [4], [8].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі досліджено основні астрофізичні прояви космічних струн та суперструн. Зокрема, розглянуто гравітаційне лінзування деякими конфігураціями петель, досліджено особливості гравітаційного лінзування на даних об'єктах. Обраховано прояв надпровідних струн завдяки нетепловому випромінюванню частинок космічної плазми, прискореної на фронті ударної хвилі навколо петлі струни. Основними результатами дисертаційної роботи є наступні:

1. Розрахунок основних характеристик петель та їх гравітаційно-лінзових характеристик, зокрема:
 - Вперше чисельно та аналітично досліджено розв'язок для ефекту гравітаційного лінзування на сильноеліптичній конфігурації петлі, зокрема, показано, що при цьому можливе одночасне виникнення як ефекту подвійного зображення, так і його значного підсилення.
 - Оцінено можливість детектування подій гравітаційного лінзування зір нашої Галактики та галактики Андромеди петлями та встановлено можливі обмеження на їх параметри із відсутності детектування.
2. Вперше розроблено модель генерації релятивістської ударної хвилі при русі надпровідної космічної струни у міжгалактичній плазмі.

3. Вперше досліджено та проаналізовано нетеплове (синхротронне, синхротронне само-комptonівське та обернене комptonівське) випромінювання частинок космічної плазми, прискорених на фронті ударної хвилі, при русі надпровідних космічних струн (чи петель як цілого) з помірно-релятивістським Лоренц-фактором, зокрема, розраховано основні частоти та потоки випромінювання.
4. Вперше досліджено вплив релятивістських ефектів на випромінювання ультрарелятивістських ударних хвиль, що утворюються внаслідок взаємодії прикаспових областей надпровідних струн з космічною плазмою, випромінювання розраховано для двох можливих режимів охолодження плазми.
 - Розраховано потоки та основні частоти синхротронного, синхротронного само-комptonівського та оберненого комptonівського випромінювання електронів від навколоприкаспової області надпровідної струни.
 - Розглянуто два можливих режими охолодження плазми – швидкий та повільний, в залежності від Лоренц-фактору прикаспової області.
5. Оцінено можливості спостереження досліджуваного випромінювання за допомогою сучасних детекторів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Опубліковані статті за темою дисертації

1. Гнатик Б. І. Нетеплове випромінювання надпровідних космічних струн у замагніченому міжгалактичному середовищі / Б. І. Гнатик, Л. В. Задорожна // Вісник Університету. Астрономія. – 2006. – 43. – С. 15–20.
2. Гавриленко П. Г. Нерелятивістський випадок гравітаційного лінзування найпростішими петлями космічних струн / П. Г. Гавриленко, Л. В. Задорожна // Український Фізичний Журнал. – 2009. – 54, №3. – С. 322–327.
3. Задорожна Л. В. Електромагнітне випромінювання космічних струн / Л. В. Задорожна, Б. І. Гнатик // Український Фізичний Журнал. – 2009. – 54, №10. – С. 1044–1052.
4. Задорожна Л. В. Спалахи електромагнітного випромінювання від прикаспових областей надпровідних космічних струн / Л. В. Задорожна, Б. І. Гнатик // Український Фізичний Журнал. – 2009. – 54, №11. – С. 1152–1160.

Тези конференцій

5. Zadorozhna L. Gravitational lensing by cosmic string loops / L. Zadorozhna, B. Hnatyk // Abstracts of VII International Conference 'Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology' in honour of the centenary of Prof. O. F. Bogorodsky, Kyiv. – 2007. – P. 17–18.
6. Задорожная Л. В. Электромагнитное излучение частиц космической плазмы при движении космической струны в ней с релятивистской скоростью / Л. В. Задорожная, Б. И. Гнатик // Тезисы Всероссийской конференции "Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра", Москва. – 2007. – С. 12.

7. Zadorozhna L. Nonthermal Radiation of Superconducting Cosmic String in Magnetized Intergalactic Medium / L. Zadorozhna, B. Hnatyk // Abstracts of XVI Open Young Scientists Conference on Astronomy and Space Physics, Kyiv. – 2009. – P. 40.

8. Zadorozhna L. Electromagnetic radiation of superconducting cosmic strings / L. Zadorozhna, B. Hnatyk // Abstracts of IX International Conference ‘Relativistic Astrophysics, Gravitation and Cosmology’, Kyiv. – 2009. – P. 26.

АНОТАЦІЯ

Задорожна Л. В. Електродинамічні та гравітаційні прояви космічних струн. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, 2010.

В дисертації досліджено спостережувані характеристики гравітаційної та електромагнітної дії космічних струн. Розраховано загальні характеристики петель та їх характеристики як гравітаційних лінз, отримані аналітичні формули підсилення блиску фонових зір деякими конфігураціями петель, отримано та детально розглянуто вигляд критичних кривих таких об'єктів, показана можливість досить сильного підсилення інтенсивності джерела. Обчислено очікувані частоти спостереження подій зі значним підсиленням блиску, що мають місце при лінзуванні на легких петлях при астрономічних спостереженнях нашої Галактики та М31 – туманності Андромеди. Оцінено можливості детектування цих об'єктів.

В роботі розглянуто релятивістський рух та взаємодію надпровідної космічної струни з космічною плазмою. Надпровідні космічні струни містять в собі безмасові носії заряду, що рухаються вздовж струни без опору. Такі струни в міжгалактичному магнітному полі можуть бути джерелами потужного нетеплового випромінювання. В дисертації розроблено модель генерації релятивістської ударної хвилі навколо петлі струни, розраховано спектри синхротронного, синхротронного само-комптонівського та оберненого комптонівського випромінювання релятивістських електронів, прискорених на фронті ударної хвилі навколо струни.

Досліджено вплив релятивістських ефектів на випромінювання прикаспових областей надпровідних струн. Показано, що внаслідок релятивістської колімації потоку випромінювання та доплерівського зміщення його частоти, випромінювання космічних струн можна зареєструвати із космологічних відстаней. Потоки випромінювання періодичні, вузьконаправлені та мають характер спалахів. Розраховано характеристики нетеплового випромінювання від прикаспових областей струн з врахуванням всіх

важливих каналів випромінювання. Наведені дані щодо очікуваних характеристик імпульсів

випромінювання для типових значень Лоренц-факторів прикаспової області для двох режимів охолодження – швидкого та повільного. Показано, що синхротронний спектр має максимум в жорсткому рентгені, а комптонівський тягнеться аж до ТеВ-ного діапазону. Очікувані потоки $\nu^{obs} F_{\nu}^{obs} \sim 10^{-14} - 10^{-12} (erg / (cm^2 \cdot s))$, зокрема, для струн масштабу Великого Об'єднання, можуть бути зареєстрованими за допомогою сучасних космічних рентгенівських та наземних черенковських телескопів (Chandra, XMM Newton, FERMI, H.E.S.S., тощо).

Ключові слова: космічні струни та суперструни, гравітаційне лінзування, ударні хвилі, нетеплове випромінювання.

ABSTRACT

Zadorozhna L. V. Electrodynamical and gravitational detection of cosmic strings. – Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 01.04.02 – theoretical physics. – National Taras Shevchenko Kyiv University, Kyiv, 2010.

The thesis deals with the study of observed characteristics cosmic strings's gravitational and electromagnetic action. The main characteristics of cosmic (super)strings in local Universe are derived, their basic descriptions as gravitational lenses are counted. An explicit form of the lens equation is obtained and relations of magnification are derived for some configurations of loops, their critical curves are derived and considered. Expected rates of observation the lensing at light loops events with high amplification are counted for our Galaxy and on the background of M31 – nebula Andromeda. The possibility of detecting these objects is estimated.

In this work it is established relativistic motion and interaction between superconducting cosmic string and cosmic plasma. Strings can hold currents, effectively become electrically superconducting wires of astrophysical dimensions. Such strings can serve as powerful sources of nonthermal radiation in magnetized intergalactic medium. In the thesis it is developed a model of production the relativistic bow shock round string loop, calculated the expected synchrotron, synchrotron self-Compton and inverse Compton on CMB background radiation fluxes of electrons accelerated by bow shock wave.

The influence of relativistic effects on the emission of nearcusp superconducting cosmic string loop's regions is investigated. It is shown that as a result of flow's relativistic collimation and Doppler-shift of frequency radiation of cosmic strings (loops) can be registered at cosmological distance from the loops to observer. The fluxes of radiations are periodical, narrow-beam and alike strong bursts. It is calculated the characteristics of nonthermal radiation from nearcusp region with the consideration of all important emission channels. Derived

emitting fluxes for typical nearcusp region's Lorenz-factors are considered for different regimes of cooling – fast and slow. Synchrotron spectrum has maximum at hard X-ray diapason and Compton spectrum stretches till TeV diapason. Expected fluxes $\nu^{obs} F_{\nu}^{obs} \sim 10^{-14} - 10^{-12} (erg / (cm^2 \cdot s))$, specifically, for GUT scale strings, can be seen by modern cosmic X-rays and earth-based Cherenkov telescopes (Chandra, XMM Newton, FERMI, H.E.S.S., et al.).

Key words: cosmic strings and superstrings, gravitational lensing, bow shock wave, nonthermal radiation.

АННОТАЦИЯ

Задорожная Л. В. Электродинамические и гравитационные проявления космических струн. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, Киев, 2010.

В диссертации исследованы наблюдаемые характеристики гравитационного и электромагнитного действия космических струн. Посчитаны основные характеристики петель космических (супер)струн как гравитационных линз, получены аналитические формулы для гравитационного линзирования некоторыми конфигурациями петель, получены и рассмотрены их критические кривые. Посчитаны ожидаемые частоты наблюдения событий со значительным усилением при линзировании на лёгких петлях в нашей Галактике и на фоне М31 – туманности Андромеды. Оценена возможность детектирования этих объектов.

В работе рассмотрено релятивистское движение и взаимодействие сверхпроводимой космической струны с космической плазмой. Сверхпроводимые струны в межгалактическом магнитном поле могут быть источниками мощного нетеплового излучения. В диссертации разработана модель генерации релятивистской ударной волны вокруг петли струны, рассчитаны спектры синхротронного, синхротронного самокомптоновского и обратного комптоновского излучения релятивистских электронов, ускоренных на фронте ударной волны вокруг струны.

Также исследовано воздействие релятивистских эффектов на излучение прикасповых областей сверхпроводимых струн. Показано, что вследствие релятивистской коллимации потока излучения и доплеровского смещения его частоты, излучение космических струн (петель) можно зарегистрировать из космологических расстояний. Потоки излучения периодические, узконаправленные и имеют характер вспышек.

Рассчитаны характеристики нетеплового излучения с учётом всех важных каналов излучения. Рассмотрено разные режимы охлаждения – быстрое и медленное. Синхротронный спектр имеет максимум в жёстком рентгене, а комптоновский тянется до ТеВ-ного диапазона. Ожидаемые потоки $\nu^{obs} F_{\nu}^{obs} \sim 10^{-14} - 10^{-12} (\text{эрг}/(\text{см}^2 \cdot \text{с}))$, для струн масштаба Большого Объединения, могут быть зарегистрированы из космологических расстояний с помощью современных космических рентгеновских и наземных черенковских телескопов (Chandra, XMM Newton, FERMI, H.E.S.S., и др.).

Ключевые слова: космические струны и суперструны, гравитационное линзирование, ударные волны, нетепловое излучение.