

Національна академія наук України
Інститут теоретичної фізики ім. М. М. Боголюбова

Руденко Ігор Валентинович

УДК 530.145, 538.9

Народження частинок, генерація лептонної асиметрії
та еволюція магнітних полів у ранньому Всесвіті

Спеціальність 01.04.02 – теоретична фізика

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата фізико-математичних наук

Київ — 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Київському національному університеті імені Тараса Шевченка.

Науковий керівник: доктор фізико-математичних наук,
професор
Вільчинський Станіслав Йосипович
Київський національний університет
імені Тараса Шевченка,
завідувач кафедри квантової теорії поля,
фізичний факультет.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,
професор
Жук Олександр Іванович,
Науково-дослідний інститут
«Астрономічна обсерваторія»
Одеського національного університету
імені І.І. Мечникова
головний науковий співробітник

доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Болотін Юрій Львович,
Інститут теоретичної фізики ім. О.І.Ахієзера
Національного наукового центру
«Харківський фізико-технічний інститут»,
начальник відділу теоретико-групових властивостей
елементарних частинок, теорії ядра
і нелінійної механіки.

Захист відбудеться «29» червня 2017 р. об 11:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01 Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Інституту теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова Національної Академії Наук України за адресою: вул. Метрологічна 14-б, м. Київ, 03680, Україна.

Автореферат розісланий «26» травня 2017 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 26.191.01,
доктор фіз.-мат. наук

В. Є. Кузьмичев

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Спроби пояснити зроблені в другій половині минулого століття такі революційні відкриття, як прискорене розширення Всесвіту, баріонну асиметрію Всесвіту, анізотропію реліктового випромінювання, існування магнітних полів в космічних пустотах (войдах), існування Темної матерії в гало галактик призвели до докорінного перегляду основ космології раннього Всесвіту. В останні два десятиріччя космологія раннього Всесвіту розвивається особливо бурхливо, що пов'язано з не менш бурхливим прогресом в області фізики високих енергій, експерименти з якої дозволяють відтворити умови, характерні для перших секунд існування Всесвіту, а також з різким зростанням спостережуваних можливостей при дослідженні Всесвіту завдяки стрімкому розвитку космічної техніки, комп'ютерних технологій та рівня якості та можливостей космологічних місій. Такий бурхливий розвиток космології раннього Всесвіту продукує неперервний потік важливих задач, розв'язок яких дасть змогу прояснити, яким був наш Всесвіт в першу секунду свого існування. Так, існування Темної матерії у Всесвіті, а також його баріонна асиметрія, вказують на неповноту Стандартної моделі елементарних частинок та вимагають розширення та доповнення її секторів. Спостереження, які поступово підтверджують існування інфляційної фази в еволюції Всесвіту, роблять надзвичайно важливим дослідження механізмів народження елементарних частинок внаслідок розпаду інфлатонного поля на етапі післяінфляційного розігріву Всесвіту (рехітингу). Нещодавні спостереження відмінних від нуля значень напруженостей магнітного поля в космічних пустотах вказують на існування так званих зародкових магнітних полів у ранньому Всесвіті, які виникли до генерації структур у Всесвіті, і механізм виникнення яких залишається поки що нез'ясованим. В даній дисертаційній роботі досліджувались механізми генерації частинок на етапі попереднього розігріву в рамках інфляційної моделі Старобінського, генерація лептонної асиметрії Всесвіту в рамках розширення Стандартної Моделі елементарних частинок за рахунок введення в її лептонний сектор право-кіральних (стерильних) нейтрино, а також еволюція зародкових магнітних полів в релятивістській кірально-асиметричній космологічній плазмі. Всі ці задачі тісно пов'язані з вищеперерахованою проблематикою космології раннього Всесвіту, що й обумовлює актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Результати, що увійшли в дисертаційну роботу, були отримані на кафедрі квантової теорії поля фізичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка в рамках теми №06БФ051-06 “Дослідження в фізиці і астрофізиці високих енергій, фізиці елементарних частинок та конденсованого стану”, номер державної реєстрації в УкрІНТЕІ - 0106U006394. Науковий керівник – д.ф.-м.н., проф. Вільчинський Станіслав Йосипович.

Метою і задачею дослідження є дослідження фізичних процесів у ранньому Всесвіті: народження частинок на стадії попереднього розігріву в рамках інфляційної моделі Старобінського, генерація лептонної асиметрії в рамках розши-

рення Стандартної моделі фізики елементарних частинок за рахунок стерильних нейтрино та дослідження еволюції зародкових магнітних полів в первинній релятивістській плазмі з кіральною асиметрією. Для її досягнення було поставлено наступні задачі:

1. З'ясувати механізм народження частинок під час розігріву Всесвіту в інфляційній моделі Старобінського. Визначити, чи реалізується механізм резонансного народження частинок в такій моделі;
2. Враховуючи космологічне розширення Всесвіту отримати аналітичні вирази для ширин розпаду інфлатонного поля у випадку слабкої константи зв'язку цього поля з полями матерії. Зробити розрахунки для випадків народження бозонів та ферміонів внаслідок розпаду інфлатонного поля, а також для випадку саморозпаду інфлатона;
3. Вивести аналітичне співвідношення, яке описує процес генерації лептонної асиметрії Всесвіту в рамках розширення Стандартної Моделі елементарних частинок за рахунок введення в неї правокіральних нейтрино (моделі ν MSM);
4. На основі обмежень, накладених з умови успішної генерації Темної матерії в ранньому Всесвіті на значення величини Δ лептонної асиметрії $10^{-3} < \Delta < 2/11$, отримати обмеження на параметри моделі ν MSM, зокрема на значення мас нейтрино та на кути змішування стерильних нейтрино з активними нейтрино;
5. Вивести систему рівнянь, яка описує динамічні властивості кірально-асиметричної неоднорідної космологічної релятивістської плазми, в якій генеруються зародкові магнітні поля. Отримати густини електричного та аксіального струмів, а також рівняння для звичайного та кірального хімічних потенціалів;
6. За допомогою отриманих рівнянь дослідити вплив неоднорідності плазми на еволюцію спіральних зародкових магнітних полів та на кіральну асиметрію в ранньому Всесвіті.

Об'єктами дослідження є народження частинок на стадії післяінфляційного розігріву, лептонна асиметрія та магнітні поля в ранньому Всесвіті.

Предметом дослідження є ширини розпаду інфлатона на частинки полів матерії та інфлатону в моделях зі слабкою константою зв'язку; параметри моделі ν MSM, зокрема, маси та кути змішування правих та лівих нейтрино; рівняння Максвелла для кіральної плазми, еволюція магнітних полів і кіральної асиметрії в неоднорідній кіральній плазмі, інверсний каскад магнітного поля.

Методи дослідження. Для отримання ширин розпаду інфлатона використовувався метод коефіцієнтів Боголюбова. При обчисленні лептонної асиметрії використовувалась наближена теорія Фермі точкової взаємодії для визначення темпів розпаду стерильних нейтрино. Для отримання густин струмів і зарядів, що входять в аномальні рівняння Максвелла використовувалась кіральна кінетична теорія, а саме кіральне рівняння Больцмана, для одночастинкової функції розподілу.

Отримані рівняння розв'язувались за допомогою чисельних методів інтегрування жорстких систем диференціальних рівнянь, зокрема формул зворотнього диференціювання. Окрім того, було використано різні математичні методи.

Наукова новизна одержаних результатів.

В дисертаційній роботі отримано наступні результати:

1. В рамках моделі Старобінського з'ясовано механізм народження бозонів та ферміонів на етапі післяінфляційного розігріву Всесвіту за рахунок розпаду інфлатонного поля, слабо зв'язаного з полями матерії. Встановлено, що резонансний механізм народження чатинок не реалізується внаслідок розширення Всесвіту та нестаціонарності ширин резонансних зон;
2. Пораховано ефективні ширини розпаду інфлатонного поля в моделі зі слабким зв'язком з врахуванням розширення Всесвіту. Показано, що темпи народження бозонів і ферміонів з інфлатонного поля не залежать від специфіки розширення Всесвіту, оскільки густина чисел заповнення народжених частинок оберненопропорційна параметру Хаббла, а темп заповнення нових мод прямопропорційний йому;
3. Знайдено аналітичний вираз для лептонної асиметрії в рамках розширення Стандартної Моделі елементарних частинок за рахунок введення в неї правокіральных нейтрино (моделі ν MSM);
4. Отримано обмеження на значення параметрів моделі ν MSM: на кути змішування та на маси стерильних нейтрино у випадках прямої та оберненої ієрархії мас нейтрино Стандартної моделі (лівих нейтрино). Показано, що у випадку прямої ієрархії існує область параметрів, при яких можлива генерація лептонної асиметрії в кількості, достатній для утворення спостережуваної Темної матерії. У випадку оберненої ієрархії така область відсутня;
5. Використовуючи кіральну кінетичну теорію вперше отримано вирази для густин кірального та електричного струмів у релятивістській неоднорідній плазмі з кіральною асиметрією, в якій генеруються зародкові спіральні космологічні магнітні поля. Доведено існування нових типів струмів у такій плазмі, обумовлених її неоднорідністю;
6. Отримано рівняння, які описують динамічні властивості звичайних і кіральних хімічних потенціалів, які доповнюють систему рівнянь Максвелла, яка описує кіральну плазму;
7. На основі чисельних розрахунків отриманої системи рівнянь досліджено еволюцію спіральних магнітних полів та кірального хімічного потенціалу в ранньому Всесвіті з урахуванням неоднорідностей плазми. Показано, що неоднорідності призводять до розтягування в часі механізму інверсного каскаду перерозподілу енергій в спектрі спіральних магнітних полів;
8. З'ясовано вплив дифузії на еволюцію інверсного каскаду. Встановлено, що дифузія розмиває неоднорідності, і в ранньому Всесвіті інверсний каскад розвивається так само, як і в однорідному випадку.

Практичне значення одержаних результатів. Робота має теоретичний

характер. Дослідження народження частинок на стадії післяінфляційного розігріву дає можливість для побудови узгодженої теорії еволюції Всесвіту. Визначені обмеження на параметри моделі зі стерильними нейтрино можуть бути корисними для експериментів з пошуку важких правокіральных нейтрино на прискорювачах. Отримані самоузгоджені рівняння електродинаміки для релятивістської неоднорідної плазми з киральною аномалією відкривають можливість для подальших чисельних досліджень первинної плазми у ранньому Всесвіті. Досліджене за допомогою чисельних методів явище інверсного каскаду, підтверджує дієвість цього механізму в неоднорідному випадку. Отримані результати щодо інверсного каскаду можуть бути перевірені в експериментах з діраківськими та вейлівськими металами.

Особистий внесок здобувача. Результати, включені до дисертації на основі публікацій із співавторами, одержані автором самостійно, включаючи аналітичні та чисельні розрахунки. У роботах по дослідженню попереднього розігріву Всесвіту [1,2] автору належать аналітичні вирази для темпів народження частинок. При дослідженні параметрів моделі зі стерильними нейтрино [3] автором було отримано вираз для лептонної асиметрії та обчислено обмеження на маси стерильних нейтрино та їх кути змішування. У роботі [4] автором було отримано розклади у ряд за степенями полів та похідних для струмів та густин частинок, отримано самоузгоджені аномальні рівняння Максвелла. У роботі [5] здобувачем було отримано чисельні розв'язки рівнянь для електромагнітного поля та кирального хімічного потенціалу.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації було апробовано на наступних міжнародних конференціях: 5th Gamow International Conference «Astrophysics and Cosmology after Gamow: Progress and perspectives», Одеса, 2015, Україна; Xth Iberian Cosmology Meeting «IberiCOS 2015», Мадрид, 2015, Іспанія; International Conference «Astronomy and Space Physics», Київ, 2014, Україна; «Наука XXI століття: сучасні проблеми фізики», Київ, 2013, Україна. Основні результати дослідження також обговорювалися на школах з фізики високих енергій, на семінарах відділу астрофізики та елементарних частинок ІТФ НАН України та кафедри квантової теорії поля КНУ імені Тараса Шевченка.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 7 робіт в провідних наукових журналах та працях конференцій. А саме: 5 робіт у фізичних журналах [1, 2, 3, 4, 5], а 2 – у працях конференцій [6,7].

Структура дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, 3 розділів, висновків, списку використаних джерел, що містить 137 найменувань. Робота написана на 153 сторінках машинописного тексту, містить 18 рисунків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ

У *вступі* було обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовані мета та задачі дослідження, показана наукова та практична цінність

отриманих результатів, визначений особистий внесок здобувача, зазначені апробація результатів роботи та структура дисертації.

У *першому розділі* досліджуються процеси народження частинок у зовнішньому полі інфлатона на стадії попереднього розігріву Всесвіту. Розгляд проводиться на прикладі моделі Старобінського, тому спочатку дано опис даної моделі. Вона представляє собою модифіковану теорію гравітації Ейнштейна, в дії якої, окрім доданку першого порядку за скаляром Річчі, присутній також доданок другого порядку:

$$S^J = -\frac{M_P^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} \left(R - \frac{R^2}{6\mu^2} \right) + S_\varphi^J + S_\psi^J, \quad (1)$$

де $M_P = M_{Pl}/\sqrt{8\pi} = 2.4 \times 10^{18}$ ГеВ, S_φ^J, S_ψ^J — дія скалярного, та спірного полів відповідно, параметр $\mu = 1.3 \times 10^{-5} M_P$ фіксується даними спостережень фонового мікрохвильового випромінювання. За допомогою конформного перетворення метрики $\tilde{g}_{\mu\nu} = \chi g_{\mu\nu}$, $\chi = e^{\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\phi}{M_P}}$ дія (1) редукується до ейнштейнівської дії з скалярним полем ϕ — інфлатоном. Проводячи перемасштабування для полів матерії $\varphi = \chi^{1/2} \tilde{\varphi}$, $\psi = \chi^{3/4} \tilde{\psi}$, а також узагальненої коваріантної похідної $\mathcal{D} = \chi^{1/2} \tilde{\mathcal{D}}$, призводить до наступної дії в моделі Старобінського (знаки тільда опущені):

$$S_{grav+infl} = -\frac{M_P^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} R + \int d^4x \sqrt{-g} \left[\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi - V(\phi) \right], \quad (2)$$

$$S_\varphi = \int d^4x \sqrt{-g} \left\{ \frac{g^{\mu\nu}}{2} \partial_\mu \varphi \partial_\nu \varphi - \frac{m_\varphi^2 \chi^{-1}}{2} \varphi^2 + \frac{g^{\mu\nu}}{\sqrt{6} M_P} \varphi \partial_\mu \varphi \partial_\nu \phi + \frac{g^{\mu\nu}}{12 M_P^2} \varphi^2 \partial_\mu \phi \partial_\nu \phi \right\}. \quad (3)$$

$$S_\psi = \int d^4x \sqrt{-g} \left(i \bar{\psi} \chi^{-1/2} \mathcal{D} \psi - \frac{m_\psi}{\sqrt{\chi}} \bar{\psi} \psi \right). \quad (4)$$

де потенціал інфлатона задається виразом $V(\phi) = \frac{3\mu^2 M_P^2}{4} (1 - \chi^{-1}(\phi))^2$. В такій моделі Всесвіт зазнає експоненційного прискореного розширення — стадія інфляції, що дає можливість розв'язати проблеми початкових умов теорії Великого вибуху. Після закінчення цього етапу інфлатон починає осцилювати в околі мінімуму свого потенціалу. При цьому, в зовнішньому швидкозмінному полі інфлатона відбуватиметься народження частинок. В стаціонарному випадку метрики Мінковського в такій задачі суттєву роль гратиме параметричний резонанс. Густина чисел заповнення народжених бозонів ростиме експоненційним чином:

$$n_k = \frac{1}{1 - \Delta^2/|g_0|^2} sh^2(\mu_+ t) \quad (5)$$

де $g_0 = \frac{\mu^2 \phi_0}{2\sqrt{6} M_P}$, а $\Delta = \omega_k^2 - \left(\frac{\mu}{2}\right)^2$ — ширина першої резонансної зони для k -ї моди скалярного поля, що збуджується з енергією ω_k (в даній задачі $\omega_k \approx k$, оскільки масами всіх відомих бозонів можна знехтувати в порівнянні з імпульсами

частинок на етапі попереднього розігріву). ϕ_0 — амплітуда поля інфлатона під час попереднього розігріву, показник резонансної експоненти задається виразом $\mu_+ = \frac{1}{\mu} \sqrt{|g_0|^2 - \Delta^2}$. Результат (5) залишається в силі і у випадку розширення Всесвіту (з інтегралом у показнику синуса), за виконання умови адіабатичності для показника резонансної експоненти $|\mu_+| \ll \mu_+^2$. Для моделі Старобінського дана умова порушується. В цьому випадку у літературі, як правило, повертаються до результатів, які дає стандартна борнівська теорія збурень для ширин розпаду інфлатону:

$$\Gamma_\varphi = \frac{\mu^3}{192\pi M_P^2}, \quad \Gamma_\psi = \frac{\mu m_\psi^2}{12\pi M_P^2} \quad (6)$$

Проте, якщо ці формули не працюють у простому випадку метрики Мінковського, чому тоді їх застосовують у більш складному випадку Всесвіту, що розширюється? Для того, щоб дати відповідь на це запитання, в роботі послідовно розглядається задача про народження частинок в зовнішньому полі інфлатона в моделі Старобінського. Рівняння для імпульсних мод скалярного поля на етапі попереднього розігріву має вигляд:

$$\ddot{\varphi}_k + \left(\omega_k^2(t) - \mu^2 \frac{\phi(t)}{\sqrt{6}M_P} \right) \varphi_k = 0 \quad \frac{\phi}{M_P} \ll 1, \quad \phi = \phi_0(t) \cos \mu t \quad (7)$$

Остання умова веде до слабкості зв'язку у моделі Старобінського. За рахунок розширення Всесвіту в даній задачі від часу залежать енергія народжуваних частинок, як $\omega_k = \frac{k}{a}$, де $a(t)$ — масштабний фактор, а також амплітуда осцилюючого поля інфлатона $\phi_0(t) = \phi_0 \left(\frac{a_0}{a} \right)^{3/2}$, де $a_0 = a(t_0)$, а t_0 — момент початку стадії післяінфляційного розігріву. Введемо позначення $\Omega_k(t)^2 = \omega_k^2(t) - 2g_0(t) \cos \mu t$, де $\frac{\mu^2 \phi_0(t) \cos \mu t}{\sqrt{6}M_P} = 2g_0(t) \cos \mu t$, $\frac{|\dot{g}_0|}{|g_0|} \ll \omega_k, \mu$. Ефекти нестационарності зовнішнього поля інфлатона та метрики у Всесвіті, що розширюється, проявляються в тому, що частота Ω_k залежить від часу. У стаціонарному випадку при $\Omega_k = \text{const}$ розв'язок φ_k буде залишатись додатньо-частотним $\varphi_k \sim e^{i\Omega_k t}$ для всіх t . Нестационарність призведе до змішування частот, що фізично означатиме народження частинок поля φ_k . Оскільки параметричний резонанс у даній задачі не розвивається, задачу можна розв'язувати пертурбативно, використовуючи g_0 в якості малого параметру. До задачі застосовується метод коефіцієнтів Боголюбова. Число народжених частинок для заданої моди в рамках цього методу визначається за допомогою коефіцієнта β , як $n_k = |\beta_k|^2$.

Використовуючи метод перевалу, знаходиться вираз для коефіцієнту Боголюбова β_k в першому порядку теорії збурень:

$$\beta_k = \frac{\mu^3 \phi_0 \sqrt{\pi}}{16i M_P \omega_k^{3/2}(t_0)} t_0^{1/2} \left(\frac{2\omega_k(t_0)}{\mu} \right)^{7/4} \quad (8)$$

Народження частинок відбувається, коли значення фізичного імпульсу частинки, що народжується, потрапляє у вузьку резонансну зону. При цьому густина станів в k -ій моді ставатиме рівною $|\beta_k|^2$. Густина енергії народжених частинок

матиме вигляд: $\rho(t) = \int \frac{k}{a^4} \theta(k - \frac{1}{2}\mu a_0) \theta(\frac{1}{2}\mu a(t) - k) |\beta_k|^2 \frac{d^3k}{(2\pi)^3}$. Для релятивістських частинок еволюція даної величини задається рівнянням $\dot{\rho}_\varphi = \Gamma_\varphi \rho_\varphi - 4H\rho_\varphi$, Γ_φ — темп народження частинок. Тоді отримуємо $\Gamma_\varphi = \frac{\mu^3}{192\pi M_P^2}$, тобто, темп народження частинок не залежить від специфіки розширення Всесвіту і має таке саме значення, що дає борнівське наближення у випадку стаціонарної метрики Мінковського. Далі у розділі розглядається також випадок народження ферміонів на етапі попереднього розігріву в моделі Старобінського. Користуючись методом коефіцієнтів Боголюбова, як і у випадку бозонів, знаходиться вираз для темпу народження ферміонів $\Gamma_\psi = \frac{\mu m_\psi^2}{12\pi M_P^2}$, що також співпадає з відповідним результатом у стаціонарній метриці.

У **другому розділі** розглядається генерація лептонної асиметрії у рамках нейтринного розширення Стандартної моделі (ν MSM), що має місце у ранньому Всесвіті. В рамках такого розширення вдається одночасно пояснити ряд феноменів, що не знаходять пояснення в рамках Стандартної моделі: активні (лівокіральні) нейтрино стають масивними, що необхідно для пояснення явища нейтринних осциляцій, у розпадах двох важчих провокіральних (стерильних) нейтрино на лептони і адрони генерується лептонна асиметрія Всесвіту, а найлегший стерильний нейтрино є кандидатом на роль частинки Темної матерії. Після електрослабкого переходу згенерована лептонна асиметрія гратиме важливу роль у процесі народження частинок Темної матерії (має місце при температурі порядку 0.1 GeV). Для успішної генерації необхідної кількості відповідних частинок необхідно, щоб під час цього процесу у Всесвіті була присутня лептонна асиметрія у кількості $10^{-3} < \Delta < 2/11$.

Розгляд задачі починається з лагранжіану моделі ν MSM:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + i\bar{\nu}_{IR}\partial_\mu\gamma^\mu\nu_{IR} - F_{\alpha I}\bar{L}_\alpha\tilde{\Phi}\nu_{IR} - \frac{M_{IJ}}{2}\bar{\nu}_{IR}^c\nu_{JR} + h.c., \quad (9)$$

\mathcal{L}_{SM} — лагранжіан Стандартної моделі, ν_{IR} — ферміонні функції правокіральних стерильних нейтрино ($I = 1, 2, 3$), що є синглетами по відношенню до $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ перетворень, M_{IJ} — майоранівські маси стерильних нейтрино. $\nu_{IR}^c = \hat{C}\bar{\nu}_{IR}^T$, $\hat{C} = i\gamma^2\gamma^0$ — оператор зарядового спряження. $\tilde{\Phi} = i\sigma_2\Phi^*$, де Φ — хігсівський дублет, σ_2 — друга з матриць Паулі. $L_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ e_\alpha \end{pmatrix}$ — лептонний дублет ($\alpha = e, \mu, \tau$), $F_{\alpha I}$ — матриця юкавівських констант взаємодії, $h.r.$ — означає ермітове спряження. Фактично, дана модифікація додає до Стандартної моделі правокіральні нейтрино, і робить лептонний сектор електрослабкої теорії аналогічним до кваркового.

Лагранжіан (9) може бути переписаний в іншому базисі, а саме, коли масова матриця стерильних нейтрино є діагональною. У цьому випадку лагранжіан має вигляд:

$$\mathcal{L}^{ad} = -g_{\alpha I}\bar{L}_\alpha N'_I\tilde{\Phi} - \frac{M_I}{2}\bar{N}'^c_I N'_I + h.c., \quad (10)$$

де N'_I — правокіральні нейтрино і $g_{\alpha I}$ — елементи юкавівської матриці у цьому

базисі. Власні стани вихідного лагранжіану, в яких стерильні нейтрино народжуються та розпадаються, пов'язані зі станами лагранжіану (10) наступним чином: $\nu_r^c \simeq N'^c + \Theta \nu_L$, ν_L – активні нейтрино СМ в ароматовому базисі, $\Theta_{\alpha I} = \frac{v}{\sqrt{2}} \frac{g_{\alpha I}}{M_I}$ – кути змішування між активними та стерильними нейтрино. ($\Theta_{\alpha I} \ll 1$). Оскільки найлегший стерильний нейтрино грає роль частинки Темної матерії, він має дуже малу взаємодію з частинками Стандартної моделі і тому не приймає участь у генерації лептонної асиметрії, а, отже, всюди індекс I приймає значення 2 або 3. Найлегше стерильне нейтрино N_1 має масу порядку кількох КеВ і утворює Темну матерію. Два інші стерильні нейтрино N_2 і N_3 мають маси принаймні менші за електрослабкий масштаб (маси калібрувальних W , Z - бозонів). Ми будемо розглядати нейтрино з масами в проміжку $m_\pi < M_{2,3} < 2$ ГеВ, де $m_\pi = 140$ МеВ – маса π -мезона. Експериментально вимірюються не самі маси активних нейтрино, а величини $\Delta m_{ij} = m_i^2 - m_j^2$. Відповідно, існує деяка невизначеність в означенні мас активних нейтрино. На практиці використовують два варіанти – пряма та обернена ієрархія.

У роботі розглядається генерація лептонної асиметрії у розпадах стерильних нейтрино N_2 і N_3 на лептони і мезони. Враховуються наступні канали розпаду: $N_I \rightarrow \pi^0 \nu_\alpha, \pi^+ e_\alpha^-, \pi^- e_\alpha^+, K^+ e_\alpha^-, K^- e_\alpha^+, \eta \nu_\alpha, \eta' \nu_\alpha, \rho^0 \nu_\alpha, \rho^+ e_\alpha^-, \rho^- e_\alpha^+$

Обрахунок даних процесів у роботі проводиться в наближенні нульової температури. У цьому випадку, для обраної області мас стерильних нейтрино можна використовувати наближення Фермі точкової взаємодії струмів і розглядати мезон та лептон, як кінцеві продукти реакції.

Лептонна асиметрія Δ може бути визначена наступним чином: $\Delta = \frac{\Gamma_{\psi \rightarrow l} - \Gamma_{\psi \rightarrow \bar{l}}}{\Gamma_{\psi \rightarrow l} + \Gamma_{\psi \rightarrow \bar{l}}}$, де $\Gamma_{\psi \rightarrow l}$ і $\Gamma_{\psi \rightarrow \bar{l}}$ повні ширини розпаду масових власних станів ψ_I стерильних нейтрино на лептони та антилептоли відповідно. Вимога на значення лептонної асиметрії на момент початку народження Темної матерії дозволяє обмежити область значень параметрів моделі νMSM . Суперпозиція отриманих у роботі обмежень і узагальнених обмежень з інших робіт представлена на Рис. 1. Вище лінії, що позначена «BAU», бариогенезис не можливий: в цій області стерильні нейтрино приходять до стану термодинамічної рівноваги за температури, вищої T_{EW} . Нижче лінії, позначеної «See-saw», дані по масам та кутам змішування нейтрино не можуть бути пояснені в рамках «see-saw» механізму. Область, позначена, як «BBN» не задовільняє критеріям нуклеосинтезу теорії Великого Вибуху. Регіон, позначений, як «Experiment», зображує частину області параметрів, яка виключається експериментами з пошуку синглетних нейтрино. Регіони, позначені, як «Cos», « Δ » і «DM» були отримані в роботі. Регіон «Cos» показує область параметрів, дозволених космологічними обмеженнями: стерильні нейтрино мають розпастися за температури, меншої, ніж їх маса ($T \lesssim M$) для порушення термодинамічної рівноваги, також, звичайно, вони мають розпастися до початку народження частинок Темної матерії, яка утворюється при температурі $T \sim 0.1$ ГеВ. Заштрихована область, позначена, як « Δ », демонструє значення параметрів, дозволених обмеженням $10^{-3} < \Delta < 2/11$, область, позначена, як «DM», зображує регіон параметрів,

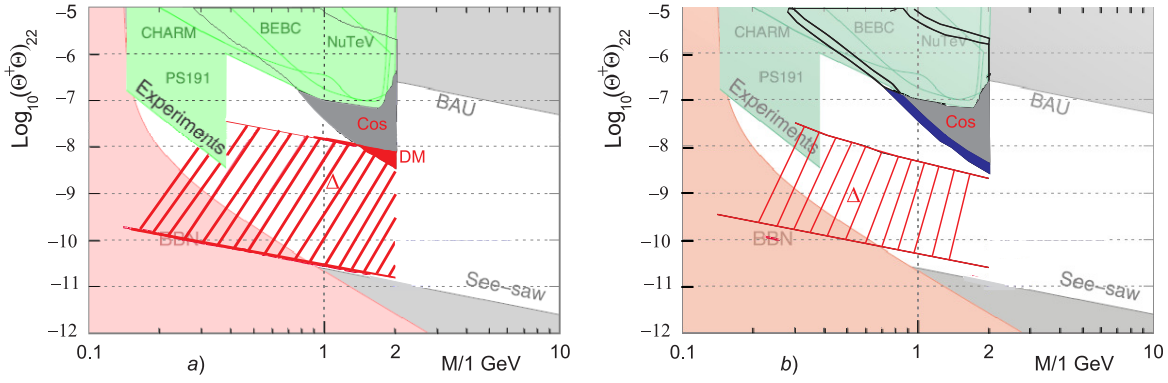


Рис. 1: Суперпозиція обмежень, отриманих в даній роботі та іншими авторами: а) випадок нормальної ієрархії, б) випадок інверсної ієрархії.

де останні два обмеження не суперечать одне одному. Остання область є сприятливою для народження частинок Темної матерії, згідно отриманих результатів. Як видно, така область існує лише у випадку нормальної ієрархії мас активних нейтрино.

Третій розділ дисертації присвячено проблемі еволюції зародкових магнітних полів у первинній плазмі. Спочатку проводиться огляд сучасного стану розуміння природи спостережуваних галактичних та позагалактичних магнітних полів, перелічуються астрофізичні та космологічні джерела первинних — зародкових полів, з яких, згідно найбільш поширеного нині погляду, формуються спостережувані поля. Суттєвою проблемою в даній задачі є виживання первинних полів протягом еволюції Всесвіту. Нещодавно було запропоновано новий механізм еволюції первинних магнітних полів у плазмі з кіральною асиметрією, що дозволяє уникнути проблем їх виживання. Кіральный магнітний ефект в такій системі призводить до того, що магнітні поля з ненульовою спіральністю виживатимуть суттєво довше, до епохи, коли температура Всесвіту становить кілька МеВ. Більше того, нелінійна взаємодія кіральної асиметрії і спіральних магнітних полів веде до ефективного механізму перекачування енергії від короткохвильових до довгохвильових мод магнітного поля, які суттєво менше зазнають дисипації. Даний механізм — інверсний каскад — робить такі магнітні поля дуже привабливими з точки зору пояснення спостережуваних великомасштабних магнітних полів.

Кіральный магнітний ефект описується наступним доданком в електричному струмі $e\mathbf{j} = \frac{\alpha}{2\pi^2}\mu_5\mathbf{B} + \sigma\mathbf{E}$, де σ — електрична провідність плазми, μ_5 — кіральный хімічний потенціал, що наближено описує дисбаланс у концентрації ліво- та правокіральних ферміонів ($\mu_5 \simeq \frac{3c^3 n_5}{T^2}$). Еволюція останньої величини в оригінальній роботі з дослідження аномального інверсного каскаду задається усередненим по об'єму системи V співвідношенням кіральної аномалії:

$$\frac{\partial\mu_5}{\partial t} = \frac{3\alpha}{2\pi^2 T^2} \frac{1}{V} \int d^3x \mathbf{E} \cdot \mathbf{B} = -\frac{3\alpha}{4\pi^2 T^2} \frac{d\mathcal{H}}{dt}, \quad (11)$$

де T – температура, $\mathcal{H}(t) = \frac{1}{V} \int d^3x \mathbf{A} \cdot \mathbf{B}$ – магнітна спіральність, а \mathbf{A} – векторний потенціал. Але, правильне співвідношення кіральної аномалії має локальний характер, і усереднення хімічного потенціалу вносить неузгодженість в задачу. Тому критично важливо розв'язати дану задачу про еволюцію інверсного каскаду в первинній плазмі без зазначеного дефекту, тобто з урахуванням неоднорідностей.

Для цього у роботі використовується так звана кіральна кінетична теорія, розгляд якої розпочинається з кінетичного рівняння:

$$\frac{\partial f_\lambda}{\partial t} + \frac{1}{1 + \frac{e}{c} \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega}_\lambda} \left[\left(e \mathbf{E} + \frac{e}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} + \frac{e^2}{c} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{B}) \boldsymbol{\Omega}_\lambda \right) \cdot \frac{\partial f_\lambda}{\partial \mathbf{p}} + \left(\mathbf{v} + e \mathbf{E} \times \boldsymbol{\Omega}_\lambda + \frac{e}{c} (\mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\Omega}_\lambda) \mathbf{B} \right) \cdot \frac{\partial f_\lambda}{\partial \mathbf{x}} \right] = I_{\text{coll}}, \quad (12)$$

де фактор $(1 + e \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\Omega}_\lambda / c)^{-1}$ додано для коректного визначення фазового об'єму, $\boldsymbol{\Omega}_\lambda = \lambda \mathbf{p} / (2|\mathbf{p}|^3)$ – кривина Беррі. Кривина Беррі є дуже важливою складовою кіральної кінетичної теорії, що дозволяє враховувати ферміонну природу частинок. В остаточних результатах для густин зарядів та струмів враховуються внески як від частинок, так і від античастинок. Параметр λ приймає значення ± 1 і визначає кіральність частинок. Одним із найпростіших наближень, яке і використано в роботі, в якому інтеграл зіткнень I_{coll} відмінний від нуля, є наближення часу релаксації $I_{\text{coll}} = -(f_\lambda - f_\lambda^{(\text{eq})}) / \tau$, де τ – час релаксації і $f_\lambda^{(\text{eq})}$ – локальна рівноважна функція розподілу: $f_\lambda^{(\text{eq})}(t, \mathbf{x}, \mathbf{p}) = \frac{1}{e^{[\epsilon_{\mathbf{p}} - \mu_\lambda(t, \mathbf{x})] / T} + 1}$, де $\epsilon_{\mathbf{p}} = c|\mathbf{p}|$. Відповідні рівноважні функції розподілу для античастинок отримуються шляхом заміни $\mu_\lambda \rightarrow -\mu_\lambda$. Тут використовується позначення для хімічних потенціалів правих та лівих ферміонів, $\mu_\lambda(t, \mathbf{x}) = \mu(t, \mathbf{x}) + \lambda \mu_5(t, \mathbf{x})$.

Еволюція електричних і магнітних полів визначається рівняннями Максвелла.

Розв'язок кінетичного рівняння шукається у формі розкладу за степенями електромагнітного поля, тобто, $f_\lambda = f_\lambda^{(\text{eq})} + \delta f_\lambda^{(1)} + \delta f_\lambda^{(2)} + \dots$. Кожна просторово-часова похідна розглядається, як додаткова степінь електромагнітного поля.

В результаті, у роботі було отримано замкнену систему рівнянь, яка, окрім рівнянь Максвелла складається з аналітичних виразів для густин зарядів та струмів, а також рівнянь на еволюцію електричного (μ) та кірального (μ_5) хімічних потенціалів. Тут важливо розглянути точний вираз для густини електричного струму:

$$\mathbf{j} = \frac{e \mathbf{B} \mu_5}{2\pi^2 c} + \frac{\tau T^2}{9c} \left(1 + \frac{3(\mu^2 + \mu_5^2)}{\pi^2 T^2} \right) \left(e \mathbf{E} - \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{x}} \right) + \frac{e^2 \tau^2 \mu}{3\pi^2} \mathbf{E} \times \mathbf{B} - \frac{2e\tau \mu \mu_5}{3\pi^2 c} \frac{\partial \mu_5}{\partial \mathbf{x}} + \frac{e\tau^2 \mu}{3\pi^2} \left(\mathbf{B} \times \frac{\partial \mu}{\partial \mathbf{x}} \right) + \frac{e\tau^2 \mu_5}{3\pi^2} \left(\mathbf{B} \times \frac{\partial \mu_5}{\partial \mathbf{x}} \right) - \frac{e\tau^2 T^2}{9c} \left(1 + \frac{3(\mu^2 + \mu_5^2)}{\pi^2 T^2} \right) \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \frac{e\tau \mu_5}{6\pi^2 c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \frac{e\tau}{6\pi^2} \mathbf{E} \times \frac{\partial \mu_5}{\partial \mathbf{x}}. \quad (13)$$

Очевидно, перший доданок в (13) описує струм кірального магнітного ефекту, який індукується ненульовим кіральним хімічним потенціалом і направлений вздовж магнітного поля. В другому доданку закладено омічний та дифузний струми. Третій доданок є нічим іншим, як відомим струмом Холла. Інші п'ять доданків — до цього не описані в літературі.

У високотемпературному наближенні $T \gg \mu_\lambda$ вирази для струмів, а також рівняння для хімічних потенціалів спрощуються.

З огляду на загальну електричну нейтральність первинної плазми, можна виключити з розгляду електричних хімічний потенціал μ . Це дозволить значно спростити задачу. Так, вираз для струму прийме вигляд $e\mathbf{j} \simeq \frac{\alpha}{2\pi^2}\mu_5\mathbf{B} + \sigma\mathbf{E}$, де електрична провідність пов'язана з часом релаксації $\tau = 9\sigma/(e^2T^2)$. Рівняння для кірального хімічного потенціалу (локальне, а не усереднене співвідношення кіральної аномалії) матиме вигляд:

$$\frac{\partial\mu_5}{\partial\eta} - \frac{3\sigma}{\alpha}\nabla^2\mu_5 = \frac{3\alpha\mathbf{E}\cdot\mathbf{B}}{2\pi^2T^2}, \quad (14)$$

Потрібно звернути увагу на наявність в даному рівнянні дифузного доданку $\frac{3\sigma}{\alpha}\nabla^2\mu_5$ на відміну від рівняння (11). Тут і далі використовуються конформні координати. Конформний час $\eta = M^*/T$, де $M^* = \sqrt{\frac{90}{8\pi^3g^*}}M_{Pl}$, M_{Pl} — маса Планка, g^* — ефективне число релятивістських степенів свободи, а T — температура Всесвіту. Також використовується співвідношення між масштабним фактором a і температурою, як на стадії домінування випромінювання: $a(t) = 1/T$. Замість всіх величин використовуються їх конформні аналоги. З рівнянь Максвелла виводиться рівняння для еволюції магнітного поля (доданком з другою похідною по часу від магнітного поля можна знехтувати у плазмі з високою провідністю):

$$\frac{\partial\mathbf{B}}{\partial\eta} = \frac{1}{4\pi\sigma} \left(\nabla^2\mathbf{B} + \frac{2\alpha}{\pi}[\nabla \times \mu_5\mathbf{B}] \right). \quad (15)$$

Чисельно задачу зручніше розв'язувати в імпульсному просторі. Для послідовності у роботі розглядається вплив дифузії на еволюцію системи. Для цього наводяться розв'язки для кількох значень параметру часу релаксації: $\tau = 6.8 \times 10^3$, який відповідає обезрозміреній провідності кіральної плазми $\sigma \approx 70$, а також два менші значення параметру, $\tau = 6.8$ і $\tau = 6.8 \times 10^{-3}$. Як видно з Рис. 2 магнітна спіральність передається від мод з більшими хвильовими векторами до мод з меншими хвильовими векторами. Це є нічим іншим, як інверсним каскадом в неоднорідній плазмі. Для суттєво малих значень часу релаксації τ , еволюція інверсного каскаду сповільнюється. Для реалістичного ж значення параметру в первинній плазмі, еволюція магнітної спіральності практично не відрізняється від однорідного випадку. Причиною цього є те, що моди кірального хімічного потенціалу з відмінними від нуля хвильовими векторами сильно подавлені в цьому випадку і не грають суттєвої ролі в еволюції.

У *висновках* підсумовуються основні результати роботи.

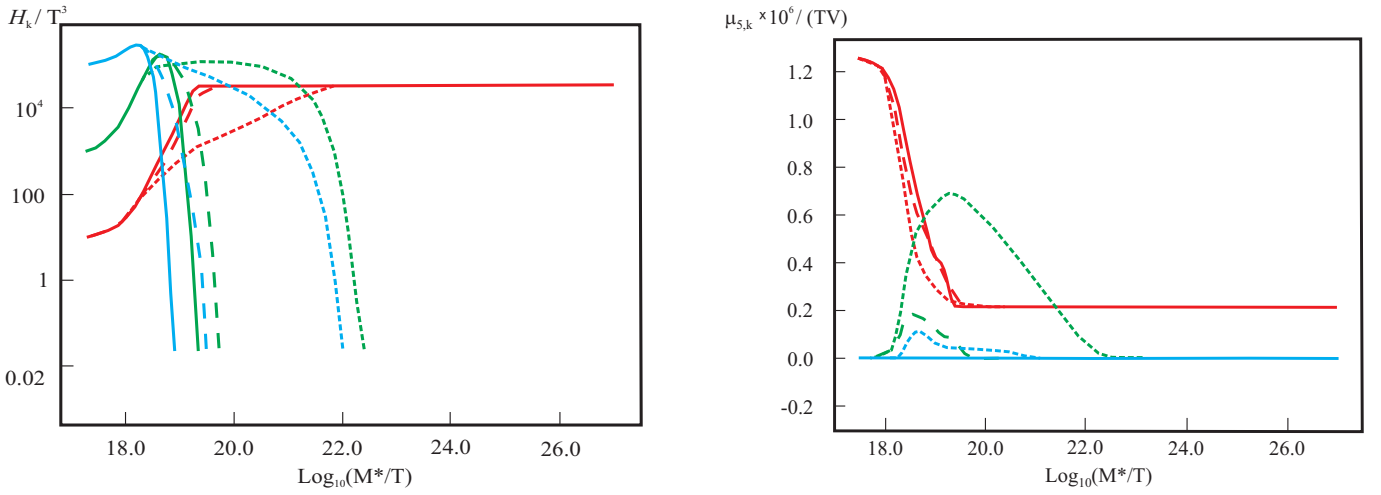


Рис. 2: Фур'є-компоненти магнітної кіральності (ліва панель) і Фур'є-компоненти кірального хімічного потенціалу (права панель), як функції конформного часу в неоднорідній кіральній плазмі з урахуванням дифузії. $\tau = 6.8 \times 10^3$ (суцільні лінії), $\tau = 6.8$ (пунктирні лінії), і $\tau = 6.8 \times 10^{-3}$ (точкові лінії).

ВИСНОВКИ

1. З'ясовано механізм народження частинок на стадії попереднього розігріву у моделі інфляції Старобінського. Показано, що в такій задачі параметричний резонанс не розвивається внаслідок розширення Всесвіту та нестаціонарності ширин резонансних зон. Натомість, народження частинок описується теорією збурень в рамках борнівського наближення;
2. Отримано аналітичні формули для ширин розпаду інфлатона на бозони, ферміони, а також ширину саморозпаду інфлатона у випадку слабого зв'язку інфлатонного поля з полями матерії. Встановлено, що специфічні властивості розширення Всесвіту призводять до того, що ефективні ширини розпаду інфлатона не залежать від часу і співпадають з результатами борнівського наближення. Це відбувається тому, що густина чисел заповнення для народжених частинок оберненопропорційна параметру Хаббла, а темп заповнення нових мод прямопропорційний йому;
3. Знайдено аналітичний вираз для лептонної асиметрії, що генерується в ранньому Всесвіті у результаті розпадів важких стерильних нейтрино моделі νMSM ;
4. Використовуючи вимогу до величини лептонної асиметрії, яка має бути згенерована у Всесвіті на момент народження найлегшого стерильного нейтрино (гіпотетично, частинка Темної матерії), отримано обмеження на параметри моделі νMSM — маси важких стерильних нейтрино та кути змішування між стерильними та активними нейтрино. Показано, що у випадку оберненої ієрархії мас активних нейтрино, не існує області значень параметрів моделі νMSM , при яких лептонна асиметрія задовільняла би космологічним вимогам, на відміну від випадку прямої ієрархії;

5. Використовуючи кіральну кінетично теорію вперше було отримано вирази для густин електричних і кіральних струмів та зарядів у релятивістській неоднорідній космологічній плазмі з кіральною асиметрією. Було отримано ряд нових доданків в струмах, про які раніше не повідомлялось і які можуть бути використані в експериментах з діраківськими та вейлівськими матеріалами;
6. Отримано рівняння, які описують динамічні властивості звичайних і кіральних хімічних потенціалів, які доповнюють систему рівнянь Максвелла, якою описується кіральна плазма;
7. За допомогою отриманої системи рівнянь було досліджено еволюцію спіральних магнітних полів та кірального хімічного потенціалу в кірально-асиметричній неоднорідній первинній плазмі. Отримано, що, як і в однорідному випадку, магнітна спіральність короткохвильових мод з часом зменшується, в той час як довгохвильових — зростає. Таким чином, було підтверджено існування явища інверсного каскаду магнітного поля в неоднорідній плазмі, що підсилює аргументи на користь такого поля, як зародкового для спостережуваних позагалактичних та галактичних магнітних полів;
8. Також в роботі встановлено вплив дифузних ефектів на еволюцію кіральної намагніченої плазми. Показано, що дифузія розмиває неоднорідності, і, за реалістичних для первинної плазми значень константи дифузії, інверсний каскад розвивається так само, як і у випадку однорідної плазми.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

- [1] Rudenok I. Post-inflationary preheating with weak coupling / Igor Rudenok, Yuri Shtanov, Stanislav Vilchinskii // *Physics Letters B.* — 2014 — Vol. 92 — P. 125031.
- [2] Rudenok I. Preheating universe after inflation / Igor Rudenok, Yuri Shtanov, Stanislav Vilchinskii // *Odessa Astronomical Publications* — 2014 — Vol. 27, no.2 — Pp. 11-15.
- [3] Gorkavenko V. M. Leptonic asymmetry of the sterile neutrino hadronic decays in the ν MSM / Volodymyr M. Gorkavenko, Igor V. Rudenok, Stanislav I. Vilchynskiy// *Ukr.J.Phys* — 2013 — Vol. 58, no.9 — Pp. 811-826.
- [4] Gorbar E. V. Anomalous Maxwell equations for inhomogeneous chiral plasma / E. V. Gorbar, I. A. Shovkovy, S. Vilchinskii, I. Rudenok, A. Boyarsky, and O. Ruchayskiy // *Physical Review D* — 2016 — Vol. 93, no.10 — P. 105028.
- [5] Gorbar E. V. Anomaly-driven inverse cascade and inhomogeneities in a magnetized chiral plasma in the early Universe / E. V. Gorbar, I. Rudenok, I. A. Shovkovy, S. Vilchinskii// *Physical Review D* — 2016 — Vol. 94, no.10 — P. 103528.
- [6] Руденок І.В. Розрахунок коефіцієнту Боголюбова в R^2 –інфляційній моделі / І.В. Руденок, С.Й. Вільчинський, В.М. Горкавенко// *Тези доповідей наукової конференції молодих вчених "Наука XXI століття"* — 2013 — С. 87.
- [7] Rudenok I. Post-inflationary preheating with weak coupling / I. Rudenok, Yu. Shtanov, S. Vilchinskii // *Збірка тез доповідей міжнародної конференції «Астрономія та фізика космосу в Київському університеті»* — 2014 — С. 38.

АНОТАЦІЯ

Руденок І.В. Народження частинок, генерація лептонної асиметрії та еволюція магнітних полів у ранньому Всесвіті – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика. – Інститут теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України, Київ, 2017.

Дисертація присвячена розгляду актуальних проблем космології раннього Всесвіту. В рамках моделі інфляції Старобінського отримано формули для темпів народження скалярних та спінових частинок у зовнішньому осцилюючому полі інфлатона. Встановлено, що через розширення Всесвіту параметричний резонанс не розвивається, а працює борнівське наближення. Отримано обмеження на маси важких стерильних нейтрино та кути змішування стерильних нейтрино з активними нейтрино в моделі ν MSM, виходячи з вимог до величини лептонної асиметрії на момент початку народження частинок Темної матерії. Отримано замкнену систему рівнянь Максвелла для плазми з киральною аномалією. За допомогою отриманих рівнянь досліджено еволюцію зародкових магнітних полів у неоднорідній релятивістській плазмі у ранньому Всесвіті. Встановлено існування інверсного каскаду магнітного поля в неоднорідному випадку.

Ключові слова: розігрів Всесвіту, модель Старобінського, стерильні нейтрино, лептонна асиметрія, первинні магнітні поля, інверсний каскад.

АННОТАЦИЯ

Руденок И.В. Рождение частиц, генерация лептонной асимметрии и эволюция магнитных полей в ранней Вселенной — На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика. – Институт теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова НАН Украины, Киев, 2017.

Диссертация посвящена рассмотрению актуальных проблем космологии ранней Вселенной. В рамках модели Старобинского получено формулы для темпов рождения скалярных и спинорных частиц во внешнем осциллирующем поле инфлатона. Установлено, что из-за расширения Вселенной параметрический резонанс не развивается, а работает борновское приближения. Получено ограничение на массы тяжелых стерильных нейтрино и углы смешивания стерильных нейтрино с активными нейтрино в модели ν MSM, исходя из требований к величине лептонной асимметрии к моменту начала рождения частиц Темной материи. Получено замкнутую систему уравнений Максвелла для плазмы с киральной аномалией. С помощью полученных уравнений исследовано эволюцию зародышевых магнитных полей в неоднородной релятивистской плазме в ранней Вселенной. Установлено существование инверсного каскада магнитного поля в неоднородном случае.

Ключевые слова: разогрев Вселенной, модель Старобинского, стерильные нейтрино, лептонная асимметрия, первичные магнитные поля, инверсный каскад.

ABSTRACT

Rudenok I.V. Particles production, lepton asymmetry generation and magnetic fields evolution in the early Universe —- Manuscript.

Thesis for the Doctor of Philosophy degree (Candidate of science in Physics and Mathematics) in speciality 01.04.02 – theoretical physics. – Bogolyubov Institute for Theoretical Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2017.

The thesis is devoted to the investigation of the problems of the early Universe. Namely, particles production on the preheating stage, lepton asymmetry generation in the sterile neutrinos extension of the Standard model and the evolution of the primordial magnetic fields in the chirally-asymmetric plasma.

The theory of inflation is introducing a stage of an accelerated expansion in the early Universe. Such modification of the cosmological evolution allows to solve such called problems of the initial conditions, which appears in the ordinary Big Bang scenario. An accelerated expansion is driven by classical scalar field — inflaton. After the end of the inflationary stage inflaton starts to oscillate near the minimum of it's potential. Particle production in the background of the oscillating inflaton field is a key process describing the stage of preheating after inflation. For sufficiently strong couplings between the inflaton and matter fields, this process is known to proceed non-perturbatively. Parametric resonance plays crucial role for bosonic fields in this case, and the evolution of the occupation numbers for fermions is non-perturbative as well. In the Minkowski space, parametric resonance for bosons and non-perturbative effects for fermions would still persist even in the case of weak coupling. In particular, the energy density of created bosons would grow exponentially with time. However, the situation is quite different in the expanding universe. We give a demonstration how the conditions of the expanding universe, specifically, redshift of the field modes, lead to the usual perturbative expressions for particle production by an oscillating inflaton in the case of weak couplings. The obtained results are relevant and fully applicable to the Starobinsky model of inflation.

In the second part of the thesis the lepton asymmetry generation in the νMSM via hadron decays of sterile neutrinos is considered. νMSM is the extension of the Standard Model by three right-handed (sterile) neutrinos. Such modification allows to solve several problems of the Standard Model: the active neutrinos become massive, lepton and baryon asymmetry can be generated in the decays of two heavier sterile neutrinos and the lightest neutrino plays the role of the Dark Matter particle. It is important to have the constraints on the parameters of the model. In the thesis such constraints is obtained from the lepton asymmetry consideration. The computations are carried at zero temperature and the background effects are ignored. Combining constraints of sufficient value of the lepton asymmetry for production of dark matter particles, condition for sterile neutrino to be out of thermal equilibrium and existing experimental data we obtained the constraints on masses and mixing angles of the sterile neutrinos and conclude that it can be satisfied only for the case of normal

hierarchy of the active neutrino mass.

The third part of thesis is devoted to the nature of the primordial magnetism. It is well-known, that non-zero magnetic field are present in all parts of the observed Universe. The magnetic fields in galaxies and clusters could be explained by the compression of pre-existing seed fields during structures formation. Recent observation of the large-scale magnetic fields in voids points on the primordial nature of the cosmic magnetism. One of the possibilities to explain the seed magnetic fields is their generation in the relativistic plasma with chiral asymmetry. The evolution of such fields is considered in the thesis. Using the chiral kinetic theory the electric and chiral current densities in inhomogeneous relativistic plasma were derived. The equations for the electric and chiral charge chemical potentials were also derived that close the anomalous Maxwell equations in such a plasma. Apart from various diffusion-like terms, we find also new dissipation-less terms that are independent of relaxation time. By making use of a simple model that captures the key features of the anomalous Maxwell equations, we study then the role of inhomogeneities on the evolution of magnetic fields in a chiral plasma. It was found that inhomogeneities of the chiral asymmetry by themselves do not prevent the anomaly-driven inverse cascade and, as in the homogeneous case, the magnetic helicity is transferred from shorter to longer wavelength helical modes of the magnetic field. However, it was also found that the evolution appears to be sensitive to the effects of diffusion. In the case when diffusion is negligible, the inverse cascade slows down considerably compared to the homogeneous scenario. In the case of the primordial plasma, though, it was found that the diffusion is substantial and efficiently suppresses chiral asymmetry inhomogeneities. As a result, the inverse cascade proceeds practically in the same way as in the chirally homogeneous model.

Key words: reheating of the Universe, Starobinsky model, sterile neutrinos, lepton asymmetry, primordial magnetic fields, inverse cascade.

Руденко Ігор Валентинович

Народження частинок, генерація лептонної асиметрії та еволюція магнітних полів у ранньому Всесвіті. (Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук.)

Зам. – 4 Формат 60 x 84/16 Обл.-вид. арк. - 1.00
Підписано до друку 17.05.2017 р. Тираж 100 прим.

Поліграфічна дільниця ІТФ ім. М.М. Боголюбова НАН України,
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 14-б

