

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
Київського національного університету
імені Тараса Шевченка
проф. Ганна ТОЛСТАНОВА



АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок
Генерація і еволюція первинних магнітних полів
(назва Проєкту)

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих вчених
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0062

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0062 «Генерація і еволюція первинних магнітних полів»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу **Підтримка досліджень провідних та молодих учених»** протокол від «16-17» вересня 2020 року № 21

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 26.04.2021
(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15.12.2021

Загальна вартість Проєкту, грн. 3 360 068,00

Вартість Проєкту по роках, грн.:

1-й рік 361 856,00

2-й рік 1 464 700,00

3-й рік 1 533 512,00

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 6 виконавців, з них:

доктори наук 2;

кандидати наук 2;

інші працівники 2.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(Ї) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Субвиконавців до проєкту не залучено.

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту (до 200 знаків)

Метою проєкту є самоузгоджений опис генерації електромагнітних полів в інфляційних моделях та їх подальшої еволюції в первинній ультрарелятивістській плазмі для пояснення спостережуваних великомасштабних магнітних полів у войдах.

4.2. Основні завдання Проєкту (до 400 знаків)

- 1) Побудувати самоузгоджену теорію ефекту Швінгера у Всесвіті, що розширюється, за допомогою квантових кінетичних рівнянь з урахуванням термалізації народжених частинок в присутності магнітного поля.
- 2) Вивчити кількісно вплив гелікальних магнітних полів на генерацію збурень кривизни, а також обчислити негаусові кореляції у спектрі первинних збурень.
- 3) Проаналізувати еволюцію гелікальних магнітних полів в ультрарелятивістській ферміонній плазмі з кіральною асиметрією.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми (до 400 знаків)

Пояснення магнітних полів у Всесвіті одна з найважливіших задач сучасної космології. Магнітні поля, народжені у ранньому Всесвіті, природним чином є присутнім всюди, в тому числі і у войдах, і можуть послужити в якості зародкового поля для галактик та їх скупчень. Велика кореляційна довжина спостережуваних магнітних полів наводить на думку про те, що ці поля могли згенеруватися протягом найдавнішої стадії в історії Всесвіту – інфляції.

- Новизна Проєкту (до 400 знаків)

Згенеровані під час та після інфляції сильні електричні поля завдяки ефекту Швінгера народжують заряджені частинки, утворюючи ультрарелятивістську плазму. Ця плазма дуже ефективно екранує електричне поле, тому повинна самоузгоджено розглядатися разом з еволюцією електромагнітних полів і інфлатона. Такий самоузгоджений розгляд генерації заряджених частинок та еволюції плазми і електромагнітних полів є принципово новим підходом, який запропонований авторами проєкту.

- Методологія дослідження (до 400 знаків)

Опис ефекту Швінгера пропонується здійснити з перших принципів, тобто із застосуванням методів квантової теорії поля у Всесвіті, що розширюється. Розглядаючи електричне та магнітне поля як зовнішні класичні великомасштабні поля, що залежать лише від часу, можна знайти часові залежності мод квантованого зарядженого поля і визначити з них такі спостережувані, як електричний струм, концентрація, тензор енергії імпульсу народжених заряджених частинок тощо.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ (до 2 сторінок) в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту (із зазначенням їх якісних та кількісних (технічних) характеристик)

За допомогою квантової кінетичної теорії здійснено опис ефекту Швінгера на стадіях інфляції та прехітінгу. Враховано, що народжені заряджені частинки термалізуються за рахунок зіткнень, які було змодельовано за допомогою інтеграла зіткнень у наближенні часу релаксації. Проаналізовано вплив зовнішнього магнітного поля на процес швінгерівського народження заряджених частинок. У роботі [1] досліджено генерацію електромагнітних полів під час хіггсівської інфляції з немінімальним зв'язком електромагнітного поля з кривиною простору-часу. Отримано явні вирази для функцій кінетичного і аксіонного зв'язку електромагнітного поля

з інфлатоном в айнштайнівській системі відліку. Визначено часові залежності модових функцій електромагнітного поля для всіх фізично значущих мод. Встановлено, що ефективна генерація можлива лише у випадку чисто аксіонного або аксіонно-домінованого зв'язку. Оцінено сучасні значення магнітного поля та його кореляційної довжини, які можуть сягати в даній моделі 10^{-15}Гс та 10 пк, відповідно.

У роботі [2] досліджено генерацію магнітних полів в інфляційній моделі з аксіонним зв'язком у формалізмі градієнтного розкладу, який описує еволюцію в часі набору білінійних електромагнітних функцій в координатному просторі. Цей формалізм дозволяє одночасно врахувати два важливих ефекти, які досі розглядалися в основному ізольовано: (i) зворотну реакцію згенерованих калібрувальних полів на еволюцію інфлатонного поля та (ii) утворення внаслідок ефекту Швінгера пар заряджених частинок і античастинок сильним електричним полем. Врахування цих ефектів дозволило показати, що зменшення згенерованих електромагнітних полів завдяки ефекту Швінгера та подальшій динамічній еволюції утворенної плазми частинок і античастинок може запобігти зворотній реакції у випадках, в яких ця реакція була б важливою [2,3]. Крім того, індукований електричний струм, який має омівську форму $J=\sigma E$, також зменшує вакуумні флуктуації Банча-Девіса глибоко всередині горизонту Хаббла. Це зменшення описується параметром Δ , який пов'язаний з проінтегрованою по часу провідністю σ , що робить опис усієї системи нелокальним у часі.

Також у роботі [4] вивчено генерацію кіральної асиметрії і кірального заряду під час аксіонної інфляції, де псевдоскалярне інфлатонне поле ϕ взаємодіє з електромагнітним полем за допомогою аксіонного зв'язку. Щоб описати еволюцію електромагнітного поля та визначити значення скалярного добутку електричного і магнітного полів $\mathbf{E}\cdot\mathbf{B}$ під час інфляції, використано формалізм градієнтного розкладу для білінійних електромагнітних функцій з довільним числом похідних по просторових координатах. Цей формалізм враховує ефект Швінгера та внесок кірального магнітного ефекту в електричний струм пропорційний кіральному хімічному потенціалу. Кіральний хімічний потенціал визначає величину кірального заряду і знаходиться за допомогою рівняння кіральної аномалії. Розв'язуючи набір рівнянь для інфлатонного поля, масштабного фактора, білінійних функцій електромагнітного поля з довільним числом похідних по просторових координатах та густини кірального заряду, знайдено, що генерація кіральної асиметрії і кірального заряду є досить ефективною, що призводить до генерації великого кірального хімічного потенціалу наприкінці інфляції з аксіонним зв'язком.

Результати роботи опубліковано в двох статтях у журналі з наукометричної бази даних Scopus та двох препринтах, які надіслані до друку у журнали, що входять до наукометричної бази Scopus.

1. O.O. Sobol, E.V. Gorbar, O.M. Teslyk, and S.I. Vilchinskii, Generation of an electromagnetic field nonminimally coupled to gravity during Higgs inflation, *Physical Review D* **104**, 043509 (2021).
2. E.V. Gorbar, K. Schmitz, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Gauge-field production during axion inflation in the gradient expansion formalism, *Physical Review D* **104**, 123504 (2021).
3. E.V. Gorbar, K. Schmitz, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Hypermagnetogenesis from axion inflation: model-independent estimates, arXiv:2111.04712 [препринт].
4. E.V. Gorbar, A.I. Momot, I.V. Rudenok, O.O. Sobol, S.I. Vilchinskii, Chirality production during axion inflation, arXiv: 2111.05848 [препринт].

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

З огляду на те, що дослідження мають фундаментальний характер, науково-технічна продукція за результатами роботи проекту не передбачена.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Проект не передбачає проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проекту в суспільній практиці.

Отримана система рівнянь і використаний формалізм можуть бути використані в подальшому для побудови дуже точних розв'язків для модових функцій калібрувального поля, що служить відправною точкою для багатьох подальших феноменологічних застосувань, включаючи феноменологію первинних збурень і баріогенезису.

Анотований звіт не містить відомостей, заборонених до відкритого опублікування.

Науковий керівник Проекту

професор кафедри квантової теорії поля фізичного факультету
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Едуард ГОРБАР


