

ВІДГУК

офіційного опонента
на дисертаційну роботу

РУДЕНКА ІГОРЯ ВАЛЕНТИНОВИЧА

“НАРОДЖЕННЯ ЧАСТИНОК, ГЕНЕРАЦІЯ ЛЕПТОННОЇ АСИМЕТРІЇ ТА ЕВО-
ЛЮЦІЯ МАГНІТНИХ ПОЛІВ У РАНЬОМУ ВСЕСВІТІ”,

що представлена на здобуття наукового ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – “теоретична фізика”

На даний момент проблематика космології раннього Всесвіту представляє значний інтерес з точки зору фундаментальної фізики. Успішний розвиток космологічних моделей має дозволити створити самоузгоджену картину еволюції Всесвіту. Так, теорія інфляції дозволяє не лише вирішити проблеми початкових умов теорії Великого вибуху, а й надає сценарій розігріву Всесвіту внаслідок народження частинок у осцилюючому полі інфлатона. Хоча теорія розігріву створювалась ще в 90-х роках ХХ сторіччя, послідовного аналізу процесів народження частинок в моделях інфляції зі слабким зв'язком з врахуванням розширення Всесвіту досі не було дано. Зокрема це стосується також добре відомої моделі інфляції Старобінського, яка згідно місії Planck найкраще узгоджується із спостережуваними даними.

Іншою важливою проблемою, вирішення якої, як очікується, слід шукати на ранніх етапах еволюції Всесвіту, є природа первинних магнітних полів. На існування таких полів вказують як спостережувані галактичні та міжгалактичні магнітні поля, що, ймовірно, могли утворитися в процесі стискування зародкових полів на етапі формування структур. Генерація цих зародкових полів можлива на стадіях інфляції та розігріву, а також на післяінфляційному етапі еволюції Всесвіту. Запропонований в нещодавніх роботах механізм магнетогенезису пов'язує первинні магнітні поля з кіральною аномалією в ранній релятивістській плазмі, яка у присутності кіральної асиметрії призводить до кірального магнітного ефекту, який суттєво впливає на еволюцію магнітних полів у первинній плазмі. За рахунок кірального магнітного ефекту виникає ефективний механізм інверсного каскаду, коли енергія від короткохвильових мод магнітного поля перекачується в довгохвильові моди. Ці довгохвильові моди є менш схильними до дисипації енергії. Таким чином, магнітні поля можуть виживати суттєво довше і стають великомасштабними. Проте в літературі при дослідженні даного феномена використовувалась наближена модель з штучно введеним однорідним кіральним хімічним потенціалом. Але, оскільки співвідношення кіральної аномалії є локальним, кіральний хімічний потенціал є неоднорідним. Тому виникає необхідність у самоузгодженій неоднорідній моделі.

Безумовно актуальними і дуже важливими проблемами сучасної космології є такі феномени, як темна матерія та темна енергія, баріонна та лептонна асиметрії Всесвіту, осциляції нейтрино Стандартної моделі. Задовільний розв'язок цих проблем може бути дано в рамках нейтринної модифікації Стандартної моделі, так званої моделі ν MSM, в якій поряд із звичайними лівокіральними нейтрино, присутні також правокірально стерильні нейтрино. Найлегша з цих частинок може слугувати кандидатом на роль темної матерії, тоді, як в розпадах двох важчих може генеруватися лептонна асиметрія. Досліджуючи останню, можна отримати обмеження на параметри моделі ν MSM, що є дуже важливим з експериментальної точки зору, оскільки стерильні нейтрино на даний момент не були задетектовані на прискорювачах або астрофізичними спостереженнями.

Усе вищесказане обумовлює **загальнонаукову і практичну актуальність** дисертаційної роботи І.В.Руденка, в якій досліджено народження частинок на стадії післяінфляційного розігріву, генерація лептонної асиметрії та еволюція магнітних полів у первинній плазмі.

Дисертаційна робота присвячена систематичному аналізу процесів народження частинок у Всесвіті, що розширюється в рамках інфляційної моделі зі слабким зв'язком інфлатона з полями матерії, отриманню темпів народження частинок; отриманню самоузгодженої системи рівнянь Максвелла у релятивістській неоднорідній плазмі з кіральною аномалією на основі кіральної кінетичної теорії та дослідженню еволюції інверсного каскаду магнітного поля в такій плазмі; дослідженню генерації лептонної асиметрії та отриманню обмежень на параметри моделі зі стерильними нейтрино, виходячи з вимог до лептонної асиметрії.

В кожній із поставлених в дисертації задач дисертант доволі майстерно використовував аналітичні і чисельні методи, що дозволило суттєво просунути фронт досліджень і поставити нові, значно складніші, питання для майбутніх дослідників. **Фактично, всі проведені дослідження є новими.**

Дисертаційна робота складається із вступу, трьох розділів, висновків, списку цитованих джерел. Повний обсяг дисертації становить 153 сторінки тексту, враховуючи 18 рисунків і 1 таблицю. Всі розділи роботи містять ґрунтовний огляд стану проблеми на початок її розв'язання. Це сприяє порозумінню змісту дисертації.

Автором за матеріалами дисертації, **опубліковано 5 статей** у наукових фахових виданнях, індексованих у Web of Science і Scopus, зроблено доповіді на 6 конференціях та додатково проведено обговорення на наукових семінарах у вітчизняних наукових інститутах.

Практичне значення роботи, на мою думку, в основному полягає у можливості використання отриманих результатів в космологічних задачах, які, зокрема, пов'язані з розігрівом Всесвіту (наприклад розрахунок температури Всесвіту), вивченням властивостей первинних магнітних полів, що в свою чергу, можуть мати вплив на інші процеси до та після рекомбінації. Отримані нові внески в електричний та кіральний струми можуть безпосередньо використовуватись в експериментах з діраківськими та вейлівськими матеріалами.

Варто підкреслити, що і в дисертації, і в авторефераті чітко, по пунктах, визначений **особистий внесок здобувача**. Вважаю, що він вагомий і задовольняє відповідним вимогам до кандидатських дисертацій МОН України.

До основних результатів дисертаційної роботи, отриманих пошукачем, можна віднести, на мій погляд, такі:

1. Використовуючи метод коефіцієнтів Боголюбова, отримано темпи народження бозонів та ферміонів на етапі післяінфляційного розігріву у моделі зі слабким зв'язком, з урахуванням розширення Всесвіту.
2. Використовуючи вимогу на суттєве значення лептонної асиметрії на момент народження частинок темної матерії, отримано обмеження на маси та константи взаємодії стерильних нейтрино моделі ν MSM у випадках прямої та оберненої ієрархії мас нейтрино Стандартної моделі.
3. Використовуючи кіральну кінетичну теорію отримано самоузгоджену систему рівнянь електродинаміки для релятивістської кіральної-асиметричної плазми в неоднорідному випадку.
4. Отримано чисельний розв'язок даної системи для магнітної спіральності і кірального хімічного потенціалу, що підтвердило існування інверсного каскаду в неоднорідному випадку. Також важливим є проведене дослідження впливу дифузії на неоднорідності в такій плазмі.

Аналіз дисертаційної роботи І.В. Руденка показав, що поряд з великим позитивним надбанням, до неї можна пред'явити і певні претензії. Зокрема, слід було б зробити такі **зауваження**:

1. У дисертації при дослідженні інверсного каскаду в кіральній-асиметричній первинній плазмі було б бажано не тільки якісно, але й кількісно оцінити вплив ненульової маси електронів на згенеровані зародкові магнітні поля.
2. В роботі розглядаються процеси народження частинок у випадку слабкої взаємодії інфлатона. В цьому випадку резонанс вузький. З методичної точки зору було б добре розглянути випадок широкого резонансу, що має місце при достатньо сильній константі зв'язку.
3. При дослідженні еволюції кірального хімічного потенціалу в дисертації обирались однорідні початкові умови для нього. Хоча, як видно з чисельного аналізу, проведеного в роботі, в хімічному потенціалі дуже швидко і виникають сильні неоднорідності, було би бажано привести також результати з неоднорідним від початку кіральним хімічним потенціалом.

Але ці зауваження ніяк не впливають на загальну надзвичайно позитивну оцінку дисертації. Резюмуючи, зазначу, що дисертаційне дослідження Руденка Ігоря Валентиновича є **логічно завершеною працею**, яка виконана на високому рівні і

цілком відповідає всім вимогам МОН України щодо кандидатських дисертацій, а її автор Руденок Ігор Валентинович, без сумніву, заслуговує на присудження йому наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – «теоретична фізика».

Офіційний опонент
доктор фізико-математичних наук,
професор, головний науковий співробітник
Науково-дослідного інституту
«Астрономічна обсерваторія»
Одеського національного університету імені
І.І. Мечникова

Жук О.І.

Підпис головного наукового співробітника
Науково-дослідного інституту
«Астрономічна обсерваторія»
Одеського національного університету імені
І.І. Мечникова,
доктора фізико-математичних наук,
професора Жука Олександра Івановича,
засвідчую:

Вчений секретар

Одеського національного університету імені
І.І. Мечникова



С.В. Курандо