

## ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

**Кузьміна Володимира Валеріановича**

**«ПРИСКОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК У**

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛЯХ ВЕЛИКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ»**

представлену на здобуття вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок

Дисертаційна робота Кузьміна В.В. присвячена теоретичному дослідженню руху заряджених частинок в полі інтенсивних електромагнітних хвиль, дослідженню нових методів прискорення заряджених частинок та нагріву плазми, знаходженню умов їх регулярного та хаотичного руху, а також умов ефективної взаємодії хвиль та частинок.

**Актуальність.** Взаємодія заряджених частинок з електромагнітними хвилями є ключовим процесом в фізиці плазми, в радіофізиці, в фізичній електроніці. Цей процес є головним при створенні теорії генераторів, при створенні теорій нагріву плазми електромагнітними хвилями. Слід відзначити що до теперішнього часу ці процеси були детально вивченими у випадку, коли параметр сили хвилі ( $\varepsilon = eE_0 / mc\omega$ ) був значно менший за 1. Однак з появою лазерів, а також потужних нових генераторів високочастотного випромінювання таких як МЦР, гіротронів, лазерів на вільних електронах цей параметр може бути більшим за 1 ( $\varepsilon \gg 1$ ). Як результат, він не може бути використаним у якості малого параметра задачі, за яким може бути розкладений рішення у фізичному процесі, який вивчається. Треба знаходити нові можливості для аналізу динаміки систем, які мають такий параметр. Відзначимо, що кількісна зміна величини цього параметра від малого значення до значення більшого за 1 призводить не тільки до кількісних змін динаміки руху заряджених частинок в таких полях, а й до якісних змін цієї динаміки. Поява таких полів відкриває нові можливості (і нові схеми) для прискорення заряджених частинок до великих швидкостей. Зокрема відкриває нові можливості прискорення заряджених частинок лазерними полями у вакуумі. Відзначимо також, що наявність таких полів відкриває нові можливості для появи режимів з динамічним хаосом. Такі режими є дуже ефективними для використанні їх для нагріву плазми до термоядерних температур. Дисертаційна робота присвячена вивченню особливостей динаміки руху частинок в полях великої інтенсивності. Тому можна вважати, що вибрана тема дисертаційної роботи є актуальною.

**Обґрунтованість і достовірність** наукових положень і висновків дисертації зумовлюється такими фактами:

Використанням для рішення задач добре апробованих методів теоретичної фізики та чисельних методів дослідження; відповідністю отриманих результатів в деяких граничних випадках з результатами других авторів; контролем точності програмного забезпечення, яке

використовувалося для проведення чисельних досліджень; в усіх випадках, коли це було можливим, дисертант здобув відомі граничні результати; в багатьох важливих випадках дисертанту вдалося описати процес на якісному рівні, який добре описує здобуті результати; здобуті результати є фізично прозорими та не суперечать фізичним уявленням про процеси, які вивчаються; Чисельні результати підтверджують аналітичні виводи; одержані аналітичні та чисельні результати в граничних випадках співпадають з результатами інших авторів; Результати дисертаційної роботи опубліковані у вітчизняних та зарубіжних виданнях, а також докладалися на міжнародних симпозиумах та конференціях.

**Значущість для науки і практики** дисертаційної роботи обумовлена тим, що в ній розглянуті важливі сторони взаємодії заряджених частинок з електромагнітними хвилями великої напруженості. Здобуті в дисертаційній роботі результати дозволили дисертанту запропонувати низку ефективних схем для прискорення заряджених частинок, а також для нагрівання плазми.

Найбільш цікаві та важливі результати, що викладені в дисертації, коротко можна сформулювати таким чином:

- У першому розділі наведено огляд літератури. Результатом цього огляду є формулювання актуальності теми дисертаційної роботи. Найбільш детальний та суттєвий огляд в цьому розділі присвячений огляду динаміки частинок в умовах циклотронного резонансу. Особлива увага при цьому була приділена авторезонансу. Були сформульовані його переваги та його недоліки.
- Другий розділ є найбільшим та, напевно, з найцікавішими результатами, які викладені в ньому. Зокрема, в цьому розділі звертається увага на той факт, що існуючі критерії виникнення режимів з динамічним хаосом в динаміці частинок в умовах циклотронних резонансів, можуть бути хибними. Тобто відсутність перекриття нелінійних резонансів не гарантує регулярної динаміки частинок. Вказано, що роль нерезонансних членів може бути причиною виникнення режиму з динамічним хаосом в цих випадках. Відзначимо також результат, який викладений в підрозділі 2.3. В цьому підрозділі викладений результат, який стосується руху частинок в полі великої кількості повздовжніх електромагнітних хвиль (в полі хвильового пакету). Дисертанту вдалося знайти умови, при виконанні яких динаміка частинок в полі хвильового пакету буде хаотичною або регулярною. Відзначимо, що здобутий критерій (формула (2.29)) простий та пов'язує всього чотири фізично прозорих параметра системи, яка вивчається: фазову та групову швидкість хвилі, її амплітуду та кількість хвиль в хвильовому пакеті. Це є дуже важливим результатом. В цьому ж розділі (підрозділ 2.5)) побудована самоузгоджена теорія взаємодії потоку заряджених частинок з полями електромагнітних хвиль. Найбільш цікавим результатом цього підрозділу є той факт, що можуть збуджуватися таким потоком частинок електромагнітні хвилі, частота

яких є порядку циклотронної частоти та яка є меншою ніж плазмова частота електронного потоку.

- В третьому розділі вивчається можливість параметричного впливу на фазові характеристики частинок, які захоплені в процес прискорення. Зокрема, процес прискорення в схемах прискорення ОЛВЕ. Показано, що параметричні резонанси можуть бути корисними для зменшення розкиду швидкостей частинок, які захоплені.
- Четвертий розділ присвячений вивченню руху частинок в схемах ОЛВЕ. Як відомо, ефективність цих схем прискорення є тим більшою, чим більшою є амплітуда хвиль, з якими взаємодіють частинки. Найбільш цікавим результатом цього розділу є факт, що до значень параметра сили хвилі 0.1 така закономірність є виправданою. Однак, вже при значеннях параметра сили хвилі 0.3 в цих схемах прискорення розвивається стохастична нестійкість. Ефективність таких схем стає незначною.
- В п'ятому розділі найбільш цікавими є результати, що описують різницю в динаміці частинок, що рухаються в електромагнітних хвилях з лінійною та з круговою поляризацією. Доведено, що в полі з круговою поляризацією є можливість створювати ефективні схеми прискорення заряджених частинок, зокрема, полями лазерного випромінювання. Такі схеми наведені у п'ятому розділі. Наприклад, було показано, що частинки з початковою енергією 5 Мев на відстані 0.4 см можуть бути прискорені до енергії 50 Мев в полі лазерного випромінювання, параметр сили хвилі яких дорівнює 3.
- В шостому розділі найбільш цікавим є результат, який доводить, що нагрів плазми регулярними полями в режимі з динамічним хаосом, є значно ефективнішим ніж нагрів плазми випадковими полями.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає у наступному:

1. Перш за все, відзначимо, що в дисертаційній роботі наведено значну кількість схем, які дозволяють використовувати їх для доприскорення заряджених частинок особливо полями лазерного випромінювання.
2. Важливими також є здобуті критерії виникнення регулярного руху частинок та виникнення режимі з динамічним хаосом. Особливо це стосується руху частинок в хвильових пакетах.
3. Важливим для застосування в схемах прискорення є результат, що рух частинок в імпульсі електромагнітної хвилі з круговою поляризацією повторює обвідну електромагнітного імпульсу.

Дисертаційна робота багата здобутими результатами. Однак в ній є недоліки. Відзначимо головні:

- Головним недоліком дисертаційної роботи є той факт, що деякі важливі результати, що здобуті дисертантом, недостатньо детально викладені в тексті дисертації. Зокрема, відзначимо два таких важливих результати. В дисертаційній роботі відзначено, що коли параметр сили хвилі є більшим за одиницю, то магнітна сила Лоренца є більшою ніж електрична сила



Лоренца. Це вірно. Однак це ствердження потребує детального опису. Другий важливий результат, який описаний в дисертаційній роботі, це результат прискорення частинки в електромагнітному імпульсі, і яка народилася в середині імпульсу. В дисертаційній роботі показано, що така частинка може придбати енергію значно більшу (втричі) ніж звичайні частинки, на яких імпульс набігає. Цей результат теж потребує більш детального освітлення. Є також деякі технічні недоліки. Зокрема, параметр сили хвилі у різних розділах дисертаційної роботи позначений різними літерами. В першому розділі є посилання на додаток 1. Такого додатку в дисертаційній роботі не має. Є додаток Б.

Однак, ці недоліки не зменшують значення здобутих в дисертації результатів, не зменшують загального доброго враження від неї. Наукові результати, положення, висновки і рекомендації, сформульовані в дисертації, викладені в 12-ох статтях, опублікованих у фахових виданнях і пройшли апробацію на 8-ми міжнародних науково-технічних конференціях. Зміст автореферату правильно і повністю відображає основні положення дисертації і відповідає вимогам ВАК України. Результати роботи рекомендуються до використання в Інституті радіофізики та електроніки НАН України, Радіоастрономічному інституті НАН України, Харківському національному університеті радіоелектроніки, Національному науковому центрі "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України, Львівському радіотехнічному інституті.

Дисертаційна робота «**ПРИСКОРЕННЯ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК У ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛЯХ ВЕЛИКОЇ ІНТЕНСИВНОСТІ**» повністю задовольняє всім вимогам, які пред'являються ВАК України до кандидатських дисертацій, а її автор, **Кузьмін Володимир Валеріанович**, безумовно, заслуговує присудження йому вченого ступеню кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.20 – фізика пучків заряджених частинок.

Офіційний опонент

**Лукін Костянтин Олександрович**,

доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач відділу Нелінійної динаміки електронних систем, Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України.



Підпис д.ф-м.н., професора Лукіна К. О. засвідчую.

Учений секретар ІРЕ НАН України ім. О.Я. Усикова

к.ф-м.н.,



І. Е. Почаніна