

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу

Кирилліна Ігоря Володимировича

«Орієнтаційні ефекти при проходженні релятивістських заряджених частинок через зігнуті кристали»,

яка представлена на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук (спеціальність 01.04.02 – «теоретична фізика»)

Актуальність теми дисертації

Дисертаційна робота І.В.Кирилліна присвячена теоретичному дослідженню процесу взаємодії пучків швидких заряджених частинок (з ультрарелятивістськими швидкостями) з орієнтованими кристалами, зокрема, зігнутими кристалами. Вибрана тема є **актуальною** як з точки зору фундаментальної фізики, оскільки вона дає нові знання в дуже важливому напрямку досліджень взаємодії випромінювання (заряджених частинок) з речовиною, так і прикладної фізики. Останнє, зокрема, пов'язано з можливістю керування пучками заряджених частинок високих енергій. Швидкі заряджені частинки при каналюванні взаємодіють з атомами кристалу когерентно. Така когерентна взаємодія дозволяє на малих відстанях суттєво змінювати напрямок руху швидких заряджених частинок. Водночас, вигин кристала дозволяє при певних орієнтаціях кристала відхиляти пучок заряджених частинок в одному напрямку або розділяти пучок на декілька частин. Детальне вивчення таких процесів є вкрай **важливим**, оскільки це може бути застосовано на великих прискорювачах заряджених частинок (в ЦЕРН, Fermilab, SLAC, FAIR).

Основна увага у дисертаційній роботі приділяється теоретичному опису орієнтаційних ефектів, які мають місце при русі високоенергетичних заряджених частинок у прямих та зігнутих кристалах. А саме, досліджується залежність ймовірності близьких зіткнень заряджених частинок з атомами кристала від його орієнтації, вплив некогерентного розсіювання в орієнтованому зігнутому кристалі на ефективність відхилення заряджених частинок, можливість зміни форми пучків заряджених частинок при проходженні частинок через зігнутий кристал, іонізаційні втрати від'ємно заряджених частинок при площинному каналюванні та вплив розсіювання частинок на ланцюжках атомів кристала на стабільність режиму площинного каналювання. Деякі з передбачених у ході дослідження нових ефектів вже дістали експериментального підтвердження.

Додатковим підтвердженням актуальності теми дисертації є той факт, що вона виконувалася в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера ІНЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України в рамках двох базових програм НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки та техніки, двох цільових програм наукових досліджень НАН України та п'яти науково-дослідних робіт НАН України та Державного фонду

фундаментальних досліджень України, в яких дисертант виступав у ролі виконавця, а також гранту НАН України дослідницькій групі молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямками розвитку науки і техніки, додаткової відомча теми наукових досліджень Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України та гранту Президента України за конкурсним проектом Державного фонду фундаментальних досліджень України, в яких дисертант виступав у ролі керівника проекту.

Структура дисертації

Дисертація складається із анотації, вступу, шести розділів основної частини, висновків, переліку посилань із 380 найменувань та одного додатку. Її викладено на 331 сторінці друкованого тексту. За змістом і структурою дисертаційна робота повністю відповідає вимогам до докторських дисертацій.

Вступ присвячено обґрунтуванню актуальності теми дослідження. В ньому сформульована мета та задачі дослідження, висвітлена наукова новизна та цінність отриманих результатів. У першому розділі проведено огляд літератури за темою орієнтаційних ефектів у прямих та зігнутих кристалах. Зокрема, показано, які механізми відхилення релятивістських заряджених частинок можливі при різних орієнтаціях зігнутого кристала. У другому розділі розвинуто теоретичний опис ефекту зменшення ймовірності близьких зіткнень релятивістських заряджених частинок з атомами зігнутого кристала при певних орієнтаціях кристала. У третьому розділі теоретичний опис двох режимів відхилення релятивістських заряджених частинок зігнутим кристалом, а саме стохастичного відхилення і площинного каналювання, узагальнено на випадок, коли враховується некогерентне розсіювання частинок. У четвертому розділі розвинуто опис процесу розділення пучка релятивістських заряджених частинок у зігнутому кристалі на декілька пучків. П'ятий розділ присвячено дослідженню спектрів іонізаційних втрат енергії релятивістських від'ємно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі. Передбачено можливість оцінки довжини деканалювання від'ємно заряджених частинок за допомогою аналізу спектрів іонізаційних втрат енергії частинок. У шостому розділі розвинуто теоретичний опис процесу розсіювання високоенергетичних додатно заряджених частинок на ланцюжках атомів при площинному каналюванні частинок. Проведено аналіз впливу такого розсіювання на стабільність режиму каналювання. Узагальнено теоретичний опис випромінювання каналюючих частинок на випадок, коли стають помітними локальні максимуми у спектрі випромінювання, пов'язані з розсіюванням на окремих ланцюжках атомів кристала.

Достовірність здобутих результатів та висновків

Достовірність результатів та висновків роботи не викликає сумнівів, оскільки в дисертації використані перевірені та добре апробовані методи теоретичної та обчислювальної фізики. Знайдені аналітичні вирази, підтверджуються чисельними розрахунками. Також вони добре корелюють з

результатами, здобутими іншими авторами. Застосування рівнянь класичної електродинаміки абсолютно виправдано, оскільки при ультрарелятивістському русі заряджених частинок в кристалах, з параметрами задачі обраними в дисертації, квантовими ефектами можна знехтувати, що детально показано в роботі.

Особо підкреслюю, що ефект зменшення ймовірності близьких зіткнень додатно заряджених частинок при переході від площинної до осьової орієнтації кристала та ефект несиметричного розділення пучка заряджених частинок при проходженні через зігнутий кристал, передбачені в дисертації, було експериментально підтверджено в експериментах на прискорювачі SPS в ЦЕРН.

Наукова новизна роботи

Наукова новизна роботи зумовлюється в першу чергу тим, що в ній передбачено низку нових ефектів, таких як зменшення ймовірності близьких зіткнень релятивістських додатно заряджених частинок з атомами зігнутого кристала при переході від площинної орієнтації кристала до осьової. Яскравим місцем дисертації вважаю проведений аналіз асиметрії розподілу частинок, каналюючих в нахилених площинах і як наслідок рекомендації з розділення пучка додатно заряджених частинок на декілька пучків з різною відносною кількістю частинок в цих пучках. В роботі розвинуто теоретичний опис стохастичного відхилення та площинного каналювання заряджених частинок з урахуванням некогерентного розсіювання, а також опис впливу розсіювання на атомних ланцюжках на стабільність площинного каналювання додатно заряджених частинок.

Практична цінність дисертаційної роботи

Практична цінність роботи пов'язана з тим, що здобуті в ній результати дозволяють краще зрозуміти особливості руху швидких заряджених частинок в орієнтованих зігнутих кристалах. Здобуті результати, зокрема, дозволяють обрати оптимальні параметри зігнутого кристала для найбільш ефективного відхилення пучків від'ємно заряджених частинок, а також для розділення пучка додатно заряджених частинок на декілька пучків.

Зауваження до роботи

Зауваження, які виникли по дисертації, мають рекомендаційний характер або стосуються помилок в тексті:

1. В дисертації розгляд орієнтаційних ефектів проведено для випадку руху заряджених частинок ультрарелятивістських швидкостей у прямих та зігнутих кристалах. Не завадило б зробити якісну оцінку можливості існування передбачених в дисертації ефектів на випадок нерелятивістських та помірно релятивістських швидкостей.

2. В розділі 5 запропоновано метод експериментального визначення довжини деканалювання, заснований на вимірюванні спектру іонізаційних втрат енергії. Вважаю за потрібне при цьому врахувати кутову розбіжність пучка заряджених частинок.

3. Сторінка 76, §1.3. Кінець першого речення «...передаючи їм частину своєї енергії, яка витрачається в основному на іонізацію атомів.» - краще сказати «...на іонізацію і збудження атомів.»

4. Сторінка 85, перший абзац, друге речення. «В експериментах було показано, що іонізаційні втрати енергії пропорційні квадрату заряду іонів (див. рис. 1.34), що узгоджується з формулою (1.36)» - правильніше сказати: узгоджується з формулою (1.36) з логарифмічною точністю.

5. Розділ 2, формула (2.4) – інтеграл руху в поперечній площині. Бажано б тут нагадати, що E – постійна величина.

6. У висновки до розділу 3 не зайвим було б додати конкретні параметри, які знайдені в розділі, щодо відхилення пучка антипротонів в рамках проекту FAIR.

7. Висновки до розділу 4. У другому і третьому пунктах йдеться про вісь $\langle 110 \rangle$. Мабуть треба додати, що це для кристала кремнію.

Слід зазначити, що наведені вище зауваження жодним чином не зменшують високого рівня роботи і її наукового та практичного значення.

Загальний висновок щодо дисертаційної роботи

Дисертаційна робота І.В. Кирилліна є завершеною науковою роботою. Вона виконана на високому фаховому рівні і містить нові, цікаві та практично значущі результати. Основні положення дисертації відображені в авторефераті. Як сама робота, так і автореферат, оформлені відповідно до вимог, які висуваються до дисертаційного дослідження. Дисертація повною мірою відповідає спеціальності 01.04.02 – «теоретична фізика», а результати роботи опубліковані у фахових журналах й апробовані на семінарах та конференціях.

Враховуючи вищесказане вважаю, що дисертація «Орієнтаційні ефекти при проходженні релятивістських заряджених частинок через зігнуті кристали» повністю задовольняє вимогам до докторських дисертацій, зокрема, п.п. 9,10,12,13 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 656 від 19.08.2015 р., № 1159 від 30.12.2015 р., № 567 від 27.07.2016 р.), а її автор, Кириллін Ігор Володимирович, повною мірою заслуговує присудження наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 – теоретична фізика.

Офіційний опонент

Доктор фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник,
заступник директора з наукової роботи
Інституту прикладної фізики НАН України



Холодов

Р.І. Холодов