

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
«ХАРКІВСЬКИЙ ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

**КИРИЛЛІН ІГОР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 539.12

**ОРІЄНТАЦІЙНІ ЕФЕКТИ ПРИ ПРОХОДЖЕННІ  
РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК  
ЧЕРЕЗ ЗІГНУТІ КРИСТАЛИ**

01.04.02 — теоретична фізика

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора фізико-математичних наук

Харків — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера  
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України.

Науковий консультант: доктор фізико-математичних наук, професор,  
академік НАН України  
**Шульга Микола Федорович**,  
ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут»  
НАН України, генеральний директор.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Анчишкін Дмитро Владленович**,  
Інститут теоретичної фізики  
імені М.М. Боголюбова НАН України,  
провідний науковий співробітник відділу теорії  
ядра і квантової теорії поля;

доктор фізико-математичних наук, професор,  
**Яновський Володимир Володимирович**,  
Інститут монокристалів НАН України,  
завідувач відділу теорії конденсованого стану  
речовини;

доктор фізико-математичних наук,  
старший науковий співробітник,  
**Холодов Роман Іванович**,  
Інститут прикладної фізики НАН України,  
заступник директора з наукової роботи.

Захист відбудеться «09» квітня 2021 р. о 15 годині на засіданні  
спеціалізованої вченої ради Д 64.845.02 Національного наукового центру  
«Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою: 61108, м.  
Харків, вул. Академічна, 1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного наукового  
центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України за адресою:  
61108, м. Харків, вул. Академічна, 1, та на офіційному сайті ННЦ ХФТІ.

Автореферат розісланий «05» березня 2021 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
канд. фіз.-мат. наук

А.І. Кірдін

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідженню орієнтаційних ефектів при проходженні релятивістських заряджених частинок через прямі та зігнуті кристали присвячена велика кількість теоретичних та експериментальних робіт. Інтерес до таких ефектів обумовлений як широким спектром можливих застосувань різних механізмів відхилення заряджених частинок при проходженні через зігнутий кристал, так і можливостями зміни форми пучків та їх розщеплення на декілька частин при проходженні через орієнтовані кристали, а також можливостями генерації електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот при проходженні релятивістських заряджених частинок через прямі та зігнуті кристали. Експериментальні дослідження орієнтаційних ефектів при русі швидких заряджених частинок в кристалах вже більше ніж півстоліття ведуться в багатьох прискорювальних центрах, таких як Європейська організація з ядерних досліджень ЦЕРН (м. Женева, Швейцарія, в основному на прискорювачах SPS та LHC), Національна прискорювальна лабораторія ім. Енріко Фермі (м. Батавія, США), Національна прискорювальна лабораторія SLAC (Стенфорд, США), ІФВЕ (м. Протвино, Росія, на прискорювачі У-70), Об'єднаний інститут ядерних досліджень (м. Дубна, Росія), Майнський університет (м. Майнц, Німеччина, на прискорювачі МАМІ). Сильні електричні поля всередині кристала дозволяють на малих відстанях змінювати напрямок руху релятивістських заряджених частинок, які проходять через кристал під малими кутами до кристалічних осей або площин. Це дозволяє в деяких випадках замінювати громіздкі магнітні системи, які потрібні для відхилення заряджених частинок, зігнутими кристалами товщиною від кількох десятків мікрон до декількох сантиметрів. Окрім компактності, серед переваг кристалів перед магнітними системами відхилення високоенергетичних заряджених частинок слід зазначити те, що вони не потребують охолодження (на відміну від надпровідникових електромагнітів) і не мають потреби в споживанні електроенергії. Серед можливих застосувань різних механізмів відхилення заряджених частинок зігнутими кристалами можна відзначити виведення релятивістських заряджених частинок з прискорювачів, зменшення емітансу пучків заряджених частинок у прискорювачах шляхом очищення пучків від гало за допомогою зігнутих кристалів, розщеплення пучків релятивістських заряджених частинок на декілька частин та зміна форми таких пучків, відхилення короткоживучих заряджених частинок з метою вимірювання їх магнітного моменту. Прямі орієнтовані кристали можуть використовуватися, наприклад, для генерації випромінювання в різних діапазонах частот. Теоретичним дослідженням в цьому актуальному науковому напрямку присвячена ця дисертація, в якій основну увагу приділено аналізу ефектів, які мають місце при проходженні релятивістських заряджених частинок через зігнуті кристали.

**Мета і завдання дослідження.** Основна мета дисертаційної роботи полягає в теоретичному описі ефектів, які мають місце при розсіюванні релятивістських заряджених частинок в орієнтованих зігнутих кристалах.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні завдання:

- знайти орієнтаційну залежність ймовірності близьких зіткнень релятивістської зарядженої частинки з атомами кристала при її русі в зігнутому орієнтованому кристалі;
- розвинути теоретичний опис процесу некогерентного розсіювання релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі та дослідити вплив такого розсіювання на ефективність відхилення частинок у зігнутому кристалі з осьовою та площинною орієнтаціями;
- знайти оптимальні умови для відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі;
- дослідити можливості розщеплення пучка позитивно заряджених частинок при їх стохастичному відхиленні у зігнутому кристалі;
- знайти спектри іонізаційних втрат енергії швидких негативно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі при товщинах кристала, близьких до довжини деканалювання частинок;
- дослідити вплив розсіювання на окремих ланцюжках атомів кристала при площинному каналюванні релятивістських заряджених частинок на стабільність площинного каналювання частинок та електромагнітне випромінювання від цих частинок.

*Об'єктом дослідження* є процеси розсіювання та випромінювання релятивістських заряджених частинок в орієнтованих кристалах.

*Предметом дослідження* є ефекти, що виникають при розсіюванні релятивістських заряджених частинок в орієнтованих зігнутих кристалах.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених у дисертації задач були використані методи класичної механіки та електродинаміки та методи чисельного моделювання руху швидких заряджених частинок в полі ланцюжків атомів кристала та атомних площин. Рух в кристалі розглядався за умов, коли товщина кристала є значно меншою за радіаційну довжину шляху частинок в речовині, тому енергія релятивістських частинок при проходженні через кристал вважалася незмінною.

**Наукова новизна отриманих результатів.** У дисертаційній роботі вперше здобуто наступні результати:

1. Враховано вплив некогерентного розсіювання на процес стохастичного відхилення заряджених частинок високої енергії у зігнутому кристалі та знайдено залежність оптимального радіуса вигину кристала при стохастичному відхиленні частинок та максимального кута, на який відхиляється задана част-

ка частинок пучка за допомогою стохастичного відхилення, від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 100 GeV до 1,3 TeV.

2. Враховано вплив некогерентного розсіювання на процес площинного каналювання релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі та знайдено залежність максимального кута відхилення заданої частини частинок пучка при площинному каналюванні від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 10 GeV до 10 TeV.

3. Запропоновано метод розщеплення пучка релятивістських позитивно заряджених частинок на декілька пучків при проходженні пучка частинок через зігнутий кристал в умовах реалізації стохастичного механізму відхилення та знайдено оптимальні умови для такого розщеплення.

4. Запропоновано метод знаходження оптимальних умов для ефективного відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі.

5. Передбачено ефект зменшення ймовірності близьких зіткнень високоенергетичних позитивно заряджених частинок при переході від площинного каналювання до стохастичного відхилення у зігнутому кристалі. Розвинуто теоретичний опис цього ефекту та знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень як позитивно, так і негативно заряджених частинок високої енергії з атомами у зігнутому кристалі від кута між початковим імпульсом частинок та площиною вигину кристала.

6. Знайдено залежність ефективності стохастичного механізму відхилення від вибору площини вигину кристала.

7. Отримано спектри іонізаційних втрат енергії швидких негативно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі, товщина якого є близькою до довжини деканалювання частинок, та знайдено зв'язок між характеристиками цих спектрів та довжиною деканалювання заряджених частинок у кристалі.

8. Отримано залежність кількості позитивно заряджених частинок, які при русі в орієнтованому кристалі залишаються в режимі площинного каналювання, від кута між початковим імпульсом частинок та кристалічними атомними площинами, в полі яких рухається частинка, та від кута між початковим імпульсом частинок та площиною, яка містить у собі кристалічну вісь, поблизу якої орієнтовано кристал, і є ортогональною до атомних площин, в полі яких має місце каналювання.

9. Розвинуто теоретичний опис випромінювання каналюючих частинок у випадку, коли стають помітними локальні максимуми у спектрі випромінювання, пов'язані з розсіюванням на окремих атомних ланцюжках.

**Практичне і наукове значення отриманих результатів** полягає в тому, що розвинутий в дисертаційній роботі теоретичний аналіз дозволяє поглибити

уявлення про процеси, які мають місце при русі релятивістських заряджених частинок у зігнутих кристалах, а результати досліджень можуть бути використані як для постановки нових експериментів в ЦЕРН, GSI та інших прискорювальних центрах, так і для застосування зігнутих кристалів для виведення пучків високоенергетичних заряджених частинок з прискорювачів, розщеплення пучків на декілька частин, зміни форми пучків на малих відстанях, відхилення короткоживучих частинок та генерації електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот.

**Особистий внесок здобувача.** Результати дисертації опубліковані у статтях [1–13], препринті [14] і тезах доповідей наукових конференцій [15–34]. Здобувач брав участь у постановці задач, вирішених у дисертації, формулюванні основних ідей та методів дослідження, проведенні найбільш складних аналітичних і чисельних розрахунків, а також виконував контроль та перевірку результатів, отриманих іншими співавторами.

У статті [1] здобувачем було знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень негативно заряджених частинок з атомами у зігнутому кристалі від кута  $\theta_{y,in}$  між початковим імпульсом частинок та площиною вигину кристала та пояснено наявність мінімуму в цій залежності при  $\theta_{y,in}$ , приблизно рівних значенню критичного кута осевого каналювання. У роботі [2] здобувачем було знайдено кутові розподіли позитивно заряджених частинок після проходження зігнутого кристала в умовах реалізації стохастичного механізму відхилення частинок і показано можливість розщеплення пучка на декілька частин, а також аналітично знайдено залежність числа частинок, які переходять в режим площинного каналювання в нахилених площинах від товщини кристала. У статті [3] здобувачем було знайдено ефективність відхилення релятивістських позитивно заряджених частинок різними площинними каналами зігнутого кристала. У роботі [4] здобувачем було узагальнено теоретичний опис стохастичного механізму відхилення на випадок руху частинок у зігнутому кристалі з урахуванням некогерентного розсіювання та знайдено аналітичний вираз для оптимального радіуса вигину кристала при стохастичному відхиленні. У статті [5] здобувачем було знайдено аналітичну залежність ймовірності близьких зіткнень від кута між атомною площиною та початковим імпульсом заряджених релятивістських частинок в моделі синусоїдального потенціалу кристалічних атомних площин. Крім того, за допомогою числового моделювання здобувачем було знайдено аналогічну залежність для моделі потенціалу кристалічних атомних площин в зігнутому кристалі в наближенні Дойля-Тернера. У роботі [6] здобувачем було знайдено залежність ефективності розщеплення пучка релятивістських заряджених частинок на декілька частин у зігнутому кристалі від орієнтації кристала та показано можливість асиметричного розщеплення. У статті [7] здобувачем було знайдено аналітичну залежність максимального кута відхилення частинок та оптимального радіуса вигину кристала від енергії час-

тинок у випадку стохастичного відхилення релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі. У роботі [8] здобувачем було отримано аналітичний вираз для максимального кута відхилення заданої долі пучка негативно заряджених частинок при площинному каналюванні у зігнутому кристалі. У статті [9] здобувачем було знайдено вираз для спектральної густини випромінювання релятивістських заряджених частинок при площинному каналюванні з урахуванням розсіювання на окремих атомних ланцюжках в моделі параболічного площинного потенціалу. Також за допомогою числового моделювання здобувачем отримано спектри випромінювання в більш точному наближенні Дойля-Тернера для площинного потенціалу кристала. У роботі [10] здобувачем було отримано залежність кута відхилення релятивістських негативно заряджених частинок від радіуса вигину кристала у випадку стохастичного механізму відхилення та показано існування максимуму в цій залежності. У статті [11] здобувачем було знайдено залежність максимального кута відхилення частинок та оптимального радіуса вигину кристала від енергії частинок у випадку площинного каналювання релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі. У роботі [12] здобувачем було отримано спектри випромінювання високоенергетичних заряджених частинок в орієнтованому кристалі та показано, що пік, присутній у спектрах при русі частинок у полі періодично розташованих кристалічних атомних ланцюжків, коли кут між початковим імпульсом частинок та кристалічною віссю є меншим за критичний кут осьового каналювання, відповідає нестійкому періодичному руху надбар'єрних частинок в полі атомних площин. У статті [13] здобувачем було отримано спектри іонізаційних втрат енергії релятивістських заряджених частинок в орієнтованому кристалі та залежність характеристик цих спектрів від параметрів кристала. У роботі [14] здобувачем було знайдено залежність ефективності стохастичного механізму відхилення від вибору площини вигину кристала.

Таким чином, особистий внесок здобувача у вирішенні задач, поставлених у дисертації, є визначальним.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на семінарах за запрошенням та робочих нарадах у закордонних наукових установах: Національний інститут ядерної фізики (відділення м. Феррари), м. Феррара, Італія (2015 та 2017 рр.), Лабораторія лінійного прискорювача, м. Орсе, Франція (2016 р.). Також вони доповідалися на наступних міжнародних наукових конференціях: XLIV Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами (Москва, Россия, 27–29 мая 2014 г.), VI International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” (Capri, Italy, October 5–10, 2014), XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям (Харьков, 16–20 марта 2015 г.), XLV Международная конференция по физике взаимодей-

ствія заряджених частиц с кристаллами (Москва, Россия, 26–28 мая 2015 г.), XIV Конференція по фізиці високих енергій, ядерної фізиці і прискорителям (Харьков, 22–25 марта 2016 г.), XLVI Международная конференція по фізиці взаємодії заряджених частиц с кристаллами (Москва, Россия, 31 мая – 2 июня 2016 г.), VII International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” (Sirmione – Desenzano del Garda, Italy, September 25–30, 2016), XV Конференція по фізиці високих енергій, ядерної фізиці і прискорителям (Харьков, 21–24 марта 2017 г.), XII International Symposium “Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures” (Hamburg, Germany, September 18–22, 2017), XVI Конференція по фізиці високих енергій, ядерної фізиці і прискорителям (Харьков, 20–23 марта 2018 г.), VIII International Conference “Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena” (Ischia, Italy, September 23–28, 2018), XVII Конференція по фізиці високих енергій і ядерної фізиці (Харьков, 26–29 марта 2019 г.), XXXI International Conference on Photonic, Electronic, and Atomic Collisions (Deauville, France, July 23–30, 2019), XIII International Symposium “Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures” (Belgorod, Russia, September 15–20, 2019), XVIII Конференція по фізиці високих енергій і ядерної фізиці (Харьков, 24–27 марта 2020 г.).

**Зв’язок праці з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано в Інституті теоретичної фізики імені О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України. Вона є складовою частиною наступних програм та проєктів:

- базова програма «Відомчий запит НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки та техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за темою «Розвиток теорії електродинамічних процесів при взаємодії заряджених частинок високих та ультрависоких енергій з аморфною речовиною, кристалічними структурами та інтенсивними зовнішніми полями» (номер державної реєстрації 0111U09550, термін виконання 2011–2015 рр., виконавець);

- базова програма «Відомчий запит НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки та техніки Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» за темою «Електромагнітні процеси в інтенсивних зовнішніх полях та при взаємодії заряджених частинок великої енергії з кристалічними та аморфними середовищами» (номер державної реєстрації 0116U007070, термін виконання 2016–2020 рр., виконавець);

- цільова програма наукових досліджень НАН України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» за темою «Дослідження механізмів взаємодії заряджених частинок великої енергії з кристалами. Пропозиції щодо вимірювання магнітних моментів короткоживучих частинок в ЦЕРН» (номер державної реєстрації 0118U100327, термін виконання 2018–2019 рр., виконавець);



- цільова програма наукових досліджень НАН України «Підтримка розвитку пріоритетних напрямів наукових досліджень» за темою «Дослідження когерентних ефектів при взаємодії частинок великої енергії з кристалічними та аморфними мішенями та їх використання для діагностики та керування параметрами пучків при проведенні прецизійних експериментів на прискорювачах CERN, LAL та GSI» (номер державної реєстрації 0120U103570, термін виконання 2020–2021 рр., виконавець);

- грант НАН України дослідницькій групі молодих вчених НАН України для проведення досліджень за пріоритетними напрямами розвитку науки і техніки за темою «Когерентні ефекти в динаміці та втратах енергії високоенергетичних заряджених частинок у кристалічних і аморфних середовищах» (номер державної реєстрації 0118U100199, термін виконання 2018–2019 рр., керівник);

- додаткова відомча тема наукових досліджень Відділення ядерної фізики та енергетики НАН України на 2019 р. «Дослідження залежності ефективності відхилення релятивістських заряджених частинок, які рухаються в зігнутому кристалі в режимі площинного каналювання, від енергії частинок» (номер державної реєстрації 0119U102937, термін виконання 2019 р., керівник);

- науково-дослідна робота НАН України за темою «Електромагнітні процеси при проходженні заряджених частинок великої енергії через кристалічні та аморфні середовища» (номер державної реєстрації 0114U002898, термін виконання 2014–2015 рр., відповідальний виконавець);

- науково-дослідна робота НАН України за темою «Розсіяння та випромінювання заряджених частинок великої енергії в тонких шарах кристалічної та аморфної речовини» (номер державної реєстрації 0116U004398, термін виконання 2016–2017 рр., відповідальний виконавець);

- науково-дослідна робота НАН України за темою «Когерентні процеси в розсіянні та випромінюванні при взаємодії заряджених частинок з прямими та зігнутими кристалами при енергіях, досяжних на прискорювачах ЦЕРН» (номер державної реєстрації 0118U006496, термін виконання 2018–2020 рр., відповідальний виконавець);

- науково-дослідна робота НАН України за темою «Розробка детекторних систем для експериментів на прискорювачах та технологій для фізики прискорювачів» (номер державної реєстрації 0115U005153, 0120U103567, термін виконання 2015–2018 рр., 2020 р., виконавець);

- науково-дослідна робота Державного фонду фундаментальних досліджень України за темою «Дослідження динаміки заряджених частинок великої енергії в прямих та зігнутих кристалах» (номер державної реєстрації 0115U005610, 0116U002983, термін виконання 2015–2016 рр., виконавець);

- грант Президента України за конкурсним проектом Державного фонду фундаментальних досліджень України за темою «Відхилення ультрарелятивістських негативно заряджених частинок за допомогою зігнутих кристалів» (номер державної реєстрації 0117U001680, термін виконання 2017 р., керівник).

Також дослідження, покладені в основу дисертації, є складовою частиною програми Міністерства освіти та науки України «Фундаментальні наукові дослідження з найбільш важливих проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного, суспільно-політичного, людського потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі та сталого розвитку суспільства і держави», в рамках тем:

- «Електромагнітні процеси та процеси за участю короткоживучих частинок у кристалах при енергіях, досяжних у ЦЕРНі» (номер державної реєстрації 0117U004866, термін виконання 2017–2019 рр., виконавець);
- «Дослідження транспорту швидких частинок у мультиплікуючих середовищах та в інтенсивних зовнішніх полях» (номер державної реєстрації 0119U002533, термін виконання 2019–2021 рр., виконавець).

У 2018–2020 рр. робота над дисертацією проводилася в докторантурі Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут».

**Публікації.** Результати дисертації опубліковані у 34 наукових працях: у 13 статтях у фахових вітчизняних і міжнародних періодичних виданнях, 1 препринті та у 20 тезах доповідей на вітчизняних і міжнародних наукових конференціях. Статті [5] та [6] опубліковані в одному номері журналу.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел із 380 найменувань на 40 сторінках та одного додатку. Робота містить 150 рисунків та 2 таблиці у тексті. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 331 сторінку, обсяг основної частини складає 264 сторінки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовується актуальність та важливість досліджень, пов'язаних із темою дисертаційної роботи, сформульовано мету, основні завдання та методи досліджень, представлено основні результати роботи, їх наукову новизну та практичне значення. Наведено також інформацію про апробацію результатів дисертаційної роботи, особистий внесок здобувача й описано структуру дисертації.

У **першому розділі** проведено огляд літератури за темою орієнтаційних ефектів у прямих та зігнутих кристалах. Показано, що такі дослідження почалися з аналізу розсіювання рентгенівських променів на орієнтованому кристалі.

На початку 1960-х років М. Т. Робінсоном та О. С. Оуеном [1\*,2\*] на основі комп'ютерного моделювання був передбачений ефект аномально великого пробігу швидких іонів, які падають на кристал під малим кутом до однієї з його головних кристалічних осей. Отримані орієнтаційні залежності довжини пробігу іонів міді у кристалах показали, що коли кристал орієнтовано відносно напрямку падіння частинок уздовж осі з малими значеннями індексів Міллера, довжина пробігу суттєво зростає. Цей ефект обумовлений явищем каналювання частинок в кристалі, при якому кореляції в розсіюванні на сусідніх атомах кристала призводять до зменшення ймовірності того, що позитивно заряджені іони будуть наближатися на малу відстань до ядер атомів. Незабаром це передбачення було підтверджено експериментально [3\*,4\*]. Було показано, що на відміну від аморфного середовища, в кристалі є напрямки, уздовж яких атоми утворюють ланцюжки та площини. Якщо високоенергетична заряджена частинка рухається в кристалі під невеликим кутом до одного з цих напрямків, з'являються кореляції в розсіюванні частинки на сусідніх атомах ланцюжка або площини, і рух частинки визначається, переважно, полем безперервного потенціалу кристалічних атомних ланцюжків або площин. Теорія явища каналювання була розвинена Й. Ліндхардом [5\*,6\*], який ввів поняття безперервного потенціалу ланцюжків атомів кристала. Це наближення відповідає випадку, коли заряджена частинка рухається під малим кутом по відношенню до кристалографічної осі та розсіюється послідовно на ланцюжках атомів, причому рух частинки між зіткненнями зазвичай є нерегулярним двовимірним. В роботі [7\*] було показано, що саме у випадку малого кута між напрямком руху високоенергетичної зарядженої частинки та кристалічною віссю розгляд задачі розсіювання частинки в кристалі може бути проведений в рамках класичної механіки.

В 1976 р. Е. М. Циганов запропонував [8\*,9\*] використання площинного каналювання швидких заряджених частинок у зігнутому кристалі для відхилення напрямку їх руху. При площинному каналюванні частинки рухаються в підбар'єрному режимі по відношенню до площинного потенціалу атомів кристала. Якщо кристал зігнути, площинний потенціал зміниться, але якщо вигин є невеликим, то в цьому потенціалі залишаться ділянки, на яких розташовані потенціальної ями. Результати комп'ютерного моделювання [10\*,11\*] підтвердили передбачення Е. М. Циганова, а перше експериментальне підтвердження можливості відхилення швидких заряджених частинок за допомогою площинного каналювання у зігнутому кристалі було опубліковане в 1979 р. в роботі [12\*].

У 1987 р. О. М. Таратін та С. А. Воробйов за допомогою чисельного моделювання показали, що ті частинки, які при падінні на кристал є надбар'єрними та не захоплюються всередині кристала в режим площинного каналювання, при русі у кристалі будуть відхилені в напрямку, що є протилежним до вектору кривини кристала [13\*,14\*]. Оскільки при цьому кут відбиття від атомної площини

майже дорівнює куту падіння на площину, за аналогією з відбиттям в оптиці, явище було названо об'ємним відбиттям заряджених частинок у зігнутому кристалі. Експериментальне підтвердження існування ефекту об'ємного відбиття заряджених частинок від атомних площин у зігнутому кристалі було опубліковане в роботах [15\*,16\*].

У 1991 р. А. А. Гриненко та М. Ф. Шульга передбачили можливість відхилення швидких заряджених частинок при їх розсіюванні на зігнутих ланцюжках атомів кристала [17\*]. На основі чисельного моделювання було розглянуто рух заряджених частинок у полі зігнутих атомних ланцюжків. Виявилось, що і для позитивно, і для негативно заряджених частинок має місце ефективне відхилення. У випадку позитивно заряджених частинок більшість частинок відхилилася на кут вигину кристала. У випадку негативно заряджених частинок кількість частинок, відхилених на кут вигину кристала, була меншою, але незалежно від знака заряду усі частинки пучка відхилилися в напрямку вектора кривини кристала. Оскільки новий механізм відхилення мав місце при орієнтаціях кристала, при яких в прямому кристалі має місце явище динамічного хаосу (тобто коли кут між імпульсом частинки та віссю атомного ланцюжка є меншим або порядку критичного кута осьового каналювання), цей механізм відхилення пізніше було названо стохастичним механізмом відхилення. В 2008-2009 роках колаборацією UA9 в ЦЕРН було проведено експерименти по виявленню стохастичного відхилення релятивістських заряджених частинок [18\*,19\*]. Експерименти доказали можливість стохастичного відхилення як позитивно, так і негативно заряджених частинок.

У **другому розділі** досліджено орієнтаційну залежність ймовірності близьких зіткнень релятивістських заряджених частинок з атомами в кристалі [1, 5, 16–18, 22, 31]. Для аналітичного розгляду цієї задачі для позитивно заряджених частинок було використано наступне наближення потенціальної енергії частинки в полі атомних площин:

$$U(x) = \frac{U_0}{2} \left[ 1 - \cos \left( 2\pi \frac{x}{d_p} \right) \right], \quad (1)$$

де  $U_0$  – це глибина потенціальної ями,  $d_p$  – це відстань між сусідніми атомними площинами, вісь  $x$  є ортогональною до атомних площин. Для знаходження траєкторії частинки у полі (1) потрібно вирішити рівняння руху:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{c^2}{E} \frac{\partial}{\partial x} U(x),$$

де  $E$  – це енергія частинки. Розв'язок цього рівняння було знайдено в наступному вигляді:

$$x(t) = \frac{d_p}{\pi} \operatorname{am} \left( \frac{\pi t v_x(0)}{d_p}, \frac{\theta_c}{\theta_{x,0}} \right),$$

де  $\operatorname{am}(u, k)$  – це амплітуда Якобі (зворотна функція еліптичного інтегралу першого роду),  $v_x(0)$  – швидкість частинки уздовж осі  $x$  в момент падіння на кристал,  $\theta_c = \sqrt{2U_0/E}$  – це критичний кут площинного каналювання,  $\theta_{x,0} = v_x(0)/c$ ,  $c$  – це швидкість світла у вакуумі,  $t$  – час, який частинка провела у кристалі. Характер залежності  $x(t)$  від часу визначається другим аргументом амплітуди Якобі і для різних значень параметра  $k = \theta_c / \theta_{x,0}$  показаний на рис. 1. Підбар'єрному руху (площинному каналюванню) відповідає випадок  $k > 1$ , тобто  $\theta_{x,0} < \theta_c$ , а надбар'єрному руху відповідає  $k < 1$ , тобто  $\theta_{x,0} > \theta_c$ . Якщо  $\theta_{x,0}$  дещо перевищує  $\theta_c$  (див. випадок  $k=0,99$  на рис. 1), позитивно заряджені частинки «зависають» над атомними площинами ( $n$ -на площина має координату  $x_n = (n + 0,5)d_p$ ,  $n \in \mathbb{Z}$ ).

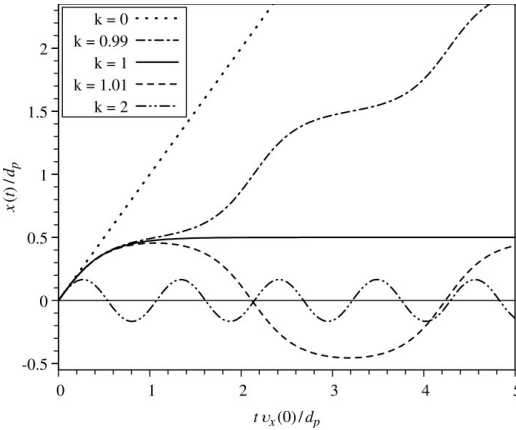


Рис 1: Траєкторії позитивно заряджених частинок у полі (1) для різних значень відношення між критичним кутом площинного каналювання та початковим значенням кута між імпульсом частинки та кристалічною атомною площиною, поблизу якої частинка рухається у кристалі.

Залежність ймовірності близьких зіткнень позитивно заряджених частинок з атомами кристала від кута  $\theta_{x,0}$  вдалося знайти в наступному вигляді:

$$P(\theta_{x,0}) = \sigma N \int_0^L \mathcal{G}_4 \left[ \operatorname{am} \left( \frac{\pi l \theta_{x,0}}{d_p}, \frac{\theta_c}{\theta_{x,0}} \right), \exp \left( -\frac{2\pi^2 r_T^2}{d_p^2} \right) \right] dl,$$

де  $L$  – це товщина кристала,  $N$  – концентрація атомів у кристалі,  $\sigma$  – перетин зіткнення частинки з атомом,  $r_T$  – середньоквадратичне відхилення атома від положення рівноваги,  $\mathcal{G}_4(\zeta, q)$  – це тета-функція Якобі четвертого роду.

Для негативно заряджених частинок залежність ймовірності близьких зіткнень з атомами кристала від  $\theta_{x,0}$  вдалося знайти в наступному вигляді:

$$P(\theta_{x,0}) = \sigma N \int_0^L \mathcal{G}_3 \left[ \operatorname{am} \left( \frac{\pi l \theta_{x,0}}{d_p}, \frac{\theta_c}{\theta_{x,0}} \right), \exp \left( -\frac{2\pi^2 r_T^2}{d_p^2} \right) \right] dl,$$

тобто відмінність від випадку позитивно заряджених частинок полягає в роді тета-функції Якобі (третій, а не четвертий).

За допомогою чисельного моделювання було знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень релятивістських заряджених частинок з атомами у зігнутому кристалі від кута між початковим імпульсом частинок та площиною вигину кристала. При моделюванні використовувався потенціал ланцюжків атомів кристала в моделі Дойля-Тернера. Також знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень заряджених частинок від кута  $\theta_{x,in}$  між атомною площиною, поблизу якої рухається частинка та початковим напрямком імпульсу частинки. У випадку позитивно заряджених частинок цю залежність показано на рис. 2. Малі значення кута  $\theta_{x,in}$  відповідають площинному каналюванню, а великі – надбар'єрному руху частинок у зігнутому кристалі. У випадку об'ємного відбиття, коли  $\theta_c < \theta_{x,in} < \alpha$ , де  $\alpha$  – це кут вигину кристала (на рис. 2  $\alpha \approx 10\theta_c$ ), ймовірність близьких зіткнень позитивно заряджених частинок з атомами зігнутого кристала має найбільше значення, тому що при об'ємному відбитті всередині кристала є область, в якій частинка проходить по дотичній до атомних площин.

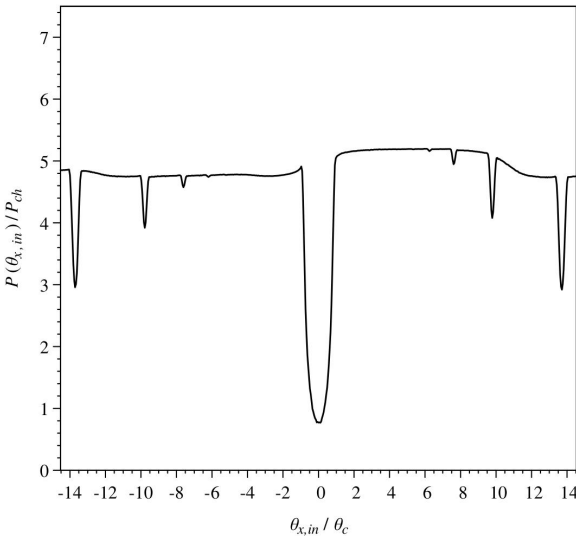


Рис 2: Залежність ймовірності близьких зіткнень протонів з енергією 400 Гев від кута між початковим імпульсом протонів та зігнутою площиною (100) при площинному каналюванні та надбар'єрному русі в зігнутому кристалі кремнію.

У **третьому розділі** при урахуванні некогерентного розсіювання отримано вираз для максимального кута, на який можна відхилити заряджені частинки за допомогою стохастичного механізму відхилення

$$\alpha_{st} = \frac{\psi_m^2}{l / R + \xi R} \quad (2)$$

де  $\psi_m$  – це максимальне значення кута  $\psi$  між імпульсом частинок та атомними ланцюжками, в полі яких частинка рухається у кристалі, при якому частинки беруть участь у стохастичному відхиленні,  $l$  – це середня довжина шляху, який частинка проходить при розсіюванні на одному атомному ланцюжку,  $R$  – радіус вигину кристала,  $\xi$  – коефіцієнт пропорційності між середнім квадратом кута некогерентного багатократного розсіювання та товщиною кристала при осьовій орієнтації кристала.

Крім того, було отримано залежність кута відхилення, до якого частка каналюваних частинок при площинному каналюванні релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі є вищою за  $f$ :

$$\alpha_{pl} = \frac{\theta_c^2}{2\zeta^2 R \left( \operatorname{erf}^{-1} \left( \frac{f}{1 - \sqrt{R_c / R}} \right) \right)^2}$$

де  $\operatorname{erf}^{-1}(x)$  – це зворотна функція помилок,  $R_c$  – критичний радіус вигину кристала при площинному каналюванні,  $\zeta$  – коефіцієнт пропорційності між середньоквадратичним значенням кута некогерентного багатократного розсіювання та коренем з товщини кристала при площинній орієнтації кристала.

Було запропоновано метод знаходження оптимальних умов для ефективного відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі. В цьому методі для пошуку оптимального радіуса вигину кристала проводиться чисельне моделювання руху антипротонів у зігнутих кристалах з різними радіусами вигину. Для кожного кристала та для кожної частинки, яка проходить через кристал, визначається товщина кристала, на якій частинка виходить з режиму відхилення, тобто з площинного каналювання або зі стохастичного режиму відхилення, відповідно. Далі для кожного кристала будується залежність числа частинок, які перебувають в режимі відхилення, від товщини кристала та визначаються товщини, які відповідають заданій кількості частинок (наприклад 20% частинок пучка, якщо для реального застосування потрібно вивести з прискорювача саме 20% частинок пучка при однократному проходженні пучка через кристал). Після проведення цих операцій для кристалів з різними радіусами вигину, отримуємо залежність товщини кристала, на яку можна відхилити задану частку час-

тинок пучка  $f$ , від радіуса вигину кристала  $R$ . Якщо поділити цю залежність на  $R$ , отримуємо залежність кута відхилення, на який можна відхилити  $fN_0$  частинок (тут  $N_0$  – це число частинок у пучку) від радіуса вигину кристала. Ця залежність має максимум, якій знаходиться в точці  $R = R_{opt}$  і відповідає найбільшому куту відхилення частинок. Крім цього, для знаходження оптимальних умов для відхилення частинок, потрібно порівняти результати, отримані за допомогою описаного вище методу, при осьовій і площинній орієнтаціях кристала. Оптимальною буде така орієнтація, яка дозволяє відхилити більшу частку частинок пучка на заданий кут.

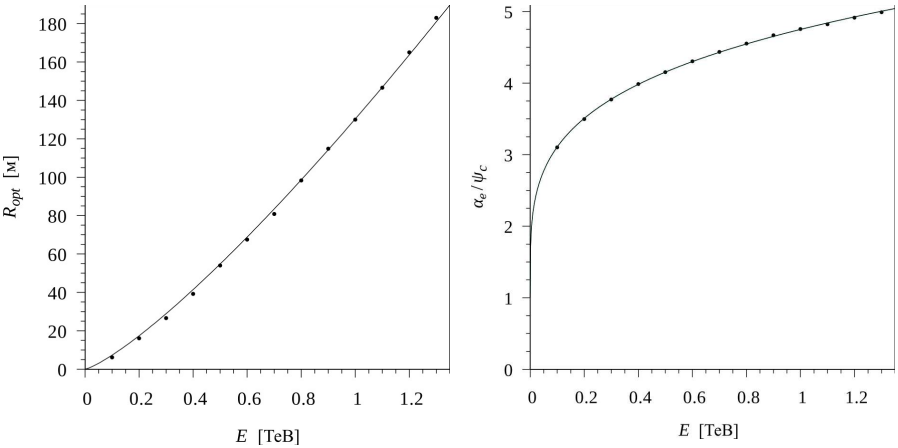


Рис. 3: Залежність оптимального радіуса вигину кристала при стохастичному відхиленні частинок (ліворуч) та відношення максимального кута, на який відхиляється  $N_0/e$  частинок пучка за допомогою стохастичного відхилення, до критичного кута осьового каналювання (праворуч) від енергії частинок. Точки відповідають результатам моделювання, отриманим в моделі потенціалу Дойля-Тернера, а суцільні криві – результатам аналітичних розрахунків в модельному потенціалі. В розрахунках в якості заряджених частинок розглядалися  $\pi^-$  мезони, а кристал кремнію було орієнтовано уздовж осі  $\langle 110 \rangle$ .

Знайдено залежність оптимального радіуса вигину кристала при стохастичному відхиленні частинок та максимального кута, на який відхиляється задана частка частинок пучка  $f$  за допомогою стохастичного відхилення, від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 100 GeV до 1,3 TeV. Ці залежності показані на рис. 3 відповідно ліворуч та праворуч для випадку  $f=1/e$ . На лівому рисунку точки відповідають оптимальним радіусам, отриманим в результаті моделювання. Суцільна крива відповідає апроксимації цих точок фун-



кцією  $F_R(E) = k_R \left( \frac{E}{1 \text{ TeV}} \right)^{5/4}$ . Така залежність в дисертації була отримана ана-

літично з рівняння (2) при застосуванні модельного потенціалу атомного ланцюжка, зворотно пропорційного квадрату відстані до ланцюжка. Найкраще погодження з отриманими точками досягається при  $k_R \approx 130$  м. На рис. 3 бачимо, що залежність  $E^{5/4}$  успішно описує залежність оптимального радіуса вигину кристала від енергії частинок не тільки для модельного потенціалу атомних ланцюжків, але і для моделі потенціалу Дойля-Тернера. На правому рисунку точки відповідають значенням  $\alpha_e$ , отриманим з моделювання. Для модельного потенціалу атомного ланцюжка, зворотно пропорційного відстані до ланцюжка, залежність  $\max(\alpha_{st})$  від енергії частинок пропорційна  $E^{-1/4}$ , тобто  $\max(\alpha_{st})/\psi_c \propto E^{-1/4}$ , де  $\psi_c$  – це критичний кут осевого каналювання. Через це для апроксимації даних, показаних на рис. 3 праворуч, використовувалася функ-

кція  $F_\alpha(E) = k_\alpha \left( \frac{E}{1 \text{ TeV}} \right)^{1/4} + C$ . Суцільна крива показує апроксимацію даних

функцією  $F_\alpha(E)$ . Ця апроксимація відповідає  $k_\alpha \approx 3,75$  і  $C \approx 1$ . На рисунку видно, що функція  $F_\alpha(E)$  успішно описує залежність  $\alpha_e/\psi_c$  (і, таким чином, максимального кута відхилення по відношенню до критичного кута осевого каналювання) від енергії частинок пучка не тільки для модельного потенціалу атомного ланцюжка, але і для потенціалу Дойля-Тернера.

Також знайдено залежність оптимального радіуса вигину кристала при площинному каналюванні частинок у зігнутому кристалі та максимального кута відхилення заданої частки частинок пучка  $f$  при площинному каналюванні від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 10 GeV до 10 TeV. Ці залежності показані на рис. 4 відповідно ліворуч та праворуч для випадку  $f = 0,1$ . На лівому рисунку результати моделювання показані точками, тоді як середнє значення  $\langle R_{opt}/R_c \rangle \approx 6,7$  показано пунктирною лінією. Результати моделювання збігаються з аналітичними розрахунками, проведеними в цьому розділі. Видно, що відношення оптимального радіуса вигину кристала до критичного радіуса площинного каналювання не залежить від енергії частинок. Таким чином, зроблено висновок, що оптимальний радіус площинного каналювання збільшується лінійно зі збільшенням енергії частинок. На правому рисунку чорні точки показують результати моделювання, в той час як пунктирна лінія показує апроксимацію цих точок функцією  $g(x) = Ax^\mu$ .  $A \approx 165$  мкрад,  $\mu \approx -0,076$ . Суцільна лінія на малюнку показує залежність критичного кута площинного каналювання від енергії частинок. Той факт, що точки, отримані в результаті моделювання в подвійному логарифмічному масштабі, знаходяться на прямій лінії, показує, що  $\max \alpha_f$  залежить від енергії частинок відповідно до степеневого закону.

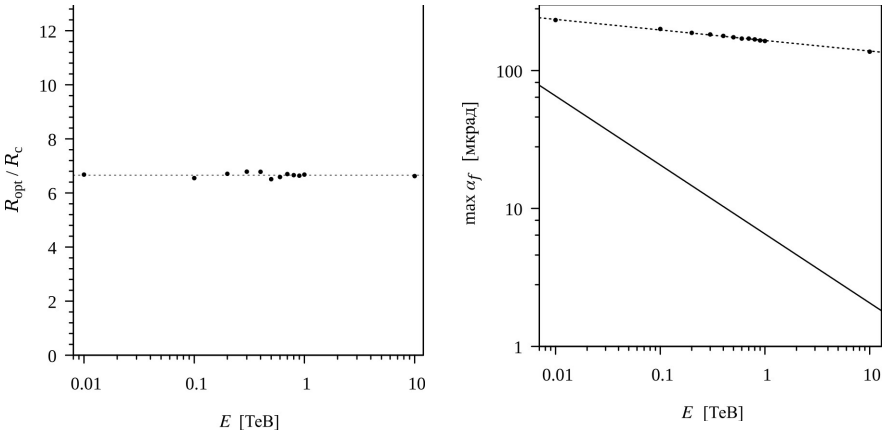


Рис. 4: Залежність оптимального радіуса вигину кристала при площинному каналюванні частинок у зігнутому кристалі (ліворуч) та відношення максимального кута, на який за допомогою площинного каналювання відхиляється 10% частинок пучка, до критичного кута осьового каналювання (праворуч) від енергії частинок. В розрахунках в якості заряджених частинок розглядалися  $\pi^-$  мезони, а кристал кремнію було орієнтовано уздовж площини (110).

Основні наукові результати розділу опубліковані в роботах [4, 7, 8, 10, 11, 15, 21, 24, 26, 28–30, 33].

У **четвертому розділі** запропоновано метод розщеплення пучка релятивістських позитивно заряджених частинок на декілька пучків при проходженні пучка частинок через зігнутий кристал в умовах реалізації стохастичного механізму відхилення та знайдено оптимальні умови для такого розщеплення [2, 6, 14, 19, 20, 23]. Показано, що число частинок, які виходять з режиму стохастичного відхилення та переходять до режиму площинного каналювання в нахилених площинних каналах (тобто таких, кут яких з площиною вигину відрізняється від  $\pi/2$ ) залежить від товщини кристала  $l$  наступним чином:

$$N_{pl}(l) = N_0 \left(1 - e^{-l/l_e}\right),$$

де  $l_e$  – це товщина кристала, на якій число частинок в стохастичному режимі відхилення зменшується в  $e$  разів. Показано, що в кристалі з меншим радіусом вигину розщеплення пучка на декілька частин проходить на меншій товщині. В якості ілюстрації цього факту на рис. 5 показані кутові розподіли протонів з кінетичною енергією 400 GeV після проходження через зігнуті кристали кремнію товщиною 2 мм з радіусами вигину а) 30,3 м та б) 6,9 м. Колір показує густину розподілу частинок. Видно, що при однаковій товщині кристалів, у крис-

талі з меншим радіусом вигину має місце розщеплення первинного пучка на декілька добре колімованих вторинних пучка.

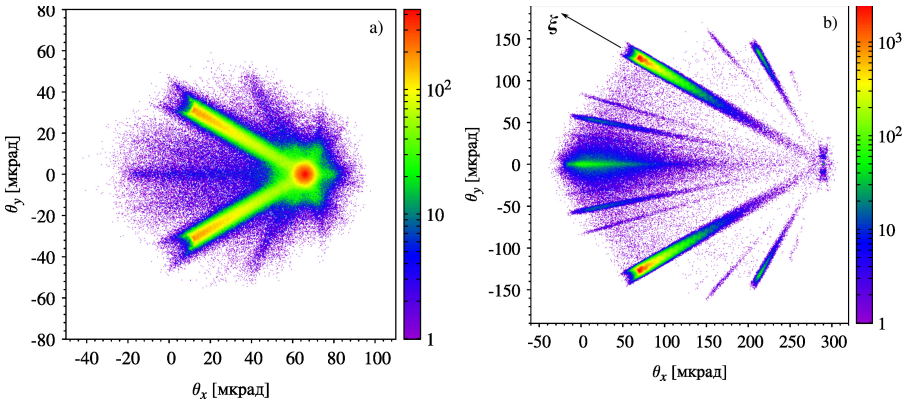


Рис. 5: Кутові розподіли протонів з кінетичною енергією 400 GeV після проходження через зігнуті кристали кремнію товщиною 2 мм з радіусом вигину а) 30,3 м та б) 6,9 м. Кристал орієнтовано уздовж осі  $\langle 111 \rangle$ .

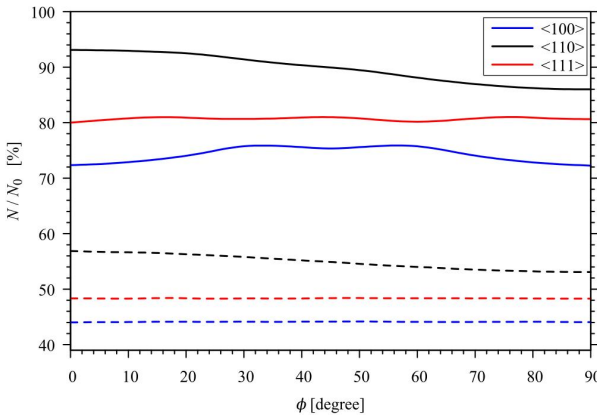


Рис 6: Відсоток позитронів (суцільні криві) та електронів (штрихові криві), які залишаються в режимі стохастичного відхилення до кінця кристала для різних орієнтацій площини вигину кристала. Енергія частинок складала 120 GeV, товщина кристала кремнію – 2 мм.

Також в цьому розділі знайдено залежність ефективності стохастичного механізму відхилення від вибору площини вигину кристала. На рис. 6 показано відношення числа частинок  $N$ , які залишаються в режимі стохастичного відхилення до кінця кристала, до числа частинок у пучку  $N_0$  для різних значень кута  $\phi$  між площиною вигину і

1) площиною (001) кристала кремнію в разі орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 100 \rangle$  по відношенню до падаючих частинок (синя лінія);

2) площиною (001) кристала кремнію в разі орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 110 \rangle$  по відношенню до падаючих частинок (чорна лінія);

3) площиною  $(\bar{1}\bar{1}2)$  кристала кремнію в разі орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 111 \rangle$  по відношенню до падаючих частинок (червона лінія).

Суцільні криві на рис. 6 відповідають руху позитронів у зігнутому кристалі, а штрихові криві відповідають руху електронів. Бачимо, що кількість позитронів, які залишаються в режимі стохастичного відхилення до кінця кристала, є найвищою для орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 110 \rangle$ . Можна також помітити, що для орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 110 \rangle$  ефективність відхилення значною мірою залежить від кута  $\phi$ . Найвища ефективність у цьому випадку має місце, коли площина вигину кристала збігається з площиною кристала (001) (коли кут між площиною вигину та основними нахиленими площинами  $(\bar{1}\bar{1}1)$  і  $(\bar{1}11)$  складає близько  $54,7^\circ$ ), тоді як найнижча ефективність відхилення відповідає випадку, коли площина вигину збігається з кристалічною площиною  $(\bar{1}\bar{1}0)$  (коли кут між площиною вигину та основними нахиленими площинами складає близько  $35,3^\circ$ ). Різниця в  $N/N_0$  при  $\phi=0$  та  $\phi=90^\circ$  в цьому випадку для осі  $\langle 110 \rangle$  складає близько 7%.

З рівняння (2) бачимо, що максимальний кут стохастичного відхилення є пропорційний квадрату критичного кута осьового каналювання, оскільки  $\psi_m \propto \psi_c$ . Це є причиною того, чому на рис. 6 число частинок, які залишаються в режимі стохастичного відхилення до кінця кристала для орієнтації уздовж осі  $\langle 111 \rangle$  є меншою, ніж в разі орієнтації уздовж осі  $\langle 110 \rangle$ , а в разі орієнтації уздовж осі  $\langle 100 \rangle$  – найменшою. Квадрати критичних кутів осьового каналювання для орієнтацій кристала уздовж осей  $\langle 110 \rangle$ ,  $\langle 111 \rangle$ , та  $\langle 100 \rangle$  співвідносяться як

$$\sqrt{2} : \frac{2\sqrt{3}}{3} : 1.$$

Рівняння (2) дає можливість стверджувати, що не дивлячись на

те, що чисельне значення відношення  $N/N_0$ , показане на рис. 6, залежить від енергії частинок, якісно залежності, представлені на рис. 6 не зміняться при зміні енергії частинок. Осьова орієнтація  $\langle 110 \rangle$  при зміні енергії частинок залишиться найбільш вдалою для отримання найбільшої кількості відхилених завдяки стохастичному механізму відхилення частинок.

Порівняння суцільних та штрихових кривих на рис. 6 показує, що у випадку негативно заряджених частинок ефективність відхилення є меншою за рахунок більшої інтенсивності некогерентного розсіювання, яке призводить до виходу частинок з режиму стохастичного відхилення. На відміну від випадку позитивно заряджених частинок, у випадку негативно заряджених частинок бачимо, що помітна залежність ефективності відхилення від кута  $\phi$  присутня лише у

випадку орієнтації кристала уздовж осі  $\langle 110 \rangle$ . Різниця між значеннями  $N/N_0$  при  $\phi = 0$  та при  $\phi = 90^\circ$  в цьому випадку становить близько 4%.

У **п'ятому розділі** отримано спектри іонізаційних втрат енергії швидких негативно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі та знайдено зв'язок між характеристиками цих спектрів та довжиною деканалювання  $l_d$  заряджених частинок у кристалі [13, 34]. На прикладі  $\pi^-$ -мезонів з кінетичною енергією 150 Гев при площинному каналюванні в полі атомних площин (110) кристала кремнію товщиною 1 мм показано, як форма спектрів іонізаційних втрат енергії негативно заряджених частинок при площинному каналюванні залежить від довжини деканалювання частинок. На рис. 7 показані ці спектри, на яких  $\mathcal{E}$  – це значення втрати енергії частинки на іонізацію у кристалі.

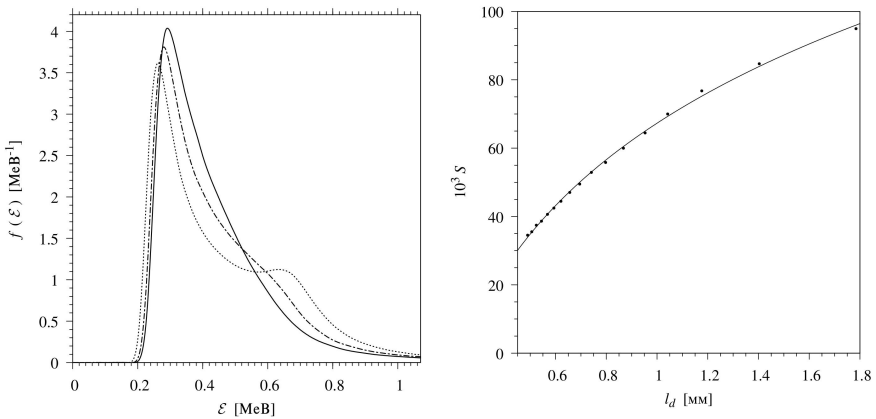


Рис. 7: Спектри іонізаційних втрат енергії  $\pi^-$ -мезонів з кінетичною енергією 150 Гев при площинному каналюванні в полі атомних площин (110) кристала кремнію товщиною 1 мм (ліворуч) та залежність площі під кривою  $f(\mathcal{E})$ , яка відповідає області  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_L$ , де  $\mathcal{E}_L \approx 250$  кеВ, від довжини деканалювання частинок у кристалі (праворуч).

Різні спектри відповідають різним значенням довжини деканалювання: суцільна крива відповідає  $l_d = 0,49$  мм, штрихпунктирна крива –  $l_d = 0,74$  мм, пунктирна крива –  $l_d = 1,78$  мм. У розглянутому випадку спектри іонізаційних втрат енергії суттєво відрізняються від спектру, характерного для разорієнтованого кристала. Бачимо, що зміна  $l_d$  супроводжується помітною зміною форми спектра. Це дає принципову можливість визначення довжини деканалювання негативно заряджених частинок шляхом вимірювання спектру іонізаційних втрат енергії частинок. Бачимо, наприклад, що при  $l_d = 1,78$  мм правий пік у

спектрі, пов'язаний з іонізаційними втратами енергії каналуючих частинок, є добре помітним, оскільки довжина деканалювання майже вдвічі перевищує товщину кристала. В той же час при  $l_d = 0,49$  мм правий пік у спектрі відсутній, оскільки довжина деканалювання є вдвічі меншою за товщину кристала. Для того, щоб можна було в експерименті шляхом вимірювання спектру іонізаційних втрат енергії отримати значення довжини деканалювання, може бути зручним порівнювати не самі спектри, приклад яких наведено на рис. 7, а різні числові параметри, які характеризують ці спектри і які є досить чутливими до значення  $l_d$ . Наприклад, роль такого параметра може виконувати площа  $S$  під кривою  $f(\mathcal{E})$  в певному інтервалі  $\mathcal{E}$ . Для прикладу обчислимо площу під кривою  $f(\mathcal{E})$ , яка відповідає області  $\mathcal{E} < \mathcal{E}_L$ , де  $\mathcal{E}_L \approx 250$  кеВ – це положення максимуму спектра, який було отримано без урахування некогерентного розсіювання. На рис. 7 праворуч показано залежність  $S$  від довжини деканалювання. Суцільна крива на рисунку це апроксимація даних, отриманих шляхом моделювання, за допомогою функції  $ax^b + c$  при  $a = 543,87$ ,  $b = 0,089$  і  $c = -476,57$ . На рисунку бачимо, що обраний параметр досить швидко змінюється зі зміною довжини деканалювання для коректного визначення значення  $l_d$  і при  $l_d < L$ , і навіть при  $l_d > L$ .

У шостому розділі отримано залежність кількості позитивно заряджених частинок, які при русі в орієнтованому кристалі залишаються в режимі площинного каналювання, від кута  $\theta_{x,in}$  між початковим імпульсом частинок та кристалічними атомними площинами, в полі яких рухається частинка, та від кута  $\theta_{y,in}$  між початковим імпульсом частинок та площиною, яка містить у собі кристалічну вісь, поблизу якої орієнтовано кристал, і є ортогональною до атомних площин, в полі яких має місце каналювання. На прикладі руху в кристалі пучка позитронів з енергією 1 ГеВ ця залежність показана на рис. 8, де кольори показують відсоток частинок, які рухаються у кристалі в режимі площинного каналювання. Лівий рисунок відповідає площинному каналюванню в полі атомних площин (001) кристала кремнію, тоді як правий рисунок відповідає площинному каналюванню в полі площин (011). Можна побачити, що для  $\theta_{y,in} \gg \psi_c$  кількість каналюваних частинок не залежить від  $\theta_{y,in}$ . Така залежність з'являється, коли  $\theta_{y,in} < 6\psi_c$ . Однак, при зменшенні кута  $\theta_{y,in}$  число каналюваних частинок зменшується не монотонно. Існують локальні екстремуми в залежності кількості каналюваних частинок від  $\theta_{y,in}$ , пов'язані з розсіюванням на окремих атомних ланцюжках кристала. Слід зазначити, що результати, показані на рис. 8, дійсні не лише для позитронів з енергією 1 ГеВ, але і для інших позитивно заряджених частинок у широкому енергетичному діапазоні, в якому як квантовими ефектами, так і некогерентним багатократним розсіюванням можна знехтувати при заданій товщині кристала.

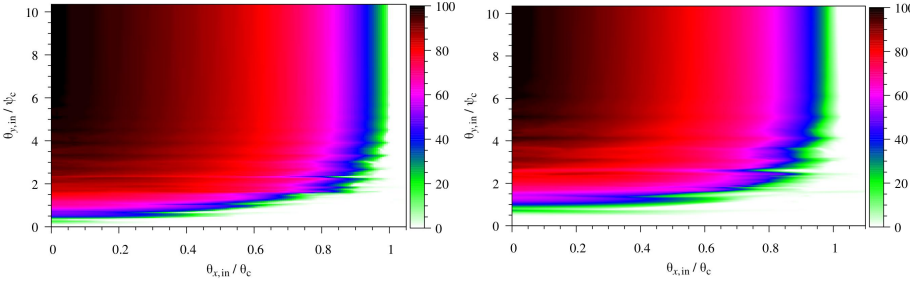


Рис. 8: Залежність відношення кількості позитронів в енергію 1 ГеВ, які рухаються в кристалі в режимі площинного каналювання в полі атомних площин (001) (ліворуч) і (011) (праворуч), до повного числа частинок у пучку (в процентах) від орієнтації кристала.

Теоретичний опис випромінювання каналюючих частинок узагальнено на випадок кутів між імпульсом частинок і атомними ланцюжками, при яких стають помітними локальні максимуми у спектрі випромінювання, пов'язані з розсіюванням на окремих атомних ланцюжках. Показана аналогія процесу руху заряджених частинок у режимі площинного каналювання з гармонічним осцилятором, на який діє періодична зовнішня сила, яка представляє собою вплив окремих ланцюжків атомів на рух частинки. В цій моделі було знайдено спектральну щільність у вигляді

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{d\omega} = & C_1 \omega_p^2 \omega L \left[ 1 - 2 \frac{\omega}{\omega_m} \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_m} \right) \right] H(\omega_m - \omega) + \\ & + \frac{C_2}{(\omega_p^2 - \omega_s^2)^2} \omega_s^2 \omega L \left[ 1 - 2 \frac{\omega}{\omega_{ms}} \left( 1 - \frac{\omega}{\omega_{ms}} \right) \right] H(\omega_{ms} - \omega), \end{aligned}$$

де  $\varepsilon$  і  $\omega$  – це енергія та частота випромінювання,  $C_1$  і  $C_2$  – константи,  $\omega_p = 2c\theta_c/d_p$ ,  $d_p$  – це відстань між сусідніми атомними площинами,  $\omega_s = 2\pi\nu_y/d_s$ ,  $d_s$  – це відстань між сусідніми атомними ланцюжками, які формують атомні площини,  $\omega_m = 2\gamma^2\omega_p$ ,  $\omega_{ms} = 2\gamma^2\omega_s$ ,  $H(x)$  – це функція Гевісайда, яка дорівнює 1 для позитивних аргументів і 0 для негативних.

Також в цьому розділі показано, що пік, присутній у спектрі випромінювання при русі частинок у полі періодично розташованих кристалічних атомних ланцюжків, коли кут між початковим імпульсом частинок та кристалічною віссю є меншим за критичний кут осьового каналювання, відповідає нестійкому періодичному руху надбар'єрних частинок в полі атомних площин.

Основні наукові результати розділу опубліковані в роботах [3, 9, 12, 25, 27, 32].

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розвинуто теорію та методи моделювання орієнтаційних ефектів у зігнутих кристалах. Вирішена теоретична задача пошуку оптимальних параметрів кристала для найбільш ефективного відхилення заряджених частинок та зміни форми пучків заряджених частинок. Знайдено орієнтаційну залежність ймовірності близьких зіткнень швидких заряджених частинок з атомами кристала. Вирішена теоретична задача про вплив некогерентного розсіювання на ефективність відхилення негативно заряджених частинок зігнутих кристалом. Сформульовано метод вимірювання довжини деканалювання релятивістських негативно заряджених частинок у кристалі по формі спектру іонізаційних втрат енергії частинок, які проходять через нього. Оцінено вплив розсіювання на окремих ланцюжках атомів на процес площинного каналювання швидких заряджених частинок у кристалі.

Основні результати дисертаційної роботи, усі з яких отримано вперше, сформульовані в наступних пунктах:

1. Розвинуто теоретичний опис стохастичного механізму відхилення релятивістських заряджених частинок у зігнутому кристалі з урахуванням некогерентного розсіювання. Передбачена наявність оптимального радіуса вигину кристала, який відповідає максимальному куту стохастичного відхилення релятивістських негативно заряджених частинок. Знайдено залежність оптимального радіуса вигину кристала при стохастичному відхиленні частинок та максимального кута, на який відхиляється задана частка частинок пучка за допомогою стохастичного відхилення, від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 100 GeV до 1,3 TeV.

2. Розвинуто теоретичний опис площинного каналювання релятивістських негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі з урахуванням некогерентного розсіювання. Передбачена наявність оптимального радіуса вигину кристала, який відповідає максимальному куту відхилення релятивістських негативно заряджених частинок при їх площинному каналюванні. Знайдено залежність максимального кута відхилення заданої частини частинок пучка при площинному каналюванні від енергії частинок в широкому діапазоні енергій від 10 GeV до 10 TeV.

3. Запропоновано метод розщеплення пучка релятивістських позитивно заряджених частинок на декілька пучків при проходженні пучка частинок через зігнутий кристал в умовах реалізації стохастичного механізму відхилення та знайдено оптимальні умови для такого розщеплення. Експерименти в ЦЕРН 2016–2017 рр. підтвердили основні передбачення теорії цього ефекту [2, 6]. Передбачена можливість несиметричного розподілу числа частинок між різни-



ми частинами розщепленого пучка релятивістських позитивно заряджених частинок у зігнутому кристалі та знайдено залежність кількості частинок в різних площинних каналах зігнутого кристала від кута падіння частинок на орієнтований кристал.

4. Запропоновано метод знаходження оптимальних умов для ефективного відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі.

5. Передбачено ефект зменшення ймовірності близьких зіткнень високоенергетичних позитивно заряджених частинок з атомами кристала при переході від площинного каналювання до стохастичного відхилення у зігнутому кристалі. Розвинуто теоретичний опис цього ефекту та знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень як позитивно, так і негативно заряджених частинок високої енергії з атомами у зігнутому кристалі від кута між початковим імпульсом частинок та площиною вигину кристала. Експерименти колаборації UA9 в ЦЕРН 2016–2018 рр. підтвердили передбачений ефект [20\*,21\*].

6. Передбачено наявність залежності ефективності стохастичного механізму відхилення релятивістських заряджених частинок від вибору площини вигину кристала. Знайдено орієнтації площини вигину кристала, які відповідають найбільш ефективному відхиленню частинок.

7. Отримано спектри іонізаційних втрат енергії швидких негативно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі для різних співвідношень між довжиною деканалювання частинок та товщиною кристала. Знайдено зв'язок між характеристиками цих спектрів та довжиною деканалювання заряджених частинок у кристалі.

8. Отримано залежність кількості площинно каналюваних позитивно заряджених частинок від кута падіння на атомні площини та від кута між початковим імпульсом частинок та площиною, яка містить у собі кристалічну вісь, поблизу якої орієнтовано кристал, і є ортогональною до атомних площин, в полі яких має місце каналювання. Отримано умови, при яких розсіювання на окремих атомних ланцюжках призводить до деканалювання частинок.

9. Розвинуто теоретичний опис випромінювання каналюючих частинок у випадку, коли стають помітними локальні максимуми у спектрі випромінювання, пов'язані з розсіюванням на окремих ланцюжках атомів кристала.

Таким чином, усі поставлені завдання виконані, і мета дисертаційної роботи досягнута.

Розвинений в дисертаційній роботі теоретичний аналіз дозволяє поглибити уявлення про процеси, які мають місце при русі релятивістських заряджених частинок у зігнутих кристалах, а результати досліджень можуть бути використані, зокрема, як для постановки нових експериментів в ЦЕРН, GSI та інших прискорювальних центрах, так і для застосування зігнутих кристалів для виведення пучків високоенергетичних заряджених частинок з прискорювачів, розщеплення пучків на декілька частин, зміни форми пучків на малих відстанях,

відхилення короткоживучих частинок та генерації електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Kirillin I. V., Shul'ga N. F. Orientation dependence of the probability of close collisions during passage of high-energy negatively charged particle through a bent crystal. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2015. Vol. 355. P. 49–52.
2. Bandiera L., Mazzolari A., Bagli E. et al. (Kirillin I. V.). Relaxation of axially confined 400 GeV/c protons to planar channeling in a bent crystal. *Eur. Phys. J. C.* 2016. Vol. 76, No. 2. P. 80.
3. Afonin A. G., Baranov V. T., Bulgakov M. K. et al. (Kirillin I. V.). A study of collimation and extraction of the U-70 accelerator beam using an axially oriented crystal. *Instrum. Exp. Tech.* 2016. Vol. 59, No. 2. P. 196–202.
4. Kirillin I. V., Shul'ga N. F., Bandiera L. et al. Influence of incoherent scattering on stochastic deflection of high-energy negative particle beams in bent crystals. *Eur. Phys. J. C.* 2017. Vol. 77, No. 2. P. 117.
5. Kirillin I. V., Shul'ga N. F. Dependence of the probability of close collisions of high-energy charged particles in a bent crystal on the orientation of the crystal. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2017. Vol. 402. P. 40–43.
6. Bandiera L., Kirillin I. V., Bagli E. et al. Splitting of a high-energy positively charged particle beam with a bent crystal. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 2017. Vol. 402. P. 296–299.
7. Kirillin I. V. On the dependence of the efficiency of stochastic mechanism of charged particle beam deflection in a bent crystal on the particle energy. *Prob. Atomic Sci. Technol.* 2017. Vol. 2017, No. 3. P. 67–71.
8. Kirillin I. V. Optimal radius of crystal curvature for planar channeling of high-energy negatively charged particles in a bent crystal. *Phys. Rev. Accel. Beams.* 2017. Vol. 20, No. 10. P. 104401.
9. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. On the influence of scattering on atomic strings on the stability of planar channeling of high-energy positively charged particles. *J. Instrum.* 2018. Vol. 13, No. 02. P. C02020.
10. Кириллін І. В. Механізми відхилення пучків високоенергетичних заряджених частинок зігнутими кристалами. Теорія та експерименти ЦЕРН. *Вісн. Нац. акад. наук України.* 2018. No. 8. P. 76–80.
11. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. Energy dependence of the efficiency of high-energy negatively charged particle beam deflection by planar channeling in a bent crystal. *Eur. Phys. J. C.* 2019. Vol. 79, No. 12. P. 1015.

12. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. On the influence of periodicity in the arrangement of crystalline atomic strings upon the spectral and spectral-angular distribution of high-energy positively charged particle radiation in crystal. *J. Instrum.* 2020. Vol. 15, No. 07. P. C07019.
13. Trofymenko S. V., Kyryllin I. V. On the ionization loss spectra of high-energy channeled negatively charged particles. *Eur. Phys. J. C.* 2020. Vol. 80, No. 7. P. 689.
14. Bandiera L., Kyryllin I. V., Brizzolari C. et al. Investigation on steering of ultrarelativistic  $e^\pm$  beam through an axially oriented bent crystal. arXiv preprint arXiv:2011.13283. 2020.
15. Шульга Н. Ф., Кириллин И. В. Сравнение эффективности различных механизмов отклонения высокоэнергетических заряженных частиц изогнутым кристаллом. XLIV Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов (27–29 мая 2014 г., Москва, РФ). Москва, 2014. С. 4.
16. Shul'ga N. F., Kirillin I. V. About the probability of close collisions during stochastic deflection of positively and negatively charged particles by a bent crystal. VI International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (October 5–10, 2014, Capri, Italy). Capri, 2014. P. 213.
17. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. О вероятности близких столкновений при отклонении заряженных частиц изогнутым кристаллом. XIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (16–20 марта 2015 г., Харьков, Украина). Харьков, 2015. С. 79.
18. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. О вероятности процессов, связанных с близкими столкновениями, при отклонении заряженных частиц изогнутым кристаллом. XLV Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов (26–28 мая 2015 г., Москва, РФ). Москва, 2015. С. 4.
19. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. Стохастическое отклонение заряженных частиц высокой энергии в изогнутом кристалле и расщепление пучка. XIV Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (22–25 марта 2016 г., Харьков, Украина). Харьков, 2016. С. 17–18.
20. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. Расщепление пучка высокоэнергетических положительно заряженных частиц при стохастическом отклонении в изогнутом кристалле. XLVI Международная конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами: тезисы докладов (31 мая – 2 июня 2016 г., Москва, РФ). Москва, 2016. С. 11.

21. Kirillin I. V., Shul'ga N. F., Bandiera L. et al. Influence of incoherent scattering on stochastic deflection of high-energy negative particle beams in bent crystals. VII International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (September 25–30, 2016, Sirmione–Desenzano del Garda, Italy). Sirmione–Desenzano del Garda, 2016. P. 69.
22. Kirillin I. V., Shul'ga N. F. Dependence of probability of close collisions of high energy charged particles in a bent crystal from the orientation of the crystal. VII International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (September 25–30, 2016, Sirmione–Desenzano del Garda, Italy). Sirmione–Desenzano del Garda, 2016. P. 70.
23. Bandiera L., Mazzolari A., Bagli E. et al. Relaxation of axially confined 400 GeV/c protons to planar channeling in a bent crystal. VII International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (September 25–30, 2016, Sirmione–Desenzano del Garda, Italy). Sirmione–Desenzano del Garda, 2016. P. 149.
24. Кириллин И. В. О зависимости эффективности отклонения заряженных частиц изогнутым кристаллом от энергии частиц. XV Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (21–24 марта 2017 г., Харьков, Украина). Харьков, 2017. С. 107.
25. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. On the stability of high-energy charged particle motion in planar channel. XII International Symposium "Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures": Book of abstracts (September 18–22, 2017, Hamburg, Germany). Hamburg, 2017. P. 58.
26. Kyryllin I. V. On the deflection of high-energy negatively charged particles by means of bent crystals. XII International Symposium "Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures": Book of abstracts (September 18–22, 2017, Hamburg, Germany). Hamburg, 2017. P. 65.
27. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. О стабильности режима плоскостного каналирования высокоэнергетических заряженных частиц. XVI Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (20–23 марта 2018 г., Харьков, Украина). Харьков, 2018. С. 109.
28. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. Об отклонении высокоэнергетических заряженных частиц при прохождении через изогнутый кристалл. XVI Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (20–23 марта 2018 г., Харьков, Украина). Харьков, 2018. С. 109–110.
29. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. Deflection of high-energy negatively charged particles by means of a bent crystal. VIII International Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (September 23–28, 2018, Ischia, Italy). Ischia, 2018. P. 109.

30. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. О зависимости эффективности отклонения высокоэнергетических заряженных частиц изогнутым кристаллом от энергии частиц. XVII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (26–29 марта 2019 г., Харьков, Украина). Харьков, 2019. С. 107.
31. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. On the probability of close collisions of charged particles with atoms in a crystal. VIII Internstional Conference "Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena": Book of abstracts (July 23–30, 2019, Deauville, France). Deauville, 2019. P. 202; Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. On the probability of close collisions of charged particles with atoms in a crystal. *J. Phys. Conf. Ser.* 2020. Vol. 1412. P. 202008.
32. Kyryllin I. V., Shul'ga N. F. Investigation of the influence of the periodicity of crystalline atomic strings arrangement on the spectral and spectral-angular distribution of high-energy charge particle radiation in crystal. XIII International Symposium "Radiation from Relativistic Electrons in Periodic Structures": Book of abstracts (September 15–20, 2019, Belgorod, Russian Federation). Belgorod, 2019. P. 29.
33. Кириллин И. В., Шульга Н. Ф. Отклонение высокоэнергетических отрицательно заряженных частиц, движущихся в изогнутом кристалле в режиме плоскостного каналирования. XVIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (24–27 марта 2020 г., Харьков, Украина). Харьков, 2020. С. 50–51.
34. Трофименко С. В., Кириллин И. В. Спектры ионизационных потерь каналированных частиц в тонких кристаллических мишенях. XVIII Конференция по физике высоких энергий, ядерной физике и ускорителям: тезисы докладов (24–27 марта 2020 г., Харьков, Украина). Харьков, 2020. С. 51.

### СПИСОК ЦИТОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- 1\*. Robinson M., Oen O., Holmes D. Computer studies of anomalous penetration of Cu recoil atoms in Cu crystal. Proc. of Conference «Bombardment Ionique». CNRS. Paris. 1962. P. 105.
- 2\*. Robinson M. T., Oen O. S. Computer studies of the slowing down of energetic atoms in crystals. *Phys. Rev.* 1963. Vol. 132. 6. P. 2385.
- 3\*. Piercy G. R., Brown F., Davies J. A., McCargo M. Experimental evidence for the increase of heavy ion ranges by channeling in crystalline structure. *Phys. Rev. Lett.* 1963. Vol. 10. P. 399.
- 4\*. Erginsoy C., Wegner H. E., Gibson W. M. Anisotropic Energy Loss of Light Particles of MeV Energies in Thin Silicon Single Crystals. *Phys. Rev. Lett.* 1964. Vol. 13. P. 530.

- 5\*. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles. *Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk.* 1965. Vol. 34. P. 1–64.
- 6\*. Линдхард Й. Влияние кристаллической решетки на движение быстрых заряженных частиц. *Успехи физических наук.* 1969. Т. 99. С. 249–296.
- 7\*. Lervig P., Lindhard J., Nielsen V. Quantal treatment of directional effects for energetic charged particles in crystal lattices. *Nuclear Physics A.* 1967. Vol. 96. P. 481–504.
- 8\*. Tsyganov E. N. Some aspects of the mechanism of a charge particle penetration through a monocrystal. Fermilab TM-682, August. 1976.
- 9\*. Tsyganov E. N. Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a monocrystal. Fermilab TM-684, September. 1976.
- 10\*. Таратин А. М., Цыганов Э. Н., Воробьев С. А. Поворот пучков заряженных частиц изогнутым монокристаллом. Численный эксперимент. *Письма в ЖТФ.* 1978. Т. 4. С. 947–950.
- 11\*. Tarantin A. M., Tsyganov E. N., Vorobiev S. A. Computer simulation of deflection effects for relativistic charged particles in a curved crystal. *Phys. Lett. A.* 1979. Vol. 72. P. 145–146.
- 12\*. Elishev A. F., Filatova N. A., Golovatyuk V. M. et al. Steering of charged particle trajectories by a bent crystal. *Phys. Lett. B.* 1979. Vol. 88. P. 387–391.
- 13\*. Taratin A. M., Vorobiev S. A. Deflection of high-energy charged particles in quasi-channeling states in bent crystals. *Nucl. Instrum. Meth. B.* 1987. Vol. 26. P. 512–521.
- 14\*. Taratin A. M., Vorobiev S. A. “Volume reflection” of high-energy charged particles in quasi-channeling states in bent crystals. *Phys. Lett. A.* 1987. Vol. 119. P. 425–428.
- 15\*. Иванов Ю. М., Петрунин А. А., Скоробогатов В. В. и др. Наблюдение отражения протонного пучка от изогнутых атомных плоскостей. *Препринт ПИЯФ 2649.* 2005.
- 16\*. Ivanov Y. M., Petrunin A. A., Skorobogatov V. V. et al. Volume reflection of a proton beam in a bent crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2006. Vol. 97. P. 144801.
- 17\*. Grinenko A., Shul’ga N. Turning a beam of high-energy charged particles by means of scattering by atomic rows of a curved crystal. *Sov. JEPT Lett.* 1991. Vol. 54. P. 524.
- 18\*. Scandale W., Vomiero A., Baricordi S. et al. High-efficiency deflection of highenergy protons through axial channeling in a bent crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2008. Vol. 101. P. 164801.
- 19\*. Scandale W., Vomiero A., Bagli E. et al. High-efficiency deflection of highenergy negative particles through axial channeling in a bent crystal. *Phys. Lett. B.* 2009. Vol. 680. P. 301–304.

- 20\*. Scandale W., Andrisani F., Arduini G. et al. Study of inelastic nuclear interactions of 400 GeV/c protons in bent silicon crystals for beam steering purposes. *Eur. Phys. J. C.* 2018. Vol. 78, No. 6. P. 505.
- 21\*. Scandale W., Arduini G., Butcher M. et al. High-efficiency deflection of high energy protons due to channeling along the  $\langle 110 \rangle$  axis of a bent silicon crystal. *Phys. Lett. B.* 2016. Vol. 760. P. 826–831.

## АНОТАЦІЇ

### **Кириллін І. В. Орієнтаційні ефекти при проходженні релятивістських заряджених частинок через зігнуті кристали. — На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.02 «Теоретична фізика» (104 – Фізика та астрономія). – Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України, Харків, 2021.

У дисертаційній роботі розвинуто теорію та методи моделювання орієнтаційних ефектів у зігнутих кристалах. Знайдено залежність ймовірності близьких зіткнень як позитивно, так і негативно заряджених релятивістських частинок з атомами у зігнутому кристалі від кута між початковим імпульсом частинок та площиною вигину кристала. Запропоновано метод знаходження оптимальних умов для ефективного відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі. Узагальнено теоретичний опис стохастичного механізму відхилення та площинного каналювання на випадок руху частинок у зігнутому кристалі з урахуванням некогерентного розсіювання. Запропоновано метод розщеплення пучка релятивістських позитивно заряджених частинок на декілька пучків при проходженні пучка частинок через зігнутий кристал в умовах реалізації стохастичного механізму відхилення та знайдено оптимальні умови для такого розщеплення. Отримано спектри іонізаційних втрат енергії швидких негативно заряджених частинок при площинному каналюванні в прямому та зігнутому кристалі та знайдено зв'язок між характеристиками цих спектрів та довжиною деканалювання заряджених частинок у кристалі. Теоретичний опис випромінювання каналюючих частинок узагальнено на випадок кутів між імпульсом частинок і атомними ланцюжками, при яких стають помітними локальні максимуми у спектрі випромінювання, пов'язані з розсіюванням на окремих атомних ланцюжках. Розвинений в дисертаційній роботі теоретичний аналіз дозволяє поглибити уявлення про процеси, які мають місце при русі релятивістських заряджених частинок у зігнутих кристалах, а результати досліджень можуть бути використані як для постановки нових експериментів, так і для застосування зігнутих кристалів для виведення пучків високоенергетичних заряджених частинок з прискорювачів, розщеплення пучків на декілька частин, зміни форми пучків на малих відстанях, відхилення короткоживучих частинок

та генерації електромагнітного випромінювання в широкому діапазоні частот. Таким чином, дослідження, проведені в дисертації, є актуальними та мають як фундаментальне, так і прикладне значення.

**Ключові слова:** релятивістські заряджені частинки, зігнутий кристал, атомні ланцюжки, атомні площини, близькі зіткнення, зміна форми пучків, іонізаційні втрати енергії, некогерентне розсіювання.

**Кириллин И. В. Ориентационные эффекты при прохождении релятивистских заряженных частиц через изогнутые кристаллы. — На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.02 «Теоретическая физика» (104 – Физика и астрономия). — Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт» НАН Украины, Харьков, 2021.

В диссертационной работе развита теория и методы моделирования ориентационных эффектов в изогнутых кристаллах. Найдена зависимость вероятности близких столкновений как положительно, так и отрицательно заряженных релятивистских частиц с атомами в изогнутом кристалле от угла между начальным импульсом частиц и плоскостью изгиба кристалла. Предложен метод нахождения оптимальных условий для эффективного отклонения отрицательно заряженных частиц в изогнутом кристалле. Обобщено теоретическое описание стохастического механизма отклонения и плоскостного каналирования в случае движения частиц в изогнутом кристалле при учете некогерентного рассеяния. Предложен метод расщепления пучка релятивистских положительно заряженных частиц на несколько пучков при прохождении пучка частиц через изогнутый кристалл в условиях реализации стохастического механизма отклонения и найдены оптимальные условия для такого расщепления. Получены спектры ионизационных потерь энергии быстрых отрицательно заряженных частиц при плоскостном каналировании в прямом и изогнутом кристалле и найдена связь между характеристиками этих спектров и длиной деканалирования заряженных частиц в кристалле. Теоретическое описание излучения каналирующих частиц обобщено на случай углов между импульсом частиц и атомными цепочками, при которых становятся заметными локальные максимумы в спектре излучения, связанные с рассеянием на отдельных атомных цепочках. Проведенный в диссертационной работе теоретический анализ позволяет углубить представление о процессах, имеющих место при движении релятивистских заряженных частиц в изогнутых кристаллах, а результаты исследований могут быть использованы как для постановки новых экспериментов, так и для применения изогнутых кристаллов для вывода пучков высокоэнергетических заряженных частиц из ускорителей, расщепление пучков на несколько частей, изменения формы пучков на малых расстояниях, отклонения короткоживущих частиц и генерации электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Таким обра-



зом, исследования, проведенные в диссертации, являются актуальными и имеют как фундаментальное, так и прикладное значение.

**Ключевые слова:** релятивистские заряженные частицы, изогнутый кристалл, атомные цепочки, атомные плоскости, близкие столкновения, изменение формы пучков, ионизационные потери энергии, некогерентное рассеяние.

**Kyryllin I. V. Orientation effects in the passage of relativistic charged particles through bent crystals. — Manuscript copyright.**

Thesis for a Doctoral Degree in Physics and Mathematics: Specialty 01.04.02 “Theoretical physics” (104 – Physics and Astronomy). – National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology” NAS of Ukraine, Kharkiv, 2021.

The Doctoral Thesis presents the theory and methods of simulation of orientation effects in bent crystals. The dependence of the probability of close collisions of both positively and negatively charged relativistic particles with atoms in a bent crystal on the angle between the initial momentum of the particles and the plane of bending of the crystal is found. A method for finding optimal conditions for the effective deflection of negatively charged particles in a bent crystal is proposed. The theoretical description of the stochastic mechanism of deflection and planar channeling in case of particle motion in a bent crystal taking into account incoherent scattering is generalized. A method for splitting a beam of relativistic positively charged particles into several beams during the passage of a beam of particles through a bent crystal under conditions of realization of a stochastic deflection mechanism is proposed and optimal conditions for such splitting are found. The spectra of ionization energy loss of fast negatively charged particles during planar channeling in a straight and bent crystal are obtained and the connection between the characteristics of these spectra and the length of decanallation of charged particles in the crystal is found. The theoretical description of the radiation of channeling particles is generalized to the case of angles between the momentum of particles and atomic strings, at which local maxima in the radiation spectrum associated with scattering on individual atomic strings become noticeable. The theoretical analysis developed in the dissertation allows to deepen the idea of the processes that take place during the motion of relativistic charged particles in bent crystals, and the results of research can be used both for setting up new experiments and for using bent crystals to derive beams from accelerators, splitting of beams into several parts, changes in the shape of beams at short distances, deflection of short-lived particles and generation of electromagnetic radiation in a wide frequency range. Thus, the research carried out in the dissertation is relevant and has both fundamental and applied significance.

**Key words:** relativistic charged particles, bent crystal, atomic strings, atomic planes, close collisions, change of beam shape, ionization energy loss, incoherent scattering.