



**КИРИЛПН**

**Ігор Володимирович** – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник відділу електродинаміки високих енергій у речовині Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

<https://orcid.org/0000-0003-3625-7521>  
Scopus Author ID: 36844175200

## МЕХАНІЗМИ ВІДХИЛЕННЯ ПУЧКІВ ВИСОКОЕНЕРГЕТИЧНИХ ЗАРЯДЖЕНИХ ЧАСТИНОК ЗІГНУТИМИ КРИСТАЛАМИ. ТЕОРІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТИ ЦЕРН

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України  
30 травня 2018 року

*Відхилення заряджених частинок високих енергій – це важлива проблема фізики прискорювачів. Для відхилення таких частинок можна використовувати електромагнітні системи або зігнуті кристали. Обидва варіанти мають свої переваги та недоліки. Головними перевагами зігнутих кристалів є їх компактний розмір та відсутність необхідності охолодження, завдяки чому в багатьох прискорювальних центрах зігнуті кристали застосовують для виведення пучків з кільцевих прискорювачів та для колімації пучків.*

**Ключові слова:** високоенергетичні заряджені частинки, зігнуті кристали, відхилення пучків заряджених частинок.

При русі високоенергетичної зарядженої частинки в кристалі під невеликим кутом до однієї з головних кристалічних осей або площин її траєкторія визначається переважно полем безперервного потенціалу кристалічних атомних ланцюжків або площин [1]. У зігнутому кристалі такий рух у полі зігнутих ланцюжків атомів або зігнутих атомних площин дає можливість відхиляти заряджені частинки від їх початкового напрямку руху.

Є три основні механізми відхилення пучків заряджених частинок при їх проходженні крізь зігнутий кристал. Перший – площинне каналювання [2, 3]. Цей механізм має місце, коли заряджені частинки рухаються в площинному каналі, утвореному сусідніми зігнутими атомними площинами. Частинки при проходженні крізь кристал в умовах площинного каналювання відхиляються на кут, який дорівнює куту вигину кристала. Площинне каналювання є ефективнішим для позитивно заряджених

частинок, ніж для негативно заряджених. Це зумовлено тим, що негативно заряджені частинки притягуються атомними ядрами, розсіяння на яких приводить до переходу з підбар'єрних станів до надбар'єрних, тобто до деканалювання.

Зменшити вплив некогерентного розсіяння на ядрах на ефективність відхилення частинок можна застосуванням механізмів відхилення, пов'язаних з когерентною взаємодією надбар'єрних частинок з атомними ланцюжками та площинами зігнутого кристала. Одним із двох таких механізмів є об'ємне відбиття [4]. При об'ємному відбитті частинки, що рухаються у зігнутому кристалі в надбар'єрних станах щодо площинних потенціальних каналів, відхиляються в напрямку, протилежному до напрямку викривлення кристала. Об'ємне відбиття ефективно як для позитивно, так і для негативно заряджених частинок, але кути відхилення є набагато меншими, ніж у разі площинного каналювання в зігнутому кристалі.

Третій механізм, який називають стохастичним відхиленням, полягає в розсіянні надбар'єрних частинок у полі зігнутих кристалічних атомних ланцюжків [5]. Стохастичний механізм відхилення ефективний і для позитивно, і для негативно заряджених частинок, що розсіюються на зігнутому кристалі, і дає змогу відхилити більшу частину пучка частинок на кут вигину кристала (як при площинному каналюванні) з ефективністю відхилення в одному напрямку, близькою до 100%.

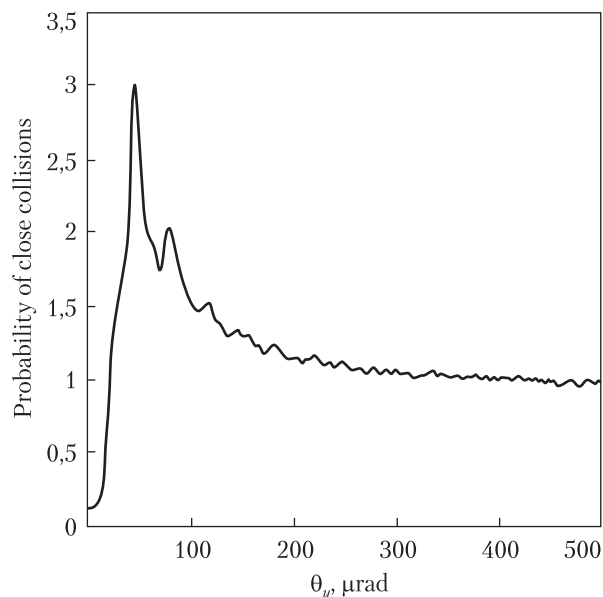
Стохастичний механізм відхилення заряджених частинок високої енергії було передбачено співробітниками Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України (ННЦ ХФТІ) М.Ф. Шульгою і А.А. Гриненком у 1991 р. [5] на основі результатів комп'ютерного моделювання руху частинок у зігнутому кристалі. У 1995 р. вони отримали критерій, який визначає можливість відхилення пучка швидких заряджених частинок за допомогою стохастичного механізму відхилення [6]. Цей критерій пов'язує товщину кристала  $L$ , радіус його вигину  $R$ , середню довжину вільного пробігу частинок між зіткненнями з сусідніми атомними ланцюжками  $l$  та

критичний кут осевого каналювання  $\psi_c$  [1]

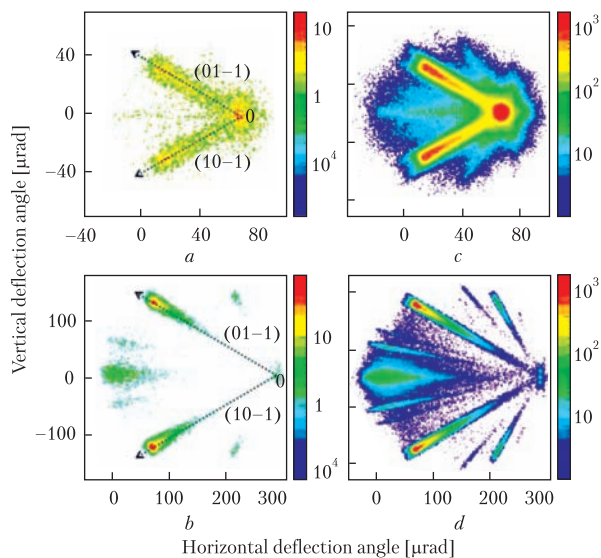
$$lL < \psi_c^2 R^2.$$

Якщо ця умова виконується, більшість частинок пучка відхилитимуться на кут вигину кристала. Експериментально можливість відхилення позитивно заряджених частинок було продемонстровано колаборацією UA9 в ЦЕРН на прикладі протонів з кінетичною енергією 400 GeV, які відхилялися від початкового напрямку руху при проходженні крізь кристал кремнію завтовшки 2 мм з  $R = 40$  м [7]. Такі параметри кристала задовольняють умові критерію Гриненка–Шульги, а тому більшість протонів було відхилено на кут вигину кристала, який дорівнював 50 мкррад.

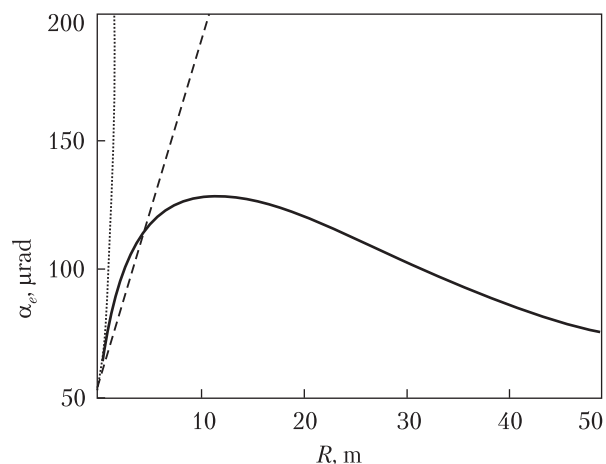
Після вдалого експерименту з відхилення позитивно заряджених частинок у ЦЕРН було проведено аналогічний експеримент з відхилення негативно заряджених частинок [8]. Пучок  $\pi^-$ -мезонів з кінетичною енергією 150 GeV було відхилено кристалом кремнію завтовшки 0,98 мм з  $R \approx 22,8$  м на кут, який дорівнював 43 мкррад. Проведені в ЦЕРН експерименти по-



**Рис. 1.** Імовірність близьких зіткнень заряджених частинок високої енергії при площинному каналюванні ( $\theta_y \gg 28$  мкррад) та стохастичному відхиленні ( $\theta_y < 28$  мкррад) у зігнутому кристалі



**Рис. 2.** Кутові розподіли протонів з кінетичною енергією 400 GeV після проходження зігнутих кристалів кремнію з радіусами вигину 30,3 м (верхні кутові розподіли) та 6,9 м (нижні кутові розподіли) [11]: *a* і *b* — експериментальні результати (експеримент було проведено на прискорювачі SPS ЦЕРН); *c* і *d* — результати комп'ютерного моделювання. Колір вказує на інтенсивність розподілу частинок



**Рис. 3.** Залежність кута відхилення  $\alpha_e$  від радіуса викривлення для  $\pi^-$ -мезонів з енергією 150 GeV. Суцільна крива відповідає руху частинок пучка в реальному кристалі, пунктирна крива — руху частинок в ідеальному кристалі, в якому відсутнє некогерентне розсіяння, а штрихова крива — руху надбар'єрних частинок в ідеальному кристалі

казали, що стохастичний механізм, на відміну від двох інших, ефективний для відхилення як позитивно, так і негативно заряджених частинок. Однак це не єдина перевага стохастичного механізму.

У роботі [9] було проведено аналіз залежності ймовірності близьких зіткнень швидких позитивно заряджених частинок (на прикладі протонів з кінетичною енергією 270 GeV) з ядрами атомів кристала від орієнтації кристала. Отримані результати наведено на рис. 1. Показано, що у випадку стохастичного відхилення, який відповідає кутам  $\theta_y < 28$  мкрад (де  $\theta_y$  — кут між початковим імпульсом частинок пучка та площиною вигину кристала), ймовірність близьких зіткнень  $\epsilon$  в багато разів меншою за таку саму ймовірність у разі площинного каналювання, яке відповідає кутам  $\theta_y \gg 28$  мкрад. Інакше кажучи, деградація кристалічної ґратки в кристалічному дефлекторі, в якому для відхилення частинок застосовано стохастичний механізм, настане значно пізніше (час різниться у кілька разів), ніж у кристалічному дефлекторі, в якому для відхилення частинок використано площинне каналювання.

У 2016 р. передбачений ефект зменшення ймовірності близьких зіткнень позитивно заряджених частинок при переході від площинного каналювання до стохастичного відхилення було підтверджено в експерименті колаборації UA9 в ЦЕРН [10].

Детальний аналіз траєкторій швидких позитивно заряджених частинок при їх стохастичному відхиленні в зігнутому кристалі показав, що в разі, якщо критерій Гриненка–Шульги не виконується, можливе розщеплення пучка на кілька окремих добре колімованих частин [11]. Приклад такого розщеплення пучка наведено на рис. 2.

З рис. 2 видно, що експеримент підтвердив можливість розщеплення пучка на кілька частин, і отримані експериментальні дані перебувають у добрій відповідності до результатів комп'ютерного моделювання.

Крім того, було проведено аналіз стохастичного відхилення негативно заряджених частинок у зігнутому кристалі. Показано, що через

сильне некогерентне розсіяння негативно заряджених частинок на теплових коливаннях атомів та на електронах у кристалі процес стохастичного відхилення негативно заряджених частинок відрізняється від стохастичного відхилення позитивно заряджених частинок. Це приводить до того, що у випадку негативно заряджених частинок, на відміну від позитивно заряджених, існує оптимальний радіус вигину кристала, який відповідає найефективнішому відхиленню.

Для знаходження оптимального радіуса викривлення за допомогою чисельного моделювання було проаналізовано залежність кута відхилення, на який відхиляється  $1/e$ -та частина частинок пучка, від радіусу викривлення. Залежність цього кута відхилення  $\alpha_e$  від радіуса викривлення наведено на рис. 3 (без втрати спільності було обрано випадок руху  $\pi^-$ -мезонів з кінетичною енергією 150 GeV у зігнутому кристалі кремнію).

Можна помітити, що суцільна крива на рис. 3 має максимум при  $R \approx 11,7$  м. Наявність цього максимуму пояснюється тим, що для відхилення заряджених частинок на фіксований кут зі збільшенням радіуса викривлення кристала потрібно збільшувати його товщину, а чим тов-

стіший кристал, тим сильніше некогерентне розсіяння. Водночас у випадку позитивно заряджених частинок (див. [11]) максимальна товщина кристала, до якої ще працює стохастичне відхилення, зростає пропорційно  $R^2$ , а отже,  $\alpha_e$  зростає пропорційно  $R$ . Таке саме лінійне зростання ми бачимо й у випадку надбар'єрних  $\pi^-$ -мезонів, які рухаються в ідеальному кристалі (штрихова лінія на рис. 3). Різке зростання  $\alpha_e$  на пунктирній кривій зумовлене тим, що без некогерентного розсіяння підбар'єрні частинки не переходять у надбар'єрний стан (тобто відсутнє деканалювання) і відхиляються на повний кут вигину кристала. Результати аналізу відхилення негативно заряджених частинок зігнутими кристалами було опубліковано в роботах [12–14].

Проведений аналіз показав, що компактні зігнуті кристали можна успішно застосовувати для вирішення таких завдань прискорювальної фізики, як відхилення пучків заряджених частинок та (у випадку позитивно заряджених частинок) розщеплення пучків на кілька частин. Для негативно заряджених частинок було знайдено оптимальні параметри зігнутого кристала, які відповідають найефективнішому відхиленню.

## REFERENCES

### [СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ]

1. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles. *Danske Vid. Selsk. Mat. Fys. Medd.* 1965. **34**: 14.
2. Tsyganov E.N. Some aspects of the mechanism of a charge particle penetration through a monocrystal. Technical Report Fermilab. 1976 (preprint TM-682).
3. Tsyganov E.N. Estimates of cooling and bending processes for charged particle penetration through a mono crystal. Technical Report Fermilab. 1976 (preprint TM-684).
4. Taratin A.M., Vorobiev S.A. Volume reflection of high-energy charged particles in quasi-channeling states in bent crystals. *Phys. Lett. A.* 1987. **119**(8): 425. [http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601\(87\)90587-1](http://dx.doi.org/10.1016/0375-9601(87)90587-1)
5. Grinenko A.A., Shul'ga N.F. Turning a beam of high-energy charged particles by means of scattering by atomic rows of a curved crystal. *Sov. JEPT Lett.* 1991. **54**: 524.
6. Shul'ga N.F., Greenenko A.A. Multiple scattering of ultrahigh-energy charged particles on atomic strings of a bent crystal. *Phys. Lett. B.* 1995. **353**(2–3): 373. [https://doi.org/10.1016/0370-2693\(95\)00496-8](https://doi.org/10.1016/0370-2693(95)00496-8)
7. Scandale W. et al. High-efficiency deflection of high-energy protons through axial channeling in a bent crystal. *Phys. Rev. Lett.* 2008. **101**:164801. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.101.164801>
8. Scandale W. et al. High-efficiency deflection of high-energy negative particles through axial channeling in a bent crystal. *Phys. Lett. B.* 2009. **680**(4): 301. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2009.09.009>

9. Chesnokov Yu.A., Kirillin I.V., Scandale W., Shul'ga N.F., Truten' V.I. About the probability of close collisions during stochastic deflection of positively charged particles by a bent crystal. *Phys. Lett. B.* 2014. **731**: 118. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2014.02.024>
10. Scandale W. 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. **760**: 826. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2016.07.072>
11. Bandiera L. et. al. Relaxation of axially confined 400 GeV/c protons to planar channeling in a bent crystal. *Eur. Phys. J. C.* 2016. **76**: 80. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-016-3899-x>
12. Kirillin I.V., Shul'ga N.F., Bandiera L., Guidi V., Mazzolari A. Influence of incoherent scattering on stochastic deflection of high-energy negative particle beams in bent crystals. *Eur. Phys. J. C.* 2017. **77**: 117. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-017-4694-z>
13. 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. *Probl. Atom. Sci. Tech.* 2017. **109**(3): 67.
14. 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. **20**(10): 104401. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.20.104401>

*I.V. Kyryllin*

Akhiezer Institute for Theoretical Physics of the National Science Center  
"Kharkov Institute of Physics and Technology" of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kharkiv)

#### MECHANISMS OF HIGH-ENERGY CHARGED PARTICLE BEAM DEFLECTION BY BENT CRYSTALS. THEORY AND CERN EXPERIMENTS

According to the materials of scientific report at the meeting of the Presidium of NAS of Ukraine,  
May 30, 2018

The deflection of high-energy charged particles is an important task of accelerator physics. For deflection of such particles, electromagnetic systems or bent crystals can be used. Both variants have their own advantages and disadvantages. The advantages of bent crystals are compact size, no need for cooling and low electricity consumption. Due to these advantages, bent crystals are used in many accelerating centers for the removal of beams from ring accelerators and for beam collimation.

**Keywords:** high-energy charged particles, bent crystals, deflection of charged particles.