



ТРОФИМЕНКО

Сергій Валерійович – доктор фізико-математичних наук, провідний науковий співробітник відділу електродинаміки високих енергій у речовині Інституту теоретичної фізики ім. О.І. Ахієзера Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут» НАН України

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ З «НАПІВГОЛИМИ» ЧАСТИНКАМИ ВИСОКИХ ЕНЕРГІЙ

За матеріалами наукового повідомлення на засіданні Президії НАН України 12 липня 2023 року

У доповіді наведено результати досліджень інтерференційних ефектів у різних електромагнітних процесах, що відбуваються при взаємодії заряджених частинок високих енергій із речовиною. Розглянуті ефекти пов'язані з проявом так званого «напівголого» стану частинок та ультрамалими розмірами згустків заряджених частинок. Основну увагу приділено процесам перехідного випромінювання та іонізаційних втрат енергії, які мають велике значення для детектування елементарних частинок і вимірювання та контролю параметрів пучків на прискорювачах. Показано, що ці ефекти можуть суттєво змінювати характеристики зазначених процесів у межах великих відстаней уздовж напрямку руху частинок.

Ключові слова: частинки високих енергій, перехідне випромінювання, іонізаційні втрати енергії.

Електромагнітні процеси, що виникають при взаємодії з речовиною високоенергетичної зарядженої частинки, можуть розвиватися на дуже великій відстані вздовж напрямку її руху. Цю відстань, яка називається довжиною формування, можна оцінити як

$$l_F \sim \frac{E^2}{m^2 c^3 \omega}$$

де E – енергія частинки, m – маса частинки, c – швидкість світла, ω – частота електромагнітного поля, що розглядається.

Для прикладу на рис. 1 наведено картину еволюції електромагнітного поля навколо швидкої зарядженої частинки після її розсіювання на атомі [1, 2]. При цьому кулонівське поле частинки ніби зривається з неї і, рухаючись у початковому напрямку, поступово перетворюється на сферично розбіжні хвилі гальмівного випромінювання. Розсіяна ж частинка протягом тривалого проміжку часу не має навколо себе повноцінного кулонівського поля і лише поступово його відновлює. Це відновлення відбувається так, що кожна компонента Фур'є цього

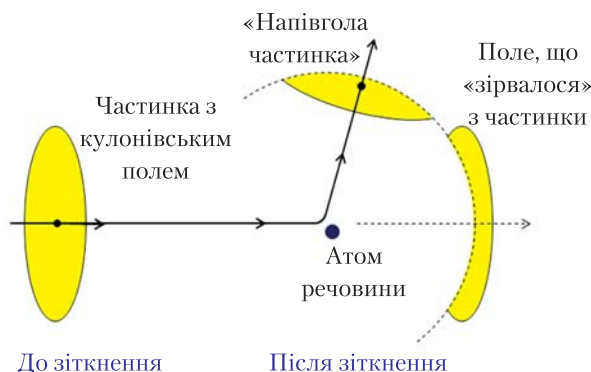


Рис. 1. Утворення «напівголої» частинки в результаті розсіювання частинки на атомі

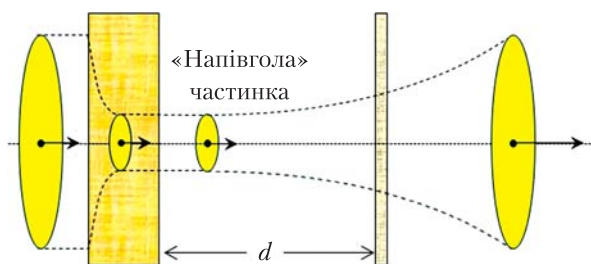


Рис. 2. Утворення «напівголої» частинки в результаті проходження частинки крізь шар речовини та її подальше проходження крізь тонку мішень

поля з частотою ω відновлює свій початковий стан, який вона мала до розсіювання, на відстані порядку l_F .

Аналогічна ситуація має місце і при проходженні частинки крізь шар речовини, навіть без зміни напрямку руху (рис. 2). У цьому випадку поляризація речовини полем частинки приводить до часткового екранування цього поля. Однак, як було показано в [3], це поле залишається в частково екранованому стані й після вильоту частинки з речовини і лише згодом поступово відновлює той вигляд, який воно мало до вльоту частинки в речовину. Відстань, на якій відновлюється кожна компонента Фур'є цього поля, так само визначається величиною l_F .

Отже, і після розсіювання, і після проходження крізь шар речовини частинка має на-

вколо себе пригнічене електромагнітне поле, якому бракує певної частини компонент Фур'є порівняно зі звичайним кулонівським полем релятивістської частинки. У роботі [1] таку частинку було названо «напівголою». При високих енергіях частинки відстань l_F може бути дуже великою і навіть перевищувати розміри всієї лабораторії. При цьому частинка, перебуваючи в напівголому стані, може зазнавати нових взаємодій із речовиною в межах цієї відстані. Це може бути, наприклад, взаємодія з елементами детектуючої апаратури або обладнання для діагностики (вимірювання, контролю) параметрів пучків заряджених частинок на прискорювачах. Характеристики електромагнітних процесів при таких взаємодіях, загалом кажучи, не описуватимуться відомими формулами, наведеними у підручниках, внаслідок прояву напівголого стану частинки.

Є велика кількість процесів, у яких проявляється напівголий стан частинок та великий розмір довжини формування l_F . Раніше такий прояв досліджували для гальмівного випромінювання електронів, що виникає при їх розсіюванні на атомах речовини. В результаті теоретично було передбачено, а згодом і спостережено експериментально в CERN такі ефекти у гальмівному випромінюванні, як ефект Ландау—Померанчука—Мігдала [4, 5] та ефект Терновського—Шульги—Фоміна [6, 7]. В останні десятиліття ці ефекти активно досліджували і продовжують досліджувати для інших видів випромінювання при взаємодії релятивістських електронів із речовиною, а саме для перехідного випромінювання [8–10], когерентного рентгенівського випромінювання у кристалах [11], характеристичного випромінювання [12], а також для іонізаційних втрат енергії електронів [13]. У роботі [14] було показано, що ці ефекти можуть також відігравати вагомий роль у радіовипромінюванні пульсарів.

Далі ми зосередимося на розгляді ефектів, пов'язаних із напівголим станом частинок, а також інших споріднених з ними інтерференційних ефектів у процесах іонізаційних втрат енергії та перехідного випромінювання електронів високих енергій. Ці процеси лежать в

основі роботи багатьох детекторів елементарних частинок, а також систем діагностики пучків заряджених частинок на прискорювачах. Тому всебічне дослідження зазначених ефектів є важливим для коректної інтерпретації результатів вимірювань такими системами за умов прояву цих ефектів. Крім того, ці ефекти відкривають нові можливості для діагностики пучків.

Рухаючись у речовині, заряджена частинка втрачає частину своєї енергії на збудження та іонізацію атомів речовини. Такі втрати енергії відомі як іонізаційні. При високих енергіях частинки величина її іонізаційних втрат визначається формулою Фермі [15], яка ще відома як формула Бете—Блоха з урахуванням ефекту густини Фермі.

У роботі [13] було теоретично досліджено іонізаційні втрати напівголого електрона у тонкій мішені (тоншій за 100 нм), що розташована на певній відстані від мішені, яка «роздягає» електрон (рис. 2). При цьому було показано, що іонізаційні втрати у такому випадку можуть помітно відрізнятися від результату, передбаченого формулою Фермі (рис. 3). Більше того, ці втрати мають суттєво залежати від відстані d між двома мішенями при $d < l_F$, де довжина формування l_F береться при характерних атомних частотах речовини. При енергії електронів $E \sim 100$ ГеВ, досяжній на прискорювачі SPS у CERN, ця відстань може досягати 100 м.

Напівголий стан частинки може також суттєво модифікувати характеристики її перехідного випромінювання. Це випромінювання виникає при проходженні зарядженою частинкою межі поділу двох різних середовищ (наприклад, при вльоті частинки з вакууму до речовини або при проходженні частинки крізь пластинку речовини у вакуумі). При високих енергіях частинки спектр цього випромінювання простягається від радіохвиль до рентгеновських частот. Перехідне випромінювання є зручним інструментом для детектування частинок та вимірювання поздовжніх і поперечних розмірів пучків на прискорювачах. Крім того, його можна використовувати для генеру-

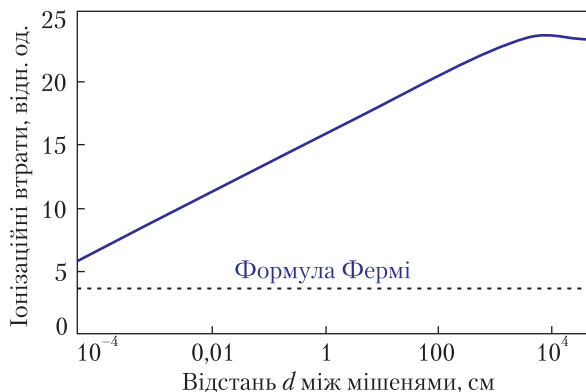


Рис. 3. Залежність іонізаційних втрат енергії напівголого електрона з енергією $E = 100$ ГеВ у тонкій мішені від її розташування (див. рис. 2)

вання рентгеновських фотонів для різних застосувань.

На тестовому пучку DESY II (м. Гамбург, Німеччина) було проведено експериментальне дослідження впливу напівголого стану електрона на його рентгеновське перехідне випромінювання у багатошарових радіаторах різного періоду [16]. Кожен такий радіатор складався з великої кількості періодично розташованих тонких алюмінієвих пластин, розділених повітряними проміжками. У разі прояву напівголого стану електронів (зокрема, при ширині повітряних проміжків, меншій за l_F або порядку l_F) спостерігалися різні типи модифікації спектра випромінювання порівняно з випадком, коли такий прояв відсутній (тобто при проміжках, набагато ширших за l_F). Отримані результати та їх теоретичний аналіз, проведений у цій самій роботі, становлять інтерес для створення нових компактних джерел вузькоспрямованих пучків рентгеновських фотонів.

У роботах [17, 18] було розроблено пропозицію експериментального дослідження перехідного випромінювання напівголих електронів у міліметровому діапазоні довжин хвиль з використанням електронних пучків прискорювача СЛЮ (енергія електронів 45 МеВ) та фотоніжктора РНІЛ (3,5 МеВ), що розміщений у м. Орсе, Франція. При цьому передбачається отримувати електрони у зазначеному стані

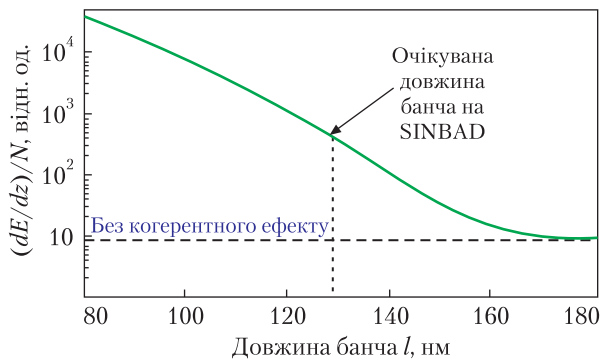


Рис. 4. Залежність іонізаційних втрат енергії банча (в розрахунку на один електрон) від його довжини у водні при параметрах, типових для SINBAD

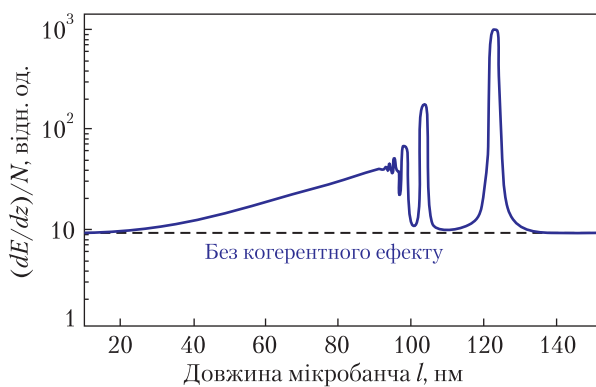


Рис. 5. Залежність іонізаційних втрат енергії пучка (в розрахунку на один електрон) від періоду його мікробанчування у водні при параметрах пучка, типових для European XFEL

внаслідок пропускання електронного пучка крізь тонкий провідний екран і досліджувати випромінювання, що виникає при подальшому падінні цього пучка на інший подібний екран. Очікується, що за умов, які можливо реалізувати на цих установках, буде спостережено не тільки пригнічення, а й посилення інтенсивності випромінювання внаслідок прояву напівголого стану електронів, а також осциляції цієї інтенсивності зі зміною відстані між екранами. Останні два ефекти раніше експериментально не спостерігалися.

Напівголий стан частинки можна розглядати як інтерференційний ефект. Наприклад, пригнічення поля частинки після її розсію-

вання є наслідком деструктивної інтерференції її кулонівського поля та поля гальмівного випромінювання, що поступово формується у кінцевому напрямку руху частинки. Аналогічно після проходження частинкою шару речовини має місце інтерференція між її кулонівським полем та полем перехідного випромінювання в напрямку руху частинки. Подібна інтерференція може відбуватися і між кулонівськими полями різних частинок, що рухаються на дуже малій відстані одна від одної. Зокрема, така ситуація реалізується при проходженні крізь речовину електронного згустку (банча) малого розміру. У цьому випадку може мати місце когерентний ефект в іонізаційних втратах енергії банча [19], який полягає в тому, що внаслідок конструктивної інтерференції полів окремих електронів банча всі вони взаємодіють з атомами як єдине ціле, що приводить до збільшення іонізаційних втрат банча.

У роботах [20, 21] побудовано теорію цього ефекту для параметрів прискорювача SINBAD, що наразі споруджується в DESY. Показано, що в цьому випадку можливе зростання іонізаційних втрат банча на кілька порядків величини (рис. 4). Також продемонстровано наявність залежності цих втрат від поздовжнього та поперечного розміру банча. Це відкриває нові можливості для вимірювання розмірів та форми банча на основі цього ефекту.

У роботах [20, 21] також передбачено резонансний ефект в іонізаційних втратах енергії пучка, що розпадається на періодичну послідовність ультракоротких банчів. Таке «мікробанчування» пучка має місце, зокрема, в рентгенівських лазерах на вільних електронах, які наразі є найпотужнішими джерелами когерентного рентгенівського випромінювання. Зазначений ефект полягає у резонансному збільшенні іонізаційних втрат пучка на кілька порядків величини при певних періодах мікробанчування (рис. 5). Цей ефект відкриває додаткові можливості для дослідження та контролю якості процесу мікробанчування в лазерах на вільних електронах.

Іонізаційні втрати енергії також є джерелом важливої інформації про характеристики руху

заряджених частинок в орієнтованих кристалах. Відомо, що при вльоті частинки в кристал під малим кутом до кристалічної площини (або осі) її може захопити поле цієї площини (або відповідного атомного ланцюга), і частинка рухатиметься вздовж цієї площини, ніби вздовж каналу. Це явище називається каналюванням [22]. Воно дає можливість відхиляти пучки заряджених частинок за допомогою зігнутих кристалів малого розміру. У деяких випадках це дозволяє замінити такими кристалами великі електромагніти, що приводить до значного енергозощадження.

Для ефективної реалізації зазначеного механізму відхилення пучків важливо знати такий параметр, як довжина деканалювання l_d . Це довжина, на якій близько 65 % частинок виходять із режиму каналювання в результаті розсіювання на теплових коливаннях атомів або на атомних електронах. Для електронів наразі є суттєві розбіжності у визначенні цієї величини. У роботі [23] було запропоновано новий метод експериментального вимірювання довжини деканалювання на основі функції розподілу іонізаційних втрат енергії частинок у кристалі $f(\epsilon)$. Ця функція (її можна вимірювати експериментально, використовуючи кри-

стал як детектор іонізаційних втрат енергії) визначає ймовірність того, що задана частинка пучка втратить певну енергію ϵ , пролітаючи крізь кристал. Як показано в [23], вигляд цієї функції помітно залежить від l_d , що дозволяє використовувати її для визначення цієї величини. Експериментальна реалізація запропонованого методу наразі запланована в рамках спільного проєкту ННЦ ХФТІ та DESY – Pilot Study of a Crystal-based Extraction for 6 GeV Electrons at DESY.

Підбиваючи підсумки, можна зазначити, що інтерференційні ефекти, пов'язані з напівголим станом частинок та малими розмірами згустків заряджених частинок, можуть суттєво змінювати характеристики різних електромагнітних процесів, що відбуваються при взаємодії частинок високих енергій із речовиною. Дослідження цих ефектів становить інтерес як у практичній площині, зокрема для діагностики пучків на прискорювачах, так і з погляду фундаментальної науки як окремий напрям досліджень в електродинаміці високих енергій. У роботі було наведено низку результатів дослідження цих ефектів для перехідного випромінювання та іонізаційних втрат енергії частинок.

REFERENCES

1. Feinberg E.L. High energy successive interactions. *Sov. Phys. JETP*. 1966. **23**(1): 132–140.
2. Akhiezer A.I., Shul'ga N.F. *High Energy Electrodynamics in Matter*. Amsterdam: Gordon and Breach Publ., 1996.
3. Shul'ga N.F., Trofymenko S.V. High-energy wave packets. "Half-bare" electron. *Journal of Kharkiv National University. Physical series "Nuclei, Particles, Fields"*. 2013. **1040**: 59–67.
4. Landau L.D., Pomeranchuk I.Ya. Limits of applicability of the theory of electron bremsstrahlung and pair production at high energies. *Dokl. Akad. Nauk SSSR. Ser. Fiz.* 1953. **92**: 535–536. (Collected papers of L.D. Landau. Ed. D. Ter Haar. Oxford: Pergamon Press, 1965. P. 589). <https://doi.org/10.1016/C2013-0-01806-3>
5. Migdal A.B. Bremsstrahlung and pair production in condensed media at high energies. *Phys. Rev.* 1956. **103**: 1811. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.103.1811>
6. Ternovsky F.F. On the theory of radiative processes in piecewise homogeneous media. *Sov. Phys. JETP*. 1961. **12**: 123.
7. Shul'ga N.F., Fomin S.P. Suppression of radiation in an amorphous medium and in a crystal. *JETP Lett.* 1978. **27**: 117.
8. Artru X., Ray C. Interference and shadow effects in the production of light by charged particles in optical fibers. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2008. **266**: 3725. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2008.03.083>
9. Shul'ga N.F., Trofymenko S.V., Syshchenko V.V. On the transition radiation and bremsstrahlung from a relativistic electron with a nonequilibrium field. *JETP Lett.* 2011. **93**: 1. <https://doi.org/10.1134/S0021364011010061>
10. Naumenko G., Popov Y., Shevelev M. Direct observation of a semi-bare electron Coulomb field recover. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2012. **357**: 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/357/1/012005>
11. Trofymenko S.V., Shul'ga N.F., Shchagin A.V. Diffracted x-ray transition radiation by a "half-bare" electron. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2019. **22**: 024501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.22.024501>

12. Trofymenko S.V. K-shell ionization and characteristic x-ray radiation by high-energy electrons in multifoil targets. *Phys. Rev. A*. 2020. **102**: 062804. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.062804>
13. Shul'ga N.F., Trofymenko S.V. On ionization energy losses of ultra-relativistic half-bare electron. *Phys. Lett. A*. 2012. **376**: 3572. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.062804>
14. Kontorovich V.M., Trofymenko S.V. On the mystery of the interpulse shift in the Crab pulsar. *J. Phys. Sci. Appl.* 2017. **7**(4): 11. <https://doi.org/10.17265/2159-5348/2017.04.002>
15. Fermi E. The ionization loss of energy in gases and in condensed materials. *Phys. Rev.* 1940. **57**: 485. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.57.485>
16. Trofymenko S.V., Nazhmudinov R.M., Shchagin A.V. et al. Formation region effects in x-ray transition radiation from 1 to 6 GeV electrons in multilayer targets. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*. 2020. **476**: 44. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2020.04.033>
17. Trofymenko S.V., Shul'ga N.F., Delerue N., Jenzer S., Khodnevykh V., Migayron A. Proposal to observe half-bare electrons on 45-MeV linac. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2017. **874**: 012076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/874/1/012076>
18. Shul'ga N.F., Trofymenko S.V., Barsuk S.Ya., Bezshyyko O.A. On transition radiation by a low-energy relativistic "half-bare" electron. *Eur. Phys. J. Plus*. 2019. **134**: 343. <https://doi.org/10.1140/epjp/i2019-12870-0>
19. Ogata A., Kondoh T., Norizawa K., Yang J., Yoshida Y., Kashiwagi S., Kanekoet T. Collective energy loss of attosecond electron bunches. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A*. 2011. **637**: S95. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.02.031>
20. Trofymenko S.V., Shul'ga N.F. Interference effect in the ionization loss of high-energy electron bunches. *Phys. Lett. A*. 2019. **383**: 2561. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2019.05.023>
21. Trofymenko S.V., Shul'ga N.F. Energy loss by relativistic electron ensembles due to coherent excitation and ionization of atoms. *Phys. Rev. Accel. Beams*. 2020. **23**: 084501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.23.084501>
22. Lindhard J. Influence of crystal lattice on motion of energetic charged particles. *Danske Vid. Selsk. Mat. Fys. Medd.* 1965. **34**: 14.
23. Trofymenko S.V., Kyryllin I.V. On the ionization loss spectra of high-energy channeled negatively charged particles. *Eur. Phys. J. C*. 2020. **80**: 689. <https://doi.org/10.1140/epjc/s10052-020-8127-z>

Sergii V. Trofymenko

*Akhiezer Institute for Theoretical Physics of the National Science Center
"Kharkiv Institute of Physics and Technology"
of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kharkiv, Ukraine*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1263-4444>

ELECTROMAGNETIC PROCESSES WITH HIGH-ENERGY "HALF-BARE" PARTICLES

According to the materials of report at the meeting of the Presidium of the NAS of Ukraine, July 12, 2023

The article presents the results of studies of interference effects in various electromagnetic processes which take place at interaction of high-energy charged particles with matter. The considered effects are associated with manifestation of the so-called "half-bare" state of particles as well as ultra-small size of charged particle bunches. The main attention is paid to the processes of transition radiation and ionization energy loss, which are of great importance for detection of elementary particles and measurement and control of beam parameters at accelerators. It is shown that the mentioned effects can significantly change the characteristics of these processes within large distances along the direction of particle motion.

Keywords: high-energy particles, transition radiation, ionization energy loss.

Cite this article: Trofymenko S.V. Electromagnetic processes with high-energy "half-bare" particles. *Visn. Nac. Akad. Nauk Ukr.* 2023. (9): 87–92. <https://doi.org/10.15407/visn2023.09.087>