

В. Є. Аушев*

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна**Відповідальний автор: aushev@fnal.gov**ВІДКРИТТЯ ЗВ'ЯЗАНОГО СТАНУ ТРЬОХ ГЛЮОНІВ – ОДДЕРОНА**

У кінці грудня 2020 р. дві колаборації TOTEM (у ЦЕРН) та D0 (Національна лабораторія імені Фермі, Фермілаб, США) опублікували результати об'єднаних досліджень, що свідчать про відкриття зв'язаного стану глюонів – оддерона. Існування цього стану було передбачено на основі квантової хромодинаміки близько 50 років тому, але довгий час не вдавалось експериментально довести його існування. Відкриття стало можливим завдяки порівнянню диференціальних перерізів розсіяння протонів на протонах із перерізами протон-антипротонного розсіяння. Різниця в перерізах точно відповідає теоретичним розрахункам внеску оддерона в амплітуди розсіяння. Активну роль в експериментах на D0, і взагалі в пошуках глюоболів у минулі роки, відіграла наша київська група. Зроблене відкриття вже оцінюється як одне з найважливіших у ЦЕРН та Фермілаб.

Ключові слова: оддерон, протон, антипротон, ВАК, Теватрон, глюон, глюбол, зв'язаний стан.

Згідно із Стандартною моделлю елементарних частинок, усі адрони (зокрема, нуклони) складаються із кварків: класичні баріони містять у собі три кварки, а мезони – два. Разом кварки утримує глюонне поле. Сильна взаємодія між кварками описується квантовою хромодинамікою (КХД), що є теорією, в якій глюон відіграє роль носія взаємодії, подібно тому, як у квантовій електродинаміці фотон є носієм електромагнітної взаємодії. Глюони мають спеціальний «кольоровий» заряд сильної взаємодії. Це відрізняє їх від фотонів, які не мають електричного заряду. Глюони, як і кварки, не можуть спостерігатися як ізольовані вільні частинки, оскільки вони мають ненульові значення кольорових зарядів. Наявність кольорового заряду дозволяє глюонам напряму взаємодіяти між собою, утворювати зв'язані стани. Це спонукало фізиків – теоретиків та експериментаторів – активно шукати такі зв'язані стани у вигляді елементарних частинок, які не містять кварків, а складаються лише із глюонів, так звані глюоболі (“glueball”). Задача зв'язаних станів глюонів відіграє фундаментальну роль для теорії сильних взаємодій, вирішення якої може стати ключовим для теорії елементарних частинок, включно із КХД (див., наприклад, [1]).

Згідно з теоретичними передбаченнями, найлегші глюоболі є скалярними мезонами із $J^{PC} = 0^{++}$ (найнижча енергія двоглюонних станів) і масою в діапазоні 1,5 - 1,7 GeV. Нами проводився активний пошук таких частинок на *ep* колайдері HERA при енергії електронів (також позитронів) 27,5 GeV та енергії протонів 920 GeV. В експерименті ZEUS нами досліджено [2] спектр інваріантних мас $K^0_s K^0_s$, який виявив групу резонансів,

що відносяться до *f*-мезонів, один з яких $f_0(1710)$ є кандидатом на глюбол у стані 0^{++} . Однак для однозначного висновку щодо природи цього стану потрібно проводити додаткові дослідження. Мінімальна безколірна комбінація з позитивною *C*-парністю складається з двох глюонів (померон), а з від'ємною – з трьох глюонів (оддерон). Процеси з обміном двома померонами (double pomeron exchange) нами досліджувались на Теватроні в рамках співпраці із колаборацією CDF [3] у процесах ексклюзивного продукування пар протилежно заряджених піонів при енергіях 900 і 1960 GeV.

У 1973 р. в роботі [4] було теоретично передбачено існування зв'язаного стану глюонів – оддерона. У той же час було запропоновано нову реджевську сингулярність [5]. Подальший розвиток подій показав, що доказ існування оддерона став справжнім викликом для експериментаторів, а дискусії між прихильниками та супротивниками цієї гіпотези то розгорялись, то затихали протягом наступних майже 50 років.

З теоретичної точки зору, оддерон є *C*-непарним партнером померона, з такими, як у померона, квантовими числами, за виключенням парності, яка в оддерона негативна [1]. *C*-непарну комбінацію можна зібрати з непарної кількості глюонів, тому вважається, що оддерону відповідає обмін зв'язаного стану трьох (або більше) глюонів. КХД, як і теорія Редже, не визначають відносну величину внеску оддерона в процеси. Однозначну відповідь про роль оддерона міг дати лише експеримент по розсіянню частинок та античастинок при великих енергіях, наприклад, протонів на протонах та протонів на антипрото-

нах. Тоді різниця поперечних перерізів цих процесів при однакових енергіях буде визначати внесок оддерона внаслідок різних знаків C -непарних внесків: у протон-протонному розсіянні оддерон має від'ємний знак, а для протон-антипротонної пари – додатний. Таких вимірювань при однакових енергіях до останнього часу не було. Винятком були хіба що вимірювання на прискорювачі ISR при 53 GeV енергії пучків. У них робилось припущення, що оддерон можна побачити в області дифракційного мінімуму. Результати вказували на різницю перерізів, але вимірювання було зроблено лише для трьох точок. І до того ж при таких енергіях внесок ω -мезонів був все ще значним і міг обумовити різницю в перерізах. Було опубліковано цілий ряд робіт, в яких робились спроби визначити внесок оддерона на основі аналізу даних для pp та $p\bar{p}$ -розсіяння [6 - 9] на прискорювачах ISR, RHIC, SPS та Теватроні. Але існуючі експериментальні дані можна було описати як з урахуванням оддерона, так і без нього, особливо, якщо є досить вільних параметрів. Аналіз не зміг виявити оддеронів і в той же час показав, наскільки важко виділити внесок оддерона в процесах пружного розсіяння протонів та антипротонів. Пропонувались також інші реакції або їхні комбінації для оцінки внеску оддерона. Зокрема, у роботі [10] було розглянуто реакції із зарядженими і нейтральними піонами або комбінації таких реакцій [11].

До труднощів виділення оддерона при аналізі можна додати також складність техніки таких експериментів. Дійсно, коли в SLAC в 1960-ті роки проводили експерименти по розсіянню релятивістських електронів на протонах, що довели існування партонів, то електронний спектрометр переміщали по експериментальному залу на рейках для зміни кута детектування. А для детектування розсіяння протонів або антипротонів на Теватроні або Великому адронному колайдері (БАК) ефекти розсіяння мають масштаб міліметрів на базі в сотні метрів. Тому детектори потрібно виносити далеко вперед від точки взаємодії. Інша технічна проблема пов'язана з тим, що в природі антипротони не існують у вільному стані серед баріонної матерії, яка нас оточує (лише є невелика компонента в космічних променях). Тому доводиться спочатку створювати антипротони в реакціях на фіксованій мішені, яку бомбардують релятивістськими протонами, а потім з них формувати пучок, який прискорюється в колайдері. Організувати це на одному потужному колайдері досі не вдалося. Вимірювання, як правило, рознесені на різні прискорювачі.

На початку 2000-х років сформувався розуміння, наскільки критичним для ролі оддерона

стануть майбутні експерименти при високих енергіях (див., зокрема, [1]). Якщо провал у pp -розсіянні збережеться навіть при більших енергіях, то це стане сильним доказом на користь моделі оддерона. Тільки під більшими енергіями тоді бачились експерименти на RHIC, що планувались.

Загалом було кілька різних передбачень, яким відповідають десятки гарних теоретичних робіт на цю тему. Серед них хотілося б виділити, зокрема, теоретичну роботу [12] за участю нашого студента Д. Лонтковського під керівництвом Л. Л. Єнковського по дослідженню високоенергетичної дифракції. Особливу увагу було приділено поведінці диференціальних поперечних перерізів, а саме так званій “dip-bump structure”. Один з головних висновків, який зробили автори, наголошував на тому, що оддерон незамінний в описі пружного розсіяння. Вони абсолютно правильно передбачили, що його відносний внесок повинен зростати із збільшенням абсолютної величини квадрата переданого чотири-імпульсу t і стає особливо важливим в області “dip-bump region”. В останні роки важливі результати по оддерону одержали наші вітчизняні теоретики [13, 14].

Рис. 1 ілюструє на прикладі експериментів TOTEM та D0 означення характерних точок у поведінці диференціального перерізу. Усі pp -зіткнення мають мінімум (“dip”), за яким слідує другий максимум (“bump”).

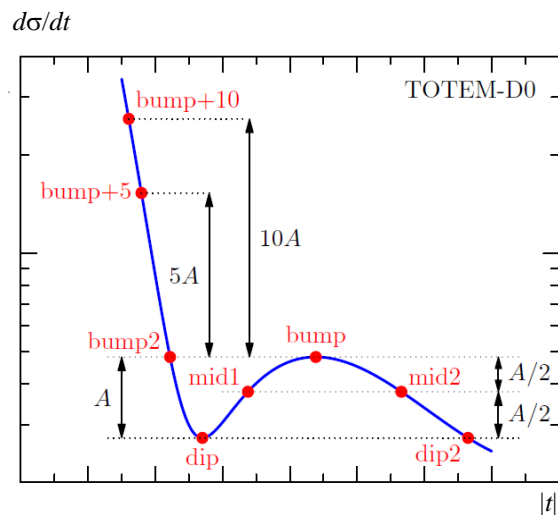


Рис. 1. Схематичне означення характерних точок у залежності диференціального перерізу від квадрата переданого чотири-імпульсу t . Величина A характеризує собою вертикальну відстань між “dip” і “bump” [15].

Задачу поєднання диференціальних перерізів протон-протонних (БАК) і протон-антипротонних (Теватрон) зіткнень при однакових енергіях виконала об'єднана команда двох колаборацій, відповідно TOTEM та D0. Схеми експериментів показано на рис. 2.

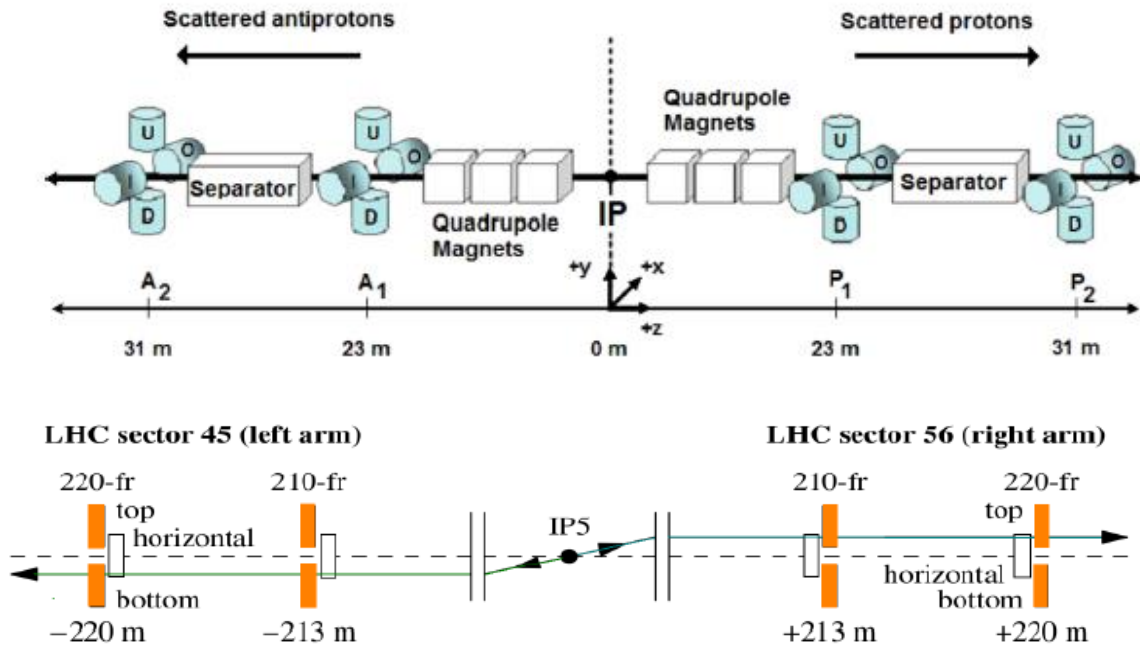


Рис. 2. Схема експериментів TOTEM (знизу) та D0 (зверху) по пошуку оддерона [16].

Але щоб виконати таке поєднання, необхідно було подолати одну важливу перешкоду. Справа в тому, що Теватрон забезпечував енергію в системі центра мас 1,96 TeV. При цій енергії було проведено вимірювання диференціальних перерізів. Протягом багатьох років наша київська група брала участь у вимірюваннях та обробці даних колаборації D0. Відрядження до Фермілаб для наших учасників тривали по 3 - 6 і більше місяців на рік. Захищено численні дипломні роботи наших студентів.

У той же час ВАК не міг спуститись до таких енергій пучків. Вихід було знайдено шляхом

ретельної екстраполяції перерізів на енергію Теватрона 1,96 TeV. Для цього на ВАК було проведено вимірювання повних перерізів при різних енергіях 2,76, 7, 8 та 13 TeV (рис. 3).

У результаті екстраполяції до енергії Теватрона було обчислено повний переріз $\sigma_{tot} = 82,7 \pm 3,1$ мб. Екстрапольований переріз було конвертовано в диференціальний переріз $d\sigma/dt = 357 \pm 26$ мб/GeV² при $t = 0$, використовуючи оптичну теорему. Колаборація D0 екстрапольовала свої поперечні перерізи при цих значеннях і одержала 341 ± 48 мб/GeV² при $t = 0$. Таким чином, дані TOTEM було скореговано з коефіцієнтом $0,954 \pm 0,071$.

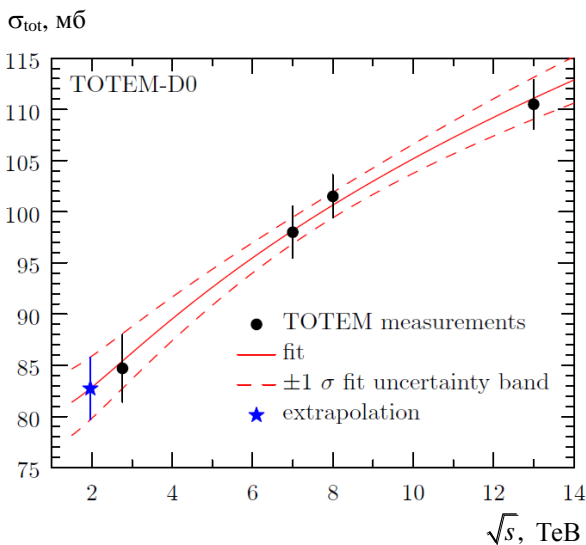


Рис. 3. Вимірювання повного перерізу в експерименті TOTEM при 2,76, 7, 8 і 13 TeV (кружечки), екстрапольовані на 1,96 TeV (зірочка). Штрихові лінії представляють смугу невизначеності 1 σ [15]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

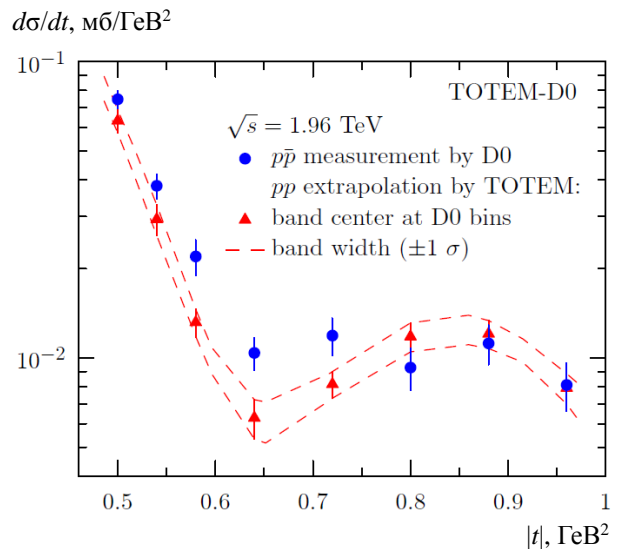


Рис. 4. Порівняння pp поперечних перерізів, вимірних D0 при 1,96 TeV, та екстрапольованих поперечних pp перерізів TOTEM. Штрихові лінії показують діапазон невизначеності 1 σ [15]. (Див. кольоровий рисунок на сайті журналу.)

Кінцевий результат порівняння диференціальних перерізів для pp і $p\bar{p}$ розсіяння показано на рис. 4. Як видно, поперечні перерізи pp та $p\bar{p}$ різняться зі значенням $3,4\sigma$. Оддерон, який становить значну частку реальної частини амплітуди, відіграє велику роль в області “dip”. У повній відповідності з передбаченням [17, 18] поперечний переріз pp виявляє глибший провал і залишається нижче перерізу $p\bar{p}$ принаймні до області “bump”. Таким чином, оддерон необхідний для опису пружного розсіяння при високих енергіях.

Результати було опубліковано у грудні 2020 р. одночасно на Фермілаб та ЦЕРН [15], а 5 березня 2021 р. в ЦЕРН було зроблено офіційну презентацію з оголошенням про відкриття оддерона [16], яку від імені двох колаборацій зробив Крістоф Ройон (Christophe Royon). Відповідні оголошення було зроблено на сайтах ЦЕРН та Фермілаб. Зроблене відкриття оцінюється як “Major discovery at CERN/Tevatron” [16].

Автор, звісно, не ставив перед собою задачу дати повний огляд теоретичних і експериментальних досліджень оддерона. Без сумніву, є багато достойних уваги оригінальних робіт і оглядів за цією тематикою. Метою було лише представити для загального розуміння основні моменти спільного дослідження TOTEM та D0, яке успішно завершилось відкриттям оддерона, а також висвітлити окремі аспекти нашої діяльності в цій області в попередні роки.

Активну роль в експериментах на D0, і взагалі в пошуках глюболів в минулі роки, відіграла

наша кївська група, основу якої складали представники КНУ імені Тараса Шевченка з активним долученням в різні роки в статусі асоційованих членів окремих науковців ІЯД та ІТФ ім. М. М. Боголюбова НАН України та студентів і аспірантів із університетів НаУКМА і КПІ. Група налічувала загалом 19 активних членів за всі роки нашої участі у вимірюваннях на детекторі D0 на Теватроні та обробці одержаних експериментальних результатів.

Щира подяка професору Л. Л. Єнковському за плідну багаторічну співпрацю і надання допоміжних матеріалів для статті, а також професору В. М. Пугачу і професору І. М. Каденку, які всіляко сприяли організації нашої групи та її входженню до колаборації D0. Вони також весь час підтримували наші дослідження за цією і більш широкою тематикою в експерименті ZEUS на колайдері HERA.

Усі 19 учасників, долучених до експерименту D0, заслуговують на подяку за свою самовіддану працю і вагомий внесок у нашу загальну справу. Серед них, зокрема, – Марина Борисова (старший науковий співробітник ІЯД), Ольга Гогота (аспірант КНУ, успішний захист дисертації в Україні), Олег Школа (аспірант КНУ), Єгор Аушев (аспірант КПІ, успішний захист дисертації в Україні), а також 10 студентів, які захистили дисертації за кордоном, зокрема Назар Стефанюк, Микола Савицький та ін. Ще більший список наших учасників експериментів на HERA, які там також показали чудові результати. Усім велика подяка!

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Л.Л. Енковский. Дифракция в адрон-адронных и лептон-адронных процессах при высоких энергиях. *ЭЧАЯ* 34 (2003) 1196 / L.L. Enkovsky. Diffraction in Hadron-Hadron and Lepton-Hadron Processes at High Energies. *Phys. Elem. Part. At. Nucl.* 34 (2003) 1196.
2. S. Chekanov et al. Inclusive $K^0_S K^0_S$ resonance production in ep collisions at HERA. *Phys. Rev. Lett.* 101 (2008) 112003.
3. M. Albrow et al. Central Exclusive Production at the Tevatron. *Int. J. Mod. Phys. A* 29 (2014) 1446009; arXiv:1409.0462.
4. L. Lukaszuk, B. Nicolescu. A Possible interpretation of pp rising total cross sections. *Lett. Nuovo Cim.* 8 (1973) 405.
5. A.V. Efremov, R. Peschanski. Evidence for new singularities in Regge phenomenology. JINR Preprint No. E2-6350 (Dubna, 1972).
6. R.J.M. Covolan et al. Pomeron and odderon at high energies. *Z. Phys. C* 58 (1993) 109.
7. P. Desgrolard, M. Giffon, L.L. Jenkovszky. Yader-naya Fizika (Physics of Atomic Nuclei) 56 (1993) 226.
8. L.L. Jenkovszky, A.N. Shelkovenko, B.V. Struminsky. Odd C-exchange in high-energy pp -bar and pp -scattering. *Z. Phys. C* 36 (1987) 495.
9. L.L. Jenkovszky, B.V. Struminsky, A.N. Shelkovenko. Differential $p\bar{p}$ scattering cross sections in the Coulomb-nucleus interference region $\sqrt{s} = 546$ GeV. *JETP Letters* 47 (1988) 346.
10. B.V. Struminsky, A.N. Shelkovenko. The odderon couplings in the vector meson production and related processes. *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* 25 (1992) 187.
11. A.P. Contogouris et al. Detecting the odderon. *Phys. Lett. B* 298 (1993) 432.
12. L. Jenkovszky, A. Lengyel, D. Lontkovskyi. The Pomeron and Odderon in elastic, inelastic and total cross sections at the LHC. *Intern. J. Mod. Physics A* 26(27-28) (2011) 4755; arXiv:1105.1202.
13. E. Martynov, B. Nicolescu. Did TOTEM experiment discover the Odderon? *Phys. Lett. B* 778 (2018) 414.
14. W. Broniowski et al. Hollowness in pp and $p\bar{p}$ scattering in a Regge model. *Phys. Rev. D* 98 (2018) 074012; arXiv:1806.04756.

15. V.M. Abazov et al. Comparison of pp and $p\bar{p}$ differential elastic cross sections and observation of the exchange of a colorless C-odd gluonic compound. Preprint FERMILAB-PUB-20-568-E; CERN-EP-2020-236; [ArXiv:2012.03981](https://arxiv.org/abs/2012.03981).
16. C. Royon. Odderon discovery in D0/TOTEM. Comparison of pp and $p\bar{p}$ differential elastic cross sections and observation of the exchange of a Colorless C-odd gluonic compound. Talk at LHC Forward Physics WG meeting, CERN, March 4 - 5, 2021.
17. V.A. Khoze, A.D. Martin, M.G. Ryskin. Elastic and diffractive scattering at the LHC. *Phys. Lett. B* **748** (2018) 192.
18. E. Martynov, B. Nicolescu. Odderon effects in the differential cross-sections at Tevatron and LHC energies. *Eur. Phys. J. C* **79**(6) (2019) 461.

V. E. Aushev*

Kyiv Taras Shevchenko National University, Kyiv, Ukraine

*Corresponding author: aushev@fnal.gov

DISCOVERY OF THE BOUND STATE OF THREE GLUONS - ODDERON

At the end of December 2020, two collaborations: TOTEM (CERN) and D0 (Fermi National Laboratory, USA) published the results of joint studies which manifested the discovery of a bound state of gluons: odderon. The existence of this state was predicted based on quantum chromodynamics about 50 years ago, but for a long time, it was not possible to prove its existence experimentally. The discovery was made possible by comparing the differential cross-sections of proton-proton scattering with the cross-sections of the proton-antiproton scattering. The difference in cross-sections corresponds exactly to the theoretical calculations of the contribution of odderon to the scattering amplitude. Active role in the experiments at D0, and in general in search of glueballs during previous years, played our Kyiv group. The discovery is already considered one of the most important at CERN and Fermilab.

Keywords: odderon, proton, antiproton, LHC, Tevatron, gluon, glueball, bound state.

Надійшла/Received 26.03.2021