

ВІДКРИТТЯ КВАРКІВ: ВІД ГІПОТЕЗИ ГЕЛЛ-МАННА ДО КВАНТОВОЇ ХРОМОДИНАМІКИ

¹ Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Анотація

У роботі розглянуто хронологію відкриття кварків — фундаментальних складових адронної матерії. Проаналізовано теоретичне підґрунтя кваркової моделі, запропонованої незалежно М. Гелл-Манном та Дж. Цвейгом у 1964 році, а також експериментальне підтвердження існування кварків у досліджах із глибоконепружного розсіювання електронів у Стенфордському лінійному прискорювальному центрі (SLAC) у 1968 році. Наведено ключові формули кваркової моделі, описано явище конфайнменту та основи квантової хромодинаміки (КХД). Розглянуто відкриття всіх шести ароматів кварків та їх роль у Стандартній моделі фізики елементарних частинок.

Ключові слова: кварки, адрони, кваркова модель, глибоконепружне розсіювання, квантова хромодинаміка, сильна взаємодія, конфайнмент, асимптотична свобода, Стандартна модель.

Abstract

This paper examines the chronology of quark discovery as the fundamental constituents of hadronic matter. The theoretical foundation of the quark model, independently proposed by M. Gell-Mann and G. Zweig in 1964, and the experimental confirmation through deep inelastic electron scattering at SLAC in 1968 are analyzed. Key formulae of the quark model are presented, together with the phenomena of confinement and the fundamentals of quantum chromodynamics (QCD). The discovery of all six quark flavors and their role in the Standard Model of particle physics are discussed.

Keywords: quarks, hadrons, quark model, deep inelastic scattering, quantum chromodynamics, strong interaction, confinement, asymptotic freedom, Standard Model.

Вступ

Фізика елементарних частинок є одним із найважливіших розділів сучасної фізики. Явища, що відбуваються у світі елементарних частинок, закономірності, яким підпорядковані ці явища, багато в чому відмінні від явищ і закономірностей макросвіту [1]. Від початку ХХ століття поступово розкривалась багаторівнева структура матерії: спочатку атом виявився подільним (дослід Резерфорда, 1911), потім стало зрозуміло, що і ядро складається з протонів та нейтронів, а вже у другій половині сторіччя встало питання — чи є нуклони дійсно елементарними частинками?

З 1950-х років фізичні прискорювачі виявляли дедалі більше адронів — частинок, що беруть участь у сильній взаємодії. Кількість відкритих частинок виявилася настільки великою, що виникли серйозні сумніви щодо їх справжньої елементарності [2]. Саме тоді з'явилась необхідність у більш глибокій класифікаційній схемі, яка заклала б теоретичний фундамент для розуміння «зоологічного саду» адронів.

Першим кроком стала «вісімкова схема» (Eightfold Way) М. Гелл-Манна 1961 року — система класифікації на основі симетрії ароматів SU(3). Але справжній переворот у розумінні природи адронів відбувся після висунення кваркової гіпотези у 1964 році та її блискучого підтвердження у 1968 році.

Теоретичне обґрунтування кваркової моделі (1964)

У 1964 році кваркова модель була незалежно запропонована двома фізиками: американцем Маррі Гелл-Манном та Джорджем Цвейгом [3]. Гелл-Манн опублікував роботу у Physics Letters, Цвейг — у вигляді внутрішнього звіту CERN. Цвейг назвав нові частинки «тузами» (aces), тоді як назва «кварк», запропонована Гелл-Манном, закріпилася у науці. Термін він запозичив із роману Джеймса Джойса «Поминки по Фіннегану» (Finnegans Wake), де зустрічається рядок «Three quarks for Muster Mark» [4].

Згідно з моделлю, усі адрони складаються із кварків трьох ароматів: u (up), d (down) та s (strange). Найбільш незвичною властивістю є їх дробовий електричний заряд. Для u-кварку:

$$Q_u = +2/3 e, \quad (1)$$

а для d- та s-кварків:

$$Q_d = Q_s = -1/3 e. \quad (2)$$

Де e — елементарний заряд електрона. Такі дробові заряди до того часу не спостерігалися ні для жодної відомої частинки. Склад нуклонів описується так: протон — $p(uud)$, нейтрон — $n(udd)$. Перевіримо заряд протона:

$$Q_p = 2 \cdot (+2/3 e) + 1 \cdot (-1/3 e) = +1 e. \quad (3)$$

Для нейтрона:

$$Q_n = 1 \cdot (+2/3 e) + 2 \cdot (-1/3 e) = 0. \quad (4)$$

На рис. 1 схематично зображено кваркову структуру протона та нейтрона з позначенням кварків і пунктирними лініями, що символізують глюонний обмін.

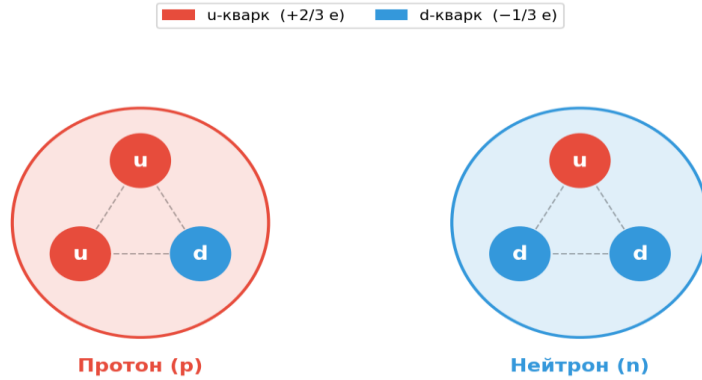


Рис. 1. Кваркова структура протона (uud) та нейтрона (udd); пунктиром позначено глюонний обмін між кварками

Баріони загалом будуються з трьох кварків (qqq), а мезони — з кварку та антикварку ($q\bar{q}$). Принцип баріонного числа зберігається завдяки тому, що кожен кварк несе баріонне число $B = +1/3$, а антикварк — $B = -1/3$:

$$B(qqq) = 3 \times (1/3) = 1, \quad B(\bar{q}\bar{q}\bar{q}) = 3 \times (-1/3) = -1. \quad (5)$$

Шість ароматів кварків у Стандартній моделі

	I покоління	II покоління	III покоління
Заряд $+2/3 e$	u <i>up</i> +2/3 e ~2.3 MeV	c <i>charm</i> +2/3 e ~1.28 GeV	t <i>top</i> +2/3 e ~173 GeV
Заряд $-1/3 e$	d <i>down</i> -1/3 e ~4.8 MeV	s <i>strange</i> -1/3 e ~95 MeV	b <i>bottom</i> -1/3 e ~4.18 GeV

Рис. 2. Шість ароматів кварків та їх основні характеристики у Стандартній моделі

Таблиця 1. Основні характеристики шести ароматів кварків

Аромат	Символ	Заряд (e)	Маса	Рік відкриття	Місце
Верхній (up)	u	+2/3	~2.3 MeV/c ²	1968 (SLAC)	США
Нижній (down)	d	-1/3	~4.8 MeV/c ²	1968 (SLAC)	США

Дивний (strange)	s	-1/3	~95 MeB/c ²	1968 (SLAC)	США
Зачарований (charm)	c	+2/3	~1.28 GeB/c ²	1974 (J/ψ)	США
Донний (bottom)	b	-1/3	~4.18 GeB/c ²	1977 (Υ)	США
Істинний (top)	t	+2/3	~173 GeB/c ²	1995 (Tevatron)	США

Експериментальне підтвердження: глибоконепружне розсіювання (1968)

Попри теоретичну елегантність, кваркова модель протягом кількох років залишалась математичним інструментом. Скептики вважали кварки зручною абстракцією. Вирішальне підтвердження прийшло з дослідів на SLAC у 1968 році [5].

Метод глибоконепружного розсіювання (deep inelastic scattering, DIS) є прямим розвитком класичного досліді Резерфорда. Електрони прискорювались до надвисоких енергій і спрямовувались на мішень із нуклонів. При взаємодії з нуклоном електрон передає йому 4-імпульс $q = k - k'$, де k та k' — 4-імпульси вхідного та розсіяного електронів. Інваріантна маса переданого імпульсу:

$$Q^2 = -q^2 = -(k - k')^2 > 0. \quad (6)$$

Теоретичну інтерпретацію результатів запропонував Джеймс Бйоркен, передбачивши явище масштабної інваріантності (Bjorken scaling): структурні функції протона $F_1(x, Q^2)$ та $F_2(x, Q^2)$ при великих Q^2 залежать лише від безрозмірної змінної — змінної Бйоркена:

$$x = Q^2 / (2M\nu), \quad (7)$$

де M — маса нуклона, $\nu = E - E'$ — переданий нейтроном. При пружному розсіюванні $x = 1$, при DIS — $0 < x < 1$. Масштабна інваріантність означає, що при $Q^2 \rightarrow \infty$:

$$F_2(x, Q^2) \rightarrow F_2(x) \text{ при } Q^2 \rightarrow \infty, \quad (8)$$

що свідчить про точкоподібну структуру розсіюваних центрів усередині нуклона [6]. Річард Фейнман, відвідавши SLAC влітку 1968 року, запропонував «партонну модель»: електрони пружно розсіюються на точкоподібних складових протона — партонах. У партонній моделі структурна функція F_2 пов'язана з функціями розподілу партонів $f_i(x)$:

$$F_2(x) = \sum e_i^2 \cdot x \cdot f_i(x), \quad (9)$$

де e_i — заряд i -го аромату кварку у одиницях e [7]. Схему процесу глибоконепружного розсіювання наведено на рис. 3.

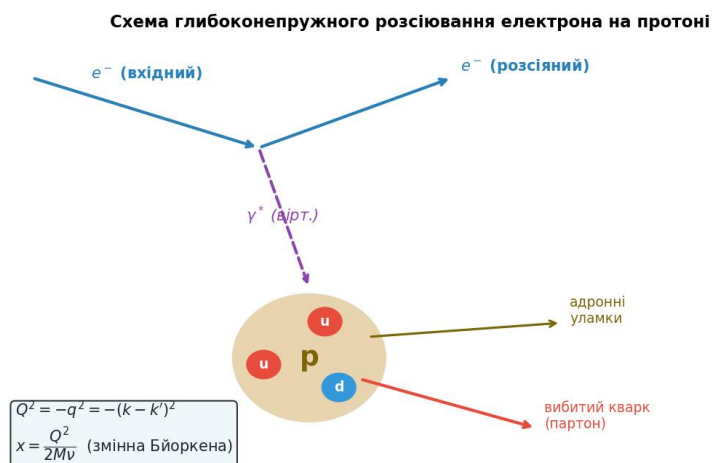


Рис. 3. Схема глибоконепружного розсіювання електрона на протоні. Віртуальний фотон γ^* вибиває один з кварків-партонів; Q^2 — квадрат переданого 4-імпульсу; x — змінна Бйоркена

Ранні результати SLAC були представлені Пановські на Міжнародній конференції з фізики високих енергій у Відні у 1968 році та опубліковані групами Блума і Брейденбаха у Physical Review Letters у 1969 році [7]. Ці дані надали перше переконливе підтвердження реальності кварків. За це відкриття Генрі Кендалл, Джером Фридман та Річард Тейлор отримали Нобелівську премію з фізики 1990 року [5].

Відкриття нових ароматів кварків та квантова хромодинаміка

Подальший розвиток фізики елементарних частинок потребував розширення кваркової схеми. У 1970 році Глешоу, Ліопулос і Майяні запропонували механізм GIM для пояснення відсутності нейтральних токів зі зміною аромату, що вимагало четвертого — «зачарованого» (charm) кварку [8]. Підтвердження прийшло у листопаді 1974 року, коли групи Ріхтера (SLAC) та Тінга (BNL) одночасно відкрили мезон J/ψ — зв'язаний стан $c\bar{c}$. Ріхтер і Тінг розділили Нобелівську премію з фізики 1976 року [9].

У 1973 році Кобаяші та Маскава показали, що порушення CP-інваріантності можна пояснити за умови існування третьої пари кварків [8]. Відповідно, у 1977 році в Fermilab відкрили b-кварк (через мезон Y), а у 1994–95 роках там само — надважкий t-кварк із масою ~ 173 GeV/c², що зіставна з масою ядра атома вольфраму [10].

Паралельно формувалась квантова хромодинаміка (КХД) — теорія сильної взаємодії. КХД є калібрувальною теорією, побудованою на групі симетрії SU(3)_c (де індекс c підкреслює, що йдеться про «кольорову» симетрію, а не ароматну). Кваркам приписується «колірний заряд» трьох типів: червоний (R), зелений (G), синій (B). Лагранжیان КХД:

$$\mathcal{L}_{KHD} = \sum_f \bar{\Psi}_f (i\gamma_\mu D_\mu - m_f) \Psi_f - (1/4) G_{\alpha\mu\nu} G_{\alpha\mu\nu}, \quad (10)$$

де Ψ_f — кваркові поля ароматів f , $D_\mu = \partial_\mu - ig_s A_{\alpha\mu} T_\alpha$ — коваріантна похідна, g_s — константа зв'язку сильної взаємодії, $G_{\alpha\mu\nu}$ — тензор глюонного поля [11].

Ключовою властивістю КХД є асимптотична свобода: константа зв'язку $\alpha_s(Q^2)$ зменшується зі зростанням Q^2 (тобто при зближенні кварків). Це описується формулою:

$$\alpha_s(Q^2) = 12\pi / [(33 - 2n_f) \cdot \ln(Q^2 / \Lambda_{QCD}^2)], \quad (11)$$

де n_f — кількість ароматів кварків ($n_f = 6$), $\Lambda_{QCD} \approx 200$ MeV — характерний масштаб КХД [11]. За відкриття асимптотичної свободи Гросс, Поліцер та Вілчек отримали Нобелівську премію з фізики 2004 року.

Протилежним ефектом є конфайнмент: при видаленні кварків на велику відстань потенціал міжкваркової взаємодії зростає лінійно:

$$V(r) \approx -4/3 \cdot \alpha_s/r + \kappa \cdot r, \quad (12)$$

де перший доданок — кулоноподібна частина (домінує при малих r), другий — лінійний потенціал з'ясування (string tension $\kappa \approx 0.18$ GeV²) [11]. При спробі відірвати кварк енергія поля стає достатньою для народження нової пари кварк-антикварк, тому ізольовані кварки у природі не спостерігаються.

Кварки у Стандартній моделі

Стандартна модель фізики елементарних частинок об'єднує три з чотирьох відомих фундаментальних взаємодій: сильну (КХД), електромагнітну та слабку. Шість ароматів кварків (рис. 2) розподілені за трьома поколіннями:

I покоління: u (up) та d (down) — найлегші і найстабільніші; є основними складовими протонів і нейтронів, а отже — всього звичайного стабільного речовинного світу.

II покоління: c (charm) та s (strange) — можуть існувати лише у нестабільних частинках або при високих енергіях. Дивний кварк з'являється у каонах та гіперонах, відкритих у космічних променях у 1947 році.

III покоління: t (top) та b (bottom) — найважчі, потребують для народження надвисоких енергій прискорювачів. Т-кварк ($m \approx 173$ GeV/c²) є найважчою відомою елементарною частинкою Стандартної моделі.

Важливим результатом є також теорема про кількість поколінь. Експерименти на прискорювачі LEP у CERN показали, що кількість поколінь легких нейтрино (а отже, і поколінь кварків) дорівнює рівно

трьом: $N_v = 2.988 \pm 0.023$ [10]. Це означає, що Стандартна модель із трьома поколіннями є завершеною з точки зору кваркової структури.

Висновки

Відкриття кварків стало одним із ключових досягнень фізики другої половини ХХ століття. За шістдесят років — від першої теоретичної гіпотези Гелл-Манна і Цвейга (1964) до відкриття t-кварку в Fermilab (1995) — кваркова модель пройшла шлях від абстрактної математичної схеми до експериментально підтвердженої теорії. Ключовими здобутками цього шляху є: підтвердження точкоподібної структури нуклонів у DIS-дослідах у SLAC (1968); відкриття J/ψ-мезона та зачарованого кварку (1974); побудова квантової хромодинаміки як галіантної калібрувальної теорії сильної взаємодії з властивостями асимптотичної свободи та конфайнменту.

Кваркова модель у поєднанні з КХД утворила фундамент Стандартної моделі — найточнішої фізичної теорії, яка будь-коли перевірялась експериментально. Разом з тим Стандартна модель не є повною: вона не включає гравітацію, не пояснює природу темної матерії та енергії, а також причини домінування матерії над антиматерією. Подальші дослідження у фізиці елементарних частинок, зокрема на Великому адронному коллайдері (LHC) у CERN, відкривають перспективи для виходу за межі Стандартної моделі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Головки М.В. Фізика і астрономія. Рівень стандарту. 11 клас. — К.: Педагогічна думка, 2019. — 256 с.
2. Бар'яхтар В.Г. Фізика. Рівень стандарту. 11 клас. — Х.: Ранок, 2019. — 288 с.
3. Gell-Mann M. A schematic model of baryons and mesons // Physics Letters. — 1964. — Vol. 8. — P. 214–215.
4. Zweig G. An SU(3) model for strong interaction symmetry and its breaking // CERN Report 8182/TH 401. — 1964.
5. Kendall H.W. Deep inelastic scattering: Experiments on the proton and the observation of scaling // Reviews of Modern Physics. — 1991. — Vol. 63, No. 3. — P. 597–614.
6. Bjorken J.D. Asymptotic sum rules at infinite momentum // Physical Review. — 1969. — Vol. 179. — P. 1547–1553.
7. Breidenbach M., Friedman J.I., Kendall H.W. et al. Observed behavior of highly inelastic electron-proton scattering // Physical Review Letters. — 1969. — Vol. 23, No. 16. — P. 935–939.
8. Glashow S.L., Iliopoulos J., Maiani L. Weak interactions with lepton-hadron symmetry // Physical Review D. — 1970. — Vol. 2. — P. 1285–1292.
9. Richter B. From the psi to charm: The experiments of 1975 and 1976 // Reviews of Modern Physics. — 1977. — Vol. 49. — P. 251–266.
10. The CDF Collaboration. Observation of Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions with the Collider Detector at Fermilab // Physical Review Letters. — 1995. — Vol. 74, No. 14. — P. 2626–2631.
11. Квантова хромодинаміка // Вікіпедія. — URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Квантова_хромодинаміка (дата звернення: 02.05.2026).

Руденко Даниїл Костянтинович, студент групи 2ПІ-25Б, Факультет інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: twncck@gmail.com

Науковий керівник: **Мартинюк Володимир Валерійович**, Доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця.

Rudenko Danyil Konstantinovich, student, group 2PI-25B, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: twncck@gmail.com.
Scientific supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriyovych**, Associate Professor, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.