



DOI 10.31110/2413-1571-2022-037-5-005

УДК [52+53]–378

ПОВНА ГРУПА  
ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ КОНСТАНТ ФІЗИКИTHE COMPLETE GROUP  
OF FUNDAMENTAL CONSTANTS OF PHYSICS

Сергій КУЗЬМЕНКОВ ✉

Херсонський державний університет, Україна  
ksg3.14159@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-5257-9523>

Serhii KUZMENKOV ✉

Kherson State University, Ukraine  
ksg3.14159@gmail.com  
<https://orcid.org/0000-0002-5257-9523>

## АНОТАЦІЯ

**Формулювання проблеми.** У статті обговорюється проблема повноти групи фундаментальних констант фізики. Аналіз існуючих списків різних авторів дав змогу дійти висновку, що жоден з них не вирішує проблему. Різні автори обґрунтовують різні списки через відсутність: 1) чітких критеріїв фундаментальності констант і 2) консенсусу щодо поняття повноти групи фундаментальних констант. Тому дослідження цієї проблеми є актуальним.

**Матеріали і методи.** Проведене дослідження спиралось на праці таких авторів як Й.Л. Розенталь (1984), П. Девіс (1982/1985), Л.Б. Окунь (1991), К.А. Томілін (2006), О.П. Спірідонов (2015) і здійснювалось шляхом систематизації, порівняльного аналізу, теоретичного осмислення наукових публікацій і навчальної літератури, узагальнення й уточнення ідей науковців.

**Результати.** 1. На нашу думку, групу констант можна вважати повною, якщо її члени є необхідними і достатніми для повної характеристики нашого Всесвіту. 2. До групи розмірних констант обґрунтовано введення космологічної сталої  $\Lambda$  як константи, що характеризує темну енергію, яка домінує у нашому Всесвіті. 3. Обґрунтовано введення принципу відповідності між групами розмірних і безрозмірних фундаментальних констант, який би давав змогу однозначно переходити від однієї групи до іншої. 4. Згідно з принципом відповідності до групи безрозмірних фундаментальних констант введено безрозмірну космологічну сталу  $\alpha_\Lambda$ . 5. Послідовне застосування принципу відповідності дало змогу уточнити і доповнити групу безрозмірних констант, зокрема, додати дві константи  $\alpha_c$  і  $\alpha_h$ , яким можна поставити у відповідність розмірні константи  $c$  (швидкість світла) та  $h$  (стала Планка). 6. Щоб забезпечити повну відповідність між групами розмірних і безрозмірних констант щодо слабкої і сильної взаємодій, обґрунтовано введення до групи розмірних констант сталої Фермі  $G_F$  і величини кольорового заряду  $g_{qs}$ . 7. Уточнено зміст безрозмірної сталої Габбла (Кузьменков, 2022).

**Висновки.** Отже, нами сформовано дві повні (на сьогодні) групи фундаментальних констант фізики (розмірних і безрозмірних) по 12 членів у кожній і систему рівнянь, які однозначно описують перехід від однієї групи констант до іншої.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** розмірна/безрозмірна фундаментальна константа; повна група фундаментальних констант; принцип відповідності; стала Габбла; космологічна стала; космологічний горизонт.

## ABSTRACT

**Formulation of the problem.** The article discusses the problem of completeness of the group of fundamental constants of physics. The analysis of the existing lists of different authors made it possible to conclude that none of them solves the problem. Different authors justify different lists due to the lack of 1) clear criteria for the fundamentality of constants and 2) consensus regarding the concept of the completeness of the group of fundamental constants. Therefore, the study of this problem is relevant.

**Materials and methods.** The conducted research was based on the works of such authors as Y.L. Rosenthal (1984), P. Davis (1982/1985), L.B. Okun (1991), K.A. Tomilin (2006), O.P. Spiridonov (2015) and was carried out through systematization, comparative analysis, theoretical understanding of scientific publications and educational literature, generalization and clarification of ideas of scientists.

**The results.** 1. In our opinion, a group of constants can be considered complete if its members are necessary and sufficient for a complete description of our Universe. 2. The introduction of the cosmological constant  $\Lambda$  as a constant characterizing the dark energy that dominates our Universe is justified to the group of dimensional constants. 3. The introduction of the principle of correspondence between groups of dimensional and dimensionless fundamental constants, which would make it possible to unambiguously move from one group to another, is substantiated. 4. According to the principle of correspondence to the group of dimensionless fundamental constants, a dimensionless cosmological constant  $\alpha_\Lambda$  was introduced. 5. The consistent application of the correspondence principle made it possible to clarify and supplement the group of dimensionless constants, in particular, to add two constants  $\alpha_c$  and  $\alpha_h$ , with which the dimensional constants  $c$  (speed of light) and  $h$  (Planck's constant) can be matched. 6. In order to ensure complete correspondence between the groups of dimensional and dimensionless constants regarding weak and strong interaction, the introduction of the Fermi constant  $G_F$  and the value of the color charge  $g_{qs}$  to the group of dimensional constants is justified. 7. The meaning of the dimensionless Hubble constant has been clarified (Kuzmenkov, 2022).

**Conclusions.** So, we have formed two complete (to date) groups of fundamental constants of physics (dimensional and dimensionless) with 12 members in each and a system of equations that unambiguously describe the transition from one group of constants to another.

**KEYWORDS:** dimensional/dimensionless fundamental constant; a complete group of fundamental constants; principle of correspondence; Hubble constant; cosmological constant; cosmological horizon.

## ВСТУП

**Постановка проблеми.** Нещодавно нами було надруковано статті: «Які фізичні константи можна вважати фундаментальними?» (Кузьменков, 2021b) і «Безрозмірні фундаментальні константи фізики: визначення і аналіз» (Кузьменков, 2022). Ми запропонували нові критерії фундаментальності фізичних констант (Кузьменков, 2021a, 2021b). Фундаментальними, на нашу думку, слід вважати константи, які, по-перше, не можна виразити через інші константи (незалежність – для розмірних констант); а, по-друге, варіації (уявні) числових значень цих констант спричиняють кардинальні зміни у нашому Всесвіті.

Згідно з цим визначенням нами було сформовано свої списки фундаментальних констант фізики, як розмірних, так і безрозмірних, які дещо відрізняються від списків, запропонованих іншими авторами (Розенталь, 1984; Девіс, 1982/1985; Окунь, 1991; Томілін, 2006; Спірідонов, 2015).

Кузьменков С. Повна група фундаментальних констант фізики. *Фізико-математична освіта*, 2022. Том 37. № 5. С. 37-42. DOI: 10.31110/2413-1571-2022-037-5-005

## Для цитування:

Кузьменков, С. (2022). Повна група фундаментальних констант фізики. *Фізико-математична освіта*, 37(5), 37-42. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-037-5-005>

Kuzmenkov, S. (2022). The complete group of fundamental constants of physics. *Physical and Mathematical Education*, 37(5), 37-42. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-037-5-005>

## For citation:

Kuzmenkov, S. (2022). Povna hrupa fundamentalnykh konstant fizyky [The complete group of fundamental constants of physics]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 37(5), 37-42. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-037-5-005>

Проте відкритим залишалось питання повноти групи фундаментальних фізичних констант, які є необхідними і достатніми для характеристики нашого Всесвіту.

**Аналіз актуальних досліджень.** Найбільш ґрунтовно проблемою фундаментальних констант фізики займалися Й.Л. Розенталь (1984), П. Девіс (1982/1985) О.П. Спірідонов (2015), К.А. Томілін (2006). Також Л.Б. Окунь (1991) в одній із статей коментував ситуацію, що склалася на той час з фундаментальними константами фізики.

Ми для зручності звели в одну таблицю пропозиції чотирьох зазначених авторів щодо переліку фундаментальних констант (табл. 1).

Таблиця 1

## Пропозиції різних авторів щодо переліку фундаментальних констант фізики

Автор	Фундаментальні константи фізики
Й. Розенталь (1984)	Безрозмірні константи фундаментальних взаємодій: $\alpha_s$ (сильної), $\alpha_e$ (електромагнітної), $\alpha_w$ (слабкої), $\alpha_g$ (гравітаційної); $N$ (розмірність простору), $m_e/m_p$ (відношення мас електрона і протона), $(m_n - m_p)/m_p$ (відношення різниці мас нейтрона і протона до маси протона)
П. Девіс (1982/1985)	$c$ (швидкість світла у вакуумі), $G$ (гравітаційна стала), $\hbar$ (стала Планка), $e$ (заряд електрона), $m_e$ (маса електрона), $m_p$ (маса протона), $G_F$ (стала Фермі), $\alpha_s$ (стала сильної взаємодії) $k$ (стала Больцмана), $H_0$ (стала Габбла), $\Lambda$ (космологічна стала), $n_\gamma/n_p$ (відношення концентрацій фотонів і протонів у Всесвіті)
О. Спірідонов (2015)	Розмірні: $G, c, \hbar, e, k, m_e, m_p, m_n$ , (маса нейтрона), $N_A$ (стала Авогадро), $st = \hbar^2 G^2 / c^7$ (квант простору-часу). Безрозмірні: $\alpha_s, \alpha_e, \alpha_w, \alpha_g, m_e/m_p, 2(m_n - m_p)/(m_n + m_p)$ (у знаменнику стоїть усереднена маса нуклона).
К. Томілін (2006)	Абсолютні міри: $c, \hbar, e, k$ (плюс квант магнітного потоку $h/2e$ (? – знаки питання наші), стала Джозефсона $2e/h$ (?) та інші). Константи взаємодій: $G, G_F$ , (стала Фермі) або $\alpha_w, \alpha_e, \alpha_s$ . Основні масштаби мас (енергій): $m_{Pl}$ , (планківська маса), $m_p$ і $m_e$

З табл. 1 видно, що Й. Розенталь (1984) розглядає переважно безрозмірні константи і надає їх найкоротший список. На нашу думку, всього два співвідношення для мас мікрочастинок, не відображають адекватно властивості нашого Всесвіту (див. Кузьменков, 2022).

П. Девіс (1982/1985) не вважає масу нейтрона фундаментальною константою, проте вважає такою сталу Больцмана, на недоцільність чого нами було вказано раніше (Кузьменков, 2021b). Сумнівною є також поява в цьому списку відношення концентрацій фотонів і протонів у Всесвіті (надлишок фотонів над баріонами). Значення цього відношення  $10^9$  навряд чи є критичним для нашого Всесвіту і тому не задовольняє запропонованому нами критерію фундаментальності констант (Кузьменков, 2021a, 2021b).

О. Спірідонов (2015) наводить групу розмірних констант, яка далека від повноти, однак включає до нього  $k$  і  $N_A$ , на недоцільність чого ми вже звертали увагу (Кузьменков, 2021a, 2021b). Щодо безрозмірних констант, то Спірідонов наводить фактично той самий список, що і Розенталь. Проте, по-перше, цей список не можна вважати повним, по-друге, тут порушується принцип відповідності (див. далі) між розмірними і безрозмірними константами. Слід також зазначити, що у другому виданні своєї книги Спірідонов (2015) прибирає як фундаментальну константу розмірність простору, мабуть, вважаючи, що кванта простору-часу  $st$ , буде цілком достатньо для представлення нашого Всесвіту.

К. Томілін (2006) розділяє фундаментальні константи на три групи і в кожну групу, крім очевидних, включає не достатньо обґрунтовані, з погляду фундаментальності, константи (як от квант магнітного потоку або стала Джозефсона – в табл. 1 ми внесли не всі). До того ж деякі з них виражаються через інші розмірні фундаментальні константи, що, на нашу думку, є неприпустимим. Урешті-решт, повну групу фундаментальних фізичних констант за Томіліним увявити складно.

Отже, **метою статті** є визначення і обґрунтування повної групи як розмірних, так і безрозмірних фундаментальних констант фізики, які є необхідними й достатніми для характеристики нашого Всесвіту.

## МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Систематизація, порівняльний аналіз і теоретичне осмислення наукових публікацій, аналіз наукової і навчальної літератури, розкриття основних дефініцій досліджуваної проблеми, узагальнення й уточнення ідей науковців.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

На нашу думку, вже визначену нами групу розмірних фундаментальних констант (Кузьменков, 2021a, 2021b). необхідно доповнити космологічною сталою  $\Lambda$ . Ця стала характеризує властивості фізичного вакууму (як найнижчого енергетичного стану будь-яких фізичних полів), метрику простору часу. Нині вона входить до основних рівнянь загальної теорії відносності А. Ейнштейна:

$$R_{ik} - \frac{1}{2} g_{ik} (R - 2\Lambda) = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ik}, \quad (1)$$

де  $g_{ik}$  – компоненти фундаментального метричного тензора,  $R_{ik}$  – компоненти тензора Річчі, що є комбінаціями  $g_{ik}$  та їх першої і другої похідних,  $R$  – інваріант кривизни – комбінація складових обох згаданих тут тензорів (їх добутків),  $T_{ik}$  – тензор енергії-імпульсу, складений із компонентів швидкостей речовини у 4-просторі, тиску  $P$  і густини енергії  $\varepsilon = \rho c^2$  (Андрієвський та ін., 2019).

На підставі заданої форми для інтервалу у метриці Фрідмана–Леметра–Робертсона–Вокера (Засов & Постнов, 2006) та обчислених компонентів тензора Річчі рівняння Ейнштейна (1) зводять до системи двох диференціальних рівнянь, які пов'язують між собою швидкість і прискорення зміни масштабного фактору  $a(t)$  залежно від інших параметрів моделі. Справа в тому, що у космології фізичну відстань між будь-якими двома близькими точками, що перебувають у стані спокою у супутній системі координат, записують через масштабний фактор (Засов & Постнов, 2006):

$$dl = a(t)dr, \tag{2}$$

де  $dr = \text{const}$  – елемент безрозмірної відстані. Отже, згадані диференціальні рівняння виглядають так (Засов & Постнов, 2006):

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} - \frac{kc^2}{a^2} + \frac{1}{3}\Lambda c^2, \tag{3}$$

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) + \frac{\Lambda c^2}{3}, \tag{4}$$

де параметр  $k = 0$  для плоского (евклідового) простору з нульовою кривизною,  $k = +1$  для однорідного простору з додатною кривизною та  $k = -1$  для однорідного простору з від'ємною кривизною. Це рівняння Фрідмана із урахуванням  $\Lambda$ . Перше рівняння зазвичай називають *рівнянням енергії*, друге – *рівнянням руху*.

Перенесення в рівнянні (1) Ейнштейна космологічної сталої в праву частину, тобто формальне її включення у тензор енергії-імпульсу, можна трактувати так, що за  $\Lambda \neq 0$  порожній простір створює гравітаційне поле (тобто кривизну простору-часу, що якраз описується лівою частиною рівняння). Причому в цьому разі гравітаційне поле має бути таким, якби в ньому була присутня матерія з густиною маси  $\rho_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}$ , густиною енергії  $\varepsilon_\Lambda = \frac{\Lambda c^4}{8\pi G}$  і незвичним тиском  $P_\Lambda = -\varepsilon_\Lambda$ .

У цьому сенсі говорять про густину енергії вакууму і тиск вакууму. Отже, наявність в рівняннях Ейнштейна космологічної сталої еквівалентно врахуванню густини енергії фізичного вакууму. Як з'ясувалось наприкінці ХХ ст., ця стала характеризує так звану «темну енергію», яка відповідає за прискорене розширення Всесвіту (Андрієвський та ін., 2019).

Числове значення космологічної сталої, що було отримано нещодавно в результаті спостережень для стандартної моделі  $\Lambda$ CDM (скорочення від Lambda–Cold Dark Matter) – сучасної космологічної моделі, в якій просторово-плаский Всесвіт заповнений, окрім звичайної баріонної матерії, темною енергією (що якраз і описується космологічною сталою  $\Lambda$  у рівняннях Ейнштейна) та холодною темною матерією, становить  $\Lambda = 1,0905 \cdot 10^{-52} \text{ м}^{-2}$  (Aghanim N. et al., 2020).

Цьому відповідає густина енергії вакууму  $\varepsilon_\Lambda = 5,25 \cdot 10^{-10} \text{ Дж/м}^3$ .

При цьому слід зазначити, що існує одна проблема, яка полягає у надзвичайній малості спостережуваного значення  $\varepsilon_\Lambda$  порівняно з теоретично очікуваним значенням, яке має бути на багато порядків більше (Засов & Постнов, 2006). Ця проблема відома в астрофізиці як «проблема космологічної сталої» і поки що не розв'язана.

Введемо безрозмірну константу, яка визначалась би через космологічну сталу. Оскільки  $\Lambda$  пов'язана з прискоренням розширенням Всесвіту, то шукану константу логічно визначити як відношення густини темної енергії до густини енергії спокою Всесвіту:

$$\alpha_\Lambda = \frac{\Lambda c^4 / 8\pi G}{\rho_{\text{кр}} c^2} = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G \rho_{\text{кр}}}, \tag{5}$$

де  $\rho_{\text{кр}} \approx 10^{-26} \text{ кг/м}^3$  – критична густина Всесвіту. Як середню густину Всесвіту було взято критичну густину, оскільки саме значення критичної густини (згідно зі спостережними даними) враховує не тільки видиму матерію, а й темну матерію, і темну енергію.

Підставляючи числові дані у формулу (5), дістаємо  $\alpha_\Lambda \approx 0,7$ .

Важливо зазначити, що системне дослідження проблеми фундаментальних констант фізики дало змогу сформулювати наступну пропозицію. Оскільки як розмірні, так і безрозмірні фундаментальні константи мають відображати один і той самий Всесвіт, то потрібно встановити *принцип відповідності* між цими групами констант, який би давав змогу однозначно переходити від однієї групи до іншої.

У групі безрозмірних фундаментальних констант є важлива підгрупа, яка пов'язана з усіма фундаментальними взаємодіями (Кузьменков, 2022). Проте, як з'ясувалось, за допомогою цієї підгрупи та навіть у поєднанні з іншими безрозмірними константами не можна задовольнити принцип відповідності. Зокрема, це стосується таких розмірних фундаментальних констант як  $c$  та  $\hbar$ .

Тому, на нашу думку, необхідно до групи безрозмірних констант додати дві константи, яким можна поставити у відповідність ці розмірні константи  $c$  та  $\hbar$ .

Наприклад, константі  $c$  можна поставити у відповідність безрозмірну константу, яку можна визначити як відношення планківської маси  $m_{\text{Pl}}$  (Андрієвський та ін., 2019) до маси електрона  $m_e$ :

$$\alpha_c = \frac{m_{\text{Pl}}}{m_e} = \frac{1}{m_e} \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2,4 \cdot 10^{22}. \tag{6}$$

Слід зазначити, що формула (6) не є очевидною. Проведений аналіз показав, що «безрозмірну швидкість світла», яка відповідає граничній швидкості поширення взаємодій (сигналів) у нашому Всесвіті, визначити не так просто. Тому

формулу (6) ми схильні розглядати як додаткове, але необхідне рівняння, яке пов'язує фундаментальні фізичні константи  $c$ ,  $G$ ,  $\hbar$ ,  $m_e$ , і допомагає сформувати повну групу безрозмірних констант.

Ще одну безрозмірну константу, яка співвідноситься вже зі сталою Планка, можна ввести як відношення енергії переходу під час утворення спектральної лінії  $H\alpha$  ( $\lambda_{H\alpha} = 656,3$  нм у серії Бальмера) до енергії спокою електрона:

$$\alpha_h = \frac{\hbar\omega}{m_e c^2} = \frac{2\pi\hbar}{m_e c \lambda_{H\alpha}} = \frac{\lambda_e}{\lambda_{H\alpha}}, \quad (7)$$

де  $\lambda_e$  – комптонівська довжина хвилі електрона. За розрахунками  $\alpha_h = 3,7 \cdot 10^{-6}$ .

З іншого боку, послідовне застосування принципу відповідності дає змогу уточнити склад груп як розмірних, так і безрозмірних констант. Наприклад, серед запропонованих нами (Кузьменков, 2021а, 2021b, 2022) списків констант є відповідності:  $e \leftrightarrow \alpha_e$  (заряд електрона  $\leftrightarrow$  безрозмірна константа електромагнітної взаємодії) і  $G \leftrightarrow \alpha_g$  (гравітаційна стала  $\leftrightarrow$  безрозмірна константа гравітаційної взаємодії). Але така відповідність відсутня для слабкої і сильної взаємодій, оскільки безрозмірні константи  $\epsilon$  (Кузьменков, 2022), а відповідних розмірних констант у запропонованому списку (Кузьменков, 2021а, 2021b) немає.

Тому ми пропонуємо згідно з принципом відповідності додати до групи розмірних фундаментальних констант сталу Фермі  $G_F$  і величину кольорового заряду  $g_{qg}$ .

Ми також хочемо уточнити визначення безрозмірної сталої Габбла. Раніше (Кузьменков, 2022) ми її визначили так:

$$\alpha_H = \frac{1}{2} \left( \frac{H_0 R_{\text{Вс}}}{c} \right)^2, \quad (8)$$

де під  $R_{\text{Вс}}$  ми розуміли радіус спостережуваного Всесвіту. Проте тут присутня деяка невизначеність, оскільки величина цього радіусу залежить від способу його визначення. Тому ми пропонуємо під  $R_{\text{Вс}}$  розуміти радіус так званого *космологічного горизонту* (інакше, *горизонту частинок*) (В. Margalef-Bentabol, J. Margalef-Bentabol, Сера, 2012).

Космологічний горизонт – це межа між спостережуваними і ще не спостережуваними областями Всесвіту, який весь час розширюється. Через розширення Всесвіту цей розмір не можна визначити як добуток швидкості світла на вік Всесвіту (згідно з  $\Lambda$ CDM-моделлю вік Всесвіту  $t_{\text{Вс}} = 13,8$  млрд років (Planck Coll., 2013)). Проте його можна визначити як добуток швидкості світла на так званий *конформний час*  $\tau$ :  $R_{\text{кр}} = c\tau_0$ , де індекс 0 означає сучасну епоху. Конформний час визначають так:

$$\tau = \int_0^t \frac{dt'}{a(t')}, \quad (9)$$

де  $a(t)$  – безрозмірний масштабний фактор,  $t$  означає поточний час, а  $t = 0$  відповідає моменту Великого вибуху. У метриці Фрідмана–Леметра–Робертсона–Вокера  $\tau_0 = 1,48 \cdot 10^{18}$  с (46,9 млрд років), а радіус космологічного горизонту становить  $R_{\text{кр}} = 4,44 \cdot 10^{26}$  м.

Отже, у формулі (8) ми пропонуємо замінити  $R_{\text{Вс}}$  на більш конкретну величину  $R_{\text{кр}}$ . І тоді матимемо:

$$\alpha_H = \frac{1}{2} \left( \frac{H_0 R_{\text{кр}}}{c} \right)^2 = 5,3. \quad (10)$$

Врешті-решт, остаточно повні (на сьогодні) групи розмірних і безрозмірних фундаментальних констант виглядають, на нашу думку, так (табл. 2 і 3):

Таблиця 2

Повна група розмірних констант фізики

№	Позначення	Назва	Зміст	Числове значення
1	$c$	швидкість світла у вакуумі	максимальна швидкість взаємодій у нашому Всесвіті	299792458 м/с
2	$G$	гравітаційна стала	характеристика інтенсивності гравітаційної взаємодії	$6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 / (\text{кг} \cdot \text{с}^2)$
3	$\hbar$	стала Планка	мінімальний квант дії, квант кутового моменту	$1,055 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$
4	$e$	заряд електрона	характеристика інтенсивності електромагнітної взаємодії	$1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$
5	$m_p$	маса протона	маса частинки, з яких складається речовина Всесвіту (видима матерія)	$1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
6	$m_n$	маса нейтрона	маса частинки, з яких складається речовина Всесвіту (видима матерія)	$1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
7	$m_e$	маса електрона	маса частинки, з яких складається речовина Всесвіту (видима матерія)	$9,109 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$
8	$G_F$	стала Фермі	характеристика інтенсивності слабкої взаємодії	$1,43 \cdot 10^{-62} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$
9	$g_{qg}$	кольоровий заряд	характеристика інтенсивності сильної взаємодії	$6,14 \cdot 10^{-13} (\text{Дж} \cdot \text{м})^{\frac{1}{2}}$

10	$H_0$	стала Габбла	характеристика швидкості розширення Всесвіту в сучасну епоху	$(67,8 \pm 1,3) \text{ км}/(\text{с}\cdot\text{Мпк})$
11	$\Lambda$	космологічна стала	характеристика темної енергії Всесвіту	$1,0905 \cdot 10^{-52} \text{ м}^{-2}$
12	$N$	розмірність простору	метрична і топологічна характеристики	3

Таблиця 3

Повна група безрозмірних констант фізики

№	Визначення і позначення	Назва	Числове значення
1	$\alpha_c = \frac{1}{m_e} \sqrt{\frac{\hbar c}{G}}$	безрозмірна «швидкість світла»	$2,4 \cdot 10^{22}$
2	$\alpha_g = \frac{Gm_p^2}{\hbar c}$	безрозмірна фундаментальна константа гравітаційної взаємодії	$5,9 \cdot 10^{-39}$
3	$\alpha_h = \frac{\lambda_e}{\lambda_{\text{H}\alpha}}$	безрозмірна стала Планка	$3,7 \cdot 10^{-6}$
4	$\alpha_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	безрозмірна фундаментальна константа електромагнітної взаємодії	$\frac{1}{137,04}$
5	$\frac{m_n}{m_p}$	відношення мас нейтрона і протона	1,0014
6	$\frac{2(m_n - m_p)}{(m_n + m_p)}$	відношення різниці мас нейтрона і протона до середньої маси нуклона	0,0014
7	$\frac{m_p}{m_e}$	відношення мас протона і електрона	1836
8	$\alpha_w = \frac{\sqrt{2}}{\pi\hbar c} \left( \frac{m_p c^2}{\hbar c} \right)^2 G_F$	безрозмірна фундаментальна константа слабкої взаємодії	$10^{-5}$
9	$\alpha_s = \frac{g_{qg}^2}{4\pi\hbar c}$	безрозмірна фундаментальна константа сильної взаємодії;	$\sim 1$ (для звичайних відносних відстаней $\approx 1 \text{ Фм}$ )
10	$\alpha_H = \frac{1}{2} \left( \frac{H_0 R_{\text{кр}}}{c} \right)^2$	безрозмірна стала Габбла	5,3
11	$\alpha_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G \rho_{\text{кр}}}$	безрозмірна космологічна стала	0,7
12	$N$	розмірність простору	3

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

1. Групу розмірних фундаментальних констант фізики слід доповнити космологічною сталою  $\Lambda$ , яка є неодмінною складовою сучасних космологічних моделей, визначає густину енергії фізичного вакууму, характеризує «темну енергію» і відповідає за прискорене розширення нашого Всесвіту. Ця константа цілком задовольняє запропонованим нами критеріям щодо фундаментальності констант, оскільки її числове значення визначає динаміку розширення нашого Всесвіту.

2. Розмірній фундаментальній константі  $\Lambda$  можна поставити у відповідність безрозмірну фундаментальну константу  $\alpha_\Lambda$ , яку, на нашу думку, можна визначити формулою (5).

3. Оскільки як розмірні, так і безрозмірні фундаментальні константи мають відображати один і той самий Всесвіт, то ми пропонуємо встановити *принцип відповідності* між цими групами констант, який би давав змогу однозначно переходити від однієї групи до іншої.

4. Використання принципу відповідності дало змогу уточнити і доповнити склад груп розмірних і безрозмірних фундаментальних констант фізики відповідно. Отже, ми доповнили групу розмірних констант ще двома (крім  $\Lambda$ ), а саме: сталою Фермі  $G_F$  і величиною кольорового заряду  $g_{qg}$ , а групу безрозмірних констант – константами  $\alpha_c$  і  $\alpha_h$ , які відповідають розмірним константам  $c$  і  $\hbar$ .

5. Врешті-решт сформовано дві повні (на сьогодні) групи фундаментальних констант фізики (розмірних і безрозмірних) по 12 членів у кожній і систему рівнянь, яка однозначно описує перехід від однієї групи констант до іншої.

У подальшому на конкретних прикладах продемонструємо вплив варіацій (уявних) числових значень нових введених констант (як розмірних, так і безрозмірних) на властивості нашого Всесвіту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Aghanim N. et al. (Planck Collaboration) (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
- Margalef-Bentabol, B., Margalef-Bentabol, J., Cepa, J. (2012). Evolution of the cosmological horizons in a concordance universe. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 12:035.



3. Planck Collaboration (2016). Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594, A13.
4. Андрієвський, С.М., Кузьменков, С.Г., Захожай, В.А., & Климишин, І.А. (2019). *Загальна астрономія*. ПромАрт.
5. Девис, П. (1985). *Случайная Вселенная* (В. Чертопруд, Пер.). Мир. (Оригінал опубліковано 1982).
6. Засов, А.В., & Постнов, К.А. (2006). *Общая астрофизика*. Фрязино.
7. Кузьменков, С. (2022). Безрозмірні фундаментальні константи фізики: визначення і аналіз. *Фізико-математична освіта*, 36(4), 46–50. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-036-4-0066>.
8. Кузьменков, С.Г. (2021а). *Фундаментальні фізичні та математичні константи: Задачі з розв'язаннями*. Херсон.
9. Кузьменков, С.Г. (2021b). Які фізичні константи можна вважати фундаментальними? *Наукові записки. Серія: Педагогічні науки*, 198, 40–44. <https://pednauk.cuspu.edu.ua/index.php/pednauk/issue/view/25>.
10. Окунь, Л.Б. (1991). Фундаментальные константы физики. *УФН*, 161(9), 177–194.
11. Розенталь, И.Л. (1984). *Элементарные частицы и структура Вселенной*. Наука.
12. Спиридонов О.П. (2015). *Фундаментальные физические постоянные: От начал физики до космологии* (2-ге вид.) ЛЕНАНД.
13. Томили, К.А. (2006). *Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах*. ФИЗМАТЛИТ.

#### REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Aghanim N. et al. (Planck Collaboration) (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>.
2. Margalef-Bentabol, B., Margalef-Bentabol, J., Cepa, J. (2012). Evolution of the cosmological horizons in a concordance universe. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*. 12:035.
3. Planck Collaboration (2016). Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 594, A13.
4. Andriievskiy, S.M., Kuzmenkov, S.H., Zakhzhai, V.A., & Klymyshyn, I.A. (2019). *Zahalna astronomiia [General Astronomy]*. PromArt. (in Ukrainian).
5. Davis, P. (1985). The Accidental Univers [Sluchaynaya Vselennaya] (V. Chertoprud, Per.). Myr. (Oryhinal opublikovano 1982). (in Russian).
6. Zasov, A.V., & Postnov, K.A. (2006). *Obshhaja astrofizika [General Astrophysics]*. Frjazino. (in Russian).
7. Kuzmenkov, S. (2022). Bezrozmirni fundamentalni konstanty fizyky: vyznachennia i analiz [Dimensionless fundamental constants of physics: definition and analysis]. *Fizyko-matematychna osvita – Physical and Mathematical Education*, 36(4), 46–50. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-036-4-006>
8. Kuzmenkov, S.H. (2021a). *Fundamentalni fizychni ta matematychni konstanty: Zadachi z rozv'iazanniamy [Fundamental Physical and Mathematical Constants: Problems with Solutions]*. Kherson. (in Ukrainian).
9. Kuzmenkov, S.H. (2021b). Yaki fizychni konstanty mozhna vvazhaty fundamentalnymy? [Which Physical Constants Can Be Considered Fundamental?]. *Naukovi zapysky. Serii: Pedagogichni nauky – Proceedings. Series: Pedagogical sciences*, 198, 40–44. <https://pednauk.cuspu.edu.ua/index.php/pednauk/issue/view/25>. (in Ukrainian).
10. Okun', L.B. (1991). Fundamental'nye konstanty fiziki [Fundamental Constants of Physics]. *UFN*, 161(9), 177–194. (in Russian).
11. Rozenal, I.L. (1984). *Jelementarnye chasticy i struktura Vselennoj [Elementary Particles and Structure of Univers]*. Nauka. (in Russian).
12. Spiridonov, O.P. (2015). *Fundamental'nye fizicheskie postojannye: Ot nachal fiziki do kosmologii [Fundamental Physical Constants: From the Beginnings of Physics to Cosmology]*. LENAND. (in Russian).
13. Tomilin, K.A. (2006). *Fundamental'nye fizicheskie postojannye v istoricheskom i metodologicheskom aspektah [Fundamental Physical Constants in historical and methodological aspects]*. FIZMATLIT. (in Russian).

