



DOI 10.31110/2413-1571-2022-036-4-006

УДК [52+53]–378]

БЕЗРОЗМІРНІ ФУНДАМЕНТАЛЬНІ КОНСТАНТИ ФІЗИКИ: ВИЗНАЧЕННЯ І АНАЛІЗ

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

DIMENSIONLESS FUNDAMENTAL CONSTANTS OF PHYSICS: DEFINITION AND ANALYSIS

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

АНОТАЦІЯ

Формулювання проблеми. Раніше (Кузьменков, 2021b) ми сформували свій список фундаментальних констант фізики, який визначили за новими запропонованими нами критеріями. Проте числові значення цих фізичних констант залежать від одиниць вимірювання, які є результатом домовленостей, тобто ці числові значення – конвенціональні, отже, носять суб'єктивний характер. Позбавитись цієї конвенціональності можна, якщо перейти до безрозмірних величин. Проте різні автори обґрунтовують різні списки безрозмірних фундаментальних констант. Тому метою нашого дослідження є визначення і обґрунтування повної групи безрозмірних фундаментальних констант фізики, які є необхідними й достатніми для характеристики нашого Всесвіту.

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

Результати. У результаті обґрунтовано введення безрозмірних фундаментальних констант на підставі того, що, по-перше, це позбавляє їх конвенціональності; по-друге, саме, безрозмірні константи сильної α_s , електромагнітної α_e , та слабкої взаємодії α_w є ключовими параметрами сучасної фізичної теорії – Стандартної моделі. До цих трьох констант, на нашу думку, необхідно додати безрозмірну фундаментальну константу гравітаційної взаємодії α_g , визначену через масу протона. Маса протона, як було нами визначено раніше, є фундаментальною фізичною константою, а протон є основою баріонної матерії Всесвіту (нейтрон у вільному стані нестабільний). Сформований нами список безрозмірних фундаментальних констант виглядає так: константи α_s , α_e , α_w , α_g , відношення мас протона і електрона m_p/m_e , відношення мас нейтрона і протона m_n/m_p , відношення різниці мас нейтрона і протона до середньої маси нуклона $2(m_n - m_p)/(m_n + m_p)$ (причому таких співвідношень має бути саме три, інакше буде порушений принцип відповідності між розмірними і безрозмірними константами), розмірність простору і безрозмірна габлієвська стала $\alpha_H = (H_0 R_{bc})^2 / 2c^2$.

Висновки. Отже, нами сформовано повну (на сьогодні) групу безрозмірних фундаментальних констант фізики. Подальших розробок підлягає з'ясування статусу космологічної сталої Λ і обґрунтування повноти групи фундаментальних констант, як розмірних, так і безрозмірних.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: безрозмірна фундаментальна константа; сильна взаємодія; електромагнітна взаємодія; слабка взаємодія; гравітаційна взаємодія; Стандартна модель; маса протона/нейтрона/електрона; розмірність простору; стала Габбла.

ABSTRACT

Formulation of the problem. Earlier (Kuzmenkov, 2021b) we formed our list of fundamental physical constants, which we determined according to the new criteria proposed by us. However, the numerical values of these physical constants depend on the units of measurement, which are the result of agreements, that is, these numerical values – are conventional, therefore, they are subjective in nature. It is possible to get rid of this conventionality by going to dimensionless quantities. However, different authors justify different lists of dimensionless fundamental constants. Therefore, the goal of our research is to define and substantiate a complete group of dimensionless fundamental constants of physics, which are necessary and sufficient to characterize our Universe.

Materials and methods. The conducted research was based on the works of such authors as Y.L. Rosenthal (1984), P. Davis (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.

Results. As a result, the introduction of dimensionless fundamental constants is substantiated on the basis that, firstly, it deprives them of their conventionality; secondly, precisely, the dimensionless constants of strong α_s , electromagnetic α_e and weak interaction α_w are the key parameters of the modern physical theory – the Standard Model. To these three constants, in our opinion, it is necessary to add the dimensionless fundamental constant of the gravitational interaction α_g determined by the mass of the proton. The mass of the proton, as we determined earlier, is a fundamental physical constant, and the proton is the basis of the baryonic matter of the Universe (the neutron is unstable in its free state). The list of dimensionless fundamental constants that we created looks like this: constants α_s , α_e , α_w , α_g , the ratio of mass proton and electron m_p/m_e , the ratio of mass neutron and proton m_n/m_p , the ratio of the difference in the masses of neutron and proton to the average mass of a nucleon $2(m_n - m_p)/(m_n + m_p)$ (and there must be exactly three such ratios, otherwise the principle of correspondence between dimensional and dimensionless constants will be violated), the dimension of space and the dimensionless Hubble constant $\alpha_H = (H_0 R_{bc})^2 / 2c^2$.

Conclusions. So, we have formed a complete (to date) group of dimensionless fundamental constants of physics. Elucidation of the status of the cosmological constant Λ and substantiation of the completeness of the group of fundamental constants, both dimensional and dimensionless, are subject to further development.

KEYWORDS: dimensionless fundamental constant; strong interaction; electromagnetic interaction; weak interaction; gravitational interaction; Standard Model; proton/neutron/electron mass; dimension of space; Hubble constant.

ВСТУП

Постановка проблеми. Нещодавно нами була надрукована стаття: «Які фізичні константи можна вважати фундаментальними?» (Кузьменков, 2021b). У цій статті ми запропонували нові критерії фундаментальності фізичних констант. 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. Це дало змогу обґрунтувати дещо новий список фундаментальних

Кузьменков С. Безрозмірні фундаментальні константи фізики: визначення і аналіз. *Фізико-математична освіта*, 2022. Том 36. № 4. С. 46-50. DOI: 10.31110/2413-1571-2022-036-4-006

Для цитування:

Кузьменков, С. (2022). Безрозмірні фундаментальні константи фізики: визначення і аналіз. *Фізико-математична освіта*, 36(4), 46-50. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-036-4-006>

For citation:

Kuzmenkov, S. (2022). Dimensionless fundamental constants of physics: definition and analysis. *Physical and Mathematical Education*, 36(4), 46-50. <https://doi.org/10.31110/2413-1571-2022-036-4-006>

Kuzmenkov, S. (2022). Bezrozmiirni 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>

констант, який відрізняється (за деякими очевидними виключеннями) від списків інших авторів (Розенталь, 1984; Девіс, 1985; Окунь, 1991; Томілін, 2006; Спірідонов, 2015).

Водночас числові значення фундаментальних фізичних констант залежать від одиниць вимірювання, які є результатом домовленостей, тобто ці числові значення – конвенціональні, отже, носять суб'єктивний характер. Позбавитись цієї суб'єктивності (конвенціональності) можна, якщо перейти до безрозмірних величин. Проте різні автори обґрунтовують дещо різні списки безрозмірних фундаментальних констант. Тому дослідження цієї проблеми є досить актуальним.

Аналіз актуальних досліджень. Безрозмірні фундаментальні константи було розглянуто у роботах: Й. Розенталь (1984), П. Девіса (1985), Л. Окуня (1991), К. Томіліна (2006) і О. Спірідонова (2015). Найбільш детально ці константи обговорювались Спірідоновим і Томіліним.

На думку Спірідонова (2015), окремі розмірні фізичні константи як, наприклад, швидкість світла у вакуумі c , гравітаційна стала G або стала Планка \hbar «грають визначальну роль у структурі відповідних фізичних теорій». «Коли ж йдеться про вироблення єдиного теоретичного опису усіх фізичних процесів, – пише далі Спірідонов, – формування єдиної фізичної картини світу, розмірні фізичні сталі сходять зі сцени. Їхнє місце займають фундаментальні безрозмірні константи – α_s (безрозмірна константа сильної взаємодії – *вставка тут і далі в дужках наша*), α_e (безрозмірна константа електромагнітної взаємодії), α_w (безрозмірна константа слабкої взаємодії), α_g (безрозмірна константа гравітаційної взаємодії), m_e/m_p і $(m_n - m_p)/m_N$ » (Спірідонов, 2015). Тут m_e , m_p , m_n – маси відповідно електрона, протона і нейтрона, а m_N – середня маса нуклона. Трохи далі Спірідонов додає ще як безрозмірну константу розмірність простору.

На наш погляд, Спірідонов дещо зміщує акценти і наводить далеко не повний список фундаментальних безрозмірних констант.

Томілін (2006) класифікує всі фізичні константи за способом обґрунтування їх значень на безрозмірні і розмірні двох типів. Але, оскільки розмірні константи не є предметом нашого дослідження, зосередимось тільки на безрозмірних константах. До них він відносить так звану «сталу тонкої структури» (фактично безрозмірну фундаментальну константу електромагнітної взаємодії), безрозмірні фундаментальні константи сильної та слабкої взаємодій і відношення мас елементарних частинок. Числові значення цих констант, на думку Томіліна, «не залежать від систем одиниць і визначаються самою Природою, вони мають так чи інакше впливати з усеохоплюючої фізичної теорії». «Зазвичай – продовжує Томілін – безрозмірні константи з'являються як емпіричні параметри, а потім знаходять своє пояснення в процесі розвитку фізичної теорії. ... Єдина фізична теорія має прагнути до ідеалу – повному поясненню усіх безрозмірних констант шляхом їх редукції до математичних сталих. Можливо, однак, що цей ідеал виявиться недосяжним, наприклад, через те, що деякі безрозмірні константи можуть виявитись чисто випадковими параметрами і фіксуватись у якийсь момент випадковим чином, наприклад, у початковий момент виникнення Всесвіту» (Томілін, 2006).

Фактично Томілін обмежується в цьому контексті детальним аналізом лише трьох перелічених фундаментальних взаємодій. Щодо гравітації, то, на думку Томіліна, універсальної безрозмірної константи, яка характеризує силу гравітаційної взаємодії не існує. Проте можна утворити специфічні безрозмірні константи, які характеризуватимуть не тільки гравітаційну силу в цілому, але й силу притягання конкретних об'єктів, наприклад, протона й електрона: $\alpha_g = Gm_p m_e / \hbar c$ або двох протонів $\alpha_g = Gm_p^2 / \hbar c$, або будь-яких інших частинок. Оскільки частинок багато і, на думку Томіліна, серед них немає найбільш фундаментальної (?), то й усі такого роду константи мають специфічний (не універсальний) характер (Томілін, 2006).

Ми з цим не погоджуємось і, по-перше, вважаємо маси протона, нейтрона й електрона фундаментальними, оскільки з цих частинок складається речовина Всесвіту (Кузьменков, 2021b), а, по-друге, для визначення безрозмірної фундаментальної константи гравітаційної взаємодії доцільно використовувати саме протон, який є основою баріонної матерії (нейтрон у вільному стані нестабільний). До того ж у цьому разі коректно порівнювати (як побачимо далі) силу взаємодій між собою.

Томілін, як безрозмірну константу, не розглядає, наприклад, розмірність простору та деякі інші. Врешті-решт, він, як і Спірідонов, не пропонує систему (повну групу) безрозмірних фундаментальних констант.

Отже, **метою статті** є визначення і обґрунтування повної групи 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, висунання і обґрунтування пропозицій щодо повної групи безрозмірних фундаментальних фізичних констант.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Відомо, що фундаментальні частинки (кварки, лептони і калібровочні бозони) разом із взаємодіями між ними утворюють деякий базис сучасної фізики елементарних частинок, здатний описати світ явищ від космічних масштабів до відстаней 10^{-19} м. «Цей теоретичний базис зазвичай називають *Стандартною моделлю* і він є своєрідною точкою відліку у подальшому розвитку фізики» (Ішханов та ін., 2007).

У Стандартній моделі усі фундаментальні ферміони мають здатність випромінювати або поглинати в одному акті лише один з носіїв взаємодії. Згідно з тим, що випромінює і поглинає фундаментальний ферміон, розрізняють *електромагнітну, слабку і сильну взаємодію*. Якщо носіями взаємодії є фотони, то маємо справу з електромагнітною взаємодією, якщо W - і Z -бозони, то зі слабкою, якщо ж носіями є глюони, то йдеться про сильну взаємодію.

Стандартна модель є одним з варіантів квантової теорії поля. Взаємодії у Стандартній моделі є не енергії взаємодії, а релятивістські інваріантні амплітуди просторово-точкових перетворень фундаментальних частинок. Структура і зміст теорії визначається тим, яка обирається конструкція елементарних амплітуд. Один з ключових параметрів

елементарних амплітуд – це константа зв'язку (константа взаємодії) Константи зв'язку визначають ймовірності перебігу фундаментальних (і не тільки) процесів. Ці константи зазвичай обирають безрозмірними і традиційно позначають як $\alpha_e, \alpha_w, \alpha_s$ (розташовані в порядку історичної появи). У елементарні амплітуди безпосередньо входять квадратні корні з цих величин (Ішханов та ін., 2007):

$$\begin{aligned} \sqrt{\alpha_e} & \text{ – в елементарну амплітуду електромагнітної взаємодії;} \\ \sqrt{\alpha_w} & \text{ – в елементарну амплітуду слабкої взаємодії;} \\ \sqrt{\alpha_s} & \text{ – в елементарну амплітуду сильної взаємодії.} \end{aligned}$$

Фундаментальна безрозмірна константа електромагнітної взаємодії. Цю константу зазвичай визначають так. Виразимо у так званих природних одиницях квантової електродинаміки (маса електрона m_e – одиниця маси, $m_e c^2$ – одиниця енергії, комптонівська довжина хвилі $\lambda_e = \hbar/m_e c$ – одиниця довжини, $\hbar/m_e c^2$ – одиниця часу) електростатичну енергію відштовхування двох електронів, що розташовані на відстані λ_e . Матимемо (Кузьменков, 2021):

$$\alpha_e = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \lambda_e} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} = \frac{1}{137,04}. \quad (1)$$

Зауважимо, що маса електрона не входить у формулу для величини α_e , тому α_e , є константою зв'язку з електромагнітним полем для будь-якої елементарної частинки, заряд якої дорівнює e , тобто ця константа має універсальний характер.

Цю константу іноді звуть «сталою тонкої структури» – таку назву величина α_e , отримала у зв'язку з працею А. Зоммерфельда про тонку структуру ліній у спектрі Гідрогену.

Зазначимо, що якщо визначити характерну швидкість електрона в атомі Гідрогену з умови квантування Бора:

$$v_B = \frac{\hbar}{m_e r_B}, \quad (2)$$

де $r_B = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{m_e e^2}$ – борівський радіус, то неважко переконатись, що

$$\alpha_e = \frac{v_B}{c}. \quad (3)$$

Дивлячись на формулу (3), можна сказати, що величина α_e характеризує роль *релятивістських ефектів* в атомі Гідрогену (Окунь, 1991). Про це свідчить також вираз, на який можна перетворити борівську енергію $W_B = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_B}$:

$$W_B = \alpha_e^2 m_e c^2, \quad (4)$$

де під величиною $m_e c^2$ розуміємо енергію спокою електрона.

Фундаментальна безрозмірна константа слабкої взаємодії. Зауважимо, що у фізиці історично був період, коли нічого не було відомо про носії слабкої взаємодії W- і Z- бозони. Передбачалось, що слабка взаємодія є чотириферміонною, за якою два ферміони перетворюються в точці у два інших ферміони. Ілюстрацією цього може слугувати класичний β -розпад та як його зображали за допомогою фейнманівських діаграм раніше (рис. 1 а). Сучасне уявлення зображено на рис. 1 б.

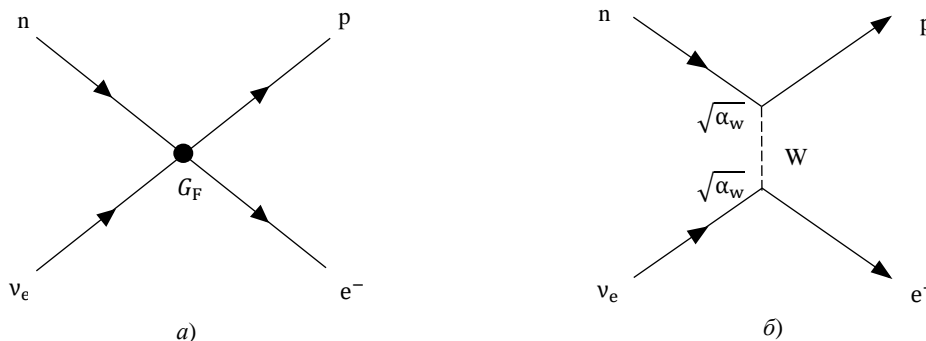


Рис. 1. Еволюція уявлень про особливості слабкої взаємодії: спочатку теорія розглядала слабкі процеси у вигляді чотириферміонного точкового перетворення частинок – а); сучасне уявлення – б) (Ішханов та ін., 2007)

Тому на початковому етапі розвитку теорії слабка взаємодія характеризувалась константою G_F , яка має назву «константа зв'язку Фермі» і є ефективною константою чотириферміонної взаємодії (Ішханов та ін., 2007). Її значення не впливає з теорії і за експериментальними даними становить $G_F = 1,43 \cdot 10^{-62} \text{ Дж} \cdot \text{м}^3$.

Фундаментальна безрозмірна константа слабкої взаємодії α_w зв'язана з константою Фермі наступною формулою (Ішханов та ін., 2007):

$$\alpha_w = \frac{\sqrt{2}}{\pi \hbar c} \left(\frac{m_W c^2}{\hbar c} \right)^2 G_F, \quad (5)$$

де $m_W = 1,43 \cdot 10^{-25} \text{ кг}$ – маса W-бозона. Якщо ж для зручності порівняння з іншими константами замість маси m_W використати масу протона m_p , то числове значення безрозмірної константи слабкої взаємодії становитиме $\alpha_w \approx 10^{-5}$.

Фундаментальна безрозмірна константа сильної взаємодії. Константа взаємодії у квантовій хромодинаміці α_s визначає значення верхівці процесу випромінювання кварком віртуального глюона. Аналогічно визначенням попередніх констант для α_s матимемо

$$\alpha_s = \frac{g_{qg}^2}{4\pi \hbar c}, \quad (6)$$

де g_{qg} – константа кварк-глюонної взаємодії (так званий *кольоровий заряд*).

Стандартна модель влаштована так, що значення констант зв'язку залежать від масштабу відносних відстаней, на яких відбуваються ті чи інші процеси. Константа сильної взаємодії α_s в області звичайних відстаней ($\approx 10^{-15}$ м = 1 Фм) має значення ~ 1 . Зі зменшенням відносних відстаней константа сильної взаємодії помітно зменшується. На відстанях масштабу 0,1 Фм ця константа становить $\alpha_s \approx 0,31$, а на відстанях 0,001 Фм $\alpha_s \approx 0,105$ (Ішханов та ін., 2007).

Фундаментальна безрозмірна константа гравітаційної взаємодії. Цю константу визначають аналогічно α_e , виражаючи гравітаційну енергію притягання двох протонів у енергіях спокою протона, які перебувають на відстані комптонівської довжини хвилі протона (Кузьменков, 2021а):

$$\alpha_g = \frac{Gm_p^2/(\hbar/m_p c)}{m_p c^2} = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} = 5,9 \cdot 10^{-39}, \quad (7)$$

де $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ кг – маса протона.

Зазначимо, що оскільки основний внесок у видиму матерію дають баріони, то замість маси електрона у природних одиницях квантової електродинаміки у цьому разі логічно використовувати масу протона.

Проте визначені безрозмірні константи фундаментальних взаємодій не повністю представляють наш Всесвіт. До них слід додати, на нашу думку, ще такі:

$$\text{відношення мас протона та електрона} - m_p/m_e = 1836; \quad (8)$$

$$\text{відношення мас нейтрона і протона} - m_n/m_p = 1,0014; \quad (9)$$

$$\text{відношення різниці мас нейтрона і протона до середньої маси нуклона} \frac{2(m_n - m_p)}{(m_n + m_p)} = 0,0014. \quad (10)$$

Друге співвідношення – (9) – необхідне ввести, тому що два інших співвідношення (8) і (10), які пропонує Спірідонов (2015), не дають змоги відновити (у разі необхідності) інформацію про маси частинок, з яких складається речовина нашого Всесвіту (два рівняння не дають однозначного розв'язку для трьох невідомих).

Список розмірних фундаментальних констант, які ми запропонували в роботі (Кузьменков, 2021b) згідно з новими критеріями фундаментальності, містить ще дві константи: розмірність простору і сталу Габбла H_0 . Розмірність простору 3 – величина безрозмірна, тому її беззастережно можна перенести до списку безрозмірних фундаментальних констант. Фундаментальність розмірності простору наочно продемонстрована, наприклад, у навчальному посібнику (Кузьменков, 2021а).

Інша справа, стала Габбла – коефіцієнт пропорційності в законі Габбла–Леметра $v = H_0 l$ (законі розширення Всесвіту), де під l можна розуміти швидкість віддалення деякої галактики, а l – відстань до неї. Цю сталу традиційно записують так: $H_0 = (67,8 \pm 1,3) \frac{\text{км}}{\text{с}}/\text{Мпк}$, а індекс «0» означає, що вимірювання відбуваються в сучасну епоху (Андрієвський та ін., 2019; Засов & Постнов, 2006). Фактично розмірність сталої Габбла – обернена секунда. Фізичний зміст сталої Габбла полягає в тому, що вона показує, на скільки у середньому зростає швидкість розширення Всесвіту на одиницю відстані (на 1 Мпк).

Введемо безрозмірну габблівську константу. Оскільки H_0 пов'язана з розширенням Всесвіту, то тут має бути задіяна гравітація. Тому цю константу можна визначити як відношення енергії самогравітації спостережуваного Всесвіту і його енергії спокою:

$$\alpha_H = \frac{GM_{\text{вс}}^2/R_{\text{вс}}}{M_{\text{вс}}c^2}, \quad (11)$$

де $M_{\text{вс}}$ – маса спостережуваного Всесвіту, $R_{\text{вс}}$ – його радіус. Тут використана формула для енергії самогравітації, що справедлива з точністю до константи порядку одиниці. Після скорочення мас в чисельнику і знаменнику замінимо ту масу, що лишилася, за допомогою очевидного виразу:

$$M_{\text{вс}} = \frac{4}{3}\pi R_{\text{вс}}^3 \rho_{\text{кр}}, \quad (12)$$

де під $\rho_{\text{кр}}$ будемо розуміти критичну густину Всесвіту, яка, в свою чергу, виражається відомою формулою (Андрієвський та ін., 2019; Засов & Постнов, 2006):

$$\rho_{\text{кр}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}. \quad (13)$$

Підставляючи (13) у (12), а (12) у (11), остаточно дістаємо:

$$\alpha_H = \frac{1}{2} \left(\frac{H_0 R_{\text{вс}}}{c} \right)^2. \quad (14)$$

За розрахунками для $R_{\text{вс}} = 10^{26}$ м отримуємо $\alpha_H \approx 0,27$.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИКИ ПОДАЛЬШОГО ДОСЛІДЖЕННЯ

На основі проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. Введення безрозмірних фундаментальних констант є доцільним, оскільки це позбавляє їх суб'єктивності (конвенціональності), що спричинена використанням одиниць вимірювання (наприклад, кілограмів, метрів і секунд), які є результатом людських домовленостей.

2. Введення безрозмірних констант фундаментальних взаємодій є також доцільним з іншої причини. Справа в тому, що три з них, а саме, безрозмірні константи сильної α_s , електромагнітної α_e та слабкої взаємодії α_w є ключовими параметрами сучасної фізичної теорії – Стандартної моделі. Згідно з уже ustalеними уявленнями значення цих констант зі зростанням переданого імпульсу (зменшенням відстані) наближаються одне до одного, поки не з'єднаються в одній точці. Отже, Стандартна модель передбачає об'єднання цих взаємодій.

3. До цих трьох констант, на нашу думку, необхідно додати безрозмірну фундаментальну константу гравітаційної взаємодії, визначену через масу протона. Маса протона, як було нами визначено раніше (Кузьменков, 2021а; 2021b), є фундаментальною фізичною константою, а протон є основою баріонної матерії Всесвіту (нейтрон у вільному стані нестабільний).

4. Список безрозмірних констант необхідно доповнити безрозмірними співвідношеннями (8), (9) і (10), пов'язаними з масами тих частинок, з яких складається речовина Всесвіту. Причому співвідношень має бути саме три (не більше і не менше), щоб можна було однозначно відновити (у разі необхідності) маси цих частинок, розв'язуючи три рівняння для трьох невідомих. У цей список слід також додати розмірність простору і безрозмірну сталу Габбла (14).

5. Отже, список безрозмірних фундаментальних констант, на нашу думку, має на сьогодні виглядати так: константи α_s , α_e , α_w , α_g , відношення m_p/m_e , m_n/m_p , $2(m_n - m_p)/(m_n + m_p)$, розмірність простору і безрозмірна габблівська стала $\alpha_H = \frac{1}{2} \left(\frac{H_0 R_{\text{вс}}}{c} \right)^2$.

Подальших розробок підлягає з'ясування статусу космологічної сталої Λ і обґрунтування повноти групи фундаментальних констант, як розмірних, так і безрозмірних.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Андрієвський, С.М., Кузьменков, С.Г., Захожай, В.А., & Климишин, І.А. (2019). *Загальна астрономія*. ПромАрт.
2. Девис, П. (1985). *Случайная Вселенная*. Мир.
3. Ишханов, Б.С., Капитонов, И.М., & Юдин, Н.П. (2007). *Частицы и атомные ядра*. Издательство ЛКИ.
4. Засов, А.В., & Постнов, К.А. (2006). *Общая астрофизика*. Фрязино.
5. Кузьменков, С.Г. (2021a). *Фундаментальні фізичні та математичні константи: Задачі з розв'язаннями*. Херсон.
6. 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>.
7. Окунь, Л.Б. (1991). Фундаментальные константы физики *УФН*, 161(9), 177–194.
8. Розенталь, И.Л. (1984). *Элементарные частицы и структура Вселенной*. Наука.
9. Спиридонов, О.П. (2015). *Фундаментальные физические постоянные: От начал физики до космологии*. ЛЕНАНД.
10. Томилин, К.А. (2006). *Фундаментальные физические постоянные в историческом и методологическом аспектах*. ФИЗМАТЛИТ.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Andriievskiy, S.M., Kuzmenkov, S.H., Zakhzhai, V.A., & Klymyshyn, I.A. (2019). *Zahalna astronomiia [General astronomy]*. PromArt. (in Ukrainian).
2. Devys, P. (1985). *Sluchainaiia Vselennaia [Random universe]*. Myr. (in Russian).
3. Yshkhanov, B.S., Kapitonov, Y.M., & Yudyn, N.P. (2007). *Chastytsy y atomnye yadra [Particles and atomic nuclei]*. Yzdatelstvo LKY. (in Russian).
4. Zasov, A.V., & Postnov, K.A. (2006). *Obshchaia astrofizyka [General astrophysics]*. Friazyino. (in Russian).
5. Kuzmenkov, S.H. (2021a). *Fundamentalni fizychni ta matematychni konstanty: Zadachi z rozv'iazanniamy [Fundamental physical and mathematical constants: Problems with solutions]*. Kherson. (in Ukrainian).
6. Kuzmenkov, S.H. (2021b). Які фізичні константи можна вважати фундаментальними? [What physical constants can be considered fundamental?]. *Naukovi zapysky. Seriya: Pedagogichni nauky – Proceedings. Series: Pedagogical sciences*, 198, 40–44. <https://pednauk.cuspu.edu.ua/index.php/pednauk/issue/view/25>. (in Ukrainian).
7. Okun, L.B. (1991). Fundamentalnye konstanty fizyky [Fundamental constants of physics]. *UFN – UFN*, 161(9), 177–194. (in Russian).
8. Rozental, Y.L. (1984). *Elementarnye chastytsy y struktura Vselennoi [Elementary particles and the structure of the Universe]*. Nauka. (in Russian).
9. Spyridonov, O.P. (2015). *Fundamentalnye fizycheskye postoiannye: Ot nachal fizyky do kosmologiy [Fundamental physical constants: From the beginnings of physics to cosmology]*. LENAND. (in Russian).
10. Tomylyn, K.A. (2006). *Fundamentalnye fizycheskie postoiannye v ystorycheskom y metodolohycheskom aspektakh [Fundamental physical constants in historical and methodological aspects]*. FYZMATLYT. (in Russian).

