

DOI <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-043-8-9>

**ФОРМУВАННЯ НАВЧАЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ
МІЖДИСЦИПЛІНАРНОГО ЗМІСТУ У ПРОЦЕСІ ПІДГОТОВКИ
МАГІСТРІВ ОСВІТНЬОЇ ГАЛУЗІ «ПРИРОДОЗНАВСТВО»**

Краснобокий Ю. М.

*кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри фізики*

*та інтегративних технологій навчання природничих наук
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини*

Ткаченко І. А.

*доктор педагогічних наук, доцент,
професор кафедри фізики*

*та інтегративних технологій навчання природничих наук
Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини
м. Умань, Черкаська область, Україна*

На кафедрі фізики та інтегративних технологій навчання природничих наук Уманського педагогічного університету здійснюється підготовка учителів-магістрів до викладання інтегрованого курсу природознавства. Навчальним планом цього освітнього ступеня, крім інших природничих дисциплін, передбачається вивчення курсів загальної і теоретичної фізики, астрономії, астрофізики та космології. У процесі реалізації навчальних програм з цих дисциплін студентам у тій, чи тій мірі доводиться освоювати їх «серцевину» – природу фундаментальних взаємодій на різних структурних рівнях матерії та їх вплив на еволюцію Всесвіту. Це й спонукало авторів до пошуку міждисциплінарного варіанту представлення цього матеріалу. Виклад його здійснюється шляхом формулювання проблем сучасної фізичної науки і можливих шляхів їх вирішення.

Нажаль, обмеження щодо обсягу публікацій на презентованій конференції не дають можливості широко розкрити дане питання. Тому зупинимося на головних, на нашу думку, його аспектах.

Відомо, що у природі між частинками матерії існує чотири основних типів фундаментальних взаємодій, а до багатьох фізичних теорій і законів входять так звані фундаментальні сталі (константи), що відповідають цим взаємодіям. Загальне, що об'єднує ці константи, – це *інформація*, яка в них міститься.

Деякі комбінації фундаментальних сталих визначають певні важливі сторони в структурі об'єктів природи. Наприклад:

– відношення $\hbar^2/m_e c^2$, де $\hbar = h/2\pi$, визначає розмір просторової оболонки для атомних явищ;

– відношення $m_e c^4/\hbar^2$ визначає характерні енергії для цих же явищ;

– вираз $(c\hbar/G)^{3/2} \cdot m_N^{-2}$, де m_N – маса нуклона, визначає граничну масу стаціонарних астрофізичних об'єктів.

Переважаюча більшість *фізичних констант* мають розмірності, які залежать від вибору системи одиниць відліку. У різних системах відліку основні одиниці мають різні числові значення і розмірності. Такий стан не влаштовує науку, оскільки зручніше мати безрозмірні константи, які не пов'язані з умовним вибором вихідних одиниць і систем відліку. Особливо важливої ролі такий підхід набуває за спроб створити загальний (цілісний) теоретичний опис всіх фізичних процесів, тобто, іншими словами, сформулювати уніфіковану (універсальну) наукову картину світу від Мікро- до Мегарівня. Виявляється, що тут основну, визначальну роль повинні відігравати безрозмірні фундаментальні, тобто «істинно» *світлові*, константи:

– константа гравітаційної взаємодії $\alpha_g = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-39}$;

– константа електромагнітної взаємодії $\alpha_e = \frac{e^2}{\hbar^2 c} \approx \frac{1}{137}$;

– константа сильної взаємодії $\alpha_s = \frac{g_s}{\hbar c} \approx 1$, де g_s – кольоровий заряд ($g_s \gg e$);

– константа слабкої взаємодії $\alpha_w = \frac{g_f m_p c^2}{\hbar^3} \approx 10^{-15}$.

У цих формулах: c – швидкість світла; m_e – маса електрона; e – заряд електрона; m_p – маса протона; \hbar – стала Планка; G – гравітаційна стала; g_f – константа Фермі; індекс «*s*» від англійського слова «strong» – сильний; індекс «*w*» від англійського слова «weak» – слабкий.

Яка ж роль фундаментальних взаємодій і значення їх констант у сучасному розумінні структури Всесвіту і його еволюції?

Нинішня наука вважає, що всі чотири види фундаментальних взаємодій і їх константи зумовлюють будову й існування Всесвіту. Теоретичні розрахунки показують, що за зміни числових значень констант цих взаємодій буде відбуватися порушення стійкості одного

або й декількох структурних елементів Всесвіту. Так, наприклад, збільшення маси електрона m_e у межах від $0,5 \text{ MeV}$ до $0,9 \text{ MeV}$ порушить енергетичний баланс у реакції утворення *дейтерію* в сонячному циклі і призведе до дестабілізації стійкості атомів і ізоотопів. Зменшення α_s на 40 % призвело б до нестабільності дейтерію, а збільшення її значення означало б вигорання водню вже на ранніх стадіях еволюції Всесвіту. Константі α_e «дозволено» змінюватися лише в межах $1/170 < \alpha_e < 1/80$. Інші її значення означають неможливість необхідного відштовхування протонів у ядрах, що призвело б до нестабільності атомів. Збільшення α_w призвело б до зменшення часу життя вільних нейтронів. Це означає, що на ранній стадії еволюції Всесвіту гелій не утворювався б і не було б реакції злиття α -частинок у процесі синтезу вуглецю C^{12} . Тоді на місці нашого *вуглецевого* Всесвіту був би Всесвіт *водневий*. Зменшення ж значення α_w призвело б до того, що всі протони виявилися б зв'язаними в α -частинки, що створило б *гелієвий* Всесвіт.

Відповідь же на питання, яка ж структура і властивості Всесвіту, криється у теоріях, які намагаються об'єднати в єдиний механізм всі чотири фундаментальні взаємодії.

У другій половині ХХ ст. проводилися інтенсивні пошуки можливого об'єднання електромагнітної, слабкої і сильної фундаментальних взаємодій. У результаті експериментальних досліджень взаємодій елементарних частинок на надпотужних прискорювачах було виявлено, що за великих енергій зіткнення протонів – біля 100 GeV – слабка і електромагнітна взаємодії на розрізняються – їх можна розглядати як єдину електрослабку взаємодію. Таку електрослабку взаємодію було теоретично передбачено американськими фізиками С.Вайнбергом і Ш.Глешоу та пакистанським фізиком А.Саламом, за що вони були удостоєні Нобелівської премії з фізики у 1979 році. У відповідності з цією теорією за електрослабку взаємодію відповідають частинки – кванти електрослабкого поля – *бозони* W^\pm і Z^0 . Підтвердження ця теорія отримала, коли у 1983 році К.Руббіа і С.ван дер Меєром ці частинки були виявлені експериментально (Нобелівська премія з фізики 1984 року). Суттєвої подальшої розробки теорія електрослабкої взаємодії отримала в працях нідерландських вчених Г.Хуфта (Хоффа) і М.Вельтмана (Нобелівська премія з фізики 1999 року).

Після того, як була створена єдина теорія електрослабкої взаємодії, з'явилася реальна перспектива побудови теорії трьох (крім гравітаційної) взаємодій. Ця програма отримала назву «*Великого*

об'єднання». Для цього потрібна була детальна розробка теорії сильної взаємодії. Створенню цієї теорії слугував той факт, що, як виявилось, протони і нейтрони в ядрах атомів у свою чергу складаються ще з менших частинок – *кварків* (М.Гелл-Манн, Нобелівська премія з фізики 1969 року). Тому дослідження перемістилися в область вивчення взаємодій між кварками і нуклонами. Виявилось, що взаємодія між нейтронами і протонами у ядрі являє собою залишковий ефект від більш потужної взаємодії між самими кварками. Отже, кварки скріплюються між собою внаслідок сильної взаємодії. Переносниками (квантами) останньої є *глюони (кольорові заряди)*. Область фізики елементарних частинок, яка вивчає взаємодію кварків і глюонів, носить назву *квантової хромодинаміки*. Тож у відповідності з квантовою хромодинамікою сильна взаємодія пов'язується з існуванням квантів міжнуклонного поля – глюонами.

Вважається, що глюони з'єднують і утримують кварки всередині протонів і ядер. Ні глюонів, ні кварків безпосередньо спостерігати поки що не вдалось, тому що їм «заборонено» вилітати із ядер назовні, подібно як *фонони* – кванти теплових коливань кристалічної ґратки – існують лише всередині твердих тіл. Ця властивість зв'язування, або утримання глюонів і кварків в *адронах* називається *конфайнментом*. Було помічено, що одиничний кварк, який з'являвся за певних процесів, майже миттєво (протягом 10^{-21} с) «прилаштовує» себе до адрона і вилітати з нього вже не може.

Розроблений натеper найпростіший варіант теорії Великого об'єднання для перетворення кварків у лептони вимагає наявності 24-х полів. Причому, 12 квантів цих полів уже відомі: фотон, дві W^{\pm} -частинки, Z^0 -частинка і вісім глюонів. У якості решти 12-ти квантів теорією передбачаються нові надважкі проміжні бозони, яким присвоїли об'єднану назву X - і Y - частинки – вони мають «колір» і електричний заряд. Ці кванти відповідають полям, які підтримують більш широку калібрувальну симетрію і здатні «перемішувати» кварки з лептонами. Тобто, X - і Y - частинки можуть перетворювати кварки в лептони і навпаки.

Таким чином, нова теорія породила нові проблеми: для переконання в можливості таких взаємодій, а отже й у справедливості теорії Великого об'єднання, необхідне експериментальне підтвердження наявності у природі X - і Y - бозонів. На даний час важко передбачити найближчу можливість одержання частинок таких високих енергій. Сучасні прискорювачі ледь досягають енергії 100–200 GeV (після реконструкції Великого адронного колайдера у 2022 році планується довести його

енергетичну потужність до $14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$) у той час як теорія Великого об'єднання має справу з енергією частинок вище $10^{14} - 10^{16} \text{ GeV}$.

Без експериментальної доказовості теорії Великого об'єднання неможливо описати ранню стадію еволюції Всесвіту, коли температура первинної плазми сягала 10^{27} K , адже саме за таких умов могли народжуватися й анігілювати надважкі бозони X і Y .

Але об'єднання трьох із чотирьох фундаментальних взаємодій – це ще не цілісна всеохоплююча теорія. Адже залишається ще *гравітація*. Теоретичні схеми, в рамках яких об'єднуються всі чотири типи взаємодій, називаються моделями «*супергравітації*». Свідченням перспективності моделей супергравітації є те, що за їх впливу склався новий підхід до об'єднання фундаментальних взаємодій – «*теорія суперструн*». У цій теорії частинка розглядається як струна – коливальна система з розподіленими параметрами. За низьких енергій струна поводить себе як частинка, а за високих – в опис руху струни необхідно вводити параметри, які відображають її вібрацію. Одним з важливих космологічних наслідків теорії суперструн є передбачення *множинності всесвітів*, у кожному з яких існує свій набір фундаментальних взаємодій.

Програма супергравітації може слугувати яскравим прикладом того, як теорія здатна значно випередити практику, досвід, можливості експерименту. Тому в цьому випадку сподіваються на опосередковані емпіричні обґрунтування моделей супергравітації даними позагалактичної астрономії, астрофізики і космології. Таким чином, наука стоїть на порозі створення єдиної теорії матерії, тобто всіх фундаментальних взаємодій (поля) і структури речовини. Правда, на цьому шляху належить вирішити ще багато складних задач (на які звертається увага студентів).

Насамперед, має бути створена квантова теорія гравітації, без якої реалізація програми супергравітації неможлива. Лише зі створенням квантової теорії гравітації можливо вдасться знайти відповіді на питання: чому наш простір має три виміри, а час лише один вимір? чому нам даний саме такий набір елементарних частинок та чим визначається їх маса? чому в природі існує елементарний електричний заряд і від чого залежить його величина? чи має властивість розпаду протон, час життя якого оцінюється у 10^{31} c ? чи існує магнітний монополь? чи існує квант гравітаційного поля – гравітон? чому існує лише чотири типи фундаментальних взаємодій, і саме ті, які нам відомі? чому світові константи мають саме такі, а не інші значення? та ін.

У сучасному природознавстві передбачається, що світові константи набули стабільних значень, починаючи з часу 10^{-35} c від моменту

зародження Всесвіту і що, таким чином, у нашому Всесвіті неначе існує надто тонка «підгонка» числових значень світових констант, яка й обумовлює необхідні їх значення для існування ядер, атомів, зірок і галактик. Як виникла і реалізувалася така ситуація – наука пояснити не може. Така «підгонка» (константи саме такі, якими вони є!) створює умови для існування не лише неорганічних речовин, але й живих організмів, у тому числі й людини.

Особливу увагу цій проблемі приділяв відомий вчений П.Дірак (Нобелівська премія з фізики 1933 року). Він першим висунув гіпотезу про те, що розвиток Всесвіту супроводжується зменшенням значення гравітаційної сталої з часом. Дірак помітив, що відношення $\alpha_e/\alpha_g=10^{40}$. Таке ж число він отримав для відношення розміру нуклона до швидкості світла. Збіг цих відношень у вигляді безрозмірної величини 10^{40} з врахуванням віку Всесвіту ($10^{17}c$) й дозволив йому вважати, що коли вік Всесвіту збільшується, то, щоб збереглося значення константи 10^{40} , гравітаційна взаємодія має зменшуватися.

Дірак не вважав такий збіг і наявність константи 10^{40} випадковим. Він виявляється й в інших варіаціях. Наприклад, відношення розміру Метагалактики ($10^{28}cm$) до розміру нуклона ($10^{-12}cm$) теж дорівнює 10^{40} . Інший приклад, число важких частинок у Всесвіті

$$N = \frac{\pi c}{Gm_p^2} = (10^{40})^2 = 10^{80}.$$

П. Дірак висловив ідею про синхронну зміну з часом фундаментальних констант. Загалом же можна вважати, що різноманіття і цілісність фізичного світу, його порядок і гармонія, передбачуваність і повторюваність формуються і управляються системою невеликого числа фундаментальних констант.

Отже багато незвичного і несподіваного містить для пізнання фізичного світу та область, де Мікросвіт виявляється пов'язаний з Мегасвітом, ультратмале з ультравеликим, елементарна частинка з Всесвітом в цілому, фізика з астрономією тощо.

Досвід авторів у викладанні перерахованих вище дисциплін показує, що такий спосіб формування змісту навчального матеріалу підвищує інтерес студентів до його освоєння, формує їх творче мислення, ініціює вибір ними таких тем курсових робіт, підготовка яких супроводжується пошуком відповідей на ще невирішені проблеми сучасної науки.