

DOI: <https://doi.org/10.31392/NZ-udu-159.2025.10>

УДК 539.129.1:524.8

Мирошніченко Ю. Б., Кириленко О. І.**МАГНІТНІ МОНОПОЛИ: ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ІСНУВАННЯ
ТА ЇХНІЙ ВПЛИВ НА ВСЕСВІТ**

Сучасна освіта потребує оновлення змісту і технологій навчання для того, щоб відповідати на виклики, що постають перед сучасним суспільством. Суспільство потребує фахівців, здатних мати широкий кругозір, творчий підхід до вирішення проблем, практичний склад розуму, а також уміння самостійно досліджувати навколишнє середовище. Важливою є здатність отримувати обґрунтовані результати та застосовувати їх на практиці, що є необхідним для розвитку інноваційних технологій.

У статті розглядається умова нульової розбіжності магнітної індукції, відома як умова соленоїдальності, та її зв'язок з принципом збереження імпульсу для системи джерел і поля. Це дозволяє більш глибоко зрозуміти взаємодію між полями і матерією. Обговорюються питання існування магнітних монополів, які теоретично можливі в межах гіпотез симетрії, але досі не знайдені експериментально. Важливо також зазначити, що існування таких монополів може мати серйозні наслідки для теоретичних моделей і нашого розуміння фундаментальних сил природи.

Розглядаються фундаментальні частинки, зокрема ферміони і бозони, що класифікуються за спіном. Кожен квант може мати масу або бути безмасивним, мати кольоровий заряд (пов'язаний з сильною взаємодією) або бути беззарядним. Окрім цього, частинки можуть мати слабкий гіперзаряд, слабкий ізоспін або бути відокремленими від слабких взаємодій. Всі ці характеристики визначають їхню здатність взаємодіяти з іншими елементами, зокрема через електричний заряд, спін або кутовий момент, що, в свою чергу, впливає на наявність магнітного моменту та його поведінку як диполя.

Стаття також піднімає питання існування магнітних монополів у контексті фізики елементарних частинок та космології. Це питання залишається однією з найбільших загадок сучасної фізики, адже експериментальні спроби їх виявлення не дають однозначних результатів. Зокрема, експеримент 1982 року під керівництвом Бласа Кабрери дав перший сигнал існування монополів, проте не зміг підтвердити цієї гіпотези. Попри це, стаття наголошує на необхідності подальших досліджень цієї теми, адже розуміння природи магнітних монополів може кардинально змінити наше розуміння фізичних законів і космічних процесів.

Ключові слова: магнітні монополи, експериментальні дослідження, теоретичні моделі, інфляція, космологія.

Ідея існування магнітних монополів є однією з центральних тем у теоретичній фізиці, оскільки вона викликає суттєві питання щодо симетрії між електричними і магнітними явищами. Протягом десятиліть фізики вивчають потенційну роль магнітних монополів у різних фізичних теоріях, таких як Стандартна модель та теорії великих об'єднаних груп. Однак експериментальні дані щодо існування магнітних монополів залишаються обмеженими. Відкриття Бласа Кабрери в 1982 році дало певний імпульс до подальших досліджень, але питання щодо реального існування цих об'єктів досі залишається відкритим. Проблема магнітних монополів не тільки

стосується фізики елементарних частинок, але й має важливі космологічні наслідки, зокрема для моделей Великого об'єднання та космічної інфляції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій свідчить про те, що, незважаючи на значні теоретичні досягнення, такі як теорія т'Хуфта-Полякова та моделі великих об'єднаних теорій, експериментальні пошуки магнітних монополів досі не дають переконливих доказів їх існування. Останні експерименти, включаючи точніші та довші дослідження за допомогою котушок з більшою кількістю петель, не принесли нових позитивних результатів. На теоретичному рівні тривають роботи щодо розширення існуючих моделей для інтеграції магнітних монополів, але навіть за умови, що теорія допускає їх можливе існування, немає конкретних доказів реальності цих об'єктів. Останні публікації підкреслюють потребу в більш точних експериментальних установках та нових методах пошуку. Зокрема, вчені, такі як Поль Дірак, Серджіо Северіні та Алессандро Сеттімі, розглядали можливість існування магнітних монополів у контексті квантової механіки, теорії електромагнетизму та великого об'єднання. Перші роботи Дірака вже вказували на потенціал існування магнітних монополів, а подальші дослідження з об'єднання електричної та магнітної симетрії в фізичних теоріях додали нові перспективи для їх існування в рамках сучасних моделей.

Метою статті є огляд і аналіз теоретичних та експериментальних аспектів існування магнітних монополів у рамках сучасної фізики елементарних частинок і космології. Особлива увага приділяється як теоретичним моделям, так і експериментальним пошукам, зокрема відкриттям, що відбулися в 1982 році, а також сучасним обмеженням, встановленим експериментами останніх років. Крім того, стаття має на меті визначити можливі напрямки майбутніх досліджень та теоретичних розробок у цій галузі.

Виклад основного матеріалу. Магнітні монополи – гіпотетичні елементарні частинки, які до цього часу не були експериментально виявлені. Однак їх існування допускається рядом теоретичних моделей фізики, таких як теорія великого об'єднання та теорія струн. Тому, необхідно розглянути можливість їх існування та впливу на Всесвіт з точки зору сучасних фізичних теорій. Магнітний монополь – це гіпотетична елементарна частинка, аналог елементарного електричного заряду для магнітного поля. Це точкове джерело статичного радіального магнітного поля, яке має лише один полюс (північний чи південний).

Ця частинка повинна мати:

– магнітний заряд, аналогічний електричному заряду в електричному полі. Однак на відміну від електричних зарядів, які можуть бути позитивними, і негативними, магнітним властивий лише один тип полярності;

– сферично-симетричне магнітне поле. Сила магнітного поля зменшується обернено пропорційно квадрату відстані від магнітного монополя.

На ранніх етапах розвитку природознавства, поширювалася думка про принципову відмінність електричних та магнітних властивостей фізичних тіл, сформульована В. Гілбертом у 1600 році. Встановлення Шарлем Кулоном

тотожності законів притягання та відштовхування для електричних і магнітних зарядів (полюсів магнітів) знову загострило питання подібності цих сил. Однак наприкінці XVIII століття стало зрозуміло, що в лабораторних умовах неможливо розділити дипольне магнітне тіло на окремі магнітні заряди. Тому уявлення про магнітно заряджену субстанцію було надовго вилучено з природознавства після праць Андре-Марі Ампера в 1820 р., де показано, що контур з електричним струмом створює таке ж магнітне поле, як і магнітний диполь.

Відновлення концепції магнітних зарядів припадає на початок 30-х років XX століття, коли переглядали основи класичної фізики і створювали квантову механіку. Поль Дірак опублікував кілька статей, присвячених проблемі магнітного монополя (тому в подальшому цю гіпотетичну частку почали називати монополем Дірака).

У 2013 році Серджіо Северіні та Алессандро Сеттімі розробили нове бачення на інтерпретацію другого рівняння Максвелла з нульовою розбіжністю.

Вони розглянули окремі фізичні аспекти системи заряджених нерелятивістських частинок, як джерела електромагнітного поля, що поширюється у вільному просторі. Зокрема було виявлено зв'язок між збереженням повного імпульсу та умовою нульової розбіжності магнітної індукції.

У виконаній роботі розглянуто необхідну умову властивості нульової розбіжності поля магнітної індукції, відому як умова соленоїдальності, що впливає безпосередньо зі збереження повного імпульсу для джерел і поля. Наразі питання існування або спостережуваності магнітних монополів, залишаються відкритими, що є правдоподібними лише теоретично згідно з відповідними гіпотезами симетрії (рис. 1).

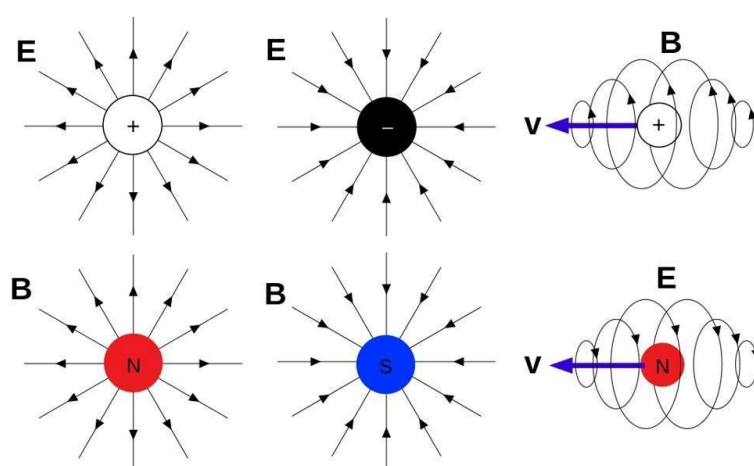


Рис. 1. Генерація електромагнітних полів позитивними і негативними електричними зарядами

Елементарні частинки — фундаментальні об'єкти квантової теорії поля,

які можна класифікувати за спіном: ферміони мають напівцілий спін, а бозони – цілий. Також існують складові частинки, які мають низку властивостей.

Кожен окремий квант у Всесвіті може мати масу або бути безмасивним. Він може мати кольоровий заряд, що означає його пов'язання з сильною взаємодією, або бути беззарядним. Частинки можуть мати слабкий гіперзаряд і/або слабкий ізоспін, а можуть бути повністю відокремленими від слабких взаємодій. Вони можуть мати електричний заряд або бути електрично нейтральними. Частинки можуть мати спін (власний кутовий момент), або бути безспіновими. Якщо частинка має електричний заряд і певну форму кутового моменту, то існує також і магнітний момент: магнітна властивість, що поводиться як диполь з північним і південним кінцем.

Однак, не існує фундаментальних об'єктів, які мають унікальний магнітний заряд, наприклад, лише північний або південний полюс. Ідея магнітного монополя є теоретичною конструкцією, але існують аргументи, які змушують визнати її фізичну присутність у Всесвіті (рис. 2).

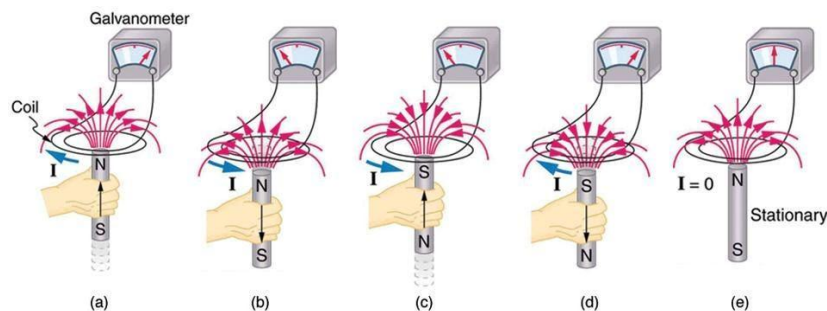


Рис. 2. Зміна поля навколо рухомого магніту або котушки дроту

На початку 1800-х років про природу електрики та магнетизму було відомо дуже мало. Загальновизнаним вважалося, що існують два типи електричних зарядів: однакові заряди відштовхуються, протилежні – притягуються, а рухомі електричні заряди створюють струм. Також було відомо, що постійні магніти мають два полюси. Однак, якщо розламати постійний магніт навпіл, незалежно від того, наскільки його подрібнити, не з'являється ні північний, ні південний полюс – магнітні заряди об'єднуються лише у дипольну конфігурацію.

У 1800-х роках було зроблено низку відкриттів, які допомогли зрозуміти суть електромагнітного Всесвіту. Людство дізналося про індукцію: як рухомі електричні заряди створюють магнітне поле і як зміна магнітних полів, у свою чергу, індукує електричний струм. Більше дізналися про електромагнітне випромінювання і про те, як прискорені електричні заряди можуть випромінювати світло різних довжин хвиль. А коли систематизували всі ці знання, стало зрозуміло, що Всесвіт не є симетричним між електричними та магнітними полями і зарядами, а рівняння Максвелла описують лише електричні заряди та струми (рис. 3).

Law of Physics	Standard Form w/o Magnetic Monopoles	With Magnetic Monopoles (simple symmetrization)
Gauss' Law	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho_e}{\epsilon_0}$
Gauss' Law for Magnetism	$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\nabla \cdot \vec{B} = \mu_0 \rho_m$
Faraday's Law of Induction	$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$	$\nabla \times \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\mu_0 \vec{j}_m$
Ampere's Circuital Law	$\nabla \times \vec{B} - \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{j}$	$\nabla \times \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \mu_0 \vec{j}_e$
Lorentz Force Equation	$\vec{F} = q_e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$	$\vec{F} = q_e(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) + q_m \left(\vec{B} - \vec{v} \times \frac{\vec{E}}{c^2} \right)$

Рис. 3. Рівняння, що описують магнітні явища

Наразі відомо, що не існує фундаментальних магнітних зарядів чи струмів, і єдині магнітні властивості, які ми спостерігаємо, виникають як індуковані електричними зарядами та струмами.

Теоретично дуже легко модифікувати рівняння Максвелла, включивши в них магнітні заряди і струми, що дає змогу об'єктам мати фундаментальний магнітний заряд і індивідуальний "північним" або "південним" полюс, властивий самому об'єкту.

У разі введення таких умов рівняння Максвелла модифікуються і стають повністю симетричними. Індукція починає працювати в іншому напрямку - рухомі магнітні заряди генерують електричні поля, а змінне електричне поле здатне індукувати магнітний струм, змушуючи магнітні заряди рухатися і прискорюватися в матеріалі, здатному проводити магнітний струм.

Довгий час усе це сприймалося як фантастичні міркування, поки не усвідомили важливість законів симетрії у фізиці та квантову природу Всесвіту. Цілком можливо, що електромагнетизм на вищому енергетичному рівні був симетричним між електричними та магнітними компонентами, а ми існуємо у низькоенергетичній версії цього світу з порушеною симетрією (рис. 4).

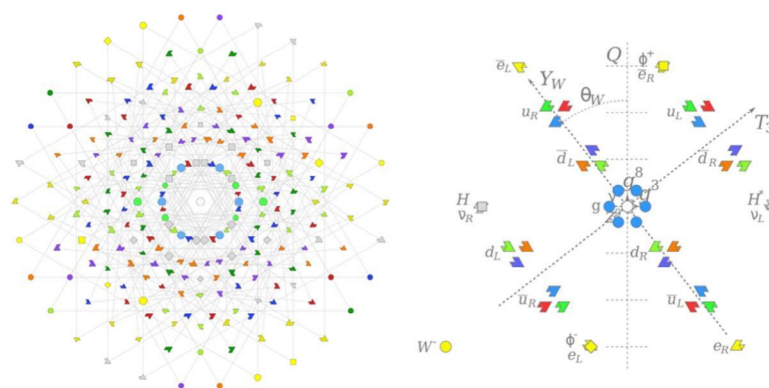


Рис. 4. Різниця між алгеброю Лі на основі групи E(8) (ліворуч) та стандартною моделлю (праворуч)

П'єр Кюрі в 1894 році був одним із перших, хто вказав на можливість існування магнітних "зарядів". Поль Дірак у 1931 році показав, що якщо хоча б один магнітний заряд існує в будь-якій точці у Всесвіті, то електричні заряди

повинні квантуватися всюди.

Це цікаво тому, що спостерігається не лише квантування електричних зарядів, а й квантування у дробових кількостях, коли мова йде про кварки. У фізиці одним із найпотужніших "натяків" на те, що нові відкриття можуть бути не за горами, стало б відкриття механізму, який міг би пояснити, чому Всесвіт має властивості, які ми спостерігаємо.

Однак ця гіпотеза не містить доказів того, що магнітні монополі насправді існують, а лише не заперечує їх існування. Теоретично квантова механіка незабаром була доповнена квантовою теорією поля, де поля також квантуються. Для опису електромагнетизму була введена калібрувальна група $U(1)$, яка використовується й досі. У калібрувальній теорії фундаментальні заряди, пов'язані з електромагнетизмом, будуть квантуватися лише тоді, коли калібрувальна група $U(1)$ є компактною; якщо калібрувальна група $U(1)$ є компактною, це дозволяє існування магнітних монополів.

Можливо, існує інша причина квантування електричних зарядів, принаймні з точки зору міркувань Дірака, і того, що ми знаємо про Стандартну модель – не впливає жодної причини, чому магнітні монополі не повинні існувати (рис. 5).

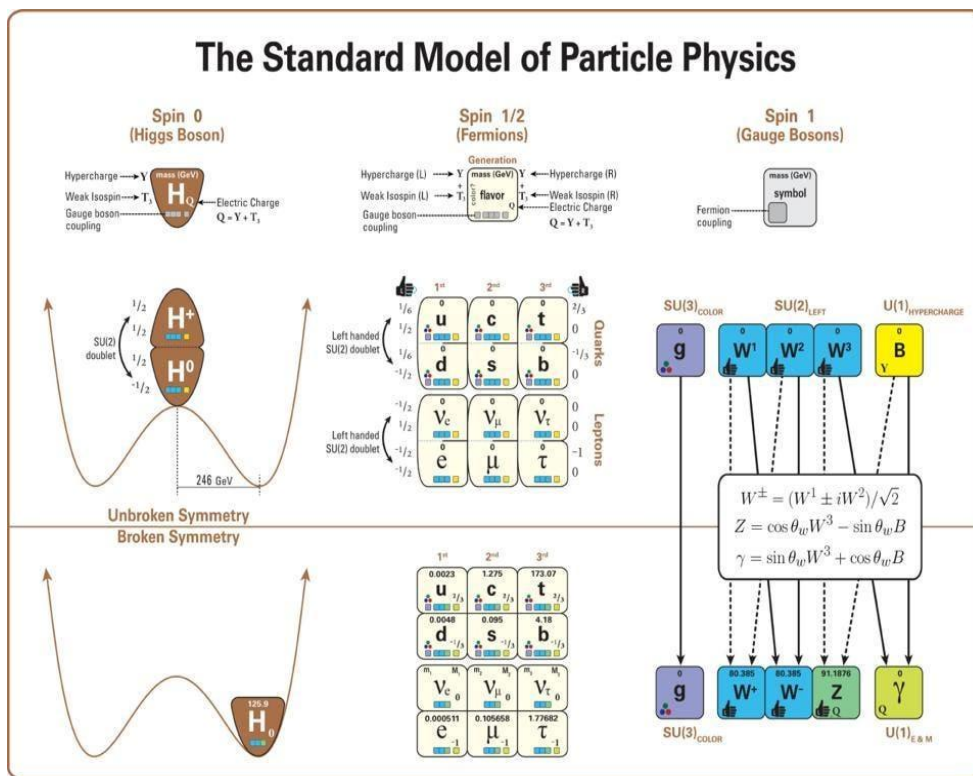


Рис. 5. Відображення структури Стандартної моделі за допомогою діаграми

Протягом багатьох десятиліть, навіть після численних математичних досягнень, ідея магнітних монополів залишалася цікавою. У 1974 році, через декілька років після визнання повної структури Стандартної моделі (у теорії груп вона описується як $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$), фізики почали розглядати ідею

об'єднання. Хоча при низьких енергіях $SU(2)$ описує слабку взаємодію, а $U(1)$ – електромагнітну, вони фактично об'єднуються при енергіях близьких до 100 GeV, маємо електрослабку шкалу. При таких енергіях об'єднана група $SU(2) \times U(1)$ описує електрослабку взаємодію, і обидві сили об'єднуються.

Чи можливо, що всі фундаментальні сили можуть об'єднатися в якусь більшу структуру при високих енергіях? Це цілком можливо, і таким чином почала виникати ідея Великої об'єднаної теорії. Розглядалися групи більших калібрів: $SU(5)$, $SO(10)$, $SU(6)$ і навіть виняткові групи. Майже одразу почали з'являтися тривожні, але захопливі наслідки. Усі ці теорії передбачали, що протон буде фундаментально стабільним, але з часом розпадатиметься; що існують нові, надважкі частинки, і, як показали в 1974 році Джерард т'Хуфт і Олександр Поляков, вони призведуть до існування магнітних монополів (рис. 6).

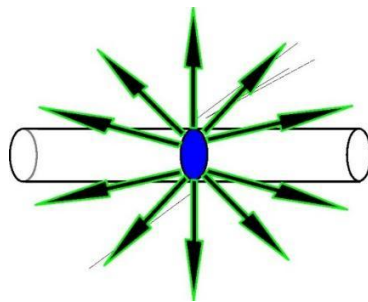


Рис. 6. Поняття магнітного монополя, що випромінює магнітні силові лінії так само, як ізольований електричний заряд

Наразі не існує доказів того, що ідеї великого об'єднання є актуальними для нашого Всесвіту, однак можливість їхнього існування незаперечна. Щоразу, коли розглядається теоретична ідея, шукають патології, які можуть призвести до сценаріїв, здатних "розірвати" Всесвіт. Коли пропонували монополи т'Хуфта-Полякова, виявили одну з патологій: магнітні монополи можуть "перекривати" Всесвіт.

У ранньому Всесвіті все було достатньо гарячим і енергетичним, щоб створити будь-яку пару частинка-античастинка з достатньою енергією $E = mc^2$ – і можна було б створити будь-яку пару частинка-античастинка. При порушенні симетрії можливо або надати ненульову масу спокою раніше безмасовій частинці, або спонтанно вирвати велику кількість частинок (або пар частинка-античастинка) з вакууму, коли симетрія порушується.

У першому випадку відбувається порушення симетрії Хіггса; в другому – може статися порушення симетрія Печчеї-Квінна, що призведе до виривання аксіонів з квантового вакууму.

У будь-якому випадку можливі руйнівні наслідки (рис. 7).

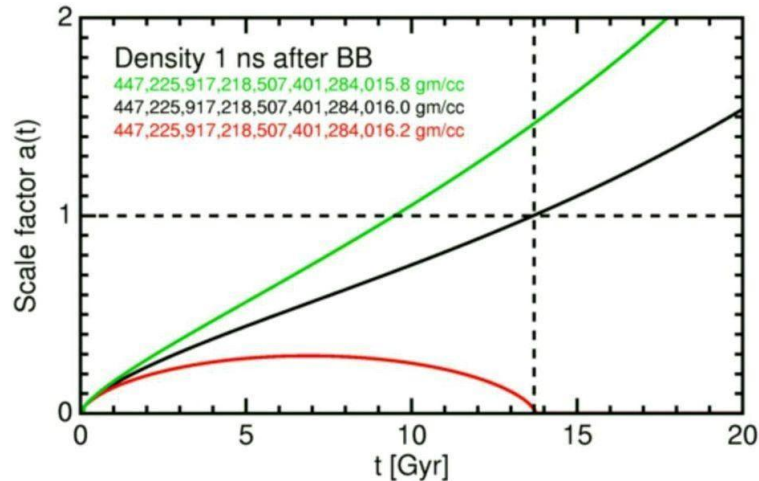


Рис. 7. Якби Всесвіт мав лише трохи більшу густину матерії (червоний), він був би замкнутим

Зазвичай Всесвіт розширюється і остигає, причому загальна густина енергії тісно пов'язана зі швидкістю розширення у будь-який момент часу. Коли взяти велику кількість раніше безмасових частинок і надати їм ненульову масу або раптово і спонтанно додати до Всесвіту велику кількість масивних частинок, швидко зросте густина енергії. Коли енергії стає більше, і швидкість розширення та густина енергії перестануть врівноважуватися, у Всесвіті стає занадто багато матерії. Це призведе до того, що швидкість розширення почне зменшуватись, а згодом почнеться стискання.

У результаті маємо повторний колапс Всесвіту, який завершується Великим Вибухом. Однак перезакриття Всесвіту не відповідає існуючій реальності. Дана загадка відома як проблема монополію, і вона стала однією з трьох основних причин космічної інфляції.

Подібно до того, як розширення Всесвіту в результаті космічної інфляції, незалежно від початкової геометрії, веде до стану, який неможливо відрізнити від плоского (що вирішує проблему плоскості), і надає однакові властивості усім точкам нашого спостережуваного Всесвіту (розв'язання проблеми горизонту), так само інфляція, якщо Всесвіт ніколи не розігрівається до рівня, що перевищує велику шкалу об'єднання після завершення інфляції, може вирішити і проблему монополію (рис. 8).

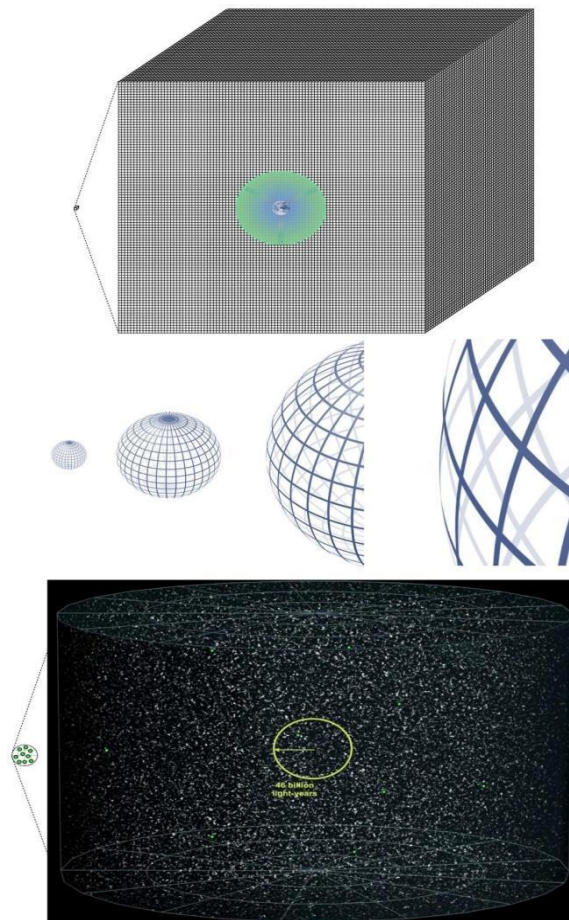


Рис. 8. Видима частина Всесвіту, що виник у минулому внаслідок розширення

Уже в 1980 році стало зрозуміло, що спільний інтерес до монополів т'Хуфта-Полякова, великих об'єднаних теорій і раних моделей космічної інфляції спонукав дослідників до спроб експериментально виявлення магнітних монополів. У 1981 році фізик-експериментатор Блас Кабрера створив криогенний експеримент з дротяною котушкою, спеціально спланований для пошуку магнітних монополів.

Він побудував котушку з вісьмома петлями і припустив, що, коли магнітний монополіус коли-небудь пройде через неї, виникне специфічний сигнал завдяки електричній індукції. Як і в разі проходження одного кінця постійного магніту через котушку, де індукується струм, магнітний монополіус, проходячи через цю ж котушку, повинен викликати електричний струм, що буде у 8 разів більшим за теоретичне значення заряду магнітного монополя, враховуючи 8 петель у його експериментальній установці. (Якби через котушку проходив магнітний диполь, сигнал спочатку був би +8, а потім -8, що дозволило б відрізнити ці два сценарії).

4 лютого 1982 року в офісі нікого не було, щоб спостерігати за експериментом. Однак наступного дня Кабрера повернувся і був шокований тим, що побачив. Експеримент зафіксував один-єдиний сигнал, який майже точно відповідав сигналу, який мав би виникнути при проходженні магнітного монополіуса (рис. 9).

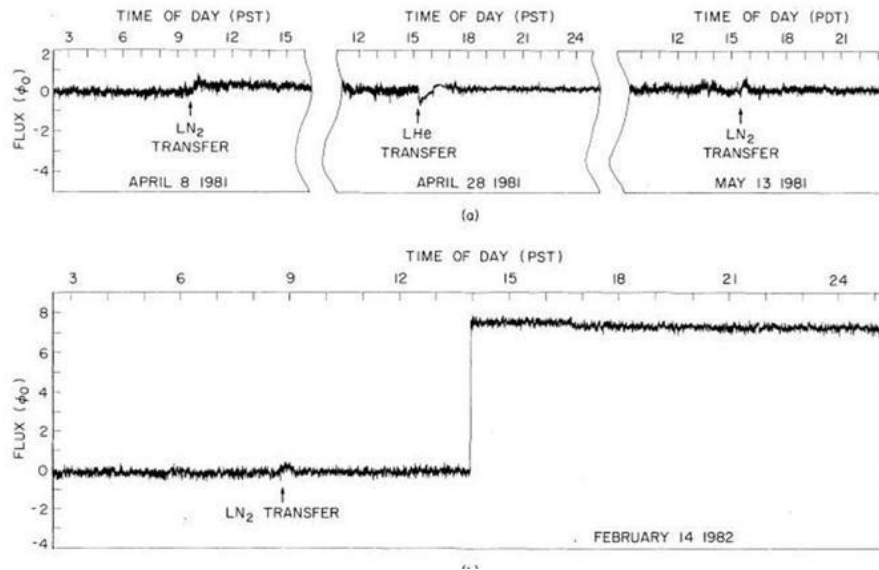


Рис. 9. Результати експерименту з восьми витками дроту, проведеного під керівництвом Бласа Кабрера у 1982 році

Це викликало великий інтерес до роботи. Чи означало це, що інфляція була помилковою, і чи справді існував Всесвіт із магнітними монополями? Чи це значило, що інфляція була правильною, і один (щонайбільше) монополь, який мав би залишитися у нашому Всесвіті, випадково пройшов через детектор Кабрера? Чи це означало, що експериментальна помилка була максимальною: збій, розіграш або щось інше, що ми не можемо пояснити?

Згодом було проведено низку експериментів, багато з яких були точнішими, тривалішими і мали більшу кількість петель у котушках, але ніхто більше ніколи не бачив нічого схожого на магнітний монополь (рис. 10).

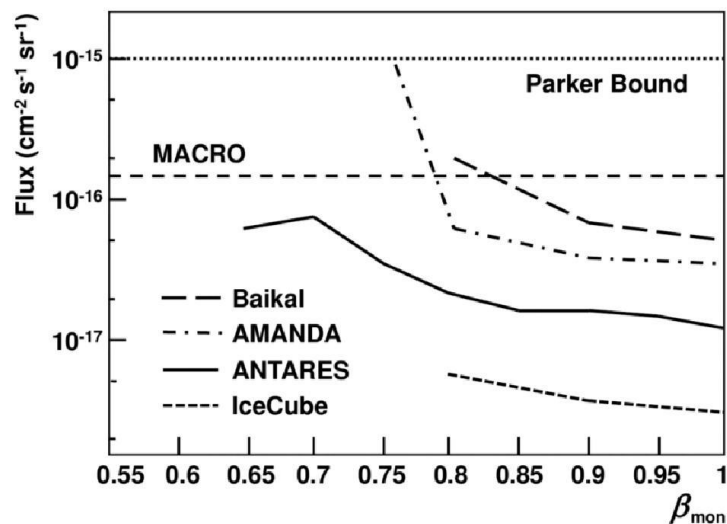


Рис. 10. Сучасні обмеження на існування магнітних монополів, отримані в результаті різноманітних експериментів

Але, незважаючи на всі експерименти, які проводилися, і ті, що тривають

досі, не було виявлено жодних інших ознак магнітних монополів. Сам Кабрера продовжував керувати численними іншими експериментами, але, ймовірно, ми ніколи не дізнаємося, що насправді сталося того дня в 1982 році. Ми знаємо, що без можливості підтвердити та відтворити результат не можна стверджувати, що існують прямі докази існування магнітних монополів.

Людству багато чого не відомо про Всесвіт, зокрема те, що відбувається при енергіях, які значно перевищують ті, які ми можемо спостерігати у зіткненнях на Великому адронному колайдері. Нам не відомо, чи може Всесвіт на певних високих енергіях насправді створювати магнітні монополи; ми просто знаємо, що при енергіях, доступних для наших спостережень, їх не було виявлено. Нам не відомо, чи було велике об'єднання властиве нашому Всесвіту на ранніх стадіях, але ми знаємо, що, що б не відбувалося на початку, це не призвело до перекриття Всесвіту чи заповнення його високоенергетичними залишками з гарячого, густого стану.

Чи допускає наш Всесвіт на якомусь рівні існування магнітних монополів? На це питання наразі не існує однозначної відповіді. Однак ми можемо з упевненістю стверджувати наступне: існує верхня межа температури, яку можна досягти на ранніх стадіях гарячого Великого вибуху; ця межа визначена обмеженнями, отриманими з спостережень гравітаційних хвиль, які мають генеруватися інфляцією; якщо велике об'єднання є актуальним для нашого Всесвіту, воно може відбуватися лише при енергетичних масштабах, вищих за цю межу; це означає, що якщо магнітні монополи існують, то вони повинні мати надзвичайно велику масу спокою, порядку 10¹⁵ ГеВ або вище.

Минуло багато років відтоді, як одна експериментальна підказка натякала на можливе існування магнітних монополів. Однак, наразі не з'явилося інших підказок, і все, що ми зможемо робити, – це припускати існування гіпотетичних монополів.

Висновки. Існування магнітних монополів залишається теоретично можливим, однак на сьогодні відсутні переконливі експериментальні докази їх існування. Технічні обмеження та складність експериментальних установок залишаються основними факторами, які стримують прогрес у пошуках магнітних монополів. Теоретичні моделі, зокрема моделі великих об'єднаних теорій, продовжують підтримувати можливість існування магнітних монополів, особливо у контексті високих енергій, до яких людство наразі не має доступу в експериментальних умовах.

Подальші дослідження, як теоретичні, так і експериментальні, зможуть пролити світло на це питання, проте наразі можливості для підтвердження існування магнітних монополів є обмеженими. Перспективи включають розвиток нових підходів до пошуку, зокрема через вдосконалення експериментальних установок, а також застосування нових теоретичних моделей, що враховують сучасні досягнення у фізиці високих енергій.

Використана література :

1. Кабера Б. Перші результати надпровідного детектора рухомих магнітних монополів / Фізичні оглядові листи, 48 (20) 1378-1381 (1982).
2. Підручник Неда Райта з космології BPS-стани в омега-фоні та інтегрованість, БУЛИЧЕВА, КСЕНІЯ ТА ІН. JHEP 1210 (2012) 116
3. Abbe C. On the Distribution of the Nebulae in Space / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 27 (7), 257–264. URL : <https://academic.oup.com/mnras/article/27/7/257/964358>
5. Olsen K. Meet the Magellanic Clouds: Our galaxy's brightest satellites / Astronomy, (2020). URL : <https://www.astronomy.com/science/meet-the-magellanic-clouds-our-galaxys-brightest-satellites/>
6. Devons S. Search for the magnetic monopole / *Soviet Physics Uspekhi*, Volume 8, Number 2, 1965. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1965v008n02ABEH003046/pdf>
7. Sidney R. Coleman (Harvard U.) Magnetic Monopole Fifty Years Later - Jun, 1982. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-3655-6_2
8. Shnir, Yakov M. Magnetic Monopoles / Springer-Verlag, Berlin, 2005. URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-29082-6>
9. Westerlund B. E. The Magellanic Clouds / Cambridge University (1997). URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997macl.book....W/abstract>

References :

1. Kabera B. (1982). Pershi rezultaty nadprovidnoho detektora rukhomykh mahnitnykh monopoliv [First results of the superconducting moving magnetic monopole detector] / FIZYChNI OHLIaDOVI LYSTY, 48 (20) 1378-1381 [in Ukrainian].
2. Pidruchnyk Neda Raita z kosmologhii [BPS states in the omega background and integration], BULYChEVA, KSENIa TA IN. JHEP, 116, 1210 (2012) [in Ukrainian].
3. Abbe C. On the Distribution of the Nebulae in Space / Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. 27 (7), 257–264. URL : <https://academic.oup.com/mnras/article/27/7/257/964358> [in English].
4. Olsen K. (2020). Meet the Magellanic Clouds: Our galaxy's brightest satellites / Astronomy. URL : <https://www.astronomy.com/science/meet-the-magellanic-clouds-our-galaxys-brightest-satellites/> [in English].
5. Devons S. (1965). Search for the magnetic monopole / *Soviet Physics Uspekhi*. Volume 8, Number 2. URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1070/PU1965v008n02ABEH003046/pdf> [in English]
6. Sidney R. (1982). Coleman (Harvard U.) Magnetic Monopole Fifty Years Later – Jun. URL : https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4613-3655-6_2 [in English].
7. Shnir, Yakov M. (2005). Magnetic Monopoles / Springer-Verlag. Berlin. URL : <https://link.springer.com/book/10.1007/3-540-29082-6> [in English].
8. Westerlund B. E. (1997). The Magellanic Clouds / Cambridge University. URL : <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997macl.book....W/abstract> [in English].

Yu. MYROSHNICHENKO, O. KIRYLENKO. Magnetic monopoles: theoretical prerequisites of existence and their influence on the universe.

Modern education needs to update the content and learning technologies in order to respond to the challenges facing modern society. Society needs specialists who are able to have a broad outlook, a creative approach to solving problems, a practical mindset, as well as the ability to independently explore the environment. The ability to obtain reasonable results and apply them in practice is important, which is necessary for the development of innovative technologies.

The article considers the condition of zero divergence of magnetic induction, known as the solenoidal condition, and its connection with the principle of conservation of momentum for a system of sources and fields. This allows for a deeper understanding of the interaction between fields and matter. The issues of the existence of magnetic monopoles, which are theoretically possible within the limits of symmetry hypotheses, but have not yet been found experimentally, are discussed. It is also important to note that the existence of such monopoles can have serious consequences for theoretical models and our understanding of the fundamental forces of nature.

Fundamental particles are considered, in particular fermions and bosons, which are classified by

spin. Each quantum can have mass or be massless, have a color charge (associated with the strong interaction) or be uncharged. In addition, particles can have a weak hypercharge, a weak isospin, or be separated from the weak interactions. All these characteristics determine their ability to interact with other elements, in particular through electric charge, spin, or angular momentum, which, in turn, affects the presence of a magnetic moment and its behavior as a dipole.

The article also raises the question of the existence of magnetic monopoles in the context of particle physics and cosmology. This question remains one of the greatest mysteries of modern physics, since experimental attempts to detect them have not yielded unambiguous results. In particular, the 1982 experiment led by Blas Cabrera gave the first signal of the existence of monopoles, but could not confirm this hypothesis. Despite this, the article emphasizes the need for further research on this topic, since understanding the nature of magnetic monopoles can radically change our understanding of physical laws and cosmic processes.

Keywords: magnetic monopoles, experimental studies, theoretical models, inflation, cosmology.

DOI: <https://doi.org/10.31392/NZ-udu-159.2025.11>

УДК 796.011

**Самойленко В. Л., Дуб І. М., Куявець Д. М.,
Некрасов Г. Г., Ящук С. М.**

МУЛЬТИМЕДІЙНІ СИСТЕМИ ЯК ЗАСОБИ ІНТЕРАКТИВНОГО НАВЧАННЯ ФІЗИЧНОЇ КУЛЬТУРИ

Сучасні освітні процеси все більше інтегрують цифрові технології, що змінює підходи до викладання та засвоєння навчального матеріалу. У сфері фізичної культури використання мультимедійних систем набуває особливого значення, оскільки дозволяє зробити навчання більш наочним, інтерактивним та індивідуалізованим. Мультимедійні технології, такі як відеоуроки, інтерактивні тренажери, мобільні додатки та доповнена реальність, сприяють підвищенню рівня мотивації учнів, урізноманітненню форм навчання та покращенню контролю за фізичним розвитком. Важливість дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності фізичного виховання в умовах цифрової трансформації освіти та зростаючої ролі технологій у житті молоді.

У статті обґрунтовано ефективність використання мультимедійних систем у процесі викладання фізичної культури. Вказано, що реалізація у навчанні інтерактивних форм і методів дає змогу якісно змінити характер взаємодії викладача та учня: здобувач освіти стає суб'єктом процесу навчання, а педагог – його організатором, що забезпечує творче зростання та внутрішній потенціал кожного студента. Визначено ключові переваги інтерактивних технологій, серед яких підвищення мотивації учнів, доступність візуального навчального матеріалу, можливість персоналізованого підходу до фізичних навантажень, покращення зворотного зв'язку між учасниками освітнього процесу та розширення можливостей самостійного навчання. Також проаналізовано вплив технологічних засобів на розвиток фізичних якостей учнів та їхню залученість до активного способу життя.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення мультимедійних навчальних платформ, розробку інтерактивних програм з адаптивними функціями для різних вікових категорій та рівнів фізичної підготовленості. Важливим аспектом є впровадження елементів віртуальної та доповненої реальності у навчальний процес, що дозволить зробити заняття з фізичної культури ще більш захопливими та ефективними.