



# ДЕЩО ПРО МАГНЕТНІ МОНОПОЛІ

Наталія Чулан, Андрій Ровенчак,

Львівський національний університет імені Івана Франка

## З історії питання

**З**найомство людини з електричними й магнетними явищами має різну історію.Хоча вияви електричних властивостей у природі є, напевно, найпоширенішими – насамперед, згадаймо грізні блискавки або існування дещо екзотичних для нас електричних риб – все ж ґрутовніше вивчення почалося з магнетних властивостей.

Слово “магнет” походить від грецького μαγνήτις λίθος ‘магнезійський камінь’. Магнезія (Магнесія, Магнісія, грецьке Μαγνησία) – це область на сході Греції<sup>1</sup>, що отримала свою назву від давнього племені магнетів (Μάγνητες). Магнезійський камінь відомий зараз як магнетит (раніше поширеним був термін “магнетний залізняк”), мінерал з хемічним складом  $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ .

На згадки про магнетит та магнетні властивості тіл натрапляємо в Теофраста з Ересу (Θεόφραστος, 371–287 до Р. Х.) у праці “Про камені” (там він також згадує про здатність бурштину притягати дрібні предмети) [2]. Китайський міністр часів Імперії Цінь на ім’я Лю-ші (呂氏), відомий також як Лю-пу-вей (呂不韦), згадує про магнет у своєрідній енциклопедії Чунь-цю (春秋, Весни й осені)<sup>2</sup>, бл. 239 р. до Р. Х.) [3, 4]. На середину III ст.

до Р. Х. припадає й початок застосування компаса в Китаї. Опис магнетних властивостей містить також фундаментальна праця “Naturalis Historia” Гая Плінія Старшого (Gaius Plinius Secundus, 23–79).

Вірогідно, першою працею, присвяченою виключно магнетові, була “Epistola de magnete” (“Лист про магнет”)<sup>3</sup>, яку 1269 року написав французький схоласт П'єр з Марікура (Петро Перегрін) (Pierre Pelerin de Maricourt; Petrus Peregrinus de Maricourt, XIII ст.) [1]. Перше по-справжньому ґрутовнє дослідження властивостей магнетів зробив Вільям Гілберт (William Gilbert, 1544–1603) у книжці “De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure” (“Про магнет і магнетні тіла і про великий магнет Землю”, 1600) [5].

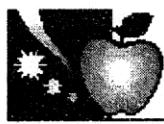
У цій же книжці Гілберт увів термін “електрика”, що походить від грецького ἡλεκτρον ‘бурштин’, оскільки саме за допомогою натирання бурштину шерстю Фалес (Талес) Мілегський (Θαλῆς ὁ Μιλήσιος, бл. 624 – бл. 546 до Р. Х.) отримав, мабуть, уперше в історії, матеріал для дослідження статичної електрики.

Попри подібність деяких електричних і магнетних властивостей – здатність притягання й відштовхування – безпосередній зв’язок між електричними й магнетними явищами вдалося встановити лише на початку

<sup>1</sup>Можливе походження від такої ж назви міста в Малій Азії (нині Туреччина), поблизу якого було виявлено поклади магнетиту [1]. Етимологічно, однак, вона споріднена з грецькою Магнезією.

<sup>2</sup>Ця енциклопедія названа за аналогією з хронікою царства Лу (бл. 5 ст. до Р. Х.).

<sup>3</sup>Повна назва: “Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, militem, de magnete”.



XIX ст. У 1820 році данський фізик Ганс Крістіан Ерстед (Hans Christian Ørsted, 1777–1851), проводячи досліди, зауважив вплив електричного струму на магнетну стрілку компаса [6]. Значна заслуга у створенні теорії електромагнетних явищ належить також французькому фізику Андре-Марі Амперові (André-Marie Ampère, 1775–1836). Цікаво зазначити спільну публікацію на цю тему [7] Ерстеда, Ампера, а також визначного вченого Франсуа Араго (франц. François Jean Dominique Arago; каталонське Francesc Joan Domènec Aragó, 1786–1853).

У 1855–1873 рр. шотландський фізик Джеймс Клерк Максвелл (James Clerk Maxwell, 1831–1879) узагальнив відомі експериментальні факти, щодо електромагнетних явищ, фактично створивши сучасну електродинаміку.

Записані у тривимірному вигляді, рівняння Максвелла є несиметричними щодо електричного ( $\mathbf{E}$ ) й магнетного ( $\mathbf{B}$ ) полів [8]. Справді, подивимося на такі два рівняння<sup>4</sup>:

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0.$$

Зміст першого з них такий: якщо ми візьмемо обмежену ділянку простору, то число електричних силових ліній (яке визначає електричне поле  $\mathbf{E}$ ), що вийшли з цієї ділянки, залежить від густини електричного заряду  $\rho$ , розташованого усередині неї. Що більший заряд, то більше  $\mathbf{E}$ . Загальна кількість магнетних силових ліній, що виходять з довільної ділянки простору, завжди дорівнює нулеві. З вищесказаного випливає, що електричні силові лінії починаються і закінчуються на зарядах, магнетні ж силові лінії ніде не починаються і не закінчуються.

До того ж, якщо вникнути глибше в зміст рівнянь Максвелла, вийде, що електричне поле цілком може існувати без магнетного, а

магнетне без електричного – ні. Фактично рівняння Максвелла вказують на відсутність магнетизму як самостійного явища. Магнетні властивості речовини пов’язані з рухомими електричними зарядами, які одночасно є елементарними носіями і електрики, і магнетизму. Але класична теорія електродинаміки не містить нічого, що пояснювало б таку нерівність електричного і магнетного полів.

Позірна несиметричність рівнянь є насправді значною мірою наслідком запису їх у тривимірному формулуванні, за якого й виникає спокуса ввести магнетний аналог електричного заряду. Цікаво, що коли б ми починали формулювати електродинаміку в межах теорії відносності, взаємозв’язок між електричним і магнетним полями бачився би дещо інакше.

На введення “магнетних зарядів” за аналогією з електричними можна натрапити у праці П’єра Кюрі (Pierre Curie, 1859–1906) [9], де зроблено поклик на аналогічну процедуру з книжки Еме Ваші (Aimé Vaschy, 1857–1899) [10].

Поль Дірак (Paul Adrien Maurice Dirac, 1902–1984), знаменитий фізик-теоретик, який віддав багато сил створенню квантової електродинаміки, був першим, хто припустив – на рівні, вищому за звичайну аналогію, – ймовірність існування частинок, що переносять магнетний заряд і створив квантову модель, яка би пояснювала їхні властивості (оригінальна праця 1931 р. [11]; див. також [12, 13]). Нині ще не має експериментального підтвердження існування магнетних зарядів. Але і класична, і квантова електродинаміка не заперечує проти їх введення для повної симетрії в рівняння Максвелла. Такі магнетні заряди, або “монополі”, мають бути повним магнетним еквівалентом електричних зарядів. Цікавим фактом є те, що введення таких частинок має пояснити дискретну природу електричного заряду.

<sup>4</sup>Тут і далі використовуємо систему СГС.



Подальший наш виклад ґрунтується на тому, що ми припускаємо існування монополів. Це дає змогу записати рівняння Максвелла з деякими поправками щодо магнетних зарядів. У такому випадку ми отримаємо дещо інший вигляд законів збереження заряду, енергії, імпульсу та моменту імпульсу, закону Біо–Савара–Лапласа, а також зможемо записати співвідношення, що пояснюють квантування електричного заряду.

*Physical laws should have mathematical beauty.*

Paul Dirac

### Рівняння Максвелла для випадку існування магнетних зарядів

Система рівнянь Максвелла для електромагнетного поля у випадку, коли б існували магнетні заряди, має вигляд [14]

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 4\pi \rho. \quad (1.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 4\pi \rho_m. \quad (1.2)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}_m. \quad (1.3)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{B} = \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}. \quad (1.4)$$

Тут очевидна симетрія:

$$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{B}, \quad \mathbf{B} \rightarrow -\mathbf{E}, \quad \rho \rightarrow \rho_m,$$

$$\rho_m \rightarrow -\rho, \quad \mathbf{j} \rightarrow \mathbf{j}_m, \quad \mathbf{j}_m \rightarrow -\mathbf{j},$$

де густинам струмів електричного і магнетного полів  $\mathbf{j}$  і  $\mathbf{j}_m$  відповідають розподіли густин зарядів  $\rho$  і  $\rho_m$ ;  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{B}$  – напруженість електричного та магнетного полів [12–14].

Знак “–” перед другим доданком у рівнянні (1.3) дає змогу записати закон збереження для

магнетного заряду у тому ж вигляді, що й для електричного:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \operatorname{div} \mathbf{j}_m = 0.$$

Повний магнетний заряд замкненої фізичної системи строго зберігається у всіх взаємодіях і перетвореннях.

Рівняння набувають класичного вигляду під час підстановки

$$\rho_m = 0, \quad \mathbf{j}_m = 0.$$

Відтак можна записати систему рівнянь Максвелла з врахуванням існування магнетних зарядів, при цьому класичні рівняння просто відображають той факт, що зазвичай монополі не спостерігаються.

Проте, існує ще деяка проблема. За відсутності магнетних зарядів електричне і магнетне поля можна переписати через скалярний і векторний потенціали  $\varphi$  та  $\mathbf{A}$ , відповідно:

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}.$$

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}.$$

Однак, якщо ввести магнетні заряди, то  $\operatorname{div} \mathbf{B}$  уже не дорівнює нулеві та його не можна зобразити як ротор якогось вектора. Один зі способів розв’язати цю проблему полягає у введенні сингулярного потенціалу. Можна також увести два нових потенціали,  $\psi$  та  $\mathbf{G}$  [13].

$$\mathbf{E} = -\operatorname{grad} \varphi - \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \operatorname{rot} \mathbf{G},$$

$$\mathbf{B} = \operatorname{grad} \psi + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial t} + \operatorname{rot} \mathbf{A}.$$

У підсумку маємо, що рівняння Максвелла, записані через потенціали, також стають симетричними.



## Квантування заряду

Існує елементарне міркування в підтримку квантованості електричного заряду [12]. Якщо розглядати нерелятивістську частинку з масою  $m$ , електричним зарядом  $e_1$  і магнетним зарядом  $\mu_1$ , що рухається зі швидкістю  $v$  у полі нерухомого тіла, що володіє зарядами  $e_2$ ,  $\mu_2$ , то рівняння руху можна записати так:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = e_1 \left( \mathbf{E} + \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{B}] \right) + \mu_1 \left( \mathbf{B} - \frac{1}{c} [\mathbf{v} \times \mathbf{E}] \right),$$

де залежність напруженостей полів  $\mathbf{E}$  і  $\mathbf{B}$  від відстані (початок координат пов'язаний з нерухомим тілом) має вигляд:

$$\mathbf{E} = e_2 \frac{\mathbf{r}}{r^3},$$

$$\mathbf{B} = \mu_2 \frac{\mathbf{r}}{r^3}.$$

У підсумку підстановки отримуємо:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = (e_1 e_2 + \mu_1 \mu_2) \frac{\mathbf{r}}{r^3} + (e_1 \mu_2 - e_2 \mu_1) \frac{1}{c} \left[ \mathbf{v} \times \frac{\mathbf{r}}{r^3} \right]$$

Помноживши векторно на  $\mathbf{r}$  зліва, отримаємо рівняння:

$$\begin{aligned} \left[ \mathbf{r} \times m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \right] &= (e_1 \mu_2 - e_2 \mu_1) \frac{1}{c} \frac{[\mathbf{r} \times [\mathbf{v} \times \mathbf{r}]]}{r^3} = \\ &= (e_1 \mu_2 - e_2 \mu_1) \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \frac{\mathbf{r}}{r}, \end{aligned}$$

оскільки похідна

$$\frac{d}{dt} \frac{\mathbf{r}}{r} = \frac{\dot{\mathbf{r}}}{r} - \frac{\mathbf{r}}{r^2} \dot{r} = \frac{\dot{\mathbf{r}} r^2 - \mathbf{r} (\ddot{\mathbf{r}} r)}{r^3} = \frac{[\mathbf{r} \times [\dot{\mathbf{r}} \times \mathbf{r}]]}{r^3}.$$

Тут виділяємо вектор моменту кількості руху, який зберігається:

$$\mathbf{J} = [\mathbf{r} \times m\mathbf{v}] - (e_1 \mu_2 - e_2 \mu_1) \frac{1}{c} \frac{\mathbf{r}}{r}.$$

Далі для спрощення розглянемо границю великої маси  $m$ , тобто вважатимемо їй другу частинку нерухомою ( $\mathbf{v} = 0$ ). У цьому випад-

ку квантування проекції моменту кількості руху  $\mathbf{J}$  на вісь  $r/r$ , що з'єднує частинки, дає умову квантування заряду:

$$\frac{e_1 \mu_2 - e_2 \mu_1}{c} = 2\pi \hbar v,$$

де  $v$  – ціле число.

Треба зазначити, що строгий розгляд цієї проблеми, зокрема й пов'язаний із коректністю інтерпретації вектора  $\mathbf{J}$  саме як моменту кількості руху, вимагає докладного квантово-механічного аналізу, який виходить далеко за межі викладеного тут підходу.

Для частинки, яка володіє електричним і магнетним зарядом, маємо:

$$\frac{e\mu}{c} = 2\pi \hbar v.$$

Тобто між елементарними магнетним  $\mu_0$  та електричним  $e$  зарядами існує простий зв'язок:

$$\mu_0 = \frac{2\pi \hbar c}{e}.$$

Отже, навіть єдиний монополь із визначенім зарядом пояснив би квантування електричного заряду – явище, яке є одним із фундаментальних законів природи і яке досі не має іншого пояснення.

### Співвідношення

$$\frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

виражає константу взаємодії, яка для електричних зарядів є достатньо малою. Звідси можна виразити одиницю електричного заряду і ввести одиницю магнетного заряду:

$$\frac{\mu^2}{\hbar c} \approx 4 \cdot 137.$$

Сили між магнетними зарядами виявляються дуже сильними, якщо, для прикладу, порівнювати з сильними ядерними взаємодіями, для яких константи взаємодії порядку 10.



Заряд магнетного монополя набагато більший від заряду електрона. У такому випадку трек монополя, який рухається в камері Вільсона чи бульбашковій камері, має помітно виділятися на фоні треків інших частинок, але нічого подібного не спостерігається. Залишається актуальним питання, чи магнетні монополі рідко народжуються, чи взагалі не існують.

Поки що ця елегантна теоретична абстракція знаходить втілення лише опосередковано в таких нових фізичних станах матерії, як бозе-конденсати [15] чи спінова крига [16–18].

### Закон Біо–Савара–Лапласа

Поки пошуки магнетних монополів тривають, припущення про їхнє існування знаходить своє застосування у виведенні законів фізики, зокрема, закону Біо–Савара–Лапласа.

Відомо, що на електрично заряджену частинку  $q$ , яка рухається зі швидкістю  $\mathbf{v}_q$  у магнетному полі  $\mathbf{B}$  діє сила Лоренца [19]

$$\mathbf{F}_q = q\mathbf{E} + \frac{q}{c}[\mathbf{v} \times \mathbf{B}].$$

Сила, що діє на нерухомий магнетний монополь  $q_m$ , є такою:

$$\mathbf{F}_m = q_m \mathbf{B}.$$

Ми не знаємо, яка сила діяла б на заряд  $q_m$ , якщо б він рухався.

Точковий заряд  $q$  створює статичне кулонівське поле  $\mathbf{E}$

$$\mathbf{E} = \frac{q}{r^2} \mathbf{r}_q,$$

де  $\mathbf{r}_q$  – одиничний вектор, який напрямлений від електричного заряду  $q$  до точки, де вектор напруженості електричного поля  $\mathbf{E}$  є визначеним.

Нехай магнетний заряд  $q_m$ , що є нерухомим, створює підібне кулонівському поле  $\mathbf{B}$

$$\mathbf{B} = \frac{q_m}{r^2} \mathbf{r}_m,$$

де одиничний вектор  $\mathbf{r}_m$  визначається аналогічно до  $\mathbf{r}_q$ .

Для рухомого електричного заряду маємо:

$$\mathbf{F}_q = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_q \times \mathbf{B}] = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_q \times \frac{q_m \mathbf{r}_m}{r^2}].$$

За третім законом Ньютона

$$\mathbf{F}_m = -\mathbf{F}_q.$$

Відтак для нерухомого заряду  $q_m$ :

$$q_m \mathbf{B} = \mathbf{F}_m = -\mathbf{F}_q = -q_m \frac{q}{c} [\mathbf{v}_q \times \frac{\mathbf{r}_m}{r^2}].$$

Прийнявши  $\mathbf{r}_m = -\mathbf{r}_q$  в останньому виразі і скоротивши на  $q_m$ , отримаємо результат, що заряд  $q$ , який рухається зі швидкістю  $\mathbf{v}_q$ , створює магнетне поле:

$$\mathbf{B} = \frac{q}{c} [\mathbf{v}_q \times \frac{\mathbf{r}_q}{r^2}].$$

Останнє співвідношення є законом Біо–Савара–Лапласа [19]. Існування монополів ще раз підтвердило б, що магнетна індукція поля створюється і рухомими електричними зарядами, і струмами.

...Відомим історичним фактом є те, що ідею магнетних монополів Дірак висловив разом із ідеєю про існування позитрона. “Позитивний електрон” невдовзі виявили за спостережуваними треками в камері Вільсона. Щодо магнетного монополя, то цікаво, скільки ще часу будуть дослідники розгадувати чергову загадку природи?

Пошук триває...

Автори висловлюють подяку Ю. Криницькому та проф. В. Ткачукові за обговорення деяких питань, висвітлених у цій статті.



## Література

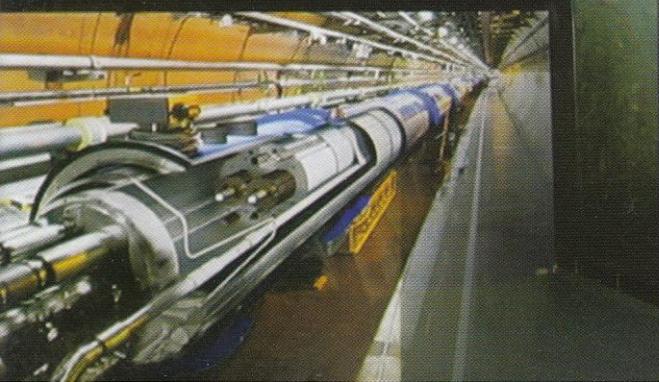
- [1] Липсон Г. Великие эксперименты в физике / пер с англ. И. Б. Виханского и В. А. Кузьмина; под ред. В. И. Рыдника. – Москва: Мир, 1972. – 215 с.
- [2] *Theophrastus. On Stones* / Introduction, Greek text, English translation and commentary by Earle R. Galley and John F. C. Richards. – Columbus, Ohio: The Ohio State University, 1956. – vii, 237 p.; текст можна знайти за адресою: [http://www.farlang.com/gemstones/theophrastus-on-stones/page\\_002](http://www.farlang.com/gemstones/theophrastus-on-stones/page_002).
- [3] *Li Shu-hua Origine de la boussole II. Aimant et boussole* // Isis. – 1954. – Vol. 45, No. 2. – P. 175–196.
- [4] *Stein R. Jong Keng, Chang Tcheou yi-k'i t'ong-k'ao* // Bulletin de l'Ecole française d'Extrême-Orient. – 1941. – Vol. 41, No. 1. – P. 394–406.
- [5] *Gilbert W. On the loadstone and magnetic bodies and on the great magnet the Earth. A new physiology, demonstrated with many arguments and experiments ...* / transl. by P. Fleury Mottelay. – New York: J. Wiley & sons, 1893. Текст можна знайти за адресою: <http://archive.org/details/williamgilbertof00gilb>.
- [6] *Örsted, J. Ch. Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*. – Hafniae: Typis Schultzianis, 1820. – 4 p.  
Текст можна знайти за адресою:  
[http://la.wikisource.org/wiki/Experimenta\\_circa\\_effectum\\_conflictus\\_electrici\\_in\\_acum\\_magneticam](http://la.wikisource.org/wiki/Experimenta_circa_effectum_conflictus_electrici_in_acum_magneticam); [http://www.ampere.cnrs.fr/ice/ice\\_book\\_detail-fr-img-ampere-ampere\\_text-63-2.html](http://www.ampere.cnrs.fr/ice/ice_book_detail-fr-img-ampere-ampere_text-63-2.html)
- [7] *Clerestorius, Ampère, Arago. Note sur les expériences électro-magnétiques relatives à l'identité de l'aimant avec l'électricité* // Annales des mines ou Recueil de mémoires sur l'exploitation des mines et sur les sciences qui s'y rapportent. – 1820. – Vol. 5. – P. 535–558.  
Текст можна знайти за адресою:  
<http://www.ampere.cnrs.fr>.
- [8] *Федорченко А. М. Теоретична фізика: В 2 т.* – К.: Вища школа, 1992.
- [9] *Curie P. Sur la possibilité d'existence de la conductibilité magnétique et du magnétisme libre* // Séances de la Société Française de Physique. – Paris, 1894. – P. 76–77.
- [10] *Vaschy A. Traité d'électricité et de magnétisme : Théorie et applications, instruments et méthodes des mesure électrique*. – Paris, 1890.
- [11] *Dirac P. A. M. Quantised singularities in the electromagnetic field* // Proc. Roy. Soc. A. – 1931. – Vol. 133. – P. 60–72.
- [12] *Швингер Ю. Магнитная модель материи* // Успехи физических наук. – 1971. – Т. 103. – С. 355–365.
- [13] *Moulin F. Magnetic monopoles and Lorentz force* // Il Nuovo Cimento. – 2001. – Vol. 116B. – N 8. – С. 869–877.
- [14] *Jun S. Song. Theory of magnetic monopoles and electric-magnetic duality: A prelude to S-duality* // J. Undergrad. Sci. – 1996. – Vol. 3. – P. 47–55.
- [15] *Pietilä V., Möttönen M. Non-Abelian magnetic monopole in a Bose-Einstein condensate* // Phys. Rev. Lett. – 2009. – Vol. 102, No. 8. – Art. 080403. – 4 p.
- [16] *Castelnovo C., Moessner R., Sondhi S. L. Magnetic monopoles in spin ice* // Nature. – 2008. – Vol. 451. – P. 42–45.
- [17] *Gingras M. J. P. Observing monopoles in a magnetic analog of ice* // Science. – 2009. – Vol. 326. – P. 375–376.
- [18] *Morris D. J. P. et al. Dirac strings and magnetic monopoles in spin ice Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub>* // Science. – 2009. – Vol. 326. – P. 411–414; <http://arxiv.org/abs/1011.1174>.
- [19] *Frank S. Magnetic monopoles, Galilean invariance, and Maxwell's equations* // Am. J. Phys. – 1992. – Vol. 60, No. 2. – P. 109–114.

# СВІТ ФІЗИКИ №3 науково-популярний журнал

2012

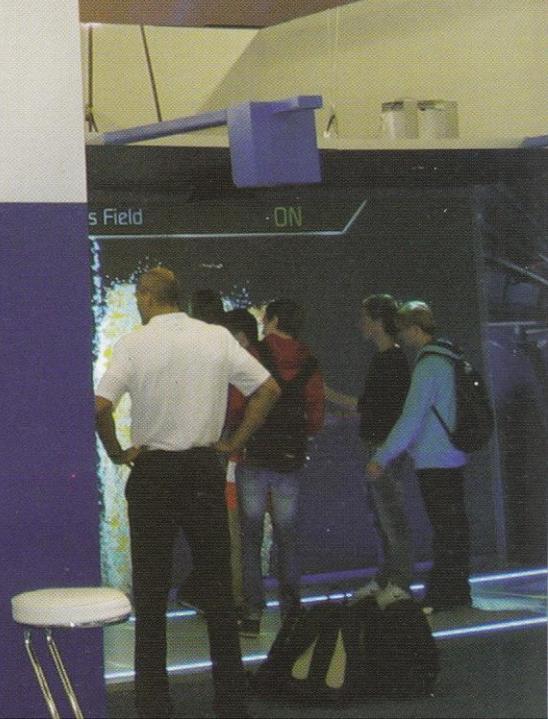


Ніхто нині не вкладатиме  
в український інтелектуальний потенціал,  
крім власної держави



*Accelerating science*

*Accelerating science*



# СВІТ ФІЗИКИ

науково-популярний журнал

3(59) '2012

Журнал "СВІТ ФІЗИКИ",  
заснований 1996 року,  
реєстраційне свідоцтво № КВ 3180  
від 06.11.1997 р.

Виходить 4 рази на рік

**Засновники:**  
Львівський національний університет  
імені Івана Франка,  
Львівський фіз.-мат. ліцей,  
СП "Євросвіт"

**Головний редактор**  
**Іван Вакарчук**

заступники гол. редактора:  
**Олександр Гальчинський**  
**Галина Шопа**

**Редакційна колегія:**

Ігор Анісімов  
Михайло Бродин  
Петро Голод  
Семен Гончаренко  
Ярослав Довгий  
Іван Климишин  
Юрій Ключковський  
Богдан Лукіянець  
Олег Орлянський  
Максим Стріха  
Юрій Ранюк  
Ярослав Яцків

Художник Володимир Гавло  
Літературний редактор Мирослава Прихода  
Комп'ютерне макетування та друк  
СП "Євросвіт"

**Адреса редакції:**

Редакція журналу "Світ фізики"  
вул. Саксаганського, 1,  
м. Львів 79005, Україна  
тел. у Львові 380 (0322) 39 46 73  
у Києві 380 (044) 416 60 68  
phworld@franko.lviv.ua  
www.franko.lviv.ua/publish/phworld

Шановні читачі, дописувачі, члени  
редколегії, засновники, працівники  
редакції та всі, хто долучився до  
творення журналу!

Вітаємо Вас із 15-річчям  
науково-популярного журналу  
"Світ фізики".

Видання популяризує українську науку,  
зокрема фізику, серед студентів, школярів,  
учителів, науковців та широкого загалу читачів.

На сторінках журналу можна прочитати про  
відомих фізиків України та світу, Нобелівських  
лавреатів та їхні досягнення у різних галузях  
фізики. Школярі та учителі можуть ознайомитися  
з умовами задач та їхніми розв'язками  
олімпіад, турнірів від обласного рівня до між-  
народного.

На сторінках видання можуть знайти цікаву  
інформацію не лише фахівці, а й ті хто цікавить-  
ся фізичними процесами, що відбуваються  
на Землі та Всесвіті.

Журнал "Світ фізики" пройшов велику до-  
рогу становлення у важкі 90-ті роки, коли в  
Україні майже не було коштів на видання такого  
роду видань українською мовою, й до нині, коли  
зацікавлення до природничих наук у молоді ще  
більше спадає, державної підтримки немає.

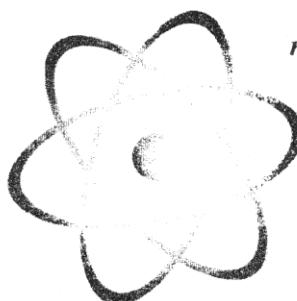
Однак періодичне видання виходить з друку,  
на ентузіазмі працює великий колектив з надією  
на позитивні зміни в науці та освіті в Україні.

Нині журнал "Світ фізики" – це відоме  
видання не лише в Україні, а й далеко за її  
межами.

Дякуємо всім за співпрацю та запрошуємо  
їх надалі подавати до редакції цікаві матеріали.

Зaproшуємо нових авторів та меценатів до  
співпраці з журналом "Світ фізики".

*Не забудьте  
передплатити журнал  
"Світ фізики"*



Передплатний індекс  
22577

Передрук матеріалів дозволяється лише з письмової  
згоди редакції та з обов'язковим посиланням на журнал  
"Світ фізики"

© СП "Євросвіт"

# ЗМІСТ

## 1. Нові та маловідомі явища фізики

Чулан Наталія, Ровенчак Андрій. Дешо про магнетні монополі  
Відкриття космічних променів

3  
9

## 2. Олімпіади, турніри...

Орлянський Олег. Додавання швидкостей і зміна кінетичної енергії  
Стефанюк Богдан. Як впливає місяць на добові зміни пришвидшення вільного падіння на Землі?

14  
20

## 3. Актуальні проблеми

Фесенко Олена. Міжнародна літня школа “Нанотехнології: від фундаментальних досліджень до прикладних застосувань”

22

## 4. Нобелівські лавреати

Шопа Галина. Ще крок до створення квантових комп’ютерів

25

## 5. Університети світу

Монастирський Любомир. Кафедрі радіоелектронного матеріалознавства – 35 років

28

## 6. Інформація

Шопа Ярослав. Трохи фізики футболу

38

## 7. Гумор

Механіка об’єктів у грі ANGRY BIRDS

43

## 8. Реальність і фантастика

Легенди

46

