УДК 371.3:378.14:53

Шевчук О.Г.

ВИКОРИСТАННЯ НЕПОВНОГО ІЗОМОРФІЗМУ АЛГЕБР ЕЛЕКТРО– ТА МАГНІТОСТАТИКИ ПРИ ВИКЛАДАННІ КУРСУ ЕЛЕКТРОДИНАМІКИ

У статті приведений приклад бієктивного відображення яке зберігає деякі основні операції алгебр електро- та магнітостатики, що дає змогу їх часткового ототожнення з точністю до фізичного змісту структур, породжених цими алгебрами. Неповний ізоморфізм алгебр електро- та магнітостатики дає можливість провести синтетичний виклад ряду тем електродинаміки, окремо зупиняючись лише на фізичному змісті елементів цих алгебр.

Ключові слова: *аналогія, алгебра, біекція, ізоморфізм, електродинаміка, магнитостатики.*

Постановка проблеми. Наразі вже можна говорити про те, що реалізовуючи завдання національної програми "Освіта: Україна XXI століття" набувають нового наповнення проблеми формування мотивації та пізнавальної активності студентів, розвитку самостійності, творчого потенціалу, організації різних форм контролю і самоконтролю, вміння застосувати на практиці здобуті знання. Одним з найпотужніших методів у формуванні вказаних вмінь та навичок, складових компетентності, розвитку евристичного мислення при вивченні фізики є метод аналогій, методологічне значення якого важко переоцінити, адже з переходом на кредитно-модульну систему навчання суттєво зростає кількість навчальних годин, відведена на самостійну роботу студентів. Встановлюючи подібність між фізичними явищами та процесами одні з яких грають роль об'єкта-прообраза, а інші – об'єкта-образа, можна намітити шляхи розв'язування задач в, на перший погляд, зовсім несхожих феноменологіях, суттєво розширивши при цьому прогностичну силу аналітичних методів. Саме тому відшукання параметрів фізичних теорій, які задовольняють положенням теорії подібності (критеріям подібності), або принципам введення аналогій, є важливим аспектом при викладанні загальної та теоретичної фізики.

Аналіз публікацій. Аналіз літератури показав, що існують можливості застосування методу аналогії не тільки при вивченні теоретичного матеріалу курсу фізики, але й при розв'язуванні задач. Метод аналогії при вивченні фізичних дисциплін детально і всебічно розглянутий в роботах [1 – 5]. Зокрема, в цих роботах приведені аналогії між параметрами теорії поступального та обертального рухів матеріальної точки, послідовного та паралельного з'єднання елементів; аналогії в задачах на обчислення роботи змінних сил різної фізичної природи; аналогія у коливальних процесах в системах з не дисипативними силами; електромеханічні аналогії та їх застосування до розв'язування задач; аналогії між описом процесів в геометричній оптиці та механіці; застосування аналогій при визначенні середніх величин. В роботах [6, 7] розглянуті аналогії при вивченні тем "Електростатичне поле та його характеристики", "Гравітаційне поле та його характеристики", створена система опорних конспектів, яка суттєвим чином спирається на ці аналогії. Оперуючи термінами концепції методу аналогій в [10] приведені таблиці співвідносності параметрів законів гідродинаміки ідеальної нестисливої рідини в каналах довільної геометричної конфігурації без джерел витоку та стоку параметрам законів постійного струму в колах з довільним розгалуженням, які не містять джерел ЕРС та реактивних елементів. В [9] приведена співвідносність параметрів законів постійного струму та законів теплотехніки для стаціонарних теплових потоків.

Мета роботи. Розширити перелік фізичних явищ та процесів, підпорядкованих основним концептуальним принципам методу аналогії за допомогою деяких положень абстрактної алгебри.

Виклад основного матеріалу дослідження. Аналіз змістової частини курсів загальної та теоретичної свідчить про те, що багато на перший погляд не пов'язаних між собою блоків інформації можна об'єднати та уніфікувати на основі алгебраїчного формалізму, провести їх класифікацію.

Введемо попередньо ряд основних означень та тверджень [8].

Алгеброю називається впорядкована пара $A = \langle \mathrm{A}, \Omega \rangle$, *де* А *– непорожня множина,* Ω *– непорожній перелік операцій на* А.

Таким чином, алгебра A визначається двома множинами:

(a) непустою множиною $\mathrm{A} \equiv |A|$. Ця множина називається *основною множиною алгебри A,* а її елементи – *елементами алгебри A*;

(b) непустою множиною операцій Ω, визначених на А. Ці операції називаються *головними* операціями алгебри A.

Дві алгебри $A = \langle \mathrm{A}, \Omega \rangle$ *та* $B = \langle \mathrm{B}, \Omega^* \rangle$ *будемо називати однотипними, якщо існує ін'єктивне відображення множини* $\Omega \to \Omega^*$, *при якому для всіх операцій виконується відображення* $f_B \xleftarrow{\psi} f_A$, $f_B \in \Omega^*$ *мають один і той же ранг. Типом алгебри A будемо називати послідовність рангів її операцій:* $MorfA = \{rang(f_1), rang(f_2), \ldots, rang(f_n)\}$.

З означень ясно, що у випадку, коли алгебри A та B є однотипними, то $Morf\ A = Morf\ B$ при введенні відображення $f_A \xrightarrow{\psi} f_B$ для всіх операцій, що діють на A та B.

Нехай A = <A, f_1, f_2, …, f_s, α_{s+1}, α_{s+2}, …, α_n,>, де $f_i\left(i \in \overline{1,s}\right)$ – операції на A, ранг яких перевищує ранг нульмісної операції, а $\alpha_p\left(p \in (s+1) \div n\right)$ – виділені в A елементи певними нульмісними операціями f_{s+1}, f_{s+2}, …, f_n. Ці елементи часто називають ще *головними* елементами A.

Розглянемо A та B – дві однотипні алгебри, f_A – довільна головна операція алгебри A, а f_B – головна операція алгебри B $\left(f_A \xrightarrow{\psi} f_B\right)$. Тоді говорять, що відображення $|A| \xrightarrow{\psi} |B|$ зберігає операцію $f_A \in \Omega$, якщо виконується умова:

$$\psi\left(f_A\left(a_1, a_2, ..., a_k\right)\right) = f_B\left(\psi(a_1), \psi(a_2), ..., \psi(a_k)\right), \forall a_1, a_2, ..., a_k \in A.$$

Алгебри A та B називають *гомоморфними* ($A \oplus B$), якщо існує відображення Ψ $|A|$ в (на) $|B|$, яке зберігає всі головні операції f_A цієї алгебри і, крім того $Morf\ A = Morf\ B$. *Якщо гомоморфізм є біекцією, а обернене відображення – гомоморфізм, то такий гомоморфізм називають ізоморфізмом, а алгебри на яких введене це відображення називають ізоморфними.*

Розглянемо дві алгебри A = < $\oplus$, +, –, $\div$, $\times$, $\frac{d}{dt}$, $\vec{l}_r$, 1_A; q, **E**, **D**, φ, $\vec{r}$, t >, та B = < $\oplus$, +, –, $\div$, $\times$, $\frac{d}{dt}$, θ_B, $\vec{0}_B$, $\vec{l}_r$; ***B***, **H**, ***A***, $\vec{r}$, t >, де $\oplus$ – дія геометричного підсумовування векторів; +, –, $\div$, $\times$ – арифметичні дії; $\frac{d}{dt}$ – оператор диференціювання за часом; $\theta_A = \theta_B = 0$ – нульові (нейтральні) елементи вибраних алгебр; $1_A = 1_B = 1$ – одиничні елементи цих же алгебр; $\vec{l}_r$ – одиничний орт радіуса-вектора; t – час; q – заряд; **E**, **H** – напруженості електростатичного та магнітостатичного полів відповідно, **D, B** – індукція електростатичного та магнітостатичного полів відповідно, φ та **A** – потенціали електростатичного та магнітостатичного полів; $\vec{r}$ – радіус-вектор заданої точки поля.

Введемо в деякій системі одиниць фізичних величин біекцію ψ :

$$q \xleftrightarrow{\psi} I;\ A \xleftrightarrow{\psi} \varphi;\ \vec{r} \xleftrightarrow{\psi} \vec{r};\ t \xleftrightarrow{\psi} t.$$

Використовуючи закони збереження електричного заряду та принцип суперпозиції електростатичних та магнітостатичних полів, неважко переконатись в тому, що відображення ψ зберігає операції {+, –, $\div$, $\times$ $\frac{d}{dt}$} між (q, I) та (**A**, φ). Збереження операції $\oplus$ є тривіальним, так як ψ відображає $\vec{r}$ в $\vec{r}$ та t в t, крім того $\theta_A = \theta_B = 0$; $1_A = 1_B = 1$. Отже, виконання умови $\psi\left(f_A\left(a_1, a_2, ..., a_k\right)\right) = f_B\left(\psi(a_1), \psi(a_2), ..., \psi(a_k)\right), \forall a_1, a_2, ..., a_k \in A$ на обраних алгебра забезпечене.

Висновок: математична структура деяких законів електростатики є ізоморфною в термінах відповідності $(q, I) \xleftrightarrow{\psi} (A, \varphi)$ законам магнітостатики, тобто, маємо неповний ізоморфізм алгебр теорій електро- та магнітостатики.

На основі вище викладеного математичного формалізму провели аналіз основних законів електро- та магнітостатики, які вивчаються в курсі електродинаміки і в рамках концепції методу аналогій встановили співвідносність операторів та параметрів, що використовуються при описі електро- та магнітостатичних полів (табл. 1, 2).

Виходячи з таблиць 1 та 2 складемо таблицю 3 деяких аналітичних співвідношень, які слідують з неповного ізоморфізму алгебр електростатики та магнітостатики.

Вказані в табл. 3 співвідношення можна використовувати при інтегрованому викладанні наступних пар тем: 1. "Електростатичне поле у вакуумі", "Стаціонарне магнітостатичне поле у вакуумі"; 2. "Опис електростатичних полів у діелектриках", "Опис магнітостатичних полів у магнетиках"; 3. "Закони Кірхгофа", "Магнітні кола з розгалуженнями" та ряду інших тем.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На завершення вкажемо на відмінність розвинутого в статті математичного формалізму від підходів, які притаманні *теорії подібності* [8]. Теорія подібності оперує *критеріями подібності*, які підкоряються трьом теоремам подібності [8]. Метод ізоморфізму алгебр фізичних параметрів, про який йшла мова в цій статті, є більш загальним підходом для вивчення фізичних процесів, адже він може бути застосованим і до опису процесів, які не задовольняють методам теорії подібності, наприклад, не є її критеріями, а є бієктивним відображенням між *математичними операціями над параметрами фізичних теорій* в яких явища та процеси виступають дуальним поєднанням об’єкту-образу та об’єкту-прообразу. Тому використання законів абстрактної алгебри розширює можливості методу аналогій, що сприяє інтегрованому викладу ряду тем курсів загальної та теоретичної фізики.

Таблиця 1

Співвідносність операторів теорії електростатичних та магнітостатичних полів

№ з/п	Електростатичне поле	Магнітостатичне поле
1.	$\oiint_S ...d\vec{S}$	$\oint_l ...d\vec{l}$
2.	$\oint_l ...d\vec{l}$	$\oiint_S ...d\vec{S}$
3.	$\frac{d}{dl}$	$\frac{\partial}{\partial a}$
4.	Дивергенція div	Ротор rot
5.	Ротор rot	Дивергенція div

Таблиця 2

Співвідносність параметрів теорії електростатичних та магнітостатичних полів

№ з/п	Електростатичне поле	Магнітостатичне поле
1.	Напруженість поля $\vec{E}(\vec{r})$	Індукція поля $\vec{B}(\vec{r})$
2.	Електрична стала ε_o	Величина, обернена до магнітної сталої $\frac{1}{\mu_o}$
3.	Заряд Q	Струм I
4.	Поляризаційний заряд (- $Q^{пол}$)	Струм намагнічування $I^{нам}$
5.	Вільний (сторонній) заряд $Q^{в}$	Струм провідності $I^{пров}$
6.	Нескінченно малий заряд dq	Нескінченно малий елемент струму $Id\vec{l}$
7.	Нескінченно малий поляризаційний заряд ($-dq^{пол}$)	Нескінченно малий елемент струму намагнічування $I^{нам}d\vec{l}$
8.	Нескінченно малий вільний (сторонній) заряд $dq^{в}$	Нескінченно малий елемент струму провідності $I^{пров}d\vec{l}$
9.	Електричний момент диполя $\vec{d}$	Магнітний момент контуру зі струмом $\vec{p}_m$
10.	Векторний диференціал елементу поверхні $d\vec{S}$	Векторний диференціал дуги $d\vec{l}$
11.	Вектор поляризованості діелектрика $\vec{P}(\vec{r})$	Вектор намагніченості $\vec{J}(\vec{r})$
12.	Діелектрична сприйнятливість $\chi(\vec{r})$	Магнітна сприйнятливість $\chi(\vec{r})$
13.	Поверхнева густина поляризаційних зарядів $\sigma_q^{пол}(\vec{r})$	Лінійна густина струму намагнічування $i^{нам}(\vec{r})$
14.	Поверхнева густина вільних зарядів $\sigma_q^{в}(\vec{r})$	Лінійна густина струму провідності $i^{пров}(\vec{r})$
15.	Поверхнева густина заряду $\sigma_q(\vec{r})$	Лінійна густина струму $i(\vec{r})$
16.	Об’ємна густина заряду $\rho_q(\vec{r})$	Вектор густини струму $\vec{j}(\vec{r})$
17.	Вектор електричної індукції $\vec{D}(\vec{r})$	Вектор напруженості МСП $\vec{H}(\vec{r})$
18.	Діелектрична проникність $\varepsilon(\vec{r})$	Магнітна проникність $\mu(\vec{r})$
19.	Скалярний потенціал $\varphi(\vec{r})$	Векторний потенціал $A(\vec{r})$

Таблиця 3

Деякі аналітичні співвідношення, які слідують з неповного ізоморфізму алгебр електростатики та магнітостатики

№ з/п	Електростатика	Магнітостатика
1.	$\oint_l \vec{E}(\vec{r})d\vec{l} = 0$	$\oiint_S \vec{B}(\vec{r})d\vec{S} = 0$
2.	$\vec{d} = q\,\vec{l}_r$	$\vec{p}_m = IS\vec{n}$
3.	$\vec{F} = \vec{d}\,\dfrac{\partial\vec{E}(\vec{r})}{\partial\vec{l}}$	$\vec{F} = \vec{p}_m\,\dfrac{\partial\vec{B}(\vec{r})}{\partial\vec{n}}$
4.	$\vec{\mu} = \left[\vec{d}, \mathrm{E}\right]$	$\vec{M} = \left[\vec{p}_m, \mathrm{B}(\mathrm{r})\right]$
5.	$\vec{p} = \chi(\vec{r})\varepsilon_0\vec{E}(\vec{r})$	$\vec{J}(\vec{r}) = \chi(\vec{r})\vec{H}(\vec{r})$
6.	$\vec{p}_n = \sigma^{\text{нам}} = \chi(\vec{r})\varepsilon_0\vec{E}_n(\vec{r})$	$\vec{J}_n(\vec{r}) = i^{\text{нам}}(\vec{r}) = \chi(\vec{r})\vec{H}_n(\vec{r})$
7.	$\varepsilon(\vec{r}) = 1 + \chi(\vec{r})$	$\mu(\vec{r}) = 1 + \chi(\vec{r})$
8.	$\oiint_S \vec{D}(\vec{r})d\vec{S} = Q^{\text{в}}$	$\oint_l \vec{H}(\vec{r})d\vec{l} = I^{\text{пров}}$
9.	$\nabla\vec{E}(\vec{r}) = \dfrac{\rho_q^{\text{в}}(\vec{r})}{\varepsilon_0}$	$rot\vec{B}(\vec{r}) = \mu_0\vec{j}^{\text{пров}}(\vec{r})$
10.	$\nabla\vec{E}(\vec{r}) = \dfrac{\rho_q^{\text{в}}(\vec{r}) + \rho_q^{\text{ст}}(\vec{r})}{\varepsilon_0}$	$rot\vec{B}(\vec{r}) = \mu\mu_0\vec{j}(\vec{r})$
11.	$\nabla\vec{D}(\vec{r}) = \rho_q^{\text{ст}}(\vec{r})$	$rot\vec{H}(\vec{r}) = \vec{j}^{\text{пров}}(\vec{r})$
12.	$rot\vec{E}(\vec{r}) = 0$	$div\vec{B}(\vec{r}) = 0$
13.	$rot\vec{D}(\vec{r}) = 0$	$div\vec{H}(\vec{r}) = 0$
14.	$\oiint_S \vec{E}(\vec{r})d\vec{S} = \dfrac{Q}{\varepsilon_0}$	$\oint_l \vec{B}(\vec{r})d\vec{l} = \mu_0 I$
15.	$\oiint_S \vec{E}(\vec{r})d\vec{S} = \dfrac{Q}{\varepsilon\varepsilon_0}$	$\oint_l \vec{B}(\vec{r})d\vec{l} = \mu\mu_0(I^{пров} + I^{нам})$
16.	$\oiint_S \vec{D}(\vec{r})d\vec{S} = Q^{\text{ст}}$	$\oint_l \vec{H}(\vec{r})d\vec{l} = \mu_0 I^{пров}$
17.	$\oiint_S \vec{\mathrm{p}}(\vec{r})d\vec{S} = -Q^{\text{нам}}$	$\oint_l \vec{J}(\vec{r})d\vec{l} = I^{\text{нам}}$
18.	$\oint_l \vec{D}(\vec{r})d\vec{l} = 0$	$\oiint_S \vec{H}(\vec{r})d\vec{S} = 0$
19.	$w = \dfrac{\vec{D}(\vec{r})\vec{E}(\vec{r})}{2}$	$w = \dfrac{\vec{H}(\vec{r})\vec{B}(\vec{r})}{2}$
20.	$W = -\vec{d}\vec{E}(\vec{r})$	$W = -\vec{p}_m\vec{B}(\vec{r})$
21.	$A = \int_1^2 q\vec{E}(\vec{r})d\vec{l}$	$A = \int_1^2 I\vec{B}(\vec{r})d\vec{l}$
22.	$d\vec{E}(\vec{r}) = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\cdot\dfrac{dq\vec{r}}{r^3}$	$d\vec{B}(\vec{r}) = \dfrac{\mu\mu_0}{4\pi}\cdot\dfrac{I\left[d\vec{l}, \vec{\mathrm{r}}\right]}{r^3}$
23.	$d\vec{F} = \vec{E}(\vec{r})dq$	$d\vec{F} = I\left[d\vec{l}, \vec{\mathrm{r}}\right]$
24.	$\vec{E}_{д} = \dfrac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\cdot\dfrac{\vec{d}}{r^3}\sqrt{1+3\cos^2\Theta}$	$\left\|\vec{B}\right\| = \dfrac{\mu\mu_0}{4\pi}\cdot\dfrac{\vec{p}_m}{r^3}\sqrt{1+3\cos^2\Theta}$
25.	$\vec{E} = \dfrac{2\vec{d}}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon(R^2 + r^2)^{3/2}}$	$\vec{B} = \dfrac{\mu\mu_0}{4\pi}\cdot\dfrac{2\vec{p}_m}{(R^2 + r^2)^{3/2}}$
26.	$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla\varphi(\vec{r})$	$\vec{B}(\vec{r}) = rot\vec{A}(\vec{r})$
27.	$\vec{D}(\vec{r}) = \varepsilon_0\vec{E}(\vec{r}) + \vec{p}(\vec{r})$	$\vec{H}(\vec{r}) = \dfrac{\vec{B}(\vec{r})}{\mu_0} - \vec{J}(\vec{r})$

Використані джерела

1. Вовк Л.І. Роль методу аналогії при викладенні фізики у вузі / Л.І. Вовк // Наукові записки: Зб. наук. праць. – Харків: ХДУ, 1998. – С. 129-132.
2. Вовк Л.І. Значення використання аналогій у навчанні для розвитку мислення студентів / Л.І. Вовк // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т.Г.Шевченка. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ ім. Т.Г. Шевченка, 2000. – № 3. – С. 21-22.
3. Вовк Л.І. Аналогії у навчанні / Л.І. Вовк // Матеріали VIII Міжнародної Наукової Конференції імені академіка М. Кравчука. – К. : НТУУ (КПІ), 2000. – 500 с.
4. Вовк Л.І. Метод аналогії як один із шляхів інтенсифікації навчання фізиці у вузі / Л.І. Вовк, В.П. Лобань // Інтенсивні технології у навчальному процесі – головна умова покращення якості підготовки фахівців: Матеріали науково-методичної конференції. – Полтава: ПКІ, 1997. – С. 116-117.
5. Вовк Л.І. Використання аналогії – одна з ефективних форм узагальнення і систематизації знань / Л.І. Вовк, П.Я. Михайлик // Дидактичні проблеми фізичної освіти в Україні: Матеріали науково-практичної конференції. – Чернігів: ЧДПУ, 1998. – С. 27-30.
6. Закалюжний В.М. Система порівняльних опорних конспектів тем "Електростатичне поле та його характеристики" та "Гравітаційне поле та його характеристики" / В.М. Закалюжний, О.Г. Шевчук // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ ім. Т.Г. Шевченка, 2011. – Вип. 89. – С. 268-274.
7. Закалюжний В.М. Опорні конспекти лекцій з теми "Електростатика" як засіб систематизації та узагальнення знань студентів з фізики" / В.М. Закалюжний, О.Г. Шевчук // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ ім. Т.Г. Шевченка, 2013. – Вип. 109. – С. 168-175.
8. Куликов Л.Я. Алгебра и теория чисел / Л.Я. Куликов. – Москва: Высшая школа, 1974. – 560 с.
9. Мельничук Л.Ю. Система комплексних завдань при викладанні фізики за програмою рівня "С" в класах ліцею природничого профілю" / Л.Ю. Мельничук, О.В. Мельничук, О.Г. Шевчук // Фізико-математичні записки: Збірник наукових праць. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 1999 – С. 91-93.
10. Мельничук О.В. Використання понятійного апарату абстрактної алгебри для синтетичного викладу студентам університету деяких розділів загальної та теоретичної фізики / О.В. Мельничук, О.Г. Шевчук // Вісник Чернігівського державного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Серія: Педагогічні науки. – Чернігів: ЧДПУ ім. Т.Г. Шевченка, 2010. – Вип. 77. – С. 237-241.

Shevchuk O.

THE USE OF PARTIAL ISOMORPHISM ALGEBRA ELETRO– AND MAGNETOSTATICS TEACHING ELETRODYNAMICS COURSE

One of the most powerful methods in the formation of skills and abilities that make up the competence, heuristic thinking development in the study of physics is the method of analogies, methodological significance of which is difficult to overestimate, because the transition to credit-modular system of training the number of teaching hours set aside for independent work of students increases significantly. By establishing the similarity between the physical phenomena and processes, some of which act as object-pre-image, and the other - the object-image, it is possible to identify solutions to problems in completely different phenomenology, significantly expanding while the predictive power of the analytical methods.

That is why the search for the physical parameters of the theory, which satisfies the provisions of the theory of similarity (similarity criteria), or the introduction of the principles of analogies is an important aspect in the teaching of general and theoretical physics. Analysis of the content of the courses of general and theoretical evidence that many seemingly unrelated can combine and harmonize on the basis of the algebraic formalism to spend their classification together pieces of information.

Purpose - to expand the list of physical phenomena and processes subject to the basic conceptual principles of the method of using the analogy of certain provisions of abstract algebra. The conclusion to be drawn from the research: mathematical structure of some of the laws of electrostatics is isomorphic in terms of compliance with the laws of magnetostatic, that is, have a part-algebra isomorphism electro- and magnetostatic theory. In the developed mathematical formalism for the introduction and justification of the partial formalism of the basic laws of electricity and magnetostatic, which are studied in the course of electrodynamics. As part of the concept of analogy method established correlation of operators and parameters used in the description of electric and magnetostatic fields.

Key words*: analogy, algebra, bijection, isomorphism, Electrodynamics, Magnetostatics*.

Стаття рекомендована кафедрою фізики
Ніжинського державного університету ім. Миколи Гоголя.

Стаття надійшла до редакції 24.05.2016