

О. А. Коновал¹, А. В. Касперський²¹Криворізький державний педагогічний університет²Національний педагогічний університет імені М.П.Драгоманова

ЗАУВАЖЕННЯ ЩОДО ЗМІСТУ ЗАКОНУ БІО-САВАРА-ЛАПЛАСА ТА ВИВЧЕННЯ ЙОГО В ОРТОДОКСАЛЬНИХ МЕТОДИКАХ

Обговорюються фізичні та методичні аспекти закону Біо-Савара.

Ключові слова: дидактика фізики, фізична реальність, закон, принцип фундаменталізації навчання.

В результаті аналізу, поданому в [4], маємо наступні точки зору щодо статусу закону Біо-Савара-Лапласа:

а) закон Біо-Савара-Лапласа є незалежним і фундаментальним експериментальним законом [2; 7; 8];

б) закон Біо-Савара-Лапласа – це наслідок формули Ампера-Грассмана [3; 10], а формула Ампера-Грассмана є вихідним фундаментально-дослідним положенням магнітостатики [11, с.67; 10, с.269];

в) закон Біо-Савара-Лапласа в принципі не може бути незалежним і дослідно-фундаментальним, оскільки елемент струму idl не може бути реалізованим як самостійна структура [12, с.221], а його використання припускає, перш за все, процедуру обґрунтування. Мабуть вперше на цю обставину щодо статусу цього закону наголос зроблений в посібнику проф. Желеховського А.В. [13];

г) закон Біо-Савара-Лапласа може бути обґрунтованим на основі правдоподібних і суперечливих міркувань [14, с.112-115; 15, с.177-178; 16, с.22; 17, с.235];

д) цей закон розглядається як результат узагальнення дослідних даних [18, с.207; 19, с.193-194; 16, с.22; 17, с.235];

е) закон Біо-Савара в інтегральній формі є наслідком рівнянь Максвелла [20, с.81; 21, с. 89; 22, с.291] і тому не виникає потреби в його обґрунтуванні;

є) закон Біо-Савара розглядається як наслідок виразу для індукції магнітного поля (в нерелятивістському наближенні) \vec{B} , що рухається з $\vec{v} = \text{const}$ та принципу суперпозиції магнітних полів «...у основу вчення про магнітне поле постійних струмів ми поклали не елементарний закон Біо-Савара, як це зазвичай прийнято, а закон, що визначає магнітне поле рухомого заряду» [12, с.221].

Слід також відмітити, що значна кількість авторів посібників та статей на цю тему відмічали суперечливість і непослідовність зазначених точок зору та методик вивчення магнітного поля постійних та квазістационарних струмів.

Причому і відчували їх власний дискомфорт та певна розгубленість при описі та поясненні основ магнітостатики [11; 23; 18; 2; 21; 18; 12; 14; 53; 68; 69; 24; 25; 26], про що свідчить непослідовна та суперечлива аргументація щодо обґрунтування закону Біо-Савара такими численними способами.

І все ж закон Біо-Савара-Лапласа в більшості навчально-методичних виданнях вважається фундаментальним. Основний аргумент, який підкріплює таку точку зору, полягає в тому, що результати розрахунків, виконаних на його основі, підтверджуються в дослідах.

Але виходячи із принципу фундаментальності, навіть співвідношення, яке не встановлене прямим експериментом, і яке є, або може бути наслідком інших принципів, підносити до рангу фундаментального і незалежного!?

Незважаючи на те, що значна більшість авторів посібників з електродинаміки вважають за необхідне обґрунтувати та використовувати (або тільки коментувати) закон Біо-Савара, існують настільки рафіновані та формальні подання класичної електродинаміки, в яких навіть не згадується такий закон [9].

Що ж говорить нам історія фізики щодо відкриття чи формулювання закону Біо-Савара?

Біо (J. Biot) та Савар (F. Savart) в 1820 році, згідно з [28, с.250], експериментально отримали залежність електромагнітної сили, що діє на магнітний полюс магнітної

стрілки з боку металевого провідника зі струмом в залежності від віддалі між цим вертикально розташованим провідником зі струмом та центром магнітної стрілки.

«Якщо провідник із вольтовим струмом, що проходить по ньому, діє на частинку північного або південного магнетизму, що знаходиться у відомому віддаленні від середини провідника, то рівнодіюча всіх сил з провідника направлена перпендикулярно до найкоротшої відстані частинки від дроту, і загальна дія провідника на будь-який південно- або північно-магнітний елементи обернено пропорційно до відстані останнього від дроту» [27, с.422].

Далі, Лаплас ввів поняття елементу струму і запропонував принцип суперпозиції: дію струму на магнітний полюс можна розглядати як результат дії на полюси стрілки дуже великого числа малих елементів, на які можна розділити струм.

І з цього він прийшов до висновку, що елемент струму діє на кожний полюс з силою, пропорційною $1/r^2$.

«Лаплас показав, що закон Біо-Савара може бути введений з допущення, що дія струму складається з дії його окремих елементів» [27, с. 422].

«Звідси Лаплас вивів, що і ці дії, подібно до тяжіння, убувають обернено пропорційно до квадрата відстані» [29, с.193].

Причому як в книзі М.Льощі [28, с.250], так і в книзі П.С.Кудрявцева [27, с.422] зовсім не вказується на яких віддаль від провідника зі струмом знаходилася магнітна стрілка, з допомогою якої визначалася «залежність електромагнітної сили» від цієї віддалі.

Але в книзі Ф.Розенберга [29] ми знаходимо певну вказівку про конкретні умови експериментів Біо.

«Якщо необмеженої довжини дріт із струмом вольта, що проходить по ньому, діє на частинку північного або південного магнетизму, що знаходиться на відомій відстані від середини дроту, то рівнодіюча всіх сил, витікаючих з дроту, направлена перпендикулярно до найкоротшої відстані частинки від дроту, і загальна дія дроту на будь-який – південний або північний – магнітний елемент обернено пропорційно до відстані останнього від дроту» [29, с.193].

І в той же час, як може знаходитися «частинка північного або південного магнетизму... на відомій відстані від середини дроту», якщо цей дріт має необмежену довжину?!

Очевидно, що «дріт із струмом вольта» мав кінцеву довжину. Проаналізуємо «залежність електромагнітної сили» від віддалі точки поля до «дроту із струмом вольта» (рис. 1).

Насправді сила, що діє на магнітний полюс стрілки з боку провідника з постійним струмом (ППС), згідно сучасних уявлень, пропорційна не $1/R$, а

$$\sim \frac{\mu_0 i \cdot l}{4\pi R \sqrt{\frac{l^2}{4} + R^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}}, \quad (1)$$

де l – довжина провідника зі струмом, i – сила струму в провіднику, R – віддалі магнітного полюса від середини провідника, V – швидкість руху носіїв заряду в провіднику зі струмом [4, с.100].

Тобто, реальна залежність сили від віддалі R складніша ніж $1/R$, чи $1/R^2$. Тому викликає подив як Біо та Савар одержали цей закон $1/R$.

Можливо були надто неточні експерименти, або вони вгадали, або ж вибрали саму просту залежність сили від віддалі R (подібну залежності гравітаційної сили взаємодії точкової маси і однорідного стержня довжини l).

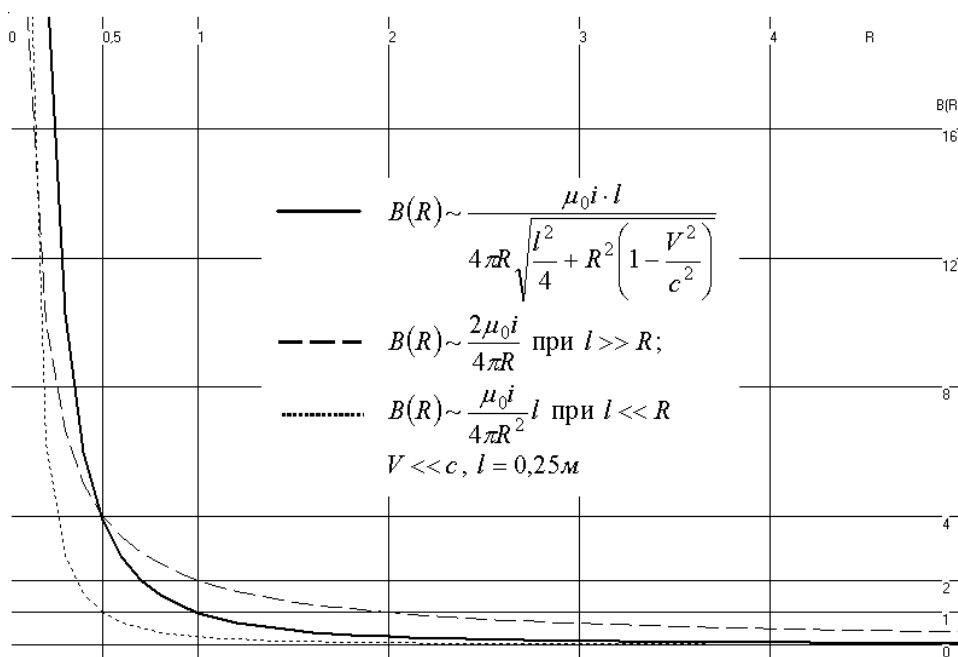


Рис. 1. «Залежність електромагнітної сили», що діє на магнітний полюс стрілки з боку ППС згідно з (1)

Здається очевидним, що в результаті скрупульозно проведених експериментів неможливо одержати залежність $1/R$.

Можливо така загально прийнята низка пояснень в [27; 28; 29] зумовлена емпіричним законом епістемології [1, с.543].

«Можливе пояснення того факту, що фізики використовують математику для формулювання законів природи, полягає в тому, що фізики досить безвідповідальні люди. Саме тому, коли фізик виявляє взаємозв'язок між двома фізичними величинами, який нагадує зв'язок, добре відомий з математики, він негайно приходить до висновку, що знайдений ним зв'язок тотожний зв'язку, розглянутому в математиці, просто тому, що він не знає ніякий інший. Мета приведення міркування полягає зовсім не в тому, щоб спростувати звинувачення фізиків у відомій безвідповідальності. Не виключено, що це звинувачення і справедливе. Проте важливо підкреслити, що математичне формулювання результатів спостережень фізика, часто досить грубих, приводить в неправдоподібно численних випадках до дивно точного опису великого класу явищ» [1, с.541] (виділено нами).

Іншими словами ми можемо серед безлічі фізичних міфів [5] виокремити наступні міфи [4; 6]:

- 1) міф про експериментальний характер закону електромагнітної індукції;
- 2) міф про визначальну роль досліду Майкельсона-Морлі при створенні СТВ А.Ейнштейном;
- 3) міф щодо закону Біо-Савара як «незалежного і фундаментального експериментального закону»;
- 4) міф щодо пояснення явища нагрівання провідників при проходженні струму по них внаслідок непружного зіткнення електронів провідності з іонами кристалічної ґратки.

Як уже відмічалось, в посібниках І.В.Савельєва, Д.В.Сивухіна в основу методики вивчення магнітного поля постійних струмів покладений вираз для магнітного поля повільно рухомої ЗЧ (який обґрунтовується з допомогою деяких правдоподібних міркувань, але які в той же час «не мають доказової сили» [14, с.113]) та принцип суперпозиції [12, 14].

І все ж незважаючи на розуміння того, що закон Біо-Савара

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{i \cdot [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \quad (2)$$

принципово недоступний дослідній перевірці, у переважній більшості сучасних навчально-методичних посібниках та підручниках він тлумачиться як експериментальний закон.

Але аналіз суті цього закону та історичних джерел свідчать про некоректність такого підходу при вивченні та інтерпретації співвідношення (2) [4].

Висновки

1. Наші дослідження показали, що в деяких випадках застосування закону (2) приводить до результатів, що суперечать основним положенням релятивістської електродинаміки [4, с.108-114].

2. Оскільки закон Біо-Савара визначає магнітне поле, що створюється елементом струму, i , припускаючи, що всі заряди, які реалізують елемент струму, рухаються з однаковою швидкістю \vec{v} , ми можемо знайти, користуючись принципом суперпозиції, магнітне поле, що створюється однією ЗЧ, яка рухається зі швидкістю \vec{v} [3] (рис. 2):

$$d\vec{B} = -\frac{\mu_0 q N}{4\pi r^3} \cdot [\vec{v}, \vec{r}] = \vec{B}_1 \cdot N$$

Тоді вираз для індукції магнітного поля, яке створюється рухомою ЗЧ, визначається формулою, який впливає із класичного закону Біо-Савара-Лапласа (2), має вигляд [3]:

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 q}{4\pi r^3} \cdot [\vec{v}, \vec{r}] = \mu_0 \epsilon_0 \left[\vec{v}, \frac{q\vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3} \right] = \mu_0 \epsilon_0 [\vec{v}, \vec{E}], \quad (3)$$

де $\vec{E} = \frac{q\vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3}$ – напруженість електричного поля, що створюється нерухомою ЗЧ у відповідній точці поля.

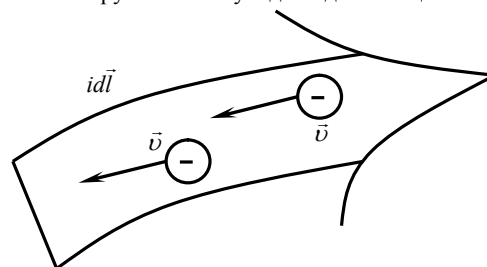


Рис. 2. Елемент струму $id\vec{l}$ реалізується сукупністю рухомих ЗЧ, $id\vec{l} = -q\vec{v}N$

Позитивні методичні моменти такої інтерпретації закону Біо-Савара та викладу теми наступні.

А. Ми можемо відразу стверджувати, що магнітне поле створюється рухомих електричним полем. Якщо швидкість переміщення його в просторі \vec{v} , то

$$\vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 [\vec{v}, \vec{E}]. \quad (4)$$

Тобто, індукція МП, яка визначається законом Біо-Савара-Лапласа і створюється елементом струму в деякій точці простору, **насправді породжується рухомих електричним полем кожної із ЗЧ, що входять до складу елементу струму.**

Б. Формула (4) справедлива також і для ЗЧ, які рухаються з релятивістськими швидкостями. Але для таких швидкостей напруженість електричного поля ЗЧ буде визначатись не співвідношенням $\vec{E} = \frac{q\vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3}$, справедливим

при $v \ll c$ ($\beta \ll 1$), а формулою

$$\vec{E} = \frac{q(1 - \beta^2)\vec{r}}{4\pi \epsilon_0 r^3 (1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{\frac{3}{2}}}$$

Тому і магнітне поле окремої ЗЧ, що рухається рівномірно, повинно описуватися формулою

$$\vec{B}_1 = \frac{\mu_0 q \cdot [\vec{v}, \vec{r}] \cdot (1 - \beta^2)}{4\pi \cdot r^3 (1 - \beta^2 \sin^2 \theta)^{3/2}}, \quad (5)$$

де $\beta = \frac{v}{c}$, θ – кут між вектором швидкості \vec{v} і радіус-вектором \vec{r} , проведеним від миттєвого положення ЗЧ у відповідну точку поля [4].

Тоді, з урахуванням (5) для закону Біо-Савара-Лапласа, як це було показано [4], слід записати у формі

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}] \cdot (1 - \beta^2)}{r^3 \cdot (1 - \beta^2 \cdot \sin^2 \theta)^{3/2}}.$$

Тобто такий підхід щодо інтерпретації закону Біо-Савара дозволив вперше сформулювати закон Біо-Савара в релятивістській формі [4].

В. Формула $\vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 [\vec{v}, \vec{E}]$ справедлива при довільних за величиною швидкостях рівномірного руху будь-якого електричного поля, напруженість якого \vec{A} .

Але в той же час формули $\vec{B} = \varepsilon_0 \mu_0 [\vec{v}, \vec{E}]$ і

$$\vec{E} = \frac{q\vec{r}}{4\pi\varepsilon_0 r^3}$$
 несумісні між собою.

Сумісне застосування їх приводить до висновків, що суперечать принципу відносності.

В той же час у стандартних посібниках та в науково-методичних публікаціях [30] ці дві формули використовуються разом, що є грубою фізичною помилкою.

3. Ми вважаємо, при вивченні та поясненні закону Біо-Савара не варто наголошувати на його експериментальній основі, посилаючись на досліди Біо та Савара, які начебто привели до формулювання (2).

В рамках методичної концепції вивчення електродинаміки, запропонованої нами [4], закон Біо-Савара в релятивістській формі є наслідком закону Кулона та принципу відносності і тому не може вважатися фундаментальним і незалежним.

Список використаних джерел:

1. Вигнер Е. Непостижимая эффективность математики в естественных науках / Е. Вигнер // Успехи физических наук. – 1968. – Т. 94. – Вып. 3. – С. 535–546.
2. Иродов И.Е. Электромагнетизм. Основные законы / И.Е. Иродов. – 4-е изд., испр. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. – 320 с.: ил.
3. Коновал О.А. Основы электродинамики: навч. посіб для студ. вищ. пед. навч. закл. / О.А. Коновал; Міністерство освіти і науки України; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 347 с.: іл.
4. Коновал О.А. Теоретичні та методичні основи вивчення електродинаміки на засадах теорії відносності: монографія / О.А. Коновал; Міністерство освіти і науки України; Криворізький державний педагогічний університет. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2009. – 346 с.: іл.
5. Ланда П.С. Заблуждения и реальность в некоторых задачах физики (теория и эксперимент) / П.С. Ланда, Д.И. Трубецков, В.А. Гусев // Успехи физических наук. – 2009. – Т. 179. – Вып. 3. – С. 255–277.
6. Коновал О.А. Реальность, истина та еквівалентні описи явищ в електродинаміці / О.А. Коновал // Збірник наукових праць Кам'янець-Подільського державного педагогічного університету. – Серія педагогічна: Проблеми дидактики фізики та шкільного підручника фізики в світлі сучасної освітньої парадигми. – Вып. 12. – Кам'янець-Подільський: К-ПДПУ, РВВ, 2006. – С. 117–120.

7. Пеннер Д. И. Электродинамика и теория относительности / Д.И. Пеннер, В.А. Угаров. – М.: Просвещение, 1980. – 271 с.
8. Терлецкий Я.П. Электродинамика: учеб. пособие для студ. физ. спец. ун-тов / Я.П. Терлецкий, Ю.П. Рыбаков. – М.: Высшая шк., 1990. – 352 с.
9. Медведев Б.В. Начала теоретической физики / Б.В. Медведев. – М.: Наука, 1977. – 496 с.
10. Кучерук І.М. Загальний курс фізики: у 3-х т.: навч. посіб. для студ. вищ. тех. і пед. закл. освіти / І.М. Кучерук, І.Т. Горбачук, П.П. Луцик; за ред. І.М. Кучерука. – Т. 2: Електрика і магнетизм. – К.: Техніка, 2001 – 452 с.
11. Матвеев А.Н. Электричество и магнетизм / А.Н. Матвеев. – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
12. Сивухин Д.В. Общий курс физики: у 5-и т. / Д.В. Сивухин. – Т. 3: Электричество. – М.: Наука, 1977. – 688 с.
13. Желеховський А.В. Курс фізики. – Вып. 3: Електрика. – Х.; К.: Держ. наук.-техн. вид-во України; ОНТИ-НКТП, 1934. – 340 с.
14. Савельев И.В. Курс общей физики: у 3-х т. / И.В. Савельев. – Т. 2: Электричество и магнетизм. Волны. Оптика. – М.: Наука, 1978. – 480 с.
15. Калашников С.Г. Электричество / С.Г. Калашников. – М.: Наука, 1964. – 666 с.
16. Федорченко А.М. Теоретическая физика. Классическая электродинамика: учеб. пособие / А.М. Федорченко. – К.: Выща шк., Головное изд-во, 1988. – 280 с.: ил.
17. Федорченко А.М. Теоретична фізика: підручник: у 2 т. / А.М. Федорченко. – Т. 1: Класична механіка і електродинаміка. – К.: Вища шк., 1992. – 535 с.: іл.
18. Тамм И.Е. Основы теории электричества / И.Е. Тамм. – М.: Наука, 1966. – 624 с.
19. Зисман Г.А. Курс общей физики / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – Т. II: Электричество и магнетизм. – М.: Наука, 1972. – 368 с.
20. Левич В.Г. Курс теоретической физики: в 2-х т. / В.Г. Левич. – Т. 1. – М.: Наука, 1969. – 912 с.
21. Мултановский В.В. Курс теоретической физики / В.В. Мултановский, А.С. Василевский. – М.: Просвещение, 1990. – 272 с.
22. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике: у 9 т. / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – Т. 5: Электричество и магнетизм. – М.: Мир, 1966. – 290 с.
23. Парселл Э. Электричество и магнетизм: учебное руководство: пер. с англ. / Э. Парселл; под ред. А.И. Шальникова и А.О. Вайсенберга. – 3-е изд., испр. – М.: Наука, 1983. – 416 с. – (Берклиевский курс физики).
24. Менумеров Р.М. К вопросу о взаимодействии элементов электрического тока / Р.М. Менумеров // Теория та методика навчання математики, фізики, інформатики: зб. наук. пр. – Вып. VI: у 3-х томах. – Т. 2: Теория та методика навчання фізики. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НМетАУ, 2006. – С. 263–267.
25. Сигалов Р.Г. Новые исследования движущих сил магнитного поля / Р.Г. Сигалов. – Ташкент: Фан, 1975. – 230 с.
26. Каменецкий С.Е. Электродинамика в курсе физики средней школы: пособие для учителей / С.Е. Каменецкий, И.Г. Пустыльник. – М.: Просвещение, 1978. – 127 с.
27. Кудрявцев П.С. История физики: у 2-х т. / П.С. Кудрявцев. – Т. 1. – М.: Гос. учеб.-педагог. изд-во Минпрос РСФСР, 1956. – 563 с.
28. Льюцци Марио. История физики / Марио Льюцци. – М.: Мир, 1970. – 463 с.
29. Розенбергер Ф. История физики / Ф. Розенбергер. – Ч. 3. – Вып. 1. – М.: Объединенное научно-техн. изд-во НКТП СССР, 1935. – 301 с.
30. Вознюк С.Ю. Формування поняття «електромагнітне поле» на основі фундаментальних фізичних понять / С.Ю. Вознюк, В.І. Кульчицький // Фізика та астрономія в школі. – 1999. – № 4. – С. 43–47.

The physical and methodical aspects of law of Biot-Savart are discussed.

Key words: didactics of physics, physical reality, law, principle of fundamentalizacii of studies.

Отримано: 11.08.2009