
Богдан БУДНИЙ (ЗМІСТ)

Віктор КУЛЬЧИЦЬКИЙ

Іван КОЗУБ

Поняття поля в класичній та квантовій електродинаміці

Для з'ясування фізичного змісту фундаментальних понять, виявлення їх універсальних функцій у побудові різних фізичних теорій, необхідно дослідити становлення сучасних фізичних теорій за оригінальними роботами їх творців. Виклад цих теорій у навчальних посібниках дає прямий шлях їх розвитку і створює хибне уявлення про кумулятивний розвиток науки, а це, в свою чергу, веде до аналогічного трактування розвитку понять у методичі.

Вихід, на наш погляд, можна знайти, відшукавши такі навчальні конструкти, застосування яких при розгляді конкретних явищ, розв'язанні задач буде “висвітлювати” суттєві грані фізичних ситуацій і цим сприятиме їх адекватному баченню. Друга їх властивість випливає зі специфіки предмету фізики та врахування психології засвоєння знань — вони повинні відображати основні властивості природи та бути близькими до повсякденних уявлень. Цим критеріям, на наш погляд, відповідають фундаментальні фізичні поняття.

У педагогічній літературі, розвиток понять, розглядається як додавання нових ознак до сформованих раніше понять. У рамках однієї фізичної теорії такий підхід не викликає принципових заперечень (він відповідає кумулятивному накопиченню знань у рамках існуючої парадигми). Але спроба формувати в такий спосіб наскрізні поняття (енергія, поле, випромінювання і т.д.) веде до труднощів принципового характеру. Адже в науці при зміні парадигми кардинально змінюється зміст як окремих понять, так і всієї понятійної сітки.

Проаналізуємо розвиток поняття поля, який відбувається при переході від електродинаміки Максвелла до квантової електродинаміки.

У класичній фізиці поле і речовина – різні в онтологічному плані фізичні об'єкти. Вважається, що поняття поля виводиться із ідеї про силу. Принциповим є лише те, що підхід на основі поняття поля дозволяє вважати “електромагнітну силу” близько діючою, як і прийнято в запропонованій Максвеллом теорії електромагнетизму – класичній електродинаміці. Разом із тим, логічно послідовну інтерпретацію (тобто фізичний зміст) поняття поля не вдалося встановити, залишаючись у межах уявлення про трьохвимірний простір, як це робилось в ньютонівській механіці. Адже якщо зміну електромагнітного поля розглядати як подію в трьохвимірному просторі, то її зміст буде залежати від вибору системи відліку, в якій вона фіксується. “Можна, – як відзначає Х.Юкава, – зберігаючи трьохвимірність, намагатися надати події об'єктивний зміст, вводячи абсолютну систему відліку, але для цього необхідний ефір, проблематичність існування якого надає трьохвимірному простору внутрішню невизначеність. Тому в теорії розглядають не трьохвимірний простір, а чотирьохвимірний простір – час, який має структуру, запропоновану Мінковським” [5, 11].

У спеціальній теорії відносності Ейнштейна простір-час має незмінну структуру (метрика Мінковського), а фізичні закони інваріантні відносно перетворень Лоренца. Виходячи із цих припущень легко будується класична електродинаміка Максвелла. Релятивістська теорія поля як самостійна концептуальна система, розвиває той аспект теорії електромагнітного поля Максвелла, який сам творець класичної електродинаміки називає “динамічним”. “Теорія, яку я пропоную, – пише Максвелл, – може бути названа теорією електромагнітного поля, тому що вона має справу з простором, який оточує електричні і магнітні тіла, і вона може бути названа також динамічною теорією, оскільки вона припускає, що в цьому просторі є матерія, яка знаходиться в русі, з допомогою якої і відбуваються спостережувані електромагнітні явища” [2, 253].

Отже, релятивістська теорія поля є логічно послідовним варіантом динамічної теорії електромагнетизму. З точки зору релятивістської теорії поле задається в кожній просторово-часовій точці, тобто розглядається як локальна подія (наприклад, зміна напруженості електромагнітного поля як силового поля). Значення таким чином заданого поля зв'язані відповідним законом: поле може задовольняти або рівняння Максвелла, або рівняння гравітаційного поля Ейнштейна.

Безпосередній зв'язок класичної і релятивістської концепції поля виявляється в тому

факті, що мислити про поле релятивістське в повній ізоляції від класичних уявлень про нього неможливо. Так, повністю відкидати уявлення про ефір як фіктивну сутність було б неправильно. Поняття ефіру в теорії відносності не вводиться. Але його відсутність не потрібно розуміти в тому смислі, що електромагнітна хвиля проходить через місця, в яких взагалі нічого немає. Теорія відносності заперечує лише роль, яка відводилась ефіру в класичних теоретичних побудовах (роль абсолютної системи відліку) і самі моделі (нерухома і пронизуюча весь простір субстанція, яка нагадує звичайне суцільне середовище, в порівнянні з яким вона дуже розріджена і ніякі її частини не рухаються одна відносно одної). Вільні ж від речовини області простору СТВ розглядає як фізичні поля. Таке уявлення про простір не було принципово новим, оскільки уже в концепції Фарадея-Максвелла використовувались уявлення про простір як область дії електричних і магнітних сил. Принципово новим у релятивістській концепції поля було лише те, що поняття поля тут виводиться із ідеї про локалізовану подію і “польовий” (близькодійчий) характер відношень між ними, які виражаються на мові чотирьохвимірного псевдоевклідового многовиду. Поняття поля в теорії відносності є “чотирьохвимірним”.

Разом із тим, релятивістська стратегія розвитку теорії поля істотно обмежує розкриття нових евристично-конструктивних аспектів ідеї поля в квантовій фізиці.

Дослідження Л.Д.Ландау і його учнів основ квантової електродинаміки як польової теорії показали, що є дві методологічні можливості трактування квантової електродинаміки — “теоретична” і “прагматична” [1, 242]. Теоретична полягає в тому, що потрібно розглянути рівняння квантової електродинаміки і для випадку самого електрона як “згустка” поля. В цьому випадку рівняння квантової електродинаміки треба розв’язувати методом граничного переходу, коли радіус електрона прямує до нуля. Розв’язуючи їх таким чином отримують тривіальний розв’язок – рівність заряду електрона нулю (нуль-заряд). Мова йде про такий розв’язок рівнянь, який означає відсутність всякої взаємодії, відсутність усіх процесів. Отже, в теоретичному плані квантова електродинаміка обмежена не ззовні (зі сторони фактів, що суперечать цій теорії), а з внутрішньої сторони.

Прагматичне трактування квантової електродинаміки полягає в тому, що вона розглядається як феноменологічна теорія, істинність якої обмежується сферою малих відстаней. Оскільки побудова квантової електродинаміки як послідовної польової теорії приводить до самовиключення взаємодії (перетворення заряду в нуль), то появились спроби взагалі звільнитися від поняття поля в теорії мікросвіту.

З розвитком квантової електродинаміки стали швидко появлятися концептуально-математичні проблеми. В квантовій механіці, як відомо, мова йшла про сили, які діють на частинки речовини, які знаходяться в ізольованих точках простору. Теорія електромагнетизму претендує на опис неперервних розподілів сили в формі електричних і магнітних полів. Складалась думка, що ідея поля логічно несумісна з принципами квантової теорії. Л.Д.Ландау і Р.Пайерлс навіть висловили припущення про те, що ряд питань, зв’язаних із квантуванням електричних і магнітних полів, свідчить про беззмістовність поняття “електромагнітне поле” стосовно до описання квантових процесів [4, 74]. Проаналізувавши цей висновок, Н.Бор разом із Л.Розенфельдом показали принципову можливість узгодження концептуальних засобів польового і квантового опису фізичної реальності. Виявилось, що засоби польового опису можуть отримувати природний зміст, який не суперечить принципам квантового опису. При цьому були виділені два відносно самостійні питання квантового узагальнення поняття поля: перше полягає в з’ясуванні квантового характеру структури “чистого” (вільного) поля-випромінювання; друге – в урахуванні квантової структури взаємодіючих полів.

Розвиток традиційної релятивістськи-оперативної схеми КТП для опису електромагнітної взаємодії ще не вимагав методології доповняльності в широкому її смислі. Як відзначають А.Ахієзер і В.Берестецький: “Незбереження числа частинок підказує метод опису взаємодії між частинками: ясно, що зручніше користуватися поняттями квантованих полів – електромагнітного і електронно-позитронного. Це означає, що 4-потенціал електромагнітного поля і хвильову функцію електрона потрібно вважати не тільки функціями координат і часу, але деякими операторами, які діють в просторі векторів станів системи взаємодіючих полів” [1, 197].

Для реалізації такого підходу потрібно було: по-перше, реконструювати поля, зв’язані з частинками, тобто задати тип поля (число компонент поля і характер їх поведінки при

перетвореннях Лоренца); по-друге, сконструювати лагранжіан. Ця процедура відповідає розгляду поля як узагальненої динамічної системи. Значення поля Φ у даній просторовій точці X є узагальненими координатами системи. Лагранжіан L повинен містити похідні від узагальнених координат по часу. Відповідно до вимог релятивістської інваріантності в нього ввійдуть, по-перше, похідні по просторових координатах, а по-друге, член, який містить взаємодію. Цей член виражається через різницю узагальнених координат поля в сусідніх точках, так що взаємодіють сусідні (нескінченно близькі) в просторі ступені свободи. Це відповідає принципу близькодії, характерному для теорії поля. Отже, опис взаємодії між частинками в квантовій електродинаміці природним чином зв'язується з поняттям квантованого поля, здатністю операторної хвильової функції виступати в якості оператора “народження” і “поглинання” частинок, тобто розглядати взаємодію як випускання і поглинання фотонів.

Як уже відзначалось, квантова електродинаміка оперує тільки такими полями взаємодіями, до яких застосовна теорема про нуль-заряд. Побудувати ж поля і взаємодії, до яких вона була б незастосовна і які мають нетривіальні (не нуль-зарядні) розв'язки за типом частинок, які спостерігаються в досліді, не вдалося. Крім того, з розвитком теорії сильної взаємодії (КХД) стало очевидно, що зв'язок між полями і частинками не настільки безпосередній і реконструювати поля, зв'язані з частинками, виходячи із інтуїтивних уявлень, вже не можна.

Ідея калібрувального поля як компенсуючого виявилась найбільш важливою в цьому плані. Її математичні джерела і перші фізичні інтерпретації виходять з вейлевської концептуально-математичної спроби розвинути загальну теорію відносності шляхом ускладнення умови інваріантності. Підхід Г.Вейля сприяв встановленню нового уявлення в тому, що математичний опис законів фізичних полів повинен задовільняти принцип інваріантності (“відносності”), якому підпорядковуються довільні перетворення масштабів вимірювальних приладів.

Формальна сторона питання про калібрувальну інваріантність полягає в наступному. Рівняння квантової механіки, в яких стан системи описується хвильовою функцією (яка має комплексну частину), залежать не тільки від просторо-часових координат, але і від “координат,” зв'язаних з властивостями самих частинок (наприклад, значень спіну). Якщо рівняння квантової механіки залишаються незмінними при множенні хвильової функції на довільний постійний множник $e^{i\alpha}$, який не залежить від просторово-часових координат точки, то кажуть, що рівняння володіють асиметрією відносно глобального фазового (калібрувального) перетворення. На відміну від глобальних, локальні калібрувальні перетворення (множення хвильової функції на множник $e^{i\alpha(\vec{r},t)}$, який залежить від просторово-часових координат точки) приводять до зміни виду рівнянь квантової механіки: в них появляються додаткові члени від диференціювання фазового множника по \vec{r} і t . Але в цьому випадку вид рівнянь можна зберегти шляхом математичної процедури введення додаткових доданків, які компенсують (нейтралізують) ті доданки, які повишлись в результаті диференціювання фазового множника по \vec{r} і t , тобто при локальних калібрувальних перетвореннях.

Подальші фізико-теоретичні дослідження показали, що подібна формальна операція дозволяє розкрити нові “квантові” евристичні можливості ідеї поля.

Відомо, що квантовій концепції електромагнітного поля властиві два аспекти:

перший — маса кванта електромагнітної дії — фотона дорівнює нулю; другий —

векторний потенціал A_μ , який входить у вираз взаємодії, має чотири компоненти, в той час, як фотон має тільки дві поляризації. Це приводило до логічних труднощів. Вказані вище аспекти квантової електродинаміки є наслідком наявності в її лагранжіані додаткової симетрії, яка не вкладається в уявлення про цю теорію, як тільки релятивістсько-інваріантну. Разом з тим саме безмасовість фотона і його нейтральність забезпечували перенормовуваність квантової електродинаміки.

В квантовій теорії поля показується, що електромагнітне поле появляється природним чином як наслідок вимоги інваріантності дії відносно калібрувального перетворення другого роду, тобто відносно локальних (залежних від x) обертів у внутрішньому просторі

комплексного поля φ [3]. Тензор $F_{\mu\nu}$ електромагнітного поля визначається рівністю

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu \quad (1)$$

він має шість компонент, три з яких компоненти електричного, а інші три — компоненти магнітного поля. Калібрувальний потенціал A_μ зв'язаний із струмом I_μ , причому константа зв'язку e є заряд поля φ . Щоб розібратися в цих результатах більш детально, розділимо їх на наступні чотири пункти.

Порівнюючи лагранжіани,

$$L_{\text{повн.}} = (\partial_\mu \varphi + ie A_\mu \varphi)(\partial^\mu \varphi^* - ie A^\mu \varphi^*) - m^2 \varphi^* \varphi - 1/4 F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} \quad (2)$$

$$iL = (\partial_\mu \varphi)(\partial^\mu \varphi^*) - m^2 \varphi^* \varphi, \quad (3)$$

які описують інваріантні дії відносно калібрувальних перетворень другого роду і калібрувальних перетворень першого роду (глобальних калібрувальних перетворень) відповідно, ми бачимо, що величини $\partial_\mu \varphi$ перетворюються коваріантно при калібрувальних перетвореннях, тобто так само, як і самі поля φ . Правило, згідно якого при наявності електромагнітного поля похідні ∂_μ замінюються величинами $\partial_\mu + ie A_\mu$, еквівалентне результату, добре відомому із класичної фізики. Оскільки при $c=1$ $\partial_\mu = (\partial_0, \nabla)$, $A_\mu = (\varphi, -\vec{A})$, то “просторова” частина правила підстановки має вид: $\nabla \rightarrow \nabla - ie\vec{A}$. Поклавши $\vec{p} = -i\hbar\nabla$, при $\hbar = 1$ маємо:

$$\vec{p} \rightarrow \vec{p} - e\vec{A}. \quad (4)$$

Якщо узагальнений імпульс \vec{P} визначається як $\partial L / \partial \vec{v}$, де L – лагранжіан, то при наявності електромагнітного поля в випадку частинки із зарядом e , він записується у вигляді

$$\vec{P} = \vec{p} + e\vec{A} = \gamma m \vec{v} + e\vec{A}. \quad (5)$$

Тоді гамільтоніан частинки із зарядом e , яка взаємодіє з електромагнітним полем, дорівнюватиме

$$H = \frac{1}{2m} (\vec{P} - e\vec{A})^2 + e\varphi, \quad (6)$$

що відповідає підстановці (4).

Отже, функція φ описує поле з зарядом e , а функція φ^* – поле з зарядом $-e$.

2. Рівняння Максвелла випливають з виразу (2) при варіаціях векторного потенціалу A_μ . Калібрувальні перетворення другого роду

$$A_\mu \rightarrow A_\mu + \frac{1}{e} \partial_\mu \mathcal{L}, \quad (7)$$

де \mathcal{L} – постійна при $\mathcal{L} = e\chi$ співпадає з перетворенням $A^\mu \rightarrow A^\mu + \partial^\mu \chi$, де χ – довільна скалярна функція. Отже, ми приходимо до нової інтерпретації електромагнітного поля: це калібрувальне поле, яке необхідно ввести, щоб гарантувати інваріантність відносно локальних $U(1)$ – калібрувальних перетворень. ($U(1)$ – група всіх комплексних чисел виду $e^{i\alpha} = \cos \alpha + i \sin \alpha$).

3. Калібрувальна інваріантність вимагає, щоб калібрувальне поле було безмасовим, оскільки масовий член в лагранжіані мав би вигляд $L_m = M^2 A_\mu A^\mu$, а він не інваріантний відносно калібрувальних перетворень (7). В звичайному підході та обставина, що електромагнітне поле не має маси і тому розповсюджується із швидкістю світла, випливає із теорії відносності.

4. Заряд e виступає як константа зв'язку, яка входить в означення коваріантної похідної.

Справді, із лагранжіана (2) видно, що інтенсивність взаємодії поля φ з електромагнітним полем характеризується множителем e .

Це проясняє подвійну роль електричного заряду. З одного боку, заряд e величина, що зберігається. З другого боку, заряд – це міра інтенсивності, з якою частинка взаємодіє з електричним і магнітним полями. Цей динамічний аспект заряду є наслідком “калібрувального принципу”, який відіграє важливу роль у фізиці частинок.

Отже, електромагнітне поле постає як калібрувальне поле, яке виникає в теорії завдяки його відновлюючій дії по відношенню до локальних калібрувальних перетворень. Цей тип інваріантності в математичному відношенні описується абельовою калібрувальною групою,

тому відповідні їй калібрувальні поля називають ще абельовими.

Але інтерпретація електромагнітного поля як калібрувального ще не привела до появи квантово-калібрувальної програми узагальнення польової фізики. Тим більше, для електродинаміки такий спосіб введення електромагнітного поля нічого істотно нового не давав. Наступний крок в узагальненні калібрувальної інваріантності був зроблений Ч. Янгом і Дж. Міллсом, які застосували принцип локальної калібрувальної інваріантності на довільні внутрішні симетрії, які характеризують властивості елементарних частинок. Для цієї мети вони зробили узагальнення формальної структури КТП, ввівши замість абельової калібрувальної групи неабельову калібрувальну групу.

Характерна особливість цього типу калібрувальних полів (полів Янга-Міллса) полягає в тому, що вони містять самоспряжені компоненти. На відміну від електромагнітного поля, яке взаємодіє тільки з зарядженими сторонніми частинками, різні компоненти поля Янга-Міллса взаємодіють один з одним, тобто навіть при відсутності сторонніх взаємодій поле Янга-Міллса містить заряджені компоненти, а лагранжіан вільного не абельового поля має здатність до самодії. Саме завдяки калібрувальним полям цього типу стало можливим здійснити теоретичне описання слабкої і сильної взаємодії на єдиній концептуальній основі. Пізніше виявилось, що самодіючий характер полів Янга-Міллса і гравітаційна основа для побудови КТП для єдиних теорій, подібних теорії супергравітації.

Сучасний розвиток калібрувальних концептуальних моделей КТП показав, що найбільш важливий аспект польового описання динаміки елементарних частинок зв'язаний з представлення їх як частинок, аналогічних "світловим квантам". Концептуальною репрезентацією цих частинок в КТП є уявлення про калібрувальні поля. Ці поля описуються статистикою Бозе-Ейнштейна. Оскільки ця статистика носить квантовий характер, то відповідні квантовані поля називають бозонними. Ферміонно-квантово-польова репрезентація елементарних складових речовини (атомної, ядерної і адронної) підпорядковуються статистиці Фермі-Дірака, а також принципу заборони Паулі. В цих теоріях поля відіграють пасивну роль. Тут вона зводиться до перетворення їх одне в одного при дії на них калібрувальних полів.

Отже, в сучасних КТП всім елементарним взаємодіям частинок відповідають бозонні поля. При "вимкненні" цих полів рівняння руху для ферміонних полів, які описують поведінку елементарних складових речовин, перетворюються у вільні, тобто взаємодія між частинками відсутня. В зв'язку з цим фізики вважають, що фундаментальна різниця між бозонами і ферміонами є відображення наявності в мікросвіті двох різних форм існування матерії, і в рамках теорії суперсиметрії намагаються розглядати бозони і ферміони як різні стани одного і того ж об'єкта – "суперчастинки". Процес переходу бозонів у ферміони і навпаки настає як процес зміни стану цього об'єкта. Суперсиметрія дозволяє покінути з розділенням фізичної реальності на речовину і взаємодію. Дійсно в теорії супергравітації концепції "взаємодія" і "речовина" можна розглядати як два доповнюючих один одного способи описання фізичної реальності, а концепцію суперсиметрії – як подальший розвиток принципу доповняльності Бора.

У зв'язку з цим звертає на себе увагу висунення на перший план в нових фізичних теоріях таких їх формоутворень, які асоційовані з узагальненнями поняття симетрії. Ці поняття зустрічаються практично в кожній роботі, присвяченій проблемам фізики високих енергій і космології, і служать основою для отримання не тривіального і доступного експериментальній перевірці знання про фізичну реальність. Завдяки цьому вони відносяться до особливого класу наукових абстракцій, які успішно проходять випробування практикою і дозволяють глибше і повніше відображати природу.

Отже, усвідомлення важливої ролі калібрувального підходу в фізиці для розвитку фізичної теорії наділяє його універсальним і методологічним статусом.

В класичній фізиці, як відомо, самодія не відігравала особливої ролі. Поняття поля в ній вводилося із ідеї про силу (концепція силового поля); в квантовій фізиці "докалібрувальної епохи" поняття поля зв'язується з ідеєю взаємоперетворення мікрооб'єктів, які існують в мікросвіті, а також ідеєю "субстанціональності" (уявлення про фотон як елементарну частинку). В "калібрувальній" фізиці поняття поля виражає насамперед ідею самодіючої матерії, і отже, квантово-калібрувальна концепція поля постає як результат синтезу ідеї сили і квантової "субстанціональності".

Проведений нами аналіз класичної і квантової електродинаміки дозволяє обґрунтувати взаємозв'язки цих теорій через фундаментальні фізичні поняття та розробити методику вивчення електромагнітного поля на основі принципів симетрії (калібрувальної інваріантності), відносності та невизначеності.

ЛІТЕРАТУРА

1. Берестецкий В.Б. Проблемы физики элементарных частиц. – М.: Наука, 1979, – 409с.
2. Максвелл Д.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. – М.: Гостехиздат, 1954. – 688с.
3. Райдер Л. Квантовая теория поля. – М.: Мир, 1987. – 512 с.
4. Розенфельд Л. Развитие принципа дополнительности// Нильс Бор. Жизнь и творчество. – М.: Наука, 1967. – С.62-87
5. Юкава Х. Лекции по физике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 126с.