

УДК 53(07)

О. С. Кузьменко, В. Г. Борота
Кіровоградська льотна академія
Національного авіаційного університету

ВИВЧЕННЯ СТУДЕНТАМИ ДИНАМІЧНИХ СИМЕТРІЙ У ПРОЦЕСІ НАВЧАННЯ ЗАГАЛЬНОГО КУРСУ ФІЗИКИ У ВИЩИХ НАВЧАЛЬНИХ ЗАКЛАДАХ

У статті аналізується та розглядається поняття симетрії, яке покладено в основу сучасних фізичних теорій. Відзначимо, що теорія великого об'єднання, заснована на принципах симетрії, знаходиться у стадії розробки. Роль принципів інваріантності у фізиці ще не вичерпана, і ми далекі від універсального закону природи. Симетрія виявляє взаємозв'язок фізичних законів, спрощує розуміння складних процесів, що протікають у мікросвіті та розглядаються в фізиці. У статті розкрито різні види динамічних симетрій, таких, як калібрувальна інваріантність, симетрія однакових частинок, дзеркальна та унітарна симетрія, а також звернуто увагу на поняття дивності елементарних частинок, на які розповсюджено принцип ізотопічної інваріантності.

Ключові слова: симетрія, загальна фізика, закони збереження, інваріантність, унітарна симетрія, дзеркальна симетрія, симетрія оборотності, античастинка, парність, дивність.

Постановка проблеми. Актуальним завданням сучасної дидактики фізики як педагогічної науки, є пошук шляхів і засобів, які мають бути ефективними для практичного використання під час вивчення теоретичних досліджень.

Слід відзначити, що одним із напрямів реформування фізичної освіти у вищих навчальних закладах є посилення її методологічної спрямованості. Рівень сформованості знань з фізики у студентів визначається засвоєнням фундаментальних фізичних понять (наприклад, симетрія), законів, теорій та принципів.

Актуальними питаннями на сучасному етапі розвитку фізичної освіти є теорія симетрії, заснована на об'єднанні фундаментальних взаємодій. На нашу думку варто сформулювати у студентів під час навчання загального курсу фізики у ВНЗ цілісне уявлення про дану науку, відповідно, на основі вивчення фундаментальних понять, одним з яких є симетрія.

Аналіз актуальних дисліджен. Поняття симетрії розглядалося в роботах В. С. Готта, Ф. М. Землянського; світоглядні питання в контексті теорії симетрії досліджені Р. М. Ганієвим [5]; проблемі симетрії у фізиці присвячені роботи Дж. Еліота, П. Добера [7]; Дж. Бірман [3] розглядав просторову симетрію та оптичні властивості твердих тіл; Г. Л. Бір та Г. Е. Пікус висвітлили в монографії [2] симетрію в деформаційних ефектах у напівпровідниках; Е. Вігнер відзначав у своїх роботах найважливіші проблеми філософського і природничо-наукового характеру, пов'язані з симетрією [4]; М. І. Садовий [13] розглядав симетрії елементарних частинок та Н. В. Подопрігора проаналізувала симетрію у фізиці твердого тіла [12] та ін.

Метою статті є розгляд поняття симетрії у процесі навчання загального курсу фізики та ознайомлення студентів із різновидами динамічної симетрії.

Виклад матеріалу. Вивчення поняття симетрії, а також інваріантності, відіграє важливу роль у процесі навчання загального курсу фізики у ВНЗ. Звернемо увагу студентів на те, що в усіх процесах, що відбуваються в природі, алгебраїчна сума електричних зарядів ізольованої системи не змінюється. Закон збереження електричного заряду в електродинаміці одержується з калібрувальної інваріантності електромагнітного поля. У свою чергу, *калібрувальна інваріантність* – це симетрія фізичної системи, що відображає симетрію електромагнітних взаємодій.

У квантовій механіці збереження заряду одержується з симетрії хвильової функції системи, що описує її фізичний стан, при зміні її квантово-механічної фази [11].

У мікросвіті розглядається принцип тотожності однакових частинок, що має назву *симетрії однакових частинок*. Перестановка будь-якої пари однакових частинок системи не змінює фізичного стану цієї системи, тобто така система інваріантна відносно перестановок. Звернемо увагу на те, що таке перетворення фізичної системи є дискретним перетворенням.

Симетрія цього типу визначає закон збереження, що використовується в квантовій теорії, наприклад, принцип Паулі є важливим принципом для вивчення сучасної фізики. Однакові частинки класичної фізики відрізняються координатами та імпульсами, а в квантовій фізиці ці частинки, мають однакові маси, заряди, магнітні моменти та спіни, що втрачають свою індивідуальність.

Розглянемо *симетрію зарядового спряження* – симетрія законів природи відносно частинок і античастинок, передусім відносно заміни знаку електричного заряду. Усі частинки в природі існують парами, частинці з додатним (від'ємним) зарядом відповідає античастинка з від'ємним (додатним) зарядом, магнітним моментом протилежного знаку. Частинки та античастинки мають тотожні значення маси, спіну, часу життя тощо. Така симетрія притаманна й нейтральним частинкам.

Першою відкритою античастинкою був позитрон, який розглядався П. Діраком унаслідок аналізу релятивістського квантово-механічного рівняння для вільного електрона [1]. Згідно з цим рівнянням, вільний релятивістський електрон має таке значення енергії, що розраховується за формулою:

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \quad (1)$$

Кожному значенню імпульса відповідає двічі вироджене значення енергії $E = +\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$ та двічі вироджене від'ємне значення енергії $E = -\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}$. Таке виродження розглядають як незалежність енергії

вільного електрона від орієнтації його спіна. Визначення знаку енергії спочатку було незрозумілим, тому наприклад, Е. Шредінгер та інші вчені намагалися позбутися станів із від'ємним значенням енергії. І. Є. Тамм відмітив, що без станів із від'ємною енергією теорія Дірака не може пояснити багатьох явищ, наприклад, аномальний ефект Зеємана, розсіяння γ -променів, гальмівне випромінювання електронів тощо.

Для пояснення такої ситуації Дірак висловив припущення, що: 1) стани електронів з від'ємним значенням енергії зайняті електронами, але їх спостерігати неможливо; 2) якщо електрон підняти з рівня від'ємних енергій на рівень з додатною енергією, то у фоні від'ємних станів звільниться місце, яке називається «*діркою*», яка веде себе як позитивно заряджена частинка. Для появи дірки і електрона потрібна енергія $E = 2m_e c^2$.

У 1932 р. Андерсен відкрив позитрон. Це відкриття підтвердило теорію Дірака. Розвиток фізики показав, що уявлення про електрони як про частинки і про позитрони як «*дірки*» має умовний зміст. Це одна з моделей процесу народження пари електрон-позитрон і модель їх анігіляції.

Відкриття частинок і античастинок, таких, як мюони, піони, нейтрино, баріони тощо підтвердило твердження Дірака про те, що «...вірогідне існування від'ємних протонів, бо оскільки ми ще можемо спиратися на теоретичні висновки, між додатними й від'ємними електричними зарядами є повна симетрія, і якщо ця симетрія має фундаментальний характер, то повинна бути можливою заміна знаку заряду будь-якого сорту частинок» [6, 74].

За допомогою потужних прискорювачів одержано античастинки для всіх частинок, включаючи й гіперони. Принцип зарядового спряження допускає існування стійких систем античастинок.

«Відкриття ядер антигелію має принципове значення, оскільки воно підтверджує теоретичні концепції існування антиречовини. Наявність антиречовини має важливе значення для розуміння процесів, що відбуваються у Всесвіті, і ходу його еволюції. Крім того, властивості частинок і античастинок пов'язані з певною симетрією простору і часу. Досліджуючи відносні властивості частинок і античастинок, можна отримати фундаментальні відомості про характер просторово-часової взаємодії частинок» [9].

Дзеркальна симетрія – це симетрія відносно операції просторового відбивання, симетрія фізичних систем при дискретному перетворенні координат:

$$x \rightarrow -x; y \rightarrow -y; z \rightarrow -z \quad (2)$$

Інверсія, тобто заміна знаку всіх координат, залишає інваріантною функцію Гамільтона замкненої системи чи системи в центрально-симетричному полі. У класичній фізиці ця симетрія не дає нового закону збереження. У квантовій механіці вона дає закон збереження просторової парності, що полягає в наступному: коли в певний момент часу просторова

парність системи мала певне значення, то вона зберігається й у подальшому. Парність системи є інтегралом руху і не змінюється з часом.

Просторову інверсію координат можна розглядати як дзеркальне відбивання, бо інверсія координат є переходом від правої системи до лівої чи навпаки. Значить, у природі лівий і правий напрями еквівалентні, симетричні та рівноправні.

Симетрія оборотності часу полягає в тому, що в рівняннях, які описують дану систему, зміна знаку часу на протилежний не призводить до зміни фізичного стану системи. Отже, за поведінкою системи не можна встановити напрям протікання часу. Унаслідок протікання часу лише в одному напрямку і процеси природи мають певну орієнтацію. Але закони природи допускають зворотне протікання процесів. Виконуючи перетворення $t \rightarrow -t$ звернемо увагу на те, що одночасово змінюється знак швидкостей частинок, а тому їх рух відбувається в зворотному напрямі, від кінцевого до початкового стану, але через ті самі проміжні стани, що й унаслідок прямого руху.

Оборотність існує лише тоді, коли в системі не відбувається дисипація енергії (відсутнє тертя, опір середовища, поглинання світла, електричний опір тощо). За цих умов ми не можемо встановити напрям протікання часу. Коли ж ці умови не виконуються, то оборотність процесів порушується. Тому інколи говорять, що напрям протікання часу обумовлений дисипацією енергії.

На перший погляд здається, що *T*-симетрія не має фізичного змісту, бо час тече лише в одному напрямі. Але, хоч інваріантність відносно відбивання часу не призводить до певного закону збереження, вона призводить до певних правил відбору, що дозволить процеси певного типу. Ці правила притаманні для елементарних процесів, які є оборотними, тобто симетричними відносно операції $t \rightarrow -t$.

Комбінована парність (CP-симетрія). У 1956 р. Лі та Янг показали, що всі досліди, що проводилися зі слабкими взаємодіями, не могли підтвердити чи спростувати збереження просторової парності. У 1957 р. Ву зі співробітниками вивчила кутовий розподіл електронів, що одержуються у процесі β -розпаду поляризованих ядер, і встановила, що слабкі взаємодії порушують закони збереження парності [8].

Порушення *P*-парності означає асиметрію простору відносно правого і лівого напрямів під дією слабких сил. Простір стає неначе закрученим, оскільки при дзеркальному відбиванні не переходить сам в себе. Цей дивний ефект суперечить ізотропності та однорідності простору, коли в ньому діють слабкі сили.

Для відновлення право-лівої симетрії простору Л. Д. Ландау [10] і незалежно Лі і Янг [11] висунули ідею комбінованої парності.

Симетрія лівого і правого внаслідок слабких взаємодій спостерігається тоді, коли лівий напрям можемо замінити на правий (і навпаки), а частинки на античастинки. Таким чином, замість двох принципів симетрії довелось ввести новий – *принцип комбінованої парності*.

Гіпотеза комбінованої парності відновила в розширеній формі симетрію, яка була спростована дослідями. Закон збереження *CP*-парності можна перевірити експериментально. Для цього використовують *CPT*-теорему (Людерса-Паулі), згідно якої добуток трьох симетрій є інваріантним перетворенням у всіх взаємодіях. Тоді при виконанні *CP*-симетрії виконується і *T*-симетрія. Перші дослідження вказали на *T*-інваріантність та підтвердили *CP*-симетрію. Пізніше були відкриті процеси, де порушується *T*-, *C*-, *CP*-симетрії. Тому, з усіх симетрій такого типу непорушною залишилася тільки *CPT*-інваріантність.

Інваріантність відносно ізотопічного перетворення називається *ізотопічною інваріантністю*. Вона притаманна сильно взаємодіючим частинкам-піонам, каонам, нуклонам, баріонам. Вивчаючи характер взаємодії між нуклонами в ядрі, учені встановили, що всі парні елементарні взаємодії є однаковими, симетричними, тобто:

$$(n - n) \equiv (p - p) \equiv (n - p) \quad (3)$$

Ця властивість називається *зарядовою незалежністю ядерних сил*. *Зарядова симетрія* – окремий випадок ізотопічної симетрії сильних взаємодій, що формулюється так: взаємодія між будь-якими нуклонами, що знаходяться з однакових просторових і спінових станах, тотожна між собою з точністю до кулоновської взаємодії.

Електромагнітні сили порушують ізотопічну симетрію ядерних сил. Нещодавно було встановлено, що між ядерними частинками діють також слабкі сили. Тому принцип ізотопічної інваріантності між ядерними частинками справедливий з точністю до слабких взаємодій.

Для опису властивостей нуклонів було введено вектор ізотопічного спіну, математично схожий зі звичайним спіном. Характер ядерної взаємодії не залежить від сорту нуклонів, для яких проекція ізотопічного спіну на довільний напрям в ізотопічному просторі різна. Тому ядерна взаємодія не залежить від знаку цієї проекції.

Отже, ядерні сили є інваріантними відносно обертання в ізотопічному просторі. Із ізотопічної інваріантності одержується закон збереження ізотопічного спіну [11].

Властивості каонів, гіперонів є незвичайними, відмінними від властивостей раніше відкритих частинок. Тому їх назвали *дивними частинками*. Для пояснення їх дивних властивостей Гелл-Манн і Нішіджіма (1953–1954 рр.) запропонували розповсюдити на дивні частинки принцип ізотопічної інваріантності. Для пояснення групового народження дивних частинок було введено нове квантове число, що називається дивністю.

Воно зберігається при сильних і електромагнітних взаємодіях і порушується слабкими. Для звичайних частинок дивність рівна нулеві, для каонів і гіперонів вона рівна ± 1 , ± 2 , ... У процесі розпаду дивних частинок дивність може змінюватись, а тому ці процеси відносяться до слабких. Закон збереження дивності пов'язаний з певною симетрією.

Слід відзначити, що в усіх без винятку ядерних реакціях без утворення античастинок зберігається загальне число нуклонів, що означає збереження масового числа. Це дало підставу ввести поняття ядерного заряду, числове значення якого для протона і нейтрона рівне $+1$, а для ядра співпадає з його масовим числом A . Після відкриття античастинок закон збереження ядерного заряду уточнили, тобто баріонам приписується баріонний заряд $+1$, а антибаріонам – баріонний заряд -1 . Закон збереження баріонного заряду формулюється, що: в усіх ядерних процесах з участю баріонів і антибаріонів сумарний баріонний заряд ізольованої системи не змінюється.

Якщо розглянути велику групу частинок, наприклад, лептони, то основною їх спільною ознакою є те, що всі вони характеризуються особливим квантовим числом-лептонним зарядом. Лептонний заряд підкоряється закону збереження, тобто повний лептонний заряд ізольованої системи зберігається при довільних перетвореннях елементарних частинок.

Пізніше цей закон розділили на два незалежні закони: 1) закон збереження електронного лептонного заряду; 2) закон збереження мюонного лептонного заряду.

У фізиці елементарних частинок роль ідеї симетрії є вирішальною, оскільки лише на її основі вдається передбачити нові частинки. Отже, сучасна класифікація елементарних частинок використовує унітарну симетрію [8]. Класифікація сильно взаємодіючих частинок є об'єднання їх на основі ізотопічної симетрії в ізотопічні мультиплети. Розширення та узагальнення ізотопічної симетрії є унітарна симетрія, що включає ізотопічну симетрію як окремий випадок.

Унітарна симетрія встановлює наявність внутрішніх зв'язків між частинками, що належать до різних ізотопічних мультиплетів і мають різні дивності. Наприклад, якщо розглянути 8 мезонів: 3 піони, 4 каони і екта-мезон, то вони мають однаковий спін і внутрішню парність, але мають різні проекції ізотопічного спіну та дивність.

Висновки та перспективи подальших наукових розвідок. У результаті проведених досліджень констатуємо те, що доцільність підпорядкування змісту навчального матеріалу з фізики базується на фундаментальних поняттях, одним із яких є симетрія, що розглядається в багатьох розділах фізики. Ідеї симетрії в курсі вивчення фізики треба використовувати з урахуванням дидактичних вимог, а також для уточнення та узагальнення фізичних понять, закономірностей.

Відповідно, ознайомлення та вивчення студентами даного поняття сприятиме формуванню сучасного наукового мислення, а також забезпечуватиме систематизацію знань із загального курсу фізики у ВНЗ та формуванню наукового світогляду, для забезпечення міжпредметних зв'язків.

Перспективи подальших пошуків у напрямі дослідження полягають у детальному аналізові поняття симетрії у процесі вивчення загального курсу фізики студентами у вищих навчальних закладах і розробленні методики навчання фізики з використанням даного поняття.

ЛІТЕРАТУРА

1. Берестецкий В. Б. Релятивистская квантовая теория / В. Б. Берестецкий, Е. М. Липшиц, Л. П. Питаевский. – Ч. 1. – М. : «Наука», 1968. – 480 с.
2. Бир Г. Л. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках : монография / Г. Л. Бир, Г. Е. Пикус. – М. : «Наука», 1972. – 584 с.
3. Бирман Дж. Пространственная симметрия и оптические свойства твердых тел / Дж. Бирман ; Соч. в 2-х т. – Т. 1. – М. : «Наука», 1978. – 387 с.
4. Вигнер Е. Этюды о симметрии / Е. Вигнер. – М. : «МИР», 1971. – 318 с.
5. Ганиев Р. М. Групповая симметрия в множестве мировоззренческих высказываний / Роберт Маликович Ганиев. — Владикавказ : Северо-Осетинский гос. ун-т им. К. Л. Хетагурова, 2001. – 108 с.
6. Гейзенберг В. Современная квантовая механика / В. Гейзенберг, Э. Шредингер, П. Дирак. – М.-Л. : «Гостехиздат», 1934. – 76 с.
7. Элиот Дж. Симметрия в физике / Дж. Элиот П. Добер ; Соч. в 2-х т. – Т. 1. – М. : Мир, 1983. – 364 с.
8. Ковалев И. З. Учение о симметрии в курсе физики средней школы : автореф. дис. ... канд. пед. наук : спец. 13.00.02 «Теория и методика обучения (физика)» / И. З. Ковалев. – К., 1976. – 24 с.
9. Логунов А. А. Шаг к познанию антивещества / А. А. Логунов // «Правда». – 1970. – С. 17.
10. Ландау Л. Д. О законах сохранения при слабых взаимодействиях / Л.Д. Ландау. – Т. 32. – Вып. 2. – М. :ЖЭТФ, 1957. – С. 405–406.
11. Ландау Л. Д. Квантовая механика / Л. Д. Ландау, Е. М. Липшиц. – М. : Физматгиз, 1963. – 702 с.
12. Подопригора Н. В. Фізика твердого тіла: навчальний посібник для студентів фізичних спеціальностей педагогічних університетів / Н. В. Подопригора, М. І. Садовий, О. М. Трифонова. – Кіровоград : ПП «Центр оперативної поліграфії «Авангард», 2013. – 416 с.
13. Садовий М. І. Окремі питання сучасної та традиційної фізики : навчальний посібник для студентів педагогічних навчальних закладів освіти / М. І. Садовий, О. М. Трифонова. – Кіровоград : Видавництво ПП «Каліч О.Г.», 2007. – 307 с.
14. Симметрия в твердом теле / Р. Нокс, А. Голд. – М. : «Наука», 1970. – 424 с.
15. Цзян-Дао Ли Слабые взаимодействия и несохранение четности / Цзян-Дао Ли. – Т. 66. – Вып.1 – М. : УНФ, 1958. – С. 89–97.

РЕЗЮМЕ

Кузьменко О. С., Борота В. Г. Изучение студентами динамических симметрий в процессе обучения общего курса физики в высших учебных заведениях.

В статье анализируется и рассматривается понятие симметрии, которое положено в основу современных физических теорий. Роль принципов инвариантности в физике еще не исчерпана, и мы далеки от универсального закона природы. Симметрия

обнаруживает взаимосвязь физических законов, упрощает понимание сложных процессов, которые протекают в микромире и рассматриваются в физике. В статье раскрыты разные виды динамических симметрий, таких, как калибровочная инвариантность, симметрия одинаковых частиц, зеркальная и унитарная симметрия, а также обратили внимание на понятие странности элементарных частиц, на которые распространен принцип изотопической инвариантности.

Ключевые слова: симметрия, общая физика, законы сохранения, инвариантность, унитарная симметрия, зеркальная симметрия, симметрия обратности, античастица, четность, странность.

SUMMARY

Kuzmenko O., Borota V. Learning of dynamic symmetries by the students in the process of study of general course of physics in higher educational establishments.

One of directions of reformation of physics education in higher educational establishments is strengthening of its methodological orientation. The level of formation of students' knowledge in physics is determined by mastering of fundamental physical concepts (for example, symmetry), laws, theories and principles. Actual question at the modern stage of development of physics education is the theory of symmetry, based on fundamental co-operations.

The concept of symmetry that is fixed in basis of modern physical theories is analyzed in the article and examined. It is stressed that the theory of large association, based on principles of symmetry, is in the stage of development. The role of principles of invariance in physics is not yet out investigated, and we are distant from the universal natural law. Symmetry finds out connection of physical laws, simplifies understanding of difficult processes that flow in micro world and are examined in physics. The different types of dynamic symmetries are exposed in the article, such, as a gauge invariance, symmetry of identical particles, mirror and unitary symmetry, and also displace attention on a concept oddities of elementary particles, on that principle of isotopic is widespread.

As a result of the conducted research it is established that expedience of submission of maintenance of educational material from physics is based on fundamental concepts, one of which is symmetry which is examined in many sections of physics. The idea of symmetry in a course of the study of physics needs to take into account didactics requirements, and also it is necessary for clarification and generalization of physical concepts, conformities to law.

Accordingly an acquaintance and study of this concept by students will be instrumental in forming of modern scientific thought, and also will provide systematization of knowledge from the general course of physics in the university and forming of scientific world view, for providing of inter-subject connections.

The prospects of subsequent searches in the direction of research consist in the detailed analysis of concept of symmetry in the process of study of general course of physics by students in higher educational establishments and development of method of studies of physics with the use of this concept.

Key words: symmetry, general physics, laws of maintenance, invariance, unitary symmetry, mirror symmetry, circulating symmetry, anti-particle, evenness, oddity.