

Ю. С. Шиховцев,
Л. Є. Шиховцева

ТЕМАТИЧНЕ СПРЯМУВАННЯ ТЕОРІЇ ІНФОРМАЦІЇ ЯК МЕТОДИЧНА СТРАТЕГІЯ STEM-ІНТЕГРАЦІЇ. ПРИКЛАДИ З ФІЗИКИ

Анотація. Об'єднання предметів природничого спрямування, або STEM-інтеграція, належить до питань найширшого наукового обговорення і становить основу освітнього процесу майбутнього за оптимістичними очікуваннями. У цьому дослідженні проводиться огляд генезису основних ідей і актуального стану речей у релевантних світових проєктах. Пропонується і обґрунтовується інтеграційна стратегія укладання матеріалу відповідних курсів наскрізною теоретичною дисципліною. Одним з важливих результатів такого підходу передбачається як розвиток компетентностей учня в одній дисципліні, так і пропедевтика іншої дисципліни, інтегрованої в курс. На прикладах кожного розділу фізики конвенціональних шкільних програм продемонстровано практичну застосовність зазначеної концепції за умови вибору квантової та класичної теорії інформації в якості магістральної лінії STEM-інтеграції. Сучасний стан міжнародного прогресу міждисциплінарної інтеграції виражається у розгалуженій множині підходів, що різняться не тільки навчальними програмами, не тільки критеріями успішності та характером зворотного зв'язку, а і самою ідеєю, способом інтеграції. Аналіз історичного ходу наукової думки з цієї проблеми відкриває перспективи успіху інтеграції природничих дисциплін теоретичною тематикою. Теорія інформації, її квантове узагальнення та плеяда їх практичних застосувань виявляють достатню різноманітність і наукову глибину, щоб претендувати на таку універсальну інтегруючу здатність. У класичних поняттях, законах, задачах та паттернах шкільної фізики можна розкрити зв'язок з основами теорії інформації та навіть проілюструвати це більш частинними, а іноді й дидактичними сутностями. В цій роботі опис зазначених можливостей здійснено таким чином, щоб оминуть необхідність залучення математичного аналізу. Наведені методичні пропозиції не мають строгої залежності від конкретного навчального плану, в чому проявляється одна з причин гнучкості розглянутої інтеграційної стратегії.

Ключові слова: методична стратегія, STEM-інтеграція, квантова теорія інформації, фізика.

1. Теоретичний аналіз питання STEM-інтеграції

Абревіатура STEM (наука, технологія, інженерія та математика) стає все більш важливою у світовому дискурсі щодо промисловості та досліджень, вищої освіти та шкільних програм [1]. STEM-освіта та наукові дослідження дедалі частіше визнаються як основні рушійні сили націо-

нального розвитку, економічної продуктивності та суспільного добробуту. Абревіатура була придумана доктором Джудіт Рамалі у 2001 році, тодішнім помічником директора управління кадрів Національного наукового фонду США. Її цитують автори [2]: «Неможливо приймати мудрі особисті рішення, або виявляти громадянську позицію, або конкурувати у все більш глобальній економіці, або починати вирішувати величезні проблеми, з якими ми стикаємося

при управлінні навколишнім середовищем, без знання науки та здатності вдумливо і відповідним чином застосовувати ці знання».

У цій цитаті зібрані деякі з ключових концепцій, що покладені в основу адвокації STEM: потреба у знаннях та навичках STEM у сучасному світі, вимоги глобальної економіки та виклики дедалі більш загрозливого довкілля.

У дисциплінарному складі STEM наявна певна невизначеність. У Німеччині використовується абревіатура MINT (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik), що, вочевидь, включає інформаційні технології, тоді як у школах англomовних країн технологія неявно охоплює як дизайн, так і інформаційні технології.

Згідно з аналізом, поданим у [3, с. 31–34], в американських школах наука (science) поряд з іншими предметами використовує математику як інструмент для багатьох цілей, а математика, особливо в прикладних темах, використовує науку для контексту. Так само технологічні/інженерні проекти спираються як на математику, так і на науку як частину процесу проектування та оцінки, але, як правило, наука та математика не розвиваються далі власної безпосередньо утилітарної цінності. Проте зустрічається дедалі більше аргументів на користь того, що міждисциплінарне мислення та практика є ключовими рисами сучасної професійної роботи в галузі STEM, а також того, що інновації виникають переважно на перетині дисциплінарних практик. Це передбачає необхідність вивчення способів розробки серйозних підходів до навчання математики та природничих наук у міждисциплінарних умовах.

У огляді досліджень міждисциплінарної математичної освіти, який становить інтерес у контексті поточного дослідження, Вільямс та ін. [4] спиралися на низку попередніх мета-аналізів та оглядів. Наприклад, вони посилаються на мета-аналіз 28 досліджень Беккера та Парку [5, с. 23–37], які дійшли висновку, що: інтеграція має найбільший ефект на ранньому етапі, як і інтеграція всіх чотирьох S, T, E та M. Вони також виявили, що позитивні ефекти інтеграції були найменшими щодо успішності з математики, але стверджується, що підвищений інтерес учнів до предмета, якщо його зв'язки з реальним світом зрозумілі, може закласти основу для покращення успішності у довгостроковій перспективі [4, с. 16].

Огляд [4] містить ряд важливих висновків для міждисциплінарної математизованої освіти. По-перше, вони вказують на те, що, незважаючи на багато років розробки і вивчення цієї галузі в навчальній практиці, в сучасній літературі існує неоднозначність у ряді питань: хто оцінюється (вчителі або учні); характер міждисциплінарності; ступінь інтегрованості цієї міждисциплінарності; характер та точність втручання; які результати вимірюються; як ці результати вимірюються та як вони аналізуються. По-друге, автори дійшли наступного висновку: «... є свідчення того, що інтегрована навчальна та міждисциплінарна робота приносить користь у навчанні, переважно щодо тих його результатів, що пов'язані з процесами вирішення задач та мета-дисциплінарністю».

Які ж практичні результати і виклики супроводжують STEM у країнах розвинутої економіки? Пошлемося на дослідження [6], в якому представлено мета-аналіз впливу STEAM на навчання та сприйняття учнями досвіду STEAM у Південній Кореї.

Унікальною особливістю інтеграції у цій країні є інтеграція предметів STEM із мистецтвом, словесністю, гуманітарними та суспільними науками. Однією з цілей ініціативи STEAM було підвищити інтерес учнів до вивчення природничих наук та математики, а також інтерес до кар'єри у сфері STEM. У 2018 році було проведено дослідження впливу уроків STEAM на інтерес учнів до вивчення природничих наук і математики та відповідної кар'єри.

Збір інформації реалізовано через опитування учнів, що використовуються з 2011 року як базові дані для вивчення впливу програм STEAM. Методи аналізу даних включають множинні лінійні регресійні оцінки за 11 підшкалами. Ці змінні охоплюють інтерес учня до певного предмета, врахування думок та ідей однолітків, цінності ідейної комунікації, значення цього предмета для учня, самоефективності у ньому, а також інтереси, пов'язані з кар'єрою у відповідній галузі.

Результати учнів молодших класів середньої школи були аналогічні результатам учнів молодших класів групи STEAM і показали значно вищі бали за всіма шкалами самоефективності, крім математичної, ніж у групі без STEAM. Однак на відміну від учнів початкової школи молодші школярі показали більшу дисперсію в інтересі до мате-

матики та уявлення про себе у математиці, ніж у природничих науках. Крім того, відмінності в кар'єрному інтересі, пов'язаному з наукою або математикою, були набагато численнішими, ніж в учнів початкової або старшої школи.

Результати учнів старших класів середньої школи відрізнялися від результатів учнів іншого середнього віку. У старшокласників спостерігається позитивний вплив на математичну самоефективність. Однак суттєвої різниці між STEAM- та не STEAM-групами в інтересі до науки, сприйнятті цінності математики та сприйнятті цінності науки не спостерігалось.

Позитивний вплив досвіду STEAM на інтерес до кар'єри STEM є багатообіцяючим. Ця різниця в областях та ступенях досягнення цілей освіти STEAM між рівнями школи передбачає, що дизайн уроків STEAM має бути диференційованим для різних рівнів школи.

Результати у їх сукупності та повноті виявляють, що загалом групи STEAM набрали вищі бали за своїм афективним сприйняттям, ніж групи без STEAM. Це явище, однак, демонструє значну залежність від школи і віку учнів.

Більш загальні висновки витікають із інтерпретації кількісних даних. До них належить передусім те, що мотивація учнів молодшого віку і середніх класів спирається на потяг до інтелектуальних викликів, естетичних шляхів самоствердження, радше ніж практичні побутові стимули. Про це свідчать результати діяльності, шифрованої літерою «А» у зазначеній вище абрєвіатурі.

По-друге, зі збільшенням відчуття суб'єктності учня, що відбувається в старших класах, збільшуються і здібності до оперування математичними абстракціями, введеними раніше, та узагальнення їх до нових форм.

По-третє, різноманіття професій, родів та видів діяльності несе учневі не тільки відчуття свободи можливостей, але і збентеження неосязності власного майбутнього.

Підводячи проміжні підсумки, висунемо ряд пропозицій: STEAM-інтеграцію можна і варто здійснити на засадах деякого теоретичного предмета, який би мав застосування у всій низці природничих дисциплін. Світовий досвід та аналітичні тенденції вказують на недостатність «життєвої» експериментальної практики та побутових задач для всеосяжної і ефективно підготовки учня до слабопрогнозованих умов

майбутніх технологічних професій. Саме таким теоретичним предметом шуканої властивості можна впевнено назвати теорію інформації. Сучасний розвиток квантової теорії інформації, квантово-комп'ютерної техніки супроводжується фундаментальними і прикладними відкриттями у фізиці та анонсує введення в експлуатацію нових засобів кількісного та якісного аналізу хімічних і біологічних явищ.

Розвинемо цю ідею з огляду на фінальний результат досліджуваної педагогічної діяльності. Кого ми прагнемо виховати? Які риси будуть притаманні людині, освіту якої ми розробляємо?

2. Нариси образу соціального успіху STEM-освіти

Байбі [7] увів до обігу вираз «STEM-грамотність» для прояснення мети STEM-освіти. Підхід STEM до викладання природничих наук та навчального плану включає задачі з реального життя, які вимагають розуміння природи наукового знання та, частково, наукового дослідження, що веде до кінцевої мети — наукової грамотності. Отже, можна стверджувати, що наукова грамотність є кінцевою метою інтегрованого підходу STEM. Тут важливо відзначити, що, всупереч поширеним помилкам, STEM виходить далеко за межі простого приділення більшої уваги кожній з дисциплін STEM. Інтеграція дисциплін STEM є метою руху STEM.

«Наукова грамотність» слугує меті допомогти людям використати наукові знання для ухвалення обґрунтованих рішень. ДеБоер [8, с. 582–601] стверджує, що термін «наукова грамотність» з часу його появи наприкінці 1950-х рр. не має точного визначення. Хоча широко стверджується, що вона є бажаним результатом природничо-наукової освіти, консенсус щодо остаточного визначення цього терміна наразі відсутній.

З історії відомо, що науковою грамотністю в педагогічній літературі називалися цілі викладання природничих наук у загальноосвітніх закладах нового середовища, що склалося після Другої світової війни. Відповідно до звіту Фонду братів Рокфеллерів [9] «... серед задач, складність яких страшенно зростає, є задача перед простим громадянином, який хоче розумно виконувати свої громадські обов'язки» [9, с. 351]. Відповіддю була наукова грамотність. Фонд визначив: «Так само, як ми повинні наполягати на тому,

щоб кожний вчений був широко освічений, ми повинні стежити за тим, щоб кожна освічена людина була грамотною в науці. Ми не можемо допустити, щоб наші найосвіченіші люди жили в інтелектуальній ізоляції один від одного, не маючи навіть елементарного розуміння інтелектуальних інтересів один одного» [9, с. 369].

У Національному огляді австралійського викладання та вивчення природничих наук [10] визначено атрибути науково грамотної людини. Зокрема, у ньому говорилося, що науково грамотна людина:

- 1) цікавиться навколишнім світом і розуміє його;
- 2) може ставити і досліджувати питання та робити науково обґрунтовані висновки;
- 3) здатна брати участь у дискусіях на науковій темі;
- 4) виявляє здатність до скепсису і сумнівається у твердженнях інших;
- 5) може приймати обґрунтовані рішення про навколишнє середовище, власне здоров'я та благополуччя.

Плутанина, спричинена нечіткими визначеннями та частим використанням словосполучення «наукова грамотність», має місце і для виразу «наукове дослідження». Неясність в цьому питанні — це, принаймні, одна з причин, через яку в наукових стандартах нового покоління [11] наголошується на «науковій практиці», а не на наукових дослідженнях. Національна дослідницька рада США у 2000 році розробила документ під назвою «Дослідження та національні стандарти наукової освіти», спрямований, зокрема, на розкриття значення наукового дослідження [12]. З одного боку, наукове дослідження концептуалізувалося як підхід до навчання. Тобто вчитель природознавства залучав студентів у ситуації (переважно відкриті), щоб вони могли ставити запитання, збирати дані та робити висновки. Коротше кажучи, мета підходу до навчання полягала в тому, щоб дозволити учням вивчати предмети науки так само, як вчені виконують свою роботу. Хоча наукове дослідження тісно пов'язане з науковими процесами, воно виходить за межі простого розвитку навичок, подібних до спостереження, класифікації, прогнозування, вимірювання, опитування, інтерпретації та аналізу даних. Наукове дослідження включає в себе традиційні наукові процеси, але також передбачає поєднання цих процесів з науковим знанням, науковими мір-

куваннями і критичним мисленням для розвитку наукових знань. У Національних стандартах природничої освіти США [13] наголошено, що учні повинні вміти формулювати наукові питання, а потім планувати і проводити дослідження, відшукуючи дані, необхідні для отримання відповідей на поставлені запитання. Отже, наукове дослідження належить до систематичних підходів, що використовуються вченими в спробі відповісти на питання, що їх цікавлять. Детальний опис наукового методу та порівняння його з інженерним викладено І. А. Сліпучіною та І. С. Чернецьким [14].

Підсумовуючи цей розділ, висловимо судження, що наукова діяльність з точки зору її суб'єкта — це самоосвіта і творчість, що відповідає логічним законам. Отже, не варто боятися критики, яка ґрунтується на уявній вузькості цільової аудиторії освіти наукового спрямування. Інформаційна епоха, індустріальний спосіб виробництва ввели наукову специфіку до практики у більшості професій, за якими сьогодні бачимо майбутнє.

3. Фізика у школі для інформації або інформація з фізики у школі. Огляд і обговорення прикладів

Як одна з центральних природничих дисциплін, фізика формує цілий спектр компетентностей когнітивного характеру. На заняттях з фізики учень навчається розумінню, розв'язуванню та інтерпретації результатів задач. Розглянемо матеріал класичних світових шкільних програм з цієї дисципліни у розрізі його зв'язків із основами теорії інформації. Наведемо також методичні рекомендації для застосування цих фактів у освітньому процесі.

3.1. Механіка

Першим розділом фізики традиційно розглядається механіка. Як і будь-яка теорія одностайних процесів, вона не має прямих відсилань до теорії інформації. Проте саме цей розділ включає комплекс моделей, які формують основу кінетичних властивостей макроскопічних явищ. Окрім зазначеної очевидної користі вивчення цього матеріалу характерне і тим, що механістична у філософському сенсі картина світу учня в подальшому вступає у протиріччя з моделями процесів іншої фізичної природи.

**Загальні фізичні поняття, значущі для вступу до теорії інформації,
та їх реалізації, доступні для викладення у школі**

Розділ фізики	Положення	Ілюстрації
Механіка	Закони зміни і збереження імпульсу, моменту імпульсу, енергії. Принцип Мопертьюї.	Брахістохрона.
Молекулярна фізика та термодинаміка	Закони збереження маси, імпульсу, енергії. Ентропія, другий закон термодинаміки, зворотність процесів. Парадокс Лошмідта.	Перший закон термодинаміки. Мікро- і макростани системи багатьох частинок. Демон Лапласа.
Електрика і магнетизм	Закони збереження енергії та заряду. Принцип найменшого опору. Квантування заряду. Цифровий і аналоговий принципи обробки інформації.	Перше правило Кірхгофа. Цифрова напівпровідникова пам'ять.
Оптика	Принцип Гюйгенса-Френеля. Принцип суперпозиції. Принцип доповнюваності. Ентропія і когерентність.	Принцип Ферма. Явище інтерференції світла, лінійна і кругова поляризації світла. Людський зір. Лазер.
Атомна і ядерна фізика	Принцип суперпозиції. Квантування заряду, енергії, імпульсу. Закони збереження імпульсу, моменту імпульсу, енергії. Квантова заплутаність.	Розподіл заряду в атомі водню в моделі Бора. Період напіврозпаду як статистична властивість. ЕПР-парадокс, електронні орбіталі.

Подолання такої суперечності учнем у процесі навчання становить визначну логічну цінність та є своєрідною пропедевтикою огляду принципу доповнюваності Бора.

Курс механіки поділяється на кінематику і динаміку. Остання вже передбачає знайомство із законами зміни і збереження імпульсу, моменту імпульсу і енергії. Як відомо, згідно з теоремою Нетер кожній симетрії фізичної системи відповідає певний закон збереження. Так, інваріантності рівнянь стану щодо операції трансляції часу відповідає збереження енергії в системі. Водночас відхилення від цього закону в деякій задачі не означає неоднорідність часу як такого, а тільки проявляє систему, що розглядається, як відкриту. До того ж закони збереження взагалі є фундаментально регламентуючими, як механічний рух, так і безліч інших явищ. Цим і обумовлена визначна роль таких законів для фізики. Отже, пропонується тут і далі розглядати їх як суто фізичне підґрунтя інформаційних концепцій.

Врешті-решт учень має отримати враження, що динаміка замкнених механічних систем без

дисипації є повністю передбачуваною вперед і назад у часі. Лабораторні роботи, механічні аспекти STEM-проектів або інші види практичної діяльності мають доповнювати це враження наступним твердженням: єдиними змінними, що впливають на точність прогнозу поведінки таких систем, є точність визначення початкових умов та точність розрахунків.

Математичне формулювання принципу стаціонарності дії та його механічного частинного випадку, відомого як принцип Мопертьюї, є надто складним для шкільного курсу [15]. Однак інтуїтивне розуміння цього загального закону природи необхідне учню для остаточного оформлення ідей детермінізму. З цією метою пропонується скористатися класичною практичною демонстрацією брахістохрони як кривої найменшого часу.

3.2. Молекулярна фізика та термодинаміка

Якщо стандартні задачі шкільної механіки, як правило, обмежуються системами одного або пари тіл, то молекулярна фізика, природно,

має справу з макроскопічною кількістю тіл. Наближено цю кількість можна обмежити згори і знизу числами, на два порядки більше і менше за число Авогадро відповідно. Модель ідеального газу, яка розглядає молекули матеріальними точками, що, до того ж, не взаємодіють між собою, повністю перебирає механічні міркування і у менш явній формі — рівняння. Явище броунівського руху є ясною ілюстрацією цього факту. Очевидно, що і закони збереження реалізуються повною мірою, хоча прослідкувати це, аналізуючи усереднені (молекулярні) величини, не завжди тривіально.

Натомість оперування термодинамічними параметрами дає змогу наочної демонстрації збереження енергії у формі першого закону термодинаміки. Суттєва відмінність такого підходу полягає у тому, що замість опису повного механічного (мікроскопічного) стану розглядаються феноменологічні властивості макроскопічного стану. Відповідність двох підходів неоднозначна: один макроскопічний стан (набір значень p, V, T) може реалізуватися через багато різних мікроскопічних станів (наборів координат та імпульсів молекул). Логічним зв'язком між двома типами опису є порівняння формули Больцмана для ентропії з її термодинамічним визначенням, поданим через кінцеві прирости.

На цьому етапі для переходу до класичної теорії інформації залишається єдиний крок — узагальнення мікроскопічного визначення ентропії до формули Шеннона.

Другий і третій закони термодинаміки розкривають учню фізичний зміст термодинамічної ентропії. Важливо звернути увагу на те, що поруч із межею між закритою і відкритою системами другий закон розділяє оборотні та необоротні в часі процеси [16]. У механіці вже були приклади явищ обох типів: до другого належать усі прояви дисипації. Варто викладення й те, що з третього закону термодинаміки можна висувати відмінність між твердим тілом і рідиною/газом в значеннях ентропії. Хоча користуватися цим законом як кількісним критерієм агрегатного або фазового стану речовини неможливо і непотрібно, та близькість до нуля ентропії можна вважати достатньою умовою твердого стану для більшості звичних задач.

Окремий педагогічний акцент на природу міжмолекулярних взаємодій та дисипації робить фізичний зміст парадокса Лошмідта. Для

прозорості постановки цього питання зручно застосувати концепцію демона Лапласа, оскільки незворотність певного процесу операційно визначається неможливістю розрахунку стану системи до початку відліку часу. Так, маємо демона, спроможного на «всеосяжність» прогнозу за мікроскопічного, механічного підходу та значно послабленого у випадку термодинамічного опису багаточастинкової системи як цілого. У дискусії про розв'язок парадокса є сенс оперувати поняттям ступенів вільності молекул і поставити запитання про обсяг повної інформації (у листах паперу, шкільних дошках або бітах) про систему за кожного з двох підходів.

3.3. Електрика і магнетизм

Принцип найменшого опору, що має своє застосування і в теорії, і в класичних задачах з електрики, становить пряму відповідність механічному принципу Мопертьюї. Найбільш наочним проявом його впливу на динаміку електричних процесів є феномен розряду в повітрі або деревині.

Правила Кірхгофа, які іноді називаються законами, є наслідками більш фундаментальних законів збереження заряду та енергії і законів Максвелла. Розгляд цієї спорідненості має підкріпити аналогії між електричною і гравітаційною взаємодіями, між зарядом і масою.

Прямий зв'язок між ідеєю першого правила Кірхгофа та задачами обробки інформації легко продемонструвати, використавши просте електричне коло з одним амперметром, двома реостатами і одним вузлом. Якщо два струми входять у вузол, з якого виходить один провідник, то сила струму в ньому дорівнюватиме сумі вхідних струмів. Регулюючи вхідні струми реостатами і знімаючи показання вихідного сигналу, можна виконати арифметичну операцію складання двох чисел, швидкість якої не залежатиме від кількості цифр у них. Пояснивши, що цим проілюстровано найпростіше аналогове обчислення, вчитель може ініціювати обговорення і розробку більш складних схем. Важливо також звернути увагу на обмеження і складності, притаманні цьому підходу.

Цифрові інформаційні технології, значно більш поширені в техніці, потребують детального розгляду. Викладення принципів дискретизації сигналу, двійкової системи числення та основ математичних операцій у ній не стано-

вистиме перепони у педагогічному сенсі та навіть логічно поєднується з класичною шкільною програмою цього курсу. Дійсно, квантування електричного заряду, як правило, сприймається учнями постулятивно, та огляд цифрових наслідків з нього, а також демонстрація цього явища на прикладах пристроїв, подібних до цифрової напівпровідникової пам'яті, може слугувати когнітивним контекстом і спростити освітній процес на цій ділянці.

3.4. Оптика

Геометрична оптика як граничний випадок хвильової з очевидністю демонструє справедливність чергового варіаційного принципу — принципу Ферма. Огляд хвильової природи світла, явищ інтерференції та дифракції потребує узагальнення принципу Ферма до принципу Гюйгенса-Френеля [17].

Порівняння явищ розповсюдження світла прямолінійними траєкторіями з явищами руху заряджених частинок в електриці та незаряджених тіл у механіці необхідно супроводжувати вказівкою на безмасовість світла. Важливо зазначити, що варіаційні принципи регламентують динаміку довільної матерії, а матерія, як витікає з курсу оптики, не обмежується масивними частинками.

У класичних шкільних програмах з оптики нерідко розглядається феномен людського зору. Зазначимо, що поглинання світлової хвилі індивідуальними паличками і колбочками (детекторами) супроводжується редукцією хвильової функції — перетворенням делокалізованої, «розмазаної» в просторі хвилі довільного фронту у локалізований біля детектора фотон. Ця частинка, звісно, негайно поглинається. Що ширше фронт хвилі, то більш помітною стає ця особливість.

Йдеться про квантове явище суперпозиції: хвиля широкого фронту досягає декількох детекторів і випадковим чином поглинається одним з них або не потрапляє в жоден. Математичний апарат квантової механіки дає змогу розглядати початкову хвилю як набір (композицію, суперпозицію) променів, що в момент і за умови поглинання цього світла позбавляється усіх складових окрім однієї — променя, який поєднує джерело хвилі і конкретно той детектор, що поглинув світло. Отже, хвиля є ніби такою частинкою, що «розповсюджується за декілько-

ма напрямками одночасно» та може редукувати до єдиної траєкторії постфактум, тобто коли цей шлях вже подолано. Яка саме траєкторія реалізується, який саме детектор поглине хвилю, що потрапила на декілька детекторів одночасно, — це фундаментально ймовірнісні запитання.

На етапі розгляду цих суто квантових властивостей світла не буде зайвим пригадати лапласівський детермінізм з механіки. Якщо протиріччя, у яке ця концепція вступає з термодинамікою, виражене парадоксом Лошмідта, знімається теорією інформації та теорією хаосу, то протиріччя з квантовою природою заперечує можливість демона Лапласа в оригінальному сенсі взагалі.

Для потреб побіжного контакту з квантовою теорією інформації важливе значення має викладення явища поляризації світла. Повний ортонормований базис поляризаційного стану складається з двох перпендикулярних лінійних поляризацій або двох протилежних циркулярних поляризацій. Отже, довільна еліптична поляризація є суперпозицією, причому обидва розклади однаково легітимні. Відмітимо, що поляризоване світло є найпростішою реалізацією так званого кубіта — квантового біта.

У рівняннях механічного коливального процесу та гармонічної хвилі вводиться поняття фази. Це виявляється достатнім для першого знайомства учня з теорією лазера. Не заглиблюючись у подробиці взаємодії світла з речовиною, можна окреслити лазер як такий генератор світла, що здатний перетворювати різномірну множину світлових хвиль однієї частоти у єдину хвилю високої амплітуди. Вхідна множина хвиль характеризується тим, що в ній наявні хвилі багатьох різних фаз і поляризацій, розподіл за якими має ненульову інформаційну ентропію. Вихідний світловий сигнал, навпаки, синфазний, поляризований, і його ентропія дорівнює нулю.

Звісно, таке «означення» лазера не претендує ані на вичерпність, ані на повноту. Ми наводимо його тут з тієї причини, що в розгляді цього питання об'єднуються концепції, що мають інформаційний вимір, а також були використані вище в механіці та термодинаміці.

3.5. Атомна і ядерна фізика

Феномени, що підлягають опису квантово-інформаційними моделями, в цьому розділі фізики наявні у надлишку, тому головним завданням

тут є адаптація опису квантових явищ для освітніх потреб. Наведемо деякі основні приклади.

Принцип суперпозиції, згаданий у попередньому розділі, яскраво маніфестує себе в атомній фізиці. Модель атома водню за Бором стверджує негативний заряд електрона рівномірно розподіленим за орбіталлю, що оточує ядро. Кажуть, що електрон перебуває у стані суперпозиції за координатою. Корпускулярні уявлення про електрон, наявність у нього маси і кванту заряду формально конфліктують з такою делокалізацією, але розгляд процесу іонізації вносить ясність у це питання.

Фотон, яким можна освітити електрон для визначення його координат як частинки, передає електрону енергію та імпульс, достатні для іонізації. Електрон вибивається фотоном і за виконання необхідних умов експерименту положення електрона перед вильотом може бути розрахованим за законами механіки. Необхідно розуміти, що це положення у просторі визначилося тільки в момент взаємодії двох частинок. Це означає, що багатократне повторення цього досліду в абсолютно однакових умовах продемонструє різні рівноімовірні результати. Так проявляється видатна властивість природи мікросвіту: здебільшого про результат квантового вимірювання заздалегідь відомий тільки розподіл його можливих значень за імовірностями.

Ілюстрація цієї властивості на прикладі ядерного розпаду підтвердила свою ефективність у курсі з атомної енергетики, співавтором якого є перший автор цієї роботи. Нехай маємо декілька однакових радіонуклідів. Якщо відомо їх час народження, а також період напіврозпаду, то легко знайти залежність їхньої кількості від часу. Експериментальна картина буде тим ближчою до теоретичної, що більшою кількістю ядер ми оперуємо. Індивідуальний розпад кожного радіонукліда, навпаки, не підлягає точному передбаченню, але його імовірність як функція часу, як і раніше, визначається законом ядерного розпаду і періодом напіврозпаду.

Концепція внутрішньої енергії, використана у термодинаміці, отримує в атомній фізиці продовження у вигляді концепції атомного збудження. Постулати Бора як регламент процесів створення і релаксації збудження також встановлюють квантування енергії, імпульсу й моменту імпульсу. Не варто недооцінювати роль акценту на нових властивостях законів збереження кван-

тованих величин, адже саме вони є теоретичною передумовою неklasичних (суто квантових) явищ. Якщо деяка величина, що зберігається, знає поділу на частини, розділяється за підсистемами у певному процесі, а її початкове значення рівне одному кванту, то підсистеми переходять у так званий заплутаний (entangled) стан.

Канонічним та хронологічно першим прикладом квантової заплутаності є ЕПР-парадокс [18]. Без деталізації власне парадоксальної природи задачі наведемо короткі адаптовані відомості про нього. Нестабільний ізотоп розпадається на два нукліди. Імпульси і координати продуктів розпаду мають відповідати рівнянням механіки, а значить, і законам збереження. Вимірювання механічного стану одного ядра має надати усю необхідну інформацію для визначення стану іншого. Насправді значення імпульсу або координати в момент вимірювання встановлюється випадковим чином зі спектра можливих. Одночасно з цим незалежно від відстані між продуктами розпаду відбувається встановлення відповідної величини другого нукліда. Це значення вже не є випадковим, а строго визначається законами збереження. Після такого вимірювання нукліди позбавляються заплутаності, тобто їхні стани втрачають описану вище позакласичну скорельованість.

Інший прояв квантової заплутаності легко зустріти в таблиці Менделєєва. Кожен атом після водню, як відомо, має в своєму складі два або більше електронів. Просторові розподіли їхньої маси або заряду ілюструються зображеннями s-, p-, d-, f-орбіталей тощо. Однак помилковим буде враження, ніби ці розподіли існують незалежно один від одного. Якщо б ми вирішили експериментально виміряти, а значить, і встановити координати одного з електронів, то механічні властивості інших миттєво «підлаштувалися» б згідно з законами збереження і наслідків ферміонної природи електронів. Не треба також розуміти під цим лише електростатичні явища, які, вочевидь, присутні в системі заряджених частинок. Характер кореляції, взаємної залежності положень та імпульсів електронів у атомах відповідає феномену квантової заплутаності та виходить за межі класичної електродинаміки.

Неможливо уявити вступ до квантової теорії інформації без ознайомлення з принципом невизначеності Гейзенберга. Введення його через уявний експеримент ЕПР-парадоксу є пря-

молінійним та не потребує коментарів. Запропонуємо іншу ілюстрацію, наділену дидактичним ступенем вільності. Нехай маємо неполяризоване світло від Сонця або лампи. Пропустимо його крізь систему трьох лінійних поляризаторів, два крайніх з яких взаємно перпендикулярні, а проміжний нахилено під кутом $\pi/4$ відносно перших. Спостерігаємо проходження світла. Заберемо проміжний поляризатор і помітимо повне поглинання світла. В цьому досліді вертикальна та горизонтальна поляризації світла відповідали одній спостережуваній величині, а діагональна — іншій. Оскільки ці спостережувані величини не комутують, то вимірювання однієї збудує розподіл імовірності за іншою. Кажуть, що ці величини задовольняють принципу невідзначеності [19].

Для відсіювання з експерименту аргументації класичної оптики, яка теж спроможна пояснити це явище, або в умовах недостачі лінійних поляризаторів можна скористатися наступними пропозиціями. По-перше, вхідний поляризатор можна прибрати, якщо використовувати лазерне світло, що вже лінійно поляризоване. По-друге, діагональний (проміжний) поляризатор можна без змін у результатах експерименту замінити на круговий. Плівки з такою властивістю поширені та доступні, бо використовуються в екранах смартфонів.

4. Висновки

Сучасний стан міжнародного прогресу міждисциплінарної інтеграції виражається у розгалуженій множині підходів, що різняться не тільки навчальними програмами, не тільки критеріями успішності та характером зворотного зв'язку, а і самою ідеєю, способом інтеграції. Аналіз історичного ходу наукової думки з цієї проблеми відкриває перспективи успіху інтеграції природничих дисциплін теоретичною тематикою.

Теорія інформації, її квантове узагальнення та плеяда їх практичних застосувань виявляють достатню різноманітність і наукову глибину, щоб претендувати на таку універсальну інтегруючу здатність. У класичних поняттях, законах, задачах та паттернах шкільної фізики можна розкрити зв'язок з основами теорії інформації та навіть проілюструвати це більш частинними, а іноді й дидактичними сутностями. В даній роботі опис цих можливостей

здійснено таким чином, щоб оминати необхідність залучення математичного аналізу. Наведені методичні пропозиції не мають строгої залежності від конкретного навчального плану, в чому проявляється одна з причин гнучкості розглянутої інтеграційної стратегії.

Список використаних джерел

1. Marginson S., Tytler R., Freeman B., Roberts K. *STEM: Country comparisons: international comparisons of science, technology, engineering and mathematics (STEM) education*. Canberra : Australian Council of Learned Academies, 2013.
2. Chute E. STEM education is branching out. *Pittsburgh Post-Gazette*. 2009. February 10.
3. Tytler R. STEM Education for the Twenty-First Century. *Integrated Approaches to STEM Education. Advances in STEM Education / Anderson J., Li Y. (Eds.)*. Cham : Springer, 2020. P. 21–43.
4. Interdisciplinary mathematics education: The state of the art. ICME-13 topical survey / Williams J. et al. Hamburg : Springer Open, 2016.
5. Becker K., Park K. Effects of integrative approaches among science, technology, engineering, and mathematics (STEM) subjects on students' learning: A preliminary meta-analysis. *Journal of STEM Education: Innovations & Research*. 2011. Vol. 12. P. 5–6.
6. Kang N. H. What Can Integrated STEAM Education Achieve? A South Korean Case. *Integrated Approaches to STEM Education. Advances in STEM Education / Anderson J., Li Y. (Eds.)* Cham : Springer, 2020. P. 227–249.
7. Bybee R. W. The case for STEM education: Challenges and opportunities. Washington, DC : NSTA Press, 2013.
8. DeBoer G. E. Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*. 2000. № 37 (6). P. 582–601.
9. Rockefeller Brothers Fund. The pursuit of excellence: Education and the future of America. Garden City, NY : Doubleday & Company, 1958.
10. Goodrum D., Rennie L. J., Hackling M. W. The status and quality of teaching and learning of science in Australian schools: A research report. Canberra : Department of Education, Training and Youth Affairs, 2001.
11. NGSS Lead States. Next generation science standards: For states, by states. Washington, DC : National Academies Press, 2013.
12. National Research Council. Inquiry and the national science education standards. Washington, DC : National Academy Press, 2000.

13. National Research Council. National science education standards. Washington, DC : National Academy Press, 1996.
14. Сліпухіна І. А., Чернецький І. С. Дослідницька діяльність студентів у контексті використання наукового й інженерного методів. *Вища освіта України*. 2015. № 3. С. 216–225.
15. Helrich C. S. Lagrangian Mechanics. *Analytical Mechanics. Undergraduate Lecture Notes in Physics*. Cham : Springer, 2017.
16. Helrich C. S. Irreversibility. *Modern Thermodynamics with Statistical Mechanics*. Berlin — Heidelberg : Springer, 2009.
17. Helrich C. S. Electromagnetic Waves. *The Classical Theory of Fields. Graduate Texts in Physics*. Berlin — Heidelberg : Springer, 2012.
18. Einstein A., Podolsky B., Rosen N. Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*. 1935. № 47. P. 777–780.
19. Pade J. Polarization. *Quantum Mechanics for Pedestrians 1. Undergraduate Lecture Notes in Physics*. Cham : Springer, 2018.
7. Bybee, R. W. (2013). *The case for STEM education: Challenges and opportunities*. Washington, DC : NSTA Press.
8. DeBoer, G. E. (2000). Scientific literacy: Another look at its historical and contemporary meanings and its relationship to science education reform. *Journal of Research in Science Teaching*, 37 (6), 582–601.
9. Rockefeller Brothers Fund (1958). *The pursuit of excellence: Education and the future of America*. Garden City, NY : Doubleday & Company.
10. Goodrum, D., Rennie, L. J., & Hackling, M. W. (2001). *The status and quality of teaching and learning of science in Australian schools: A research report*. Canberra : Department of Education, Training and Youth Affairs.
11. *NGSS Lead States. Next generation science standards: For states, by states*. (2013). Washington, DC : National Academies Press.
12. *National Research Council. Inquiry and the national science education standards*. (2000). Washington, DC : National Academy Press.
13. *National Research Council. National science education standards*. (1996). Washington, DC : National Academy Press.

References

1. Marginson, S., Tytler, R., Freeman, B., & Roberts, K. (2013). *STEM: Country comparisons: international comparisons of science, technology, engineering and mathematics (STEM) education*. Canberra : Australian Council of Learned Academies.
2. Chute, E. (2009). STEM education is branching out. *Pittsburgh Post-Gazette*, February 10.
3. Tytler, R. (2020). *STEM Education for the Twenty-First Century*. J. Anderson, & Y. Li. (Eds.). *Integrated Approaches to STEM Education*. Advances in STEM Education (pp. 21–43). Cham : Springer.
4. Williams, J., Roth, W.-M., Swanson, D., Doig, B., Groves, S., Omuvwie, M., et al. (2016). *Interdisciplinary mathematics education. The state of the art. ICME-13 topical survey*. Hamburg : Springer Open.
5. Becker, K., & Park, K. (2011). Effects of integrative approaches among science, technology, engineering, and mathematics (STEM) subjects on students' learning: A preliminary meta-analysis. *Journal of STEM Education: Innovations & Research*, 12, 5–6.
6. Kang, N. H. (2020). *What Can Integrated STEAM Education Achieve? A South Korean Case*. J. Anderson, & Y. Li. (Eds.). *Integrated Approaches to STEM Education*. Advances in STEM Education (pp. 227–249). Cham : Springer.
14. Slipukhina, I. A., & Chernetskyi, I. S. (2015). Doslidnytska diialnist studentiv u konteksti vykorystannya naukovoho y inzhenerneho metodiv [Research activities of students in the context of the use of scientific and engineering methods]. *Vyshcha osvita Ukrainy — Higher Education in Ukraine*, 3, 216–225 [in Ukrainian].
15. Helrich, C. S. (2017). *Lagrangian Mechanics*. Analytical Mechanics. Undergraduate Lecture Notes in Physics. Cham : Springer.
16. Helrich, C. S. (2009). *Irreversibility*. Modern Thermodynamics with Statistical Mechanics. Berlin — Heidelberg : Springer.
17. Helrich, C. S. (2012). *Electromagnetic Waves*. The Classical Theory of Fields. Graduate Texts in Physics. Berlin — Heidelberg : Springer.
18. Einstein, A., Podolsky, B., & Rosen, N. (1935). Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review*, 47, 777–780.
19. Pade, J. (2018). *Polarization*. Quantum Mechanics for Pedestrians 1. Undergraduate Lecture Notes in Physics. Cham : Springer.

Yu. S. Shykhovtsev,
L. Ye. Shykhovtseva

THEMATIC ORIENTATION OF INFORMATION THEORY AS A METHODOLOGICAL STRATEGY OF STEM-INTEGRATION. EXAMPLES FROM PHYSICS

Abstract. *The incorporation of natural sciences or STEM integration is a matter of the broadest scientific discussions and the basis of the future educational process according to optimistic expectations. This study reviews the genesis of the main ideas and the current state of affairs in relevant global projects. The integration strategy of coordinating the material of the relevant courses by a progressive theoretical discipline is suggested and substantiated. One of the important expected consequences of this approach is the development of student competencies in one discipline with simultaneous propaedeutics of another discipline integrated into the course. Given examples from each section of conventional school physics programs demonstrate the practical applicability of this concept, provided the choice of quantum and classical information theory as the main line of STEM integration. The current state of international progress in interdisciplinary integration is expressed in a ramified set of approaches that differ not only in training programs, not only in the criteria for success and the nature of feedback, but also in the very idea, the method of integration. An analysis of the historical course of scientific thought on this issue opens up success prospects for integration of natural disciplines by means of a theoretical subject. The theory of information, its quantum generalization and the plethora of their practical applications reveal sufficient diversity and scientific depth to claim such a universal integrating ability. In the classical concepts, laws, tasks and patterns of school physics, one can reveal the connection with the foundations of information theory and even illustrate this with more particular and sometimes didactic entities. In this paper, the description of these possibilities is carried out in such a way as to avoid the need to involve mathematical analysis. The above methodological proposals do not have a strict dependence on a specific curriculum, which is one of the reasons for the flexibility of the integration strategy under consideration.*

Keywords: *methodical strategy, STEM-integration, quantum information theory, physics.*

ІНФОРМАЦІЯ ПРО АВТОРІВ

Шиховцев Юрій Сергійович — молодший науковий співробітник відділу створення і використання навчально-тематичних систем знань, НЦ «Мала академія наук України», м. Київ, Україна, yushykh@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7000-7003>

Шиховцева Людмила Євгенівна — методистка 2 категорії лабораторії фізико-технічних наук, НЦ «Мала академія наук України», м. Київ, Україна, ludmila.shihovceva@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6865-8787>

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shykhovtsev Yu. S. — Junior Researcher, Department of creation of educational-thematic systems of knowledge, NC “Junior Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv, Ukraine, yushykh@gmail.com; ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7000-7003>

Shykhovtseva L. Ye. — Methodologist of Laboratory of Physical and Technical Sciences, NC “Junior Academy of Sciences of Ukraine”, Kyiv, Ukraine, ludmila.shihovceva@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6865-8787>

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2022