

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**МЕТОДОЛОГІЯ ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ФІЗИЧНИХ
НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ
ЧАСТИНА II**

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра
за освітньою програмою «Моделювання фізичних процесів»
та доктора філософії
за освітньою програмою «Фізика»
спеціальності Е5 Фізика та астрономія

Укладачі: Л.П. Пономаренко, Л.В. Рижко

Електронне мережеве навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2026

УДК 001.891(075.8)
М54

Укладачі: *Пономаренко Лілія Петрівна*, канд.фіз.-мат. наук, доц.
Рижко Лариса Володимирівна, д.філософ.наук, проф.

Рецензент *Хамітов Н.В.*, чл.-кор.НАН України, д.філософ. наук, проф.,
пров. наук.співроб. Інституту філософії ім. Г.С. Сковороди НАН
України

Відповідальний
редактор *Решетняк С.О.*, д. фіз.-мат.наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 7 від 08.05.2026 р.)
за поданням вченої ради факультету/навчально-наукового інституту
(протокол № 3 від 08.04.2026 р.)*

М54 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістр за освітньою програмою «Моделювання фізичних процесів» та доктор філософії за освітньою програмою «Фізика» спеціальності Е5 Фізика та астрономія / КПІ ім. Ігоря Сікорського: уклад.: Л.П. Пономаренко, Л.В. Рижко. – Електрон. текст. дані (1 файл).– Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026. – 121 с.

Навчальний посібник «Методологія та організація фізичних наукових досліджень. Частина II» призначений для здобувачів спеціальності Е5 «Фізика та астрономія» та присвячений методологічним і організаційним засадам сучасного фізичного дослідження. У виданні висвітлено структуру та критерії науковості фізичних досліджень, особливості їх інформаційного забезпечення, а також питання планування й реалізації експериментальних і теоретичних робіт. Окрему увагу приділено специфіці кваліфікаційного PhD-дослідження у фізичних науках у міжнародному та українському контекстах. Посібник спрямований на формування методологічної культури, дослідницької компетентності та наукової автономії здобувачів і може бути корисним для студентів, аспірантів і викладачів інших фізичних та технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 001.891(075.8)

Реєстр. № НП XX/XX-XXX. Обсяг 5,5 авт. арк.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. Фізичне дослідження як вид наукової діяльності: методологія, структура і критерії науковості.....	8
1.1. Фізичне дослідження як особливий вид наукової діяльності.....	8
1.1.1. Кількісний характер фізичного пізнання: вимірювання, математичні моделі, дані.....	8
1.1.2. Еволюція структури фізичного дослідження.....	10
1.2. Методологічний статус фізичного дослідження.....	16
1.2.1. Еволюція методологічного статусу фізичного дослідження.....	16
1.2.2. Технології та міждисциплінарність як визначальні елементи методологічного статусу фізики.....	20
1.3. Критерії науковості фізичного дослідження.....	25
1.3.1. Критерії науковості та їх історична трансформація в практиці фізики.....	25
Контрольні запитання.....	30
 Розділ 2. Інформаційне забезпечення фізичних наукових досліджень.....	36
2.1. Дані в системі фізичного пізнання: поняття, міжнародні визначення та їх методологічні обмеження.....	36
2.1.1. Поняття даних у фізичних дослідженнях.....	36
2.1.2. Специфіка фізичних наукових даних.....	40
2.1.3. Збір, обробка й управління фізичними даними.....	42
2.2. Перетворення даних на інформацію як ключовий етап фізичного пізнання.....	44
2.2.1. Перетворення фізичних даних на інформацію.....	44
2.2.2. Особливості фізичної інформації.....	46
2.3. Знання як валідована і системна форма фізичної інформації.....	47
2.3.1. Перетворення інформації на знання.....	47
2.3.2. Особливості фізичного знання.....	49
2.4. Штучний інтелект у сучасному інформаційному забезпеченні фізики....	50
2.4.1. Штучний інтелект як методологічний інструмент формування фізичних даних, інформації та знання.....	50
2.4.2. Епістемологічні ризики інтеграції ШІ у фізичні дослідження.....	53
Контрольні запитання.....	56
 Розділ 3. Планування наукового експерименту: теоретичні та експериментальні дослідження.....	58
3.1. Етапи процесу наукового дослідження: класичний і сучасний підходи..	58
3.1.1. Об'єкт і предмет наукового дослідження у фізиці: класичне та сучасне розуміння.....	58
3.1.2. Етапи фізичного наукового дослідження: базова структура і сучасне розгортання.....	63

3.2. Завдання і структура експериментальних досліджень у фізиці.....	66
3.2.1. Класичний підхід до експериментальних досліджень у фізиці.....	66
3.2.2. Сучасний підхід до експериментальних досліджень у фізиці.....	69
3.2.3. Порівняння класичного та сучасного експерименту у фізиці: методологічні можливості та ризики.....	75
3.3. Завдання і структура теоретичних досліджень у фізиці.....	78
3.3.1. Класичний підхід до теоретичних досліджень у фізиці.....	78
3.3.2. Сучасний підхід до теоретичних досліджень у фізиці.....	81
3.3.3. Порівняння класичних і сучасних теоретичних методів: методологічні можливості та ризики.....	84
Контрольні запитання.....	91
 Розділ 4. Сутність та структура кваліфікаційного дослідження.....	92
4.1. PhD як кваліфікаційний рівень і дослідницька форма наукової діяльності.....	92
4.1.1. PhD як дослідницька кваліфікація: цілі, функції та очікувані результати.....	92
4.1.2. PhD-дослідження як інструмент формування наукової автономії та дослідницької зрілості.....	95
4.2. Сутність кваліфікаційного PhD-дослідження: міжнародний та український контексти.....	97
4.2.1. Міжнародний контекст: PhD як дослідницький проєкт і професійна соціалізація.....	97
4.2.2. Український контекст: PhD як нормативно визначена кваліфікаційна робота.....	102
4.3. Порівняння моделей PhD-дослідження у фізичних науках: міжнародний та український контексти.....	107
4.3.1. Від атестаційної дисертації до відкритого дослідницького процесу: специфіка PhD у фізичних науках.....	107
4.3.2. Типові помилки PhD-досліджень: методологічний, організаційний та етичний виміри.....	112
Контрольні запитання.....	116
Список використаної літератури.....	118

Вступ

Сучасний розвиток фізики як фундаментальної науки відбувається в умовах глибокої трансформації наукового пізнання. Зміни охоплюють не лише зміст досліджень, а й їх методологію, організацію, інформаційне забезпечення та інституційні форми існування науки. Зростання ролі цифрових технологій, обчислювальних методів, великих масивів даних, міждисциплінарних дослідницьких проєктів і глобальних наукових інфраструктур суттєво змінює характер фізичного дослідження. У цих умовах особливої ваги набуває системне осмислення методологічних засад фізичної науки та формування в здобувачів цілісного бачення сучасної дослідницької діяльності.

Навчальний посібник «Методологія та організація фізичних наукових досліджень. Частина II» є логічним продовженням першої частини, у якій було розглянуто науку як культурний феномен і проаналізовано загальні методологічні основи наукового пізнання. У другій частині акцент переноситься безпосередньо на специфіку фізичного дослідження як особливого виду наукової діяльності, його структурну організацію, інформаційне забезпечення, практику планування експериментів і теоретичних робіт, а також на кваліфікаційний вимір підготовки здобувачів ступеня доктора філософії.

Метою посібника є формування у студентів спеціальності Е5 «Фізика та астрономія» системного розуміння сучасної методології фізичних досліджень, розвитку навичок критичного аналізу наукових підходів, усвідомлення ролі даних, інформації та знання у фізичному пізнанні, а також підготовка до самостійної наукової діяльності на рівні магістерської та докторської підготовки.

У **розділі 1** фізичне дослідження розглядається як специфічна форма наукової діяльності, що характеризується кількісним способом опису реальності, опорою на вимірювання, математичне моделювання та експериментальну перевірку. Аналізуються еволюція структури фізичного дослідження, трансформація його методологічного статусу, роль технологій і міждисциплінарності в сучасній фізиці. Особливу увагу приділено критеріям науковості та їх історичній зміні – від класичних уявлень про детермінованість і

експериментальну перевірюваність до сучасних вимог відтворюваності, інфраструктурної забезпеченості та цифрової валідності результатів.

Розділ 2 присвячено інформаційному виміру фізичного пізнання. У ньому послідовно розглядається ієрархія «дані – інформація – знання», аналізуються міжнародні підходи до визначення наукових даних, особливості їх збирання, обробки та управління у фізичних дослідженнях. Значну увагу приділено цифровим технологіям, принципам відкритої науки та інтеграції штучного інтелекту в дослідницькі практики. Розкрито як методологічні можливості, так і епістемологічні ризики, пов'язані з використанням алгоритмічних систем у формуванні наукового результату.

У **розділі 3** висвітлюються питання планування наукового дослідження, структури експериментальних і теоретичних робіт у фізиці. Порівнюються класичні та сучасні підходи до визначення об'єкта і предмета дослідження, аналізуються етапи наукового процесу, роль гіпотези, моделі, експерименту та інтерпретації результатів. Окремо розглядаються методологічні можливості та обмеження сучасного експерименту й теоретичного моделювання, що функціонують у середовищі складних обчислювальних систем і великих дослідницьких колективів.

Розділ 4 зосереджений на кваліфікаційному вимірі фізичних PhD-досліджень як дослідницькому рівні підготовки. У ньому розкривається сутність PhD-дослідження як форми професійної соціалізації науковця, аналізуються міжнародні та українські моделі організації докторської підготовки, окреслюються типові методологічні, організаційні та етичні помилки. Особливий акцент зроблено на формуванні наукової автономії, відповідальності та дослідницької зрілості здобувача.

Посібник має міждисциплінарний характер і поєднує філософсько-методологічний, інформаційний та організаційний підходи до аналізу фізичної науки. Він спрямований не лише на засвоєння теоретичних положень, а й на розвиток уміння застосовувати методологічні принципи в реальній дослідницькій практиці.

На завершення, пропонований навчальний посібник покликаний не лише надати здобувачам системні знання про методологію, організацію та сучасні інструменти фізичних наукових досліджень, але й стимулювати їх до активної участі в науковій діяльності. Наука є динамічною та швидко трансформується, тому майбутні дослідники повинні бути готові до постійного професійного зростання, оновлення знань і вдосконалення дослідницьких навичок, а також до активної взаємодії у національному й міжнародному науковому середовищі. Укладачі сподіваються, що цей посібник стане надійним орієнтиром у формуванні методологічної культури, наукової автономії та відповідальності здобувачів і відкриє нові горизонти для їхнього професійного й особистісного розвитку.

Розділ 1. Фізичне дослідження як вид наукової діяльності: методологія, структура і критерії науковості

1.1. Фізичне дослідження як особливий вид наукової діяльності

1.1.1. Кількісний характер фізичного пізнання: вимірювання, математичні моделі, дані

Фізика як наука історично сформувалася навколо ідеї кількісного опису природних явищ. На відміну від наук, які вивчають якісні характеристики об'єктів, фізичне дослідження базується на вимірюванні фізичних величин із визначеними одиницями, невизначеностями та метрологічними стандартами. Саме кількісні параметри забезпечують можливість перевірки, відтворюваності та міжсуб'єктного порівняння результатів.

У сучасній фізиці кількісні вимірювання нерозривно пов'язані з математичним моделюванням, яке дозволяє формалізувати емпіричні спостереження та перетворювати їх на обчислювані прогнози. Фізичне пізнання здійснюється через побудову ідеалізованих математичних моделей, які пояснюють явища як у якісному, так і в кількісному вимірах. Це означає, що явище не лише вимірюється, а й кількісно моделюється для подальшого зіставлення з даними. Характерним прикладом є сучасні експерименти з перевірки квантової нелокальності, зокрема експерименти типу Aspect, у яких результати вимірювань кореляцій між поляризаціями заплутаних фотонів зіставляються з кількісними передбаченнями квантової теорії. У цих дослідженнях саме статистична обробка великих масивів експериментальних даних і математичний аналіз кореляційних функцій дозволяють робити висновки про фундаментальні властивості фізичної реальності.

Нині моделювання виступає суттєвою складовою сучасної фізичної методології (поряд із експериментом і теорією). Комп'ютерні моделі, симуляції, чисельні експерименти перетворюються на самостійний інструмент перевірки гіпотез.

Важливою особливістю фізичних досліджень є тісне поєднання експерименту і теорії. Традиційно фізика розглядалася як наука, у якій експеримент обов'язково має підтвердити або спростувати теоретичні побудови. У класичних підходах, характерних для класичної механіки та електродинаміки ХІХ століття, ця взаємодія була лінійною: експеримент – аналіз – підтвердження теорії.

Сучасна фізика розвиває цю традицію, оскільки моделі, теорії, експеримент і дані утворюють ітеративний цикл, у межах якого кожен елемент впливає на інші та коригує їх. Емпіричні дані не лише перевіряють теорію, але й активно формують її структуру.

Класичним прикладом є розвиток квантової механіки, де експериментальні обмеження вимірювань мали ключове значення у формуванні нового математичного формалізму. Так, у своїй праці 1925 року Вернер Гейзенберг свідомо відмовився від неспостережуваних величин, будуючи теорію на основі вимірюваних спектральних характеристик, що стало фундаментом матричної механіки. Сучасні дослідження неможливі без обчислювальних процедур, де відтворюваність стосується не лише експериментальної установки, але й алгоритмів обробки даних, програмного коду та обчислювального середовища, що ще більше підсилює цю тенденцію.

Відтак, нині відбувається зміна самої структури наукового фізичного дослідження: експеримент і теорія доповнюються обчислювальною інтерпретацією.

З огляду на особливості сучасних фізичних наукових досліджень, слід зазначити, що фізичне дослідження – це систематична, цілеспрямована та методологічно обґрунтована діяльність, спрямована на вивчення властивостей фізичних систем, процесів і явищ із метою формулювання законів, моделей, пояснень і прогнозів.

1.1.2 Еволюція структури фізичного дослідження

Для осмислення сутності наукового фізичного дослідження принципово важливим є розуміння його історичної еволюції. Фізичне дослідження як форма наукової діяльності не є сталою чи незмінною практикою. Воно розвивалося разом зі змінами уявлень про природу, удосконаленням вимірювальної техніки, розвитком математичних методів, обчислювальних засобів, а в останні десятиліття – також алгоритмічних і ШІ-технологій. Водночас ця еволюція стосується не лише технічних інструментів дослідження, а насамперед внутрішньої логіки наукового пізнання, тобто способів формування фізичних даних, їх перетворення на інформацію та механізмів виникнення фізичного знання.

У зв'язку з цим фізичне дослідження доцільно розглядати як історично змінну методологічну практику, у межах якої трансформуються уявлення про роль теорії, експерименту, даних і процедур інтерпретації. Для цілісного аналізу цієї еволюції доцільно виокремити кілька основних етапів розвитку наукових фізичних досліджень.

1. Класичний етап (XVII – кінець XIX століття)

Класичне фізичне дослідження сформувалося в межах експериментально-теоретичної парадигми, що утвердилася у XVII столітті разом з ідеєю математичного опису природи. Його підґрунтя було закладене працями Ісаака Ньютона та його послідовників, які продемонстрували, що фізичні явища можуть бути описані універсальними математичними законами. У межах цієї парадигми теорія виконувала провідну методологічну функцію, оскільки саме вона визначала, які фізичні величини є істотними, які взаємозв'язки між ними підлягають дослідженню та які експериментальні перевірки мають науковий сенс.

Експеримент у класичній фізиці мав чітко окреслене призначення перевірки теоретичних тверджень. Його розглядали як засіб підтвердження або спростування вже сформульованих законів, а не як автономне джерело знання. Дані трактувалися як результат безпосереднього вимірювання фізичних величин

і не мали самостійного методологічного статусу. Їх сприймали як прозорі відображення фізичної реальності, а значущість таких результатів визначалася виключно в контексті теоретичної інтерпретації.

Вимірювальні прилади у класичній фізиці розглядалися як нейтральні засоби фіксації, що не впливають на досліджуваний об'єкт. Інтерпретація результатів повністю покладалася на дослідника, а похибки та обмеження вимірювань зазвичай трактувалися як другорядні технічні обставини, а не як самостійна методологічна проблема.

Показовими в цьому контексті є спектроскопічні дослідження XIX століття. Формула Бальмера (1885), яка емпірично описувала закономірності спектра атома гідрогену, виникла як узагальнення експериментальних вимірювань, однак ще не супроводжувалася розгорнутою теоретичною моделлю. Подібна ситуація була винятком для класичної фізики, у якій зазвичай саме теорія випереджала експеримент і визначала концептуальні межі інтерпретації емпіричних результатів.

2. Перехідний етап (кінець XIX – перша третина XX століття)

Кінець XIX – початок XX століття став періодом глибокого методологічного зламу в розвитку фізичних досліджень. У цей час зазнало змін уявлення про класичну фізику як завершену й внутрішньо узгоджену систему знання, а також було поставлено під сумнів трактування експериментальних даних як безпосередніх і самодостатніх «фактів природи». Фізичне дослідження починає осмислюватися як складніший пізнавальний процес, у якому принципове значення мають не лише вимірювання, а й теоретичні припущення та інтерпретаційні рамки.

Важливим прикладом у цьому контексті є експеримент Майкельсона–Морлі (1887), який продемонстрував, що навіть надзвичайно точні вимірювання можуть не підтвердити фундаментальні теоретичні уявлення свого часу. Попри високий рівень експериментальної точності, очікуваного ефекту руху Землі відносно ефіру зафіксовано не було. Це засвідчило, що проблема полягала не в недосконалості вимірювань, а в самій теоретичній основі інтерпретації результатів. У цьому сенсі експеримент уперше чітко виявив методологічний

розрив між точністю даних і коректністю теоретичних припущень. Унаслідок цього експериментальні дані почали сприймати не як «очевидні факти», незалежні від умов їх отримання, а як результат складної взаємодії теорії, вимірювального приладу та процедури спостереження. Вимірювальний інструмент перестає розглядатися як нейтральний посередник між дослідником і природою, натомість постає активним елементом дослідницької практики, що впливає на характер зафіксованих результатів.

Подальший розвиток квантової фізики остаточно закріпив уявлення про теоретичну зумовленість фізичних даних. Квантові явища не піддавалися опису в межах класичних уявлень про безперервність, детермінізм і наочність фізичних процесів. Експериментальні результати, отримані у мікросвіті, виявилися принципово неінтерпретованими без залучення нових теоретичних концепцій, зокрема квантування енергії, корпускулярно-хвильового дуалізму та ймовірнісного характеру фізичних процесів.

Переконливим прикладом є модель атома Бора (1913). Спектральні лінії атома гідрогену були відомі ще з експериментальних досліджень XIX століття, однак лише в межах квантової моделі ці дані набули чіткого фізичного змісту як наслідок переходів між дискретними енергетичними рівнями. Відтак експериментальні факти залишилися незмінними, проте їх інтерпретація зазнала радикальної трансформації, що наочно демонструє залежність фізичного знання від теоретичної структури.

У цей перехідний період формується принципово нове уявлення про фізичне дослідження, яке перестає трактуватися як лінійна послідовність етапів «теорія – експеримент – підтвердження» і починає осмислюватися як цілісна взаємодія теорії, експерименту та інтерпретації.

Відтак перехідний етап кінця XIX – початку XX століття закладає методологічні основи сучасної фізики, у якій дані, прилади й теоретичні моделі розглядаються як взаємопов'язані елементи єдиного дослідницького процесу. Саме в цей період формується розуміння фізичного дослідження як складної когнітивної практики, що поєднує вимірювання, моделювання і теоретичну інтерпретацію.

3. Інфраструктурний етап (середина XX століття)

Після Другої світової війни фізичні дослідження входять у нову фазу розвитку, яку умовно можна окреслити як інфраструктурний етап. У цей період наукові дослідження дедалі частіше реалізуються у формі масштабних, тривалих і технологічно складних програм, що потребують значних матеріальних, фінансових і кадрових ресурсів. З'являються прискорювачі елементарних частинок, ядерні реактори дослідницького призначення, радіоастрономічні комплекси, супутникові системи спостереження та великі міжнародні лабораторії, зокрема такі, як CERN.

Унаслідок цього фізичне дослідження перестає бути індивідуальною або локальною лабораторною практикою й набуває виразно колективного характеру. Воно здійснюється великими науковими колективами, у межах яких чітко розподіляються ролі між теоретиками, експериментаторами, інженерами, техніками та фахівцями з обробки даних. У результаті змінюється соціальна організація науки: фізичне знання дедалі частіше продукується не окремим ученим, а інституційно організованою дослідницькою спільнотою.

Технологічна опосередкованість стає визначальною рисою цього етапу. Експериментальні дані більше не отримуються безпосередньо шляхом простих вимірювань, а формуються за допомогою складних установок, що охоплюють детектори, системи керування, електроніку та первинні засоби автоматизованої реєстрації. Відповідно експеримент дедалі більше залежить від технічних характеристик інфраструктури, а сам процес отримання даних ускладнюється та набуває багатоступеневого характеру.

Водночас, попри глибокі інституційні й технологічні зміни, методологічна структура фізичного дослідження на цьому етапі загалом зберігає класичні риси. Теорія й експеримент залишаються основними джерелами фізичного знання, а експериментальна перевірка теоретичних передбачень і надалі розглядається як центральний механізм наукової легітимації результатів. Обчислювальні засоби, хоча й починають активно застосовуватися, відіграють переважно допоміжну роль, слугуючи інструментом обробки експериментальних даних або виконання окремих теоретичних розрахунків.

Проте саме на інфраструктурному етапі закладаються передумови для подальшої методологічної трансформації фізики. Масштабність експериментів, зростання обсягів даних і ускладнення апаратури поступово підводять фізичне дослідження до меж, за якими традиційне уявлення про експеримент і обчислення як другорядний інструмент стає недостатнім. Це створює підґрунтя для формування наступного етапу розвитку фізики, у якому дані, обчислення та алгоритмічні методи набудуть самостійного методологічного статусу.

Отже, інфраструктурний етап середини ХХ століття поєднує збереження класичних методологічних принципів із радикальними змінами в масштабах, організації та технічній основі фізичного дослідження, підготувавши ґрунт для подальшої цифрової й алгоритмічної трансформації науки.

4. Обчислювальний та даноцентричний злам (кінець ХХ – початок ХХІ століття)

Наприкінці ХХ століття фізика входить у нову фазу розвитку, пов'язану зі стрімким прогресом обчислювальної техніки, цифрових технологій і методів чисельного аналізу. Зростання обчислювальної потужності, поява високопродуктивних комп'ютерів та розвиток спеціалізованого програмного забезпечення докорінно змінюють способи здійснення фізичних досліджень. Обчислення і робота з даними перестають бути лише допоміжним засобом теорії або експерименту й набувають самостійного методологічного статусу.

Числове моделювання та комп'ютерні симуляції більше не виконують винятково функцію перевірки аналітичних розв'язків або уточнення параметрів теоретичних моделей. У багатьох галузях фізики вони стають основним способом дослідження систем, які є надто складними для повного аналітичного опису або недоступними для безпосереднього експериментального вивчення. Це стосується, зокрема, кліматичної фізики, астрофізики, фізики плазми, фізики конденсованого стану та нелінійних динамічних систем.

На цьому етапі фізичне знання дедалі частіше формується у вигляді замкненого дослідницького циклу: спостереження → дані → модель → прогноз → зіставлення з новими даними. У такій структурі експериментальні та спостережувальні дані не лише підтверджують теорію, а й активно впливають на

побудову моделей і уточнення їх параметрів. Моделі, своєю чергою, використовуються для прогнозування поведінки систем у режимах, які ще не були безпосередньо спостережені, після чого ці прогнози знову зіставляються з новими даними.

Унаслідок цього дані набувають статусу центрального наукового ресурсу. Вони перестають бути лише «вхідною інформацією» для теорії та стають основою для побудови й розвитку моделей. Це зумовлює зміну уявлень про відтворюваність і перевірюваність результатів. Відтворюваність означає вже не лише можливість повторення експерименту, а здатність відтворити повний обчислювальний цикл: від підготовки даних і вибору чисельних методів до реалізації алгоритмів та аналізу результатів.

Методологічно важливою особливістю цього етапу є також зростання ролі апроксимацій, дискретизацій і чисельних схем. Фізичний результат дедалі частіше залежить від вибору обчислювальної сітки, кроку інтегрування, граничних умов і алгоритмів розв'язання рівнянь. Це потребує нового рівня осмислення методології та посиленого наукового контролю, оскільки помилки або приховані припущення на обчислювальному етапі можуть істотно впливати на фізичну інтерпретацію.

Отже, обчислювальний і даноцентричний поворот означає трансформацію фізики від моделі, що спиралася переважно на теорію та експеримент, до такої, де дані, моделювання й обчислювальні процедури становлять рівнозначні складові наукового пізнання. Саме на цьому етапі формується методологічне підґрунтя для подальшого алгоритмічного переосмислення фізики, у межах якої штучний інтелект і автоматизовані методи аналізу даних стають новим чинником розвитку наукового знання.

Відтак кінець XX – початок XXI століття позначає глибоку зміну не лише інструментарію, а й логіки фізичного дослідження. Фізика поступово переходить від домінування аналітичного мислення до поєднання теоретичних, обчислювальних і даноцентричних підходів, що визначає сучасний методологічний статус науки про природу.

5. III-орієнтований етап (приблизно з 2015 року – дотепер)

Етап розвитку фізичного дослідження, зорієнтований на використання штучного інтелекту, не є простим продовженням обчислювального та даноцентричного зламу, а становить якісно новий методологічний рівень. Його поява стала можливою завдяки поєднанню трьох чинників: накопиченню великих масивів фізичних даних, розвитку високопродуктивних обчислювальних ресурсів і поширенню методів машинного навчання, здатних працювати з багатовимірними сигналами, складними просторово-часовими структурами та нелінійними залежностями. Унаслідок цього алгоритмічні системи перестають бути лише засобом обробки даних і починають впливати на саму структуру фізичного пізнання.

У сучасних фізичних дослідженнях штучний інтелект залучається вже на ранніх етапах формування даних. Алгоритмічні методи застосовуються для автоматизованого відбору подій, фільтрації шумів і визначення того, які сигнали взагалі вважаються фізично значущими. Це означає, що III впливає не лише на аналітичний етап, а й на епістемологічний статус даних, формуючи попередній рівень фізичної реальності, доступної для подальшого дослідження.

Показовим прикладом є гравітаційно-хвильова фізика. Дані, отримані детекторами, представляють надзвичайно слабкі сигнали, занурені у складний і нестабільний шум. Без алгоритмічної обробки, включно з методами машинного навчання, ці сигнали не можуть бути ані виявлені, ані коректно інтерпретовані. Фізичний факт реєстрації гравітаційної хвилі є результатом взаємодії експериментальної установки, теоретичної моделі сигналу та алгоритмічної системи аналізу даних. У такий спосіб III стає невід'ємною складовою експериментального процесу, а не зовнішнім допоміжним інструментом.

Подібна методологічна ситуація спостерігається у фізиці елементарних частинок, де алгоритми машинного навчання використовуються для класифікації подій, реконструкції траєкторій частинок і відокремлення рідкісних фізичних процесів від масивного фону. У матеріалознавстві III застосовується для прогнозування кристалічних структур, властивостей нових матеріалів і фазових переходів ще до їх експериментального синтезу. В астрофізиці та

космології алгоритмічні методи використовуються для автоматизованої класифікації галактик, аналізу великих оглядових спостережень і виявлення аномальних об'єктів, які не вписуються в наявні теоретичні моделі.

Водночас інтеграція штучного інтелекту у фізичне дослідження породжує принципово нові методологічні питання. Центральними стають проблеми інтерпретованості алгоритмічних моделей, визначення меж їх застосовності та відповідальності дослідника за результати, отримані з використанням непрозорих обчислювальних процедур. Фізичний результат більше не може вважатися науково коректним лише на підставі високої точності передбачень; він має бути включений у систему фізичних понять і узгоджений із фундаментальними законами.

Відтак, на етапі, зорієнтованому на застосування штучного інтелекту, фізичне дослідження дедалі чіткіше набуває рис циклічної системи взаємодії даних, алгоритмів, моделей і фізичного знання. Класична лінійна схема «теорія → експеримент» трансформується у складний динамічний процес «дані ↔ алгоритми ↔ моделі ↔ інтерпретація ↔ нові дані». Серед ключових моментів цієї еволюції доцільно виокремити математизацію фізики, стандартизацію вимірювань, усвідомлення теоретичної навантаженості даних, інфраструктурну організацію науки, даноцентричний злам і, зрештою, інтеграцію штучного інтелекту як повноцінного методологічного чинника.

Розуміння цієї еволюції є необхідною умовою розуміння не лише сучасних технічних можливостей фізичного дослідження, а і його меж, ризиків і відповідальності. У XXI столітті фізичне пізнання дедалі більше залежить від алгоритмічних рішень, а отже, потребує підвищеної методологічної рефлексії, прозорості та критичного ставлення до ролі штучного інтелекту у формуванні наукового знання.

1.2. Методологічний статус фізичного дослідження.

1.2.1. Еволюція методологічного статусу фізичного дослідження

Фізичне дослідження є не лише сукупністю експериментальних і теоретичних процедур, а особливим видом наукової діяльності, що має власний методологічний статус. Під методологічним статусом фізичного дослідження слід розуміти його місце в системі наукового пізнання, характер взаємодії теорії, експерименту, даних і технологій, а також критерії наукової обґрунтованості результатів. Історичний розвиток фізики засвідчує, що цей статус не був сталим, а зазнавав істотних трансформацій.

У класичній фізиці методологічний статус дослідження визначався домінуванням теорії. Теоретична модель виконувала конститутивну функцію: вона визначала, які величини є фізично значущими, які експерименти мають науковий сенс і в який спосіб слід інтерпретувати отримані результати. Експеримент мав підпорядкований характер і слугував засобом підтвердження або спростування теоретичних тверджень. Важливо, що в цей період:

- дослідження мало лінійну структуру «теорія → експеримент → висновок»;
- дані не розглядалися як самостійний об'єкт аналізу;
- вимірювальні прилади вважалися нейтральними засобами фіксації, що не впливають на зміст знання.

Отже, фізичне дослідження тлумачилося як раціональна процедура перевірки універсальних законів природи, а його науковий статус визначався логічною узгодженістю теорії та відтворюваністю експериментальних результатів.

Наприкінці XIX століття класичне уявлення про методологічний статус експерименту зазнає кризи. З'ясовується, що експериментальні дані не є «чистими фактами», незалежними від теоретичних припущень. Результати вимірювань виявляються залежними від конструкції приладу, способів калібрування, вибору параметрів і від теоретичного розуміння самого процесу вимірювання.

Розвиток квантової механіки остаточно закріпив цю зміну. Дані атомної спектроскопії набули фізичного змісту лише в межах квантово-механічних моделей. Це означало, що експеримент перестав виконувати роль зовнішнього критерію теорії і перетворився на її внутрішню складову.

Унаслідок цього методологічний статус фізичного дослідження зазнає суттєвих змін, а саме:

- експеримент і теорія починають розглядатися як взаємозалежні компоненти;
- інтерпретація стає невід'ємною складовою дослідницького процесу;
- формується уявлення про теоретичну навантаженість емпіричних даних.

У середині XX століття фізичні дослідження набувають нового методологічного статусу, пов'язаного з індустріалізацією науки. Великі експериментальні установки, складні вимірювальні системи та міжнародні наукові колаборації змінюють уявлення про характер фізичного дослідження. Саме на цьому етапі дослідження перестає бути індивідуальною формою діяльності; експеримент набуває тривалого й багатоетапного характеру; істотно зростає роль процедур, стандартів і протоколів.

Методологічно це означає, що фізичне дослідження вже не зводиться до окремого експерименту або теоретичного доведення. Воно набуває рис організованої технологічної системи, у якій принципового значення набувають не лише результати, а й способи їх отримання.

Наприкінці XX століття відбувається ще одна принципова методологічна зміна, пов'язана із розвитком обчислювальної техніки та цифрових методів аналізу. Числове моделювання, комп'ютерні симуляції та статистична обробка даних перестають виконувати допоміжну роль і стають рівноправними складовими фізичного дослідження. Методологічний статус дослідження змінюється в кількох ключових аспектах:

- дані набувають центрального значення;
- відтворюваність означає не лише повторюваність експерименту, а й можливість відтворення обчислювальних процедур;

- теоретичні моделі дедалі частіше реалізуються у формі алгоритмів і програмного коду.

У цілому фізичне дослідження набуває циклічного характеру, у межах якого дані, моделі та обчислення перебувають у постійній взаємодії.

На початку XXI століття (приблизно з 2015 року) методологічний статус фізичного дослідження зазнає якісної зміни у зв'язку з активним упровадженням алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту. ШІ перестає бути лише інструментом аналізу й постає активним учасником пізнавального процесу. На цьому етапі:

- алгоритми впливають на відбір і структурування даних;
- частина інтерпретаційних процедур здійснюється автоматизовано;
- результати можуть бути коректними з погляду прогнозування, але складними для безпосереднього фізичного пояснення.

Це означає, що фізичне дослідження постає як інтегрована система, у якій:

- теорія, експеримент, дані, алгоритми та інтерпретація утворюють єдине ціле;
- критерії науковості охоплюють прозорість даних, програмного коду й моделей;
- відповідальність дослідника поширюється також на алгоритмічні рішення.

Отже, сучасне фізичне дослідження має інтегративний методологічний статус. Воно більше не є ані суто теоретичним, ані суто експериментальним процесом. Фізичне знання формується на перетині теорії, експерименту, даних, обчислень і алгоритмів.

1.2.2. Технології та міждисциплінарність як визначальні елементи методологічного статусу фізики

Фізичні дослідження нерозривно пов'язані з розвитком технологій, оскільки саме технічні інновації визначають, що саме може бути виміряно, з

якою точністю та за яких умов. Межі експериментального пізнання у фізиці ніколи не задаються виключно теорією. Вони завжди зумовлені рівнем розвитку приладів, матеріалів, джерел енергії, систем реєстрації та обробки даних. Тому розвиток фізики водночас є розвитком технічного прогресу.

У класичній фізиці цей зв'язок наочно ілюструє становлення електромагнетизму у XIX столітті. Відкриття електромагнітної індукції Майклом Фарадеєм стало можливим не лише завдяки пошуку зв'язку між електричними й магнітними явищами, а й завдяки створенню нових джерел струму, котушок, провідників і чутливих гальванометрів. Без удосконалення вимірювальних приладів неможливо було зафіксувати слабкі індукційні струми та встановити кількісні закономірності. Показовим є також експеримент Майкельсона і Морлі з перевірки існування ефіру, який потребував надзвичайно точного інтерферометра. Саме технічна можливість вимірювати малі різниці ходу світлових променів зумовила радикальний результат експерименту, що згодом став підґрунтям для формування спеціальної теорії відносності. Техніка не просто забезпечувала експеримент, а фактично відкрила шлях до перегляду фундаментальних уявлень про простір і час. Ще один класичний приклад пов'язаний із дослідженням будови атома. Дослід Резерфорда з розсіянням альфа-частинок став можливим лише завдяки розвитку вакуумних технологій, джерел радіоактивного випромінювання та методів реєстрації частинок. Без цих технічних передумов модель атомного ядра залишалася б суто гіпотетичною.

У сучасній фізиці залежність досліджень від техніки стала ще виразнішою та набула принципово іншого масштабу. Яскравим прикладом є експериментальні дослідження елементарних частинок на Великому адронному колайдері в CERN. Відкриття бозона Гігса стало можливим лише завдяки створенню надпотужних прискорювачів, надпровідних магнітів, складних детекторів і систем обробки колосальних обсягів даних, аналіз яких без алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту є практично неможливим. Теоретичні моделі існували десятиліттями, однак експериментальна перевірка стала реальною лише після досягнення відповідного технологічного рівня. Іншим показовим прикладом є реєстрація гравітаційних

хвиль установкою *LIGO*. Для фіксації змін довжини інтерферометричних плечей знадобилися надточні лазери, вакуумні системи та системи активної стабілізації, а також інтелектуальні методи аналізу сигналів. Фактично межі експерименту визначалися не стільки фізичною теорією, скільки можливістю створити прилад із необхідною чутливістю. Поєднання високоточної лазерної техніки з алгоритмами машинного навчання зробило можливим експериментальне підтвердження передбачень загальної теорії відносності. У космічній фізиці аналогічну роль відіграють сучасні телескопи, зокрема космічний телескоп *James Webb Space Telescope*. Його інфрачервоні детектори, кріогенні системи охолодження та багатошарові дзеркала дають змогу досліджувати ранні етапи еволюції Всесвіту й атмосфери екзопланет. Такі дослідження були принципово недоступними для наземних телескопів попередніх поколінь і нині визначаються не лише чутливістю детекторів, а й здатністю інтелектуальних систем виявляти приховані закономірності у великих масивах даних.

Відтак фізичні дослідження завжди розвиваються у тісній взаємодії з технічними інноваціями, які не лише підвищують точність вимірювань, а й визначають сам рівень науково можливого. Якщо в класичній фізиці це виявлялося у вдосконаленні вимірювальних приладів і експериментальних установок, то в сучасній фізиці техніка постає масштабною інфраструктурою, без якої фундаментальні відкриття стають принципово неможливими.

Слід зазначити, що визначальною рисою сучасних фізичних досліджень стала міждисциплінарність. Упродовж тривалого часу фізика розвивалася як відносно автономна наукова дисципліна з чітко окресленим об'єктом дослідження, власним математичним апаратом і специфічними експериментальними методами. У класичному розумінні фізик вивчав фундаментальні властивості матерії та поля, спираючись на поєднання теорії й контрольованого експерименту. Проте в ході історичного розвитку характер фізичних досліджень поступово змінювався, і в сучасній науці міждисциплінарність стала не допоміжною рисою, а структурною необхідністю.

На етапі становлення класичної фізики міждисциплінарність у сучасному розумінні практично була відсутня. Фізика формувалася як універсальна

природнича наука, а використання математики або окремих хімічних знань не розглядалося як вихід за межі дисципліни. Інші галузі знань виконували переважно інструментальну функцію, не впливаючи на методологічну самостійність фізики. У цей період об'єкти дослідження були відносно простими, а експериментальні установки – локальними, що давало змогу фізиці зберігати внутрішню цілісність і не потребувало системної взаємодії з іншими науками. Ситуація починає змінюватися у другій половині XIX століття, коли фізика стикається з об'єктами, які неможливо повністю описати в межах однієї дисципліни. Показовим прикладом є становлення спектроскопії. Дослідження спектрів речовин і випромінювання зір поєднали фізичні методи оптики, хімічні уявлення про елементи та астрономічні спостереження. Хоча на цьому етапі міждисциплінарність ще не була усвідомленою стратегією, вона вже стала практичною необхідністю. Фізичні методи почали застосовуватися до об'єктів, що належали різним галузям природознавства, і це істотно розширило межі самої фізики.

На початку XX століття міждисциплінарність перестає бути випадковим явищем і набуває системного характеру. Формування квантової механіки та розвиток атомної фізики тісно пов'язані з хімією, зокрема з поясненням структури атомів і молекул. Саме в цей період виникають квантова хімія та молекулярна спектроскопія. Фізичні моделі виявляються непридатними без хімічної інтерпретації, а експериментальні дані – без міждисциплінарного контексту. Унаслідок цього міждисциплінарність стає методологічно необхідною, оскільки без неї неможливо зрозуміти фізичний зміст отриманих результатів.

Після Другої світової війни фізичні дослідження набувають інфраструктурного характеру. З'являються великі лабораторії, прискорювачі, напівпровідникові технології та ядерна енергетика. Саме в цей період формується фізика твердого тіла, яка швидко переростає в матеріалознавство – міждисциплінарну галузь на стику фізики, хімії та інженерії. Створення транзистора у 1947 році є символічною подією, коли фундаментальні фізичні принципи безпосередньо інтегруються з технологічними та інженерними

завданнями. Фізика починає не лише пояснювати природу, а й цілеспрямовано конструювати нові властивості матеріалів, що принципово змінює характер досліджень.

У другій половині XX століття фізика активно залучається до вивчення складних, відкритих і нелінійних систем. Формуються такі напрями, як біофізика, геофізика, фізика атмосфери, фізика турбулентності, а згодом і економічна фізика. Об'єкти дослідження в цих галузях не можуть бути адекватно описані виключно фізичними методами без залучення біології, наук про Землю, статистики та теорії складних систем. На цьому етапі міждисциплінарність стає умовою адекватності фізичного опису, оскільки спрощені моделі виявляються недостатніми.

У XXI столітті міждисциплінарність перетворюється на визначальну рису сучасної фізики. Це пов'язано з такими ключовими чинниками, як зростання обсягів даних, розвиток обчислювальних методів і впровадження алгоритмічних та ШІ-технологій. Сучасні фізичні дослідження неможливі без тісної інтеграції з інформатикою, статистикою та суміжними науками. Фізика клімату поєднує фізику атмосфери, океанографію та числове моделювання; біофізика - фізичні методи з біологічними інтерпретаціями; матеріалознавство використовує машинне навчання для пошуку нових структур і властивостей речовини. На цьому етапі міждисциплінарність стає не зовнішнім доповненням, а внутрішньою логікою фізичного дослідження.

Отже, міждисциплінарність сучасної фізики зумовлена не кон'юнктурними тенденціями, а об'єктивною складністю досліджуваних об'єктів і методів їх пізнання. Усвідомлення цього створює підґрунтя для узгодженого поєднання різних підходів у цілісну систему наукового знання.

1.3. Критерії науковості фізичного дослідження

1.3.1. Критерії науковості та їх історична трансформація в практиці фізики

Методологічний статус сучасного фізичного дослідження визначають його критерії науковості, які не є незмінними абстрактними вимогами. Вони формуються історично й безпосередньо залежать від того, як організоване наукове дослідження. Фізика як фундаментальна природнича наука формується і розвивається на основі чітко визначених критеріїв науковості. Ці критерії безпосередньо впливають із реальної експериментальної та теоретичної практики. Водночас зміст кожного з них історично змінюється разом із розвитком техніки, методів вимірювання та обчислювальних засобів.

Науковість фізичного дослідження визначається сімома взаємопов'язаними критеріями: 1. емпірична верифікованість і фальсифікованість, 2. відтворюваність результатів, 3. математична формалізація і кількісність, 4. узгодженість з емпіричними даними і теоретична несуперечливість, 5. прогностична спроможність, 6. об'єктивність, 7. методологічна прозорість.

У сучасній фізиці критерії науковості не скасовують класичних вимог, але істотно їх розширюють і ускладнюють. Коротко розглянемо, як змінювалися ці критерії в процесі розвитку фізики.

1. Емпірична верифікованість і фальсифікованість

У класичній фізиці емпірична верифікованість і фальсифікованість розглядалися як базовий критерій науковості. Твердження вважалося науковим лише за умови, що воно могло бути перевірене експериментально і, в принципі, спростоване досвідом. Перевірка здійснювалася через безпосередній лабораторний експеримент або спостереження, які можна було повторити в аналогічних умовах. Закони механіки Ньютона, наприклад, перевірялися через розрахунок руху тіл, сил, прискорень і траєкторій, а відхилення експериментальних даних від теоретичних передбачень безпосередньо ставили під сумнів коректність закону або межі його застосування. Аналогічно класична

електродинаміка перевірялася через експерименти з електричними колами, магнітними полями та поширенням електромагнітних хвиль.

У цьому контексті фальсифікація означала можливість прямого експериментального спростування окремого твердження. Якщо, наприклад, виміряне прискорення тіла систематично не відповідало передбаченням ньютонівської механіки за контрольованих умов, це розглядалося як підстава для перегляду теоретичної моделі або її припущень.

У сучасній фізиці методологічний зміст цього критерію істотно ускладнюється. Багато досліджуваних явищ не допускають прямого лабораторного відтворення, а емпірична перевірка здійснюється опосередковано, через складні експериментальні установки і непрямі спостереження. Наприклад, у фізиці елементарних частинок наявність нової частинки не «спостерігається» безпосередньо, а встановлюється через статистично значущі відхилення у розподілах продуктів розпаду. У такому разі перевірці підлягає не лише підсумковий результат, а й уся процедура його отримання: калібрування детекторів, моделі фону, алгоритми відбору подій і статистичні критерії значущості.

Характерною рисою сучасної фізики є також відкладена емпірична верифікованість. Теоретичні передбачення можуть десятиліттями залишатися неперевіреними через відсутність необхідних технологічних засобів. Класичним прикладом є гравітаційні хвилі, передбачені загальною теорією відносності, або бозон Гігса, необхідний для узгодженості Стандартної моделі. У цих випадках верифікованість визначалася не можливістю негайного експерименту, а принциповою можливістю створити установку, здатну зафіксувати відповідний ефект. Сам факт подальшого експериментального підтвердження таких передбачень є прикладом реалізації відкладеної верифікованості.

Важливою особливістю сучасного підходу є також розширене розуміння фальсифікації. Вона більше не зводиться до спростування одного окремого вимірювання. Наприклад, у космології перевірка моделей темної матерії або темної енергії здійснюється через узгодженість різних незалежних спостережень: реліктового випромінювання, розподілу галактик, гравітаційного

лінзування. Невідповідність між цими даними може фальсифікувати не окремий числовий результат, а цілу модель або клас теоретичних припущень.

Особливо це характерно для експериментів із великими масивами даних і застосуванням чисельних та алгоритмічних методів. У таких дослідженнях фальсифікація стосується всієї дослідницької системи, включно з моделями шуму, методами обробки даних і алгоритмами аналізу. Помилка або некоректне припущення на будь-якому з цих етапів може призвести до хибного фізичного висновку, навіть якщо окремі вимірювання формально видаються коректними.

Отже, у сучасній фізиці емпірична верифікованість і фальсифікованість зберігають статус фундаментального критерію науковості, але набувають системного характеру. Науковим визнається не просто твердження, що узгоджується з окремим експериментом, а така теоретико-експериментальна конструкція, яка допускає принципову перевірку, критичний аналіз і можливість спростування на будь-якому етапі дослідницького процесу.

2. Відтворюваність результатів

У класичному розумінні відтворюваність означала можливість повторити експеримент за аналогічних умов і отримати той самий результат. Такий підхід відповідав локальним і відносно простим експериментальним установкам, де всі істотні параметри могли бути відтворені в іншій лабораторії. Передбачалося, що інший дослідник, використовуючи ті самі прилади або їхні аналоги, здатен самостійно перевірити отриманий результат. Наприклад, вимірювання прискорення вільного падіння, спектральних ліній хімічних елементів або електричних характеристик матеріалів давали стабільні значення незалежно від місця і часу проведення дослідів. Саме така експериментальна відтворюваність забезпечувала об'єктивність і універсальність класичного фізичного знання.

Сучасний методологічний статус фізичного дослідження істотно змінює зміст цього критерію. Багато сучасних експериментів характеризуються високою складністю, масштабністю й унікальністю, що робить їх буквально повторення неможливим або економічно недосяжним. У таких умовах відтворюваність перестає означати просте повторення експерименту і набуває інформаційно-методологічного характеру.

У сучасній фізиці відтворюваність означає насамперед можливість повторного аналізу експериментальних даних, відтворення алгоритмів їх обробки та перевірку стійкості використаних моделей і параметрів. Науково коректним визнається результат, який може бути підтверджений шляхом незалежного аналізу тих самих даних іншими дослідниками або дослідницькими групами, навіть якщо сам експеримент не може бути повторений фізично.

У випадку великих експериментальних установок відтворюваність забезпечується також внутрішньою перевіркою результатів за допомогою різних детекторів, незалежних каналів вимірювання та альтернативних методів аналізу. Такий підхід дає змогу виявляти систематичні похибки і підвищує надійність отриманих висновків. Крім того, ключовим елементом відтворюваності стає відтворюваність чисельних і алгоритмічних процедур, включно з параметрами статистичного аналізу та методами машинного навчання.

Показовим прикладом є сучасна фізика елементарних частинок, де експериментальні результати підтверджуються незалежними колабораціями та альтернативними підходами до аналізу даних. Часто для цього застосовуються методи штучного інтелекту, що вимагає додаткової уваги до відтворюваності алгоритмів, навчальних вибірок і процедур оптимізації. У таких дослідженнях наукова відтворюваність досягається не через повторення експерименту, а через прозорість і повторюваність усіх етапів обробки та інтерпретації даних.

Отже, у сучасній фізиці відтворюваність результатів перестає бути винятково експериментальною вимогою і стає системним методологічним критерієм, що охоплює дані, алгоритми, моделі та дослідницьку інфраструктуру. Саме така розширена форма відтворюваності забезпечує наукову надійність фізичних результатів в умовах зростаючої складності експериментів і цифровізації наукового пізнання.

3. Математична формалізація і кількісність

Класична фізика від самого початку формувалася як математизована наука. Її фундаментальні закони описуються у вигляді чітко визначених аналітичних рівнянь, які пов'язують фізичні величини однозначними функціональними залежностями. Закони Ньютона, рівняння Максвелла,

рівняння теплопровідності або хвильові рівняння не лише фіксують якісні закономірності, а й дають змогу здійснювати прямі кількісні обчислення, робити точні передбачення та перевіряти їх експериментально. Саме математична форма забезпечує можливість об'єктивної перевірки фізичних тверджень і відрізняє фізичний закон від описового або спекулятивного узагальнення.

У сучасній фізиці зміст цього критерію істотно розширюється. Багато реальних фізичних систем є настільки складними, що їх аналітичний опис у замкненій формі є неможливим або практично недосяжним. Тому поряд із класичними рівняннями дедалі ширше застосовуються чисельні моделі, методи математичної статистики, стохастичні підходи та комп'ютерні симуляції. У таких випадках математична формалізація реалізується не у вигляді аналітичних рівнянь, а у формі алгоритмічно заданої моделі, яка все одно спирається на чітко визначені математичні структури й параметри.

Подальшим етапом розвитку цього критерію є використання методів машинного навчання і штучного інтелекту у фізичних дослідженнях. Алгоритми штучного інтелекту застосовуються для аналізу великих масивів експериментальних даних, побудови ефективних моделей складних систем і виявлення прихованих закономірностей. Проте сам факт використання таких алгоритмів не змінює вимоги науковості. Навіть якщо модель отримано із застосуванням штучного інтелекту, вона залишається науково прийнятною лише за умови, що має чіткий зв'язок із фізичними величинами, містить контрольовані параметри і допускає кількісне зіставлення з експериментальними даними.

У такий спосіб математична формалізація в сучасній фізиці переходить від винятково аналітичних форм до поєднання аналітичних, чисельних і алгоритмічних описів. Водночас числові параметри залишаються незмінним ядром критерію науковості. Фізична модель, незалежно від її технічної реалізації, повинна забезпечувати кількісні характеристики, перевірювані передбачення та однозначне співвіднесення з вимірюваними величинами. Саме це зберігає науковий статус фізики в умовах зростаючої складності досліджуваних систем і широкого впровадження штучного інтелекту.

4. Узгодженість з емпіричними даними і теоретична несуперечливість

Класична фізика висувала вимогу логічної узгодженості теорії з іншими встановленими законами та експериментальними фактами. Теорія вважалася науковою лише за умови, що її твердження не суперечать перевіреним емпіричним даним і утворюють внутрішньо зв'язну логічну систему. У цьому контексті узгодженість означала насамперед відсутність логічних суперечностей між основними законами та можливість їх спільного застосування для опису фізичних явищ.

У сучасній фізиці методологічний зміст цього критерію також суттєво розширюється. Йдеться вже не лише про узгодженість окремої теорії з іншими теоретичними положеннями, а про узгодженість усієї дослідницької системи, що охоплює експериментальні дані, теоретичні моделі, чисельні методи, статистичні процедури та алгоритмічні інструменти аналізу. Науковим визнається лише такий результат, який коректно інтегрується у цю систему без утворення логічних або емпіричних суперечностей.

Історія фізики показує, що поява нових теорій зазвичай не призводить до повного відкидання попередніх. Навпаки, нові теоретичні побудови включають старі моделі як граничні випадки у певних межах застосовності. Класичним прикладом є ньютонівська механіка, яка залишається справедливою для малих швидкостей і слабких гравітаційних полів, хоча була концептуально перевизначена в межах спеціальної і загальної теорії відносності. Така спадкоємність забезпечує кумулятивний характер фізичного знання і підтримує його внутрішню цілісність.

У сучасній фізиці цей принцип набуває особливої ваги через безпрецедентне зростання обсягів експериментальних даних і складності моделей. Нові теорії та чисельні моделі повинні узгоджуватися з великими масивами вже накопичених результатів, бути внутрішньо логічно несуперечливими і мати чітко визначені межі застосування. Крім того, вони мають коректно працювати в межах обчислювальних і статистичних процедур, на яких ґрунтується сучасний аналіз даних.

Показовим прикладом є квантова електродинаміка, яка в межах потрібної точності узгоджується з класичною електродинамікою і відтворює її результати за макроскопічних умов, водночас забезпечуючи коректний опис мікроскопічних процесів. Аналогічні вимоги узгодженості висуваються і до моделей, побудованих із застосуванням чисельних методів або штучного інтелекту. Такі моделі визнаються науково достовірними лише за умови, що вони не суперечать відомим фізичним законам, узгоджуються з експериментальними даними і мають чітко окреслені межі валідності.

Отже, узгодженість з емпіричними даними і теоретична несуперечливість у сучасній фізиці означають не статичну відповідність окремим фактам, а динамічну інтеграцію нового знання у вже наявну систему фізичних теорій, методів і даних. Саме ця системна узгодженість забезпечує стабільність, надійність і розвиток фізичного знання в умовах зростаючої складності наукових досліджень.

5. Прогностична спроможність

Одним із ключових критеріїв науковості фізики є її прогностична спроможність, тобто здатність теорій і моделей передбачати нові явища, ефекти або кількісні значення, які ще не були експериментально встановлені. Саме ця властивість відрізняє фізичне знання від суто описового або ретроспективного і надає йому особливого пізнавального та прикладного значення.

У класичній фізиці прогностична сила проявлялася передусім у точних аналітичних передбаченнях. Закони механіки Ньютона дозволили з високою точністю передбачати рух планет, комет і супутників, а також такі явища, як сонячні та місячні затемнення. Аналогічно класична теорія пружності дала змогу заздалегідь розраховувати поведінку інженерних конструкцій, а класична електродинаміка передбачила існування електромагнітних хвиль ще до їх експериментального відкриття. Саме здатність робити точні та перевірювані передбачення зробила класичну фізику надійною основою технічного і промислового розвитку.

У сучасній фізиці прогностична спроможність зберігає фундаментальне значення, але реалізується в умовах значно більшої складності досліджуваних

систем. Багато сучасних теорій і моделей не допускають простих аналітичних розв'язків, тому передбачення здійснюються за допомогою чисельного моделювання, статистичних методів і високопродуктивних обчислень. Наприклад, у фізиці конденсованого стану властивості нових матеріалів, таких як надпровідники або топологічні ізолятори, прогноуються на основі квантово-механічних розрахунків ще до їх синтезу в лабораторії.

Особливо показовими є приклади з фізики фазових переходів і складних систем. Чисельні моделі дають змогу передбачати критичні температури, характер переходів і поведінку систем поблизу критичних точок, що згодом перевіряється експериментально. В астрофізиці та космології прогностична спроможність проявляється у передбаченні спектрів випромінювання, еволюції зір або гравітаційних сигналів, які потім підтверджуються спостереженнями.

На сучасному етапі дедалі більшого значення набуває використання методів машинного навчання і штучного інтелекту для побудови прогностичних моделей. Алгоритми застосовуються, зокрема, для передбачення властивостей матеріалів, оптимізації експериментальних параметрів або прогнозування поведінки нелінійних і багатокомпонентних систем. Водночас науковий статус таких передбачень зберігається лише за умови, що вони є кількісно визначеними, фізично інтерпретованими та допускають експериментальну перевірку.

Важливо підкреслити, що прогностична спроможність у фізиці не зводиться до статистичного передбачення або апроксимації відомих даних. Науково значущими вважаються ті передбачення, які впливають із теоретичної або модельної структури і ведуть до відкриття нових ефектів або уточнення фундаментальних властивостей систем. Саме підтвердження таких передбачень експериментом є одним із найсильніших аргументів на користь науковості фізичної теорії.

Отже, прогностична спроможність у фізиці еволюціонувала від точних аналітичних передбачень класичної науки до складних чисельних і алгоритмічних прогнозів сучасності. Проте її методологічна сутність залишається незмінною: фізична теорія або модель є науковою лише тоді, коли

вона здатна робити нові, кількісно визначені та перевірювані передбачення щодо поведінки реальних фізичних систем.

6. Об'єктивність

У класичній фізиці об'єктивність тлумачилася передусім як незалежність результату від особистості дослідника. Вважалося, що за умови коректно поставленого експерименту фізичний факт «говорить сам за себе», а роль суб'єкта зводиться до реєстрації результату. Об'єктивність асоціювалася з безпосереднім вимірюванням, повторюваністю і використанням стандартизованих приладів та одиниць вимірювання. За такого підходу вважалося, що вплив дослідника на результат або відсутній, або є методологічно неістотним.

Сучасний методологічний статус фізичного дослідження демонструє істотно інше розуміння об'єктивності. Дані більше не розглядаються як «природні факти», що існують незалежно від засобів їх отримання, а як результат складної, багаторівневої процедури. Ця процедура охоплює конструкцію і характеристики вимірювального приладу, алгоритми збору та попередньої обробки сигналів, процедури калібрування, моделювання шумів і фонових ефектів, а також обчислювальні й статистичні методи аналізу. Кожен із цих етапів впливає на кінцевий результат і має бути методологічно контрольованим.

У цьому контексті об'єктивність у сучасній фізиці означає не усунення людини з процесу дослідження, а прозорість, відтворюваність і контрольованість усіх процедур, що ведуть до отримання результату. Методологічно об'єктивним визнається не будь-який виміряний числовий результат, а лише той, для якого чітко задокументовано шлях його отримання, включно з усіма припущеннями, корекціями та обмеженнями. Саме така процедурна об'єктивність забезпечує можливість незалежної перевірки і інтерсуб'єктивність, що демонструє консенсус наукової спільноти.

У класичній фізиці об'єктивність значною мірою забезпечувалася стандартизацією одиниць вимірювання і використанням відносно простих приладів, де вплив систематичних похибок був обмеженим і добре

контрольованим. Результат у таких умовах практично не залежав від конкретного дослідника, якщо експеримент було виконано коректно.

У сучасній фізиці поняття об'єктивності істотно розширюється і охоплює систематичний контроль похибок, складний статистичний аналіз, перевірку стійкості результатів до зміни параметрів обробки даних, а також аналіз можливих алгоритмічних упереджень. Особливо це важливо у дослідженнях, де використовуються автоматизовані системи обробки даних і методи штучного інтелекту. У таких випадках необхідно чітко відокремлювати фізично значущий сигнал від артефактів, зумовлених особливостями алгоритмів або навчальних вибірок.

Отже, об'єктивність у сучасній фізиці постає не просто як незалежність результату від суб'єкта, а як інституційно і методологічно забезпечена властивість наукового знання. Вона досягається через стандартизацію процедур, відкритість методів, контроль похибок і прозорість алгоритмічних рішень, що дозволяє зберігати наукову надійність фізичних результатів в умовах зростаючої складності експериментів і аналітичних інструментів.

7. Методологічна прозорість

У класичній фізиці методологічна прозорість розумілася насамперед як детальний опис експериментальної установки і теоретичних міркувань, достатній для того, щоб інший дослідник міг відтворити експеримент або перевірити логіку теоретичних висновків. Прозорість забезпечувалася публікацією формул, схем приладів, умов проведення дослідів і послідовності міркувань. За такого підходу вважалося, що цього опису досить для наукової перевірки результату.

У сучасній фізиці зміст цього критерію розширюється у зв'язку зі зростанням складності експериментів, масштабів дослідницьких інфраструктур, обсягів даних і ролі обчислювальних та алгоритмічних методів. Методологічна прозорість більше не обмежується текстовим описом експерименту або формальним виведенням рівнянь. Вона охоплює відкритий і структурований опис усіх етапів дослідження: від отримання даних до їх обробки, аналізу та інтерпретації.

Саме в цьому контексті ключову роль відіграє концепція відкритої науки. Відкрита наука закріплює методологічну прозорість як інституційну норму, що передбачає доступність експериментальних і спостережувальних даних, відкритість методів аналізу, публікацію програмного коду та можливість незалежної перевірки результатів. Для фізики це означає перехід від індивідуальної відтворюваності до колективної перевірки результатів у межах міжнародної наукової спільноти.

Науковість фізичного дослідження нині передбачає не лише формальний опис експериментальних умов, а й публікацію або довготривалий доступ до даних, чітке документування процедур калібрування, статистичної обробки і чисельного моделювання, а також явне формулювання припущень, обмежень і меж застосовності результатів. Без цього неможлива ані незалежна перевірка, ані коректне повторне використання результатів у подальших дослідженнях.

Сучасний методологічний статус фізичного дослідження робить прозорість і відповідальність не етичним доповненням, а внутрішнім критерієм науковості. Об'єктом оцінювання стає не тільки кінцевий результат, а весь шлях його отримання. Науково значущим визнається лише той результат, для якого інші дослідники можуть простежити, відтворити або критично проаналізувати всі ключові етапи дослідження, спираючись на відкриті дані та методи.

Особливої актуальності цей критерій набуває у дослідженнях із використанням штучного інтелекту. У межах відкритої науки наголошується на необхідності прозорості алгоритмів, доступності навчальних вибірок або їх опису, документування параметрів моделей і аналізу стійкості результатів. Непрозорі алгоритмічні рішення можуть призводити до спотворення фізичної інтерпретації, тому відповідальність за використані алгоритми стає складовою наукової доброчесності.

Отже, у сучасній фізиці методологічна прозорість означає принципову відкритість дослідницького процесу, інституційно закріплену в практиках відкритої науки. Вона забезпечує можливість перевірки, повторного використання та розвитку фізичного знання й є необхідною умовою

відтворюваності, об'єктивності та прогностичної надійності результатів у цифрову епоху.

У підсумку сучасні критерії науковості охоплюють не лише формальні вимоги до результатів, а й відповідальність за використані методи, дані та алгоритми, здатність до аналітичного мислення і критичної оцінки власних висновків. У цьому сенсі методологічна прозорість і відкритість стають не зовнішнім етичним доповненням, а внутрішньою умовою наукової легітимності фізичних досліджень.

Отже, сучасна фізика залишається науковою дисципліною не всупереч зростаючій складності своїх об'єктів і методів, а саме завдяки цій складності, оскільки вона формалізована, методологічно контрольована й підпорядкована чітко визначеним критеріям науковості. Саме це забезпечує надійність, відтворюваність і прогностичну силу фізичного знання в умовах швидкого розвитку техніки, цифрових технологій і штучного інтелекту.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Чи можна вважати сучасну фізику «теоретично-експериментальною» дисципліною, чи вона вже стала «теоретично-експериментально-алгоритмічною»? Що це означає для методологічного статусу фізичного знання?

2. Як змінюється поняття емпіричного факту в умовах використання машинного навчання для первинної обробки експериментальних даних? Чи можна говорити, що алгоритм стає співтворцем фізичної реальності?

3. Чи є великі міжнародні експерименти (CERN, LIGO, космічні телескопи) новою формою колективного суб'єкта пізнання?

4. У яких випадках чисельна симуляція може вважатися еквівалентом експерименту? Чи має «чисельний експеримент» той самий епістемологічний статус, що й лабораторний?

5. Чи можлива фальсифікація теорії в умовах складної інфраструктурної системи, де перевірці підлягає не лише теорія, а вся дослідницька екосистема (прилади, алгоритми, статистика)?

6. Чи зберігає класична вимога математичної формалізації свою визначальну роль у добу data-driven підходів? Чи може модель, побудована AI без явного фізичного формалізму, бути науковою?

7. Чи є сучасна фізика кумулятивною чи радше ітеративною?

8. Як слід розуміти відтворюваність у випадку унікальних експериментів, які неможливо повторити фізично?

9. Чи створює інтеграція штучного інтелекту нові ризики для критеріїв науковості (зокрема прозорості та об'єктивності)? Якими мають бути нові методологічні вимоги до ШІ-орієнтованих досліджень?

10. Чи є міждисциплінарність ознакою сили сучасної фізики, чи вона свідчить про розмивання її методологічної автономії?

Розділ 2. Інформаційне забезпечення фізичних наукових досліджень

2.1. Дані в системі фізичного пізнання: поняття, міжнародні визначення та їх методологічні обмеження

2.1.1. Поняття даних у фізичних дослідженнях

Інформаційне забезпечення є невід'ємною складовою сучасної методології фізичних наук. Воно охоплює сукупність процесів збору, зберігання, оброблення, передавання та інтерпретації даних, що забезпечують відтворюваність, перевірюваність і наукову достовірність результатів фізичних досліджень. Жодне фізичне дослідження не може бути реалізоване без системного підходу до роботи з даними, оскільки саме дані становлять емпіричну основу теоретичних узагальнень і моделей.

У міжнародних аналітичних документах наголошується, що у XXI столітті наука дедалі більше набуває характеру діяльності, керованої даними та знанням (*data-driven i knowledge-driven science*), що зумовлює потребу в розвиненій цифровій інфраструктурі, стандартизації та глобальній науковій співпраці. Зокрема, у *UNESCO Science Report (2021)* підкреслюється, що сучасні наукові дослідження значною мірою залежать від ефективного управління даними, відкритого доступу та міждисциплінарної взаємодії.

У фізиці інформаційне забезпечення виступає не лише як сукупність технічних засобів, а як фундаментальний методологічний принцип, що поєднує експеримент, теоретичний аналіз і комп'ютерне моделювання в єдину систему наукового пізнання. Воно охоплює повний цикл дослідження: від первинної фіксації вимірювань і спостережень до формування узагальненого наукового знання, придатного для перевірки, відтворення та подальшого розвитку.

Сучасні фізичні дослідження дедалі більше визначаються не лише обсягом зібраних даних, а й їхньою якістю, структурованістю, керованістю та інтерпретованістю. Провідні міжнародні організації, зокрема OECD (*Organisation for Economic Co-operation and Development*), UNESCO (*United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization*), Європейська комісія та

ISO (*International Organization for Standardization*), підкреслюють, що дані перетворилися на центральний ресурс науки. Коректне визначення, оброблення та інтерпретація даних розглядаються як необхідна умова забезпечення відтворюваності, відкритості й наукової надійності результатів.

Отже, фізика поступово переходить від класичної експериментально-теоретичної моделі до даноцентричної та штучно-інтелектуально інтегрованої науки. У цьому контексті поняття «дані», «інформація» та «знання» потребують уточнення з урахуванням специфіки фізичного пізнання та мають ґрунтуватися на загальноприйнятих міжнародних стандартах і рекомендаціях.

У науковому розумінні дані є первинною формою наукового знання. Вони являють собою зафіксовані результати спостережень, вимірювань або обчислень, що відображають властивості, стани чи динаміку фізичних об'єктів і процесів. Саме дані є вихідним матеріалом для подальшої інтерпретації, узагальнення та побудови фізичних теорій, а також для перевірки гіпотез і відтворення дослідницьких процедур.

Згідно з документами OECD (*Making Open Science a Reality, 2015*), дані визначаються як формалізовані представлення фактів, концептів або інструкцій, придатні для передавання, інтерпретації чи оброблення людиною або машиною. Таке визначення підкреслює універсальний характер даних, їхню придатність до автоматизованої обробки та роль у цифровому науковому середовищі, де дані дедалі частіше стають основою інфраструктурних рішень і міжнародного обміну.

Загальноприйняте визначення поняття «дані» запропоноване Міжнародною організацією зі стандартизації в документі ISO/IEC 2382:2015 (*Information Technology – Vocabulary*). У ньому дані визначаються як формалізоване представлення інформації, придатне для комунікації, інтерпретації або оброблення. У цьому підході акцент зроблено на формальності подання, можливості багаторазового використання та універсальності застосування, що є особливо важливим у контексті цифрових систем зберігання й обробки.

Водночас зазначається, що таким загальним визначенням властиві високий рівень абстракції та міждисциплінарний характер, унаслідок чого специфіка окремих наукових галузей, зокрема фізики, у ньому безпосередньо не відображена. Для фізики принципово важливо, що дані не є нейтральним набором чисел: вони завжди пов'язані з вимірювальними приладами, умовами експерименту, процедурами калібрування та теоретичними моделями, які задають рамки їх інтерпретації.

У документах UNESCO (*Recommendation on Open Science, 2021*) використовується поняття «наукові дані», під яким розуміють фактичні записи числового, текстового, зображувального, звукового або іншого характеру, що використовуються як первинні джерела наукових досліджень. Хоча в цьому визначенні наголошується на фактичному статусі даних і їхній ролі як джерела наукового знання, технічні та дисциплінарні особливості роботи з ними залишаються поза увагою, що потребує додаткового уточнення саме для фізичного дослідницького контексту.

2.1.2. Специфіка фізичних наукових даних

Наведені міжнародні визначення створюють універсальну основу для розуміння поняття «дані», однак вони не охоплюють низку принципово важливих характеристик, притаманних саме фізичним науковим даним. Фізика як експериментально-кількісна наука формує специфічний тип даних, безпосередньо пов'язаний із вимірюваннями, приладовими системами, метрологічними процедурами та теоретичними моделями. Відтак фізичні дані не лише фіксують результати, а й репрезентують взаємодію між фізичною реальністю, інструментальними засобами та обчислювально-теоретичним апаратом.

Фізичні наукові дані характеризуються такими ключовими особливостями:

1. *Кількісність і метризованість*, оскільки фізика оперує вимірюваними величинами, вираженими в одиницях Міжнародної системи (SI), з обов'язковим урахуванням похибок, калібрування та метрологічної точності.

2. *Експериментальний характер*, адже дані є результатом взаємодії вимірювального приладу з реальним фізичним об'єктом або процесом.

3. *Розвинена система метаданих*, що охоплює інформацію про конфігурацію детекторів, параметри експерименту, рівень шуму, умови калібрування, температуру, тиск тощо.

4. *Теоретична зумовленість*, оскільки у фізиці дані не існують поза межами інтерпретаційної моделі або теорії, а значення величин набувають змісту через відповідність фізичним законам, рівнянням і припущенням.

5. *Великі обсяги та високі швидкості надходження*, що є характерним для сучасних експериментів, наприклад, десятки петабайтів даних на рік у проєктах Великого адронного колайдера або десятки терабайтів за ніч у масштабних астрономічних оглядах.

6. *Стандартизовані формати зберігання й обробки*, зокрема ROOT, HDF5, NetCDF, FITS, спеціально розроблені для фізичних досліджень і довготривалої роботи з даними.

З урахуванням сучасних підходів до трактування даних і специфіки фізичного пізнання доцільно сформулювати таке визначення: фізичні наукові дані – це формалізовані кількісні записи вимірювань, спостережень або числових симуляцій фізичних явищ, подані у машинно-читаній формі, описані системою метаданих і придатні для аналітичного, статистичного та обчислювального опрацювання.

У фізичних дослідженнях прийнято розрізняти експериментальні, обчислювальні та аналітичні дані. Експериментальні дані отримують безпосередньо в процесі вимірювань у лабораторних або польових умовах. Обчислювальні дані виникають у результаті числового моделювання фізичних процесів. Аналітичні дані є похідними від первинних і охоплюють узагальнені, очищені та нормалізовані результати, які вже частково інтегровані в інтерпретаційну логіку та порівняльний аналіз.

Показовим прикладом є система *Worldwide LHC Computing Grid* у CERN, яка щорічно обробляє понад 30 петабайтів даних від детекторів зіткнень частинок. Кожен набір даних супроводжується розширеними метаданими, що забезпечує можливість повторного аналізу, перевірки результатів і довготривалого збереження наукової цінності. У цьому сенсі інфраструктура постає не лише як технічна платформа, а і як інструмент методологічного забезпечення відтворюваності.

Важливим є також етичний вимір роботи з даними у фізиці. Дослідники зобов'язані забезпечувати цілісність, точність і достовірність даних, уникати маніпуляцій, дотримуватися принципів відкритої науки та стандартів довготривалого збереження. Етична відповідальність охоплює не лише коректність фіксації результатів, а й повноту метаданих, відтворюваність процедур оброблення та прозорість аналітичних рішень.

2.1.3. Збір, оброблення та управління фізичними даними

Методи збору та оброблення даних є ключовими складниками інформаційного забезпечення фізичних досліджень. Вибір методів визначається природою досліджуваного фізичного явища і може включати спостереження, експеримент або числове моделювання. Кожен із цих підходів формує специфічні масиви даних і висуває власні вимоги до точності, калібрування, фільтрації та валідації.

У класичній фізиці домінують приладові методи, зокрема електричні, оптичні, магнітні, ядерні та інші. Сучасним дослідженням дедалі більше властиві автоматизовані системи збору даних DAQ (*Data Acquisition Systems*), які забезпечують реєстрацію мільйонів подій за секунду з високою часовою та просторовою роздільною здатністю. За цих умов збір даних перетворюється на алгоритмічно організований процес відбору та первинної фільтрації.

Сучасні наукові інфраструктури ґрунтуються на принципах інтеграції, автоматизації та використання методів машинного навчання для опрацювання великих потоків даних. У межах *European Open Science Cloud* підкреслюється

роль цифрових екосистем, що поєднують обчислювальні ресурси, сховища даних і аналітичні інструменти, формуючи середовище, у якому дані циркулюють між дослідницькими групами та дисциплінами, а результати стають відтворюваними в межах стандартизованих процедур.

У фізиці оброблення даних охоплює кілька послідовних етапів: попередню фільтрацію шумів, калібрування вимірювальних систем, статистичний аналіз і візуалізацію результатів. Ці етапи забезпечують перехід від сирих вимірювань до науково інтерпретованих результатів, придатних для порівняння, узагальнення та подальшого теоретичного осмислення. Важливо, що кожен етап має бути методологічно задокументований – від параметрів фільтрації до критеріїв відсікання та способів оцінювання похибок.

У сучасному науковому контексті поняття даних у фізичних дослідженнях нерозривно пов'язане з принципами відкритості та повторного використання. Дані більше не розглядаються як локальний продукт окремого експерименту або дослідницької групи, а як елемент глобальної наукової інфраструктури. Саме тому концепція відкритих даних (*Open Data*) стала одним із базових принципів сучасної науки та ключовим чинником забезпечення наукової верифікації.

Згідно з *FAIR Data Principles*, наукові дані мають відповідати чотирьом фундаментальним вимогам: бути знаходжуваними (*Findable*), доступними (*Accessible*), інтероперабельними (*Interoperable*) та придатними до повторного використання (*Reusable*). Ці принципи не лише визначають технічні стандарти зберігання й опису даних, а й формують нову методологічну основу фізичних досліджень, у межах якої дані розглядаються як довготривалий науковий ресурс.

Європейська комісія у 2023 році офіційно підтвердила FAIR-принципи як обов'язкові для всіх дослідницьких проєктів, що реалізуються в межах програми *Horizon Europe*. Це означає, що фізичні дані мають супроводжуватися стандартизованими метаданими, бути доступними для незалежної перевірки та придатними для повторного аналізу в інших дослідницьких контекстах. Відкритість даних у такий спосіб стає складовою критерієм науковості поряд із

точністю та відтворюваністю, а вимоги до роботи з даними дедалі частіше закріплюються в політиках грантодавців і стандартах наукових інституцій.

Практична реалізація цих принципів у фізиці здійснюється через спеціалізовані відкриті платформи даних. Зокрема, CERN підтримує *CERN Open Data Portal*, який надає доступ до експериментальних даних з детекторів Великого адронного колайдера разом із документацією, програмним кодом і метаданими. Аналогічну політику впроваджують *NASA* та *European Space Agency*, які створили відкриті репозитарії спостережних і супутникових даних, широко застосовуваних у фізиці Землі, астрофізиці та кліматичних дослідженнях. У національному контексті України важливу роль відіграє URIS—Українська система дослідницької інформації, що функціонує як інструмент інтеграції українських наукових даних до *European Research Area*. Розвиток URIS, підтриманий МОН України, сприяє гармонізації українських фізичних досліджень із європейськими стандартами відкритої науки та управління даними.

Отже, у сучасній фізиці поняття даних виходить за межі формального розуміння їх як зафіксованих результатів вимірювань. Фізичні дані дедалі більше постають як відкритий, структурований і методологічно регламентований ресурс, що забезпечує відтворюваність результатів, розвиток міждисциплінарних досліджень і колективний характер наукового знання. У цьому сенсі відкриті дані є не лише технічною вимогою, а фундаментальною умовою сучасного фізичного пізнання.

2.2. Перетворення даних на інформацію як ключовий етап фізичного пізнання

2.2.1. Перетворення фізичних даних на інформацію

Ключовим етапом інформаційного забезпечення фізичних наукових досліджень є перетворення первинних даних на інформацію. Саме на цьому етапі здійснюється перехід від формальних, часто надлишкових і зашумлених результатів вимірювань до впорядкованого та осмисленого опису фізичних

явищ. Перетворення даних на інформацію охоплює інтерпретацію, структурування, контекстуалізацію та надання даним наукового змісту, що принципово відрізняє «масив даних» від «опису процесу».

Відповідно до стандарту ISO/IEC 2382:2023, інформація визначається як дані, інтерпретовані в певному контексті з метою набуття змісту. Ключовою відмінністю між даними та інформацією є наявність контексту й смислового наповнення. Дані можуть існувати ізольовано як набір чисел або сигналів, тоді як інформація завжди пов'язана з інтерпретаційною моделлю, яка визначає, що саме вважається значущим і в який спосіб це описується.

У фізиці перетворення даних на інформацію означає перехід від «сирих» результатів вимірювань або симуляцій до структурованих описів фізичних процесів. Наприклад, у класичній механіці виміряні значення координат і часу набувають інформаційного змісту лише після побудови графіків залежності швидкості або прискорення від часу та співвіднесення їх із рівняннями руху. У ядерній фізиці масиви даних щодо імпульсів і енергій частинок стають інформацією після побудови енергетичних спектрів, виділення піків і зіставлення їх із конкретними ядерними переходами. У багатьох розділах фізики саме процедура «перекладу» даних мовою спектрів, полів, розподілів і кореляцій формує інформаційний образ явища.

У *UNESCO Science Report (2021)* наголошується, що перетворення даних на інформацію охоплює процеси абстрагування, контекстуалізації та зменшення невизначеності. У фізичних дослідженнях це означає не лише технічне опрацювання сигналів, а й методологічно обґрунтоване зниження впливу випадкових чинників, шумів і систематичних похибок, що може істотно змінювати інтерпретацію результатів.

На практиці цей етап включає низку взаємопов'язаних процедур. До них належать нормалізація вимірювань, приведення даних до єдиної шкали або системи одиниць, усунення фонових складових, корекція систематичних зсувів, аналіз статистичних похибок і перевірка достовірності результатів. Застосування статистичних методів, зокрема усереднення, фільтрації, кореляційного аналізу та

байєсівських підходів, дає змогу відокремити фізично значущі сигнали від випадкових флуктуацій, а також коректно оцінити міру впевненості у висновках.

Важливого значення набувають стандарти подання та опису результатів, які забезпечують сумісність і порівнюваність інформації між різними лабораторіями, експериментами та науковими спільнотами. Принципи відкритої науки, зокрема *FAIR Data Principles*, підкреслюють необхідність того, щоб інформація була придатною до повторного використання, машинного опрацювання та незалежної перевірки; отже, процедури перетворення даних на інформацію мають бути достатньо прозорими й відтворюваними.

2.2.2. Особливості фізичної інформації

Специфікою фізичних наук є те, що інформація виникає лише після застосування теоретичної або феноменологічної моделі. На відміну від багатьох інших галузей знання, у фізиці самі по собі оброблені дані ще не гарантують наукового змісту без інтерпретації в межах певних законів, рівнянь або гіпотез. Це означає, що фізична інформація завжди є модельно зумовленою, а її зміст формується в точці перетину «дані – метод обробки – модель».

Наприклад, спектр випромінювання набуває інформаційного значення лише після віднімання фону, калібрування детектора та співвіднесення піків із конкретними енергетичними переходами. Аналогічно, реконструйована траєкторія частинки в детекторі є результатом застосування алгоритмів відновлення та кінематичних моделей руху. Калібрований лазерний сигнал стає інформацією лише після врахування характеристик оптичної системи й умов експерименту. Карта космічного мікрохвильового фону є інформаційним об'єктом лише після складного опрацювання даних, вилучення астрофізичних завад і порівняння з космологічними моделями, які задають інтерпретаційну перспективу.

Отже, фізична інформація завжди поєднує кілька взаємопов'язаних компонентів: форму (вигляд обробленого сигналу, спектра, графіка або поля), зміст (відображення конкретного фізичного процесу або закономірності),

контекст (який охоплює модель, умови експерименту, методи обробки та обмеження вимірювальної системи). Така структура є методологічно важливою, адже підкреслює, що інформаційний зміст не є «автоматично наявним» у даних.

З огляду на це фізичну інформацію доцільно визначити так: фізична інформація – це оброблені та інтерпретовані дані фізичних вимірювань або числового моделювання, які в межах певної теоретичної чи експериментальної моделі набули наукового змісту та відображають закономірності досліджуваного явища.

Слід підкреслити, що перетворення даних на інформацію є не лише технічним етапом аналізу, а фундаментальною методологічною ланкою фізичного пізнання. Саме на цьому рівні встановлюється зв'язок між емпіричними результатами та фізичними законами, що забезпечує перехід від вимірювання до наукового розуміння, а також визначає межі достовірності й коректності інтерпретації.

2.3. Знання як валідована і системна форма фізичної інформації

2.3.1. Перетворення інформації на знання

У структурі наукового пізнання знання посідає найвищий рівень ієрархії. Воно формується тоді, коли інформація проходить послідовні етапи систематизації, перевірки, узагальнення та інтеграції в цілісну теоретичну конструкцію. Якщо дані є первинною фіксацією фактів, а інформація надає їм смислового контексту, то знання забезпечує пояснення, передбачення та концептуальне розуміння закономірностей реального світу, зокрема обґрунтування причинно-наслідкових зв'язків.

У *UNESCO Science Report (2021)* наукове знання визначається як структурований і перевірений масив інформації, що дає змогу розуміти та прогнозувати. Це визначення підкреслює дві принципові характеристики знання: по-перше, його внутрішню впорядкованість і системність; по-друге, здатність не лише описувати вже спостережувані явища, а й передбачати нові результати та ефекти, тобто виконувати прогностичну функцію.

У фізичних науках знання фіксується у формі законів, рівнянь, принципів, теоретичних моделей і узагальнених концепцій. Класичним прикладом є закон збереження енергії, який сформувався не як одноразове відкриття, а як підсумок тривалого аналізу великого масиву експериментальних результатів у механіці, термодинаміці та електродинаміці. Аналогічно, систематизація спектрів атомного випромінювання та виявлення їх закономірностей привели до становлення квантової механіки, яка не лише пояснила вже відомі експериментальні факти, а й передбачила нові явища, зокрема дискретність енергетичних рівнів та тунелювання. Саме здатність теорії виходити за межі наявного емпіричного матеріалу є однією з визначальних ознак знання.

Отже, знання у фізиці не зводиться до суми накопиченої інформації. Воно є результатом постійної перевірки, критичного осмислення, логічного узгодження та включення окремих результатів у ширший теоретичний контекст. Важливою рисою фізичного знання є його історична змінність: теорії уточнюються, розширюються або замінюються внаслідок появи нових даних, інструментів і методів аналізу, які змінюють межі спостережуваного й вимірюваного.

У сучасній фізиці процес формування знання дедалі частіше відбувається в умовах даноцентричної та III-інтегрованої науки. Наприклад, відкриття гравітаційних хвиль стало можливим не лише завдяки експериментальним вимірюванням у межах проєкту LIGO, а й завдяки складним алгоритмам аналізу сигналів, що узагальнили інформацію з багаторічних спостережень і дозволили підтвердити передбачення загальної теорії відносності. Подібним чином у фізиці елементарних частинок знання про властивості бозона Гігса сформувалося внаслідок інтеграції експериментальних даних, статистичних методів і теоретичних моделей, де обґрунтованість висновків забезпечувалася сукупністю незалежних перевірок, контролем систематичних похибок і узгодженістю з теоретичними положеннями.

2.3.2. Особливості фізичного знання

Фізичне знання має низку специфічних рис, що відрізняють його від знання в інших галузях науки.

1. *Формалізованість.* Фізичне знання виражається у строгих математичних формах: рівняннях, законах, симетріях, операторних співвідношеннях і моделях. Така формалізованість забезпечує точність, однозначність інтерпретації та можливість кількісного прогнозування. Наприклад, рівняння Максвелла не лише описують електромагнітні явища, а й дають змогу передбачати поведінку хвиль у різних середовищах.

2. *Верифікованість і фальсифіковуваність.* Відповідно до методологічного підходу К. Поппера, наукове знання має бути принципово фальсифіковуваним, тобто фізичні теорії повинні допускати експериментальну перевірку і потенційне спростування. Саме ця властивість відмежовує наукове знання від тверджень, які неможливо спростувати і виконує функцію критерію демаркації.

3. *Системність.* Фізичне знання існує не у вигляді ізольованих тверджень, а як елемент цілісних теоретичних систем. Закони і моделі пов'язані між собою в межах таких теорій, як класична механіка, квантова механіка, електродинаміка або термодинаміка. Модифікація одного елемента системи часто зумовлює перегляд усієї теоретичної побудови, що підкреслює внутрішню зв'язність фізичного знання.

4. *Відтворюваність у сучасних умовах.* Традиційно відтворюваність фізичного знання забезпечувалася повторенням експериментів. Сьогодні до цього додається відтворюваність через числове моделювання, комп'ютерні симуляції та відкриті набори даних. Використання високопродуктивних обчислень і методів штучного інтелекту дає змогу перевіряти теоретичні передбачення навіть у випадках, коли прямий експеримент є технічно, економічно або принципово недоступним у лабораторних умовах.

З огляду на наведене фізичне знання можна визначити так: фізичне знання – це формалізована, верифікована та системно організована інформація

про фізичні закономірності, інтегрована в теоретичну структуру і відтворювана за допомогою експерименту, числового моделювання або їх поєднання.

Рівень знання завершує ієрархію «дані – інформація – знання» у фізичних науках, забезпечуючи перехід від фіксації явищ до їх пояснення та передбачення. Саме на цьому рівні фізика реалізує свою пізнавальну функцію як фундаментальна наука, здатна не лише описувати світ, а й формувати цілісне уявлення про його закони, межі застосування моделей і умови їх перевірки.

2.4. Штучний інтелект у сучасному інформаційному забезпеченні фізики

2.4.1. Штучний інтелект як методологічний інструмент формування фізичних даних, інформації та знання

У сучасній фізиці штучний інтелект поступово перестає бути допоміжним технічним засобом аналізу й інтегрується в усі рівні наукового пізнання: від формування первинних даних до побудови фізичного знання. Цей процес не є різким розривом із класичною методологією, а має еволюційний і внутрішньо узгоджений характер, зумовлений зростанням обсягів даних, ускладненням експериментальних систем і потребою в нових підходах до інтерпретації результатів.

У документах OECD, UNESCO та Європейської комісії підкреслюється, що у XXI столітті наука переходить до моделі *data-driven science*, у межах якої алгоритмічні методи, машинне навчання та штучний інтелект стають невід’ємними складниками наукової інфраструктури. У фізиці цей перехід є особливо помітним, оскільки сучасні експерименти генерують такі обсяги даних, які принципово неможливо опрацювати виключно традиційними методами. Це зумовлює потребу в нових механізмах відбору, фільтрації та інтерпретації результатів.

На етапі формування фізичних даних штучний інтелект дедалі частіше інтегрується безпосередньо в системи збору інформації. Алгоритми машинного навчання використовуються для онлайн-фільтрації подій, керування

детекторами та оптимізації параметрів експерименту в режимі реального часу. Показовим прикладом є експерименти в CERN, де тригерні системи на основі машинного навчання відбирають фізично значущі події зі сотень мільйонів зіткнень частинок за секунду. Без таких алгоритмів значна частина потенційно важливих даних була б втрачена ще на етапі реєстрації. Отже, штучний інтелект впливає не лише на обробку, а й на сам склад первинних фізичних даних, визначаючи, які саме події потрапляють у подальший аналіз.

У термоядерних дослідженнях, зокрема в межах проєкту ITER, алгоритми штучного інтелекту застосовуються для контролю стабільності плазми та адаптивного налаштування діагностичних систем. У цьому випадку фізичні дані формуються вже з урахуванням прогнозів, побудованих ШІ, що змінює класичне уявлення про пасивний характер вимірювання та посилює взаємозалежність між експериментом і алгоритмічним керуванням.

На етапі перетворення даних на інформацію роль штучного інтелекту полягає в автоматизованому виявленні структур, закономірностей і значущих сигналів у великих і зашумлених масивах даних. У цьому контексті ШІ виконує функції контекстуалізації та зменшення невизначеності, забезпечуючи виявляти закономірності та класифікувати події в обсягах, недосяжних для ручної обробки.

У межах *LIGO Scientific Collaboration* алгоритми глибинного навчання застосовуються для розпізнавання слабких сигналів гравітаційних хвиль на фоні складного шуму. Такі алгоритми не лише прискорюють аналіз, а й змінюють сам спосіб формування інформації про фізичні процеси, дозволяючи виявляти події, які раніше могли залишатися непоміченими або вимагали надмірних обчислювальних ресурсів.

В астрофізиці, зокрема в оглядових проєктах типу *Rubin Observatory*, машинне навчання використовується для автоматичної класифікації астрономічних об'єктів, виявлення короткочасних подій і побудови карт розподілу матерії. У цьому випадку інформація про фізичні процеси формується як результат взаємодії даних спостережень із навченою моделлю, яка інтегрує

попередні знання та статистичні закономірності, водночас висуваючи нові вимоги до прозорості й валідації результатів.

Найбільш методологічно значущою є роль штучного інтелекту на рівні формування фізичного знання. На цьому етапі ШІ виходить за межі суто інструментальної обробки інформації й починає брати участь у побудові моделей, генерації гіпотез і перевірці теоретичних припущень. У сучасній фізиці алгоритми машинного навчання використовуються для автоматизованого пошуку параметрів теорій, оптимізації складних моделей і виявлення ефективних описів багатовимірних систем. Так, у фізиці конденсованого стану ШІ допомагає ідентифікувати фазові переходи та нові стани матерії без попереднього задання порядкових параметрів, а в космології застосовується для зіставлення числових симуляцій зі спостережуваними даними та уточнення моделей еволюції Всесвіту.

Принципово важливо, що в цих випадках штучний інтелект не замінює фізичну теорію, а виступає її інструментальним розширенням. Знання, сформоване за участю ШІ, залишається валідним лише за умови, що отримані результати можуть бути інтерпретовані в межах фізичних законів, перевірені незалежними методами та інтегровані в існуючі теоретичні системи з чітким визначенням умов застосування і меж коректності.

Інтеграція штучного інтелекту у фізичні дослідження має суттєві методологічні наслідки. По-перше, змінюється статус даних, які дедалі частіше формуються як результат взаємодії експерименту з алгоритмічними моделями. По-друге, інформація стає більш контекстуалізованою, але водночас менш прозорою, що вимагає нових підходів до інтерпретованості та верифікації. По-третє, фізичне знання набуває гібридного характеру, поєднуючи класичні теоретичні конструкції з алгоритмічними моделями.

Отже, штучний інтелект органічно входить у структуру фізичного пізнання як необхідний інструмент сучасної науки. Він не руйнує традиційну ієрархію «дані – інформація – знання», а трансформує її, підсилюючи кожен рівень і відкриваючи нові можливості для пояснення та передбачення фізичних

явищ. У цьому сенсі ШІ слід розглядати не як зовнішню технологію, а як внутрішній методологічний компонент сучасної фізики.

2.4.2. Епістемологічні ризики інтеграції ШІ у фізичні дослідження

Активне впровадження штучного інтелекту в сучасні фізичні дослідження супроводжується не лише методологічними перевагами, а й низкою епістемологічних ризиків, які вже проявляються в реальних наукових практиках. Вони стосуються природи наукового пояснення, статусу істини, критеріїв верифікації та прозорості знання. Ці ризики не є суто технічними, а мають фундаментальний методологічний характер, оскільки стосуються засад наукового пізнання й впливають на те, як фізика розрізняє пояснення, опис, прогноз і доказ. Сьогодні вони фіксуються на прикладі провідних міжнародних проєктів і наукових інфраструктур, де алгоритмічні рішення стали частиною повсякденної дослідницької практики.

Одним із ключових епістемологічних викликів є феномен «чорної скриньки» (*black box*). Багато сучасних алгоритмів глибинного навчання, що демонструють високу ефективність у класифікації, прогнозуванні та виявленні закономірностей, не надають прозорого пояснення способів формування результату. Для фізики це є принциповою проблемою, оскільки виникає ризик послаблення пояснювальної функції фізичного знання та зменшення прозорості зв'язку між моделлю й реальністю.

У класичній фізиці рівняння та моделі мають інтерпретований характер: кожен член рівняння наділений фізичним змістом, а математична структура відображає закономірності реального світу. У випадку складних ШІ-моделей цей зв'язок часто послаблюється: алгоритм може коректно передбачати результат, не надаючи водночас зрозумілого фізичного пояснення. У такій ситуації виникає ризик редукції фізичного знання до суто інструментального прогнозування, наближеного до феноменологічного опису без глибокого теоретичного підґрунтя та без відповіді на питання «чому».

В експериментах з фізики елементарних частинок, зокрема в межах CERN, алгоритми глибинного навчання широко застосовуються для класифікації подій, відбору сигналів і фільтрації фону. Такі моделі часто демонструють вищу ефективність порівняно з традиційними методами аналізу, однак мають обмежену інтерпретованість. У практиці аналізу даних Великого адронного колайдера трапляються ситуації, коли нейронна мережа коректно відокремлює фізично значущі події, але фізичний зміст її рішень залишається непрозорим. Це ускладнює інтерпретацію результатів у межах Стандартної моделі або її розширень і створює ризик використання ефективного інструменту без повного розуміння фізичних ознак, що лежать в основі класифікації.

Інший фундаментальний ризик пов'язаний із проблемою верифікації та фальсифікації результатів, отриманих за допомогою ШІ. У класичній методології науки знання має бути принципово фальсифіковуваним, тобто допускати можливість експериментального спростування. Для традиційних фізичних теорій це означає чітке формулювання гіпотез і передбачень, що можуть бути перевірені незалежними експериментами. У випадку ШІ-моделей ситуація ускладнюється, оскільки їхня внутрішня логіка рідко формулюється у вигляді явних гіпотез або рівнянь. Постає питання, що саме підлягає фальсифікації у випадку помилки або нестабільного результату та де локалізується «наукове твердження» у складній алгоритмічній системі.

Алгоритми можуть бути чутливими до архітектури мережі, вибору навчальних даних, процедур регуляризації та параметрів оптимізації. Унаслідок цього критерій науковості зміщується від фальсифікації окремих тверджень до статистичної валідації моделей, що потребує переосмислення класичних епістемологічних підходів і водночас вимагає строгих протоколів відтворюваності саме для алгоритмів. Це ускладнює класичну верифікацію, оскільки об'єктом перевірки стає не лише фізичне твердження, а й алгоритмічна конструкція.

У межах *LIGO Scientific Collaboration* алгоритми машинного навчання використовуються для розпізнавання слабких сигналів гравітаційних хвиль на тлі складного шуму. Дослідження показують, що глибинні нейронні мережі

здатні виявляти сигнали швидше за традиційні методи узгодженої фільтрації. Водночас виникає проблема: алгоритм може ідентифікувати сигнали, що корелюють із навчальними зразками, але не мають однозначної фізичної інтерпретації. У такому випадку ускладнюється застосування класичного критерію експериментальної верифікації, оскільки значущість події виявляється алгоритмічно опосередкованою.

Інтеграція штучного інтелекту впливає і на розуміння істини в фізиці. Традиційно істина пов'язується з відповідністю теоретичних тверджень реальним фізичним процесам, підтвердженою експериментом і логічною узгодженістю теорії. У ШІ-орієнтованих підходах дедалі більшого значення набуває прагматичний та інструментальний критерії істини: ефективність прогнозу, мінімізація помилок, оптимальність рішень. Це породжує ризик підміни онтологічної істини епістемічною корисністю, коли алгоритм демонструє високу точність без відображення реальної фізичної структури явища.

У фізиці плазми, кліматичному моделюванні та фізиці складних систем штучний інтелект дедалі частіше використовується для побудови швидких сурогатних моделей, що замінюють ресурсоємні числові симуляції. Такі моделі можуть забезпечувати точні прогнози, але не відтворювати фізичні механізми. Це породжує фундаментальну проблему статусу істини: чи є знанням модель, яка ефективно передбачає поведінку системи, але не має прозорого фізичного тлумачення.

Ще одним ризиком є алгоритмічне упередження, пов'язане з вибором навчальних даних, попередніх моделей і параметрів оптимізації. Оскільки штучний інтелект навчається на наявних даних, він може відтворювати та підсилювати приховані припущення, закладені в експериментальній або теоретичній базі. У фізиці це може призводити до замкнених інтерпретаційних циклів, у яких нові результати підтверджують уже прийняті моделі, а альтернативні гіпотези залишаються поза увагою. Особливо небезпечним це є в дослідженнях складних систем, де висока корельованість даних поєднується з обмеженим розумінням фізичних механізмів.

В астрономічних оглядових проєктах машинне навчання застосовується для класифікації мільйонів об'єктів і виявлення нових явищ, однак навчання таких моделей базується на вже класифікованих даних. У космології використання ШІ для зіставлення спостережуваних карт великомасштабної структури Всесвіту з числовими симуляціями може призводити до підтвердження саме тих моделей, які були закладені в симуляції, звужуючи простір альтернативних інтерпретацій.

У сукупності ці ризики свідчать про те, що інтеграція штучного інтелекту в фізику потребує розширення класичних критеріїв наукової валідності. Окрім формалізованості, верифікованості та відтворюваності, дедалі більшої ваги набувають критерії інтерпретованості алгоритмів, прозорості навчальних даних, відтворюваності моделей і етичної відповідальності дослідників. Міжнародні документи OECD і UNESCO наголошують на необхідності розвитку відповідального та пояснюваного ШІ в науці, що для фізики означає збереження провідної ролі фізичного мислення.

Отже, епістемологічні ризики інтеграції ШІ вже є частиною реальної практики сучасної фізики. Їх усвідомлення не заперечує наукової цінності штучного інтелекту, але вимагає посиленого методологічного контролю, розвитку пояснюваних моделей і збереження критичного мислення як фундаменту фізичного пізнання. ШІ-інтегрована фізика не скасовує класичну фізику, а розширює її методологічний інструментарій, водночас потребуючи нових критеріїв науковості та відповідального використання алгоритмічних інструментів.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Який статус мають наукові дані: чи можна вважати їх «сирими» (raw data), чи вони завжди є результатом теоретично та технологічно опосередкованої конструкції?
2. Як цифровізація науки впливає на класичну ієрархію «дані → інформація → знання»?

3. Наскільки можливе формування знання без явної теоретичної інтерпретації в умовах аналізу за допомогою штучного інтелекту?
4. Який методологічний статус алгоритмів машинного навчання: чи можуть вони розглядатися як інструменти, співмірні з традиційним математичним апаратом?
5. У чому полягає різниця між відкритими даними (Open Data) та відкритою наукою (Open Science), і якою мірою відкритість забезпечує відтворюваність досліджень?
6. Як слід визначати «достатність даних» у великих фізичних експериментах (Big Data)? Де проходить межа між статистичною значущістю результатів і їх фізичною інтерпретацією?
7. Яким чином великі дослідницькі інфраструктури (EOSC, CERN, LIGO) змінюють структуру сучасної науки і чи формують вони нові форми залежності від цифрових платформ?
8. Чи можна розглядати чисельне моделювання як самостійне джерело емпіричного знання у фізиці?
9. Які ризики для наукової об'єктивності створює використання алгоритмів типу «чорної скриньки» (black box AI) у фізичних дослідженнях?
10. Як має трансформуватися поняття відтворюваності в умовах унікальних або наддорогих експериментів?

Розділ 3. Планування наукового експерименту: теоретичні та експериментальні дослідження

3.1. Етапи процесу наукового дослідження: класичний і сучасний підходи

3.1.1. Об'єкт і предмет наукового дослідження у фізиці: класичне та сучасне розуміння

Наукове дослідження у фізиці є складним багаторівневим процесом, який поєднує теоретичне осмислення, експериментальну перевірку та інтерпретацію здобутих результатів у межах певної наукової картини світу. Планування такого дослідження не обмежується технічною підготовкою експерименту або формальним добором методів вимірювання, а передбачає розуміння методологічної структури фізичного пізнання, значення теорії, експерименту та обчислювальних інструментів для формування наукового знання.

Історично у фізиці сформувалися відносно чіткі уявлення про етапи наукового дослідження, характер взаємодії між теорією та експериментом, а також критерії науковості здобутих результатів. У класичній фізиці ці уявлення виникали в ситуації обмежених експериментальних можливостей і домінування аналітичних теоретичних методів, що зумовлювало лінійну структуру дослідження та чітке розмежування між теоретичним і експериментальним етапами.

Сучасна фізика функціонує на якісно інших засадах. Розвиток високоточних експериментальних установок, поява великих масивів даних, широке застосування числового моделювання та алгоритмічних методів, зокрема штучного інтелекту, спричинили трансформацію самої логіки наукового дослідження. Теорія, експеримент і обчислення дедалі частіше поєднуються в єдиному інтегрованому процесі, у якому межі між етапами є змінними, а наукові результати формуються циклічно, у режимі постійного уточнення.

У цьому контексті особливої ваги набуває методологічний аналіз планування наукового експерименту. Йдеться не лише про добір інструментів

або методів, а про усвідомлення того, як формується фізичне знання, які припущення закладаються на різних етапах дослідження та які можливості й ризики пов'язані з класичними і сучасними підходами.

Наукове дослідження у фізиці відбувається як цілеспрямований пізнавальний процес, який передбачає чітке визначення того, що саме вивчається і який аспект цього об'єкта підлягає аналізу. У методології науки ці два рівні фіксуються категоріями *об'єкт дослідження* та *предмет дослідження*. Їх розмежування є вирішальним для коректної постановки наукової проблеми, добору методів дослідження, інтерпретації результатів і визначення меж наукової валідності отриманих висновків.

Об'єкт дослідження у фізиці це фрагмент фізичної реальності, на який спрямована пізнавальна діяльність дослідника. Це може бути матеріальне тіло, поле, частинка, фізичний процес або складна система взаємодіючих елементів. Об'єкт існує незалежно від конкретного дослідження, проте в межах науки він ніколи не постає безпосередньо, а завжди осмислюється через певну теоретичну, експериментальну або обчислювальну модель. Так, у класичній механіці об'єктом дослідження може бути матеріальна точка або тверде тіло, в електродинаміці – електромагнітне поле, у квантовій фізиці – атом або елементарна частинка, у сучасній астрофізиці – система компактних об'єктів або великомасштабна структура Всесвіту.

Варто наголосити, що жодне фізичне дослідження не охоплює об'єкт у всій його повноті. Об'єкт завжди конституюється в науковому пізнанні шляхом абстрагування, ідеалізації та моделювання. Отже, об'єкт фізики є не просто «річчю самою по собі», а наслідком методологічного добору й теоретичного осмислення фізичної реальності.

Предмет дослідження є конкретизацією об'єкта і відображає ті властивості, параметри або закономірності, які безпосередньо вивчаються в межах певного дослідження. Якщо об'єкт відповідає на запитання «що вивчається», то предмет визначає «який саме аспект об'єкта, за яких умов і якими методами досліджується». Наприклад, об'єктом дослідження може бути атом, а предметом – енергетичні рівні електронів; об'єктом є плазма, а предметом –

характер турбулентних флуктуацій; об'єктом є гравітаційні хвилі, а предметом – форма, частотний спектр і амплітуда сигналу, реконструйованого з експериментальних даних. Предмет дослідження завжди формується у зв'язку з теоретичною моделлю, методами вимірювання, наявними технологіями та рівнем розвитку інструментальних і обчислювальних засобів.

У класичній фізиці об'єкт дослідження зазвичай трактували як чітко локалізовану, відносно просту систему, яку можна ізолювати від зовнішніх впливів. Предмет дослідження був стабільним і безпосередньо ґрунтувався на теоретичній моделі. Теорія заздалегідь визначала, які фізичні величини є істотними, а експеримент мав на меті їх вимірювання та перевірку відповідних законів. Для класичного підходу характерна лінійна логіка дослідження: теорія визначає предмет, експеримент перевіряє теоретичні твердження, а технології виконують переважно допоміжну функцію.

У сучасній фізиці розуміння об'єкта і предмета дослідження істотно змінюється. Об'єкт часто постає як складна, багаторівнева або непрямо спостережувана система, а предмет дослідження формується не лише до початку експерименту, а й поступово в процесі аналізу експериментальних, обчислювальних і симуляційних даних. Теорія, експеримент, числове моделювання та алгоритмічні методи спільно визначають, які саме аспекти об'єкта стають предметом дослідження. Для сучасної фізики характерна циклічна логіка пізнання, у межах якої предмет може уточнюватися, змінюватися або навіть зазнавати радикального перегляду в ході дослідження.

Вирішальну роль у цій трансформації відіграє штучний інтелект. Алгоритмічні методи машинного навчання та аналізу великих даних дедалі частіше впливають не лише на опрацювання результатів, а й на сам спосіб визначення предмета дослідження. Для частини сучасних напрямів фізики характерно що предмет дослідження формується як наслідок виявлення структур, кореляцій або аномалій у великих масивах даних, які не були попередньо передбачені теорією. У таких випадках предмет дослідження не встановлюється заздалегідь, а виникає в процесі взаємодії даних, алгоритмів і теоретичної інтерпретації.

Наприклад, у гравітаційно-хвильовій фізиці об'єктом є астрофізичні події злиття компактних об'єктів, проте предметом дослідження стає реконструйований сигнал у даних інтерферометрів, ідентифікований за допомогою алгоритмів машинного навчання. У фізиці плазми об'єктом є плазма в магнітній пастці, а предметом – статистичні характеристики нестабільностей, виявлені шляхом поєднання експериментальних вимірювань, симуляцій і ШП-аналізу. У матеріалознавстві предметом дослідження можуть бути кореляції між мікроструктурою і властивостями матеріалу, отримані шляхом алгоритмічного аналізу великих масивів експериментальних і симуляційних даних.

У сучасній фізиці штучний інтелект опосередковано впливає і на розуміння об'єкта, і на конституювання предмета дослідження, змінюючи класичне уявлення про пасивний характер вимірювання та однозначно визначений предмет аналізу. Об'єкт дедалі частіше постає як складна система, доступна пізнанню лише через дані й алгоритмічні реконструкції, а предмет набуває динамічного та контекстуального характеру.

Отже, об'єкт і предмет дослідження є ключовими методологічними категоріями фізики, які визначають логіку наукового пізнання. У класичній фізиці вони мали чіткі та відносно стабільні межі й визначалися переважно теоретично. У сучасній фізиці, особливо за умов даноцентричної та ШП-інтегрованої науки, об'єкт часто є опосередковано фіксованою складною системою, а предмет дослідження формується у взаємодії теорії, експерименту, даних, алгоритмів і технологій. Це відображає глибоку методологічну трансформацію фізики як науки та зміну способів наукового пізнання фізичної реальності.

Відмінності між класичним і сучасним підходами до розуміння об'єкта і предмета фізичного дослідження узагальнено в таблиці 1, яка фіксує найхарактерніші методологічні зміни, пов'язані з інтеграцією даних і штучного інтелекту в сучасну фізику.

Таблиця 1. Об'єкт і предмет фізичного дослідження: класичний та сучасний (ШІ-інтегрований) підходи

Критерій	Класична фізика	Сучасна, ШІ-інтегрована фізика
Об'єкт дослідження	Чітко визначена фізична система, доступна прямому спостереженню або вимірюванню	Складна або опосередковано фіксована система, доступна через дані та моделі
Визначення об'єкта	Визначається до початку дослідження	Уточнюється в процесі аналізу експериментальних і обчислювальних даних
Предмет дослідження	Попередньо визначені фізичні величини або залежності	Аспекти об'єкта, що виявляються або уточнюються під час аналізу даних
Формування предмета	Впливає з теоретичної моделі	Формується у взаємодії теорії, даних і алгоритмічних методів
Зв'язок об'єкта і предмета	Прямий і відносно стабільний	Опосередкований моделями та алгоритмами
Основний ризик	Спрощення реальної системи	Втрата фізичної інтерпретації результатів

Як видно з таблиці 1, штучний інтелект і алгоритмічні методи впливають не лише на аналіз результатів, а й на саме конституювання предмета дослідження. У низці сучасних напрямів фізики предмет виникає як наслідок виявлення структур, кореляцій або сигналів у даних, які не були явно передбачені вихідною теорією. Це означає, що предмет дослідження набуває динамічного характеру і може змінюватися в ході дослідження.

У підсумку, у сучасній фізиці об'єкт дедалі частіше постає як складна система, реконструйована через дані, а предмет – як аналітичний фокус, сформований у взаємодії теорії, експерименту, симуляцій і алгоритмів. Це не скасовує класичних методологічних категорій, проте змінює спосіб їх практичного застосування.

3.1.2. Етапи фізичного наукового дослідження: базова структура і сучасне розгортання

Незалежно від історичної доби, фізичне наукове дослідження має інваріантну логіку, яка відображає універсальний характер наукового пізнання. Цю логіку можна звести до обмеженої кількості базових етапів, що в тій чи іншій формі притаманні як класичній, так і сучасній фізиці. Водночас у сучасних умовах кожен із цих етапів набуває внутрішньо ускладненої, багаторівневої організації та включає додаткові підетапи, пов'язані з роботою з даними, моделями, обчислювальними й експериментальними технологіями. Отже, відмінність між класичним і сучасним фізичним дослідженням полягає не в кількості етапів, а у складності їх реалізації та характері взаємозв'язків між ними.

У класичній фізиці кожен базовий етап здійснювався відносно просто і мав переважно лінійну організацію. *Першим етапом* була постановка наукової проблеми та визначення об'єкта і предмета дослідження. Наукова проблема формулювалася на підставі наявної теорії або окремих експериментальних фактів. Об'єкт дослідження зазвичай був чітко локалізованим, а предмет – стабільним і зафіксованим у межах відповідної теоретичної моделі.

Другим етапом була побудова теоретичної моделі, яка мала аналітичний та ідеалізований характер і задавала очікувані фізичні закономірності.

Третій етап становив експериментальну перевірку, у межах якої проєктувався експеримент, виконувалися вимірювання та здійснювався збір відносно невеликих обсягів даних.

Четвертий етап – аналіз і тлумачення результатів – спирався на класичні статистичні методи, а інтерпретація результатів повністю залежала від дослідника.

Завершальним *п'ятим етапом* було узагальнення, перевірка та фіксація отриманого знання, що передбачало формулювання висновків, підтвердження або спростування теоретичних положень і публікацію результатів.

У сучасній фізиці ті самі п'ять базових етапів зберігаються, проте кожен із них суттєво ускладнюється і втрачає жорстку лінійну послідовність.

Постановка проблеми дедалі частіше здійснюється в межах ширшого дослідницького контексту і може виникати внаслідок аналізу великих масивів даних. Об'єкт дослідження нерідко є складною або опосередковано фіксована системою, а предмет уточнюється поступово в процесі виконання дослідження.

Побудова моделі набуває гібридного теоретико-обчислювального характеру, поєднуючи аналітичні підходи з числовими симуляціями, статистичними та алгоритмічними моделями. Експеримент реалізується як інтегрована технологічна система, що охоплює автоматизований збір даних, тригерні механізми та первинну обробку сигналів. Аналіз даних стає багаторівневим, здійснюється із залученням числових методів і машинного навчання, а інтерпретація результатів набуває гібридного характеру. На етапі валідації особливу увагу приділяють відтворюваності та повторному використанню знання: перевіряється весь дослідницький процес, а результати оприлюднюються разом із даними та програмним кодом.

Отже, кількість базових етапів фізичного дослідження залишається сталою і відображає універсальну логіку наукового пізнання. Сучасна фізика не вводить принципово нових етапів, проте радикально ускладнює внутрішню організацію кожного з них, перетворюючи дослідження на циклічну, технологічно опосередковану систему формування знання.

Показовим прикладом еволюції етапів фізичного дослідження від класичного до сучасного підходу є атомна спектроскопія. У XIX столітті цей напрям розвивався в межах класичної експериментальної фізики та був спрямований на систематичне дослідження спектрів випромінювання і поглинання атомів. Вирішальним етапом стало виявлення емпіричних закономірностей у спектрах, що передували формуванню квантової теорії.

Центральну роль у цьому процесі відіграли дослідження Бальмера, який проаналізував експериментальні спектральні дані атома водню та встановив просту математичну залежність для довжин хвиль видимих спектральних ліній. Ця формула мала суто емпіричний характер і не знаходила пояснення в межах класичної фізики. Методологічно відкриття Бальмера є типовим прикладом класичного наукового підходу: об'єктом дослідження був атом водню,

предметом – дискретні довжини хвиль спектральних ліній, даними – експериментальні вимірювання, а результатом – емпіричний закон без теоретичного обґрунтування.

Подальші узагальнення, виконані Рідбергом, засвідчили універсальність цієї залежності, однак не усунули проблему відсутності фізичного тлумачення. Лише роботи Нільса Бора показали, що спектральні закономірності Бальмера випливають із квантованих енергетичних рівнів електрона в атомі водню. У такий спосіб емпіричні спектроскопічні дані стали не просто засобом перевірки теорії, а підґрунтям для її побудови.

У першій половині XX століття спектроскопія стала одним із ключових джерел формування квантової механіки. Водночас методологія дослідження залишалася класичною: експеримент, обмежені обсяги даних і домінування дослідницької інтерпретації.

У другій половині XX – на початку XXI століття атомна спектроскопія зазнала суттєвої методологічної трансформації, пов'язаної з появою принципово нових експериментальних умов. Методи лазерного охолодження та утримання атомів радикально змінили фізичні умови формування спектральних ліній, усунувши доплерівське уширення та зробивши можливими надвисокоточні спектроскопічні вимірювання.

Унаслідок цього спектроскопія в сучасній фізиці виконує не лише функцію реєстрації спектрів, а й виступає інструментом підготовки та керування квантовим станом досліджуваних систем. Відповідно розширився і предмет дослідження: окрім спектральних ліній аналізуються надтонкі зсуви частот, часові характеристики еволюції системи та кореляції між квантовими станами. Саме такий підхід лежить в основі створення сучасних оптичних атомних годинників і високоточних експериментальних перевірок фундаментальних фізичних теорій.

Отже, розвиток спектроскопії наочно демонструє, що еволюція фізичних досліджень від класичного до сучасного підходу полягає не у зміні об'єкта дослідження, а у трансформації методології, технологій і логіки наукового пізнання. Це дає підстави розглядати сучасну фізику як даноцентричну,

технологічно інтегровану науку з циклічною організацією дослідницького процесу.

3.2. Завдання і структура експериментальних досліджень у фізиці

3.2.1. Класичний підхід до експериментальних досліджень у фізиці

Експериментальні дослідження у фізиці історично стали фундаментальною основою формування наукового знання про природу. У класичній фізиці експеримент розглядався як контрольована, відтворювана та цілеспрямована процедура, спрямована на виявлення кількісних закономірностей фізичних явищ і перевірку теоретичних положень. У методологічному вимірі класичний експеримент посідав підпорядковане, проте принципово важливе місце щодо теорії, оскільки саме він забезпечував її емпіричну перевірку та кількісне підтвердження фізичних законів.

За такого підходу експеримент не виступав безпосереднім джерелом формування теорії, а функціонував у межах уже визначеної теоретичної рамки. Ця логіка була характерною для більшості класичних досліджень, у яких фізична реальність розглядалася як така, що є доступною для прямого вимірювання за умови належної ізоляції об'єкта та контролю зовнішніх впливів.

Основні завдання експериментальних досліджень у класичній фізиці зводилося до:

- встановленні кількісних залежностей між фізичними величинами на основі вимірювань;
- перевірці справедливості теоретичних законів у заданих умовах;
- визначенні числових значень фізичних сталих і параметрів моделей;
- уточненні меж застосовності теоретичних уявлень.

У класичному підході експеримент, як правило, ініціювався теорією. Саме теоретична модель визначала, які величини вважалися фізично суттєвими, які параметри підлягали вимірюванню та яких результатів очікували. За таких умов експеримент виконував функцію підтвердження або уточнення вже

сформульованих теоретичних положень, а не автономного джерела нових концептуальних побудов.

Показовими в цьому контексті є, зокрема, експерименти Кавендіша з вимірювання гравітаційної сталої, у яких експериментальна постановка повністю визначалася ньютонівською теорією гравітації. Об'єкт, предмет і метод дослідження були задані заздалегідь, а завдання експерименту зводилося до уточнення числового значення фізичної сталої. До класичних експериментальних досліджень належать також експерименти Бойля і Маріотта, що встановили кількісні залежності між параметрами газів, а також дослідження Фарадея з електромагнітної індукції, у яких експериментальні факти підтверджували загальні закономірності електромагнітних явищ. У всіх цих випадках експеримент виконував верифікаційну та вимірну функції, а фізичне знання формувалося як результат поєднання теорії з контрольованим експериментом.

Класичне експериментальне дослідження мало чітко окреслену лінійну структуру, що відображала послідовну логіку наукового пізнання.

Першим етапом була постановка фізичної задачі, яка виникала внаслідок теоретичного аналізу або окремих емпіричних спостережень і стосувалася конкретного фізичного явища. Проблему формували таким чином, щоб її можна було розв'язати в межах наявного теоретичного апарату.

Другим етапом була побудова ідеалізованої моделі об'єкта, яка давала змогу описати його поведінку з використанням обмеженої кількості змінних. Ідеалізація розглядалася як необхідна умова експериментального аналізу, оскільки саме вона забезпечувала можливість зіставлення експериментальних результатів із теоретичними передбаченнями.

Третій етап – проєктування експериментальної установки, передбачав створення приладів і вибір методів вимірювання, орієнтованих на мінімізацію впливу сторонніх чинників. Принцип дії приладів був прозорим і безпосередньо пов'язаним із фізичними законами, що забезпечувало довіру до отриманих результатів.

Четвертий етап полягав у проведенні вимірювань у контрольованих умовах. Дані фіксувалися вручну або за допомогою простих реєструвальних пристроїв, а їхній обсяг залишався відносно невеликим, що давало змогу дослідникові зберігати повний контроль над процесом збирання інформації.

П'ятий етап – обробка та інтерпретація результатів, включав обчислення середніх значень, оцінювання похибок, побудову графіків і зіставлення експериментальних даних із теоретичними передбаченнями. Інтерпретація результатів повністю залежала від дослідника та рівня його теоретичної підготовки.

Завершальним *шостим етапом* було формулювання висновків, у межах якого здійснювалися узагальнення щодо підтвердження або спростування теорії, а результати фіксувалися у формі наукових публікацій.

Класичні експериментальні дослідження у фізиці характеризувалися локальним характером експерименту, обмеженими обсягами даних, високою прозорістю експериментальної процедури та людиноцентрованим характером інтерпретації. Технології при цьому розглядалися переважно як допоміжні засоби фіксації фактів і не входили до структури доказу як самостійний методологічний елемент. Саме в межах такої експериментальної практики сформувалися базові методологічні стандарти фізики.

Класичний експеримент заклав фундаментальні вимоги до точності, відтворюваності та контролю похибок, які й сьогодні залишаються ключовими принципами наукового дослідження. Водночас ця модель експерименту мала низку обмежень, пов'язаних із неможливістю дослідження складних, багатофакторних або непрямо спостережуваних явищ. Усвідомлення цих обмежень поступово стало методологічною передумовою переходу до сучасних форм експериментальних досліджень.

3.2.2. Сучасний підхід до експериментальних досліджень у фізиці

Сучасні експериментальні дослідження у фізиці істотно відрізняються від класичних не лише рівнем технічної складності, а й методологічним статусом експерименту. Якщо в класичній фізиці експеримент переважно виконував функцію перевірки вже сформульованих теоретичних законів, то в сучасній фізиці він дедалі частіше стає джерелом нових типів даних, які самі по собі потребують складної обробки, моделювання та статистичної інтерпретації. За таких умов експеримент втрачає характер ізольованої процедури й набуває рис складової інтегрованої технологічної системи, що поєднує вимірювання, обчислення та алгоритмічний аналіз.

Ця трансформація зумовлена сукупністю взаємопов'язаних чинників: зростанням точності вимірювань, появою складних багатокomпонентних експериментальних установок, переходом до великих потоків даних і широким упровадженням автоматизованих та алгоритмічних методів аналізу. Унаслідок цього змінюється не лише технічна сторона експерименту, а й логіка його включення в процес формування фізичного знання, а також характер взаємодії між експериментом і теорією.

Завдання експерименту в сучасній фізиці істотно розширюються і охоплюють генерацію великих багатовимірних наборів даних, виявлення нових фізичних ефектів, перевірку фундаментальних теорій з надвисокою точністю, калібрування числових моделей і формування відтворюваних наборів даних для подальших досліджень. За такої організації експеримент взаємодіє з теорією в замкненому циклі «дані – модель – експеримент – уточнення».

Показовими в цьому плані є сучасні експерименти з прямого пошуку частинок темної матерії, у яких аналіз даних потребує застосування складних статистичних і алгоритмічних процедур, включно з багатовимірною оцінкою фону, байєсівськими та частотними методами статистики, алгоритмічним розділенням сигналу і шуму, а також методами машинного навчання для класифікації подій. Значна частина експериментального процесу – від первинного відбору подій до побудови статистичних обмежень –

автоматизується і реалізується як єдиний обчислювально-експериментальний процес.

Сучасне експериментальне дослідження у фізиці має нелінійну, циклічну та багаторівневу структуру, що істотно відрізняє його від класичної лінійної схеми «гіпотеза – експеримент – перевірка». Якщо в класичному підході окремі етапи дослідження чітко слідували один за одним, то в сучасній фізиці вони перебувають у постійній взаємодії та взаємному уточненні.

Наукова проблема формується не лише на основі теоретичних міркувань, а й у результаті аналізу попередніх експериментальних даних, результатів числових симуляцій і статистичних закономірностей, виявлених у великих масивах інформації. У багатьох випадках саме дані або симуляції вказують на аномалії чи ефекти, які згодом набувають статусу повноцінної наукової проблеми. За таких умов початковий етап дослідження перестає бути суто теоретичним і набуває даноцентричного характеру.

Проектування сучасного експерименту також виходить за межі класичного уявлення про експериментальну установку як сукупність приладів. Воно охоплює створення складних систем збору даних, тригерних механізмів, процедур калібрування, а також алгоритмів попередньої обробки, які визначають, які саме дані вважатимуться релевантними. Уже на цьому етапі закладаються модельні припущення і статистичні критерії, що впливають на подальший аналіз.

Аналіз експериментальних результатів у сучасній фізиці є багаторівневим і поєднує числове моделювання, статистичні методи та алгоритмічні підходи. Перевірці підлягають не лише кінцеві фізичні результати, а й самі дані, використані моделі, програмний код, параметри обробки та стійкість висновків до зміни методів аналізу. Унаслідок цього експериментальне дослідження набуває характеру відкритого циклу, в якому кожна ітерація може призводити до перегляду попередніх етапів.

Однією з ключових рис сучасного експерименту є високий рівень автоматизації. Вимірювання здійснюються безперервно, з великою частотою і з мінімальним безпосереднім втручанням людини. Роль дослідника при цьому

поступово зміщується від рівня прямого спостереження до рівня проєктування експерименту, контролю параметрів, валідації даних і інтерпретації результатів.

Показовим прикладом такого підходу є гравітаційно-хвильова фізика. В експериментах проєкту LIGO реєстрація надзвичайно малих змін довжини плечей лазерного інтерферометра забезпечується автоматизованими системами стабілізації, цифрової фільтрації та кореляційного аналізу сигналів. За таких умов експериментальний результат формується як продукт складної технологічної й обчислювальної обробки, а не як окреме вимірювання.

Подібний рівень автоматизації характерний і для сучасних спектроскопічних методів в атомній та молекулярній фізиці. Лазерна спектроскопія дає змогу вимірювати частоти квантових переходів з надзвичайно високою точністю, що використовується, зокрема, у створенні оптичних атомних годинників. У таких експериментах фізичний результат є неможливим без стабілізації лазерів, цифрової обробки сигналів і статистичного аналізу, що знову підкреслює технологічно опосередкований характер сучасного експерименту.

Ще однією визначальною особливістю сучасного експерименту є робота з великими обсягами даних. У фізиці елементарних частинок детекторні комплекси на базі CERN реєструють мільйони подій за секунду, що унеможливорює повне збереження і подальший аналіз усіх вимірювань у класичному розумінні. За таких умов експериментальний метод охоплює багаторівневі тригерні системи, які здійснюють алгоритмічний відбір потенційно значущих подій ще до етапу збереження даних. Унаслідок цього алгоритмічні процедури стають конститутивною частиною експерименту, а не лише інструментом післяекспериментальної обробки результатів.

Аналогічна ситуація спостерігається і в сучасній астрофізиці. Оглядові телескопи формують величезні масиви зображень і часових рядів, у яких фізично значущі події є вкрай рідкісними. Виявлення спалахів наднових, транзитів екзопланет або гравітаційних лінз здійснюється за допомогою автоматизованих алгоритмів попередньої обробки та класифікації даних. У відповідних умовах експериментальний метод охоплює не лише реєстрацію випромінювання, а й алгоритмічне визначення того, що вважатиметься фізично значущою подією.

Показовими з методологічного погляду є сучасні експерименти з прямого пошуку частинок темної матерії, зокрема WIMP-кандидатів (*Weakly Interacting Massive Particles*), у підземних детекторах типу XENON, LUX-ZEPLIN (LZ) та PandaX. У цих дослідженнях об'єктом експерименту є гіпотетичні частинки темної матерії, а предметом — надзвичайно рідкісні сигнали їхньої взаємодії з атомами детектора.

Принципово важливо, що в таких експериментах відсутність зареєстрованого сигналу є не менш інформативною, ніж його наявність. Нульовий результат дає змогу встановлювати статистично обґрунтовані верхні межі на переріз взаємодії темної матерії з нуклонами, тим самим виключаючи цілі класи теоретичних моделей. За таких обставин експеримент виконує не лише верифікаційну, а й селективну та евристичну функції щодо теорії.

Методологічно такі експерименти істотно відрізняються від класичних «нульових результатів» подібно до експерименту Майкельсона–Морлі. Якщо в класичному випадку нульовий результат безпосередньо спростовував конкретну гіпотезу, то в сучасних експериментах з темної матерії він формується як статистичний висновок, отриманий у межах складної моделі фонів, детекторної відповіді та алгоритмічного аналізу даних.

Аналіз експериментальних даних у таких дослідженнях потребує застосування багатовимірних статистичних методів, включно з байєсівськими та частотними підходами, моделюванням фону, алгоритмічним розділенням сигналу і шуму, а також використанням методів машинного навчання для класифікації подій. Значна частина експериментального процесу, включно з первинним відбором подій і побудовою обмежень на параметри моделей, автоматизується та реалізується як єдиний експериментально-обчислювальний процес. У такій конфігурації експерименти з пошуку темної матерії є характерним прикладом даноцентричного експерименту, в якому фізичний результат не зводиться до окремого вимірювання, а формується як узгоджений статистичний висновок у межах складної технологічної та теоретичної інфраструктури.

Суттєвою рисою сучасних експериментальних досліджень є їхній тісний і системний зв'язок із числовим моделюванням. У багатьох галузях фізики експериментальні результати не мають самостійного фізичного змісту без зіставлення з теоретичними або феноменологічними моделями.

Так, у фізиці плазми експерименти на токамаках супроводжуються числовими симуляціями магнітного утримання, нестабільностей і турбулентних процесів. Дані експерименту використовуються для калібрування моделей, тоді як результати симуляцій визначають параметри наступних експериментальних запусків. У такій ситуації експеримент і модель утворюють замкнений цикл взаємного уточнення.

Подібна логіка притаманна і кліматичній та атмосферній фізиці, де експериментальні спостереження із супутників і наземних станцій інтегруються з числовими моделями загальної циркуляції атмосфери. Тут експериментальний метод фактично є складовою циклу «спостереження – модель – прогноз», у якому жоден з елементів не має безумовного пріоритету.

У сучасній фізиці зростає також роль непрямих експериментальних методів, коли досліджуване явище не спостерігається безпосередньо, а реконструюється на основі вторинних ефектів. Так, гравітаційні хвилі виявляються через їхній вплив на просторово-часову структуру, а багато частинок у фізиці високих енергій ідентифікуються лише за продуктами розпаду.

Такі експерименти принципово залежать від складної статистичної обробки та чіткої теоретичної інтерпретації. Фізичний результат формується не як окреме вимірювання, а як узгоджений висновок, отриманий у межах багаторівневої експериментально-обчислювальної процедури.

У сучасних експериментальних дослідженнях у фізиці штучний інтелект і методи машинного навчання перестають бути лише допоміжними інструментами обробки даних і набувають статусу конститутивного елемента експериментального методу. Це означає, що алгоритмічні процедури безпосередньо впливають на формування експериментального факту, визначаючи, які події вважаються фізично значущими, які дані включаються до аналізу та які висновки можуть бути зроблені на їхній основі.

У класичному експерименті епістемологічний ланцюг мав вигляд: вимірювання → обробка → інтерпретація. У сучасному експерименті між вимірюванням та інтерпретацією з'являється додатковий, принципово новий рівень – алгоритмічний. Саме на цьому рівні здійснюються первинний відбір подій, фільтрація шуму, класифікація сигналів і попередня реконструкція фізичних величин. У результаті значна частина того, що згодом інтерпретується як експериментальний результат, формується ще на етапі алгоритмічної обробки.

Показовим прикладом є експерименти у фізиці елементарних частинок. У сучасних колайдерних дослідженнях методи машинного навчання інтегровані в багаторівневі тригерні системи, які здійснюють відбір подій у режимі реального часу. За умов реєстрації мільйонів подій щосекунди саме алгоритмічні критерії визначають, які зіткнення зберігаються для подальшого аналізу. Помилки або упередження в цих алгоритмах можуть призводити не лише до втрати статистики, а й до систематичного виключення нетипових або несподіваних фізичних процесів. Під час дослідження гравітаційних хвиль методи глибокого навчання застосовуються для швидкого виявлення слабких сигналів злиття компактних об'єктів у шумових даних лазерних інтерферометрів. Нейронні мережі навчаються на великих масивах змодельованих хвильових форм і дають змогу ідентифікувати кандидатні події ще до застосування повного статистичного аналізу. У такому разі штучний інтелект виконує функцію первинного виявлення, після чого застосовуються строгі методи параметричної оцінки та перевірки достовірності сигналу.

Показовими є також експериментальні дослідження у фізиці плазми та керованого термоядерного синтезу. У сучасних токамаках алгоритми машинного навчання використовуються для прогнозування плазмових збурень і нестабільностей у режимі реального часу. Алгоритмічні моделі аналізують великі масиви сенсорних даних і дають змогу коригувати параметри експерименту ще до виникнення аварійних режимів. За таких умов штучний інтелект впливає не лише на інтерпретацію даних, а й на динаміку експерименту, що є принципово новим порівняно з класичною експериментальною фізикою.

У сучасній спектроскопії та матеріалознавстві методи машинного навчання застосовуються для аналізу складних спектрів, реконструкції структур матеріалів і виявлення кореляцій між мікроскопічною будовою та макроскопічними властивостями. У низці випадків алгоритми виявляють закономірності, які не були передбачені вихідними теоретичними моделями, і тим самим стають джерелом нових гіпотез.

Методологічно важливо, що алгоритми штучного інтелекту не є нейтральними інструментами. Вони втілюють конкретні модельні припущення, вибір навчальних вибірок, критерії оптимізації та статистичні пороги, які безпосередньо впливають на експериментальний результат. Тому використання ШІ переносить частину пізнавальної відповідальності з індивідуального дослідника на алгоритмічні системи та потребує нових процедур валідації, перевірки стійкості й інтерпретованості результатів.

З огляду на викладене, у сучасній фізиці штучний інтелект стає повноцінним учасником експериментального процесу, а не лише засобом обробки даних. Експериментальний факт дедалі частіше формується як результат взаємодії детектора, алгоритмів, моделей і експертної інтерпретації. Це відображає глибоку трансформацію методології експериментального пізнання та зміну уявлень про те, яким чином у фізиці дані перетворюються на знання.

3.2.3. Порівняння класичного та сучасного експерименту у фізиці: методологічні можливості та ризики

Експеримент у фізиці є провідним інструментом здобуття емпіричного знання, однак його епістемологічна роль, внутрішня структура та методологічний статус зазнавали істотних змін упродовж розвитку науки і технологій. Хоча класичний і сучасний експериментальні підходи ґрунтуються на загальній логіці наукового пізнання, способи реалізації цієї логіки суттєво відрізняються. Вони не перебувають у відношенні простого заміщення, а репрезентують різні історично сформовані способи організації взаємодії між

теорією, даними, технологіями та процедурами інтерпретації. Саме ці відмінності визначають як методологічні можливості, так і характерні ризики кожного підходу, усвідомлення яких є необхідною умовою коректного використання експериментальних результатів у сучасній фізиці.

Для класичного експерименту визначальними були локальність експериментальної постановки, відносна простота технічних засобів і суб'єктивний характер інтерпретації. Ці риси забезпечували високу прозорість і контрольованість дослідження, проте водночас задавали межі його пізнавальних можливостей. Насамперед це проявлялося в обмеженості обсягу та різноманітності експериментальних даних. Робота з невеликими наборами вимірювань підвищувала чутливість результатів до випадкових похибок і локальних ефектів, що ускладнювало виявлення нюансів або багатofакторних закономірностей. Характерним прикладом є ранні спектроскопічні дослідження XIX століття, які дозволяли встановити основні серії спектральних ліній, але не забезпечували доступу до тонкої і надтонкої структури, що стала спостережуваною лише зі зростанням точності та обсягу даних.

Другим принциповим обмеженням класичного експерименту була його теоретична навантаженість. Оскільки експериментальна постановка, як правило, визначалася наперед заданою теоретичною моделлю, саме вона окреслювала коло фізично значущих величин і параметрів. У результаті експеримент міг виявитися нечутливим до явищ, що не вписувалися в домінантні теоретичні уявлення. У класичній електродинаміці це призводило до того, що дискретний характер атомних спектрів тривалий час сприймався як експериментальна аномалія, а не як сигнал до перегляду фундаментальних теоретичних засад.

Важливу роль відігравала і залежність інтерпретацій від теоретичних настанов автора. Суб'єктивний характер аналізу означав, що висновки значною мірою залежали від індивідуального досвіду, інтуїції та теоретичних очікувань дослідника. Це підвищувало ризик когнітивних упереджень і вибіркового тлумачення даних. Історично такі обмеження проявлялися, зокрема, у ранніх вимірюваннях фундаментальних фізичних констант, коли різні лабораторії отримували несумісні результати через відмінності в методах обробки даних і

оцінювання похибок. Додатковим чинником була обмежена відтворюваність, яка часто залежала від індивідуальної майстерності експериментатора та неформалізованих процедур.

Сучасний експериментальний підхід формується за принципово інших умов. Його визначальними рисами є високий рівень автоматизації, робота з великими потоками даних і системне використання алгоритмічних методів аналізу. Це істотно розширює пізнавальні можливості фізики, однак водночас породжує якісно нові методологічні ризики, що не зводяться до класичних проблем експериментального контролю.

Передусім ідеться про непрозорість алгоритмічної обробки. Складні багаторівневі алгоритми і системи машинного навчання можуть опосередковувати зв'язок між первинним вимірюванням і кінцевим результатом настільки, що цей зв'язок стає недостатньо очевидним для дослідника. У фізиці елементарних частинок значна частина даних відсіюється ще на етапі тригерних систем, і помилки або неявні припущення, закладені в алгоритмах, здатні призводити до систематичної втрати фізично значущих подій.

З цим тісно пов'язаний ризик алгоритмічних упереджень. Оскільки методи машинного навчання навчаються на попередніх даних, вони неминуче відтворюють закладені в них модельні припущення. У результаті зростає ймовірність ігнорування нетипових або несподіваних сигналів, зокрема в астрофізичних оглядах, де рідкісні явища можуть залишатися непоміченими через відсутність аналогів у навчальних вибірках.

Ще одним характерним ризиком є віддалення дослідника від первинних експериментальних даних. Зростання рівня автоматизації зменшує безпосередній контакт фізика з вимірюваними сигналами, що ускладнює інтуїтивне розуміння експериментального процесу і підвищує залежність від проміжних алгоритмічних рішень. До цього додається інфраструктурна залежність сучасних експериментів, які потребують складних технічних систем, великих колективів і значних обчислювальних ресурсів. За таких умов технічні або організаційні збої можуть призводити до втрати унікальних результатів, відтворення яких є практично неможливим.

З урахуванням наведеного порівняння класичного і сучасного експерименту у фізиці дозволяє зробити принциповий методологічний висновок: ризики експериментального пізнання не усуваються з розвитком науки, а змінюють свою форму. Класичний експеримент був обмежений масштабом і суб'єктною інтерпретацією, тоді як сучасний стикається з проблемами алгоритмічної непрозорості, інфраструктурної складності та опосередкованого доступу до даних. Усвідомлення цих особливостей є необхідною передумовою відповідального використання сучасних експериментальних методів і формування надійного фізичного знання.

3. 4. Завдання і структура теоретичних досліджень у фізиці

3.4.1. Класичний підхід до теоретичних досліджень у фізиці

Класичний підхід до теоретичних досліджень у фізиці сформувався в межах наукової картини світу, що трактувала фізичну реальність як об'єктивно впорядковану, детерміновану та принципово пізнавану засобами раціонального аналізу. Теоретичне пізнання в класичній фізиці спиралося передусім на аналітичний математичний апарат і логіко-дедуктивний спосіб мислення. Визначальну роль у формуванні теорій відігравали диференціальні рівняння, варіаційні принципи, симетрії та закони збереження, які розглядалися як фундаментальні основи опису фізичних явищ і процесів.

У такій методологічній рамці головним завданням класичної теоретичної фізики було формулювання універсальних фізичних законів загального характеру, що вважалися справедливими незалежно від конкретних експериментальних умов. Теорія прагнула виявити найзагальніші закономірності руху й взаємодії, здатні пояснювати широкий клас явищ на основі обмеженого набору фундаментальних принципів. Водночас важливою складовою теоретичної роботи була побудова аналітичних математичних моделей фізичних систем, для яких можна було отримати точний або квазіточний розв'язок. Одержання аналітичних співвідношень для фізичних

величин розцінювалася як показник теоретичної завершеності та наукової значущості моделі.

З цим безпосередньо пов'язувалося завдання кількісного передбачення, тобто отримання таких результатів, які могли бути безпосередньо зіставлені з експериментальними даними або астрономічними спостереженнями. Класична теорія не обмежувалася поясненням уже відомих фактів, а мала забезпечувати перевірювані прогнози щодо поведінки фізичних систем у нових умовах. Показовим прикладом є класична небесна механіка, у межах якої рівняння Ньютона, а згодом формалізми Лагранжа і Гамільтона дозволили не лише описати рух небесних тіл, а й теоретично обґрунтувати стійкість Сонячної системи та характер орбітальних збурень, досліджених Лагранжем і Лапласом.

Подібну методологічну роль відіграла і класична електродинаміка. Рівняння Максвелла стали зразком теорії, яка, узагальнивши відомі експериментальні закони, привела до принципово нового теоретичного результату – передбачення існування електромагнітних хвиль. Це передбачення було отримане в межах суто аналітичного формалізму і лише згодом підтверджене експериментально, що наочно демонструє високий прогностичний потенціал класичного теоретичного підходу.

Важливим завданням класичної теорії було також пояснення експериментальних фактів через загальні принципи, а не шляхом накопичення ізольованих емпіричних закономірностей. Фізичні явища інтерпретувалися як прояви дії фундаментальних законів, симетрій і законів збереження, що забезпечувало концептуальну єдність фізичної картини світу. Для реалізації цього завдання широко застосовувався метод ідеалізацій. Поняття матеріальної точки, ідеального газу або абсолютно твердого тіла не відповідали жодному реальному об'єкту, проте дозволяли виділити суттєві фізичні механізми й побудувати теорії, які з високою точністю описували макроскопічні властивості систем у широкому діапазоні умов.

Реалізація зазначених завдань відбувалася в межах відносно сталої структури класичного теоретичного дослідження. Зазвичай воно починалося з формулювання фізичної проблеми на основі експериментальних фактів або

спостережень. Далі здійснювалися ідеалізація системи та вибір узагальнених координат, після чого будувалася аналітична математична модель у формі диференціальних рівнянь або варіаційного принципу. Отримання точного або наближеного аналітичного розв'язку розглядалося як центральний етап теоретичної роботи. Наступним кроком була фізична інтерпретація результатів і аналіз поведінки системи в різних режимах. Завершальною стадією слугувало зіставлення теоретичних передбачень з експериментом, який виконував переважно верифікаційну функцію. У цілому ця структура мала лінійний характер і передбачала чіткий поділ між побудовою теорії та її експериментальною перевіркою.

Характерними рисами класичного підходу були пріоритет аналітичних методів над числовими, орієнтація на точні або замкнені розв'язки, тісний зв'язок між математичним формалізмом і фізичною інтерпретацією, а також домінування детерміністських моделей. Ймовірнісні та статистичні методи відігравали допоміжну роль і застосовувалися переважно в термодинаміці та молекулярно-кінетичній теорії. Математичний формалізм використовувався насамперед як засіб опису вже встановлених закономірностей, а не як автономний інструмент систематичного пошуку нових структур.

Методологічне значення класичного підходу полягає в тому, що саме він сформував стандарти теоретичної строгості, логічної узгодженості та пояснювально-передбачувальної сили фізичних теорій. У його межах були закладені фундаментальні уявлення про роль моделей, ідеалізацій і математичного формалізму в науковому пізнанні. Водночас обмеження цього підходу, зокрема його слабка придатність до опису складних, нелінійних і багаторівневих систем, зумовили необхідність розвитку сучасних теоретичних методів, що виходять за межі класичної парадигми.

3.4.2. Сучасний підхід до теоретичних досліджень у фізиці

Сучасний етап розвитку фізики характеризується глибокою перебудовою теоретичних досліджень, зумовленою як ускладненням об'єктів вивчення, так і суттєвим зростанням обчислювальних та інформаційних можливостей науки. Якщо класична теоретична фізика була зорієнтована переважно на побудову аналітично завершених моделей, то сучасна теорія дедалі частіше має справу з системами, для яких точний аналітичний опис є принципово недосяжним. За цих умов аналітичні методи зберігають своє значення, проте втрачають домінуючий статус і доповнюються числовими, статистичними та алгоритмічними підходами.

Сучасна теоретична фізика функціонує в ситуації, коли фізичне знання формується на перетині теорії, обчислень і даних, а математичний формалізм реалізується не лише у вигляді аналітичних формул, а й у вигляді алгоритмів, симуляцій і числових експериментів. У цьому сенсі теоретичне дослідження виходить за межі традиційного аналітичного опису і набуває характеру інтегрованої модельно-обчислювальної практики.

Завдання сучасної теоретичної фізики зберігають спадкоємність із класичними, однак набувають нового методологічного наповнення. Центральним залишається пояснення фізичних явищ і виявлення закономірностей, проте таке пояснення дедалі частіше здійснюється в межах ефективних теорій, валідних лише в певних масштабах або енергетичних режимах.

У фізиці конденсованого стану, наприклад, замість прямого виведення макроскопічних властивостей із мікроскопічних принципів широко застосовуються ефективні моделі типу моделі Габбарда або теорії Фермі-рідини, які описують поведінку електронів у кристалах лише в низькоенергетичному наближенні. Такі моделі не претендують на універсальність, проте забезпечують адекватний опис релевантних фізичних режимів.

Одним із ключових завдань сучасної теорії є побудова числово реалізованих моделей. У квантовій хімії та атомній фізиці це проявляється у

застосуванні числових методів для розрахунку електронної структури складних молекул, де аналітичні розв'язки відсутні, а фізично значущі величини визначаються шляхом масштабних обчислень.

Суттєвого значення набуває також завдання отримання статистично обґрунтованих передбачень. У сучасній космології параметри стандартної космологічної моделі визначаються не як точні значення, а як імовірнісні розподіли, отримані внаслідок зіставлення теоретичних симуляцій із великими масивами спостережних даних реліктового випромінювання та великомасштабної структури Всесвіту.

Важливою складовою сучасних теоретичних досліджень є інтеграція теорії з експериментальними та спостережними даними. Теоретичні моделі дедалі частіше використовуються для оптимізації експериментальних програм, вибору параметрів вимірювань і визначення стратегій аналізу даних. У фізиці високих енергій, зокрема, теоретичні уявлення безпосередньо впливають на налаштування тригерних систем і алгоритмів відбору подій.

Окремим завданням сучасної теорії є дослідження складності фізичних систем, зокрема нелінійних ефектів, нестійкостей, фазових переходів і процесів самоорганізації, які не зводяться до простих аналітичних залежностей і потребують спеціальних числових та статистичних методів.

На відміну від лінійної структури класичної теорії, сучасне теоретичне дослідження має циклічну та багаторівневу організацію. Воно часто починається з аналізу експериментальних даних або результатів попередніх числових симуляцій, у межах яких виявляються нетривіальні кореляції, аномальні режими або відхилення від очікуваної поведінки.

Наступним етапом є побудова ефективної теоретичної моделі, що поєднує аналітичні співвідношення з числовими параметризаціями. Уже на цьому рівні враховуються обчислювальна складність задачі та можливості її реалізації на сучасних обчислювальних платформах.

Центральне місце в структурі сучасного теоретичного дослідження займає числове моделювання, яке фактично виконує функцію теоретичного експерименту. У квантовій хромодинаміці на ґратці властивості адронів

визначаються шляхом багатомільйонних симуляцій, а фізичний результат формується як статистично узгоджений висновок.

У фізиці плазми та керованого термоядерного синтезу числові симуляції турбулентності й магнітного утримання застосовуються для прогнозування режимів роботи установок і корекції параметрів експерименту. Отримані результати проходять статистичну обробку і валідацію, після чого зіставляються з експериментальними або спостережними даними. На цій основі модель уточнюється, що знову запускає дослідницький цикл. У такий спосіб теорія, обчислення і дані утворюють єдиний дослідницький контур.

Визначальною рисою сучасної теорії є домінування числових і гібридних методів, у яких аналітичні підходи виконують структуроутворювальну та пояснювальну функції. Теоретичне дослідження дедалі частіше набуває рис чисельного експерименту.

Значну роль відіграють статистичні та ймовірнісні методи. У гідродинаміці та фізиці плазми рівняння Нав'є–Стокса відомі аналітично, однак практично значущі розв'язки можливі лише числовими методами, що робить симуляцію основним джерелом знання про поведінку системи.

Принципово новою рисою є алгоритмічний і ШІ-орієнтований характер сучасної теорії. У матеріалознавстві методи машинного навчання поєднуються з теорією функціоналу густини для пошуку нових надпровідних і термоелектричних матеріалів. У гравітаційно-хвильовій фізиці алгоритми глибокого навчання застосовуються для швидкого виявлення слабких сигналів у шумових даних і попередньої оцінки параметрів джерел.

Характерною є також багаторівнева картина фізичної реальності, у межах якої різні рівні опису мають власні ефективні закони і не зводяться безпосередньо один до одного.

Методологічне значення сучасного підходу полягає в тому, що теоретична фізика перестає бути суто аналітичною дисципліною і функціонує як інтегрована модельно-обчислювальна практика. Теорія виступає не лише системою формул, а інструментом навігації в просторі можливих фізичних сценаріїв.

Водночас цей підхід породжує нові методологічні виклики, пов'язані з інтерпретованістю числових результатів, алгоритмічними упередженнями, залежністю від даних і обчислювальної інфраструктури.

Сучасні методи теоретичних досліджень не заперечують класичний підхід, а істотно його розширюють, формуючи методологію фізичного пізнання, у якій теорія, обчислення і дані становлять єдиний пізнавальний контур.

3.4.3. Порівняння класичних і сучасних теоретичних методів: методологічні можливості та ризики

Еволюція теоретичних методів у фізиці не означає відмови від класичної наукової традиції, а відображає її включення до більш складної та багаторівневої методологічної системи. Класичні теоретичні підходи заклали фундамент фізичної науки, сформували базові закони і принципи, а також встановили стандарти математичної строгості, логічної узгодженості та пояснювально-передбачувальної здатності теорії. Сучасні теоретичні методи не скасовують цих засад, а істотно розширюють можливості теоретичного пізнання, насамперед у дослідженні складних фізичних систем, опис яких потребує залучення значних обсягів даних і обчислювальних ресурсів.

Незалежно від історичного етапу, теоретичні дослідження у фізиці спрямовані на формування узагальненого, формалізованого та внутрішньо узгодженого знання про фізичну реальність. Водночас способи реалізації цього завдання зазнали істотних змін. У класичній фізиці теорія ґрунтувалася переважно на аналітичних методах, ідеалізаціях і дедуктивному мисленні. У сучасній фізиці ці підходи доповнюються числовим моделюванням, статистичними методами та алгоритмічними процедурами, що призводить до зміни методологічної архітектури теоретичного пізнання.

Однією з принципових відмінностей між класичними і сучасними теоретичними методами є ставлення до можливості отримання аналітичного розв'язку. У класичній теорії наявність точного або наближеного аналітичного розв'язку розглядалася як необхідна умова повноцінності теоретичної моделі.

Аналітичні розв'язки в небесній механіці чи електродинаміці не лише забезпечували кількісні передбачення, а й формували цілісне фізичне розуміння досліджуваних систем.

У сучасній фізиці відсутність аналітичного розв'язку не вважається методологічним обмеженням. У багатьох напрямках теоретичне знання формується переважно на основі числових симуляцій. Так, у числових реалізаціях квантової хромодинаміки на дискретній ґратці фізичні характеристики адронів визначаються шляхом масштабних обчислювальних розрахунків, а результати мають статистичний характер. У фізиці турбулентності або плазми числове моделювання фактично виконує функцію основного теоретичного інструмента, замінюючи аналітичний аналіз у практично значущих режимах.

Суттєво змінюється і роль ідеалізацій. У класичній фізиці ідеалізовані моделі використовувалися для виділення ключових фізичних механізмів і були зорієнтовані на універсальність опису. У сучасній теорії дедалі більшого значення набуває концепція ефективних теорій, валідних у чітко визначених масштабах або фізичних режимах. Наприклад, у фізиці конденсованого стану ефективні моделі електронної взаємодії застосовуються лише в обмежених енергетичних діапазонах і не претендують на фундаментальний опис поза цими межами. Це відображає перехід від універсалістського підходу до контекстуально та масштабно зумовленого теоретичного опису.

Принципових змін зазнає також характер теоретичних передбачень. Класична теорія була тісно пов'язана з детерміністською картиною світу і орієнтувалася на точне передбачення значень фізичних величин. У сучасній теоретичній фізиці статистичний характер результатів визнається як невід'ємна риса. У космології, фізиці елементарних частинок і теорії складних систем теоретичні висновки формуються у вигляді імовірнісних розподілів, довірчих інтервалів і статистичних обмежень на параметри моделей.

Значно зростає роль обчислень і алгоритмічних процедур. Якщо в класичній теорії числові обчислення виконували допоміжну функцію, то в сучасній фізиці вони стають центральним елементом теоретичного методу. Цей

процес посилюється із впровадженням методів машинного навчання та штучного інтелекту.

Штучний інтелект у сучасній теоретичній фізиці використовується не лише для прискорення обчислень, а й як інструмент аналізу складних багатовимірних залежностей. Алгоритми машинного навчання дозволяють апроксимувати складні відображення між фізичними параметрами, працювати з великими просторами змінних і виявляти кореляції, які не завжди впливають безпосередньо з аналітичних моделей. У матеріалознавстві це використовується для прогнозування властивостей нових матеріалів, у гравітаційно-хвильовій фізиці – для попереднього виявлення сигналів, у фізиці високих енергій – для наближеного відтворення результатів складних теоретичних розрахунків.

Методологічно важливо, що використання алгоритмічних підходів змінює епістемологічний статус теоретичного знання. Частина фізичного змісту реалізується у вигляді параметрів моделей і алгоритмів, які не завжди мають пряме аналітичне тлумачення. Це актуалізує питання пояснювальної здатності теорії, інтерпретованості результатів і критеріїв наукової валідності. Водночас такі підходи підсилюють орієнтацію сучасної фізики на узгодження теорії з великими масивами даних і на забезпечення надійних прогнозів.

Змінюється і взаємодія між теорією, експериментом та даними. У класичній фізиці експеримент виконував переважно функцію перевірки теоретичних положень. У сучасній фізиці це розмежування значною мірою стирається: теорія, експеримент і обчислення утворюють єдиний методологічний комплекс. Теоретичні моделі безпосередньо впливають на проєктування експериментів, вибір режимів вимірювання і алгоритмів аналізу, як це має місце, зокрема, у колайдерній фізиці або кліматичному моделюванні.

У підсумку, порівняння класичних і сучасних теоретичних методів показує, що розвиток теорії у фізиці не є лінійною заміною одного підходу іншим. Класичні методи забезпечили фундаментальні принципи і стандарти науковості, тоді як сучасні методи істотно розширили горизонти теоретичного пізнання, інтегрувавши числові, статистичні та алгоритмічні практики. Саме ця

інтеграція визначає специфіку сучасної теоретичної фізики як багаторівневої, дано-та обчислювально орієнтованої системи наукового пізнання.

Як класичні, так і сучасні теоретичні методи у фізиці характеризуються не лише значним пізнавальним потенціалом, а й наявністю внутрішніх методологічних ризиків, що безпосередньо впливають на інтерпретацію результатів і траєкторію розвитку фізичного знання. Ці ризики не є зовнішніми недоліками теорії, а випливають із її вихідних принципів, способів моделювання та форм теоретичного представлення фізичної реальності.

Одним із фундаментальних ризиків класичних теоретичних підходів є надмірна ідеалізація фізичних систем. Класична теорія широко спиралася на спрощені моделі, що ґрунтувалися на припущеннях про матеріальні точки, неперервні середовища, ідеальні умови або відсутність флуктуацій. Такі ідеалізації забезпечували можливість аналітичного розв'язання задач, однак часто втрачали адекватність поза межами вузького класу явищ.

Показовим прикладом є класична теорія випромінювання абсолютно чорного тіла. Побудована на припущенні про неперервний розподіл енергії, вона приводила до зростання енергії випромінювання зі збільшенням частоти без будь-яких обмежень. Формально узгоджений у межах класичної фізики результат виявився фізично неприйнятним і засвідчив обмеженість вихідних теоретичних припущень. Усунення цієї суперечності вимагало перегляду базових уявлень і привело до введення квантів енергії, що стало відправною точкою квантової теорії.

Іншим істотним ризиком класичної теорії є її теоретична замкненість. Усталена модель могла визначати не лише спосіб пояснення явищ, а й межі того, що вважалося фізично допустимим або значущим. За таких обставин експериментальні результати, які не вкладалися в наявну теоретичну схему, нерідко трактувалися як аномалії або похибки вимірювань, а не як підстави для перегляду теорії.

Характерним прикладом є проблема атомних спектрів у XIX столітті. Дискретна структура спектральних ліній була експериментально надійно встановлена, однак класична електродинаміка не дозволяла її принципового

пояснення. Тривала відсутність теоретичної інтерпретації цих фактів свідчила не про недосконалість експерименту, а про глибинні обмеження класичних теоретичних уявлень.

Додатковим ризиком класичного підходу була обмежена придатність аналітичних методів до дослідження нелінійних і багатofакторних систем. Такі методи виявлялися ефективними лише для відносно простих або сильно ідеалізованих задач.

Показовим у цьому контексті є задача трьох тіл у класичній механіці, для якої не існує загального аналітичного розв'язку. Дослідження Пуанкаре показали, що навіть детерміністські класичні системи можуть демонструвати складну динаміку з високою чутливістю до початкових умов, що виходить за межі традиційного аналітичного опису.

Сучасні теоретичні методи істотно розширили пізнавальні можливості фізики завдяки застосуванню числового моделювання, статистичних підходів і алгоритмічних засобів. Водночас така методологічна еволюція зумовила появу нових типів ризиків, які або були відсутні в класичній теорії, або мали в ній другорядне значення.

Одним із ключових ризиків сучасної теорії є виникнення числових артефактів, зумовлених апроксимаційним характером обчислювальних методів. На відміну від аналітичних розв'язків, числові результати залежать від вибору дискретизації, кроку інтегрування, граничних умов, алгоритмів стабілізації та схем усереднення. У нелінійних системах ці технічні чинники можуть суттєво впливати на отримані результати.

Типовим прикладом є числове моделювання турбулентних режимів у гідродинаміці та плазмовій фізиці. За різних параметрів розрахунку можуть з'являтися штучні структури потоку, які не мають фізичного аналога. За таких умов стає принципово важливим розмежування між реальними фізичними ефектами і результатами числової процедури.

Другим суттєвим ризиком є надмірна параметризація теоретичних моделей. Сучасні моделі складних систем часто містять значну кількість ефективних параметрів, значення яких визначаються шляхом узгодження з

експериментальними або спостережними даними. Хоча це підвищує точність опису, воно може знижувати пояснювальну прозорість теорії.

Показовим прикладом є сучасна космологія. Стандартна модель Λ CDM демонструє високий ступінь узгодженості з даними космічного мікрохвильового фону і великомасштабної структури Всесвіту, однак містить компоненти, фізична природа яких залишається невизначеною. У цьому випадку формальна успішність моделі не супроводжується завершеним фізичним поясненням.

Окрему групу ризиків становить алгоритмічна непрозорість підходів, заснованих на методах машинного навчання. Такі алгоритми широко застосовуються для апроксимації складних залежностей, класифікації станів або прогнозування властивостей систем, однак внутрішні механізми їх роботи часто не мають прямої фізичної інтерпретації.

Показовим є приклад матеріалознавства, де нейронні мережі використовуються для прогнозування стабільності кристалічних структур або електронних властивостей матеріалів без явного зв'язку з традиційними фізичними параметрами, такими як симетрії або типи взаємодій. У результаті теоретичний прогноз може бути точним, але слабо інтегрованим у фізичну картину явища.

Тісно з цим пов'язаний ризик відтворення прихованих припущень, закладених у навчальні набори даних. Алгоритми, навчені на обмежених вибірках, можуть знижувати чутливість до нетипових або нових фізичних процесів, що не були представлені у вихідних даних.

Ще одним важливим ризиком сучасної теорії є послаблення фізичної інтуїції дослідника. За умов домінування складних обчислювальних процедур зменшується роль граничних оцінок, аналітичних міркувань і простих модельних уявлень, що ускладнює критичну перевірку результатів.

Отже, сучасна теоретична фізика стикається не з дефіцитом методів, а з необхідністю методологічного контролю над використанням числових і алгоритмічних засобів. Числові артефакти, надмірна параметризація, алгоритмічна непрозорість і зниження інтерпретованості результатів не

заперечують ефективності сучасних підходів, але визначають межі їх коректного застосування.

У цьому контексті ключовим методологічним завданням стає систематичне зіставлення числових і алгоритмічних результатів із фундаментальними фізичними принципами, симетріями та граничними випадками, що забезпечують концептуальну цілісність фізичного знання.

Аналіз теоретичних і експериментальних досліджень свідчить про те, що теорія та експеримент не є автономними складовими наукового пізнання. Вони утворюють взаємопов'язану методологічну систему, у межах якої фізичне знання формується як результат взаємодії теоретичних моделей, експериментальних процедур, обчислювальних методів і способів інтерпретації даних.

Аналіз класичних підходів показує, що фізичні дослідження тривалий час будувалися за лінійною схемою з чітким розмежуванням між теоретичним формулюванням законів і їх експериментальною перевіркою. Така структура забезпечувала принципову прозорість, але обмежувала можливості вивчення складних систем. Сучасний етап розвитку фізики характеризується інтеграцією теорії, експерименту й обчислень у єдиний дослідницький контур, що зумовлює необхідність нового рівня методологічної рефлексії.

Отже, планування наукового дослідження у сучасній фізиці слід розглядати як усвідомлений методологічний процес, який поєднує класичні підходи з новими обчислювальними й алгоритмічними можливостями та спрямований на забезпечення надійності, відтворюваності й змістовної інтерпретованості результатів.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Поясніть, як зростання складності фізичних моделей впливає на сучасне розуміння фізичного закону.
2. Охарактеризуйте роль спрощення в побудові фізичних моделей. У яких випадках воно підвищує пояснювальну силу моделі?
3. Розкрийте значення ієрархії моделей (мікро $\rightarrow$ мезо $\rightarrow$ макро) у сучасній теоретичній фізиці.
4. Поясніть роль параметризації у побудові складних фізичних моделей.
5. Проаналізуйте вплив чисельної нестабільності алгоритмів на достовірність результатів фізичного моделювання.
6. Охарактеризуйте можливості комп'ютерних симуляцій у дослідженні фізичних явищ.
7. Поясніть співвідношення точності та пояснювальної сили у багатопараметричних моделях.
8. Визначте роль інтуїції дослідника у роботі з сучасними обчислювальними моделями.
9. Охарактеризуйте методологічне значення багатомасштабного моделювання (multiscale modeling).
10. Поясніть, яку роль відіграють моделі у сучасному фізичному пізнанні

Розділ 4. Сутність та структура кваліфікаційного дослідження

4.1. PhD як кваліфікаційний рівень і дослідницька форма наукової діяльності

4.1.1. PhD як дослідницька кваліфікація: цілі, функції та очікувані результати

Кваліфікаційне дослідження на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) є найвищим рівнем академічної підготовки в сучасній освітньо-науковій системі. Воно засвідчує не лише завершення формальної освітньої траєкторії, а передусім набуття дослідницької кваліфікації, яка підтверджує здатність особи до самостійного, відповідального та методологічно обґрунтованого продукування нового наукового знання.

На відміну від попередніх освітніх рівнів, PhD не може тлумачитися виключно як освітній ступінь. Його сутність полягає у поєднанні освітнього, наукового та професійного вимірів, у центрі яких перебуває оригінальне наукове дослідження, виконане відповідно до міжнародно визнаних стандартів науковості, академічної доброчесності та відкритої наукової комунікації.

Головною метою PhD-дослідження є формування самостійного науковця, здатного:

- виявляти й формулювати нові або недостатньо досліджені наукові проблеми;
- здійснювати критичний аналіз існуючих теоретичних підходів, концепцій та емпіричних даних;
- обґрунтовувати методологічний вибір і працювати в умовах наукової невизначеності;
- отримувати нові результати, що мають теоретичну та/або прикладну значущість.

Отже, мета PhD полягає не лише у поглибленні спеціалізованих знань, а у становленні дослідницької автономії, наукової відповідальності та професійної

зрілості здобувача. Як дослідницька кваліфікація, PhD виконує кілька взаємопов'язаних функцій.

По-перше, науково-пізнавальну. Вона полягає у створенні нового знання або суттєвому переосмисленні наявного. PhD-дослідження не має компілятивного чи суто оглядового характеру; воно передбачає отримання оригінального результату, який робить самостійний внесок у розвиток відповідної галузі.

По-друге, методологічну. У межах PhD здобувач не лише застосовує відомі методи, а й обґрунтовує їхню релевантність, адаптує або розвиває методологічний інструментарій відповідно до специфіки поставленої наукової проблеми. У цьому сенсі дисертаційне дослідження демонструє рівень методологічної культури та здатність до рефлексивного використання наукових засобів.

По-третє, професійну та соціалізаційну. PhD є інституційно оформленим етапом інтеграції здобувача у професійну наукову спільноту. Йдеться про засвоєння академічних норм, стандартів якості, принципів доброчесності, а також практик наукової комунікації, рецензування й публікаційної діяльності.

По-четверте, комунікативну. PhD передбачає включення результатів дослідження до національного та міжнародного наукового дискурсу через публікації, участь у конференціях, семінарах, наукових мережах і дослідницьких проєктах. Науковий результат набуває повноцінного статусу лише за умови його публічної презентації та фахової оцінки.

Очікувані результати PhD як дослідницької кваліфікації суттєво ширші, ніж сам факт захисту дисертації. До них належать:

- отримання оригінального наукового результату, що має самостійну наукову цінність і визнається фаховою спільнотою;
- здатність аргументовано представляти та захищати власні наукові висновки;
- сформована дослідницька ідентичність і готовність до подальшої наукової діяльності;

- досвід відкритої наукової комунікації та дотримання принципів академічної доброчесності;
- підготовленість до самостійної наукової, викладацької або експертної діяльності.

У такому розумінні PhD не є завершенням наукової підготовки, а початком повноцінної наукової кар'єри. Захист дисертації фіксує досягнутий рівень дослідницької автономії, але не вичерпує процес професійного становлення науковця.

Порівняно з магістерською кваліфікаційною роботою, що має переважно навчально-дослідницький характер, PhD-дослідження орієнтоване на створення нового знання та формування дослідника як автономного суб'єкта наукової діяльності. Якщо магістерська робота демонструє здатність працювати з джерелами та застосовувати відомі методи, то PhD вимагає самостійної наукової ініціативи, відповідальності за обрані підходи та за отримані результати.

Водночас конкретне розуміння цілей, функцій і очікуваних результатів PhD варіюється залежно від освітніх і наукових традицій. Існують відмінності між міжнародними та пострадянською моделями підготовки докторів філософії, що стосуються структури дослідження, ролі наукового керівника, рівня автономії здобувача та критеріїв оцінювання наукового внеску.

Для українського контексту особливо важливим є усвідомлення цих відмінностей у процесі гармонізації національної системи підготовки докторів філософії з міжнародними стандартами, без втрати власної інституційної специфіки. Саме таке розуміння PhD як дослідницької кваліфікації дозволяє коректно визначити його цілі, функції та очікувані результати в сучасній системі науки й вищої освіти.

4.1.2. PhD-дослідження як інструмент формування наукової автономії та дослідницької зрілості

Однією з ключових функцій PhD-дослідження у сучасній науково-освітній системі є формування наукової автономії та дослідницької зрілості здобувача. На цьому етапі відбувається якісний перехід від керованої навчально-дослідницької діяльності до самостійної наукової практики, у межах якої дослідник бере на себе повну відповідальність за постановку наукової проблеми, вибір методології, інтерпретацію результатів і дотримання етичних стандартів дослідження.

У сучасних умовах ці процеси дедалі тісніше пов'язані з принципами відкритої науки, які змінюють традиційні уявлення про наукову автономію. Якщо раніше автономія дослідника часто асоціювалася з індивідуальною замкненістю та обмеженим доступом до результатів дослідження, то сьогодні вона дедалі більше розглядається як здатність діяти самостійно в умовах відкритості, прозорості та колективної перевірюваності знання.

Наукова автономія в контексті PhD означає здатність здобувача не лише самостійно приймати дослідницькі рішення, а й робити їх відкритими для наукової спільноти: чітко аргументувати вибір теми, методів і даних, забезпечувати відтворюваність результатів та бути готовим до публічної критики. Отже, автономія поєднується з відповідальністю за якість і прозорість наукової роботи.

PhD-дослідження створює умови для поступового формування такої автономії через роботу в ситуації теоретичної, методологічної та емпіричної невизначеності. Здобувач не лише обирає власну дослідницьку траєкторію, а й навчається документувати цей вибір, робити його зрозумілим і перевірюваним для інших. Саме тут принципи відкритої науки відіграють важливу методологічну роль, стимулюючи критично-аналітичне осмислення щодо джерел даних, процедур аналізу та меж інтерпретації.

Автономія у PhD-дослідженні не означає ізоляцію від наукової спільноти. Навпаки, відкриті публікації, доступні дослідницькі дані, відкриті методи та

програмний код сприяють включенню здобувача у глобальний науковий діалог. Здатність працювати автономно в такому відкритому середовищі є важливим показником дослідницької зрілості.

Поняття дослідницької зрілості у сучасному PhD-дослідженні охоплює не лише глибину теоретичних знань або технічну майстерність, а й усвідомлення соціальної відповідальності науки. У межах відкритої науки зрілість дослідника проявляється у здатності:

- усвідомлювати суспільну значущість і потенційні наслідки власних досліджень;
- забезпечувати прозорість дослідницького процесу;
- коректно працювати з даними, зокрема з урахуванням принципів повторного використання та довгострокового збереження;
- дотримуватися стандартів академічної доброчесності та відкритого цитування.

Кваліфікаційне дослідження сприяє формуванню цієї зрілості через необхідність не лише отримати новий результат, а й зробити його доступним, інтерпретованим і перевірюваним. Здобувач навчається розрізняти наукову новизну та інформаційний шум, коректно обмежувати висновки та уникати необґрунтованих узагальнень, що особливо важливо в умовах відкритого доступу до результатів дослідження.

Особливе значення у формуванні автономії та зрілості має трансформація ролі наукового керівника. В умовах відкритої науки керівник дедалі частіше виконує функцію методологічного консультанта та модератора академічної дискусії, тоді як здобувач стає відповідальним суб'єктом відкритого дослідницького процесу. Така модель сприяє розвитку здатності самостійно аргументувати наукові рішення та приймати відповідальність за їхні наслідки.

Важливим елементом формування дослідницької зрілості є також участь у відкритій науковій комунікації: підготовка публікацій у відкритому доступі, презентація результатів на конференціях, робота з відкритими рецензіями та коментарями. У цьому процесі PhD-здобувач набуває досвіду взаємодії з різними

формами академічної критики та вчиться інтегрувати її у подальший розвиток власного дослідження.

У ширшому пізнавальному вимірі PhD-дослідження в контексті відкритої науки сприяє формуванню усвідомлення того, що наукове знання є не завершеним продуктом, а відкритим процесом, який розвивається через перевірку, уточнення та колективне обговорення. Усвідомлення цієї динаміки є важливим показником дослідницької зрілості та наукової автономії.

Отже, PhD-дослідження в умовах відкритої науки виступає не лише інструментом індивідуального професійного становлення, а й механізмом включення молодого науковця у сучасну культуру відкритого, відповідального та відтворюваного наукового знання. Саме через таке поєднання автономії, зрілості та відкритості PhD набуває свого повноцінного методологічного статусу в сучасній науці.

4.2.Сутність кваліфікаційного PhD-дослідження: міжнародний та український контексти

4.2.1. Міжнародний контекст: PhD як дослідницький проєкт і професійна соціалізація

У більшості країн Європейського простору вищої освіти PhD-дослідження розглядається передусім як індивідуальний дослідницький проєкт, що реалізується в реальному науковому середовищі під систематичним науковим керівництвом. У цій логіці PhD є не стільки «великим текстом», скільки комплексним доказом здатності здобувача діяти як автономний дослідник: формулювати наукову проблему, обґрунтовувати методологічний вибір, працювати з даними, отримувати валідні результати, дотримуватися принципів наукової доброчесності, презентувати результати у фаховій спільноті та витримувати експертну перевірку.

У сучасному міжнародному академічному середовищі підготовка PhD дедалі тісніше пов'язується з принципами відкритої науки, які формують нову модель організації наукового пізнання, засновану на відкритості, прозорості,

відтворюваності та відповідальності. У цьому контексті PhD-дослідження розглядається не лише як індивідуальний кваліфікаційний проєкт, а як складова відкритого наукового процесу, результати якого мають бути доступними для перевірки, повторного використання та критичного осмислення міжнародною науковою спільнотою.

На рівні європейських і міжнародних політик принципи відкритої науки вже не сприймаються як додаткова опція або добровільна ініціатива окремих дослідників. Вони поступово інтегруються в інституційні вимоги до дослідницьких проєктів і докторської підготовки. У зв'язку з цим PhD-дослідження дедалі частіше оцінюється не лише за критеріями наукової новизни, а й за тим, наскільки коректно й відповідально в ньому реалізуються принципи відкритості, прозорості та відтворюваності.

Європейські рамкові підходи до докторської підготовки фіксують базовий принцип: навчання на третьому циклі здійснюється «через дослідження» (*learning through research*), а центральною діяльністю аспіранта є виконання оригінального наукового дослідження. Саме цю ідею розгортають рекомендації *Salzburg II*, які, з одного боку, підкреслюють різноманітність моделей докторських шкіл, а з іншого – наголошують на необхідності уникати надмірної стандартизації, зберігаючи при цьому високі вимоги до якості дослідницького середовища та наукової відповідальності.

У межах міжнародного підходу доцільно виділити кілька ключових характеристик.

1. Орієнтація на результат і науковий внесок.

Центральним, вимірюваним «ядром» PhD-дослідження є наукова новизна та внесок у відповідну галузь знань, а також демонстрація дослідницької зрілості здобувача. Формальна структура дисертаційного тексту залишається важливою, однак вона є вторинною порівняно з тим, чи здатен автор переконливо обґрунтувати наукову проблему, методи її дослідження, межі валідності результатів та їх значення для подальших наукових студій.

2. Дисертація як інструмент оцінювання дослідницьких компетентностей.

У мінародному контексті дисертація передусім є інтегрованим звітом про виконаний дослідницький проєкт. Вона слугує основним інструментом, за допомогою якого зовнішні експерти оцінюють:

- ступінь самостійності здобувача;
- обґрунтованість методологічних рішень;
- коректність роботи з даними та аналізу результатів;
- здатність працювати з науковою невизначеністю;
- уміння критично співвідносити власні висновки з існуючою науковою літературою.

3. Професійна соціалізація в дослідницькій спільноті.

PhD-дослідження у міжнародних системах передбачає системну інтеграцію здобувача в практики академічної професії. Йдеться про участь у наукових семінарах і конференціях, публікаційну активність, рецензування, академічну мобільність і розвиток навичок наукової комунікації. На рівні політик ЄС ці орієнтири підтримуються документом *Principles for Innovative Doctoral Training*, який серед ключових принципів називає міждисциплінарність; міжнародність; розвиток переносних навичок і увагу до майбутньої кар'єрної траєкторії докторанта.

4. Інституційна відповідальність і якісне дослідницьке середовище.

У традиції європейських національних систем особливо підкреслюється вимога, щоб наукові ступені здобувалися в дослідницькому середовищі, яке забезпечує належні академічні стандарти, якість наукового керівництва, регулярний моніторинг прогресу та прозорі процедури оцінювання. Такі підходи відображені, зокрема, у документах QAA (*Quality Assurance Agency for Higher Education*), що визначають характеристики досліджень докторського рівня.

У практиці міжнародних університетів домінують два базові формати PhD-дисертацій, які визнаються рівноцінними за умови виконання головної функції – демонстрації оригінальності результатів і самостійності автора.

Монографічна дисертація представляє собою цілісний авторський текст із класичною логікою викладу (вступ, огляд літератури, методи, результати, обговорення, висновки). Такий формат частіше використовується в гуманітарних

і частині соціальних наук, але залишається поширеним і в природничих дисциплінах у разі концептуально єдиного дослідження. Наприклад, рекомендації *Harvard University* визначають типовий діапазон обсягу дисертацій (часто 100–300 сторінок), наголошуючи, що структура має бути логічно організованою та придатною до експертизи й архівування.

Дисертація за публікаціями (thesis by publication, cumulative або integrated thesis) передбачає, що ядро роботи становить серія статей, опублікованих або прийнятих до друку, доповнених інтеграційними розділами. Такі розділи забезпечують цілісність дисертації: постановку проблеми, огляд літератури, узгоджену методологію, синтез результатів і узагальнення наукового внеску та його обмежень. Університетські правила, зокрема в *University of Oxford* та *ETH Zurich*, прямо підкреслюють, що дисертація за публікаціями не може бути механічною сумою статей і має бути оформлена як єдиний науковий документ.

Окрему увагу університети приділяють питанням авторських прав і повторного використання опублікованих матеріалів. Так, *Massachusetts Institute of Technology* детально регламентує порядок включення вже опублікованих робіт до дисертації з урахуванням видавничих угод.

Загалом, провідні університети поєднують формалізацію вимог до PhD-дисертацій із збереженням ключового принципу: кваліфікаційна робота оцінюється як дослідницький проєкт, а не як суто формальний текст. *University of Cambridge* і *Stanford University*, наприклад, встановлюють чіткі вимоги до формату та процедур подання, водночас наголошуючи, що оформлення, готове до публікації, розглядається як мінімальний рівень наукової придатності дослідження. На наднаціональному рівні *Principles for Innovative Doctoral Training* Європейської комісії формують концептуальну модель сучасної докторської підготовки, визначаючи її як дослідницько орієнтований процес із наголосом на інтернаціоналізації, міждисциплінарності, розвитку трансферних навичок і взаємодії з позаакадемічним сектором. Паралельно Європейська університетська асоціація у рекомендаціях *Salzburg II* підкреслює необхідність збереження автономії та різноманітності докторських програм за умови

безумовного пріоритету дослідження й інституційної відповідальності університетів за якість докторського середовища.

Гнучкість форматів дисертації відображає принципову установку: результат PhD-дослідження оцінюється не за єдиною «правильною» композицією тексту, а за сукупністю доказів наукової зрілості. У природничих науках дисертація за публікаціями часто є практичною нормою, тоді як у гуманітарних дисциплінах переважає монографічний формат, хоча дедалі ширше застосовуються гібридні моделі.

У сучасному міжнародному академічному контексті дослідницька доброчесність розглядається не як сукупність формальних заборон або процедур контролю, а як базовий принцип організації наукової роботи на рівні PhD. Вона визначає спосіб формування, перевірки та поширення знання і безпосередньо пов'язана з довірою до результатів дослідження, на якому здобувач виступає як відповідальний суб'єкт наукової діяльності, а не як студент, що виконує навчальне завдання. Саме тому міжнародні рекомендації наголошують на формуванні культури доброчесності, а не лише на формальному контролі її дотримання.

Доброчесність у цьому розумінні охоплює чесність у постановці проблеми та гіпотез, прозорість методологічних рішень, відповідальне поводження з даними, коректне представлення результатів і меж їх валідності, а також етичну взаємодію з науковою спільнотою. Особливе значення має прозорий опис методології, що забезпечує можливість відтворення або критичної перевірки результатів.

У міжнародній практиці управління даними розглядається як невід'ємна складова PhD-дослідження. Розроблення *Data Management Plan* дозволяє системно описати типи даних, формати їх зберігання, метадані, умови архівування та обмеження доступу. Такий підхід поширений у програмах, пов'язаних із *Horizon Europe*, і дедалі частіше інтегрується в університетські вимоги.

Зростання ролі обчислювальних методів і штучного інтелекту додатково розширює уявлення про дослідницьку доброчесність. У цьому контексті

важливими стають документування коду, опис алгоритмів, декларування використаних інструментів і усвідомлення обмежень автоматизованих методів. Міжнародна практика дедалі чіткіше вимагає прозоро зазначати характер використання ШІ-інструментів, щоб експерти могли оцінити ступінь авторської відповідальності.

Публікаційна активність, що є типовою складовою PhD у міжнародному контексті, зумовлює підвищену увагу до етики авторства. До ключових принципів належать коректне визначення співавторства, прозоре зазначення внеску здобувача у спільних публікаціях, недопущення дублювання результатів і відповідальність за достовірність опублікованих даних.

Методологічно важливо, що в міжнародному контексті дослідницька доброчесність виступає не допоміжною вимогою, а одним із ключових критеріїв оцінювання PhD-дослідження. Водночас вона розглядається не карально, а як елемент професійної ідентичності дослідника. У цьому сенсі PhD є не лише перевіркою наукових здібностей, а й ініціацією у відповідальну наукову практику, що підтримує довіру до науки як соціального інституту.

4.2.2. Український контекст: PhD як нормативно визначена кваліфікаційна робота

В українській системі вищої освіти та наукової атестації PhD-дослідження визначається передусім як кваліфікаційна наукова робота, виконана здобувачем третього рівня вищої освіти з метою присудження ступеня доктора філософії. Її зміст, форма та процедура оцінювання регламентуються державними нормативно-правовими актами, підзаконними документами у сфері освіти і науки, а також рішеннями органів забезпечення якості вищої освіти. У цьому значенні PhD у національному контексті виступає не лише академічним результатом, а й державно визнаною кваліфікацією, вбудованою в систему формалізованого контролю якості підготовки.

На відміну від міжнародної моделі український підхід сильніше акцентує атестаційно-процедурний вимір: дотримання встановлених вимог, відповідність

формальним критеріям, коректність документації, процедурний контроль допуску та захисту. Це створює специфічний баланс між двома логіками: з одного боку, дисертація повинна демонструвати науковий внесок і дослідницьку компетентність, з іншого – слугувати інструментом перевірки відповідності нормативно визначеним умовам присудження ступеня.

В умовах нормативного регулювання української системи PhD-дослідження має відповідати базовим вимогам, які становлять ядро експертизи дисертації в спеціалізованих (разових) вчених радах:

- наявність наукової новизни, що формулюється як нові наукові положення, результати, підходи, узагальнення або уточнення наявних уявлень у певній галузі;
- чітко окреслений особистий внесок здобувача, який має бути відмежований від колективних результатів (зокрема у разі співавторства);
- спрямованість на розв'язання актуальної наукової проблеми, значущої для відповідної спеціальності та галузі знань.

Ці критерії загалом узгоджуються з міжнародною логікою оцінювання PhD (внесок, автономність, валідність результатів), однак у національній практиці вони часто реалізуються через атестаційні механізми, що підсилюють роль формального підтвердження відповідності.

У результаті українська дисертація виконує подвійну функцію:

1. демонструє здатність здобувача до самостійної наукової роботи;
2. виступає документом державної атестації, який має бути бездоганним з погляду встановлених процедур і вимог.

Характерною рисою української моделі є те, що PhD-дослідження на практиці нерідко сприймається передусім як завершений текстовий продукт, який необхідно підготувати і захистити в межах чітко визначеної процедури. Це зміщує акценти:

- з довготривалого розвитку дослідницького проєкту та академічної соціалізації – на логіку «допуску до захисту»;

- з відкритості дослідницького процесу – на повноту та відповідність структурним шаблонам;
- з інтеграції в міжнародну комунікацію – на внутрішню атестаційну завершеність.

У методологічному розумінні це може сприяти ситуації, коли дисертація формально відповідає всім вимогам, але є менш гнучкою щодо інноваційного змісту дослідження, відкритих практик роботи з даними та інтенсивної інтеграції у міжнародний дискурс (що в міжнародній моделі виступає суттєвим елементом професійної соціалізації докторанта).

- Українська практика вирізняється помітним рівнем формалізації структури дисертації. Типово дисертація:
 - пишеться державною мовою;
 - оформлюється як спеціально підготовлений рукопис (а не як кумулятивна дисертація за публікаціями як домінантний формат);
 - має орієнтовно визначений обсяг основного тексту;
 - містить регламентований набір елементів.

Особливу роль відіграє вступ, який виконує одночасно пояснювальну і контрольну функції. У ньому обов'язково подаються: актуальність теми; мета і завдання; об'єкт і предмет; методи дослідження; наукова новизна; практичне значення; апробація результатів. Завдяки цьому спеціалізована рада отримує можливість здійснити формалізовану експертизу відповідності роботи ключовим вимогам навіть у випадках, коли міжнародна зовнішня оцінка або широка відкрита наукова дискусія навколо результатів є обмеженими.

Формалізація процедури захисту має очевидні позитивні аспекти: вона забезпечує уніфікацію вимог, процедурну прозорість, відносну порівнюваність робіт і чіткість адміністративних кроків. Водночас надмірне домінування формальних вимог може мати низку методологічних наслідків, зокрема:

- стимулювання шаблонізації викладу (коли структура підміняє дослідницький задум);

- посилення орієнтації на форму замість процесу побудови та перевірки знання;
- зменшення гнучкості у виборі форматів представлення результатів (порівняно з практикою «thesis by publication» або гібридними моделями, поширеними в міжнародних університетах);
- слабша інтеграція елементів відкритої науки (дані, код, протоколи, відтворюваність) як нормативно значущих критеріїв оцінювання.

У підсумку можливий парадокс: робота може бути бездоганною з погляду структури і процедур, але менш переконливою щодо методологічної інноваційності, відкритості та відтворюваності результатів, які в міжнародному контексті дедалі частіше розглядаються як складові наукової якості.

В українській системі академічна доброчесність тривалий час інституціоналізувалася переважно як процедурна вимога. Найбільш типові практики включають:

- обов'язкову перевірку дисертаційного тексту на плагіат;
- використання інституційних або централізованих антиплагіатних систем;
- застосування формалізованих показників «унікальності» тексту як маркера відповідності.

У цій логіці доброчесність нерідко зводиться до відсутності текстових запозичень, тоді як питання достовірності даних, коректності методів, прозорості процедур аналізу, відтворюваності результатів і документування обчислювальних пайплайнів (код, версії, параметри, середовища) можуть залишатися вторинним оцінюванням.

Разом із тим сучасні українські підходи й рекомендації поступово розширюють розуміння доброчесності, наближаючи його до міжнародного розуміння, де вона трактується як культура відповідального дослідження, а не лише як контроль. До сфери інституційної уваги дедалі частіше включаються відповідальність за достовірність результатів, коректність роботи з даними,

обґрунтованість методологічних рішень і персональна відповідальність здобувача за повний дослідницький цикл.

Окремим напрямком подальшої трансформації є інтеграція принципів відкритої науки в докторську підготовку: управління даними, метадані, архівування, умови доступу, можливості повторного використання, а також документування коду та обчислювальних процедур. У міжнародному контексті ці елементи дедалі частіше розглядаються як ознаки дослідницької зрілості; в українській практиці їх системне включення до оцінювання PhD ще потребує інституційного закріплення та повсякденної інтеграції в підготовку здобувачів.

Отже, PhD-дослідження в Україні формується на перетині двох підходів: державної атестаційної логіки та міжнародного розуміння PhD як дослідницької кваліфікації. Подальша еволюція національної моделі пов'язана не лише з удосконаленням нормативної бази, а й з переорієнтацією інституційних практик університетів на PhD як процес професійної соціалізації, формування автономії, дослідницької зрілості та відповідальної відкритості результатів. Саме таке поєднання здатне зблизити українську систему з сучасними європейськими підходами, не руйнуючи її процедурної визначеності, але посилюючи дослідницький зміст і довіру до результатів як у національному, так і в міжнародному науковому середовищі.

Отже, сутність PhD-дослідження в українській системі визначається поєднанням дослідницьких і атестаційних функцій, при домінуванні останніх. Це забезпечує формальну керованість і уніфікацію, але водночас створює ризики редукції PhD до регламентованої процедури, а не повноцінного наукового процесу.

У контексті інтеграції України до Європейського простору вищої освіти ключовим викликом стає зміщення акценту з формальної відповідності на дослідницьку якість, що передбачає переосмислення ролі дисертації, доброчесності та методологічної автономії PhD-здобувача.

4.3. Порівняння моделей PhD-дослідження у фізичних науках: міжнародний та український контексти

4.3.1. Концепція PhD-дослідження у фізиці: дослідницький процес проти атестаційного результату

PhD-дослідження у фізичних науках має низку принципових особливостей, що відрізняють його як від докторських досліджень в інших галузях знання, так і між різними національними науковими системами. Фізика як експериментально-теоретична дисципліна поєднує фундаментальні математичні моделі, складну експериментальну інфраструктуру, числове моделювання та роботу з великими масивами даних. У зв'язку з цим моделі PhD-підготовки у фізичних науках є особливо чутливими до інституційних, методологічних і технологічних відмінностей між міжнародним та українським контекстами, а також до ступеня інтеграції принципів відкритої науки.

У міжнародному контексті PhD у фізиці розглядається передусім як участь у реальному науковому дослідженні, інтегрованому в роботу дослідницької групи, лабораторії або великої наукової колаборації. Докторант з перших років підготовки залучається до актуальних проєктів, результати яких мають самостійну наукову цінність незалежно від факту захисту дисертації. У цій моделі захист PhD фіксує вже здійснений науковий внесок, а не завершує ізольований дослідницький цикл.

Показовим є приклад фізичних PhD-програм у CERN, де здобувачі ступеня працюють у складі великих колаборацій, зокрема ATLAS або CMS. За таких умов дисертація формується як узагальнення особистого внеску докторанта в колективний експеримент, а ключовими критеріями успішності виступають участь у публікаціях, коректність аналізу даних і дотримання стандартів відкритості та відтворюваності.

В українському контексті PhD у фізичних науках значно частіше зберігає результатоцентричну та текстоцентричну модель, у якій дисертація розглядається як завершений індивідуальний продукт. Навіть за наявності участі у колективних проєктах акцент зміщується на формальне виокремлення

результатів, придатних для включення в рукопис дисертації та атестаційної перевірки, що узгоджується з нормативною логікою української PhD-моделі.

У міжнародних PhD-програмах з теоретичної фізики домінує модель, у якій докторант працює в межах активної наукової школи, інтегрованої у глобальну дослідницьку мережу. Наприклад, у теоретичній фізиці конденсованого стану в *University of Cambridge* або *ETH Zurich* PhD-здобувачі включені в дослідницькі групи, де теоретичні моделі, числове моделювання і експеримент перебувають у постійному науковому діалозі.

За таких умов дисертація часто має формат *thesis by publication* або гібридну структуру, а теоретична новизна оцінюється не за обсягом тексту, а за здатністю запропонувати нову модель, метод або інтерпретацію, що проходить зовнішнє міжнародне рецензування. Принципи відкритої науки проявляються тут у прозорості припущень, доступності обчислювальних моделей і можливості незалежної перевірки теоретичних результатів.

В українській теоретичній фізиці PhD-дослідження значно частіше зберігає індивідуалізований характер. Теоретична робота нерідко здійснюється в межах локальної наукової традиції, а міжнародне рецензування результатів до моменту захисту є обмеженим. Це посилює роль внутрішньої експертизи, але зменшує рівень зовнішньої перевірки теоретичних побудов і їх інтеграції в глобальний науковий дискурс.

В експериментальній фізиці PhD-дослідження нерозривно пов'язане з доступом до складної та дорогої наукової інфраструктури. У міжнародному контексті докторанти мають змогу працювати з унікальними установками, такими як синхротронні джерела, лазерні інтерферометри, космічні телескопи та детектори високих енергій.

Наприклад, у галузі гравітаційно-хвильової фізики PhD-дослідження в університетах, залучених до колаборації *LIGO – Virgo Collaboration*, будуються навколо аналізу реальних експериментальних даних. У таких умовах дисертація є вторинною щодо участі в експерименті та формується як узагальнення внеску докторанта в обробку сигналів, статистичний аналіз або числове моделювання астрофізичних джерел.

В українських умовах доступ до подібної інфраструктури часто є обмеженим, що зумовлює специфіку експериментальних PhD-досліджень. Вони або зосереджуються на локальних установках з обмеженим міжнародним залученням, або набувають напівтеоретичного характеру, де експериментальні дані використовуються опосередковано. Це впливає на масштаби досліджень і можливості інтеграції в глобальні фізичні колаборації.

Міжнародна модель PhD у фізичних науках тісно пов'язана з принципами відкритої науки, які у фізиці мають не декларативний, а практичний характер. Дані експериментів, числові коди, симуляції та обчислювальні пайплайни часто зберігаються у відкритих або напіввідкритих репозиторіях, а докторанти зобов'язані документувати методи аналізу, параметри моделей і версії програмного забезпечення.

У фізиці високих енергій, астрофізиці або обчислювальній фізиці PhD-дисертація дедалі частіше розглядається як один з елементів ширшого дослідницького ланцюга, що включає відкриті дані, відтворювані обчислення і колективну відповідальність за результати. Відповідно, дослідницька зрілість докторанта оцінюється також за здатністю працювати з відкритими даними та дотримуватися стандартів відтворюваності.

В українському контексті ця модель лише формується. Робота з даними і кодом часто залишається внутрішньою справою окремої дослідницької групи, а вимоги до відтворюваності та публічного доступу мають переважно декларативний характер. Це обмежує можливості зовнішньої перевірки результатів і включення українських PhD-досліджень у міжнародні відкриті наукові екосистеми.

У міжнародних PhD-програмах з фізики здобувач розглядається як повноцінний учасник наукового процесу, який несе відповідальність за частину колективного знання. Захист дисертації є важливою, але не єдиною формою визнання його наукової кваліфікації. Публікації, відкриті дані, код і участь у колабораціях виступають рівнозначними маркерами професійної зрілості.

В українській моделі PhD-здобувач у фізичних науках частіше перебуває в позиції того, хто підтверджує кваліфікацію, а не того, хто вже повністю

інтегрований у глобальну дослідницьку спільноту. Це впливає як на структуру дисертації, так і на характер наукової соціалізації, зменшуючи роль відкритих дослідницьких практик.

Проте процес модернізації української системи підготовки докторів філософії дедалі більше орієнтується на узгодження з європейськими моделями докторської освіти, насамперед із *Salzburg Principles* та розвитком відкритої науки як домінуючої парадигми сучасного наукового пізнання. Ці орієнтири не є суто формальними рекомендаціями, а відображають глибинну зміну розуміння PhD як дослідницької кваліфікації, що формується у відкритому, міжнародному та відповідальному науковому середовищі.

У *Salzburg Principles*, розроблених *European University Association*, докторська підготовка визначається як підготовка на основі дослідження (*research-based training*), у межах якої навчання здійснюється через активну дослідницьку діяльність, а не через засвоєння заздалегідь заданого навчального контенту. Ключовим положенням є пріоритет оригінального наукового внеску, автономії здобувача та відповідальності інституції за створення повноцінного дослідницького середовища. У цьому сенсі PhD-програма розглядається не як набір формальних вимог до дисертації, а як комплексна система професійної соціалізації молодого науковця.

В українському контексті імплементація цих принципів відбувається поступово й нерівномірно. З одного боку, в нормативних документах МОН і НАЗЯВО дедалі частіше декларується дослідницький характер третього рівня вищої освіти, наголошується на самостійності здобувача, якості наукового середовища та міжнародній інтеграції. З іншого боку, практична реалізація *Salzburg Principles* часто обмежується структурною адаптацією без повного переосмислення атестаційної логіки PhD-дослідження.

Особливо показовим є зіставлення *Salzburg Principles* із принципами *Open Science*, які формують сучасний міжнародний стандарт дослідницької діяльності. Відкрита наука передбачає відкритість результатів, прозорість методів, доступність даних, відтворюваність обчислень і етичну відповідальність дослідника перед науковою спільнотою та суспільством. У

цьому підході PhD-дисертація розглядається не як закритий атестаційний документ, а як елемент відкритого наукового процесу, інтегрованого у глобальний обіг знань.

Для українських PhD-програм це означає зміщення акценту:

- від формального дотримання структури – до обґрунтованості дослідницького дизайну;
- від контролю текстової унікальності – до забезпечення відтворюваності результатів;
- від ізольованої дисертації – до публікацій, відкритих даних і прозорих методів.

Перші кроки у цьому напрямі вже простежуються. Зокрема, в акредитаційних критеріях НАЗЯВО дедалі більше уваги приділяється питанням дослідницької інфраструктури, академічної доброчесності в широкому розумінні, міжнародної мобільності та публікаційної активності здобувачів. Однак ці елементи поки що не становлять цілісної *Open Science*-орієнтованої моделі PhD-підготовки, а часто функціонують як додаткові вимоги поряд із традиційною атестаційною процедурою.

Методологічно гармонізація українських PhD-програм із *Salzburg Principles* та *Open Science* вимагає не лише змін у нормативній базі, а й трансформації інституційної культури університетів. Йдеться про перехід від логіки «підготовки дисертації до захисту» до логіки формування дослідника, здатного працювати в умовах відкритої науки, критично осмислювати власні результати, документувати дані й код, а також нести персональну відповідальність за наукову достовірність.

У цьому аспекті гармонізація з європейськими принципами не означає механічного запозичення моделей, а передбачає переосмислення ролі PhD-дослідження в українській системі – від атестаційного продукту до процесу наукового пізнання, інтегрованого у міжнародний дослідницький простір.

Порівняльний аналіз показує, що у фізичних науках розбіжності між міжнародною та українською моделями PhD-дослідження є особливо виразними. Міжнародна модель орієнтована на включення докторанта в реальні

експериментальні й теоретичні дослідження з високим рівнем відкритості, колективної відповідальності та відтворюваності результатів. Українська модель зберігає атестаційний і текстоцентричний характер, що забезпечує формальну структурованість, але обмежує інтеграцію PhD-досліджень у глобальний фізичний науковий простір.

Для фізичних наук ключовим викликом стає переорієнтація PhD-дослідження з індивідуального рукопису на дослідницький процес, у якому дисертація є лише одним з елементів складної системи експерименту, теорії, обчислень і відкритих даних. Саме така трансформація дозволяє узгодити українську PhD-підготовку з сучасними міжнародними стандартами та принципами відкритої науки без втрати національної нормативної визначеності.

4.3.2. Типові помилки PhD-досліджень: методологічний, організаційний та етичний виміри

Типові помилки PhD-досліджень, зокрема у фізичних науках, рідко зумовлені браком інтелектуальних здібностей або недостатньою фаховою підготовкою здобувачів. У більшості випадків їхні причини лежать у площині методологічного саморозуміння PhD: неповного усвідомлення його сутності як дослідницької кваліфікації, змішування освітньої та наукової логік, а також у напруженні між формалізованими атестаційними вимогами й реальною практикою сучасної науки.

PhD-дослідження є першим етапом, на якому здобувач діє як автономний дослідник і несе повну відповідальність за постановку проблеми, вибір методів, спосіб інтерпретації та якість доказової бази. Саме тому PhD перебуває в зоні підвищеного ризику: з одного боку, очікується оригінальний науковий внесок, з іншого, дослідження здійснюється в умовах часових, інституційних та ресурсних обмежень. Аналіз типових помилок має навчально-методологічний сенс і сприятиме формуванню усвідомленого ставлення до власного дослідницького процесу, що є важливою ознакою наукової зрілості.

Однією з найпоширеніших методологічних помилок є плутанина між темою, науковою проблемою та реальним внеском. Здобувач може переконливо обґрунтувати актуальність наряду, але так і не сформулювати чітке наукове питання, відповідь на яке є принципово новою для фізики. У таких випадках тема залишається надто широкою, мета набуває декларативного характеру, а новизна редукується до формулювань «уточнено», «проаналізовано», «досліджено», які не фіксують ні меж задачі, ні критерію новизни.

Показовою є ситуація, коли дисертація присвячена «дослідженню властивостей напівпровідникових матеріалів», однак не уточнюється, про яку саме властивість ідеться (електропровідність, фотолюмінесценція, рухливість носіїв, дефектні стани тощо), у яких умовах і режимах вона проявляється, а головне, чому наявні моделі не дають задовільного пояснення. Методологічним наслідком стає відсутність критерію успішності, оскільки неможливо однозначно визначити, чи здобуто нове знання, чи лише відтворено відомі результати в іншій конфігурації.

Важливо також звернути увагу на формалізацію методології. Методи вказуються як «обов'язковий» структурний елемент, однак не пояснюється, як саме вони працюють на перевірку гіпотези або на встановлення причинно-наслідкових зв'язків. У фізичних PhD-дослідженнях це проявляється, зокрема, у використанні складних математичних, статистичних або алгоритмічних підходів без аналізу їхньої фізичної релевантності, меж застосовності та чутливості до припущень.

Показовий приклад: застосування машинного навчання для прогнозування плазмових нестабільностей, де нейронна мережа демонструє високу точність, але не аналізується, які саме фізичні параметри визначають її рішення, чи є модель стійкою до шуму, як змінюється результат при зсуві розподілів даних, і чи не «вивчає» алгоритм побічні ознаки (артефакти вимірювань). У такій конфігурації метод перестає бути інструментом фізичного пізнання і перетворюється на алгоритмічну «чорну скриньку». Це суперечить як класичним вимогам пояснювальності, так і сучасним стандартам відкритої

науки, де прозорість припущень і відтворюваність процедур є частиною наукової якості.

Ще одна типова помилка пов'язана з ототожненням обсягу тексту із науковою якістю. У дисертаціях це проявляється у надмірно розлогих оглядових розділах або детальному описі експериментальної установки за відсутності системного аналізу результатів, похибок, валідації та фізичних висновків. У фізиці кількість сторінок не є маркером глибини: вирішальними є чіткість постановки задачі, здатність виділити суттєвий результат, коректно інтерпретувати його фізичний зміст і межі застосовності.

Окрему групу становлять помилки, пов'язані з даними, числовим моделюванням і відтворюваністю. У сучасній фізиці значна частина результатів отримується через числові симуляції або аналіз великих масивів даних, тому слабке місце PhD часто лежить не в ідеях, а у «технології доказу».

Типовими є: некритичне використання архівних даних без опису їхнього походження та систематик; поверхневий аналіз похибок; некоректне перенесення висновків, отриманих у вузькому діапазоні параметрів, на «універсальні» закономірності; ігнорування впливу вибору порогів, фільтрів, критеріїв відбору або граничних умов. У моделюванні додатково проявляється ризик числових артефактів: результат може залежати від дискретизації, кроку інтегрування, схеми стабілізації, параметрів згладжування у стохастичних алгоритмах.

Не менш серйозною проблемою є непрозорість обчислювальних процедур: відсутність документації коду, неможливість відтворити обчислення, неконтрольована зміна параметрів між запусками, відсутність фіксації версій бібліотек, середовища та конфігурацій. У таких випадках результат стає нефальсифікованим у практичному сенсі, адже інший дослідник не може повторити шлях «від даних до висновку». Це суперечить базовому принципу наукової верифікованості та сучасним стандартам відкритої науки.

Особливої уваги потребує помилка підміни фізичного пояснення алгоритмічним результатом, характерна для досліджень, заснованих на аналізі даних, та для ШІ-орієнтованих підходів. Кореляція, класифікація або прогноз,

знайдені алгоритмом, можуть бути цінним інструментом, але без обґрунтування фізичного механізму та без аналізу альтернативних інтерпретацій вони не інтегруються в теоретичну систему фізики і не мають пояснювальної сили. У межах PhD такий результат може бути лише проміжним кроком. Повноцінним внеском він стає тоді, коли пов'язаний із фізичною моделлю, межами валідності та перевірюваними наслідками.

Поряд із методологічними помилками суттєву роль відіграють організаційні та процесуальні. Однією з найпоширеніших є відкладення формулювання наукового внеску «на потім». Здобувач тривалий час накопичує матеріал, коди, графіки, проміжні результати, але не формує чіткої логіки дослідження: що саме доводиться, через які критерії, з якими обмеженнями і як це пов'язано з попередньою літературою. На фінальній стадії це призводить до фрагментарності, слабкої зв'язності розділів і труднощів із перетворенням набору робіт на цілісну наукову історію.

Не менш проблемною є некоректна модель взаємодії з науковим керівником. Один крайній варіант це повна залежність, коли здобувач не формує власної дослідницької позиції і очікує «готових рішень». Інший крайній варіант це ізоляція, уникання регулярного обговорення та ігнорування методологічних зауважень. Натомість PhD за своєю природою передбачає керовану автономію: здобувач поступово бере на себе відповідальність за ключові наукові рішення, але робить це в системі регулярної експертної перевірки, яка зменшує ризик тупикових траєкторій.

Окремий вимір становлять етичні помилки та порушення дослідницької доброчесності. У практиці PhD-досліджень доброчесність нерідко звужується до формального проходження антиплагіатної перевірки, тоді як маніпуляції з даними, селективний відбір результатів, «підгонка» параметрів під бажану картину або непрозорість алгоритмів можуть залишатися поза увагою. Зосередження на формальній «унікальності» тексту здатне маскувати глибші проблеми достовірності та наукової чесності: чи коректно проведено аналіз, чи чесно представлені негативні результати, чи розкриті систематичні похибки, чи не приховані невдалі запуски симуляцій, чи описані всі ключові припущення.

Для фізичних наук існують і специфічні етичні зони ризику: некоректне авторство у колективних роботах, непрояснений особистий внесок у співавторських статтях, «мовчазне» використання чужих кодів або даних без належної атрибуції, відсутність декларації застосованих інструментів автоматизації та ШІ, а також недостатнє документування процедур, через що результат стає неперевірюваним.

Узагальнюючи, доцільно підкреслити: більшість типових помилок PhD-досліджень мають методологічне, організаційне або інституційне походження, а не є наслідком «слабкості» здобувача. Їх уникнення пов'язане з раннім і чітким формулюванням наукового внеску; усвідомленим вибором методів із поясненням їхньої фізичної релевантності; прозорою роботою з даними, похибками і кодом; розмежуванням фізичного знання та алгоритмічних інструментів; регулярною експертною перевіркою проміжних рішень; а також постійним співвіднесенням дослідження з міжнародними стандартами доброчесності та принципами відкритої науки.

Саме така дослідницька самосвідомість перетворює PhD-дослідження з формальної кваліфікаційної роботи на справжній етап становлення фізика-дослідника, для якого науковий результат є не лише «висновком у тексті», а відтворюваним, методологічно контрольованим і пояснювально інтегрованим внеском у систему фізичного знання.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому полягає основна мета PhD-дослідження: перевірка рівня засвоєних знань чи демонстрація здатності здобувача продукувати нове наукове знання? Які критерії дозволяють відрізнити ці два підходи?
2. Якою має бути оптимальна міра спеціалізації PhD-дослідження? Чи повинна дисертація зосереджуватися на вузькій проблемі, чи водночас демонструвати методологічну універсальність і здатність дослідника працювати з ширшими науковими контекстами?

3. Де проходить межа між науковою автономією здобувача та інтелектуальним впливом наукового керівника? Які форми взаємодії сприяють розвитку дослідницької самостійності?
4. Яку роль відіграє наукова невизначеність у PhD-дослідженні? Чи повинно воно містити елемент дослідницького ризику, і яким чином цей ризик пов'язаний з можливістю отримання нових результатів?
5. Наскільки кількість наукових публікацій може бути адекватним критерієм оцінювання PhD-дослідження? Які альтернативні показники наукової якості можна запропонувати?
6. Яким чином міжнародні стандарти підготовки PhD (зокрема принципи відкритої науки та академічної мобільності) співвідносяться з національними нормативними вимогами до дисертаційних досліджень?
7. Чи можна розглядати міждисциплінарність як показник наукової зрілості дослідника? У яких випадках вона сприяє поглибленню дослідження, а коли може призводити до втрати теоретичної чіткості?
8. У чому полягає принципова різниця між навчальним дослідженням, спрямованим на опанування методів, і кваліфікаційним дослідженням, метою якого є отримання нового наукового результату?
9. Яку роль відіграє PhD у формуванні дослідницької ідентичності науковця? Чи обмежується він розвитком професійних компетентностей, чи передбачає становлення самостійної наукової позиції?
10. Яким чином цифровізація науки, розвиток великих даних і глобальна конкуренція у науковому середовищі змінюють зміст і критерії PhD-дослідження?

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ladyman J. Understanding philosophy of science. London : Routledge, 2012.
2. Frigg R., Hartmann S. Models in science // The Stanford Encyclopedia of Philosophy. 2020. <https://plato.stanford.edu/entries/models-science/>
3. Rupy S. Scientific theories as networks of models // Studies in History and Philosophy of Science. 2016. Vol. 56. P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2015.10.001>
4. Heilbron J. L. The history of physics: A very short introduction. Oxford : Oxford University Press, 2016. <https://doi.org/10.1093/actrade/9780199684129.001.0001>
5. Winsberg E. Philosophy and climate science. Cambridge: Cambridge University Press, 2018. <https://doi.org/10.1017/9781107280892>
6. Humphreys P. The philosophical novelty of computer simulation methods // Synthese. 2019. Vol. 196. P. 389–405. <https://doi.org/10.1007/s11229-017-1606-7>
7. Saltelli A., Bammer G. Five ways to ensure that models serve society: a manifesto // Nature. 2020. Vol. 582. P. 482–484. <https://doi.org/10.1038/d41586-020-01812-9>
8. Jasanoff S. Science and technology studies in a new key // Science, Technology & Human Values. 2021. Vol. 46. P. 459–476. <https://doi.org/10.1177/01622439211004962>
9. Ладанюк А. П., Власенко Л. О., Кишенько В. Д. Методологія наукових досліджень. Київ : Ліра-К, 2018.
10. Астрелін І. М., Косогіна І. В., Кирій С. О. Методологія наукових досліджень. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/5066>
11. Leonelli S. Philosophy of open science. Cambridge: Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781108770705>
12. Boumans M., Leonelli S. (eds.). Data journeys in the sciences. Cham : Springer, 2020. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-37177-7>

13. Borgman C. Big data, little data, no data: Scholarship in the networked world. Cambridge, MA: MIT Press, 2015. <https://doi.org/10.7551/mitpress/9963.001.0001>
14. Kitchin R. The data revolution: Big data, open data, data infrastructures and their consequences. London : Sage, 2014.
15. Hey T., Tansley S., Tolle K. (eds.). The fourth paradigm: Data-intensive scientific discovery. Redmond: Microsoft Research, 2009. <https://www.microsoft.com/en-us/research/publication/fourth-paradigm-data-intensive-scientific-discovery/>
16. Wilkinson M. D. et al. The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship // Scientific Data. 2016. Vol. 3. Article 160018. <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
17. Science Europe. Practical guide to the international alignment of research data management. Brussels, 2021. <https://scienceeurope.org/our-resources/practical-guide-to-the-international-alignment-of-research-data-management/>
18. European Commission. European Open Science Cloud (EOSC). Brussels, 2023. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/open-science/eosc_en
19. UNESCO. UNESCO recommendation on open science. Paris, 2021. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379949>
20. OECD. Making open science a reality. Paris : OECD Publishing, 2015. <https://doi.org/10.1787/9789264233972-en>
21. European Commission. Open innovation, open science, open to the world: A vision for Europe. Brussels, 2016. <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/system/files/2016-05/rise-openinnovation-open-science-open-to-the-world.pdf>
22. Leonelli S., Tempini N. (eds.). Data-centric biology: A philosophical study. Chicago: University of Chicago Press, 2020. <https://doi.org/10.7208/chicago/9780226616505.001.0001>
23. Beisbart C., Saam N. J. (eds.). Computer simulation validation. Cham : Springer, 2019. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-70766-2>

24. Edwards P. N. A vast machine: Computer models, climate data, and the politics of global warming. Cambridge, MA : MIT Press, 2019.
25. Parker W. S. Reanalyses and corroboration: toward a philosophy of climate science // Studies in History and Philosophy of Science. 2017. Vol. 65–66. P. 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.shpsa.2017.07.003>
26. Buchanan M. Machine learning and the future of physics // Nature Physics. 2019. Vol. 15. P. 2–3. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0416-4>
27. Carleo G. et al. Machine learning and the physical sciences // Reviews of Modern Physics. 2019. Vol. 91. Article 045002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.91.045002>
28. George D., Huerta E. A. Deep learning for real-time gravitational wave detection // Physics Letters B. 2018. Vol. 778. P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.physletb.2017.12.053>
29. Degraeve J. et al. Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning // Nature. 2022. Vol. 602. P. 414–419. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-04301-9>
30. Heaven D. Why deep-learning AIs are so easy to fool // Nature. 2022. Vol. 605. P. 418–420. <https://doi.org/10.1038/d41586-022-01321-8>
31. National Academies of Sciences. Reproducibility and replicability in science. Washington, DC: National Academies Press, 2019. <https://doi.org/10.17226/25303>
32. Weisberg M. Simulation and similarity: Using models to understand the world. Oxford: Oxford University Press, 2013. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199933661.001.0001>
33. European University Association. Salzburg principles: Recommendations for doctoral programmes. Brussels, 2005. <https://eua.eu/resources/publications/626:salzburg-principles.html>
34. European University Association. Salzburg II recommendations. Brussels, 2010. <https://eua.eu/resources/publications/627:salzburg-ii-recommendations.html>

35. European Commission. Principles for innovative doctoral training. Brussels, 2011. https://research-and-innovation.ec.europa.eu/document/download/9b7c2b0e-9c9a-4f3b-9a43-77a4e0e0eaa5_en
36. Quality Assurance Agency for Higher Education. UK quality code for higher education: Research degrees. Gloucester, 2020. <https://www.qaa.ac.uk/docs/qaa/quality-code/advice-and-guidance-research-degrees.pdf>
37. European Commission. Agreement on reforming research assessment. Brussels, 2022. <https://coara.eu>
38. European Commission. European charter for researchers and code of conduct for recruitment of researchers. Brussels, 2023. <https://research-and-innovation.ec.europa.eu/jobs-research>
39. Kwiek M. Changing European academics. London : Routledge, 2019.
40. Bouter L. What research institutions can do to foster research integrity // Science and Engineering Ethics. 2020. Vol. 26. P. 2363–2369. <https://doi.org/10.1007/s11948-020-002016>
41. Wilsdon J. et al. The metric tide: Independent review of the role of metrics in research assessment. 2018. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4929.1363>
42. OECD. OECD science, technology and innovation outlook 2023. Paris: OECD Publishing, 2023. <https://doi.org/10.1787/0b55736e-en>
43. КПП ім. Ігоря Сікорського. Положення про підготовку здобувачів ступеня доктора філософії у КПП. Київ, 2023.
44. Решетняк С. О., Савченко Д. В. Презентація результатів наукових досліджень: навч. посіб. для здобувачів ступеня доктора філософії за спеціальністю 104 «Фізика та астрономія». Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2021. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/50664>