

Пролог

## Дослухаючись до Всесвіту

Я гадаю, що чиста думка справді може досягнути  
реальність, як мріяли древні.

Альберт Ейнштейн

*Щодо методу теоретичної фізики, 1933*

«Ейнштейн повністю куку». Саме так зухвалий молодий Роберт Оппенгеймер висловився про знаменитого на весь світ науковця на початку 1935 року, після відвідин Принстону<sup>1</sup>. Ейнштейн уже десятиліття намагався побудувати амбіційну нову теорію такими методами, які Оппенгеймеру та іншим здавались безглуздими. Ейнштейн фактично ігнорував усі успіхи, досягнуті в розумінні матерії в її найменших вимірах з використанням квантової теорії. Він прагнув претензійної нової теорії не у відповідь на нові експериментальні відкриття та факти, які були здатні спантеличити будь-кого, а як інтелектуальної вправи — покладаючись лише на свої уявлення, підкріплені математикою. Хоча ця спроба виявилася непопулярною серед його колег, він був піонером методу, подібного до того, який дехто з його найбільш видатних наступників зараз успішно використовує в найпередовіших дослідженнях.

Оппенгеймера й багатьох інших фізиків того часу навряд чи варто ганити за засудження Ейнштейнових математичних підходів: адже здавалося, що це суперечить одному з основних уроків останніх 250 років наукових досліджень, а саме тому, що нерозумно намагатися зрозуміти закони природи, покладаючись на чисту думку, як вважали Платон та інші мислителі. Загальноприйнято було те, що фізики

мають дослухатися до Всесвіту — що він їм каже про їхні теорії за допомогою результатів спостережень та експериментів, зроблених у реальному світі. В цьому разі теоретики могли уникнути самообману, не думати, що знають про природу більше, ніж насправді.

Ейнштейн, звісно, знав, що він робить. З ранніх 1920-х років досвід часто підказував йому, що саме математична стратегія подавала найбільші надії на досягнення його основної мети — дослідити найфундаментальніші закони природи. Він казав молодій студентці Естер Саламан у 1925 році: «Я хочу знати, як Бог створив цей світ. Мене не цікавлять цей чи інший феномен, [властивості] того чи іншого елемента. Я хочу знати Його думки, все інше — деталі»<sup>2</sup>. З його точки зору, «кінцевим завданням фізика» було збагнути порядок, якому підлягають процеси цілого Всесвіту — від поведінки крихітних частинок, що коливаються всередині атомів, до конвульсій галактик у відкритому космосі<sup>3</sup>. Сам факт, що, попри різноманітність і складність Усесвіту, цей порядок відносно простий, був, як на Ейнштейна, не чим іншим, як «дивом, або вічною таємницею»<sup>4</sup>.

Математика забезпечувала незрівнянно точний спосіб вираження цього вищого порядку. Фізики та їхні попередники могли формулювати універсальні закони мовою математики і застосовували їх не тільки тут і зараз, на Землі, але до будь-чого будь-де, від початку часів до найвіддаленішого майбутнього. Теоретиків, які дотримувалися цієї програми (включаючи Ейнштейна), цілком резонно можна звинуватити в зарозумілій гордині, але аж ніяк не в браку амбіцій. Можливості математики у відкритті нових законів природи стали Ейнштейновою ідеєю фікс. Він уперше оприлюднив свої математичні спроби фізичних досліджень навесні 1933 року, коли читав спеціальну лекцію для громадської аудиторії в Оксфорді. Говорячи спокійно й довірливо, він спонукав теоретиків пробувати досліджувати фундаментальні закони не тільки ортодоксальним методом — простим відгуком на нові експериментальні відкриття, — а й надихатися чистою математикою. Цей підхід був таким радикальним, що він, імовірно, перелякав фізиків зі своєї аудиторії, хоча зрозуміло, що заперечувати йому ніхто не наважився. Він розповів, що вже практикував те, що

проповідує, використовуючи математичний підхід, щоб поєднати свою теорію гравітації з електромагнітною теорією. Він вірив, що цієї мети можна досягти, якщо спробувати передбачити їхню математичну структуру — математичні формулювання обох теорій були найбільш імовірним ключем до їхньої уніфікації.

Ейнштейн добре знав, що математична стратегія такого типу не працюватиме в більшості інших наукових дисциплін, бо їхні теорії зазвичай не сформульовані мовою математики. Наприклад, Чарльз Дарвін, пояснюючи свою теорію еволюції природним добром, взагалі не послуговувався математикою. Так само в першому описі теорії дрейфу континентів Альфред Вегенер використовував тільки слова. Одним потенційним недоліком таких теорій було те, що слова можуть бути зрадливими — невизначеними й неправильно трактованими, тоді як математичні концепції є точними, добре визначеними й придатними до логічного й творчого розвитку. Ейнштейн вважав, що ці якості зручні для теоретичних фізиків, які мають користуватися всіма цими перевагами. погодилися з ним лише кілька з його колег, зате висміяли навіть найбільш палкі прихильники. Його гостроязкий друг Вольфганг Паулі зайшов так далеко, що звинуватив Ейнштейна в тому, що той зрадив фізику: «Я маю привітати вас (чи я мав висловити співчуття?), що ви переключилися на чисту математику... Я не буду провокувати вас заперечувати мені, щоб не зволікати зі смертю [вашої поточної] теорії»<sup>5</sup>. Відкинувши всі подібні коментарі, Ейнштейн продовжив свій самотній шлях, хоча мало з його робіт було опубліковано; він став Дон Кіхотом сучасної фізики<sup>6</sup>. Після його смерті в 1955 році всі провідні фізики дійшли згоди, що жалюгідний провал його підходів виправдовує його критиків. Але це судження виявилось дещо передчасним.

Хоча Ейнштейн помилявся, озвучуючи переваги теорій матерії на субатомному рівні, щодо одного він виявився далекогляднішим, ніж більшість його недоброзичливців. У середині 1970-х, через двадцять років після його смерті, кілька видатних фізиків пішли його шляхом, намагаючись скористатися думкою, яка спиралася на чисту математику, щоб розбудувати міцно усталені, але помилкові теорії.

Тоді я був безвусим студентом, настороженим цією мозковою стратегією й неабияк переконаний, що вона хибна й веде в нікуди. Мені здавалось очевидним, що для теоретика найкращий шлях уперед полягає в тому, щоб керуватися експериментальними даними. Цей ортодоксальний метод цілком задовольняв теоретиків, які розробляли сучасну теорію субатомних сил. Пізніше відома як Стандартна модель фізики частинок, ця теорія була дивовижною: побудована на основі тільки кількох простих принципів, вона швидко витіснила всі попередні підходи до опису поведінки субатомних частинок. Вона добре пояснювала внутрішні процеси в кожному атомі. Що я не повністю оцінив тоді, так це те, наскільки мені пощастило сидіти на галерці, спостерігаючи розгортання епічної сучасної драми.

Ті роки запам'яталися відвідинами десятків семінарів, присвячених новим екзотичним теоріям, які захоплювали, однак узгоджувалися з експериментами тільки приблизно. Крім того, їхні поборники були впевнені, що їм усе вдалося, — частково через те, що їхні теорії відрізнялися цікавою новою математикою. Мені це здавалось дуже своєрідним способом фізичних досліджень — я думав, що значно краще дослухатися до того, що нам підказує природа (не в останню чергу тому, що вона ніколи не бреше).

Я відчував, що повіяло свіжим вітром, і, наскільки міг усвідомити, він дув у непривабливо математичному напрямі. Особисто я очікував, що цей тренд з часом швидко виснажиться, але знову помилявся. На початку 1980-х років це віяння тільки зміцніло — частково через те, що потік нової інформації від експериментів із субатомними частинками та силами вповільнився з водоспаду до рідких крапель. З цієї причини все більше теоретиків переключалися на чисте міркування, доповнене математикою. Це привело до нових підходів до фундаментальної фізики — теорії струн, яка прагнула дати об'єднаний звіт щодо природи на найнижчому рівні, припускаючи, що основні складники Всесвіту — не частинки, а крихітні шматочки струни. Теоретики досить далеко просунулися із цією теорією, але, попри величезні зусилля, так і не змогли зробити хоч одне передбачення, яке можна було б перевірити експериментально. Скептики на

кшталт мене почали думати, що ця теорія виявилася чимось не більшим, ніж математична наукова фантастика.

Мене вражало, що багато провідних фізиків-теоретиків не були знеохочені різкою відсутністю прямого експериментального підтвердження. Знову і знову вони підкреслювали потенціал нової теорії, а також дивовижну ширину й глибину її зв'язків із математикою, багато з яких були одкровенням навіть для математиків світового класу.

Це багатство дало змогу перевести співпрацю між фізиками-теоретиками та математиками навіть на вищий рівень і згенерувати низку результатів, що викликали ейфорію, особливо у математиків. І стало ясніше, ніж будь-коли, що не тільки математика незамінна для фізики, а й фізика так само необхідна для математики.

Цей взаємний виграш математики та фізики, здавалось, представив точку зору, висловлену в 1930-х фізиком Полем Діраком, якого іноді характеризували як «теоретика теоретиків»<sup>7</sup>. Він вважав, що фундаментальна фізика робить успіхи, застосовуючи теорії дедалі більшої математичної краси<sup>8</sup>. Ця тенденція переконувала його — як «предмет віри, а не логіки», — що фізики мають завжди шукати приклади красивої математики<sup>9</sup>. Легко було зрозуміти, чому це переконання мало особливий відгук серед експертів зі струн: їхня теорія характеризувалась винятковою математичною красою, тож, згідно з ходом думок Дірака, мала великі перспективи.

Панування теорії струн значно сприяло тому, щоб надати сучасній фундаментальній фізиці сильного математичного забарвлення. Майкл Атія — блискучий математик, який зосередився на теоретичній фізиці — згодом провокативно написав про «математичне поглинання фізики»<sup>10</sup>. Деякі фізики, однак, були збентежені, побачивши багатьох своїх більш талановитих колег за розробкою малозрозумілих математичних теорій, які в багатьох випадках було неможливо перевірити. В 2014 році американський експериментатор Бертон Ріхтер похмуро підсумував свої тривоги щодо цієї тенденції: «Здається, що теорія невдовзі зможе базуватися не на реальних, виконаних у реальному світі експериментах, а на уявних експериментах,

проведених у головах теоретиків»<sup>11</sup>. Він побоювався, що наслідки можуть бути катастрофічними: «Теоретики надихатимуться не новими спостереженнями, а математикою. Як на мене, це буде кінцем досліджень у фундаментальній фізиці, якою ми її знаємо».

Розчарування станом сучасної теоретичної фізики навіть стало темою публічних розмов. Протягом останнього десятиліття кілька впливових коментаторів націлилися на теорію струн, описуючи її як «казкову фізику», яка «навіть не помиляється», і водночас покління теоретичних фізиків звинуватили в тому, що вони «загублені в математиці»<sup>12</sup>. Зараз уже стали звичними зауваження деяких критиків у медіа, особливо в блогосфері, які незадоволені цим і кажуть, що сучасна фізика повинна повернутися на прямий і вузький шлях реальної науки.

Такий погляд оманливий і занадто песимістичний. В цій книжці я доводитиму, що сучасні фізики-теоретики насправді обрали цілком розсудливий і винятково перспективний шлях. З одного боку, їхній підхід логічно й творчо впливає зі століть здобутків, започаткованих ще Ісааком Ньютоном. Сформулювавши математичні закони, які описують рух та гравітацію, він зробив більше, ніж будь-хто інший, щоб розробити першу, основану на математиці й придатну для експериментальної перевірки, структуру для опису реального світу. Він чітко вказав, що довготерміновою метою є дедалі більше розуміння Всесвіту в термінах дедалі меншої кількості концепцій<sup>13</sup>. З другого боку, провідні теоретики нині дотримуються цього порядку денного, твердо стоячи на двох гранітних наріжних каменях ХХ століття: Ейнштейновій загальній теорії відносності як модифікації ньютонівських поглядів на простір та час, і квантовій механіці, яка описує поведінку матерії в найменших масштабах. Досі жоден експеримент не спростував жодну із цих двох теорій, тож вони утворюють чудову основу для досліджень.

Як часто підкреслював Ейнштейн, дуже важко схрестити квантову механіку й загальну теорію відносності. Фізики, зрештою, спромоглися поєднати їх в одну теорію, яка зробила вражаюче успішні передбачення, в одному з випадків аж до збігу з відповідними

експериментальними вимірюваннями до одинадцяти знаків після коми<sup>14</sup>. Здавалося б, природа нагадала нам голосно і ясно, що бажає, щоб ми шанували обидві теорії. Сучасні фізики-теоретики, виходячи з цього успіху, наполягають, що кожна нова теорія, яка претендує на універсальність, має бути узгодженою як з теорією відносності, так і з квантовою механікою. Ця наполегливість привела до наслідків, яких ніхто не передбачав: не тільки до нових здобутків у фізиці — включно з теорією струн, — а й до безлічі зв'язків із найсучаснішою математикою. Ніколи не було зрозумілішим, що фізика та математика переплетені: нові концепції в фундаментальній фізиці проливають світло на нові концепції в математиці, і навпаки. Причиною цього є те, що багато провідних фізиків вважають, що можуть отримувати знання не тільки з експериментів, а й з математики, яка виникає, коли поєднуються теорія відносності і квантова механіка.

Вражаюча ефективність математики у фізиці захоплювала мене ще відтоді, коли я був школярем. Я пам'ятаю своє здивування тим, що абстрактні методи, які ми вивчали на уроках математики, чудово підходили до розв'язування задач на уроках фізики. Найбільш дивовижним для мене було те, що математичні рівняння, які пов'язують невідомі величини  $x$  та  $y$ , можуть бути застосовані до спостережень, що описують реальний світ, з  $x$  та  $y$ , які означають величини, що можуть бути виміряні експериментально. Мене вражало, що кілька простих правил, підкріплених математикою, яку ми ось щойно вивчили, можуть застосовуватися для точного передбачення всього — від шляху м'ячиків для гольфу до траєкторій планет.

Наскільки я згадую, ніхто з моїх шкільних вчителів не коментував, яким чином абстрактна математика позичила себе фізиці так витончено, можна навіть сказати — чудотворно<sup>15</sup>. В університеті мене навіть ще більше вразило, що теорії, які включають основи математики, можуть описувати так багато явищ реального світу — від форми магнітних полів біля дроту зі струмом до руху частинок усередині атома. Здавалося простим фактом наукового життя, що математика абсолютно необхідна фізиці. І тільки набагато пізніше я побачив зворотний бік цієї історії: фізика необхідна математиці.