

## 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 раних 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 гостроязичий 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 вигреш математики та фізики, здавалось, представляв 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 покоління 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 доводиму, що сучасні фізики-теоретики насправді обрали цілком розсудливий і винятково перспективний шлях. З одного боку, їхній підхід логічно й творчо випливає 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.

\*

Одна з моїх головних цілей у написанні цієї книги — звернути увагу на те, як математика, що, безперечно, є корисною для фізиків, надає також безцінні підказки про те, як цю механізм Всесвіту. Я починаю з Ньютонового епохального використання математики для формулювання і застосування закону всесвітнього тяжіння, який неодноразово перевірено спостереженнями та ретельними вимірюваннями. Далі я пояснюю, як у XIX столітті були відкриті математичні закони електрики та магнетизму з використанням математичних структур та інструментів, що справило неабиякий вплив на наше розуміння природи.

Потім я переходжу до двох новаторських відкриттів: спочатку до загальної теорії відносності, а потім — до квантової механіки, найбільш революційної теорії у фізиці за останні сторіччя. Ейнштейн, розробляючи теорію відносності, щоб удосконалити наше розуміння гравітації, мусив використати математику, яка була новою для нього, і успіх цього підходу змінив його погляди на корисність сучасної математики для фізики. Так само, коли фізики розробляли квантову механіку для розуміння матерії, то були змушені використовувати розділи незнайомої математики, яка змінила їхні погляди, наприклад на поведінку кожної з найменших природних частинок.

Із середини 1970-х років багато талановитих мислителів опинилося на родючих загальних ґрунтах між математикою та фізикою. Проте більшість фізиків трималися від цієї території подалі, віддаючи перевагу стандартному й більш обережному підходу, очікуючи від природи, що вона сама розкриє свої секрети через експерименти й спостереження. Німа Аркані-Хамед, один з послідовників Ейнштейна на факультеті Інституту передових досліджень у Принстоні, зробив собі ім'я, застосовуючи саме такі ортодоксальні підходи. Однак близько десятиліття по тому, як він почав вивчати зіткнення між субатомними частинками, він і його колеги неодноразово помічали, що працюють над тими самими темами, що й деякі провідні світові математики. Аркані-Хамед швидко перетворився на завзятого рекламіста корисності сучасної математики для фундаментальної фізики.

Він залишився фізиком до кінчиків пальців: «Моїм першим пріоритетом завжди буде фізика — допомагати відкривати закони, які керують Всесвітом, — казав він. — Ми маємо дослухатися [до природи] якомога уважніше, застосовуючи кожне спостереження й вимірювання, які можуть чогось нас навчити. Зрештою, експерименти завжди будуть мірилом наших теорій». Але його математичні роботи радикально змінили хід його думок щодо фізичних досліджень: «Ми можемо підслуховувати природу, не тільки приділяючи увагу експериментам, а й намагаючись зрозуміти, як їхні результати можуть бути пояснені найглибшою математикою. Можна сказати, що Всесвіт промовляє до нас числами»<sup>16</sup>.

1

## Математика розганяє хмари

Варто було математиці розігнати хмари, як нашим очам відкрилися речі, які так довго дражнили уми давніх філософів і даремно розсварювали їхні школи галасливими дебатами.

Едмонд Голлі,  
«Ода Ньютоні та його "Началам"», 1687

Ейнштейн скромно оцінював свої досягнення. Однак він розумів своє місце в історії науки й усвідомлював, що сам стояв на плечах титанів, найширшими з яких були Ньютоні. Через два століття після смерті англійця Ейнштейн писав: «...цей яскравий геній... визначив плаин західної думки, досліджень та практики, як ніхто інший до нього чи після нього»<sup>17</sup>. Серед найбільших здобутків Ньютоні, як зауважив Ейнштейн згодом, було те, що він став «першим творцем всеосяжної, працездатної системи теоретичної фізики»<sup>18</sup>.

Ньютон ніколи не говорив про «фізиків» та «науковців» — ці терміни були введені через понад століття після його смерті<sup>19</sup>. Скоріше, він уявляв себе насамперед людиною Божою, а вже потім математиком і натурфілософом, що намагається зрозуміти раціональність усього Божого творіння шляхом поєднання роздумів та експерименту. Він уперше публічно презентував свій математичний підхід до натурфілософії в 1687, коли опублікував «Начала» — тритомне видання, яке зробило його відомим як одного з фундаторів Просвіт-

\* Повна сучасна назва — «Математичні начала натуральної філософії». — Прим. ред.

ництва. В передмові до цього видання він дав зрозуміти, що пропонує не менше, ніж «новий спосіб філософствування»<sup>20</sup>.

Ньютон відкинув метод роботи, який фактично всі його сучасники вважали найкращим для наслідування. Вони робили припущення про механізми, які могли б пояснити, як працює природа, так, наче ті були частиною величезного годинникового механізму, який необхідно зрозуміти. Натомість Ньютон зосередився на русі матерії на Землі та в космосі — частині Божого творіння, яку можна було точно описати за допомогою *математики*. Найістотніше, на чому він наполягав, що теорія повинна перевірятися тільки точними розрахунками, отриманими в результаті найточніших спостережень над реальним світом. Якщо теорія не узгоджується з експериментальними результатами, її потрібно модифікувати або замінити на кращу. Зараз це очевидно, але в часи Ньютоні такі погляди були досить радикальними.<sup>21</sup>

Коли Ньютон опублікував свої «Начала», він був сорокачоти-рьохрічним професором, що жив тихим академічним життям у Трініті-Коледжі (Кембридж) у кімнатах, вікна яких зараз виходять на ряд крамниць, включаючи книгарню Геффера<sup>22</sup>. Майже за два десятиліття до цього університет запропонував йому лугасівську кафедру математики, хоча він нічого не опублікував на цю тему. Математика була тільки одним з його інтересів: у Кембриджі він був краще знайний своєю розробкою та побудовою телескопа, які засвідчили його виняткові практичні навички.

Як набожний і непохитний протестант, він вірив, що народився для того, щоб зрозуміти роль Бога у створенні світу, і рішуче очищав християнську науку від продажності розбещених священників і тих, хто потурав прагненням багатьох людей загрузати в ідолопоклонстві й забобонах<sup>23</sup>. Ньютон брався до цієї та інших своїх праць з такою непереборною енергією й такою ретельною зосередженістю, що іноді забував поїсти<sup>24</sup>. Для цього колючого й підозрілого вченого життя було не чим іншим, як жартом — усмішка час від часу з'являлася на його обличчі, але люди майже не помічали, щоб він сміявся<sup>25</sup>.

До свого помешкання Ньютон запрошував тільки кількох знайомих, і, відповідно, лише кілька експертів усвідомлювали міру його

таланту. Він не цікавився поширенням свого нового знання і одного разу зауважив, що не має бажання, щоб його «рукописи друкували» — відносно нова друкарська культура була не для нього<sup>26</sup>. Коло його довірених осіб включало хіміка Френсіса Вігані, який з розчаруванням виявив себе відставленим після того, як розповів великому мислителю «фривольну історію» про черницю<sup>27</sup>.

Нова система натурфілософії не виникла на пустому місці — вона з'явилась після десятиліть виношування й відлюдних наукових занять. У вступному слові до «*Начал*» Ньютон засвідчив, кому завдячує: по-перше, давнім грекам, які, насамперед, зосереджувалися на всьому, що потрібне для розуміння *руху*, а, по-друге, мислителям, які «взялися перетворювати феномени природи на математичні закони»<sup>28</sup>. Щоб зрозуміти, на чому ґрунтувались ньютонівські підходи, було б повчально коротко оглянути ці впливи, починаючи з давніх греків, які навчили європейців мистецтва думати.

\*

З давніх греків найбільше наблизився до створення науки (*scientia*, латиною «знання») в сучасному розумінні філософ Арістотель (384–322 до н. е.) у своїх працях. Він вважав, що, попри безлад навколишнього світу, природа підпорядковується принципам, які людина може дослідити, а не зовнішньому втручання, наприклад нетактовних богів<sup>29</sup>. З усіх давніх філософських шкіл Арістотель найбільшу увагу приділяв *фізиці* — слово, утворене від *physis*, що значить «природа», — яка включає вчення в діапазоні від астрономії до психології. Саме поняття «фізика» набуло свого сучасного значення лише на початку XIX століття.

Широта тематики праць Арістотеля — від космології до зоології й від поезії до етики — зробила його, ймовірно, найбільш впливовим мислителем у галузі природничих наук в нашій історії. Він вважав, що світ природи можна описати загальними принципами, які виражають основні причини всіх типів змін і можуть впливати на будь-яку матерію, включно зі змінами її форми, кольору, розміру й руху. Його наукові праці, зокрема книжка «*Фізика*», здаються більшості

сучасних читачів дивними — частково через те, що він намагався зрозуміти світ, спираючись на чистий розум, майже не підкріплений ретельними спостереженнями.

Найбільш характерним для його погляду на світ є те, що в ньому немає місця математиці. Арістотель, розмірковуючи про науку, відмовився, наприклад, використовувати елементи арифметики й геометрії, азам яких на той момент вже було тисячі років. Обидві галузі математики ґрунтувалися на людському досвіді й були розвинені мислителями, які зробили вирішальний крок, що ознаменував перехід від спостережень реального світу до загальної абстракції. Більшість базових елементів арифметики, наприклад, походять з часів, коли людські істоти вперше узагальнили ідею двох палиць, двох вовків, двох пальців тощо до абстрактного числа 2, не пов'язаного з жодним конкретним об'єктом. Це було ґрунтовне узагальнення, хоча й важко сказати, коли саме його зробили вперше. Початки геометрії — відношення між точками, лініями й кутами в просторі — датувати легше: близько 3000 рік до н. е., коли люди в стародавньому Вавилоні й долині Інду почали вивчати землю, море й небо. Проте у ставленні Арістотеля до науки не було місця математиці, «метод якої відрізняється від природничих наук»<sup>30</sup>.

Відмова Арістотеля від математичного міркування була антитезою до філософії його вчителя Платона й ще одного славетного древнього вченого Піфагора (який, можливо, ніколи не існував, і приписуване йому вчення є роботами інших вчених). Піфагорійці вивчали арифметику, геометрію, музику й астрономію, дотримувалися поглядів, що цілі числа були критично важливі. Їхні видатні спроби пояснити, наприклад, співвідношення між музичними гармоніями та властивостями геометричних фігур, укріпили Піфагорійську школу у вірі, що цілі числа були основою для фундаментального розуміння того, яким чином працює Всесвіт.

Платон вважав, що математика є фундаментом для філософії, і був переконаний, що до розуміння світу має привести геометрія. Для Платона складні реалії довкола нас є, власне, тінями досконалих геометричних фігур, які існують цілком окремо в абстрактному світі

математики. В тому світі форми та інші геометричні об'єкти досконалі: точки нескінченно малі, лінії ідеально прямі, площі абсолютно пласкі тощо. Тож, наприклад, він розглядав би нерівну квадратну кришку столу як «тінь» досконалого квадрата, нескінченно тонкої ідеально прямої лінії якого перетинаються точно під кутом 90 градусів. Така досконала математична фігура не може існувати в реальному світі, але вона є деталлю того, що сучасні математики часто описують як Платонів світ, який для них є не менш реальним, ніж світ довкола нас.

Через чверть сторіччя після смерті Арістотеля грецький мислитель Евклід представив нові стандарти точності математичного розмірковування. У своєму розкішному тринадцятитомному трактаті «*Елементи*» він виклав основи геометрії ясно й вичерпно, запровадивши нові стандарти логічних міркувань із цієї теми. Попри те що ніхто не вважав це легким читанням, «*Елементи*» стали найбільш значущою книжкою в історії математики й справили значний вплив на мислителів упродовж століть. Одним з провідних фізиків, які згодом потрапили під чари цієї книги, був Ейнштейн, який зауважив: «Якщо Евклід не зміг запалити ваш юнацький ентузіазм, значить, ви не створені бути вченим»<sup>31</sup>.

Математика також ставала корисною на практиці. Особливим прихильником використання математичних ідей у своїх винаходах був Архімед — досить згадати його насос з архімедовим гвинтом (шнеком) та параболічне дзеркало. Кілька його послідовників у Стародавній Греції використали геометричні міркування, щоб виміряти відстань до Сонця та Місяця від Землі, кулястість Землі та нахил осі обертання Землі, часто з вражаюче високим ступенем точності. До виникнення ідеї, що закономірності в поведінці об'єктів, які людські істоти спостерігають довкола себе на Землі, можуть бути описані математичними законами, ще були століття. Однак математика вже змогла дозволити приземленим людським істотам перевершити їхні чуття й розгорнути образне мислення аж до небес.

Прості математичні ідеї почали приносити користь багатьом з мислителів, які просували вперед науку. В Середні віки багато

з найбільш видатних математичних інновацій постало на ісламських територіях, приблизно в тому районі, який зараз охоплюють Іран та Ірак<sup>32</sup>. Науковці із цього регіону досягли вражаючих математичних успіхів, включаючи розвиток алгебри (від арабського *al-jabr*, що означає «збирання розбитих частинок»). Ці інновації сформували основи сучасної алгебри, яка вживає абстрактні символи, скажімо  $x$  та  $y$ , для представлення кількостей, які можуть набувати числових значень і бути математично розрахованими.

До середини XVI століття, коли був народжений Шекспір, математика стала помітною складовою майже всіх галузей фізичної науки — включно з астрономією, оптикою та гідравлікою — так само, як і музики. Нові ідеї про математичний спосіб опису взаємозв'язків світу набрали сили, достатньої для появи сумнівів у Арістотелевому способі міркування, який домінував у християнській та ісламській думці впродовж 2000 років. Одним з найбільш важливих внесків була ідея, висловлена Миколою Коперніком у 1543 році, що центр Всесвіту — не Земля, а Сонце. Ця радикальна думка позначила початок того, що стало відоме як наукова революція. Серед її піонерів було двоє астрономів, які також були й математиками: німець Йоганн Кеплер та італієць Галілео Галілей. Вони вважали, що найкращий шлях зрозуміти світ — не зосереджуватися на зовнішньому вигляді речей, а давати точний опис їхнього руху. Для них було особливо важливим виявляти математичні закономірності у вимірюваннях, зроблених на рухомих об'єктах. Серед здобутків Кеплера було те, що він виявив такі закономірності в русі планет орбітами довкола Сонця, тоді як Галілео відкрив закономірності, так би мовити, «ближчі до дому» — в траєкторіях об'єктів у вільному падінні.

Для побожного Кеплера Бог був «архітектором Всесвіту» і створив його згідно з планом, який людська істота може зрозуміти, використовуючи геометрію — предмет, до якого Кеплер ставився як богослов<sup>33</sup>. Любитель суперечок Галілей часто наголошував на важливості порівняння передбачень наукових теорій безпосередньо зі спостереженнями над реальним світом: ця вимога зробила його «батьком сучасної науки» в очах Ейнштейна, хоча Галілей явно



перебільшував точність своїх експериментальних даних<sup>34</sup>. Також він не був профаном у математиці й цінував її важливість для людського розуміння природи, проголосивши в 1623 році, що книга природи «написана мовою математики»<sup>35</sup>. Його думки були частиною культурної тенденції в багатьох найбагатших європейських містах: математика почала підкріплювати комерційне та мистецьке життя через нові методи бухгалтерії та використання геометричної перспективи в мистецтві та архітектурі<sup>36</sup>.

Ні Кеплер, ні Галілей повністю не збагнули ідею, яка мала стати центральною для науки: що навколишній світ може бути описаний законами, які застосовні скрізь та, ймовірно, завжди<sup>37</sup>. Ця обговорювана Арістотелем ідея, що існують фундаментальні закони природи, найбільш чітко проявилася в працях француза Рене Декарта, які домінували в європейській думці кілька десятиліть від початку 1640-х років — в еру, на яку припала і смерть Галілея, і народження Ньютона. Декарт вийшов за межі аристотелівської науки й намагався застосувати до тяжіння, теплоти, електрики та інших аспектів реального світу механізми, які описував з виразною жвавістю, маючи на увазі, що ні він сам, ні будь-хто інший не має прямих свідчень, що не помиляється<sup>38</sup>.

Декарт оприлюднив свої ідеї в книжці «*Принципи філософії*», яку рекомендував читати, не відриваючись, наче роман (він запевняв своїх читачів, що більшість їхніх складностей із цим текстом мають зникнути після третього прочитання). У цій книжці майже відсутня математика і не зазначено, як експерименти можуть перевірити його механічні теорії — такі, як ідея, що всі планети довкола Сонця рухають велетенські закручені вихори матерії. Найзнаменитіший експериментатор Лондону Роберт Гук був палким прихильником Декарта, але, втім, дратувався панівним розумовим підходом до науки: «Правда в тому, що природнича наука вже занадто довго залишається тільки роботою мозку та фантазії: зараз слушний час повернути її до простоти й обґрунтованості спостережень за матеріальними й очевидними речами»<sup>39</sup>.

Коли Гук писав ці слова в 1665 році, двадцятидвохрічний Ісаак Ньютон саме виконував блискучу творчу роботу як у математиці, так

і в натурфілософії. На той час він уже був обізнаний з думками давніх греків, і в одному зі своїх нотатників записав давню схоластичну цитату: «Платон мені друг, Арістотель теж друг, але істина — ще більший друг»<sup>40</sup>. Ньютон також був добре поінформований щодо відкриттів Кеплера, Галілея й Декарта, і, як ці та інші мислителі, спростовували аристотелівський консенсус. Найбільш вирішальною подією в математичній освіті Ньютона було прочитання Декартової «*Геометрії*»: як казав знаменитий Ньютонів учень Девід Вайтсайд, десь на першій сотні сторінок цієї книжки Ньютонів «математичний дух запалав»<sup>41</sup>. Якби він опублікував свої математичні відкриття в той період, його б визнали одним зі світових експертів у цій дисципліні, проте жоден з його колег не знав, чого він досягнув. Людство відкрило його майже на чверть століття пізніше, коли він почав рухати науку до більш систематичного вивчення світу природи, що ґрунтувалося на математиці та кількісних спостереженнях. Він написав свій маґнум опус, одну з найважливіших книжок в історії людської думки.

\*

Ньютон міг би ніколи не написати «*Начал*», якби не ініціатива та наполегливість астронома Едмонда Галлея, який найбільше запам'ятовувався спостереженнями комети, що пізніше була названа на його честь. Один з кількох Ньютонових друзів, Галлей витратив майже три роки, умовляючи і підлежуючи впертого автора та сприяючи йому розповсюдити свій шедевр, і навіть пропонував оплатити вартість його видання. «*Начала*», книга приблизно на п'ятсот сторінок, надійшла в продаж у Лондоні в суботу 5 липня 1687 року — червоний день календаря в історії науки, хоча тоді це не стало якоюсь надзвичайною подією. Видавці надрукували близько шести сотень примірників, але щоб продати їх всі, довелося докласти зусиль — навіть після анонімного огляду, який вихваляв «незрівнянного автора» за розповсюдження «найбільш видатного зразка сил Розуму» (ці слова належали Галлею<sup>42</sup>). Ньютон представив свою систему в надто аскетичному стилі — частково, щоб «не спокушати дилетантів у математиці», як він пізніше висловився<sup>43</sup>. В результаті книжка була практично незрозуміла