12+

И.И. Зайнуллин

# ВЕЛИЧАЙШАЯ ТАЙНА ВСЕЛЕННОЙ



# Ильвир Зайнуллин
# Величайшая тайна вселенной

*https://litres.ru/74757149*
*ISBN 9785007149150*

## Аннотация

Мы привыкли считать, что наука способна объяснить всё. Но что, если за пределами наших знаний скрывается нечто, способное перевернуть представление о реальности? Кто или что породило Вселенную? Почему возникла жизнь? Как материя обрела сознание? И существует ли вопрос, на который человечество никогда не найдёт ответа? Эта книга откроет перед вами двери в мир величайших тайн, где заканчивается привычная картина мира и начинается неизвестность.

# Содержание


| | |
|---|---|
| Предисловие | 5 |
| ГЛАВА 1 ПОЧЕМУ СУЩЕСТВУЕТ ВСЕЛЕННАЯ? | 12 |
| ГЛАВА 2 ПОЧЕМУ ВО ВСЕЛЕННОЙ ПОЯВИЛОСЬ СОЗНАНИЕ? | 26 |
| ГЛАВА 3 ПОЧЕМУ МАТЕМАТИКА ПОНИМАЕТ ВСЕЛЕННУЮ? | 42 |
| ГЛАВА 4 СУЩЕСТВУЕТ ЛИ БУДУЩЕЕ ДО ТОГО, КАК ОНО НАСТУПИЛО? | 52 |
| ГЛАВА 5 МОЖНО ЛИ ВЫЧИСЛИТЬ ВСЁ БУДУЩЕЕ? | 68 |
| ГЛАВА 6. МОЖЕТ ЛИ МАТЕМАТИКА ДОКАЗАТЬ ВСЁ? | 86 |
| ГЛАВА 7. СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ВОПРОСЫ, НА КОТОРЫЕ НЕЛЬЗЯ ОТВЕТИТЬ АЛГОРИТМИЧЕСКИ? | 112 |
| ГЛАВА 8. КОГДА ВЫЧИСЛЕНИЕ СТАНОВИТСЯ НЕВОЗМОЖНО ТРУДНЫМ | 134 |
| ГЛАВА 9. БЕСКОНЕЧНОСТЬ, КОТОРУЮ НЕВОЗМОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ | 152 |
| Конец ознакомительного фрагмента. | 154 |

# Величайшая тайна вселенной

Ильвир Ирекович Зайнуллин

© Ильвир Ирекович Зайнуллин, 2026

ISBN 978-5-0071-4915-0
Создано в интеллектуальной издательской системе Ridero

# Предисловие

Представьте, что однажды ночью вы выходите из дома и смотрите на звёздное небо. Перед вами открывается безмолвная бездна, в которой мерцают тысячи далёких огней. Каждый из них может быть солнцем, вокруг которого вращаются планеты. Где-то среди этих планет, возможно, существуют океаны, горы, атмосферы и существа, которые тоже поднимают глаза к небу и пытаются понять, что окружает их мир. Но стоит задуматься всего на несколько секунд, как привычная картина начинает разрушаться. Что именно вы видите? Не просто звёзды, а свет, который отправился в путешествие задолго до вашего рождения. Некоторые из этих фотонов покинули свои источники тысячи лет назад, другие — миллионы, а отдельные сигналы, доступные современным телескопам, несут сведения о событиях, произошедших почти в начале наблюдаемой истории космоса. Вы смотрите вверх, но одновременно смотрите в прошлое. И чем дальше простирается ваш взгляд, тем глубже он погружается в историю мира, существовавшего задолго до появления Земли, жизни и человеческой мысли.

Теперь задайте себе вопрос, который способен превратить обычное созерцание ночного неба в одно из самых тревожных интеллектуальных переживаний: почему всё это вообще существует? Почему есть звёзды, пространство, время, ма-

терия и законы природы? Почему реальность не является абсолютной пустотой? И если Вселенная возникла, что означает само слово «возникла», когда речь идёт о пространстве и времени, за пределами которых мы не умеем уверенно рассуждать? Мы привыкли искать причины событий. Пламя появляется потому, что возникли условия для горения; река течёт благодаря перепаду высот; планета движется под действием гравитации. В повседневной жизни почти каждое событие можно связать с другим событием, предшествующим ему. Но когда мы пытаемся применить тот же принцип ко всему существующему, перед нами возникает вопрос, который не похож ни на одну обычную задачу. Если у Вселенной есть причина, то откуда взялась сама причина? Если она объясняется более фундаментальной реальностью, то почему существует эта реальность? И если цепочка объяснений должна где-то закончиться, что находится в её основании?

Человечество научилось измерять движение далёких галактик, обнаруживать планеты у других звёзд, расшифровывать молекулярную структуру наследственности, создавать искусственные системы, способные анализировать огромные массивы информации, и исследовать процессы, происходящие внутри атомных ядер. Мы отправляем аппараты к другим планетам, регистрируем гравитационные волны, изучаем реликтовое излучение и восстанавливаем историю космоса по слабым следам древних событий. Однако каждое крупное достижение науки обладает странным свойством: оно не

только закрывает старые вопросы, но и открывает новые, зачастую более глубокие. Когда мы выяснили, что Земля не является центром мироздания, пришлось пересмотреть положение человечества во Вселенной. Когда обнаружилось, что звёзды представляют собой далёкие солнца, космос перестал быть просто украшенным огнями небесным сводом. Когда современная космология позволила реконструировать ранние стадии расширения Вселенной, выяснилось, что история привычного мира уходит в состояние, для описания которого необходимы теории, объединяющие физику элементарных частиц, гравитацию и природу пространства-времени. Наука словно снимает одну завесу за другой, но за каждой из них обнаруживается пространство для новых вопросов.

Самое удивительное заключается в том, что задавать эти вопросы способна сама Вселенная, по крайней мере в одном известном нам смысле: внутри неё возникли существа, которые научились исследовать условия собственного появления. Атомы, образовавшиеся в космических процессах, стали частью живых организмов; живые организмы сформировали нервные системы; нервные системы породили сознательный опыт, язык, математику и способность строить теории о происхождении материи. В результате появляется почти невероятная ситуация. Реальность, существовавшая миллиарды лет без человеческих наблюдателей, породила существ, которые пытаются понять её устройство. Человек состоит из вещества Вселенной, но способен рассуж-

дать о галактиках, расположенных на расстояниях, которые невозможно преодолеть за время человеческой жизни. Он является частью исследуемого объекта и одновременно выступает исследователем. Его мозг сформировался в результате естественной истории, но теперь пытается постичь саму историю, которая его сформировала. И здесь возникает загадка, к которой мы будем возвращаться на протяжении всей книги: почему часть реальности оказалась способна задавать вопросы о целом?

Возможно, главная интеллектуальная опасность заключается не в том, что человечество пока не знает ответов на некоторые фундаментальные вопросы. Незнание само по себе не является катастрофой. Напротив, признание незнания нередко становится началом подлинного исследования. Гораздо опаснее другая возможность: некоторые вопросы могут оказаться устроены так, что наши привычные способы поиска ответов не способны привести нас к окончательному решению. Мы можем столкнуться не с временной нехваткой данных, а с пределами самого познания. Возможно, отдельные стороны реальности невозможно наблюдать непосредственно. Возможно, математическая теория не способна охватить все истины, которые мы хотели бы выразить математически. Возможно, субъективный опыт нельзя полностью объяснить одним лишь описанием физических процессов, хотя именно физические процессы лежат в основе работы мозга. А возможно, все эти трудности в конечном счё-

те разрешимы, и сегодняшние загадки исчезнут после появления более совершенных теорий. Пока у нас нет достаточных оснований объявлять окончательную победу ни одной из этих возможностей. Но именно поэтому исследование становится особенно интересным.

Эта книга не обещает раскрыть тайну существования одним эффектным ответом. Подобное обещание было бы слишком простым для проблемы, которая затрагивает основания физики, математики, биологии, философии и теории сознания. Наша задача гораздо серьёзнее: пройти по границе между тем, что человечество уже сумело установить, тем, что остаётся предметом научного спора, и тем, относительно чего мы пока даже не знаем, возможно ли окончательное решение. Мы исследуем происхождение Вселенной, природу времени, устройство реальности, возникновение жизни, загадку сознания, возможность существования внеземного разума, пределы математического знания и вопрос о том, сможет ли наука когда-нибудь создать исчерпывающее описание мира. В каждом случае мы будем различать подтверждённые результаты, обоснованные гипотезы и философские предположения. Это необходимо не для того, чтобы ослабить ощущение тайны, а для того, чтобы сделать его подлинным. Настоящая загадка гораздо глубже выдуманной сенсации, потому что ей не требуется искусственное преувеличение.

Есть одна мысль, которую стоит удерживать с самого начала. Возможно, величайшее открытие человечества будет

заключаться не в получении окончательного ответа на все вопросы, а в понимании того, какие вопросы мы способны решить, какие требуют совершенно новых способов мышления и какие заставляют пересматривать само понятие объяснения. Мы привыкли считать знание накоплением ответов. Но по мере развития науки становится заметно, что знание — это ещё и способность точнее определять собственное незнание. Человек, который не подозревает о существовании проблемы, может чувствовать себя уверенно. Человек, который обнаружил глубину проблемы, иногда испытывает растерянность. Однако именно второй уже сделал шаг вперёд. Он увидел не просто неизвестную область, а границу между тем, что ему казалось очевидным, и тем, что действительно требует объяснения.

Поэтому начнём наше путешествие с вопроса, который находится глубже многих других. Не с вопроса о том, из чего состоят звёзды, как работают клетки или почему мы видим сны. Не с вопроса о том, каким образом возникла человеческая цивилизация и куда она движется. Начнём с самого основания, с того, что обычно принимается как нечто само собой разумеющееся. Начнём с существования.

Почему есть нечто, а не ничто?


И.И. Зайнуллин
ВЕЛИЧАЙШАЯ ТАЙНА ВСЕЛЕННОЙ
КНИГА, КОТОРАЯ ЗАСТАВИТ ВАС ПО-НОВОМУ ВЗГЛЯНУТЬ НА МИР
И.И. Зайнуллин
ВЕЛИЧАЙШАЯ ТАЙНА ВСЕЛЕННОЙ
ВЕЛИЧАЙШАЯ ТАЙНА ВСЕЛЕННОЙ

# ГЛАВА 1 ПОЧЕМУ СУЩЕСТВУЕТ ВСЕЛЕННАЯ?

В истории человеческой мысли есть вопросы, которые становятся сложнее всякий раз, когда мы пытаемся ответить на них. Сначала они кажутся почти детскими, потому что формулируются простыми словами. Затем выясняется, что за этой простотой скрывается пропасть, которую не удаётся пересечь ни обычной логикой, ни привычным научным объяснением. Вопрос о существовании Вселенной относится именно к таким вопросам. Ребёнок может спросить, кто создал мир. Взрослый человек может ответить, что Вселенная расширяется, что её наблюдаемая история началась около 13,8 миллиарда лет назад с горячего плотного состояния, что галактики формируются под действием гравитации, а химические элементы возникают в звёздах и других космических процессах. Все эти сведения важны и во многом подтверждены наблюдениями. Но они не устраняют первоначальную загадку. Они описывают, как развивалась Вселенная, которую мы наблюдаем, однако не дают автоматически ответа на вопрос, почему существует сама реальность и почему она обладает именно такими свойствами.

Чтобы почувствовать глубину этой проблемы, представим, что перед нами находится сложнейший механизм. Мы

постепенно изучаем его детали, определяем функции отдельных компонентов, выясняем, каким образом одна часть взаимодействует с другой, и в конце концов получаем полное представление о работе устройства. Однако затем возникает вопрос: кто изготовил сам механизм? Если мы находим мастерскую, в которой он был собран, то можем исследовать инструменты, материалы и технологии. Но откуда взялась мастерская? Если она была построена раньше, кто построил её? Кажется, что поиск причины можно продолжать бесконечно, переходя от одного объяснения к другому. Вселенная создаёт ещё более трудную проблему, потому что мы не можем заранее считать её обычным объектом, находящимся внутри более крупного пространства. Если пространство само является частью Вселенной, то вопрос о внешнем месте, где она могла быть изготовлена, уже требует отдельного обоснования. Мы не вправе автоматически переносить привычные отношения между предметами повседневного мира на реальность в целом.

Здесь важно различить два вопроса, которые часто смешивают. Первый заключается в том, как возникла наблюдаемая Вселенная в том виде, который мы видим сегодня. Второй состоит в том, почему существует какая-либо реальность вообще. На первый вопрос космология постепенно даёт всё более подробные ответы. Современная научная картина описывает расширение пространства, эволюцию ранней горячей Вселенной, образование атомов, возникновение

первых звёзд и галактик, а затем формирование сложных структур, включая планетные системы. Эта картина опирается на несколько независимых линий наблюдательных свидетельств, хотя некоторые этапы ранней истории, особенно самые первые моменты, остаются предметом исследований. Второй вопрос имеет иной статус. Даже если когда-нибудь мы построим безупречную теорию, описывающую все физические процессы от ранней Вселенной до её возможного далёкого будущего, останется возможность спросить, почему существует реальность, подчиняющаяся именно этой теории. Успешное описание устройства мира не тождественно объяснению того, почему мир вообще есть.

В начале XX века представление о Вселенной как о вечной и неизменной системе стало уступать место динамической картине космоса. Наблюдения показали, что далёкие галактики в среднем удаляются друг от друга, а развитие теоретической физики позволило описывать расширение пространства в рамках общей теории относительности. Постепенно сформировалась космологическая модель, согласно которой наблюдаемая Вселенная прошла через чрезвычайно горячее и плотное раннее состояние. В популярной речи это часто называют рождением Вселенной из ничего, но такая формулировка вводит в заблуждение. Теория Большого взрыва не является простым утверждением о том, что абсолютное ничто внезапно превратилось во всё существующее. Она описывает эволюцию ранней Вселенной и её последую-

щее расширение, опираясь на физические модели и наблюдения. Что именно происходило на предельно ранних этапах, когда наши проверенные теории перестают быть достаточными, остаётся открытым вопросом. А что означает само начало времени, если оно действительно имело место, — уже отдельная концептуальная трудность.

Представим теперь, что учёным удалось бы обнаружить убедительные свидетельства того, что наша Вселенная возникла из некоторого более фундаментального состояния. Казалось бы, загадка решена: мы нашли то, из чего появился мир. Но на следующем шаге неизбежно возникнет вопрос о природе этого состояния. Было ли оно физическим? Существовали ли в нём время и причинность? Можно ли говорить о его существовании в том же смысле, в каком мы говорим о существовании материи и пространства? Если оно подчинялось определённым законам, почему действовали именно эти законы? Если же оно не подчинялось никаким законам, что вообще означает такое утверждение? Каждый возможный ответ открывает новую область исследования. И это не обязательно означает, что научное объяснение обречено на бесконечный регресс. Возможно, будущая теория позволит показать, что некоторые вопросы сформулированы неправильно или что привычное разделение на причину и следствие неприменимо к предельным условиям. Но пока это возможности, а не установленные факты.

Особую трудность представляет понятие абсолютного ни-

что. В повседневной жизни мы называем пустотой помещение без мебели, участок пространства без видимых предметов или сосуд, из которого удалили вещество. Однако во всех этих случаях сохраняется нечто: пространство, физические поля, возможность измерения, действующие законы или сама система, в рамках которой мы говорим об отсутствии предметов. Даже вакуум в современной физике не следует отождествлять с философским ничто. Физический вакуум описывается в рамках определённой теории и обладает структурой, допускающей физические характеристики и процессы. Абсолютное ничто, если понимать его как полное отсутствие объектов, пространства, времени, свойств, законов и возможностей, — гораздо более радикальное понятие. Мы не можем просто взять образ пустой комнаты и мысленно удалить из неё мебель, воздух, стены и свет, потому что останется сама комната как пространство представления. Чем решительнее мы пытаемся устранить всё существующее, тем труднее понять, что именно мы описываем.

Возможно, именно поэтому вопрос «почему существует нечто, а не ничто?» нельзя считать обычной задачей, ожидающей решения по образцу физических задач. В физике мы обычно начинаем с определённого набора условий и выясняем, какие процессы из них следуют. Но вопрос о существовании требует объяснить не только процессы, но и саму основу, на которой возможно построение физического описания. Если мы предполагаем существование законов при-

роды, то можем исследовать их последствия. Однако почему существуют законы, а не полное отсутствие каких-либо закономерностей? Если мы говорим, что определённое состояние Вселенной необходимо следует из фундаментального принципа, то почему существует этот принцип? Можно попытаться утверждать, что он не нуждается в объяснении, но тогда мы должны признать, что цепочка объяснений где-то достигает основания, которое принимается как исходное. Возможно, такое основание действительно существует. Однако остаётся вопрос, почему именно оно является окончательным, а не просто ещё одним элементом более глубокой реальности.

Один из возможных ответов связан с идеей необходимости. Согласно этому подходу, существование мира не является случайным фактом, который мог бы не иметь места. Возможно, реальность в некотором глубоком смысле не может не существовать, а её основные свойства определяются логической, математической или метафизической необходимостью. На первый взгляд такая мысль привлекательна: если существование необходимо, не нужно искать внешнюю причину, которая его вызвала. Но трудность заключается в том, что необходимо показать, в каком именно смысле существование неизбежно. Логическая непротиворечивость некоторого описания сама по себе не доказывает, что соответствующая реальность существует физически. Математическая модель может быть последовательной, но вопрос о том, поче-

му именно она описывает действительный мир, требует отдельного рассмотрения. Поэтому идея необходимого существования остаётся серьёзной философской позицией, а не общепринятым научным результатом.

Другая возможность предполагает, что наша Вселенная является частью более обширной реальности. Некоторые теоретические модели допускают существование множества вселенных, областей пространства с различными физическими параметрами или более фундаментальной структуры, из которой могут возникать отдельные космологические миры. Подобные идеи способны предложить интересные объяснения некоторых особенностей наблюдаемой Вселенной. Например, если существует множество областей с различными условиями, то неудивительно, что наблюдатели обнаруживают себя в той области, где условия допускают их появление. Но даже если подобная картина окажется верной, первоначальная проблема не исчезнет автоматически. Почему существует более обширная реальность? Почему она допускает образование вселенных? Почему действуют правила, согласно которым возможны разные физические условия? Множество вселенных может расширить картину космоса, но само по себе оно не отвечает на вопрос о существовании всего как такового. Кроме того, различные модели множественных вселенных обладают разной степенью научной разработанности и проверяемости, поэтому их нельзя представлять как установленный факт.

Есть и другой путь рассуждения: возможно, понятие причины применимо только к событиям внутри времени, а потому вопрос о причине Вселенной в целом содержит скрытое противоречие. Если время является частью физической реальности и имеет собственную историю, то не обязательно существует более ранний момент, в котором Вселенная ожидала своего появления. Просить назвать событие, предшествовавшее самому времени, может быть столь же проблематично, как спрашивать, что находится севернее Северного полюса. Аналогия не решает проблему окончательно, но показывает, что наши привычные понятия могут терять смысл на границах применимости. Однако из этого не следует, что вопрос о существовании Вселенной бессмысленен во всех отношениях. Возможно, он требует не временной причины, а другого вида объяснения. Физики и философы продолжают исследовать эти возможности, не располагая единственным общепринятым ответом.

Здесь возникает принципиальное различие между отсутствием ответа и доказательством невозможности ответа. То, что современная наука не объясняет окончательное происхождение реальности, ещё не означает, что объяснение недостижимо в принципе. История познания неоднократно показывала, что явления, казавшиеся загадочными, получали естественные объяснения после появления новых методов и теорий. Молнии перестали быть исключительно предметом мифологических представлений, болезни начали иссле-

довать на уровне микроорганизмов и клеточных процессов, а движение планет оказалось подчинено законам, которые можно выразить математически. Но было бы столь же ошибочно заключать, что всякий вопрос обязательно получит окончательный ответ только потому, что некоторые прежние загадки удалось решить. Разумная позиция требует сохранять открытость в обе стороны: не объявлять загадку вечной лишь из-за нынешнего незнания и не обещать полного объяснения всего на основании прошлых успехов.

Можно ли представить момент, когда человечество наконец узнает окончательную причину существования Вселенной? Возможно, будущая физика объединит квантовую теорию и гравитацию, предложит более глубокое описание пространства-времени и покажет, каким образом наблюдаемая космологическая история связана с фундаментальными законами. Такое открытие могло бы изменить наши представления о начале космоса настолько радикально, что сегодняшние модели показались бы лишь приближённым описанием. Но даже в этом случае остаётся открытой возможность дальнейшего вопроса: почему фундаментальная теория имеет именно такую структуру? Возможно, она окажется единственной математически согласованной теорией, допускающей существование наблюдателей и сложной реальности. Возможно, обнаружится, что многие альтернативы внутренне противоречивы. Но и тогда потребуется объяснить, в каком смысле математическая уникальность связа-

на с реальным существованием. Между утверждением «мы нашли единственную допустимую модель» и утверждением «мы объяснили, почему реальность существует» может сохраняться значительное расстояние.

Предположим, что однажды исследователи действительно установят: фундаментальные свойства нашей Вселенной не могли быть иными. Все физические константы, структуры и закономерности будут выведены из более общего принципа, а сама теория окажется настолько строгой, что не оставит места для альтернативных вариантов в пределах принятой системы. Будет ли это окончательным ответом? Для физики такое достижение стало бы революционным. Но философский вопрос может сохраниться в изменённом виде: почему существует реальность, в которой реализуется эта математическая структура? Возможно, на этом этапе мы поймём, что требование дополнительного объяснения не всегда осмысленно. Возможно, слово «почему» здесь выражает человеческую привычку искать причинные связи даже там, где применимы иные формы описания. А возможно, мы обнаружим ещё более глубокий уровень реальности. Сейчас ни один из этих исходов нельзя уверенно исключить.

В этой загадке скрывается ещё одна неожиданность. Человек склонен считать существование чем-то совершенно обычным, потому что никогда не сталкивался с абсолютным отсутствием реальности. Мы просыпаемся в мире, который уже существует; пользуемся языком, возникшим задолго до

нас; исследуем законы, которые не зависят от наших желаний; строим теории на основании наблюдений, проведённых внутри той же Вселенной, которую пытаемся объяснить. Поэтому само существование часто остаётся невидимым фоном нашего мышления. Мы замечаем отдельные вещи, но почти не замечаем того, что все вещи вообще присутствуют. И лишь когда внимание направляется на этот фон, он перестаёт казаться самоочевидным. Мир становится загадочным не потому, что в нём внезапно появляется нечто необычное, а потому, что мы начинаем видеть необычность самого привычного факта: всё это есть.

Возможно, именно здесь начинается подлинная философия. Не в накоплении эффектных утверждений о скрытых силах и тайных причинах, а в способности остановиться перед самым очевидным и обнаружить, что его очевидность обманчива. Мы знаем, что существуем. Мы знаем, что наблюдаемая Вселенная обладает определённой историей и закономерностями. Мы умеем исследовать многие процессы, происходящие в ней. Но между знанием о том, что мир существует, и пониманием того, почему он существует, лежит пространство, которое пока не удалось заполнить ни одной общепринятой теорией. Это пространство не следует превращать в доказательство сверхъестественного, но не следует и закрывать его преждевременными заявлениями о том, что наука уже дала окончательный ответ. Честность перед тайной требует большего мужества, чем поспешная уверен-

ность.

И всё же вопрос о существовании не обязательно должен вести к отчаянию или интеллектуальному тупику. Его значение состоит ещё и в том, что он показывает масштаб человеческого мышления. Существо, возникшее на одной из планет возле обычной звезды, способно поставить под сомнение самоочевидность всего существующего. Оно может исследовать происхождение звёзд, оценивать возраст космоса, строить математические модели и размышлять о том, применимы ли причинность и время к реальности в целом. Даже если окончательный ответ окажется недостижимым, само стремление к нему уже свидетельствует о необычайной способности человеческого разума выходить за пределы непосредственного опыта. Мы не просто живём во Вселенной. Мы способны сделать существование Вселенной предметом размышления.

Но в этот момент возникает новый вопрос, возможно, ещё более странный. Если существование мира настолько фундаментально, почему внутри этого мира появились существа, для которых оно стало загадкой? Почему материя, подчиняющаяся физическим законам, смогла сформировать мозг, который не только реагирует на окружающую среду, но и создаёт абстрактные понятия, размышляет о бесконечности и спрашивает о причинах собственного появления? Как получилось, что определённая организация вещества сопровождается переживанием цвета, боли, радости, страха и удивле-

ния? Мы можем описать работу нервных клеток, измерить электрическую активность мозга и обнаружить связи между определёнными процессами и состояниями человека. Но остаётся вопрос, почему физическая активность сопровождается субъективным опытом и как именно следует понимать эту связь.

Именно поэтому следующая загадка будет посвящена сознанию. Если первая глава поставила вопрос о том, почему существует реальность, то вторая приблизит нас к ещё более непосредственной тайне: почему реальность не просто происходит, но для кого-то становится переживаемой? Почему во Вселенной есть не только движение частиц и взаимодействие полей, но и внутренний мир, в котором человек ощущает себя существующим? Мы научились изучать мозг с беспрецедентной точностью, однако вопрос о природе субъективного опыта остаётся предметом активных исследований и философских споров. Возможно, его решение потребует новых теорий. Возможно, мы должны пересмотреть привычные представления о сознании. А возможно, трудность заключается в том, что исследователь пытается объяснить собственный опыт средствами, которые сами доступны ему только через этот опыт.

В этом и заключается переход от одной великой тайны к другой. Мы начали с существования Вселенной и обнаружили, что даже самое фундаментальное понятие не поддаётся простому объяснению. Теперь мы обратимся к сознанию

— явлению, которое кажется нам более знакомым, чем далёкие галактики, поскольку каждый из нас непосредственно переживает собственное существование. Но именно эта близость может оказаться обманчивой. Мы видим звёзды с помощью приборов, изучаем атомы посредством экспериментов и восстанавливаем историю космоса по сохранившимся свидетельствам. Сознание же является одновременно предметом исследования и условием, через которое исследование становится возможным. Чтобы понять его, нам придётся заглянуть в глубины мозга, исследовать границы объективного описания и выяснить, насколько далеко может продвинуться наука в объяснении самого переживания.

И тогда перед нами откроется следующая дверь.

# ГЛАВА 2 ПОЧЕМУ ВО ВСЕЛЕННОЙ ПОЯВИЛОСЬ СОЗНАНИЕ?

Вы можете закрыть глаза и представить красный цвет. Можете вспомнить запах дождя, услышать в памяти голос близкого человека, почувствовать воображаемое прикосновение или мысленно вернуться в место, где были много лет назад. В этот момент вы не просто обрабатываете сведения об окружающем мире. Вы переживаете нечто изнутри. У вас есть собственная перспектива, из которой красный цвет выглядит именно так, воспоминание обладает определённым эмоциональным оттенком, а боль отличается от радости не только набором внешних признаков, но и самим характером переживания. Мы настолько привыкли к этому внутреннему миру, что редко задумываемся о его необычности. Между тем сознательный опыт представляет собой одну из самых глубоких проблем современной науки и философии. Мы знаем, что человеческое сознание тесно связано с работой мозга. Изменения в нервной системе способны менять память, внимание, эмоции, восприятие и чувство собственного «я». Но почему физические процессы сопровождаются субъективным опытом, остаётся сложным вопросом, для которого пока нет общепринятого окончательного ответа.

Представим, что мы получили возможность наблюдать за мозгом человека с невероятной точностью. Мы видим работу нейронных сетей, измеряем электрические импульсы, регистрируем химические сигналы, определяем, какие области мозга участвуют в восприятии цвета, формировании воспоминаний и принятии решений. Мы можем проследить, как свет отражается от предмета, попадает в глаз, преобразуется в нервные сигналы и передаётся в мозговые структуры, участвующие в зрительной обработке. Мы можем исследовать, какие процессы сопровождают распознавание красного яблока и чем они отличаются от процессов, возникающих при восприятии зелёного листа. Однако затем возникает вопрос, который нельзя устранить простым увеличением разрешения приборов. Почему вся эта сложная физическая деятельность сопровождается тем, что человеку что-то видно? Почему обработка сигналов не остаётся исключительно бессознательным процессом, а в определённых условиях связана с переживанием цвета, формы и пространства? Мы можем знать всё больше о механизме восприятия, но само наличие внутреннего опыта требует отдельного объяснения.

Чтобы понять трудность, представим гипотетическую машину, которая распознаёт изображения значительно лучше человека. Она обнаруживает предметы, классифицирует лица, различает оттенки, оценивает расстояния, строит модели окружающей среды и принимает решения на основании полученной информации. Мы можем подробно описать

её архитектуру, алгоритмы и физические процессы. Но можем ли мы на основании одной лишь способности распознавать изображения заключить, что машина действительно видит их так, как видит человек? Ответ не очевиден. Возможно, определённые формы искусственной системы способны обладать субъективным опытом, но само выполнение задачи ещё не доказывает этого. С другой стороны, мы не можем автоматически объявить, что машина лишена любого возможного переживания лишь потому, что её внутреннее устройство отличается от человеческого мозга. Вопрос требует критериев, которых у нас пока нет в виде общепринятого надёжного теста. Именно здесь проходит граница между наблюдаемым поведением, вычислительными функциями и субъективным опытом.

В повседневной жизни мы обычно не сомневаемся в наличии сознания у других людей. Мы видим, что они реагируют на боль, рассказывают о переживаниях, обладают воспоминаниями, строят планы и проявляют эмоции. Их биология и нервная система во многом сходны с нашими, поэтому предположение о наличии у них внутреннего опыта является естественным и обоснованным. Но с точки зрения строгого исследования существует различие между непосредственным переживанием и внешним свидетельством о нём. Я могу непосредственно знать, что испытываю боль, но чужая боль доступна мне через слова, поведение, физиологические реакции и аналогию с собственным опытом. Это не делает чу-

жие переживания сомнительными в обычном человеческом смысле. Однако показывает, почему сознание трудно исследовать теми же методами, которыми мы изучаем внешние объекты. Внутренний опыт не лежит перед наблюдателем так же, как камень, клетка или далёкая звезда.

На протяжении истории философии предлагались разные способы понять связь сознания и физической реальности. Одни подходы рассматривают сознание как результат определённых процессов мозга, которые при достаточной организации порождают субъективный опыт. Другие подчёркивают, что описание физических функций само по себе ещё не объясняет, почему эти функции сопровождаются переживанием. Некоторые философы считают, что проблема возникает из-за ограниченности наших нынешних понятий и что по мере развития нейронауки мы сможем сформулировать более точное объяснение. Другие полагают, что для понимания сознания может потребоваться серьёзный пересмотр существующих представлений о природе субъективности и физического мира. Ни одна из этих позиций не должна приниматься только потому, что она звучит наиболее смело или наиболее привычно. Важнее понять, какие именно вопросы каждая из них решает, какие трудности оставляет и какие свидетельства могли бы помочь отличить одну позицию от другой.

Одна из центральных трудностей состоит в том, что физическое описание обычно формулируется через свойства, из-

меряемые извне: положение, движение, энергию, взаимодействие, электрическую активность и химические процессы. Сознательный опыт, напротив, известен нам через то, каково переживать определённое состояние. Боль может сопровождаться активностью нервных волокон и определёнными изменениями в мозге, но для самого человека она представляет собой неприятное ощущение. Страх можно исследовать через гормональные реакции, изменения сердечного ритма и работу нервных систем, но переживание страха включает в себя внутреннее чувство угрозы. Мы способны устанавливать закономерные связи между этими уровнями описания, однако остаётся спорным вопрос, достаточно ли полного физического объяснения для объяснения субъективного характера опыта. Возможно, связь между физическими процессами и переживанием будет понятна после появления более совершенной теории. Но сегодня было бы преждевременно считать, что проблема уже окончательно решена.

Особенно остро эта загадка проявляется в простом вопросе: почему определённый физический процесс сопровождается именно таким переживанием, а не другим? Почему восприятие красного цвета имеет один характер, а восприятие синего — другой? Почему боль неприятна, а некоторые формы удовольствия воспринимаются как приятные? Наука может исследовать, какие длины волн света связаны с определёнными зрительными реакциями, как зрительная система кодирует информацию и какие мозговые процессы участву-

ют в различении оттенков. Она также может исследовать механизмы боли и то, каким образом нервная система обрабатывает потенциально опасные сигналы. Но философская проблема возникает там, где мы спрашиваем, почему эти процессы сопровождаются именно такими качествами переживания. Само по себе описание различий между физическими сигналами ещё не равнозначно объяснению того, почему эти различия ощущаются определённым образом.

Здесь необходимо избегать распространённой ошибки. Трудность объяснения сознания не означает, что сознание обязательно является сверхъестественным явлением или что мозг не имеет к нему отношения. Напротив, огромное количество исследований демонстрирует глубокую связь между состоянием мозга и содержанием сознательного опыта. Повреждения определённых областей мозга способны нарушать речь, память, узнавание лиц и пространственную ориентацию. Анестезия может временно устранять обычный сознательный опыт, а воздействие некоторых веществ меняет восприятие, внимание и чувство собственного «я». Эти факты являются серьёзными свидетельствами того, что сознание тесно связано с физической работой нервной системы. Однако установление зависимости ещё не означает, что мы располагаем полным объяснением всех аспектов этой зависимости. Можно знать, какие условия необходимы для определённого явления, и всё ещё не понимать, почему оно обладает именно теми свойствами, которыми обладает.

Попробуем рассмотреть проблему с другой стороны. Допустим, будущая нейронаука создаст полную карту всех процессов, сопровождающих определённое переживание. Учёные смогут описать активность каждой значимой нервной цепи, взаимодействие нейромедиаторов, обмен сигналами между областями мозга и изменения, происходящие в организме. Более того, они смогут предсказывать с высокой точностью, какие слова человек произнесёт, на что обратит внимание и как изменится его поведение при определённых условиях. Будет ли это означать, что сознание полностью объяснено? Возможно, сторонники функционального подхода ответят утвердительно, если теория объяснит все необходимые механизмы и покажет, как они связаны с отчётами о переживаниях. Другие философы могут возразить, что даже идеальное описание процессов от третьего лица оставляет вопрос о том, каково это — быть существом, у которого происходят эти процессы. Разногласие заключается не только в нехватке данных, но и в том, что именно мы считаем достаточным объяснением.

Этот спор имеет практическое значение. Если мы хотим понять, могут ли искусственные системы обладать сознанием, недостаточно спросить, способны ли они отвечать на вопросы, вести разговор или демонстрировать поведение, похожее на человеческое. Необходимо определить, какие свойства системы имеют отношение к субъективному опыту и можем ли мы вообще надёжно обнаруживать этот опыт

внешними методами. Возможно, некоторые будущие системы будут обладать архитектурой, которая позволит серьёзно рассматривать гипотезу о наличии у них сознания. Возможно, новые исследования покажут, что определённые популярные критерии сознания недостаточны. Но пока не существует общепринятого способа, который позволял бы уверенно устанавливать наличие субъективного опыта у любой сложной искусственной системы. Поэтому необходимо различать впечатляющее поведение, способность обрабатывать информацию и доказанное наличие сознания. Это разные утверждения, и смешение между ними способно привести к серьёзным ошибкам.

Не менее загадочным является само чувство собственного «я». Большинство людей воспринимает себя как относительно единую личность, которая существует во времени, обладает воспоминаниями, принимает решения и несёт ответственность за свои поступки. Нам кажется, что внутри нас находится устойчивый наблюдатель, который смотрит на мир через органы чувств и управляет телом. Однако исследования мозга показывают, что ощущение единства личности складывается из множества процессов. Восприятие тела, память, внимание, эмоциональная регуляция и представление о собственных намерениях связаны с различными механизмами, которые взаимодействуют друг с другом. При некоторых неврологических состояниях эти процессы могут нарушаться, и привычное чувство собственного «я» меняет-

ся. Это заставляет спросить: является ли личность единым внутренним центром или она представляет собой сложную организацию процессов, которые создают устойчивое переживание собственной непрерывности?

Представим, что человек просыпается после обычного сна и чувствует, что он остался тем же самым человеком, которым был накануне. Его тело продолжает существовать, воспоминания сохраняют значительную часть прежнего содержания, а планы связывают прошлое с будущим. Но что именно обеспечивает это ощущение непрерывности? Мы знаем, что клетки организма обновляются, физическое состояние мозга меняется, воспоминания могут искажаться, а взгляды и характер человека постепенно преобразуются. Тем не менее личность не исчезает при каждом изменении. Вероятно, устойчивость нашего «я» связана не с абсолютной неизменностью какой-либо одной части мозга, а с непрерывностью организации, памяти, телесных процессов и взаимодействия с окружающей средой. Но этого наблюдения недостаточно, чтобы закрыть философский вопрос о личной идентичности. Если изменить память человека, повлияет ли это на то, кем он является? Если воспроизвести его воспоминания в другой системе, возникнет ли там та же личность или только её подобие?

Подобные вопросы перестают быть чисто фантастическими, когда мы рассматриваем возможное развитие нейротехнологий и искусственного интеллекта. Допустим, в будущем

исследователи научатся создавать чрезвычайно точные модели индивидуального мозга. Такая модель будет воспроизводить воспоминания человека, особенности его речи, привычки, характерные реакции и способы рассуждения. Для окружающих она может оказаться практически неотличимой от оригинала. Но будет ли это продолжением сознательной жизни исходного человека? Или появится новая система, которая лишь убедительно воспроизводит его поведение? Если оригинал продолжает жить одновременно с копией, трудно утверждать, что оба являются одним и тем же индивидуальным субъектом в обычном численном смысле. Если же оригинал умирает до запуска модели, вопрос не становится автоматически проще. Поведенческое сходство может быть чрезвычайно глубоким, но само по себе оно не доказывает тождество субъективного опыта. Мы пока не знаем, возможно ли подобное воспроизведение сознания и какие критерии следовало бы использовать для оценки его результата.

В этом месте загадка сознания соединяется с загадкой смерти. Человек способен представить собственное отсутствие, но любое представление об отсутствии создаётся существующим сознанием. Мы можем вообразить тёмную комнату, пустое пространство или мир, в котором нас больше нет, однако воображаемая картина всё равно переживается кем-то. Поэтому субъективное отсутствие опыта трудно представить изнутри. Это не является доказательством существования сознания после смерти; подобный вывод был

бы логически необоснованным. Но эта трудность показывает, насколько тесно наше мышление связано с собственной перспективой. Мы привыкли смотреть на мир изнутри переживания и поэтому сталкиваемся с ограничениями, когда пытаемся представить полное отсутствие этой перспективы. Наука исследует процессы, связанные с жизнью мозга и прекращением его деятельности, а философия анализирует значение личной идентичности и субъективного опыта. Эти направления могут дополнять друг друга, но их вопросы не всегда совпадают.

Возможно, самая глубокая особенность сознания заключается в том, что оно позволяет миру становиться предметом осознанного переживания. Камень существует, звезда излучает свет, галактика движется в пространстве, но мы не располагаем основаниями приписывать этим объектам человеческий тип внутреннего опыта. Человек же способен не только взаимодействовать с окружающей средой, но и осознавать часть собственных состояний, сравнивать их, описывать словами и размышлять об их природе. Сознание позволяет реальности появиться в форме внутреннего мира, в котором есть ощущения, воспоминания, ожидания и вопросы. Но мы не знаем, насколько распространено подобное явление во Вселенной. Возможно, сознательная жизнь возникает сравнительно часто при подходящих условиях. Возможно, она чрезвычайно редка. Возможно, существуют формы субъективного опыта, настолько отличающиеся от человече-

ских, что мы пока не умеем даже сформулировать правильные критерии их обнаружения.

И здесь мы возвращаемся к космосу. Мы научились обнаруживать планеты у далёких звёзд и оценивать, какие условия могут существовать на их поверхности. Мы изучаем химический состав атмосфер, ищем возможные признаки биологических процессов и пытаемся определить, насколько распространены условия, допускающие возникновение жизни. Однако обнаружить планету, подходящую для жизни, — не то же самое, что обнаружить саму жизнь. Найти признаки жизни — не то же самое, что доказать существование разумной цивилизации. А установить наличие разумной цивилизации — ещё не значит понять, каким образом её представители переживают собственное существование. Каждый шаг открывает новый уровень вопроса. Возможно, однажды человечество получит убедительные свидетельства того, что мы не одиноки. Тогда проблема сознания выйдет за пределы земной биологии и станет вопросом о разнообразии форм разума во Вселенной.

Представьте, что радиотелескопы регистрируют сигнал, который невозможно объяснить известными естественными источниками, а последующие наблюдения подтверждают, что он содержит сложную структуру и имеет искусственное происхождение. Это было бы одним из величайших открытий в истории человечества. Но даже тогда мы знали бы о другой цивилизации лишь то, что смогли извлечь из сигна-

ла. Мы не обязательно понимали бы её биологию, историю, способы восприятия, эмоциональную жизнь или внутренний мир. Возможно, её представители обладали бы формами сознания, которые не укладывались бы в наши психологические категории. Они могли бы воспринимать время иначе, чем мы, строить коллективные формы мышления или использовать способы коммуникации, не похожие на человеческий язык. Всё это остаётся предположением, но оно указывает на важный предел: способность установить контакт с другим разумом не гарантирует способности полностью понять его субъективный мир.

Сознание, таким образом, оказывается не одной загадкой, а целым узлом взаимосвязанных проблем. Мы пытаемся понять, как оно связано с физическими процессами, почему существует субъективный опыт, что делает личность единой во времени, возможно ли сознание у искусственных систем и насколько разнообразными могут быть формы переживания в природе. Некоторые из этих вопросов постепенно становятся доступнее благодаря нейронауке, когнитивной психологии и вычислительным моделям. Другие остаются предметом философских споров. Было бы неверно утверждать, что современная наука ничего не знает о сознании: мы обладаем огромным массивом данных о работе мозга, механизмах восприятия, памяти, внимания и бодрствования. Но было бы столь же неверно заявлять, что все фундаментальные вопросы уже решены. Между пониманием механизмов

и окончательным объяснением субъективности пока сохраняется пространство для исследований.

Возможно, будущая теория сознания покажет, что нынешняя формулировка проблемы нуждается в пересмотре. Мы можем обнаружить, что некоторые философские трудности возникают из-за неверных предположений о природе опыта или из-за смешения разных уровней объяснения. Возможно, появятся новые методы исследования, которые позволят точнее связывать субъективные отчёты с измеримыми процессами и строить более надёжные модели сознательных состояний. Но есть и другая возможность: чем глубже мы будем изучать сознание, тем отчётливее станет различие между объективным описанием системы и тем, каково быть этой системой изнутри. Сегодня мы не можем заранее знать, какая из этих перспектив окажется наиболее плодотворной. И именно поэтому исследование сознания остаётся одной из самых захватывающих интеллектуальных задач современности.

Теперь обратите внимание на странное положение, в котором оказался читатель. Мы начали с вопроса о Вселенной, существование которой кажется очевидным, но не имеет окончательного философского объяснения. Затем перешли к сознанию, которое каждый из нас переживает непосредственно, но природу которого мы всё ещё пытаемся понять. В первом случае мы спрашиваем, почему вообще существует реальность. Во втором — почему часть этой реаль-

ности обладает внутренним опытом. И в обоих случаях обнаруживается одна и та же особенность: привычные понятия, прекрасно работающие в повседневной жизни, становятся недостаточными, когда мы приближаемся к фундаментальным основаниям мира. Причина, существование, объяснение, личность и опыт кажутся ясными до тех пор, пока мы не начинаем исследовать их глубже.

Но есть ещё одна загадка, которая соединяет все предыдущие вопросы. Сознание, каким бы сложным оно ни было, существует в физическом мире и использует материальные процессы мозга. Мозг, в свою очередь, способен создавать математические модели, которые описывают движения планет, строение атомов и историю Вселенной. Получается, что система, возникшая внутри природы, может строить абстрактные описания самой природы и с их помощью предсказывать события, которые ещё не произошли. Почему математические конструкции человеческого разума так успешно применяются к физической реальности? Является ли математика лишь удобным языком, который мы изобрели для описания закономерностей, или её структура каким-то образом отражает глубинное устройство мира? И почему ограниченный человеческий мозг способен открывать закономерности, распространяющиеся далеко за пределы непосредственного опыта?

Эти вопросы приведут нас к следующей великой тайне — математике. Мы увидим, как абстрактные идеи, не име-

ющие очевидного практического назначения в момент своего создания, иногда становятся основой физических открытий спустя десятилетия или даже столетия. Мы рассмотрим, почему математическое описание позволяет так точно предсказывать природные явления, существует ли предел математического знания и может ли разум доказать всё, что истинно. Возможно, именно здесь обнаружится ещё одна граница между устройством реальности и способностью человека её постичь.

Пока же сохраним главный вопрос этой главы. Мы знаем, что мозг играет центральную роль в человеческом сознании. Мы умеем исследовать многие процессы, лежащие в основе восприятия, памяти, внимания и поведения. Но почему физическая деятельность мозга сопровождается субъективным опытом и насколько далеко может продвинуться объяснение этого опыта — вопросы, на которые человечество пока не имеет единственного общепринятого ответа. Это не повод отказываться от исследования. Напротив, именно такие вопросы требуют максимальной интеллектуальной честности, точности и воображения.

Потому что, возможно, самое удивительное в сознании заключается не только в том, что оно существует. Самое удивительное — в том, что оно способно осознать собственную загадочность.

# ГЛАВА 3 ПОЧЕМУ МАТЕМАТИКА ПОНИМАЕТ ВСЕЛЕННУЮ?

Представьте человека, который сидит за столом и записывает на бумаге символы, не имеющие никакого непосредственного отношения к окружающему миру. Он исследует абстрактные структуры, доказывает теоремы, рассматривает воображаемые пространства и устанавливает отношения между величинами, которые невозможно увидеть невооружённым глазом. Его работа может казаться далёкой от реальности: вокруг нет ни планет, ни звёзд, ни атомов, ни электрических цепей. Есть только мысли и математические конструкции. Но спустя десятилетия выясняется, что разработанный им математический аппарат позволяет описывать движение небесных тел, поведение света, распространение волн или свойства вещества. Абстрактная идея, возникшая без практической цели, неожиданно оказывается подходящим инструментом для исследования мира. Почему это происходит? Почему Вселенная подчиняется закономерностям, которые человеческий разум способен выражать математически? И почему математика, созданная существами с ограниченным мозгом и конечным жизненным опытом, оказывается применимой к процессам, происходящим на расстоянии миллиардов световых лет?

яниях в миллиарды световых лет и на масштабах, намного меньших атома?

На первый взгляд ответ кажется простым. Мы придумали математику именно для того, чтобы описывать закономерности, поэтому неудивительно, что она работает. Люди считали предметы, измеряли участки земли, рассчитывали строительные конструкции и наблюдали за движением небесных тел. Постепенно возникли системы чисел, геометрические методы и более сложные математические теории. Из этого можно заключить, что математика представляет собой созданный человеком инструмент, подобный языку или чертежу. Но такой ответ объясняет лишь часть явления. Многие математические области развивались из чисто теоретического интереса, без ясного понимания их будущего применения. Некоторые концепции, первоначально казавшиеся абстрактными и даже странными, позднее оказались полезными для физики. Кроме того, математические модели иногда не просто описывают уже известные закономерности, но и позволяют предсказывать явления, которые ещё не наблюдались. Поэтому вопрос заключается не только в том, почему мы можем применять числа к предметам, но и в том, почему абстрактные структуры так часто оказываются удивительно точными моделями природных процессов.

Возьмём простейший пример — движение планет. На протяжении долгого времени люди наблюдали за небом и пытались найти порядок в изменении положения светил.

Первоначальные представления опирались на повседневный опыт и геоцентрическую картину мира, в которой Земля занимала центральное положение. Постепенно наблюдения, математические расчёты и развитие астрономических теорий привели к радикальному изменению этой картины. Законы движения и гравитации позволили описывать орбиты планет как следствия общих закономерностей, а не как отдельные события, требующие самостоятельного объяснения. Впоследствии более точные наблюдения выявили ограничения ньютоновской модели, и общая теория относительности предложила более глубокое описание гравитации через геометрию пространства-времени. Каждая новая теория позволяла объяснять больше явлений и делать более точные предсказания в определённых областях применимости. Математика здесь выступала не украшением научного объяснения, а его центральным инструментом.

Особенно поразительно то, что математические модели могут предсказывать явления до того, как они становятся доступными наблюдению. Когда теория позволяет вывести существование неизвестного объекта или определить свойства ещё не обнаруженного процесса, она демонстрирует нечто большее, чем простое приспособление к известным данным. Разумеется, не каждое математическое следствие соответствует реальному миру. Можно построить множество непротиворечивых моделей, которые описывают воображаемые структуры, не существующие в нашей Вселенной. Но когда

одна из моделей выдерживает независимую экспериментальную проверку, возникает важный вопрос: почему природа реализует именно такие закономерности? Возможно, математический аппарат успешно отражает устойчивые отношения, обнаруживаемые в мире. Возможно, человеческий разум отбирает и развивает те математические структуры, которые оказываются полезными для решения научных задач. Эти объяснения не исключают друг друга. Однако они оставляют пространство для более глубокого размышления о связи между математической абстракцией и физической реальностью.

Существует точка зрения, согласно которой математика является прежде всего продуктом человеческой деятельности. Люди создают определения, выбирают аксиомы, устанавливают правила доказательства и исследуют последствия этих правил. В таком понимании математические объекты не обязательно существуют независимо от человеческого мышления; они могут рассматриваться как элементы формальных систем, которые мы строим и развиваем. Но есть и другая позиция: математические истины не создаются по нашему желанию, а открываются. Если из определённых предпосылок строго следует некоторый результат, мы не можем произвольно решить, что он неверен, сохранив исходные правила рассуждения. В этом смысле математика кажется обладающей независимостью от человеческих предпочтений. Мы можем изобрести новую систему обозначений, но

не можем сделать так, чтобы логически вытекающее следствие перестало вытекать из принятых предпосылок. Спор между созданием и открытием математических объектов касается не только терминологии, но и нашего понимания того, что такое абстрактная истина.

Чтобы почувствовать сложность проблемы, представим разумную цивилизацию, возникшую на планете у другой звезды. Её представители могли бы иметь совершенно иную биологию, другие органы чувств и необычную историю развития. Их язык мог бы не походить на человеческие языки, а способы представления окружающего мира могли бы отличаться от наших. Однако если они исследуют устойчивые количественные отношения, строят сложные технические системы и изучают физические процессы, им, вероятно, придётся столкнуться с некоторыми математическими закономерностями, которые мы также обнаруживаем. Они могли бы использовать иные обозначения и развивать другие методы, но некоторые отношения между величинами не зависели бы от их культурных предпочтений. Это не доказывает, что вся математика существует независимо от разума, но позволяет увидеть, почему вопрос о её универсальности имеет глубокий смысл. Возможно, математические структуры обладают объективными свойствами, которые могут быть открыты разными разумными существами независимо друг от друга.

При этом не следует делать слишком быстрый вывод, буд-

то Вселенная буквально состоит из математических объектов. Математика способна описывать физические отношения с огромной точностью, но вопрос о том, что именно связывает математическую модель с реальностью, остаётся отдельным. Карта может точно отражать структуру местности, однако из этого не следует, что сама местность сделана из бумаги и линий. С другой стороны, аналогия с картой тоже ограничена: фундаментальные математические структуры иногда определяют не только внешний вид описания, но и то, какие закономерности могут существовать в рамках теории. Научная модель должна не просто быть красивой или непротиворечивой, но и соответствовать наблюдениям. Поэтому математическая возможность, физическая реализуемость и фактическое существование — три разных вопроса. Их смешение создаёт иллюзию, будто любая абстрактная конструкция обязана иметь реальный аналог.

Ещё одна трудность заключается в том, что математика не является единой неподвижной системой, в которой человечество однажды записало окончательный набор истин. На протяжении истории возникали новые области, менялись способы доказательства, появлялись различные геометрии, логические системы и подходы к основаниям математического знания. Некоторые результаты оказались неожиданными даже для самих математиков. В определённых формальных системах существуют утверждения, которые нельзя доказать или опровергнуть средствами самой системы при

условии её непротиворечивости и выполнения других технических предпосылок. Теоремы о неполноте, доказанные Куртом Гёделем, показали, что достаточно выразительные формальные системы не могут при определённых условиях охватить все арифметические истины средствами собственных доказательств. Эти результаты не означают, что математика бесполезна или что любое утверждение можно считать истинным. Они показывают, что между истиной, доказательством и формальной системой существуют более сложные отношения, чем предполагалось в некоторых программах полного формального обоснования математики.

Именно здесь вопрос о математике соединяется с вопросом о пределах разума. Если даже формальные системы, построенные для строгого доказательства, обладают ограничениями, может ли человеческое мышление когда-нибудь получить полное знание о математической структуре реальности? Возможно, мы сможем построить более мощные системы, расширить аксиоматические основания и доказать множество утверждений, которые ранее оставались недоступными. Но переход к более сильной системе не обязательно устраняет все ограничения: новые основания сами потребуют анализа, а вопрос о полноте и непротиворечивости может возникнуть на следующем уровне. Это не означает, что любое математическое исследование обречено на бесконечное движение без результата. Напротив, математика добивается огромных успехов. Но её история показывает, что стро-

гость не равнозначна абсолютной завершённости, а наличие мощного метода не гарантирует возможности решить им все мыслимые задачи.

Представим теперь, что будущая физика найдёт математическую теорию, которая объединит все известные фундаментальные взаимодействия и позволит выводить наблюдаемые свойства Вселенной из небольшого набора принципов. Это было бы величайшим достижением. Но даже такая теория не обязательно ответит на все вопросы, которые человек способен сформулировать о мире. Она могла бы описывать физические закономерности, но не давать готовых ответов на все вопросы о возникновении жизни, субъективном опыте, ценностях или смысле человеческого существования. Часть этих вопросов может получить естественно-научные объяснения, часть потребует междисциплинарных подходов, а некоторые будут зависеть от того, что именно мы понимаем под ответом. Полная физическая теория не обязательно является полной энциклопедией всех возможных истин. Описание законов движения материи и объяснение всех аспектов человеческого опыта — не одно и то же. Поэтому идея единой теории требует точного определения: что именно она должна объяснять и какие вопросы останутся за пределами её задач.

Возможно, самое удивительное свойство математики состоит не в том, что она даёт окончательные ответы на все вопросы, а в том, что она позволяет строить чрезвычай-

но точные рассуждения о реальности, которая намного превосходит наши непосредственные возможности восприятия. Человеческий глаз не способен увидеть отдельный атом в обычных условиях, а жизнь одного человека слишком коротка, чтобы непосредственно наблюдать многие космические процессы на протяжении миллионов лет. Но математические модели позволяют связывать разрозненные наблюдения, проверять гипотезы и делать выводы о недоступных масштабах. Мы можем исследовать внутреннее строение звёзд, реконструировать раннюю историю Вселенной и предсказывать поведение систем, которые невозможно воспроизвести в полном масштабе на Земле. В этом смысле математика расширяет границы разума, позволяя ему выйти далеко за пределы непосредственного опыта. Но она же напоминает, что любая модель имеет предпосылки, область применимости и пределы достоверности.

Итак, математика оказывается одновременно инструментом познания и загадкой сама по себе. Мы используем её для описания Вселенной, но продолжаем спорить о природе математических объектов, основаниях истины и причинах удивительной применимости абстрактных структур к физическому миру. Возможно, математические отношения отражают фундаментальные свойства реальности. Возможно, успех математики объясняется особенностями человеческого мышления и тем, как мы отбираем модели, соответствующие наблюдениям. Возможно, верное объяснение объеди-

нит несколько этих идей. На сегодняшний день ни одна простая формула не закрывает вопрос окончательно. И это делает математику не только языком науки, но и предметом самостоятельного философского исследования.

Однако следующая загадка будет ещё более тревожной. Если математика позволяет описывать многие процессы, происходящие во Вселенной, означает ли это, что всё происходящее можно вычислить? Можно ли заранее определить будущее любой физической системы, если знать её состояние и законы, которым она подчиняется? Или в самой структуре мира существуют процессы, которые невозможно полностью предсказать никаким алгоритмом? Чтобы приблизиться к ответу, нам предстоит исследовать природу времени, случайности, вычисления и предсказания. И, возможно, выяснить, что даже там, где действуют строгие законы, возможность знать всё заранее вовсе не гарантирована.

Ведь между закономерностью и предсказуемостью существует различие, которое человечество только учится понимать.

# ГЛАВА 4 СУЩЕСТВУЕТ ЛИ БУДУЩЕЕ ДО ТОГО, КАК ОНО НАСТУПИЛО?

Представьте, что вы стоите на берегу моря и наблюдаете за волнами. Одна волна приближается к берегу, другая уже разбивается о камни, третья только начинает подниматься вдали. Вы без труда различаете прошлое, настоящее и будущее. Волна, которая разбилась о камни, уже стала частью прошлого. Та, которую вы наблюдаете прямо сейчас, принадлежит настоящему. А та, что ещё находится вдалеке, представляет собой событие, которое только должно произойти. Кажется, что здесь нет никакой загадки. Время движется вперёд, события сменяют друг друга, а будущее постепенно превращается в настоящее и затем исчезает в прошлом. Мы строим планы, вспоминаем пережитое и воспринимаем текущий момент как единственную точку, в которой действительно существуем. Но стоит задуматься о природе времени немного глубже, как привычная картина начинает терять устойчивость. Почему мы воспринимаем время именно так? Существует ли объективный момент настоящего, который отделяет уже состоявшуюся реальность от ещё не наступивших событий? Или ощущение движущегося времени связано с особенностями нашего сознания, тогда как фундаменталь-

ная физическая картина мира устроена совершенно иначе?

В повседневной жизни время кажется самым очевидным свойством существования. Мы замечаем, что дети растут, предметы изнашиваются, звёзды меняют состояние, а организмы проходят путь от рождения до смерти. Любое человеческое действие происходит в определённой последовательности. Сначала возникает намерение, затем принимается решение, после чего совершается поступок. Мы воспринимаем эту последовательность не как произвольный способ описания, а как нечто фундаментальное. Прошлое кажется завершённым, настоящее — непосредственно переживаемым, будущее — открытым. Однако современная физика показывает, что время гораздо сложнее привычного внутреннего ощущения. Оно связано с пространством, движением, гравитацией и физическими процессами. В определённых условиях часы, движущиеся относительно наблюдателя, могут отсчитывать время иначе, чем часы, находящиеся в другой системе отсчёта. Гравитационное поле также влияет на ход часов. Следовательно, универсальное время, одинаковое для всех наблюдателей во всех обстоятельствах, не соответствует современной физической картине мира.

Революция в понимании времени произошла с развитием специальной теории относительности Альберта Эйнштейна. До неё ньютоновская механика широко использовала представление об абсолютном времени, которое течёт одинаково независимо от движения наблюдателя. Эта модель чрез-

вычайно успешно описывает множество процессов в повседневных условиях, но при высоких скоростях и в более точных физических измерениях требуется другая картина. Теория относительности показала, что измерения времени и пространства зависят от движения наблюдателя, а понятия одновременности двух событий не являются универсальными для всех систем отсчёта. Два события, которые один наблюдатель считает одновременными, другой наблюдатель при определённых условиях может считать происходившими в разное время. Это не иллюзия восприятия и не недостаток измерительных приборов. Речь идёт о фундаментальном свойстве пространства-времени, подтверждённом многочисленными экспериментами.

Чтобы понять значение этого открытия, представим двух наблюдателей, находящихся в разных местах и движущихся относительно друг друга. Они пытаются установить, происходят ли два удалённых события в один и тот же момент. Каждый использует точные часы, световые сигналы и согласованные процедуры измерения. При определённых обстоятельствах результаты их измерений окажутся различными, причём оба наблюдателя будут действовать в соответствии с одной и той же физической теорией. Это означает, что Вселенная не обладает единой универсальной границей настоящего, которая одинаково разделяет прошлое и будущее для всех возможных наблюдателей. То, что кажется естественным на человеческом масштабе, оказывается не столь оче-

видным на фундаментальном уровне. Наше восприятие настоящего связано с тем, что мы живём при сравнительно небольших скоростях и в условиях, где релятивистские эффекты обычно незаметны. Но природа не обязана сохранять все особенности человеческой интуиции за пределами привычного опыта.

Из теории относительности возникла идея четырёхмерного пространства-времени, в котором события рассматриваются как элементы единой геометрической структуры. Пространство и время в этой картине не являются полностью независимыми сценами, на которых разворачивается история Вселенной. Они связаны друг с другом и образуют общую структуру, свойства которой определяют возможные отношения между событиями. В некоторых философских интерпретациях этой картины используется представление о «блочной Вселенной»: прошлые, настоящие и будущие события рассматриваются как части четырёхмерного пространства-времени, а не как элементы реальности, которые последовательно возникают и исчезают. Но здесь необходимо проявить осторожность. Геометрическое описание пространства-времени само по себе не доказывает, что будущее существует в том же смысле, что и настоящее, или что человеческая свобода является иллюзией. Блочная Вселенная — это философская интерпретация определённых аспектов физической теории, а не экспериментально установленный ответ на все вопросы о времени.

Тем не менее эта интерпретация ставит перед нами вопрос, от которого трудно отмахнуться. Если будущее является частью пространства-времени в таком же смысле, как прошлое, то что означает наше ощущение, будто оно ещё не существует? Почему мы помним вчерашний день, но не можем с такой же непосредственностью вспомнить завтрашний? Почему прошлое воспринимается как совокупность состоявшихся событий, а будущее — как множество возможностей? Возможно, различие связано с тем, как устроены память, причинность и физические процессы. Наш мозг формирует воспоминания о событиях, оставивших следы в нервной системе. Он постоянно использует накопленную информацию для прогнозирования будущего, но эти прогнозы не являются воспоминаниями о действительно пережитых событиях. Однако такое объяснение касается механизмов нашего восприятия времени, а не обязательно его окончательной физической природы. Даже если мы поймём, почему мозг различает прошлое и будущее, останется вопрос, существует ли объективное течение времени независимо от сознательного наблюдателя.

Здесь появляется одно из самых странных обстоятельств. В уравнениях многих фундаментальных физических теорий нет очевидного аналога того субъективного движения времени, которое мы ощущаем каждую секунду. Физические модели описывают состояния систем, отношения между событиями и изменения физических величин. Но само ощу-

щение настоящего, которое будто бы движется из прошлого в будущее, не всегда занимает в этих описаниях отдельное место. Это породило вопрос: является ли течение времени фундаментальным свойством реальности или оно возникает из сочетания физических процессов и особенностей сознания? Нельзя утверждать, что физика уже доказала иллюзорность времени. Из отсутствия специального механизма субъективного течения в определённых уравнениях не следует, что время не существует. Но возникает необходимость различать измеряемое физическое время и наше переживание его движения. Возможно, они связаны глубже, чем кажется. Возможно, различие между ними указывает на ограниченность привычных понятий.

Не менее важна проблема направления времени. Если посмотреть на фильм, в котором человек бросает чашку на пол и разбивает её, а затем запустить запись в обратном направлении, мы увидим, как осколки собираются вместе, поднимаются с пола и превращаются в целую чашку. Мы сразу почувствуем, что обратная последовательность событий выглядит неправдоподобно. Однако на уровне многих простых механических процессов фундаментальные уравнения допускают описание как прямого, так и обратного изменения времени. Если бы мы наблюдали движение идеализированной системы без потерь и других усложняющих факторов, математическое описание часто не выделяло бы единственное направление времени так, как это делает наша повседневная

интуиция. Почему же в реальном мире разбитые чашки не собираются сами собой, тепло не переходит самопроизвольно от холодного тела к горячему, а воспоминания не формируются о будущем?

Одно из важнейших объяснений связано с энтропией — физической величиной, которая играет центральную роль во втором начале термодинамики. В широком смысле энтропия характеризует количество микроскопических способов, которыми может быть реализовано определённое макроскопическое состояние, хотя точное определение зависит от рассматриваемой физической системы. Для изолированной системы статистически типичным является переход к состояниям с большей энтропией. Поэтому многие процессы, которые мы наблюдаем в повседневной жизни, имеют выраженное направление: тепло распространяется, газы смешиваются, а упорядоченные структуры при отсутствии соответствующих условий разрушаются. Но и здесь остаётся глубокий вопрос. Почему Вселенная в раннем состоянии обладала условиями, которые позволили сформироваться выраженной термодинамической стрелке времени? Почему мы живём в истории, в которой энтропия в целом возрастает, а не наблюдаем симметричную картину с таким же естественным движением к прошлому?

Статистическая природа энтропии помогает объяснить, почему определённые процессы происходят намного чаще других. Существует несравнимо больше микроскопиче-

ских конфигураций, соответствующих многим макроскопическим состояниям с высокой энтропией, чем конфигураций, соответствующих некоторым более упорядоченным состояниям. Поэтому переход к состояниям с большей энтропией чрезвычайно вероятен для подходящих систем. Но это объяснение не отменяет вопроса о начальных условиях Вселенной. Чтобы понять, почему наблюдаемая история обладает выраженной временной асимметрией, необходимо учитывать не только статистические свойства физических процессов, но и то, каким было раннее состояние космоса. Современная космология исследует эту проблему, однако полное объяснение низкой начальной гравитационной энтропии ранней Вселенной остаётся предметом дискуссий. Иными словами, мы достаточно хорошо понимаем многие механизмы стрелы времени, но вопрос о её глубочайшем происхождении ещё не закрыт.

Теперь вернёмся к человеческому сознанию. Мы не просто существуем в последовательности событий, но и переживаем время как непрерывный поток. Нам кажется, что настоящее обладает особым статусом: прошлое уже прошло, будущее ещё не наступило, а сейчас происходит единственный момент, который мы можем непосредственно пережить. Но это ощущение не обязательно отражает фундаментальную структуру Вселенной во всех деталях. Мозг интегрирует информацию, поступающую через органы чувств, формирует устойчивую картину окружающего мира и связывает те-

кущие ощущения с памятью и ожиданиями. Даже то, что мы называем мгновенным восприятием, предполагает обработку сигналов, происходящую во времени. Мы переживаем мир не как набор изолированных математических точек, а как относительно непрерывную последовательность событий. Возможно, субъективное настоящее представляет собой результат работы когнитивных механизмов, позволяющих организму ориентироваться в меняющейся среде.

Но если настоящее связано с работой мозга, возникает следующий вопрос: существует ли оно только для сознательных существ? До появления жизни на Земле происходили физические процессы, формировались звёзды, сталкивались галактики и возникали химические элементы. Мы описываем эту историю с помощью временных последовательностей, хотя в те эпохи не существовало человека, который мог бы непосредственно наблюдать их. Поэтому было бы неправильно заключать, что время целиком создаётся человеческим сознанием. Физические процессы обладают измеряемыми временными отношениями независимо от того, наблюдает ли их человек. Однако из этого не следует, что субъективное ощущение течения времени полностью совпадает с физическим временем. Вероятно, необходимо различать существование физических отношений между событиями и переживание этих отношений сознательным субъектом. Именно на границе между ними возникает одна из самых сложных проблем философии времени.

Представим теперь, что будущее уже существует в некотором объективном смысле. Означает ли это, что все события заранее определены и никакие наши решения ничего не меняют? Такой вывод был бы слишком поспешным. Даже если рассматривать события как элементы четырёхмерной структуры, из этого не следует автоматически, что человеческие действия лишены причинного значения. Наши решения, желания и рассуждения сами являются частью процессов, благодаря которым происходят события. Если человек изучает последствия своих поступков, меняет планы и выбирает другой путь, эти изменения не находятся вне реальности: они входят в её причинную структуру. Вопрос о свободе воли требует отдельного анализа того, что мы понимаем под свободой, ответственностью и возможностью поступить иначе. Само по себе геометрическое представление о пространстве-времени не решает этот спор.

С другой стороны, если будущее не существует в завершённом виде, что именно означает его открытость? Существуют ли многочисленные возможности, из которых позднее реализуется одна, или будущее представляет собой только область того, чего мы пока не знаем? Различие между этими вариантами принципиально. В первом случае неопределённость может быть связана с реальной множественностью возможных исходов. Во втором она может отражать ограниченность наших знаний о состоянии мира. Классическая механика во многих ситуациях позволяет точно определить бу-

дущее состояние системы, если известны её начальные условия и действующие законы. Но практическое предсказание осложняется тем, что начальные условия невозможно измерить с бесконечной точностью, а некоторые системы чрезвычайно чувствительны к малым различиям. Квантовая механика добавляет другой уровень сложности, поскольку в стандартных интерпретациях её предсказания часто имеют вероятностный характер. При этом вопрос о том, является ли квантовая неопределённость фундаментальной или отражает более глубокую структуру реальности, зависит от интерпретации теории.

Здесь важно различать непредсказуемость и отсутствие причин. Погода может быть трудной для долгосрочного прогнозирования не потому, что она не подчиняется физическим законам, а потому, что атмосферные процессы сложны, чувствительны к начальным условиям и зависят от множества взаимосвязанных факторов. Даже небольшие ошибки в измерениях способны со временем приводить к существенным расхождениям в прогнозах. Подобная чувствительность характерна для систем, изучаемых теорией хаоса. Хаос в математическом смысле не означает полного отсутствия закономерностей. Напротив, хаотическая система может подчиняться строгим уравнениям, но демонстрировать ограниченную практическую предсказуемость. Поэтому мы не должны отождествлять способность точно вычислить будущее с существованием объективного порядка. Мир может быть за-

кономерным, но его поведение не всегда доступно точному прогнозированию.

Вопрос о времени приобретает ещё большую глубину, когда мы обращаемся к космологии. Если Вселенная имеет конечный возраст в рамках стандартной модели горячего Большого взрыва, то что означает утверждение, что у времени было начало? Возможно ли говорить о событии, которое произошло до возникновения самого времени? Некоторые космологические модели предполагают, что привычное понятие времени может терять применимость в предельно ранних условиях. Другие рассматривают сценарии, в которых наша наблюдаемая космологическая история связана с более ранними фазами или с иной структурой реальности. Однако многие из этих идей остаются гипотетическими, а их проверка чрезвычайно сложна. Мы не располагаем общепринятым окончательным описанием того, что происходило на самой ранней границе применимости известных физических теорий. Поэтому утверждения о том, что человечество уже точно знает, что было «до Большого взрыва», следует рассматривать с осторожностью.

Возможно, вопрос о начале времени требует от нас отказаться от привычной картины, в которой всякое событие должно располагаться внутри бесконечной последовательности более ранних событий. Наш разум сформировался в мире, где причины обычно предшествуют последствиям, а действия происходят в определённом временном порядке. Мы

редко сталкиваемся с ситуациями, в которых сама временная структура становится предметом исследования. Поэтому нам трудно представить, что время может обладать геометрическими свойствами, изменяться под влиянием гравитации или иметь историю, отличную от привычного представления о бесконечной реке. Но трудность воображения не является доказательством невозможности. Научные теории не обязаны соответствовать повседневным образам, если они опираются на строгую математику и подтверждаются наблюдениями. Именно поэтому исследование времени требует готовности пересматривать интуицию, сохраняя при этом требовательность к доказательствам.

Есть и ещё одна сторона этой загадки. Время делает возможной историю. Без последовательности изменений не было бы эволюции звёзд, развития жизни, формирования памяти и человеческой цивилизации в привычном нам виде. Мы воспринимаем собственную жизнь как путь, в котором прошлые события влияют на настоящее, а настоящее определяет будущие возможности. Наши отношения, достижения и ошибки приобретают значение благодаря тому, что события связаны в последовательность. Но если на фундаментальном уровне время устроено не так, как мы переживаем его субъективно, возникает вопрос: в каком смысле человеческая история является реальной? Ответ не требует отрицать значение жизни или считать человеческий опыт иллюзией. Даже если наше восприятие времени зависит от

устройства мозга, переживаемые события остаются частью физической истории мира. Однако понимание связи между субъективной последовательностью и объективным пространством-временем может изменить наши представления о личности, памяти и ответственности.

Представим, что однажды физика создаст теорию, которая объединит квантовые процессы и гравитацию и позволит описывать самые ранние состояния Вселенной без противоречий, возникающих в нынешних подходах. Возможно, она объяснит, каким образом возникла привычная временная структура, почему наблюдаемая Вселенная имеет определённую историю и как связаны фундаментальные процессы с термодинамической стрелой времени. Это стало бы огромным шагом вперёд. Но даже тогда может сохраниться вопрос о том, почему мы переживаем время как движущийся поток и почему сознательное настоящее кажется нам особенным. Возможно, этот вопрос получит полноценный ответ в рамках нейронауки и физики. Возможно, окажется, что некоторые его формулировки основаны на смешении разных понятий. А возможно, он продолжит оставаться философски значимым даже после существенного научного прогресса. Сейчас мы не можем заранее определить, где именно проходит граница между этими возможностями.

Именно поэтому время является одной из величайших загадок существования. Оно кажется самым знакомым явлением, поскольку каждое событие нашей жизни связано с

ним. Но при попытке понять его природу обнаруживается множество уровней проблемы: физическое измерение времени, относительность одновременности, направление термодинамических процессов, субъективное ощущение настоящего, начало космологической истории и вопрос о будущем. Ни одно из этих направлений нельзя без остатка заменить другим. Объяснение работы часов не объясняет полностью субъективное переживание времени. Описание энтропии не решает автоматически проблему начала Вселенной. А философская интерпретация пространства-времени не может подменить собой экспериментальную физику. Чтобы приблизиться к пониманию, необходимо удерживать все эти различия и исследовать, каким образом они связаны.

Но есть вопрос, который делает проблему времени особенно тревожной. Если физические законы допускают описание процессов в рамках определённой математической структуры, если будущее в некоторых моделях можно вычислять на основании настоящего состояния, а сознание воспринимает события как последовательность, то существует ли предел предсказания? Может ли разум, обладающий достаточно полной информацией, заранее вычислить всё, что произойдёт во Вселенной? Или сама природа содержит процессы, для которых никакой универсальный метод предсказания невозможен? Этот вопрос ведёт нас от философии времени к проблеме вычислимости, хаоса и пределов математического знания. Он заставляет задуматься не только о

том, что существует, но и о том, что в принципе может быть известно.

В следующей главе мы рассмотрим идею, которая долгое время казалась естественным пределом научного идеала: если известны все законы природы и все необходимые исходные данные, будущее можно вычислить полностью. Мы увидим, почему эта идея оказалась гораздо сложнее, чем представлялось, и почему даже совершенное знание законов не обязательно означает возможность предсказать каждое событие.

Возможно, Вселенная не скрывает от нас будущее намеренно. Возможно, никаких тайн в привычном смысле у неё нет. Но вполне возможно, что между существованием закономерности и возможностью полностью её познать лежит граница, которую не так просто преодолеть.

# ГЛАВА 5 МОЖНО ЛИ ВЫЧИСЛИТЬ ВСЁ БУДУЩЕЕ?

Представьте разум, который превосходит человеческий не в несколько раз и даже не в тысячи раз, а настолько, что наши величайшие научные достижения кажутся ему простыми арифметическими упражнениями. Он знает законы физики с предельной точностью, обладает вычислительными возможностями, которые невозможно сравнить с современными компьютерами, и способен анализировать состояния огромного количества физических систем. Он наблюдает движение галактик, взаимодействие элементарных частиц, процессы в атмосферах планет и развитие живых организмов. Перед ним не существует технических ограничений, знакомых человеку. Если какая-либо задача допускает решение, он способен найти его практически мгновенно. Может ли такой разум вычислить будущее Вселенной? Сможет ли он заранее определить каждое столкновение частиц, каждое движение планеты, каждое решение человека и каждый этап развития цивилизации? Или существуют границы, которые нельзя преодолеть даже с помощью бесконечно совершенного интеллекта? Этот вопрос имеет огромное значение, потому что затрагивает саму идею научного познания. Если всё происходящее можно вычислить, то достаточно ли

нам когда-нибудь узнать законы и исходные условия, чтобы получить полное описание будущего? А если нет, то в чём именно заключается ограничение?

В классической механике долгое время существовал образ предельного познающего разума, который получил особенно известную формулировку в рассуждениях Пьера-Симона Лапласа. Представим интеллект, которому в один момент доступны все положения и скорости всех тел, а также все законы, определяющие их движение. Если такой интеллект способен выполнить необходимые расчёты без ошибок и располагает достаточными вычислительными возможностями, то прошлое и будущее могли бы стать для него столь же доступными, как настоящее. В этой картине Вселенная напоминает гигантский механизм, в котором каждое состояние однозначно связано с предыдущим, а случайность отражает лишь наше незнание. Такой подход оказал огромное влияние на научное мировоззрение. Он выражал стремление найти универсальные закономерности и показать, что природные события не являются произвольными. Однако развитие физики, математики и теории вычислений выявило ряд ограничений, которые не позволяют безоговорочно принимать этот образ в качестве окончательного описания реальности.

Прежде всего необходимо различать три вещи: детерминизм, предсказуемость и вычислимость. Детерминизм в общем смысле предполагает, что состояние системы и действу-

ющие законы определяют её последующее развитие. Предсказуемость означает возможность получить достаточно точную информацию о будущем состоянии на основании доступных данных. Вычислимость относится к существованию определённого формального метода, который способен получить требуемый результат за конечное число вычислительных шагов. Эти понятия связаны, но не совпадают. Система может подчиняться детерминированным законам, однако быть практически непредсказуемой из-за чрезвычайной чувствительности к начальным условиям. Некоторые математические задачи могут иметь однозначно определённый ответ, но не существовать универсального алгоритма, который находил бы этот ответ для всех возможных входных данных. Поэтому вопрос о том, можно ли вычислить будущее, требует более точной формулировки, чем простое утверждение о существовании законов природы.

Рассмотрим сначала практическую сторону проблемы. Чтобы предсказать состояние физической системы, необходимо знать её начальные условия. Но реальные измерения никогда не дают абсолютной точности. Любой прибор имеет ограничения, любое наблюдение сопровождается неопределённостями, а сложная система может зависеть от огромного количества взаимосвязанных параметров. Для многих процессов небольшие ошибки измерения остаются несущественными. Если мы приблизительно знаем положение обычного предмета, то можем с достаточной точностью

предсказать, где он окажется через короткий промежуток времени. Однако существуют системы, в которых небольшие различия в начальных условиях со временем приводят к большим различиям в результатах. Именно это свойство лежит в основе теории хаоса. Оно не означает, что такие системы лишены законов. Напротив, их поведение может определяться строгими математическими правилами. Проблема заключается в том, что ограниченная точность исходных данных делает долгосрочный прогноз всё менее надёжным.

Одним из наиболее известных примеров является атмосфера Земли. Погодные процессы зависят от температуры, давления, влажности, движения воздушных масс, солнечного излучения, состояния океанов и множества других факторов. Все эти элементы взаимодействуют между собой, образуя сложную динамическую систему. Современные модели позволяют делать полезные прогнозы, но точность прогноза обычно снижается по мере увеличения временного горизонта. Даже если вычислительные мощности будут значительно увеличены, остаётся проблема исходных данных: невозможно измерить абсолютно всё с бесконечной точностью. Малые ошибки могут постепенно усиливаться, и через определённое время несколько почти одинаковых исходных состояний способны привести к существенно различающимся прогнозам. Следовательно, даже при детерминированной модели долгосрочное предсказание может иметь фундаментальные практические ограничения, связанные с чувствительно-

стью системы к начальному состоянию.

Однако хаос сам по себе не доказывает, что будущее принципиально невозможно вычислить. Если мы говорим об идеализированной математической системе и предполагаем, что её исходное состояние задано точно, дальнейшее развитие может быть однозначно определено. Трудность возникает при переходе от математической идеализации к физическому измерению. В реальном мире мы не располагаем бесконечной точностью и не можем хранить в компьютере неограниченное количество информации. Поэтому необходимо различать утверждение «система чрезвычайно трудна для предсказания на практике» и утверждение «никакой алгоритм в принципе не способен получить её будущее». Первое может быть верным для многих сложных систем, не влекущих второго. Если мы хотим понять истинные пределы познания, нам необходимо исследовать не только ограничения техники, но и математические результаты, которые касаются самой возможности алгоритмического решения задач.

Здесь мы подходим к одной из величайших идей теории вычислений — проблеме остановки. В середине XX века математик Алан Тьюринг исследовал фундаментальные возможности вычислительных процедур и показал, что существует принципиальное ограничение для универсального алгоритма, который пытался бы определить, завершится ли любая произвольная программа при любом допустимом входе или будет выполняться бесконечно. На первый взгляд

это кажется узкой технической проблемой, интересной лишь специалистам по программированию. Но её значение гораздо глубже. Она показывает, что даже в строго формализованном мире алгоритмов существуют вопросы, для которых не может быть универсального решающего метода, работающего во всех случаях. Ограничение здесь не связано с недостатком скорости компьютера или нехваткой памяти в конкретной машине. Речь идёт о невозможности создать единый алгоритм, который всегда выдавал бы правильный ответ для всего класса задач.

Представим, что кто-то предлагает создать идеальную программу, способную анализировать любую другую программу и заранее определять, завершится ли её выполнение. Если такая программа существовала бы и давала правильный ответ во всех случаях, можно было бы попытаться построить специальную программу, которая намеренно вела бы себя противоположным образом в зависимости от полученного прогноза. Если анализатор предсказывает, что специальная программа остановится, она продолжает работать бесконечно. Если анализатор предсказывает, что она будет работать бесконечно, она немедленно останавливается. Возникает логическое противоречие: программа заставляет предсказание оказаться неверным независимо от того, каким оно было. Этот аргумент показывает, что универсального безошибочного решателя проблемы остановки не существует в рамках стандартной модели вычислений. Его сила

заключается не в сложности вычислений, а в самой логической структуре задачи.

Почему это имеет отношение к познанию Вселенной? Потому что современная наука во многом использует вычислительные модели. Мы описываем процессы с помощью математических уравнений, разрабатываем алгоритмы для анализа наблюдений, моделируем развитие систем и пытаемся предсказывать последствия различных условий. Если некоторые формально заданные задачи не имеют универсального алгоритмического решения, возникает вопрос, существуют ли аналогичные ограничения в моделировании сложных физических процессов. Но здесь нужно соблюдать точность. Теорема о проблеме остановки непосредственно относится к вычислительным моделям и не доказывает, что любое будущее физической Вселенной непредсказуемо. Чтобы перенести результат на конкретную физическую систему, необходимо установить, что её поведение действительно позволяет выразить соответствующую вычислительную задачу и что рассматриваемая модель применима к реальности. Это важное направление исследований, но нельзя без дополнительных доказательств превращать теорему Тьюринга в универсальный аргумент против научного познания.

И всё же проблема остановки меняет наше представление об идеальном предсказателе. Мы привыкли думать, что если алгоритм достаточно сложен, то его можно ускорить, запустить на более мощном компьютере или снабдить допол-

нительной памятью. Иногда это действительно помогает. Задача, требующая нескольких дней вычислений на обычном компьютере, может быть решена гораздо быстрее на специализированной системе. Но существуют различия между задачами, которые пока слишком трудны для нас, и задачами, для которых не существует универсального алгоритма решения. В первом случае развитие вычислительных технологий способно радикально изменить ситуацию. Во втором ограничение имеет иной характер. Оно не исчезает только потому, что компьютер становится быстрее. Таким образом, увеличение вычислительной мощности не гарантирует, что любая формально поставленная задача когда-нибудь станет решаемой.

Теперь представим, что мы располагаем не только вычислительной машиной, но и полной математической моделью Вселенной. Все фундаментальные законы известны, а начальное состояние задано с максимально возможной точностью. Можно ли вычислить каждое событие? В первую очередь необходимо спросить, допускает ли выбранная физическая теория однозначное определение будущего состояния из заданных условий. В классической механике многие задачи именно так и устроены в идеализированных условиях. Но квантовая механика требует более тонкого рассмотрения. Её стандартный формализм позволяет вычислять вероятности результатов измерений, а не всегда предсказывать отдельный результат с абсолютной определённостью. Разные ин-

терпретации квантовой теории по-разному объясняют смысл этой вероятностности. Некоторые сохраняют детерминированную картину на более глубоком уровне, другие принимают фундаментальную роль вероятностных исходов. Экспериментальные данные ограничивают допустимые интерпретации, однако вопрос о том, что именно следует считать окончательной картиной квантовой реальности, остаётся предметом дискуссий.

Даже если природа на фундаментальном уровне окажется полностью детерминированной, из этого не следует, что любой её процесс будет вычислимым эффективным способом. Для предсказания может потребоваться настолько большое количество операций, что вычисление окажется практически невозможным. В некоторых случаях объём информации, необходимый для точного описания состояния системы, может быть огромным. Кроме того, вычисление будущего физического объекта иногда требует ресурсов, сравнимых с ресурсами самой системы. Если речь идёт о моделировании огромной части Вселенной с максимальной точностью, возникает вопрос, может ли конечный вычислитель полностью воспроизвести динамику объекта, который сам обладает колоссальным количеством степеней свободы. Это не доказывает абсолютную невозможность всех форм предсказания, но показывает, что идеал всеведущего вычислителя сталкивается с ограничениями, которые не сводятся к недостаточной мощности современных устройств.

Есть ещё одна тонкость. Чтобы вычислить будущее, предсказатель должен каким-то образом получить информацию о текущем состоянии мира. Но если наблюдатель является частью самой Вселенной, его измерения не происходят за пределами реальности. Он использует физические приборы, хранит информацию в материальных носителях и выполняет вычисления в рамках тех же законов, которые пытается исследовать. Поэтому идея абсолютного внешнего наблюдателя, способного мгновенно охватить все детали Вселенной, может быть не физической моделью, а абстрактным мысленным экспериментом. В реальном мире любой исследователь ограничен доступом к данным, временем, энергией и возможностями измерения. Он не может просто занять позицию вне Вселенной, если сама Вселенная понимается как совокупность всей физической реальности. Но мысленные эксперименты сохраняют ценность, поскольку помогают определить, какие ограничения связаны с техникой, а какие — с логикой, математикой или физическими законами.

Особенно интересен вопрос о том, может ли разум предсказать собственное поведение. Представим, что система обладает полным описанием человеческого мозга, знает текущее состояние организма и умеет моделировать все процессы, влияющие на решения человека. Если она способна точно вычислить, какое решение будет принято, сможет ли она сообщить этот результат самому человеку? А если человек узнает прогноз, изменится ли его поведение? Например, си-

стема сообщает: «Через десять минут ты выберешь вариант А». Человек, желая опровергнуть предсказание, намеренно выбирает вариант Б. Тогда возникает вопрос, учитывал ли прогноз сам факт своего сообщения и реакцию человека на него. Если не учитывал, он оказался неполным. Если учитывал, возникает более сложная проблема: может ли человек узнать результат, не изменив условий, на основании которых он был вычислен? Это не универсальное доказательство невозможности самопредсказания, но важный пример того, как включение предсказания в предсказываемую систему усложняет задачу.

Подобные трудности известны в логике, теории игр, кибернетике и исследованиях рефлексивных систем. Прогноз способен влиять на поведение объекта, если объект узнаёт прогноз и реагирует на него. Экономический прогноз, опубликованный заранее, может изменить решения участников рынка. Предсказание поведения человека способно повлиять на его выбор. Предупреждение о возможной аварии может заставить систему изменить режим работы и предотвратить событие, которое без предупреждения действительно произошло бы. Поэтому некоторые предсказания должны учитывать не только состояние мира, но и собственное распространение в этом мире. Чем сложнее система и чем больше её элементы способны реагировать на информацию, тем труднее отделить описание будущего от вмешательства в условия его наступления.

Но не следует думать, что подобные трудности уничтожают возможность научного прогноза. Наоборот, современная наука постоянно использует предсказания, которые оказываются достаточно точными для практических задач. Мы прогнозируем движение планет, рассчитываем траектории космических аппаратов, оцениваем распространение инфекций, моделируем климатические изменения и предсказываем свойства материалов. Успехи этих направлений показывают, что ограниченность полного предсказания не равнозначна беспомощности. Нам не обязательно знать каждую деталь будущего, чтобы получать надёжные знания о вероятных исходах и управлять многими процессами. Важно лишь понимать, на каком уровне работает прогноз, какие предпосылки он использует и насколько устойчивы его результаты к изменению исходных данных.

Возможно, наиболее радикальная мысль заключается в том, что некоторые ограничения знания могут быть не временными недостатками цивилизации, а следствием самой структуры задач, которые мы пытаемся решать. Теоремы о неполноте показывают, что определённые формальные системы имеют ограничения в отношении доказуемости. Проблема остановки демонстрирует невозможность универсального алгоритмического решения для всех программ. Теория хаоса объясняет, почему даже детерминированные системы могут быть практически непредсказуемыми. Квантовая механика требует осторожного отношения к идее классическо-

го предсказания всех индивидуальных событий. Эти результаты относятся к разным областям и не образуют единой теории абсолютного незнания. Но вместе они заставляют отказаться от упрощённого представления, будто достаточно увеличить интеллект и вычислительную мощность, чтобы любое неизвестное стало известным.

При этом было бы ошибкой утверждать, что человечество уже доказало существование универсальной границы, за которой невозможно никакое дальнейшее познание. Каждая из рассмотренных проблем имеет собственные условия применимости. Теоремы о неполноте не означают, что любая математическая задача неразрешима. Проблема остановки не доказывает, что нельзя предсказать ни одну программу. Хаос не делает бессмысленными краткосрочные прогнозы. Квантовая механика не исключает точных предсказаний многих измеряемых величин. Серьёзный анализ требует различать конкретные ограничения и широкие философские выводы. Но именно эта точность позволяет увидеть действительную глубину проблемы. Пределы познания не обязательно проявляются как одна гигантская стена. Возможно, они образуют сложную систему границ, каждая из которых возникает по своей причине.

Представим теперь цивилизацию, которая опережает человечество на миллионы лет научного развития. Она умеет использовать энергию звёзд, строит вычислительные системы невиданного масштаба, исследует структуру простран-

ства-времени и обладает теориями, о которых мы пока не можем даже помыслить. Будет ли её знание абсолютным? Возможно, она решит множество задач, которые сегодня кажутся нам неразрешимыми. Но если определённые математические ограничения применимы к её формальным системам, а физические ограничения действуют независимо от уровня технологического развития, то и эта цивилизация может столкнуться с вопросами, не решаемыми универсальным методом. Разумеется, мы не можем уверенно переносить каждый результат современной теории вычислений на любую мыслимую цивилизацию. Однако сама возможность такого ограничения заслуживает внимания. Интеллектуальное превосходство не обязательно означает выход за пределы логических и физических условий существования.

В этом месте возникает парадокс, который будет сопровождать нас в дальнейших главах. Чем более совершенным становится разум, тем больше задач он способен решать. Но развитие знания одновременно позволяет ему обнаруживать классы задач, которые нельзя решить теми средствами, которыми он располагает. Он учится отличать неизвестное от принципиально невычислимого, сложное от алгоритмически неразрешимого, вероятностное от детерминированного и практическую неопределённость от логического ограничения. Это не означает, что разум неизбежно приходит к отчаянию. Напротив, точное понимание границ делает исследование эффективнее. Оно позволяет не тратить бесконечные

ресурсы на попытки найти универсальный метод там, где доказано, что такого метода не существует, и направлять усилия на задачи, для которых решения действительно возможны.

И всё же остаётся вопрос: если мы не можем вычислить всё будущее, означает ли это, что будущее содержит нечто принципиально непознаваемое? Возможно, да, но ответ зависит от того, что мы подразумеваем под непознаваемостью. Одно дело — невозможность заранее определить единичный исход, другое — невозможность вычислить его универсальным алгоритмом, третье — невозможность получить точный прогноз из-за ограничений измерения. Эти ситуации не тождественны. Некоторые процессы можно описывать статистически, даже если невозможно точно предсказать каждое отдельное событие. Некоторые задачи не имеют универсального алгоритмического решения, но отдельные случаи могут решаться. Некоторые физические системы невозможно предсказывать на длительном горизонте с высокой точностью, однако их общее поведение остаётся доступным исследованию. Поэтому понятие предела знания должно быть многослойным, а не сводиться к простому утверждению о том, что человечество никогда ничего не узнает окончательно.

Возможно, однажды мы научимся гораздо точнее понимать связь между физическими законами, вычислительными процессами и наблюдаемой реальностью. Мы сможем опре-

делить, какие аспекты Вселенной допускают эффективное моделирование, какие требуют вероятностных описаний и какие задачи сталкиваются с формальными ограничениями. Но даже это достижение не обязательно позволит предсказать каждое событие. Оно может дать нам более точную карту границ предсказуемости. И такая карта сама по себе будет огромным интеллектуальным достижением. Ведь знание о том, что можно вычислить, не менее важно, чем знание конкретного результата вычисления. Оно определяет, где имеет смысл искать решение, какие методы использовать и какие обещания следует считать нереалистичными.

Мы начали эту главу с образа идеального разума, способного вычислить будущее Вселенной. Теперь становится ясно, что сама идея такого предсказателя требует множества оговорок. Нужно знать, какие законы действуют, каким образом задаётся состояние системы, существует ли подходящий алгоритм, какие физические ресурсы необходимы для вычислений и как система реагирует на собственные прогнозы. В некоторых случаях точное предсказание возможно. В других оно практически недостижимо. В третьих математическая теория устанавливает ограничения для универсального алгоритма. А в квантовой физике вопрос о статусе индивидуальных исходов зависит от интерпретации теории и характера измерений. Нельзя объединить всё это в одно простое доказательство того, что будущее полностью известно или полностью непознаваемо. Но можно сделать более важ-

ный вывод: закономерность мира не гарантирует абсолютной предсказуемости.

И здесь возникает новая загадка. Если Вселенная допускает процессы, которые трудно предсказать, а некоторые математические задачи не имеют универсального алгоритмического решения, как нам вообще удаётся получать знания о природе? Почему научный метод работает настолько хорошо, что позволяет создавать технологии, предсказывать затмения, исследовать атомы и отправлять аппараты к далёким планетам? Возможно, наш успех связан с тем, что многие интересующие нас процессы обладают устойчивыми закономерностями и допускают приближённое описание. Возможно, природа предоставляет достаточно регулярности для развития науки, но не гарантирует абсолютной доступности каждого своего аспекта. Мы не знаем, является ли это случайным обстоятельством или глубокой особенностью мира. Однако следующий шаг нашего исследования приведёт нас к ещё одному фундаментальному вопросу: почему сама Вселенная допускает возникновение наблюдателей, способных изучать её законы?

Это возвращает нас к началу книги. Мы спрашивали, почему существует нечто, а не ничто. Затем пытались понять, почему часть существующей реальности обладает сознанием. После этого исследовали удивительную применимость математики и пределы вычисления будущего. Теперь перед нами постепенно вырисовывается общая проблема:

мир существует, обладает закономерностями и в определённой степени доступен познанию, но это не означает, что вся его структура автоматически прозрачна для любого разума. Возможно, между реальностью и знанием о ней существует принципиальное различие. Возможно, часть ограничений связана с нашим биологическим устройством, часть — с доступом к информации, а часть — с логическими и физическими условиями самой задачи познания.

Но если познание имеет пределы, то, где именно они проходят? Как отличить временное незнание от принципиальной невозможности получить ответ? Можно ли доказать, что некоторый вопрос не имеет решения, не располагая при этом полным знанием о реальности? И не возникает ли здесь парадокс: чтобы понять, что нам недоступно, мы должны обладать достаточным знанием о том, что находится за пределами наших возможностей? Эта проблема приведёт нас к следующей главе, посвящённой одной из самых глубоких идей современной логики и философии математики. Мы рассмотрим, почему даже строгая система доказательств может оказаться неспособной установить все истины, которые в определённом смысле относятся к её собственной области.

Возможно, самое трудное открытие разума заключается не в том, что он не способен знать всё. Самое трудное — установить, какие именно формы незнания неизбежны, а какие существуют лишь потому, что мы пока не нашли правильный путь к ответу.

# ГЛАВА 6. МОЖЕТ ЛИ МАТЕМАТИКА ДОКАЗАТЬ ВСЁ?

Представим себе библиотеку, в которой собраны все книги мира. Не только написанные, но и те, которые когда-либо будут написаны. В этой библиотеке находятся описания каждой звезды, каждого атома, каждого возможного движения планет, каждой мысли, которую способен породить человеческий мозг. Здесь можно найти ответы на вопросы о происхождении Вселенной, природе сознания, устройстве материи и судьбе человечества. Однако у этой библиотеки есть одна особенность: каждая книга должна быть доказана. Ни одно утверждение не может попасть на её полки только потому, что оно кажется правдоподобным, согласуется с опытом или принято большинством учёных. Каждая мысль обязана предъявить безупречное логическое обоснование.

Но что произойдёт, если однажды исследователь найдёт утверждение, которое истинно, однако внутри правил этой библиотеки его невозможно доказать? А что, если подобных утверждений окажется не одно и не тысяча, а бесконечно много? И что, если самое удивительное заключается не в том, что человек пока не знает доказательства, а в том, что определённые доказательства принципиально недостижимы для системы, в которой он работает?

На первый взгляд подобная ситуация кажется противоречием. Мы привыкли считать математику образцом абсолютной точности. В отличие от истории, где свидетельства могут быть неполными, или биологии, где результаты эксперимента зависят от множества факторов, математика словно располагает особым правом на окончательную истину. Если доказательство построено правильно, оно не зависит от национальности исследователя, исторической эпохи, политических обстоятельств или человеческих предпочтений. Теорема, доказанная две тысячи лет назад, не перестаёт быть верной только потому, что изменились представления общества. Математическая истина обладает удивительной устойчивостью.

Именно поэтому вопрос о границах математического доказательства настолько тревожен. Если даже дисциплина, созданная для достижения максимальной строгости, сталкивается с принципиальными ограничениями, то что это говорит о возможностях человеческого разума? Неужели существуют истины, которые невозможно доказать определёнными средствами, хотя они не являются ложными? Может ли логическая система обнаружить пределы собственных возможностей? И если да, то не означает ли это, что мечта о завершённом, полностью обоснованном знании изначально содержала в себе неразрешимое противоречие?

Чтобы понять масштаб проблемы, необходимо вернуться к одной из самых амбициозных интеллектуальных про-

грамм в истории науки. На рубеже девятнадцатого и двадцатого веков математики стремились не просто открывать новые теоремы. Они хотели создать фундамент, который позволил бы систематически устанавливать истинность математических утверждений, устранив любые сомнения относительно надёжности самого метода доказательства. Речь шла о превращении математики в строго организованную систему, в которой каждое утверждение либо уже доказано, либо может быть доказано по установленным правилам, а противоречия исключены на уровне оснований.

Это была не просто техническая задача. За ней скрывалось представление о разуме как о силе, способной построить собственное совершенное здание. Если правильно определить исходные положения, установить правила логического вывода и последовательно применять их, то можно будет получить всю совокупность математических истин, по крайней мере в принципе. Человеку останется лишь выполнять работу, иногда невероятно сложную, но всегда подчинённую заранее определённым правилам.

Такое представление обладало огромной привлекательностью. Оно обещало, что математическое знание может быть не только надёжным, но и завершённым в особом смысле: для каждого строго сформулированного вопроса будет существовать процедура, позволяющая установить ответ. Если утверждение истинно, система должна суметь его доказать. Если оно ложно, система должна суметь доказать его отрица-

ние. А если система сама претендует на безупречность, необходимо найти способ обосновать, что её правила никогда не приведут к противоречию.

В этом проекте проявилась одна из глубочайших человеческих надежд: разум стремился не просто познавать мир, но и устранить неопределённость из самого процесса познания. Казалось, что достаточно тщательно исследовать основания мышления, чтобы однажды получить интеллектуальный инструмент, не имеющий внутренних слабостей. Однако именно попытка достичь такой завершённости привела к открытию, которое изменило философию математики и заставило по-новому взглянуть на отношения между истиной, доказательством и познающим субъектом.

В 1931 году австрийский математик Курт Гёдель опубликовал результаты, известные как теоремы о неполноте. Их значение трудно переоценить. Гёдель показал, что определённые ограничения возникают не из-за недостатка человеческих вычислительных ресурсов, не из-за слабости конкретной математической школы и не из-за того, что исследователи ещё не нашли достаточно изобретательный метод. Ограничения связаны с самой структурой формальных систем, если эти системы обладают достаточно богатым языком, чтобы описывать элементарную арифметику, и при этом их правила можно эффективно задать.

Первую теорему о неполноте можно передать простыми словами следующим образом: для всякой непротиворечи-

вой формальной системы определённого класса, способной выразить достаточно значительную часть арифметики, существуют утверждения, которые система не может доказать или опровергнуть своими собственными средствами. При соблюдении дополнительных условий такие системы оказываются неполными: они не способны установить статус каждого математического утверждения, которое допускает их язык.

Здесь необходимо остановиться и внимательно разобраться в формулировке. Гёдель не доказал, что математика бессмысленна. Он не показал, что доказательствам нельзя доверять. Он не утверждал, что любое сложное утверждение принципиально недоказуемо. Напротив, его результат стал возможен благодаря исключительной строгости математического мышления. Он показал не беспомощность доказательства, а границу определённого типа доказательных систем.

Формальная система состоит из исходных утверждений, называемых аксиомами, языка, на котором формулируются утверждения, и правил, по которым из уже принятых положений выводятся новые. Аксиомы в таком контексте выполняют роль отправных точек. Они не доказываются внутри самой системы, а принимаются в качестве основания рассуждений. Правила вывода определяют, какие заключения допустимо получать из имеющихся посылок.

Представим шахматную партию. Правила шахмат определяют, какие ходы разрешены, какие позиции возможны и что

считается победой. Игрок может совершить блестящий ход или ошибиться, но он не может объявить коня ладьёй, не изменив саму игру. Аналогичным образом формальная система устанавливает границы допустимых доказательных действий. Утверждение считается доказанным в ней не потому, что оно выглядит убедительно, а потому, что существует последовательность разрешённых шагов, ведущая от аксиом к этому утверждению.

Разумеется, математические системы гораздо сложнее шахмат. Они могут содержать бесконечно много возможных доказательств, а сами их утверждения способны описывать чрезвычайно сложные структуры. Но аналогия помогает увидеть важное различие: существование истины и возможность получить её по правилам конкретной игры — не одно и то же. Можно задать вопрос, который имеет определённый смысл, но не разрешается имеющимися средствами. В математике подобное различие приобретает принципиальное значение.

Самое поразительное в подходе Гёделя заключалось в том, что он сумел заставить арифметику говорить о самой себе. Обычно математические утверждения посвящены числам, отношениям, последовательностям и структурам. Но Гёдель разработал способ кодировать выражения и доказательства числами. Благодаря этому высказывания о математических формулах можно было представить средствами арифметики. Рассуждения о доказательствах превращались в рассуж-

дения о числах, а свойства формальной системы становились предметом математического анализа внутри достаточно богатого языка самой системы.

На этом этапе возникает идея, которая кажется почти фантастической. Представим себе утверждение, смысл которого приблизительно сводится к следующему: «Это утверждение не имеет доказательства в данной системе». В обычной речи подобная фраза вызывает подозрение. Если она истинна, то, возможно, мы только что её доказали, а значит, она ложна. Если она ложна, то, возможно, её можно доказать, но тогда она утверждает, что доказательства не существует. Возникает знакомая структура самореференции — высказывание обращается к собственному статусу.

Однако конструкция Гёделя была гораздо точнее бытового парадокса. Он не просто записал фразу на естественном языке. Он математически построил выражение, которое кодирует утверждение о невозможности его доказательства в рассматриваемой формальной системе. При определённых условиях, если система непротиворечива, она не может доказать это выражение. В классической логике, при соблюдении необходимых предпосылок, подобное построение позволяет получить утверждение, которое система не способна разрешить своими средствами.

Важно понять, что здесь происходит. Система располагает правилами вывода, способна строить доказательства и исследовать числа. Но когда она сталкивается с определён-

ным утверждением о собственных доказательных возможностях, её возможностей оказывается недостаточно для завершения задачи. Она не может просто применить ещё одно правило, которое автоматически решило бы проблему. Если бы такое универсальное правило уже содержалось в системе и действительно разрешало соответствующее утверждение, это противоречило бы самому результату конструкции.

В этом заключается глубокая особенность неполноты: ограничение обнаруживается не снаружи, благодаря случайному вмешательству наблюдателя, а через математический анализ того, что система способна выразить и доказать. Система оказывается достаточно мощной, чтобы описать некоторые особенности собственного поведения, но недостаточно мощной, чтобы полностью контролировать все истины, возникающие в этом описании.

Для человека, привыкшего представлять математику как бесконечно расширяемый, но в конечном счёте полностью упорядоченный мир, этот результат может показаться неприятным. Возникает ощущение, будто мы обнаружили трещину в фундаменте здания, которое всегда считалось символом безупречной надёжности. Но это ощущение требует уточнения. Трещина появляется не в математике как таковой, а в надежде получить одновременно всеобъемлющую, эффективно заданную, непротиворечивую систему, которая способна выразить достаточно богатую арифметику и разрешить каждое соответствующее утверждение.

Иными словами, проблема заключается не в том, что математика перестаёт работать, а в том, что она не может быть завершена именно тем способом, который предполагала определённая программа формализации. Можно продолжать открывать теоремы, создавать новые теории, уточнять определения и разрабатывать более сильные системы аксиом. Неполнота не останавливает математическое исследование. Она меняет наше понимание того, чего от него можно ожидать.

Но здесь возникает вопрос, который значительно глубже первоначальной формулировки: если утверждение не доказуемо в системе, означает ли это, что оно истинно?

Ответ требует осторожности. Невозможность доказательства сама по себе не делает утверждение истинным. Существует множество недоказуемых в конкретной системе утверждений, которые могут быть ложными, а может существовать и ситуация, в которой система не способна установить ни истинность утверждения, ни его ложность. Неполнота не является универсальным механизмом превращения любой недоказуемой фразы в истину.

В случае гёделевских конструкций вопрос об истинности зависит от того, какую систему мы рассматриваем, какие предпосылки принимаем и как интерпретируем утверждения этой системы. Для стандартной арифметической интерпретации и при соответствующих условиях гёделевское утверждение можно понимать как истинное утверждение о

том, что оно не имеет доказательства внутри системы. Но это заключение опирается на рассуждение о системе с определённой внешней точки зрения. Оно не означает, что любое недоказуемое утверждение автоматически истинно во всех возможных интерпретациях.

Здесь впервые отчётливо проявляется различие между внутренним и внешним взглядом на математическую систему. Изнутри мы располагаем аксиомами и правилами, которыми разрешено пользоваться. Снаружи мы можем исследовать саму систему, рассматривать её свойства и доказывать утверждения о том, что она способна или не способна вывести. То, что недоступно одному уровню описания, иногда становится доступным на другом.

Но внешний взгляд тоже не является последней инстанцией. Как только мы начинаем обосновывать свойства системы извне, возникает вопрос о надёжности средств, которыми пользуемся для такого обоснования. Если мы применяем более сильную математическую теорию, можем ли мы быть уверены в ней? Если мы используем новые аксиомы, на чём основана уверенность в их непротиворечивости? Если мы доказываем надёжность одних правил с помощью других, почему именно эти другие правила заслуживают доверия?

Так появляется своеобразная лестница оснований. Одна система позволяет рассматривать другую, более ограниченную. Более сильная теория может доказывать некоторые свойства более слабой. Однако из этого не следует, что вся

лестница обязательно заканчивается в точке, где больше не требуется никаких обоснований. Возможно, мы можем построить чрезвычайно надёжную и мощную систему, но вопрос о том, почему мы доверяем именно ей, способен породить новое исследование.

Это не означает, что математическое знание лишено оснований. Напротив, оно располагает чрезвычайно строгими методами проверки. Но надёжность доказательства и способность одной формальной системы полностью обосновать все собственные основания — разные задачи. Первая может достигаться в огромном количестве конкретных случаев. Вторая сталкивается с ограничениями, которые невозможно устранить простым увеличением числа страниц в учебнике или количеством работающих математиков.

Вторая теорема Гёделя о неполноте усиливает эту проблему. При стандартных предпосылках для достаточно сильной, эффективно заданной и непротиворечивой формальной системы, способной выразить арифметику, существует ограничение на возможность доказать внутри неё собственную непротиворечивость. Грубо говоря, система не может, используя только свои собственные средства и соответствующий способ формализации, предъявить доказательство того, что она никогда не приведёт к противоречию.

Почему это важно? Потому что непротиворечивость является одним из главных требований к математическому основанию. Если из аксиом можно вывести одновременно

некоторое утверждение и его отрицание, система теряет способность надёжно различать допустимые выводы. В классической логике противоречивая система позволяет вывести любое утверждение, что делает её непригодной в качестве надёжного основания для обычного математического рассуждения.

Математики, разумеется, не обязаны отказываться от системы только потому, что она не доказывает собственную непротиворечивость. Можно исследовать её извне. Можно искать относительные доказательства непротиворечивости, показывающие, что если одна теория непротиворечива, то непротиворечива и другая. Можно строить модели, сравнивать аксиоматические системы и анализировать их последствия. Такие методы составляют важную часть математической логики.

Однако ни один из этих подходов не превращает вторую теорему в несуществующую проблему. Если для обоснования одной системы мы обращаемся к другой, вопрос о надёжности второй системы может остаться открытым в рамках принятого основания. Мы не обязательно попадаем в бесконечный регресс в практическом смысле, но обнаруживаем, что требование абсолютного самообоснования не выполняется так легко, как могло казаться.

Здесь необходимо различать два желания. Первое — иметь математические теории, которым можно обоснованно доверять. Второе — иметь единственную систему, кото-

рая самостоятельно и окончательно доказывает надёжность всех своих методов и разрешает все выражаемые в ней вопросы. Первое желание является нормальной целью математической практики. Второе сталкивается с принципиальными ограничениями.

Гёдель не лишил математику фундамента. Он показал, что фундамент нельзя отождествлять с мечтой о замкнутой системе, способной без остатка доказать собственную безупречность. Это различие имеет огромное значение для понимания науки. Надёжное знание не обязано быть знанием, которое само содержит окончательное доказательство всех условий своей надёжности. В противном случае требование к обоснованию может оказаться строже, чем возможности самой формальной структуры, которую мы пытаемся обосновать.

Но почему же неполнота вообще возникает? Почему нельзя просто добавить ещё одну аксиому, затем ещё одну, затем ещё тысячу, пока все вопросы не получат ответы?

В некоторых случаях именно так и поступают. Если система не разрешает определённое утверждение, математики могут добавить его или его отрицание в качестве новой аксиомы. Полученная система будет сильнее прежней: она сможет доказать то, что раньше оставалось недоказуемым. Однако такой шаг не обязательно решает все проблемы. Если новая система сохраняет достаточную выразительную силу, к ней применимы соответствующие результаты о неполноте.

В ней также появятся утверждения, статус которых не удастся разрешить её собственными средствами при выполнении необходимых условий.

Это похоже на расширение карты. Допустим, путешественник обнаружил, что его карта не описывает некоторую область. Он может добавить новые сведения, уточнить границы, нанести дороги и населённые пункты. Карта станет лучше. Но если мы потребуем, чтобы она содержала полное и окончательное описание всего мира, включая каждую деталь, каждое изменение и все свойства самой карты, задача приобретёт совершенно иной масштаб.

Математическая система не является географической картой, и аналогия не должна подменять доказательство. Однако она помогает увидеть принцип: расширение описания способно устранить конкретный пробел, но не гарантирует окончательного устранения всех возможных пробелов. Более мощная система получает новые возможности, однако вместе с ними возникают и новые вопросы, которые можно сформулировать именно благодаря расширению её языка.

В этом смысле неполнота напоминает горизонт, который отступает по мере продвижения исследователя. Человек поднимается на вершину и видит дальше, чем прежде. Он строит более совершенные инструменты и расширяет доступную область. Но новый обзор открывает и новые границы, которые раньше были скрыты. Разумеется, математическая неполнота не тождественна физическому горизонту, а эта

метафора не доказывает существования бесконечного числа неразрешимых вопросов любого типа. Она лишь выражает общую структуру ситуации: увеличение возможностей не всегда ведёт к окончательному завершению исследования.

Особенно важно, что результаты Гёделя не следует понимать как доказательство существования особого мистического знания, принципиально недоступного математике. Недоказуемость всегда рассматривается относительно определённой системы, её языка, аксиом и правил. Утверждение, недоказуемое в одной системе, может быть доказано в другой. Если мы меняем исходные предпосылки, то меняется и пространство доступных доказательств.

Поэтому правильный вопрос звучит не так: «Какие истины навсегда запрещены математике?» Он звучит иначе: «Какие утверждения не могут быть разрешены средствами данной системы и что требуется для их разрешения в более широком контексте?» Эта формулировка менее драматична, но гораздо точнее. Она сохраняет подлинную глубину открытия, не превращая его в необоснованное утверждение о мистических пределах человеческого познания.

И всё же за математической точностью скрывается философская проблема. Если истинность и доказуемость не совпадают, то каким образом мы вообще узнаём, что некоторое недоказуемое в данной системе утверждение истинно? Не пользуемся ли мы при этом интуицией, которую сами же пытались заменить строгими правилами? Не возникает ли

противоречие между стремлением формализовать разум и фактом, что рассуждение о границах формализации иногда требует взгляда за пределы рассматриваемой системы?

Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо понять, что слово «истина» имеет несколько связанных, но не тождественных смыслов. В формальной системе утверждение может быть доказуемым, если существует допустимая последовательность выводов, ведущая к нему из аксиом. Истинным оно может называться относительно определённой математической структуры или интерпретации, в которой оценивается его содержание. Доказуемость является свойством отношения между утверждением, аксиомами и правилами вывода. Истинность зависит от того, что именно утверждение говорит и в какой интерпретации мы его рассматриваем.

В классической математике эти понятия часто тесно связаны. Мы выбираем аксиомы, стремимся к их обоснованности и ожидаем, что доказанные теоремы будут истинны в предполагаемой интерпретации. Однако связь между доказуемостью и истинностью не означает, что одно понятие можно без остатка заменить другим. Теорема Гёделя демонстрирует, что при определённых условиях невозможно добиться полного совпадения этих понятий в рамках одной эффективно заданной формальной системы.

Здесь полезно представить себе два вопроса. Первый: «Верно ли данное утверждение?» Второй: «Существует ли доказательство этого утверждения, построенное по прави-

лам выбранной системы?» Эти вопросы похожи, но отвечают на разные стороны проблемы. В первом случае мы спрашиваем о математическом содержании. Во втором — о возможностях конкретного доказательного аппарата.

В повседневной жизни различие между ними не всегда заметно. Если теорема давно доказана, никто не обязан каждый раз заново устанавливать её истинность. Если доказательство проверено и принято математическим сообществом, мы обычно считаем вопрос решённым. Но когда исследователь изучает саму структуру формальных систем, различие становится центральным. Можно исследовать не только отдельные математические объекты, но и границы методов, которыми эти объекты изучаются.

Это напоминает ситуацию в физике, когда необходимо отличать свойства самого объекта от ограничений измерительного прибора. Прибор может не позволять получить определённые сведения, хотя это ещё не доказывает, что у объекта нет соответствующего свойства. Но и здесь аналогия имеет границы: математическая недоказуемость не является просто техническим шумом или недостаточной точностью инструмента. Она может быть установлена строгим математическим доказательством и относиться к самой структуре выбранной системы.

Именно поэтому открытие Гёделя имеет особую интеллектуальную силу. Оно не предлагает отказаться от разума в пользу догадок. Оно показывает, что разум способен матема-

тически исследовать ограничения собственных формальных методов. Мы не просто сталкиваемся с неизвестным. Мы можем доказать, что определённый способ организации знания не обеспечивает полноту, которой от него требовали.

В этом заключена неожиданная форма интеллектуального успеха. Открытие предела не обязательно является поражением. Если мы обнаруживаем, что метод не может решить некоторый класс задач, мы получаем важное знание о самом методе. Мы понимаем, где его возможности заканчиваются, какие условия необходимы для его применения и почему дальнейшее расширение требует изменения оснований или перехода к иной системе.

Но можно ли считать такой внешний анализ окончательным? Допустим, математик рассматривает формальную систему и доказывает, что в ней существует недоказуемое утверждение. Он использует более широкое рассуждение, чтобы установить ограничение исходной системы. Не означает ли это, что он уже вышел за пределы первоначальных правил и получил преимущество перед системой, которую исследует?

В определённом смысле — да. Внешняя теория может располагать средствами, которых нет у исследуемой системы. Однако из этого не следует, что человеческий разум вообще превосходит любую формальную систему или способен всегда обнаруживать истину, недоступную машинам и алгоритмам. Такой вывод был бы слишком сильным. Мы мо-

жем изучать одну систему средствами другой, но сама возможность перехода не доказывает существования единого человеческого механизма, который безошибочно преодолевает все формальные ограничения.

Человек способен ошибаться, принимать ложные предпосылки и неверно оценивать математические доказательства. Интуиция может помогать открывать новые направления исследования, но не гарантирует истины. Если математик рассуждает о гёделевском утверждении, он должен опираться на точные предпосылки и корректные логические шаги. Его преимущество состоит не в мистической способности видеть абсолютную истину, а в возможности менять уровень анализа и использовать различные методы доказательства.

Вопрос становится ещё сложнее, когда мы переносим его на искусственный интеллект. Если достаточно мощная система не может доказать все истины, выражаемые в её собственном формальном языке, означает ли это, что человеческое мышление принципиально превосходит вычислительные системы? Нет, по крайней мере, непосредственно из теорем Гёделя такого заключения не следует. Математические ограничения формальных систем нельзя автоматически превращать в доказательство превосходства человеческого сознания над искусственным интеллектом.

Человек тоже использует формальные методы, опирается на ограниченные ресурсы памяти и внимания, допускает ошибки и не способен одновременно удерживать в со-

знании все возможные математические доказательства. Если мы формализуем конкретную процедуру человеческого рассуждения, к ней могут применяться вопросы, сходные с теми, которые возникают при анализе вычислительных систем. Если же мы утверждаем, что человеческий разум обладает способностью выходить за пределы любой формализации, нам необходимо отдельно доказать, что такая способность действительно существует и действует надёжно.

Иногда можно услышать рассуждение: человек понимает истинность гёделевского утверждения, которое машина не способна доказать, следовательно, человек обладает принципиально более высоким типом интеллекта. Но здесь скрывается несколько недоказанных переходов. Во-первых, необходимо установить, что именно понимает человек и на каких предпосылках основано его заключение. Во-вторых, нужно определить, какая конкретно машина и какая система аксиом рассматриваются. В-третьих, следует доказать, что искусственный интеллект не может использовать другую систему, добавить новые аксиомы или исследовать исходную систему извне.

Без этих уточнений аргумент превращается в философскую декларацию. Теоремы Гёделя действительно имеют отношение к обсуждению вычислимости, формального мышления и возможностей искусственного интеллекта, но они не дают простого ответа на вопрос о природе сознания. Они показывают определённые пределы формальных систем, а не

устанавливают готовую иерархию всех возможных интеллектов.

Впрочем, проблема от этого не становится менее интересной. Напротив, она приобретает новый масштаб. Если мы создаём искусственный интеллект, способный самостоятельно формулировать математические гипотезы, проверять доказательства и строить новые теории, то можем ли мы заранее определить полный перечень истин, которые он никогда не сможет установить? Или каждый раз, когда мы определяем его ограничения, мы одновременно открываем пространство для создания более мощной системы?

Ответ зависит от того, насколько точно определена сама задача. Для конкретного формального аппарата можно исследовать ограничения. Для достаточно сильных формальных систем существуют строгие результаты о неполноте. Для произвольного интеллекта, описание которого не сведено к фиксированной системе аксиом или конкретному алгоритму, вопрос становится гораздо сложнее. Нельзя просто перенести математическую теорему на любое вообразимое устройство мышления, не уточнив, что именно мы называем системой и какие свойства ей приписываем.

Однако существует ещё одна сторона проблемы, которая часто остаётся в тени. Неполнота показывает, что невозможно получить всё математическое знание посредством одной системы определённого типа. Но что именно мы понимаем под «всем знанием»? Должны ли мы включать в него

каждое истинное утверждение, которое можно сформулировать? Каждую теорему, каждое описание всех чисел, каждую характеристику всех возможных структур? Или речь идёт только о тех утверждениях, которые относятся к некоторой конкретной области?

Чем шире мы понимаем знание, тем сложнее становится задача его полного охвата. В реальной математике нет единого списка всех возможных вопросов, который можно было бы однажды исчерпывающе закрыть. Новые понятия позволяют формулировать новые утверждения. Новые теории выявляют отношения, которые раньше не имели ясного выражения. Иногда открытие нового математического языка меняет само представление о том, какие вопросы заслуживают постановки.

При этом неполнота не означает, что любое развитие автоматически создаёт совершенно новую бесконечность загадок, превосходящую предыдущую. Подобные формулировки звучат эффектно, но требуют осторожности. Строгий результат Гёделя относится к системам с определёнными характеристиками. Его значение заключается именно в точности условий, а не в универсальной метафоре бесконечного незнания.

Тем не менее для философии науки из этого следует важный вывод. Мы должны различать завершённость отдельного исследования и завершённость всей системы знания. Конкретная математическая задача может быть решена оконча-

тельно. Теория может обладать высокой степенью строгости и объяснять огромный класс явлений. Целая область математики может иметь тщательно разработанные основания. Но из успеха отдельных исследований не следует, что существует единая конечная процедура, способная разрешить все утверждения достаточно богатого математического языка.

Этот вывод разрушает одну из самых устойчивых интеллектуальных иллюзий: будто неизвестное всегда является временным результатом недостаточного развития. Иногда мы действительно не знаем ответа, потому что ещё не нашли подходящего метода. История науки полна подобных случаев. Но в других ситуациях проблема может заключаться в ограничениях самой постановки, в свойствах выбранной системы или в невозможности получить требуемый результат определёнными средствами.

Различить эти ситуации чрезвычайно трудно. Пока доказательство не найдено, мы не всегда знаем, имеем ли дело с чрезвычайно сложной задачей или с утверждением, которое невозможно разрешить внутри данной системы. Для этого иногда требуется глубокий анализ не только самого вопроса, но и средств, которыми мы пытаемся на него ответить. Математическая логика ценна именно тем, что превращает часть таких вопросов в предмет строгого исследования.

И здесь возникает парадокс, который касается не только математики. Чтобы узнать границы метода, необходимо исследовать его возможности. Но исследование границ то-

же осуществляется некоторым методом, который сам имеет собственные условия применимости. Мы можем уточнять эти условия, строить новые уровни анализа и получать всё более глубокие результаты. Однако требование, чтобы последний уровень окончательно обосновал абсолютно все возможные уровни, нельзя считать автоматически выполнимым.

Не следует делать из этого вывод, будто мы обречены на бесконечное сомнение и не способны ни в чём быть уверенными. Подобный вывод был бы столь же поспешным, как и вера в абсолютно завершённую систему знания. Между абсолютной самодостаточностью и полным скептицизмом существует огромное пространство рационального исследования. Мы можем иметь веские основания для принятия теорий, проверять доказательства, обнаруживать ошибки, сравнивать альтернативные системы и постепенно улучшать наши представления.

Математика не становится менее надёжной из-за того, что не всякая система способна доказать все выражаемые в ней истины. Скорее, мы начинаем точнее понимать природу её надёжности. Доказательство остаётся одним из самых сильных инструментов рационального познания, но его сила проявляется в рамках определённых правил и предпосылок. Если мы хотим выйти за пределы этих рамок, нам необходимо ясно обозначить, какие новые основания мы принимаем и что именно можем с их помощью установить.

Именно поэтому теоремы Гёделя следует рассматривать не как конец математики, а как одно из её наиболее глубоких достижений. Математика смогла исследовать собственные методы, формализовать понятие доказательства и обнаружить ограничения определённых способов организации знания. Она не просто столкнулась с неизвестным, а сумела доказать существование границ для конкретной интеллектуальной конструкции.

Возможно, в этом и заключается один из важнейших признаков зрелого разума: способность не только пользоваться инструментом, но и изучать условия, при которых инструмент перестаёт быть достаточным. Незрелое мышление склонно считать, что любой вопрос обязан иметь ответ, а отсутствие ответа свидетельствует лишь о недостатке усилий. Более внимательное мышление допускает, что некоторые вопросы требуют иной системы понятий, иных предпосылок или пересмотра самого требования, предъявляемого к знанию.

Но если математика не может гарантировать полноту определённой формальной системы, то существует ли вообще универсальный алгоритм, который для любого математического утверждения определял бы, доказуемо оно или нет? Можно ли создать машину, которой достаточно передать условие задачи, чтобы она всегда возвращала правильный ответ: существует доказательство или не существует? Или даже такая процедура, казалось бы, вполне техниче-

ская и точная, сталкивается с собственными непреодолимыми ограничениями?

Этот вопрос приводит нас к другой великой проблеме математической логики — проблеме разрешимости. Здесь речь уже не только о том, что конкретная система может не доказать определённое утверждение. Речь идёт о возможности существования общего алгоритма, который способен решить целый класс вопросов независимо от того, насколько сложными окажутся отдельные случаи.

Представим, что мы располагаем бесконечным временем, невероятно быстрым компьютером и совершенной памятью. Может ли такая машина решить любую математическую задачу, если мы дадим ей достаточно точное описание? Или существуют вопросы, для которых проблема заключается не в скорости вычислений, не в объёме памяти и не в недостатке времени, а в отсутствии универсального алгоритма, способного гарантированно выдать правильный ответ для всех возможных входных данных?

В следующей главе мы приблизимся к одной из самых удивительных границ вычислимости. Мы рассмотрим задачи, для которых невозможно создать универсальную процедуру решения в том смысле, который допускает строгая математическая формализация. И тогда станет ясно: ограничения разума связаны не только с тем, сколько он способен узнать, но и с тем, какие вопросы вообще могут быть разрешены посредством алгоритма.

# ГЛАВА 7. СУЩЕСТВУЮТ ЛИ ВОПРОСЫ, НА КОТОРЫЕ НЕЛЬЗЯ ОТВЕТИТЬ АЛГОРИТМИЧЕСКИ?

Представим себе машину, которой поручили решить любую математическую задачу. Она не устаёт, не отвлекается, не испытывает страха перед сложностью и не теряет уверенности после тысяч неудачных попыток. Её память практически безгранична, а скорость вычислений настолько велика, что человеческое воображение с трудом способно представить масштаб её возможностей. Мы загружаем в неё задачу, нажимаем кнопку и ждём. Если ответ существует, машина должна его найти. Если решения нет, она обязана сообщить об этом. Никаких догадок, никаких вероятностных оценок, никаких приблизительных заключений. Только окончательный, безошибочный результат.

Подобная машина кажется естественным продолжением математического разума. Если человек способен сформулировать задачу, значит, можно попытаться поручить её решение устройству, которое превосходит человека по скорости вычислений, объёму памяти и способности перебирать варианты. Если существующие компьютеры слишком медлен-

ны, мы создадим более мощные. Если обычные алгоритмы работают недостаточно эффективно, разработаем новые. Если задача требует миллиардов операций, мы увеличим производительность. На первый взгляд всё сводится к техническому прогрессу.

Но здесь скрывается вопрос, способный изменить само понимание вычислений. Возможно ли, что существуют задачи, которые нельзя решить не потому, что компьютер недостаточно быстр, а потому, что универсального алгоритма для них вообще не существует? Не задачи, требующие тысячи лет вычислений, а задачи, для которых невозможно создать процедуру, гарантированно выдающую правильный ответ во всех допустимых случаях.

Различие между этими ситуациями принципиально. Если задача требует триллиона операций, то более быстрый компьютер может сократить время решения. Если же задача неразрешима алгоритмически, увеличение скорости не поможет. Можно построить машину в миллион раз мощнее современной, снабдить её огромной памятью и предоставить ей любые мыслимые технические преимущества. Но если требуемая универсальная процедура математически невозможна, никакое ускорение вычислений не превратит её в существующий алгоритм.

Чтобы почувствовать масштаб проблемы, необходимо отказаться от привычного представления, будто любой точно сформулированный вопрос обязательно допускает механи-

ческое решение. В повседневной жизни мы постоянно сталкиваемся с задачами, для которых можно придумать последовательность действий. Чтобы сложить два числа, достаточно применить арифметическое правило. Чтобы отсортировать список, можно использовать соответствующий алгоритм. Чтобы проверить, делится ли одно целое число на другое без остатка, существует точная процедура. Сложность подобных операций может различаться, но сама возможность их выполнения не вызывает сомнений.

Однако из существования алгоритмов для огромного количества задач не следует, что алгоритмически разрешимы все задачи, которые человек способен сформулировать. Мы склонны переносить успешный опыт из знакомых областей на весь мир математических вопросов. Если сегодня компьютер решает задачи, которые ещё недавно казались недоступными, возникает соблазн предположить, что завтра он сможет решить любую задачу. Но такой вывод не учитывает принципиальную разницу между сложностью и неразрешимостью.

Сложность означает, что решение существует в рамках определённого метода, но его получение может требовать значительных ресурсов. Неразрешимость означает, что не существует алгоритма требуемого типа, который правильно решал бы все случаи рассматриваемой задачи. Это утверждение относится не к скорости конкретной машины, а к возможности существования самого универсального метода.

История открытия подобных ограничений тесно связана с развитием математической логики в первой половине двадцатого века. Математики стремились установить, можно ли построить общий метод, который позволял бы автоматически решать математические вопросы. В идеале исследователь должен был бы перевести задачу на строгий язык, передать её механической процедуре и получить однозначный ответ. Такой подход обещал превратить значительную часть математического исследования в систематическое вычисление.

Но для того чтобы выяснить, существует ли универсальный метод, необходимо было прежде всего определить, что именно считается алгоритмом. Без такого определения вопрос оставался бы расплывчатым. Можно было бы постоянно предлагать новые способы решения, но невозможно было бы строго доказать, что ни один из них не сработает.

В 1930-х годах сразу несколько исследователей заложили основы математического понимания вычислений. Среди них особое место занимают Алан Тьюринг и Алонзо Чёрч. Их работы позволили строго исследовать, какие задачи могут быть решены посредством эффективных процедур. Тьюринг предложил абстрактную модель вычислительного устройства, которая впоследствии получила название машины Тьюринга. Это не было описанием конкретного компьютера, собранного из металла и электронных компонентов. Речь шла о математической модели, позволяющей исследо-

вать саму логику вычисления.

Машина Тьюринга обладает простым набором возможностей. Она может читать символы, изменять их, перемещаться по условной ленте и выполнять действия согласно конечному набору правил. В этой модели нет ничего похожего на человеческое сознание, воображение или интуицию. Но именно благодаря своей простоте она оказалась чрезвычайно мощным инструментом для исследования вычислимости.

Смысл модели состоит не в том, чтобы воспроизвести физическую конструкцию современного компьютера, а в том, чтобы выделить основные принципы механического вычисления. Если задача может быть решена алгоритмом в соответствующем формальном смысле, её можно представить как процесс, выполняемый подходящей машиной Тьюринга. Современные языки программирования, процессоры и операционные системы устроены намного сложнее, но в отношении вычислимости они не приобретают магической способности решать задачи, которые недоступны любой машине такого универсального типа.

Разумеется, физические компьютеры имеют ограничения, связанные с энергопотреблением, памятью, временем, надёжностью компонентов и законами природы. Абстрактная машина Тьюринга не учитывает эти инженерные трудности. Она позволяет исследовать более фундаментальный вопрос: существует ли процедура решения в принципе, если отвлечься от конкретных технических ограничений.

Именно здесь появляется одна из самых удивительных идей математической логики: иногда можно доказать, что универсального алгоритма не существует. Для этого не требуется проверить все возможные программы. Не нужно перебирать каждый вариант вычисления и убеждаться в его неудаче. Достаточно построить строгий аргумент, показывающий, что любой предполагаемый универсальный решатель привёл бы к противоречию.

В этом заключается интеллектуальная сила теории вычислимости. Она позволяет не только создавать алгоритмы, но и устанавливать невозможность их существования для определённых задач. Мы можем знать не только то, что некоторый метод работает, но и то, что никакой метод заданного типа не способен гарантированно решить поставленную проблему.

Одним из центральных примеров является проблема остановки. Её формулировка выглядит почти обманчиво простой. Представим, что у нас есть компьютерная программа и определённые входные данные. Будет ли программа когда-нибудь выполнена до конца, или она продолжит работать бесконечно?

В обычных случаях ответ получить нетрудно. Если программа состоит из нескольких простых команд, можно проследить последовательность действий. Если в ней есть цикл, можно изучить условие его завершения. Если программа написана аккуратно и её поведение достаточно понятно, разработчик часто способен заранее установить, завершится ли

выполнение.

Однако произвольные программы могут обладать чрезвычайно сложным поведением. Они способны создавать новые данные, запускать другие вычисления, многократно изменять внутреннее состояние и использовать результаты предыдущих операций для выбора последующих действий. Иногда программа завершается быстро. Иногда выполняется миллионы шагов. Иногда попадает в бесконечный цикл. А иногда её дальнейшее поведение зависит от вычислений, настолько сложных, что определить результат обычным анализом практически невозможно.

Возникает естественная идея: давайте создадим отдельную программу, которая будет анализировать любые другие программы. Мы передадим ей исходный код и входные данные, а она сообщит, завершится ли выполнение. Если завершится, ответ будет положительным. Если никогда не завершится, ответ будет отрицательным. Такая система могла бы стать универсальным инструментом проверки программного обеспечения.

На первый взгляд задача кажется вполне достижимой. Ведь компьютерная программа является конечным описанием. Её текст состоит из ограниченного количества символов. Раз она имеет конечную структуру, можно предположить, что анализатор сумеет изучить все возможные варианты её поведения. Но конечность описания не означает, что все последствия этого описания можно определить универсальным

механическим способом.

Алан Тьюринг доказал, что универсального алгоритма, который для любой программы и любых входных данных всегда правильно определял бы, остановится ли программа или будет работать бесконечно, не существует. Это не означает, что невозможно анализировать программы вообще. Многие конкретные случаи разрешимы, а многочисленные методы статического анализа, проверки свойств и доказательства корректности действительно позволяют обнаруживать ошибки и устанавливать важные характеристики программ. Невозможность относится к универсальному решателю проблемы остановки для всех допустимых случаев.

Чтобы понять, почему такой результат возможен, представим, что универсальный анализатор всё-таки существует. Назовём его предсказателем. Ему можно передать любую программу и данные, после чего он гарантированно определит, завершится ли выполнение.

Теперь представим программу, которая умеет обращаться к этому предсказателю. Она передаёт ему собственное описание и спрашивает, остановится ли она сама. Если предсказатель сообщает, что программа завершится, она специально входит в бесконечный цикл. Если предсказатель сообщает, что программа не завершится, она немедленно заканчивает работу.

Получается странная конструкция. Если предсказатель утверждает, что программа остановится, программа делает

так, чтобы не остановиться. Если предсказатель утверждает, что программа не остановится, она завершает выполнение. Какой бы ответ ни дал предсказатель, он окажется неправильным.

Конечно, это описание упрощает технические детали формального доказательства. В строгой версии необходимо точно определить представление программ, входных данных и процедуру самоприменения. Но основная идея передана верно: предположение о существовании безошибочного универсального решателя приводит к построению случая, в котором он неизбежно ошибается.

Следовательно, первоначальное предположение неверно. Универсального алгоритма, решающего проблему остановки для всех программ и всех входных данных, не существует.

Обратите внимание на особенность этого доказательства. Мы не утверждаем, что предсказатель слишком медленный. Мы не говорим, что ему потребуется миллиард лет. Мы не предполагаем, что у него недостаточно оперативной памяти или что процессор не справится с объёмом операций. Мы доказываем, что требуемая процедура невозможна в принципе в рамках принятого понятия алгоритма.

Это совершенно иной тип ограничения. Если бы мы столкнулись с задачей, для которой не хватает вычислительных ресурсов, можно было бы попытаться построить более мощное устройство. Но в случае проблемы остановки увеличение скорости не устраняет противоречие. Оно возникает

из самой идеи универсального предсказателя, который должен безошибочно отвечать на все вопросы соответствующего класса.

Теперь возникает следующий вопрос: какое отношение всё это имеет к человеческому познанию? Неужели теорема о программах может что-то сказать о природе разума, о способности предсказывать будущее или о границах научного знания?

Прежде всего она показывает, что точное описание задачи ещё не гарантирует существования универсального способа её решения. Мы можем сформулировать вопрос совершенно однозначно, определить все допустимые входные данные и строго установить, какой ответ считается правильным. Но даже после этого может оказаться, что общего алгоритма для получения ответа не существует.

Это важный урок для науки. Мы часто представляем неизвестное как задачу, которая ждёт своего решения. В таком представлении ответ уже словно находится где-то впереди, а исследователю нужно лишь подобрать подходящий инструмент. Однако проблема остановки показывает, что некоторые вопросы требуют более осторожной постановки. Важно выяснять не только то, можем ли мы получить ответ на конкретном примере, но и существует ли универсальная процедура, которая гарантирует ответ во всех случаях.

Разумеется, из проблемы остановки нельзя заключить, что все сложные вопросы науки неразрешимы. Нельзя утвер-

ждать, что невозможно предсказывать поведение физических систем, оценивать последствия решений или анализировать работу искусственного интеллекта. Теорема касается строго определённого математического класса задач. Её философское значение состоит не в том, что она запрещает прогнозирование вообще, а в том, что она опровергает надежду на универсальную алгоритмическую процедуру для определённого типа вопросов.

В повседневной жизни мы успешно предсказываем множество событий. Мы рассчитываем движение планет на определённые промежутки времени, оцениваем траектории объектов, строим инженерные конструкции и создаём системы управления. Научные прогнозы могут быть исключительно точными, если исследуемая область допускает подходящие модели и необходимые исходные данные доступны.

Но успешность таких прогнозов не означает, что существует единый алгоритм, способный заранее определить все возможные последствия любой программы или любого вычислительного процесса. Возможность решать большое количество конкретных задач не равнозначна возможности решить все задачи соответствующего класса.

Именно здесь человеческий разум сталкивается с соблазном универсализации. Мы обнаруживаем мощный метод и начинаем рассматривать его как потенциальный ключ ко всему. Когда математический анализ позволил описывать движение планет, возникло ощущение, что механические за-

коны способны объяснить мир гораздо шире, чем предполагалось раньше. Когда компьютеры научились выполнять сложнейшие вычисления, появилась надежда автоматизировать практически любое интеллектуальное действие. Когда искусственный интеллект продемонстрировал способность решать задачи, которые прежде считались исключительно человеческими, возник вопрос, не является ли всякое мышление в конечном счёте вычислением.

Эти направления исследований чрезвычайно плодотворны. Но ни одно из них не освобождает нас от обязанности различать успех конкретного метода и доказательство его универсальности. Проблема остановки показывает, что даже в математике, где задача может быть сформулирована абсолютно точно, универсальный алгоритмический ответ иногда невозможен.

Однако здесь есть тонкость. Если универсальный алгоритм не существует, означает ли это, что человек не способен определить результат в отдельном случае? Нет. Неразрешимость проблемы остановки не означает, что мы не можем установить остановку конкретной программы. Во множестве случаев ответ очевиден или доказывается достаточно простым анализом. Существуют также программы, для которых можно построить сложные математические доказательства завершения или бесконечного выполнения.

Невозможность универсального решения означает, что нельзя создать одну эффективную процедуру, которая га-

рантированно разрешает все случаи. Для некоторых программ мы найдём ответ. Для других можем не суметь его установить доступными методами. В отдельных ситуациях мы можем доказать, что конкретная программа завершится, хотя универсальный алгоритм для всех программ недостижим.

Это различие чрезвычайно важно, поскольку иначе понятие неразрешимости легко превратить в чрезмерное утверждение о невозможности знания вообще. Теория вычислимости не говорит, что мы не можем знать ничего определённого о поведении программ. Она говорит, что не существует единого алгоритмического метода, который решал бы каждый возможный случай поставленной задачи.

Теперь перенесём проблему на более широкую область. Представим себе искусственный интеллект, который анализирует собственные программы, проверяет их поведение и пытается предсказать, какие результаты получит в будущем. Если его работа основана на вычислениях, то некоторые задачи, связанные с анализом произвольных программ, не могут быть решены универсальным алгоритмом. Это ограничение относится не только к слабым системам. Оно не исчезает автоматически с увеличением вычислительной мощности.

Но было бы ошибкой заключать, что искусственный интеллект не способен анализировать себя. Системы могут проверять определённые свойства собственного кода, исследовать ограниченные классы программ и использовать дока-

зательные методы для проверки конкретных действий. Ограничение возникает тогда, когда от них требуют универсального решения проблемы остановки для произвольных программ и произвольных входных данных.

Более того, человеческий разум не получает автоматического освобождения от этого ограничения. Человек может изучать программы, придумывать доказательства и замечать закономерности, которые не были очевидны машине. Но если мы пытаемся создать эффективную универсальную процедуру, которая для любого возможного вычислительного процесса гарантированно определяет его остановку, мы возвращаемся к математической проблеме, доказанной Тьюрингом.

Человеческая интуиция может помогать находить решения там, где формальный поиск неэффективен. Но интуиция не является доказательством существования универсального метода. Чтобы утверждать, что люди способны решать все случаи проблемы остановки, необходимо было бы предъявить надёжный способ, который действительно работает во всех случаях. Теорема Тьюринга показывает невозможность такого алгоритма в принятом формальном смысле.

Можно, конечно, предположить, что человек способен действовать неалгоритмически. Этот вопрос обсуждается в философии сознания и теоретических исследованиях интеллекта. Однако само предположение не решает проблему. Нужно объяснить, что означает неалгоритмическое дей-

ствие, как оно устроено и каким образом гарантирует правильность ответа. Если такой механизм не описан и его надёжность не доказана, он остаётся гипотезой, а не установленным превосходством человеческого мышления.

В этом отношении проблема остановки напоминает теоремы Гёделя, рассмотренные в предыдущей главе. Обе области показывают ограничения определённых формальных методов, но эти ограничения не следует смешивать. Неполнота касается доказуемости утверждений в достаточно сильных формальных системах при определённых условиях. Проблема остановки касается отсутствия универсального алгоритма, который решал бы вопрос о завершении произвольных программ. Эти результаты связаны общей тематикой математической логики и вычислимости, но отвечают на разные вопросы.

Если неполнота заставляет нас различать математическую истину и доказуемость в конкретной системе, то проблема остановки заставляет различать существование ответа для отдельного случая и существование универсальной процедуры получения ответов. В обоих случаях оказывается, что кажущаяся естественной идея всеобщего решения сталкивается с точными математическими препятствиями.

И здесь мы подходим к одному из главных вопросов всей книги. Что значит знать пределы разума? Достаточно ли перечислить задачи, которые мы пока не умеем решать? Или настоящее понимание начинается тогда, когда мы можем до-

казать, что определённый способ решения не способен охватить все возможные случаи?

Между этими двумя уровнями существует принципиальная разница. Когда мы говорим «мы пока не умеем», мы оставляем открытой возможность того, что новый метод решит задачу. Когда мы доказываем неразрешимость в определённом формальном смысле, мы получаем более сильный результат: никакая процедура заданного типа не сможет гарантированно справиться со всеми случаями. Мы не просто фиксируем недостаток знаний, а устанавливаем границу конкретного класса методов.

Но даже доказанная граница не обязательно является границей всего познания. Неразрешимая задача может стать разрешимой после изменения условий, ограничения класса входных данных или перехода к иной постановке. Иногда вместо точного ответа можно получить полезную оценку. Иногда можно определить результат для большинства практически важных случаев, не решая все теоретически возможные варианты. Иногда исследователь меняет сам вопрос и получает новый, более продуктивный способ описания проблемы.

Поэтому зрелая наука не требует от каждого метода универсальности. Она стремится понимать область его применимости, условия надёжности и характер ограничений. Хороший метод не обязан отвечать на все мыслимые вопросы. Он должен точно отвечать на те вопросы, для которых пред-

назначен, и позволять исследователю понимать, где заканчивается обоснованность его результатов.

Проблема остановки также заставляет пересмотреть значение слова «предсказание». Мы нередко думаем о предсказании как о простом чтении будущего. Будто бы все события уже содержатся в текущем состоянии системы, а наблюдателю остаётся лишь извлечь их из скрытого описания. Но вычислительные процессы показывают, что даже если правила работы системы полностью заданы, не всегда существует универсальная процедура, которая определит её дальнейшее поведение для любого возможного случая.

Это не доказывает, что будущее физической Вселенной в целом невычислимо. Для такого утверждения потребовались бы отдельные аргументы о законах природы, начальных условиях и математическом описании физических процессов. Однако результаты теории вычислимости дают нам основание быть осторожнее с обещаниями универсального предсказания. Между знанием правил и возможностью эффективно определить все их последствия может существовать глубокий разрыв.

Можно знать исходный код программы, но не иметь универсального алгоритма, который решает, остановится ли она. Можно знать правила игры, но не иметь простого способа заранее определить все свойства каждой возможной партии. Можно полностью понимать формальное описание процесса на уровне его базовых операций, но сталкиваться с во-

просами о его итоговом поведении, для которых общего решения не существует.

Эти примеры не означают, что результат вычисления не определён. В конкретном случае программа либо остановится, либо не остановится. Но определённость результата и наличие универсального способа заранее установить его — разные свойства. В этом различии заключается одна из наиболее важных идей теории вычислимости.

Представим, что человечество создало компьютер, превосходящий все нынешние системы. Он способен анализировать колоссальные объёмы данных, строить научные теории, проектировать новые материалы и самостоятельно совершенствовать программное обеспечение. Он может решать задачи, на которые у исследователей ушли бы тысячи лет. Однако из этого не следует, что он сможет решить любую математически сформулированную проблему.

Возможно, такой компьютер окажется чрезвычайно эффективным в огромном числе практически значимых областей. Он сможет проверять сложные программы, находить ошибки, доказывать теоремы и предлагать новые гипотезы. Но если мы потребуем от него универсального решения проблемы остановки для всех программ, мы предъявим требование, которое невозможно выполнить средствами обычного алгоритмического вычисления.

Это не уменьшает значения будущих интеллектуальных систем. Напротив, оно позволяет точнее сформулировать,

чего от них можно ожидать. Искусственный интеллект может стать невероятно мощным исследовательским инструментом, не превращаясь в универсального решателя всех математических вопросов. Его возможности будут зависеть не только от мощности оборудования, но и от структуры задач, доступных методов и природы требуемых гарантий.

Возможно, именно здесь скрывается важный урок для будущего человечества. Мы привыкли измерять интеллект способностью решать всё более сложные задачи. Но иногда интеллектуальный прогресс заключается не в том, чтобы решить задачу, а в том, чтобы понять, почему первоначальное требование невозможно выполнить в универсальном виде. Такой вывод может сэкономить огромные ресурсы, направить исследование в другую сторону и помочь избежать ложных обещаний.

Тьюринг не просто показал, что некоторые программы трудно анализировать. Он доказал, что универсальный алгоритм решения проблемы остановки невозможен. Тем самым он провёл различие между задачей, для которой пока не найдено эффективного метода, и задачей, для которой метод требуемого типа не может существовать вообще.

Но если универсальный алгоритм не способен решить все случаи проблемы остановки, можем ли мы хотя бы создать алгоритм, который решает большинство случаев? Можно ли построить системы, которые гарантированно справляются со всеми практически важными задачами, оставляя в сто-

роне редкие математические исключения? В инженерии и программировании подобный подход широко применяется. Но возникает более глубокий вопрос: как определить, какие случаи важны, и можно ли математически установить границы между разрешимыми и неразрешимыми классами?

Ответ требует отдельного исследования. Существуют классы программ, для которых проблема остановки разрешима. Существуют ограниченные языки программирования, где поведение программ можно анализировать с гарантией завершения. Существуют формальные методы, которые позволяют доказать корректность конкретных алгоритмов. Но чем шире мы делаем класс допустимых программ, тем сложнее становится задача универсального анализа. Невозможность общего решения не запрещает создавать эффективные специализированные инструменты.

Здесь мы снова встречаемся с идеей, которая проходит через всю книгу: границы знания зависят от структуры поставленного вопроса. Иногда достаточно уточнить условия, чтобы задача стала разрешимой. Иногда расширение условий превращает разрешимую задачу в неразрешимую. Иногда переход к более мощному языку позволяет выразить новые свойства, но одновременно делает универсальный анализ невозможным.

Разум не существует в пустоте. Он работает с определёнными понятиями, правилами, моделями и представлениями. То, что мы можем узнать, во многом зависит от того,

каким образом сформулирован вопрос и какие средства доступны для получения ответа. Поэтому исследование границ интеллекта неизбежно становится исследованием границ самих методов описания и вычисления.

Однако на этом история не заканчивается. Проблема остановки показывает, что не существует универсального алгоритма для определённого класса вопросов. Но она ещё не раскрывает всей сложности вычислительного мира. Даже там, где алгоритм существует, решение может требовать настолько огромного количества ресурсов, что практически оказывается недостижимым. И наоборот, задача может быть формально разрешимой, но настолько трудной, что ни один доступный компьютер не справится с ней в разумное время.

Получается, что перед нами существуют по меньшей мере две разные границы. Первая — принципиальная: универсального алгоритма не существует. Вторая — практическая: алгоритм существует, но необходимые вычисления могут превышать доступные ресурсы. Если смешивать эти границы, мы рискуем либо объявлять невозможным то, что лишь трудно, либо обещать решить то, для чего не существует универсального метода.

В следующей главе мы рассмотрим эту разницу подробнее. Нас ждёт мир вычислительной сложности, где вопрос будет звучать иначе: даже если решение существует и алгоритм можно построить, сколько ресурсов потребуется для его получения? Почему одни задачи решаются за доли се-

кунды, а другие становятся практически недостижимыми даже для мощнейших вычислительных систем? И может ли разрыв между возможностью решения и реальной доступностью решения стать ещё одним пределом, определяющим будущее науки и искусственного интеллекта?

# ГЛАВА 8. КОГДА ВЫЧИСЛЕНИЕ СТАНОВИТСЯ НЕВОЗМОЖНО ТРУДНЫМ

Представим, что человечество получило в своё распоряжение компьютер, который в тысячу раз быстрее всех существующих вычислительных систем вместе взятых. Он способен обрабатывать огромные массивы информации, моделировать сложные физические процессы и выполнять за секунды расчёты, на которые прежде требовались месяцы. Исследователи уверены: теперь многие проблемы, десятилетиями остававшиеся нерешёнными, наконец будут преодолены. Мы увеличили мощность, расширили память, усовершенствовали алгоритмы. Казалось бы, что ещё может помешать прогрессу?

Однако учёные запускают программу для решения одной из сложных комбинаторных задач и получают неожиданный результат. Компьютер не выдаёт ответ через секунду, минуту или день. Он продолжает работать, потребляя ресурсы, но завершение вычислений отодвигается на сроки, которые трудно представить. Исследователи заменяют процессор более мощным, оптимизируют код, применяют параллельные вычисления. Время сокращается, но задача всё равно остаётся практически недоступной.

Самое неприятное заключается в том, что алгоритм существует. Математики знают процедуру, которая гарантированно найдёт решение. Никто не доказал, что задача неразрешима. В отличие от проблемы остановки, здесь не требуется невозможный универсальный предсказатель. Программа в принципе может завершить работу и вернуть правильный ответ. Но цена этого ответа оказывается настолько высокой, что его получение теряет практический смысл.

Так мы сталкиваемся с одной из важнейших проблем современной теоретической информатики: вычислительной сложностью. Она изучает не только то, можно ли решить задачу алгоритмически, но и то, какие ресурсы необходимы для её решения. В первую очередь исследователей интересует время вычисления и объём памяти, хотя существуют и другие виды ресурсов, важные для специальных классов задач.

На первый взгляд может показаться, что сложность — всего лишь вопрос производительности. Если компьютер медленный, нужно построить быстрый. Если программа неэффективна, необходимо улучшить алгоритм. Если задача требует слишком много операций, можно распределить работу между тысячами процессоров. Все эти решения действительно способны иметь огромное значение. Но теория вычислительной сложности исследует ситуации, когда рост требований настолько стремителен, что простое увеличение мощности не устраняет основную проблему.

Представим задачу, для решения которой достаточно проверить тысячу вариантов. Даже обычный компьютер может выполнить такую работу быстро. Теперь предположим, что число вариантов растёт в зависимости от размера входных данных. Если увеличение входа вдвое приводит к увеличению количества операций в четыре раза, задача может оставаться вполне доступной. Если число операций растёт примерно пропорционально размеру входа, ситуация ещё проще. Но если каждый новый элемент заставляет число вариантов удваиваться, рост становится совершенно иным.

Пусть у нас есть задача, в которой необходимо проверить все возможные комбинации некоторого набора элементов. Для одного элемента вариантов мало. Для двух их больше. Для трёх больше ещё. Но если каждый дополнительный элемент удваивает число возможных комбинаций, то увеличение входных данных всего на несколько десятков единиц способно привести к колоссальному росту количества вариантов.

Это экспоненциальный рост. Его особенность состоит в том, что сложность увеличивается не просто на фиксированную величину при добавлении очередного элемента. Она растёт кратно, и каждый следующий шаг усиливает уже накопленный эффект. Поэтому задача, которая кажется простой на маленьких примерах, может стать практически невыполнимой при сравнительно небольшом увеличении размера входных данных.

Рассмотрим условный пример. Допустим, программа должна проверить все подмножества набора из двадцати элементов. Количество возможных подмножеств составляет немногим более миллиона, что для современного компьютера может быть вполне посильным. Если увеличить набор до сорока элементов, число подмножеств превысит триллион. А если довести его до шестидесяти элементов, количество вариантов окажется настолько огромным, что полный перебор станет чрезвычайно затратным даже для мощных вычислительных систем.

Здесь важен не конкретный пример и не точное время работы программы, которое зависит от оборудования и реализации. Важно другое: увеличение размера задачи всего в несколько раз способно увеличить пространство поиска на многие порядки. Компьютер не обязательно становится медленнее в обычном смысле. Он просто вынужден обрабатывать настолько больше вариантов, что прежние преимущества теряют значение.

Вычислительная сложность позволяет описывать подобные явления независимо от конкретной модели компьютера. Вместо того чтобы говорить, сколько секунд потребовалось определённому процессору, исследователи изучают, как меняется количество необходимых операций при увеличении размера входных данных. Это даёт возможность сравнивать алгоритмы и оценивать их поведение на больших задачах.

Конечно, подобная оценка не всегда предсказывает фак-

тическое время выполнения. На практике имеют значение архитектура компьютера, качество программирования, доступная память, структура данных, параллелизм и множество других обстоятельств. Но асимптотический анализ помогает понять общий характер роста вычислительных затрат. Он отвечает на вопрос, как ведёт себя алгоритм, когда задача становится значительно больше.

Особое значение имеет различие между полиномиальным и экспоненциальным ростом. Если время работы алгоритма ограничено некоторой степенью размера входных данных, его часто относят к полиномиальному классу по времени. Если же время растёт экспоненциально, вычислительная цена может быстро стать неприемлемой. Это не означает, что любой полиномиальный алгоритм практически быстр, а любой экспоненциальный обязательно бесполезен. Полином с очень высокой степенью тоже способен потребовать колоссальных ресурсов, а некоторые экспоненциальные алгоритмы эффективно работают на небольших входах. Но различие между этими типами роста имеет фундаментальное значение для понимания масштабируемости вычислений.

Проблема становится особенно интересной, когда мы рассматриваем задачи, для которых решение можно проверить значительно быстрее, чем найти. Представим сложную головоломку. Найти правильный ответ трудно: приходится исследовать огромное количество возможных комбинаций. Но если кто-то уже сообщил решение, проверка может занять

всего несколько минут. Достаточно подставить предложенный вариант и убедиться, что все условия выполнены.

Подобное различие возникает во многих областях. Иногда поиск ответа требует огромной работы, а проверка готового результата оказывается сравнительно простой. Например, если предложен маршрут, удовлетворяющий определённым ограничениям, можно проверить его длину и убедиться, что он проходит через нужные пункты. Но найти маршрут, оптимальный среди огромного числа возможных вариантов, может быть гораздо труднее.

Это наблюдение привело к появлению одного из центральных понятий теории вычислительной сложности — класса NP. В упрощённом объяснении он включает задачи, для которых предложенное решение можно проверить за полиномиальное время. Здесь важно не перепутать проверку с поиском. Принадлежность задачи к NP не означает, что её невозможно решить быстро, и не означает, что любое её решение обязательно трудно найти. Она указывает на особый способ оценки сложности: если нам предъявили подходящий ответ, его правильность можно проверить достаточно эффективно.

Другой важный класс — P. Он включает задачи, которые можно решить детерминированным алгоритмом за полиномиальное время. Интуитивно это означает, что для них существует метод, чьи вычислительные затраты растут относительно контролируемым образом при увеличении размера

входных данных. В теории сложности P часто рассматривается как математическая модель эффективной разрешимости, хотя реальная практическая эффективность зависит и от других факторов.

Теперь возникает вопрос, который десятилетиями остаётся одним из величайших нерешённых вопросов теоретической информатики: совпадают ли классы P и NP? Иными словами, если решение задачи можно быстро проверить, всегда ли существует способ быстро его найти?

Этот вопрос выглядит почти бытовым, но его математические последствия чрезвычайно глубоки. Если P и NP совпадают, то для каждого класса задач, где предложенное решение проверяется за полиномиальное время, существует и полиномиальный алгоритм поиска решения. Если же P и NP различаются, то существуют задачи, решение которых можно эффективно проверить, но для которых не существует полиномиального алгоритма решения в общем случае.

Важно подчеркнуть: на сегодняшний день общепринятого доказательства ни равенства, ни неравенства P и NP нет. Большинство специалистов предполагает, что P не совпадает с NP, однако это остаётся недоказанной гипотезой. Мы не можем представлять предполагаемое неравенство как установленный факт. Научная честность требует отделять результаты, доказанные математически, от обоснованных, но пока не подтверждённых предположений.

Почему же этот вопрос вызывает такой интерес? Пото-

му что многие сложные задачи оптимизации, проектирования, планирования и поиска связаны с огромным пространством возможных решений. Если бы оказалось, что для соответствующих задач существуют универсальные полиномиальные алгоритмы, это могло бы радикально изменить множество областей науки и техники. Однако даже доказательство P = NP не означало бы автоматически, что все практические задачи стали бы решаться мгновенно. Полиномиальный алгоритм может иметь настолько высокую степень или настолько большие постоянные затраты, что его применение останется непрактичным. Кроме того, необходимо было бы разработать конкретные алгоритмы и установить, как именно они работают для нужных задач.

Если же P и NP различаются, это подтвердило бы, что по крайней мере некоторые задачи, решения которых легко проверять, не имеют полиномиальных алгоритмов общего решения. Но даже тогда не следует ожидать, что каждая отдельная задача NP автоматически окажется практически сложной во всех случаях. Для многих задач существуют эффективные методы, приближённые алгоритмы, эвристики и специальные решения, хорошо работающие на реальных данных.

Теория сложности не обещает, что все вычислительные проблемы можно разделить на простые и невозможные одним движением. Она предлагает язык, позволяющий исследовать структуру вычислительных затрат и устанавливать от-

ношения между классами задач. Её результаты часто имеют условный характер: если существует алгоритм определённого типа для одной задачи, то можно построить соответствующий алгоритм для другой; если одна задача обладает определённым свойством, это накладывает ограничения на возможные методы решения связанных задач.

Здесь появляется ещё одно важное понятие — NP-полнота. Задача называется NP-полной, если она принадлежит NP и при этом достаточно выразительна, чтобы к ней можно было свести любую задачу из NP с помощью эффективного преобразования соответствующего типа. Говоря проще, такая задача представляет собой одну из наиболее трудных задач класса NP в том смысле, что эффективный алгоритм для неё позволил бы эффективно решать все задачи этого класса.

Если для одной NP-полной задачи будет найден полиномиальный алгоритм, то это приведёт к выводу P = NP. И наоборот, если когда-нибудь будет доказано, что P не равно NP, тогда ни одна NP-полная задача не сможет иметь полиномиального алгоритма общего решения. Это делает такие задачи особенно важными: они связывают множество разнообразных вычислительных проблем в единую математическую структуру.

Но почему вообще задачи из совершенно разных областей могут оказаться связанными? Как может проблема планирования расписания иметь отношение к задаче выбора марш-

рута или к логической головоломке? Ответ заключается в том, что под внешними различиями могут скрываться одинаковые вычислительные структуры. Если одну задачу можно эффективно преобразовать в другую так, чтобы решения сохранялись, то методы решения одной задачи способны переноситься на другую.

Подобные преобразования позволяют математикам не решать каждую задачу с нуля. Они исследуют отношения между задачами, обнаруживают общие структуры и выясняют, какие результаты можно перенести из одной области в другую. Иногда проблема, которая выглядит уникальной, оказывается математически эквивалентной уже известной задаче. Это позволяет использовать существующие методы или, напротив, понять, почему поиск универсального решения может быть чрезвычайно трудным.

И всё же необходимо различать вычислительную сложность и алгоритмическую неразрешимость. Проблема остановки не имеет универсального алгоритма решения в принятом формальном смысле. Для NP-полных задач универсальные алгоритмы решения существуют в виде перебора вариантов, но вопрос о наличии полиномиальных алгоритмов общего решения остаётся открытым. В первом случае доказана невозможность определённого универсального метода. Во втором случае неизвестно, существует ли более эффективный общий метод требуемого типа.

Это различие принципиально. Если мы не можем решить

задачу за разумное время, из этого ещё не следует, что она неразрешима. Возможно, мы используем плохой алгоритм. Возможно, существует более эффективный метод, который пока не найден. Возможно, конкретный входной экземпляр обладает особенностями, позволяющими решить его быстро. А возможно, задача действительно требует очень больших ресурсов в общем случае. Чтобы установить, какая из этих возможностей верна, нужны отдельные доказательства и анализ.

Именно здесь проявляется опасность чрезмерного оптимизма в отношении вычислительной мощности. Мы можем построить более быстрый компьютер, но если алгоритм требует экспоненциального времени, рост производительности не всегда позволяет справиться с увеличением размера задачи. Удвоение вычислительной мощности даёт определённое сокращение времени работы, однако экспоненциальный рост количества вариантов способен быстро поглотить это преимущество.

Представим, что для задачи из определённого класса необходимо исследовать все комбинации, число которых удваивается при добавлении каждого нового элемента. Если компьютер стал в тысячу раз быстрее, это позволяет обработать в тысячу раз больше вариантов за то же время. Но увеличение числа элементов даже на небольшую величину может увеличить количество комбинаций в миллионы или миллиарды раз. Поэтому технический прогресс сам по себе

не гарантирует решения проблемы масштабируемости.

С другой стороны, история вычислений показывает, что удачный алгоритм способен дать намного больший эффект, чем простое увеличение мощности оборудования. Если исследователь заменяет экспоненциальный метод полиномиальным для соответствующего класса задач, выигрыш при больших размерах входа может оказаться колоссальным. Поэтому развитие информатики заключается не только в создании новых процессоров, но и в поиске более глубоких математических структур, позволяющих избегать бессмысленного перебора.

Это обстоятельство имеет огромное значение для искусственного интеллекта. Современные системы способны решать множество задач, которые требуют поиска в больших пространствах вариантов. Они используют эвристики, обученные модели, методы оптимизации и приближённые вычисления. Часто эти подходы дают превосходные результаты на практике, даже если не гарантируют нахождения абсолютного оптимума во всех возможных случаях.

Но здесь необходимо понимать цену компромисса. Эвристика может быстро найти хорошее решение, не гарантируя, что оно лучше всех остальных. Приближённый алгоритм может обеспечить результат, достаточно близкий к оптимальному, но не всегда точный. Вероятностный метод может работать с высокой надёжностью, однако его гарантии отличаются от гарантии безошибочного решения для каждого до-

пустимого случая.

Такие методы не являются недостатком науки. Напротив, они позволяют получать полезные результаты в ситуациях, где точное решение слишком дорого или недоступно при имеющихся ресурсах. Но если мы хотим понимать реальные возможности искусственного интеллекта, необходимо различать точность, скорость, надёжность и универсальность. Система, которая за секунду находит очень хорошее решение, может быть практичнее системы, которая гарантированно находит оптимальное решение, но требует десятилетий вычислений.

Возникает вопрос: не означает ли это, что интеллект будущего будет определяться не столько способностью найти абсолютно правильный ответ, сколько умением выбирать приемлемый компромисс между точностью и затратами? Во многих прикладных областях именно так и происходит. Инженеру часто нужен не теоретически совершенный проект среди всех мыслимых вариантов, а конструкция, удовлетворяющая требованиям безопасности, стоимости, долговечности и сроков. В медицине и научном моделировании могут быть полезны приближённые решения, если их ограничения известны и учтены.

Но существуют области, где цена ошибки настолько высока, что приблизительного ответа недостаточно. В критических системах управления, криптографии, авиации и некоторых инженерных расчётах необходимы строгие гаран-

тии для определённых свойств. Здесь нельзя просто заменить доказательство уверенностью, основанной на множестве успешных тестов. Требуется тщательно определять, какие характеристики должны быть гарантированы, и выбирать методы, способные обеспечить необходимый уровень надёжности.

Поэтому вычислительная сложность ставит перед нами не только техническую, но и философскую проблему. Мы должны решить, что именно считаем успешным знанием. Всегда ли нужен точный ответ? Достаточно ли вероятностной оценки? Допустим ли компромисс между качеством решения и временем его получения? Какую цену мы готовы заплатить за абсолютную гарантию? Ответы на эти вопросы зависят от конкретной задачи, однако сама необходимость такого выбора показывает, что рациональность не сводится к механическому поиску максимальной точности любой ценой.

Представим теперь, что человечество создаёт искусственный интеллект, способный анализировать практически любую научную проблему. Он строит модели, исследует альтернативы и находит решения, которые человек никогда не смог бы получить самостоятельно. Но даже такой интеллект будет вынужден учитывать вычислительные затраты. Если он ищет оптимальный вариант среди огромного количества комбинаций, ему необходимо выбрать стратегию. Он может исследовать ограниченное пространство поиска, использовать при-

ближения, применять вероятностные методы или изменять постановку задачи.

Чем сложнее задача, тем важнее становится способность понимать не только её условия, но и стоимость различных методов решения. Разум, который не умеет оценивать ресурсы, может потратить колоссальные усилия на задачу, для которой существует более простой путь, или пытаться добиться абсолютного оптимума там, где практическая ценность такого оптимума ничтожна.

Однако вычислительная сложность не устанавливает единого предела для всех интеллектов. Она исследует определённые математические модели вычислений и конкретные классы задач. Будущие системы могут использовать новые архитектуры, специализированное оборудование и методы, которые значительно улучшат решение отдельных проблем. Но если мы хотим утверждать, что определённая задача стала доступной принципиально новым способом, необходимо показать, какие именно предпосылки изменились и какие гарантии обеспечивает новый метод.

Нельзя автоматически заключать, что квантовые компьютеры решат все трудные задачи, а развитие искусственного интеллекта устранит вычислительную сложность. Квантовые вычисления действительно предоставляют новые возможности для некоторых классов задач, но не являются универсальным средством мгновенного решения любой проблемы. Аналогично, искусственный интеллект способен обна-

руживать закономерности и разрабатывать алгоритмы, но сам факт наличия интеллектуальной системы не доказывает существования эффективного метода для каждой математической задачи.

Здесь мы возвращаемся к основной теме книги. Разум часто воспринимается как универсальная сила, которой достаточно предоставить информацию и ресурсы, чтобы она в конечном счёте нашла ответ. Но теория вычислимости и теория сложности заставляют разделить несколько вопросов. Существует ли решение? Существует ли алгоритм? Существует ли алгоритм, работающий достаточно эффективно? Можно ли получить ответ с требуемой точностью и гарантией? Имеются ли необходимые физические ресурсы для выполнения вычисления?

Каждый вопрос описывает отдельный уровень проблемы. Положительный ответ на один из них не гарантирует положительного ответа на остальные. Решение может существовать, но не иметь универсального алгоритма поиска. Алгоритм может существовать, но требовать чрезмерного времени. Быстрый метод может выдавать приближённый результат без гарантии абсолютной оптимальности. Даже если вычисление формально доступно, физическая реализация может потребовать ресурсов, которые невозможно предоставить в реальных условиях.

Таким образом, слово «невозможно» скрывает несколько разных смыслов. Иногда оно означает логическую проти-

воречивость. Иногда — отсутствие алгоритма определённого типа. Иногда — чрезмерную вычислительную сложность. Иногда — физическую недоступность необходимых ресурсов. Смешение этих значений порождает путаницу и приводит к ошибочным выводам о возможностях науки и интеллекта.

Настоящее понимание начинается с точного определения того, о какой невозможности идёт речь. Только после этого можно оценивать перспективы решения, искать альтернативные методы и определять, какие ресурсы действительно необходимы.

И всё же остаётся вопрос, который выводит нас за пределы компьютерных программ и математических алгоритмов. Если вычисления имеют принципиальные и практические ограничения, то как они связаны с устройством самой Вселенной? Является ли физическая реальность в своей основе вычислительным процессом? Можно ли представить мир как гигантскую систему, которая шаг за шагом обновляет собственное состояние? И если Вселенная действительно допускает вычислительное описание, означает ли это, что её можно полностью смоделировать?

Возможно, сама природа не является компьютером в буквальном смысле. Возможно, вычисление — лишь один из способов описывать физические процессы. Но если мы попытаемся представить Вселенную как объект, который должен быть полностью воспроизведён вычислительной систе-

мой, мы столкнёмся с новыми вопросами: сколько информации необходимо для описания мира, какие процессы физически моделируемы и может ли система, находящаяся внутри Вселенной, полностью вычислить поведение самой Вселенной?

В следующей главе мы обратимся к этой проблеме. Нас ждёт вопрос о бесконечности — не только как о математическом понятии, но и как о вызове для человеческого воображения. Мы выясним, почему бесконечность нельзя просто представить как чрезвычайно большое число, каким образом математика научилась работать с бесконечными множествами и почему некоторые свойства бесконечности противоречат интуиции, сформированной опытом конечного мира.

# ГЛАВА 9. БЕСКОНЕЧНОСТЬ, КОТОРУЮ НЕВОЗМОЖНО ПРЕДСТАВИТЬ

Попробуем провести мысленный эксперимент. Представьте, что перед вами находится число, состоящее из миллиарда цифр. Оно настолько велико, что его невозможно полностью записать в обычной книге, если отвести под каждую цифру отдельное место. Однако это число всё ещё конечно. У него есть последняя цифра. Можно начать считать от единицы и, по крайней мере теоретически, дойти до него. Можно прибавить к нему единицу и получить ещё большее число. Каким бы огромным ни казалось исходное значение, оно не перестаёт быть частью мира конечных величин.

Теперь представьте число, которое больше любого конечного числа. Не просто больше миллиарда, триллиона или числа, которое можно записать с помощью всех атомов наблюдаемой Вселенной. Оно больше любого числа, которое вы могли бы назвать, независимо от того, сколько времени вы потратили бы на его описание. Попытайтесь мысленно приблизиться к этому понятию, и вы обнаружите, что привычные способы представления перестают работать. Воображение предлагает всё более крупные величины, но каждая из них остаётся конечной. Мы можем продолжать увеличи-

вать число, однако само это действие не приводит нас к бесконечности.

# Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, купив полную легальную версию на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.