



ПУТЬ РАЗУМА

МЫСЛЕННЫЕ
ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Мысленные эксперименты Эйнштейна
оставили по себе обширное
и запутанное наследство

Сабина Хоссенфельдер

Gedankenexperiment (в переводе с немецкого — «мысленный эксперимент») — это известный способ Альберта Эйнштейна визуализировать идеи и модели, что привело к величайшим достижениям в физике. Идею конечности скорости света (ключевой постулат специальной теории относительности) Эйнштейн сопроводил простым рассуждением о поезде. Общая теория относительности, эта монументальная теория гравитации, наглядно представляется с помощью поездок вверх-вниз на лифте. В обоих случаях мысленный эксперимент с деталями соответствующей теории помог восполнить то, что нельзя было получить в лаборатории.

Эйнштейн был не первым и не последним теоретиком, кто использовал мысленный эксперимент, но именно его достижения имели решающее значение для того, чтобы возвести мысленный эксперимент в статус краеугольного камня методологии теоретической физики. Сегодня ученые регулярно используют мысленный эксперимент для поиска новых эффектов в существующих теориях, а также для того, чтобы анализировать новые теории и искать в них несоответствия.

Широчайший масштаб охвата мысленного эксперимента, доступного современным исследователям, порождает ряд вопросов. Так, в поисках теории великого объединения, призванной связать мелко-масштабный мир квантовой механики с эйнштейновским описанием крупномасштабной Вселенной, наиболее популярные концепции совершенно лишены реальной наблюдательной и экспериментальной поддержки. Сможет ли один только мысленный

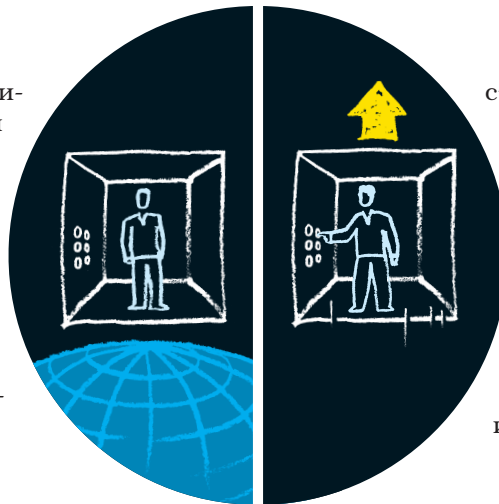
эксперимент поддержать новые теории? Насколько можно доверять логическим выводам, полученным с помощью мысленного эксперимента? Где проходит грань между научной интуицией и фантазией? Наследие Эйнштейна не способно дать четкого ответа на эти вопросы. С одной стороны, налицо впечатляющий успех теории Эйнштейна. С другой стороны, многие из его наиболее известных мысленных экспериментов были основаны все-таки на данных экспериментов реальных, таких, например, как классический эксперимент Майкельсона — Морли по измерению постоянства скорости света. Кроме того, в своих мысленных экспериментах Эйнштейн всегда фокусировался только на тех величинах, которые хотел исследовать, поэтому не мог постичь более глубокие, неизвестные слои реальности. Тем не менее ошибки в мысленных экспериментах Эйнштейна косвенно способствовали более поздним открытиям.

ОБ АВТОРЕ

Сабина Хоссенфельдер (Sabina Hossenfelder) — профессор Скандинавского института теоретической физики в Стокгольме. Область научных интересов: квантовая гравитация и теории, обобщающие стандартную модель.



Мы будем рассматривать наиболее значимые для развития науки мысленные эксперименты Эйнштейна, отмечая их достоинства и подчеркивая ограниченность их области применения с целью понять, почему эти эксперименты до сих пор остаются жизненно важными для современных задач теоретической физики.



стал основой общей теории относительности. Другими словами, мысленный эксперимент с лифтом дал Эйнштейну возможность сделать смелый научный вывод, который в конечном итоге привел его к величайшему достижению в познании природы — к выводу о глубокой связи геометрии пространства-времени и гравитационной силы.

Лифт без окон

В реализации мысленных экспериментов гений Эйнштейна помогал выявить необходимые условия и допущения эксперимента и отбросить ненужные детали. Рассмотрим его самый знаменитый эксперимент 1907 г.: движущийся лифт. Эйнштейн утверждал, что человек, находящийся внутри лифта без окон, никогда не сможет сказать, находится ли лифт в состоянии покоя в гравитационном поле или же движется с постоянным ускорением. Из этого утверждения Эйнштейн сделал вывод, что законы физики должны быть одинаковы в обеих ситуациях. Вывод был назван «принцип эквивалентности». Согласно этому принципу, локально (т.е. в лифте) эффекты гравитационного поля такие же, как и при ускорении в отсутствие силы тяжести. Переведенный на язык математики, принцип эквивалентности

Призрачное действие

В своей научной карьере Эйнштейн боролся с принципами квантовой механики, в частности с принципом неопределенности, согласно которому чем больше известно о каком-то одном параметре фундаментальной частицы (например, положении), тем меньше становится известно о другом параметре (например, импульсе), и наоборот. Эйнштейн считал, что наличие принципа неопределенности указывает на ошибочность квантовой теории.

В течение многолетнего научного контакта с датским физиком-теоретиком, специалистом по квантовой теории Нильсом Бором (Niels Bohr), Эйнштейн задумал серию мысленных экспериментов для демонстрации возможности нарушения принципа неопределенности, но Бор все их опроверг. Дискуссия двух ученых только укрепила Бора во мнении, что квантовая неопределенность есть основополагающий аспект природы. Ведь если даже сам великий Эйнштейн не смог придумать способа точного измерения положения и импульса частицы, значит однозначно что-то такое есть в принципе неопределенности!

В 1935 г. со своими научными коллегами Борисом Подольским (Boris Podolsky) и Натаном Розеном (Nathan Rosen) Эйнштейн опубликовал наиболее мощный аргумент против принципа неопределенности. Возможно, потому, что не Эйнштейн, а Подольский готовил текст статьи, мысленный эксперимент Подольского — Эйнштейна — Розена (ПЭР) был представлен не в виде наглядного (картинки с коробкой, часами и световыми пучками), а в виде абстрактной серии

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Одним из важнейших вкладов Эйнштейна в физику стало эффективное использование мысленного эксперимента (*Gedankenexperiment*).
- Так, научная интуиция Эйнштейна в мысленном эксперименте с падающим лифтом привела его к величайшему достижению — общей теории относительности.
- В современной науке некоторые из наиболее важных проблем теоретической физики привлекают мысленные эксперименты с черными дырами.
- Однако существует проблема: насколько мысленные эксперименты соответствуют реальности и могут служить доказательной базой новых теорий?

уравнений, описывающих взаимодействия между двумя обобщенными квантовыми системами.

Наиболее простая версия ПЭР-эксперимента состоит в изучении парадоксального поведения двух частиц, находящихся в состоянии квантовой запутанности, т.е. в одном общем квантовом состоянии. Представьте себе нестабильную частицу нулевого спина, распадающуюся на две дочерние частицы, которые начинают двигаться в противоположные стороны друг от друга. Отметим, что спин частицы есть мера ее углового момента, но не имеет ничего общего со скоростью вращения частицы. Законы сохранения диктуют равенство нулю суммарного спина обеих частиц, поэтому их спины ориентированы в разные стороны. Законы квантовой механики говорят, что в отсутствие наблюдений ни одна из частиц не обладает каким-то определенным спином. После того как производится наблюдение одной из частиц, состояние второй частицы мгновенно изменяется, даже если расстояние между частицами очень велико.

Эйнштейн полагал, что это «призрачное действие на расстоянии» — полная чепуха. В специальной теории относительности нет места мгновенности, потому что ничто не может двигаться быстрее конечной скорости света. Таким образом, не может быть способа мгновенного контакта между частицами, находящимися на большом расстоянии друг от друга. Эйнштейн предположил, что результаты измерений трактуются неверно и что они должны быть определены до измерения по «скрытым неизвестным», которые не учитываются при квантово-механическом рассмотрении этой задачи. После десятилетий обсуждений в 1964 г. физик Джон Белл (John Stewart Bell) сформулировал теорему, позволяющую количественно описать, как именно пара запутанных частиц обменивается информацией и как такая схема отличается от предложенной Эйнштейном модели «скрытых неизвестных».

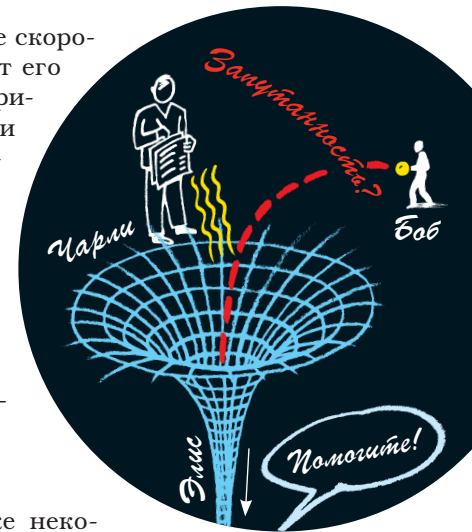
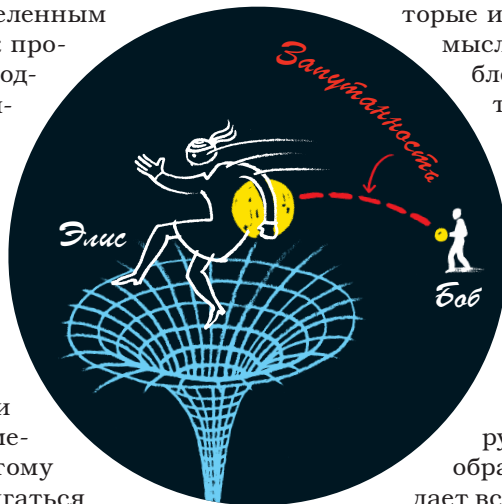
С 70-х гг. прошлого века лабораторные эксперименты с частицами в запутанном квантовом состоянии неоднократно подтвердили, что Эйнштейн был неправ. Квантовые частицы действительно делятся информацией, и обмен информацией не может быть объяснен с помощью скрытых переменных. «Призрачное действие на расстоянии» реально, но эксперименты показали, что оно не может быть использовано для передачи

информации быстрее скорости света, что делает его согласованным с теорией относительности Эйнштейна. Кажущееся противоречие здравому смыслу остается научной загадкой, а ошибочная оппозиция Эйнштейна позволила найти решающие объяснения этого парадокса.

Элис и Боб

В современной науке некоторые из наиболее значимых мысленных экспериментов посвящены проблеме примирения четко тикающей релятивистской Вселенной Эйнштейна с неопределенностями квантовых частиц. Рассмотрим, например, информационный парадокс черной дыры. В модели, объединяющей общую теорию относительности и квантовую теорию поля, черные дыры испаряются, за счет квантовых эффектов их масса медленно уменьшается. Кроме того, процесс испарения необратим: вне зависимости от того, что именно формирует черную дыру (т.е., какие частицы ее образуют), испаряющаяся черная дыра отдает всегда одно и то же излучение, из которого нет возможности извлечь информацию о составе той или иной индивидуальной черной дыры. Проблема в том, что описанный процесс запрещен в квантовой теории, поскольку рождение чего-либо всегда обратимо во времени. Например, согласно законам квантовой механики, пепел сожженной книги по-прежнему содержит всю информацию, которая когда-то была в книге (хотя, конечно, достать эту информацию очень непросто). А вот для испаряющихся черных дыр так не получается. Таким образом, налицо парадокс. Объединение квантовой механики и общей теории относительности утверждает, что черные дыры обязаны испаряться, что, однако, противоречит законам квантовой механики. Совершенно точно мы где-то ошиблись — но вот где?

В попытках разрешить этот парадокс проводится следующий мысленный эксперимент. Рассмотрим пару наблюдателей, Боба и Элис, каждый из которых несет с собой по одной из пары запутанных квантовых частиц (тех самых призрачных персонажей мысленного эксперимента ПЭР). Элис прыгает в черную дыру, унося свою частицу с собой. Боб остается снаружи со своей частицей.



Без Элис частица Боба — совершенно обычная, со спином, который может принимать одно из двух возможных направлений; информация о связи этой частицы с другой частицей теряется вместе с Элис.

Пример с Бобом и Элис подводит нас к важному понятию современной теоретической физики — комплементарности (или взаимодополняемости) черной дыры. Это понятие было введено в 1993 г. ученым Стэнфордского университета Леонардом Сасскиндом (Leonard Susskind) и его коллегами и служит замечательным продолжением золотого правила Эйнштейна о любом мысленном эксперименте: сосредоточиваться только на том, что планируется измерять. Сасскинд с коллегами постулировали, что информация, упавшая в черную дыру вместе с Элис, должна однажды выйти наружу в процессе испарения этой черной дыры. Однако такой сценарий порождает новые парадоксы, поскольку в квантовой механике рассматривается только один «партнер по запутыванию» (свойство, называемое моногамией). Другими словами, если частицы Боба и Элис находятся в состоянии квантовой запутанности, то частица Боба больше не может быть запутанной ни с одной другой частицей. Однако комплементарность черной дыры требует, чтобы частица Боба была запутана еще и с частицей, которая позже излучится черной дырой, — моногамия нарушается. На первый взгляд, свойство комплементарности всего лишь поменяло один парадокс на другой.

В детективном жанре есть понятие идеального преступления, и аналогично ему мы можем сказать, что если нет свидетеля наступления парадокса, то, возможно, законы природы и не были нарушены. Свойство комплементарности опирается на тот аргумент, что физически невозможно наблюдать, как запутанные частицы Элис и Боба «совершают преступление», противоречащее их физической природе. Чтобы представить, как могло бы разворачиваться «идеальное квантово-механическое преступление», выведем на сцену третьего наблюдателя, Чарли, который парит где-то поблизости от черной дыры, следя за Элис и Бобом. Он наблюдает, как Боб остается снаружи, а Элис падает к черной дыре, и измеряет излучение черной дыры. Теоретически закодированная в излучении информация может насторожить Чарли, т.е. он может решить, что моногамия нарушена. Но чтобы узнать это наверняка, Чарли должен сравнить свои наблюдения не только с наблюдениями Боба, но и с наблюдениями Элис — внутри черной дыры. Таким образом, Чарли должен провести наблюдения снаружи черной дыры, а потом упасть в черную дыру к Элис, чтобы поделиться с ней этой информацией. Однако оказывается, что Чарли никак не сможет это сделать: до того как они обмениваются информацией, их разорвет приливными силами.

Их ужасная судьба укрепит незыблемость законов квантовой механики, гласящих, в частности, что никакое нарушение законов квантовой механики не может быть зафиксировано у черной дыры. Таким образом, теоретики могут безнаказанно совершать преступление против природы — все равно его никто никогда не сможет зафиксировать.

Заметим, что вышесказанный аргумент удовлетворяет далеко не всех теоретиков. Один из аргументов против теории комплементарности — возможность нарушения принципа эквивалентности, который родился в мысленном эксперименте Эйнштейна с падающим лифтом. Общая теория относительности предсказывает, что точно так же как пассажир лифта не может отличить силы тяжести от ускорения, он не заметит ничего необычного при пересечении горизонта событий черной дыры. Другими словами, ничто не скажет пассажиру лифта, что он преодолел поверхность невозвращения.

Теперь давайте вернемся к запутанной ситуации с Элис и Бобом. Если излучение, которое видит Боб, находясь вне черной дыры, содержит всю информацию, которая упала туда вместе с Элис, то это излучение должно выходить с огромной энергией — иначе оно не преодолеет гравитационный барьер вблизи горизонта. Данная энергия настолько велика, что уничтожит любого наблюдателя, падающего в черную дыру, задолго до пересечения им горизонта. Другими словами, комплементарность черной дыры приводит к появлению вблизи черной дыры своеобразного барьера частиц сверхвысокой энергии — а это противоречит принципу эквивалентности Эйнштейна.

Все наши рассуждения о парадоксах черной дыры имели сугубо теоретический характер. На самом деле мы никогда не сможем установить истину в этих вопросах. Однако поскольку как постановки задач, так и методы их решения помогут лучше понять квантовую природу пространства-времени, все эти головоломки представляют собой очень оживленное поле деятельности физиков-теоретиков. И все это следует из эйнштейновской традиции размышлений о падающих лифтах. ■

Перевод: О.С. Сажина

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Алберт Д., Галчен Р. Квантовая механика угрожает теории относительности // ВМН, № 5, 2009.
- Полчински Д. Огненная грань миров // ВМН, № 5–6, 2015.
- Einstein's Dice and Schrödinger's Cat: How Two Great Minds Battled Quantum Randomness to Create a Unified Theory of Physics. Paul Halpern. Basic Books, 2015.