

## О НАУЧНОМ МЕТОДЕ (ВМЕСТО ВВЕДЕНИЯ)

---

Нередко считается, что специальную и общую теории относительности, а также и квантовую механику понимали только их первооткрыватели. При этом предполагается, что современные учёные, уступая интеллектуально первооткрывателям, пользуются аппаратом этих теорий, не разбираясь в его сути. Получается что-то вроде мистики или фокуса, а не научного знания.

Действительно, популяризаторы науки, среди которых были и первооткрыватели этих теорий, часто преподносили предмет своих исследований в парадоксальной форме. Очевидно, что те явления, которые они наблюдали, противоречили существующим на тот момент представлениям о природе. И таким образом первооткрыватели делились своей радостью от познания столь удивительных явлений, стараясь заинтриговать читателей и слушателей.

Учёные, которые в начале XX века создавали обсуждаемые здесь теории, двигались в кромешной тьме, ведь им приходилось разбираться в предмете, в котором ещё никто ничего не понимал. Они нашли в себе силы абстрагироваться от своих предрассудков и устоявшихся стереотипов, сосредоточиться на строгом описании опытных данных. Это позволило им сформулировать взгляд на природу сделанных ими наблюдений, который теперь позволяет с высокой точностью, количественно, а не только качественно, описывать всё более широкий круг явлений.

Представьте, что вы пробираетесь ночью через тёмный лес, не зная правильного направления, и только смутно чувствуете, что где-то там, далеко, возможно, что-то вас ждёт. Первопроходцы проделали этот путь, нашли, можно сказать, драгоценные залежи — круг удивительных явлений природы, а затем

указали к ним направления. Их последователи, образно говоря, проложили там дороги, провели коммуникации, поставили уличное освещение. И теперь нам доступно огромное количество связанных друг с другом наблюдений, теоретических и экспериментальных, работающие на новых принципах приборы и механизмы, а не разрозненный набор двух-трёх парадоксальных фактов.

Нынешнему студенту 3-го или 4-го курса можно уже как туристу двигаться вдоль новых широких проспектов и открывать бывший когда-то крошечно тёмным мир. Поэтому если он достаточно основательно изучил теорию относительности и квантовую механику, то уровень его знаний может оказаться намного выше уровня первооткрывателей. И не вследствие того, что он умнее, что, конечно, не исключено. А потому, что ему легче разобраться в сути теории, имея в своём распоряжении значительно больший массив взаимосвязанных данных.

Представить, а потому и понять явления, описываемые механикой Ньютона, гораздо легче, чем теорию относительности или квантовую механику. Ведь механика Ньютона имеет дело с объектами, размеры и скорости которых привычны и легко представимы человеку, а их движения и взаимодействия происходят в гравитационных полях, сравнимых с земным.

Современные теории также можно понять, выбрав подходящий угол зрения. Для этого необходимо подобрать адекватные ассоциации из нашей повседневной жизни. Но нахождение такого правильного угла требует от популяризатора науки и читателя некоторой работы ума и умения абстрагироваться.

Формат научно-популярной книги не подразумевает использования сложной математики, без которой невозможна основательная разработка современных теорий. Поэтому здесь мы ограничимся небольшим количеством несложных формул, наглядными, упрощёнными картинками и рассказами о результатах экспериментов. Нам хотелось бы донести до старшеклассника, интересующегося физикой и математикой, достижения науки XX века и дать ему представление о том, куда двигаться, если он решит углубить свои знания фундаментальной физики<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Мы предполагаем, что читатель этой книги знаком с механикой Ньютона, геометрией Евклида и тригонометрией. В частности, мы

Для этого мы выбрали некоторые явления из современной фундаментальной физики, которые можно объяснить, не выходя за рамки школьного курса физики и математики. Основной сложностью при написании научно-популярного текста является именно необходимость избегать использования сколько-нибудь сложных формул и математических структур. При этом, в отличие от слов, формулы, благодаря математической строгости, не позволяют слишком большого произвола в их интерпретации: там, где в научной статье или книге можно показать одно уравнение или картинку и пару уточняющих предложений, в научно-популярном тексте придётся писать несколько абзацев или даже страниц с пояснениями. И при этом необходимо очень аккуратно подбирать слова и обговаривать условия, чтобы, с одной стороны, избежать использования научно-технического жаргона, а с другой — добиться хотя бы сколько-нибудь однозначного и корректного изложения материала для читателя, знакомого только со школьной физикой и математикой. Всё это стоит помнить при чтении данной книги. Ну а для начала во введении мы поделимся представлениями о том, как устроен научный метод познания.

Представим себе предмет познания в виде многогранного и сложного кристалла. Одна и та же его грань под одним углом, в преломлённом свете, будет казаться непостижимо сложно изогнутой и многоцветной, а под другим — плоской и прозрачной поверхностью. Вопрос в том, как выбрать правильный угол.

На начальном этапе создания любой теории круг явлений, которые она описывает, представляет собой нечто подобное бруску неизвестного материала, и исследователю надо каким-то способом понять, что же внутри него скрывается. Как это сделать? Можно, например, постучать по бруску в разных местах и посмотреть, как он откликнется на это воздействие. Можно пропустить через него ток, тепло или какое-то излучение и посмотреть на результаты всех этих воздействий в разных местах. В идеале следует использовать весь арсенал методов, имеющихся в распоряжении учёного.

---

предполагаем, что ему знакомы такие понятия, как система отсчёта, декартова система координат, поворот системы координат, вектор, функция, график функции, производная, касательная к графику функции, асимптота гиперболы.

Затем необходимо разработать математический аппарат, который количественно опишет проведённые наблюдения и даст предсказания о том, как брусок будет реагировать на другие воздействия. В конце концов надо проверить эти предсказания новыми экспериментами. Таким образом, постепенно усложняются и методы, и предмет исследования. Что-то подобное происходит с ребёнком, познающим окружающий его мир с помощью визуальных, слуховых, обонятельных и тактильных ощущений.

Рассмотрим несколько важных наблюдений о том, как устроен научный метод. Начнём с простого примера. Все знают, что законы Ньютона следуют из опыта. Но что это значит? Например, второй закон,  $\vec{F} = m\vec{a}$ , не является результатом какого-то конкретного эксперимента, в котором независимо измерены сила, масса и ускорение, а затем установлена их данная формальная связь. На самом деле этот закон в краткой форме описывает некоторую совокупность взаимосвязанных экспериментов. При этом отдельно взятый опыт из этой совокупности, несомненно, можно объяснить, используя не законы Ньютона, а иные соотношения, как это и делали многие учёные ещё до Галилея. Но задача состоит в объяснении именно *всей совокупности* экспериментов вместе, а не каждого опыта по отдельности.

Более того, если всю эту совокупность опытных данных можно объяснить иным способом, то он будет эквивалентен формулировке механики с использованием законов Ньютона. Например, студентам технических вузов известны по крайней мере ещё две формулировки классической механики, носящие имена Лагранжа и Гамильтона (созданные при участии и других выдающихся учёных, что верно, впрочем, и в случае законов Ньютона). В этих формулировках механики постулируются другие уравнения, а законы Ньютона возникают лишь как следствия. Среди постулатов в формулировке Лагранжа, например, присутствует так называемый принцип наименьшего действия. Однако все эти теории переходят одна в другую и эквивалентны ньютоновской. Что и не удивительно, ведь они описывают одну и ту же совокупность опытных данных.

Приведём и другой пример, который поясняет то, в каком смысле физические законы описывают природные явления.

Известно, что до гелиоцентрической системы Коперника в европейских научных кругах наибольшей популярностью пользовалась геоцентрическая система Птолемея, в которой планеты и Солнце вращались вокруг покоящейся Земли. И это звучит не так уж и безумно, если вспомнить аргументацию её апологетов: если Земля движется, да ещё и вращается, то почему мы этого не замечаем? Так ли уж очевиден ответ на этот вопрос, если никаких знаний о гравитации и механике тогда не было? Как вообще подступиться к этой проблеме, если у вас нет ни приборов, ни точного способа определения времени? Сейчас, когда нам известен ответ на этот вопрос и с ним согласны все окружающие нас разумные люди, нам легко поддерживать и защищать его в спорах. А в те времена? Кто пошёл бы на риск потери репутации, а то и свободы или даже жизни, защищая общепринятую сейчас, но противоречащую «здравому смыслу» в те времена точку зрения?

И это ещё не все. Дело в том, что с экспериментальной точки зрения система Птолемея безупречно описывала движение планет. Во времена Галилея считалось, что планеты могут двигаться только по идеальным кривым, таким как прямые или окружности. Сам Галилей считал, что такое движение происходит по инерции. Но при этом не считалось логически противоречивым накладывать одно «инерциальное» движение на другое, как изображено на рис. 0.1. Если такие движения действительно являются инерциальными, то почему не могут существовать их композиции?

В таком случае планета движется по окружности, центр которой, в свою очередь, движется по другой окружности, и так далее до последнего круга с центром внутри Земли. Такие окружности назывались эпициклами, а основной круг, с центром внутри Земли, назывался деферентом.

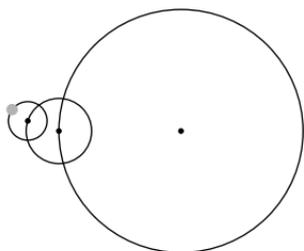


Рис. 0.1. Эпициклы в системе Птолемея. Большая окружность называется деферентом. По ней движется центр меньшей окружности, а по последней, в свою очередь, совершает движение планета (отмечена серым цветом)

Было установлено, что, подбирая количество эпициклов, их радиусы и частоты вращения, можно описать любое движение планеты со сколь угодно высокой наперёд заданной точностью.

Когда Коперник сформулировал свою систему, он тоже старался строго описать движение планет вокруг Солнца. И тоже использовал эпициклы. Это требовало титанических вычислений, а не голословного утверждения о гелиоцентричности. Но так как его система только зарождалась, а система Птолемея существовала и разрабатывалась уже около полутора тысяч лет, Коперник давал менее точное описание движения планет. Не говоря уже о том, что его система содержала логические противоречия. Например, центры деферентов некоторых планет находились за пределами Солнца. В принципе все эти противоречия можно было устранить, но в чём же тогда преимущество системы Коперника над птолемеевой? Ведь она не выглядит проще!

Как нам теперь известно, в основе гелиоцентрической системы лежит один простой закон. А именно, закон всемирного тяготения:

$$|\vec{F}| = G \frac{Mm}{R^2}.$$

Если допустить, как указывает эта формула, что сила притяжения между Солнцем и планетой обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними, то из этого следуют все законы движения планет, полученные Кеплером. При этом планеты и Солнце вращаются вокруг общего центра масс, и не по эпициклам и деферентам, а по эллипсам. И делают они это только в приближении, в котором не учитывается воздействие планет друг на друга. Более того, всё это верно только для системы отсчёта, в которой центр масс Солнечной системы покоится. Перечисление условностей можно продолжать до бесконечности, потому что любое математически строгое описание природных явлений верно только в каком-то приближении.

Важно, что закон всемирного тяготения универсален. Он описывает не только движения планет Солнечной системы и Луны, но и падение яблока на голову Ньютона, и вращение звёзд в галактиках и самих галактик в их скоплениях. Именно

поэтому этот закон позволяет делать предсказания. А какие предсказания можно извлечь из системы Птолемея, кроме определения положений исключительно планет Солнечной системы?

Итак, учёному всегда приходится иметь дело лишь с некоторым приближённым описанием реальных природных явлений. Ведь для математически строгого, количественного их описания необходимы идеализации. Иначе не избавиться от возникающих логических противоречий.

Например, представьте себе, что у вас есть весы, которые могут измерять массу с точностью до трёх граммов. Тогда они не покажут разницы между грузиками с массами пять и семь граммов, а также между грузиками в семь и девять граммов. Но разницу между пятью и девятью граммами покажут. Таким образом, мы получим кажущееся логическое противоречие в виде  $a = b$ ,  $b = c$ , но  $c > a$ . Поэтому учёному в формулировке своих утверждений необходимо прибегать к идеализациям. Например, в ситуации с грузиками считать, что мы можем измерить массу с любой наперёд заданной точностью, в то время как реально существующие весы позволяют сделать это ненамного точнее имеющегося разрешения их шкалы.

Также в природе не бывает идеальных прямых и бесконечно тонких линий. Однако мы можем пользоваться такими идеализованными понятиями при проектировании зданий, расчётах площадей земель и ожидаемых урожаев. И делаем мы это всегда приближённо, как правило, считая абсолютно плоской территорию, с которой снимается урожай. Вопрос в том, какая точность нас устроит в каждом конкретном случае. Например, некоторые компоненты обычных зданий проектируются с точностью до нескольких миллиметров, достаточной для того, чтобы в окнах не было щелей. А компоненты детекторов частиц на ускорителях, которые по размерам сопоставимы с многоэтажными зданиями, проектируются с точностью до микрон ( $1/1\,000\,000 = 10^{-6}$  метра), чтобы была возможность получить достаточно точные треки частиц и воспроизвести положения так называемых вершин реакций — того места, где произошло взаимодействие частиц.

Известно также, что идеальных инерциальных систем отсчёта не существует. Однако, в зависимости от постановки за-

дачи, в некотором приближении можно использовать систему, связанную с тем или иным реально существующим объектом. А уже при создании теории можно допустить существование таких идеализированных систем отсчёта, как это и сделал Галилей при формулировке первого закона Ньютона.

Не бывает также и точечных частиц. Однако мы можем считать даже спутник или планету точкой при расчёте их орбит. Все зависит от условий эксперимента и постановки задачи. Например, в лекции по квантовой механике мы обсудим, в каких случаях элементарную частицу можно считать материальной точкой, а в каких нет. Но и это обсуждение не даст исчерпывающей картины всего многообразия процессов, в которых проявляются свойства элементарных частиц.

Попробуйте задуматься, почему у исследователя должна возникнуть мысль, что частица всегда и при всех условиях обязана вести себя как материальная точка или как шарик некоторого радиуса. Разве этот исследователь провёл эксперименты по выявлению свойств и поведения частиц при всех энергиях, на всех расстояниях и во всех возможных средах? Откуда мы берём интуитивное «предвидение», каким должен быть результат эксперимента, который ещё не был поставлен? Достаточно ли полагаться только на интуицию и на её основе формулировать «правдоподобную» теорию, не требуя независимой проверки? С одной стороны, без интуитивного предвидения результата невозможно двигаться вперёд, а с другой — любую интуитивную правдоподобную догадку необходимо проверять — с помощью вычислений, опытов, компьютерных экспериментов и наблюдений.

Математические идеализации позволяют учёному найти простую модель, которая приближённо описывает некоторый круг явлений. А если этот круг явлений достаточно широкий, то модель превращается в «теорию».

В идеале в своей научной статье учёный-естествоиспытатель производит расчёт не только результата эксперимента, но и приближения, с которым этот результат получен. И тогда любой другой исследователь в принципе может повторить такой эксперимент или вычисление и убедиться в верности или ложности обсуждаемых утверждений. Именно последнее и позволяет при создании аппаратов и механизмов получать

заранее заданные характеристики их работы. Действуя определённым образом и при определённых условиях, вы получите соответствующий результат. Эта причинно-следственная связь представляет собой факт объективной реальности, а вот хорошо это или плохо и нравится кому-то или нет, является уже фактором субъективным.

Далее подчеркнём, что любой фундаментальный физический закон природы имеет пределы применимости, насколько бы фундаментальным и общим он нам не представлялся. Например, как было сказано выше, законы механики и гравитации Ньютона применимы, только если мы обсуждаем движение объектов достаточно больших размеров со скоростями существенно меньше скорости света и в достаточно слабых гравитационных полях. А если мы перейдём к очень большим скоростям, очень маленьким объектам или очень сильным гравитационным полям, то механика Ньютона теряет свою применимость и её заменяют другие теории. Это не значит, что новые теории опровергают старую механику. Ведь квантовая механика и теория относительности практически совпадают с теорией Ньютона в пределах применимости последней.

Новые теории, в свою очередь, тоже имеют свои пределы применимости. Например, квантовую механику и специальную теорию относительности обобщает квантовая теория поля. А квантовую теорию поля и общую теорию относительности должна обобщить квантовая гравитация или что-то вроде неё.

Понятно, что ограниченная применимость любого фундаментального естественно-научного закона всегда оставляет неизведанной какую-то область природы. Это означает, что в любом исследовании, сколь бы основательным оно ни было, всегда остаются какие-то нерешённые проблемы. И нет рецепта, позволяющего решить все проблемы науки сразу. Занятие физикой — это не медитация буддийского монаха. Поэтому учёный и не может позволить себе стремиться познать всё и сразу. Хорошо это или плохо — каждый решает сам для себя, но именно поэтому познание является бесконечным процессом.

Вернёмся теперь к сути наших рассуждений. На данный момент в квантовой механике и теории относительности нет ничего мистического. Не будет преувеличением сказать, что предмет этих теорий столь же хорошо изучен, как и механика

Ньютона. Теперь в тумане находится квантовая гравитация. Там действительно многое непонятно, а вот квантовая механика и теория относительности уже давно являются основой прикладных технологий. В области применимости этих теорий человечеству не известен ни один достоверный экспериментальный факт, который бы их опровергал. Более того, без использования знаний, следующих из квантовой механики, инженер не сможет добиться того, чтобы работали мобильные телефоны и телевизоры, а без теории относительности — системы глобального позиционирования, такие как ГЛОНАСС и GPS, как мы расскажем в первой лекции. Не говоря уже о том, что без всех этих теорий невозможно было создать атомные электростанции.

Мы хотели бы поблагодарить Валерия Анатольевича Рубакова, Валерию Ахмедову, Сергея Попова, Александру Анохину, Константина Кузнецова, Уго Москеллу, Ольгу Лубенченко, Александра Лубенченко, Игоря Полюбина и Арсения Полюбина за корректуру текста и за ценные замечания. Эмиль Ахмедов хотел бы поблагодарить руководство Института Альберта Эйнштейна в Потсдаме в лице Германа Николаи и Штефана Тайсена за гостеприимство во время работы над некоторыми частями этой книги.