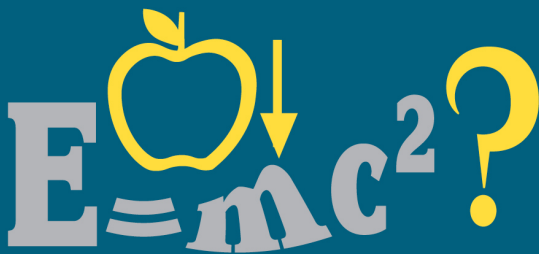


**АЛЬБЕРТ  
ЭЙНШТЕЙН**  
ЛЕОПОЛЬД ИНФЕЛЬД



**ЭВОЛЮЦИЯ  
ФИЗИКИ**

**Альберт Эйнштейн  
Леопольд Инфельд  
Эволюция физики  
Серия «Наука: открытия  
и первооткрыватели»**

*Текст предоставлен правообладателем*

*[http://www.litres.ru/pages/biblio\\_book/?art=40739979](http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=40739979)*

*Эволюция физики / Альберт Эйнштейн, Леопольд Инфельд ; [пер.*

*с англ. С. Суворова]: АСТ; Москва; 2018*

*ISBN 978-5-17-110599-0*

### **Аннотация**

«Эволюция физики» – необычная книга. Книга, которая, по словам авторов, была написана для читателя, лишенного «каких-то конкретных знаний по физике и математике», но «заинтересованного в физических и философских идеях». Книга, которую сами авторы уподобили детективной повести, где в роли детектива выступает наука, пытающаяся разгадать тайны Вселенной. «Мы не писали учебника по физике. Здесь нет систематического изложения элементарных физических фактов и теорий. Наша задача состояла скорее в том, чтобы широкими мазками обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений», – признавались авторы книги. Не потому ли и книга их, при всем многообразии и

богатстве изложенного в ней научного материала, по-прежнему имеет успех у самого широкого круга читателей по всему миру?..

# Содержание

Предисловие	7
I. Расцвет механистического воззрения	9
Великая повесть о тайнах природы	10
Первая руководящая идея	13
Векторы	22
Загадка движения	32
Конец ознакомительного фрагмента.	50

# Альберт Эйнштейн, Леопольд Инфельд Эволюция физики

Серия «Наука: открытия и первооткрыватели»

Albert Einstein Leopold Infeld

THE EVOLUTION OF PHYSICS

## ЭВОЛЮЦИЯ ФИЗИКИ



Перевод с английского *С.Г. Суворова*

Серийное оформление и компьютерный дизайн *Г. Смирновой*

© The Hebrew University of Jerusalem, Israel

© Перевод. С.Г. Суворов, наследники, 2018

© Издание на русском языке AST Publishers, 2018

# Предисловие

*Прежде чем вы начинаете чтение, вы вправе ожидать ответа на некоторые простые вопросы. С какой целью написана эта книга? Кто тот воображаемый читатель, для которого она предназначена?*

*Трудно начать с ясного и последовательного ответа на эти вопросы. Гораздо легче ответить на них в конце книги, хотя это было бы совершенно лишним. Мы находим, что проще сказать, чем эта книга не стремится быть. Мы не писали учебника по физике. Здесь нет систематического изложения элементарных физических фактов и теорий. Скорее наше стремление состояло в том, чтобы широкими штрихами обрисовать попытки человеческого разума найти связь между миром идей и миром явлений. Мы стремились показать те активные силы, которые вынуждают науку создавать идеи, соответствующие реальности нашего мира. Но наше изложение должно быть простым. Сквозь лабиринт фактов и понятий мы должны были избрать столбовой путь, который казался нам самым характерным и значительным. Те факты и теории, которые не лежали на избранном пути, мы должны были опустить. Наша основная цель вынуждала нас сделать определенный выбор фактов и идей. О важности проблемы не следует судить по числу страниц, посвященных ей. Некоторые суще-*

ственные направления мысли не были отражены не потому, что они казались нам несущественными, а потому, что они не лежат на том пути, который мы избрали.

Когда мы писали книгу, мы вели длинные дискуссии о характере нашего идеализированного читателя и сильно беспокоились о нем. Мы восполняли полное отсутствие у него каких-либо конкретных сведений по физике и математике большим числом его достоинств. Мы считали его заинтересованным в физических и философских идеях и были вынуждены восхищаться тем терпением, с каким он пробивался через менее интересные и более трудные страницы. Он ясно сознавал, что для того, чтобы понять какую-либо страницу, он должен был внимательно прочитать предыдущие. Он знал, что научная, хотя бы и популярная, книга не может читаться так же, как новелла.

Книга – это беседа между вами и нами. Вы можете найти ее скучной или интересной, утомительной или возбуждающей, но наша цель будет достигнута, если эти страницы дадут некоторое представление о вечной борьбе изобретательного человеческого разума за более полное понимание законов, управляющих физическими явлениями.

А. Эйнштейн

Л. Инфельд

# **I. Расцвет механистического воззрения**

*Великая повесть о тайнах природы. – Первая руководящая идея. – Векторы. – Загадка движения. – Еще одна руководящая идея. – Является ли теплота субстанцией? – Увеселительная горка. – Мера превращения. – Философские воззрения. – Кинетическая теория вещества.*

# Великая повесть о тайнах природы

В нашем воображении рисуется книга. Это искусно написанная повесть о событиях, обстоятельства которых скрыты от нас под покровом загадочных тайн. Повесть эта дает нам все существенные путеводные нити и заставляет нас создать свою собственную теорию происходящего. Если мы внимательно следуем замыслу повести, мы приходим к полному раскрытию всех обстоятельств еще раньше, чем автор раскрывает их в конце книги. Само это раскрытие, если речь идет не о плохой повести, не разочаровывает нас: оно появляется в тот самый момент, когда мы его ждем.

Можем ли мы уподобить читателя такой книги ученым, которые через все следующие друг за другом поколения продолжают добиваться раскрытия тайн в книге природы? Сравнение неверно и его нужно впоследствии отбросить, но оно имеет некоторое оправдание; его следует расширить и видоизменить, чтобы сделать более соответствующим попыткам науки разгадать тайну Вселенной.

Эта великая повесть о тайнах еще не окончена. Мы даже не можем быть уверены в том, что она имеет окончательное завершение. Но уже само чтение дало нам много. Оно научило нас основам языка природы. Оно позволило нам понять многие путеводные нити и было источником радости и духовного подъема в периоды усиленного продвижения науки.

Но мы ясно представляем себе, что, несмотря на все прочитанные и разобранные тома, мы еще далеки от ее конца, если, конечно, такой конец вообще существует. В каждой стадии мы стремимся найти объяснение, находящееся в согласии с уже открытыми идеями. Теории, принятые в качестве пробных, объяснили много фактов, но никакого общего решения, совместимого со всем тем, что нам известно, пока еще не достигнуто. Очень часто совершенная на вид теория оказывалась неверной. Появляются новые факты, которые противоречат теории или же не объясняются ею. Чем больше мы читаем, тем более полно и высоко оцениваем совершенную конструкцию книги, хотя полная разгадка ее тайн кажется все удаляющейся по мере того, как мы продвигаемся вперед.

Со времени великолепных рассказов Конан-Дойля почти в каждой детективной новелле наступает такой момент, когда исследователь собрал все факты, в которых он нуждается, по крайней мере, для некоторой фазы своей проблемы. Эти факты часто кажутся совершенно странными, непоследовательными и в целом не связанными. Однако великий детектив заключает, что в данный момент он не нуждается ни в каких дальнейших розысках и что только чистое мышление приведет его к установлению связи между собранными фактами. Он играет на скрипке или, развалившись в кресле, наслаждается трубкой, как вдруг, о Юпитер, эта связь найдена! Он не только уже имеет в руках объяснение всех обстоятельств дела, но он знает, какие другие определенные собы-

тия должны были случиться. Так как теперь он совершенно точно знает, где искать их, он может, если ему хочется, идти собирать дальнейшие подтверждения своей теории.

Ученый, читая книгу природы, если нам позволено будет повторить эту банальную фразу, должен сам найти разгадку, потому что он не может, как это часто делает нетерпеливый читатель других повестей, обратиться к концу книги. В нашем случае читатель – это тоже исследователь, который ищет, как объяснить, хотя бы отчасти, связь событий между собой. Чтобы получить даже частичное решение этой задачи, ученый должен собирать неупорядоченные факты и своим творческим мышлением делать их связанными и понятными.

Наша цель – в последующих страницах описать в общих чертах, какова работа физиков, соответствующая чистому мышлению исследователя. Мы будем, главным образом, касаться роли мыслей и идей в смелых исследованиях, имеющих целью познание физического мира.

# Первая руководящая идея

Попытки прочесть великую повесть о тайнах природы так же стары, как и само человеческое мышление. Однако лишь немногим более трех столетий назад ученые начали понимать язык этой повести. С того времени, т. е. со времени Галилея и Ньютона, чтение продвигалось быстро. Развилась техника исследования, систематические методы отыскания и изучения руководящих идей. Были разрешены некоторые загадки природы, хотя многие решения в свете дальнейших исследований оказались временными и поверхностными.

Самая фундаментальная проблема, остававшаяся в течение тысячи лет неразрешенной из-за ее сложности, – это проблема движения. Все движения, которые мы встречаем в природе, – движение камня, брошенного в воздух, движение плывущего в море корабля, движение повозки, тянущейся вдоль улицы, – в действительности очень сложны. Чтобы понять все эти явления, лучше всего начать с наиболее простых возможных случаев и постепенно продвигаться к более сложным. Рассмотрим тело, находящееся в покое. Чтобы изменить положение такого тела, необходимо оказать некоторое воздействие на него, толкнуть или поднять, или заставить действовать на него другие тела, например лошадь или паровую машину. Наша интуиция связывает движение с такими действиями, как толчок или тяга. Повторение опыта

заставило бы нас отважиться на дальнейшее утверждение, что если мы хотим, чтобы тело двигалось быстрее, мы должны толкать его сильнее. Кажется естественным заключение, что чем сильнее действие, оказываемое на тело, тем больше будет его скорость. Карета, запряженная четверкой лошадей, движется быстрее, чем карета, запряженная парой. Таким образом, интуиция говорит нам, что скорость существенно связана с внешним воздействием.

Для читателей детективных выдумок привычно, что фальшивая нить запутывает повесть и отдаляет ее разрешение. Метод рассуждения, навязываемый интуицией, неверен и приводит к ложным идеям о движении, которые сохранились в течение столетий. Может быть, главным основанием продолжительной веры в эту интуитивную идею повсюду в Европе был великий авторитет Аристотеля. В «*Механике*», в продолжение двух тысяч лет приписываемой ему, мы читаем:

«Движущееся тело останавливается, если сила, его толкающая, прекращает свое действие».

Открытие, сделанное Галилеем, и применение им методов научного рассуждения были одним из самых важных достижений в истории человеческой мысли, и оно отмечает действительное начало физики. Это открытие учит нас тому, что интуитивным выводам, базирующимся на непосредственном наблюдении, не всегда можно доверять, так как они иногда ведут по ложному следу.

Но где интуиция ведет к ошибкам? Правильно ли сказать, что карета, запряженная четверкой лошадей, должна двигаться быстрее, чем запряженная только двумя?

Проверим ближе основные факты движения, начиная с простых повседневных опытов, хорошо известных человечеству с начала цивилизации и полученных в жестокой борьбе за существование.

Предположим, что некто, идущий по горизонтальной дороге с багажной тележкой, внезапно перестает ее толкать. Тележка будет двигаться еще некоторое время, пройдя небольшое расстояние, а затем остановится. Мы спрашиваем: как можно увеличить это расстояние? Для этого имеются различные способы, например смазывание колес или устройство более гладкой дороги. Чем легче вращаются колеса и чем ровнее дорога, тем дальше будет двигаться тележка. А что же дает смазывание колес или сглаживание неровностей пути? Только одно: становится меньше внешнее влияние. Уменьшается эффект, называемый трением, как в колесах, так и между колесами и дорогой. Это уже теоретическое толкование наблюдаемых данных, толкование, которое пока еще произвольно. Один важный шаг дальше, и мы попадем на правильный след. Представим себе совершенно гладкий путь и колеса, вовсе не имеющие трения. Тогда ничто не остановит тележки и она будет катиться вечно. Этот вывод достигнут только размышлением об идеализированном эксперименте, который никогда не может быть осуществлен,

так как невозможно исключить все внешние влияния. Идеализированный эксперимент указывает путь, на котором фактически были установлены основы механики движения.

Сравнивая оба метода подхода к проблеме, мы можем сказать, что интуитивная идея такова: чем больше воздействие, тем больше скорость. Таким образом, наличие скорости показывает, действуют ли на тело внешние силы. Новый же путь, указанный Галилеем, таков: если ничто не толкает и не тянет тело или если на тело ничто не действует каким-либо другим образом, короче говоря, если на тело не действуют никакие силы, оно покоится или движется прямолинейно и равномерно, т. е. всегда с одинаковой скоростью по прямой. Следовательно, скорость сама по себе не показывает, действуют ли на тело внешние силы или нет. Правильный вывод Галилея был сформулирован спустя поколение Ньютоном в виде *закона инерции*. Этот закон – обычно первое из физики, что мы выучиваем в школе наизусть, и многие из нас могут его вспомнить.

*Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерно-прямолинейного движения, если только оно не вынуждено изменять его под влиянием действующих сил.*

Мы видели, что закон инерции нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести лишь умозрительно – мышлением, связанным с наблюдением. Этот идеализированный эксперимент никогда нельзя выполнить в действительности, хотя он ведет к глубокому пониманию

действительных экспериментов

Из многообразия сложных движений в окружающем нас мире мы выбираем в качестве первого примера прямолинейное и равномерное движение. Это движение – простейшее, ибо при этом на движущееся тело не действуют никакие внешние силы. Однако прямолинейное и равномерное движение никогда нельзя реализовать; камень, брошенный с башни, или тележка, толкаемая вдоль дороги, никогда не могут двигаться абсолютно прямолинейно и равномерно, потому что мы не можем полностью исключить влияния внешних сил.

В хорошей повести о загадочных тайнах самые очевидные нити часто ведут к ложным подозрениям. В наших попытках понять законы природы мы подобным же образом находим, что самое очевидное интуитивное объяснение зачастую бывает ложным.

Человеческое мышление творит вечно изменяющуюся картину вселенной. Вклад Галилея в науку состоял в разрушении интуитивного воззрения и в замене его новым. В этом – значение открытия Галилея.

Но немедленно же возникают дальнейшие вопросы о движении. Если не скорость является показателем внешней силы, действующей на тело, то что же тогда? Ответ на этот фундаментальный вопрос был найден Галилеем, а вернее Ньютоном; он образует новую руководящую идею в наших исследованиях.

Чтобы найти правильный ответ, мы должны немного глубже вдуматься в опыт с тележкой на абсолютно гладкой дороге. Прямолинейность и равномерность движения в нашем идеализированном опыте были обязаны отсутствию всех внешних сил. Теперь представим себе, что прямолинейно и равномерно движущаяся тележка получает толчок в направлении движения. Что произойдет при этом? Очевидно, ее скорость увеличится. Так же очевидно, что толчок в направлении, противоположном направлению движения, должен уменьшить скорость. В первом случае движение тележки ускоряется толчком, во втором – замедляется. Вывод вытекает сразу же: действие внешней силы изменяет скорость. Таким образом, не сама скорость, а ее изменение есть следствие толчка или тяги. Сила либо увеличивает, либо уменьшает скорость, соответственно тому, действует ли она в направлении движения или в противоположном направлении. Галилей видел это ясно и написал в своем труде *«Беседы о двух новых науках»*:

«...скорость, однажды сообщенная движущемуся телу, будет строго сохраняться, поскольку устранены внешние причины ускорения или замедления, – условие, которое обнаруживается только на горизонтальной плоскости, ибо в случае движения по наклонной плоскости вниз уже существует причина ускорения, в то время как при движении по наклонной плоскости вверх налицо замедление; из этого следует, что движение по горизонтальной плоскости вечно,

ибо, если скорость будет постоянной, движение не может быть уменьшено или ослаблено, а тем более уничтожено».

Идя по этому верному пути, мы достигаем более глубокого понимания проблемы движения. Основой классической механики, как она сформулирована Ньютоном, является связь между силой и изменением скорости, а не между силой и самой скоростью, как мы думали, согласно интуиции.

Мы использовали два понятия, играющих принципиальную роль в классической механике: силу и изменение скорости. В дальнейшем развитии науки оба эти понятия расширяются и обобщаются. Поэтому они должны быть исследованы подробнее.

Что такое сила? Интуитивно мы чувствуем, что именно обозначается этим термином. Это понятие возникает из усилия, которое мы производим при толчке, броске или тяге, из того мускульного ощущения, которое сопровождает все эти действия. Но обобщение этих понятий выходит далеко за пределы столь простых примеров. Мы можем думать о силе, даже не воображая себе лошадь, тянущую повозку. Мы говорим о силе притяжения между Солнцем и Землей, Землей и Луной, и о таких силах, которые вызывают приливы и отливы. Мы говорим о силе, с которой Земля воздействует на все предметы вокруг нас, удерживая их в сфере своего влияния, и о силе ветра, производящей морские волны и приводящей в движение листья деревьев. Когда и где мы на-

блюдаем изменение скорости, тогда и там причиной этому является внешняя сила в самом общем смысле. Ньютон писал в своих «*Принципах*»:

«Воздействующая сила есть действие, оказываемое на тело, чтобы изменить его состояние покоя или равномерного прямолинейного движения.

Эта сила проявляется только в действии, она не сохраняется в теле, когда действие прекращается, ибо тело сохраняет всякое новое состояние, которое оно приобретает, исключительно благодаря его инерции. Воздействующие силы имеют различное происхождение: таковы силы удара, давления и центростремительные».

Если камень падает с вершины башни, его движение неравномерно: его скорость возрастает с падением. Мы заключаем, что в направлении движения действует внешняя сила или, другими словами, что Земля притягивает камень. Возьмем другой пример. Что происходит, когда камень брошен прямо вверх? Скорость уменьшается до тех пор, пока камень не достигнет своей наивысшей точки, после чего он начинает падать на Землю. Это уменьшение скорости вызывается той же силой, что и ускорение падающего тела. В одном случае сила действует в направлении движения, в другом случае – в противоположном направлении. Сила одна и та же, но она вызывает или возрастание скорости или замедление, соответственно тому, падает ли камень или он бро-

шен вверх.

# Векторы

Все движения, которые мы только что рассматривали, – *прямолинейные*, т. е. являются движениями по прямой линии. Теперь мы должны сделать дальнейший шаг. Мы приходим к пониманию законов природы, анализируя простейшие случаи и опуская в своих первых попытках все усложнения. Прямая линия проще, чем кривая. Однако рассмотрением только прямолинейного движения удовлетвориться невозможно. Движения Луны, Земли и планет – как раз те движения, к которым принципы механики применялись с таким блестящим успехом, – это все движения по кривым путям. Переход от прямолинейного движения к криволинейному приносит новые трудности. Мы должны иметь смелость побороть их, если мы хотим понять принципы классической механики, давшей нам первую руководящую идею и создавшей тем самым исходную точку для развития науки.

Рассмотрим другой идеализированный эксперимент, в котором совершенно гладкий шар катится по гладкому столу. Мы знаем, что если шару дан толчок, т. е. если к нему приложена внешняя сила, то его скорость изменится. Предположим теперь, что направление удара не совпадает с линией движения, как это имело место в примере с тележкой. Пусть удар направлен иначе, скажем, перпендикулярно к этой линии. Что происходит с шаром? Можно различать три стадии

движения: начальное движение, действие силы и конечное движение, после того как сила перестала действовать. Согласно закону инерции скорость как перед действием силы, так и после него абсолютно постоянна. Но имеется различие между равномерным движением до и после действия силы: изменилось направление. Направление начального движения шара и направление действия силы перпендикулярны друг к другу. Конечное движение будет совершаться не по какой-либо одной из этих линий, а где-то между ними, ближе к направлению силы, если толчок силен, а начальная скорость мала, и ближе к первоначальной линии движения, если толчок незначителен, а начальная скорость велика. Наш новый вывод, основанный на законе инерции, таков: в общем случае действие внешней силы изменяет не только скорость, но и направление движения. Понимание этого факта подготавливает нас к обобщению, введенному в физику понятием *вектора*.

Мы можем продолжать применение нашего непосредственного метода рассуждения. Исходная идея – это опять Галилеев закон инерции. Мы еще далеко не исчерпали следствий этой ценной руководящей идеи в решении загадки движения.

Рассмотрим два шара, движущихся в разных направлениях по гладкому столу. Для большей определенности предположим, что оба направления перпендикулярны друг к другу. Так как никаких внешних сил нет, то движения шаров абсо-

лютно равномерны. Предположим далее, что численно скорости их равны, т. е. оба шара за один и тот же промежуток времени покрывают одинаковое расстояние. Но правильно ли сказать, что оба шара имеют одинаковую скорость? Ответ может быть: либо да, либо нет! Если спидометры двух автомашин показывают сто километров в час, то обычно говорят, что они имеют одинаковую скорость независимо от того, в каком направлении они движутся. Но наука для своих нужд должна создавать свой собственный язык, свои собственные понятия. Научные понятия часто начинаются с понятий, употребляемых в обычном языке повседневной жизни, но они развиваются совершенно иначе. Они преобразовываются и теряют двусмысленность, связанную с обычным языком, они приобретают строгость, что и позволяет применять их в научном мышлении.

С физической точки зрения гораздо выгоднее сказать, что скорости двух шаров, движущихся в различных направлениях, различны. Хотя это – дело чистого соглашения, но гораздо удобнее сказать, что четыре автомашины, едущие из одного и того же пункта по различным дорогам, имеют не одну и ту же скорость, даже если численно скорости, зарегистрированные на их спидометрах, все равны сорока километрам в час. Это различие между скоростью, взятой по абсолютной величине, и скоростью, в которой учитывается направление, иллюстрирует, как физика, отправляясь от понятия, употребляемого в повседневной жизни, изменяет его та-

ким путем, который оказывается плодотворным в дальнейшем развитии науки.

Если величина измерена, то результат выражается некоторым числом единиц. Длина отрезка может быть равна 3 метрам 7 сантиметрам, вес некоторого объекта равен 2 килограммам 3 граммам, измеренный промежуток времени – стольким-то минутам или секундам. В каждом таком случае результат измерения выражается числом. Однако одного только числа недостаточно для описания некоторых физических понятий. Признание этого факта отмечает значительный успех в научном исследовании. Направление, так же как и число, существенно, например, для характеристики скорости. Такая величина, обладающая и числовым значением и направлением, называется *вектором*. Обычный символ для него – это стрелка. Скорость может быть представлена стрелкой или, короче говоря, вектором, длина которого в некоторой избранной шкале единиц выражает численное значение скорости, а направление которого есть направление движения.

Если четыре автомашины расходятся с численно одинаковой скоростью из одного пункта, то их скорости могут быть представлены четырьмя векторами одинаковой длины, как это видно на рисунке 1. В избранной шкале один сантиметр представляет сорок километров в час. Таким путем любая скорость может быть обозначена вектором и, наоборот, если известна шкала, то из такой векторной диаграммы может

быть установлена скорость.

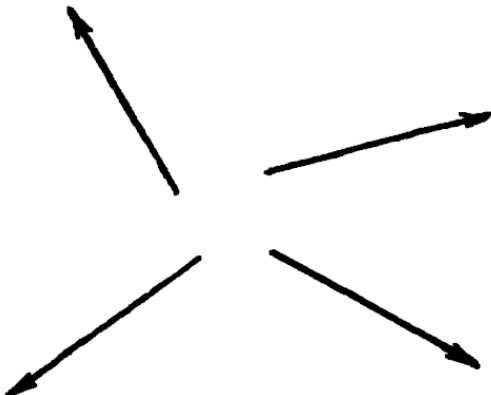


Рис. 1.

Если две автомашины проходят по автостраде мимо друг друга и их спидометры показывают сто километров в час, то мы характеризуем их скорости двумя различными векторами со стрелками, заостренными в противоположных направлениях (рис. 2).



Рис. 2.

Точно так же и стрелки, указывающие направление «в город» и «из города» в нью-йоркском метро, должны быть заострены в противоположных направлениях. Но все поезда, идущие в город с численно равной скоростью, имеют одинаковую скорость и по направлению, которая может быть представлена одним и тем же вектором. Однако вектор ничего не говорит о том, какую станцию поезд проходит или по какому из многих параллельных путей он идет.

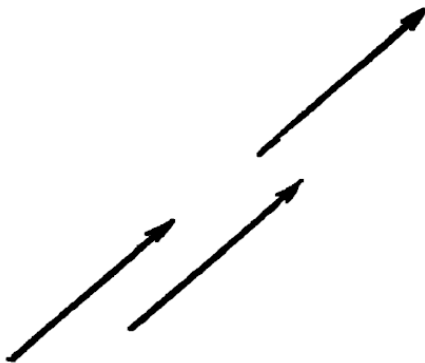


Рис. 3.

Другими словами, согласно выбранному условию все такие векторы (рис. 3) можно считать равными: они лежат либо вдоль одной и той же линии, либо вдоль ей параллель-

ных и имеют стрелки, заостренные в том же самом направлении. Следующий рисунок показывает различные векторы, ибо они отличаются либо по длине, либо по направлению, либо по тому и другому вместе. Те же самые четыре вектора можно нарисовать другим путем, так, чтобы все они расходились из одной точки (рис. 5). Так как исходная точка несущественна, то эти векторы могут представлять скорости четырех автомашин, движущихся из одного пункта, либо же скорости четырех автомашин в различных частях страны, путешествующих с указанными скоростями в указанных направлениях.

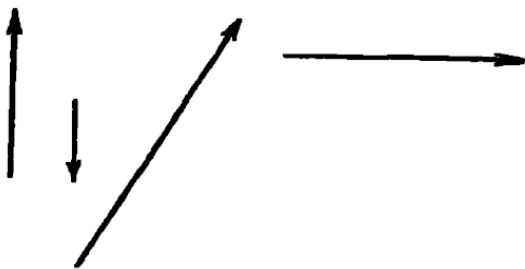


Рис. 4.

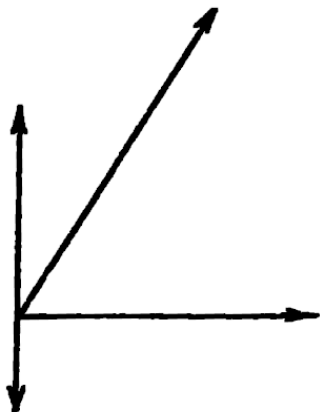


Рис. 5.

Это векторное представление можно применить к описанию обсуждавшихся ранее фактов прямолинейного движения. Мы говорили о тележке, движущейся равномерно по прямой и получающей толчок в направлении ее движения, который увеличивает ее скорость. Графически это можно представить двумя векторами: коротким, обозначающим скорость до толчка, и длинным, имеющим то же направление и обозначающим скорость после толчка (рис. 6). Значение пунктирного вектора ясно. Он представляет собой изменение скорости, вызванное толчком. В случае, когда сила направлена против движения и движение замедляется, диаграмма выглядит иначе (рис. 7). Пунктирный вектор опять

соответствует изменению скорости, но в этом случае его направление иное. Ясно, что не только сами скорости, но и их изменения – тоже векторы. Но всякое изменение скорости вызвано внешней силой; следовательно, и сила должна быть представлена тоже вектором. Для того чтобы характеризовать силу, недостаточно установить, с каким усилием мы толкаем тележку; мы должны также сказать, в каком направлении мы толкаем. Сила, как и скорость и ее изменение, должна быть представлена вектором, а не только одним числом. Поэтому внешняя сила – это тоже вектор, который должен иметь то же направление, что и изменение скорости. На обоих рисунках пунктирные векторы показывают как направление силы, так и изменение скорости.

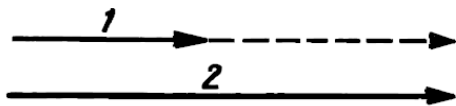


Рис. 6.

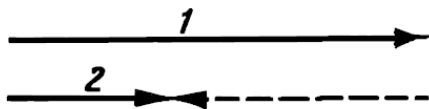


Рис. 7.

Здесь скептик может заметить, что он не видит никакого преимущества от введения векторов. Все, что было сделано, – это перевод признанных ранее фактов на необычный и сложный язык. В этой стадии, в самом деле, было бы трудно убедить скептика, что он неправ. Пока он действительно прав. Но мы увидим, что именно этот странный язык приводит к важным обобщениям, в которых векторы оказываются существенными.

## Загадка движения

До тех пор, пока мы имеем дело с прямолинейным движением, мы далеки от понимания движений, наблюдаемых в природе. Мы должны рассмотреть криволинейные движения. Наш следующий шаг – определить законы, управляющие такими движениями. Это нелегкая задача.

В случае прямолинейного движения понятия скорости, изменения скорости и силы оказались чрезвычайно полезными. Но мы не видим непосредственно, как можно применить их к случаю криволинейного движения. В самом деле, можно представить себе, что старые понятия окажутся непригодными для описания движения в общем случае и что нужно создать новые понятия. Следует ли нам пробовать идти старыми путями, или нужно искать новые?

Обобщение понятий – процесс, часто применяемый в науке. Метод обобщения не определен однозначно, ибо обычно существует множество путей его осуществления. Однако при всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщенное понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполнены первоначальные условия.

Лучше всего это можно объяснить на примере, с которым мы имеем дело теперь. Мы можем попробовать обобщить прежние понятия скорости, изменения скорости и силы для

случая движения вдоль кривой. Когда мы говорим о кривой, мы включаем в это понятие и прямую. Прямая есть особый тривиальный пример кривой. Поэтому, если скорость, изменение скорости и сила введены для движения по кривой, то они тем самым автоматически вводятся и для движения по прямой. Но этот результат не должен противоречить результатам, полученным раньше. Если кривая становится прямой, то все обобщенные понятия должны свестись к обычным понятиям, описывающим прямолинейное движение. Но это ограничение недостаточно, чтобы однозначно определить обобщение. Оно явно оставляет многие возможности. История науки показывает, что самые простые обобщения иногда оказываются удачными, а иногда нет. Мы должны сперва делать догадки. В нашем случае нетрудно найти правильный метод обобщения. Новые обобщенные понятия оказываются очень удачными и помогают нам понять как движение брошенного камня, так и движение планет.

Что же означают слова «скорость», «изменение скорости» и «сила» в общем случае криволинейного движения? Начнем со скорости. Пусть вдоль кривой слева направо движется очень маленькое тело (рис. 8). Такое маленькое тело часто называют *частицей*. Точка на кривой на нашем рисунке показывает положение частицы в некоторый момент времени. Какова скорость, соответствующая этому моменту времени и положению? Опять руководящая идея Галилея наво-

дит нас на тот путь, каким введена скорость. Мы должны еще раз использовать свое воображение и представить себе идеализированный эксперимент. Частица движется вдоль кривой слева направо под влиянием внешних сил. Представим себе, что в данный момент времени в точке, отмеченной на рисунке, все эти силы внезапно перестают действовать. Тогда согласно закону инерции движение должно быть равномерным и прямолинейным. Практически мы, конечно, никогда не можем полностью освободить тело от внешних влияний. Мы можем только сделать предположение: «что должно произойти, если...» и судить об уместности нашего предположения с помощью заключений, которые можно из него сделать, и проверки согласия этих заключений с экспериментом.



Рис. 8.

Вектор на следующем рисунке указывает предполагаемое направление равномерного движения в случае, если бы все внешние силы исчезли. Это так называемое тангенциальное или касательное направление. Если смотреть на движущуюся частицу через микроскоп, то можно увидеть очень небольшую часть ее пути, представляющуюся в виде неболь-

шого, едва искривленного отрезка. Касательная линия является его продолжением. Нарисованный таким образом вектор представляет скорость в данный момент. Вектор скорости лежит на касательной линии. Его длина представляет собой численную величину скорости или ту скорость, которая указывается, например, спидометром автомашины.



Рис. 9.

Наш идеализированный эксперимент, в котором уничтожены силы для того, чтобы найти вектор скорости, нельзя принимать слишком серьезно. Он только помогает нам понять, что мы должны называть вектором скорости *при* криволинейном движении, и позволяет нам определить его для данного момента в данной точке.

На рисунке 10 показаны векторы скорости для трех различных положений частицы, движущейся вдоль кривой. В этом случае во время движения меняются не только направления, но и величины скорости, как показывает длина векторов.



Рис. 10.

Удовлетворяет ли это новое понятие скорости требованию, сформулированному для всех обобщений? Иначе говоря, сводится ли оно к прежнему понятию скорости, если кривая становится прямой? Очевидно, да. Касательная к прямой есть сама прямая. Вектор скорости лежит на линии движения, так же как это было в случае движущейся тележки или катящегося шара.

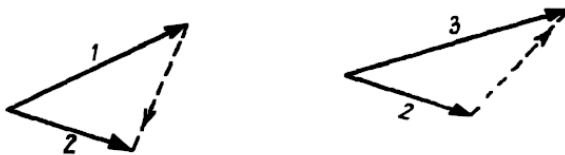


Рис. 11.

Следующий шаг – это введение изменения скорости частицы, движущейся вдоль кривой. Оно также может быть выполнено различными путями, из которых мы выберем самый простой и удобный. Последний рисунок показывал

несколько векторов скоростей, представляющих движение вдоль кривой в разных точках. Первые два из них можно опять нарисовать так, чтобы они имели общую исходную точку (рис. 11), что, как мы видели, возможно проделывать с векторами. Пунктирный вектор мы называем изменением скорости. Его начальная точка представляет собой конец первого вектора, а конечная точка – конец второго вектора. Этим и определено изменение скорости. Такое определение может на первый взгляд показаться искусственным и бессмысленным. Оно становится гораздо яснее в особом случае, в котором векторы  $1$  и  $2$  имеют одинаковое направление (рис. 12). Конечно, это означает переход к случаю прямолинейного движения. Если оба вектора имеют одну и ту же начальную точку, то пунктирный вектор опять связывает их конечные точки. Рисунок 12 совпадает с рисунком 6 на стр. 23, а прежнее понятие оказывается частным случаем нового понятия. Следует заметить, что мы должны были разделить обе линии на рисунке, ибо иначе они совпали бы и стали неразличимы.

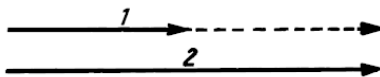


Рис. 12.

Теперь мы должны сделать последний шаг в процессе

обобщения. Это будет самой важной из всех догадок, которые мы сделали до сих пор. Связь между силой и изменением скорости должна быть установлена так, чтобы мы могли найти руководящую идею, позволяющую нам понять общие проблемы движения.

Руководящая идея для объяснения движения вдоль прямой была весьма простой: внешняя сила вызывает изменение скорости; вектор силы имеет то же направление, что и изменение скорости. Но что теперь следует рассматривать в качестве руководящей идеи для криволинейного движения? Совершенно то же самое! Единственное различие в том, что изменение скорости имеет теперь более общее значение, чем раньше. Мимолетный взгляд на пунктирные векторы на двух последних рисунках показывает это очень ясно. Если скорость известна для всех точек кривой, то направление силы в любой точке может быть найдено сразу же. Нужно нарисовать векторы скорости для двух моментов, отделенных очень короткими интервалами времени, а стало быть, соответствующих положениям, очень близким друг к другу. Вектор, проведенный из конца первого вектора к концу второго, показывает направление действующей силы. Но существенно, что оба вектора скорости должны быть отделены лишь «очень коротким» интервалом времени. Строгий анализ таких слов, как «очень близкий», «очень короткий», далеко не прост. Именно этот анализ привел Ньютона и Лейбница к открытию дифференциального исчисления.

Путь, который привел к обобщению руководящей идеи Галилея, длинен и извилист. Мы не можем показать здесь, какими изобильными и плодотворными оказались последствия этого обобщения. Его применение приводит к простому и удобному объяснению многих фактов, до того времени несогласованных и непонятных.

Из всего разнообразия движений мы возьмем лишь самое простое и применим к его объяснению только что сформулированные законы.

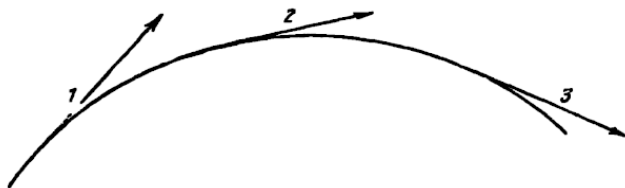


Рис. 13.

Пуля, выпущенная из ружья, камень, брошенный под углом к горизонту, струя воды, выходящая из трубы, — все они описывают хорошо известную траекторию одного и того же типа — параболу. Вообразим себе, например, что к камню присоединен спидометр, так что вектор скорости камня может быть определен для любого момента.

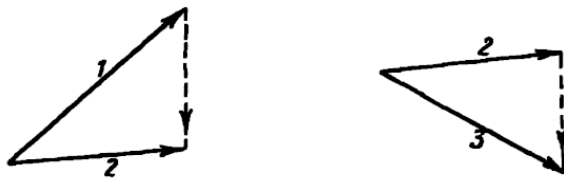


Рис. 14.

Результат представлен на рисунке 13. Направление действующей на камень силы совершенно такое же, как и направление изменения скорости; мы уже видели, как его можно определить. Следующий рисунок показывает, что сила вертикальна и направлена вниз. Совершенно то же самое мы видим, рассматривая движение камня, брошенного с вершины башни. Пути, а также и скорости совершенно различны, но изменения скоростей имеют одинаковое направление – к центру Земли.

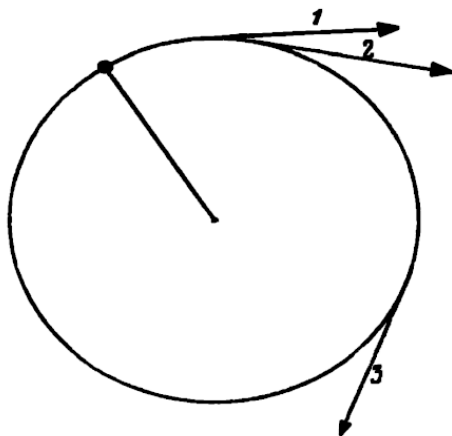


Рис. 15.

Камень, привязанный к веревке и вращающийся в горизонтальной плоскости, движется по окружности. Все векторы на диаграмме, представляющей это движение, имеют одинаковую длину, если величина скорости постоянна (рис. 15). Тем не менее вектор скорости непрерывно меняется, так как траектория не прямолинейна. Только в равномерном прямолинейном движении не участвуют никакие силы. Здесь же сила налицо, и скорость изменяется, но не по величине, а по направлению. Согласно закону движения должна существовать некоторая сила, вызывающая это изменение; в данном случае сила действует между камнем и рукой, держащей веревку.

Сразу же возникают дальнейшие вопросы: в каком направлении действует сила? Опять векторная диаграмма дает ответ. На рисунке 16 даны векторы скоростей для двух очень близких точек и найдено ускорение. Видно, что этот последний вектор должен быть направлен вдоль веревки к центру окружности и всегда перпендикулярен к вектору скорости или касательной. Другими словами, рука через веревку воздействует на камень с некоторой силой.

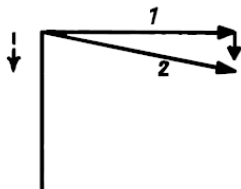


Рис. 16.

Совершенно аналогичен и более важный пример – обращение Луны вокруг Земли. Обращение Луны можно считать приблизительно за равномерное круговое движение. Сила, действующая на Луну, направлена к Земле, что можно вывести на том же основании, на каком в предыдущем примере выведено, что сила была направлена к руке. Никакой веревки, связывающей Луну и Землю, нет, но мы можем представить себе линию между центрами обоих тел; сила лежит на этой линии и направлена к центру Земли, как и сила, дей-

ствующая на камень, брошенный в воздух или падающий с башни.

Все, что мы сказали о движении, можно суммировать в одном предложении. *Сила и изменение скорости суть векторы, имеющие одно и то же направление.* Это чрезвычайно важная руководящая идея, но она недостаточна для полного объяснения всех наблюдаемых движений. Переход от Аристотелева образа мышления к Галилееву положил самый важный краеугольный камень в обоснование науки. Прорыв был сделан, линия дальнейшего развития была ясна. Наш интерес здесь лежит в первоначальной стадии развития, в исследовании начальной руководящей идеи, в раскрытии того, как рождаются новые физические понятия в жестокой борьбе со старыми идеями. Мы касались только новаторских работ в науке, состоящих в нахождении новых и неожиданных путей развития; мы касались только прогресса в научной мысли, создающей вечно изменяющуюся картину мира. Начальные и основоположные шаги всегда имеют революционный характер. Научное воображение находит старые понятия слишком ограниченными и заменяет их новыми. Развитие, продолжающееся по какой-либо уже принятой линии, эволюционно до тех пор, пока не достигается следующий поворотный пункт, когда должно быть завоевано новое поле исследования. Но чтобы понять, какие основания и какие трудности вызывают изменение основных понятий, мы должны знать не только исходные руководящие идеи, но и

выводы, которые могут быть из них сделаны.

Одна из наиболее важных характерных черт современной физики состоит в том, что выводы, сделанные из начальных идей, имеют не только качественный, но и количественный характер. Рассмотрим опять камень, падающий с башни. Мы видели, что его скорость возрастает по мере того, как он падает, но мы хотели бы знать гораздо больше. А именно, каково это изменение? Каковы положение и скорость камня в любой момент после того, как он начал падать? Нам хочется уметь предсказывать события и определять с помощью эксперимента, подтверждает ли наблюдение эти предсказания, а тем самым и исходные положения.

Чтобы сделать количественные выводы, мы должны использовать математический язык. Самые фундаментальные идеи науки по существу своему просты и, как правило, могут быть выражены языком, понятным каждому. Но чтобы охватить всю совокупность следствий, выводимых из той или иной общей идеи, требуется знание высокоуточенной техники исследования. И если мы хотим сделать выводы, которые можно сравнить с результатами эксперимента, нам необходима математика как орудие исследования. Поскольку мы касаемся только фундаментальных физических идей, мы можем избежать языка математики. Так как в этой книге мы проводим это последовательно, мы должны иногда ограничиваться ссылкой без доказательств на некоторые результаты, необходимые для понимания руководящих идей, возни-

кающих в дальнейшем развитии. Этот отказ от математического языка оплачивается потерей в точности и необходимостью временами ссылаться на результаты без указания на то, как они были достигнуты.

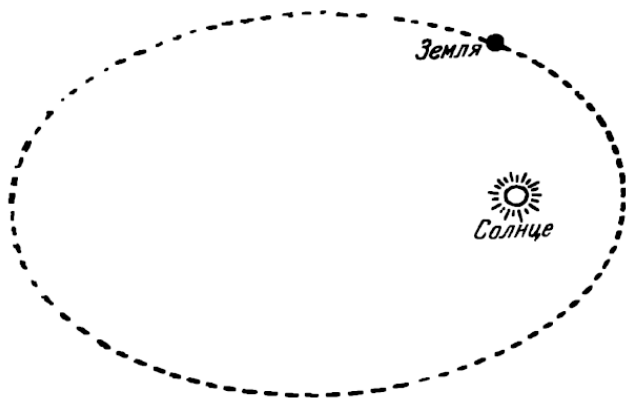


Рис. 17.

Очень важный пример движения – движение Земли вокруг Солнца. Известно, что ее путь представляет собой замкнутую кривую, называемую эллипсом (рис. 17). Построение векторной диаграммы изменения скорости показывает, что сила, действующая на Землю, направлена к Солнцу. Но после всего сказанного – это скудная информация. Нам хотелось бы уметь предсказывать положения Земли и

других планет для любого произвольного момента времени. Нам хотелось бы предсказать дату и продолжительность следующего солнечного затмения и многие другие астрономические события. Все это возможно сделать, но не на основе одной только исходной идеи, указанной выше, ибо необходимо знать не только направление силы, но и ее абсолютное значение, ее величину. Вдохновенной догадкой об этом мы обязаны Ньютону. Согласно его *закону тяготения* сила притяжения между двумя телами простым образом зависит от расстояния их друг от друга: она уменьшается, когда увеличивается расстояние. Когда расстояние удваивается, она уменьшается в  $2 \times 2 = 4$  раза; когда расстояние увеличивается в три раза, она уменьшается в  $3 \times 3 = 9$  раз.

Таким образом, мы видим, что в случае силы тяготения нам удалось выразить в простой форме зависимость силы от расстояния между движущимися телами. Подобным же образом мы поступаем во всех иных случаях, когда действуют силы других видов, например электрические, магнитные и другие силы. Мы стремимся дать для силы простое выражение. Такое выражение оправдывается лишь в том случае, когда из него можно сделать выводы, подтверждаемые экспериментом.

Но знание одной только силы тяготения недостаточно для описания движения планеты. Мы видели, что векторы, представляющие силу и изменение скорости, для любого короткого промежутка времени имеют одно и то же направление,

но мы должны вслед за Ньютоном сделать еще один шаг, предположив простое отношение между их длинами. Если взять все другие условия одинаковыми, т. е. исследовать движение одного и того же тела и изменения скорости рассматривать через одинаковые промежутки времени, то, по Ньютону, изменение скорости пропорционально силе.

Таким образом, для количественных заключений о движении планет необходимы два дополнительных предположения. Одно – общего характера, устанавливающее связь между силой и изменением скорости. Другое – специального: оно устанавливает точную зависимость частного вида рассматриваемой силы от расстояния между телами. Первое – это общий закон движения Ньютона, второе – его закон тяготения. Совместно они определяют движение планет. Это можно сделать ясным при помощи следующего, несколько неуклюже звучащего рассуждения. Предположим, что в данный момент как положение, так и скорость планеты могут быть определены и что сила известна. В таком случае согласно закону Ньютона мы узнаем изменение скорости за очень короткий промежуток времени. Зная начальную скорость и ее изменение, мы можем найти скорость и положение планеты в конце указанного промежутка времени. Повторяя этот процесс, мы можем проследить весь путь движения, не прибегая в дальнейшем к помощи начальных данных. Однако метод, примененный здесь, практически весьма неудобен. Практически такая последовательная процедура была бы столь же

скупна, сколь и не точна. К счастью, она не является необходимой: математика дает нам более короткий путь и делает возможным точное описание движения, на которое нужно гораздо меньше чернил, чем мы употребляем для написания одной только фразы. Достигнутые таким путем выводы могут быть доказаны или опровергнуты наблюдением.

Внешнюю силу того же вида, что и в рассмотренном примере движения Земли, можно обнаружить и в движении камня, падающего в воздухе, и во вращении Луны по ее орбите; это – сила земного притяжения материальных тел. Ньютон установил, что движение падающих камней, движение Луны и планет – это только очень специальные проявления универсальной силы тяготения, действующей между двумя любыми телами. В простых случаях движение может быть описано и предсказано с помощью математики. В отдельных чрезвычайно сложных случаях, когда рассматривается действие многих тел друг на друга, математическое описание не так просто, но основные принципы те же самые.

Мы находим, что выводы, к которым мы пришли, следуя нашей исходной руководящей идее, осуществляются в движении брошенного камня, в движении Луны, Земли и планет.

Такова фактически вся наша система положений, которая должна быть доказана или опровергнута экспериментом. Ни одно из положений не может быть выделено для самостоятельного испытания. Найдено, что в отношении планет, дви-

жущихся вокруг Солнца, система механики действует блестяще. Тем не менее мы легко можем представить себе, что другая система механики, основанная на других предпосылках, может оказаться столь же хорошей.

Физические понятия суть свободные творения человеческого разума и не однозначно определены внешним миром, как это иногда может показаться. В нашем стремлении понять реальность мы отчасти подобны человеку, который хочет понять механизм закрытых часов. Он видит циферблат и движущиеся стрелки, даже слышит тиканье, но он не имеет средств открыть их корпус. Если он остроумен, он может нарисовать себе некую картину механизма, которая отвечала бы всему, что он наблюдает, но он никогда не может быть вполне уверен в том, что его картина единственная, которая могла бы объяснить его наблюдения. Он никогда не будет в состоянии сравнить свою картину с реальным механизмом, и он не может даже представить себе возможность или смысл такого сравнения. Но он, конечно, уверен в том, что по мере того, как возрастает его знание, его картина реальности становится все проще и проще и будет объяснять все более широкий ряд его чувственных восприятий. Он может также верить в существование идеального предела знаний и в то, что человеческий разум приближает этот предел. Этот идеальный предел он может назвать объективной истиной.

# 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.