В.И. Фистуль

ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ

17 научных эссе

МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2010

УДК 530.1
ББК 22.3
Ф 63

Фистуль В.И. **Принципы физики. 17 научных эссе.** — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. — 148 с. — ISBN 978-5-9221-1279-6.

В книге доступно, с понятными примерами, изложены основные принципы физики как фундаментальной науки. Книга полезна для понимания неразрывной связи между различными разделами физики и их осознанного изучения в свете указанных принципов.

Книга предназначена преподавателям физики и учащимся старших классов физико-математических школ, а также преподавателям и студентам младших курсов вузов, в которых физика не является профилирующим предметом.

ISBN 978-5-9221-1279-6

ОГЛАВЛЕНИЕ

ЭССЕ 1
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПРИНЦИПАХ

1.1. Что же такое принцип?

В энциклопедической литературе понятие «принцип» трактуется как некое основное положение, лежащее в основе чего-либо, а именно — в основе теории, мировоззрения, политической или общественной организации, машины и т. д. Таковы принципы механики Ньютона, принципы термодинамической теории, принцип действия паровой машины, принципы построения, например, социалистической партии какой-либо страны и т. п.

К понятию «принцип» примыкают и другие понятия, такие, как «постулат», «аксиома» и более редко применяемое в наши дни понятие «начало». Все они также лежат в основе человеческого знания о том или ином рассматриваемом объекте. Они используются наряду с принципами, но все же все они различаются по смыслу и значимости. Рассмотрим их сущность и различия.

Постулат является исходным положением (утверждением), носящим, во всяком случае на первоначальном этапе, предположительный смысл какой-либо теории.

Постулаты формулируются без строгих доказательств и не могут быть выведены из предыдущего знания, т. е. ни из принципов, ни из более раннего опыта, ни из предшествующих теорий. Типичным примером являются знаменитые постулаты Бора. Для их понимания вспомним предложение Э. Резерфордом в 1911 г. планетарной модели атома, по которой электроны в атоме вращаются вокруг атомного ядра по круговым орбитам. Эта красивая и ясная модель противоречила законам классической электродинамики: ускоренно движущийся электрон должен излучать электромагнитные волны и тем самым уменьшать свою энергию и в конце концов «упасть» на ядро. Атом перестанет существовать!

Нильс Бор выдвинул два постулата, совершенно не соответствующие законам классической электродинамики, а именно: согласно первому постулату существуют особые, стационарные орбиты, на которых энергия электрона локализуется, что позволяет электрону находиться на постоянном расстоянии от ядра. По второму постулату Бора электрон излучает энергию только при переходе с более высоколежащей стационарной орбиты на нижележащую, но тоже стационарную орбиту.

Постулаты Бора были приняты научным сообществом в первую очередь потому, что они хорошо объяснили дискретный характер спектров излучения атомов, наблюдаемых на опыте. Но главная их роль в том, что они послужили основой создания квантовой теории. Это как раз показывает основную черту понятия «постулат» — организацию знания на начальном этапе создания новой теории.

От постулата мало отличается понятие *аксиома*. Это понятие пришло из математики и отражает, как и постулат, исходное положение, которое принимается без доказательства при построении какой-либо теории. Но в отличие от постулата аксиома кладется в основу доказательств всех других положений этой теории.

Начала — некие обобщающие понятия, имеющие смысл законов, но тех законов, которые определяют сущность целой науки или даже области наук. Таковы, например, начала термодинамики, хотя современная терминология их именует соответственно первым, вторым и третьим законами термодинамики и являющиеся соответственно законом сохранения и превращения энергии; принципом возрастания энтропии; определением точки отсчета энтропии [1].

Таким образом, термины «начала» сегодня являются своего рода терминологическим анахронизмом.

Принципы *отнюдь не являются исходными положениями*. Они, наоборот, являются наиболее обобщенными заключениями, отражающими фундаментальные факты.

Законы тоже обобщают фундаментальные факты, но они не наиболее обобщенные представления фактов. Наибольшая обобщенность фактов проявляется в том, что один и тот же принцип может лежать в основе не одного, а нескольких законов.

Таким образом, отдельные факты обобщаются в законы, а законы объединяются в еще более глобальные формулировки принципов. Следовательно, принципы могут заменять довольно значительное число законов.

Значит, любой принцип представляет собой некоторое обобщенное знание, которое в свернутом (интегрированном) виде содержит определенные факты, понятия, законы. В результате принцип — это «особая форма познания, обеспечивающая упорядочение или синтез знания» [2].

1.2. Классификация принципов

Сегодня все известные принципы можно распределить по четырем большим группам:

I. Нравственно-этические принципы;

II. Методологические принципы;
III. Естествено-научные принципы;
IV. Философские принципы.

Нравственно-этические принципы восходят к известным с древности религиозным заповедям, таким, как «не убий», «не укради» и т. п. Эти же принципы являются и принципами морали. Слово «мораль» происходит от латинского mores — нравы. Хорошо известно восклицание: «O temporos, o mores!», что в переводе звучит: «О времена, о нравы»! Уже из него видно, что мораль не есть что-то постоянное, незыблемое. Мораль вообще явление историческое. Она возникла в самом начале формирования общества и развивается в процессе изменения экономических и других общественных отношений, например, развития материальной и духовной культуры человечества или его части. Поэтому мораль изменяется во времени и в пространстве. Мораль сегодня и, например, в средние века существенно различна. Кроме того, представления о морали у различных народов, проживающих в одно и то же время, но в различных, достаточно удаленных друг от друга регионах Земли тоже сильно различаются.

В результате изменчивости морали оказываются не постоянными и нравственно-этические принципы.

Не надо думать, что нравственно-этические принципы имеют только гуманитарный характер. Они проявляются и в точных науках с не меньшей силой. Взять, например, принцип красоты в математике или в теоретической физике. Многим известны восклицания вроде «какое красивое решение!» применительно к результату математической задачи, равно как к нахождению красивой комбинации в шахматной партии.

К вопросу о принципе красоты в теоретической физике я могу рассказать о своей встрече с академиком И. К. Кикоиным. В нашей беседе мы обсуждали формулу, найденную в теоретической работе одного физика. И, к моему удивлению, Исаак Константинович сказал: «...Я думаю, я даже уверен, что эта формула правильная. Ведь она красива, а это залог правильности!»

Более подробно о принципе красоты и о других нравственно-этических принципах мы будем говорить ниже в соответствующих эссе, им посвященных.

Методологические принципы преследуют цель облегчения процесса познания явлений, происходящих в мире, окружающем Человека [3]. Эти принципы являются продуктом мыслительной деятельности человека в его стремлении найти общие черты в разрозненных явлениях и процессах для сокращения временны́х затрат, необходимых для их понимания и трактовки. Примерами методологических принципов являются принцип единства физики, принципы причинности, дополнительности, соответствия и ряд других, которые мы тоже опишем в данной книге. Важно, что эти принципы не проявляются в природе, а придуманы теоретической физикой для систематизации круга явлений и облегчения построения теорий.

Естественно-научные принципы, наоборот, проявляются в природе. Как она действует в различных своих проявлениях? Как попало, случайным образом или из всех возможностей она выбирает какую-то одну? Если это так, то каков критерий выбора? Вот вопросы, которые издавна, по крайней мере, начиная где-то в XVI–XVII веках задавали себе многие естествоиспытатели. Самый простой и естественный ответ на эти вопросы носил телеологический характер [1]): «все в руках божьих», и именно эти руки определяют тот или иной путь, по которому всем движет природа. Наука пришла к выводу о том, что природа в своей «деятельности» руководствуется именно естественно-научными принципами.

Для более полной классификации эти принципы разделяют на два вида: частно-научные и общенаучные.

К первому относят те, которые представляются общими лишь для одной отдельно взятой науки или области научного знания. Таковы, например, принципы относительности Галилея–Ньютона и Эйнштейна, принцип квантования и др.

Примерами вторых могут служить принципы наименьшего действия, сохранения и превращения энергии, принципы симметрии.

К последней группе нашей классификации принадлежат **философские принципы**, имеющие наиболее общий характер, объединяющий по существу все остальные принципы. Поэтому подобные принципы являются наиболее фундаментальными. К ним относятся принцип материального единства мира, принципы единства материи, движения, пространства и времени, принципы развития, системной организации материи, принципы единства и борьбы противоположностей, взаимного перехода количественных и качественных изменений [4].

Философские принципы как раз относятся к тем, которые не существуют в природе, а являются элементами теоретического знания или установками, определяющими поведение людей [4].

Несмотря на принятую нами классификацию принципов надо понимать, что не существует резких границ между принципами различных групп. Так многие из естественно-научных принципов одновременно являются и методологическими. Типичными примерами являются все

---

[1]) Телеология (от греч. telos — родительный падеж teleos — результат, завершение, цель и ...логия) — идеалистическое учение о цели и целесообразности. Постулирует особый вид причинности, отвечающий на вопрос, для чего, ради какой цели совершается тот или иной процесс.

принципы относительности или, скажем, принцип неопределенности Гейзенберга. Точно так же и методологические прнципы носят, как правило, философский характер. Поэтому между теми и другими принципами нет четкой незыблемой границы. Более того, каждое эпохальное открытие в естествознании приводит к изменению известных и формулировке новых философских принципов. Это станет ясно из более подробного рассмотрения философских принципов в этой книге.

1.3. Принципы и опыт

«Его Величество опыт» — единственный и справедливый судья всякой теории в Науке. А может ли подвергнуться опытной проверке принцип физики? К этому вопросу не раз обращались лучшие умы физиков и философов. Рассматривались многие принципы. Вот, например, Дюгем [7] в качестве примера обратился к принципу инерции. Этот принцип утверждает, что материальная точка, подвергнутая воздействию какого-либо тела, движется с равномерной скоростью в прямолинейном направлении. Но ведь человек может наблюдать только относительные движения. Поэтому этот принцип имеет экспериментальный смысл только, когда мы выбираем какой-нибудь определенный пункт, какое-нибудь твердое тело, считаем его неподвижным и к нему относим движение рассматриваемой материальной точки. Если принятая неподвижная точка не фиксирована, принцип инерции теряет всякий смысл. А в качестве фиксированной точки можно выбрать не Землю, а Солнце или неподвижные звезды. В результате без оговорки, что мы принимаем за фиксированную точку, принцип инерции бессмыслен. А если опыт не согласуется при выборе одной какой-либо фиксированной точки, то мы выберем другую, а если и в этом случае опыт не будет подтверждать принцип, мы выберем еще одну фиксированную точку. И так далее до бесконечности. Поэтому опровержения принципа инерции опытным путем дождаться невозможно.

Аналогично Дюгем вслед за Пуанкаре рассматривает Ньютоновский принцип равенства действия и противодействия. Дюгем формулирует этот принцип следующим образом: «Центр тяжести изолированной системы может обладать движением только прямолинейным и равномерным». Но в действительности, кроме всей Вселенной, изолированных систем не бывает! Поэтому постановки какого-либо контрольного, проверочного опыта этому принципу быть не может. Значит, мы всегда можем считать этот принцип верным.

Таким образом, есть некоторые принципы механики, и не только механики, для которых просто абсурдно задавать вопрос: согласуется ли этот принцип с данными опыта или нет. Сама постановка задачи проверки таких принципов опытным путем абсурдна.

Дюгем отмечает, что такой «странный» характер присущ не только принципам механики и приводит в [7] примеры из химии и кристаллографии.

А. Пуанкаре в [8] рассматривает алгоритм введения понятия «принцип» в виде схемы А–С–В, в которой первоначальный закон выражал соотношение между двумя голыми фактами А и В. Между ними вводится промежуточный отвлеченный факт С, более или менее фиктивный. В примере Ньютоновского тяготения роль С отведена «неуловимой сущности тяготения». Тогда мы имеем соотношение между А и С, которое можем считать строго точным и которое есть *принцип*, и другое — между С и В, которое продолжает существовать как *закон*, могущий быть пересмотренным.

Принцип, который с тех пор как бы кристаллизовался, уже не подчинен опытной проверке. *Он ни верен, ни неверен* (подчеркнуто нами. — *В. Ф.*).

1.4. Неизменность принципов

С точки зрения изменчивости или неизменчивости целесообразно сопоставить принципы и законы. Последние безусловно не постоянны во времени. В [5] мы показали изменчивость законов по мере развития Науки. То-есть наблюдаемые нами законы — это временные законы, и когда их временный характер становится ясным, то они обязательно заменяются другими, новыми законами, более общими, охватывающими устаревший закон в виде частного случая. По выражению А. Пуанкаре [6], «не может наступить междуцарствие». А принципы? Они остаются неприкосновенными. Более того, «только для них и совершаются перемены, и сами перевороты служат лишь блестящим подтверждением принципов» [6]. Эту ситуацию по меткому выражению А. Пуанкаре можно сравнить с многовековой историей какого-либо города. В нем старые, отжившие свой век постройки со временем разрушаются, некоторые вообще сносятся. На их месте возникают новые, и спустя определенное время, город становится неузнаваемым. Но такой взгляд будет только у обывателя, а взгляд не дилетанта среди новых построек увидит и часть старых, и черты прежней планировки. Наконец, веками сохраняется название города, а с ним ассоциируется нечто неизменное, типичное именно для этого города. Так обстоит дело и с принципами Науки.

1.5. Об этой книге

Теперь несколько слов о построении настоящей книги. Оно значительно отличается от двух предыдущих книг реализованной автором трилогии («Фундаментальные законы классической физики» и «Законы атомной и квантовой физики». Физматлит, 2002 и 2003). В этих книгах было принято обычное последовательное изложение законов физики, фактически так же или почти так же, как развивалась сама физика. Но принципы физики таким образом изложить невозможно, поскольку они формулировались самостоятельно и отражают различные периоды их открытия. Часто они формулировались даже спустя много лет после основополагающих открытий в физике. Наконец, один и тот же принцип может охватывать не один, а несколько законов, открытых в разное время. Все это приводит к тому, что каждый принцип вроде бы не связан с остальными. В действительности это далеко не так, и в последующем изложении мы постараемся показать эту связь. Тем не менее, мы посчитали возможным построить содержание книги в виде отдельных, своего рода научных эссе и даже вынесли эту особенность в заглавие книги. Хорошо такое построение книги или нет — судить читателям.

ЭССЕ 2

ПРОБЛЕМА ДЕТЕРМИНИЗМА И ПРИНЦИП ПРИЧИННОСТИ

Слово детерминизм произошло от латинского determino, что означает — определяю [9]. Идея детерминизма состоит в том, что все явления, события в мире не произвольны, а подчиняются объективным закономерностям, существующим вне и независимо от их познания.

В современной физике проявление детерминизма связывается с существованием объективных физических закономерностей и находит наиболее полное и общее отражение в фундаментальных физических теориях [4]. А фундаментальные физические теории (законы) в свою очередь представляют собой сущность наших знаний о физических закономерностях; приближенное, но наиболее полное на сегодня отражение объективных процессов в Природе.

Решение проблем детерминизма предполагает разделение физических теорий, а значит, и законов на динамические и статистические, т. е. вероятностные.

Динамическая теория представляет совокупность динамических законов, отображающих однозначную функциональную связь физических величин.

Исторически первой и к тому же наиболее простой такой теорией была классическая механика Ньютона. Ее законы относятся к материальной точке, но так как любое тело макроскопических размеров можно представить в виде материальных точек, то его движения как целого можно описать заданием координат и импульсов всех частиц тела в начальный момент времени. А в любой последующий момент времени его координаты и импульсы можно определить, пользуясь вторым законом Ньютона. Таким образом, координаты и импульсы частиц любой системы (тела) полностью определяют ее состояние в механике.

Пример физической теории динамического характера представляет теория Максвелла (электродинанамика). Объектом ее исследования является электромагнитное поле, а не материальные тела, как в механике Ньютона. Несмотря на это различие, структура механики и электродинамики в общих чертах аналогичны [2]. Уравнения Максвелла по заданным начальным значениям электрического и магнитного полей внутри некоторого объема пространства позволяют однозначно определить оба поля в любой последующий момент времени.

Подобие структур механики и электродинамики мы встречаем и в других теориях: термодинамике, теории гравитации, механике сплошных сред. Это служило долгое время представлению об абсолютном детерминизме всех без исключения динамических закономерностей. Такая форма детерминизма, получившая сегодня название классического (механического) детерминизма, наиболее четко была сформулирована П. Лапласом: «Ум, которому были бы известны для какого-либо данного момента все силы, одушевляющие природу, и относительное положение всех ее составляющих частей, если бы вдобавок он оказался достаточно обширным, чтобы подчинить эти данные анализу, обнял бы в одной формуле движение величайших тел Вселенной наравне с движением мельчайших атомов, не осталось бы ничего, что было бы для него недостоверным, и будущее, так же как и прошлое, предстало бы перед его взором» [10].

Таким образом, Лаплас сформулировал принцип детерминизма, *по которому все явления в Природе предопределены с абсолютной необходимостью*.

Согласно этому принципу в мире нет и не может быть ничего случайного. Тогда как же быть со многими явлениями, которые мы воспринимаем как случайные? Ответ по Лапласу очень прост — он связан с сиюминутной ограниченностью наших знаний. С течением времени, с пополнением методов исследования и расширением знаний многие «случайные» явления перейдут в ранг познаных и детерминированных. Так думалось до тех пор, пока оказалось, что динамические законы не абсолютны. Более универсальными законами Природы являются вовсе не динамические, а статистические. Первым, кто понял вероятностный характер поведения отдельных молекул в ансамбле большого их числа, был Максвелл. Впоследствии эти представления развивали Л. Больцман, Дж. Гиббс и другие.

Сегодня общими характеристиками статистических (вероятностных) теорий являются следующие.

1. Любое состояние представляет собой вероятностную характеристику системы. Это значит, что если в динамических теориях состояние системы задается значениями самих физических величин, то в статистических теориях оно задается расределением этих величин.
2. Начальные состояния однозначно определяют не сами значения физических величин, а вероятности этих значений.

Таким образом, в статистических теориях определяются средние значения физических величин.

Они играют роль самих физических величин в динамических теориях.

В результате глубокую форму детерминизации Природы отражают два ее вида: жесткий *классический* детерминизм и *вероятностный* детерминизм. По [4] последний может быть назван современным детерминизмом.

С течением развития науки пришлось отказаться от классического детерминизма в физике как от универсального понятия. Особенно это стало ясно после открытия квантовой механики, т. е. после открытия статистических законов микромира.

Основное уравнение квантовой механики — уравнение Шредингера определяет волновую функцию состояния во времени [11]. Ее значение в начальный момент времени позволяет найти ее значения в любой последующий момент времени. Таким образом, волновая функция характеризует состояние. Ее квадрат определяет вероятность обнаружить частицу в определенной области пространства [11]. Так как статистические законы являются более общими для описания физических закономерностей, то они более точно описывают любые процессы в Природе по сравнению с динамическими законами. Сегодня статистические законы доминируют над динамическими, а это означает, что первые являются более высокой ступенью детерминизма. Но это не служит отказом от классического детерминизма.

Вообще говоря, существуют два аспекта проблемы детерминизма [12]: динамические законы отражают поведение индивидуальных объектов, а статистические законы описывают совокупность большого числа таких объектов. В этом и состоит правильное понимание соотношения между двумя видами детерминизма. Отсюда видно, что динамические и статистические законы описывают разные формы движения материи и не сводимы друг к другу, а лишь дополняют друг друга. Так же, как две стороны монеты. Ведь одна без другой существовать не могут.

Вывод из анализа соотношения между динамическими и статистическими законами, а значит, и между двумя видами детерминизма сформулирован в [4]: «*Современный* (*вероятностный*) *детерминизм представляет собой обобщение классического детерминизма*, *новый*, *более высокий этап его развития*».

Наряду с представлениями о детерминизме в науке, особенно в ее философской части, существовали иные представления, полностью отрицающие детерминизм явлений Природы, — *интердетерминизм*.

Его основу составляет телеология, предполагающая, будто течение всех процессов в природе предопределяется действием «целеполагающего» начала.

Для лучшего понимания различий в двух подходах, телеологического и детерминирующего, обратимся к сравнительным описаниям.

Телеология. Заранее предопределена цель, и течение процесса подчинено достижению цели.

Детерминизм. Каждое событие или результат процесса происходит по некоторой причине.

Конечно, предопределение цели заранее предполагает некую потустороннюю (божественную) силу, о которой в наше время уже и не стоит говорить разумным материалистически настроенным homo sapience, но в наше время интердетерминизм выступает «в других одеждах». Его приверженцы увидели, что среди законов квантовой механики нет никаких динамических. В силу этого некоторые ученые, а среди них были Н. Бор и В. Гейзенберг, отождествляли первичную важность статистических законов с интердетерминизмом. Другие же ученые вроде А. Эйнштейна и М. Планка, по-прежнему стояли на позициях детерминизма. Просто «доминирующее значение статистических законов означает переход к более высокой ступени детерминизма, а не отказ от него вообще» [4]. Все сказанное показывает, что основа любой формы детерминизма лежит в причинности, т. е. первичным для любого процесса, события, закона является *причина*, а вторичным являются следствия, определяемые этой причиной. По-видимому, понятия причины и следствия известны, пожалуй, еще с древности, поскольку Человек всегда пытается найти ответ на вопрос, «почему» происходит то или иное событие в жизни или явление Природы.

Вся классическая физика в поисках ответов на подобные вопросы понимает причинность так: *состояние механической системы в начальный момент времени с известным законом взаимодействия частиц есть причина, а ее состояние в последующий момент — следствие.* В этом и состоит смысл принципа причинности.

В современном мире принцип причинности очень многими воспринимается как само собой разумеющееся. Но так было не всегда и, более того, в наши дни некоторые, даже авторитетные ученые, считают этот принцип примитивным и абсолютно не нужным (лишним) науке. Другая группа ученых отвергает этот принцип, как не способный быть применимым к микрообъектам, подчиняющимся квантовым законам. Для ученых первой группы мы можем процитировать слова великого М. Планка, охарактеризовавшего принцип причинности «как самый эвристический [1)] принцип», как «самый ценный путеводитель, каким мы только располагаем, чтобы ориентироваться в пестрой путанице явлений и находить направления, в каких должны идти физические исследования, чтобы они дали плодотворные результаты. Точно так же, как закон причинности руководит только что просыпающейся душой

1) Эвристика — наука, изучающая творческую деятельность, методы, используемые в открытии нового [14].

ребенка и в его уста вкладывает неутомимый вопрос “почему”, он сопровождает исследователя всю жизнь и непрестанно ставит перед ним новые проблемы» [13].

Вторая группа «низвергателей» принципа причинности исходит из того, что квантовые микрообъекты не могут иметь одновременно и определенную координату, и определенную соответствующую проекцию импульса (см. эссе 13, п. 13.3). Поэтому делается вывод о том, что в начальный момент времени состояние системы точно не определяется, а значит, не могут быть предсказаны и последующие состояния. Отсюда вроде бы нарушается принцип причинности. Но ведь в квантовой механике (мы уже писали об этом выше) состояние микрообъекта полностью определяется волновой функцией. Задание волновой функции для данного момента времени определяет ее значения в последующие моменты. Таким образом, *состояние системы микрочастиц, определенное в квантовой механике, однозначно вытекает из предшествующего состояния, как того требует принцип причинности.* Следовательно, никакого нарушения принципа причинности применительно к микрообъектам нет, поскольку в квантовой механике понятие состояния микрочастицы имеет совершенно другой смысл, чем в классической механике.

В заключение, обратим внимание на лукавое отношение великих Бора и Гейзенберга к «ниспровержению» принципа причинности. Пусть непроизвольное, но все же лукавое. Обратимся, например, к третьему постулату Бора, говорящему, что излучение электрона происходит только при его перескоке с одной орбиты на другую. То-есть этот постулат выражает причинную связь между межорбитальным скачком электрона и излучением этого же электрона. Первое явление — скачок производит второе явление — излучение. Это ли не типичное проявление причинности? Таким образом, Бор молча предполагает причинную обусловленность. В ней в неявном виде содержится признание принципа причинности, так яростно отвергаемого самим Бором.

Аналогично и Гейзенберг, отвергая принцип причинности, в действительности пользуется им. Так, в своей книге [15] он описывает образование следа от частицы, пролетевшей через камеру Вильсона: «Частица сталкивается в камере с атомами газа и их ионизирует. Полученные ионы вызывают конденсацию водяных паров вокруг себя и ввиду этого дают центры для образования маленьких водяных капель. Таким образом, вдоль пути летящей частицы создаются водяные капельки, непосредственно доступные наблюдению».

Легко усмотреть в основе такого объяснения молчаливо положенное представление о причинной связи двух явлений: одно вызывает другое.

И здесь налицо проявление принципа причинности, а вовсе не его отрицание.

ЭССЕ 3
ПРИНЦИПЫ УЧЕНИЯ ГАЛИЛЕЯ

3.1. Принцип инерции

Огромной научной заслугой Галилея является его отношение опыта (эксперимента) и теории. Галилей был первым из ученых-естественников, который пальму первенства в науке отдавал эксперименту. Поэтому он исследовал законы движения чисто, экспериментальным путем. Для этого он пользовался обычными предметами, т. е. «подручными средствами». Он изучал, как скатываются шарики по наклонной плоскости, как падают предметы с большой высоты на землю, как качаются маятники и т. д. В результате Галилей открыл великий принцип — принцип инерции. Этот принцип состоит в том, что если на любое тело ничто не действует и оно движется с определенной скоростью по прямой линии, то оно будет двигаться с той же самой скоростью и по той же самой прямой линии вечно.

В этой формулировке принципа инерции содержится важная особенность: отсутствие какого-либо действия на тело со стороны его окружения. Эта особенность, конечно, является идеализацией — ведь в земных условиях любое движение тела по любой поверхности сопровождается трением тела об эту поверхность и это воздействие тормозит движение тела. Его скорость с течением времени падает, и принцип инерции как бы нарушается.

Из этого, и ему подобных примеров, возникает желание поставить такие опыты, которые бы доказали справедливость принципа инерции. И тут оказывается, что принцип инерции проверить опытным путем невозможно.

Поясним это утверждение так, как это сделано в [16]: «...мы можем наблюдать движения только относительные. Поэтому принцип этот получает экспериментальный смысл только в том случае, когда мы выбираем какой-нибудь определенный путь, какое-нибудь твердое геометрическое тело, считаем его неподвижным и к нему относим движение нашей материальной точки. Фиксация этой неподвижной точки составляет неразрывную часть выражения самого принципа. Если эта неподвижная точка не фиксирована, выражение принципа теряет всякий смысл. И сколько различных таких опорных пунктов, столько и различных принципов. Мы выразим один принцип инерции, если скажем, что движение изолированной точки, отнесенное к Земле, прямолинейно и равномерно, но мы выразим другой принцип, если ту же фразу повторим, относя движение к Солнцу, и еще другой принцип, если мы отнесем движение к системе неподвижных звезд. Но тогда несомненно одно: каково бы ни было движение материальной точки, отнесенное к одной неподвижной точке, можно всегда и самым различным образом выбрать вторую точку так, что если смотреть с нее, наша материальная точка как будто будет двигаться прямолинейно и равномерно. Поэтому не следует искать экспериментального подтверждения принципа инерции. Ложный, если относить движения к одной неподвижной точке, он может стать истинным, если выбрать другой путь для сравнения, а выбрать этот последний всегда остается возможным.

Если бы принцип инерции, сформулированный по отношению к Земле, как к неподвижному пункту, оказался в противоречии с фактами наблюдения, можно было бы его заменить принципом инерции, в котором движения были бы отнесены к Солнцу. Если бы и этот принцип в свою очередь оказался бы ложным, можно было бы заменить Солнце системой неподвижных звезд и так далее».

Таким образом, не может быть и речи о подтверждении или опровержении принципа инерции опытным путем. Но этот принцип входит в виде одной из основ в состав теоретической механики. Ее цель — описание экспериментальных законов, подлежащих сравнению с опытными фактами. Согласие законов с фактами одновременно служит подтверждением принципа.

3.2. Принцип относительности

Из трех разделов механики — кинематики, статики и динамики — Галилея в первую очередь интересовала кинематика, изучающая движения отдельных материальных точек и материальных тел. При этом термин «движение» имеет двоякий смысл: геометрический и механический.

В механике он понимается совсем по-другому, чем в геометрии, настолько по-другому, что хотелось бы иметь здесь даже два разных названия, что, однако, противоречит твердо укоренившейся традиции [17].

Под словом «движение» в геометрии понимается некоторое точечное преобразование, сопоставляющее каждой точке A определенную точку A'. Таким образом, для геометра вопрос, каким образом точка A перешла в точку A', не имеет смысла. Само сопоставление $A \to A'$ — это и есть движение.

В противоположность этому в механике «движение» — это всегда процесс, переводящий точку из одного положения в другое. При этом здесь представляют интерес и траектории отдельных точек, и скорости или ускорения этих точек в отдельные моменты времени.

Наиболее принципиальное отличие механических движений от геометрических как раз и состоит в учете в механике фактора времени в то время как геометрия вообще не «знает» такого понятия. Полное описание «механического» движения, переводящего некую фигуру F в фигуру F', задается указанием того, как изменяет положение каждая точка фигуры F с течением времени. В этом случае можно говорить о функциональной зависимости $A = A(t)$ каждой точки фигуры F. Эта зависимость задается в интервале времени $t_0 < t < t_1$ в момент t_0 рассматриваемая фигура занимает исходное положение F (так что $A(t_0) = A$ — это точка фигуры F), а в момент t_1 положение F (так что $A(t_1) = A'$ — точка фигуры F'; см. рис. 1, заимствованный из [17]).

Вслед за автором [17] выясним, какие свойства движущихся тел интересуют механику, какие понятия имеют механический смысл, а какие не имеют.

На первый взгляд может показаться, что основными понятиями механики (точнее, кинематики) являются «траектория», «скорость» и «ускорение»: траектория точки A — это просто линия, вычерчиваемая этой точкой в процессе ее движения; средняя скорость точки A на интервале от момента t_0 до момента t_1 определяется как длина пути между точками $A(t_0)$ и $A(t_1)$, деленная на разность $t_1 - t_0$, а мгновенная скорость в момент t — как предел средней скорости на малом интервале времени от t до $t + \Delta t$ при $\Delta t \to 0$ (производная от пути по времени); среднее ускорение на интервале от t_0 до t_1 определяется как величина приращения скорости на этом интервале, деленная на $t_1 - t_0$, а мгновенное ускорение в момент t — как предел среднего ускорения на малом интервале от t до $t + \Delta t$ при $\Delta t \to 0$ (производная от скорости по времени). Однако на самом деле положение здесь оказывается совсем не таким: ни траектории, ни скорости точек сами по себе никакого механического смысла не имеют и рассматриваться механикой не могут.

Это положение требует разъяснения. Лучше, чем это сделал сам Галилей, вряд ли удастся кому-нибудь еще. Поэтому предоставим ему слово (цит. по [17]): «Уединитесь с кем-либо из друзей в просторное помещение под палубой какого-нибудь корабля, запаситесь мухами, бабочками и другими подобными мелкими летающими насекомыми; пусть будет у вас там также большой сосуд с водой и плавающими в нем маленькими рыбками; подвесьте далее наверху ведерко, из которого вода будет капать капля за каплей в другой сосуд с узким горлышком, подставленный внизу. Пока корабль стоит неподвижно, наблюдайте прилежно, как мелкие летающие животные с одной и той же

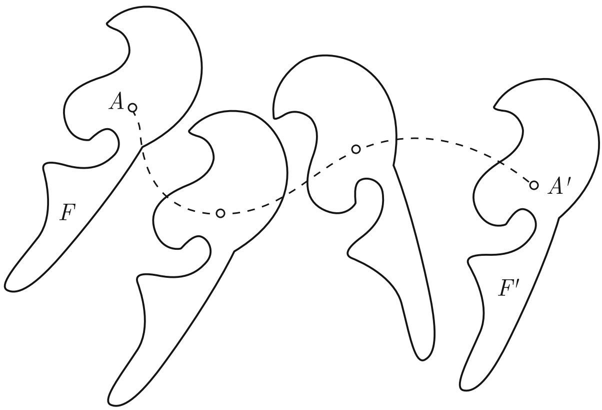

Рис. 1. Пример плоского движения фигуры F в положение F' [17]

скоростью движутся во все стороны помещения; рыбы, как вы увидите, будут плавать безразлично во всех направлениях; все падающие капли попадут в подставленный сосуд, и вам, бросая какой-нибудь предмет, не придется бросать его с большей силой в одну сторону, чем в другую, если расстояния будут одни и те же; и если вы будете прыгать сразу двумя ногами, то сделайте прыжок на одинаковое расстояние в любом направлении. Прилежно наблюдайте все это, хотя у вас не возникает никакого сомнения в том, что пока корабль стоит неподвижно, все должно происходить именно так. Заставьте теперь корабль двигаться с любой скоростью, и тогда (если только движение будет равномерным и без качки в ту и другую сторону) во всех названных явлениях вы не обнаружите ни малейшего изменения и ни по одному из них вы не сможете установить, движется корабль или стоит неподвижно. Прыгая, вы переместитесь по полу на то же расстояние, что и раньше, и не будете делать бо́льших прыжков в сторону кормы, чем в сторону носа, на том основании, что корабль быстро движется, хотя за то время, как вы будете в воздухе, пол под вами будет двигаться в сторону, противоположную вашему прыжку, и, бросая какую-нибудь вещь товарищу, вы не должны будете бросать ее с большей силой, когда он будет находиться на носу, а вы на корме, чем когда ваше взаимное положение будет обратным; капли, как и ранее, будут падать в нижний сосуд, и ни одна не упадет ближе к корме, хотя пока капля находится в воздухе, корабль пройдет много пядей; рыбы в воде не с большим усилием будут плыть к передней, чем к задней части сосуда; наконец, бабочки и мухи по-прежнему будут летать во всех направлениях, и никогда не случится того, чтобы они собрались у стенки, обращенной к корме, как если бы устали, следуя за быстрым движением корабля, от которого они были совершенно обособлены, держась долгое время в воздухе;

и если от капли зажженного ладана образуется немного дыма, то видно будет, как он восходит вверх и держится наподобие облачка, двигаясь безразлично, в одну сторону не более, чем в другую…».

В этой цитате приведено высокохудожественное, красочное по мнению автора [17] описание одного из фундаментальнейших принципов механики, который мы сегодня называем *принципом относительности Галилея* и который можно кратко сформулировать в виде следующего утверждения: *никакие механические эксперименты, производимые внутри физической системы, не смогут обнаружить равномерное и прямолинейное движение этой системы* [17].

Таким образом, механические явления, происходящие в двух лабораториях, одна из которых движется по отношению к другой равномерно и прямолинейно (например, на покоящемся и на движущемся кораблях, о которых говорит в своем «Диалоге» Галилей [18]), с точки зрения наблюдателей, находящихся в одной и другой лабораториях, совершенно одинаковы, неразличимы. Из принципа относительности Галилея вытекает, что все изучаемые механикой свойства тел сохраняются при преобразованиях физической системы, состоящих в придании ей постоянной по величине и по направлению скорости (эти преобразования называются *преобразованиями Галилея*). Иными словами, механический смысл имеют только такие свойства движущихся тел, которые не меняются при преобразованиях Галилея, имеющих вид:

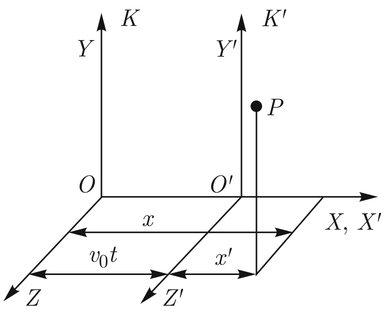

Рис. 2. К выводу уравнения (1). Две системы отсчета, движущиеся друг относительно друга с постоянной скоростью v [19]

$$\begin{aligned} x &= x' + v_0 t,\\ y &= y',\\ z &= z',\\ t &= t'. \end{aligned} \qquad (1)$$

где величины координат x, y, z и времени t относятся к одной системе координат K, а эти же величины с верхним индексом «штрих» относятся к другой системе координат K' (рис. 2), эти две системы движутся друг относительно друга с постоянной скоростью v_0.

Чтобы получить выражения (1), обратимся к рис. 2.

На этом рисунке оси x и x' двух систем координат совпадают, а оси y и y' и оси z и z' параллельны друг другу. Найдем связь между координатами x, y, z некоторой точки P в системе K и координатами x', y', z' той же точки в системе K'.

Если начать отсчет времени с того момента, когда начала координат обеих систем совпадают, то, как следует из рисунка, $x = x' + v_0 t$, $y = y'$, $z = z'$. Добавим к этим соотношениям принятое в классической механике предположение, что время обеих систем течет одинаковым образом, т. е. что $t = t'$, получим совокупность четырех уравнений (1), называемых *преобразованиями Галилея* [19].

Дифференцирование этих соотношений по времени дает связь между скоростями точки P по отношению к системам отсчета K и K':

$$\begin{aligned} &\dot{x} = \dot{x}' + v_0 \qquad && v_x = v_x' + v_0, \\ &\dot{y} = \dot{y}, \qquad \text{или} && v_y = v_y', \\ &\dot{z} = \dot{z}, && v_z = v_z'. \end{aligned} \tag{2}$$

Три скалярных соотношения (2) эквивалентны следующему соотношению между вектором скорости $\mathbf{v}$ по отношению к системе K':

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}' + \mathbf{v}_0. \tag{3}$$

Продифференцируем по времени соотношение (3). Учитывая, что $\mathbf{v}_0$ постоянно, получим

$$\dot{\mathbf{v}} = \dot{\mathbf{v}}' \quad \text{или} \quad \dot{\mathbf{a}} = \dot{\mathbf{a}}'. \tag{4}$$

Таким образом, ускорение какого-либо тела во всех системах отсчета, движущихся друг относительно друга прямолинейно и равномерно, оказывается одним и тем же. Отсюда, согласно второму закону Ньютона, вытекает, что силы, действующие на тело в системах K и K', также будут одинаковыми.

Следовательно, уравнения динамики не изменяются при переходе от одной инерциальной системы отсчета к другой.

С механической точки зрения все инерциальные системы отсчета совершенно эквивалентны. Ни одной из них нельзя отдать предпочтение перед другими. Практически это проявляется в том, что никакими механическими опытами, проведенными в пределах данной системы отсчета, нельзя установить, находится ли она в состоянии покоя или в состоянии равномерного прямолинейного движения. Впервые это заключение было выяснено Галилеем.

Положение о том, что все механические явления в различных инерциальных системах отсчета протекают одинаковым образом, вследствие чего никакими механическими опытами невозможно установить, покоится данная система отсчета или движется равномерно и прямолинейно, носит название *принципа относительности Галилея*.

ЭССЕ 4
ПРИНЦИПЫ МЕХАНИКИ НЬЮТОНА

4.1. Законы механики

И. Ньютон в 1687 г. опубликовал книгу «Математические начала натуральной философии», состоящую из трех частей. В первых двух излагались законы движения тел. Третья часть была посвящена системе Мира. Эта часть особенно смущала Ньютона, поскольку философию он считал «наглой и сутяжной дамой и боялся иметь с ней дело, чтобы не быть вовлеченным в судебную тяжбу».

Именно в этой последней части Ньютон изложил свои идеи, которые навсегда стали руководящими принципами методологии физики. Но нам прежде всего надо познать основные законы механики, сформулированные в первых двух частях этой книги [20].

В качестве первого закона механики Ньютон принял открытый Галилеем закон инерции (см. эссе 3 «Принцип инерции»), но Ньютон сформулировал его более строго.

Центральным в механике Ньютона является второй закон, который связывает изменение импульса тела $\mathbf{P} = m\mathbf{v}$ с действующей на него силой: $\Delta\mathbf{P}/\Delta t = \mathbf{F}$, т. е. изменение импульса тела в единицу времени равно действующей на него силе и происходит в направлении ее действия. Так как в механике Ньютона масса не зависит от скорости, то $\mathbf{F} = \Delta(m\mathbf{v})/\Delta t = m\Delta\mathbf{v}/\Delta t = m\mathbf{a}$, где $\mathbf{a}$ — ускорение.

В третьем законе механики был отражен тот факт, что действие тел всегда носит характер взаимодействия и что силы действия и противодействия равны по величине и противоположны по направлению.

Четвертым законом, сформулированным Ньютоном, был закон всемирного тяготения. Главной идеей, положенной в основу этого закона, была тождественность силы, удерживающей Луну на ее орбите, и силы, приводящей к падению тел, например, камня на Землю. Он писал: «Луна тяготеет к Земле и силою тяготения постоянно отклоняется от прямолинейного движения и удерживается на своей орбите». Ньютон, используя астрономические данные и формулу Гюйгенса для центростремительного ускорения a_y^0:

$$a_{\text{ц}} = v^2 R, \qquad (5)$$

где v — скорость движения тела по круговой траектории, R — ее радиус, нашел, что центростремительное ускорение Луны в 3600 раз меньше ускорения падения камня на Землю. Поскольку расстояние от центра Земли до центра Луны в 60 раз больше радиуса Земли, то можно предположить, что сила тяготения убывает обратно пропорционально квадрату расстояния. Ньютон формулирует это так: «Сила, с которой Луна удерживается на орбите, направлена к Земле и обратно пропорциональна квадратам расстояний мест до центра Земли». Затем на основании законов Кеплера этот вывод он распространяет на все планеты: «Силы, которыми главные планеты постоянно отклоняются от прямолинейного движения и удерживаются на своих орбитах, направлены к Солнцу и обратно пропорциональны квадратам расстояний до центра его». Наконец, высказав положение о всеобщем характере сил тяготения и одинаковой их природе на всех планетах, показав, что «вес тела на всякой планете пропорционален массе этой планеты».

Установив экспериментальный закон пропорциональности массы тела m и его веса P: $P = mg$, где g — величина земного ускорения, Ньютон делает вывод, что сила тяготения между телами пропорциональна массам этих тел. Так был установлен знаменитый закон всемирного тяготения, который записывается известной формулой:

$$F = \gamma m_1 m_2 / r^2, \tag{6}$$

где r — расстояние между центрами тел с массами m_1 и m_2; γ — постоянная тяготения ($6,67 \cdot 10^{-11}$ Нм^2/кг^2).

Закон Ньютона (6) обосновывает систему Коперника и законы Кеплера.

Еще до Ньютона некоторые ученые считали, что сила тяготения обратно пропорциональна квадрату расстояния. Но только Ньютон сумел логически обосновать и убедительно доказать с помощью законов динамики и эксперимента этот всеобщий закон.

Установление пропорциональности между массой и весом означало, что масса является не только мерой инерции, но и мерой гравитации [21].

Три закона механики находили много опытных подтверждений и поэтому были быстро признаны, а теория тяготения Ньютона вызвала многочисленные острые дискуссии и нуждалась в доказательствах, которые и появлялись время от времени. Триумфом этой теории можно считать событие 1846 года. В этом году французский астроном Леверье писал своему немецкому коллеге Галле следующее: «Направьте Ваш телескоп на точку эклиптики в созвездии Водолея на долготе 326 градусов и Вы найдете в пределах одного градуса от этого места новую планету с заметным диском, имеющую вид звезды приблизительно девятой величины». Указанная точка была вычислена Леверье и независимо англичанином Адамсом на основе закона всемирного тяготения Ньютона при анализе наблюдаемых «неправильностей» в движении Урана и предположения, что они вызываются влиянием неизвестной планеты. И действительно, осенью 23 сентября 1846 года Галле направил телескоп в указанную точку неба и обнаружил планету, названную Нептуном и предсказанную ранее Леверье. Расхождение с предсказанным расстоянием составляло всего 52 минуты. С того времени родилось выражение «открытие на кончике пера».

Несмотря на блестящее подтверждение теории тяготения Ньютона, дискуссии вокруг закона всемирного тяготения продолжались. Противники атеизма требовали ответа на вопрос: какова природа тяготения — имеет ли оно материальную природу или оно представляет собой проявление божественной воли? В результате подобных дискуссий Ньютон писал: «До сих пор я излагал небесные явления и приливы наших морей на основании силы тяготения, но я не указывал причины самого тяготения. Причину я до сих пор не мог вывести из явлений, гипотез же я не измышляю». Сегодня ясно, что эти слова Ньютона относятся к «измышлению» гипотез «на пустом месте». В других случаях он обсуждает ряд гипотез. Таковыми являются, например, предположения об абсолютном пространстве или об обусловленности всех явлений Природы «некоторыми силами, с которыми частицы тел, вследствие причин, покуда неизвестных, или стремятся друг к другу и сцепляются в правильные фигуры, или же взаимно отталкиваются и удаляются друг от друга».

Ньютон был убежден в объективном существовании материи, пространства и времени, в существовании объективных законов мира, доступных человеческому познанию. Он стремился свести все явления к механике, т. е. Ньютон исповедовал механицизм — механистический материализм. Но одновременно он глубоко верил в Бога и считал, что «мудрость Господня открывается одинаково в строении Природы и в священных книгах. Изучать и то и другое — дело благородное».

Таким образом, для Ньютона не было конфликта между наукой и религией. В его мировоззрении сочеталось и то и другое. Дягилев в [21] отмечает, что это характерно для многих выдающихся ученых не только в прошлом, но и в XIX и XX веках.

4.2. Метод принципов Ньютона

Свой метод познания сам Ньютон характеризует следующим образом: «Вывести два или три общих принципа движения из явлений и после этого изложить, каким образом свойства и действия всех телесных вещей вытекают из этих явных принципов, было бы очень важным шагом в философии, хотя бы причины этих принципов и не были бы еще открыты» [20].

Под принципами Ньютон подразумевает наиболее общие законы, лежащие в основе физики. Этот метод был назван впоследствии методом принципов. Требования к исследованию Ньютон изложил в виде четырех правил:

1. Не до́лжно принимать в Природе иных причин сверх тех, которые истинны и достаточны для объяснения явлений.
2. Одинаковым явлениям необходимо приписывать одинаковые причины.
3. Независимые и неизменные при экспериментах свойства тел, подвергнутых исследованию, надо принимать за общие свойства материальных тел.
4. Законы, индуктивно найденные из опыта, нужно считать верными, пока им не противоречат другие наблюдения.

Таким образом, Ньютон освободил науку от любого произвола путем однозначного объяснения Природы, а до него все предшественники пользовались в науке произвольными допущениями.

Поскольку принципы устанавливаются путем исследования явлений Природы, то вначале они представляют собой гипотезы, из которых путем логической дедукции получают следствия, проверяемые на практике. Поэтому метод принципов Ньютона, как отмечает Ф. Дягилев в [21], есть по существу гипотетико-дедуктивный метод, который в современной физике является одним из основных для построения физических теорий. «Математические начала натуральной философии» Ньютона представляют собой первый, наиболее совершенный пример применения в опытной науке этого метода.

Большинство ученых до Ньютона считали, что гипотезы и принципы выводятся прямо из опыта. Следовательно, также прямо из опыта выводится и теория, цель которой найти связь одних опытных данных с другими. Дягилев в подтверждение этой точки зрения в [21] приводит высказывание Лавуазье: «Я поставил себе законом никогда не делать никаких выводов, которые не вытекали бы непосредственно из опытов и наблюдений». И далее слова французского физика Ж. Б. Био: «Высшая степень совершенства в естествознании состоит в том, чтобы выводить из опыта не только эмпирические законы, но и принципы и общие законы». Такова была принятая до Ньютона методология эмпиризма. Ньютон первым обратил внимание на то, что хотя эксперимент и дает данные для построения теории, но он является недостаточным для этого. Другим источником являются теоретические предпосылки в виде экстраполяции старых понятий, принципов и гипотез и принципов и гипотез, сформулированных на основе новейших представлений. Характерная особенность при этом состоит в том, что исходные понятия и принципы имеют все более абстрактный характер.

Вообще роль абстракции в установлении принципов очень велика. Об этом мы написали в [5]; наш мозг устроен так, что ни один человек не может удержать в памяти все измерения (факты), а ведь все это огромное количество фактов он должен сообщить другим людям. И это тоже невозможно, если с результатами индивидуальных измерений ничего не делать.

К счастью, за работу берется абстракция. Именно абстракция отбрасывает все частные, индивидуальные детали и находит только то, что имеет общее значение. «...Так абстракция формулирует физический закон». Эти слова, взятые у Дюгема [7] описывают особенности установления законов, но они же относятся и к формулировке принципов. Ведь принципы — это еще более высокое обобщение законов.

Роль абстракции проявилась очень наглядно при построении теории в работах Максвелла. По словам Луи де Бройля, «теория Максвелла представляет собой первый шаг на пути все более и более возрастающей абстракции, который столь характерен для теорий современной физики».

Принципы и вся методология Ньютона высоко оценивалась самой жизнью и многими учеными на протяжении всего времени от создания его «Начал» до сегодняшнего дня. Мы приведем лишь одно высказывание великого Эйнштейна: «Прости меня, Ньютон, ты нашел единственный путь, возможный в твое время для человека величайшей научной творческой способности и силы мысли. Понятия, созданные тобой, и сейчас еще остаются ведущими в нашем физическом мышлении, хотя мы теперь и знаем, что если мы стремимся к более глубокому пониманию взаимосвязей, то мы должны будем заменить эти понятия другими, стоящими дальше от сферы непосредственного опыта» [8].

Современная физика не отбросила механику Ньютона, она только установила границы ее применимости. Об этом мы будем говорить в Эссе 11, посвященном общей теории относительности Эйнштейна. По словам С. И. Вавилова, «механика Ньютона — не историческая реликвия, а основа естествознания сегодняшнего дня» [22].

4.3. Принципы механической картины Мира

Основными идеями механической картины Мира являются атомизм, т. е. представление об атомах как структурных элементах всего сущего, и механицизм как убеждение сведения сущности всех явлений к механике. Фундаментальными понятиями, составляющими базис теории любой картины Мира, являются материя, движение, пространство, время, взаимодействие. Ни одно понятие из перечисленных пяти не может существовать без остальных. Все они вкупе и отражают единство Мира.

Рассмотрим специфику этих понятий в механической картине Мира (МКМ).

Материя рассматривается состоящей из атомов — неделимых абсолютно твердых движущихся частиц. По этой причине в МКМ приняты понятия механики: материальные точки и абсолютно твердые тела, которые рассматриваются как системы материальных точек с неизменным расстоянием между ними.

Пространство по Ньютону — это пустое вместилище тел. Его свойства не зависят от того, есть ли в нем материальные объекты или нет. Оно не связано с временем. Пространство трехмерно, непрерывно, бесконечно, однородно и изотропно. Такое пространство Ньютоном называлось абсолютным. Оно безотносительно к чему бы то ни было внешнему, остается всегда одинаковым и неподвижным.

Кроме абсолютного, Ньютон рассматривает и относительное пространство, которое Человек познает посредством пространственных отношений между телами.

Время по Ньютону двояко: абсолютное и относительное время. Первое из них познается людьми в процессе измерений. Второе же «абсолютное, истинное, математическое время само по себе и по самой своей сущности, без всякого отношения к чему-либо внешнему протекает равномерно и иначе называется длительностью». Таким образом, время — пустое вместилище событий, не зависящее ни от чего. Оно течет в одном направлении (от прошлого к будущему), оно непрерывно, бесконечно и везде одинаково (однородно).

Абсолютное пространство, так же как и время, не содержит никаких меток, от которых можно было бы вести отсчет и ответить на вопросы «Где?» и «Когда?». Поэтому для изучения в них материальных объектов необходимо вводить систему отсчета (часы и систему координат).

Система отсчета, жестко связанная с абсолютным пространством, является инерциальной.

Движение. В МКМ признавалось только механическое движение, т. е. изменение положения тела в пространстве с течением времени. Считалось, что любое сложное движение можно представить как сумму пространственных перемещений (см. Эссе 13, п. 13.2).

Движение в МКМ возникает под влиянием сил. Силы сравнивают по вызываемым ими ускорениям одного и того же тела. Величина

$$m = F/a$$

для данного тела оставалась постоянной. Она же характеризует инертность тела. Количественная мера инертности тела — это его инертная масса.

Взаимодействие. Все многообразие взаимодействий современная физика сводит к четырем фундаментальным взаимодействиям: сильному, слабому, электромагнитному и гравитационному. Гравитационное взаимодействие означает присутствие сил притяжения между любыми телами. Величина этих сил определяется из закона всемирного тяготения.

Зная массу одного тела (эталона) и силу гравитации, можно определить и массу второго тела. Масса, найденная из закона всемирного тяготения, получила название гравитационной. Поэтому масса — это мера инертности и гравитации.

Гравитационные силы являются универсальными, т. е. они действуют всегда имежду любыми телами и сообщают им одинаковое ускорение g. На поверхности Земли среднее значение этой величины составляет $g = 9{,}81$ м/с^2. Природа гравитационных сил не была выяснена Ньютоном, да и сегодня она еще остается загадкой.

Важнейшими принципами МКМ являются следующие три: причинности (см. эссе 2), принцип относительности Галилея (см. эссе 3) и принцип дальнодействия, по которому взаимодействие тел может происходить на большом расстоянии между ними без видимого прямого контакта между ними. В то же время притяжение или отталкивание между ними безусловно существует.

Одновременно с этими, скорее философскими принципами, в учении Ньютона фигурирует главный принцип, имеющий наряду с философским и общенаучный характер, гласящий о равенстве действия и противодействия, о котором мы уже говорили выше. Здесь есть смысл описать одну часто встречающуюся ошибку, неправильно трактующую третий закон Ньютона. Вот как его формулирует сам Ньютон: «...взаимодействия двух тел друг на друга между собой равны и направлены в противоположные стороны». Далее он наглядно поясняет содержание этого закона: «Если кто нажимает пальцем на камень, то и палец его также нажимается камнем. Если лошадь тащит камень, привязанный к канату, то и обратно она с равным усилием оттягивается к камню, ибо натянутый канат своей упругостью производит одинаковое усилие на лошадь в сторону камня и на камень в сторону лошади... Если какое-нибудь тело, ударившись в другое тело, изменяет его количество движения на сколько-нибудь, то оно само претерпит в своем собственном количестве движения то же самое изменение, но обратно направленное, ибо давления этих тел друг на друга постоянно равны» (цит. по [24]). Часто ошибка связана с рассуждениями типа: если действующая сила всегда вызывает равную по величине, но противоположно направленную силу противодействия, то результирующая сила всегда будет равна нулю. В действительности действие — это сила, приложенная к одному из взаимодействующих тел, а противодействие — сила, приложенная к другому телу. Следовательно, каждое из тел находится под действием одной силы, которая и вызывает его движение [23].

ЭССЕ 5

ПРИНЦИП ФАЗОВОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

5.1. Сущность принципа

Во многих физических явлениях проявляется принцип фазового запаздывания. Его сущность состоит в том, что *любая термодинамическая система реагирует на периодическое внешнее воздействие с запаздыванием по фазе.*

Существование этого принципа обусловлено тем, что время релаксации, характеризующее возврат системы к равновесному состоянию, отлично от нуля. Действительно, пусть рассматриваемая система имеет собственное время релаксации τ. Обозначим через f реакцию системы на приложенное периодически изменяющееся воздействие

$$F = F_0 + F_1 \sin \omega t. \tag{7}$$

Таким образом, f есть функция от F и не является функцией от времени t при $F = F_0$.

В условиях малых отклонений от равновесия приход к нему описывается уравнением

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -K(f - f^0), \tag{8}$$

где f — равновесное значение функции f^0, K — константа, равная $k = 1/\tau$.

В общем случае величина K также может быть функцией от F, но чтобы не затемнять картину, мы будем считать K постоянной величиной.

Считая $F_1 \ll F_0$, разложим равновесную функцию f^0 в ряд вблизи $F = F_0$ и ограничимся первыми двумя членами разложения:

$$f^0(F) = (f^0)_{F_0} + \left(\frac{\partial f^0}{\partial F}\right)_{F_0} F \sin \omega t. \tag{9}$$

После подстановки (9) в (8) получим

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -K\Big[f - (f^0)_{F_0}\Big] + A \sin \omega t, \tag{10}$$

где

$$A = KF_1\left(\frac{\partial f^0}{\partial F}\right)_{F_0}. \tag{11}$$

Интегрирование (10) приводит к зависимости

$$f - f^0 = C\exp(-Kt) + \left(\frac{A}{\sqrt{K^2+\omega^2}}\right)\sin(\omega t - \varphi), \tag{12}$$

где

$$\operatorname{tg}\varphi = -\frac{\omega}{K} = -\omega\tau. \tag{13}$$

Из сравнения (7) и (12) видно, что между переменной составляющей воздействия F и переменной составляющей реакции системы f возникает фазовый сдвиг φ. Зная частоту ω, с которой меняется приложенное к системе воздействие F и измеряя экспериментально $\operatorname{tg}\varphi$, можно из (13) найти характеристическое время прихода к равновесию изучаемой системы.

Разумеется, указанные выше закономерности предполагают отсутствие резонансных частот в изучаемой системе.

В заключение укажем, что все сказанное остается в силе, если K будет функцией периодического воздействия F. В этом случае появляющиеся после интегрирования усложненного кинетического уравнения (10) дополнительные слагаемые оказываются членами второго порядка малости и могут не приниматься во внимание.

5.2. Экспериментальные методы, использующие принцип фазового запаздывания

В основе экспериментальных методов, использующих принцип фазового запаздывания, лежит знание частоты ω, воздействия F и опытное измерение $\operatorname{tg}\varphi$. Такие методы, часто называемые модуляционными, широко применялись в разных областях науки еще до того, как был сформулирован сам принцип фазового запаздывания [1]).

Несмотря на известность, модуляционные методы [26–28] еще очень редко применяются для исследования, (например, термически обратимых процессов). То есть речь идет о методах, в которых внешним воздействием является температура. Поэтому мы рассмотрим метод исследования фазового запаздывания именно на примере изучения кинетики термически обратимых процессов.

Для этих целей обычно используют два способа: изотермический и изохронный, описание которых имеется в большом числе монографий

[1]) Принцип фазового запаздывания был сформулирован и исследован автором этой книги совместно с П. М. Гринштейном и опубликован в 1974 г. в [25]

и учебников (см., например, [29, 30]). Оба способа реализуются в условиях большого отклонения системы от равновесия. Тогда как теория кинетики любого термически обратимого процесса обычно предполагает, что в каждый момент времени в кинетическом процессе существуют малые отклонения от равновесия, иначе требуется построение нелинейной кинетической теории, которая в настоящее время практически отсутствует. Несовпадение условий эксперимента и модели, заложенной в кинетическую теорию процесса, приводит к неточности определения τ.

Далее, быстрые процессы, т. е. процессы с малым $\tau(\tau \approx 1\text{с})$ не могут быть исследованы ни изотермическим, ни изохронным методами из-за больших экспериментальных трудностей. Фазовый же метод относительно легко позволяет определять малые τ.

Отметим, что K в уравнении (8) — константа скорости процесса, который можно записать в виде квазихимической реакции

$$A + B \xrightarrow{K} C. \tag{14}$$

Модуляция температуры будет приводить к периодическому изменению концентраций компонентов в реакции, т. е. все уравнения (8)–(12) будут справедливыми, если в них под величиной f понимать концентрацию какого-либо из компонентов реакции (14). Отсюда становится очевидной общность фазового метода для изучения кинетики термически обратимых процессов, которые описываются уравнениями киниматики химических реакций.

Приведем еще один пример реализации метода фазового запаздывания — это измерение *внутреннего трения*. Его сущность заключается в определении потерь энергии в твердом теле при поглощении ультразвуковых волн [31]. Если действующее на образец твердого тела электрическое напряжение меняется периодически с частотой ω по закону $\sigma = \sigma_0 \cos \omega t$, то из-за того, что существует конечное время релаксации — время возврата к равновесному состоянию, деформация тела будет иметь вид $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos(\omega t - \varphi)$, т. е. σ и ε сдвинуты по фазе на угол φ. Величина этого угла определяется потерями энергии, расходуемыми на другие процессы в твердом теле, протекающими одновременно с чистой деформацией. Мерой этих потерь обычно служит *тангенс угла потерь* $\operatorname{tg} \varphi$, который принято обозначать Q^{-1} и называть *коэффициентом внутреннего трения*:

$$\operatorname{tg} \varphi = Q^{-1}. \tag{15}$$

Величина Q, таким образом, аналогична добротности электрического колебательного контура.

Деформация твердого тела, кроме приложенного механического напряжения, определяется еще и температурой. Если в каком-либо температурном интервале релаксационные процессы отсутствуют, то Q^{-1} монотонно возрастает с увеличением температуры. Если же имеет место релаксация, то на кривой $Q^{-1}(T)$ появляется пик. В первом приближении он появляется при $\omega\tau = 1$, а так как $\tau = \tau_0 \exp\,(H/kT)$, где H — энергия активации релаксационного процесса, τ_0 — постоянная величина, то нетрудно определить выражение для температуры $T_{\max}$, при которой появляется пик внутреннего трения:

$$T_{\max} = \frac{H}{k\,\ln(1/\omega\tau_0)}. \tag{16}$$

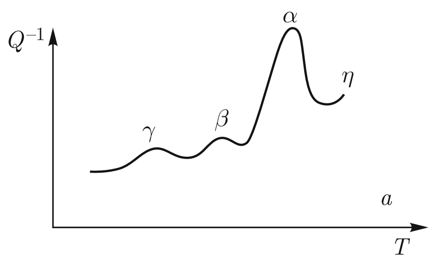

Рис. 3. Пример температурной зависимости спектра внутреннего трения

В твердом теле могут протекать одновременно несколько процессов релаксационной природы. Каждому из них присуще свое время релаксации, и из-за $\omega\tau = 1$ они будут проявляться в виде пиков при разных частотах. В результате на опыте получают частотный спектр величины Q^{-1}. Пример такого спектра с пиками, соответствующими разным процессам релаксации в кристалле, показан на рис. 3.

ЭССЕ 6
ПРИНЦИПЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

6.1. Особенности термодинамики

Термодинамика как учение о теплоте и ее способности совершать механическую работу была основана французским ученым Сади Карно, опубликовавшим работу [32] в 1824 г. В этом труде С. Карно разработал основы теории работы тепловых машин. Он же ввел важнейшие понятия «обратимого» и «кругового» процессов. Но самым главным в этой работе были впервые сформулированы условия превращения теплоты в работу. В последствии эти условия явились содержанием так называемого *принципа Карно* (см. п. 6.4).

С течением времени выкристаллизовались следущие характерные особенности термодинамики как науки (они хорошо описаны в [33]):

1. Аппарат современной термодинамики строится на небольшом числе (пяти) универсальных, абсолютно достоверных закономерностях — принципах, утверждающих существование определенных функций состояния, и уравнениях, связывающих их. Этим объясняется универсальность аппарата термодинамики, применимость его к анализу самых разнообразных явлений и абсолютная достоверность выводов, полученных с его помощью, равная достоверности закона сохранения энергии.
2. Концентрированным математическим выражением всех принципов и идей термодинамики являются два ее фундаментальных уравнения — так называемые основное уравнение состояния и основное уравнение процесса. Эти два уравнения вместе с аппаратом математики составляют аппарат современной термодинамики с весьма стройной и логичной структурой. По общности и универсальности он уступает только «языку природы» — математике.
3. Существуют два метода применения закономерностей термодинамики при анализе физических явлений и установлении соотношений между различными свойствами веществ — метод циклов и метод потенциалов.

   С помощью метода циклов необходимые соотношения получают на основе применения отдельных закономерностей термодинамики к воображаемым циклам, используя свойство функций состояния — независимость их изменения от характера процесса.

Методом потенциалов эти соотношения находят, используя математические свойства двух фундаментальных уравнений термодинамики — основного уравнения состояния и основного уравнения процесса.

Более подробному описанию этих методов посвящены п.п. 6.3.3 и 6.3.4. Это вступление закончу словами А. Эйнштейна, сказанными им в качестве характеристики термодинамики: «Теория производит тем большее впечатление, чем проще ее предпосылки, чем разнообразнее ее предметы, которые она связывает, и чем шире область ее применения. Отсюда глубокое впечатление, которое произвела на меня термодинамика. Это единственная универсальная теория, относительно которой я убежден, что в рамках применимости ее основных понятий она никогда не будет опровергнута».

6.2. Принцип эквивалентности различных видов энергии

Известно, что в Природе проявляются различные виды энергии: механическая, тепловая, электрическая, химическая и т. п. Все они могут переходить из одной формы в другие. Количественной мерой каждой из них является количество видов работы. Энергетические переходы могут совершаться в строго определенных количествах. Эти эквивалентные количества не зависят ни от характера преобразования одного вида энергии в другой, ни от условий протекания самого́ энергетического преобразования.

Из школьного курса физики читатели наверняка помнят механический эквивалент теплоты (427 кг·м/кал), т. е. коэффициент пропорциональности в законе, связывающем механическую работу с количеством тепла, затрачиваемого на ее производство. Но подобные коэффициенты пропорциональности — эквиваленты, существуют между любой парой перечисленных выше видов энергий. В таблице 1 приведены численные значения эквивалентов.

Таблица 1. Эквиваленты пересчета энергетических единиц

	Дж	кг·м	кал	эрг	Вт · час
1 кг· м	9,81	1	2,34	$2,81 \cdot 10^7$	$2,72 \cdot 10^{-3}$
1 кал=	4,18	0,427	1	$4,18 \cdot 10^7$	$1,16 \cdot 10^3$
1 эрг=	10^{-7}	$1,02 \cdot 10^{-8}$	$2,39 \cdot 10^{-8}$	1	$2,78 \cdot 10^{-11}$

6.3. Термодинамические принципы существования

6.3.1. Принцип существования координат состояния. Координатами состояния называются такие физические величины, которые изменяют свое значение при обмене энергией эпределенного вида. В отсутствии именно этого вида обмена энергией (пусть даже другие виды энергетитического обмена существуют) координаты состояния не изменяются.

Координаты состояния еще называют *обобщенным координатами.*

Координаты состояния являются экстенсивными величинами, т. е. зависящими от количества вещества (массы) системы. Примерами таких величин являются объем, внутренняя энергия (см. п. 6.3.4).

Наиболее просто обстоит дело при обмене энергией механического вида. В этом случае обобщенной координатой — механической координатой состояния — является объем термодинамической системы.

В случае фазовых превращений или химических реакций изменения происходят не со всеми составляющими системы, а тишь с теми, которые принимают участие в этих процессах. Координатой состояния в этих случаях являются массы композитов системы. При этом общая масса системы может оставаться неизменной, но масса одних компонент может увеличиваться sa счет уменьшения массы других компонент.

Сложнее обстоит дело с координатой состояния при тепловом воздействии. В этом случае тепловой координатой состояния является *энтропия*, сущность которой мы рассмотрим в п. 6.3.5.

В результате анализа вопроса об обобщенных координатах или, что то же самое, о кординатах состояния был сформулирован принцип их существования [33]: *существует такая категория экстенсивных функций состояния — координат состояния, значения которых однозначно определяют состояние системы и изменение которых является обязательным признаком проявления соответствующего взаимодействия: механического* (*обьем*), *электрического* (*заряд*), *теплового* (*энтропия*) *и т. п.*

6.3.2. Принцип существования однозначных уравнений состояния. Любой термодинамической системе присущи ряд параметров, т. е. физических величин, характеризующих ее состояние. Среди них есть такие, которые допускают непосредственное измерение. Примером могут служить объем системы, температура, давление. Такие величины называют *параметрами состояния* термодинамической системы. На первый взгляд, кажется, что их требуется очень много для задания состояния. Но так как многие параметры связаны между собой, то нет необходимости для характеристики системы задавать все параметры. Достаточно выбрать лишь некоторые из физических величин, которые полностью определят состояние системы. Такие величины называют *независимыми переменными*. Остальные физические величины являются функциями этих независимых переменных. Совершенно ясно, что эта связь может быть выражена в виде однозначных уравнений, в которых аргументами выступают независимые переменные, а функциями — значения какой-либо одной из функциий состояния. Такие уравнения получили название *уравнений состояния*.

В термодинамике показывается, что вместо независимых переменных могут быть приняты координаты состояния [33]. В этом случае говорят об *однозначных уравнениях состояния*. В результате формулируется принцип существования однозначных уравнений состояния: *существуют однозначные уравнения состояния системы с координатами состояния в качестве независимых переменных*. Этими уравнениями являются $T = T(S, V \ldots), P = P(S, V \ldots), U = U(S, V \ldots)$ и т. п., где T — температура, P — давление, U — внутренняя энергия (см. п. 6.3.4), V — объем, S — энтропия (см. п. 6.3.5).

6.3.3. Принцип существования потенциалов взаимодействий. Потенциалы взаимодействия (обобщенные силы) — это физические величины, различие которых в термодинамической системе и окружающей среде является причиной обмена энергией.

Различают потенциалы взаимодействий по виду последних. Это *деформационное взаимодействие* — передача энергии в виде механической работы, соответствующий потенциал — *абсолютное давление*, соответствующий тепловой потенциал — *абсолютная температура*. *Электрическое взаимодействие* определяется потенциалом, которым является *электрическое поле*. Потенциал, обусловливающий *химическое взаимодействие и фазовое превращение* — *химический потенциал*, величину которого можно только вычислить через другие измеряемые физические величины, а не измерить прямо прибором.

Все потенциалы взаимодействия — величины интенсивные, т. е. не зависящие от количества вещества системы. На примерах температуры и давления в этом легко убедиться.

Все сказанное содержится в соответствующем принципе существования потенциалов взаимодействий [33]: *существует категория интенсивных функций состояния — потенциалов взаимодействий, которые являются движущими причинами соответствующих видов взаимодействий*.

С помощью потенциалов взаимодействия можно определить количество энергии, передаваемой в любом виде, по соотношению

$$\delta W_i = P_i \, dx_i, \tag{17}$$

в котором W_i — количество воздействия, P_i — потенциал взаимодействия, x_i — координата состояния [1]).

6.3.4. Принцип существования внутренней энергии. Общая мера различных форм движения — это энергия системы. Известны механическая, электрическая, химическая, ядерная виды энергии. Любая термодинамическая система обладает некоторым запасом энергии. Начиная с Р. Клаузиуса (1850 г.) в термодинамике фигурирует понятие внутренней энергии — суммы всех видов энергий, проявляющихся в системе.

Само существование внутренней энергии — это и есть один из принципов термодинамики. Его еще именуют *первым законом термодинамики*.

Для дальнейшего заметим, что для теплоты и работы принято следующее правило знаков: положительной принимают количество теплоты, если она «подводится» к системе, а работу паринимают положительной, если она «совершается» системой над окружающей средой. В термодинамике под изолированной системой понимают совокупность термодинамической системы и окружающей среды.

Первый закон термодинамики для изолированной системы с учетом правила знаков имеет вид:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - L - \sum A_i, \tag{18}$$

где ΔU — изменение внутренней энергии системы; U_2 и U_1 — значения внутренней энергии системы в ее конечном и начальном состояниях; Q — количество теплоты; L — количество механической работы; $\sum A_i$ — сумма количеств немеханических работ (электрической, химической и др.).

Для бесконечно малых изменений Q, L, $-A_i$ будет и малое изменение U. Соответственно (18) будет записано как

$$dU = \delta Q - \delta L - \sum \delta A_i. \tag{19}$$

Уравнение первого закона термодинамики для системы, в которой имеются только теплота и механическая работа (такая система называется термомеханической), принимает вид:

$$dU = \delta Q - \delta L. \tag{20}$$

Здесь обозначение d подчеркивает, что бесконечно малое изменение внутренней энергии, которая является функцией состояния, обладает свойствами полного диференциала, а количества теплоты dQ и работы δL, являющиеся функциями процесса, свойствами полного

[1]) О различии физического смысла значков δ и d см. в п. 6.3.4.

диференциала не обладают. Таким образом, мы пока без доказательств ввели понятие внутренней энергии. Так же как и в [33] покажем существование внутренней энергии путем применения к круговому процессу принципа эквивалентности теплоты и работы.

При круговом процессе термодинамическая система, претерпев ряд изменений, возвращается в исходное состояние. Все параметры и функции состояния изменяются в процессе, а в конце цикла принимают свое первоначальное значение. Таким образом, при завершении кругового процесса в системе не произойдет никаких изменений.

В этом же процессе должен выполняться принцип эквивалентности, на основании которого при выборе одинаковых единц для теплоты и работы можно записать $(L/Q) = 1$, справедливое для кругового процесса. Или для этого же процесса:

$$Q - L = 0. \tag{21}$$

Поскольку значение этой разности не изменяется, то вся разность представляет собой функцию состояния системы. Эту функцию назвали *внутренней энергией*.

Для некругового процесса

$$(Q - L) = \mathrm{const} = U_2 - U_1. \tag{22}$$

Это же выражение выражает принцип эквивалентности в термомеханической системе.

Отсюда видно, что принцип существования внутренней энергии можно трактовать как следствие принципа эквивалентности.

6.3.5. Принцип существования энтропии. Принцип существования энтропии утверждает ее существование как функции состояния и гласит: *для каждой термодинамической системы существует физическая величина, значение которой зависит от состояния системы и изменение которой происходит только под действием энергии, передаваемой в виде теплоты.*

Эта величина была введена Клаузиусом в 1856 г. и названа им *энтропией*.

Математическое выражение энтропии имеет вид:

$$ds = \frac{\delta Q}{T} \tag{23}$$

(см. примечание к п. 6.3.3).

В [33] отмечается, что принцип существования энтропии является частным случаем принципа существования координат состояния (см. п. 6.3.1).

К сожалению, понять физический смысл энтропии не просто из-за того, что ее значение не может быть измерено никаким способом (никаким прибором), а доказательство ее существования Клаузиусом оказалось некорректным (см. ниже). Тем не менее, для доказательства существования энтропии Клаузиус применил бесспорный факт невозможности перехода теплоты само собой от холодного тела к горячему. Это безусловно правильно. Поэтому доказательством существования энтропии является опыт, подтверждающий все выводы, полученные на основании использования понятия энтропии и ее аналитического выражения (23).

Существование энтропии доказывается Клаузиусом на основе им же доказанной теоремы Карно (см. п. 4.5.4), что уже само по себе вызывает неудовлетворение. Поэтому, строго говоря, прямое доказательство существования энтропии остается проблемой.

В заключение этого раздела процитируем, хотя и пространное, изложение проблемы доказательства существования энтропии, заимствованное из раздела 7.6 книги [33]:

«... Все это привело к возникновению направления в термодинамике, которое отвергает необходимость специального доказательства существования энтропии с помощью каких-либо постулатов. Фактически предлагается непосредственно постулировать существование энтропии. При этом отпадает необходимость в проведении аналитического доказательства на основе принятого постулата, необходимость обосновывать справедливость оного неочевидного положения с помощью другого столь же неочевидного. В качестве доказательства существования энтропии предлагается рассматривать опыт, который подтверждает все выводы и уравнения, полученные на основе использования аналитического выражения принципа существования энтропии (23)». Одним словом, в отношении энтропии предлагается поступить так же, как поступил В. Гиббс с химическим потенциалом, введя это понятие без какого-либо доказательства (по интуиции и логике исследования), т. е. непосредственно постулировав его существование. Опыт подтвердил существование химического потенциала. Вопроса о необходимости как-то доказывать его существование не возникало.

Рассмотрев несостоятельность классического доказательства теоремы Карно, полезно привести замечательные слова известного физика М. Борна: «Неизбежна критика классических доказательств, но это не означает принижения великолепных достижении мастеров науки, чья интуиция вывела нас на верный путь; нужно только отмести в сторону мусор, который не отваживалась удалить чересчур почтительная традиционность».

Несмотря на все сказанное, убеждающее нас об априорном введении понятия энтропии, обратимся к его введению в науку еще раз после рассмотрения цикла Карно в следующем параграфе.

6.4. Принцип Карно

Французский физик и инженер Никола Леонар Сади Карно в 1824 г. сформулировал принцип, вошедший в историю науки под его именем: *движущая сила тепла не зависит от агентов, взятых для ее развития; ее количество исключительно определяется температурами тел, между которыми, в конечном счете, производится перенос теплорода* [34]. Он подчеркивал, что движение в паровых машинах, являющихся равновесными системами, всегда сопровождается восстановлением равновесия теплорода, т. е. переходом «теплорода от тела, температура которого более или менее высока, к другому, где она ниже» [34]. Карно отрицал возможность получения «движущей силы» (механической работы) только за счет теплоты одного источника (нагревателя). Таким образом, Карно исповедовал господствующую в его время концепцию теплорода, оставленную в последствии как неправильную. Но для правильных выводов о принципах работы тепловых машин, которые изучал Карно, представления о теплороде как о движущей силе тепла вовсе были не нужны.

Карно понимал теплоту как колебательное движение молекул, а количество теплоты как механическую энергию, расходуемую на то, чтобы привести молекулы в движение.

Карно легко сформулировал эквивалентность количества теплоты и работы, положенную в основу первого начала термодинамики, и пришел к выводу о том, что поглощаемые и развиваемые при различных превращениях количества теплоты взаимно компенсируются, не уничтожаясь, а только видоизменяясь [35].

Принцип Карно, получивший также название принципа действия паровых двигателей, был первым утверждением необратимости физических процессов, ибо считалось, что теплород течет из горячего тела в холодное, тогда как обратное течение его требовало бы затраты механической энергии со стороны какого-либо «посредника».

От анализа работы паровой машины Карно переходит к анализу идеальной тепловой машины, свойства которой не зависят от применяемого рабочего тела. Он показал, что отдача этой идеальной машины (да и реальной тоже) определяется не природой нагретого тела, а зависит только от разности температур теплого и холодного тел. Таким образом, Карно показал самостоятельное значение термодинамики как науки. Ее изучение у Карно не получило должного развития из-за принятой им ложной теории теплорода. По этому поводу Ф. Энгельс пишет [36]: Карно «...добрался почти до самой сути дела; полностью разобраться в вопросе ему помешали не недостаток фактического материала, а исключительно только предвзятая ложная теория, ... которая была навязана физикам злокозненной философией, а придумана ими самими при помощи их собственного натуралистического мышления, столь якобы превосходящего метафизически-философствующий способ мышления».

Важным шагом в развитии термодинамики было согласование принципа Карно с принципом сохранения энергии. Это согласование сделано У. Томсоном в 1848 г. В этой работе Томсон формулирует условия получения работы за счет теплоты: «Если какая-либо машина устроена таким образом, что при работе ее в противоположном направлении все механические и физические процессы в любой части ее движения превращаются в противоположные, то она производит ровно столько механической работы, сколько могла бы произвести за счет заданного количества тепла любая термодинамическая машина с теми же самыми температурами источника тепла и холодильника» [24].

Вывод Томсона оказался очень важным для понимания нереальности создания вечного двигателя второго рода [38]: известно, что при работе тепловой машины не вся теплота, взятая у нагревателя, передается холодильнику. Часть ее в соответствии с принципом сохранения энергии, эквивалентности теплоты и работы превращается в совершаемую машиной работу. Второе начало термодинамики в формулировке У. Томсона означает: в природе невозможен процесс, единственным результатом которого была бы механическая работа, совершенная за счет охлаждения теплового резервуара. Тем самым доказывается нереальность создания вечного двигателя второго рода [39].

6.5. Принцип эквивалентности превращений

Клаузиус в 1850 г. рассматривая равновесные термодинамические системы, сформулировал первое начало термодинамики — принцип эквивалентности теплоты и работы: *...переход теплоты от теплого тела к холодному имеет место, когда теплота совершает работу и одновременно выполняется условие, что рабочее вещество приходит в то же самое состояние, в каком оно было вначале.* Он же второе начало термодинамики представляет в виде тепловой аксиомы: «Теплота само собой не может переходить от тела холодного к телу горячему; такой переход существует только при наличии других изменений».

Далее принцип эквивалентности теплоты и работы был расширен Клаузиусом в *принцип эквивалентности превращений*: если мы назовем эквивалентными два превращения, которые могут замещать друг друга, не требуя для этого никакого другого длительного изменения, то возникновение из работы количества теплоты Q, имеющего температуру T, обладает эквивалентом Q/τ, а переход количества теплоты Q от температуры T_1 к T_2 имеет эквивалент $Q(1/\tau_2 - 1/\tau_1)$, где τ есть некоторая функция температуры, независимая от рода процесса, с помощью которого совершается превращение.

Для выражения эквивалентности превращений Клаузиус и ввел *энтропию*, выражающую меру способности тел к превращению.

6.6. Принцип возрастания энтропии (принцип Клаузиуса)

В термодинамической характеристике различных процессов надо четко различать процессы равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые. Для их определения и понимания сформулируем еще раз саму сущность второго начала термодинамики: некомпенсированный переход тепла в работу невозможен. Отсюда вытекает невозможность любых процессов, составной частью которых должен был бы явиться некомпенсированный переход тепла в работу [38]. Именно поэтому все процессы подразделяются на обратимые и необратимые. Эти понятия относятся к процессам, протекающим исключительно в изолированных системах, под которыми подразумеваются такие совокупности тел (включая и воздействующие на них механизмы), на которые не производится никаких внешних энергетических воздействий, т. е. изолированная система отделена от окружения непроницаемой для тепла оболочкой. Из-за этого полная энергия в такой системе не может ни убывать, ни возрастать.

Если какой-нибудь прпоцесс, протекающий в рассматриваемой системе, записать в виде перехода системы из состояния A в состояние B:

$$A \to B, \tag{24}$$

то обратный переход

$$B \to A \tag{25}$$

возможен без каких бы то ни было изменений в окружении, и в этом случае прямой переход (24) называют обратимым. Если же обратный переход (25) без каких-либо изменений в окружении невозможен, то процесс (24) необратимый.

Для лучшего понимания приведем пример *трения*, как необратимого процесса.

Строгий анализ показывает, что обязательное и достаточное условие обратимости процесса состоит в том, чтобы все происходящие процессы в системе протекали равновесно. Это значит, что в течение процесса система проходит через ряд непрерывно следуемых друг за другом равновесных состояний. Кроме того, равновесный процесс сопровождается минимумом затрачиваемой на него работы [38].

Из всего сказанного следует, что признаком обратимости или необратимости процесса $A \to B$ является возможность или невозможность протекания обратного процесса $B \to A$. Возникает необходимость отыскать количественную меру необратимости прямого процесса

$A \to B$. Такой мерой является возрастание энтропии изолированной системы [38].

Подчеркнем, что речь идет об изолированной системе.

Оказывается, что *энтропия изолированной системы или остается постоянной*, *если процесс*, *испытываемый системой*, *обратим*, *или же она возрастает*, *если процесс необратим*. Таким образом, *энтропия изолированной системы ни при каких условиях не может убывать*.

В заключение этого раздела нельзя пройти мимо проблемы «тепловой смерти Вселенной». Эта «проблема» возникла сразу после получения соотношения (23). Это соотношение показывает, что энтропия Мира, как и любая система, стремится к максимуму, т. е. Вселенная, развиваясь, движется к состоянию равновесия. Значит, все виды энергии превращаются в энергию теплового движения, а она рассеивается равномерно по всему пространству. Отсюда должно происходить выравнивание температуры всех тел во Вселенной. Следовательно, Вселенная должна прийти в состояние теплового равновесия. Этот предполагаемый факт и получил название «тепловой смерти Вселенной». Этот мало утешительный для человечества вывод долгое время бурно дискутировался в ученом мире до тех пор, пока не стала ясной ошибочность приложения законов термодинамики во Вселенной. Стало ясно, что Вселенная в силу своей бесконечности не является замкнутой системой. Именно поэтому к ней не применимы многие законы и принципы, справедливые для замкнутых систем. В том числе оказался неправомерным и вывод о тепловой смерти Вселенной. Ученый и не только ученый мир может спать спокойно!

6.7. Принцип необратимости

Чувство необратимости времени основано на наблюдениях живой природы и физических явлений. Сущность принципа необратимости состоит в том, что «теплота не может переходить *сама собой* (выделено нами — *В. Ф.*) от более холодного тела к более горячему». Эта формулировка Клаузиуса. Далее он пишет: «...слова "сама собой" требуют, чтобы быть вполне понятными, еще объяснения, которое дано мною в различных местах моих работ. Прежде всего они должны выражать, что теплота никогда не может накопляться с помощью теплопроводности или излучения в более теплом теле за счет более холодного. При этом все то, что в этом отношении было известно об излучении уже раньше, должно быть распространено также и на те случаи, в которых вследствие преломления или отражения направление лучей как-нибудь изменяется и этим достигается известная концентрация последних. Далее, наш принцип должен относиться и к таким процессам, которые составлены из многих разнообразных явлений как круговой процесс, описанный выше. С помощью такого процесса теплота, правда, может (как мы видели при описании кругового процесса) перейти от более холодного тела к более теплому; но наш принцип утверждает, что тогда одновременно с таким переходом должен иметь место и противоположный переход теплоты от более теплого к более холодному телу, либо должно произойти какое-нибудь другое изменение, обладающее той особенностью, что оно не может быть обращено без того, чтобы не вызвать со своей стороны такой противоположный переход теплоты. Этот одновременно происходящий противоположный переход теплоты или другое изменение, которое имеет следствием такой противоположный переход теплоты должен рассматриваться как *компенсация* перехода теплоты от более холодного тела к более теплому. Пользуясь этим понятием, можно слова «сама собой» заменить словами «без компенсации» и высказать приведенный выше принцип следующим образом: *переход теплоты от более холодного тела к более теплому не может иметь места без компенсации*» [34].

Как видите, необратимость тепла потребовала оговорки «без компенсации», т. е. без другого процесса, связанного с переходом тепла от теплого тела к холодному. Таким образом, у Клаузиуса второе начало термодинамики придает времени определенное направление, делает неравноценным два направления времени, дает реальную основу для различия положительного и отрицательного направления. Возрастание энтропии *означает направленность времени*.

Как следствие всего сказанного, необратимость процесса сопровождается условием возрастания энтропии, математическое выражение которого записывается в виде [26].

Эта формула одновременно выражает принцип необратимости, т. е. принцип необратимости полностью тождествен принципу возрастания энтропии или, что то же самое, принципу Клаузиуса, качественно рассмотренному нами в п. 6.6.

6.8. Принцип Ленца–Ле Шателье–Брауна (принцип смещения равновесия)

Следуя термодинамическим представлениям, любая система может находиться в состоянии равновесия при определенных параметрах T_0, P_0 и V_0. Но при изменении этих и любых других равновесных параметров система выводится из состояния равновесия. Такими воздействиями на систему могут быть изменение концентрации компонентов системы, температура, давление, электрическое поле, если какие-то компоненты системы имеют электрический заряд, и т. п.

Естественно возникает вопрос: как будет реагировать система на подобные изменения равновесных параметров? Первым, кто дал ответ на этот вопрос, был российский физик Э. Х. Ленц в 1834 г. Он рассматривал частный случай системы, на которую действует электрическое поле, а в системе при этом возникает электрическая индукция. Ленц установил правило направления электромагнитных процессов: «Всякий индукционный электромагнитный процесс направлен так, что стремится препятствовать действию причины, обусловившей его возникновение». Ленц назвал это утверждение не принципом, а правилом, поскольку он не понимал его общности для любой системы и не мог понимать, потому что общий термодинамический подход к любым системам в его время еще не был широко принят. Только спустя 50 лет в 1884 г. французский ученый Ш. Ле Шателье предпринял поиск термодинамической аналогии закону индукции Ленца [40].

Принцип Ле Шателье гласит: «*Внешнее воздействие, выводящее систему из равновесия, вызывает в этой системе процессы, стремящиеся ослабить результат этого воздействия*».

Этот принцип пытался обосновать в 1887 г. немецкий ученый К. Браун. Он опирался на условия устойчивости равновесия, а так как критерии устойчивости фаз очень подробно проанализированы Дж. Гиббсом, то рассматриваемый принцип В.М. Глазов предлагает именовать принципом Гиббса–Ле Шателье [41], но, по нашему мнению, в названии принципа нельзя отбрасывать и имена Ленца и Брауна.

Значение этого принципа обусловлено тем, что на его основе без дальнейшего конкретного анализа можно предсказать направление, в котором под влиянием внешнего воздействия изменится термодинамический процесс, протекающий в произвольной системе. Если повысить температуру, иначе говоря, подвести некоторое количество тепла, то, согласно этому принципу, в системе при этом стимулируются процессы, поглощающие тепло. Следовательно, при повышении температуры химическая реакция протекает в том направлении, в котором она является эндотермической. Например, химической адсорбции газов, как правило, сопутствует выделение тепла (экзотермическая адсорбция). Соответственно при повышении температуры наблюдается десорбция газов (эндотермическое направление реакции) [40]. Принцип Ле Шателье–Брауна дает возможность предсказать, в каком направлении сместится состояние равновесия, если изменить какие-либо другие внешние параметры, определяющие состояние системы, например, давление, внешнее электрическое поле и т. п. [41, 42].

6.9. Принцип Онзагера [33]

В классической термодинамике по существу отсутствует время, и поэтому она не может ничего сказать о скоростях протекания процессов в системе. Она дает только указание о направлении процесса в сторону приближения к состоянию равновесия в соответствии с принципом Ленца–Ле Шателье–Брауна (см. п. 6.8 настоящего эссе).

В реальной жизни имеется большое число стационарных неравновесных процессов. За примерами далеко ходить не надо. Вот лишь некоторые из них: диффузия, тепло- и электропроводность. Все они описываются феноменологическими (т. е. не вдающимися в сущность) *уравнениями переноса*. Так, плотность потока вещества I_M при диффузии (закон Фика) равна количеству вещества M, проходящему в единицу времени t через единицу площади поперечного сечения F потока, пропорционального градиенту концентрации ∇c:

$$I_M = \frac{dM}{dF/dt} = D\nabla c,$$

где D — коэффициент диффузии.

Теплопроводность определяется потоком тепла I_Q (закон Фурье), который равен количеству тепла Q, проходящему в единицу времени через единицу площади поперечного сечения F проводника тепла, и градиентом температуры ∇T:

$$I_Q = \frac{dQ}{dF/dt} = \text{æ}\nabla T,$$

величина æ — это удельная теплопроводность вещества.

Аналогично определяется и плотность электрического тока I_q (закон Ома):

$$I_q = \frac{dq}{dF/dt} = \sigma\nabla U.$$

Здесь q — заряд электрона, σ — удельная электропроводимость, U — электрический потенциал.

Легко видеть, что в уравнениях переноса величины потоков I_i являются линейными функциями *движущих сил* X_i — градиенты температуры, концентрации, потенциалов, скоростей и т. д.:

$$I_i = L_{ik}X_j.$$

Американский физик норвежского происхождения Онзагер в 1931 г. показал, что для совместных (сопряженных) потоков $I_1, I_2, \ldots, I_i$ каждый из них обусловлен соответствующими движущими силами $X_1, X_2, \ldots, X_i$ и является линейной функцией всех указанных движущих сил:

$$I_1 = L_{11}X_1 + L_{12}X_2 + \ldots + L_{1k}X_k$$

$$I_2 = L_{21}X_1 + L_{22}X_2 + \ldots + L_{2k}X_k$$

....

$$I_i = L_{i1}X_1 + L_{i2}X_2 + \ldots + L_{ik}X_k$$

Эти уравнения получили название линейных уравнений Онзагера.

В общем виде эти уравнения можно записать как

$$I_i = \sum_k L_{ik} X_k.$$

Здесь число сопряженных потоков обозначено индексом «k», а коэффициенты L_{ik} называют кинетическими коэффициентами.

В приведенных линейных уравнениях Онзагера коэффициенты с одинаковыми индексами относятся только к соответствующим потокам, а со смешанными характеризуют взаимосвязь потоков.

Принцип Онзагера, чаще называемый теоремой Онзагера, гласит, что между кинетическими коэффициентами существует *соотношение взаимностей*:

$$L_{ik} = L_{ki}.$$

Впоследствии было установлено, что это соотношение взаимности справедливо только в отсутствии внешнего магнитного поля и система как целое не вращается. Если же $\mathbf{H} \neq 0$ и система вращается с угловой скоростью ω, то соотношение взаимностей имеет вид

$$L_{ik}(\mathbf{H}) = L_{ki}(-\mathbf{H}); \quad L_{ik}(\omega) = L_{ki}(-\omega).$$

ЭССЕ 7
ПРИНЦИПЫ СИММЕТРИИ И ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

7.1. Общие определения

Общие понятия о симметрии мы привели в первой книге из нашей трилогии [5]. Здесь мы рассмотрим принципы симметрии более подробно и к тому же каждый из рассматриваемых принципов сопоставим с соответствующим законом сохранения. Надо сказать, что между этими двумя категориями — принципами симметрии и законами сохранения — существует принципиальная фундаментальная связь. Эту связь доказывает важная теорема математической физики, установленная немецким математиком Эмми Нетер в 1918 г. [43]. Эта теорема утверждает, что любому непрерывному преобразованию координат соответствует некоторая сохраняющаяся величина (инвариант). Если эти преобразования «*связаны со свойствами симметрии пространства и времени*, *то каждому свойству пространства и времени должен соответствовать определенный закон сохранения*» [5].

Определим, что такое симметрия в физике, какое место и значение принципы симметрии занимают в науке, каково их философское значение. Определим также общие представления о законах сохранения физических величин. Мы будем придерживаться тех определений, которые даны всем этим понятиям в книге [4].

Симметрия в физике — это свойство физических законов, детально описывающих поведение систем, оставаться неизменными (инвариантными) при определенных преобразованиях, которым могут быть подвергнуты входящие в них величины.

Законы сохранения физических величин — это утверждения, согласно которым численные значения некоторых физических величин не изменяются со временем в любых процессах или в определенных классах процессов.

Безусловным условием справедливости всех законов Природы является их соответствие принципам сохранения.

Философское значение принципов симметрии и законов сохранения состоит в том, что они представляют наиболее общую форму выражения детерминизма. Эти принципы демонстрируют единство материального мира, существование глубокой связи между самыми разнообразными формами движения материи, а также связь между свойствами пространства–времени и сохранением физических величин.

Значение принципов симметрии и законов сохранения в современной физике состоит в том, что на эти принципы можно опираться при построении новых фундаментальных теорий.

7.2. Пространственно-временные симметрии

Сущность пространственно-временных (внешних) симметрий изложим так, как это сделано в [4].

1. *Сдвиг времени*, т. е. изменение начала отсчета времени не меняет физических законов. Это означает, что все моменты времени объективно равноправны и можно взять любой момент за начало отсчета времени. Время однородно.

Из инвариантности физических законов относительно этого преобразования вытекает закон сохранения энергии. В подтверждение этого рассмотрим один пример с силой тяготения. Если бы сила притяжения тел к Земле изменялась со временем, то энергия не сохранялась бы. Мы могли бы поднимать тела вверх в моменты минимального значения силы притяжения, и опускать их вниз в моменты увеличения силы притяжения. Выигрыш в работе был бы налицо, и можно было бы создать вечный двигатель.

2. *Сдвиг системы отсчета* пространственных координат не меняет физических законов. Объективно это означает равноправие всех точек пространства (однородность пространства). Перенос (сдвиг) в пространстве какой-либо физической системы никак не влияет на процессы внутри нее. Из этой симметрии вытекает закон сохранения импульса.

3. *Поворот системы отсчета* пространственных координат оставляет физические законы неизменными. Это означает изотропность пространства: свойства пространства одинаковы по всем направлениям. Из инвариантности законов физики относительно этого преобразования вытекает закон сохранения момента импульса.

4. Фундаментальные физические законы не изменяются при *обращении знака времени*, т. е. при замене в уравнениях теории t на $-t$. Это означает, что все соответствующие процессы в Природе обратимы во времени.

Это заключение может вызвать удивление. Ведь существуют явления

5. Существует *зеркальная симметрия* Природы: отражение пространства в зеркале не меняет физических законов. Преобразование $r \to -r$ оставляет уравнения, описывающие различные процессы, неизменными. В квантовой механике этой симметрии соответствует

сохранение особого квантового числа — четности, которое нужно приписать каждой частице.

6. Операция *зарядового сопряжения* (замена всех частиц на анти частицы) не изменяет характера законов Природы. Зеркальная симметрия и зарядовое сопряжение сохраняются только при сильных и электромагнитных взаимодействиях. При слабых взаимодействиях эти симметрии нарушаются. Была высказана гипотеза об инвариантности физических законов только при одновременном преобразовании $r \to -r$ и зарядовом сопряжении, но в 1964 г. экспериментальные данные по распаду элементарных частиц K_L^0 мезонов показали, что и последняя, *комбинированная симметрия*, не всегда выполняется. С чем это связано, неясно до сих пор.

Необходимо упомянуть еще о том, что законы Природы одинаковы во всех инерциальных системах отсчета. В этом состоит *принцип относительности* — основной постулат теории относительности Эйнштейна (см. эссе 11). Соответственно физические законы не изменяются при преобразованиях Лоренца, связывающих значения координат и времени в различных инерциальных системах отсчета.

Из принципа относительности вытекает сохранение скорости движения центра масс изолированной системы.

7.3. Внутренние симметрии

Из раздела 7.2 следует, что в современной физике существует определенная иерархия принципов симметрии. Одни из них выполняются при любых взаимодействиях, а другие только при сильных и электромагнитных.

Эта иерархия еще очетливее проявляется во внутренних симметриях, описывающих специфические свойства элементарных частиц.

Вслед за авторами [4] приведем внутренние симметрии и рассмотрим их так, как это сделано в [4].

1. При всех превращениях элементарных частиц сумма электрических зарядов частиц остается неизменной. В этом состоит *закон сохранения электрического заряда*. Этот закон входит в структуру современных физических теорий, но глубокие причины выполнения этого закона остаются неизвестными.

В квантовой механике сохранению электрического заряда отвечает некоторое преобразование волновой функции (калибровочное преобразование) [44], не изменяющее уравнений этой теории.

2. Опыт показывает, что ядерное вещество сохраняется: разность между числом тяжелых сильно взаимодействующих частиц (барионов) и числом их античастиц не изменяется при любых процессах. Барионы могут рождаться только парами: частица–античастица. Самые легкие

барионы — протоны — не распадаются на другие частицы. Это можно трактовать так: каждому бариону нужно приписать особое квантовое число — барионный заряд, равный $+1$, а каждому антибариону — заряд -1. Тогда определенный таким образом барионный заряд сохраняется. Его сохранению соответствует свое калибровочное преобразование волновой функции [4].

3. Аналогичным образом обстоит дело с легкими элементарными частицами — лептонами: электронами, нейтрино, μ-мезонами (мюонами) и τ-мезонами. Разность числа лептонов и антилептонов не изменяется при превращениях элементарных частиц. В этом состоит закон *сохранения лептонного заряда*. Однако после открытия различных видов нейтрино стало очевидным, что необходимо ввести три сохраняющихся независимо друг от друга лептонных заряда: электронный, μ-мезонный и τ-мезонный.

В развиваемых в настоящее время единых теориях различных взаимодействий (см. эссе 17) принимают, что только электрический заряд должен всегда сохраняться. Барионный и лептонный заряды, возможно, не сохраняются, хотя экспериментально нарушения сохранения этих зарядов до сих пор не обнаружено.

4. Изотопическая инвариантность. Опытным путем была установлена зарядовая независимость сильных взаимодействий, т. е. их независимость от электрического заряда. Например, сильные взаимодействия протона с протоном и нейтрона с нейтроном совершенно одинаковы в силу их независимости от электрического заряда. Поэтому В. Гейзенберг предложил рассматривать протон и нейтрон как два различных состояния одной частицы — нуклона. Различаются протон и нейтрон только тем, что протон электрически заряжен, а нейтрон нет. Небольшое различие их масс обусловлено электромагнитными взаимодействиями. При сильных взаимодействиях они выступают как одна частица.

Зарядовая независимость характерна не только для нуклонов, но и для всех сильно взаимодействующих частиц.

Для описания данной ситуации была введена особая величина — изотопический спин [45]. Изотопический спин сохраняется при сильных взаимодействиях, но изменяется в процессах, вызванных электромагнитными или слабыми взаимодействиями. *Сохранение изотопического спина* означает зарядовую независимость сильных взаимодействий.

Зарядовой независимости сильных взаимодействий отвечает так называемая SV_2-симметрия волновых функций сильно взаимодействующих частиц (изотопическая инвариантность).

Изотопическая инвариантность позволила осуществить первую систематику сильно взаимодействующих частиц, объединив их в группы с одинаковыми изотопическими спинами — *зарядовые мультиплеты*. Частицы, входящие в мультиплет, имеют близкие массы и различаются электрическими зарядами.

Нуклоны образуют зарядовый дублет с изотопическим спином 1/2. Три π-мезона (пиона) образуют зарядовый триплет с изотопическим спином 1 и т. д.

5. Еще одна симметрия, связанная с сохранением квантового числа — странности, выполняется при сильных и электромагнитных взаимодействиях, но нарушается слабыми взаимодействиями [45].

Все сильно взаимодействующие частицы, кроме нуклонов и пионов, обладают странностью, которая принимает значения $+1$ или -1. При сильных и электромагнитных взаимодействиях сумма странностей всех частиц остается неизменной. В этом и состоит закон сохранения странности.

Поэтому при сильных взаимодействиях всегда рождаются пары частиц с противоположными знаками странности. Распад же этих частиц происходит под влиянием слабых взаимодействий, меняющих странность на единицу. В результате странные частицы живут в сотни тысяч миллиардов раз дольше, чем это положено сильно взаимодействующим частицам.

7.4. Принцип Кюри — пример проявления принципа симметрии в кристаллофизике [46] [1)]

Симметрия естественных кристаллов прямо бросалась в глаза еще с древних пор и долгое время не воспринималась исследователями в связи с изучением свойств кристаллов.

Общефизическое значение учения о кристаллофизической симметрии было положено принципом Кюри, называемым более правильно принципом Неймана–Минитероде–Кюри. Этот принцип постулирует полное или частичное тождество симметрии физических свойств кристалла с его геометрической симметрией [46]. Мы называем этот принцип по имени лишь одного Пьера Кюри, обобщившего этот принцип и распространившего его на широкий класс физических явлений, «выходящих за рамки кристаллофизики» [3].

Принцип Кюри сводится к двум утверждениям [3]:

1. Если объект A произвольной природы определяет объект B и имеет элемент симметрии, то и B имеет тот же элемент симметрии, т. е. $G_A \equiv G_B$, где G_A и G_B — группы симметрии объектов A и B.

---

1) Более серьезное изучение учения о симметрии требует знания теории групп и ее приложений (см., например, [47, 48] или популярное изложение [49]).

2. Если объект A мысленно расчленен на части $a_1, a_2, \ldots, a_n$, которые имеют группы симметрии $G_1, \ldots, G_n$, то пересечение этих групп принадлежит группе симметрии объекта A: $G^* = G_A$.

Принцип Кюри, к сожалению, не повлиял на развитие фундаментальной физики в XIX и XX в. в. Только в семидесятых годах XX века появились попытки связать этот принцип с методологией теоретической физики [46].

ЭССЕ 8
ПРИНЦИП СОХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

8.1. Энергия, ее сохранение и превращения

О сохранении энергии написано так много, что, пожалуй, даже неприлично писать еще раз. Тем не менее, многие авторы говорят о законе сохранения энергии, в то время как другие называют его принципом сохранения энергии.

Изложение сущности этого принципа следовало бы начать с определения самого понятия «энергия», но мы для ознакомления с этим понятием отошлем читателя к первой нашей книге [5] из трех, составляющих задуманную нами серию.

Здесь же, прежде всего, повторим определение энергии как *способность производить работу*.

В науке долгое время теплота рассматривалась как вещество, способное перетекать от одного тела к другому. Это вещество именовалось теплородом. Долгая «жизнь» теплорода объясняется тем, что это понятие не мешало развитию термодинамики (см. п. 6.4) и ее практическим приложениям вроде изобретения Дж. Уаттом в 1774–1784 гг. паровой машины. Паровая машина, паровой молот и другие изобретения наглядно демонстрировали эффект превращения тепловой энергии в механическую. Но подобное превращение тепла в работу серьезно встало «в повестку дня» только когда экспериментально было показано, что известное количество затраченной работы дает всегда одно и то же определенное количество теплоты. Так был установлен механический эквивалент теплоты.

Но подлинно революционной была мысль Р. Майера о взаимной обратимости теплоты и работы. Как Майер пришел к этой мысли, работая судовым врачом, читатель может узнать из [5]. Он был убежден в неразрушимости «сил Природы», под которыми Майер понимал различные виды энергии. Он считал, что «создание или уничтожение силы лежит вне области человеческой мысли или действия. Единственной задачей физики является поэтому знакомство с различными формами силы и исследование условий их метаморфоз. При всех физических и химических процессах данная сила остается постоянной». Это ли не принцип сохранения силы (энергии)?

После Майера пивовар по профессии, англичанин Джоуль экспериментально осуществил всевозможные превращения химической энергии в электрическую, механическую, тепловую и обратно. Он многократно определял величину механического эквивалента теплоты.

Третий автор принципа сохранения энергии — Г. Гельмгольц сформулировал этот принцип математически в виде простого уравнения:

$$E + U = \mathrm{const}, \tag{26}$$

где U — потенциальная энергия, E — кинетическая энергия.

Современным читателям это уравнение покажется слишком простым и малозначащим. Возразить им можно словами М. Планка: «Как ни незначительным кажется на первый взгляд это преобразование, перспектива, которую оно открывает во всех областях физики, чрезвычайно велика, ибо возможность его обобщения для любых явлений Природы легко бросается в глаза» [50].

В заключение этого раздела рассмотрим два вопроса, касающихся принципа сохранения энергии.

Вопрос первый — почему принцип, а не закон сохранения энергии? Мы тоже в [5] называли его законом. Но сегодня обратим внимание на различие законов и принципов. Таких различий не мало, но главное — это большая общность принципов — каждый принцип охватывает не один закон, а несколько. В то же время закон — единственное заключение о чем-либо. Вот принцип сохранения энергии охватывает ряд законов. С одним из них — законом (принципом) возможных перемещений мы познакомимся в следующем разделе.

Второй вопрос связан с постоянством энергии. Ведь энергия в целом не уничтожается и не возникает. Она постоянна, лишь переходит из одной формы в другую. Откуда и как возникло это постоянное количество энергии во Вселенной? На этот вопрос, строго говоря, Наука пока сказать ничего определенного не может, но ясно, что источник не в божественном «включении будильника».

8.2. Принцип возможных перемещений

Полное развитие принцип возможных перемещений получил в работах Лагранжа (1788 г.). Прежде всего сформулируем понятие «возможное перемещение».

Это такое бесконечно малое перемещение тела или материальной точки, которое допускается связями системы, т. е. существующими ограничениями свободы передвижения тел, образующих систему [38]. Это сухое классическое определение трудно понять без специальных пояснений. В качестве таковых приведем два примера.

Пример первый. Пусть по условию задачи задано, что тело при перемещении должно оставаться все время на некоторой поверхности.

Пример второй. Два каких-нибудь тела соединены жестким стержнем, и поэтому они остаются на неизменном расстоянии друг от друга.

Принцип возможных перемещений заключается в следующем: «*необходимое и достаточное условие равновесия состоит в том, что сумма работ всех сил, приложенных к телам системы, для каждого возможного перемещения системы должна быть равна нулю или меньше нуля*».

Этот принцип сильно упрощает решение многих задач статики, поскольку он позволяет не принимать во внимание силы жестких связей (как во втором примере), а учитывать только одни внешние силы и силы трения. Суммарная работа всех других сил в соответствии с принципом возможных перемещений равна нулю.

Многочисленные примеры применения этого принципа при решении задач механики (статики) читатель найдет в [38, 51].

ЭССЕ 9

ПРИНЦИП ГЮЙГЕНСА

Издавна Человек интересовался световыми явлениями. В том числе и явлениями отражения и преломления света при попадании светового луча на границу двух сред. Такими средами были пáры воздух–вода, воздух–стекло, две различные жидкости и т. п. Начало опытов со световыми лучами относится ко II веку н. э. Лишь несколько веков спустя было установлено постоянство отношения $\sin\alpha/\sin\beta = n$, в котором α и β соответственно углы падения и преломления света на границе двух сред. Величина n называется показателем преломления, и она постоянна для рассматриваемых сред.

Этот закон был открыт голландским математиком Снеллиусом, как следует из бумаг, оставшихся после его смерти в 1626 г. [1]. Но при жизни Снеллиус этот закон не опубликовал, и хотя истинные причины отсутствия публикации остались неизвестными, нам кажется, ими является отсутствие понимания в то время физики явления преломления света. «Объяснение» закона Снеллиуса было дано Декартом. Слово «объяснение» мы взяли в кавычки потому, что оно было дано Декартом ошибочно. Он пришел к закону Снеллиуса на основе предположения о большей скорости света в более плотной среде, чем в менее плотном воздухе. В действительности дело обстоит совсем наоборот. Ошибку Декарта исправил Гюйгенс, который рассматривал свет как волновой процесс: свет — это волны, распространяющиеся, по Гюйгенсу, в эфирной материи. Такой подход отвергал ньютоновскую трактовку света как поток материальных частиц.

Подход Гюйгенса сегодня описан практически во всех учебниках физики [38, 52] и в популярной литературе, посвященной оптической физике [53–55]. Мы воспользуемся его описанием из [53]. Для этого обратимся к рис. 4. Плоская волна — свет на нем представлена сечением ее фронта прямой линией AA. Согласно представлениям Гюйгенса все точки этой линии на которые падает свет, становятся точечными источниками вторичных сферических волн.

Фронты этих вторичных световых волн будут создавать картину в виде полуокружностей — штриховые линии на рис. 4. Огибающая

---

[1] Это имя в различных переводах пишется по-разному. Так, например, в переводе известных Фейнмановских лекций это имя пишется как Снелл.

этих фронтов — линия BB — возникает через некоторый промежуток времени Δt. Каждая точка линии BB также является источником вторичных световых волн. Сами лучи на рис. 4 показаны стрелками. В каждой точке пространства световые лучи перпендикулярны волновому фронту, проходящему через эту точку. Отсюда формулируется принцип Гюйгенса: *каждая точка, до которой доходит световое возбуждение, становится, в свою очередь, центром вторичных волн, поверхность, огибающая в некоторый момент времени эти вторичные волны, указывает положение к этому моменту фронта действительно распространяющейся волны.*

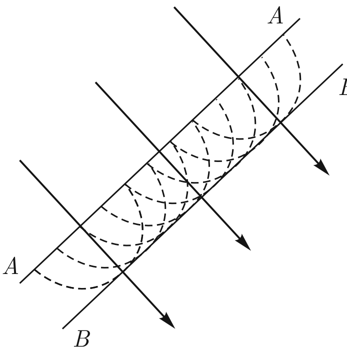

Рис. 4. Иллюстрация образования вторичных световых волн (штриховые полуокружности) при падении первичной световой волны [53]

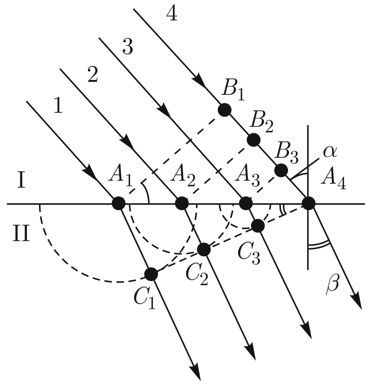

Рис. 5. К выводу закона преломления света на границе двух сред по Гюйгенсу (по [53])

Теперь обратимся к рис. 5, с помощью которого, используя принцип Гюйгенса, в [53] получен закон преломления света.

На поверхность раздела A_1A_4 двух сред I и II падает плоская световая волна. Ее характеризует угол падения α.

Обозначим скорости света в этих средах соответственно v_1 и v_2, считая среду I воздухом, а более плотную среду II — водой. Нам достаточно рассмотреть всего три луча 1–3. Штриховая прямая A_1B_1 — положение волнового фронта в момент времени, когда луч 1 достигает границы сред. В этот же момент в соответствии с принципом Гюйгенса точка A_1 превращается в источник вторичной сферической волны. Из этой точки распространяется как отраженная волна (в среде I), так и преломленная (в среде II).

Сначала рассмотрим только преломление света. Штриховая полуокружность с центром A_1 изображает фронт сферической волны через промежуток времени Δt, за который луч 3 проходит от B_1 до A_3. Этот промежуток времени будет

$$\Delta t_1 = \frac{B_1A_3}{v_1} = \frac{A_1C_1}{v_2}. \qquad (27)$$

Аналогичными рассуждениями получим

$$\Delta t_2 = \frac{B_2A_3}{v_1} = \frac{A_2C_2}{v_2}, \qquad (28)$$

нетрудно видеть, что огибающая полуокружностей на рис. 5 есть прямая C_1A_3. Из этого же рисунка видно, чго $\sin\alpha = B_1A_3/A_1A_3$ и $\sin\beta = A_1C_1/A_1A_3$. Следовательно, $\sin\alpha/\sin\beta = B_1A_3/A_1C_1$. Отсюда при использовании (28) получаем

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}. \qquad (29)$$

Это уже правильное соотношение в отличие от неправильного, обратного, полученного Декартом.

Позднее в физику было введено понятие показателя преломления:

$$n = \frac{c}{v}, \qquad (30)$$

где c — скорость света в вакууме — универсальная постоянная, равная 2,9979 $\cdot 10^8$ м/с, а v — скорость света в среде.

Закон преломления света с учетом (30) и (31) будет иметь вид

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Индексы 1 и 2 относятся к двум средам.

Теперь рассмотрим, как использовать принцип Гюйгенса для исследования закона отражения света. На рис. 6 показаны падающие (слева) и отраженные (справа) световые лучи. В момент касания падающего луча поверхности MN в точке A в ней возникают вторичные колеба-

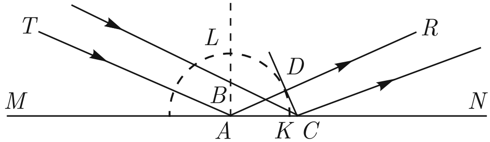

Рис. 6. Падающие (слева) и отраженные лучи (справа) в момент касания поверхности MN. В точке A возникают вторичные колебания (штрихованая полуокружность)

ния (штриховая полуокружность). Через время $t = BC/c$ второй луч тоже достигнет поверхности MN. Здесь c — скорость света в вакууме. За это время вторичные колебания достигнут сферы с радиусом AD. Таким образом, все точки плоскости CD, касательной к сфере LK и перпендикулярной к плоскости чертежа, обладают одной фазой и плоскость CD является фронтом отраженной волны. Из геометрического построения отраженной волновой поверхности CD следует закон отражения света: *углы падающего луча AT и отраженного AR с нормалью An равны друг другу.*

Впрочем, этот закон был найден еще в глубокой древности, поскольку он не только прост, но и весьма нагляден, чего не скажешь о законе преломления.

ЭССЕ 10
ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ

10.1. Исторические мифы и реальные старинные задачи

Одной из известных старинных задач является задача Герона. Эту задачу относят ко II веку до н. э. Ею открывается бесчисленное множество задач на отыскание наибольшего или наименьшего значения какой-либо величины или более обшего-либо.

Эти задачи объединяются в специальный класс экстремальных задач (от слова «экстремум»). Их решение потребовало разработки специальных методов — *вариационных*. О них мы будем говорить ниже в п. 10.3 настоящего эссе, а пока вернемся к задаче Герона [1]), изображенной на рис. 7. По одну сторону от прямой l даны точки A и B. Требуется найти на этой прямой такую точку D, чтобы сумма расстояний AD и BD была наименьшей.

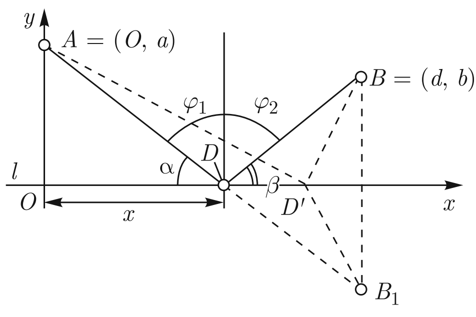

Рис. 7. К решению задачи Герона [54]

Точка D находится на пересечении прямой l с прямой AB_1, где B_1 — точка, лежащая по другую сторону приямой l и симметричная точке B.

[1]) Герон Александрийский — математик времени античности. Известен многими математическими исследованиями, в том числе и выводом известной формулы для площади треугольника — формулы Герона.

Решение этой задачи читатель найдет самостоятельно. Если же он затруднится с решением, то для этого на рис. 7 построена любая точка D, а само решение он найдет в [54].

Из рис. 7 легко видеть, что углы α и β, а также углы с нормалью $D\varphi_1$ и φ_2 попарно равны друг другу. Сегодня, считая, что AD и BD — это лучи света, мы определяем закон отражения света: *угол падения света равен углу отражения*. Интересно, что Герон, пожалуй, был первым, высказавшим принцип: «*Природа действует кратчайшим путем*».

В [54] приведена цитата из сочинения Дамианоса, комментирующего Герона, но уже в VI веке н. э.: «Герон показал, что прямые, наклоненные под равными углами, являются самыми меньшими из всех промежуточных, образующих наклоны с одной и той же стороны от одной и той же прямой».

И далее: «...если Природа не хочет попусту отводить луч зрения, то она изломит их под равными углами». В этих словах мы впервые сталкиваемся с мыслью о том, что Природа в своих действиях «руководствуется» экстремальными принципами.

Другая старинная задача, если верить легенде, связана с именем финикийской царевны Дидоны и относится к IX веку до н. э. Во время бегства от преследования брата Дидона облюбовала участок земли на берегу Средиземного моря. Ей охотно продали эту землю, так как она запросила за нее смехотворно малую плату: столько, сколько земли можно окружить бычьей шкурой. Но после того, как сделка состоялась, умная и не менее хитрая Дидона разрезала бычью шкуру на узкие полоски, связала их и окружила этой длинной связкой большую территорию. На ней она построила крепость и рядом город Карфаген! Такова легенда, а строго математически эта задача формулируется так [54]: *среди замкнутых плоских кривых, имеющих заданную длину, найти кривую, охватывающую максимальную площадь*. Это и есть задача Дидоны. Ее по научному называют *изопериметрической задачей*, т. е. одной из таких, которые характеризуют одинаковым периметром. Можно строго доказать, что наибольшую площадь на плоскости среди многих изопериметрических фигур охватывает окружность. А в пространстве? Очевидно, что наибольшей вместимостью будет обладать шар.

По этому поводу я вспоминаю одну быль из военного (1941–1945 гг.) времени. Эту историю когда-то нам студентам рассказал наш преподаватель — физик. Он в тяжелое время покупал на рынке керосин. В то время это было нужно и для обогрева, и для освещения. Для покупки этот физик предъявил продавцу — малограмотному старику–крестьянину химическую колбу объемом 0,5 л. Но шаровая форма зрительно скрадывает объем, и на вопрос, сколько будет стоить керосин в этой колбе, старик ответил: «За керосин в таком маленьком пузырьке возьму немного», — и назвал мизерную цену. Каково было его удивление, когда он увидел, что в этот «пузырек» помещается более 0,5 л керосина!

Мы не будем приводить решения изопериметрической задачи. Оно и так ясно, но при желании читатель найдет одно из таких решений на страницах книги [54], а вообще среди обширной литературы, посвященной изопериметрическому свойству круга и аналогичному изопифанному свойству шара (свойству охватывать наибольший объем) порекомендуем читателю работы [56, 57].

Следующая задача «родилась» вовсе не в далекой древности, но все же и не в наши дни, а в 1696 г. В этом году знаменитый швейцарский математик — один из братьев Бернулли — Иоганн по существу объявил конкурс среди математиков на решение, как он написал, «новой задачи». Он ее сформулировал следующим образом: «в вертикальной плоскости даны точки A и B (рис. 8). Определить путь AMB, спускаясь по которому под действием собственной тяжести тело M, начав двигаться из точки A, достигнет точки B в кратчайшее время». Другими словами, вопрос конкурса гласил: какая кривая является *брахистохроной*? По-гречески брахистохрона — это наибыстрейшая.

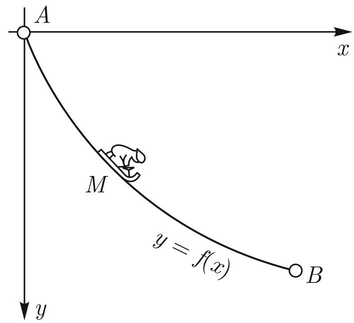

Рис. 8. К формулировке задачи И. Бернулли [54]

Под этим названием задача И. Бернулли и вошла в историю науки. В конкурсе, объявленном И. Бернулли, приняли участие, кроме его самого, еще много выдающихся ученых: Лейбниц, Якоб Бернулли, Лопиталь, Ньютон. Все они по-разному решали эту задачу, но результат у всех был одинаков: брахистохроной являлась циклоида — кривая, которую описывает точка окружности, катящаяся без скольжения по прямой.

Название «циклоида» было дано еще Галилеем и означало «связанная с кругом».

Если читатель захочет скрупулезно рассмотреть решения задачи о брахистохроне и соответственно весь математический анализ этой задачи, начиная с математического вывода уравнения циклоиды, то мы ему порекомендуем замечательную книгу [54]. Мы же запишем уравнение циклоиды без вывода:

$$x(\varphi) = R(\varphi - \sin\varphi) + C_1; \quad y(\varphi) = R(1 - \cos\varphi), \tag{31}$$

где x и y — координаты любой точки кривой циклоиды; φ — угол, образованный точкой касания катящейся окружности, ее центром и любой

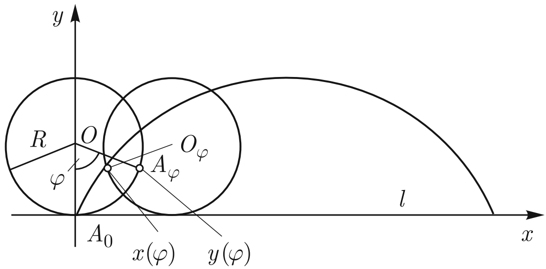

Рис. 9. Иллюстрация к выводу уравнения циклоиды [54]

точкой на этой окружности (рис. 9). За подробностями мы по-прежнему отошлем читателя к книге [54]. Для нас же важно, что решением задачи о брахистохроне является отыскание функции, удовлетворяющей соотношению

$$\sqrt{1+[R(x)]^2}\,\sqrt{f(x)} = C, \tag{32}$$

где C — некоторая константа.

Нетрудно видеть, что функция f должна удовлетворять дифференциальному уравнению

$$y' = \sqrt{\frac{C-y}{y}} \tag{33}$$

Уравнение (33) и является дифференциальным уравнением циклоиды.

Для тех, кто умеет интегрировать, В. М. Тихомиров в [54] показывает, как это сделать с уравнением (33).

Делаем подстановку $y = C\sin^2(t/2) = C(1-\cos t)/2$. Тогда

$$dx = \frac{\sqrt{c}\,\sin(t/2)d(C\sin^2(t-2))}{\sqrt{2}\,\cos(t-2)} = C\sin^2\frac{t}{2}dt = C(1-\cos t)\frac{dt}{2}.$$

После интегрирования последнего соотношения получаем

$$X = \frac{C}{2}(t-\sin t) + C_1, \quad y = \frac{C}{2}(1-\cos t). \tag{34}$$

Теперь следует лишь произвести замену букв:

$$\frac{C}{2} = R, \quad t = \varphi.$$

Циклоида оказалась связанной с законами Природы.

Во-первых, именно циклоида, а вовсе не окружность, как считал Галилей, обладает свойством, что тело, скользящее по ней (без трения) совершает колебания с периодом, не зависящим от начального положения тела.

В задаче о брахистохроне опять появилась циклоида, но совершенно не по сказанному только что поводу. Из формул (32) или (34) следует правило построения циклоиды, которая является решением задачи И. Бернулли. Для этого заметим, что все циклоиды (34) гомотетичны.

Этот термин требует пояснения. Он означает «преобразование подобия» или преобразование плоскости или пространства, при котором каждой точке M ставится в соответствие точка M', лежащая на OM', где O — фиксированная точка, например, начало координат. Отношение $OM' : OM = K$ называют коэффициентом гомотетии. Эта величина одинакова для всех точек M, отличных от 0.

В силу гомотетичности всех циклоид (34) можно взять любую из них, имеющую точку $A = (0,0)$ — левую вершину (рис. 10), соединить ее с точкой M прямой, которая пересечет построенную циклоиду в точке M' и применить гомотетию с коэфициентом $|AM'| : |AM|$. В результате применения таким образом многих точек на кривой AM получим искомую брахистохрону, т. е. кривую, по которой тело движется под действием собственной тяжести от точки A до точки M за кратчайшее время.

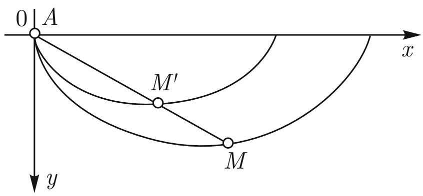

Рис. 10. К выводу кривой брахистохроны

Приведенные в этом разделе задачи относятся к экстремальным, т. е. к тем, в которых ищется максимум или минимум какой-либо функции.

Описанными задачами не исчерпывается класс задач такого типа. Читатель может ознакомиться с подобными задачами в имеющейся литературе [58–60].

10.2. Принцип Ферма

Как же следует решать экстремальные задачи? Неужели в каждой такой задаче надо изобретать индивидуальный способ решения? А нельзя ли создать общую методику решения любых экстремальных задач? Эту проблему по заданию того же И. Бернулли решил Леонард Эйлер в 1774 г. Он нашел уравнение, которому должна удовлетворять «кривая линия, обладающая свойством максимума или минимума». Это уравнение сегодня называется уравнением Эйлера. Но еще лучший общий метод решения экстремальных задач был создан Лагранжем (иногда его метод называют методом вариаций).

Раздел математики, анализирующий задачи на максимум и минимума, с легкой руки Эйлера стал называться вариационным исчислением.

Мы не будем в этой книге подробно излагать ни метод Эйлера, ни метод Лагранжа. Это сильно отвлекло бы нас от основной темы нашего сочинения. При желании читатели могут познакомиться с ними в рекомендованных нами книгах [54, 58–60].

Мы же перейдем непосредственно к описанию принципа Ферма. Этот принцип относится к оптике — прохождению света при столкновении световых лучей с отражательными и преломляющими средами. Этот вопрос занимал умы многих ученых еще в античности. Так Герон Александрийский (II век до н. э.) высказал мысль, что свет от точки к точке движется по кратчайшему пути. Если наблюдать за световым лучом в однородной среде, например в воздухе, то ни у кого не возникнет сомнения в правильности утверждения Герона — свет действительно распространяется по прямой линии. Поэтому мы и отождествляем понятие светового луча с его прямолинейной траекторией.

Кстати, принцип Герона основывается на представлении о том, что *Природа действует наиболее легкими и доступными путями*. Об этом мы еще будем говорить при описании принципа простоты в эссе 15.

Прямолинейное распространение света происходит и при отражении света от плоской поверхности (зеркала). Поэтому принцип кратчайшего пути казался правильным всегда. Но если взглянуть на явление преломления света на границе двух сред, то легко убедиться, что преломление света не подчиняется принципу кратчайшего пути. Посмотрите, например, на чайную ложечку, опущенную в стакан с чаем. Ферма нашел более общий принцип, объясняющий оба явления — и отражение, и преломление света: он заменил принцип кратчайшего пути принципом *наименьшего времени*. Чудесную иллюстрацию этого принципа дал Р. Фейнман в [61]. Приведем его иллюстрацию: «Чтобы убедиться, что путь по прямой здесь (т. е. при преломлении на границе двух сред) не самый быстрый, представим себе следующую ситуацию. Хорошенькая девушка падает из лодки в воду в точке B и кричит, просит спасти. Линия X — это берег (рис. 11). Вы находитесь на суше в точке A и видите, что произошло. Вы умеете плавать и умеете бегать, но бегаете вы быстрее, чем плаваете. Что вам делать? Бежать по прямой к берегу? Чуть поразмыслив, вы поймете, что выгоднее пробежать несколько дальше по берегу, чтобы уменьшить ваш путь в воде, потому что в воде вы будете двигаться гораздо медленнее». Как говорится — коментарии здесь излишни!

Теперь, когда суть принципа кратчайшего времени, чаще называемого принципом Ферма, стала понятной, запишем его формулировку: *действительный путь распространения света* (*траектория светового луча между двумя точками пространства*) *есть путь*, *для*

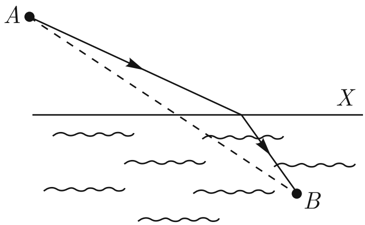

Рис. 11. К объяснению преломления света в соответствии с принципом кратчайшего времени — принципом Ферма [53]

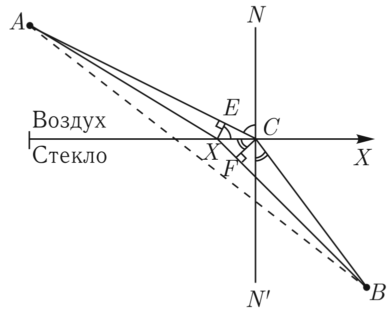

Рис. 12. Иллюстрация принципа Ферма для случая преломления [61]

прохождения которого требуется минимальное время по сравнению с другими мыслимыми путями между теми же точками.

Ферма показал, как, пользуясь его принципом, легко получить закон преломления света. Мы сделаем это более простым путем, так, как это продемонстрировано в [61].

Обратимся к рис. 12. Будем считать решением задачи путь ACB. Ему соответствует наименьшее время из всех возможных путей. Возьмем близкую точку X. Вычислим времена прохождения по пути AXB и по пути ACB. Рассмотрим сначала путь по суше. Опустим перпендикуляр EX и увидим, что путь стал короче на длину EC. Таким образом, на суше выиграли в длительности пути. А в воде? Опустив перпендикуляр CF, мы увидим, что в воде необходимо проплыть дополнительное расстояние XF. И это будет проигрышем.

Далее надо сделать предположение о соотношении скоростей света в обеих средах. Таким предположением является равенство

$$EC = nXF, \tag{35}$$

где n — показатель преломления света.

Тогда

$$XC \sin EXC = nXC \sin XCF. \tag{36}$$

Сокращая на величину XC и замечая, что

$$EXC = ECN = \theta_1 \quad \text{и} \quad XCF = BCN' = \theta_2, \tag{37}$$

получаем

$$\sin\theta_1 = n \sin\theta_2, \tag{38}$$

а это и есть закон Снелиуса (см. эссе 9).

Любой принцип в физике, как правило, объясняет не одно, а несколько явлений. Не составил исключения и принцип Ферма. Мы приведем лишь один пример с заходом Солнца (рис. 13). Нам кажется, что Солнце еще над горизонтом, тогда как оно в действительности уже зашло, т. е. находится ниже линии горизонта. Дело в том, что верхние слои атмосферы разрежены, а нижние слои более плотные. Свет в этих более плотных слоях распространяется медленнее, чем в менее плотных верхних слоях. Поэтому солнечные лучи придут в какую-то точку за горизонтом быстрее, если будут двигаться не по прямой линии, а по траектории, показанной на рис. 13, сокращая свой путь в менее плотных слоях атмосферы.

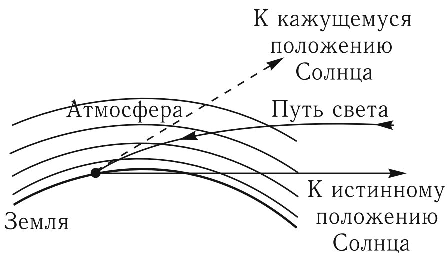

Рис. 13. Истинное и кажущееся положения заходящего Солнца

Мы взяли этот пример из книги Фейнмана [61]. Там же автор приводит еще примеры такого рода, наглядно объясняющие эффекты *миража*, принцип действия *собирательной линзы* и ряд других эффектов. При желании читатель может познакомиться с ними в [61] и многократно убедиться в справедливости принципа Ферма.

10.3. Сущность вариационного исчисления

В следующем разделе мы познакомимся с важнейшим вариационным принципом физики — принципом наименьшего действия, но для этого хорошо бы познакомить читателя с основами вариационного исчисления. Тем более, что этот раздел математики юный читатель не изучает в большинстве вузов, а тем более — в средней школе.

Для понимания сути вариационного исчисления предварительно необходимо дать определение некоторых важнейших понятий математического характера.

Понятие о *функционале*. Все мало-мальски математически образованные люди хорошо знают, что такое функции, в том числе и функции не одного, а многих n переменных. Гораздо меньше известно о функциях бесконечного числа переменных, когда переменными являются сами функции. Такие функции от функций в математике называются *функционалами*.

Понятие *пространства*. Возьмем отрезок $[a, b]$ на числовой прямой. Обозначим совокупность всех непрерывных функций на этом отрезке $C[a, b]$. Эту совокупность в математике называют *пространством*.

Понятие *функции* $F(y)$ *на пространстве* $C[a, b]$ — это некоторое правило, которое по непрерывной функции $y(x)$, заданной на $[a, b]$, позволяет вычислить число $F(y)$.

Приведем примеры из [54]. Примем $a = 0$ и $b = 1$.

Пример 1. $F_1(y) = 2y(0)$. Здесь предписано по функции $y(x)$ сначала вычислить то число, которое она принимает в точке нуль, а потом умножить его на 2. Вычислим значение $F_1(y)$ для нескольких известных функций.

Если $y(x) = x$, то $y(0) = 0$, значит, $F_1(y) = 0$.

Если $y(x) = \sqrt{x^2 + 1}$, то $y(0) = 1$, значит, $F_1(y) = 2$.

Если $y(x) = 5 \cdot 2^x$, то $y(0) = 5$, значит, $F_1(y) = 10$.

Пример 2. $F_2(y) = \int\limits_0^1 y(x)\,dx$. Этот функционал — площадь под графиком $y(x)$.

Если $y(x) = 1$, то $F_2(y) = 1$.

Если $y(x) = x$, то $F_2(y) = 1/2$.

Если $y(x) = \sin x$, то $F_2(y) = 1 - \cos 1$ и т. д.

$C^4([a, b])$ — пространство при котором на отрезке $[a, b]$ непрерывны не только дифференцируемые функции $y(x)$, но непрерывны и их производные.

Теперь мы определим, что же такое вариационное исчисление и каков алгоритм нахождения $F(y)$ по функции $y(x)$ из $C^4([a, b])$.

Вариационным исчислением называют раздел теории экстремальных задач, в котором изучают максимумы и минимумы функционалов.

Чтобы получить $F(y)$ по функции $y(x)$ из $C^4([a, b])$, сначала надо продифференцировать $y(x)$. Затем надо $y(x)$ и $y'(x)$ подставить в аргументы функции $f(x, y, z)$. В результате получают функцию одного переменного $f(x, y(x), y'(x))$. Интеграл от этой функции дает искомый функционал $F(y)$:

$$F(y) = \int\limits_a^b f(x, y(x), y'(x))\,dx.$$

10.4. Принцип наименьшего (стационарного) действия

10.4.1. Понятие действия. Среди фундаментальных понятий физики (масса, энергия, пространство, время и др.) важнейшим понятием является *действие*.

Сегодня среди ученых все больше и больше распространяется мнение, что понятие *действие* является самым важным из всех понятий физической науки. Не надо забывать, что понятие действия по существу явилось истоком квантовой механики: представление о минимальном кванте действия привело к квантовой теории.

Впервые понятие действия было сформулировано Лейбницем еще в 1669 г. в его произведении, оставшемся неопубликованным при его жизни и еще почти 200 лет после его смерти. О причинах столь долгого неопубликования мы поговорим позже. Сейчас мы отметим, что понятие «действие» вроде бы *антропоморфно*, что отмечалось многими учеными в XVIII и XIX веках.

Антропоморфизм — наделение человеческими качествами и свойствами предметов и явлений неживой Природы, небесных тел, животных и мифических существ, например, богов.

Но легко понять, что «действие» не более антропоморфно, чем давно укоренившиеся в физике понятия «сила», «работа» и т. п. По Лейбницу мерой действия служит «определенное количество» материи, передвинувшееся на определенное расстояние при поступательном равномерном движении в течение определенного времени. То есть действия пропорциональны произведению количества материи, расстояний, на которые они передвигаются, и скоростей. Тут же он дает и второе определение действия как произведение «движущихся тел, пройденных промежутков времени и квадратов скоростей». Оба определения являются строго эквивалентными и выражаются как mvs или mv^2t. Эти определения остались неизменными и в современном понимании величины действия [62].

Историки науки склонны считать Лейбница первым, обнаружившим, что в истинных движениях физических систем действие может быть как минимальным, так и максимальным. Отсюда следовало заключение, что наш, созданный Богом, лучший из миров мог оказаться и худшим, в котором содержался бы минимум Добра при максимуме Зла. Этот вывод был несовместим с господствующими в то время религиозными представлениями. Вполне возможно, что этот диссонанс и явился причиной неопубликования работы Лейбница.

10.4.2. Вариационные принципы. Со времен Герона из Александрии известно, что действительный путь, выбираемый светом при распространени от *источника S к наблюдателю O с отражением в зеркале является* ***кратчайшим*** *из всех геометрически возможных путей*.

Этой формулировкой закона отражения света Герон по существу ознаменовал возникновение в физике в то время нового подхода, получившего впоследствие название *вариационных принципов*.

Идея любого вариационного принципа состоит в том, чтобы варьировать некоторую величину, характеризующую данный процесс (в примере Герона этой величиной является длина пути, соединяющего S и O), и отбирать из всех мыслимых процессов тот, который реализуется в действительности, основываясь на каком-то *экстремальном* свойстве величины, характеризующей процесс. В примере Герона — это *минимальная* длина пути.

Только спустя два века, уже в XVIII столетии, вариационным принципам в науке было уделено должное внимание. История их развития заслуживает отдельного описания (см. п. 10.4.5) главным образом потому, что из этой истории видно, как вариационные принципы «завоевывали» разные области науки и как сегодня они широко используются в механике, биологии, системах управления и практически во всех областях человеческой деятельности.

10.4.3. Вариационный принцип в механике. Вариационный принцип в механике был сформулирован в виде принципа наименьшего действия Лагранжем [62].

Современная формулировка этого принципа принадлежит Гамильтону (1805–1865 гг.). Рассмотрим эту формулировку. Для этого будем перемещать частицу по мировым линиям.

Мировая линия — это линия, обозначающая движение в четырехмерном пространстве–времени. Это аналог траектории в обычном трехмерном пространстве.

Пусть частица перемещается вдоль мировой линии от мировой точки x_1, t_1 к мировой точке x_2, t_2. В каждой точке мировой линии частица имеет кинетическую энергию $E_{\text{кин}} = mv^2/v$ и потенциальную энергию $E_{\text{пот}}$, зависящую от ее положения. Для всякого малого промежутка времени Δt составим разность $E_{\text{кин}} - E_{\text{пот}}$, величину которой называют *лагранжианом*. Ее обозначают символом L:

$$L = E_{\text{кин}} - E_{\text{пот}}. \tag{39}$$

Произведение $L\,dt$ называют элементарным действием за интервал времени Δt. Теперь можно сформулировать принцип Лагранжа–Гамильтона: *из всех возможных мировых линий, соединяющих мировые точки, действительная мировая линия характеризуется экстремальным значением величины полного действия*. Под полным действием понимают сумму всех значений $L\Delta t$ на всем интервале времени от t_1 до t_2.

10.4.4. Принцип наименьшего действия (хрестоматийное изложение). Для лучшего понимания вариационного принципа наименьшего действия мы помещаем в эту книгу его иллюстративное разъяснение, данное Р. Фейнманом в т. 6 «Электродинамика» его известных лекций [63]. Таким образом, мы позволили себе этот пункт представить в виде своего рода хрестоматии, допустив лишь минимальные сокращения.

Пусть имеется частица в поле тяжести. Эта частица, выйдя откуда-то, свободно движется куда-то в другую точку. Ты подбросил ее, скажем, кверху, она взлетела, а потом упала (рис. 14). От исходного места к конечному она прошла за какое-то время. Попробуй теперь какое-то другое движение. Пусть для того, чтобы перейти «отсюда сюда», она двигалась уже не так, как раньше, а так, как показано на рис. 15, но все равно очутилась на нужном месте в тот же самый момент времени, что и раньше.

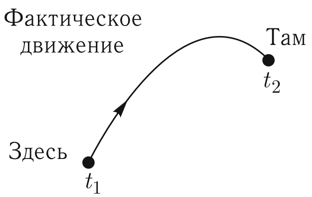

Рис. 14. Истинное движение подброшенной частицы от точки t_1 до точки t_2

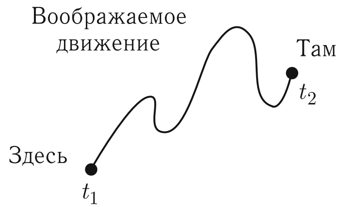

Рис. 15. Воображаемое движение частицы от точки t_1 до точки t_2

И вот, если ты подсчитаешь кинетическую энергию в каждый момент времени на пути частицы, вычтешь из нее потенциальную энергию и проинтегрируешь разность по всему тому времени, когда происходило движение, то увидишь, что число, которое получится, будет больше, чем при истинном движении частицы.

Иными словами, законы Ньютона можно сформулировать не в виде $F = ma$, а вот как: средняя кинетическая энергия минус средняя потенциальная энергия достигает своего самого наименьшего значения на той траектории, на которой предмет двигается в действительности от одного места к другому.

Попробую пояснить это чуть понятнее.

Если взять поле тяготения и обозначить траекторию частицы $x(t)$, где x — высота над землей (обойдемся пока одним измерением; пусть траектория пролегает только вверх и вниз, а не в стороны), то кинетическая энергия будет равна

$$\frac{1}{2}\, m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2,$$

а потенциальная энергия в произвольный момент времени будет равна mgx.

Теперь для какого-то момента движения по траектории беру разность кинетической и потенциальной энергий и интегрирую по всему времени от начала до конца. Пусть в начальный момент времени t движение началось на какой-то высоте, а кончилось в момент t на другой определенной высоте (рис. 16). Тогда интеграл равен

$$\int\limits_{t_1}^{t_2} \left[\frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - mgx\right] dt.$$

Истинное движение совершается по некоторой кривой (как функция времени она является параболой) и приводит к какому-то определенному значению интеграла. Но можно себе представить какое-то другое движение: сперва резкий подъем, а потом какие-то причудливые колебания (рис. 17).

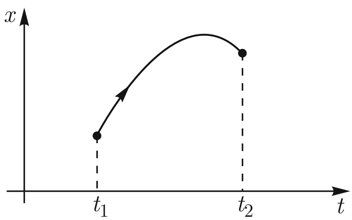

Рис. 16. Движение частицы на различных высотах; начальная высота в момент t_1; конечная — в момент t_2

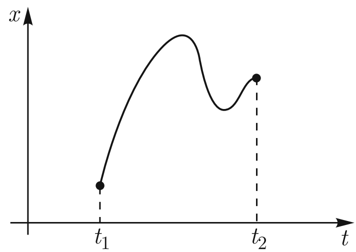

Рис. 17. Воображаемое движение частицы на разных высотах в моменты времени t_1 и t_2

Можно подсчитать разность потенциальной и кинетической энергий на таком пути или на любом другом. И самое поразительное — что настоящий путь это тот, по которому этот интеграл наименьший.

Проверим это. Для начала разберем такой случай: у свободной частицы вовсе нет потенциальной энергии. Тогда правило говорит, что при переходе от одной точки к другой за заданное время интеграл от кинетической энергии должен оказаться наименьшим. А это значит, что частица обязана двигаться равномерно. (И это правильно, мы же знаем, что скорость в таком движении постоянна.) А почему равномерно? Разберемся в этом. Если было бы иначе, то временами скорость частицы превысила среднюю, а временами была бы ниже ее, а средняя скорость была бы одинаковой, потому что частице надо было бы дойти «отсюда сюда» за условленное время. Например, если тебе нужно попасть из дома в школу на своей машине за определенное время, то это можно сделать по-разному: ты можешь сперва гнать, как сумасшедший, а в конце притормозить, или ехать с одинаковой скоростью, или сначала можешь даже отправиться в обратную сторону, а уж потом повернуть к школе и т. д. Во всех случаях средняя скорость, конечно, должна быть одной и той же — частное от деления расстояния от дома до школы на время. Но и при данной средней скорости ты иногда двигался слишком быстро, а иногда чересчур медленно. А средний квадрат чего-то, что отклоняется от среднего, как известно, всегда больше квадрата среднего; значит, интеграл от кинетической энергии при колебаниях скорости движения всегда будет больше, нежели при движении с постоянной скоростью. Ты видишь, что интеграл достигнет минимума, когда скорость будет постоянной (при отсутствии сил). Правильный путь показан на рис. 18.

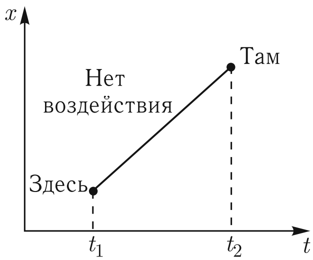

Рис. 18. Движение частицы от точки t_1 до t_2 в отсутствии внешних сил

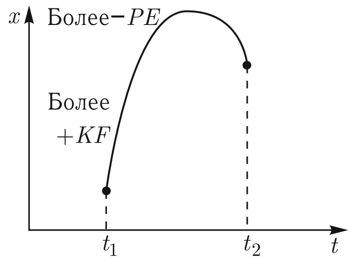

Рис. 19. Движение предмета между t_1 и t_2, подброшенного вверх. На участке от t_1 до t_x растет кинетическая энергия, аЁот t_x до t_2 превалирует потенциальная энергия

Предмет же, подброшенный в поле тяжести вверх, сперва поднимается быстро, а потом все медленнее (рис. 19). Происходит это потому, что он обладает и потенциальной энергией, а наименьшего значения должна достигать разность между кинетической и потенциальной энергиями. Раз потенциальная энергия возрастает по мере подъема, то меньшая *разность* получится, если как можно быстрее достичь тех высот, где потенциальная энергия велика.

Тогда, вычтя из кинетической энергии этот высокий потенциал, мы добьемся уменьшения среднего. Так что выгоднее такой путь, который идет вверх и поставляет добрый отрицательный кусок за счет потенциальной энергии.

Но с другой стороны, нельзя ни двигаться слишком быстро, ни подняться слишком высоко, потому что на это потребуется чересчур много кинетической энергии. Надо двигаться достаточно быстро, чтобы подняться и спуститься за определенное время, имеющееся в твоем распоряжении. Так что не следует стараться взлететь слишком высоко, а просто надо достичь какого-то разумного уровня. В итоге оказывается, что решение есть своего рода равновесие между желанием раздобыть как можно больше потенциальной энергии и желанием как можно сильнее уменьшить количество кинетической энергии — это стремление добиться максимального уменьшения разности кинетической и потенциальной энергий.

Попробую доказать то, о чем я рассказал.

Математическая задача, которую мы будем решать, очень трудна и своеобразна. Имеется некоторая величина S, называемая действием. Она равна кинетической энергии минус потенциальная, проинтегрированная по времени:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} (\text{к. э.} - \text{п. э.})\, dt.$$

Не забудьте, что п. э. и к. э. — функции времени. Для любого нового мыслимого пути это действие принимает свое определенное значение. Математическая задача состоит в том, чтобы определить, для какой кривой это число меньше, чем для других.

Вы скажете: «О, это просто обычный пример на максимум и минимум. Надо подсчитать действие, продифференцировать его и найти минимум».

Но погодите. Обычно у нас бывает функция какой-то переменной и нужно найти значение переменной, при котором функция становится наименьшей или наибольшей. Скажем, имеется стержень, нагретый посредине. По нему растекается тепло, и в каждой точке стержня устанавливается своя температура. Нужно найти точку, где она выше всего. Но у нас речь идет совсем об ином — каждому пути в пространстве отвечает свое число, и предполагается найти тот путь, для которого это число минимально. Это совсем другая область математики. Это не обычное исчисление, а *вариационное* (так его называют).

В этой области математики имеется много своих задач. Скажем, окружность определяют как геометрическое место точек, расстояния которых от данной точки одинаковы, но окружность можно определить и иначе: это та из кривых *данной длины*, которая ограничивает собою наибольшую площадь. Любая другая кривая такого же периметра ограничивает площадь меньшую, чем окружность. Так что, если поставить задачу: найти кривую данного периметра, ограничивающую наибольшую площадь, то перед нами будет задача из вариационного исчисления, а не из того исчисления, к которому мы привыкли.

Итак, мы хотим взять интеграл по пути, пройденному телом. Сделаем это так. Все дело в том, чтобы вообразить себе, что существует истинный путь и что любая другая кривая, которую мы проведем — не настоящий путь, так что если подсчитать для нее действие, то получится число, превышающее то, которое мы получим для действия, соответствующего настоящему пути (рис. 20).

Итак, задача: найти истинный путь. Где он пролегает?

Один из способов, конечно, мог бы состоять в том, чтобы подсчитать действие для миллионов и миллионов путей и потом посмотреть, при каком пути это действие наименьшее. Тот путь, при котором действие минимально, и будет настоящим.

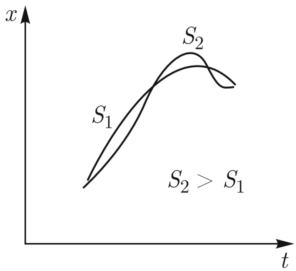

Рис. 20. Настоящий S_1 и не настоящий S_2 пути тела

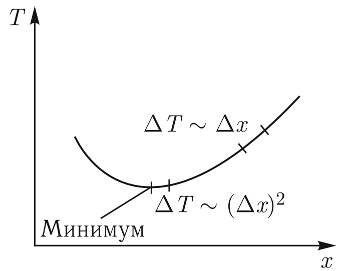

Рис. 21. Изменение температуры с расстоянием; *а*) — $\Delta t \sim \Delta x$; *б*) — $\Delta t \sim \Delta x^2$

Такой способ вполне возможен. Однако можно сделать проще. Если имеется величина, обладающая минимумом (из обычных функций, скажем, температура), то одно из свойств минимума состоит в том, что при удалении от него на расстояние *первого* порядка малости функция отклоняется от минимального своего значения только на величину *второго* порядка (рис. 21). А в любом другом месте кривой сдвиг на малое расстояние изменяет значение функции тоже на величину первого порядка малости. Но в минимуме легкие уходы в сторону в первом приближении не приводят к изменению функции.

Это-то свойство мы и собираемся использовать для расчета настоящего пути. Если путь правильный, то кривая чуть-чуть отличная от него, не приведет в первом приближении к изменению величины действия. Все изменения, если это был действительно минимум, возникнут только во втором приближении. Это легко доказать. Если при каком-то отклонении от кривой возникают изменения в первом порядке, то эти изменения в действии *пропорциональны* отклонению. Они, по всей вероятности, увеличат действие; иначе это не был бы минимум. Но раз изменения *пропорциональны* отклонению, то перемена знака отклонения уменьшит действие. Выходит, что при отклонении в одну сторону действие возрастает, а при отклонении в обратную сторону — убывает. Единственная возможность того, чтобы это действительно был минимум, — это чтобы в первом приближении никаких изменений не происходило и изменения были бы пропорциональны квадрату отклонения от настоящего пути.

Итак, мы пойдем по следующему пути: обозначим через $\underline{x(t)}$ (с чертой внизу) истинный путь — тот, который мы хотим найти. Возьмем некоторый пробный путь $x(t)$, отличающийся от искомого на небольшую величину, которую мы обозначим на рис. 22 через $\eta(t)$.

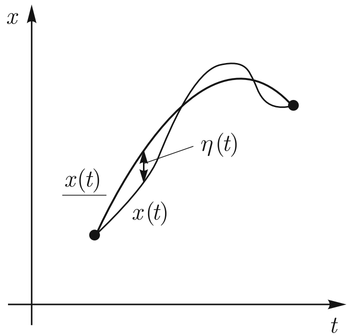

Рис. 22. Истинный $\underline{x(t)}$ и неистинный (пробный) $x(t)$ пути тела ($\eta(t)$ — отличие пробного пути от истинного (искомого) пути)

Идея состоит в том, что если мы подсчитаем действие S на пути $x(t)$, то разность между этим S и тем действием, которое мы вычислили для пути $x(t)$ (для простоты оно будет обозначено S), или разность между $\underline{S}$ и S, должна быть в первом приближении по η нулем. Они могут отличаться во втором порядке, но в первом разность обязана быть нулем.

И это должно соблюдаться для любой η. Впрочем, не совсем для любой. Метод требует принимать во внимание только те пути, которые начинаются и кончаются в одной и той же паре точек, т. е. всякий путь должен начинаться в определенной точке в момент t_1 и кончаться в другой определенной точке в момент t_2. Эти точки и моменты фиксируются. Так что наша функция η (отклонение) должна быть равна нулю на обоих концах: $\eta(t_1) = 0$ и $\eta(t_2) = 0$. При этом условии наша математическая задача становится полностью определенной.

Если бы вы не знали дифференциального исчисления, вы могли бы проделать такую же вещь для отыскания минимума обычной функции $f(x)$. Вы бы задумались над тем, что случится, если взять $f(x)$ и прибаить к x малую величину h, и доказывали бы, что поправка к $f(x)$ в первом порядке по h должна в минимуме быть равна нулю. Вы бы подставили $x + h$ вместо x и разложили бы $f(x + h)$ с точностью до первой степени h. Словом, повторили бы все то, что мы намерены сделать с η.

Итак, идея наша заключается в том, что мы подставляем $x(t) = \underline{x(t)} + \eta(t)$ в формулу для действия

$$S = \int \left[\frac{m}{2}\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 - V(x)\right] dt,$$

где через $V(x)$ обозначена потенциальная энергия. Производная dx/dt — это, естественно, производная от $\underline{x(t)}$ плюс производная от $\eta(t)$, так что для действия получаем такое выражение:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{m}{2} \left(\frac{d\underline{x}}{dt} + \frac{d\eta}{dt} \right)^2 - V(\underline{x} + \eta) \right] dt.$$

Теперь это нужно детально расписать. Для квадратичного слагаемого получаем

$$\left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right)^2 + 2\frac{d\underline{x}}{dt} + \frac{d\eta}{dt} + \left(\frac{d\eta}{dt} \right)^2.$$

Но постойте-ка! Ведь нам не нужно заботиться о порядках выше первого. Можно убрать все слагаемые, в которых есть η^2 и высшие степени, и ссыпать их в ящик под названием «второй и высшие порядки». Из этого выражения туда попадет только одна вторая степень, но из чего-то другого могут войти и высшие. Итак, часть, связанная с кинетической энергией, такова:

$$\frac{m}{2} \left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right)^2 + m\frac{d\underline{x}}{dt}\,\frac{d\eta}{dt} + \text{ (второй и высшие порядки)}.$$

Дальше нам нужен потенциал V в точках $\underline{x} + \eta$. Считаем η малой и разлагаем $V(x)$ в ряд Тейлора. Приближенно это будет $V(x)$; в следующем приближении (из-за того, что здесь стоят обычные производные) поправка равна η, умноженной на скорость изменения V по отношению к x, и т. д.:

$$V(\underline{x} + \eta) = V(\underline{x}) + \eta V'(\underline{x}) + \frac{\eta^2}{2} V''(\underline{x}) + \ldots$$

Для экономии места обозначим через V'' производную V по x. Слагаемое с η^2 и все, стоящие за ним, попадают в категорию «второй и высшие порядки». И о них больше нечего беспокоиться. Объединим все, что осталось:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \left[\frac{m}{2} \left(\frac{d\underline{x}}{dt} \right)^2 - V(\underline{x}) + m\frac{d\underline{x}}{dt}\,\frac{d\eta}{dt} - \eta V'(\underline{x}) + \begin{pmatrix} \text{второй} \\ \text{и высшие} \\ \text{порядки} \end{pmatrix} \right] dt.$$

Если мы теперь внимательно взглянем на это, то увидим, что два первых написаных здесь члена отвечают тому действию S, которое я написал бы для искомого истинного пути $\underline{x}$. Я хочу сосредоточить ваше внимание на изменении S, т. е. на разности между S и тем $\underline{S}$, которое получилось бы для истинного пути. Эту разность мы будем записывать как δS и назовем ее вариацией S. Отбрасывая второй и высшие порядки, получим для δS

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2} \left[m \frac{d\underline{x}}{dt} \frac{d\eta}{dt} - \eta V'(x) \right] dt.$$

Теперь задача выглядит так. Вот передо мной некоторый интеграл. Я не знаю еще, каково это $\underline{x}$, но я твердо знаю, что какую η я ни возьму, этот интеграл должен быть равен нулю. «Ну что ж, — подумаете вы, — единственная возможность для этого — чтобы множитель при η был равен нулю». Но как быть с первым слагаемым, где есть $d\eta/dt$? Вы скажете: «Если η обращается в ничто, то ее производная такое же ничто; значит коэффициент при $d\eta/dt$ должен тоже быть нулем». Ну это не совсем верно потому, что между отклонением η и его производной имеется связь; они не полностью независимы, потому что $\eta(t)$ должно быть нулем и при t_1, и при t_2.

При решении этих задач вариационного исчисления всегда пользуются одним и тем же общим принципом. Вы чуть сдвигаете то, что хотите варьировать (подобно тому, как это сделали мы, добавляя η), бросаете взгляд на члены второго порядка, затем расставляете все так, чтобы получился интеграл в таком виде: «сдвиг (η), умноженный на то, что получится», но чтобы в нем не было никаких производных от η (никаких $d\eta/dt$). Непременно нужно так все преобразовать, чтобы осталось «нечто», умноженное на η. Сейчас вы поймете, отчего это так важно. Существуют формулы, которые подскажут вам, как в некоторых случаях это можно проделать без каких-либо выкладок; но они не так уж общи, чтобы стоило заучивать их; лучше всего проделывать выкладки так, как это делаем мы.

Как же я могу переделать член $d\eta/dt$, чтобы в нем появилось η? Я могу добиться этого, интегрируя по частям. Оказывается, что в вариационном исчислении весь фокус в том и состоит, чтобы расписать вариацию S и затем проинтегрировать по частям так, чтобы производные от η исчезли.

Во всех задачах, в которых появляются производные, проделывается такой же фокус.

Припомните общий принцип интегрирования по частям. Если у вас есть произвольная функция f, умноженная на $d\eta/dt$ и проинтегрированная по t, то вы расписываете производную от ηf:

$$\frac{d}{dt}(\eta f) = \eta \frac{df}{dt} + f \frac{d\eta}{dt}.$$

В интересующем вас интеграле стоит как раз последнее слагаемое, так что

$$\int f \frac{d\eta}{dt}\, dt = \eta f - \int \eta \frac{df}{dt}\, dt.$$

В нашей формуле для δS за функцию f принимается произведение m на $d\underline{x}/dt$, поэтому я получаю для δS выражение

$$\delta S = m\frac{d\underline{x}}{dt}\,\eta(t)\Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2}\frac{d}{dt}\left(m\frac{d\underline{x}}{dt}\right)\eta(t)\,dt - \int_{t_1}^{t_2} V'(\underline{x})\,\eta(t)\,dt.$$

В первый член должны быть подставлены пределы интегрирования t_1 и t_2. Тогда я получу под интегралом член от интегрирования по частям и последний член, оставшийся при преобразовании неизменным.

А теперь происходит то, что бывает всегда, — проинтегрированная часть исчезает. (А если не исчезает, то нужно переформулировать принцип, добавив условия, обеспечивающие такое исчезновение!) Мы уже говорили, что η на концах пути должна быть равна нулю. Ведь в чем состоит наш принцип? В том, что действие минимально при условии, что варьируемая кривая начинается и кончается в избранных точках. Это значит, что $\eta(t_1) = 0$ и $\eta(t_2) = 0$. Поэтому проинтегрированный член получается равным нулю. Мы собираем воедино остальные члены и пишем:

$$\delta S = \int_{t_1}^{t_2}\left[-m\frac{d^2\underline{x}}{dt^2} - V'(\underline{x})\right] h(t)\,dt.$$

Вариация S приобрела теперь такой вид, какой мы хотели ей придать: что-то стоит в скобках (обозначим его F), и все это умножено на $\eta(t)$ и проинтегрировано от t_1 до t_2.

У нас вышло, что интеграл от какого-то выражения, умноженного на $\eta(t)$, всегда равен нулю:

$$\int F(t)\,\eta(t)\,dt = 0.$$

Стоит какая-то функция от t; умножающее на $\eta(t)$ и интегрирую ее от начала до конца. И какова бы ни была η, я получаю нуль. Это означает, что функция $F(t)$ равна нулю. В общем-то это очевидно, но я на всякий случай покажу вам один из способов доказательства.

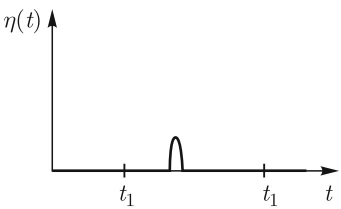

Рис. 23. Зависимость $\eta(t)$ (см. рис. 22) от времени

Пусть в качестве $\eta(t)$ я выберу нечто, что равно нулю всюду, при всех t, кроме одного, заранее выбранного значения t. Оно остается нулем, пока я не дойду до этого t (рис. 23). Затем оно подскакивает на мгновение и сразу же осаживает назад. Если вы берете интеграл от этой η, умноженной на какую-то функцию F, то единственное место, в котором вы получите что-то не нулевое, — это там, где $\eta(t)$ подскакивало; и у вас получится значение F в этом месте на интеграл по скачку. Сам по себе интеграл по скачку не равен нулю, но после умножения на F он должен дать нуль. Значит, функция в том месте, где был скачок, должна оказаться нулем. Но ведь скачок можно было сделать в любом месте; значит, F должна быть нулем всюду.

Мы видим, что если наш интеграл равен нулю при какой угодно η, то коэффициент при η должен обратиться в нуль. Интеграл действия достигает минимума на том пути, который будет удовлетворять такому сложному дифференциальному уравнению:

$$-m\frac{d^2\underline{x}}{dt^2} - V'(\underline{x}) = 0.$$

На самом деле это уравнение не так уж сложно: вы его уже встречали прежде. Это просто $F = ma$. Первый член — это масса, умноженная на ускорение; второй — это производная от потенциальной энергии, т. е. сила.

Итак, мы доказали (по крайней мере для консервативной системы), что принцип наименьшего действия приводит к правильному ответу; он утверждает, что путь, обладающий минимумом действия, — это путь, удовлетворяющий закону Ньютона.

Теперь я хочу перейти к некоторым обобщениям. В первую очередь, всю эту историю можно было проделать и в трех измерениях. Вместо простого x я тогда ввел бы x, y и z как функции t и действие выглядело бы посложнее. При трехмерном движении мы должны использовать полную кинетическую энергию: $m/2$, умноженное на квадрат всей скорости. Иначе говоря,

$$\text{е. э.} = \frac{m}{2}\left[\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dt}\right)^2\right].$$

Кроме того, потенциальная энергия теперь является функцией x, y и z. А что можно сказать о пути? Путь есть некоторая кривая общего вида в пространстве; ее не так легко начертить, но идея остается прежней. А как обстоит дело с η? Что ж, η и имеет три компоненты. Путь можно сдвигать по x, и по y, и по z или во всех трех направлениях одновременно. Так что η теперь вектор. От этого сильных усложнений не получается. Раз нулю должны быть равны лишь вариации *первого порядка*, то можно провести расчет последовательно с тремя сдвигами. Сперва можно сдвинуть η только в направлении x и сказать, что коэффициент должен обратиться в нуль. Получится одно уравнение. Потом мы сдвинем η в направлении y и получим второе. Затем сдвинем в направлении z и получим третье.

Можно все, если угодно, проделать в другом порядке. Как бы то ни было, возникает тройка уравнений. Но ведь закон Ньютона — это тоже три уравнения в трех измерениях, по одному для каждой компоненты. Метод может быть обобщен и на произвольное число частиц. Если, скажем, у вас есть две частицы и между ними действуют какие-то силы и имеется взаимная потенциальная энергия, то вы просто складываете их кинетические энергии и вычитаете из суммы потенциальную энергию взаимодействия. А, что вы варьируете? Пути обеих частиц. Тогда для двух частиц, движущихся в трех измерениях, возникает шесть уравнений. Вы можете варьировать положение частицы 1 в направлении x, в направлении y и в направлении z, и то же самое проделать с частицей 2, так что существует шесть уравнений. Так и должно быть. Три уравнения определяют ускорение частицы 1 через силу, действующую на нее, а три других — ускорение частицы 2 из-за силы, действующей на нее. Следуйте всегда тем же правилам игры и вы получите закон Ньютона для произвольного числа частиц.

Я сказал, что мы получим закон Ньютона. Это не совсем верно, потому что в закон Ньютона входят и неконсервативные силы, например, трение. Ньютон утверждал, что ma равно всякой F. Принцип же наименьшего действия справедлив только для *консервативных* систем, где все силы могут быть получены из потенциальной функции. Но ведь вы знаете, что на микроскопическом уровне, т. е. на самом глубинном физическом уровне неконсервативных сил не существует. Неконсервативные силы (такие, как трение) появляются только от того, что мы пренебрегаем микроскопическими сложными эффектами: просто слишком много частиц приходится анализировать. *Фундаментальные* же законы *могут* быть выражены в виде принципа наименьшего действия.

Мы на этом прервем хрестоматийное изложение сути принципа наименьшего действия по Фейнману. Вернемся к нему в эссе 13 после ознакомления с принципами квантовой механики.

10.4.5. Связь принципов наименьшего действия и сохранения энергии. Если спросить у большинства даже образованных людей, пожалуй, кроме немногих физиков: какой самый важный определяющий всю нашу жизнь принцип? Без сомнения, что подавляющее большинство «проголосует» за принцип сохранения энергии. Многие с удивлением узна́ют, что, например, великий Планк писал [65]: «Принцип сохранения энергии можно вывести из принципа наименьшего действия; следовательно, он в нем содержится; между тем, сделать обратное не удается. Поэтому принцип сохранения энергии является более частным, а принцип наименьшего действия — более общим законом». Почему же наука долгое время отдавала предпочтение принципу сохранения энергии, а не принципу наименьшего действия? Это связано с рядом причин. Ученые, даже безусловно знающие и понимающие суть вариационных принципов, вроде М. Планка, главную причину видели в числе уравнений, следуемых из того и из другого принципов. Для полного изучения движения число уравнений должно равняться числу независимых переменных. Это и дает принцип наименьшего действия, а принцип сохранения энергии применяется к какому-нибудь конкретному случаю и дает одно уравнение. Хотя его и недостаточно, но простота принципа сохранения энергии определяет его массовую доступность.

Некоторую трудность практического использования принципа наименьшего действия вызывает и нахождение нулевой первой вариации. В то время как принцип сохранения энергии используется прямо без дополнительных условий.

Наконец, большие затруднения у «простых» людей связаны с отсутствием достаточного образования в области математики. Ведь раздела, посвященного вариационному исчислению, нет в учебных программах школ и вузов даже в настоящее время — в начале XXI века!

Для ознакомления с более подробным отношением обоих принципов читателю можно порекомендовать книгу [66].

10.4.6. История развития принципа наименьшего действия; его значение для науки. Много лет спустя после работ Лейбница и Ферма, а именно в 1774 г., Мопертюи по существу переоткрыл принцип наименьшего действия, во всяком случае, придал ему статус всеобщего принципа, объясняющего все движения в Природе. О религиозной окраске этого принципа в трактовке Мопертюи мы специально будем говорить в п. 10.4.8. С самого начала Мопертюи понимал под количеством действия произведение массы тела, его скорости и пути, пройденного телом. Таким образом, отбрасывая «религиозные одежды», принцип наименьшего действия у Мопертюи выступал в роли единого принципа, объясняющего целесообразность устройства всей Природы. Другое дело, что Мопертюи свято верил, что создание такого единого всеобщего принципа доказывает «мудрость и существование творца».

Результат математизации принципа привел Эйлера к связи принципа с вариационным исчислением.

Решая задачу о брахистохроне (см. п. 10.1), И. Бернулли дал общий метод решения аналогичных задач. Попутно И. Бернулли сформулировал свой частный принцип: «Если кривая дает максимум или минимум, то такими же свойствами обладает и каждая бесконечно малая часть этой кривой». В некоторых случаях элементы кривой не обладают таким свойством. Поэтому принцип Бернулли не имеет общего характера.

Л. Эйлер для элементов пути, дающих максимум или минимум, использовал в уравнении принципа наименьшего действия не весь путь S, а элемент пути ds. В результате в работах Эйлера принцип наименьшего действия приобрел более общий характер, чем у Мопертюи.

У последнего фигурировали лишь начальные и конечные (вообще — прерывные) изменения скорости, а Эйлер смог применить принцип к непрерывным движениям. После этого работа Мопертюи стала иметь лишь историческое значение.

Эйлер решил большое число задач о свободном движении брошенных тел, показав тем самым универсальность значения принципа наименьшего действия для движения таких тел.

Результаты Эйлера в 1760–1761 гг. были обобщены Лагранжем. Он прежде всего распространил принцип на произвольную систему n точек с массами m, произвольным образом действующих друг на друга и находящихся под действием центральных сил, пропорциональных произвольным степеням расстояний. В этом случае на движение системы налагается требование наименьшего или наибольшего значения суммы [64]:

$$\sum_{i-1}^{n} m_1 \int v_i ds_i. \tag{40}$$

Если теперь считать, что при переходе из точки A в точку B полная энергия частицы не меняется: $E = T + U = \mathrm{const}$, то из всех траекторий частицы, соединяющих точки A и B, истинной будет траектория, соответствующая минимуму величины [64]:

$$S = \int_A^B mv\, ds. \tag{41}$$

Из этого выражения видно, что в него не включены координаты точки. Отрезок AB не зависит от координаты точек на пути, проходимым телом.

Таким образом принцип наименьшего действия в форме, данной Лагранжем, характеризует движение независимо от выбора той или иной системы координат.

Уже в XIX веке заслуга Гамильтона состояла в превращении принципа наименьшего действия из метода механики в метод физики [62]. Он показал близкую связь принципа наименьшего действия в механике с принципом Ферма в оптике. Гамильтонова функция

$$V = \int_A^B v\, ds, \tag{42}$$

где $A(x_0, y_0, z_0)$ и $B(x_n, y_n, z_n)$ — граничные точки, полностью характеризует оптическую систему.

На функцию (42) по Гамильтону накладывается требование нулевой первой вариации:

$$\delta V = 0. \tag{43}$$

После этого Гамильтон находит как функцию граничных точек и находит уравнения, связывающие косинусы светового луча и координаты граничных точек [64]. Оказалось, что эти уравнения аналогичны лагранжевым уравнениям, а функция V соответствует интегралу действия.

Гамильтон показал, что и «корпускулярные», и «волновые» воззрения приводят для большого круга проблем к одним и тем же результатам при определении геометрических свойств лучей. Луч света может рассматриваться как перпендикуляр к некоторой волновой поверхности и как траектория световой частицы; но при переходе от одного воззрения к другому математический аппарат не меняется. Именно это обстоятельство и явилось основой той глубокой аналогии между механическими и оптическими процессами, которая была указана Гамильтоном [64].

Далее Гамильтон развил вариационный принцип, который уже отличался от принципа наименьшего действия тем, что истинный путь частицы характеризуется не интегралом по пути от количества движения (41), а *интегралом по времени от функции Лагранжа*:

$$W = \int\limits_{t_0}^{t_1} L dt, \tag{44}$$

который для истинного пути будет или наименьшим, или наибольшим. В этом состоит фундаментальное отличие от принципа наименьшего действия Мопертюи–Эйлера.

Заметим, что в случае, когда $L = T - U$, оба принципа совпадают.

В конечном счете после нового вариационного принципа Гамильтона рассматриваемый вариационный принцип можно отнести к любым процессам, а не только к механическому.

Сам Гамильтон новый принцип, который продолжал именоваться принципом наименьшего действия уже скорее по привычке, а не по своей физической сути, относил ко всей физике.

После Гамильтона в тридцатые годы XIX века Карл Густав Якоби (1804–1851) придал принципу новую форму. В [64] довольно просто показано, как Якоби получает этот новый вид принципа Гамильтона: Якоби умножает удвоенную кинетическую энергию T на квадрат элемента времени dt. Удвоенную кинетическую энергию можно считать произведением массы частицы и квадрата ее скорости:

$$2T = mv^2 = m\left(\frac{dx}{dt}\right)^2,$$

где dx — элемент длины траектории частицы. Умножив эту величину на dt^2, получаем

$$2T dt^2 = \sqrt{2T}\,\sqrt{2T dt^2} = \sqrt{2Tm}\, ds. \tag{45}$$

В формуле принципа наименьшего действия под знаком интеграла стоит действие — энергия, помноженная на время.

Мы можем представить принцип наименьшего действия в форме

$$\delta A = \delta \int_{t_1}^{t_2} 2T dt = 0 \tag{46}$$

и заменить здесь подынтегральное выражение новым, взятым из (45):

$$\delta A = \delta \int_{S_1}^{S_2} V_2.$$

В этом случае интегрирование ведется не по времени, а по пути. Если силы консервативны и кинетическая энергия T равна разности полной энергии E и потенциальной энергии U, то написанное условие можно заменить другим:

$$\delta A = \delta \int_{S_1}^{S_2} \sqrt{2m(E-U)}\, ds. \tag{47}$$

В форме принципа (47), данной Якоби, важно, что интеграл берется не по времени, а по пути.

В [64] так оценивается значение развития вариационного принципа: «Когда механика вплотную подходит к физическим закономерностям, когда в механике подготовляется аппарат, применимый не только к ней, но и к другим областям, одной из существенных сторон подготовки становится такое представление динамических закономерностей, в котором наглядная механическая интерпретация исчезает. Метод обобщенных координат и принцип наименьшего действия превращаются из механических, обобщающих закономерности движения в собственно механическом смысле, в метод и принцип физики».

После Гамильтона и Якоби существенный вклад в развитие вариационного принципа внес российский математик М.В. Остроградский (1801–1861). Его вывод принципа наименьшего действия (мы тоже используем его историческое название) получен из более общих условий, чем это сделал Гамильтон.

Мы не будем более подробно рассматривать вывод Остроградского. Скажем лишь, что его вывод основывается на собственно математических проблемах теории дифференциальных уравнений и вариационного исчисления.

Остроградский сумел распространить принцип Гамильтона на случай зависимости функции Лагранжа явно от времени, чего вообще не было у Гамильтона.

Из всех вариационных принципов принцип Гамильтона–Остроградского является наиболее важным.

Этот принцип используют в теории упругости, гидромеханике, электродинамике, статистической физике, квантовой механике и других разделах физики.

А. Эйнштейн, Э. Шредингер, А. Зоммерфельд показали, что принцип Гамильтона–Остроградского распространяется на релятивистскую и волновую механику.

Последний штрих преобразования принципа наименьшего действия в общий принцип физики внес Г. Гельмгольц. Он ввел понятие кинетического потенциала, способствовавшее обобщению физической интерпретации принципа. Кинетический потенциал — это величина, из которой можно получить действие путем интегрирования по времени. Эта величина фигурировала в различных областях физики без какой-либо механической интерпретации. В трудах Гельмгольца кинетический потенциал трактовался не как производная величина — разность между кинетической и потенциальной энергиями, а как исходная величина. Это было важным шагом для перехода к немеханическому пониманию принципа наименьшего действия, так как кинетический потенциал может отличаться от механического понятия разности $T - U$.

Вне механики различие между кинетической и потенциальной энергиями теряет непосредственный смысл. Поэтому самостоятельный характер понятия кинетического потенциала позволяет сделать принцип наименьшего действия универсальным принципом физики необратимых процессов, не сводя ее законы к законам механики, иными словами — позволяет трактовать указанный принцип уже не как механический, а как общефизический и, более того, как общенаучный. Ведь в наши дни вариационные принципы, кроме указанных выше, стали применяться в кибернетике, биологии, математической экономике.

10.4.7. Принцип Гаусса (наименьшего принуждения). В анализе развития вариационных принципов нельзя пройти мимо работ Гаусса. В 1829 г. он в статье [67] выдвинул в качестве наиболее общего начала принцип: *система со связями без трения, находясь под действием любых сил, движется таким образом, что принуждение со стороны связей и давление на связи имеет наименьшее значение.* По Гауссу этот принцип, получивший название «принципа наименьшего принуждения», звучит так: «Движение системы материальных точек, связанных между собой произвольным образом и подверженных любым влияниям, в каждое мгновение происходит в наиболее совершенном, какое только возможно, согласии с тем движением, каким обладали бы эти точки, если бы все они стали свободными, т. е. оно происходит с наименьшим возможным принуждением, если в качестве меры принуждения, примененного в течение бесконечно малого мгновения, принять сумму произведений массы каждой точки на квадрат величины ее отклонения от того положения, которое она заняла бы, если бы была свободна» [67].

В [64] эта сумма обозначена через Z, а система точек записана как

$$Z = \sum_{k=1}^{3n} m_k \left(\ddot{x}_k - \frac{X_k}{m_k} \right)^2. \tag{48}$$

Если бы внутренних связей не было, величина, стоящая в скобках, равнялась бы нулю, так как при этом

$$\ddot{x}_k = \frac{X_k}{m_k}. \tag{49}$$

Ненулевая величина разности, стоящей в скобках, свидетельствует об отклонении движения частицы от свободного движения, т. е. *о результате принуждения со стороны внутренних связей*. Вот почему принцип Гаусса получил свое второе название.

По этому принципу величина Z в (48) должна быть наименьшей, т. е. ее вариация δZ должна равняться нулю.

Варьируются ускорения $\ddot{x}$. Остальные величины $x_k, \dot{x}_k, m_k$ каждой частицы остаются неизменными. Из этих условий можно получить уравнения Лагранжа для системы частиц.

10.4.8. Философский аспект принципа наименьшего действия. Естественно-научные принципы, о которых шла речь в этой книге, существуют в Природе независимо от воли Человека, хотя обнаруживаются в результате его экспериментального и теоретического труда. Более того, можно утверждать, что Природа в своей «деятельности» руководствуется именно этими принципами. Когда мы так утверждаем, то это вовсе не значит, что естественно-научные принципы носят телеологический, а тем более теологический характер.

Термин «телеология» происходит от греческих слов «telos», означающего «цель», и «logos» — «слово», «учение». Поэтому телеология предполагает, что течение всех процессов предопределено заранее целеполагающим началом [68].

Телеологии противостоит понятие детерминизма, в основе которого лежит принцип причинности (см эссе 2).

Под теологией (от слов «theos» (греч.) — Бог и ...логия) понимают совокупность религиозных доктрин о сущности и действиях Бога. Теология предполагает концепцию Бога, сообщающего Человеку знания о себе в откровении [68].

Ярким примером философской борьбы телеологии с детерминизмом является принцип наименьшего действия.

Философское рассмотрение этого принципа состоит из двух частей. В первой анализируется справедливость или несправедливость теологического и телеологического понимания сущности принципа, а во второй — методология применения вариационных принципов в науке вообще.

Оставим в стороне причины неопубликования Лейбницем принципа наименьшего действия. Нашу версию этого мы высказали в п. 10.4.1 этого эссе. Но новое переоткрытие этого принципа Мопертюи в 1340 г. было внешне очень привлекательным с телеологической точки зрения. Действительно первоначально этот принцип трактовался не как экстремальный, а как минимальный, т. е. казалось, что все процессы в Природе протекают «экономно», с минимумом затрат времени, энергии. Откуда проистекает такая экономная разумность Природы? Ответ естествен — от Бога. Поэтому Мопертюи считал сам принцип наименьшего действия сильнейшим аргументом, доказывающим существование Бога.

Теологическое и телеологическое обоснование принципа содержалось и в работе Эйлера. А вот в работах У. Гамильтона автор в своей философской трактовке принципа наименьшего действия исходил из идеи экстремумов и формулировал его как принцип стационарного действия. Гамильтон отрицал упрощенную теологическую и телеологическую трактовку Мопертюи. Но в то же время Гамильтон пытается представить принцип наименьшего действия как принцип, выражающий целесообразность некоторого высшего типа, которая ведет к признанию существования Бога [69].

Важную роль в отказе от теологии и телеологии сыграл Лагранж, но еще более важное значение внес Г. Герц. Он вывел принцип наименьшего действия в форме Мопертюи–Эйлера–Лагранжа и в форме Гамильтона–Остроградского (см. п. 10.4.6) из принципа кратчайшего пути, т. е. из принципа, в котором не просматривается телеологический и теологический смысл. Но самым существенным аргументом против теологического и телеологического толкования вариационных принципов оказалась их экстремальность, а не минимальность.

История вариационных принципов и вариационного исчисления показывает, что идеи о минимумах и максимумах как философских категориях сыграли положительную конструктивную роль в открытии и правильном философском истолковании вариационных принципов. Существенную познавательную роль в становлении вариационных принципов имел также принцип простоты Природы [69] (см. эссе 15).

Из предыдущего изложения наглядно видна всеобщность вариационных принципов и в частном случае — принципа наименьшего действия. Эта всеобщность, конечно, привлекает философов разного толка. Главными философскими школами являются позитивисты и диалектики-материалисты.

Первые считают, что над наукой не должно быть никаких философских задач исследования мировоззренческих проблем. Главная черта позитивизма — сведение задач науки лишь к описанию явлений. Вторые призваны вскрывать наиболее общие законы развития Природы.

Всеобщее значение принципа наименьшего действия позитивисты отождествляют с существованием общего математического метода решения задач, имеющих вариационный характер и относящихся к различным наукам.

Общность же математического метода выводится позитивистами лишь из свойств нашего мышления. При этом они пытаются усмотреть основания науки в математике.

Диалектико-материалистическая теория познания и анализ физического материала приводят к выводу о том, что всеобщая математическая форма принципа наименьшего действия выражает с той или иной степенью точности и полноты всеобщий объективный закон науки, условно называемый принципом наименьшего действия, а не условно и более правильно — вариационным принципом.

Вариационный принцип выражает то, что для всех форм движения материи определенная физическая величина, называемая действием, имеет тенденцию принимать экстремальное состояние. «Действие» является наиболее универсальной из известных физических величин, характеризующих движение как с точки зрения пространственных, так и временны́х изменений.

Факт существования единого физического закона показывает единство различных разделов науки, изучающих конкретные формы движения материи.

Отражением содержательного единства физических теорий является единство и аналогичность их по математической форме.

Рассмотрение принципа наименьшего действия как всеобщего объективного законы физики, обобщающего законы, которые содержат причинное описание явлений в различных разделах этой науки, позволяет сделать вывод о том, что анализируемый принцип является обобщенной формой выражения причинности в физике.

Математическая форма вариационных принципов, в том числе принципа наименьшего действия, определяется существованием объективных экстремальных закономерностей. С ними мы встречаемся не только в физике, но и в биологии, кибернетике, в человеческом мышлении. Подход к экстремумам как философским категориям был начат еще Дж. Бруно, но почти не получил развития, пожалуй, до сих пор.

На этом мы закончим описание философской части обсуждения вариационного подхода к описанию неживой Природы. Хотя применение принципа наименьшего действия в биологии уже есть в значительной степени применение этого принципа к Природе живого.

По-видимому, этот принцип применим к одушевленной Природе и более прямо. Зачатки такого подхода были опубликованы О. Бондаренко [70]. Изложим его подход. В основе его подхода лежат два фундаментальных понятия. Это уже известный нам принцип наименьшего действия и *активность*. Активность предполагает экономию затрат энергии телом, системой. Наивысшая активность соответствует минимальному расходу энергии. Это заключение на первый взгляд покажется вряд ли правильным. Но посмотрим, как тело падает на землю: свободно и по прямой. Скорость его постоянно меняется в зависимости от ускорения свободного падения. И все же мы можем вычислить среднюю скорость, которая зависит от высоты и времени полета. Допустим далее, что тело вдруг само собой решило падать с аберрацией, т. е. не по прямой, а по кривой; при этом его падение по-прежнему остается свободным, без воздействия каких-либо сил, кроме силы притяжения (гипотетическое свободное криволинейное падение). В последнем случае пройденный телом путь увеличится, время в пути также возрастет и соответственно изменится ускорение: при криволинейном движении ускорение слагается из нормального и касательного (т. е. в данном случае дополнительного) ускорений. Отсюда средняя скорость тела при свободном криволинейном падении на землю должна несколько уменьшиться. Часть энергии тела в этой гипотетической ситуации будет тратиться не на полет тела к земле, а на преодоление возникших препятствий, в частности на то, чтобы «заставить» тело двигаться по кривой при постоянном стремлении к выпрямлению пути, т. е. движению по касательной. То-есть часть энергии будет расходоваться непроизводительно, если под этим понимать цель — падение на землю.

Наоборот, при свободном прямолинейном падении, которое мы реально имеем в жизни, вся энергия будет тратиться строго «по целевому назначению», т. е. непроизводительных затрат в этом случае быть не должно, и кинетическая энергия — энергия движения — окажется максимальной.

Таким образом, при свободном прямолинейном падении тело должно развивать бóльшую скорость, чем оно развивало бы, если падало бы свободно криволинейно.

Если вернуться к определению активности, то тело, движущееся прямолинейно, является *более активным*, чем тело, движущееся криволинейно. По принципу наименьшего действия любое тело стремится выбирать более активное состояние, в результате чего возрастают его скорость (до оптимальной для данной среды) и произведенная полезная работа. Отсюда замысел Природы заключается в стремлении избежать аберраций. Если можно выбрать прямой путь (наименьшее), то выбирается прямой путь. И именно это позволяет: сэкономить энергию, увеличить стремительность, скорость, полезную работу, активность в целом.

О. Бондаренко приводит такой пример: если раскрутить на веревке груз, а потом отпустить его, то груз полетит вперед по касательной к ранее описываемой окружности. Было криволинейное движение, стало прямолинейное. Под воздействием внешней силы было аберрированное движение, а при прекращении действия силы движение стало неаберрированное, т. е. тело освободившееся, предоставленное само себе, немедленно выберет прямой путь — по инерции, в соответствии с принципом наименьшего действия. Отсюда, между прочим, следует вывод, который действует, по-видимому, и в неодушевленной, и в одушевленной Природе: ограничение свободы (приложение силы извне) — это подавление естественной активности. О. Бондаренко утверждает, что тела сохраняют «упорство» в выборе оптимального для них состояния: они стремятся в соответствии с принципом наименьшего действия к движению по инерции, которое предполагает: а) отсутствие внешнего воздействия, б) максимальную активность и в) минимальные затраты энергии.

Если обратиться к современной трактовке первого закона механики и его ньютоновской, т. е. первоначальной формулировке, то мы увидим:

Формулировка Ньютона	**Современная формулировка**
Всякое тело продолжает удерживаться в состоянии покоя и равномерного прямолинейного движения, пока оно не понуждается приложенными силами изменить это состояние.	Всякое тело сохраняет состояние покоя или равномерного и прямолинейного движения, если действие со стороны других тел не изменяет этого состояния.

Из сравнения обоих формулировок нетрудно видеть, что современная физика не признает стремления к наименьшему, оптимальному, энергетически выгодному, т. е. она недооценивает принцип наименьшего действия. Вообще современная физика искажает понятие активности. Она понимает активность как *видимую активность*. «Если фирма демонстрирует лихорадочную деятельность своих сотрудников, значит, она работает активно. Если на кафедре успешно защищается множество диссертаций, значит работа ведется активно. Качество подменяется количеством! Подобный подход предполагает экстенсивность освоения темы вместо интенсивности, интерес к структуре вместо интереса к функции, наконец, упор на внешнюю (видимую) сторону процесса при игнорировании внутренней (невидимой, но также реально существующей)».

О. Бондаренко приводит и второй наглядный пример: «Человек в лодке гребет сильными, уверенными движениями. Он активен? Безусловно — на первый взгляд. А на второй взгляд может оказаться, что он гребет против течения и в конечном счете не движется, а стоит на месте. В таком случае чего стоит его активность? Расхода энергии действительно много, а «выхлопа» нет. Это пример видимой активности». Я бы сказал — непроизводительной активности.

Действительная активность не тождественна видимой; действительная активность есть активность высшего уровня.

Всякое тело стремится к экономии энергии и, таким образом, к самому активному состоянию. При экономии энергии тело движется по инерции, прямолинейно, не ускоренно (ему ничего не мешает, тело избавилось от воздействия внешних сил), и именно в таком случае скорость тела будет оптимальной. А поскольку энергия экономится, тело как система существует дольше. Такое состояние более устойчиво.

Таким образом, чем активнее тело, т. е. чем оно быстрее движется, тем больше кинетическая энергия и соответственно тем меньше потенциальная энергия (покой). Следовательно, принцип наименьшего действия заставляет тела предпочитать движение покою.

При недооценке принципа наименьшего действия мы, тем самым, недооцениваем кинетическую энергию и движение вообще, не делая качественной разницы между движением и покоем.

Система, которая движется, дольше «живет» по сравнению с покоящейся системой, так как первая меньше расходует энергию и тем самым, меньше «устает».

Физика, биология, физиология указывают: когда человек движется (с оптимальной скоростью), он меньше затрачивает энергии, чем когда просто стоит, поскольку при ходьбе часть мышц вследствие инерции тела отдыхает, при стоянии задействованы практически все мышцы. Следовательно, если мы идем, то меньше устаем. Парадоксально, но факт!

О. Бондаренко свой подход переносит целиком на Человека, на общество. Он показывает, что бесконечная активность продлевает жизнь.

Этому способствует более высокий уровень жизни. Основная тенденция четко просматривается: чем выше уровень жизни, тем в целом больше ее продолжительность. Люди меньше устают от жизни. Они подчиняются принципу наименьшего действия, т. е. прямо выполняют закон Природы.

Пока рано говорить о правильности или неправильности подхода, развиваемого О. Бондаренко в [70]. Главное в его подходе — это рассмотрение принципа наименьшего действия в сочетании с понятием активности движения. Во всяком случае, нам представляется, что без этого понятия вариационные принципы не удастся обобщить настолько, чтобы они с успехом были бы применены к одушевленной материи. Для этого скорее всего придется пересмотреть и математические формы этих принципов.

ЭССЕ 11
ПРИНЦИПЫ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

11.1. Принцип относительности А. Эйнштейна

Долгое время в физике господствовала идея мирового эфира несмотря на трудности ее применения. Главной трудностью являлась невозможность совместить абсолютную твердость эфира с его полной прозрачностью. Об этой и других трудностях эфирной гипотезы читатель может прочитать во второй книге нашей серии [71]. Критериальным опытом, способным подтвердить существование эфира, являлось определение скорости распространения света в направлении движения Земли и в противоположном направлении. Но классический опыт такого рода, выполненный Майкельсоном [71], не обнаружил разницу в этих скоростях. Рядом исследователей результат измерений Майкельсона был многократно подтвержден.

Основываясь на этом результате, т. е. на инвариантности (независимости) скорости света в пустоте, А. Эйнштейн сформулировал принцип, утверждающий, что не только механические (как считал Галилей), но и *никакие физические опыты и наблюдения*, *производимые внутри инерциальной системы*, *не дают возможности решить вопрос*, *имеет ли вся эта система в целом прямолинейное равномерное движение или же она находится в покое*. Таким образом, Эйнштейн расширил понимание принципа относительности Галилея. Поэтому расширенный принцип именуют «частным принципом относительности», хотя он, по существу, является более общим, чем принцип относительности Галилея.

11.2. Принципы специальной теории относительности (СТО) [1]

Пока физика вплоть до первых лет двадцатого века оперировала представлениями механики, все они не вызывали сомнения. Одним из таких представлений была модель эфира. Эфир был введен как

[1] В основе нашего изложения лежит содержание СТО в книге [72].

среда, объясняющая ньютоновскую теорию тяготения, т. е. действие на расстоянии или передачу силы гравитации через пустое пространство. Среди различных воздействий эфиру приписывалась способность передавать и световые колебания. Но чтобы объединить многие экспериментальные факты, приходилось по мере их «поступления» вводить все больше и больше произвольных допущений о свойствах эфира. Например, эфир увлекается движущейся Землей, а Земля движется через эфир.

Материальная среда, в которой распространяется свет, увлекает за собой эфир, но со скоростью, равной половине скорости среды. Эти и другие нелогичности привели А. Эйнштейна в 1905 г. к новой идее, заменившей предположения теории эфира двумя принципами (постулатами), на которых основывается созданная им специальная теория относительности (СТО):

1) все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах;
2) скорость света (в пустоте) одинакова с точки зрения всех наблюдателей независимо от движения источника света относительно наблюдателя.

Первый из этих принципов по существу не отличается от принципа относительности Галилея (см. раздел 3.2), зато второй из принципов Эйнштейна был абсолютно новым, показывающим, что пространство (x, y, z) и время t связаны друг с другом в единую форму движения, образующую четырехмерное пространство. В отличие от этого в учении Ньютона время совершенно не зависит от координат пространства. В ньютоновской механике время абсолютно, т. е. численное значение времени одинаково во всех системах отсчета независимо от их движения, т. е. $t' = t$, где t' относится к одной (любой) из систем отсчета, а t — к первоначальной системе отсчета.

Это соотношение вошло составной частью в раздел 3.2 как одно из уравнений (1) преобразований Галилея.

Возникает вопрос, а применимы ли эти преобразования не только в механике, но и к электромагнитным явлениям?

Ответ на этот вопрос дает хотя бы пример взаимодействий неподвижного проводника с током и отдельного заряда q в двух системах K и K', где K' — подвижная относительно K — неподвижной системы отсчета (рис. 24).

В системе K на q действует сила отталкивания F. Поскольку K' относительно K движется вправо (так мы условились для примера), то наблюдателю в K кажется, что проводник и отдельный заряд движутся влево. Наблюдатель в K' получит силу F, действующую на заряд q, что и неподвижный наблюдатель в K. Но так как заряд q в K движется, то в соответствии с законами электродинамики мы должны учесть и магнитную силу $F_{\text{м}}$ в электрическом поле заряженного

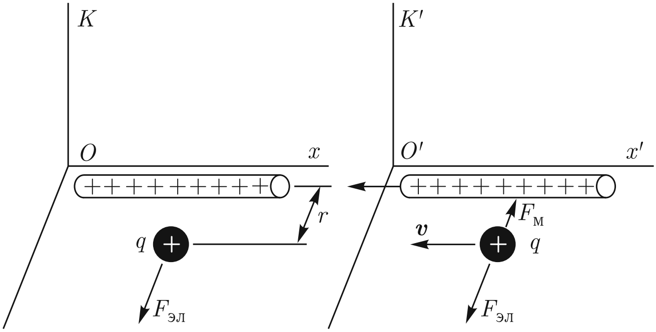

Рис. 24. Зависимость координаты O от времени движения тела t по истинному пути

проводника — силу Лоренца, направленную противоположно F [73]. Поэтому наблюдатель в K' делает вывод, что результрующая сила, действующая на заряд q, меньше силы, определенной в K. Но этого не может быть, потому что противоречит реальным измерениям, и, кроме того, это означает, что есть различия между законами механического движения (а они одинаковы во всех инерциальных системах) и законами электродинамики, которые оказываются неодинаковыми.

Таким образом, приходится признать, что принципы Галилея не применимы к движению заряженных частиц в инерциальных системах и надо считать, что одни и те же физические процессы в разных системах описываются по-разному. Отсюда приходится считать системы K и K' неравноценными только из-за того, что одна из них неподвижна, а другая — нет. Опыт же уверяет нас в том, что обе эти системы полностью равноценны. Кроме того, невозможно установить границу между механическими и электрическими характеристиками вещества. Ведь все механические тела содержат электрические заряды (заряженные частицы), а во всех электродинамических системах движущиеся частицы обладают массами.

Остается только согласиться с утверждением: все физические законы должны быть одинаковыми во всех инерциальных системах, т. е. с первым принципом СТО.

Самое убедительное подтверждение второго принципа о постоянстве скорости света, положенное А. Эйнштейном в основу СТО, было получено в наблюдениях светоизлучения двойных звезд. Схематически это показано на рис. 25. По Галилею свет от обоих компонент двойной звезды приходил бы к наблюдателю на Земле с разными скоростями, а именно: $c + v$ при приближении одной компоненты и $c - v$ при удалении второй компоненты от Земли.

Разница во времени регистрации света от обеих компонентов двойной звезды по расчетам должна составлять почти 7 дней. Но в дей-

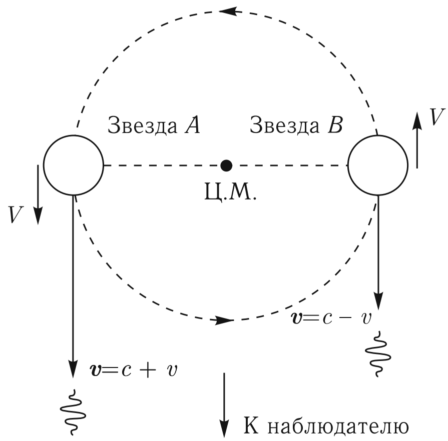

Рис. 25. Мыслимые скорости света, движущегося от звезд A и B двойной звезды в случае зависимости скорости света от скорости источников света [72]

ствительности астрономические наблюдения говорят, что этого нет. Следовательно, справедлив и второй принцип СТО.

Эйнштейн показал, что в СТО правило сложения скоростей имеет вид

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}. \tag{50}$$

Если v_1 и v_2 малы по сравнению со скоростью света c, то (50) переходит в $v = v_1 + v_2$, что соответствует механике Ньютона. Если же одна из скоростей близка к c, например, $v_1 = c$, то

$$v = \frac{c + v_2}{1 + \frac{c v_2}{c^2}} = \frac{c + v_2}{1 + \frac{v_2}{c}} = \frac{c + v_2}{\frac{c + v_2}{c}} = c. \tag{51}$$

Нетрудно убедиться, что в любом случае ($v_1 = c$ и/или $v_2 = c$) результирующая скорость $v = c$. Это показывает, что скорость света одинакова для всех наблюдателей.

11.3. Преобразования Лоренца

Сам Эйнштейн в доказательство справедливости своего второго принципа о постоянстве скорости света привел пример с ударом молнии в движущийся вагон поезда (рис. 26). Этот рисунок и описание к нему мы заимствовали из книги В. В. Горбачева [72].

Наблюдатель в K увидит два удара молний в концах движущегося вагона в тот момент, когда с ним поравнялась середина вагона. Поскольку концы вагона на равном от него расстоянии, то он видит

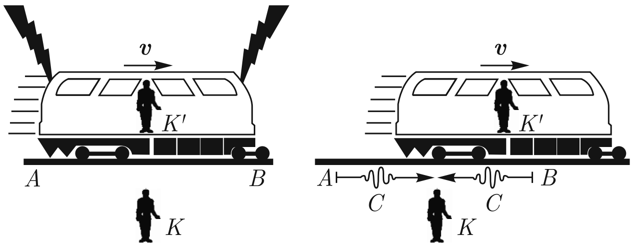

Рис. 26. «Поезд Эйнштейна» — пример того, как наблюдатели в подвижной (K') и неподвижной (K) системах видят по-разному удар молнии в вагон [72]

вспышки молний одновременно. В середине вагона стоит наблюдатель K'. Наблюдатель K знает, что его колега K' двигается к точке B и удаляется от точки A. Сам наблюдатель K неподвижен в инерциальной системе отсчета — движущемся вагоне — и, поскольку он находится на одинаковом расстоянии от концов вагона, то вспышка света приходит к нему сначала от B (он к ней движется, значит ближе). Поэтому он приходит к выводу, что вспышка в B происходит раньше, чем в A. В результате два события, которые выглядят одновременными в системе отсчета K, кажутся неодновременными в системе K' из-за относительности движения обеих систем.

Если наблюдатель в K увидел удар молнии в точке A немного раньше, чем удар в точке B, то он решит, что событие в A произошло раньше, чем в B, тогда как наблюдателю в K' по-прежнему будет казаться, что событие в B предшествовало событию в A. В результате оба наблюдателя увидят события, происходящие в противоположной последовательности. Прошлое и будущее поменяются местами! По этому поводу В. В. Горбачев в [72] приводит английское шутливое четверостишье:

«Сегодня в полдень пущена ракета.
Она летит куда быстрее света
И долетит она до цели в семь часов утра
Вчера!»

Если второй постулат Эйнштейна справедлив, т. е. всегда $v \ll c$v, то ни один из наблюдателей не увидит события в перевернутом порядке, чтобы следствие наступило не после причины, а после следствия! Принцип причинности (см. эссе 2) остается незыблемым, а оба наблюдателя K и K' увидят вспышку молнии одновременно.

Все сказанное заставляет отвергнуть преобразования Галилея (см. эссе 3) как неприменимые при $v \simeq c$. Для этой области больших скоростей вместо галилеевских преобразований Лоренцем были введены другие преобразования, получившие название Лоренцевых:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{\beta}{c}x}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{52}$$

где $\beta = v/c$.

Они утверждают, что поперечные координаты в обеих системах отсчета одинаковы, а изменяются только продольная координата x' в направлении движения x' и время t'. Отсюда следует, что пространственная координата и время связаны друг с другом, а значит, в случае $v = c$ надо переходить к четырехмерному пространству и описывать движение в единой пространственновременной системе осчета. Ее будет характеризовать некий параметр ds [72]:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2, \tag{53}$$

где c — универсальная предельная скорость распространения физических воздействий, т. е. скорость света в вакууме.

В результате Лоренцевы преобразования приводят к еще одному принципу теории относительности: «*В Природе нет ни абсолютного пространства, ни абсолютного времени*».

При $v \ll c$ множитель $\beta = 0$, $t' = t$ и преобразования Лоренца переходят в преобразования Галилея.

11.4. Лоренцевы сокращения

Приведем теперь наиболее важные следствия СТО [72]: сокращение длины и замедление течения времени.

Стержень длиной l в неподвижной системе K отсчитывается от начала координат O и заканчивается в x (рис. 27). Чему равна его длина в другой движущейся системе K'? Наблюдатель в K' производит это измерение, измеряя время, за которое начало его системы O проходит вдоль стержня. Этот интервал времени отсчитывается им от момента, когда начала координат O и O' совпадают, т. е. $t_1 = 0$ и $t'_1 = 0$.

В момент, когда начало O', двигаясь со скоростью v, достигает конца стержня, часы в системе K показывают t_2, а в системе $K' - t'_2$. Наблюдатель K видит, что нача́ло O прошло путь l со скоростью v, так что $t_2 = l/v$. Интервал времени, измеренный в K', будет

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{t_2 - \frac{\beta}{c}l}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{54}$$

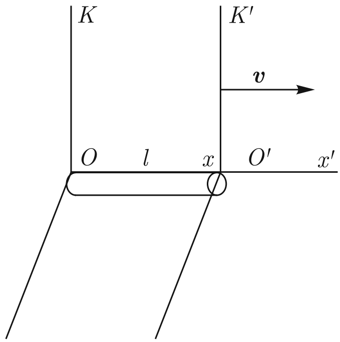

Рис. 27. Сокращение длины отрезка в направлении его движения со скоростью света [72]

как это следует в соответствии с (52) и условием $t' = 0$, $x_2' = l$. Учитывая, что $t_2 = l/v$, мы получим

$$\Delta t' = \frac{\frac{l}{v} - \frac{v}{c^2}l}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\frac{l}{v} - \frac{v^2}{c^2}\frac{l}{v}}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{\frac{l}{v}(1-\beta^2)}{\sqrt{1-\beta^2}} = \frac{l}{v}\sqrt{1-\beta^2}\,. \tag{55}$$

Умножая обе части этого равенства на v и учитывая, что $v\,\delta t'$ равно l' — длине стержня с точки зрения наблюдателя в K', получим

$$l' = l\sqrt{1-\beta^2}\,, \tag{56}$$

а это означает, что наблюдатель в K', движущийся относительно стержня, увидит его более коротким по сравнению с тем, что увидит наблюдатель в K, покоящийся относительно стержня. Конечно, так будет только для v, близкой к скорости света c.

При таких скоростях будет происходить и замедление течения времени, которое в движущейся системе равно

$$t' = \frac{t}{\sqrt{1-\beta^2}}. \tag{57}$$

Интервал времени t', отсчитанный по часам в системе K', с точки зрения наблюдателя в системе K оказывается продолжительнее интервала t, отсчитанного по его собственным часам. Отсюда следует вывод, что для любого наблюдателя движущиеся относительно него часы идут медленнее таких же часов, но покоящихся в его системе. Этот результат привел к так называемому парадоксу близнецов. Он был сформулирован и объяснен Эйнштейном, и поэтому мы посчитали, так же как и в [72], наилучшим его классическое изложение, оставив те же имена близнецов, что и у Эйнштейна.

«Допустим, на Земле существуют два близнеца Эл и Боб. Боб — космонавт и отправляется в космическое путешествие к какой-то звезде на расстоянии в 10 световых лет. Поскольку расстояние в 1 световой год свет проходит за 1 год, то 1 световой год, деленный на скорость света c, просто равен 1 году. Эл остается на Земле. Если космический корабль Боба летит со скоростью $v = 0{,}99\,c$ относительно Земли, то по часам Эла это путешествие займет время $\Delta t = 10/0,\,99 = 10\,$лет. Так как на возвращение затрачивается такое же время, то, когда корабль Боба вернется на Землю, Эл постареет на 20 лет. Однако Бобу представлялось, что Земля и звезда — цель его путешествия — двигались со скоростью 0,99 с относительно него и расстояние от Земли до звезды сократилось до $l' = 10\sqrt{1-(0{,}99\,c)^2} = 1{,}4$ световых года. Следовательно, по часам Боба путешествие к звезде и обратно заняло всего лишь 2,8 года. Обнимая брата при встрече, Боб обнаружил, что его брат-близнец стал на $20 - 2{,}8 = 17{,}2$ г. старше его. Но мы знаем, что любое движение относительно! Поэтому если фиксировать все путешествие в системе отсчета Боба, то с его точки зрения такое путешествие совершили Земля и находящийся на ней Эл. По этой причине часы Эла должны идти медленнее часов Боба, так что когда Эл вместе с Землей вернется из своего «путешествия» и встретится с братом, то Боб должен обнаружить, что его брат-близнец моложе его. Мы, таким образом, пришли к парадоксу.

Этот парадокс разрешится, если учесть, что Эл все время находился в инерциальной системе отсчета, тогда как путешественник Боб подвергался ускорению: ракета набирала скорость 0,99 с, описывала орбиту вокруг звезды и испытывала торможение при подлете к Земле. Правильный подсчет показывает, что в действительности Боб будет стареть, но не так быстро, как остающийся на Земле его брат-близнец».

Замедление времени позволяет вообразить заманчивую возможность путешествовать к далеким звездам. Если такое путешествие будет совершаться со скоростью близкой к скорости света, то космонавты смогут без труда преодолевать огромные расстояния за времена достаточно малые по сравнению с человеческой жизнью. По возвращении домой они застанут уже другую Землю, на которой за время их отсутствия пройдут сотни, а может быть, и тысячи лет.

Но нужно учесть, что путешественник может ничего и не выиграть, поскольку все биологические процессы в его организме тоже идут с меньшей скоростью по сравнению со скоростью на Земле и в результате все жизненные отправления, умственная и физическая его деятельность тоже будут происходить в замедленном темпе.

11.5. Энергетическое соотношение Эйнштейна

Масса тела, измеренная в той системе отсчета, относительно которой тело покоится, называется массой покоя или собственной массой тела и обозначается m_0. Тогда m, измеренная наблюдателем, движущимся относительно тела со скоростью v, равна

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \tag{58}$$

из которой также следует, что скорость материального тела не может достичь скорости света c или превысить ее, так как при $v = c$ знаменатель в (58) обращается в нуль и m становится бесконечно большой. Разумеется, бесконечно большая масса не имеет физического смысла, отсюда вытекает, что все материальные тела могут двигаться лишь со скоростями меньшими, чем скорость света.

Теперь обратим внимание на то, что при $v \ll c$ уравнение (58) приближенно можно записать в виде

$$m = m_0 1 + \frac{1}{2}\beta^2. \tag{59}$$

Умножим обе части этого выражения на c^2 и, учитывая, что $c^2\beta^2 = v^2$, найдем

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2}m_0v^2. \tag{60}$$

В соответствии с первым постулатом СТО все физические законы одинаковы во всех инерциальных системах, следовательно, должны выполняться законы сохранения энергии, импульса и момента импульса. Но мы только что установили, что скорость в движущейся системе меньше, чем в неподвижной, а закон сохранения импульса должен считаться по-прежнему справедливым. Тогда получается, что масса тела в системе K', по мнению наблюдателя, в K больше, чем масса тела в системе K, на величину $1/\sqrt{1-\beta^2}$.

Второе слагаемое в правой части выражения (60) есть не что иное как классическое выражение кинетической энергии. А слагаемое m_0c^2 выражает, очевидно, некое внутреннее свойство тела, поскольку оно зависит только от массы покоя m_0. Эта величина называется *энергией покоя* или *собственной энергией тела*. Сумма энергии покоя и энергии движения (т. е. кинетической энергии) и есть полная энергия тела $mc^2 = m_0c^2 + E_{\text{кин}}$. Правая часть этого выражения есть полная энергия тела E. Соответственно, это равенство переписывается как

$$E = mc^2, \tag{61}$$

т. е. в виде хорошо известного соотношения Эйнштейна эквивалентности массы и энергии. Теперь уже можно подвести итоги рассмотрения

СТО. Для этого, пожалуй, лучше всего дать слово самому Эйнштейну [74]:

«Специальная теория относительности основывается на двух фундаментальных положениях: физические законы одинаковы во всех системах координат, движущихся прямолинейно и равномерно друг относительно друга; скорость света всегда имеет одно и то же значение. Из этих положений, полностью подтвержденных экспериментом, выведены свойства движущихся стержней и часов, изменения их длины и ритма, зависящие от скорости. Теория относительности изменяет законы механики. Старые законы несправедливы, если скорость движущейся частицы приближается к скорости света. Новые законы движения тела, сформулированные теорией относительности, блестяще подтверждаются экспериментом.

Дальнейшее следствие теории относительности (специальной) есть связь между массой и энергией. Масса — это энергия, а энергия имеет массу. Оба закона сохранения — закон сохранения массы и закон сохранения энергии — объединяются теорией относительности в один закон, в закон сохранения массы-энергии».

11.6. Принципы общей теории относительности (ОТО)

11.6.1. Принцип эквивалентности. Во второй из книг нашей серии [71] мы отмечали, что А. Эйнштейн в 1915 г. создал более общую теорию относительности, уже не ограничивающуюся только прямолинейным и равномерным движением. Эта теория ОТО рассматривает любые движения, в том числе — и с ускорением. Ее отличие от СТО состоит в учете гравитации.

В [71] мы отмечали, что изложить ОТО, не пользуясь сложным математическим аппаратом, практически невозможно.

Тем более это сложно для тех читателей, на уровень которых расчитана эта книга. Все же мы попытаемся кое-что сделать в этих целях, по существу повторив изложенное в [71].

Для понимания основ ОТО прежде всего определим два понятия о системах отсчета: инерциальной и неинерциальной.

Инерциальные — это такие системы отсчета, в которых выполняются классические законы динамики. В таких системах движение можно относить к системе координат, неподвижно связанной с каким-либо свободно движущимся телом. В инерциальной системе отсчета все направления физически эквивалентны и различные точки пространства обладают одинаковыми физическими свойствами.

Следовательно, по своим физическим свойствам все инерциальные системы *эквивалентны* друг другу. Поэтому уравнения движения любой механической системы остаются неизменными *инвариантными* при переходе от одной инерциальной системы к другой.

Можно определить инерциальные системы и иначе: это системы, движущиеся друг относительно друга с постоянной скоростью.

Неинерциальные — это системы, которые движутся относительно друг друга с *ускорением* или *замедлением*.

Для ОТО чрезвычайно важен *принцип эквивалентности*, отождествляющий свойства движения в неинерциальной системе движению в инерциальной системе в присутствии *гравитационного поля*. То есть система тел, *неподвижная в поле тяготения*, и система тел, *движущаяся с ускорением вне поля тяготения*, *не отличаются* по поведению тел в этих системах. Это значит, что всегда можно найти постоянное и однородное *гравитационное поле*, которое вызывает точно такое же ускорение тел и будет *эквивалентным* постоянному ускорению системы.

С этих позиций рассмотрим ставший уже классическим иллюстративный пример человека в лифте, описанный еще Эйнштейном. Этот пример приводится во многих описаниях ОТО. Мы опишем его так, как это сделал автор [75].

Представим человека в кабине лифта. Пока лифт покоится, человек может одним из методов определить напряженность гравитационного поля на поверхности Земли, которая приблизительно равна 981 см/с^2. Он может это сделать, скажем, измеряя время, за которое тело падает на пол с высоты 100 см. Напряженность поля в этом случае равна $g = 100 \cdot 2/t^2$.

Предположим, что человек в лифте не имеет возможности получать информацию извне. Вместо того, чтобы сделать заключение, что он и кабина находятся в покое в гравитационном поле, он может рассуждать также следующим образом: "Все тела в кабине испытывают ускорение в 981 см/с^2, пока они не будут остановлены столкновением с другими телами или с полом кабины. Так как это ускорение не зависит от индивидуальных характеристик испытуемых тел, то непохоже, что ускорения соответствуют реальным силам, которые действуют на эти тела. Вероятно, что моя система отсчета, связанная с кабиной, не является инерциальной системой, а по каким-то мне неизвестным причинам движется вверх относительно инерциальной системы с ускорением в 981 см/с^2. Те тела внутри кабины, которые хотя бы временно не принуждены участвовать в этом ускоренном движении, подчиняются закону инерции и отстают от этого движения, пока не наталкиваются на пол кабины".

Представим себе теперь, что трос подъемника оборвался и что кабина, не снабженная автоматически останавливающим приспособлением, свободно падает в гравитационном поле Земли. Во время этого падения тела внутри кабины испытывают такое же ускорение, как и сама кабина, и поэтому не ускоряются относительно нее. Наблюдатель внутри кабины может это интерпретировать так, что ускорение кабины прекратилось и что его система отсчета стала инерциальной.

С другой стороны, можно рассмотреть и более фантастический мысленный эксперимент. Пусть кабина помещена в область пространства, где нет гравитационного поля.

Если кабину предоставить самой себе и если она не вращается вокруг оси, проходящей через ее центр инерции, она будет представлять собой инерциальную систему.

Предположим теперь, что кто-то начинает тянуть с постоянной силой трос, прикрепленный к потолку кабины.

Кабина перестает быть инерциальной системой. Если тело внутри кабины не находится в контакте с другими телами, оно, подчиняясь закону инерции, будет отставать от ускоряющейся кабины, т. е. оно будет, так сказать, «падать» на пол. Человек в кабине может ошибиться и приписать ускорение испытуемых тел действию гравитационного поля».

В тождественности протекания явлений в системе Земли с тяготением и в движущейся системе с ускорением и состоит суть принципа эквивалентности.

Отсюда следует, что переход от системы x, y, z, в которой действуют силы тяжести, к системе x', y', z', движущейся относительно x, y, z с ускорением, не будет отражаться на ходе процессов. Таким образом, законы, управляющие этими процессами, оказываются *ковариантными*.

Это означает, что они имеют один и тот же вид во всех системах координат.

Заметим, что принцип эквивалентности и возможность перехода к системе без тяготения применимы лишь там, где гравитационное поле однородно, а оно, строго говоря, в большом объеме всегда неоднородно. Поэтому необходимо ограничиться очень малыми областями пространства (более точно — бесконечно малыми).

Однако Эйнштейну все же удалось перейти к общему принципу, позволяющему и в больших областях, в которых гравитационные поля неоднородны, сравнивать неинерциальные системы отсчета и доказать, что законы Природы (любые, а не только законы механики) не меняются при переходе от одной системы к другой. В том и состоит величайшая заслуга Эйнштейна, что он сумел перейти от принципа эквивалентности к общей теории относительности.

11.6.2. Экспериментальные доказательства справедливости ОТО. Главное в ОТО — это, пожалуй, предсказание искривления четырехмерной (x, y, z, t) геометрии пространства–времени так называемого мира Минковского. В рамках ОТО появление гравитации связывается именно с искривлением пространства–времени. Можно рассмотреть такой пример. Если A и B движутся с экватора на север, то через какое-то время расстояние между ними уменьшится. Это дает основание утверждать, что A и B как бы притягивает некая «сила», которую в принципе и можно называть гравитацией. Разумеется, здесь нет никакой «силы». В заблуждение вводит то обстоятельство, что геометрия пространства, в котором движутся A и B, криволинейная, а для описания их положения используется геометрия Евклида на плоскости. То же самое происходит и в нашем реальном мире. Если мы считаем, что Вселенная может быть описана геометрией Евклида, то возникает таинственная сила — гравитация, происхождение которой мы не можем объяснить. В ОТО все эффекты гравитации приписываются неевклидовому характеру геометрии Вселенной, четырехмерной геометрии искривленного пространства–времени. А это и есть криволинейная геометрия Римана для больших пространств.

Известно, что Эйнштейн до самой смерти пытался обосновать идею, что не только гравитацию, но и всю физическую Вселенную можно целиком описать на основе одной лишь геометрии. И это идет еще от понимания Природы древними греками. Платон говорил: «Бог — это геометр».

К сожалению, без глубокого проникновения в математику, как то — переход к неевклидовой геометрии, т. е. искривлению пространства–времени, тензорному и вариационному исчислениям и другим математическим архисложностям, мы не можем изложить теорию ОТО. Но мы приведем ее экспериментальные доказательства.

Прецессия перигелия орбиты планет. Астрономы еще около 100 лет назад обнаружили во времени малое перемещение перигелия — ближайшей к Солнцу точки квазиэллипса (рис. 28) планеты Меркурий. Обработка измерений этого перемещения дала величину 43,11″ за 100 лет. Многие попытки объяснить перемещение перигелия Меркурия не увенчались успехом.

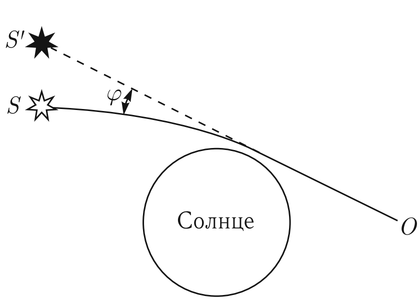

Рис. 28. Отклонение световых лучей от звезды S при прохождении их вблизи Солнца

В частности, было предположено даже присутствие какой-то ранее не наблюдавшейся планеты между Меркурием и Солнцем, которую назвали Вулканом. Ее поиск в течение многих лет был безуспешен.

В то же время еще Ньютон показал, что если гравитационная сила меняется с расстоянием в точности как $1\ /r^2$, то эллиптические орбиты планет не должны изменяться во времени. В частности, ближайшая к Солнцу точка эллипса не должна менять своего положения по отношению к «неподвижным» звездам. Существуют, конечно, небольшие отклонения от точно эллиптических орбит, называемые возмущениями и обусловленные тем, что на данную планету действуют другие планеты. Но эти отклонения очень малы по сравнению с гравитационной силой Солнца. Кроме того, разработаны надежные математические методы расчета таких возмущений. Вот почему наблюдаемая прецессия перигелия Меркурия привела к выводу о некоторой неточности ньютоновского закона $F \sim 1/r^2$. Из ОТО Эйнштейна следовало, что за каждый оборот планеты массы M вокруг Солнца ее перигелий смещается на угол

$$\Delta\varphi = \frac{3\pi r_g}{a_0(1-\varepsilon)^2}, \tag{62}$$

где r_g — гравитационный радиус Солнца, равный $2,9$ км [76], a_0 — большая полуось эллипса орбиты планеты, ε — эксцентриситет квазиэллипса.

Из расчетов по (62) полученные значения $\Delta\varphi$ для разных планет приведены в табл. 2 [76]:

Таблица 2. Значения углового смещения перигелия планет

Планета	Меркурий	Венера	Земля	Марс
$\Delta\varphi''$	43,02	8,6	3,8	1,3

Видно, что наибольшим значением $\Delta\varphi$ обладает Меркурий.

Расчетная и экспериментальная величины $\Delta\varphi$ согласуются прекрасно!

Искривление световых лучей Солнцем. Общая теория относительности предсказывает, что когда луч света проходит вблизи массивного тела, его путь должен слегка искривляться. Такой результат можно качественно понять, если вспомнить, что электромагнитное излучение, в том числе свет, обладает энергией и этой энергии по (61) соответствует масса. Поэтому гравитационное поле действует на свет и искривляет его траекторию так же, как массивное тело действует на пролетающую мимо него частицу. Так как свет распространяется с огромной скоростью, это воздействие проявляется лишь в течение короткого времени.

Отклонение света от прямолинейного пути мало́ даже при прохождени около такого массивного тела, как Солнце, но, тем не менее, оно есть. Это было проверено экспериментально в момент солнечного затмения. В результате измерения дали отклонения, раные $2''$, а ОТО дает результат $1,75''$.

Гравитационное красное смещение. Из общих представлений мы знаем, что если выпустить из рук какой-либо предмет, то, падая вниз, он будет в поле тяготения увеличивать свою скорость и кинетическую энергию. Аналогично, «падая» в гравитационном поле, будет набирать свою энергию и свет, благодаря наличию у него массы, связанной с энергией излучения. Как мы знаем, увеличение кинетической энергии падающего тела или частицы обусловлено возрастанием скорости ($E = mv^2/2$). Однако, поскольку свет всегда распространяется со скоростью c, увеличение его энергии связано с возрастанием частоты световой волны.

Было установлено также, что если направление света противоположно направлению вектора напряженности гравитационного поля, то свет будет терять энергию и в соответствии с $E = hv$ его частота будет понижаться. Действительно, оказалось, что видимый свет, испускаемый Солнцем, имеет в гравитационном поле Земли пониженную частоту или, что то же самое, увеличенную длину волны. А это с точки зрения положения его в диапазоне длин волн означает смещение света в гравитационном поле к красному концу спектра. Величина этого смещения очень мала, но измерима ($\Delta v/v = 2,5 \cdot 10^{-15}$) и с точностью до 10% совпадает со значением, предсказанным ОТО.

Любая теория прельщает ученых тем, что, кроме удачного объяснения ранее не объяснимых опытных фактов, еще и предсказывает новые эффекты. Разумеется, оба эти критерия характеризуют «хорошую, правильную» теорию. ОТО Эйнштейна именно такой и является. Выше мы привели примеры объяснения некоторых экспериментальных фактов. А в качестве предсказуемой силы ОТО укажем на ее прогноз существования *гравитационных волн*. Подобно тому, как ускоренно движущийся электрический заряд испускает излучение, движущееся в гравитационном поле массивное тело должно испускать гравитационные волны. Если это так, то должны существовать и кванты гравитацирнного поля — *гравитоны*?! Существуют ли такие волны, существуют ли гравитоны и могут ли гравитационные волны найти такое же важное практическое применение, как электромагнитные? Вот вопросы, на которые ответа наука еще не имеет.

Интересные соображения и кое-какие результаты, касающиеся этих и ряда других подобных вопросов, читатель найдет в [76].

ЭССЕ 12
ПРИНЦИПЫ МАХА

Для автора этой книги было настоящим откровением узнать, что Э. Маху принадлежат не один, а два принципа, оказавших значительное влияние на развитие физики и Науки в целом. Один из этих принципов носит физический характер. Его мы так и будем называть «физический принцип Маха». А второй назовем общенаучным принципом или, как более часто он называется, «принципом экономии мышления».

Первый принцип был сформулирован вовсе не Э. Махом, а А. Эйнштейном и вытекает он из математического описания общей теории относительности. Ниже, в разделе 12.1, мы покажем это подробнее.

Второй принцип был сформулирован самим Махом и является основой его философских взглядов на методологию развития науки. Ему мы посвятили раздел 12.2.

Здесь мы кратко опишем сведения о Махе как об ученом.

Эрнст Мах — австрийский физик и философ родился в 1858 г. и прожил до 1916 г. Его научная биография подразделяется на два практически не связанных друг с другом направления. Одно из них — развитие и история механики. Мах глубоко понял сущность механики Ньютона. В том числе ее недостатки и научные проблемы. В своей деятельности он внес серьезные новации в эту область науки. Так, во-первых, он возродил лейбницевские возражения трактовки инерции тела, как проявление влияния других тел Вселенной. Этот взгляд оформился Махом в физический принцип, который мы рассмотрим в разделе 12.1.

Много усилий Мах потратил на изучение механических движений тел с большими и сверхбольшими скоростями. Хорошо известно введенное им в эту область науки «число Маха»: отношение скорости тела к скорости звука. Это число стало важнейшей характеристикой вещества при выборе материала в качестве высокотемпературного для построения космических летательных аппаратов [77].

Второе направление его работ посвящено философским воззрениям на материю, Науку и основное понятие бытия.

Это его философское направление вошло в науку как *позитивизм*, трактующий науку как наиболее удобный способ упорядочения чувственных восприятий. А любые представления о действительном материальном мире, мол, просто бесполезны. Как легко видеть, все последующее развитие физики опровергало полностью маховское позитивистское учение. Это направление работ Маха мы рассмотрим еще в разделе 12.2.

12.1. Физический принцип Маха

При рассмотрении в п. 11.6.2 движения перигелия планеты Меркурий ни в теории ОТО, ни в нашем изложении не акцентируется внимание на то, чем физически определяется система координат, относительно которой должно измеряться движение перигелия. В. Паули в [78] отмечает, что эта система отличается от всех других, которые равномерно вращаются относительно нее. Отличие состоит в сферической симметрии гравитационного поля и, в первую очередь, — поведении граничных условий на бесконечности в пространстве.

Такое выделение ряда систем координат с помощью граничных условий, с одной стороны, логически не противоречит постулату обще ковариантности, но с другой — противоречит духу релятивистской теории и должно рассматриваться по Паули [78] как «тяжелый теоретико-познавательный недостаток» и в обычной классической механике, и в обеих видах теории относительности (СТО и ОТО), причем в последней теории тяготение базируется на гравитационном уравнении, которое с некоторыми оговорками имеет вид

$$G_{ik} = æT_{ik}, \tag{63}$$

в котором G_{ik} и T_{ik} — соответственно тензоры напряженности гравитационного поля и энергии, æ — гравитационная постоянная Эйнштейна.

Величина $æc^2$ равна $1,87 \cdot 10^{-27}$ см^2 [78]. Заметим, что эта величина отличается от обычной гравитационной постоянной, используемой в теории Ньютона.

Из сказанного вытекает требование: *гравитационное поле (G-поле) должно определяться однозначным и общековариантным образом при задании одних только значений тензора энергии T_{ik}.*

Именно Мах ясно осознал указанный выше недостаток механики Ньютона и заменил абсолютное ускорение ускорением остальных масс Вселенной. Эйнштейн назвал этот постулат принципом Маха [78].

По Ньютону пространство существует всегда, т. е. даже когда из него удалены все физические тела. В отличие от этого Мах предположил, что удаление тел прекращает существование пространства. Сегодня это воззрение распространяется и на время: если пространство и время материальны, как любая среда (тела, поля и т. п.), и объективны, т. е. существуют независимо от сознания Человека, то исчезновение среды неизбежно влечет за собой исчезновение пространства и времени.

Этот принцип требует, чтобы инерция материи определялась только окружающими массами и исчезала при устранении всех остальных масс.

Эта идея Маха все-таки остается проблематичной. Что понимать под удалением пространства и времени? Есть ли способ описать математически эти явления? Приходится признать, что до сих пор это не удалось. Соответственно и теория гравитации, включающая физический принцип Маха, еще пока не создана [76].

Тем не менее, Эйнштейн много думал об этой проблеме. Он рассуждал так: объединим гипотетически все физические тела Вселенной в единое шаровидное тело. Если пространство существует абсолютно независимо от этого тела, то это тело, покоящееся относительно пространства, окажется шаром. Если тело будет вращаться, то оно будет иметь форму эллипсоида вращения. Если рассуждения Маха об отсутствии абсолютного пространства верны, то представления о неподвижности или о вращении тела теряют смысл, и измерения формы тела, если они как-то могут быть возможны, дадут шаровидность тела. Если рассмотреть два тела, удаленных друг от друга на большое расстояние, то при справедливости принципа Маха, так как налицо полная симметрия задачи, установить, какое из этих двух тел вращается, невозможно. Если же абсолютное пространство существует, то можно установить абсолютный характер вращения каждого из тел: одно будет покоиться, другое вращаться или оба будут покоиться или же вращаться, и тем самым определить форму каждого тела.

Такими же рассуждениями, увеличивая число тел мы приблизимся к существующим космическим условиям.

Принцип Маха приводит к тому, что космические («далекие») массы после усреднения их относительных движений создают выделенную систему отсчета Маха, которая «принимается нами за абсолютное пространство» [76].

В заключение этого раздела упомянем известный пример с ведром, наполненным водой. К ведру привязана веревка, с ее помощью будем быстро вращать ведро с водой. Легко убедиться, что поверхность воды искривляется и вся масса воды прижимается к стенкам ведра. Любой скажет, что на воду действует центробежная сила. Но откуда она берется? По Маху — причина состоит во вращении воды относительно далеких масс, т. е. относительно системы отсчета Маха. Но этот же эффект можно трактовать как покоющуюся воду и вращательное движение далеких масс. По Маху и инертность массы определяется расположением далеких космических масс.

Физический принцип Маха оказал существенное влияние на мировоззрение Эйнштейна. Он понимал, что ОТО оказалась не настолько всеобщей, «насколько предполагал ее создатель».

В настоящее время существуют три точки зрения на физический принцип Маха. Приверженцы первой из них считают его полностью надуманным, ибо теория, созданная с его помощью, не дает опытной проверки. Но, как говорится, «еще не вечер».

Вторая точка зрения состоит в том, что ОТО не требует никакой модификации, но она должна применяться только к Вселенной подходящего вида. Мы ведь не вправе ждать, что ОТО будет годиться для любой Вселенной, включая даже самую общую, резко отличающуюся от той, в которой живет Человек [72]. До тех пор, пока ОТО будет применяться к нашей и ей подобным Вселенным, будет постоянно возникать вопрос о физическом принципе Маха — так утверждают приверженцы второй точки зрения.

Третья точка зрения связана с верой в создание в будущем такой теории, которая даст подробное объяснение принципа Маха.

К сожалению, отсутствует теория, объясняющая связь инерциальных свойств на Земле с веществом вдали. Поэтому построение необходимой теории остается открытым вопросом.

К большому огорчению всего прогрессивного ученого мира, Э. Мах не ограничился открытием физического принципа. Он, по его мнению, «пошел дальше» и обратился к философской стороне своих представлений о Природе. Эта дорога его завела в область полного отрицания атомизма, в область трактовки Науки лишь как методологии упорядочения человеческих ощущений [78]. Эти взгляды никакого отношения не имеют к тому физическому принципу, который связывается с именем Маха.

Почему так получилось? На наш взгляд, к этому привели две причины. Первая состоит в том, что Мах не понял всей глубины своего физического принципа. Ведь даже имя этому принципу дал Эйнштейн. Именно он понял его глубину и глобальную значимость. Кстати, Эйнштейн не разделял философии Маха, его антиатомизм. Эйнштейн, по нашему мнению, просто не обращал внимания на его философские конструкции.

Надо сказать, что Мах «платил Эйнштейну той же монетой» — он до конца своей жизни не признавал теории относительности.

Здесь мы не можем пройти мимо ленинской критики махизма [81]. Большинство физиков, историков науки, политологов все годы советской власти в СССР слишком верноподданически трактовали эту критику — они отрицали полностью весь махизм, включая даже то, что Мах сделал положительного: и физический принцип Маха, и его исследования движений тел с большими скоростями, и его учение о жидкостях. Вообще все, с чем он вошел в историю физики как один из знаменитых ученых. Это был, конечно, большой «перегиб», причиной которого был стопроцентный догматизм советских философов и простая человеческая боязнь большинства физиков возможных репрессий со стороны власти. Немалую роль в этом отрицательном явлении сыграл факт незнания Лениным основополагающих работ А. Эйнштейна, например, той, в которой великий физик дал не менее великому принципу имя Маха.

12.2. Маховский принцип экономии мышления

Э. Мах в [82] четко сформулировал свое понимание задачи «всей и всякой Науки»: замещение опыта воспроизведением и предвосхищением фактов в наших мыслях. Тем самым, он — сторонник скорее мыслимых опытов, чем реальных, выполнимых исследователем экспериментально.

Отсюда его философская позиция об экономии труда как о движущей силе всей науки в целом.

Во всех своих работах Э. Мах приводит многочисленные подтверждения экономической функции науки.

Вот ряд его примеров. Во-первых, суть любого преподавания — это сплошная экономия при передаче опытных знаний одному индивидууму от другого. Мах пишет, что, более того, «опыт целых поколений сохраняется в виде письменных памятников в библиотеках и усваивается, таким образом, дальнейшими поколениями, благодаря чему повторение его этими последними становится ненужным». Таким образом, по Маху и средства сообщения, в первую очередь наша речь, тоже является институтом экономическим.

Следующий пример экономии науки дает нам математика, которая по Маху являет собой экономию счета. Он пишет, что если к 5 однородным объектам прибавить 7, то уже не нужно будет пересчитывать всю совокупность этих предметов. Можно сразу прямо считать от 5 дальше: ... 6, 7 и т. д. Наконец, Человек еще более «сразу» суммирует 5 и 7, т. е. предвосхищает результат счета, равный 12.

Таким образом, цель всех численных операций — это экономия прямого счета. В четырех правилах арифметики видны доказательства правильности этого взгляда.

В алгебре хорошо видна эта же тенденция. Так, из примера, приведенного Махом в [82],

$$\frac{x^2 - y^2}{x + y} = x - y,$$

видно, что некая сложная операция слева всегда может быть заменена более простой справа независимо от чисел, подставляемых вместо x и y. Этот пример показывает, что «математика есть метод замены, насколько это возможно и в самой экономной форме новых численных операций выполненными уже раньше и, следовательно, не подлежащими повторению».

Аналогичную картину нам являет и более сложный пример с определителями, который читатель найдет при желании в той же книге [82].

Наконец, еще один пример экономии мысли Мах приводит из физики. Этот пример мы рассмотрели в эссе 9. Из него видно, что нет нужды рассматривать преломление каждого оптического луча, а можно воспользоваться результатом — законом преломления, найденным ранее. Налицо — экономия труда.

После этих и других многочисленных примеров, которые читатель при желании найдет сам, становится ясной мысль Маха о том, что из-за короткого времени человеческой жизни и ввиду ограниченной памяти человека более или менее значительное знание достижимо только при *величайшей экономии мысли*.

Мах возводит это суждение до принципа, по которому задача Науки состоит в том, чтобы возможно полнее изобразить факты с *наименьшей затратой работы мышления*.

До сих пор мы согласны со взглядами Маха, т. е. согласны с его принципом экономии мышления. Нам только досадно, что Мах прошел мимо связи этого второго его принципа с принципом наименьшего действия (см. раздел 10.4), хотя эта связь видна «невооруженным взглядом». Но это сегодня после философского осмысления (см. п 10.4.8) принципа наименьшего действия и его распространения практически на все факты человеческой жизни. А во времена Маха принцип наименьшего действия рассматривался как чисто физический, сначала даже как принцип механики. Но ведь Мах в первую очередь был механиком и глубоко понимающим эту науку! Поэтому от него можно было ждать понимания связи указанных принципов.

Далее Мах распространил свой взгляд на экономию науки как движущую силу создания новой теории. Но он совершил кардинальную ошибку, полагая, что мы нередко пользуемся «придуманными» вспомогательными понятиями. Таков, по его мнению, атомизм. Он недвусмысленно в [82] пишет: «Атомная теория имеет в физике подобную же функцию, какую имеют известные математические вспомогательные представления: она есть математическая модель для изображения фактов». И еще: «Естествоиспытатель будет рассматривать эти теории (имеются ввиду понятия об атомах, В.Ф.) как вспомогательное средство *временного характера* и будет стремиться к замене их каким-нибудь более естественным воззрением».

Из философских представлений Маха упомянем еще одну вопиющую неправильность: его отрицание принципа причинности. В [82] он прямо пишет: «В Природе нет причины и нет следствия». Надо сказать, что предщественником Маха в этом отношении был английский философ Давид Юм (1711—1776).

Он тоже признавал только последовательность во времени, ставшую нам привычной, и отрицал причинность.

Весь ход развития науки в XX и начале XXI века показывает, насколько Мах не понял прогрессивность атомной науки, насколько он был неправ в отрицании принципа причинности, в оценке структуры и роли теории вообще. Поэтому критика В.И. Лениным в книге «Материализм и эмпириокритицизм» философии Маха была, конечно, правильной. Иное дело, что советские «трактовщики» ленинской критики «выплеснули с водой и ребенка» — они в конечном счете замолчали все то, что у Маха было ценным. Это привело к тому, что труды Маха, включая его абсолютно «надежные» научные работы, в советское время не переводились и даже переведенные ранее не переиздавались. Лишь в новой России сделаны пока еще робкие шаги по исправлению этого положения. Примером может служить выход в свет книги [82].

ЭССЕ 13

ПРИНЦИПЫ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

13.1. Чем отличается квантовая механика от классической

Главное отличие квантовой механики состоит в различии объектов ее применения. Если классическая механика изучает состояние и движение макроскопических объектов, т. е. тел, занимающих значительный объем и перемещающихся в существенных по размерам областях пространства, то квантовая механика применяется к объяснению явлений, происходящих с частицами очень малой массы в очень малых участках пространства.

Возникает вопрос, а почему к малым объектам неприменима классическая механика? Это ясно из многих несовпадений опытных данных с результатами применения классической механики и электродинамики. В [5] приведен лишь один пример такого противоречия: устойчивость и долгоживучесть атомов с классической моделью движения атомов в атоме по круговым орбитам. Классика требует непрерывного излучения электромагнитной энергии движущимися по круговым орбитам электронами. Это излучение должно привести к непрерывному уменьшению энергии электрона и, в конце концов, к его падению на ядро атома. Атом оказывается неустойчивым.

Вопиющее противоречие с опытом показывает, что теория, применимая к атомным явлениям, должна в корне отличаться в основных представлениях и законах.

Опыт по дифракции частиц показывает, что поведение материальных частиц малых размеров (электронов) обнаруживает черты волнового процесса.

Иными словами, столь малым объектам присущ *корпускулярно-волновой дуализм*. Ничего подобного мы не наблюдаем в движении макроскопических тел.

В [83] автор приводит пример, показывающий, что в свойствах движения малых объектов должно появляться «нечто принципиально новое». Этот пример связан с возмущениями наблюдателем при измерениях. Человек может наблюдать какой-нибудь объект только в том случае, если дать ему взаимодействовать с чем-то внешним по отношению к нему. Поэтому всякий акт наблюдения неизбежно сопровождается каким-то возмущением, вносимым в наблюдаемый объект.

Наблюдаемый объект называют *классическим*, если величиной возмущения можно пренебречь и для его описания можно применять классическую механику. Если же некоторой «предельной величиной возмущения», связанной с существованием кванта действия, нельзя пренебречь, то объект называют *квантовым* и для его описания нужна новая теория.

Величина минимального квантового действия именуется *квантовой постоянной* или более просто — *постоянной Планка*. Численно она равна $1,054 \cdot 10^{-27}$ эрг $\cdot$ с.

Таким образом, квантовую систему можно наблюдать только произведя в ней значительные возмущения. Поэтому нельзя ожидать однозначной связи между результатами наблюдений. В результате для квантовой системы характерны *неопределенность* и *статистичиость*. Поэтому квантовая теория должна позволять предвычислять не результаты наблюдений, а лишь вероятности получения того или иного результата при измерении.

Заметим, что классический объект обычно называют *прибором*, *а о процессе взаимодействия его с квантовым объектом говорят как об измерении.*

Специфика представлений квантовой механики вызывает и специфику ее математического аппарата. Главное в нем то, что каждое состояние квантовой системы может быть описано в данный момент времени определенной (вообще говоря, комплексной) функцией координат Ψ_k. Эта функция называется *волновой функцией* системы.

В случае системы, состоящей из многих частиц, волновая функция Ψ зависит не от трех координат, а от всех координат системы; она является функцией точки в многомерном конфигурационном пространстве, а не в реальном физическом пространстве. Эти свойства волновой функции не позволяют ее толковать как некоторое распределенное в пространстве поле, подобно электромагнитному и другим полям [83].

Функцию Ψ нельзя измерить на опыте, но непосредственный физический смысл имеет $|\Psi|^2$ или, что то же самое, $\Psi\Psi^*$, где Ψ^* — сопряженная функция.

Квадрат модуля волновой функции $|\Psi|^2$ определяет распределение вероятностей, значений координат системы.

С течением времени состояние квантовой системы меняется. Поэтому волновую функцию нужно рассматривать как функцию также и от времени.

13.2. Принцип суперпозиции

Принцип суперпозиции утверждает ряд свойств волновой функции, и поэтому он является *основным принципом квантовой механики*.

Из него следует, что вероятности в квантовой механике складываются с учетом интерференции:

$$|\Psi|^2 = |c_1|^2|\Psi_1|^2 + |c_2|^2|\Psi_2|^2 + (c_1^* c_2 \Psi_1^* \Psi_2 + c_1 c_2^* \Psi_1 \Psi_2^*). \tag{64}$$

Таким образом, в принципе суперпозиции заключены прежде всего и корпускулярные, и волновые свойства квантовых объектов.

13.3. Принцип неопределенности Гейзенберга

Сочетание корпускулярных и волновых свойств у одних и тех же квантовых объектов (электронов, нейтронов и т. п.) естественно не могут быть объяснены классической механикой. Ведь классическая механика отражает лишь корпускулярные, т. е. дискретные свойства объектов. Следовательно, ее законы распространяются только на те явления, в которых волновые свойства объектов не играют или играют ничтожно малую роль.

Волновые свойства характеризуются длиной волны

$$\lambda = \frac{\hbar}{p}, \tag{65}$$

где p — импульс частицы; $\hbar$ — фундаментальная постоянная, называемая *квантовой постоянной* и равная $1,054 \cdot 10^{-27}$ эрг $\cdot$ с. Постоянная $\hbar = h/2\pi$, где h — постоянная Планка.

Пока линейные размеры l, характеризующие явление, например, амплитуда колебаний, размеры области движения и т. п., велики по сравнению с длиной волны, законы классической механики хорошо отражают закономерности Природы. Но при $l \ll \lambda$ законы классической механики теряют силу. Примером служит движение электронов в атомах. Здесь оказывается несправедливым основное представление классической механики: состояние движущегося объекта определяется *одновременными* мгновенными *значениями* координат и количеством движения.

А какие же количественные отношения будут действовать в условиях $l \gg \lambda$? Для выяснения этого вопроса представим, что пучок электронов падает на дифракционную решетку (кристалл) или на отдельную щель. Постоянную решетки (ширину щели) обозначим Δx. Угол отклонения частицы за счет дифракции от первоначального направления ее движения обозначим α. Картина дифракции, как известно, представляет собой череду максимумов интенсивности электронов.

Условием первого максимума в этой картине является выражение

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \sim \sin\alpha,$$

которое при малых углах α переходит в

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \sim 1. \tag{66}$$

Изменение импульса ΔP частицы при дифракции будет определяться аналогичным выражением:

$$\frac{\Delta P}{P} \sim 1. \tag{67}$$

После объединения этих двух выражений получаем

$$\frac{\lambda}{\Delta x} \sim \frac{\Delta P}{P}$$

или

$$\Delta P \Delta x \sim \lambda P. \tag{68}$$

Учитывая (65), последнее выражение приобретает окончательный вид

$$\Delta P \Delta x \sim \hbar. \tag{69}$$

Это соотношение является важнейшим исходным принципом квантовой механики, называемым *принципом неопределенности*. Этот принцип был впервые сформулирован В. Гейзенбергом в 1927 г.

В соответствии с этим принципом скорость, также как и импульс частицы, не может иметь определенного значения *одновременно* с координатами.

Характено, что если частица имеет строго определенный импульс P, то равновероятны все ее положения в пространстве. В результате можно говорить лишь о вероятности нахождения частицы в той или иной точке пространства. Понятие траектории частицы в этих условиях теряет смысл.

Соотношения неопределенности имеются и для других величин. В [83] приведен пример неопределенности величин энергии и времени. В системе сколь угодно слабо взаимодействующей с внешними объектами имеем:

$$\Delta(E - E') \sim \frac{h}{\Delta t}. \tag{70}$$

Об этом соотношении говорят как о *соотношении неопределенности для энергии*. Однако необходимо подчеркнуть, что его смысл не имеет ничего общего со смыслом соотношения неопределенности $\Delta P \Delta x$ для координаты и импульса. В последнем выражении ΔP и Δx суть неопределенности в значениях импульса и координаты *в один и тот же момент* они показывают, что эти две величины вообще не могут иметь одновременно строго определенных значений. Энергии же E, E' рассматриваемой системы, напротив, могут быть измерены в каждый данный момент времени с любой точностью. Величина

$E - E'$ в соотношении (70) есть разность двух точно измеренных значений энергии *в два различных момента времени*, а отнюдь не неопределенность в значении энергии в определенный момент времени; Δt — промежуток времени между измерениями.

13.4. Принцип дополнительности Бора

Принцип дополнительности возник из попыток осмыслить появление в квантовой механике наглядных образов — корпускул и волн, которые одновременно характерны для объектов микромира. Выше, в разделе 13.1, мы говорили о том, что микрообъектам присущ корпускулярно-волновой дуализм. В физике сразу после этого открытия возникает вопрос — каким же образом совмещаются эти противоречивые свойства у одного объекта? Ответ на этот вопрос был дан Н. Бором в 1927 г. Он был одним из первых немногих ученых, понявшим, что суждения о процессах в микромире мы можем делать только через явления макромира. Дело в том, что наши органы чувств не воспринимают микропроцессы, так как Человек сам является макроскопическим существом. Поэтому все приборы, реагирующие на индивидуальные акты в микромире, являются макроскопическими, но надо ясно понимать, что понятия, с помощью которых описывается работа приборов, не могут быть полностью применимы к микрообъектам. Ведь поведение последних не подчиняется законам классической механики.

Н. Бором для разрешения этого противоречия был сформулирован *принцип дополнительности*, согласно которому для *полного описания квантово-механических явлений* необходимы два взаимоисключающих (*дополнительных*) набора классических понятий (например, частиц и волн).

Только одновременная совокупность таких понятий дает полную исчерпывающую информацию об этих явлениях как о целостных [61].

Таким образом, принцип дополнительности является результатом философского осмысления квантовой механики.

Частным выржением принципа дополнительности является соотношение неопределенностей Гейзенберга, рассмотренное в разделе 13.3 настоящего эссе.

13.5. Тождественность частиц в квантовых системах

Квантовым системам, состоящим из одинаковых частиц, присущи специфические свойства, не имеющие аналога в классических системах. В последних одинаковые частицы хотя и имеют тождественные (одинаковые) свойства, все же сохраняют свою индивидуальность. Иными словами, частицы в классической физической системе в данный момент времени могут быть «перенумерованы». В дальнейшем можно за каждой из этих частиц следить по ее траектории и, следовательно, в любой момент времени каждую частицу можно идентифицировать.

В квантовой механике в силу принципа неопределенности (см. раздел 13.3) понятие траектории частицы теряет всякий смысл. Поэтому в квантовой механике не существует никакой возможности следить в отдельности за каждой из одинаковых частиц и тем самым различать их. Можно сказать, что в квантовой механике одинаковые частицы полностью теряют свою индивидуальность. Одинаковость частиц по их физическим свойствам имеет здесь весьма глубокий характер — она приводит к полной неразличимости частиц. В этом и состоит *принцип неразличимости одинаковых частиц в квантовых системах*.

Б. Иванов [83] рассматривает пример системы, состоящей всего из двух частиц. В силу их тождественности состояния системы, получающиеся друг из друга просто перестановкой обеих частиц, должны быть физически полностью эквивалентными. Это значит, что в результате такой перестановки волновая функция системы может измениться только на несущественный фазовый множитель. Пусть $\Psi(\xi_1, \xi_2)$ есть волновая функция системы, причем ξ_1, ξ_2 условно обозначают совокупности трех координат и проекции спина каждой из частиц. Тогда должно быть:

$$\Psi(\xi_1, \xi_2) = e^{i\alpha}\Psi(\xi_2, \xi_1),$$

где α — некоторая вещественная постоянная.

В результате повторной перестановки мы вернемся к исходному состоянию, между тем как функция Ψ окажется умноженной на $e^{2i\alpha}$. Отсюда следует, что $e^{2i\alpha} = 1$ или $e^{i\alpha} = \pm 1$. Таким образом,

$$\Psi(\xi_1, \xi_2) = \pm\Psi(\xi_2, \xi_1).$$

Мы приходим к результату, что имеется всего две возможности: волновая функция либо *симметрична* (т. е. совершенно не меняется в результате престановки частиц), либо *антисимметрична* (т. е. при перестановке меняет знак). Очевидно, что волновые функции всех состояний одной и той же системы должны иметь одинаковую симметрию; в противном случае волновая функция состояния, представляющего суперпозицию состояний различной симметрии, была бы ни симметрична, ни антисимметрична. Этот результат непосредственно обобщается на системы, состоящие из произвольного числа одинаковых частиц. Таким образом, свойства систем одинаковых частиц описываются либо симметричными, либо антисимметричными волновыми функциями и зависят от рода частиц, входящих в состав системы. О системах частиц, описывающихся антисимметричными функциями, говорят как о подчиняющихся *статистике Ферми*, а о системах частиц, описывающихся симметричными функциями, — как подчиняющихся *статистике Бозе*.

Вид распределения частиц, подчиняющихся тому или другому статистическому закону, мы приведем в разделе 13.7.

В заключение этого раздела отметим, что иногда принцип тождественности частиц в квантовой механике формулируется как «принцип неразличимости», т. е. утверждается, что тождественные частицы «принципиально неразличимы».

Таким образом, объективное свойство тождественности одинаковых характеристик частиц одного типа подменяется субъективной неразличимостью, которая, наоборот, в действительности является следствием тождественности.

13.6. Принцип соответствия

Этот принцип сформулирован Н. Бором в 1923 г. Он гласит, что «*никакая новая теория не может быть справедливой, если она не содержит в качестве предельного случая старую теорию, относящуюся к тем же явлениям, поскольку старая теория уже оправдала себя в своей области*».

Этот принцип имеет глубокий философский смысл: теории, справедливость которых была экспериментально установлена для определенной группы явлений, с построением новой теории не отбрасываются, но сохраняют свое значение для прежней области явлений как предельное выражение законов новых теорий. Выводы новых теорий в области, где справедлива старая теория, переходят в выводы этих старых теорий.

Принцип соответствия представляет собой конкретное выражение в физике диалектики соотношения абсолютной и относительной истин. Каждая физическая теория — ступенька познания — является относительной истиной. Смена физических теорий — это процесс приближения к абсолютной истине, процесс, который никогда не будет полностью завершен из-за бесконечной сложности, бесконечного разнообразия окружающего нас мира.

Принцип соответствия после своего появления прояснил ряд неизвестных или известных, но не отчетливо формулируемых «истин». Например, каждая фундаментальная физическая теория имеет определенные границы применимости.

И эти границы устанавливаются весьма строго и точно только после создания новой, более общей теории. В качестве примера приведем определение границы применимости механики Ньютона. Она оказалась справедливой только когда скорость движения тел много меньше скорости света, но это выяснилось только после создания СТО (см. эссе 11).

Создание квантовой механики установило, что законы классической механики справедливы, когда действие движущейся частицы много больше постоянной Планка. При этом условии квантовая механика приводит к тем же результатам, что и классическая.

13.7. Принцип причинности и детерминизм микрообъектов в квантовой механике

Принцип неопределенности на первый взгляд приводит к выводу о неприменимости принципа причинности при анализе явлений, происходящих с объектами микромира. Действительно, как показано в эссе 2, посвященному классическому принципу причинности, по состоянию системы в некоторый момент времени и силам, приложенным к ней, можно абсолютно точно описать ее состояние в любой последующий момент. При этом любое состояние системы полностью определяется значениями координат и импульсов всех частиц системы.

Таким образом, классическая физика основывается на следующем понимании причинности: *состояние механической системы в начальный момент времени с известным законом взаимодействия частиц есть причина, а ее состояние в последующий момент — следствие.* Но из предыдущего изложения следует, что микрообъекты не могут иметь одновременно и определенную координату, и определенную соответствующую проекцию импульса, поэтому делается вывод о том, что в начальный момент времени состояние системы точно не определяется. А если это так в начальный момент времени, то не могут быть предсказаны и состояния в последующих моментах времени. Налицо явное нарушение принципа причинности. Но не надо забывать, что речь идет о нарушении классического принципа причинности, при котором состояние (координаты, импульс) частицы понимаются классическим образом. В квантовой механике состояние микрообъекта определяется волновой функцией (см. раздел 13.1 настоящего эссе), т. е. состояние микрообъекта приобретает совершенно другой смысл, чем в классической механике.

Задание волновой функции для данного момента времени определяет ее значение в последующие моменты. Таким образом, состояние системы микрочастиц, определенное в квантовой механике, однозначно вытекает из предшествующего состояния, как того требует принцип причинности. Просто после появления квантовой механики возникло расширительное толкование принципа причинности, а вовсе не его отмена.

В результате новое выражение закона причинности находит применительно к микрочастицам новое понимание детерминизма, существенно отличное от классического (механистического) его понимания.

До сих пор некоторые ученые неприменимость классических (механистических) представлений к объектам микромира воспринимают как крах объективных закономерностей в Природе и, следовательно, как новое «опровержение» материализма. Мы не будем занимать внимание читателей на подобных взглядах, неправильность которых многократно, начиная с Ф. Энгельса и В. Ленина, демонстрировалась в литературе. Читателям, интересующимся этими взглядами и их критикой, мы можем порекомендовать небольшую, но емкую брошюру [83].

13.8. Принцип запрета Паули

Состояния электрона в атоме водорода описываются четырьмя квантовыми числами: n, l, f, m [71]. С их помощью можно получить полное описание всех возможных в этом атоме переходов между энергетическими уровнями, а следовательно, и линий в спектре излучения или поглощения. При этом экспериментально установлено, что в общем случае стационарные состояния, в которых два или более электронов принимали бы одинаковый набор значений всех квантовых чисел, не реализуются в Природе; *причины этого нам неизвестны* [84]! Мы сталкиваемся здесь с *принципом упорядочения* огромной важности, которому подчиняется реальный физический мир. Этот принцип, называемый *принципом запрета*, был впервые открыт и сформулирован в 1925 г. Паули. В современной формулировке он гласит: *два электрона не могут обладать одинаковым полным набором квантовых чисел*. При этом подразумевается, что эти два электрона входят в данную электронную систему. Примером может служить система электронов данного атома.

Таким образом, при размещении электронов на различных допустимых уровнях следует соблюдать принцип Паули; ни один энергетический уровень, соответствующий данному полному набору квантовых чисел, не может быть занят более чем одним электроном.

Принцип Паули диктует распределение электронов по оболочкам в атоме. Автор книги [84] рассмотрел гипотетический случай отсутствия этого принципа и пишет, что Мир в отсутствии принципа Паули был бы очень скучен и однообразен: у всех атомов в основном состоянии электроны скапливались бы вокруг ядра и образовывали одинаковое бесструктурное сферическое распределение заряда. Полностью потеряв весь свой запас энергии и орбитального момента импульса, все электроны перешли бы в конце концов на уровень с набором квантовых чисел с $n = 1$, $l = 0$.

Лишь слабое подобие структуры могло бы возникнуть из-за наличия у электронов спина.

Сначала сам Паули считал принцип запрета справедливым только для электронов, но впоследствии была обнаружена его применимость и к другим квантовым объектам. Известно, что ядра атомов с нечетными массовыми числами, например, H^4, He^3, Li^7 и т. д., удовлетворяют принципу Паули, тогда как на ядра с четными массовыми числами (такие как He^4, N^{14}, O^{16}) он не распространяется. В настоящее время считается справедливым следующее правило: все частицы «элементарные» или «составные», обладающие полуцелым спином, подчиняются принципу Паули. Такие частицы называются *фермионами*. К ним относятся протоны, электроны, нейтроны, нейтрино, ядра He^3 и т. д. Напротив, к частицам с целым значением спина принцип Паули не относится; такие частицы называются бозонами и к их числу относятся, например, фотоны, ядра He^4 и др.

Между типом статистики, которой подчиняются частицы, и величиной спина частиц существует однозначная связь: для фермионов (полуцелый спин) — статистика Ферми и действует принцип Паули, для бозонов (целый спин) — статистика Бозе и принцип Паули не действителен. Из этого правила не обнаружено исключений. Даже нет никаких намеков на возможность его нарушения.

Необходимо заметить, что пока окончательно не ясна истинная природа принципа Паули, так как Наука сегодня еще не может объяснить все основные свойства элементарных частиц.

13.9. Тонкая подстройка Вселенной

В жизни Человечества известен феномен «тонкой подстройки Вселенной». Его формулировка была продиктована первоначально простым вопросом: почему так называемые физические постоянные имеют «сегодняшние», а не какие-нибудь иные значения? И другой вопрос, связанный с первым: что случилось бы со Вселенной, или по крайней мере — с нашей Землей и жизнью на Земле, если бы фундаментальные физические постоянные изменили свои значения? Эти вопросы вполне правомерны, поскольку численные значения фундаментальных постоянных находят из опыта и независимо друг от друга, а самое главное — все фундаментальные постоянные теоретически не обоснованы.

М. Планком в свое время было сделано предположение об изменчивости некоторых фундаментальных постоянных во времени, но это предположение до сих пор не нашло подтверждения.

В [85, 86] авторы демонстрируют, что будет с жизнью на Земле при увеличении или при уменьшении многих фундаментальных констант. Из этих книг мы приведем лишь один пример с постоянной Планка. Для начала положим гипотетически увеличение постоянной Планка в 100 раз, как это сделано в [85]. Прежде всего, Солнце будет посылать на Землю в 100 раз больше энергии — ведь каждый квант света увеличится в 100 раз! Цветность мира не изменится, поскольку частоты квантов останутся прежними.

Земля, получая стократное увеличение энергии, уменьшила бы расстояние до Солнца в 10 раз (ведь интенсивность излучения обратно пропорциональна квадрату расстояния). Земля получит столько же солнечного тепла, сколько она получила бы на расстоянии от Солнца всего на 15 млн км. Для сравнения автор [85] пишет, что это расстояние почти в 4 раза меньше, чем расстояние от солнца до Меркурия! А на Меркурии сегодня температура поверхности составляет 400 °С! Поэтому на Земле будет жара, доходящая до нескольких тысяч градусов! Понятно, что полярные льды на Земле растаяли бы и даже испарились, практически все на Земле и даже сама земная кора.

Обратим теперь внимание на дуализм всех частиц материи, им присущи и масса, и длина волны. Из соотношений $E = mc^2$ и $E = hv$ легко получить связь m и v: $m = hv/c^2$ или $m = h/\lambda c$, т. е. масса всех частиц увеличится, как и h расплавилось бы в 100 раз.

Дальше дадим слово автору книги [85]: «Пожалуй, самые неприятные последствия вызвало увеличение массы звезд. Колоссально возросшие давление и температура в их недрах в результате сжатия под действием увеличившегося тяготения внешних слоев привели к коренному изменению хода термоядерных реакций. Для многих звезд это оказалось роковым: число вспышек новых и сверхновых звезд стало стремительно расти. Звезды становились "нейтронными".

Эти грандиозные катастрофы, бывшие ранее чрезвычайно редкими, стали массовыми. Из-за этого Вселенная пронизывается мощнейшими потоками космических лучей — немыми свидетелями происшедших гигантских звездных взрывов.

И далее: «Увеличение массы Солнца вызвало возрастание притяжения к нему. Теперь уже скорость Земли в ее движении вокруг Солнца (она равняется 30 км/с) оказалась намного меньшей, чем необходимая для сохранения постоянной орбиты. И Земля, сойдя со своего извечного пути в Космосе, понеслась со все возрастающей скоростью к Солнцу.

Увеличилась в 100 раз и масса самой Земли, подписав тем самым приговор Луне. Наше ночное светило также доживает последние дни или даже часы. Луна покинула свою околоземную орбиту и с высоты более 380 000 км устремилась к Земле. Вот почему так быстро увеличиваются размеры лунного диска, который мы увидели, поднявшись над слоем облаков. Может быть Луне посчастливится уклониться от прямого удара о Землю — удара, который бы оказался губительным для них обеих. Но даже в этом случае неминуемо разрушение Луны под действием сил тяготения на множество осколков в тот момент, когда она, приближаясь к Земле, перейдет невидимую, но роковую для всех небесных тел границу, ближе которой сопротивление приливным силам уже невозможно.

Губительным оказалось возрастание массы Земли и для всего находящегося на ее поверхности. Даже не будь ничего иного, одно это сделало бы жизнь на Земле, вероятно, невозможной. Подумайте сами, наш вес возрос до 600–800 т! Не выдерживая столь увеличенной тяжести, ломаются лапы животных, крылья птиц, стволы деревьев. Рушатся дома, ломаются машины.

Давление в недрах Земли, сжатой в 100 раз большей силой тяжести, стало огромным; сильно повысилась и температура недр; начались грозные тектонические явления — вулканические извержения, землетрясения.

И еще. Атмосферное давление на поверхности Земли возросло тоже в 100 раз — ведь во столько раз увеличился вес воздуха над нами. Это внезапное увеличение барометрического давления до 10 000 атмосфер привело к гибели почти всего живого на Земле, вызвало разрушение машин и механизмов. Даже небольшой ветер сметает с лица Земли все, находящееся на ней, теперь он стал страшнее любого урагана — напор воздушного потока возрос в колоссальной степени и потому, что частицы воздуха стали в 100 раз массивнее, и потому, что возросло число этих частиц в единице объема.

Разве только в одном повышение атмосферного давления оказалось благотворным: оно замедляет испарение океана. Ведь, чтобы вода закипела при большом давлении, ее нужно нагреть значительно сильнее».

А что произойдет при уменьшении постоянной Планка в те же 100 раз? Конечно, читатель легко поймет последующее за этим уменьшение солнечной энергии, получаемое Землей от Солнца. Это приведет к значительному похолоданию вплоть до обледенения всего, что есть на Земле.

Страшным будет и уменьшение масс всех тел, в том числе и Солнца. Снижение давления и температуры в его недрах приведет к прекращению солнечных термоядерных реакций, а сегодня они являются тем источником энергии, который «питает» Землю и все, что на ней. Можно сказать, что при стократном уменьшении постоянной Планка произойдет угасание Солнца.

Сильно уменьшится вслед за массой и притяжение Солнца. И главное — из-за этого все планеты Солнечной системы увеличат свою скорость вокруг Солнца. Они сойдут со своих орбит и по гиперболическим траекториям будут разбегаться вдаль от Солнца! Солнце — почти погасшее — одиноко без сопровождающих планет будет существовать в мировом космическом океане.

А у нас на Земле свой собственный вес и вес всех других тел уменьшится в $(\Delta h)^2$, т. е. в 10 000 раз! Какие будут последствия? Наверняка — ужасными, хотя бы из-за того, что уменьшится во столько же раз атмосферное давление! Наступит сильнейшая кислородная недостаточность — кровь закипает, а это почти мгновенная смерть! Так произошло с космонавтами В. Н. Волковым, В. И. Пацаевым и Г. Т. Добровольским в 1971 г. при разгерметизации их космического корабля почти в космическом вакууме.

Таким образом, «хрен редьки не слаще» — и увеличение, и уменьшение постоянной Планка приведет к такой всемирной катастрофе, что все ее нюансы и предугадать невозможно, да они не будут играть роли на фоне тех глобальных изменений, о которых мы написали.

Нельзя пройти мимо изменения соотношения неопределенности $\Delta x \Delta p = h$ при изменении постоянной Планка, например, в те же 100 раз. При том же Δx изменится в 100 раз скорость. Скорее всего, при таких скоростях нуклоны вряд ли удержатся в ядрах атомов и все атомные ядра во Вселенной распадутся. Только водород, поскольку его ядро состоит всего из одной частицы — протона, сохранится как химический элемент. Вся Вселенная станет водородной!

Картина изменения Вселенной при изменении постоянной Планка в ± 100 раз поистине грандиозно катастрофична. Не спасает положение и более слабое изменение постоянной Планка, скажем в 10 раз. Более того, в [86] говорится, что увеличение постоянной Планка всего на 15 % не даст протону возможность соединиться с нейтроном. Интересно, что изменение этой постоянной в меньшую сторону позволило бы образовываться устойчивым ядрам ^{2}He, следствием чего явилось бы выгорание всего водорода на ранних стадиях расширения Вселенной. «Требуемое для этого изменение существующих значений величин h не превышает 10%» [86].

Описанная выше картина, кстати, убеждает нас в неизменности постоянной Планка как в прошлом, так и в будущем. Ее значение вечно, пока существует сама материя.

Мы подробно привели гипотетический пример с изменением постоянной Планка, но нечто аналогичное может происходить и с другими фудаментальными константами. Их не мало. Таковы размерные постоянные: гравитационная постоянная, заряд и масса электрона, масса протона, скорость света и безразмерные — константы четырех фундаментальных взаимодействий: гравитационного $Gm/hc = 10^{-19}$; электромагнитного $e^2/\hbar^2 c$; сильного g_s/hc, где $g_s \gg e$; $g^2 = hc$; слабого $Fm^2c^2/\hbar^3$, где $F = 1,4 \cdot 10^{-62}$ Дж$\cdot$ м^3 — константа Ферми.

Заметим, что гравитационное взаимодействие удерживает тела на Земле и планеты на их орбитах, Электромагнитное — удерживает элктроны в атомах, и соединяет их в молекулы, Слабое — обеспечивает горение Солнца, Сильное — обеспечивает стабильное существование атомных ядер.

Все перечисленные числовые величины тех и других констант имеют определенные значения и никакие другие. Во всяком случае, существуют очень и очень узкие пределы их изменений. Только существование многих констант в этих пределах делает фундаментальные константы фундаментальными, т. е. неизменными. Такая неизменность и определяет ту Вселенную, которую мы имеем.

Создается впечатление, что такая «тонкая подстройка Вселенной» была «создана» в результате какого-то пока не познанного процесса. В принципе рассматриваются две возможности: случайная и неслучайная. Первая возможность предполагает случайное сочетание очень многих совпадений. Вероятность случайного совместного существования всех констант, составляющих «тонкую подстройку», представляется невозможной.

Так что же — неслучайные, т. е. кем-то сознательно созданные условия образования «тонкой подстройки»? Ответа на этот извечный вопрос современная Наука сегодня дать не может. Конечно, ответы теологического характера нас не устраивают. Так что проблема остается проблемой.

Отсюда вытекает проблема, волнующая Человечество на протяжении всей его сознательной истории: занимаем ли мы выделенное положение в этом мире. Признание «тонкой подстройки» закономерным явлением приводит к заключению, что с самого начала во Вселенной потенциально заложено появление «наблюдателя» на определенном этапе ее развития. А тем самым признается выделенность в Природе Вселенной и порождаемого ею «наблюдателя», т. е. Человека с его интелектом.

«Если "тонкая подстройка" изначально заложена во Вселенной, то линия ее последующего развития в основном предопределена. А появление наблюдателя на соответствующем этапе неизбежно», — таковы мысли, высказанные автором книги [86].

Мы со своей стороны скорее согласимся с этой мыслью, чем отвергнем ее. Развивая подобные мысли, можно пойти дальше и считать, что появление Разума во Вселенной заранее «запланировано». Не все люди на Земле сегодня позитивно воспринимают такой «крамольный» взгляд.

Более подробное и более строгое исследование принципа «тонкой подстройки» еще впереди.

ЭССЕ 14
ПРИНЦИП НАБЛЮДАЕМОСТИ

Еще во времена Галилея физики руководствовались соображением, согласно которому имеет смысл то, что наблюдаемо, и необходимо избегать всего, что ненаблюдаемо.

Галилей считал, что экспериментальный факт имеет концептуальную значимость: наблюдение становится экспериментальным фактом, когда оно осмысливается на основе определенной концептуальной точки зрения. Наблюдения и теория не противоречат друг другу, они суть элементы целостной системы. Внутреннее согласование между элементами этой системы Галилей трактовал как наблюдательный критерий истинности теоретических построений и как теоретический критерий верности наблюдения.

И. Ньютон также понимал принцип наблюдаемости в широком смысле. Наблюдаемое, полагал он, — это не только то, что дается непосредственно в ощущениях, но и то, что зависит от теоретического истолкования.

Интересно, что Ньютон принимал за истину абсолютное пространство и абсолютное время вопреки тому, что они непосредственно не наблюдаемы, а относительное пространство и относительное время, хотя они наблюдаемы, считал неистинными.

В дальнейшем в классической физике отношения между наблюдением и теорией так и не пришли к окончательному единообразному пониманию. По мнению одних ученых, под принципом наблюдаемости следует понимать требование, по которому предметом изучения физики должны быть лишь принципиально наблюдаемые величины.

По мнению других, смысл принципа наблюдаемости состоит в ограждении физиков от неадекватных понятий: избегайте того, что нельзя наблюдать!

Видно, что понимание принципа наблюдаемости весьма противоречиво [87].

В явной форме принцип наблюдаемости получил свое развитие в теории относительности и в квантовой теории и не сразу. После ряда изменений взглядов основоположников А. Эйнштейна и В. Гейзенберга установился определенный взгляд, по которому сегодня в современной физической теории принцип наблюдаемости получил «умеренную» интерпретацию, которая предполагает нечто среднее между слабой формой этого принципа (требованием соответствия между теорией и экспериментом) и радикальной его формой (требованием измеримости всех теоретических элементов).

Такая интерпретация указывает на то, что наблюдаемость необходима, но наблюдаемость не всех теоретических конструктов, а только тех, которым можно придать всеобщий смысл. Это требование известно как принцип косвенной наблюдаемости [88].

По нашему мнению, к такому принципу косвенной наблюдаемости принадлежат многие физические явления и законы. Так, гипотезы, вводимые в науку первоначально с целью объяснения фактов, могут впоследствии удовлетворять принципу косвенной наблюдаемости и превращаться в конструкты с явным всеобщим (онтологическим) смыслом.

Чем более необходимым в теории становится конструкт, тем правомернее трактовать его как косвенно наблюдаемый образ реальности. С этой точки зрения и атом, и кврковая гипотеза могут восприниматься как наблюдаемый образ реальности. Действительно, множество фактов успешно объясняется гипотезой о кварках. Это свидетельствует о соответствии этой гипотезы принципу косвенной наблюдаемости. Она сегодня безусловно является правильным образом реальности. В этом нас убеждает более ранний пример с нейтрино. Эта частица сначала была введена как гипотеза для объяснения бета-распада, а потом приобрела онтологический смысл и, наконец, была реально обнаружена на опыте. Почему нечто аналогичное не может произойти с кварком?

Соответствие требованию наблюдаемости в современном смысле, т. е. требованию объяснения непротиворечивым образом опытных фактов, Эйнштейн рассматривал как один из основных критериев качественности теории [88].

ЭССЕ 15
ПРИНЦИП ПРОСТОТЫ

А. Эйнштейн считал, что теорию нельзя признать истинной без того, чтобы она, кроме принципа наблюдаемости, (см. эссе 14) удовлетворяла бы принципу простоты. Он писал, что теория тем лучше, «чем проще ее предпосылки, чем разнообразнее предметы, которые она связывает, и чем шире область ее применения» [89].

Вера в гармонию и простоту Природы вдохновляет исследователя.

Этот критерий — естественную и логическую простоту, лежащую в фундаменте теоретической системы понятий и отношений между ними, — Эйнштейн называл «внутренним совершенством».

Мысль о простоте как эквиваленте правильности любого объяснения стара, как мир. Требование простоты средневековый философ У. Оккам сформулировал как правило, в соответствии с которым не следует без необходимости увеличивать число сущностей.

Многие известные исследователи свои работы сообразовывали с требованием простоты. Это Коперник, Кеплер, Галилей, Ньютон, Лейбниц, Лаплас, Френель, Пуанкаре, Эйнштейн и др.

Переход от специальной теории относительности к общей Эйнштейн объяснял необходимостью отыскать наиболее простое обобщение из всех возможных. СТО имеет «внешнее оправдание», т. е. соответствует экспериментальным фактам, но все еще далека от «внутреннего совершенства» — простоты.

В исследованиях Бора тоже просматривается тенденция к простым объяснениям, а Гейзенберг считал, что простота гипотезы является решающим условием ее корректности [88].

В современной физике простота признается эвристическим принципом, т. е. способствующим познанию.

Интересны высказывания Р. Фейнмана: «Истину можно узнать по простоте и изяществу» [90]. Он же писал в [91]: «Ваша догадка состоит в том, что нечто — очень простое. Если вы не видите сразу же, что это неверно и если так оказывается проще, чем раньше, — значит это верно».

На современном этапе методология рассматривает принцип простоты как критерий выбора одной теории из нескольких возможных. Характерным примером могут служить электродинамика Лоренца и теория относительности Эйнштейна. Обе теории согласуются с опытом, но СТО Эйнштейна имеет преимущество — она проще. Ведь Лоренцевская электродинамика имела одиннадцать предпосылок! Теория же СТО фактически исходила из одного постулата постоянства скорости света во всех инерциальных системах. Казалось, что все просто, но это лишь кажущаяся позиция.

В действительности было бы хорошо, если выбор более простой теории или гипотезы гарантировал и выбор их истинности. Но это не всегда так. Часто среди более сложных гипотез оказываются и такие, которые более точно приближаются к истине.

Оказывается, что истинность двух конкурирующих гипотез может быть выяснена лишь со временем в процессе их развития. Это так называемый *принцип динамической простоты*. Не меньшее значение имеет «сиюминутная» простота — статическая простота, поскольку исследователь в своей работе должен выдвигать различные гипотезы и не может ждать слишком долгое время для выбора одной из них.

В существовании указанных двух видов простоты заключается сложность рассмотренного принципа, его трансформируемость из одного вида в другой. Поэтому окончательное решение понятия простоты еще впереди.

ЭССЕ 16
ПРИНЦИП КРАСОТЫ

«Красота спасет мир» — это известное выражение Ф. М. Достоевского долгое время воспринималось мною лишь как некая крылатая фраза без какого-либо глубокого философского, а тем более — практического смысла. Но мое мнение изменилось, когда мне стало ясно, что красота — это частный случай более общего понятия о прекрасном.

«Красота» относится преимущественно к внешней форме чего-либо. В науке — это относится к математической формуле, к ее выводу, к логическому пояснению физического явления и т. п. В [92] автор приводит ясный пример различия понятия «красоты» и понятия «прекрасного»: когда говорят «прекрасный кувшин», то имеют в виду кувшин удобный, прочный, вместительный, т. е. отвечающий своему практическому назначению. Когда же говорят «красивый кувшин», то имеют в виду не его практическое назначение, а его облик и красоту внешнего вида — изящество формы, пропорциональность объемов, окраску, тонкость отделочного орнамента и т. д.

Термины «красивое» и «прекрасное» часто употребляются как тождественные. Это справедливо лишь там, где «прекрасное» применяется в эстетическом смысле и оно одновременно является и красивым, т. е. прекрасным не только по содержанию, но и по форме.

Такое понимание обоих понятий в особенности подходит к Науке, к ее теориям, и к ее практическим приложениям. Например, Г. В. Плеханов писал: «Красота есть соответствие формы содержанию».

Красота — понятие всеобъемлющее и разнообразное. Есть красота живой Природы, есть красота в живописных изображениях, красота в музыке, в архитектуре, наконец, красота Человека и человеческих отношений. Анализ общих характеристик понятия красоты оставим философам, а мы отметим лишь существенные черты понимания красоты.

Первая черта — антропная сущность понятия красоты, т. е. представление о красоте сугубо «вкусовое» чувство, присущее Человеку. Более того, то, что одному человеку кажется красивым, другим воспринимается как некрасивое и даже уродливое. Эта черта — результат многих чисто человеческих качеств и сиюминутных ощущений.

Антропная черта понятия красоты имеет отношение к Человеку, к живой и неодушевленной Природе, к искусству и практически не относится к Науке.

Вторая черта — наиболее полное восприятие понятия красоты специалистами в данной рассматриваемой области.

Эта черта в полной мере относится к Науке, но не только. Примером может служить шахматная партия. Человек, не знакомый глубоко с шахматами, не может оценить красоту шахматного этюда или комбинаций. Похожая ситуация проявляется и в Науке. Поэтому красота СТО может быть понятна только специалистам — физикам (главным образом, теоретикам). Но это не умаляет значимости принципа красоты для развития Науки. Читатель, возможно, задаст вопрос: а как красота может влиять на развитие Науки? Дело в том, что объективно существует общность между красотой и истиной [92]. Ведь формальные качества истины: ясность мышления, последовательность и целесообразность логических рассуждений, гармоничность теории и т. п., могут радовать и восхищать людей. «Поэтому не только при восприятии искусства, но и при изучении талантливого научного труда можно испытывать эстетическое наслаждение» [92].

Однако в науке эстетическая сторона имеет подчиненное значение и гораздо слабее, чем в искусстве.

Важно, что красота способствует пониманию и формированию истины, а истина в свою очередь помогает видеть подлинную красоту.

Более полное исследование связи красоты в Науке с истинными представлениями о физических явлениях еще предстоит разработать в будущем. В этой предстоящей работе имеется объективное затруднение, связанное с тем, что ни принцип красоты, ни принцип простоты (см. эссе 15) не могут быть облечены в математическую форму. Поэтому остается только присоединиться к словам известного скульптора С. Коненкова: «Можно всю жизнь преданно служить красоте, глубоко понимать все ее тончайшие проявления и одновременно испытывать самые большие затруднения, когда надо выразить свое понимание красоты» [93].

ЭССЕ 17
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

17.1. Возможно ли единство физики?

Сколько человечество помнит себя, практически все его «участники» задавались вопросами, откуда и как все произошло? На разных исторических этапах ответы разнились, но Человек всегда думал и искал единый ответ на эти вопросы. Поэтому проблема единства имеет от роду, пожалуй, столько же лет, сколько и самому Человеку. Почему возникла и развивается эта проблема единства? Нам кажется, что эта проблема произошла от единства самой Природы. Действительно, мы имеем массу примеров, свидетельствующих о единстве Природы. Оно проистекает, во-первых, от единого источника энергии — Солнца, питающего все, что существует на Земле и даже вне Земли, скажем — в нашей Вселенной.

Во-вторых, Человек видит смену дня и ночи, лета и зимы, схожесть представителей флоры и фауны, несмотря на многие различия. Наконец, повторяющиеся от индивидуума к индивидууму жизнь и смерть самого человека. Поэтому и представления Человека о них, как отражение Природы в нашем мышлении, тоже должны быть едины. Сначала так и было — Человек приписывал единство немногим богам. Таковы были боги Огня, Воды и Земли. Затем недалеко от них ушли вперед древнегреческие мыслители. Их представления «по существу еще близки к предшествующим мифологическим взглядам» [5]. Это — Фалес, считавший первичной субстанцией воду, Анаксимандр, думающий о воздухе как о едином Первоначале, Гераклит, приписывающий первичность материи огню.

Эти и еще многие мыслители (их называли философами) так или иначе искали единственное первоначало всего сущего.

Это, если хотите, и есть первые представления о единстве воззрений на Природу.

В районе 400 г. до н.э. появились взгляды Левкиппа и Демокрита на атомную структуру материи. Их атомистика уже безусловно была тем единством, которое описывает разнообразие формы и размеров постоянно хаотически движущихся атомов. Атомы сталкиваются друг с другом, образуя своеобразные вихри. Эти вихри служат материалом для создания всего сущего в окружающем мире, в том числе и самого мира.

После Дальтона (1803 г.) наступила новая атомная эра, которая развивается и до сих пор. Одновременно с ее развитием Наука пошла по пути дифференциации, а не интеграции.

Постепенно создавались целые научные направления. Механика, оптика, электричество, магнетизм — вот далеко не все направления естественных наук, которые вскрывали свои принципы и законы, заставившие ученых прекратить поиски единства. Уж очень разными выглядели природные явления и их теоретические объяснения. Начиная с Аристотеля (род. в 384 г. до н.э.) единая наука о Природе начала разделяться на логику, этику, ботанику, физику и другие направления. Возник период дифференциации наук, продолжавшийся до второй половины двадцатого века. Лишь отдельные всплески «инакомыслия» появлялись время от времени в этот период развития естествознания и его передового направления — физики.

Сия чаша научных интеграционных попыток не минула и российских философов. Так, В. В. Соловьев и О. Н. Лосский стремились выявить взаимосвязи различных представлений как фактора интегративности научного познания.

Наибольшее значение для интеграции взглядов на мир имело учение Ньютона — механика. Механический стиль мышления это важный этап интеграции научного знания. Но к началу XIX столетия механика, в основном, выполнила выпавшую на ее долю историческую миссию интегративного характера. Интегративные функции связывались уже не с одной механикой, а со всей совокупностью физико-химико-биологического цикла [94]. Затем лидером естествознания становится физика, и на ее основе в первой половине XX века если и проявлялись интеграционные тенденции в Науке, то они проявлялись на базе физических представлений.

Во второй половине XX века потребность в единении наук и в единой картине мира значительно усилилась. Характерно на этот счет высказывание М. Планка: наука представляет собой единое целое, так как существует «непрерывная цепь от физики и химии через биологию и антропологию к социальным наукам» [95]. Тот же Планк мечтал о единстве физики, когда писал в [95]: «... с тех пор, как существует изучение Природы, оно имело перед собой в качестве идеала конечную высшую задачу объединить пестрое многообразие физических явлений в единую систему, а если возможно, то в единственную формулу».

Реально о единстве физики уже в наше время, т. е. в последней четверти века, начали говорить физики после того, как стали понятны фундаментальные взаимодействия элементарных частиц. Таких взаимодействий в настоящее время известно четыре.

Сразу отметим, что когда мы говорим, что взаимодействия понятны, то имеется понимание того, в каких процессах или физических явлениях каждое из взаимодействий проявляется, и что каждое взаимодействие обеспечивает в жизни нашей Вселенной. Именно это отражено в табл. 3. Пожалуй и только

Таблица 3. Фундаментальные взаимодействия и их проявление (в порядке возрастания величины)

Вид взаимодействия	Характеристическая константа	Что обеспечивает
Гравитационное	$a_g = \frac{G_m}{\hbar} c = 10^{-39}$	Удерживает тела на Земле и планеты на их орбитах
Слабое	$a_w = \frac{g m^2 c^2}{\hbar^3 c} = 10^{-5}$	Обеспечивает длительное горение Солнца
Электромагнитное	$a_c = \frac{e^2}{\hbar^2 c} = \frac{1}{137}$	Удерживает электроны в атомах. Соединяет атомы в молекулы
Сильное	$a_s = \frac{g_s}{\hbar^2 c} \backsimeq 1$	Обеспечивает стабильное существование атомных ядер

В современном естествознании предполагается, что мировые константы, характеризующие четыре вида взаимодействий, стабильны, начиная со времени 10 с с момента рождения Вселенной. О такой «тонкой (точной) подгонке» числовых значений мировых констант мы уже писали в эссе 13. Их возникновение и существование точной подгонки совершенно не ясно. Тем не менее, заманчивость создания единой теории, которая бы объединила все четыре вида взаимодействий, прельщала многих. Особенно глубокий след в этом направлении оставил А. Эйнштейн. С колоссальным упорством и с глубокой верой в единство физики он отдал 30 своих последних лет поискам так называемой единой теории поля. Мечта Эйнштейна состояла в том, что такая теория должна охватывать все известные явления. Он хотел с помощью новой будущей теории объяснить и природу элементарных частиц, которых сегодня уже известно более двух сотен [72].

К сожалению, это Эйнштейну не удалось. Но его тридцатилетняя эпопея поисков единой теории поля является тем научным подвигом, который не имеет аналога в жизни ученых-физиков на протяжении всей истории науки. Для него характерно высказывание в ответ на чей-то вопрос, принесли ли его усилия хоть какую-то пользу? Он ответил: «По крайней мере, я знаю 99 путей, которые не годятся».

Об этом подвиге и о физической сущности его попыток хорошо написано в интереснейшей популярной книге [96], которую мы рекомендуем прочитать всем, кто интересуется единством физики.

Эта книга замечательна еще и полным отсутствием сложных математических выкладок, которыми изобилует сама теория Эйнштейна.

Заканчивая раздел, посвященный единству физики, мы должны отметить, что интегративные тенденции вовсе не отменяют дифференциацию Науки на отдельные разделы и направления. Это двоякое развитие Науки будет продолжаться и в будущем.

Таким образом, можно сформулировать *принцип единства и множественности развития Науки*. В этом, если хотите, есть согласие с общим философским принципом единства и борьбы противоположностей. Но тогда поиски единства физики не являются ли попытками поймать недосягаемую нам «жар-птицу»?

17.2. На пути к «третьей культуре»

Идея объединения в конце XX века приобрела еще один аспект: объединение естественно-научных представлений с гуманитарными.

В настоящее время мнения ученых на необходимость и возможность такого объединения разделились. Одни усматривают в будущем усиление «разрыва» естественно-научного и гуманитарного знания; другие прогнозируют если не слияние, то все же значительное сближение. При этом не надо забывать, что сфера искусства, литературы, музыки определяется личностью их творцов, а в Науке это хотя и имеет место, но все же не определяющее. Действительно, если, например, Ньютон не открыл бы законы механики, то их бы открыл какой-нибудь другой ученый. И главное: это были бы абсолютно те же законы, что открытые Ньютоном.

Таким образом, различия между двумя культурами — естественно-научной и гуманитарной — есть, всегда были и безусловно будут в будущем. Но прежде различия между ними абсолютизировались. Так и считалось, что научное знание объективно, а гуманитарное — субъективно. Сегодня мы видим, что начиная с конца XX века вскрываются все больше и больше элементы, объединяющие их в единое Человекознание.

У нас на глазах рождается так называемая третья культура. Для нее, прежде всего, характерен отказ от *дисциплинарного* подхода и переход к *проблемному* подходу. Такой переход прогнозировал еще в 30-х годах века В. И. Вернадский, когда говорил о целесообразности для ученых специализироваться не по наукам, а по проблемам [97]. При этом понятийное мышление, господствующее в Науке, и мышление образами, характерное для гуманитарного (например, художественного) творчества, образуют взаимосвязанное единство. Подобное единство все более осознается как реальность в XX и XXI веках.

Список литературы

1. *Исаев С.И.* Термодинамика. Изд. 3-е. — М.: МГТУ им. Н. Баумана, 2000. 414 с.
2. *Демин В.Н.* Принципы материалистической диалектики в научном познании. — М.: , 1979. 184 с.
3. Методические принципы физики / Под ред. В. М. Кедрова и Н. Ф. Овчинникова. — М.: Наука, 1975. 512 с.
4. Философские проблемы естествознания / Под ред. С. Т. Мелюхина. — М.: Высшая школа, 1985. 400 с.
5. *Фистуль В.И.* Фундаментальные законы классической физики. — М.: Физматлит, 2002. 132 с.
6. *Пуанкаре А.* Последние мысли / В кн. Пуанкаре А. О науке. Пер. с франц. / Под ред. Л. С. Понтрягина. — М.: Наука, 1983. 560 с.
7. *Дюгем П.* Физическая теория. Ее цель и строение. Пер. с франц. — СПб.: Образование, 1910. 326 с.
8. *Пуанкаре А.* Ценность науки / В кн. Пуанкаре А. О науке. Пер. франц. / Под ред. Л. С. Понтрягина. — М.: Наука, 1983. 560 с.
9. БСЭ. Т. 8. Изд. 3-е. — М.: 1972, С. 146.
10. *Лаплас П.* Опыт философии теории вероятностей. — Спб.: 1908. 206 с.
11. *Блохинцев Д.И.* Введение в квантовую механику. — М.: Гостехиздат, 1949. 484 с.
12. *Мякишев Г.Я.* Динамические и статистические закономерности в физике. — М.: 1973. 271 с.
13. *Plank M.* Die Kausalitat in der Natur. — Stuttgart: Vortage und Erinnerung. S. 268.
14. Философский словарь. Изд. 4-е / Под ред. И. Т. Фролова. — М.: Политлитература, 1980. 444 с.
15. *Гейзенберг В.* Физические принципы квантовой теории. — Л.–М.: Гостехиздат, 1932. 145 с.
16. *Николаи Е.Л.* Труды по механике. — М.: Гостехиздат, 1955. 583 с.
17. *Яглом И.М.* Принцип относительности Галилея и неевклидова геометрия. — М.: Наука, 1969. 304 с.
18. *Галилей Г.* Избранные произведения в 2-х томах. Т. I. — М.: Наука, 1964. 640 с.
19. *Воронов В.К.*, *Гречнева И.В.*, *Сагдеев Р.З.* Основы современного естествознания. — М.: Высшая школа, 1998. 348 с.
20. *Ньютон И.* Математические начала натуральной философии. — М.: Наука, 1929. 71 с.
21. *Дягилев Ф.М.* Концепции современного естествознания. — М.: ИМПЭ, 1998. 192 с.

22. *Вавилов С.И.* И. Ньютон. — М.–Л.: АН СССР, 1961. 290 с.
23. *Путилов К.А.* Курс физики. — М.: Гос. Уч.-пед. Гиз, 1947. 776 с.
24. *Тельфер Я.М.* История и методология термодинамики и статистической физики. — М.: Высшая школа, 1969. 475 с.
25. *Фистуль В.И.* Физика и химия твердого тела. Т. 1. — М.: Металлургия, 1995. 480 с.
26. *Фистуль В.И.* Распад пересыщенных полупроводниковых твердых растворов. — М.: Металлургия, 1977. 240 с.
27. *Гринштейн П.М.*, *Петровский В.И.*, *Фистуль В.И.* Зав. лаб., 1976. Т. 42, № 6. С. 696–698.
28. Сб. «Релаксационные явления в металлах и сплавах». — М.: Металлургиздат, 1963. 340 с.
29. *Дамаск А.*, *Дине Дж.* Точечные дефекты в металлах. — М.: Мир, 1966. 283 с.
30. *Келли Б.* Радиационные повреждения в твердых телах. — М.: Атомиздат, 1970. 236 с.
31. *Постников В.С.* Внутреннее трение в металлах. — М.: Металлургия, 1974. 352 с.
32. *Карно С.* Статья в сб. «Второе начало термодинамики» / Под ред. Л. К. Тимирязева. — М.–Л.: Гостехиздат, 1934. 311 с.
33. *Сирота Н.Н.* Термодинамика и статистическая физика. — Минск: Вышэйшая школа, 1969. 471 с.
34. Сб. «Второе начало термодинамики». — См. п. 32.
35. *Тухман А.А.* Об основаниях термодинамики. — М.: Энергоатомиздат, 1986. 383 с.
36. *Маркс К.*, *Энгельс Ф.* Соч. Т. 20. — М.–Л.: Госполитиздат. 828 с.
37. *Томсон У.* Динамическая теория теплоты. — См. Сб. 32.
38. *Ферми Э.* Термодинамика / Пер. с англ. — Харьков: ХГУ, 1969. 140 с.
39. *Румлянский И.М.* Методологические принципы физики в системе развивающегося знания. — Кишинев: Штиинца, 1986. 167 с.
40. *Смилга В.П.* Физический энциклопедический словарь. Т. 2. — М.: Сов. Энциклопедия, 1962. с. 595.
41. *Глазов В.М.* Основы физической химии. — М.: Высшая школа, 1981. 456 с.
42. *Эпштейн П.С.* Курс термодинамики / Пер. с англ. — М.–Л.: Гостехиздат, 1948. 419 с.
43. *Цит. по Александров П.С.* // Успехи мат. наук. 1936. Вып. 2.
44. *Ландау Л.Д.*, *Лифшиц Е.М.* Теория поля. — М.: Наука, 1988. 509 с.
45. *Мякишев Г.Я.* Элементарные частицы. — М.: Просвещение, 1983. 170 с.
46. *Шубников А.В.*, *Копцик В.А.* Симметрия в науке и искусстве. – М.: Наука, 1972. 339 с.
47. *Александров П.С.* Введение в теорию групп. 2-е изд. — М.: Учпедгиз, 1938. 144 с.
48. *Любарский Г.Я.* Теория групп и физика. — М.: Наука, 1986. 222 с.
49. *Александров П.С.* Введение в теорию групп / Библ. Квант, вып.7. — М.: Наука, 1980. 144 с.

50. *Планк М.* Принцип сохранения энергии. — М.–Л.: ГОНТИ, 1938. 236 с.
51. *Лагранж Ж. Л.* Аналитическая механика. — М.–Л.: Гостехиздат, 1950. С.
52. *Хвольсон О. Д.* Курс физики. Т. 1. — Берлин: РСФСР, Гиз, 1923. 686 с.
53. *Тарасов Л. В.*, *Тарасова А. Н.* Беседы о преломлении света. Библ. Квант, вып. 18. — М.: Наука, 1982. 176 с.
54. *Тихомиров В. М.* Рассказы о максимумах и минимумах. Библ. Квант, вып. 56. — М.: Наука, 1986. 192 с.
55. Творцы физической оптики / Сост. Франкфурт У. И. — М.: Наука, 1973. 351 с.
56. *Бляшке В.* Круг и шар. — М.: Наука, 1967. 232 с.
57. *Бляшке В.* Греческая и наглядная геометрия / В сб. «Математическое просвещение». — М.: Физматгиз, 1958. 197 с.
58. *Болтянский В. Г.*, *Яглом И. М.* Геометрические задачи на максимум и минимум / В кн. «Энциклопедия элементарной математики». Кн. V. — М.: Наука, 1966. С. 270.
59. *Зетель С. И.* Задачи на максимум и минимум. — М.–Л.: Гостехиздат, 1948. 224 с.
60. *Шклярский Л. О.*, *Ченцов Н. Н.*, *Яглом И. М.* Геометрические неравенства и задачи на максимум и минимум. — М.: Наука, 1970. 374 с.
61. *Фейнман Р.*, *Лейтон Р.*, *Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 3. — М.: Мир, 1965. 238 с.
62. *Полак Л. С.* Вариационные принципы механики их развитие и применение в физике. — М.: Физматгиз, 1960. 599 с.
63. *Фейнман Р.*, *Лейтон Р.*, *Сэндс М.* Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. — М.: Мир, 1966. 344 с.
64.
65. *Планк М.* Принцип наименьшего действия / В кн. «Вариационные принципы механики» (см. 62).
66. *Франкфурт У. И.* Закон сохранения и превращения энергии. — М.: Наука, 1976. 192 с.
67. *Гаусс К.* О новом общем начале механики / Пер. с нем. Примеч. к кн. Ж. Лагранж (см. 51).
68. БСЭ. Т. 42. — М.: Изд.-во БСЭ, 1956. 658 с.
69. *Асеев В. А.* Философский аспект вариационных принципов физики // Реф. канд. дисс. — Пермь: Университет, 1967.
70. *Бондаренко О.* Об идеологических основах физики / Сообщ. в Интернет: http:// OlegBondarenko.Narod.ru/about-new-physics.htm, 01.08.2002.
71. *Фистуль В. И.* Законы атомной и квантовой физики. — М.: Физматлит, 2003. 176 с.
72. *Горбачев В. В.* Концепции современного естествознания. Ч. 1. — М.: МГУП, 2000. 274 с.
73. *Тамм И. Е.* Основы теории электричества. — М.–Л.: Гостехтеориздат, 3-е изд., 1946. 660 с.
74. *Эйнштейн А.*, *Инфельд Л.* Эволюция физики / Пер. с англ. — М.: Наука, 1965. 328 с.

75. *Бергман П.Г.* Введение в теорию относительности. — М.: ИЛ, 1947. 380 с.
76. *Шмутцер Э.* Теория относительности. Современное представление / Пер. с нем. — М.: Мир, 1981. 232 с.
77. *Фистуль В.И.* Новые материалы. — М.: МИСиС, 1995. 142 с.
78. *Паули В.* Теория относительности. — М.–Л.: Гостехиздат, 1947. 300 с.
79. *Бонди Г.* Гипотезы и мифы в физической теории / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. 104 с.
80. *Мах Э.* Анализ ощущений и отношение физического к психическому. — М.: 2-е изд. — М.: Изд.-во Скирмунта, 1908. 308 с.
81. *Ленин В.И.* Материализм и эмпириокритицизм. — М.: Политиздат, 1977. 392 с.
82. *Мах Э.* Механика. Историко-критический очерк ее развития / Пер. с нем. — Ижевск: «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. 456 с.
83. *Иванов Б.Н.* Новая физика. — М.: АН СССР, 1963. 136 с.
84. *Кемпфер Ф.* Путь в современную физику / Пер. с англ. — М.: Мир, 1972. 376 с.
85. *Гильзин К.* Новеллы о мире иных констант. — М.: Детская литература, 1966. 254 с.
86. *Карпенко С.Х.* Концепции современного естествознания. — М.: Культура и спорт, 1977. 520 с.
87. *Дышлевый В.И.*, *Кравченко А.М.*, *Роженко Н.М.* Философия и физика. — Киев: Наукова Думка, 1968. 100 с.
88. *Симанов А.Л.*, *Стригачев А.* Методические принципы физики. — Новосибирск: Наука, 1992. 221 с.
89. *Эйнштейн А.* Собр. науч. трудов в 4-х томах. Т. IV. — М.: Наука, 1967. с. 210.
90. *Фейнман Р.* Характер физических законов. 2-е изд. — М.: Наука, 1987. 160 с.
91. Там же.
92. *Ванслов В.В.* Проблема прекрасного. — М.: Изд.-во полит. литературы, 1967. 264 с.
93. *Коненков С.Т.* // Огонек №45. — М.: Изд.-во Правда, 1956. с. 15.
94. *Лось В.А.* Основы современного естествознания. — М.: ИНФРА-М, 2000. 192 с.
95. *Планк М.* Единство физической картины мира. — М.: Наука, 1966. 288 с.
96. *Паркер Б.* Мечта Эйнштейна / Пер. с англ. — М.: Наука, 1991. 122 с.
97. *Вернадский В.И.* Философские мысли натуралиста, см. В. И. Вернадский — Труды по философии естествознания. — М.: Наука, 2000. 504 с.

Учебное издание

ФИСТУЛЬ Виктор Ильич

ПРИНЦИПЫ ФИЗИКИ

17 НАУЧНЫХ ЭССЕ

Редактор *Автор*
Корректор: *В.Р. Игнатова*
Оригинал-макет: *И.Г. Андреева*
Оформление переплета: *А.В. Андросов*

Подписано в печать 20.12.2010. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 9,25. Уч.-изд. л. 10. Тираж 300 экз.
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»
МАИК «Наука/Интерпериодика»
117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90
E-mail: fizmat@maik.ru, fmlsale@maik.ru;
http://www.fml.ru

Отпечатано в ГУП
«ИПК Чувашия», 428019
г. Чебоксары, пр-т И.Яковлева, 13

ISBN 978-5-9221-1279-6

9 785922 112796