

# Максвелл о логике динамического объяснения\*

Д. Ту́рнер

время ветвь первой науки описывает одну группу физических явлений, а ветвь второй науки описывает другую группу. Так, например, в аналогии, открытой лордом Кельвином между электростатикой и теорией распространения теплоты в твердом теле, обе науки имеют ту же самую математическую форму, причем линии электрической силы соответствуют линиям теплового потока, но первая ветвь описывает распределение электричества в проводниках и изоляторах, а вторая ветвь описывает движение тепла от более нагретых к более холодным частям тела<sup>1/\*</sup>.

То, что я назову *динамической аналогией*, есть специальный вид физической аналогии. В динамической аналогии по крайней мере одна из двух рассматриваемых дисциплин является ветвью динамики. Ветви науки динамики описывают конфигурацию и движение того, что Максвелл называл материальными системами. Так, например, в аналогии, которую сам Максвелл открыл между электростатикой и установившимся движением несжимаемой жидкости, обе дисциплины имеют ту же самую математическую форму, причем линиям электрической силы соответствуют линии движения жидкости или линии тока, но первая дисциплина описывает электрические явления, а вторая — то, как жидкость течет от источников к стокам. Другим примером служит аналогия Максвелла между электростатикой и распределением натяжений и давлений в упругом теле. Здесь линии электрической силы соответствуют линиям, вдоль которых распространяется растяжение и от которых направляется давление.

*Динамическое объяснение*<sup>2</sup> есть, таким образом, отношение между двумя дисциплинами, из которых по крайней мере одна является ветвью динамики, причем такое, что математическая форма одной дисциплины тождественна математической форме другой. Но вместо описания групп свойств этими двумя дисциплинами, соответствующими одна другой, говорят, что первая группа свойств оказывается тождественной второй группе. Чтобы придать этому определению максвелловскую терминологию, будем говорить, что динамическое объяснение есть динамическая аналогия, взятая в буквальном смысле. Вместо свойств материальной системы, имитирующих<sup>3</sup> свойства, описываемые второй дисциплиной, говорят, что первая

В ходе своих исследований по электромагнетизму и по кинетической теории газов Джемс Максвелл изложил некоторые мысли о природе самой науки. Его наблюдения в этой области интересны в настоящее время не только потому, что они принадлежат ему, а потому, что они остаются до сих пор поучительными. Взгляды Максвелла можно найти во многих отступлениях, которыми он оживлял свои научные статьи и трактаты, и в различных статьях и обзорах, подготовленных им для более популярного изложения. Рассмотренные вопросы имеют отношение к его собственным вкладам в физику; они включают логику динамического объяснения, метод физической аналогии, и вечный вопрос о противопоставлении действия на расстоянии непосредственному соприкосновению. В настоящем очерке я хочу рассмотреть взгляды Максвелла на динамическое объяснение.

1. То, что Максвелл называл динамическим объяснением, можно лучше всего пояснить на примере динамической аналогии, которую, в свою очередь, можно лучше всего иллюстрировать тем, что он называл физической аналогией.

Физическая аналогия есть соотношение между ветвью одной науки и ветвью другой науки — такое, что обе ветви имеют одинаковую математическую форму, но в то же

\* Из журнала «Annals of Science», 1956, 11, стр. 238—245.

\* См. примечания в конце статьи.— Прим. ред.

группа свойств образует<sup>4</sup> вторую группу. Так, в кинетической теории газов коллективные свойства большого числа материальных частиц образуют наблюдаемые свойства газов, как, например, средняя кинетическая энергия частиц образует температуру газа. Максвелл называл такую ветвь динамики, которая описывает подобную материальную систему, физической гипотезой<sup>5</sup>.

Конечно, не все объяснения, которые приписывают тождество двум группам свойств, описываемым двумя различными дисциплинами, являются динамическими объяснениями, так как не все такие объяснения рассматривают ветви динамики. Так, например, в электромагнитной теории света говорят, что электромагнитные волны внутри известного диапазона длин волн образуют световые волны.

Но определение динамического объяснения составляет только половину дела. Воображение не должно обогнать природу. Если динамическое объяснение должно быть научным, то физическая гипотеза должна удовлетворять определенным условиям адекватности. Максвелл более или менее явно признавал два таких условия: условие непротиворечивого представления и то, что я назову условием независимого доказательства.

Физическая гипотеза удовлетворяет условию *непротиворечивого представления*, если эта гипотеза оказывается совместной с фундаментальными принципами динамики, включающими, например, ньютоновы законы движения и принцип сохранения механической энергии. Новая наука не только должна оправдывать группу физических явлений, которую она описывает, но не должна также противоречить принципам, установленным другими науками<sup>6</sup>. Слова «consistent representation» («непротиворечивое представление») являются максвелловским переводом выражения, употребленного в 1845 г. Гауссом в письме к Вильгельму Веберу<sup>7</sup>. Гаусс писал, что не способен образовать «konstruirbar Vorstellung» того, как распространение электромагнитных возмущений имеет место в конечный период времени<sup>8</sup>.

Физическая гипотеза удовлетворяет условию *независимого доказательства*, если свойства материальной системы, которую она описывает, можно исследовать независимо от той науки, которую она имеет назначением объяснить. Заканчивая трактат «Электричество и магнетизм», ссылаясь на более раннюю попытку построить ди-

намическое объяснение электромагнитной науки, Максвелл указывал, что задача динамического объяснения всегда позволяет бесконечное число решений. «Попытка представить работающую модель этого механизма, которую я тогда сделал, должна быть принята не за что большее, чем она на самом деле есть — доказательство того, что можно вообразить механизм, способный осуществить связь, механически эквивалентную действительной связи частей электромагнитного поля. Задача определения механизма, требуемого для того, чтобы осуществить данный вид связи между движениями частей некоторой системы, всегда допускает бесконечное число решений. Из этих решений некоторые могут быть более неуклюжи, или более сложны, чем другие, но все они должны удовлетворять условиям механизма вообще»<sup>9</sup>. Если нет никаких независимых признаков для того, чтобы выделить одно объяснение среди бесчисленного множества других, то это объяснение в лучшем случае тривиально; оно служит только для того, чтобы доказать возможность динамического объяснения.

Я предполагаю сначала рассмотреть применение динамического объяснения Максвеллом в его исследованиях по электромагнетизму, а затем — роль, которую такая программа играла в его исследованиях кинетической теории газов.

2. В первом из трех мемуаров по электричеству и магнетизму — «О фарадеевых линиях силы» [13], прочитанном в 1865 г., Максвелл демонстрировал динамическую аналогию между электростатикой и движением жидкости. Он также утверждал, что ближайшей задачей физики является обеспечить динамическое объяснение наук об электричестве и магнетизме. Во втором мемуаре — «О физических линиях силы» [14], опубликованном в 1861—1862 гг., Максвелл вывел знаменитые уравнения поля и электромагнитную теорию света и начал проектируемое динамическое объяснение, заключавшееся в том, что он назвал теорией молекулярных вихрей. В этой теории свойств системы вращающихся сферических ячеек, натянутых подобно шарикам вдоль линий магнитной силы, утверждалось, что эти шарики образуют наблюдаемые свойства магнитного действия. Вращение ячеек заставляет их раздвигаться в боковом направлении и сжиматься в продольном направлении, что в свою очередь создает напряжение вдоль линий магнитной силы и одинаковое во-

всех направлениях давление в плоскости, расположенной под прямым углом к линиям силы. Далее, свойства системы маленьких частицек, движущихся между соседними вихрями, когда их угловые скорости различаются, образуют наблюдаемые свойства электрического действия. Теория молекулярных вихрей, к удовлетворению Максвелла, отвечала условию непротиворечивого представления, но не могла удовлетворить условию независимого доказательства. В третьем мемуаре — «Динамическая теория электромагнитного поля» [9], опубликованном в 1864 г. и в «Электричестве и магнетизме», опубликованном в 1863 г., Максвелл утверждал, что физика пока должна удовлетвориться более скромным достижением — тем, что он называл динамической теорией.

Динамическая теория есть динамическое объяснение в менее полной форме. Она ставит задачей спецификацию материальной системы, которая прежде всего не противоречила бы науке, которая должна быть объяснена и должна обладать такой общностью чтобы избегать деталей, требуемых динамическим объяснением. В заметке «О доказательстве уравнений движения системы со связями» Максвелл рассматривает переход от динамического объяснения к динамической теории, пользуясь слегка отличающимися терминами.

«При формулировке динамических теорий физических наук очень часто бывало на практике, что изобреталась какая-нибудь специальная динамическая гипотеза и затем при помощи уравнений движения из нее выводились определенные результаты. Согласие с этими результатами, как предполагалось, давало определенную степень доказательства в пользу этой гипотезы.

Истинный метод физического объяснения состоит в том, чтобы начать с явлений и вывести из них силы путем прямого применения уравнений движения. Трудность при таком подходе заключалась до сих пор в том, что мы наталкиваемся, по крайней мере во время первых стадий исследования, на столь неопределенные результаты, что не имеем достаточно общих членов для выражения их без введения какого-нибудь понятия, не выводимого строго из наших предпосылок.

Поэтому очень желательно, чтобы люди науки изобрали какой-нибудь метод утверждения, благодаря которому представления настолько точные, насколько они могут

быть, могли бы быть доведены до ума и в то же время были бы достаточно общими, чтобы можно было избежать введения неоправданных деталей»<sup>10</sup>.

А в рецензии для «Nature» на книгу «Натуральная философия» лорда Кельвина, тогда еще В. Томсона, и П. Г. Тэта Максвелл добавил:

«Но когда мы имеем основание считать, что явления, попадающие в сферу нашего наблюдения, образуют только малую часть того, что действительно происходит в системе, вопрос заключается не в том, какие явления будут результатом гипотезы, что система эта есть система определенного специфического вида, но в том — какова наиболее общая характеристика материальной системы совместной с условием, что движения тех частей системы, которые мы можем наблюдать, суть те же, которые мы на самом деле находим»<sup>11</sup>.

В электромагнетизме искомая для спецификации материальная система оказалась уравнениями движения, развитыми в 1788 г. Лагранжем в его «Аналитической механике». Законы движения Ньютона и уравнения Лагранжа эквивалентны, но представляют собой разные методы определения движения материальной системы. В заметке об уравнениях движения и в главе по этому вопросу в «Электричестве и магнетизме» Максвелл рассматривает уравнения Лагранжа как с математической, так и с физической точки зрения<sup>12</sup>. С математической точки зрения исследования Лагранжа сделали возможным сведение законов движения Ньютона, которые необходимо иметь в количестве трех для каждой частицы материальной системы, к числу, равному числу степеней свободы данной системы. С физической точки зрения исследования Лагранжа позволили перенести описание части механизма из жесткой системы протяженных координат в пространстве Декарта к тому, что Максвелл характеризовал как «независимые ведущие колеса<sup>13</sup> механизма».

Кельвин и Тэт назвали эти новые координаты, служившие для замены координат Декарта, игнорируемыми координатами; теперь они называются обобщенными координатами, а изменения их по времени называются обобщенными скоростями. Для того чтобы применить уравнения Лагранжа к материальной системе, необходимо сначала определить, каковы обобщенные координаты и скорости этой системы, и затем найти, как потенциальная

и кинетическая энергии системы зависят от этих величин. Тогда можно определить, удовлетворяет ли система принципу сохранения механической энергии. Этот принцип утверждает, что сумма потенциальной и кинетической энергий материальной системы остается постоянной во время движения.

В рецензии на труд Кельвина и Тэта Максвелл объяснил природу динамического объяснения. Объяснил, почему иногда такое объяснение должно быть оставлено, объяснил природу динамической теории и то, как задача динамической теории может быть разрешена применением уравнений Лагранжа. Для иллюстрации Максвелл описал церковный перезвон с определенными специфическими свойствами.

«В обычном перезвоне каждый колокол имеет один канат, который спускается через отверстие в полу в комнату звонарей. Но представим себе, что каждый канат вместо того, чтобы приводить в действие один колокол, участвует в движении многих частей механизма, и что движение каждого колокола определяется не движением одного только каната, а движением нескольких; далее предположим, что весь этот механизм закрыт и совершенно незнаком людям, стоящим у канатов, которые могут видеть только дыры в потолке над ними»<sup>14</sup>.

Задача динамического объяснения состоит в том, чтобы выяснить природу механизма в перезвоне на основании наблюдаемых движений канатов. Но так как имеется бесконечное множество решений этой задачи, и так как этот механизм, по определению, недоступен, то такое объяснение тривиально. Оно не может удовлетворить условию независимого доказательства. Задача динамической теории заключается в том, чтобы доказать, не прибегая к недоступному механизму, что наблюдаемое движение канатов совместимо с основными принципами динамики. Решение состоит в определении, применимы ли уравнения Лагранжа к механизму перезвона и остается ли сумма потенциальной и кинетической энергий механизма постоянной во время движения. Для того чтобы применить уравнения Лагранжа, прежде всего необходимо установить обобщенные координаты и скорости системы. В задаче о механизме перезвона обобщенные координаты оказываются положениями канатов, а обобщенные скорости — скоростями изменения этих положений. При помощи надле-

жающей манипуляции с канатами звонари могут определить, как выражаются потенциальная и кинетическая энергии этого механизма в функции обобщенных координат и скоростей<sup>15</sup>.

История электромагнетизма является в своем роде задачей о перезвоне. Закон Ампера о притяжении и отталкивании между элементами тока и закон Фарадея об электромагнитной индукции соответствуют наблюдаемому движению канатов. Попытка Максвелла дать динамическое объяснение этих законов в его теории молекулярных вихрей соответствует попытке объяснить природу механизма в перезвоне из наблюдаемого движения канатов. Более скромную задачу динамической теории Максвелл описывает в «Электричестве и магнетизме»: «Что я теперь предлагаю сделать — это изучить следствия из допущения, что явление электрического тока — это явление движущейся системы, причем движение передается от одной части этой системы к другой силами, природу и законы которых мы даже не пытаемся определить, потому что мы можем исключить эти силы из уравнений движения методом, данным Лагранжем для любой системы со связями»<sup>16</sup>. Задача применения уравнений Лагранжа к системе электрических цепей упрощается, если она ограничивается цепями, в которых электрическая емкость пренебрежимо мала. Для такой системы Максвелл обнаружил, что обобщенные координаты являются совокупностью значений, необходимых для фиксирования положения, формы и размеров каждой цепи; а обобщенными скоростями являются скорости изменения этих значений вместе с силой тока в каждой цепи; энергия же системы является по форме полностью кинетической<sup>17</sup>. При помощи такой эмпирической модели Максвелл получил из уравнений Лагранжа законы Ампера и Фарадея в несколько обобщенной форме и доказал, что они совместимы с принципом сохранения механической энергии.

3. В предыдущем рассуждении о вкладе Максвелла и его истолковании этого вклада один пункт нуждается в разъяснении. Максвелл обнаружил, что уравнения Лагранжа являются наиболее общей характеристикой материальной системы, совместимой с наблюдаемым действием электрических токов. Таким образом, его вклад состоял в доказательстве динамической аналогии, хотя в этой аналогии соответствующие свойства были весьма об-

щими. Но Максвелл истолковал свой вклад, как доказательство динамической теории, т. е. как доказательство того, что законы электричества и магнетизма описывают наблюдаемые действия промежуточного механизма, хотя детали этого механизма остаются не уточненными.

Максвелл в глубине души никогда не сомневался в том, что в основе совокупности всех физических явлений лежит движение материи как непосредственно наблюдаемое, так и в скрытом виде наблюдаемых действий материальных систем. Он допускал, что использование динамических терминов в электромагнетизме являлось только аналогией, но он считал, что имеется одно важное исключение. В последнем из трех мемуаров по электричеству «Динамическая теория электромагнитного поля», рассматривая более раннюю попытку полного динамического объяснения, Максвелл настаивал на том, что энергия, независимо от различного рода явлений, в которых она обнаруживается, всегда представляет собой механическую энергию.

«Я попытался ранее описать специфический тип движения и специфический вид напряжения, которые были бы так распределены, чтобы объяснить эти явления. В настоящей статье я избегаю гипотез такого рода и, применяя такие термины, как электрическое количество движения и электрическая упругость в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, я хочу просто направить внимание читателя на механические явления, которые помогут ему в понимании электрических явлений. Все подобные фразы в настоящей статье должны пониматься как иллюстративные, а не объясняющие.

Однако, говоря об энергии поля, я хочу, чтобы меня понимали буквально. Вся энергия есть то же, что и механическая энергия, независимо от того, существует ли она в форме движения или в форме упругости или в какой-либо другой форме. Энергия электромагнитных явлений есть механическая энергия»<sup>18</sup>.

А в самом последнем параграфе «Электричества и магнетизма» Максвелл цитировал утверждение Торричелли о том, что энергия «...является квинтэссенцией такой тонкой природы, что она не может содержаться ни в каком сосуде за исключением самой внутренней субстанции материальных вещей»<sup>19</sup>.

Убеждение, что вся энергия является механической энергией, отражается также в максвелловской интерпретации электромагнитной теории света. Вместо того чтобы считать, что электромагнитные свойства образуют и свойства света, он утверждал, что свойства материальной системы образуют и электромагнитные, и оптические свойства. В мемуаре «О физических линиях сил», где впервые дано математическое выражение электромагнитной теории света, Максвелл обсуждает доказательства в пользу этой теории. После замечания о том, что отношение электростатической единицы заряда к электромагнитной единице тока, вычисленное из экспериментов Кольрауша и Вебера, имеет размерность и приблизительную величину скорости света в воздухе, измеренную Физо, Максвелл приходит к заключению: «... едва ли мы можем избежать вывода, что свет состоит из поперечных колебаний той же самой среды, которая является причиной электрических и магнитных явлений»<sup>20</sup>. Подобные же комментарии встречаются и в позднейшем мемуаре «Динамическая теория электромагнитного поля»<sup>21</sup> и в изложении электромагнитной теории в «Электричестве и магнетизме». «Если будет обнаружено, что скорость распространения электромагнитных возмущений такая же, как скорость света, и притом не только в воздухе, но и в других прозрачных средах, то мы будем иметь сильные доводы для того, чтобы поверить, что свет является электромагнитным явлением, а комбинация оптического и электрического доказательств создаст убеждение в реальности среды, подобное тому, которое мы получаем в случае других видов материи от комбинированного доказательства наших чувств»<sup>22</sup>. Безусловно, Максвелл не только верил в то, что свойства материальной системы образуют как электромагнитные, так и оптические свойства, но он верил также, что когда-нибудь знание таких вещей, как «...является ли электрический ток в действительности потоком материального вещества или двойным потоком, или является ли его скорость большой или малой при измерении в футах в секунду... сделает возможным появление приемлемого динамического объяснения электромагнетизма»<sup>23</sup>.

«Знание этих вещей приведет по крайней мере к началу полной динамической теории электричества, в которой мы будем рассматривать электрическое действие, не

как в этом трактате — как явление, вызываемое неизвестной причиной и подчиненное только общим законам динамики, но как результат известных движений, известных частей материи, в котором в качестве объектов изучения будут не только суммарные эффекты и окончательные результаты, но весь промежуточный механизм и детали этого движения»<sup>24</sup>.

4. Теперь я хочу показать, что и в своих исследованиях по кинетической теории газов или, как он называл ее, динамической теории газов, Максвелл истолковывал свои результаты как неполные и верил, что когда-нибудь физика исправит этот недочет.

В статье для «Nature» о молекулах Максвелл проводил различие между свойствами совокупности сущностей, исследуемой индивидуально и свойствами этих же самых сущностей, исследуемых коллективно. Он называл изучение первого рода свойств *историческим*, или *динамическим методом*, а изучение второго рода свойств *статистическим методом*<sup>25</sup>. Физическая гипотеза кинетической теории газов состоит в описании движения малых материальных частиц, называемых молекулами, которые не могут быть непосредственно наблюдаемы. Максвелл допускал, что хотя отдельная молекула при столкновении с другой молекулой изменяет ее скорость, распределение молекулярных скоростей в совокупности молекул остается постоянным. Исходя из такого допущения, он доказал, что распределение молекулярных скоростей происходит по закону ошибок. Физическая гипотеза не говорит о том, какие молекулы обладают какими скоростями; она игнорирует индивидуальные истории. В этом смысле теория для Максвела была неполной.

Вера Максвела в то, что статистический метод являлся временным выходом, необходимым только до тех пор, пока физика не получит более полного знания о движении молекул, ясно обнаруживается в некоторых других замечаниях, сделанных им в статье «Молекулы». Он замечает, что статистический метод описывает «новый род закономерностей, закономерность средних», но эта закономерность не является «совершенным знанием всех данных»; она является только достаточной «для всех практических целей».

«Уравнения динамики полностью выражают законы исторического метода в применении к материи, но при-

менение этих уравнений предполагает совершение знание всех данных. Но мельчайшее количество материи, которое мы можем подвергнуть эксперименту, состоит из миллионов молекул, ни одна из которых никогда не является ощутимой индивидуально для нас. Поэтому мы не можем удостовериться в действительном движении любой из этих молекул; так что мы вынуждены оставить строго исторический метод и принять статистический метод, когда мы имеем дело с большими группами молекул.

Данные статистического метода в применении к молекулярной науке являются суммами большого числа молекулярных величин. При изучении соотношений между величинами такого рода мы встречаемся с новым видом закономерности — закономерностью средних, на которую мы можем полагаться совершенно достаточно для всех практических целей, но которая не может претендовать на тот характер абсолютной точности, который принадлежит законам абстрактной динамики»<sup>26</sup>.

Вера в то, что статистический метод является только временным выходом, ясна также из рассуждения Максвела о возможном противоречии, возникающем в науке из существования двух методов исследования<sup>27</sup>. В «Теории теплоты» Максвелл изобрел знаменитого *демона* для того, чтобы иллюстрировать возможность того, что свойства совокупности сущностей, исследуемые историческим методом, могут противоречить свойствам тех же самых сущностей, исследуемых статистическим методом. С помощью простого механического приспособления демон, наделенный способностью наблюдать отдельные молекулы, может нарушить второй закон термодинамики в его статистической интерпретации.

«...представим себе существо, чувства которого настолько обострены, что оно может проследить за траекторией каждой молекулы; такое существо, атрибуты которого все еще существенно конечны, как и наши, было бы способно делать то, что в настоящее время невозможно для нас. В самом деле, мы видели, что молекулы в сосуде, наполненном воздухом при однородной температуре, движутся с отнюдь не равномерными скоростями, хотя средняя скорость любого произвольно выбранного большого количества их почти точно равномерна. Теперь предположим, что сосуд разделен на две части *A* и *B* перегородкой,

в которой имеется малое отверстие, и что существо, которое может видеть отдельные молекулы, открывает и закрывает это отверстие так, чтобы пропускать только более быстрые молекулы из *A* в *B* и только более медленные молекулы из *B* в *A*. Таким образом, это существо без затраты работы поднимет температуру в *B* и понизит температуру в *A* в противоречии со вторым законом термодинамики<sup>28</sup>.

5. В инвентарной книге максвелловской мысли имеется как приходная, так и расходная сторона. На стороне прихода, в электромагнетизме, Максвелл ограничил свои исследования после отступления от полного динамического объяснения тем, что мы теперь называем макроскопической областью. А в кинетической теории проникновение в микроскопическую область было поддержано независимым доказательством. С расходной стороны Максвелл оставил убежденным, что вся энергия является механической энергией. Однако его не следует слишком сильно обвинять за это убеждение. Это было не столько догмой относительно природы Вселенной, сколько программой объединения физики, создания новой теории и открытия новых физических явлений.

В «Действии на расстоянии» Максвелл заметил, что некоторые силы в природе кажутся действующими на расстоянии из отдельных центров, как, например, тяжение, в то время как другие силы кажутся действующими через промежуточную среду, как, например, круги, распространяющиеся по воде, когда бросают камень в пруд. Он также заметил, что эти два вида сил фигурируют в программах, которые намечают физики в их попытках исключить силы другого рода. Максвелл присоединялся к защитникам непосредственного действия, потому что это казалось ему более «философским», более научным<sup>29</sup>.

«Почему мы не должны тогда допускать, что знакомый нам способ передачи движения путем толчков и тяги нашими руками является примером всех действий между телами даже в тех случаях, в которых мы не можем ничего наблюдать между телами, что принимало бы участие в действии»<sup>30</sup>.

Динамическое объяснение привело физику от времен Ньютона далеко в XIX столетие. В исследованиях Максвелла оно продвинуло как теорию электричества, так и

теорию материи. Но, как оказалось, это продвижение помогло установить пределы той программы, которая вызвала его.

В заключение я хочу упомянуть о комментариях Ари Пуанкаре и в новейшее время Артура Розенблота и Норберта Винера о возможности бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении<sup>31</sup>. Комментарии Пуанкаре интересны не только ввиду их ясности, но и потому, что ему неоднократно приписывали открытие такой возможности<sup>32</sup>. В предисловии к «Электричеству и оптике»<sup>33</sup>, опубликованном в 1901 г., и в рассуждениях об исследованиях Максвелла в «Основаниях науки»<sup>34</sup> Пуанкаре объяснял, как Максвелл доказал, что действие электрических токов совместимо с основными принципами динамики и как общность этого доказательства сделала возможным игнорирование как деталей механизма, так и связи между механизмом и совокупностью наблюдаемых явлений, и как это доказательство, таким образом, установило возможность бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении без построения в отдельности этих связей.

В статье для «Philosophy of Science» о «Роли моделей в науке», опубликованной в 1945 г., Розенблют и Винер, не упоминая о Максвелле, обобщили это наблюдение, указывая, что любой вид объяснения допускает бесконечное число решений. Вместо перезвона с канатами, ведущими к недоступному механизму, они в качестве иллюстрации предложили закрытый ящик с входами и выходами, соединенными с системой электрических цепей, скрытых внутри ящика. Одно и то же соотношение между входами и выходами можно объяснить различными схемами цепей, различными токами, различными сопротивлениями и т. д. Возможно получить тот же самый выход для того же входа с различными физическими схемами. Если несколько различных схем такого рода заключены в ящики, к которым возможен подход только через входные и выходные клеммы, то нельзя различить между различными возможностями, не обращаясь к новым входам или выходам или к обоим<sup>35</sup>. Для того чтобы выделить одно объяснение из бесчисленного множества других, требуется независимое доказательство.

## Примечания

- <sup>1</sup> Более подробное рассмотрение взглядов Максвелла на метод физической аналогии см. в моей статье по этому вопросу [27].
- <sup>2</sup> См. Максвелл [12], 2, 418. Он писал: «...когда физическое явление может быть полностью описано, как изменение в конфигурации и движении материальной системы, говорят, что динамическое объяснение этого явления полно».
- <sup>3</sup> См. Максвелл [14], 1, 488.
- <sup>4</sup> См. Максвелл [14], 1, 490.
- <sup>5</sup> См. Максвелл [13], 1, 155.
- <sup>6</sup> См. Максвелл [20], § 567. Он писал: «Образуя представления и слова, относящиеся к какой-либо науке, которая, подобно электричеству, имеет дело с силами и их действием, мы должны постоянно иметь в виду представления, свойственные фундаментальной науке — динамике, чтобы мы могли на первой стадии развития науки избежать несовместимости с тем, что было уже установлено...»
- <sup>7</sup> См. Максвелл [20], § 861 и [12], 2, 419.
- <sup>8</sup> Письмо к Веберу было опубликовано в [3], 5, 629. Как Дж. Дж. Томсон, так и сэр Джозеф Лармор ссылаются на это письмо, переводя эту фразу соответственно как «конкретное представление» [26], стр. 1 и как «рабочее представление» [5], стр. 319.
- <sup>9</sup> Максвелл [20], § 831. См. также отзыв о лагранжевых уравнениях движения в главе «Об уравнениях движения системы со связями» [20], особенно §§ 555—557.
- <sup>10</sup> Максвелл [15], 2, 309.
- <sup>11</sup> Максвелл [17], 2, 781. Сэр Джозеф Лармор отзывался о новом способе Максвелла рассматривать физику, как об «агностической точке зрения». [5], стр. 28.
- <sup>12</sup> Максвелл [15], 2, 308 и [20] §§ 553—554. См. также [17], 2, 782—783.
- <sup>13</sup> Максвелл [17], 2, 782.
- <sup>14</sup> Максвелл [17], 2, 783.
- <sup>15</sup> Максвелл [17], 2, 783—784. Он писал: «Они могут придать каждому канату любое положение и любую скорость и могут оценить его количество движения, остановив все канаты сразу и чувствуя, какое усилие натяжения дает каждый канат. Если они возьмут на себя труд установить, какое количество работы им необходимо затратить для того, чтобы стянуть канаты вниз к заданному ряду положений, и выражить это через эти положения, то они найдут потенциальную энергию системы, выраженную в известных координатах. Если они затем найдут натяжение какого-либо каната, вызванное скоростью, равной единице, сообщенной этому или какому-нибудь другому канату, то они смогут выразить кинетическую энергию через координаты и скорости».
- <sup>16</sup> Максвелл [20], § 552. См. также §§ 110—111, в которых Максвелл рассматривает состояние натяжения в электростатическом поле. Он писал: «Необходимо тщательно усвоить, что мы сделали только один шаг в теории действия среды. Мы предположили, что среда находится в состоянии натяжения, по мы никаким путем не учитывали этого натяжения и не объясняли, как оно сохраняется. Однако этот шаг представляется мне

очень важным, так как он объясняет действием последовательных частей среды явления, которые, как предполагалось ранее, объяснимы только непосредственным действием на расстоянии... Я не был в состоянии сделать следующий шаг, а именно, объяснить механическими соображениями эти натяжения в диэлектрике. Поэтому я оставляю теорию в этом пункте...»

<sup>17</sup> Максвелл [20], §§ 568—577.

<sup>18</sup> Максвелл [9], 1, 563—564. См. также [8], 2, 227: «Таким образом, слова: скорость, количество движения, сила и т. д. приобрели определенное точное значение в элементарной динамике. Они употребляются также в динамике систем со связями в таком смысле, который хотя и совершенно аналогичен элементарному смыслу, шире его и более общ... Имеются опять-таки определенные электрические явления, связанные соотношениями такой же формы, как и соотношения, которые связывают динамические явления. Прилагать к этим электрическим явлениям фразы динамики с соответствующими различиями и с временными оговорками представляет собой смелую метафору: но это — законная метафора, если она сводит истинное представление об электрических соотношениях к таким, которые уже испытаны в динамике».

<sup>19</sup> Максвелл [20], § 866. Цитата взята из «Lezioni Accademiche» (Флоренция, 1715), стр. 25.

<sup>20</sup> Максвелл [14], 1, 500.

<sup>21</sup> Максвелл [9], 1, 580.

<sup>22</sup> Максвелл [20], § 781.

<sup>23</sup> Максвелл [20], § 574.

<sup>24</sup> Там же.

<sup>25</sup> Максвелл [10], 2, 374. Различие между динамическим и статистическим методами и сейчас в широком употреблении и было приписано Максвеллу. См., например, Гиббс [4], стр. VIII; Коген [1], стр. 139; и Винер [28], сноска к стр. 81.

<sup>26</sup> Максвелл [10], 2, стр. 374.

<sup>27</sup> Дальнейшим доказательством этой веры Максвелла является его утверждение, что когда физика не в состоянии исследовать, вследствие малой величины, то, что он называет «явлениями на водоразделе» (water shed phenomena), она должна обратиться за помощью к статистическому методу. В явлениях на водоразделе наблюдается неустойчивое состояние: очень малая причина может вызвать очень большое следствие — подобно тому, как легкий толчок, данный неустойчиво сбалансированному валуну, вызывает оползень. Максвелл противопоставляет явления на водоразделе явлениям, подчиняющимся принципу непрерывности, в которых малое изменение причины вызывает только малое изменение следствия. См. Максвелл [21] и [18], стр. 13—14.

<sup>28</sup> Максвелл [19], стр. 328—329. См. также [16], 2, 670. См. также рассуждение Максвелла об использовании статистического метода в социальных науках. Оно сходно с его рассуждением о применении статистического метода в физике в том отношении, что Максвелл опять-таки видел возможное противоречие, возникающее вследствие существования статистического метода с историческим [10], 2, 373—374.

<sup>29</sup> Максвелл [11], 2, 312.

<sup>30</sup> Там же. См. также [20], § 502. Сравнивая свою программу с программой континентальных ученых, Максвелл писал: «Представления, которым я пытался следовать, это представления о действии через среду — от одной части до прилегающей к ней части. Эти представления были в значительной степени использованы Фарадеем, и моей целью, поставленной в нескольких опубликованных статьях, была разработка их в математической форме и сравнение результатов с известными фактами. Это сравнение результатов, двух методов, совершенно противоположных в самых основных принципах, с философской точки зрения должно привести к ценным данным для изучения условий научного размышления».

<sup>31</sup> Возможность бесконечного числа решений задачи о динамическом объяснении может даже быть источником юмора, как на карикатурах Руба Гольдберга, на которых показано некоторое количество механизмов, последовательно воздействующих друг на друга, в выполнении такой простой функции, как задувание горящей спички.

<sup>32</sup> См., например, Коген [1], стр. 85; Шлик [25], стр. 29; Маргенау [7], стр. 77; Линдсей и Маргенау [6], стр. 191; Деверё [2], стр. 705.

<sup>33</sup> Пуанкаре [22], стр. VII—VIII.

<sup>34</sup> Пуанкаре [23], стр. 174—183.

<sup>35</sup> Розенблют и Винер [24], стр. 318—319.

15. Maxwell J. C. On the Proof of the Equations of Motion of a Connected System. «Proc. of the Cambr. Phil. Soc.», 2, 1876; repr. in Papers, 2, 308—309.
16. Maxwell J. C. Tait's «Thermodynamics». «Nature», 17 (Nov. 1877 — April 1878); repr. in Papers, 2, 660—671.
17. Maxwell J. C. Thomson and Tait's Natural Philosophy. «Nature», 20 (May 1879 — Oct. 1879); repr. in Papers, 2, 776—785.
18. Maxwell J. C. Matter and Motion. N. Y.
19. Maxwell J. C. Theory of Heat. 8<sup>th</sup> ed. L., 1885.
20. Maxwell J. C. A Treatise on Electricity and Magnetism. 3<sup>th</sup> ed. Oxford, 1892.
21. Maxwell J. C. Does the Progress of Physical Science tend to give any advantage to the opinion of Necessity (or Determinism) over that of the Contingency of Events and the Freedom of the Will? In: L. Campbell and W. Garnett «The Life of James Clark Maxwell», L., 1884, pp. 357—366.
22. Poincaré H. Electricité et Optique. 2<sup>th</sup> ed. P., 1901.
23. Poincaré H. The Foundations of Science. N. Y., 1921.
24. Rosenblueth A. and Wiener N. The Role of Models in Science. «Philosophy of Science», 12 (1945).
25. Schlick M. Philosophy of Nature. N. Y., 1949.
26. Thomson J. J. Recent Researches in Electricity and Magnetism. Oxford, 1893.
27. Turner J. Maxwell on the Method of Physical Analogy. «The British Journ. for the Philosopay of Science».
28. Wiener P. Cohen's Philosophical Interpretations of the History of Science. Glenco, 1951.

## Литература

1. Cohen M. R. Preface to Logic. N. Y. 1945.
2. Devereux G. A. conceptual Scheme of Society. «Am. J. of Sociology», v. XLV (1941).
3. Gauss C. F. Werke, 2-nd ed. Goettingen, 1877.
4. Gibbs J. W. Elementary Principles in Statistical Mechanics. N. Y., 1902.
5. Larmor J. Aether and Matter. Cambridge, 1900.
6. Lindsay R. B. and Margenau H. «Foundations of Physics», N. Y., 1936.
7. Margenau H. Nature of Physical Reality. N. Y., 1950.
8. Maxwell J. C. Address to the Mathematical and Physical Sections of the British Association. «Scientific Papers of James Clark Maxwell». Cambridge, 1890, 2, 215—229.
9. Maxwell J. C. «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. «Rey. Soc. Transactions», v. CLV (1864); reprinted in Papers, 1, 526—597.
10. Maxwell J. C. Molecules. «Nature», 8 (May, 1873 — Oct. 1873); repr. in «Papers», 2, 361—378.
11. Maxwell J. C. On Action at a Distance. Papers, 2, 311—323.
12. Maxwell J. C. On the Dynamical Evidence of the Molecular Constitution of Bodies. «Nature», 11 (Nov. 1874 — April 1875); repr. in Papers, 2, 418—438.
13. Maxwell J. C. On Faraday's Lines of Force. «Trans. of the Cambridge Phil. Soc.», 10, part 1; repr. in Papers, 1, 155—229.
14. Maxwell J. C. On Physical Lines of Force. «Phil. Mag.», 21 (1861) and 23 (1862); repr. in Papers, 1, 451—513.