

# Вестник МОСКОВСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 5 — 1963

Ц. С. САРАНГОВ, Б. И. СПАССКИЙ

## О МЕТОДЕ МОДЕЛЕЙ И АНАЛОГИЙ В РАЗВИТИИ ФИЗИКИ

Процесс развития естественных наук, в том числе и физики, очень сложен. Ход его определяется всей общественно-исторической практикой людей, очень сложным переплетающимся влиянием целого ряда сторон общественной жизни, при определяющем влиянии производства.

И все-таки процесс развития физической науки, определяющийся всей общественно-исторической практикой людей, мы можем рассматривать как изолированный процесс, как процесс в известном смысле самодвижения. При этом на первый план выступают особенности развития физики как естественной науки, определяемой ее предметом, т. е. физическими свойствами материи, а также свойствами и особенностями человеческого познания. Такая абстракция является законной. Она дает возможность поставить вопрос о закономерностях развития этой науки.

Важнейшим вопросом, относящимся к проблеме закономерностей развития физической науки, является вопрос о роли моделей и аналогий в ее развитии. Историческое развитие физики показывает, что метод аналогий и метод моделей применяются довольно широко. При помощи этих методов был сделан ряд открытий первостепенного значения, целые разделы физики возникали с их использованием. Вполне естественно считать метод аналогий одним из проявлений объективных законов развития физической науки.

О взглядах на роль метода аналогий и моделей см., например, [1—4]. Один из основоположников естествознания Галилей широко применял метод аналогий. Так, выступая в защиту системы Коперника, он пользовался аналогией между поверхностью Луны и поверхностью Земли, аналогией между системой Земля — Луна, системой Юпитер — его спутники и т. д. ([5], стр. 247).

В развитии учения о тяготении существенную роль сыграла аналогия, существующая между силой тяготения и световым потоком, излучаемым светящейся точкой. Эта аналогия заключается в том, что сила тяготения и интенсивность светового потока в данной точке обратно пропорциональны расстоянию от этой точки до источника силы или до светящейся точки. Аналогия эта угадывалась гораздо раньше, чем Ньютон установил закон всемирного тяготения. Еще в средние века широко бытовала гипотеза о существовании аналогии между действиями, исходящими из небесных светил, и светом ([6], стр. 293). Этой аналогией

руководствовался Кеплер, хотя он и не сумел прийти к правильному выводу. На основе этой аналогии Буллиальд в 1645 г. ранее Ньютона высказал мысль, что сила тяготения с увеличением расстояния должна уменьшаться подобно интенсивности света, т. е. обратно пропорционально квадрату расстояния ([7], стр. 189). Такого рода идеи в какой-то мере присущи и модели взаимодействия элементарных частиц посредством испускания и поглощения виртуальных частиц.

Хорошо известно, какую важную роль в развитии теории электричества играла аналогия между полем тяготения и постоянным электрическим полем. Теория потенциала, развитая первоначально для тяготения, была затем использована в теории электричества.

Также большую роль в истории физики играла аналогия между световыми волнами и волнами, распространяющимися в упругой среде. Теория сплошных сред начала развиваться по-настоящему вместе с развитием волновой теории света, теории эфира и решением задачи распространения в нем упругих колебаний.

Широко методом аналогии пользовался Ампер. Из опыта Эрстеда известно, что магнитная стрелка устанавливается перпендикулярно току. В магнитном поле Земли стрелка устанавливается перпендикулярно параллелям. Отсюда по аналогии следует, что в Земле протекают круговые токи от Востока к Западу с учетом соотношения направлений тока и магнитной стрелки в опыте Эрстеда. Следовательно, причиной существования магнитного поля являются «земные круговые токи». А отсюда по аналогии Ампер пришел к идее о молекулярных токах, создающих магнитное поле постоянных магнитов. Владея гипотезой о молекулярных токах, позволяющих рассматривать каждую молекулу как маленький магнит, Ампер решил воспроизвести эти невидимые микроскопические молекулярные токи в макроскопических масштабах в форме круговых, а затем и прямолинейных токов.

В современной физике так же, как и в классической, широко используется метод аналогии. Как известно, большую роль в открытии современной квантовой механики сыграла аналогия, существующая между механическими и оптическими явлениями, открытая еще Гамильтоном и использованная де-Бройлем и Шредингером. Эйнштейн развил общую теорию относительности исходя из принципа эквивалентности, но принцип эквивалентности представляет собой аналогию между силами тяготения и силами инерции в ускоренно движущейся системе отсчета.

Для современной физики характерно применение так называемой структурной аналогии ([8], стр. 60, 368). Сущность структурной аналогии заключается в том, что новые теории сохраняют структуру старых. Существенно изменяется конкретное содержание элементов структуры, но элементы структуры новой теории соотносятся между собой, как и элементы структуры старой теории. Такая аналогия служит определенным указанием при построении новой теории, которая требует, сохранив структуру существующей теории, изменить содержание элементов этой структуры так, чтобы получить лучшее согласие с экспериментом. По существу так именно развилась матричная форма квантовой механики. Гейзенберг заменил в теории Бора соответственно уравнения движения Ньютона матричными «уравнениями движения», а квантовые условия — перестановочными соотношениями [9].

В квантовой теории поля (например, в квантовой электродинамике) классические уравнения поля по своей форме сохраняются, но функции поля рассматриваются как эрмитовы операторы, удовлетворяющие соответствующим перестановочным соотношениям (см., например, [10], стр. 11).

Метод аналогий применяется в физике не только в разработке каких-либо конкретных теорий или частных вопросов, но и в формировании общих физических представлений, общих физических концепций.

Известно, что физика XVIII в. строилась на представлении о существовании так называемых невесомых. Предполагалось существование материи тепла — теплорода, световой материи, электрической и магнитной материи и т. д. Такой взгляд был вызван тем обстоятельством, что в случаях, когда не происходит переходов одной формы энергии в другие, между энергией и веществом существует аналогия. Так, при тепловых явлениях, когда нет превращения теплоты в работу, между тепловой энергией и веществом наблюдается аналогия, заключающаяся в том, что как общее количество вещества, так и общее количество теплоты при всевозможных процессах остаются неизменными. Перенесение этой аналогии на всевозможные формы энергии и привело к идее существования невесомых материй ([1], стр. 330).

В развитии и формировании общих картин мира, таких, как механическая или электромагнитная, также важную роль играли умозаключения по аналогии. Законы механического движения были изучены прежде всех других законов природы. Применение этих законов было огромным успехом в развитии познания, в развитии науки. Применение этих законов дало возможность объяснить многие ранее непонятные явления, с их помощью удалось объяснить движения небесных тел, построить количественную теорию вселенной. Естественно, что подобного рода успехи привели к мысли распространить законы и принципы механики на все явления природы. Возникла идея о том, что познание механических форм движения в различных процессах дает возможность полного познания этих форм движения. Так возникла механическая картина мира, которая долгое время господствовала в науке.

Почему же метод аналогий приводит к положительным результатам в развитии науки? На этот вопрос ученые и философы различных направлений дают разные ответы.

Например, представители позитивистской философии, не признававшие за познанием объективного характера, объяснение эвристического значения метода аналогии в науке видели в так называемом принципе экономии мышления, которому, по их мнению, следует человеческое познание ([2], стр. 232).

Материалисты, стоящие на механистических позициях, объясняли эвристическое значение аналогии единством мира, причем это единство заключалось для них в том, что все законы природы в конечном счете сводятся к механическим. Аналогия сводилась ими к тождеству.

Диалектический материализм также признает единство мира. Однако для него единство мира заключается прежде всего в материальности. Это во-первых, а во-вторых, это единство означает единство во многообразии.

Это единство проявляется во многом. Например, в том, что между всеми вещами и явлениями природы, несмотря на их бесконечное качественное разнообразие, существуют количественные связи, которые подчиняются соотношениям, устанавливаемым математикой.

Возникновение и развитие кибернетики также обусловлено этой причиной. Кибернетика устанавливает общие закономерности, присутствующие и механическим конструкциям, и электрическим цепям, и биологическим объектам, включая сюда и человеческий организм. И это несмотря на коренные различия между всеми этими объектами.

На поразительную аналогичность дифференциальных уравнений

физики, как выражение единства во многообразии физических явлений, указывал В. И. Ленин ([12], стр. 276).

Вот это единство во многообразии и является объективным обстоятельством, дающим возможность широко использовать метод аналогий в науке. Так как единство во многообразии является общим положением для всей природы, то и метод аналогий должен рассматриваться как одна из закономерностей развития науки, в частности физики.

Часто использование метода аналогий приводит к построению мысленных моделей исследуемых явлений. Если между исследуемым объектом или совокупностью явлений или процессов, с одной стороны, и известными уже объектами, группами явлений или процессов, с другой — существует частичное сходство, т. е. аналогия, то второй объект, группа явлений, процессов может рассматриваться как модель первого объекта, совокупности явлений или процессов.

В качестве примера можно привести использование мысленных моделей для электромагнитных или тепловых процессов в классической физике.

В XVIII в. на основе аналогии между теплотой и веществом для объяснения тепловых явлений была использована модель тепла: некое невесомое вещество — теплород. В этот же период для электрических и магнитных явлений на основе той же самой аналогии использовалась модель для этих явлений, в основе которой лежало представление о существовании электрической и магнитной жидкостей.

После установления закона сохранения и превращения энергии модели, в основе которых лежали представления о невесомых жидкостях, были оставлены. Для тепловых явлений была построена модель, основанная на молекулярно-кинетических представлениях. В основу же электромагнитных явлений были положены многочисленные модели электромагнитного поля, основанные на аналогии между этим полем и полем скоростей жидкости в различных вариантах.

В XX столетии большое значение в развитии физики играла модель атома, сначала модель Бора. В современной квантовой механике также в некоторых случаях используется модель атома, как системы, состоящей из ядра, окруженного электронным облаком.

В отличие от метода аналогий, методу моделей в истории физики различными учеными и философами давалась различная оценка.

Многие материалисты XIX в. переоценивали значение метода моделей в развитии науки вообще, в частности физики.

Наиболее крайнюю позицию в этом отношении занимал, как известно, В. Томсон, который связывал успехи той или иной теории определенной группы явлений с возможностью построения для этой группы явлений модели, в то время естественно механической. Он писал: «Мне кажется, что истинный смысл вопроса — понимаем мы или не понимаем физическое явление, сводится к следующему: можем ли мы построить соответствующую механическую модель. Я остаюсь неудовлетворенным, пока я не построю такой модели; если смогу ее сделать, я пойму; в противном случае, я не понимаю» ([13], стр. 131, 270).

В противоположность этому направлению к концу XIX в. развилось другое, сводившее роль моделей в развитии физики почти к нулю. Оно опиралось на концепцию, согласно которой метод физической науки должен сводиться к установлению количественных соотношений между измеряемыми величинами, т. е. на положение позитивистской философии.

Дюгем, например, по существу отрицал какое-либо эвристическое значение метода моделей. Он пытался доказать ([6], стр. 116), что

использование метода моделей Максвеллом при выводе им уравнений электромагнитного поля не играло никакой положительной роли. В общем виде Дюгем так оценил метод моделей в развитии физики: «Признаем без оценок, что пользование механическими моделями могло привести некоторых физиков на путь открытий и может еще привести к новым открытиям. Одно несомненно: вклад, внесенный ими в развитие физики, далеко не так велик, как нас в этом хотят уверить. Если сравнить его со вкладом абстрактных теорий, он окажется весьма скудным» ([6], стр. 117).

Мы видим и иное отношение к методу моделей в истории физики.

Фарадей, использовавший модельные представления о силовых линиях в теории электромагнитных явлений, не придавал им абсолютного значения. Он подчеркивал, что эти силовые линии каждый может представить, как он хочет, что представление о них будет с развитием науки изменяться ([14], стр. 257).

Максвелл, положивший в основу своего вывода уравнений электромагнитного поля метод моделей, также не придавал этим моделям абсолютного значения. Используя модели для первоначального вывода уравнений электромагнитного поля, он затем больше к ним не возвращался, рассматривая их как леса при постройке здания.

Больцман, который широко пользовался модельными представлениями в своих работах по кинетической теории материи, также со временем перестал придавать им абсолютное значение. Так, первый параграф своих «Лекций по теории газов» он назвал «Механическая аналогия для свойств газов», толкуя представления о структуре газов, которыми пользуется кинетическая теория, лишь как модель действительной их структуры ([15], стр. 76).

Таким образом, развилось также мнение, что моделям, используемым в физике, нельзя придавать абсолютного значения, их следует рассматривать, как нечто преходящее, изменяющееся в процессе развития науки.

Развитие теории относительности и особенно квантовой механики поставило по новому вопрос о методе моделей в физической науке.

На модели начали смотреть как на приближенные образы действительности, изменяющиеся и уточняющиеся в процессе развития науки; однако в квантовой механике даже такого приближенного, но единого образа микрообъекта оказалось построить невозможно.

Здесь физика впервые встретилась с такими объектами, которые в рамках существующей теории невозможно наглядно интерпретировать как нечто целое и единое.

Такое положение вновь воскресило теории, отвергающие какую бы то ни было серьезную роль метода моделей в развитии физики. Согласно этим высказываниям объекты микромира не допускают вообще каких-либо наглядных представлений, а следовательно, отрицается роль моделей в их исследовании [16—18].

Однако возникновение и развитие квантовой механики протекало при довольно широком использовании метода моделей.

Действительно, де-Бройль ([19], стр. 641) и Шредингер ([19], стр. 678) с самого начала при построении так называемого волнового варианта квантовой механики пользовались моделью частицы в виде волны, волнового пакета, размазанного заряда вокруг ядра и т. д. Гейзенберг, хотя и заявил в первой работе [9], послужившей началом развития так называемой матричной механики, что в атомной механике нужно отбросить старые наглядные представления, фактически использовал в этой же работе модель атома, как совокупности виртуальных

осцилляторов, принятую к тому времени в квантовой теории дисперсии [20].

И в дальнейшем в квантовой механике, а также в теории элементарных частиц, при всей ненаглядности этих теорий, широко использовался метод моделей (модель атома как ядра, окутанного электронным облаком, модель ядра наподобие капли, модель вакуума как резервуара частиц, модель взаимодействия элементарных частиц через обмен виртуальными частицами и т. д.).

Эйнштейн дал объяснение фотоэффекта, исходя из модели, основанной на аналогии света с частицами [21]. В современной физике наметилась тенденция вводить модели пространства-времени как физического объекта (кривое пространство, закрученное, прерывное, конечное и бесконечное) [22—26].

Модель твердого тела в форме пространственной кристаллической решетки находит подтверждение в экспериментах по дифракции рентгеновских лучей и электронов. При изучении колебаний кристаллической решетки применяется понятие фонона, возникшее по аналогии с понятием фотона. Можно говорить о газе фононов, о газе фотонов и применять к ним соответствующие статистики, т. е. классическая модель идеального газа в преобразованном виде применяется в теории твердого тела, в квантовой теории света. В теории электропроводности полупроводников и вообще твердого тела применяются такие модельные представления, как экситоны и поляроны и т. д.

Современная физика также продолжает пользоваться методом моделей. Правда, модели современной физики отличаются от моделей классической. Если в классической физике можно было построить одну модель для какого-либо объекта (хотя и не совершенную, но все-таки одну), которая охватывала все основные свойства объекта, то в современной теории микроявлений такой единой модели построить нельзя. Действительно, для одних целей электрон или поток электронов можно мыслить себе как поток частиц, подобных шарикам, заряженным и обладающим магнитным моментом. В другом случае поток электронов можно представить себе как распространяющиеся в пространстве волны. Эти два представления несовместимы друг с другом, но и то и другое представляют электрон в определенных условиях достаточно хорошо.

В современной физике широко применяются модели, и это не отрицают даже позитивисты, вернее неопозитивисты. Исходя из своей философии, они не признают модель как форму отражения и воспроизведения действительности ([27], стр. 85), сводя ее или к интерпретации (в смысле семантики) [28], или к математической гипотезе ([29], стр. 198).

Таким образом, модели применяются как в классической, так и в современной физике\*.

Как мы уже подчеркивали, между различными явлениями природы, между различными формами движения есть общее. Это общее дает возможность пользоваться методом аналогий в науке, который в ряде случаев принимает конкретную форму метода моделей.

Модель наглядно иллюстрирует с помощью макроскопических образов такие стороны исследуемого объекта, которые недоступны непосредственному зрительному восприятию.

Но поскольку модель в логическом отношении опирается на аналогию, то она дает повод переносить известные свойства и отношения

\* Следует заметить и то, что если классические модели обычно вводили некоторые гипотетические субстанции, то модели современной физики обычно избегают их. Можно было бы указать и другие различия между классическими и современными моделями.

с относительно изученного объекта на исследуемый объект и искать их в нем экспериментально.

Если экспериментальные поиски увенчаются успехом, т. е. переносимые свойства и отношения (в более или менее преобразованной форме) будут обнаружены в исследуемом объекте, то модель выступает как физическая гипотеза, нашедшая экспериментальное подтверждение (более или менее полное). В этом случае модель, сочетая в себе чувственное и логическое, которые взаимно дополняют и обогащают друг друга в ней ([30], стр. 74), активизирует процесс познания и приводит к успеху, и ей принадлежит положительная роль в развитии науки.

Такую роль сыграли модели, употребляемые Максвеллом для построения теории электромагнитного поля. Механическая модель Максвелла не давала, конечно, адекватного образа электромагнитного поля, ибо, как выяснилось позже, последовательную механическую модель этого поля построить нельзя. Однако из его модели следовало существование тока смещения. Нужно прямо сказать, что вряд ли в то время можно было бы построить электродинамику близкого действия чисто формально. Больше того, нужно подчеркнуть, что использование модели Максвеллом натолкнуло его на правильную мысль о токе смещения, его величине и дало возможность построить количественную теорию электромагнитного поля.

Такую же роль сыграли многие модели, употребляемые в современной физике, несмотря на то, что между моделью и оригиналом — микрообъектом существует гораздо больший разрыв, нежели это было в классической физике, в частности в электродинамике.

Конечно, не все модели, применяемые в физике, сыграли положительную роль. Например, попытка Дж. Дж. Томсона представить наглядно квант света как кольцо из электрической силовой линии, не дала каких-либо положительных результатов ([31], стр. 129).

Более того, такого рода модели могут даже тормозить развитие науки, особенно тогда, когда исследователи предаются забвению ограниченность аналогий, на которые они опираются, и превращают аналогии в тождества.

В заключение отметим, что аналогия, выражая общее, сходное в явлениях, подчеркивает при этом и различие между ними. Поэтому применение аналогий в физике, если иметь в виду их ограниченность, отнюдь не препятствует возникновению новых представлений, новых понятий, новых теорий, отражающих то, в чем новая область явлений качественно отличается от относительно исследованных областей явлений. В этом случае аналогия сама устанавливает те границы, в которых их применение является полезным. Если физические представления и теории рассматривать в процессе их развития, то аналогия есть связующее звено между ними.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Максвелл Д. К. Избр. соч. по теории электромагнитного поля. ГИТТЛ, М., 1954, стр. 12.
2. Мах Э. Познание и заблуждение. Издание С. Скримунта, М., 1909, стр. 225—238.
3. Arber A. The analogy in the history of Science. In studies and essays offered to G. Sarton. N. Y., 1947, pp. 219, 233.
4. Полак Л. С. Вариационные принципы механики, их развитие и применение в физике. Физматгиз, М., 1960, стр. 367—370.
5. Галилей Г. Диалог о двух главнейших системах мира, птоломеевой и коперниковой. ОГИЗ, М. — Л., 1948.
6. Дюгем П. Физическая теория. Ее цель и строение. Книгоиздательство «Образование», СПб, 1910.