

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУКФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

530.001.572

ПОСТРОЕНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ *)*Р. Пайерлс*

Физики стремятся использовать различного рода модели в качестве подспорья в решении достаточно сложных физических проблем. В зависимости от целей использования модели могут различаться по степени как упрощений, так и чрезмерных усложнений. Высказано предположение о возможности обособленного рассмотрения семи различных типов моделей. Содержание каждого из них раскрывается на примерах, причем одновременно рассмотрены и примеры негативного плана, которые характеризуют случаи неправильного понимания существа привлекаемой модели.

При чтении любых современных работ по физике или прислушиваясь к разговорам между физиками почти неизбежно вы натолкнетесь на упоминание слова модель. Распространенность этого обычая строить модели проиллюстрирована в табл. I. В ней перечислено некоторое число моделей, известных благодаря своему использованию в различных областях физики. Многие из них так и называют моделями, однако табл. I содержит также и такие примеры, к которым неприменимо это слово в обычном его понимании. Эти последние, однако, настолько близки по своей природе к признанным моделям, что включение их в таблицу представляется вполне логичным.

Стоит более подробно раскрыть сущность и цели использования таких моделей. Мы увидим, что разные модели служат совершенно различным целям и соответственно с этим меняется их природа. Чтобы отчетливее подчеркнуть данные различия, собранные в таблице модели были разбиты на ряд типов, которые будут определены и проанализированы ниже. Для более ясного понимания смысла проведенной типизации мы обсудим несколько характерных примеров моделей каждого типа. Представляет также интерес остановиться на противоречиях, которые могут возникнуть в том случае, если модель одного типа ошибочно отнесена к другому, или в более общем плане, если на присущие этой модели ограничения закрывают глаза.

*) Peierls R. Model-Making in Physics. — Contemp. Phys., January/February 1980, v. 21, pp. 3—17. — Перевод А. А. Радцига.

Сэр Р. Э. Пайерлс — английский физик-теоретик, член Королевского общества (1945). Основные работы посвящены теории твердого тела, магнетизму, квантовой электродинамике и ядерной физике. Профессор Бирмингемского университета (1937—1963 гг.) и Оксфордского университета (1963—1974 гг.). В настоящее время сотрудник лаборатории ядерной физики Оксфордского университета. Статья написана по материалам лекции, прочитанной в Оксфорде 4 мая 1979 г. на мемориале Чёрвелла и Саймона.

Таблица

Примеры известных моделей, используемых в разных областях физики

Астрономия и космология	
Птолемей (эпициклы)	
Коперник/Кеплер	
Модели Вселенной: Эйнштейн, де Ситтер, Фридман	
Модель Непрерывной эволюции мира против модели Большого взрыва	
Макроскопическая физика	
Линейный отклик (законы Ома, Ньютона, Гука, Фурье)	
Эфир Максвелла	
Цикл Карно	
Атомы, молекулы, химия	
Флогистон	Оболочечная модель
Гипотеза атомизма	Приближение Хартри—Фока
Модель атома Дж. Дж. Томсона	Приближение Борна
Модель атома Резерфорда	Модель электролита Дебая—Хюккеля
Боровская модель атома водорода	γ -микроскоп Гейзенберга
Боровская модель многоэлектронных атомов	Модель Гайтлера—Лондона
	Эйнштейн—Подольский—Розен
Кинетическая теория	
Идеальный газ	Демон Максвелла
Ван-дер-Ваальс	Конденсация идеального бозе-газа
Средний свободный пробег	Модель решеточного газа
Твердое тело	
Модель Эйнштейна	Вигнеровская модель электронного газа
Модель Дебая	Модель желе
Модель Борна—фон Кармана	Модель ячеистого потенциала (muffin-tin model)
Дебаевская модель фонового рассеяния	Лондоновская модель сверхпроводника
Клаузиус—Моссотти	Модель спаривания (БКШ)
Блоховский электрон	
Магнетизм	
Модель ферромагнетика Вейсса	Модель «X—Y»
Модель антиферромагнетика Нееля	Модель Гейзенберга
Модель Изинга	Модель Стонера
Ядерная физика	
Гейзенберговская модель ядерных сил	Модель спаривания
Сила Майораны	Оптическая модель
Оболочечная модель	Приближение Борна
Метод Хартри-Фока	Борновское приближение искаженной волны
Модель составного ядра	Модель прямого взаимодействия
Модель жидкой капли	Модели гигантского (дипольного) резонанса
Модель ферми-газа	Гольдхабера—Теллера/Йенсена—Стейнфеделя/Брауна—Больстерли
Модель Нильсона	Модель файрбола
Кластерная модель	
α -частичная модель	
Элементарные частицы	
Кварковая модель	Партонная модель
Модель Венециано	Модель мешка
Реджеонная модель	

Конечно, само определение категорий и отнесение к ним конкретных моделей весьма субъективно, и многие читатели могут предпочесть другой выбор типов моделей или поставить под сомнение мой порядок отнесения к ним рассмотренных примеров. Однако мало найдется тех, кто будет несогласен с широтой охвата представленного здесь материала.

ТИП 1: ГИПОТЕЗА (ТАКОЕ МОГЛО БЫ БЫТЬ)

Первый из упомянутых типов в действительности не является моделью чего-то в прямом смысле этого слова. Его включение сюда объясняется тем обстоятельством, что такие гипотезы часто называют моделями. Вообще говоря, они представляют собой пробное описание явления, причем его автор либо верит в его возможность, либо считает даже его истинным.

Тип 1: Г и п о т е з а (Такое могло бы быть)

Птолемей (эпициклы) (тип 2?)

Коперник/Кеплер

Модели Вселенной: Эйнштейн, де Ситтер, Фридман

Модель Непрерывной эволюции мира в противовес модели Большого взрыва

Эфир Максвелла (тип 2?)

Модель атома Дж. Дж. Томсона

Модель атома Резерфорда

Боровская модель атома водорода

Модель ядерных сил Майораны

Весьма почтенными по возрасту примерами такого рода являются модели Вселенной Аристотеля и Птолемея, от которых позже отказались, и усовершенствованная Кеплером модель Коперника, которую и сейчас мы считаем достаточно точной.

Приход эры релятивизма расширил эту проблему и поставил вопрос о создании модели пространственно-временной структуры Вселенной типа моделей Эйнштейна, де Ситтера и Фридмана. Эти «модели» фактически доходят до утверждений относительно природы Вселенной, которые могут быть или не быть правильными.

Аналогичные слова можно сказать о моделях атома Дж. Дж. Томсона и Резерфорда. Обе они представляли собой гипотезы строения атома. По Томсону положительный заряд был распределен по всему объему атома и электроны (кстати, открытые именно им) находились в нем подобно изюминкам в пироге. Такое предположение могло бы быть истинным, но таковым не оказалось. На основе своих экспериментов по рассеянию α -частиц Резерфорд пришел к заключению, что в атоме имеется ядро, содержащее положительный заряд, вокруг которого вращаются электроны и это представление отвечает нашему сегодняшнему взгляду на атом, хотя оно и было уточнено в рамках квантовой механики.

Термин «боровская модель» иногда используется для обозначения подхода Нильса Бора к описанию атома водорода, которое является более количественным вариантом модели Резерфорда. Эта модель включает в себя квантовые условия отбора возможных орбит движения электронов и правила определения частот переходов при излучении и поглощении света. Рассматриваемая «модель» все же относится к типу 1, и мы продолжим считать ее правильной с учетом уточнений, которые принесла с собой квантовая механика.

Некоторые, однако, в таком же ключе говорят о боровской модели атомов с числом электронов больше одного. И действительно, Н. Бор много сделал для объяснения структуры таких атомов и характера заполнения электронных оболочек элементов в периодической таблице Менделеева, но здесь мы сталкиваемся с моделью другого типа, к рассмотрению которой еще вернемся ниже.

Другими примерами моделей типа 1 являются конкурирующие в космогонии гипотезы о Непрерывной эволюции мира и Большом взрыве, причем вторая из них в настоящее время считается предпочтительной, а также модель Майораны для ядерных сил.

Идея Максвелла об эфире, относившаяся первоначально к разряду гипотез, заняла потом свое место среди феноменологических описаний явления, и мы остановимся на ней подробнее в разделе, посвященном моделям типа 2.

ТИП 2: ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (ВЕДЕМ СЕБЯ ТАК, КАК ЕСЛИ БЫ...)

Весьма часто отмечают, что данное физическое явление могло бы быть объяснено путем привлечения определенного механизма, однако имеющих свидетельств недостаточно, чтобы убедить нас в справедливости такого истолкования. Хотя поиск окончательного ответа на этом пути оказывается незавершенным, само описание явления в терминах некоей модели может быть полезным для объяснения соотношений и формулировки предположений относительно будущих приложений или экспериментов. Ниже представлены примеры моделей типа 2 из нашего общего предметного списка.

Тип 2: Феноменологическая модель (Ведем себя так, как если бы...)

Птолемей (эпициклы)?
Флогистон
Эфир Максвелла (тип 1?)
Атомизм (→ тип 1)
Модель ферромагнетика Вейсса (→ тип 5)
Модель антиферромагнетика Нееля (→ тип 5)
Кварковая модель (→ тип 1?)
Реджеонная модель
Партонная модель

Я оставил в этом перечне моделей эпициклы Аристотеля и Птолемея под вопросом. Хотя они уже нашли себе место среди гипотез, трудно отделиться от удивления по поводу того, действительно ли верили их создатели в существование этих вложенных одна в другую хрустальных сфер или считали их скорее удобным способом описания движения планет.

В приведенной выше табличке нашли себе место атомистические представления, которые на ранних этапах развития науки основывались на признании того, что весовые отношения, с которыми химические элементы входят в соединения, могут быть объяснены путем приписывания атомам характеристических весов. Позднее кинетическая теория продемонстрировала, каким образом уравнения состояния идеального газа и другие соотношения могут быть выведены при учете теплового движения атомов или молекул. На этом этапе, однако, еще не был известен метод определения размера и числа атомов. Все результаты оставались в равной мере справедливыми, если можно было наполовину снизить вес каждого атома и вдвое поднять их число. Можно было даже подумать, что сам переход к пределу бесконечного числа бесконечно малых атомов является закономерным — предельный переход, который бы не испугал чрезмерно современных теоретиков. Трудно понять поэтому, что такие выдающиеся физики, как Эрнст Мах, отказывались принять гипотезу о существовании атомов. И лишь в начале XX века появились точные методы определения абсолютной шкалы атомных весов, т. е. числа Авогадро (хотя некоторые вполне хорошие оценки делались и ранее), причем разные методы давали сравнимые результаты. Это окончательно перевело представление об атомах в категорию моделей типа 1.

Другим характерным примером служит модель ферромагнетизма Пьера Вейсса. Он выдвинул идею о том, что ответственные за намагничивание ферромагнетиков микроскопические магниты (как теперь известно, их роль играют электронные спины атомов) находятся под действием не только наложенного магнитного поля, но также и некоторого «молекулярного поля», пропорционального числу уже ориентированных магнитов, т. е. намагничиванию. Эта простая идея позволила прояснить важную особенность в поведении таких тел, а именно, наличие характерной для каждого ферромагнетика точки Кюри, т. е. температуры, выше которой спонтанное намагничивание непрерывным, хотя и очень резким, образом спадает до нуля.

В более поздних работах удалось показать, что в целом ряде вопросов рассмотренная модель оказалась неадекватной. Так, например, с ее помощью нельзя правильно установить температурную зависимость величины намагничивания как при очень низких температурах, так и вблизи точки Кюри; теория Вейсса также бессильна оценить вклад магнитной составляющей в удельную теплоемкость тела при температурах выше точки Кюри. Причина этого заключается в том, что сила взаимодействия между элементарными магнитами, ориентирующая их в одном направлении, зависит не только от степени намагничивания, но также и от детального распределения ориентированных магнитов. Полная теория ферромагнетизма оказалась весьма сложной и даже на сегодняшний день не может обойтись без приближений и полуэмпирических правил. По этой причине модель Вейсса остается полезной и по сей день, если нам необходимо быстро сориентироваться в вопросах предполагаемого поведения ферромагнетика в незнакомых условиях. Модель антиферромагнетизма Нееля и модель упорядочения слоев Брэгга — Вильямса являются примерами моделей, в точности основанных на том же принципе, что и модель Вейсса.

В процессе формулировки своих уравнений электромагнитного поля Джеймс Клерк Максвелл столкнулся с необходимостью поддержать гипотезу о существовании эфира, т. е. упругой среды с высокой жесткостью, который пронизывает все тела. Это понадобилось ему по той причине, что он не смог избавиться от предвзвешенности, согласно которой любое объяснение физического явления должно исходить из механических представлений. Отсюда он вынужден прибегать к оговоркам в своей наиболее важной работе по теории электромагнитного поля, которые заставляют нас поместить его подход к решению этой проблемы где-то между моделями типа 1 и 2. Прочитав здесь его собственные слова^{9 *}):

«Я имел уже прежде случай попытаться описать особый вид движения и особый вид напряжения, приспособленных для объяснения гипотезы такого рода, и пользуясь такими словами, как электромагнитное количество движения и электрическая упругость в отношении известных явлений индукции токов и поляризации диэлектриков, хочу только направить мысль читателя на механические явления, которые могут помочь ему понять электрические явления. Все подобные выражения в настоящей статье должны рассматриваться как иллюстративные, а не как объясняющие.

Однако говоря об энергии поля, я хочу быть понятым буквально. Всякая энергия есть то же, что механическая энергия, существует ли она в форме обычного движения или в форме упругости, или в какой-нибудь другой форме. Энергия в электромагнитных явлениях — это механическая энергия».

В качестве современного примера можно остановиться на кварковой модели (ср. ³). Как было показано, можно достичь регулярности в схеме

^{*}) Имеется перевод этой части текста из «Динамической теории электромагнитного поля. Часть III — Общие уравнения электромагнитного поля» в книге: Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. Пер. с англ. З. А. Цейтлина. — М.: ГИТТЛ, 1954, — С. 300, 301. (Прим. перев.)

классификации элементарных частиц (как барионов, так и мезонов) с помощью группы симметрии, известной как $SU(3)$. Кроме того, Гелл-Манн и Нееман установили, что любые свойства этой схемы можно вывести, исходя из модели, в которой каждый барион считается состоящим из трех новых частиц (названных Гелл-Манном «кварками»), причем поведение этих частиц и их взаимодействия описываются весьма простыми законами. Первоначально данная схема представляла собой простейшую реализацию свойств, заложенных в группе симметрии $SU(3)$, и в качестве таковой могла быть отнесена к типичным представителям моделей типа 2. Последующее развитие этой модели позволило получить значительно большее число результатов, находящихся в согласии с экспериментом, и в настоящее время вероятно было бы правильно относить кварковую модель к гипотезам типа 1, несмотря на то, что некоторые ее детали (и, в частности, число разновидностей кварков) меняются и в дальнейшем можно ожидать каких-то новых изменений.

ТИП 3: ПРИБЛИЖЕНИЕ (ЧТО-ТО СЧИТАЕМ ИЛИ ОЧЕНЬ МАЛЫМ, ИЛИ ОЧЕНЬ БОЛЬШИМ)

Совсем небольшое число уравнений в физике поддается точному решению, и, как правило, исследователь вынужден либо прибегать к использованию каких-то приближенных методов, либо искать численные решения. Если в рассматриваемой проблеме «задействовано» большое число переменных или кто-то заинтересован в изучении общих свойств возможных решений, то вычислительная работа становится достаточно громоздкой. В этих случаях наиболее естественный способ решения проблемы основан на использовании приближений. В процессе обучения физике мы по всей видимости переоцениваем роль совершенно исключительных проблем, поддающихся точному решению с помощью элементарных функций, и не уделяем достаточного внимания гораздо более общей ситуации, в которой используются различные приближенные методы решения. Начинаящие физики обычно испытывают неудобство при отыскании приближенных решений и даже в ситуации, когда требуется найти только приближенный ответ, часто предпочитают искать точный ответ (если таковой возможен) и из него уже получают искомое приближенное решение. Навряд ли стоит объяснять, почему искусство выбора подходящего приближения, проверки его непротиворечивости (например, отсутствие взаимных сокращений отдельных частей выражений) и отыскания, по крайней мере, интуитивных соображений по поводу удовлетворительности данного приближения является куда более утонченным, чем искусство нахождения строгого решения уравнения.

Т и п 3: П р и б л и ж е н и е (Что-то считаем или очень малым, или очень большим)

Линейный отклик (законы Ома, Ньютона, Гука, Фурье)
Идеальный газ
Оболочечная модель атома
Метод Хартри — Фока для атомов
Модель Борна — фон Кармана
Решетка Вигнера
Борновское приближение для атомов
Борновское приближение искаженной волны для ядер

Один из важных типов проблем, в которых требуется использование приближений, можно охарактеризовать термином «линейный отклик». Его применяют к ситуациям, в которых по определению ищется отклик системы на воздействие некоторого параметра в предельном случае, когда этот параметр может рассматриваться как бесконечно малый. В качестве характерного примера отметим закон Ома. Мы определяем сопротивление

всей цепи или ее части через отношение падения напряжения к току в пределе бесконечно малого падения напряжения. Мы уже достаточно привыкли к цепям, содержащим металлические проводники, и как раз в металлах трудно создать столь сильные перепады напряжения, чтобы наблюдались заметные отклонения от линейного закона. Из сказанного легко понять, почему многие привыкают считать закон Ома в качестве закона природы, а не обычного приближения. Поучительно поэтому представить себе те эффекты, которыми пренебрегли при формулировке линейного закона, и оценить их величину в некоторых практически интересных случаях. Так, например, отличающаяся ситуация имеет место в полупроводниках, и здесь легко можно выйти за пределы применимости закона Ома. Чтобы обеспечить линейный режим в диэлектриках, необходимо прибегнуть к специальным ухищрениям.

Весьма похожи в принципе между собой и другие случаи реализации условий «линейного отклика» системы на приложенное возмущение, такие, как закон Гука в теории упругости, ньютоновский закон охлаждения, или закон Фурье в теории теплопроводности, однако во всех этих случаях исследователь весьма часто наталкивается на довольно существенные отклонения от линейного закона изменения величин. Так происходит, в частности, с измерениями упругих констант или коэффициентов теплопроводности, которые требуют принятия специальных мер, таких, как экстраполяция к исчезающе малым значениям напряжений или градиентов. Важно отдавать себе отчет в том, что нас могут интересовать значения коэффициентов линейного отклика даже и в том случае, когда легко можно обнаружить с помощью эмпирического подхода и/или теории наличие более строгих законов изменения искомых величин. Так, например, вопрос об устойчивости системы зависит от знака коэффициентов ее линейного отклика на воздействие различных внешних возмущений.

Имеется, однако, и много примеров моделей другого типа, в которых мы считаем какую-либо величину малой, но вовсе не в наших силах сделать ее бесконечно малой. В качестве примера здесь можно остановиться на оболочечной модели, нашедшей весьма широкое применение в атомной физике. В рамках этой модели мы рассматриваем движение электронов в некотором усредненном потенциальном поле и считаем малыми отклонения потенциала от среднего и вызванные ими эффекты корреляции между движением разных электронов. Анализ движения электронов в усредненном поле и определение потенциала такого поля выполняются численными методами. На этой стадии исследования многие из атомных уровней энергии будут еще вырожденными, поскольку в расчет не бралась зависимость энергии атома от относительного направления орбитальных и спиновых моментов различных электронов. Важно, поэтому, провести учет этих оставшихся эффектов в рамках теории возмущений, чтобы получить ясную картину распределения энергетических уровней и свойств атомных состояний. Часто бывает достаточным остановиться уже на первом по порядку приближении теории, т. е. включить в рассмотрение линейные по неучтенным взаимодействиям члены, но в некоторых ситуациях приходится идти дальше и оценивать последующие члены разложения. В любом случае необходимо иметь четкое представление о физическом смысле отброшенных членов более высокого порядка малости, чтобы с уверенностью судить о том, в каких ситуациях они могут оказаться важными для рассматриваемой задачи.

При анализе проблем, подобных упомянутой выше, обычно не удается дать строгое доказательство того, что выбранное приближение является адекватным, или, если быть более точным, установить пределы изменения погрешности вычислений, обусловленной отбрасыванием членов более

высокого порядка малости. В таких ситуациях на помощь приходят здравый смысл и накопленный опыт работы: квалифицированный физик обычно знает, где его подстерегают принципиальные ошибки, и потому может оценить предполагаемые здесь эффекты.

Тот, кто плохо знаком со способом мышления физиков, может подумать, что нужда в таких интуитивных суждениях о недоказанных строго приближениях делает весь этот подход неудовлетворительным. Следует однако напомнить, что уже с самого начала при формулировке физической проблемы исследователь вынужден прибегать к такого рода умозаключениям. Никакой эксперимент нельзя в точности повторить из-за огромного числа внешних факторов, меняющихся день ото дня и от места к месту, причем эти изменения могут *случайно* повлиять на ситуацию. На практике приходится брать под контроль слишком много различных факторов, начиная от погоды, состояния магнитного поля Земли, уровня приливных (отливных) вод или всплесков солнечной активности и кончая возрастом и настроением экспериментатора. При нормальной работе физиков всеми или большей частью отмеченных вариаций параметров можно пренебречь. Исследование роли любого из них часто оказывается нам под силу, и в результате мы можем убедиться в справедливости сделанных пренебрежений, хотя конечно же можем придумать и такие эксперименты, на результатах которых любой из этих малых эффектов скажется в самой решающей степени. Доказательство того, что всеми возможными вариациями параметров можно пренебречь, наталкивается на слишком большие технические трудности и потому вряд ли возможно, а в случае, когда само исследуемое явление еще плохо изучено, и вовсе безнадежно. Другими словами, физик пользуется такого рода интуитивными суждениями даже и до того момента, как проблема оказывается сформулированной.

В качестве еще одного примера остановимся на модели идеального газа. Мы подразумеваем под ним газ, в котором отсутствуют столкновения между молекулами и потому они двигаются полностью независимо одна от другой. По мере уменьшения давления любой реальный газ все в большей степени стремится к пределу, установленному идеальным газом. В результате этого появляется возможность экспериментирования со столь разреженным газом, в котором можно пренебречь отклонениями от законов идеального газа. Такой газ можно использовать, например, в газовом термометре и установить достаточно точную шкалу абсолютных температур. Если использовать рассматриваемое приближение именно таким способом, то оно ничем не отличается от ранее отмеченных приближений линейного отклика. Однако и при значительно более высоких плотностях газа весьма полезно наглядно представлять себе значительно более простую ситуацию с идеальным газом. Для целей количественного описания поведения такого газа можно подкорректировать результаты, учтя столкновения между отдельными частицами. При этом мы не выйдем за рамки использования обычной модели типа 3. Однако довольно часто этими поправками можно пренебречь, когда речь заходит о быстрой ориентировке в вопросах возможного поведения исследуемого газа, и тогда фактически используемое приближение следует отнести к моделям типа 4.

ТИП 4: УПРОЩЕНИЕ (ОПУСТИМ ДЛЯ ЯСНОСТИ НЕКОТОРЫЕ ДЕТАЛИ)

Многие проблемы, с которыми сталкиваются физики, выглядят на первый взгляд настолько сложными, что в итоге всегда имеется возможность оказаться в положении человека, «не видящего из-за леса дерева». Большую роль в преодолении такой ситуации может сыграть использова-

ние упрощенной модели, в которой опущены некоторые усложняющие детали.

Тип 4: У п р о щ е н и е (Опустим для ясности некоторые детали)

Модель Клаузиуса — Моссотти
 Ван-дер-Ваальс
 Дебаевская модель удельной теплоемкости
 Модель электролита Дебая — Хюккеля
 Модель Гайтлера — Лондона
 Блоховский электрон
 Оболочечная модель ядра
 Модель Нильсона
 Модель составного ядра
 Оптическая модель
 Борновское приближение для ядер
 Модель прямого взаимодействия
 Модель гигантского резонанса Брауна — Больстерли
 Модель фэйрбола

В качестве примера рассмотрим подход Дебая к определению удельной теплоемкости твердых тел. П. Дебай, который был большим мастером по части конструктивной разработки и использования моделей, в свое время заинтересовался тепловыми колебаниями кристаллической решетки. В большинстве практически интересных случаев можно рассматривать колебания решетки как гармонические (это типичное приближение типа 3) и описывать их с помощью понятия об упругой волне, характеризующейся длиной волны, направлением распространения и поляризацией. Эти колебания представляют собой акустические волны в случае, когда их длина волны превышает характерный размер решетки, причем их частота линейным образом связана с волновым числом, а коэффициент пропорциональности совпадает со скоростью звука.

Для определения теплоемкости кристаллической решетки необходимо знать частотный спектр колебаний, т. е. число нормальных колебаний (мод), приходящихся на любой интервал частот. Легко показать, что плотность мод для акустической ветви колебаний пропорциональна квадрату частоты с коэффициентом пропорциональности, зависящим от скорости звука. (Поскольку скорость звука зависит от направления распространения волны и ее поляризации, то приходится вводить в рассмотрение эффективную скорость звука, определяемую путем усреднения величины обратного куба скорости звука по направлениям и поляризации. Ее нахождение опирается на знание упругих констант кристалла.) Частотный спектр колебаний для более коротких длин волн зависит от деталей проявления динамических свойств кристаллической решетки. Однако мы знаем полное число мод, т. е. интеграл от функции плотности мод по спектру частот, которое должно быть равно числу степеней свободы или, что то же самое, утроенному числу атомов.

Дебаевская модель опирается на предположение о том, что функция плотности мод остается пропорциональной ω^2 для всех частот ω , меньших некоторого максимального значения. Это значение выбирается из условия правильности определения полного числа нормальных колебаний решетки. На рис. 1 проиллюстрирован дебаевский спектр колебаний. Если известно значение эффективной скорости звука, то указанный спектр не содержит произвольного параметра. В силу того, что эта величина скорости не определялась тогда точно, П. Дебай рассматривал ее (или, что эквивалентно, максимум частоты) в качестве свободного параметра.

Уже из способа построения данной модели становится ясно, что она должна правильно описывать поведение кристалла при очень низких температурах, когда возбуждаются только низкочастотные колебания, и вы-

соких температурах, где можно пренебречь квантовыми эффектами и классический закон равнораспределения энергии по внутренним степеням свободы колеблющегося атома приводит к закону Дюлонга и Пти (при

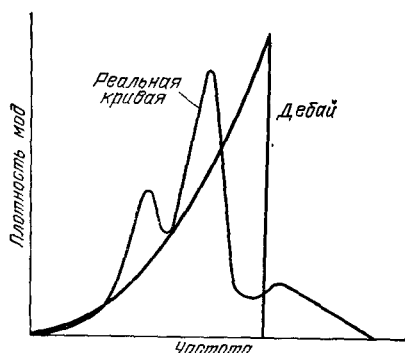


Рис. 1. Частотные зависимости спектра колебаний кристаллической решетки, отвечающие модели Дебая и реалистическому расчету ⁸.

правильном, конечно, выборе числа степеней свободы). Поэтому дебаевская модель обеспечивает только качественную интерполяционную формулу в области средних температур. Нельзя ожидать, что полученные

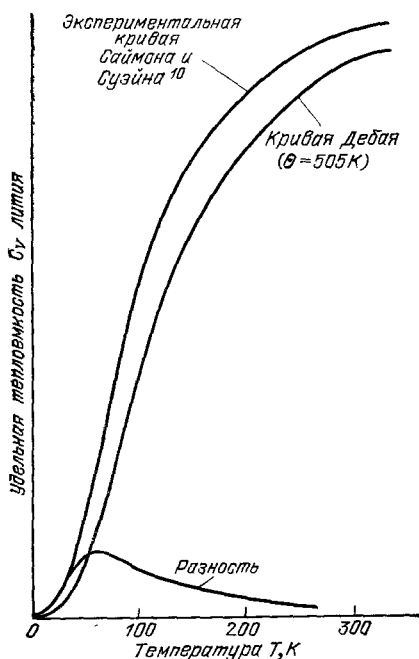


Рис. 2. Удельная теплоемкость лития согласно измерениям Саймона и Суэйна ¹⁹ и расчету этих же авторов в рамках дебаевской модели.

На рисунке построена также кривая разности двух отмеченных теплоемкостей.

поскольку они привыкли считать дебаевский закон весьма надежным. На рис. 2 представлены экспериментальные данные Саймона и Суэйна ¹⁰ для удельной теплоемкости C_v лития. Там же построена дебаевская зависимость для характеристической температуры

в рамках этой модели результаты окажутся точными во всем интервале температур, так как они соответствуют нереалистическому спектру собственных частот колебаний решетки. На рис. 1 воспроизведена также реалистическая кривая частотной зависимости плотности мод для кристалла NaCl, рассчитанная Келлерманом ⁸ с помощью модели Борна — фон Кармана (последняя относится к моделям типа 3).

В течение продолжительного времени считалось, что дебаевский закон изменения теплоемкости твердого тела является значительно более точным, чем можно себе представить. Это объяснялось во многом тем, что существовало совсем немного точных измерений теплоемкости при низких температурах и, кроме того, максимальное значение частоты (или, что эквивалентно, дебаевская температура) рассматривалось в качестве варьируемого параметра, что позволяло разумно аппроксимировать искомую функцию теплоемкости в области средних температур.

Когда были выполнены более точные измерения теплоемкости при низких температурах (например, в работах Ф. Саймона), их результаты оказались сюрпризом для многих исследователей,

$\Theta = 505 \text{ K}$, рассчитанная в работе ¹⁰, и кривая разности двух отмеченных функций. Как и ожидалось, в пределе $T = 0$, когда и экспериментальная и дебаевская кривые стремятся к нулю, и при высоких температурах, где оба метода дают значение, отвечающее закону Дюлонга и Пти, искомая разность кривых обращается в нуль. Горб на кривой разности теплоемкостей был интерпретирован с помощью представления о процессе перестройки кристаллической структуры. Лишь непонимание природы используемой модели могло привести к такому неправильному выводу. Действительные пределы применимости дебаевской модели были установлены Блэкманом ¹.

Я воспользовался этим примером в своей лекции на мемориале Чёрвелла — Саймона в Оксфорде и не почувствовал угрызений совести от выставления напоказ ошибки, допущенной одним из юбиляров — Фрэнсисом Саймоном, поскольку она из разряда тех, что допускаются большими физиками, и мы должны ее глубоко проанализировать. Я попытался отыскать столь же поучительную ошибку в работах лорда Чёрвелла и не смог этого сделать, так что смею из этого заключить, что Ф. Саймон был более выдающимся физиком из них двоих!

Другим примером модели типа 4 является модель составного ядра, предложенная Нильсом Бором в 1936 г. До тех пор обычным был способ рассмотрения ядерных столкновений по аналогии со случаем столкновений атомных частиц, так что, к примеру, рассеяние нейтрона ядром трактовалось в виде процесса, заключающего в себе преимущественное движение нейтрона в статическом поле сил и весьма редкое тесное сближение его с одним из структурных элементов ядерной мишени. При этом можно было ожидать, что в большинстве случаев процесс рассеяния нейтрона не будет сопровождаться значительными потерями энергии и что вероятность радиационного захвата нейтрона при таких столкновениях должна быть очень малой. Поэтому большое удивление вызвали результаты экспериментов Э. Ферми и других авторов, которые продемонстрировали, как правило, небольшое сечение рассеяния нейтронов и большое сечение их захвата ядром. Аналогичным же образом представляло загадку наличие многих очень резких резонансов в сечении столкновений медленных нейтронов.

Н. Бор показал, что модель независимых, слабо взаимодействующих частиц обосновать нельзя и вместо этого следует воспользоваться представлением о формировании единой системы взаимодействующих на близком расстоянии нуклонов ядерной мишени и налетающего нейтрона, т. е. составного ядра. В данном случае дело происходит так, что хотя нейтрон и приносит с собой положительную энергию и потому обладает, в принципе, достаточной энергией для своего вылета из ядра, но избыток энергии в системе распределяется между многими партнерами и вероятность ее прежней концентрации на одной из частиц очень мала и, следовательно, пройдет достаточно много времени до момента вылета из ядра застрявшего нейтрона или другой частицы. Вероятность излучательного перехода за это время может стать достаточно большой и, кроме того, длительное время жизни возбужденной системы объясняет с помощью принципа неопределенности наличие острых резонансов в энергии.

Данная ситуация наглядно проиллюстрирована на рис. 3, взятом из статьи Н. Бора ², который воспроизводит ее аналогию с «бильiardным» шаром, закатившимся в уже заполненное другими подобными же шарами углубление. Очевидно, что вероятность прокатиться попавшему в углубление шару напрямик через него и выйти на другой стороне весьма мала. Использование этой модели сказалось весьма плодотворно на всем развитии ядерной физики и особенно на изучении реакций, инициируемых нейтронами.

Такой успех убедил большинство из нас, включая и Нильса Бора, в том, что модель типа «жидкой капли» может найти приложение к любым проблемам, касающимся изучения ядер в основном или слабо возбужденном состоянии. Если во всех этих случаях мы имеем дело с сильной связью между нуклонами, то нет смысла в присвоении им отдельных орбит движения, как это делается в модели электронных оболочек атома. Многие физики поэтому сильно противились попыткам описать структуру ядер на языке оболочечной модели. В данной ситуации твердая вера в возможности использования модели жидкой капли вне пределов ее справедливости задерживала достижение здесь заметного прогресса вплоть до мо-

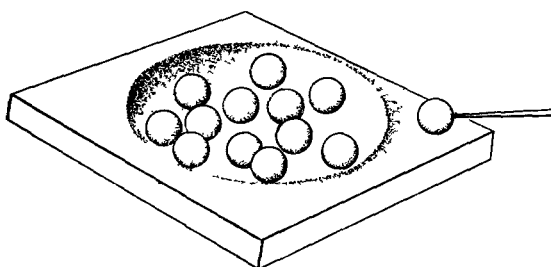


Рис. 3. Иллюстрация Н. Бора² для модели составного ядра.

мента, когда успешные расчеты в рамках оболочечной модели ядер с очевидностью продемонстрировали значение последней для многих задач с низким уровнем возбуждения. Лишь позднее удалось оценить, что в основном или близком к нему состояниях ядер, когда оказываются заполненными все орбиты движения с относительно низкой энергией, принцип Паули принижает роль эффектов взаимодействия меж-

ду нуклонами. Эти эффекты становятся более существенными при повышенных уровнях возбуждения, наблюдаемых, например, в составном ядре, так что каждая из рассмотренных моделей имеет свою собственную область справедливости.

Перечень моделей типа 4 включает в себя много примеров из ядерной физики. Этого и следовало ожидать, поскольку ядерная физика сталкивается с многочастичными проблемами, точное решение которых осуществить весьма трудно, и кроме того характеризуется широким диапазоном изменения энергий и очень различающимися типами реакций. Как раз в данной ситуации использование моделей может принести заметную пользу в деле понимания нами существа возникающих проблем.

ТИП 5: ЭВРИСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ (КОЛИЧЕСТВЕННОГО ПОДТВЕРЖДЕНИЯ НЕТ, НО МОДЕЛЬ СПОСОБСТВУЕТ БОЛЕЕ ГЛУБОКОМУ ПРОНИКНОВЕНИЮ В СУТЬ ДЕЛА)

Иногда бывает необходимо, или полезно, еще дальше отойти в сторону от реалистического описания исследуемого явления и достичь тем самым еще большего его упрощения, сохраняя тем не менее достаточную меру подобия с реальной ситуацией. В итоге это помогает нам узнать нечто новое о природе последней. Различие между моделями этого типа и типа 4, по всей видимости, менее остро, чем в случае ранее проведенного деления моделей на первые четыре типа, однако я надеюсь на то, что следующий ниже перечень примеров отчасти прояснит стоящую за этим мысль.

Тип 5: Эвристическая модель (Количественного подтверждения нет, но модель способствует более глубокому проникновению в суть дела)

Боровская модель многоэлектронного атома
Средняя длина свободного пробега

Идеальный бозе-газ
 Эйнштейновская модель удельной теплоемкости
 Модель желе
 Модель ячеистого потенциала
 Модель спаривания для сверхпроводников или ядер
 Ферромагнетик Гейзенберга
 Ферромагнетик Стонера
 Метод Хартри — Фока для ядер
 Модель ферми-газа для ядер
 Модель жидкой капли
 Кластерная модель
 α -частичная модель
 Модели гигантского резонанса Гольдхабера — Теллера/Йенсена — Стейнфеделя
 Модель Венециано
 Модель мешка

В качестве типичного примера остановимся на понятии о средней длине свободного пробега в кинетической теории. Во многих случаях столкновения между молекулами играют важную роль даже в разреженных газах. Это в особенности касается процессов переноса, таких, как вязкость, диффузия или теплопроводность. Законченная теория интересующих нас столкновений частиц выглядит весьма внушительно и отнюдь не всегда позволяет получить физически наглядные результаты. Часто, поэтому, исходят из предположения о том, что каждой молекуле присуща определенная вероятность столкновения с другой молекулой на единице пройденного пути и что после такого столкновения движение пробной частицы носит случайный характер, т. е. она «не помнит» о своей скорости или направлении движения до момента удара. Указанная модель позволяет вывести простые соотношения для коэффициентов переноса и многих других величин с помощью понятия о средней длине свободного пробега частицы. В силу излишнего переупрощения ситуации в рамках рассматриваемой модели получаемые в итоге значения отношений между коэффициентами переноса не обязательно являются правильными (если не имеют место определенные тождественные соотношения между ними, которые не зависят от характера модели, — скажем, соотношение Эйнштейна между подвижностью ионов во внешнем электрическом поле и их коэффициентом диффузии). Обычно, однако, они правильно отражают порядок величины эффекта. Встречаются и такие случаи, особенно в электронной теории металлов и теории теплопроводности кристаллической решетки неметаллов, где приходится использовать при описании разных явлений различающиеся на порядки величин значения средней длины свободного пробега. Однако данная модель настолько хорошо зарекомендовала себя в ситуациях, где требуется получить общее представление о величине эффекта, что все это время ею широко пользовались даже и те, кто знаком с присущими ей недостатками и ловушками. Так например, с помощью этой модели можно быстро сориентироваться в результатах эксперимента при низких давлениях газа, когда средняя длина свободного пробега пробной частицы может быть сравнимой либо с размерами сосуда с газом, либо с диаметром трубки. В любом из этих случаев объемные эффекты приходится рассматривать в рамках кнудсеновского подхода. Аналогичным же образом модель средней длины свободного пробега может оказаться полезной при оценке возможного влияния определенных количеств примесей на переносные свойства основного компонента или некоторые другие явления.

Другим примером эвристической модели является эйнштейновская модель в теории теплоемкости твердых тел. Она предшествовала обсуждавшейся нами ранее модели теплоемкости по Дебаю. Появление этой модели восходит ко времени, когда выяснялся смысл квантовых гипотез Планка

и Эйнштейна. Было известно, что при низких температурах теплоемкость твердых тел падает ниже уровня, установленного законом Дюлонга и Пти, и А. Эйнштейн попытался объяснить этот эффект с помощью квантовой теории. Особенно хорошо изученным в то время объектом в квантовой теории был гармонический осциллятор и было также известно, что колебания атомов в кристалле достаточно неплохо аппроксимируются гармоническим законом. А. Эйнштейн остановился на наиболее простом предположении из возможных, когда стал рассматривать независимое движение атомов с одной резонансной частотой. Полученный в итоге результат предсказывал уменьшение удельной теплоемкости C_V от предельного значения Дюлонга и Пти при высоких температурах до нуля при $T = 0$ и поэтому находился в качественном согласии с данными наблюдений. Эйнштейновская модель устанавливает экспоненциальный закон падения теплоемкости при низких температурах, тогда как правильный результат $C_V \sim T^3$ можно получить из расчета по модели Дебая. А. Эйнштейн прекрасно понимал, конечно, ограниченность своей модели, но поставленная им цель была достигнута.

На самом деле, как видно из рис. 1, спектр колебаний в кристалле представляет собой ряд достаточно узких пиков, характеризующих накопление мод вблизи определенных частот. Поэтому эта область спектра достаточно хорошо описывается в рамках модифицированной модели Эйнштейна, учитывающей наличие нескольких резонансных частот осцилляторов, причем для некоторых веществ может наблюдаться доминирующий вклад одной единственной частоты упругих колебаний. В силу сказанного может случиться, что в области средних температур более грубая модель Эйнштейна правильнее воспроизводит реальное поведение кристалла, чем более усложненная модель Дебая.

В качестве более современного нам примера можно остановиться на модели мешка адронов (т. е. сильно взаимодействующих элементарных частиц; см. ⁷). В рамках этой модели предполагается наличие резкой границы («мешка») между внутренней областью «свободного» движения составляющих кварков только под влиянием умеренно сильного взаимодействия со своими соседями и с учетом ограничений, накладываемых наличием мешка, и внешним пространством, в которое одиночные кварки проникнуть не могут. Некоторые из моих коллег могут не согласиться с тем, что я отнес эту модель к типу 5, и могут настаивать на существенно большем ее реализме. Вполне может оказаться, что последующие работы поставят рассматриваемую модель в еще более близкое положение к непротиворечивой теории явления, чем это представляется нам сегодня.

ТИП 6: АНАЛОГИЯ (УЧТЕМ ТОЛЬКО НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ)

Иногда бывает необходимо (или удобно) узнать что-то о физической системе на основе изучения более простой системы, которая не имеет сходства с исходной системой во всех деталях, но передает лишь некоторые типичные ее особенности. Ниже приведен перечень относящихся сюда примеров.

Тип 6: А н а л о г и я (Учтем только некоторые особенности)

Дебаевская модель фононного рассеяния
 Модель Изинга
 Модель «X—Y»
 Решеточный газ
 Лондоновская модель сверхпроводника
 Гейзенберговская модель ядерных сил

В качестве первого примера рассмотрим модель Изинга. Эта модель применяется для описания ферромагнетиков или упорядоченных сплавов, каждый узел решетки которых может находиться в одном из двух состояний (два противоположно ориентированных магнитных диполя в случае ферромагнетика, или два сорта атомов в сплаве). В рамках рассматриваемой модели предполагается наличие взаимодействия для каждой пары расположенных рядом узлов, зависящее от характера состояний, в которых они могут находиться. Е. Изинг, впервые сформулировавший эту модель *), исследовал только случай одномерной решетки, т. е. линейной цепочки. Он показал, что эта модель не позволяет установить сколь угодно интересных физических особенностей, таких, как резкий фазовый переход и т. д. Это привело его к убеждению, что резкий фазовый переход никогда не осуществим в одномерном случае при наличии сил конечного радиуса действия и данный вывод был позднее доказан более строгими методами.

Однако модель Изинга в случае двумерной и трехмерной решетки позволяет установить наличие фазовых переходов, причем все еще благодаря ее простоте это удастся сделать путем обозримых приближений. В двумерном случае оказалось возможным найти даже точное аналитическое решение задачи, к которому Л. Онзагер пришел, пользуясь очень красивой математикой. Нереалистичность этой модели в части описания ферромагнетизма объясняется тем обстоятельством, что в случае, когда атомный спин превышает значение $1/2$, возможно большее, чем два, число возможных его ориентаций, а при спине $1/2$ нельзя пренебречь квантовыми эффектами. Несколько лучше обстоит дело со сплавами, если отвлечься от случая сплава металлов, в котором взаимодействие между атомами частично опосредствовано электронами проводимости и никак не может считаться ограниченным ближайшими соседями.

Тем не менее модель Изинга позволяет многое узнать о характере изменения интересующих нас величин. Так, например, из решения Онзагера в случае двумерной решетки следует, что удельная теплоемкость кристалла не просто терпит разрыв в месте критической точки (как первоначально предполагалось в случае фазового перехода второго рода), а стремится к бесконечности по мере приближения к точке перехода либо снизу, либо сверху. Этот результат оказался полезным для развития теории фазовых переходов, которая превратилась сейчас в очень живую ветвь статистической механики. Некоторые варианты модели Изинга послужили основой для разработки новых методов и приближений в этой области физики.

Другим примером, который демонстрирует также и ловушки на пути использования аналогий, является подход П. Дебая ⁴ к учету ангармонизма колебаний кристаллической решетки. Ранее мы уже упоминали о гармоническом приближении, которое приводит к существованию независимых мод в форме упругих волн в решетке. Для ряда проблем, таких, как теплопроводность решетки или затухание звуковых волн, становится существенным учет поправок к гармоническому приближению. Учет ангармонизма колебаний приводит к установлению связи между различными модами. П. Дебай рассматривал эту проблему по аналогии со случаем рассеяния света на флуктуациях плотности, например в газе. Поскольку показатель преломления света зависит от плотности среды, при наличии флуктуаций плотности должны наблюдаться флуктуации показателя преломления и рассеяние света. Теория этого явления достаточно хорошо разработана. П. Дебай показал, что учет нелинейных членов

*) В 1920 г. подобную же модель ввел в рассмотрение В. Ленц. (Прим. перев.)

в потенциале взаимодействия атомов приводит к зависимости показателя преломления звуковых волн от плотности. Тепловое движение решетки, которое затрагивает продольные волны, вызывает флуктуации плотности и, следовательно, флуктуации показателя преломления акустических волн. Мы можем, таким образом, воспользоваться известными результатами теории рассеяния света. Этот подход приводит к некоторым весьма интересным выводам, в частности коэффициент теплопроводности кристалла при высоких температурах (где выполняется эмпирический закон Дюлонга и Пти) оказывается обратно пропорциональным температуре. Однако можно привести и негативные примеры, опять же следующие из аналогии. Так например, рассматриваемая теория предсказывает конечную теплопроводность для непрерывной среды, не обладающей атомной структурой, тогда как легко можно доказать, что в этом случае коэффициент теплопроводности обращается в бесконечность.

Причина этой неудачи заключена в том, что теория рассеяния света учитывает только статические флуктуации плотности. И это допустимо делать в отношении рассеяния света, поскольку смещения флуктуаций плотности происходят со скоростью звука, которая мала по сравнению со скоростью света. При описании же рассеяния звуковых волн мы сталкиваемся, очевидно, с тем, что пренебречь скоростью распространения волн плотности в кристалле нельзя. Это еще один случай, позволяющий учиться на ошибках великого физика, который был известным мастером в части придумывания и использования моделей.

Еще одна очень поучительная история использования аналогий связана с первой статьей В. Гейзенберга ⁶ о природе ядерных сил. Это произошло вскоре после открытия нейтрона, и хотя сам В. Гейзенберг понимал, что можно описывать ядра состоящими из нейтронов и протонов, он не мог все же избавиться от мысли, что нейтрон должен в конечном счете состоять из протона и электрона. При этом возникала аналогия между взаимодействием в системе нейтрон — протон и взаимодействием атома водорода с протоном. Эта то аналогия и привела его к заключению, что должны существовать обменные силы взаимодействия между нейтроном и протоном, возникающие при обмене зарядом, которые аналогичны обменным силам в системе $H - H^+$, обусловленным переходом электрона между двумя протонами. Данное предположение оказалось конструктивным и позднее было все-таки доказано существование обменных сил взаимодействия между нейтроном и протоном, хотя ими не исчерпывалось полностью взаимодействие между двумя частицами и было небольшое различие в деталях взаимодействия, связанное с характером его зависимости от спиновых переменных.

Но, следуя той же аналогии, В. Гейзенберг пришел к заключению об отсутствии ядерных сил взаимодействия между двумя протонами и к постулированию отталкивательного характера сил между двумя нейтронами. Оба последних вывода находятся в противоречии с данными более поздних исследований. В частности, их признание нарушило бы правило зарядовой симметрии, согласно которому ядерные силы не изменяются при замене нейтронов на протоны и наоборот.

ТИП 7: МЫСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ (ГЛАВНОЕ СОСТОИТ В ОПРОВЕРЖЕНИИ ВОЗМОЖНОСТИ)

Последний рассматриваемый нами тип моделей несколько отличается по своей природе от остальных. Он носит название мысленного (*gedanken*) эксперимента и характеризует модель возможного эксперимента (который может быть не очень легко осуществимым или не слишком реалистичным), не нарушающего любые известные физические законы.

Тип 7: Мысленный эксперимент (Главное состоит в опровержении возможности)

Цикл Карно
Демон Максвелла
 γ -микроскоп Гейзенберга
Эйнштейн — Подольский — Розен

Обычной целью постановки таких мысленных экспериментов является ниспровержение выдвинутых гипотез. Если обсуждаемая гипотеза предсказывала противоречащий здравому смыслу результат или вывод, перечеркивающий известные из эксперимента принципы, то такую гипотезу необходимо считать ложной. Подобного рода аргументы весьма характерны для термодинамики, и начало им было положено циклом Карно, который, к примеру, устанавливает предельные значения к. п. д. тепловой машины, работающей в заданном температурном диапазоне.

Несколько отличный пример мысленного эксперимента дает демон Максвелла, контролирующий отверстие, через которое могут пролетать молекулы газовой смеси. Он либо открывает заслонку перед молекулами одного сорта и закрывает ее перед другими молекулами, либо пропускает лишь молекулы с определенной скоростью и задерживает те из них, скорость движения которых лежит вне отмеченного интервала. Идея постановки этого эксперимента состоит в том, чтобы показать невозможность существования такого демона без нарушений законов термодинамики (если только не считать, что его деятельность не требует затрат определенного количества свободной энергии).

Другой столь же гипотетический эксперимент связан с работой γ -микроскопа Гейзенберга, который он использовал для иллюстрации принципа неопределенности. Идея эксперимента заключалась в том, чтобы показать, как освещение электрона (необходимое для наблюдения его в микроскопе) вызывало неконтролируемое изменение его импульса, причем оно было тем большим, чем большая требовалась точность в определении координаты электрона. Этот эксперимент не использовался для доказательства какого-либо положения, поскольку соотношение неопределенности можно было вывести непосредственно из формализма квантовой механики. Да и доказать его с помощью предложенного мысленного эксперимента было трудно, поскольку доказать можно было лишь то, что использованный метод наблюдений не выводит нас за рамки соотношений неопределенности. Кроме того всегда могут существовать и другие методы. Цель В. Гейзенберга заключалась в демонстрации того, что можно понять сущность нового принципа без привлечения математического аппарата квантовой механики. И он испытывал потребность именно в иллюстрации своего принципа, а не в доказательстве.

Роль мысленного эксперимента заключена в попытке опровергнуть выдвинутое утверждение, например, такое, как соотношение неопределенности. Если бы можно было придумать единственный эксперимент, в котором могли быть измерены физические величины с погрешностью меньше, чем следует из принципа неопределенности, то такой принцип был бы отвергнут. А. Эйнштейн, скептически относившийся к воззрениям, принятым в квантовой механике, пытался придумать множество таких мысленных экспериментов, однако в конце концов Н. Бор находил изъяны в каждом из них. Эти споры в существенной степени способствовали пониманию нами принципа неопределенности.

Несколько отличаются в этом плане доводы Эйнштейна, Подольского и Розена⁵, которые показали, что если в состоянии с нулевым полным спином находятся две частицы со спином $1/2$, то наблюдение за одной из них позволяет получить также информацию о спине другой частицы, хотя к

тому времени они могут оказаться на значительном удалении в пространстве. Так что никакой информации о другой частице, извлеченной путем измерений характеристик первой частицы, нельзя получить ранее довольно отнесенного момента времени. Намерение авторов заключалось в демонстрации логического парадокса в квантовой механике. В действительности было показано, что волновая функция в квантовой механике не может рассматриваться в качестве величины, обладающей физической реальностью; она выражает состояние нашего знания о физической системе.

Общим элементом для всех этих разных типов моделей служит то, что они помогают нам более ясно представить существо физических проблем путем анализа упрощенных ситуаций, более доступных нашей интуиции. Эти модели служат ступеньками на пути к рациональному объяснению реальной действительности.

При выборе названия этой статьи я опасался, что сочетание слов «построение моделей» (model-making) может породить воспоминания о строительстве моделей железных дорог или кораблей. Однако в конце концов я пришел к убеждению, что оно вряд ли вызовет недоразумения, поскольку и эта деятельность направлена на то, чтобы уменьшить размеры железной дороги или корабля до разумных пропорций. Мы можем взять эти модели в руки и повернуть другой стороной и наверняка получим более ясное представление об их форме и структуре, чем из вида реальных объектов. А это и способствует как раз тому, что физик пытается сделать со своими моделями.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Blackman M.— Rept. Prog. Phys., 1942, v. 8, p. 11.
2. Bohr N.— Science, 1936, v. 86, p. 161.
3. Close F.— Contemp. Phys., 1979, v. 20, p. 293.
4. Debye P. Vorträge über die kinetische Theorie der Materie und der Elektrizität.— Leipzig: Teubner.— S. 19.
5. Einstein A., Podolski B., Rosen N.— Phys. Rev., 1935, v. 47, p. 777.
6. Heisenberg W.— Zs. Phys., 1932, Bd. 77, S. 1.
7. Johnson K. A.— Sci. American, 1979, v. 241, No. 1, p. 100.
8. Kellerman E. W.— Phil. Trans. Roy. Soc. Ser. A, 1940, v. 238, p. 513.
9. Maxwell J. C.— Ibid., 1864, v. 155, p. 459.
10. Simon F., Swain R. C.— Zs. phys. Chem., 1935, Bd. 28, S. 189.