

## УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

### ЭКСПЕРИМЕНТ И ТЕОРИЯ В ФИЗИКЕ\*)

*Макс Борн*

Естественно, что человек должен рассматривать работу своих рук или своего мозга как полезную и важную. Поэтому никто не будет возражать ревностному экспериментатору, хвастающемуся своими инструментами и до некоторой степени смотрящему свысока на «бумажно-чернильную» физику своего друга — теоретика, который в свою очередь гордится своими возвышенными идеями и презирает грязные пальцы другого. Но в наши годы этот вид дружественного соперничества превратился в нечто более серьезное. В Германии школа крайних экспериментаторов, руководимая Ленардом и Штарком, зашла настолько далеко, что вообще отрицает теорию как «еврейское изобретение» и объявляет эксперимент как единственный подлинно «арийский» метод науки. Имеется также движение в противоположном направлении, которое — хотя и не с расовых позиций — является не менее радикальным, объявляя, что для разума, хорошо натренированного в математике и теории познания, законы природы очевидны без обращения к эксперименту. Этой философии следуют два выдающихся астронома — Эддингтон и Милн, хотя, кажется, это повело их в несколько различных направлениях.

Моей целью здесь является не обсуждение каких-либо замечательных теорий этих людей, я хочу обратить ваше внимание на философию Эддингтона, которая провозглашает триумф теории над экспериментом. Я являюсь физиком-теоретиком (еврейского происхождения), и можно было бы ожидать, что я буду радоваться этой философии. Но я не радуюсь.

Напротив, я считаю, что эти идеи представляют собой значительную опасность для здорового развития науки. Именно это убеждение побудило меня принять ваше предложение прочитать лекцию на эту трудную тему. Однако я не желаю ни спорить с Эддингтоном о глубоких философских принципах, ни состязаться с ним в его непревзойденном мастерстве диалектики в полемике. Все, что я хочу, это показать вам простейшим образом взаимное отношение между теорией и экспериментом в действительном развитии науки и представить взвешенное мнение о современной ситуации и будущих возможностях.

Но даже и эта более скромная программа не легка, ввиду того, что действующий ученый имеет мало времени, чтобы тратить его на историю. Я очень мало, даже слишком мало, читал оригинальной литературы,

\*) Эта статья представляет собой несколько расширенный доклад, прочитанный на собрании Деремского философского общества и Общества чистой науки Королевского Колледжа в Ньюкасл-апон-Тайне 21 мая 1943 года. Перевод с английского С. Г. Суворова.

и в большей части мои знания идут из вторых рук, взяты из учебников, руководств и энциклопедий. Однако имеются два ободряющих момента. Я достаточно знаю несколько великих классических шедевров в области математики и физики, чтобы быть уверенным в отношении исторической и персональной основы, на которой они вырастали. А во-вторых, я достаточно стар, чтобы сказать, что в продолжение моей собственной жизни я наблюдал развитие современной физики, которая представляет самую значительную часть всей физики. Мне кажется, что это дает достаточный материал, чтобы составить некоторое мнение.

Рассматривая детально историю науки, мы замечаем своего рода цикл, периоды развертывания экспериментальных исследований, чередующиеся с периодами теоретического развития. Теории имеют тенденцию стать все более абстрактными и общими. Они достигают высшей точки в принципах, которым философы сперва противятся, а позднее их осваивают. Коль скоро принципы становятся частью философской системы, начинается процесс догматизации и окаменения. Эти черты замечаются уже в наиболее старых количественных науках — математике и астрономии. Нет сомнения в том, что первые геометрические знания, открытые шумерийцами, вавилонянами и египтянами, были чисто эмпирическими. Греки открыли логическую взаимосвязь геометрических фактов и основали первую дедуктивную науку, как она сформулирована в сочинении Евклида. Современный математик, конечно, может смотреть на геометрию как на продукт чистого мышления, принимая аксиомы и постулаты в качестве определений, а всю систему рассматривая как занимательную игру. Но это, конечно, не то, что греческие философы разумели под своей геометрией: они верили в то, что имели дело со свойствами реальных вещей. Тот факт, что предсказания их теорий всегда подтверждались опытом, приводил к убеждению, что аксиомы евклидовой геометрии содержат окончательно истину.

Система Евклида просуществовала 2000 лет. Она пережила угасание и падение греко-римской цивилизации и все более поздние социальные сдвиги в истории. Она прошла через все фазы более или менее сознательной догматизации. Даже после расцвета современной научной эпохи, с ее критическим пересмотром традиционных взглядов, действительная ценность евклидовских положений была вне сомнений, но их возможность была сделана предметом философских спекуляций. Кант допустил, что мы имеем непосредственное и точное знание об известных вещах — пространстве, времени, причинности и т. д., — и объяснил его допущением, что в действительности мы имеем дело не с самими вещами, а с формами нашей интуиции об этих вещах. Правдоподобно, что эти формы мышления даны нам *à priori*, то есть до опыта. Главным примером априорного знания были у Канта геометрические теоремы, *ipso verbo*\*) он имел в виду обозначить канонические правила Евклида.

Та идея, будто мы можем получать знание *à priori*, имеет свои корни в историческом факте устойчивости греческой геометрии, которая была заменена более общей теорией только в наше время. Действительное основание долговечности греческой геометрии лежит в точности, с какой она описывает поведение тел в нашем земном окружении. Первые сомнения возникли не на основе учета экспериментальных данных, а по логическим основаниям. Некоторые математики нашли, что одна из евклидовых аксиом, а именно аксиома о параллельных линиях, менее очевидна, чем другие, и стали интересоваться, не могла ли она быть выведенной из остальных. Все усилия выполнить это были напрасны, и в конце концов была

\*) этими словами. (Прим. перев.)

сделана попытка (впервые Гауссом, но не опубликовано; затем независимо Больyai и Лобачевским \*) доказать независимость аксиомы о параллельных путем построения геометрической системы, в которой она не имеет силы. Эти построения неевклидовой геометрии оказались успешными. Гаусс даже произвел измерения, чтобы обнаружить, какая геометрия справедлива в реальном мире. Он и его последователь Риман ясно сознавали эмпирический характер геометрии. Риман создал математический фундамент, на основе которого Эйнштейн, уже в наше время, успешно свел геометрию к физике, создав свою общую теорию относительности.

История астрономии параллельна истории геометрии с тем различием, что уже некоторые из греческих философов имели ясные идеи о сферической форме Земли, центральном положении Солнца в планетарной системе и о реальных расстояниях между ее членами — идеи, которые были утеряны или подавлены в течение мрачной эпохи средневековья. Церковь приняла греческую философию и науку в той форме, какую ей придали Аристотель и Птолемей. Глядя на это историческое явление с нашей точки зрения, мы можем сказать, что застой науки в средние века был вызван чрезмерным почитанием разума, который противопоставлялся материальным явлениям, что вело к предпочтению теоретических спекуляций перед экспериментом\*\*).

В самом деле, современная наука в эпоху Ренессанса началась с новой философии, которая рассматривала систематический эксперимент как главный источник знания. Ее пророком был Френсис Бэкон, ее реальными основателями — Галилей и Ньютон. Схоластическая философия была подвергнута критике уже Декартом и другими философами, которые пользовались главным образом логическими и метафизическими аргументами; однако теории вселенной, развивавшиеся этими рационалистами, кажутся нам неубедительными, поскольку они не базируются на достаточных данных наблюдения или эксперимента. Ибо существенное различие между нашим временем и средневековьем состоит в отказе от традиций и в установлении опыта как истинного источника знания. Ренессанс означал не только открытие заново греческой литературы, но и возрождение греческого духа, скептических и в то же время конструктивных взглядов греческой философии. Тогда-то и был установлен метод индуктивного мышления, который ведет от единичного наблюдения к общим законам. Этот метод сам может стать предметом философского анализа. Ясно, что он предполагает не только фундаментальную веру в существование естественных законов, но также и критерии для различения подлинных закономерностей от случайных и другие принципы такого же рода. Но я не могу останавливать внимание на этих абстрактных проблемах. Я только хочу установить, что революция, которая заменила схоластицизм современной наукой, низложила дедуктивный метод из его господствующего положения и поставила его на его собственное место. И Галилею и Ньютону был абсолютно ясен индуктивный характер новой философии: теории, которые они создавали путем синтеза экспериментальных результатов, использовались для постановки новых экспериментов, и, если эти испытания были благоприятны, теория считалась подтвержденной. Это — законный метод

---

\*) История зарождения идей неевклидовой геометрии подробно прослежена В. Ф. Каганом, крупнейшим знатоком этого вопроса; см.: В. Ф. Каган, Лобачевский и его геометрия, М., 1955. (Прим. перев.)

\*\*) Макс Борн рассматривает здесь историю только в свете развития идей; на самом деле застой науки в средневековье, как и последующее возрождение, объясняется не «чрезмерным почитанием разума», а более глубоко лежащими, в конечном счете экономическими, причинами. (Прим. перев.)

науки, сочетание дедукции и индукции, которое описывается в многочисленных учебниках. Но это не вся история.

И Галилей и Ньютон страстно желали избежать метафизических спекуляций (*hypotheses non fingo*). Но через некоторое время, когда законы механики были вполне известны, мы обнаруживаем попытки вывести их из принципов, которые своей формулировкой впускают мысль о внеопытном происхождении. Наиболее преуспевающим из этих принципов является принцип наименьшего действия. Известно, что Мопертюи пришел к нему через телеологическую идею: предполагалось, что природа действует подобно человеческому существу, с определенной целью, которую она стремится достигнуть с наименьшей возможной величиной «действия». Почему математическое выражение, которое Мопертюи дал для этого действия, природа должна столь высоко оценивать, чтобы расходовать так экономно, — это, конечно, трудно объяснить. Мы знаем теперь, что действительные движения соответствуют не реальному минимуму действия, за исключением кратковременных интервалов, а стационарным состояниям, и мы рассматриваем принцип наименьшего действия только как очень полезное и мощное орудие для конденсирования сложных дифференциальных уравнений в кратком выражении.

Мощь этого принципа в форме, данной ему Гамильтоном, видна из того факта, что с его помощью могут быть формулированы не только классическая механика частиц и твердых тел, но также теория упругости, гидродинамика, электродинамика и все современные теории поля, связанные с элементарными частицами (электрон, протон, мезон). Для примера рассмотрим электродинамику.

С этой целью допустим существование скалярного потенциала  $\Phi$  и вектор-потенциала  $A$  и введем ради сокращения векторы

$$E = -\text{grad } \Phi - \frac{1}{c} \frac{\partial A}{\partial t}, \quad H = \text{rot } A. \quad (1)$$

Тогда принцип наименьшего действия для электродинамики в вакууме дается уравнением

$$\delta \int \int \frac{1}{2} (E^2 - H^2) dv dt, \quad (2)$$

где  $dv$  означает элемент объема, а интегрирование распространяется на рассматриваемое пространство и время, символ  $\delta$  означает бесконечно малую вариацию потенциалов.

Результаты этой вариации выражены в форме дифференциальных уравнений, и они оказываются уравнениями Максвелла

$$\text{rot } H = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}, \quad \text{rot } E = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (3)$$

для вакуума, если только  $E$  и  $H$  интерпретируются как векторы электрического и магнитного поля.

Вариационный принцип имеет что-то убедительное в том отношении, что он конденсирует огромную область явлений в одном кратком выражении, и это достоинство затем возвышается, если он рассматривается глазами математика, который изучал теорию относительности и знает, что  $E$  и  $H$  совместно образуют так называемый шести-вектор, имеющий определенные трансформационные свойства при изменении системы координат, то есть лорентцевы преобразования пространства и времени. Так как существуют только два инварианта  $E^2 - H^2$  и  $(EH)^2$  и поскольку электродинамическое действие должно быть инвариантным, оно может быть только их функцией. Прибавьте к этому постулат о том, что результирующие уравнения должны быть линейными, в этом случае действие

должно быть квадратичной функцией, и вы прямо приходите к выражению, приведенному выше.

Оно кажется непосредственным выводом из основных принципов. Если эти принципы известны и налицо пронизательный ум нашего математика, то максвелловские уравнения представляются результатом чистого мышления, а черная работа экспериментаторов — устарелой и излишней.

Едва ли мне нужно объяснять вам ошибочность такой точки зрения. Она состоит в том, что ни одно из понятий, применяемых математиками, таких, как потенциал, вектор-потенциал, векторы поля, лорентцевы преобразования, не исключая и самого принципа действия, не является очевидным и данным *à priori*. Даже если бы крайне одаренный математик построил их, чтобы описать свойства возможного мира, ни он, ни кто-либо другой не имел бы ни малейшего понятия, как применить их к реальному миру. Перед физикой стоит проблема: как реальные явления, наблюдаемые с помощью наших органов чувств, обогащенных инструментами, могут быть сведены к простым понятиям, подходящим для точного измерения и полезным для формулировки количественных законов. От первого наблюдения элементарных электрических явлений, вроде притяжения малых частиц или наблюдения небольших искр, к понятию электрического поля и потенциала лежал долгий путь, и еще более долг был путь к уяснению их взаимоотношений с соответствующими магнитными силами и к системе связывающих их максвелловских уравнений.

Когда я был студентом, сорок лет назад, понятие поля в вакууме казалось нам крайне странным, оно усваивалось лишь с трудом. От этого пункта до полного развития теории относительности, с ее формальным аппаратом лорентцевых преобразований, с ее инвариантами, ковариантными векторами и тензорами опять-таки предстояло долгое и утомительное путешествие. Релятивизация времени была для нас вынужденной: работа Эйнштейна появилась позднее экспериментов Майкельсона и Морлея, и даже сам Лорентц неохотно сдавал свой абсолютный стационарный эфир и принимал эквивалентность различных времен, допускаемых его преобразованиями.

Последовательность исторических событий ясно показывает истинное положение вариационного принципа: он находится в конце длинной цепи рассуждений как удовлетворительная и красивая конденсация результатов. Возможно, он даже помогал найти эти результаты (хотя я в этом сомневаюсь в случае электродинамики). Но он мало имеет отношения к образованию новых фундаментальных понятий, которые являются характерными чертами электродинамики. Революционной концепцией, отличающей электродинамику от классической механики, является концепция поля. По работам Фарадея можно видеть, как зарождались его наблюдения диэлектрических, парамагнитных и диамагнитных свойств; но, чтобы формулировать их, понадобилась мощная математика Максвелла. Однако это была не просто чистая математика, а удивительный акт прорицания. Факты, известные в то время, должны были привести (для вакуума) к незавершенной форме уравнений (3), а вместо первого уравнения к следующему:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = 0.$$

Решающий шаг [Максвелла состоял в добавлении отсутствующего члена  $\frac{1}{c} \frac{d\mathbf{E}}{dt}$ ; этот шаг был сделан без прямого опытного обоснования и сначала направлялся механическими моделями эфира, а позднее — рассуждениями о математическом совершенстве и красоте, вы, однако, можете приписать его действию гения. Это тот член, который ведет к предсказанию

волн с конечной скоростью  $c$ , к электромагнитной теории света, к радио и всему тому, что олицетворяет современную радиотехнику.

В самом деле, это блестящий пример возможностей, существующих для физика-теоретика: он обнаруживает недостатки теории и стремится устранить их посредством того, что вы можете назвать «математической гипотезой». Если он удачлив, если модифицированная теория предсказывает явления, подтверждаемые новыми экспериментами, вы можете назвать это «синтетическими» предсказаниями. Пророчество этого рода более редко, но гораздо более выразительно — по крайней мере по моему мнению — и вообще гораздо более важно, чем нормальный «аналитический» тип научного пророчества, базирующийся на твердо установленной теории. Примеров последнего рода столь много, что трудно подобрать наиболее характерный. Они встречаются в повседневной жизни физика или инженера, который проектирует аппарат и ожидает, что тот будет работать «согласно плану».

Если вы войдете в комнату и увидите голову и тело человека за конторкой, вы будете уверены, что он имеет ноги, хотя последних вы не видите, и вы не удивитесь, если обнаружится, что вы были правы в этом предсказании (увы, вы можете и ошибиться, человек может быть инвалидом). Так вот это как раз то, что происходит в обычном развитии науки, с единственным различием, что здесь образы, которые не наблюдались, но ожидаются, менее обычны, чем образ человеческого тела, и должны быть получены некоторыми вычислениями.

С другой стороны, то, что я разумею под синтетическим предсказанием, можно проиллюстрировать с помощью примера о противоположной стороне Луны, которая невидима, подобно ногам человека за конторкой. Предположим, что в то время, когда был открыт сферический вид видимой части Луны, нашлись средневековые философы, которые настаивали на том, что вы всегда должны делать простейшие допущения и что плоскость есть простейшая поверхность. В таком случае астрономы должны были бы объяснить, что Луна — это полусфера с плоской задней стороной, в полном согласии с доступными тогда наблюдениями. Однако под влиянием других исследований понятие о том, что такое простое, изменяется. И вот однажды человек обнаружил, что круговая кромка, где пересекаются сфера и плоскость, не совпадала с его понятием простоты и что полная сфера была более совершенной поверхностью. Но спустя некоторое время новые наблюдения обнаружили наличие малых колебаний Луны, которые сделали малые части невидимой стороны видимыми и показали отсутствие кромки, непрерывность поверхности.

Максвелловское добавление отсутствующего члена есть как раз такое сглаживание грубоватости образа, хотя этот образ имеет здесь математическую структуру более тонкого типа, чем сфера.

Позвольте мне немного расширить это понятие образа, которое я здесь употреблял. То, что я разумею, есть идея, которую современные психологи (фон Эренфельс, Келер, Вертхеймер и другие) ввели под немецким термином «Gestalt» для того, чтобы описать элементарные процессы, связанные с восприятием чувственных впечатлений. То, что одновременно чувственные восприятия являются не независимыми друг от друга, вроде мозаики, а образуют психическое единство определенного образа, — это является экспериментальным фактом. В примере с человеком вы не видите цветные пятна, а восполняете их посредством побочного процесса, и вы видите человека за конторкой. Хорошим примером образа является мелодия; она слышится совместно с составляющими тонами, но, очевидно, представляет собой нечто большее, чем эти составляющие тона. Это — моя излюбленная идея, что на вопрос о том, «что такое реальность, описы-

ваемая формулой теоретической физики?», можно ответить, применяя то же самое понятие с дополнительным замечанием, что «образы» физических вещей суть инварианты уравнений. Их реальность того же самого типа — я имею ввиду объективную реальность во внешнем мире, — как и реальность любого образа хорошо знакомых вещей, например образа человеческого тела. И я не вижу, чтобы аналитическое предсказание в науке сильно отличалось от той повседневной процедуры, без которой мы не могли бы жить и благодаря которой мы ожидаем, что образ, узнанный по немногим критериям, является полным и обладает всеми другими свойствами, характерными для него. Однако синтетическое предсказание базируется на гипотетическом предположении о том, что реальный образ частично известного явления отличается от того, каким он кажется. Если, будучи подтверждено экспериментом, это предсказание дает новое знание, то, хотя в его основе и лежит гипотеза, это — законный метод. Но его удача в высокой степени зависит от интуиции и едва ли может быть изучена.

Я думаю, что это различие полезно для того, чтобы оценить значение научных открытий. Позвольте иллюстрировать сказанное несколькими примерами.

Одним из наиболее замечательных примеров является открытие Галлеем планеты Нептун в соответствии с теоретическим предсказанием, сделанным Адамсом и независимо Леверье, на основе малых возмущений в движении других планет. Это был удивительный подвиг математического искусства и терпения, а также уверенности в результатах. Но, не умаляя их, можно сказать, что это не расширяло кругозор теории; это было аналитическое предсказание, применение хорошо известных образов ньютоновской механики.

Совершенно такова же ситуация в отношении знаменитого предсказания конической рефракции Гамильтоном, которое часто цитируется как пример мощи теории. Я ничуть не отрицаю этой мощи. Но несомненно, что это открытие базировалось на данной теории и состояло в искусном распутывании запутанных свойств волновой поверхности Френеля. С точки зрения предложенной классификации оно принадлежит к аналитическому классу.

Оно совершенно отличается от эйнштейновского предсказания отклонения света солнцем, выведенного из его общей теории относительности. Ибо эта теория есть фундаментальное обобщение ньютоновской теории. Я хочу использовать этот пример, чтобы показать вам, что если Эйнштейн сделал догадку, то он имел для нее очень солидную основу в физических фактах, так что для нее правомерно применить слово «синтез». Акт научного воображения состоит в угадывании значительности факта, который в данном случае был известен со времен Ньютона, но уже перестал возбуждать любопытство многих поколений физиков. Речь идет о факте пропорциональности между массой, измеряющей инерцию, и массой, измеряющей гравитацию; эту пропорциональность масс предположил Ньютон и позднее с крайне высокой степенью точности подтвердили Бессель, Этвеш и другие. Ньютон и его последователи не в состоянии были объяснить этот факт, но странно то, что в течение двух столетий эта проблема вообще даже и не возникала у его последователей. Возможность этого решения зависела от длинного ряда исследований: замены понятия силы, действующей на расстоянии, понятием поля, распространяющегося с конечной скоростью; установления линейной относительности и, наконец, что не менее важно, гипотетического обобщения евклидовой геометрии Гауссом, Риманом, Ричи, Леви-Чивита и другими. Все это было необходимо, и это было сфокусировано в разуме Эйнштейна загадкой о двух

аспектах массы. Новая теория является гигантским синтезом длинной цепи опытных результатов, а не самопроизвольного колебания мозга. Общая относительность выражает физические законы на геометрическом языке и в то же время превращает геометрию в часть физики. Она имеет такую же априорную видимость или даже в еще более высокой степени, чем геометрия Евклида. Это связано с ее математическим совершенством, без которого мы вовсе не могли бы признать ее как теорию. Но если мы настолько удовлетворены, что рассматриваем ее как окончательную, мы заблуждаемся. Скоро обнаружилось, что общая теория относительности не была последним словом. Она не помогла в понимании природы материи, существования различных элементарных частиц и полей. Обобщения пытались делать сам Эйнштейн, Вейль, Эддингтон и другие. Но шанс правильной догадки оказался небольшим. До сих пор на этом пути не обнаружилось ничего определенного, не считая того факта, что, кроме эйнштейновской первоначальной модели, существует обширный простор для возможных теорий.

Позвольте теперь рассмотреть другую фундаментальную ветвь современной физики — квантовую теорию. Ей предшествовала серия экспериментальных открытий — катодных лучей, рентгеновых лучей, радиоактивности и т.д., многие из которых, как обнаружилось позднее, не подчинялись законам классической механики и электродинамики. Но ни одно из них не вело непосредственно к открытию кванта энергии. Вы знаете, что Планк (в 1900 г.) был вынужден к этому — я хотел бы сказать — «в отчаянии», ввиду несостоятельности классических законов объяснить свойства теплового излучения. Он открыл свою формулу излучения, интерполируя полуэмпирические законы для очень длинных и очень коротких волн, а впоследствии в виде пробы предложил свою интерпретацию в терминах конечных квантов энергии. Долгий двадцатипятилетний период накануне появления квантовой механики характеризуется накоплением все новых эмпирических данных в пользу реальности этого кванта и обнаружением полной неприспособленности классических понятий для оперирования с ним. Я напомним только некоторые выдающиеся открытия: эйнштейновское объяснение фотоэлектрического эффекта; его теория удельной теплоемкости твердых тел; боровское истолкование комбинационного принципа Ритца в линейных спектрах и его экспериментальное подтверждение Франком и Герцем; тщательно прослеженная Бором общая теория атомной структуры и периодической таблицы элементов; эффекты Комптона и Штерна — Герлаха; расшифровка полосатых спектров и открытие квантовых правил в них; а также многочисленные другие открытия. Неясные идеи о кванте становились яснее с каждым новым открытием; небольшие модификации фундаментальных принципов ничего не дали бы, происходила глубокая революция.

Квантовая механика, которая была результатом этого процесса, имела два, по-видимому, независимых корня — матричную механику и ее обобщения (Гейзенберг, Борн, Иордан, Дирак) и волновую механику (де-Бройль, Шредингер).

Прежде чем обсуждать эти идеи, позвольте мне сказать несколько слов о математическом аппарате. Оба аспекта квантовой механики в большой степени опирались на работы Гамильтона. Это часто признавалось в отношении волновой механики; Гамильтон подготовил путь, распуская связь между геометрической оптикой и волновой теорией и демонстрируя тесную аналогию между принципом Ферма в оптике и собственной, Гамильтона, формулировкой принципа наименьшего действия в динамике. Но и другая форма квантовой механики, которая характеризуется применением матриц и операторов, может быть также прослежена до фунда-



ментальной концепции Гамильтона. Мы отмечаем в этом году столетие изобретения Гамильтоном кватернионов — первого примера некоммутативной алгебры. Это бесцветное выражение не волнует воображения так, как это делает фраза «неевклидова геометрия», которая ясно указывает на разрыв с древней традицией мышления и на начало новой эпохи. Но работа Гамильтона знаменует собой поворотный пункт такого же порядка значимости. Он стремился обобщить представление о векторах на плоскости посредством комплексных чисел  $z = x + iy$  на векторы в пространстве. В основе лежала идея: получить аналитический двойник к геометрическим конструкциям (например, «геометрическая сумма» двух векторов  $\mathbf{a}$  и  $\mathbf{b}$  представляется аналитическим процессом  $\mathbf{a} + \mathbf{b}$ ).

Гамильтон нашел естественное обобщение обычных комплексных чисел, имеющее 4 члена (кватернионы), для которых справедливы все законы алгебры, за исключением одного — коммутативного закона умножения:  $ab$  отличается от  $ba$ . Это было началом современной алгебры, которую можно грубо сравнить с геометрией Римана по ее влиянию не только на математику, но с таким же успехом и на физику. Сами кватернионы не были столь плодотворны, как надеялся Гамильтон и его восторженные ученики. Более общая конструкция — матрицы Гейлеса — оказалась гибким орудием для бесчисленных математических и физических исследований. Я научился их применять, будучи молодым студентом (моими учителями в алгебре были Розанес и Минковский), и я применял их к различным проблемам теоретической физики (например, в теории кристаллической решетки). Таким образом, я имел счастливый случай признать символическое умножение Гейзенберга (которое я сейчас буду обсуждать) в качестве примера хорошо известного матричного исчисления и быть первым, насколько я знаю, кто когда-либо записал такое странное уравнение  $pq - qp = h/2\pi i$  (опубликовано совместно с Иорданом), в котором некоммутативные символы являются правильными выразителями физических величин (координаты  $q$  и импульса  $p$ ). Почти одновременно Дирак установил некоммутативную механику, в очень общей и удовлетворительной форме. Ныне вся теоретическая физика базируется на этих математических методах.

Часто говорят, что Гейзенберга привела к принципу матричной механики метафизическая идея, и это положение используется теми, кто верит в силу чистого разума, в качестве примера в свою пользу. Так вот, если бы вы спросили самого Гейзенберга, он резко возразил бы против этого взгляда. Поскольку мы работали вместе, я полагаю, что я знаю, что влияло на его мышление. В то время мы все были убеждены в том, что новая механика должна базироваться на новых понятиях, имеющих только слабую связь с классическими понятиями, выраженную в боровском постулате соответствия. Гейзенберг считал, что величины, которые не имеют непосредственной связи с экспериментом, должны быть исключены. Он хотел обосновать новую механику как можно более непосредственно на опытных данных. Если это и есть «метафизический» принцип, то, конечно, я не могу возражать; я только хочу сказать, что это именно тот фундаментальный принцип современной науки в целом, который отличает ее от схоластики и догматических систем философии. Но если под этим принципом разумеют (как это делают многие) исключение из теории всех ненаблюдаемых, то это ведет к бессмыслице. Например, волновая функция Шредингера  $\psi$  является такой ненаблюдаемой величиной, и, конечно, она позднее была принята Гейзенбергом как полезное понятие. Он установил не догматический, а эвристический принцип. Он обнаружил с помощью научной интуиции неадекватные (*spurious* — поддельные) понятия, которые должны быть исключены. Я постараюсь объяснить это.

Согласно Бору, электроны движутся по орбите вокруг атомного ядра подобно движению планет вокруг Солнца. Чтобы описать такие квазипериодические движения, классическая механика использует метод Фурье; каждая координата разлагается на сумму гармонических движений, первое из которых имеет частоту  $\nu_1$ , основную, следующие имеют частоту, кратную ей,  $\nu_2 = 2 \nu_1$ ,  $\nu_3 = 3 \nu_1$ , ..., это обертоны.

Однако оказалось, что спектральные линии атомов не следуют этим гармоникам,  $\nu_n = n \nu_1$ . В действительности они подчиняются правилу, открытому Ритцем. Все частоты в спектре могут быть выражены с помощью ряда «термов»  $T_1, T_2, \dots$  в виде  $\nu_{nm} = T_n - T_m$ ; поэтому они образуют квадратную таблицу из элементов с двумя индексами:

$$\begin{pmatrix} 0 & \nu_{12} & \nu_{13} & \dots \\ \nu_{21} & 0 & \nu_{23} & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}.$$

Спектроскописты-экспериментаторы обыкновенно располагали свои измерения групп линий, так называемых мультиплетов, в такую таблицу, и теперь кажется странным, что это никогда не внушало математически образованным физикам идею о матрицах. Но так не случилось. Действительное развитие было гораздо более сложным и базировалось на еще большем числе данных. Сначала возникла боровская идентификация термов  $T_n$  с величиной энергии стационарных состояний, путем применения планковского закона в виде  $E_n = hT$ . Затем последовал длинный ряд соображений о выведении квантовых формул из классических, посредством некоего рода математической гипотезы, направляемой принципом соответствия (Бор, Гейзенберг и Крамерс, Борн). Эти формулы, хорошо подтвержденные экспериментом, внушили Гейзенбергу идею, что квантовые формулы могут быть выражены некоторым видом символического умножения; ключом к этому формализму является замечание, что из правила Ритца вытекает аддитивный комбинационный закон частот

$$\nu_{nk} + \nu_{km} = \nu_{nm};$$

отсюда мультипликативное комбинационное правило для амплитуд

$$e^{i\nu_{nk}t} + e^{i\nu_{km}t} = e^{i\nu_{nm}t}.$$

Это сразу ведет к гейзенберговскому умножению, которое было скоро идентифицировано с хорошо известным матричным исчислением (Борн и Иордан). Первое подтверждение новой теории и ее обобщений ( $q$  — числа Дирака, операторы Шредингера) было найдено в идентичности результатов в простых случаях с формулой, предварительно полученной посредством принципа соответствия.

Следовательно, это была существенно индуктивная линия рассуждения, которая вела к наиболее абстрактной из известных в физике теорий, где наблюдаемые представляются некоммутирующими величинами (матрицы или операторы), а их числовые значения — их собственными значениями.

Совершенно иным было происхождение волновой механики. Казалось, что корпускулярный характер катодных лучей был окончательно установлен экспериментами Дж. Дж. Томсона, и никто не ожидал, что они могут быть использованы для получения интерференционных колец. Поэтому де-бройлевское ассоциирование волн и корпускул справедливо рассматривалось как триумф интуиции. Но и здесь также эмпирические основания совершенно ясны: специальная теория относительности показала, что:

1) три компоненты импульса  $\mathbf{p}$  и энергия  $\varepsilon$  образуют четырехмерный вектор, то есть имеют некоторые определенные трансформационные свойства;

2) три компоненты волнового вектора (вектор в направлении волновой нормали длиной  $k = 1/\lambda$ , где  $\lambda$  — длина волны) и частота  $\nu$  также ведут себя подобно 4-вектору;

3) квантовая теория Планка, тем временем хорошо подтвержденная экспериментом, утверждает, что с каждой энергией  $\varepsilon$  связывается частота  $\nu$ , так что  $\varepsilon = h\nu$ .

Эти факты строго доказывают, что с каждой частицей ассоциируется волна, волновой вектор которой параллелен импульсу частицы и удовлетворяет уравнению  $\mathbf{p} = \hbar \mathbf{k}$ .

Это закон де-Бройля. Де-Бройль изучал следствия для плоских волн и указал на интерпретацию боровских квантовых условий с помощью стоячих волн. Но что он предсказал? Насколько я знаю, ничего. В таком случае была ли интерференция катодных лучей открыта экспериментально? В этом тоже нет никакой истины. Реальные факты таковы: руководимые замечанием Эйнштейна, мой коллега Франк и я размышляли о значении волн де-Бройля. Однажды я получил письмо от Дэвисона из Америки, содержащее отчет об измерениях, произведенных при отражении электронов кристаллами никеля, с вопросом, могут ли иметь смысл странные максимумы на его кривых. Как это получилось, что мы связали их с де-Бройлем, я не могу припомнить в деталях. Некоторые замечания Эйнштейна имели к этому какое-то отношение; также рассуждения об эффекте Рамзауэра (то есть о возрастании пробега свободных электронов в некоторых газах при уменьшении скорости). Как-то мы побудили ученика Франка Эльзасера обработать это. Он нашел правильное объяснение, и формула де-Бройля была подтверждена. Окончательное доказательство электронной дифракции на кристаллах обязано Дэвисону и Г. П. Томсону. Замечателен исторический факт, что на сына человека, который установил корпускулярную природу катодных лучей, пала судьба показать их волновую природу.

Такова истинная история, которая в конечном счете не умаляет достижения де-Бройля. Ибо таков естественный путь научного прогресса.

Действительная плодотворность этих идей была выяснена Шредингером. Он открыл их связь с работами Гамильтона по динамике и геометрической оптике и установил общее волновое уравнение, которое справедливо не только для свободных электронов, но также и для электронов, связанных в атомах. Он же разработал представление физических величин линейными операторами. Этот метод обладает замечательным преимуществом, которое состоит в преобразовании странных уравнений некоммутативной физики в обычный анализ. Если, например, импульс  $\mathbf{p}$  представляется дифференциальным оператором  $\frac{\hbar}{2\pi i} \frac{d}{dq}$ , то коммутационное правило  $pq - qp = \frac{\hbar}{2\pi i}$  сводится к тривиальному утверждению, что для любой функции

$$\frac{d}{dq} qf(q) - q \frac{d}{dq} f(q) = f(q).$$

Подставляя такие дифференциальные операторы в уравнение энергии, в механике получают волновое уравнение Шредингера. Следует напомнить, что этот мощный синтез волновой теории и механики зародился совершенно независимо от матричной механики; позднее эквивалентность обоих методов была доказана Шредингером, вместе с многочисленными приложениями к старым и новым проблемам.

Однако новая теория была очень формальна. Никто не знал, что реально означают волновые функции Шредингера. И опять решение этого вопроса не было свободным изобретением разума, а было вынуждено экспериментальными фактами. Статистическая интерпретация де-бройлевых волн была внушена мне моим знанием экспериментов по атомным столкновениям, которые я изучал у моего коллеги — экспериментатора Джемса Франка. Все развитие квантовой механики показывает, как совокупность наблюдений и измерений медленно создает абстрактные формулы для их сжатого описания и что понимание их значения наступает впоследствии. Это было завершено гейзенберговскими рассуждениями о невозможности одновременных точных измерений положения и скорости и других подобных пар «сопряженных» величин (соотношения неопределенностей), сопровождавшихся множеством абстрактных математических исследований, граничащих с гносеологией и философией (Йордан, Дирак, Нейман и другие).

Сущность статистической интерпретации такова: квадрат шредингеровской  $\psi$ -функции для совокупности частиц представляет собой вероятность нахождения частиц в местах (или со скоростями, или с энергиями), обозначенных ее аргументами. Было бы очень привлекательно рассказать об этом замечательном предмете, особенно о соотношениях неопределенности и о проблеме причинности и детерминизма в физике. Но это выходило бы за рамки этой лекции, и я должен ограничиться лишь несколькими замечаниями. Согласно классической механике, конфигурация и скорости всех частиц замкнутой системы в данный момент полностью определяют ее будущее движение. В квантовой механике также имеется величина, которая определяется ее начальным значением, а именно  $\psi$ -функция; однако из  $\psi$ -функции можно найти не конфигурацию и скорости частиц, а только вероятность определенной конфигурации или определенной совокупности скоростей. Поэтому ситуация в отношении детерминизма является фундаментально отличной \*).

Статистические методы применялись в термодинамике задолго до развития квантовой механики. Они рассматривались как выражение недостатка нашего знания, с затаенной мыслью, что этот дефект еще может быть устранен. В новой теории имеется естественный предел для усовершенствования нашей информации, и статистика становится составной частью самой механики.

Термодинамическая статистика стала центральной частью физики, и необходимо бросить мимолетный взгляд на ее развитие.

Термодинамика являет собой классический пример индуктивного метода. Два фундаментальных закона, касающиеся сохранения энергии и существования монотонного возрастания энтропии, являются конденсированными выражениями накопленного опыта, а именно невозможности построения перпетуум-мобиле и машины, которая могла бы почерпнуть теплоту из резервуара (вроде моря) и преобразовать ее полностью в механическую работу (перпетуум-мобиле второго рода). Уайтекер называл положения такого рода «принципами импотентности», и он высказал идею, что достаточно нескольких таких принципов, чтобы вывести всю физику. Например, относительность есть следствие нашего бессилия посылать сигналы с неограниченной скоростью, а квантовая механика может быть сведена к нашему бессилию измерить одновременно координаты и моменты и т. д. \*\*). Как бы то ни было, я хочу подчеркнуть тот пункт, что все

\*) Как следует из других работ Борна, под детерминизмом он понимает лапласовский детерминизм, исключающий случайность. (Прим. перев.)

\*\*) Данную Уайтекером формулировку законов природы в виде «принципов бессилия» («принципов импотентности») нельзя считать приемлемой ввиду ее антропоморф-

эти принципы, в частности принцип термодинамики, не даны *à priori*, а являются результатами долгого опыта. Человек никогда не признавал поражения, иначе как после упорной борьбы. Однако в этой связи случай Роберта Майера нуждается в специальном рассмотрении. Майер был врачом, и его научное воображение направлялось на проблемы эквивалентности теплоты и механической работы физиологическим наблюдением различия цвета человеческой крови в тропиках и в нашем среднем климате. Отправляясь от этой странной исходной точки зрения, он нашел в конечном счете метод вычисления механического эквивалента теплоты из простых свойств газов. Но, когда он представил свою статью на рассмотрение для публикации, она была отвергнута редакторами, потому что она была богато украшена философскими и метафизическими рассуждениями. В то время это не было рекомендацией для физической теории. С другой стороны, старательные измерения Джоуля и математические рассуждения Гельмгольца были приняты без труда. Это было жестоко для Майера и, может быть, не справедливо; ибо на самом деле он дал убедительное доказательство, как это позднее признали Джоуль и Гельмгольд. Постараемся извлечь опыт из этого прискорбного дела. Если мы отклоняем некоторые философские аргументы, это не означает, что мы отклоняем любую теорию, к которой они применяются. Я прошу вас вспомнить это, когда я должен буду критиковать некоторых современных авторов.

Удивительной чертой термодинамики является то, что немногие простые и негативные положения ведут к таким широко распространенным следствиям, как существование абсолютной температуры и энтропии, и ко многим числовым взаимосвязям между измеримыми величинами, таким, как удельная теплота, сжимаемость, тепловое расширение, гальвано- и термоэлектрические коэффициенты, химическое сродство и т. д. Однако, несмотря на свое название, термодинамика является только формальной связью между термическими и динамическими свойствами. Реальное тождество теплоты с движением было установлено кинетической теорией, сначала для газов, а позднее — для систем более общего типа. Вы все знаете основную идею: и невозможно и не необходимо знать каждую деталь движения всех бесчисленных атомов в куске вещества, но достаточно знать их поведение в среднем, чтобы предсказать измеряемые явления. Таким путем статистика вводится в механику. Принципы статистической механики развивались шаг за шагом, путем «проб и ошибок», от впервые установленного Максвеллом закона распределения скоростей до наиболее сложных обобщений Больцмана, Гиббса, Фаулера и Дарвина. Эти принципы используют, конечно, понятие вероятности и разделяют его противоречивый характер. Насколько я понимаю, единственным обоснованием доктрины вероятности, которая (хотя и неудовлетворительно для ума, посвятившего себя «абсолюту») кажется по крайней мере не более мистичной, чем наука в целом, является эмпирический взгляд: законы вероятности справедливы точно так же, как и любой другой физический закон, в силу согласия их следствий с опытом. Развитие статистической физики является демонстрацией этого взгляда. Каждая статистика зависит от выбора равновероятных случаев, или, более общо, от выбора веса данного распределения. Справедливо, что инвариантные свойства уравнений классической механики до некоторой степени ограничивают этот выбор

---

ного характера и, главное, бессодержательности. На самом деле наше познание продвигает вперед только раскрытие положительного содержания законов. Только после открытия закона сохранения и превращения энергии стало ясно, почему невозможно создать вечный двигатель, и именно на почве знания этого закона стало возможно быстрое и целеустремленное развитие техники. Это относится и ко всем остальным принципам. (Прим. перев.)

(посредством так называемой теоремы Лиувилля), но тот результат, что статистический вес пропорционален объему в фазовом пространстве (координаты и импульсы), может быть оправдан только согласием следствий с наблюдениями.

То же самое справедливо для модификаций, введенных квантовой теорией. Описание статистических весов для квантовой системы даже проще: каждое состояние данной энергии, которое никакими физическими средствами не может быть расщеплено на несколько состояний, имеет одинаковый вес. Это предположение подтверждено многочисленными примерами; если, например, оно применяется к электрическим осцилляторам, испускающим и поглощающим излучение, то для последнего получают планковский закон.

Но как раз этот пример может быть также рассмотрен с иной точки зрения, и тогда он приводит к новому и фундаментальному результату. Согласно де-Бройлю, само излучение, очевидно, должно быть эквивалентно газу, состоящему из квантов света или фотонов, к которому квантовая статистика может быть применена непосредственно (без использования поглощающих и излучающих осцилляторов). Если теперь эти фотоны трактуются как подлинные частицы, имеющие свою собственную индивидуальность, то планковский закон не получается. Вместо этого следует предположить, что два состояния, которые различаются только обменом двумя фотонами, физически неразличимы и статистически должны считаться только как одно состояние. Другими словами, фотоны не имеют индивидуальности. Бозе и Эйнштейн распространили это предположение на другие газы и показали, что для крайне низких температур и высоких давлений должны быть отклонения от обычных газовых законов.

К сожалению, эти условия едва ли достижимы экспериментально, и интересующий нас результат об отсутствии индивидуальности частиц должен был бы оставаться теоретической спекуляцией, если бы это не было подтверждено совершенно иным способом рассуждения.

Это пришло из спектроскопии\*). Первым шагом было открытие спина электрона Гаудсмитом и Юленбеком, которое произошло накануне открытия волновой механики, когда интерпретация эмпирических фактов осуществлялась в терминах механики электрона. Эти факты состояли в наблюдении того, что многие спектральные линии обнаружили тонкую структуру (дублеты, триплеты и т. д.); такие факты не могли быть объяснены, если считать, что электрон есть бесструктурная частица; они могли быть объяснены, только если электрону приписывалось вращательное движение, если этот спин трактовался с помощью уже известных квантовых правил (эффект Штерна — Герлаха).

Второй шаг был также связан со спектроскопией. Ключом к пониманию атомных спектров является комбинационный принцип Ритца, который мы уже обсуждали (стр. 362): все линии спектра можно получить, взяв разность  $\nu_{nm} = T_n - T_m$  ряда термов  $T_1, T_2, \dots$ . Но с самого начала было ясно, что не все эти разности соответствуют реально наблюдаемым линиям и что должны быть сформулированы так называемые правила отбора и исключения. Когда Бору удалось интерпретировать термы  $T_n$  как уровни энергии электронных орбит и он был в состоянии приписать определенные квантовые числа каждому из электронов, обнаружилось, что должны быть исключены не только определенные переходы между двумя

\*) Фактически история развивалась так, как рассказано в тексте: в открытии спина электрона и подтверждении статистики Бозе — Эйнштейна сыграли роль спектроскопические исследования. Однако крайне низкие температуры оказались экспериментально достижимыми, и в этой области были действительно открыты предсказанные отклонения от обычных газовых законов. (Прим. перев.)

электронными состояниями, но что даже некоторые механически возможные состояния не встречаются. Паули сформулировал этот принцип исключения чрезвычайно простым образом: состояния, в которых два электрона должны были бы иметь один и тот же ряд квантовых чисел (включающих и спиновое число), не существуют; и, более того, если у двух электронов произойдет взаимная перестановка их квантовых чисел, то они будут соответствовать тому же самому состоянию всего атома.

Здесь мы снова встречаемся с отсутствием индивидуальности частиц, но на основе гораздо более непосредственных данных. Ибо мы не должны забывать, что принцип исключения Паули покоится на таких фактах наблюдения, как отсутствие наинизшего состояния атома гелия (оба электрона имеют наинизший ряд квантовых чисел), и подтверждается бесчисленными следствиями. Наиболее важное из них — это объяснение периодической системы элементов, которое существенно покоится на идее замкнутых оболочек электронов, вытекающей из принципа Паули.

С точки зрения волновой механики ситуация может быть описана следующим образом: рассмотрим функцию  $\psi(n_1, n_2)$ , где  $n_1, n_2$  являются квантовыми числами двух нераспознаваемых частиц. Как упоминалось раньше, квадрат  $\psi$ -функции представляет собой вероятность нахождения частиц в состоянии  $n_1, n_2$ , и отсутствие индивидуальности выражается уравнением  $\psi^2(n_1, n_2) = \psi^2(n_2, n_1)$ . Отсюда следуют две возможности для самой  $\psi$ :

или

$$\psi(n_1, n_2) = \psi(n_2, n_1),$$

или

$$\psi(n_1, n_2) = -\psi(n_2, n_1).$$

Второй случай для равных значений  $n_1$  и  $n_2$  предполагает:

$$\psi(n, n) = -\psi(n, n) = 0,$$

что очевидно является выражением принципа исключения Паули. Теперь обнаружилось, что не этот случай, а первый ( $\psi$  симметрична относительно своих аргументов) соответствует статистике Бозе и Эйнштейна, в то время как другой случай ( $\psi$  не симметрична относительно своих аргументов) отмечает совершенно иное поведение. Статистические следствия для этого случая, который справедлив не только для электронов, но также и для протонов (и других частиц), были исследованы Ферми и Дираком.

Эти свойства симметрии волновых функций и принцип Паули являются существенной частью квантовой механики. Надеюсь, что я убедил вас в том, что они выведены путем долгого индуктивного процесса, в котором вспышки воображения сменялись усиленным наблюдением и интерпретацией фактов. Это был период идеальной кооперации эксперимента и теории. Не было ни экспериментатора, хвастающегося эмпирической непорочностью своих результатов, ни теоретика, претендующего на априорность познания, были взаимная помощь и ободрение.

Раз только квантовая механика и квантовая статистика были установлены, они, конечно, позволили сделать бесчисленные аналитические предсказания, многие из которых были подтверждены экспериментами. Электронную структуру атомов и молекул можно было вычислять подобно тому, как во времена после Ньютона вычисляли планетарную систему.

Наиболее важным результатом является объяснение линейных и полосатых спектров, природы металлического состояния и химической валентности. Число предсказанных или подтвержденных экспериментов было подавляющим. Одним из наиболее замечательных предсказаний

было предсказание Гейзенбергом существования двух типов водородных молекул — пара- и ортоводорода.

Казалось, что теоретическая формула окончательно и победоносно возглавила эксперимент.

Но, увы, только на короткое время. Снова наступила волна экспериментальных открытий, многие из которых были полной неожиданностью и даже в скрытом виде не содержались в принятой теории.

Большинство из них относилось к радиоактивности, космическим лучам и атомным ядрам. Быть может, наиболее неожиданным было открытие нейтрона (Чадвик). Оно полностью изменило наши взгляды на структуру ядер и открыло путь к ее трактовке квантовой механикой. В общем можно сказать, что примерно с 1930 г. эксперимент возглавлял теорию. Но имеются и два выдающихся теоретических предсказания, а именно предсказания элементарных частиц — позитрона и мезона.

Однако замечательно, что и эти открытия не являются продуктом чистого размышления, а конечным результатом длинной цепи эмпирических исследований. Позитрон связан с дираковским линейным волновым уравнением электрона, с учетом его спина. Чтобы рассказать вам об истории этого уравнения, понадобилась бы целая лекция. Может быть, достаточно сказать, что спин электрона, который, как объяснялось выше, был открыт посредством типичной индукции из спектроскопических фактов, а именно из мультиплетной природы определенных линий (Юленбек и Гаудсмит), вошел в квантовую механику путем введения ряда простых матриц, представляющих два направленных состояния спина (Паули), и что каждый шаг развития спиновой теории был внушен и проверен спектроскопическими данными. Дирак придал ему чрезвычайную утонченность, открыв, что естественное релятивистское обобщение волнового уравнения Шредингера автоматически вело к спину. Здесь очень трудно излагать, каким образом, обсуждая решения дираковских уравнений, физики пришли к представлениям о состояниях с отрицательной энергией и как Дираку удалось примирить это с нашими традиционными взглядами на энергию, истолковав незанятые состояния как позитроны. Я должен напомнить, что сначала Дирак был уверен в том, что положительные частицы, представленные в его теории, были протонами. Но он сам поправился, найдя, что «дырки» не соответствовали большой массе, и он признал их за положительные электроны, когда последние были действительно открыты в космических лучах (Андерсон, Блеккет).

В случае мезона я постараюсь отметить некоторые идеи, которые привели японского физика Юкаву к утверждению о существовании новых частиц с массой, промежуточной между массой электрона и протона. Исходным пунктом явилось существование короткодействующих сил, которые удерживали совместно в ядре нейтроны и протоны. Юкава заметил, что потенциал вида  $\frac{e^{-r/a}}{r}$  обладал бы требуемыми свойствами, если бы постоянная длина  $a$  была выбрана порядка ядерных размеров ( $10^{-13}$  см); этот потенциал является обобщением кулоновского потенциала  $1/r$  электростатических сил (заряд 1) и удовлетворяет не лапласовскому уравнению  $\Delta\Phi=0$ , а несколько модифицированному уравнению  $\Delta\Phi = \frac{\Phi}{a^2}$ . И вот подобно тому, как электростатика может рассматриваться как особый случай электродинамики, описываемой уравнениями Максвелла, так можно построить и динамическое поле Юкавы, которое содержит указанное выше поле, как статический случай. Каждый компонент поля удовлетворяет, вместо обычного волнового уравнения  $\Delta\Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0$ , видоизмененному



уравнению Юкава

$$\Delta\Phi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = \frac{\Phi}{a^2}. \quad (4)$$

Полные уравнения поля могут быть получены из принципа наименьшего действия, отличающегося по своему внешнему виду от его вида в электродинамике (см. (2) стр. 356) наличием добавочного члена  $\frac{1}{2} a^2 (\Phi^2 - A^2)$  в подынтегральном выражении.

Эти уравнения имеют решения, которые указывают на наличие плоских волн, так же как в случае Максвелла, и, согласно общему принципу де-Бройля, должны существовать частицы, связанные с этими волнами, аналогично тому, как фотоны связаны со световыми волнами. Согласно теории относительности, энергия частицы массы  $m$  зависит от импульса  $p$  по формуле

$$\left(\frac{\varepsilon}{c}\right)^2 = m^2 c^2 + p^2. \quad (5)$$

Если подставить в уравнение (5) соотношения Планка и де-Бройля  $\varepsilon = h\nu$ ;  $p = \hbar k$ , то получим

$$\left(\frac{\nu}{c}\right)^2 = \left(\frac{mc}{\hbar}\right)^2 + k^2. \quad (6)$$

С другой стороны, волновое уравнение Юкава (4) ведет для волны  $\Phi = A \sin 2\pi(\nu t - kx)$  к тому же соотношению  $\nu$  и  $k$  при условии, что

$$\frac{mc}{\hbar} = \frac{1}{2\pi a}. \quad (7)$$

Это есть соотношение между длиной  $a$  ( $\sim 10^{-13}$  см) действия ядерных сил и массой  $m$  частиц, связанных с вибрирующим полем Юкава; из этого соотношения получают

$$m = \frac{\hbar}{2\pi ac} = \frac{6 \cdot 10^{-27}}{2\pi 10^{-13} 3 \cdot 10^{10}} = 3 \cdot 10^{-25} g. \quad (8)$$

Эта масса в несколько сот раз больше массы электрона ( $10^{-27}$  г), но явно меньше массы протона (1800 электронных масс).

Таким путем Юкава пришел к предсказанию новой частицы, ныне называемой мезоном, которая была действительно открыта спустя некоторое время в космическом излучении. И опять это получилось в результате не априорных принципов, а остроумного синтеза прочно установленного знания с новой простой гипотезой.

Я надеюсь, что этих примеров будет достаточно, чтобы показать вам как теории создаются и применяются.

Сэр Ч. Г. Дарвин, мой предшественник по кафедре в Эдинбурге, однажды сказал примерно следующее: «Обыкновенный человек (скажем мы) может видеть вещь, если она находится на расстоянии дюйма впереди его носа; немногие могут видеть ее на два дюйма; а если кто-нибудь может видеть ее на три дюйма, то он гениальный человек». Я старался описать вам некоторые действия этих «двух- или трехдюймовых» людей. Мое восхищение ими не уменьшается от сознания того факта, что они направлялись опытом всего человечества к тому правильному месту, в которое следовало совать свои носы. Я не стремился также анализировать понятие о красоте, или совершенстве, или простоте естественного закона, которое отчасти руководило правильным отгадыванием. Я убежден, что такой анализ ни к чему бы не привел; ибо сами эти понятия подвержены развитию. Мы учимся чему-нибудь новому от каждого нового случая, и я не склонен принять конечные теории о неизменяемых законах человеческого разума.

Но теперь я должен вернуться к моему исходному пункту и применить полученные результаты к неразрешенным еще проблемам физики, и в частности к философии Эддингтона. Несмотря на блестящие достижения последнего периода, состояние теоретической физики столь же проблематично, как оно было в любое время, если мы исключаем гордые времена покойной королевы Виктории, когда верили, что все загадки уже разрешены. Имеется несколько элементарных частиц — фотоны, электроны и позитроны, нейтроны и протоны, мезоны заряженные и незаряженные (нейтретто) и, может быть, нейтрино. Каждая из них связана с волновой функцией и имеет характерные константы (масса, заряд), которые появляются в волновом уравнении. Но все эти поля едва ли приведены в связь и мы не имеем никакой теории, объясняющей безразмерность отношений различных констант (например, отношение 1845 массы протона к массе электрона). Особенно таинственной является безразмерность числа, которое в силу своего появления впервые в спектроскопии (Зоммерфельд)

называется постоянной тонкой структуры; речь идет об отношении  $\frac{hc}{2\pi e^2}$  ( $e$  — заряд электрона), которое эмпирически близко к 137. У нас есть квантовая теория ядра, которая дала много важных результатов; но она выглядит столь же временной, как и боровская квантовая теория перед открытием волновой механики. Гораздо более серьезной является болезнь «бесконечностей». Они имеются двух видов, представленные двумя простыми случаями: электростатическая энергия заряженной сферы радиуса  $r$  равна  $e^2/r$ , если не считать числового фактора; при уменьшении радиуса до нуля она становится бесконечной. Следовательно, точечный заряд имеет бесконечную энергию (или массу, согласно закону Эйнштейна). Далее, энергия квантованного осциллятора есть не  $h\nu n$  (как первоначально предполагал Планк), где  $n$  — целое число, а  $h\nu(n + \frac{1}{2})$ ; следовательно, существует (для  $n=0$ ) нулевая энергия  $\frac{1}{2} h\nu$ , и поэтому каждая система, которая может рассматриваться (с помощью теоремы Фурье) как суперпозиция бесконечного числа гармонических осцилляторов (например, полость, заполненная излучением), имеет бесконечную нулевую энергию. Подобные бесконечности появляются во многих рассуждениях, касающихся взаимодействия частиц и излучения, и для избавления от них было затрачено много изобретательности.

Для того чтобы исключить бесконечность собственной энергии, Дирак, Прайс и другие видоизменили определения энергии и импульса в механике и электродинамике. Я сам пришел к заключению, что эта бесконечность обнаруживает фундаментальный недостаток максвелловых уравнений, и заменил их обобщенной группой, и хотя эти уравнения нелинейны и, по-видимому, не легко поддаются обработке, они имеют некоторый шанс быть ближе к истине, поскольку они появляются в новой теории Шредингера, которая является синтезом гравитации, электродинамики и мезонной теории. Другой вид бесконечностей создается бесконечным числом частот, над исключением их физики так же бились с большим или меньшим успехом (Дирак, Гейтлер, Пенг и другие).

Эддингтон, как и все мы, беспокоился по поводу всех этих трудностей и сделал интересную попытку преодолеть их. Его ведущая идея состоит в том, что существенная трудность в теории всегда может быть прослежена до гносеологической ошибки, до неверного или слишком узкого понятия. С этим я согласен. Но когда он стремится поправить эти ошибки построениями, которые он рассматривает как гносеологическое доказательство, то я не желаю следовать за ним. Я сомневаюсь по поводу видимости перед его носом. Например, он получает числовые значения для

двух упомянутых выше безразмерных чисел, а именно, для  $\frac{hc}{2\pi e^2}$  и для отношения массы протона к массе электрона.

Эти безразмерные числа выражены в терминах свойств абстрактного «фазового пространства». Математическая теория этого пространства  $E$ -чисел очень красива и представлена в таком виде, что внушает наиболее естественные мысленные конструкции. Но нельзя отрицать тот факт, что никто никогда не рассматривал  $E$ -числа, прежде чем была разработана дираковская теория спина, которая сама была итогом длинной серии абстракций, к которым мы были принуждены экспериментом. И если бы  $E$ -числа существовали в математике, как существуют различные подобные некоммутативные «алгебры», то, прежде чем существование и свойства спина были извлечены из наблюдений, никто не угадал бы ни того, как эти числа могли бы применяться в физике, ни того, какое значение они могли бы иметь. Эддингтон связывает безразмерные физические константы с числом  $n$  размерностей его  $E$ -пространств, и его теория приводит к функции  $f(n) = \frac{1}{2} n^2(n^2 + 1)$ , которая для последовательностей даже таких чисел, как  $n=2, 4, 6, \dots$ , дает значения 10, 136, 666...\*).

Так вот, в то время, когда Эддингтон начал свою работу, экспериментальное значение величины  $hc/2\pi e^2$  было близко к  $136 = f(4)$ . Позднее эксперименты показали большее значение и ныне оно очень близко к 137. Соответственно Эддингтон приспособил свою теорию, добавив единицу.

Отношение масс также было получено в терминах этих целых чисел, а именно, как отношение двух корней квадратного уравнения:

$$10x^2 - 136x + 1 = 0,$$

которое равно 1847,9 и близко к экспериментальному значению 1836,5 (и должно корректироваться дальше).

Я не могу критиковать источник этих выражений, поскольку мне не удалось его понять. Какие-то немногие совпадения этого рода, которые не являются настоящими предсказаниями, но выражают величины, известные из экспериментов, кажутся мне слабым доказательством для значительной теории. И едва ли имеются какие-либо другие предсказания. Ни нейтрон, ни мезон не были им предвидены. И если подсчитывается число частиц во вселенной, то мало надежды проверить это экспериментально, хотя я допускаю, что это может быть очень полезное понятие. Я далек от нападок на теории Эддингтона или от сомнения в их результатах. Если бы обнаружилось, что они правильны, я радовался бы. Но я припишу эти (возможные) удаchi не эддингтоновской философии как доктрине, за которой должны следовать другие, а его личному гению и интуиции.

Наконец, позвольте бросить взгляд на теорию Милна, которого я упомянул в начале. Он также претендует на то, что должны быть выведены универсальные законы природы с помощью чисто гносеологических принципов. Один из них — это «операционалистический метод» определения. Это наименование было дано американским физиком Бриджменом процедуре, вполне обычной для физиков. Она состоит в требовании, что

\*) Это действительно апокалиптические числа. Следует предположить, что хорошо известные строки откровения св. Иоанна должны быть написаны так:

Я увидел зверя, поднимающегося из моря, имеющего  $f(2)$  рогов..., а его число есть  $f(6)$ ..

Но должен ли символ  $x$  в выражении

... и была дана ему власть продолжать  $x$  месяцев...

интерпретироваться в виде  $1 \cdot f(3) - 3 \cdot f(1)$  или в виде  $\frac{1}{3} [f(4) - f(2)]$ , это может оспариваться.

физическая величина должна быть определена не путем словесного сведения к другим хорошо известным понятиям, а через предписание операций, необходимых, чтобы ее представить и измерить. Это здоровое правило, реакция против буквоедства и фетишизма слов. Оно очень полезно в классической физике, где имеют дело с величинами, доступными непосредственному измерению, как, например, в термодинамике (Бриджмен сам специалист в этой области) или в электродинамике. Так, например, резонно ввести температуру путем описания термометрических операций, или определить электрическое поле, прибегая к силам, действующим на малые заряженные пробные тела. Но операционалистическое определение довольно неуместно, если вы желаете распространить понятие поля на атомное ядро и электроны, а в квантовой теории оно терпит неудачу. Волновая механика имеет каталог «наблюдаемых». Но это не означает, что соответствующие величины представляются переменными, значения которых могли бы быть измерены; они представляются дифференциальными или интегральными операторами, собственные значения которых и могут быть измерены. Я не могу усмотреть, какую экспериментальную «операцию» можно было бы изобрести, чтобы определить математический оператор. Более того, я уже упоминал, что имеются понятия, применяемые в волновой механике, которые не наблюдаемы, например волновая функция Шредингера; нет принципиально никаких средств наблюдать ее, следовательно, нет никакого «операционалистического» определения. Однако это может не касаться Милна, поскольку он интересовался главным образом астрономией. Посмотрим, как он применял операционалистический принцип.

Все эмпирическое знание о звездах базируется на свете, идущем от неба, и его интерпретации с помощью земных инструментов, телескопов, электроскопов, часов. Милн сводит свое основное рассуждение к применению одних часов. Он отказывается допустить расстояние в междוזвездном пространстве как наблюдаемое и предлагает свести это понятие к утверждению о времени прибытия сигналов. С этой целью он предполагает существование наблюдателей на других небесных телах, с часами и сигналами времени, имеющими силу для им подобных. Элементарная операция для исследования пространства состоит в следующем: мы посылаем световой сигнал в данный момент  $t_1$  по нашим часам; он достигает наблюдателя на другой звезде и отражается или возвращается к нам, куда прибывает в момент  $t_2$  по нашим часам, неся с собой информацию о времени  $\tau$  прибытия сигнала, прочитанного по часам удаленной звезды. Из этих данных  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $\tau$  (часто повторенных) Милн предполагает вывести основания геометрии, кинематику и даже динамику вселенной.

Часы Милна и световые сигналы — это, конечно, подражание хорошо известному методу, который Эйнштейн применил для того, чтобы показать, что понятие абсолютной одновременности абсурдно, и чтобы вывести преобразования Лорентца. Однако имеется и фундаментальное отличие: световой сигнал у Эйнштейна путешествует только между двумя пунктами на одном и том же небесном теле, а не от одной звезды к другой. Его модель — это только абстракция и упрощение действительного наблюдения, выраженного негативным результатом эксперимента Майкельсона и Морлея. Кроме того, преобразования Лорентца были найдены не этим путем (в таком случае они назывались бы преобразованиями Эйнштейна), они были уже известны, так как были выведены (Лорентцем) из изучения уравнений Максвелла и применены для истолкования эксперимента Майкельсона. Как это обычно бывает в физике, гносеологический вывод Эйнштейна был сделан после формального открытия, что вызвало сильное удивление тех, кто придерживался идеи об абсолютном времени.

С другой стороны, операции Милна не являются какой-либо идеализацией реальных экспериментов. Они кажутся мне непонятными измышлениями: земной свет, отраженный от неподвижной звезды, видел ли кто-нибудь нечто подобное? Или похоже ли на то, что во всей будущей истории человечества кто-нибудь увидит это? А наблюдатели с часами на других звездах, часами, освещенными светом, пришедшим от нас, так что можем читать их по его возвращении, или наблюдатели, учтиво показывающие нам время по своим часам всякий раз как прибывает наш сигнал? Я затрудняюсь признать в таких фантазиях реалистическую идею об операционалистическом определении.

Но это не все. У Милна есть и другие предположения и гносеологические принципы. Его наблюдатели находятся не на произвольной звезде, а на спиральной туманности или галактиках, которые, согласно современной звездной астрономии, являются островными вселенными, бесчисленно и вполне равномерно распределенными в пространстве. Каждая из них состоит из миллионов и миллионов звезд, как и наша собственная Галактика. Но Милн рассматривает их как единичные частицы, указывает свойственные им массы. Затем он применяет принцип единообразия, а именно, что наблюдатель найдет те же законы природы и тот же общий аспект вселенной (с помощью своих часов и сигналов времени, описанных выше), в какой бы галактике он ни располагался. Это называется гносеологическим принципом. Но в формулировке Милна применяется и один эмпирический «факт» — существование абсолютного нуля времени, эпоха творения. Ну, а за этим странным предположением есть ведь ряд астрономических наблюдений, а именно, красное смещение спектральных линий спиральной туманности. Было найдено, что это красное смещение возрастает с возрастанием расстояния от туманности, и это интерпретируется как доплеровский эффект; он показывает, что вся система галактик расширяется во всех направлениях. Этот странный факт возбудил много спекуляций, и было показано (Леметром, Робертсоном и другими), что эйнштейновская общая теория относительности допускает решения уравнений поля, которые представляют такую расширяющуюся вселенную. Но поскольку наблюдаемо только мгновенное распределение скоростей, все утверждения о прошлом и будущем мира являются гипотетическими, не фактами, а экстраполяциями из некоторой теории. Милн выбирает предположение о том, что вселенная расширяется из начального состояния ужасающей концентрации, и принимает это как факт: мир сотворен  $2 \cdot 10^9$  лет назад в виде скопления масс в малом пространстве.

Милновское объяснение процесса расширения, который имел место со времени этой эпохи, состоит в простом замечании, что массы, собранные вместе в начальный момент, имели различные скорости, и поэтому в каждый другой момент распределялись так, что звезда с более высокой скоростью должна была находиться на большем удалении. Это и в самом деле есть результат наблюдений красного смещения спектральных линий, когда оно интерпретируется как доплеровский эффект. Шредингер однажды заметил мне, что эта ситуация напоминает ему человека, смотрящего на лошадиные скачки и удивляющегося, почему лошади впереди несомненно наиболее быстрые, когда внезапно он глубоко поражается очевидной «кинематической» интерпретацией. По-видимому, то же самое случилось с Милном в такой степени, что он посвятил невероятное количество изобретательности для примирения этого предположения с принципом относительности и вывода из него, совместно с постулатом единообразия, законов природы, включая гравитацию и электромагнетизм.

Обыкновенный физик едва ли будет следовать за высоким полетом его идей. Межзвездное пространство не пусто, а материя взаимодействует

со светом (дисперсия, абсорбция и эмиссия). Световые сигналы, проходящие огромные расстояния между галактиками, могут быть подвержены существенному воздействию при таком взаимодействии. Представляется неправильным исключить эту возможность с самого начала обоснованием всей геометрии и кинематики на световых сигналах, совершенно не считая других возражений, сделанных выше. В самом деле, если допускают милновский метод просматривания пространства с помощью световых сигналов и часов только между относительно близкими соседними системами (где межзвездной материей можно было бы пренебречь), то получают, как показал Робертсон, эйнштейновскую вселенную уже упомянутого типа (Леметр, Робертсон). Далее следует полагать, что взаимодействие световых волн с межзвездной материей может способствовать или даже вызвать красное смещение\*).

Наконец, возраст милновской вселенной, по-видимому, будет довольно коротким по сравнению с возрастом нашей планеты. Согласно надежным радиоактивным методам, горные породы земной коры образовались по крайней мере  $1,5 \cdot 10^9$  лет назад, что составляет три четверти времени существования всей вселенной.

Но я не специалист в этих космологических вопросах, и я не намереваюсь подчеркивать некоторые слабые пункты этой теории. Это было бы несправедливым, ибо смелостью идеи о выведении структуры мира из немногих принципов и мастерством в преодолении громадных трудностей можно лишь восхищаться. Я не хочу расхолаживать тех, кто чувствует в себе призвание пуститься в такое рискованное путешествие.

Но я убежден, что в науке нет философской столбовой дороги с гносеологическими указателями. Нет, мы находимся в джунглях и отыскиваем свой путь, посредством проб и ошибок, строя свою дорогу *позади* себя, по мере того как мы продвинулись вперед. Мы не *находим* на перекрестках указательных столбов, но наши собственные разведчики *воздвигают* их, чтобы помочь остальным. Идеи Эддингтона и Милна объявляются в качестве таких указателей. Но трудность состоит в том, что они указывают в противоположных направлениях: обе теории претендуют на то, что они построены на априорных принципах, но они сильно различаются и внутренне противоречивы.

Моя лекция достигла бы своей цели, если бы вы не нашли в этом ничего удивительного; это именно то, что ожидал бы ученый-эмпирик. Мой совет тем, кто хочет чему-либо научиться, искусство научного предвидения не должно полагаться на абстрактное основание, его задача расшифровать тайный язык природы из документов самой природы — фактов опыта.

\*) В последние годы мнение о том, что красное смещение является доплеровским эффектом, вновь укрепилось. Было экспериментально доказано, что подобное смещение, укладывающееся в ту же доплеровскую формулу, имеет место для широкого диапазона длин волн от ультрафиолета до дециметровых радиоволн. Смещение радиоволн невозможно объяснить их взаимодействием с межзвездной материей ввиду того, что в этом случае мы имеем дело с длиной волн другого порядка. Было бы неверным вообще отрицать взаимодействие световых волн с межзвездной материей, но, по-видимому, его эффект не может, по крайней мере полностью, объяснить красное смещение.

Несмотря на это, Борн прав в основном вопросе: в его отрицании концепции Милна в целом, согласно которой красное смещение будто бы доказывает, что вселенная родилась  $2 \cdot 10^9$  лет назад из ужасающей концентрации массы в точке. Борн справедливо расценивает эти суждения о прошлом и будущем мира как необоснованные спекуляции. (Прим. перев.)